



PHITS

Particle and Heavy Ion Transport code System



User's Manual

Ver. 3.35

序文

本マニュアルは、放射線挙動解析コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) の使用方法についてまとめたものです。PHITS は、あらゆる物質中での様々な放射線の挙動を模擬するモンテカルロ計算コードです。放射線施設の設計、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の様々な分野で国内外の研究者・技術者に利用されています。本コードに組み込まれた物理モデルや機能の詳細については、下記の文献^{1 2 3} やこれを引用する文献をご覧ください。本マニュアルでは、PHITS の実行方法やこれを使用する上で必要となるパラメータについて紹介します。

本マニュアルの内容は表紙に示す PHITS のバージョンに対応したものとなっています。また、予告なしにその内容が変更される場合があります。本マニュアルに関するお問い合わせは、PHITS 事務局 (phits-office@jaea.go.jp) までご連絡ください。

¹ T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, R.N. Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024).

² Y. Iwamoto, T. Sato, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, N. Matsuda, R. Hosoyamada, and K. Niita, Benchmark study of the recent version of the PHITS code, J. Nucl. Sci. Technol. 54:5, 617-635 (2017).

³ Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Sato, N. Matsuda, S. Kunieda, Y. celik, N. Furutachi and K. Niita, Benchmark study of particle and heavy-ion transport code system using shielding integral benchmark archive and database for accelerator-shielding experiments, J. Nucl. Sci. Technol. 59, 665-675 (2022).

目次

1	最近の改良点と開発体制	1
1.1	最近の改良点	1
1.2	開発体制	24
1.3	PHITS の参考文献	25
2	インストール及び実行方法	27
2.1	Windows OS におけるインストール及び実行方法	27
2.1.1	インストール方法	27
2.1.2	実行方法	28
2.1.2.1	“送る”による実行方法	28
2.1.2.2	コマンドプロンプトからの実行方法	28
2.1.3	推奨ソフトウェア	29
2.2	Mac OS におけるインストール及び実行方法	29
2.2.1	インストール方法	29
2.2.2	実行方法	30
2.2.2.1	ドラッグ&ドロップによる実行方法	30
2.2.2.2	ターミナルからの実行方法	31
2.2.3	“PHITS_Installer.command”の Manual モードによるインストール	32
2.2.4	“PHITS_Installer”の Automatic と Manual が共に動作しないときの対応	33
2.3	Linux OS におけるインストール及び実行方法	33
2.3.1	インストール方法	33
2.3.2	実行方法	34
2.3.2.1	シェルを使用せず直接実行ファイルを指定して実行する方法	34
2.4	実行ファイルの変更方法	35
3	再開計算と中断方法	36
3.1	再開計算	36
3.2	計算の中断	36
4	入出力ファイルの共通書式	38
4.1	セクションの種類	39
4.2	読み込みコントロール	40
4.3	ファイルの挿入	41
4.4	ユーザー定義定数	42
4.5	ユーザー定義文字列	42
4.6	数式の利用	43
4.7	粒子の表式	44
4.8	標準出力 (phits.out) の書式	47
4.9	タリー出力の書式	51
5	各セクションの書式	54
5.1	[Title] セクション	54
5.2	[Parameters] セクション	55
5.2.1	計算モード	55
5.2.2	ヒストリー数、配列の大きさ	56

5.2.3	計算打切エネルギー、モデル切り替えエネルギー	60
5.2.4	時間カット、ウエイトカット、ウエイトウインドウ	66
5.2.5	阻止能モデル	68
5.2.6	弾性散乱や全断面積、反応断面積モデル	69
5.2.7	崩壊や脱励起過程モデル	70
5.2.8	イベントジェネレーターとカーマ近似	71
5.2.9	Adjoint (時間逆行) モード	72
5.2.10	核反応モデルオプション	73
5.2.11	低エネルギー中性子に関するオプション	74
5.2.12	光子輸送の PHITS オリジナルモデル	75
5.2.13	EGS5 用パラメータ	76
5.2.14	光・ミューオン反応モデル	79
5.2.15	ミューオン生成モデル	80
5.2.16	ニュートリノ反応モデル	81
5.2.17	クローン散乱や重力場・電磁場に関するオプション	82
5.2.18	出力オプション (1)	84
5.2.19	出力オプション (2)	85
5.2.20	出力オプション (3)	86
5.2.21	出力オプション (4)	87
5.2.22	ボクセル及び連続四面体形状のオプション	88
5.2.23	幾何形状のエラー関係	90
5.2.24	入出力ファイル名	92
5.2.25	その他	93
5.2.26	Dumpall オプション	94
5.2.27	Event Generator Mode	99
5.3	[Source] セクション	101
5.3.1	<Source> : マルチソース	102
5.3.2	共通パラメータ	103
5.3.3	円柱分布ソース	106
5.3.4	角柱分布ソース	107
5.3.5	ガウス分布ソース (x, y, z 独立)	108
5.3.6	一般パラボラ分布ソース (x, y, z 独立)	109
5.3.7	ガウス分布ソース (xy 平面)	110
5.3.8	一般パラボラ分布ソース (xy 平面)	111
5.3.9	球及び球殻分布ソース	112
5.3.10	位相空間線源	114
5.3.11	s-type = 12 ソース	116
5.3.12	円錐形状分布ソース	117
5.3.13	三角柱形状分布ソース	118
5.3.14	xyz メッシュ空間分布ソース	119
5.3.15	連続四面体を線源とするソース	122
5.3.16	面上分布ソース	123
5.3.17	dump データソース	124
5.3.18	ユーザー定義ソース	127
5.3.19	エネルギー分布の定義	130
5.3.19.1	積分型連続エネルギー分布	132

5.3.19.2	微分型連続エネルギー分布	134
5.3.19.3	離散的エネルギー分布	135
5.3.19.4	離散的+積分型連続エネルギー分布	136
5.3.19.5	微分型ガウス分布・マクスウェル分布	138
5.3.19.6	微分型任意関数分布	139
5.3.19.7	RI 線源によるエネルギー分布	140
5.3.19.8	タリー結果を用いたエネルギー分布	144
5.3.19.9	宇宙線フラックスのエネルギー・角度分布	145
5.3.20	角分布の定義	149
5.3.21	時間分布の定義	151
5.3.22	マルチソースの例題	154
5.3.23	ダクトソースオプション	158
5.4	[Material] セクション	161
5.4.1	書式	161
5.4.2	元素 (核種) の定義	161
5.4.3	物質組成比の定義	162
5.4.4	物質パラメータ	162
5.4.5	阻止能の指定	162
5.4.5.1	阻止能データベースファイルのフォーマット	163
5.4.6	$S(\alpha, \beta)$ の指定	163
5.4.7	飛跡構造解析計算用の化学形の指定	164
5.4.8	例題	164
5.5	[Surface] セクション	166
5.5.1	書式	166
5.5.2	面の記述方法	169
5.5.3	マクロボディーの面定義	179
5.6	[Cell] セクション	180
5.6.1	書式	180
5.6.2	セルの記述方法	181
5.6.3	Universe 構造	184
5.6.4	Lattice 構造	186
5.6.5	繰り返し幾何形状	189
5.6.5.1	LIKE n BUT セルパラメータ	189
5.6.5.2	Lattice を用いた階層構造	191
5.6.5.3	ボクセルファントム (voxel phantom) の利用	193
5.6.5.4	連続四面体形状の利用	195
5.7	[Transform] セクション	198
5.7.1	書式	198
5.7.2	座標変換の定義と使い方	198
5.7.2.1	$M = \pm 1$ の場合	199
5.7.2.2	$M = \pm 2$ の場合	199
5.7.2.3	$M = \pm 3$ の場合	200
5.7.3	タリーの場合	201
5.8	[Temperature] セクション	202
5.9	[Mat Time Change] セクション	203
5.10	[Magnetic Field] セクション	204

5.10.1	荷電粒子	204
5.10.2	中性子	205
5.10.3	磁場マップの読込方法	206
5.10.4	磁場マップの形式	207
5.10.4.1	ヘッダーの指定方法	207
5.10.4.2	磁場強度の定義方法	208
5.11	[Electro Magnetic Field] セクション	210
5.11.1	一様な電場と磁場の利用	210
5.11.2	電場マップの利用方法	210
5.12	[Delta Ray] セクション	212
5.13	[Track Structure] セクション	213
5.14	[Super Mirror] セクション	216
5.15	[Elastic Option] セクション	217
5.16	[Data Max] セクション	218
5.17	[Frag Data] セクション	219
5.18	[Importance] セクション	222
5.19	[Weight Window] セクション	224
5.20	[WW Bias] セクション	226
5.21	[Forced Collisions] セクション	229
5.22	[Repeated Collisions] セクション	231
5.23	[Volume] セクション	232
5.24	[Multiplier] セクション	233
5.24.1	Multiplier サブセクション	234
5.25	[Mat Name Color] セクション	238
5.26	[Reg Name] セクション	240
5.27	[Counter] セクション	241
5.28	[Timer] セクション	243
5.29	[User Defined Interaction], [User Defined Particle] セクション	244
5.29.1	ユーザーコードの応用例	245
6	タリーセクションの共通書式	247
6.1	メッシュ型	247
6.1.1	領域メッシュ	248
6.1.2	階層構造の領域と体積の定義	249
6.1.3	r-z メッシュ	250
6.1.4	xyz メッシュ	251
6.1.5	四面体メッシュ	251
6.2	エネルギーメッシュ	252
6.3	LET メッシュ	252
6.4	時間メッシュ	253
6.5	角度メッシュ	253
6.6	メッシュの定義方法	254
6.6.1	メッシュタイプ	254
6.6.2	e-type = 1 の場合	254
6.6.3	e-type = 2, 3 の場合	255
6.6.4	e-type = 4 の場合	255

6.6.5	e-type = 5 の場合	255
6.7	他のタリーパラメータ	255
6.7.1	part パラメータ	255
6.7.2	axis パラメータ	257
6.7.3	samepage パラメータ	257
6.7.4	file パラメータ	257
6.7.5	resfile パラメータ	258
6.7.6	unit パラメータ	258
6.7.7	factor パラメータ	258
6.7.8	output パラメータ	259
6.7.9	info パラメータ	259
6.7.10	title パラメータ	259
6.7.11	ANGEL パラメータ	259
6.7.12	2d-type パラメータ	260
6.7.13	gshow パラメータ	260
6.7.14	rshow パラメータ	261
6.7.15	x-txt, y-txt, z-txt パラメータ	262
6.7.16	volmat パラメータ	262
6.7.17	epsout パラメータ	262
6.7.18	カウンターパラメータ	262
6.7.19	resol 分解能、width 線太さパラメータ	263
6.7.20	trcl 座標変換	263
6.7.21	dump パラメータ	263
6.8	複数のタリー結果の統合機能	265
6.9	複数のタリー結果の解析機能	267
6.9.1	ユーザー定義 anatally 機能	269
6.9.2	分散分析機能	269
6.9.2.1	輸送計算のインプットファイル (phits.inp)	269
6.9.2.2	分析機能スクリプト用インプットファイル (autorun.inp)	270
6.9.2.3	スクリプトの動作	270
6.9.2.4	出力形式	270
6.10	拡張された統計指標出力機能	272
6.10.1	使用方法	272
6.10.2	各統計指標の計算方法と出力例	274
6.10.3	Statistical check sheet	278
7	各タリーセクションの書式	279
7.1	[T-Track] セクション	279
7.2	[T-Cross] セクション	284
7.3	[T-Point] セクション	291
7.4	[T-Adjoint] セクション	294
7.5	[T-Deposit] セクション	297
7.6	[T-Deposit2] セクション	305
7.7	[T-Heat] セクション	308
7.8	[T-Yield] セクション	312
7.9	[T-Product] セクション	319

7.10 [T-DPA] セクション	325
7.11 [T-LET] セクション	329
7.12 [T-SED] セクション	333
7.13 [T-Time] セクション	337
7.14 [T-Interact] (従来の [T-Star]) セクション	341
7.15 [T-Dchain] セクション	347
7.16 [T-WWG] セクション	356
7.17 [T-WWBG] セクション	362
7.18 [T-Volume] セクション	365
7.19 [T-Userdefined] セクション	367
7.20 [T-Gshow] セクション	372
7.21 [T-Rshow] セクション	374
7.22 [T-3Dshow] セクション	377
7.22.1 box の定義	380
7.22.2 3dshow の例題	381
7.23 [T-4Dtrack] セクション	384
8 dump ファイルの処理	387
9 領域エラーチェック	388
10 コンパイル	390
10.1 Windows OS におけるコンパイル方法	390
10.1.1 Microsoft Visual Studio と Intel Fortran を利用したコンパイル (Windows 用)	390
10.1.2 Makefile を利用したコンパイル	390
10.2 Mac OS におけるコンパイル方法	391
10.2.1 Makefile を利用したコンパイル	391
10.3 Linux OS におけるコンパイル方法	392
10.3.1 Makefile を利用したコンパイル	392
10.4 KURBUC を含めたコンパイル	392
10.5 配列の大きさの変更	393
11 並列版のための指定方法	394
11.1 メモリ分散型並列	394
11.1.1 セットアップ方法	394
11.1.2 Windows での実行方法	395
11.1.3 コマンドラインでの実行方法	395
11.1.4 maxcas, maxbch の指定方法	395
11.1.5 異常終了の処理	396
11.1.6 Dump, dumpall, [t-userdefined] の出力ファイル名	396
11.1.7 PHITS での読み込みファイルの指定	396
11.2 メモリ共有型並列	396
11.2.1 実行方法	396
11.2.2 メモリ共有型並列計算の注意点	397

12 FAQ	398
12.1 パラメータ設定関連	398
12.2 エラー、コンパイル関連	400
12.3 タリー関連	402
12.4 線源設定関連	404
12.5 PHIG-3D 関連	405
12.6 その他	405
APPENDIX	407
A ANGEL	407
A.1 タリー定義文	407
ANGEL パラメータ	407
SANGEL パラメータ	408
B PHITS で扱えない物理現象リスト	410
C 評価済み核データライブラリ	411
索引	414

1 最近の改良点と開発体制

1.1 最近の改良点

以下に、PHITS バージョン 3.02 以降の主な改良点を記載します。

バージョン 3.35 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2025 年 3 月 28 日)

- JENDL-5 の放射化断面積を DCHAIN 及び `ndata` 形式で整備し、“`dchain-sp/data`” 及び “`XS/yield`” フォルダにそれぞれ格納しました。また、これに伴い `[t-yield]` 及び `[t-dchain]` の `ndata` パラメータの初期値を 2 に変更しました。本改良は、日本原子力研究開発機構の岩本信之博士のご協力により実施しました。
- `[t-wwg]` に粒子誘導機能と低エネルギー・アンバイアス法を導入しました。また、`pedestal` パラメータを導入することにより、過度な粒子分割を防ぐようにしました。
- `[cell]` セクションに `#all` 機能を導入し、真空や空気など粒子輸送の舞台となる領域を簡単に定義できるようにしました。これに伴い、`lec01` や `snowman` など、いくつかの講習会資料を修正しました。
- ほぼすべてのタリーに対して `sum over` の値を正しく導出するようにし、その誤差を出力可能としました。
- Dump 線源を用いて 2 段階計算を行う際、ヘッダーファイルから粒子情報の種類を自動で読み込むようにしました。この項目を含む上記 3 項目の開発は、(株) ナイスの協力により実施しました。
- PHIG-3D で `xyz` メッシュのタリー結果を読込・表示できるようにしました。また、Polygon Boolean 法による描画機能を導入し、メモリ使用量を削減しました（ただし、曲面が多い体形は除く）。本開発は、海上技術安全研究所の大西世紀博士の協力により実施しました。
- PHITS 専用化学コード (PHITS-Chem)⁴ において、放射線治療で使用される様々な種類の放射線に対して G 値が計算できるよう開発し、“`utility/usrtally/ChemCode`” に格納しました。また、計算したラジカル挙動を PHIG-3D を用いて描写できる機能も追加し、空間分割アルゴリズムを採用することで、従来に比べて計算時間が短縮されました。
- AmBe 線源など α 線を用いた中性子源を再現するサンプルを “`sample/source/NeutronSource/Precise-model`” に追加しました。
- RT-PHITS を核医学線量評価に応用するツール ExPORT-PHITS⁵ を開発し、“`utility/RT-PHITS`” フォルダに格納しました。
- 新しいインテルコンパイラ (ifx) に対応するようにソースコードを修正しました。また、Windows のプロジェクトファイルを目的別 (シングル版・OpenMP 版・MPI 版・デバッグ版) に整備して `bin` フォルダに格納しました。詳細は “`document/Install-IntelFortran-OneAPI-en.pdf`” をご参照ください
- 最新版 Mac の CPU が Intel から Apple シリコンに移行したことにより、Mac 用実行ファイルを作成するコンパイラを ifort から gfortran に変更しました。
- 陽子・イオン用飛跡構造解析コード ITSART を改良しました。従来の電離に加えて、ラザフォード散乱や電子的励起も考慮できるようになりました。また、従来扱えた陽子入射に加えて、イオン入射への適用性が格段に向上しています。

⁴Matsuya et al., Phys. Chem. Chem. Phys. (2025), DOI: 10.1039/d4cp04216f

⁵T. Sato et al., EJNMMI Physics (2025), DOI: 10.1186/s40658-025-00743-6

- **[t-deposit]** 及び **[t-dpa]** に **mother** パラメータを導入し、ターゲット核毎の **kerma** や **DPA** を計算可能としました。これに伴い、**BNCT** の奨励設定や講習会資料を大幅に変更しました。
- 宇宙線線源モードで平面 (**s-type=1** 及び **2**) から線源を発生させるモードを追加しました。地表面ミューオンフラックスの角度分布 (**1** から **45** 度まで) 及び低高度 (**300g/cm²** 以上) の陽子フラックス計算精度を向上させました。**SPE** モードで **environ=4** の場合に **Oct. 1989** イベントを正しく再現できるようにしました (従来は **Sep. 1989** イベントを再現していました)。
- **EGS** を用いた場合の 1 物質中の元素数制限 (従来は **20**) を撤廃しました。また、**Cm, Bk, Cf, Es** (それぞれ原子番号 **96,97,98,99**) の元素における **EGS** を用いた電子・陽電子の輸送が可能になりました。本改良は、日本原子力研究開発機構の古高和禎博士、及び高エネルギー加速器研究機構の波戸芳仁博士及び平山英夫博士の協力により実施しました。
- **[multiplier]** セクションで 4 点 (3 次) ラグランジュ補間公式による内挿方法が利用可能になりました。本改良にご協力いただいた上養義朋博士、及び日本原子力学会放射線工学部会簡易遮蔽計算コードレビュー WG 各位に感謝いたします。
- 将来的に **CAD** データから変換されたデータをよりシームレスに取り扱うため、新たに **HDF5** 形式の四面体メッシュ体系を読み込む機能を追加しました。
- 核反応モデル **INC-ELF** による α 入射反応の計算が可能となりました。本改良は、九州大学 魚住裕介准教授及び古田稔将氏の協力により実施しました。
- **[T-4Dtrack]** タリーにおけるデフォルトの出力フォーマットを **T4D** フォーマットに変更しました。また、いくつかのパラメータを追加しました。
- 一部の **DCHAIN** 放射化断面積ライブラリで (n, n') 反応断面積が抜けていたので、それらを追加しました。
- **[User Defined Interaction]** の応用例 (陽電子起因のミューオン対生成、ニュートリノ反応、領域ごとのエネルギーカットオフ) を追加しました。
- 新しいパラメータ **lionprd** を導入し、核データを使用した中性子入射反応における 2 次軽イオンの発生をコントロールできるようにしました。イベントジェネレーターモードを使用しない場合に関係します。また、類似の機能を持っていた **kerma** パラメータを廃止しました。
- 再開始計算などで入力ファイルの整合性をチェックする機能のデフォルトを **OFF** (**ireschk=1**) にしました。
- 連続四面体形状の体系をチェック **itgchk** の際に、各四面体の体積がゼロでないことを確認する機能を追加しました。また、連続四面体形状の体系チェックモード **itgchk** の動作を **OpenMP** 並列に対応させました。
- **itetra=1,2** を指定した際の四面体メッシュ体系のバイナリーデータ用ファイル名を **[parameters]** セクションの **file(30)** で自由に設定できるようにしました。
- **BDF** 形式の四面体メッシュファイルを指定する際に、拡張子付きのファイル名で指定するように修正しました。また、バイナリファイルの形式を同時に変更したので、**itetra=2** を指定して作ったバイナリファイルは作り直しが必要です。
- **mesh=tet** を指定したタリーで、一部の四面体要素 (四面体要素の **Universe** を構成する領域に含まれる四面体) だけのタリー結果を出力するオプションを追加しました。四面体数の多い四面体メッシュ体系の一部だけの結果を得たい場合に、出力時間およびファイルサイズを節約することができます。

- [T-product] タリーに **primary** パラメータを新たに導入しました。原子・核反応の結果、反応の結果一次粒子が残る場合、それをタリーするかどうか切り替えます。
- [t-product] で **part** にアイソマーを **Na-24m**(第一アイソマー)や **In-116m**(第一アイソマー)、**In-116n**(第二アイソマー)のように指定できるようになりました。**Na-24g**のように **g** を指定すると、アイソマーを除いた基底状態だけをタリーできます。
- 四面体メッシュ体系の場合に [weight window] で **mesh=tet** と指定することで、四面体メッシュ上の **weight** 値を設定できるようにしました。併せて、四面体メッシュ体系の場合に [T-WWG], [T-WWBG] で **mesh=tet** が使えるようになりました。また、[T-WWBG] では **mesh=xyz** も使えるようになりました。
- TRC 面 (カットされた円錐面) を用いて頂点をもつ円錐を定義した場合、自動的に $R_2=1.0e-5$ となるようにしました。
- [t-dchain] の結果を **anatally** で処理できるようになりました。
- **angel** パラメータに **cmap** と **ndis** を追加しました。2次元プロットのカラーマップを選択でき、また離散的なカラーバーを用いることもできます。
- ParaView の講習会資料を更新し、“lecture/advanced/paraview”フォルダに格納しました。本資料は、九州大学の藤淵俊王教授の協力により作成しました。
- 以下のバグ修正を行いました。
 - 核分裂核種に対するカーマファクター計算方法に関する不具合
 - 光核反応核データを使った計算で、放出中性子のエネルギーや角度が誤った座標系で変換されているのを修正しました。仏国 CEA の Cédric Jouanne 博士、Louis Garnaud 氏、仏国 INSTN の Nathalie Labonnote 氏の協力で行いました。
 - 電磁場中での電子挙動に関する不具合 (無限ループに陥るバグ、磁場マップを使った際の **mgf** パラメータが 1.0 以外の場合に電子挙動が変になるバグなど)。
 - 2次元ジオメトリ描画の際、まれに一部の体系が消えてしまうバグ (version 3.341 のみで発生)。
 - DCHAIN を使って RI 線源形式で [source] セクションを書き出す際の不具合。
 - 1 MeV/n 以下の重陽子により引き起こされる核反応が起きなかった不具合。
 - 飛跡構造解析に関するいくつかの不具合。
 - 重陽子及び α 粒子の核データライブラリを使った場合に、その **dmax** 値を超えるエネルギーを持つ2次粒子が生成されない不具合。
 - [t-deposit] の **unit=5**、[t-let] の **unit=13 or 14**、及び [t-sed] の **unit=7 or 8** の場合に再開計算が正しく実行されない不具合。
 - 球殻線源 (**s-type=9**) で角度分布が正しく定義できない不具合。
 - 核異性体の核データライブラリを読み込む際の不具合。
 - 線源を **dir=-1** とした場合にイベントジェネレータモードを使った際の不具合。
 - [t-cross] で **samepage=z** とした場合の不具合。
 - ユーザーが自作した ASCII 形式の **dump** 線源が読み込めない不具合。
 - PHITS-Pad や RT-PHITS に関するいくつかの不具合。
 - [T-Dchain] タリーの **mesh=tet** で、[Volume] セクションの定義が存在しない入力ファイルの場合に、誤ってフラックスの値を体積で割った数値の **Dchain** 入力ファイルを作成してしまう不具合を修正しました。

- NRF の断面積計算に単位や計算式の間違いがあったのを修正しました。QST の静間俊行上席研究員の協力で行いました。

バージョン 3.34 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2024 年 3 月 26 日)

- Windows 用インストーラを更新しました。詳細は 2.1.1 節インストール方法をご参照ください。また、これに伴い 32bit 版の Windows のサポートを終了しました。
- JENDL-5 の自動設定ファイルを作成してそのインストーラを“phits/XS/jendl5”フォルダに格納しました。この項目を含む上記 2 項目は、アドバンスソフト株式会社のご協力により実施しました。
- [material] セクションで天然元素を指定した場合に展開する安定同位体を指定するファイル“natural_abundance_20c.dat” (JENDL-5 用) 及び“natural_abundance_50c.dat” (JENDL-4 用) を“data”フォルダに追加しました。これらのファイルは、アドレスファイル (“xsdir.jnd”) の最初に書かれた中性子ライブラリによって使い分けられます。また、“xsdir.jnd”に格納された各安定同位体の質量テーブルを更新しました。本改良は、日本原子力機構 核データ研究グループの岩本信之博士のご協力により実施しました。
- meta-stable 核種に対する中性子ライブラリを読み込めるようにしました (ただし JENDL-5 を用いた場合のみ)
- 最初のセクションの前に \$DBG=1 と書くことにより、メモリ違反や未初期化変数のチェックを行うデバッグモードでの計算を可能としました。
- 拡張された統計指標出力機能を実装しました。従来の統計誤差に加えて、タリー結果に関する分散の分散 (VOV: variance of variance) や性能指数 (FOM: figure of merit)、確率密度分布 (PDF: probability density function) といった統計指標を出力させます。Version 3.34 では、[t-track] と [t-point] のタリー結果に対して使用可能です。詳細は、6.10 をご覧ください。本開発は、原子力規制庁から日本原子力研究開発機構への「令和 5 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費 (PHITS コードに係る検証作業及び統計指標確認機能の開発) 事業」による成果です。
- 水の放射線分解で生じるラジカルの挙動をシミュレーションする PHITS-Chem コードをパッケージに加えました。本コードは [track structure] セクションと組み合わせることで利用可能です (現在は電子線のみに対応です)。詳細は、“utility/usrtally/ChemCode”をご参照ください。
- 任意物質に対する電子飛跡構造解析モード ETSART⁶を導入しました。
- ヒストリーカウンタを使って特定領域の統計誤差を小さくするように調整された [weight window] を自動で作成する粒子誘導機能を [t-wwg] に導入しました。詳細は、“phits/lecture/advanced/weightB”をご参照ください。
- [weight window] 及び [t-wwg] の xyz メッシュ最小・最大値が整数で定義された際に自動で微調整するパラメータ deltxyz を導入しました。
- 荷電粒子に対する adjoint モードを導入しました。詳細は“phits/utility/adjoint/charged”フォルダをご参照ください。
- PHITS 入力ファイル作成専用エディタ (PHITS-Pad) の β 版を組み込みました。詳細は“phits/phitspad/manual”フォルダにあるマニュアルをご参照ください。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として坂本健作氏、伊巻正氏の協力により実施しました。

⁶ Y. Hirata et al., Development of an electron track-structure mode for arbitrary semiconductor materials in PHITS, Jpn. J. Appl. Phys. 62, 106001 (2023).

- [T-4Dtrack] タリーを導入しました。このタリーで出力された粒子の飛跡ファイルを PHIG-3D の “Particle tracks” タブで読み込むことで、飛跡の静止画または動画を作成できます。
- [User Defined Interaction] セクションを導入し、ユーザーが比較的簡単に独自の相互作用を PHITS に組み込めるようになりました。
- [User Defined Particle] セクションを導入し、ユーザーが比較的簡単に独自の粒子を PHITS に組み込めるようになりました。この機能を用いることで、既存の粒子の性質（寿命や崩壊パターンなど）を変更することも可能です。
- タリーの **rshow** オプションが **mesh=tet** でも利用できるようになりました。
- ユーザー定義定数 **ci** として定義した数値を **file(6)(D=phits.out)** に出力するオプションを導入しました。[parameters] において **ncvalout** により指定した回数だけ出力します。また、**c999** まで定義できるように拡張しました。
- [t-cross] の **output** パラメータを **a-type** や **e-type** の有無から自動で判定するようにしました。
- [t-interact] を用いて飛跡構造解析モードにおける反応数を計算する際の反応カテゴリ (**output** パラメータ) を整理しました。
- 荷電粒子ライブラリを用いた場合や、ターゲット内でエネルギーが変化する厚いターゲットに対しても [forced collisions] を適用可能としました。
- **multiplier** サブセクションで使った **multiplier** の数値を [multiplier] セクションの形式で出力する新しいパラメータ **mtinfo** を導入しました。
- 荷電粒子ライブラリや高エネルギー中性子ライブラリを用いた場合でも MT 番号 1-3（全反応断面積、弾性散乱断面積、非弾性散乱断面積）を **multiplier** サブセクションで利用できるようにしました。
- 断面積出力モード (**icntl=1 & inucr=100**) を用いて **multiplier** サブセクションで定義可能な全ての MT 番号（負値含む）に対するデータを出力可能としました。また [libout] に **epsout** パラメータを導入し、出力した断面積データの画像ファイルを生成できるようにしました。この項目を含む上記 4 項目の改良は、RIST の古立直也博士のご協力により実施しました。
- D-T 反応に対する [frag data] のサンプル入力ファイルを “phits/sample/fragdata/d-T” に追加しました。本データを利用した成果を公表する際は論文⁷を引用してください。
- EPS ファイルで軸数値を表記する際、10 進数型と指数型を指定する ANGEL パラメータ (**xdec**, **xexp**, **ydec**, **yexp**) を導入しました。
- 以下のバグ修正を行いました。なお、先頭の 4 項目は version 3.31（もしくは 3.33）以降に限定して発生していた不具合です。
 - [t-deposit]、**unit=0**、**factor<0** の場合に正しく規格化されない不具合。
 - RI 線源で N-13, O-15, F-18 を指定して **proj=all** とした場合に陽電子と消滅 γ 線が両方考慮されてしまう不具合。
 - インプットファイルの同じ行に 2 つ以上の文字列変数が使えない不具合。
 - KURBUC モードが動作しない不具合。

⁷ T. Nishitani, M. Ishikawa, M.-S. Cheon, S.-H. Hong, R. Rodionov, S. di Sarra, V. Krasilnikov, D. Gin, B. Coriton, “Neutronic simulations of in-vessel neutron calibrations for ITER neutron diagnostics by using simplified ITER model”, J. Fusion Eng. Des., DOI: 10.1016/j.fusengdes.2023.113548

- [t-point] で axis=t とした場合の不具合。
- ITSART を使った場合に [t-interact] が正しく動作しない不具合。
- [t-product] で EGS や飛跡構造解析モードで電子散乱が起きた場合に、生成粒子として電子をカウントしてしまう不具合。
- 電子の飛跡が磁場領域を透過した後に多少ずれてしまう不具合。
- 四面体メッシュ体系で反射境界が動作しない不具合。

バージョン 3.33 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2023 年 9 月 1 日)

- 高エネルギー核データとして格納していた JENDL-4.0/HE (陽子・中性子) と JENDL/DEU-2020 (重陽子) を JENDL-5⁸に入れ替えました。ファイルサイズの観点から、中性子及び陽子に対しては一部の核種しか含まれておらず、また JENDL-4.0/HE や JENDL/DEU-2020 はパッケージから削除されているのでご注意ください。これに伴い、初期設定で利用する高エネルギー核データライブラリ (lib パラメータ) は、光核反応や α 粒子反応も含めて全て JENDL-5 に統一しました。パッケージに含まれる核データライブラリの種類やデータの追加方法に関しては、Appendix C 評価済核データライブラリをご参照ください。本入れ替えに関しては、日本原子力研究開発機構 炉物理・熱流動研究グループの今野力博士と多田健一博士、及び核データ研究グループの中山梓介博士にご協力いただきました。
- JENDL-5 の一部導入に伴い、炭素も天然元素組成比に展開するようにしました。従来は、JENDL-4 が天然炭素として断面積を評価していたため、炭素のみ天然元素組成比で展開していませんでした。
- タリーの factor パラメータを負値にすると、結果のうちの最大値が factor の絶対値と同じになるよう規格化する機能を加えました。
- [t-deposit2] で検出器の分解能を考慮する機能を追加しました。
- 文字列変数を使った入力ファイルを読み込めるように PHIG-3D を改良しました。また、セル毎に透明度を設定できるようにしました。本改良は、海上技術安全研究所の大西世紀博士の協力により実施しました。
- PHITS をインストールするフォルダ名 (環境変数 PHITSPATH もしくは file(1) パラメータ) の最大文字数を約 170 に変更しました。
- RI 線源機能で消滅光子を出さないオプション (iannih=1) をデフォルトとしました。これは、proj=all のときに陽電子の消滅による γ 線と消滅光子が二重カウントされていたためです。
- [t-dchain] が定義されている場合は強制的に jmout=1 とするように変更しました。
- 密度が 1 g/cm³ 以下の場合に、角度分散やエネルギー分散を考慮した場合の最大ステップ長 deltc を密度と連動させないようにしました。これにより、空気など気体中での分散の幅が以前の version と比べて少し小さくなります。
- 飛跡構造解析コード KURBUC が動作している間、核反応を起こさないよう改定しました。元々の KURBUC が計算する飛程などを厳密に再現することができます。
- 以下のバグ修正を行いました。なお、先頭の 2 項目を除いて、全て version 3.31 以降に限定して発生していた不具合です。
 - [t-cross] において 2 つ以上の multiplier サブセクションが定義された場合に再開始計算で発生する不具合

⁸ Iwamoto O, Iwamoto N, Kunieda S, et al. Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5. J Nucl Sci Technol. 2023;60(1):1-60.

- **transform** を利用した四面体メッシュ体系で四面体メッシュ線源機能 (**s-type=24**) を使った場合に線源位置が異常となる不具合
- “**phits.out**” の計算時間が 2 倍で表示されてしまう不具合
- マクロボディで特定の面を使った場合 (93 の機能) に発生したメモリ違反
- xyz メッシュ線源 (**s-type=22**) で **nx**, **ny**, **nz** に負値を用いた場合に発生したメモリ違反
- RI 中性子源で娘核も中性子を発生する場合に生じていた不具合
- KURBUC モードで発生したメモリ違反
- DCHAIN3.31 で **jmode=-1** とした場合の不具合
- 複数のマルチソースで異なる **reg** パラメータを指定した場合に起きる不具合
- 繰り返し形状 (**lattice**) で非常に大きなメッシュ数 (一次元の指定が 10000 を越す) の場合に **lost particle** が発生するバグを修正しました。併せて、四面体メッシュ形状で **lost particle** が稀に発生するバグを修正しました。
- **eps** ファイルの 2 ページ目以降で点線が表示されなくなるバグを修正しました。

Version 3.32 では、以下のバグを修正しました。なお、最初の 4 項目は Version 3.31 特有のバグです。(2023 年 5 月 16 日)

- RI 線源を使って中性子を発生させた際、エネルギースペクトルが離散的になってしまう不具合を修正。
- [**surface**] や [**cell**] セクションで **infl** コマンドを使用した際に発生していたバグを修正。
- [**t-cross**] で **axis=t** とした際に発生していたバグを修正。
- [**transform**] を多用した場合に稀に発生していたバグを修正。
- **dmax(1)** が 20 MeV 以下に設定された場合に発生していたバグを修正。
- 重陽子・ α 粒子に対するライブラリの **dmax** と入射エネルギーが完全に一致していた場合に発生していたバグを修正。
- メタステーブル核種に対する中性子核データライブラリ読み込み不具合を修正。
- Windows 版で CPU time が 24 時間 (86400 秒) 以上計測されない不具合を修正。

バージョン 3.31 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2023 年 4 月 7 日)

- ガンマ崩壊モデル EBITEM を改良し、EBITEM Ver.2 として完成しました。中性子捕獲反応から生じるガンマ線を EGAF(Evaluated Gamma Activation File) によって計算する他、内部転換反応から生じる原子脱励起反応も計算するようにしました。**|igamma| ≥ 2** にしていれば、特に操作を必要とせず、自動的に Ver.2 を使用します。
- ユーザー定義文字列を利用可能としました。詳細は 4.5 節 ユーザー定義文字列をご参照ください。
- タリーの画像出力で同じページに表示するデータをコントロールするパラメータ **samepage** を導入しました。詳細は 6.7.3 節 **samepage** パラメータをご参照ください。この項目を含む上記 2 項目の開発は、(株) ナイスの協力により実施しました。
- 断面積出力モード (**icntl=1**) で核データライブラリに含まれる情報を直接出力する機能 (**inucr=100**) を導入しました。詳細は、“**phits/sample/icntl1**” フォルダをご参照ください。
- RI 線源機能 (**e-type=28,29**) を自発核分裂中性子源に適用可能としました。

- 荷電粒子の核反応断面積の最大値をメモリに格納することにより計算を高速化しました。この項目を含む上記3項目の改良は、RISTの古立直也博士のご協力により実施しました。
- [t-sed] タリーに新しいモデルを導入し、PHITSに組み込まれた飛跡構造解析モデルに基づいてマイクロドジメトリ量を計算可能としました。
- ユーザー定義モデル (PHITS-UDM) を開発しました。ユーザー独自の相互作用と生成粒子を定義することが可能となります。詳細は、<https://github.com/sakaki-y/PHITS-UDM> をご参照下さい。
- 連続四面体形状として許されない四面体同士の交差の有無をチェックするオプション **itgchk** を導入しました。
- **anataly** で異なる種類のタリー結果を組み合わせで解析可能となりました。
- [t-product] で核データによる反応によって生成された粒子をタリーできるようになりました。上記2つの開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として坂本健作氏、三浦孝充氏の協力により実施しました。
- 電磁場を抜けた後も電子の挙動が電磁場の影響を受けてしまうバグを修正しました。このバグは、version3.25以降、発生していました。
- 同じ核種に対して JENDL4 と他の核データ (JENDL-4.0/HE を除く) を同時に使った場合に発生していたバグを修正しました。
- [t-point] でタリーする際に、標的核の熱運動が適切に計算されないバグを修正しました。熱中性子による散乱がタリー結果に寄与する場合に影響し、線量計算のようにエネルギー積分した量をタリーした時に最大で20%程度ずれた結果を出していました。

バージョン 3.30 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2023年1月10日)

- **negs** パラメータに新たなオプションを導入し、**negs=2** とした場合は、電子、陽電子、光子の上限エネルギー **dmax(12)**, **dmax(13)**, **dmax(14)** が自動で 10 TeV に設定されるようにしました。
- イベントジェネレーターモードを使用した場合、中性子捕獲反応から生じる一個目のガンマ線の計算に EGAF(Evaluated Gamma Activation File) を使うようにしました。従来は原子番号が 32(Ge) までの核に評価済みデータを、それ以外の核は理論モデル EBITEM で計算していました。この改良により、32(Ge) までの核に加えて、原子番号 33(As) から 83(Bi) までの天然存在核種全てと、U-235、U-238 の中性子捕獲反応にも評価済みデータを使用することで、より正確な計算が可能になりました。
- [t-cross] 及び [t-product] で LET の関数として結果を出力するオプションを追加しました。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として坂本健作氏、三浦孝充氏の協力により実施しました。
- DCHAIN で出力する線量の単位を **idosunit** で調整する際、その変換係数が変更されました。
- ITSART の電離・励起断面積計算方法を変更し、阻止能が ATIMA の結果とほぼ一致するように改良しました。
- 断面積出力モード (**icntl=1**) に、電子を除く荷電粒子の物質中での阻止能を出力する新たなオプション (**inucr=16**)、及び任意かつ複数のエネルギーに対して結果を出力する機能を追加しました。
- これまで静的に確保していた幾何学形状や線源情報メモリを動的に確保するように修正しました。これにより、複雑な体系などメモリ消費量の多い計算をする際、**mdas** を増やして再コンパイルする必要がなくなりました。本改良は、RISTの室伏昭氏及び古立直也博士の協力により実施しました。

- 国際放射線防護委員会 (ICRP) より許諾を受け、ボクセル型及びメッシュ型 ICRP 標準成人男女人体モデルのサンプル入力ファイルを “sample/icrp” フォルダに追加しました。ボクセル型の入力ファイルは原子力機構の遠藤章博士、メッシュ型の入力ファイルは韓国 Hanyang 大学の Chan Hyeong Kim 博士及び Bangho Shin 氏の監修により作成しました。これらの人体モデルを利用した成果を発表する際は、それぞれ ICRP publication 110 及び 145 を引用してください。
- PHIG-3D でジオメトリエラー (2 重定義、未定義領域) を検出する機能を導入しました。本開発は、海上技術安全研究所の大西世紀博士の協力により実施しました。
- タリーの出力ファイルを対数表示にした場合に、縦軸が 20 桁を超えるような時でも適切に eps ファイルを作成できるように ANGEL を改良しました。また、これに伴い ANGEL の実行ファイルも更新しました。
- CAD 体系を連続四面体形状に変換して PHITS に組み込む手順をまとめた資料を作成し、“utility/CADimport” フォルダに格納しました。
- 中性子輸送に対して [t-point] を使った場合に発生していた 2 つのバグを修正しました。バグの発生条件は、放出角度分布が非等方的な γ 線 (例えば炭素標的からの 4.4 MeV γ 線) をタリーした場合と、熱中性子以外の中性子が非弾性散乱を起こした時に発生する 2 次中性子をタリーした場合です。前者は、該当する γ 線の強度を数桁大きく評価していました。後者は、実効線量の計算のようにエネルギーに関して積分した量をタリーした時はほとんど影響ありません (約 1%) が、エネルギー分布を見ると違いが露わになります。
- icxnp=1 とした場合に 1 GeV 以上の n - n 及び n - p 弾性散乱断面積が正しく計算されない不具合を修正しました。このバグは version 3.25 から生じていました。
- 四面体メッシュ体系の gshow による体系表示のバグを修正した。

バージョン 3.29 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2022 年 9 月 12 日)

- 宇宙線線源モードで地表面における 1 TeV 以上のミューオンの角度分布を改良しました。
- 電子飛跡構造解析モードで 2 次電子 (オージェ電子含む) のエネルギーサンプリング手法を改良しました。
- RT-PHITS に新たな機能として、重粒子線治療の治療計画データ (RT-Plan) を読み込んで線量評価を行う機能を追加しました。また、独自の GUI を開発し、直感的な操作による容易な設定や、視覚的な照射体系および患者体系の確認、そして線量分布の評価が可能になりました。詳細は “/phits/utility/RTphits” をご参照ください。
- PHIG-3D に 2 重定義領域と未定義領域を表示する機能を追加しました。
- タリーの part を指定する際に、粒子名の前に負符号を付けて指定することで、全体から指定された粒子の寄与を除いた結果を出力できるようになりました。
- OneAPI の Intel Fortran Compiler の無償提供が開始されましたので、そのダウンロード方法やそれを使った PHITS の再コンパイル方法などをまとめた資料 (Install-IntelFortran-OneAPI-en.pdf) を作成して document フォルダに格納しました。また、計算速度の観点などから、今後は PHITS の奨励コンパイラは Intel Fortran のみとし、gfortran はサポート対象外とします。
- 粒子ウェイトを変化させながらヒストリー毎の情報を引き出すタリー ([t-deposit] with output=deposit, [t-deposit2], and [t-interact] with MorP=Prob) を使った場合のバグを修正しました。[t-deposit] と [t-deposit2] に関しては、誤差のみに影響を与え、タリー結果そのものは問題ありません。一方、[t-interact] の場合は、誤差とタリー結果の両方に影響を与えていましたのでご注意ください。

- Windows 版 OpenMP で dump 線源を作成した場合に稀に発生する不具合を修正しました。この不具合はインテルコンパイラのバグに起因し、計算が途中で止まらない限り、計算結果に影響はありません。
- RI 線源機能で α 崩壊核種に対して **part=all** とした場合の不具合を修正しました。
- 四面体メッシュ体系で **gshow** による体系描画 (2 次元および 3 次元) をする際にエラーが起きるバグを修正しました。

バージョン 3.28 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2022 年 5 月 9 日)

- 楕円環体及び円環体に対して **[transform]** を有効としました。
- 水標的限定ながら、任意物質飛跡構造計算モデル **ISTART** 使用時に分子的励起を考慮できるようになりました。
- 任意物質飛跡構造計算モデル **ISTART** において、ラザフォード散乱をトーマスフェルミモデルで計算することで、散乱角度カットオフの指定をなくしました。従来、散乱角度は **[parameters]** セクションのパラメータ **ruth_min** (デフォルトは 0.01 radian) でカットオフしていましたが、軌道電子によるスクリーニングを考慮するため、今後は自動でカットオフされます。
- 新フォーマットの熱中性子散乱則 $S(\alpha, \beta)$ が読み込めないバグを修正しました。
- PHITS3.27 から発生していた **[t-yield]** のバグ (MPI 版、アイソマー生成計算、並びに **axis=chart** 及び **axis=dchain** 以外が正しく動作しない問題) を修正しました。
- PHITS3.27 から発生していた **DCHAIN-PHITS** で核分裂収率が正しく読み込めないバグを修正しました。
- **[t-deposit]** と飛跡構造解析モードを組み合わせると起こるバグ (エネルギー付与が正しく計算されない、イオンの飛程が伸びてしまう) を修正。
- **Anatally** モードに関する様々なバグを修正。

バージョン 3.27 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2022 年 3 月 22 日)

- 中性 K 中間子が **K-long(K_L^0)** または **K-short(K_S^0)** として崩壊するようになりました。
- 任意物質向け飛跡構造解析モード **ITS** を改良し、**ITSART**(Ion Track Structure calculation model for Arbitrary Radiation and Targets) に改称しました。Auger 電子生成と、原子脱励起による X 線生成を考慮できるようになりました。また、100 倍程度計算速度を向上しました。それと、厚いターゲット中で粒子の輸送順序を変えることで、粒子バンクのオーバーフローを防ぎます。**[track structure]** セクションで、**mID** を -1 にしたセルに適用されます。
- 光核反応に対する **ACE** フォーマット核データライブラリー読み込み機能を作成しました。また、その上限エネルギーを指定するパラメータ **dnpmax** を **[parameters]** セクションに追加しました。この開発は、(株) ナイスの協力により実施しました。
- 核データライブラリーの有無及びその上限エネルギーをアドレスファイル (“**xmdir**”) から自動で判定する機能を導入しました。また、デフォルトで利用する核データライブラリーの拡張子を指定するパラメータ **lib(i)** (i は粒子番号) を **[parameters]** セクションに追加しました。これにより、**[data max]** セクションで個々の核種のライブラリー上限エネルギーをユーザーが指定する必要がなくなり、JENDL-4.0/HE などの高エネルギー核データライブラリーを簡単に利用可能となりました。

- 高エネルギー核データ利用時に **e-mode=1** もしくは **2** とすると、全断面積のみライブラリーから読み込み、2 次粒子の情報は核反応モデルを用いて決定する新たな高エネルギー核データ用イベントジェネレーターモードを開発しました。
- **[t-yield]** の **axis=chart** もしくは **dchain** 及び **[t-dchain]** において、生成される核種数の上限を指定するパラメータ **mxnuclei** を導入し、そのデフォルト値を **3000** としました。従来は、メタステابلを含む核図表上の全ての核種 ($136 \times 236 \times 3 = 96288$) の生成を想定していたので、この改良により **[t-yield]** や **[t-dchain]** を使った計算のメモリ使用量が大幅に削減されました。
- 全ての **tally** で **part** を **6** 個以上指定可能としました。ただし、**tally** 以外のセクションでは **6** 個が上限です。この項目を含む上記 5 項目の改良は、RIST の古立直也博士のご協力により実施しました。
- 熱中性子散乱則 $S(\alpha, \beta)$ に関する取り扱い方法を改良し、連続エネルギー熱散乱則ライブラリー (continuous energy thermal scattering library)、複合弾性熱散乱則ライブラリー (mixed elastic thermal scattering library)、及びナノダイヤモンドなど微少角中性子散乱 (SANS) モデルを含むライブラリーに対応させました。本改良は、European Spallation Source (ESS) の José Ignacio Marquez Damian 博士にご協力いただきました。詳細は、文献⁹やホームページ¹⁰をご参照下さい。
- 宇宙線線源モードに低地球軌道 (Low Earth Orbit, LEO) モードを追加しました。また、特定の天頂核に対する大気圏内宇宙線スペクトルを任意の方向に発生させる機能を追加しました。
- **[transform]** セクションに新しいオプション **M=±3** を追加しました。
- **icntl=1** のときに **iMeVperU** を有効にして **MeV/n** 単位での出力を可能としました。
- **[t-sed]** で Auger 電子によるピークを考慮しないモードを追加しました。
- **s-type=17(dump ソース)** で方向ベクトルに関する情報がなかった場合に **dir** などにより方向を指定できるようにしました。
- 特殊なタリーを除くほぼ全てのタリーに対して **anatally** 機能を追加しました。未対応なものは **[t-cross]** の **mesh=r-z**, **[t-adjoint]**, **[t-deposit2]**, **[t-heat]**, **[t-dchain]**, **[t-wwg]**, **[t-wwbg]**, **[t-volume]**, **[t-userdefined]**, **[t-gshow]**, **[t-rshow]**, **[t-3dshow]** です。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として RIST の三浦孝充氏の協力により実施しました。
- コンプトン散乱におけるドップラー効果を考慮可能な物質数の制限を撤廃し、**iprofr=1** (デフォルト) で動作するようにしました。
- ACE フォーマット形式での重陽子の核データライブラリー JENDL/DEU-2020 を **XS** フォルダに追加しました。また、これに伴い **FragData** 形式での重陽子ライブラリーは削除しました。本改良は、日本原子力研究開発機構核データ研究グループの中山梓介博士にご協力いただきました。当該ファイルを使用した成果を公開する際は論文¹¹を引用してください。
- サンプルフォルダ ("phits/sample") を拡充しました。具体的には、様々な中性子源や宇宙線源、**fragdata** を使った **d-D** 反応を再現する例題を追加しました。なお、**d-D** 反応に対する **fragdata** を利用した成果を公開する際は論文¹²を引用してください。

⁹ J.I. Marquez Damian, D. DiJulio, V. Santoro, L. Zanini, G. Muhrer. "Improvements in thermal neutron scattering data sampling in PHITS", UCANS9 Meeting, Riken, Japan (2022).

¹⁰ <https://git.esss.dk/spallation-physics-group/phits-tsl>

¹¹ S. Nakayama, O. Iwamoto, Y. Watanabe, and K. Ogata, JENDL/DEU-2020: deuteron nuclear data library for design studies of accelerator-based neutron sources, J. Nucl. Sci. Technol., 805-821 (2021), DOI:10.1080/00223131.2020.1870010.

¹² T. Nishitani, S. Yoshihashi, K. Ogawa, M. Miwa, S. Matsuyama, A. Uritani, "Neutron yield calculation of thin and thick d-D targets by using PHITS with frag data table", J. Nucl. Sci. Technol., DOI:10.1080/00223131.2021.1981475

- [Source] の RI 線源機能で、**proj=all** と設定すると放射性核種が放出可能な放射線種 (α 線、 β 線、 γ 線) 全てが線源となる機能を追加しました。(ただし、自発核分裂から放出される中性子は含まれませんのでご注意ください。) 本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として RIST の三浦孝充氏の協力により実施しました。
- [counter] の動作契機として **ndata** を追加しました。[t-yield] や [t-dchain] において **ndata=2,3** とした場合に、この [counter] の設定を加えることで、生成量を 2 重カウントしないようになります。
- 以下のバグを修正しました。
 - [t-yield] で **axis=xy** のときに再開始計算や **sumtally** が動作しない不具合を修正しました。また、**ndata=3** かつ **e-mode=0** の場合に発生していた不具合を修正しました。
 - 座標変換 ([transform]) を数多く使った際に稀に発生するジオメトリエラーを修正しました。
 - 負パイオンが停止したときに **npidk=0** (デフォルト) としても吸収反応が起きない不具合を修正しました。このバグは、**version 3.13** で **1 keV** に引き下げた負パイオンのカットオフエネルギー (**emin(5)**) に起因していたため、そのデフォルト値を **1 MeV** に戻しました。
 - 大気圏内の宇宙線線源モードで、ブラックホールモードの中性子と地表面モードのミューオンの角度分布がオリジナルモデル (PARMA) と異なっていたバグを修正しました。
 - PHITS2.85 から発生していた [elastic option] のバグを修正しました。
 - PHIG-3D の不具合をいくつか修正しました。
 - 電子の飛跡構造解析モードを微修正しました。具体的には、**100 keV** 以上の断面積データを変更したため、高エネルギー領域における電離・励起イベント数が従来と結果が異なりますのでご注意ください。
 - カットオフエネルギーに近い陽電子が反応してカットオフ以下のエネルギーになった場合に消滅 γ 線を放出しないバグを修正しました。

バージョン 3.26 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2021 年 9 月 1 日)

- 重陽子及び α 粒子に対する ACE フォーマット核データライブラリー読み込み機能を作成しました。ただし、[data max] 機能にはまだ対応しておりませんので、重陽子及び α 粒子に対するライブラリーを使う場合は、入力ファイルで使う全ての核種に対してライブラリーを準備する必要があります。ライブラリーは、JENDL¹³ や TENDL¹⁴ のホームページなどからダウンロード可能です。本改良は、株式会社先端力学シミュレーション研究所の協力により実施しました。
- Version 3.25 のみで発生していたメモリ関連の不具合 (Insufficient virtual memory というエラーが出て計算が止まる) を修正しました。また、必要に応じて確保するメモリ領域をコントロールするパラメーター **xsmemory** を [parameters] セクションに導入しました。
- ユーザー定義タリーを用いた DNA 損傷計算モード (“/phits/utility/usrtally/DNAdamage”) で複雑な二重鎖切断 (Complex DSB) を計算可能としました。
- 任意物質向け飛跡構造解析モードを改良し、ラザフォード散乱を考慮できるようにしました。[track structure] セクションで、**mID** を **-1** にしたセルに適用されます。
- SCINFUL モードで検出器から突き抜ける陽子の扱いを変更しました。

¹³ <https://wwwndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-deu-2020.html>

¹⁴ https://tendl.web.psi.ch/tendl_2019/tendl2019.html

- **dump** ソースを使った計算が **OpenMP** 版で動作しない不具合を修正しました。
- **[t-DPA]** セクションにおいて、**arc-DPA** の計算方法及び出力単位を修正しました。
- **anattally** モードで不要な配列数チェックを行ってしまうバグを修正しました。
- 宇宙線線源モードが **MPI** 版で正しく動作しない不具合を修正しました。
- **PHIG-3D** に関するいくつかのバグを修正しました。

バージョン 3.25 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2021 年 7 月 9 日)

- **NVIDIA TOOL KIT** (旧 **PGI** コンパイラ) に対応しました。**NVIDIA TOOL KIT** を使ってコンパイルしたい場合は、“**makefile**”で **ENVFLAGS=LinNVIDIA** としてください。なお、動作確認は **NVIDIA TOOL KIT 20.9** でのみ行っており、それ以外の **version** では正しく動作しない可能性があることご了承ください。本改良は、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所の山口充孝博士及び日本ヒューレット・パッカード株式会社の白井信裕氏の協力により実施しました。
- 核データを格納するメモリを静的から動的メモリに変更し、**mdas** パラメータを増やすことなく巨大な核データを読み込み可能としました。本改良は、株式会社先端力学シミュレーション研究所の協力により実施しました。
- **DCHAIN-PHITS** を改良し、核分裂生成収率データを読み込めるようにしました。また、これに伴い、核分裂生成収率データを“**dchain-sp/data**”フォルダに追加しました。さらに、最大崩壊連鎖長を調整するパラメータ **ilchain** を導入しました。詳細は **dchain-sp\manual** にあるマニュアルをご参照ください。
- 1 GeV 以下の中性子・水素散乱断面積を選択するオプション **icxnp** を導入し、デフォルトで **JENDL/HE-2007** に格納された値を使うように変更しました。本改良は、原子力機構 放射線挙動解析研究グループの佐藤大樹博士の協力により実施しました。
- 任意物質・任意イオンに対して使える汎用飛跡構造解析モードを開発しました。**[track structure]** セクションで、**mID** を **-1** にしたセルに適用されます。純物質やその混合物だけでなく、一部の化合物は **[material]** セクションで **chem=CO2** 等と指定することで、その化学結合を考慮した計算ができます。
- **[t-cross]** に新たな **output** オプション **a-flux** と **oa-flux** を追加し、ある面を横断する粒子フラックスの角度分布を出力可能としました。
- **Anattally** を **OpenMP** 並列計算に対応させました。
- **[t-yield]** 及び **[t-dchain]** を使った場合の計算時間を劇的に短縮しました。場合によっては、計算時間が 1/10 程度に短くなる可能性があります。
- “**xmdir**”で 1 行あたりに読み込める最大文字数を 80 文字から 130 文字に変更しました。
- **PHITS** に格納されている 22 核種の評価済み高エネルギー核データライブラリー **JENDL-4.0/HE** を、日本原子力研究開発機構 炉物理標準コード研究グループから正式にリリースされたファイルに差し替えました。また、⁶Li と ⁷Li の陽子データを新たに追加しました。詳細は **Appendix C** をご参照ください。ファイルの作成、及びファイル読み込みに関連する **PHITS** の修正は、炉物理標準コード研究グループの今野力博士にご協力いただきました。
- **JENDL-4.0/HE** の **Li** に対する陽子核データ読込バグを修正しました。これにより、加速器中性子源などで用いられる **Li(p,n)** 反応が正しく **PHITS** で再現できるようになりました。

- **xyz** メッシュの **[weight window]** を使った場合のバグを修正しました。空間的なメッシュ幅が大きすぎると（粗すぎると）、幅を十分小さくしたときの結果と比べて粒子フルエンスが大きくなる場合があります。
- ウェイトが 1 以外の粒子が真空中で発生した場合に **[importance]** がうまく機能しない不具合を修正しました。
- **rpp** などのマクロボディを回転した際に、面番号の定義順に依存してまれに二重定義領域が発生してしまうバグを修正しました。
- **PHIG-3D** に関して、**transform** の回転方向が逆になるなど、いくつかのバグを修正しました。

バージョン 3.24 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。（2021 年 3 月 12 日）

- **[t-dchain]** の xyz メッシュ機能を使った **PHITS** → **DCHAIN-PHITS** → **PHITS** 接続計算による誘導放射能被ばく線量計算を可能としました。詳細は、“[/phits/dchain-sp/sample/3-step_dose_xyz](#)” をご参照ください。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として **RIST** の三浦孝充氏の協力により実施しました。
- あるヒストリー中に発生する全粒子のカウンター値の最大値を使ってタリーに制限を掛けるヒストリーカウンター機能を導入しました。この機能を使えば、特定のイベントが発生した場合に線源発生まで遡ってタリーすることが可能となります。詳細は、“[/phits/sample/misc/history_counter](#)” フォルダをご参照ください。本改良は、**RIST** の古立直也博士のご協力により実施しました。
- 各バッチの計算結果を独立に集計して出力する機能 (**itall=4**) を導入し、バッチ毎に発生させる線源をコントロールする機能 (**[source]** の **ibatch** パラメータ) を導入しました。これらの機能を組み合わせれば、一度の **PHITS** 実行で独立した複数の線源によるタリー結果を得ることができ、線源条件のみを変更して多数の計算が必要な場合にその計算時間を短縮することが可能となります。本改良は、**RIST** の古立直也博士のご協力により実施しました。
- エラー ID の代わりに、エラーが発生したソースコードのファイル名・サブルーチン名・行番号を出力する機能を導入しました。この機能は、**[parameters]** で **ierROUT=1** とすることにより有効となります。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として伊巻正氏の協力により実施しました。
- **multiplier** サブセクションでパラメータや数式を使えるようにしました。ただし、括弧を使った数式は利用できません。
- ユーザー定義 **anataly** のサンプルとして、線量平均 **LET** を計算するモードと、標的核医学治療の生物学的線量を計算するモードを“[/phits/utility/usranatal](#)” フォルダに追加しました。
- **JENDL Deuteron Reaction Data File 2020 (JENDL/DEU-2020)**¹⁵ の **[frag data]** ファイルを“[/phits/XS/fragdata/](#)”に追加しました。このデータファイルを使用することにより、**Li^{6,7}**, **Be⁹**, **C^{12,13}** 標的における重陽子入射反応の放出粒子を精度良く模擬できるようになります。本データファイル作成に関しては、日本原子力研究開発機構 核データ研究グループの中山梓介博士にご協力いただきました。当該ファイルを使用した成果を公開する際は論文¹⁶を引用してください。また、これを使用したサンプルインプットを“[/phits/recommendation/NeutronSource](#)”に追加しました。加速器中性子源の計算を模擬したものとなります。

¹⁵ <https://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-deu-2020.html>

¹⁶ S. Nakayama, O. Iwamoto, Y. Watanabe, and K. Ogata, JENDL/DEU-2020: deuteron nuclear data library for design studies of accelerator-based neutron sources, J. Nucl. Sci. Technol., 805-821 (2021), DOI:10.1080/00223131.2020.1870010.

- DICOM2PHITS を大幅に改良し、PET-CT データなどの読込も可能とした RadioTherapy package based on PHITS (RT-PHITS) を開発しました。詳細は、“/phits/utility/RTphits” をご参照ください。本開発は、量子科学技術研究開発機構の古場裕介博士、米内俊祐博士、松本真之介博士、張維珊博士、大阪大学の渡部直史博士、佐々木秀隆氏の協力により実施しました。
- PHITS の入力ファイルを読み込んで 3 次元体系を可視化するソフトウェア PHIG-3D を開発しました。本開発は、海上技術安全研究所の大西世紀博士が開発した Gxsview¹⁷ を元に、同博士の協力により実施しました。また、PHIG-3D の著作権は海上技術安全研究所が有しますが、日本原子力研究開発機構には使用、改造および第三者への再ライセンスが許諾されています。
- 宇宙線線源モード、[frag data]、電子磁場などで発生していたいくつかのバグを修正しました。また、Version 3.23 から発生していた OpenMP 及び複数 Lattice 読込に関する不具合を修正しました。ただし、Linux・OpenMP 版で dump 線源データを読み込む機能に関しては、まだ不具合が修正されていないので、ご注意ください。
- Version 3.22 以降、メモリの使い方を変更したためユーザー定義タリーのサンプル (“/phits/utility/usrtally”) が使えなくなっていた不具合を修正しました。また、これまでご自身で作られたユーザー定義タリーが最新版ソースと併せてコンパイルできなくなっている可能性がありますので、その場合は、“/phits/utility/usrtally/readme-jp.docx” を参照の上、プログラムを修正してください。

バージョン 3.23 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2021 年 1 月 12 日)

- 太陽活動、地磁気、周辺環境の影響を考慮して大気圏内や宇宙空間における宇宙線フラックスを再現する新たな線源モードを追加しました。詳しくは、5.3.19.9 節をご参照ください。
- 1 つもしくは複数のタリー結果に “usranatal.f” で書かれた演算処理を行って新たなタリー結果を出力する機能（ユーザー定義 anatally）を追加しました。また、そのサンプルとして、ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）及び粒子線治療の生物学的線量を確率論的マイクロドジメトリモデル¹⁸に従って計算するプログラムを組み込みました。詳しくは、マニュアル 6.9.1 節及び utility\usranatal をご参照ください。
- 加速器線源 (s-type=11) でエネルギー分布を持つ線源 (e-type) を定義可能としました。
- 断面積出力モード (icntl=1) で光子反応断面積を出力できるようにしました。ipnint=1,2 とすることで、光核反応の各成分を出力するように切り替わります。
- [material] で定義できる同位体数を 92 から 300 に変更しました。
- Importance や Weight Window で粒子が 1 度に 10 個以上に分割された際に warning を出すようにしました。
- [t-dpa] セクションにおいて、欠陥性成功率の補正を考慮した arc-dpa (idpa=1) を出力できるようにしました。詳細は論文¹⁹をご参照ください。
- xyz メッシュにおける物質の最大値を 10 から 100 に増加し、新規の入力パラメータを導入するなどの改良を DCHAIN-PHITS に行いました。詳細は dchain-sp\manual にあるマニュアルをご参照ください。また、新規の参考文献²⁰が出版されましたので、DCHAIN-PHITS を用いた論文発表時にはこれを引用してください。

¹⁷ S. Ohnishi, Gxsview: Geometry and cross section viewer for calculating radiation transport, SoftwareX, 14, 100681 (2021).

¹⁸ T. Sato and Y. Furusawa, Radiat. Res. 178, 341-356 (2012).

¹⁹ Y. Iwamoto, S. Meigo, and S. Hashimoto, J. Nucl. Mater. 538 (2020) 152261. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152261>

²⁰ H. N. Ratliff, N. Matsuda, S. ichiro Abe, T. Miura, T. Furuta, Y. Iwamoto, and T. Sato, “Modernization of the DCHAIN-PHITS activation code with new features and updated data libraries,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B, vol. 484, pp. 29-41, 2020. doi: 10.1016/j.nimb.2020.10.005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.10.005>

- **OpenMP** メモリ共有型並列計算の計算効率を改善するため、スレッドプライベート変数の削減等のコード改良を実施しました。入力ファイルに依って効果は異なりますが、**OpenMP** 実行時のオーバーヘッドが削減され、**OpenMP** の並列性能が向上しました。本改良は原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として日本ヒューレット・パッカード株式会社の白井信裕氏の協力により実施しました。
- 体系の **Lattice** 構造データのメモリ領域を動的確保するように改良しました。これにより、大容量のボクセルデータを使用する計算ではメモリ領域の拡張に伴う **PHITS** の再コンパイルが不要になりました。
- 2つ以上の **lattice** 構造を使用した場合に計算が止まるバグを修正しました。このバグは、**version3.22** のみ発生していました。
- データリスト型 (**typ=-1 & -2**) かつメッシュ幅が均等でない磁場マップ・電磁場マップを使用した際、電場・磁場の強さが正しく考慮できないバグを修正しました。

バージョン 3.22 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2020 年 10 月 9 日)

- 加速器でのビーム・エミッタンスを定義できるように、位相空間線源 (**s-type=11**) でガウス分布した位相空間からサンプリング可能としました。また、関連マニュアルを整備しました (5.3.10 節参照)。本開発は、量子科学技術研究開発機構の榊泰直博士にご協力いただきました。
- 磁場マップで磁場を与えたときに電子以外の粒子に対する相対論が考慮できていなかったバグを修正しました。本バグ修正は、九州大学の徳永直輝氏にご協力いただきました。
- バージョン 3.21 で発生していた、**gshow** や [**t-gshow**] で領域番号が出力されないバグを修正しました。

バージョン 3.21 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2020 年 9 月 14 日)

- **ICRU90** に示された阻止能を使った計算機能を追加しました。具体的には、水・空気・炭素中における陽子及び炭素イオンの阻止能データベースを整備し **data\dedx** フォルダに格納しました。電子に関しては、**epstfl** パラメータで **ICRU90** に対応した密度補正係数の利用の有無を選択できるようにしました。詳しくは **utility\icru90** をご参照下さい。本改良は、KEK 波戸芳仁博士及び産業技術総合研究所の清水森人博士にご協力いただきました。
- **SCINFUL-QMD**²¹ に格納された断面積を用いて有機シンチレータの応答関数を正確に計算する **SCINFUL** モードを導入しました。詳しい使い方は **utility\usrtally\scinful-qmd** をご参照ください。本機能の開発は、日本原子力研究開発機構 放射線挙動解析研究グループの佐藤大樹博士にご協力いただきました。
- **Adjoint mode** を導入しました。これにより、広範囲に散らばる線源から小さな領域の光子フルエンスを効率的に計算することができます。詳しくはマニュアル [**t-adjoint**] 及び **utility\adjoint** をご参照ください。本機能の開発は、日本原子力研究開発機構 計算科学センターの Alex Malins 博士にご協力いただきました。
- 22 核種の評価済み高エネルギー核データライブラリー **JENDL-4.0/HE** を **PHITS** パッケージに格納しました。詳細は **APENDIX** をご参照ください。
- 長らく整備中だった **icntl=1** の一部機能 (断面積・カーマファクター出力モード) を完成させ、その使い方をマニュアルに追記しました。詳しくは **utility\icntl1** をご参照ください。

²¹ D. Satoh, T. Sato, N. Shigyo and K. Ishibashi, SCINFUL-QMD: Monte Carlo based computer code to calculate response function and detection efficiency of a liquid organic scintillator for neutron energies up to 3 GeV, JAEA-Data/Code, 2006-023 (2006).

- サブアクチノイド (原子番号 89 未満) の原子核が統計崩壊を始めるとき、従来の核分裂モデルに代わって Iwamoto の核分裂モデルを使えるようにしました。本機能の開発は、原子力機構・原子力基礎工学研究センター・核変換システム開発 Gr. の岩元大樹博士の協力により実施しました。また現在は使われていませんが、今後のアクチノイド核分裂モデル改良を視野に、`phits\data` フォルダに核分裂バリアの表 `Fission_barrier_table_PhysRevC_91_024310.dat`²²を導入しました。
- ガンマ崩壊モデル EBITEM を改良し、`phits\data\RIPL` フォルダに置いた RIPL(Reference Input Parameter Library)-3²³ の核構造データを読むようにしました。従来は 2012 年頃の古い核構造データを、PHITS のソース内に取り込んで使っていました。この改良により、計算精度の向上、実行可能ファイルの縮小、実行時のメモリ節約、コンパイルの高速化ができました。使用時には特に操作を必要とせず、自動的に新しいバージョンを使用します。
- XYZ メッシュ空間分布線源 (`s-type=22`) で、各メッシュから等しい数の粒子を発生させ、ウェイトを変化させてその強度を調整するモードを導入しました。
- DCHAIN-PHITS で統計誤差を出力できるようにしました。また、`[t-dchain]` タリーに連続四面体のメッシュ毎にタリー結果を出力する `mesh=tet` のオプションを追加しました。
- 系統的不確かさを評価する機能を `[t-deposit](output=dose)` でも利用できるようにしました。また、1つのインプットファイルに複数のタリーセクションが書かれている場合も利用できるようになりました。他、分析機能用スクリプトファイル `autorun` のバグを修正しました。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として RIST の三浦孝充氏の協力により実施しました。
- OpenMP メモリ共有型並列計算の計算効率を改善するため、タリー変数の非共有化を選択できるオプション `italsh` を追加しました。これまではタリー変数はスレッド間で共有することで、必要メモリ領域を少なくする仕様にしていましたが、メモリ競合を防止する処理がボトルネックとなり、計算速度が低下する場合があるため、タリーの共有/非共有を選択できるようにしました。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として日本ヒューレット・パッカード株式会社の吉廣保氏と白井信裕氏の協力により実施しました。
- 新しいパラメータ `gsline` を `[parameters]` セクションに導入し、各タリーの `gslat` パラメータを一括コントロールできるようにしました。また、`gslat` に新たなオプションを追加しました。
- `[cell]` セクション全体を一度バイナリ化して読込を高速化する `icells` パラメータを導入しました。
- ボクセルデータを使用する計算の出力データ量の抑制と計算時間の短縮のため、入力ファイルのエコー (“`phits.out`”) にボクセルデータを出力しないように改良しました。なお、`ivoxel=3` のオプションを `[parameters]` セクションで指定すると、今まで通り、入力ファイルのエコーにボクセルデータも出力します。
- 同一の物質番号を用いて密度が異なる領域を定義した場合に、各 `cell` の物質番号と密度をチェックするための新しいパラメータ `ichkmat` を導入しました。従来このチェックは自動的に行っていたのですが、`cell` 数が多い場合に計算時間が長くなるなどの不具合が発生したため、手動で設定するように変更しました。初期設定ではチェックしなくなるのでご注意ください。密度が異なる同一の物質番号の `cell` が特定の順番で定義された場合に、`gshow` でジオメトリが正しく描画できなくなります。

²² Peter Moller, Arnold J. Sierk, Takatoshi Ichikawa, Akira Iwamoto, and Matthew Mumpower, Fission barriers at the end of the chart of the nuclides, Phys. Rev. C 91, (2015) 024310.

²³ R. Capote, M. Herman, P. Oblozinsky, P.G. Young, S. Goriely, T. Belgia, A.V. Ignatyuk, A.J. Koning, S. Hilaire, V.A. Plujko, M. Avrigeanu, O. Bersillon, M.B. Chadwick, T. Fukahori, Zhigang Ge, Yinlu Han, S. Kailas, J. Kopecky, V.M. Maslov, G. Reffo, M. Sin, E.Sh. Soukhovitskii and P. Talou, Reference Input Parameter Library (RIPL-3), Nuclear Data Sheets, 110, Issue 12, (2009) 3107-3214

- 陽子核データライブラリーを使った場合に、反応断面積のエネルギー変化を考慮せずにステップ幅を決めていたバグを修正しました。これに伴い、ステップ幅中での最大断面積を与えるエネルギーを指定するパラメータ **epseudo** を導入しました。また、**[data max]** セクションを使って一部の核種のみに対してライブラリーを使うように指定した場合に 2 次粒子が発生しなくなるバグも修正しました。本改良は、高度情報科学技術研究機構の古立直也博士のご協力により実施しました。
- 他に次のバグ修正を行いました。電子の電磁場中でのバグ（真空中で反応する問題や反射境界が効かない問題）を修正。電磁場マップで z 軸方向に掛かった磁場中の挙動を修正。四面体メッシュ体系内で **[t-deposit]** タリー計算を行う際に誤って次の境界領域のマテリアルを使用していたバグを修正。

バージョン 3.20 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。（2020 年 3 月 19 日）

- 陽子 ($E < 300$ MeV) 及び炭素イオン ($E < 10$ MeV/n) に対する飛跡構造解析コード KURBUC²⁴ を導入しました。本改良は、同コード開発者の Hooshang Nikjoo 教授と Thiansin Liamsuwan 博士の協力により実施しました。
- 光子によるミュオン対の生成を考慮できるようにしました。**[parameters]** セクションで **igmuppd=1** と指定することにより本機能は動作します。本機能の開発は、KEK 坂本泰仁博士にご協力いただきました。詳細は、下記の文献²⁵ をご覧ください。
- 特定の領域における核反応生成粒子の統計精度を向上させるため **[Repeated Collisions]** セクションを導入しました。詳細は 5.22 節をご参照ください。本機能の開発は、原子力機構・原子力基礎工学研究センター・核変換システム開発 Gr. の岩元大樹博士の協力により実施しました。
- **[t-cross]** に、**a-type mesh** の角度基準を決めるパラメータ **iangform** を新規追加しました。従来の角度基準である通過した面の法線ベクトル (**iangform=0**) に加え、x 軸 (**iangform=1**)、y 軸 (**iangform=2**)、z 軸 (**iangform=3**) が選択できます。
- **[frag data]** に微断面積を群データではなく点データで与える機能を追加しました。**opt=5** で利用できます。
- 物質の阻止能をユーザーが与えるデータベースから直接読み込む機能を開発しました。また、そのサンプルデータとして、様々な物質に対する陽子及び α 粒子の阻止能を PSTAR 及び ASTAR²⁶ で計算した結果を “/data/dedx” フォルダに格納しました。この開発は、(株) ナイスの協力により実施しました。
- 電場マップ読み込み機能を追加しました。この開発は、(株) アドバンスソフトの協力により実施しました。
- Xorshift64 方式に基づく新しい擬似乱数生成法を導入し、初期設定として利用するようにしました。この改良により、乱数周期が 2^{46} から $2^{64} - 1$ に大幅に延長されます。
- ボクセルやテトラによる複雑形状を **gshow** できれいに描けるように修正しました。この開発は、(株) ナイスの協力により実施しました。

²⁴ Uehara S, Nikjoo H, Goodhead DT, 1993, Cross sections for water vapour for Monte Carlo electron Track structure from 10 eV to 10 MeV region. Phys Med Biol 38: 1841-1858;

Hooshang Nikjoo, Shuzo Uehara, Dimitris Emfietzoglou, Interaction of Radiation with Matter, CRC Press, Published June 11, 2012;
Liamsuwan T, Uehara S, Emfietzoglou D and Nikjoo H 2011, Physical and biophysical properties of proton tracks of energies 1 keV to 300 MeV in water, Int. J. Radiat. Biol. 87 141-60;

Liamsuwan T and Nikjoo H 2013 A Monte Carlo track structure simulation code for the full-slowing-down carbon projectiles of energies 1 keV u^{-1} - 10 MeV u^{-1} in water, Phys. Med. Biol. 58 673-701

²⁵ Y. Sakaki et al., Implementation of muon pair production in PHITS and verification by comparing with the muon shielding experiment at SLAC, Nucl. Instr. & Meth. A 977, 164323 (2020).

²⁶ <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>

- DCHAIN-PHITS 用の新たな中性子放射化断面積ライブラリーをいくつか追加し、それらを組み合わせたライブラリーを初期設定で使用するようにしました。また、初期設定で **itdecs** 及び **itdecn** パラメータを 1 として、核反応によるターゲット減少分を考慮できるようにしました。詳細は、7.15 節をご参照ください。本機能の開発は、原子力機構・原子力基礎工学研究センター・炉物理標準コード研究 Gr. の今野力研究主幹の協力により実施しました。
- ATIMA に入力するエネルギー単位が原子質量単位あたりの **MeV/u** ではなく核子あたりの **MeV/n** だった不具合を修正しました。この修正により、荷電粒子の飛程が多少（最大で 1% 程度）変化しますのでご注意ください。また、PHITS の入力ファイルで指定するエネルギーは **MeV** もしくは **MeV/n** です。マニユアルや **Input echo** の **MeV/u** と記載していた箇所は、全て **MeV/n** に修正しました。
- Maxwellian 分布を持つ線源 (**e-type=3,7**) のエネルギーのベキを指定できるようにし、その初期値を 0.5 としました。従来は 1.0 に固定されていましたが、正しい Maxwellian 分布を再現できていませんでしたので、ご注意ください。
- 分散分析に基づいて PHITS の計算結果における系統的不確かさを評価する機能を追加しました。また、自動的に PHITS の輸送計算を実行して分散分析の結果を得られるようにするために、分析機能用スクリプトファイルとして、**autorun** を一新しました。詳細は 6.9.2 節をご参照ください。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として RIST の三浦孝充氏の協力により実施しました。
- PHITS-FLUENT の接続計算についての資料を作成しました。“/phits/utility/FLUENT” フォルダをご確認ください。

バージョン 3.17 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2019 年 10 月 29 日)

- 連続四面体形式でタリー結果を出力する際、csv 形式（コンマ区切り）で出力する機能 (**foamout=2**) を追加しました。
- EGS5 で **[t-deposit]** を使った場合に初期化されていない変数があり、場合によっては結果が極端に変になるバグを修正しました。
- 各タリーの **sum over** の計算方法を修正しました。
- **nedisp=1** としたときのカットオフ粒子の扱いを修正しました。
- “usrdfn2.f” で計算する生物学的線量のパラメータが T.Sato et al. Radiat. Prot. Dosim. 143, 491-496 (2010) に基づいていましたが、T.Sato et al. Radiat. Res. 171, 107-117 (2009) に基づくように修正しました。

バージョン 3.16 では、**sangel** に関するバグとバージョン 3.15 で発生していた **[t-track]** で “_err” のファイルが作成されないバグを修正しました。(2019 年 9 月 26 日)

バージョン 3.15 では、主に次のバグ修正を行いました。(2019 年 9 月 12 日)

- EGS5 と **[t-deposit]** を使用した場合に、エネルギーカットオフの成分を過大評価するバグを修正しました。このバグはバージョン 3.13 と 3.14 で発生していました。また、バージョン 3.10 以降で発生していた EGS5 と **lattice** 構造を組み合わせて使用した場合のバグも修正しました。
- **itall=3** により利用できるタリーの評価値及び統計誤差の推移をバッチ毎に表示する機能が、入力条件により動作しないバグを修正しました。このバグはバージョン 3.13 と 3.14 で発生していました。
- バージョン 3.14 で発生していた DCHAIN のバグを修正しました。

バージョン 3.14 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2019 年 8 月 18 日)

- DCHAIN-SP を改良し、DCHAIN-PHITS としました。主な改良点は、中性子放射化断面積ライブラリー及び崩壊データライブラリーを最新のデータに基づいて整備した点と、PHITS の統計誤差の伝播を考慮した誘導放射能計算を可能とした点です。これに伴い **[t-dchain]** にライブラリーや誤差計算の有無を選択する新たなパラメータが加わりました。詳しくは 7.15 節をご参照ください。
- 飛跡構造解析モードとユーザー定義タリーを組み合わせた DNA 損傷計算機能を開発し、そのサンプルデータを “/phits/utility/usrtally/DNAdamage” フォルダに格納しました。
- PHITS バージョン 3.13 固有のバグ (**[t-interact]** の一部機能が動作しない、電子飛跡構造解析モードで 2 次電子が生成されない問題) を修正しました。

バージョン 3.13 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2019 年 8 月 2 日)

- 陽子、パイオン、ミューオン、イオンに対するカットオフエネルギーの初期値を 1 MeV/n から 1keV/n に引き下げました。
- **[surface]** セクションで定義した特定の面上から線源を発生させる新たな線源タイプ (**s-type=26**) を導入しました。詳しくは、5.3.16 節をご参照下さい。
- Tally の評価値及び統計誤差の推移をバッチ毎に表示する機能 (**itall=3**) を導入しました。ただし、この機能は現在のところ **[t-track]** と **[t-point]** のみ動作します。
- **stdcut** で定義した統計目標に達したタリーを順次、計算から除外するパラメータ **istdcut** を導入しました。**[t-point]** や **[t-sed]** など、タリー計算そのものに時間が掛かる場合に有効となります。また、計算開始直後に統計誤差がばらつくことがあるため、指定したバッチまでは **stdcut** による打ち切り機能が無効にするパラメータ **istdbat** を導入しました。
- 阻止能計算に ATIMA を採用した場合、水 (H₂O) に対する Ionization Potential は初期値として 75 eV が選択されるように設定されているのですが、従来は、この設定が水素の同位体 1H を明示的に指定した場合にのみ有効で、質量数を定義せずに水素元素 H を指定した場合には無効 (69 eV が選択される) となっていました。そこで、**H 2 0 1** や **H -0.1111 0 -0.8889** のように質量数を指定しなくても水素と酸素の元素比が約 2:1 で構成される物質は水と認識するよう判定基準を修正しました。この修正により、version 3.13 以降、質量数を指定せずに定義した水中での荷電粒子の飛跡長が微妙 (ほとんどの場合は 1%未満) に長くなりますのでご注意ください。また、水の Ionization Potential を自由に設定できるパラメータ **ih2o** に関する判定基準も同様に修正しました。
- MPI 並列 version で統計誤差打ち切り機能 (**stdcut**) が動作しないバグ、Universe 構造に反射面が存在した場合に正しく考慮されないバグ、EGS5 を使った場合に希に前のヒストリーの影響を受けてしまうバグなど、いくつかバグを修正しました。

バージョン 3.12 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2019 年 6 月 19 日)

- **[source]** セクションでマルチソース毎に異なるカウンター値を設定できるようにしました。また、定義可能なマルチソースの数を 200 から 500 に拡張しました。
- **[t-dchain]** で核変換による放射性同位元素の減少分を考慮可能としました。この変更に伴い DCHAIN も修正しました。古い version の DCHAIN では新しい **[t-dchain]** の出力結果を読み込めませんのでご注意ください。
- Windows の OpenMP 版を用いた場合でも **itall=1** オプション (バッチ毎に eps ファイルを出力する機能) が有効となるようにしました。

- Fluent との連成計算で密度情報が正しく受け渡しできない問題など、いくつかバグ修正を行いました。

バージョン 3.11 では、主に次のバグ修正を行いました。(2019 年 5 月 16 日)

- 四面体体系を使った輸送計算を MPI 並列で実行しようとするエラーが起きて終了するバグを修正しました。このバグは PHITS ver.3.10 のみに存在するバグです。
- 磁場マップ読込機能で、**r-z** グリッド型 (**type** = -2, -4) の読込の際に正しく磁場が読み込まれない場合があります、これを修正しました。
- RI 線源機能で、陽電子を放出する核種で陽電子と光子放出を両方考慮した場合、消滅 γ 線が 2 重カウントされてしまうことが分かりました。これを回避するために、新しいパラメータとして **iannih** を導入し、光子線源では消滅 γ 線を考慮しないオプションを作成しました。

バージョン 3.10 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2019 年 3 月 13 日)

- 熱流体解析コード (ANSYS Fluent など) との連成計算を可能としました。この目的のため、PHITS に読み込める連続四面体形状の形式に NASTRAN のバルクデータ形式を追加しました。この形式を利用することで、熱流体解析コード等で用意した連続四面体形状を PHITS でも共通して使用することができます。また、新たに連続四面体のメッシュ毎にタリー結果を出力する **mesh=tet** オプションを **[t-track]**, **[t-deposit]**, **[t-yield]**, **[t-product]**, **[t-dpa]** に導入しました。その際、OpenFoam のフィールドデータ形式で出力する機能も追加し、PHITS の計算結果を熱流体解析コードなどで直接読み込めるようにしました。この開発は、原子力機構 原子力基礎工学研究センター 燃料・材料工学 Dv のサポートのもと、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (CTC) の協力により実施しました。
- 上記目的の一部として **[t-deposit]** に **unit=5** を追加し、J/m³/source 単位での出力機能を追加しました。
- 高エネルギー核データライブラリー JENDL-4.0/HE を正しく読み込めるよう改良し、いくつかサンプルを PHITS パッケージに入れました。詳しくは `\phits\recommendation\jendlHE` をご参照ください。
- xyz もしくは r-z グリッド形式で表現される複雑な磁場構造を考慮可能としました。本改良は、(株) 先端力学シミュレーション研究所 (ASTOM R&D) の協力により実施しました。
- **[t-dchain]** で **mesh=xyz** が指定可能となりました。これに伴い、DCHAIN も仕様が変更されていますので、ご注意ください。なお、DCHAIN で計算した残留放射能の空間分布を可視化する機能や、その結果を線源として PHITS に取り込む機能は、まだ完成していません。本開発は、原子力機構・システム計算科学センター・スーパーコンピュータ利用に係るプログラミング支援作業の一環として RIST の三浦孝充氏の協力により実施しました。
- e, μ, τ ニュートリノとその反粒子入射による反応のモデルを、入射エネルギー 150MeV まで組み込みました。ただし、標的は軌道電子、¹H, ²H のみ可能で、²H より重い原子核との相互作用は未実装です。
- 九州大学で開発中の核反応モデル INC-ELF を改良し、標的核の集団励起による散乱や、高精度な荷電粒子放出バリア計算が可能としました。本改良は、九州大学 魚住裕介准教授及び渡辺岳氏の協力により実施しました。
- 電子飛跡構造解析モードで Auger 電子の生成を考慮することにより、その計算精度を向上させました。本改良は、原子力機構 松谷悠佑博士研究員の協力により実施しました。

- [T-deposit] で **dresol** や **dfano** だけでは表せない分解能を再現するために、ユーザー定義検出器分解能機能を使えるようにしました。その関数は“**usresol.f**”で定義でき、サンプルとして **CdZnTe** の非対称ピークを再現するために **SCK-CEN** の **Meleshkovskii** 氏らが開発したモデルがデフォルトで組み込まれています。
- 極めて細かい構造を持つジオメトリ（ボクセルファントムや連続四面体形状など）を [t-gshow] や **gshow** できれいに描画するため、ピクセル状に幾何形状を出力する新たなオプション（**gshow=5**）を追加しました。
- 短縮形式の **Lattice** 構造データに対応しました。ボクセルファントムのデータなど、同じ物質が連続して並んでいる場合、その個数を負の値で指定することによりファイルサイズが大幅に縮小され、読込時間を短縮することができます。
- 負ミューオン捕獲反応の調整オプションを導入しました。
- [t-deposit] で付与エネルギーに重み付けする 3 つ目の関数を導入しました。その関数は“**usrdfn3.f**”で定義でき、サンプルとして医学物理計算で重要となる水等価線量を評価するモデルがデフォルトで組み込まれています。
- “**batch.out**”の仕様を変更し、**PHITS** 実行中に残りバッチ数を調整可能としました。
- [t-cross] で **mesh=xyz** もしくは **r-z** の場合、メッシュで区切られた閉曲面を 1 つの横断面として設定することにより、各メッシュ内に流入もしくは流出する粒子数（もしくはフラックス）を計算可能としました。
- [t-deposit] で **output=deposit** として付与エネルギー確率分布を計算する場合に、異なる **Lattice** 座標内にある同一セル番号への付与エネルギーを別個に扱う機能を導入しました。
- 最新版 **ENDF** など γ 線スペクトルデータが 1000 以上ある核データライブラリーの読込を可能としました。
- **ifixchg** パラメータを導入し、**ATIMA** で電荷を指定して阻止能を計算可能としました。ただし、電荷交換反応は未実装のため、現在のところ、極めて薄いターゲット以外は物理的に正しい阻止能が計算できませんのでご注意ください。
- **emin(12)** を指定して **emin(13)** を指定しなかった場合の陽電子挙動の不具合を修正しました。**Lattice** 構造中で電子に対して電磁場が効かない問題を修正しました。それ以外にもいくつかマイナーなバグを修正しました。

バージョン 3.08 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。（2018 年 8 月 20 日）

- [t-yield] 及び [t-dchain] でユーザーが独自に指定する放射化断面積を読み込む機能を追加しました。詳しくは、7.8 節をご参照ください。本改良は、革新的研究開発推進プログラム **ImPACT**「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」の一環として実施されました。
- **RI** 線源機能で、特性 **X** 線と内部転換電子を考慮可能としました。
- **CAD** から変換されたデータを使用するため、連続四面体形状で境界面が一致しないデータでも使用可能としました。
- ユーザー定義ソース (“**usrsors.f**”) 内で、インプットファイルで指定したパラメータ (**c1-c99**) を使えるようにしました。

- ANGEL で結果を描画する際、数値データのチェックを行わずに高速で描画するモードをデフォルトとしました。
- 円柱分布線源 (**s-type=1**) で **r0=r1** とすると、線源位置が 0 から **r1** の範囲でサンプリングされてしまう不具合など、いくつかのバグを修正。

バージョン 3.07 では、**[weight window]** の xyz メッシュを EGS5 を使用した場合でも指定できるように改良しました。また、半導体ソフトウェア発生率を計算するための換算係数を **[multiplier]** のデフォルトデータとして追加しました。他、JAM を使用した際に稀に発生するバグを修正しました。(2018 年 7 月 5 日)

バージョン 3.06 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2018 年 5 月 29 日)

- **igamma** パラメータを負値にすることにより、励起核の運動によるドップラー効果を無視し、放出される特性ガンマ線スペクトルが単色ピークとなる機能を追加しました。
- 核子とガンマ線放出の競合を考慮できる統計崩壊モデル GEM Ver.2 を導入しました。**[parameters]** において **ngem=2** と指定することにより利用できます。
- **[transform]** で、z,y,x 軸周りの回転を簡易に定義できる形式を導入しました。
- Windows PC において、MPI プロトコルを用いたメモリ分散型並列計算が可能となりました。この開発は、(株) ナイスの協力により実施いたしました。
- **e-mode=2** を指定した状態で、INCL などの核反応モデルが動作した場合に発生するバグを修正しました。条件により、1MeV 以下の中性子フルエンスが数 10% 程度減少していました。このバグはバージョン 3.05 で発生しておりました。

バージョン 3.05 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2018 年 3 月 14 日)

- 従来 **[t-heat]** でしか行えなかったカーマ近似による付与エネルギー計算機能を **[t-deposit]** にも追加しました。その際、カーマ近似の使用の有無は、イベントジェネレータモードや EGS5 の使用状況から自動的に判断します。この改良により、付与エネルギー計算は全て **[t-deposit]** で行えるようになりました。
- 1 ヒストリー内でエネルギー付与する粒子のウェイトが同じ場合に、**[t-deposit]** の **output=deposit** で正しく計算できるようになりました。この改良により、**s-type=9** かつ **dir=-all** とした場合の線源や非荷電粒子に **[forced collisions]** を用いた際の付与エネルギー分布が適切に評価できるようになります。
- **[t-cross]** において **axis=z** とした場合に、出力されるグラフの形式を折れ線グラフとしました。
- **[t-cross]** で **z-type=1** とした場合に、**nz=0** とすることで、タリー面を 1 面だけ設定できるようにしました。
- **[t-interact]** において、電子と陽電子による knock on electron 生成の成分を **output=deltaray** から切り分け、**output=knockelec** で出力するように変更しました。また、同成分を **[counter]** における **delt** から切り分け、**knoc** でカウントするように変更しました。
- RI 線源機能を使用して Auger 電子を発生させる場合に、**RIsource.ack** にデータがない RI 核種については、**RIsource.rad** のデータを利用するように改良しました。
- **iMeVperu=1** とした場合に、**[t-product]** でエネルギーが正しく計算されないバグを修正しました。

バージョン 3.04 では、**[t-star]** でヒストリ毎の反応頻度分布を出力可能としました。また、飛跡構造解析モードで起きた反応数も計算可能としました。さらに、反応数 (**interaction**) を計算するタリーであることが直感的に分かるように、タリー名を **[t-interact]** に変更しました。ただし、プログラム上は **[t-star]** という名称も引き続き利用することが可能です。(2018 年 2 月 16 日)

バージョン 3.03 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2018 年 2 月 1 日)

- 連続四面体から線源粒子を発生させる機能を追加しました。**s-type=24** とすることにより利用できます。詳細は、5.3.15 節をご覧ください。
- **[weight window]** 及び **[t-wwg]** において xyz メッシュ形状が選択できるようになりました。
- **[multiplier]** において **part** を指定できるようにし、粒子別の係数を定義できるようにしました。また、この機能を応用して、様々な種類の被ばく線量をあらかじめデータベース化した換算係数を用いて計算できるようにしました。
- **[t-deposit]** で **output=deposit** とし、**dresol** を設定した場合に **part=all** 以外の結果が適切に計算されないバグを修正しました。
- **iMeVperu=1** とした場合に、**[t-track]** 等で荷電粒子のレンジ計算が適切に行われないバグを修正しました。

バージョン 3.02 では、主に次の改良とバグ修正を行いました。(2017 年 12 月 1 日)

- ユーザー定義タリー **[t-userdefined]** で指定できる新しいパラメータ **nudtvar** と **udtvar(i)** を追加しました。 $i = \text{nudtvar}$ を上限とする **udtvar(i)** の数値をインプットファイルで指定し、それらを **subroutine usrtally** 内で使用できます。**udtvar(i)** は、従来の **udtpara** と同様の役割を果たしますが、指定できる数 (**nudtvar**) に制限はありません。なお、**udtpara** は本バージョン以降も使用可能です。
- **[t-let]** と **[t-sed]** に対して新たな **unit** を追加しました。
- 球殻線源 (**s-type=9**) で **dir=iso** とした場合、従来は球殻の外側から線源を発生させていましたが、球殻上から線源を発生するように変更しました。この変更は、線源球殻の外側に物質がある場合のみ結果に影響を与えます。
- EGS5 を利用せず光子のみの輸送を行った場合に、**[counter]** で原子相互作用 (**atom**) のプロセスがカウントされない不具合を修正しました。
- **[delta ray]** セクションを使ってデルタ線を発生させる際の制限付阻止能計算のバグを修正しました。
- 荷電粒子を輸送する際の角度分散に関するバグを修正しました。**emin** を 1MeV/n より低く設定し、**nspred** を有効にした場合に発生していました。SOBP による粒子線治療を模擬した計算において影響がありました。このバグは、version 2.96 から含まれておりました (それ以前の version は問題ありません)。

1.2 開発体制

PHITS の開発は、日本原子力研究開発機構が中心となって、高度情報科学技術研究機構、高エネルギー加速器研究機構、九州大学等と共同で進められています。

現在の開発メンバーは以下の通りです。

(財) 高度情報科学技術研究機構 (RIST)

仁井田浩二

(国研) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)

佐藤達彦、岩元洋介、橋本慎太郎、小川達彦、古田琢哉、安部晋一郎、甲斐健師、松谷悠佑²⁷、
松田規宏、平田悠歩、関川卓也、Lan Yao、Pi-En Tsai²⁸、Hunter Ratliff²⁹

(共) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

岩瀬広、坂木泰仁、杉原健太

(国) 九州大学 (Kyushu University)

執行信寛

ウィーン工科大学, オーストリア

Lembit Sihver

また、これまでに以下の方々が PHITS の開発に寄与されました。

原子力機構

高田弘、明午伸一郎、勅使河原誠、前川藤夫、原田正英、池田裕二郎、坂本幸夫、中島宏、深堀智生、
奥村啓介、甲斐哲也、野田秀作

(国) 東京工業大学 (TITech)

千葉敏

東北大学工学部

中村尚司

Chalmers University, Sweden

Davide Mancusi

1.3 PHITS の参考文献

バージョンに関わらず、PHITS をご使用になられた場合は次の文献を引用してください。

- T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, R.N. Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024).

この文献はオープンアクセスとなっており、次の URL からダウンロードできます。

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00223131.2023.2275736>

この他に、PHITS がもつ特徴についてまとめた文献には次のものがあります。

²⁷北海道大学

²⁸現所属: Zap Energy, USA

²⁹現所属: Western Norway University of Applied Sciences (HVL), Norway

- H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, Development of general purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code. J Nucl Sci Technol. 39, 1142-1151 (2002).
- K. Niita, T. Sato, H. Iwase, H. Nose, H. Nakashima and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System; PHITS, Radiat. Meas. 41, 1080-1090 (2006).
- L. Sihver, D. Mancusi, T. Sato, K. Niita, H. Iwase, Y. Iwamoto, N. Matsuda, H. Nakashima, Y. Sakamoto, Recent developments and benchmarking of the PHITS code, Adv. Space Res. 40, 1320-1331 (2007).
- L. Sihver, T. Sato, K. Gustafsson, D. Mancusi, H. Iwase, K. Niita, H. Nakashima, Y. Sakamoto, Y. Iwamoto and N. Matsuda, An update about recent developments of the PHITS code, Adv. Space Res. 45, 892-899 (2010).
- K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L. Sihver, PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code 2010-022 (2010).
- K. Niita, H. Iwase, T. Sato, Y. Iwamoto, N. Matsuda, Y. Sakamoto, H. Nakashima, D. Mancusi and L. Sihver, Recent developments of the PHITS code, Prog. Nucl. Sci. Technol. 1, 1-6 (2011).
- T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).
- T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P.-E. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, H. Shigyo, L. Sihver, and K. Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018).

2 インストール及び実行方法

PHITS は、Windows (7 以降)、Mac (OS X v10.6 以降) 及び Linux 上で動作する Fortran プログラムです。各環境にあわせて用意されたインストーラを使用することで、簡単に実行環境を準備できます。

PHITS をインストールするにあたっては、物理メモリが 1GB (推奨は 2GB)、ハードディスクの空き容量が 6GB のコンピュータをご用意ください。また、Windows と Mac の OS に関しては、管理者 (Administrator) 権限をもつアカウントで使用する必要があります。

以下の 2.1, 2.2, 2.3 節では、それぞれ Windows, Mac, Linux OS における PHITS のインストールと実行方法についてご紹介します。

2.1 Windows OS におけるインストール及び実行方法

2.1.1 インストール方法

- (1) 古いバージョンの PHITS をインストールしている場合は、ご自身で編集したファイルのバックアップを取ってください (上書きインストールをします)。ただし、アドレスファイル (“xsdir.jnd”) のみ上書きの可否を選択可能で、上書きする場合は古いファイルのバックアップを自動で作成します。
 - (2) PHITS パッケージの win フォルダにある “phits_win_setup.exe” をダブルクリック。
 - (3) インストールフォルダを指定 (“c:/phits” を奨励します)
 - (4) 必要なソフトウェアを選択。初めて PHITS をインストールする PC の場合は「新規インストール」、更新の場合は「バージョンアップ」を選択することを奨励します (2.1.3 節参照)。
 - (5) インストール完了
 - (6) インストールが適切に完了したかどうかを確認するため、“/phits/lecture/basic/lec01/lec01.inp” のファイルを指定し、右クリックして “送る” → “PHITS” を選択
 - (7) “xz.track.all.eps” が作成されたことを確認
- (注意) インストールフォルダや PHITS のインプットファイルがあるフォルダの名称にスペースや漢字があるとエラーになる場合がありますので、そのような文字が使われていないフォルダでご利用ください。

インストーラは、下記の内容を実施します。

- (1) エディタのインストールが選択された場合は、そのエディタをインストールして “*.inp” と “*.out” ファイルに関連付ける。また、そのエディタから PHITS や PHIG-3D を直接実行できるように設定ファイルを修正する。
- (2) Ghostscript が選択された場合は、Ghostscript のインストーラを実行する。
- (3) SumatraPDF が選択された場合は、SumatraPDF のインストーラを実行する。
- (4) PHIG-3D の実行に必要な Visual C++ 再頒布可能パッケージをインストールする。
- (5) phits.7z を指定したインストールフォルダに展開する。
- (6) PHITS の実行形式を含むフォルダ “phits/bin” に PATH を通す。
- (7) 環境変数 PHITSPATH を追加する (これによりインプットファイルで file(1) を指定する必要がなくなります)。

- (8) “phits/bin” フォルダにある “phits.bat”、“angel.bat”、“phig3d.bat”、及び “phits/dchain-sp/bin” フォルダにある “dchain.bat” のショートカットを “送る (sendto)” フォルダに作成する。
- (9) JENDL-5 インストール用に “app/7za.exe” を “phits/bin” フォルダにコピーする。

2.1.2 実行方法

PHITS を実行する場合は、“送る” による方法とコマンドプロンプトを用いる方法があります。

2.1.2.1 “送る” による実行方法

Windows の “送る” 機能を用いて PHITS を実行できます。PHITS の入力ファイルを指定して右クリックをすると、“送る” → “PHITS” が表示されますので、これを選択することで PHITS が実行されます。この方法では、“/phits/bin/” フォルダにある PHITS 用のバッチファイル “phits.bat” のショートカットを “送る” に登録しています。このため、“phits.bat” を編集することで、その変更を “送る” による PHITS の実行内容に反映させることができます。

2.1.2.2 コマンドプロンプトからの実行方法

Windows の CUI (Character user interface) である “コマンドプロンプト” から、コマンド入力により PHITS を実行できます。Windows の “スタートボタン” をクリックし、検索ボックスに “cmd” と入力して表示される “cmd.exe” を選択すると、図 1 に示すようなコマンドプロンプトのウインドウが立ち上がります。

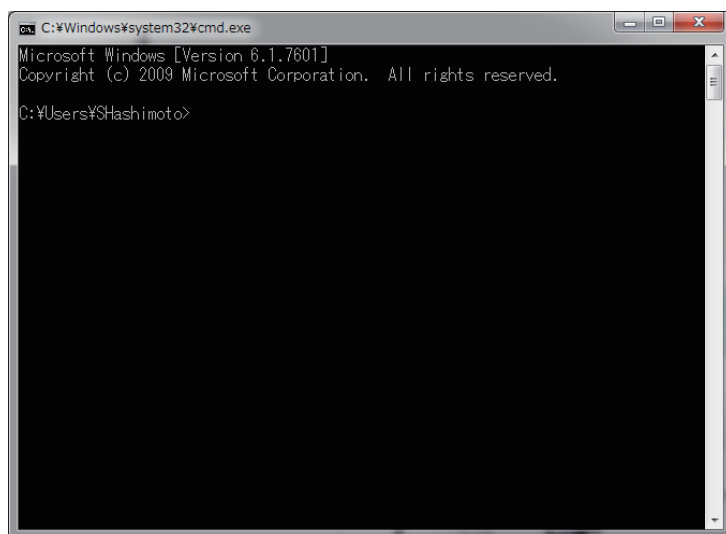


図 1: コマンドプロンプトのウインドウ

PHITS の実行方法は、“cd” コマンドを使ってインプットファイルのあるフォルダに移動した後、コマンドプロンプト上で下記のように入力します。

```
phits.bat phits.inp
```

ここで、“phits.inp” は PHITS のインプットファイル名です (例: lec01.inp)。コマンドプロンプトにおいて ↑ キーを押すと、過去のコマンド履歴が出ますので、同じインプットファイルを何度も実行する場合に便利です。

2.1.3 推奨ソフトウェア

PHITS を実行するために必要なソフトウェアは特にありません。ただし、PHITS の入力ファイルを作るためには、行番号を表示可能なテキストエディタがインストールされていることが望ましいです（エラーが生じたときに、原因となる入力ファイルの行番号が表示されるため）。また、画像出力ファイル（EPS 形式）を見るためには、Ghostscript 及び SumatraPDF をインストールする必要があります。Windows 用のフリーのテキストエディタは、

- TeraPad（日本語）(<http://www5f.biglobe.ne.jp/~t-susumu/>)
- Notepad++（英語）(<https://notepad-plus-plus.org/>)

などがあります。Ghostscript 及び SumatraPDF のインストールに関しては、下記のホームページをご参照ください。

- Ghostscript (<https://www.ghostscript.com/releases/gsdnld.html>)
- SumatraPDF (<https://www.sumatrapdfreader.org/free-pdf-reader>)

SumatraPDF は Ghostscript をインストールした後にインストールしてください。

2.2 Mac OS におけるインストール及び実行方法

2.2.1 インストール方法

- (1) PHITS パッケージに入っている“/mac/”フォルダ中の、“PHITS_Installer.command”をコントロールキーを押しながら右クリックして、ショートカットメニューの“開く”を選択してください。
- (2) インストールモードの選択において、**Automatic** を選択します（図 2 参照）。**Automatic** モードで上手くインストールできない場合は、後に述べる **Manual** モードによるインストールを試してください。（詳細は PHITS パッケージ中の“/mac/README-jpn.pdf”をご参照ください。）

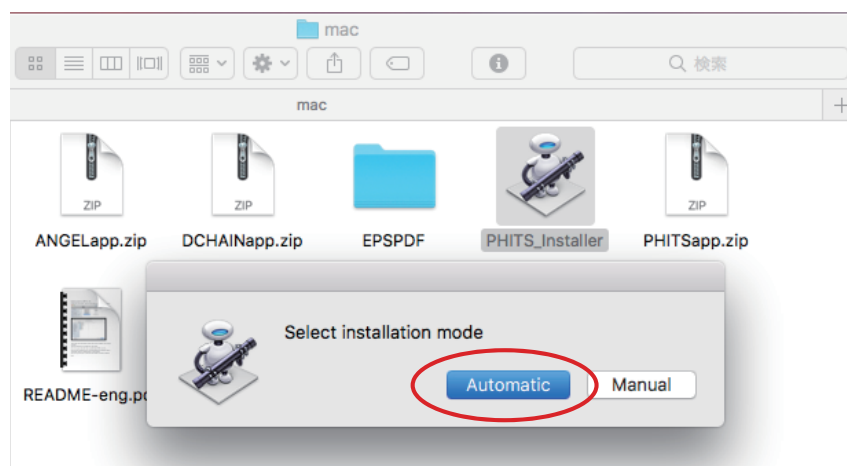


図 2: インストールモードの選択

- (3) インストール先のフォルダを指定します。通常、アカウント名（例：iwamoto）と同名のフォルダが選択されるので、“選択”を押します（図 3 参照）。インストール完了後、システムを再起動（もしくはログアウトして再ログイン）してください。

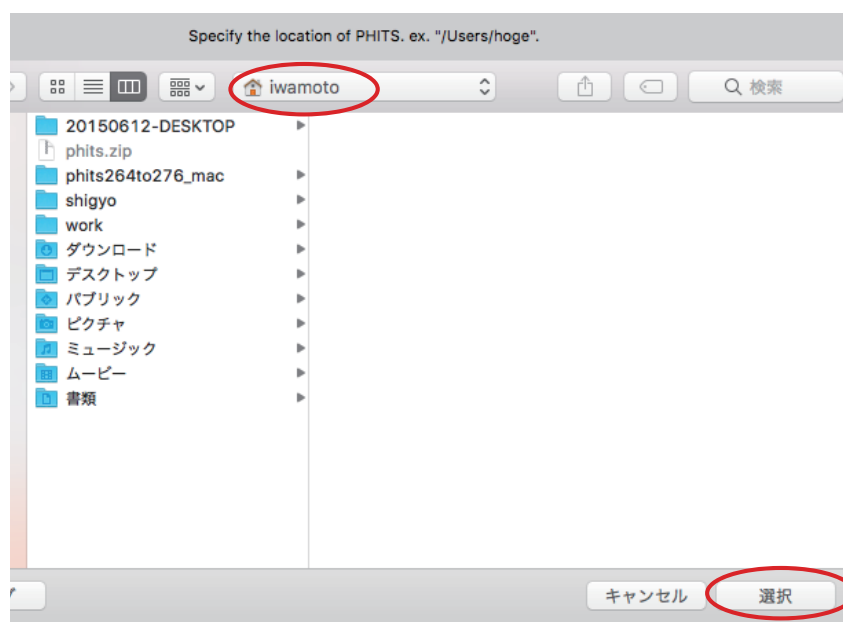


図 3: インストールフォルダの選択

(4) インストール先に“/phits/”という名前のフォルダが作られます。このフォルダの中には、PHITS 本体とソース、講習会の資料、例題などが入っています。

(注 1) インストール後に“/phits/”フォルダを別のフォルダへ移動させると PHITS は動作しなくなります。その場合はもう一度インストールし直してください。

(注 2) インストール先に“/phits/”という名前のフォルダが存在する場合は、古いフォルダは“/phits[今日の日付].[現在の時刻]/”に名称が変更されます。

(注 3) PHITS パッケージをコピーするフォルダやインストールフォルダの名称にスペースや漢字があるとエラーになる場合がありますので、このような文字が使われていないフォルダにインストールしてください。

2.2.2 実行方法

PHITS を実行する場合は、ドラッグ&ドロップによる方法とターミナルを用いる方法があります。

2.2.2.1 ドラッグ&ドロップによる実行方法

PHITS を実行する場合は、インプットファイルを Dock にある青い PHITS アイコンへドラッグ&ドロップします (図 4 参照)。実行のテストとして、Dock にある Finder アイコンをクリックし“phits/lecture/basic/lec01”フォルダを開いて、“lec01.inp”を PHITS アイコンへドラッグ&ドロップしてください。新たにターミナルウィンドウが立ち上がり、計算状況が出力されます。計算結果の出力ファイルは、インプットファイルがあるフォルダに作られます。また、再度同じ名前のインプットで計算を実行したい場合は、計算状況が出力されたターミナルで↑キーを押してからリターンキーを押せば実行できます。

また、ANGEL 及び DCHAIN-SP を動かす際は、PHITS のタリーで出力されたそれぞれのインプットファイルを Dock にある赤い ANGEL アイコンもしくは緑の DCHAIN アイコンにドラッグ&ドロップします。



図 4: Dock にある PHITS アイコンへのドラッグ&ドロップ

PHIG-3D を動かす際は、インプットファイルを Dock にあるロボット図柄の PHIG3D.launch アイコンにドラッグ&ドロップします。

PHITS-Pad を動かす際は、インプットファイルを Dock にある PHITSPAD.launch アイコンにドラッグ&ドロップします。

2.2.2.2 ターミナルからの実行方法

“PHITS_Installer”によりインストールが完了した後、ターミナルからコマンド入力により PHITS を実行できます。Dock にある Finder アイコンをクリックして“アプリケーション”→“ユーティリティ”→“ターミナル”を選択して、ターミナルを起動してください。

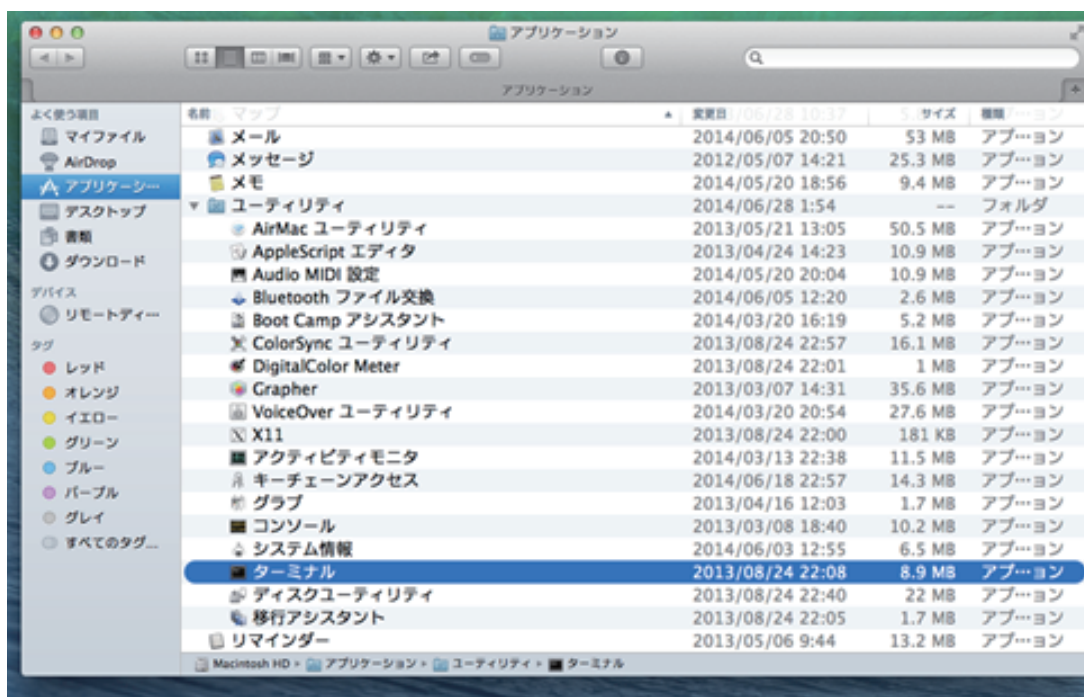


図 5: ターミナルを選択する画面

PHITS の実行方法は、“cd”コマンドを使ってインプットファイルのあるフォルダに移動した後、ターミナルで下記のように入力します。

```
phits.sh input.inp
```

ここで、“input.inp”は PHITS のインプットファイル名です（例：lec01.inp）。ターミナルで↑キーを押せば過去のコマンド履歴が出ますので、同じインプットファイルを何度も実行する場合に便利です。

PHITS と同様、ANGEL、DCHAIN-SP、PHIG-3D、PHITS-Pad もターミナルから実行できます。ANGEL の実行方法は、ターミナルで

```
angel.sh angel.out
```

と入力します。ここで“angel.out”は、ANGEL のインプットファイル名です（例：track.xz.out）。DCHAIN の実行方法は、ターミナルで

```
dchain.sh dchain.out
```

と入力します。ここで“dchain.out”は、DCHAIN の入力ファイル名（PHITS の [t-dchain] で指定したファイル名）です。

PHIG-3D の実行方法は、ターミナルで

```
phig3d.sh input.inp
```

と入力します。ここで、“input.inp”は PHITS のインプットファイル名です（例：lec01.inp）。

PHITS-Pad の実行方法は、ターミナルで

```
phitspad.sh input.inp
```

と入力します。ここで、“input.inp”は PHITS のインプットファイル名です（例：lec01.inp）。

2.2.3 “PHITS_Installer.command” の Manual モードによるインストール

Automatic モードで上手くインストールできない場合には、Manual モードをお試しください。

- (1) ホームディレクトリ (例: “/Users/iwamoto”) に “phits” フォルダを作成します。
- (2) 事務局よりダウンロードした zip ファイルを展開してできた “phitsXXXXA” フォルダ内の “phits.7z” をホームディレクトリ (例: “/Users/iwamoto”) へコピーします。
- (3) コピーした “phits.7z” を展開 (ダブルクリック) します。
- (4) “phitsXXXXA/mac” フォルダの中の “ANGEL.app.zip”、“DCHAIN.app.zip”、“EPSPDF.app.zip”、“PHIG3D_launch.app.zip”、“PHITS.app.zip”、“PHITSPAD.app.zip” を、“/phits/bin” フォルダへコピーして展開 (ダブルクリック) します。
- (5) “PHITSXXXXA/mac” フォルダの中の “PHITS_Installer.command” を右クリックしてショートカットメニューの “開く” を選択します。
- (6) インストールモードの選択において、Manual を選択します。
- (7) “/phits/bin” フォルダの中の “phits252_mac.exe” を選択し、インストールを開始します。
- (8) “/phits/lecture/basic/lec01” フォルダにある “lec01.inp” を Dock にある青い PHITS アイコンへドラッグ & ドロップして PHITS を実行して下さい。

2.2.4 “PHITS_Installer”の Automatic と Manual が共に動作しないときの対応

ターミナルから PHITS を実行できるようにします。ターミナルを使って PHITS を初めて実行する場合は、PHITS の実行ファイルがあるフォルダに PATH を通す必要があります。PATH を通すためには、ターミナルで下記のコマンドを入力する必要があります。

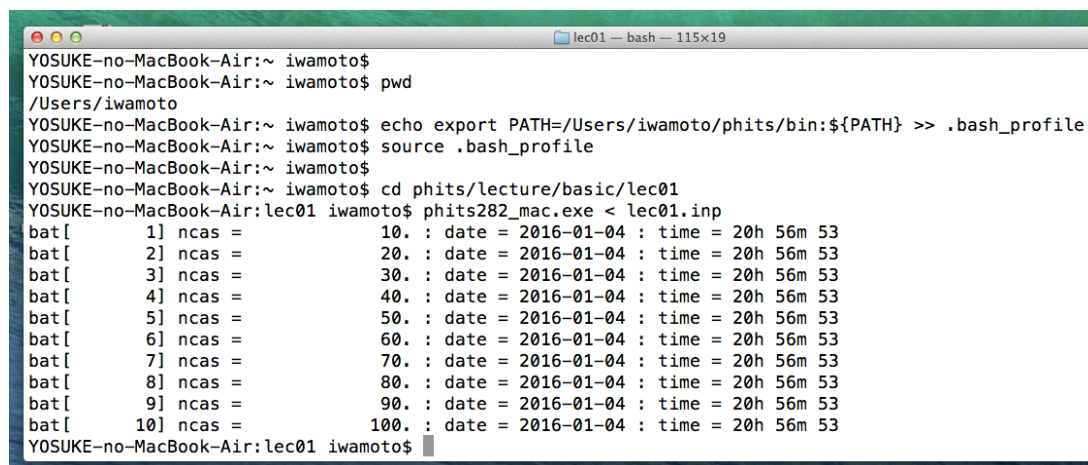
```
echo 'export PHITSPATH=/PATH-TO-PHITS/phits/bin' >> .zshenv
echo 'export PATH=$PHITSPATH/bin:$PHITSPATH/dchain-sp/bin:$PATH' >> .zshenv
source .zshenv
```

ここで、“PATH-TO-PHITS”は各自のインストール先のフォルダ名に変更してください(例:/Users/iwamoto)。フォルダ名が分からない場合は、ターミナルを立ち上げた時点で、

```
find $HOME -name phitsXXX_mac.exe
```

を入力してください。ここで、“XXX”は PHITS のバージョンを表します。(例: 334. 事務局よりダウンロードした zip ファイルを展開してできた“PHITSXXXA”フォルダの XXX が PHITS のバージョンです。) 表示される結果から“/phits/bin/”を削除したものが“PATH-TO-PHITS”に対応します。なお、この PATH の設定は、初めて PHITS を実行する時のみ必要となり、それ以降は不要です。

次に、“/phits/bin/phits.sh”の11行目の“phitsYYY_mac.exe”、更に14行目の“phitsYYY_mac_openmp.exe”の YYY をインストールしようとしているバージョンに合わせます。実行方法については、前節をご覧ください。実行までの流れを図6に示します。



```
YOSUKE-no-MacBook-Air:~ iwamoto$
YOSUKE-no-MacBook-Air:~ iwamoto$ pwd
/Users/iwamoto
YOSUKE-no-MacBook-Air:~ iwamoto$ echo export PATH=/Users/iwamoto/phits/bin:${PATH} >> .bash_profile
YOSUKE-no-MacBook-Air:~ iwamoto$ source .bash_profile
YOSUKE-no-MacBook-Air:~ iwamoto$
YOSUKE-no-MacBook-Air:~ iwamoto$ cd phits/lecture/basic/lec01
YOSUKE-no-MacBook-Air:lec01 iwamoto$ phits282_mac.exe < lec01.inp
bat[ 1] ncas = 10. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 2] ncas = 20. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 3] ncas = 30. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 4] ncas = 40. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 5] ncas = 50. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 6] ncas = 60. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 7] ncas = 70. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 8] ncas = 80. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[ 9] ncas = 90. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
bat[10] ncas = 100. : date = 2016-01-04 : time = 20h 56m 53
YOSUKE-no-MacBook-Air:lec01 iwamoto$
```

図 6: ターミナルを使った PHITS 実行の流れ

2.3 Linux OS におけるインストール及び実行方法

2.3.1 インストール方法

まず、PHITS パッケージから“phits.zip”をインストールしたいフォルダにコピーします。また、PHITS パッケージの linux フォルダから Linux 用のインストーラ“PHITS-Installer_lin.sh”を同じフォルダにコピーしてください。インストーラに実行権限を付加するため、ターミナルで、このフォルダに移動して以下のコマンドを実行してください。

```
chmod +x PHITS-Installer_lin.sh
```

次にインストーラーを実行します。以下の様に実行してください。

```
./PHITS-Installer_lin.sh
```

ZIP ファイルの解凍、各ファイルに書かれた PATH の修正、実行ファイル PATH の設定の順でインストール作業が行われます。ZIP ファイルの解凍の際にパスワードの入力が求められますので、インストール用のパスワードを入力してください。Bash の使用を想定して PATH の設定を “.profile” に追加しているので、他のシェルを使用している方は適宜変更してください。インストールの途中でエラーが表示されないようであれば、無事インストールは完了です。

PATH の設定を有効にするために、以下のコマンドを実行してください。

```
source ~/.profile
```

次回ログイン以降は、ログイン時に自動的に “.profile” が読み込まれるはずですので、上のコマンドをログイン毎に行う必要はありません。

2.3.2 実行方法

Linux 環境ではターミナルで PHITS を実行します。ターミナルを起動し、“cd” コマンドを使ってインプットファイルのあるフォルダに移動した後、ターミナルで下記のように入力します。

```
phits.sh phits.inp
```

ここで、“phits.inp”は PHITS のインプットファイル名です（例：lec01.inp）。ターミナルで↑キーを押せば過去のコマンド履歴が出ますので、同じインプットファイルを何度も実行する場合に便利です。

PHITS と同様、ANGEL や DCHAIN もターミナルから実行できます。ANGEL の実行方法は、ターミナルで

```
angel.sh angel.inp
```

と入力します。ここで“angel.inp”は、ANGEL のインプットファイル名です（例：track.xz.out）。DCHAIN の実行方法は、ターミナルで

```
dchain.sh dchain.out
```

と入力します。ここで“dchain.out”は、DCHAIN の入力ファイル名（PHITS の [t-dchain] で指定したファイル名）です。

(注) 実行時に許可がありません等のエラーがでる場合は、実行ファイルに実行権限が付加されていないことが原因と思われるので、実行ファイルが格納されているフォルダ “phits/bin/” 等に移動し、以下のコマンドにより実行権限の付加を行ってください。

```
chmod +x XXX
```

ここで、“XXX”は実行ファイル名です。

2.3.2.1 シェルを使用せず直接実行ファイルを指定して実行する方法

インプットファイルのあるフォルダに移動した後、以下の様にコマンドを入力することで、シェルファイル “phits.sh” を利用せずに直接実行ファイルを指定して実行することができます。

```
phitsXXX.exe < input.inp
```

ここで、“phitsXXX.exe”は PHITS 実行ファイル、“input.inp”はインプットファイルを表します。ただ、この実行方法で `infl` を用いる場合には注意が必要で、“input.inp”の 1 行目を

```
file = input.inp
```

として自身のファイル名を記述してください。`infl` の使い方については、4.3 節をご覧ください。

2.4 実行ファイルの変更方法

PHITS の実行ファイルは、Windows、Mac、Linux 用全て“phits/bin”フォルダに格納されており、1 つの CPU を使うシングル版のみならず並列計算用やデバッグ用のものが含まれています。これらの実行ファイルは、インプットファイルの最初のセクションの前にコマンドを入れることにより、使い分けることが可能です。

並列計算にはメモリ共有型並列とメモリ分散型並列があります。メモリ共有型並列で実行する場合は、PHITS のインプットファイルにおいて、最初のセクションの前に `$OMP=N` (N は使用する CPU コア数) を加えてください。その際、 $N = 1$ の場合は並列計算を使用しません。また、 $N = 0$ の場合は計算機が持つ全てのコアを使用します。なお、バージョン 2.73 より、メモリ共有型並列計算は 64bit 版 Windows のみで動作するようにしていますのでご注意ください。また、`$MPI=M` と指定すれば並列数 M のメモリ分散型並列で実行可能ですが、そのためには、事前に MPICH2 (Windows の場合) や OpenMPI (Linux の場合) のインストールが必要になります。詳しくは 11.1.1 節をご参照下さい。

また、最初のセクションの前に `$DBG=1` と書くことにより、メモリ違反や未初期化変数のチェックを行うデバッグモードでの計算が可能となります。PHITS の実行中に Access violation もしくは Segmentation fault というエラーが起きたり、無限ループや計算の異常終了などが発生したら、デバッグモードで実行してください。何かエラーメッセージが出たら、そのメッセージを実行した PC 環境の情報とともに PHITS 事務局までご連絡ください。

3 再開始計算と中断方法

3.1 再開始計算

PHITS を実行して得られたタリー結果の統計量が足りない場合に、その結果を読み込んで、続き計算（再開始計算）を行うことが可能です。**[parameters]** セクションにおいて、**istdev < 0** とすることで、再開始計算を実行できます。その際の統計誤差計算モードは、過去のタリー結果を踏襲します。再開始計算は、各タリー別に行いますので、過去のインプットファイルに新たにタリーを加えた再開始計算も可能です。再開始計算の流れは、以下のようになります。

- (1) 各タリーの **resfile** (デフォルトは **file** で指定した出力ファイル名と同じ) で指定したファイルの有無をチェックする。
- (2) ファイルが存在しない場合は、そのタリーは新規タリーとして扱う。全てのファイルが存在しない場合は、**istdev = -2** の場合はヒストリー分散、**istdev = -1** の場合はバッチ分散モードとして新規計算を開始する。
- (3) ファイルが存在する場合は、そのファイルから統計誤差計算モード (**istdev**)、これまでの全ウェイト数 (**resc2**) や全ヒストリー数 (**resc3**)、バッチ当たりのヒストリー数 (**maxcas**、バッチ分散モードのみ必要)、次の初期乱数シード (**rijklst**)、タリーパラメータ、結果及び相対誤差などを読み込む。
- (4) 過去のタリーと入力ファイルで指定したタリーの一致性を確認する (一致しない場合はエラーメッセージを出力して実行停止。ただし、全てのパラメータをチェックするわけではないので注意)。
- (5) 過去のタリーが複数ある場合、それらの間での統計誤差モードや **maxcas** (バッチ分散モードのみ) の一致性を確認する。一致した場合は、その値を再開始計算で利用する。一致しない場合は、エラーメッセージを出力して実行停止する。
- (6) 初期乱数シードを一番目に読み込んだ過去タリーの **rijklst** に変更。(**rijklst** が過去タリー間で異なる場合は、警告を出力するが計算は可能)
- (7) 再開始計算を実行し、その結果を過去のタリー結果に加えて **file** で指定したファイルに出力する。**resfile** を指定しない場合、出力ファイル (**file**) と過去タリーファイル (**resfile**) が同じであるため、過去の結果に新しい結果を上書きして出力する。

再開始計算を行う際の注意点としては、[1] 統計誤差計算モードの違うタリー同士で再開始計算をしないこと、[2] バッチ分散の場合は必ず **maxcas** を統一すること、[3] ジオメトリや入射粒子に関しては新旧ファイルの一致性を確認しないので、ユーザーの責任で必ず一致させること、などがあります。

3.2 計算の中断

プログラムを実行すると、カレントディレクトリに “**batch.out**”³⁰ というファイルが作られます。そのファイルにはひとつのバッチが終了する毎に、(メモリ分散型並列の場合にはバッチ数 × (PE - 1) 毎に、) そのバッチの計算時間など、簡単な情報が出力されます。メモリ分散型並列の場合には、各 PE の状態が含まれます。異常終了が起こった PE はこれでチェックできます。

“**batch.out**” の 1 行目は、

```
10 <--- number of remaining batches
```

³⁰ Version 2.85 以前は **batch.now** というファイル名でした。

となっています。この最初の数字はその時点での残りバッチ数です。この数字を減らして **batch.out** を保存することにより、任意のバッチで計算を終了させることができます。例えば、“3”にするとその時点から3バッチ分計算を実行した後で終了しますし、“0”にするとその時のバッチで計算が終了します。この機能により、途中経過を見ながら計算を中断することができます。

ただし、デフォルト設定では、計算途中のタリー結果の画像ファイル (**eps** 形式) は出力されません。各タリーにおいて **epsout** を設定し (6.7.17 節を参照)、**[parameters]** セクションにおいて **itall=1** とすることで、途中結果を画像ファイルで確認することができます。

バージョン 2.86 以降、**[parameters]** セクションにおいて **file(22)** を指定することにより、“**batch.out**” のファイル名を変更できるようになりました。これにより、同一ディレクトリにおいて複数のインプットファイルに対して **PHITS** を実行することが可能となりました。

“**batch.out**” に出力される **rijk** は、各バッチ毎 (各 **IP number** 毎) に与えられた初期乱数の値です。特定のバッチで異常終了が起こった時など、任意のバッチの計算を再現したい場合にこの値を利用できます。

4 入出力ファイルの共通書式

PHITS の入力ファイルは、テキストエディタで編集できるテキスト形式で作成します。入力ファイルは [*****] で始まる複数のセクションで構成されており、目的や機能に応じてセクション単位で情報を読み込みます。セクションの順番は自由です。[*****] の先頭の空白は 4 個まで無視しますが、それ以上はセクションの始まりとは認識しませんので注意して下さい。セクション毎に入力形式が変わりますが、基本的には以下に示す 2 つの書式を取ります。一つは、各セクションに固有のキーワード（パラメータ）に数値や文字列で設定する方式であり、

キーワード（パラメータ） = 数値 または 文字列

と書きます。この際、半角の空白（スペース）は無視されます。もう一つは、複数の数値を設定する場合であり、半角の空白を区切り文字として、次のような形式となります。

数値（文字列） 1 数値（文字列） 2 数値（文字列） 3 ...

出力ファイルは、基本的にテキスト形式（“.out”）のものが出力されますが、オプションを設定することにより、計算結果を画像表示した eps 形式（“.eps”）のファイルも出力されます。

PHITS における各物理量の単位は、基本的に、長さは cm、時間は ns、エネルギーは MeV（もしくは核子あたりの量を表す MeV/n）です。また、座標系は右手系をとっています。

4.1 セクションの種類

セクションには、次の様なものがあります。

表 1: セクションの種類 (1)

name	説明
[title]	計算のタイトルを定義します。
[parameters]	ヒストリー数など、計算の動作を決めるパラメータを定義します。
[source]	入力ソース粒子の情報を定義します。
[material]	体系を構成する物質を定義します。
[surface]	体系を構成する面を定義します。
[cell]	体系を構成する cell を定義します。
[transform]	体系を構成する面などの座標変換を定義します。
[temperature]	cell の温度を定義します。
[mat time change]	物質の時間変化を定義します。
[magnetic field]	体系を構成する領域の磁場を定義します。
[electro magnetic field]	体系を構成する領域の電磁混合場を定義します。
[delta ray]	δ 線を発生させます。
[track structure]	飛跡構造解析モードを使用するための設定を定義します。
[super mirror]	低エネルギー中性子のスーパーミラーを定義します。
[elastic option]	低エネルギー中性子の弾性衝突のオプションを定義します。
[data max]	核種毎に核データライブラリを利用する上限エネルギーを定義します。
[frag data]	ユーザー指定断面積読み込み機能について定義します。
[importance]	領域の importance を定義します。
[weight window]	領域の weight window を定義します。
[ww bias]	[weight window] のパラメータにかけるバイアスを定義します。
[forced collisions]	強制衝突の領域とファクターを定義します。
[Repeated collisions]	核反応の繰返し衝突の領域とファクターを定義します。
[volume]	体系を構成する領域の体積を定義します。
[multiplier]	multiplier を定義します。
[mat name color]	物質表示の名前、色、大きさを指定します。
[reg name]	領域表示の名前、大きさを指定します。
[counter]	counter を定義します。
[timer]	粒子の固有時間をリセット、ストップを定義します。
[user defined interaction]	ユーザーが定義した相互作用を制御します。
[user defined particle]	ユーザーが定義した粒子を制御します。

表 2: セクションの種類 (2)

name	説明
[t-track]	粒子の飛跡長 (track length) やフルエンスを導出するタリー。
[t-cross]	粒子の面横断回数やフルエンスを導出するタリー。
[t-point]	ある点や線上のフルエンスを導出するタリー。
[t-deposit]	物質におけるエネルギー付与を導出するタリー。
[t-deposit2]	2つの領域でのエネルギー付与の相関を出力するタリー。
[t-heat]	物質におけるエネルギー付与を導出するタリー。(非推奨 ³¹)
[t-yield]	残留核の生成量を導出するタリー。
[t-product]	線源や核反応による生成粒子を導出するタリー。
[t-dpa]	原子あたりのはじき出し数 (DPA) を導出するタリー。
[t-let]	LET の関数として飛跡長や線量を導出するタリー。
[t-sed]	微小領域におけるエネルギー付与分布を導出するタリー。
[t-time]	Energy cut off と escape 粒子の個数を導出するタリー。
[t-interact] (従来の [t-star])	反応数を導出するタリー。
[t-dchain]	DCHAIN 用入力ファイルを作成するタリー。
[t-wwg]	[weight window] のパラメータを出力するタリー。
[t-wwbg]	[ww bias] のパラメータを出力するタリー。
[t-volume]	体積自動計算機能のためのタリー。
[t-userdefined]	ユーザー定義による任意の物理量を導出するタリー。
[t-gshow]	ジオメトリ (仮想空間) を 2 次元で表示するタリー。
[t-rshow]	ジオメトリを 2 次元で物理量による色分けをして表示するタリー。
[t-3dshow]	ジオメトリを 3 次元で表示するタリー。
[T-4Dtrack]	PHIG-3D で粒子の飛跡を表示するためのタリー。
[end]	入力ファイルの終了を示します。

これらのセクション単位でデータを読み込みます。従って、入力ファイルの先頭から最初のセクションまで、また [end] 以下の部分は読み飛ばします。

4.2 読み込みコントロール

大文字、小文字、空白文字 (L)

ファイル名を除いて、大文字小文字は区別しません。行頭、行末の空白文字は無視します。セクション名は間に空白文字を入れてもかまいません。ただし、[*****] の先頭の空白文字は 4 個まで無視しますが、それ以上はセクションの始まりとは認識しませんので注意して下さい。

タブ

タブは、8 個のブランクに置き換えます。

継続行

一行に書くことができる文字数は半角文字で 200 字までです。それ以降の文字は読み込まれません。

³¹ バージョン 3.04 までは [t-deposit] によるカーマ近似計算ができなかったため、この計算が可能な [t-heat] との使い分けを行っていました。

一行に収まらないデータは、行末に“¥”をつけると次行を含めて一行と扱います。複数行が使用できます。ただし、[cell]と[surface]の継続行は“¥”を使用せず、先頭に5個以上の空白文字を入れてください。

行連結

短いパラメータ文が続くとき、複数行を“;”でつなぐことにより一行に表示することができます。例えば、

```
idbg = 0 ; ibod = 1 ; naz = 0
```

のように書くことができます。ただし、メッシュの記述のようにサブセクションの書式が決まっている場合は使用できません。

コメント文字

PHITS では、以下の文字がコメント文字として使用でき、それ以降に書かれた文字列は無視されます。

- \$: 全ての場所でコメント文字として扱われます。
- #及び!: [surface], [cell] セクションを除いてコメント文字として扱われます。
- c␣ (␣は空白文字): 行頭5カラム目以内にある場合にコメント文字として扱われます。ただし、[material] セクションでは炭素元素として認識されるため、この機能は無効になります。[material] セクションでも“c␣”をコメント文字として扱うためには、[parameters] セクションで `icommat=1` と定義してください。

なお、%は version 3.30 以前はコメント文字として使えましたが、文字列変数の定義に%を使うようにしたため 3.31 以降はコメント文字として使えません。もし、%をコメント文字として使用する必要がある場合は、`$RWT=0` を最初のセクションが始まる前に追加してください。

空白行

空白行は、読み飛ばします。コメント文字で始まる行も読み飛ばします。

セクションの読み飛ばし

ひとつのセクションを読み飛ばしたいとき、[*****] off のようにセクション名の後に“off”をつけると、次のセクションまでを読み飛ばします。直後に書かれた `infl:` や `set:` が意図せず読み飛ばされる場合がありますのでご注意ください。

セクション途中からの読み飛ばし

セクションの途中で、行頭に `qp:` を挿入すると、この行以降次のセクションまでを読み飛ばします。

全ての読み飛ばし

入力ファイルのどこでも、`q:` を行頭に入れると、それ以降全てを読み飛ばします。これは、[end] と同じです。

4.3 ファイルの挿入

入力ファイルのどの場所でも他のファイルを取り込みます。インクルードファイルの書式は、

```
infl: { file.name } [ n1 - n2 ]
```

です。{ } 内がファイル名、[] 内が行数指定です。 n_1 行から n_2 行をインクルードします。行数指定は省略できます。省略した場合は、そのファイル全てをインクルードします。また、

```
[ n1 - ]
[ -n2 ]
```

という表現も可能です。上が n_1 行から最後まで、下が先頭から n_2 行までをインクルードします。インクルードは、8 回までネストできます。インクルードファイルを読み終えると、一層上のファイルに戻ります。

WINDOWS 系の環境でコマンドラインインタプリタ (コマンドプロンプト) により PHITS を実行している場合に、**infl** を使用する際は注意が必要です。このときは、インプットファイルの 1 行目を

```
file = input.dat
```

としてください。ここで、**input.dat** はインプットファイルです。コマンドラインインタプリタを用いた実行方法については、2.1.2.2 節をご参照ください。

4.4 ユーザー定義定数

入力ファイル中の、数字を入力すべき箇所、数値の代わりに、**c1** から **c999** の、ユーザーが定義した定数を書いておくことが出来ます。定数のセットの書式は以下の通りです。

```
set:  c1[ 52.3 ] c2[ 2 * pi ] c3[ c1 * 1.e-8 ]
```

ただし、**ci**[] において、*i* と [] の間に空白文字を入れることができないのでご注意ください。この定数セットは、どの場所でも可能です。定数名は、**c1** から **c999** まで、何度でもセットし直せます。セットした以降、次にセットされるまで、その数値を保持します。定義の中で他の定数を用いる場合 (上の 3 番目の例)、その時点での値が参照され、それ以降、定義の中で用いられている定数 (上の 3 番目の例では **c1**) をリセットしても定数の値は変化しません。**pi** は、デフォルトで定義されている定数です。

[**paraemters**] セクションにおいて **ncvalout** を指定することにより、この回数だけ **ci** として定義した数値が **file(6) (D=phits.out)** に出力されます。ユーザー定義定数として使用されている数値を確認したい場合に設定してください。

Sumtally サブセクション内で定義した定数は無視されるのでご注意ください。

ユーザー定義プログラム (“**usrsors.f**”, “**usrtally.f**”, “**usrdfn1.f**” など) の中でこれらの変数を使いたい場合は、

```
parameter ( mfc = 100 )
common /rval1/ cval(mfc), aval(mfc)
```

と宣言した上で、**cval** として利用できます。例えば、**c1** パラメータは **cval(1)** に相当します。なお、複数回同じパラメータを定義した場合、インプットファイルの最後に定義した値がユーザー定義プログラム内で有効となります。

4.5 ユーザー定義文字列

Version 3.31 以降、任意の文字列を変数化して利用できるようになりました。その定義の書式は以下の通りです。

```
set: %part_name%[neutron proton alpha]
```

変数名は%で挟んで定義してください。**PHITS** の他の入力箇所と違い、文字列変数名のみ大文字と小文字が区別されますのでご注意ください。ユーザー定義変数と同じく、定義された次の行から有効となり、同じ文字列変数を何度でもセットし直せます。ただし、変数の場合とは異なり、ユーザー定義文字列は1行で1つの文字列のみ定義可能です。また、定義できる変数名とその値（文字列）は100文字までです。上記例の場合、例えば複数のタリーで

```
part = %part_name%
```

と定義すれば、各タリーでスコアする粒子を一括して変更することができます。

この機能を利用するため、**version 3.31** 以降の **PHITS** は、文字列変数を置換した後の入力情報を別ファイル（以下、リライトファイル）に一旦出力した後、そのファイルを読み込む形で実行されます。リライトファイル名は、元入力ファイル名の拡張子の前に“**_rwt**”を追加した名前となります。例えば、元の入力ファイル名が“**phits.inp**”の場合、“**phits_rwt.inp**”となります³²。リライトファイルには、**infl** コマンドで読み込んだ入力情報も含まれます。

リライトファイルの出力及び削除の有無は、特殊パラメータ **\$RWT** により変更可能です。**\$RWT** は最初のセクションが始まる前に定義する必要があり、その値の意味は以下の通りです。

- **\$RWT=0** : リライトファイルを出力しない。この場合は、文字列変数が利用できませんが、入力ファイルが巨大な場合、その読み込み時間を短縮することができます。
- **\$RWT=1** (デフォルト) : リライトファイルを出力し、計算終了時に削除する。
- **\$RWT=2** : リライトファイルを出力し、計算終了時に削除しない。
- **\$RWT=3** : リライトファイルを出力し、その直後に **PHITS** の実行を停止する。このオプションは、**icntl=0** の場合のみ有効となり、複数の **infl** コマンドを使った入力ファイルを他者と共用する際などに便利となります。

4.6 数式の利用

入力ファイルで数字の入力箇所、数式の利用が可能です。数式の書式は、**Fortran** 形式です。利用できる内部関数は、

表 3: 内部関数

Intrinsic				Function			
FLOAT	INT	ABS	EXP	LOG	LOG10	MAX	MIN
MOD	NINT	SIGN	SQRT	ACOS	ASIN	ATAN	ATAN2
COS	COSH	SIN	SINH	TAN	TANH		

³² ターミナル等で、**phitsXXX_win.exe < temp.inp** のように（**XXX** はバージョン番号、**temp.inp** は入力ファイル）、バッチファイルやスクリプトファイルを使用せずに、直接 **PHITS** の実行ファイルを使用した場合は、リライトファイルの名前が入力ファイルのそれを参照せずに“**phits_rwt.inp**”となります。

例として、

```
param = c1 * 3.5 * sin( 55 * pi / 180 )
```

この例のように、**param** = の後に 1 個の数字が期待される場合は、数式の途中で空白が許されますが、幾つかの数字の並びが期待される場合は、空白が数字の区切りを示しますので空白は使えません。このときは、空白を省いて記述するか、{ **c1** * 2 / **pi** } のように { } で括ってください。

4.7 粒子の表式

[source] セクションや、タリーセクションで用いる粒子の表式を下の表にまとめます。粒子を定義するときは、**symbol** か **kf-code** を用います。**symbol** のないものは、**kf-code** だけ利用可能です。

粒子タイプ 11 の **other particles** は、表 4 にあるように **kf** コードで指定します。また、これらの粒子の崩壊チャンネルは表 5 にあるものが含まれています。

JQMD コードの導入に伴い、原子核の入射、輸送が可能となりました。原子核種の指定の仕方は、**208Pb**, **56Fe** の形式です。**Pb**, **Fe** と指定すれば、同位体全てを意味します。もちろん入射粒子の指定には使えません。**ityp=19** の **nucleus** は、全ての原子核から **ityp=1,15,16,17,18**、すなわち **proton**, **deuteron**, **triton**, **3He**, **alpha** を除いた全てを意味します。**kf** コードで原子核を指定するには、**kf** = **Z** * 1000000 + **A** とします。

以前は、光子の名前を “gamma” としてきましたが、“photon” と変更しましたので注意して下さい。

表 4: List of the transport particles.

ityp	symbol	kf-code	particle name	ityp	symbol	kf-code	particle name
1	proton	2212	proton	11	–	+ – 12	$\nu_e \bar{\nu}_e$
2	neutron	2112	neutron	11	–	+ – 14	$\nu_\mu \bar{\nu}_\mu$
3	pion+	211	π^+	11	–	–2212	\bar{p}
4	pion0	111	π^0	11	–	–2112	\bar{n}
5	pion–	–211	π^-	11	–	–311	\bar{K}^0
6	muon+	–13	μ^+	11	–	130	K_L^0
7	muon–	13	μ^-	11	–	310	K_S^0
8	kaon+	321	K^+	11	–	+ 221	η
9	kaon0	311	K^0	11	–	331	η'
10	kaon–	–321	K^-	11	–	+ – 3122	$\Lambda^0 \bar{\Lambda}^0$
11	other	below	other particle	11	–	+ – 3222	$\Sigma^+ \bar{\Sigma}^+$
12	electron	11	e^-	11	–	+ – 3212	$\Sigma^0 \bar{\Sigma}^0$
13	positron	–11	e^+	11	–	+ – 3112	$\Sigma^- \bar{\Sigma}^-$
14	photon	22	γ	11	–	+ – 3322	$\Xi^0 \bar{\Xi}^0$
15	deuteron	1000002	deuteron	11	–	+ – 3312	$\Xi^- \bar{\Xi}^-$
16	triton	1000003	triton	11	–	+ – 3334	$\Omega^- \bar{\Omega}^-$
17	3he	2000003	^3He	11	–	+ - 16	$\nu_\tau \bar{\nu}_\tau$
18	alpha	2000004	α	11	–	+ - 15	$\tau^- \tau^+$
19	nucleus	Z*1000000+A	nucleus	11	–	113	ρ^0
				11	–	+ - 213	$\rho^+ \rho^-$
				11	–	223	ω
				11	–	+ - 20213	$a_1^+ a_1^-$
				11	–	+ - 313	$K^{*0} \bar{K}^{*0}$
				11	–	+ - 323	$K^{*+} \bar{K}^{*-}$
				11	–	333	ϕ
				11	–	+ - 411	$D^+ D^-$
				11	–	+ - 421	$D^0 \bar{D}^0$
				11	–	+ - 431	$D_s^+ D_s^-$
				11	–	+ - 511	$B^0 \bar{B}^0$
				11	–	+ - 521	$B^+ B^-$
				11	–	+ - 531	$B_s^0 \bar{B}_s^0$
				11	–	+ - 541	$B_c^+ B_c^-$

表 5: 崩壊チャンネルと寿命（分岐比や崩壊モードの変更はソースコード“src/dklos.f”を変更し再コンパイルすることで可能です。その他の粒子に関しては、“data/decay/decay_data_1.dat”を参照してください。）

	分岐率	寿命 (sec)		分岐率	寿命 (sec)
$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	100%	8.867×10^2	$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$	64.1%	2.631×10^{-10}
$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	100%	0	$\rightarrow n + \pi^0$	other	
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	100%	2.6029×10^{-8}	$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$	51.57%	7.99×10^{-11}
$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	100%	2.6029×10^{-8}	$\rightarrow n + \pi^+$	other	
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	100%	2.19703×10^{-6}	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$	100%	0
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$	100%	2.19703×10^{-6}	$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$	100%	1.479×10^{-10}
$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$	20.34%	5.116×10^{-8}	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$	100%	2.90×10^{-10}
$\rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$	20.34%		$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$	100%	1.639×10^{-10}
$\rightarrow \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	13.57%		$\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$	67.8%	8.22×10^{-11}
$\rightarrow \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu$	13.57%		$\rightarrow \Xi^0 + \pi^-$	23.6%	
$\rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$	19.59%		$\rightarrow \Xi^- + \pi^0$	other	
$\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	12.59%				
$K_S^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$	30.72%	8.954×10^{-11}			
$\rightarrow \pi^+ + \pi^-$	69.28%				
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	63.56%	1.2371×10^{-8}			
$\rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$	5.07%				
$\rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu_\mu$	3.352%				
$\rightarrow \pi^+ + \pi^0$	20.67%				
$\rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$	1.760%				
$\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$	5.583%				
$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	63.56%	1.2371×10^{-8}			
$\rightarrow \pi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$	5.07%				
$\rightarrow \pi^0 + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	3.352%				
$\rightarrow \pi^- + \pi^0$	20.67%				
$\rightarrow \pi^- + \pi^0 + \pi^0$	1.760%				
$\rightarrow \pi^- + \pi^- + \pi^+$	5.583%				
$\eta \rightarrow \gamma + \gamma$	38.9%	0			
$\rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$	31.9%				
$\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	23.7%				
$\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \gamma$	other				
$\eta' \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \eta$	44.1%	0			
$\rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \eta$	20.5%				
$\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \gamma$	30.1%				
$\rightarrow \gamma + \gamma$	other				

4.8 標準出力 (phits.out) の書式

計算時間や発生した粒子数など、PHITS 計算に関わる基本的な情報は、**file(6)** パラメータで指定する標準出力ファイル（通常、“phits.out”を奨励）に書き出されます。書き出される情報は、以下に示す 6 つのカテゴリに分類されており、**[parameters]** セクションで定義する **infout** パラメータによって出力させるカテゴリを指定できます。

出力情報カテゴリ

I 基本情報

下記を除く全ての情報

II インプットエコー（入力ファイルの再出力）

III メモリ情報、バッチ情報

IV 粒子情報

V 詳細情報（分散低減情報、領域別散乱情報、物質別散乱情報）

VI 開発者情報

これらの情報は、下記の順番で書き出されます。

PHITS ロゴ、バージョン、開発者、計算タイトル、計算開始時刻（カテゴリ I、ただし開発者情報はカテゴリ VI）

13 行目に使用した **PHITS** のバージョンが出力されます。掲示板や **PHITS** 事務局等に質問を送る際は、バージョン情報を併せてお送りください。入力ファイルで **[title]** セクションが定義されている場合は、**[Job Title]** 欄にその文字列がそのまま出力されます。

インプットエコー（入力ファイルの再出力、カテゴリ II）

>>> **Input Echo** >>> と書かれた行から **[END] of Input Echo** <<< と書かれた行の間に、入力ファイルで指定したパラメータが整理した形で書き出されます。その際、#以降にコメントとしてパラメータの意味が出力されますので、パラメータの意味が分からなくなったときなどに参考にしてください。また **ci** や計算式を使って定義したパラメータは、計算した数値が直接書き出されます。さらに、**RI** 線源機能や宇宙線線源機能などを使って線源を定義した場合は、粒子のエネルギースペクトルがコメント文形式で出力されますので、実際に生成される粒子のエネルギースペクトルを確認することが可能です。

メモリ情報（カテゴリ III）

幾何学形状用メモリ (**GG/CC memory**)、断面積ライブラリ用メモリ (**high energy material / low energy material**)、タリー用メモリ (**real tally memory**)、粒子情報保存用メモリ (**bank memory**)、その他のメモリ (**other memory**)、合計メモリ (**used total memory**) 毎に、その使用量が書き出されます。ただし、これらのメモリ使用量は静的に確保した領域の大きさを表しており、動的に確保される断面積ライブラリ用メモリやタリー用メモリの値は常に小さくなることにご注意ください。

各線源詳細情報（**nwsors** を指定した場合のみ）

[parameters] セクションで **nwsors** を指定した場合、最初に発生した **nwsors** 個の線源の種類 (**ityp**)、領域番号 (**reg**)、物質番号 (**mat**)、エネルギー (**energy**)、位置 (**x, y, z**)、方向ベクトル (**u, v, w**)、及びウェイト (**wt**) が書き出されます。

バッチ情報（カテゴリ III）

各バッチの終了時の全ヒストリー数 (ncas)、そのバッチが開始されたときの初期乱数 (bitseed)、及びそのバッチの計算に掛かった CPU 時間が書き出されます。ここに書かれている bitseed を [parameters] セクションで定義することにより、そのバッチからの計算を再現することができます。

計算プロセス情報（number of analyz call vs ncol、カテゴリ I）

PHITS には、核反応、領域横断、線源発生、バッチ終了時など全ての計算過程（プロセス）で呼ばれる共通サブルーチン analyz があり、どのプロセスが発生したかを識別するパラメータ ncol 毎の呼び出し回数が書き出されます。ncol の詳細は 5.2.26 節「Dumpall オプション」を参照してください。

分散低減情報（カテゴリ V）

[importance], [weight window], [forced collisions] などウェイトをコントロールするセクションを使った場合に、領域毎の粒子分割 (splitting) や粒子選別 (Russian Roulette) に関する詳細な情報が書き出されます。

領域別散乱情報（カテゴリ V）

発生した高エネルギー核反応数、データライブラリ利用回数、チャンネル別中性子・光子データライブラリ利用回数、フラックスやエネルギーの増減などの詳細な情報が領域別 (Region-wise) に書き出されます。

物質別散乱情報（カテゴリ V）

上記情報が物質別 (Medium-wise) に書き出されます。

粒子情報（カテゴリ IV）

輸送された粒子の種類 (List of transport particles)、及びその生成数 (prod. particles)、崩壊数 (particle decays)、停止した数 (stop. particles)、領域外に抜け出た数 (leak. particles) などの情報が書き出されます。

発生線源情報（カテゴリ I）

線源粒子の数やウェイトが書き出されます。

荷電粒子阻止能データ情報（カテゴリ I）

ATIMA モデルを使って荷電粒子の阻止能を計算する際 (ndedx = 1 or 3)、新たな輸送荷電粒子とターゲット核の組み合わせができる毎に、その阻止能データをあらかじめ確保したメモリ領域に格納していきます。ここでは、その阻止能データのメモリ使用量 (dedx) とその上限値 (mdbatima) が書き出されます。このメモリ使用量が上限値に達すると、それ以降にできた新たな組み合わせに対しては、その阻止能をメモリに格納せず直接計算するため、計算速度が低下する可能性があります。その場合は、[parameters] セクションで mdbatima をより大きい値に設定することにより、計算速度を維持することが可能となります。

ジオメトリエラー情報（カテゴリ I）

ジオメトリエラー発生数に関する情報が書き出されます。Number of lost particles は、未定義領域に入ってしまった粒子の数で、この数が nlost を超えると計算が強制終了されてしまいます。強制終了された場合は、ジオメトリや線源の設定を再確認してください。ただし、まれに桁落ちなど不可避な原因でも発生するため、設定に問題がなく lost particle の頻度が非常に低い場合（おおよそ 10,000 ヒストリーに 1 回もしくはそれ以下）は、nlost の値を [parameters] セクションで変更して強制終了を回避してください。Number of geometry recovering は、何らかの理由により粒子座標と領域番号がずれてしまったが、粒子座標を少しずらすことにより問題を回避できたプロセスの数です。主に桁落ちが原因であり、頻度が高くてあまり気にする必要はありません。一方、Number of unrecovered errors は、上記問題を回避できなかったエラーの数

で、その時点で粒子の追跡を停止してしまうため、頻度が高いと問題となります。

乱数情報 (カテゴリ I)

初期乱数 (initial random seed) 及び再開計算を行うための次の乱数 (next initial random seed) の値が書き出されます。

各プロセスやモデル・ライブラリの計算回数・CPU 時間情報 (カテゴリ I)

各プロセスやモデル・ライブラリの計算回数及びそれに要した CPU 時間に関する情報が書き出されます。各項目の意味は以下の通りです。ただし、`icput=0` の場合は `total cpu time` 以外の計算時間が出力されません。またその場合、`transport`、`set data`、`other` の項目自体が出力されません。[parameters] セクションで `infout=8` とした場合は核反応モデル毎のサマリーが出力され、各入射粒子の反応が何回モデル計算されたか (count) とその計算が成功した回数 (real) 及びその成功率 (%) が書き出されます。

- `total cpu time`: 総計算時間
- `transport`: 総計算時間から以下の 5 項目に要した時間を除いた時間
- `set data`: 入力パラメータの読込など粒子輸送計算が開始される前に要した時間
- `analysis`: 全てのプロセスの計算回数・時間 (プロセスについては「計算プロセス情報」を参照)
- `nevap`: 蒸発モデルによる計算回数・時間
- `dexgam`: 原子核脱励起モデルによる計算回数・時間
- `other`: その他の計算時間
- `nreac`: 原子・原子核反応モデルによる計算回数・時間
- `dklos`: 粒子崩壊過程の計算回数・時間
- `hydro`: 核子同士散乱過程の計算回数・時間
- `n-data`: 中性子ライブラリによる計算回数・時間
- `h-data`: 陽子・重陽子・ α 粒子ライブラリによる計算回数・時間
- `p-data`: 光子の原子データライブラリによる計算回数・時間 (`negs=-1` の場合)
- `e-data`: 電子・陽電子の原子ライブラリによる計算回数・時間 (`negs=-1` の場合)
- `p-egs5`: EGS5 を用いた光子の計算回数・時間
- `e-egs5`: EGS5 を用いた電子・陽電子の計算回数・時間
- `e-tsmode`: 電子飛跡構造解析モードによる計算回数・時間
- `ion-tsmode`: イオン (陽子含む) 飛跡構造解析モードによる計算回数・時間
- `photonucl`: 光核反応モデルによる計算回数・時間
- `photonucl lib`: 光核反応ライブラリによる計算回数・時間
- `mu-reac`: ミューオン核反応モデルの計算回数・時間
- `mu-brem`: ミューオンによる制動放射 X 線発生モデルの計算回数・時間

- mu-pprd: ミューオンによる対生成モデルの計算回数・時間
- mu-cap: ミューオン捕獲反応モデルの計算回数・時間
- elast: 全ての弾性散乱過程の計算回数・時間
- ncasc: 核反応モデルによる直接過程・前平衡過程の計算回数・時間
- bertini: Bertini モデルによる計算回数・時間
- isobar: isobar モデルによる計算回数・時間
- JAM: JAM モデルによる計算回数・時間
- QMD: JQMD モデル、JQMD-2.0 による計算回数・時間
- JAMQMD: JAMQMD モデルによる計算回数・時間
- INCL: INCL モデルによる計算回数・時間
- INCELF: INC-ELF モデルによる計算回数・時間
- frag data: frag data による計算回数・時間
- SCINFUL: SCINFUL モードによる計算回数・時間

引用文献情報（カテゴリ I）

PHITS を使った計算結果を発表する際に引用すべき文献の情報が書き出されます。また、INCL モデル、Kurotama モデル、EGS モードなど外部機関が開発したモデルを使った場合は、それらのオリジナル文献の引用情報も書き出されます。

4.9 タリー出力の書式

各タリーの出力結果は、そのタリーの **file** パラメータで指定した名前のファイルに書き出されます。また、タリー結果がプロット軸が 2 次元の **axis** パラメータ (**xy**, **yz**, **xz**, **rz**, **chart**) を指定した場合は、**file** で指定したファイル名の拡張子の前に **_err** を加えたファイルに統計誤差の結果が出力されます。さらに、各タリーに **epsout**, **vtkout**, **bmpout** パラメータなどが定義されている場合は、**file** で指定したファイル名の拡張子を **.eps**, **.vtk**, **.bmp** に変更した画像形式のファイルが出力されます。例えば、**file = track.out**, **axis = xy**, **epsout=1** と設定した場合は、“**track.out**” (タリー結果の数値出力)、“**track_err.out**” (統計誤差の数値出力)、“**track.eps**” (タリー結果の画像出力)、“**track_err.out**” (統計誤差の画像出力) の 4 ファイルが書き出されます。なお、開発チームが奨励するタリー数値出力ファイルの拡張子は **.out** ですが、これ以外の拡張子ファイルを指定しても特に問題はありません。

タリー出力ファイルには、まずインプットエコー (入力パラメータを整理した形で書き出したもの) が出力された後、タリー結果が **ANGEL** で処理できるグラフ表示形式で出力されます。**axis** で指定した軸以外のパラメータが変化する場合、複数枚のグラフ表示形式でタリー結果が出力され、各グラフは **newpage:** というコマンドで区切られます。以下、“**recommendation/CosmicRay/track_eng.out**”と“**track.out**”を例として、プロット軸が 1 次元及び 2 次元のデータ形式の概要を示します。なお、2 次元データで表示する場合、**xy** 平面の場合は **z** 軸の + 側から見た図、**xz** 平面の場合は **y** 軸の + 側から見た図、**yz** 平面の場合は **z** 軸の + 側から見た図となります。

track_eng.out (プロット軸が 1 次元 (エネルギー) の場合)

1-51 行目 ([*t-track*] から #----- まで)

最初にインプットエコーが書き出されます。

53 行目 (#*newpage:*)

この行以降に、1 ページ目のグラフに関する情報が出力されることを意味します。

54 行目 (#*no. = 1 reg = 1000001*)

ページ番号 (*no.*) 及びこのページのグラフで固定されたパラメータ (この場合は領域番号) がコメントアウト形式で書き出されます。複数の領域に対する合計値を出力する場合、その領域番号は 1000001、1000002 のように 1000000+統合領域番号となります。

56 行目 (*x: Energy [MeV/n]*)

X 軸ラベルが書き出されます。各タリーの **x-txt** パラメータで指定できます。

57 行目 (*y: Flux [1/cm²/(MeV/n)/source]*)

Y 軸ラベルが書き出されます。各タリーの **y-txt** パラメータで指定できます。

58 行目 (*p: xlog ylog afac(0.8) form(0.9)*)

グラフの基本設定に関する **ANGEL** パラメータが書き出されます。例えば **xlog** 及び **ylog** は、**X** 及び **Y** 軸がそれぞれ対数表示であることを定義しています。なお、横軸のデフォルトはメッシュタイプが 1,2,4 の場合は線形 (**xlin**)、3,5 の場合は対数 (**xlog**) になり、縦軸は常に対数です。タリー内に **ANGEL** パラメータを定義した場合は、そのコマンドがここに書き出されます。各 **ANGEL** パラメータの意味は、**APPENDIX A ANGEL** もしくは **ANGEL** マニュアルをご参照ください。

59 行目 (*h: n x y(proton),hh0l n y(neutron),hh0dr n y(Fe),hh0ub n*)

次行以降に書かれたタリー結果のプロット方法を定義しています。**n** は読み飛ばし、**x** は **X** 軸数値、**y(proton)**, **hh0l** などは **Y** 軸数値を表します。**Y** 軸数値の括弧内は **Legend** で、**hh0l** はグラフの描画方法を定義しています。例えば、**hh** はヒストグラム、**0** はマークなし、**1** は黒色実線を表しています。

60 行目 (# *e-lower e-upper proton r.err neutron r.err Fe r.err*)

次行以降に書かれたタリー結果の意味を示しています。ただし、#で始まるコメント行のため、**ANGEL** では処理されません。基本的には、**axis** で定義したパラメータ (この場合はエネルギー) メッシュの下限

値・上限値・タリー結果・相対誤差の順番で出力されます。複数の **part** を指定した場合は、列を追加して各 **part** のタリー結果・相対誤差が書き出されます。

61–180 行目

タリー結果の数値データが出力されます。行数はメッシュ数で、列数は (2+**part** で指定した粒子数 ×2) となります。

182 行目 (*# sum over*)

タリー結果の合計値もしくは平均値が出力されます。ただし、この値には誤差が出力されませんのでご注意ください。

184 行目 (*'no. = 1, reg = 1000001'*)

ページのタイトルが出力されます。

185–191 行目 (*msuc: {\huge Track Detection in reg mesh}* から *e:*まで)

図のタイトルや PHITS と ANGEL のバージョンなどが ANGEL パラメータ形式で出力されます。

193–199 行目 (*# Information for Restart Calculation* 以降)

最後に、乱数やヒストリー情報など再開計算に必要な情報が出力されます。

track.out (プロット軸が 2 次元 (**x,y**) の場合)

1–97 行目 (*[t-track]* から *#-----* まで)

最初にインプットエコーが書き出されます。

99 行目 (*#newpage:*)

この行以降に、1 ページ目のグラフに関する情報が出力されることを意味します。

100–103 行目 (*# no. = 1 ie = 1 iz = 1 part. = all* から *# mset = 1* まで)

ページ番号 (**no.**) 及びこのページのグラフで固定されたパラメータがコメントアウト形式で書き出されます。

105 行目 (*'no. = 1, ie = 1, iz = 1, mset = 1'*)

ページのタイトルが出力されます。

106–108 行目 (*msuc: {\huge Astronaut dose in pSv/source}* から *msdl: {\it calculated by \PHITS 3.28}* まで)

図のタイトルや PHITS と ANGEL のバージョンなどが ANGEL パラメータ形式で出力されます。

110–119 行目 (*x: x [cm]* から *p: ymin(-60.00000) ymax(60.00000)* まで)

2 次元プロットの詳細な設定が ANGEL パラメータ形式で出力されます。例えば、**c3**, **c4** パラメータで定義される **cmin**, **cmax** は、表示するデータの最小値・最大値をそれぞれ表しています。また **p: zlog** はデータを対数表示でプロットすることを意味しており、**p: zlin** とすれば線形表示となります。

120–121 行目 (*# ny = 120 nx = 120* から *# ((data(x,y), x = 1, nx), y = ny, 1, -1)* まで)

データのメッシュ数及び格納順番が書き出されます。この例では、データが X 昇順 → Y 降順で 120 個ずつ並んでいることを示しています。

123 行目 (*hc: y = 59.50000 to -59.50000 by 1.000000 ; x = -59.50000 to 59.50000 by 1.000000 ;*)

データをプロットする軸座標が書き出されます。この場合は縦軸に対しては上から下に向かって 59.5 から -59.5 まで 1.0 間隔で、横軸に対しては左から右に向かって -59.5 から 59.5 まで 1.0 間隔でデータが並んでいることを意味します。

124–1563 行目

data(1,ny) data(2,ny) ... data(nx,ny) data(1,ny-1) data(2,ny-1) data(3,ny-1) ... data(nx,ny-1) ... data(1,1) data(2,1) ... data(nx,1) の順番で連続してデータが書き出されます。ただし、10 個データを書き出すごとに改行されますので、この例では $120 \times 120 / 10 = 1440$ 行に渡ってデータが出力されます。エクセルなどの表計算ソフトにコピー&ペーストできる形式で出力したい場合は、タリー設定で **2d-type=5** としてください。詳細は 6.7.12 節「2d-type パラメータ」をご参照ください。

1566 行目 (*# gshow*)

2次元プロットと重ね合わせ表示する幾何学形状に関する情報出力の開始を意味します。**gshow=0** の場合は出力されません。

1568–2681 行目

幾何学形状に関する情報が出力されます。

2684–2713 行目 (z: *xorg(1.03)* から p: *ymin(-60.00000) ymax(60.00000)* まで)

グラフ表示に関する様々な設定が出力されます。

2716 行目 (*newpage:*)

新しいグラフページの開始を意味します。ヒストグラムの場合と異なり各 **part** に対して1枚の2次元プロットを出力するため、同じ設定でも複数ページの出力となります。この例だと、1ページ目が **part=all**、2ページ目が **part=proton** に対するデータで、以下、**part=neutron** (5333 行目)、**part=Fe** (7950 行目) と続きます。

10566–10572 行目 (*# Information for Restart Calculation* 以降)

最後に、乱数やヒストリー情報など再開計算に必要な情報が出力されます。

5 各セクションの書式

5.1 [Title] セクション

このセクションでは、計算のタイトルを定義します。タイトルは、標準出力の先頭に印字されます。書式は次の様なものです。何行でもかまいません。ただし、このセクションでは空白行は無視されます。

```
[ T i t l e ]  
This is a test calculation of PHITS.  
Any number of title lines are allowed.  
.....
```


5.2 [Parameters] セクション

このセクションでは、PHITS の動作を決定するパラメータを指定します。書式は次の様なものです。

```
[ Parameters ]
para1 = number | file.name
para2 = number | file.name
.....
```

パラメータの順番は自由、省略すれば、デフォルト値が読み込まれます。

以下に各々のパラメータの意味と値を説明します。(D=) は、デフォルト値です。

5.2.1 計算モード

表 6: icntl パラメータ

パラメータ	値	説明
icntl	(D=0)	基本動作オプション。
	= 0	通常の粒子輸送計算。
	= 1	断面積・カーマファクター出力モード (/phits/sample/icntl1 参照)
	= 3	input echo の書き出し。メモリー空間、ライブラリー、ファイルのチェック用。
	= 5	全てを真空 (void) 領域とし、粒子の反応や散乱、電離等が起こらない輸送計算を実行する。geometry check や体積・面積計算の際に使用する。
	= 6	ソースのチェック。[t-product] で線源粒子をタリーできる。
	= 7	[t-gshow] タリーの実行。
	= 8	xyz メッシュタリーの gshow オプションのあるものの幾何形状表示。
	= 9	[t-rshow] タリーの実行。
	= 10	reg メッシュタリーの rshow オプションのあるものの幾何形状表示。
	= 11	[t-3dshow] (3 次元幾何形状表示タリー) の実行。
	= 12	dumpall ファイルから読み込んで再計算。file(15) で出力ファイルを指定。
	= 13	タリー結果の統合機能 (Sumtally 機能) の利用。
	= 14	体積自動計算機能の利用。
	= 15	[t-wwbg] タリーの実行。
	= 16	分析機能スクリプトの利用。
	= 17	[anatally] セクションの実行。

icntl=1 は、従来、核反応計算モードとして使っていましたが、現在は、断面積や Kerma factor などを出力する目的でのみ利用可能です。詳しくは“/phits/sample/icntl1”フォルダをご参照ください。

icntl=12 を指定すると、dumpall=1 で計算した時にダンプしたデータを基に再計算します。輸送に関しては、最初に計算した全ての情報を再現します。再計算の時には、最初に計算したインプットファイルが必要になります。タリーを除いて同じものを使わないと矛盾が生じます。maxcas, maxbch は、ダンプファイルに指定されているものを使いますので変更できません。最初に計算したときと異なるタリーを入れて再計算したいときなど有効です。ただし、dumpall=1 で計算するときは、巨大なデータファイルが作成されることがありますから注意してください。dumpall=1 でダンプする情報は、5.2.26 で解説します。

icntl=13 を指定することにより、**Sumtally** 機能を利用することができます。この機能の詳細は 6.8 をご覧ください。

icntl=14 を指定することで、**[t-volume]** による体積自動計算機能を利用することができます。この機能の利用方法は 7.18 をご覧ください。

icntl=15 を指定することで、**[ww bias]** のパラメータを自動生成する **[t-wwbg]** が機能します。この機能の利用方法は 7.17 をご覧ください。

分析機能スクリプトを利用する場合は、**icntl=16** と指定する必要があります。

5.2.2 ヒストリー数、配列の大きさ

表 7: ヒストリー数、配列の大きさに関するパラメータ (1)

パラメータ	値	説明
maxcas	(D=10)	1 バッチのヒストリー数。上限は 2147483647。
maxbch	(D=10)	バッチ数。上限は 2147483647。
maxbnk	(D=100000)	コンピュータメモリに一時的に保存できる 2 次粒子の最大数。(ただし [weight window] を設定した場合は D=10000000) 高エネルギー粒子入射で大量に二次粒子が発生した場合や、 [importance] や [weight window] を使って大量に粒子分割が起きた場合に、 jbnk = 0 , ibnk = 1 のような警告が出ることがあります。その際は、この値を大きくすることにより計算が高速化できる可能性があります。ただし、1 粒子あたり約 300 byte のメモリを使用するため、大きくしすぎるとコンピュータがメモリ不足に陥りエラーが発生する可能性がありますのでご注意ください。
iwwbnk	(D=1)	[weight window] を設定した際に、メモリに蓄積する 2 次粒子の数が maxbnk に近づくにしたがって粒子分割を抑制する機能の利用の有無に関するオプション。 1 の場合に有効、それ以外は無効となる。
igeomem	(D=100000)	1 つのセルの定義で使える余剰メモリサイズ。 # を多用するなど 1 つのセルの定義が複雑になりすぎた場合、このパラメータが不足しているというエラーが出ます。その場合は、セルの定義を簡素化するか、このパラメータを指定された数もしくはそれ以上に増やして再度 PHITS を実行してください。
xsmemory	(D=1.0)	核データライブラリー読込配列の大きさ。通常は変更する必要はありませんが、入力ファイルによっては、この値を変更するように指示される可能性があります。その際は、値を変更するとともに入力ファイルを PHITS 事務局までお送り下さい。

メモリ分散型並列計算では、バッチ単位で並列化しています。このため、入力のバッチ数 **maxbch** が $N_{PE}-1$ の整数倍となるように指定してください。ここで、 N_{PE} は並列計算で使用する実行 PE(Processing Element) 数です。上記の -1 は、並列計算のコントロールのために 1PE 使うためです。もし整数倍でないときは、**maxbch** が整数倍になるように変更し、加えて全ヒストリー数が入力した数と同程度となるように **maxcas** を自動で調整します。この自動調整が実行された場合は、出力のインプットエコーの最後にコメントが書き出されます。

表 8: ヒストリー数、配列の大きさに関するパラメータ (2)

パラメータ	値	説明
timeout	(D=-1.0)	PHITS 計算の打ち切り時間 (sec)。
istdev	(D=0)	新規 / 再開始計算及び統計誤差導出方法のコントロール。
	=-2	再開始計算 (ただし、過去のタリー結果が全くない場合は、 istdev=2 として新規計算を開始。
	=-1	再開始計算 (ただし、過去のタリー結果が全くない場合は、 istdev=1 として新規計算を開始。
	=0	新規計算。統計誤差は、メモリ共有型並列で italsh=1 の場合はバッチ分散を、それ以外はヒストリー分散を自動的に選択します。
	=1	新規計算。統計誤差は、各バッチ間の分散の平方根として導出。
italsh	=2	新規計算。統計誤差は、各ヒストリー間の分散の平方根として導出。
	(D = 0)	OpenMP (メモリ共有型並列計算) を利用した場合にスレッド間のタリー変数の共有/非共有を切り替えるオプション。タリー変数を共有すれば、少ない物理メモリでも並列計算が実行できるため、大容量のタリー領域を必要とする並列計算の実行で有用です。一方で、メモリ競合を防止するプロセスのために計算速度が低下する可能性があります。少ないヒストリー数で計算速度等の確認をした上でお使いください。また、メモリ共有型並列で italsh=1 の場合、タリー変数をスレッド毎に用意しないため、統計誤差はバッチ分散 (istdev=1) でしか計算できません。
	= 0	タリー変数をスレッド間で共有しない。
ireschk	= 1	タリー変数をスレッド間で共有する。
	(D=1)	再開始計算時のタリーパラメータ一致性確認の有無。
	=0	読み込むタリー出力の設定が現在のタリー設定と一致しているか確認する。
	=1	上記確認を行わない。極めて長いタリー設定をした場合、タリー出力に全ての設定が書き込まれずに、新旧ファイル一致性の確認でエラーが出てしまう場合があります。その場合、 ireschk=1 とし、一致性を確認しないモードで再開始計算を実行してください。

timeout を用いることにより、PHITS 計算の打ち切り時間を指定できます。**timeout** が正の場合に機能します。バッチ終了時の CPU 時間が **timeout** を超えた場合に、そのバッチで計算を終了します。バッチの途中で **timeout** を超えた場合は、そのバッチが終了するまで計算が継続します。メモリ分散型並列の場合は、全ての CPU 時間の和で判定します。ただし、ご使用の計算機によっては CPU 時間が正しく取得できず、**timeout** を適切に使用できない場合がありますのでご注意ください。

統計誤差計算は、各バッチ間のタリー量の分散の平方根として標準偏差を導出するバッチ分散モードと、各ヒストリー間のタリー量の分散の平方根として標準偏差を導出するヒストリー分散モードがあります。どちらも、次式で標準偏差 σ を計算します。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i w_i / \bar{w})^2 - N \bar{X}^2}{N - 1}} \quad (1)$$

ここで N は標本数 (**istdev=1** のときは全バッチ数、**istdev=2** のときは全ヒストリー数) であり、 x_i, w_i は各標本のタリー量及びソースウェイト、 \bar{w} はソースウェイトの平均値です。PHITS 内部では σ の絶対値を計算していますが、それをタリー量の平均値 \bar{X} で割った相対誤差を出力しています。そして、標準誤差 (standard

error of the mean) は σ/\sqrt{N} により計算できるので、これをタリー量の平均値 \bar{X} で割った量を相対誤差、

$$(\text{r.err}) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}\bar{X}} \quad (2)$$

により求め出力しています。

バッチ分散の場合は、同じ全ヒストリー数でも、**maxcas** と **maxbch** の組み合わせによって標準誤差が変化しますのでご注意ください。基本的には、**maxbch** を大きくした方が計算の信頼性は高くなりますので、正確に統計誤差を計算したい場合は、**maxbch** を少なくとも 10 以上としてください。ただし、**PHITS** は、各バッチ終了時にいろいろな処理をしますので、**maxbch** を大きくしすぎると計算時間が長くなりますのでご注意ください。一方、ヒストリー分散モードの場合は、標準誤差は全ヒストリー数のみに依存し、**maxcas** と **maxbch** の組み合わせには依存しません。したがって、通常の計算では、ヒストリー分散モードを選択することをお薦めします。しかしながら、xyz メッシュタリーを細かく設定する等、メモリを多く使用するタリーを設定している場合には、ヒストリー分散モードでの計算時間が莫大となることがありますのでご注意ください。なお、各ヒストリーの分散を導出するタリー (**[t-deposit]** タリーの **output = deposit** や **[t-deposit2]** など) の場合は、統計誤差として標準誤差を出力しており、**istdev** の値に関係なく、寄与したヒストリー数の平方根から計算します。すなわち、寄与したヒストリー数が K の場合、その相対誤差は $1/\sqrt{K}$ となります。

統計誤差は、通常、タリー量の右側の **r.err** の列に出力されます。ただし、**axis = xy, rz** など 2 次元表示の場合は、各タリーで指定した **file** パラメータの拡張子の手前に **_err** と付けた別ファイルに出力します。例えば、**file=tally.out** と指定した場合、統計誤差のファイル名は **tally.err.out** となります。このファイルの書式は通常のタリー出力と同じですので、**ANGEL** で処理することにより投稿誤差を 2 次元表示で確認することができます。詳細は 4.9 節「タリー出力の書式」をご覧ください。

PHITS で評価しているのは標準誤差なので、必ずしも真値がこの範囲内に収まるわけではないのでご注意ください。平均値を中心として $\pm 1\sigma$ の範囲は約 68% の信頼区間を表しており、この範囲に約 68% の確率で計算結果が含まれることを意味します。また、核反応モデルに起因する系統的な不定性は含まれていません。

istdev < 0 とした場合は、再開始計算となります。その場合、統計誤差計算モードは、過去のタリー結果を踏襲します。再開始計算については、3.1 をご覧ください。

³³ R. Picard and T. Booth, LA-UR-08-06204.

³⁴ G. Marsaglia, 2003. Xorshift RNGs. Journal of Statistical Software. 8, 14, 1-6.

表 9: 乱数に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
nrandgen	(D=1) =0 =1	擬似乱数生成法オプション。 線形合同法を使用する。乱数の周期は 2^{46} 。詳細は下記文献 ³³ を参照。 xorshift64 を使用する。乱数の周期は $2^{64} - 1$ 。詳細は下記文献 ³⁴ を参照。
irskip	(D=0) irskip>0 irskip<0	乱数をコントロールするオプション。 irskip 回ヒストリーをスキップして計算を開始 (デバッグ用) irskip 回ヒストリーの乱数をスキップして計算を開始 (手動並列用)
rseed	(D=0.0) rseed=0 rseed≠0	初期乱数オプション 初期乱数として 6647299061401 を使用する。 nrandgen=0 の時はこの整数値を使用し、 nrandgen=0 の時はこの値に対応するビットデータを使用する。 rseed を初期乱数とする。 nrandgen=0 の時は絶対値の整数値を使用する。 nrandgen=1 の時は入力値 (実数可、負値可) に対応するビットデータを使用する。
itimrand	(D=0) =0 =1	時間依存の初期乱数オプション。 rseed により決まる値を使用する。 計算の開始時間情報より決まる初期乱数を使用する。
bitrseed		初期乱数のビットデータ (0 か 1 で表される 64 桁の整数列)。デフォルトは 6.647299061401E+12 のビットデータ。

5.2.3 計算打切エネルギー、モデル切り替えエネルギー

表 10: 計算打切エネルギーに関するパラメータ (1)

パラメータ	値	説明
emin(i)	(D=1.0e-3) (D=1.0e-11) (D=1.0e-3) (D=1.0) (D=1.0) (D=1.0e+9) (D=1.0e-3) (D=1.0e-3)	(i=1) 陽子の計算打切エネルギー [MeV]。 (i=2) 中性子の計算打切エネルギー [MeV]。 (i=3,4,6-10) 正パイオン、中性パイオン、ミューオン、ケイオンの計算打切エネルギー [MeV]。 (i=5) 負パイオンの計算打切エネルギー [MeV]。1MeV より小さくした場合は、エネルギーカットオフの際に負パイオンの吸収反応が起こらなくなります。 (i=11) その他の粒子 (ityp=11) の計算打切エネルギー [MeV]。 (i=12,13) 電子 (i=12)、陽電子 (i=13) の計算打切エネルギー [MeV]。 (i=14) 光子の計算打切エネルギー [MeV]。 (i=15-19) 重陽子 (i=15)、3 重陽子 (i=16)、 ³ He(i=17)、 ⁴ He(i=18)、原子核 (i=19) の計算打切エネルギー [MeV/n]。ここで、MeV/n は核子あたりの MeV。 粒子番号 i は表 4 を参照。
dmax(i)	(D=emin(i)) (D=20.0) (D=1.0e+3)	(i=1,12,13,15,18) 粒子番号 i の粒子に対するライブラリー（電子・陽電子は原子反応ライブラリー、それ以外は核データライブラリー）を利用する際の上限エネルギー [MeV]（重陽子及び α 粒子に対しては [MeV/n]）。なお、i=3-11,16,17,19 に対するライブラリーは、現在のところ使用できません。 (i=2) 中性子に関する核データライブラリーを利用する際の上限エネルギー [MeV]。 (i=14) 光子に関する原子反応ライブラリーを利用する際の上限エネルギー [MeV]。 PHITS のパッケージに含まれているライブラリーは i=1,2,12,13,14 のみなので、これら以外の粒子についてはご自身でライブラリーを用意して使用してください。詳しくは APPENDIX C をご参照ください」
dprmax	(D=0)	光核反応ライブラリーを利用する上限エネルギー [MeV]。なお、dmax(14) は光子の原子反応（コンプトン散乱、光電効果など）に対するライブラリー上限エネルギーである点に注意。
lib(i)		dmax(i) や dprmax を指定した際、最優先で利用される核データライブラリーの拡張子。ただし、dmax(2) ≤ 20 の場合は、アドレスファイル (“xsdir”) で最初に書かれたファイル (“xsdir.jnd” の場合は JENDL-4.0) が優先されます。また、指定された核種に対するライブラリーがない場合、警告メッセージが表示されたうえで、20 MeV 以下の中性子に対しては上記のアドレスファイルにある先頭ライブラリー、それ以外の粒子に対しては核反応モデルが自動的に利用されます。

表 11: 計算打切エネルギーに関するパラメータ (2)

パラメータ	値	説明
		(lib(i) の場合の続き)
	(D=20h) (D=20c) (D=20u) (D=20o) (D=20a)	(i=1) 陽子に対する核データライブラリ。デフォルト (20h) は JENDL-5 ³⁵ (i=2) 中性子に対する高エネルギー核データライブラリ。デフォルト (20c) は JENDL-5。dmax(2)≤20 の場合は適用されないことに注意。 (i=14) 光子に対する核データライブラリ。デフォルト (20u) は JENDL-5。光子の原子反応に対するライブラリではないことに注意。 (i=15) 重陽子に対する核データライブラリ。デフォルト (20o) は JENDL-5 (i=18) α 粒子に対する核データライブラリ。デフォルト (20a) は JENDL-5
esmin esmax	(D=0.001) (D=3000000)	電子・陽電子を除く荷電粒子の range 計算の最小エネルギー [MeV/n]。 電子・陽電子を除く荷電粒子の range 計算の最大エネルギー [MeV/n]。
cmin(i)	(D=1.0)	粒子番号 i の粒子の反応計算打切エネルギー [MeV]。(ただし、i=15-19 の場合は [MeV/n]。) cmin(i) 未満のエネルギーで起こる反応や散乱 (δ 線生成も含みます) は無視する。 ただし、中性子、電子・陽電子、光子のデフォルト値は emin(i) です。また、重陽子 (i=15) のデフォルト値は 0.001 MeV/n です。
etsmin etsmax	(D=1e-6) (D=1e-2)	飛跡構造解析を実施する電子 (もしくは陽電子) のエネルギーの下限値 [MeV]。 飛跡構造解析を実施する電子 (もしくは陽電子) のエネルギーの上限値 [MeV]。
tsmax	(D=1e-3)	陽子やイオンに対する飛跡構造解析を行う最大エネルギー [MeV/n]。飛跡構造解析を行わない場合は、ATIMA など通常の阻止能モデルを使って電離エネルギー損失を計算します。各自でコンパイルした PHITS でモデル KURBUC を使った陽子やイオンに対する飛跡構造解析を行いたい場合は、10.4 節をご参照ください。

emin, esmin, cmin, etsmin によって各々のエネルギー領域に制限を与える際は、その値未満となります。したがって例えば、emin(1) で陽子の計算打切エネルギーを指定した場合、丁度その値のエネルギー (デフォルトだと 0.001 MeV) をもつ陽子は計算打切とはなりません。一方、dmax, esmax, etsmax の場合は、その値以下が対象となります。

輸送粒子のエネルギーが emin より低くなると、エネルギーカットオフとなり、輸送計算が打ち切られます。その際、残りの運動エネルギーはその場所に付与され、中性子を除く表 5 の粒子は崩壊します。また、陽電子は対消滅を起こします。

emin(2) や dmax(2) を指定しない場合、これらの値は nucdata オプションによって自動的に調整されます。例えば、nucdata=0 の場合、emin(2)=dmax(2)=1.0e-3 となります。また、emin(12,13) や dmax(12,13) を指定しない場合、これらの値は negs オプションによって自動的に調整されます。例えば、negs=1 の場合、emin(12,13)=0.1、dmax(12,13)=1.0e+3 となります。詳細は、表 12 をご覧ください。

粒子のエネルギーを E とした場合に、 $\text{emin} < E < \text{dmax}$ の範囲にあるエネルギーをもつ粒子の反応や散乱がライブラリーにより計算されます。 $\text{emin} > \text{dmax}$ とすれば、ライブラリーを用いた計算をしません。中性子と光子のライブラリーの上限は、それぞれ 20 MeV と 100 GeV です。また、EGS5 を利用しない場合の電子と陽電子のライブラリーの上限は 10 GeV となります。

³⁵ Iwamoto O, Iwamoto N, Kunieda S, et al. Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5. J Nucl Sci Technol. 2023;60(1):1-60.

エネルギー E の荷電粒子について物質中の飛程 (range) を計算する際、 $\text{esmin} < E < \text{esmax}$ の範囲でデータテーブルを作成して計算します。より小さい、もしくは、より大きなエネルギーを取り扱いたい場合には、 esmin や esmax を設定してください。通常はデフォルト値のままで計算を行います。

荷電粒子の計算打ち切りエネルギー emin を esmin よりも小さくすることはできません。その場合、 emin は自動的に esmin の値に修正されます。

[Frag Data] で考慮したい最小の入射エネルギーに応じて、 $\text{cmin}(i)$ を設定してください。

etsmin は、原理的には 1 meV まで設定可能ですが、計算時間が膨大になりますので、1 eV 程度に設定することをお勧めします。 etsmax は、1 keV よりも大きく設定する必要があります。原理的には極めて大きい値も設定可能ですが計算時間が膨大になりますので、現実的には 100 keV 以下に設定することをお勧めします。飛跡構造解析の場合は、必ず EGS5 モードを用いて $\text{emin}(12-13)$ を 1 keV に設定する必要があります。

表 12: 光子・電子・陽電子・中性子の輸送に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
negs	(D=-1)	光子・電子・陽電子の輸送に関するオプション。
	= -1	PHITS オリジナルモデルを用いて光子のみ輸送する。デフォルト値である $\text{emin}(14)=0.001$, $\text{dmax}(14)=1000.0$ が使用されるが、これらのパラメータを指定した場合は、それらの値が優先される。
	= 0	電子・陽電子・光子の輸送を行わない。 $\text{emin}(14)=\text{dmax}(14)=1.0\text{e}+9$ に自動調整される。
	= 1	EGS5 を用いて光子・電子・陽電子を輸送する。 $\text{emin}(12,13)=0.1$, $\text{emin}(14)=0.001$, $\text{dmax}(12-14)=1000.0$ に自動調整されるが、これらのパラメータを直接指定した場合は、それらの値が優先される。このオプションを使用する場合は、 $\text{file}(1)$ もしくは $\text{file}(20)$ の設定が必要になる。
	= 2	$\text{negs}=1$ と同様だが、電子・陽電子・光子の上限エネルギー $\text{dmax}(12-14)$ が 1 GeV ではなく 10 TeV ($1\text{e}+7$) に自動調整される。
nucdata	(D=1)	中性子に関するライブラリーの使用についてのオプション。
	= 0	中性子に関するライブラリーを使用しない。 $\text{emin}(2)=\text{dmax}(2)=1.0\text{e}-3$ に自動調整し、中性子の輸送計算をライブラリーを使用せずに実行する。ただし、 $\text{emin}(2)$ や $\text{dmax}(2)$ を直接指定した場合は、それらの値が優先される。
	= 1	中性子断面積データライブラリー JENDL-4.0 に合わせたデフォルト値 ($\text{emin}(2)=1.0\text{e}-11$, $\text{dmax}(2)=20.0$) を使用する。ただし、 $\text{emin}(2)$ や $\text{dmax}(2)$ を直接指定した場合は、それらの値が優先される。このオプションを使用する場合は、 $\text{file}(1)$ もしくは $\text{file}(7)$ の設定が必要になる。
ieleh	(D=0)	電子、陽電子の輸送オプション。
	= 0	エネルギー e が $\text{dmax}(12)$ 以上の場合、減速や反応を行わない。
	= 1	エネルギー e が $\text{dmax}(12)$ 以上の場合、ウエイト値 wgt を $\text{wgt} = e/\text{dmax}(12)$ に変更し、 $\text{dmax}(12)$ の値をエネルギーとして輸送計算を実行する。

$\text{negs}=1,2$ 以外を設定した上で、輸送させる電子・陽電子のエネルギーが $\text{emin}(12,13)$ と $\text{dmax}(12,13)$ の範囲に入ると、PHITS オリジナルの電子輸送アルゴリズムが動作します。ただし、このアルゴリズムの利用は非推奨であり、計算精度も保証していないのでご注意ください。

表 13: モデル切り替えエネルギーに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
ejamnu	(D=20.)	核子の核反応モデルに関する Bertini (もしくは JQMD) と JAM への切り替えエネルギー [MeV]。
ejampi	(D=20.)	パイオンの核反応モデルに関する Bertini と JAM の切り替えエネルギー [MeV]。
eisobar	(D=0.0)	isobar=1 の時の isobar モデルの上限エネルギー [MeV]。
isobar	(D=0) = 0 = 1	isobar モデルのオプション isobar モデルを用いない isobar モデルを用いる
eqmdnu eqmdmin ejamqmd	(D=20.) (D=10.) (D=3000.)	核子の核反応モデルに関する Bertini と JQMD の切り替えエネルギー [MeV]。 JQMD 適用の下限エネルギー [MeV/n]。 原子核の核反応モデルに関する JQMD と JAMQMD の切り替えエネルギー [MeV/n]。
inclg einclmin einclmax	(D=1) =0 =1 =2 (D=1.0) (D=3000.0)	核子、パイオン、軽イオン ($d, t, {}^3\text{He}, \alpha$) の核反応モデルとして INCL を適用する場合のオプション。 INCL を使用しない。核子の反応については、 ejamnu と eqmdnu の値に応じて、JAM、JQMD、Bertini のモデルが適用される。パイオンの反応については、 ejampi の値に応じて、JAM か Bertini が適用される。軽イオンの反応については JQMD が適用される。 核子、パイオン、軽イオンが関与する核反応で INCL を使用する。 核子とパイオンが関与する核反応で INCL を使用する。 INCL が適用される下限のエネルギー [MeV/n]。 INCL が適用される上限のエネルギー [MeV/n]。
incelf eielfmin eielfmax	(D=0) =0 =1 =2 (D=1.0) (D=3500.)	核子が関与する核反応モデルとして INC-ELF を使用する。 INC-ELF を使用しない。 陽子、中性子、 α 入射反応に INC-ELF を使用する。 陽子、中性子入射反応に INC-ELF を使用する。 INC-ELF が適用される下限のエネルギー [MeV]。 INC-ELF が適用される上限のエネルギー [MeV]。
irqmd	(D=0) =0 =1	核反応モデルとして JQMD か JQMD-2.0 を使用する。 JQMD を使用する。 JQMD-2.0 を使用する。

d, t, α 原子核を輸送している場合、**eqmdmin** 以下のエネルギーでは JQMD による原子核反応をさせません。低エネルギーでの JQMD の適用には限界がありますし、通常物質中だと低エネルギーでは飛程が短いので核反応を考慮しなくても影響は小さいです。

高エネルギーの原子核反応は、デフォルトで 3.0 GeV/n で、JQMD から JAMQMD モデルへと切り替わります。この切り替えエネルギーを **ejamqmd** で変えられます。核子入射反応でも、**eqmdnu**, **ejamnu**, とこの **ejamqmd** の値を調整すれば、JAMQMD モデルで計算することも可能です。

INCL (Intra-Nuclear Cascade of Liège) は、核子、パイオン、軽イオン入射反応を記述する核反応モデルです。バージョン 2.50 から、明示的にモデルの選択を行わない場合、これらの入射粒子の反応に対しては基本的にこのモデルが使用されるようになりました。もし、本モデルを用いて得られた結果を発表する場合

は、必ず下記文献³⁶を引用してください。

INC-ELF (Intra-Nuclear Cascade with Emission of Light Fragment) は軽イオン生成機構をもつ核反応モデルです。核子 (陽子、中性子) が入射反応の時に使用できます。本モデルを用いて得られた結果を発表する際は、必ず下記文献³⁷を引用するようにしてください。

JQMD, JQMD-2.0 は核反応を記述するモデルで、特に重イオン入射反応を記述するのに優れています。バージョン 2.70 以降は、それまで使われていた JQMD に加えて、JQMD-2.0 も選択できるようになりました。JQMD-2.0³⁸ は JQMD を改良し、反応の記述をより合理的にしたモデルで、周辺衝突反応の扱いが特に改善されています。ただし核反応の計算にかかる時間が 2 倍程度長くなります。

	(10^{-11} MeV) emin(2)=cmin(2)	(20 MeV) dmax(i)	(3 GeV) einclmax
Neutron	Nuclear data	INCL (inclg=1)	JAM
	(10^{-3} MeV) emin(1)	(1 MeV=cmin(1)) einclmin	(3 GeV) einclmax
Proton		INCL (inclg=1)	JAM
	(10^{-3} MeV/n) emin(i)	(1 MeV/n=cmin(i)) einclmin	(3 GeV/n) einclmax
d, t, ^3He , α		INCL (inclg=1)	JAMQMD
	(10^{-3} MeV/n) emin(i)	(10 MeV/n=cmin(i)) eqmdmin	(3 GeV/n) ejamqmd
Nucleus		JQMD	JAMQMD

図 7: 核反応モデルの切り替えエネルギー

³⁶ A. Boudard, J. Cugnon, J.-C. David, S. Leray, and D. Mancusi, Phys. Rev C87, 014606 (2013).

³⁷ Y. Sawada, Y. Uozumi, S. Nogamine, T. Yamada, Y. Iwamoto, T. Sato, and K. Niita, Nucl. Instr. & Meth. B 291, 38-44 (2012).

³⁸ T. Ogawa, T. Sato, S. Hashimoto, D. Satoh, S. Tsuda, and K. Niita, Phys. Rev C92, 024614 (2015).

³⁹ ACE format における DPD Block の total particle production cross section に値が無い場合。

表 14: モデル切り替えエネルギーに関するパラメータ 2

パラメータ	値	説明
iscinful	(D=0) =0 =1	0.1–150 MeV の中性子と炭素の核反応計算に SCINFUL-QMD のデータベースを適用する SCINFUL モードのオプション。 SCINFUL-QMD のデータベースを使用しない (核反応モデルを使う)。 SCINFUL-QMD のデータベースを使う。この場合 [data max] セクションで炭素のライブラリー上限エネルギーを 0.1 MeV に設定する必要があります。詳しくは <code>utility\usrtally\scinful-qmd</code> をご参照ください。
lionprd	(D=-1) =-1 =0 =1	新しいパラメータ <code>lionprd</code> を導入し、核データを使用した中性子入射反応における 2 次軽イオン (p,d,t,3He, α) の発生をコントロールするオプション。 中性子のエネルギーが 20 MeV から <code>dmax(2)</code> の間にある場合に、2 次軽イオンを発生させる。 中性子のエネルギーが <code>dmax(2)</code> 以下の場合に、2 次軽イオンを発生させない。 中性子のエネルギーが <code>dmax(2)</code> 以下の場合に、2 次軽イオンを発生させる。 このオプションは e-mode を用いない時の中性子入射反応に関係します。使用する核データが軽イオンに関する生成反応断面積をもっていない場合 ³⁹ 、このオプションは機能しません。中性子のカーマ係数 (heating numbers) はこのオプションによって値が変わります。発生させた軽イオンの寄与の分だけその値が減少します。ただし、中性子エネルギーが 20 MeV 以上では正確でない可能性があることに注意してください。
epseudo	(D=10.0)	荷電粒子核データライブラリーを使う際、ステップ幅中での最大断面積を与えるエネルギーを指定するパラメータ。このエネルギーを小さくすると、低エネルギー核反応の計算精度が多少上がりますが、計算時間が飛躍的に長くなります。
tsxcl	(D=1) =0 =1	飛跡構造解析モード時の核反応計算に関するオプション。 飛跡構造解析モードで輸送される粒子の核反応を無視する。なお、KURBUC が使われているときはこれと関係なく、核反応は無視される。 核反応を無視しない。

5.2.4 時間カット、ウエイトカット、ウエイトウインドウ

表 15: 時間カット、ウエイトカット、ウエイトウインドウに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
tmax(i)	(D=1.e+9)	粒子番号 i (i =1-20) の粒子の計算打切時間 [nsec]。粒子番号は表 4 を参照。
wc1(i) wc2(i) swtm(i)	(D=-0.5) (D=wc1/2) (D=1.0)	i -th 粒子の minimum weight i -th 粒子の cutoff weight i -th 粒子の minimum source weight
wupn	(D=5)	ウエイトウインドウの上限値 = [Weight Window] セクションで指定した下限値 × wupn. (wupn ≥ 2)
wsurvn	(0.6*wupn)	サバイバルウエイト値 (1 < wsurvn < wupn)
mxspln	(D=5)	スプリット数の最大値、サバイバルの最大倍数 (mxspln > 1)
mwhere	(D=0)	ウエイトウインドウのアクションの場所 -1: 核反応時、0: 両方、1: 境界横断時
iwwbias	(D=0) = 0 = 1	[ww bias] に関するオプション。 [ww bias] の値を用いない。 [ww bias] で与えたバイアスの値の逆数が [weight window] で指定したウエイトの下限値にかかる。
nfcseg	(D=50)	荷電粒子に対して forced collision を適用する際の対象領域分割数。この値を小さくすると計算時間が短くなりますが、厚いターゲットの場合は、ターゲット内での詳細なエネルギー変化を考慮できなくなるため計算精度が落ちる可能性があります。
istdcut	(D=0) = 0 = 1	個別タリー打ち切り機能の切り替え。 統計誤差が stdcut 以下になっても計算終了時まで全てのタリー計算を続行します。なお、 istdcut でタリーを打ち切った後に再開始計算を行うと、乱数の重複が起きてしまう可能性があります。再開始計算を行う場合は、前回のシミュレーションで最後まで実行されたタリーをインプットファイルの最初に書くようにしてください。 統計誤差が stdcut 以下になったタリーから計算を打ち切ります。
istdbat	(D=0)	計算初期に stdcut を無効にするパラメータ。バッチ番号が istdbat 以下の場合、 stdcut による計算打ち切りを行いません。OpenMP を利用した場合、バッチ分散から統計誤差を推定するため (istdev = 1), 計算初期に統計誤差が不安定になります。そのような場合は、誤差が安定してくるバッチ数を istdbat に指定してください。

時間のカットオフは粒子毎に **tmax(i)**= で指定します。単位は nsec です。カットオフ時間を上回った粒子は輸送を終了し、殺されます。高エネルギーの場合ほとんど意味がありませんが、低エネルギーの輸送で利用できます。

ウエイトカットオフは、インポートانس、強制衝突、implicit capture、ウエイトウインドウを利用し、粒子のウエイトが変化する場合に、指定のウエイトカットオフ値になった粒子にロシアンルーレットを施すものです。ウエイトウインドウを指定した粒子については作用しません。

粒子のウエイトが、WC2 とソースの発生場所のインポートانسと現在のインポートانسの比 R の積、 $WC2 \times R$ より小さくなった時、現在の粒子ウエイト WGT の関数、 $WGT/(WC1 \times R)$ の確率で存続させ、その時粒子のウエイトを $WGT = WC1 \times R$ とします。それ以外は、その粒子を殺します。WC1, WC2 の入力

が負の数で与えられた場合は、 $|WC1| \times SWTM$ また、 $|WC2| \times SWTM$ が $WC1, WC2$ として設定されます。インポートランスが指定されていない粒子や、領域は、インポートランスは全て 1 にセットされます。

ウェイトウインドウのパラメータについては、通常はデフォルト値で省略できます。

`iwwbias=1` とした場合、`input echo` の `[weight window]` には `[ww bias]` で定義した値を考慮した結果が書き出され、`[ww bias]` には `off` が付きます。もし、`[ww bias]` が定義されていない場合は、`input echo` において全ての値が 1 となった `[ww bias]` が書き出されます。

5.2.5 阻止能モデル

表 16: 阻止能モデルに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
ndedx	(D=3) = 0 = 1 = 2 = 3	電子・陽電子を除く荷電粒子の dE/dx オプション 重イオンは SPAR ⁴⁰ 、他は NMTC オリジナル 重イオン、陽子は ATIMA ⁴¹ 、他は NMTC オリジナル 重イオン、陽子、パイオン、ミューオンは SPAR、他は NMTC オリジナル 全ての荷電粒子に対して ATIMA を利用する
mdbatima	(D=500)	ATIMA 用データベースの最大値
dbcutoff	(D=0.0)	ATIMA 用データベース作成の下限エネルギー (MeV/n)
ih2o	(D=-1) < 0 > 0	ATIMA の時の水 (H2O のみ) の Ionization Potential オプション デフォルト値、75 eV 水の Ionization Potential (eV)
ifixchg	(D=0) = 0 = 1	ATIMA で阻止能を計算するときの電荷数 有効電荷。高エネルギーの場合は完全電離 (フルストリップ)、エネルギーが低くなると経験式に従って徐々に電荷が下がる。 固定値。基本的には完全電離を仮定するが、 izst パラメータで線源粒子の電荷を指定した場合、核反応が起きるまではその値となる。実際は物質中ですぐに電子がはぎ取られて完全電離状態となるが、その過程は模擬できないため、薄膜やガス中での計算を想定。
irlet	(D=1) = 0 = 1	δ 線生成機能を使ったときの荷電粒子の dE/dx 計算手法。 従来手法 (実際に生成した δ 線のエネルギーを非制限阻止能から差し引く方法)。 制限付阻止能。

ndedx は、バージョン 2.00 以前は **ndedx=0** を、それより後からバージョン 2.85 までは **ndedx=2** をデフォルトとしておりましたので、注意してください。

バージョン 2.85 より、阻止能計算モデル ATIMA のアルゴリズムを改良し、高速化しました。従来のアルゴリズムでは、輸送計算の途中で新たな粒子が発生したり、別の物質に到達したりする度に、毎回 ATIMA による阻止能計算を実行し、粒子の飛程を求めています。そこで、計算された粒子・物質の組みに対する情報をデータベースとして記憶しておき、次の同じ組の呼び出しではデータベースを参照することで、計算負荷の高い ATIMA の呼び出し回数を減らすように変更しました。この改良により、精度の高い ATIMA を用いた PHITS シミュレーションが、SPAR を用いた場合とほぼ同程度の計算時間で実行できるようになりました。

バージョン 2.97 より、**Np** から **Bk** ($93 \leq Z \leq 97$) の元素を含む物質についても、**ndedx=3** を使用できるようになりました⁴²。その際、核的阻止能の計算に必要なイオン化ポテンシャルおよび密度補正のパラメータを文献⁴³より追加し、電子的阻止能の計算は SPAR で代用しました。

⁴⁰ T.M. Armstrong and K.C. Chandler, ORNL Report, ORNL-4869 (1973).

⁴¹ ATIMA モデルについては、次のウェブサイトをご覧ください。 <https://web-docs.gsi.de/~weick/atima/>

⁴² バージョン 2.96 以前では、U より大きな核種を含む物質を扱う場合、ATIMA は使用できません。その際は **ndedx=2** としてください。

⁴³ R.M.Sternheimer, Atomic data and nuclear data tables, 30, 261-271 (1984) の表 1。

5.2.6 弾性散乱や全断面積、反応断面積モデル

表 17: 弾性散乱や全断面積、反応断面積モデルに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
ielas	(D=2) = 0 = 1 = 2	弾性散乱オプション 弾性散乱を考慮しない 中性子の弾性散乱を考慮する 中性子と陽子の弾性散乱を考慮する
ielms	(D=720)	弾性散乱角度分布分点数
icxnp	(D=1) =0 =1	1 GeV 以下の中性子・水素散乱断面積オプション。 JAM オリジナル断面積。 JENDL/HE-2007 に格納された値。
icxsni	(D=0) = 0 = 1 = 2	核子・原子核間の反応断面積、弾性散乱、全断面積オプション Pearlstein-Niita の式 ⁴⁴ KUROTAMA モデル Sato の式 ⁴⁵
icrhi	(D=2) = 0 = 1 = 2	原子核・原子核反応の反応断面積オプション Shen の式 NASA の式 KUROTAMA モデル
icrdm	(D=0) = 0 = 1	重陽子の反応断面積オプション icrhi と同じ MWO の式
icxspi	(D=1) = 0 = 1	パイオンの反応断面積オプション 幾何学的な断面積 Hashimoto の式

KUROTAMA モデルは、幅広いエネルギー範囲において様々な原子核間同士の反応断面積を再現する最新のモデルです。詳細はこの文献⁴⁶をご覧ください。また、本モデルを使用して得られた結果を使用して論文発表等を行う場合は、必ず該当文献をご引用ください。

オリジナルの NASA の式⁴⁷ は、軽イオンに対して低エネルギー補正項 X_m が導入されていますが、PHITS では $X_m = 1$ として計算しています。

MWO の式は、重陽子の全反応断面積を精度良く記述するモデルです。主に、入射エネルギーが 1 GeV 以下の領域および標的核が炭素以上の大きさをもつ場合に、高い信頼性をもちます。詳細は文献⁴⁸をご覧ください。また、本モデルを使用して得られた結果を使用して論文発表等を行う場合は、必ず該当文献をご引用ください。

バージョン 2.86 より、Hashimoto の式がパイオンの全反応断面積のモデルとしてデフォルトで使用されます。この式は、従来の幾何学的な断面積と比べて、入射エネルギー依存性を考慮しており、デルタ共鳴によるピーク構造を再現します。

⁴⁴ 文献 [S. Pearlstein, *Astrophys. J.* 346, 1049 (1989)] にあるモデルを基に、実験値を再現するように改良したモデルです。

⁴⁵ T. Sato, R. Kataoka, H. Yasuda, S. Yashiro, T. Kuwabara, D. Shiota, and Y. Kubo, *Radiat. Prot. Dosim.* 161 (2014) 274-278.

⁴⁶ K. Iida, A. Kohama, and K. Oyamatsu, *J. Phys. Soc. Japan* 76, 044201 (2007), and L. Sihver *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth. B* 334, 34-39 (2014).

⁴⁷ R.K. Tripathi, F.A. Cucinotta, and J.W. Wilson, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 155 (1999) 349-356

⁴⁸ K. Minomo, K. Washiyama, and K. Ogata, *J. Nucl. Sci. Technol.* 54, 127-130 (2017).

5.2.7 崩壊や脱励起過程モデル

表 18: 崩壊や脱励起過程モデルに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
nevap	(D=3) = 0 = 3	蒸発モデルのオプション 蒸発モデルを用いない GEM モデルを用いる
ngem	(D=1) = 0 = 1 = 2	GEM モデルのオプション。 デフォルトバージョン (Ver.1) を使う。 Ver.1 を使う。 Ver.2 を使う (核子放出・ガンマ線放出の競合、殻補正に KTUY のデータ ⁴⁹ を使う)。
ifission	(D=1) = 0 = 1 = 2	核分裂反応モデルのオプション。 デフォルトバージョン (Ver.1) を使う。 Ver.1 を使う。 統計崩壊開始時に原子番号が 89 未満の核は、Ver.1 に代わって Iwamoto モデル ⁵⁰ を使用する。
igamma	(D=2) = 0 = 1 = 2 = 3 =-1, -2, -3	残留核の γ 崩壊オプション。 γ 崩壊を考慮しない。 γ 崩壊を考慮する。 γ 崩壊を EBITEM モデルを用いて考慮する。 γ 崩壊とアイソマー生成を EBITEM モデルを用いて考慮する。 バージョン 2.73 以前では、1-3 の場合に <code>file(14)=trxcrd.dat</code> を [parameters] セクションで設定する必要があります。 1,2,3 と同様ですが励起核の運動に起因するドップラー効果を無視します。
ismm	(D=0) = 0 = 1	統計マルチフラグメンテーションモデル (SMM) のオプション。 統計マルチフラグメンテーションモデルを用いない。 統計マルチフラグメンテーションモデルを用いる。JQMD の場合、JQMD から GEM への切り替え時間がデフォルトの 150 fm/c から 75 fm/c に変わります。

EBITEM モデルを用いてアイソマー生成を考慮すると、[t-yield] において `axis=chart`, `dchain` とした場合に、生成されたアイソマーの情報が出力されます。本モデルに関する詳細は文献⁵¹をご覧ください。

`igamma<0` は反応の物理過程を歪めるため、必要な場合 (ガンマ線放出の準位構造を調べるなど) 以外は使わないでください。

統計マルチフラグメンテーションモデルは、鉛や水銀などの重い核、または 100 MeV/n 前後での核反応で核種生成の再現性を向上させます。ただし核反応の計算にかかる時間が場合によっては数倍長くなります。本モデルに関する詳細は文献^{52 53}をご覧ください。

⁴⁹ H. Koura, T. Tachibana, M. Uno, and M. Yamada, RIKEN Accel. Prog. Rep. 36 (2003) 9; H. Koura, TOURS Symposium on Nuclear Physics V, AIP Proceedings 704 (2004) 60.

⁵⁰ Hiroki Iwamoto, and Shin-ichiro Meigo, Journal of Nuclear Science and Technology, 56 (2019) 160-171.

⁵¹ T. Ogawa, S. Hashimoto, T. Sato, and K. Niita, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 325 (2014) 35-42.

⁵² T. Ogawa, T. Sato, S. Hashimoto, and K. Niita, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 723 (2013) 36-46.

⁵³ J.P. Bondorf, A.S. Botvina, A.S. Iljinov, I.N. Mishustin, and K. Sneppen, Physics Reports 257 (1995) 133-221.

5.2.8 イベントジェネレーターとカーマ近似

表 19: イベントジェネレーターとカーマ近似に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
e-mode	(D=0) = 0 = 1 = 2	Event generator mode に関するオプション。 単純サンプリングモード (イベントジェネレーターモード無効)。 Event generator mode Ver. 1. (単純サンプリング + 蒸発モデル)。 Event generator mode Ver. 2 (Ver.1 + 荷電粒子生成量高精度化 + 中性子エネルギー分布の高精度化)。 e-mode≠0 で高エネルギー核データライブラリー ⁵⁴ を利用した場合、全反応断面積のみライブラリーから読み込み、2 次粒子の情報は核反応モデルにより決定します。ただし、その場合でも、20MeV 以下の中性子に対しては Event generator mode Ver. 1 もしくは 2 が利用されます。
ikerman	(D=0) =0 =1	[t-deposit] で付与エネルギーを計算する際、中性子に対してカーマ近似の使用の有無を決めるオプション。 自動調整。イベントジェネレーターモードを使用すると (e-mode ≥1)、中性子反応により放出される荷電粒子を明示的に計算するため、カーマ近似は利用しなくなります。 常にカーマ近似を利用しない。
ikemap	(D=0) =0 =1	[t-deposit] で付与エネルギーを計算する際、光子に対してカーマ近似の使用の有無を決めるオプション。 自動調整。EGS5 モードを使用すると (negs =1,2)、2 次電子を明示的に計算するため、カーマ近似は利用しなくなります。また、EGS5 モードを利用しない場合でも、電子のカットオフエネルギー emin (12) 及び emin (13) を 10 MeV 以下に設定すると利用しなくなります。 常にカーマ近似を利用しない (電子による付与エネルギーを計算する)。

イベントジェネレーターモードは、20 MeV 以下の中性子による検出器波高、残留核の反跳、微細線量など、イベントごとの量を計算する場合必要な機能です。単純サンプリングモード (**e-mode**=0) は核データの二次中性子エネルギー分布を正確に再現しますが、エネルギー・運動量保存則は満たしません。**e-mode** オプションの詳細は 5.2.27 をご覧ください。

⁵⁴ 荷電粒子や光核反応ライブラリーを含む。

5.2.9 Adjoint（時間逆行）モード

表 20: Adjoint mode のパラメータ

パラメータ	値	説明
iadjoint	(D=0)	Adjoint mode の輸送オプション。
	= 0	Adjoint mode を用いない（通常の輸送計算）。
	= 1	光子に対する Adjoint モードを用いる（“/phits/utility/adjoint/adjoint” 参照）。
	= 2	荷電粒子に対する Adjoint モードを用いる（“/phits/utility/adjoint/charged” 参照）。

Adjoint モードとは、時間を逆行させて粒子を追跡する計算手法を表します。通常の計算では、線源領域に比べてタリー領域が小さい場合に統計が溜まりにくくなりますが、Adjoint モードを使って線源とタリー領域を入れ替えることにより、効率的なシミュレーションが可能となります。また、タリーしたい粒子が決まっている場合に、その粒子が主にどこから飛来してきたのか推定する際にも有用となります。PHITS には、光子 (3 MeV 以下) 及び荷電粒子 (電子・陽電子を除く) に対する Adjoint モードが組み込まれており、それぞれ **iadjoint=1** 及び **2** として実行します。

光子に対する adjoint モード (**iadjoint=1**) は、専用タリー [**t-adjoint**] と組み合わせて実行します。このモードでは、光子は物質と逆反応し、その反応は 3.0 MeV 以下のエネルギー領域で連続的にモデル化されています。このモードを使用する場合は、以下の 3 つのパラメータを定義する必要があります。

```
dmax(14) = 3.0
negs = -1
file(7) = file(1)/data/xsdir.adj
```

[**t-adjoint**] では、通常計算で線源となるべき領域を指定し、その **e-type** メッシュの最小と最大のエネルギー値は [**Source**] セクションで定義するエネルギー分布の最小値と最大値と一致するようにしてください。[**t-adjoint**] の **e-smin** と **e-smax** パラメータは、実際の光子線源の最小と最大エネルギーを定義することになります。詳細は下記の文献⁵⁵を参照してください。

荷電粒子に対する adjoint モード (**iadjoint=2**) は、[**t-track**] や [**t-cross**] と組み合わせて実行します。このモードでは、荷電粒子は物質内で阻止能に応じてエネルギーを増やしながら進みます。エネルギー範囲などの制限はありませんが、核反応は考慮できない点にご注意ください。荷電粒子のステップ幅が大きいと誤差が大きくなるので、**deltm** を小さい値（おおよそ 0.01 以下）に設定し、その値を変更しても結果が大きく変わらないことを確認してからご使用ください。

⁵⁵A. Malins *et al.*, “Continuous energy adjoint transport for photons in PHITS ” EPJ Web Conf., 153, 06001 (2017). DOI: 10.1051/epj-conf/201715306001

5.2.10 核反応モデルオプション

表 21: 核反応モデルオプションに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
inmed	(D=1) = 0 = 1 = 2	Bertini モデルの核子核子断面積オプション free (nmtclk25.dat) Cugnon old (nmtclk95.dat) Cugnon new (nmtclk30.dat)
andit	(D=0) = 0 = 1 = 2	Bertini モデルの Δ 角分布オプション 50%等方、50%前方 全て等方分布 全て前方分布
iidfs	(D=0) = 0 = 1	中性子入射核分裂反応のオプション = 0 中性子の核データを使用する = 1 文献値に基づき中性子多重度 ν とエネルギー分布を再現する
idwba	(D=0) = 0 = 1	DWBA スペクトルのオプション = 0 DWBA 計算で求めた離散スペクトルを考慮しない = 1 DWBA 計算で求めた離散スペクトルを考慮する
npidk	(D=0) = 0 = 1	計算打切エネルギーに達した負パイオンの崩壊の取り扱い = 0 吸収反応を強制的に考慮する = 1 崩壊させる

inmed オプションは、**inmed=1** の **inmedium** 断面積がデフォルトになっています。

iidfs=1 を指定した場合、下に示す 18 核種の核分裂で放出される中性子の多重度 ν とエネルギー分布を文献⁵⁶にあるデータに基づき再現します。

U-238, Pu-238, Pu-240, Pu-242, Cm-242, Cm-244, Cf-252, Th-232, U-232, U-233, U-234, U-235, U-236, Np-237, Pu-239, Pu-241, Am-241, Bk-249.

idwba は、特定の標的原子核における陽子、重陽子入射反応を対象として、放出中性子や陽子のエネルギースペクトルに、DWBA（歪曲波ボルン近似）によって計算した離散スペクトルを追加するオプションです。具体的には、以下の入射エネルギーと反応が対象となります。

30–400 MeV における ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応

10–50 MeV における ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 反応

10–50 MeV における ${}^{6,7}\text{Li}(d, n){}^{7,8}\text{Be}$ および ${}^{6,7}\text{Li}(d, p){}^{7,8}\text{Li}$ 反応

5–25 MeV における ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ および ${}^9\text{Be}(d, p){}^{10}\text{Be}$ 反応

10–50 MeV における ${}^{12,13}\text{C}(d, n){}^{13,14}\text{N}$ および ${}^{12,13}\text{C}(d, p){}^{13,14}\text{C}$ 反応

崩壊チャンネルを持つ粒子が、計算打切エネルギーに達した時には、全て崩壊させます。その中で負パイオンについては、**npidk=0** としていると、まず強制的に核反応を試み吸収させます。それでも吸収されなかった場合は、やはり崩壊させます。

⁵⁶ J. M. Verbeke, C. Hagmann, and D. Wright, “Simulation of Neutron and Gamma Ray Emission from Fission and Photofission”, UCRL-AR-228518 (2014).

5.2.11 低エネルギー中性子に関するオプション

以下のパラメータは、20 MeV 以下の中性子の計算に用います。

表 22: 低エネルギー中性子に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
emcnf	(D=0, 0)	中性子捕獲のしきい値 (MeV) これ以上で implicit capture、以下で analog capture
dnb	(D=-1) =-1 = 0 > 0	核分裂からの delayed neutron 数 natural sampling no delayed neutron neutron number
nonu	(D=1) =0	通常の fission として扱う fission を起こさない。単なる中性子捕獲反応として扱う。 光子が生成される。
isaba	(D=0) = 0 = 1	$S(\alpha, \beta)$ に関するオプション。 このオプションを使用しない。 $S(\alpha, \beta)$ を使用した計算においてデータの内挿を行う。
isans	(D=0) = 0 = 1	微小角中性子散乱 (small angle neutron scattering, SANS) モデルの使用の有無に関するオプション。 SANS モデルを使わない。 SANS モデルを使う。この場合、SANS モデルに対応した熱中性子散乱則ライブラリーが必要となります。

nonu=0 とすることで、計算体系内に設定された核分裂性核種に、輸送中の中性子が核分裂反応を誘起した際、2 次中性子による中性子増倍効果を発現させず、即ち、中性子を発生させずに、単に中性子捕獲反応として輸送計算を継続することができます。用途としては、臨界解析コード等により別途評価した同体系における中性子実効増倍率を加味した中性子線源等を用いて、実質的な中性子透過問題の評価が行えます。これは、MCNP コードにおける NONU カード相当に相当します。

isaba=1 は、薄膜等の散乱回数が少ない場合を計算する際に指定してください。

5.2.12 光子輸送の PHITS オリジナルモデル

以下のパラメータは、**negs**≠ 1, 2 のときのみ有効となります。

表 23: 光子輸送オリジナルモデルに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
emcpf	(D=100)	photon の詳細モデルの上限 (MeV)
nocoh	(D=0) = 0 = 1	photon の coherent scattering のオプション coherent scattering を起こす coherent scattering を起こさない
xnum	(D=1) = 0 > 0	x-ray photon のオプション x-ray photon を生成しない analog x-ray photon 数

5.2.13 EGS5 用パラメータ

表 24: EGS5 用パラメータ 1

パラメータ	値	説明
ipegs	(D=0)	PEGS5 (EGS5 用断面積生成プログラム) コントロールオプション。 pegs5.inp をユーザー自身で変更したいときに使用します。なお、ipegs が 1 以上の場合、iegsout は自動的に 1 となり PEGS5 関連ファイルを残すようにします。(ただし、iegsout = 2 としている場合は変更しません。) また、negs≠ 1,2 のときは無効となります。
	= -1	PEGS5.inp の作成○、PEGS5 の実行○、PHITS の実行×
	= 0	PEGS5.inp の作成○、PEGS5 の実行○、PHITS の実行○
	= 1	PEGS5.inp の作成×、PEGS5 の実行○、PHITS の実行○
	= 2	PEGS5.inp の作成×、PEGS5 の実行×、PHITS の実行○
imsegs	(D=1)	多重散乱 (Multiple Scattering) の扱いに関するオプション。
	= 0	EGS5 オリジナル手法。ソース発生直後のみ starting scattering strength を使って多重散乱を詳細に模擬し、その後は、maximum scattering strength を使用する。
	= 1	PHITS-EGS5 独自の手法。物質が変わるたびに starting scattering strength を使用して多重散乱を詳細に模擬する。これにより、多少計算時間が長くなるが、chard パラメータを変更することなく薄膜による散乱をある程度正確に模擬できるようになる。
iegsout	(D=0)	EGS5 出力ファイルオプション
	= 0	EGS5 用の出力ファイルを残さない。ただし、計算を途中で打ち切った場合は、ファイルが残る場合があります。
	= 1	再読込するファイル (pegs5.inp, pegs5.dat, pegs5.msfit) のみ残す
	= 2	全て残す。各ファイルに出力される情報の詳細は、EGS5 のマニュアル ⁵⁷ をご参照ください。

PEGS は EGS5 を使用する前に動作させる Fortran のサブプログラムです。EGS5 の計算で必要となる物質毎の断面積データを生成します。

negs=1,2 の場合、電子・陽電子・光子の輸送エネルギー下限に対するデフォルト値が emin(12,13)=0.1, emin(14)=0.001 となります。上限は、negs=1 の場合 dmax(12-14)=1000.0 (1 GeV)、negs=2 の場合 dmax(12-14)=1e+7 (10 TeV) となります。ただし、これらの値を [parameters] セクションで直接指定した場合は、指定した値が優先されます。また、多くの EGS5 用パラメータのデフォルト値がオリジナル EGS5 の値と異なっていることにご注意ください。

バージョン 2.76 より EGS5 を使用している場合でも光核反応を考慮することができるようになりました。ipnint=1 とした場合は、以前のバージョンと結果が変わりますのでご注意ください。

⁵⁷ H. Hirayama *et al.*, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).

表 25: EGS5 用パラメータ 2

パラメータ	値	説明
iegsrand	(D=-1) < 0 = 0 > 0	EGS5 で使う乱数初期値。0 以上を指定した場合、EGS5 用の乱数を使うため、MPI 並列計算や再開始計算ができなくなることにご注意ください。 EGS5 用の乱数は使わない (PHITS で使う乱数をそのまま利用する) EGS5 のデフォルト乱数初期値 (314159265) を使う 指定した値を EGS5 乱数初期値として使う
iedgfl	(D=1) = 0 = 1	K 及び L 殻特性 X 線に関するオプション = 0 K 及び L 殻特性 X 線を扱わない = 1 K 及び L 殻特性 X 線を扱う
iauger	(D=1) = 0 = 1	K 及び L 殻オージェ電子に関するオプション = 0 K 及び L 殻オージェ電子を扱わない = 1 K 及び L 殻オージェ電子を扱う
iraylr	(D=1) = 0 = 1	レイリー散乱 (Rayleigh scattering) に関するオプション = 0 レイリー散乱を扱わない = 1 レイリー散乱を扱う
lpolar	(D=0) = 0 = 1	光子散乱での直線偏光 (linearly polarized photon scattering) に関するオプション (未対応) = 0 直線偏光を扱わない = 1 直線偏光を扱う
iunrst	(D=0) = 1 = 2 = 3 = 4 = 5 = 6 = 7	PEGS5 による阻止能出力オプション。ただし、計算結果が変わってしまうので、0 以外の値を指定する場合は ipegs=-1 として PEGS5 のみ実行すること。 = 1 unrestricted collision only = 2 unrestricted collision and radiative = 3 unrestricted collision, restricted radiative = 4 restricted collision, unrestricted radiative = 5 unrestricted radiative only = 6 restricted radiative only = 7 restricted collision only
chard	(D=0.1)	EGS5 のステップサイズをコントロールするパラメータ。 imsegs=0 として薄膜のある体系を計算する場合、その薄膜の厚さ程度に設定する必要があります。オリジナルの EGS5 では物質毎に設定できますが、PHITS では全ての物質に対して同じ値を設定します。 また、負値を入力した場合は、その絶対値を各物質の密度 (g/cm ³) で割った値を EGS5 で使用する chard パラメータに設定します。密度が薄く巨大な体系 (km オーダー) では、負値を設定することにより、計算時間を大幅に短縮できます。

表 26: EGS5 用パラメータ 3

パラメータ	値	説明
epstfl	(D=0) = 0 = 1	ICRU90 に格納された衝突断面積に関する密度補正係数を利用するオプション。 ICRU90 を使わない。 ICRU90 を使う。この場合、[material] セクションで定義した物質から、液体の水、グラファイト、空気を自動的に判別して、それらの物質に対して ICRU90 に対応した密度補正係数を使います。自動判別する基準は以下の通りです。 液体の水 : H 及び O で構成され密度が 0.9–1.1 g/cm ³ の物質 C で構成され密度が 1.55–2.40 g/cm ³ の物質 C, N, O, 及び Ar で構成され密度が 0.03 g/cm ³ の物質。このしきい値密度は gasegs パラメータで調整可能です。
gasegs	(D=0.03)	この密度以下の物質は、PEGS で自動的に気体とみなされます。
incohr	(D=1) = 0 = 1	コンプトン散乱角の非干渉散乱関数 (incoherent scattering function, S/Z rejection) に関するオプション 非干渉散乱関数を使わない (自由電子との散乱) 非干渉散乱関数を使う (束縛電子との散乱) (ibound が自動的に 1 に固定されます)
iprofr	(D=1) = 0 = 1	コンプトン散乱におけるドップラー効果に関するオプション ドップラー効果を考慮しない ドップラー効果を考慮する (incohr と ibound が自動的に 1 に固定されます)
impacr	(D=1) = 0 = 1	EII (Electron impact ionization) に関するオプション EII を考慮しない EII を考慮する
ieispl	(D=0) = 0 = 1	EII により発生する光子の扱いに関するオプション 分割しない (no splitting) 分割する (splitting)
neispl	(D=0)	ieispl=1 のときに分割する光子の数
ibrdst	(D=1) = 0 = 1	制動放射の発生角度に関するオプション 固定値 サンプリング
iprdst	(D=1) = 0 = 1	電子対生成の発生角度に関するオプション 固定値 サンプリング
iphter	(D=1) = 0 = 1	光電子の角度分布に関するオプション 固定値 (入射光子の方向) サンプリング
ibound	(D=1) = 0 = 1	コンプトン断面積に関するオプション 自由コンプトン断面積 (free Compton cross section) 束縛全コンプトン断面積 (bound total Compton cross section)
iaprim	(D=1) = 0 = 1 = 2	制動放射断面積に関するオプション Motz <i>et al.</i> の経験式を使う ICRU-37 で与えられた放射阻止能 (radiative stopping power) に規格化する 規格化しない

5.2.14 光・ミューオン反応モデル

表 27: 光・ミューオン反応モデルに関するパラメータ 1

パラメータ	値	説明
ipnint	(D=0) = 0 = 1 = 2	光核反応のオプション。 (バージョン 2.30 以前、 ipngdr というパラメータ名であったもの。) 光核反応を考慮しない。 光核反応を考慮する。ただし核共鳴蛍光散乱を除く。 核共鳴蛍光散乱を含む全ての光核反応を考慮する。 (偏光については欄外参照。)
pnimul	(D=1.0)	光核反応のサンプリング確率に乗じる倍率。
imucap	(D=1) = 0 = 1 = 2	負ミューオンが止まったときのミューオン捕獲反応に関するオプション。 ミューオニックアトム生成後の特性 X 線の放出と核吸収反応を考慮する。 考慮しない。 考慮する。特性 X 線の放出の計算で用いるパラメータは、デフォルト値を使用する。 考慮する。特性 X 線の放出の計算で用いるパラメータは、 file(28) で指定したユーザー定義ファイルから読み込む。
iqmdscm	(D=0) = 0 = 1	ミューオン捕獲反応の計算で表面合体モデル ⁵⁸ (Surface Coalescence Model, SCM) を利用するオプション。 SCM を使わない。 SCM を使う。
scm.h0	(D=0.25)	SCM の調整パラメータ $h0$ 。[GeV fm/c]
scm.d	(D=1.75)	SCM の調整パラメータ D 。[fm]
scm.rcls	(D=-1.124) > 0 < 0	SCM の調整パラメータ $R0$ [fm] を設定するためのパラメータ $Rcls$ [fm]。 $R0 = Rcls$ $R0 = Rcls * A^{-1/3}$

ipnint=2 とした際に考慮される核共鳴蛍光散乱については、入射光子が偏極している場合、**[source]** セクションで **sx, sy, sz** を用いて偏光方向を指定できます。その偏極方向を考慮して、散乱光子の角度分布が決定されます。

⁵⁸ Y. Watanabe and D. N. Kadrev, Proc. Int. Conf. Nucl. Data Sci. Technol. 2007 (ND2007) (2007) 1121-1124.

表 28: 光・ミューオン反応モデルに関するパラメータ 2

パラメータ	値	説明
imuint	(D=1) = 0 = 1	仮想光子を介して高エネルギーミューオンが引き起こす核反応に関するオプション。 考慮しない。 考慮する。
imubrm	(D=1) = 0 = 1	ミューオンによる制動放射に関するオプション。 考慮しない。 考慮する。
imuppd	(D=1) = 0 = 1	ミューオンによる電子・陽電子対生成に関するオプション。 考慮しない。 考慮する。
emumin	(D=200.0)	仮想光子を介して核反応を引き起こすミューオンの最低エネルギー (MeV)。imuint = 1 の場合のみ有効。
emumax	(D=1.0e+6)	仮想光子を介して核反応を引き起こすミューオンの最大エネルギー (MeV)。imuint = 1 の場合のみ有効。

emumin を変更した場合、ミューオン核反応断面積が全エネルギー領域で変化しますのでご注意ください。

5.2.15 ミューオン生成モデル

表 29: ミューオン生成モデルに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
igmuppd	(D=0) = 0 = 1	光子によるミューオン対の生成に関するオプション。 考慮しない。 考慮する。もし、生成されたミューオンの多重クーロン散乱を考慮したい場合は nspred=-2 としてください。
gmumul	(D=1.0)	光子によるミューオン対生成のサンプリング確率に乗じる倍率。

- 陽電子起因のミューオン対生成 ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$) に関しては [User Defined Interaction] に関する 5.29.1 節をご覧ください。
- **igmuppd** によるミューオン対生成の詳細については、文献⁵⁹ をご覧ください。

⁵⁹ Y. Sakaki et al., Implementation of muon pair production in PHITS and verification by comparing with the muon shielding experiment at SLAC, Nucl. Instr. & Meth. A 977, 164323 (2020).

5.2.16 ニュートリノ反応モデル

表 30: ニュートリノ反応モデルに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
ntrnore	(D=0)	ニュートリノ反応のオプション。
	= 0	ニュートリノの反応を考慮しない。
	= 1	ニュートリノの反応を考慮する。

ntrnore = 1 によって考慮されるのは、 $^1\text{H}(\bar{\nu}_e, e^+)n$ 反応、 $^2\text{H}(\bar{\nu}_e, \bar{\nu}'_e)np$ 反応、 $^2\text{H}(\nu_e, e^-)2p$ 反応、 $^2\text{H}(\nu_e, \nu'_e)np$ 、電子との弾性散乱反応です。入射エネルギーが 20 MeV 以上では一部の反応で断面積の外挿を行います。ただし、入射エネルギーが 150 MeV 以上の反応チャンネル（例： μ ニュートリノの荷電カレント反応）は、考慮されませんのでご注意ください。表 31 に、考慮しているニュートリノ反応の有無を標的粒子毎にまとめました。考慮している場合は、その上限エネルギーを示しています。

表 31: 各標的粒子に対するニュートリノ反応の上限エネルギー。これより高いエネルギーでは外挿した値を使用します。×は未実装、-は反応が存在しないことを表します。

荷電カレント反応				中性カレント反応			
	e^-	^1H	^2H		e^-	^1H	^2H
ν_e	∞	-	20	ν_e	∞	×	20
$\bar{\nu}_e$	-	150	20	$\bar{\nu}_e$	∞	×	20
ν_μ	×	-	×	ν_μ	∞	×	20
$\bar{\nu}_\mu$	-	×	×	$\bar{\nu}_\mu$	∞	×	20
ν_τ	×	-	×	ν_τ	∞	×	20
$\bar{\nu}_\tau$	-	×	×	$\bar{\nu}_\tau$	∞	×	20

[User Defined Interaction] の機能を用いて、より高エネルギーのニュートリノ反応をシミュレートすることができます。詳細は 5.29.1 節をご覧ください。

5.2.17 クーロン散乱や重力場・電磁場に関するオプション

表 32: クーロン散乱に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
nspred	(D=0) = 0 = 1 = 2	電子・陽電子を除く荷電粒子のクーロン散乱 (angle straggling) オプション ⁶⁰ 。 クーロン散乱を考慮しない クーロン散乱を考慮する。NMTC オリジナル (推奨) クーロン散乱を考慮する。Moliere 理論に基づく Lynch の式 ⁶¹ -1, -2 で指定することもできます。負値で指定した場合は常にクーロン散乱を考慮し、正值で指定した場合は線源粒子が一度反応を起こすまで考慮します。計算時間短縮のため、通常の計算には 0 もしくは正值を奨励していますが、希薄な大きい体系中の荷電粒子の輸送計算やミューオンのような透過性の高い荷電粒子の輸送計算の場合は負値を設定してください。
ascatl	(D=13.6)	Lynch の式 (下記参照) の係数 A 。nspred = 2 の場合のみ有効。
ascatl2	(D=0.038)	Lynch の式 (下記参照) の係数 B 。nspred = 2 の場合のみ有効。
nedisp	(D=0) = 0 = 1	電子・陽電子を除く荷電粒子の減速過程におけるエネルギー分散 (energy straggling) のオプション。 エネルギー分散を考慮しない。 (推奨) エネルギー分散を考慮する。Landau Vavilov ⁶²

⁶⁰ 厚さが 1cm 以下の薄膜等による散乱計算を行う場合は、**del1t0** をその厚さの 1/10 に設定してください。

⁶¹ $\sigma = A \frac{\sqrt{X/X_0}}{p\beta} [1 + \frac{B}{\log_{10}(e)} \log_{10}(X/X_0)]$; G.R. Lynch and O.I. Dahl, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res, B 58, 6-10 (1991) の式 (12).

⁶² 本モデルについては、次のウェブサイトをご覧ください。 <http://www.dnp.fmph.uniba.sk/cernlib/asdoc/geantold/H2GEANTPHYS332.html>

表 33: 重力場・電磁場に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
gravx	(D=0)	重力場の方向ベクトルの x 成分
gravy	(D=0)	重力場の方向ベクトルの y 成分
gravz	(D=0)	重力場の方向ベクトルの z 成分
usrmgt	(D=1) = 1 = 2	[magnetic field] で time を指定した時のユーザーサブルーティンオプション usrmgt1.f を使用、現在、Wobbler magnet がインストール usrmgt2.f を使用、現在、中性子用パルスマグネットがインストール
usrelst	(D=1) = 1 = 2	[elastic option] でのユーザーサブルーティンオプション usrelst1.f を使用、現在、中性子用 Bragg 散乱用プログラム usrelst2.f を使用、現在、中性子用サンプルプログラム
imagnf	(D=0) = 0 = 1	磁場のオプション = 0 磁場を考慮しない = 1 磁場を考慮する。数 cm 以下の距離で軌道が大きく曲がる強い電磁場やエネルギーの低い荷電粒子の軌道を計算したい場合は、磁場中での最大飛行メッシュ (deltg) を小さく設定してください (ただし、電子・陽電子は除く)。
ielctf	(D=0) = 0 = 1	電磁混合場のオプション = 0 電磁混合場を考慮しない = 1 電磁混合場を考慮する。数 cm 以下の距離で軌道が大きく曲がる強い電磁場やエネルギーの低い荷電粒子の軌道を計算したい場合は、電磁場中での最大飛行メッシュ (deltg) を小さく設定してください (ただし、電子・陽電子は除く)。

gravx, **gravy**, **gravz** は、重力場の方向ベクトル。重力を設定したときは、1 eV 以下の中性子に作用します。**gravx=1**, **gravy=0**, **gravz=0** を指定したときは、x 負方向に重力が作用します。

5.2.18 出力オプション (1)

表 34: 出力オプションに関するパラメータ 1

パラメータ	値	説明
infout	(D=7)	file(6) に出力する情報を指定するオプション。 下記 I, II, III, IV, V, VI は出力情報のカテゴリを表し、詳細は 4.8 節の「標準出力 (phits.out) の書式」を参照。
	= 0	I
	= 1	I, II
	= 2	I, III
	= 3	I, IV
	= 4	I, II, III
	= 5	I, II, IV
	= 6	I, III, IV
	= 7	I, II, III, IV, VI
	= 8	I, II, III, IV, V, VI
ncvalout	(D=0)	ユーザー定義定数 <i>ci</i> として定義した数値を file(6) に出力するオプション。このパラメータで指定した回数だけ出力します。
nrecover	(D=0)	Lost particle が発生して recover に成功した場合に、warning message を出力する回数。
ierrout	(D=0)	エラーや警告が表示された際、そのメッセージを出力したソースコードのプログラム名、サブルーチン名、行番号を出力するオプション。
	= 0	上記情報を出力しない。
	= 1	上記情報を出力する。例えば、---L:22332/R:param/F:read02.f と出力された場合、read02.f の 22332 行目、サブルーチン（もしくはファンクション）param でメッセージが出力されたことを意味します。
idmprijk	(D=0)	デバッグ用乱数出力オプション（速度低下あり。OFF 推奨）
	= 0	rijkdmp.inp ファイルを作成しない。
	= 1	ヒストリの乱数値を rijkdmp.inp ファイルに書き出す。ファイルはヒストリ毎に上書きされ、（異常）終了時の最新乱数値が得られる。MPI 使用時は MPI プロセス毎に rijkdmp***.inp を作成。ここで***は PE 番号。なお、OpenMP 並列計算では動作しません。

5.2.19 出力オプション (2)

表 35: 出力オプションに関するパラメータ 2

パラメータ	値	説明
dumpall	(D=0)	全ての情報のダンプオプション
	= 0	出力なし
	= 1	ファイル名 file(15) の dumpall ファイルにバイナリ形式でデータを出力
	= -1	ファイル名 file(15) の dumpall ファイルにアスキー形式でデータを出力
idpara	(D=3)	メモリ分散型並列計算の時、dumpall ファイル名のオプション
	= 0	/wk/uname/ファイル名 file(15)
	= 1	/wk/uname/ファイル名 file(15) の後に PE 番号を付加
	= 3	ファイル名 file(15) の後に PE 番号を付加

dumpall=1, -1 を指定すると、輸送に関して全ての情報をファイルに書き出します。このファイルを基に、icntl=12 を指定して再計算ができます。最初に計算したときと異なるタリーを入れて再計算したいときなど有効です。ただし、dumpall の機能を利用するときは、巨大なデータファイルが作成されることがありますから注意してください。実際にダンプする情報は、5.2.26 のところで解説します。

“/wk/uname/”にある“/wk/”と“/uname/”はそれぞれデフォルトのディレクトリ名と環境変数 LOGNAME から読み込まれるユーザー名です。メモリ分散型並列計算時は PE (Processor Element) 毎に別のファイルを用意して書き出します。idpara=0, 1 の場合は、各 PE がもっているハードディスク中の“/wk/uname/”のディレクトリにファイルを作成します。idpara =1, 3 の場合は、ファイル名の最後に各 PE 番号を付けて総 PE 数 -1 個のファイルを作成します。各 PE は対応するファイルにのみその PE で得られたデータを書き出します。

5.2.20 出力オプション (3)

表 36: 出力オプションに関するパラメータ 3

パラメータ	値	説明
itall	(D=0)	タリーの出力をバッチ毎に行うオプション。
	= -1	出力なし。
	= 0	数値データのみ出力する。
	= 1	数値データおよび画像ファイル (*.eps など) を出力する ⁶³ 。
	= 2	各バッチ終了時に数値データを異なるファイルに出力する。ファイル名は、指定のファイル名にバッチ番号を付けたもの。
	= 3	タリー結果とその統計誤差がヒストリー数（或いはバッチ数）によって、どのように推移するかを表示させる。タリーセクションで指定したファイル名の拡張子の前に “.Std” を付けたファイルに出力する。ただし、この機能は [t-track] と [t-point] でのみ動作します。
iMeVperu	(D=0)	タリー出力におけるエネルギーの単位に関するオプション。
	=0	MeV として出力する。
	=1	MeV/n（核子あたりの量）として出力する。ただし、原子核以外については MeV として出力します。
itstep	(D=1)	magnetic field などの粒子の運動量に変化する場でのタリーを取るオプション
	= 0	境界、核反応までタリーを取らない
	= 1	ステップごとにタリーを取る
imout	(D=0)	[material] セクションでの物質表示オプション
	= 0	mat[12], 208Pb.33c タイプ
	= 1	mat[12], Pb-208.33c タイプ
	= 2	m12, 82208.33c MCNP 入力タイプ
jmout	(D=0)	[material] セクションでの物質密度表示オプション
	= 0	入力のまま
	= 1	粒子密度に変換する
	= 2	質量比 (%) に変換する
kmout	(D=0)	核データ物質情報表示オプション
	= 0	表示無し
	= 1	input echo に表示する バージョン 2.86 より、核種毎の dmax も出力されるようになりました。

iMeVperu=1 とした場合、[t-track], [t-cross], [t-point], [t-product], [t-time], [t-interact] において、原子核のエネルギーの単位を核子あたりの量 [MeV/n] に変換して、各物理量を出力します。例えば、[t-track] において unit=2 とした場合、[1/cm²/MeV/source] ではなく [1/cm²/(MeV/n)/source] を単位とする結果が出力されます。

磁場など粒子の運動量を変化させる場がある時、[t-track] で表示する磁場中の軌跡は deltm をステップ幅として表現します。もし、粒子の軌跡を滑らかに表示したい場合は、deltm の値を小さくしてください。

⁶³ ただし、vtk ファイルに関しては itall=0,1 の両方で出力されます。

5.2.21 出力オプション (4)

表 37: 出力オプションに関するパラメータ 4

パラメータ	値	説明
matadd	(D=1) = 0 = 1	[cell] セクションにおいて同一の物質番号を用いて密度が異なる領域を定義した場合のオプション。 同じ物質番号で扱う。 新しい物質番号を付与する。
natural	(D=1) = 0 = 1 = 2	[material] セクションにおいて質量数を指定せずに行った元素に対し、天然存在比による展開を行うかどうかのオプション。核データライブラリーの使用時のみ関連し、核反応モデル計算の際はこのパラメータの値に関係なく常に展開します。 = 0 展開しない ⁶⁴ 。 = 1 展開する。ただし、 file(6) には展開せず書き出す。 = 2 展開する。ただし、 file(6) に展開した結果を書き出す。
iggcm	(D=0) = 0 = 1	ジオメトリに関する warning 等のメッセージをエコーする = 0 エコーしない = 1 インプットエコー部分に書き出す
icput	(D=0) = 0 = 1	CPU 時間のカウントオプション = 0 カウント無し = 1 カウント有り
ipara	(D=0) = 0 = 1	パラメータ表示オプション = 0 入力のみを表示 = 1 全てを表示
nwsors	(D=0)	nwsors 個のソース情報を file(6) に書き出す
gsline	(D=2) = 0 = 1 = 2 = 3	各タリーの gslat を一括で設定するパラメータ。基本的には gsline=gslat となりますが、各タリーで gslat を明示的に指定した場合、そちらのパラメータの方が優先されます。 = 0 境界線を描画しない。 = 1 境界線を描画する。(ただしボクセルファントムはきれいに描画されません。) = 2 同じセルの場合は境界線を描画しない。 = 3 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。 また、 gsline=2,3 の場合、 gshow ≥ 3 としても、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。

[**cell**] セクションにおいて同一の物質番号で密度の違う領域を複数定義した場合、デフォルト設定 (**matadd=1**) では、最初のもの以外の密度の物質に対して新しい物質番号を付与します。**matadd=0** とすることで同じ物質番号を指定できるようになりますが、[**Mat Name Color**] セクションで指定する物質番号には影響がないのでご注意ください。すなわち、このセクションでは自動的に付与された新しい番号を指定する必要があります。この番号は **file(6)** (**D=phits.out**) の最初に **Warning** として出力されますので、その値をご参照ください。

計算時間短縮のため、**cpu** 時間のカウントをデフォルトで無しにしました。各過程の計算時間を知りたい時は、**icput=1** として下さい。

input echo の入力パラメータの表示は、デフォルトで入力のあったものだけですが、**ipara=1** とすれば全てのパラメータのデフォルト値がエコーされます。

⁶⁴ 使用している核データライブラリーに指定した天然元素がない場合、エラーメッセージを出力します。

5.2.22 ボクセル及び連続四面体形状のオプション

表 38: ボクセルのオプションに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
icells	(D=3)	[cell] セクション全体のバイナリ形式による出力・読込。複雑な体系の場合、一度バイナリ化して再読込することにより計算時間が短縮されます。ただし、一つ一つの cell の定義が単純で cell 数が多い場合は、むしろ計算時間が長くなってしまう場合もありますのでご注意ください。また、icells=1 でバイナリ形式のファイルを読み込む際、[surface] と [cell] セクションの記述を消したりしないようにしてください。他に、同一の物質番号を用いて密度が異なる領域を定義した場合は本機能を使用しないようにしてください。
	= 0	バイナリの入出力なし。[cell] のエコーを出力しない。
	= 1	file(19) からバイナリ形式のジオメトリを読み込む。[cell] のエコーを出力しない。ivoxel は自動的に 1 になる。
	= 2	file(19) にバイナリ形式のジオメトリを出力する。ivoxel は自動的に 2 になる。
	= 3	通常モード。バイナリの入出力なし。[cell] のエコーは出力する。
ivoxel	(D=0)	ボクセルデータのバイナリ形式による出力・読み込み。
	=0	出力なし。
	=1	ファイル名 file(18) からバイナリ形式のボクセルデータを読み込む。
	=2	ファイル名 file(18) にバイナリ形式のボクセルデータを出力する。
	=3	=0 と同じ動作。ただし、ボクセルデータを入力ファイルエコーに出力（これ以外のオプションでは非表示）。

ivoxel=2 を指定すると、ボクセルデータをバイナリ形式でファイル名 file(18) に出力して計算を終了します (バージョン 2.30 以前では、終了せずに引き続き計算を行います)。その後、このデータファイルがある状態で ivoxel=1 として再度 PHITS を実行させると、通常一時的に行うバイナリデータの作成を省略して、以後の計算を行います。PHITS では、読み取ったインプットデータを一時的にバイナリ形式で書き出し、それを読み込んでから粒子輸送計算を行います。したがって、読み込むデータ量が大きくなると、それに比例して書き出しの際の計算時間がかかることになります。ivoxel を利用すると、バイナリデータの書き出しを省略するため、何度も PHITS を実行する場合に計算時間が短縮されます。ただし、このパラメータが使えるのは、fill 以降が単純な universe 番号の並びになっている場合のみで、座標変換などが含まれる場合 (例えば 3(1 0 1) など) はエラーとなってしまいますのでご注意ください。

表 39: 連続四面体形状のオプションに関するパラメータ

パラメータ	値	説明
itetvol	(D=0) =0 =1	連続四面体形状利用時 (LAT=3) における体積の自動計算。 自動で計算しない。 自動で計算しタリーなどで体積の値として使用する。
itetra	(D=0) =0 =1 =2	連続四面体データのバイナリ形式による出力・読み込み。バイナリファイルは ntetsurf や ntetelem に依存しますので、それらのパラメータを変更した場合は、再度、 itetra=2 としてバイナリファイルを作り直してください。 出力なし。 ファイル名 file(30)(D=Tetra.bin) からバイナリ形式の連続四面体データを読み込む。 ファイル名 file(30)(D=Tetra.bin) にバイナリ形式の連続四面体データを出力する。
ntetsurf	(D=100)	連続四面体計算のメッシュ分割の際に、一つの領域に許容する連続四面体の外部面の数。
ntetelem	(D=200)	連続四面体計算のメッシュ分割の際に、一つの領域に許容する四面体の数。
itetauto	(D=0) =0 =1	連続四面体 universe に対応する領域の自動作成。 自動で作成しない。 自動で作成する。TetGen 形式では.txt ファイル要。
itgchk	(D=0) =0 =1	連続四面体形状として許されない体積ゼロの四面体や四面体同士の交差の有無をチェックするオプション。 チェックしない。 チェックを実行し、実行後に即終了する ⁶⁵ 。輸送計算等を実行したい場合は 0 を選択。最初に検知された四面体体系の異常を “tet-geoerr.inp” ファイルに出力する。PHIG3D を使って状況の確認が可能。

itetvol=1 を指定することで、連続四面体形状 (LAT=3) を使用している場合に、連続四面体形状内に現れる Universe の体積を自動で計算して使用します。ただし、単純に四面体の体積を足し上げるため、Universe と Fill の入れ子構造で、連続四面体形状の一部を切り出して使用している場合などは、正しい体積の値とならないので、注意が必要です。**itetvol=1** が指定されている場合は上記の計算値が Volume セクション等での指定よりも優先されます。

itetra=2 を指定すると、連続四面体形状を読み込んで輸送計算に必要な情報データを生成した後に、その情報をバイナリ形式でファイル名 **file(30)(D=Tetra.bin)** に出力して計算を終了します。その後、このデータファイルがある状態で **itetra=1** として再度 PHITS を実行させると、データ処理を省略して必要情報をファイルから読み込みます。四面体数の多い連続四面体データを使用する際には、データ処理に計算時間がかかるため、同じ連続四面体形状を使用して何度も PHITS を実行する場合には、計算時間の短縮が図れます。

連続四面体形状を使用する計算では、計算スピードを向上させるため、形状を収めた直方体を自動で細分化し、個々の領域に入る四面体の数を減らす二種類のアルゴリズムが組み込まれています。一つは、連続四面体の外側から連続四面体内へと粒子が入射される場合にどの四面体の面を通過するかの判定に使用するアルゴリズムで、領域を細分化して一つの領域に含まれる外部面の数を **ntetsurf** 以下に限ることで、輸送計算を高速化します。もう一つは、連続四面体内に線源が存在する場合に、放射線が発生する位置がどの四面体に属するかの判断に使用するアルゴリズムで、領域を細分化して、一つの領域に含まれる四面体

⁶⁵ 1 以外にも 10 以下の数値 **n** を指定することで、**n** 番目に検知された四面体の異常な体系を “tet-geoerr.inp” ファイルに出力します。ただし、検知は 10 個で終了するため、11 以上を指定するとファイルが出力されません。

の数を **ntetelem** 以下に限ることで、輸送計算を高速化します。

itetauto=1 を指定すると、連続四面体形状の各四面体の要素 **universe** に対応する領域を自動で作成します。連続四面体形状の構成物質が増えた場合に領域を手作業で作成する手間が省けます。主に **NASTRAN** バルクデータ形式で連続四面体形状を読み込む場合に便利です。詳しくは 5.6.5.4 をご参照ください。

5.2.23 幾何形状のエラー関係

表 40: 幾何形状のエラー関係のパラメータ 1

パラメータ	値	説明
nlost	(D=10)	lost particle の許容値 (1PE あたり)
igerr	(D=1)	region error 時の recovery 回数
igchk	(D=0)	=0: 領域横断後の幾何形状チェックを行いません。 =1: 領域横断後の flight mesh を deltb に設定し、幾何形状のチェックを行います。
ichkmat	(D=0) = 0 = 1	[cell] セクションにおいて同一の物質番号を用いて密度が異なる領域を定義した場合に、各 cell の物質番号と密度をチェックするオプション。 チェックしない。条件により gshow でジオメトリが正しく描画できない場合があります。ただし、計算結果には影響を与えません。 チェックする。gshow でジオメトリが正しく描画できますが、cell 数が多い体系の場合、読込時間が長くなります。
deltb	(D=1.e-9)	領域横断後の flight mesh (cm) igchk=1 で、この距離で幾何形状のチェックを行います。 また、importance, forced collision で追加される粒子の境界面からの距離。また、source で粒子が境界上にあるときの移動距離としても使います。

igchk=1 とすると、輸送粒子が領域の境界面を横断した後に **deltb** “flight mesh.” だけ粒子を移動させて幾何形状のチェックを行います。具体的には粒子の運動方向に沿って境界面から **deltb** のみ移動させます。幾何形状のチェックとはその粒子がどの領域に属しているかを判定するものであり、境界面が曲面となる領域を粒子輸送する際に重要となる機能です。

表 41: 幾何形状のエラー関係のパラメータ 2

パラメータ	値	説明
deltm	(D=20.12345)	最大飛行メッシュ(cm)。 idelt に連動。
deltc	(D=2.012345)	電子・陽電子を除く荷電粒子に関して、エネルギーもしくは角度分散を考慮した場合 (nedisp ≠ 0 もしくは nspred ≠ 0) の最大飛行メッシュ [cm]。密度が 1.0 g/cm ³ 以上の場合は idelt に連動する。
delt0	(D=0.1)	角度分散を考慮した場合 (nspred ≠ 0) の境界面直前の最大ステップ長。境界面を跨ぐ際に角度分散を考慮すると lost particle が発生してしまうため、この最終ステップ長に対しては角度分散を考慮しません。したがって、厚さが 1 cm 以下の薄膜等による散乱計算を行う場合は、散乱を正確に記述するためにその厚さの 1/10 に設定してください。
deltg	(D=1.012345)	電子・陽電子を除く荷電粒子に関して、電磁場における最大飛行メッシュ(cm)。
deltt	(D=1.0)	時間に依存した磁場における最大飛行時間 (msec)。
deltxyz	(D=0.0001)	[weight window] 及び [t-wwg] の xyz メッシュ最大値・最小値が整数で定義された場合の自動調整幅。具体的には、最小値は $-1 \times \text{deltxyz}$ 、最大値は $+2 \times \text{deltxyz}$ ずらしします。
idelt	(D=1)	最大飛行メッシュに関するオプション。 =0: 最大飛行メッシュとして deltm , deltc を使用。 =1: deltm , deltc を領域の密度で割った値を最大飛行メッシュとする。ただし、密度が 1.0 g/cm ³ 以下の場合は、 deltc は密度で割らずにそのまま使用する。

バージョン 2.80 以降、**idelt**=1 となっており、**deltm**, **deltc** を領域の密度 (g/cm³) で割った値が最大飛行メッシュとして使われます。これにより、数百 m 以上の空気中の粒子輸送計算を行う場合に、計算時間が短縮されます。

5.2.24 入出力ファイル名

表 42: 入出力ファイル名に関するパラメータ

パラメータ	値	説明
file(1)	(D=PHITSPATH)	PHITS インストールフォルダ名。環境変数 PHITSPATH が設定されていない場合は c:/phits がデフォルトとなります。このパラメータを指定することにより、フォルダ構造を変えない限り他の入力ファイル名 file(7,20,21,24,25,26) の指定が不要となります。ただし、それらのパラメータを直接指定した場合は、指定値が優先されます。
file(6)	(D=phits.out)	サマリーの出力ファイル名。指定しない時は、標準出力。
file(7)	(D=file(1)/data/xsdir.jnd)	断面積ディレクトリファイル名。
file(10)	(D=fort.10)	計算打切エネルギー以下の陽子情報の出力ファイル名。
file(11)	(D=nuc1cal.out)	核反応計算の出力ファイル名。
file(12)	(D=fort.12)	計算打切エネルギー以下の中性子情報の出力ファイル名。
file(13)	(D=fort.13)	計算打切エネルギー以下の γ 線情報の出力ファイル名。
file(15)	(D=dumpall.dat)	dumpall=1 を指定した場合の出力ファイル名。
file(18)	(D=voxel.bin)	ivoxel=1, 2 を指定した際のバイナリデータ用ファイル名。
file(19)	(D=gcell.bin)	icells=1,2 を指定した際のバイナリデータ用ファイル名。指定したファイル名と、そのファイル名に .cfg の拡張子を付けた 2 つのファイルが生成されます。
file(20)	(D=file(1)/XS/egs/)	EGS5 用断面積データを格納したフォルダ名。 negs=1,2 のときに必要。
file(21)	(D=file(1)/dchain-sp/data/)	DCHAIN 用データを格納したフォルダ名。
file(22)	(D=batch.out)	現在のバッチ情報を出力するファイル名。
file(23)	(D=pegs5)	PEGS5 用出力ファイル名。
file(24)	(D=file(1)/data)	DECDC データ (RIsorce.dat) を格納したフォルダ。
file(25)	(D=file(1)/XS/tra)	飛跡構造解析モード用の断面積データを格納したフォルダ名。
file(26)	(D=file(1)/data/multiplier)	付録の [multiplier] セクションデータベースを格納したフォルダ名。
file(27)	(D=file(1)/XS/yield/)	ユーザー指定の放射化断面積を格納したフォルダ名。指定する場合はフォルダ名の最後に “/” を入れてください。
file(28)	(D=file(1)/data/aama.dat)	ユーザー指定の MUONIC ATOM CASCADE program 用入力ファイル名。
file(29)	(D=file(1)/data/dedx)	阻止能データベースファイルを格納したフォルダ名。
file(30)	(D=Tetra.bin)	itetra=1,2 を指定した際のバイナリデータ用ファイル名。

バージョン 2.74 より、 $|\text{igamma}| \geq 1$ のときでも、 γ 崩壊情報データファイル **trxcrd.dat** を **file(14)** に指定する必要がなくなりました。

5.2.25 その他

表 43: その他のパラメータ

パラメータ	値	説明
inucr	 = 2 = 12 = 14 = 16 = 100	断面積・カーマファクター出力モード (icntl=1) のオプション。詳細は“ phits/sample/icntl1 ”を参照 1つの核種に対する弾性・非弾性散乱反応断面積の出力。 1つの物質に対する中性子カーマ係数の出力。 1つの物質に対する光子カーマファクターの出力。 1つの物質に対する阻止能の出力。 核データライブラリ断面積（微分断面積、反応タイプ毎の断面積）の出力。
idam(i) rdam(i)	integer real*8 i = 1 - 100	ユーザー定義の整数変数 ユーザー定義の実数変数 これらは、各プログラムの中で common /userp/ idam(100), rdam(100) を引用すれば用いることができる
icommat	(D=0) = 0 = 1	[material] セクションにおけるコメント文字のオプション。 行頭の c (は空白文字) をコメント文字として扱わない。 行頭の c (は空白文字) をコメント文字として扱う。

バージョン 2.89 より、デフォルトでは **[material]** セクションにおいて行頭の **c** (は空白文字) をコメント文字として使用できなくなりました。コメント文字として使用したい場合は、**icommat=1** としてください。

5.2.26 Dumpall オプション

`dumpall=1`, `-1` を指定して計算すると、再計算に必要な輸送の情報を全てファイルに書き出します。このファイルを用いて `icntl=12` を指定すると、同じ `dumpall` の値で計算した時にダンプしたデータを基に再計算します。輸送に関しては、最初に計算した全ての情報を再現します。再計算の時には、最初に計算したインプットファイルが必要になります。タリーを除いて同じものを使わないと矛盾が生じます。`maxcas`, `maxbch` は、ダンプファイルに指定されているものを使いますので変更できません。最初に計算したときと異なるタリーを入れて再計算したいときなど有効です。ただし、`dumpall` の機能を利用するときは、巨大なデータファイルが作成されることがありますから注意してください。

バイナリ形式で書き出したデータは、マシン間での互換性がないので注意してください。以下に書き出されるデータの種類と順序を説明します。

(1) NCOL

NCOL は、プログラムの中の変数で、粒子輸送のタイミングの認識変数です。

NCOL

- 1 : start of calculation
- 2 : end of calculation
- 3 : end of a batch
- 4 : source
- 5 : detection of geometry error
- 6 : recovery of geometry error
- 7 : termination by geometry error
- 8 : termination by weight cut-off
- 9 : termination by time cut-off
- 10 : geometry boundary crossing
- 11 : termination by energy cut-off
- 12 : termination by escape or leakage
- 13 : (n,x) reaction
- 14 : (n,n'x) reaction
- 15 : sequential transport only for tally
- 16 : surface cross for WW of xyz mesh

NCOL=1, 2, 3 の時は、書き出しは NCOL だけです。従って、以下の書き出しは、NCOL \geq 4 の時です。

(2) NOCAS, NOBCH, RCASC, RSOUIN

これら 4 つの変数は、NCOL=4 の時にだけ書き出されます。それぞれの意味は、

- NOCAS : current event number in this batch
- NOBCH : current batch number
- RCASC : real number of NOCAS+maxcas*(NOBCH-1)
- RSOUIN : sum of the weight of source particle

(3) NO, MAT, ITYP, KTYP, JTYP, MTYP, RTYP, OLDWT

これらの変数の意味は、

NO : cascade id in this event
 MAT : material id
 ITYP : particle type
 KTYP : particle kf-code
 JTYP : charge number of the particle
 MTYP : baryon number of the particle
 RTYP : rest mass of the particle (MeV)
 OLDWT : weight of the particle at (x,y,z)

(a) QS

この変数は、ITYP=12, 13 の時、すなわち電子、陽電子の時のみ出力されます。QS は、電子の dE/dx です。

QS : dE/dx of electron at (x,y,z)

(4) IBLZ1, IBLZ2, ILEV1, ILEV2

これらの変数の意味は、

IBLZ1 : cell id at (x,y,z)
 IBLZ2 : cell id after crossing
 ILEV1 : level structure id of the cell at (x,y,z)
 ILEV2 : level structure id of the cell after crossing

(a) ILAT1

階層構造をもつ CELL の変数です。書き出しは、ILEV1>0 の時に

```
write(io) ( ( ILAT1(i,j), i=1,5 ), j=1,ILEV1 )
```

で行われます

(b) ILAT2

階層構造をもつ CELL の変数です。書き出しは、ILEV2>0 の時に

```
write(io) ( ( ILAT2(i,j), i=1,5 ), j=1,ILEV2 )
```

で行われます

(5) COSTH, UANG(1), UANG(2), UANG(3), NSURF

各変数の意味は以下の通りです。これらはバージョン 2.30 から出力されるようになりました。

COSTH : cosine of an angle of incidence in a surface crossing
 UANG(1,2,3) : x,y,z component of a normal vector of its surface, respectively
 NSURF : internal number of the surface

Note that this is different from the surface number defined in the [surface] section

(6) NAME, NCNT(1), NCNT(2), NCNT(3)

これらの変数の意味は、

NAME : collision number of the particle
 NCNT(1,2,3) : values of counter 1, 2, and 3

(7) WT, U, V, W

これらの変数の意味は、

WT : weight of the particle at (xc,yc,zc)
 U, V, W : unit vector of momentum of the particle

(8) E, T, X, Y, Z

これらの変数の意味は、

E : energy of the particle at (x,y,z) (MeV)
 T : time of the particle at (x,y,z) (nsec)
 X, Y, Z : position coordinate of the preceding event point (cm)

(9) EC, TC, XC, YC, ZC

これらの変数の意味は、

EC : energy of the particle at (xc,yc,zc) (MeV)
 TC : time of the particle at (xc,yc,zc) (nsec)
 XC, YC, ZC : position coordinate of the particle (cm)

(10) SPX, SPY, SPZ

これらの変数の意味は、

SPX, SPY, SPZ : unit vector of spin direction of the particle

(11) NZST

この変数は粒子がもつ電荷 (charge state) を表します。

(12) NCLSTS

この変数は、Collision が起こった時に、すなわち、NCOL=13, 14 の時にのみ書き出されます。意味は、衝突もしくは崩壊による生成粒子の個数です。原子核も含みます。NCLSTS>0 の時に、次の変数が書き出されます。

(a) MATHZ, MATHN, JCOLL, KCOLL

これらの変数の意味は、

MATHZ : Z number of the mother nucleus
 MATHN : N number of the mother nucleus
 JCOLL : reaction type id1
 KCOLL : reaction type id2

JCOLL, KCOLL はそれぞれ次のような意味を持ちます。

JCOLL

- 0 : nothing happen
- 1 : Hydrogen collisions
- 2 : Particle Decays
- 3 : Elastic collisions
- 4 : High Energy Nuclear collisions
- 5 : Heavy Ion reactions
- 6 : Neutron reactions by data
- 7 : Photon reactions by data
- 8 : Electron reactions by data
- 9 : Proton reactions by data
- 10 : Neutron event mode
- 11 : delta ray production
- 13 : Photon reactions by EGS5
- 14 : Electron reactions by EGS5

KCOLL

- 0 : normal
- 1 : high energy fission
- 2 : high energy absorption
- 3 : low energy n elastic
- 4 : low energy n non-elastic
- 5 : low energy n fission
- 6 : low energy n absorption

(b) ICLUSTS, JCLUSTS, QCLUSTS, JCOUNT

これらの変数は、各生成粒子の情報を記述するもので、**NCLSTS** だけ繰り返し、また、それぞれの変数も以下のように配列を持ちます。書き出しは以下のように行われます。

```
do i = 1, NCLSTS
  write(io) ICLUSTS(i)
  write(io) ( JCLUSTS(j,i), j=0,7)
  write(io) ( QCLUSTS(j,i), j=0,12)
  write(io) ( JCOUNT(j,i), j=1,3)
end do
```

これらの変数の意味は、

ICLUSTS kind of particle

- 0 : nucleus
- 1 : proton
- 2 : neutron
- 3 : pion
- 4 : photon
- 5 : kaon
- 6 : muon
- 7 : others

JCLUSTS(i)

- i = 0 : angular momentum
- = 1 : proton number
- = 2 : neutron number
- = 3 : ityp
- = 4 : status of the particle 0: real, <0 : dead
- = 5 : charge number
- = 6 : baryon number
- = 7 : kf code

QCLUSTS(i)

- i = 0 : impact parameter
- = 1 : x-component of unit vector of momentum
- = 2 : y-component of unit vector of momentum
- = 3 : z-component of unit vector of momentum
- = 4 : $e_{tot} = \sqrt{p^2 + m^2}$ (GeV)
- = 5 : rest mass (GeV)
- = 6 : excitation energy (MeV)
- = 7 : kinetic energy (MeV)
- = 8 : weight
- = 9 : time (nsec)
- = 10 : x coordinate (cm)
- = 11 : y coordinate (cm)
- = 12 : z coordinate (cm)

5.2.27 Event Generator Mode

通常、核データを使う計算では、イベント毎のエネルギーと運動量は保存しません。モンテカルロのシミュレーションを多数回繰り返して、平均を取ると、エネルギーと運動量が保存することが保証されます。これは、核データを用いたモンテカルロシミュレーションが、一体の Boltzmann 方程式を数値的に解いていることに対応しています。従って、核データを用いた計算では、一体の観測量しか計算できません。例えば、ある領域の熱量、フラックスなどです。これらは平均値です。また、モンテカルロ計算で用いる核データも一体 (inclusive) のデータしか含まれていません。平均値の周りの分散は、二体以上の分布関数に関係しますから、一体の Boltzmann 方程式では導くことはできません。例えば、PHITS の [t-heat] にある、deposit エネルギー分布は、平均値の周りの分散ですから、二体以上の分布関数によって決まる量です。ですから、核データを用いた計算では求めることができません。反応前と反応後で入射粒子と原子核が変化しないのであれば、つまり、弾性散乱だけが起こると仮定すると、一体の情報から全てのエネルギーと運動量が決まりますから、計算できるわけです。これは極めて例外的な状況で、反応後の生成粒子が変化したり、複数になったりすると破綻します。

高エネルギーの核反応に対しては、通常、核データが整備されていないので、カスケードモデル、JAM、QMD、等の核反応モデルを利用します。これらのモデルは、ひとつの核反応毎に、エネルギー、運動量の保存したモンテカルロ手法で核反応を計算します。このような核反応モデルを用いた輸送計算は、全体として、ひとつのイベント毎にエネルギー、運動量の保存したシミュレーションになっていますから、実際の現象を模擬するという意味で、Event Generator と呼ばれています。輸送コードとして、核データを使ったシミュレーションと似ていますが、概念的には全く異なるものです。このシミュレーションでは、ひとつのイベント毎の観測量は物理的に意味を持ちません。ヒストリーで平均した量だけが物理的に意味を持ちます。平均値周りのイベントによる分散も計算できますが、これは、モンテカルロ手法の統計分散で、物理的なものではありません。物理的な分散を記述する二体以上の相関の情報が核データにも基礎となる方程式にも含まれていないからです。一方、Event Generator では、観測量の分散は物理的な分散に対応します。その精度の問題はありますが、全ての相関を記述している枠組みになっています。高エネルギーのシミュレーションは、大抵この Event Generator になっていて、一体の観測量のほかに、コインシデンス実験の解析や、測定器のレスポンス関数のシミュレーションに応用することができます。

最近、低エネルギーの中性子の関係した分野でも、従来の一体の観測量、熱量やフラックスのほかに、deposit エネルギー分布、2 粒子相関などの高次の相関が含まれる物理量が求められてくるようになりました。例えば、半導体素子の放射線によるソフトエラーの問題、細胞の放射線による影響の問題などは、微視的な領域での deposit エネルギーの分散が問題になります。これらの問題に従来の核データを用いたこのシミュレーションでは対応することができません。そこで、PHITS では、核データを使う低エネルギー領域でも Event Generator としてシミュレートできるモデルを作りました。これが、e-mode = 1,2 で実行される EventGenerator Mode^{66 67 68} です。

このモデルの詳細は、他の論文を見ていただくこととして、ここでは、まず、モデルの概略を説明します。中性子入射反応で核データが記述するものは、全断面積、Capture、Elastic、(n, n')、(n, Nn') 等のチャンネル毎の断面積、それと放出粒子の inclusive な微分断面積です。これらの情報からは、残留核の運動量、2 粒子の相関などは一意に決められません。情報が足りないからです。そこで、PHITS では、これら核データの情報を用いるとともに、特殊な統計崩壊モデルを導入しました。まず、核データのチャンネル毎の断面積を用います。次に、チャンネル毎に次のようなモデルを設定します。まず、Capture の場合、入射中性子が Capture された場合の融合原子核の運動量、励起エネルギーは運動学的に一意に決定されますから、この原子核に、中性子の崩壊確率をゼロにした統計崩壊を行います。この場合、光子の放出、荷電粒子の放出だけが含まれる統計崩壊を行うことになります。e-mode = 1 では放出する粒子は区別されませんが、e-mode=2 にすると反応チャンネルを反映して放出する粒子を決定します。たとえば、(n, γ) 反応なら必ず光子のみを放

⁶⁶ Y. Iwamoto *et al.*, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007, DOI: 10.1051/ndata:07417.

⁶⁷ K. Niita *et al.*, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007, DOI: 10.1051/ndata:07398.

⁶⁸ Y. Iwamoto *et al.*, Prog. Nucl. Sci. Technol. 2, 931-935 (2011).

出、 (n, α) 反応なら α 粒子一個と光子のみを放出する、ということになります。次に、Elastic では、核データに従って、放出中性子の運動量を決定します。この運動量から運動学的に残留核の運動量が一意に決定されます。 (n, n') では、核データに従って、まず、放出中性子の運動量を決定します。この運動量から運動学的に残留核の運動量と励起エネルギーが一意に決定されますから、この原子核に、中性子の崩壊確率をゼロにした統計崩壊を行います。Capture の時と同じように、光子の放出、荷電粒子の放出だけが含まれる統計崩壊を行うことになります。Elastic では **e-mode=1** も **2** も結果は同じになります。最後に、 (n, Nn') 反応ですが、**e-mode=1** の場合はまず、核データを用いて一個目の放出中性子の運動量を決定します。この運動量から運動学的に残留核の運動量と励起エネルギーが一意に決定されますから、この原子核に、通常の統計崩壊を行います。即ち、中性子崩壊も含んだ、光子、荷電粒子の統計崩壊を行うことになります。この場合だけ、終状態の中性子の数が核データで指定された N になる保証はありませんが、そのずれは小さいことを確認しています。**e-mode=2** では、核データを元にした統計サンプリングを行うことで、 N 個の中性子全ての運動量を同時に決定します。この運動量から運動学的に残留核の運動量と励起エネルギーが一意に決定され、続いて光子放出のみを考慮する統計崩壊を行います。このとき終状態の中性子の数は必ず N 個となり、二個目以降の中性子の運動量も核データから決定されるため、**e-mode=1** より精度が上がります。このようなモデルを用いることにより、核データを用いた低エネルギーの中性子の反応も、イベント毎にエネルギー、運動量の保存した Event Generator になり、核データだけでは記述できなかった、残留核の運動量、2 粒子相関など全ての情報がイベント毎に記述できるようになります。

次に、**e-mode** を使う場合の注意点を示します。まず、**dmax(2)** を設定し、核データを用意し、中性子の核データによる計算を可能にします。粒子放出の精度をあげるために、原子核の基底状態の近くの励起状態の情報を必要としますので、**igamma=1-3** が必要になります。次に、統計崩壊モデルは、GEM 即ち **nevap=3** が必要です。これらは、**e-mode=1,2** を指定すると自動的に設定されます（特に指定しなければ **igamma** は 2 になります）。もし過去の計算と比較するなどの理由で **e-mode=1**, **igamma=1** を使いたい場合は、**igamma=1** としても計算はできます。

次に、**e-mode** を使うと可能になる新しい観測量を示します。**[t-deposit]** に関して、通常 **dmax(2)** 以下のエネルギーの中性子による付与エネルギーはカーマ近似によって計算しますが⁶⁹、**e-mode** を使う場合は、中性子反応から生成される 2 次荷電粒子や残留核の寄与を計算して付与エネルギーとします。当然この場合、中性子のカーマ近似による計算は考慮されません。**[t-yield]**, **[t-product]** では、通常、**dmax(2)** 以下のエネルギー、即ち、中性子の核データを使う領域の生成核種、生成粒子はタリーされませんが、これが可能になります。**[t-dpa]** は、通常 **dmax(2)** 以下のエネルギーの中性子による寄与を計算しませんが、**e-mode** を使うことで考慮できるようになります。

⁶⁹ バージョン 3.05 以降の仕様です。以前の version では、**[t-deposit]** ではカーマ近似を使った計算ができませんでした。

5.3 [Source] セクション

このセクションでは線源粒子の情報を定義します。粒子を発生させる領域の形状は **s-type** により指定し、表 44 にある値が選択できます。**[source]** で指定できるパラメータには、**s-type** 固有のものと共通のものがあり、同じパラメータでも **s-type** によって意味が変わる場合がありますのでご注意ください。これらの詳細については、次ページ以降の説明をご参照ください。

粒子のエネルギーは、単色であれば **e0** で指定し、分布をもつ場合は **e-type** により指定します⁷⁰。**e-type** の指定方法については、5.3.19 節をご覧ください。**[source]** セクションにおけるエネルギーの単位は、基本的に MeV/n (核子当たりの MeV) です。ただし、核子で構成されない粒子 (光子、電子、パイオン、ミューオンなど) の場合は、MeV です。

表 44: ソースタイプ

ソースタイプ	説明
s-type = 1, (4)	円柱 (円面、ペンシルビーム)。
s-type = 2, (5)	角柱 (長方形)。
s-type = 3, (6)	ガウス分布 (x, y, z 独立)。
s-type = 7, (8)	一般パラボラ分布 (x, y, z 独立)。
s-type = 9, (10)	球及び球殻分布。
s-type = 11	位相空間線源。
s-type = 12	Decay-turtle の出力を読み込む。
s-type = 13, (14)	ガウス分布 (xy 平面)。
s-type = 15, (16)	一般パラボラ分布 (xy 平面)。
s-type = 17	Dump data 線源 (dump ファイルの読み込み)。
s-type = 18, (19)	円錐形状。
s-type = 20, (21)	三角柱形状。
s-type = 22, (23)	xyz メッシュ空間分布。
s-type = 24	連続四面体線源。
s-type = 26	面上分布。
s-type = 100	ユーザー定義のソースプログラム。 usrsors.f にプログラムを書きこみコンパイルする。

表 44 中の **s-type**= の後にある括弧内の数字は、バージョン 2.94 以前の仕様です。なお、バージョン 2.95 以降で **e0** と **e-type** の両方が定義されている場合は、従来の **s-type** による指定が優先されますので、ご注意ください。例えば、**s-type**=1 であれば **e0** が、**s-type**=4 であれば **e-type** の定義が有効となります。

⁷⁰ バージョン 2.95 以降の仕様です。バージョン 2.94 以前は、**e0** と **e-type** のどちらを指定するかで、使用する **s-type** を使い分けていました。例えば、円柱形状で単色であれば **s-type**=1 とした上で **e0** を定義し、エネルギー分布をもつ円柱形状線源であれば、**s-type**=4 とした上で **e-type** を定義していました。

5.3.1 <Source> : マルチソース

マルチソースの機能を使用して、エネルギーや線種を変えた線源を複数定義することができます。各線源を、<source>=相対比、の書式で始まるサブセクションで定義し、各線源の相対的な強度を“相対比”として与えます。各<source>サブセクションでは1つの **s-type** を指定し、その指定に伴うパラメータを書きます。ただし、<source>=の上の行で **reg** パラメータを指定すると<source>の行が継続行として扱われてエラーになるため、**reg** は各<source>サブセクションの最後には書かないように注意してください。

totfact=は規格化定数を意味し、タリー結果にその絶対値が掛かります。この値が正の場合は、与えられた“相対比”にしたがって各線源の粒子を発生させます。一方、負の場合は、各線源の粒子を同確率で発生させ、与えられた相対比にしたがって各粒子のウェイトを変更します。線源強度の相対比が極端に違う場合は、**totfact** を負で与えることにより、強度の大小にかかわらず統計量を増やすことができます⁷¹。

表 45: マルチソース

パラメータ	説明
<source> =	マルチソースの開始、数字はこのソースの相対比。
totfact =	(D=1) マルチソース全体の規格化定数。 正の数で与えた場合、相対比に従ってソース粒子を生成。 負の数で与えた場合、同数のソース粒子を生成し、相対比に従って weight を変化させる。
iscorr =	(D=0) マルチソース相関オプション。 0: 通常のマルチソース。 1: 複数のマルチソースを1つのイベントとしてまとめて発生させる。核反応により生成する複数の2次粒子を1つのイベントとして計算したい場合などに用いる。ただし、 iscorr=2,3 の場合と違い、複数のソースが発生する場所は同一ではなく、それぞれが指定したソースの発生領域から確率的に選ばれる。 2: 1と同じく複数のマルチソースを1つのイベントとするが、2つ目以降の線源を1つ目の線源と同じ場所から発生させるオプション。任意の場所で発生する核反応を再現するときなどに使う。 3: 1と同じく複数のマルチソースを1つのイベントとするが、2つ目以降の線源を1つ目の線源と同じ場所から逆方向に発生させるオプション。任意の場所で2つに崩壊する粒子を再現するときなどに使う。 iscorr=1,2,3 の場合、<source>は整数の絶対値で定義する必要があります。また、規格化に関しては、発生した複数の放射線を1つの線源として扱いたい場合は、<source>で定義した数値の合計を totfact で指定してください。例えば、(X,1p2n) 反応を1つの線源として模擬する際は、陽子線源に対して<source>=1、中性子線源に対して<source>=2とし、 totfact=3 とします。逆に、発生した各放射線をそれぞれ1線源として扱いたい場合は、 totfact は iscorr=0 の場合と同じになります。

⁷¹ バージョン 3.04 以前では、ウェイトを変更する線源を設定すると、[t-deposit] で **output=deposit** とする場合や [t-deposit2] を使用する場合には利用できませんでした。

5.3.2 共通パラメータ

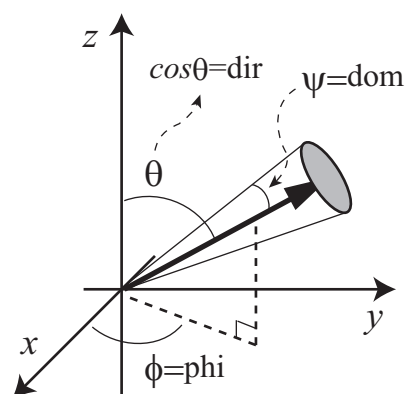
各ソースタイプに共通なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=**) のあるものは、省略可能です。原子核や軽複合粒子のエネルギーは、核子当たりで指定します。

表 46: 共通ソースパラメータ 1

パラメータ	説明
proj =	入射粒子：粒子の指定方法は表 4 を参照。
sx =	(D=0) スピンの方向ベクトルの x 成分。
sy =	(D=0) スピンの方向ベクトルの y 成分。
sz =	(D=0) スピンの方向ベクトルの z 成分。
reg =	(D=all) [cell] セクションで定義したセル番号を指定して、ソースを発生させる領域を限定します。すなわち、ソースタイプ毎に決まる領域とここで指定する領域が重なった部分からソースを発生させます。書式は reg = { 1 - 5 } 10 34 です。また、 reg = (6 < 10[1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造も指定できます。詳細は、6.1.1 節にあるタリーの領域指定箇所を参照して下さい。
ntmax =	(D=1000) 領域限定の際の最大再試行回数。
trcl =	(D=なし) 座標変換番号もしくは座標変換定義。
wgt =	(D=1.0) ソース粒子のウェイト。
factor =	(D=1.0) ソース粒子の規格化定数。全てのタリー結果を factor 倍します。ただし、マルチソースの場合は使えませんので、規格化は totfact を用いて行って下さい。また、マルチソースでない場合、 totfact * factor が実質的な規格化定数になります。
izst =	(D=proj で指定した粒子の電荷) 入射粒子の電荷 (charge state)。 [magnetic field] や [electro magnetic field] セクションで定義できる磁場や電場中の運動を記述する際にのみ使用されます。また、[parameters] において ifixchg=1 とした場合は、ATIMA で計算する阻止能もこの電荷となります。ここで指定した値は輸送の途中で変化しません。ただし、核反応で生成された原子核の電荷は Z に戻る。
cnt(i) =	(D=0) ソース粒子の counter 初期値。i は counter 番号 (i=1-3) に対応します。各<source>で異なるカウンター初期値を設定することにより、それぞれの寄与を区別してタリーすることが可能です。

入射粒子の方向は **dir**, **phi**, **dom** の 3 つパラメータを用いて指定します。図 8 にこれらと入射粒子の方向との関係を示します。入射粒子の方向を太い実線で表しており、極角と方位角をそれぞれ θ, ϕ とした場合に、 $\cos \theta = \text{dir}$, $\phi = \text{phi}$ の関係があります。ただし、**dir** は $\cos \theta$ の値を、**phi** は degree 単位の値を与えます。**phi** は省略可能で、その場合はランダムとなります。**dom** は入射粒子を発生させる際、一定の広がりをもたせる場合に利用します。**dir**, **phi** で決定した方向を中心に、平面角で $\psi = \text{dom}$ 、すなわち立体角として $2\pi(1 - \cos \psi)$ の範囲で入射粒子の方向をランダムに決定します。**dom** の値も degree 単位です。

入射粒子の方向を等方分布させたい場合は **dir=all** と設定します。他に、**dir=data** とし、その下に **a-type** サブセクションを用意することにより、任意の関数やデータの角分布をもつ線源を模擬できます。

図 8: 入射粒子の方向とパラメータ **dir**, **phi**, **dom** の関係

dir は、**s-type=9** とそれ以外で意味が違いますので注意してください。また、**s-type=11,12** では **dir= ±1** しか指定できません。

trcl の指定により、座標変換が使えます。**wgt** は、ソース粒子の初期ウエイトです。また、規格化定数 **factor** は、タリーなどの出力に乘じる定数です。**dump** ファイル読み込みの際に、オリジナルのソース当たりの出力にする場合などに便利です。**wgt** と **factor** は、逆数の関係になります。

スピンは、指定しないか全てゼロの場合は、未定義のまま磁場に入ります。この場合、磁場に入ったときの磁場の方向と偏極率に従い、初期スピンの定義されます。ここで、スピンの指定された場合は、磁場の定義の偏極率に関係なく、ここで定義されたスピンの方向で磁場に入ります。

表 47: 共通ソースパラメータ 2

パラメータ	説明
ispfs = 0, 1, 2	<p>(D=0) 自発核分裂からの中性子線源。(Version 3.31 以降、RI 線源機能 (e-type=28,29) でも自発核分裂中性子が再現できるようになりましたので、γ 線との混合場を表現する場合はそちらの利用を奨励します。)</p> <p>ispfs = 1,2 を指定し、proj として、U-238, Pu-238, Pu-240, Pu-242, Cm-242, Cm-244, Cf-252, Th-232, U-232, U-233, U-234, U-235, U-236, Np-237, Pu-239, Pu-241, Am-241, Bk-249 の放射性核種を指定した時、これらの核種が自発核分裂を起こした場合に放出される中性子を線源とすることができる。</p> <p>ispfs=1 の場合、タリーの計算結果が自発核分裂の回数当たりで規格化されます。これに対し、ispfs=2 の場合は、自発核分裂で発生した中性子 1 個当たりで規格化されます。</p> <p>この線源を使用した場合、[source] セクションで指定した e0 や e-type で指定されるエネルギー分布、dir や a-type で指定される角度分布は無視されます。RI 線源機能 (e-type=28,29) とは違い、proj で指定した粒子ではなく、中性子が線源粒子となりますのでご注意ください。</p>
ibatch =	<p>(D=all) itall=4 の場合に各マルチソースが有効となるバッチ番号を指定する。書式は all, もしくはバッチ番号です。{1-5} のように複数バッチ番号をまとめて指定することができます。</p>

ispfs を用いた中性子線源については、文献⁷²にあるデータを参照しました。また、本文献にあるデータを用いる際、これらのデータ及び記述する FORTRAN プログラムの開発については、株式会社ナイスの Liem Peng Hong 氏のご協力を得ました。ここに氏への謝意を表します。

次のように、**proj** に Pu-240 を指定し、**ispfs=1** とすると、Pu-240 の自発核分裂による放出される中性子が線源粒子となります。この場合、**e0** の値も定義されていますが、無視されます。

⁷² J. M. Verbeke, C. Hagmann, and D. Wright, "Simulation of Neutron and Gamma Ray Emission from Fission and Photofission", UCRL-AR-228518 (2014).

```
[ S o u r c e ]  
  s-type =   1  
    proj = 240Pu  
      e0 =  1.0  
      z0 =   0  
      z1 =   0  
      r0 =  0.0  
      dir = 1.0000  
    ispfs = 1
```

5.3.3 円柱分布ソース

円柱分布ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 48: 円柱分布ソースパラメータ

s-type = 1	円柱のとき。
x0 =	(D=0.0) 円柱の中心軸の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) 円柱の中心軸の y 座標 [cm]。
z0 =	(D=0.0) 円柱の z 軸方向の下限 [cm]。
z1 =	(D=0.0) 円柱の z 軸方向の上限（円面の場合は下限と同じ）[cm]。
r0 =	(D=0.0) 円柱の半径（ r0=0.0 のときペンシルビーム）[cm]。
r1 =	(D=0.0) 円柱の内半径 [cm]。中空部分を指定する。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、 a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.4 角柱分布ソース

角柱分布ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=**) のあるものは、省略可能です。

表 49: 角柱分布ソースパラメータ

s-type = 2	角柱のとき。
x0 =	(D=0.0) 角柱の下限の x 座標 [cm]。
x1 =	(D=0.0) 角柱の上限の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) 角柱の下限の y 座標 [cm]。
y1 =	(D=0.0) 角柱の上限の y 座標 [cm]。
z0 =	(D=0.0) 角柱の下限の z 座標 [cm]。
z1 =	(D=0.0) 角柱の上限の z 座標 (長方形の場合は下限と同じ) [cm]。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.5 ガウス分布ソース (x, y, z 独立)

このガウス分布は、 x, y, z 軸で独立なガウス分布です。ガウス分布 (x, y, z 独立) ソースタイプに必要なパラメーターを以下に示します。パラメーターの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 50: ガウス分布 (x, y, z 独立) ソースパラメータ

s-type = 3	ガウス分布 (x, y, z 独立) のとき。
x0 =	(D=0.0) ガウス分布の中心の x 座標 [cm]。
x1 =	(D=0.0) ガウス分布の x 方向の半値全幅 [cm]。
y0 =	(D=0.0) ガウス分布の中心の y 座標 [cm]。
y1 =	(D=0.0) ガウス分布の y 方向の半値全幅 [cm]。
z0 =	(D=0.0) ガウス分布の中心の z 座標 [cm]。
z1 =	(D=0.0) ガウス分布の z 方向の半値全幅 [cm]。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.6 一般パラボラ分布ソース (x, y, z 独立)

このパラボラ分布は、 x, y, z 軸で独立なパラボラ分布です。一般パラボラ分布 (x, y, z 独立) ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 51: 一般パラボラ分布 (x, y, z 独立) ソースパラメータ

s-type = 7	一般パラボラ分布 (x, y, z 独立) のとき。
x0 =	(D=0.0) X パラボラ分布の中心の x 座標 [cm]。
x1 =	(D=0.0) X パラボラ分布の幅 [cm]。
y0 =	(D=0.0) Y パラボラ分布中心の y 座標 [cm]。
y1 =	(D=0.0) Y パラボラ分布の幅 [cm]。
z0 =	(D=0.0) Z パラボラ分布の中心の z 座標 [cm]。
z1 =	(D=0.0) Z パラボラ分布の幅 [cm]。
rn =	(D=2) 一般パラボラの次数。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.7 ガウス分布ソース (xy 平面)

このガウス分布は、xy 平面でのガウス分布です。ガウス分布 (xy 平面) ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 52: ガウス分布 (xy 平面) ソースパラメータ

s-type = 13	ガウス分布 (xy 平面) のとき。
x0 =	(D=0.0) ガウス分布の中心の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) ガウス分布の中心の y 座標 [cm]。
r1 =	(D=0.0) ガウス分布の半値全幅 [cm]。
z0 =	(D=0.0) z 軸方向の下限 [cm]。
z1 =	(D=z0) z 軸方向の上限 [cm]。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.8 一般パラボラ分布ソース (xy 平面)

このパラボラ分布は、xy 平面でのパラボラ分布です。一般パラボラ分布 (xy 平面) ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 53: 一般パラボラ分布 (xy 平面) ソースパラメータ

s-type = 15	一般パラボラ分布 (xy 平面) のとき。
x0 =	(D=0.0) パラボラ分布の中心の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) パラボラ分布の中心の y 座標 [cm]。
r1 =	(D=0.0) パラボラ分布の幅 [cm]。
z0 =	(D=0.0) z 軸方向の下限 [cm]。
z1 =	(D=z0) z 軸方向の上限 [cm]。
rn =	(D=2) 一般パラボラの次数。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.9 球及び球殻分布ソース

球及び球殻分布ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=**)のあるものは、省略可能です。

表 54: 球及び球殻分布ソースパラメータ

s-type = 9	球及び球殻分布のとき。
x0 =	(D=0.0) 球及び球殻分布の中心の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) 球及び球殻分布の中心の y 座標 [cm]。
z0 =	(D=0.0) 球及び球殻分布の中心の z 座標 [cm]。
r1 =	(D=0.0) 球及び球殻分布の内半径 [cm]。ゼロの場合は球。
r2 =	(D=0.0) 球及び球殻分布の外半径 [cm]。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の方向。 $-1.0 \leq \text{dir} \leq 1.0$: 球の中心からの外向き法線に対する方向余弦。方位角は常に等方。 dir = data : 球の中心からの外向き法線に対する方向余弦分布。 a-type サブセクションが必要。方位角は常に等方。 dir = all : 球殻表面から等方分布。球面上に RI 線源が付着した状態を再現したい場合などに用いる。 dir = -all : 球の中心からの法線の内向き \cos 分布。外側から等方的に物質を照射したい場合に用いる。ウェイトを使って中心方向にバイアスを掛けるため、 dir=iso よりも効率的に中心にある物体を照射できる。ただし、 ag1 などのパラメータは使えない。 dir = iso : 中心から r1 の距離にある半径 r2 の円面から垂直に球側に向けて一様分布。 dir=-all と異なりバイアスは掛からないが、 ag1 などのパラメータが利用可能。宇宙線線源モードの奨励設定。
ag1 =	(D=-1.0) 天頂角 (z 軸 + 方向に対する方向余弦) のカットオフ最小値。 dir=iso のみ有効。
ag2 =	(D=1.0) 上記カットオフ最大値。
pg1 =	(D=0.0) 方位角 [degree] のカットオフ最小値。 dir=iso のみ有効。 -360 から $+360$ の範囲で設定可能。線源が進行する方向ではなく発生する方位角である点に注意。
pg2 =	(D=360.0) 上記カットオフ最大値。
isbias =	(D=0) ag1, ag2, pg1, pg2 を使って角度範囲を指定した場合、もしくは宇宙線線源モードで eg1, eg2 を使ってエネルギー範囲を指定した場合 (5.3.19.9 節参照) にカットオフされた粒子の処理方法。 =0 エネルギーが 0 の光子を発生させることにより、次のヒストリーに進む。 =1 許容角度・エネルギー範囲内に粒子を必ず発生させるように乱数を調整する。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

外側から等方的に照射される線源を再現したい場合は、**dir=-all** もしくは **iso**, **r1=r2** とします。その際の球の内側におけるフラックスは $1/\pi/(r1)^2$ となります。**r1** と **r2** の関係は、**dir=iso** の場合を除いて **r1≤r2** としてください。**dir=iso** の場合は基本的に **r1=r2** としてください (**r1>r2** でも可)。

ag1, ag2, pg1, pg2 を使って角度範囲を指定した場合、その範囲外の粒子がサンプリングされた場合は、その粒子をエネルギー 0 の光子として即座にカットオフします。したがって、不要な方向からの粒子を発生させずに計算時間を短縮することができます。一方、即座にカットオフされた光子も線源としてカウントされますので、規格化定数 (**totfact**) は、**ag1** や **ag2** を指定しない場合 (例えば、単位フルエンス (/cm²) あ

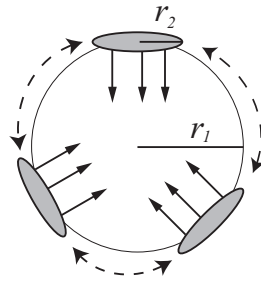


図 9: **dir=iso** の場合のイメージ図。ただし線源発生位置は常に中心から半径 **r1** の球面上となります。

たりに規格化したい場合は線源面の表面積 $\pi(r_2)^2$ から変更する必要はありません。ただし、**isbias=1** とした場合は、許容角度・エネルギー内に粒子が発生するように乱数を調整しますので計算時間は短縮できませんが、宇宙線線源モードの場合は予めサンプリングが成功する割合を計算して **totfact** に乗じておく必要があります。

5.3.10 位相空間線源

ビーム方向に垂直な位相空間で指定するソース分布です。加速器における RMS エミッタンス（エネルギーによる規格化はされていません）の線源を模擬する際、有用となります。以下、位相空間線源に必要なパラメータを示します。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 55: 位相空間線源のパラメータ

s-type = 11	位相空間線源のとき。
x0 =	(D=0.0) ビーム中心の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) ビーム中心の y 座標 [cm]。
z0 =	(D=0.0) z 軸方向の下限 [cm]。
z1 =	(D=0.0) z 軸方向の上限 [cm]。
rx =	(D=0.0) x 方向における位相空間の楕円の傾き [rad]。
ry =	(D=0.0) y 方向における位相空間の楕円の傾き [rad]。
wem =	(D=0.0) 位相空間からのサンプリング方法 (図 10 参照)。 wem > 0: 位相空間に一樣な線源。wem は RMS エミッタンス [$\pi\text{cm} \times \text{mrad}$] を表す。 wem = 0: 位相空間にガウス分布する線源。
x1 =	(D=0.0) x 方向の最大半径/最大角度の比 [cm/mrad]。 (wem>0 の場合) rx=0 における x 方向のガウス分布標準偏差 [cm]。 (wem=0 の場合)
y1 =	(D=0.0) y 方向の最大半径/最大角度の比 [cm/mrad]。 (wem>0 の場合) ry=0 における y 方向のガウス分布標準偏差 [cm]。 (wem=0 の場合)
xmrad1 =	(D=0.0) rx=0 における x 方向角度のガウス分布標準偏差 [mrad]。 (wem=0 のみ有効)
ymrad1 =	(D=0.0) ry=0 における y 方向角度のガウス分布標準偏差 [mrad]。 (wem=0 のみ有効)
x2 =	(D=0.0) x 方向の位相空間中心 [cm]。
y2 =	(D=0.0) y 方向の位相空間中心 [cm]。
xmrad2 =	(D=0.0) x 方向角度の位相空間中心 [mrad]。
ymrad2 =	(D=0.0) y 方向角度の位相空間中心 [mrad]。
dir =	(D=1) 入射粒子の軸方向の方向余弦。1 か -1 のみ指定可能。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

サンプリングされた位相空間座標が $(X, X'), (Y, Y')$ の場合、位相空間の傾きと中心のずれを考慮した後の座標 $(X_m, X'_m), (Y_m, Y'_m)$ は以下の数式で計算されます。

$$\begin{aligned}
 X_m &= X \cos(rx) - X' \sin(rx) + x2 \\
 X'_m &= X \sin(rx) + X' \cos(rx) + xmrad2 \\
 Y_m &= Y \cos(ry) - Y' \sin(ry) + y2 \\
 Y'_m &= Y \sin(ry) + Y' \cos(ry) + ymrad2
 \end{aligned}$$

最終的な線源の発生位置 $x[\text{cm}], y[\text{cm}]$ 及びその方向ベクトル (u, v, w) は以下の計算式で決定されます (た

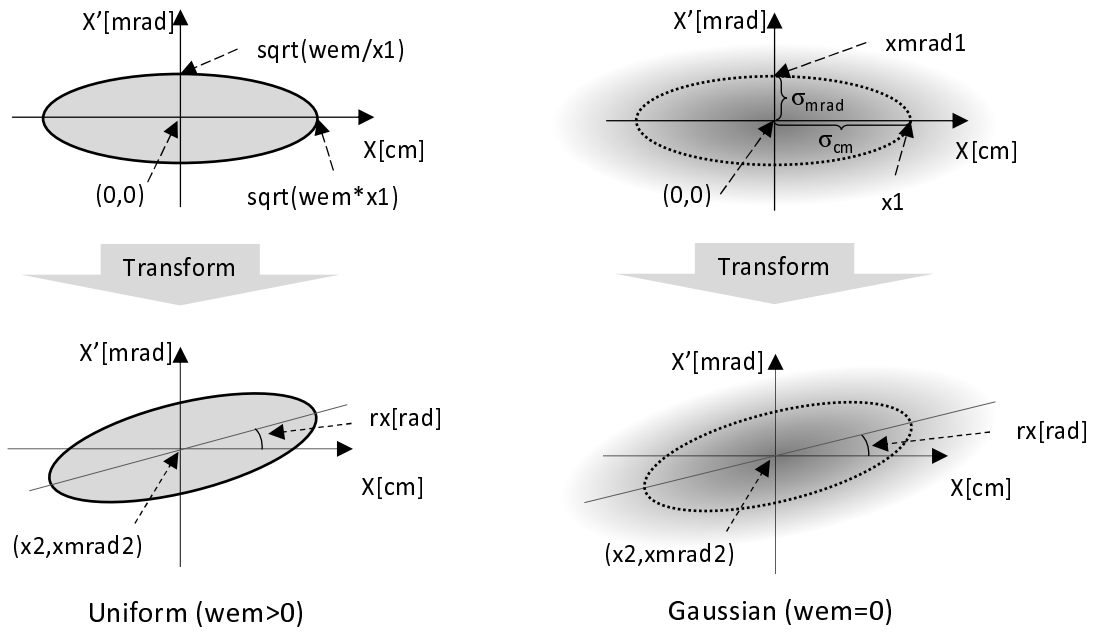


図 10: 位相空間からのサンプリング方法

だし $\text{dir}=1.0$ の場合)。

$$\begin{aligned}
 x &= X_m + x0 \\
 y &= Y_m + y0 \\
 u &= \frac{\tan(X'_m/1000)}{\sqrt{1.0 + \tan^2(X'_m/1000) + \tan^2(Y'_m/1000)}} \\
 v &= \frac{\tan(Y'_m/1000)}{\sqrt{1.0 + \tan^2(X'_m/1000) + \tan^2(Y'_m/1000)}} \\
 w &= \frac{1.0}{\sqrt{1.0 + \tan^2(X'_m/1000) + \tan^2(Y'_m/1000)}}
 \end{aligned}$$

例えば、位相空間にガウス分布する線源で 10π mm·mrad の rms エミッタンスを設定したい場合、 $\text{wem}=0$ とした上、 $\text{x1}=0.2$ 、 $\text{xmrad1}=5.0$ というように、 x と xmrad と π の積、つまり位相空間図上の距離 rms と角度 rms で表される楕円面積 ($\text{x1}*\text{xmrad}*\pi$ mm·mrad) の大きさを包括する 2 次元ガウス分布を設定します。なお、 x2 や xmrad2 などは、ビーム軸やビーム発散角の軸のずれを表現するためのパラメータで、理想的なビームに対しては 0 となります。一方、 $\text{wem}>0$ の場合は、 $x = \sqrt{\text{wem} * \text{x1}}$ と $\text{xmrad} = \sqrt{\text{wem}/\text{x1}}$ と π の積で表される位相空間上の楕円の中に、発生線源のすべてが一応に収まるような分布の線源となります。この時、楕円の内部以外の部分には線源分布は発生しませんので、一般的な加速器ビームを模擬する場合は、 $\text{wem}=0$ を選択して、rms エミッタンスで表現される分布以外にも粒子分布を発生することができる 2 次元ガウス分布形状にしてお使いください。

5.3.11 s-type = 12 ソース

decay-turtle の出力をソースとして取り込みます。s-type=12 の分布ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=**) のあるものは、省略可能です。

入力ファイルのソースの数が足りなくなった場合は、初めに戻って同じデータを繰り返し使います。

表 56: s-type = 12 のソースパラメータ

s-type = 12	decay-turtle の出力を読み込むとき。
x0 =	(D=0.0) ビームの x 座標のオフセット [cm]。
y0 =	(D=0.0) ビームの y 座標のオフセット [cm]。
z0 =	(D=0.0) ビームの z 座標のオフセット [cm]。
dir =	(D=1) 入射粒子の軸方向の方向余弦。1 か -1 のみ指定可能。
file =	decay-turtle 出力ファイル名 (パスも含む)。

decay-turtle の出力のデータ形式は、倍精度、アスキー形式で、各レコードは、

xp, xq, yp, yq, e0, wt0, pz0

で、それぞれは次の様な変数です。

表 57: decay-turtle データ

変数	説明
xp, yp	ビーム粒子の入射位置 [cm]。
xq, yq	ビーム粒子の進行方向に垂直な面となす角度 [mrad]。
e0	ビーム粒子の運動量 [GeV/c]。
wt0	ビーム粒子のウェイト。
pz0	ビーム粒子の偏極度 (未使用)。

5.3.12 円錐形状分布ソース

円錐形状分布ソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。線源粒子は円錐の側面からのみ発生します。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 58: 円錐形状分布ソースパラメータ

s-type = 18	円錐形状。
x0 =	(D=0.0) 円錐の頂点の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) 円錐の頂点の y 座標 [cm]。
z0 =	(D=0.0) 円錐の頂点の z 座標 [cm]。
x1 =	(D=0.0) 円錐頂点から底面中心に向けたベクトルの x 成分 [cm]。
y1 =	(D=0.0) 円錐頂点から底面中心に向けたベクトルの y 成分 [cm]。
z1 =	(D=0.0) 円錐頂点から底面中心に向けたベクトルの z 成分 [cm]。
r0 =	(D=0.0) 母線の長さ [cm]。
r1 =	(D=0.0) カットする円錐部分の母線の長さ [cm]。カットされた円錐の側面を線源領域とする場合に指定します。これを指定すると、頂点から r1 離れた位置までは線源を発生させず、 r1 から r0 の間の位置で線源を発生させます。 r1 < r0 としてください。
r2 =	(D=0.0) 円錐の母線と軸のなす角度 [degree]。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

5.3.13 三角柱形状分布ソース

s-type=20 とすることで、三角柱形状に線源を発生させることができます。パラメータ **exa** を指定することで、上底面もしくは下底面から、指数関数的 $\exp(-ax)$ にソース強度が減衰する分布、もしくは一様な分布を定義することができます。前者は、**exa** に正の値を与えることで、係数の値 a を指定できます。

三角柱形状分布のソースタイプに必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。**(D=***)** のあるものは、省略可能です。

表 59: 三角柱状分布ソースパラメータ

s-type = 20	三角柱形状。
x0 =	(D=0.0) 三角柱の頂点の x 座標 [cm]。
y0 =	(D=0.0) 三角柱の頂点の y 座標 [cm]。
z0 =	(D=0.0) 三角柱の頂点の z 座標 [cm]。
x1 =	(D=0.0) 三角柱頂点から第 1 頂点へのベクトルの x 成分 [cm]。
y1 =	(D=0.0) 三角柱頂点から第 1 頂点へのベクトルの y 成分 [cm]。
z1 =	(D=0.0) 三角柱頂点から第 1 頂点へのベクトルの z 成分 [cm]。
x2 =	(D=0.0) 三角柱頂点から第 2 頂点へのベクトルの x 成分 [cm]。
y2 =	(D=0.0) 三角柱頂点から第 2 頂点へのベクトルの y 成分 [cm]。
z2 =	(D=0.0) 三角柱頂点から第 2 頂点へのベクトルの z 成分 [cm]。
x3 =	(D=0.0) 三角柱頂点から底面頂点へのベクトルの x 成分 [cm]。
y3 =	(D=0.0) 三角柱頂点から底面頂点へのベクトルの y 成分 [cm]。
z3 =	(D=0.0) 三角柱頂点から底面頂点へのベクトルの z 成分 [cm]。
exa =	(D=0.0) 指数関数減衰の係数。exa>0; $\exp(-ax)$, exa=0; 一様分布。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、 a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

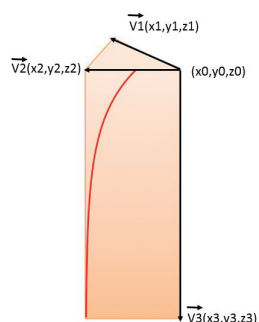


図 11: 三角柱分布の座標の指定

5.3.14 xyz メッシュ空間分布ソース

s-type=22 により複雑な空間分布をもつ線源を発生させることができます。空間分布を定義するパラメータは、**x**, **y**, **z-type** サブセクションとその直後に記載する相対強度 I_{ijk} , ($i = 1, \dots, n_x; j = 1, \dots, n_y; k = 1, \dots, n_z$) です。**dir**, **phi**, **dom** によって線源の方向を指定することも可能です。ただし、空間メッシュ毎に方向を変えることはできないので注意してください。表 60 にメッシュ空間分布ソースのパラメータを示します。パラメータの順序は、相対強度のデータを除き、自由です。**(D=***)** のあるものは、省略可能です。

表 60: xyz メッシュ空間分布ソースパラメータ

s-type = 22	xyz メッシュ空間分布。
mesh = xyz	mesh は xyz のみ選択できます。
x-type =	x-type の型。この下に x-type サブセクションが必要。
y-type =	y-type の型。この下に y-type サブセクションが必要。
z-type =	z-type の型。この下に z-type サブセクションが必要。
	x-, y-, z-type サブセクションの下に、相対強度 I_{ijk} のデータを並べます。データは x, y, z の順に変化させてください。ただし、 x-, y-, z-type サブセクションの nx, ny, nz が正の場合は昇順、負の場合は降順となります。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、 a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
isbias =	(D=0) 各メッシュから発生させる粒子の数を変化させて線源強度を調整。 = 1 各メッシュからランダムに粒子を発生させ、その weight を変化させて線源強度を調整。 = 2 各メッシュから均等に粒子を発生させ、その weight を変化させて線源強度を調整。 この場合、一度、粒子が発生したメッシュからは、全てのメッシュから粒子が発生するまで再度粒子が発生しなくなります。ただし、メモリ分散型 (MPI) 並列の場合は、各ノードで粒子が発生したメッシュを記録しますので、別のノードの計算で同じメッシュから粒子が発生する場合があります。

相対強度 I_{ijk} のデータの順番は、**nx, ny, nz** が全て正の場合は次のようになります。

$$I_{111}, I_{211}, \dots, I_{n_x 11}, I_{121}, I_{221}, \dots, I_{n_x n_y 1}, I_{112}, I_{212}, \dots, I_{n_x n_y n_z} \quad (3)$$

ここで、 $n_x = |\mathbf{nx}|$, $n_y = |\mathbf{ny}|$, $n_z = |\mathbf{nz}|$ です。そして、例えば **nx, ny** が正、**nz** が負の場合は、

$$I_{11n_z}, I_{21n_z}, \dots, I_{n_x 1n_z}, I_{12n_z}, I_{22n_z}, \dots, I_{n_x n_y n_z}, I_{11n_z-1}, I_{21n_z-1}, \dots, I_{n_x n_y 1} \quad (4)$$

のように、 $k = n_z = |\mathbf{nz}|$ となる行列要素を最初に並べてください。

s-type=22 とした例題を以下に示します。

例 1: xyz メッシュ空間分布ソースの例題

```

1:  [ S o u r c e ]
2:  s-type = 22
3:  proj = neutron
4:  e0 = 1.0
5:  dir = all
6:  mesh = xyz
7:  x-type = 2
8:  nx = 3
9:  xmin = -10
10: xmax = 10
11: y-type = 2
12: ny = -3
13: ymin = -10
14: ymax = 10
15: z-type = 2
16: nz = -2
17: zmin = -10
18: zmax = 10
19: 1 2 3
20: 4 5 6
21: 7 8 9
22:
23: 1 0 3
24: 0 5 0
25: 7 0 9

```

この例題では、 x, y, z 軸に関して -10cm から 10cm の範囲を線源領域とし、それぞれ 3,3,2 に分割しています。ただし、**ny** と **nz** は負で定義しているため、相対強度 I_{ijk} は j と k に関して降順に並べます。よって、例題の 19-21 行目には、 $k = 2$ 、すなわち $[0\text{cm} \leq z \leq 10\text{cm}]$ の範囲のデータが並べられており、

$$\begin{pmatrix} I_{132} & I_{232} & I_{332} \\ I_{122} & I_{222} & I_{322} \\ I_{112} & I_{212} & I_{312} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} \quad (5)$$

となります。また、23-25 行目には、 $k = 1$ 、すなわち $[-10\text{cm} \leq z \leq 0\text{cm}]$ の範囲のデータが並んでおり、

$$\begin{pmatrix} I_{131} & I_{231} & I_{331} \\ I_{121} & I_{221} & I_{321} \\ I_{111} & I_{211} & I_{311} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 0 \\ 7 & 0 & 9 \end{pmatrix} \quad (6)$$

となります。図 12 に、この条件で発生させた線源の空間分布を示します。**[t-product]** において **output=source** として求めており、左図が $[0\text{cm} \leq z \leq 10\text{cm}]$ 、右図が $[-10\text{cm} \leq z \leq 0\text{cm}]$ の結果です。左図において、番号 1,2,3,4,5,6,⋯ の領域が、それぞれ $I_{132}, I_{232}, I_{332}, I_{122}, I_{222}, I_{322}, \dots$ と対応しており、領域番号が増加するにつれて、段階的に線源の発生量が増加しているのがわかります。右図においては、番号 2,4,6,8 の領域で線源が発生しておらず、式 6 の右辺において 0 とした I_{ijk} と対応しています。

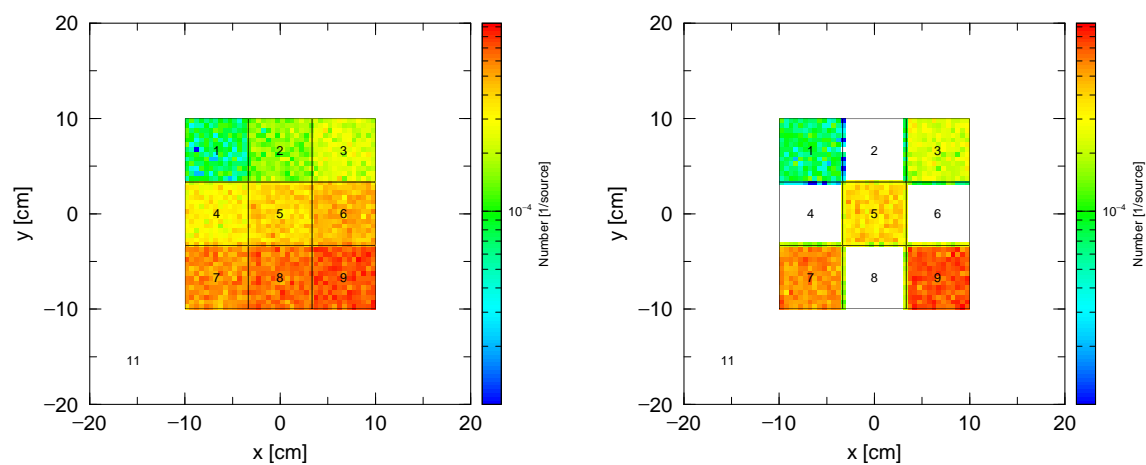


図 12: 例題 1 の線源を [t-product] によりタリーした結果。左図が $[0 \text{ cm} \leq z \leq 10 \text{ cm}]$ 、右図が $[-10 \text{ cm} \leq z \leq 0 \text{ cm}]$ の結果である。

5.3.15 連続四面体を線源とするソース

s-type=24 により、体系で定義した連続四面体形状（5.6.5.4 節）の各四面体から発生する線源を考慮することができます。四面体が属する **universe** のセル番号を指定することで、同じ **universe** に属する四面体から各四面体の体積の割合に従って粒子が均一に発生します。ここでは、セル番号は一個しか設定できないので、二個以上のセル番号を指定したい場合は、マルチソース（5.3.1 節）を用いて設定してください。**dir**, **phi**, **dom** によって線源の方向を指定することも可能です。表 61 に連続四面体ソースのパラメータを示します。パラメータの順序は自由です。**(D=***)** のあるものは、省略可能です。`\utility\TetraGEOM` フォルダにある資料やサンプルインプットもご参照ください。

表 61: 連続四面体ソースパラメータ

s-type = 24	連続四面体形状。
tetreg =	四面体が属する universe のセル番号。1 つしか指定できない。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、 a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

s-type=24 とした例題を以下に示します。

例 2: 連続四面体ソースの例題

```

1:  [ S o u r c e ]
2:  s-type = 24
3:  proj = proton
4:  tetreg = 201
5:  dir = all
6:  e0 = 70

```

この例題では、**tetreg** により指定したセル番号 201 の領域から一様に発生する線源を定義しています。ここで指定するセル番号は、例 43 の 13 行目のように何らかの **universe** に属している必要があります。

5.3.16 面上分布ソース

特定の面から発生するソースを定義します。面線源では線源の発生位置での面の法線を z 軸として、角度分布は既存の定義が使えます。定義に必要なパラメータを以下に示します。パラメータの順序は自由です。(D=**) のあるものは、省略可能です。

表 62: 面上分布ソースパラメータ

s-type = 26	面線源のとき。
suf =	粒子を発生させる面番号。 [surface] セクションで定義した面番号で指定します。指定できる面の種類は PX, PY, PZ, SO, S, SX, SY, SZ, C/X, C/Y, C/Z, CX, CY, CZ で、2 つ以上の面は指定できません。
cut =	粒子を発生する面上の領域を制限します。 [surface] セクションで定義した面番号に符号を付けて指定します。複数の面番号を指定することができますが、球や円柱は合わせて 1 つしか定義することができません。面番号の符号は、 [cell] セクションで領域を定義する時と同様の意味を持ちます。ただし、 : や () は使えません。例えば cut = 1 -2 3 -4 であれば、面 1 及び 3 のプラスもしくは外側かつ面 2 及び 4 のマイナスもしくは内側で囲まれる領域を指定することになります。また、指定した領域が閉じられていない場合はエラーとなります。例えば、 s や cx などで外側を指定した場合は、必ず、 px,py,pz を使って閉じた領域を設定する必要があります。
dir =	(D=1.0) 線源の発生位置での面の法線からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、 a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all ; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; cos² の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。

suf や **cut** で指定する面番号を **[surface]** セクションで定義する際、**trcl** は使用できません。**[source]** セクションで指定した **trcl** は有効です。

5.3.17 dump データソース

s-type=17 とすることで **dump** ファイルに落とされた粒子情報を線源として利用できます。パラメータ **idmpmode** を切り替えることにより、粒子情報の取り扱い方法として 2 種類を選択することができます。**idmpmode=0** の場合は、**dump** ファイルに記録された粒子を一つ一つの独立したイベントによる粒子であるとして統計処理を行います。対して **idmpmode=1** の場合は、**dump** ファイルに記録されたヒストリーとバッチの情報を利用することで、**dump** ファイルを作成した際のイベント情報を基に粒子間の相関を考慮した統計処理を行います。**dump** ファイルを用いたつなぎ計算を行う場合は、前段階のイベント情報を考慮して統計誤差を評価できるように **idmpmode=1** としてください。⁷³

このソースタイプに関連するパラメータは以下の通りです。パラメータの順序は自由です。(D=***) のあるものは、省略可能です。

表 63: dump データのソースパラメータ (1)

s-type = 17	dump ファイルを読み込むとき。
file =	dump ファイル名 (パスも含む)。
dump =	dump データの個数。負で与えた時はアスキーファイル。0 の場合は、必要情報をタリー標準出力ファイルから読み込みますので、次行で各 dump データの情報を与える必要はありません。
(次行)	dump データの情報。
jpsf =	Phase space file 用の特別オプション。 z0 の指定が必要。 =1 は変換時に weight 無しの場合。=2 は有りの場合。
(以下省略可能)	以下のものが指定されたとき、dump データがある場合も dump データより優先します。
x0 =	下限 x 座標 [cm]。
x1 =	上限 x 座標 [cm]。
y0 =	下限 y 座標 [cm]。
y1 =	上限 y 座標 [cm]。
z0 =	下限 z 座標 [cm]。
z1 =	上限 z 座標 [cm]。
sx =	スピンの方向ベクトルの x 成分。
sy =	スピンの方向ベクトルの y 成分。
sz =	スピンの方向ベクトルの z 成分。
dir =	入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、 a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all ; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
wgt =	(D=1.0) ソース粒子のウエイト。

⁷³ **idmpmode=1** および **dmpmulti** による使い回し計算は、日本原子力学会「2015 年春の年会」での波戸氏 (KEK) らの発表“モンテカルロつなぎ計算における不確かさ評価” (演題番号 N50) を参考に改良を行ったものです。

表 64: dump データのソースパラメータ (2)

(以下省略可能)	以下のものも指定可能です。
factor =	(D=1.0) ソース粒子のウエイトの規格化定数。
t-type =	(D=0) 時間分布。
reg =	(D=all) 領域を限定する。
ntmax =	(D=1000) 領域限定の際の最大再試行回数。
trcl =	(D=なし) 座標変換番号もしくは座標変換定義。
idmpmode =	dump ソースモードの選択。 (D=0) dump データが nocas と nobach の情報を含まない場合。 (D=1) dump データが nocas と nobach の情報を含む場合。 =0: dump ファイルに記録された粒子情報を 1 つ 1 つの独立したヒストリーとして統計処理を実行する。 =1: dump ファイルを作成した際のヒストリーの情報 (粒子間の相関) を考慮し統計処理を実行する。
dmpmulti =	dump ファイルの使い回しの回数。 (D=0.0) idmpmode=0 の場合。 (D=1.0) idmpmode=1 の場合。 =0.0: (maxcas*maxbch) で指定した全ヒストリー数の計算が終了するまで使いまわす。ただし、 idmpmode=1 の場合は指定できない。 >0.0: 指定した回数だけ粒子情報を使いまわす。小数点以下の数字はデータを確率的に採用 (ロシアンルーレット) することで考慮する。

idmpmode=1 を使用するためには、使用する dump データにヒストリー番号 (**nocas**) とバッチ番号 (**nobch**) が含まれている必要があります。PHITS のタリー出力により dump ファイルを生成すると、ファイル名に “.dmp” が付いた dump ファイルと共に “.dmp” が付かない通常のタリーファイルが生成されますが (6.7.21 節参照)、**idmpmode=1** を使用するためには、この通常タリーファイルも必要とされますので、使用する dump ファイルと同じフォルダに配置してください。**idmpmode=1** では、この通常タリーファイルから前段階の **maxcas, maxbch** の情報を読み込みます。これによりインプットファイルに記述した **maxcas, maxbch** の値は無視されます。また、**idmpmode=1** ではソースの規格化定数 **totfact** の値が無視されます。ソースの規格化定数 **totfact** を乗じた計算を行いたい場合は、dump ファイルを作成する前段階の計算において乗じるようにしてください。dump ファイル内の粒子のウェイト値に反映されます。**idmpmode=1** はマルチソースと同時に使うことはできません。また、**stdcut** や **batch.out** を使って計算を途中で止めた場合は、結果が正しく規格化されなくなりますので、必ず計算は最後まで実行するようにしてください。

dmpmulti は dump ファイルの使い回しの回数を制御します。**dmpmulti=2.0** の場合 dump ファイルを 2 回使い回しますが、具体的には、1 個の粒子情報に対してウェイト値を 0.5 倍した 2 個の粒子を線源として発生させた計算を実行します。小数点以下の数字は、使い回す回数をもう 1 つ増やすかどうかに関連し、各々の粒子情報に対して乱数により決定します。例えば、**dmpmulti=2.3** の場合、使い回す回数が 70% の確率で 2 回、30% の確率で 3 回となります。また、**dmpmulti=0.0** を指定した場合は、**maxcas, maxbch** で指定される全イベントが終了するまで、dump ファイルを使い回します。ただし、これは **idmpmode=0** でのみ有効となります。

dump ファイルを線源として使う計算では、基本的に再開始計算 (**istdev<0**) はできません。**dmpmulti=0.0** の時のみ可能ですが、この場合は **idmpmode=0** となるため、dump データの粒子情報を 1 つ 1 つの独立したヒストリーとして扱うことになり、データが十分ないと統計的に偏った結果を与えることとなります。

よって、統計量を増やした結果を得るためには、基本的には **dmpmulti** の値を大きく取って再度計算してください。ただしこの場合も、**dump** ファイルにあるデータ量が十分でないと、**dmpmulti** を増やしても、求める精度まで統計誤差が小さくならない可能性があるのでご注意ください。データ量が少ない場合は、**dump** ファイルにデータを蓄える計算の段階からやり直す必要があります。

dump データの情報は、自動読込 (**dump=0**) の場合を除いて、**dump** パラメータでデータの個数を指定します。正で与えた時はバイナリーファイルの読み込み、負で与えた時はアスキーファイルの読み込みをします。次の行に 1 つのレコードのデータの並びを指定します。その時の番号と物理量の関係は、以下の通りです。

表 65: dump データの種類と番号 (1)

物理量	kf	x	y	z	u	v	w	e	wt	time	c1	c2	c3	sx	sy	sz
番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

表 66: dump データの種類と番号 (2)

物理量	name	nocas	nobch	no
番号	17	18	19	20

ここで、**kf** は粒子を識別する **kf-code** (表 4 を参照)、**x, y, z** 単位を **cm** とする空間座標、**u, v, w** は運動量の単位ベクトル、**e** は **MeV** を単位とするエネルギー (原子核の場合は **MeV/n**)、**wt** は粒子ウエイト、**time** は時間 (単位は **nsec**)、**c1, c2, c3** はカウンターの値、**sx, sy, sz** はスピンの方向ベクトルです。**name** は粒子の衝突回数、**nocas** はあるバッチの中のヒストリー番号、**nobch** はバッチ番号、**no** はそのヒストリー中でのカスケード ID です。これらはバイナリーのときは **real*8** のデータで、アスキーのときは **n(1p1d24.15)** のデータフォーマットで格納されています。

例えば、9 つのデータが次の順番で並んでいる時、

```
kf e wt x y z u v w
```

このデータを読み込むには、

```
dump = 9
1 8 9 2 3 4 5 6 7
```

と指定します。

5.3.18 ユーザー定義ソース

usrsors.f にプログラムを書き込むことにより、ユーザー定義のソースを利用することができます。以下に示すソースのパラメータをソースセクションに指定した場合は、ユーザーソースで定義された値よりも優先します。

表 67: ユーザー定義ソースで指定できるパラメータ

s-type = 100	ユーザー定義ソースのとき。
(以下省略可能)	以下のものが指定されたとき、ユーザー定義データがある場合もユーザー定義データより優先します。
x0 =	下限 x 座標 [cm]。
x1 =	上限 x 座標 [cm]。
y0 =	下限 y 座標 [cm]。
y1 =	上限 y 座標 [cm]。
z0 =	下限 z 座標 [cm]。
z1 =	上限 z 座標 [cm]。
sx =	スピンの方向ベクトルの x 成分。
sy =	スピンの方向ベクトルの y 成分。
sz =	スピンの方向ベクトルの z 成分。
dir =	(D=1.0) 入射粒子の z 軸方向からの方向余弦。 all を指定した時は、等方分布。 data を指定した時は、a-type サブセクションが必要。
phi =	(D=all) 入射粒子の方位角 [degree]。 = all; 0 から 360 の範囲でランダムに決定。
dom =	(D=0.0) 入射粒子方向の立体角範囲 [degree]。 = -1 ; \cos^2 の bias がかった分布。
e0 =	(単色の場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
e-type =	(分布をもつ場合) 入射粒子のエネルギー [MeV/n]。
wgt =	(D=1.0) ソース粒子のウェイト。
factor =	(D=1.0) ソース粒子のウェイトの規格化定数。
t-type =	(D=0) 時間分布。
reg =	(D=all) 領域を限定する。
ntmax =	(D=1000) 領域限定の際の最大再試行回数。
trcl =	(D=なし) 座標変換番号もしくは座標変換定義。

インプットファイルで set により指定したユーザー定義定数 c1-c99 は、プログラム内で cval(1-99) により参照できます。ただし、複数回指定した場合は最後に定義した値が有効となります。

デフォルトで `usrsors.f` に入っているプログラムは、以下のようなものです。最初のコメント部に、ソースに必要な変数と、粒子指定に必要な `kf code` のリストがあります。次に、プログラム内で使用できる一様乱数と、ガウス乱数の `function` の説明があります。プログラムの最初の部分は、初期化の際のファイルのオープン例があります。最後の部分に必要な変数の値の一つの例が書かれています。この例題を参考にユーザー定義ソースを書いてください。ソースセクションで指定した変数は、優先しますから、その場合は、ここで定義する必要はありません。

ファイル 1: `usrsors.f`

```

1:  *****
2:      subroutine usrsors(x,y,z,u,v,w,e,wt,time,name,kf,nc1,nc2,nc3,
3:      &                sx,sy,sz)
4:  *      sample subroutine for user defined source.
5:  *      variables :
6:  *          x, y, z : position of the source.
7:  *          u, v, w : unit vector of the particle direction.
8:  *          e      : kinetic energy of particle (MeV).
9:  *          wt     : weight of particle.
10: *          time   : initial time of particle. (ns)
11: *          name   : usually = 1, for Coulmb spread.
12: *          kf     : kf code of the particle.
13: *          nc1    : initial value of counter 1
14: *          nc2    : initial value of counter 2
15: *          nc3    : initial value of counter 3
16: *          sx,sy,sz : spin components
17: *-----*
18: *      kf code table
19: *      kf-code: ityp : description
20: *          2212 : 1 : proton
21: *          2112 : 2 : neutron
22: *          211 : 3 : pion (+)
23: *          111 : 4 : pion (0)
24: *          -211 : 5 : pion (-)
25: *          -13 : 6 : muon (+)
26: *          13 : 7 : muon (-)
27: *          321 : 8 : kaon (+)
28: *          311 : 9 : kaon (0)
29: *          -321 : 10 : kaon (-)
30: *      kf-code of the other transport particles
31: *          12 : nu_e
32: *          14 : nu_mu
33: *          221 : eta
34: *          331 : eta'
35: *          -311 : k0bar
36: *          -2112 : nbar
37: *          -2212 : pbar
38: *          3122 : Lanmda0
39: *          3222 : Sigma+
40: *          3212 : Sigma0
41: *          3112 : Sigma-
42: *          3322 : Xi0
43: *          3312 : Xi-
44: *          3334 : Omega-
45: *-----*
46: *      available function for random number
47: *          unirn(dummy) : uniform random number from 0 to 1
48: *          gaurnd(dummy) : gaussian random number
49: *          for exp( - x**2 / 2 / sig**2 ) : sig = 1.0
50: *****
51:      implicit real*8 (a-h,o-z)

```

```

52:  *-----
53:      parameter ( pi = 3.141592653589793d0 )
54:      data ifirst / 0 /
55:      save ifirst
56:      character filenm*50
57:  *-----
58:  *      example of initialization
59:  *-----
60:      if( ifirst .eq. 0 ) then
61:  c          filenm = 'input.dat'
62:  c          inquire( file = filenm, exist = exex )
63:  c          if( exex .eqv. .false. ) then
64:  c              write(*,*) 'file does not exist => ', filenm
65:  c              call parastop( 887 )
66:  c              end if
67:  c              open(71, file = file(i), status = 'old' )
68:
69:  c          close(71)
70:          ifirst = 1
71:      end if
72:  *-----
73:  *      example for 3 GeV proton with z-direction
74:  *-----
75:          x = 0.0
76:          y = 0.0
77:          z = 0.0
78:          u = 0.0
79:          v = 0.0
80:          w = 1.0
81:          e = 3000.0
82:          wt = 1.0
83:          time = 0.0
84:          name = 1
85:          kf = 2212
86:          nc1 = 0
87:          nc2 = 0
88:          nc3 = 0
89:          sx = 0.d0
90:          sy = 0.d0
91:          sz = 0.d0
92:  *-----
93:      return
94:      end

```

5.3.19 エネルギー分布の定義

エネルギー分布をもつ線源粒子を定義する場合は、**e0** パラメータではなく、**e-type** サブセクションを用います。ただしその際、**e0** はコメントアウトなどで未定義となるようにしてください。また、エネルギーの単位は、原子核以外は **MeV**、原子核の場合は **MeV/n** となります。ただし、本節の以下の説明では、エネルギーの単位が **MeV** の場合のみを示していますので、原子核の場合は適宜 **MeV/n** に読み替えてください。

表 68 に、利用できる線源のエネルギー分布の種類をまとめます。幾つかの特殊な場合を除き、分布の種類は積分型か微分型で大きく分かれています。積分型はエネルギーに関して積分した強度を定義するのに対し、微分型はエネルギー微分値、すなわち単位が **[particles/MeV]** で与えられた線源スペクトルを定義してください。また、線源の発生方法には、与えられた強度に対して生成する粒子数を調整するものと、粒子のウェイト値を調整するものがあります。前者は、分布を再現するように、各エネルギービンに生成する粒子の数を統計的に調整します。これに対して後者は、各ビンに同数の粒子を生成させ、粒子のウェイト値を強度に合わせて変化させることにより、分布を再現します。

表 68: 線源のエネルギー分布の種類。発生方法には、粒子のウェイト値を一定にして各ビンで発生させる粒子数を調整する方法と、粒子数を一定にして各ビンでウェイト値を変更する方法があります。e-type に括弧の数字を指定すると、エネルギー点を波長 (Å) で与えることができます。

エネルギー分布の種類	発生方法	e-type	説明
積分型連続エネルギー分布	粒子数 ウェイト値	1, (11) 4, (14)	各エネルギービンの下限値とそのビンにおける線源粒子の生成確率の積分値を与えることにより、連続的なエネルギー分布を指定する。
微分型連続エネルギー分布	粒子数 ウェイト値	21, (31) 24, (34)	各エネルギービンの下限値とそのビンにおける線源粒子の生成確率の微分値を与えることにより、連続的なエネルギー分布を指定する。
離散的エネルギー分布	粒子数 ウェイト値	8, (18) 9, (19)	各エネルギー点とその点における線源粒子の生成確率を与えることにより、離散的なエネルギー分布を指定する。
離散的+積分型連続エネルギー分布	粒子数 ウェイト値	22, (32) 23, (33)	各エネルギービンの下限値・上限値とそのビンにおける線源粒子の生成確率の積分値を与えることにより、任意のエネルギー分布を指定する。
微分型ガウス分布	粒子数	2, (12)	分布の中心値と半値全幅を与えることにより、微分線源スペクトルをガウス分布で与える。
微分型マクスウェル分布	粒子数 ウェイト値	3 7	温度パラメーターを与えることにより、微分線源スペクトルをマクスウェル分布で与える。
微分型任意関数分布	粒子数 ウェイト値	5, (15) 6, (16)	微分線源スペクトルを任意関数で与える。
RI 線源によるエネルギー分布	粒子数 ウェイト値	28 29	放射性核種と放射能を与えることにより、その核種の崩壊に伴って放出される放射線を線源とする。
タリー結果を用いたエネルギー分布	粒子数	20	タリーで求めたエネルギー分布を線源の分布として指定する。
宇宙線フラックスのエネルギー・角度分布	粒子数 ウェイト値	25 26	宇宙空間及び大気圏内における宇宙線フラックスのエネルギー及び角度分布を絶対値も含めて再現する線源。

定義したいエネルギー分布の種類や発生方法に応じて、該当する e-type を指定してください。e-type の値によって、各サブセクションの入力形式が変わります。以下では、各 e-type の入力形式とパラメータについてご説明します。(D=***) のあるものは、省略可能です。

5.3.19.1 積分型連続エネルギー分布

表 69: 線源エネルギー分布パラメータ (1)

パラメータ	説明
e-type = 1, (11)	各エネルギービンの下限値 e(i) とそのビンにおける線源粒子の生成確率の積分値 w(i) を与えることにより、連続的なエネルギー分布を指定する。統計的に w(i) に比例するように各ビンに生成する粒子の数を調整し、エネルギー分布を表現する。11 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー群数。 ne が正の場合は、各ビン内の微分フラックスを [1/MeV] の単位で表示させた際に一定となるように粒子を生成し、負の場合は、[1/Lethargy] の単位で一定となるように粒子を生成する。 データは自由フォーマットで次の様に与える。 (e(i),w(i),i=1, ne), e(ne +1) 各ビンに生成される粒子数の積分値は w(i) に比例する。
e-type = 4, (14)	e-type = 1, (11) と同じエネルギー分布を発生させる。ただし、 e-type = 1, (11) が生成数を調整してエネルギー分布を表現するのに対し、 e-type = 4, (14) では、全てのエネルギービンに同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトの積分値を w(i) に比例して変化させることによりエネルギー分布を表現する。また、 p-type = 1 とし生成個数比 p(i) を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定のエネルギーをもつ線源の統計量を変化させることができる。14 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー群数。 ne が正の場合は、各ビン内の微分フラックスを [1/MeV] の単位で表示させた際に一定となるように粒子を生成し、負の場合は、[1/Lethargy] の単位で一定となるように粒子を生成する。 データは自由フォーマットで次の様に与える。 (e(i),w(i),i=1, ne), e(ne +1) デフォルト (p-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 p-type = 1 で p(i) を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
p-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで p(i)=1 、以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 p(i) を次の行からデータで与える。 (p(i),i=1,ne)

中性子光学のために、エネルギー分布を波長 (Å) で指定できるオプションを設けました。**e-type=1, 2** の代わりに **e-type=11, 12** を指定すると、エネルギーの入力を全て波長に置き換えて読み込みます。その他の場合は、入力で変換式を使って MeV に直してください。例えば、**e0 = 8.180425e-8/13**2** は、13Å の中性子のエネルギーを与えます。

e-type = 1 の場合の入力フォーマットは以下ようになります。

```
e-type = 1
ne = n
  e(1)  w(1)
  e(2)  w(2)
  e(3)  w(3)
  ....  ...
  e(n-1) w(n-1)
  e(n)   w(n)
  e(n+1)
```

この場合、エネルギー分布は、

```
e(1)-e(2)  w(1)
e(2)-e(3)  w(2)
e(3)-e(4)  w(3)
.....    ...
e(n-1)-e(n) w(n-1)
e(n)-e(n+1) w(n)
```

のように与えられます。よって例えば、0-2MeV 間を 0.2、2-4MeV 間を 0.6、4-6MeV 間を 0.2 としたい場合、入力フォーマットは

```
e-type = 1
ne = 3
  0  0.2
  2  0.6
  4  0.2
  6
```

となります。

5.3.19.2 微分型連続エネルギー分布

表 70: 線源エネルギー分布パラメータ (2)

パラメータ	説明
e-type = 21, (31)	各エネルギービンの下限值 $e(i)$ とそのビンにおける線源粒子の生成確率の微分量 $[d\phi/dE](i)$ を与えることにより、連続的なエネルギー分布を指定する。統計的に $[d\phi/dE](i)*[e(i+1)-e(i)]$ に応じて各ビンに生成する粒子を調整し、エネルギー分布を表現する。31 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー群数。ne が正の場合は、各ビン内の微分フラックスを [1/MeV] の単位で表示させた際に一定となるように粒子を生成し、負の場合は、[1/Lethargy] の単位で一定となるように粒子を生成する。 データは自由フォーマットで次の様に与える。 (e(i),[dφ/dE](i),i=1, ne), e(ne +1) 各ビンに生成される粒子数の積分値は $d\phi/dE(i)*[e(i+1)-e(i)]$ に比例する。
e-type = 24, (34)	e-type = 21, (31) と同じエネルギー分布を発生させる。ただし、 e-type = 21, (31) が生成数を調整してエネルギー分布を表現するのに対し、 e-type = 24, (34) では、全てのエネルギービンに同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトの積分値を $w(i)*[e(i+1)-e(i)]$ に比例して変化させることによりエネルギー分布を表現する。また、 p-type = 1 とし生成個数比 $p(i)$ を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定のエネルギーをもつ線源の統計量を変化させることができる。34 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー群数。ne が正の場合は、各ビン内の微分フラックスを [1/MeV] の単位で表示させた際に一定となるように粒子を生成し、負の場合は、[1/Lethargy] の単位で一定となるように粒子を生成する。 データは自由フォーマットで次の様に与える。 (e(i),w(i),i=1, ne), e(ne +1) デフォルト (p-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 p-type = 1 で $p(i)$ を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
p-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで $p(i)=1$ 、以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 $p(i)$ を次の行からデータで与える。 (p(i),i=1,ne)

5.3.19.3 離散的エネルギー分布

表 71: 線源エネルギー分布パラメータ (3)

パラメータ	説明
e-type = 8, (18)	各エネルギー点 e(i) とその点の線源粒子の生成確率 w(i) を与えることにより、離散的なエネルギー分布を指定する。統計的に w(i) に比例するように各点に粒子を生成させ、離散的なエネルギー分布を表現する。放射性元素の崩壊により生成される γ 線のようにエネルギー幅を持たない線源を定義するために使います。18 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー点数。データは自由フォーマットで次の様に与える。 (e(i),w(i),i=1,ne) 各点に生成される粒子数は w(i) に比例。
e-type = 9, (19)	e-type = 8, (18) と同じエネルギー分布を発生させる。ただし、 e-type = 8, (18) が生成数を調整してエネルギー分布を表現するのに対し、 e-type = 9, (19) では、全てのエネルギー点に同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトを w(i) に比例して変化させることにより不連続なエネルギー分布を表現する。また、 p-type = 1 とし生成個数比 p(i) を与えることにより、各点の生成個数を変化させ、特定のエネルギーをもつ線源の統計量を変化させることができる。19 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー点数。データは自由フォーマットで次の様に与える。 (e(i),w(i),i=1,ne) デフォルト (p-type=0) で各点に等しい個数が生成される。 各点に生成される粒子数は p(i) に比例。
p-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全ての点で p(i)=1 、以下のデータは無し。 for 1, 各点の生成個数比 p(i) を次の行からデータで与える。 (p(i),i=1,ne)

5.3.19.4 離散的+積分型連続エネルギー分布

表 72: 線源エネルギー分布パラメータ (4)

パラメータ	説明
e-type = 22, (32)	各エネルギービンの下限值 emin(i) と上限値 emax(i) 及びそのビンにおける線源粒子の生成確率の積分値 w(i) を与えることにより、任意のエネルギー分布を指定する。 e-type = 8,9,18,19 のように離散的なエネルギー分布を表現するときは、エネルギービンの下限値と上限値を同じ値にする。統計的に w(i) に比例するように各ビンに生成する粒子の数を調整し、エネルギー分布を表現する。32 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー群数。 ne が正の場合は、各ビン内の微分フラックスを [1/MeV] の単位で表示させた際に一定となるように粒子を生成し、負の場合は、[1/Lethargy] の単位で一定となるように粒子を生成する。 データは自由フォーマットで次の様に与える。 (emin(i),emax(i),w(i),i=1, ne) 各ビンに生成される粒子数の積分値は w(i) に比例する。
e-type = 23, (33)	e-type = 22, (32) と同じエネルギー分布を発生させる。ただし、 e-type = 22, (32) が生成数を調整してエネルギー分布を表現するのに対し、 e-type = 23, (33) では、全てのエネルギービンに同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトの積分値を w(i) に比例して変化させることによりエネルギー分布を表現する。また、 p-type = 1 とし生成個数比 p(i) を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定のエネルギーをもつソースの統計量を変化させることができる。33 の時は、エネルギーを波長 (Å) で与える。
ne =	エネルギー群数。 ne が正の場合は、各ビン内の微分フラックスを [1/MeV] の単位で表示させた際に一定となるように粒子を生成し、負の場合は、[1/Lethargy] の単位で一定となるように粒子を生成する。 データは自由フォーマットで次の様に与える。 (emin(i),emax(i),w(i),i=1, ne) デフォルト (p-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 p-type = 1 で p(i) を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
p-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで p(i)=1 、以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 p(i) を次の行からデータで与える。 (p(i),i=1,ne)

中性子光学のために、エネルギー分布を波長 (Å) で指定できるオプションを設けました。**e-type=22, 23** の代わりに **e-type=32, 33** を指定すると、エネルギーの入力を全て波長に置き換えて読み込みます。その他の場合は、入力で変換式を使って MeV に直してください。例えば、**e0 = 8.180425e-8/13**2** は、13Å の中性子のエネルギーを与えます。

e-type = 22 の場合の入力フォーマットは以下ようになります。

```
e-type = 22
ne = n
    emin(1) emax(1)  w(1)
    emin(2) emax(2)  w(2)
    emin(3) emax(3)  w(3)
    ....   ...
    emin(n-1) emax(n-1) w(n-1)
    emin(n) emax(n)   w(n)
```

よって例えば、0-2MeV 間を 0.2、2-4MeV 間を 0.6、4-6MeV 間を 0.2、及び 5.6MeV 単色を 0.4 としたい場合、入力のフォーマットは

```
e-type = 22
ne = 4
    0   2   0.2
    2   4   0.6
    4   6   0.2
    5.6 5.6 0.4
```

となります。

5.3.19.5 微分型ガウス分布・マクスウェル分布

表 73: 線源エネルギー分布パラメータ (5)

パラメータ	説明
e-type = 2, (12)	微分線源スペクトル ($d\varphi/dE$) をガウス分布で与える。12 の時は、エネルギーを波長 (\AA) で与える。
eg0 = eg1 = eg2 = eg3 =	ガウス分布の中心値 [MeV/n]。 ガウス分布の半値全幅 [MeV/n]。 ガウス分布のカットオフ最小値 [MeV/n]。 ガウス分布のカットオフ最大値 [MeV/n]。
e-type = 3	微分線源スペクトル ($d\varphi/dE$) を Maxwell 分布 $f(E) = E^a \exp(-E/T)$ で与える。
nm =	エネルギー群数。nm を正の数で与えた時は線形で等分点を決定し、負の数で与えた時は対数で等分点を決定。この数値が少ない場合は分布が滑らかにならないので、100 以上（対数の場合は -100 以下）を奨励します。
et0 = et1 = et2 = et3 =	温度パラメーター $T[\text{MeV}]$ 。Boltzmann 定数 $k = 8.617 \times 10^{-11} [\text{MeV/K}]$ と温度 $t[\text{K}]$ を用いて $T = kt$ により計算してください。 Maxwell 分布のカットオフ最小値 [MeV/n]。 Maxwell 分布のカットオフ最大値 [MeV/n]。 (D=0.5) エネルギーのベキ (上式のパラメータ a)。
e-type = 7	e-type = 3 と同じエネルギー分布を発生させる。ただし、 e-type = 3 が生成数を調整してエネルギー分布を表現するのに対し、 e-type = 7 では、全てのエネルギービンに同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトの積分値を Maxwell 分布 $f(E) = E^a \exp(-E/T)$ に応じて変化させることによりエネルギー分布を表現する。また、 p-type = 1 とし生成個数比 $p(i)$ を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定のエネルギーをもつ線源の統計量を変化させることができる。
nm =	エネルギー群数。nm を正の数で与えた時は線形で等分点を決定し、負の数で与えた時は対数で等分点を決定。この数値が少ない場合は分布が滑らかにならないので、100 以上（対数の場合は -100 以下）を奨励します。 デフォルト (p-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 p-type = 1 で $p(i)$ を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
et0 = et1 = et2 = et3 =	温度パラメーター $T[\text{MeV}]$ 。 Maxwell 分布のカットオフ最小値 [MeV/n]。 Maxwell 分布のカットオフ最大値 [MeV/n]。 (D=0.5) エネルギーのベキ (上式のパラメータ a)。
p-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで $p(i)=1$ 、以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 $p(i)$ を次の行からデータで与える。($p(i), i=1, nm$)

$a = 0.5$ の時の Maxwell 分布 $f(E) = \sqrt{E} \exp(-E/T)$ は、粒子の速さ v で表した一般的な分布 $f(v)$ と $f(E)dE \propto f(v)dv$ の関係を持ちます。 $f(v) = A v^2 \exp(-mv^2/kt)$ であるとし、 $mv^2/2 = E$ より $mv dv = dE$ であるため、 $f(v)dv = A(E/m) \exp(-E/T) \cdot (1/m \sqrt{E}) dE = (A/m^2) \sqrt{E} \exp(-E/T)$ となります。ただしここで $T = kt$ です。

5.3.19.6 微分型任意関数分布

表 74: 線源エネルギー分布パラメータ (6)

パラメータ	説明
e-type = 5, (15) f(x) =	微分線源スペクトル ($d\varphi/dE$) を任意の関数 $f(x)$ で与える。15 の時は、エネルギーを波長 (\AA) で与える。 Fortran 形式で書いた関数。x はエネルギー [MeV/n] を表す。 内部変数や定数が使えます。例) $f(x) = \exp(-c1*x**2)$
nm =	(D=-200) エネルギー群数。nm を正の数で与えた時は線形で等分点を決定し、負の数で与えた時は対数で等分点を決定。
eg1 = eg2 =	エネルギー分布のカットオフ最小値 [MeV/n]。 エネルギー分布のカットオフ最大値 [MeV/n]。
e-type = 6, (16) f(x) =	e-type = 5, (15) と同じエネルギー分布を発生させる。ただし、 e-type = 5, (15) が生成数を調整してエネルギー分布を表現するのに対し、 e-type = 6, (16) では、全てのエネルギービンに同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトの積分値が任意の関数 $f(x)$ に応じて変化させることによりエネルギー分布を表現する。また、 p-type = 1 とし生成個数比 $p(i)$ を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定のエネルギーをもつ線源の統計量を変化させることができる。16 の時は、エネルギーを波長 (\AA) で与える。 Fortran 形式で書いた関数。x はエネルギー [MeV/n] を表す。 内部変数や定数が使えます。例) $f(x) = \exp(-c1*x**2)$
nm =	(D=-200) エネルギー群数。nm を正の数で与えた時は線形で等分点を決定し、負の数で与えた時は対数で等分点を決定。 デフォルト (p-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 p-type = 1 で $p(i)$ を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
eg1 = eg2 =	エネルギー分布のカットオフ最小値 [MeV/n]。 エネルギー分布のカットオフ最大値 [MeV/n]。
p-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで $p(i)=1$ 、以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 $p(i)$ を次の行からデータで与える。 ($p(i), i=1, nm$)

5.3.19.7 RI 線源によるエネルギー分布

マルチソースでこの機能を使用する際は、<source>=1.0 とし **totfact** を以下のように指定してください。

- マルチソースの全てで **e-type** = 28,29 を使用する場合は、<source>の個数を入力する。
- マルチソースで **e-type** = 28,29 以外を含む場合は、各<source>が絶対強度となるように設定し、すべての<source>の和を入力する。

なお、上記の方法で決めた値に－をつけ、負の値として **totfact** を指定した場合は、各線源の粒子を同確率で発生させ、与えられた放射能（Bq 数）の比に応じて各粒子のウェイトを変更します。放射能が大きく違う複数の線源を定義する場合は、**totfact** を負で与えることにより、Bq 数の大小にかかわらず統計量を増やすことができます。

⁷⁴ A. Endo, Y. Yamaguchi and K.F. Eckerman, Nuclear decay data for dosimetry calculation - Revised data of ICRP Publication 38, JAERI 1347 (2005).

表 75: 線源エネルギー分布パラメータ (7)

パラメータ	説明
e-type= 28,29	<p>放射性核種とその放射能 (単位 Bq) を与えることにより、その放射性核種の崩壊に伴って放出される α 線、β 線 (オージェ電子含む)、γ 線、または自発核分裂中性子を線源とした計算が実行できます。なお、proj=all と設定することで、放射性核種が放出可能な放射線種 (α 線、β 線、γ 線、自発核分裂中性子) 全てが線源となります。放出される粒子のスペクトル計算には、放射性核種崩壊データベース DECDC⁷⁴が使用されます。なお、このデータベースは ICRP Publication 107 と同等で、半減期 1 分以上のほぼ全ての核種 (メタステーブル含む) に対する崩壊データベースが含まれています。</p> <p>この機能を使う場合は、崩壊データファイル RISource.dat が置かれたフォルダを [parameters] セクションにおいて file(24) (D=c:/phits/data/) により指定する必要があります。</p> <p>e-type= 28 の場合、崩壊データベースにより計算された放出強度にしたがって、各エネルギーの粒子を生成します。</p> <p>e-type= 29 の場合、崩壊データベースにより計算された全てのエネルギー点に同数の粒子を生成させ、その放出強度にしたがって、各エネルギーのウェイトを変化させます。</p>
ni=	<p>放射性核種の数。放射性核種とその放射能は次の様なフォーマットで指定する。 (RI(i),A(i),i=1,ni) ただし、核種 RI(i) は 137Cs あるいは Cs-137 の書式で指定する。放射能 A(i) は Bq (ベクレル) 単位で指定する。</p>
dtime=	<p>(D=-10.0) 時間経過の指定オプション。</p> <p>dtime>0 (単位は sec) : 指定した時間が経過した時点の指定核種及びその娘核種の放射能による α 線、β 線 (オージェ電子含む)、γ 線、自発核分裂中性子を設定します。各 RI の放射能は、dtime 経過後の値に減衰します。例えば、半減期 1 分の RI を 100Bq で指定し、dtime=60.0 と設定した場合、その RI の放射能は 50Bq と見なされます。</p> <p>dtime=0: 指定した放射能 (時間経過なし) による α 線、β 線 (オージェ電子含む)、γ 線、自発核分裂中性子を設定します。ただし、指定した核種の娘核のメタステーブルから放出される γ 線については、そのメタステーブルの半減期が 1 分以上の場合は考慮されません。</p> <p>dtime<0: 指定した放射性核種の半減期 $\times dtime$ が経過した時点の指定核種及びその娘核種の放射能による α 線、β 線 (オージェ電子含む)、γ 線、自発核分裂中性子を設定します。ただし、dtime>0 の場合と異なり、放射能の絶対値は減衰しません。例えば、半減期 1 分の RI を 100Bq で指定し、dtime=-1.0 と設定した場合、その RI の放射能は 100Bq のまま娘核種の崩壊を考慮可能です。放射平衡まで達する時間が分からない場合は、dtime=-10.0 のように長めの値を設定しておく と便利 です。 dtime<0 とする場合、親核と娘核 (例えば Cs-137 と Ba-137m) を同時に指定することはできません。</p>

表 76: 線源エネルギー分布パラメータ (8)

パラメータ	説明
	(e-type= 28,29 の場合の続き)
actlow=	(D=1.0e-10) 放射能の下限の指定オプション (Bq)。指定した時間経過後の放射能がこの値より小さい場合、その放射性核種の α 線, β 線 (Auger 電子、内部転換電子含む) , γ 線 (特性 X 線含む) は線源に設定されません。
norm=	(D=0) 線源強度の規格化オプション。 0: 1 秒あたり (/sec) の量を出力するように規格化します。その際、線源強度は、 Bq 単位で指定した放射能強度 (dtime>0 の場合はその崩壊も考慮した後) とします。 1: 崩壊に伴って放出される α 線, β 線 (Auger 電子含む) , γ 線 1 つあたりの量を出力するように規格化します。(通常の PHITS の規格化方法に準拠)
iaugers=	(D=0) Auger 電子 (内部転換電子含む) の取扱オプション (proj=electron のみ有効)。 0: Auger 電子を含む (β 線 + Auger 電子)。 1: Auger 電子を含まない (β 線のみ)。 2: Auger 電子のみを取り扱う。
iannih=	(D=1) 電子対消滅により生成される光子 (消滅光子) の取扱オプション (proj=photon のみ有効)。 0: 消滅光子を含む。 1: 消滅光子を含まない。別のマルチソースで proj = positron として陽電子の放出を明示的に考慮する場合は、消滅光子の 2 重カウントを防ぐため、こちらのオプションを選択してください。
icharctx=	(D=0) 特性 X 線の取扱オプション (proj=photon のみ有効)。 0: 特性 X 線を含む (γ 線 + 特性 X 線)。 1: 特性 X 線を含まない (γ 線のみ)。 2: 特性 X 線のみ取り扱う。

e-type = 28,29 の場合の入力例は以下のようになります。

```
[ S o u r c e ]
totfact = 2.0
<source> = 1.0
  s-type = 1
    proj = photon
    dir = all
    r0 = 0.
    z0 = 0.
    z1 = 0.
  e-type = 28
    ni = 1
      Cs-137 100.
    dtime = -10.0
  actlow = 1.0
<source> = 1.0
  s-type = 1
    proj = photon
    dir = all
    r0 = 0.
    z0 = 0.
    z1 = 0.
  e-type = 28
    ni = 1
      Cs-134 100.
    dtime = -10.0
  actlow = 1.0
```

ここでは、Cs-137 と Cs-134 が共に 100Bq ずつ存在し、それらが放射平衡になった状況を線源として指定しています。また、actlow を 1(Bq) することで、この数値以下の放射能の影響を無視しています。

また、例えば、Cs-137 の崩壊に伴って放出される photon と electron を同時に考慮したい場合は、photon と electron の 2 つの<source>セクションをもつマルチソースを定義します。両者の崩壊数は同じとなるため、ソースの相対比は 1.0 と指定します(<source>=1.0)。その際、マルチソース全体の規格化定数 totfact は、各<source>の和となるため、2.0 と指定します。

5.3.19.8 タリー結果を用いたエネルギー分布

表 77: 線源エネルギー分布パラメータ (9)

パラメータ	説明
e-type= 20	<p>file=によってファイル名を指定することにより、タリーで求めたエネルギー分布を線源の分布として設定できます。使用できるのは、[t-track], [t-cross], [t-point], [t-product], [t-time], [t-interact] において、axis=eng として求めた結果のみです。file=には、各タリーで出力ファイルとして指定したファイル名 (***.out) を書いてください。各タリーで得られる分布は unit=の値によりエネルギーの微分量か積分量の2つの形式に分かれますが、線源として使用する際も各形式に沿ってエネルギー分布を表現します。ただし、時間 (nsec) や角度 (sr) に関する微分は考慮しません。また、分布の絶対値は、タリー結果を積分した値で規格化します。</p> <p>重イオンのエネルギー分布を線源とする場合は、初期設定ではタリー結果のエネルギー単位が MeV、線源のエネルギー単位が MeV/n のため結果がずれてしまいます。したがって、1回目の計算（エネルギー分布を出力する計算）の [parameters] セクションに iMeVperU=1 を設定してタリー結果も MeV/n で出力するようにしてください。</p>
file=	タリーの出力ファイル名。

線源として使用する分布は、タリー結果を得る際に **part=**で指定した最初の粒子の結果です。ただし、その粒子が線源粒子として発生するわけではないのでご注意ください。線源として発生させる粒子の種類は **proj=**で指定します。

入力例は以下の通りです。 **e-type=20** と **file=**を指定すれば本機能を使用できます。

```
[ S o u r c e ]
s-type = 1      # axial source with energy spectrum
proj = neutron  # kind of incident particle
dir = 1.0       # z-direction of beam [cosine]
r0 = 0.         # radius [cm]
z0 = 0.         # minimum position of z-axis [cm]
z1 = 0.         # maximum position of z-axis [cm]
e-type = 20     # energy distribution given by tally output
file = cross.out # file name of tally output
```

5.3.19.9 宇宙線フラックスのエネルギー・角度分布

表 78: 線源エネルギー分布パラメータ (10)

パラメータ	説明
e-type= 25,26	<p>宇宙空間及び大気圏内における宇宙線フラックスのエネルギー及び角度分布を絶対値も含めて再現する線源です。</p> <p>e-type=25 の場合、宇宙線モデルで計算したフラックスに従って、各エネルギーの粒子を生成します。</p> <p>e-type=26 の場合、各エネルギー群に同数の粒子を発生させ、宇宙線モデルで計算したフラックスに従って、各粒子のウェイトを変化させます。</p> <p>e-type=25,26 の場合、各マルチソースの<source>は 1.0 とする必要があります。また、計算する宇宙線フラックスの単位は (/cm²/sec) であり、totfact に線源面積（例えば、s-type=9 の場合は $\pi(r_2)^2$）を設定することにより、タリー結果を自動的に (/sec) に規格化することができます（ただし、銀河宇宙線の場合のみ）。totfact を負値で指定した場合は、各マルチソースから同数の粒子を発生させますので、フラックスの大小にかかわらず統計量を増やすことができます。なお、e-type=25,26 を使う場合は、全てのマルチソースで同じ e-type 及び icenv を指定してください。</p>

表 79: 線源エネルギー分布パラメータ (11)

パラメータ	説明
	(e-type= 25,26 の場合の続き)
icenv=	<p>(D=0) 宇宙線環境パラメータ。</p> <p>1-5: PARMA/EXPACS⁷⁵で計算した大気圏内における銀河宇宙線 (Galactic Cosmic-Ray, GCR) モード。それぞれ、理想大気中 (=1)、地表面 (=2)、航空機コックピット (=3)、航空機客室 (=4)、ブラックホールモード (=5) を表します。icenv=2-4 の場合は、周辺環境パラメータ environ を定義する必要があります。ブラックホールモードは、地面からの反射中性子を全てカットするので、大地を含んだシミュレーションに最適です (使い方は “phits/sample/source/Cosmicray/GCR-blackhole/readme.txt” を参照)。なお、周辺環境が影響するのは中性子のみで、それ以外の粒子に対しては icenv=1-5 は同じ結果を与えます。また、s-type=9 かつ dir=iso とした場合、大気圏内の複雑な宇宙線角度分布も自動で再現します (z 軸+方向が天頂角方向)。粒子種類 (proj) は、中性子、陽子、重イオン ($Z \leq 28$)、μ 粒子、光子、電子、陽電子が指定可能です。</p> <p>0: DLR モデル⁷⁶で計算した宇宙空間における銀河宇宙線 (GCR) モード。粒子種類 (proj) は、陽子及び重イオン ($Z \leq 28$) が指定可能です。また、alti を指定した場合は、磁気圏の影響を考慮して⁷⁷、その高度における典型的な衛星軌道上⁷⁸での GCR フラックスを再現します。</p> <p>-1: Tylka モデル⁷⁹で計算した宇宙空間における太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle, SEP) モード。environ パラメータを指定することにより、4 種類の太陽高エネルギー粒子イベント (Solar Particle Event, SPE) から再現するフルエンスを選ぶことができます。粒子種類 (proj) は陽子のみが指定可能です。このモードを選択して線源面積を totfact に指定した場合、タリー結果は (/sec) ではなく各イベントの積算値 (/SPE) に規格化されます。</p> <p>-2: SPENVIS コード⁸⁰に組み込まれた AP-8 モデル⁸¹を使って計算した典型的な衛星軌道上⁷⁸での捕捉陽子 (Trapped Proton, TP) モード。粒子種類 (proj) は陽子のみが指定可能です。</p>

⁷⁵ T. Sato, Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS, PLOS ONE 10(12): e0144679 (2015) DOI: 10.1371/journal.pone.0144679

T. Sato, Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes. PLOS ONE 11(8): e0160390 (2016). DOI: 10.1371/journal.pone.0160390

⁷⁶ Matthia D, Berger T, Mrigakshi AI, Reitz G, A ready-to-use galactic cosmic ray model. Adv Space Res 51: 329-338 (2013).

⁷⁷ 静止磁場モデル (Tyganenko (1989), Planetary and Space Science, 37(1), 5-20) を用い、Kp 指数=3 とし反陽子追跡法で計算しています。詳しくは、Sato et al. (2018), Radiat. Prot. Dosim. 180, 146-149 をご参照ください。

⁷⁸ 国際宇宙ステーションの軌道 (傾斜角 51.6 度、平均高度 340 – 420 km) を模擬します。

⁷⁹ Tylka, A.J., Dietrich, W.F., A new and comprehensive analysis of proton spectra in ground-level enhanced (GLE) solar particle events, the 31st International Cosmic Ray Conference. Universal Academy Press, Poland (2009).

⁸⁰ The Space Environment Information System (2010). <http://www.spnvis.oma.be/>

⁸¹ Sawyer D, Vette J (1976) AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. National Space Science Data Center, Report 76-06, Greenbelt, Maryland.

表 80: 線源エネルギー分布パラメータ (12)

パラメータ	説明
	(e-type= 25,26 の場合の続き)
nm=	(D=-200) エネルギー群数。nm を正の数で与えた時は線形で等分点を決定し、負の数で与えた時は対数で等分点を決定。
eg1=	エネルギー分布のカットオフ最小値 [MeV/n]。デフォルト値は、中性子は 1.0e-8、その他の粒子は大気圏内モード (icenv>0) の場合は 1.0e-2、宇宙空間モード (icenv≤0) の場合は 1.0 となります。
eg2=	エネルギー分布のカットオフ最大値 [MeV/n]。デフォルト値は、中性子、光子、電子、陽電子は 1.0e4、μ 粒子は 1.0e8、SEP 陽子は 1.0e5、その他の粒子は 1.0e6 となります。
ag1= ag2=	(D=-1.0) 大気圏内宇宙線線源モードで角度分布を計算する天頂核の下限値 [cos θ] (D=1.0) 大気圏内宇宙線線源モードで角度分布を計算する天頂核の上限値 [cos θ] s-type=9 の場合は、実際の線源粒子の方向も ag1 から ag2 の範囲に限定されます。それ以外の場合は、ag1, ag2 は線源エネルギー分布の計算のみに影響し、実際の線源粒子の方向は dir パラメータなどにより決定されます。その際、totfact を指定した立体角で除することにより (/s/sr) 単位で規格化した宇宙線源を模擬できます。詳しくは “phits/sample/source/cosmicray/GCR-parallel” をご参照ください。
solarmod=	(D=0) 銀河宇宙線フラックスを計算するために必要となる太陽活動度 (W-index)。icenv≥0 のみ有効。太陽活動が活発になると、太陽風の影響により銀河宇宙線のフラックスは低下します。太陽極小及び極大期におけるおおよその値はそれぞれ 0 と 150 程度ですが、これよりも低くなる場合や高くなる場合もあります。このパラメータを指定しない場合は、icyear, icmonth, icday で指定した年月日の W-index をデータベースから参照し、デフォルトの日付から推定した W-index は 0.1 です。そのデータベースには、1951 年以降は中性子モニタの計数率 ⁸² から推定した各日の W-index が、それ以前は Usoskin ら ⁸³ が太陽黒点数より再構築した太陽活動度より推定した各月の W-index が格納されています。なお、データベースのない年月日 (1611 年以前、1647-1699 年、及び直近の数か月) を指定した場合、「Specified date is wrong (too past or too recent)」というエラーが出ます。また、直近の W-index は WASAVIES ホームページ ⁸⁴ よりダウンロード可能です。

⁸² NMDB: Real-Time Database for high-resolution Neutron Monitor measurements, <http://www01.nmdb.eu/>

⁸³ I.G. Usoskin, K. Mursula, S.K. Solanki, M. Schuessler, and G.A. Kovaltsov, A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610, J. Geophys. Res. 107(A11), 1374, (2002).

⁸⁴ Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particle, NICT, <https://wasavies.nict.go.jp/FFPday.txt>

表 81: 線源エネルギー分布パラメータ (13)

パラメータ	説明
	(e-type= 25,26 の場合の続き)
icyear=	(D=2009) 太陽活動度を計算するための年。icenv \geq 0 かつ solarmod を指定しない場合のみ有効となります。なお、1614 年-1950 年を指定した場合は黒点観測データから推定した月平均の太陽活動度、1951 年以降を指定した場合は地上中性子モニタ計数率から推定した日平均の太陽活動度が利用されます。
icmonth=	(D=10) 太陽活動度を計算するための月。icenv \geq 0 かつ solarmod を指定しない場合のみ有効となります。
icday=	(D=20) 太陽活動度を計算するための日。icenv \geq 0 かつ solarmod を指定しない場合のみ有効となります。
depatom=	大気深度 (g/cm ²)。大気圏内モード (icenv $>$ 0) のみ有効。このパラメータを指定しない場合は、alti で定義した高度 (km) より US Standard Atmosphere 1986 ⁸⁵ を使って大気深度を計算します。デフォルトの高度 (=0 km) から計算した大気深度は約 1033 g/cm ² です。
alti=	(D=0) 大気圏内モード (icenv $>$ 0) の場合は高度 (km) を表し、depatom を指定しない場合のみ有効。銀河宇宙線モード (icenv=0) 及び捕捉陽子モード (icenv=-2) の場合は、衛星軌道の平均高度 (km) を表し、現在のところ低地球軌道 (Low Earth Orbit, 340 – 420 km) のみ指定可能。
rigid=	宇宙線のカットオフリジディティ (GV)。カットオフリジディティとは、磁気圏を透過可能な宇宙線の最低リジディティ (磁場による曲がりにくさ) を表しており、極域で低く赤道付近で高くなります (おおよそ 0–18 GV 程度)。大気圏内モード (icenv $>$ 0) の場合は、地球に垂直に入射した場合のカットオフリジディティ (vertical cut-off rigidity) を表し、このパラメータを指定しない場合、glat 及び glong で指定した緯度・経度より MAGNETOCOSMICS ⁸⁶ で構築したデータベースを使って自動的に決定します。デフォルトの glat 及び glong から推定したカットオフリジディティは 0 GV です。宇宙空間モード (icenv \leq 0) の場合は、rigid パラメータで指定した値以下のリジディティを持つ宇宙線を全てカットし、そのデフォルト値は 0 GV です。
glat=	(D=90) カットオフリジディティを計算するための緯度 (degree)。正値が北緯、負値が南緯を表し、icenv $>$ 0 かつ rigid を指定しない場合のみ有効となります。
glong=	カットオフリジディティを計算するための経度 (degree)。正値が東経、負値が西経を表し、icenv $>$ 0 かつ rigid を指定しない場合のみ有効となります。
environ=	大気圏内の中性子フラックスに関する周辺環境パラメータ (icenv=2–4) もしくは SEP イベント ID (icenv=-1)。icenv=2 の場合は地中の水分含有率、icenv=3 及び 4 の場合は航空機の重量 (100 ton) を表し、そのデフォルト値は 0.15 となります。ただし、どちらの量も、理想的な環境における中性子フラックスからの「ゆがみ」の大きさを表すためのパラメータであり、純粋な物理量ではなく、条件により調整が必要となることに注意する必要があります ⁸⁷ 。icenv=-1 の場合は再現する SPE の種類を 1–4 の整数で表し、それぞれ、Feb. 1956 (=1、デフォルト)、Nov. 1960 (=2)、Aug. 1972 (=3)、Sep. 1989 (=4)、Jan. 2005 (=5) に発生した SPE に対応しています。

⁸⁵ U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976.⁸⁶ <http://cosray.unibe.ch/~laurent/magnetocosmics/>⁸⁷ T. Sato and K. Niita, Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere, Radiat. Res. 166, 544-555 (2006).

5.3.20 角分布の定義

`dir = data`を指定した場合は、次のような **a-type** = で始まる角分布サブセクションが必要です。(D=***)
のあるものは、省略可能です。

表 82: 角分布パラメータ (1)

パラメータ	説明
a-type = 1, (11)	角度分点 a(i) と各ビンにおける線源粒子の生成確率 w(i) を与えることにより、任意の角度分布を指定する。 分点は、1 の時は cos で、11 の時は degree で与える。 各ビンに生成される積分粒子数は、 w(i) に比例する。
na =	角度群数。データは自由フォーマットで次の様に与える。 (a(i),w(i),i=1, na), a(na +1)
a-type = 4, (14)	a-type = 1, (11) と同じ角度分布を発生させる。ただし、 a-type = 1, (11) が生成数を調整して角度分布を表現するのに対し、 a-type = 4, (14) では、全ての角度ビンに同数の粒子を生成させ、粒子のウエイトの積分値が w(i) となるように角度分布を表現する。 分点は、4 の時は cos で、14 の時は degree で与える。 各ビンに生成される積分粒子数は、 q(i) に比例する。
na =	角度群数。データは自由フォーマットで次の様に与える。 (a(i),w(i),i=1, na), a(na +1) デフォルト (q-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 q-type = 1 で q(i) を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
q-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで q(i)=1 。以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 q(i) を次の行からデータで与える。 (q(i),i=1,na)

表 83: 角度分布パラメータ (2)

パラメータ	説明
a-type = 5, (15) g(x) =	角度分布 ($d\varphi/d\Omega$) を任意の関数 g(x) で与える。 分点は、5 の時は cos で与え、15 の時は degree で与える。 Fortran 形式で書いた関数。x は角度を表す。 内部変数や定数が使えます。例) g(x) = exp(-c1*x**2)
nn =	角度群数。
ag1 = ag2 =	角度分布のカットオフ最小値。 角度分布のカットオフ最大値。
a-type = 6, (16) g(x) =	a-type = 5, (15) と同じ角度分布を発生させる。ただし、 a-type = 5, (15) が生成数を調整して角度分布を表現するのにに対し、 a-type = 6, (16) では、全ての角度ビンに同数の粒子を生成させ、粒子のウェイトを任意の関数 g(x) に比例して変化させることにより角度分布を表現する。 分点は、6 の時は cos で与え、16 の時は degree で与える。 Fortran 形式で書いた関数。x は角度を表す。 内部変数や定数が使えます。例) g(x) = exp(-c1*x**2)
nn =	角度群数。 デフォルト (q-type = 0) では各ビンに等しい個数が生成される。 q-type = 1 で q(i) を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
ag1 = ag2 =	角度分布のカットオフ最小値。 角度分布のカットオフ最大値。
q-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで a(i)=1 。以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 a(i) を次の行からデータで与える。 (q(i), i=1, nm)

5.3.21 時間分布の定義

t-type = で始まる時間分布サブセクションを指定することにより、線源に時間分布をもたせることができます。**t-type** =1,2 はそれぞれ矩形分布と Gauss 分布、**t-type** =3,4 は時間分布を分点と強度分布で与えます。**t-type** =5,6 は時間に関する強度分布を任意の関数で与えます。また、**t-type** =100 では、エネルギーの関数として時間分布の型を指定できます。(D=**) のあるものは、省略可能です。

表 84: 時間分布パラメータ (1)

パラメータ	説明
t-type = 0, 1, 2	(D=0) 時間分布。 0: 時間分布なし。t=0.0。 1: 矩形分布。 2: Gauss 分布。
t0 =	(D=0.0) 第 1 の時間分布の中心時刻 [ns]。
tw =	時間分布の幅 [ns]。矩形分布の場合は全幅。Gauss 分布の場合は半値全幅。
tn =	時間分布の数。
td =	時間分布の間隔 [ns]。
tc =	(D=10×tw) Gauss 分布の場合のカットオフ時間 [ns]。

表 85: 時間分布パラメータ (2)

パラメータ	説明
t-type = 3	時間分点 $t(i)$ と各ビンにおける線源粒子の生成確率の積分値 $w(i)$ を与えることにより、任意の時間分を指定する。統計的に $w(i)$ に比例するように各ビンに生成する粒子の数を調整し、時間分布を表現する。
ntt =	時間群数。データは自由フォーマットで次のように与える。 $(t(i), w(i), i=1, ntt), t(ntt+1)$ 各ビンに生成される粒子数の積分値は $w(i)$ に比例する。
t-type = 4	t-type=3 と同じ時間分布を発生させる。ただし、 t-type=3 が生成数を調整して時間分布を表現するのに対し、 t-type=4 では、全ての時間ビンに同数の粒子を生成させ、粒子のウェイトの積分値を $w(i)$ に比例して変化させることにより時間分布を表現する。また、 o-type=1 とし生成個数比 $o(i)$ を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定の時刻をもつ線源の統計量を変化させることが出来る。
ntt =	時間群数。データは自由フォーマットで次のように与える。 $(t(i), w(i), i=1, ntt), t(ntt+1)$ デフォルト (o-type=0) では各ビンに等しい個数が生成される。 o-type=1 で $o(i)$ を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
o-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで $o(i)=1$ 。以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 $o(i)$ を次の行からデータで与える。 $(o(i), i=1, ntt)$

表 86: 時間分布パラメータ (3)

パラメータ	説明
t-type = 5 <i>h(x)</i>	微分時間スペクトル ($d\phi/dt$) を任意の関数 $h(t)$ で与える。 Fortran 形式で書いた関数。x は時刻 [ns] を表す。内部変数や定数が使える。
ll	時刻群数。
tg1 tg2	時間分布のカットオフ最小値 [ns]。 時間分布のカットオフ最大値 [ns]。
t-type = 6 <i>h(x)</i>	t-type=5 と同じ時間分布を発生させる。ただし、 t-type=5 が生成数を調整して時間分布を表現するのに対し、 t-type=6 では、全ての時間ビンに同数の粒子を生成させ、粒子のウェイトの積分値を $w(i)$ に比例して変化させることにより時間分布を表現する。また、 o-type=1 とし生成個数比 $o(i)$ を与えることにより、各ビンの生成個数を変化させ、特定の時刻をもつ線源の統計量を変化させることが出来る。 Fortran 形式で書いた関数。x は時刻 [ns] を表す。内部変数や定数が使える。
ll	時刻群数。 デフォルト (o-type=0) では各ビンに等しい個数が生成される。 o-type=1 で $o(i)$ を設定した場合は、それらの値に各ビンの生成粒子数の積分値は比例する。
tg1 tg2	時間分布のカットオフ最小値 [ns]。 時間分布のカットオフ最大値 [ns]。
o-type = 0, 1	(D=0) 生成個数のオプション。 for 0, 全てのビンで $o(i)=1$ 。以下のデータは無し。 for 1, 各ビンの生成個数比 $o(i)$ を次の行からデータで与える。 ($o(i), i=1, ntt$)

t-type =100 を指定し、PHIITS のソースファイルを書き換えることで、任意の時間分布を与えることができます。この機能を使用する場合は、ソースファイルのひとつ sors.f ファイルにある subroutine tdis01 を書き換えてください。

表 87: 時間分布パラメータ (4)

パラメータ	説明
t-type = 100	エネルギーの関数として時間分布を与える。詳細は、ソースプログラムに書き込んで実現する。
tg1 tg2	時間分布のカットオフ最小値 [ns]。 時間分布のカットオフ最大値 [ns]。

5.3.22 マルチソースの例題

マルチソースの例題を紹介します。この例題には、関数を用いたエネルギー分布や、角度分布の例も含まれています。まず、ソースセクションのリストを示します。

例 3: マルチソースの例題

```

1:  [ S o u r c e ]
2:  totfact = 3
3:  <source> = 9.72
4:  s-type = 1
5:  proj = proton
6:  z0 = 2
7:  z1 = 29
8:  r0 = 5
9:  r1 = 4
10: dir = 0.0
11: e-type = 6
12: eg1 = 1.e-6
13: eg2 = 1.e-3
14: nm = -200
15: set: c10[1.e-4]
16: f(x) = x**(1.5)*exp(-x/c10)
17: <source> = 1
18: s-type = 1
19: proj = photon
20: z0 = 1
21: z1 = 2
22: r0 = 5
23: dir = -1
24: e-type = 5
25: eg1 = 1.e-3
26: eg2 = 5.e-1
27: nm = 200
28: set: c10[1.e-1]
29: set: c20[1.e-1/2.35482]
30: f(x) = exp(-(x-c10)**2/2/c20**2)
31: <source> = 1
32: s-type = 1
33: proj = neutron
34: z0 = 29
35: z1 = 30
36: r0 = 5
37: e-type = 6
38: eg1 = 1.e-2
39: eg2 = 1.e+3
40: nm = -200
41: set: c10[92.469]
42: set: c20[5.644e+10]
43: f(x) = c10/c20*exp(-sqrt(x*(x+1876))/c10)*(x+938)/sqrt(x*(x+1876))
44: dir = data
45: a-type = 5
46: ag1 = 0
47: ag2 = 1
48: nn = 200
49: g(x) = exp(-(x-1)**2/0.3**2)

```

この例題には、3つの<source>で始まるソースが含まれる。最初のソースは、円柱で z が2cmから29cmで、半径が5cm、ただし、 $r1=4$ が定義してあるので、半径4cmの内側は含まれていない。中空の円柱ソースである。次のソースは、やはり円柱で半径5cm、 z が1cmから2cmまでの厚さが1cmの薄い円柱である。最後のソースは、前と同じ薄い円柱で、 z 座標が29cmから30cmまでである。各ソースの<source>に定義される、各ソースの相対比である。ここでは、各ソースの体積比になっている。従って、このマルチソースでは、定義されるソース領域に均一に粒子が生成される。この座標分布を [t-product] で output=source, icntl=6 で計算したものを以下に示す。このソースは、円柱の表面、厚さ1cmの領域を定義している。

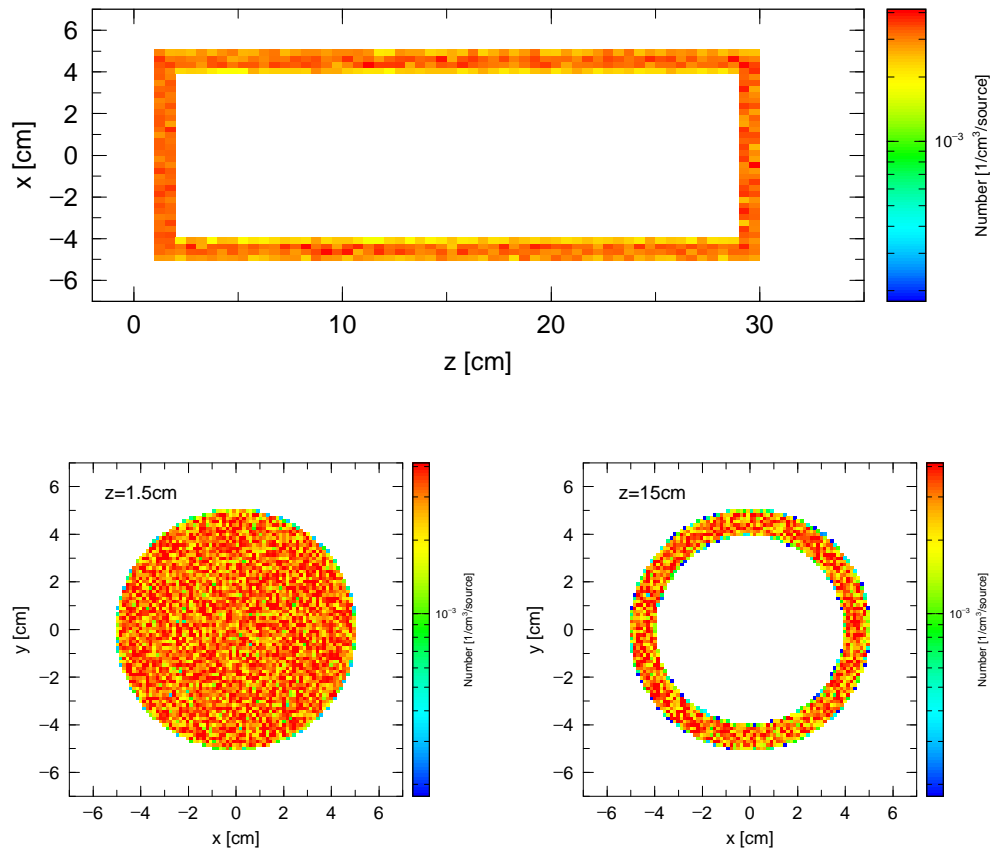


図 13: マルチソース、空間分布

次に、3つのソースは、ソース粒子が、陽子、光子、そして中性子である。それぞれエネルギー分布が関数で定義してある。最初のもは、Maxwell 分布、次がガウス分布、最後が任意の関数である。最初の Maxwell 分布は、e-type=7 の

```
e-type = 7
et0 = 1.e-4
et1 = 1.e-6
et2 = 1.e-3
```

と同義である。また、2 番目のガウス分布は、e-type=2 の

```
e-type = 2
eg0 = 1.e-1
eg1 = 1.e-1
eg2 = 1.e-4
eg3 = 5.e-1
```

と同義である。

これらのエネルギー分布を、やはり、[t-product] で output=source, icntl=6 で計算したものを以下に示す。結果は、粒子ごとにプロットしているの、各ソースごとのエネルギー分布が色別に表されている。

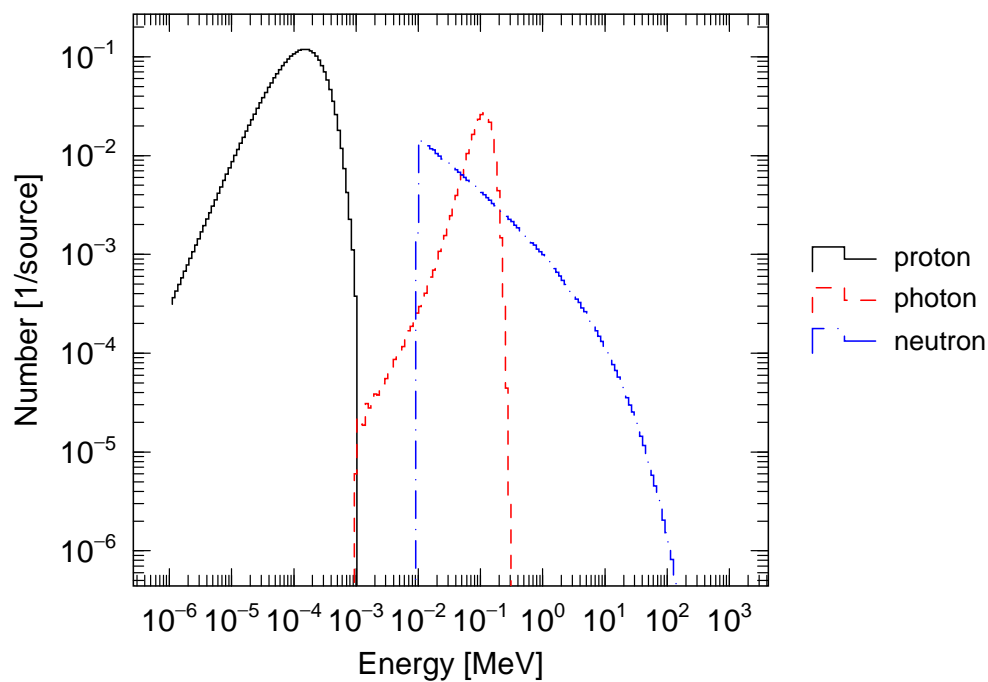


図 14: マルチソース、エネルギー分布

最初のソースは、 $\text{dir}=0$, 即ち 90 度方向、2 番目が $\text{dir}=-1$, 180 度方向、3 番目が $\text{dir}=\text{data}$ で角度分布を持つ。ここでは、0 度を中心としたガウス分布が関数形で定義されている。この結果は、[t-cross] を用いて次のように表される。

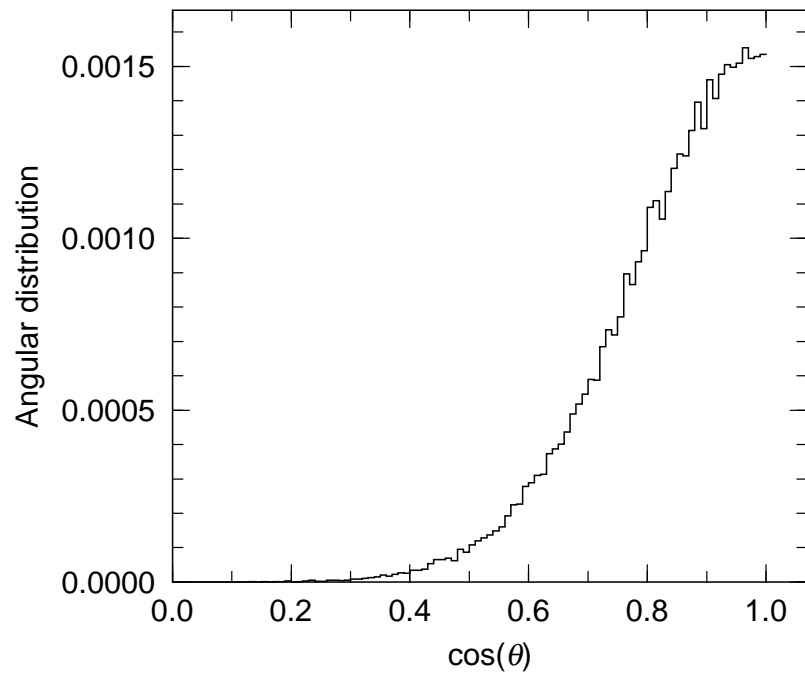


図 15: マルチソース、角度分布

5.3.23 ダクトソースオプション

中性子分光施設の非常に長い中性子導管を扱うために、特別なソースを生成するダクトソースオプションを作りました。等方的なソースを仮定すると、長いビームラインの中のカレントは、立体角の関係からソースの位置からの距離の二乗に反比例します。このことは、ビームラインの壁にぶつかるカレントは、“wall current”と呼ばれますが、例えば 100m 位置で、1m 位置に比べて 6 桁小さくなります。このような状況での計算の統計を上げるために、粒子のウェイトを変化させて、シミュレーション粒子の wall current が、ビームラインのどの場所でも同じになるようなオプションを設けました。

このダクトソースオプションは、**s-type = 1, 2** の円柱と角柱のソースに **dom = -10** を指定することにより適応されます。各パラメーターとその意味を下にまとめます。

表 88: ダクトソースオプションのパラメータ

パラメータ	説明
dom = -10	ダクトソースの指定。
dl0 =	ビームラインの始点 z0 からの距離 [cm]。
dl1 =	ダクトソースの始点 z0 からの距離 [cm]。
dl2 =	ダクトソースの終点 z0 からの距離 [cm]。
dpf =	dl2 を通過する粒子の割合。
drd =	s-type = 1 円柱の時のビームラインの半径 [cm]。
dxw =	s-type = 2 角柱の時のビームラインの X サイズ [cm]。
dyw =	s-type = 2 角柱の時のビームラインの Y サイズ [cm]。

ビームラインの形状は、**s-type=1** の時は円柱、**s-type=2** の時は角柱を仮定しています。また、**z1=z0** と **dir=1** も仮定しています。後者は、ビームラインの方向です。これを変更する時は、**trcl** を用いてください。ソース粒子は、**z0** 地点で、**s-type=1** の時は **r0** の内部、もしくは、**s-type=2** の時は、**x0, x1, y0, y1** の内部で生成されます。

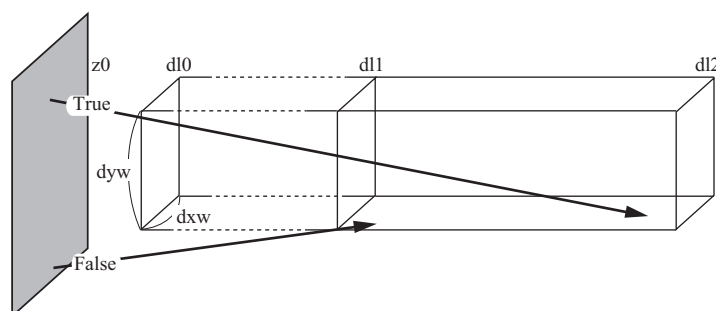


図 16: 角柱のダクトソースのイメージ図

ソース粒子の方向は、ダクトに当たる位置から決定されます。**dl1** から **dl2** の間のダクトに粒子が均一に当たるように壁の位置が決まります。そのとき、等方分布を仮定して粒子のウェイトが決まります。全体の規格化定数は、**z0** 地点で **dl0** 地点のダクト面積と同じ領域で発生した粒子が **dl0** 地点のダクトを通過する粒子数で規格化されます。通常、**dl0** から **dl2** のダクト壁から全てのソース領域が見える時、この規格化定数は 1 です。もし、**z0** 地点でのソース領域が、**dl0** 地点のダクト面積より大きい場合は、**z0** 地点でダクト面積より大きい領域からダクトに入った粒子は、ソース粒子の規格化には含まれません。このことは、**z0** 地点でダクト面積より大きい領域からダクトに入った粒子は、規格化定数を変えずにダクト管内のカレ

ントを増加させます。このダクトソースでは、粒子のソース位置での角分布は、ビームラインの方向のダクト面積の立体角で均一であるということを仮定しています。

次に、簡単な例題を示します。最初の例は、角柱のビームラインを仮定し、ソースサイズとガイド断面積は同じとしています。ダクトソースのセクションは、

例 4: ダクトソースオプションの例題 (1)

```

1  [ S o u r c e ]
2:
3:  set: c1[200]    $dl0
4:  set: c2[500]    $dl1
5:  set: c3[5000]   $dl2
6:  set: c4[5.0]    $x*2 at z0
7:  set: c5[5.0]    $y*2 at z0
8:  set: c10[5.0]   $dxw
9:  set: c20[5.0]   $dyw
10: set: c30[0.001] $dpf
11:
12: s-type = 2
13: proj  = neutron
14: e0    = 20.0
15: x0    = -c4/2
16: x1    = c4/2
17: y0    = -c5/2
18: y1    = c5/2
19: z0    = 0.0
20: z1    = 0.0
21: dir   = 1.0
22: phi   = 0.0
23:
24: dom = -10
25: dl0 = c1
26: dl1 = c2
27: dl2 = c3
28: dxw = c10
29: dyw = c20
30: dpf = c30

```

最初のパートでこのダクトソースに必要な定数、 $dl0$, $dl1$, $dl2$ と dxw , dyw , dpf を定義しています。次のパートで、ソースの位置、エネルギーを定義しています。最後のパートで、ダクトソースのパラメーターを定義しています。ここでは、5m から 50m のビームラインの中の **current** と **wall current** を [t-cross] タリーを用いて計算しています。結果を右の図に示します。同じ図に、理想的な場合の解析的な解、つまり、**current** が $1/L^2$ に比例し、**wall current** が $1/L^3$ に比例するグラフも描いてあります。十字の印が、 $dl0$ の位置です。この **current** が 1 です。ダクトソースオプションの結果は、理想的な場合と完全に一致しています。

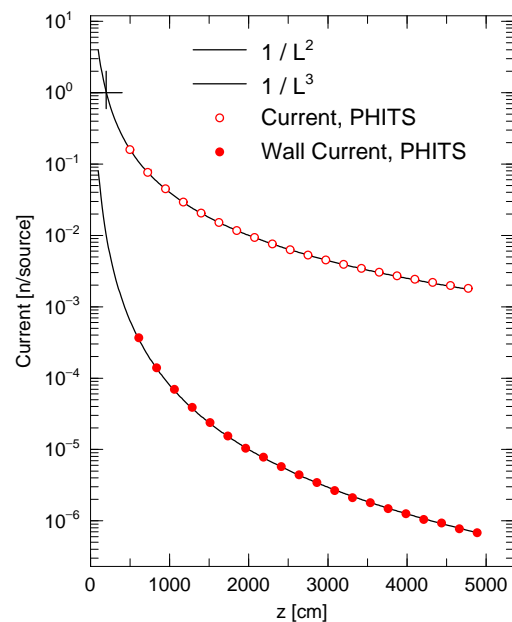


図 17: ダクトソースオプション例題 1

次の例題は、ソース領域の大きさを変えたものです。

例 5: ダクトソースオプションの例題 (2)

```

1  [ S o u r c e ]
2:
3:  set: c1[200]    $dl0
4:  set: c2[500]    $dl1
5:  set: c3[5000]   $dl2
6:  set: c4[10.0]   $x*2 at z0
7:  set: c5[10.0]   $y*2 at z0
8:  set: c10[5.0]   $dxw
9:  set: c20[5.0]   $dyw
10: set: c30[0.001] $dpf
11:
12: s-type = 2
13: proj  = neutron
14: e0    = 20.0
15: x0    = -c4/2
16: x1    = c4/2
17: y0    = -c5/2
18: y1    = c5/2
19: z0    = 0.0
20: z1    = 0.0
21: dir   = 1.0
22: phi   = 0.0
23:
24: dom = -10
25: dl0 = c1
26: dl1 = c2
27: dl2 = c3
28: dxw = c10
29: dyw = c20
30: dpf = c30

```

次のグラフが示すように、この例題では、**current**、**wall current** ともに増加しています。この増加分がソース領域のダクトより大きい部分からの寄与を示します。従って、このオプションによって、ソースのマージン領域からの寄与を自動的に扱うことができます。

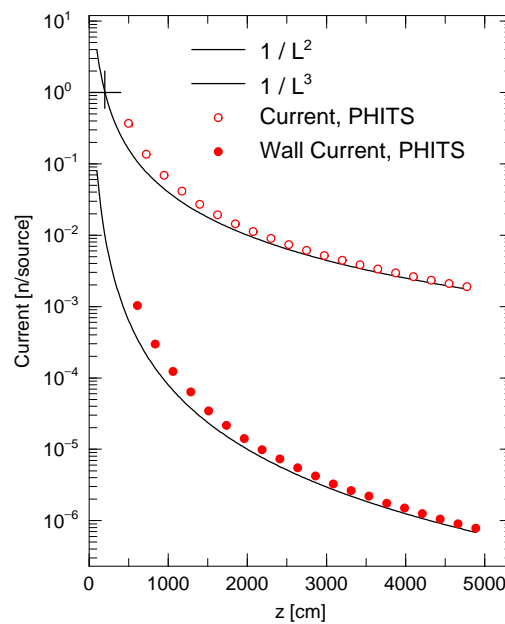


図 18: ダクトソースオプション例題 2

5.4 [Material] セクション

5.4.1 書式

このセクションでは、体系を構成する物質を定義します。ここで定義した物質は、[cell] セクションをはじめとする幾つかのセクションで参照されます。

書式は以下の通りです。物質番号の後に、物質を構成する元素（核種）とその組成比を交互に書きます。

```
[ M a t e r i a l ]
```

```
MAT[物質番号]      元素   組成比   元素   組成比   ...   ...
```

物質番号 n は 1 から 99999 まで選択でき、MAT[n] あるいは Mn の 2 種類の表現で指定することができます。ただし、MAT[n] において、MAT と [の間には空白文字を入れることができないのでご注意ください。

コメント文字として #, %, !, \$ の 4 文字が使用できます。バージョン 2.88 までは行頭の c \square (\square は空白文字) もコメント文字として使用することができていましたが、それより後のバージョンではデフォルトでは使用できなくなりました。もし、コメント文字として使用したい場合は、[parameters] セクションにおいて icommat=1 としてください。また、ファイルのインクルード文、定数定義などは、セクションの途中でも用いることが出来ます。

5.4.2 元素（核種）の定義

上記書式の元素の箇所には、定義したい物質の元素記号を書いてください。核種を指定する場合は、質量数を加えた表式を書いてください。208Pb, Pb-208, 82208 のどの形式でも可能です。例えば水素は、1H, H-1, 1001 と指定します。元素記号のみ、あるいは質量数をゼロにした場合（例えば Pb, 82000）は、その元素の同位体を天然存在比で展開します。ただし、JENDL-4.0 に含まれない核種に関しては展開されませんのでご注意ください。

PHITS パッケージに含まれている JENDL-4.0 以外の核データライブラリーを使用する場合は、断面積ディレクトリファイル file(7) (D=xmdir) にそのライブラリ付属の xmdir の情報を追加してください。もし、20MeV 以下の中性子データライブラリーについて、JENDL-4.0 以外のものを使用する場合は、物質番号毎にそのライブラリーの id を表 89 の NLIB により指定してください。ライブラリーの id は、ライブラリー番号（2桁の数字）とデータのクラス（1文字のアルファベット）を組み合わせで定義されており、例えば JENDL-4.0 の中性子ライブラリーであれば 50c となります。中性子以外にも、PLIB, ELIB, HLIB を指定することで、それぞれ光子、電子、陽子のライブラリーを指定して利用することができます。また、物質番号毎ではなく、核種毎に使用するデータライブラリーを指定する場合は、その核種の指定を 208Pb.50c, Pb-208.50c, 82208.50c のような形式で行ってください。ただし、基本的に PHITS では、中性子などの入射粒子に対して各々 1 種類のライブラリーを指定するようにし、その指定は NLIB, PLIB, ELIB, HLIB により行ってください。もし、2 種類目のライブラリーを指定したい場合は、中性子に関してのみ可能ですので、NLIB による指定を行った上で、ライブラリーを変更したい核種を 208Pb.50c のような形式で定義してください。また、各物質の後に拡張子でライブラリーを指定できるのは中性子のみです。たとえば、 ^6Li と ^7Li について、陽子の JENDL/4.0-HE ライブラリーを利用する場合、HLIB を用いて、

```
6Li 0.001
```

```
7Li 0.999
```

```
hlib=51h
```

としてください。なお、*id* によるライブラリーの指定がない場合は、**file(7)** 中のリストを上から検索し、その核種で最初に該当したライブラリーを使用します。どの核データが使用されたのかを知りたい場合は、**[parameters]** において **kmout=1** とすることで、サマリーの出力ファイル **file(6)** (**D=phits.out**) にその情報が書き出されます。

EGS5 を使用する場合は、1 つの物質番号に含む元素の数（核種の数ではありません）は 20 以下としてください。

5.4.3 物質組成比の定義

上記書式の組成比の箇所には、その物質番号で定義した物質に含まれる元素（核種）の組成比を書いてください。正の数で書いた場合は原子数比、負の数で書いた場合は質量比の意味となります。例えば、水 (H_2O) を定義したい場合は、

```
MAT[1] H 2 0 1
```

あるいは、

```
MAT[1] H -2/18 0 -16/18
```

と指定します。水の分子量がおおよそ 18 であることから、水に含まれる水素と酸素の質量比がそれぞれ約 2/18 と 16/18 となるためです。

粒子輸送計算時に使用される物質の密度は、**[cell]** セクションで定義します。ただし、**[t-deposit]**, **[t-deposit2]**, **[t-let]**, **[t-sed]** セクションにおいて **letmat** を指定する場合は、本セクションの組成比の箇所では物質密度を定義する必要があります。その際、正の数の場合は粒子密度（単位は $[10^{24} \text{ atoms/cm}^3]$ ）、負の数の場合は質量密度（単位は $[\text{g/cm}^3]$ ）として定義します。

5.4.4 物質パラメータ

核データライブラリーを使う領域に関して、物質毎のパラメータを **keyword=value** の形で指定します。挿入場所は、その物質番号のサブセクション中なら自由です。指定できるパラメータとその意味は以下の通りです。

5.4.5 阻止能の指定

PHITS では、通常、物質の阻止能は **ndedx** パラメータで指定するモデル（ATIMA、SPAR など）で計算します。しかし、それらのモデルでは精度が十分ではない場合や、ICRU90 で定義した阻止能を使いたい場合は、阻止能のデータベースを直接読み込ませることができます。その指定方法は

```
dedxfile = ファイル名
```

で指定できます。この阻止能データベースファイルは、**file(29)** で指定したフォルダ（初期設定は **file(1)/data/dedx**）に格納しておく必要があります。また、様々な物質に対する陽子及び α 粒子に対して PSTAR 及び ASTAR⁸⁸ で計算した阻止能データベースを上記フォルダに格納していますので、必要に応じて指定してご使用ください。なお、本機能は ATIMA で阻止能を計算する放射線に対してのみ有効となります。また、エネルギー分散 (**nedisp**) や角度分散 (**nspred**) は、従来と同様に機能します。

⁸⁸ <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>

表 89: 物質パラメータ

パラメータ	値	説明
GAS	D = 0 = 0 = 1	電子の阻止能の密度効果 液体もしくは固体の計算に適する 気体の計算に適する
ESTEP	= <i>n</i>	電子輸送のサブステップの数を <i>n</i> にする <i>n</i> が build-in のデフォルト値より小さい時は無視される
NLIB PLIB ELIB HLIB	= <i>id</i> = <i>id</i> = <i>id</i> = <i>id</i>	デフォルトの中性子ライブラリー番号を <i>id</i> にする デフォルトの光子ライブラリー番号を <i>id</i> にする デフォルトの電子ライブラリー番号を <i>id</i> にする デフォルトの陽子ライブラリー番号を <i>id</i> にする
COND	< 0 = 0 > 0	伝導体設定 絶縁体 (Default) 1 個でも絶縁体があれば絶縁体、それ以外は伝導体 1 個でも伝導体があれば伝導体

5.4.5.1 阻止能データベースファイルのフォーマット

dedxfile で指定する阻止能データベースファイルでは、\$と#がコメントとして利用できます。また、PHITS 入力ファイルとほぼ同じく大文字小文字の区別はありません。指定できるパラメータは **unit** と **kf** のみで、それぞれ阻止能を与えるエネルギーの単位と放射線の種類を表します。

unit = 1: MeV (全運動エネルギー、デフォルト)
 = 2: MeV/u (atomic mass unit あたりの運動エネルギー)
 = 3: MeV/n (核子あたりの運動エネルギー)

unit は、最初の **kf** コードを指定する前に指定してください。kf は対象となる粒子の **kf** コードを指定し、その後に阻止能データベースを

エネルギー 阻止能

順にエネルギーの昇順で定義してください。ここで、エネルギーは **unit** で指定した単位、阻止能は MeV/(g/cm²) の単位で与えてください。阻止能の単位は変更できませんのでご注意ください。指定したエネルギー範囲外の放射線や **kf** コードを指定しなかった放射線に対しては、**ATIMA** で計算した値がそのまま利用されます。複数の放射線に対する阻止能を定義する場合は、1 つのデータベースファイルにまとめてください。複数用意したデータベースファイルを 1 つの物質に対して使用することはできません。

5.4.6 $S(\alpha, \beta)$ の指定

低エネルギー中性子の輸送の際、熱中性子散乱データ $S(\alpha, \beta)$ のライブラリーが必要になる場合があります。特に、熱エネルギー付近で挙動が大きく変わりますのでご注意ください。 $S(\alpha, \beta)$ ライブラリーは、

MTn 物質 ID

で指定できます。ここで、**n** はその物質の物質番号です。物質 ID は、**xmdir** に書かれている ID 番号 (lwtr.20t など) です。例えば、常温の水の場合は、

```

M1  H    2.0
    O    1.0
MT1 lwtr.20t

```

のように指定します。各データの物質や温度情報は/XS/tsl/tsl-table に書かれていますので、そちらをご参照下さい。

5.4.7 飛跡構造解析計算用の化学形の指定

飛跡構造解析計算を行う場合、物質の化学形が重要です。電子の飛跡構造解析や、KURBUC を用いた陽子や炭素の飛跡構造解析は、水の断面積を密度によって規格化することによって物質の断面積を計算しますので、化学形の指定は不要です。しかし、ITSART (Ion Track Structure calculation model for Arbitrary Radiation and Targets) を用いた陽子・イオンの飛跡構造解析の場合、構成元素をもとに断面積やイオン化ポテンシャルを計算することに加え、以下の物質はさらに化合物であることを考慮できます。

H₂O, CO₂, NH₂, NH₃, SF₆, TeF₆, CH₄, CH₃, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₆H₆, (CH₃)₂NH

化合物としての化学形を考慮する場合、

```

M1  H    2.0    O 1.0
chem = H2O

```

のように表記します。化合物や純物質の混合物の場合、物質量 (モル) の比で

```

M1  H  1.62  O  0.01  N 1.6  C 0.4  Ar  0.1
chem = H2O  0.01  N2  0.8  CH4  0.4  Ar  0.1

```

のように表記します。Chem 内の物質質量比は自動で規格化されるので、絶対値は重要ではありません。

5.4.8 例題

幾つかの例題を下に示します。

例 6: [material] セクションの例題 (1)

```

1: [ M a t e r i a l ]
2: MAT[ 1 ]
3:   1H          1.0000000E-04
4:   208Pb       1.7238000E-02
5:   204Pb       4.6801000E-04
6:   206Pb       7.9430000E-03
7:   207Pb       7.2838000E-03
8: MAT[ 2 ]
9:   1H          1.0000000E-09
10:  14N         4.6801000E-05
11:  16O         7.9430000E-06

```

元素 (核種) と組成比の順番は、元素-組成比がデフォルトで、これを逆にしたいときは、

例 7: [material] セクションの例題 (2)

```

1: [ M a t e r i a l ]
2:   den          nuc      <-----
3: MAT[ 1 ]
4:  1.0000000E-04    1H

```

```

5: 1.7238000E-02    208Pb
6: 4.6801000E-04    204Pb
7: 7.9430000E-03    206Pb
8: 7.2838000E-03    207Pb
9: MAT[ 2 ]
10: 1.0000000E-09    1H
11: 4.6801000E-05    14N
12: 7.9430000E-06    16O

```

のように、den nuc を入れて定義します。

例 8: [material] セクションの例題 (3)

```

1: [ M a t e r i a l ]
2: m1      80196.49c  5.9595d-5
3:         80198.49c  3.9611d-3
4:         80199.49c  6.7025d-3
5:         80200.49c  9.1776d-3
6:         80201.49c  5.2364d-3
7:         80202.49c  1.1863d-2
8:         80204.49c  2.2795d-3
9: $       ...Be...
10: m3      4009.37c  1.2362E-1
11: mt3     be.01
12: $       ...h2o (25C)...
13: m4      1001.37c  6.6658d-2      8016.37c  3.3329d-2
14: mt4     lwtr.01
15: $       ...b4c (natural boron; 25%-density)...
16: m5      6012.37c  6.8118d-3
17:         5011.37c  2.1825d-2
18: $       ...liquid-h2 (20K)...
19: m6      1001.49c  3.1371d-2      1011.49c  1.0457d-2
20: mt6     orthoh.00  parah.00

```

5.5 [Surface] セクション

5.5.1 書式

このセクションでは、[cell] セクションでセル（小部屋）を定義するために使用する面 (surface) を定義します。PHITS で定義できる面には平面、球面、円柱面などがあり、これらの形状に対応した方程式の各パラメータを指定することで、それぞれの面を定義します。コメント文字として\$の他に、行頭のc_l (lは空白文字) が使用できます。ファイルのインクルード文、定数定義などは、セクションの途中でも用いることが出来ます。継続行には、先頭に5桁の空白が必要です。

書式は以下の通りです。面番号、座標変換番号、面記号、面定義数値の順番で、各面を定義します。各項目の意味は表 90 を参照してください。

[S u r f a c e]			
面番号	座標変換番号	面記号	面定義数値

面記号は、表 91 に示す1つの方程式で表現できる面や、表 92 にある複数の面を組み合わせたマクロボディーの記号により指定します。面定義数値では定数や数式が使えます。また、面番号の前に“*”をつけると全反射面、“+”をつけると白色反射面を定義できます。例えば、無限に広がる繰り返し構造を模擬する場合は、全反射面の機能を使うと便利です。但し、四面体メッシュ体系内では反射面が動作しません。四面体メッシュ体系内で反射面を使いたい場合は、物理的に無視できる薄い四面体メッシュ体系外領域を内部に定義し、その中に反射面を定義すれば、反射を実現できます。

表 90: 面記述書式

項目	説明
面番号	1 ~ 999999 が使用できます。
座標変換番号	座標変換を行わない場合は指定しません。座標変換がある場合は、[transform] セクションで定義する TR _n の番号 <i>n</i> を指定します。
面記号	表 91 および表 92 にある面記号を指定します。
面定義数値	定義する面により 1 個から 15 個の入力値を指定します。

表 91: 方程式で定義される面

面記号	型式	解説	方程式	入力数値
P	平面	汎用	$Ax + By + Cz - D = 0$	A, B, C, D
PX		X 軸に垂直	$x - D = 0$	D
PY		Y 軸に垂直	$y - D = 0$	D
PZ		Z 軸に垂直	$z - D = 0$	D
P	平面	3 点を通る面		$x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$
SO	球	中心が原点	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
S		汎用	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - R^2 = 0$	x_0, y_0, z_0, R
SX		中心が X 軸上	$(x - x_0)^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	x_0, R
SY		中心が Y 軸上	$x^2 + (y - y_0)^2 + z^2 - R^2 = 0$	y_0, R
SZ		中心が Z 軸上	$x^2 + y^2 + (z - z_0)^2 - R^2 = 0$	z_0, R
C/X	円柱	X 軸に平行	$(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - R^2 = 0$	y_0, z_0, R
C/Y		Y 軸に平行	$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 - R^2 = 0$	x_0, z_0, R
C/Z		Z 軸に平行	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - R^2 = 0$	x_0, y_0, R
CX		X 軸上	$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY		Y 軸上	$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ		Z 軸上	$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R
K/X	円錐	X 軸に平行	$\sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \mp t (x - x_0) = 0$	$x_0, y_0, z_0, t ^2, k$
K/Y		Y 軸に平行	$\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} \mp t (y - y_0) = 0$	$x_0, y_0, z_0, t ^2, k$
K/Z		Z 軸に平行	$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \mp t (z - z_0) = 0$	$x_0, y_0, z_0, t ^2, k$
KX		X 軸上	$\sqrt{y^2 + z^2} \mp t (x - x_0) = 0$	$x_0, t ^2, k$
KY		Y 軸上	$\sqrt{x^2 + z^2} \mp t (y - y_0) = 0$	$y_0, t ^2, k$
KZ		Z 軸上	$\sqrt{x^2 + y^2} \mp t (z - z_0) = 0$	$z_0, t ^2, k$
				k は ± 1 or 未指定
SQ	楕円 双曲面 放物面	X, Y, または Z 軸に 平行な軸	$A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C(z - z_0)^2 + 2D(x - x_0) + 2E(y - y_0) + 2F(z - z_0) + G = 0$	$A, B, C, D, E, F, G, x_0, y_0, z_0$
GQ	円柱 円錐 楕円 双曲面 放物面	X, Y, または Z 軸に平行 でない軸	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Jz + K = 0$	$A, B, C, D, E, F, G, H, J, K$
TX	楕円環体 円環体	X, Y, または Z 軸に 平行	$(x - x_0)^2/B^2 + (\sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	x_0, y_0, z_0, A, B, C
TY			$(y - y_0)^2/B^2 + (\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	x_0, y_0, z_0, A, B, C
TZ			$(z - z_0)^2/B^2 + (\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	x_0, y_0, z_0, A, B, C

[surface] セクションで定義した面を [cell] セクションで使用する際、基本的にはその面によって作られる形状の内側をマイナス側、外側をプラス側として指定してください。ただし、平面などの閉じた形状でない面の場合は、その面を表す方程式 $f(x, y, z) = 0$ に対して、任意の座標 (x_0, y_0, z_0) を代入して判別してください。左辺の値 $f(x_0, y_0, z_0)$ が正であれば座標 (x_0, y_0, z_0) が含まれる領域がプラス側、負であればマイナス側となります。例えば、PY で $D = 5$ とした場合、方程式が $f(x, y, z) = y - 5 = 0$ となるため、原点 $(0, 0, 0)$ を含む領域は $f(0, 0, 0) = 0 - 5 = -5$ のマイナス側となります。

面記号 P を用いて、3 つの座標を与えることにより平面を定義できます。この場合、座標原点を含む領域がマイナス側として定義されますので、[cell] セクションで使用する際はご注意ください。

円錐の場合、 x_0, y_0, z_0 等で指定する頂点を中心に、中心軸に沿ってプラス側とマイナス側の両方に円錐面が定義されます。 k の入力を 1 とすると軸のプラス側に広がる面のみを指定し、 $k = -1$ とすると軸のマイナス側に広がる面のみを指定します。 k に何の値も与えない場合はその両方を指定します。

表 92: マクロボディー

面記号	型式	入力数値	解説
BOX	任意の BOX 平面 (全ての角が 90 度)	$x_0, y_0, z_0,$ $A_x, A_y, A_z,$ $B_x, B_y, B_z,$ C_x, C_y, C_z	基点の座標 基点からの第 1 面のベクトル 基点からの第 2 面のベクトル 基点からの第 3 面のベクトル
RPP	直方体 (各面が x, y, z 軸に 垂直)	$x_{\min}, x_{\max},$ $y_{\min}, y_{\max},$ z_{\min}, z_{\max}	x 座標の最小値、最大値 y 座標の最小値、最大値 z 座標の最小値、最大値
SPH	球 (汎用球 S と同じ)	$x_0, y_0, z_0,$ R	中心座標 球の半径
RCC	円柱	$x_0, y_0, z_0,$ $H_x, H_y, H_z,$ R	底面の中心座標 底面の中心からの上面中心へのベクトル 円柱の半径
RHP or HEX	任意の 6 角柱 プリズム	$x_0, y_0, z_0,$ $H_x, H_y, H_z,$ $A_x, A_y, A_z,$ $B_x, B_y, B_z,$ C_x, C_y, C_z	基点の座標 基点からの高さベクトル 基点からの第 1 面へのベクトル 基点からの第 2 面へのベクトル 基点からの第 3 面へのベクトル
REC	楕円柱	$x_0, y_0, z_0,$ $H_x, H_y, H_z,$ $A_x, A_y, A_z,$ B_x, B_y, B_z	楕円柱底面の中心座標 シリンダーの高さベクトル (H) H に垂直な楕円の長軸ベクトル (A) H と A に垂直な楕円の短軸ベクトル (B)
TRC	カットされた円錐	$x_0, y_0, z_0,$ $H_x, H_y, H_z,$ $R_1,$ R_2	円錐底面の中心座標 円錐の高さベクトル 底面の半径 上面の半径
ELL	楕円体	$R > 0$ のとき、 $x_1, y_1, z_1,$ $x_2, y_2, z_2,$ R $R < 0$ のとき、 $x_0, y_0, z_0,$ $A_x, A_y, A_z,$ R	第 1 焦点の座標 第 2 焦点の座標 長軸の半径 この場合、長軸を中心に回転して楕円体を作りますので、 長軸 < 短軸となっても問題ありません 楕円体の中心 長軸のベクトル 短軸の半径
WED	くさび形	$x_0, y_0, z_0,$ $A_x, A_y, A_z,$ $B_x, B_y, B_z,$ H_x, H_y, H_z	頂点の座標 底面の三角形においてある頂点から別の頂点へのベクトル (A) A の頂点とは別の頂点へのベクトル (B) 高さベクトル (H)

カットされた円錐 (TRC) を用いる際、上面の半径 (R_2) を 0 にしないよう注意してください。例えば、TRC を用いてカットされていない (頂点をもつ) 円錐を定義する場合は、 R_2 の値に小さな値を入れてください。

くさび形 WED は、その底面が直角三角形である必要があります。任意の三角形は直角三角形を組み合わせで作成してください。

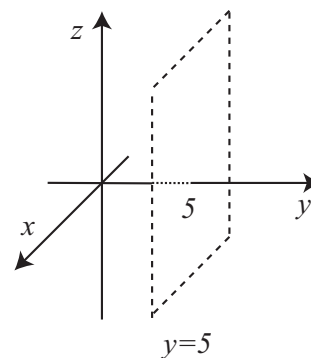
5.5.2 面の記述方法

本節では、表 91 と 92 で示した各面と各マクロボディについて、例題と図を用いて説明します。

例 9: 平面の例題 (1)

```
1: [surface]
2: 1 PY 5
```

PX, PY, PZ はそれぞれ x, y, z 軸に垂直な平面を定義します。この例題では、面記号に PY、面定義数値に 5 を指定することで、面番号 1 の面を y 軸に垂直な $y = 5$ の平面として定義しています。この面は、図 19 の破線で示した面ようになります。

図 19: 例題 9 で定義した $y = 5$ の平面。

例 10: 平面の例題 (2)

```
1: [surface]
2: 1 P 2 2 1 10
3: 2 P 5 0 0 0 5 0 0 0 10
```

任意の面を定義する際は、面記号に P を指定します。この場合、面定義数値の指定方法には 2 種類あり、方程式 $Ax + By + Cz - D = 0$ を満たす A, B, C, D を指定する方法と、平面を通る 3 つの座標 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ を指定する方法があります。前者の方法は、定義したい面に垂直な法線ベクトル (s, t, u) とその面が通る点の座標 (x_0, y_0, z_0) がわかっている場合に利用できます。この条件を満たす平面の方程式は、

$$s(x - x_0) + t(y - y_0) + u(z - z_0) = 0 \quad (7)$$

となり、これを変形すると、

$$sx + ty + uz - (sx_0 + ty_0 + uz_0) = 0 \quad (8)$$

となるため、 $A = s, B = t, C = u, D = sx_0 + ty_0 + uz_0$ を指定することで、目的の面を定義できます。例題 (2) に示した面番号 1 は、法線ベクトルを $(2, 2, 1)$ とし、座標 $(5, 0, 0)$ を通る面です。この面は、図 20 の破線で示した面ようになります。後者の方法では、定義したい面が通過する 3 つの座標を指定します。例題 (2) の面番号 2 は、座標 $(5, 0, 0), (0, 5, 0), (0, 0, 10)$ を通る面となっており、面番号 1 の面と同じものです。

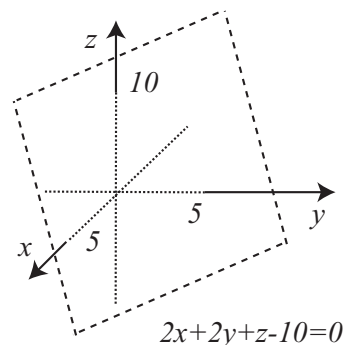


図 20: 例題 10 で定義した面。

例 11: 球面の例題

```

1:  [surface]
2:   1  SO    5
3:   2  SZ   10  3
4:   3   S   10 10 0  3

```

球面を定義する際は、**SO, SX, SY, SZ, S**を指定します。**SO**は座標原点を中心とする球面を定義する場合に指定し、面定義数値としてその半径 R を指定します。この例題では、2行目において、原点を中心として半径を 5cm とする球面を面番号 1 の面として定義しています。**SX, SY, SZ**は、それぞれ x, y, z 軸上に中心をもつ球面を定義する際に指定します。面定義数値は、各軸上の値と半径 R を指定します。例題の 3 行目では、 z 軸上の座標 (0, 0, 10) を中心とする半径 3cm の球面を面番号 2 の面として定義しています。任意の座標 (x_0, y_0, z_0) を中心とする球面を定義する場合は **S** を指定します。この場合、面定義数値には、球の中心を示す座標 (x_0, y_0, z_0) と半径 R を指定します。例題では、(10, 10, 0) を中心とする半径 3cm の球面を面番号 3 の面として定義しています。例題で定義した面番号 1, 2, 3 の面は図 21 に示す 3 つの球面ようになります。

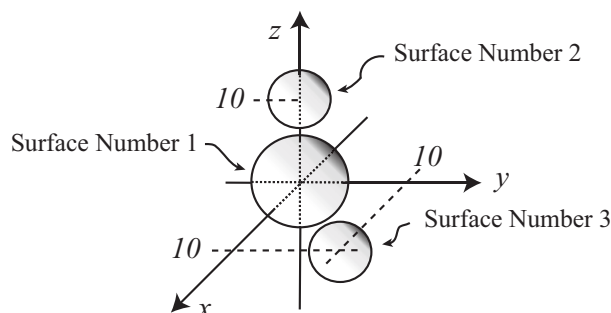


図 21: 例題 11 で定義した 3 つの球面。

例 12: 円柱側面の例題

```

1:  [surface]
2:   1  CY    5
3:   2  C/Y  15 0  3

```

x, y, z 軸を中心軸とする円柱の側面を定義する際には、それぞれ **CX, CY, CZ** を指定します。この場合、面定義数値には円柱の半径 R を指定します。例題の 2 行目では、 y 軸を中心軸とする半径 5cm の円柱の側面を定義しています。これは図 22 の右上に示す円柱の側面に対応しています。次に、**C/X, C/Y, C/Z** は、それぞれ x, y, z 軸に平行な直線を中心軸とする円柱の側面を定義する際に指定します。この場合、円柱の半径 R の他に、中心軸が通る点の座標を指定する必要があります。例題の 3 行目では、 y 軸に平行で座標 (15, 0, 0) を通る直線を中心軸とする円柱の側面を定義しています。 $x_0 = 15, z_0 = 0$ の値を面定義数値の 1, 2 番目のそれぞれで指定しており、最後に半径 3cm を与えています。この面は、図 22 の左下に示す円柱の側面に対応します。

x, y, z 軸に平行でない直線を中心軸とする円柱は面記号 **GQ** を用いて定義できますが、**[transform]** を使った座標変換を利用する方が便利です。

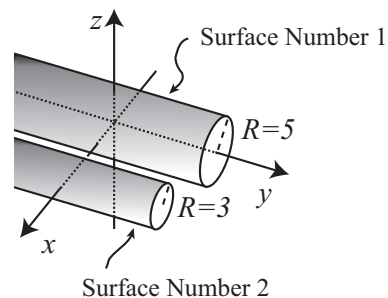


図 22: 例題 12 で定義した 2 つの円柱の側面。

例 13: 円錐面の例題

```

1:  [surface]
2:   1  KZ   0  1
3:   2  K/Z  0 20 0 1/3  1

```

x, y, z 軸を中心軸とする円錐面を定義する際は、**KX, KY, KZ** を指定します。面定義数値には、各軸上の頂点の座標、円錐の角度に関するパラメータ $|t|^2$ および円錐の広がる方向に関するパラメータ k (省略可) を指定します。例題の 2 行目に **KZ** を指定した例を示しており、面定義数値の 1 番目に頂点の z 座標 $z_0 = 0$ 、2 番目に $|t|^2 = 1$ を指定しています。面記号 **KZ** の方程式は、

$$\sqrt{x^2 + y^2} \mp |t|(z - z_0) = 0 \quad (9)$$

なので、各面定義数値の値を代入すると、

$$\sqrt{x^2 + y^2} - z = 0, (z > 0) \quad (10)$$

$$\sqrt{x^2 + y^2} + z = 0, (z < 0) \quad (11)$$

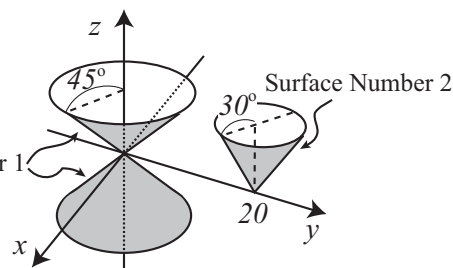


図 23: 例題 13 で定義した円錐面。

となります。この場合、面番号 1 の面は、円錐の頂点を $(0, 0, 0)$ とし、 z 軸を中心軸とする円錐面となり、図 23 の左側に示す面ようになります。頂点を境にして、 z 軸に沿ってプラス側が式 (10) に対応しており、マイナス側が式 (11) に対応しています。これらはそれぞれ面定義数値の最後に $k = 1$ あるいは $k = -1$ を指定することで定義できますが、例題の 2 行目では k を未指定としており、この場合は両方の面を定義することになります。また、面定義数値の 2 番目は、円錐の中心軸と母線のなす角度 θ と、 $|t|^2 = \tan^2 \theta$ の関係にあります。よって、面番号 1 の場合は $\tan \theta = 1$ 、すなわち $\theta = 45^\circ$ となります。次に、 x, y, z 軸に平行な中心軸をもち、座標 (x_0, y_0, z_0) を頂点とする円錐面を定義する場合は、**K/X, K/Y, K/Z** を指定します。例題の 3 行目に、**K/Z** を指定した例を示します。頂点は $(0, 20, 0)$ であり、 z 軸に平行な中心軸をもつ円錐面を定義しています。 $|t|^2 = 1/3$ であることから、 $\tan \theta = 1/\sqrt{3}$ 、すなわち $\theta = 30^\circ$ となります。また、 $k = 1$ とすることで、プラス側の円錐面のみを定義しています。なお、 $k = \pm 1$ を定義した場合、斜め方向への回転ができなくなってしまう。そのような場合は、 k は定義せずに両側に広がる円錐面を定義した上で、別の面を定義して片側のみに広がる円錐面を表現してください。

例 14: 楕円面の例題

```

1:  [surface]
2:   1  SQ   1/9**2 1/6**2 1/3**2  0 0 0 -1  0 0 0

```

図 24 に示すような楕円面を定義する場合は、**SQ** を指定します。楕円面の方程式は、 x, y, z 軸方向の半径がそれぞれ a, b, c の場合に、

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (12)$$

と書けます。よって、**SQ** の面定義数値の 1,2,3 番目にそれぞれ $A = 1/a^2, B = 1/b^2, C = 1/c^2$ を指定し、4,5,6 番目には $D = E = F = 0$ 、7 番目には $G = -1$ を指定することで、楕円面を定義できます。例題では、 x, y, z 軸方向の半径がそれぞれ 9, 6, 3cm の場合の楕円面を定義しています。

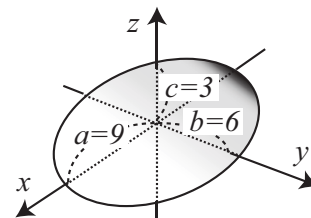


図 24: 例題 14 で定義した楕円面。

楕円を回転させて定義される回転楕円体を指定する場合は、回転軸以外の軸方向の径の長さを一致させます。例えば、 x 軸を回転軸とする場合は、 $b = c$ すなわち $B = C$ と指定します。また、面定義数値の 8,9,10 番目で、楕円体の中心の座標 (x_0, y_0, z_0) を指定します。例題では、座標原点 $(0, 0, 0)$ を楕円体の中心としています。なお、 D, E, F に 0 以外の値を指定すると、楕円面以外の 2 次曲面を表すことになるのでご注意ください。

例 15: 双曲面の例題

```

1:  [surface]
2:   1  SQ      1/6**2 1/3**2 -1/5**2  0 0 0 -1 0 0 0
3:   2  SQ      -1/6**2 -1/3**2 1/5**2  0 0 0 -1 0 20 0

```

図 25 の中央と右側に示したような双曲面を定義する場合は、面記号に **SQ** を指定します。中央に示したものは一葉双曲面、右側に示したものは二葉双曲面と呼ばれており、それぞれ次の方程式によって定義されます。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (13)$$

$$-\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (14)$$

ただし、これらは z 軸を中心軸としたものです。また、 $a = b$ の場合は回転双曲面となります。例題の 2 行目で定義している面番号 1 が、図 25 の中央にある一葉双曲面となります。面定義数値の 1,2,3 番目にそれぞれ $A = 1/6^2, B = 1/3^2, C = -1/5^2$ を指定し、4,5,6 番目には $D = E =$

$F = 0$ 、7 番目には $G = -1$ を指定しています。中心軸は z 軸であり、面定義数値の 8,9,10 番目に $(0,0,0)$ を指定することで、中心軸が座標原点を通ります。この双曲面と z 軸に垂直な平面の交線は楕円となります。図 25 の左側に示したのが、 $z = 0$ の平面上で面番号 1 の面を見た図です。 x, y 軸方向の半径がそれぞれ $a = 6, b = 3\text{cm}$ の楕円となっています。例題の 3 行目で定義しているのが、図 25 の右側に示す二葉双曲面です。面番号 1 とは a, b, c の符号を逆転させており、面定義数値の 4,5,6 番目を 0、7 番目を $G = -1$ とすることで、二葉双曲面を定義しています。ただし、面定義数値の 8,9,10 番目において $(x_0, y_0, z_0) = (0, 20, 0)$ と指定することで、中心軸が $(0, 20, 0)$ を通過する面となっています。また、二葉双曲面を用いて **[cell]** セクションで領域を定義する際は、座標 (x_0, y_0, z_0) を含む領域がマイナス側、含まない方がプラス側となります。図の右下にある双曲面の内側の領域もプラス側として指定することになりますので、ご注意ください。

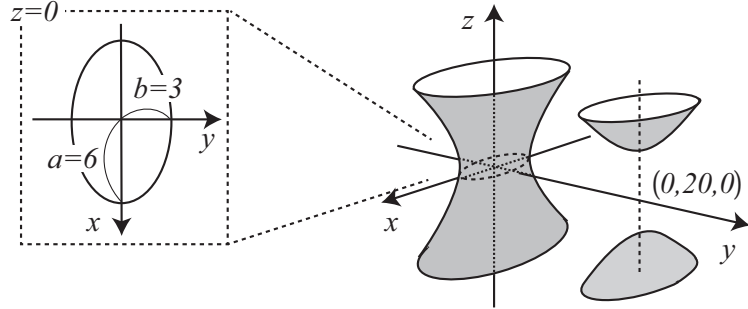


図 25: 例題 15 で定義した双曲面。

例 16: 放物面の例題

```

1:  [surface]
2:   1  SQ      1 1/2**2 0 0 0 -1 0 0 0 0

```

図 26 の中央に示したような放物面を定義する場合には、例題 16 のように面記号 **SQ** を用いて指定します。

一般に z 軸を中心軸とする放物面の式は次のようになります。

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \quad (15)$$

よって、面定義数値の 1,2,3 番目にそれぞれ $A =$

$1/a^2, B = 1/b^2, C = 0$ を指定し、4,5,6 番目には $D = E = 0, F = -1$ 、7 番目には $G = 0$ を指定することで、 z 軸を中心軸とする放物面を定義できます。例題では $a = 1, b = 2$ の放物面を定義しています。この放物面と z 軸を含む平面の交線は放物線となり、 $y = 0$ と $x = 0$ の平面上で見ると、それぞれ図 26 の左側と右側に示す放物線となります。また、放物面の頂点 (x_0, y_0, z_0) は面定義数値の 8,9,10 番目で指定します。

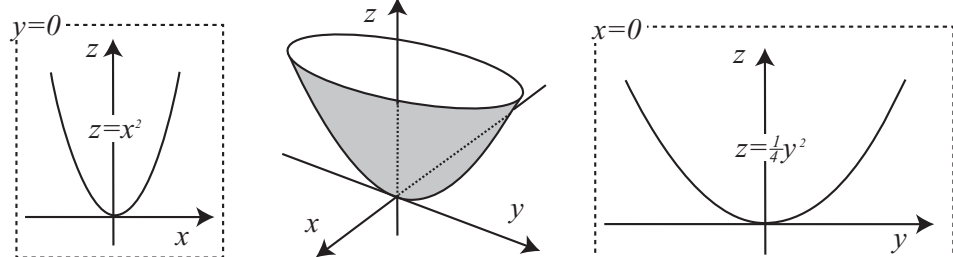


図 26: 例題 16 で定義した放物面。

例 17: GQ の例題

```

1: [surface]
2: set: c1[30]
3: set: c2[cos(c1/180*pi)]
4: set: c3[sin(c1/180*pi)]
5: 1 GQ c2**2 1/2**2 c3**2 0 0 -2*c2*c3 -c3 0 -c2 0

```

面記号 **GQ** は、 x, y, z の 2 次式で表現される曲面を定義する場合に使用します。同様に 2 次式で表現される **CX** 等 (円柱)、**KX** 等 (円錐)、**SQ** (楕円面等) との違いは、中心軸が x, y, z 軸と平行でない曲面に対しても定義できる点です。ただし、単純な 1 次変換であれば、**CX, KX, SQ** 等で定義した面に対して **[transform]** セクションで定義した座標変換を適用する方が便利です。例題 17 では、例題 16 で取り扱った放物面を y 軸回りに 30° だけ回転させた例を示しており、図 27 ような面を定義できます。この例題で指定した面定義数値は、下記の計算により求めたものです。座標 (x, y, z) を y 軸周りに θ 回転させた座標を (x', y', z') とすると、これらの関係は、

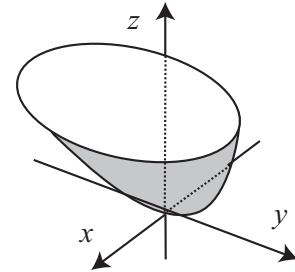


図 27: 例題 17 で定義した放物面。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (16)$$

と書けます。この関係式より、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \cos \theta - z' \sin \theta \\ y' \\ x' \sin \theta + z' \cos \theta \end{pmatrix} \quad (17)$$

が求まるので、式 (15) に代入すると、

$$\begin{aligned} x' \sin \theta + z' \cos \theta &= \frac{(x' \cos \theta - z' \sin \theta)^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2}, \\ x' \sin \theta + z' \cos \theta &= \frac{x'^2 \cos^2 \theta + z'^2 \sin^2 \theta - 2x'z' \cos \theta \sin \theta}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2}, \\ x' \sin \theta + z' \cos \theta &= \frac{\cos^2 \theta}{a^2} x'^2 + \frac{\sin^2 \theta}{a^2} z'^2 - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{a^2} x'z' + \frac{y'^2}{b^2}, \\ 0 &= \frac{\cos^2 \theta}{a^2} x'^2 + \frac{1}{b^2} y'^2 + \frac{\sin^2 \theta}{a^2} z'^2 - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{a^2} x'z' - x' \sin \theta - z' \cos \theta \end{aligned} \quad (18)$$

と x', y', z' の方程式が得られます。この式と表 91 にある **GQ** の方程式を比べ、各面定義数値を指定すると、放物面を y 軸周りに θ だけ回転させた面を定義できます。この例題では、 $\theta = 30^\circ$ を **c1** として定数定義しており、これを用いた $\sin \theta, \cos \theta$ をそれぞれ **c2, c3** として定数定義しています。

例 18: 楕円環面（トーラス面）の例題

```

1:  [surface]
2:  1  TZ      0 0 0 10 3 5

```

図 28 の中央に示すような楕円環面（トーラス面）は、楕円をその円の外側にある軸を中心に回転させて得られる面です。面記号 **TX**, **TY**, **TZ** を用いて定義することができ、それぞれ x, y, z 軸を回転軸とする楕円環面を定義します。 z 軸を回転軸とする楕円環面の方程式は、

$$\frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (19)$$

と書くことができます。この場合の楕円は長軸方向に $2a$ 短軸方向に $2b$ の大きさを持ち、楕円の中心と回転軸の距離は R となります。例題 18 では楕円環体の中心を原点としており、面定義数値の 1,2,3 番目は全て 0 と指定しています。面定義数値の 4 番目に $A = R = 10\text{cm}$ 、5 番目に $B = b = 3\text{cm}$ 、6 番目に $C = a = 5\text{cm}$ を指定することで、長軸方向に 10cm 、短軸方向に 6cm の大きさをもつ楕円を z 軸から 10cm 離れた位置で回転させた楕円環面を定義しています。図 28 の左側に示したのが $z = 0$ の平面との交線です。原点と環の中心との距離は 10cm 、環の大きさは $5 \cdot 2 = 10\text{cm}$ となります。図 28 の右側に示したのが $y = 0$ の平面との交線です。ただし、 x 軸のプラス側のみ示しています。環の断面図となっており、楕円が長軸方向に 10cm 、短軸方向に 6cm の大きさをもっていることがわかります。

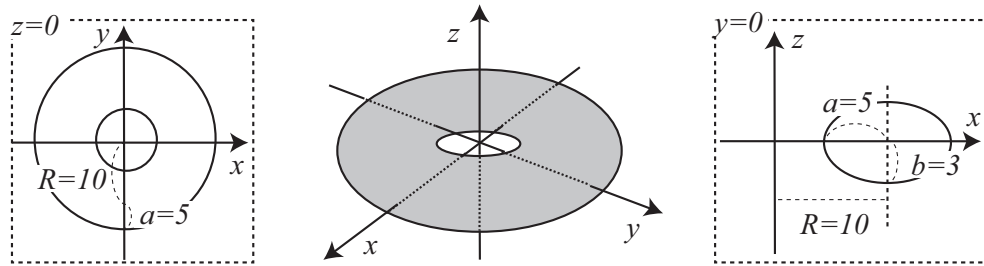


図 28: 例題 18 で定義した楕円環面。

例 19: BOX の例題

```

1:  [surface]
2:  1  BOX      5 5 0 9 0 0 0 6 0 0 0 3

```

任意の直方体の面を定義する場合は、面記号 **BOX** を指定します。面定義数値には、基点の座標 $P(x_0, y_0, z_0)$ と、直方体を形作る 3 つのベクトル $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$, $\mathbf{B}(B_x, B_y, B_z)$, $\mathbf{C}(C_x, C_y, C_z)$ の各成分を指定します。これらの関係は図 29 のようになります。例題 19 では、点 $(5, 5, 0)$ を頂点の 1 つとし、 $\mathbf{A} = (9, 0, 0)$, $\mathbf{B} = (0, 6, 0)$, $\mathbf{C} = (0, 0, 3)$ の 3 つのベクトルが示す方向に広がった直方体の面を定義しています。任意の直方体の面を定義する際、 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ は x, y, z 軸に平行である必要はありませんが、各々のベクトルの関係は垂直である必要があります。

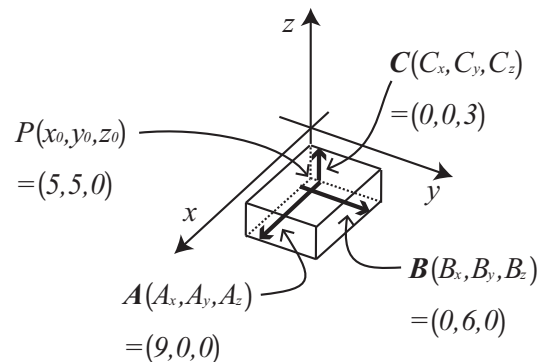


図 29: 例題 19 で定義した直方体の面。

例 20: RPP の例題

```

1:  [surface]
2:  1  RPP    5 14  5 11  0 3

```

面記号 **RPP** は、 xy, yz, zx 平面に平行な各々2つずつの平面で囲まれる直方体の面を定義する場合に指定します。よって、**BOX**とは違い、各軸に対して任意の傾きをもつ直方体は定義できません。面定義数値として、 x, y, z に関するそれぞれの最小値と最大値を与えます。例題 20 では、面定義数値の 1 から 6 番目に、 $x_{\min} = 5, x_{\max} = 14, y_{\min} = 5, y_{\max} = 11, z_{\min} = 0, z_{\max} = 3$ を指定しており、例題 19 で定義したものと同一直方体の面を定義しています。

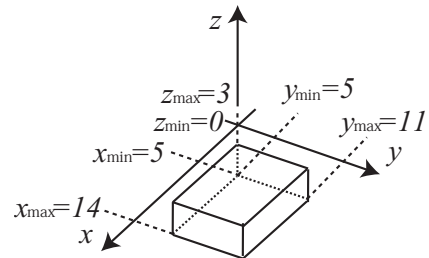


図 30: 例題 20 で定義した直方体の面。

例 21: SPH の例題

```

1:  [surface]
2:  1  SPH    5 5 5  5

```

面記号 **SPH** を指定することで、任意の点を中心とする球面を定義できます。面定義数値には、球の中心の座標 (x_0, y_0, z_0) を 1, 2, 3 番目に指定し、球の半径を 4 番目に指定します。例題 21 では、点 $(5, 5, 5)$ を中心とし、半径を $R = 5\text{cm}$ とする球面を定義しています。なお、任意の球面 **S** との違いはありません。

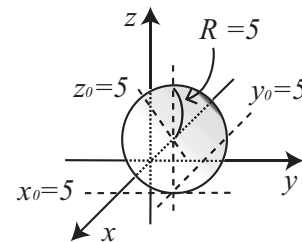


図 31: 例題 21 で定義した球面。

例 22: RCC の例題

```

1:  [surface]
2:  1  RCC    5 5 0  0 0 10  5

```

面記号 **RCC** を指定することで、円柱面を定義できます。面定義数値として、円柱の底面の中心座標 $P(x_0, y_0, z_0)$ の各成分、その点から上面中心へのベクトル $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z)$ の各成分と半径 R を指定します。これらの関係は図 32 のようになります。例題では、 $P(5, 5, 0)$ を円柱底面の中心とし、上面中心へのベクトルを $\mathbf{H} = (0, 0, 10)$ 、半径を $R = 5\text{cm}$ としています。**CX** や **C/X** 等とは違い、 x, y, z 軸に平行ではない直線を中心軸とする円柱面を定義する際に便利です。

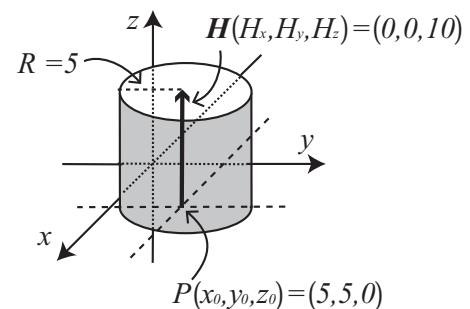


図 32: 例題 22 で定義した円柱面。

例 23: RHP の例題

```

1:  [surface]
2:  1  RHP    0 0 0 0 0 10 5 0 0 2 -5 0 -2 -5 0

```

図 33 の右側に示すような六角柱の面を定義する場合は、面記号 **RHP** あるいは **HEX** を指定します。面定義数値には、六角形となる底面の中心の座標 $P(x_0, y_0, z_0)$ の各成分と、その点から上面中心へのベクトル $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z)$ の各成分の他、六角形を定義するための 3 つのベクトル $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$, $\mathbf{B}(B_x, B_y, B_z)$, $\mathbf{C}(C_x, C_y, C_z)$ の各成分を指定します。六角形の中心 P と 3 つのベクトル $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ の関係は、図 33 の左側に示すようになります。すなわち、点 P から六角形の連続する 3 つの辺に下ろした垂線の大きさと方向を 3 つのベクトルとして与えます。例題 23 では、原点を底面の中心とし、 z 軸方向に 10cm の高さをもつ六角柱の面を定義しています。面定義数値の 1,2,3 番目には原点 $(0, 0, 0)$ の各成分を指定し、4,5,6 番目では $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z) = (0, 0, 10)$ の各成分を指定しています。7 番目から 15 番目までは $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ の x, y, z 成分をそれぞれ順番に指定し、図 33 の左側に示す y 軸に関して対称な六角形を定義しています。

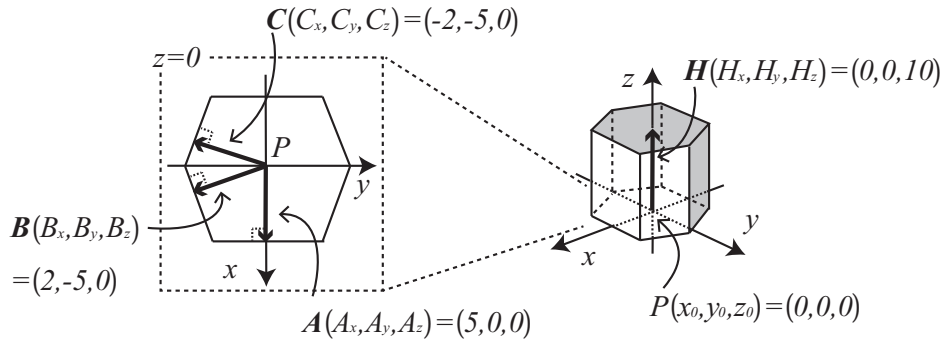


図 33: 例題 23 で定義した六角柱の面。

例 24: REC の例題

```

1:  [surface]
2:  1  REC    0 0 0 0 0 10 5 0 0 0 2 0

```

図 34 の右側に示すような楕円柱の面を定義する場合は、面記号 **REC** を指定します。面定義数値には、底面の中心の座標 $P(x_0, y_0, z_0)$ の各成分と、その点から上面中心へのベクトル $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z)$ の各成分の他、楕円を定義するための 2 つのベクトル $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$, $\mathbf{B}(B_x, B_y, B_z)$ の各成分を指定します。楕円の中心 P と 2 つのベクトル \mathbf{A}, \mathbf{B} の関係は、図 34 の左側に示すようになります。楕円の中心を始点として、図のように長軸ベクトル \mathbf{A} と短軸ベクトル \mathbf{B} を定義します。

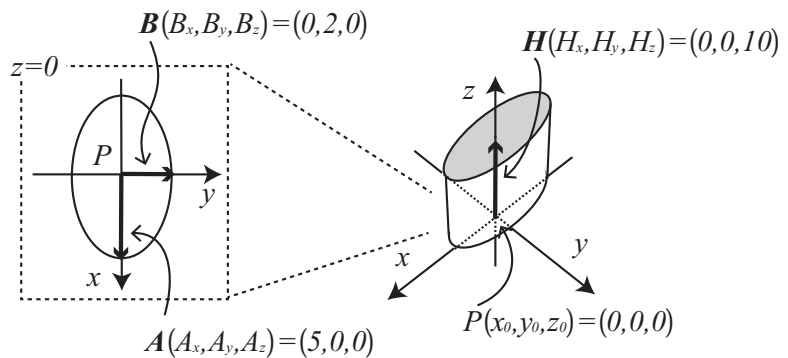


図 34: 例題 24 で定義した楕円柱の面。

ようになります。楕円の中心を始点として、図のように長軸ベクトル \mathbf{A} と短軸ベクトル \mathbf{B} を定義します。例題 24 では、原点を底面の中心とし、 z 軸方向に 10cm の高さをもつ楕円柱の面を定義しています。面定義数値の 1,2,3 番目には原点 $(0, 0, 0)$ の各成分を指定し、4,5,6 番目では $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z) = (0, 0, 10)$ の各成分を指定しています。7 から 12 番目までは \mathbf{A} と \mathbf{B} の x, y, z 成分をそれぞれ順番に指定し、図 34 の左側に示す楕円を定義しています。

例 25: TRC の例題

```

1:  [surface]
2:  1  TRC    0 0 0  0 0 10  5  2

```

図 35 に示すようなカットされた円錐の面を定義する場合は、面記号 **TRC** を指定します。面定義数値には、底面の中心の座標 $P(x_0, y_0, z_0)$ の各成分と、その点から上面中心へのベクトル $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z)$ の各成分に加えて、底面の円の半径 R_1 と上面の円の半径 R_2 を指定します。例題 25 では、原点を底面の中心とし、 z 軸方向に 10cm の高さをもつカットされた円錐の面を定義しています。面定義数値の 1,2,3 番目には原点 $(0, 0, 0)$ の各成分を指定し、4,5,6 番目では $\mathbf{H}(H_x, H_y, H_z) = (0, 0, 10)$ の各成分を指定しています。底面の半径は $R_1 = 5\text{cm}$ 、上面の半径は $R_2 = 2\text{cm}$ としており、これらを面定義数値の 7,8 番目のそれぞれで指定しています。

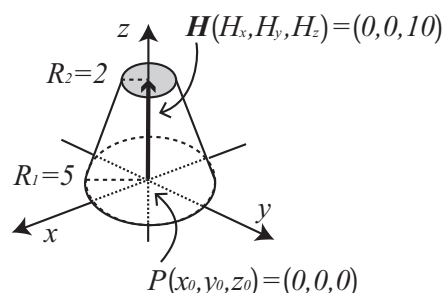


図 35: 例題 25 で定義したカットされた円錐の面。

なお、上面の半径 (R_2) を 0 に設定した場合、自動的に $R_2=1.0\text{e-}5$ となります。これは、**TRC** を用いて頂点を持つ円錐面を定義できないためです。

例 26: ELL の例題 (1)

```

1:  [surface]
2:  1  ELL    3 3 0  -3 -3 0  9

```

面記号 **ELL** を用いて、任意の位置に回転楕円体の面を定義できます。楕円の焦点の座標や中心の座標を指定することで楕円を定義し、その楕円を長軸周りに回転させることで、楕円面を定義します。ただし、この面記号は面定義数値の 7 番目に指定する R の符号によって、1 から 6 番目に指定する値の意味が変わります。例題 26 では R が正の場合を扱っており、この場合は、楕円を形作る 2 つの焦点と長軸の半径を指定します。面定義数値の 1,2,3 番目で楕円の第 1 焦点の座標 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ を与え、4,5,6 番目で第 2 焦点の座標 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、7 番目の値 R には長軸の半径を与えます。図 36 の右側に示したのが、例題 26 により定義された楕円面です。楕円の第 1,2 焦点の座標はそれぞれ $P_1(x_1, y_1, z_1) = (3, 3, 0)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2) = (-3, -3, 0)$ としており、 xy 平面上に定義しています。また、長軸の方向は xy 平面上で x 軸から 45° 傾けた方向としており、図 36 の左側に示すような楕円となっています。長軸の長さは $2R = 18\text{cm}$ であり、この軸を回転軸とする回転楕円体の面が定義されます。

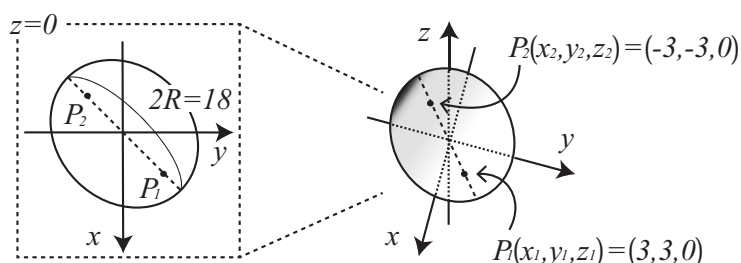


図 36: 例題 26 で定義した楕円面。

面記号 **SQ** で定義する楕円面との違いは、回転軸を傾けることが容易である点です。ただし、**ELL** は、楕円体の 2 つの軸の長さが等しい回転楕円体のみを定義する変数であることに注意してください。

例 27: ELL の例題 (2)

```

1:  [surface]
2:  1  ELL    0 0 0  6 6 0  -6

```

例題 27 では面記号 **ELL** の 7 番目の面定義数値 R が負の場合を扱っています。この場合は、楕円を定義するために、中心の座標 P と長軸ベクトル A および短軸の半径を指定します。例題では楕円の中心を原点としており、定義数値の 1,2,3 番目でその座標を $P(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ と与えています。4,5,6 番目では A を $(A_x, A_y, A_z) = (6, 6, 0)$ と与えており、図 37 の左側に示すような楕円を定義しています。7 番目の値 R はその絶対値が 6cm となっており、これが楕円の短軸の半径となります。図 37 の右側が、左側の楕円を長軸を回転軸として回転させて求めた楕円面です。

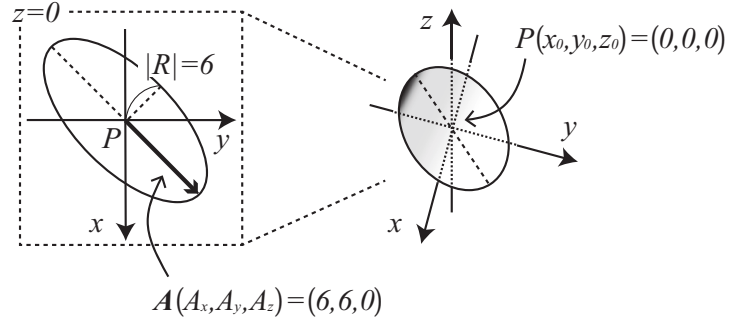


図 37: 例題 27 で定義した楕円面。

例 28: WED の例題

```

1:  [surface]
2:  1  WED    0 0 0  10 0 0  0 10 0  0 0 5

```

面記号 **WED** を用いて、図 38 に示すようなくさび形の面を定義できます。ただし、定義できるくさび形はその底面と上面が直角三角形となる三角柱のみです。例題 28 では、面定義数値の 1,2,3 番目で底面の 1 つの頂点の座標 $P(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$ を指定しており、これを始点とする 2 つのベクトル $A(A_x, A_y, A_z) = (10, 0, 0)$ と $B(B_x, B_y, B_z) = (0, 10, 0)$ を 4,5,6 番目と 7,8,9 番目で指定することで、直角三角柱を定義しています。面定義数値の 10,11,12 番目では、ベクトル $H(H_x, H_y, H_z) = (0, 0, 5)$ を指定しており、三角柱の高さを決定しています。

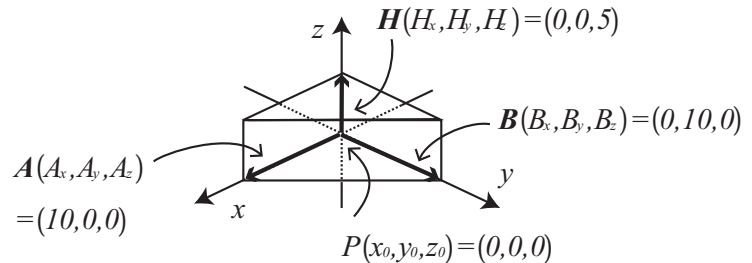


図 38: 例題 28 で定義したくさび形の面。

5.5.3 マクロボディーの面定義

マクロボディーで定義した面をセル定義文で使うときは、マイナス記号がマクロボディーの内側、プラス記号が外側を表します。また、マクロボディーを構成するそれぞれの面もセル定義文で使うことができます。[surface] で定義した面番号の後にピリオド“.”を入れ、その後に表 93 にあるマクロボディー面番号を付けます。

各マクロボディー面番号は以下の通りです。

表 93: マクロボディー面番号

記号	マクロボディー面番号	解説
BOX	1	(A_x, A_y, A_z) の終点に垂直な面
	2	(A_x, A_y, A_z) の始点に垂直な面
	3	(B_x, B_y, B_z) の終点に垂直な面
	4	(B_x, B_y, B_z) の始点に垂直な面
	5	(C_x, C_y, C_z) の終点に垂直な面
	6	(C_x, C_y, C_z) の始点に垂直な面
RPP	1	x_{\max} の面
	2	x_{\min} の面
	3	y_{\max} の面
	4	y_{\min} の面
	5	z_{\max} の面
	6	z_{\min} の面
SPH		定義した面番号の面のみ
RCC	1	半径 R の円柱の側面
	2	(H_x, H_y, H_z) の終点に垂直な面
	3	(H_x, H_y, H_z) の始点に垂直な面
RHP or HEX	1	(A_x, A_y, A_z) の終点に垂直な面
	2	面 1 の対面
	3	(B_x, B_y, B_z) の終点に垂直な面
	4	面 3 の対面
	5	(C_x, C_y, C_z) の終点に垂直な面
	6	面 5 の対面
	7	(H_x, H_y, H_z) の終点に垂直な面
	8	(H_x, H_y, H_z) の始点に垂直な面
REC	1	楕円柱の側面
	2	(H_x, H_y, H_z) の終点に垂直な面
	3	(H_x, H_y, H_z) の始点に垂直な面
TRC	1	円錐面
	2	(H_x, H_y, H_z) の終点に垂直な面
	3	(H_x, H_y, H_z) の始点に垂直な面
ELL		定義した面番号の面のみ
WED	1	底面と上面の斜辺を含む面
	2	B と H を含む面
	3	A と H を含む面
	4	A と B および H の終点を含む面
	5	A と B および H の始点を含む面

5.6 [Cell] セクション

5.6.1 書式

このセクションでは、[surface] セクションで定義した面を使ってセル (小部屋) の定義を行います。これは基本的にセルは閉じた空間として定義し、様々な形状のセルを組み合わせることにより、粒子を輸送する仮想空間を構築します。PHITS では、粒子が飛ぶことが可能な内部空間とそれ以外の空間を分けて定義する必要があり、後者を外部ボイド (真空) として明示的に指定しなければなりません。

コメント文字として\$の他に、行頭のc \square (\square は空白文字) が使用できます。このセクションではセルの定義に#を用いるため、PHITS の入力ファイルでのコメント文字#は利用できません。ファイルのインクルード文、定数定義などは、セクションの途中でも用いることが出来ます。継続行には、先頭に5桁の空白が必要です。

書式は以下の通りです。セル番号、物質番号、物質密度、セル定義文、キーワード形式のセルパラメータの順番で各セルを定義します。各項目の意味は表 94 を参照してください。

[C e l l]				
セル番号	物質番号	物質密度	セル定義文	セルパラメータ

また、LIKE n BUT セルパラメータの表式や lattice 構造も使うことができます。似たような構造のセルを複数並べる場合に効率良く設定できます。利用方法の詳細は 5.6.5 節をご覧ください。セルパラメータの種類については表 95 にまとめています。

表 94: セル記述書式

項目	説明
セル番号	1 ~ 999999 まで使用できます。
物質番号	[material] セクションで指定した物質番号を入力します。ただし、そのセルが内部空間にあるボイド (真空) のときは 0 を、外部ボイドのときは -1 を指定します。
物質密度	そのセルに含まれる物質の密度を与えます。 単位は、正の場合は粒子密度 (10^{24} atoms/cm ³)、負の場合は質量密度 (g/cm ³) となります。ここで指定した粒子密度が計算に使用されますが、物質の組成比は [material] セクションで指定した密度を基に与えられます。従って、同じ組成で密度の異なる物質を定義可能となります。その際に、異なる物質番号を付加するパラメータ matadd を加えました。 セルがボイドのとき、すなわち物質番号が 0 か -1 の場合はこの項目は入力しません。
セル定義文	[surface] セクションで定義された面の面番号や集合代数の演算子を用いてセルの幾何形状を記述します。演算子の記号は \square (空白), :, #でそれぞれ積 (and), 和 (or), 否定 (not) を表します。(,) も使用できます。記述方法は 5.6.2 節をご参照ください。
LIKE n BUT	セルの内容がセル番号 n とほとんど同じで、BUT 以下に記述されるセルパラメータの値だけ違うセルを定義します。
セルパラメータ	書式は keyword=value です。キーワードとして VOL (体積), TMP (温度), TRCL (transform), U (universe), LAT (lattice), FILL が使用できます。また LIKE n BUT の場合は、これらに加えて MAT (物質番号), RHO (密度) が使えます。各キーワードの意味は表 95 を参照してください。

同じ物質番号を指定して別の密度をもつセルを複数定義した場合はご注意ください。2 番目以降のセル番号の物質番号として別の数字が割り振られます。

セル定義文において、積を意味する \square (空白) の方が、和を意味する $+$ より先に演算されるのでご注意ください。

表 95: セルパラメータ

項目	説明
VOL	そのセルの体積 (cm^3) を与えます。
TMP	そのセルの物質がもつ温度 (MeV) を与えます。
TRCL	そのセルを座標変換します。書式は [transform] セクションと同じです。
U	Universe 番号。1 ~ 999999 まで使用できます。Universe 構造を利用する場合に定義します。利用方法は 5.6.3 節を参照してください。
LAT	Lattice 番号。LAT=1 の場合は四角柱、LAT=2 の場合は六角柱を定義します。これらを単位とした繰り返し構造 (lattice 構造) を利用する場合に指定します。利用方法は 5.6.4 節を参照してください。
FILL	U で定義した universe 番号を入力し、そのセルを U で定義した宇宙 (universe) で満たします。利用方法は 5.6.3, 5.6.4 節を参照してください。
MAT	LIKE n BUT MAT= m の表式で用います。セル番号 n とは物質番号が違うセルを定義できます。
RHO	LIKE n BUT RHO= x の表式で用います。セル番号 n とは密度が違うセルを定義できます。密度の単位はセル番号 n と同じです。

5.6.2 セルの記述方法

任意の形状の構造物を仮想空間に構築する場合、最初にその構造物の表面を座標空間において定義し、次に対応する領域をその面で閉じることによってセル (小部屋) をつくる、という方法があります。この方法は面の表側と裏側を区別して表現し、更に集合代数の演算子を利用することによって各セルを定義します。

考えている領域が定義した面の表側と裏側のどちらに属するかを区別するために、 x, y, z で記述した面の方程式を利用します。具体的には、方程式 $f(x, y, z) = 0$ で定義された面があった場合に、ある領域の中の座標 (x_0, y_0, z_0) を代入した $f(x_0, y_0, z_0)$ が正であればその領域はプラス側、負であればマイナス側と表現します。例として、

例 29: [cell] セクションの例題 (1)

```

1:  [ Cell ]
2:   1   0  -10
3:   2  -1   10
4:  [ Surface ]
5:   10  SZ   3   5

```

を考えてみます。5 行目の SZ を用いて定義される面番号 10 の面は中心を (0,0,3)、半径を 5cm とする球面であるため、方程式は $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + (z - 3)^2 - 5^2 = 0$ となります。球の内はマイナス側、外はプラス側と定義されますが、これらは球の中心の座標 (0,0,3) や球の外の適当な座標 (0,0,10) を代入して、 $f(0, 0, 3) = -25 < 0$, $f(0, 0, 10) = 24 > 0$ となることから確認できます。[cell] セクションではこのような領域の区切り方を行った上で、必要に応じて各領域にセル番号を付与します。例題 (1) の 2 行目では、セル番号 1 のセルがボイド (真空) であることと、その領域が球面のマイナス側であることが定義されており、図 39 で示す仮想空間を構築します。図 39 は、例題 (1) でつくられる領域を xz 平面で切った断面図として見た

ものです。本来は球ですが、2次元平面で見た結果円となっています。例題(1)の3行目では外部ボイドが明示的に定義されており、そのセル番号を2と指定しています。

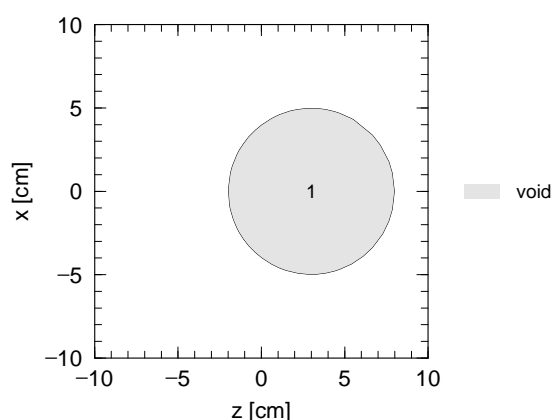


図 39: 例題(1)の空間を xz 平面で切り取った断面図。セル番号1の領域はボイド(真空)。

例題(1)の球面の様に1つの面だけで閉じた空間が定義できる場合は簡単ですが、**[surface]** セクションで定義できる面の多くは半無限領域をつくるため、幾つかの領域を組み合わせる必要があります。これを行うにあたって、PHITSでは集合代数の考え方を導入しており、次の演算子を用いて閉じた領域を構成します。演算子は \sqcup (空白), $:$, $\#$ の3つで、それぞれ積 (and), 和 (or), 否定 (not) を表します。また、 $()$ で囲んだ範囲は1つの領域とみなします。ただし、 \sqcup (空白) と $:$ は面番号同士を演算するのに対して、 $\#$ はセル番号に掛かります。また、**#all** とした場合は、outer void 及び他のユニバースに定義されたものを除く全てのセルを除外しますので、シミュレーション空間全体を定義するのに便利です。他、 $()$ を用いてまとめた領域に対しては、どの演算子でも掛けることができます。それでは、演算子を用いた次の例を考えてみましょう。

例 30: **[cell]** セクションの例題(2)

```

1:  [ Cell ]
2:   1  0  11 -12  13 -14  15 -16
3:   2 -1 #1
4:  [ Surface ]
5:   11 PX -6
6:   12 PX  6
7:   13 PY -6
8:   14 PY  6
9:   15 PZ -6
10:  16 PZ  6

```

この例題では半無限領域をつくる **PX, PY, PZ** の面を使用して、一辺が **12cm** の立方体をつくっています。**PX, PY, PZ** はそれぞれ yz, xz, xy 平面に平行な面を定義する面記号であるため、例えば5,6行目で定義している面番号11,12の面は、それぞれ座標 $(-6,0,0), (6,0,0)$ を通り yz 平面に平行な面となります。これらの方程式はそれぞれ $x+6=0, x-6=0$ ですから、原点 $(0,0,0)$ を含む領域は、面番号11に対しては $0+6=6>0$ によりプラス側、面番号12に対しては $0-6=-6<0$ よりマイナス側となります。よって、面番号11と12で囲まれた領域は“11のプラス側かつ12のマイナス側”となり、演算子 \sqcup (空白)を用いて **11 \sqcup -12**と記述します。面番号が13~16の面も同様ですから、 x, y, z の3方向に関して閉じた空間を表現するには、2行目の様に6つの面を \sqcup でつなげた書き方をします。例題(2)ではこの閉じた領域をセル番号1でかつボイドであるとして定義しています。図40に、この例題でつくられる領域を xz 平面で切った断面図として示しました。本来は立方体ですが、2次元平面で見た結果正方形となっています。また、2行目ではセルに掛かる

演算子#を用いて外部ボイドを定義しています。これはセル番号1の領域以外の範囲を対象にするという意味になります。

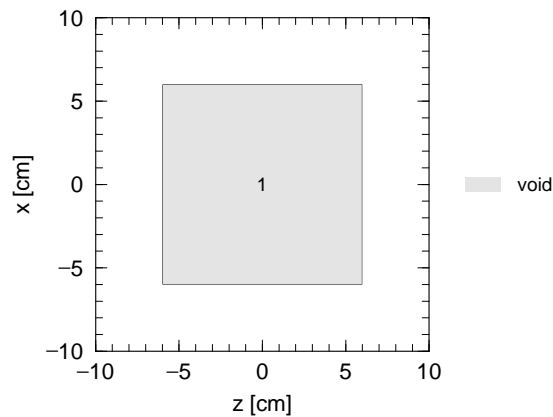


図 40: 例題 (2) の空間を xz 平面で切り取った断面図。セル番号 1 の領域はボイド (真空)。

次は () と:の記号を使用した例です。例題 (1) で示した球と (2) の立方体を合わせた形状を考えています。

例 31: [cell] セクションの例題 (3)

```

1:  [ Cell ]
2:   1  0 -10 : (11 -12 13 -14 15 -16)
3:   2 -1 #1
4:  [ Surface ]
5:   10 SZ 3 5
6:   11 PX -6
7:   12 PX 6
8:   13 PY -6
9:   14 PY 6
10:  15 PZ -6
11:  16 PZ 6

```

2 行目の () で囲んだ部分が例題 (2) のセル番号 1 の領域に相当しており、これと例題 (1) の球面の内側を合わせた領域がこの例題ではセル番号 1 として定義されています。図 41 に示したのが例題 (3) の領域を xz 平面で切った断面図です。本来は立方体から球の一部が飛び出た形状をもつ立体ですが、2 次元平面では図のようになっています。本例題の様に、領域を足し合わせる場合に使用する演算子が:です。

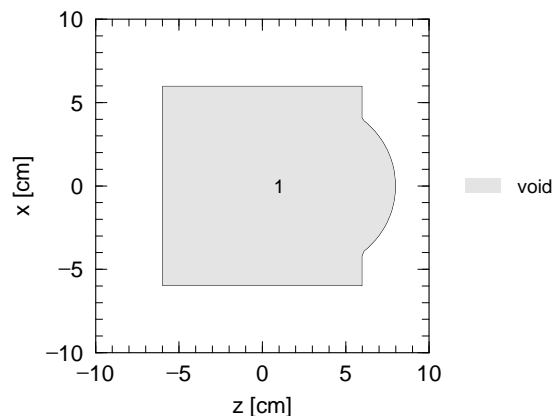


図 41: 例題 (3) の空間を xz 平面で切り取った断面図。セル番号 1 の領域はボイド (真空)。

例題 (4) では更に、立方体を球の内側と外側に分けた場合を考えます。

例 32: [cell] セクションの例題 (4)

```

1:  [ Material ]
2:    mat[1]  1H 2  160 1
3:  [ Cell ]
4:    1  0      -10
5:    2  1 -1.0  10 (11 -12 13 -14 15 -16)
6:    3 -1      #1 #2
7:  [ Surface ]
8:    10 SZ  3  5
9:    11 PX -6
10:   12 PX  6
11:   13 PY -6
12:   14 PY  6
13:   15 PZ -6
14:   16 PZ  6

```

[surface] セクションは例題 (3) と同じです。5 行目で“立方体の内側でかつ球の外側”の領域を記号 \square (空白) を用いて記述しており、これをセル番号 2 と定義しています。また、本例題では [material] セクションで “water” を物質番号 1 として定義しており、セル番号 2 の領域には粒子密度が 1.0×10^{24} atoms/cm³ の “water” が満たされています。図 42 に結果を示します。ただし、xz 平面で切った断面図です。セル番号 1 は 4 行目で定義しており、この球の中はボイドとしています。外部ボイドの定義は 6 行目で行っており、セル番号 1 と 2 の領域を除いた他の全てが外部となっています。

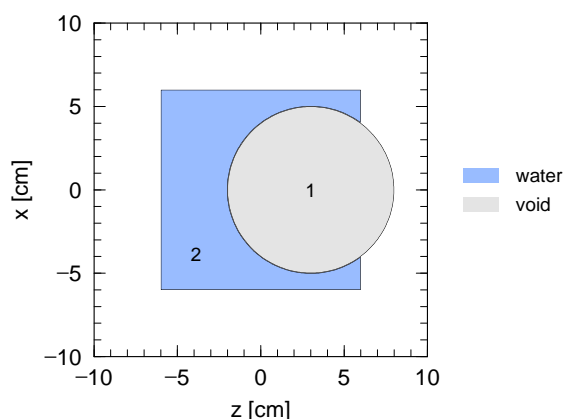


図 42: 例題 (4) の空間を xz 平面で切り取った断面図。セル番号 1 の領域はボイド (真空) とし、セル番号 2 の領域には水を満たした。

幾何学形状を定義する際、何もない領域 (真空や空気) も他の領域と 2 重定義にならないように定義する必要があります。そのような場合、**#all** と定義することにより、定義された領域を全て除外するので便利です。ただし、外部ボイドや他の **Universe** (次節参照) に定義された領域は除外されません。また、1 つのインプットファイルに **#all** は 1 つしか定義できません。

5.6.3 Universe 構造

PHITS では、セルパラメータ **U** を用いて、複数の宇宙 (universe) を定義できます。各宇宙に個別の仮想空間を構築することで、ある宇宙の一部として別の宇宙の内部構造を引用することが可能となります。この様に、多数の宇宙をそれぞれ定義し、相互に参照するための機能をここでは **universe** 構造と呼びます。ただし、実際に粒子輸送の舞台となる空間そのものは 1 つだけであり、この空間の一部を別の宇宙の内部構造で

満たす (置き換える) 場合に **universe** 構造を利用します。単純に一部分だけを置き換える場合はあまり意味がありませんが、特に 5.6.5 節の繰り返し幾何形状を利用するときには有効となる機能です。

例題として、図 43 に示した 3 つの宇宙を組み合わせる仮想空間を構築する方法について考えます。図の (a) が実際に粒子輸送を行う空間で、一辺が 12 cm の立方体を yz 平面で分割した 2 つの直方体で構成されています。ただし、示した図は xz 平面で切った断面図です。図の (b) と (c) が、(a) とは違う内部構造をもつ **universe** の 1 と 2 で、座標の中心に半径 5 cm、高さ 12 cm の円柱を配置しています。これらは、内部構造は同じですが、各領域を構成する物質が違ってきます。**Universe 1** では円柱内部に水が満たされ、その外はボイド (真空) となっているのに対し、**universe 2** では円柱内部は鉄で、その外部は水で満たされています。

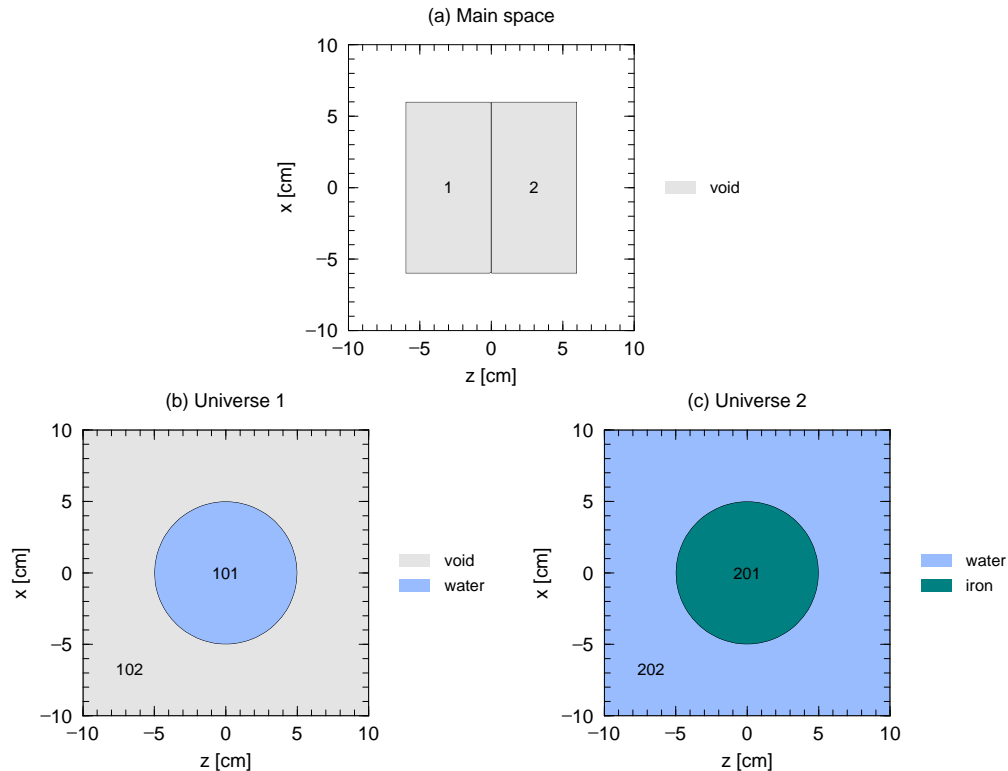


図 43: (a) 立方体を yz 平面で分割した 2 つの直方体。(b) 円柱内部に水を満たし、それ以外はボイドとした universe 1。(c) 鉄の円柱の周りを水で満たした universe 2。

(b) の universe 1 を (a) のセル番号 1 の領域に入れ、(c) の universe 2 をセル番号 2 の領域に入れた仮想空間を構築する例が以下の例題 (5) です。

例 33: [cell] セクションの例題 (5)

```

1:  [ Material ]
2:    mat[1]  1H 2  160 1
3:    mat[2]   Fe 1
4:  [ Cell ]
5:    1  0      11 -12 13 -14 15 -17 FILL=1
6:    2  0      11 -12 13 -14 17 -16 FILL=2
7:    101 1 -1.0 -10 13 -14 U=1
8:    102 0      #101 U=1
9:    201 2 -10.0 -10 13 -14 U=2
10:   202 1 -1.0 #201 U=2
11:     9 -1      #1 #2
12:  [ Surface ]
13:   10 CY    5
14:   11 PX   -6

```

```

15:    12 PX  6
16:    13 PY -6
17:    14 PY  6
18:    15 PZ -6
19:    16 PZ  6
20:    17 PZ  0

```

7,8行目で universe 1 を、9,10行目で universe 2 を定義しています。これらは共に面番号 10,13,14 を使って定義した円柱を中心に置いた宇宙となっています。Universe 1 では、セル番号 101 の円柱内部に物質番号 1 の水を入れ、その外部をボイドにしてセル番号 102 の領域と定義しています。Universe 2 では、円柱内部をセル番号 201 として鉄柱にし、セル番号 202 の外部には水を満たしています。7~10 行目の最後にある U=1, 2 がそのセルがどの宇宙に属するかを指定するパラメータです。5, 6 行目で、それぞれ図 43(a) のセル番号 1,2 を定義しており、最後の FILL=1, 2 によってそのセルをどの universe によって満たすか(置き換えるか)を決定します。この例題の結果を示したのが図 44 です。xz 平面の断面図ですが、セル番号 1 の領域が universe 1 に、セル番号 2 が universe 2 に置き換えられているのがわかります。

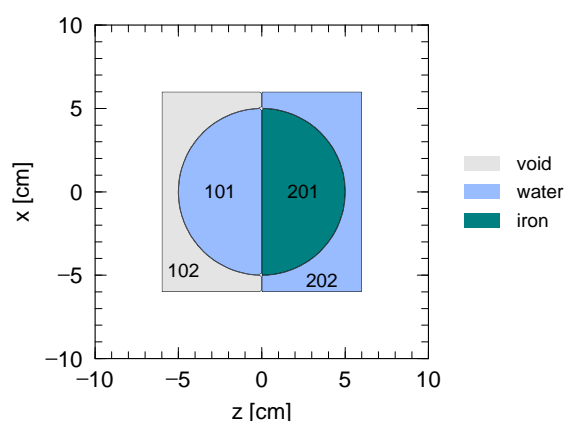


図 44: 例題 (5) の空間を xz 平面で切り取った断面図。セル番号 1 の領域に universe 1 のセル番号 101 と 102 が、セル番号 2 の領域に universe 2 のセル番号 201 と 202 が入っている。

Universe 構造を利用する際の注意点として、未定義の領域を引用しないことと、座標系が全ての宇宙で一致していることが挙げられます。例えば前者については、例題 (5) の 8 行目でセル番号 102 の領域をボイドとして定義する必要があり、これがないと 5 行目で引用した際にセル番号 102 の部分を適切に設定できません。各 universe の全ての領域を定義する必要はありませんが、引用する領域については何らかの物質(かボイド)を指定しておかなければなりません。またその際、置き換える元の領域よりも引用する領域を少し広く定義しておかないと、エラーが出る場合がありますのでご注意ください。次に、後者については、座標原点の位置、x,y,z 軸の方向、空間のスケールがどの universe でも同じです。これは同じ [surface] セクションで定義した面を利用しているためです。別の宇宙を引用する場合は、対応する座標を確認してください。例えば、例題 (5) の 14,15 行目で PX の値を変えると、図 45 の様に円柱の一部が立方体の中に入らなくなります。

5.6.4 Lattice 構造

本節では、lattice 構造の仕組みと定義の仕方、および基本的な利用方法について説明します。この機能は似た形状を多数繰り返す場合に非常に有効です。より実際的な設定方法については 5.6.5 節をご覧ください。

Lattice 構造は、図 46 に示す四角形と六角形の 2 種類の形状を基本単位として、格子状に繰り返し並べる機能です。U パラメータで指定して、基本格子を無限に並べた宇宙をつくります。ただし、その内部は別の

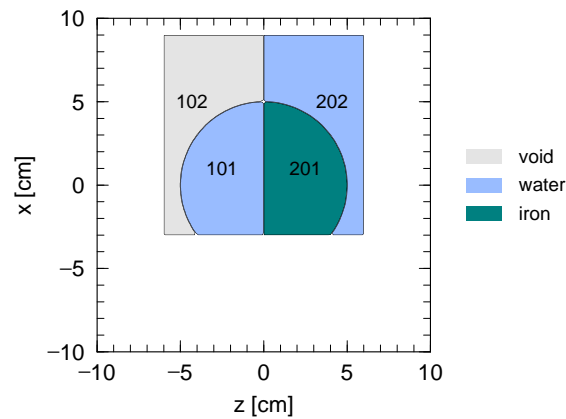


図 45: 例題 (5) において、セル番号 1 と 2 の範囲を x 方向に関してずらした場合。

U パラメータを用いて定義した宇宙で満たす必要があります。パラメータ **LAT** を用いて、四角形は **LAT=1**、六角形は **LAT=2** として定義できます。図 46 に示した図形の各辺に付いた数字は各々の図形を定義する際の面の順番を意味しており、[**surface**] セクションで定義した面番号を図の数字の順に並べます。1 と 2、3 と 4、5 と 6 の面はそれぞれが平行な面として定義されている必要があります。もちろん、プラス側・マイナス側のどちらであるかも指定します。ただし、1 と 2 の長さ と 3 と 4 の長さを変えることは可能で、正方形や正六角形でなくても構いません。

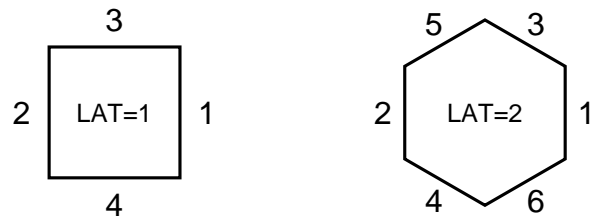


図 46: Lattice 構造の基本単位として使用できる四角形 (左) と六角形 (右)。各辺の番号は、**LAT** パラメータを定義する際の面の順番。

はじめに、四角形 (**LAT=1**) の lattice 構造を利用した例を考えます。

例 34: [**cell**] セクションの例題 (6)

```

1:  [ Material ]
2:  mat[1] 1H 2 160 1
3:  [ Cell ]
4:    1 0          11 -12 13 -14 15 -16 FILL=1
5:    101 0        -26 25 -24 23 -22 21 LAT=1 U=1 FILL=2
6:    201 1 -1.0 -90 U=2
7:    2 -1          #1
8:  [ Surface ]
9:    11 PX -6
10:   12 PX 6
11:   13 PY -6
12:   14 PY 6
13:   15 PZ -6
14:   16 PZ 6
15:   21 PX -2
16:   22 PX 2
17:   23 PY -2
18:   24 PY 2
19:   25 PZ -2
20:   26 PZ 2
21:   90 BOX -10 -10 -10 20 0 0 0 20 0 0 0 20

```

5 行目で **lattice** の基本格子を定義しています。**LAT=1** で扱うことができる形状は四角形ですが、3 次元の形状を考えると実際には四角柱となります。図 46 で示した様に、定義には最低 4 面必要で、4 面の場合は高さが無限大の四角柱となります。したがって、本例題で定義しているのは断面が一边 4cm の正方形となる無限の高さをもつ四角柱となり、これが y 軸に関して平行かつ隙間無く並んでいる宇宙を **universe 1** としています。この格子状の集まり全てがセル番号 101 の領域です。これとは別に 6 行目において、面記号 **BOX** を用いて一边 20cm の立方体が原点にある宇宙を定義しており、これは **universe 2** としています。このセル番号 201 の立方体には水が入っており、**FILL=2** を用いることにより、セル番号 101 中の格子一つ一つが水で満たされることになります。4 行目でセル番号 1 を **universe 1** で満たした領域として定義しており、これが一边 12cm の立方体であることから、本例題の仮想空間は図 47 のようになります。左図が 3 次元的に見た立体図で、右図がこれを xz 平面で切り取った断面図です。図を見てわかる様に、同じ四角柱が全部で 9 つ並んでいます。これらは、**universe 1** においては高さが無限大ですが、セル番号 1 の領域が y 軸方向にも制限されているため、結果的に有限の高さをもつ四角柱となっています。もし、有限の高さをもった四角柱を **lattice** の基本単位としたい場合は、例えば面番号 23, 24 による領域の制限を 5 行目に加える必要があります。

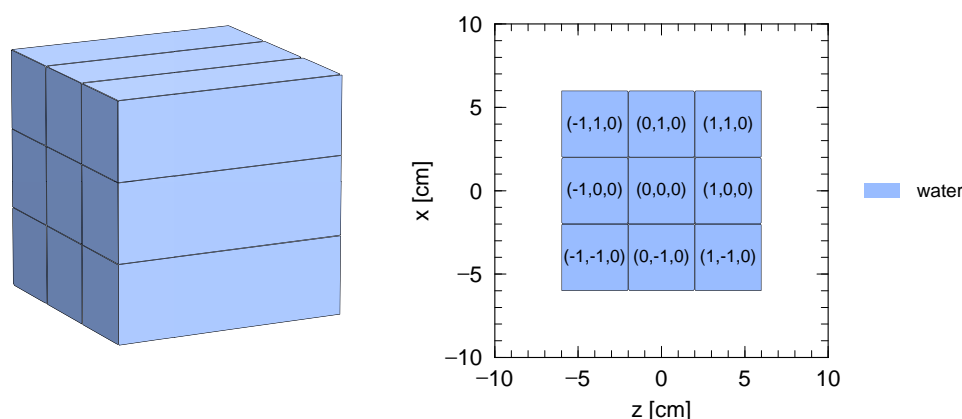


図 47: 例題 (6) の空間を立体的に見た図 (左) とこれを xz 平面で切り取った断面図 (右)。各格子は、中に示された座標によって区別される。

図 47 の右図で示した様に、各円柱には **lattice** 座標 (i, j, k) がふられており、各々の領域がセル番号 101 の中のどれであるかを区別できるようになっています。ただし、この座標は必ずしも通常の座標 (x, y, z) とは対応しておらず、単位格子を定義する際の面の順番で決まります。すなわち、図 46 の左図において、辺 2→1 の方向が i 、4→3 が j の方向となります。残りの k の向きは、 i, j と同様にセル定義文の順番で決定されます。例題 (6) の 5 行目では、 z 軸方向、 x 軸方向の順番で定義しているため、 i は z 軸、 j は x 軸に対応付けがなされています。実際に図 47 の右図でも、 z が増える方向に i が増加し、 x が増える方向に j の値が増えていることがわかります。各タリーにおいて **mesh=reg** により領域指定する場合は、**(201 < 101[-1 0 0])** の書式を用います。これは“セル番号 101 の **lattice** 座標 $(-1, 0, 0)$ に含まれているセル番号 201 の領域”という意味です。この書式に関しては 6.1.2 節をご参照ください。なお **lattice** 座標 (i, j, k) は、**[t-gshow]** タリーにおいて **output=7 or 8** を指定することで表示させることができます。

次の例題は六角形 (**LAT=2**) の **lattice** 構造を利用した場合です。

例 35: [cell] セクションの例題 (7)

```

1:  [ Material ]
2:    mat[1]  1H 2  160 1
3:  [ Cell ]
4:    1  0      11 -12 13 -14 15 -16 FILL=1
5:    101 0     -31 32 -33 34 -35 36 -24 23 LAT=2 U=1 FILL=2

```

```

6:      201  1  -1.0  -90  U=2
7:      2  -1          #1
8:      [ Surface ]
9:      11  PX  -6
10:     12  PX   6
11:     13  PY  -6
12:     14  PY   6
13:     15  PZ  -6
14:     16  PZ   6
15:     23  PY  -2
16:     24  PY   2
17:      set: c1[2]
18:     31  PZ  [ c1*cos(pi/6)]
19:     32  PZ  [-c1*cos(pi/6)]
20:     33  P   1  0  [ 1/tan(pi/3)] [ c1]
21:     34  P   1  0  [ 1/tan(pi/3)] [-c1]
22:     35  P   1  0 [-1/tan(pi/3)] [ c1]
23:     36  P   1  0 [-1/tan(pi/3)] [-c1]
24:     90  BOX -10 -10 -10  20 0 0  0 20 0  0 0 20

```

17~23 行目で正六角形をつくるための面の定義を行っています。これらを組み合わせると、 xz 平面で見た場合に正六角形となり、 y 軸に垂直な六角柱となります。ここで、正六角形の一边の長さを 2cm とし、これを $c1$ として定数定義しています。また、組み込み定数である π (円周率 π) および面記号 PZ , P を用いて、 60 度ずつ回転した平面を定義しています。Lattice 構造の基本格子は 5 行目で定義しており、セル定義文中の面番号の順番は図 46 の右図にある数字の通りとなっています。ただし、最後に面番号 23, 24 による y 軸方向の制限を加えています。したがって本例題では、高さが 4cm 、一辺が 2cm の六角柱を無限に並べた宇宙が **universe 1** となります。各六角柱には 6 行目で定義した **universe 2** が入っており、実質的には水で満たされたセル番号 201 が入っていることとなります。4 行目で、先の例題と同様に、セル番号 1 の領域を **universe 1** で満たしており、本例題の結果は図 48 となります。左図が立体図、右図がこれを xz 平面で切った断面図です。左図からわかる様に、六角柱が詰められた **universe 1** から立方体の領域だけを切り取った形状になっています。また、 y 軸方向にも 3 列が並んでおりますが、その高さは揃えられており、いわゆる 3 次元のハニカム構造はつきりません。右図では各領域に lattice 座標 (i, j, k) が付けられています。図を見てわかる様に、 i は左から右、 j は左下から右上に向かって増加しており、これらはやはり 5 行目のセル定義文のところに並べる順番に依存します。図 46 の右図において、辺 $2 \rightarrow 1$ の方向が i 、 $4 \rightarrow 3$ が j の方向となります。 k についても同様で、面番号 $24 \rightarrow 23$ の順番であれば y 軸方向に、 $23 \rightarrow 24$ であれば $-y$ 軸方向に k の値は増加します。各タリーにおいて **mesh=reg** により領域指定する場合は、 $(201 < 101[-2 \ 0 \ 0])$ の書式を用います。これは“セル番号 101 の lattice 座標 $(-2, 0, 0)$ に含まれているセル番号 201 の領域”という意味です。この書式の詳細は 6.1.2 節をご覧ください。なお lattice 座標 (i, j, k) は、**[t-gshow]** タリーにおいて **output=7 or 8** を指定することで表示させることができます。

5.6.5 繰り返し幾何形状

多数の同じ、あるいは少し違うだけの構造のセルを並べる場合に、当然 1 つ 1 つのセルを定義することは可能ですが、基本となるセルを 1 つ用意しこれを繰り返すことで効率良く設定できます。5.6.4 節の lattice 構造の利用もその 1 つであり、他には **LIKE n BUT** セルパラメータの表式も利用できます。

5.6.5.1 LIKE n BUT セルパラメータ

セル番号 n のセルと同様であるが、**BUT** 以下の内容だけが違うセルを定義する方法です。**BUT** の後に続くセルパラメータには表 95 に挙げたものがあります。以下の例題では、**TRCL** と **MAT** を使用した場合を考えしています。

例 36: [cell1] セクションの例題 (8)

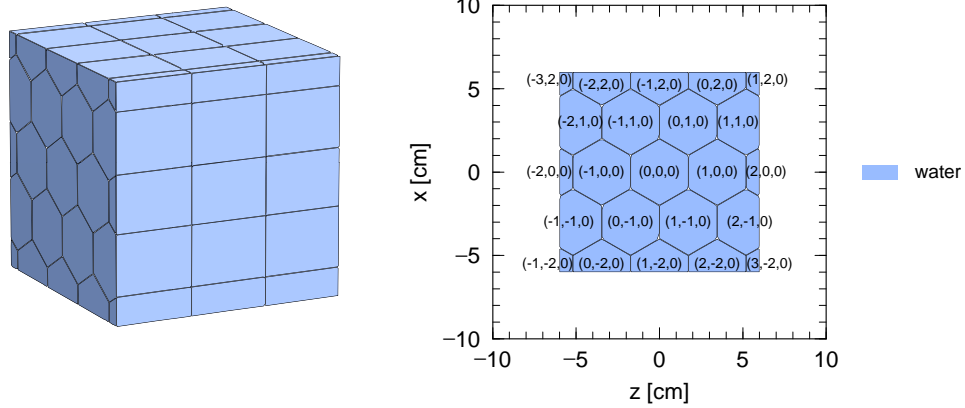


図 48: 例題 (7) の空間を立体的に見た図 (左) とこれを xz 平面で切り取った断面図 (右)。各格子は、中に示された座標によって区別される。

```

1:  [ Material ]
2:  mat[1]  1H 2  160 1
3:  mat[2]  Fe 1
4:  [ Cell ]
5:      1  0      -10  13 -14  #2 #3 #4
6:      2  1 -1.0   11 -12  13 -14  15 -16
7:      3  LIKE 2 BUT  TRCL=1
8:      4  LIKE 2 BUT  TRCL=2  MAT=2
9:      5  -1      #(-10  13 -14)
10: [ Surface ]
11:  10  CY  10
12:  11  PX  -2
13:  12  PX   2
14:  13  PY  -2
15:  14  PY   2
16:  15  PZ  -2
17:  16  PZ   2
18: [ Transform ]
19: *tr1  3 0 -5
20: *tr2  0 0 6 30 90 120 90 0 90 60 90 30 1

```

7, 8 行目で **LIKE n BUT** セルパラメータの表式を用いてセルを定義しています。この元となるセル番号 2 は 6 行目で定義しており、中に水が入った一辺 4cm の立方体です。セル番号 2 は原点を中心として配置されていますが、これを 19 行目で定義した座標変換番号 1 で座標変換したのがセル番号 3 です。座標変換番号 1 は、 x 軸方向に 3cm、 z 軸方向に -5cm 平行移動する変換ですから、 xz 平面上で見ると図 49 のようになります。この図は本例題の結果を xz 平面で切り取った断面を示しています。次のセル番号 4 は **TRCL** と **MAT** のセルパラメータを使用しており、座標変換番号 2 による平行移動 (および回転) を行い、その上で物質番号 2 に中の物質を変更しています。回転は xz 平面上で 30 度行っており、図 49 でも確認できます。5 行目では、セル番号 1 を半径 10cm、高さ 4cm の円柱と定義しています。ただし、セル番号 2, 3, 4 の領域が含まれない様に、**#** を用いてこれらを除いています。また、これに伴い外部ボイドの定義も 9 行目に示す様な書き方が必要です。単純に **#1** のみではセル番号 2, 3, 4 の領域も外部ボイドとなってしまいます。

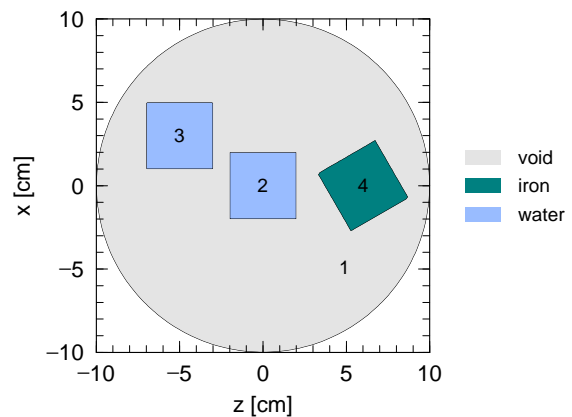


図 49: 例題 (8) の空間を xz 平面で切り取った断面図。セル番号 1 の円柱の中にセル番号 2, 3, 4 が入っている。

5.6.5.2 Lattice を用いた階層構造

5.6.4 節で見た四角柱や六角柱の lattice をより複雑なものにするために、universe を用いて階層構造を構築することができます。考え方は universe 構造に基づいており、universe 1 の一部を universe 2 で満たし、更に universe 2 の一部を universe 3 で満たし、といった手続きで各階層を定義していくことが可能です。PHITS では基本的に最大 10 (param.inc 中の mxlv で変更できます) の階層構造をつくることができます。

例 37: [cell] セクションの例題 (9)

```

1:  [ Material ]
2:    mat[1]  1H 2  160 1
3:    mat[2]  Fe 1
4:  [ Cell ]
5:    1  0      11 -12  13 -14  15 -16 FILL=1
6:    101 0      -26 25 -22 21 LAT=1 U=1
7:      FILL=-1:1 -1:1 0:0
8:      2 2 3  2 3 2  3 2 2
9:    201  1 -1.0 -90 U=2
10:   301  2 -10.0 -10 U=3
11:   302  0      10 U=3
12:    2 -1      #1
13:  [ Surface ]
14:   10 CY  1.5
15:   11 PX -6
16:   12 PX  6
17:   13 PY -6
18:   14 PY  6
19:   15 PZ -6
20:   16 PZ  6
21:   21 PX -2
22:   22 PX  2
23:   25 PZ -2
24:   26 PZ  2
25:   90 BOX -10 -10 -10 20 0 0 0 20 0 0 0 20

```

まず 5, 6 行目にある、四角柱の lattice 構造とそれを引用するセル番号 1 の定義は例題 (6) と同じです。ただし、7, 8 行目におけるセルパラメータ **FILL** の使い方が違っており、ここでは各格子の状態を個別に指定しています。7 行目では取り扱う範囲を決めており、各格子に割り振られた lattice 座標 (i, j, k) を参照して **FILL**=の後ろで決定しています。本例題では、 i に関して -1 から 1 まで (3 つ)、 j に関して -1 から 1 まで (3 つ)、 k に関して 0 から 0 まで (実質は 1 つ) をセル番号 101 の lattice 構造と定義しています。合計 $3 \times 3 \times 1 = 9$ の格子が対象となり、それぞれを満たす宇宙は 8 行目で指定しています。この順番は lattice 座標 (i, j, k) で表現して、 $(-1, -1, 0), (0, -1, 0), (1, -1, 0), (-1, 0, 0), \dots$ の様になっており、2 であれば universe 2 で、3 であれば universe 3 でその格子を満たすことを意味します。

Universe 2 を水が入った一辺 20cm の立方体を原点付近に配置した宇宙として、universe 3 を原点に半径 1.5cm の鉄柱を置いた宇宙として定義しており、9 つの四角柱の内 3 つが特別な構造をもつことになります。結果を示したのが図 50 で、 xz 平面に関する断面図です。この図から $(i, j, k) = (1, -1, 0), (0, 0, 0), (-1, 1, 0)$ の格子が内部構造をもっていることがわかります。各タリーにおいて **mesh=reg** により領域指定する場合は、 $(302 < 101[0 \ 0 \ 0] < 1)$ の書式を用います。これは“セル番号 1 を満たしたセル番号 101 の lattice 座標 $(0, 0, 0)$ ”

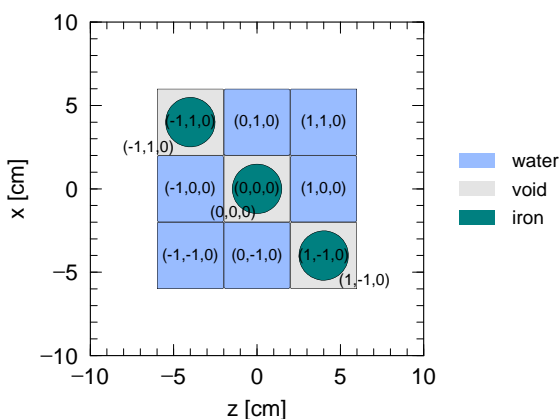


図 50: 例題 (9) の空間を xz 平面で切り取った断面図。9 つの四角柱の内、3 つが鉄柱を中心に配した内部構造をもっている。

に含まれているセル番号 302 の領域” という意味で、図 50 では中心の四角柱にある鉄柱周辺のボイドの領域を指します。この様な書式については 6.1.2 節を参照してください。

次は、階層構造をより複雑にした例です。

例 38: [cell] セクションの例題 (10)

```

1:  [ Material ]
2:  mat[1] 1H 2 160 1
3:  mat[2] Fe 1
4:  [ Cell ]
5:    1 0      11 -12 13 -14 15 -16 FILL=1
6:  101 0      -26 25 -22 21 LAT=1 U=1
7:      FILL=-1:1 -1:1 0:0
8:      2 2 3(1 0 1) 2 3(1 0 1) 2 3(1 0 1) 2 2
9:  201 1 -1.0 -90 U=2
10: 301 0      -36 35 -32 31 LAT=1 U=3
11:      FILL=-1:0 -1:0 0:0
12:      4 2 2 4
13: 401 2 -10.0 -10 U=4
14: 402 0      10 U=4
15: 2 -1      #1
16: [ Surface ]
17: 10 CY 0.5
18: 11 PX -6
19: 12 PX 6
20: 13 PY -6
21: 14 PY 6
22: 15 PZ -6
23: 16 PZ 6
24: 21 PX -2
25: 22 PX 2
26: 25 PZ -2
27: 26 PZ 2
28: 31 PX -1
29: 32 PX 1
30: 35 PZ -1
31: 36 PZ 1
32: 90 BOX -10 -10 -10 20 0 0 0 20 0 0 0 20

```

この例題でつくられる仮想空間は、図 51 のようになります。ただし、 xz 平面で切った断面を示しています。まず、一辺 12cm の立方体を 9 つの四角柱に分け、その内の 3 つに内部構造をもたせた点は例題 (9) と同じです。違うのは universe 3 として定義した宇宙を更に内部構造をもった格子で埋めたことで、9~11 行目でその状態を指定しています。ここでは $2 \times 2 \times 1 = 4$ の四角柱を定義しており、その内の 2 つが鉄柱をもつ格子となっています。また、8 行目の (1 0 1) は座標変換を表しており、引用する際に universe 3 を x 軸方向に 1cm、 z 軸方向に 1cm 平行移動しなさい、という意味となります。セル番号 301 は、原点 (0,0,0) を中心にもつ四角柱を基本単位としているため、図の様な配置にする場合は少しずらす必要があります。また、lattice を用いて階層構造を作成した場合の mesh=reg による領域指定は、階層構造を増やした書式により行います。例えば図 51 において $x = -1, z = -1$ を中心とする微小四角柱のボイド部分は、(402 < 301[-1 -1 0] < 101[0 0 0] < 1) と記述します。もし対象とする階層が更に深くなった場合は、< と lattice 座標を用いて階層を増やすことで各領域を指定できます。この書式の詳細につ

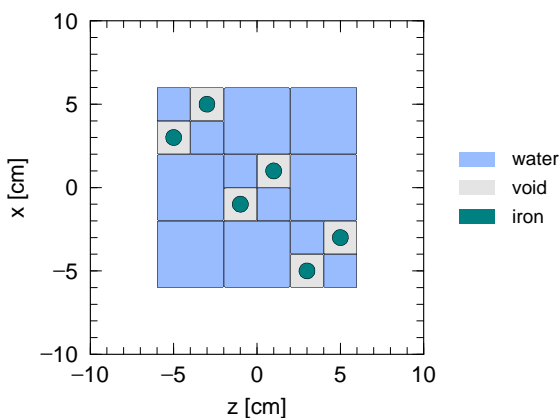


図 51: 例題 (10) の空間を xz 平面で切り取った断面図。9 つの四角柱の内 3 つが構造をもち、更に 4 つの四角柱で構成されている。

いては 6.1.2 節をご覧ください。

5.6.5.3 ボクセルファントム (voxel phantom) の利用

PHITS では lattice 構造を利用してボクセルファントム (voxel phantom) を仮想空間として設定できます。ボクセルファントムとは微小立方体を積み重ねて生物などの複雑な構造物を表現したものです。CT 等の画像データを元にして作成するボクセルデータを使用します。本節では、非常に簡単なボクセルデータを用意し、これを用いた設定方法について説明します。

基本的な考え方として、まず粒子輸送を行うためのある一定の大きさをもつ立方体 (直方体) を用意し、その中に微小立方体 (ボクセル) を並べます。その際、lattice 構造の LAT=1 を利用し、各ボクセルの座標が指定できる様にセルパラメータ FILL を使います。FILL を使用した場合、各ボクセルがどの状態か、すなわちどの universe で満たされているか、が指定できるため、水や鉄 (あるいはボイド) で満たされた universe を引用することで、様々な構造物をつくることができます。したがって、ボクセルデータは各ボクセルの位置座標と構成物質の情報をもっている必要があり、ここでは $L_{000} L_{100} L_{200} \cdots L_{stu} \cdots$ の順番で並べたデータ群を想定しています。ここで、 L_{stu} は lattice 座標 (i, j, k) にあるボクセルの構成物質 (universe 番号) です。

以下では、一辺が 10cm の立方体の中に一辺 2cm のボクセルを合計 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 並べた場合を考えています。

例 39: [cell] セクションの例題 (11)

```

1:  [ Material ]
2:  mat[1]  1H 2  160 1
3:  mat[2]  Fe 1
4:  [ Cell ]
5:      1  0      11  -12  13  -14  15  -16  FILL=1
6:    101  0      -20  LAT=1  U=1
7:      FILL=-2:2  -2:2  -2:2
8:      2 2 2 2 2  2 2 2 2 2  2 2 3 2 2  2 2 2 2 2  2 2 2 2 2
9:      2 2 2 2 2  2 3 3 2 2  2 3 4 3 2  2 3 3 2 2  2 2 2 2 2
10:     2 2 2 2 2  2 3 3 3 2  3 4 4 4 3  2 3 3 3 2  2 2 2 2 2
11:     2 2 2 2 2  2 2 3 3 2  2 3 4 3 2  2 2 3 3 2  2 2 2 2 2
12:     2 2 2 2 2  2 2 2 2 2  2 2 3 2 2  2 2 2 2 2  2 2 2 2 2
13:    201  0      -90  U=2
14:    301  2 -10.0  -90  U=3
15:    401  1  -1.0  -90  U=4
16:      2  -1      #1
17:  [ Surface ]
18:    11  PX  -5
19:    12  PX   5
20:    13  PY  -5
21:    14  PY   5
22:    15  PZ  -5
23:    16  PZ   5
24:    20  BOX  -1 -1 -1  2 0 0  0 2 0  0 0 2
25:    90  BOX -10 -10 -10  20 0 0  0 20 0  0 0 20

```

5 行目でセル番号 1 の領域を一辺が 10cm の立方体として定義しています。これが次の行のセル番号 101 の lattice で満たされており、基本単位は面番号 20 で定義した一辺 2cm の立方体です。ここでは面記号 BOX を用いて微小立方体 (ボクセル) を定義しています。7 行目でボクセルを lattice 座標 (i, j, k) のそれぞれに 5 つずつ並べるとしており、8~12 行目で各ボクセルを満たす universe 番号を指定しています。ボクセルは $(-2, -2, -2), (-1, -2, -2), \dots, (2, 2, 2)$ の順番で並んでおり、ボイドの場合は 2、鉄は 3、水は 4 の数字が対応しています。ボイドや鉄、水が入った空間の定義は 13~15 行目で行っており、それぞれが一辺 20cm の立方体に入った宇宙を universe 2, 3, 4 としています。本例題のボクセルで表現しているのは多少いびつな形状の鉄の箱に水が入っている構造物です。結果を図 52 に示しました。左図が立体的にそのまま見た結果、右図が表面の一部を透明にして見た結果です。少しずれていますが、図の左から右が i 軸、下から上が j 軸、奥

から手前が k 軸の方向に対応します。見てわかる様に、でこぼこした鉄の箱の中には水が入っており、この構造物を対象に粒子輸送計算を行うことができます。各タリーにおいて `mesh=reg` により領域指定する場合は、`(401 < 101[0 0 0] < 1)` の書式を用います。あるいは、セル番号 1 中の水の部分全てを指定したい場合は、`(401 < 1)` とすることができます。これらの書式については 6.1.2 節をご覧ください。ただし、`(301 < 101[-2:2 -2:2 -2:2] < 1)` の様な指定方法はありません。セル番号 101[-2:2 -2:2 -2:2] の全てにセル番号 301 の領域が含まれているわけではないためです。



図 52: 例題 (11) の構造物を立体的に見た図 (左) と表面の一部を取り除き内部を見た図 (右)。

例 39 の 8 から 12 行目の `universe` の羅列について、バージョン 3.09 以降では短縮形式での記述が可能になりました。ボクセルファントムの様なデータでは、同じ `universe` 番号が連続することが多いため、この短縮形式を利用することで、大幅に記述を省略することができます。これにより、膨大なボクセルデータに対するファイルサイズの削減や読み書きに掛かる計算時間の短縮につながります。短縮形式では、連続する `universe` 番号について、一つ目の `universe` 番号はこれまでどおり記述し、二つ目には `universe` 番号ではなく、これ以降に同じ `universe` 番号が連続する数を負の符号を付けて記述します。これにより、例 39 の 8 から 12 行目は以下のように記述することができます。

例 40: `[cell]` セクションの例題 (11')

```
8:      2 -11 3 2 -17 3 -1 2 -2 3
9:      4 3 2 -1 3 -1 2 -12 3 -2
10:     2 3 4 -2 3 2 3 -2 2 -12 3
11:     -1 2 -1 3 4 3 2 -2 3 -1 2
12:     -17 3 2 -11
```

例 39 では、`universe` 番号の 2 が 12 個並んだ後に、`universe` 番号の 3 が記述されているのに対し、例 40 では、`universe` 番号の 2 の後に同じ `universe` 番号がさらに 11 個並んでいるとの意味で、-11 の記述がされています。

PHITS では、最初に読み取ったインプットデータを一時的にバイナリ形式で書き出し、それを再度読み込んで粒子輸送計算を行います。例題 (11) で扱ったのは簡単なボクセルですが、一般的にボクセルデータは大規模なものとなり、それを PHITS の実行の度に読み書きするのは非常に時間がかかります。これを緩和するために、`[parameters]` セクションの `ivoxel` パラメータを使う方法があります。`ivoxel` は、ボクセルデータ (実質的には例題 (11) の 8 から 12 行目) をバイナリとして出力させて保存し、2 度目からはそのバイナリを読んで計算するという機能を持ちます。PHITS 実行時に `ivoxel=2` とすると `file(18)` にデータを書き出してそのまま終了します (ただし、バージョン 2.30 以前では、終了せずに引き続き輸送計算を行います) ので、以降 `ivoxel=1` と設定することで該当ファイルからバイナリデータを読み込んで計算できます。また、大量のボクセルデータを PHITS のインプットファイルとは別のファイルに保存して計算するときは、`infl` を使用します。この場合の `ivoxel` の使い方も同じです。

5.6.5.4 連続四面体形状の利用

本節では、連続四面体形状の仕組みと定義の仕方、および基本的な利用方法について説明します。連続四面体形状はポリゴン的一种で、様々な大きさの四面体を組み合わせることで、複雑な形状をもつ物体を表現できるようになります。なお、四面体メッシュ体系内では反射面が動作しません。四面体メッシュ体系内で反射面を使いたい場合は、物理的に無視できる薄い四面体メッシュ体系外領域を内部に定義し、その中に反射面を定義すれば、反射を実現できます。

PHITS では二種類の連続四面体形状の形式に対応しています。一つは四面体メッシュ分割ソフトウェア TetGen によって生成される Node ファイルと Element ファイルで四面体形状を表現する形式で、もう一つは有限要素法 CAE ソフトウェア NASTRAN のバルクデータ形式です。

TetGen での形式は、

- Node ファイル: 各四面体の各々の頂点の xyz 座標
- Element ファイル: 各四面体要素を構成する 4 つの頂点

の 2 つのファイルで表現されます。Node ファイルおよび Element ファイルは、共通のファイル名に .node および .ele という拡張子が付いた形を想定しています。PHITS のインプットファイルでは、この共通ファイル名を指定することになります。この機能の具体的な利用方法については、\phits\utility\TetraGEOM フォルダにある資料やサンプルインプットをご参照ください。

次に、Node ファイルおよび Element ファイルの例を示します。

例 41: Node ファイルの例

```
1:  # Simple two elements
2:  5  3  0  0
3:  # pointID x y z
4:  1  0.0 -2.5 -4.0
5:  2  -4.0 -2.5  0.0
6:  3  4.0 -2.5  0.0
7:  4  0.0 -2.5  4.0
8:  5  0.0  2.5  0.0
```

Node ファイルでは、まず始めにこのファイルに含まれる全ての頂点の数と扱っている次元数を設定します (2 行目)。PHITS で扱える次元は 3 次元のみです。2 行目の最後の 2 つの 0 は PHITS では使われずに無視されます。その下に (4 行目以下)、

[頂点番号] [x] [y] [z]

の順で頂点番号とその頂点の xyz 座標を指定します。

例 42: Element ファイルの例

```
1:  # Simple two elements
2:  2  4  1
3:  # elementID point(1:4) universe
4:  1  1  2  3  5  5001
5:  2  5  2  3  4  5002
```

Element ファイルでは、まず始めにこのファイルに含まれる全要素数と 1 つの要素を構成する頂点の数 (PHITS では、1 次要素の四面体しか扱えないので、4 となります) と要素に付加する情報の数 (PHITS では 1) を設定します (2 行目)。その下に (4 行目以下)、

[要素番号] [頂点番号 1] [頂点番号 2] [頂点番号 3] [頂点番号 4] [要素 universe 番号]

の順で各要素の情報を指定します。要素番号は各四面体の ID 番号、頂点番号 1~4 はその四面体を構成する頂点の番号で Node ファイル内で定義した番号です。最後の要素 universe 番号で、各四面体をどの universe 番号の空間で満たすかを指定します。各 universe の定義は PHITS のインプットファイルで行います (例 43 の 13,14 行目参照)。なお、Node ファイルおよび Element ファイル内では、任意の行で # から始まるコメント行を挿入することができます。

Node ファイルおよび Element ファイルは四面体メッシュ分割ソフトウェア TetGen を使って作成することができます。多少技術が必要ですが、一般的なポリゴンデータもこのソフトウェアを使って連続四面体に変換することが可能です。TetGen は次のウェブサイト <http://wias-berlin.de/software/tetgen/> から無料でダウンロード可能です。TetGen の使い方については、TetGen のマニュアルをご参照ください。

NASTRAN のバルクデータ形式は、構造解析計算や流体解析計算など様々なソフトウェアで一般的に出力可能な形式です。PHITS ではバルクデータ形式の中で、頂点情報 GRID と四面体ソリッド要素情報 CTETRA で構成される BDF ファイル (拡張子.bdf) を読み込むことができます。通常、何らかのソフトウェアにより体系を作成し、それをバルクデータ形式で出力することが想定されることから、バルクデータ形式に関する詳細は省略します。詳しくは NASTRAN バルクデータで検索してください。構造計算や流体計算と同一の形式を採用することで、これらの計算と放射線輸送計算をシームレスに繋いだ解析が可能となりました。具体的な利用方法については、`\phits\utility\FLUENT` フォルダにある資料をご参照ください。

次に、PHITS のインプットファイルにおける指定の仕方について説明します。

例 43: [cell] セクションの例題 (12)

```

1:  [Material]
2:  mat[1] 14N 78.1 160 20.9 40Ar 0.93
3:  mat[2] 1H 2 160 1
4:  mat[3] 56Fe 1
5:  [Surface]
6:  10 rpp -5.0 5.0 -3.0 3.0 -5.0 5.0
7:  20 rpp -7.0 7.0 -5.0 5.0 -7.0 7.0
8:  90 so 500.0
9:  [Cell]
10: 101 1 -0.001205 -20 U=1 LAT=3 tfile=Tetra TSFAC=1.0
11: 1 0 -10 FILL=1
12: 2 -1 10
13: 201 2 -1.0 -90 U=5000
14: 202 3 -7.874 -90 U=5001

```

例 44: [cell] セクションの例題 (13)

```

10: 101 1 -0.001205 -20 U=1 LAT=3 nfile=Tetra.bdf TSFAC=1.0

```

PHITS で連続四面体形状を取り扱うためには、直方体 (面記号 RPP) で指定する領域を定義し、その中に四面体連続形状を展開します。全ての四面体の頂点はこの直方体の中に含まれる必要があります。ただし、直方体の大きさを連続四面体形状の大きさからかけ離れて大きく取り過ぎると計算の都合で問題が生じるので、連続四面体形状が全て収まる適当な大きさの直方体としてください。10 行目では、セル番号 101 の領域として、面番号 20 で定義される 14cm×10cm×14cm の直方体の中にファイル名 Tetra で指定される連続四面体形状を展開しています。LAT=3 は連続四面体形状を使用するオプションの指定で、TFILE に与えられるファイル名に対応する Node ファイルおよび Element ファイルが読み込まれることになります。NASTRAN バルクデータ形式のファイル

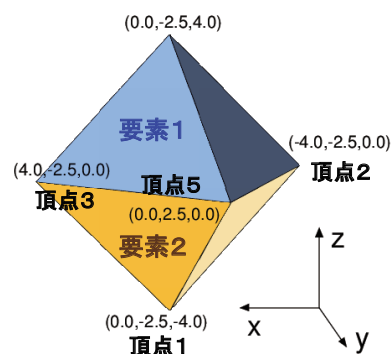


図 53: 例題 (12) で作られる連続四面体形状。

を使用する場合は、44 の様に **TFILE** の代わりに **NFILE** でファイル名を指定してください。なお、**NFILE** を指定する際、拡張子（例えば.bdf）をもつ場合は、それまで含めたファイル名を指定してください⁸⁹。Windows 以外の OS では、ファイル名に大文字小文字の区別があるので、ファイル名の指定はどちらの形式でも大文字小文字を正しく入力してください。**TSFAC** の指定により、**Node** ファイルで与えられる四面体頂点の座標に対する規格化定数を与えることができます。ここでは、**TSFAC=1.0** なので、**Node** ファイルで与えられる座標をそのまま使用します。セル番号 101 の領域に対するマテリアルの指定は領域 101 内で連続四面体を除く領域で使用されることになります。11 行目でセル番号 1 の領域を 10cm×6cm×10cm の直方体として定義しています。**Fill** の指定により、この領域が 10 行目のセル番号 101 で定義される連続四面体を含む領域によって満たされることになります。このように連続四面体形状 (**LAT=3**) を使用する場合も、**Lattice** 構造の指定と同じように、**Universe** と **Fill** を利用した入れ子構造を定義してください。**Element** ファイルで指定される各四面体の要素 **universe** に対応する領域の指定は **Lattice** 構造での指定と同様で 13,14 行目で行っています。この例題では、四面体要素 1 には物質番号 2 の水 (H₂O) が、四面体要素 2 には物質番号 3 の鉄 (Fe) が含まれることになります。

連続四面体形状の構成物質が増えた場合は、各四面体の要素 **universe** に対応する領域の数が増えます。この手作業の負担を減らすため、自動的にこの領域を作成するオプションを追加しました。この自動領域追加オプションを使用するには、パラメータセクションで **itetauto=1** と指定してください。連続四面体形状に含まれる全ての **universe** に対応する領域を自動で作成します。この際に、面番号 5000 番の非常に大きな球面とセル番号 5001 番から 5000+n 番を新たに追加します。ここで、**n** は連続四面体形状に含まれる **universe** の数です。ですので、このオプションを使う際にはこれらの面番号およびセル番号を使用しないようにしてください。**NASTRAN** バルクデータ形式ファイルを使用する場合は、バルクデータに含まれる **PSOLID** タブおよび **MAT** タブの情報を読み取り、自動的に追加領域の密度が設定されます。**TetGen** 形式ファイルを使用する場合は、これらの情報を外部ファイルで与える必要があります。同じファイル名で拡張子.txt のファイルを用意し、45 の様に各 **universe** 番号と密度を一行毎に記述してください。追加されたセル番号 5001 番から 5000+n 番の領域には自動的にセル番号と同じマテリアル番号が割り振られます。対応するマテリアルが存在しない状態で一度 **PHITS** を実行すると 46 の様なエラーメッセージが表示されますので、このメッセージを参考に連続四面体形状の **universe** に対応するマテリアルを 5001 番から 5000+n 番に定義してください。**phits.out** に含まれるインプットエコーに追加された面および領域が記述されるので、正しく指定が行えたかどうかを確認することができます。

例 45: txt ファイルの例

```
1:  5001 5001 -1.0
2:  5002 5002 -7.874
```

例 46: エラーメッセージの例

```
*** ERROR : undefined material
TETRA material (MID): 5001
should be defined as material ID number: 5001
*** ERROR : undefined material
TETRA material (MID): 5002
should be defined as material ID number: 5002
```

LAT=3 を指定した cell には **TRCL** を指定することができません。連続四面体形状で読み込んだ体系に座標変換を加えるには、**fill/universe** を利用した階層構造を用意し、**LAT=3** を指定して連続四面体形状を読み込む直方体の定義よりも上の階層に **TRCL** を指定するようにしてください。具体的な利用方法については、“/phits/utility/TetraGEOM” フォルダにある資料やサンプルインプットをご参照ください。

⁸⁹ PHITS ver.3.34 以前では拡張子 (.bdf) を含めずにファイル名を指定する仕様でした。

5.7 [Transform] セクション

5.7.1 書式

このセクションでは、[source], [surface], [cell] の各セクション、**r-z**, **xyz** メッシュの場合の各タリー、磁場や電場の定義の際に使用できる座標変換の定義を行います。コメント文字として\$の他に、行頭のc␣ (␣は空白文字) が使用できます。**infl:**によるファイルの挿入、**set:**によるユーザー定義定数の設定は、セクションの途中でも行うことができます。なお、[transform] を用いて可能な座標変換は回転と平行移動のみであり、拡大・縮小はできない点にご注意ください。

書式は以下の通りです。

[Transform]

TRn X₀ Y₀ Z₀ B₁ B₂ B₃ B₄ B₅ B₆ B₇ B₈ B₉ M

TRn の n により定義する座標変換番号を指定します。次の X_0, Y_0, Z_0 は平行移動に関する入力値であり、その後の $B_i (i = 1, \dots, 9)$ は回転に関する入力値です。最後の M は変換方法のオプションで、これにより B_i の表す意味や座標変換に用いる式が変わります。

表 96: 座標変換パラメータ

項目	説明
n	座標変換番号。1 ~ 999999 が使用できます。
X_0, Y_0, Z_0	平行移動の x, y, z 成分。単位は cm。
$B_1 \sim B_9$	回転に関する入力の各成分。具体的には、 $M = \pm 1$ の場合は式 (20) と (21) をご参照ください。行列式が 1 でない場合は、1 となるように規格化されます。 $M = \pm 2, \pm 3$ の場合は、それぞれ節 5.7.2.2 と節 5.7.2.3 に示した入力方式をご確認ください。
M	変換方法のオプション。 正の場合は回転させた後に平行移動させ、負の場合は平行移動させた後に回転させます。 = ± 1 は、 $B_i (i = 1, \dots, 9)$ に回転行列の成分を直接入力するオプションです。 = ± 2 と ± 3 は、 x, y, z 軸回りの回転を角度だけ入力することで簡易的に指定するオプションです。 $M = \pm 2$ の場合は、原点中心の回転のみ扱い、回転させる順番も z, y, x 軸の順で固定です。 $M = \pm 3$ の場合は、回転の中心座標を指定することでき、回転させる順番も指定できます。指定する角度は、TRn の場合は radian 単位、*TRn の場合は degree 単位です。

5.7.2 座標変換の定義と使い方

この節では、 M の値によって変わる B_i の意味や座標変換式について説明し、例題を示すことで使い方を簡単にご紹介します。ただし、変換の対象がタリーの場合は、それ以外の場合と変換前後の座標系が式の上では逆になるのでご注意ください。タリーの座標変換については節 5.7.3 をご覧ください。

5.7.2.1 $M = \pm 1$ の場合

このオプションでは、回転行列の成分を直接入力することで任意の回転を指定できます。座標変換前の座標を (x, y, z) 、変換後の座標を (x', y', z') とすると、 $M = 1$ の時の変換式は、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & B_4 & B_7 \\ B_2 & B_5 & B_8 \\ B_3 & B_6 & B_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

となり、 $M = -1$ の時は、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & B_4 & B_7 \\ B_2 & B_5 & B_8 \\ B_3 & B_6 & B_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - X_0 \\ y - Y_0 \\ z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

となります。変換を行う対象を、 $M = 1$ の場合は回転してから平行移動させ、 $M = -1$ の場合は平行移動してから回転させます。回転は、どちらの場合も、xyz 座標系の原点に対して行われます。ただし、平行移動は $M = 1$ と -1 で逆向きとなるのでご注意ください。例えば、 x 方向に 10 cm 移動したい場合は、 $M = 1$ の場合は $X_0=10$ 、 $M = -1$ の場合は $X_0 = -10$ と指定します。この関係は $M = \pm 2, \pm 3$ の場合も同じです。

例 47: [transform] セクションの例題 (1)

```

1: [ Transform ]
2: set: c10[90] $ angle of around Z (degree)
3: set: c20[30] $ angle of around Y (degree)
4: set: c30[0]  $ angle of around X (degree)
5:
6: tr1  0 0 0
7:      cos(c10/180*pi)*cos(c20/180*pi)
8:      sin(c10/180*pi)*cos(c30/180*pi)+cos(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*sin(c30/180*pi)
9:      sin(c10/180*pi)*sin(c30/180*pi)-cos(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*cos(c30/180*pi)
10:     -sin(c10/180*pi)*cos(c20/180*pi)
11:      cos(c10/180*pi)*cos(c30/180*pi)-sin(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*sin(c30/180*pi)
12:      cos(c10/180*pi)*sin(c30/180*pi)+sin(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*cos(c30/180*pi)
13:      sin(c20/180*pi)
14:     -cos(c20/180*pi)*sin(c30/180*pi)
15:      cos(c20/180*pi)*cos(c30/180*pi)
16:      1

```

上の例題は、 z 軸周りに $c10$ 度、次に y 軸周りに $c20$ 度、最後に x 軸周りに $c30$ 度回転させる回転行列を書き下したものです。 $c10, c20, c30$ の定数に値を入れることにより、各軸周りの回転を定義できます。

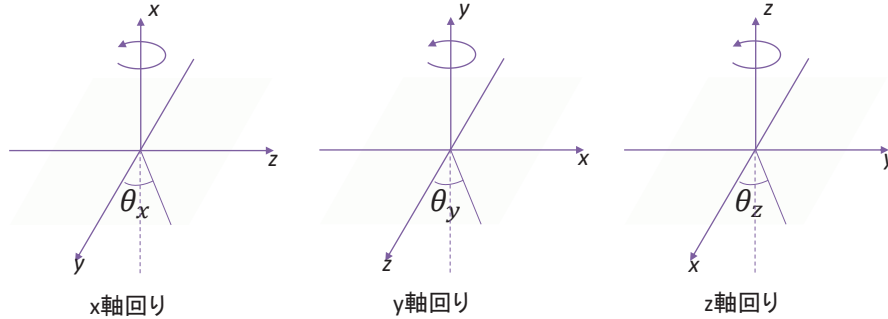
5.7.2.2 $M = \pm 2$ の場合

これは x, y, z 軸周りの回転のみを容易に指定できるオプションです。軸毎の回転角度を入力するだけでよく、回転行列の成分を指定する必要がありません。ただし、原点を中心とした回転のみを扱い、回転させる順番は z, y, x 軸の順で固定です。

入力方式は次のようになります。

TRn X_0 Y_0 Z_0 θ_z θ_y θ_x 0 0 0 0 0 0 2
--

ここで、 X_0, Y_0, Z_0 はそれぞれ平行移動の x, y, z 成分、 $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ はそれぞれ z, y, x 軸周りの回転角度です。 B_4-B_9 の 0 の部分にはどんな数字でも良いので入れておく必要があります。

図 54: x, y, z 軸周りの回転の方向

各軸周りの回転の方向は図 54 をご参照ください。それぞれの回転を行列で表すと、

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{pmatrix}, \quad R_y = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix}, \quad R_z = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (22)$$

となります。これにより、 $M = 2$ の時の座標変換の式は、変換前の座標を (x, y, z) 、変換後の座標を (x', y', z') とすると、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_x R_y R_z \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

となり、 $M = -2$ の時は、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_x R_y R_z \begin{pmatrix} x - X_0 \\ y - Y_0 \\ z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

となります。 $M = \pm 1$ の節で書いたように、平行移動は $M = 2$ と -2 で逆向きとなるのでご注意ください。

例 48: [transform] セクションの例題 (2)

```
1:  [ Transform ]
2:  *tr1  0 0 0 90 30 0 0 0 0 0 0 2
3:  tr2   0 0 0 pi/2 pi/6 0 0 0 0 0 0 2
```

これは $M = 2$ の例題です。例題 (47) と同じ回転の座標変換を簡易に入力できます。`*tr1` は degree 単位、`*` の付かない `tr2` は radian 単位で回転角度を指定します。

5.7.2.3 $M = \pm 3$ の場合

このオプションは、回転の中心となる座標を指定できるようにし、また回転する軸の順番を任意に変更できるようにしたものです。

入力方式は次のようになります。

<code>TRn X0 Y0 Z0 XC YC ZC A1 θ1 A2 θ2 A3 θ3 3</code>
--

ここで、 X_0, Y_0, Z_0 はそれぞれ平行移動の x, y, z 成分、 X_C, Y_C, Z_C は回転の中心となる座標の x, y, z 成分です。 A_i と $\theta_i (i = 1, 2, 3)$ はそれぞれ、 i 回目の軸回転の軸と角度です。 $A_i = 1, 2, 3$ の場合はそれぞれ x, y, z 軸の回転を i 回目に実行することを意味します。また、 $A_i = 0$ の場合は回転させないことを意味します。例えば、 y 軸回りのみ回転させる場合は $A_1 = 2, A_2 = A_3 = 0$ とします。

$M = 3$ の時の座標変換の式は、変換前の座標を (x, y, z) 、変換後の座標を (x', y', z') とすると、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_3 R_2 R_1 \begin{pmatrix} x - X_C \\ y - Y_C \\ z - Z_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

となります。 R_1, R_2, R_3 には、それぞれ A_1, A_2, A_3 で指定した x, y, z 軸の回転行列が入ります。 $M = -3$ の時は、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_3 R_2 R_1 \begin{pmatrix} x - X_C - X_0 \\ y - Y_C - Y_0 \\ z - Z_C - Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix}, \quad (26)$$

となります。なお、 $M = \pm 1$ の節で書いたように、平行移動は $M = 3$ と -3 で逆向きとなるのでご注意ください。

例 49: [transform] セクションの例題 (3)

```
1:  [ Transform ]
2:  *tr1  0.0 0.0 5.0  0.0 10.0 0.0  2 45.0  3 -60.0  0 0.0  3
```

これは $M = 3$ の例題です。座標 $(0.0, 10.0, 0.0)$ を中心とする座標系において、 y 軸周りに 45 度、 z 軸周りに -60 度回転させた後、 z の $+$ 方向に 5 cm 平行移動させます。

5.7.3 タリーの場合

タリーに座標変換をかけると変換後の点を中心とした座標系で表示するようになり、いわゆる物体固定系 (body-fixed coordinate system) で計算結果を表示できるようになります。この場合、変換後の座標系で結果を描画することから、タリー以外の場合と比べて変換式の関係が逆になります。例えば $M = 1$ の時、変換前の座標を (x, y, z) 、変換後の座標、すなわちタリーで表示する座標、を (x', y', z') とすると、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & B_4 & B_7 \\ B_2 & B_5 & B_8 \\ B_3 & B_6 & B_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - X_0 \\ y - Y_0 \\ z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (27)$$

となります。これは例えば、変換前のタリーで $x = 20$ cm の位置に表示されていた物が、変換後のタリーでは $x' = 20 - X_0$ cm の位置に表示されることを意味します。すなわち、 X_0 が正の場合は、その分だけ x 軸の負側にシフトして表示されます。同様に $M = -1$ の時は、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 & B_3 \\ B_4 & B_5 & B_6 \\ B_7 & B_8 & B_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

となります。 $M = \pm 1$ 以外の場合も同様の挙動になりますのでご注意ください。

5.8 [Temperature] セクション

このセクションでは、Free-Gas Thermal Temperature を定義します。単位は **MeV** です。時間の定義はできません。この量は、[cell] セクションのセルパラメーターでも定義できますが、領域が重なった場合は、この [temperature] で定義した値が優先します。両方で定義されない領域は、 $2.585 \times 10^{-8} \text{MeV}$ にセットされます。なお、一般的に温度は熱中性子の放射線挙動にのみ影響を与え、それ以外の放射線挙動には物理的に影響を与えません。

書式は、

[Temperature]	
reg	tmp
1	1.0*1.e-8
11	5.0*1.e-8
({ 2 - 5 } 8 9)	2.0*1.e-8
(11 12 15)	3.0*1.e-8
16	6.0*1.e-8
....
....

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。しかし、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造は、使えません。

領域番号 (reg) と温度 (tmp) の順番を変えたいときは、tmp reg とします。読み飛ばしコラム用の non も使えます。

5.9 [Mat Time Change] セクション

このセクションでは、ある特定の物質をある時間で異なる物質に変化させる機能を定義します。時間の単位は `nsec` です。書式は、

[Mat Time Change]		
mat	time	change
1	50.0	11
2	100.0	12
3	1000.0	0
....	
....	

物質番号 (`mat`) と (`time change`) の順番を変えたいときは、`mat change time` の様に定義行で変えます。読み飛ばしコラム用の `non` も使えます。この3つのコラムは全て必須です。`mat` で定義された物質が、`time` で定義された時間で `change` で定義された物質に変化します。時間によってシャッターの開閉がある場合などを想定しています。

5.10 [Magnetic Field] セクション

5.10.1 荷電粒子

PHITS では、指定した領域において磁場を設定することができます。電子・陽電子についてこの機能を使用する場合は、EGS5 を利用してください。このセクションでは、磁場を及ぼす **region** もしくは **cell** の番号 (**reg**) と、磁場のタイプ (**typ**)、磁石の間隔の半分 (**gap**)、磁場の強さ (**mgf**)、座標変換 (**trcl**)、時間変化 (**time**) を定義します。このセクションで定義された磁場を有効にするには、**[parameters]** において **imagnf=1** を指定してください。

書式は、

[Magnetic Field]						
reg	typ	gap	mgf	trcl	time	
1	4	10.00000	-5.956540	3	non	
2	4	10.00000	6.416140	1	non	
3	2	10.00000	-7.611980	0	0.0	
4	2	10.00000	3.516000	0	pi/2	
(150 < 61)	4	13.00000	7.880140	2	non	
(150 < 62)	4	13.00000	-7.440800	2	non	
(150 < 63)	4	13.00000	9.441010	2	non	
(150 < 64)	4	13.00000	-8.295220	2	non	
(150 < 65)	4	13.00000	3.694830	2	non	
(150 < 66)	4	13.00000	-2.099350	2	non	
...	
...	

ここで、**time** は、ユーザー定義の磁場の時間変化のパラメータです。**non** が、時間変化無しです。ユーザー定義サブルーティンは、**usrmgt1.f** と **usrmgt2.f** がサンプルルーティンとして含まれています。前者が Wobbler 磁石、後者が中性子用パルスマグネットです。これらを切り替えるには、パラメータセクションで、**usrmgt=1,2** で指定します。Wobbler の時の **time** パラメータは、位相を指定し、パルスマグネット時は、立ち上がり時間を指定します。**pi** は、円周率の定数として使用できます。

reg は、**region**、**typ** は磁場のタイプ、二重極電磁石が **2**、四重極電磁石が **4**、**gap** は、磁石の間隔の半分 (cm)、**mgf** は磁場の強さ (kG)、**trcl** は、座標変換の定義番号です。座標変換は、**[transform]** セクションで定義します。

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。また、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの **lattice**, **universe** 構造も指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。

この書式を用いれば **lattice** のひとつひとつに異なる **magnet field** を定義することも可能です。上の定義で、同じセルが二重に定義された時は、初めに定義された値が採用されます。

これらの順番を変えたいときは、定義の文字列の順番を変えます。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。

二重極電磁石の場合、磁石の間隔 **gap** は意味がありませんが、何らかの数値を入力して下さい。磁場の働く領域は、真空の領域、即ち、**mat** が **0** のときに限りません。磁場中でも減速、散乱が起こります。

trcl は、省略できます。**trcl** コラムがある場合で、座標変換のないときはゼロを書いてください。磁場中心の軸は **z** 軸上、磁場の方向は、二重極電磁石では、**y** 軸正方向、即ち正荷電粒子が **z** 軸正方向に進むときに、**x** 軸負方向に偏極します。四重極電磁石では、正荷電粒子が **z** 軸正方向に進むときに、**x** 軸方向に収

束、y 軸方向に分散の配置です。これらの位置関係を幾何形状に合わせるには、**trcl** による座標変換が必要です。座標変換で、z 軸を磁石の幾何形状の中心軸に変換します。

[source] セクションのパラメータ **izst**=を用いて入射粒子の電荷価数を指定した場合、磁場中の運動はその価数に応じたものになります。通常の *PHITs* では、荷電粒子、特に原子核は、磁場の中で電荷価数 *Z* の粒子として振る舞います。しかしながら、加速原子核では、電荷価数が *Z*、即ち全ての電子が剥ぎ取られた状態以外に、幾つかの電荷状態が存在する場合があります。**izst** を用いることで、その状態にある粒子の運動を模擬できるようになります。ここで指定された価数は、輸送の途中では変化しません。ただし、核反応を起こし、生成される原子核には影響を及ぼしません。即ち、原子核反応で生成された原子核の価数は、*Z* に戻ります。

数 cm 以下の距離で軌道が大きく曲がる強い磁場やエネルギーの低い荷電粒子の軌道を計算したい場合は、磁場中での最大飛行メッシュ(**deltg**) を小さく設定してください（ただし、電子・陽電子は除く）。

5.10.2 中性子

中性子光学のための磁場の書式は、ほぼ荷電粒子の場合と同じですが、細かい点が異なりますので、ここにまとめて説明します。まず書式の例題を下に示します。

[Magnetic Field]							
reg	typ	gap	mgf	trcl	polar	time	
1	60	0.00000	35000.0	3	non	non	
2	61	0.00000	35000.0	1	1	non	
3	106	5.00000	7130.0	0	0	non	
4	104	0.00000	3.5	0	non	5.0	
5	102	0.00000	0.20	0	non	non	
6	101	3.00000	7130.0	2	1	non	
7	103	0.00000	35000.0	0	-1	non	
...	
...	

タイプは上の7種類あります。60、61は、最もシンプルな6極磁場で、重力効果や追加2極磁場は入れられません。60は、スピンとの相互作用なし、即ちスピンは磁場に平行か反平行かで記述されます。61は、スピンとの相互作用が入ります。磁場の弱いところでのスピンの反転などが起こります。磁場の強さは、**mgf** のコラムに $[T/m^2]$ の単位で指定します。

次に100番台は、全てスピンとの相互作用を考慮しています。また、重力効果、追加の2極磁場が入れられます。106が6極、104が4極、102が2極磁場です。z方向の追加2極磁場の強さは、**gap** のコラムに記述します。単位はT(テスラ)です。

101は、磁場の値をユーザー定義ファイル **usrmgf1.f** で定義します。このユーザープログラムでは、原研の中性子光学グループで測定された6極磁場の値が格納された4つのファイルからデータを読み込み、それらを内挿して計算に用います。磁場の強さは、**mgf** で定義した値に規格化します。**gap** のコラムで与えた2極磁場は、定義した磁場領域全域に作用します。

103も、ユーザー定義ファイルを参照するオプションです。103では、**usrmgf3.f** を参照します。**usrmgf3.f** には、6極磁場の式が書いてありますので、このまま動かせば、106を指定した時と同じになります。ユーザー定義磁場を書く場合は、添付の **usrmgf1.f** と **usrmgf3.f** を参考にして下さい。

中性子のスピンは、ソースセクションで **sx**, **sy**, **sz** で、定義すれば、その方向で磁場に入射します。ソースセクションで定義しないか、**sx**, **sy**, **sz** 全てがゼロの場合は、最初に磁場に入った時の磁場の方向で初期化されます。その時、このセクションの **polar** のコラムで定義される偏極率によりスピンの向きが磁場に平行か反平行かの比率が決定されます。**non** は、偏極率ゼロと同義です。偏極率 P の定義は、

$$P = \frac{\phi_+ - \phi_-}{\phi_+ + \phi_-}$$

ここで、 ϕ_+ と ϕ_- は、スピンが磁場に平行な粒子数と反平行な粒子数です。

5.10.3 磁場マップの読込方法

Version 3.10 より、xyz グリッドもしくは r-z グリッドで表現された任意の磁場構造を読み込むことが可能となりました。その書式の例題を以下に示します。

```
[ Magnetic Field ]
reg   typ   gap   mgf   trcl   file
101   -1    10.0   0.5   0      xyzlist.dat
102   -2    100.0   3.0   0      rzlist.dat
103   -3    10.0   10.0   0      xyzmap.dat
104   -4     1.0    1.0   1      rzmap.dat
```

磁場マップは4つの形式で定義でき、それぞれ **typ**=-1, ..., -4 で指定します。中性子に対して磁場を考慮したい場合は **typ**=-101, ..., -104 となります。1つのインプットファイルで同タイプの磁場マップを2つ以上指定することができません。各形式は表 97 のようになります（詳細は 5.10.4 節参照）。

表 97: 利用できる磁場マップの形式

typ	説明
-1 or -101	xyz グリッド, データリスト型
-2 or -102	r-z グリッド, データリスト型
-3 or -103	xyz グリッド, データマップ型
-4 or -104	r-z グリッド, データマップ型

磁場マップの場合、**gap** と **mgf** が通常の磁場の場合と比べて意味が異なり、**gap** は飛程の分割数（磁場がない場合の飛程を **gap**×100 等分し、ルンゲ・クッタ法を用いて飛跡を解析します）、**mgf** は磁場マップで指定した磁場強度の倍率となります。例えば、磁場マップで指定した磁場の単位が T（テスラ）の場合、**mgf**=10 とすることにより kG 単位に変換して PHITS で読み込むことができます。**file** は磁場マップファイル名です。なお、電子・陽電子は EGS5 モードを用いた場合のみ磁場が有効となり、その飛程の分割数は **gap** とは無関係となります。また、電子・陽電子の場合は、通常の磁場と同じく座標変換 (**trcl**) が有効になりませんのでご注意ください。

5.10.4 磁場マップの形式

全ての磁場マップファイルは、ヘッダー部分とデータ部分に分けられます。ヘッダー部分は#や\$を使ってコメント文を挿入することができますが、データ部分にはコメントを書くことができません。各磁場マップのサンプルは `\phits\utility\magmap` フォルダに格納されていますので、そちらもご参照ください。

5.10.4.1 ヘッダーの指定方法

ヘッダー部分では、PHITS インプットファイルと同じく、スペースは無視され、大文字・小文字の区別はありません。ヘッダーパラメータは、1 行に 1 つずつ指定します。指定可能なヘッダーパラメータを表 98 に示します。

表 98: 磁場マップで指定可能なヘッダーパラメータ

パラメータ	説明
nx	x 方向のグリッド数 (typ =-1 & -3 で有効, 省略不可)
ny	y 方向のグリッド数 (typ =-1 & -3 で有効, 省略不可)
nz	z 方向のグリッド数 (全ての typ で有効, 省略不可)
nr	r 方向のグリッド数 (typ =-2 & -4 で有効, 省略不可)
xmin	x グリッドの最小値 (typ =-3 で有効, D=0)
xmax	x グリッドの最大値 (typ =-3 で有効, 省略不可)
ymin	y グリッドの最小値 (typ =-3 で有効, D=0)
ymax	y グリッドの最大値 (typ =-3 で有効, 省略不可)
zmin	z グリッドの最小値 (typ =-3 & -4 で有効, D=0)
zmax	z グリッドの最大値 (typ =-3 & -4 で有効, 省略不可)
rmin	r グリッドの最小値 (typ =-4 で有効, D=0)
rmax	r グリッドの最大値 (typ =-4 で有効, 省略不可)
ibxmap	x 方向磁場マップデータの有 (=1) 無 (=0)。(typ =-3 で有効, D=1)
ibymap	y 方向磁場マップデータの有 (=1) 無 (=0)。(typ =-3 で有効, D=1)
ibzmap	z 方向磁場マップデータの有 (=1) 無 (=0)。(typ =-3 & -4 で有効, D=1)
ibrmap	r 方向磁場マップデータの有 (=1) 無 (=0)。(typ =-4 で有効, D=1)
extendx	x 負方向への磁場の拡張 (typ =-1 & -3 で有効, 省略した場合は拡張しない)
extendy	y 負方向への磁場の拡張 (typ =-1 & -3 で有効, 省略した場合は拡張しない)
extendz	z 負方向への磁場の拡張 (全ての typ で有効, 省略した場合は拡張しない)
data	この行以降がデータ部分となります (全ての typ で有効, 省略不可)

extend を指定し、磁場の向きを反転させて拡張したい場合は、同じ行に **flip=br**, **bz** のように反転したい磁場を書きます。例えば

```
extendx flip = bz
extendy flip = bz
```

とした場合は、図 55 のように z 方向の磁場の向きが反転します (x,y 方向に関しては、同じ向きの磁場が拡張されます)。

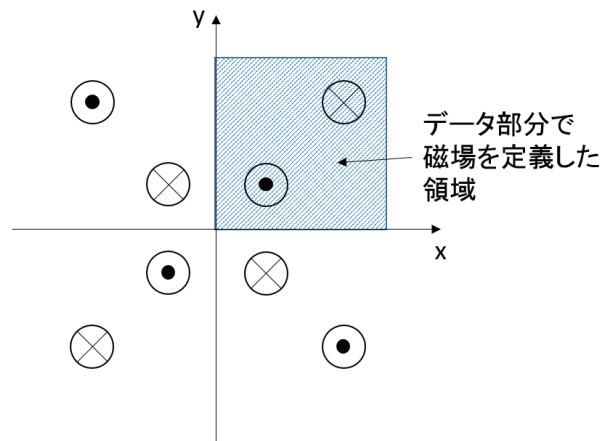


図 55: **flip** を使用し、磁場の向きを反転させて拡張した例。

5.10.4.2 磁場強度の定義方法

データ部分では、スペース、タブ、もしくはコンマ区切りで数値データを指定します。文字やコメントは入れられませんのでご注意ください。ただし、数値データの後ろのカラムであれば自由にコメントを入れることができます。距離の単位は **cm**，磁場の単位は **kG** です。粒子位置における磁場強度はグリッド上の値を線形内挿して導出しますので、入力する磁場強度は、グリッドの中点ではなく各グリッド上の値を入力してください。以下、**typ** 別の磁場指定方法を示します。

- **typ=-1: xyz グリッド，データリスト型**

x_1	y_1	z_1	$B_{x_{1,1,1}}$	$B_{y_{1,1,1}}$	$B_{z_{1,1,1}}$
x_1	y_1	z_2	$B_{x_{1,1,2}}$	$B_{y_{1,1,2}}$	$B_{z_{1,1,2}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_1	y_1	z_{nz}	$B_{x_{1,1,nz}}$	$B_{y_{1,1,nz}}$	$B_{z_{1,1,nz}}$
x_1	y_2	z_1	$B_{x_{1,2,1}}$	$B_{y_{1,2,1}}$	$B_{z_{1,2,1}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_1	y_{ny}	z_{ny}	$B_{x_{1,ny,nz}}$	$B_{y_{1,ny,nz}}$	$B_{z_{1,ny,nz}}$
x_2	y_1	z_1	$B_{x_{2,1,1}}$	$B_{y_{2,1,1}}$	$B_{z_{2,1,1}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_{nx}	y_{ny}	z_{ny}	$B_{x_{nx,ny,nz}}$	$B_{y_{nx,ny,nz}}$	$B_{z_{nx,ny,nz}}$

- **typ=-2:** rz グリッド, データリスト型

r_1	z_1	$B_{r_{1,1}}$	$B_{z_{1,1}}$
r_1	z_2	$B_{r_{1,2}}$	$B_{z_{1,2}}$
\vdots	\vdots	\vdots	
r_1	z_{nz}	$B_{r_{1,nz}}$	$B_{z_{1,nz}}$
r_2	z_1	$B_{r_{2,1}}$	$B_{z_{2,1}}$
\vdots	\vdots	\vdots	
r_{nr}	z_{nz}	$B_{r_{nr,nz}}$	$B_{z_{nr,nz}}$

- **typ=-3:** xyz グリッド, データマップ型

$B_{x_{1,1,1}}$	$B_{x_{1,2,1}}$	$B_{x_{1,3,1}}$	\cdots	$B_{x_{1,ny,1}}$
$B_{x_{2,1,1}}$	$B_{x_{2,2,1}}$	$B_{x_{2,3,1}}$	\cdots	$B_{x_{2,ny,1}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$B_{x_{nx,1,1}}$	$B_{x_{nx,2,1}}$	$B_{x_{nx,3,1}}$	\cdots	$B_{x_{nx,ny,1}}$
$B_{x_{1,1,2}}$	$B_{x_{1,2,2}}$	$B_{x_{1,3,2}}$	\cdots	$B_{x_{1,ny,2}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$B_{x_{nx,1,nz}}$	$B_{x_{nx,2,nz}}$	$B_{x_{nx,3,nz}}$	\cdots	$B_{x_{nx,ny,nz}}$

(同様のマップを B_y, B_z に対しても繰り返す)

- **typ=-4:** rz グリッド, データマップ型

$B_{r_{1,1}}$	$B_{r_{1,2}}$	$B_{r_{1,3}}$	\cdots	$B_{r_{1,nz}}$
$B_{r_{2,1}}$	$B_{r_{2,2}}$	$B_{r_{2,3}}$	\cdots	$B_{r_{2,nz}}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$B_{r_{nr,1}}$	$B_{r_{nr,2}}$	$B_{r_{nr,3}}$	\cdots	$B_{r_{nr,nz}}$

(同様のマップを B_z に対しても繰り返す)

データの順番は変更することはできません。ただし、**typ=-3 & -4** で **ibxmap** などのパラメータを 0 にした場合は、その方向に対する磁場データを省略することができます（その場合、その方向に対する磁場強度は全て 0 となります）。また、**typ=-1 & -2** で指定する座標は、必ず昇順となるようにしてください。計算時間は、同じ磁場であればデータマップ型の方が短くなりますが、データリスト型でも各グリッド間隔が全て等しければ、データマップ型とほぼ同等になります。

5.11 [Electro Magnetic Field] セクション

このセクションでは、指定した空間に電場と磁場を設定するためのパラメータを定義します。**[parameters]** セクションで **ielctf=1** とすることでこのセクションで定義したパラメータが有効となり、荷電粒子の電磁場中の運動を記述できるようになります。電子・陽電子についてこの機能を使用する場合は、EGS5 を利用してください。電場と磁場は任意に併存させることができます。

5.11.1 一様な電場と磁場の利用

次の書式により、一様な電場や磁場を設定できます。ただし、**[Magnetic Field]** セクションで定義できる 4 極磁場は設定できません。

[Electro Magnetic Field]				
reg	elf	mgf	trcle	trclm
1	100	1	1	2
2	100	1	1	2

パラメータは、電磁場を指定する region もしくは cell の番号 (**reg**)、電場の強さ (**elf**)、磁場の強さ (**mgf**)、電場の方向 (**trcle**)、磁場の方向 (**trclm**) です。場の強さ **elf** と **mgf** の単位は、それぞれ kV/cm と kGauss です。電場と磁場の方向 **trcle** と **trclm** は、座標変換番号 **trcl** を用いて定義します。これらを 0 とした場合は、電場の向きが x 軸の +、磁場の向きが y 軸の + の方向となります。**trcle** と **trclm** は省略できません。場の強さを 0 とした場合や **trcl** が必要ない場合も 0 と入力してください。

[source] セクションのパラメータ **izst** を用いて入射粒子の電荷価数を指定した場合、電磁場中の運動はその価数に応じたものになります。通常の PHITS では、荷電粒子、特に原子核は、電場や磁場の中で原子番号 *Z* の電荷をもつ粒子として振る舞います。しかしながら、加速原子核では、電荷価数が *Z*、即ち全ての電子が剥ぎ取られた状態以外に、幾つかの電荷状態が存在する場合があります。**izst** を用いることで、その状態にある粒子の運動を模擬できるようになります。ここで指定された価数は、輸送の途中では変化しません。ただし、核反応を起こして生成される原子核には影響を及ぼしません。即ち、原子核反応で生成された原子核の価数は、その原子番号 *Z* に戻ります。

数 cm 以下の距離で軌道が大きく曲がる強い電磁場やエネルギーの低い荷電粒子の軌道を計算したい場合は、電磁場中での最大飛行メッシュ (**deltg**) を小さく設定してください（ただし、電子・陽電子は除く）。

5.11.2 電場マップの利用方法

Version 3.20 より、xyz グリッドもしくは r-z グリッドで表現された任意の電場構造を読み込むことが可能となりました。基本的には書式は 5.10.3 節「磁場マップの読込方法」と同じですが、ファイル名は **filee** で指定します。また、磁場マップと共存させる場合は、そのファイル名を **filem** で指定します。その書式の例題を以下に示します。

[Electro Magnetic Field]									
reg	type	typm	gap	elf	mgf	trcle	trclm	filee	filem
102	-3	-1	10.0	100.0	10.0	0	0	xyzmap.dat	xyzlist.dat

type 及び **typm** は、電場及び磁場マップの形式を表し、表 97 で示す **typ** と同じ値が指定できます。ただし、中性子に対しては動作しませんので、-101 から -104 を指定することはできません。1 つのインプットファイルで同タイプの電場マップもしくは磁場マップを 2 つ以上指定することができません。**elf** 及び **mgf** は、電場及び磁場マップの強度倍率で、それぞれ 1 とした場合の単位は **kV/cm** と **kG** となります。**gap** はルンゲ・クッタ法を用いて飛跡を解析する際に飛程の分割数を決定するパラメータであり、そのデフォルト値は 10 で、大きくするほど刻み幅が小さくなります。なお、電子・陽電子は EGS5 モードを用いた場合のみ電磁場が有効となり、その飛程は **gap** とは無関係になります。**trcle** と **trclm** は、電場・磁場それぞれの座標変換番号を示しており、通常電磁場と同じく、電子・陽電子の場合は有効になりませんのでご注意ください。

電場マップの定義方法は、単位が **kG** ではなく **kV/cm** である点を除いて磁場マップの定義方法と同じです。5.10.4 節「磁場マップの形式」をご参照ください。

5.12 [Delta Ray] セクション

このセクションでは、物質中を荷電粒子が通過した場合にその飛跡周辺に発生するノックアウト電子 (δ 線) を 2 次粒子として発生させる機能をコントロールします。荷電粒子が通過する物質に与えるエネルギーは、通常 $LET(dE/dx)$ として評価され、その軌道上にのみ付与されます。しかし、高エネルギーの δ 線が発生した場合などは、その輸送によって 1 次粒子の軌道から離れた位置にエネルギーが付与されることが知られており、本セクションを利用することでその影響を調べることが可能となります。 δ 線生成断面積は、Butts と Katz の式⁹⁰ より計算し、そのエネルギーや角度を決定する際は相対論を考慮しています

本機能と [t-sed] タリーは併用できませんのでご注意ください。

真空 (void) 以外の領域毎に、 δ 線を発生させるしきい値エネルギー E_{th} (単位は MeV) を決めることができます。この値より高いエネルギーの δ 線を実際に 2 次粒子として発生させます。 E_{th} 以下の δ 線の寄与は通常の LET で評価しており、設定できる E_{th} の最小値は 0.001 MeV (=1 keV) です。ただし、 E_{th} を 10 keV 以下に設定したり、 δ 線を発生させる領域の厚さをおおよそ $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下に設定すると、荷電粒子の挙動が多少変化しますのでご注意ください。具体的には、荷電粒子の実効的な阻止能が、 δ 線を多く放出しすぎることにより高くなってしまいます。また、1 MeV 以下の荷電粒子による δ 線生成を計算したい場合は `emin(1)`, `emin(i=15-19)` を 1 keV に設定する必要があります。[delta ray] セクションを利用しない場合は、 E_{th} にデフォルトの値として $1.e+10$ が入っており、事実上 δ 線は発生しません。領域番号と E_{th} はそれぞれ `reg`, `del` で指定します。その書式は以下の例の通りです。

```
[ delta ray ]
      reg      del
        1      0.1
       11      1.0
       ....
       ....
```

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。しかし、(6 < 10 [1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造は使えません。領域番号 (reg) としきい値エネルギー (del) の順番を変えたいときは、`del reg` とします。読み飛ばしコラム用の `non` も使えます。GG の場合も、`cell` でなく `reg` を使ってください。

⁹⁰ J. J. Butts and R. Katz, "Theory of RBE for Heavy Ion Bombardment of Dry Enzymes and Viruses", Radiation Research 30, 855-871 (1967).

5.13 [Track Structure] セクション

1 keV 以下のような低エネルギー電子・陽電子について、飛跡構造計算⁹¹を実施すると、電子・陽電子が電離・励起もしくは分子振動・回転のような衝突イベントによる減速過程を模擬することができます。この計算機能を利用すると、10 eV 程度の低エネルギー電子数が多数生成されるため、従来アルゴリズムと比較して計算時間が膨大に掛かります。そのため、通常の大さの体系（cm オーダー）における放射線挙動解析には適しません。

このセクションでは、飛跡構造解析を行うセルを指定します。**mID** は利用する飛跡構造解析モデルを指定するための ID 番号で、-1,0,1 は表 99 のような意味を持ちます。

表 99: mID による飛跡構造解析モデルの指定

mID		電子・陽電子	陽子 0-300 MeV 炭素 0-10 MeV/n	それ以外の陽子や イオン
-1	任意物質向け 飛跡構造解析モード	chem=H2O: ETS chem=Si: EST for Si 上記以外: ETSART	ITSART	ITSART
0	(飛跡構造解析をしない)	– (EGS etc.)	– (ATIMA etc.)	– (ATIMA etc.)
1	液体水向け 飛跡構造解析モード	ETS	KURBUC	ITSART

- -: 飛跡構造解析モードなし（カッコ内は飛跡構造解析の代わりに使われるモデルで、**negs** や **ndedx** により切り替わります）
- ETS: 水用電子・陽電子飛跡構造解析モード
- KURBUC⁹²: 水中の炭素・陽子用飛跡構造解析モード
- ITSART: 任意物質・イオン用飛跡構造解析モード
- ETSART: 任意物質用電子・陽電子飛跡構造解析モード
- ETS for Si: 半導体シリコン用電子・陽電子飛跡構造解析モード (PHITS-ETS for Si)⁹³

水以外の標的物質に対し ETS、KURBUC を使用すると、液体水の断面積データから電子密度スケールリングにより、標的物質の平均自由行程が算出されます。**mID=1** で用いられる特定物質向け飛跡構造解析モードは、標的が液体水に限定される代わりに、電離・励起などの個々の反応を最も精密に計算できます。一方、**mID=-1** で用いられる任意物質向け飛跡構造解析モードは、

(1) 任意の標的に適用できる

⁹¹ T. Kai et al., “Thermal equilibrium and prehydration processes of electrons injected into liquid water calculated by dynamic Monte Carlo method”, *Radiat. Phys. Chem.*, 115, 1-5 (2015).

⁹² Uehara S, Nikjoo H, Goodhead DT, 1993, Cross sections for water vapour for Monte Carlo electron Track structure from 10 eV to 10 MeV region. *Phys Med Biol* 38: 1841-1858;

Hooshang Nikjoo, Shuzo Uehara, Dimitris Emfietzoglou, *Interaction of Radiation with Matter*, CRC Press, Published June 11, 2012;

Liamsuwan T, Uehara S, Emfietzoglou D and Nikjoo H 2011, Physical and biophysical properties of proton tracks of energies 1 keV to 300 MeV in water, *Int. J. Radiat. Biol.* 87 141-60;

Liamsuwan T and Nikjoo H 2013 A Monte Carlo track structure simulation code for the full-slowng-down carbon projectiles of energies 1 keV u⁻¹ - 10 MeV u⁻¹ in water, *Phys. Med. Biol.* 58 673-701

⁹³ Yuho Hirata, Takeshi Kai, Tatsuhiko Ogawa, Yusuke Matsuya and Tatsuhiko Sato, 2022, Implementation of the electron track-structure mode for silicon into PHITS for investigating the radiation effects in semiconductor devices, *Japanese Journal of Applied Physics*, 61, 106004.

(2) ラザフォード散乱による反跳原子を考慮できる

というメリットがある一方、標的原子の励起を明示的に扱わないといった近似を用います。任意物質向け飛跡構造解析モードでも以下の物質であれば **[material]** セクションにおいて **chem** パラメータで指定することで、分子構造をある程度反映した計算ができます。

H₂O, CO₂, NH₂, NH₃, SF₆, TeF₆, CH₄, CH₃, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₆H₆, (CH₃)₂NH

```
[track structure]
```

```
reg  mID
```

```
1    1
```

```
2    0
```

同じ値の領域をまとめて書く、(2 - 5 8 9) という書式も使えます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。しかし、(6 < 10[100] < u=3) などの **lattice, universe** 構造は使えません。領域番号 (**reg**) と利用する断面積データの ID 番号 (**mID**) の順番を変えたいときは、**mID reg** とします。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。

以下は重要なパラメータの設定です。**[parameters]** セクションに **etsmax, etsmin** を設定します。これらは飛跡構造解析を実施する電子・陽電子エネルギーの上限・下限値で単位は (MeV) です。上限値を上げる、もしくは下限値を下げると計算時間がより長くなりますので、ご注意ください。飛跡構造解析モードを利用する場合は、必ず EGS5 モード (**negs=1,2**) を用いて **emin(12-13)** を 1 keV に設定する必要があります。

```
[ Parameters ]
```

```
emin(12) = 1.E-03
```

```
emin(13) = 1.E-03
```

```
negs      = 1
```

```
etsmax    = 1.E-2
```

```
etsmin    = 1.E-6
```

etsmax は飛跡構造解析を実施する陽子・イオンのエネルギー上限であり、単位は MeV です。エネルギー下限値は、陽子・炭素イオンのそれぞれの場合について **emin(1)** と **emin(19)** (D=1e-3 MeV/n) で調整可能です。陽子・炭素イオンのそれぞれについて **KURBUC** の適用上限は 300 MeV と 10 MeV/n です。それ以上大きい **etsmax** が設定された場合は、上限以下で **KURBUC** を使用し、上限から **etsmax** の間や陽子・炭素以外のイオンには **ITSART** を使用します。

```
[ Track structure ]
```

```
reg      mID      ebg      wvl
```

```
1        -1
```

```
2        -1      2.8      6.5
```


Version 3.34 より任意物質用電子・陽電子飛跡構造解析モード ETSART と半導体 Si 用電子飛跡構造解析モード Si-ETS が追加されました。mID=-1 を設定することにより ETSART モードを利用できます。ETSART ではバンドギャップエネルギーを入力することで半導体物質における励起反応を考慮したシミュレーションが可能です。バンドギャップエネルギーは [track structure] セクションに ebg[eV] で定義します。ebg が未定義の場合、デフォルトで ebg = 0 として扱われ、励起反応は無視されます。また、物質中で電子正孔対が一つ生成するのに必要なエネルギー (w 値) を wvl [eV] に設定すると、電子がカットオフエネルギー (etsmin) に達した際に、etsmin を w 値で除した値を [t-interact] における電子の発生数としてタリーします。この機能により比較的高いエネルギーの放射線による電子生成数を評価する際に、etsmin を高く設定することで効率的に電子の発生数が計算できます。また、[material] セクションにおいて chem を指定し mID=-1 を設定すると、その物質を対象とした電子線飛跡構造解析が実行できます。Version 3.34 時点では、ETS が chem=H2O、Si-ETS が chem=Si で実行可能です。

5.14 [Super Mirror] セクション

このセクションでは、低エネルギーの中性子のスーパーミラーによる反射の機能を定義します。ここでは、以下のような半経験的なスーパーミラーの反射率を仮定します。

$$R = \begin{cases} R_0 & \text{if } Q \leq Q_c \\ \frac{1}{2}R_0(1 - \tanh[(Q - mQ_c)/W])(1 - \alpha(Q - Q_c)) & \text{if } Q > Q_c \end{cases}$$

ここで Q は、散乱ベクター (\AA^{-1}) で、次のように定義されます。

$$Q = |\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_f| = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda}$$

m は、ミラーの物質とレイヤーの数などに依存するパラメーターです。 Q_c は、一層のレイヤーによる臨界散乱ベクター、これ以上の Q で、反射率は α の傾斜で直線的にカットオフ値 $Q = mQ_c$ まで減少する。その時のカットオフの幅は W で表される。

これらのパラメーターは、このセクションで次のように定義される。

[Super Mirror]						
r-in	r-out	mm	r0	qc	am	wm
{2001-2020}	3001	3	0.99	0.0217	3.0	0.003
2500	3500	3	0.99	0.0217	3.0	0.003
2600	3600	3	0.99	0.0217	3.0	0.003
....
....
....

反射の面は、**r-in** が入射領域、**r-out** が反射体領域の間の面で定義されます。

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。また、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造も 指定できます。

上の標識のその他のパラメーターは、 m を mm で、 R_0 を r0、 Q_c を qc (\AA^{-1})、 α を am (\AA)、 W を wm (\AA^{-1}) で定義します。

このスーパーミラーの反射は、10eV 以下の中性子、また、 $\sin\theta > 0.001$ の時に制限されます。後者は、表面の粗さに因るものです。

5.15 [Elastic Option] セクション

このセクションでは、核データを用いる低エネルギー中性子の弾性散乱について、ユーザー定義の角分布を与えるパラメータを指定します。ユーザー定義のサブルーティンのサンプルとして、`usrelst1.f` と `usrelst2.f` が用意してあります。これらは、パラメータセクションで、`usrelst=1, 2` で切り替えることができます。

書式は、以下のように、このオプションを適用する領域番号と、ユーザー定義サブルーティンで用いる 4 つの定数を定義することができます。

[Elastic Option]				
reg	c1	c2	c3	c4
1	5	1	3.3	0.4
2	1	1	1.1	0.7
3	3	1	0.3	0.8
...
....

物質番号 (**reg**) と (**c1 c2 c3 c4**) の順番を変えたいときは、**reg c3 c2 c1 c4** の様に定義行で変えます。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。同じ名前をまとめて書く、**{ 4 - 7 }** という書式も使えます。ただし、**({ 4 - 7 } 9 10)** という表式は使えません。

現在、サンプルサブルーティンとして入っている、`usrelst1.f` と `usrelst2.f` は、それぞれ、前者がデータベースを用いた **Bragg** 散乱の角分布、後者が、任意の関数形を用いた角分布が記述できるようになっています。

5.16 [Data Max] セクション

このセクションでは、マテリアルの核種ごとにライブラリー利用の上限エネルギー **dmax** を設定することができます。このセクションは、6 つまで定義することができます。

```
[Data Max]
part = neutron proton
mat   nucleus  dmax
all   Fe       20
5     all      50
3     56Fe     150
```

最初の行に **part=** の書式で輸送粒子を指定します。省略はできません。Version 3.27 より、**[parameters]** セクションで定義した **dmax(i)** と **lib(i)** (i は粒子番号) から自動で各核種のライブラリー上限エネルギーを設定するようにしましたので、高エネルギー核データを含めて利用可能な全てのライブラリーを使いたい場合は、このセクションを定義する必要はありません。

マテリアルごとに指定するときは **mat** コラムを用います。ここにはマテリアル番号、もしくは、**all** を使うことができます。**nucleus** コラムで核種を指定します。**56Fe**、もしくは、**26056** の書式で指定します。**Fe**、**26000** などの質量を指定しない場合は、その核種の全ての同位体を指定することになります。また、**all** も使うことができます。**dmax** のコラムでその核種のライブラリー利用の上限エネルギー (MeV) を指定します。(mat) (nucleus) (dmax) の順番は可変です。また、読み飛ばしのコラム **non** も使えます。

同じ核種が重ねて定義されている場合は、後出が優先されます。

[parameters] セクションで定義される、**dmax(1)** と **dmax(2)** は、このセクションで定義される **dmax** の最大値とすることが望まれます。

dmax の値がライブラリーの上限エネルギーよりも高い値に設定された場合は、上限エネルギーの断面積の値を **dmax** まで使います。例えば、通常の JENDL-4.0 を使う場合、**dmax=200** と設定すると、20 MeV から 200 MeV までは 20 MeV の断面積が使用されます。また、ライブラリーによって上限が違う場合は本セクションで個別に定義してください。

[parameters] セクションで、**kmout=1** を指定すると、**file(6)** (D=phits.out) にマテリアル毎に各核種の **dmax** が出力されます。

5.17 [Frag Data] セクション

このセクションでは、ユーザー指定断面積読み込み機能について定義できます。この機能を使用することにより、特定の粒子間の核反応イベントをユーザーが指定した断面積データを用いて模擬できます。ただし、本機能で指定した粒子間、エネルギー領域にある反応に対しても、核データライブラリを使用する設定になっている場合は、データライブラリにある情報が優先的に使用されます。また、指定できる入射粒子は、陽子や中性子、原子核のみです。光子や電子は指定できないのでご注意ください。他に、核子の弾性散乱の寄与は **PHITS** のモデルにより別途考慮されます。

本機能を用いて生成される粒子は、その断面積に応じてウエイト値が変わります。場合によっては非常に小さい値となりますので、ウエイトカットオフを避けるために、**[parameters]** セクションにおいて **wc2(i)** の値を粒子 **i** 毎に変えてください。粒子の反応計算打切エネルギー **cmin(i)** は、考慮したい最小の入射エネルギーに応じて設定してください。

書式は、以下のようになります。

[Frag Data]			
opt	proj	targ	file
0	12C	160	DDX_12C-160.dat
1	proton	63Cu	DDX_p-63Cu.dat

opt が 0 の場合は指定した断面積を使用しません。これが 1 の場合は、**proj** と **targ** で指定した粒子間の核反応を **file** で指定したファイルにある断面積データを基に模擬します。**opt** が 2,3 の場合は整備中です。**opt** が 4 の場合は、入射エネルギーや放出角度、放出エネルギーについて、与えられたデータを基に単純な外挿を行います。ただし、この外挿オプションは、下記にある **neo** が正で、**nag** が 0 でない場合しか使用できません。また、放出エネルギーや角度の微分断面積データが群形式ではなく点形式で与えられた時は、**opt** を 5 としてください。この場合、線形内挿を行って放出粒子のエネルギーと角度の依存性を再現します。

file で指定する断面積データファイルの書式は、以下のようになります。

```

projectile
target
nei
ein(1) ein(2) ein(3) ..... ein(nei+1)
totxs(1) totxs(2) totxs(3) ..... totxs(nei+1)
neo
eout(1) eout(2) eout(3) ..... eout(neo+1)
nag
angle(1) angle(2) angle(3) ..... angle(nag+1)
nfrg
frag(1) frag(2) frag(3) ..... frag(nfrg)

proxs(1,1) proxs(1,2) proxs(1,3) ..... proxs(1,nfrg)
ddx(1,1,1,1) ddx(1,1,1,2) ddx(1,1,1,3) ..... ddx(1,1,1,nag)
ddx(1,1,2,1) ddx(1,1,2,2) ddx(1,1,2,3) ..... ddx(1,1,2,nag)
.....
ddx(1,1,neo,1) ddx(1,1,neo,2) ddx(1,1,neo,3) ..... ddx(1,1,neo,nag)

```

(続き)

```

ddx(1,2,1,1) ddx(1,2,1,2) ddx(1,2,1,3) ..... ddx(1,2,1,nag)
ddx(1,2,2,1) ddx(1,2,2,2) ddx(1,2,2,3) ..... ddx(1,2,2,nag)
.....
ddx(1,2,neo,1) ddx(1,2,neo,2) ddx(1,2,neo,3) ..... ddx(1,2,neo,nag)
.....
.....

ddx(1,nfrg,1,1) ddx(1,nfrg,1,2) ddx(1,nfrg,1,3) ..... ddx(1,nfrg,1,nag)
ddx(1,nfrg,2,1) ddx(1,nfrg,2,2) ddx(1,nfrg,2,3) ..... ddx(1,nfrg,2,nag)
.....
ddx(1,nfrg,neo,1) ddx(1,nfrg,neo,2) ddx(1,nfrg,neo,3) ..... ddx(1,nfrg,neo,nag)

proxs(2,1) proxs(2,2) proxs(2,3) ..... proxs(2,nfrg)
ddx(2,1,1,1) ddx(2,1,1,2) ddx(2,1,1,3) ..... ddx(2,1,1,nag)
ddx(2,1,2,1) ddx(2,1,2,2) ddx(2,1,2,3) ..... ddx(2,1,2,nag)
.....
ddx(2,1,neo,1) ddx(2,1,neo,2) ddx(2,1,neo,3) ..... ddx(2,1,neo,nag)
.....
.....
.....

proxs(nei+1,1) proxs(nei+1,2) proxs(nei+1,3) ..... proxs(nei+1,nfrg)
ddx(nei+1,1,1,1) ddx(nei+1,1,1,2) ddx(nei+1,1,1,3) ..... ddx(nei+1,1,1,nag)
ddx(nei+1,1,2,1) ddx(nei+1,1,2,2) ddx(nei+1,1,2,3) ..... ddx(nei+1,1,2,nag)
.....
ddx(nei+1,1,neo,1) ddx(nei+1,1,neo,2) ddx(nei+1,1,neo,3) ..... ddx(nei+1,1,neo,nag)
.....
.....

ddx(nei+1,nfrg,1,1) ddx(nei+1,nfrg,1,2) ddx(nei+1,nfrg,1,3) ..... ddx(nei+1,nfrg,1,nag)
ddx(nei+1,nfrg,2,1) ddx(nei+1,nfrg,2,2) ddx(nei+1,nfrg,2,3) ..... ddx(nei+1,nfrg,2,nag)
.....
ddx(nei+1,nfrg,neo,1) ddx(nei+1,nfrg,neo,2) ddx(nei+1,nfrg,neo,3) ..... ddx(nei+1,nfrg,neo,nag)

```

最初に、**projectile** と **target** において入射粒子と標的粒子のそれぞれを指定します。**nei** は入射エネルギーの分点数で、その次の行に **nei+1** 点の入射エネルギー (**ein**: 単位は **MeV/n**) を指定し、更にその次の行に同数の全反応断面積 (**totxs**: 単位は **mb**) を指定します。ここで **totxs** が 0 の場合は、**icxsni** や **icrhi** で指定する全反応断面積モデルにより得られた値が使われます。**neo** は放出粒子のエネルギー分点数で、その次の行に **neo+1** 点の放出エネルギー (**eout**: 単位は **MeV/n**) を指定します。ただし、**opt** が 5 の場合は **neo** 点

の **eout** を指定してください。nag は放出角度の分点数で、その次の行に nag+1 点の角度 (angle) を指定します。ただし、opt が 5 の場合は nag 点の angle を指定してください。nag>0 の場合はラジアン単位 (rad)、nag<0 の場合は度数単位 (degree) で angle を与えます。nag=0 の場合は等方分布を仮定します。nfrg は放出粒子の数で、その次の行に nfrg 個の放出粒子を指定します。proxs は各放出粒子のある入射エネルギーに対する生成断面積 (mb) で、その次の行から 2 重微分断面積 (ddx: 単位は mb/MeV/sr) を並べます。1 つの proxs に対して neo×nag 点の 2 重微分断面積のデータが必要で、それを 1 単位として nei+1 個のデータを並べます。放出粒子を複数指定する場合 (nfrg>1) は、proxs から始まるデータ群が nfrg で指定した数だけ必要となります。

また、neo を書くべき行で model と書いた場合は、PHITS に組み込まれている核反応モデルが使用されます。その場合は、微分断面積のデータを与える必要はありません。

例 50: 断面積データファイルの例

```

1:  proton
2:  63Cu
3:  1
4:  10.0    100.0
5:  1000.0  500.0
6:  3
7:  1.0  10.0  50.0  100.0
8:  -6
9:  0.0  30.0  60.0  90.0  120.0  150.0  180.0
10: 1
11: neutron
12: 300.0
13: 10.0  10.0  10.0  10.0  10.0  10.0
14: 15.0  13.0  12.0  11.0  10.0  10.0
15: 10.0  11.0  10.0  11.0  10.0  10.0
16: 0.0
17: 5.0   5.0   5.0   5.0   5.0   5.0
18: 10.0  8.0   7.0   6.0   5.0   5.0
19: 5.0   6.0   5.0   6.0   5.0   5.0

```

例 50 に断面積データファイルの一例を示します。1,2 行目にそれぞれ入射粒子として proton、標的粒子として ⁶³Cu を指定しています。3 行目がエネルギー分点数で、この例では nei=1 としています。4,5 行目において入射エネルギーと全反応断面積を nei+1 点ずつ与えています。6 行目は放出粒子のエネルギー分点数です。この例では neo=3 としており、7 行目で放出エネルギーとして、1.0, 10.0, 50.0, 100.0MeV の値を指定しています。8 行目は角度の分点数です。これをマイナスにし、9 行目で与える角度の情報を度数単位で与えています。10 行目で放出粒子として取り扱いたい数を決めており、11 行目でその粒子 (=neutron) を指定しています。12 行目に入射エネルギーが 10.0MeV の場合の neutron 生成反応断面積を与えており、13,14,15 行目でこの入射エネルギーにおける 2 重微分断面積を与えています。各行は 7 行目で決めたエネルギービンに対応しており、各列は 9 行目で決めた角度ビンに対応しています。基本的に、12 行目の生成反応断面積には、13,14,15 行目の微分断面積を積分した量を与えてください。一致しない場合は、生成反応断面積の値を使って規格化されます。16,17,18,19 行目は、入射エネルギーが 100.0MeV の場合の生成反応断面積と 2 重微分断面積です。16 行目の生成反応断面積は 0 にしていますが、この場合、生成反応断面積として、17,18,19 行目の微分断面積を内挿して積分した値を使用します。

neo をマイナスで指定することで、放出粒子のエネルギーを離散的に与えることができます。この場合、eout の個数は neo としてください。

neo を 0 にすると、放出粒子のエネルギースペクトルをガウス分布で与えることができます。この場合は、ddx の箇所にガウス分布の平均値と分散の値を MeV で与えてください。

ddx の箇所で、0 の値が並ぶ場合は次のような省略形を利用できます。

0 -9

この例では、0 が合計 10 個並ぶことを意味します。

5.18 [Importance] セクション

このセクションでは、cell の importance を定義します。定義されない領域もしくは粒子は、1.0 にセットされます。

このセクションは、6 つまで定義することができます。書式は、

[I m p o r t a n c e]	
part =	proton neutron
reg	imp
1	1.000000
11	5.000000
({ 2 - 5 } 8 9)	2.000000
(11 12 15)	3.000000
(6<10[1 0 0]<u=3)	6.000000
....
....

最初の行に **part =** の書式で粒子を指定します。省略した時のデフォルトは、**part = all** で全粒子です。**part =** の書式の詳細はタリーの粒子指定と同じ書式です。しかし、指定できるのは **ityp** としての区別だけです。それぞれの原子核などは、個別には指定できません。

領域番号 (**reg**) と (**imp**) の順番を変えたいときは、**imp reg** とします。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。また、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの **lattice**, **universe** 構造も指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。

階層構造のある場合の **importance** の指定の仕方は、各階層の **importance** の積を最下層の **importance** とします。ただし、最下層の特定のセルの **importance** の指定が、上の書式で可能です。この書式を用いれば **lattice** のひとつひとつに異なる **importance** を定義することも可能です。上の定義で、同じセルが二重に定義された時は、初めに定義された値が採用されます。

透過性のある粒子に、具体的にはニュートリノですが、**importance** を強く設定されていると、計算時間が膨大になります。この危険を避けるために、**part=all** で指定してもニュートリノは省かれていますので、注意して下さい。

階層のあるセルの **importance** の指定は、幾つかの書き方がとり得ます。例えば、最下層のセル 5 6 7 が共に上位のセル 11 12 13 に含まれる時、

```
1:  [ Importance ]
2:    reg          imp
3:  ( 5 6 7 < 11 )  2.0
4:  ( 5 6 7 < 12 )  4.0
5:  ( 5 6 7 < 13 )  8.0
6:  ( 11 12 13 )    1.0
```

で定義される **importance** と、

```
1:  [ Importance ]
2:    reg          imp
3:  ( 5 6 7 )      1.0
4:    11           2.0
5:    12           4.0
6:    13           8.0
```

は、同じ結果を与えます。ただし、後者の場合、**importance** のサマリーでセル 5 6 7 の **importance** の値は、1.0 と表示されます。

5.19 [Weight Window] セクション

このセクションでは、ウエイトウインドウを定義します。このセクションは、6つまで定義することができます。書式は、以下のような形式となります。

[Weight Window]				
mesh = reg				
part = proton neutron				
eng = 5				
(tim = 5)				
	6.00e-7	3.98e-1	1.00e+0	7.00e+0 5.00e+4
reg	ww1	ww2	ww3	
1	0.010000	0.100000	0.001000	
11	0.005000	0.050000	0.000300	
({ 2 - 5 } 8 9)	0.001000	0.010000	0.000100	
(11 12 15)	0.000500	0.005000	0.000030	
(6<10[1 0 0]<u=3)	0.000010	0.001000	0.000010	
....	
	ww4	ww5		
	0.010000	0.100000		
	0.005000	0.050000		
	0.001000	0.010000		
	0.000500	0.005000		
	0.000010	0.001000		
		

最初の行に、**mesh=reg**、**xyz** もしくは **tet** を指定してメッシュ型を指定してください。もし **mesh** の指定を省略した場合は、デフォルトである **reg** が形状型として選択されます。**mesh=xyz** を指定した場合は、その後 **x-type**、**y-type**、**z-type** でメッシュの大きさや数を定義してください。詳しい定義方法は、“6. タリー共通パラメータの書式”を参照してください。その際、**x,y,z** メッシュの面と **cell** の面が一致しないようご注意ください。特に、パラメータを使ってジオメトリと **xyz** メッシュ範囲を連動させている場合はご注意ください。なお、version 3.34 より、**[weight window]** 及び **[t-wwg]** の **xyz** メッシュ最大値・最小値が整数で定義された場合は、その整数から最小値は $-1 \cdot \text{deltxyz}$ 、最大値は $+2 \cdot \text{deltxyz}$ ずらすようにしています。(FAQ 2.9 参照)。**mesh=tet** は連続四面体形状を含む体系でしか使用できません。**mesh=tet** を指定した次の行で **reg=** の書式で連続四面体形状を収めた直方体領域を指定してください。連続四面体形状を構成する各四面体要素に **weight window** を設定できます。なお、**mesh=r-z** は定義できませんのでご注意ください。

そして、**part =** の書式で粒子を指定します。省略した時のデフォルトは、**part = all** で全粒子です。**part =** の書式の詳細はタリーの粒子指定と同じ書式です。しかし、指定できるのは **ityp** としての区別だけです。それぞれの原子核などは、個別には指定できません。

次に、エネルギーもしくは、時間のメッシュを定義します。**eng =** もしくは **tim =** でメッシュの個数を、次行に、メッシュの値 (e_1, e_2, e_3, \dots) を定義します。このメッシュ毎のウエイトウインドウの下限値を以下に定義します。各下限値は、**ww1, ww2, ww3,** でエネルギーもしくは時間メッシュを指定します。ここで **wwi** は、 $e_{i-1} < E < e_i$ のメッシュのウインドウ下限値です。 $e_0 = 0, t_0 = -\infty$ を仮定しています。**eng =** も

しくは **tim** = の定義がない場合は、エネルギーもしくは、時間のメッシュを仮定せず、ひとつの領域とします。この場合は、**ww1** だけを定義します。

領域 (**reg**、**xyz** もしくは **tet**) は、最初のコラムに固定です。上の例題の様に、ひとつの表に、**ww1**, **ww2**, ... が書き切れない時は、次の表に書き足すことができます。この時、最初の領域 (**reg**、**xyz** や **tet**) のコラムは、省略できます。また、領域の並びは、上の表と同じと仮定しています。読み飛ばしコラム用の **non** は使えます。

reg のコラム指定する際は、同じ値の領域をまとめて書く ({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。そして、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの **lattice**, **universe** 構造も指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。**xyz** の場合は (**ix iy iz**) の順番で指定してください。また、**tet** の場合は選択した連続四面体形状の全ての四面体要素について、要素番号に続く書式で各下限値を指定する必要があります。

透過性のある粒子に、具体的にはニュートリノですが、**importance** を強く設定されていると、計算時間が膨大になります。この危険を避けるために、**part=all** で指定してもニュートリノは省かれていますので、注意して下さい。

5.20 [WW Bias] セクション

このセクションでは、[weight window] で指定したウェイトの下限值に対して、特定の領域にバイアス（傾斜）をかけることができます。特に、[t-wwg] を用いて自動的に [weight window] を作成した際、更に特定の領域にウェイト値のバイアスをかけたい場合に利用できます。図 56 に、[weight window] と [ww bias] を組み合わせた輸送計算を実行する際の流れを示しました。最初に [t-wwg] を用いて [weight window] を作成します。これで十分な場合は不要ですが、注目しているタリー領域が限定的である場合は、[ww bias] を作成して特定の領域にバイアスをかけることにより、効率的に統計量を増やすことが可能となります。[ww bias] を作成する方法は2通りあり、Weight Window Bias Generator (WWBG) である [t-wwbg] を利用して自動的に作成する方法と、本節でご紹介する手動で作成する方法です。[t-wwbg] の利用方法については、7.17 節 [T-WWBG] セクションをご覧ください。作成した [ww bias] と [weight window] を組み合わせた輸送計算を実行する場合は、[parameters] において icntl=0 および iwwbias=1 としてください。

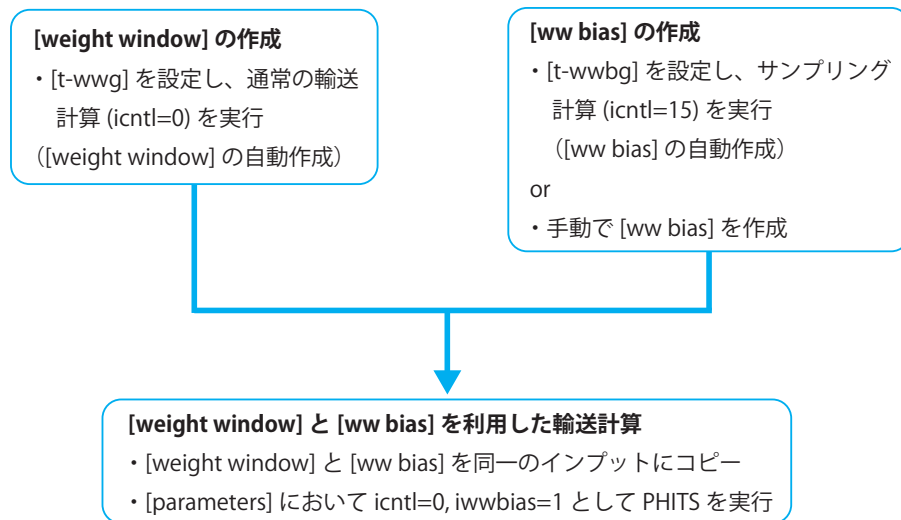


図 56: [weight window] と [ww bias] を組み合わせた輸送計算の概要。

[weight window] が複数定義されている場合のバイアスの掛け方は、インプットに出てきた順番通りに、[ww bias] を組み合わせていきます。つまり、[weight window] と同じ数の [ww bias] が必要です。

[ww bias] の書式は、以下のようになります。バイアスをかける予定の [weight window] と同じ粒子、エネルギーメッシュ、領域を指定してください。領域の指定で、もし mesh の指定を省略した場合は、デフォルトである reg が形状型として選択されます。mesh=xyz を指定した場合は、その後に [weight window] と同じ x-type, y-type, z-type の定義が必要です。mesh=tet を指定した場合は、その後に [weight window] と同じ領域の指定が reg= の書式が必要です。

```
[ WW Bias ]
part = neutron
eng = 2
      1e-3  1.0
reg   wwbl   wwbl
  1    0.25   0.25
  2    0.50   0.50
  3    1.00   1.00
  4    2.00   2.00
  ....
```

最初に **part=** の書式で粒子を指定します。**part=all** がデフォルトなので、省略した場合は全粒子が対象となります。**part=** の書式の詳細はタリーの粒子指定と同じです。ただし、指定できるのは **ityp** としての区別だけです。核種のそれぞれを個別に指定することはできません。次に、エネルギーメッシュを定義します。**eng=** でメッシュの個数を指定し、その次の行に、メッシュの値 (e_1, e_2, e_3, \dots) を定義します。更にその次の行に **reg, wwbl, wwbl, ...** と記載し、**reg** の列には領域番号、**wwbi** の列には各領域にかけたいバイアスの値を与えます。その際、読み飛ばしコラム用の **non** が使えます。**wwbi** は、**eng=** で指定したエネルギーメッシュの数だけ用意してください。各 **wwbi** の列は、エネルギー E が $e_{i-1} < E < e_i$ となる粒子を対象としています。ここで $e_0 = 0$ です。領域番号の指定では、同じ値の領域をまとめて書く ($\{ 2 - 5 \} 89$) という書式も使えます。また、($6 < 10[1 \ 0 \ 0] < u=3$) などの **lattice, universe** 構造も指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。

[parameters] において **iwwbias=1** とすると、[ww bias] で与えたバイアスの値の逆数が [weight window] で指定したウェイトの下限值にかかります。この場合、**input echo** の [weight window] には [ww bias] で定義した値を考慮した結果が書き出され、[ww bias] には **off** が付きます。もし、[ww bias] が定義されていない場合は、**input echo** において全ての値が 1 となった [ww bias] が書き出されます。

[ww bias] を用いた計算の 1 例を以下に示します。

例 51: [ww bias] の例題

```
1:  [ WW Bias ]
2:    part = neutron
3:    eng = 1
4:      1.000000E+05
5:
6:    reg   wwbl
7:    1     1/7
8:    2     1/6
9:    3     1/5
10:   4     1/4
11:   5     1/3
12:   6     1/2
13:   7     1
14:   8     2
15:   9     3
16:  10     4
17:  11     5
18:  12     6
```

考慮する粒子は中性子とし、エネルギーメッシュは 100GeV 以下の領域 1 つを指定しています。領域番号 1 から 12 に対してバイアスをかけており、領域 7 を中心にして、少ない方には弱く、大きい方には強くバイアスをかけています。

図 57(a) が、例題 51 を適用した体系の xz 断面図です。体系には z 軸を中心とした半径 100cm のコンクリートの円柱が配置されており、 $x = 0, y = 0, z = 90\text{cm}$ の点から 14MeV 中性子を等方線源として発生させました。最初に [t-wwg] により [weight window] を作成し、そのウエイト値をそのまま用いて計算して求めた中性子のフルエンス分布が図 57(b)、例題 51 を適用して求めた結果が図 57(c) です。図 (b) を見てわかるように、バイアスをかけずに [weight window] を利用して求めた結果は、 z 軸のプラス側とマイナス側に同様に粒子数が広がっています。それに対し、図 (c) では、例題 51 に示す値が示すように、 z 軸のプラス側では粒子が増加し、マイナス側では減少しています。このように、マイナス側が重要でなく、プラス側の領域について詳細に調べたい場合は、[ww bias] によってバイアスをかけることにより、効率的にシミュレーションを実行することができます。

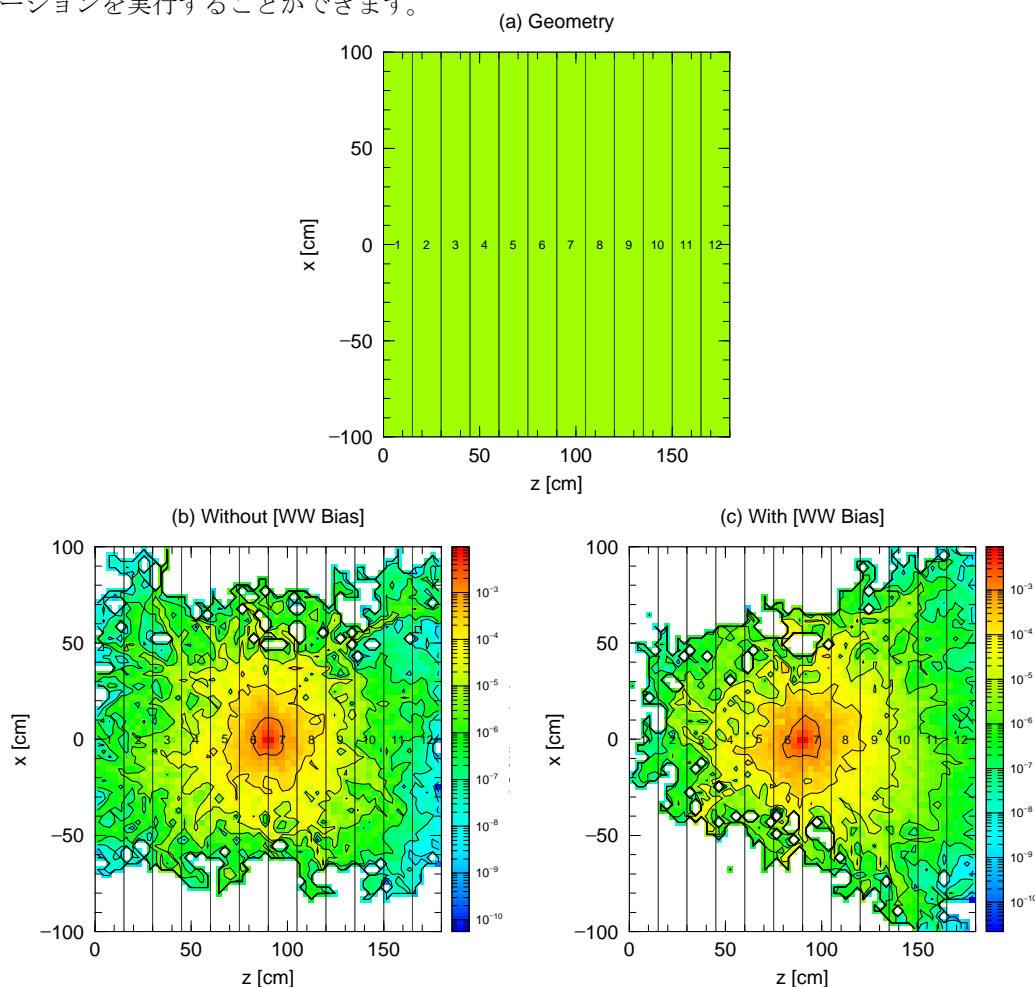


図 57: (a) 体系の xz 断面図。(b)[ww bias] を適用せずに計算した結果。(c) 例題 51 に示した [ww bias] を適用して計算した結果。

5.21 [Forced Collisions] セクション

強制衝突 (forced collisions) は、特定の領域において衝突の確率を人為的に上げて 2 次粒子のタリー効率を上げるために利用します。薄膜ターゲットや厚いターゲットでも衝突断面積が低くほとんどの入射粒子が衝突しない状況において有用となります。強制衝突の領域に入った指定された粒子は、ふたつに分離されます。ひとつはその領域の透過確率をその重みにかけた粒子で、次の領域まで透過させます。もうひとつは、 $(1 - \text{透過確率})$ を乗じた重みを持った粒子で、この強制衝突の領域で強制的に衝突を起こさせます。非荷電粒子の場合、透過確率は入射粒子の断面積に従って計算し、衝突位置は領域内で一様となるように確率的に決定します。一方、荷電粒子の場合は、強制衝突領域をいくつかに分割して各領域でのエネルギー損失と衝突確率を事前に決定し、その確率に従って衝突位置をサンプリングします。その分割数は全ての強制衝突領域で共通で、[parameters] セクションの `nfcseg (D=50)` で定義します。なお、[forced collisions] を使わない場合の反応確率が約 10% を超えるような場合に [forced collisions] を使うと正しい結果が得られませんのでご注意ください。

強制衝突の領域と強制衝突係数をこのセクションで指定します。定義されない領域の強制衝突係数は、ゼロにセットされます。

このセクションは、6 つまで定義することができます。その書式は、

[Forced Collisions]	
part =	proton neutron
reg	fcl
1	1.000000
11	0.500000
({ 2 - 5 } 8 9)	0.200000
(11 12 15)	0.300000
(6<10[1 0 0]<u=3)	-0.500000
....
....

最初の行に `part =` の書式で粒子を指定します。省略した時のデフォルトは、`part = all` で全粒子です。ただし、電子、陽電子は強制衝突はできません。`part =` の書式の詳細はタリーの粒子指定と同じ書式です。しかし、指定できるのは `ityp` としての区別だけです。それぞれの原子核などは、個別には指定できません。

領域番号 (`reg`) と (`fcl`) の順番を変えたいときは、`fcl reg` とします。読み飛ばしコラム用の `non` も使えます。

同じ値の領域をまとめて書く、`({ 2 - 5 } 8 9)` という書式も使えます。

また、`(6 < 10[1 0 0] < u=3)` などの `lattice, universe` 構造も 指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず `()` で括ってください。

この書式を用いれば `lattice` のひとつひとつに異なる `forced collision factor` を定義することも可能です。上の定義で、同じセルが二重に定義された時は、初めに定義された値が採用されます。

強制衝突の係数 `fcl` は次の様な意味を持ちます。まず、ゼロは強制衝突をさせません。 $|\text{fcl}| > 1$ はエラーです。 $|\text{fcl}| \leq 1$ の時は、強制衝突の確率を $|\text{fcl}|$ 倍します。その分、強制衝突粒子の重みを $1/|\text{fcl}|$ 倍します。

強制衝突領域での多重散乱と `weight cutoff` との関係では、次のふたつのオプションがあります。`fcl < 0` の時、強制衝突による生成粒子は通常の衝突をさせます。その時 `weight cutoff` は行いません。`fcl > 0` の時、強制衝突による生成粒子も更に強制衝突をさせます。この時、そのたびに `weight cutoff` を行います。また、タリーは `weight cutoff` の前に行います。この関係を良く理解して `weight cutoff` と強制衝突の係数を決めな

いと、強制衝突はさせたが出てきた粒子は全て殺されてしまうということもあり得ます。例えば、強制衝突で発生させた2次粒子の軌跡や強制衝突領域から離れた場所における粒子の情報をタリーする場合は該当します。この場合、**[parameters]** セクションにおいてウェイトカットオフ **wc1(i)** を低く設定する必要があります。

5.22 [Repeated Collisions] セクション

繰返し衝突 (repeated collisions) は、非弾性散乱の核反応（重イオン反応を含む核反応モデルを用いた高エネルギー核反応）が起こった時に、核反応のシミュレーションを繰り返し、生成物の統計的揺らぎを平均化する機能です。核反応チャンネルに確率は小さいが生成物の影響が大きい核分裂等があるときに有効です。生成物は繰返し回数によりそのウェイトを変化させ、生成後は通常のウェイトカットオフ等の機能が有効になります。ただし、生成物のタリーは、ウェイトカットオフ等の処理の前に行われます。

繰返し衝突の領域と繰返し係数等を以下のように指定します。このセクションは、6つまで定義することができます。その書式は、

```
[ Repeated Collisions ]
  part = proton neutron
mother = 2
        207Pb  208Pb
  emin = 800
  emax = 10000
  reg   n-coll  n-evap
  66     50      1
  67     10      1
  68     10     10
```

最初の行に **part=** の書式で入射粒子を指定します。省略した時のデフォルトは、**part=all** で全ての粒子です。指定できる核反応は非弾性散乱の核反応（重イオン反応を含む核反応モデルを用いた高エネルギー核反応）です。核データを用いた核反応等は利用できません。次に、**mother** で核反応の標的核種を指定します。省略した時は、そのセルの全核種です。まず、個数を指定し、次の行で核種をその個数分指定します。質量数のない **Pb** 等の指定も可能です。次の **emin** と **emax** で、入射粒子のエネルギー範囲を指定します。省略した場合は全エネルギー領域が対象となります。次の行は、**reg n-coll n-evap** です。まず、**reg** の列で対象のセルを指定します。次の **n-coll** では核反応モデルでの繰返し回数、**n-evap** では蒸発モデルでの繰返し回数を指定します。

5.23 [Volume] セクション

このセクションでは、cell の体積 (cm³) を定義します。この量は、以下のタリーセクションで用いられます。両方で定義されない領域は、1.0 cm³ にセットされます。書式は、

[V o l u m e]	
reg	vol
1	1.000000
11	5.000000
({ 2 - 5 } 8 9)	2.000000
(11 12 15)	3.000000
16	6.000000
....
....

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。しかし、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造は、使えません。タリーで異なる universe でのセルの体積を細かく定義する時は、タリーセクションの中の volume 定義を用いてください。

領域番号 (reg) と体積 (vol) の順番を変えたいときは、vol reg とします。読み飛ばしコラム用の non も使えます。

5.24 [Multiplier] セクション

このセクションで定義した係数は、[t-track], [t-cross], [t-point] の **multiplier** サブセクションで利用することができます。エネルギーの関数として係数を定義し、タリー結果にその係数を乗じます。例えば、任意の線量換算係数を用意し、その値を用いた場合の線量を評価する、といったことに利用できます。

ひとつの [multiplier] セクションにひとつの係数のセットを定義でき、用意できる [multiplier] セクションの数の上限は 100 です。書式は以下のようになります。

```
[ Multiplier ]
number = -201
interpolation = log
part = all
lagrange = 2
file = multiplier201.out
epsout = 1
y-txt = Conversion coefficients (arb.)
ne = 10
      20.0      2.678
      30.0      7.020
      50.0     18.50
     100.0     24.26
     200.0     16.13
     500.0     10.51
    1000.0     10.55
    2000.0     10.98
    5000.0     12.10
   10000.0     12.45
```

最初に、この係数をタリーの中で使うときの ID 番号を **number** で指定します。指定できる ID は、-200 から -299 までの負整数です。対象となる粒子は **part** で指定します。定義方法は、タリーの **part** 定義方法と同じで、**all** も使えます。1 つの [multiplier] で定義できる粒子数の最大は 6 つです。同じ multiplier ID で様々な粒子に対するデータを定義したい場合は、それぞれの粒子に対して [multiplier] セクションを定義してください。データの内挿方法は **interpolation** で定義し、log-log 内挿の場合は **log**、linear-linear 内挿の場合は **lin**、log-linear 内挿の場合は **xlog** または **ylin**、linear-log 内挿の場合は **xlin** または **ylog**、内挿せず群定数として使う場合は **glow** もしくは **ghigh** と設定します。データ数は **ne** で指定し、その下に **ne** の数だけエネルギー点と係数の値をそれぞれ定義します。なお、エネルギー点は昇順で書く必要があり、**glow** あるいは **ghigh** の場合は、エネルギー点として群の下限あるいは上限値をそれぞれ設定します。データの外挿方法は指定できません。定義したエネルギー下限値以下には最小エネルギー点の係数値が、上限値以上には最大エネルギー点の係数値が使用されます。定義したエネルギー範囲外の結果を使用したくない場合は、各タリーの **e-type** で調整してください。

Version 3.35 より、4 点（3 次）ラグランジュ補間公式による内挿方法が利用可能になりました。これは ICRP 等でも推奨されることがある補間方法です。切り替え方法は **lagrange** パラメータを使用します。これまでの 2 点間補間は 2(default) を、4 点ラグランジュ補間は 4 を指定してください。**file** で出力ファイル名を指定すると、入力データおよび補間データが出力されます。**epsout** と併せてご使用ください。また、

[multiplier] セクションで定義した係数の名称を出力ファイル中に明記したい場合は、**y-txt** により **y** 軸の表示テキストを定義してください。

Version 3.03 より、いくつかの ID に対してデフォルトの値が設定されています。それらのデータは、/phits/data/multiplier/フォルダに格納されており、m+“ID の絶対値”+.inp というファイル名でそれぞれまとめられています（例: ID が-200 の場合は、m200.inp）。設定されているのは線量換算係数データ（単位 pSv·cm²）と半導体ソフトエラー発生率（単位は (FIT/Mbit)/(cm²/s)）であり、表 100 に各 ID との対応関係をまとめています。このフォルダ内のデータは、ユーザーが自分で追加することも可能です。これらの ID をインプットファイルの [multiplier] セクションで再定義した場合は、再定義した値が優先されます。

半導体ソフトエラー発生率を評価するための multiplier(ID=-299) には、仮想的な素子に対して PHITS とデバイスシミュレーターで評価した中性子 SEU 断面積を格納しています⁹⁴。この素子に対するバックグラウンドソフトエラー発生率⁹⁵ はおよそ 400 FIT/Mbit（2MB の SRAM で 18 年に 1 回ソフトエラーが発生する頻度）となります。なお、FIT はソフトエラー率を表す単位で、1 FIT = 1e-9 err/hour です。SEU 断面積は半導体製品によって異なるため、実在の電子機器のソフトエラー率を正確に算出する目的には使用できません。あくまで一般的な地上環境におけるソフトエラー率との比較や、およその目安を把握する目的に使用してください。

表 100: 格納されている換算係数データの一覧

Multiplier ID	格納されているデータ
-200	$H^*(10)$ ⁹⁶
-201	ICRP60 定義に基づく実効線量（前方照射） ⁹⁷
-202	ICRP103 定義に基づく実効線量（前方照射） ⁹⁸
-203	ICRP103 定義に基づく実効線量（等方照射） ⁹⁸
-204	新しい実用量 H^* （全ての照射条件で最大となる実効線量） ⁹⁸
-210	男女平均した実効線量当量（等方照射） ⁹⁹
-211	男性に対する実効線量当量（等方照射） ⁹⁹
-212	女性に対する実効線量当量（等方照射） ⁹⁹
-213	男性に対する造血組織線量当量（等方照射） ⁹⁹
-214	女性に対する造血組織線量当量（等方照射） ⁹⁹
-215	男性に対する皮膚線量当量（等方照射） ⁹⁹
-216	女性に対する皮膚線量当量（等方照射） ⁹⁹
-299	半導体ソフトエラー発生率（等方照射） ¹⁰⁰

5.24.1 Multiplier サブセクション

定義した係数をタリーで利用する場合は、[t-track], [t-cross], [t-point] の multiplier サブセクションを使います。基本的な表式は ($C \ k$) です。 C を規格化定数、 k を ID 番号（ただし $k < 0$ ）として指

⁹⁴ しきい電荷量を 0.6 fC と仮定し、中性子のエネルギー範囲として 1 MeV~1 GeV を考慮しています。詳細な計算方法は、S. Abe and Y. Watanabe, IEEE Trans. Nucl. Sci. 61, 3519-3526 (2014)、をご参照ください。

⁹⁵ 東京地表面における宇宙線フラックスを PARMA モデルで計算して推定しています。PARMA モデルは、<http://phits.jaea.go.jp/expacs> よりダウンロード可能です。

⁹⁶ EXPACS (<http://phits.jaea.go.jp/expacs/>) よりデータを抜粋。

⁹⁷ Y. Sakamoto, O. Sato, S. Tsuda, N. Yoshizawa, S. Iwai, S. Tanaka, and Y. Yamaguchi, “Dose conversion coefficients for high-energy photons, electrons, neutrons and protons”, JAERI-1345, (2003) 他。

⁹⁸ ICRU Report 95, 2020.

⁹⁹ ICRP Publication 123, Ann. ICRP 42(4), 2013.

¹⁰⁰ S. Abe and Y. Watanabe, IEEE Trans. Nucl. Sci. 61, 3519-3526 (2014).

定します。具体的には、各タリーのセクションにおいて、以下の様な書式で使します。

```
multiplier = all
      part = neutron
      emax = 1000
      mat   mset1      mset2
      all   ( 1 -201 ) ( 2 -202 )
```

multiplier =では **all** を指定してください。**part** =で係数を乗じる粒子を指定します。6 個まで複数指定可能であり、**all** も利用できます。省略すれば **all** を指定したことになります。ただし、指定した粒子以外の寄与はゼロになります。**emax** =で係数を乗じるエネルギーの上限を設定します。省略した場合は、**[multiplier]** セクションで指定したエネルギーの最大値、もしくはライブラリを使う場合はその上限値がセットされます。それ以上では、その最大値に対する値が入ります。**mat** が係数を乗じる物質番号ですが、基本的に **all** としてください。**mset1, mset2** は **multiplier** セットの指定です。このセットは全部で 6 つまで指定可能で、それぞれのセット毎に結果が出力されます。また、ひとつのタリーセクション内に複数の **multiplier** サブセクションを指定できます。ただし、その時の **multiplier** セットの数は等しくなければなりません。

[multiplier] セクションで定義せずに使用できる係数もあります。 $k = -1$ の場合は $1/\text{weight}$ を乗じ、モンテカルロ粒子の（すなわち、**weight** を常に 1 とした時の）結果を出力します。 $k = -2$ の場合は $1/\text{velocity}$ を乗じます。 $k = -120$ の場合は、物質の密度を乗じますので、**icntl=5** と組み合わせれば領域内の質量が計算できます。また、**phits/data/multiplier/** フォルダ内にある ID 番号もインプットで定義せずに利用することができます。現在、整備されている ID 番号とデータの種類の表 100 をご参照ください。様々な種類の線量換算係数が格納されています。これらの単位は $\text{pSv}\cdot\text{cm}^2$ ですので、フルエンスを $(/\text{cm}^2/\text{sec})$ に規格化すれば、 (pSv/sec) 単位で被ばく線量を推定することができます。なお、重イオンに対する線量換算係数のエネルギー単位は核子あたりの MeV である MeV/n ですので、重イオンによる線量を計算したい場合は **[parameters]** セクションで **iMeVperu=1** と設定してください。

この他、 $k = -101, -102, -112, -114$ でそれぞれ陽子、中性子、電子、光子のセットが選択されます。これらの換算係数は、AP(前方-後方) 照射条件で評価された実効線量換算係数です¹⁰¹。これらの値は、ID 番号が -201 の換算係数とほぼ同等ですが、単位が $(\mu\text{Sv}/h)/(n/\text{sec}/\text{cm}^2)$ に規格化されている点が異なりますのでご注意ください。すなわち、フルエンスを $(/\text{cm}^2/\text{sec})$ で規格化した場合に、 $(\mu\text{Sv}/h)$ 単位で被ばく線量を導出するように調整されています。(PHITS ver.2.00 から、線量換算係数のデータの内挿の仕方を **linear-linear** から **log-log** に変えたので、注意してください。)

また、核データライブラリに含まれる断面積やカーマ係数などを読み込んで乗じることも可能です。その場合は、各 **mset** の書式が

```
( C m MT1 MT2 ... )
```

のようになります。ここで、**C** は規格化定数、**m** は **[material]** で定義した物質番号、**MT1**, **MT2** は乗じたい係数の MT 番号です。2 つ以上の MT 番号を入力した場合は、基本的にはそれら MT 番号のデータの積が乗せられます。和を乗じたい場合は、加算したい MT 番号を:で繋ぎます。MT 番号とは、核反応の種類毎に決められた番号です。詳細は、<https://wwwndc.jaea.go.jp/cgi-bin/ENDFfig?help=yes> や <https://www.oecd-neo.org/dbdata/data/manual-endf/endf102.pdf> の Appendix B をご覧ください。その代表的なものを以下に示します。

¹⁰¹ Y. Sakamoto, O. Sato, S. Tsuda, N. Yoshizawa, S. Iwai, S. Tanaka, and Y. Yamaguchi, "Dose conversion coefficients for high-energy photons, electrons, neutrons and protons", JAERI-1345, (2003)

MT 番号	説明
1	: (z,total) 全反応断面積 [barn]
2	: (z,z0) 弾性散乱断面積 [barn]
3	: (z,nonelas.) 非弾性散乱断面積 [barn]
4	: (z,n) 1 中性子生成断面積 [barn]
16	: (z,2n) 2 中性子生成断面積 [barn]
17	: (z,3n) 3 中性子生成断面積 [barn]
18	: (z,fission) 核分裂断面積 [barn]
22	: (z,n α) 中性子・ α 粒子生成断面積 [barn]
27	: (z,abs) 吸収断面積 [barn]
28	: (z,np) 中性子・陽子生成断面積 [barn]
102	: (z, γ) γ 線生成捕獲断面積 [barn]
103	: (z,p) 1 陽子生成断面積 [barn]
104	: (z,d) 1 重陽子生成断面積 [barn]
105	: (z,t) 1 三重陽子生成断面積 [barn]
106	: (z, ^3He) ^3He 生成断面積 [barn]
107	: (z, α) 1α 粒子生成断面積 [barn]
108	: (z, 2α) 2α 粒子生成断面積 [barn]
109	: (z, 3α) 3α 粒子生成断面積 [barn]

ただし、**part=neutron** の結果に対して、**MT=103** のような荷電粒子を生成する反応の断面積を乗じる場合は、**[parameters]** において **e-mode> 0** としてください。

また、**MT** 番号の箇所に負値の特殊番号を入力することにより、下記に示す係数を乗じることも可能です。
中性子の場合

特殊番号	説明
-1	: 熱補正しない全断面積 [barn]
-2	: 吸収断面積 [barn]
-3	: 熱補正しない弾性散乱断面積 [barn]
-4	: 反応あたりの平均発熱量 [MeV/collision]
-5	: γ 線生成断面積 [barn]
-6	: 全核分裂断面積 [barn]
-7	: 核分裂による平均中性子放出数 ν [個/fission]
-8	: 核分裂による平均発熱量 Q [MeV/fission]

光子の場合

特殊番号	説明
-1	: コンプトン散乱 (incoherent scattering) 断面積 [barn]
-2	: レイリー散乱 (coherent scattering) 断面積 [barn]
-3	: 光電効果断面積 [barn]
-4	: 電子対生成断面積 [barn]
-5	: 全反応断面積 [barn]
-6	: 反応あたりの平均発熱量 [MeV/collision]

以下、**mset** の例題をいくつか示します。

- (100.0 5 1): 物質番号 5 番の全反応断面積を 100 倍して乗じる
- (1.0 3 1 -4): 物質番号 3 番の中性子に対するカーマ係数 (全反応断面積 x 平均発熱量) を乗じる

- (1.0 4 -5 -6): 物質番号 4 番の光子に対するカーマ係数を乗じる (**part=photon** の場合)
- (1.0 5 4:16:17): 物質番号 5 番の (n,n),(n,2n),(n,3n) 反応断面積の和を乗じる
- (1.0 1 -6 -8): 物質番号 1 番の核分裂生成熱 (核分裂断面積 x Q 値) の和を乗じる。

実際に利用された **multiplier** の数値が知りたい場合は、**multiplier** サブセクションにおいて **part** パラメータの後に **mtinfo=1** と定義した上で、出力したいエネルギー点を **e-type** 形式で定義してください。そのタリーの出力ファイルに **multiplier** の数値が **[multiplier]** セクション形式で出力されます。ただし、物質番号を 0 とした場合は、**[material]** に設定された中で、計算に使用している最初の物質番号の時の係数を書き出します。例えば、一番最初に書かれた物質番号が **[cell]** 等で参照されていないならば、その物質番号の係数を書き出しません。

5.25 [Mat Name Color] セクション

このセクションでは、`gshow` タリー、`3dshow` タリーで領域を表示する時の、物質番号毎に物質の名前と色、表示の文字の大きさを指定します。デフォルトは、名前は物質番号、色は物質の出現順に割り振ります。書式は、

[Mat Name Color]				
mat	name	size	color	
0	void	1	lightgray	
1	air	0.5	yellowgreen	
2	{mat 2}	2	orangeyellow	
3	{mat 3}	2	{ 0.067 0.600 1.00 }	
{ 4 - 7 }	Fe	3	mossgreen	
....			
....			

物質番号(mat)と(name size color)の順番を変えたいときは、`mat color size name`の様に定義行で変えます。読み飛ばしコラム用の`non`も使えます。`name color`の何れかが定義されなければなりません。省略された場合は、デフォルトと見なされます。同じ名前、色の物質をまとめて書く、`{ 4 - 7 }`という書式も使えます。ただし、`({ 4 - 7 } 9 10)`という表式は使えません。文字の大きさは、デフォルトを1とした相対値で指定します。

名前に空白が入る時は、`{ }`で括ってください。また、名前の中で括弧`(,)`を使うときは、`¥(, ¥)`としてください。名前の中で括弧`{, }`は使えません。ただし、`¥{, ¥}`とすることで、`LaTeX`表記による上付きや下付き文字を使用できます。例えば、`^¥{ 208 ¥}Pb`とすると、 ^{208}Pb と表示されます。名前として定義できる文字数の上限は80です。

[cell] セクションにおいて同一の物質番号で密度の違う領域を複数定義した場合、デフォルト設定(`matadd=1`)では、最初のもの以外の密度の物質に対して新しい物質番号を付与します。この番号は、`file(6)` (`D=phits.out`)の[material]セクションに出力されるので、その値を`mat`としてご使用ください。また、[parameters]セクションにおいて`matadd=0`とすることで、同じ物質番号が割り振られるようになりますが、この機能は本セクションで指定する物質番号には影響がありません。この番号は`file(6)`の最初にWarningとして出力されますので、その値をご参照ください。

色の指定は、`ANEL`の書式に準じます。記号(`r bbb yy`)、名前(`red orange blue`)、また、HSB数値 H (色相) S (彩度) B (明度)で指定できます。HSB数値指定の時は`{ }`で括ってください。HSB数値が1個しか指定されない場合は、彩度、明度は1に設定されます。

次頁に、色指定の記号、名前、HSB数値の表を示します。なお、名前の入力の小文字で行ってください。

表 101: グレースケール

記号	HSB定義	出力	名前
W	-1.0		white
O	-0.8		lightgray
K	-0.6		gray
J	-0.4		darkgray
F	-0.2		matblack
E	-0.0		black

表 102: 記号による色指定

記号	HSB定義	出力	名前
R	1.000		red
RR	0.933		orange
RRR	0.867		—
Y	0.800		yellow
YY	0.733		—
YYY	0.667		—
G	0.600		green
GG	0.533		—
GGG	0.467		—
C	0.400		cyan
CC	0.333		—
CCC	0.267		—
B	0.200		blue
BB	0.133		violet
BBB	0.067		magenta

表 103: 名前、数値による色指定

名前	出力	HSB定義		
darkred		1.000	1.000	0.600
red		1.000	1.000	1.000
pink		1.00	0.500	1.000
pastelpink		0.900	0.500	1.000
orange		0.933	1.000	1.000
brown		0.900	1.000	0.500
darkbrown		0.900	1.000	0.300
pastelbrown		0.900	0.600	0.500
orangeyellow		0.867	1.000	1.000
camel		0.800	0.700	0.700
pastelyellow		0.800	0.700	1.000
yellow		0.800	1.000	1.000
pastelgreen		0.700	0.600	1.000
yellowgreen		0.700	1.000	1.000
green		0.600	1.000	1.000
darkgreen		0.600	1.000	0.600
mossgreen		0.500	1.000	0.300
bluegreen		0.500	1.000	1.000
pastelcyan		0.400	0.400	1.000
pastelblue		0.250	0.400	1.000
cyan		0.400	1.000	1.000
cyanblue		0.400	1.000	0.500
blue		0.200	1.000	1.000
violet		0.133	1.000	1.000
purple		0.100	1.000	0.500
magenta		0.067	1.000	1.000
winered		0.002	0.800	0.700
pastelmagenta		0.067	0.600	1.000
pastelpurple		0.100	0.400	0.500
pastelviolet		0.133	0.400	1.000

5.26 [Reg Name] セクション

このセクションでは、[t-gshow]、[t-rshow]、[t-3dshow] で出力されるセル番号（数字）の表示を任意の名前に変更し、またその文字の大きさも変更できます。他のタリーで gshow や rshow オプションを使用した場合の出力結果にも反映されます。書式は、

[Reg Name]			
reg	name	size	
1	cover	1	
2	body	0.5	
3	{cell 2}	2	
4	{cell 3}	2	
{ 5 - 8 }	tube	3	
....		
....		

です。セル番号 (**reg**) と名前 (**name**) や文字の大きさ (**size**) の順番を変えたいときは、**reg size name** の様に定義行で変えます。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。**name** と **size** の何れかが定義されなければなりません。省略された場合は、デフォルトと見なされます。セル番号をまとめる { 4 - 7 } という書式も使えます。ただし、({ 4 - 7 } 9 10) という表式は使えません。名前に空白が入る時は、{ } で括ってください。名前の中で括弧 { , } を表示することはできませんが、 \mathbb{Z} { \mathbb{Z} } とすることで、LaTeX 表記による上付きや下付き文字を使用できます。例えば、 \mathbb{Z} { 208 \mathbb{Z} }Pb とすると、 ^{208}Pb と表示されます。名前の中で括弧 (,) を使うときは、それぞれ \mathbb{Z} (, \mathbb{Z}) としてください。また、名前として定義できる文字数の上限は 80 です。文字の大きさは、デフォルトを 1 とした相対値で指定します。

5.27 [Counter] セクション

このセクションでは、タリーで用いるカウンターの設定をします。カウンターは3つ用意され、それぞれのカウンターで領域ごとに、その動作を定義します。カウンターの動作契機は大きく分けると5つあり、領域に入った時¹⁰² (in)、領域を出た時 (out)、境界で反射を起こした時 (ref)、反応を起こした時 (coll)、ndata によるタリーが行われた時 (ndata) です。それぞれに、カウンターの進捗 (-9999~9999)、もしくは、ゼロセット (10000) を定義できます。カウンターは粒子に付随して、散乱によって生成される粒子は、親のカウンターを引き継ぎます。*i* カウンターの容量は、-9999 から 9999 まででそれ以下、以上になる時は変化しません。カウンターは、**part =** を使って粒子毎に指定できます。また、***part =** とすれば、カウンターを動作させない粒子を指定できます。

書式は以下のようになります。

```
[ C o u n t e r ]
counter = 1
    part = neutron proton
    reg      in      out      coll      ref
      1      1    10000         0         0
     11      1    10000         0         0
counter = 2
    *part = proton deuteron triton 3he alpha nucleus
    reg                        in      out      coll
    ( { 2 - 5 } 8 9 )         -1         0         1
counter = 3
    part = 208Pb
    reg                        coll
    ( 11 12 15 )                5
    ( 6<10[1 0 0]<u=3 )        100
    ....                      .....
    ....                      .....
```

読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。in out coll ref の内、少なくともひとつは定義されなければなりません。省略された場合は、ゼロ、つまりカウントなしと見なされます。数字は、カウンターの進捗を表します。この数だけカウンターに加えられます。10000 は、ゼロセットを意味します。ソース粒子のカウンター初期値はゼロです。

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。また、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造も指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。universe を使って体系を作成した際は、「universe を入れ込む枠のセル番号」ではなく、「universe 内で定義しているセル番号」を指定して下さい。

part=での粒子指定では、粒子は20個まで指定できます。原子核は、**208Pb** のように質量数を指定すればその核、**Pb** のように質量数を指定しなければ、**Pb** の同位体全体を指定することになります。

¹⁰² 指定した領域内で線源を発生する場合もカウンターが動作します。この仕様はマニュアルに記載していませんでしたが、実装時より含まれている仕様です。in で指定した領域内で線源を発生する計算を実行された場合はご注意ください。

バージョン 2.90 以降、反応を起こした時 (**coll**) に属するイベントを細かく分類し、カウンターの動作契機を増やしました。まず、**coll** は、原子核反応を起こした時 (**nucl**)、原子相互作用により粒子を生成した時 (**atom**)、崩壊を起こした時 (**dcay**) の 3 つに分類されます。そして、**nucl** と **atom** は更にそれぞれ 3 つと 10 つに分かれます。表 104 に **coll** に属する各種のイベントを示します。これらの反応イベントを詳細に分析したい場合は、カウンターの動作契機として各反応のキーワードを指定してください。ただし、例えば、**coll** と **nucl** を同時に指定した場合は、重複してカウントされますので、ご注意ください。

fiss を設定すると、散乱（核反応）が起こり、更に核反応として核分裂が起こった時だけカウンターが呼ばれます。核分裂が起こったかどうかの判定は、核データを使う時は核データの **fission** チャンネルが選択された時、反応モデルを使う時は統計崩壊過程において **fission** チャンネルが選ばれた時です。

表 104: **coll** に属するイベントの分類

相互作用	反応イベント	説明
nucl	elst	原子核反応を起こした時。
	iels	弾性散乱を起こした時。
	fiels	非弾性散乱を起こした時。
	fiss	核分裂を起こした時。
atom	delt	原子相互作用により粒子を生成した時。
	knoe	デルタ線を生成した時。
	fluo	電子と陽電子による knock on electron 生成が起こった時。
	auge	蛍光 X 線を生成した時。
	brem	Auger 電子を生成した時。
	phel	制動放射を起こした時。
	cmpt	光電効果を起こした時。
	pprd	コンプトン散乱を起こした時。
	anlh	電子陽電子対を生成した時。
	rayl	陽電子が消失した時。
	rayl	レイリー散乱を起こした時。
dcay		崩壊を起こした時。

動作契機として **in**, **out** を設定しかつ **[t-cross]** でその境界面を指定した場合、タリーした後にカウンター値が変わるのでご注意ください。変化前のカウンター値を指定しないと、境界面を通過する瞬間の情報はタリーされません。一方、**coll** やこれに属する反応イベントを動作契機として設定した場合は、タリーする前にカウンター値が変わります。**[t-yield]**, **[t-product]**, **[t-interact]**, **[t-point]** において反応イベントが起こった瞬間の情報をタリーする場合は、変化後のカウンター値を指定してください。

動作契機として **ndata** を設定すると、**[t-yield]** や **[t-dchain]** において **ndata=2,3** とした場合に、**file(27)** で指定したフォルダにある断面積データを参照してタリーした時にカウンター値が変わります。これにより、生成量の 2 重カウントを避けることができます。**ndata** オプションを使用した **[t-yield]** や **[t-dchain]** では、核反応モデル等で評価された生成量の代わりに、上記の断面積データを参照した評価値がタリーされます。しかし、核反応モデル等で生成された 2 次粒子はその後も輸送計算の対象となるため、**output=cutoff** の場合、その 2 次粒子の寄与もタリーされて 2 重カウントとなります。そこで例えば、**ndata** のカウンター値を 1 とし、タリーにおいて **ctmax(i)=0, (i=1,2,3)** とすることで、1 度タリーされた粒子の寄与が制限されて、2 重カウントを避けることが可能となります。

5.28 [Timer] セクション

このセクションでは、各粒子が持っている時計のリセット、ストップをコントロールします。タイマーは、領域ごとに、その動作を定義します。タイマーの動作契機は4つあり、領域に入った時¹⁰³ (in)、領域を出た時 (out)、散乱を起こした時 (coll)、境界で反射 (ref) を起こした時です。それぞれに、ゼロリセット (-1)、ストップ (1)、何もしない (0) の動作が定義できます。書式は、

[T i m e r]				
reg	in	out	coll	ref
1	0	-1	0	0
11	1	0	0	0
....
....
....

領域番号 (reg) と (in out coll ref) の順番を変えたいときは、**reg coll in out ref** の様に定義行で変えます。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。**in out coll ref** の内、少なくともひとつは定義されなければなりません。省略された場合は、ゼロ、つまり何もしません。

同じ値の領域をまとめて書く、({ 2 - 5 } 8 9) という書式も使えます。また、(6 < 10[1 0 0] < u=3) などの lattice, universe 構造も 指定できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。

¹⁰³ 指定した領域内で線源を発生する場合もタイマーが動作します。この仕様はマニュアルに記載していませんでしたが、実装時より含まれている仕様です。in で指定した領域内で線源を発生する計算を実行された場合はご注意ください。

5.29 [User Defined Interaction], [User Defined Particle] セクション

このセクションは、ユーザーが定義した相互作用または粒子を利用するためのセクションです。

- 詳細は“/phits/utility/UserDefinedModel/readme-jp.pdf”を参照してください。
- 現在、電子、陽電子および光子で User Defined Interaction を使用する場合は EGS5 を使用する必要があります (negs=1, 2)。
- 設定可能なユーザー定義粒子の kf-code 値の範囲は $900000 \leq \text{kf} \leq 999999$ または $-999999 \leq \text{kf} \leq -900000$ です。

/phits/src/ フォルダに関連する以下の 3 種類のファイルがあります：

(1) udm_int_<NAME>.f90

ユーザーが定義した相互作用の情報（断面積など）が書かれたモジュールが定義されたソースファイル。ファイル名の <NAME> の部分は、ユーザーが任意に決められます。udm_int_sample.f90 は初めから /phits/src/ フォルダに入っています。このサンプル・ソースでは、100 MeV 以上の電子または陽電子が、原子番号 Z の物質と $Z \times 10^{-6}$ barn の断面積で相互作用し、ユーザー定義粒子を 1 つ放出します。

(2) udm_part_<NAME>.f90

ユーザーが定義した粒子の情報（質量、寿命、分岐比など）が書かれたモジュールが定義されたソースファイル。ファイル名の <NAME> の部分は、ユーザーが任意に決められます。udm_part_sample.f90 は初めから /phits/src/ フォルダに入っています。このサンプルコードでは、電子ニュートリノに崩壊するユーザー定義粒子を定義します。その質量と寿命はインプットファイルで指定できます。

(3) udm_manager.f90

使用するモジュールを指定するファイル。

以下は、[User Defined Interaction] の入力例です。

```
[ User Defined Interaction ]
$ Name          Bias    Parameters
my_interaction   1.0e+5  900000
```

この入力例は、初めから入っている udm_int_sample.f90 を動かすためのインプットファイルです。第 1, 2 引数は、使用するモジュールの Name とバイアス値を入力します。例えば、my_interaction は、udm_int_sample.f90 で定義されている udm_int_sample モジュールの Name 変数に代入された文字列と同じものです。バイアスの値を 1 以上にすることで、断面積の小さいプロセスの発生頻度を上げることができます。その場合、発生粒子の重みは自動で調整されるため、平均的な最終結果はバイアスの値に依りません。第 3 引数では 0 個以上のパラメータ値を入力できます。使用するパラメータの個数や意味は、使用するソースファイルに依存します。udm_int_sample モジュールの場合、パラメータ値の 1 番目は、生成するユーザー定義粒子の kf-code です。

以下は、[User Defined Particle] の入力例です。

```
[ User Defined Particle ]
$ Name      kfcode  Parameters
my_particle  9000000  1.0 1e-8
```

この入力例は、初めから入っている `udm_part_sample.f90` を動かすためのインプットファイルです。第1,2 引数は、使用するモジュールの **Name** と、このファイルで扱う粒子の **kf-code** を入力します。例えば、`my_particle` は、`udm_part_sample.f90` で定義されている `udm_part_sample` モジュールの **Name** 変数に代入された文字列と同じものです。第3 引数では0 個以上のパラメータ値を入力できます。使用するパラメータの個数や意味は、使用するソースファイルに依存します。`udm_part_sample` モジュールの場合、パラメータ値の1, 2 番目は、ユーザー定義粒子の質量 (MeV) と寿命 (秒) です。`udm_part_<NAME>.f90` ファイルはユーザー定義粒子だけでなく、既存の粒子の性質 (寿命や分岐比) を変更することもできます。

5.29.1 ユーザーコードの応用例

例1：陽電子起因のミューオン対生成 ($e^+e^-_{\text{atomic}} \rightarrow \mu^+\mu^-$)。

ユーザーコード: `udm_int_ee2mumu.f90`

使用方法:

```
[ User Defined Interaction ]
$ Name      Bias      Parameters
ee2mumu     1.0e+5
```

例2：ニュートリノ反応

データベースを読み込むことで、より幅広いニュートリノ反応を生成できます。データベースの例を以下のURL からダウンロードできます:

<https://rcwww.kek.jp/research/shield/sakaki/phits/temp.html>

ユーザーコード: `udm_int_neutrino.f90`

使用方法:

```
[ User Defined Interaction ]
$ Name      Bias      Parameters
neutrino    1          <データベースフォルダの絶対パスまたは相対パス>
```

例3：指定の領域または粒子にのみエネルギーカットオフを適用する。

ユーザーコード: `udm_int_kill.f90`

使用方法: <kf-code> に対応する粒子を、領域番号 <reg> において、エネルギーが <kf> 未満で輸送したくない場合、これら3つの値を **Parameters** の部分に繰り返し書く。**Bias** の数値は無視される。

```
[ User Defined Interaction ]
$ Name    Bias    Parameters
kill      1      <kf1> <reg1> <emin1>    <kf2> <reg2> <emin3>    ...
```

記入例 1: 電子 (kf=11) を領域 101 でエネルギーが 500 MeV 未満の場合、および中性子 (kf=2112) を領域 102 でエネルギーが 100 MeV 未満の場合輸送しない。(kf=0 はすべての粒子を意味する。)

```
[ User Defined Interaction ]
$ Name    Bias    Parameters
kill      1      11 101 500    2112 102 100
```

記入例 2: 各行に<kf> <reg> <emin> の情報が書き込まれたデータファイルを用意する。Parameters の部分にそのファイルの相対パスまたは絶対パスを記述する。

```
[ User Defined Interaction ]
$ Name    Bias    Parameters
kill      1      emin.txt
```

emin.txt の中身の例 (数値が 3 つ並んでいない行はスキップされる):

```
#   kf  reg  emin
    11  101  100
   -11  101  100
  2212  102   50
     0  103   30
```


6 タリーセクションの共通書式

タリーセクションには、以下のセクションがあります。

表 105: タリーセクションの種類

name	説明
[t-track]	粒子の飛跡長 (track length) やフルエンスを導出するタリー。
[t-cross]	粒子の面横断回数やフルエンスを導出するタリー。
[t-point]	ある点や線上のフルエンスを導出するタリー。
[t-deposit]	物質におけるエネルギー付与を導出するタリー。
[t-deposit2]	2つの領域でのエネルギー付与の相関を出力するタリー。
[t-heat]	物質におけるエネルギー付与を導出するタリー。(非推奨 ¹⁰⁴)
[t-yield]	残留核の生成量を導出するタリー。
[t-product]	線源や核反応による生成粒子を導出するタリー。
[t-dpa]	原子あたりのはじき出し数 (DPA) を導出するタリー。
[t-let]	LET の関数として飛跡長や線量を導出するタリー。
[t-sed]	微小領域におけるエネルギー付与分布を導出するタリー。
[t-time]	Energy cut off と escape 粒子の個数を導出するタリー。
[t-interact] (従来の [t-star])	反応数を導出するタリー。
[t-dchain]	DCHAIN 用入力ファイルを作成するタリー。
[t-wwg]	[weight window] のパラメータを出力するタリー。
[t-wwbg]	[ww bias] のパラメータを出力するタリー。
[t-volume]	体積自動計算機能のためのタリー。
[t-userdefined]	ユーザー定義による任意の物理量を導出するタリー。
[t-gshow]	ジオメトリ (仮想空間) を 2 次元で表示するタリー。
[t-rshow]	ジオメトリを 2 次元で物理量による色分けをして表示するタリー。
[t-3dshow]	ジオメトリを 3 次元で表示するタリー。

本節では、これらのタリーセクションで共通に使われるパラメータの定義の仕方を説明します。

6.1 メッシュ型

上に示した各タリーでは、データを収集する幾何形状の種類として、領域メッシュ(reg)、r-z メッシュ(r-z)、xyz メッシュ(xyz)が使えます。また、[t-track]、[t-desposit]、[t-yield]、[t-product]、[t-dpa]、[t-dchain] でのみ使用可能な四面体メッシュ(tet)があります。

タリーセクションにおいてはこれらのメッシュを 1 つ指定する必要があるため、次のような形式で指定します。

```
mesh = reg
```

¹⁰⁴ バージョン 3.04 までは [t-deposit] によるカーマ近似計算ができなかったため、この計算が可能な [t-heat] との使い分けを行っていました。

6.1.1 領域メッシュ

領域メッシュの場合、**mesh=reg** とした次の行に **reg=**としてタリーするセル番号を指定します。

```
mesh = reg
reg = 1 2 { 3 - 5 } all
```

複数のセル番号は空白区切りで指定します。また、**{ n1 - n2 }** の表式により、**n1** から **n2** までのセル番号を一度に指定することができます。上の例ではセル番号 3 から 5 のそれぞれを指定しており、**3 4 5** とした場合と同じ意味になります。他に、**all** とすることで定義した全てのセル番号を個別に指定できます。

幾つかのセル番号をまとめた時は () を用います。

```
mesh = reg
reg = ( 1 2 ) ( { 3 - 5 } ) ( all )
```

(1 2) により、セル番号 1 と 2 の結果を合わせた値を出力します。また、({ 3 - 5 }) により、セル番号 3,4,5 の結果を一つに合計した値を出力します。ただし、(n1 - n2) の表記は使用できないのでご注意ください。他に、(all) とすると、全てのセル番号の結果を合計した値を出力します。これらの複数のセル番号をまとめた領域には、1000001 より始まる識別番号が PHITS 内部で割り当てられます。この識別番号はタリーの出力ファイルの最初の部分にエコーとして書き出され、次節で説明する **volume** サブセクションで適切な体積を与える際に使用されます。

Universe や **lattice** の機能を使用して計算体系（ジオメトリ）を定義した場合は、複数の空間 (**universe**) を入れ子にした階層構造となります。階層は < で表し、次のような形式でタリーする領域を指定します。

```
mesh = reg
reg = ( 301 < 101[0 0 0] )
```

階層構造を含む領域を指定する際は、必ず () で囲まなくてはなりません。この例は **[cell1]** セクションにある例 37 の体系を参照しており、“セル番号 101 の **lattice** 座標 (0,0,0) に含まれているセル番号 301 の領域”という意味を表しています。セル番号 101 の後ろにある [] によりタリーの対象とする **lattice** 座標を指定します。（**Lattice** 座標については 5.6.4 節をご参照ください。）これにより、[] にある座標を変更することで、別の **lattice** 座標に含まれているセル番号 301 の領域を指定することができます。個別に幾つか指定する時はコンマを用い、**101[-1 -1 0, 1 -1 0, 0 0 0]** のように書きます。また、**101[-1:1 -1:1 0]** の様に指定した場合は、**lattice** 座標 (*i, j, k*) で表現した $-1 \leq i \leq 1, -1 \leq j \leq 1, k = 0$ の範囲に含まれる $3 \times 3 \times 1 = 9$ 個の **lattice** を意味します。この場合、9 個タリー結果を分けて出力するのでご注意ください。もし、一つにまとめた結果を求める場合は、(301 < (101[-1:1 -1:1 0])) と記載してください。ひとつの階層の中で () を用いると、それは括弧内の領域をまとめることを意味します。他に、(u=3 < 101[0 0 0]) と指定すると、u=3 に含まれる全てのセル番号が展開されます。例えば、u=3 に含まれるセル番号が 301 と 302 の場合、この指定方法は **reg= (301 < 101[0 0 0]) (302 < 101[0 0 0])** と書いた場合と同じになります。なお、階層構造をもつ場合も **reg=all** が使用できますが、最下層でないセルは除かれます。

6.1.2 階層構造の領域と体積の定義

次の例題を見てみましょう。

例 52: mesh = reg の例題 (1)

```

1:      mesh = reg
2:      reg = (all)
3:      ({ 201 - 205 })
4:      ( 161 < 160[1:2 3:6 1:1] )
5:      ( (201 202 203 204) < (161 162 163) )
6:      ( ( 90 100 ) 120 < 61 ( 62 63 ) )

```

このメッシュ定義文をタリーで用いてエコーを取ると次のものが得られます。

例 53: mesh = reg の例題 (2)

```

1:      mesh = reg          # mesh type is region-wise
2:      reg = ( all ) ( { 201 - 205 } ) ( 161 < 160[ 1:2 3:6 1:1 ] ) ( (
3:          { 201 - 204 } ) < ( { 161 - 163 } ) ) ( ( 90 100 ) 120 < 61
4:          ( 62 63 ) )
5:      volume              # combined, lattice or level structure
6:      non  reg      vol      # reg definition
7:      1  10001      8.1000E+01 # ( all )
8:      2  10002      5.0000E+00 # ( { 201 - 205 } )
9:      3  10003      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 1 3 1 ] )
10:     4  10004      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 2 3 1 ] )
11:     5  10005      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 1 4 1 ] )
12:     6  10006      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 2 4 1 ] )
13:     7  10007      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 1 5 1 ] )
14:     8  10008      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 2 5 1 ] )
15:     9  10009      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 1 6 1 ] )
16:    10  10010      1.0000E+00 # ( 161 < 160[ 2 6 1 ] )
17:    11  10011      4.0000E+00 # ( ( { 201 - 204 } ) < ( { 161 - 163 } ) )
18:    12  10012      2.0000E+00 # ( ( 90 100 ) < 61 )
19:    13  10013      1.0000E+00 # ( 120 < 61 )
20:    14  10014      2.0000E+00 # ( ( 90 100 ) < ( 62 63 ) )
21:    15  10015      1.0000E+00 # ( 120 < ( 62 63 ) )

```

入力では5つの領域の様に見えますが、エコーを見るとタリーを取る領域として15の領域が定義されていることが分かります。それぞれ単一の領域番号で表されないので、新たに10000番台の番号を付けてその体積と領域の定義文がエコーされます。この場合、[volume]セクションが無いので各セルの体積は1と定義されています。

まず、(all) は、この例題では81個の最下層のセルが定義されているので、この領域の体積は81となっています。もし最下層のセルの体積が正確に [volume] セクションで定義されていれば、この領域の体積は入力しなくても正確に与えられます。次に ({ 201 - 205 }) は、201から205までの領域をまとめたものですから、体積として5がエコーされています。これも [volume] セクションで正確に体積が定義されていれば、この領域の体積は入力しなくてもかまいません。

次に、(161 < 160[1:2 3:6 1:1]) ですが、これは、160の領域の中に161の領域がlatticeとして組まれています。ここでは、lattice座標の*i*に関して1から2、*j*に関して3から6、*k*に関して1の各latticeに含まれているセル番号161の計8個の領域でタリーを取ることを意味します。エコーでは、最下層の領域の数1が体積としてエコーされています。このような場合は、次に示すvolumeサブセクションで体積を与えなければなりません。

次は、((201 202 203 204) < (161 162 163)) ですが、これは、各階層に幾つかの領域が記述されていますが、全て括弧で括られてひとつの領域にされているので、全体としてもひとつの領域を表します。エコーの体積は、最下層の領域の和としているので正しくはありません。これもvolumeサブセクションで与えなければなりません。

最後の ((90 100) 120 < 61 (62 63)) は、各階層に 2 つずつ独立な領域があるので計 4 個の領域に分割されます。それぞれの体積はやはり **volume** サブセクションで与える必要があります。

Volume サブセクションは、インプットエコーの書式をそのまま使えます。書式は、

```
mesh = reg
reg = 1 2 3 4 ( 5 < 12 ) ( {13 - 17} )
volume
reg      vol
  1      1.0000
  2      5.0000
  3      6.0000
  4      1.0000
10001    6.0000
10002    5.0000
```

上の例題では、**reg** として、1 から 4 まではそのまま、(5 < 12) ({13 - 17}) は、10001 と 10002 を用います。この番号は、一度インプットエコーを取ると得られます。上の例題より分かるように、インプットエコーの部分をそのままコピーし、体積の値だけを変更すれば済みます。

領域番号 (**reg**) と体積 (**vol**) の順番を変えたいときは、**vol reg** とします。読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。インプットエコーでは、**non** として通し番号が付けられています。**axis = reg** の時の タリーの出力の際にはこの番号が **X** 軸の値として出力されます。

6.1.3 r-z メッシュ

r-z スコアリングメッシュの場合、まず、円柱の中心軸の *x, y* 座標のオフセットを

```
mesh = r-z
x0 = 1.0
y0 = 2.0
```

の書式で定義します。これは省略可能でデフォルト値はゼロです。

次に、

```
mesh    = r-z
r-type = [1-5]
.....
r-type = [1-5]
z-type = [1-5]
.....
z-type = [1-5]
```

で始まる各サブセクションによって r と z とのメッシュを定義します。メッシュ定義文は後述します。

[**t-track**] タリーに関しては、既存の r, z メッシュに加え、 θ メッシュを指定することができます。ここで、 r, θ, z はそれぞれ円柱座標系における

r : 円の半径

θ : 円面における角度

z : 円柱の中心軸上の位置

であり、 θ を定義する方位角の基線は x 軸です。[**t-track**] において θ に関するメッシュを指定する際は、**a-type** を用いてください。**a-type=1,2,-1,-2** のタイプがありますが、これらの数字が正の場合は角度の単位を余弦で与え、負の場合は **degree** 単位で与えることになります。ただし、円柱の定義であるので、0 度から 360 度までしか指定できません。また、角度のメッシュを加えたことにより、角度を横軸にして出力できるようになりました。そのために **axis** として、**rad** と **deg** を指定できます。**rad** は **radian** で、**deg** は **degree** の単位で出力します。

6.1.4 xyz メッシュ

xyz スコアリングメッシュの場合、

```
mesh    = xyz
x-type  = [1-5]
.....
.....
y-type  = [1-5]
.....
.....
z-type  = [1-5]
.....
.....
```

で始まる各サブセクションによって x, y, z のメッシュを定義します。サブセクションの記載方法は後述します。

6.1.5 四面体メッシュ

連続四面体（四面体メッシュ）形状 5.6.5.4 を使用している場合にのみ有効で、この体系内の各四面体で物理量をタリーすることができます。但し、現状では [**t-track**]、[**t-deposit**]、[**t-yield**]、[**t-product**]、[**t-dpa**] のみ使用可能です。書式は、

```
mesh    = tet
reg      = 100
```

のように **mesh** の指定の次の行で領域番号 (**reg**) を指定します。ここで領域番号として、連続四面体形状を収めた直方体領域を指定してください。こうすることで、この直方体領域に定義した全ての四面体に対し

て、個別に物理量がタリーされます。四面体メッシュ体系を構成する一部の四面体要素の **Universe** を構成する領域（ユニバース領域）だけを指定したい場合は、階層構造領域の指定と同様に、次のような形式で指定します。

```
reg = ( 201 202 < 101 )
```

ここで、201、202 は四面体のユニバース領域で、この指定によりセル 101 に展開される四面体メッシュ体系のうち、201、202 のユニバース領域に含まれる四面体に対して、個別に物理量がタリーされます（例 43 参照）。また、ユニバース領域のみを

```
reg = 201
```

のように指定することもできます。2 つ以上のユニバース領域を指定する場合は、(201 202) のように括弧で括る必要があります。ユニバース領域での指定は、入力ファイル内に四面体メッシュ体系が一つしか定義されていない場合にのみ有効です。四面体の合計は、代わりに領域メッシュ(mesh=reg) で、ユニバース領域を指定することで、実現できます。また、四面体の一部をくり抜いて使用している場合、四面体の体積を自動で計算しているため、正しい物理量が導出されない恐れがあります。この場合も領域メッシュ(mesh=reg) を使用して回避してください。

6.2 エネルギーメッシュ

タリーのエネルギーメッシュは

```
e-type = [1-5]
.....
.....
```

で始まる **e-type** サブセクションによって定義します。単位は MeV (**iMeVperU=1** の場合は MeV/n)。[**t-deposit2**] では、**e1-type**, **e2-type** で二つのエネルギーメッシュを定義します。サブセクションの記載方法は後述します。

6.3 LET メッシュ

タリーの LET メッシュは

```
l-type = [1-5]
.....
.....
```

で始まる **l-type** サブセクションによって定義します。単位は **keV/um**。サブセクションの記載方法は後述します。

6.4 時間メッシュ

タリーの時間メッシュは

```
t-type = [1-5]
.....
.....
```

で始まる **t-type** サブセクションによって定義します。単位は **nsec** です。サブセクションの記載方法は後述します。

6.5 角度メッシュ

cross, product タリーで用いる角度メッシュは

```
a-type = [1, 2, -1, -2]
.....
.....
```

で始まる **a-type** サブセクションによって定義します。この定義により、余弦 (**cos**) もしくは角度 (**degree**) を定義します。**a-type** を正で定義したときは余弦 (**cos**)、負で定義したときは角度 (**degree**) を表します。サブセクションの記載方法は後述します。

6.6 メッシュの定義方法

e-type, **t-type**, **x-type**, **y-type**, **z-type**, **r-type**, **a-type**, **l-type** で始まる 8 種類のサブセクションを記載することで、各メッシュを定義します。最初の一字を除くと全て共通なので、ここでは **e-type** を例に解説します。**ne** を **nx**, **ny**, **nz**, ..., **emin** を **xmin**, **ymin**, **zmin**, ..., の様に読み換えてください。

定義したメッシュの最小のビンに **emin** の値自身は含まれます。一方、最大のビンに **emax** の値自身は含まれません。

6.6.1 メッシュタイプ

メッシュの指定の仕方は 5 種類あり、それを **e-type** = [1-5] で指定します。1 から 5 番までのそれぞれのメッシュタイプは以下のようなものです。

表 106: メッシュタイプ

メッシュタイプ	内容
1	群数、分点をデータで与える。
2	群数と最小値、最大値を与え、線形で等分点が与えられる。
3	群数と最小値、最大値を与え、対数で等分点が与えられる。
4	メッシュ幅と最小値、最大値を与え、線形で等分点が与えられる。このとき、分点の最大値は与えた最大値もしくは最大値を超える最小の値となるように群数が決定される
5	最小値、最大値、メッシュ幅の対数値とを与え、対数で等分点が与えられる。このとき、分点の最大値は与えた最大値もしくは最大値を超える最小の値となるように群数が決定される

ただし、**a-type** 即ち、角度のメッシュでは、1, 2 (-1, -2) のメッシュタイプしか使えません。

[**t-cross**] で **z-type**=1 とした場合のみ、群数 **nz** を 0 としてデータ点を 1 つだけ指定することが可能です。この場合、**z** = (データ点) とする面のみがタリー面として設定されます。

以下に、それぞれのメッシュタイプのデータの定義の書式を示します。

6.6.2 e-type = 1 の場合

書式は、

```
e-type = 1
  ne = number of group
        data(1) data(2) data(3) data(4)
        data(5) data(6) data(7) data(8)
        .....
        .....
        data(ne+1)
```


です。この際、継続行のシンボル無しに複数行にまたがっても自動判別します。

6.6.3 e-type = 2, 3 の場合

この次に群数、最小値、最大値を次の様な書式で与えます。

```
e-type = 2, 3
  ne = number of group
  emin = minimum value
  emax = maximum value
```

6.6.4 e-type = 4 の場合

この次にメッシュ幅、最小値、最大値を次の様な書式で与えます。

```
e-type = 4
  edel = width of mesh
  emin = minimum value
  emax = maximum value
```

6.6.5 e-type = 5 の場合

この次にメッシュ幅、最小値、最大値を次の様な書式で与えます。

```
e-type = 5
  edel = log( width of mesh )
  emin = minimum value
  emax = maximum value
```

この場合、メッシュ幅は対数上での幅、即ち $edel = \log(M_{i+1} / M_i)$ です。

6.7 他のタリーパラメータ

6.7.1 part パラメータ

タリーの中で粒子を指定する時は、

```
part = proton neutron pion+ 3112 208Pb
```

のように空白で区切って定義するか、

```
part = proton
part = neutron
part = pion+
part = 3112
part = 208Pb
```

のように、パラメータを繰り返すことも出来ます。粒子名の表式は表 4 を参照してください。kf コード番号での指定も可能です。

```
part = all
```

と定義すると、粒子すべての和を表わします。

複数の粒子をひとつのグループとしてタリーしたいときは、次のように () が使えます。() 中の粒子は、最大 6 個まで指定できます。ただし、kf コード番号を () で使用する場合は、最後の kf コード番号と) の間にスペースが必要です。スペースが無い場合は、**part** パラメータの指定が不正とのエラーメッセージが出力されます。

```
part = ( proton neutron ) all pion+ 3112 208Pb
```

この場合、**proton** と **neutron** を合わせたものが、最初のグループとして出力されます。2 番目は、全ての粒子の和です。全体として 5 種類の粒子についての出力になります。原子核は、**208Pb** のように質量数を指定すればその核、**Pb** のように質量数を指定しなければ、**Pb** の同位体全体を指定することになります。

粒子名の前に負符号をつけて指定すると、全体から指定された粒子の寄与を除いた結果が出力されます。kf コード番号での指定の場合は、() を使って、() の前に負符号をつけるように指定してください。複数の粒子の寄与を除いた結果をタリーしたい場合は () を使ってグループを作り、その () の前に負符号を付けてください。() 内で、負符号により指定粒子の寄与を除く指定はできません。**part** パラメータの指定が不正とのエラーメッセージが出力されます。

```
part = -proton -(proton alpha) -(2112) -(11 -11)
```

この場合、1 番目は **proton** の寄与を除いたもの、2 番目は **proton** と **neutron** の寄与を除いたもの、3 番目は中性子 (2112) を除いたもの、4 番目は電子 (11) と陽電子 (-11) の寄与を除いたものが出力されます。

6.7.2 axis パラメータ

出力データの x 軸を定義します。**axis** の種類は、タリーの種類とタリーのメッシュ型によりますが、

```
eng, reg, x, y, z, r, t, xy, yz, zx, rz,
cos, the, mass, charge, chart, dchain,
let, t-eng, eng-t, t-e1, e1-t, t-e2, e2-t, e12, e21
```

があります。

```
axis = eng
```

のように定義します。

ひとつのタリーで複数の **axis** が定義できます。

```
axis = eng x y
```

とするか、

```
axis = eng
axis = x
axis = y
```

のように表わすことも出来ます。ひとつの **axis** に対して、ひとつのファイルに結果が出力されます。従って、複数の **axis** を定義した場合は、次のファイルパラメータで同数のファイル名を定義する必要があります。なお、**[t-yield]** では、1つのタリーに1つの **axis** しか指定できません。複数の **axis** に対して残留核収率を計算したい場合は、複数の **[t-yield]** タリーを作成してください。これは、統計誤差を正しく計算するためにバージョン 2.50 以降についた制限です。

6.7.3 samepage パラメータ

画像出力ファイルの同じページに表示するデータの種類を指定します。指定可能なパラメータは、**axis** で定義できるパラメータです。デフォルトは **part** で、その場合、**part** パラメータで指定した複数の粒子に対する結果が同じページに出力されます。**samepage** には、**axis** で指定したものとは別のパラメータを指定する必要があります。**samepage** で指定したデータのビン数が 20 を超える場合、**eps** ファイルには 1 から 20 ビン目までしか表示されないのご注意ください。**[t-yield]** タリーの他、幾つかのタリーでは使用できません。

6.7.4 file パラメータ

出力ファイル名を定義します。書式は、

```
file = file.001 file.002 file.003
```

のようにファイル名を書きます。もし、PHITS のインプットファイルがあるディレクトリとは別の場所に出力させたい場合は、相対パスか絶対パスの形で指定してください。ただし、“.eps”や“.vtk”の拡張子をもつ名前は指定しないようにしてください。**axis**を複数指定したときは、その数だけファイル名を指定します。このとき

```
file = file.001
file = file.002
file = file.003
```

のように一行にひとつずつ書くこともできます。

6.7.5 resfile パラメータ

再開始計算時に使用する乱数を把握するため、以前の計算で出力されたタリーファイル名を指定します。書式は

```
resfile = file.001
```

のようにファイル名を書きます。もし、インプットファイルがあるディレクトリとは別の場所にあるファイルを指定する場合は、相対パスか絶対パスの形で指定してください。複数の **file** を指定した場合でも、**resfile** は 1 つで十分です。2 つ以上指定した場合、先に書いたファイルが優先されます。**resfile** のデフォルトは、**file** です。その場合、過去タリーファイルから結果を読み込んで、新しい結果を加えて同じファイルに上書きします。

6.7.6 unit パラメータ

出力の単位を定義します。通常番号で次の様に定義します。

```
unit = number
```

番号とその単位の内容は、各タリーの説明で解説します。

6.7.7 factor パラメータ

出力の規格化定数を定義します。[t-gshow] タリーでは、境界線の太さを指定します。次の様に定義します。

出力の規格化定数を定義します。[t-gshow] タリーでは、境界線の太さを指定します。次の様に定義します。

```
factor = number
```

正の値だと、出力の物理量にこの定数が掛けられます。負の値 (例:-*c*) を指定すると、タリー中の最大値が *c* となる様に規格化されます。

6.7.8 output パラメータ

出力する情報の種類を定義します。次の様に定義します。

```
output = name of output
```

詳細は、各タリーの説明で行います。

6.7.9 info パラメータ

出力するタリー出力で、詳細情報を出力するかどうかのオプションです。通常、0 か 1 で定義します。

```
info = 0, 1
```

6.7.10 title パラメータ

タリー出力に表示されるタイトルを定義します。

```
title = title of the tally
```

省略可能です。省略された場合、デフォルト値が入ります。

6.7.11 ANGEL パラメータ

タリー出力で、ANGEL のパラメータを追加します。

```
angel = xmin(1.0) ymin(1.3e-8)
```

ここで定義したパラメーターは、タリー出力の中で

```
p: xmin(1.0) ymin(1.3e-8)
```

と記載され、横軸と縦軸の最小値をそれぞれ指定した値に変更します。

ANGEL については、A をご覧ください。

6.7.12 2d-type パラメータ

タリー出力で、`axis = xy` などの 2 次元表示を選択したときの、2 次元データの表示のオプションです。番号で指定します。ただし、`rshow` オプションがあるタリーでは、意味を持ちません。

`2d-type = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7`

- `2d-type = 1, 2, 3, 6, 7`

これは、データの並びが `FORTRAN` の書式で書くと

```
( ( data(ix,iy), ix = 1, nx ), iy = ny, 1, -1 )
```

で、1 行に 10 個のデータが入り、ANGEL 用のヘッダーが付きます。ヘッダーは、1 は、等高線、2 は、クラスタープロット、3 は、カラープロットです。6 は、クラスターと等高線です。7 は、カラープロットと等高線です。

- `2d-type = 4`

これは、データの並びが `FORTRAN` の書式で書くと

```
do iy = ny, 1, -1
do ix = 1, nx
  ( x(ix), y(iy), data(ix,iy) )
end do
end do
```

で、1 行に `x(ix), y(iy), data(ix,iy)` の 3 個のデータが入ります。

- `2d-type = 5`

これは、データの並びが `FORTRAN` の書式で書くと

```
y/x ( x(ix), ix = 1, nx )
do iy = ny, 1, -1
  ( y(iy), data(ix,iy), ix = 1, nx )
end do
```

で、1 行に `nx + 1` 個のデータが並び、全部で `ny + 1` 行です。Excel 等に取り込むデータとして便利です。

6.7.13 gshow パラメータ

[`t-gshow`], [`t-rshow`] 以外のタリーで用いることができます。タリーのメッシュが `xyz` メッシュ、`axis` が `xy`, `yz`, `xz` で、かつ `2d-type = 1,2,3,6,7` の ANGEL の出力を 想定したタリーで、これを指定すると、出力の画面

に領域の境界線、また物質番号、領域番号、LAT 番号が表示されます。

```
gshow = 0, 1, 2, 3, 4
```

0 で表示無し、1 は境界線の表示、2 は境界線と共に物質番号、3 は境界線と共に領域番号、4 は境界線と共に領域番号と LAT 番号、を表示します。物質番号、領域番号、LAT 番号を表示させるときに、**resol** を使って分解能を **resol** 倍にすると、番号の表示が乱れますので、番号を表示させるときは、**resol** でなくメッシュの個数を増やして分解能を上げてください。パラメータセクションで、**icntl = 8** とすることにより、実際の計算をすることなしに、タリーを設定した領域を事前に見ることができます。**icntl = 8** とすると、輸送計算はせずに、xyz メッシュ、xy, yz, zx, **axis** のタリーで **gshow = 1, 2, 3, 4** が指定してあるものの領域を指定のファイルに書き出します。その時、物質毎に色分けします。この機能を使い、大きい計算の前に、タリーの領域の確認、xyz メッシュの分解能の適否を確認することをお勧めします。

6.7.14 rshow パラメータ

[**t-cross**] と [**t-gshow**] 以外のタリーで用いることができます。タリーの **mesh** が **reg** 及び **tet** メッシュの場合に利用でき、領域毎及び四面体要素毎に求めた物理量の大きさに応じた色を幾何形状表示させた体系に付与します。**axis** は **xy**, **yz**, **zx** のどれかを指定する必要があり、更に **rshow** パラメータの下に **xyz** のメッシュパラメータが必要となります。**rshow** の値を変えることで、境界線、物質番号、領域番号を表示させることができます。

```
rshow = 1, 2, 3
x-type = [2,4]
.....
.....
y-type = [2,4]
.....
.....
z-type = [2,4]
.....
.....
```

0 で表示無し、1 は境界線の表示、2 は境界線と共に物質番号、3 は境界線と共に領域番号、を表示します。0 の時は、xyz メッシュパラメータは、不必要なのでコメントアウトして下さい。物質番号、領域番号を表示させるときに、**resol** を使って分解能を **resol** 倍にすると、番号の表示が乱れますので、番号を表示させるときは、**resol** でなくメッシュの個数を増やして分解能を上げてください。ただし、**gslat** が未設定の状態では、同じ物質 (**rshow=2**) や同じセル (**rshow=3**) の間で境界線を描画せず、統合的に表示するので、正しい領域毎および四面体要素毎の値で表示されない恐れがあります。そこで、**gslat=1** を同時に指定することを推奨します。

reg 及び **tet** メッシュでこのオプションを付けると、領域ごとの出力はありません。従って、計算の後に図の体裁や最大値最小値の調整などは、元のデータがありませんからできません。このオプションを付ける時は、**axis=xy,yz,zx** で用いるわけですが、その他に **axis=reg** 或いは **tet** も加えて別ファイルに領域

の物理量のデータを保存することをお勧めします。そのデータと、**[t-rshow]** タリーを用いることにより、再度加工したデータを元に表示することが可能となります。

パラメータセクションで、**icntl = 10** とすることにより、実際の計算をすることなしに、タリーを設定した領域を事前に見ることができます。**icntl = 10** とすると、輸送計算はせずに、**reg** メッシュ、**xy**, **yz**, **zx**, **axis** のタリーで **rshow = 1, 2, 3** が指定してあるものの領域を 指定のファイルに書き出します。その時、物質毎に色分けします。この機能を使い、大きい計算の前に、タリーの領域の確認、**xyz** メッシュの分解能の適否を確認することをお勧めします。

6.7.15 x-txt, y-txt, z-txt パラメータ

ANGEL 表示の *x, y, z* 軸のテキストをデフォルトから変えたい時に用います。これらのテキストは、ANGEL パラメータでは、変えられません。

```
x-txt = テキスト
y-txt = テキスト
z-txt = テキスト
```

6.7.16 volmat パラメータ

volmat パラメータは、**xyz** メッシュでメッシュが領域境界を またいでいる時の体積補正をするものです。これが有効になるのは、**xyz** メッシュでかつ **material** の指定がある場合です。領域をまたいだメッシュの体積を、メッシュサイズから与えるのではなく、指定された **material** を含む体積をモンテカルロ的に計算します。その時のスキャンは、各軸に平行な 1 辺当たり **volmat** 数の軌跡で計算します。この数をあまり大きく取るとメッシュ数にもよりますが、計算時間が膨大になることがありますので注意して下さい。**volmat** を負の数で指定すると、強制的に全ての **xyz** メッシュをスキャンします。正の場合は、メッシュの 8 頂点が同じ物質ならスキャンしません。

6.7.17 epsout パラメータ

epsout = 1 を指定すると、出力ファイルを ANGEL で処理した **eps** ファイルを作成します。ファイル名は出力ファイルの拡張子を **eps** に変えたファイル名です。パラメータセクションで **itall = 1** を指定して、出力の **eps** ファイルを **ghostview** を用いて画面に表示し、**w** キーを押して **eps** ファイルの更新に伴う画面の書き換えを指定していれば、パッチ毎にタリーの結果の変化を自動的に画面上で確認できます。

6.7.18 カウンターパラメータ

[counter] セクションで定義したカウンターを用いて、タリーで集める物理量に制限を加えることができます。各カウンターごとに、最小値と最大値を **ctmin(i)**, **ctmax(i)** で定義します。**i** は、カウンター番号、1 から 3 です。デフォルト値は最小値が -9999、最大値が 9999 です。複数のカウンターを用いる時は、それらの条件の共通部分となります。

また、あるヒストリー中に発生する全粒子のカウンター値の最大値を使って制限を加えることも可能です。その場合は、**chmin(i)**, **chmax(i)** を使います。この機能を使えば、特定のイベントが発生した場合に線源発生まで遡ってタリーすることが可能となります。詳しくは “/phits/sample/misc/history_counter” フォル

ダをご参照ください。ただし、この最大カウンター制限機能は、バッチ分散モード (**istdev=1**) では動作しません。また、**[weight window]** などの分散低減法を使用した計算やイベントジェネレーターモードを使用しない計算の場合は、ヒストリーカウンターの機能が適切に動作しない可能性がありますのでご注意ください。

6.7.19 resol 分解能、width 線太さパラメータ

resol を使い、**gshow**、**rshow**、**3dshow** の表示の時、指定した **xyz** のメッシュを固定したまま、境界線を求める分解能を上げることができます。デフォルトは 1 で、**xyz** のメッシュの分解能と同じです。**resol = 2** とすると各辺 2 倍のメッシュになります。**xyz** メッシュのタリーで、境界線の精度だけ上げるのに便利です。また、**3dshow** の時も、荒い精度で表示を確認してから、**resol** を大きくして最終的なきれいな図を得ることができます。**resol** を大きくしてもメモリーは変化しません。ただし、物質番号、領域番号、LAT 番号を同時に表示させるときには、**resol** を使って分解能を **resol** 倍にすると、番号の表示が乱れますので、番号を表示させるときは、**resol** でなくメッシュの個数を増やして分解能を上げてください。

width は、**gshow**、**rshow**、**3dshow** の表示の時の線の太さを定義します。デフォルトは、0.5 です。

6.7.20 trcl 座標変換

r-z、**xyz** メッシュの座標を **trcl** により座標変換します。書式は以下のように 2 通りあります。

```
trcl = number
trcl = O1 O2 O3 B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 M
```

最初の書式は、**[transform]** セクションで定義した座標変換番号です。次の書式は、この定義の中で座標変換を定義します。**[transform]** と同じように 13 個の数字で定義します。一行に収まらない場合は、複数の行にわたって定義できます。その時は自動認識しますので、行末の継続行の記号 **¥** は必要ありません。ただし、継続行は先頭に 12 個以上の空白が必要です。

r-z、**xyz** メッシュの他に、**3dshow** のタリーで **box** を定義するときにも、**trcl** による座標変換が使えます。書式は **[t-3dshow]** のところで示します。

6.7.21 dump パラメータ

[t-cross]、**[t-time]**、**[t-product]** タリーで、様々な粒子の情報を **dump** データとして出力させることができます。その際、出力させる粒子情報と出力する順番を **dump** パラメータで指定します。**dump** するデータを書き込むファイルは、**file** 定義文で指定した名前に “**_dmp**” を付けたファイルです。なお、各タリーがファイルに **dump** データを出力させるタイミングが違うことにより、ヒストリーカウンタ機能によって **dump** で出力する粒子情報を制限することはできません。

dump データの情報は、まず、**dump =** でデータの個数を指定します。正で与えた時は、バイナリーファイル、負で与えた時は、アスキーファイルへの書き込みをします。次の行にひとつのレコードのデータの並びを指定します。その時の番号と物理量の関係は、以下の通りです。

ここで、**kf** は粒子を識別する **kf-code** (表 4 を参照してください)、**x, y, z** は座標 (cm)、**u, v, w** は運動量の単位ベクトル、**e** はエネルギー (MeV)、原子核の場合は核子当たりのエネルギー、**wt** は粒子ウエイト、**time** は時間 (nsec)、**c1, c2, c3** はカウンターの値、**sx, sy, sz** はスピンの方向ベクトルです。**name** は粒子の衝突回数、**nocas** はバッチの中の現在のイベント数、**nobch** は現在のバッチ数、**no** は現在のイベントでのカスケード ID

表 107: dump データの種類と番号 (1)

物理量	kf	x	y	z	u	v	w	e	wt	time	c1	c2	c3	sx	sy	sz
番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

表 108: dump データの種類と番号 (2)

物理量	name	nocas	nobch	no
番号	17	18	19	20

です。これらはバイナリーファイルの時は `real*8` のデータで、アスキーファイルの時は、`n(1p1d24.15)` のフォーマットで格納します。

例えば、9 つのデータを次の順番で書き出させたいとき、

`kf e wt x y z u v w`

このデータを書き込みたいときは、

`dump = 9`
`1 8 9 2 3 4 5 6 7`

と指定します。

`dump` パラメータを用いてダンプさせる時は、`axis`、`file` 数ともにひとつに制限されます。また、`unit` は 1 に固定されます。`dump` するデータを書き込むファイルは、`file` パラメータで指定した名前に“`_dmp`”を付けたファイルです。`file` パラメータで定義された `file` 名には、通常の結果が書き出されます。この結果からダンプされたデータの規格化定数を読み取ってください。メモリ分散型並列計算時には使用する並列 PE (Processor Element) 数 -1 個のファイルを作成します。データを `dump` するファイルの名前の最後に PE 番号をつけたファイルが作られ、各 PE は対応するファイルにのみデータの書き出しと読み込みを行います。

6.8 複数のタリー結果の統合機能

Sumtally 機能を使うことにより、複数のタリー結果を足し合わせることができます。足し合わせの方法は 2 種類あり、手動で並列計算を実行するために各タリー結果のヒストリー数を考慮して足し上げる方法と、各タリー結果に任意の重み付けをして加重平均を求める方法があります。前者は、並列計算が利用できず、限られた計算資源を有効に利用したい場合に役立ちます。後者は、例えば複数の線源による計算を行う際、それらの強度を任意に変えた場合の結果を、計算をやり直さずに求めることができます。

Sumtally 機能が動作する条件は次の 3 つです。

- [parameters] セクションにおいて **icntl=13** とする
- 足しあわせたいタリー結果の条件 (**mesh**, **axis**, **part** など) が一致していること
- 足しあわせたいタリー結果の条件が書かれたタリーセクションにおいて、**sumtally** サブセクションを設定する^{105 106}

Sumtally サブセクションが設定されていても、**icntl=13** となっていなければその内容は無視されます。(バージョン 2.88 以降では、全てのタリーで本機能を利用できます。) この機能の具体的な利用方法については、`\phits\utility\sumtally` フォルダにある資料やサンプルインプットをご参照ください。

Sumtally サブセクションは、“sumtally start”と“sumtally end”で挟んだ領域で設定します。本サブセクション内のユーザー定義定数 **ci** ($i = 1 \sim 99$) は無視されるのでご注意ください。

Sumtally サブセクションで使えるパラメータは表 109 の通りです。

表 109: sumtally サブセクションパラメータ

name	値	説明
isumtally =	1(省略時), 2	Sumtally 機能の計算方法 1: 手動並列計算用 2: 加重平均計算
nfile = (次行)	数 file name 数値	タリーファイル数 タリーファイル名、重み付けの値 isumtally=2 の場合は自動的に規格化されます
sfile =	file name	sumtally 機能で足しあわせた結果の出力ファイル名
sumfactor =	(省略可、D=1.0)	規格化定数

isumtally=1 の場合は手動で並列計算を実行することができます。例えば、**maxcas=100**, **maxbch=10** で計算した結果 **result-1.out** と **maxcas=100**, **maxbch=20** で計算した結果 **result-2.out** がある場合、次のように sumtally サブセクションを設定することで **maxcas=100**, **maxbch=30** の条件で計算した結果 **result-s.out** を得ることができます。

例 54: sumtally 機能を用いた例題 (**isumtally=1**) の場合)

```

1: sumtally start
2: isumtally = 1          $(D=1) sumtally option, 1:integration, 2:weighted sum
3: nfile = 2             $ number of tally files
4:   result-1.out  1.0

```

¹⁰⁵ バージョン 2.81 以前では、sumtally サブセクションが設定されたタリーセクションにおいて **file** パラメータが設定されていなくても動作しましたが、バージョン 2.82 以降ではこのパラメータがないとエラーになりますのでご注意ください。

¹⁰⁶ バージョン 2.85 以前では、1 つのインプットファイルにおいて 1 つの sumtally サブセクションしか設定できませんのでご注意ください。

```

5:      result-2.out  1.0
6:  sfile = result-s.out $ file name of output by sumtally option
7:  sumfactor = 1.0      $ (D=1.0) normalization factor
8:  sumtally end

```

ただし、乱数の重複を避けるために、**result-2.out** の計算を実行する際は **[parameters]** セクションにおいて **irskip=-1000** を設定してください。また、足し合わせるファイル名の右で設定する重み付けの値は、基本的に 1 としてください。**isumtally=1** の場合、重み付けの値を 1 より変更することで、各タリー結果を求めた際のソースウェイトの平均値を変えることになります (**[source]** セクションで **wgt** を変更した場合と同じ)。なお、**isumtally=1** で得られたタリー結果に対しては再開計算を実行することが可能です。この場合は **nfile** 以下で指定するタリーファイルの内、一番下のファイルにある乱数が用いられます。

isumtally=2 の場合、次の計算式により加重平均値 \bar{X} を求めます。

$$\bar{X} = F \sum_{j=1}^N \frac{r_j}{r} \bar{X}_j \quad (29)$$

ここで、 F が **sumfactor** で指定する規格化定数、 N が **nfile** で指定するタリーファイル数、 \bar{X}_j が j 番目のタリーファイルの結果、 r_j が j 番目のタリーファイルの重み付けの値です。 r は $r = \sum_{j=1}^N r_j$ で計算しており、重み付けの値 r_j を変えることで、各タリー結果の相対的な強度を任意に与えることができます。標準偏差 σ_X は、 j 番目のタリー結果の標準偏差を σ_{X_j} とし、

$$\sigma_X = F \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\frac{r_j}{r}\right)^2 \sigma_{X_j}^2} \quad (30)$$

により求めています。**isumtally=2** は、例えば、ある標的に対して左右から違う量の放射線を照射した結果を求めたい時に利用できます。左から照射した結果が **result-l.out**、右から照射した結果が **result-r.out** であった場合、2:3 の割合で照射した結果は次のような設定で計算することができます。

例 55: sumtally 機能を用いた例題 (**isumtally=2**) の場合)

```

1:  sumtally start
2:  isumtally = 2          $(D=1) sumtally option, 1:integration, 2:weighted sum
3:  nfile = 2              $ number of tally files
4:      result-l.out  2.0
5:      result-r.out  3.0
6:  sfile = result-s.out $ file name of output by sumtally option
7:  sumfactor = 5.0       $ (D=1.0) normalization factor
8:  sumtally end

```

この条件と同じシミュレーションはマルチソースの機能を利用することで実行可能です。しかし、照射割合を変えるなど、色々な条件の計算を調べたい場合は、**isumtally=2** を利用するのが便利です。なお、重み付けの値は、足し合わせるタリー結果の相対的な割合にしか影響しませんのでご注意ください。絶対値を変える場合は **sumfactor** の値を変更します。また、**isumtally=2** の場合は、乱数等の再開計算に必要な情報は出力されず、再開計算ができないようになっています。

6.9 複数のタリー結果の解析機能

前セクションの `sumtally` 機能は複数のタリー結果の単純な加重和を計算する機能ですが、より複雑な解析を行いたい場合は `anatally` 機能を使ってください。例えば、粒子線治療における生物学的線量を吸収線量の絶対値を考慮して計算したり、物質密度がもつ誤差が計算結果に与える影響を系統的不確かさとして評価することが可能です。

本機能は、通常の輸送計算により得られた複数のタリー結果を解析するものです。動作方法として次の2つがあります。

- 手動で通常の輸送計算を実行した後、その結果得られたタリーファイルを指定して `anatally` 機能を動作させる。(例 56 参照)
- “`autorun`” スクリプトを利用して、自動的に通常の輸送計算と `anatally` 機能の動作を通して実行する。(6.9.2 節参照)

後者の方法は、基本的に上の例にある系統的不確かさを評価する時に使用します。前者の方法でも評価できますが、入力値を多数変動させて不確かさを評価する場合は後者の方が便利です。

`Anatally` 機能自体は、`[parameters]` セクションにおいて `icntl=17` とすることで動作します。ただし、適切に動作させるためには次の条件を満たす必要があります。

- 解析の対象となる複数のタリーが `mesh`, `axis`, `part` やエネルギー、空間等の分割数（ビン数）について同じ条件で得られていること。
- 解析したいタリー結果のファイル名等をまとめた `[anatally]` セクションが設定されていること。
- 上のタリー結果を出力したタリーセクションにおいて、`anatally start` と `anatally end` のみの `anatally` サブセクションが設定されていること。

`[anatally]` セクションは、`icntl=17` の時のみ有効となります。その際、`anatally` サブセクションは `[anatally]` と `[t-track]` などのタリーセクションの2箇所に必要です。前者では解析したいファイル名等を記載し、後者では中身のない（`anatally start` と `anatally end` のみの）サブセクションを記載します。（なお、“`autorun`” スクリプトを利用する場合は、`icntl=16` とし、`[anatally]` は作成せず、解析したいファイル名など表 110 にあるパラメータはタリーセクション中の `anatally` サブセクションにまとめてください。）

`Anatally` サブセクションは、“`anatally start`” と “`anatally end`” で挟んだ領域で設定します。本サブセクション内のユーザー定義定数 `ci` ($i = 1 \sim 999$) は無視されるのでご注意ください。

Anatally サブセクションで利用できるパラメータは表 110 の通りです。なお、現在のバージョンでは、`icntl=16,17` の場合に、6.10 節にある `itall=3` の場合に指定できる `ix, iy, iz, ipart` 等のパラメータは利用できません。

表 110: anatally セクションパラメータ

name	値	説明
<code>ianataldchain =</code>	(省略可、D=0)	[t-dchain] のタリー結果を扱うときのオプション。 0: [t-dchain] のタリー結果を扱わない。 1: [t-dchain] のタリー結果を扱う。[t-dchain] セクションで <code>file</code> パラメータで指定したファイルを指定することにより、DCHAIN 用の出力ファイル(.dout, .dtrk, .tyld) の処理が自動的に行われます。ただし、このオプションを使用する場合は、 <code>anatally start</code> の次の行に書いてください。
<code>manatally =</code>	0, 1(省略時)	anatally 機能の計算方法 0: ユーザー定義 anatally(“usranatal.f”) に書かれたプログラムに従う (6.9.1 節参照) 1: 分散分析モード (6.9.2 節参照)
<code>nfile =</code> (次行)	数 file name	タリーファイル数 タリーファイル名
<code>sfile =</code>	file name	anatally 機能で解析した結果の出力ファイル名

例 56: anatally 機能を用いた例題 (manatally=0) の場合)

```

1: [t-track]
    .....
    .....
2: anatally start
3: anatally end
    .....
    .....

4: [anatally]
5: anatally start      1
6: manatally = 0      $(D=1) anatally option, 0:user-defined anatally, 1:anova
7: nfile = 2          $ number of tally files
8:   result-1.out
9:   result-2.out
10: sfile = result-a.out $ file name of output by anatally option
11: anatally end      1

```

この例では、通常の輸送計算 (`icntl=0` の計算) で得られた [t-track] のタリーファイル `result-1.out` と `result-2.out` を使用し、ユーザー定義タリーによって計算した結果を `result-a.out` に出力します。[anatally] セクション中の `anatally start` と `anatally end` の後にある数字は anatally サブセクションの ID 番号です。解析したいタリーファイルのパラメータ (`mesh`, `axis`, `part` など) が書かれたタリーセクションが、そのインプットファイルにおいて、何番目のタリーセクションなのかを ID 番号として書いてください。上の例で、もし [t-track] より上に 1 つ別のタリーセクションが書かれていた場合は、[anatally] セクションにおいて、`anatally start` と `anatally end` の後には 2 と記載してください。

6.9.1 ユーザー定義 `anatally` 機能

ユーザー定義 `anatally` (“`usranatal.f`”) に書かれたプログラムに従って計算した値を出力します。既定プログラムとして、ユーザー定義定数に従って各タリー値を重み付けして加算するモードと、確率論的マイクロドジメトリ (SMK) モデル¹⁰⁷に従って BNCT における光子等効果線量を計算するモードが組み込まれています。その具体的な使用法は、“`/phits/utility/usranatal`” をご参照ください。また、PHITS の再コンパイルが必要となりますが、同フォルダには、粒子線治療における生物学的線量を SMK モデルに従って計算するサンプルプログラムも含まれていますので、そちらもご活用下さい。

6.9.2 分散分析機能

スクリプトを利用して、計算条件を変えながら実行した輸送計算の結果を分析することができます。例えば、物質の密度に誤差が含まれる場合、その誤差の範囲で密度を変化させながら輸送計算を実行することで、密度の誤差が計算結果に与える影響を調べることが可能です。PHITS では、専用の分析機能スクリプト “`autorun.bat`” (Windows) や “`autorun.sh`” (Mac, Linux) を利用することで、計算条件の変化がタリー結果に与える影響を自動的に分析することができます。

(注) ただし、現在のバージョンでは次の制限があります。利用可能なのは `[t-track]` と `[t-deposit]` (`output=dose`) のみです。変えられる計算条件は 1 つだけです。また、`anatally` サブセクションを指定しますが、6.10 節にある `itall=3` の場合に指定できる `ix, iy, iz, ipart` 等のパラメータは利用できません。

分散分析機能は以下のような流れで利用します。

- (1) PHITS の輸送計算の入力情報をまとめたインプットファイル（ここでは “`phits.inp`” とする）を用意する。
- (2) 分析機能スクリプト用のインプットファイル（ここでは “`autorun.inp`” とする）を用意する。
- (3) `autorun.inp` を入力ファイルとして “`/phits/bin`” フォルダにあるスクリプト `autorun.bat` or `autorun.sh` を実行する。

各インプットファイルの内容とスクリプトの動作の詳細は次節以降でご説明します。

6.9.2.1 輸送計算のインプットファイル (`phits.inp`)

輸送計算の情報をまとめた `phits.inp` (ファイル名変更可能) では、変化させたい数値をユーザー定義定数 `ci` ($i = 1, \dots, 999$) により指定してください。また、`[parameters]` セクションにおいて `icntl=16` としてください。そして、分析機能を利用したいタリーセクションに、次のような `anatally` サブセクションを設定してください。

例 57: 分散分析機能を利用する場合のタリーセクションにおける `anatally` サブセクション

```
1: anatally start
2: manatally = 1
3: sfile = track_a.out
4: anatally end
```

`Anatally` サブセクションは、`anatally start` と `anatally end` で挟んだ領域で設定します。`manatally` は分析内容を決めるオプションです。`manatally=1` の場合、計算条件 `ci` の変化がタリー結果に与える影響を分散分析 (ANOVA; analysis of variance) に基づき系統的な不確かさとして評価します。`sfile` は分析結果を出力するファイル名です。

¹⁰⁷ T. Sato and Y. Furusawa, Radiat. Res. 178, 341-356 (2012);
T. Inaniwa and N. Kanematsu, Phys. Med. Biol. 63, 095011 (2018);
T. Sato et al., Sci Rep. 8, 988 (2018)

6.9.2.2 分析機能スクリプト用インプットファイル (autorun.inp)

専用のスクリプト (autorun.bat, autorun.sh) を実行する際に使用するインプットファイル autorun.inp (ファイル名変更可能) は次の形式で作成してください。

例 58: 分析機能を利用する場合のスクリプト用インプットファイル

```
1: file=phits.inp
2: set:c1
3: c-type=2
4: cmin=10
5: cmax=100
6: nc=10
```

file=の後に、輸送計算の情報をまとめた PHITS のインプットファイル名を書いてください。**set:**の後はそのインプットファイル内で変化させたい計算条件 **ci** ($i = 1, \dots, 99$) の情報を記載してください。**set:c1** の次の行から、**e-type** 等のタリーのメッシュタイプと同じ形式で **ci** のデータを指定します。**c-type=1, 2, 3** が指定できます。上の例では、**c1=10** より **100** までを **10** きざみで変化させ、各条件の輸送計算を実行します。

6.9.2.3 スクリプトの動作

スクリプト autorun.bat, autorun.sh は次の流れで各計算を実行します。

- (1) autorun.inp から **ci** に関する情報を読み取り、“nc.info.inp”に書き出す。
- (2) **icntl=16** の条件で PHITS を実行し、phits.inp と nc.info.inp の内容に基づき、輸送計算実行用の一時ファイル “phits_tmp.inp” と分析用ファイル “anattally.inp” および計算条件ファイル “varfile-j.inp” ($j = 1, \dots, nc$) を作成する。
- (3) 計算条件を変えて求めた輸送計算の結果をまとめる “outfiles” フォルダを作成する。
- (4) phits_tmp.inp と varfile-j.inp をインプットファイルとして、合計 **nc** 回 PHITS を実行する。その際、 j 番目 ($j = 1, \dots, nc$) の PHITS のタリー結果は、outfiles フォルダ中に “/j/” フォルダを作成し、各々移動する。
- (5) anattally.inp をインプットファイルとして、**icntl=17** の条件で PHITS を実行する。その分析結果を **sfile** で指定したファイルに書き出す。

6.9.2.4 出力形式

sfile で指定したファイルには、通常のタリー結果の平均値と統計誤差に加え、系統的不確かさ u_{syst} と全不確かさ u_{tot} が出力されます。これらは次の関係を満たします。

$$u_{\text{tot}}^2 = u_{\text{syst}}^2 + u_{\text{stat}}^2 / N \quad (31)$$

ここで、 N は標本数であり、統計誤差は右辺第 2 項の平方根により計算されます。詳細は文献¹⁰⁸を参照してください。

出力は、例えば **axis=x, part=all** の場合は次のようになります。

¹⁰⁸ S. Hashimoto and T.Sato, Estimation method of systematic uncertainties in Monte Carlo particle transport simulation based on analysis of variance, J. Nucl. Sci. Technol. 56, 345-354 (2019).

h: n	x	y(all),hh01	n
#	x-lower	x-upper	all	r.err
2.0000E-01	4.0000E-01	7.9333E-03	1.3865	1.1539 0.7686
4.0000E-01	6.0000E-01	1.1495E-02	1.3951	1.2479 0.6237
.....				

all の列にタリー結果の平均値を出力し、その右側に全不確かさ、系統的な不確かさ、統計誤差の順に相対値で出力します。なお、統計量が少ない場合は系統的な不確かさの推定値が負となり、その場合は **0** と出力します。

[t-dchain] の結果に本機能を使用した場合は、**sfile** で指定したファイルに全不確かさのみ出力します。通常統計誤差が出力されている箇所に全不確かさが出力されるので、そのファイルを使用して **DCHAIN** を実行することで、系統的な不確かさを含む全誤差の伝播を評価することができます。

6.10 拡張された統計指標出力機能

統計誤差（標準偏差）は、計算によって得られたタリーの平均値の信頼性を判断する重要な統計指標です。しかし、計算を始めたばかりで統計量が少ない時や **[weight window]** などの統計的な偏りが発生しやすいオプションを使用した場合は、平均値や統計誤差が大きく変化する時があるため、得られた平均値が信頼できるかを確認する指標として統計誤差だけでは不十分な場合があります。そこで、様々な統計指標を出力させてその内容を確認することで、信頼性の高い結果が得られているかどうかを確認するのが本機能の目的です。

タリー結果として通常出力される平均値と統計誤差の全ヒストリー数（バッチ数）の増加に対する各値の推移を出力する他、統計誤差のばらつきの程度を表す分散の分散 (VOV: variance of variance) や計算時間に対する統計誤差の減少の度合いを表す性能指数 (FOM: figure of merit) の全ヒストリー数に対する推移を出力させます。また、これらの値が統計的に信頼できるかどうかを一覧表で示す **statistical check sheet** と得られるタリー結果の頻度をまとめた確率密度分布 (PDF: probability density function) を出力させることができます。

ただし、現在のバージョンでは、**[t-track]** (**mesh=tet** を除く) と **[t-point]** のタリーのみ使用可能です。また、再開計算には対応していません。（通常出力される平均値と統計誤差は再開計算によって統計量を加算できますが、VOV, FOM, PDF と各統計量の全ヒストリー数に対する推移の結果は再開計算時にリセットされます。）

6.10.1 使用方法

本機能を使用する際は、次のパラメータ設定を行ってください。

- **[parameters]** セクションにおいて **itall=3** を設定する。
- 本機能を使用したいタリーセクションにおいて **anatally** サブセクションを設定する。
- 本機能を使用したいタリーセクションにおいて **iextstat** を設定する。（**anatally** サブセクション内のパラメータではないのでご注意ください。）
- (**iextstat=2** の場合) 本機能を使用したいタリーセクションにおいて **prodenmn**, **prodenmx**, **nbproden** を設定する。（これらも **anatally** サブセクション内のパラメータではないのでご注意ください。）

これらの設定を行った上で、**iextstat** を 0（初期値）, 1, 2 と変えることにより、出力させる統計指標の内容を変更することができます。

- A) (**iextstat=0** の場合) 平均値と統計誤差の全ヒストリー数に対する推移を出力する。
- B) (**iextstat=1** の場合) 平均値と統計誤差に加えて **VOV** と **FOM** の全ヒストリー数に対する推移を出力させ、**statistical check sheet** を出力する。
- C) (**iextstat=2** の場合) B) の内容に加えて、**PDF** を出力する。この場合は、タリー結果の範囲を確認するテスト計算を実行し、出力範囲を設定して本計算を実行してください。詳細は 6.10.2 節の C) をご覧ください。

本機能が動作すると、タリーセクションで指定したファイル名の拡張子の前に **.Std** を付けたファイルを作成し、各バッチ終了時に A), B), C) の内容に応じたそれぞれの統計指標をそのファイルに出力します。1 つのタリー結果（平均値）あたり、A), B), C) のそれぞれの場合に計 2, 5, 6 ページの **eps** ファイルが出力されるため、ファイル容量が莫大になる可能性があります。空間メッシュやエネルギーメッシュのビン数が多い場合は、下に示す **anatally** サブセクション内のパラメータ設定により、出力させる空間やエネルギーの

ビンを制限してください。また、A, B, C と出力内容を増やすにしたがって、使用するメモリ容量等の計算機に対する負荷が大きくなるのでご注意ください。

例 59: Anatally サブセクションにより、出力させるメッシュを指定する場合。

```
1: anatally start
2: ix = 89 91
3: iz = 61 81 101
4: iy = 1
5: ipart = 1
6: anatally end
```

Anatally サブセクションは、**anatally start** と **anatally end** で挟んだ領域で設定します。もし、これらの 2 行のみでメッシュのビンの指定が無い場合は、全てのビンの結果を出力します。(本統計指標出力機能を使用する場合は、ビンの指定が無い場合でも、2 行のみの **anatally** サブセクションを設定してください。) **ix, iz, iy** はそれぞれ **x-type**, **z-type**, **y-type** で定義した各変数のメッシュのビンを指定するためのパラメータであり、この例の場合、x について 89 と 91 番目のビンを指定しています。指定範囲は各メッシュの全ての組み合わせとなっており、上の例では x について 2 点と z について 3 点指定していることから、合計 $2 \times 3 = 6$ 個のタリー結果について統計指標を出力させます。**ipart=1** は **part=** で定義した粒子の内、最初の粒子のみ出力させることを意味しており、例えば **part = proton neutron** としていた場合、**proton** に関するタリー結果のみを出力させることになります。

メッシュを指定する変数には、次の 10 種類があります。**ireg**: 領域 (セル)、**ix, iy, iz, ir, ie, it, ia**: **x-, y-, z-, r-, e-, t-, a-type** サブセクション、**ipart**: **part** パラメータ、**imul**: **multiplier** パラメータ。省略した変数については、全てのメッシュ点を出力させます。明示的に **all** を指定することもできます。ただし、**{ n1 - n2 }** や **()** の入力方法は使用できません。

なお、6.9 節で、複数のタリー結果の解析機能を使用する際にも **anatally** サブセクションを設定しますが、ここで説明している **itall=3** の場合とは使用できるパラメータや考え方が違うのでご注意ください。

例 60: 拡張された統計指標出力機能を用いた例題。

```
1: [parameters]
2: icntl=0
3: maxcas = 1000
4: maxbch = 100
5: itall =3
   .....
   .....
6: [t-track]
7: mesh = xyz
   .....
   .....
8: file = track.out
9: epsout = 2
10: iextstat = 2
11: prodenmn = 1E-5
12: prodenmx = 1E-2
13: nbproden = 50
14: anatally start
15:   ix = 10
16:   iy = 10
17:   iz = 50 100
18:   ipart = 1
19: anatally end
```

[parameters] において **itall=3** が設定されていることによって、**anatally** サブセクションが設定されている [t-track] のタリー結果について、拡張された統計指標が出力されます。上の例では、“track.StD.out” ファ

イルが作成され、“track.StD.eps” ファイルに図示した結果が出力されます。anataly サブセクションにおいて設定された条件により、x と y について 10 番目のビン、z について 50 と 100 番目のビン、part について 1 番目の粒子の結果が出力されます。iextstat=2 となっているため 1 つのビンの組み合わせに対して 6 ページ分の出力がありますが、1 から 6 ページに iz=50 に対する結果が出力され、7 から 12 ページに iz=100 に対する結果が出力されます。また、iextstat=2 の場合に出力されるタリー結果の確率密度分布 (PDF: probability density function) について、出力範囲の下限、上限、分割数をそれぞれ prodenmn, prodenmx, nbproden で設定しており、上の例では 10^{-5} から 10^{-2} の範囲を 50 分割して PDF を出力します。

6.10.2 各統計指標の計算方法と出力例

前節で示したように、本機能では出力する内容を A), B), C) の 3 つに切り替えることができます。本節ではそれぞれの統計指標の計算方法と出力例や出力結果の分析方法についてまとめます。

A) 平均値と統計誤差の全ヒストリー数に対する推移の出力

この場合は平均値と統計誤差を出力します。ある i 番目のヒストリーを計算した際のタリー結果を x_i とすると、合計 N 回のヒストリー数によるタリー結果の平均値 \bar{x} は、

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (32)$$

となります。ここで、 \sum は $i=1$ から N までの和を取ることを意味します。なお、ここでは簡単化のためウエイト値は常に 1 としました。統計誤差として、

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - N\bar{x}^2}{N-1}} \quad (33)$$

により計算されるサンプル平均の標準誤差 (standard error of the mean) σ を計算しており、平均値 \bar{x} との比 $R = \sigma/\bar{x}$ を統計誤差として出力します。統計的な偏りがない計算であれば、平均値はヒストリー数が増加するにしたがって一定値に収束し、統計誤差は全ヒストリー数 N に対して $1/\sqrt{N}$ で減少します。

A) の場合、出力する eps ファイルの 1 と 2 ページ目に、それぞれ平均値（統計誤差を誤差棒で表示）と統計誤差の結果を出力します。横軸を全バッチ数としており、各バッチ終了時にそれまでの全バッチ数に対する結果を示します。図 58 に、1 m 厚さのコンクリートの遮蔽体に対して 10 MeV 中性子ビームを照射し、照射面と反対側の面における中性子流量をタリーした結果について、本機能を用いて出力した例を示します。maxcas= 10^4 としており、maxcas の分だけバッチ毎に全ヒストリー数が増加して平均値と統計誤差が推移する状況を確認できます。左パネルの平均値の結果から、40 バッチまでは平均値が大きく変化しているものの、それ以降は徐々に一定値に近づいていることがわかります。次に右パネルの結果から、40 バッチ以降は統計誤差が減少傾向を示しており、ヒストリー数の平方根の逆数に比例して減少していることが確認できます。

B) Statistical check sheet と平均値、統計誤差、分散の分散 (VOV: variance of variance)、性能指数 (FOM: figure of merit) の全ヒストリー数に対する推移の出力

この場合は、A) の内容に VOV と FOM を追加して出力すると共に、これらの統計指標の信頼性をチェックする statistical check sheet を出力します。

VOV は統計誤差のばらつきの程度を表す統計指標であり、各タリー結果 x_i の平均値 \bar{x} からのずれ、 $(x_i - \bar{x})$ 、の 4 乗の和と 2 乗の和の 2 乗の比を計算して求めます。

$$\text{VOV} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{\{\sum (x_i - \bar{x})^2\}^2} - \frac{1}{N} \quad (34)$$

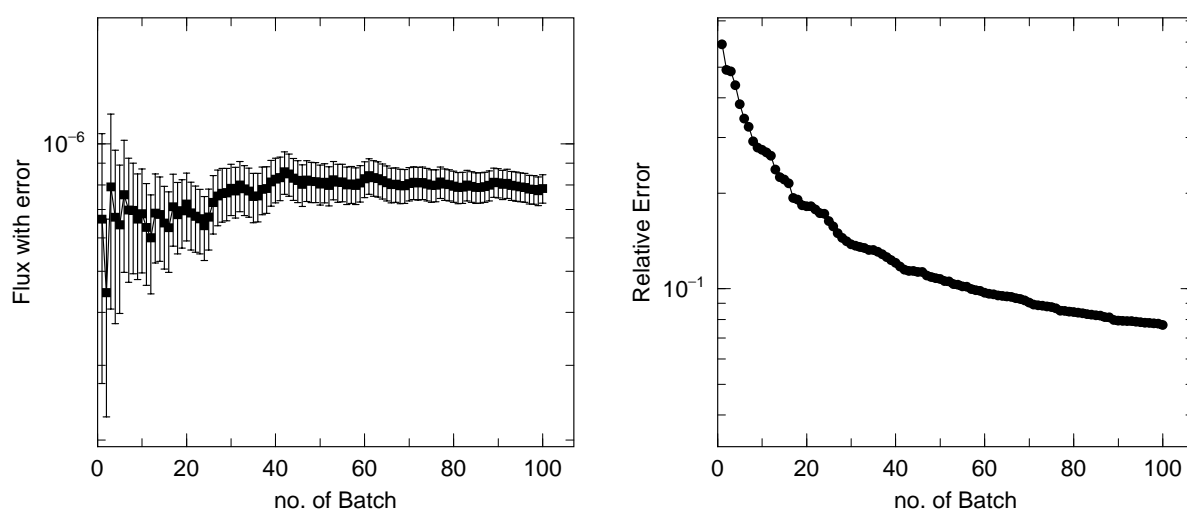


図 58: 平均値と統計誤差の全ヒストリー数（全バッチ数）に対する推移。

ただし、この式において平均値 \bar{x} を式 (32) により書き換えると、

$$\text{VOV} = \frac{\sum x_i^4 - \frac{4}{N} \sum x_i \sum x_i^3 + \frac{8}{N^2} (\sum x_i)^2 \sum x_i^2 - \frac{4}{N^3} (\sum x_i)^4 - \frac{1}{N} (\sum x_i^2)^2}{\left\{ \sum x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum x_i)^2 \right\}^2} \quad (35)$$

となるため、具体的にはこの式 (35) の表現に基づいて計算しています。式 (34) の右辺第一項を見ると、分子が N 個の和であり、分母が N 個の和の 2 乗であることから、右辺第二項と同様に $1/N$ の依存性をもつことがわかります。このため、統計量が十分な場合、VOV は $1/N$ で減少します。

FOM は計算時間に対する統計誤差の減少の度合いを表す統計指標であり、標準誤差 σ と平均値 \bar{x} の比 R 及び計算時間 T [min] を用いて、

$$\text{FOM} = \frac{1}{R^2 T} \quad (36)$$

により計算します。 R は N の平方根に反比例するので、安定した数値計算が行われて T と試行回数 N が比例関係を示す場合は、FOM の値は一定となります。逆に、FOM があるヒストリーの前後で大きく変化した場合は、 T と N の比例関係がなくなっており、そのヒストリーで非常に長い計算時間が必要であった等の異常を確認することができます。

B) の場合、1 ページ目に statistical check sheet を出力し、2, 3, 4, 5 ページ目にそれぞれ平均値、統計誤差、VOV、FOM の全ヒストリー数に対する推移を出力します。図 59 に、図 58 と同じ計算を行った場合の statistical check sheet を示します。Quantity の列に統計指標の種類、output の列に出力する値の種類を示しています。Value の列に、そのバッチ終了時の値 (current value) と全ヒストリー数に対する依存性の評価値 (history dep.) を出力しています。Desired の列に各値が統計的に信頼できると判断できる基準値を示しており、pass の列でその基準を満たしているかどうかを判定した結果を示しています。(全ヒストリー数に対する依存性の評価方法や基準を満たす条件については次節で説明します。) 図 59 の結果では、統計誤差の大きさについての基準 (< 0.05) 以外は満たしており、安定した計算が実行されていることがわかります。ただ、統計誤差は一番重要な指標なので、その基準を満たす程度には統計量を増やすことが望ましいです。図 60 に、VOV と FOM の全ヒストリー数に対する推移を示しています。左パネルから、VOV が 40 バッチ以降で減少傾向を示しており、 $1/N$ で減少していることがわかります。一方、右パネルの結果から、FOM が 40 バッチ以降で一定値に収束している様子を確認できます。

Statistical check sheet at batch 100

no. = 1, reg = 11

Quantity	Output	Value	Desired	Pass
Mean	Current value	7.8418E-07	Constant	yes
Mean	History dep. (rel. slope)	-0.0162	= 0.00	
Relative error	Current value	0.0769	< 0.05	no
Relative error	History dep. (p in N ^p)	-0.5053	= -0.50	yes
Variance of the variance	Current value	0.0133	< 0.10	yes
Variance of the variance	History dep. (p in N ^p)	-1.0189	= -1.00	yes
Figure of Merit	Current value	3.8531E+01	Constant	yes
Figure of Merit	History dep. (rel. slope)	-0.0158	= 0.00	

図 59: 100 バッチ終了時の statistical check sheet。

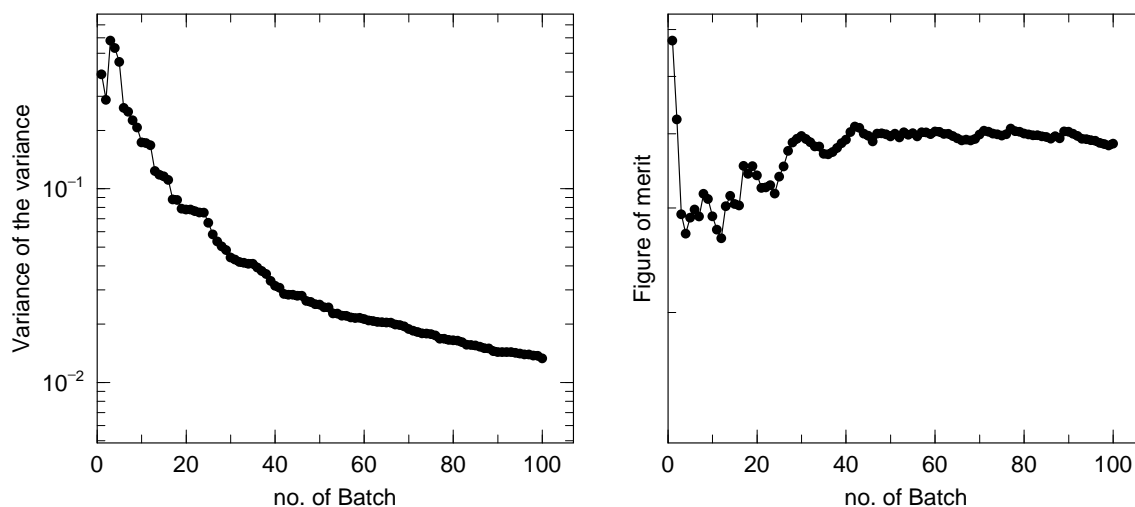


図 60: 分散の分散 (VOV) と性能指数 (FOM) のヒストリー数（バッチ数）に対する推移。

C) Statistical check sheet と平均値、統計誤差、VOV、FOM の全ヒストリー数に対する推移の出力、及びタリー結果の確率密度分布 (PDF: probability density function)

この場合は、B) の内容に加えて、計算によって得られたタリー結果の頻度分布を表す PDF を出力します。ただし、PDF を出力する範囲を調べるためのテスト計算モードとその範囲を明示的に指定して PDF を求める本計算モードがあるのでご注意ください。基本的に、まずはテスト計算モードで範囲を調べて、その後、出力範囲の下限 (prodenmn (D=1e-2)) と上限 (prodenmx (D=1e+2)) 及び分割数 (nbproden (D=100)) を指定して本計算を実施してください。

PDF の計算については、出力するタリー結果の範囲 $[x_{\min}, x_{\max}]$ と対数スケールで分割する数 n_{pdf} を決めておき、各ヒストリーのタリー結果 x_i が得られた時に、どのビン番号に入るかを調べ、そのビンのカウント数を増やしていきます。そして、最終的にその分布が積分して 1 となるように規格化したものを出力します。ここで、タリー結果が 0 の場合はカウントしないので、分布のピーク位置と平均値 \bar{x} がずれる場合があります。

テスト計算モードは、PDF の出力に関するパラメータ **prodenmn**, **prodenmx**, **nbproden** が一つも指定されていない時に動作します。テスト計算モードでは、初期値として $x_{\min} = 10^{-2}$, $x_{\max} = 10^2$, $n_{\text{pdf}} = 100$ として計算を始め、範囲 $[x_{\min}, x_{\max}]$ から外れたタリー結果が得られた場合、その大小関係によって範囲の上限や下限を変更することで、そのタリーが取り得る範囲を自動的に調べます。例えば、 10^3 のタリー結果が得られた場合は、それを 10 倍した値を上限値とし、 $x_{\max} = 10^4$ と変更します。一方、小さいタリー結果が得られた場合は、その値の $1/10$ を x_{\min} とします。このようにして、最終的に出力された PDF の分布を見ることで、そのタリー結果が取り得る範囲が確認できます。ただし、タリー結果が初期値 $x_{\min} = 10^{-2}$, $x_{\max} = 10^2$ から数 10 桁も違う値を取る場合は、出力される PDF の横軸の範囲がその桁数だけ広がってしまうのでご注意ください。その場合は、次に示す本計算モードで出力範囲を指定しながら、手動で調整してください。なお、テスト計算モードでは、調整によって範囲が変わる度に記憶した PDF のデータをリセットするため、他の統計指標と違うヒストリー数に対する結果が出力されます。また、MPI や OpenMP による並列計算は使用できません。

次に、**prodenmn**, **prodenmx**, **nbproden** のどれか一つでも指定されていると本計算モードが動作します。明示的に指定していないパラメータはそれぞれのデフォルト値が設定されます。本計算モードでは、記憶するタリー結果の範囲が途中で変わることはなく、タリー結果 x_i の PDF を出力します。ただし、設定された範囲の上限より大きな値がタリー結果として得られた場合は、ワーニングメッセージを出力します。5 回程度（並列計算を使用しない場合）でメッセージ出力を止めますが、このメッセージが出たら、一旦計算を止め、上限 (**prodenmx**) を増やしてから再度本計算モードを実行してください。なお、本計算モードでは MPI や OpenMP による並列計算が使用可能です。

C) の場合、1 から 5 ページ目までは B) の内容と同じです。更に 6 ページ目にそのバッチ終了時の PDF を出力します。図 61 に、図 58 と同じ計算を行った場合の PDF を示します。正規分布と判断できる程十分な統計量ではありませんが、 10^{-3} 辺りにピークをもつ分布であり、およそ 10^{-4} から 10^{-2} の範囲内の値をタリー結果として得ていることがわかります。また、図 59 からこのタリー結果の平均値は約 10^{-6} であり、ピークのある 10^{-3} とは 3 桁程違っていることから、0 で無いタリー結果を得られる割合が $1/1000$ 程度であることがわかります。

PDF はタリー結果の具体的な数値を直接的に確認することが可能な指標であり、例えば、分布から（特に大きな値の方に）外れた領域に値を持っているといった異常を発見しやすくなります。ただし、きれいな分布構造を確認するためには、他の統計指標と比べて多くのヒストリー数が必要となるのでご注意ください。この観点から、PDF は statistical check sheet の項目には入れておりません。

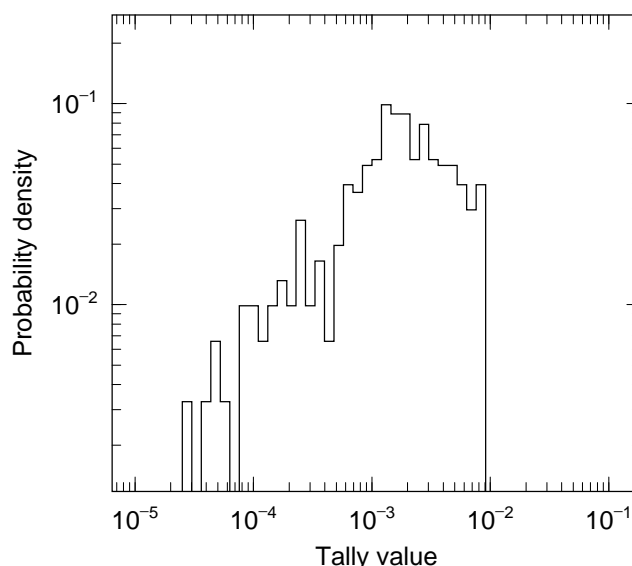


図 61: タリー結果の確率密度分布 (PDF)。

6.10.3 Statistical check sheet

この check sheet では、平均値、統計誤差、分散の分散 (VOV: variance of variance)、性能指数 (FOM: figure of merit) に関するバッチ終了時の値 (current value) と全ヒストリー数に対する依存性 (history dep.) を出力し、統計的に信頼できる基準値と比較することで、合計 6 個のチェック項目について pass したかどうかを判定します。

ヒストリー数に対する依存性は全ヒストリーの後半の結果から評価しており、例えば 100 バッチが終了した時は 51 から 100 バッチの時の値を使って評価します。平均値と FOM はヒストリー数依存性がない、すなわち一定値に収束することから、 $f(N_{\text{batch}}) = aN_{\text{batch}} + b$ の関数（ここで、 N_{batch} は全バッチ数）を仮定して最小二乗法でフィッティングを行い、その係数 a が 0 に近いかどうかで判定します。具体的には、この係数を最終バッチ時の値で規格化した値の絶対値が 0.05 未満であれば yes とし、以上であれば no と判定します。統計誤差については、ヒストリー数の平方根の逆数に比例することから、 $f(N_{\text{batch}}) = b \exp(aN_{\text{batch}})$ の関数を仮定して最小二乗法でフィッティングを行い、係数 a が -0.5 に近いかどうかで判定します。具体的には、-0.475 から -0.525 の範囲にあれば yes とします。VOV については、ヒストリー数に対して反比例となることから、統計誤差と同様の関数系を仮定して最小二乗法を行い、係数 a が -1.0 に近いかどうかで判定します。具体的には、-0.95 から -1.05 の範囲にあれば yes とします。

この check sheet で pass の判定に用いている基準値は絶対的なものではないことにご注意ください。計算条件や目的とする計算精度によって、計算結果の信頼性を判断する基準は変わります。6 個の全てが yes だからといって、常にその結果が信頼できるわけではありません。逆に、ある項目が no となっても、その統計指標のヒストリー数に対する推移を確認することで、問題ないと判断できる場合もあります。

7 各タリーセクションの書式

7.1 [T-Track] セクション

指定した任意の空間における粒子の **fluence** を出力します。このタリーでは、指定した空間を粒子が通過した際に、その空間における飛跡長 (**track length**) を計算しており (図 62 参照)、飛跡長の和を空間の体積で割ることによって、単位面積あたりの粒子の流量が得られるようになっています。

例えば、このタリーは指定した空間に置いた測定機器の応答の状況を調べるのに利用できます。各測定機器がもつ応答性能を ($[\text{cm}^2]$ の単位をもつ) 断面積の形で計算しておけば、その値を本タリーで求めた **fluence** と掛け合わせることで、シミュレートした状況においてその測定機器が何回応答するかを評価できます。

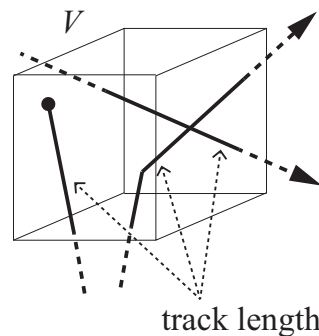


図 62: Track タリー: 空間内の飛跡 (実線) の長さを計算する。

表 111: [t-track] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz, tet	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、reg=において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechr1 =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
a-type =	1, 2, -1, -2 (省略可)	mesh=r-z とした場合の θ に関する角度メッシュ。 角度メッシュサブセクションが必要。

表 112: [t-track] パラメータ (2)

名前	値	説明
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	eng,reg,x,y,z,r, tet, rad,deg, xy,yz,xz,rz, t	出力データの x 軸。 出力データの x 軸 (mesh=tet でのみ有効)。 出力データの x 軸 (mesh=r-z で、 θ に関する自由度)。 2 次元表示。 時間軸。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	1,2,3,4 11,12,13,14	1: [1/cm ² /source] 2: [1/cm ² /MeV/source] 3: [1/cm ² /Lethargy/source] 4: [cm/source] 11:[1/cm ² /nsec/source] 12:[1/cm ² /nsec/MeV/source] 13:[1/cm ² /Lethargy/nsec/source] 14:[cm/nsec/source]
factor =	(省略可, D=1.0)	normalization factor

unit = 3, 13 の場合の **Lethargy** はエネルギーに関する自然対数目盛を表しています。各エネルギービンの上限と下限がそれぞれ $E_{\text{high}}, E_{\text{low}}$ のときに、各 **Lethargy** の幅を $\ln(E_{\text{high}}/E_{\text{low}})$ で与えます。

unit = 1, 2, 3, 11, 12, 13 を指定すると、**fluence**、すなわち入射粒子あたりの飛跡長の和をその空間の体積で割った値を出力します。ただし、**reg** メッシュを用いている場合は、その体積を [**Volume**] セクションで与える必要があります。これが与えられていないときは、体積が 1cm³ であるとして、入射粒子あたりの飛跡長の和をそのまま出力します。**r-z, xyz** メッシュの場合は体積が自動的に計算できますので、その値が用いられます。**unit=4,14** を指定すると、体積で割らずにそのまま飛跡長の和を出力します。

本タリーに関しては、**mesh=r-z** とした場合に、既存の r, z メッシュに加え、 θ メッシュを指定することができます。 θ に関するメッシュを指定する際は、**a-type** を用いてください。また、角度を横軸にして出力する場合は、**axis** として **rad** か **deg** を指定してください。**rad** は radian で、**deg** は degree の単位で出力します。

表 113: [t-track] パラメータ (3)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow , rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 114: [t-track] パラメータ (4)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all: デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、xyz メッシュ 1 辺のスキャン数。
multiplier =	物質数 (省略可)	multiplier を物質毎に指定します。 詳細は 5.24.1 Multiplier サブセクションをご覧ください。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
foamout =	0(省略時), 1, 2	1 でタリー出力結果 (数値データ) を OpenFOAM フィールドデータ形式で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を foam に変えたファイル名。 2 でタリー出力結果 (四面体要素番号、重心 x 座標、y 座標、z 座標、体積、数値データ、相対誤差) を CSV 形式 (コンマ区切り) で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を csv に変えたファイル名。 mesh=tet, axis=tet のときのみ有効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。

表 115: [t-track] パラメータ (5)

名前	値	説明
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。
iextstat =	0 (省略時),1,2	拡張された統計指標出力機能に関するオプション。 0: 平均値と統計誤差の全ヒストリー数に対する推移を出力する。 1: iextstat=0 の内容に加えて分散の分散 (VOV: variance of variance) と性能指数 (FOM: figure of merit) の全ヒストリー数に対する推移を出力させ、 statistical check sheet を出力する。 2: iextstat=1 の内容に加えて、タリー結果の確率密度分布 (PDF: probability density function) を出力する。この場合は、タリー結果の範囲を確認するテスト計算を実行し、出力範囲を設定して本計算を実行してください。
prodenmn = prodenmx = nbproden =	(省略可、D=1e-2) (省略可、D=1e+2) (省略可、D=100)	PDF の出力範囲の下限。 PDF の出力範囲の上限。 PDF の出力時の分割数 (対数スケール)。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができません。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

拡張された統計指標出力機能を使用する場合は、[parameters] において **itall=3** とし、対象とする [t-track] において **anatally** サブセクションを設定した上で、**iextstat** を指定してください。**Anatally** サブセクションは、**anatally start** と **anatally end** で挟んだ領域で設定します。**iextstat=2** で PDF を出力させる場合、対象とするタリー結果の取り得る範囲がわかっている場合は、**prodenmn**, **prodenmx**, **nbproden** パラメータによって PDF の出力範囲を指定し、本計算モードで PHITS を動かしてください。範囲がわからない場合は、これらの 3 つのパラメータを指定せず、テスト計算モードで PHITS を動かし、その範囲を確認してから本計算モードに進んでください。なお、**iextstat**, **prodenmn**, **prodenmx**, **nbproden** は **anatally** サブセクションの外側で指定するようにしてください。拡張された統計指標出力機能についての詳細は、6.10 節をご覧ください。

7.2 [T-Cross] セクション

指定した任意の面における粒子の **current**、または **flux** を出力します。粒子が面を通過する度にそのままカウントするものが **current** で、面の法線ベクトルに対して粒子が角度 θ で入射した場合に $1/\cos\theta$ の重みを付けてカウントするものが **flux** (ただし、単位時間あたりの量ではないので、正確には **fluence**) です。これらは共に面を通過する単位面積あたりの粒子の数を意味する物理量ですが、**current** が単に指定した面を通過する粒子の総量を評価するのに対し、**flux** は粒子の流れの方向に垂直な面を通過する量を評価します。したがって、単位面積あたりの値を求める際に必要となる面積が違ふこととなり (図 63 参照)、**flux** の場合は $1/\cos\theta$ の重みを付けてカウントすることになります。なお、図 63 の S は、**mesh=reg** を選択している場合は形状メッシュサブセクションにおいて **area** として与えます。**mesh=r-z, xyz** を選択している場合は自動的に計算された値が使用されるため必要ありません。

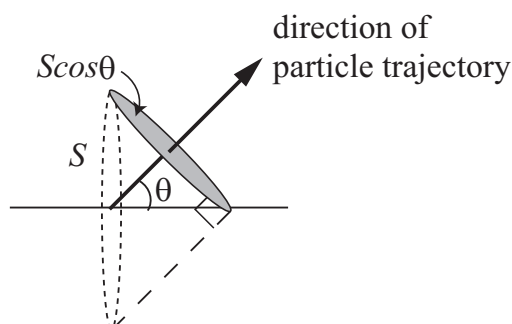


図 63: 指定した面の面積 S と粒子の運動の方向に対して有効な面素 $S \cos \theta$ の関係。

本タリーの **flux** は $1/\cos\theta$ の重みを考慮した量となるため、**[t-track]** で指定する領域の厚さを無限に薄くした場合と同等の結果が得られます。これにより例えば、指定した面に沿って設置した測定機器の応答の状況を調べるのに利用でき、前もって ($[\text{cm}^2]$ の単位をもつ) 断面積の形で計算しておいた各測定機器の応答性能と掛け合わせることで、その測定機器が応答する回数を見積もることができます。

表 116: **[t-cross]** パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型、メッシュ型サブセクションが必要。
enclos =	0(省略時), 1	mesh=r-z のときは z 軸に垂直な面と r 軸に垂直な面の 2 種類をタリー面として定義。 mesh=xyz のときは z 軸に垂直な面のみをタリー面として定義。 メッシュ型によって区切られた領域を取り囲む面をタリー面として定義。 1 つの領域を構成する全ての面を 1 つのタリー面として扱う。

r-z メッシュの時にメッシュの側面が円柱状のあるセルの側面と一致する場合や、**xyz** メッシュの時に座標変換によって存在するセルの境界面とタリー面が一致する場合は、計算結果がおかしくなる可能性がありますので注意してください。

バージョン 3.10 より、**mesh=xyz** または **r-z** とした場合に **enclos=1** とすることで、メッシュ型によって区切られた領域を取り囲む面をタリー面として設定する機能を追加しました。このとき、1 つの領域を構成する全ての面を、1 つのタリー面として扱います。例えば **mesh=xyz** の場合、**enclos=0** では z 軸に垂直な面のみをタリー面としますが、**enclos=1** では **xyz** メッシュで形作られる直方体の 6 面をタリー面とします。また、**forward** はタリー面に囲まれた領域に流入する方向、**backward** はタリー面に囲まれた領域から流出する方向を意味します。そして、単位面積あたりの量の計算では、その閉曲面の総面積を使用します。

表 117: [t-cross] パラメータ (2)

名前	値	説明
e-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
eng2let =	0(省略時) = 1	e-type で指定したエネルギーを LET に変換しない。 エネルギーを LET(keV/ μ m) に変換する。結果を LET の関数として出力するには、 eng2let=1 とした上で axis=let とする。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
a-type =	1, 2, -1, -2 (省略可)	角度メッシュ(1, 2 :cos, -1, -2 :degree)。 a-curr , oa-curr の時に指定する必要がある。角度メッシュサ ブセクションが必要。
iangform =	0 (省略時) ,1,2,3	a-type mesh の角度基準を選択する。 0: 面の法線ベクトルと粒子の運動方向の成す角度 (θ と等しい)。 1: x 軸と粒子の運動方向の成す角度。 2: y 軸と粒子の運動方向の成す角度。 3: z 軸と粒子の運動方向の成す角度。
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	eng, let, reg, x, y, z, r, cos, the xy yz, xz, rz t	出力データの x 軸。 角度 (cos, the)。 2 次元表示。 2 次元表示。 enclos=1 の場合のみ有効。 時間軸。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を 指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定でき る。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の 場合でも 1 つのみ指定。

表 118: [t-cross] パラメータ (3)

名前	値	説明
unit =	1, 2, 3, 4, 5, 6 11, 12, 13, 14, 15, 16	1: [1/cm ² /source] 2: [1/cm ² /MeV/source] 3: [1/cm ² /Lethargy/source] 4: [1/cm ² /sr/source] 5: [1/cm ² /MeV/sr/source] 6: [1/cm ² /Lethargy/sr/source] 11: [1/cm ² /nsec/source] 12: [1/cm ² /MeV/nsec/source] 13: [1/cm ² /Lethargy/nsec/source] 14: [1/cm ² /sr/nsec/source] 15: [1/cm ² /MeV/sr/nsec/source] 16: [1/cm ² /Lethargy/sr/nsec/source]
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
output =	flux current f-curr b-curr o-curr of-curr ob-curr a-curr oa-curr a-flux oa-flux	タリー面における粒子フラックスを出力。 タリー面を横断する粒子数を出力。 面を前方に向かって横断する粒子数を出力。 タリー面を後方に向かって横断する粒子数を出力。 以下は、エネルギー分布や角度分布の有無を明示的に出力するオプションですが、version 3.34 以降の使用は奨励されていません。 e-type を指定しない場合の current。 e-type を指定しない場合の f-curr。 e-type を指定しない場合の b-curr。 a-type を指定した場合の current。 e-type を指定せず a-type を指定した場合の current。 a-type を指定した場合の flux。 e-type を指定せず a-type を指定した場合の flux。

角度メッシュを用いることで、面の法線ベクトルとのなす角 θ 毎の **current** もカウントできます。図 64 はこの測定をイメージしたものです。**unit=4, 5, 6, 14, 15, 16** を指定すると、角度メッシュサブセクションで与えられる角度のビンの幅から対応する立体角を計算し、単位立体角あたりの量を出力します。

unit = 3, 6, 13, 16 の場合の **Lethargy** はエネルギーに関する自然対数目盛を表しています。各エネルギービンの上限と下限がそれぞれ $E_{\text{high}}, E_{\text{low}}$ のときに、各 **Lethargy** の幅を $\ln(E_{\text{high}}/E_{\text{low}})$ で与えます。

unit = 4, 5, 6, 14, 15, 16 の場合の **sr** は、立体角の単位ステラジアン (steradian) を表しています。

output=f-curr, b-curr, of-curr, ob-curr は、xyz メッシュと r-z メッシュで利用できます。ただし、xyz メッシュの場合は、z 軸の方向に対してのみタリーが機能します。

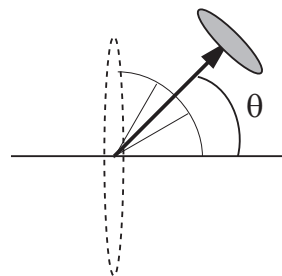
図 64: 角度メッシュを用いた **current** の角度分布の評価。

表 119: [t-cross] パラメータ (4)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=2)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow を指定した際の lattice の境界線に関するオプション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍しま す。
width =	0.5(省略時)	gshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義します。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 120: [t-cross] パラメータ (5)

名前	値	説明
dump = (次行)	データ数 データ定義	ファイルに粒子の情報をダンプします。 mesh=reg のみ。正で与えた時はバイナリー、負の時はアスキーファイル。 データの順番を定義します。ただし、 idmpmode=1 の使用のためには、 nocas および nobch の情報が必要です。
letmat =	(省略可)	(eng2let=1 の場合のみ有効) LET(dE/dx) を評価する物質番号。 省略時は、実際の物質。 物質を指定する場合の密度は、 [Material] セクションで定義された密度となる。したがって、水に対する LET 分布を計算したい場合、 [Material] セクションで、水の密度が 1g/cm^3 となるように定義する必要がある。また、負の場合は電子・陽電子の dE/dx として 1g/cm^3 の水に対する値が参照される。詳しくは、“ phits/recommendation/ParticleTherapy ” を参照してください。
multiplier =	物質数 (省略可)	multiplier を物質毎に指定します。 ¹⁰⁹ 詳細は 5.24.1 Multiplier サブセクションをご覧ください。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	i-th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

[t-cross] で、**dump** を用いることができるのは、**reg** メッシュのみです。また、**axis** は **reg** に固定されます。**dump** を指定したときは、**e-type**, **a-type**, **t-type** の指定は、上限と下限の意味しかもちません。**unit** は 1 に固定、**output** は **current** もしくは、**a-curr**, **oa-curr** になります。**dump** 定義文を用いてダンプさせる時は、**axis**、**file** 数ともにひとつに制限されます。**dump** するデータを書き込むファイルは、**file** 定義文で指定した名前に “**_dmp**” を付けたファイルです。**file** 定義文で定義された **file** 名には、通常のタリーの結果が書き出されます。なお、**dump** で出力する粒子情報は、面を通過した直後にファイルに書き出されますので、ヒストリーカウンタ機能で制限を掛けることはできません。**dump** ファイルを使用した接続計算を **idmpmode=1** で実行するには、**nocas** および **nobch** の情報を出力しておく必要があります。また、**idmpmode=1** を使用するためには、ここで出力される “**_dmp**” が付いた **dump** ファイルと共に **file=** で指定した名前の通常のタリー出力ファイルが必要になります。メモリ共有型並列計算を実行する場合、本機能による **dump** ファイルの作

¹⁰⁹ バージョン 2.86 より、[t-cross] でも **multiplier** の機能が使えるようになりました。

成と **dumpall** によるイベント情報の書き出しは共存できませんのでご注意ください。

[**counter**] における動作契機として **in, out** を設定しかつ [**t-cross**] でその境界面を指定した場合、タリーした後にカウンター値が変わるのでご注意ください。変化前のカウンター値を指定しないと、境界面を通過する瞬間の情報はタリーされません。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[**parameters**] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

メッシュ型として **mesh=reg** を選択した場合、それに続くメッシュ型サブセクションにおいて、タリーするための横断面を定義する必要があります。横断面の定義は、出て行く領域 (**r-from**) と入ってくる領域 (**r-to**) の領域番号を指定する形で行います¹¹⁰。また、単位面積あたりの量を計算するために、その横断面の面積を **area** (単位は cm^2) として与えてください。

mesh=reg の場合のメッシュ型サブセクションは、次のような書式となります。

```
mesh = reg
reg = number of crossing surfaces
r-from  r-to      area
  2      8        10.0
  3      8         5.0
( 4 5 ) ( 4 5 )   2.0
(13<5) (14<5)    7.0
(13<6) (14<6)    7.0
(13<7) (14<7)    7.0
...      ...      ....
...      ...      ....
```

mesh=reg と書いた次の行で、**reg=**により、指定したい横断面の数を決めてください。更にその次の行から、行列形式で **r-from**, **r-to**, **area** を指定します。これらは **reg=** で決めた数の行数分のデータセットが必要です。データ列の順番は、**r-from r-to area** がデフォルトです。この見出しの行は省略できますが、もし順番を変える場合は、**area r-from r-to** のように各列の見出しを明示してください。また、読み飛ばしコラム用の **non** も使えます。領域番号を指定する際は、領域をまとめる (**{ 2 - 5 } 8 9**) という書式や (**6 < 10 [1 0 0] < u=3**) などの **lattice**, **universe** 構造も利用できます。ただし、単一の数字で無い場合は必ず () で括ってください。これらの順番を変えたい場合は、見出しの順番を変えます。

mesh=reg とした際に、粒子 **fluence** を求める場合は注意が必要です。上の例題において、上から3番目に示した指定方法以外は、片方向の **fluence** になります。したがって、粒子 **fluence** をタリーする場合は、両方向の寄与を足し合わせるために、**r-from** と **r-to** の両方に横断面を挟む2つの領域番号を書いてください。

メッシュ型で、**mesh=r-z** を選択した場合は、 $r_i - r_{i+1}$ で定義される領域の **nz+1** 個の **z** 横断面と、 $z_i - z_{i+1}$ で定義される領域の **nr+1** 個の **r** 横断面の2種類の横断面が定義されます。**r-surface** と外部ボイドの面が同じ場合は、この面での **cross** は、タリーされませんからご注意ください。

メッシュ型で、**mesh=xyz** を選択した場合は、 $x_i - x_{i+1}$, $y_j - y_{j+1}$ で定義される領域の **nz+1** 個の **z** 横断面が定義されます。このとき、**x**, **y** 横断面は定義されません。

mesh = r-z, **xyz** の時は、面を横断する粒子の両方向が自動的に入ります。また、これらの時の **forward** は、**z** 面では、正方向、**r** 面では中心から外方向を意味します。バージョン 3.05 より、**z-type=1** とした場合に **nz=0** とすることで、タリー面を1面だけ設定できるようにしました。

¹¹⁰ バージョン 2.96 以前は、**r-from** と **r-to** ではなく、それぞれ **r-in** と **r-out** を使用していました。**r-in** と **r-out** は、バージョン 2.97 以降でも利用できますが、出て行く領域 (**r-in**) と入ってくる領域 (**r-out**) の **in** と **out** が逆になっていますのでご注意ください。

7.3 [T-Point] セクション

[t-point] タリーは、ある点 (point detector) やリング状の線分 (ring detector) におけるフルエンスを計算することができます。PHITS は、通常、設定した領域に確率的に入ってくる放射線をタリーするため、タリー領域が小さくなると、十分な統計精度を得るためには極めて長い計算時間を要する場合があります。極端な例として、タリー領域を点や線分に設定した場合、どれだけ計算時間を費やしても結果を得ることはできません。[t-point] タリーは、[t-track] や [t-cross] タリーの手法とは異なり、線源位置、もしくは、散乱によって粒子が発生した地点で、タリー位置への方向確率と透過確率を計算して評価することができます。ただし、散乱点での生成粒子の角度分布、エネルギー分布があらかじめ分かっていないと評価できません。また、物質中での荷電粒子のエネルギー損失があると透過確率の評価が難しいので、対象粒子は、核データの存在する中性子と光子に限られます。したがって、[t-point] タリーの利用条件は、

- (1) 輸送計算の上限エネルギーは、ライブラリを使う上限エネルギー (dmax) とする
- (2) 検出可能な粒子は中性子・光子のみとする
- (3) Event Generator mode 及び EGS5 mode を使用しない
- (4) 面定義で全反射や白色反射の面を利用しない

となります。本タリーの計算原理や具体的な利用方法については、\phits\utility\tpoint フォルダにある readme やサンプルインプットをご参照ください。

表 121: [t-point] パラメータ (1)

名前	値	説明
point =	数	指定する point detector の数。サブセクションが必要。
ring =	数	指定する ring detector の数。サブセクションが必要。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
part =	粒子名 (省略可)	タリーする粒子。省略時は neutron photon。
axis =	eng, t	出力データの x 軸。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類の指定。axis で定義可能なパラメータを指定できる。point, ring も指定可能。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	1, 2, 3 11, 12, 13	1: [1/cm ² /source] 2: [1/cm ² /MeV/source] 3: [1/cm ² /Lethargy/source] 11:[1/cm ² /nsec/source] 12:[1/cm ² /nsec/MeV/source] 13:[1/cm ² /Lethargy/nsec/source]
factor =	(省略可, D=1.0)	normalization factor

unit = 3, 13 の場合の Lethargy はエネルギーに関する自然対数目盛を表しています。各エネルギービンの上限と下限がそれぞれ $E_{\text{high}}, E_{\text{low}}$ のときに、各 Lethargy の幅を $\ln(E_{\text{high}}/E_{\text{low}})$ で与えます。

通常のタリーで指定する **mesh** パラメータの代わりに、**[t-point]** タリーでは、**point** もしくは **ring** パラメータを指定します。まず、**point detector** の場合、入力書式は次のようになります。

```
[ T-point ]
point =    1      # number of point detectors
non      x        y        z        r0
    1    10.0    0.0    50.0    1.0
```

point=n で **point detector** の個数 n を指定します。ひとつの **[t-point]** タリーセクションで定義できるポイントの上限数は 20 です。これ以上のポイントを定義するときは、複数のセクションを用意してください。次の行には、ポイントを指定する座標 (x,y,z)、ポイント周辺の特異領域の半径 (r0) のデータ順を定義します。読み飛ばしのコラムの指標 (non) も使えます。これらのデータの並びを変えるときは、この行で指定してください。この定義文の下に **point=** で指定した数だけデータを定義します。座標は、x,y,z 座標 [cm] で指定し、特異領域の半径 (r0) も [cm] で指定してください。ここで、特異領域の半径については、`\phits\utility\tpoint` フォルダにある `readme` をご参照ください。

次に、**ring detector** の場合は、次のような入力書式になります。

```
[ T-point ]
ring =    1      # number of ring detectors
non  axis   ar      rr      r0
    1    z    50.0   10.0    1.0
```

ring=n で **ring detector** の個数 n を指定します。次の行には、リングの軸を x,y,z の文字で指定する **axis**、原点からリングの位置までの距離 (ar)、リングの半径 (rr)、ポイント周辺の特異領域の半径 (r0) のデータ順を定義します。読み飛ばしのコラムの指標 (non) も使えます。これらのデータの並びを変えるときは、この行で指定してください。この定義文の下に **ring=** で指定した数だけデータを定義します。リング軸は (x,y,z) の文字で指定し、リングまでの距離 (ar) とリングの半径 (rr) は [cm] で指定します。特異領域の半径 (r0) も [cm] で指定してください。ここで、特異領域の半径については、`\phits\utility\tpoint` フォルダにある `readme` をご参照ください。

表 122: **[t-point]** パラメータ (2)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
multiplier =	物質数 (省略可)	multiplier を物質毎に指定します。 詳細は 5.24.1 Multiplier サブセクションをご覧ください。

表 123: [t-point] パラメータ (3)

名前	値	説明
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	i-th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。
iextstat =	0 (省略時),1,2	拡張された統計指標出力機能に関するオプション。 0: 平均値と統計誤差の全ヒストリー数に対する推移を出力する。 1: iextstat=0 の内容に加えて分散の分散 (VOV: variance of variance) と性能指数 (FOM: figure of merit) の全ヒストリー数に対する推移を出力させ、statistical check sheet を出力する。 2: iextstat=1 の内容に加えて、タリー結果の確率密度分布 (PDF: probability density function) を出力する。この場合は、タリー結果の範囲を確認するテスト計算を実行し、出力範囲を設定して本計算を実行してください。
prodenmn =	(省略可、D=1e-2)	PDF の出力範囲の下限。
prodenmx =	(省略可、D=1e+2)	PDF の出力範囲の上限。
nbproden =	(省略可、D=100)	PDF の出力時の分割数 (対数スケール)。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることが出来ます。stdcut を正とし、[parameters] セクションにおいて itall=0,1 とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく stdcut よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、stdcut を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

拡張された統計指標出力機能を使用する場合は、[parameters] において itall=3 とし、対象とする [t-point] において anatally サブセクションを設定した上で、iextstat を指定してください。Anatally サブセクションは、anatally start と anatally end で挟んだ領域で設定します。iextstat=2 で PDF を出力させる場合、対象とするタリー結果の取り得る範囲がわかっている場合は、prodenmn, prodenmx, nbproden パラメータによって PDF の出力範囲を指定し、本計算モードで PHITS を動かしてください。範囲がわからない場合は、これらの 3 つのパラメータを指定せず、テスト計算モードで PHITS を動かして、その範囲を確認してから本計算モードに進んでください。なお、iextstat, prodenmn, prodenmx, nbproden は anatally サブセクションの外側で指定するようにしてください。拡張された統計指標出力機能についての詳細は、6.10 節をご覧ください。

7.4 [T-Adjoint] セクション

光子輸送の adjoint mode 計算 (iadjoint=1) で結果を出力するタリーです。このタリーの結果は通常の輸送計算における [T-Track] タリーの結果に相当します。Adjoint mode 計算の詳細や [T-Adjoint] の e-type (エネルギーメッシュ)、e-smin、e-smax、factor パラメータ定義については 5.2.9 節と \phits\utility\adjoint\ フォルダにあるサンプルインプットをご参照ください。

表 124: [t-adjoint] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、reg=において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
axis =	eng, reg, x, y, z, r xy, yz, xz, rz t	出力データの x 軸。 2 次元表示。 時間軸。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	1 (のみ)	[1/cm ² /source]
factor =	(省略可, D=1.0)	normalization factor。実際の光子線源放射量を定義。

表 125: [t-adjoint] パラメータ (2)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow , rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 126: [t-adjoint] パラメータ (3)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
multiplier =	物質数 (省略可)	multiplier を物質毎に指定します。 詳細は 5.24.1 Multiplier サブセクションをご覧ください。
m-source =	(D=1)	[source] セクションに記載されているマルチソースの数を指定 (最大 6 まで)。出力ファイルにはマルチソース毎にフラックスと相対誤差を出力する。
e-smin =	(D=0.58)	実際の光子線源の最大エネルギー。
e-smax =	(D=0.62)	実際の光子線源の最小エネルギー。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[**parameters**] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

Anatally サブセクションを設定することで、タリー結果と統計誤差の推移を表示する機能を有効にした際に、出力させるメッシュを指定することができます。Anatally サブセクションは、**anatally start** と **anatally end** で挟んだ領域で設定します。詳細は、6.10 節をご覧ください。

7.5 [T-Deposit] セクション

放射線による付与エネルギー（発熱）を出力するタリーです。バージョン 3.05 以降、カーマ近似を用いた中性子や光子による付与エネルギーも計算できるようになりました。カーマ近似の使用の有無は、イベントジェネレータモードや電子輸送計算の設定に従って自動的に調整されます（詳しくは、[parameters] セクションの 5.2.8 節にある **ikerman**, **ikerman** を参照）。ただし、中性子のカーマ近似が有効となるのは、核データを利用する **dmax(2)**（通常は 20 MeV）以下のみです。

荷電粒子による付与エネルギーを計算する場合は、ユーザーが **usrdfn1.f** や **usrdfn2.f** を変更して自由に定義できるファクターを乗じることができます。ただし、この機能はカーマ近似や飛跡構造解析モードには適応していませんのでご注意ください。サンプルプログラムとして、**usrdfn1.f** には粒子の LET に ICRP60 で定義された $Q(L)$ 関係を乗じて線量当量を導出するプログラムが、**usrdfn2.f** には、**microdosimetric kinetic model** に基づいて生物学的線量を導出するプログラムが入っています。なお、これら既定プログラムを使う場合は、**letmat** で水を指定する必要があります（詳しくは奨励設定の **particletherapy** を参照）。

本タリーにおいて **output=deposit** とした場合は、ヒストリー毎の付与エネルギー分布を計算するため、検出器の応答を模擬することができます。その際、ファノ因子などを指定することにより検出器の分解能も考慮可能です。なお、**output=deposit** の場合は、カーマ近似による付与エネルギーが考慮されませんので、必ずイベントジェネレータモードや電子輸送計算を行うように設定してください。また、[weight window] などの使用により、1 ヒストリー内でエネルギー付与する粒子のウェイトが変わる場合は適切な結果が得られないのでご注意ください。

表 127: [t-deposit] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz, tet	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において（ ）等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。
reg vol		volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 output=deposit に必要。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
part =	all (省略時), 粒子名	タリーする粒子。 neutron や photon を指定した場合は、中性子や光子のカーマ近似による付与エネルギーがそれぞれ出力されます。

[t-deposit] では、タリーする領域に入る粒子ごとの付与エネルギーを **part=**で指定して計算することはできません。領域に入る粒子毎の付与エネルギーをタリーするには、[counter] で **part=**を用いて、特定の入射粒子から引き起こされる付与エネルギーをカウンターで指定する必要があります。

output=dose で **unit=0** とした場合、[Gy/source] を単位とする吸収線量が出力されます。**mesh=reg** の場合は、**volume** パラメーターを用いるか、[**volume**] セクションにおいて各領域の体積を設定する必要があります。ただし、吸収線量は不可算量ですので、各 x 軸に関する積分値 (sum over) は出力されません。また、領域内に複数の物質が混在する場合、その領域の吸収線量は全体の平均値とならないことにご注意ください。例えば、領域の 1 と 2 にある質量 M_1 と M_2 の物質にそれぞれ E_1 と E_2 の熱量が吸収された場合、その平均吸収線量は $\frac{E_1+E_2}{M_1+M_2}$ ですが、PHITS で計算する値は $\frac{E_1}{M_1} \frac{V_1}{V_1+V_2} + \frac{E_2}{M_2} \frac{V_2}{V_1+V_2}$ となります。ここで、 V_1 と V_2 はそれぞれ領域 1 と 2 が占める体積を表します。

output=deposit で **deposit=0** とした場合、**part** パラメータで指定した粒子種の total deposit (**part=all** の結果) に対する寄与を出力します。その際に、**part** パラメータで **all** が指定されていない時は、自動的に **all** が追加されます。一方、**output=deposit** で **deposit=1** とした場合、粒子種毎の deposit エネルギー分布が個別に出力されるため、各粒子種について得られた結果を足し上げた値と **all** を指定した結果は一致しませんのでご注意ください。

output=deposit で **deposit=0** とした場合、**part=all** 以外のタリー結果に対する統計誤差は、**istdev** の値に関わらず、ヒストリー分散モードにより計算した標準偏差となります。

表 128: [t-deposit] パラメータ (2)

名前	値	説明
axis =	eng,reg,x,y,z,r, tet, xy,yz,xz,rz,t-eng,eng-t t	出力データの x 軸。 出力データの x 軸 (mesh=tet でのみ有効)。 2 次元表示。 時間軸。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	0,1,2,3,4,5	0: Dose [Gy/source]; output=dose のみ 1: Dose [MeV/cm ³ /source] output=dose のみ 2: Dose [MeV/source] output=dose のみ 3: Number [1/source]; output=deposit のみ 4: Number [1/nsec/source]; output=deposit のみ 5: Dose [J/m ³ /source]; output=dose のみ
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
output =	dose deposit	荷電粒子のエネルギー付与をタリーする。 ヒストリー毎のエネルギー付与分布をタリーする。 e-type サブセクションが必要。 カーマ近似によるエネルギー付与は考慮されないの、必ずイベントジェネレータモードや電子輸送計算を行うように設定してください。
deposit =	0(省略時), 1	output=deposit 選択時のエネルギー表示オプション。 0: total deposit および各粒子の寄与の分布 (通常はこちらをご使用ください)。 1: 各粒子の deposit エネルギー分布 (ver. 2.81 以前の計算方法です)。
mother = (次行)	(省略可) all, 数 208Pb Pb	カーマファクタを計算する母核を限定する。複数定義可。 カーマ近似を用いる中性子及び光子による線量計算に対してのみ有効 (荷電粒子による付与エネルギーは原理的に各元素からの寄与に弁別不可能なため)。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの核種を次の行に記述する。負の場合は、それらの母核を対象から外すことを意味する。 質量数を指定すれば、その核。質量数を指定しなければ、その核の同位体全てを指定。複数の母核群を指定したいときは、複数の [t-deposit] セクションを定義する。

表 129: [t-deposit] パラメータ (3)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow , rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 130: [t-deposit] パラメータ (4)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
letmat =	(省略可)	LET(dE/dx) を評価する物質番号。省略時は、実際の物質。 物質を指定する場合の密度は、[Material] セクションで定義された密度となる。したがって、水に対する LET 分布を計算したい場合、[Material] セクションで、水の密度が 1g/cm^3 となるように定義する必要がある。また、負の場合は電子・陽電子の dE/dx として 1g/cm^3 の水に対する値が参照される。詳しくは、“ phits/recommendation/ParticleTherapy ” を参照してください。
dedxfnc =	(省略可, D=0)	0:ファクター無し。1:usrdfn1 を使用。2:usrdfn2 を使用。 サンプルプログラムとして、“usrdfn1.f”には粒子の LET に ICRP60 で定義された $Q(L)$ 関係に乗じて線量当量を導出するプログラムが入っており、“usrdfn2.f”には microdosimetric kinetic model に基づいて生物学的線量を導出するプログラムが入っています。これらの関数は、カーマ近似や飛跡構造解析モードによる付与エネルギーは考慮されませんのでご注意ください。
dresol	(省略可, D=0.0)	検出器の分解能を表すパラメータ 1。output=deposit の場合のみ有効。 dresol = σ_r , dfano =F の場合、各イベントの付与エネルギー E は標準偏差が $\sqrt{\sigma_r^2 + FE}$ のガウス分布に従って分散される。ただし、 dresol <0 の値を入力すると、エネルギー分解能 (エネルギー依存性やピーク形状などは) “usrresol.f” で定義されたもので置き換わる。
dfano=	(省略可, D=0.0)	検出器の分解能を表すパラメータ 2。output=deposit の場合のみ有効。 dresol = σ_r , dfano =F の場合、各イベントの付与エネルギー E は標準偏差が $\sqrt{\sigma_r^2 + FE}$ のガウス分布に従って分散される。

一般に fano factor は無次元量として定義されていますが、**dfano** パラメータはエネルギーの次元をもつ量として定義されていますのでご注意ください。例えば、Si 半導体検出器で fano factor を 0.1、一对の電子正孔対を生成するのに必要な平均エネルギーを 3.62eV とすると、**dfano**= $3.62\text{E-06} * 0.1 = 3.62\text{E-07}$ となります。

表 131: [t-deposit] パラメータ (5)

名前	値	説明
nlatcel	(省略可)	Lattice 内にある同一セル番号へのエネルギー付与量を各格子別に扱って統計処理したい場合に、その Lattice を定義するセル番号 (lat コマンドのあるセル番号) を指定する。1 つのみ指定可能で、省略もしくは 0 が指定された場合は各格子別に扱わない。 output=deposit のときのみ有効。
nlatmem	(省略可、D=1000)	nlatcel を利用した際の 1 ヒストリー内で別個に扱うセルの最大個数。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
foamout =	0(省略時), 1, 2	1 でタリー出力結果 (数値データ) を OpenFOAM フィールドデータ形式で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を foam に変えたファイル名。 2 でタリー出力結果 (四面体要素番号、重心 <i>x</i> 座標、 <i>y</i> 座標、 <i>z</i> 座標、体積、数値データ、相対誤差) を CSV 形式 (コンマ区切り) で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を csv に変えたファイル名。 mesh=tet, axis=tet のときのみ有効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。

表 132: [t-deposit] パラメータ (6)

名前	値	説明
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

reg = (100 200 300 ...) のような複数領域における付与エネルギーの総和を出力する機能の拡張として、条件に応じて重み付けを行う機能を追加しました。本機能を用いる事で、下式に示すように、指定した領域 i へのヒストリー毎の付与エネルギー $E_{\text{history},i}$ に対して、条件に応じて異なる係数 $\alpha_i(N_{\text{list}})$ を乗じ、複数領域の deposit energy の総和 E_{history} を算出します。

$$E_{\text{history}} = \sum_i \alpha_i(N_{\text{list}}) \times E_{\text{history},i} \quad (37)$$

本機能はヒストリー毎の付与エネルギーに応じて重み付けを行う機能で、特定領域への付与エネルギーに応じて電荷収集効率が変わるような、半導体ソフトウェア解析などに利用できます。エネルギーや LET など粒子の条件に応じて付与エネルギーに重み付けを行いたい場合は、ユーザー定義重み付け関数 (**usrdfn1.f** や **usrdfn2.f**) を作成する必要があります。本機能は **mesh = reg** のみ対応しており、**reg = weightsum** とする事で動作します。付与エネルギーに乗じる係数のリストを複数定義し、ヒストリー毎に指定した条件に応じて異なる係数リストを使用する事が可能です。本機能を使用する際の書式は次の通りです。

```

mesh = reg
reg = weightsum
ncond = 4
  no    cell    operator    ethres    list
    1    100      ge          0.1         1
    2    100      gt          0.2         1
    3    100      eq          0.0         2
  and    200      lt          0.4         2
    4    100      le          0.5         3
ncell = 5
  cell    list01    list02    list03    list00
    100      0.0        0.5        1.0        1.0
    200      0.1        0.6        2.0        1.0
    300      0.2        0.7        3.0        1.0
    400      0.3        0.8        4.0        1.0
    500      0.4        0.9        5.0        1.0

```

まず、**ncond** = m で条件の数 m を指定します。この次の行には、条件番号 (**no**)、領域番号 (**cell**)、演算子 (**operator**)、閾エネルギー (**ethres**)、リスト番号 (**list**) のデータ順を定義します。これらのデータの並

びを変えるときは、この行で指定してください。この定義文の下に **ncond** = で指定した数だけ条件を定義します。条件は、「1 ヒストリーにおいて、領域番号 (**cell**) への **deposit energy** が、閾エネルギー (**ethres**) に対して演算子 (**operator**) の関係を満たす場合、後述するリスト番号 (**list**) の係数を使用する」ことを意味します。条件に合致するか否かのチェックは上の行から順に行うため、いくつかの条件に合致するヒストリーに対しては、先に指定した条件が優先されます。全ての条件に合致しないヒストリーに対しては、**list00** に記載した係数が使用されます。条件番号 (**no**) に **and** と記載することで複数の条件を設定できます。領域番号 (**cell**) では、領域をまとめる (**2 - 5 8 9**) という書式が使えます。また、(**6 < 10[1 0 0] < u=3**) などの **lattice**, **universe** 構造も指定できます。ただし、単一の数字でない場合は必ず () で括ってください。演算子 (**operator**) では、**greater than(gt)**, **greater equal(ge)**, **equal(eq)**, **less equal(le)**, **less than(lt)** の 5 種類を使用できます。閾エネルギー (**ethres**) の値の単位は MeV です。

続いて、**ncell = n** で総和を取る対象とするセルの数 *n* を指定します。この次の行には、領域番号 (**cell**)、リスト番号 (**listxx**) のデータ順を定義します。これらのデータの並びを変えるときは、この行で指定してください。この定義文の下に **ncell** = で指定した数だけ領域番号と係数を定義します。こちらの領域番号 (**cell**) でも、領域をまとめる書式、**lattice**, **universe** 構造を指定できます。単一の数字でない場合は必ず () で括ってください。なお、同じ領域番号を複数定義すると **deposit energy** が積算されますので注意してください。**list00** を定義しない場合、全ての係数の値がゼロに設定されます。

7.6 [T-Deposit2] セクション

このタリーは、[t-deposit] を2つの領域で同時に実行し、付与エネルギーをタリーしてその相関などを見るものです。 dE , E カウンターなどの模擬に用いることができ、2つの領域の付与エネルギーの相関を2次元プロットすることなどができます。[t-deposit] において **output=deposit** とした場合と同様に、検出器の応答を模擬することができます。このタリーでは、[t-deposit] タリー同様、任意の物質の LET(dE/dx) の関数のユーザー定義のファクターを乗じることができます。これは、usrdfn1.f, usrdfn2.f で定義されます。

表 133: [t-deposit2] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh = reg =	reg r1 r2	メッシュ型。 必ず2つの領域番号を指定する。
volume reg vol	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e1-type =	1,2,3,4,5	領域 r1 に関するエネルギーメッシュ。エネルギーメッシュサブセクションが必要。
e2-type =	1,2,3,4,5	領域 r2 に関するエネルギーメッシュ。エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	eng1,eng2,t, e12,e21,t-e1,t-e2,e1-t,e2-t	出力データの x 軸。 2次元表示。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種別を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも1つのみ指定。
unit =	1,2	1: Number [1/source] 2: Number [1/nsec/source]
factor =	(省略可, D=1.0)	normalization factor

[t-deposit2] では、荷電粒子のエネルギー付与だけをタリーするので、タリーする領域に入る粒子ごとのエネルギー付与を **part=**で指定することはできません。領域に入る粒子毎の付与エネルギーをタリーするには、[counter] で **part=**を用いて、特定の入射粒子から引き起こされる付与エネルギーをカウンターで指定する必要があります。

表 134: [t-deposit2] パラメータ (2)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
letmat1 =	(省略可)	領域 r1 に関する LET(dE/dx) を評価する物質番号。省略時は実際の物質。
letmat2 =	(省略可)	領域 r2 に関する LET(dE/dx) を評価する物質番号。省略時は実際の物質。 物質を指定する場合の密度は、[Material] セクションで定義された密度となる。したがって、水に対する LET 分布を計算したい場合、[Material] セクションで、水の密度が 1g/cm^3 となるように定義する必要がある。また、負の場合は電子・陽電子の dE/dx として 1g/cm^3 の水に対する値が参照される。詳しくは、“phits/recommendation/ParticleTherapy”を参照してください。
dedxfnc1 =	(省略可,D=0)	領域 r1 に関して、0:ファクター無し、1: usrdfn1 を使用、2: usrdfn2 を使用する。
dedxfnc2 =	(省略可,D=0)	領域 r2 に関して、0:ファクター無し、1: usrdfn1 を使用、2: usrdfn2 を使用する。 サンプルプログラムとして、“usrdfn1.f”には粒子の LET に ICRP60 で定義された $Q(L)$ 関係に乗じて線量当量を導出するプログラムが入っており、“usrdfn2.f”には microdosimetric kinetic model に基づいて生物学的線量を導出するプログラムが入っています。これらの関数は、カーマ近似や飛跡構造解析モードによる付与エネルギーは考慮されませんのでご注意ください。
dresol1	(省略可, D=0.0)	タリー領域 1 の検出器分解能を表すパラメータ 1。dresol1= σ_r , dfano1=F の場合、各イベントの付与エネルギー E は標準偏差が $\sqrt{\sigma_r^2 + FE}$ のガウス分布に従って分散される。ただし、dresol1<0 の値を入力すると、エネルギー分解能（エネルギー依存性やピーク形状などは）“usrresol.f”で定義されたもので置き換わる。
dresol2	(省略可, D=0.0)	タリー領域 2 の検出器分解能を表すパラメータ 1。詳細は dresol1 の項目を参照。
dfano1=	(省略可, D=0.0)	タリー領域 1 の検出器分解能を表すパラメータ 2。詳細は dresol1 の項目を参照。
dfano2=	(省略可, D=0.0)	タリー領域 2 の検出器分解能を表すパラメータ 2。詳細は dresol1 の項目を参照。

表 135: [t-deposit2] パラメータ (3)

名前	値	説明
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、axis= e12, e21, t-e1, t-e2, e1-t, e2-t の場合は無効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	i-th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.7 [T-Heat] セクション

カーマ近似を用いて付与エネルギー（発熱）を出力するタリーです。ただしバージョン3.05以降[t-deposit]でも同様の計算が可能となったため、それ以降のバージョンでは利用を奨励していません。なお、イベントジェネレータモードを用いた場合 (**e-mode**≥1) は中性子のカーマ近似は用いません。また、**electron=1** かつ電子の輸送を含んでいる時は、光子のカーマ近似は用いずに電子の付与エネルギーから計算します。

表 136: [t-heat] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型、メッシュ型サブセクションが必要
axis =	reg, x, y, z, r, xy, yz, xz, rz	出力データの x 軸 2 次元表示
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類の指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	スコアする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト、この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
output =	heat simple	total : 全付与エネルギー total : 全付与エネルギー leakage : 外部ボイドに出ていった粒子の運動エネルギー。 更に、 total : 全付与エネルギー recoil : 計算打切エネルギー (emin(15-19)) 設定時の残留核の運動エネルギー。 ionization : 荷電粒子のエネルギーによる付与エネルギー。 low neutron : 中性子カーマ係数を用いた際の付与エネルギー。 photon : 光子カーマ係数を用いた際の付与エネルギー。ただし、 electron=1 のときは、カットオフ電子による付与エネルギー。 others : 残留核の残留エネルギー。 igamma=1 の場合、励起状態にある残留核から光子が放出されるのでゼロに近づく。

[t-heat] について全般的に言えることですが、最終的に熱に変換するエネルギーは、荷電粒子の ionization の過程を通してです。しかしながら、輸送コードの中では、cutoff エネルギーがあり、最後の過程まで追わずに輸送を終了します。従って、熱の成分として recoil、others などの成分が出力されます。これらの成分は、輸送のパラメータにより変化します。

表 137: [t-heat] パラメータ (2)

名前	値	説明
output = (続き)	all	simple の結果に加えて、以下の各粒子の寄与を書き出す。 recoil に対する $d, t, {}^3\text{He}, \alpha, \text{residual nuclei}$ の寄与。 ionization に対する $p, \pi^+, \pi^-, \text{others}$ の寄与。(ionization に関しては part で指定した粒子の寄与も出力するが、eps ファイルには出力されない。) stopped particle: 物質中で停止した粒子の運動エネルギーの proton, neutron, $\pi^+, \pi^-, \text{others}$ の寄与。(stopped particle に関しては part で指定した粒子の寄与も出力するが、eps ファイルには出力されない。) others: 残留核の励起エネルギー (remaining excitation energy) と fission の成分が出力される。 axis が 2 次元表示のときは、all は simple と同じで、total, recoil, ionization, low neutron, electron, others が出力される。
part =	粒子名 (省略可)	output=all の場合に、ここで指定した荷電粒子による付与エネルギー (ionization 成分) と物質中で停止した粒子のエネルギー量 (stopped particle 成分) を出力する。ただし、eps ファイルには出力されない。 また、カーマ近似を使用した計算において光子と中性子による寄与を調べる場合、part=photon neutron としてもこれらの寄与を区別できないので注意してください。各々の寄与を求める場合は output=simple として出力される内容をご確認ください。
unit =	0, 1, 2	0: [Gy/source] 1: [MeV/cm ³ /source] 2: [MeV/source]
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル
angel =	(省略可)	angel パラメータ
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2 次元表示のオプション

unit = 0 とした場合、[Gy/source] を単位とする吸収線量出力されます。mesh = reg の場合は、volume パラメーターを用いるか、[volume] セクションにおいて各領域の体積を設定する必要があります。ただし、吸収線量は不可算量ですので、各 x 軸に関する積分値 (sum over) は出力されません。また、領域内に複数の物質が混在する場合、その領域の吸収線量は全体の平均値とならないことにご注意ください。例えば、領域の 1 と 2 にある質量 M_1 と M_2 の物質にそれぞれ E_1 と E_2 の熱量が吸収された場合、その平均吸収線量は $\frac{E_1+E_2}{M_1+M_2}$ ですが、PHITS で計算する値は $\frac{E_1}{M_1} \frac{V_1}{V_1+V_2} + \frac{E_2}{M_2} \frac{V_2}{V_1+V_2}$ となります。ここで、 V_1 と V_2 はそれぞれ領域 1 と 2 が占める体積を表します。

表 138: [t-heat] パラメータ (3)

名前	値	説明
x-txt = y-txt = z-txt =	(省略可) (省略可) (省略可)	x-軸テキスト y-軸テキスト z-軸テキスト
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz, axis=xy,yz,xz の時、領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示 gshow=5 は、icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg, axis=xy,yz,xz の時、領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。 この下に xyz のメッシュ型サブセクションが必要
resol = width =	1(省略時) 0.5(省略時)	gshow, rshow オプションの時、領域境界を求める分解能を各辺 resol 倍します。 gshow, rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義します。
volume reg vol	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、xyz メッシュ 1 辺のスキャン数
epsout =	0(省略時), 1, 2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。 2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時), 1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。 ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時), 1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。 ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時), 1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。 テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。

表 139: [t-heat] パラメータ (4)

名前	値	説明
electron =	0(省略時), 1	電子の寄与のオプション 0: 光子のカーマ係数を使う 1: 電子のエネルギー付与から計算する。 この場合、電子の輸送が必要
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値 i-th カウンターの最大値
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
trcl =	(省略可)	r-z, xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow を指定した際の lattice の境界線に関するオプション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルファントムはきれいに描画されません。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、Lattice や連続四面体以外でも、隣接セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.8 [T-Yield] セクション

生成核種を出力します。陽子数 Z と中性子数 N が共に 1 以上の核種が対象です。核データを用いた反応計算では残留核の生成が考慮されません。ただし、**dmax(2)** 以下の中性子による反応の場合は、**e-mode** ≥ 1 とすることで残留核もタリーされます。

表 140: [t-yield] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz, tet	メッシュ型、メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、 [volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 reg vol volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
part =	all(省略時)、粒子名	入射粒子。
axis =	reg, x, y, z, r, tet, xy, yz, xz, rz mass charge chart dchain	出力データの x 軸 出力データの x 軸 (mesh=tet でのみ有効) 2 次元表示 質量数分布を表示。 nucleus パラメーターを指定した場合 isotope 分布。 charge 原子番号に関する分布を表示。 nucleus パラメーターの指定不可。 nucleus chart 形式 (x 軸: N ; 中性子数, y 軸: Z ; 陽子数)。 nucleus パラメーターの指定不可。 dchain DCHAIN 用の出力。全ての isotope を出力。 mesh=r-z の場合は使用できません。 [t-yield] のみ、1 つのタリーセクションにつき 1 つの axis しか指定できません。
info =	0, 1	chart のとき stable nuclei と magic number を出力。
file =	file name	出力ファイル名を定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。

[t-yield] セクションでは、**part** によりタリーする入射粒子を指定できますが、出力されるのはそれらの寄与を足し合わせた結果となります。入射粒子毎の寄与を分けてタリーしたい場合は、複数の [t-yield] セクションを設定してください。

[parameters] セクションにおいて **igamma=3** とすると、 γ 崩壊とアイソマー生成が EBITEM モデルを用いて考慮されます。その際、**axis=chart, dchain** とした場合に、生成されたアイソマーの情報も出力されます。

表 141: [t-yield] パラメータ (2)

名前	値	説明
unit =	1, 2	1: [1/source] 2: [1/cm ³ /source]
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
output =	(省略可) product cutoff	タリーするタイミングを変更します。省略時は product 核反応で生成された核種をタリーする。デフォルト。 エネルギーカットオフで止まった核種をタリーする。原子核を輸送させない場合は、 product と同じになる。
mother = (次行)	(省略可) all , 数 208Pb Pb	核種生成をする母核を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの核種を次の行に記述する。負の場合は、それらの母核を対象から外すことを意味する。 質量数を指定すれば、その核。質量数を指定しなければ、その核の同位体全てを指定。複数の母核群を指定したいときは、複数の [t-yield] セクションを定義する。
nucleus = (次行)	(省略可) all , 数 208Pb Pb	出力する核種生成を限定する。複数定義可。 all : デフォルト、この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの核種を次の行に記述する。 質量数を指定すれば、その核。質量数を指定しなければ、 Pb の同位体全てを指定。
elastic =	1 (省略時) ,0,-1	核反応で生成された 2 次粒子 (残留核や反跳核を含む) の取扱いオプション。 output=product の場合。 1: 弾性散乱の場合も含めて全ての 2 次粒子を加算する。 0: 非弾性散乱により生成された 2 次粒子のみ加算する。 -1: 弾性散乱など標的核と同じ原子核が 2 次粒子に存在する場合は何もカウントしない。それ以外は、全ての 2 次粒子を加算し、壊れた標的核を差し引く。 output=cutoff の場合。 0,1: 核反応時には何もカウントしない。 -1: 核反応で壊れた標的核を差し引く。 elastic=-1 の場合は、タリー結果が負値になる場合があります。その場合、 eps ファイルにはその核種に対する結果が表示されなくなりますので、ご注意ください。
mxnuclei =	3000(省略時)	axis=chart もしくは dchain のときにタリーする最大生成核種数。 0: メタステーブルを含め、核図表上の全ての核種 (陽子数 136*質量数 236*メタステーブル 3=96288 核種) をタリーする。 >0: 生成核種数が mxnuclei になるまでタリーし、それ以降に新たな核種が生成された場合は、警告を出した上で無視する。この値を小さくすると、メモリ削減及び計算時間短縮の効果が 있습니다。

output=cutoff を指定したときは、**part**, **mother** の指定は無視されます。

表 142: [t-yield] パラメータ (3)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 143: [t-**yield**] パラメータ (4)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
foamout =	0(省略時), 1, 2	1 でタリー出力結果 (数値データ) を OpenFOAM フィールドデータ形式で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を foam に変えたファイル名。 2 でタリー出力結果 (四面体要素番号、重心 <i>x</i> 座標、 <i>y</i> 座標、 <i>z</i> 座標、体積、数値データ、相対誤差) を CSV 形式 (コンマ区切り) で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を csv に変えたファイル名。 mesh=tet, axis=tet のときのみ有効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。

表 144: [t-yield] パラメータ (5)

名前	値	説明
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。
special =	D=0 (省略可)	> 0 の時タリー領域での核反応を special 回繰り返し、また統計崩壊を反応あたり 10 回繰り返し、核種生成断面積の統計を上げる。
ndata =	0, 1, 2(省略時), 3	核反応イベントの結果を核種生成断面積（放射化断面積）データで置き換えるオプション。 0: このオプションを使用しません。 1: 陽子と中性子入射で標的核が ^4He , ^{14}N , ^{16}O の場合に置き換える。 2: 陽子、中性子、重陽子、 α 入射反応及び光核反応イベントを、 e-mode を使わずに評価済み核データによって計算した場合に、 file(27) (D=file(1)/XS/yield/) で指定したフォルダにある断面積データで置き換える。 3: 陽子、中性子、重陽子、 α 入射反応及び光核反応イベントを、評価済み核データ (e-mode 有り無し両方共) や核反応モデルによって計算した場合に、 file(27) で指定したフォルダにある断面積データで置き換える。

[**counter**] において **coll** やこれに属する反応イベントを動作契機として設定した場合は、タリーする前にカウンター値が変わります。このため、反応イベントが起こった瞬間の情報をタリーする場合は、変更後のカウンター値を指定してください。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[**parameters**] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

ndata のオプションを設定することにより、通常は核データや核反応モデルによって評価される粒子の生成量を特殊反応断面積データ (**ndata=1**) や **file(27)** で指定したフォルダにある断面積データ¹¹¹ (**ndata=2,3**) による評価値に置き換えます。核反応モデル等で再現するのが困難な粒子生成量を評価する場合に効果を発揮します。具体的には、核反応イベントが発生した際に、核反応モデル等で評価された生成粒子をタリーする代わりに、各反応データを参照して評価した生成量をタリーします。この置き換えは **ndata** が設定されたタリーでセクションでのみ有効となり、他のタリーセクションの結果や粒子輸送計算には影響を与えません。ただし、**output=cutoff** の場合は 2 重カウントが発生する可能性があるので注意してください。例えば、核反応モデルで発生した粒子が **emin** 以上のエネルギーをもつ場合、発生時に反応データで置き

¹¹¹ Ver. 3.35 以降、JENDL-5 の放射化断面積データが整備されています。使用した場合は次の文献を参照してください。O. Iwamoto, N. Iwamoto, S. Kunieda, F. Minato, S. Nakayama, Y. Abe, et al., "Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5", J. Nucl. Sci. Technol., 60(1), 1-60 (2023). DOI: 10.1080/00223131.2022.2141903 (Open Access).

換えた成分とエネルギーカットオフ時にタリーされた成分で2重カウントとなってしまいます。この場合、**ndata=2,3**の時であれば、[**counter**]において**ndata**を動作契機として設定することで2重カウントを避けることができます。詳細については、5.27を参照してください。

ndata=1とすると、 ^4He , ^{14}N , ^{16}O を標的とする核子入射反応イベントが起こった時に、内蔵された特殊反応断面積データを参照した結果をタリーします。内蔵されているのは以下の反応チャンネルです。これらの反応断面積の励起関数を参照し、生成粒子をタリーします。

$^4\text{He}(n, x)^3\text{H}$	$^{14}\text{N}(n, x)^3\text{H}$	$^{14}\text{N}(n, x)^7\text{Be}$	$^{14}\text{N}(n, x)^{11}\text{Be}$	$^{14}\text{N}(n, x)^{10}\text{C}$	$^{14}\text{N}(n, x)^{11}\text{C}$
$^{14}\text{N}(n, x)^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}(n, x)^{13}\text{N}$	$^{16}\text{O}(n, x)^3\text{H}$	$^{16}\text{O}(n, x)^7\text{Be}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{11}\text{Be}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{10}\text{C}$
$^{16}\text{O}(n, x)^{11}\text{C}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{14}\text{C}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{15}\text{C}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{13}\text{N}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{16}\text{N}$	$^{16}\text{O}(n, x)^{14}\text{O}$
$^{16}\text{O}(n, x)^{15}\text{O}$	$^4\text{He}(p, x)^3\text{H}$	$^{14}\text{N}(p, x)^7\text{Be}$	$^{14}\text{N}(p, x)^{11}\text{Be}$	$^{14}\text{N}(p, x)^{10}\text{C}$	$^{14}\text{N}(p, x)^{11}\text{C}$
$^{14}\text{N}(p, x)^{13}\text{N}$	$^{14}\text{N}(p, x)^{14}\text{O}$	$^{16}\text{O}(p, x)^3\text{H}$	$^{16}\text{O}(p, x)^7\text{Be}$	$^{16}\text{O}(p, x)^{11}\text{Be}$	$^{16}\text{O}(p, x)^{10}\text{C}$
$^{16}\text{O}(p, x)^{11}\text{C}$	$^{16}\text{O}(p, x)^{14}\text{C}$	$^{16}\text{O}(p, x)^{13}\text{N}$	$^{16}\text{O}(p, x)^{14}\text{O}$	$^{16}\text{O}(p, x)^{15}\text{O}$	

ndata=2,3とすると、**file(27)**で指定したフォルダにある断面積データを参照します。Ver. 3.35以降、このフォルダにはJENDL-5の放射化断面積データが入っており、それぞれ200, 200, 100, 50, 200 MeV/nまでの陽子、中性子、重陽子、 α 入射反応及び光核反応について、この断面積データを参照した結果を得ることができます。**ndata=2**の時は、**e-mode**を使わずに評価済み核データによって計算した場合のみ断面積データで置き換えます。**ndata=3**の時は、上のような制限は無く、基本的に全ての核反応イベントの計算結果を断面積データで置き換えます。**file(27)**にある標的核種及び入射エネルギー以外の反応については置き換えは発生せず、評価済み核データや核反応モデルによる結果がそのままタリーされます。

ndata=2,3の時、**output=product**の場合は全ての粒子の生成量を断面積データの置き換えによって評価しますが、**output=cutoff**の場合は、 $d, t, ^3\text{He}, \alpha$ といった軽イオンの生成量は置き換えません。これらの粒子は、評価済み核データや核反応モデルによって計算した際に、**emin**以上のエネルギーをもって発生する可能性が高く、輸送後、エネルギーカットオフ時にタリーされるからです。ただし、**output=cutoff**の場合でも、**e-mode**を使わずに評価済み核データによって計算した時は、上の軽イオンの生成が起こらない(**lionprd=-1**(初期値)の場合)ため、全ての粒子の生成量を置き換えます。また、**ndata=2,3**で**axis=dchain**の時は、20 MeV以下の中性子入射反応に対して、断面積データによる置き換えをしません。このエネルギー領域の反応による生成量についてはDCHAINで計算することを想定して、タリーの条件が設定されているためです。

ndata=2,3に関しては、**file(27)**のフォルダ(**D=file(1)/dchain-sp/data/**)にある断面積データを差し替えることにより、ユーザーが用意した断面積データを参照させることができます。断面積データのファイル名は、“Pd107-y-n.dat”のように、“[標的核の元素記号]+[質量数(3桁)]+[-y-]+[入射粒子ID])+[.dat]”と指定してください。ただし、元素記号が1文字の場合は“O_”のように、アンダーバーを付記してください。入射粒子IDは、陽子がp、中性子がn、重陽子がd、 α がa、光子(光核反応)がgです。ファイルの中のフォーマットは、

```
# ZAP = 48113  LIP = 1  INT = 2
# Elab (MeV)      sigma (b)
1.000000e-11  0.000000e+00
2.530000e-08  0.000000e+00
2.000000e+01  0.000000e+00
2.100000e+01  0.000000e+00
.....
```

のように、ZAP, LIP, INTによりそれぞれ生成核種、アイソマー状態、内挿方法を指定します。生成核種は1000Z+A(3桁)のフォーマットで指定し、そのアイソマー状態を0:基底状態、1:第1準安定状態、2:第2準安定状態の番号により指定します。次のINT=(1,2,3,4,5)は、内挿方法の指定で、

```
INT = 1 : Histogram  
      2 : Linear - Linear  
      3 : Log - Linear  
      4 : Linear - Log  
      5 : Log - Log
```

となっています。2行目は、

```
# Elab (MeV)    sigma (b)
```

で、1コラム目に入射エネルギー [MeV]、2コラム目に断面積 [Barn] を書き並べてください。ここで、エネルギービン数は自由です。

7.9 [T-Product] セクション

核反応による生成粒子、ソースの発生粒子をタリーします。**[t-yield]** との違いは、エネルギー分布や、時間分布が取れることです。核データを用いた反応計算では残留核の生成が考慮されません。ただし、**dmax(2)** 以下の中性子による反応の場合は、**e-mode \geq 1** とすることで残留核もタリーされます。

表 145: [t-product] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz, tet	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、 [volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechr1 =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
eng2let =	0(省略時) = 1	e-type で指定したエネルギーを LET に変換しない。 エネルギーを LET(keV/ μ m) に変換する。結果を LET の関数として出力するには、 eng2let=1 とした上で axis=let とする。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
a-type =	1, 2, -1, -2 (省略可)	生成粒子の放出角度に関する角度メッシュ(1, 2 :cos, -1, -2 :degree)。 角度メッシュサブセクションが必要。
part =	all(省略時), 粒子名	生成粒子。
axis =	eng, let, reg, x, y, z, r, tet, cos, the, xy, yz, xz, rz, t	出力データの x 軸。 出力データの x 軸 (mesh=tet でのみ有効)。 角度 (cos θ , θ)。 2 次元表示。 時間軸。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。

part はアイソマー原子核を指定することも可能です。**Na-24m**, **In-116m**, **In-116n**, **In-116g** のように末尾に **m** (第一アイソマー), **n** (第二アイソマー), **g** (基底核) を置いて識別できます。その場合、**[Parameters]** セクションで **|igamma|= 3** をセットしてください。**|igamma|=3** の場合でも、**part=Na-24** のように表記すると、従来通り基底核とアイソマーの合計を出力します。

unit = 5,6,15,16,25,26,35,36 の場合の **Lethargy** はエネルギーに関する自然対数目盛を表しています。各エネルギービンの上限と下限がそれぞれ $E_{\text{high}}, E_{\text{low}}$ のときに、各 **Lethargy** の幅を $\ln(E_{\text{high}}/E_{\text{low}})$ で与えます。

unit = 21 - 26, 31 - 36 の場合の **sr** は、立体角の単位ステラジアン (steradian) を表しています。

output= decay, source の場合、一次粒子は存在しないので **primary** は無効になり、**primary** によってタリーから除外される粒子はありません。**output= nonela, fission** の場合、一次粒子は残存することがありますが、二次粒子と一次粒子の区別はつかないので、**primary** は無効になり、**primary** によってタリーから除外される粒子はありません。**output= atomic** で、Track structure モードを使い、かつ **primary** が 1 の場合、原子反応が起こるごとに一次粒子をタリーします。膨大な回数タリーされるので、意図が正しいかよく確認してください。**output= nuclear** は **nonela** と **elastic** の合計ですが、**elastic** に **primary** は影響し、**nonela** の分には影響しません。

表 146: [t-product] パラメータ (2)

名前	値	説明
unit =	1, 2, 3, 4, 5, 6 11,12,13,14,15,16 21,22,23,24,25,26 31,32,33,34,35,36	1: [1/source] 2: [1/cm ³ /source] 3: [1/MeV/source] 4: [1/cm ³ /MeV/source] 5: [1/Lethargy/source] 6: [1/cm ³ /Lethargy/source] 11:[1/nsec/source] 12:[1/cm ³ /nsec/source] 13:[1/MeV/nsec/source] 14:[1/cm ³ /MeV/nsec/source] 15:[1/Lethargy/nsec/source] 16:[1/cm ³ /Lethargy/nsec/source] 21: [1/sr/source] 22: [1/cm ³ /sr/source] 23: [1/MeV/sr/source] 24: [1/cm ³ /MeV/sr/source] 25: [1/Lethargy/sr/source] 26: [1/cm ³ /Lethargy/sr/source] 31:[1/nsec/sr/source] 32:[1/cm ³ /nsec/sr/source] 33:[1/MeV/nsec/sr/source] 34:[1/cm ³ /MeV/nsec/sr/source] 35:[1/Lethargy/nsec/sr/source] 36:[1/cm ³ /Lethargy/nsec/sr/source]
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
output =	source nuclear (default) nonela elastic decay fission atomic	[source] セクションで設定した線源粒子をタリーする。 核反応からの生成粒子。 elastic を含む。 非弾性散乱からの生成粒子。 弾性散乱からの生成粒子。 崩壊反応からの生成粒子 (RI 線源として定義した粒子は含まれません)。 核分裂からの生成粒子 (核分裂中性子源として定義した粒子は含まれません)。 原子相互作用からの生成粒子。
primary =	1(省略時), 0	1: 反応後に残る一次粒子と二次粒子を両方タリーする。 0: 反応の二次粒子だけをタリーする。 output=nuclear, elastic, atomic でのみ有効。それ以外は自動で 0 になる。

表 147: [t-product] パラメータ (3)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルファントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 148: [t-product] パラメータ (4)

名前	値	説明
mother = (次行)	(省略可) all, 数 208Pb Pb	核反応をする母核を限定する。複数定義可。 all: デフォルト。この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの核種を次の行に記述する。負の場合は、それらの母核を対象から外すことを意味する。output=atomic のときは使用不可。 質量数を指定すれば、その核。質量数を指定しなければ、その核の同位体全てを指定。複数の母核群を指定したいときは、複数の [t-product] セクションを定義する。
dump = (次行)	データ数 データ定義	ファイルに粒子の情報をダンプします。mesh=reg のみ。正で与えた時はバイナリー、負の時はアスキーファイル。 データの順番を定義します。ただし、idmpmode=1 の使用のためには、nocas および nobch の情報が必要です。
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all: デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
letmat =	(省略可)	(eng2let=1 の場合のみ有効) LET(dE/dx) を評価する物質番号。省略時は、実際の物質。 物質を指定する場合の密度は、[Material] セクションで定義された密度となる。したがって、水に対する LET 分布を計算したい場合、[Material] セクションで、水の密度が 1g/cm^3 となるように定義する必要がある。また、負の場合は電子・陽電子の dE/dx として 1g/cm^3 の水に対する値が参照される。詳しくは、“phits/recommendation/ParticleTherapy”を参照してください。

[t-product] で、dump を指定したときは、e-type, t-type の指定は、上限と下限の意味しかありません。unit は 1 に固定です。dump 定義文を用いてダンプさせる時は、axis、file 数ともにひとつに制限されます。dump するデータを書き込むファイルは、file 定義文で指定した名前に “.dmp” を付けたファイルです。file 定義文で定義された file 名には、通常のタリーの結果が書き出されます。なお、dump で出力する粒子情報は、反応した直後にファイルに書き出されますので、ヒストリーカウンタ機能で制限を掛けることはできません。dump ファイルを使用した接続計算を idmpmode=1 で実行するには、nocas および nobch の情報を出力しておく必要があります。また、idmpmode=1 を使用するためには、ここで出力される “.dmp” が付いた dump ファイルと共に file= で指定した名前の通常のタリー出力ファイルが必要になります。メモリ共有型並列計算を実行する場合、本機能による dump ファイルの作成と dumpall によるイベント情報の書き出しは共存できませんのでご注意ください。

ソースに dump ファイルを用い、[t-product] で、dump を指定し、output = source、icntl = 6 を指定すると、dump ファイルの加工ができます。既存の dump ファイルから、特定の粒子や、特定のエネルギーの情報、また、情報の数を減らしたファイルなどを、新しい dump ファイルとして作成できます。

表 149: [t-product] パラメータ (5)

名前	値	説明
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
foamout =	0(省略時), 1, 2	1 でタリー出力結果 (数値データ) を OpenFOAM フィールドデータ形式で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を foam に変えたファイル名。 2 でタリー出力結果 (四面体要素番号、重心 <i>x</i> 座標、 <i>y</i> 座標、 <i>z</i> 座標、体積、数値データ、相対誤差) を CSV 形式 (コンマ区切り) で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を csv に変えたファイル名。 mesh=tet, axis=tet のときのみ有効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	<i>i</i> -th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	<i>i</i> -th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の <i>i</i> -th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の <i>i</i> -th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

[counter] において **coll** やこれに属する反応イベントを動作契機として設定した場合は、タリーする前にカウンター値が変わります。このため、反応イベントが起こった瞬間の情報をタリーする場合は、変更後のカウンター値を指定してください。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることが出来ます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.10 [T-DPA] セクション

“原子あたりのはじき出し数 (DPA; Displacement Per Atom)” の関数で評価される放射線損傷は、原子炉や加速器施設等で使用される材料の劣化を表す指標で、大強度ビーム、特に重イオンに関して重要な課題の一つです。原子のはじき出しは入射粒子と標的原子の衝突を起源として起こり、飛ばされた原子 (一次はじき出し原子, PKA; Primary Knock on Atom) が再度別の原子に衝突することによって連鎖的に発生します。このタリーではその頻度を DPA として出力します。輸送荷電粒子のクーロン散乱断面積からの寄与を含んでおり、重イオン入射の場合にも適切に評価されます。また、**e-mode**≥1 を用いて、低エネルギーの中性子入射反応から生成する荷電粒子による DPA の寄与も計算できます。なお、[T-DPA] セクションでは各タリー結果の合計値 (sum over) は出力されません。

表 150: [t-dpa] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz, tet	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、reg=において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	eng,reg,x,y,z,r, tet, xy,yz,xz,rz	出力データの x 軸。 出力データの x 軸 (mesh=tet でのみ有効)。 2 次元表示。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	1,2	1: DPA [x1.E-24/source] 2: DPA [1/source]
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
output =	dpa	total DPA の出力。
idpa =	0(省略時), 1	0: 欠陥の非熱的再結合補正を考慮しない dpa (NRT-dpa)。 1: 欠陥の非熱的再結合補正を考慮する dpa (arc-dpa)。
mother =	(省略可) all, 数	DPA に寄与する母核を限定する。複数定義可。 all: デフォルト。この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの核種を次の行に記述する。負の場合は、それらの母核を対象から外すことを意味する。
(次行)	208Pb Pb	質量数を指定すれば、その核。質量数を指定しなければ、その核の同位体全てを指定。複数の母核群を指定したいときは、複数の [t-dpa] セクションを定義する。

表 151: [t-dpa] パラメータ (2)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 152: [t-dpa] パラメータ (3)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
foamout =	0(省略時), 1, 2	1 でタリー出力結果 (数値データ) を OpenFOAM フィールドデータ形式で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を foam に変えたファイル名。 2 でタリー出力結果 (四面体要素番号、重心 <i>x</i> 座標、 <i>y</i> 座標、 <i>z</i> 座標、体積、数値データ、相対誤差) を CSV 形式 (コンマ区切り) で出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を csv に変えたファイル名。 mesh=tet, axis=tet のときのみ有効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。

表 153: [t-dpa] パラメータ (4)

名前	値	説明
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	i-th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.11 [T-LET] セクション

任意の物質の LET(dE/dx) の関数として、track length や、dose をタリーします。[t-heat] と異なり、ここでの dose は、荷電粒子のエネルギー付与だけをタリーします。LET の単位は、 $\text{keV}/\mu\text{m}$ です。[T-LET] を使い、中性子の輸送計算を行う場合は、Event Generator mode (e-mode ≥ 1) にする必要があります。また、電子に関しては、計算打切エネルギー (emin) 以下の粒子の寄与はタリーさせませんので、ご注意ください。

表 154: [t-let] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、reg=において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
l-type =	1,2,3,4,5	LET メッシュ。単位は $[\text{keV}/\mu\text{m}]$ 。LET メッシュサブセクションが必要。 ただし、メッシュを細かく設定しすぎる ()1 桁あたり 20 分割以上) と、得られた LET スペクトルに物理的に意味のないピークが生じますのでご注意ください。
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	let, reg, x, y, z, r, xy, yz, xz, rz	出力データの x 軸。 2 次元表示。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。

表 155: [t-let] パラメータ (2)

名前	値	説明
unit =	1,2,3,4,5,6	1: Track [cm/(keV/ μ m)/source] 2: Dose [MeV/(keV/ μ m)/source] 3: Track [cm/ln(keV/ μ m)/source] 4: Dose [MeV/ln(keV/ μ m)/source] 5: Track [cm/source] 6: Dose [MeV/source]
	7, 8, 9, 10, 11, 12	7: Track [1/cm ² /(keV/ μ m)/source] 8: Dose [MeV/cm ³ /(keV/ μ m)/source] 9: Track [1/cm ² /ln(keV/ μ m)/source] 10: Dose [MeV/cm ³ /ln(keV/ μ m)/source] 11: Track [1/cm ² /source] 12: Dose [MeV/cm ³ /source]
	13, 14	13: $L * f(L)$ [dimensionless] ただし $\int f(L)dL = 1$ に規格化。 14: $L * d(L)$ [keV/ μ m] ただし $\int d(L)dL = 1$ に規格化。
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor

Version 3.02 より新たな **unit**(=13,14) が加われました。どちらもマイクロドジメトリ分野でよく使われる形式で、 $f(L)$ と $d(L)$ は、それぞれ LET(L) に対する飛跡及び線量の確率密度 (probability density) を表します。**unit**=13, 14 の結果は、それぞれ **unit**=2, 4 の結果と比例関係にありますが、確率密度関数の積分値が 1 に規格化されているため、その絶対値が異なります。また、**sum over** の代わりに、**unit**=13 の場合は頻度平均 (Frequency mean)、**unit**=14 の場合は線量平均 (Dose mean) の値が出力されます。ただし、その誤差は出力されません (常に 0.000 となる)。なお、**unit**=13,14 は、**axis=let** のみ有効となります。

表 156: [t-let] パラメータ (3)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 157: [t-let] パラメータ (4)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
letmat =	(省略可)	LET(dE/dx) を評価する物質番号。省略時は、実際の物質。 物質を指定する場合の密度は、[Material] セクションで定義された密度となる。したがって、水に対する LET 分布を計算したい場合、[Material] セクションで、水の密度が 1g/cm^3 となるように定義する必要がある。また、負の場合は電子・陽電子の dE/dx として 1g/cm^3 の水に対する値が参照される。詳しくは、“ phits/recommendation/ParticleTherapy ”を参照してください。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[**parameters**] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.12 [T-SED] セクション

PHITS は、巨視的な体系内での放射線挙動を解析する計算コードですので、マイクロドジメトリなどで使われる DNA や細胞サイズの微視的な領域内での付与エネルギー (lineal energy (y) もしくは specific energy (z)) 分布を、[t-deposit] や [t-heat] などを用いて直接計算することはできません。そこで、飛跡構造解析の結果に基づいて構築した計算式を用いて、微小領域におけるエネルギー付与分布を計算するタリー [t-sed] を導入しました。このタリーを用いれば、 δ 線やオージェ電子による寄与も考慮して、微小領域における y 分布や z 分布を計算することができます。なお、sed の名前の由来は、Specific Energy Distribution です。計算方法の詳細は、下記の文献^{112 113} を参照してください。また、[delta ray] セクションによってコントロールする δ 線の発生機能は、本タリーとは併用できませんのでご注意ください。本タリーを使用する場合は、EGS モードを On にして電子・陽電子のカットオフエネルギーを 10 keV もしくは 100 keV に指定してください (negs=1 or 2; emin(12-13)=0.01 or 0.1)。

[t-sed] は任意の物質中の微小領域内付与エネルギー分布をタリーします。ただし、水以外の物質に対する精度検証は行っていないので、ご注意ください。その際、[t-heat] と異なり、dose は、荷電粒子のエネルギー付与だけをタリーします。したがって、[t-sed] を使い中性子の輸送計算を行う場合は、event generator mode (e-mode \geq 1) にする必要があります。微小領域の付与エネルギーを表す単位として、deposit energy ε (MeV), lineal energy y (keV/ μ m), specific energy z (Gy) があります。各単位の詳細は、ICRU Report36 をご参照ください。

表 158: [t-sed] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、reg=において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。
reg vol		volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
iechr1 =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
model =	0,1 (D=0)	0: old model (文献 ^{112, 113}) 1: new model (paper under preparation)
se-unit =	0,1,2,3	微小領域の付与エネルギー単位。 0: Number of ionizations and electronic excitations. model=1 のときのみ選択可。 1: Deposit energy ε [MeV] 2: Lineal energy y [keV/ μ m] 3: Specific energy z [Gy]
cdiam =	(省略可、D=1,0)	ターゲット領域 (球) の直径。単位は μ m で 0.001–2.0 まで指定可能。負値で指定した場合は、酸素からの Auger 電子によるピークを考慮しない。

¹¹² T. Sato, R. Watanabe and K. Niita, “Development of a calculation method for estimating the specific energy distribution in complex radiation fields”, Radiat. Prot. Dosim. 122, 41-45 (2006).

¹¹³ T. Sato, Y. Kase, R. Watanabe, K. Niita and L. Sihver, “Biological dose estimation for charged-particle therapy using an improved PHITS code coupled with a microdosimetric kinetic model”, Radiat. Res. 171, 107-117 (2009).

表 159: [t-sed] パラメータ (2)

名前	値	説明
se-type =	1, 2, 3, 4, 5	付与エネルギーメッシュ (単位は se-unit で指定)。 エネルギーメッシュサブセクションが必要 (ne , emin , emax など指定)。 実行中に 'Warning: Z bin is not enough!' と出た場合は、ここで指定する specific energy (もしくは lineal energy) の範囲が狭すぎて、マイクロドジメトリ関数で分布が正しく計算できないことを示しています。この場合、 emin を下げる、 emax を上げる、 ne を大きくするなどの対応が必要です。微少領域の直径が $1\mu\text{m}$ の Lineal energy を計算する場合 (cdiam=1.0 , se-unit=2)、 se-type=3 , emin=0.01 , emax=10000.0 , ne=60 以上が適当です。
part =	all (省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	sed, reg, x, y, z, r, xy, yz, xz, rz	出力データの x 軸。 2 次元表示。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	1,2,3,4,5,6 7,8	1: Track [cm/(keV/ μm)/source] 2: Dose [MeV/(keV/ μm)/source] $y * f(y)$ に比例 3: Track [cm/ln(keV/ μm)/source] 4: Dose [MeV/ln(keV/ μm)/source] $y * d(y)$ に比例 5: Track [cm/source] 6: Dose [MeV/source] 7: $y * f(y)$ [dimensionless] ただし $\int f(y)dy = 1$ に規格化。 8: $y * d(y)$ [keV/ μm] ただし $\int d(y)dy = 1$ に規格化。 (se-unit=2 の場合。 se-unit=1,3 の場合は、(keV/ μm) が MeV もしくは Gy となる。)
factor =	(省略可、 D=1.0)	normalization factor

Version 3.02 より新たな **unit(=7,8)** が加われました。どちらもマイクロドジメトリ分野でよく使われる形式で、 $f(y)$ と $d(y)$ は、それぞれ **Lineal energy**, y に対する飛跡及び線量の確率密度 (probability density function) を表します。**unit=7,8** の結果は、それぞれ **unit=2,4** の結果と比例関係にあります。前者は確率密度の積分値が 1 に規格化されているため、その絶対値が異なります。また、**sum over** の代わりに、**unit=7** の場合は頻度平均 (Frequency mean)、**unit=8** の場合は線量平均 (Dose mean) の値が出力されます。ただし、その誤差は出力されません (常に 0.000 となる)。なお、**unit=7,8** は、**axis=sed** のみ有効となります。

表 160: [t-sed] パラメータ (3)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 161: [t-sed] パラメータ (4)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1辺のスキャン数。
letmat =	(省略可)	LET(dE/dx) を評価する物質番号。省略時は、実際の物質。 物質を指定する場合の密度は、[Material] セクションで定義された密度となる。したがって、水に対する LET 分布を計算したい場合、[Material] セクションで、水の密度が 1g/cm^3 となるように定義する必要がある。また、負の場合は電子・陽電子の dE/dx として 1g/cm^3 の水に対する値が参照される。詳しくは、“ phits/recommendation/ParticleTherapy ” を参照してください。
rhomat =	(省略可,D=1.0)	letmat で定義した物質の密度 (g/cm^3)。[t-sed] は水に対して開発されたモデルですが、水以外の物質に適用する場合は rhomat の定義が必要となります。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[**parameters**] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.13 [T-Time] セクション

Energy cut offにより輸送を止められた粒子と escape 粒子、decay 粒子の個数を時間タリーで出力します。時間の単位は nsec です。

このタリーを用いると、energy cut off 粒子や escape 粒子、decay 粒子のエネルギースペクトルを取ることができます。特に、energy cut off 粒子だけに注目して発生時のスペクトルを取るタリーは、このタリー以外にはありません。

表 162: [t-time] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、reg=において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechr1 =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
axis =	t,eng,reg,x,y,z,r, xy,yz,xz,rz	出力データの x 軸。 2 次元表示。
samepage =	(省略可, D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種類を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。
unit =	1, 2, 3, 4	1: [1/source] 2: [1/nsec/source] 3: [1/nsec/cm ³ /source] 4: [1/nsec/cm ³ /MeV/source]
factor =	(省略可, D=1.0)	normalization factor
output =	all cutoff escape decay	energy cut off 粒子、escape 粒子および decay 粒子。 energy cut off 粒子。 escape 粒子。 decay 粒子。

表 163: [t-time] パラメータ (2)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 164: [t-time] パラメータ (3)

名前	値	説明
dump = (次行)	データ数 データ定義	ファイルに粒子の情報をダンプします。 mesh=reg のみ。正で与えた時はバイナリー、負の時はアスキーファイル。 データの順番を定義します。ただし、 idmpmode=1 の使用のためには、 nocas および nobch の情報が必要です。
material = (次行)	(省略可) all , 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。

[t-time] で、**dump** を用いることができるのは、**output = cutoff** だけです。**dump** を指定したときは、**e-type**, **t-type** の指定は、上限と下限の意味しかありません。**unit** は 1 に固定です。**dump** 定義文を用いてダンプさせる時は、**axis**, **file** 数ともにひとつに制限されます。**dump** するデータを書き込むファイルは、**file** 定義文で指定した名前に“**_dmp**”を付けたファイルです。**file** 定義文で定義された **file** 名には、通常のタリーの結果が書き出されます。なお、**dump** で出力する粒子情報は、**output** で指定した条件を満たした直後ファイルに書き出されますので、ヒストリーカウンタ機能で制限を掛けることはできません。**dump** ファイルを使用した接続計算を **idmpmode=1** で実行するには、**nocas** および **nobch** の情報を出力しておく必要があります。また、**idmpmode=1** を使用するためには、ここで出力される“**_dmp**”が付いた **dump** ファイルと共に **file=** で指定した名前の通常のタリー出力ファイルが必要になります。メモリ共有型並列計算を実行する場合、本機能による **dump** ファイルの作成と **dumpall** によるイベント情報の書き出しは共存できませんのでご注意ください。

表 165: [t-time] パラメータ (4)

名前	値	説明
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	i-th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

7.14 [T-Interact] (従来の [T-Star]) セクション

ある領域内で起きた反応回数を出力します。従来は、**star density** を計算するため **[t-star]** と名付けていましたが、原子相互作用などより一般的な反応の回数を計算できるよう拡張しましたので、**version 3.04** より **[t-interact]** に名称変更しました。ただし、プログラム上は **[t-star]** という名称も引き続き利用することが可能です。なお、原子相互作用による反応回数をタリーするためには、**EGS5** モードを使用してください (**negs=1,2**)。また、核データを使うエネルギー領域における核反応回数をタリーするためには、イベントジェネレータモードを使用する必要があります (**e-mode \geq 1**)。

表 166: [t-interact] パラメータ (1)

名前	値	説明
mesh =	reg, r-z, xyz	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、 [volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
iechrl =	72(省略時)	volume のインプットエコーの時の最大コラム数。
e-type =	1,2,3,4,5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1,2,3,4,5 (省略可)	時間メッシュ。 時間メッシュサブセクションが必要。
part =	all(省略時), 粒子名	入射粒子。
axis =	eng, reg, x, y, z, r, xy, yz, xz, rz, t act	出力データの <i>x</i> 軸。 2次元表示。 時間軸。 反応数 (MorP=prob のときに選択)。
MorP =	mean, prob (省略可)	反応数の平均値 (mean) もしくはヒストリ毎の頻度分布 (prob) を選択します。ただし、 prob は mesh=reg のときのみ選択可能です。
maxact =	(省略可、 D=100)	axis=act のときの最大反応数。この数を超える反応数が起きた場合は、その確率が overflow の欄 (sum over の手前) に出力されます。
samepage =	(省略可、 D=part)	画像出力ファイルの同じページに示すデータの種別を指定する。 axis で定義可能なパラメータを指定できる。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可、 D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の場合でも 1 つのみ指定。

表 167: [t-interact] パラメータ (2)

名前	値	説明
unit =	1, 2 11, 12	1: [1/cm ³ /source] 2: [1/cm ³ /MeV/source] 11:[1/cm ³ /nsec/source] 12:[1/cm ³ /nsec/MeV/source]
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
output =	all decay elastic nuclear fission absorption heavyion transmut atomic deltaray knockelec atmflu auger brems photoelec compton pairprod annih ts.hit ts.ioniz ts.bio ts.w	出力させる反応の種類。1 種類のみ指定可能。 全ての反応。 Decay 反応。 弾性散乱。 核反応。ただし elastic は含まない。[t-product] の nonela に相当。 核分裂。 吸収反応。 重イオン反応。 標的核が核変換を起こした場合の反応。 多重クーロン散乱を除いた原子相互作用。 デルタ線生成。 電子と陽電子による knock on electron 生成。 原子蛍光 X 線放出。 Auger 電子放出。 制動放射。 光電効果。 コンプトン散乱。 電子陽電子対生成。 陽電子消失。 飛跡構造解析モード全ての反応総計。 飛跡構造解析モード全ての電離。 飛跡構造解析モードで発生した生物学的影響を与えるイベント（電離、 電子的励起、電子捕獲、解離性電子付着）の総数。 飛跡構造解析モードで発生した電子（電離+電子剥ぎ取り）の総数。領 域内での付与エネルギーをこの値で割った結果が w 値となります。 (次ページに続く)

¹¹³ PHITS-etsmode は PHITS における電子飛跡構造解析モードのことです。

表 168: [t-interact] パラメータ (3)

名前	値	説明
		(output の続き) 個別の飛跡構造解析モード (ETS, KURBUC, ISTART, ET-SART) で発生した反応数をタリーしたい場合は、以下のパラメータをご利用ください。 PHITS-etsmode ¹¹⁴ における弾性散乱 (elastic scattering)。 PHITS-etsmode における電離 (ionization)。 PHITS-etsmode における電子的励起 (electronic excitation)。 PHITS-etsmode における解離性電子付着 (dissociative electron attachment)。 PHITS-etsmode における振動励起 (vibration excitation)。 PHITS-etsmode におけるフォノン励起 (photon excitation)。 PHITS-etsmode における回転励起 (rotation excitation)。 PHITS-etsmode におけるプラズモンによる励起 (plasmon excitation)。 PHITS-etsmode における電離と電子的励起の和。 PHITS-etsmode における全反応の和。 PHITS-KURBUC ¹¹⁵ における弾性散乱 (elastic scattering)。 PHITS-KURBUC における電離 (ionization)。 PHITS-KURBUC における電子的励起 (electronic excitation)。 PHITS-KURBUC における電子捕獲 (electron capture)。 PHITS-KURBUC における上記 3 成分の和。 PHITS-KURBUC における電子剥ぎ取り (electron stripping)。 PHITS-KURBUC におけるすべての反応の和。 ITSART ¹¹⁶ における弾性散乱 (elastic scattering)。 ITSART における電離 (ionization)。 ITSART における電子的励起 (electronic excitation)。 ITSART における電離と電子的励起の和。 ITSART における全反応の和。
mother =	(省略可) all, 数	核反応をする母核を限定する。複数定義可。 all: デフォルト。この場合省略した場合と同じ。数を指定した場合、その数だけの核種を次の行に記述する。負の場合は、それらの母核を対象から外すことを意味する。output=atomic のときは使用不可。
(次行)	208Pb Pb	質量数を指定すれば、その核。質量数を指定しなければ、その核の同位体全てを指定。複数の母核群を指定したいときは、複数の [t-interact] セクションを定義する。

¹¹⁵ PHITS-KURBUC は PHITS における炭素・陽子線飛跡構造解析モードのことです。¹¹⁶ ITSART は PHITS における任意物質・イオン飛跡構造解析モードのことです。

表 169: [t-interact] パラメータ (4)

名前	値	説明
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ。
2d-type =	1,2,3,4,5,6,7 (省略可、D=3)	2次元表示のオプション。
gshow =	0(省略時), 1, 2, 3, 4, 5	mesh=xyz , axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3)、LAT 番号 (4) を表示。 gshow=5 は、 icntl=8 の場合にピクセル形式で物質色を表示します。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	mesh=reg,tet axis=xy,yz,xz の時、 領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッ シュセクションが必要。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow,rshow を指定した際の lattice 及び連続四面体の境界線に関するオ プション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルフアントムはきれいに描画されま せん。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接 セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
resol =	1(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を求める。分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	gshow , rshow オプションの時、領域境界を表示する線の太さを定義し ます。
trcl =	(省略可)	r-z , xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義。

表 170: [t-interact] パラメータ (5)

名前	値	説明
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	タリーする material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト。この場合省略した場合と同じ数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を対象から外すことを意味する。 material 番号
volmat =	(省略可、D=9)	xyz メッシュで material が指定されている時、各メッシュの volume correction を行う。(0 で無し) volmat の値は、 xyz メッシュ1 辺のスキャン数。
epsout =	0(省略時),1,2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, rz の場合は無効。
bmpout =	0(省略時),1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時),1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
maxangel =	part 数 (省略時)	eps ファイルで表示する part の数を指定します。数値データのファイルには part で指定した粒子全ての結果が書き出されますが、 eps ファイルとして図示する際にその数を制限するパラメータです。
ctmin(i) = ctmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最小値。 i-th カウンターの最大値。
chmin(i) = chmax(i) =	(省略可、D=-9999) (省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。 ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

[counter] において **coll** やこれに属する反応イベントを動作契機として設定した場合は、タリーする前にカウンター値が変わります。このため、反応イベントが起こった瞬間の情報をタリーする場合は、変更後のカウンター値を指定してください。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができます。**stdcut** を正とし、[parameters] セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

表 171: [t-interact] パラメータ (6)

名前	値	説明
nlatcel =	(省略可)	Lattice 内にある同一セル番号での反応回数を各格子別に出力する。 MorP=prob の場合のみ有効。
nlatmem =	(省略可、D=1000)	nlatcel を利用した際の 1 ヒストリー内で別個に扱うセルの最大 個数。

7.15 [T-Dchain] セクション

このセクションでは、DCHAIN を実行するための入力ファイルを作成します。PHITS と接続計算用に整備した DCHAIN の接続計算の概要を図 65 に示します。DCHAIN の実行方法や例題については、`\phits\recommendation\DCHAIN` フォルダにある資料やサンプルインプットをご参照ください。また、DCHAIN の詳細は、`\phits\dchain-sp>manual` にあるマニュアルや DCHAIN-SP についてまとめられた資料¹¹⁷をご参照ください。

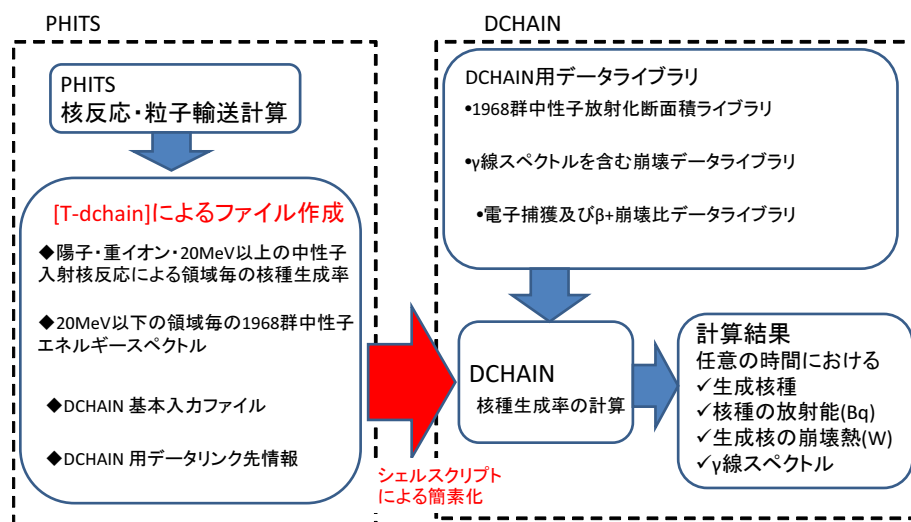


図 65: PHITS と DCHAIN の接続計算の概要。

[t-dchain] は、1968 群の中性子スペクトル、核種生成率、DCHAIN 用の基本入力ファイルを自動的に作成するためのタリーです。このタリーの出力を DCHAIN に入力することにより、任意の時間における生成核種の放射能、崩壊熱、 γ 線スペクトルを計算できます。

DCHAIN は、20MeV 以下の中性子スペクトルに 1968 群の放射化断面積を乗じて 20MeV 以下の中性子による核種生成率を計算し、陽子、重イオン、中間子、20 MeV 以上の高エネルギー中性子による核種生成率と足し合わせます。その後、崩壊データを利用して照射中及び照射終了後の任意の時刻における核種の蓄積量、誘導放射能、 γ 線エネルギースペクトル及び α 、 β 及び γ 線の放出による崩壊熱等を評価します。

PHITS 計算における粒子輸送や [source] セクションで指定する線源の時間分布による経過時間は、DCHAIN で考慮する経過時間とは無関係ですのでご注意ください。

なお、イベントジェネレータモードを使うと、低エネルギー中性子核反応による放射化も、DCHAIN のデータライブラリを使わずに PHITS で直接計算することができます。ただし、その計算精度は、データライブラリを使った場合と比べてあまり検証されていないので、[t-dchain] タリーを使う場合は、イベントジェネレータモードをオフ (e-mode=0) として計算することを奨励いたします。また、最初から放射化している核種を [material] セクションで設定しても、その放射能の寄与は DCHAIN 計算に含まれないのでご注意ください。

バージョン 3.00 以降では、[material] において質量数を指定せずに定義した元素について、天然存在比による展開を考慮した上で DCHAIN のインプットを作成するようにしました。ただし、同一核種を複数定義した場合は、後に定義した方しか考慮されないのでご注意ください。例えば、ある物質番号の組成として、

MAT[1] Fe 1 56Fe 1

と定義した場合、Fe に含まれる 56Fe の寄与は DCHAIN 実行時には無視されます。

¹¹⁷ 甲斐哲也 他, “DCHAIN-SP 2001: 高エネルギー粒子誘導放射能計算コード”, JAERI-Data/Code-2001-016 (2001).

表 172: [t-dchain] パラメータ (1)

name	値	説明
mesh =	reg, xyz, tet	メッシュ型 (reg, xyz, tet のみ対応)。 メッシュ型サブセクションが必要。(reg=セル番号)
file =	file name	DCHAIN のインプットファイル名。1 つだけ定義する。 拡張子は任意のものが使用できるが、.dtrk, .dyld, .dout は使用不可。
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。
ndata =	0, 1, 2(省略時), 3	核反応イベントの結果を核種生成断面積 (放射化断面積) データで置き換えるオプション。 0: このオプションを使用しません。 1: 陽子と中性子入射で標的核が ^4He , ^{14}N , ^{16}O の場合に置き換える。 2: 陽子、中性子、重陽子、 α 入射反応及び光核反応イベントを、e-mode を使わずに評価済み核データによって計算した場合に、file(27) で指定したフォルダにある断面積データで置き換える。 3: 陽子、中性子、重陽子、 α 入射反応及び光核反応イベントを、評価済み核データ (e-mode 有り無し両方共) や核反応モデルによって計算した場合に、file(27) で指定したフォルダにある断面積データで置き換える。
iredufmt =	0,1(省略時)	[T-Dchain] タリーの出力形式の切り替えオプション。 0 の場合、古い形式を使用する。(普通の [T-Track] と [T-Yield] の形式) 1 の場合、[T-Dchain] のために用意された新しい形式を使用する。xyz や tet で大きなメッシュ数の場合にはこちらをご使用ください。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることが出来ます。stdcut を正とし、[parameters] セクションにおいて itall=0,1 とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく stdcut よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、stdcut を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

ndata の詳細については、7.8 を参照してください。

表 173: [t-dchain] パラメータ (2)

name	値	説明
timeevo = (次行)	データ数 時間 相対強度	<p>照射・冷却時間ステップの数。</p> <p>照射時間または冷却時間、相対照射強度 (timeevo 個)。</p> <p>●照射・冷却時間ステップは、計算開始時からの通算時間ではなく、各照射・冷却ステップ毎の時間。時間の単位は、秒 (s)、分 (m)、時 (h)、日 (d)、年 (y) であり、数値と単位の間には 1 つ以上の空白が必要。例: 5 秒 → 5 s, 22 日 → 22.0 d, 8.3 年 → 8.3e+0 y また、単位と相対強度の間にも空白を入れてください。</p> <p>●相対照射強度は、線源の基準強度 (amp) に対する相対強度で、照射時間ステップ毎に変化させることができる。例: 基準強度と同じ場合は 1.0、冷却時間ステップの場合は 0.0 とする。※例 61 [t-dchain] タリーの入力例を参照。</p>
outtime = (次行)	データ数 時間	<p>計算結果出力時間の数</p> <p>計算結果出力時間 (outtime 個)。</p> <p>●正の値を指定した場合は計算開始時からの通算時間で、負の値を指定した場合は最後の照射時間ステップ終了後からの時間になる。時間の単位は、秒 (s)、分 (m)、時 (h)、日 (d)、年 (y) であり、数値と単位の間には 1 つ以上の空白が必要。照射中と冷却中の任意の時間を指定でき、照射・冷却時間ステップの区切り時間と一致する必要はない。ただし、timeevo で指定した値を超えた時間を指定することはできない。※例 61 [t-dchain] タリーの入力例を参照。</p> <p>また、例えば"0.0 m"など、放射能が 0 のときの値も出力させるオプションパラメータ iprtb2 を [t-dchain] セクション内で 0 に設定してください。</p>
amp =	(省略可, D=1.0)	<p>線源の基準強度 (source/sec)。</p> <p>[source] セクションで totfact を指定している場合は、amp×totfact が実際の線源強度 (単位 source/sec) となるように amp を調整してください。また、norm=0 (デフォルト値) で RI 線源を使用した場合、自動的に totfact に単位が source/sec となる係数が掛かるので amp=1 としてください。</p>

表 174: [t-dchain] パラメータ (3)

name	値	説明
target =	(省略可, D=0)	対象領域の構成物質（核種及び密度）の設定 なし：0, 次行以降の記載不要 あり：1, 次行以降の記載必要 ※構成物質に関するパラメータは、入力ファイルの [Material] , [Cell] , [Volume] セクションから自動的に設定されるので、通常は記述の省略が可能。 ※ [Material] で定義した核種以外を DCHAIN で計算したい場合や [Volume] で体積を定義しない場合は、次行以降に target=1 として対象領域に対する通し番号、cell 番号、体積の順番で入力し、 tg-list サブセクションが必要。（例 62 をご参照ください。）
iertdcho =	(D=1) 1 (省略時) 0	PHITS の統計誤差の DCHAIN 計算における伝播に関するオプション。（ iredufmt=0 の場合、 [t-yield] の結果の不確かさが部分的に“***_err.dyld”に出力されます。） DCHAIN 計算における伝播を評価し、その結果を放射化出力ファイル（“***.act”）に書き出します。 DCHAIN 計算における伝播を評価せず、結果の出力も行いません。
itdecs =	(D=1) 0 1 (省略時)	核破砕反応によるターゲット減少に関するオプション。 核破砕反応によるターゲット減少を考慮しない。 考慮する。
itdecn =	(D=1) 0 1 (省略時)	核データ領域の中性子反応によるターゲット減少に関するオプション。 核データ領域の中性子反応によるターゲット減少を考慮しない。 考慮する。

表 175: [t-dchain] パラメータ (4)

name	値	説明
inxslib =	(D=100)	DCHAIN で使用される中性子反応断面積ライブラリの選択。
	0,40	JEFF-3.1A (2009–2019 年の DCHAIN-SP 標準)
	1	FENDL/A-2.0 (2001–2009 年の DCHAIN-SP 標準) (古い 175 群の t-track 中性子フラックスを使用した場合のみ動作します。)
	2,20	JENDL/AD-2017
	21	JENDL-4.0 ¹¹⁸
	30	ENDF/B-VII.1 ¹¹⁹
	31	ENDF/B-VIII.0 ¹²⁰
	41	JEFF-3.3 ¹²¹
	50	FENDL/A-3.0 ¹²²
	51	EAF-2010 ¹²³
	60	BROND-3.1 ¹²⁴
	70	CENDL-3.1 ¹²⁵ Note that missing isotopic data for S, Cl, K, Ca, V, Zn, W, Hg, and Tl.
	90	TENDL-2017 ¹²⁶ ただし、ファイル容量が大きいためパッケージには含まれていません。必要な方は PHITS 事務局までご連絡ください。
	100	hybrid library composed of, in order: JENDL-5 + JENDL-4.0 + ENDF/B-VIII.0 + JEFF-3.3 + FENDL/A-3.0
	101	hybrid library of: ENDF/B-VIII.0 + JENDL-5 + JENDL-4.0 + JEFF-3.3 + FENDL/A-3.0
	102	hybrid library of: JEFF-3.3 + FENDL/A-3.0 + ENDF/B-VIII.0 + JENDL-5 + JENDL-4.0
	120	hybrid library of: JENDL/AD-2017 + JENDL-4.0 + ENDF/B-VIII.0 + JEFF-3.3 + FENDL/A-3.0 (PHITS version 3.34 以前のデフォルトライブラリ)
	-1	hnxslib パラメータでライブラリ名を指定する。(詳細は DCHAIN のマニュアルをご覧ください。)

Hybrid library は、左側が優先ライブラリです。計算時にある反応チャンネルが含まれる場合はそのデータを利用し、含まれなければその右にあるライブラリを利用し、という順番でデータを探します。

¹¹⁸ K. Shibata et al., “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering,” Journal of Nuclear Science and Technology, 48, 1, 1-30 (2011).

¹¹⁹ M. B. Chadwick et al., “ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data,” Nuclear Data Sheets, 112, 12, 2887 - 2996 (2011), special Issue on ENDF/B-VII.1 Library.

¹²⁰ D. A. Brown, et al., “ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data,” Nuclear Data Sheets, 148, 1 - 142 (2018), special Issue on Nuclear Reaction Data.

¹²¹ A. Plompen et al., “The Joint Evaluated Fission and Fusion Nuclear Data Library, JEFF-3.3,” Submitted to The European Physical Journal (2019).

¹²² R. A. Forrest, et al., “FENDL-3 Library-Summary Documentation,” Tech. Rep. INDC(NDS)-0628, International Atomic Energy Agency (Dec. 2012).

¹²³ J.-C. Sublet, et al., “The European Activation File: EAF-2010 neutron-induced cross section library,” Tech. Rep. CCFE-R (10) 05 (2010).

¹²⁴ A. I. Blokhin, et al., “New version of neutron evaluated data library BROND-3.1,” Yad. Reak. Konst, 2, 2, 62 (2016).

¹²⁵ Z. G. Ge, et al., “The updated version of Chinese evaluated nuclear data library (CENDL-3.1),” J. Korean Phys. Soc, 59, 2, 1052-1056 (2011).

¹²⁶ D. Rochman et al., “The TENDL library: hope, reality and future,” EPJ Web Conf., 146, 02006 (Sep. 2017).

これら以外にも、DCHAIN のインプットに書き込むパラメータ

imode, jmode, idivs, iregon, inmtcf, ichain, itdecs, itdecn, isomtr, ifisyd, ifisye, iyild, iggrp, ibetap,
acmin, istabl, igsdef, igsorg, ebeam, prodpn, hnxslib, hdcylib, iwrchn, chrlvth, iwrchdt, iwrchss,
idosecf, ixsrall, irdonce, foamout, foamvals, ipltmode, ipltaxis

を [t-dchain] セクションで直接指定することが可能です。各パラメータの意味や DCHAIN の入力パラメータおよび出力結果については、\phits\dchain-sp>manual にある DCHAIN のマニュアルをご参照下さい。

表 176: [t-dchain] パラメータ (5)

name	値	説明
idcylib =	(D=5) 0 2 3 4 5 (省略時)	DCHAIN で使用される崩壊データライブラリの選択。 DCHAIN の旧バージョンで使用されていたハイブリッドライブラリ (EAF-3.1, FENDL/D-1, ENSDF (1997), Table of Isotopes 8th ed. (1996), 核図表 1996) JENDL/DDF-2015 ENDF/B-VIII.0 ENDF/B-VIII.0 (優先) と JENDL/DDF-2015 のハイブリッドライブラリ。 JENDL/DDF-2015 (優先) と ENDF/B-VIII.0 のハイブリッドライブラリ。
acmin	(D=0.0) = 0.0 > 0.0 < 0.0	放射能出力ファイルに出力する核種の下限条件。 放射能の下限を自動設定 (全放射能 $\times 10^{-10}$) 放射能の下限值 [Bq] を指定。 生成核種数密度の下限值 [atoms/cm3] を指定 (-1 を乗じた負の値)。
istabl	(D=0) = 0 = 1	放射能出力ファイルの安定核種出力オプション。 出力しない。 出力する。
iphtout	0(省略時)	DCHAIN による PHITS の [source] 出力オプション。 0 or 1: RI 線源形式での [source] を出力しない。 10 or 11: proj=all で定義する RI 線源。 20 or 21: proj=photon で定義する RI 線源。 30 or 31: proj=electron で定義する RI 線源。 40 or 41: proj=positron で定義する RI 線源。 50 or 51: proj=alpha で定義する RI 線源。 下一桁を 1 にすると、従来形式 (DCHAIN のデータベースに基づく γ 線エネルギースペクトル) も出力される。例えば、iphtout=11 とした場合、proj=all で定義する RI 線源と従来形式の γ 線スペクトルが両方出力される。また、負値で定義した場合、各出力時間の線源情報が個別ファイル ("*_t1.pht","*_t2.pht"...) に出力されるため、infl コマンドで直接 PHITS 入力ファイルに取り込むことが可能となる。
iaonucl	0(省略時)	DCHAIN で出力する EPS ファイルに表示する核種数。DCHAIN の angelout_nuclides パラメータに相当。
aonucl		iaonucl で指定した数だけ核種を指定する (例 Cs-137 Ba-137m H-3)
aoreg		DCHAIN で出力する EPS に表示する領域番号。DCHAIN の angelout_region パラメータに相当。
dversion	(D=1) = 0 = 1 = 2	DCHAIN のバージョン。 DCHAIN-SP DCHAIN-PHITS DCHAIN-PHITS (ただし、ユーザが "data/dchain.EnGroup.dat" で指定する中性子エネルギー群を利用する。)

例 61: [t-dchain] タリーの入力例

```

1:      mesh = reg          <-region メッシュの指定
2:      reg = 100          <-計算領域の指定
3:      file = testDC.spd   <-DCHAIN 入力ファイル名の指定
4:      title = [t-dchain] test calc.
5:      amp = 1.0E12        <-線源の基準強度 (source/秒)
6:
7:      timeevo = 4          <-照射・冷却時間ステップの数
8:          3.0 h  1.0      <-3 時間運転
9:          2.0 h  0.0      <-2 時間運転停止
10:         3.5 h  1.0      <-3.5 時間運転
11:         15.5 h 0.0      <-15.5 時間運転停止
12:
13:      outtime = 3          <-計算結果出力時間の数
14:          3.0 h          <-運転開始から 3.0 時間後
15:          -1.0 h         <-最後の照射終了時間から 1 時間後
16:          -3.0 h         <-最後の照射終了時間から 3 時間後

```

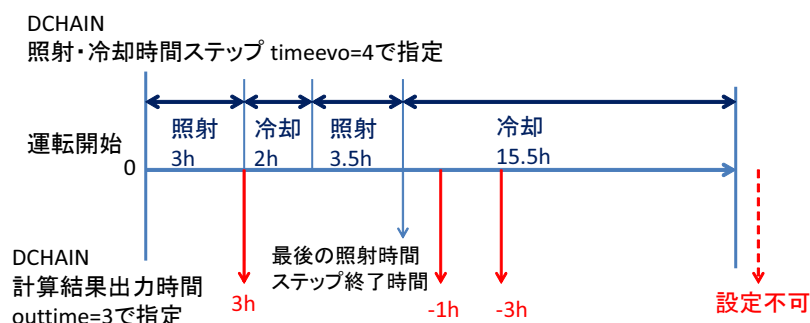


図 66: 例 61 における照射・冷却時間ステップと計算結果出力時間の関係。

例 62: [t-dchain] のパラメータ target=1 の場合の入力例

```

.....
:      target = 1          <-対象領域の構成物質 (核種及び密度) の設定有
:      non    reg    vol   <-省略可
:      1      1    8000.0   <-通し番号、cell 番号、体積 (cm^3)
:      tg-list = 2         <-対象領域構成物質に含まれる核種の数
:          H-1  6.689E-02   <-核種の元素記号と原子数密度 (10^24 個/cm^3)
:          O-16 3.345E-02
:      2      2    2000.0   <-通し番号、cell 番号、体積 (cm^3)
:      tg-list = 1         <-対象領域構成物質に含まれる核種の数
:          Fe-56 8.385E-02  <-核種の元素記号と原子数密度 (10^24 個/cm^3)

```

他に必要な PHITS 入力ファイルの設定及び注意事項は次のとおりです。

- [Parameters] セクションにおいて次のパラメータの設定を行う必要があります。

- file(21): DCHAIN 用データフォルダの場所を指定します。

- [Volume] セクションにおいて各領域の体積を指定します。PHITS には reg メッシュの体積を自動で計算する機能がないため、この入力が必要となります。

このセクションが作成するファイルで、DCHAIN 実行に必要なファイルを以下に示します。ここで、*** は file=で指定した、拡張子を除く名前を示します。

- DCHAIN の基本入力ファイル: file で指定したファイル。

- 20MeV 以下の中性子スペクトルファイル: “***.dtrk”
- 核種生成率ファイル: “***.dyld”
- DCHAIN 用データ格納フォルダのリンク名が書かれたファイル: “dch.link.dat”

DCHAIN を実行する際に、下記の名前をもつファイルは消えてしまうのでご注意ください。
“yield.out, out-gsdef, out-gamsporg, out-allreg, spd-act.out, angel-data.ang, out-phits, out-dcychains”

7.16 [T-WWG] セクション

[t-wwg] は、[weight window] セクションのパラメータを出力するタリーです。想定している 3 次元体系に対して、weight window 機能が効果的に動作するパラメータを自動で得ることができる Weight Window Generator (WWG) です。基本的には、まず [t-wwg] を設定したインプットで仮計算を行い、次に、得られた [weight window] のパラメータを加えたインプットで本計算を行う、という流れで本タリーを利用します。mesh=reg の場合は [volume] セクション等により各セルの体積を与えておく必要があります。また、再開計算機能や sumtally 機能を利用したい場合は、wwg 以外の axis を定義した上で、[parameters] セクションで ireschk=1 (デフォルト値) とする必要があります。ただし、粒子誘導機能を利用 (chwei パラメータを指定) した場合は、再開計算機能や sumtally 機能は使えません。

出力する [weight window] の下限値 $W_{klm,low}$ は、仮計算で得られた各メッシュのフルエンス $\Sigma_j \Phi_{jklm}$ (j はヒストリー、 k は粒子、 l はエネルギーメッシュ、 m は幾何学メッシュ) に基づいて次式で決定します。

$$W_{klm,low} = C_{kl} \left[\left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,x\%ile} + \Sigma_j \Phi_{jklm} \right]. \quad (38)$$

ここで $\left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,x\%ile}$ は粒子 k 、エネルギーメッシュ l に対するフルエンスの下限 x パーセンタイル値を表し、 x の値は pedestal パラメータより指定可能です (初期値は 10 パーセンタイル)。Version3.34 までは自動的に最小値を選ぶようにしていましたが、 $\Sigma_j \Phi_{jklm}$ が 0 の場合が多いと粒子の無限増殖が頻発してしまうため、ある程度の大きさの値を設定するように変更しました。式 (38) の C_{kl} は規格化定数で、normww パラメータに応じて次式で決定します。

$$C_{kl} = \begin{cases} \frac{W_{\max}}{\left[\left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,x\%ile} + \left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,\max} \right]} & \text{for normww} = 0 \\ \frac{W_{\max}}{\left[\left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,x\%ile} + \left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,\max} \right]} \frac{\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{k,l}}{\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{k,l,\max \text{ or } \min}} & \text{for normww} = 1 \text{ or } -1 \\ \frac{W_{\max}}{\left[\left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,x\%ile} + \left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,\max} \right]} \frac{\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{k,l}}{\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{\max \text{ or } \min}} & \text{for normww} = 2 \text{ or } -2 \end{cases} \quad (39)$$

ここで $\left(\Sigma_j \Phi_{jklm} \right)_{k,l,\max}$ は $\Sigma_j \Phi_{jklm}$ の最大値、 $\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{k,l}$ 、 $\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{k,l,\max \text{ or } \min}$ 及び $\left(\Sigma_{jm} \Phi_{jklm} \right)_{\max \text{ or } \min}$ は、空間的に積分したフルエンスとその最大値 (もしくは最小値)、 W_{\max} は wwmax パラメータで指定する $W_{klm,low}$ の最大値で、デフォルトは 0.99 となります。 W_{\max} のデフォルト値が 1 でない理由は、桁落ちの関係でウェイト 1 の線源が発生した際にいきなり分割されてしまうのを防ぐためです。normww パラメータは、粒子、エネルギー群間でモンテカルロ粒子数¹²⁷の調整の有無を決めるオプションで、例えば 1 を選択した場合は、各エネルギー群のモンテカルロ粒子数が均等になるように [weight window] が調整されます。

通常の設定では、指定した領域内のモンテカルロ粒子ができる限り均等になるような [weight window] を生成します。一方、遮へい体後方における特定領域の線量を短時間で精度良く評価したい場合などは、ヒストリーカウンターと chwei(i) パラメータで指定する誘導強度 B_{\max} を組み合わせることにより、その領域にモンテカルロ粒子が届きやすくなるようバイアスを掛けた粒子誘導型の [weight window] を生成することができます。各領域のバイアスファクター B_{klm} は、その領域のモンテカルロ粒子フルエンス φ_{jklm} より次式で決定します。

$$B_{klm} = \frac{\Sigma_j H_{ij} \varphi_{jklm}}{\left(\Sigma_j H_{ij} \varphi_{jklm} \right)_{k,l,\max}} [B_{\max} - 1] + 1. \quad (40)$$

ここで H_{ij} は、 j 番目のヒストリーにおけるカウンター番号 i のヒストリーカウンター値を表します。 B_{klm} は、 $\Sigma_j H_{ij} \varphi_{jklm}$ が最大となる領域で $B_{\max} = \text{chwei}(i)$ となり最も大きくなります。本機能を用いた場合、式 (38) 及び (39) の $\Sigma_j \Phi_{jklm}$ が $\Sigma_j \Phi_{jklm} / B_{klm}$ に置換され、 B_{klm} が大きい領域ほど $W_{klm,low}$ が小さくなります。詳細は、文献¹²⁸や講習会資料¹²⁹をご参照ください。

¹²⁷ モンテカルロ計算で実際に追跡する粒子の数。ウェイトを乗じる前のフルエンスに相当。

¹²⁸ Sato et al. Nucl. Instr. & Meth. B, 2024; 557: 165535.

¹²⁹ “phits/lecture/advanced/weightB”や“phits/lecture/advanced/shielding”

[t-wwg] の入力書式は、以下の通りです。

表 177: [t-wwg] パラメータ (1)

name	値	説明
mesh =	reg, xyz, tet	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。reg、xyz と tet のみ指定可。
part =	all(省略時), 粒子名	タリーする粒子。
material = (次行)	(省略可) all, 数 2 5 8	スコアする material を限定する。複数定義可 all: デフォルト、この場合省略した場合と同じ。 数を指定した場合、その数だけの material を 次の行に記述する。 material 番号。
e-type =	1, 2, 3, 4, 5	エネルギーメッシュ。 エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1, 2, 3, 4, 5 (省略可)	時間メッシュ。エネルギーメッシュと併用不可。 時間メッシュサブセクションが必要
unit =	1(省略可)	1: [1/cm ² /source] 1 のみ指定可。
axis =	eng, reg, tet, xy, yz, xz, t, ww	出力データの x 軸。wwg 以外は [t-track] と同じ。 再開計算が必要な場合は、2 つ以上の axis を定義 し、最初の 1 つを wwg 以外のどれかで指定する。
file =	file name	axis の数だけ定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開計算時の過去タリーファイル名。複数 axis の 場合でも 1 つのみ指定。

このタリーでは、mesh は reg、xyz と tet のみ指定可能で、r-z は指定できません。これは、[weight window] セクションのパラメータが r-z の形式に対応していないためです。mesh=xyz を指定した場合は、x,y,z メッシュの面と cell の面が一致しないようご注意ください。特に、パラメータを使ってジオメトリと xyz メッシュ範囲を連動させている場合はご注意ください。なお、version 3.34 より、[weight window] 及び [t-wwg] の xyz メッシュ最大値・最小値が整数で定義された場合は、その整数から最小値は $-1 \cdot \text{deltxyz}$ 、最大値は $+2 \cdot \text{deltxyz}$ ずらすようにしています。(FAQ 2.9 参照)。mesh=tet は連続四面体形状を含む体系でしか使用できません。連続四面体形状を構成する各四面体要素の値を出力することができます。出力の axis には、基本的に、[weight window] セクションのパラメータを出力する wwg を指定してください。この他に、eng, reg, tet, xy, yz, xz, t も指定できますが、これらは [t-track] で指定した場合と同じ結果しか得られず、[weight window] に関係する値は得られません。ここで、xy, yz, xz の 2 次元表示は rshow=1 を指定したときのみに有効です。

表 178: [t-wwg] パラメータ (2)

name	値	説明
factor =	(省略可、D=1.0)	normalization factor
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
angel =	(省略可)	angel パラメータ
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	axis=xy,yz,xz の時、領域境界 (1)、物質番号 (2)、 領域番号 (3) を表示。 この下に xyz のメッシュ型サブセクションが必要。
resol =	1(省略時)	rshow 時の表示オプション。
width =	0.5(省略時)	rshow 時の表示オプション。
volume	(省略可)	reg メッシュの時に、各領域の体積を定義します。この行の下に volume 定義文が必要です。省略した場合、[volume] セクションで定義された体積の値が使用されます。 また、 reg= において () 等により特殊な領域指定を行った場合は、 volume を省略すると、インプットエコーに PHITS 内部で与えられた領域番号が出力されます。 volume 定義文。書式は 6.1.2 を参照。
reg vol		
epsout =	0(省略時), 1, 2	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。 ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名。 2 とすることで更に誤差棒を表示する。ただし、 axis= xy, yz, xz, wwg の場合は無効。
trcl =	(省略可)	rshow での座標変換。
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	gshow を指定した際の lattice の境界線に関するオプション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルファントムはきれいに描画されません。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、 Lattice や連続四面体以外でも、隣接セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、 gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。

表 179: [t-wwg] パラメータ (3)

name	値	説明
pedestal =	(省略可、D=0.1)	フラックスが 0 の領域における weight window の下限値を決定するパーセンタイル値 (式 (38) の x) $\div 100$ 。
normww	(省略可、D=-2)	粒子、エネルギー群間でモンテカルロ粒子数の調整の有無を決めるオプション (式 (39) 参照)。 0: 調整を行わない。 ± 1 : 各エネルギー群のモンテカルロ粒子数が等しくなるように調整する。 ± 2 : 各粒子・エネルギー群のモンテカルロ粒子数が等しくなるように調整する。
wwmax	(省略可、D=0.99)	規格化定数。 $W_{klm,low}$ の最大値に相当 (式 (39) 参照)。

normww を正值で指定した場合は、全体的にウェイトウィンドウ値が低くなるため、主に粒子分割により各粒子のウェイトをコントロールします。一方、負値で指定した場合は、全体的にウェイトウィンドウ値が高くなるため、ロシアンルーレットが頻繁に行われるようになります。幅広いエネルギー分布を持つ線源の場合などヒストリ毎の分散が大きい計算条件に対しては、1 ヒストリあたりの計算時間が短くなる負値の方が単位計算時間当たりの統計が良くなります。したがって、**normww** のデフォルト値は-2としています。ただし、**normww=-2** かつ各粒子・各エネルギー群の中で 1 つでも粒子フルエンスが極端に低い群がある場合、それ以外の群に属するほとんどの粒子がロシアンルーレットによりカットされてしまいますので、粒子やエネルギー群の設定には十分にご注意ください。**part** に関しては、**all** もしくは **neutron photon** (中性子・光子のみの輸送計算の場合) と設定することを奨励します。エネルギー群に関しては、最大でも 2 から 3 群程度とし、タリーへの寄与の大きいエネルギー帯の群幅を少し狭く設定してください。なお、どのような設定が最適か不明な場合は、**part=all**、**ne=1** を奨励します。その場合、計算結果は **normww** には依存しません。

表 180: [t-wwg] パラメータ (4)

name	値	説明
ctmin(i) =	(省略可、D=-9999)	i-th カウンターの最小値。
ctmax(i) =	(省略可、D= 9999)	i-th カウンターの最大値。
chmin(i) =	(省略可、D=-9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最小値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chmax(i) =	(省略可、D= 9999)	ヒストリー内で発生した全粒子の i-th カウンターの最大値。バッチ分散モード (istdev=1) では設定不可。
chwei(i) =	(省略可、D=0)	粒子誘導型 [t-wwg] を利用する際の誘導強度 (式 (40) の B_{\max})。i はカウンター番号。このパラメータは、カウンター番号に関わらず 1 つの [t-wwg] に対して 1 つしか定義することはできません。このパラメータを定義した場合、再開計算や sumtally による結果の合算ができなくなりますのでご注意ください。
chplane=	(省略可、D=all)	式 (40) の $(\sum_j H_{ij} \varphi_{jklm})_{k,l,\max}$ を決定する際に最大値を検索する面。デフォルト値は all で、全ての領域から最大値を検索します。xy, yz, もしくは xz を指定した場合は、それらの面毎に最大値を決定して規格化します。ダクトストリーミング計算に粒子誘導型 [t-wwg] を使う場合、ダクトと垂直な面を指定すると本計算の計算時間が短縮できます。本パラメータは、mesh=xyz かつ chwei が定義された場合のみ有効となります。
elowthre	(省略可、D=0)	低エネルギー・アンバイアス法のしきい値エネルギー [MeV]。このエネルギー以下の weight window 下限値を定数倍することにより、人為的に低エネルギー側のモンテカルロ粒子密度を下げて計算時間を短縮することができる。0 の場合は、低エネルギー・アンバイアス法は使わない。また低エネルギー・アンバイアス法を使う場合は ne=1 としてください。
elowbias	(省略可、D=5.0)	低エネルギー・アンバイアス法を利用する場合の低エネルギー群 weight window 下限値の倍率。
stdcut =	(省略可、D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることができません。stdcut を正とし、[parameters] セクションにおいて itall=0,1 とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が 0 より大きく stdcut よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、stdcut を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

wwg の出力例を以下に示します。

```
[ Weight Window ]
  mesh =  reg

set:  c71[0.0]  c72[c71+2.13496E-08]  c73[1.25478E-04]
set:  c74[0.0]  c75[c74+9.29569E-09]  c76[2.08987E-04]

part = neutron
eng =  2
      1.000000E-03  1.000000E+03

reg          ww1          ww2
1  (8.94092E-05+c71)/c73  (2.08987E-04+c74)/c76
2  (1.25478E-04+c71)/c73  (1.26817E-04+c74)/c76
3  (8.53835E-05+c71)/c73  (5.78131E-05+c74)/c76
```

ここでは、中性子に対して、2群のエネルギービンの weight window のパラメータが定義されています。パラメータの定義には c** で表される定数が使われています。この場合、c71-c73 が第 1 エネルギー群 ($E < 1\text{keV}$) に対するパラメータ c74-76 が第 2 エネルギー群 ($1\text{keV} < E < 1\text{GeV}$) に対するパラメータです。これらのパラメータの中でユーザー自身を変更する可能性があるパラメータは、各群に対して左端で定義される初期設定値が 0 のパラメータ c71 や c74 などです。これらのパラメータは、各群の weight window にある一定値を加える際、利用します。

7.17 [T-WWBG] セクション

[t-wwbg] は、[ww bias] のパラメータを出力するタリーです。本タリーは Weight Window Bias Generator (WWBG) となっており、[weight window] で与えるウエイトの下限値にバイアス（傾斜）をかけることができる [ww bias] のパラメータを自動的に用意することができます。[ww bias] は、特に、[t-wwg] を用いて自動的に [weight window] を作成した際、更に特定の領域にウエイト値のバイアスをかけたい場合に利用できます。図 67 に、[weight window] と [ww bias] を組み合わせた輸送計算を実行する際の流れを示しました。最初に [t-wwg] を用いて [weight window] を作成します。これで十分な場合は不要ですが、注目しているタリー領域が限定的である場合は、[ww bias] を作成して特定の領域にバイアスをかけることにより、効率的に統計量を増やすことが可能となります。[ww bias] を作成する方法は 2 通りあり、本節でご紹介する [t-wwbg] を利用して自動的に作成する方法と、手動で作成する方法です。[t-wwbg] は、1 つのインプットファイルにおいて 1 つのみ指定でき、[parameters] において icntl=15 とすることで動作します。[ww bias] の設定方法や手動で作成する方法については、5.20 節 WW Bias セクションをご覧ください。また、作成した [ww bias] と [weight window] を組み合わせた輸送計算を実行する場合は、[parameters] において icntl=0 および iwwbias=1 としてください。

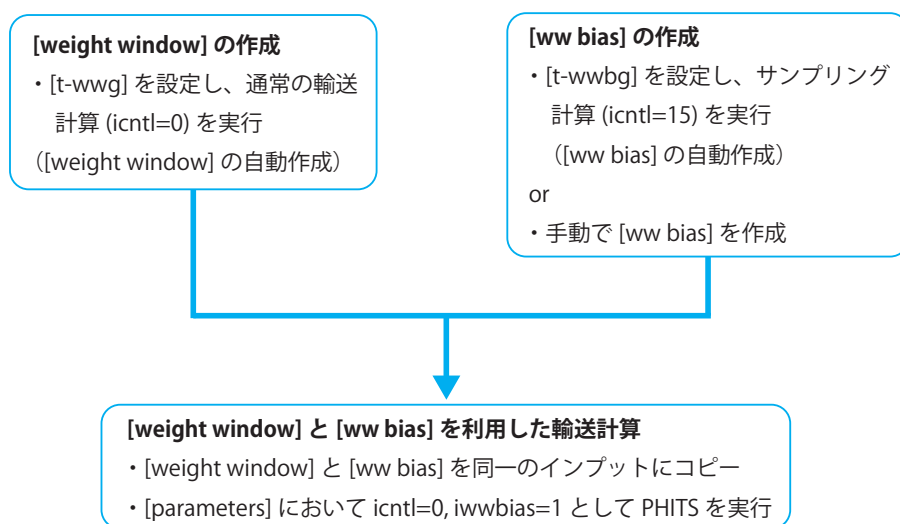


図 67: [weight window] と [ww bias] を組み合わせた輸送計算の概要。

[t-wwbg] で用意されるバイアス値は、図 68 にある始点 (x_0, y_0, z_0) と終点 (x_1, y_1, z_1) で決まるベクトルを中心軸とする複数の円柱領域において段階的に設定されます。図 68 に示したのは、3 つの大きさの違う円柱が入れ子構造となっている円柱領域の断面図です。円柱領域を指定するのに必要なパラメータは、上

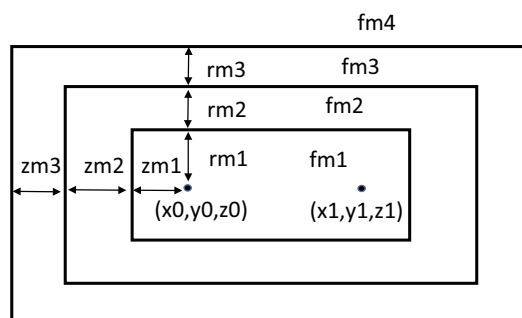


図 68: 円柱領域を指定する際のパラメータ。

記の始点と終点の座標の他、**n-mesh**, **r-mesh**, **z-mesh**, **f-mesh** です。**n-mesh** は入れ子構造を取る円柱の数です。**r-mesh**, **z-mesh** はそれぞれ円柱の半径と高さに関する差分量となっており、図 68 に示すように各円柱の大きさを定義します。これらはそれぞれ **n-mesh** の数と同じだけ指定する必要があります。また、**f-mesh** では、[**t-wwbg**] で指定したいバイアス値を円柱領域の内側から指定することができます。**f-mesh** として (**n-mesh**)+1 個のバイアス値が必要で、最後の値は定義された円柱領域外のバイアス値を意味します。これらの円柱領域は実際の輸送計算の体系とは無関係に定義することができ、指定された各円柱領域のバイアス値を参照しながら、実際の各領域のバイアス値を決定します。なお、このセクションで定義した円柱領域が [**cell**] で定義した外部ボイド領域に入ってしまう場合は、**r-out** を用いて外部ボイドを拡張することができます。

[**t-wwbg**] の入力書式は、以下の通りです。

表 181: [**t-wwbg**] パラメータ

name	値	説明
mesh =	reg, xyz, tet	メッシュ型。メッシュ型サブセクションが必要。 reg , xyz と tet だけ指定可。
part =	all (省略時), 粒子名	タリーする粒子。
e-type =	1, 2, 3, 4, 5	エネルギーメッシュ。エネルギーメッシュサブセクションが必要。
t-type =	1, 2, 3, 4, 5 (省略可)	時間メッシュ。時間メッシュサブセクションが必要。 エネルギーメッシュとの併用は不可。
axis =	xy, yz, xz, wwbg	再開始計算は不可。 xy, yz, xz は rshow オプションが必要。
file =	file name	出力ファイル名。 axis の数だけ定義する。
angel =	(省略可)	angel パラメータ。
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト。
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト。
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト。
rshow =	0(省略時), 1, 2, 3	axis=xy,yz,xz の時、領域境界 (1)、物質番号 (2)、領域番号 (3) を表示。この下に xyz 形状メッシュセクションが必要。
resol =	1(省略時)	rshow 時の表示オプション。
width =	0.5(省略時)	rshow 時の表示オプション。
epsout =	0(省略時), 1	eps ファイルの出力オプション。ファイル名は、 file で指定した出力ファイルの拡張子を eps に変えた名称。
x0, y0, z0 =		バイアスをかける円柱領域の始点の <i>x, y, z</i> 座標。
x1, y1, z1 =		バイアスをかける円柱領域の終点の <i>x, y, z</i> 座標。
n-mesh =	n	円柱領域の数。
r-mesh =	rm1, rm2, ..., rmn	円柱領域の半径の差分。 n-mesh で指定した数だけ必要。
z-mesh =	zm1, zm2, ..., zmn	円柱領域の長さ方向の差分。 n-mesh で指定した数だけ必要。
f-mesh =	fm1, fm2, ..., fmn, fm(n+1)	円柱領域のバイアス値。 (n-mesh で指定した数) +1 だけ必要。
r-out =	(省略可, D=0)	拡張する外部ボイドの半径 [cm]。D=0 の場合は拡張なし。

[weight window] と [ww bias] を組み合わせて輸送計算で使用するには、同じ領域を指定する必要があるため、[t-wwg] を用いて自動的に [weight window] を作成する場合は、[t-wwbg] にも [t-wwg] と同じ領域の定義が必要です。

[t-wwbg] の入力例を以下に示します。

例 63: [t-wwbg] の入力例

```

1:  [ T - WWBG ]
2:      mesh = xyz
3:      x-type = 2
4:      nx = 30
5:      xmin = -75
6:      xmax = 75
7:      y-type = 2
8:      ny = 30
9:      ymin = -75
10:     ymax = 75
11:     z-type = 2
12:     nz = 40
13:     zmin = 0.0
14:     zmax = 200
15:     axis = wwbg
16:     file = wwbg.out
17:     part = neutron
18:     e-type = 1
19:     ne = 2
20:     0.0 1e-3 1.0
21:     x0 = 0.0
22:     y0 = -20
23:     z0 = 50
24:     x1 = 0.0
25:     y1 = 20
26:     z1 = 150
27:     n-mesh = 3
28:     r-mesh = 10 10 10
29:     z-mesh = 10 10 10
30:     f-mesh = 1.0 0.5 0.1 0.05
31:     r-out = 1000

```

この例題では、始点と終点をそれぞれ (0, -20, 50), (0, 20, 150) としており、これらにより指定されるベクトルを中心軸とした 3 つの円柱領域が定義されています。図 69 に示したのが、この例題で用意されるバイアス値の空間分布です。3 つの円柱の半径は **r-mesh** により指定されており、一番内側のものから 10cm ずつ増加しています。また、これらの円柱の高さは **z-mesh** により指定されており、円柱の上面側と底面側にそれぞれ 10cm ずつ、すなわち、円柱の高さとして 20cm ずつ増加しています。バイアス値は、**f-mesh** により、円柱領域の内側から 1.0, 0.5, 0.1, 0.05 と段階的に設定されており、その変化の様子を図 69 の色の变化から確認することができます。

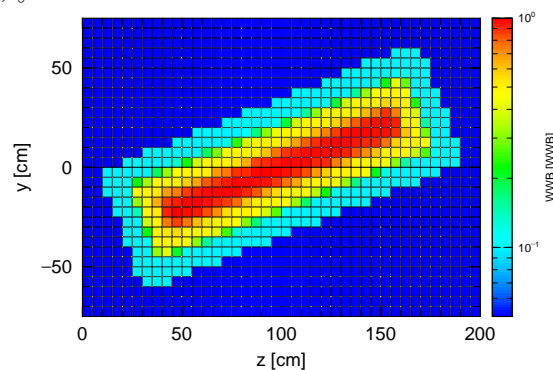


図 69: 例 63 により用意されるバイアス値の空間分布。

7.18 [T-Volume] セクション

各タリーにおいて **mesh=reg** とした場合、特定の **unit** の結果を正しく求めるためには、各セルの体積が必要となります。**[t-volume]** セクションは各セルの体積を自動で計算するためのタリーです。この体積自動計算機能では、各セルの物質を真空 (**void**) とし、特別な線源領域を設定したモンテカルロ積分を実行します。

本機能を使用する際は、**[t-volume]** セクションを設定し、**[parameters]** セクションにおいて **icntl=14** としてください。本タリーは、1つのインプットファイルにおいて1つのみ指定できます。

[t-volume] の入力書式は、以下の通りです。

表 182: **[t-volume]** パラメータ

name	値	説明
mesh =	reg	メッシュ型。 reg だけ指定可。
file =	file name	ファイ名を定義する。
resfile =	(省略可, D=file)	再開始計算時の過去タリーファイル名。
r-out =	(省略可, D=0.0)	外部ボイドの半径 (cm)。
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル。
method =	(省略可, D=0)	モンテカルロ積分に関するオプション。 0: 粒子軌跡による積分。 1: 線源発生源点による積分。
s-type =	1, 2	体積計算の線源の種類。 1: 球体系線源。原点 (x0, y0, z0) と半径 r0 が必要。 2: 直方体線源。 x0, x1, y0, y1, z0, z1 が必要。
x0, y0, z0, x1, y1, z1, r0 =		線源の形状を定義する座標や半径。
stdcut =	(省略可, D=-1)	統計誤差による計算打ち切り機能のしきい値。

s-type により、体積計算時の線源の種類を指定できます。**s-type=1** では、中心を (**x0,y0,z0**) とし半径を **r0** とする球の表面から、法線内向きに **cos** 分布となるよう線源を発生させます。**s-type=2** では、**x=x0** と **x1**、**y=y0** と **y1**、**z=z0** と **z1** の面により形作られる直方体の6面から、法線内向きに様な線源を発生させます。いずれの種類の場合でも、対象とするセルが線源領域に十分な余裕をもって囲まれるようにしてください。また、これらの領域に外部ボイド (物質番号-1) の領域が含まれないように注意してください。

stdcut を指定することで、タリー結果の統計誤差を基準として、PHITS の計算を打ち切ることが出来ます。**stdcut** を正とし、**[parameters]** セクションにおいて **itall=0,1** とした場合に機能します。バッチ終了時、タリー結果の全ての統計誤差が0より大きく **stdcut** よりも小さくなった場合に、そのバッチで計算を終了します。ただし、計算が終了するのは、そのタリーの全ての結果が条件を満たした場合になります。また、**stdcut** を指定したタリーセクションが複数ある場合は、全てのタリーセクションの結果が条件を満たした時に計算を終了します。

本機能を用いて PHITS を実行した場合、**file(6)** (D=phits.out) において出力される **[source]** には、体積計算で使った線源の情報が書き出されます。インプットファイルにある **[source]** の内容は出力されませんのでご注意ください。

以下に [t-volume] の一例を示します。

例 64: [t-volume] の例題

```

1:  [ T - V o l u m e ]
2:    mesh =  reg          # mesh type is region-wise
3:    reg = 101 102 103 104 105
4:    file = volume.out    # file name of output for [volume]
5:    s-type = 1           # 1: Sphere source, 2: Rectangular source
6:    x0 = 0.0             # (D=0.0) x of sphere center
7:    y0 = 0.0             # (D=0.0) y of sphere center
8:    z0 = 0.0             # (D=0.0) z of sphere center
9:    r0 = 50.0            # radius of sphere

```

[t-volume] において mesh=reg とし、体積を求めたいセルの番号を reg=にて指定します。s-type の選択とこれに関連した x0 などのパラメータを設定することで、体積計算用の特別な線源領域を定義します。基本的に、対象とするセルを囲むように線源領域を決定してください。対象とするセルが線源領域を越えていると正しく計算できません。また、逆に線源領域を広く取り過ぎると、計算時間が長くなってしまいますのでご注意ください。求めた体積は、file=で指定したファイルに出力されます。この出力ファイルの形式は以下の通りです。

```

[ T - V o l u m e ] off
    mesh =  reg          # mesh type is region-wise
    ....
    ....

[ V o l u m e ]
non      reg      vol      non
  1      101      5.0370E+02  0.2909
  2      102      2.4727E+03  0.1634
    ....
    ....

# Information for Restart Calculation
    ....
    ....

```

[volume] セクションの形式で出力されるので、infl コマンド等により、icntl=0 とした本計算で使用できます。ここで、[volume] の最後の列にある数字は計算した体積の統計誤差（相対誤差）です。再開始計算のための情報も出力されていますので、統計誤差が大きい場合は、[parameters] に istdev=-1 or -2 を加えて、再開始計算を行なってください。

7.19 [T-Userdefined] セクション

ユーザー定義タリーは、通常のタリーでは得ることができない様々な物理量をタリーする機能です。各ユーザーが PHITS のソースファイル `usrtally.f` を Fortran 言語を用いて変更し、求める物理量を書き出します。このため、ソースファイルのコンパイルが必要となります。

インプットファイルで `[t-userdefined]` セクションを定義することにより、PHITS 実行時に `subroutine usrtally` を通過するようになります。通過のタイミングは `dumpall` の書き出しと同じで、あらゆるイベントが発生した時です。本タリーの基本的な考え方として、`subroutine usrtally` で示されている変数を if 文等の条件で選別してカウントすることで、求める物理量を引き出します。この `subroutine` で扱うことができる変数を以下で説明しますが、中には値を変更すると PHITS の計算がおかしくなる変数もあるので、十分に注意してください。本タリーの具体的な利用方法については、`\phits\utility\usrtally` フォルダにある `readme` やサンプルインプットをご参照ください。

`[t-userdefined]` セクションでは、書き出し用ファイル名を与える `file` と `subroutine usrtally` で使用できるパラメータの数を指定する `nudtvar` およびそのパラメータの値 `udtvar(i)`¹³⁰が定義できます。これらは再コンパイルせずに変更できる変数となります。

表 183: `[t-userdefined]` パラメータ

name	値	説明
<code>file =</code>	file name	<code>subroutine usrtally</code> 内で使用できる書き出し用ファイル。最大 50 まで定義できる（装置番号=151-200）。
<code>nudtvar =</code> <code>udtvar(i) =</code>	0（省略時） 数値 (D=0)	定義する <code>udtvar(i)</code> の数。 <code>subroutine usrtally</code> 内で使用できるパラメータ。 <code>i = nudtvar</code> まで定義できる。

例 65: `[T-Userdefined]` パラメータの入力例

```

1:      file = output1.dat      <-装置番号は 151 で、subroutine usrtally 内では iudtf(1)
2:      file = output2.dat      <-装置番号は 152 で、subroutine usrtally 内では iudtf(2)
3:      nudtvar = 2              <-subroutine usrtally 内では nudtvar
4:      udtvar(1) = 20.0         <-subroutine usrtally 内では udtvar(1)
5:      udtvar(2) = -10.0        <-subroutine usrtally 内では udtvar(2)

```

¹³⁰ バージョン 3.01 以前の `udtparai` ($i = 0 - 9$) と同様の役割を果たします。バージョン 3.02 以降の PHITS でも `udtparai` は使用可能です。

以下が **subroutine usrtally** 内で示されている変数となります。

(1) **NCOL**:

これはプログラムの中の変数で、粒子輸送のタイミングの認識変数です。

NCOL

- 1 : start of calculation
- 2 : end of calculation
- 3 : end of a batch
- 4 : source
- 5 : detection of geometry error
- 6 : recovery of geometry error
- 7 : termination by geometry error
- 8 : termination by weight cut-off
- 9 : termination by time cut-off
- 10 : geometry boundary crossing
- 11 : termination by energy cut-off
- 12 : termination by escape or leakage
- 13 : (n,x) reaction
- 14 : (n,n'x) reaction
- 15 : sequential transport only for tally
- 16 : surface cross for WW of xyz mesh

(2) **npe, me**:

それぞれメモリ分散型並列計算時の並列 PE(Processor Element) 数と各 Element の識別番号。

(3) **ipomp,npomp**:

それぞれメモリ共有型並列計算時のスレッド識別番号と使用している全スレッド数。

(4) **iusrally**:

subroutine usrtally への通過をコントロールするパラメータ。インプットファイルに [T-Userdefined] セクションがあれば 1 となっています。

(5) **iudtf(50)**:

file で定義したファイルの装置番号 (151-200)。

(6) **nudtvar**:

nudtvar として定義した数。使用できる **udtvar(i)** の上限値。

(7) **udtvar(i)**:

udtvar(i) で定義した値。**i=nudtvar** まで使用できる。インプットファイルで定義していない **udtvar(i)** には 0 が入っている。

(8) **NOCAS, NOBCH, RCASC, RSOUIN**:

- NOCAS** : current event number in this batch
- NOBCH** : current batch number
- RCASC** : real number of **NOCAS+maxcas*(NOBCH-1)**
- RSOUIN** : sum of the weight of source particle

(9) NO, IDMN, ITYP, KTYP, JTYP, MTYP, RTYP, OLDWT:

NO : cascade id in this event
 IDMN : material id
 ITYP : particle type
 KTYP : particle kf-code
 JTYP : charge number of the particle
 MTYP : baryon number of the particle
 RTYP : rest mass of the particle (MeV)
 OLDWT : weight of the particle at (x,y,z)

(10) QS:

電子の阻止能 (dE/dx)。

(11) IBLZ1, IBLZ2, ILEV1, ILEV2:

IBLZ1 : cell id at (x,y,z)
 IBLZ2 : cell id after crossing
 ILEV1 : level structure id of the cell at (x,y,z)
 ILEV2 : level structure id of the cell after crossing

(a) ILAT1:

階層構造をもつ CELL の変数です。

(b) ILAT2:

階層構造をもつ CELL の変数です。

(12) COSTH, UANG(1), UANG(2), UANG(3), NSURF:

COSTH : cosine of an angle of incidence in a surface crossing
 UANG(1,2,3) : x,y,z component of a normal vector of its surface, respectively
 NSURF : internal number of the surface
 Note that this is different from the surface number defined in the [surface] section

(13) NAME, NCNT(1), NCNT(2), NCNT(3):

NAME : collision number of the particle
 NCNT(1,2,3) : values of counter 1, 2, and 3

(14) WT, U, V, W:

WT : weight of the particle at (xc,yc,zc)
 U, V, W : unit vector of momentum of the particle

(15) E, T, X, Y, Z:

E : energy of the particle at (x,y,z) (MeV)
 T : time of the particle at (x,y,z) (nsec)
 X, Y, Z : position coordinate of the preceding event point (cm)

(16) EC, TC, XC, YC, ZC:

EC : energy of the particle at (xc,yc,zc) (MeV)
 TC : time of the particle at (xc,yc,zc) (nsec)
 XC, YC, ZC : position coordinate of the particle (cm)

(17) SPX, SPY, SPZ:

SPX, SPY, SPZ : unit vector of spin direction of the particle

(18) NZST:

粒子がもつ電荷 (charge state)。

(19) NCLSTS:

意味は、衝突もしくは崩壊による生成粒子の個数です。原子核も含みます。

(a) MATHZ, MATHN, JCOLL, KCOLL:

MATHZ : Z number of the mother nucleus
 MATHN : N number of the mother nucleus
 JCOLL : reaction type id1
 KCOLL : reaction type id2

JCOLL, KCOLL はそれぞれ次のような意味を持ちます。

JCOLL

0 : nothing happen
 1 : Hydrogen collisions
 2 : Particle Decays
 3 : Elastic collisions
 4 : High Energy Nuclear collisions
 5 : Heavy Ion reactions
 6 : Neutron reactions by data
 7 : Photon reactions by data
 8 : Electron reactions by data
 9 : Proton reactions by data
 10 : Neutron event mode
 11 : delta ray production
 13 : Photon reactions by EGS5
 14 : Electron reactions by EGS5

KCOLL

- 0 : normal
- 1 : high energy fission
- 2 : high energy absorption
- 3 : low energy n elastic
- 4 : low energy n non-elastic
- 5 : low energy n fission
- 6 : low energy n absorption

(b) ICLUSTS, JCLUSTS, QCLUSTS, JCOUNT:

これらの変数は、各生成粒子の情報を記述するもので、NCLSTS だけ繰り返し、また、それぞれの変数も以下のように配列を持ちます。

ICLUSTS kind of particle

- 0 : nucleus
- 1 : proton
- 2 : neutron
- 3 : pion
- 4 : photon
- 5 : kaon
- 6 : muon
- 7 : others

JCLUSTS(i)

- i = 0 : angular momentum
- = 1 : proton number
- = 2 : neutron number
- = 3 : ityp
- = 4 : status of the particle 0: real, <0 : dead
- = 5 : charge number
- = 6 : baryon number
- = 7 : kf code

QCLUSTS(i)

- i = 0 : impact parameter
- = 1 : x-component of unit vector of momentum
- = 2 : y-component of unit vector of momentum
- = 3 : z-component of unit vector of momentum
- = 4 : $e_{tot} = \sqrt{p^2 + m^2}$ (GeV)
- = 5 : rest mass (GeV)
- = 6 : excitation energy (MeV)
- = 7 : kinetic energy (MeV)
- = 8 : weight
- = 9 : time (nsec)
- = 10 : x coordinate (cm)
- = 11 : y coordinate (cm)
- = 12 : z coordinate (cm)

7.20 [T-Gshow] セクション

xyz メッシュで指定する面の領域境界を表示します。この機能は、[parameters] で **icntl=7** を指定すれば、輸送計算を行うことなく、出力させることができます。

output=10 (他のタリーの **gshow=5** オプション) は、**Lattice** や **Tetra** 構造が細かすぎてジオメトリに空白が出来てしまう場合に選択してください。

表 184: [t-gshow] パラメータ (1)

name	値	説明
mesh =	xyz	メッシュ型 xyz のみ、メッシュ型サブセクションが必要
axis =	xy, yz, xz	2 次元表示
file =	file name	axis の数だけ定義する
output =	1, 2 3, 4 5, 6 7, 8 9, 10	1: 境界線、2: 境界線+物質色 3: 境界線+物質番号、4: 境界線+物質色+物質番号 5: 境界線+領域番号、6: 境界線+物質色+領域番号 7: 境界線+LAT 番号、8: 境界線+物質色+LAT 番号 9: 全て表示しない、10: ピクセル形式で物質色を表示
resol =	1(省略時)	領域境界を求める分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	領域境界を表示する線の太さを定義します。
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル
angel =	(省略可)	angel パラメータ
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト

output=7,8 は、最下層のセルが **Lattice** それ自身の時のみ、**Lattice** の成分番号を (4,1,2) の形式で出力します。例えば、5.6.4 節で示した図 47 は、次の様な [t-gshow] のインプットで出力しています。

例 66: [t-gshow] の例題

```

1:  [ T - gshow ]
2:    mesh = xyz
3:    x-type = 2
4:    nx = 100
5:    xmin = -10.
6:    xmax = 10
7:    y-type = 1
8:    ny = 1
9:    -5.0 5.0
10:   z-type = 2
11:    nz = 100
12:    zmin = -10.
13:    zmax = 10.
14:    axis = xz
15:    output = 8
16:    file = cell-example6.dat
17:    epsout = 1

```

表 185: [t-gshow] パラメータ (2)

name	値	説明
epsout =	0(省略時), 1	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名
bmpout =	0(省略時), 1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。 ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkout =	0(省略時), 1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルを出力する。 ファイル名は出力ファイルの拡張子を vtk に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
vtkfmt =	0(省略時), 1	タリー出力結果の三次元可視化用ファイルのフォーマット。 テキスト形式 (0) またはバイナリ形式 (1) を選択する。
trcl =	(省略可)	r-z, xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	Lattice の境界線に関するオプション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルファントムはきれいに描画されません。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、Lattice や連続四面体以外でも、隣接セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。

7.21 [T-Rshow] セクション

xyz メッシュで指定する面の領域境界と、与えられた領域毎の物理量に比例した色でその領域を塗ります。通常は、reg メッシュで得られた物理量を value 定義文に書きこみ xyz メッシュで指定する面に領域の色として出力することを目的とします。従って、この機能は、パラメーターセクションで icntl = 9 を指定した時だけ出力させることができます。

物理量に対して、色の変化を線形であるか、対数であるかは、ANGEL パラメーターで、zlog, zlin で指定して下さい。デフォルトは、zlin です。

表 186: [t-rshow] パラメータ (1)

name	値	説明
mesh =	xyz	メッシュ型 xyz のみ、メッシュ型サブセクションが必要
axis =	xy, yz, xz	2 次元表示
file =	file name	axis の数だけ定義する
output =	1, 2, 3	1: 境界線、2: 境界線+物質番号、 3: 境界線+領域番号
resol =	1(省略時)	領域境界を求める分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	領域境界を表示する線の太さを定義します。
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル
angel =	(省略可)	angel パラメータ
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト
reg = value		領域定義 各領域の物理量を定義します。 この行の下に value 定義文が必要。
reg val		value 定義文。書式は volume 定義文と同じ。6.1.2 を参照。
iechrl =	72(省略時)	value のインプットエコーの時の最大コラム数

表 187: [t-rshow] パラメータ (2)

name	値	説明
epsout =	0(省略時), 1	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名
bmpout =	0(省略時), 1	二次元ビットマップ画像ファイルを出力する。 ファイル名は出力ファイルの拡張子を bmp に変えたファイル名。 mesh=xyz, axis=(xy, yz, xz のいずれか) のときのみ有効。
trcl =	(省略可)	r-z, xyz メッシュの座標変換番号もしくは座標変換定義
gslat =	2 (省略時) , = 0 = 1 = 2 = 3	Lattice の境界線に関するオプション。 境界線を描画しない。 境界線を描画する。(ただしボクセルファントムはきれいに描画されません。) 同じセルの場合は境界線を描画しない。 同じ物質の場合は線なし。この場合、Lattice や連続四面体以外でも、隣接セルが同じ物質の場合は境界線が描画されなくなります。また、gshow ≥ 3 の場合でも、セル番号や Lat 番号は表示されなくなります。

例えば、5.6.4 節の図 47 に色を付ける場合、次の例題で示すような **[t-rshow]** タリーを用いると、図 70 の結果を得ることができます。

例 67: **[t-rshow]** の例題

```

1:  [ T - rshow ]
2:    mesh = xyz
3:    x-type = 2
4:    nx = 100
5:    xmin = -10.
6:    xmax = 10.
7:    y-type = 1
8:    ny = 1
9:    -5.0 5.0
10:   z-type = 2
11:   nz = 100
12:   zmin = -10.
13:   zmax = 10.
14:   axis = xz
15:   output = 1
16:   file = cell-example6-rshow.dat
17:   epsout = 1
18:   reg = (201<101[-1 1 0]<1) (201<101[0 1 0]<1) (201<101[1 1 0]<1)
19:         (201<101[-1 0 0]<1) (201<101[0 0 0]<1) (201<101[1 0 0]<1)
20:         (201<101[-1 -1 0]<1) (201<101[0 -1 0]<1) (201<101[1 -1 0]<1)
21:   value
22:   non    reg      val      # reg definition
23:   1 1000001 1.0000E+00 # ( 201 < 101[ -1 1 0 ] < 1 )
24:   2 1000002 2.0000E+00 # ( 201 < 101[  0 1 0 ] < 1 )
25:   3 1000003 3.0000E+00 # ( 201 < 101[  1 1 0 ] < 1 )
26:   4 1000004 4.0000E+00 # ( 201 < 101[ -1 0 0 ] < 1 )
27:   5 1000005 5.0000E+00 # ( 201 < 101[  0 0 0 ] < 1 )
28:   6 1000006 6.0000E+00 # ( 201 < 101[  1 0 0 ] < 1 )
29:   7 1000007 7.0000E+00 # ( 201 < 101[ -1 -1 0 ] < 1 )
30:   8 1000008 8.0000E+00 # ( 201 < 101[  0 -1 0 ] < 1 )
31:   9 1000009 9.0000E+00 # ( 201 < 101[  1 -1 0 ] < 1 )

```

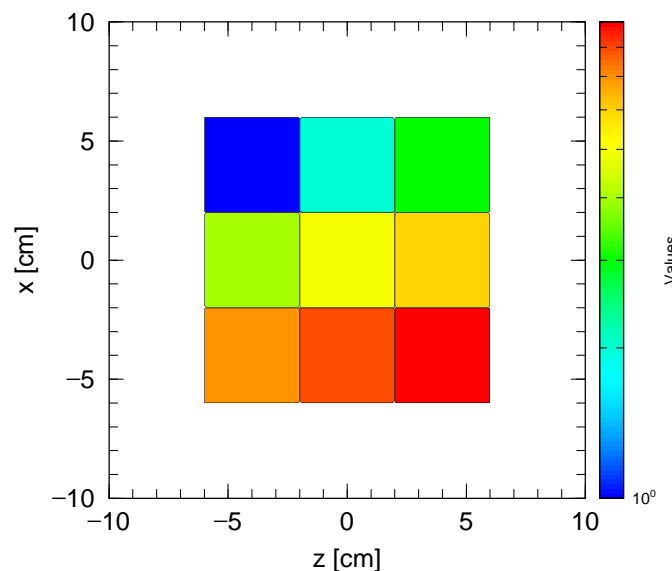


図 70: **[t-rshow]** の例題を用いて図 47 の各領域に色をつけた結果。

7.22 [T-3Dshow] セクション

幾何形状の3次元パース図を出力します。このタリーは、パラメーターセクションで `icntl = 11` を指定した時だけ出力させることができます。

表 188: [t-3dshow] パラメータ (1)

name	値	説明
<code>output =</code>	<code>0, 1, 2, 3</code> (省略時 3)	<code>0</code> : ドラフト、 <code>1</code> : 境界線のみ、 <code>2</code> : 境界線無し、 <code>3</code> : 境界線+カラー
<code>material =</code> (次行)	(省略可) <code>all</code> , 数 <code>2 5 8</code>	表示する material を限定する。複数定義可。 all : デフォルト、この場合省略した場合と同じ。 数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数にした場合は、それらの material を表示しないことを意味する。 material 番号
<code>x0 =</code> <code>y0 =</code> <code>z0 =</code>	(<code>D=0.0</code>) (<code>D=0.0</code>) (<code>D=0.0</code>)	焦点の座標。 この点と目の位置を結んだ線が画面の中央になる。
<code>e-the =</code> <code>e-phi =</code> <code>e-dst =</code>	(<code>D=80</code>) (<code>D=140</code>) (<code>D=w-dst*10</code>)	目の位置の焦点から見た極角 (polar angle) θ [degree] 目の位置の焦点から見た方位角 (azimuthal angle) ϕ [degree] 目の位置と焦点の間の距離 [cm]
<code>l-the =</code> <code>l-phi =</code> <code>l-dst =</code>	(<code>D=e-the</code>) (<code>D=e-phi</code>) (<code>D=e-dst</code>)	光源の焦点から見た極角 (polar angle) θ [degree] 光源の焦点から見た方位角 (azimuthal angle) ϕ [degree] 光源と焦点の間の距離 [cm]
<code>w-wdt =</code> <code>w-hgt =</code> <code>w-dst =</code> <code>w-mnw =</code> <code>w-mnh =</code> <code>w-ang =</code>	(<code>D=100</code>) (<code>D=100</code>) (<code>D=200</code>) (<code>D=100</code>) (<code>D=100</code>) (<code>D=0.0</code>)	画面フレームの幅 [cm] 画面フレームの高さ [cm] 画面フレームの中央と焦点の間の距離 [cm]。画面フレームの中央と焦点を結ぶ直線は、画面フレーム平面に垂直で、かつ目の位置を通る。 画面横方向のメッシュ数 画面高さ方向のメッシュ数 画面の回転 (degree)
<code>heaven =</code>	(<code>D=y</code>)	画面上方向の向き <code>x</code> , <code>-x</code> , <code>y</code> , <code>-y</code> , <code>z</code> , <code>-z</code> で指定
<code>mirror =</code>	(<code>D=0</code>)	<code>=-1</code> で画面の左右鏡面変換

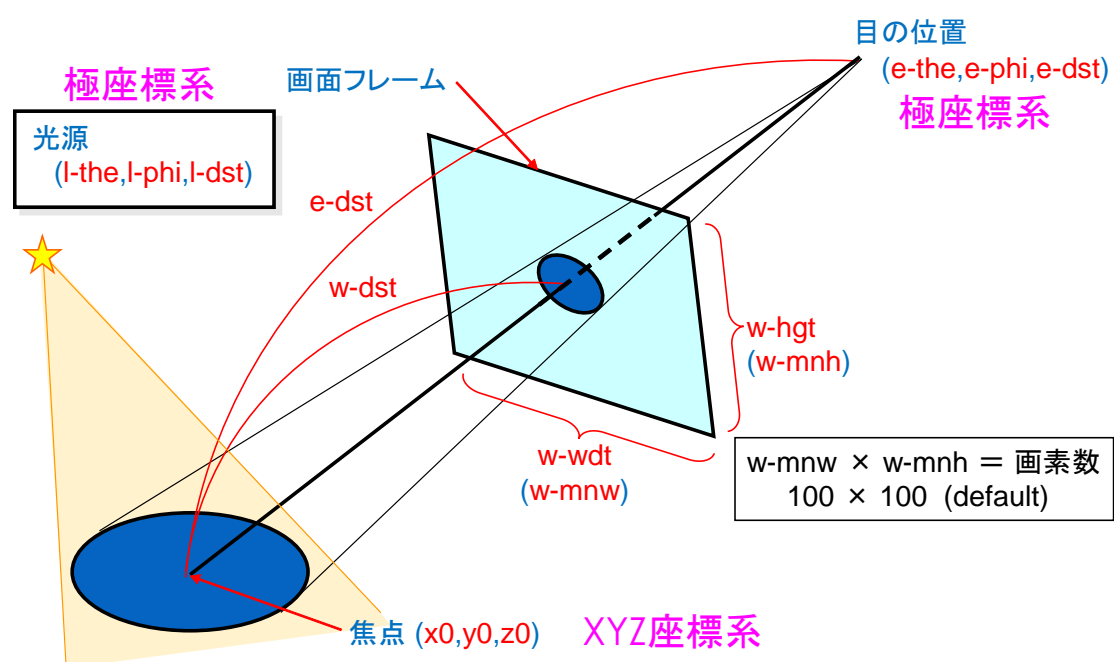


図 71: 3dshow タリー: 原点 $(x0, y0, z0)$ 、目の位置 $(e-the, e-phi, e-dst)$ 、光源 $(l-the, l-phi, l-dst)$ 及び画面フレーム $(w-wdt, w-hgt, w-dst)$ の与え方。

表 189: [t-3dshow] パラメータ (2)

name	値	説明
line =	(D=0) 0, 1	output = 1, 3 の時、0: 物質境界 + 面境界、 1: 物質境界 + 面境界 + 領域境界 を描く。
r-out =	(D=50000)	目の位置と光源を含む外部ボイドの半径 [cm]
shadow =	(D=0)	影の強さ、0 で影無し。2 ぐらいが適当。
bright =	(D=0.8)	面の明るさの制限、1 で最大、0 で明るさ無し
dark =	(D=0.2)	面の暗さの制限、1 で暗さ無し、0 で最大
box =	(D=0)	透過 box の数、最大 5 個まで。
box	10 個の数字	透過 box の数だけ繰り返す
matinbox =	(省略可) all, 数	box 内で表示する material を指定する。複数定義可。 all : デフォルト、この場合省略した場合と同じ。 数を指定した場合、その数だけの material を次の行に記述する。負の数は不可。
(次行)	2 5 8	material 番号
reginbox =	(省略可) all, 領域番号	box 内で表示する領域を指定する。複数定義可。 all : デフォルト、この場合省略した場合と同じ。 matinbox の指定のある物質では、非表示にする
resol =	1(省略時)	境界を求める分解能を各辺 resol 倍します。
width =	0.5(省略時)	域境界を表示する線の太さを定義します。
file =	file name	axis の数だけ定義する
title =	(省略可)	出力ファイルヘッダーのタイトル
angel =	(省略可)	angel パラメータ
sangel =	(省略可)	sangel パラメータ
x-txt =	(省略可)	x-軸テキスト
y-txt =	(省略可)	y-軸テキスト
z-txt =	(省略可)	z-軸テキスト
epsout =	0(省略時), 1	1 で出力ファイルを ANGEL で処理した eps ファイルを作成。ファイル名は出力ファイルの拡張子を eps に変えたファイル名
axishow =	(D=1) 0, 1, 2	0:xyz 軸を表示しない。 1:xyz 軸を左下に表示する。 2:xyz 軸を中心に表示する。

reg = また、reginbox = の表式は、サブセクション 6.1.1 の領域メッシュの指定の仕方と同じです。

計算時間短縮のため、光源、目の位置が外部ボイドの内側に納まるように、半径 r-out の球を新たに設定してその外側を外部ボイド、その内側を内部ボイドに設定しています。r-out のデフォルトの値が小さい場合は、つまり、幾何形状がこの値より大きい場合、もしくは、光源、目の位置を非常に遠くに置きたい時など、r-out の値を大きく設定して下さい。この新しく加えられた外部ボイドを定義する球の設定は、インプットエコーで見ることができます。従って、この icntl = 11 の計算のインプットエコーの出力を再び計算のインプットに用いますとエラーします。目の位置と光源を一致させれば、影はできません。

7.22.1 box の定義

透過 box は、最大 5 個まで定義できます。これらの box で定義された内部は、光は透過します。box の定義は、空間内の 3 点、 $\mathbf{b}_0(x_0, y_0, z_0)$, $\mathbf{b}_1(x_1, y_1, z_1)$, $\mathbf{b}_2(x_2, y_2, z_2)$ を与えて、この 3 点で定義される平面に垂直な方向、つまり、 $(\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_0) \times (\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_0)$ の方向に点 \mathbf{b}_3 を点 \mathbf{b}_0 から長さ L のところに取ります。この 4 点で下図のように box を定義します。この box の定義には、座標変換が使えます。box の各点を定義する前に trcl=で座標変換番号を定義するか、trcl=(.....) のように座標変換を直接定義します。

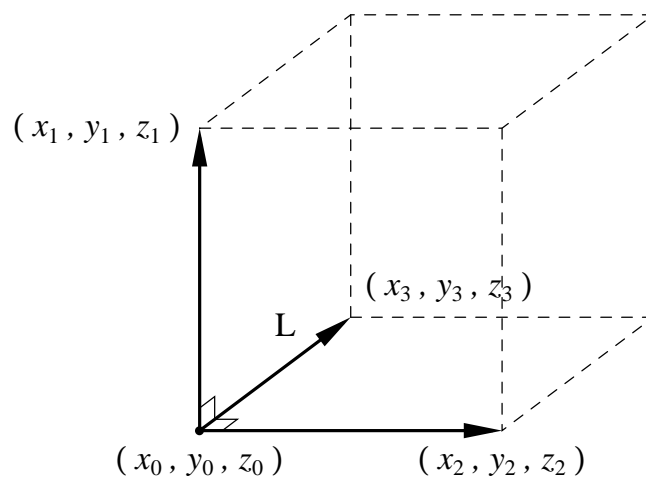
ただし、透過 box で定義した空間に真空(void)があると適切に機能しない場合があります。そのときは、密度を薄くした空気等の物質でその領域を満たしてください。

box の定義の書式は、

```

box = 2
box  x0  y0  z0
      x1  y1  z1
      x2  y2  z2  L
box  trcl = 2
      x0  y0  z0
      x1  y1  z1
      x2  y2  z2  L
box  *trcl = (0 0 0  0 90 90  90 60 150  90 30 60  -1)
          0.0  0.0  0.0
        -5.0  0.0  0.0
          0.0  0.0  5.0   5.0

```



7.22.2 3dshow の例題

3dshow の例題を見てみましょう。以下の例題の幾何形状は、以下のようなものです。

例 68: [t-3dshow] の例題 (1)

```

1: [cell]
2:   1  0 -1 fill=1
3:   2  0 -41 42 -43 44 -45 46  u=1 fill=5
4:  22  0 -41 42 -43 44 -45 46  u=1 trcl=(0 0 20) fill=6
5:  23  like 22 but trcl=(0 0 40) fill = 7
6:   5  0 -21 22 -23 24 -25 26  u=5 lat=1 fill=3
7:   6  0 -21 22 -23 24 -25 26  u=6 lat=1 fill= -1:1 0:0 0:0  2 2(0 0 5) 2
8:   7  0 -21 22 -23 24 -25 26  u=7  fill= -1:1 0:0 0:0  2 3 2 lat=1
9:   3  1  3.97300E-02  3 u=2
10:  4  6  4.18280E-02 -3 u=2
11:  13  5  8.47130E-04 -3 u=3
12:  14  3  1.23620E-01  3 u=3
13:   8  -1 +1
14: [surface]
15:   1  rpp -15 15 -5 5 -5 55
16:  21  px   5
17:  22  px  -5
18:  23  py   5
19:  24  py  -5
20:  25  pz  15
21:  26  pz  -5
22:  41  px  15
23:  42  px -15
24:  43  py   5
25:  44  py  -5
26:  45  pz  15
27:  46  pz  -5
28:   5  rpp -20 20 -5 5 -5 35
29:   6  rpp -20 20 -5 5 -5 15
30:   7  rpp -20 20 -5 5 35 55
31:   3  c/y  0 10 4

```

全体は直方体、中にやはり直方体の lattice とその中に円柱が入っています。これを表示する 3dshow のインプットは次のようになります。

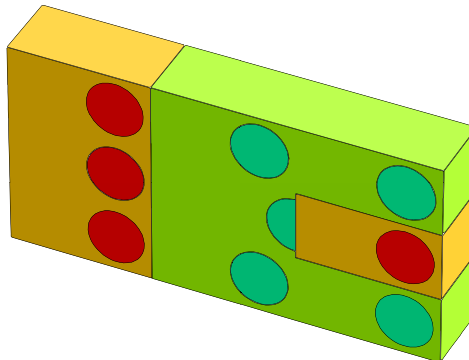
例 69: [t-3dshow] の例題 (2)

```

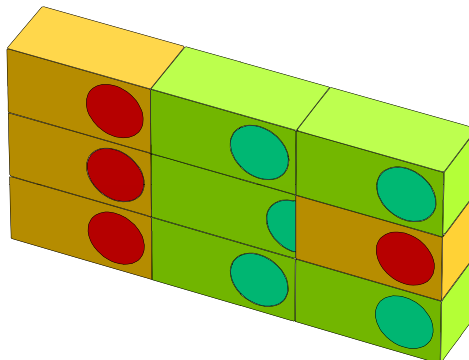
1: [t-3dshow]
2:   output = 3
3:   heaven = x
4:   resol = 2
5:   width = 0.1
6:   x0 = 0
7:   y0 = 0
8:   z0 = 25
9:   e-the = 70
10:  e-phi = 50
11:  e-dst = 1000
12:  l-the = 50
13:  l-phi = 25
14:  l-dst = 2000
15:  w-wdt = 60
16:  w-hgt = 40
17:  w-dst = 150
18:  file = dshow.dat

```

この結果は、



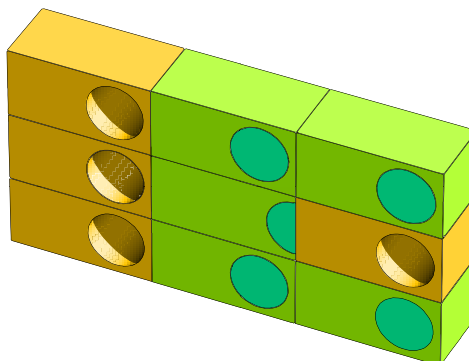
となります。これに、**line = 1**を加えて、領域境界の線も書き込んでみます。



lattice がどう組まれているかが分かると思います。次に、赤の領域、物質 5 番を透明にするために、また、影を付けるために、

```
material = -1
          5
shadow = 2
```

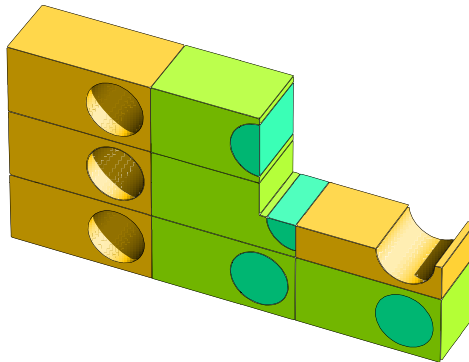
を加えます。



次に、box を設定します。

```
box = 1
box 0 10 30
    100 10 30
      0 10 100 100
```

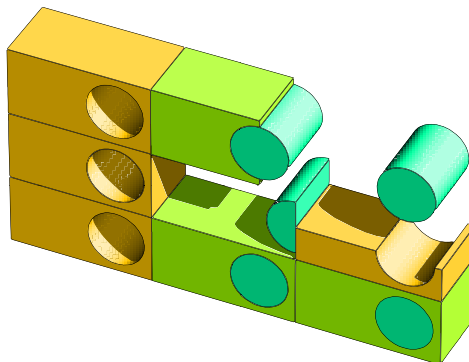
box により、一部が透明になり内部が見られます。



次に、

```
reg = ( 3 < 6[0 0 0] )
matinbox = 1
      6
```

を加え、box 外では、 $\text{reg} = (3 < 6[0 \ 0 \ 0])$ を透明にし、box 内では、物質 6 番が見える様になります。



これらの組み合わせで、複雑な構造の内部を希望どおり表示することが可能になります。

7.23 [T-4Dtrack] セクション

粒子の軌跡情報（位置と時間）を出力します。出力ファイルを PHIG-3D の **Particle tracks** タブで読み込ませることで計算体系上に軌跡を出力できます。

表 190: [T-4Dtrack] パラメータ (1)

名前	値	説明
file	出力ファイル名	書き出し用ファイル名。
reg	all (省略時)	飛跡を書き出す領域番号を指定する。書式は 46 章を参照。
part	all (省略時)	飛跡を書き出す粒子を指定する。指定しない場合は全ての粒子を書き出す。 part に nucleus が含まれている場合、不安定原子核も書き出し対象になる。ただし、対象となる原子核は、半減期が HalfLifeMin と HalfLifeMax の間のものに限られます。書式は 6.7.1 章を参照。
stepminEM	= 0.0 (省略時)	電子、陽電子、光子の最小ステップ距離 (cm)。この値を調整することで、PHIG-3D を用いた描画の質を大きく損なうことなくデータサイズを小さくできる。詳細は以下の (1) を参照。スキップの例外は以下の (2) を参照。
SkipRate	= 0.0 (省略時)	粒子トラックの端点の書き出しをスキップする割合を指定する。全粒子に対して適応される。0 から 1 の値を設定する。例えば、 SkipRate=0.9 と指定した場合、90% の確率で端点の書き出しがスキップされる。出力ファイルサイズは、およそ $(1 - \text{SkipRate})$ 倍になる。スキップの例外は以下の (2) を参照。
SkipRate-of(kf-code)	= 0.0 (省略時)	SkipRate を kf-code で指定された粒子にのみ適応する。例えば、 SkipRate-of(2112)=0.9 と指定した場合、中性子に対し 90% の確率で端点の書き出しがスキップされる。 SkipRate も同時に設定されている場合、 SkipRate-of の設定値が優先される。

- (1) ある粒子飛跡は、基本的に連続したステップで構成される。電子、陽電子、光子の平均自由行程は基本的に非常に小さく、したがって全てのステップを書き出すとデータサイズが非常に大きくなってしまふ。そこで、あるステップの始点からの距離が **stepminEM** 以下のステップは書き出さないことで、データサイズを節約する。
- (2) 次の 3 条件のいずれかを満たす場合は飛跡点の書き出しがスキップされない: 1. 粒子がエネルギーカットオフに達する。2. 粒子が領域の境界に達する。3. 相互作用を起こし終状態の数が 2 以上の場合。

表 191: [T-4Dtrack] パラメータ (2)

名前	値	説明
HistoryMax	無し (省略時)	書き出すイベント数の最大値。省略時は全てのイベントを書き出す。
HistoryFile	入力ファイル名 (パス)	書き出すイベント番号を指定したファイル名。指定しない場合は全てのイベントを書き出す。 ファイル構造: 1 行ごとに書き出したいイベントの NOCAS (イベント番号) と NOBCH (バッチ番号) を記入する (例 1)。数値は実数形式でもよみこめるため、 NOCAS と NOBCH を指定した dump データファイルも読み込める。
format	= t4d (省略時) = pict	出力フォーマットの指定 t4d フォーマットで出力する。詳細は “/phits/utility/t-4dtrack/T4D-format/readme-jp.pptx” を参照。 EGS5 で用いられる pict フォーマットで出力する。
verbose	= 0 = 1 (省略時) = 2	出力レベルの指定。詳細は “/phits/utility/t-4Dtrack/format/readme-jp.pptx” を参照。 PHIG-3D での飛跡表示に必要最小限の情報を出力。 飛跡のセル情報なども出力。セル情報の活用法の例は “/phits/utility/t-4Dtrack/OriginTrackFinder/readme-jp.pptx” を参照。 カウンターの情報なども出力。ただし、カウンターの値を出力する際は、別のタリーで ctmin または ctmax を用いる必要がある。
precision	= 6 (省略時)	出力する実数の桁数

以下は、**HistoryFile** で指定するファイルの入力例です。

```
# NOCAS NOBCH
    1      1
    2      1
    3      1
    1      2
    2      2
    3      2
```

表 192: [T-4Dtrack] パラメータ (3)

名前	値	説明
PinnedOption	 = 0 (省略時) = 1 = 2	指定した粒子がエネルギーカットオフ以下になり停止した後、すぐに描画から消さずに残すか（ピン留めするか）を選択する。残す時間は指定可能。 ピン留めしない。 生成原子核をピン留めする。対象の原子核を半減期で指定可能。 PinnedParticles で指定した粒子をピン留めする。
PinnedTimeOption	 = 0 (省略時) = 1 = 2	ピン留めする時間のタイプを指定 固定時間。 PinnedTimeFix で指定。 aHalf × 不安定核の半減期 $\max(0, aHalf \times \log_{10}(\text{半減期}/s) + bHalf)$ (ns)
PinnedTimeFix	= 10.0 (省略時)	ピン留めする固定時間 (ns)。 PinnedTimeOption = 0 で使用する。
aHalf	= 1.0 (省略時)	半減期のスケールパラメータ。 PinnedTimeOption = 1,2 で使用する。
bHalf	= 0.0 (省略時)	半減期の対数項のスケールパラメータ。 PinnedTimeOption = 2 で使用する。
HalfLifeMin	= 1.0e-22 s (省略時)	対象とする不安定核種の半減期の最小値。 part = nucleus , PinnedTimeOption = 1,2 で利用される。数値の後にスペースを1つ以上入れ、その後に時間の単位を入力する。使用可能な単位は s, min, h, d, y で、それぞれ 秒、分、時間、日、年を意味する。
HalfLifeMax	= 3.0e+32 s (省略時)	対象とする不安定核種の半減期の最大値。 part = nucleus , PinnedTimeOption = 1,2 で利用される。数値の入力方法は HalfLifeMin と同じ。
PinnedParticles	無し (省略時)	ピン留めする粒子名または kf コードを入力。複数入力する場合はスペースで間を開ける。

8 dump ファイルの処理

[t-cross], [t-time], [t-product] タリーで、粒子の情報をファイルにダンプすることができます。このダンプファイルをソースとして新たな継続計算ができます（詳細は“lecture/advanced/sourceB” 参照）。また、ダンプファイルの情報を処理することにより、既存のタリーにはない物理量の集計を取ることができます。そのためには、ユーザーがダンプファイルを読み込んで処理するプログラムを書かなければなりません。そのプログラムの雛形として、バイナリーダンプファイルをアスキーへ、アスキーダンプファイルをバイナリーへ変換するプログラム“dump-a.f”を添付しました。また、このプログラムを使えば、1つのダンプファイルを複数に分割したり、複数のファイルを1つに統合したりすることもできます。MPI 並列計算の場合、dump ファイルを並列数と一致するように分割する必要がありますので、ダンプファイルを作成する計算と線源として使用する計算で並列数が異なる際、有用となります。以下、その使用方法です。

プログラムは、実行ファイル（“dump-a.win.exe”, “dump-a.mac.exe” もしくは “dump-a.lin.exe”）をダブルクリック、もしくはターミナルから実行することで起動します。起動したら、

```
** input the file name of input dump file
** blank for direct input from console
```

というメッセージが出ますので、インプットファイル名を入力して Enter キーを押します。コンソールから直接パラメータを指定したい場合は、何も入力せずに Enter キーを押してください。インプットファイルには、以下の情報（括弧内はパラメータ名）が必要となります。

- 1 行目 (iasb): 入力ダンプファイルのフォーマット (0: バイナリ, 1: アスキー)
- 2 行目 (ipur): 利用目的 (0: フォーマット変換, 1: 分割/統合, 2: ユーザー定義プログラム)
- 3 行目 (chin): 入力ダンプファイル名
- 4 行目 (isdmp(0)): 各粒子に対する情報数（次の行で入力する ID の数）
- 5 行目 (isdmp(1-isdmp(0))): dump データの ID 番号（表 65,66 参照）
- 6 行目 (chot): 出力ダンプファイル名
- 7 行目 (irec): 読み込む粒子数（0 の場合は、全て読み込みます）
- 8 行目 (ninp): 入力ダンプファイルの分割数 (ipur = 1 のみ必要、分割されていない場合は 0 を入力)
- 9 行目 (nout): 出力ダンプファイルの分割数 (ipur = 1 のみ必要、分割しない場合は 0 を入力)

フォーマット変換用（“dump-convert.inp”）とファイル分割/統合用（“dump-divcom.inp”）のサンプル入力ファイルが“phits/utility/dump-a”フォルダにあります。なお、ファイルを分割する際、同じヒストリーによって作られた粒子の情報は同じファイルに出力されます。これは、生成された 2 次粒子の相関を残すためです。

9 領域エラーチェック

3次元体系を構築する際、ある場所を2つ以上の領域で定義してしまう多重定義や、1つも領域を設定しない未定義領域が生じる可能性があります。これらの領域エラーが発生した状態では、輸送している粒子の現在位置がわからなくなってしまう場合があります。適切な輸送計算を実行することができません。領域エラーチェックは、構築した体系内に2重定義や未定義領域がないか確認するための機能です。この機能を利用して領域エラーのない3次元体系を作成してください。

領域エラーチェック機能は、ジオメトリを2次元表示するタリーで自動的に実行されます。具体的には [t-gshow], [t-rshow] タリー、及び icntl=8 or 10 の場合に axis = xy, yz, or xz として gshow or rshow オプションを指定したタリーが該当します。

領域エラーがある場合、図 72 のような出力結果が得られます。多重定義領域がある場合はその領域を黒色で、未定義領域がある場合はその領域を紫色で表示します。ただし、未定義領域がある場合に、その周りの定義された領域が消えてしまう場合があります。

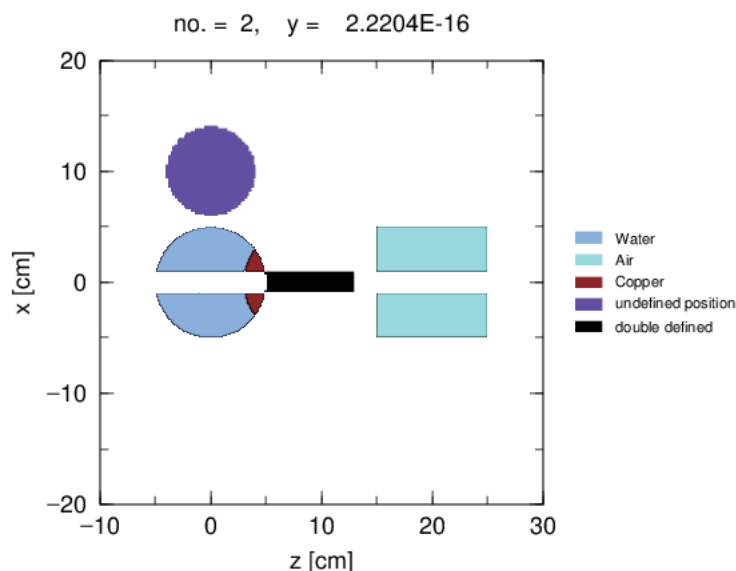


図 72: 領域エラーがある場合の出力結果

file=で指定したファイル名の拡張子を“.err”に変えた領域エラーファイルを作成します。このファイルには、エラーが起こっている領域の(x,y,z)座標が次のような形式で出力されます。

```
Errors of cell definition in EPS Page No. = 1
Overlapped Cell IDs  x, y, z  coordinates
(Cells 0          0  indicate undefined region)
    100      102   -4.847761E+00  1.234568E-11 -1.211940E+00
        0         0   -4.241791E+00 -2.500000E+00 -8.079602E-01
```

1行目のエラーは、セル100と102が $x = -4.847761E+00$, $y = 1.234568E-11$, $z = -1.211940E+00$ で重なっていることを示しています。2行目のエラーは、 $x = -4.241791E+00$, $y = -2.500000E+00$, $z = -8.079602E-01$ の場所が未定義領域であることを示しています。

この領域エラーチェック機能を用いれば、複雑な3次元体系を作成する場合でも、効率的にエラー領域を見つけることができます。ただしこの機能は、タリー領域で指定している範囲しかチェックしませんのでご

注意ください。また、範囲内であっても、xyz メッシュで区切った格子点しかチェックしませんので、小さな領域エラーがある場合は見逃してしまう可能性がありますので、ご注意ください。

10 コンパイル

ユーザー定義線源 5.3.18 やユーザー定義タリー 7.19 を利用する場合は、PHITS をコンパイルする必要があります。PHITS 事務局で推奨しているコンパイラは Intel Fortran Compiler (11.1 以降)¹³¹ です。これ以外のコンパイラによる不具合に関しては十分なサポートができないことをご了承ください。

表 193 に、各 OS においてコンパイル可能なコンパイラと並列計算に関する設定の組み合わせをまとめました。可能な組み合わせには ✓ をつけています。表にある single は並列計算を行わない場合を表しており、MPI と Open MP はそれぞれ MPI プロトコルと Open MP を利用した並列計算、hybrid はそれらを組み合わせた並列計算の設定を表しています。並列計算については、11 節をご覧ください。

表 193: 各 OS におけるコンパイル可能なコンパイラと設定の組み合わせ。*gfortran を使った場合の OpenMP 高速化性能はそれほど高くありません。

OS	Intel Fortran				gfortran			
	single	MPI	Open MP	hybrid	single	MPI	Open MP	hybrid
Windows	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Mac	✓		✓		✓		✓*	
Linux	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

10.1 Windows OS におけるコンパイル方法

10.1.1 Microsoft Visual Studio と Intel Fortran を利用したコンパイル (Windows 用)

“/phits/bin/” フォルダ内に、Microsoft Visual Studio と Intel Fortran を組み合わせた環境で利用可能なソリューションファイル (“phits-intel.sln”) が含まれています。これらのソフトウェアのインストール方法と利用方法については、“phits/document/Install-IntelFortran-OneAPI-en.pdf” をご参照ください。なお、古い version の Intel Fortran (ifort) をお使いの場合は、同じく “bin” フォルダに含まれる “phits-ifort.vfproj” をダブルクリックして、リリースモードに変更してからコンパイルしてください (Version 3.34 以前の “phits-intel.vfproj” を使ったコンパイル方法と同じです)。

10.1.2 Makefile を利用したコンパイル

“/src/” フォルダ内にある “makefile” を使って、PHITS をコンパイルすることができます。ただし、これに対応したコンパイラが少ないため、現在この方法は奨励されません。この方法でコンパイルするには、“makefile” を各自の環境に合わせて書き換える必要があります。具体的には、このファイルの最初の辺りにある ENVFLAGS に計算環境に応じた変数をセットしてください (例えば、gfortran compiler を使用する場合は WinGfort)。作成される実行ファイル名は、phits_XXX.exe (XXX は ENVFLAGS にセットした変数) のようになります。例えば、ENVFLAGS=WinGfort の場合は、phits_WinGfort.exe が実行ファイル名です。“makefile” 中のコンパイラオプションなどは一例ですので、場合によってはそれらを変更することによりうまくコンパイルできる可能性があります。なお、付属の “makefile” が想定しているのは GNU make です。もし、“make” コマンドで動作しない場合は、“gmake” をお試しください。

Windows 用コンパイラとして gfortran をインストールする場合は、

¹³¹ PHITS は Intel Fortran でコンパイルした方が高速化されますので、可能であれば Intel Fortran の利用をお勧めいたします。Intel Fortran は Intel OneAPI の一部として提供されており、これを使うためのインストール手順は、“phits/document/Install-IntelFortran-OneAPI-en.pdf” を参照してください。

- MinGW-w64 - for 32 and 64 bit Windows

(<https://sourceforge.net/projects/mingw-w64/files/?source=navbar>)

にアクセスし、左上にある“Download Latest Version”をクリックしてインストーラーをダウンロードしてください。ダウンロードしたインストーラー（exe ファイル）を実行するとインストールが始まりますので、“Version”は最新版（もしくはそれ以外の適合 version）を選択し¹³²、“Architecture”は 64bit であれば“x86_64”、32bit であれば“i686”を選択しながら進めてください。これら以外に変更する必要はありません。最後は“next”を押すとインストールが完了します¹³³。次に、PHITS をコンパイルする場合は以下の手順で行ってください。

- (1) インストールしたフォルダにある“mingw-w64.bat”をダブルクリックしてコマンドプロンプトを開く。
- (2) cd コマンドなどにより“/phits/src/”フォルダに移動して、

```
mingw32-make
```

と、コマンドを入力するとコンパイルが始まります。ただしその際、あらかじめ“makefile”を編集し、ENVFLAGS=WinGfort と変更しておいてください。また、MPI や OpenMP は利用しない設定としてください。

作成した実行ファイル（phits_WinGfort.exe）を使用するには、gfortran をインストールしたフォルダに PATH を通す必要があります。最も簡単な方法は“phits.bat”を使う方法です。その場合は、テキストエディタで“mingw-w64.bat”を開き、その 2 行目にある

```
set PATH=C:\Program Files\mingw-64\...
```

の行を“phits.bat”の 2 行目にコピー＆ペーストし、PHITS_Single_EXE パラメータの箇所を作成した実行ファイル名（例えば、c:/phits/phits_WinGfort.exe）に変更します。以上により、従来と同じ方法（送る → PHITS、もしくは TeraPad から PHITS を実行）で PHITS を実行することができます。その際、OpenMP は使えませんのでご注意ください。また、PHITS 実行後に“Note: The following floating-point exceptions are signaling: IEEE_DENORMAL”のような警告が出る場合がありますが、無視しても問題ありません。

10.2 Mac OS におけるコンパイル方法

10.2.1 Makefile を利用したコンパイル

“/src/”フォルダ内にある“makefile”を使って、PHITS をコンパイルすることができます。そのためには、“makefile”を各自の環境に合わせて書き換える必要があります。具体的には、このファイルの最初の辺りにある ENVFLAGS に計算環境に応じた変数をセットしてください（例えば、Intel Fortran を使用する場合は MacIfort）。また、メモリ共有型並列を使用する場合は、USEOMP のある行の“#”を消して、これらを有効にしてください。作成される実行ファイル名は、phits_XXX.exe（XXX は ENVFLAGS にセットした変数）のようになります。例えば、ENVFLAGS=MacIfort の場合は、phits_MacIfort.exe が実行ファイル名です。更に、USEOMP を有効にした場合は phits_MacIfort_OMP.exe のようになります。“makefile”中のコンパイラオプションなどは一例ですので、場合によってはそれらを変更することによりうまくコンパイルできる可能性があります。なお、付属の“makefile”が想定しているのは GNU make です。もし、“make”コマンドで動作しない場合は、“gmake”をお試しください。

Intel OneAPI がインストールされているマシンでは ifort を使ってください¹³⁴。このためには“makefile”で ENVFLAGS=MacIfort としてください。OneAPI をお持ちでない場合は gfortran を使ってください。gfortran

¹³² gfortran のバージョン 4.9-5.4 で、適切にコンパイルされない場合があります。

¹³³ なお、このパッケージをインストールした場合、“make”コマンドとして“mingw32-make”が利用できるようになります。

¹³⁴ なお、2025 年時点で Mac 用の Intel compiler は提供されていません。

をインストールするためには Homebrew パッケージマネージャを使用します。Homebrew がインストールされていない場合には、ターミナルで以下のコマンドを実行してください。

```
/bin/bash -c "$(curl -fsSL https://raw.githubusercontent.com/Homebrew/install/HEAD/install.sh)"
```

Homebrew のインストール後にターミナルで次のコマンドを実行して、gfortran をインストールしてください。

```
brew install gcc
```

以上で gfortran のインストールが完了します。gfortran を使ってコンパイルするためには、“makefile”で ENVFLAGS=MacGfort としてください。

10.3 Linux OS におけるコンパイル方法

10.3.1 Makefile を利用したコンパイル

“/src/”フォルダ内にある“makefile”を使って、PHITS をコンパイルすることができます。そのためには、“makefile”を各自の環境に合わせて書き換える必要があります。具体的には、このファイルの最初の辺りにある ENVFLAGS に計算環境に応じた変数をセットしてください（例えば、Linux で Intel Fortran¹³⁵を使用する場合は LinIFX）。また、メモリ分散型並列及びメモリ共有型並列を使用する場合は、USEMPI や USEOMP のある行の“#”を消して、これらを有効にしてください。作成される実行ファイル名は、phits_XXX.exe（XXX は ENVFLAGS にセットした変数）のようになります。実行ファイルは“/src/”フォルダの親フォルダである“/phits/”フォルダに作られます。例えば、ENVFLAGS=LinIFX の場合は、phits_LinIFX が実行ファイル名です。更に、USEOMP を有効にした場合は phits_LinIFX_OMP のようになります。“makefile”中のコンパイラオプションなどは一例ですので、場合によってはそれらを変更することによりうまくコンパイルできる可能性があります。なお、付属の“makefile”が想定しているのは GNU make です。もし、“make”コマンドで動作しない場合は、“gmake”をお試しください。

10.4 KURBUC を含めたコンパイル

陽子及びイオンに対する飛跡構造解析コード KURBUC のソースコード“kurbuc.f”は、著作権の関係上“src”フォルダに含まれておりません。パッケージに含まれる“kurbuc.f”は、本物の“kurbuc.f”がなくてもコンパイルができるように作成したダミーファイルです。したがって、上記手順でそのままコンパイルすると、陽子やイオンに対する飛跡構造解析を行うことができない PHITS 実行ファイルが作成されます。

各自で作成した実行ファイルで陽子やイオンに対する飛跡構造解析を行いたい場合は、まずは通常のコンパイルを実施した後、作成された kurbuc 用オブジェクトファイル(“kurbuc.o”や“kurbuc.obj”など)を“src/kurbuc-obj”フォルダに含まれる各自の環境に合ったオブジェクトファイルに置き換えて、実行ファイルを再作成してください。通常のコンパイル方法で実行ファイルが再作成されない場合は、例えば“main.f”を再保存してタイムスタンプを更新してから再コンパイルしてください。各オブジェクトファイルのコンパイル環境は、“src/kurbuc-obj/readme.txt”をご参照ください。各自の環境に対応するオブジェクトファイルがない場合や、付属のオブジェクトファイルでは正しく動作しない場合は、PHITS 事務局までご連絡ください。

¹³⁵ Intel Fortran (Intel OneAPI の一部として提供されています) のインストール方法と利用方法については、“phits/document/Install-IntelFortran-OneAPI-en.pdf”をご参照ください。

10.5 配列の大きさの変更

インクルードファイル“param.inc“の中に、ユーザーが場合により変更しなければならない配列の大きさが記述されています。特に重要なのは、**kvlmax**（定義する cell や material の最大数）、**itlmax**（定義するタリーの最大数）、**isrc**（定義するマルチソースの最大数）です。

以下に現在のデフォルト値が記述された“param.inc“を示します。

ファイル 2: param.inc

```
*****
*
*      'param.inc'
*
*****
!      when you increase mdas over 250000000, you have to define integer*8 instead of integer in the next line
integer mdas,mcmx,mci,mmdas,mmmx,nbnds,mct,multmax,pnlmax
integer kvlmax, kvmmx, itlmax, inevt, isrc, nbchmax, maxchapara
integer mxprodxs
real*8 das
parameter ( mdas   = 80000000 )
parameter ( kvlmax =   3000 )
parameter ( kvmmx  = 1000000 )
parameter ( itlmax =   200 )
parameter ( inevt  =    71 )
parameter ( isrc   =   3000 )
parameter ( nbchmax=  10000 )
parameter ( multmax=   500 )
parameter ( pnlmax =   3000 )
parameter ( maxchapara = 1000 )
parameter ( mxprodxs = 20000 )

*-----*
*
*      pnlmax : maximum number of material in photonuclear library
*
*-----*

common /mdasa/ das( mdas )
common /mdasb/ mmmx

*-----*
*
*      mdas   : total memory * 8 = byte
*      mmmx   : maximum number of total array
*
*      kvlmax : maximum number of regions, cell and material
*      kvmmx  : maximum number of id for regions, cel and material
*
*      itlmax : number of maximum tally entry
*      inevt  : number of collision type for summary
*      isrc   : number of multi-source
*      nbchmax: maximum number of batch assigned to parallel MPI node
*      pnlmax : maximum number of material in photonuclear library
*      mxprodxs : maximum number of produced nuclides in prodxs
*
*-----*
```

11 並列版のための指定方法

並列計算には、メモリ分散型並列とメモリ共有型並列計算があり、PHITS ではその両方に対応しています。また、両者を組み合わせたハイブリッド並列も可能です。メモリ分散型並列のためには、お使いのコンピュータに **MPI** をインストールする必要があります。メモリ共有型並列は、特にプロトコルなどをインストールする必要はありません。ただし、同じ数の CPU を使った場合はメモリ分散型並列の方が計算時間が短くなる場合が多いです。シングル・並列計算の切り替えはコンパイラオプションで行い、それぞれ別の実行ファイルを作る必要があります。詳しくは 10 節をご参照ください。なお、メモリ分散型並列 (**MPICH2** を利用) の場合は、**Intel Fortran Compiler** (11.1 以降) か **gfortran** (4.8 と 7 シリーズ以降) のコンパイラで実行ファイルを作成可能です。一方、メモリ共有型並列の場合は、**Intel Fortran Compiler** のみ作成可能で、**gfortran** は未対応ですのでご注意ください。

メモリ分散型並列では、各 CPU コアにそれぞれバッチ単位で **Job** を渡して、全てのコアがそのバッチ計算を終了した時点でメインのコアが結果を集計します。全てのコアがジオメトリやタリーの情報をそれぞれ読み込むため、メモリは、シングルで走らせるときのコア数倍必要となります。したがって、ボクセルファントムなど、巨大なメモリを必要とする計算には不向きです。また、全てのコアが計算終了するまで集計を待つため、バッチ当たりのヒストリー数 (**maxcas**) が少ないなど、各コア間での計算時間にばらつきが大きい場合は、計算時間が不必要に長くなってしまいます。

メモリ共有型並列では、各コアにヒストリー単位で **Job** を渡して、各コアは、ジオメトリやタリーなどの情報を共有しながら計算します。したがって、メモリの使用量は、シングルで走らせる場合と大差はありません。しかし、メモリへの書き込みアクセスが競合するため、タリー結果などを頻繁に書き込む計算 (**[t-sed]** を使った計算など) では、計算時間が不必要に長くなってしまいます。

11.1 メモリ分散型並列

11.1.1 セットアップ方法

メモリ分散型 (**MPI**) 並列を実行するためには、**MPI** プロトコルをインストールする必要があります。ここでは、1 台の Windows PC を用いて並列計算を行う場合の **MPI** プロトコルインストール方法について解説します。複数台の Windows PC を接続して並列計算を行う場合は、“/phits/document/mpi/” フォルダに含まれる “Windows-MPI-setup-jp.docx” をご参照下さい。また、Mac 及び Linux に関しては、インターネットなどを参照して各自で **MPI** プロトコルをインストールして下さい。

Windows の場合は、**MPI** プロトコルとして Argonne National Laboratory が配布しているフリーソフト **MPICH2** の利用を奨励します (パッケージに含まれる **MPI** 版実行ファイルが **MPICH2** を利用してコンパイルされているため)。この最新バージョンは Windows へのインストーラが含まれていないので、<http://www.mpich.org/static/downloads/1.4/> にある “mpich2-1.4-win-x86-64.msi” (64 ビット版) もしくは “mpich2-1.4-win-ia32.msi” (32 ビット版) をダウンロードして下さい。ダウンロードしたら **msi** ファイルを右クリックしてインストールを選択して下さい。その際、インストール先フォルダはデフォルト “C:/Program Files/MPICH2/” から変更せず、使用者は “Everyone” にして下さい。インストール時に “Passphrase” を要求されますが、何を入力しても問題ありません。ただし、複数台で並列計算を実行する場合は、共通の **Passphrase** が必要になりますので、入力した **Passphrase** を覚えておいてください。**MPICH2** のインストールが完了したら、“/phits/document/mpi/” フォルダにある “smpd-install.bat” ファイルを右クリックして、“管理者として実行” としてください。これで設定が完了です。

Linux の場合は **OpenMPI** のインストールが必要になります。**OpenMPI** のインストールは、**OpenMPI** のホームページ (<https://www.open-mpi.org/>) をご参考の上、環境にあわせて行ってください。

11.1.2 Windows での実行方法

1 台の Windows PC で MPI 並列版の PHITS を実行するためには、PHITS 入力ファイルの最初のセクションの前に $\$MPI=M$ (M は並列数) と書きます。例えば CPU コアが 4 つ搭載された PC で最も効率よく計算したい場合は

```
 $\$MPI = 4$ 
```

とします。なお、実際の並列実行 PE (processing element) 数は、コントロール用に 1 つ追加されるため $M+1$ となります。この状態で入力ファイルを保存し、通常の実行方法と同じく “送る” → “PHITS” とすることにより、MPI 並列で PHITS を実行できます。ただし、初めて実行する際は、Windows のユーザー名とパスワードを聞かれますので、ユーザー名は何も入力せずにそのままリターン (デフォルトで入ります)、パスワードには Windows にログインする際のパスワードを入力して下さい。なお、現在のところ OpenMP と組み合わせたハイブリッド並列には対応していないため、OpenMP 用のコマンド $\$OMP$ と MPI 用のコマンド $\$MPI$ の両方が入力ファイルに書かれた場合は、後ろに書いた方を優先する仕様になっています。

11.1.3 コマンドラインでの実行方法

Linux や Mac, もしくは複数台の Windows PC で MPI 並列計算を行うためには、コマンドラインを用いる必要があります。その実行方法は、例えば

```
mpirun -np 5 phits_LinIfort_MPI.exe
```

のようになります。ここで “mpirun” はインストールした MPI プロトコルの実行ファイル名で、Windows の場合は “mpiexec.exe” となります。-np の後の数字は並列の実行 PE 数、“phits_LinIfort_MPI.exe” は PHITS の実行ファイル名です。このコマンドを qsub など各コンピュータに合わせた方法で投入してください。また、メモリ分散型並列版では、自動的に phits.in ファイルから入力ファイル名を読み込みます。この phits.in は固定です。このファイルの 1 行目に

```
file = input_file_name
```

のように入力ファイル名を記述します。従って、起動シェルでインプットファイルのリダイレクトはできませんので注意してください。これは、メモリ分散型並列だけの制約です。シングル版はこれまでの通りです。

なお、phits.in の 1 行目に file=phits.in と書けば、それ以下の行に通常のインプットファイルを書いて実行することもできます (2.3.2 節参照)。

11.1.4 maxcas, maxbch の指定方法

PHITS のメモリ分散型並列計算では、バッチ単位で並列化しています。従って、入力バッチ数 maxbch は、並列の実行 PE 数 (コントロールに 1PE 使うので、全 PE 数 -1) の整数倍になるように指定して下さい。もし整数倍でないときは、整数倍になるように、またトータルヒストリー数が入力データとほぼ同じになるように、プログラムが自動で変換します。変換した場合は、出力のインプットエコーの最後にコメントが出力されます。後述しますが、バッチ毎の情報はメモリ分散型並列の場合は、バッチ数 \times (PE -1) 毎に出力されます。途中停止もこの単位で行うことができます。

なお、再開始計算の場合 (istdev < 0) は、maxcas を過去の計算結果と一致するよう自動調整するため、全ヒストリー数を合わせる上記調整は行いません。maxbch を (PE-1) の整数倍にする調整のみ行います (端数は切り捨てます)。

11.1.5 異常終了の処理

プログラムが異常終了した場合、その異常終了した PE を切り離して実行します。最終的に残った PE の計算結果の合計を全体の結果として出力します。バッチ毎の情報と計算のサマリーの中に PE の状態が出力されます。

11.1.6 Dump, dumpall, [t-userdefined] の出力ファイル名

メモリ分散型並列を使用した場合、Dump, dumpall, [t-userdefined] の出力ファイルが分割され、各ファイル名の最後に “.005” のように IP 番号と関連した数字が割り振られます。並列数が 4 桁、5 桁の場合は付与される番号の桁も増えます。

11.1.7 PHITS での読み込みファイルの指定

PHITS で読み込みが必要となるファイルは、Decay-Turtle からの出力をソースとして使うときのソースファイルです。前者は、2.6MB のファイルで、各 PE が同じファイルを同時に読み込みを初めても、読み込みが最初の一回だけということもあり、それほどネットワークに負担を掛けないと思われますので、1 箇所に置いていても問題無いと思います。しかし、後者はファイルが 100MB 近く大きいもので、ソースの読み込みのたびにファイルをアクセスしに行きますので、1 箇所からの読み込みには問題が生じる可能性があります。そこで、Decay-Turtle のデータファイルを利用する場合は、あらかじめこのファイルを各 PE のワークディレクトリ /wk の下に、例えば、/wk/j9999/turtle/sours.dat のようにコピーして、PHITS のインプットで、file = /wk/j9999/turtle/sours.dat のように指定して下さい。

11.2 メモリ共有型並列

11.2.1 実行方法

メモリ共有型並列版 PHITS は、Linux の場合やコマンドラインから直接実行ファイルを指定する場合を除き、PHITS のインプットファイルにおいて、最初のセクションの前に \$OMP=N (N は使用する CPU コア数) を加えることで実行できます。その際、N = 1 の場合は並列計算を使用しません。また、N = 0 の場合は計算機が持つ全てのコアを使用します。これらは、phits.bat (Windows OS の場合) や phits.sh (Mac OS の場合) を利用して PHITS を実行する場合に動作します。

Linux の場合やコマンドラインから直接実行ファイルを指定する場合は、シングル版 PHITS の実行方法と同じく、

```
phits_LinIfort_OMP.exe < phits.inp
```

のようになります (phits_LinIfort_OMP.exe は実行ファイル名)。メモリ分散型並列と異なり、リダイレクトが使えるため、インプットファイル名 (phits.inp) は可変です。ただし、並列数を指定するために、環境変数 “OMP_NUM_THREADS” をコア数に合わせて設定する必要があります。通常、この環境変数はデフォルトでコア数に設定されていますが、最新のコンピュータは、1 つのコアで複数のスレッドを処理することが可能なため、コア数よりも多く設定されている場合があります。しかし、PHITS の並列処理では、“OMP_NUM_THREADS” にコア数以上の値を設定しても、ファイルの書き込み競合による計算遅延が起きてしまい、計算時間が長くなってしまいます。そのような場合は、手動で環境変数を変更してください。環境変数の変更は

```
export OMP_NUM_THREADS=8
```

のように行います。また、ハイブリッド並列の場合は、各実行ノードの環境変数をそれぞれ変更する必要があります。ご注意ください。

バージョン 2.73 より、Windows OS については、メモリ共有型並列版 PHITS の実行ファイルとして 64bit 版をインストールするようにしました。32bit 版のメモリ共有型並列の実行ファイルの場合、使用するコア数が増えるとヒープメモリが不足してエラーが発生していましたが、64bit 版を使用することでこれが回避される可能性があります。

Linux の場合、メモリ共有型並列の実行のために、“libiomp5.so” のライブラリが必要とされる場合があります。この場合には以下の手順に従い、設定を行ってください。まず、“libomp-dev” のパッケージを各ディストリビューションの手順に従いインストールして下さい。例えば Ubuntu の場合は、

```
sudo apt-get install libomp-dev
```

でインストールできます。これにより、“/usr/lib/x86_64-linux-gnu/libomp.so.5” のライブラリがインストールされます。次に、このディレクトリに移動

```
cd /usr/lib/x86_64-linux-gnu/
```

し、“libiomp5.so” にシンボリックリンクを作ります。

```
sudo ln -s libomp.so.5 libiomp5.so
```

これにより、“libiomp5.so” のライブラリが認識されるようになり、PHITS によるメモリ共有型並列計算が実行できるようになります。

11.2.2 メモリ共有型並列計算の注意点

CPU コア数が 1 つの場合、メモリ共有型並列版 PHITS の計算時間は、シングル版 PHITS の計算時間よりも 2 倍程度長くなります。したがって、コア数が 2 以下のコンピュータでは、メモリ共有型並列計算による計算時間短縮のメリットはほとんどありません。

Linux で実行時にセグメンテーションエラーが生じる場合は、実行前にスタックサイズを広げることでより解決する場合があります。スタックサイズの広げ方は、

```
export OMP_STACKSIZE=1G
```

のようになります（スタックメモリを 1GB にする場合）。

メモリ共有型並列計算結果は、シングルでの計算結果と一致するように設計しています。両方で結果が異なる場合は、バグの可能性がありますので PHITS 事務局までご連絡ください。

12 FAQ

12.1 パラメータ設定関連

Q1.1 Ver.2.88 以前で動いていたインプットファイルがそれ以降の version で動きません。

A1.1 Ver.2.89 以降、ミス誘発しやすい仕様をいくつか変更しています。基本的には、従来のインプットをそのまま使えるように設計していますが、場合によってはインプットの修正が必要になる場合があります。以下、その例です。

- (1) Ver.2.89 以降では天然炭素の記号 C との混同を防ぐため **[material]** で行頭の c \square (\square は空白文字) をコメント文字として利用できません (それ以外のセクションでは引き続き利用可能です)。**[material]** でエラーが出るようになった場合は、コメント文字として使っている c \square を \$ や # に変更するか、**[parameters]** セクションに **icommat=1** と追記してください。
- (2) 光子や電子の輸送のみを行う場合、従来は中性子の核データがなくても問題ありませんでしたが、Ver.2.93 以降は自動的に中性子の核データを利用する設定になっているため “There is no cross section table(s) in xsdir” というエラーが出てしまいます。この場合は、**[parameters]** に **nucdata=0** と追記して核データを使わない設定に変更してください。
- (3) Ver.2.96 以降では、**[parameters]** セクションが 2 つ以上ある場合、エラーを出して実行を止めるようにしました。2 つ以上定義している場合は、1 つに統合してください。
- (4) Ver.2.96 以降、**icntl** に応じて不要なタリーを自動的に **off** にするようにしました。自動的に **off** にされたタリーセクション内に **set** や **infl** コマンドがある場合、それらも無効になりますのでご注意ください。なお、Ver.2.96 以降、**off** されたセクション内に **set** や **infl** コマンドがある場合は **warning** が出力されます。

Q1.2 電子・陽電子が輸送されません。

A1.2 電子・陽電子の計算には時間が掛かるためデフォルトでは輸送しない設定になっています。電子・陽電子を輸送したい場合は、**negs=1,2** として EGS5 モードを利用するようにしてください。

Q1.3 核反応モデルに関して、デフォルトの設定は最も精度がよい設定ですか？

A1.3 基本的にはそうなるように設定していますが、重イオン核反応や高エネルギー核反応により生成される残留核の収率を精度よく計算したい場合は、**irqmd=1** や **ismm=1** のオプションを利用することを勧めています。ただし、これらのオプションを有効にすると、計算時間が長くなってしまう場合があります。

Q1.4 イベントジェネレータモードは、どのような場合に使えばよいのでしょうか？

A1.4 イベントジェネレータモード (以下、**e-mode**) を使った方がよい計算は、検出器の応答関数計算や、半導体ソフトエラー発生率の計算など、イベント毎の情報が必要となる計算です。具体的には、**[t-deposit]**, **[t-let]**, **[t-yield]** などを使う計算では、**e-mode** を使った方がよい場合が多いです。逆に、使わない方がよい計算は、中性子束やガンマ線束だけを求める遮蔽計算などです。**[t-track]**, **[t-cross]** などしか利用しない場合は、一般的に **e-mode** を使う必要はありません。詳しくは「5.2.27 Event Generator Mode」をご参照ください。なお、**version2.76** からイベントジェネレータモードを使う場合の奨励値は **e-mode=2** となっていますので、ご注意ください。

Q1.5 統計誤差導出方法 (**istdev** の設定) はどういう条件で切り替えれば良いですか？

A1.5 バッチ分散モード (**istdev=-1 or 1**) しか選択できないメモリ共有型並列計算の場合を除き、基本的に全ヒストリー数 (**maxcas*maxbch**) で統計誤差を評価するヒストリー分散モード (**istdev=-2 or 2**) の方を推奨します。しかしながら、ヒストリー分散モードでは、ヒストリーの計算が終了する毎に誤差情

報を記録するため、タリーのメッシュ数が大きい場合 (xyz メッシュで **nx** や **ny** を数 1000 ずつ設定するなど) には、計算時間が異常に長くなる可能性があります。そのような条件で計算する際は、バッチ分散モードに切り替えて、**maxbch** を十分に大きく (10 以上) 設定するようにしてください。

Q1.6 JENDL 以外の核データを PHITS で使うことは可能でしょうか？

A1.6 ACE フォーマット (MCNP が読み込める形式) であれば可能です。ただし、20 MeV 以下の中性子ライブラリとそれ以外で手順が変わります。

I 20 MeV 以下の中性子ライブラリの場合

I-(1) 新しく入手した核データに付録されている **xmdir** ファイルをテキストエディタで開き、核データのアドレス情報に関する部分 (例えば 1001.80c 0.999167 xdata/endl71x/H/1001.710nc 0 1 4 17969 0 0 2.5301E-08) を全てコピーする。

I-(2) PHITS の **data** フォルダ内にある **xmdir.jnd** をテキストエディタで開き、その 180 行目付近にある **directory** の下に、コピーした内容を貼り付ける。上に書かれている方が優先されるため、最初の JENDL-4.0 のアドレス情報 (1001.50c 0.999167 neu/H_001.j40n_300K 0 1 1 30720 0 0 2.585E-08) より上にペーストしてください。

I-(3) PHITS の **XS** フォルダ内に、上記アドレス情報が一致するように新しく入手した核データファイルをコピーする。例えば、上記のアドレス情報であれば、**XS** フォルダ内に **xdata/endl71x/H** フォルダを作って **1001.710nc** ファイルをその中にコピーする。

II その他のライブラリ (陽子・重陽子・光核反応・高エネルギー中性子ライブラリなど) の場合

II-(1) 新しく入手した核データに付録されている **xmdir** ファイルをテキストエディタで開き、核データのアドレス情報に関する部分 (例えば 1001.80c 0.999167 xdata/endl71x/H/1001.710nc 0 1 4 17969 0 0 2.5301E-08) を全て PHITS の **data** フォルダ内にある **xmdir.jnd** の末尾にコピー & ペーストする。

II-(2) PHITS の **XS** フォルダ内に、上記アドレス情報が一致するように新しく入手した核データファイルをコピーする。例えば、上記のアドレス情報であれば、**XS** フォルダ内に **xdata/endl71x/H** フォルダを作って **1001.710nc** ファイルをその中にコピーする。

II-(3) **[parameters]** セクションで **lib(i)** により、使うライブラリを明示的に指定する。例えば、上記のアドレス情報であれば、**lib(2)=80c** と指定する。また、使用するライブラリの最大エネルギーを **dmax(i)** で設定する。なお、指定された核種に対するライブラリがない場合、警告メッセージが表示された上で、核反応モデルが自動的に利用される。

なお、最新版 ENDF (ENDF/B-VIII.0) の ACE フォーマットファイルは下記よりダウンロード可能です。

<https://nucleardata.lanl.gov/ace/lib80x>

この中には、アドレスファイルとして “**xmdir**” 及び “**xmdir.2.0**” が含まれますが、“**xmdir**” の方をお使い下さい。また、“**xmdir.jnd**” にコピーした後、2 行に跨るデータがある場合は、「+」を「**ptable**」に一括置換してください。

Q1.7 光核反応により生成する粒子 (中性子・放射性核種) の統計を効果的にためる方法がありますか？

A1.7 **pnimul** パラメータを使うことにより、他の反応 (コンプトン散乱など) と比べて光核反応を起こしやすくすることができます。例えば、**pnimul=2.0** とすると、光核反応を引き起こす確率を 2 倍にする代わりに、光核反応で生成した粒子のウェイトを 1/2 にします。ウェイトを変化させるので、イベント毎の情報が必要な場合は使えません。また、**pnimul** パラメータを大きくしすぎると (100 以上)、光子・電子の挙動がずれてきてしまいますので、本パラメータを使う場合は、光子・電子の挙動 (フラックス・線量など) が大きく変動しないことを確認しながら使ってください。

- Q1.8 再開始計算を行おうとすると、タリーを変更していないにもかかわらず “Error: inconsistent tally parameters” というエラーが出て止まります。対処方法はありますか？
- A1.8 この問題は、桁落ちの関係で新旧タリーのパラメータが異なると PHITS が認識してしまうことにより発生します。タリーで使うパラメータを複雑な数式などで定義した場合によく発生します。この問題が生じた場合は [parameters] セクションで `ireschk = 1` と設定し、タリーの一致性をチェックしないモードで再開始計算を実行して下さい。

12.2 エラー、コンパイル関連

- Q2.1 コンパイルがうまくできません。
- A2.1 PHITS のコンパイルに関しては、基本的には「10 コンパイル」をご参照ください。PHITS は、Intel Fortran 11.1 以降及び gfortran 4.7 以降でコンパイル可能です。OneAPI の Intel Fortran コンパイラなら “[phits/document/OneAPI-Fortran-manual.pdf](#)” の通り、無償で入手できます。なお、PHITS 事務局が奨励するコンパイラは、計算速度の観点から Intel fortran です (Q2.6 参照)。
- Q2.2 実行中に Access violation もしくは Segmentation fault というエラーが起きてしまいます。
- A2.2 PHITS のメモリ関連バグの可能性が高いです。問題が発生したインプットファイルの 1 行目に `$DBG=1` と追記して PHITS をデバッグモードで実行してください。何かエラーメッセージが出たら、そのメッセージを実行した PC 環境の情報とともに PHITS 事務局までご連絡ください。自分でコンパイルした PHITS 実行ファイルをお使いの方は、デバッグモード (“makefile” の `DEBUG? = false` を `true` に変更して再コンパイル) で実行して、そのエラーメッセージをお教えください。
- Q2.3 外部ファイルを取り込むためのコマンド `infi:` が使えません。
- A2.3 `infi:` コマンドを使うためには、インプットファイルの 1 行目に `file=インプットファイル名` と書いておく必要があります。もしくは、通常の PHITS 用インプットファイルの他に、別のファイルを準備し、そのファイルの先頭行に `file=通常 PHITS のインプットファイル名` と書いて実行することも可能です。
- Q2.4 Windows では実行できるインプットファイルが LINUX や UNIX では実行できません。
- A2.4 いろいろな原因が考えられますが、Windows と LINUX 系 (UNIX 含む) では、リターンコードが違いファイルの転送に失敗している可能性があります。通常、Windows から LINUX 系にファイルを転送する際、FTP などのプロトコルを使うと思いますが、その転送の際、アスキーモードとバイナリモードというのがあり、アスキーファイル (PHITS のインプットファイルなど) は、アスキーモードで転送しないと、ファイルが破損してしまう可能性があります。お使いの FTP ソフトの設定をご確認ください。なお、Windows で作られたバイナリファイル (PHITS の実行ファイルなど) を LINUX 系に転送しても、通常、正しく動作しません。
- Q2.5 Cygwin 上で PHITS は動作しますか？
- A2.5 はい。PHITS の makefile にある Cygwin の項目をご参照ください。
- Q2.6 Intel fortran と gfortran、どちらが PHITS をコンパイルするのに適していますか？
- A2.6 基本的には、Intel fortran を使うことをお勧めいたします。理由は、計算速度が速いためです。gfortran では、最適化オプションを付けると正しく動作しない場合があるため、奨励の最適化オプションは -O0 (すなわち最適化しない) です。したがって、平均で 3-5 倍くらいの計算速度の差があると考えています。Intel fortran は 2020 年頃以降、oneAPI ツールキットとして無償で提供されています。
- Q2.7 メモリ分散型並列 (MPI) と共有型並列 (OpenMP) はどのように使い分けるのがよいのでしょうか？

A2.7 MPI プロトコルがインストールされたコンピュータであれば、基本的に MPI の方が計算速度は速くなります。ただし、通常の Windows や Mac には MPI プロトコルがインストールされていないので、簡単に並列計算を実行したいのであれば、OpenMP を使うことをお勧めしています。また、ボクセルファントムや高エネルギー核データライブラリなどの巨大なメモリを使用する計算では、MPI だとメモリ容量をオーバーしてしまう場合があります。その場合は、MPI と OpenMP を組み合わせたハイブリッド並列を実施する必要があります。その際、メモリの許す限りできるだけ MPI 並列数を増やした方が計算速度は速くなります。ただし、ジョブコントロール用にも OpenMP 並列数分のコアを使用しますので、MPI 並列数の設定にはご注意ください。例えば、128 コアの計算機を使って OpenMP 並列数 8 で計算する場合、指定できる MPI 並列数は、 $128/8 - 1 = 15$ 、となります。

Q2.8 DCHAIN を実行した際に、「指定されたファイルが見つかりません」といったエラーが表示されます。

A2.8 DCHAIN のインプットファイルや infl コマンドを含む PHITS のインプットファイルが全角文字を含むフォルダ名の中に置かれている場合、適切に動作しません。その場合は、半角文字のみのフォルダ名に変更してください。

Q2.9 Lost particle が頻発します。どう対処したらよいでしょうか？

A2.9 いろいろな理由が考えられますが、最も多いのは、ジオメトリに 2 重定義や未定義領域がある場合です。[t-gshow] や icntl=8 オプションを使ってジオメトリを描画し、黒や紫の部分がいないか確認してください。また、ジオメトリが正しく定義されていても、以下のケースに該当する場合は Lost particle が頻発する可能性がありますので、入力ファイルの修正が必要となります。

- (1) 線源発生位置もしくは線源の進行方向とセルの境界面が完全に一致している場合。この場合、線源の発生位置に少し幅を持たせてください。例えば、 $x = 0$ に線源とセル境界面がある場合、線源の発生位置を $x0 = x1 = 0$ とするのではなく、 $x0 = 0, x1 = 0.001$ のようにしてください。
- (2) Lattice 構造を [transform] で回転させ、かつ Lattice 構造を入れる外枠セルと Lattice 構造そのものの大きさが完全に一致している場合。この場合、Lattice 構造を入れる外枠セルを少しだけ小さくしてください。詳細は“phits/lecture/advanced/voxel”をご参照ください。
- (3) [weight window] の xyz メッシュ境界面とセルの境界面が完全に一致している場合。この場合、[weight window] の xyz メッシュを少しずらして定義してください。また、[t-wwg] を使って [weight window] を作成する場合は、[t-wwg] で定義する xyz メッシュを少しずらしてください。特に、パラメータを使ってジオメトリと xyz メッシュ範囲を連動させている場合はご注意ください。なお、version 3.34 より、[weight window] 及び [t-wwg] の xyz メッシュ最大値・最小値が整数で定義された場合は、その整数から最小値は $-1 * \text{deltxyz}$ 、最大値は $+2 * \text{deltxyz}$ ずらすようにしています。

なお、上記いずれにも該当しない場合でも、桁落ちの関係でどうしても Lost particle が出てしまう場合があります。その場合、おおよその目安として、数 1000 ヒストリに 1 回程度の頻度であれば、無視して問題ありません。それ以上の頻度であれば、PHITS 事務局までご連絡ください。

Q2.10 Linux で PHITS の OpenMP 並列計算ができません。ライブラリ “libomp5.so”—, が必要というメッセージが出ます。

A2.10 OpenMP による並列計算のためには “libomp5.so” のライブラリのインストールが必要になる場合があります。この場合、各ディストリビューションの手順に従い libomp-dev をインストールしてください。例えば Ubuntu の場合は、

```
sudo apt-get install libomp-dev
```

でインストールできます。これにより、“/usr/lib/x86_64-linux-gnu/libomp.so.5” のライブラリがインストールされます。次に、このディレクトリに移動

```
cd /usr/lib/x86_64-linux-gnu/
```

し、“libomp5.so” にシンボリックリンクを作ります。

```
sudo ln -s libomp.so.5 libomp5.so
```

これにより、“libomp5.so” のライブラリが認識されるようになり、PHITS によるメモリ共有型並列計算が実行できるようになります。

Q2.11 Linux で PHITS を実行しようすると、GLIBC_2.34 not found の様なエラーがでます。

A2.11 PHITS パッケージに付属している Linux 用の実行ファイルは、新しいバージョンの GLIBC ライブラリを使用しています。このため、古い Linux の OS（例：Ubuntu 20.04LTS）では、このようなエラーが出て実行できません。この場合、OS のアップデートを検討していただくか、ご自身の環境で、PHITS のソースを再コンパイルしていただく必要があります。再コンパイルには Fortran コンパイラが必要となりますので、Intel Fortran や Gfortran などの Fortran コンパイラを用意してください。PHITS のソースコードは“phits/src”フォルダに含まれています。“makefile”の中の ENVFLAGS の値をご自身の環境に合わせて変更し、make コマンドを実行することで、簡単に PHITS の再コンパイルをすることができます（10.3 節参照）。

Q2.12 無限ループや計算の異常終了など、明らかに PHITS のバグと思われる症状が発生します。どうしたら良いでしょうか？

A2.12 問題が発生したインプットファイルの 1 行目に \$DBG=1 と追記して PHITS をデバッグモードで実行してください。何かエラーメッセージが出たら、そのメッセージ、実行した PC 環境の情報、可能ならば実行に必要な入力ファイル一式を PHITS 事務局までお送りください。また、問題を再現するため、idmprijk=1 を [parameters] に設定して再度実行し、（異常）終了時の乱数値が出力される rijkdmp.inp（MPI 並列時は rijkdmp***.inp、***は PE 番号）を同時に送っていただけると、問題解決の作業がし易くなります。

12.3 タリー関連

Q3.1 [t-heat] と [t-deposit] は何が違うのでしょうか？

A3.1 共に放射線による付与エネルギー（発熱）を出力するタリーです。ただし、[t-heat] でしか実行できなかったカーマ近似による計算は、version 3.05 以降、[t-deposit] でも可能となったため、現在 [t-heat] の利用は奨励していません。

Q3.2 [t-track] で重イオンの track length を計算すると、結果が不自然なのですが。

A3.2 重イオンのエネルギーは、入射エネルギーや切断エネルギーに対しては核子あたりのエネルギー [MeV/n] で指定しますが、タリーの中でエネルギーを指定する場合は、核子あたりではなく、全エネルギー [MeV] で指定します。ただし、[parameters] において iMeVperu=1 とすることで、タリーにおけるエネルギーの単位を MeV/n に変えることができます。

Q3.3 [t-let]、[t-sed] の結果が不自然なのですが。

A3.3 letmat で LET を計算する物質を指定する際、その物質が PHITS の体系内で使われている場合、密度はその体系内で使用している密度となります。例えば、水蒸気内の発熱量に対する LET 分布を、液体の水 (1g/cm^3) に対する LET の関数として計算したい場合、[Material] で 2 つの水を定義し、1 つを PHITS の体系内で使用し、もう 1 つを letmat で使用する必要があります。また、letmat で使用する物質の密度は、原子数密度の絶対値 (1H 6.893407e-2 16O 3.446704e-2) を指定してください。詳しくは、奨励設定ファイルの ParticleTherapy をご参照下さい。また、[t-let] の場合、LET メッシュ幅を細かく設定しすぎると結果がガタガタしてしまいますので、あまり細かいメッシュ幅を設定しないようにしてください (1 桁 10 メッシュ程度まで)。

Q3.4 タリー結果の誤差はどのように計算されているのでしょうか？

A3.4 バージョン 2.50 より、正しく計算できるように修正しました。詳しくは「5.2.2 ヒストリー数、配列の大きさ」をご参照ください。

Q3.5 並列計算で dump モードは使えるのでしょうか？

A3.5 基本的には使えます。ただし、メモリ共有型 (OpenMP) 並列の場合は、1 つのファイルに全てのノードからの情報を書き込むため、書き込む順番がヒストリー番号毎に並ばなくなってしまう。一方、メモリ分散型 (MPI) 並列の場合は、dump ファイル名にコア番号付けたファイルを出力しますので、そのような問題は起きません。

Q3.6 mesh = reg と mesh = xyz を用いて同じ直方体内のフラックスや発熱量を計算した場合に、それぞれの結果が異なるのですが。

A3.6 タリー結果を単位体積あたりに規格化して出力する場合、xyz や r-z メッシュではタリー領域の体積を自動的に計算して出力しますが、reg メッシュの場合は、[volume] セクションで体積を指定しない限り体積を 1cm^3 として出力します。例えば、mesh = reg で [volume] セクションがない場合、[t-track] の unit=1[1/cm²/source] と unit=4[cm/source] は同じ値を与えます。

Q3.7 [t-deposit] で output=deposit とした場合に入射エネルギーよりも高いイベントが発生するのはなぜでしょうか？

A3.7 発熱する核反応 (Q 値が正) が発生すると、入射粒子よりも 2 次粒子の合計エネルギーが高くなるため、入射エネルギーよりも付与エネルギーが大きくなる場合があります。また、xyz メッシュもしくは r-z メッシュかつエネルギー分散を考慮した場合 (nedisp≠0)、エネルギー分散の考慮方法の仕様により、イベント毎の情報が正しく計算できなくなってしまう。そのような場合は、mesh = reg として、[cell] セクションで領域を細かく分割して計算してください。

Q3.8 axis = xz で表示する際、横軸と縦軸を入れ替えることは可能でしょうか？

A3.8 可能です。まず、該当タリーの x-type と z-type に関連するパラメータを入れ替えます。次に下記 3 行をそのタリーに追加します。

```
trcl = 0 0 0 0 0 1 0 1 0 1 0 0
x-txt = x [cm]
y-txt = z [cm]
```

これで図が 90 度回転します。

Q3.9 タリーを増やすと計算時間が長くなるのですが対策方法はありますか？

A3.9 メッシュ数の多い場合などメモリ使用量の多いタリーを使うと、ヒストリー毎のメモリ初期化の計算時間がボトルネックになる場合があります。その場合は、istdev=1(バッチ分散) や italsh=1(タリーメモリの共有化、OpenMP のみ) を試してみてください。また、version 2.94 から 3.24 の間は、[t-dchain] 及び [t-ylid] を使うと計算時間が最大で 5 倍くらいになってしまいますので、これらのタリーを使った計算で計算時間にお困りの方は、PHITS 事務局までご連絡ください。

Q3.10 **Sum over** の値に対する統計誤差が知りたいのですが、簡単に出力できるでしょうか？

A3.10 残念ながらできません。**Sum over** の統計誤差が必要な場合は、メッシュ数を 1 にして、**sum over** の値を計算する専用のタリーを新たに設定してください。

Q3.11 **stdcut** を使って計算を打ちきる際、全てのメッシュではなく特定のメッシュに対する統計誤差のみチェックする方法はあるでしょうか？

A3.11 残念ながらありません。一部のデータのみチェックしたい場合は、メッシュをチェックしたい領域に限定した新たなタリーを設定して、そちらに **stdcut** を定義してください。

Q3.12 **PHITS** のタリーと **MCNP** のタリーとの対応を教えてください。

A3.12 以下の通りです。

- F1: Surface Current → [t-cross] with output=current
- F2: Surface Flux → [t-cross] with output=flux
- F4: Track Length cell flux → [t-track]
- F4 with FM card: Reaction number → [t-interact], [t-yield], [t-product]
- F5: Flux at a point and ring → [t-point]
- F6: Energy Deposition → [t-deposit] with output=dose
- F8: Pulse Height → [t-deposit] with output=deposit

Q3.13 [t-cross] で **mesh=reg** で計算した結果と同じ領域を **mesh=xyz** や **r-z** で定義して計算した結果が異なるのですが。

A3.13 [t-cross] で **mesh=reg** の場合は、タリー面の表面積 (**area**) を定義しないと絶対値が/cm² に規格化されません。また、**mesh=r-z** の時にメッシュの側面が円柱状のあるセルの側面と一致する場合や、**mesh=xyz** の時に座標変換によって存在するセルの境界面とタリー面が一致する場合は、桁落ち誤差により数え落としが発生してしまうので、そのような場合はメッシュサイズを微妙に変化させて境界面と一致しないようにしてください。

12.4 線源設定関連

Q4.1 等方線源ソース (**s-type=9**, **dir = -all**) のときの規格化はどのようにすればよいですか？

A4.1 **PHITS** で作る等方線源は、指定した球の中でフラックスが一定値: $1/\pi/r_1^2$ (r_1 は球の内径) となるように作られています。したがって、**PHITS** の結果 (/source) を単位フルエンス当たりに変換するには、結果に πr_1^2 を乗じてください。また、等方線源の作成にはウェイトの概念を利用していますので、検出器の応答関数などイベント毎の分布計算には利用できませんので、ご注意ください。そのような計算が必要な方は、**dir = iso** としてください。

Q4.2 **PHITS** で認識する線源領域が、実際の領域とずれるのですが。

A4.2 面線源や点線源を定義する際、その面や点が、Cell で使う **surface** と完璧に一致している場合、**PHITS** の中で認識する線源領域が実際の領域とずれる場合があります。このような状態を避けるため、面線源や点線源は、**cell** で使う面とは少しずらして作成するようにしてください。また、特定の面に完璧に平行なビームを発生させた場合も同様のエラーが起きる可能性がありますのでご注意ください。

12.5 PHIG-3D 関連

Q5.1 Windows で PHIG-3D を起動しようとする「VCOMP140.DLL が見つからない」というエラーが出て止まってしまいます。

A5.1 Microsoft Visual C++ 2015 再頒布可能パッケージを次のウェブページからダウンロードしてインストールしてみてください。

<https://www.microsoft.com/en-US/download/details.aspx?id=53840>

それでもエラーが解消されない場合は、事務局までご連絡ください。

Q5.2 文頭に `set:cXX[X.X]` を記載すると、PHIG-3D が立ち上がりません。

A5.2 [Parameters] セクション以下に、`set:cXX[X.X]` を記載してください。

Q5.3 [Material] セクションにおいて、“C” で始まる行を記載すると、“too few material input” のエラーメッセージが出ます。例えば、以下の状況でエラーとなります。

```
mat[5]
      C 2 H 4
```

A5.3 “C” で始まる行を避けるため、以下の通りに修正してください。

```
mat[5] C 2 H 4
```

Q5.4 Mac で PHIG-3D を起動しようとする「開発元を検証できないため開けません」というエラーが出てしまいます。

A5.4 コントロールキーを押しながら右クリックしてショートカットメニューの「開く」を選んで起動してください。また、「システム環境設定」->「セキュリティとプライバシー」から許可を与えることも可能です。

Q5.5 描画ボタンを押すと「Not enough free memory」というエラーが出ます。

A5.5 PHITS 本体を含む他のアプリなどがメモリを大量に使用している可能性がありますので、もし他のアプリが動いているならそれらを停止してから再度試してみてください。それでもうまく行かない場合は、左のタブにある「Setting」をクリックして「解像度（サンプリングレート）」の「点数/セル」の数値を小さくしてください。

12.6 その他

Q6.1 規制庁への加速器施設や廃棄物保管庫等の許認可申請において、PHITS による遮蔽計算の結果を使用することができるでしょうか？

A6.1 RI 法の申請においては、PHITS が認められています。J-PARC をはじめとして、放医研の新治療棟、北大の陽子線治療施設、神奈川がんセンターの重粒子線治療施設等で、実績が多数あります。一方、炉規法に関しては、申請において認められるかどうか未確認です。許可取得例をご存知でしたら、事務局までご一報ください。これまでにユーザーの皆様からいただいた情報は、次のウェブページにまとめています。<https://phits.jaea.go.jp/image/shinsei-PHITS.pdf>

Q6.2 PHITS で得られた解析結果を商用目的で利用することは可能でしょうか？

A6.2 基本的には可能です。例えば、PHITS の解析結果を元に新しい検出器を開発して販売することや、外部機関から加速器の遮蔽設計を請け負って対価を得ることも問題ありません。ただし、PHITS を含む商品（例えば PHITS の実行ファイルが含まれる治療計画システムなど）を開発して販売する場合は、原子力機構と商用利用契約を結んでいただく必要があります。そのような計画がある場合は、早めに事務局までお知らせ下さい。

Q6.3 放射線に関連する物理現象で PHITS で扱えないものは何でしょうか？

A6.3 PHITS は個々の放射線の挙動をモンテカルロ法を用いて解析するため、複数の放射線による影響（電流や放射線自身が作る電場の影響など）を考慮することができません。また、物理過程の後に引き起こされる化学過程や材質の変化は模擬することができません。詳しくは、B 節をご参照ください。

Q6.4 インストーラを削除してしまったため、新しい PC に PHITS をインストールできません。どうしたらよいでしょうか？

A6.4 ホームページの「連絡・質問」ページから「新バージョン請求」を選択して「使用している PHITS のバージョン」欄に「新規インストール希望」と書いて PHITS 事務局にご連絡ください。ユーザー登録の有無を確認した上で、登録済みであれば最新版を無料でお送りいたします。

Q6.5 大規模な並列計算を実行したいのですが、PHITS がインストールされた共用のスパコンはありますか？

A6.5 PHITS がインストールされた共用スパコンは、公益財団法人 計算科学振興財団（通称 FOCUS）<https://www.j-focus.or.jp/> より有償で利用可能です。なお、このスパコンにインストールされた PHITS を使う場合でも、PHITS のユーザー登録は各自で必要となります。

APPENDIX

1

A ANGEL

ANGEL は、簡単なインプットから、EPS (Enhanced PostScript) 形式のグラフを素早く描くために設計されたプログラムです。すなわち、ANGEL は、Angel 言語 (数値データファイルをグラフ化するために書き加える必要最低限の命令) から PostScript 言語 (Adobe 社のグラフィックコントロールプログラムの規格のプログラム言語) への翻訳機です。ANGEL は、PHITS のソースに含まれ、また PHITS の出力もアスキーファイルの他に eps ファイルの出力を得ることができますが、その後のグラフの整形などに ANGEL が必要になる場合があります。単体の ANGEL をコンパイルするためには、“/src/” フォルダにある “make.ang” を “makefile” に名称変更して “make” する必要があります。その他の ANGEL に関することは、ANGEL のマニュアルを参照してください。

A.1 タリー定義文

ANGEL パラメータ

タリー出力で、ANGEL のパラメータを追加します。

```
angel = xmin(1.0) ymin(1.3e-8)
```

ここで定義したパラメーターは、タリー出力の中で

```
p: xmin(1.0) ymin(1.3e-8)
```

と記載され、横軸と縦軸の最小値をそれぞれ指定した値に変更します。

表 194, 195, 196 に主要な ANGEL パラメータをまとめました。他の ANGEL のパラメータに関しては、ANGEL のマニュアルをご覧ください。

表 194: ANGEL パラメータ (1)

ANGEL パラメータ	説明
xmin	横軸の目盛の最小値。
xmax	横軸の目盛の最大値。
ymin	縦軸の目盛の最小値。
ymax	縦軸の目盛の最大値。
xlin	横軸を線形表示。
xlog	横軸を対数表示。
ylin	縦軸を線形表示。
ylog	縦軸を対数表示。
xdec	横軸数値を 10 進数表記。
xexp	横軸数値を指数表記。
ydec	縦軸数値を 10 進数表記。
yexp	縦軸数値を指数表記。

表 195: ANGEL パラメータ (2)

ANGEL パラメータ	説明
cmin	2次元表示（カラープロット）の最小値。
cmax	2次元表示（カラープロット）の最大値。
cmnm	長さの単位を cm から nm に変換。
cmum	長さの単位を cm から μm に変換。
cmmm	長さの単位を cm から mm に変換。
cmmt	長さの単位を cm から m に変換。
cmkm	長さの単位を cm から km に変換。
nsps	時間の単位を nsec から psec に変換。
nsus	時間の単位を nsec から μsec に変換。
nsms	時間の単位を nsec から msec に変換。
nssc	時間の単位を nsec から sec に変換。
scmn	時間の単位を sec から min に変換。
schr	時間の単位を sec から hour に変換。
scdy	時間の単位を sec から day に変換。
scyr	時間の単位を sec から year に変換。

表 196: ANGEL パラメータ (3)

ANGEL パラメータ	説明
cmap	カラーマップ名を指定。 例： <code>angel = cmap(phits2)</code> 使える cmap 名は、 'phits2' および Matplotlib で使用されているもの ¹³⁶ 。カラーマップ名に '_r' をつけることでカラーバーを反転できる。 例： <code>angel = cmap(hot_r)</code>
ndis	横軸の目盛の最大値。

バージョン 2.89 以降、デフォルトの出力サイズを 4A から US レターに変更しました。もし、出力する eps ファイルの用紙サイズを変更する場合は、ANGEL パラメータとして、**a4us**(US レター)、**a3pp**(A3)、**a4pp**(A4)、**a5pp**(A5)、**b3pp**(B3)、**b4pp**(B4)、**b5pp**(B5) を指定してください。() の中は各々の用紙サイズです。

SANGEL パラメータ

タリー出力において、ANGEL 用のパラメータを追加できるようになります。ANGEL パラメータ定義文では **p:** で始まる ANGEL 用パラメータしか定義できませんが、本定義文を使用することで任意の ANGEL 用パラメータを定義できるようになります。例えば、**infl:** パラメータを定義することで、タリー出力ファイルに対して実験値などをまとめた外部ファイルを挿入し、計算値と比較した結果を図示することができます。

書式は、**sangel**=でタリー出力に書き出す行数を指定し、その次の行からその行数だけパラメータを加えます。例えば、

```
sangel = 2
infl:{exp.dat}
w: ($\theta=$ 0 deg) / X(10) Y(100)
```

¹³⁶ J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment", Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007.
カラーマップ: <https://matplotlib.org/stable/users/explain/colors/colormaps.html>
ライセンス: <https://matplotlib.org/stable/project/license.html>
ライセンスは、**a-main1.f** にも直接記載されています。

とすることで、**exp.dat** にまとめた実験値を図示すると共に、**X=10**，**Y=100** の座標位置に “ $\theta=0$ deg” というコメントを加えることができます。

バージョン 3.31 以降、デフォルトでは **sangel** 中に **infl** が使用できなくなりました。使用する場合は、**\$RWT=0** を最初のセクションが始まる前に追加してください。

B PHITS で扱えない物理現象リスト

「PHITS で扱えない物理現象は何ですか？」という質問を頻繁に受けましたので、以下にその一覧を示します。事務局等に質問する際、ご参照ください。

- 臨界計算
- 放射線同士の相互作用（例：高エネルギー粒子衝突実験の模擬）
- 放射線自身が生み出す電場の影響（例：レーザー加速，プラズマ）
- 電子が引き起こす核反応
- 1keV 以下の光子（可視光含む）の発生と輸送（例：チェレンコフ光，シンクロトロン放射光，シンチレーション発光）
- 電流に関連する物理現象（例：ガス検出器における電子なだれ）
- 電荷交換反応（イオンの電荷が物質で変化する事象，ただし有効電荷の変化は考慮）¹³⁷
- 偏光の影響¹³⁸
- 化学反応（例：ラジカル生成・輸送）
- 放射線照射による材料特性の変化，欠陥の時間発展
- 電子以外の放射線による特性 X 線の発生（例：PIXE）
- 遅発中性子の発生

¹³⁷ 飛跡構造解析モードを利用した場合は可能

¹³⁸ Nuclear Florescence Resonance(NRF) では考慮可能

C 評価済み核データライブラリ

PHITS パッケージには、エネルギー 20 MeV 以下の中性子に対応した JENDL-4.0（全 405 核種、表 197 参照）、エネルギー 200 MeV 以下の中性子・陽子に対応した JENDL-5¹³⁹（約 30 核種に限定、表 198 参照）、及びエネルギー 100 MeV/n 以下の重陽子に対応した JENDL-5（全 9 核種、表 199 参照）が含まれています。JENDL-5 に関しては、ファイルサイズを考慮して格納する放射線の種類やターゲット核種を限定しています。パッケージに含まれていないデータを利用したい場合は、以下の手順に従ってデータを追加してください。

- (1) “phits/XS” フォルダにある “jendl5_setup_win.exe” もしくは “jendl5_setup_mac_lin.sh” を実行。上記ファイルがない場合は、まずは PHITS version 3.34 以降にアップデートしてください。
- (2) インストール方法と利用するフォルダを指定。
- (3) 編集するアドレスファイル (“xsdir.jnd”) を指定。
- (4) インストールしたいライブラリを選択。

インストーラは、以下の手順を実行します。

- (i) 選択した JENDL-5 の圧縮データ（7zip 形式）をダウンロードして展開。ただし、上記 (2) での選択次第で、この過程はスキップ可能です。
- (ii) 指定した “xsdir” ファイルに新たにダウンロードしたデータのアドレス情報を追記。その際、JENDL-4 など従来の情報よりも先（上の行）に追記されるので、全ての核種において JENDL-5 が優先して使用されます¹⁴⁰。また、天然元素展開も、JENDL-5 のデータ (“data/natural_abundance_20c.dat”) が利用されるようになります。

JENDL-5 以外のライブラリを使う方法に関しては、FAQ 1.6 をご参照ください。また、“phits/XS” フォルダには、上記データ以外にも JENDL-4.0 ベースの熱中性子散乱則データ (tsl)、EPDL97¹⁴¹ ベースの光子原子反応断面積データ (pho)、EEDL¹⁴² ベースの電子・原子反応断面積データ (ele, 現在は不使用)、EGS モード用の断面積データ (egs)、飛跡構造解析用の断面積データ (tra)、Adjoint 計算用の断面積データ (adj) などが含まれています（括弧内はフォルダ名）。

¹³⁹ Iwamoto O, Iwamoto N, Kunieda S, et al. Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5. J Nucl Sci Technol. 2023;60(1):1-60.

¹⁴⁰ 中性子ライブラリは、最後にダウンロードしたデータが優先して利用されますので、常温（300 K）以外のデータを選択した場合はご注意ください。“xsdir.jnd” に書かれるアドレス情報の順番を変更することにより優先順位を変更することができます。

¹⁴¹ Cullen et al., UCRL-50400, 6, Rev.5, 1997.

¹⁴² Perkins et al., UCRL-50400, 31, 1991.

表 197: PHITS パッケージに含まれる JENDL-4.0 中性子ライブラリ ($E \leq 20$ MeV, 300 K) の核種リスト

¹ H	² H	³ He	⁴ He	⁶ Li	⁷ Li	⁹ Be	¹⁰ B	¹¹ B	¹² C
¹⁴ N	¹⁵ N	¹⁶ O	¹⁹ F	²³ Na	²⁴ Mg	²⁵ Mg	²⁶ Mg	²⁷ Al	²⁸ Si
²⁹ Si	³⁰ Si	³¹ P	³² S	³³ S	³⁴ S	³⁶ S	³⁵ Cl	³⁷ Cl	⁴⁰ Ar
³⁹ K	⁴⁰ K	⁴¹ K	⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca	⁴⁶ Ca	⁴⁸ Ca	⁴⁵ Sc	⁴⁸ Ti
⁴⁷ Ti	⁴⁸ Ti	⁴⁹ Ti	⁵⁰ Ti	⁵⁰ V	⁵¹ V	⁵⁰ Cr	⁵² Cr	⁵³ Cr	⁵⁴ Cr
⁵⁵ Mn	⁵⁴ Fe	⁵⁶ Fe	⁵⁷ Fe	⁵⁸ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Co	⁵⁸ Ni	⁵⁹ Ni	⁶⁰ Ni
⁶¹ Ni	⁶² Ni	⁶⁴ Ni	⁶⁵ Ni	⁶³ Cu	⁶⁵ Cu	⁶⁴ Zn	⁶⁵ Zn	⁶⁶ Zn	⁶⁷ Zn
⁶⁸ Zn	⁷⁰ Zn	⁶⁹ Ga	⁷¹ Ga	⁷⁰ Ge	⁷² Ge	⁷³ Ge	⁷⁴ Ge	⁷⁶ Ge	⁷⁵ As
⁷⁴ Se	⁷⁶ Se	⁷⁷ Se	⁷⁸ Se	⁷⁹ Se	⁸⁰ Se	⁸² Se	⁷⁹ Br	⁸¹ Br	⁸⁰ Kr
⁸² Kr	⁸³ Kr	⁸⁴ Kr	⁸⁵ Kr	⁸⁶ Kr	⁸⁵ Rb	⁸⁶ Rb	⁸⁷ Rb	⁸⁴ Sr	⁸⁶ Sr
⁸⁷ Sr	⁸⁸ Sr	⁸⁹ Sr	⁹⁰ Sr	⁸⁹ Y	⁹⁰ Y	⁹⁰ Y	⁹⁰ Zr	⁹¹ Zr	⁹² Zr
⁹³ Zr	⁹⁴ Zr	⁹⁵ Zr	⁹⁶ Zr	⁹⁴ Nb	⁹⁵ Nb	⁹⁴ Nb	⁹² Mo	⁹⁴ Mo	⁹⁵ Mo
⁹⁶ Mo	⁹⁸ Mo	⁹⁸ Mo	⁹⁹ Mo	¹⁰⁰ Mo	¹⁰⁰ Tc	⁹⁹ Tc	¹⁰⁰ Ru	¹⁰¹ Ru	¹⁰² Ru
¹⁰¹ Ru	¹⁰² Ru	¹⁰³ Ru	¹⁰⁴ Ru	¹⁰⁵ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹⁰⁵ Rh	¹⁰⁴ Rh	¹⁰⁵ Pd	¹⁰⁴ Pd
¹⁰⁵ Pd	¹⁰⁶ Pd	¹⁰⁷ Pd	¹⁰⁸ Pd	¹¹⁰ Pd	¹⁰⁷ Ag	¹⁰⁹ Ag	^{110m} Ag	¹¹¹ Ag	¹⁰⁶ Cd
¹⁰⁸ Cd	¹¹⁰ Cd	¹¹¹ Cd	¹¹² Cd	¹¹³ Cd	¹¹⁴ Cd	¹¹⁶ Cd	¹¹³ In	¹¹⁵ In	¹¹² Sn
¹¹⁴ Sn	¹¹⁵ Sn	¹¹⁶ Sn	¹¹⁷ Sn	¹¹⁸ Sn	¹¹⁹ Sn	¹²⁰ Sn	¹²² Sn	¹²³ Sn	¹²⁴ Sn
¹¹⁴ Sn	¹¹⁵ Sb	¹¹⁶ Sb	¹¹⁷ Sb	¹¹⁸ Sb	¹¹⁹ Sb	¹²⁰ Te	¹²² Te	¹²³ Te	¹²⁴ Te
¹²⁵ Sn	¹²⁶ Sb	^{127m} Sb	¹²⁸ Sb	^{129m} Sb	¹³⁰ Sb	¹³² Te	¹²⁷ Te	¹²⁹ Te	¹³⁰ Te
¹³¹ I	¹³⁵ I	¹²⁴ Xe	¹²⁶ Xe	¹²⁸ Xe	¹²⁹ Xe	¹³⁰ Xe	¹³¹ Xe	¹³² Xe	¹³³ Xe
¹³⁴ Xe	¹³⁵ Xe	¹³⁶ Xe	¹³³ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁵ Cs	¹³⁶ Cs	¹³⁷ Cs	¹³⁰ Ba	¹³² Ba
¹³⁴ Ba	¹³⁵ Ba	¹³⁶ Ba	¹³⁷ Ba	¹³⁸ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹³⁸ La	¹³⁹ La	¹⁴⁰ La	¹⁴⁰ Ce
¹³⁶ Ce	¹⁴¹ Ce	¹⁴² Ce	¹⁴³ Ce	¹⁴⁴ Ce	¹⁴³ Pr	¹⁴⁴ Pr	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Nd
¹⁴⁷ Nd	¹⁴⁸ Nd	¹⁴⁹ Nd	¹⁵⁰ Nd	¹⁵¹ Pm	¹⁵² Pm	¹⁵³ Pm	¹⁵⁴ Pm	¹⁵¹ Pm	¹⁵² Sm
¹⁴⁷ Sm	¹⁴⁸ Sm	¹⁴⁹ Sm	¹⁵⁰ Sm	¹⁵¹ Sm	¹⁵² Sm	¹⁵³ Sm	¹⁵⁴ Sm	¹⁵¹ Eu	¹⁵² Eu
¹⁵³ Eu	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	¹⁵⁶ Eu	¹⁵⁷ Eu	¹⁵² Gd	¹⁵³ Gd	¹⁵⁴ Gd	¹⁵⁵ Gd	¹⁵⁶ Gd
¹⁵⁷ Gd	¹⁵⁸ Gd	¹⁵⁹ Gd	¹⁶⁰ Gd	¹⁶¹ Tb	¹⁶² Tb	¹⁶³ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁵⁹ Dy	¹⁶⁰ Dy
¹⁶¹ Dy	¹⁶² Dy	¹⁶³ Dy	¹⁶⁴ Dy	¹⁶⁵ Er	¹⁶⁶ Er	¹⁶⁷ Er	¹⁶⁸ Er	¹⁶⁹ Er	¹⁷⁰ Er
¹⁶⁹ Tm	¹⁷⁰ Yb	¹⁷¹ Yb	¹⁷² Yb	¹⁷³ Yb	¹⁷⁴ Yb	¹⁷⁵ Yb	¹⁷⁶ Hf	¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁸ Hf
¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁸ Hf	¹⁷⁹ Hf	¹⁸⁰ Hf	¹⁸¹ Hf	¹⁸² Hf	¹⁸³ Ta	¹⁸⁴ W	¹⁸⁵ W	¹⁸⁶ W
¹⁸⁴ W	¹⁸⁶ W	¹⁸⁸ Os	¹⁸⁷ Os	¹⁸⁸ Os	¹⁸⁹ Os	¹⁹⁰ Os	¹⁹¹ Os	¹⁹² Os	¹⁹³ Au
¹⁹⁶ Hg	¹⁹⁸ Hg	¹⁹⁹ Hg	²⁰⁰ Hg	²⁰¹ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁴ Hg	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb
²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Pb	²¹⁰ Pb	²¹¹ Pb	²¹² Pb	²¹³ Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁵ Pb	²¹⁶ Pb	²¹⁷ Pb
²¹⁸ Pb	²¹⁹ Pb	²²⁰ Pb	²²¹ Pb	²²² Pb	²²³ Pb	²²⁴ Pb	²²⁵ Pb	²²⁶ Pb	²²⁷ Pb
²²⁸ Th	²²⁹ Th	²³⁰ Th	²³¹ Th	²³² Th	²³³ Th	²³⁴ Th	²³⁵ Th	²³⁶ Th	²³⁷ Th
²³² Pa	²³³ Pa	²³⁴ Pa	²³⁵ Pa	²³⁶ Pa	²³⁷ Pa	²³⁸ Pa	²³⁹ Pa	²⁴⁰ Pa	²⁴¹ Pa
²³⁸ U	²³⁹ U	²⁴⁰ U	²⁴¹ U	²⁴² U	²⁴³ U	²⁴⁴ U	²⁴⁵ U	²⁴⁶ U	²⁴⁷ U
²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴³ Pu	²⁴⁴ Pu	²⁴⁵ Pu	²⁴⁶ Pu	²⁴⁷ Pu	²⁴⁸ Pu
²⁴³ Am	²⁴⁴ Am	²⁴⁵ Am	²⁴⁶ Am	²⁴⁷ Am	²⁴⁸ Am	²⁴⁹ Am	²⁵⁰ Am	²⁵¹ Am	²⁵² Am
²⁴⁷ Cm	²⁴⁸ Cm	²⁴⁹ Cm	²⁵⁰ Cm	²⁵¹ Cm	²⁵² Cm	²⁵³ Cm	²⁵⁴ Cm	²⁵⁵ Cm	²⁵⁶ Cm
²⁴⁹ Cf	²⁵⁰ Cf	²⁵¹ Cf	²⁵² Cf	²⁵³ Cf	²⁵⁴ Cf	²⁵⁵ Cf	²⁵⁶ Cf	²⁵⁷ Cf	²⁵⁸ Cf
²⁵³ Es	²⁵⁴ Es	²⁵⁵ Es	²⁵⁶ Es	²⁵⁷ Es	²⁵⁸ Es	²⁵⁹ Es	²⁶⁰ Es	²⁶¹ Es	²⁶² Es
⁹⁹ Es	⁹⁹ Es	⁹⁹ Es	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰⁰ Fm	¹⁰⁰ Fm	¹⁰⁰ Fm	¹⁰⁰ Fm	¹⁰⁰ Fm

表 198: PHITS パッケージに含まれる JENDL-5 中性子・陽子ライブラリ ($E < 200$ MeV, 300 K) の核種リスト

¹ H	² H	⁶ Li [†]	⁷ Li [†]	⁹ Be [†]	¹² C	¹³ C	¹⁴ N	¹⁶ O	²⁷ Al
²⁸ Si	²⁹ Si	³⁰ Si	⁴⁰ Ca	⁴² Ca	⁴³ Ca	⁴⁴ Ca	⁴⁶ Ca	⁴⁸ Ca	⁵⁴ Fe
⁵⁶ Fe	⁵⁷ Fe	⁵⁸ Fe	⁶³ Cu	⁶⁵ Cu	²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Pb
²⁶	²⁶	²⁶	²⁹	²⁹	⁸²	⁸²	⁸²	⁸²	⁸³

† 陽子データのみ格納。

表 199: PHITS パッケージに含まれる JENDL-5 重陽子ライブラリ ($E < 100$ MeV/n, 300 K) の核種リスト

⁶ Li	⁷ Li	⁹ Be	¹² C	¹³ C	²⁷ Al	⁶³ Cu	⁶⁵ Cu	⁹³ Nb
³	³	⁴	⁶	⁶	¹³	²⁹	²⁹	⁴¹

索引

- <source>, 20, 102, 140
- $S(\alpha, \beta)$, 10, 11
- all, 23
- [Frag Data], 62
- [Repeated Collisions], 18
- [Repeated collisions], 231
- [Source], 12
- [T-4Dtrack], 2, 5, 40, 384
- [T-Dchain], 3
- [T-Track], 357
- [T-WWBG], 3
- [T-WWG], 3
- [User Defined Interaction], 2
- [Volume], 3
- [anatally], 55, 267
- [cell], 1, 7, 17, 39, 41, 87, 88, 90, 103, 161, 166, 172, 180–184, 186, 188–193, 196, 198, 202, 238, 349
- [counter], 12, 23, 24, 39, 241, 262, 297, 305, 316, 317, 324, 345
- [data max], 10, 12, 18, 39, 64, 218
- [delta ray], 24, 39, 212, 333
- [elastic option], 12, 39, 217
- [electro magnetic field], 39, 103, 210
- [end], 40, 41
- [forced collisions], 5, 23, 39, 48, 229
- [frag data], 14, 18, 39, 219
- [importance], 14, 39, 48, 222, 223
- [libout], 5
- [magnetic field], 39, 103, 204, 210
- [mat name color], 39, 87, 238
- [mat time change], 39, 203
- [material], 4, 13, 15, 39, 41, 87, 161, 164, 165, 180, 184, 186, 188–193, 196, 214, 238, 347, 349, 398, 399, 405
- [multiplier], 2, 5, 23, 24, 39, 92, 233, 235
- [paraemters], 5, 42, 229
- [parameters], 2, 10, 12, 14, 17, 18, 23, 36, 37, 39, 41, 47, 55, 103, 140, 144, 162, 194, 204, 210, 214, 218, 219, 226, 227, 230, 235, 236, 238, 265, 267, 283, 289, 293, 296, 297, 303, 307, 311, 312, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 348, 354, 356, 360, 362, 365, 372, 398, 400, 402, 405
- [reg name], 39, 240
- [repeated collisions], 39
- [source], 14, 20, 39, 44, 79, 101, 198, 205, 210, 296, 321, 347, 365
- [super mirror], 39, 216
- [surface], 7, 20, 39, 41, 95, 123, 166, 180–184, 186–193, 196, 198, 369
- [t-3dshow], 40, 55, 240, 247, 377
- [t-DPA], 13
- [t-adjoint], 72, 294
- [t-cross], 3, 5–8, 13, 18, 22, 23, 40, 72, 86, 144, 233, 247, 254, 261, 284, 291, 404
- [t-dchain], 1, 3, 6, 11–14, 17, 20–22, 32, 34, 40, 242, 247, 347, 403
- [t-deposit2], 6, 9, 40, 58, 102, 162, 247, 305
- [t-deposit], 2, 3, 5, 9, 10, 14, 17–19, 21, 23, 40, 58, 71, 100, 102, 112, 162, 247, 269, 297, 305, 333, 404
- [t-dpa], 2, 15, 21, 40, 100, 247, 325
- [t-gshow], 16, 22, 40, 55, 188, 240, 247, 258, 261, 372, 374
- [t-heat], 23, 40, 247, 308, 333
- [t-interact], 5, 6, 9, 20, 23, 24, 40, 86, 144, 247, 341, 404
- [t-let], 3, 24, 40, 162, 247, 329, 403
- [t-point], 6, 8, 9, 20, 40, 86, 144, 233, 247, 272, 291, 404
- [t-product], 6, 8, 21, 23, 40, 55, 86, 100, 120, 144, 247, 319, 404
- [t-rshow], 40, 55, 240, 247, 261, 262, 374, 376
- [t-sed], 8, 11, 20, 24, 40, 162, 212, 247, 333, 394
- [t-star], 24, 40, 247, 341
- [t-time], 40, 86, 144, 247, 337
- [t-track], 14, 19–21, 40, 72, 86, 144, 233, 235, 247, 269, 272, 279, 291
- [t-userdefined], 24, 40, 247, 367, 396
- [t-volume], 40, 56, 247, 365
- [t-wwbg], 40, 55, 226, 247, 362
- [t-wwg], 1, 4, 24, 40, 226, 247, 356
- [t-yield], 1, 10–13, 21, 22, 40, 70, 100, 242, 247, 257, 312, 319, 403, 404
- [temperature], 39, 202

- [timer], 39, 243
- [title], 39, 47, 54
- [track structure], 4, 10, 12, 13, 39, 213
- [transform], 7, 10–12, 23, 39, 166, 181, 190, 198, 200, 201
- [user defined interaction], 5, 39, 244
- [user defined particle], 5, 39, 244
- [volume], 39, 232, 249, 349, 354, 356, 366
- [weight window], 3, 4, 14, 23, 24, 39, 48, 66, 226, 247, 263, 272, 297, 356, 362
- [weight window], 224
- [ww bias], 39, 56, 66, 226, 247, 362
- #all, 1
- \$DBG, 4, 35
- \$MPI, 35, 394, 395
- \$OMP, 35, 395
- 2d-type, 260, 281, 287, 295, 300, 307, 309, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344
- 3dshow, 263
- a-curr, 286
- a-flux, 13
- a-type, 5, 18, 103, 106–112, 117–119, 122–124, 127, 149, 150, 253, 254, 279, 285, 319
- aama.dat, 92
- absorption, 342
- acmin, 352
- act, 341
- actlow, 140
- adjoint mode, 4, 16, 72, 294
- ag1, 112, 147, 150
- ag2, 112, 147, 150
- aHalf, 386
- all, 10, 12, 119, 122, 123, 218, 224, 227, 233, 235, 248, 280, 285, 291, 297, 299, 305, 308, 313, 319, 323, 325, 329, 334, 337, 341, 343, 357, 363
- alti, 148
- amp, 349
- anataly, 3, 8, 10, 11, 13, 267, 283, 293, 296
- andit, 73
- ANGEL, 9, 23, 58, 407
- angel, 281, 287, 292, 295, 300, 307, 309, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 372, 374, 376, 379
- ANGEL*, 374
- ANGEL, 259–262
- ANGEL パラメータ, 259, 407
- angle straggling, 68
- anlh, 242
- annih, 342
- aonucl, 353
- aoreg, 353
- arc-DPA, 13
- area, 290
- ascat1, 82
- ascat2, 82
- ATIMA, 19, 22, 68, 103, 162
- atmflu, 342
- atom, 24, 242
- atomic, 321, 342
- auge, 242
- auger, 342
- Auger 電子, 11, 21, 23, 140
- autorun, 17, 19, 269
- axis, 11, 12, 23, 58, 70, 250, 257, 260–262, 280, 285, 291, 294, 298, 305, 308, 312, 319, 325, 329, 334, 337, 341, 357, 363, 372, 374, 376
- axishow, 379
- b-curr, 286
- batch.out, 22, 36, 92
- becquerel, 140
- Bertini, 63, 70, 73
- bHalf, 386
- bitrseed, 58
- bmpout, 282, 302, 311, 315, 324, 327, 340, 345, 373, 375
- BOX, 168, 188, 189, 191–193
- brem, 242
- brems, 342
- BROND-3.1, 351
- c-type, 270
- C/X, 167
- C/Y, 167
- C/Z, 167
- CAD, 2, 9, 22
- cdiam, 333
- CENDL-3.1, 351
- chard, 79

- charge, 257, 312
- chart, 11, 70, 257, 312
- Chart of the Nuclides, 352
- chem, 13, 164, 214
- chmax, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 357
- chmax(i), 263
- chmin, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 357
- chmin(i), 263
- chplane, 360
- chwei, 360
- cmap, 3, 408
- cmax, 270, 408
- cmin, 270, 408
- cmin(i), 60, 219
- cmkm, 408
- cmmm, 408
- cmmt, 408
- cmnm, 408
- cmpt, 242
- cmum, 408
- coll, 241
- color, 203, 238
- complex DSB, 12
- compton, 342
- COND, 162
- cos, 257, 285, 319
- cosmic-ray source, 13
- CPU 時間, 87
- ctmax, 242, 262, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 357
- ctmin, 262, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 357
- Cugnon, 70
- current, 158–160, 284, 286, 404
- cut, 123
- cutoff, 313, 337
- cval, 127
- CX, 167
- CY, 167, 186, 190–192
- CZ, 167
- d-D 反応, 11
- data, 122, 123
- dbcutoff, 68
- dcay, 242
- DCHAIN, 2, 3, 7, 8, 10, 13–15, 17, 19–21, 92, 347
- dchain, 11, 70, 257, 312
- decay, 321, 337, 342
- decay 粒子, 337
- decay-turtle, 101, 116, 396
- DECDC, 92, 140
- dedxfile, 162
- dedxfnc, 301
- dedxfnc1, 307
- dedxfnc2, 307
- deg, 280
- delayed neutron, 74
- delt, 23, 242
- delt0, 82, 91
- Δ 角分布, 73
- δ 線, 39, 68, 212
- deltaray, 23, 342
- deltb, 90
- deltc, 6, 90
- deltg, 91, 205, 210
- deltm, 72, 86, 90
- deltt, 91
- deltxyz, 4
- delxyz, 91
- den, 164
- depatom, 148
- deposit, 9, 22, 23, 58, 102, 112, 297, 298, 308, 309, 404
- dfano, 22, 301
- dfano1, 307
- dfano2, 307
- DICOM2PHITS, 15
- dir, 3, 11, 23, 24, 103, 106–114, 116–119, 122–124, 127, 147, 149
- dl0, 158
- dl1, 158
- dl2, 158
- dmax, 3, 218
- dmax(1), 7
- dmax(12), 8, 62
- dmax(13), 8, 62
- dmax(14), 8, 62
- dmax(2), 62, 100, 312, 319
- dmax(2)), 297
- dmax(i), 60, 218

- dmpmulti, 125
- DNA damage, 12
- 能, 20
- dnb, 74
- Dock, 30
- dom, 103, 106–111, 117–119, 122–124, 158
- dose, 298, 404
- DPA, 2
- dpa, 325
- dpf, 158
- dpnmax, 10, 60
- drd, 158
- DRES, 70
- dresol, 22, 24, 301
- dresol1, 307
- dresol2, 307
- dtime, 140
- dump, 3, 10, 11, 13, 15, 101, 104, 124, 126, 127, 264, 288, 323, 339, 387, 396
- dumpall, 55, 85, 92, 94, 396
- Dump 線源, 1
- dversion, 353
- DWBA, 73
- dxw, 158
- dyw, 158

- e-dst, 377
- e-mode, 11, 12, 23, 71, 99, 236, 308, 312, 319, 325, 341, 347, 348
- e-phi, 377
- e-smax, 72, 296
- e-smin, 72, 296
- e-the, 377
- e-tyep, 130
- e-type, 5, 7, 15, 101, 106–112, 114, 117–119, 122–124, 127, 132, 134–136, 138, 139, 252, 254, 255, 279, 285, 291, 294, 297, 319, 337, 341, 357, 363
- e0, 101, 106–112, 114, 116–119, 122–124, 127, 130
- e1-t, 257, 305
- e1-type, 305
- e12, 257, 305
- e2-t, 257, 305
- e2-type, 305
- e21, 257, 305
- EAF-2010, 351
- EAF-3.1, 352
- EBITEM, 7, 8, 17, 70, 312
- EEDL, 411
- eg0, 138
- eg1, 138, 139, 147
- eg2, 138, 139, 147
- eg3, 138
- EGAF, 7, 8
- EGS, 2, 6
- EGS5, 19, 20, 23, 62, 71, 76, 79, 92, 162, 204, 210, 214, 341, 398
- eielfmax, 63
- eielfmin, 63
- einclmax, 63
- einclmin, 63
- eisobar, 63
- ejamnu, 63
- ejampi, 63
- ejamqmd, 63
- elastic, 313, 321, 342
- electron, 308, 311
- Element file, 195
- elf, 210
- ELIB, 162
- ELL, 168
- elowbias, 360
- elowthre, 360
- elst, 242
- emax, 231, 235
- emcnf, 74
- emcpf, 75
- emin, 24, 212, 231
- emin(1), 214
- emin(12), 22, 62, 71, 214
- emin(13), 22, 62, 71, 214
- emin(14), 62
- emin(19), 214
- emin(2), 62
- emin(5), 12
- emin(i), 60, 308, 329
- emumax, 80
- emumin, 80
- enclos, 284
- ENDF/B-VII.1, 351
- ENDF/B-VIII.0, 351, 352
- energy cut off 粒子, 337

- energy straggling, 68
- eng, 224, 227, 257, 280, 285, 291, 294, 298, 319, 337, 341, 357
- eng-t, 257, 298
- eng1, 305
- eng2, 305
- eng2let, 285, 319
- ENSDF, 352
- environ, 2, 146, 148
- EPDL97, 411
- eps, 262, 282, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 315, 324, 327, 332, 336, 340, 345, 357, 363, 373, 375
- epseudo, 18, 64
- epsout, 37, 262, 282, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 315, 324, 327, 332, 336, 340, 345, 357, 363, 372, 373, 375, 379
- epstfl, 16, 79
- eqmdnu, 63
- escape, 337
- escape 粒子, 337
- esmax, 60
- esmin, 60
- ESTEP, 162
- et0, 138
- et1, 138
- et2, 138
- et3, 138
- ETS, 213
- ETS for Si, 213
- ets_dea, 343
- ets_e-exc, 343
- ets_elast, 343
- ets_ioniz, 343
- ets_ioniz_e-exc, 343
- ets_p-exc, 343
- ets_plasmon, 343
- ets_r-exc, 343
- ets_v-exc, 343
- ETSART, 4, 213
- etsmax, 60, 214
- etsmin, 60, 214
- event generator mode, 71
- exa, 118
- Excel, 260
- EXPORT-PHITS, 1
- f-curr, 286
- f-mesh, 363
- factor, 5, 6, 103, 125, 258, 280, 286, 291, 294, 299, 305, 309, 313, 321, 325, 330, 334, 337, 342, 357
- FAQ, 398
- fcl, 229
- FENDL/A-2.0, 351
- FENDL/A-3.0, 351
- FENDL/D-1, 352
- figure of merit, 272
- file, 36, 58, 124, 257, 258, 280, 285, 291, 294, 299, 305, 308, 312, 319, 323, 325, 329, 334, 337, 339, 341, 348, 357, 363, 365–367, 372, 374, 376, 379, 384
- file(1), 6, 62, 92
- file(10), 92
- file(11), 92
- file(12), 92
- file(13), 92
- file(14), 92
- file(15), 92
- file(18), 88, 92
- file(19), 88, 92
- file(20), 62, 92
- file(21), 92
- file(22), 37, 92
- file(23), 92
- file(24), 92, 140, 146
- file(25), 92
- file(26), 92
- file(27), 242, 316, 348
- file(28), 79, 92
- file(29), 92, 162
- file(30), 2, 92
- file(6), 5, 42, 47, 84, 87, 92, 162, 218, 238, 365
- file(7), 62, 72, 92, 162
- FILL, 180, 181, 186, 188, 189, 191–193, 196
- fill, 89
- fiss, 242
- fission, 321, 342
- flight mesh, 90
- fluence, 279, 284, 290
- FLUENT, 19
- fluo, 242
- flux, 113, 284, 286, 404

- foamout, 19, 282, 302, 315, 324, 327
- format, 385
- Fortran, 43, 260
- Frag Data, 11

- gap, 204
- GAS, 162
- gasegs, 79
- GEM, 70
- GG, 39, 202
- ghigh, 233
- Ghostscript, 29
- ghostview, 262
- ginfo, 281, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 373, 375
- glat, 148
- glong, 148
- glow, 233
- gmake, 391
- gmumul, 80
- GQ, 167
- grav, 83
- gshow, 9, 10, 16, 18, 22, 55, 240, 260, 261, 263, 281, 287, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344
- gslat, 17, 87, 261, 281, 287, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 373, 375
- gsline, 17, 87

- HalfLifeMax, 386
- HalfLifeMin, 386
- HDF5, 2
- heat, 308
- heaven, 377
- heavyion, 342
- HEX, 168
- HistoryFile, 385
- HistoryMax, 385
- HLIB, 162
- hnxslib, 351
- HSB, 238

- iadjoint, 72
- ianataldchain, 268
- iangform, 18, 285
- iannih, 6, 21, 140
- iaonucl, 353

- iaprim, 79
- iauger, 79
- iaugers, 140
- ibatch, 14, 104
- ibod, 41
- ibound, 79
- ibrdst, 79
- icday, 148
- icells, 17, 88, 92
- icenv, 146–148
- ichkmat, 17, 90
- icmonth, 148
- icntl, 5, 7, 8, 11, 15, 16, 43, 55, 93, 226, 235, 261, 262, 265, 267, 362, 365, 372, 374, 398
- icommat, 41, 93, 398
- icput, 49, 87
- icrdm, 69
- icrhi, 69, 221
- ICRP, 9
- ICRU90, 16, 162
- icxnp, 9, 13, 69
- icxsni, 69, 221
- icxspi, 69
- icyear, 148
- idam(i), 93
- idbg, 41
- idcylib, 352
- idelt, 91
- idmpmode, 125, 288, 323, 339
- idosunit, 8
- idpa, 15, 325
- idpara, 85
- idwba, 73
- iechrl, 279, 294, 297, 305, 309, 311, 312, 319, 325, 329, 333, 337, 341, 374
- iedgfl, 79
- iegsout, 76
- iegsrand, 79
- ieispl, 79
- ielas, 69
- ielctf, 83, 210
- ieleh, 62
- ielms, 69
- iels, 242
- ierROUT, 14, 84
- iertdcho, 349

- ixtstat, 272, 283, 293
- ifission, 70
- ifixchg, 22, 68, 103
- ifx, 1
- igamma, 7, 23, 70, 92, 100, 312, 319
- igchk, 90
- iggeomem, 56
- igerr, 90
- iggcm, 87
- igmuppd, 18, 79, 80
- ih2o, 20, 68
- iidfs, 73
- ikerman, 71, 297
- ikermmap, 71, 297
- ilchain, 13
- imagnf, 83, 204
- iMeVperU, 11, 144
- iMeVperu, 23, 24, 86, 235, 402
- imout, 86
- impacr, 79
- Importance, 15
- importance, 222, 223
- imsegs, 76
- imubrm, 80
- imucap, 79
- imuint, 80
- imuppd, 80
- in, 241
- INC-ELF, 2, 21, 63
- incelf, 63
- INCL, 63
- inclg, 63
- incohr, 79
- infl, 7, 35, 41, 366, 398, 408
- infl:, 198
- info, 259, 312
- infout, 47, 84
- inmed, 73
- inmedium, 73
- input echo, 55, 67, 86, 87, 227
- interpolation, 233
- inucr, 5, 7, 8, 93
- inxslib, 351
- Ionization Potential, 20
- ionization potential, 68
- ipara, 87
- ipegs, 76
- iphter, 79
- iphtout, 353
- ipngdr, 79
- ipnint, 15, 76, 79
- iprdst, 79
- iprofr, 11, 79
- iprtb2, 349
- iqmdscm, 83
- iraylr, 79
- iredufmt, 348
- ireschk, 2, 56, 356, 400
- irlet, 68
- irqmd, 63, 398
- isaba, 74
- isbias, 112, 119
- iscinful, 64
- iscorr, 102
- ismm, 70, 398
- iso, 24, 112, 113
- isobar, 63
- ispfs, 104
- isrc, 393
- istabl, 352
- istdbat, 20, 66
- istdcut, 20, 66
- istdev, 36, 56, 263, 283, 288, 293, 296, 298, 302, 307, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 366, 395, 403
- isumtally, 265
- itall, 14, 19, 20, 37, 86, 104, 262, 269, 283, 289, 293, 296, 303, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 348, 360, 365
- italsh, 17, 56, 403
- itdecn, 19, 349
- itdecs, 19, 349
- itetra, 2, 89, 92
- itetvol, 89
- itgchk, 2, 8, 89
- itimrand, 58
- itlmax, 393
- its_e-exc, 343
- its_elas, 343
- its_hit, 343
- its_ioniz, 343
- its_ioniz_e-exc, 343

- ITSART, 1, 6, 8, 10, 213
itstep, 86
ityp, 224, 227
iunrst, 79
ivoxel, 17, 88, 92, 194
iwwbias, 66, 226, 362
iwwbnk, 56
izst, 103, 205, 210

JAM, 23, 63, 69
JAMQMD, 63
JEFF-3.1A, 351
JEFF-3.3, 351
JENDL, 12, 399
JENDL-4.0, 62, 161, 351, 411
JENDL-4.0/HE, 10, 13, 16, 21, 411
JENDL-5, 1, 4, 6, 317, 411
JENDL/AD-2017, 351
JENDL/DDF-2015, 352
JENDL/DEU-2020, 11, 14
JENDL/HE-2007, 13, 69
JENDL4, 8
jmode, 7
jmout, 6, 86
jpsf, 124
JQMD, 44, 63
JQMD-2.0, 63

K/X, 167
K/Y, 167
K/Z, 167
kerma, 2
Kerma factor, 55
kerma factor, 16
kf コード, 44, 256
kf-code, 44, 45
kmout, 86, 162
knockelec, 23, 342
knoe, 23, 242
KURBUC, 5–7, 18, 64, 164, 213, 392
kurbuc_e-cap, 343
kurbuc_e-exc, 343
kurbuc_e-stp, 343
kurbuc_elast, 343
kurbuc_hit, 343
kurbuc_ioniz, 343
kurbuc_ioniz_e-exc_e-cap, 343
KUROTAMA, 69
kvlmax, 393
KX, 167
KY, 167
KZ, 167

l-dst, 377
l-phi, 377
l-the, 377
l-type, 252, 254, 329
lagrange, 234
Landau, 82
LAT, 89, 180, 181, 187–189, 191–193, 196, 372
LaTeX, 238, 240
lattice, 16, 103, 180, 181, 186, 190, 191, 193, 202, 204, 212, 216, 222, 225, 227, 229, 232, 241, 243, 248, 249, 290, 372
lattice 座標, 188, 191, 193, 248, 249
LAT 番号, 261
let, 301, 307, 319, 329
letmat, 162, 288, 297, 301, 323, 332, 336
letmat1, 307
letmat2, 307
LET メッシュ, 252
lib, 6
lib(i), 10, 60, 218
LIKE n BUT, 180, 190
lin, 233
line, 379
Linux, 27, 33, 392
lionprd, 2, 65
log, 233
lost particle, 90
lpolar, 79
Lynch の式, 82

m-source, 296
Mac, 27, 29, 391
magnetic field, 91
make, 391
makefile, 13
manatally, 268, 269
mass, 257, 312
MAT, 180, 181, 190
mat, 161, 164, 165, 203, 204, 218, 235, 238

- matadd, 87, 180, 238
- material, 262, 282, 296, 301, 307–309, 315, 323, 327, 332, 336, 339, 345, 357, 377
- maxact, 341
- maxangel, 282, 288, 293, 302, 307, 315, 324, 327, 332, 336, 340, 345
- maxbch, 125
- maxbnk, 56
- maxcas, 36, 56, 125, 394, 395
- Maxwellian, 19
- MCNP, 86, 404
- mdas, 8, 13
- mdbatima, 48, 68
- mesh, 5, 17, 21, 119, 188, 191, 194, 224, 226, 247–251, 255, 272, 279, 280, 284, 290, 294, 297, 305, 308, 312, 319, 326, 337, 341, 348, 357, 363, 365, 372, 374, 376
- method, 365
- mgf, 204, 210
- mID, 10, 13
- mirror, 377
- model, 333
- Moliere 理論, 82
- MorP, 9
- mother, 2, 231, 299, 313, 323, 325, 343
- MPICH2, 35, 394
- mset, 235
- mtinfo, 5, 237
- multi-source, 296
- multiplier, 6, 14, 233, 282, 288, 292, 296
- mxnuclei, 11, 313
- n-coll, 231
- n-evap, 231
- n-mesh, 363
- na, 149
- name, 203, 238, 240
- NASA, 69
- natural, 87
- naz, 41
- nbproden, 272, 283, 293
- nc, 270
- ncvalout, 5, 42, 84
- ndata, 1, 12, 242, 316, 348
- ndedx, 48, 68, 162
- ndis, 3, 408
- ne, 132, 134–136, 233
- nedisp, 19, 68, 90, 162
- negs, 8, 61, 62, 71, 76, 79, 92, 214, 341, 398
- neispl, 79
- neutrino, 81
- nevap, 70
- nfcseg, 66, 229
- nfile, 265, 268
- ngem, 23, 70
- ni, 140
- nlatcel, 303, 346
- nlatmem, 303, 346
- NLIB, 162
- nlost, 49, 90
- nm, 138, 139, 147
- nn, 150
- no ionization, 55
- no reaction, 55
- nocoh, 75
- Node file, 195
- non, 204, 214, 240, 290
- nonela, 321
- nonu, 74
- norm, 140, 349
- normww, 359
- Notepad++, 29
- npidk, 12, 73
- nrandgen, 58
- nrecover, 84
- NRF, 4
- nsms, 408
- nspred, 24, 79, 80, 82, 91, 162
- nsps, 408
- nssc, 408
- nsus, 408
- ntetelem, 89
- ntetsurf, 89
- ntmax, 103, 125, 127
- ntrnore, 81
- ntt, 152
- nuc, 164
- nucdata, 61, 62, 398
- nucl, 242
- nuclcal.out, 92
- nuclear, 321, 342
- nucleus, 218, 313

- nuclide, 140
- nudtvar, 24, 367
- number, 233
- nwsors, 47, 87
- nx, 119
- ny, 119
- nz, 23, 119

- o-curr, 286
- o-type, 152
- oa-curr, 286
- oa-flux, 13
- ob-curr, 286
- of-curr, 286
- off, 398
- OpenMP, 13, 16, 403
- OpenMPI, 394
- opt, 18
- out, 241
- output, 5, 9, 13, 22, 23, 58, 102, 112, 120, 188, 259, 286, 297, 298, 305, 308, 313, 321, 325, 337, 342, 372, 374, 376, 377, 404
- outtime, 349

- P, 167, 189
- p-type, 132, 134–136, 138, 139
- pairprod, 342
- param.inc, 393
- ParaView, 3
- PARMA, 12
- part, 9–11, 24, 218, 222, 224, 227, 229, 231, 233, 241, 243, 255, 256, 280, 285, 291, 297, 305, 309, 312, 319, 325, 329, 334, 337, 341, 357, 363, 384
- PE, 36, 56, 85, 90, 395, 396
- pedestal, 1, 359
- PEGS, 79
- PEGS5, 92
- pg1, 112
- pg2, 112
- phel, 242
- phi, 103, 106–111, 117–119, 122–124
- PHIG-3D, 1, 5, 6, 9, 12–15, 40, 405
- PHIG3D, 89
- PHITS-Chem, 1, 4
- PHITS-Pad, 4
- PHITS-UDM, 8
- phits.in, 395
- phits.out, 47
- PHITSPATH, 6, 92
- photoelec, 342
- photon, 44, 75, 308
- PinnedOption, 386
- PinnedParticles, 386
- PinnedTimeFix, 386
- PinnedTimeOption, 386
- PLIB, 162
- pnimul, 79
- point, 291
- pprd, 242
- precision, 385
- primary, 3, 321
- Prob, 9
- probability density function, 272
- Processing Element, 56
- prodenmn, 272, 283, 293
- prodenmx, 272, 283, 293
- product, 313
- proj, 5, 12, 103, 146
- PX, 167, 182–184, 186, 188–193
- px, 196
- PY, 167, 182–184, 186, 188–193
- py, 196
- PZ, 167, 182–184, 186, 188–193
- pz, 196
- pz0, 116

- q-type, 149, 150
- q:, 41
- qp:, 41

- r, 257, 280, 285, 298, 308, 312, 319, 337, 341
- r-from, 290
- r-in, 290
- r-mesh, 363
- r-out, 290, 363, 365
- r-to, 290
- r-type, 251, 254
- r-z, 22, 198, 247, 250, 251, 279, 284, 290, 294, 297, 319, 326, 337, 341
- r0, 23, 106, 117, 365
- r1, 23, 106, 110–113, 117

- r2, 112, 113, 117
- rad, 280
- rayl, 242
- RCC, 168
- rdam(i), 93
- REC, 168
- ref, 241
- reg, 55, 102, 103, 125, 127, 188, 191, 194, 202, 204, 210, 214, 217, 222–224, 226, 229, 231, 232, 240, 241, 243, 247–250, 257, 261, 262, 279, 280, 284, 285, 290, 294, 297, 298, 305, 308, 309, 312, 319, 325, 326, 329, 333, 337, 341, 348, 357, 363, 365, 374, 376, 377, 384
- region error, 90
- resc2, 36
- resc3, 36
- resfile, 36, 258, 280, 285, 291, 294, 299, 305, 308, 312, 319, 325, 329, 334, 337, 341, 357, 365
- resol, 263, 281, 287, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 372, 374, 379
- RHO, 180, 181
- rhomat, 336
- RHP, 168
- rigid, 148
- rijk, 37
- rijklst, 36
- ring, 291
- RIPL, 17
- RIsorce.ack, 23
- RIsorce.dat, 92, 140
- RIsorce.rad, 23
- RI 線源, 3, 7, 12, 349
- 能, 6, 7, 10
- rn, 109, 111
- RPP, 168
- rpp, 14, 196
- rseed, 58
- rshow, 5, 55, 240, 260–263, 281, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363
- RT-PHITS, 1, 9, 15
- ruth_min, 10
- rx, 114
- ry, 114
- rz, 58, 257, 280, 298, 308, 312, 319, 337, 341
- S, 167
- s-type, 2, 3, 11, 15, 17, 20, 23, 24, 101, 102, 104, 106–114, 116–119, 122, 124, 127, 147, 365, 366
- $S(\alpha, \beta)$, 163
- samepage, 3, 7, 257, 280, 285, 291, 299, 305, 308, 319, 325, 329, 334, 337, 341
- sangel, 19, 281, 287, 292, 295, 300, 307, 309, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 372, 374, 379, 408
- SANGEL パラメータ, 408
- SANS, 74
- scdy, 408
- schr, 408
- SCINFUL-QMD, 16, 64
- SCINFUL モード, 12, 16, 64
- scm_d, 83
- scm_h0, 83
- scm_rcls, 83
- scmn, 408
- scyr, 408
- SDM, 70
- se-type, 334
- se-unit, 333
- sed, 334
- set, 127, 398
- set:, 198, 405
- sfile, 265, 268, 269
- Shen, 69
- simple, 308
- size, 240
- SkipRate, 384
- SkipRate-of, 384
- SO, 167
- solarmod, 147
- source, 120, 321
- SPAR, 162
- special, 316
- SPH, 168
- SQ, 167
- star density, 341
- stdcut, 20, 283, 288, 293, 296, 303, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 348, 360, 365, 404

- suf, 123
SumatraPDF, 29
sumfactor, 265
sumtally, 12, 42, 55, 265, 356
surface, 166, 290
swtm(i), 66
SX, 167
sx, 79, 103, 124, 126, 127
SY, 167
sy, 79, 103, 124, 126, 127
symbol, 44, 45
SZ, 167, 181, 183, 184
sz, 79, 103, 124, 126, 127

t, 257, 280, 285, 291, 294, 298, 305, 319, 337, 341, 357
t-e1, 257, 305
t-e2, 257, 305
t-eng, 257, 298
t-type, 125, 127, 151, 253, 254, 279, 285, 291, 294, 297, 305, 319, 337, 341, 357, 363
t0, 151
Table of Isotopes 8th ed., 352
target, 349
tc, 151
td, 151
TENDL, 12
TENDL-2017, 351
TeraPad, 29
tet, 2, 5, 17, 21, 247, 251, 261, 279, 280, 297, 298, 312, 319, 326
Tetra.bin, 89
tetreg, 122
TFILE, 196
tg-list, 349
the, 257, 285, 319
tim, 224
timeevo, 348
timeout, 56
title, 259, 281, 287, 292, 295, 300, 307, 309, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 348, 357, 365, 372, 374, 379
tmax(i), 66
TMP, 180, 181
tmp, 202
tn, 151
totfact, 102, 103, 125, 140, 146, 147, 349
transform, 7
transmut, 342
TRC, 3, 168
TRCL, 103, 180, 181, 190, 204, 263, 311, 357, 373, 375, 380, 381
trcl, 123, 125, 210, 281, 287, 295, 300, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344
trcle, 210
trclm, 210
trxcrd.dat, 70, 71, 92
ts_bio, 342
ts_hit, 342
ts_ioniz, 342
ts_w, 342
TSFAC, 196
tsmax, 60
tsxcl, 64
tw, 151
TX, 167
TY, 167
typ, 16, 204
TZ, 167

U, 103, 180, 181, 184, 186, 188, 189, 191–193, 196, 202, 204, 212, 216, 222, 225, 227, 229, 232, 241, 243, 248, 290
udtpara, 24, 367
udtvar, 24, 367
unit, 5, 21, 24, 86, 258, 280, 286, 291, 294, 298, 305, 308, 309, 313, 321, 325, 330, 334, 337, 342, 357, 365
universe, 89, 103, 122, 181, 184, 188, 191, 193, 194, 202, 204, 212, 216, 222, 225, 227, 229, 232, 241, 243, 248, 290
usrdfn1.f, 297, 305
usrdfn2.f, 19, 297, 305
usrdfn3.f, 22
usrelst, 83
usresol.f, 22, 301, 307
usrmgt, 83
usrsors.f, 22, 101
usrtally.f, 367

variance of variance, 272
Vavilov, 82

- verbose, 385
- VOL, 180, 181
- vol, 232, 249, 250, 279, 294, 297, 305, 311, 312, 319, 325, 329, 333, 337, 341
- volmat, 262, 282, 296, 301, 311, 315, 323, 327, 332, 336, 339, 345
- volume, 232, 249, 250, 279, 294, 297, 305, 311, 312, 319, 325, 329, 333, 337, 341, 357, 374
- voxel, 88, 193
- voxel phantom, 194
- vtkfmt, 282, 302, 311, 315, 324, 327, 340, 345, 373
- vtkout, 282, 302, 311, 315, 324, 327, 340, 345, 373
- w-ang, 377
- w-dst, 377
- w-hgt, 377
- w-mnh, 377
- w-mnw, 377
- w-wdt, 377
- wc1(i), 66, 230
- wc2(i), 66, 219
- WED, 168
- weight cutoff, 229, 231
- Weight Window, 15
- Weight Window Bias Generator, 226, 362
- Weight Window Generator, 226, 356
- weight window, 224
- wem, 114
- wgt, 103, 124
- width, 263, 281, 287, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 372, 374, 379
- Windows, 27, 42, 390, 397
- Wobbler magnet, 83, 204
- wt0, 116
- wwbg, 363
- wwbi, 227
- wwg, 357
- wwi, 224
- wwmax, 359
- x, 257, 280, 285, 298, 308, 312, 319, 337, 341
- x-ray, 75
- x-txt, 262, 281, 287, 295, 300, 307, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 372, 374, 379
- x-type, 119, 224, 226, 251, 254, 261, 372, 376
- x0, 106–112, 114, 116–118, 124, 127, 250, 363, 365, 366, 377
- x1, 107–109, 114, 117, 118, 124, 127, 363, 365
- x2, 114, 118
- x3, 118
- xdec, 5, 407
- xexp, 5, 407
- xlin, 407
- xlog, 407
- xmax, 407
- xmin, 259, 407
- xmrad1, 114
- xmrad2, 114
- xnum, 75
- Xorshift64, 18
- xp, 116
- xq, 116
- xsdir, 4, 10, 13, 27, 92, 162, 399
- xsmemory, 12, 56
- XY, 167
- xy, 12, 58, 257, 260–262, 280, 285, 298, 308, 312, 319, 337, 341, 357, 363, 372, 374, 376
- xyz, 14, 15, 21, 55, 119, 198, 224, 226, 247, 251, 260–262, 279, 284, 290, 294, 297, 319, 326, 337, 341, 372, 374
- xyz メッシュ線源, 7
- xz, 261, 280, 285, 298, 312, 319, 337, 341, 357, 363, 372
- y, 257, 280, 285, 298, 308, 312, 319, 337, 341
- y-txt, 262, 281, 287, 295, 300, 307, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 372, 374, 379
- y-type, 119, 224, 226, 251, 254, 261, 372, 376
- y0, 106–112, 114, 116–118, 124, 127, 250, 363, 365, 377
- y1, 107–109, 114, 117, 118, 124, 127, 363, 365
- y2, 114, 118
- y3, 118
- ydec, 5, 407
- yexp, 5, 407
- ylin, 407
- ylog, 407
- ymax, 407
- ymin, 259, 407

- ymrad1, 114
ymrad2, 114
yp, 116
yq, 116
yz, 257, 260–262, 280, 285, 298, 308, 312, 319, 337, 341, 357, 363, 372, 374

z, 23, 257, 280, 285, 298, 308, 312, 319, 337, 341
z-mesh, 363
z-txt, 262, 281, 287, 295, 300, 307, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 363, 374, 379
z-type, 23, 119, 224, 226, 251, 254, 261, 372, 376
z0, 106–112, 114, 116–118, 124, 127, 363, 365, 377
z1, 106–111, 114, 117, 118, 124, 127, 363, 365
z2, 118
z3, 118
zlin, 374
zlog, 374
ZP, 167
zx, 257, 261, 262

異常終了, 36, 396
階層構造, 191, 222, 248, 249
核種, 44, 161
核データ, 86, 162
角度メッシュ, 253
吸収反応, 80
境界線, 258, 261, 372, 374
空白, 38, 40, 41, 44, 54, 180, 248, 256
繰り返し幾何形状, 185, 190
群数, 132, 136, 254, 255
計算打切エネルギー, 60, 82, 92, 329
計算打切時間, 66
継続行, 255
元素, 161
元素記号, 161
最小値, 90, 132, 136, 168, 254, 255, 262
最大値, 132, 136, 168, 254, 255, 262
座標変換, 198
座標変換, 39, 166, 190, 204, 263, 281, 287, 295, 300, 311, 314, 322, 326, 331, 335, 338, 344, 357, 373, 375, 380
座標変換番号, 190
残留核, 70, 396
残留核の γ 崩壊, 70, 92

四重極電磁石, 204
質量密度, 162, 180
集合代数, 180, 181
詳細モデル, 75
時間カット, 66
時間メッシュ, 253
磁場, 83, 204
重力, 83
蒸発モデル, 70
生成核種, 312
セル, 180, 181
セル定義文, 179, 180, 188
セル番号, 122, 180, 181, 185, 188, 190, 191, 193, 248
組成比, 161
体積, 232, 249, 250, 262, 365
体積補正, 262
体積、面積計算, 55, 112
タブ, 40
弾性散乱, 69, 93
中性子光学, 132, 136, 205
中性子捕獲, 74
定数定義, 161, 166, 180, 198
天然存在比, 87, 161, 347
等高線, 260
二重極電磁石, 204
標準出力, 54, 92
物質番号, 87, 161, 164, 180, 181, 184, 186, 190, 235, 261, 309, 357, 372, 374
物質密度, 162, 180
分解能, 261, 262
偏極率, 104, 206
密度, 87, 180
メッシュ幅, 254, 255
メモリ共有型並列, 16, 35, 391, 392, 394
面記号, 166, 167, 182, 188, 193
面積, 290
面定義数値, 166
面番号, 166, 179–181, 186, 187, 193
余弦, 106–111, 114, 116
乱数, 58
粒子密度, 86, 162, 180, 184
領域番号, 202, 222, 226, 229, 232, 243, 249, 250, 261, 290
領域メッシュ, 247, 248
連続四面体, 10, 17, 19, 22, 24, 89, 101, 122, 195

- ソースのチェック, 55
- ソース粒子のタリー, 55
- ソースファイル, 396
- ダクトソース, 158
- イベントジェネレーターモード, 263
- イベントジェネレータモード, 8, 23, 297, 298, 308, 341
- インクルード, 41, 42, 161, 166, 180, 198
- インストール, 27
- ウエイトウインドウ, 66, 224
- ウエイトカット, 66
- データファイル, 396
- エネルギーメッシュ, 252, 279, 285, 291, 294, 297, 319, 337, 341, 357, 363
- エネルギー分散, 68
- ドップラー効果, 11, 70
- ドラッグ&ドロップ, 30
- カウンター, 20, 126, 241, 262, 264, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 357
- カラープロット, 260
- クローン散乱, 68
- クラスタープロット, 260
- バッチ, 36, 56, 86, 262, 395, 396
- バッチ分散, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 403
- バンク, 56
- パラメーターセクション, 374
- パラメータセクション, 261, 262
- ヒストリー数, 58, 395
- ヒストリーカウンタ, 4
- ヒストリーカウンター, 14, 263, 283, 288, 293, 296, 302, 307, 311, 316, 324, 328, 332, 336, 340, 345, 357
- コメント文字, 41, 161, 166, 180, 198
- コンパイル, 101, 390
- コンプトン散乱, 11
- ノ因子, 297
- スーパーミラー, 216
- スコアリングメッシュ, 250, 251
- スピン, 104, 126, 206, 264
- セルパラメータ, 180, 181, 184, 190, 202
- セル番号, 240
- ミューオン核反応, 79
- ミューオン捕獲反応, 79
- メッシュ定義文, 249
- メッシュタイプ, 254
- メッシュ型, 247
- メモリ共有型並列, 396
- メモリ分散型並列, 23, 35, 36, 56, 85, 264, 392, 394, 395
- モデル切り替えエネルギー, 60
- ユーザー定義 anatally, 14, 15, 269
- ユーザー定義タリー, 15
- ユーザー定義定数, 42, 265, 267
- ユーザー定義文字列, 7, 42
- ライブラリー, 55, 60, 162, 164
- ラグランジュ補間, 2
- 位相, 204
- 位相空間線源, 16, 114
- 宇宙線フラックス, 15, 145, 146
- 宇宙線線源モード, 2, 9, 11, 15
- 円環体, 10
- 能, 4, 272
- 核データライブラリー, 10
- 核異性体, 3
- 核共鳴蛍光散乱, 79
- 角度メッシュ, 279, 285, 319
- 擬似乱数生成, 18
- 計算の中断, 36
- 光核反応, 3, 10, 79
- 光核反応ライブラリー, 60
- 高エネルギー核データ用イベントジェネレーターモード, 11
- 座標変換番号, 198
- 再開始計算, 12, 36, 56, 58, 258, 280, 285, 291, 294, 299, 305, 308, 312, 319, 325, 329, 334, 337, 341, 356, 357, 363, 365, 366, 395
- 四面体メッシュ, 9, 166
- 四面体メッシュ形状, 6, 7
- 四面体メッシュ線源, 7
- 四面体メッシュ体系, 3
- 時間メッシュ, 279, 285, 291, 294, 297, 319, 337, 341, 357, 363
- 自発核分裂中性子源, 7
- 線量換算係数, 234

阻止能, 18, 162

送る, 28

楕円環体, 10

断面積出力モード, 7, 8

統計誤差, 17, 56, 257

特殊反応断面積データ, 317

特性 X 線, 22

内部転換電子, 22

熱中性子散乱則データ, 411

半導体ソフトエラー, 23, 234

反射面, 166, 195

飛跡構造解析モード, 9, 12, 13, 18, 20, 21, 24, 39,
60, 64, 92, 164, 213, 297, 342

微少角中性子散乱, 74

標準出力, 47

負パイオン, 12

負ミューオン捕獲反応, 22

分散分析, 19, 269

面上分布ソース, 101, 123

PHITS User's Manual Ver. 3.35



2012 年 12 月 27 日	Ver.2.52	発行
2013 年 11 月 19 日	Ver.2.64	発行
2015 年 03 月 23 日	Ver.2.76	発行
2015 年 12 月 16 日	Ver.2.82	発行
2016 年 09 月 29 日	Ver.2.88	発行
2017 年 12 月 01 日	Ver.3.02	発行
2019 年 04 月 03 日	Ver.3.10	発行
2019 年 09 月 26 日	Ver.3.16	発行
2019 年 10 月 29 日	Ver.3.17	発行
2020 年 03 月 19 日	Ver.3.20	発行
2020 年 09 月 14 日	Ver.3.21	発行
2020 年 10 月 09 日	Ver.3.22	発行
2021 年 01 月 12 日	Ver.3.23	発行
2021 年 03 月 12 日	Ver.3.24	発行
2021 年 07 月 09 日	Ver.3.25	発行
2021 年 09 月 01 日	Ver.3.26	発行
2022 年 03 月 22 日	Ver.3.27	発行
2022 年 05 月 09 日	Ver.3.28	発行
2022 年 09 月 12 日	Ver.3.29	発行
2023 年 01 月 10 日	Ver.3.30	発行
2023 年 04 月 07 日	Ver.3.31	発行
2023 年 05 月 16 日	Ver.3.32	発行
2023 年 09 月 01 日	Ver.3.33	発行
2024 年 03 月 26 日	Ver.3.34	発行
2025 年 03 月 28 日	Ver.3.35	発行

PHITS 開発チーム :

佐藤達彦¹, 岩元洋介¹, 橋本慎太郎^{1,†}, 小川達彦¹, 古田琢哉¹, 安部晋一郎¹,
甲斐健師¹, 松谷悠佑^{1,2}, 松田規宏¹, 平田悠歩¹, 関川卓也¹, Lan Yao¹,
Pi-En Tsai^{1,*}, Hunter Ratliff^{1,**}, 岩瀬広³, 坂本泰仁³, 杉原健太³, 執行信寛⁴,
Lembit Sihver⁵, 仁井田浩二⁶

¹(国研) 日本原子力研究開発機構, ²(国) 北海道大学,

³(共) 高エネルギー加速器研究機構, ⁴(国) 九州大学,

⁵ ウィーン工科大学, オーストリア, ⁶(財) 高度情報科学技術研究機構,

* 現所属: Zap Energy, USA, ** 現所属: HVL, Norway,

† 本マニュアルの編集担当

Reference List

Nuclear reaction models

Model name	Reference
JAM (Jet AA Microscopic transport model)	Nara et al., Phys. Rev. C, 2000; 61: 024901
Bertini	Bertini, Phys Rev; 1969, 188.4: 1711
INCL4.6 (Liege Intra-Nuclear Cascade model)	Boudard et al., Phys. Rev. C, 2013; 87: 014606
INC-ELF	Sawada, Nucl. Instr. & Meth. B, 2012; 291, 38-44
JQMD (JAERI Quantum Molecular Dynamics)	Niita et al., Phys. Rev. C, 1995; 52: 2620
JQMD Ver.2 (JAERI Quantum Molecular Dynamics Ver.2)	Ogawa <i>et al.</i> , Phys. Rev. C, 92 (2015) 024614
JAMQMD (JAM + JQMD)	Ogawa et al. Ogawa et al., Phys. Rev. C 2018; 98: 024611
DWBA (Distorted Wave Born Approximation)	Hashimoto et al, Nucl. Instr. Meth. B, 2014; 333: 27-41.
μ -pair production	Sakaki et al., Nucl. Instr. & Meth. A, 2020; 977, 164323.
μ -interaction model	Abe et al, J. Nucl. Sci. Technol., 2017; 54.1: 101-110.
ν -interaction model	N/A
GEM (Generalized Evaporation Model)	Furihata, Nucl. Instr. Meth. B, 2000; 171: 251
GEM Ver.2 (Generalized Evaporation Model)	N/A
JENDL-4 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library ver. 4):	Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2011; 48: 1
JENDL-5 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library ver. 5)	Iwamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2023; 60: 1
Photo-nuclear reaction models	Noda et al, J. Nucl. Sci. Technol., 2014; 52(1), 57–62.

NRF (Nuclear Resonance Fluorescence model)	Ogawa et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2016; 53: 1766
SCINFUL-QMD	D. Satoh et al. J. Nucl. Sci. Technol., 2022; 59: 1047-1060
SMM (Statistical Multifragmentation Model)	Ogawa, et al, Nucl. Instr. Meth. A, 2013; 723, 36-46.
EBITEM (ENSDF-Based Isomeric Transition and isomEr production Model)	Ogawa, et al, J. Nucl. Sci. Technol., 2023, 61(1), 68–73.
Event-generator model Ver.1	Niita, et al. <i>International Conference on Nuclear Data for Science and Technology</i> . EDP Sciences, 2007. p. 1167-1169.
Event-generator model Ver.2	Ogawa, et al. Nucl. Instr. Meth. A, 2014, 763: 575-590.
Kurotama model	Iida, et al, J. Phys. Soc. Japan, 2007; 76, 044201, L. Sihver et al., Nucl. Instr. & Meth. B, 2014 ; 334, 34-39
MWO formula	K. Minomo, K. Washiyama, and K. Ogata, J. Nucl. Sci. Technol. 2017 ; 54, 127-130.
Iwamoto's fission model	H. Iwamoto, and S. Meigo, J. Nucl. Sci. Technol., 56, 2019; 160-171.
Muon virtual photo-nuclear reaction model and negative muon atomic capture model	S. Abe and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 54, pp. 101-110, 2017.

Atomic reaction models

Model name	Reference
ATIMA (Stopping power calculation code)	https://web-docs.gsi.de/~weick/atima/
EGS5 (Electron Gamma Shower ver. 5):	Hirayama et al., SLAC-R-730 & KEK Report 2005-8
EPDL97 (Evaluated Photon Data Library '97 version):	Cullen et al., UCRL-50400

PHITS-KURBUC (Kyushu University Radiobiology Unit Code)	Liamsuwan et al., Phys. Med. Biol., 2013; 58: 673 Y. Matsuya et al. Phys. Med. Biol., 2021, 66, 06NT02
PHITS-ETS (Electron Track Structure code)	Kai et al., Radiat. Phys. Chem. 2015; 108: 13
PHITS-ETS-for-Si (Electron Track Structure code for Si)	Yuho Hirata <i>et al</i> 2022 <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> 61 106004
ITSART (Ion Track Structure model for Arbitrary Radiation and Targets)	Ogawa et al., Sci. Rep. 2021; 11: 24401
ETSART (Electron Track Structure model for ARbitrary Targets)	Hirata et al., Jpn. J. Appl. Phys. 2023; 62: 106001
Delta-ray production model [Delta Ray]	Butts et al, Radiation Research, 1967; 30, 855-871
Muon Bremsstrahlung and electron positron pair-production model	S. Abe and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol., 2017, 54, pp. 101-110,

Geometry functions

Name of function	Reference
Tetrahedral mesh (LAT=3)	Furuta et al. Phys. Med. Biol. 2017, 62, 4798
ICRP boxel phantom	ICRP Publication 110
mesh-type reference computational phantoms (MRCPs)	ICRP Publication 145

Source functions

Name of function	Reference
Cosmic-ray source (e-type = 28,29)	T.Sato, PLOS ONE 10, 2015, e0144679 ; T.Sato, PLOS ONE 11, 2016, e0160390
Fission source (isrfs > 0)	Verbeke et al, 2014 ; UCRL-AR-228518.
RI source	ICRP Publication 107; Endo et al, JAERI, 1347 (2005)

Tallies

Name of functions	Reference
[T-DPA] tally	Y. Iwamoto et al., Journal of Nuclear Materials, 538, 152261 (2020)
Microdosimetric distribution tally [T-SED] model = 0	Sato et al. Radiat. Prot. Dosim. 2006, 122, 41 Sato, et al, Radiat. Res. 2009, 171, 107-117 .
Microdosimetric distribution tally [T-SED] model = 1	Sato et al. <i>Phys. Med. Biol.</i> , 2023; 68.15: 155005.
[T-Dchain] tally + DCHAIN Dchain-sp γ	Ratliff, et al., Nucl. Instr. & Meth. B, 2020; 484: 29-41.
[T-adjoint] tally	Malins et al, <i>EPJ Web of Conferences</i> . 2017, 06001.
[T-WWG] & [Counter]	Sato <i>et al.</i> Nucl. Instr. & Meth. B, 2024; 557: 165535
Systematic uncertainty calculation	Hashimoto et al, J. Nucl. Sci. Technol. 2019; 56, 345-354.

Utilities

Name of function	Reference
DNA damage code phits-utility γ usr γ tally γ DNAdamage	Matsuya et al. Int. J. Radiat. Biol. 2022, 98(2), 148–157
Chemical code phits-utility γ usr γ tally γ ChemCode	Y. Matsuya et al Phys. Med. Biol., 2024, 69, 035005 Matsuya et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 2025. DOI: 10.1039/d4cp04216f
PHIG-3D	Ohnishi, SoftwareX, 2021; 14, 100681
OpenMP parallelism	Furuta et al. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering,. 2013; 2099-2102.
RT-PHITS	Furuta, et al., <i>Phys. Med. Biol.</i> , 2022; 67.14: 145002.
RT-PHITS for nuclear medicine	Sato et al., EJNMMI Physics, 2021, 8: 4

ExPORT-PHITS	Sato et al., EJNMMI Physics, 2025. DOI: 10.1186/s40658-025-00743-6
FFT-based and TE-based SMK model phits-utility¥usranatal¥smk_*	Sato et al., Int. J. Radiat. Biol. 2021, 97, 1450-1460