

神岡地下実験室の極低放射能ゲルマニウム検出器に おけるバッググラウンドの理解

横浜国立大学大学院 理工学府
数物・電子情報系理工学専攻 物理工学ユニット
学籍番号 21NC218
鈴木 芹奈

2023年1月31日

概要

2021年2月に、岐阜県にある神岡地下実験室で極低放射能仕様のゲルマニウム検出器が納入され、2022年1月よりこのゲルマニウム検出器の本格的な運用を行っている。このゲルマニウム検出器のバックグラウンド源を同定し、それを低減することで、世界最高感度のスクリーニングシステムの構築を目指している。

本研究ではゲルマニウム検出器部材中に含まれる放射性不純物から発生する放射線をシミュレーションツール Geant4 を用いてシミュレーションし、バッググラウンドスペクトルを見積もった。そして、シミュレーションで見積もったバッググラウンドスペクトルを実機で観測されたバックグラウンド事象と比較して、ゲルマニウム検出器のバッググラウンドの理解を試みた。

目 次

第 1 章 ゲルマニウム検出器	4
1.1 構造	4
1.2 遮蔽体の組み立て及び検出器のセットアップ	7
1.2.1 神岡地下実験室	7
1.2.2 実験室 C(Lab-C)	7
1.2.3 遮蔽体の組み立て作業	9
1.2.4 測定システムのセットアップ作業	10
1.3 測定原理	10
1.4 サンプル試料の測定方法	11
第 2 章 ゲルマニウム検出器のバッググラウンド源	13
2.1 ウラン系列	13
2.2 トリウム系列	15
2.3 アクチニウム系列	15
2.4 その他の放射性不純物	18
2.5 制動放射	18
2.6 ゲルマニウム検出器で測定されたバッググラウンド	19
第 3 章 Geant4 シミュレーション	21
3.1 プログラム全体の概要	21
3.2 各ファイルの特徴	22
3.3 可視化	23
第 4 章 モンテカルロシミュレーション	24
4.1 ガンマ線源を用いた検出器較正作業	24
4.1.1 ガンマ線源のエネルギースペクトル	25
4.1.2 エネルギー分解能	26
4.1.3 検出効率	27
4.2 バッググラウンドのシミュレーション	27
4.2.1 検出器部材中のバッググラウンド候補	27
4.2.2 シミュレーションのライブタイム	31
4.2.3 シミュレーション結果	33

第 5 章 シミュレーション結果によるバッググラウンドスペクトルの再現	42
5.1 含有量の測定データがある放射性不純物	44
5.1.1 ^{60}Co	44
5.1.2 ^{40}K	45
5.1.3 ^{137}Cs	45
5.1.4 ^{235}U	46
5.2 含有量の測定データがない放射性不純物	47
5.2.1 ^{26}Al	48
5.2.2 ^{57}Co	48
5.2.3 ^{58}Co	50
5.2.4 ^{65}Zn	50
5.3 ^{210}Pb と ^{210}Bi による制動放射	51
5.4 ウラン系列上流部、トリウム系列	52
5.4.1 ^{238}U	52
5.4.2 ^{232}Th	54
5.5 各放射性不純物含有量	55
第 6 章 結論・今後の展望	57
謝辞	58
参考文献	59

第1章 ゲルマニウム検出器

HPGe 検出器 (High Purity Germanium detector) は、ゲルマニウムを使用した半導体検出器のうち、特に高純度のゲルマニウム結晶を使用した極低放射能仕様のものを指す。この検出器は、主にサンプル試料に含まれている放射性不純物から放出されるガンマ線を測定することでサンプル中の放射性不純物含有量を同定するために用いられる。本論文では、HPGe 検出器を「ゲルマニウム検出器」と呼ぶこととする。

本研究で使用したゲルマニウム検出器の基本情報を表 1.1 に示す。

表 1.1: 本研究で使用したゲルマニウム検出器の基本情報

製造元	Million Technologies • CANBERRA(France)
型	同軸 P 型タイプ
相対効率	80%
エンドキャップ	高純度、極低放射能アルミニウム製
神岡地下実験室納入時期	2021 年 2 月
組み立て、セットアップ時期	2021 年 8 月～12 月
運用開始時期	2022 年 1 月

表 1.1 の相対効率の定義は、「直径 3 インチ、長さ 3 インチの円筒形の NaI(Tl) シンチレーション検出器に対する、 ^{60}Co 点状線源を検出器の前方軸上 25 cm の位置に置いたときのエネルギー 1333 keV のガンマ線の全吸収ピークの相対検出効率」[1] である。エンドキャップとは、検出器本体部分であるゲルマニウム結晶を覆う金属製のカバーのことを指す。

1.1 構造

本研究で使用しているゲルマニウム検出器の遮蔽体は図 1.1 である。遮蔽体内部には、図 1.2 のゲルマニウム検出器本体が設置されている。ゲルマニウム検出器本体であるゲルマニウム結晶は図 1.2 のアルミニウム製エンドキャップ内部に設置されている。ゲルマニウム結晶の表面には不感層と呼ばれる領域があり、その領域ではガンマ線の検出ができない。一般的に不感層の厚さは 0.5 mm から 0.7 mm 程度である。

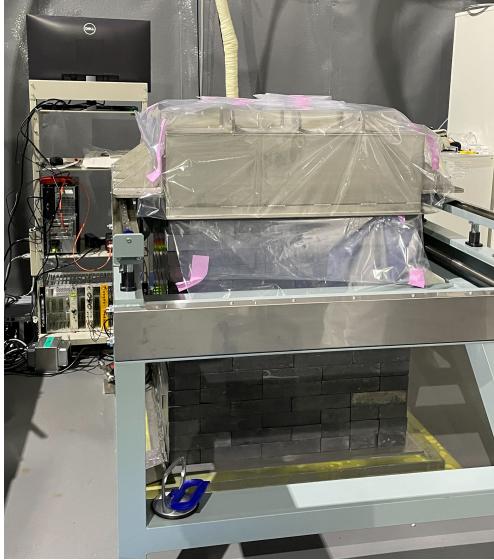


図 1.1: ゲルマニウム検出器の遮蔽体



図 1.2: ゲルマニウム検出器本体

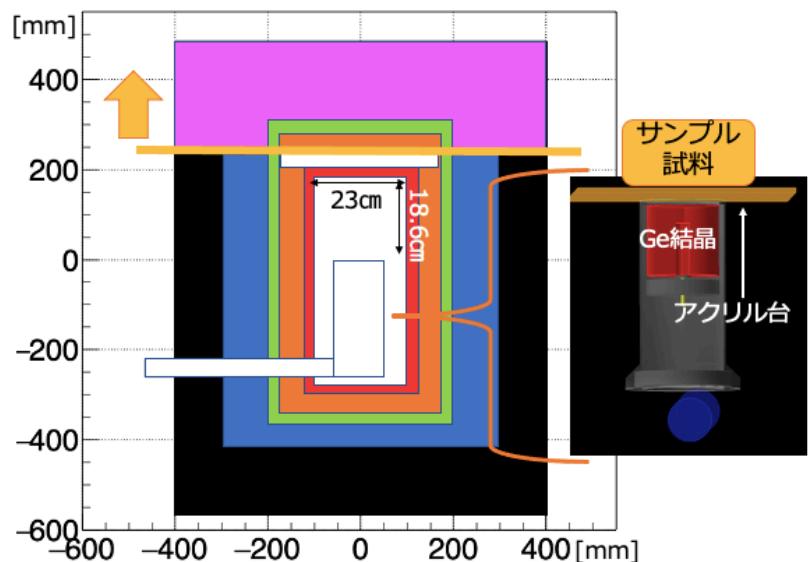


図 1.3: ゲルマニウム検出器、サンプルスペース、遮蔽体の断面図

図 1.3 にゲルマニウム検出器、サンプルスペース、遮蔽体の断面図を示した。サンプルスペースを中心として内側から 6N 銅（赤）と無酸素銅（橙）の銅シールド二層、放射性不純物含有量が異なる鉛シールド三層（緑、青、黒）が覆う構造となっている。またシールドの黄色の線から上部は蓋（ピンク）になっており、開閉することができる。図 1.4 のように遮蔽体の蓋部分にも銅と鉛シールドが使用されている。また、ゲルマニウム結晶を覆うアルミニウム製エンドキャップにサンプルが直接触れることがないように、サンプルスペースには図 1.5 のようにアクリル製のサンプル台が設置されている。サンプル台に原子番号が小さい炭素と水素でできたアクリルを使用することで、サンプル試料から放出されるガンマ線を極力遮蔽することなくゲルマニウム検出器の検出効率を下げないようにした。

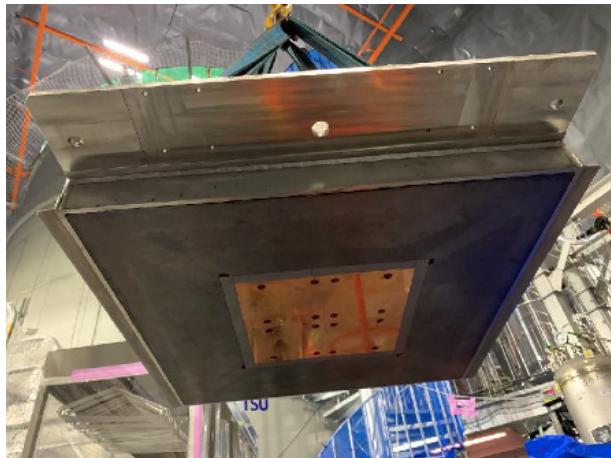


図 1.4: 遮蔽体上部の蓋



図 1.5: アクリル製のサンプル台

また遮蔽体後方は図 1.6 のようになっており、上部に伸びている配管からゲルマニウム結晶を冷やすための液体窒素が自動で供給される。さらに図 1.7 にある遮蔽体から出ている細い金属管からラドン含有量を低減した空気（ラドンフリーエア）を供給しており、サンプルスペース内のラドン濃度を減らしている。

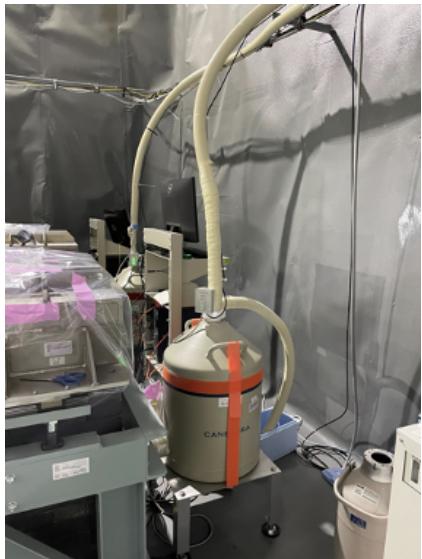


図 1.6: 遮蔽体後方



図 1.7: ラドンフリーエア供給管

1.2 遮蔽体の組み立て及び検出器のセットアップ

本研究で使用したゲルマニウム検出器は、2021年2月に岐阜県飛騨市神岡町にある神岡地下実験室の実験室C(Lab-C)に納入された。この節では、検出器の設置場所と2021年8月～12月に行なった組み立て及びセットアップ作業について述べる。

1.2.1 神岡地下実験室

神岡地下実験室は岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下1000mにある。スーパーカミオカンデ実験(以下、SK)は、1996年から神岡地下実験室で観測を行っている。SKは、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、加速器ニュートリノ、超新星背景ニュートリノなどを観測することでニュートリノの性質及び宇宙の歴史の解明を目指している。この地下実験施設ではSK以外にも日本、アメリカ、中国、イギリス、イタリアなど世界各国の約40の大学や研究機関の共同研究が行われており、Lab-A、Lab-B、Lab-Cなどの実験室がある。図1.8に神岡地下実験室の俯瞰図とLab-Cの位置を示した。

1.2.2 実験室C(Lab-C)

実験室全体がクリーンルームになっているため、クリーンスーツを着用して入室する。1年を通して18、19度前後の気温で保たれており、湿度も20%程度に保たれている。

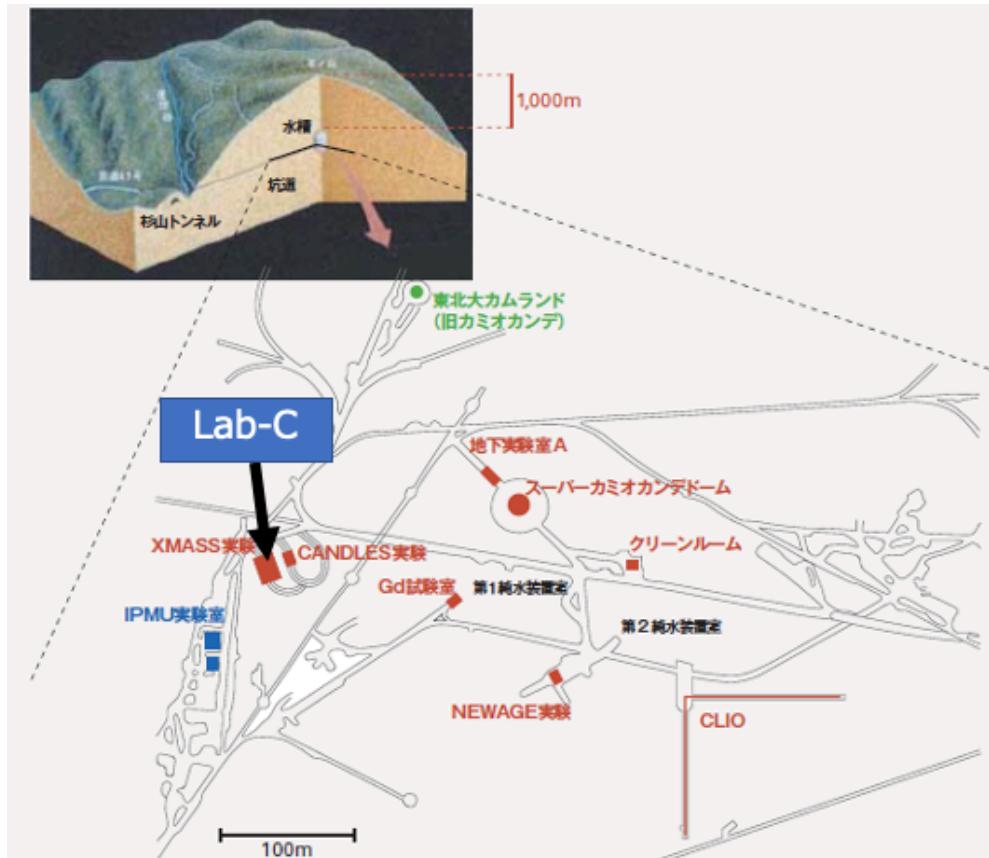


図 1.8: 神岡地下実験室の俯瞰図 [2]

1.2.3 遮蔽体の組み立て作業

ゲルマニウム検出器の測定を行う際に、外部からの放射性不純物の侵入を防ぐ遮蔽体を組み立てる作業を行った。手順は以下の通りである。

- 縦 10 cm × 横 20 cm × 幅 5 cm の直方体の銅と鉛のブロック（一部形が異なるものもある）の全ての面をエタコールで拭いた。
- 内側から 6 cm が銅シールド、その外側 22.5 cm が鉛シールドとなるようにシールドのブロックを 1 段ごとに積んだ。
- 金枠を遮蔽体の周囲に設置し、蓋部分の遮蔽体をクレーンで乗せた。

手順 1 のエタコール拭きは、ブロック表面に付いた錆や汚れに含まれる不純物含有量を低減させるための作業である。遮蔽体組み立て作業時の写真を図 1.9 に示す。

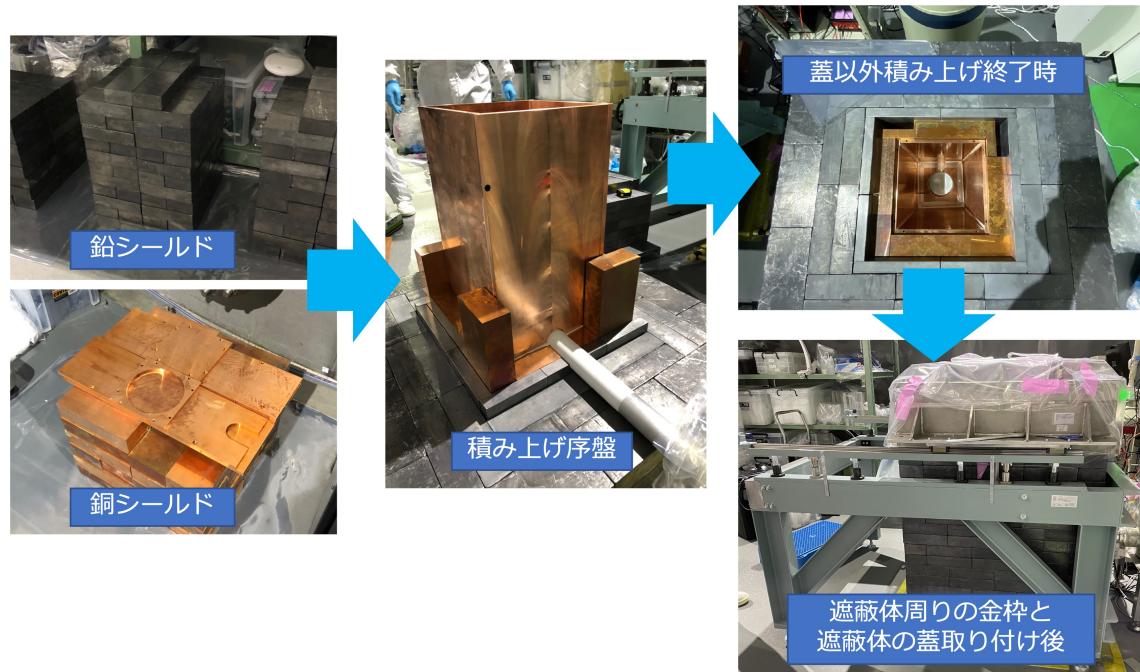


図 1.9: 遮蔽体組み立て作業

銅及び鉛ブロック間の隙間が可能な限り小さくなるように積み上げ作業が行われた。これはブロックの隙間から放射線やラドンを多く含んだ空気が侵入するのを防ぐためである。

1.2.4 測定システムのセットアップ作業

測定システムの概要を図 1.10 に示す。

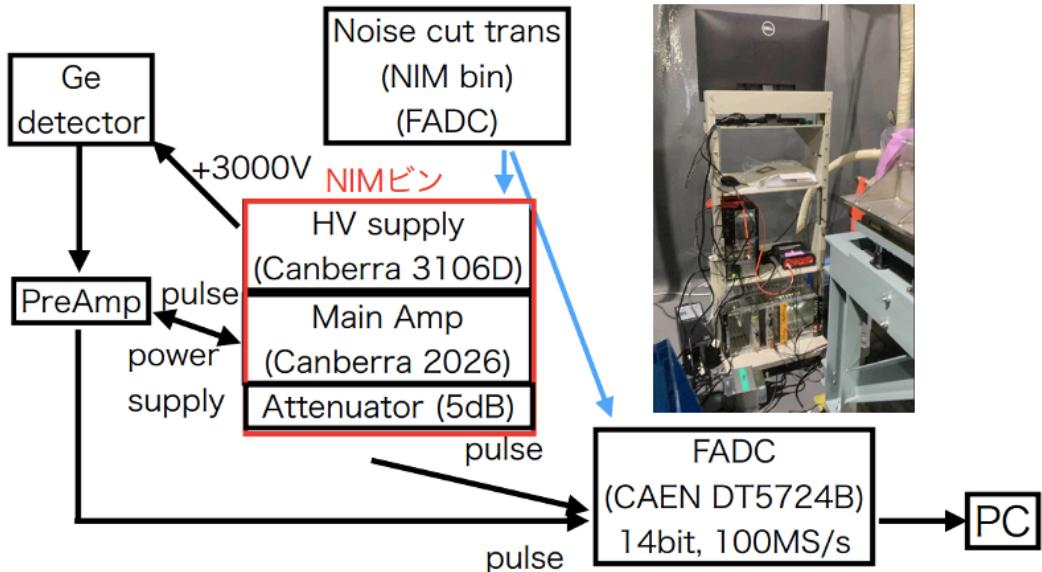


図 1.10: 測定システム [2]

ゲルマニウム検出器に付いているプリアンプからの信号がメインアンプ (Canberra Model 2026) によって整形増幅され、プリアンプからの信号とメインアンプからの信号の両方が波形デジタイザ (CAEN DT5724B) で記録されている。ここでメインアンプからの信号は ^{208}Tl の 2615 keV でサチュレーションしないように 5 dB のアテネータを通している。これらの機器には電源からのノイズが乗らないように UPS やノイズカットトランジスタが接続されている。記録された波形について、最初の 200 サンプリングチャンネル ($2 \mu\text{s}$) からベースラインを計算し、波形の最大値からベースラインを引いた ADC カウントをガンマ線のエネルギーに対応させている。ADC カウントからガンマ線のエネルギーへの変換は、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba の較正データを用いて行っている。

1.3 測定原理

半導体には P 型半導体と N 型半導体がある。P 型半導体は 4 個の元素の結晶に不純物として 3 個の元素を含み、キャリアは正孔である。一方で N 型半導体は不純物として 5 個の元素を含み、キャリアは電子である。P 型半導体と N 型半導体を結合したものを PN 接合と呼び、逆バイアス電圧をかけることによって中心部に空乏層と呼ばれるキャリアがない領域ができる。この空乏層にガンマ線が入ると原子と相互作用をし、エネルギー損失を起こして多数の電子正孔対を生成する。空乏層には逆バイアス電圧がかけられているため、生じた電子や正孔はそれぞれ電極に集められ電

流が生じる。この電流の大きさを測定することによってガンマ線のエネルギーを検出する。ゲルマニウムは同じく半導体検出器によく使われるシリコンと比べて原子番号が大きい(シリコンが14、ゲルマニウムが32)ためガンマ線の検出に向いている。ガンマ線と物質との光電吸収の反応断面積は原子番号 Z の5乗に比例するため、ゲルマニウムはシリコンと比べて60倍以上の反応断面積を持つことになる。また、電子正孔対を作るのに必要なエネルギーが小さいため、他のガンマ線検出器と比べて高いエネルギー分解能を持つ。一方でゲルマニウム結晶の価電子帯と伝導帯の間のバンドギャップが狭いため、常温では電子が熱励起して漏れ電流が大きくなってしまう。このためゲルマニウム検出器を運用する際は、液体窒素温度(77K)に冷却する必要がある。[3][4]

1.4 サンプル試料の測定方法

サンプル試料の測定手順を以下に示す。また、測定時に使用するPCのキャプチャー画面を図1.11に示す。

1. サンプルスペースにサンプル試料を入れ、検出器のふたを閉める
2. PCで測定開始の操作を行う
3. 測定開始時と同様に測定終了の操作を行う

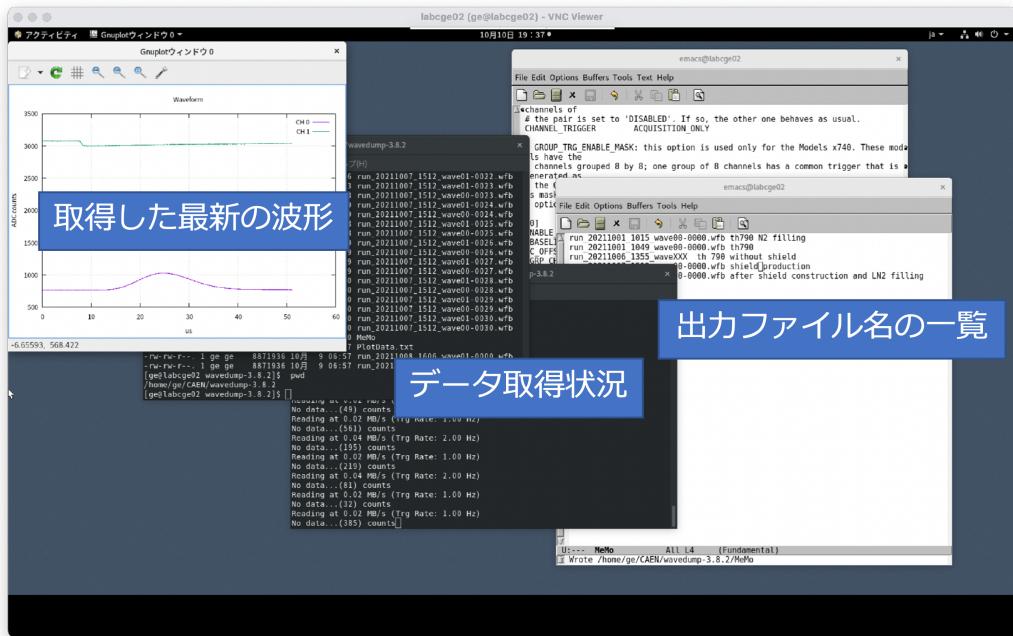


図 1.11: ゲルマニウム検出器のデータ収集PCのキャプチャー画面

データ収集 PC には VPN 接続することができ、神岡地下実験室外からも操作することができる。
データ収集 PC では信号が入ってきたタイミングや波形がリアルタイムで確認することができるようになっている。

第2章 ゲルマニウム検出器のバググラウンド源

ゲルマニウム検出器は放射性不純物から放出されたガンマ線を測定する。この章ではゲルマニウム検出器で測定する、ガンマ線を放出する放射性不純物について述べる。

2.1 ウラン系列

図 2.1 のウラン系列は ^{238}U から ^{206}Pb まで放射性崩壊する、自然界に存在する崩壊系列である。 ^{238}U の半減期はおよそ 45 億年と非常に長く、ゲルマニウム検出器の構成部材に含まれている場合はバググラウンド源となる。

このウラン系列の中で、ゲルマニウム検出器のバググラウンド候補として考えられる主な核種とそのガンマ線のエネルギーを表 2.1 に示す。

表 2.1: ウラン系列の核種のガンマ線エネルギー

核種	エネルギー [keV]
^{234}Th	63.3
^{234}Th	93.0
^{234}Pa	1001
^{226}Ra	186
^{214}Pb	295
^{214}Pb	352
^{214}Bi	609
^{214}Bi	1120
^{214}Bi	1764
^{210}Pb	46.5

また、崩壊系列において全ての核種が同じ頻度で崩壊する状態を「放射平衡」と呼ぶが、ウラン系列には周りの核種と比較して長い半減期を持つ核種が存在するため、放射平衡が成り立っていない可能性がある。よって本研究では、ウラン系列を ^{238}U を起点とした上流部、 ^{226}Ra を起点とした中流部、 ^{210}Pb を起点とした下流部の三つに分けて考えることとする。

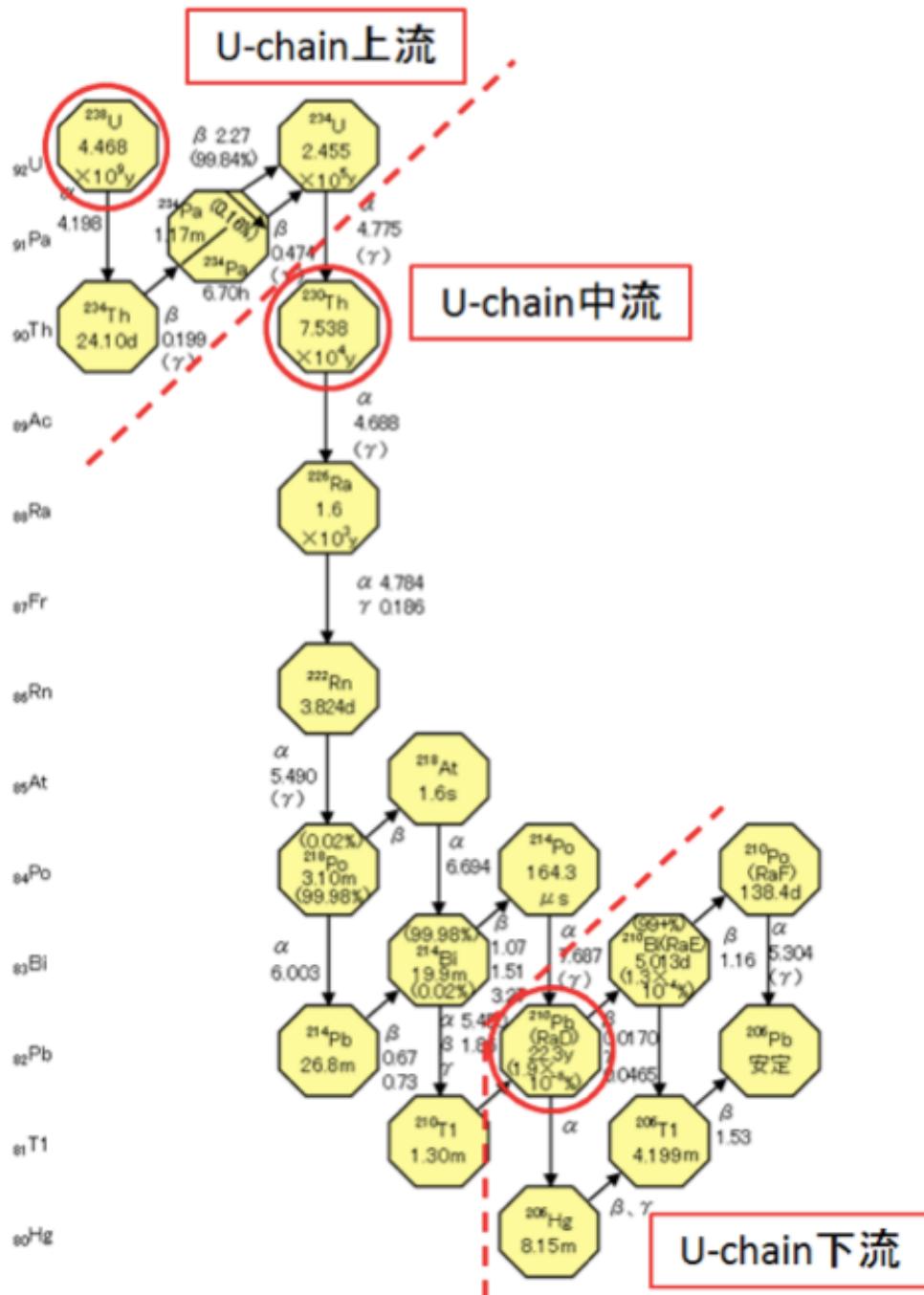


図 2.1: ウラン系列 [3]

2.2 トリウム系列

図 2.2 に示したトリウム系列は ^{232}Th から ^{208}Pb まで放射性崩壊する崩壊系列である。 ^{232}Th の半減期はおよそ 141 億年と非常に長く、ウラン系列の ^{238}U と同様にゲルマニウム検出器の構成部材に含まれている場合はバッググラウンド源となる。

このトリウム系列の中で、ゲルマニウム検出器のバッググラウンド候補として考えられる核種とそのガンマ線のエネルギーを表 2.2 に示す。

表 2.2: トリウム系列の核種のガンマ線エネルギー

核種	エネルギー [keV]
^{228}Ac	338
^{228}Ac	911
^{228}Ac	969
^{212}Pb	239
^{212}Bi	727
^{208}Tl	583
^{208}Tl	861
^{208}Tl	2615

2.3 アクチニウム系列

図 2.3 に示したアクチニウム系列は ^{235}U から ^{207}Pb まで放射性崩壊する崩壊系列である。 ^{235}U もウラン、トリウム系列と同様に半減期はおよそ 7.1 億年と長く、ゲルマニウム検出器の構成部材に含まれている場合はバッググラウンド源となる。

このアクチニウム系列の中で、ゲルマニウム検出器のバッググラウンド候補として考えられる核種とそのガンマ線のエネルギーを表 2.3 に示す。

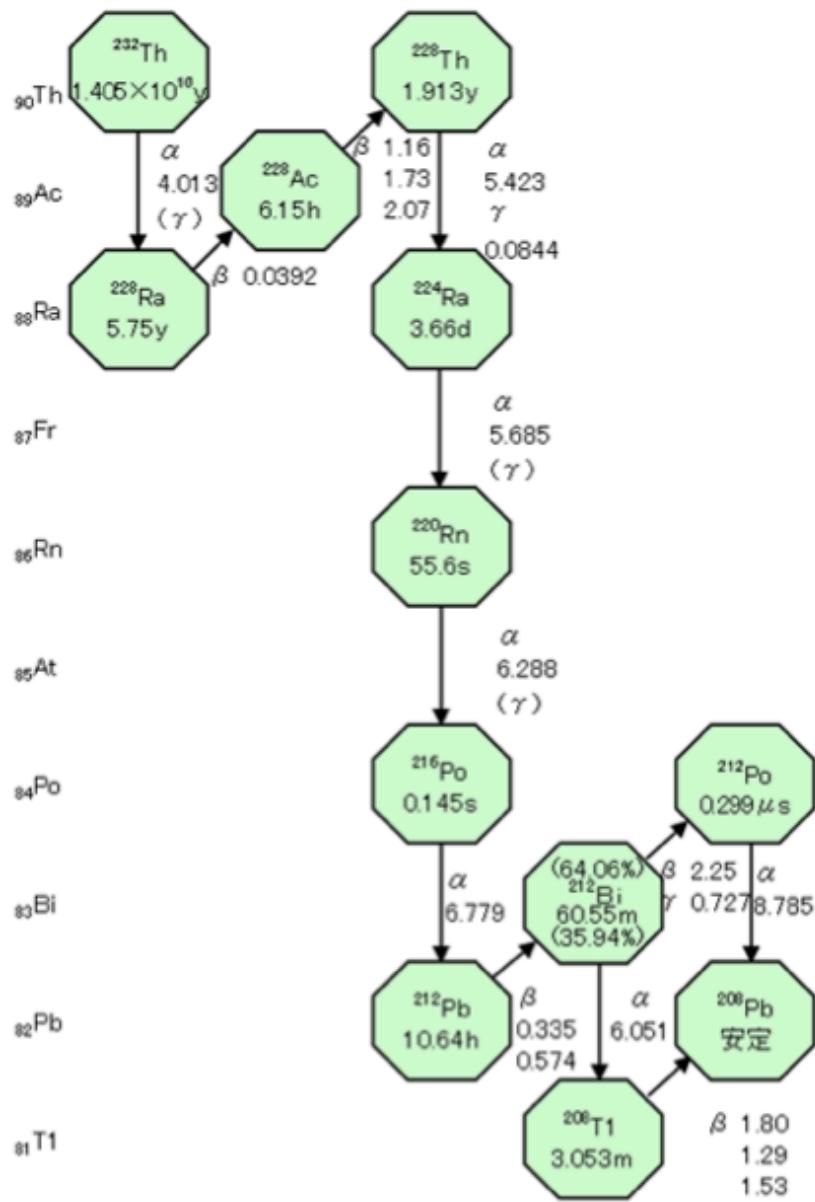


図 2.2: トリウム系列 [3]

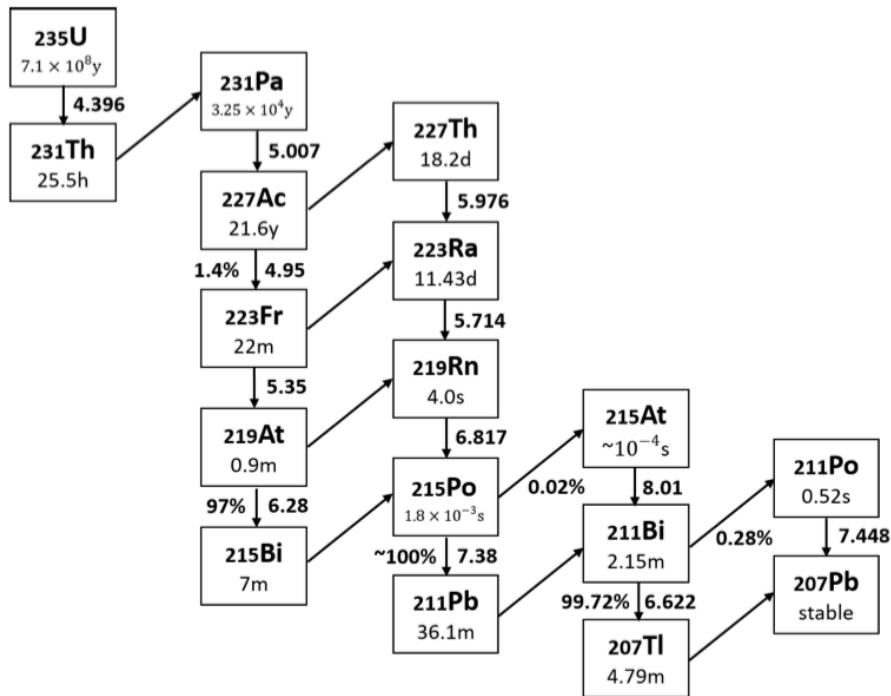


図 2.3: アクチニウム系列 [5]

表 2.3: アクチニウム系列の核種のガンマ線エネルギー

核種	エネルギー [keV]
^{235}U	144
^{235}U	163
^{235}U	205
^{231}Th	84
^{231}Pa	284
^{227}Th	256
^{223}Ra	154
^{223}Ra	269
^{219}Rn	271
^{219}Rn	402
^{211}Pb	405
^{211}Pb	427
^{211}Pb	832

2.4 その他の放射性不純物

ウラン系列やトリウム系列の放射性不純物の他にも、 ^{60}Co や ^{40}K といった放射性不純物がゲルマニウム検出器のバッググラウンドになる。これらの核種はゲルマニウム検出器が地下に搬入される前に、地上で宇宙線（主に宇宙線ミューオン）を浴び検出器の構成部材中で原子核破碎が起きて生成されるものである。よってこれらの放射性不純物は、検出器を神岡地下実験室に搬入した後は宇宙線の侵入が少ないために徐々に減少していく。

ウラン、トリウム、アクチニウム系列以外でゲルマニウム検出器のバッググラウンド候補として考えられる放射性核種とそのガンマ線のエネルギー、半減期を表 2.4 に示す。

表 2.4: ウラン、トリウム、アクチニウム系列以外の放射性核種のガンマ線エネルギーと半減期 [6]

核種	エネルギー [keV]	半減期
^{60}Co	1173	5.27 年
^{60}Co	1333	5.27 年
^{57}Co	136	272 日
^{58}Co	810	70.9 日
^{40}K	1461	1.25×10^9 年
^{137}Cs	662	30.1 年
^{26}Al	1809	7.17×10^5 年
^{65}Zn	1116	244 日

2.5 制動放射

電子などの荷電粒子が原子核近くを通過するときに電界によって減速され、その時に失ったエネルギーを電磁波である X 線として放出する。この現象を制動放射と呼ぶ。また、制動放射によって放出された X 線を制動放射線と呼ぶ。制動放射線のスペクトルは連続となっており、そのエネルギー損失は (2.1) 式 [7] のように電子のエネルギーに比例し、標的物質の原子番号のおよそ 2 乗に比例する。[8]

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2c^4} \left(4\ln\frac{2E}{m_0c^2} - \frac{4}{3} \right) \quad (2.1)$$

N は標的物質の原子密度、 E は電子のエネルギー、 Z は標的物質の原子番号、 m_0 は電子の質量をそれぞれ指す。ゲルマニウム検出器のバッググラウンドの候補として、 ^{210}Bi のベータ崩壊で発生する 1.16 MeV の電子による制動放射が挙げられる。

2.6 ゲルマニウム検出器で測定されたバッググラウンド

神岡地下実験室 Lab-C に設置されているゲルマニウム検出器を用いたバッググラウンド測定を 2021 年 12 月と 2022 年 7 月の 2 回行った。バッググラウンド測定時は、サンプルスペースにサンプル試料を入れずに測定を行う。図 2.4 にバッググラウンド測定時のエネルギースペクトルを示す。

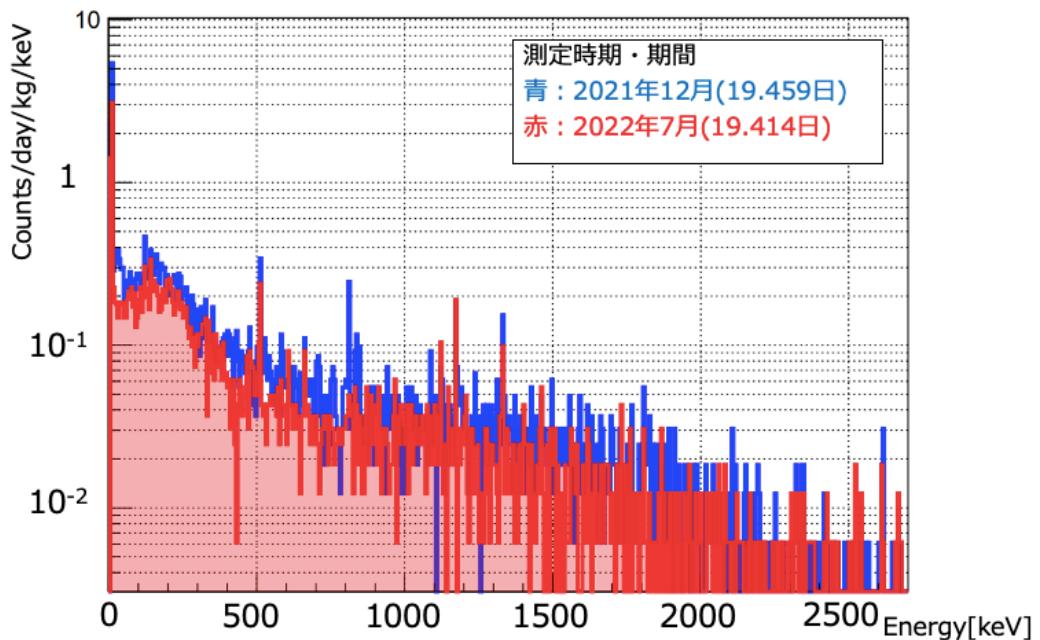


図 2.4: ゲルマニウム検出器のバッググラウンド測定時のエネルギースペクトル

青いスペクトルが 2021 年 12 月に測定したもの、赤いスペクトルが 2022 年 7 月に測定したものである。全体的に 2022 年 7 月に測定したバッググラウンドが 2021 年 12 月の結果を下回っている。40~2700 keV の連続成分でカウントレートを見ると 2021 年のものが 147 count/keV、2022 年のものが 102 count/keV となっており、神岡地下実験室に納入後時間経過と共にバッググラウンドが低減している。図 2.5 は図 2.4 をエネルギー領域ごとに拡大したものである。いずれの図も横軸はエネルギー [keV]、縦軸は [Counts/day/kg/keV] となっている。

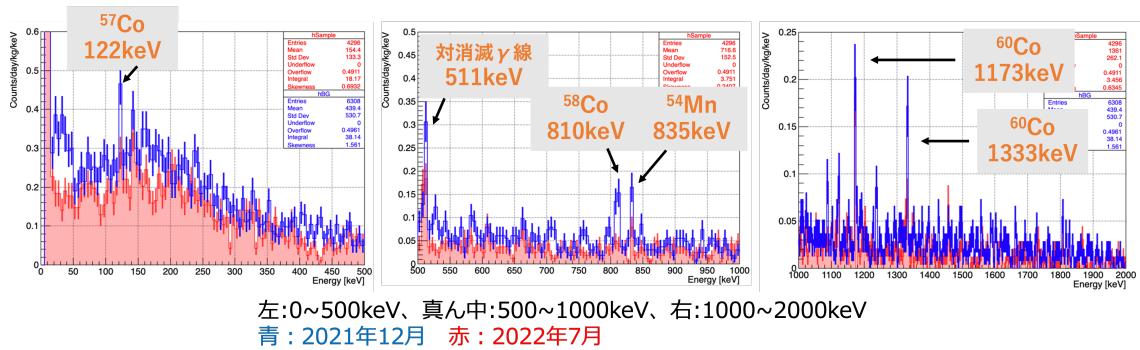


図 2.5: 図 2.4 のエネルギースペクトル拡大図

図 2.5 に示した宇宙線による原子核破碎によって生成された放射性不純物からのガンマ線のエネルギーピークは、2021 年 12 月の測定から 2022 年 7 月の測定にかけて減少傾向となっている。2021 年 12 月の各放射性不純物のデータを 1 として 2022 年 7 月のデータの割合を表 2.5 に示す。表 2.5 を見ると、半減期が 70.9 日である ^{58}Co が最も減少が顕著であった。よって 2.4 節で述べたように、ゲルマニウム検出器が地下に設置されたことで検出器に侵入する宇宙線の量が大幅に減少し、宇宙線が起源となるバッゲグラウンド源が時間経過と共に減少したと結論できる。

表 2.5: 宇宙線による原子核破碎によって生成された放射性不純物からのガンマ線のエネルギーピーク(割合は 2021 年 12 月測定時を 1 としたときの 2022 年 7 月の値)

核種	^{57}Co	対消滅 γ 線	^{58}Co	^{54}Mn	^{60}Co	^{60}Co
エネルギー [keV]	122	511	810	835	1173	1333
半減期	272 日	—	70.9 日	312 日	5.27 年	5.27 年
割合	0.87 ± 0.51	0.94 ± 0.27	0.11 ± 0.14	0.77 ± 0.61	1.25 ± 0.44	0.62 ± 0.30

第3章 Geant4シミュレーション

本研究では、Geant4をベースにした検出器シミュレーションを使用した。Geant4とはスイスの機関であるCERNが無償提供しているシミュレーション用ツールキットとなっており、宇宙素粒子分野や医療分野でよく使用されている。Geant4には電子や光子などの粒子の動きや相互作用がライブラリに収められており、必要なライブラリを用いてプログラムを作成した。

3.1 プログラム全体の概要

図3.1に、使用したプログラムの全体図を示す。このプログラムは2020年に東北大学の中村輝石氏が作成したものを、本シミュレーション用に改造したものである。主な流れとして、サンプルの情報を config.txt から読み取った main.cc が青枠で囲ったファイル群を参照しながらプログラムを実行し、最終的に energy_deposit.txt という結果出力のファイルを生成する、というものである。

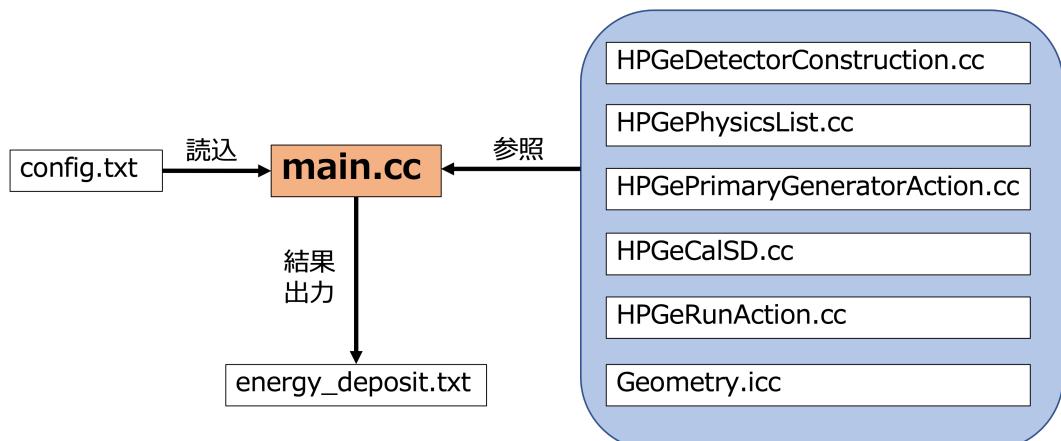


図 3.1: シミュレーションプログラム

3.2 各ファイルの特徴

以下にそれぞれのファイルの特徴を述べる。

main.cc

図 3.1 にあるように、main.cc は多くのファイルからジオメトリやサンプルの情報を読み込むプログラムの中心を担っている。各情報を読み込み後、放射性不純物を発生させる条件や、出力させるファイル名の指示などを行う。

config.txt

config.txt では、放射性不純物を発生させるサンプル情報の入力を主に行っている。シミュレーションを行う検出器構成部材やサンプルの質量、形状や材質、シミュレーションを行う回数を入力することができる。

HPGeDetectorConstruction.cc

config.txt ではサンプルの質量や材質を設定するが、HPGeDetectorConstruction.cc ではサンプルの形状の詳細な設定を行うことができる。

HPGePhysicsList.cc

シミュレーション時に考慮する粒子の動きや相互作用といった物理の設定を行う。

HPGePrimaryGeneratorAction.cc

HPGePrimaryGeneratorAction.cc ではシミュレーションの途中経過などを出力でき、正常にプログラムが動いているかを確認することができる。

HPGeCalSD.cc

HPGeCalSD.cc は、1 イベントごとに出力結果の情報を得るファイルとなっている。各イベントで得られる位置情報やエネルギーの情報など、設定を変えることで様々な情報を取得することができるようになっている。

HPGeRunAction.cc

HPGeRunAction.cc は、HPGeCalSD.cc から得られた出力情報を読み込んで出力ファイルに書き込む内容を指示するものである。

Geometry.icc

Geometry.icc では、ゲルマニウム検出器全体のジオメトリの設定を行う。シミュレーションを行うゲルマニウム検出器によってジオメトリが異なるため、各ゲルマニウム検出器用にファイル名が異なっている。本研究で使用したファイル名は「GeometryUGAPGe.icc」である。UGAP はこの研究が行われている、新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の変化 (Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics)」の名前に由来している。[9]

energy_deposit.txt

プログラムを実行して最後に得られる出力ファイルである。本シミュレーションでは、ゲルマニウム検出器のシールドなどのサンプルに含まれる放射性不純物が放出したガンマ線がゲルマニウム結晶部分で落としたエネルギー（エネルギー・デポジット）が 0 keV よりも大きい場合に、そのエネルギーの数値を出力するものである。

3.3 可視化

このプログラムを実行する際、作成したジオメトリや放射性不純物の発生場所などが自分の意図したものであるかを可視化して確認することができる。図 3.2 にゲルマニウム検出器をシミュレーション実行時に可視化したものを見せる。可視化すると、HPGeDetectorConstruction.cc や GeometryUGAPGe.icc で定義したジオメトリが正しく設定できていることやサンプルから出る緑色のガンマ線の軌跡が確認できる。この図は例として、アクリル製のサンプル台から高さ 8.3cm のところにある ^{133}Ba 線源をサンプルとして 10 イベント発生させたものである。図 3.2 のようにサンプルと放射性不純物の発生位置などを確認しながら、シミュレーションを行った。

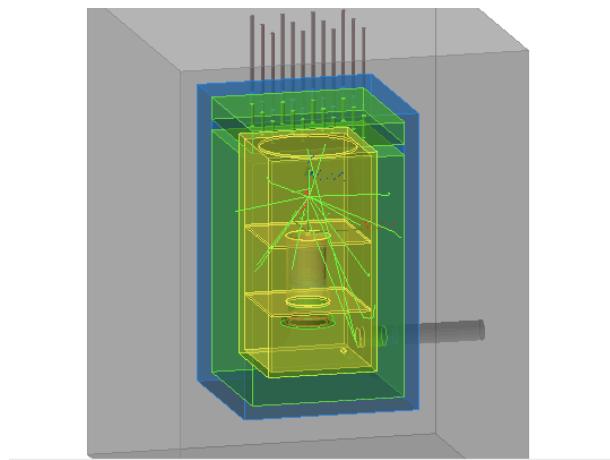


図 3.2: ゲルマニウム検出器をシミュレーション実行時に可視化した様子

第4章 モンテカルロシミュレーション

乱数を用いてランダムに事象を発生させてシミュレーションを行うことをモンテカルロシミュレーションと呼ぶ。本研究では、第3章で述べた Geant4 プログラムをベースにモンテカルロシミュレーションを行い各検出器部材から放射性不純物を発生させ、ゲルマニウム検出器でどれだけのエネルギーが検出されるかを見積もった。

4.1 ガンマ線源を用いた検出器較正作業

ゲルマニウム検出器の組み立てやセットアップ作業を行った後、この検出器が正常に運用できるのか確認するため、2021年8月18日にガンマ線源を用いて検出器較正作業を行った。使用したガンマ線源は⁶⁰Co、¹³³Ba、¹³⁷Cs の三種類である。以下の表 4.1 に各ガンマ線源の半減期と強度、測定を行った時間（ライブタイム）を示す。また、表 4.1 の強度に関しては、2002年1月25日に測定が行われて得られた強度であり、キャリブレーション実施日である 2021 年 8 月 18 日時点の強度は 2002 年のデータを元に半減期を用いて算出した。

表 4.1: 各ガンマ線源の半減期、強度、ライブタイム

放射線源	⁶⁰ Co	¹³³ Ba	¹³⁷ Cs
半減期	5.271 年	10.51 年	30.01 年
強度 (2002/1/25)	16.3kBq	15.7kBq	18.7kBq
強度 (2021/8/18)	1.24kBq	4.33kBq	11.9kBq
ライブタイム	1195 秒	661 秒	447 秒

図 4.1、4.2 に使用したガンマ線源の構造を示す。図 4.1 のように円柱形のアクリルの赤い丸で囲っている部分に直径 7mm の円盤状の各ガンマ線源が配置されている。このガンマ線源を図 4.2 のように台座に装着し、ゲルマニウム検出器のサンプルスペースの真ん中に来るよう配置して測定を行った。そして上記を同じ条件でモンテカルロシミュレーションを行って得られた予想エネルギースペクトルと測定結果を比較し、ゲルマニウム検出器のエネルギー分解能や検出効率を算出した。

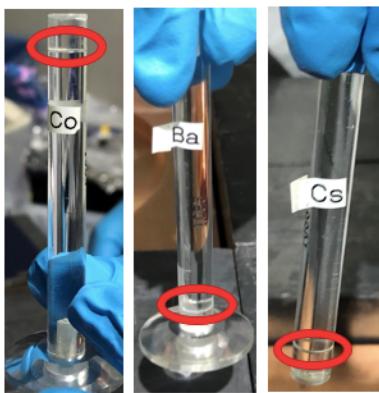


図 4.1: 較正に使用したガンマ線源

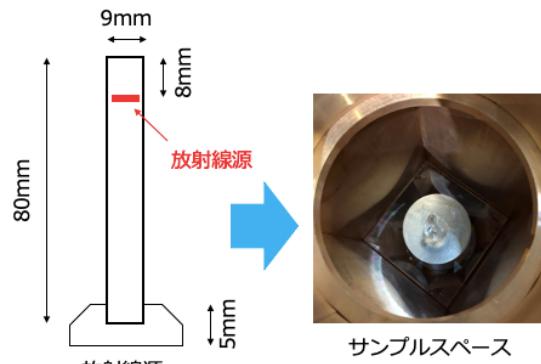


図 4.2: ガンマ線源のサンプルスペースへの設置

4.1.1 ガンマ線源のエネルギースペクトル

ゲルマニウム検出器で各ガンマ線源の測定を行った結果、それぞれ以下の図 4.3、4.4、4.5 のようなエネルギースペクトルが得られた。黒のスペクトルがゲルマニウム検出器の測定結果、赤のスペクトルがモンテカルロシミュレーションの結果である。

シミュレーション結果では実測データのライブタイムに合わせて放射性不純物の崩壊数を規格化している。これらのエネルギースペクトルを見ると、各ガンマ線源が放出するガンマ線エネルギー以下のエネルギー領域では、実測データとシミュレーション結果が良い一致を見せてている。また、⁶⁰Co の 1173 keV、1333 keV、¹³³Ba の 81 keV、276 keV、303 keV、356 keV、384 keV、¹³⁷Cs の 662 keV といった各ガンマ線源特有のガンマ線のエネルギーピークがはっきりと確認された。

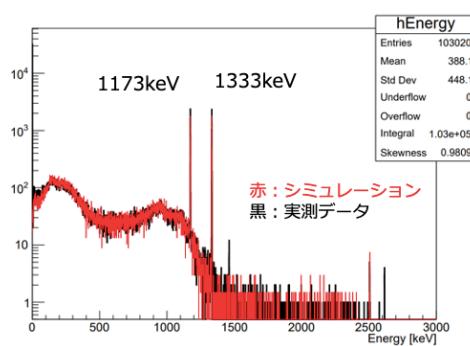


図 4.3: ⁶⁰Co のエネルギースペクトル

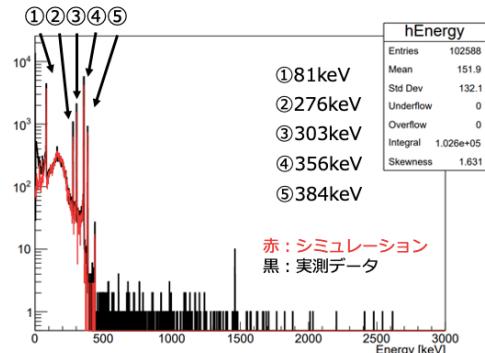


図 4.4: ¹³³Ba のエネルギースペクトル

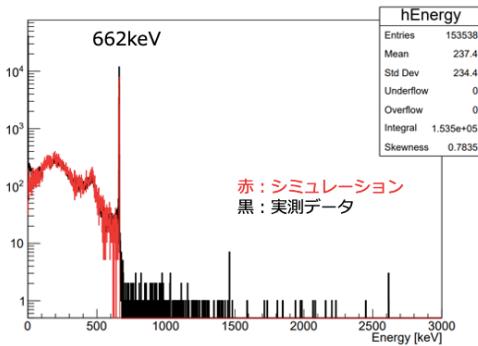


図 4.5: ^{137}Cs のエネルギースペクトル

4.1.2 エネルギー分解能

図 4.3～図 4.5 で得られた各エネルギーピークをガウスフィッティングしそれぞれの標準偏差 [keV] を求めた。またそれぞれ標準偏差を用いて半値全幅 (FWHM) を求めると、以下の表 4.2 のようになつた。これらの半値全幅は各エネルギーピークにおけるゲルマニウム検出器のエネルギー分解能を指す。

表 4.2: 各エネルギーピークのガウスフィッティング時の標準偏差とエネルギー分解能

放射線源	エネルギー [keV]	標準偏差 [keV]	エネルギー分解能 [keV]
^{60}Co	1173	0.832	1.96
	1333	0.857	2.01
^{133}Ba	81	0.650	1.53
	276	0.598	1.41
	303	0.675	1.58
	356	0.653	1.54
	384	0.646	1.52
	662	0.705	1.66

表 4.2 よりゲルマニウム検出器のエネルギー分解能は 1.41 から 2.01 keV の範囲で得ることができた。各エネルギー E とエネルギー分解能 R を直線フィットすると、

$$R = 0.0005E + 1.3888 \quad (4.1)$$

となり、エネルギー分解能のエネルギー依存性を確認することができた。このエネルギー分解能を以後のモンテカルロシミュレーションに実装した。

4.1.3 検出効率

得られた各ガンマ線エネルギーピークからそれぞれ検出効率を算出した結果、図 4.6 のようになつた。青点が実測データから求めた検出効率、赤点がシミュレーション結果から求めた検出効率である。

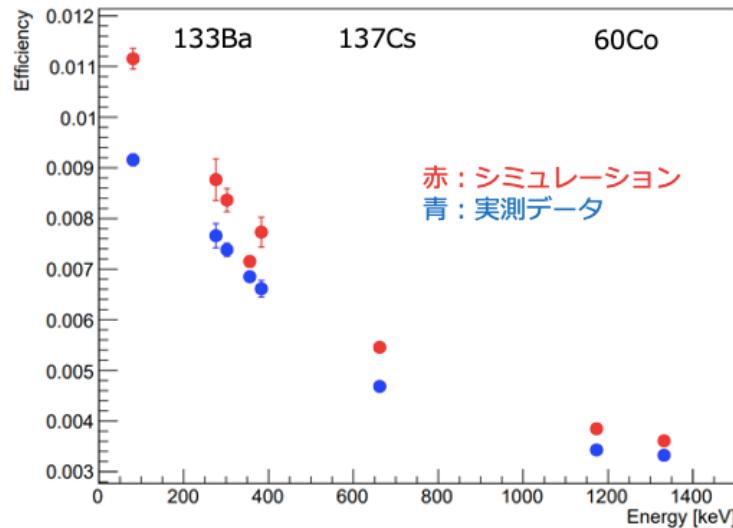


図 4.6: 検出効率の比較

図 4.6 から、エネルギーが低いほど検出効率が高い傾向が見て取れる。また、全体的にシミュレーション結果から得られた検出効率が実測データの検出効率を上回っている。各エネルギーの検出効率を比較するとおよそ 15% の差が生じていることがわかつた。およそ 15% の精度の違いは神岡地下実験室に設置されている他のゲルマニウム検出器でも同様の傾向が見られており、本研究で用いるゲルマニウム検出器の本格運用に問題がないと結論できた。

4.2 バッググラウンドのシミュレーション

4.2.1 検出器部材中のバッググラウンド候補

まず、ゲルマニウム検出器の各構成部材を図 4.7 のように分けてシミュレーションを行つた。シールドに関しては銅と鉛などの材質の違いと、放射性不純物含有量の違いによって分別している。シミュレーションを行つた検出器部材とバッググラウンド候補は、表 4.3 の通りである。

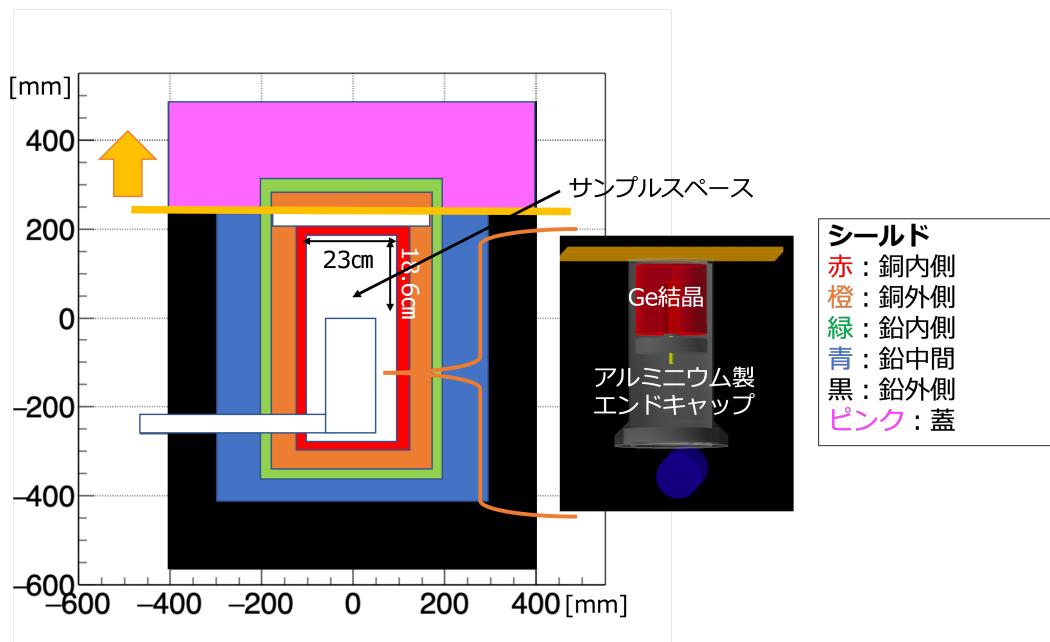


図 4.7: ゲルマニウム検出器の構成部材

表 4.3: シミュレーションを行った検出器部材とバッググラウンド候補

検出器部材	バッググラウンド候補
銅内側シールド	^{210}Pb
銅外側シールド	^{210}Pb 、 ^{40}K 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{232}Th
鉛(内側、中間、外側)シールド	^{210}Pb 、 ^{40}K 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U
サンプルスペース中空気	^{222}Rn
アルミニウム製エンドキャップ	^{210}Pb 、 ^{26}Al
ゲルマニウム結晶	^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn

続いて、シミュレーションに用いた各検出器部材に含まれる各放射性不純物の含有量についてそれぞれ述べる。

ゲルマニウム検出器による測定結果

遮蔽体に用いられる銅および鉛ブロック中の放射性不純物からのバッググラウンドのシミュレーションでは、表 4.4 にまとめた別のゲルマニウム検出器による測定結果の数値を用いた。別のゲルマニウム検出器による銅および鉛ブロックの測定は 2016 年から 2017 年に行われた。

表 4.4: 別のゲルマニウム検出器による遮蔽体材料中の放射性不純物含有量の測定結果 [太字 Bq/kg、太字以外 mBq/kg]

放射性不純物	シールド			
	銅外側	鉛内側	鉛中間	鉛外側
Middle U-chain	<1.05	<1.24	<2.36	<3.93
Upper U-chain	<33.8	<45.0	<72.0	<79.4
²¹⁰ Pb	<491	5.78±0.94	38.9±2.9	175.1±8.6
Th-chain	<0.80	<0.98	<1.34	<2.41
⁴⁰ K	<10.3	<8.70	<16.0	<66.3
⁶⁰ Co	<0.62	<0.19	<0.38	<0.14
¹³⁷ Cs	<0.60	<0.99	<1.14	<2.69
²³⁵ U	<11.5	<110	<197	<755

表の太字部分は単位が Bq/kg であり、有意な数値となっている。よって鉛シールド内には ²¹⁰Pb が有意に含まれていることが確認された。また、各測定データにはウラン系列上流、中流、トリウム系列も含まれているが、実際にゲルマニウム検出器で測定されたバッググラウンドスペクトル(図 2.4) ではこれらの放射性不純物による固有のエネルギーピークが有意には確認されていない。従って、ウラン系列上流部の ²³⁸U とトリウム系列 ²³²Th については測定データがある中で一番ゲルマニウム結晶に近い、銅外側シールドのみシミュレーションを行うこととした。一方で鉛シールドについてはウラン系列下流部の ²¹⁰Pb のみがバッググラウンドに影響を与えるレベルで検出器部材に含まれているとしてシミュレーションを行った。

アルミニウム製エンドキャップ

エンドキャップ部分に使用されているアルミニウムサンプルを別のゲルマニウム検出器で測定を行ったところ、放射性不純物のエネルギーピークが確認されず、どの放射性不純物も有意に含まれていないという結果となった。続いて表面アルファ検出器 Ultra-Lo1800 (XIA LLC 製) [10] でサンプル試料表面から発生するアルファ線の測定を行ったところ、ウラン系列の ²¹⁰Po 固有のアル

ファ線である 5.3 MeV が有意に確認された。よってゲルマニウム検出器では確認できなかったが、 ^{210}Po の上流部分に当たる ^{210}Pb がアルミニウムのバルク中に含まれていることが考えられる。そこで以下の手順で ^{210}Pb の含有量の導出を行った。[10]

1. 表面アルファ検出器によるエンドキャップ材料であるアルミニウムの測定で、 $2.5 < E < 4.8 \text{ MeV}$ に $1.02 \times 10^{-3} \text{ alpha/cm}^2/\text{hr}$ のアルファ線バググラウンドが観測された。
2. 上記の結果より ^{210}Pb の含有量を求めるため、Geant4 を用いて表面アルファ検出器での測定状況を再現したシミュレーションを行った。 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ mm}$ で質量が $2.7 \times 10^{-5} \text{ kg}$ のアルミニウムの板から 5.3 MeV のアルファ線を 10000 発発生させ、板から出てきたエネルギーが $2.5 < E < 4.8 \text{ MeV}$ の条件を満たすイベント（バルク事象）を得るというものである。図 4.8 は、このシミュレーションのイベントディスプレイである。

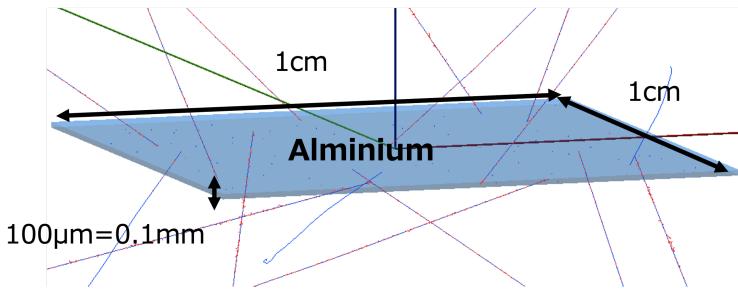


図 4.8: アルミニウム板から 5.3 MeV のアルファ線を発生させるシミュレーションのイベントディスプレイ

3. 2 のシミュレーション結果より、 ^{210}Pb の含有量を求めるための変換係数を求めた。 $2.5 < E < 4.8 \text{ MeV}$ の条件を満たすイベントは合わせて 558 イベントであった。

$$[\text{発生イベント数/kg}] / [\text{カウント数}/\text{cm}^2 \times 3600 \text{ s}] \quad (4.2)$$

$$= [10000 / (2.7 \times 10^{-5})] / [558 / 1 \times 3600] \quad (4.3)$$

$$= 1.84 \times 10^2 (\text{Bq/kg}) / (\text{alpha/cm}^2/\text{hr}) \quad (4.4)$$

4. 1 で得られた表面アルファ検出器の測定結果と 3 で求めた変換係数を用いて、以下のように ^{210}Pb の含有量を求めた。

$$1.02 \times 10^{-3} (\text{alpha/cm}^2/\text{hr}) \times 1.84 \times 10^2 (\text{Bq/kg}) / (\text{alpha/cm}^2/\text{hr}) \quad (4.5)$$

$$= 1.88 \times 10^{-1} \text{ Bq/kg} \quad (4.6)$$

また、²⁶Alについてはアルミニウム製エンドキャップの素材である²⁷Alの同位体として、アルミニウム製エンドキャップ内に存在しバッゲングラウンド源となる可能性がある。しかし、ゲルマニウム検出器などの含有量の測定結果が全くないため、シミュレーションの条件を設定して行った。

サンプルスペース中空気、銅内側シールド

空気中にはラドンが多く存在しており、これはゲルマニウム検出器にとっても大きなバッゲングラウンド源となり得る。そこでサンプルスペース内の空気中に含まれるラドンについてシミュレーションを行った。サンプルスペースにはラドンの含有量を減らしたラドンフリーエアが絶えず供給されているが、ラドン検出器で測定された結果[11]によると $<0.1\text{ mBq}/\text{m}^3$ で²²²Rnが含まれている。

またラドンにはウラン系列の²²²Rnとトリウム系列の²²⁰Rnがあるが、²²⁰Rnの半減期が55秒と短く、ゲルマニウム検出器のサンプルスペースに運ばれてくるラドンフリーエア中に含まれていたとしても、配管を通過している間にほとんどが放射性崩壊を起こしてなくなってしまうと考えられる。従って、本シミュレーションでは半減期が3.8日のウラン系列²²²Rnのみを扱った。

銅内側シールドについては表4.5のようにゲルマニウム検出器で測定した結果が存在せず、表面アルファ検出器で測定された結果[10]により²¹⁰Pbが17 mBq/kgから40 mBq/kgのレートで含まれていることがわかっている。シミュレーションでは上限値である40 mBq/kgを使用した。

ゲルマニウム結晶

このゲルマニウム検出器は製造されたフランスから日本に船で運ばれ、神岡地下実験室に納入される前までは地上にあった。地上にある期間では、宇宙線ミューオンの影響を受け、ゲルマニウム結晶中のゲルマニウム原子が原子核破碎を起こして放射性不純物が生成されてしまう。ここで主に生成される放射性不純物として、ゲルマニウムの質量数72.6よりも小さい核種である⁵⁷Co、⁵⁸Co、⁶⁵Znが挙げられる。

ゲルマニウム結晶についてサンプルを何らかの検出器で測定したデータは存在しないが、図2.4のバッゲングラウンド測定結果ではこれらの固有のエネルギーピークが確認されているものもある。よって、各シールドやアルミニウム製エンドキャップのシミュレーション結果や実際のバッゲングラウンド測定データと比較し、原子核破碎によってゲルマニウム結晶に含まれている放射性不純物含有量を概算することとした。

4.2.2 シミュレーションのライブタイム

本シミュレーションでは、ライブタイムが100日となるように設定した。これは図2.4で示したゲルマニウム検出器のバッゲングラウンド測定のライブタイムが約20日であり、それと比較して十分に大きなシミュレーションデータを蓄積するためである。ライブタイムを100日で設定し、各放射性不純物含有量のデータと各検出器部材の質量を用いてシミュレーションカウント（各検出器部

材中の放射性不純物の崩壊数) を以下のように求めることができる。

$$\boxed{\text{ライブタイム [s]}} = \frac{\text{シミュレーションカウント (放射性不純物の崩壊数)}}{\text{放射性不純物含有量 [Bq/kg]} \times \text{検出器部材の質量 [kg]}} \quad (4.7)$$

4.2.1 節で挙げた各放射性不純物含有量と (4.7) 式を用いて、検出器部材中の放射性不純物について崩壊数を求めると、表 4.5、4.6 のようになった。

表 4.5: 各遮蔽体中の放射性不純物のシミュレーションでの崩壊数

放射性不純物	シールド (括弧内は質量 [kg])				
	銅内側 (50.56)	銅外側 (377.2)	鉛内側 (355.7)	鉛中間 (1558)	鉛外側 (3141)
²¹⁰ Pb	1.747×10^7	1.600×10^9	1.775×10^{10}	5.236×10^{11}	4.755×10^{14}
⁴⁰ K	-	3.357×10^7	2.673×10^7	2.154×10^8	1.799×10^9
⁶⁰ Co	-	2.021×10^6	5.838×10^5	5.115×10^6	3.799×10^6
¹³⁷ Cs	-	1.955×10^6	3.042×10^6	1.534×10^7	7.300×10^7
²³⁵ U	-	3.748×10^7	3.380×10^8	2.652×10^9	2.049×10^{10}
²³⁸ U	-	1.102×10^8	-	-	-
²³² Th	-	2.607×10^6	-	-	-

表 4.6: 遮蔽体以外の検出器部材中の放射性不純物のシミュレーションでの崩壊数

放射性不純物	検出器部材 (括弧内は質量)		
	サンプルスペース中空気 (30.29g)	アルミニウム製エンドキャップ (477.8g)	ゲルマニウム結晶 (1.730kg)
²²² Rn	2.029×10^3	-	-
²¹⁰ Pb	-	7.748×10^5	-
²⁶ Al	-	1.000×10^5	-
⁵⁷ Co	-	-	1.035×10^4
⁵⁸ Co	-	-	1.035×10^4
⁶⁵ Zn	-	-	1.035×10^4

ただしエンドキャップの ²⁶Al とゲルマニウム結晶の ⁵⁷Co、⁵⁸Co、⁶⁵Zn のシミュレーションでは含有量の測定データがないため、²⁶Al では 1.000×10^5 回、⁵⁷Co、⁵⁸Co、⁶⁵Zn では 1.035×10^4 回ずつ放射性不純物を発生させた。ゲルマニウム結晶にはガンマ線を検出することができない不感層

とガンマ線を検出することができる有感層があるが、これらを分けてシミュレーションを行った。シミュレーションでの崩壊数が 1.035×10^4 回となっているが、不感層と有感層の体積比が 1:29 であることから、崩壊数も 345:10000 としているためである。この崩壊数がライブタイム 100 日に当たると仮定し、ここから (4.7) 式を用いて以下のように放射性不純物含有量を仮定することとした。

$$100 \times 86400 \text{ s} = \frac{1.0 \times 10^5 \text{ 回}}{0.4778 \text{ kg} \times {}^{26}\text{Al の含有量 [Bq/kg]}} \quad (4.8)$$

$${}^{26}\text{Al の含有量} = 24.22 \text{ mBq/kg} \quad (4.9)$$

$$100 \times 86400 \text{ s} = \frac{1.035 \times 10^4 \text{ 回}}{1.673 \text{ kg} \times {}^{57}\text{Co,} {}^{58}\text{Co,} {}^{65}\text{Zn の含有量 [Bq/kg]}} \quad (4.10)$$

$${}^{57}\text{Co,} {}^{58}\text{Co,} {}^{65}\text{Zn の含有量} = 0.6918 \text{ mBq/kg} \quad (4.11)$$

鉛外側シールドの ${}^{210}\text{Pb}$ のシミュレーションについては、シミュレーションでの崩壊数がおよそ 475 兆回となってしまい、膨大な時間を要することがわかった。よって時間の都合上およそ 1 兆回分 (ライブタイム 0.262 日) のシミュレーションを行い、バッググラウンドへの影響の程度を評価することとした。

4.2.3 シミュレーション結果

各検出器部材のバッググラウンド候補についてシミュレーションを行った結果をそれぞれ示す。

銅内側シールド

銅内側シールド中の、 ${}^{210}\text{Pb}$ からのエネルギースペクトルを図 4.9 に示す。図 4.9 を見ると、 ${}^{210}\text{Pb}$ 固有のガンマ線のエネルギーである 46.5 keV のピークが確認できた。また、100 keV 付近をピークとして山型のスペクトルとなっていることがわかった。これは、 ${}^{210}\text{Pb}$ の娘核である ${}^{210}\text{Bi}$ の 1.16 MeV のベータ線による制動放射の連続成分であると考えられる。

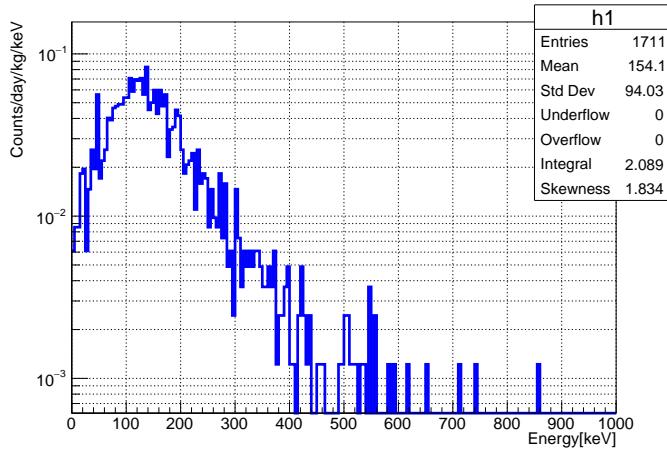


図 4.9: 銅内側中の ^{210}Pb からのバググラウンドスペクトル

銅外側シールド

銅外側シールド中の ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U 、 ^{210}Pb 、 ^{238}U 、 ^{232}Th からのエネルギースペクトルを図 4.10 から図 4.16 に示す。

図 4.10 では ^{60}Co の 1173 keV、1333 keV、図 4.11 では ^{40}K の 1461 keV、図 4.12 では ^{137}Cs の 662 keV、図 4.13 のアクチニウム系列では 403 keV、427 keV、832 keV など、4.15 のウラン系列では 352 keV や 609 keV など、図 4.16 のトリウム系列についても 583 keV、911 keV などがピークとして確認された。一方で図 4.14 では、 ^{210}Pb のピークである 46.5 keV は確認できなかった。これらのシミュレーション結果の和は図 2.4 のバググラウンド測定時のエネルギースペクトルと比較して 1 桁以上大きいことがわかった。よって、他のゲルマニウム検出器で測定された上限値よりも有意に放射性不純物含有量が少ない可能性が高いと考えられる。

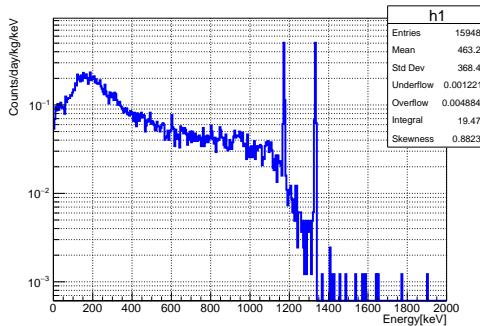


図 4.10: 銅外側中の ^{60}Co からのバググラウンドスペクトル

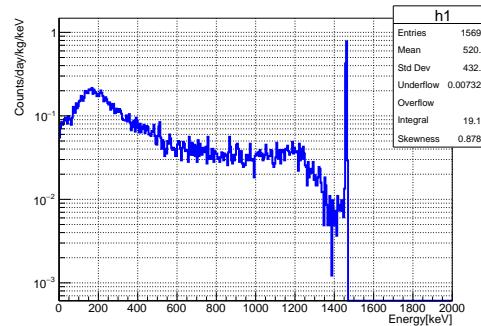


図 4.11: 銅外側中の ^{40}K からのバググラウンドスペクトル

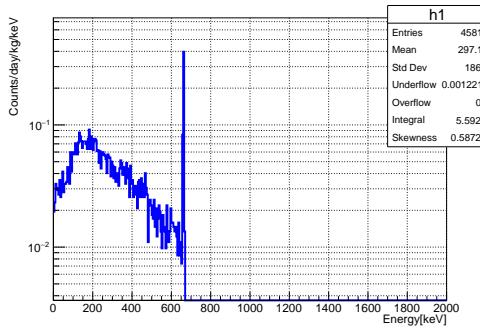


図 4.12: 銅外側中の ^{137}Cs からのバッググラウンドスペクトル

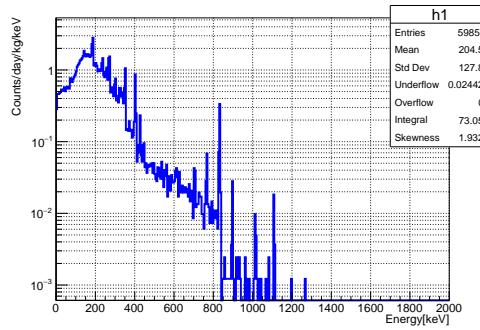


図 4.13: 銅外側中の ^{235}U からのバッググラウンドスペクトル

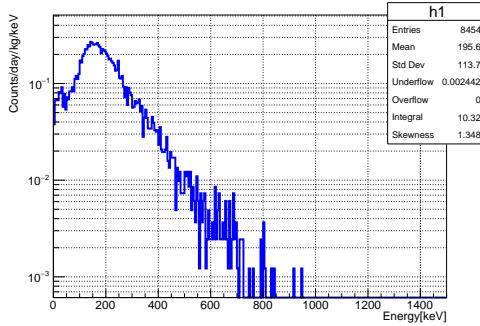


図 4.14: 銅外側中の ^{210}Pb からのバッググラウンドスペクトル

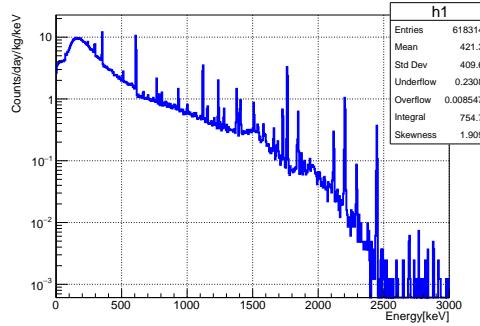


図 4.15: 銅外側中の ^{238}U からのバッググラウンドスペクトル

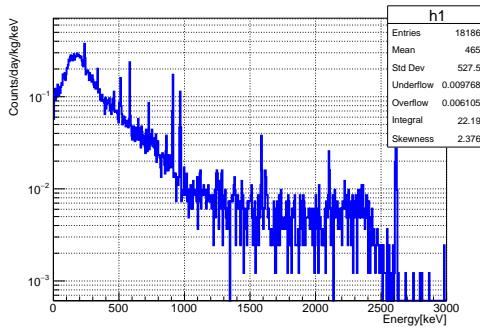


図 4.16: 銅外側中の ^{232}Th からのバッググラウンドスペクトル

鉛内側シールド

鉛内側シールド中の ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U 、 ^{210}Pb からのエネルギースペクトルを図 4.17 から図 4.21 に示す。

図 4.17 ではわずかに ^{60}Co の 1173 keV、図 4.18 では ^{40}K の 1461 keV、図 4.19 ではわずかに ^{137}Cs の 662 keV のピークが確認できた。図 4.20 の ^{235}U については図 4.15 と比較してピークが 832 keV を除いて全体的に確認されなかった。銅外側シールドと鉛内側シールドのシミュレーション結果を各放射性不純物で比較すると、全ての放射性不純物で銅外側シールドの結果からおおよそ 1 衍下があり、銅のシールドより外側にあることで放射性不純物が遮蔽されていることがわかる。

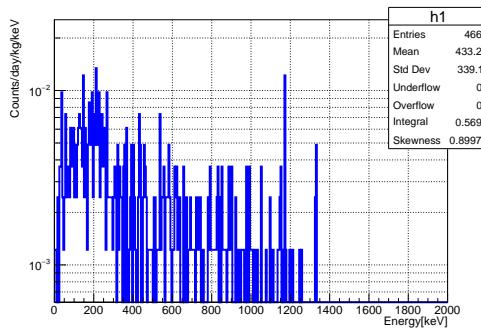


図 4.17: 鉛内側中の ^{60}Co からのバッググラウンドスペクトル

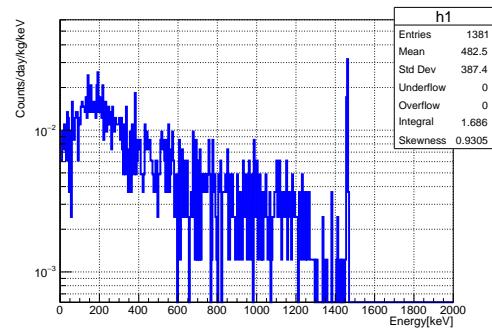


図 4.18: 鉛内側中の ^{40}K からのバッググラウンドスペクトル

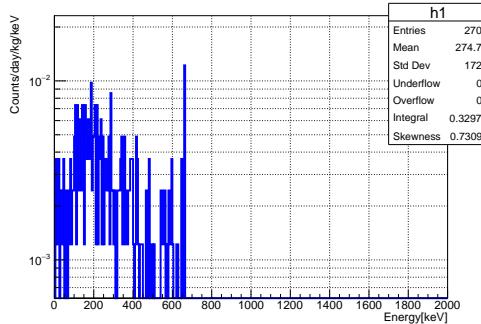


図 4.19: 鉛内側中の ^{137}Cs からのバッググラウンドスペクトル

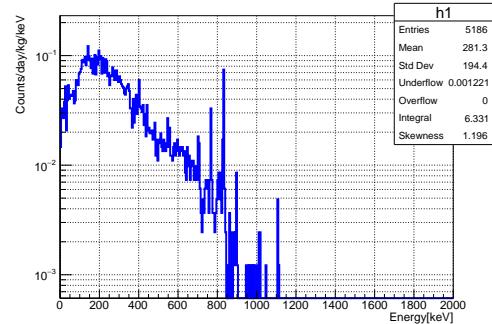


図 4.20: 鉛内側中の ^{235}U からのバッググラウンドスペクトル

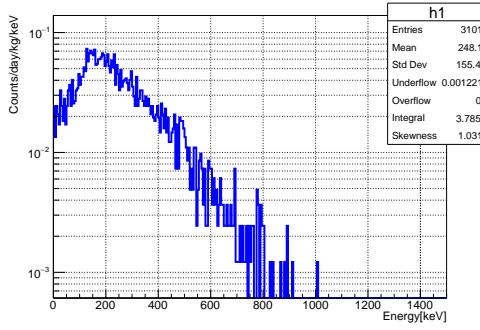


図 4.21: 鉛内側中の ^{210}Pb からのバググラウンドスペクトル

鉛中間シールド

鉛中間シールド中の ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U 、 ^{210}Pb からのエネルギースペクトルを図 4.22 から図 4.26 に示す。

鉛中間シールドのシミュレーションでは、図 4.23 の ^{40}K の 1461 keV の確認はできたが、他の放射性不純物についてはほとんどピークが確認できなかった。鉛内側シールドのシミュレーション結果と各放射性不純物で比較すると、全ての放射性不純物で鉛内側シールドの結果からおおよそ 1 枝下がり、銅のシールドに加え鉛のシールドが内側にあることでさらに放射性不純物が遮蔽されていることがわかる。

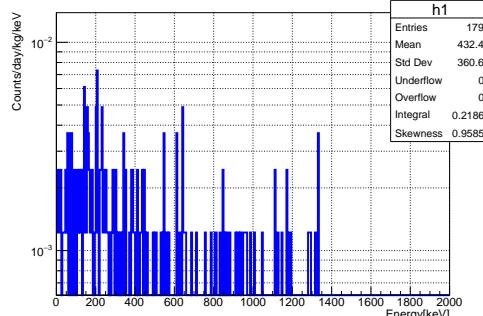


図 4.22: 鉛中間中の ^{60}Co からのバググラウンドスペクトル

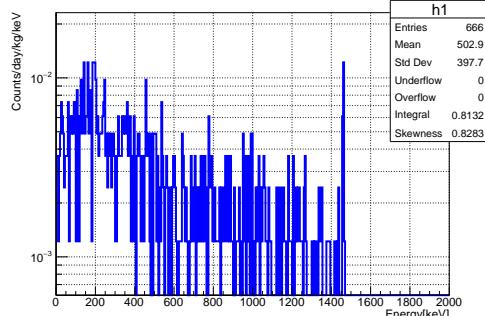


図 4.23: 鉛中間中の ^{40}K からのバググラウンドスペクトル

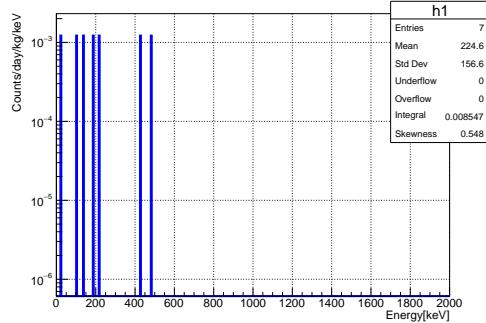


図 4.24: 鉛中間中の ^{137}Cs からのバッググラウンドスペクトル

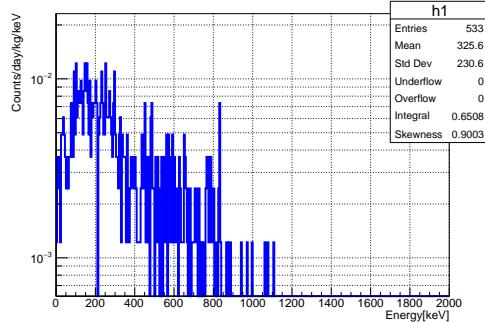


図 4.25: 鉛中間中の ^{235}U からのバッググラウンドスペクトル

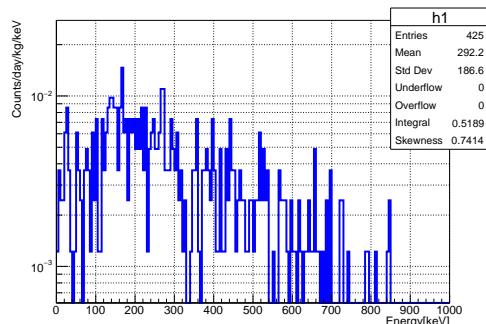


図 4.26: 鉛中間中の ^{210}Pb からのバッググラウンドスペクトル

鉛外側シールド

鉛外側シールド中で、 ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs ではエネルギーデポジットが全く確認されなかった。また、時間の都合上 1.247×10^{12} カウント分でシミュレーションを行った ^{210}Pb では、36.7 keV と 97.4 keV の 2 カウントのエネルギーデポジットを確認した。 1.247×10^{12} カウントはライブタイムで 0.262 日に換算できるため、1 日でおよそ 8 イベント確認される見積りとなる。さらに ^{235}U を発生させてシミュレーションを行った結果得られたエネルギーデポジットは、およそ 200 億カウント中で 137 keV、167 keV、268 keV、476 keV の 4 カウントのみであった。よってこれらのシミュレーション結果より、鉛外側シールドに含まれる放射性不純物がゲルマニウム検出器のバッググラウンドにほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

サンプルスペース中空気

サンプルスペース内のラドンフリーエア中の ^{222}Rn からのエネルギースペクトルを図 4.27 に示す。確認されたエネルギーデポジットが非常に少なく、わずかに 400 keV 付近をピークとした山型になっている傾向が見られた。

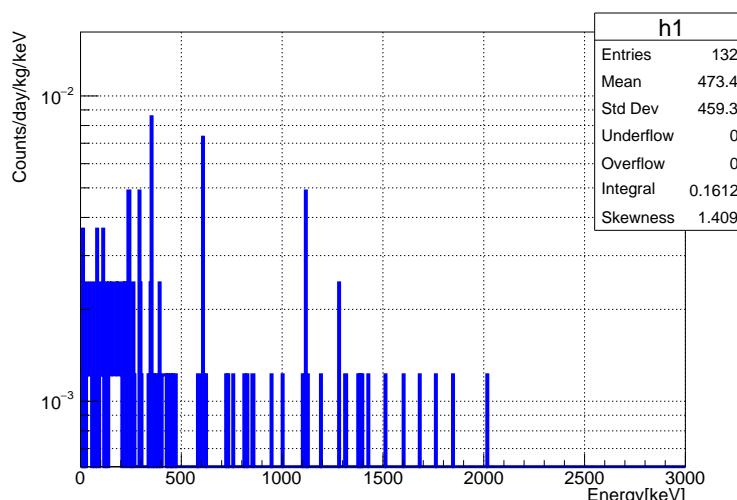


図 4.27: サンプルスペース中空気の ^{222}Rn からのバッググラウンドスペクトル

アルミニウム製エンドキャップ

アルミニウム製エンドキャップ中の ^{210}Pb と ^{26}Al からのエネルギースペクトルを図 4.28 と図 4.29 に示す。 ^{26}Al については含有量の測定データがないため、 1.0×10^5 カウントをライブタイム 100 日分と仮定してエネルギースペクトルを描画している。

図 4.28 の ^{210}Pb のシミュレーション結果では、アルミニウム製エンドキャップがゲルマニウム検出

器本体にかなり近い場所にあるため、 ^{210}Pb の 46.5 keV のピークが顕著に出ていることがわかる。また図 4.29 の ^{26}Al のシミュレーション結果ではガンマ線のピークである 1809 keV と、対消滅ガンマ線により発生するエネルギー 511 keV のピーク、そして 1809 keV と 511 keV のサムピークの 3 つが確認できた。縦軸の数値を確認すると図 2.4 のバッググラウンド測定結果を大幅に上回っているため、スペクトルを簡単にフィットすることでおおよその含有量を概算する作業を第 5 章で行う。

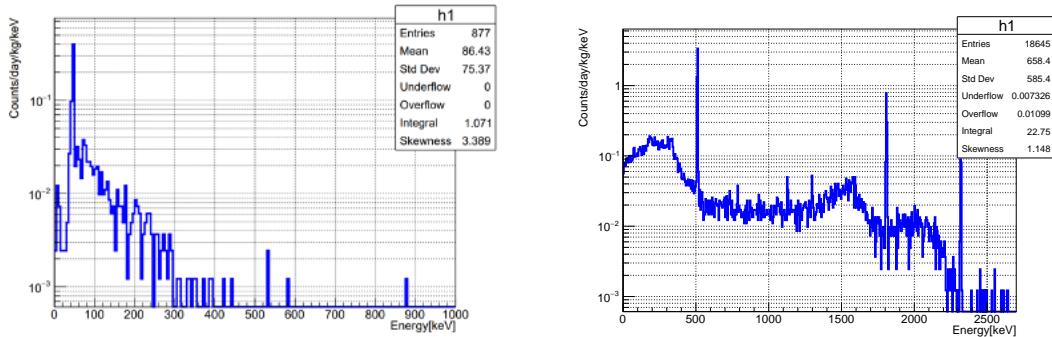


図 4.28: アルミニウム製エンドキャップ中の ^{210}Pb から
図 4.29: アルミニウム製エンドキャップ中の ^{26}Al
からのバッググラウンドスペクトル
からのバッググラウンドスペクトル

ゲルマニウム結晶

ゲルマニウム結晶中の ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn からのエネルギースペクトルを図 4.30 から図 4.32 に示す。これらの放射性不純物についても含有量の測定データがないため、 1.035×10^4 カウントをライブタイム 100 日分と仮定してエネルギースペクトルを描画している。

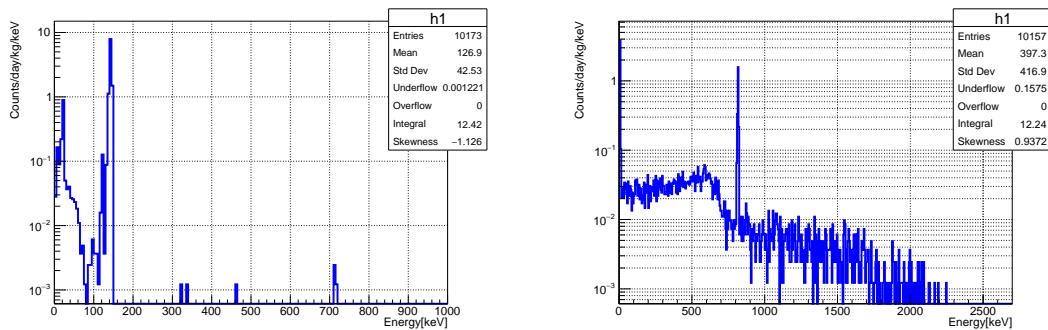


図 4.30: ゲルマニウム結晶中の ^{57}Co からのバッ
ググラウンドスペクトル
図 4.31: ゲルマニウム結晶中の ^{58}Co からのバッ
ググラウンドスペクトル

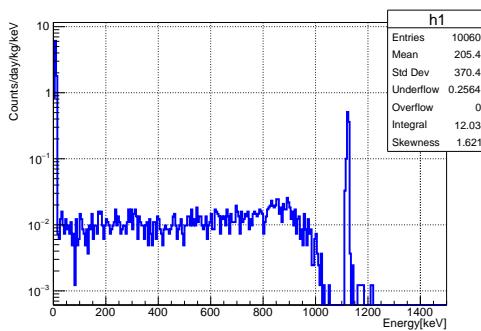


図 4.32: ゲルマニウム結晶中の ^{65}Zn からのバッググラウンドスペクトル

図 4.30、4.31、4.32 では ^{57}Co のガンマ線エネルギーのピークと ^{58}Co のエネルギーピーク、そして ^{65}Zn のエネルギーピークの 3 つが確認された。

^{57}Co は固有のガンマ線エネルギーが 136 keV であるが、 ^{57}Co を各検出器部材から発生させてシミュレーションを行った結果では 144 keV の位置にピークが確認された。これは 136 keV に加えて電子捕獲反応で発生するオージェ電子のエネルギーが同時にゲルマニウム検出器で測定されているものと考えられる。オージェ電子は通常のサンプル測定時にはゲルマニウム検出器では測定されないが、 ^{57}Co が検出器本体であるゲルマニウム結晶に含まれているものとしてシミュレーションを行っているため、オージェ電子のエネルギー一分が足されてピークとなっているものと思われる。続いて、 ^{58}Co では固有のガンマ線エネルギーが 811 keV、 ^{65}Zn では 1116 keV であるが、これらについてもそれぞれシミュレーション結果では 818 keV と 1125 keV でピークが確認された。 ^{57}Co と同様にオージェ電子、あるいは特性 X 線のエネルギーが同時に測定されたことによるものだと考えられる。

第5章 シミュレーション結果によるバッググラウンドスペクトルの再現

他の検出器で測定された、各検出器部材中に含まれる放射性不純物から放射線を発生させてエネルギーデポジットを得るシミュレーション結果を第4章で得た。他の検出器で測定された放射性不純物含有量の多くは上限値であるが、シミュレーションによる予想バッググラウンドスペクトルと測定結果を比較すると図5.1となった。この章で示すバッググラウンドスペクトルは赤が2022年7月の測定結果、青がシミュレーションによる予想スペクトルである。また、BIN幅は5 keVである。ただし、統計量が不十分となっている鉛外側シールドの ^{210}Pb のシミュレーション結果については図5.1から省いている。

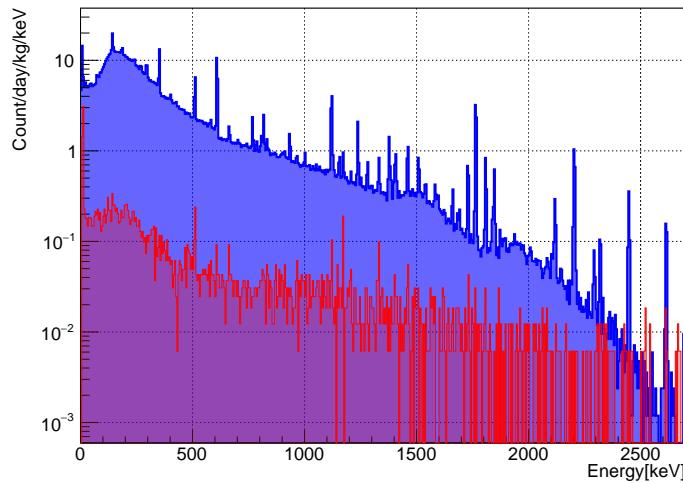


図5.1: 測定されたバッググラウンドスペクトルとシミュレーションによる予想スペクトルの比較

図5.1によると測定データと比較して、シミュレーションの予想値が大きく上回っていることがわかる。これは各検出器部材中の放射性不純物含有量の測定結果のほとんどが上限値であることが原因である。従って、各検出機部材に含まれる放射性不純物の崩壊頻度は上限値と比べて小さいことが考えられる。特にゲルマニウム検出器本体と比較的近くにある銅内側、銅外側シールドやアルミニウム製エンドキャップ、検出器本体のゲルマニウム結晶の影響が高いため、これらのシミュレー

ション結果を中心に放射性不純物含有量の調整を行い、測定データの再現を試みた。

バッググラウンドのシミュレーション結果から測定データの再現を行うため、以下の手順で処理を行った。

1. ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U 、 ^{210}Pb 、 ^{222}Rn の放射性不純物からの寄与を足し合わせたシミュレーション結果を準備した。
2. ^{60}Co のエネルギーピークである 1173 keV、1333 keV の縦軸の数値を合わせるようにシミュレーション結果を調整した。
3. ^{40}K のエネルギーピークである 1461 keV の縦軸の数値を合わせた。
4. ^{137}Cs のエネルギーピークである 662 keV の縦軸の数値を合わせた。
5. ^{235}U (アクチニウム系列) のエネルギーピークの中で、バッググラウンドでわずかに確認できるピークである ^{211}Pb の 832 keV を用いて縦軸の数値を合わせた。
6. 手順 2 から 5 の調整後のスペクトルに ^{26}Al 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn のシミュレーション結果を追加した。
7. ^{26}Al のエネルギーピークである 1809 keV の縦軸の数値を合わせた。
8. ^{57}Co で検出されたエネルギーピークである 144 keV の縦軸の数値を合わせた。
9. ^{58}Co で検出されたエネルギーピークである 818 keV の縦軸の数値を合わせた。
10. ^{65}Zn で検出されたエネルギーピークである 1125 keV の縦軸の数値を合わせた。
11. ^{210}Pb のエネルギーピークである 46.5 keV の縦軸の数値と、スペクトルの山の頂上付近である 145 keV から 150 keV で合わせた。
12. ^{238}U 、 ^{232}Th のシミュレーション結果を追加後、ウラン系列のエネルギーピーク 2 種類で調整を行った。
13. トリウム系列のエネルギーピーク 2 種類で調整を行った。

上記の手順では、シミュレーション結果を少しづつ追加して各放射性不純物のシミュレーション結果を調整している。別の方法もいくつか挙げられるが、各放射性不純物のシミュレーション結果をそれぞれ測定データと比較する方法では、最後に全ての調整結果を足して測定データと比較する際にシミュレーション結果が測定データを上回ってしまうことが予想される。また、全ての放射性不純物のシミュレーション結果から一気に調整を行ってしまうと、各放射性不純物の調整倍率が実態からかけ離れてしまうことが予想される。よって、上記の方法を用いることとした。

調整では、各放射性不純物のエネルギーピークでシミュレーション結果全体の和とバッググラウンドの数値を比較し、シミュレーション結果の和がバッググラウンドの数値となるように、バッグ

ラウンドへの影響が大きい検出器部材について順番にシミュレーション結果の数値を調整した。サンプルスペース中の空気に含まれる ^{222}Rn については有意なエネルギーピークが見られず、バッゲングラウンドに対して大きな影響はないと考えられるため、数値の調整を行うことなくシミュレーション結果に含めることとした。それぞれの手順について行った結果を 5.1、5.2、5.3 節、5.4 節で具体的に述べる。

5.1 含有量の測定データがある放射性不純物

シミュレーションを行った放射性不純物の内、 ^{26}Al 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn は含有量の測定データがなく、ライブタイムを 100 日と仮定してシミュレーションを行っているため、まずはこれらのシミュレーション結果を省いて調整を行うこととした。図 5.2 は ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U 、 ^{210}Pb 、 ^{222}Rn の寄与を足して得られたエネルギースペクトルである。このスペクトルから、 ^{60}Co 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{235}U について順番に調整を行った。

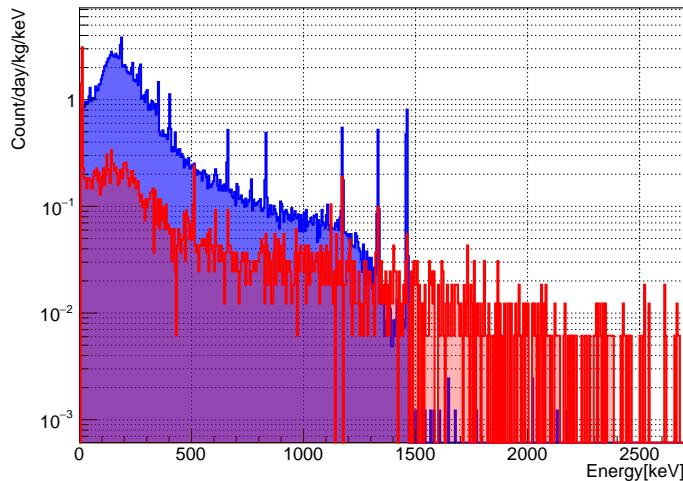


図 5.2: 手順 1 で得られたエネルギースペクトル

5.1.1 ^{60}Co

^{60}Co では銅外側シールドの影響が最も大きいと考えられるため、銅外側シールドのシミュレーション結果のみの調整を行った。 ^{60}Co を銅外側シールドから発生させてシミュレーションを行った結果より、 ^{60}Co の固有のガンマ線エネルギーである 1173 keV、1333 keV について縦軸の値を比較すると、

$$\begin{aligned}
\text{バッググラウンド} (1173 \text{ keV}, 1333 \text{ keV}) &= (0.1903, 0.09823) \\
\text{銅外側シールド以外のシミュレーション結果の和} (1173 \text{ keV}, 1333 \text{ keV}) &= (0.0078, 0.0482) \\
\text{銅外側シールド} (1173 \text{ keV}, 1333 \text{ keV}) &= (0.4933, 0.4823)
\end{aligned}$$

となった。よって、シミュレーション結果の和の数値がバッググラウンドの数値と等しくなるためには、それぞれのエネルギーピークで銅外側シールドのシミュレーション結果を 0.2881 倍 (1173 keV) と 0.1875 倍 (1333 keV) する必要がある。2つのピークで数値が異なるため、この調整では大きい方である 1173 keV の 0.2881 倍を採用することとした。銅外側シールドの ^{60}Co のシミュレーション結果に 0.2881 倍を行った結果、図 5.3 のようになった。1333 keV はシミュレーション結果が測定データを上回っていることがはっきりと確認できるが、1173 keV については測定データに近づいた。

5.1.2 ^{40}K

^{40}K についても ^{60}Co と同様に銅外側シールドの影響が最も大きいため、銅外側シールドの結果調整を行った。 ^{40}K を銅外側シールドから発生させてシミュレーションを行った結果より、 ^{40}K の固有のガンマ線エネルギーである 1461 keV について縦軸の値を比較すると、

$$\begin{aligned}
\text{バッググラウンド} (1461 \text{ keV}) &= (0.05525) \\
\text{銅外側シールド以外のシミュレーション結果の和} (1461 \text{ keV}) &= (0.0443) \\
\text{銅外側シールド} (1461 \text{ keV}) &= (0.7509)
\end{aligned}$$

となった。よって銅外側シールドの ^{40}K のシミュレーション結果を 0.01460 倍すると数値が合うことになり、調整を行った結果が図 5.4 となる。図 5.3 では 1461 keV のピークが大きく測定データを上回っていたが、調整を行ったことで補正された。

5.1.3 ^{137}Cs

^{137}Cs についても同様に銅外側シールドの影響が最も大きいため、銅外側シールドの結果調整を行った。 ^{137}Cs を銅外側シールドから発生させてシミュレーションを行った結果より、 ^{137}Cs の固有のガンマ線エネルギーである 662 keV について縦軸の値を比較すると、

$$\begin{aligned}
\text{バッググラウンド} (662 \text{ keV}) &= (0.09209) \\
\text{銅外側シールド以外のシミュレーション結果の和} (662 \text{ keV}) &= (0.076) \\
\text{銅外側シールド} (662 \text{ keV}) &= (0.3993)
\end{aligned}$$

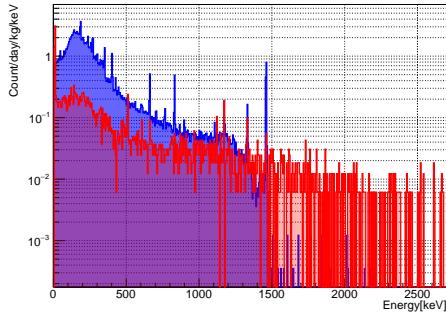


図 5.3: ^{60}Co 調整後のエネルギースペクトル

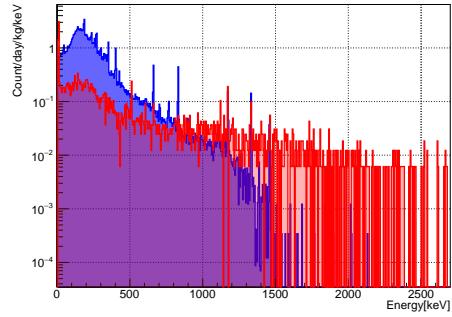


図 5.4: ^{40}K 調整後のエネルギースペクトル

となった。よって銅外側シールドの ^{137}Cs のシミュレーション結果を 0.04031 倍すると数値が合うことになる。この調整を行った結果が図 5.5 となる。この調整により 662 keV の補正をすることができた。

5.1.4 ^{235}U

^{235}U では、 ^{235}U 含有量の測定データがある中で一番ゲルマニウム検出器に近い銅外側シールドの影響が一番大きいが(図 4.13)、バッググラウンドと比較しておおよそ 0.1 倍以下にはなることが想定される。また、図 4.20 で得られた鉛内側シールドの ^{235}U シミュレーション結果では銅外側シールドの結果のおよそ 0.1 倍となっており、銅外側シールドのみを調整すると、鉛内側シールドがバッググラウンドへ大きな影響を及ぼしてしまうことになる。よって、 ^{235}U については鉛内側シールドのシミュレーション結果の調整を行った後、銅外側シールドのシミュレーション結果の調整を行った。

^{235}U 系列のガンマ線エネルギーの中で、バッググラウンドスペクトルにもわずかにピークが確認できた ^{211}Pb の 832 keV について縦軸の値を比較した。まず銅外側シールドについての結果を省き、鉛内側シールドについて比較した結果、

$$\begin{aligned} \text{バッググラウンド (832 keV)} &= (0.05525) \\ \text{鉛内側シールド以外のシミュレーション結果の和 (832 keV)} &= (0.02703) \\ \text{鉛内側シールド (832 keV)} &= (0.07867) \end{aligned}$$

となった。よって ^{235}U の鉛内側シールドのシミュレーション結果を 0.3592 倍することで数値が合うことになった。しかし、この後銅外側シールドのシミュレーション結果を同様に比較するため、減少幅が少々大きくなるように 0.3333 倍として調整を行うこととした。

続いて、銅外側シールドのシミュレーション結果を 832 keV について比較すると、以下のようになった。

$$\begin{aligned}
 \text{バッゲグラウンド (832 keV)} &= (0.05525) \\
 \text{銅外側シールド以外のシミュレーション結果の和 (832 keV)} &= (0.0539) \\
 \text{銅内側シールド (832 keV)} &= (0.3385)
 \end{aligned}$$

よって ^{235}U の銅外側シールドのシミュレーション結果を 0.004139 倍することで数値が合うことになった。これらの調整を行った結果が図 5.6 となる。図 5.5 と比較すると、832 keV の部分に加えて、0 keV から 500 keV の低エネルギー領域でもシミュレーション結果が測定データに近づいていることが確認された。

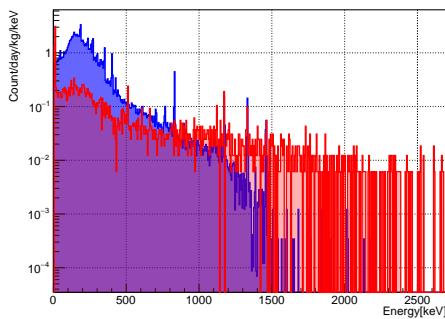


図 5.5: ^{137}Cs 調整後のエネルギースペクトル

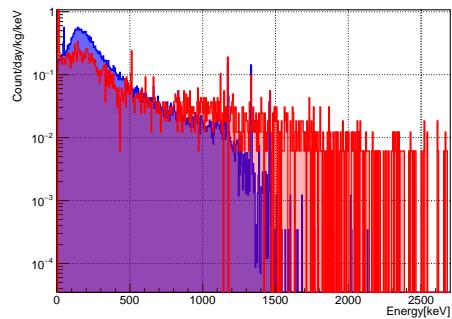


図 5.6: ^{235}U 調整後のエネルギースペクトル

5.2 含有量の測定データがない放射性不純物

5.1 節では省いていた、 ^{26}Al 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn のシミュレーション結果を図 5.6 に加えると図 5.7 のようになった。ここでは ^{26}Al のシミュレーションカウントが 1.000×10^5 回でライブタイムが 100 日、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn のシミュレーションカウントが 1.035×10^4 回でライブタイムが 100 日と仮定してシミュレーションを行っていたが、スペクトルの縦軸の数値を合わせる調整によりさらに正確な含有量の算出が期待できる。これらの放射性不純物についても 5.1 節と同様に処理を行った。

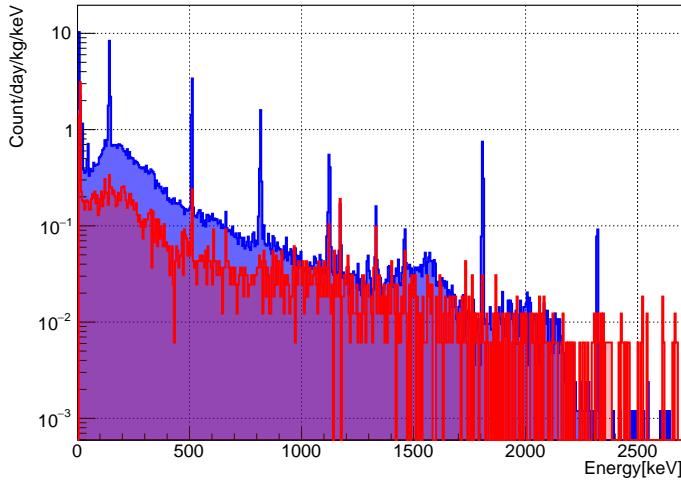


図 5.7: 手順 6 で得られたエネルギースペクトル

5.2.1 ^{26}Al

^{26}Al ではアルミニウム製エンドキャップのみでシミュレーションを行っているため、この結果を用いて、 ^{26}Al の固有のガンマ線エネルギーである 1809 keV について縦軸の値を比較すると、

$$\begin{aligned}
 \text{バックグラウンド (1809 keV)} &= (0.03070) \\
 \text{エンドキャップ以外のシミュレーション結果の和 (1809 keV)} &= (0.0000) \\
 \text{エンドキャップ (1809 keV)} &= (0.7485)
 \end{aligned}$$

となった。つまり、シミュレーション結果の和とアルミニウム製エンドキャップのシミュレーション結果が等しいため、1809 keV についてはアルミニウム製エンドキャップからの寄与のみであることがわかる。よって ^{26}Al のシミュレーション結果を 0.04102 倍すると数値が合うことになる。処理を行った結果が図 5.9 となり、1809 keV の部分や図 4.29 で確認されていた対消滅ガンマ線の 511 keV のピーク、そしてそれらのサムピークについても測定データに近づいたことが確認できた。

5.2.2 ^{57}Co

^{57}Co ではゲルマニウム結晶のみでシミュレーションを行っているため、この結果を用いて処理を行った。4.2.3 節でも述べた通り、 ^{57}Co は固有のガンマ線エネルギーが 136 keV であるが、シミュレーション結果では 144 keV の位置にピークが確認された。従って 136 keV ではなく 144 keV の位置で比較を行うと、

$$\begin{aligned}
 \text{バッググラウンド (144 keV)} &= (0.3377) \\
 \text{ゲルマニウム結晶以外のシミュレーション結果の和 (144 keV)} &= (0.596) \\
 \text{ゲルマニウム結晶 (144 keV)} &= (7.662)
 \end{aligned}$$

となった。このシミュレーション結果の和が測定データの数値になるように、ゲルマニウム結晶のシミュレーション結果の調整を試みると、倍率を求めることができず限りなく 0 倍に近いことがわかった。

ここで、144 keV 付近の測定データを 1 keV ビンで拡大すると図 5.8 のようになり、測定データでは有意なピークを確認することができなかった。従って、 ^{57}Co について 0 倍として調整することとし、図 5.10 が得られた。

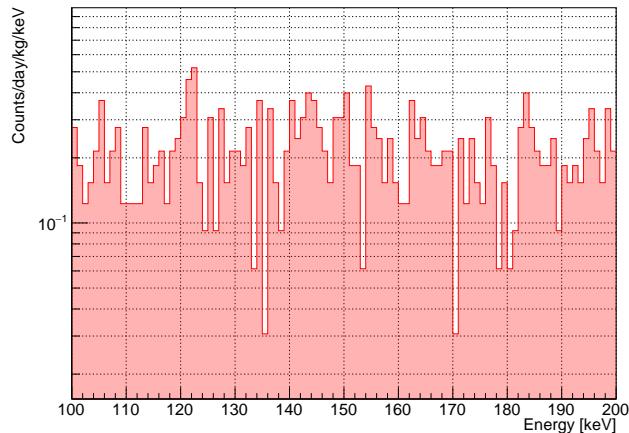


図 5.8: バッググラウンドスペクトルの拡大図

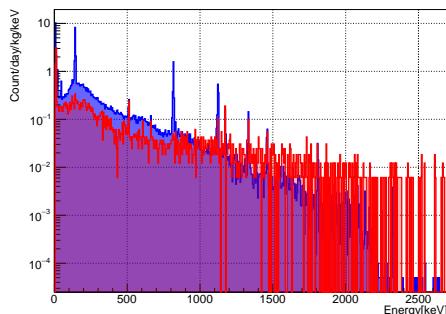


図 5.9: ^{26}Al 調整後のエネルギースペクトル

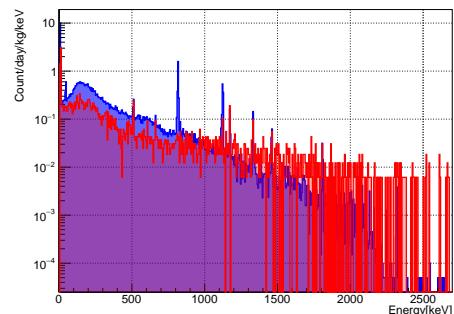


図 5.10: ^{57}Co 調整後のエネルギースペクトル

5.2.3 ^{58}Co

^{58}Co についても ^{57}Co と同様にゲルマニウム結晶のみでシミュレーションを行っているため、この結果を用いて調整を行った。 ^{58}Co は固有のガンマ線エネルギーが 811 keVであるが、シミュレーション結果では 818 keV の位置にピークが確認された。従って 811 keVではなく 818 keV の位置で比較を行うと、

$$\begin{aligned} \text{バッググラウンド (818 keV)} &= (0.04975) \\ \text{ゲルマニウム結晶以外のシミュレーション結果の和 (818 keV)} &= (0.035) \\ \text{ゲルマニウム結晶 (818 keV)} &= (1.549) \end{aligned}$$

となった。よって ^{58}Co のシミュレーション結果を 0.009569 倍すると数値が合うことになる。この調整を行った結果が図 5.11 であり、大幅に実測データを上回っていた 818 keV のピークが補正されたことが確認できた。

5.2.4 ^{65}Zn

^{65}Zn も ^{57}Co 、 ^{58}Co と同様にゲルマニウム結晶のみでシミュレーションを行っているため、この結果を用いて調整を行った。固有のガンマ線エネルギーが 1116 keVであるが、シミュレーション結果では 1125 keV の位置にピークが確認された。従って 1116 keVではなく 1125 keV の位置で比較を行うと、

$$\begin{aligned} \text{バッググラウンド (1125 keV)} &= (0.1044) \\ \text{ゲルマニウム結晶以外のシミュレーション結果の和 (1125 keV)} &= (0.0182) \\ \text{ゲルマニウム結晶 (1125 keV)} &= (0.5189) \end{aligned}$$

となった。よって ^{65}Zn のシミュレーション結果を 0.1662 倍すると数値が合うことになる。この調整を行い、図 5.12 のようになった。ここまで調整を行い、ほとんどのエネルギーピークが補正され全体的にシミュレーション結果が測定データに近づいてきていることが見受けられた。

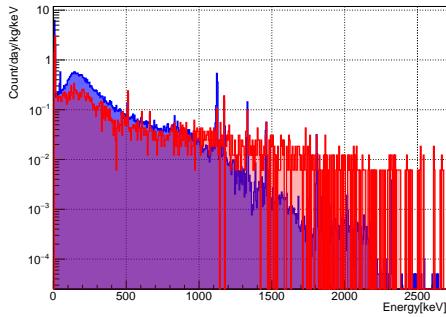


図 5.11: ^{58}Co 調整後のエネルギースペクトル

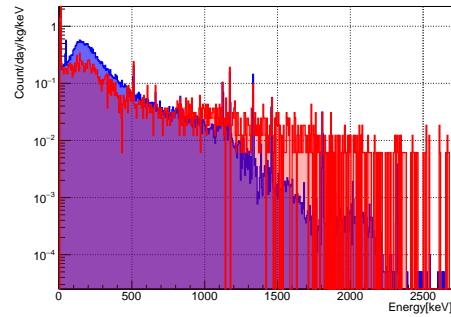


図 5.12: ^{65}Zn 調整後のエネルギースペクトル

5.3 ^{210}Pb と ^{210}Bi による制動放射

^{210}Pb については始めからシミュレーション結果の和の中に入れ他の放射性不純物調整の比較を行っていた。しかし放射性不純物含有量の測定結果はあるものの、バッググラウンドスペクトルでは 46.5keV のピークが有意には見えていないため、他の放射性不純物の調整が終了した後で処理を行うこととした。 ^{210}Pb については別のゲルマニウム検出器のサンプル測定で有意な値が得られている鉛内側、鉛中間、鉛外側シールドを除いた、アルミニウム製エンドキャップ、銅内側、銅外側シールドのシミュレーション結果を用いて調整を行った。

まずは、銅内側、銅外側シールドについて調整を行った。銅シールドについての ^{210}Pb シミュレーション結果は図 4.9、4.14 にあるように 46.5 keV のピークが確認されず、150 keV 付近を頂点とした山型のスペクトルになっている。よって、スペクトルの頂点となっている 145 keV から 150 keV のビンについて比較し、調整を行った。

$$\text{バッググラウンド} (145 - 150 \text{ keV}) = (0.2517)$$

$$\text{銅内側、外側シールド以外のシミュレーション結果の和} (145 - 150 \text{ keV}) = (0.2275)$$

$$\text{銅内側、銅外側シールド} (145 - 150 \text{ keV}) = (0.3313)$$

よって ^{210}Pb の銅内側、銅外側シールドのシミュレーション結果を 0.07310 倍する調整を行い、図 5.13 が得られた。

続いてアルミニウム製エンドキャップで行った ^{210}Pb のシミュレーション結果の調整を行った。エンドキャップのシミュレーション結果は図 4.28 にあるように 46.5 keV のピークが主にバッググラウンドに大きな影響を与えている。従って 46.5 keV の縦軸の数値の比較を行うと、

$$\text{バッググラウンド} (46.5 \text{ keV}) = (0.1780)$$

$$\text{エンドキャップ以外のシミュレーション結果の和} (46.5 \text{ keV}) = (0.0939)$$

$$\text{エンドキャップ} (46.5 \text{ keV}) = (0.3932)$$

となり、アルミニウム製エンドキャップのシミュレーション結果を 0.2139 倍する調整を行った。その結果図 5.14 が得られ、0 keV から ^{60}Co のエネルギーピーク付近の 1200 keV まではシミュレーション結果と測定データが比較的良く一致している。しかし 1200 keV よりも高エネルギー側では、エネルギーが高くなるほどシミュレーション結果が測定データを下回る傾向が見られた。

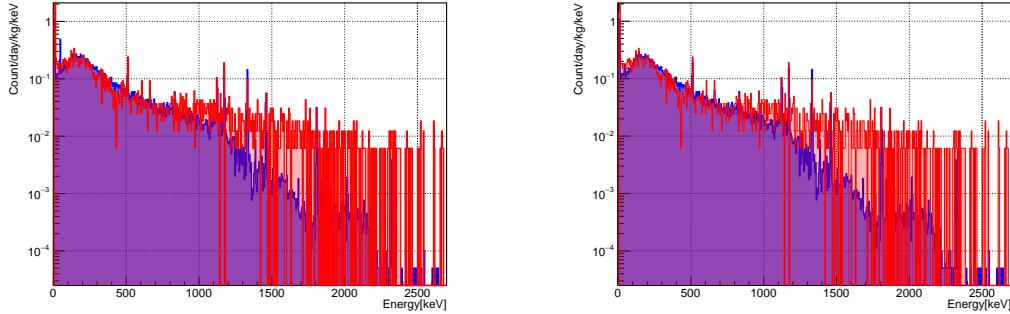


図 5.13: 銅内側、銅外側シールドの ^{210}Pb 調整後 図 5.14: エンドキャップの ^{210}Pb 調整後のエネルギースペクトル

5.4 ウラン系列上流部、トリウム系列

ウラン系列上流部やトリウム系列について有意なピークがバッゲグラウンドスペクトルには見られていないが、図 5.14 より 1200 keV よりも高エネルギー側でシミュレーション結果が測定データを再現することができていない。よってウラン系列上流部やトリウム系列の放射性不純物が影響を与えていていることが考えられる。最後に、ウラン系列上流部とトリウム系列について銅外側シールドのシミュレーション結果を用いて測定データの再現を試みた。

5.4.1 ^{238}U

まず、図 5.14 に銅外側シールドで行った ^{238}U と ^{232}Th のシミュレーション結果を追加したものが図 5.15 になる。特に ^{238}U のシミュレーション結果がバッゲグラウンドに大きな影響を与えていくことがわかる。

^{238}U の銅外側シールドでのシミュレーション結果と測定データを比較し、ウラン系列のエネルギーピークのうち（表 2.1）、測定データでわずかにピークがあるように思われる 352 keV、609 keV について比較を行った。

$$\text{バッゲグラウンド (352 keV, 609 keV)} = (0.1166, 0.09209)$$

$$\text{銅外側シールド以外のシミュレーション結果の和 (352 keV, 609 keV)} = (0.23, 0.10)$$

$$\text{銅外側シールド (352 keV, 609 keV)} = (11.78, 10.37)$$

上記のようになったが、352 keV、609 keV でそれぞれ調整を行うための倍率を今までと同様に計算すると、どちらのエネルギーでも限りなく 0 倍に近い、という結果となった。すでに他の放射性不純物で測定データを再現しており、ウラン系列上流部のシミュレーション結果はほとんど含まれないということになる。

ここで、352 keV と 609 keV 付近について測定データを規格化する前のカウントデータをそれぞれ見ると、表 5.1 のようになった。

表 5.1: 測定データを規格化する前のカウントデータ

ビン	カウントデータ	統計誤差
345-350 keV	14	14±3.7
350-355 keV	19	19±4.4
355-360 keV	10	10±3.2
600-605 keV	4	4±2
605-610 keV	15	15±3.9
610-615 keV	7	7±2.6

表 5.1 より、352 keV が含まれるビンの統計誤差である 19 ± 4.4 と、隣のビンの統計誤差 14 ± 3.7 が 1σ の範囲で重なるため、統計のふらつきが影響して測定データにピークがあるように見えたと考えられる。また、609 keV が含まれるビンについては隣のビンの統計誤差と比較しても 1σ 以上離れているが、大元のカウントデータの統計が少ないため有意なピークであると断定することはできない。

従って、352 keV と 609 keV について統計的に有意なピークを測定データに確認することができないため、 ^{238}U のシミュレーション結果を 0 倍として調整することとした。調整後のスペクトルが図 5.16 になる。

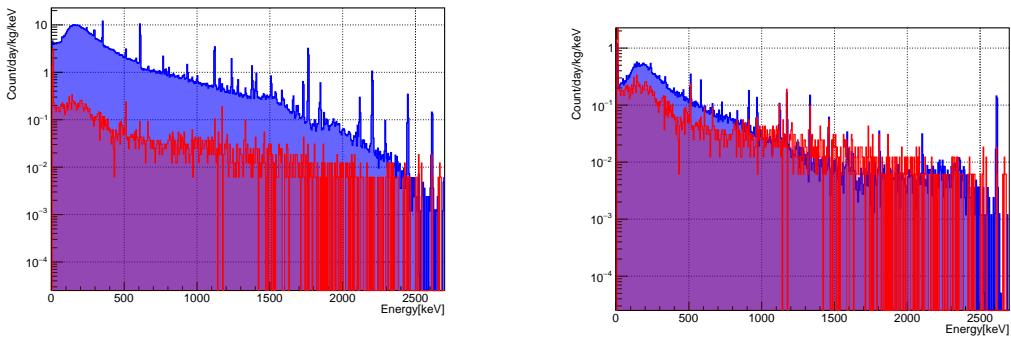


図 5.15: 図 5.14 に ^{238}U と ^{232}Th のシミュレーション結果を追加したエネルギースペクトル

図 5.16: ^{238}U 調整後のエネルギースペクトル

5.4.2 ^{232}Th

^{232}Th の銅外側シールドでのシミュレーション結果と測定データを比較し、トリウム系列のエネルギーピークのうち（表 2.2）、測定データでわずかにピークがあるように思われる 583 keV、911 keV について比較を行った。

$$\text{バッゲグラウンド (583 keV, 911 keV)} = (0.06139, 0.05525)$$

$$\text{銅外側シールド以外のシミュレーション結果の和 (583 keV, 911 keV)} = (0.0382, 0.0194)$$

$$\text{銅外側シールド (583 keV, 911 keV)} = (0.2372, 0.1597)$$

よって、 ^{232}Th の銅外側シールドのシミュレーション結果をそれぞれ 0.09785 倍 (583 keV)、0.2246 倍 (911 keV) すると数値の数値を調整することができる。 ^{232}Th の調整では、減少幅が小さい方である 911 keV の 0.2246 倍を採用して調整を行った。調整後のスペクトルが図 5.17 となる。

図 5.17 を見ると 1200 keV より高エネルギー側でもシミュレーション結果が測定データに近づいたことが確認できた。また、1500 keV より高エネルギー側ではおおよそ 3 倍ほどシミュレーション結果が測定データを下回っている傾向が見られた。

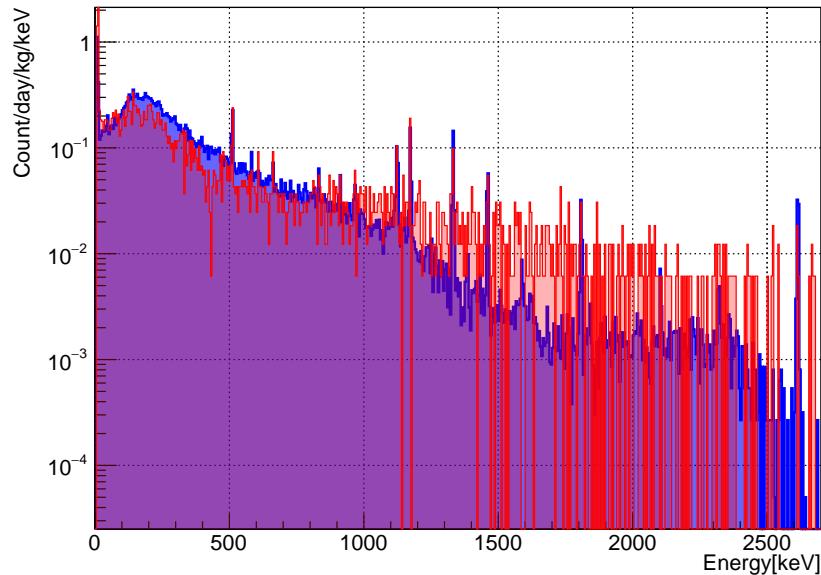


図 5.17: ^{232}Th 調整後のエネルギースペクトル

5.5 各放射性不純物含有量

5.1 節から 5.4 節でシミュレーション結果の調整を行い測定データの再現を試みたが、ここまでで調整を行った放射性不純物と倍率を表 5.2 に示す。

表 5.2: 測定データ再現のために使用した倍率

放射性不純物	検出器部材	倍率
^{60}Co	銅外側シールド	0.2881
^{40}K	銅外側シールド	0.01460
^{137}Cs	銅外側シールド	0.04031
^{235}U	銅外側シールド	0.004139
	鉛内側シールド	0.3333
^{26}Al	アルミニウム製エンドキャップ	0.04102
^{57}Co	ゲルマニウム結晶	0
^{58}Co	ゲルマニウム結晶	0.009569
^{65}Zn	ゲルマニウム結晶	0.1662
^{210}Pb	アルミニウム製エンドキャップ	0.2139
	銅内側、銅外側シールド	0.07310
^{238}U	銅外側シールド	0
^{232}Th	銅外側シールド	0.2246

表 5.2 の倍率を見ると、全ての放射性不純物で銅、鉛シールドやアルミニウム製エンドキャップ、ゲルマニウム結晶に含まれる量が少なくとも 3.5 割以下になることが期待される結果となった。このような結果になった原因として、他のゲルマニウム検出器による検出器部材の測定感度の低さが挙げられる。4.2.1 節でシミュレーションに使用した各放射性不純物含有量について述べたが、そのほとんどが上限値での測定結果となっていた。つまりサンプル試料中の放射性不純物含有量が mBq/kg になると、測定を行った別のゲルマニウム検出器では正確に測定できなくなってしまうことがわかる。また、銅と鉛シールドのサンプルをゲルマニウム検出器で測定した時期は 2016 年から 2017 年であり、少なくとも 5、6 年は経過したこととなる。測定から 6 年が経過したとすると、半減期が比較的短い ^{60}Co の 5.27 年では 0.45 倍に、 ^{137}Cs の 30.1 年では 0.87 倍となり、ゲルマニウム検出器での測定データよりも現在は小さくなっていることが考えられる。

続いて、シミュレーションで使用した各放射性不純物含有量と、表 5.2 の倍率を用いてバッゲグラウンドスペクトルの再現後に得られた含有量を表 5.3 に示す。現在、各検出器部材の再測定は行われていないため、定量的な議論をすることはできない。今後、本研究で開発したゲルマニウム検出器や長寿命の放射性不純物含有量の測定得意とする ICP-MS など様々な測定方法を用い、より高い感度で検出器部材中の放射性不純物含有量の測定を行うことで、ゲルマニウム検出器のバッゲグラウンド源を同定し、世界最高感度を実現したい。

表 5.3: 各検出器部材に含まれる放射性不純物含有量 [mBq/kg]

検出器部材	放射性不純物	測定された含有量	再現後の含有量
銅内側シールド	^{210}Pb	17-40	2.9
銅外側シールド	^{210}Pb	<491	36
	^{60}Co	<0.62	0.18
	^{40}K	<10.3	0.15
	^{137}Cs	<0.60	0.024
	^{235}U	<11.5	0.048
	^{238}U	<33.8	0
	^{232}Th	<0.80	0.18
鉛内側シールド	^{210}Pb	$5.78 \pm 0.94 \text{Bq/kg}$	$5.78 \pm 0.94 \text{Bq/kg}$
	^{60}Co	<0.19	0.19
	^{40}K	<8.70	8.70
	^{137}Cs	<0.99	0.99
	^{235}U	<110	37
鉛中間シールド	^{210}Pb	$38.9 \pm 2.9 \text{Bq/kg}$	$38.9 \pm 2.9 \text{Bq/kg}$
	^{60}Co	<0.38	0.38
	^{40}K	<16.0	16.0
	^{137}Cs	<1.14	1.14
	^{235}U	<197	197
鉛外側シールド	^{210}Pb	$175.1 \pm 8.6 \text{Bq/kg}$	$175.1 \pm 8.6 \text{Bq/kg}$
	^{60}Co	<0.14	0.14
	^{40}K	<66.3	66.3
	^{137}Cs	<2.69	2.69
	^{235}U	<755	755
サンプルスペース中空気	^{222}Rn	<0.1	0.1
アルミニウム製エンドキャップ	^{210}Pb	188	40
	^{26}Al	-	0.99
ゲルマニウム結晶	^{57}Co	-	0
	^{58}Co	-	0.0066
	^{65}Zn	-	0.11

第6章 結論・今後の展望

極低放射能仕様のゲルマニウム検出器が2021年2月に神岡地下実験室に納入された。その後、2021年8月から12月にかけて組み立て及びシステムのセットアップ作業を行い、2022年1月に本格的な運用を開始した。このゲルマニウム検出器のバッググラウンドの理解のため、本研究ではGeant4をベースとしたプログラムを作成し、各検出器部材に含まれる放射性不純物から放射線を発生させるシミュレーションを行った。そして放射線がゲルマニウム結晶に落とすエネルギースペクトルを作成し、実際にゲルマニウム検出器で測定されたバッググラウンドスペクトルと比較を行った。シミュレーションで用いた各検出器部材中の放射性不純物含有量を調整した結果、1200 keV付近までの低エネルギー側ではシミュレーション結果が測定データを比較的良く再現することができた。しかし、1200 keVより高エネルギー側ではシミュレーション結果が測定データを下回った。また、シミュレーションのインプットに用いた検出器部材の各放射性不純物含有量は、全て3.5割以下に調整される結果となった。サンプル測定を行った別のゲルマニウム検出器などの測定感度が足りず、放射性不純物含有量の測定値の多くが上限値であることが主な原因である。さらに検出器部材中の放射性不純物含有量の測定時期から5~6年が経過しているため、崩壊が進み放射性不純物含有量が減ったことも原因の一つである。

今後は、改めて本研究で開発したゲルマニウム検出器やICP-MSといったより感度の高い検出器で検出器部材の再測定を行うことで、より正確にバッググラウンドの理解を進めていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご協力とご指導をしていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

まず、担当教員である南野彰宏先生には研究についての助言をしていただき、研究が詰まった時には様々な視点で解決の糸口を教えていただき、資料を揃えてくださいました。研究のみならず日頃のゼミナールでのご指導や、学会発表の機会も与えてくださり、新たに様々な経験をすることができた二年間となりました。ご多忙の中でサポートをしてくださり、本当にありがとうございました。感謝申し上げます。

また、東北大学ニュートリノ科学研究センターの市村晃一先生には、ゲルマニウム検出器についてわからないところを一から教えていただき、測定データや解析方法を教えていただきました。さらに神岡では、実際にゲルマニウム検出器の組み立てや放射線源の測定などを現地で学ばせていただくことができました。心より御礼申し上げます。

続いて、東北大学の中村輝石先生には本研究で使用したシミュレーションツールの大元を提供してください、シミュレーション方法などに行き詰った際にはいつも丁寧に相談に乗ってくださいました。御礼申し上げます。

そして、東京大学宇宙線研究所の関谷洋之先生、池田一得先生、細川佳志先生、家城佳先生、東京大学の中島康博先生、東京理科大学の伊藤博士先生には日頃のミーティングにて様々なご助言やご指導をいただきました。御礼申し上げます。

さらに、本研究室のメンバーにもたいへんお世話になりました。基本オンラインでの研究活動を続けておりましたが、時々研究室に顔を出した際には様々な話で研究のヒントをもらう時もありました。お礼申し上げます。

最後に、私の両親にも感謝申し上げます。家にいながらの研究生活が続く中、日々の生活を支えていただき、困っているときには研究の相談に乗っていただきました。

改めまして、ご協力いただいた全ての方々に深く御礼申し上げます。研究を通して得た知識や経験を今後の人生に活かしていきたいと思っております。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会, ”ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー(改訂原案)”, 環境放射線モニタリング技術検討チーム第11回会合 資料2 (2019)
- [2] 市村 晃一, ”D01班: 神岡Geスクリーニング”, 東北大学 ニュートリノ科学研究中心, 第8回極低放射能技術研究会発表資料 (2022)
- [3] 中川 克磨, ”Ge検出器を用いたXMASS検出器材料のスクリーニングとバックグラウンドへの影響の評価”, 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 宇宙線研究所 修士論文 (2014)
- [4] 安部 航, ”Lab-1、Lab-AのGe検出器”, 東京大学 宇宙線研究所, 極低放射能技術研究会発表資料 (2017)
- [5] 港 陽子, 鈴木 彩香, ”小型ラドン検出器の開発”, 奈良女子大学 理学部 数物科学科 卒業論文 (2018)
- [6] National Nuclear Data Center, 2023/1/6
<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
- [7] Glenn F. Knoll, ”Radiation Detection and Measurement 4th Edition”, John Wiley & Sons, Inc. (2010)
- [8] ATOMICA, ”制動放射線”, 2023/1/11
https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_442.html
- [9] UGAP2022, 2023/1/6
<https://www.lowbg.org/ugap/ws/am2022/index.html?LangP=EN>
- [10] K.Abe et al.(XMASS Collaboration), ”Identification of ^{210}Pb and ^{210}Po in the bulk of copper samples with a low-background alpha particle counter”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A884 157-161 (2018), arXiv:1707.06413
- [11] Y.Nakano et al., ”Measurement of radon concentration in super-Kamiokande’s buffer gas”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 867, Pages 108-114 (2017)