

# 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クグラウンドの理解

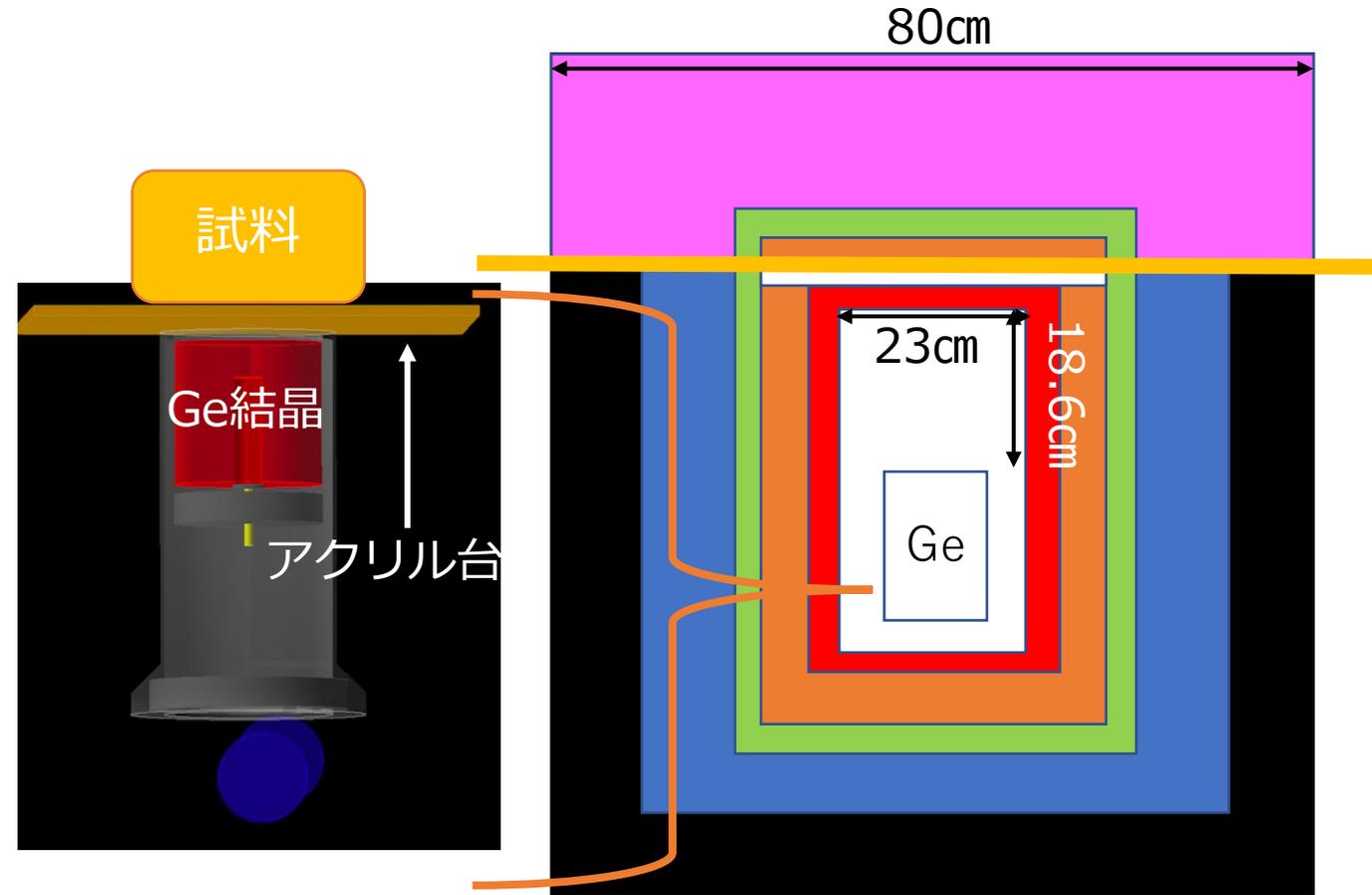
横浜国立大学      鈴木 芹奈

横国大理工<sup>A</sup>, 東北大ニュートリノセンター<sup>B</sup>, 東北大理<sup>C</sup>, 東大宇宙線研<sup>D</sup>,  
東大理<sup>E</sup>, 東理大理工<sup>F</sup>, ILANCE<sup>G</sup>

南野彰宏<sup>A</sup>, 市村晃一<sup>B</sup>, 中村輝石<sup>C</sup>, 関谷洋之<sup>D</sup>,  
池田一得<sup>D</sup>, 細川佳志<sup>D</sup>, 家城佳<sup>D</sup>, 中島康博<sup>E</sup>, 伊藤博士<sup>F</sup>, Guillaume Pronost<sup>G</sup>

# ゲルマニウム検出器の仕様

- ・ 遮蔽体（内側から）
  - ① 6 N(99.9999%)銅（厚さ1cm）
  - ② 銅（厚さ5cm）
  - ③ 低BG鉛（厚さ2.5cm）
  - ④ 鉛（厚さ10cm + 10cm）
- ・ サンプルスペース  
23cm×23cm×18.6cm（右図の白い部分）  
アクリル台の上に試料を配置
- ・ ゲルマニウム結晶  
相対効率80%



エンドキャップとGe検出器断面図

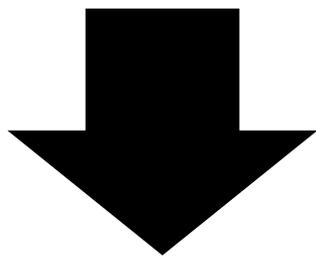
# ゲルマニウム検出器の開発

2021年2月：新たな極低放射能ゲルマニウム(Ge)検出器  
が神岡地下実験室(Lab-C)に納入

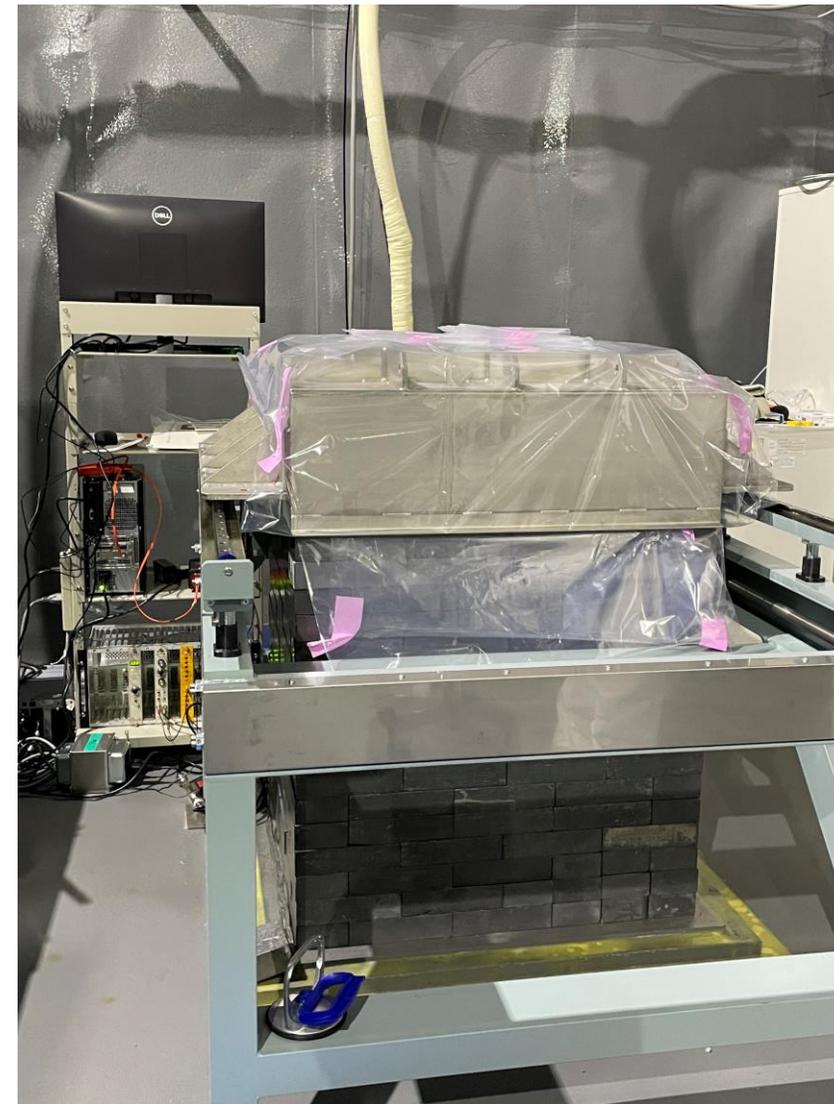
8月～12月：遮蔽体の組み立て及びセットアップ

2022年1月：本格的な運用を開始

世界最高レベルの低バックグラウンドを目指している



バックグラウンド(BG)源を正確に理解する必要がある

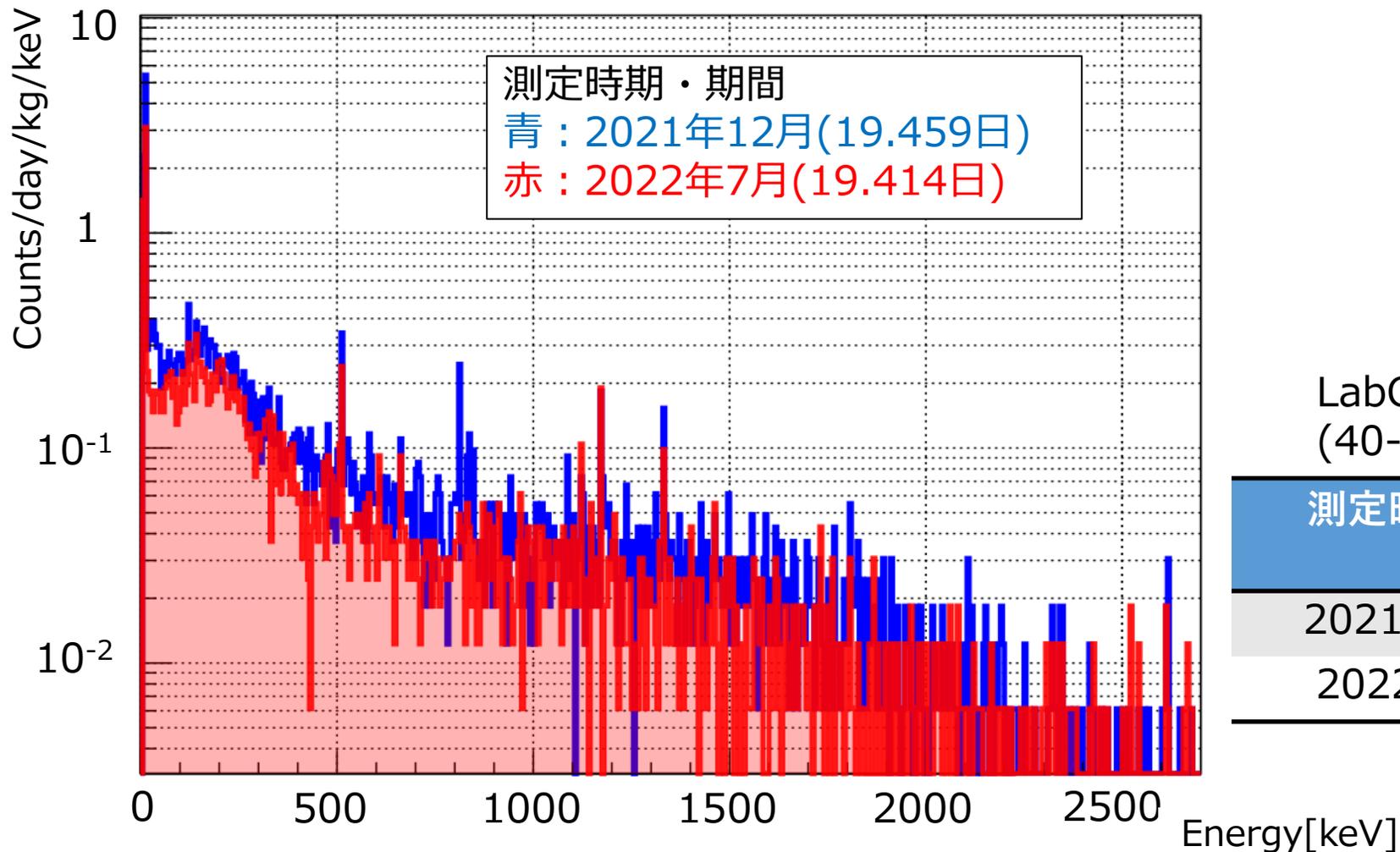


Ge検出器全体

# 本研究の目的

ゲルマニウム検出器の構成部材に含まれる放射性不純物によるバックグラウンドをシミュレーションによって確認し、バックグラウンド源を同定する

# 現在のGe検出器のバックグラウンド(BG)



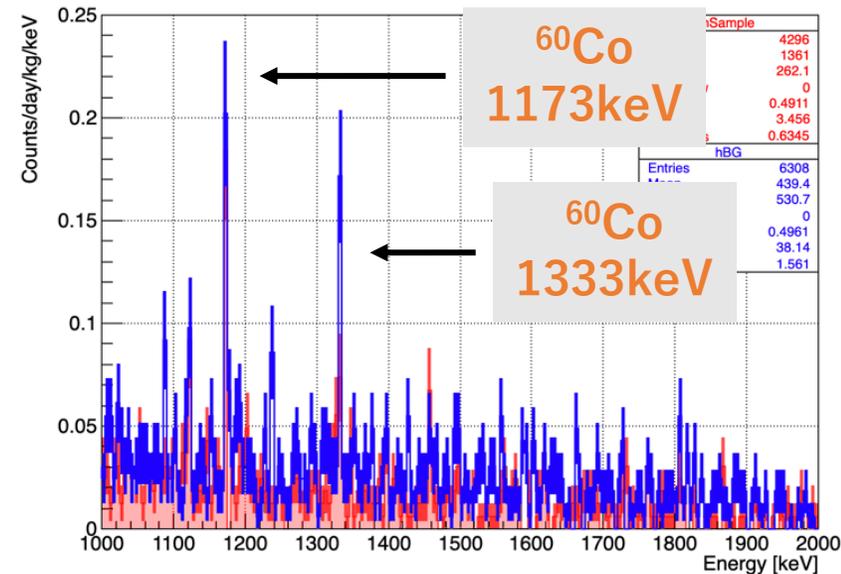
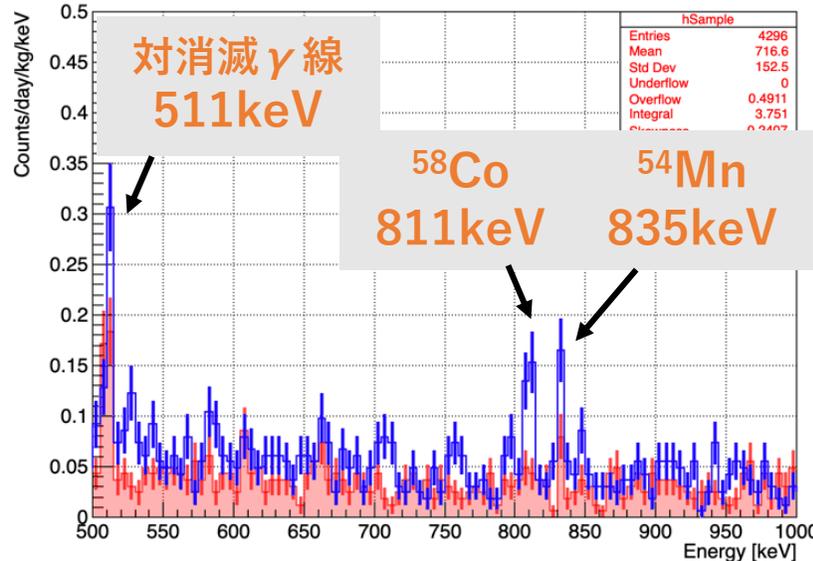
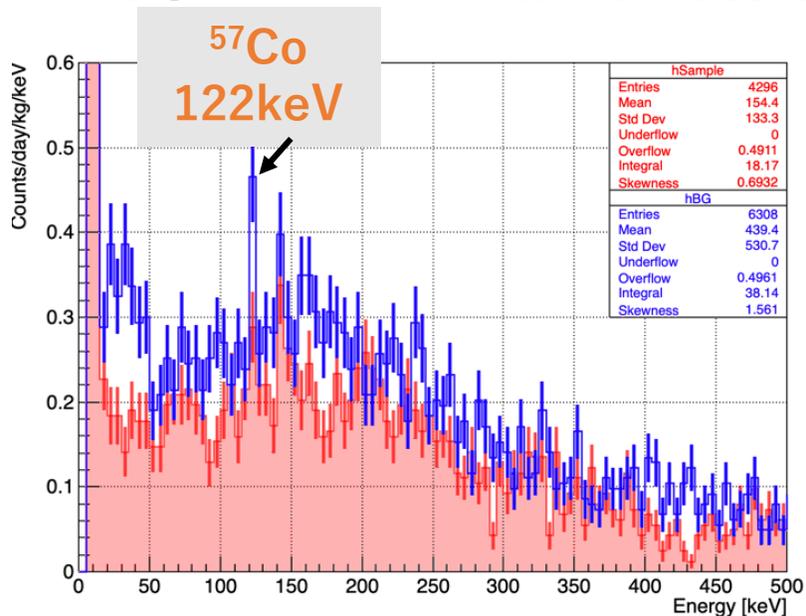
LabC2号機のBGカウントレート  
(40-2700keV)

測定時期	カウントレート [counts/day/kg]
2021/12	143.54
2022/7	102.22

LabC2号機のBGスペクトル

# 現在のGe検出器のBG

いずれも縦軸：Counts/day/kg/keV 横軸：Energy[keV]



LabC2号機のBGスペクトル(左:0~500keV、真ん中:500~1000keV、右:1000~2000keV)

青：2021年12月 赤：2022年7月

2022年7月測定時の各ピーク値の比較(2021年12月測定時を1とする)

核種	$^{57}\text{Co}$	対消滅 $\gamma$ 線	$^{58}\text{Co}$	$^{54}\text{Mn}$	$^{60}\text{Co}$	$^{60}\text{Co}$
エネルギー[keV]	122	511	811	835	1173	1333
半減期	272日		70日	312日	5.27年	5.27年
割合	$0.87 \pm 0.51$	$0.94 \pm 0.27$	$0.11 \pm 0.14$	$0.77 \pm 0.61$	$1.25 \pm 0.44$	$0.62 \pm 0.30$

# シミュレーション方法

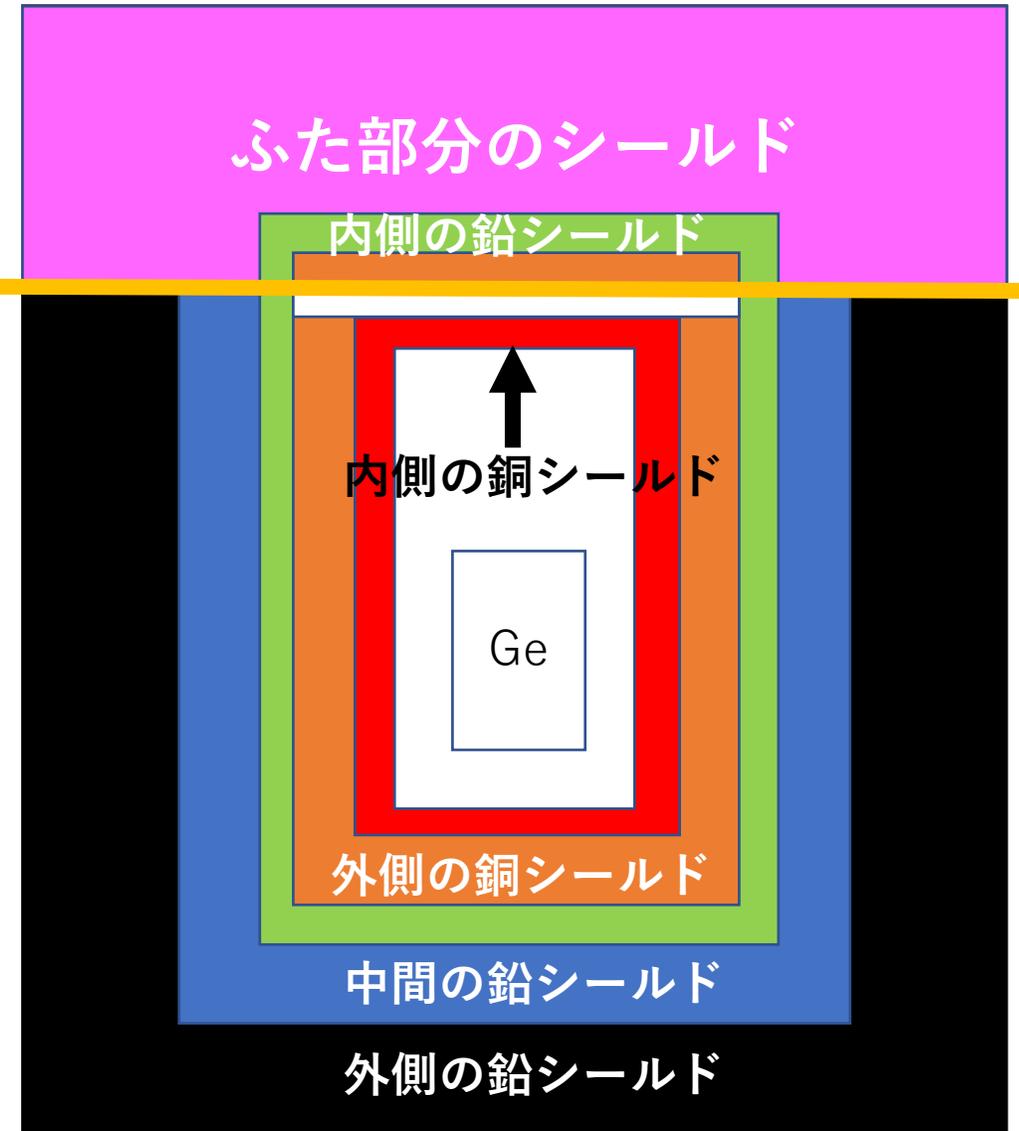
Geant4を用いて各検出器構成部材から一様に放射性核種を発生させるモンテカルロシミュレーションを行い、エネルギーデポジットを確認した

## 現在までにシミュレーションを行った部材

- ・ Al エンドキャップ
- ・ サンプルスペース内  
空気のラドン(White)
- ・ 内側の銅シールド(Red)
- ・ 外側の銅シールド(Orange)
- ・ 内側の鉛シールド(Green)
- ・ 中間の鉛シールド(Blue)

## 現在進行中の部材

- ・ 外側の鉛シールド(Black)



エンドキャップとGe検出器断面図

# 放射性不純物の崩壊頻度・崩壊数

Ge検出器の各シミュレーション箇所における崩壊頻度と崩壊数

検出器部材	放射性不純物	崩壊頻度 [Bq/kg]	崩壊数
Alエンドキャップ	$^{210}\text{Pb}$	$1.88 \times 10^{-1}$	100日分
サンプルスペース内空気のRn	$^{222}\text{Rn}$	$< 1.0 \times 10^{-4}$	100日分
内側の銅シールド	$^{210}\text{Pb}$	$< 4.0 \times 10^{-2}$	100日分
外側の銅シールド	U, Th-chain	10ページで説明	100日分
内側の鉛シールド	$^{210}\text{Pb}$	5.78	100日分
中間の鉛シールド	$^{210}\text{Pb}$	38.9	100日分
外側の鉛シールド	$^{210}\text{Pb}$	178.1	進行中

## 各部材の崩壊頻度について

- ① Alエンドキャップ…Ge検出器および表面アルファ検出器測定結果より算出
- ② サンプルスペース内空気のRn…Ge検出器に送られるラドンフリーエア中のRnを測定した論文より引用
- ③ 内側の銅シールド…銅シールドサンプル中の $^{210}\text{Pb}$ 含有量を測定した論文より引用
- ④ 内側の鉛シールド…Ge検出器の測定結果を利用
- ⑤ 中間の鉛シールド…Ge検出器の測定結果を利用
- ⑥ 外側の鉛シールド…Ge検出器の測定結果を利用

# Alエンドキャップの崩壊頻度

I. エンドキャップに使用のAlの表面アルファ検出器及びGe検出器での測定結果により、ウラン系列 $^{210}\text{Pb}$ で放射平衡が成り立っていないと仮定

表面アルファ検出器： $^{210}\text{Po}(5.3\text{MeV})$   $1.02 \times 10^{-3}(\text{alpha}/\text{cm}^2/\text{hr}) \times 2.5 < E < 4.8 \text{ MeV}$

Ge検出器：どの核種も有意に見られなかった

II. Iより $^{210}\text{Pb}$ の崩壊頻度を求めるため、シミュレーションを行った

→ 5.3MeVの $\alpha$ 線( $^{210}\text{Po}$ (U-chain))を10000発発生させ、Al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を得る (バルク事象)

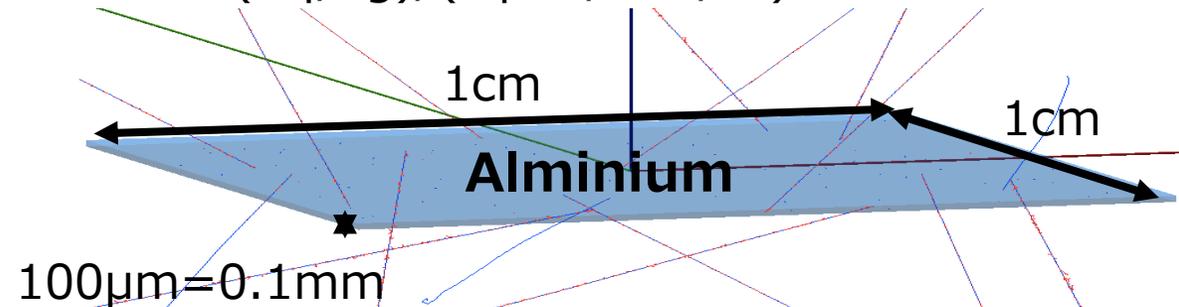
III. IIの結果より、 $^{210}\text{Pb}$ の崩壊頻度を求めるための変換係数を求めた

$$\begin{aligned} [\text{発生イベント数}/\text{kg}] / [\text{カウント数}/\text{cm}^2 \times 3600\text{s}] &= [10000 / (2.7 \times 10^{-5} \text{kg})] / [558 / 1\text{cm}^2 \times 3600\text{s}] \\ &= 1.84 \times 10^2 (\text{Bq}/\text{kg}) / (\text{alpha}/\text{cm}^2/\text{hr}) \end{aligned}$$

IV. IのAlの測定結果とIIIで得られた変換係数により $^{210}\text{Pb}$ の崩壊頻度を計算した

$$\begin{aligned} ^{210}\text{Pbの崩壊頻度} &= 1.02 \times 10^{-3}(\text{alpha}/\text{cm}^2/\text{hr}) \times 1.84 \times 10^2(\text{Bq}/\text{kg}) / (\text{alpha}/\text{cm}^2/\text{hr}) \\ &= 1.88 \times 10^{-1} \text{Bq}/\text{kg} \end{aligned}$$

イベントディスプレイ

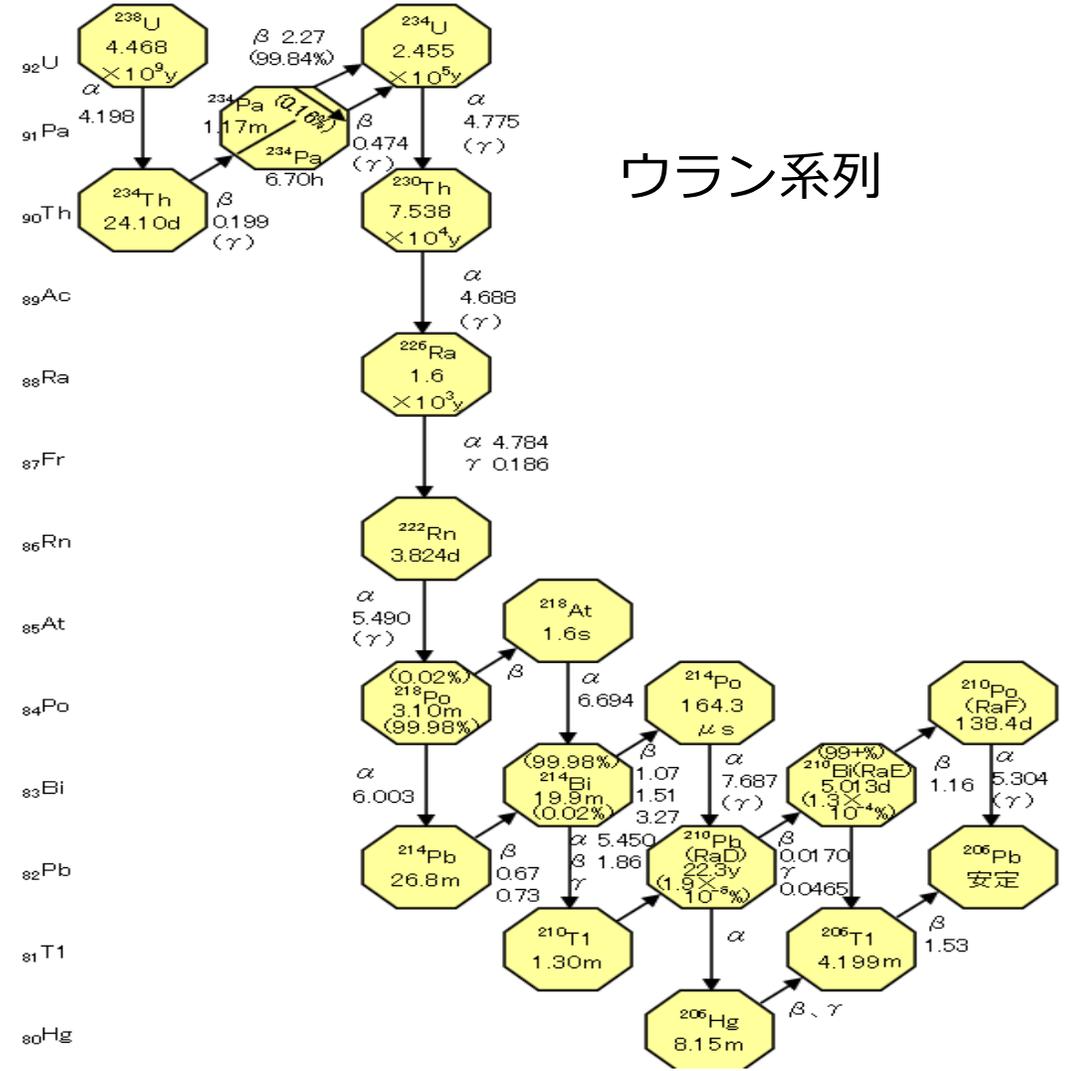


# 外側の銅シールドの崩壊頻度

シールドのGe検出器における測定結果

	放射性不純物	崩壊頻度
ウラン系列	Middle U-chain	< 1.05 mBq/kg
	Upper U-chain	< 33.8 mBq/kg
	<sup>210</sup> Pb	< 491 mBq/kg
トリウム系列	Th-chain	< 0.80 mBq/kg

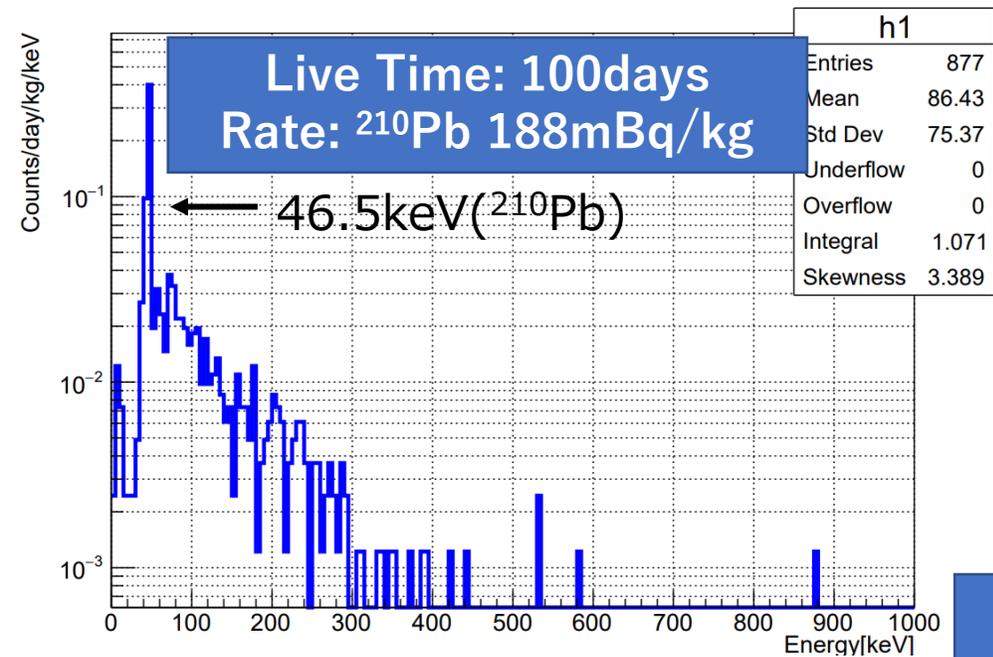
Ge検出器での測定結果では、有意な値が求められていないウラン系列で放射平衡を満たしていると仮定し、崩壊頻度が一番小さい1.05mBq/kgでウラン系列を、0.80mBq/kgでトリウム系列をそれぞれシミュレーションを行った



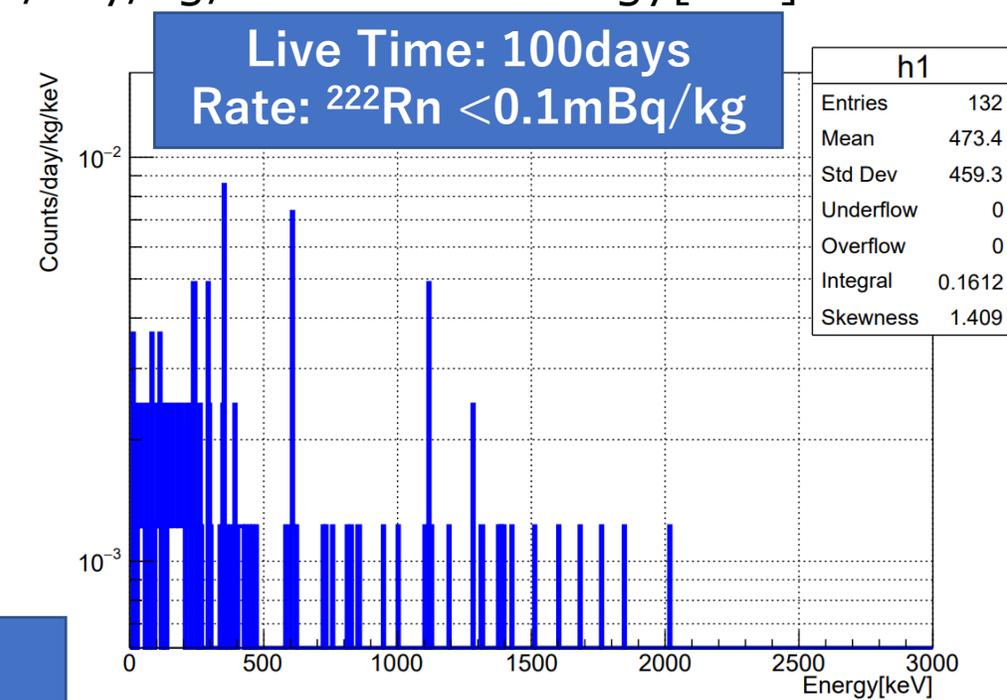
ウラン系列

# シミュレーション結果

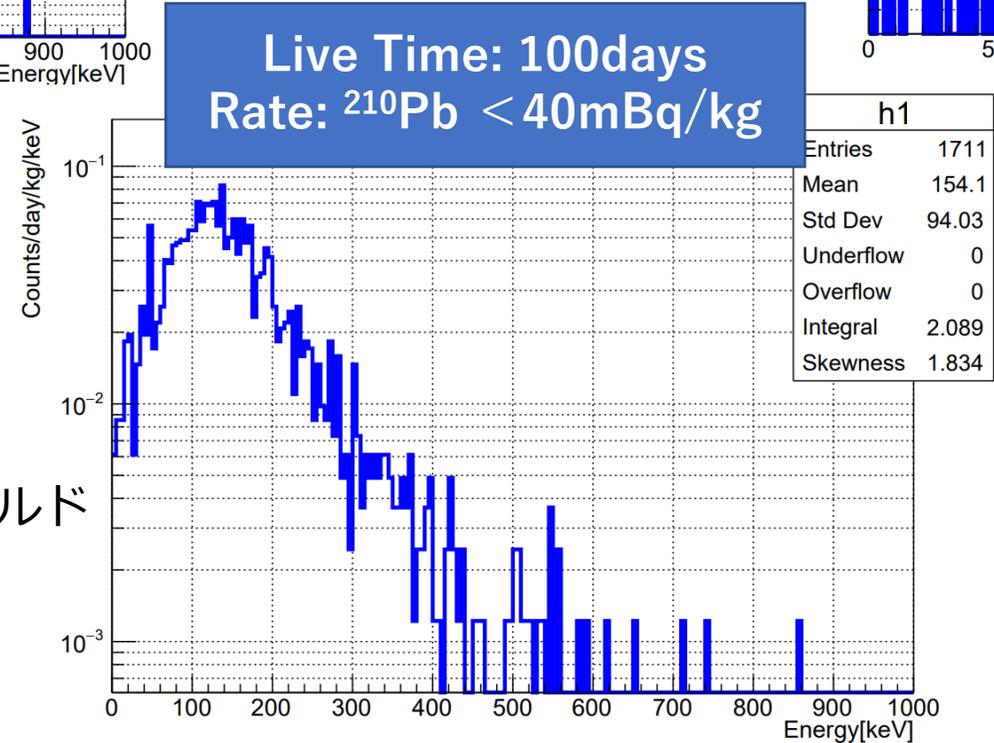
いずれも縦軸 : Counts/day/kg/keV 横軸 : Energy[keV]



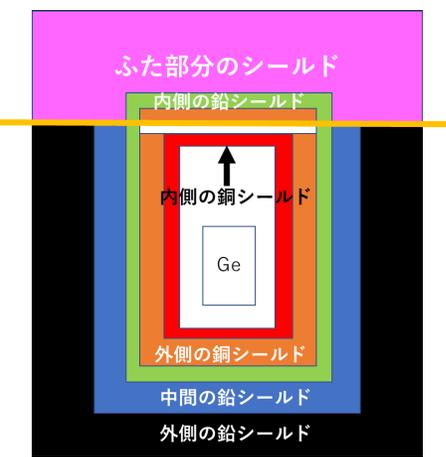
AI エンドキャップ



サンプルスペース内空気のRn

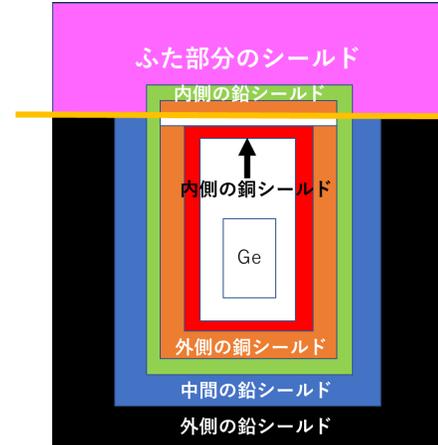


内側の銅シールド (Red)



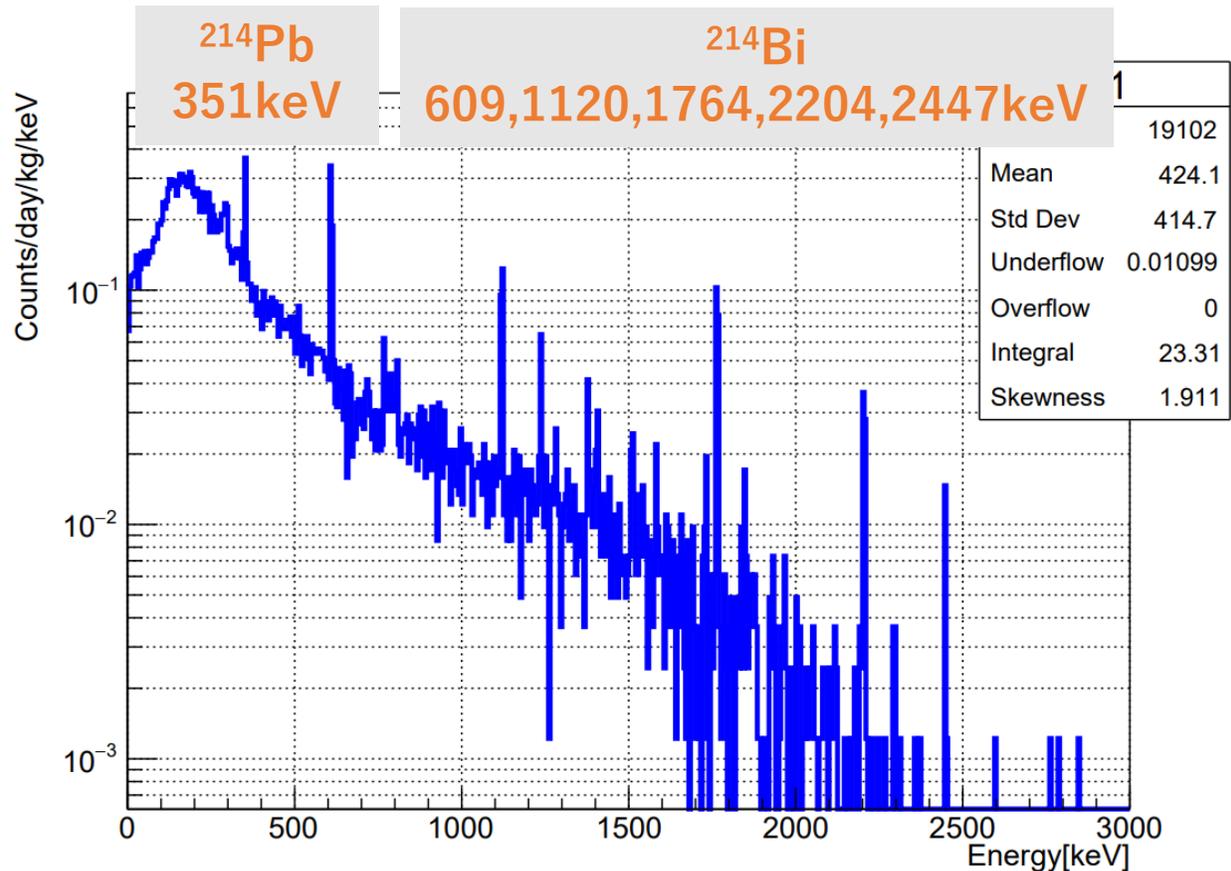
# シミュレーション結果

いずれも縦軸 : Counts/day/kg/keV 横軸 : Energy[keV]

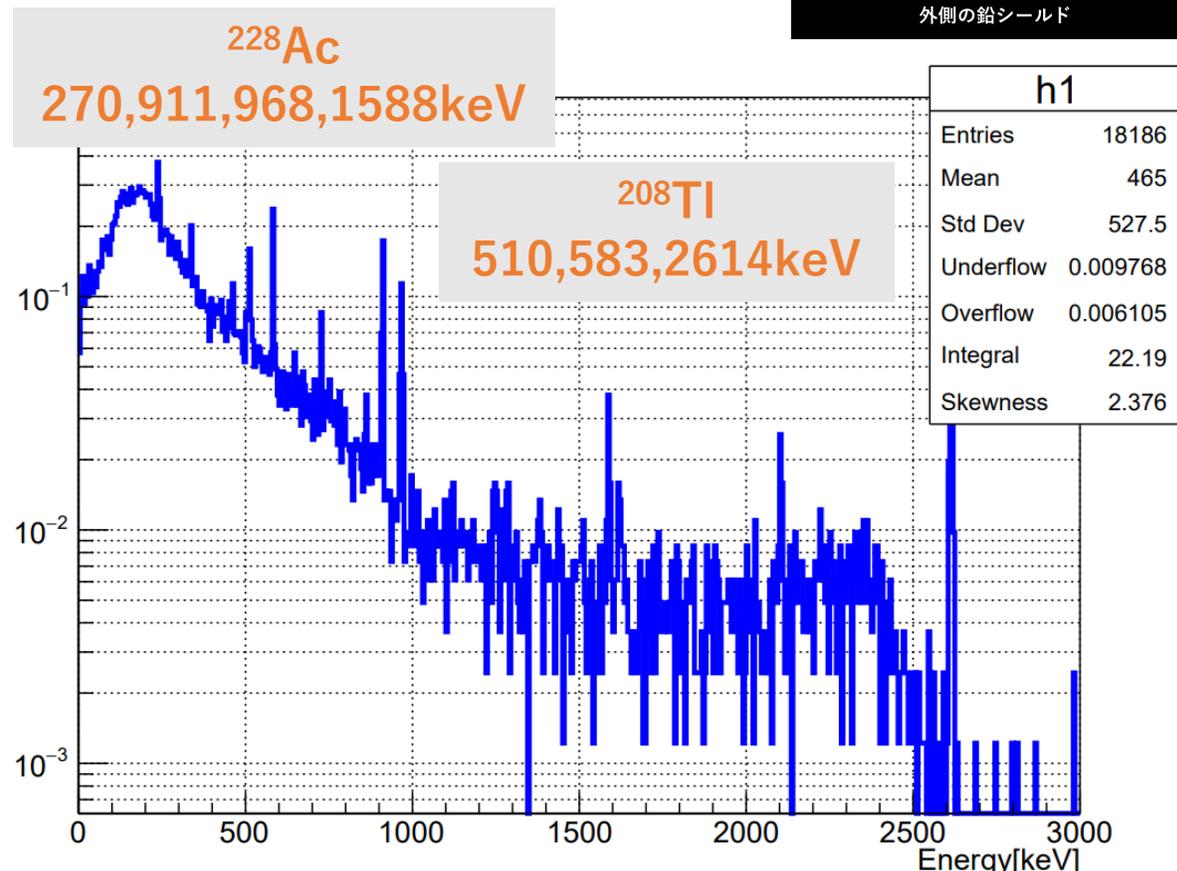


Live Time: 100days  
Rate: 1.05mBq/kg

Live Time: 100days  
Rate: 0.80mBq/kg



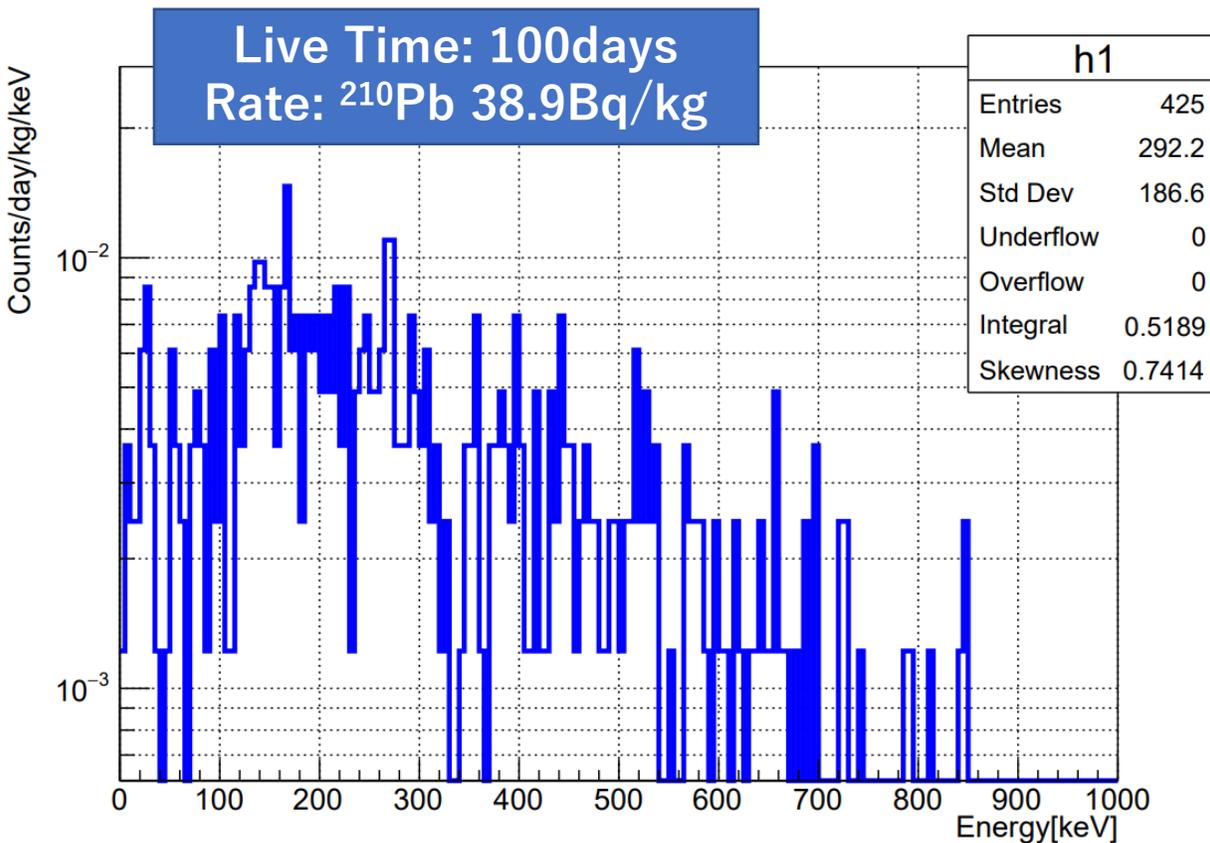
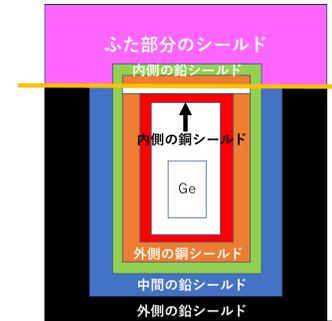
外側の銅シールド ウラン系列(Orange)



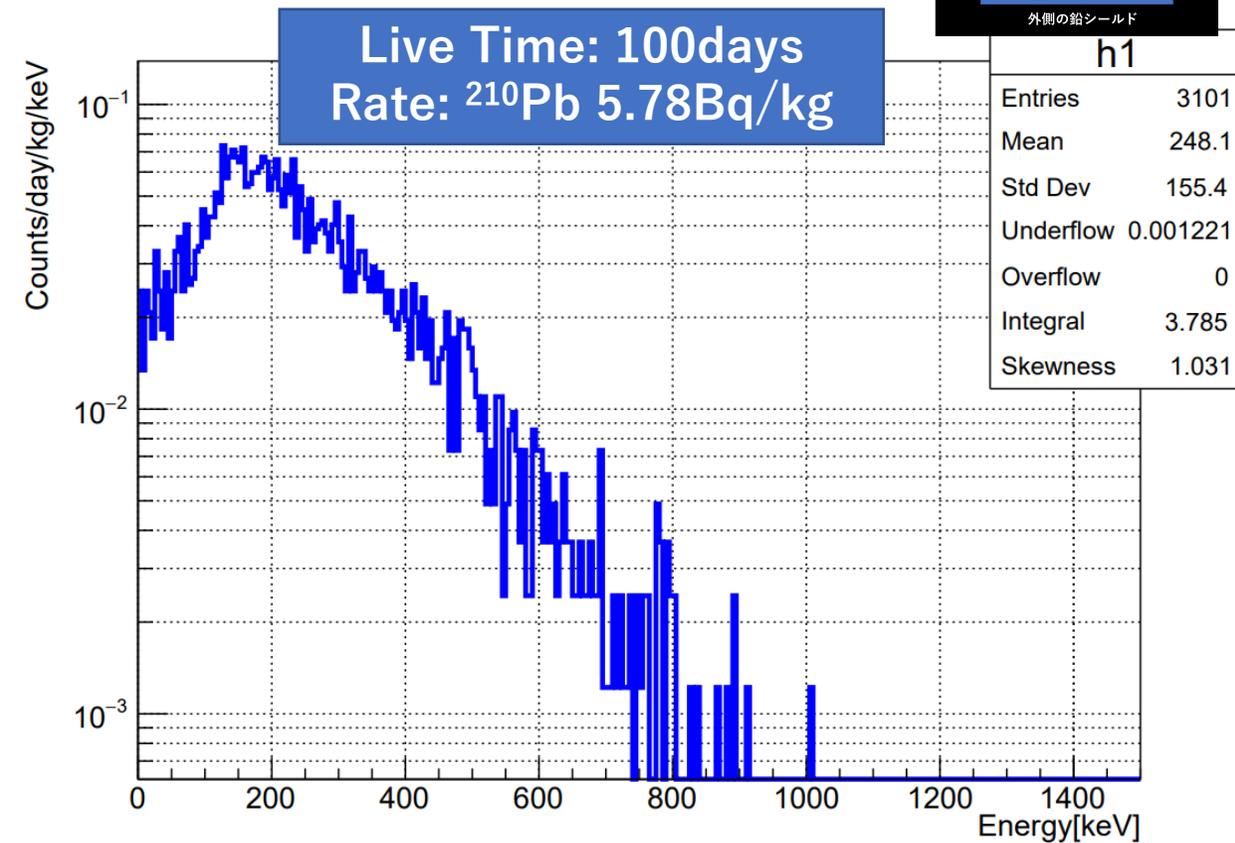
外側の銅シールド トリウム系列(Orange)

# シミュレーション結果

いずれも縦軸 : Counts/day/kg/keV 横軸 : Energy[keV]



中間の鉛シールド(Blue)



内側の鉛シールド(Green)

$^{210}\text{Pb}$ 由来のガンマ線(46.5keV)、 $^{210}\text{Bi}$ の $\beta$ 崩壊後(1.16MeV)の制動放射によるガンマ線のエネルギーデポジットを確認

# 外側の鉛シールドのシミュレーション状況

Rate:  $^{210}\text{Pb}$  175.1Bq/kg

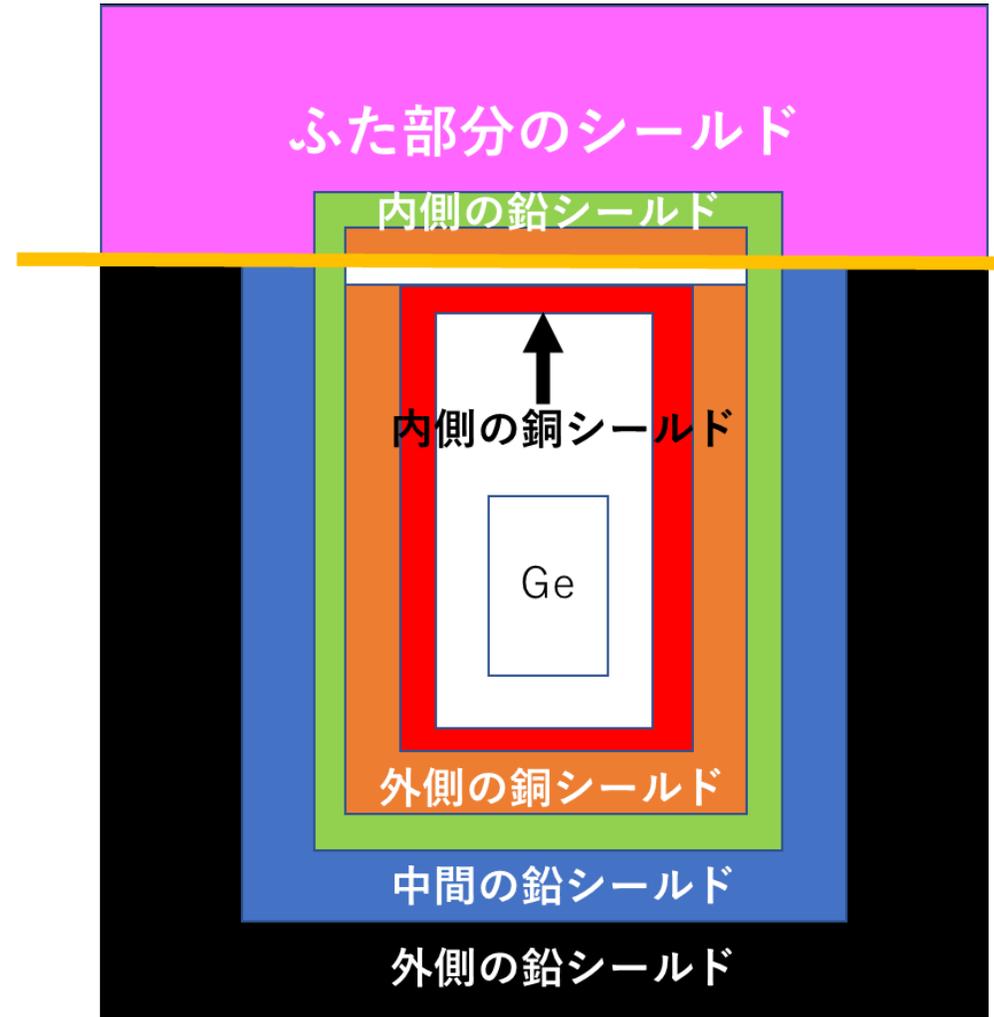
神岡sukapのCPUクラスタにジョブを投げる形でシミュレーションの統計を増やしている  
100日分のデータ取得を目指しているが、シミュレーションに時間を要している  
(1日に1ジョブで11億回のシミュレーション)

## 現在の状況

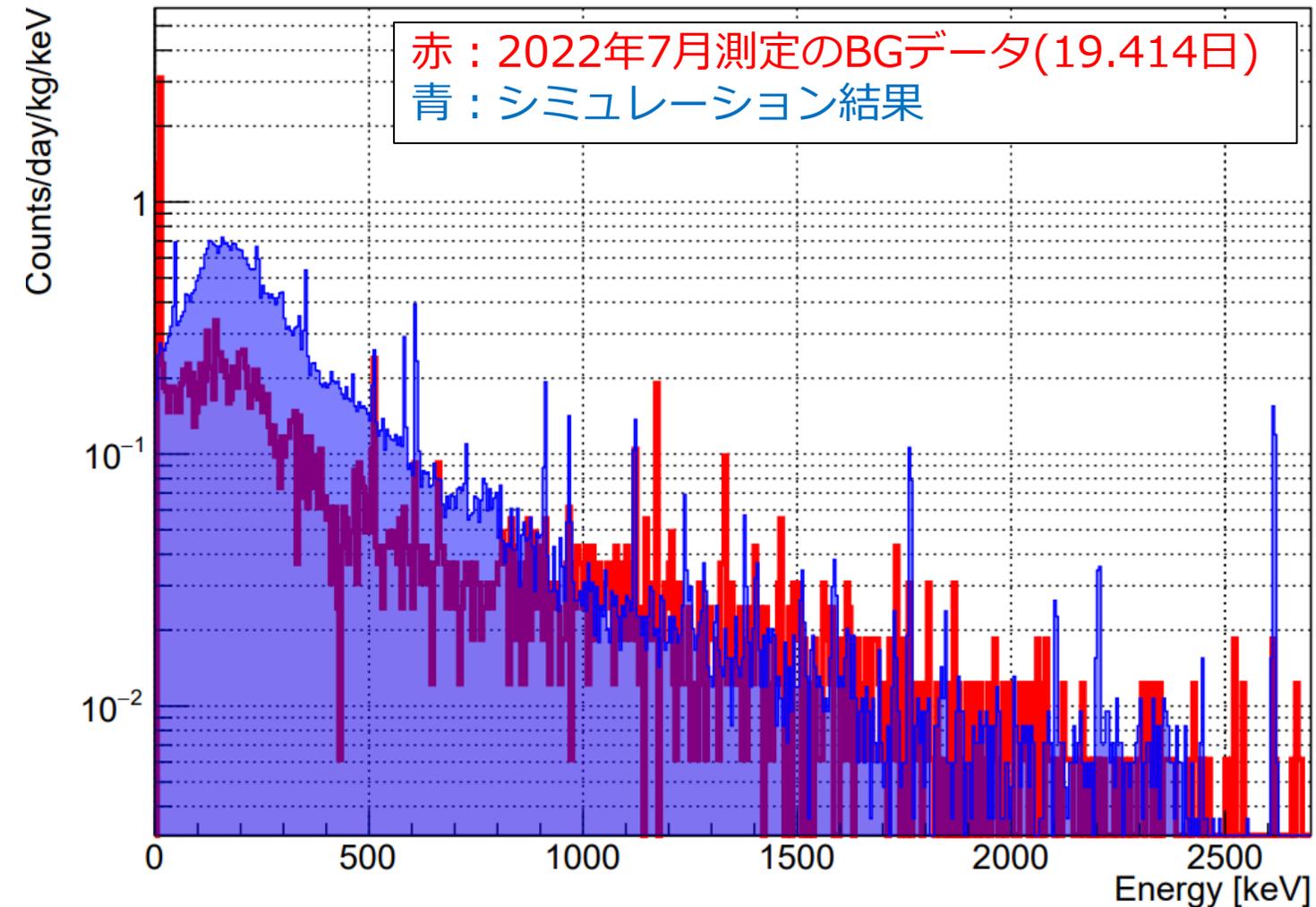
シミュレーション回数: **0.422 兆回** / 475 兆回

エネルギーデポジット: **2 カウント**

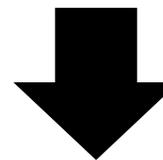
崩壊数: **0.089 日分**



# 結果 (BGスペクトルとの比較)



- 1000keV以下の領域ではシミュレーション結果がBGデータを上回っている
- 1000keVよりも大きい領域ではBGデータの方がシミュレーション結果を上回っている



- 現在行っている外側の銅シールド、外側の鉛シールドについてのシミュレーションをさらに進め評価を行う
- シミュレーションで評価できていない宇宙線起源の放射性不純物、環境放射線などからの影響を確認していく

Ge検出器の本BGスペクトルとシミュレーション結果の比較

# まとめ

## 結果

- ・ 神岡地下実験室で新たに運用が始まったGe検出器では、低BGを実現できた
- ・ このGe検出器のBG源を同定するため、Geant4を用いてAIエンドキャップとサンプルスペース内空気のRn、銅、鉛シールドのモンテカルロシミュレーションを行った
- ・ Ge検出器のBGスペクトルとシミュレーション結果を比較した

## 今後の展望

- ・ 外側の銅、鉛シールドのシミュレーションをさらに進め評価する
- ・ 宇宙線起源の放射性不純物や外から来る環境放射線からの寄与を見積もり、BG源を同定する
- ・ その知見によって、さらなる低BG化を目指す

# Back Up

# 表面アルファ検出器(Ultra-Lo-1800)

サンプルから放出されるアルファ線(表面・バルク事象)を測定する  
2015年1月：神岡地下実験室クリーンルームに導入

表面アルファ検出器の仕様

	仕様
検出効率	>90% (2 $\pi$ )
エネルギー分解能	<9% FWHM (4.6MeV)
検出エネルギー範囲	1~10MeV
到達可能BGLレベル	10 <sup>-4</sup> alpha/cm <sup>2</sup> /hr

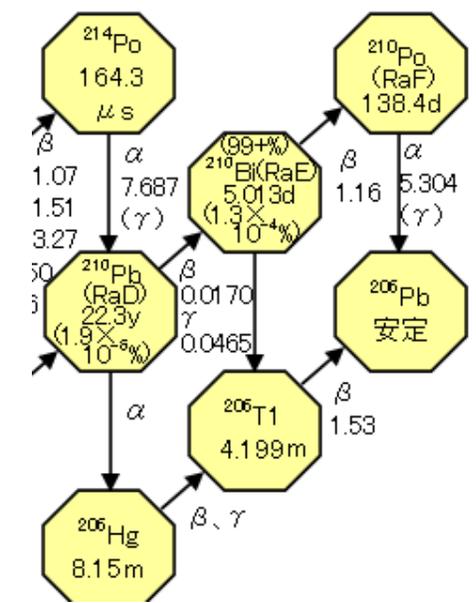


表面アルファ検出器全体と  
サンプルスペース

BGの正確な把握が困難である<sup>210</sup>Pb  
について、表面とバルク事象を区別  
して理解できる

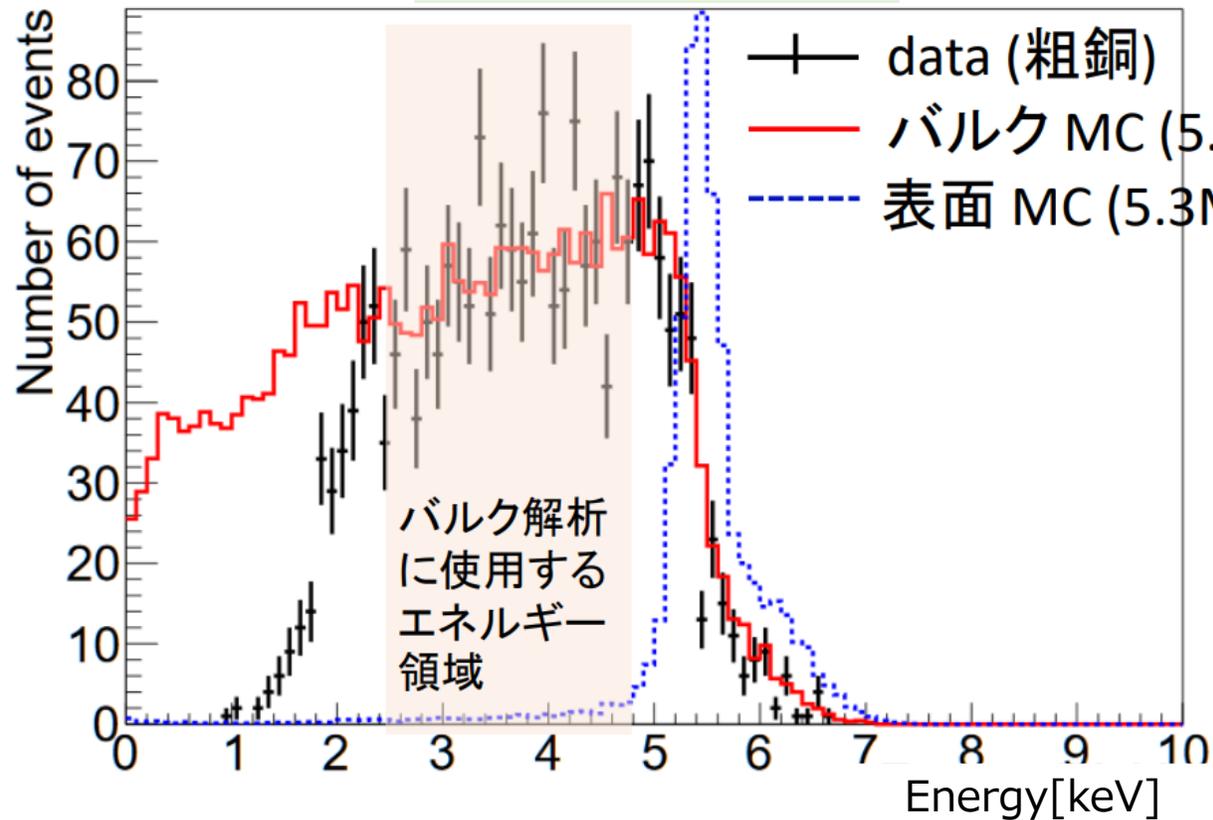
引用：小林兼好 第六回極低放射能技術研究会

# 表面アルファ検出器(Ultra-Lo-1800)



$^{210}\text{Pb}$

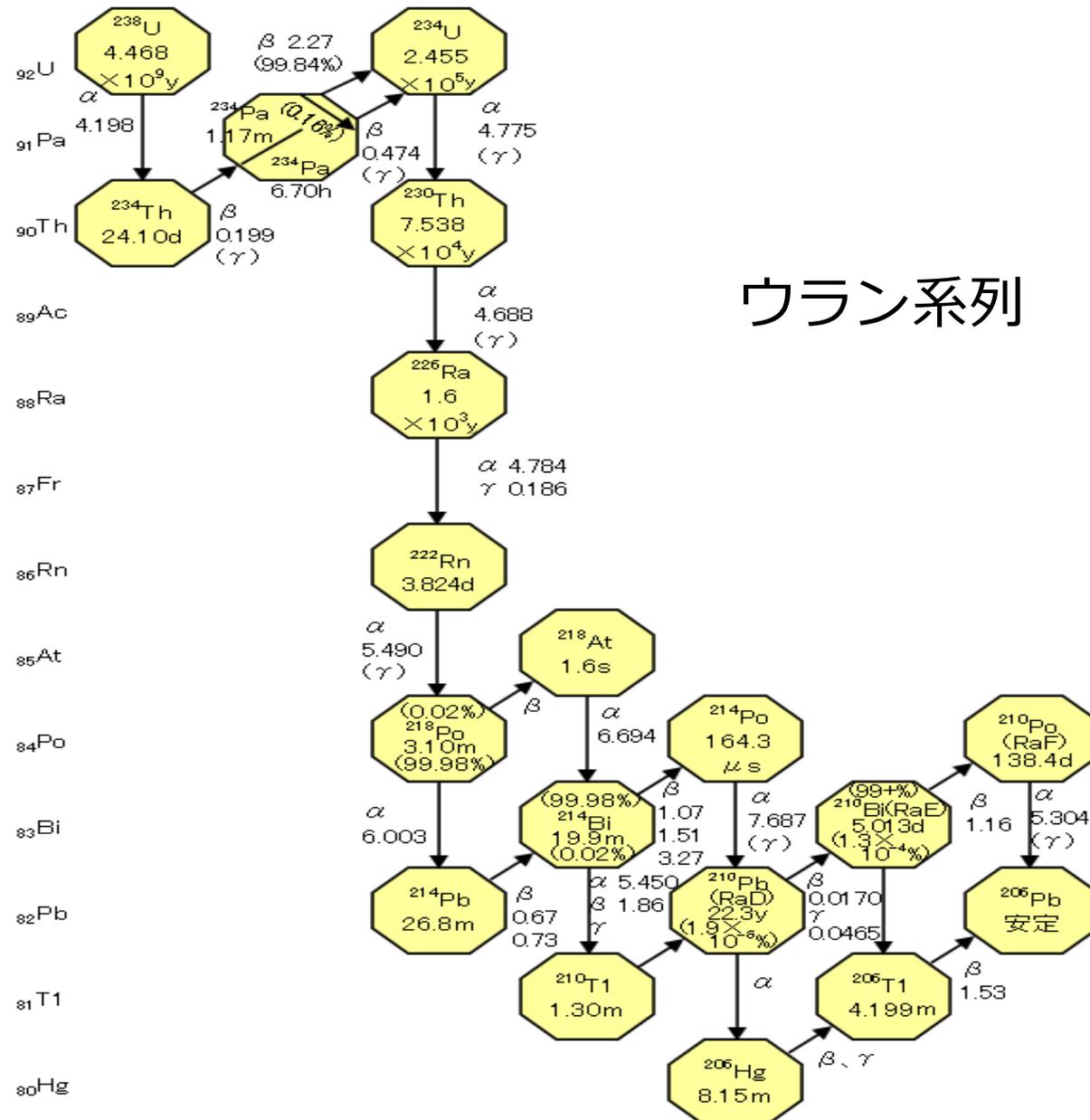
- 地下実験で主なBG源となる
- $^{222}\text{Rn}$ が空気中に存在し、娘核が物質表面に付着するため、 $^{210}\text{Pb}$ が残る
- 放射平衡が容易に崩れ、Ge検出器やICP-MSといった他の検出器では表面とバルクの区別ができないため、全体量の把握が困難 ⇒表面アルファ検出器を利用

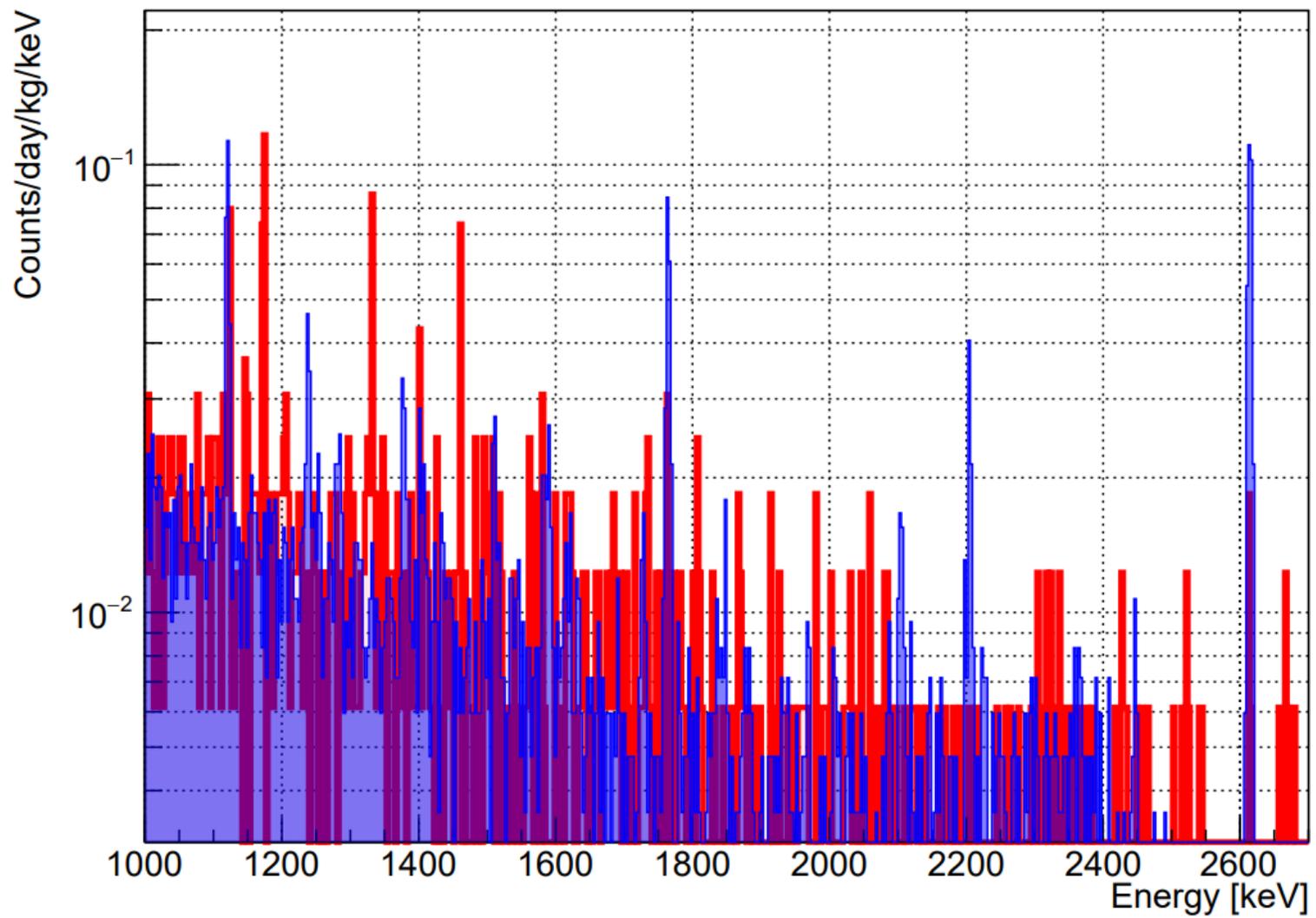


粗銅の表面アルファ検出器測定結果とシミュレーション結果

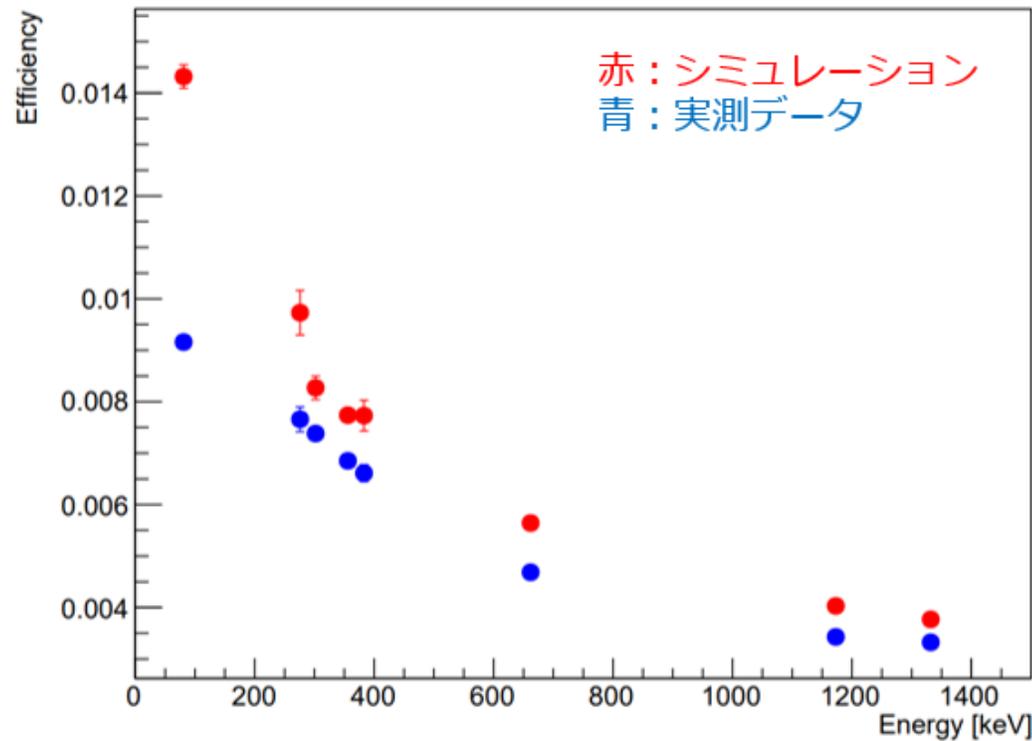
引用：小林兼好 第六回極低放射能技術研究会

# ウラン系列

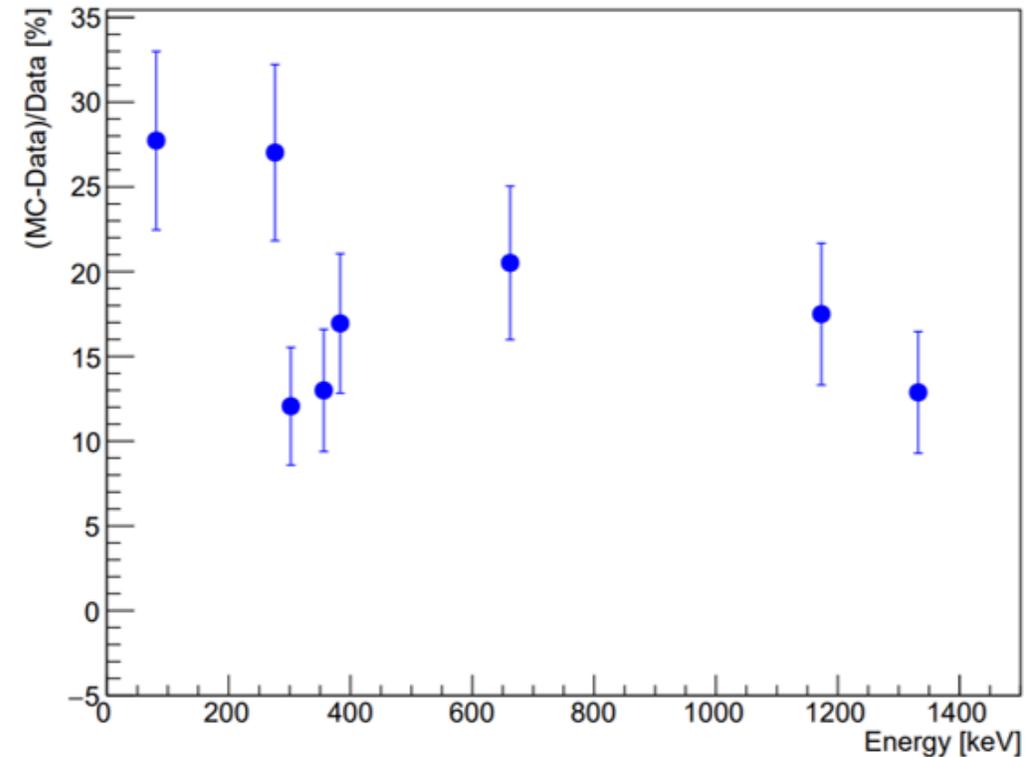




# 結果 (検出効率)



グラフ7. 各エネルギーにおけるガンマ線の検出効率(線源上側)



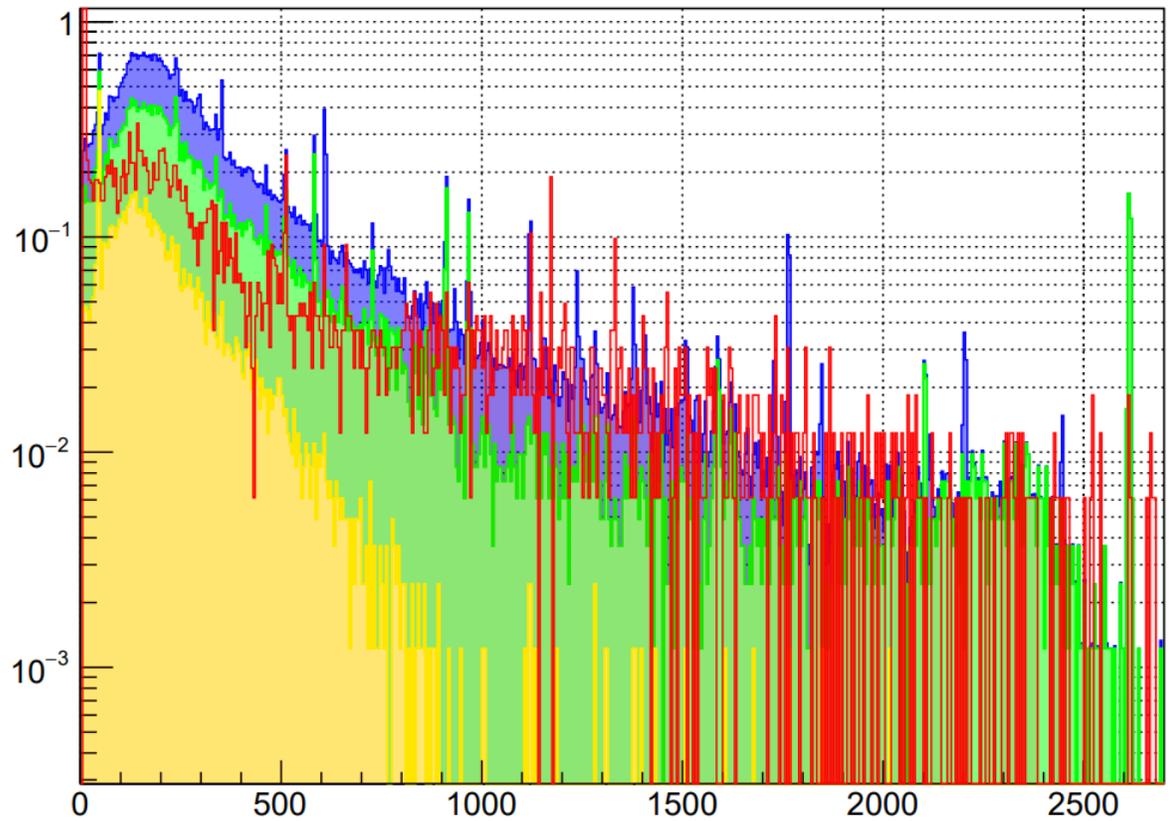
グラフ8. シミュレーションと実測データの検出効率の比較

およそ+20%の精度でシミュレーションが実測データを再現している

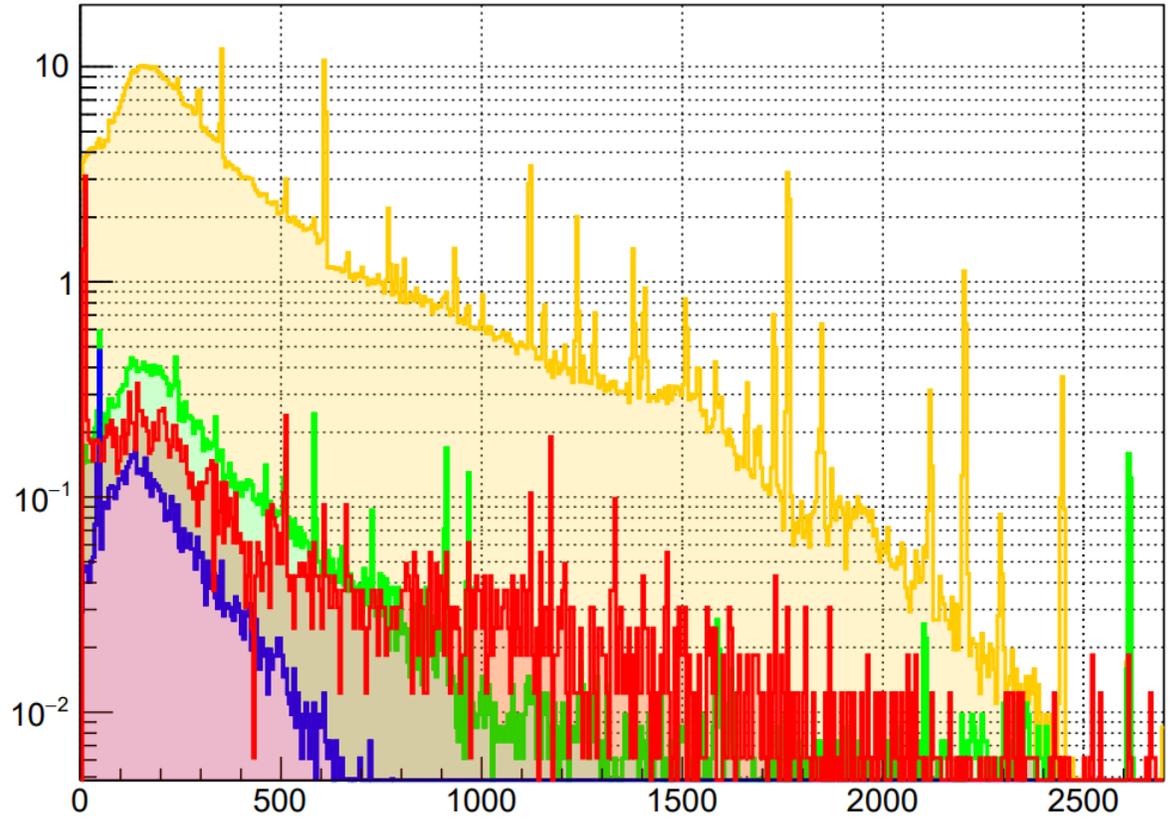
ウラン系列を全て放射平衡と仮定  
 ウラン系列：1.05mBq/kg(左図)

Th-chainとUpper U-chainの結果のみ使用

ウラン系列：33.8mBq/kg(右図)



Red : BG data in Jul.2022(19.414day)  
 Blue: Upper U-chain  
 Green: Th-chain  
 Yellow: other MC result



Red : BG data in Jul.2022(19.414day)  
 Blue: other MC result  
 Green: Th-chain  
 Yellow: Upper U-chain