



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

Faculty of Science and Technology ,Keio University
Experiment Education Support Center
Central Service Facilities for Research

Yasuo Komukai



<線量評価研修会：2018年2月7～9日> 講義と実習

高いレベルの放射線管理技術者を育成するため、
放射線を正しく測定し、評価する技能を座学だけでなく、
実務技術習得に重点を置いた技術習得の研修を行う。



放射線遮へい計算や線量評価を自立て行える者を育成

講義： γ 線と物質の相互作用、線量の定義、測定器の種類、測定原理・・・

防護量（実効線量）と実用量（周辺線量当量）の関係

実習：遮蔽材による散乱線の違い、測定誤差

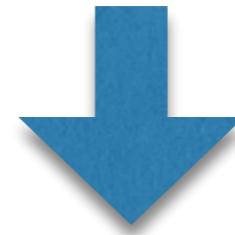
計算実習：各種計算コードの概要、演習 → 実習との比較検討



<計算実習>

従来、簡易な遮蔽計算式で計算し、過度に安全側に評価計算されている

- 1) 透過率データを用いる方法
- 2) 実効線量ビルドアップ係数を用いる方法
- 3) 実効換算係数を用いる方法



計算コードで評価したデータを基に遮蔽計算実務マニュアルが整備されている

【計算コードの用途】

- ・放射線強度評価
- ・線量評価（空間）
- ・遮蔽設計
- ・放射化（物）
- ・被爆線量評価（人）
- ・医療応用

- ・実測したデータとの比較評価
- ・遮蔽設計（今後、申請書として提出の可能性）

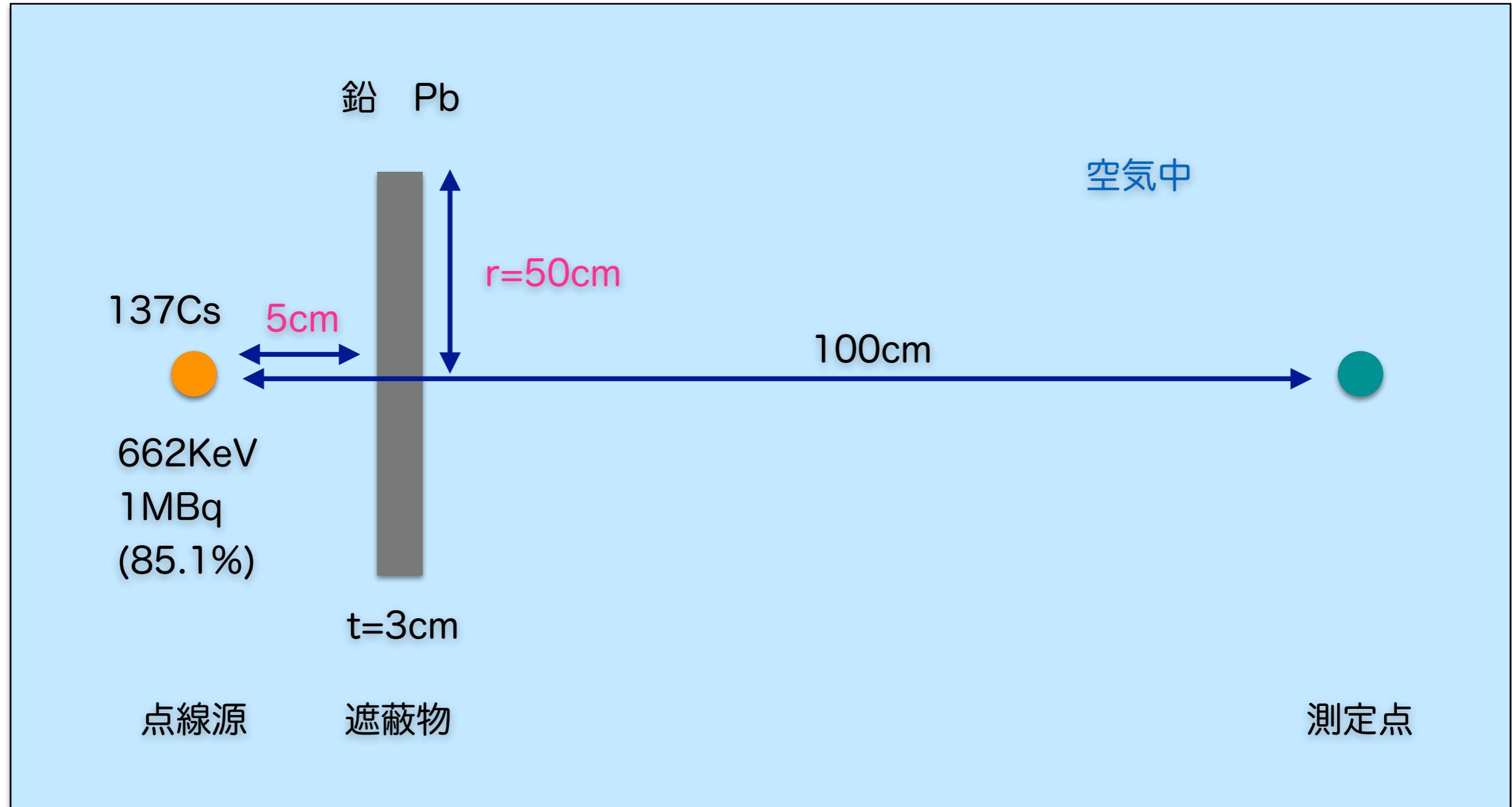
まずは、慶應理工学部の申請書類との比較



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<計算モデル>

*Rad Pro Calculatorは設定できず





Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<計算実習で使用した簡易遮蔽計算コード①>

Rad Pro Calculator

Site Navigation Menu Home Page Online Calculators > Freeware > Rad Pro Information > Documents > Help >

For those needing portability, Rad Pro for Desktop works with Windows 8.1/10 tablets. Will not work with Surface tablets running Windows RT.

Gamma Emitter Point Source Dose-Rate <--to--> Activity and Shielding Calculations (In Air)

Select Calculation
 Activity and Dose-Rate Shield Thickness Add Shielding

Enter or Select Isotope Cs-137 Select Activity Calculation
 Activity to Dose-Rate Dose-Rate to Activity

Select Dose-Rate Units uSv/hr Select Activity Units MBq Enter Activity 1 MBq

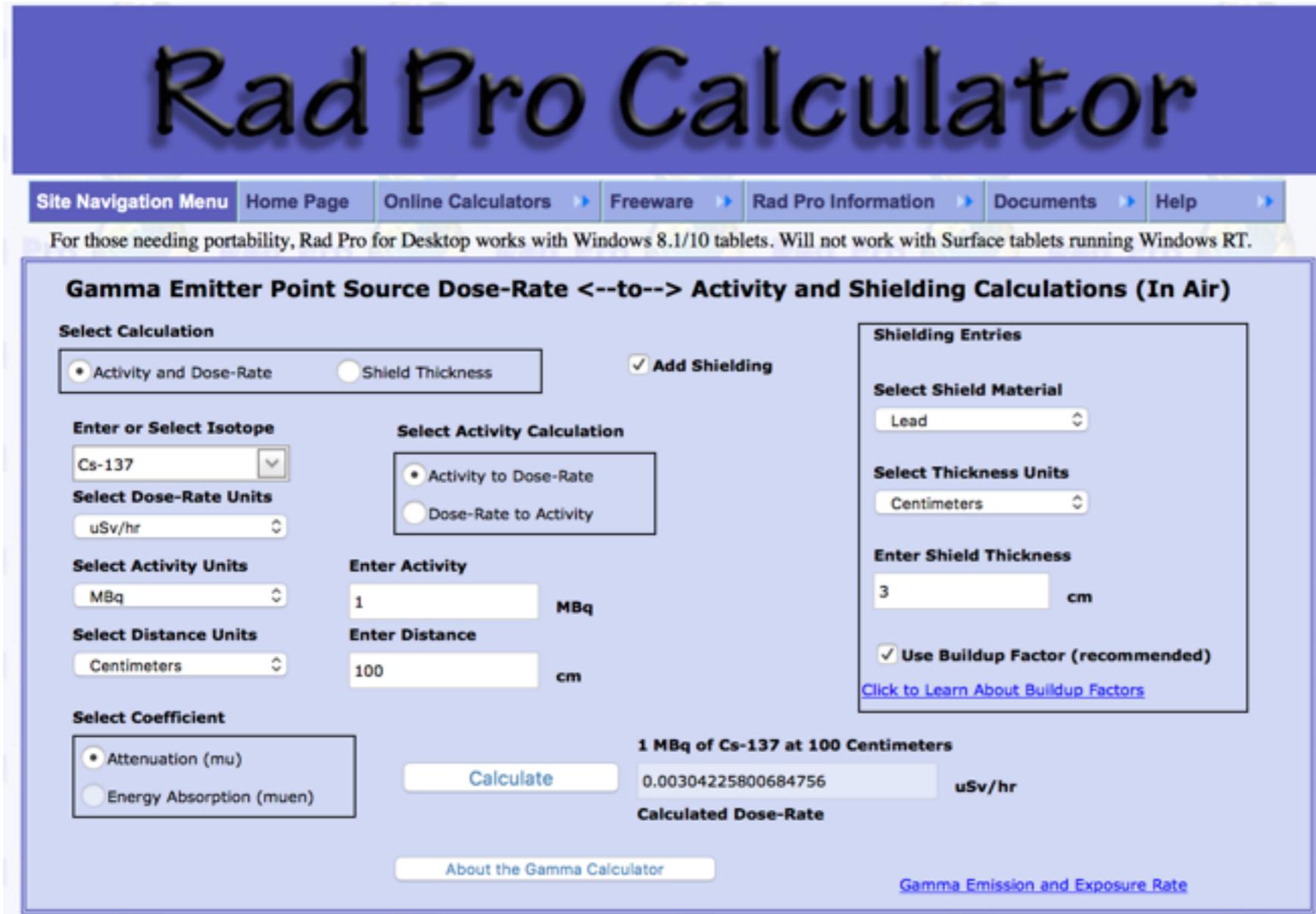
Select Distance Units Centimeters Enter Distance 100 cm

Select Coefficient
 Attenuation (μ) Energy Absorption (μen)

Shielding Entries
Select Shield Material Lead Select Thickness Units Centimeters Enter Shield Thickness 3 cm
 Use Buildup Factor (recommended)
[Click to Learn About Buildup Factors](#)

1 MBq of Cs-137 at 100 Centimeters
Calculate 0.00304225800684756 uSv/hr
Calculated Dose-Rate

[About the Gamma Calculator](#) [Gamma Emission and Exposure Rate](#)



Rad Pro Calculator

- onlineで計算可
- windows用プログラムあり
- β 線、 γ 線、X線・・・
- γ 線は遮蔽計算あり

<http://www.radprocalculator.com/default.aspx>



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

Gamma Emitter Point Source Dose-Rate <--to--> Activity and Shielding Calculations (In Air)

Select Calculation

 Activity and Dose-Rate Shield Thickness Add Shielding

Enter or Select Isotope

Cs-137



核種

Select Dose-Rate Units

uSv/hr



線量率

Select Activity Units

MBq

放射能

Enter Activity

1

MBq

Select Distance Units

Centimeters

距離

Enter Distance

100

cm

Select Coefficient

 Attenuation (mu) Energy Absorption (muen)**1 MBq of Cs-137 at 100 Centimeters**

0.00304225800684756

uSv/hr

Calculated Dose-Rate[About the Gamma Calculator](#)[Gamma Emission and Exposure Rate](#)

Shielding Entries

Select Shield Material

Lead

遮蔽材料

Select Thickness Units

Centimeters

遮蔽厚

Enter Shield Thickness

3

cm

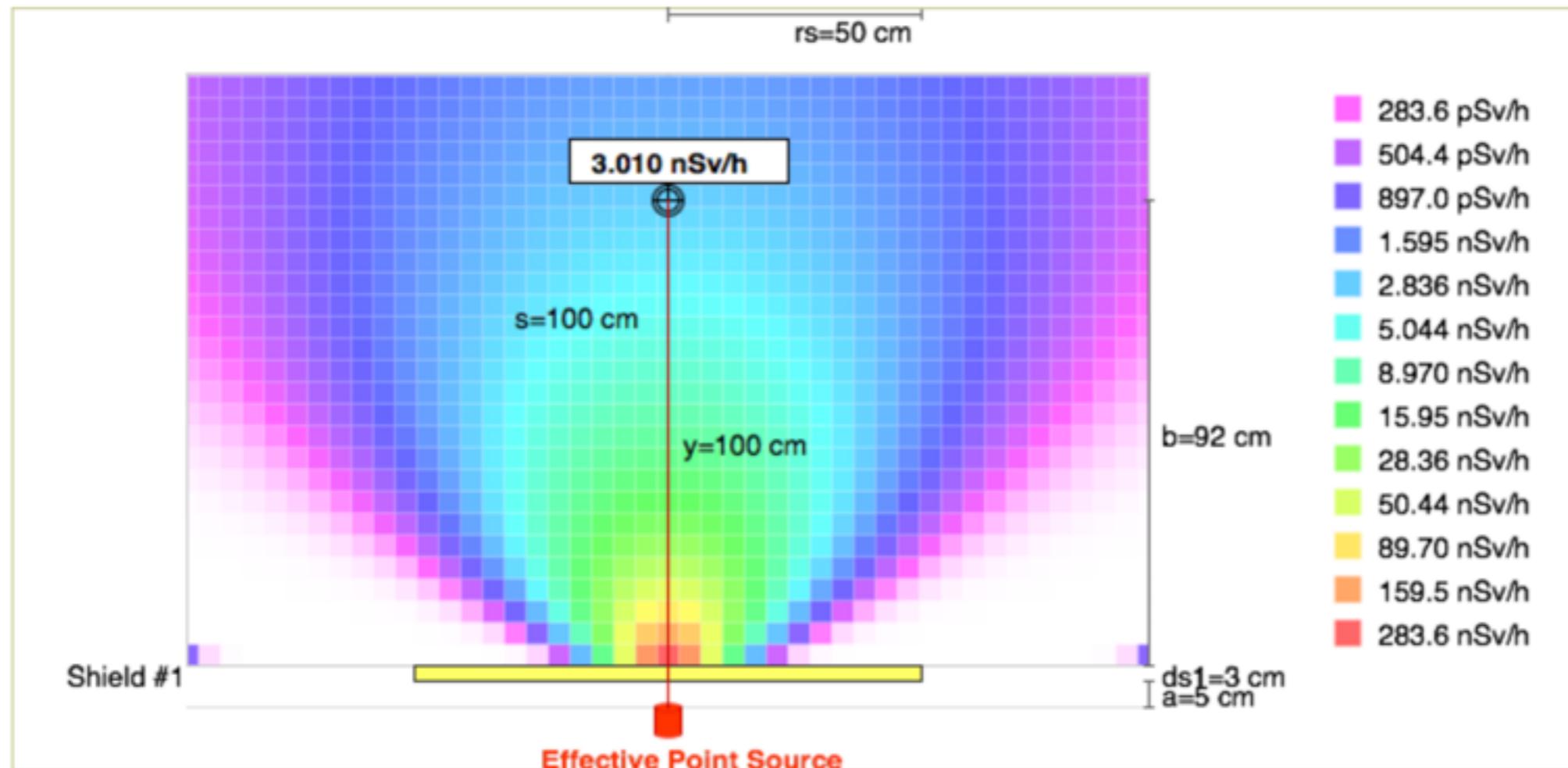
 Use Buildup Factor (recommended)[Click to Learn About Buildup Factors](#)



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<計算実習で使用した簡易遮蔽計算コード②>

External Radiation Dose Calculator
(Virtual Geiger Counter)



<http://www.wise-uranium.org/rdcx.html>



		Mode HELP
Select here before any other entry! (Selection resets all other parameters)		Example data sets (set Shield layers=1 and appropriate source mode first!)
Number of Shield layers: <input type="radio"/> 0 <input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 遮蔽物の数量	<p>空気を選択→</p> <p><input checked="" type="radio"/> Point Source</p> <p><input type="radio"/> Volume Source</p>	<p>Ex. 1 Shielding in free air</p> <p>Ex. 2 48Y Cylinder with Heels from UF6_nat</p> <p>Ex. 3 30B Cylinder with Heels from UF6_enr</p> <p>Ex. 4 DU bullet buried in soil</p> <p>Ex. 5 Uranium mill tailings cover</p> <p>Ex. 6 48Y Cylinder with UF6_nat</p> <p>Ex. 7 30B Cylinder with UF6_enr</p> <p>Ex. 8 Reprocessed uranium storage</p> <p>Ex. 9 Depleted uranium storage</p>



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

核種と数量の選択

Point Source Material Composition

[HELP](#)

Total amount: g
Select Source Material, or enter individual concentrations below -----

Individual amounts below

Consider self-shielding of point source with: rho_{so} - Source density [g/cm³]

Element / Nuclide	IMPORT		Element / Nuclide			Element / Nuclide		
Cs-137	<input type="text" value="1e6"/>	<input type="button" value="Bq/g"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
Ba-137m	<input type="text" value="1e6"/>	<input type="button" value="Bq/g"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
		<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
		<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
		<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
		<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
		<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>
		<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>			<input type="button" value="wt %"/>



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

遮蔽物の選択

Shield #1 Material Composition

NORMAL ▾

Lead (Pb) ▾

11.35 rho_{sh1} - Shield density [g/cm³] ▾

Element / Nuclide IMPORT **Element / Nuclide** **Element / Nuclide**

Element / Nuclide	IMPORT	Element / Nuclide	Element / Nuclide
Pb	100	wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾
		wt % ▾	wt % ▾



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

Ex. 1 Ex. 2 Ex. 3 Ex. 4 Ex. 5 Ex. 6 Ex. 7 Ex. 8 Ex. 9 **Geometry Parameters** [RESET](#) [HELP](#)

100	y - Distance of receptor from x-axis [cm]	- or -	b - Distance of receptor from shield rear surface [cm]
5	a - Distance of source from shield front surface [cm]		
	x - Horizontal displacement of receptor [cm]		
3	ds1 - Shield #1 thickness [cm]		
25	rs - Shield radius [cm]	- or -	0.196350 sas - Shield surface area [m^2]
10	integration step width [cm]		
1	integration step height [cm]		

- ・線源の測定点までの距離
- ・線源から遮蔽物までの距離
- ・遮蔽物の厚さ
- ・遮蔽物の大きさ（面積）
- ・計算パラメータ



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

(出力パラメータの調整)

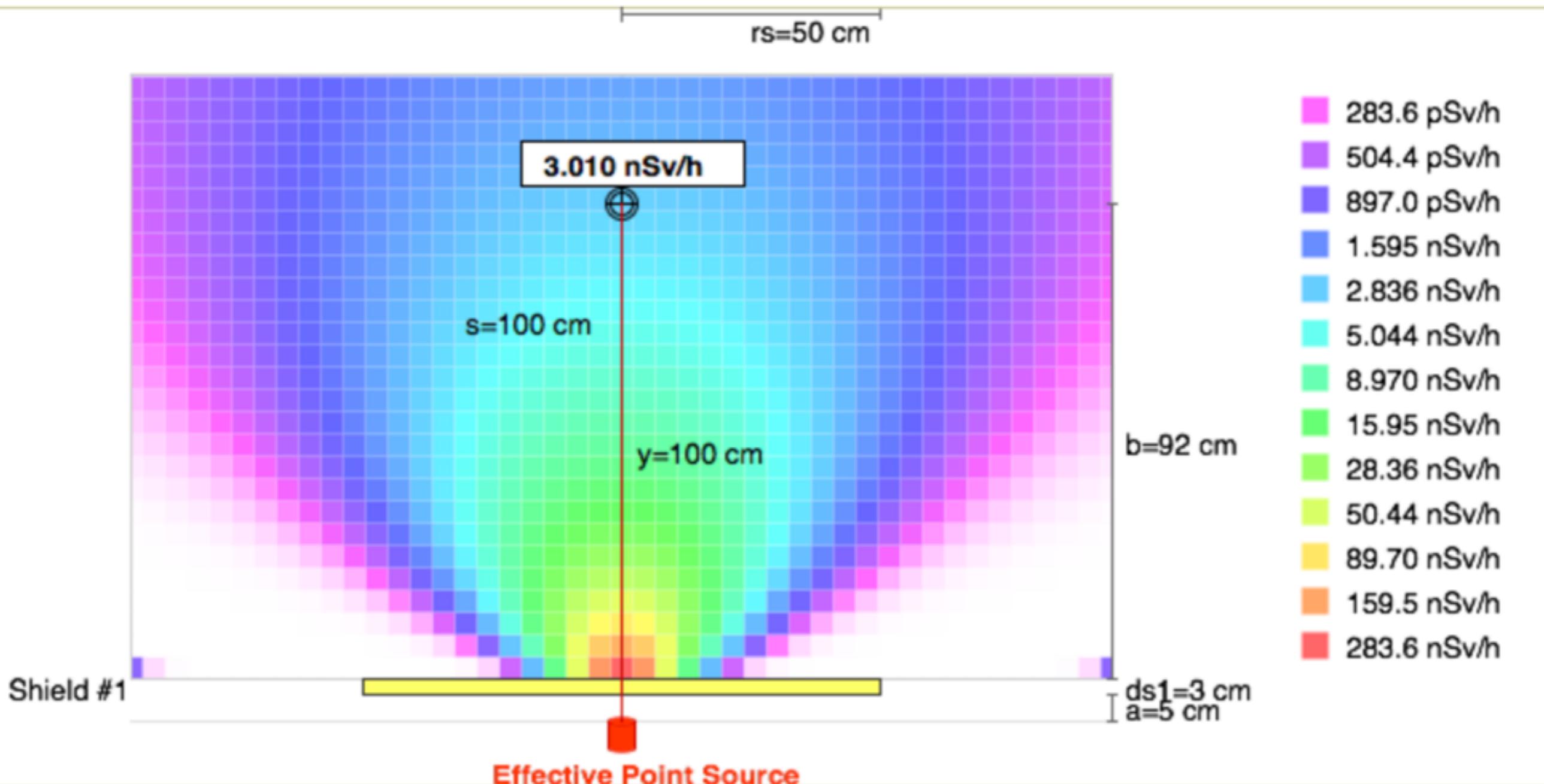
Output Parameters		
Dose Options	Graph Detail	Result Detail
<p>Sv/h <input type="button" value="Dose Rate Unit"/></p> <p>continuous <input type="button" value="Exposure for annual dose rates"/></p> <p>Air, Dry (Near Sea Level) <input type="button" value="Receptor material"/></p> <p>1 Terrestrial gamma dose coeff. in air [Sv/Gy]</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Use buildup factors for: Shield #1: <input type="button" value="auto select"/></p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> Show integration grid</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Show dose color map:</p> <p>10 x Raster width [pixel]</p> <p>10 y Raster width [pixel]</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Logarithmic color scale: 3 Decades</p>	<p>Dose from each layer:</p> <p><input type="button" value="Totals only"/></p>

線量率

出力画像設定



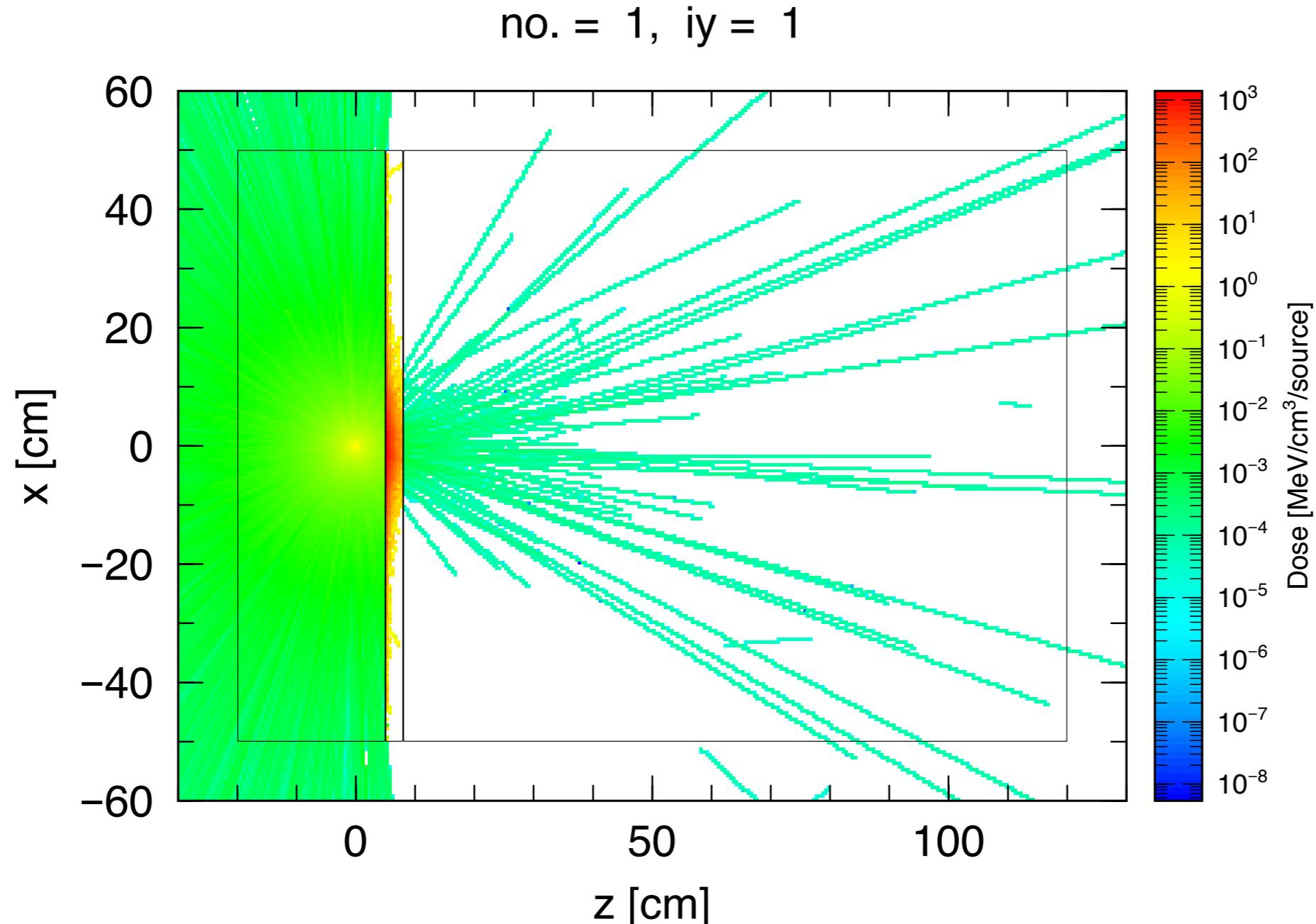
Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation





Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<計算実習で使用した~~簡易~~遮蔽計算コード③> PHITS





<遮蔽計算コードによる計算結果の比較>

uSv/h

	Pb 0cm	Pb 1cm	Pb 2cm	Pb 3cm
Rad Pro Calculator	0.0761	0.0287	0.0094	0.0030
Virtual Geiger Counter	0.0807	0.0296	0.0097	0.0030
PHITS	0.0799	0.0300	0.0093	0.0032



<PHITSの入手方法>

PHITSコードは、原子力技術に関する計算コード → 利用許諾が必要

1. RISTの原子力コードセンターの 申し込みページより利用申し込み
手続きに必要な利用申込書と誓約書を記入の上、原子力コードセンターに提出。
手数料が必要。（コード1件につき、**消費税込み13,176円**）
2. PHITS事務局が開催するPHITS講習会に参加する方法
PHITS講習会に参加して、**手数料も無償**でPHITSコード入手。利用申込書と誓
約書を事前にPHITS事務局に提出。（必要書類を提出しても、講習会に欠席した
場合は提供されない）



第14回PHITS研究会/講習会に参加 (2018年8月22日～24日)



<PHITS研究会/講習会スケジュール>

場所：いばらき量子ビーム研究センター

#講習会(初級コース)

8/23

10:40 - 10:55 PHITS のインストール

10:55 - 11:40 PHITS の概要説明

12:40 - 14:10 基礎実習 1-1(体系の作成方法)

14:10 - 15:10 基礎実習 1-2(線源の設定方法)

15:10 - 17:10 基礎実習 2(タリーの設定方法)

8/24

9:30 - 10:30 演習問題(基礎実習 1,2 の宿題)

10:30 - 12:00 基礎実習 3-1(輸送計算に関する設定)

13:00 - 14:00 基礎実習 3-2(物理モデルの設定)

14:00 - 15:30 総合実習 1(α 線, β 線, γ 線, 中性子線をとめるには?)

15:30 - 16:30 総合実習 2(陽子ビームで雪だるまを溶かそう!)

16:30 - 17:00 質疑応答・まとめ



PHITSとは？

Particle and Heavy Ion Transport code System

放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

適用例

- ・ 加速器遮蔽設計
- ・ 放射線治療・防護研究
- ・ 宇宙・地球惑星科学

扱う物理現象：輸送過程 + 衝突過程

PHITS は、JAEA、RIST、KEK が中心となり、様々な研究機関と協力して開発を進めている国産の汎用モンテカルロ放射線挙動解析コード

モンテカルロ法

長所：3次元の複雑な形状のモデル化が容易

放射線の衝突、散乱などの物理現象の忠実な模擬が可能

短所：計算時間が長い

統計現象を数値的に取り扱う結果、解が必然的に統計誤差をともなう

標準的な疑似乱数生成法（線形合同法）とランダムウォーク法を使用



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

PHITSに組み込まれた物理モデル

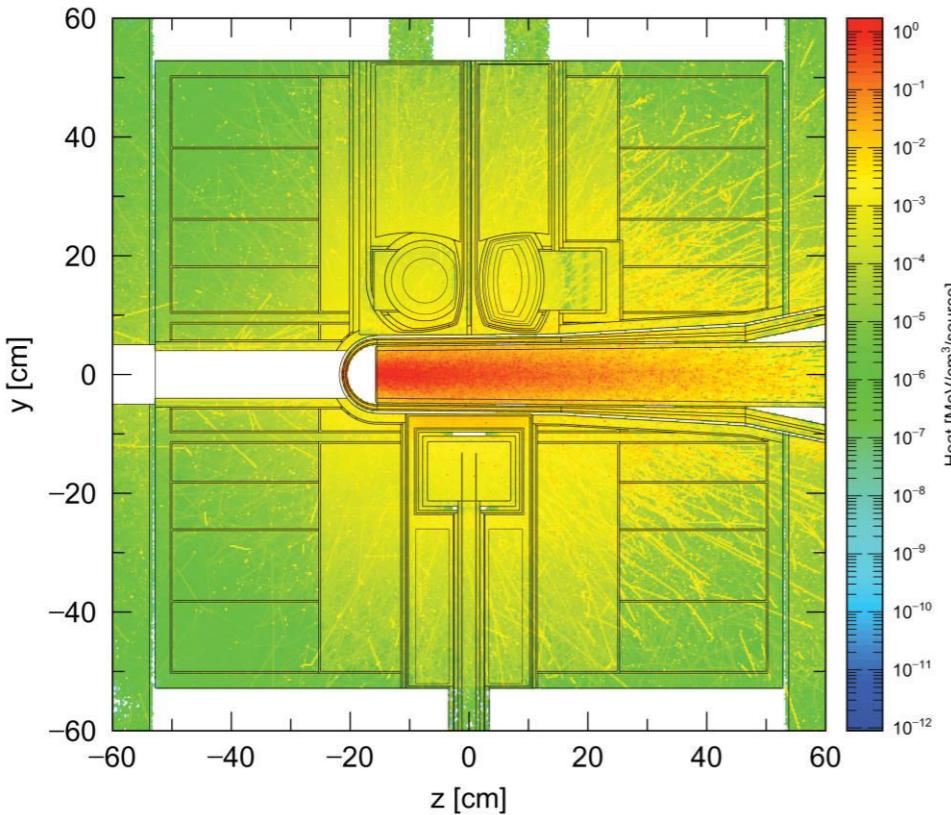
Neutron	Proton, Pion (other hadrons)	Nucleus	Muon	e^- / e^+	Photon
1 TeV		1 TeV/u			1 TeV
Intra-nuclear cascade (JAM) + Evaporation (GEM) 3.0 GeV		JAMQMD + GEM	Virtual Photo- Nuclear JAM/ JQMD + GEM 200 MeV	EGS5 or EPDL97	Photo- Nuclear JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
Intra-nuclear cascade (INCL4.6) + Evaporation (GEM) 20 MeV	d t ^3He α	Quantum Molecular Dynamics (JQMD) + GEM 10 MeV/u	ATIMA + Original	1 keV	1 keV
Nuclear Data Library (JENDL-4.0) + EGM 0.1 meV	1 MeV	Ionization ATIMA	Muonic atom + Capture	*Track structure 1 meV	*Only in water
	1 keV				

Physics models of PHITS and their switching energies



中性子発生装置周辺の電離量計算

Energy Deposition



水銀ターゲット付近の電離量計算

Be reflector

Fe reflector

Moderators

Hg target

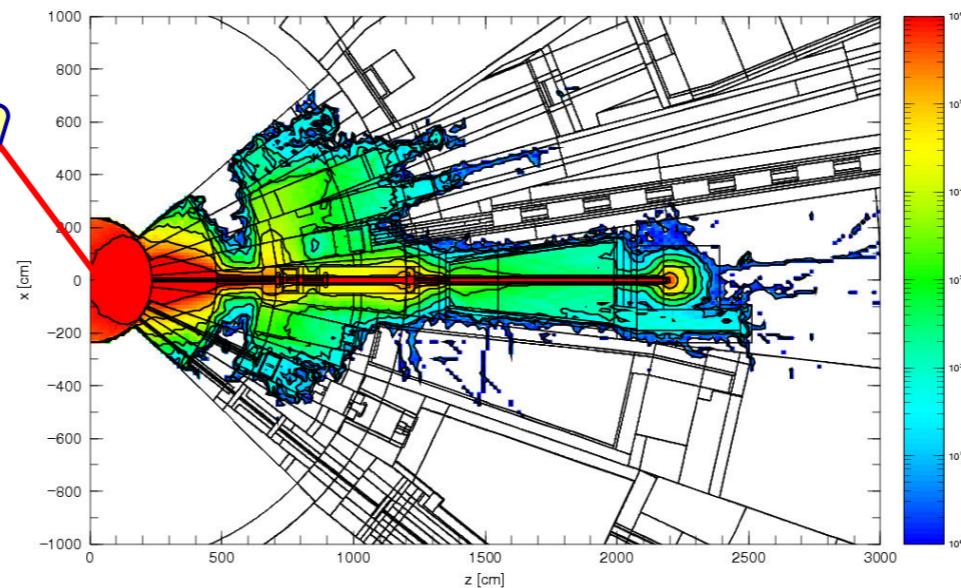
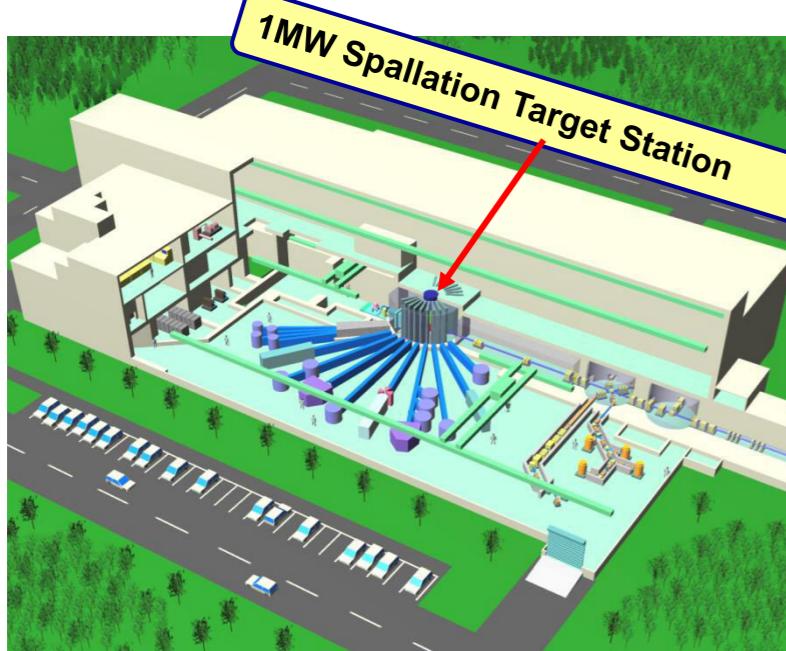
水銀ターゲット付近の幾何形状

M. Harada et al. *J. Nucl. Material* 343, 197 (2005)



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

中性子ビームラインの遮蔽設計



物質生命科学施設の中性子ビームライン周辺の発熱量計算結果

ダクトソース機能

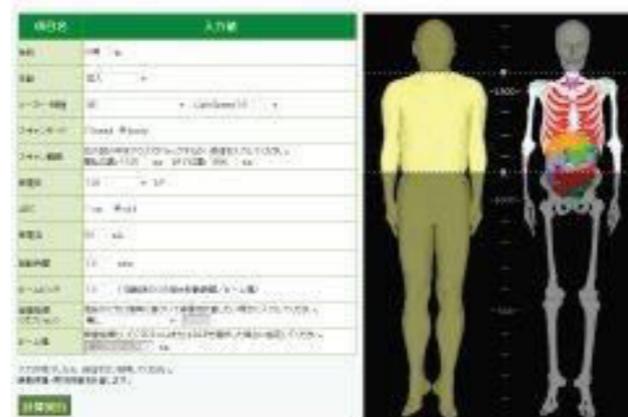
- ・中性子ビームライン専用の線源決定機能
- ・短時間で統計誤差の小さい結果が得られるよう中性子の生成数を自動調整



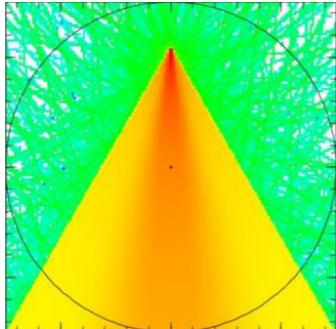
CT撮影時の線量評価システム：**WAZA-ARI**

WAZA-ARIとは？

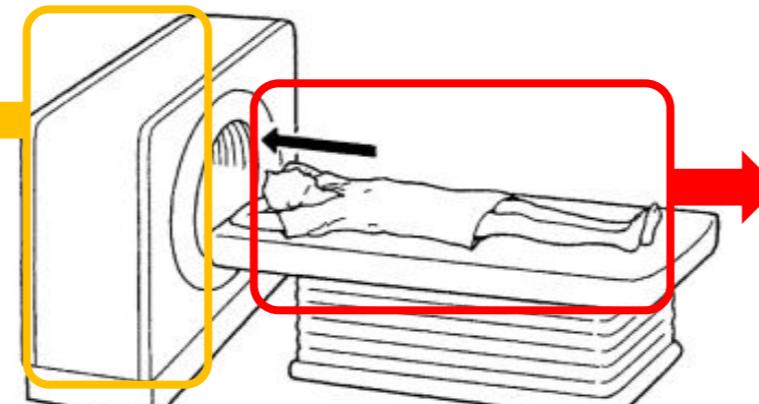
- CT撮影時の患者の線量を評価する
Webベースのシステム
- PHITSと日本人ボクセルファントムを組
み合わせて計算したCT機種毎の被ばく
線量データベースを格納



PHITSによるCT線量計算



実験的検証に基づいて機種毎の線源強度を決定
線源モデル



CT検査

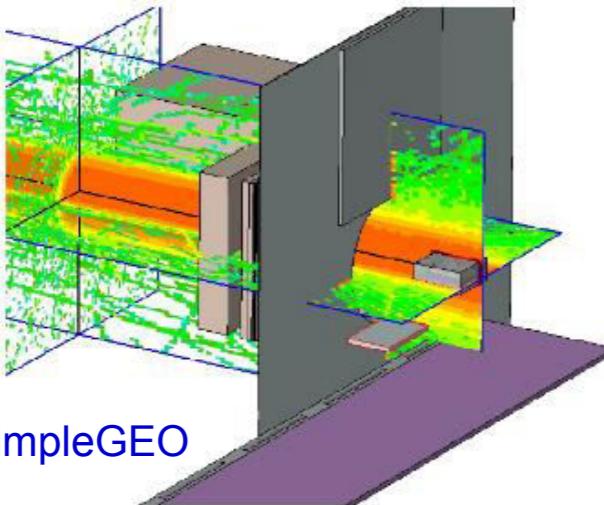


人体モデル

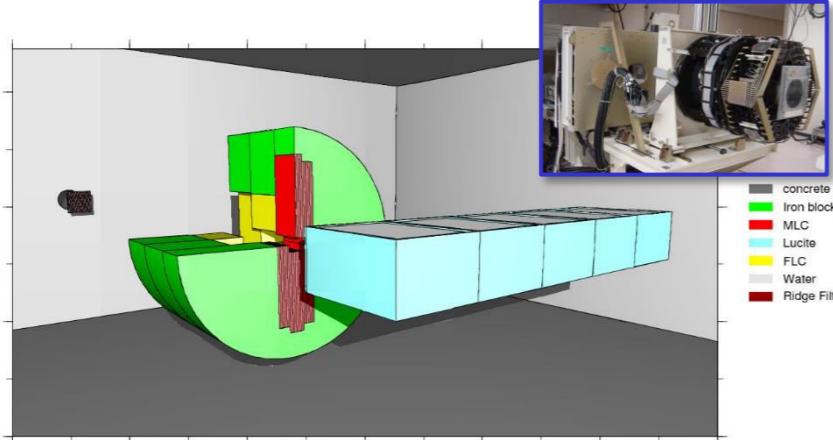


Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

粒子線治療への応用

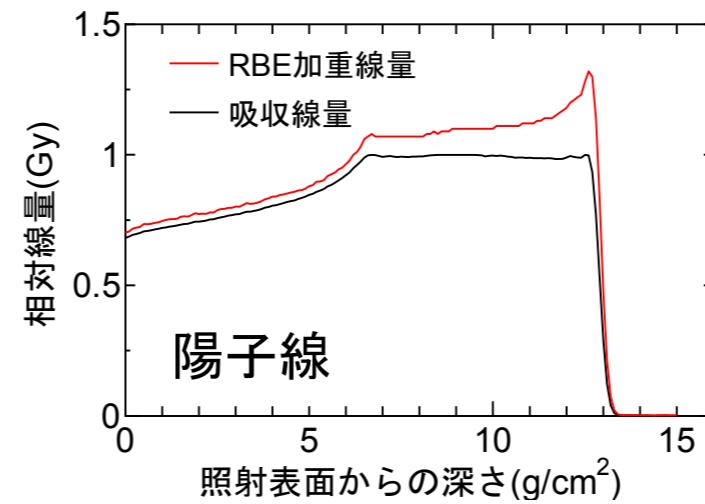


O. Ploc et al. IEEE Aerospace Conf. (2017)

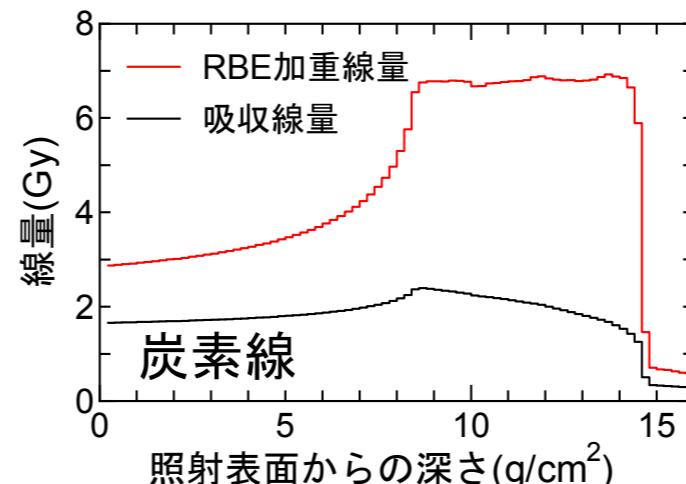


S. Yonai et al. Med Phys. 39, 4782-92 (2012)

粒子線治療場の2次散乱線評価



K. Takada et al. JRR 59, 91-99 (2018)



T. Sato et al. Radiat. Res. 171, 107-117 (2009)

吸収線量・RBE加重線量の評価

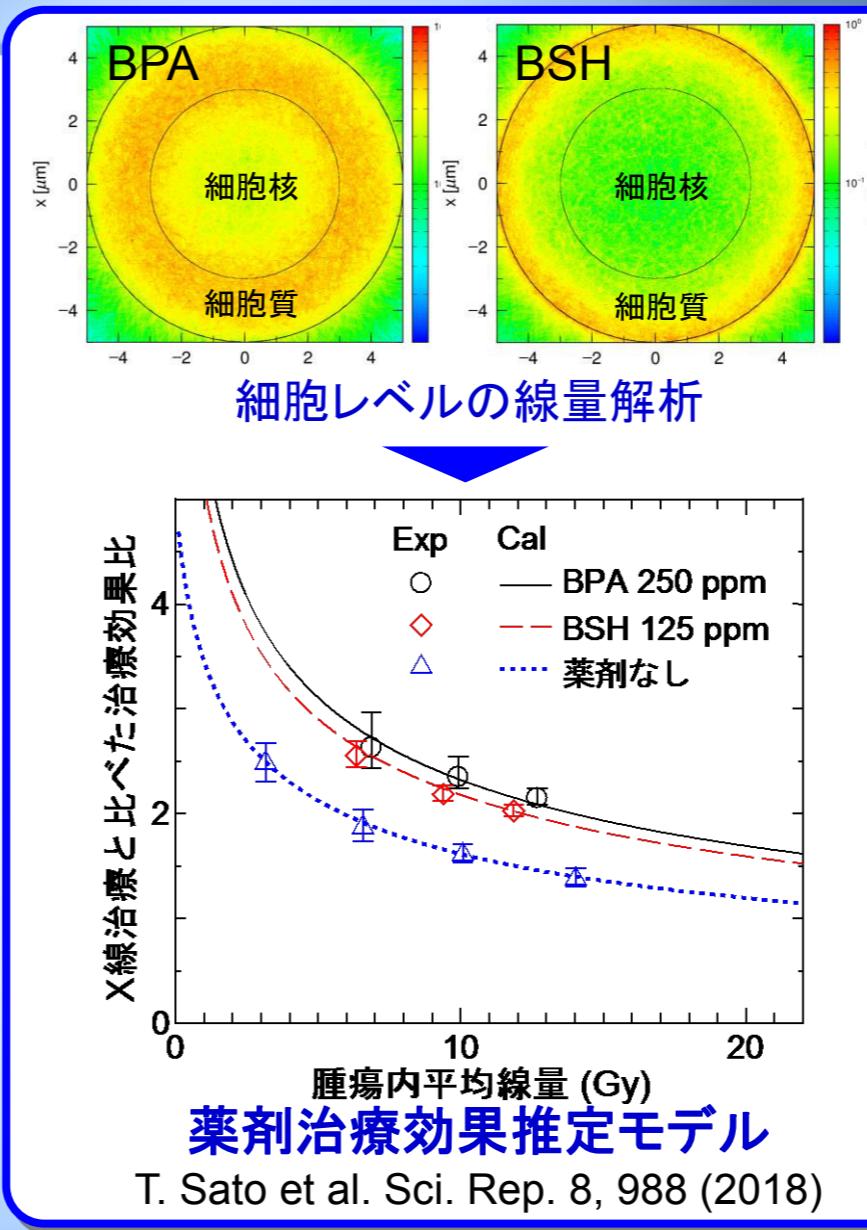
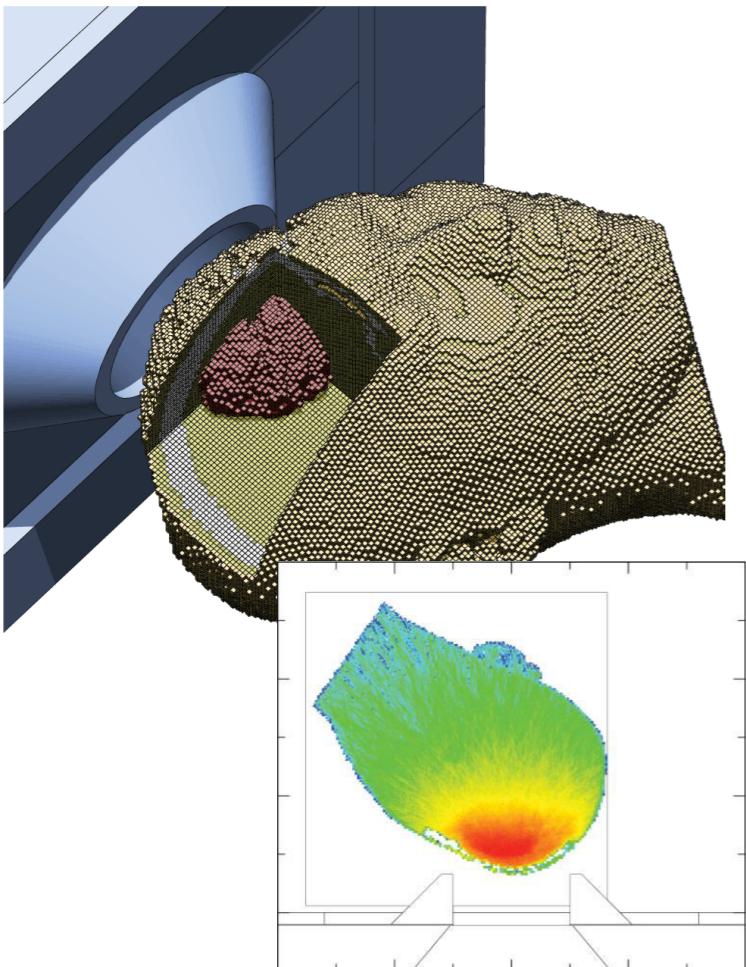
24

phits-introductionより



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

BNCTへの応用

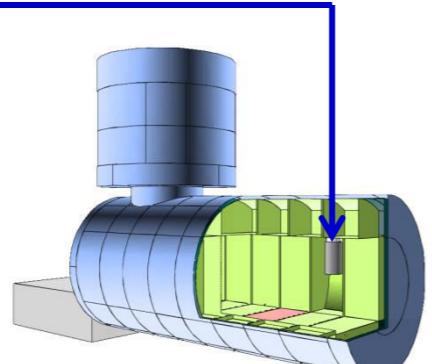
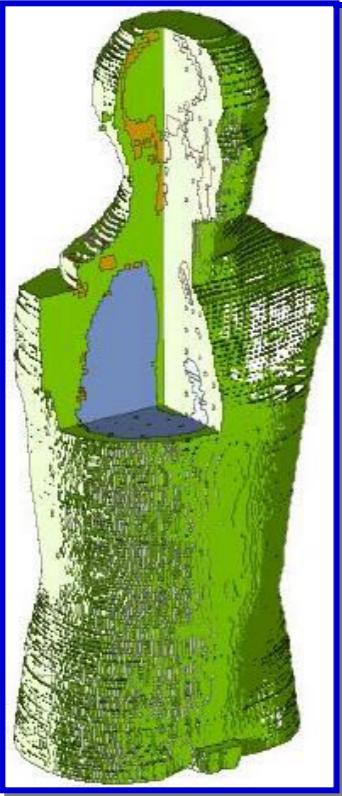


phits-introductionより



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

宇宙飛行士の宇宙線被ばく線量評価



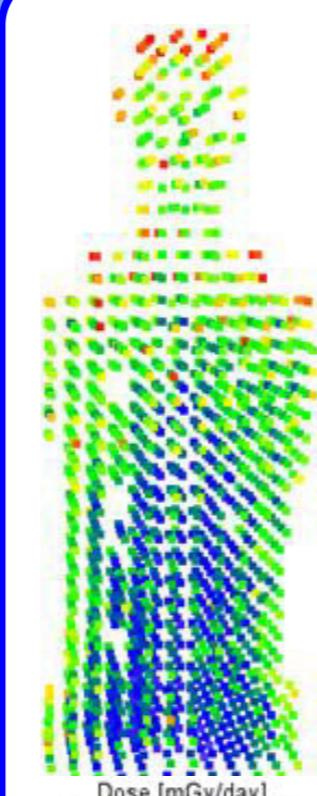
Virtual Kibo Module



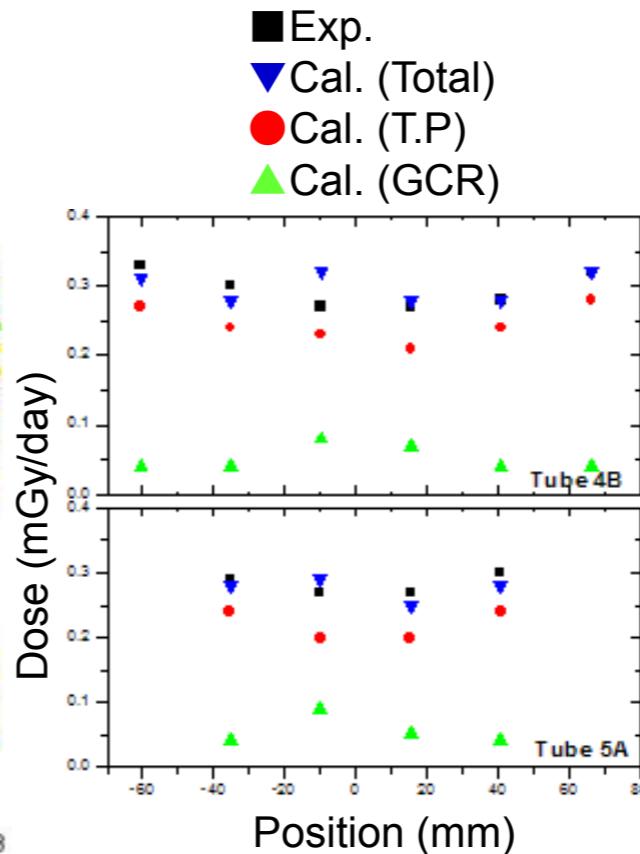
JAXA

MATROSHKA実験

人体ファントムをISSに搭載して
宇宙飛行士の宇宙線被ばく線量
を測定する欧州主導プロジェクト



PHITSによる再現結果



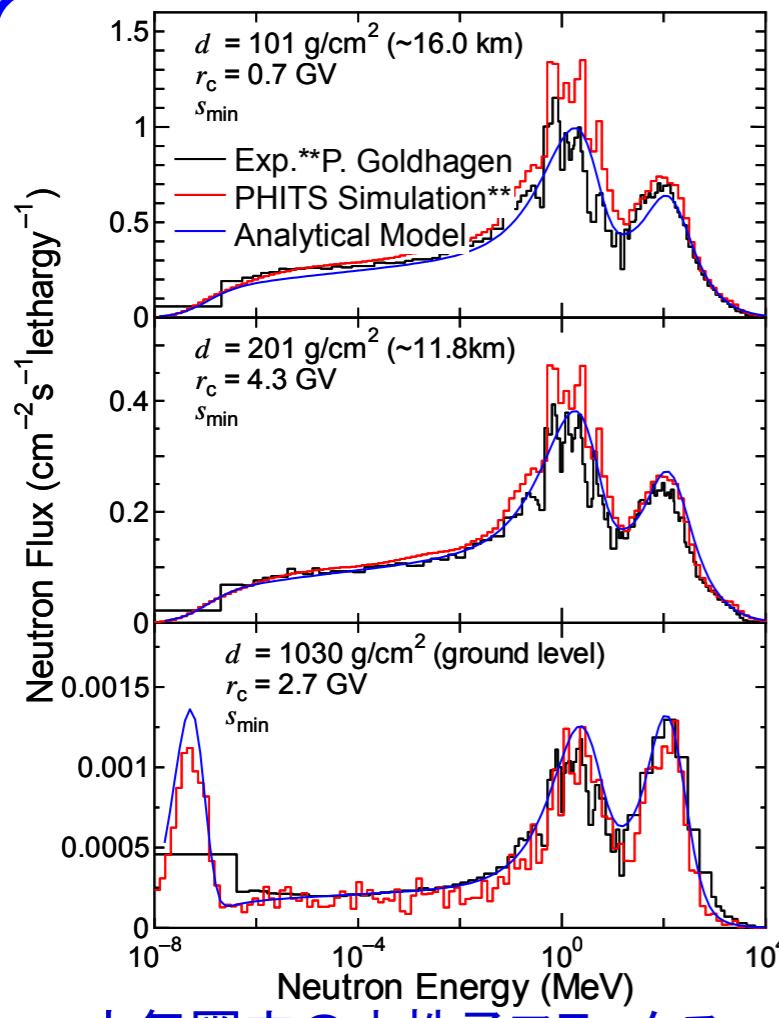
L. Sihver et al. *Radiat. Environ. Biophys.* **49**, 351 (2010), M. Puchalska, *Adv. Space Res.* (2012) 31

phits-introductionより



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

大気圏内の宇宙線挙動解析



PHITSシミュレーション

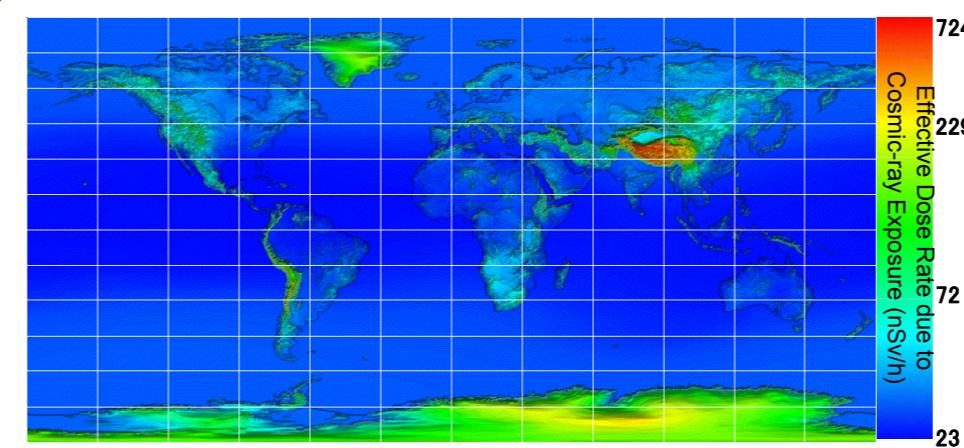
- 大気圏内の宇宙線挙動を太陽活動度、地磁気強度を考慮してPHITSで計算

モデル化

任意地点・時間における宇宙線flux・被ばく線量を瞬時に計算可能とした

ソフトウェアEXPACSとしてWebで公開

<http://phits.jaea.go.jp/expacs>



日本の航空会社による乗務員被ばく線量管理や地球惑星物理学に利用

T. Sato, PLOS ONE. 10, e0144679 (2015), T.Sato, Sci Rep 6, 33932 (2016)

32

phits-introductionより



<PHITSによる計算>

インプットファイルの準備

*ソースはFORTRANで書かれているが、設定ファイルを作るだけで計算可

- ①計算条件 → [Parameter]
- ②線源情報 → [Source]
- ③物質の定義・密度 → [Material]
- ④体系の定義 → [Cell],[Surface]
- ⑤検出器の設定 (Tally) → [T-track],[T-deposit],[Multiplier]
- ⑥体系確認 → [T-gshow]



<PHITSによる計算>

```
[Source]
s-type = 1          # mono-energetic axial source
proj = photon
dir = all          # z-direction of beam [cosine]
r0 = 0.0           # radius [cm]
z0 = 0             # minimum position of z-axis [cm]
z1 = 0             # maximum position of z-axis [cm]
e-type = 28         # RI source
ni = 1              # number of registered nuclide
                   # data = ( nuclide(i), activity(i), i = 1, ni )
Cs-137 1.0e6      # (Bq)
                   # -> 2.00000E+02 (Bq), half life: 9.52027E+08 (sec)
norm = 0            # (D=0) normalization factor =0:(/sec) =1:(/source)
dtime = -10.0       # (D=-10.0) cooling time: sec(+) or half_life(-)
```



<PHITSによる計算>

```
[Source]
s-type = 1
proj = photon
e0 = 0.662
r0 = 0.0000
x0 = 0.0000
y0 = 0.0000
z0 = 0.0000
z1 = 0.0000
dir = all
```



<PHITSによる計算>

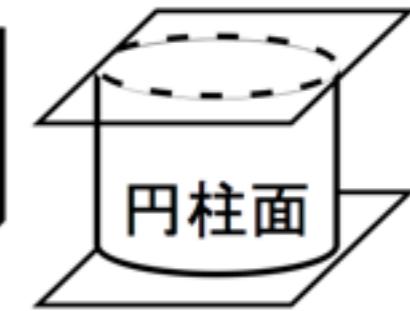
1) [Material]で物質を定義する

水(H₂O)

アルミ(Al)

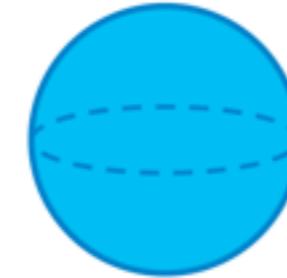


2) [Surface]で容れ物の面を定義する

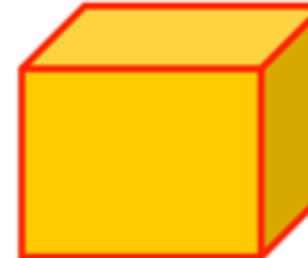


組み合わせる

3) [Cell]で物質を入れて容れ物(セル)を定義する



球状の水



直方体
のアルミ



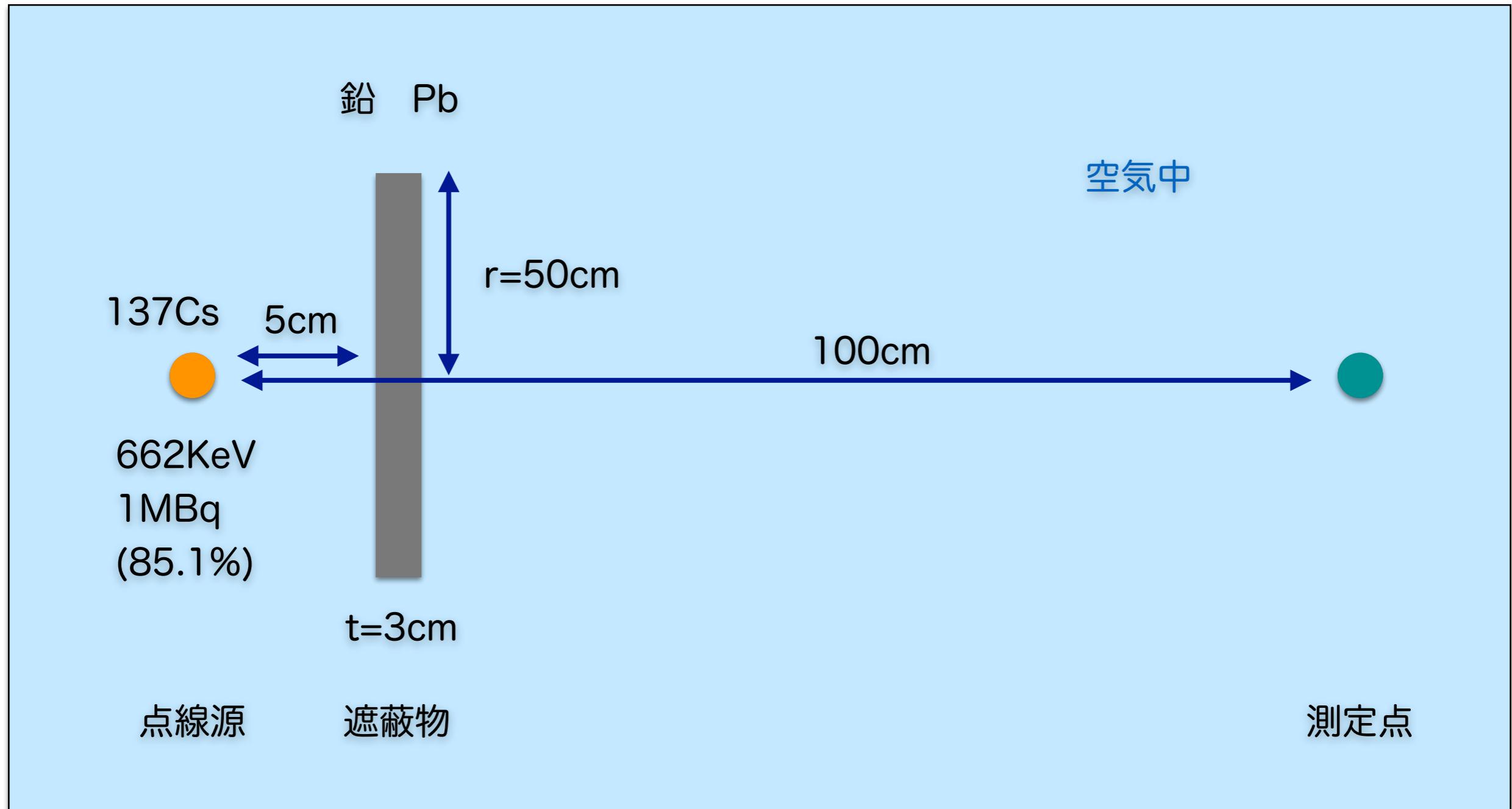
円柱状の水

phits-lec01より



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<計算モデル>





Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

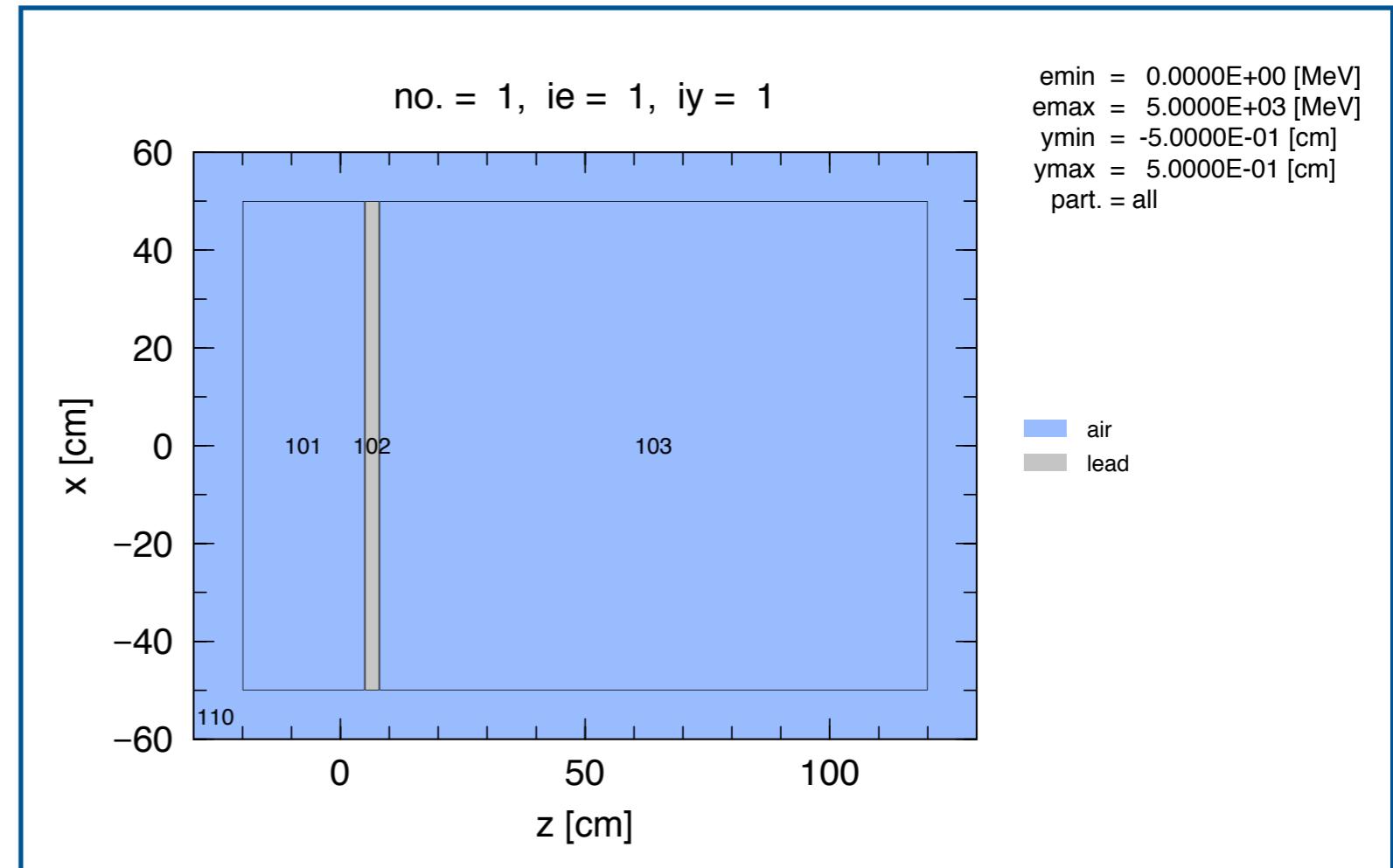
[Material]

```
$ Air D = 1.21e-3 g/cm3  
MAT[1]    N  4.0586E-05  
          O  1.0800E-05  
          Ar  2.4255E-07
```

```
$ Lead D = 11.34 g / cm3  
MAT[2] $ Lead  
      Pb 1.0
```

[Mat Name Color]

mat	name	color
1	air	pastelblue
2	lead	gray



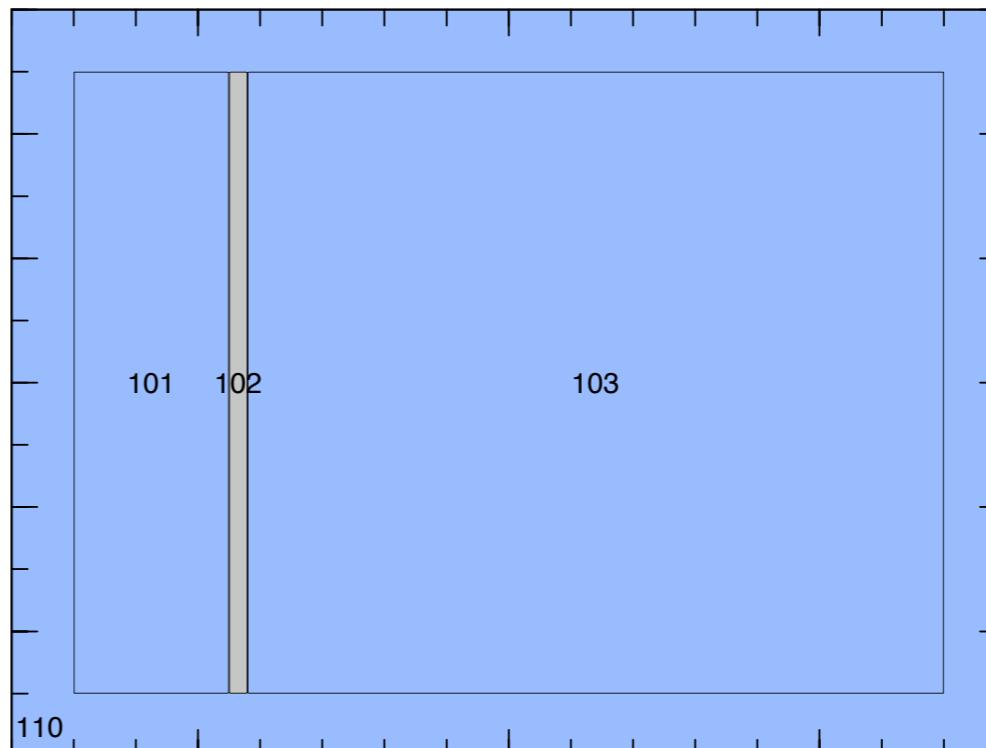


Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

```
[Surface]
10 so 500.
11 cz 50. $ Air
12 pz -20.
13 pz 5.0
21 cz 50. $ Lead
22 pz 5.0
23 pz 8.0
31 cz 50. $ Air
32 pz 8.0
33 pz 120.0
```

```
[Cell]
100 -1 10 $ void outside of 10
101 1 -1.21e-3 -11 12 -13 $ cylinder Air
102 2 -11.34 -21 22 -23 $ cylinder Lead
103 1 -1.21e-3 -31 32 -33 $ cylinder Air
110 1 -1.21e-3 -10 #101 #102 #103
```





<PHITSによる計算>

Tally:Flux

```
[ T - Track ] $ flux_xz map
  title = Track Detection in xyz mesh
  mesh = xyz      # mesh type is xyz scoring mesh
  x-type = 2       # x-mesh is linear given by xmin, xmax and nx
    nx = 240        # number of x-mesh points
    xmin = -60.      # minimum value of x-mesh points
    xmax = 60.       # maximum value of x-mesh points
  y-type = 1       # y-mesh is linear given by ymin, ymax and ny
    ny = 1          # number of y-mesh points
    -0.5 0.5
  z-type = 2       # z-mesh is given by the below data
    nz = 320        # number of z-mesh points
    zmin = -30.      # minimum value of y-mesh points
    zmax = 130.      # maximum value of y-mesh points
  e-type = 1       # e-mesh is given by the below data
    ne = 1          # number of e-mesh points
    0.0 5000.0
  unit = 1         # unit is [1/cm^2/source]
  axis = xz        # axis of output
  file = flux_xz_map.out # file name of output for the above axis
  part = all
  gshow = 3        # 0: no 1:bnd, 2:bnd+mat, 3:bnd+reg 4:bnd+lat
  epsout = 1        # (D=0) generate eps file by ANGEL
```



<PHITSによる計算>

Tally:Dose

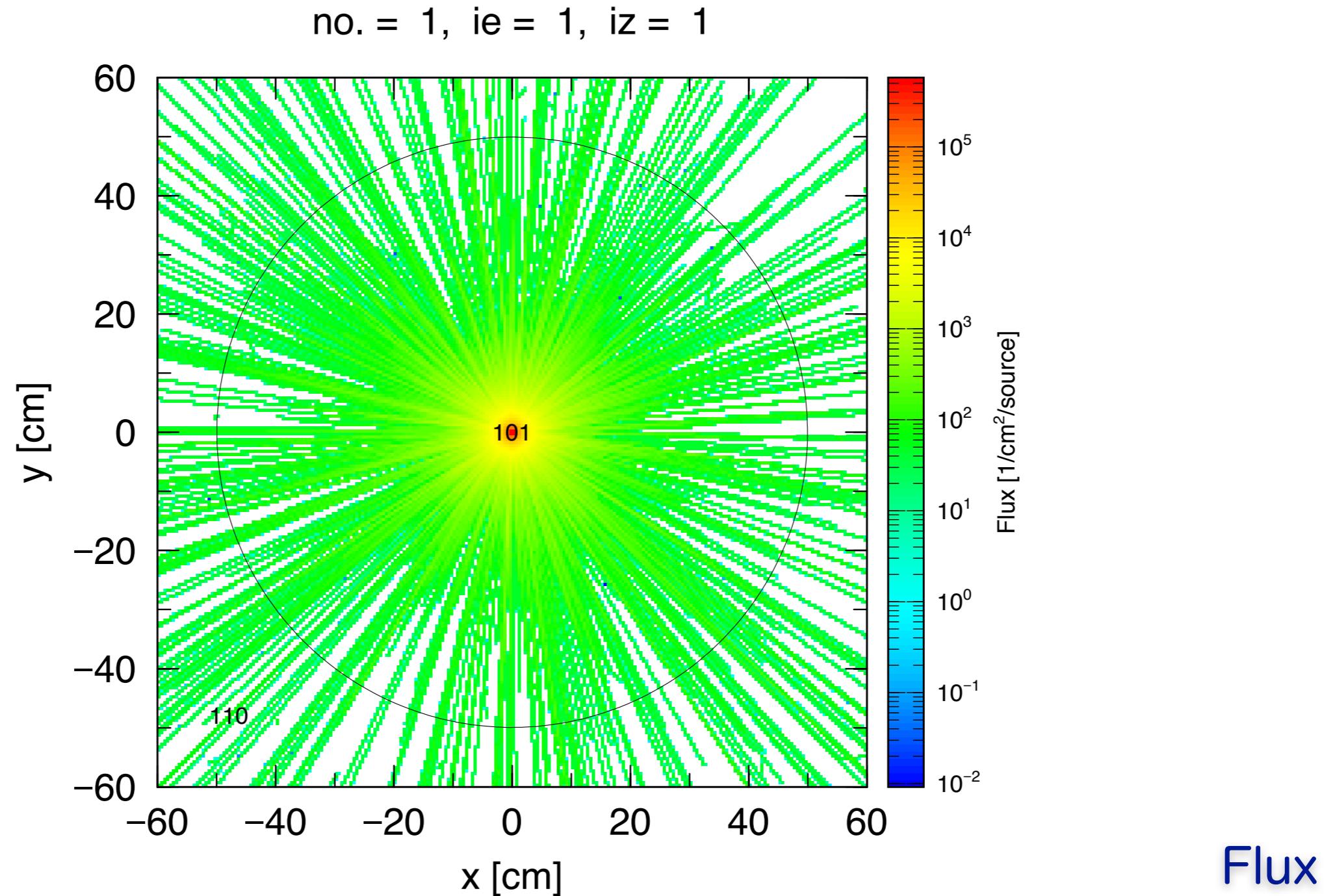
```
[ T - Deposit ] $ dose xz map
title = Energy deposition in xyz mesh
mesh = xyz      # mesh type is xyz scoring mesh
x-type = 2       # x-mesh is linear given by xmin, xmax and nx
xmin = -60.00000 # minimum value of x-mesh points
xmax = 60.00000 # maximum value of x-mesh points
nx = 240        # number of x-mesh points
y-type = 1       # y-mesh is given by the below data
ny = 1          # number of y-mesh points
      -5.0 5.0
z-type = 2       # z-mesh is linear given by zmin, zmax and nz
zmin = -30.00000 # minimum value of z-mesh points
zmax = 130.00000 # maximum value of z-mesh points
nz = 320        # number of z-mesh points
unit = 1         # unit is [MeV/cm^3/source]
material = all   # (D=all) number of specific material
output = dose    # total deposit energy
axis = xz        # axis of output
file = dose_xz_map.out # file name of output for the above axis
part = all
gshow = 1         # 0: no 1:bnd, 2:bnd+mat, 3:bnd+reg 4:bnd+lat
epsout = 1        # (D=0) generate eps file by ANGEL
```



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

137Cs 1MBq 662keV

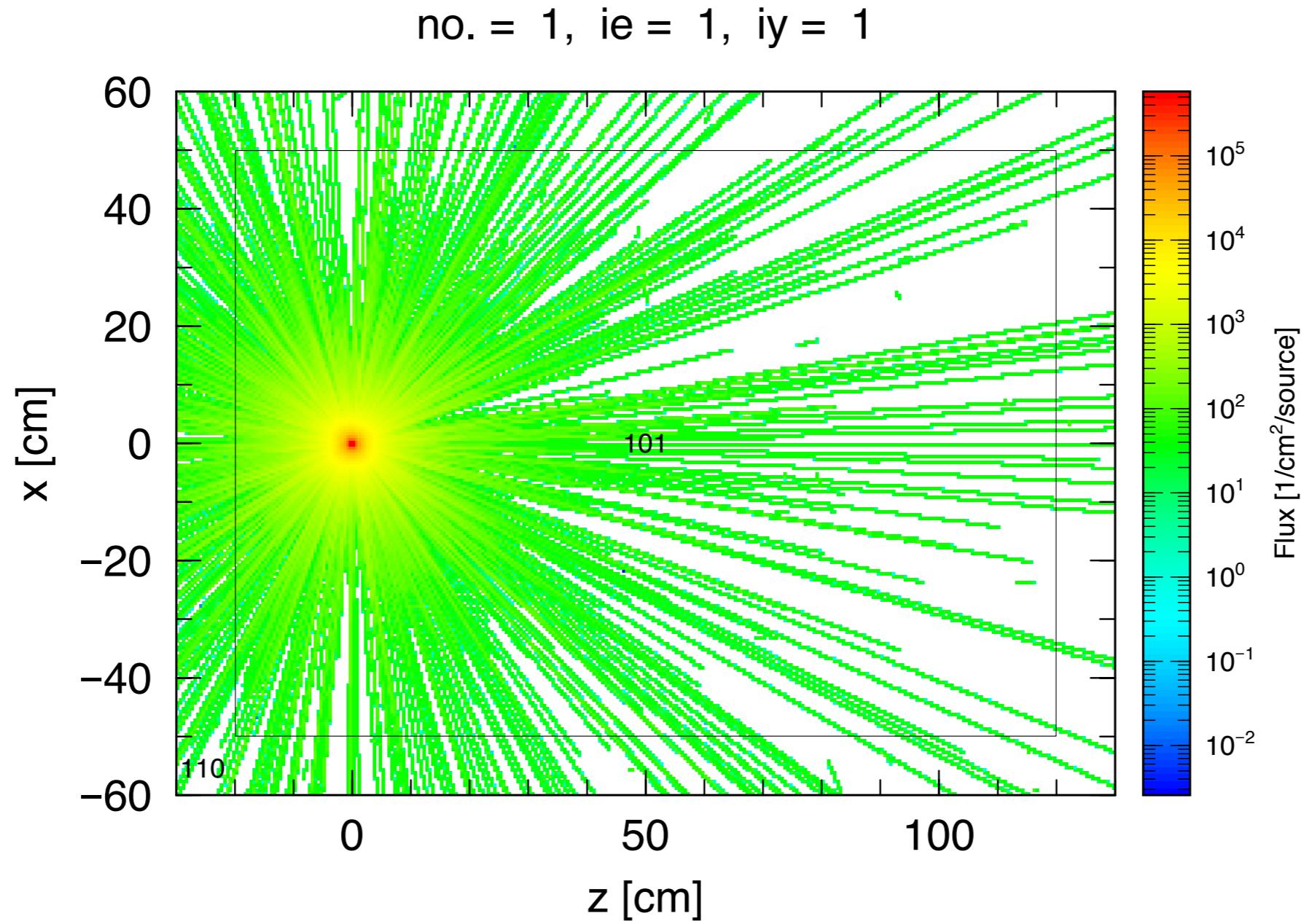




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

137Cs 1MBq 662keV



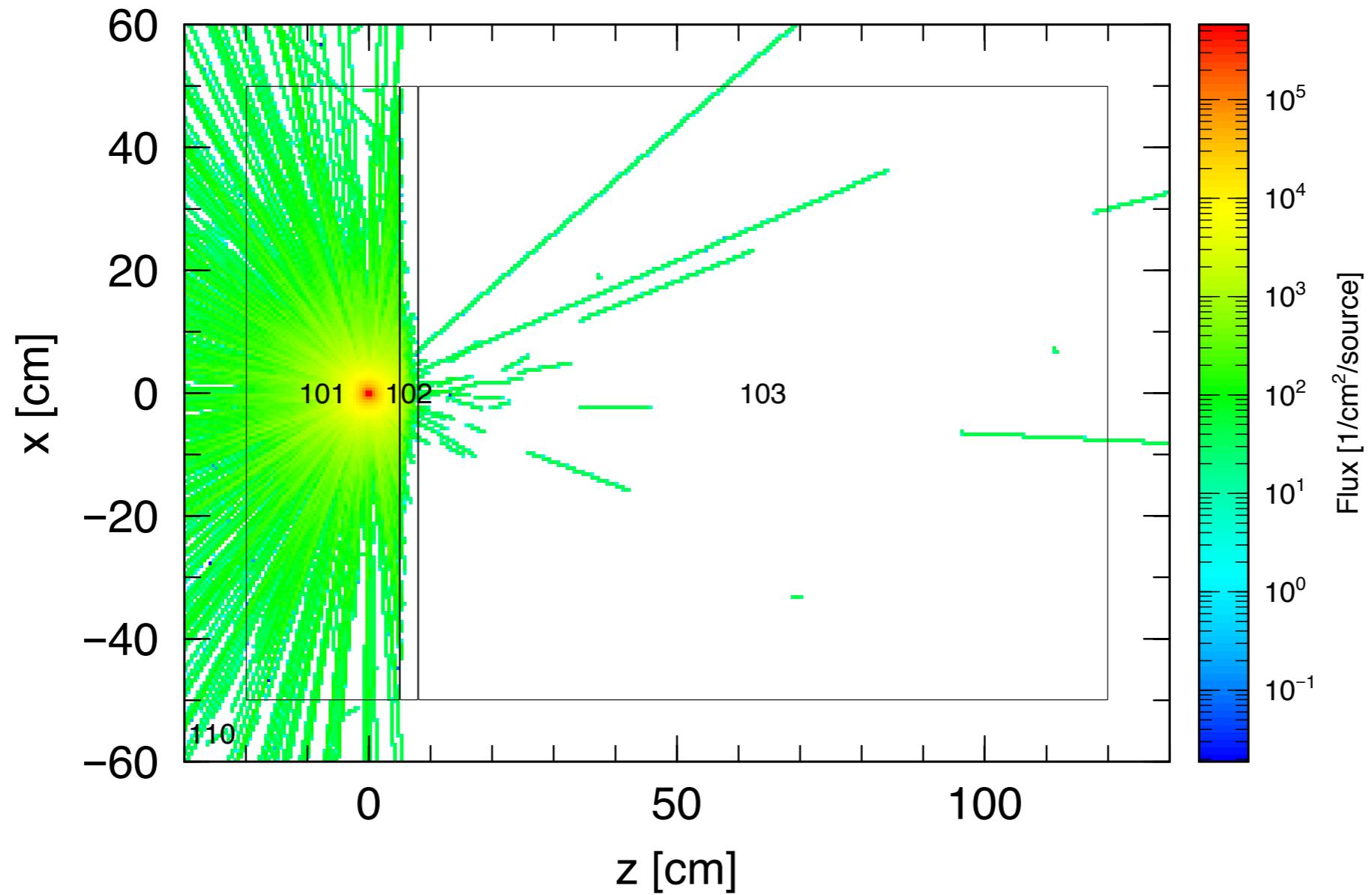


Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

137Cs 1MBq 662keV

no. = 1, ie = 1, iy = 1



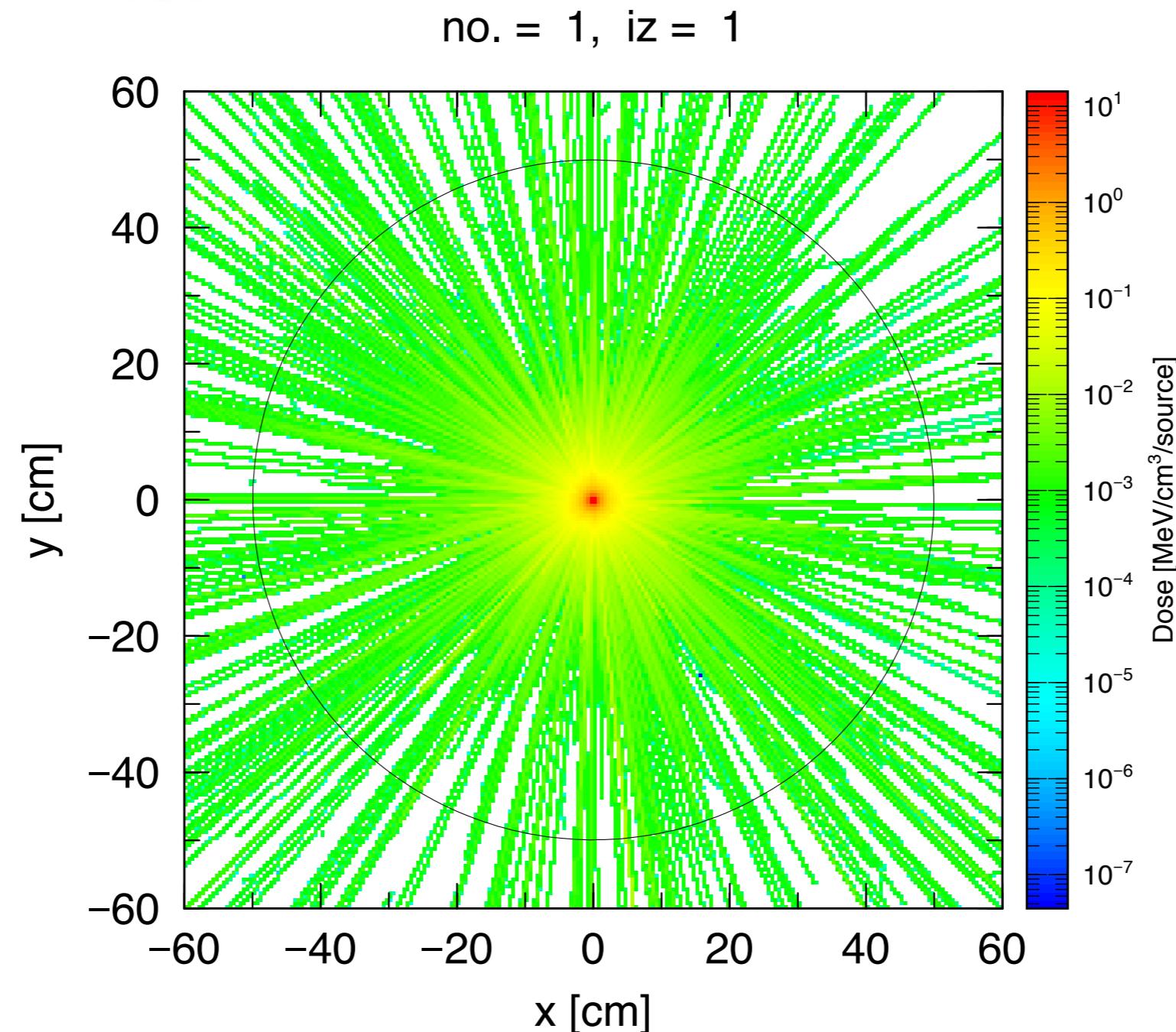
Flux



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

137Cs 1MBq 662keV

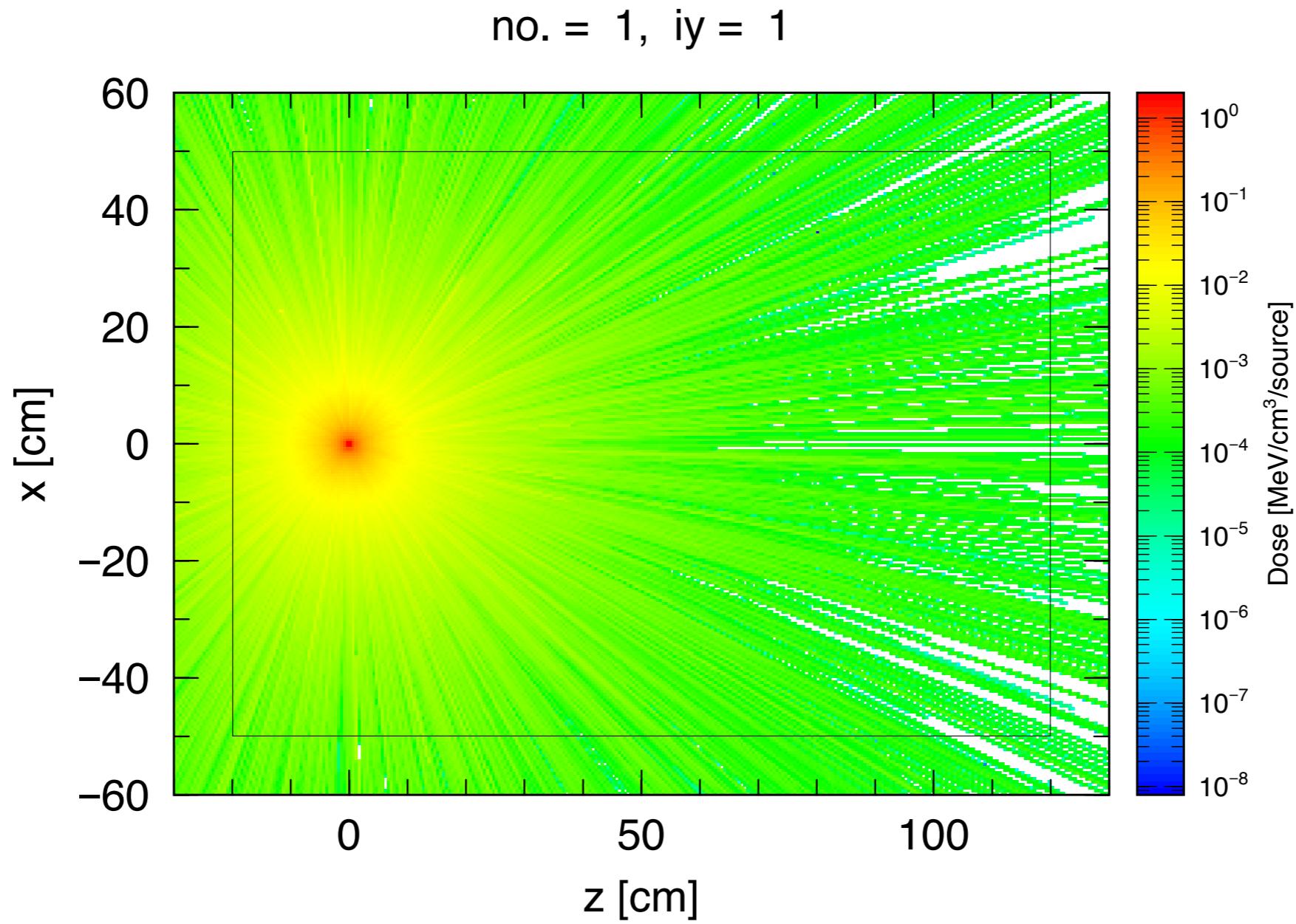




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

137Cs 1MBq 662keV

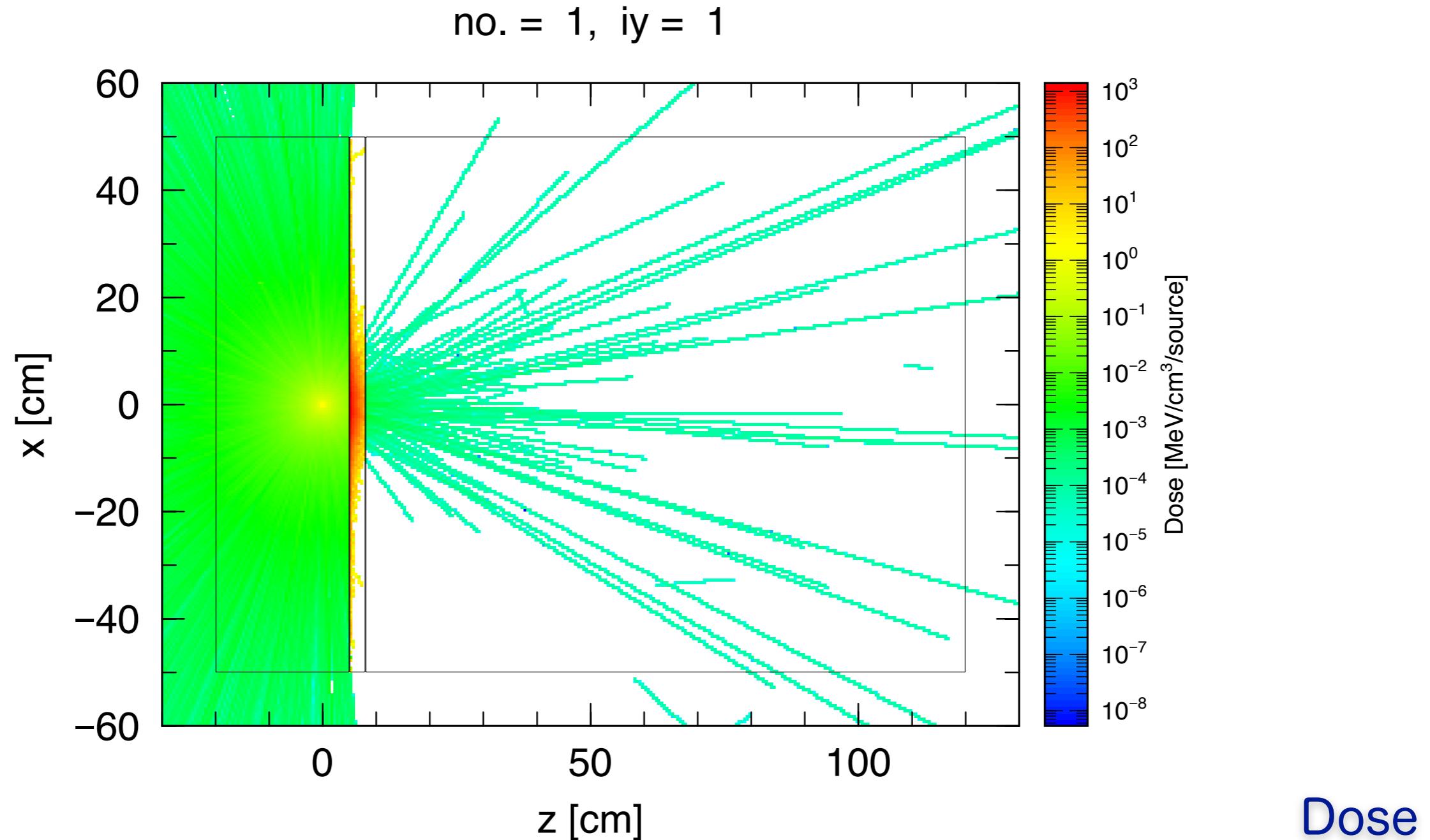




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>

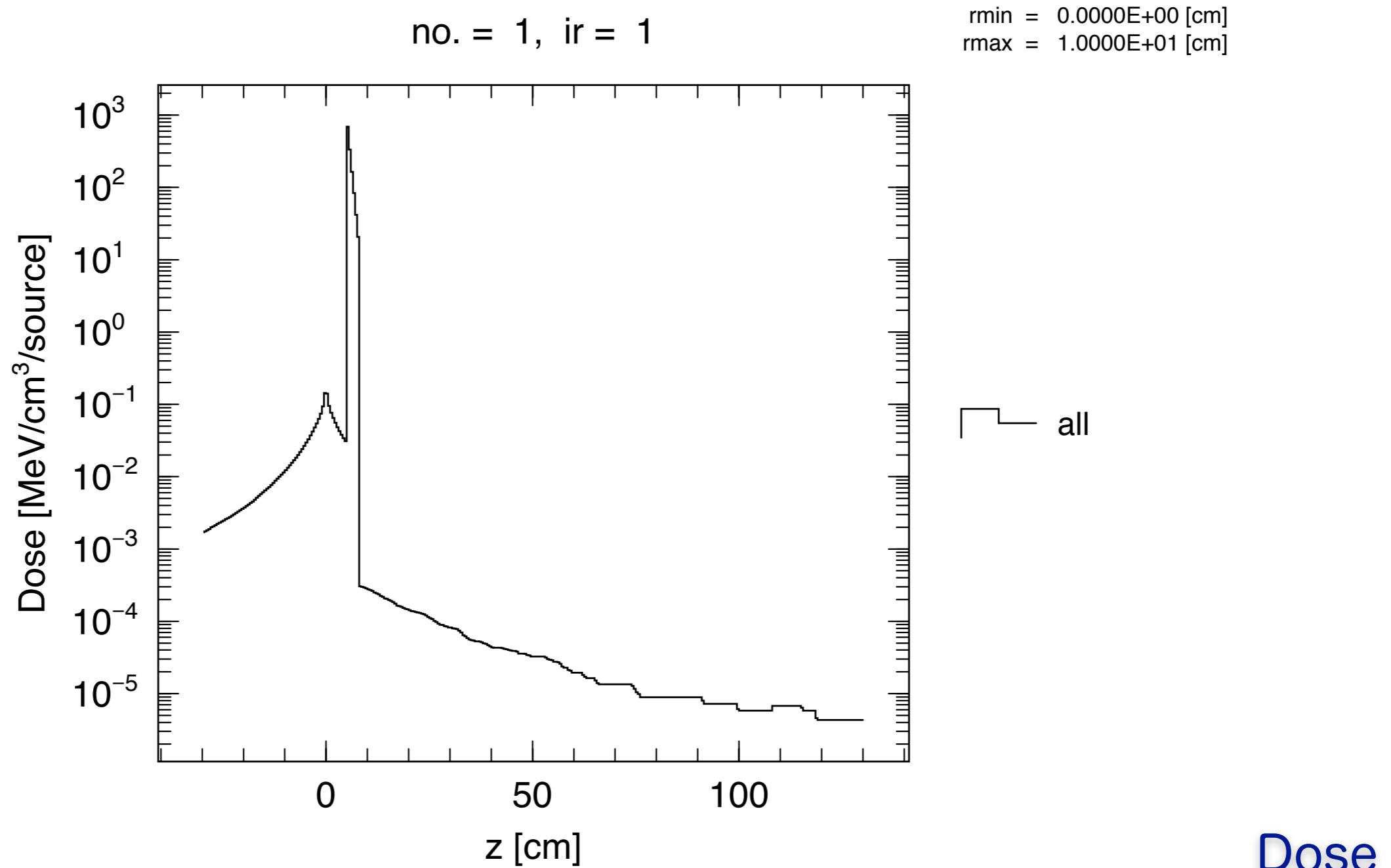
137Cs 1MBq 662keV





Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<PHITSによる計算>





Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

非密封線源：31棟107室

核種	線種	エネルギー(MeV)	半減期	1日最大数量(MBq)	貯蔵能力(MBq)
125I	γ	0.0274	60.1d	0.74	55.5
45Ca	β	0.257	164d	3.7	111
32P	β	1.71	14.26d	18.5	555
35S	β	0.167	87.5d	3.7	185
42K	γ	1.535	12.136h	0.37	11.1
55Fe	X	0.0059	2.37y	0.37	37
86Rb	γ	1.077	18.66d	0.37	11.1
14C	β	0.156	5730y	7.4	740
3H	β	0.0186	12.3y	18.5	1850
51Cr	γ	0.32	27.7d	3.7	111

密封線源：22棟407室

核種	線種	エネルギー(MeV)	半減期	1日最大数量(MBq)	貯蔵能力
57Co	γ	0.122	271.74d	925	925



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

[人の常時立ちに入る場所の遮蔽計算]

計算点 P1		立入時間 線量限度	40 h/w 1000 μ Sv/w				μ Sv/w P1合計 10. 46	
線源位置	核種	放射能Q(MBq)	Γ	コンクリート厚cm	減衰係数k	距離L(m)	線量率H	限度との比
S1	45Ca	3. 7	1. 9514e-5	0	1	0. 5	1. 16e-2	1. 16e-5
	125I	0. 74	0. 0124	0	1	0. 5	1. 47e+0	1. 47e-3
	32P	18. 5	8. 4036e-4	0	1	0. 5	2. 49e+0	2. 49e-3
	35S	3. 7	7. 05e-6	0	1	0. 5	4. 17e-3	4. 17e-6
	42K	0. 37	0. 0322	0	1	0. 5	1. 91e+0	1. 91e-3
	55Fe	0. 37	0. 0005	0	1	0. 5	2. 96e-2	2. 96e-5
	86Rb	0. 37	0. 0117	0	1	0. 5	6. 93e-1	6. 93e-4
	14C	7. 4	6. 6552e-6	0	1	0. 5	7. 88e-3	7. 88e-6
	3H	18. 5	3e-11	0	1	0. 5	1. 01e-7	1. 01e-10
	51Cr	3. 7	0. 00458	0	1	0. 5	2. 71e+0	2. 71e-3
S2	45Ca	0	1. 9514e-5	10	0. 0375	5	0. 00e+0	0. 00e+0
	125I	0	0. 0124	10	0. 000001	5	0. 00e+0	0. 00e+0
	32P	0	8. 4036e-4	10	0. 387	5	0. 00e+0	0. 00e+0
	35S	0	7. 05e-6	10	0. 00027	5	0. 00e+0	0. 00e+0



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

非密封線源：31棟107室

*減衰補正あり

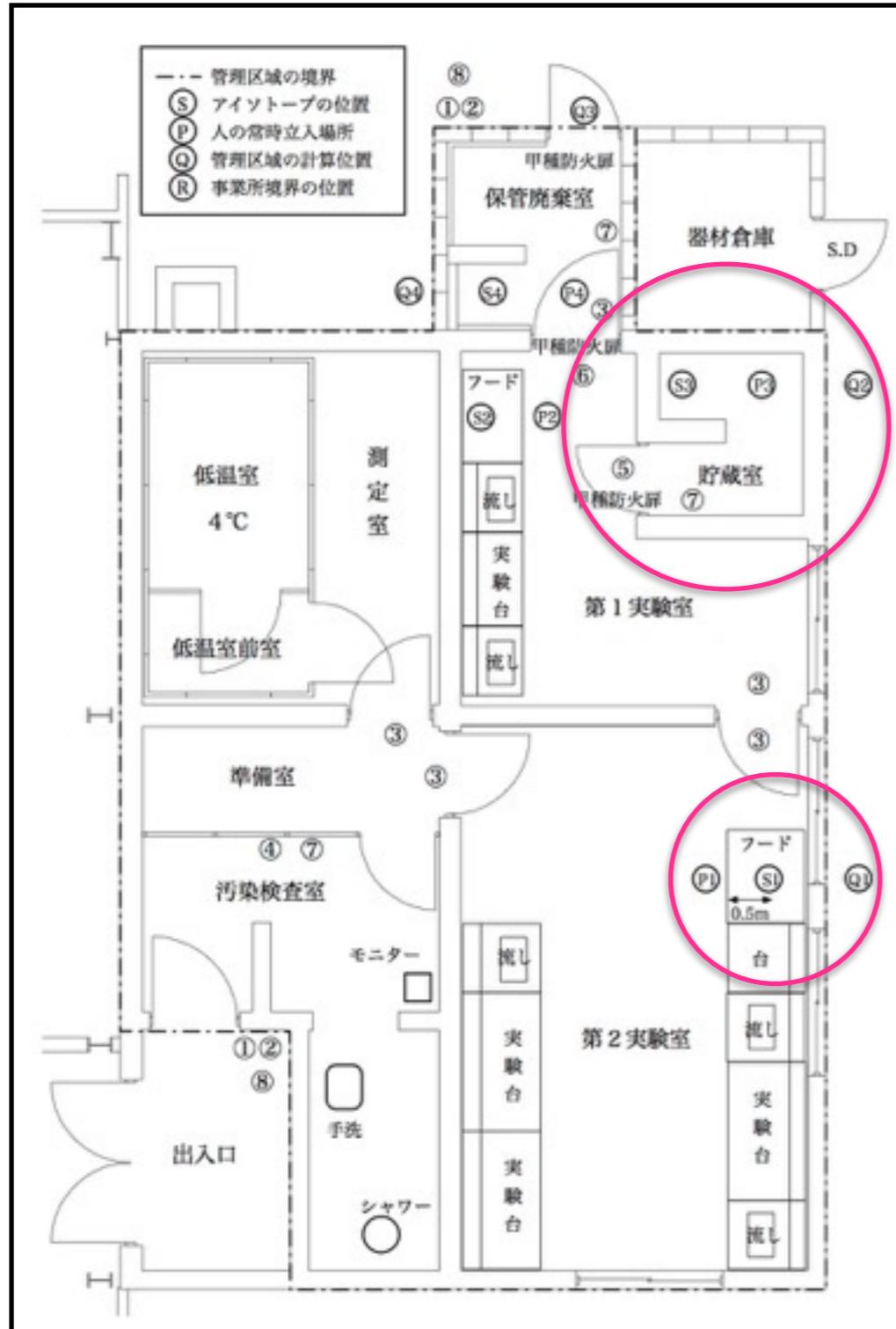
$$\text{実効線量} H[\mu\text{Sv}] = Q[\text{MBq}] \times \Gamma [\mu\text{Sv}/\text{h}/\text{MBq at 1m}] \times \text{時間} T[\text{h}] \times k / L^2$$

*制動放射線の実効線量定数は原子番号20を原子番号12換算[0.564倍]

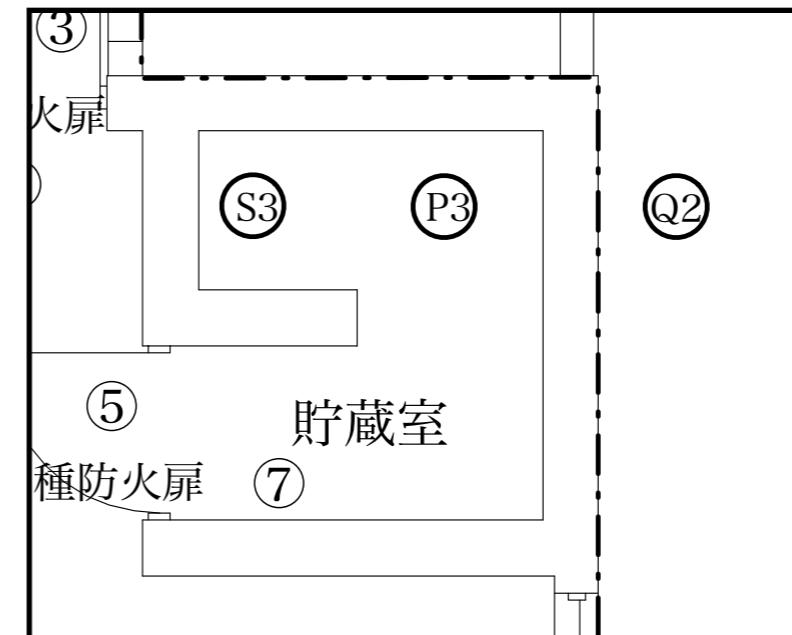
核種	放射能Q 1日最大使用(MBq)	放射能Q 貯蔵能力(MBq)	実効線量率定数 Γ [$\mu\text{Sv}/\text{h}/\text{MBq at 1m}$]	実効線量率定数 Γ 制動放射線(原子番号20) [$\mu\text{Sv}/\text{h}/\text{MBq at 1m}$]	減衰係数k コンクリート厚25cm
125I	0.74	55.5	0.0124		0.0000001
45Ca	3.7	111		3.46E-05	0.00081
32P	18.5	555		1.49E-03	0.0519
35S	3.7	185		1.25E-05	0.000083
42K	0.37	11.1	0.0322		0.335
55Fe	0.37	37	0.0005		0.000001
86Rb	0.37	11.1	0.0117		0.195
14C	7.4	740		1.18E-05	0.0000566
3H	18.5	1850		6.05E-11	0.0000001
51Cr	3.7	111	0.00458		0.0964



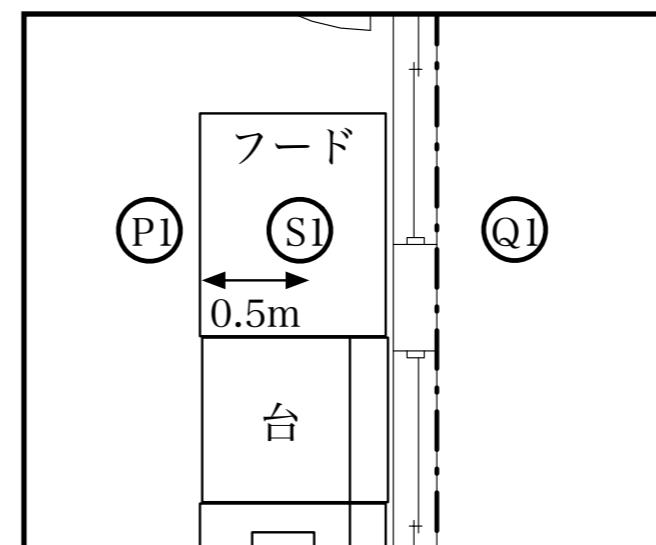
Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation



②貯蔵場所から0.5mでの実効線量の計算 -> P3



③貯蔵場所から1.5m(コンクリート25cmで遮蔽)での空間線量の計算 -> Q2

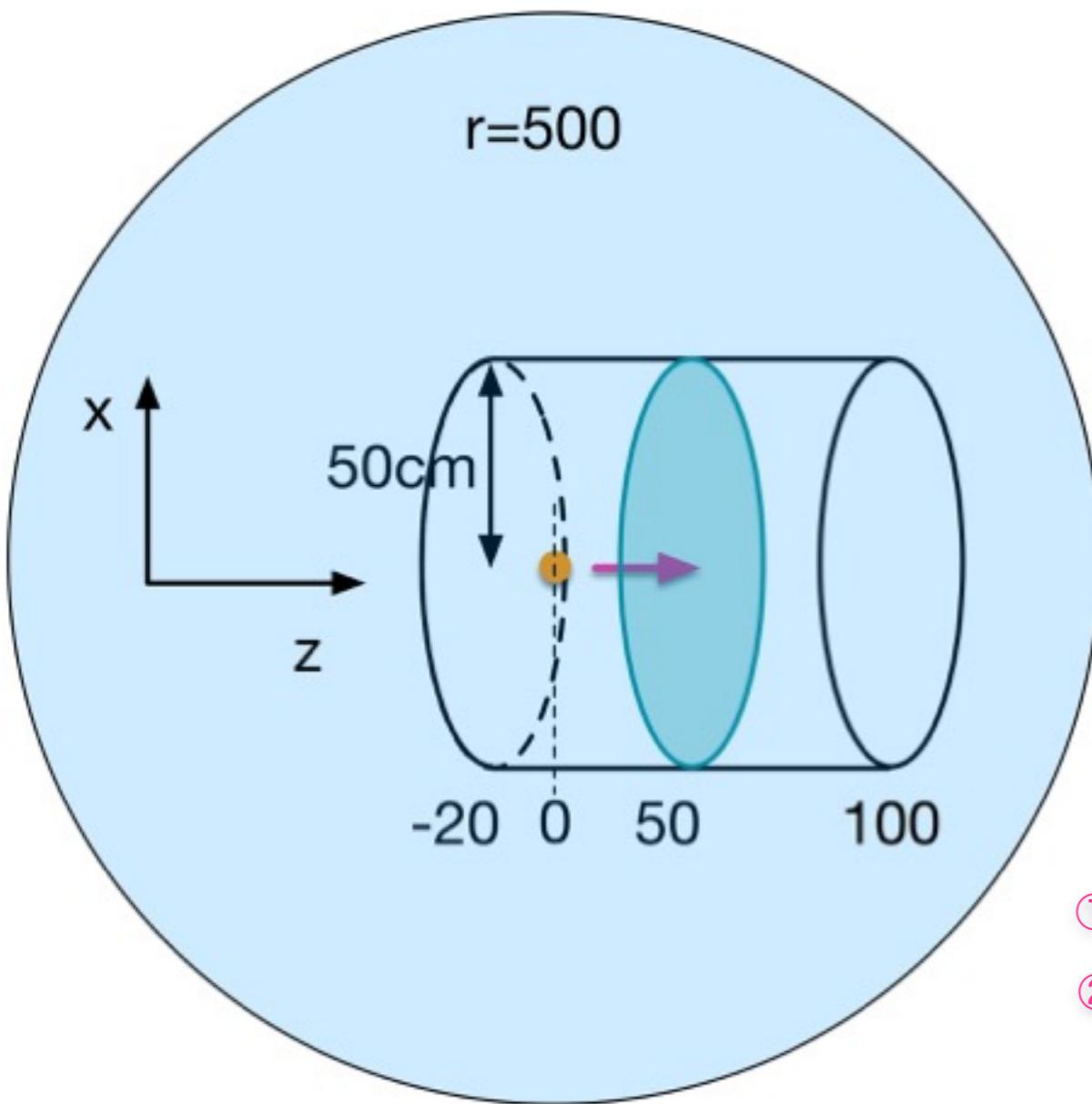


P1 = Q1 (Q1は遮蔽なし(窓))

①全核種を1日最大使用数量使用したときの0.5mでの実効線量の計算 -> P1



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>



- ・身長170cm 体重60kgの人間の体表面積は約16,000cm²
- ・片側では8,000cm² → $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times \pi = 7,853\text{cm}^2$
- ・線源から50cmの位置に半径50cm厚さ1cmの空間で実効線量率を計算
(1cm線量当量/フルエンス) 比 [pSv cm²] × 3600(sec))
- ・計算範囲は全て空気
- ・シミュレーション範囲はx = -60 ~ 60 , z = -30 ~ 110
- ・1日最大使用数量と貯蔵数量で計算

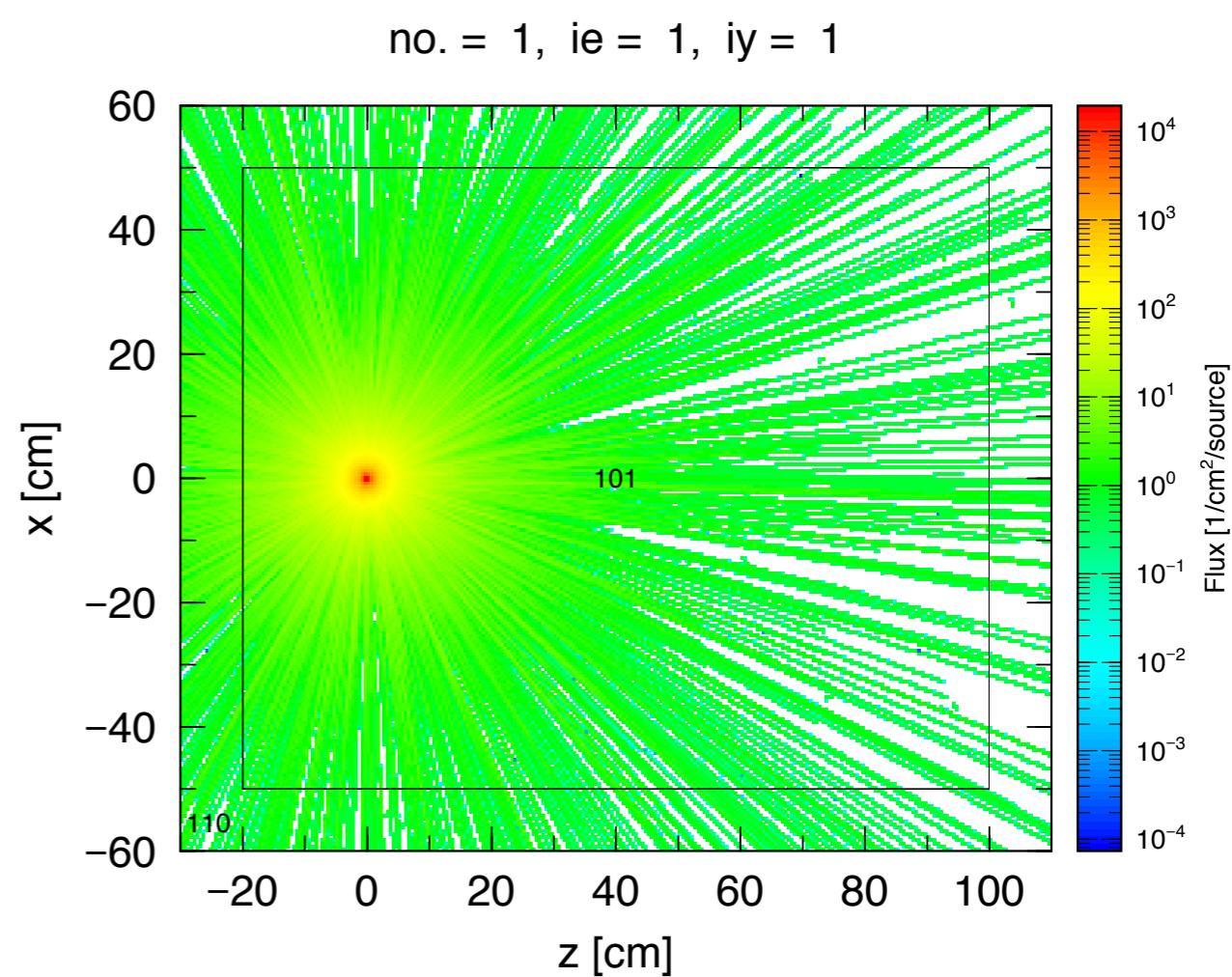
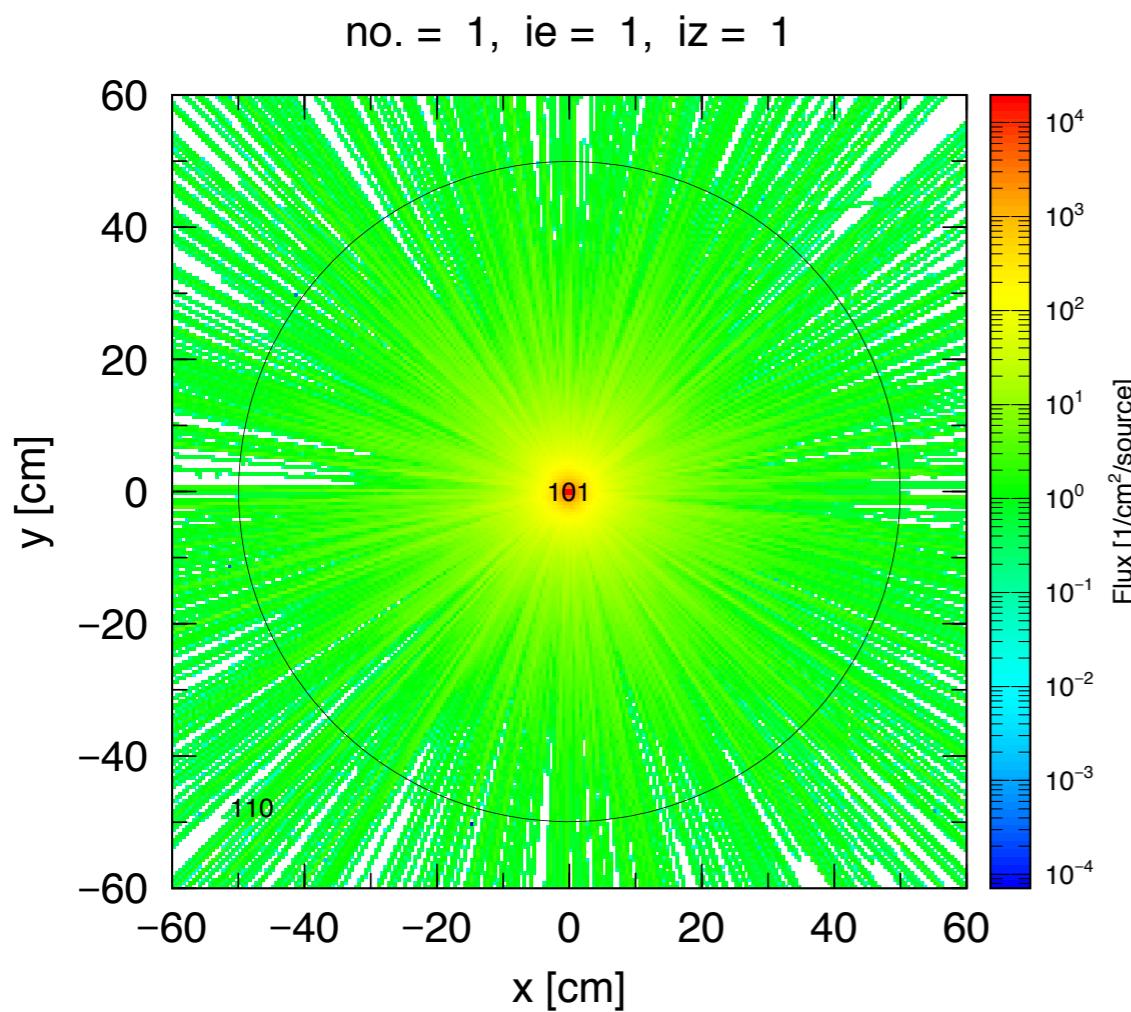
- ①全核種を1日最大使用数量使用したときの0.5mでの実効線量の計算 -> P1
- ②貯蔵場所から0.5mでの実効線量の計算 -> P3



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Flux : 86Rb 50cm (遮蔽なし) 1.077 MeV 0.37MBq (1日最大使用数量)

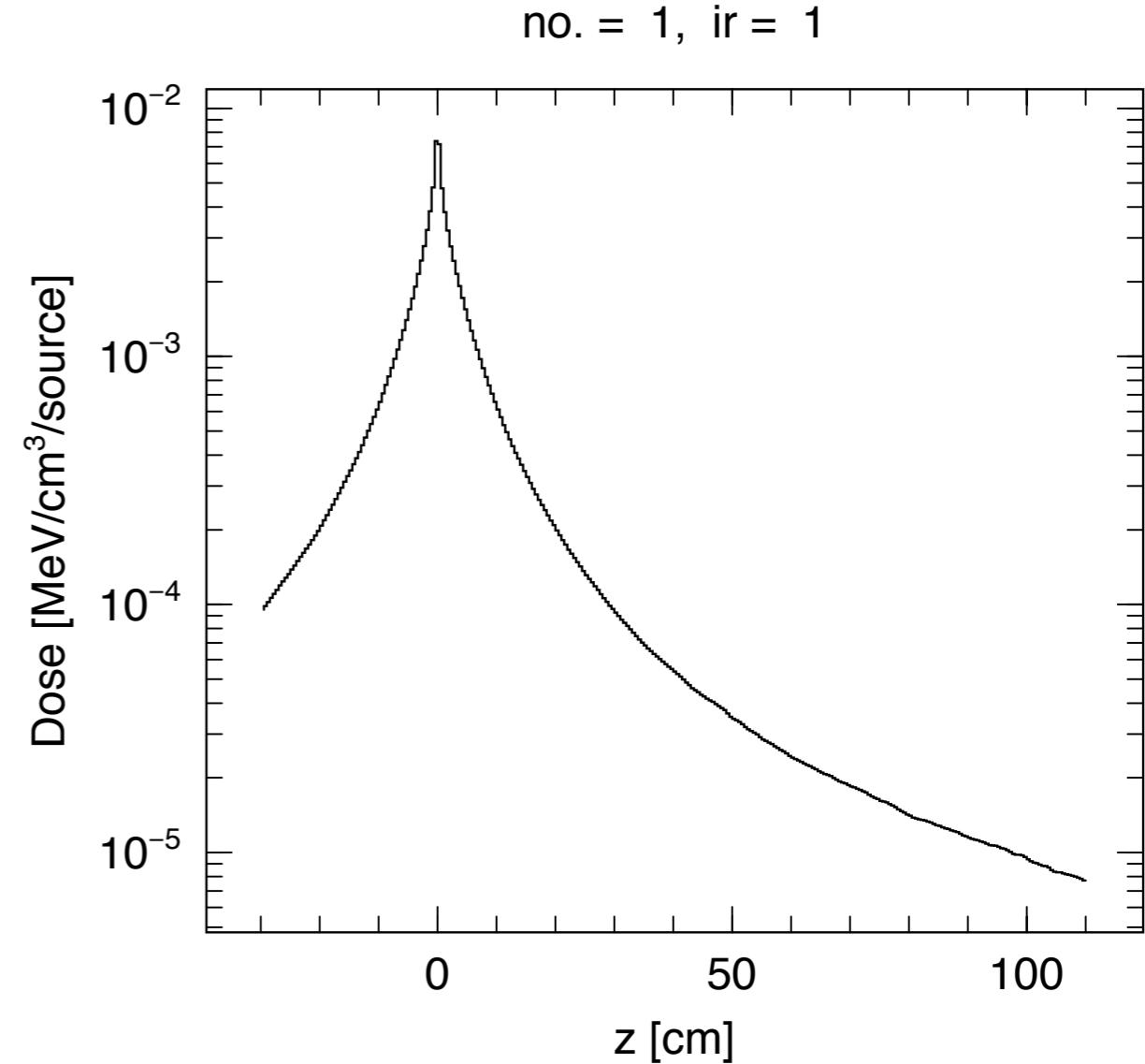
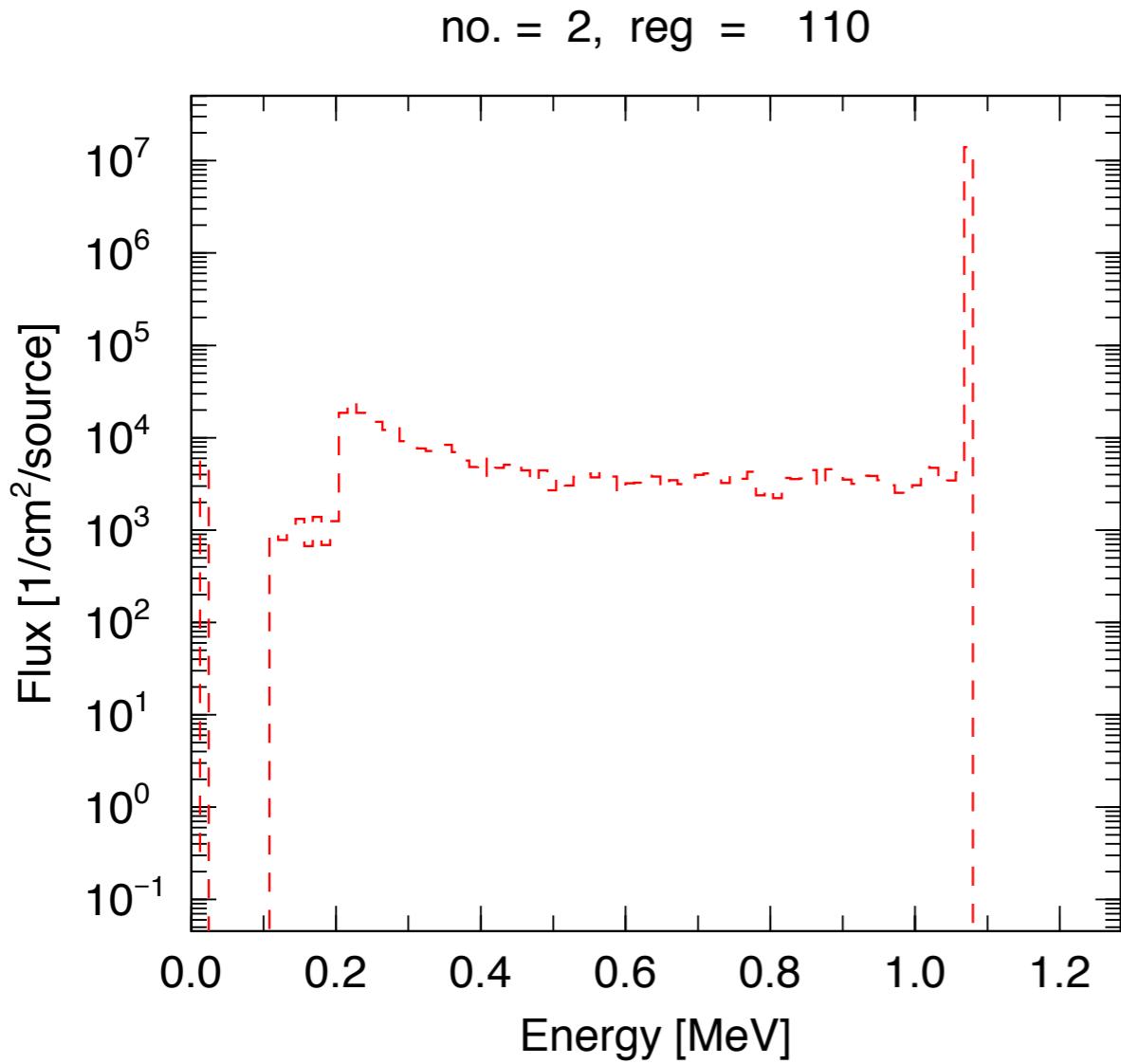




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Flux,Dose : 86Rb 50cm (遮蔽なし) 1.077 MeV 0.37MBq (1日最大使用数量)

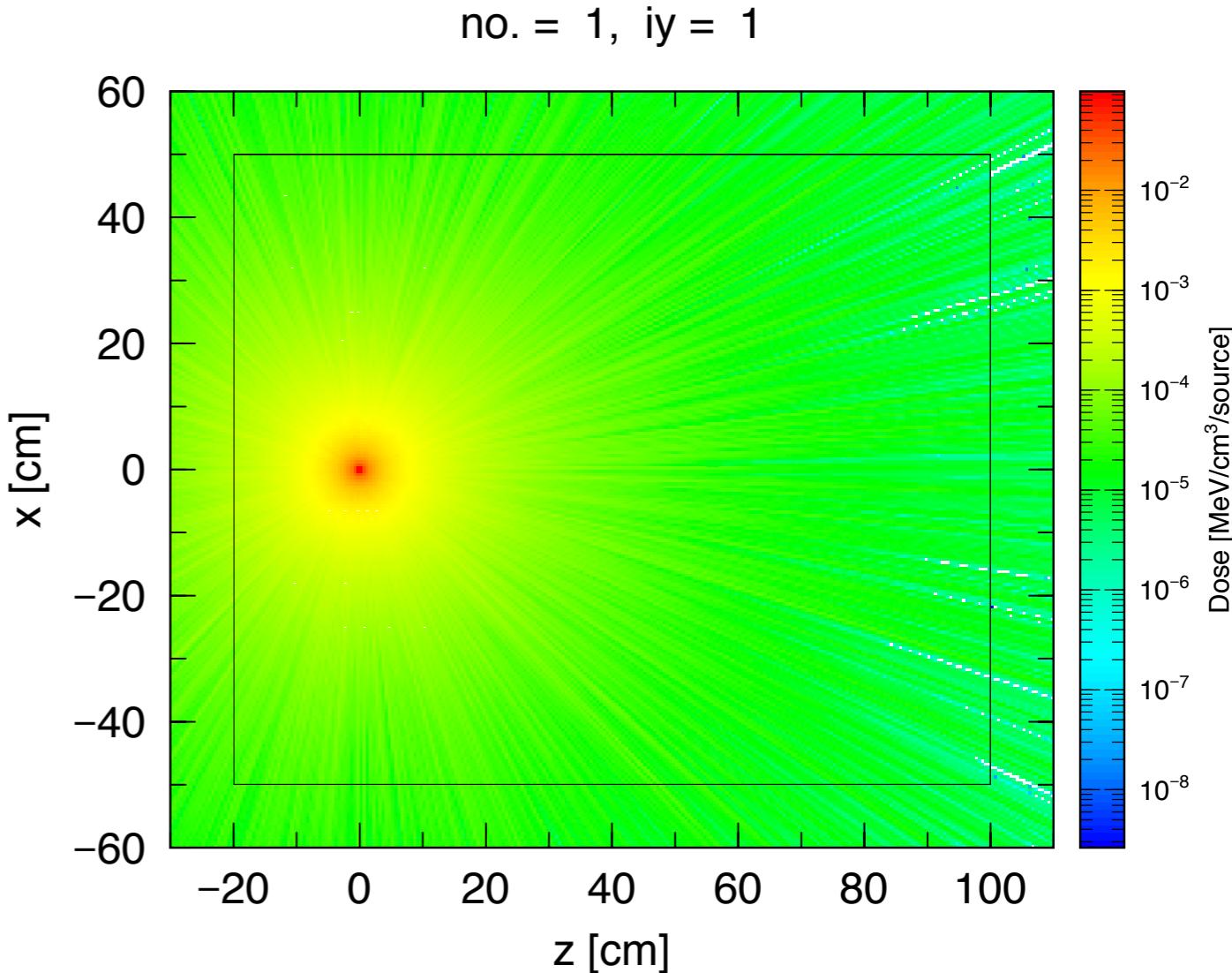
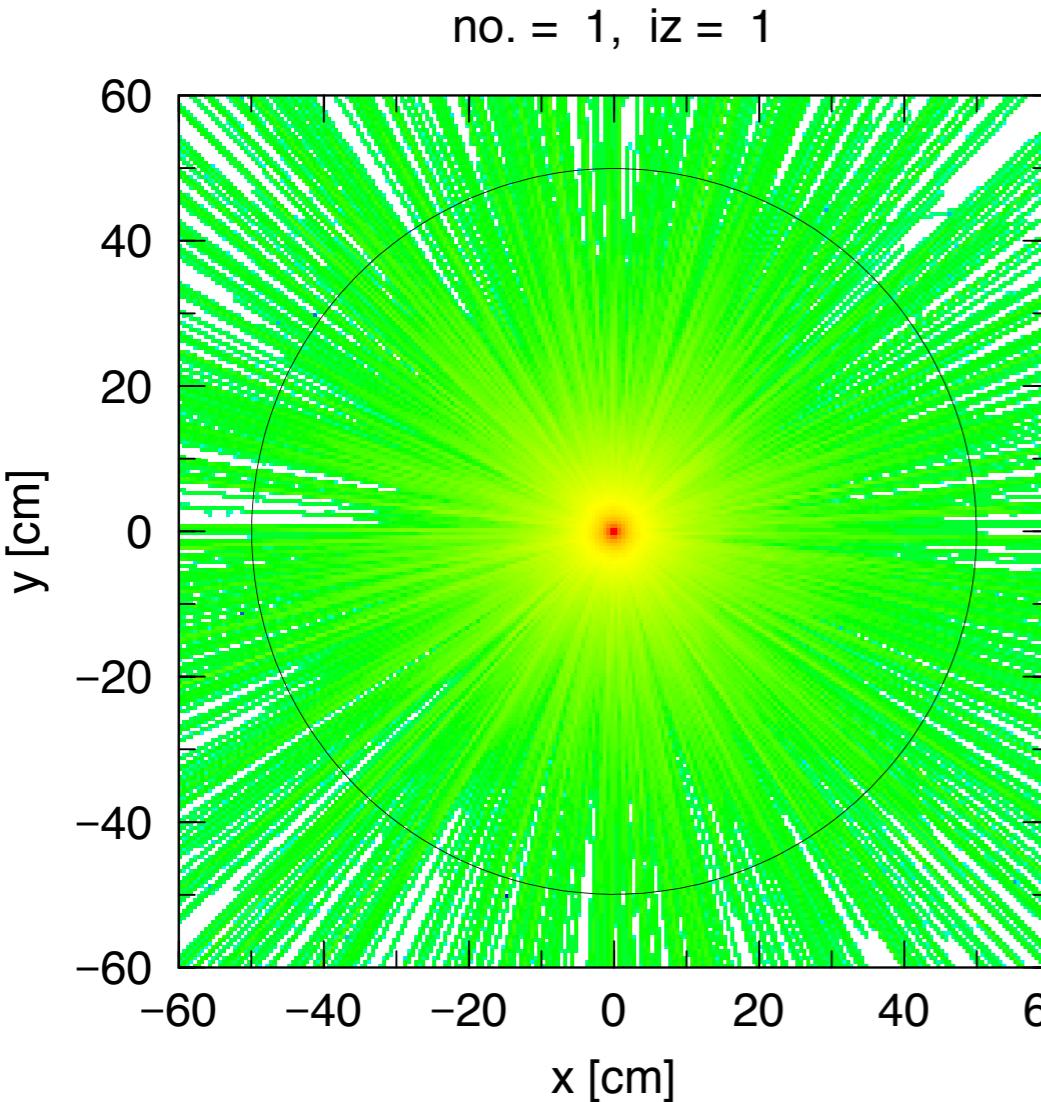




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Dose : 86Rb 50cm (遮蔽なし) 1.077 MeV 0.37MBq (1日最大使用数量)

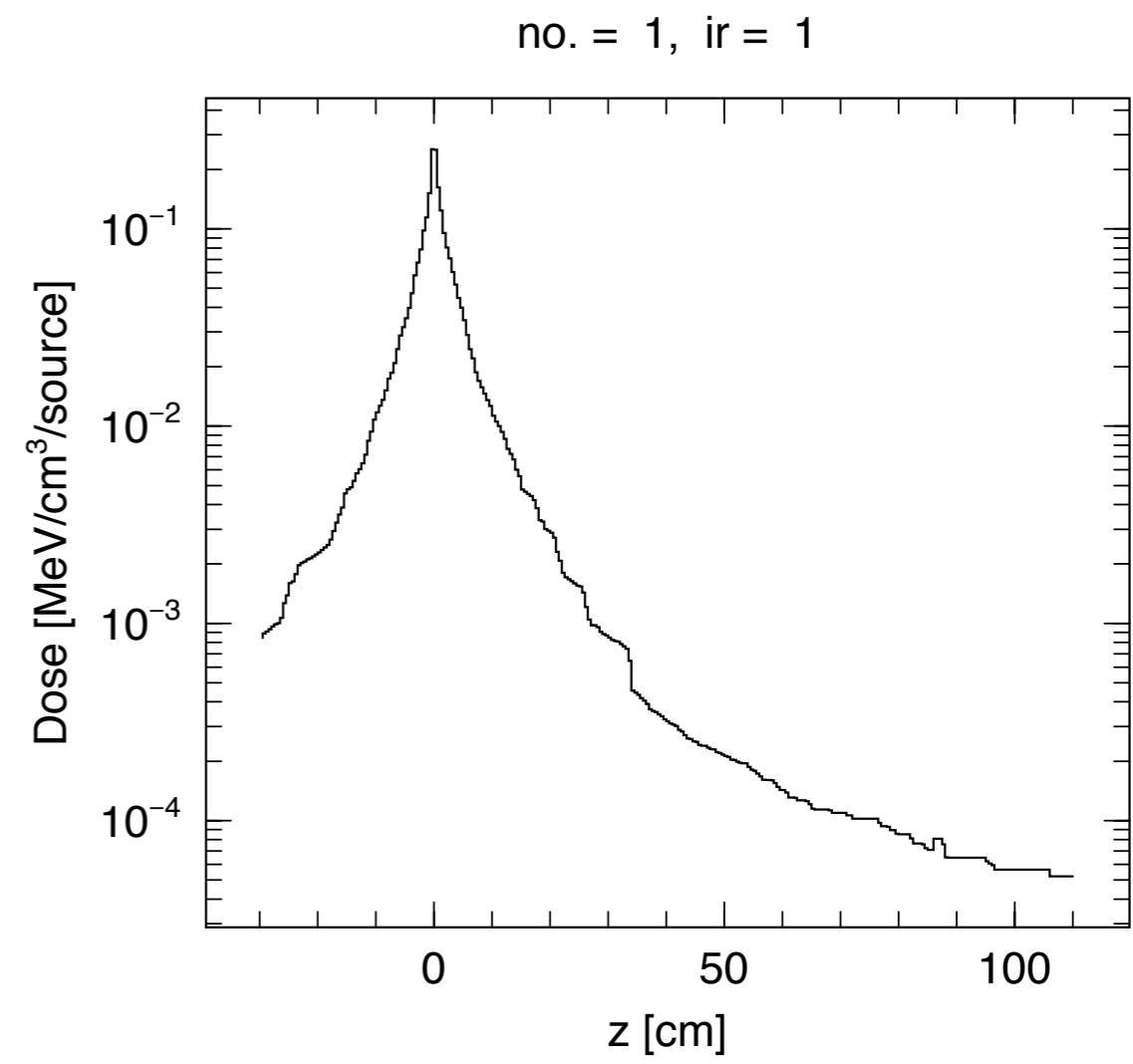
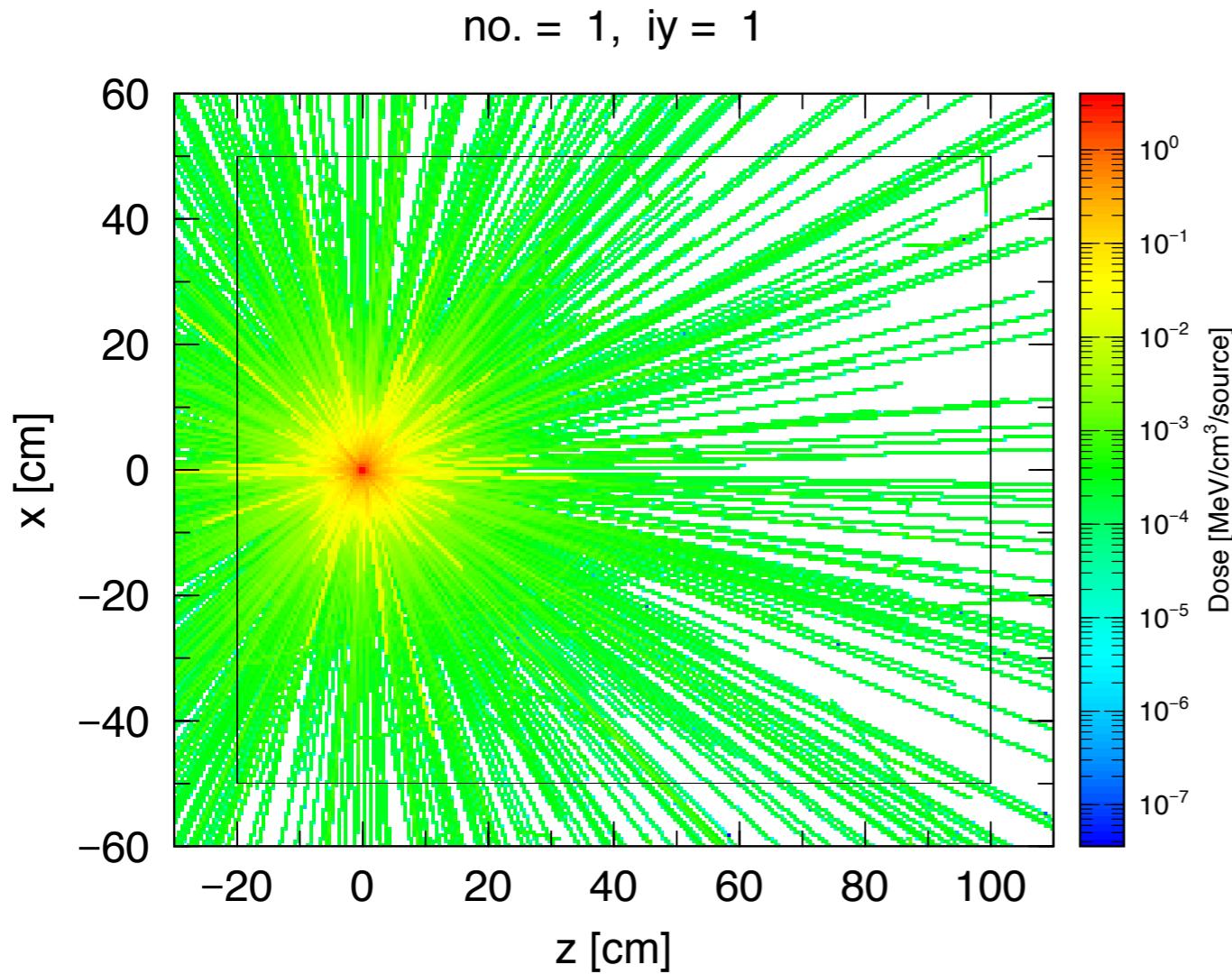




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Dose : 125I 50cm (遮蔽なし) 0.0275 MeV 0.74MBq (1日最大使用数量)

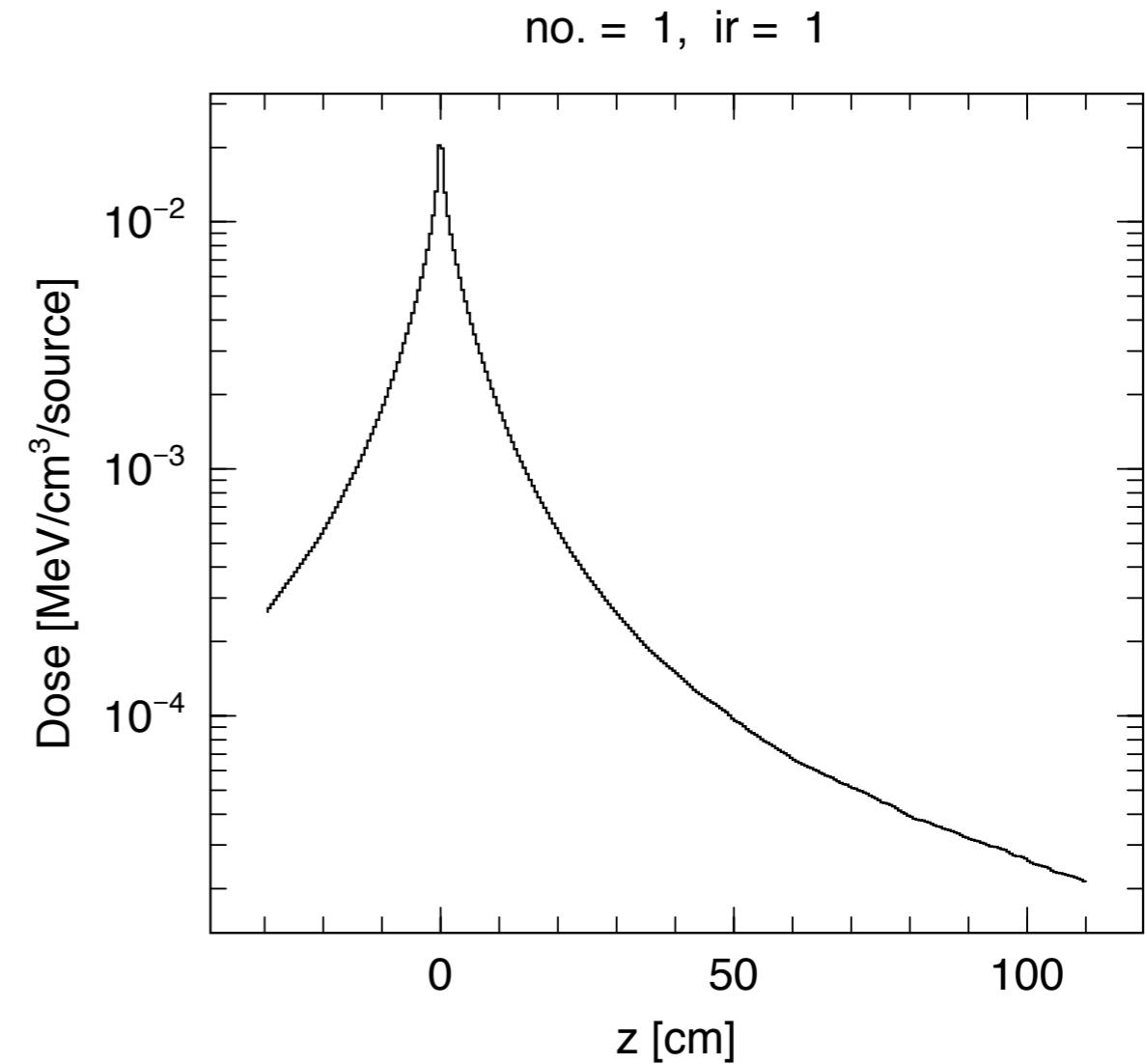
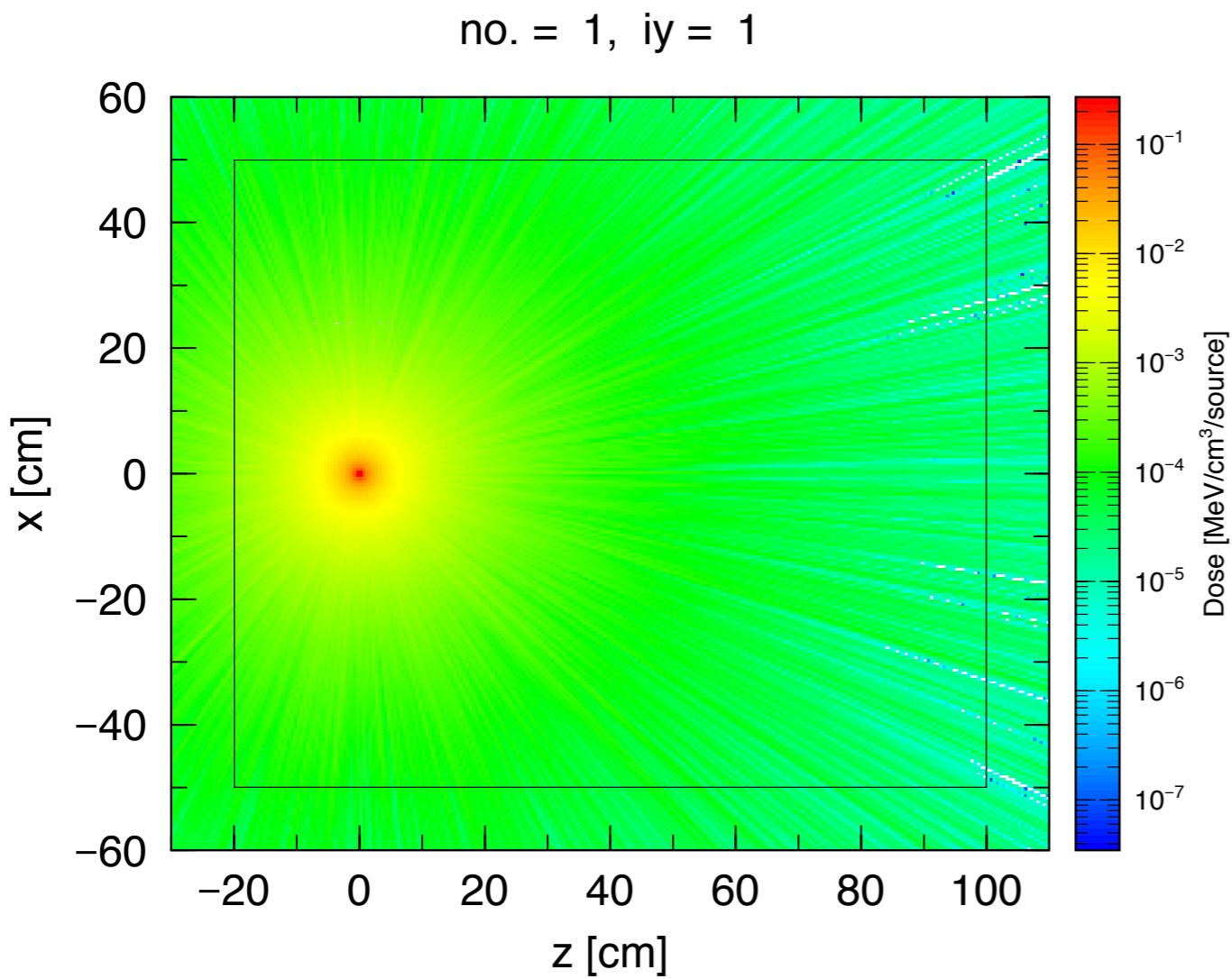




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Dose : 42K 50cm (遮蔽なし) 1.536 MeV 0.37MBq (1日最大使用数量)



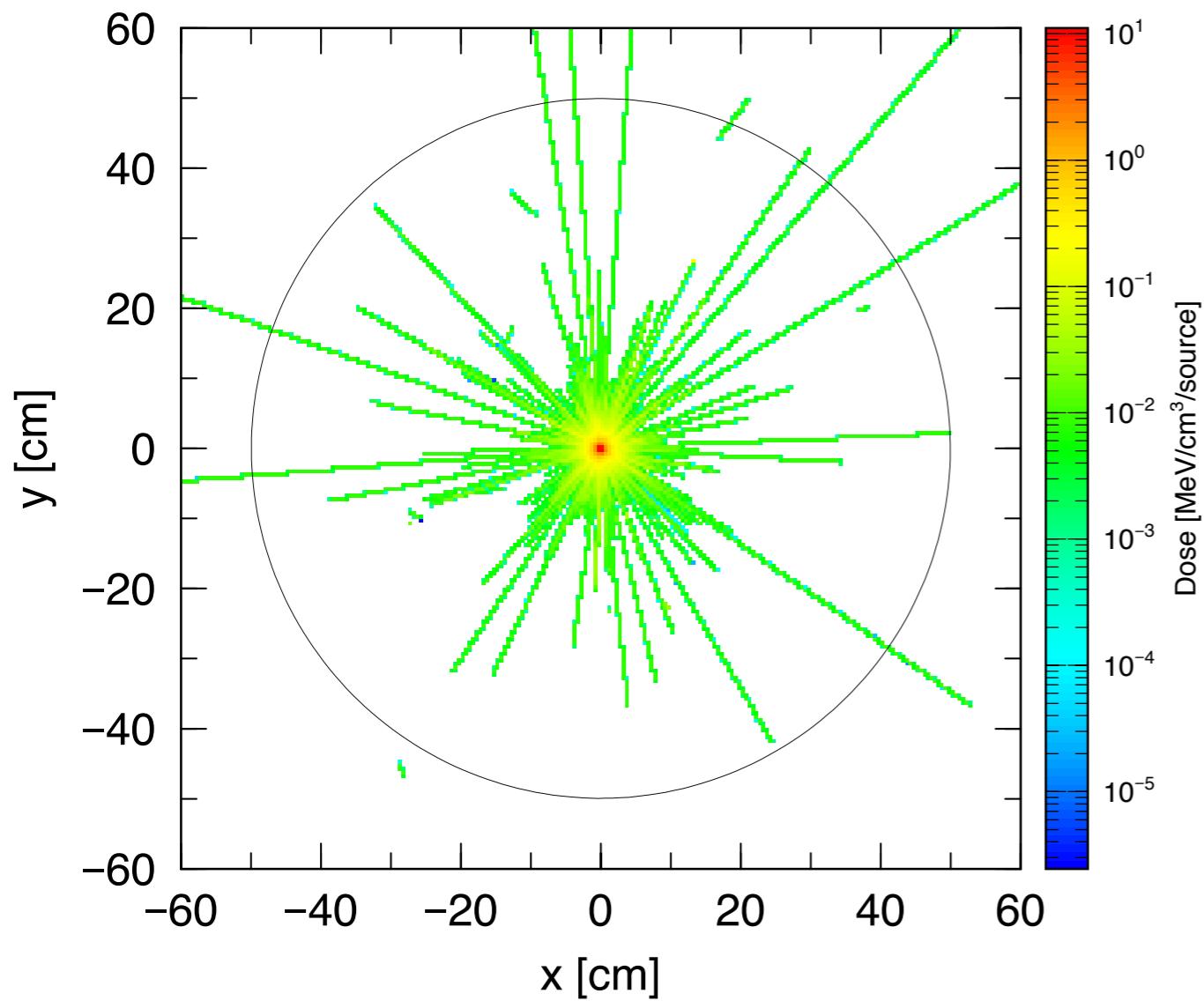


Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

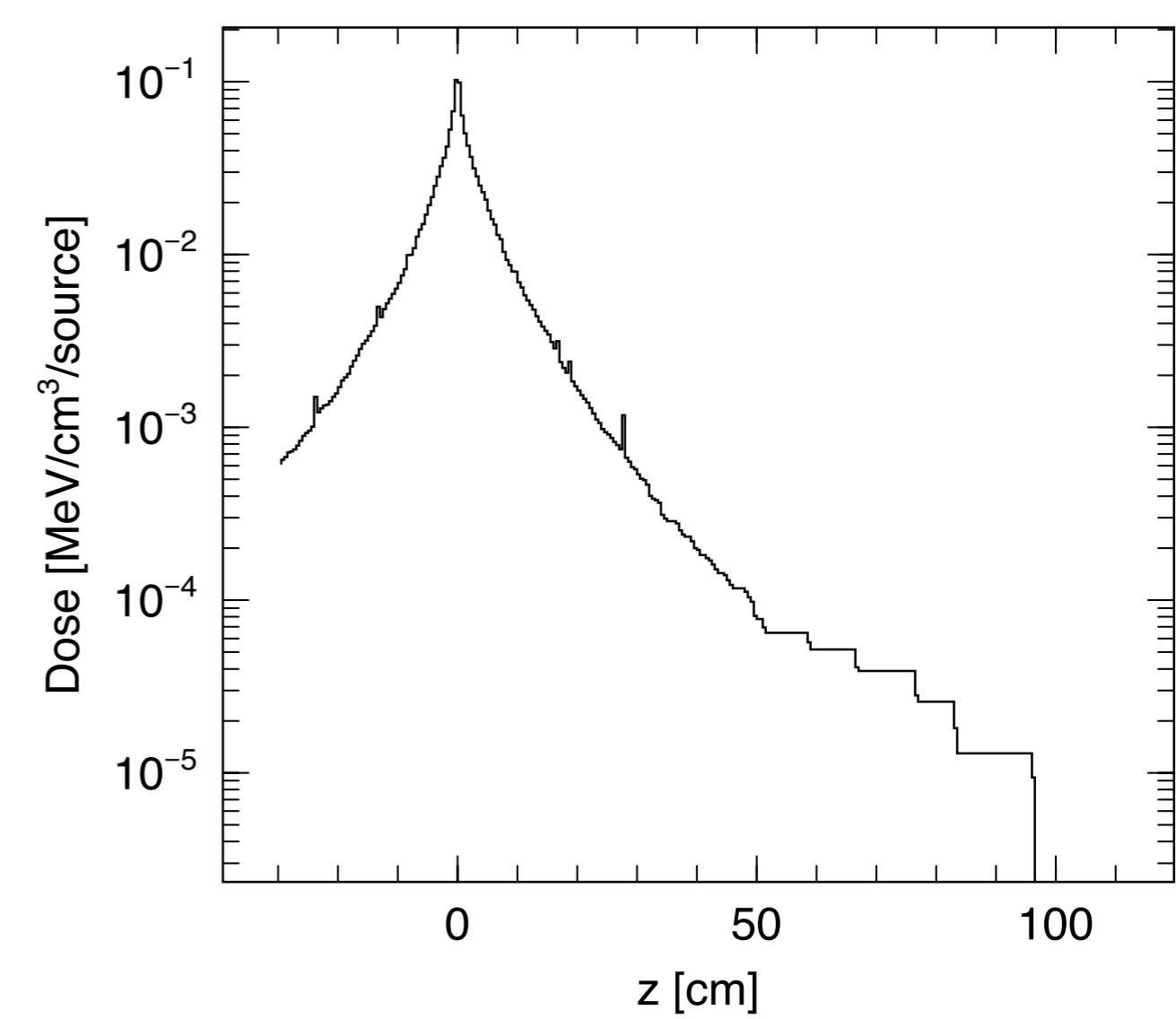
<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Dose : 55Fe 50cm (遮蔽なし) 0.0059 MeV 0.37MBq (1日最大使用数量)

no. = 1, iz = 1



no. = 1, ir = 1

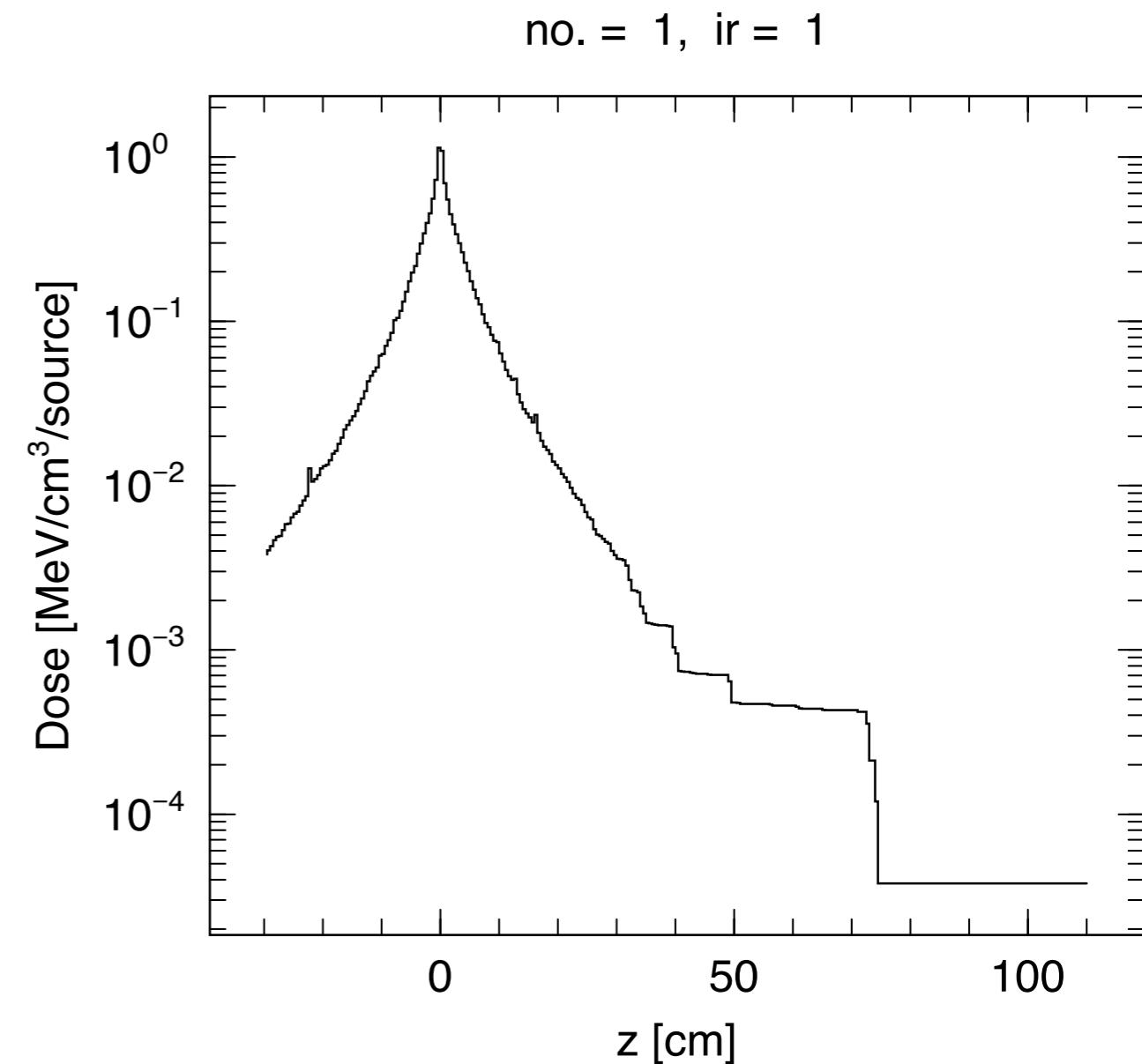
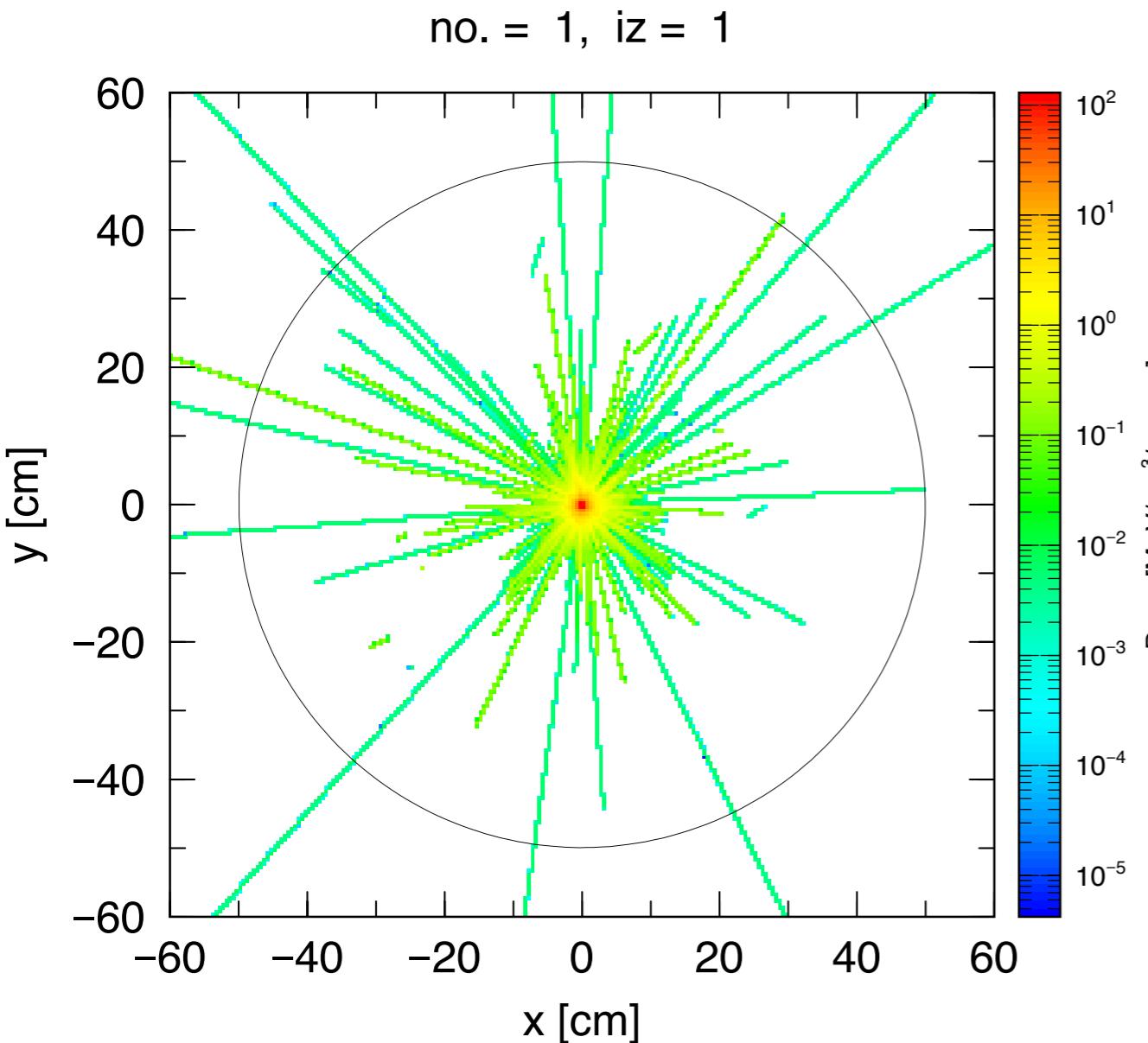




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

Dose : ^{51}Cr 50cm (遮蔽なし) 0.32 MeV 3.7MBq (1日最大使用数量)





Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

1日8時間、1週40時間、**人が常時立ちに入る場所**の線量限度は1mSv/week

核種	線種	エネルギー (MeV)	1日最大数量 (MBq)	PHITS [Sv/h]	PHITS 限度との比	慶應計算
125I	γ	0.0274	0.74	7.35E-08	2.94E-03	1.47E-03
42K	γ	1.535	0.37	3.69E-08	1.48E-03	1.91E-03
55Fe	X	0.0059	0.37	9.36E-11	3.74E-06	2.96E-05
86Rb	γ	1.077	0.37	1.37E-08	5.47E-04	6.93E-04
51Cr	γ	0.32	3.7	5.58E-08	2.23E-03	2.71E-03
SUM					7.20E-03	6.81E-03

β 線の寄与も含めると → 9.33E-03

全ての線源からの寄与の総和 : 1.05E-02

モンテカルロ・シミュレーションの統計誤差を10%と考えると信頼できる値



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

貯蔵室：1週2.5時間、人が常時立ちに入る場所の線量限度は1mSv/week

核種	線種	エネルギー (MeV)	貯蔵数量 (MBq)	PHITS [Sv/h]	PHITS 限度との比	慶應計算
125I	r	0.0274	55.5	5.52E-06	1.38E-02	6.88E-03
42K	r	1.535	11.1	1.11E-06	2.77E-03	3.57E-03
55Fe	X	0.0059	37	9.36E-09	2.34E-05	1.85E-04
86Rb	r	1.077	11.1	4.10E-07	1.03E-03	1.30E-03
51Cr	r	0.32	111	1.67E-06	4.18E-03	5.08E-03
SUM					2.18E-02	1.70E-02

β線の寄与も含めると→ 2.18E-02



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

貯蔵室に、1日8時間、1週40時間、線量限度は1mSv/weekとしても大丈夫！

核種	線種	エネルギー(MeV)	貯蔵数量 (MBq)	PHITS [Sv/h]	PHITS 限度との比
125I	γ	0.0274	55.5	5.52E-06	2.21E-01
42K	γ	1.535	11.1	1.11E-06	4.43E-02
55Fe	X	0.0059	37	9.36E-09	3.74E-04
86Rb	γ	1.077	11.1	4.10E-07	1.64E-02
51Cr	γ	0.32	111	1.67E-06	6.69E-02
SUM					3.49E-01



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

1日8時間、1週40時間、3月13週 事業所境界の線量限度は1.3mSv/3月

核種	線種	エネルギー (MeV)	1日最大数量 (MBq)	PHITS [Sv/h]	PHITS 限度との比	慶應計算方法
125I	r	0.0274	0.74	7.35E-08	2.94E-02	1.47E-02
42K	r	1.535	0.37	3.69E-08	1.48E-02	1.91E-02
55Fe	x	0.0059	0.37	9.36E-11	3.74E-05	2.96E-04
86Rb	r	1.077	0.37	1.37E-08	5.47E-03	6.93E-03
51Cr	r	0.32	3.7	5.58E-08	2.23E-02	2.71E-01
SUM					7.20E-02	3.12E-01

Q1点で問題ないことを確認



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

β 線の飛程

$$0.15\text{MeV} < E_{\text{max}} < 0.8\text{MeV} \rightarrow R = 0.407E_{\text{max}}^{1.38}$$

$$0.8\text{MeV} < E_{\text{max}} \rightarrow R = 0.542E_{\text{max}} - 0.133$$

核種	エネルギー[MeV]	飛程[cm]
45Ca	0.257	51.6
35S	0.167	25.8
14C	0.156	25.9
3H	0.0186	-
32P	1.71	656.0

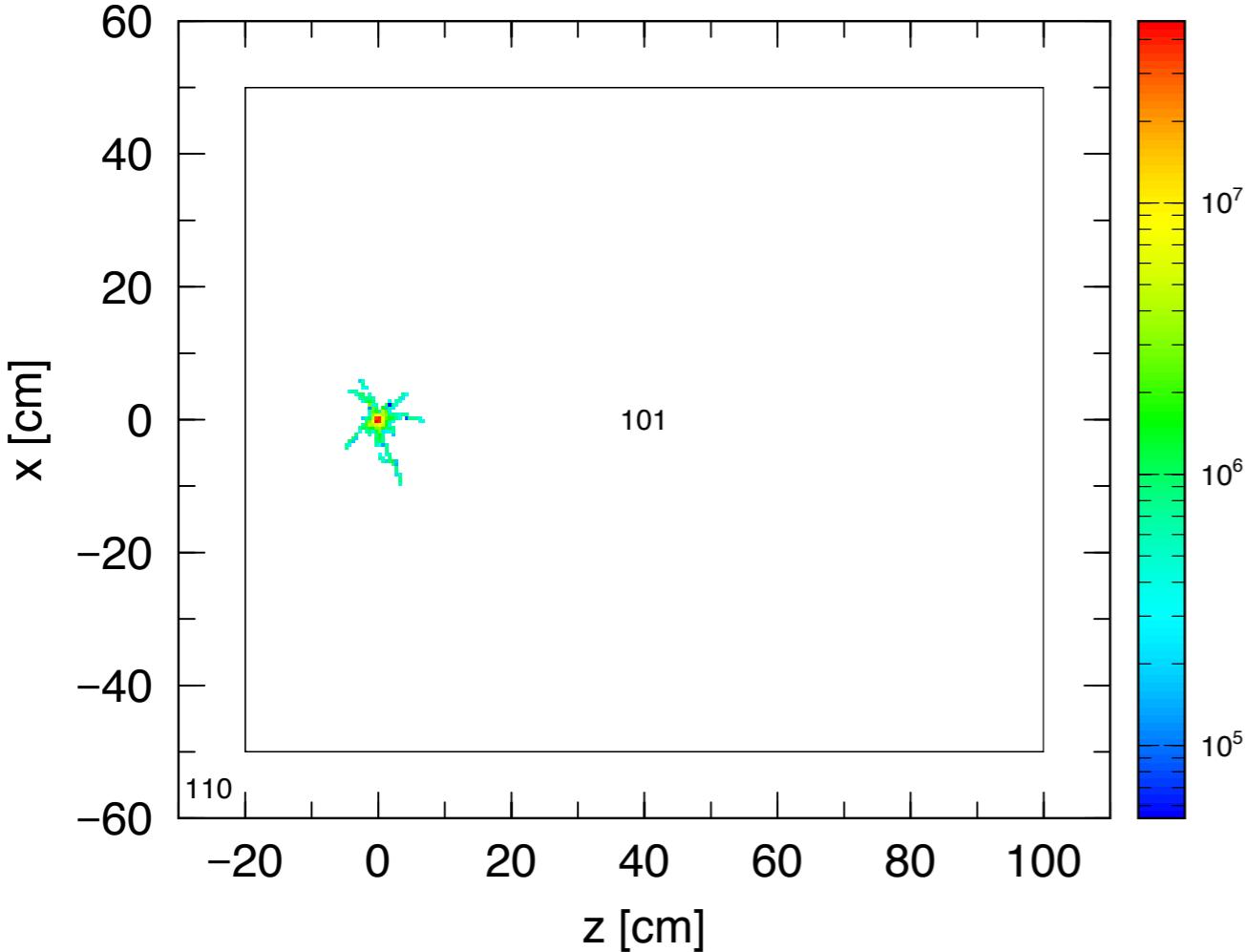
$$\rho = 0.0121 \text{ (空気)}$$



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

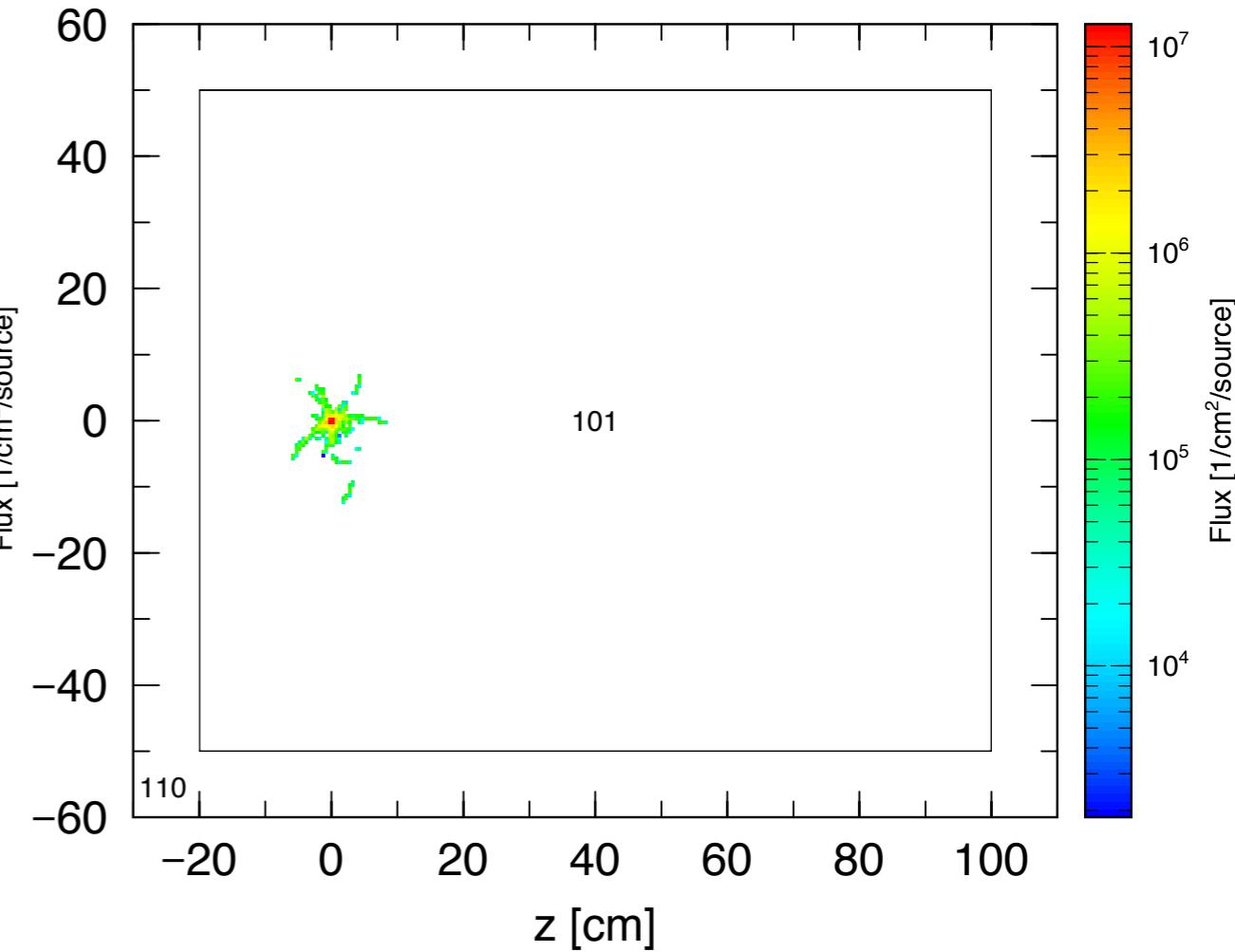
14C 0.156MeV

no. = 1, ie = 1, iy = 1



35S 0.167MeV

no. = 1, ie = 1, iy = 1



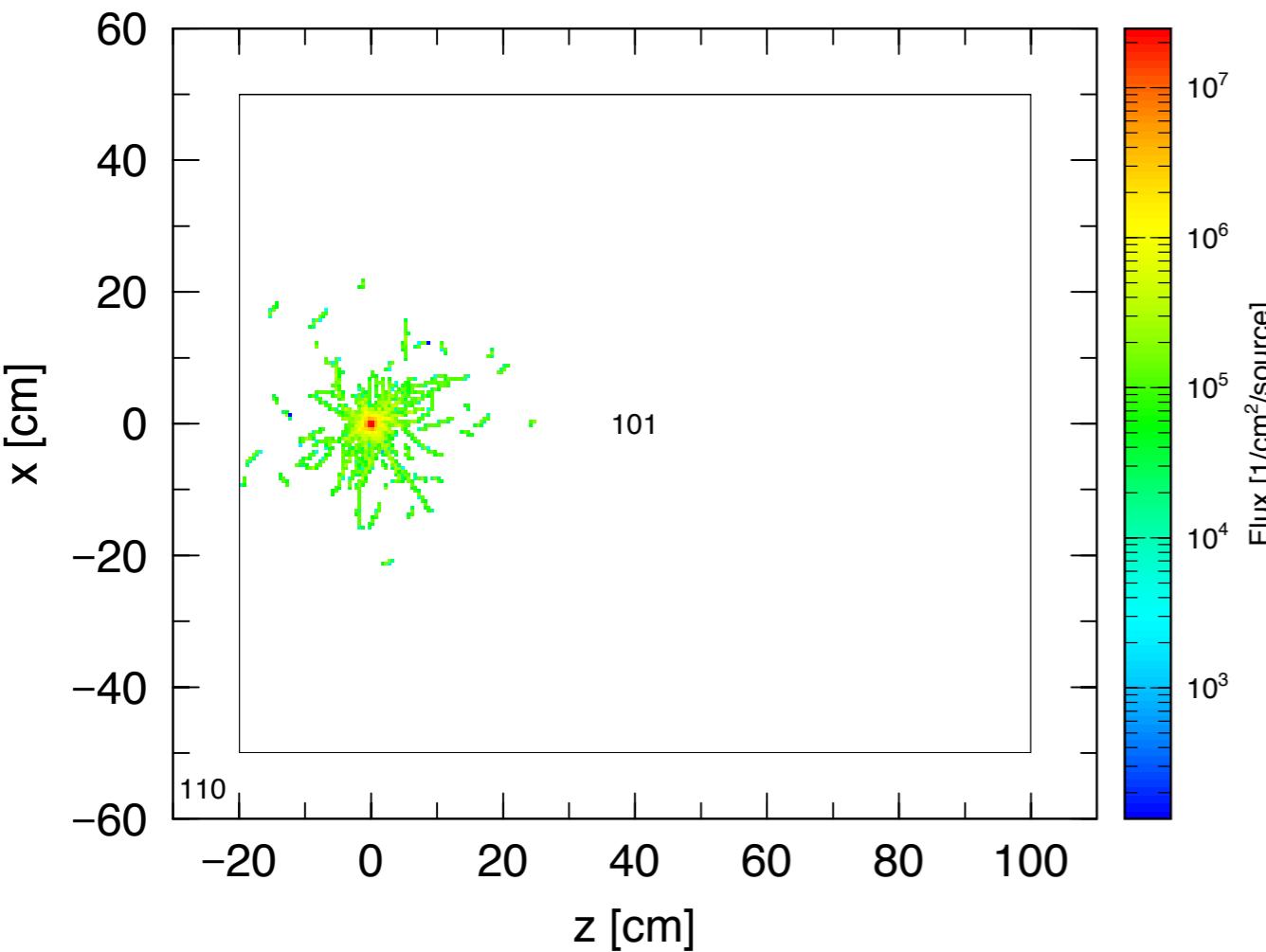


Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

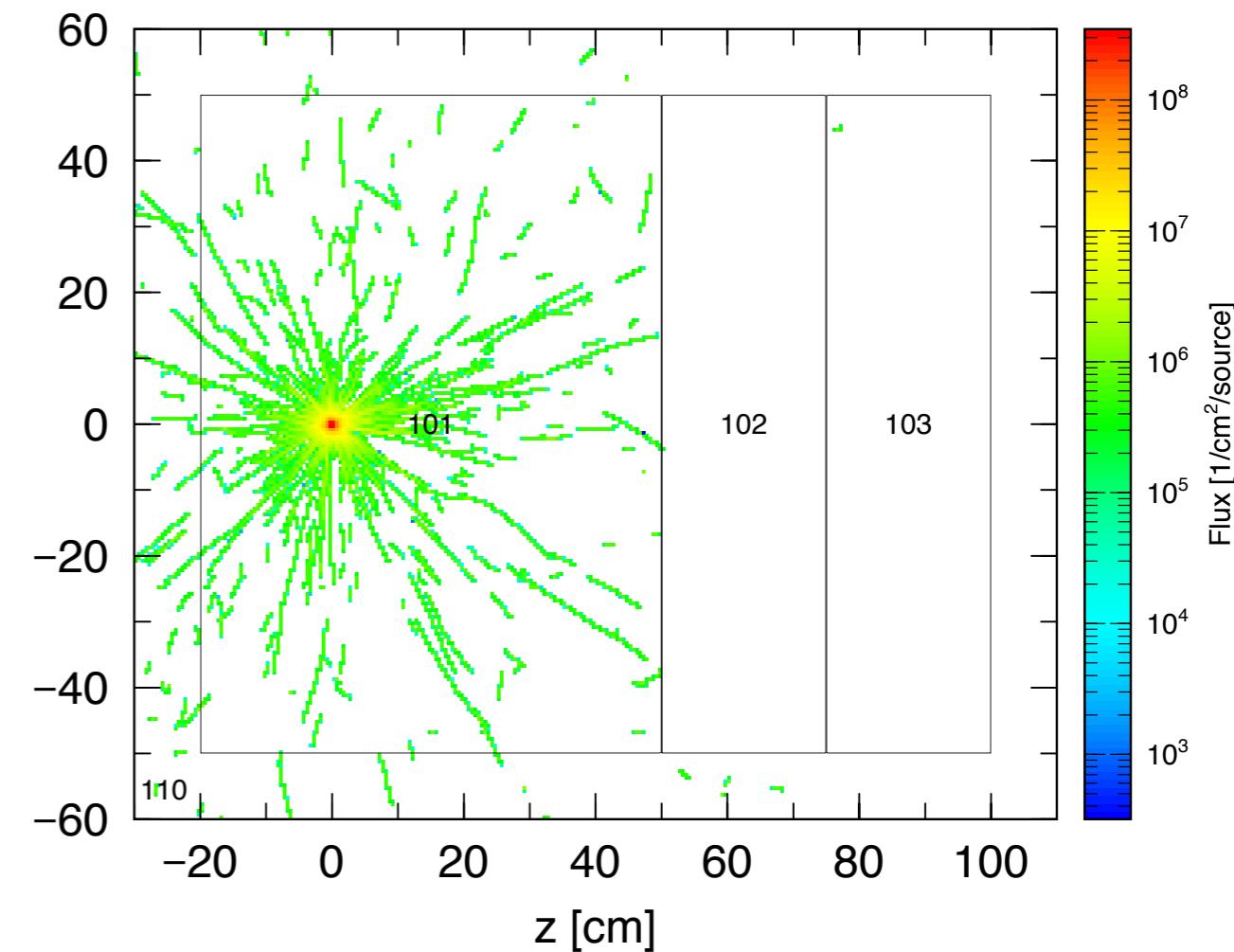
45Ca 0.257MeV

no. = 1, ie = 1, iy = 1



32P 1.71MeV

no. = 1, ie = 1, iy = 1





<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

32P 1.71MeV

水ファントムでの計算結果

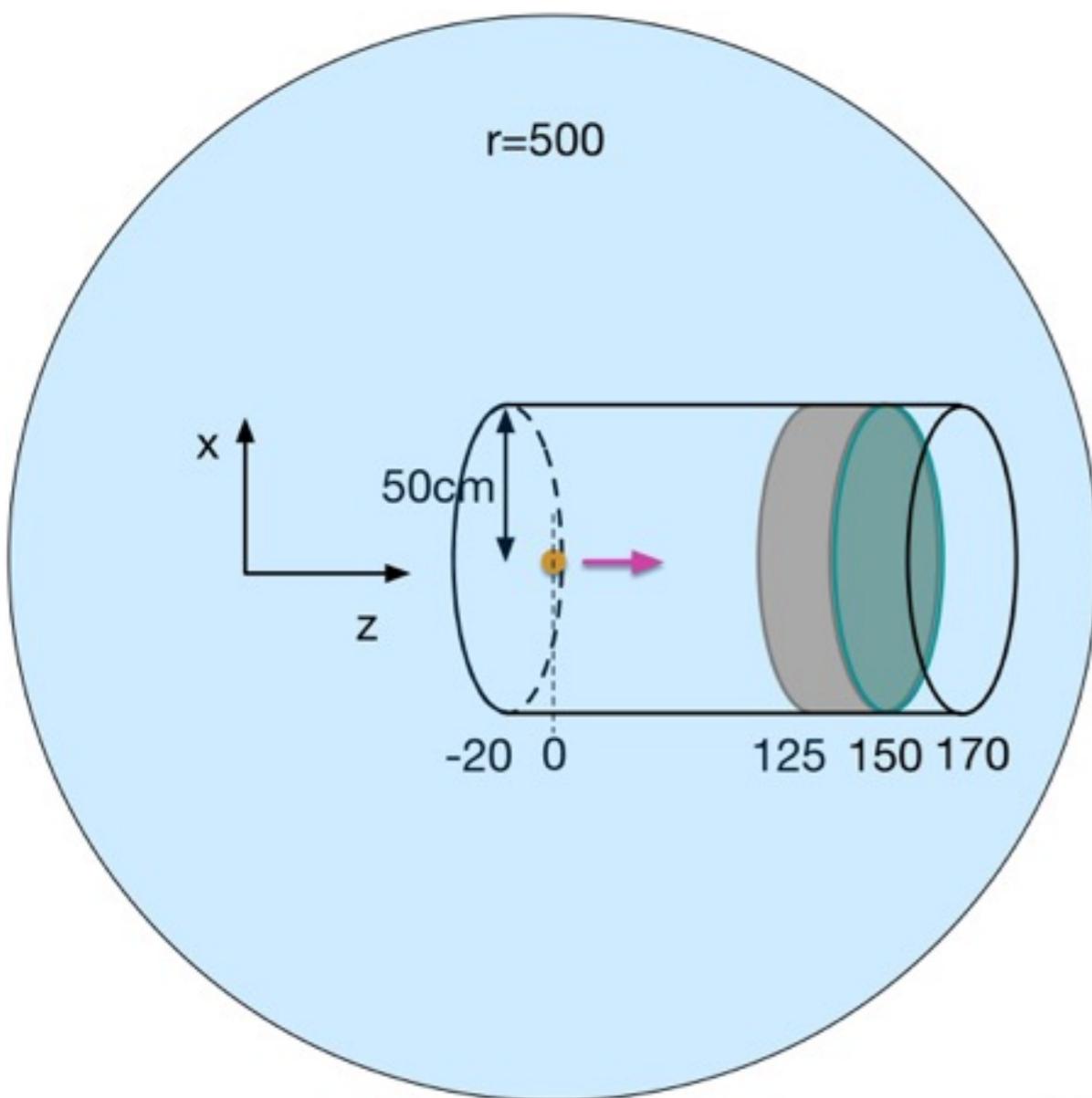
計算コード	吸収線量：線源から50cm	
	32P 18.5MBq [Gy/h]	32P 555MBq [Gy/h]
Rad Pro Calculator	7.055E-04	2.117E-02
PHITS	7.368E-04	2.10E-02

h: n		y(all)		n
#	z-lower		hh0l	n
5.0000E+01	5.0100E+01	7.7571E-06	0.0430	
5.0100E+01	5.0200E+01	5.1534E-06	0.0567	
5.0200E+01	5.0300E+01	2.5443E-06	0.0808	
5.0300E+01	5.0400E+01	9.7358E-07	0.1252	
5.0400E+01	5.0500E+01	2.5212E-07	0.2620	
5.0500E+01	5.0600E+01	6.7685E-09	1.0000	
5.0600E+01	5.0700E+01	9.3596E-10	1.0000	
5.0700E+01	5.0800E+01	2.9756E-10	1.0000	
5.0800E+01	5.0900E+01	0.0000E+00	0.0000	
5.0900E+01	5.1000E+01	0.0000E+00	0.0000	

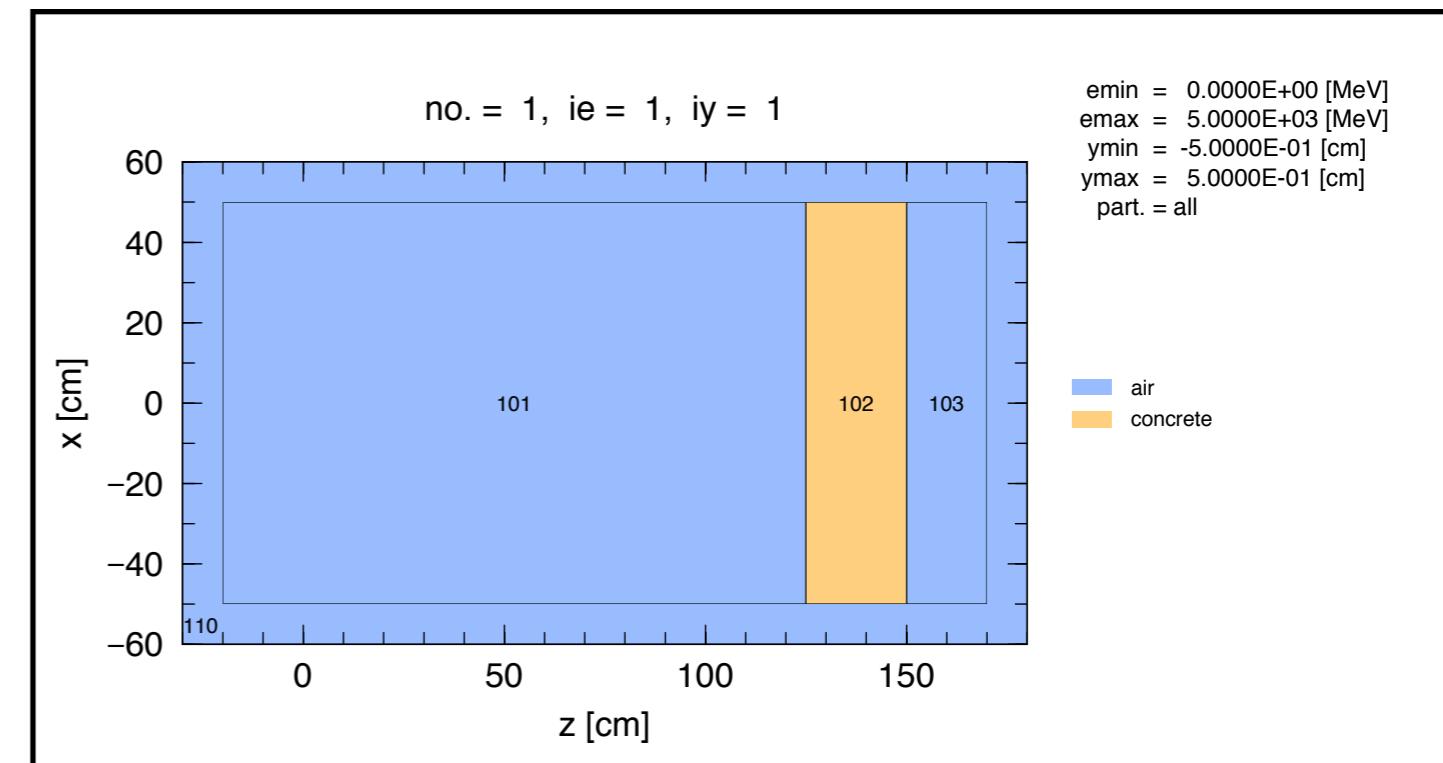
PHITSによる計算で、555Bq—水ファントムで0.5mm程度までしか進まない
皮膚は0.5mm 皮膚の組織荷重係数は0.01なので・・・



<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>



- ・線源から125cmの位置に厚さ25cmのコンクリートを設置
- ・線源から150cmの位置にて線量率を計算
- ・シミュレーション範囲は $x = -60 \sim 60$, $z = -30 \sim 180$
- ・貯蔵数量で計算



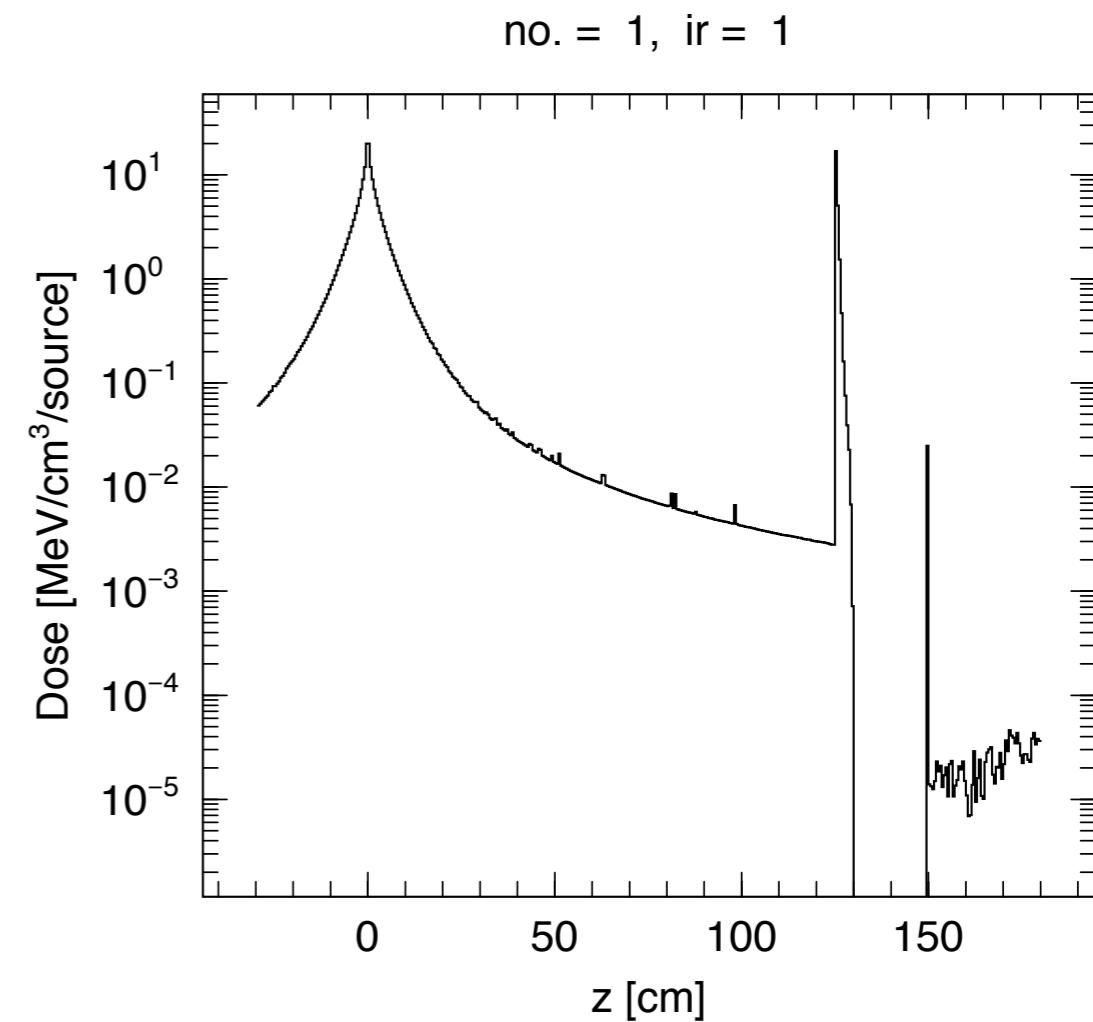
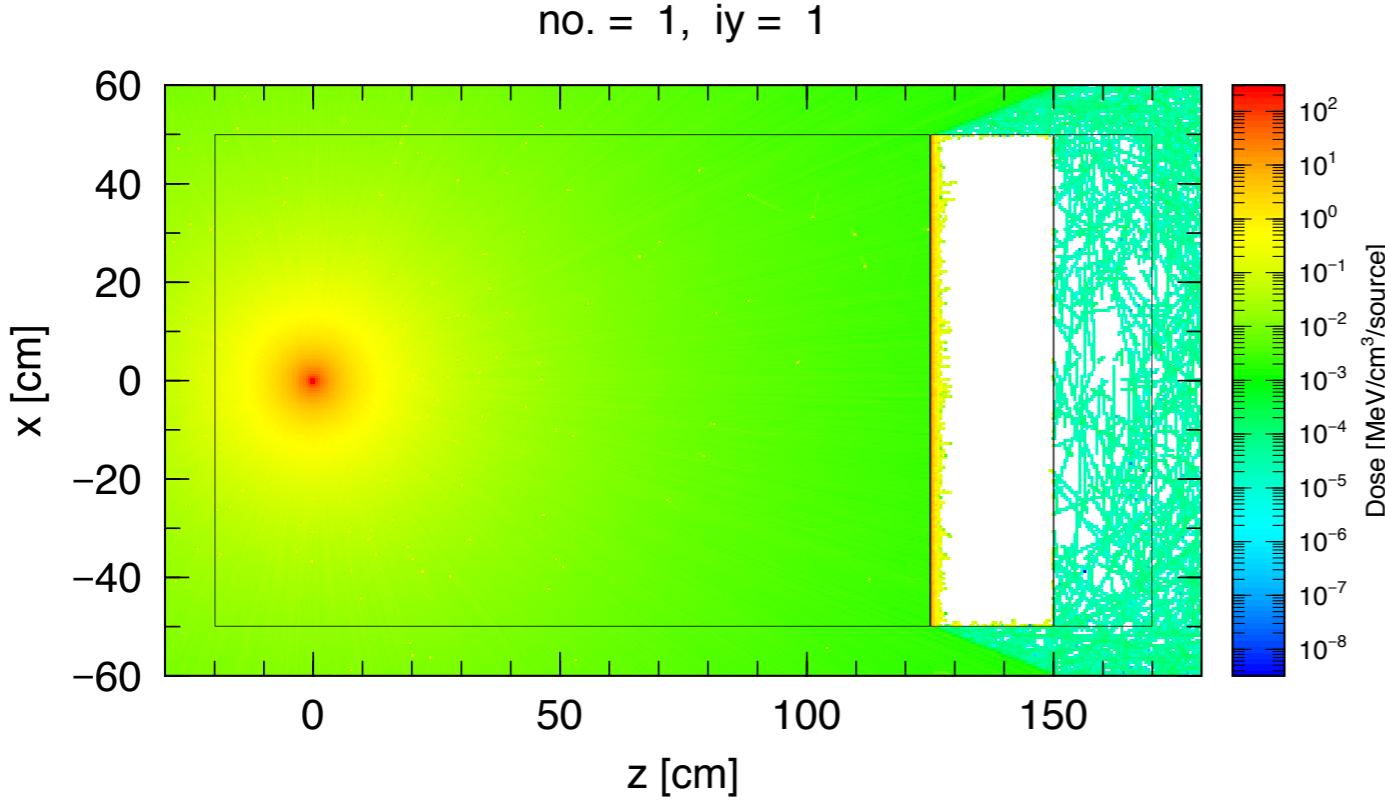
③貯蔵場所から1.5m(コンクリート25cmで遮蔽)での空間線量の計算 -> Q2



Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

125I 55.5MBq 0.0275MeV

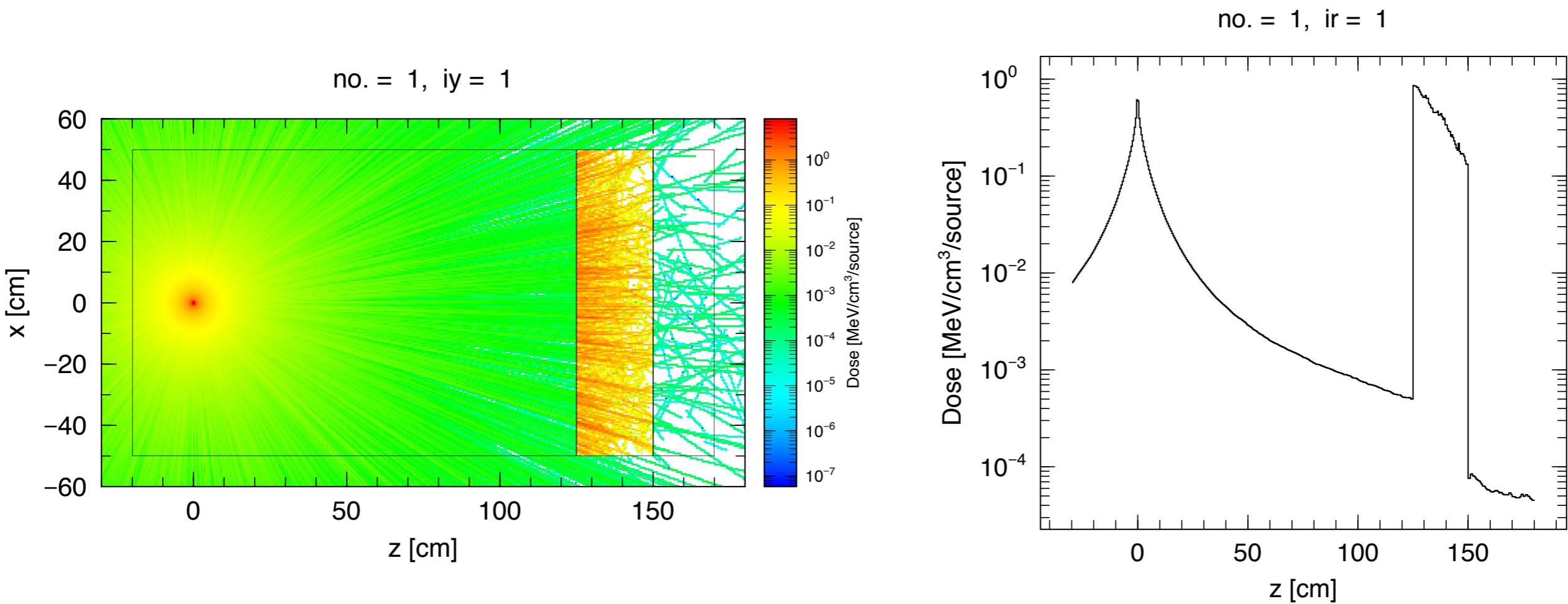




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

42K 11.1MBq 1.535MeV

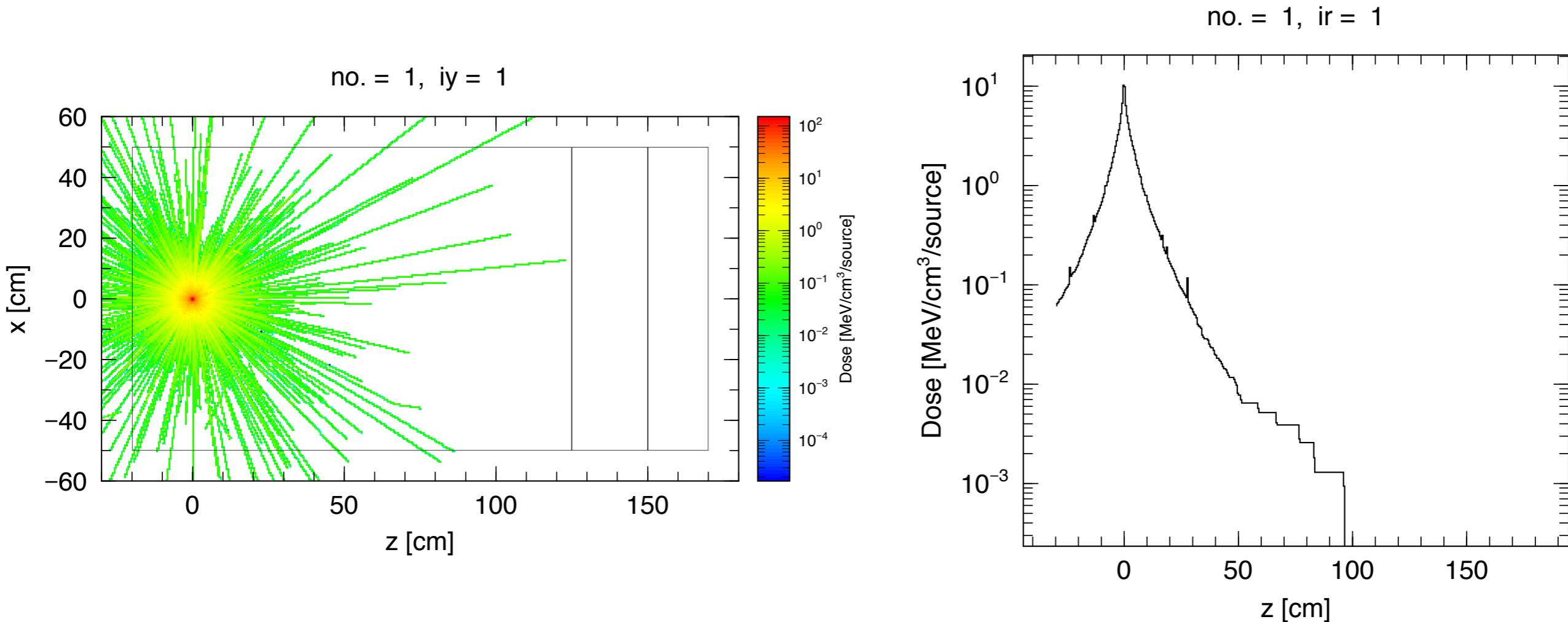




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

55Fe 37MBq 0.0059MeV

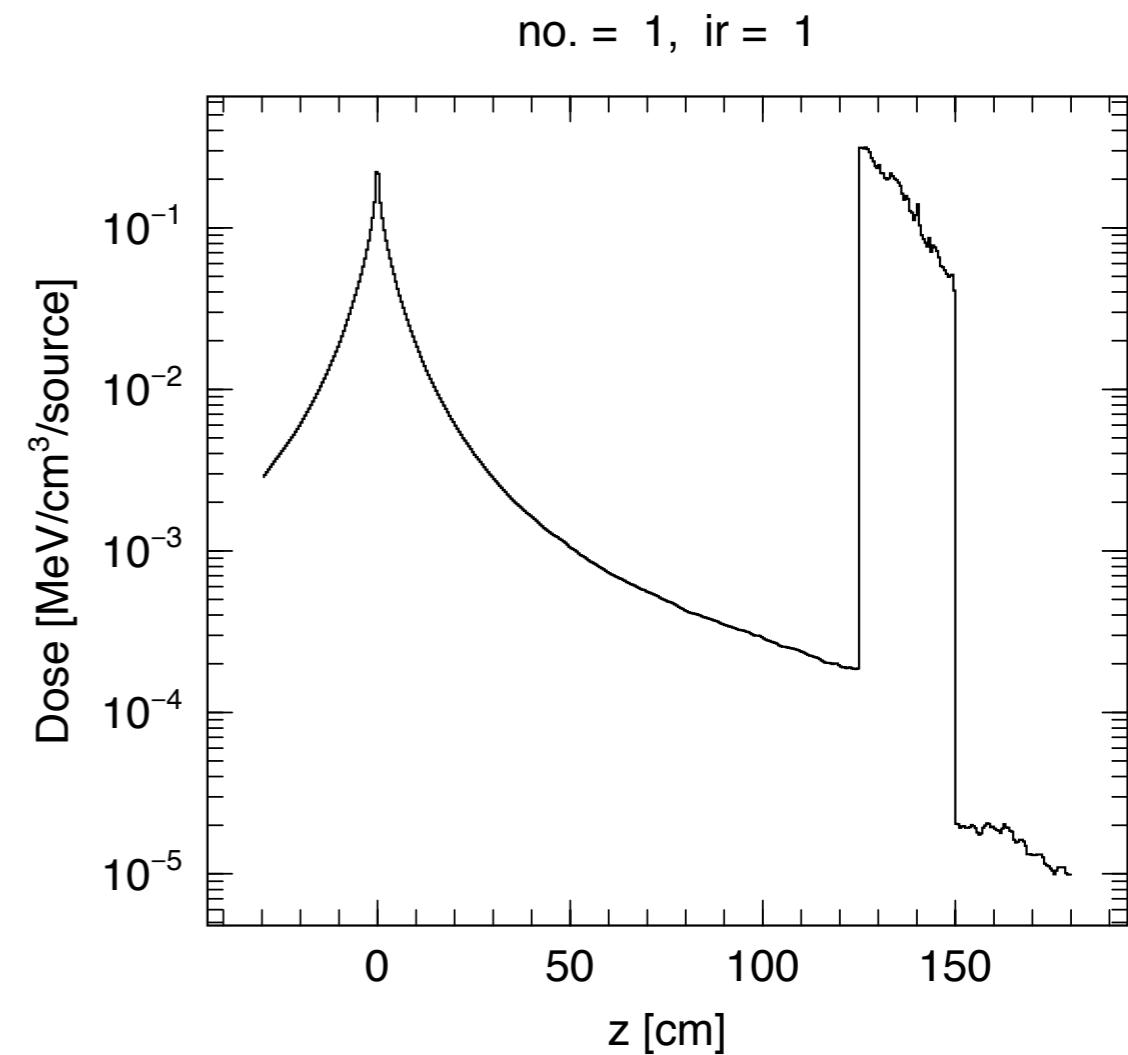
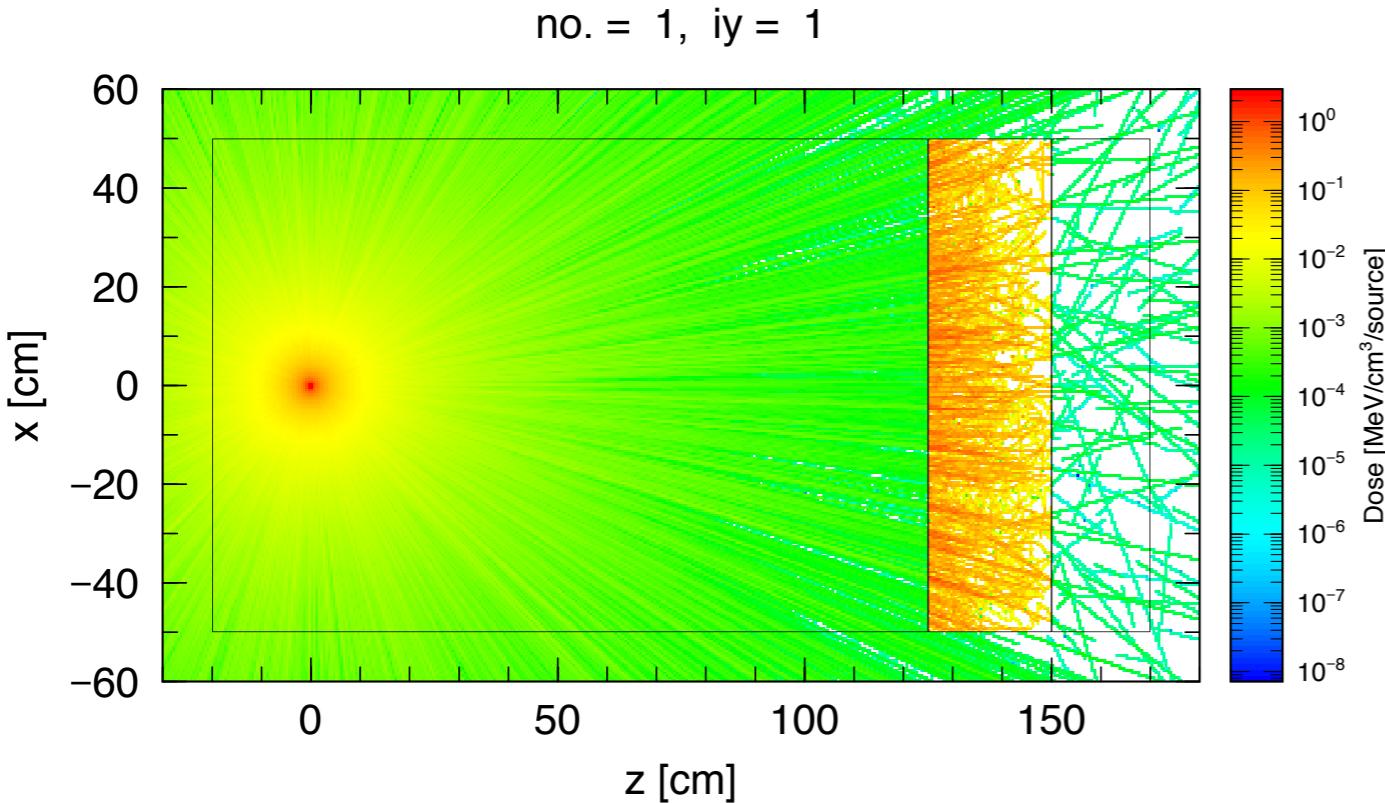




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

86Rb 11.1MBq 1.077MeV

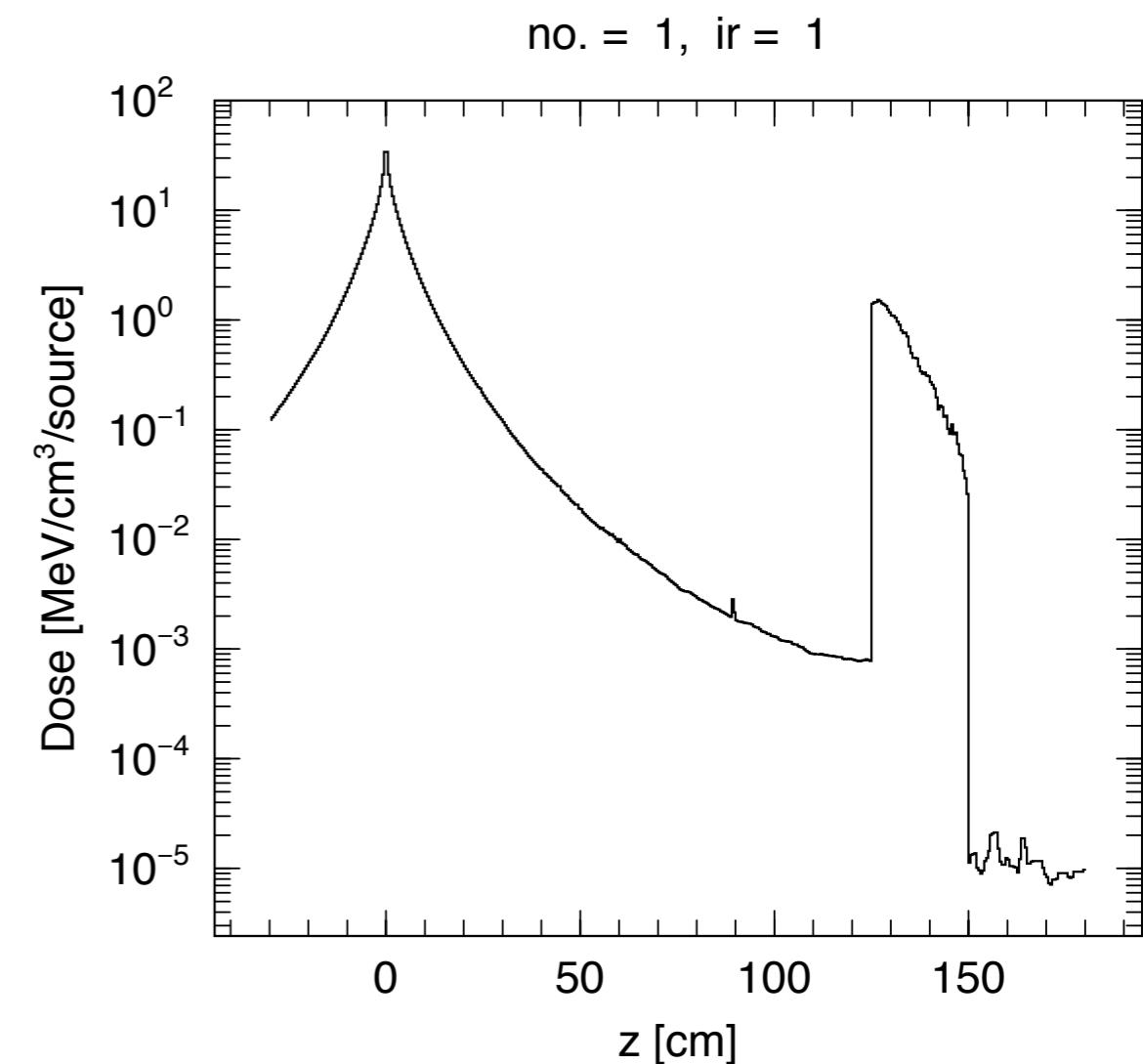
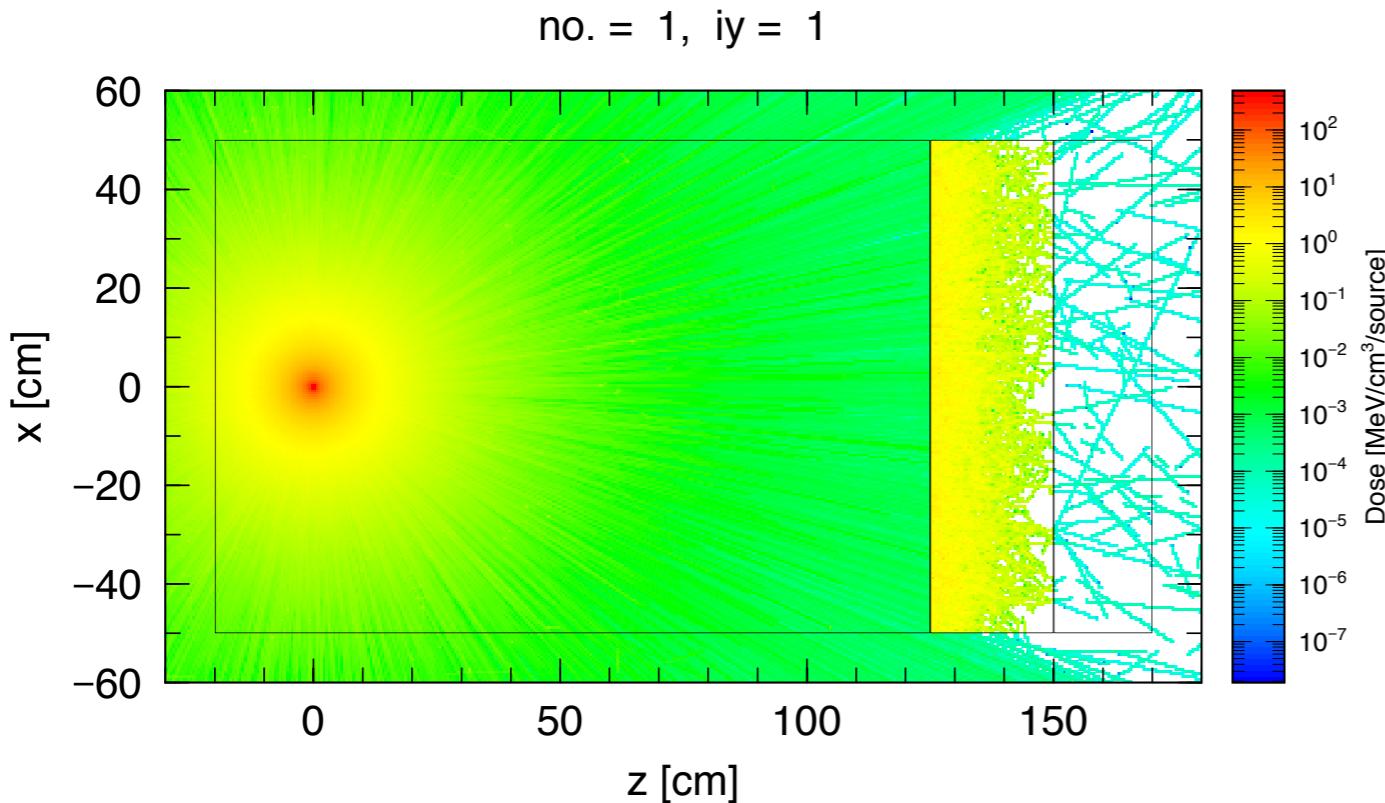




Radiation dose evaluation using Monte Carlo Simulation

<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

51Cr 111MBq 0.32MeV





<理工学部アイソトープ施設の遮蔽計算>

1日8時間、1週40時間、3月13週 事業所境界の線量限度は1.3mSv/3月
(線源から1.25mのところに25cmのコンクリート壁：1.5mの実効線量を計算)

核種	線種	エネルギー (MeV)	貯蔵数量 (MBq)	PHITS [Sv/h]	PHITS 限度との比	慶應計算方法
125I	r	0.0274	55.5	7.69E-09	3.07E-03	1.22E-08
42K	r	1.535	11.1	3.13E-08	1.25E-02	2.13E-02
55Fe	X	0.0059	37	0	0	3.29E-10
86Rb	r	1.077	11.1	3.59E-03	3.59E-03	4.50E-03
51Cr	r	0.32	111	8.58E-09	3.43E-03	8.17E-02
SUM					2.26E-02	1.13E-01

Q2点で問題ないことを確認



<まとめと今後について>

- ・ 線量評価研修会及びPHITS講習会に参加して、シミュレーションによる線量評価方法を身につけることができた
- ・ 慶應理工学部アイソトープ室の線量評価比較をおこなった
- ・ 今後は継続して、他の測定点や密封線源の遮蔽計算の検証をおこなう（遮蔽設計・被ばく線量評価や、申請時の検証に使用する予定）
- ・ EGS5との比較・・・