

第一回 学術変革「地下稀事象」 若手研究会

PIKACHU Phase 1 実験の立ち上げと現状



筑波大 D1 大森 匠

2025/3/7

^{160}Gd の二重ベータ崩壊探索

2

◆ニュートリノを伴う二重ベータ崩壊($2\nu 2\beta$)

- 一部原子核では既に発見
- 核行列要素(NME)計算の妥当性検証に有効

◆ ^{160}Gd は $2\nu 2\beta$ 未発見

◆先行研究：GSO 結晶による探索[1]

→ 結晶内の U/Th 系列不純物で感度が制限

[1] F.A.Danevich et al., Nucl. Phys. A, Vol. 694, Iss. 1–2, 2001, Pages 375–391
[2] N. Hinohara et al., Phys. Rev. C 105, 044314 (2022)

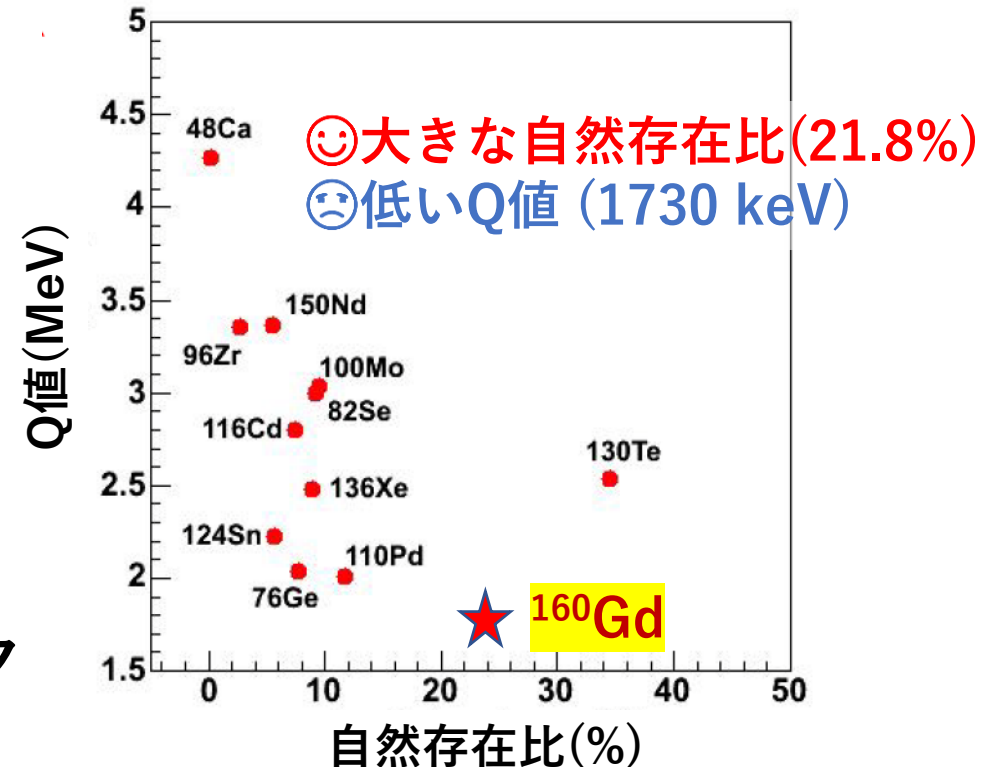
$$(T_{1/2}^{2\nu})^{-1} = \frac{G_{2\nu}(Q_{\beta\beta}, Z)}{\text{位相因子}} \frac{|M_{2\nu}|^2}{\text{NME}}$$

近似モデル・計算手法
の違いで 2 ~ 3 倍の不定性

Limit	$T_{1/2}^{0\nu}$	$T_{1/2}^{2\nu}$
先行研究 (90% C.L.)	$> 1.3 \times 10^{21}$ 年	$> 1.9 \times 10^{19}$ 年
理論予想[2]	-	4.7×10^{20} 年

1桁程度の感度改善で $2\nu 2\beta$ 発見の可能性

見つからなくても NME 計算に重要なフィードバック



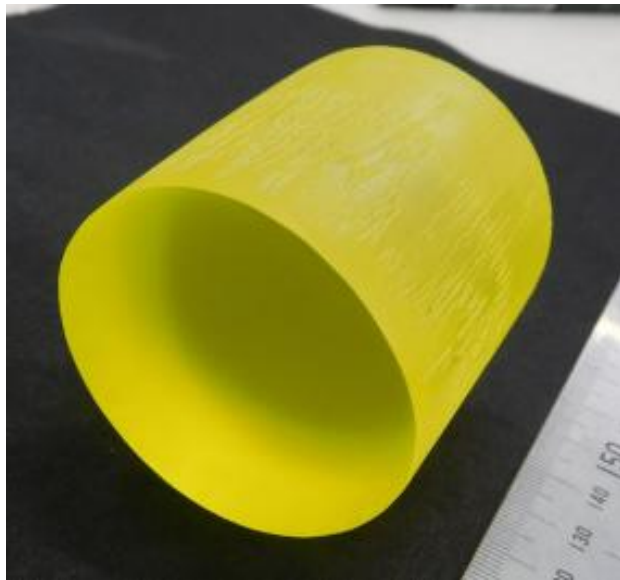
◆ GAGG (Ce:Gd₃Al₂Ga₃O₁₂) 大型単結晶を用いて $2\nu 2\beta$ 発見を目指す !!

- ✓ 大型結晶 → 6.5 cm ϕ , 14.5 cmL サイズで先行研究の 3.5 倍の ¹⁶⁰Gd 量.
- ✓ 大発光量 → GSO の約 6 倍. エネルギー分解能の向上.
- ✓ 粒子識別 → α 線バックグラウンド(BG)を除去可能.

[3] T. Omori et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 033D01 (2024).

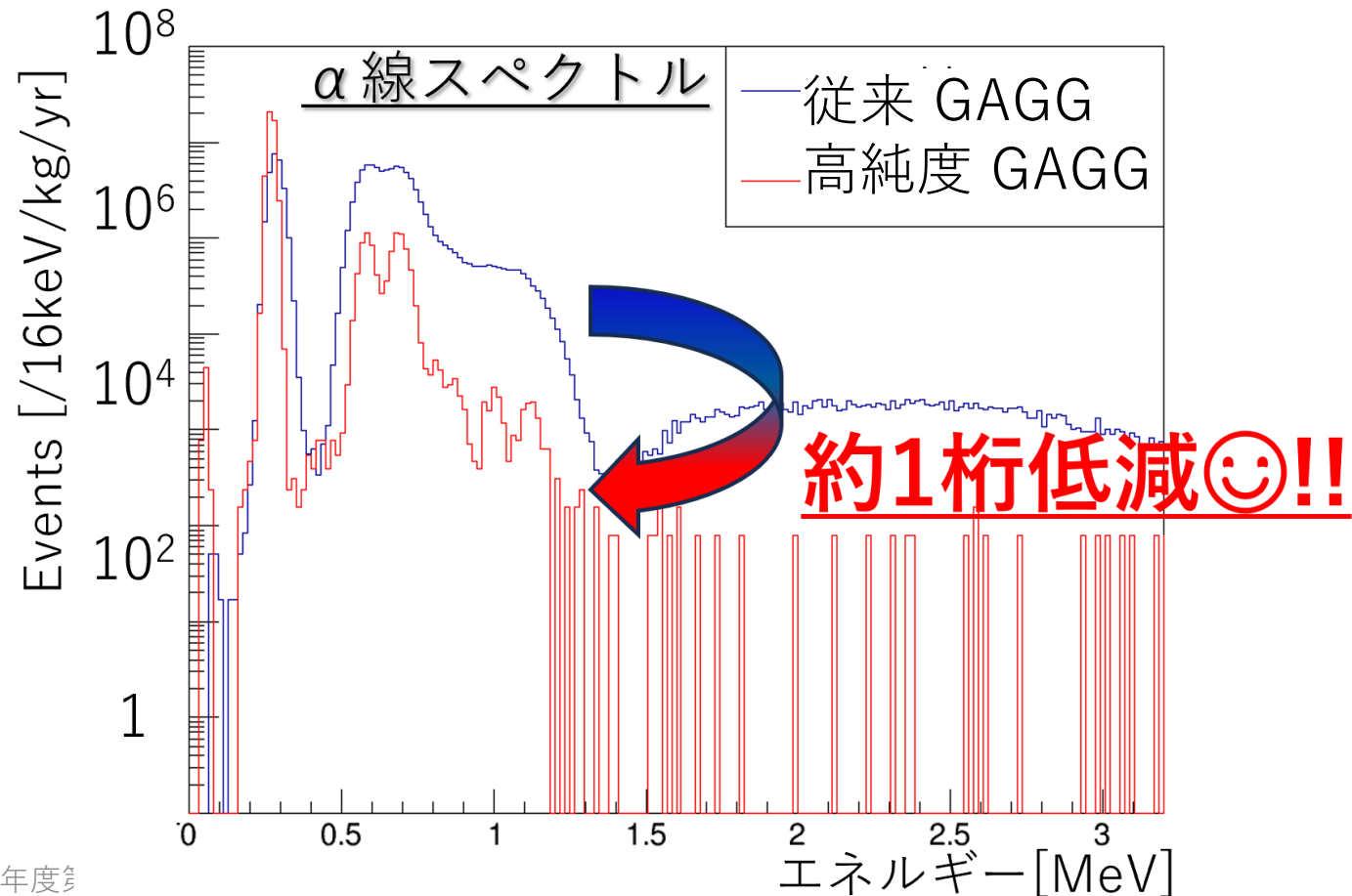
◆ 高純度 GAGG の開発・BG 評価[3]

- 神岡地下で BG 測定
- ¹⁶⁰Gd: 84 g, 測定時間: 15.7 h
→ 従来結晶から約 1 桁 BG 低減!



✓ 高純度 GAGG
(5.4 cm ϕ , 5.2 cmL)

宇宙史研究センター2024年度第

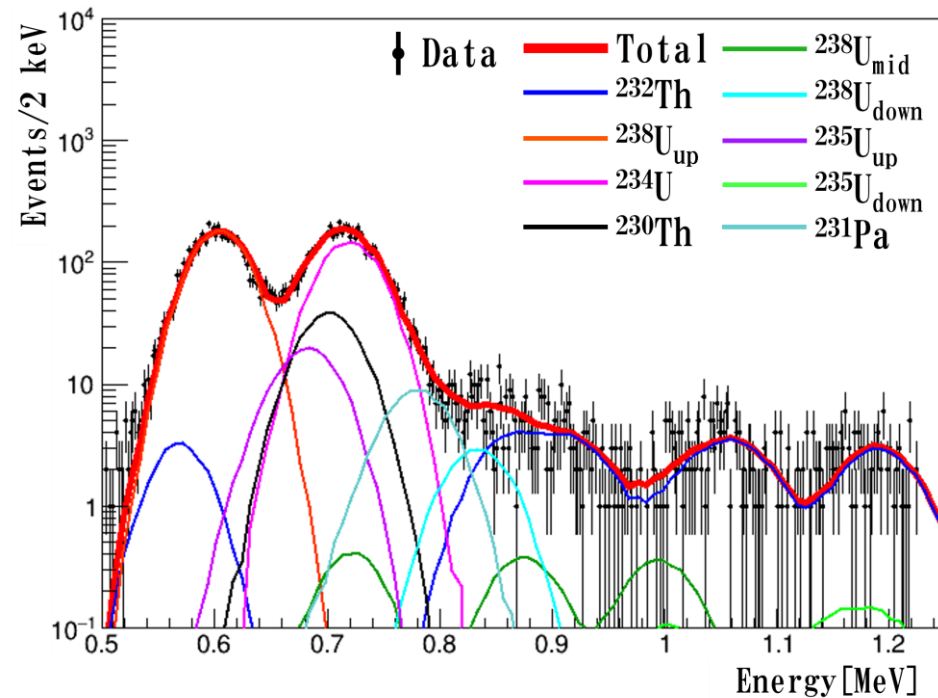


BG モデルによるデータの再現

◆ GEANT4 で BG モデルを構築し、データにフィッティング

◆ α 線BG

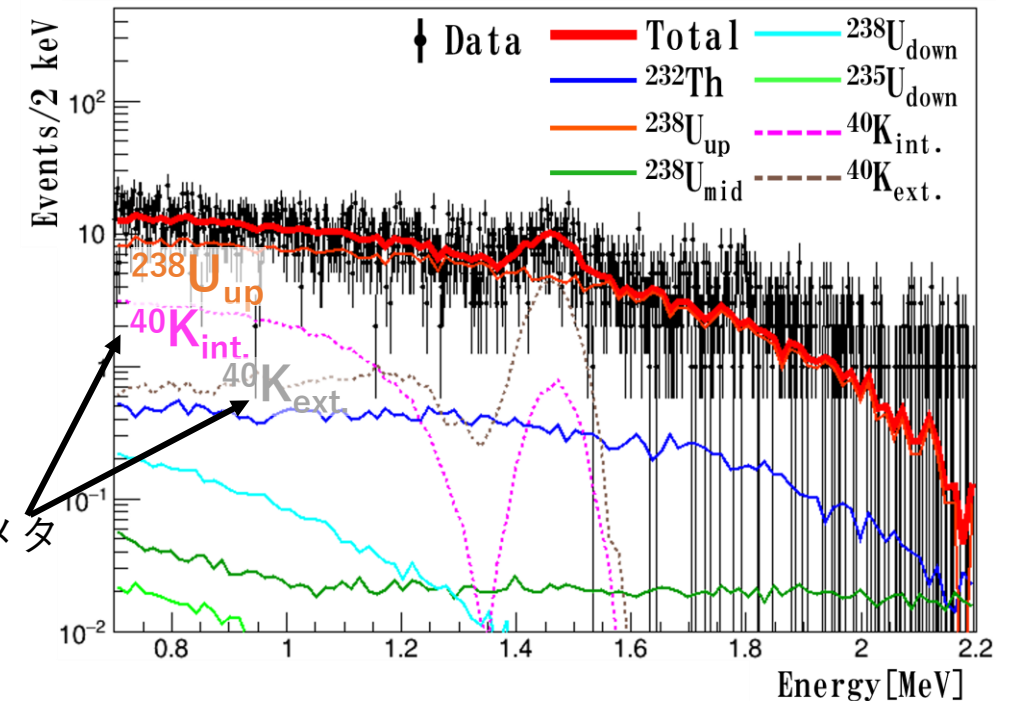
- 結晶内部の U/Th 系列
- フィット結果を β 線BG に外挿



◆ β 線BG

- U/Th 系列に加え、結晶内の ^{40}K と外部からの ^{40}K γ 線

フィットパラメータ
はこの2つ



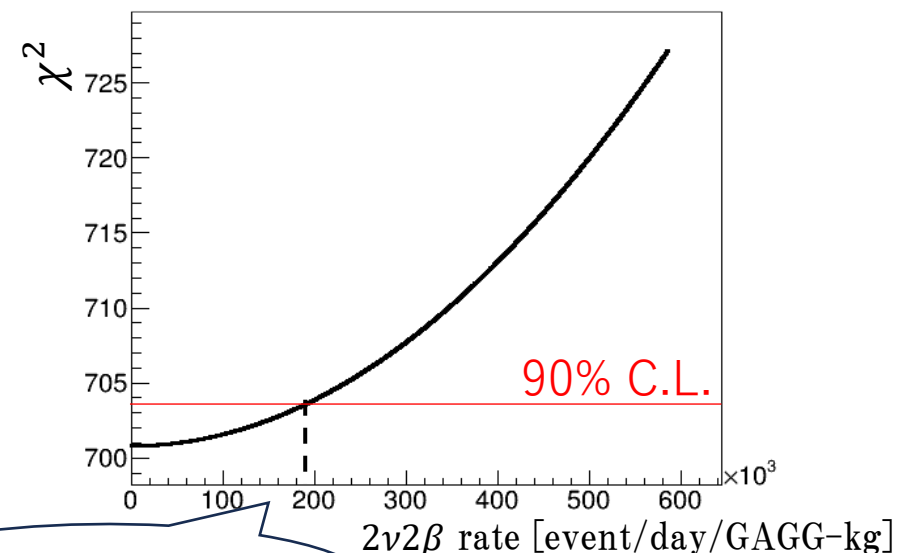
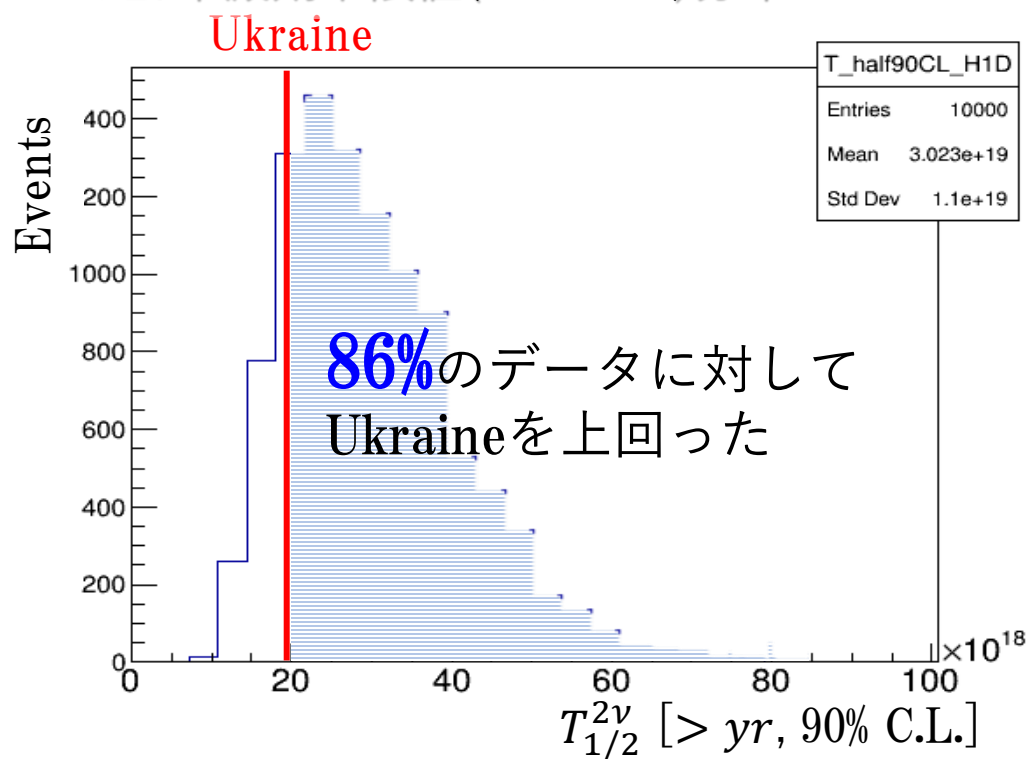
→ ^{234}Pa ($^{238}\text{U}_{\text{up}}$) が Q 値で支配的な BG (124 ± 2 mBq/kg)

◆ BG モデルでデータをよく再現できている

疑似データによる感度の見積り

- ◆ Best-fit の BG モデルを基に疑似データを 10,000 イベント作成
 - 高純度GAGGの大型ver. 2本, 2年探索を仮定
- ◆ $2\nu(0\nu)$ 信号レートにする χ^2 を計算し, 半減期下限値を見積もった

✓ 2ν 半減期下限値 (90% C.L.) 分布



[4] T. Omori et al. <https://arxiv.org/abs/2412.04712>

✓ 90% C.L. 半減期下限値まとめ[4]

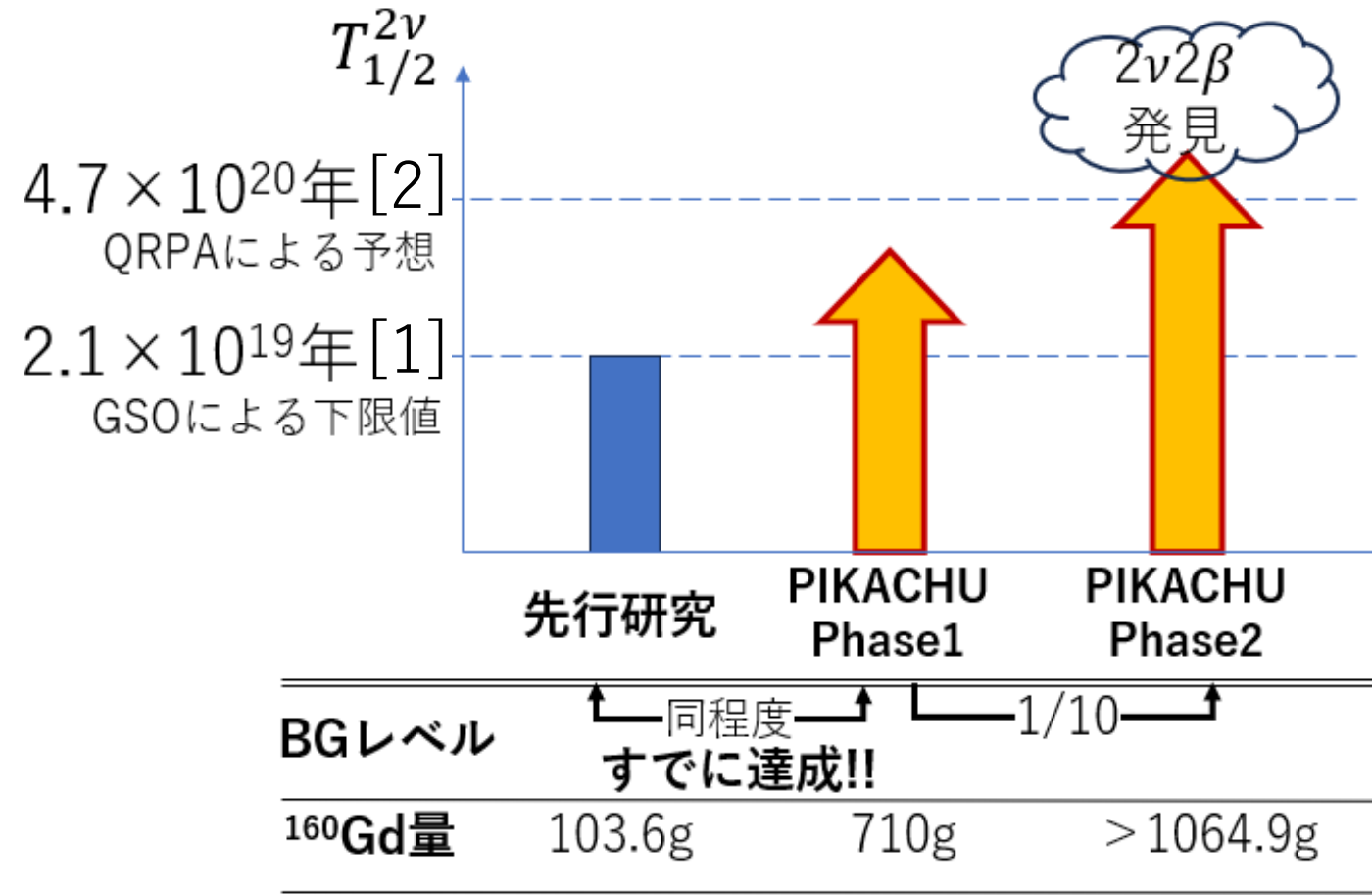
	$T_{1/2}^{2\nu} [yr]$	$T_{1/2}^{0\nu} [yr]$
PIKACHU 予想感度	$> 2.78 \times 10^{19}$	$> 1.70 \times 10^{21}$
ウクライナ	$> 1.9 \times 10^{19}$	$> 1.3 \times 10^{21}$

◆Phase 1

- ✓ 目的: 探索感度更新
- ✓ 大型高純度 GAGG 2 本で 2 年探索
- ✓ Phase 2 に向けた R&D (後述)
- ✓ 低 BG 実験環境を整えて, 2024 年 12 月に開始!



[1] F.A.Danevich et al., Nucl. Phys. A, Vol. 694, Iss. 1–2, 2001, Pages 375–391
[2] N. Hinohara et al., Phys. Rev. C 105, 044314 (2022)



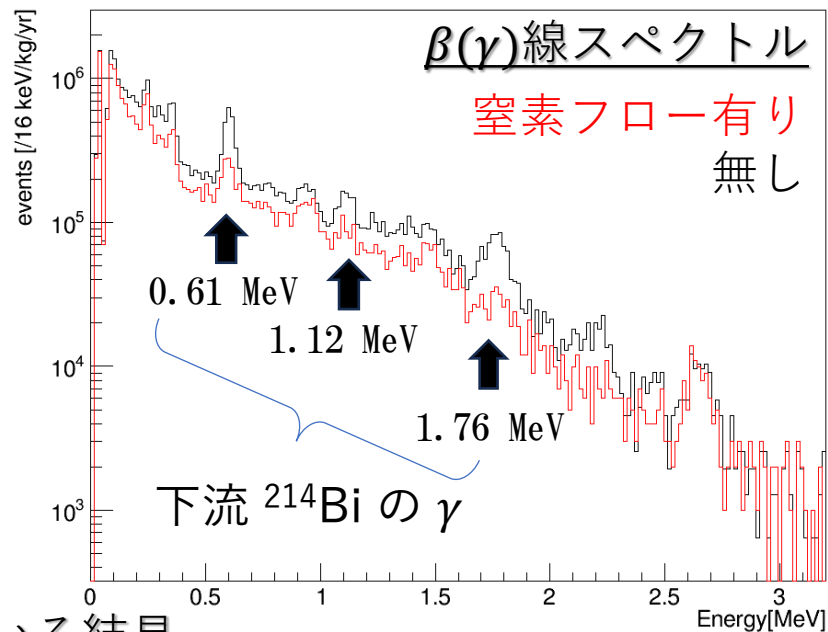
◆Phase 2

- ✓ 目的: $2\nu 2\beta$ 発見
- ✓ 高純度 GAGG より更に 1 桁きれいな結晶で探索

Phase 1 実験セットアップ

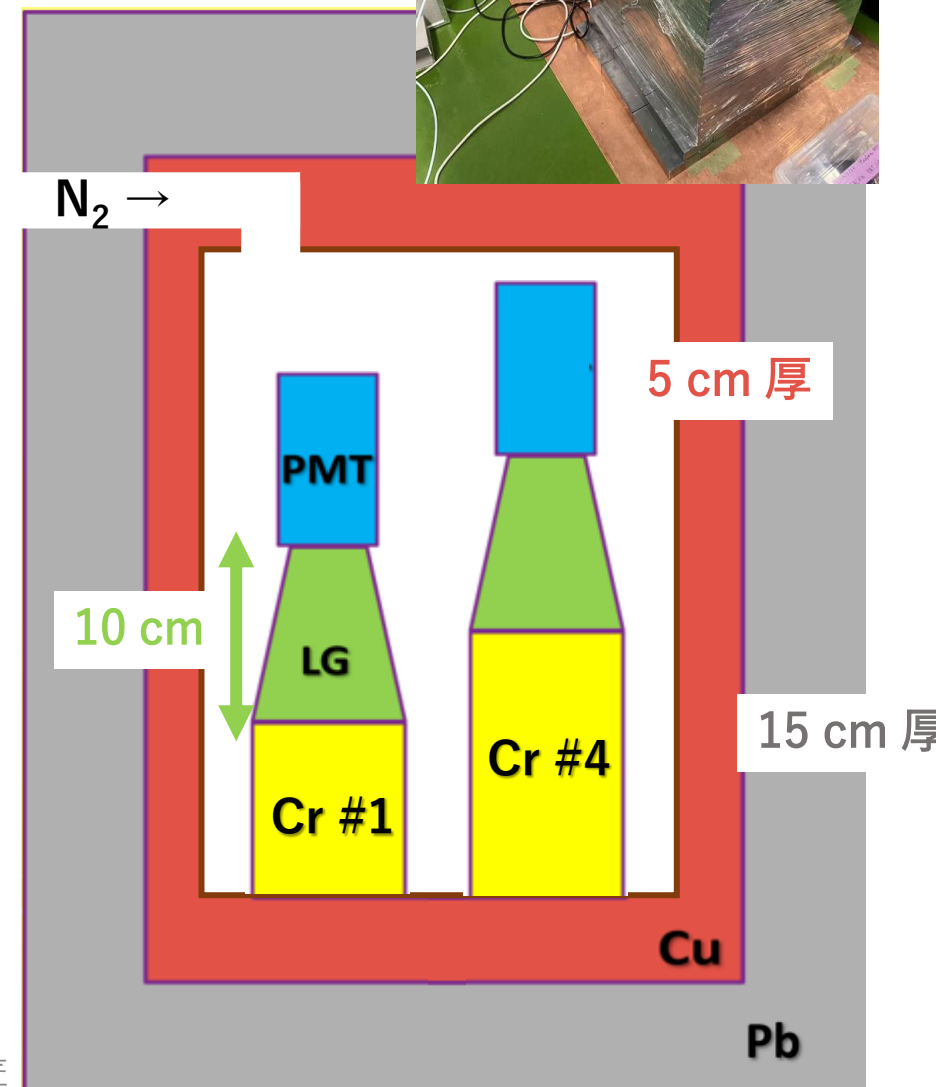
◆ 神岡地下の銅・鉛シールドで実施

- PMT, アクリル製ライトガイド(LG), GAGG を接合
- 窒素フローで空气中 ^{222}Rn 由来の BG を抑制



✓ 現在の用いている結晶

結晶名	サイズ	^{160}Gd 量	不純物量
Cr #1 (高純度GAGG)	5.4 cm ϕ , 5.2 cmL	84 g	-
Cr #4	6.5 cm ϕ , 10 cmL	250 g	Cr #1 の 約2~3 倍



データ収集 (DAQ) の概要と現状

◆ローパスフィルタの導入

- PMT 出力波形に含まれる立ち上がり 30 ns 以下のノイズを除去

◆DAQ 閾値

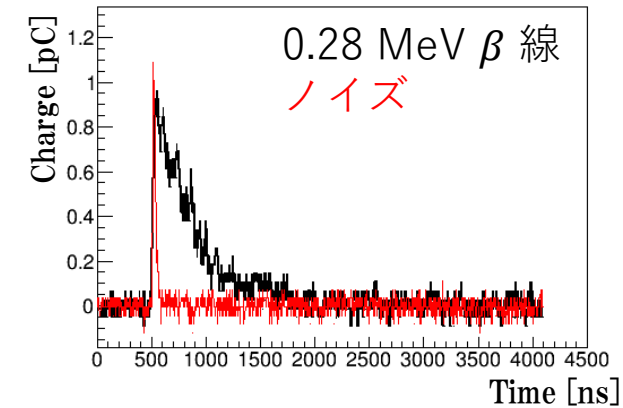
→PMT 由来と思われるノイズで制限. 今後もっと下げたい

- Cr #1: 0.15 MeV (α), 0.10 MeV (β)
- Cr #4: 0.22 MeV (α), 0.13 MeV (β)

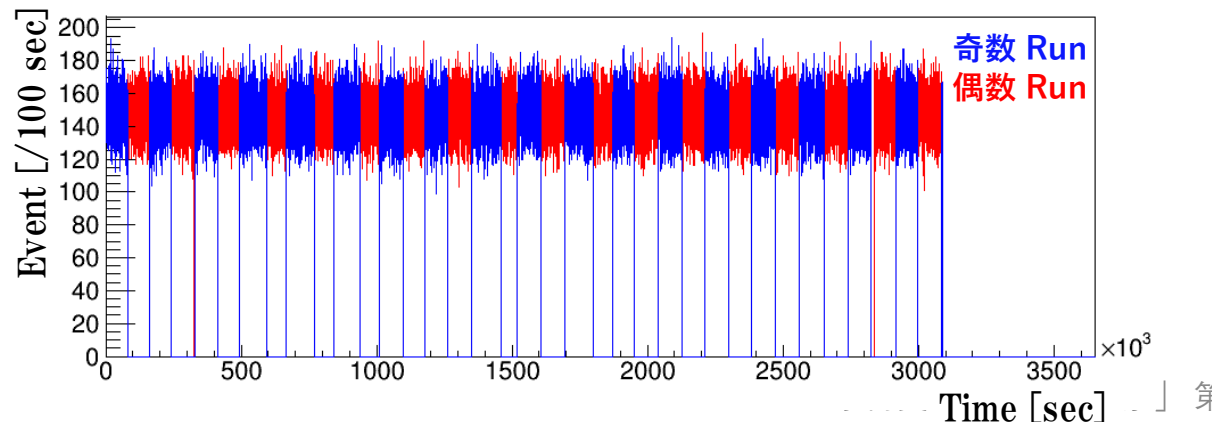
◆信号レート (854.3 時間データ)

- 閾値や PMT 電圧が変動していないか.

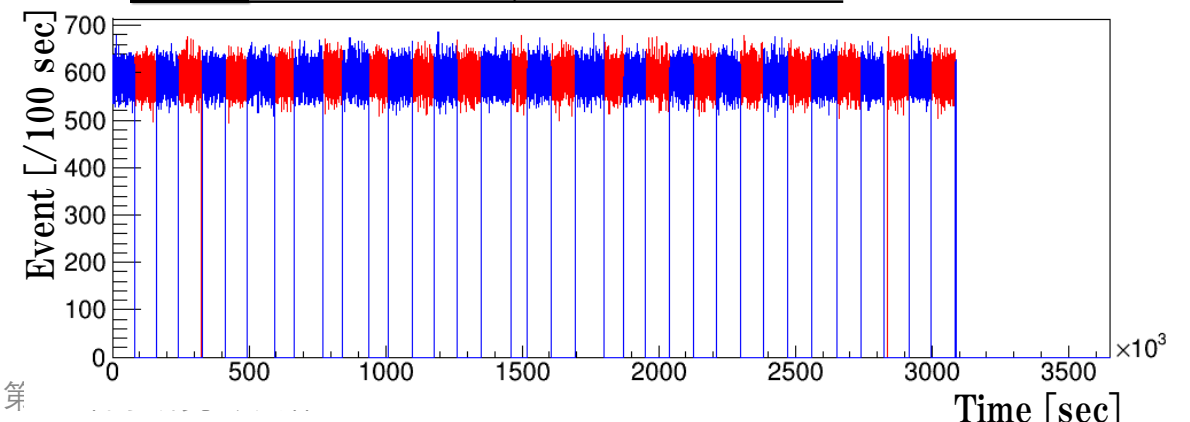
⇒ これまで両結晶とも安定してデータ取得できている



Cr #1 平均 1.5 Hz, Std. dev. 8.3%



Cr #4 平均 5.9 Hz, Std. dev. 4.1%

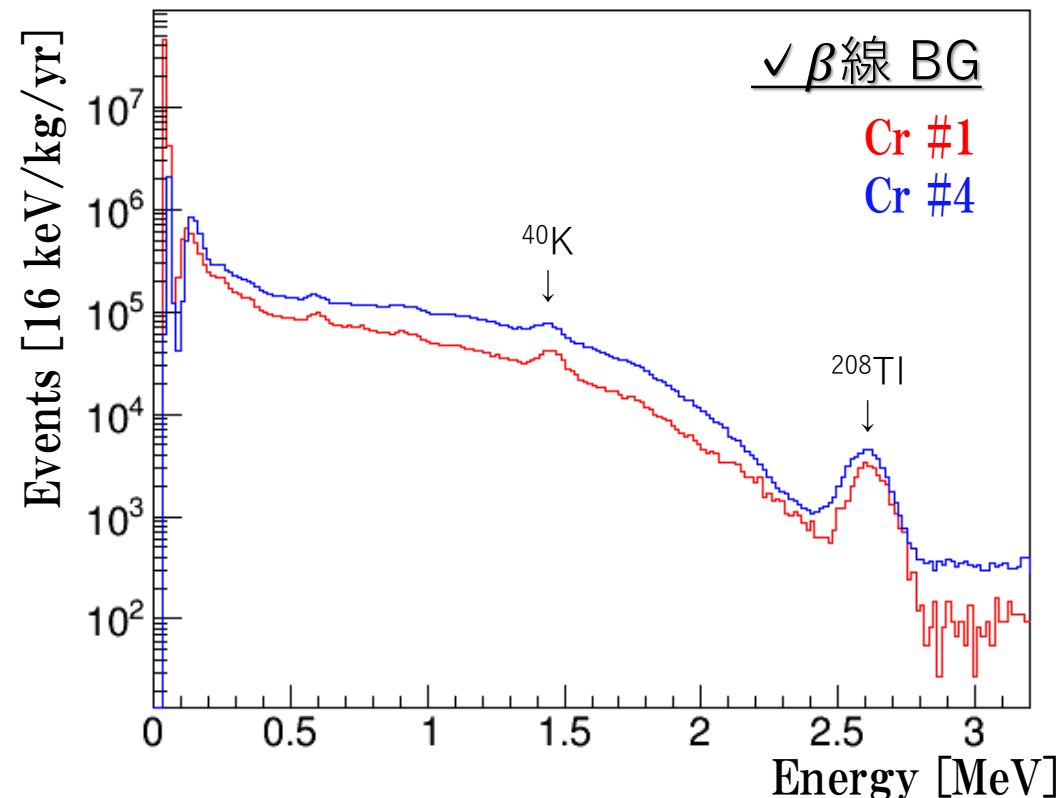
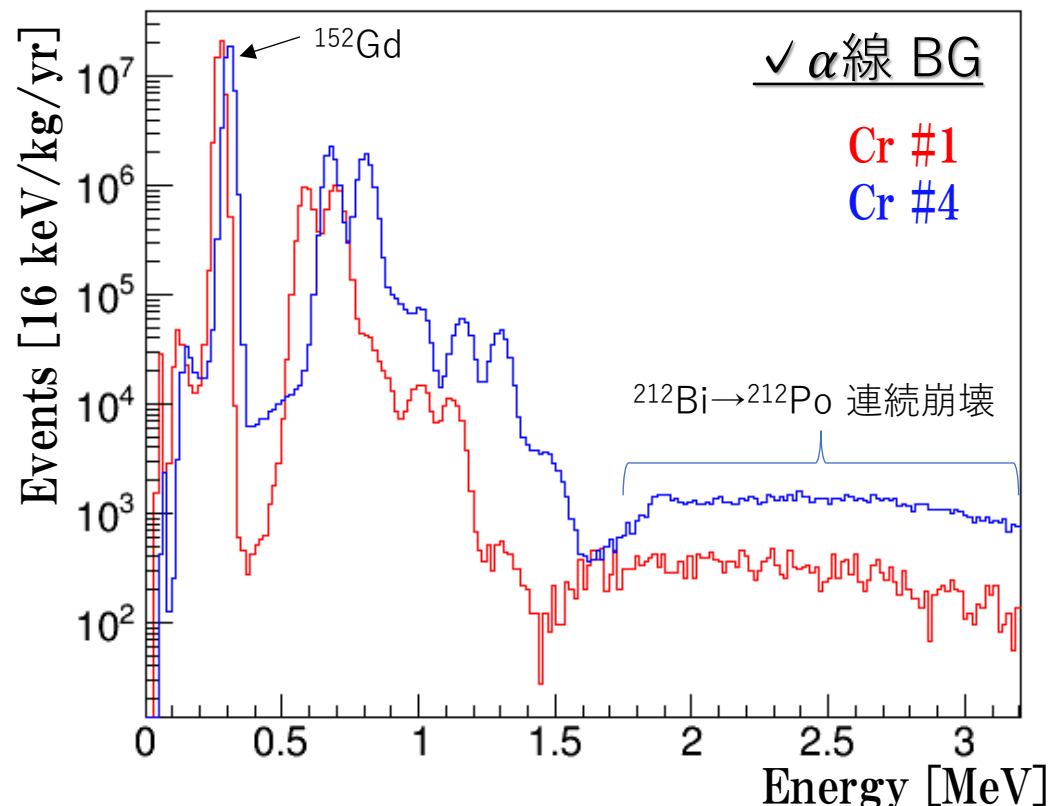


Phase1 BG スペクトル(現状)

9

◆ γ 線ピーク (^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{208}Tl) でエネルギー較正

◆854.3 時間分のデータ



⇒Phase 1 達成には Cr #1 純度かつ Cr #4 サイズの結晶が望ましい

- ・ 現在大型高純度 GAGG を育成中

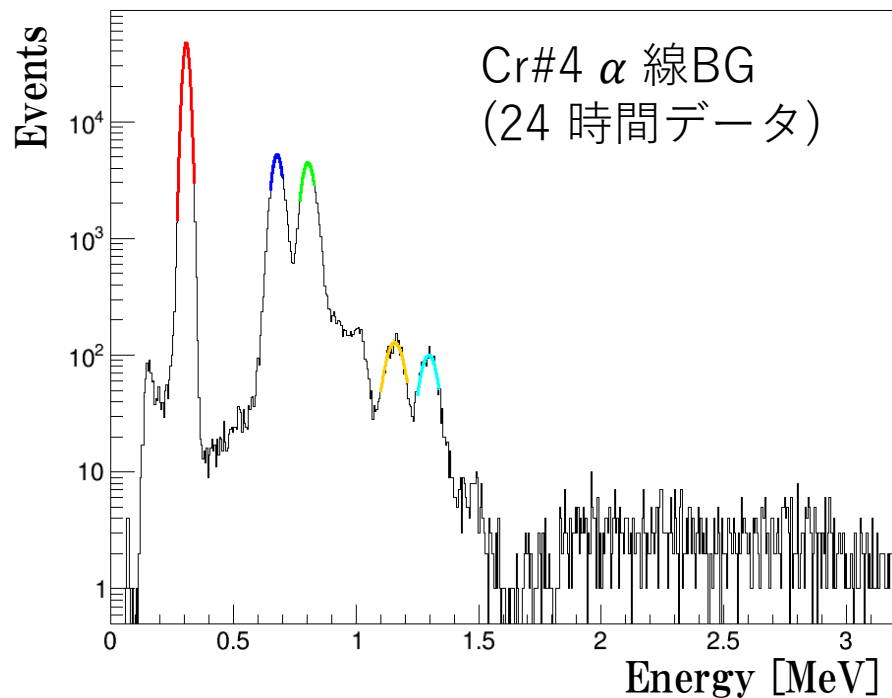
◆主要ピークの位置変動から, ゲイン安定性を評価した

α, γ ピークによるゲイン安定性評価

10

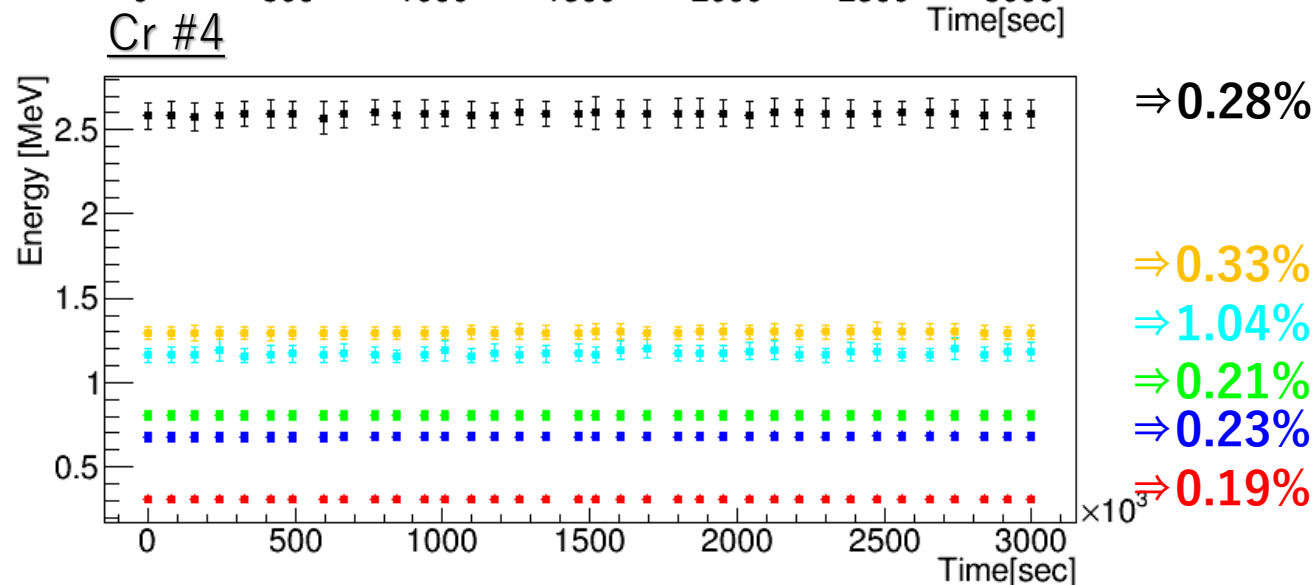
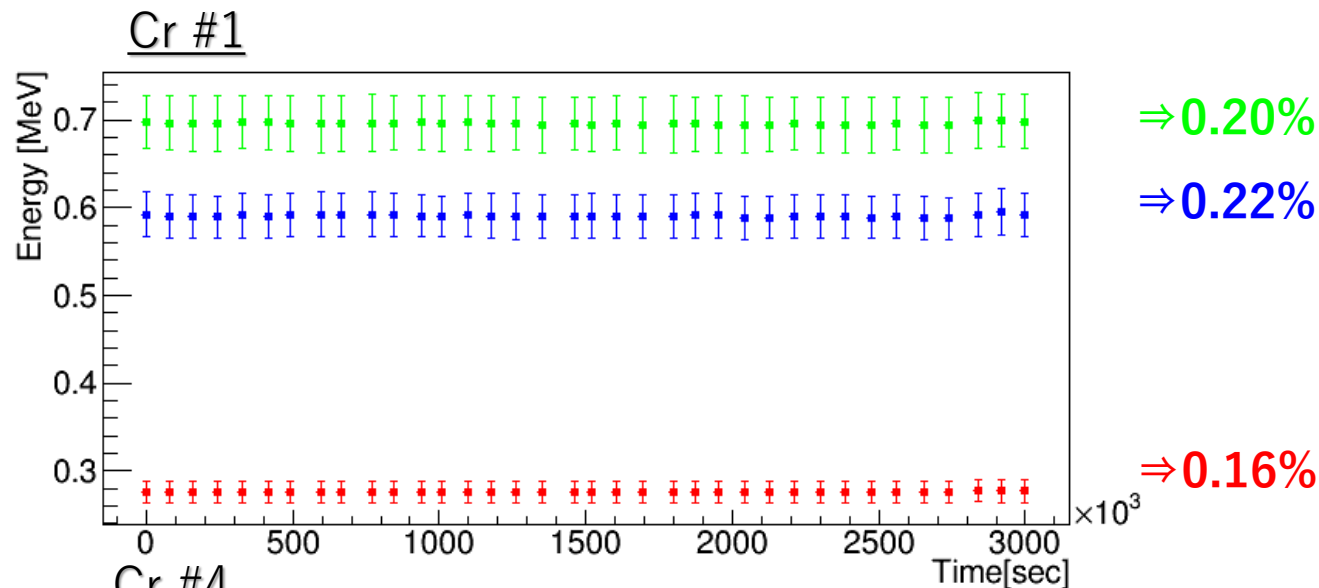
◆統計の多いピークをガウスフィット

- Cr #1: ^{152}Gd , ^{238}U , ^{234}U
- Cr #4: ^{152}Gd , ^{238}U , ^{234}U , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{208}Tl



◆ピーク位置の揺らぎは充分小さく 分解能に対する影響は無視できる

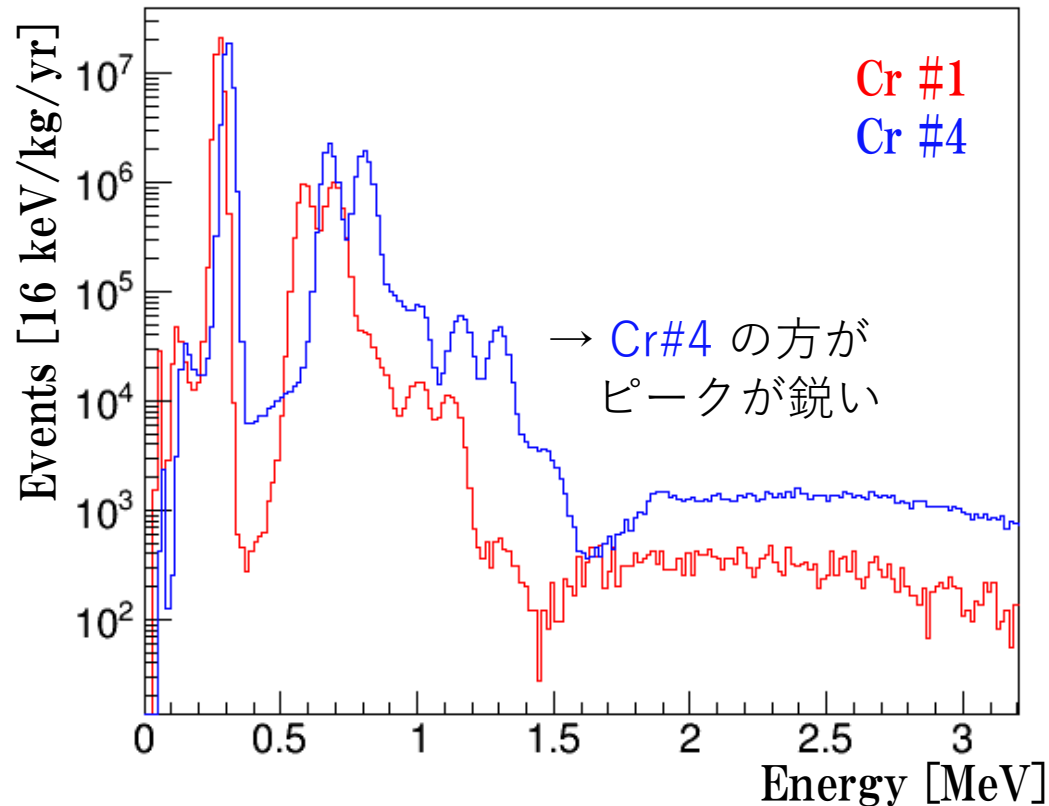
✓ 1 日毎のピーク位置の変動と平均に対する揺らぎ



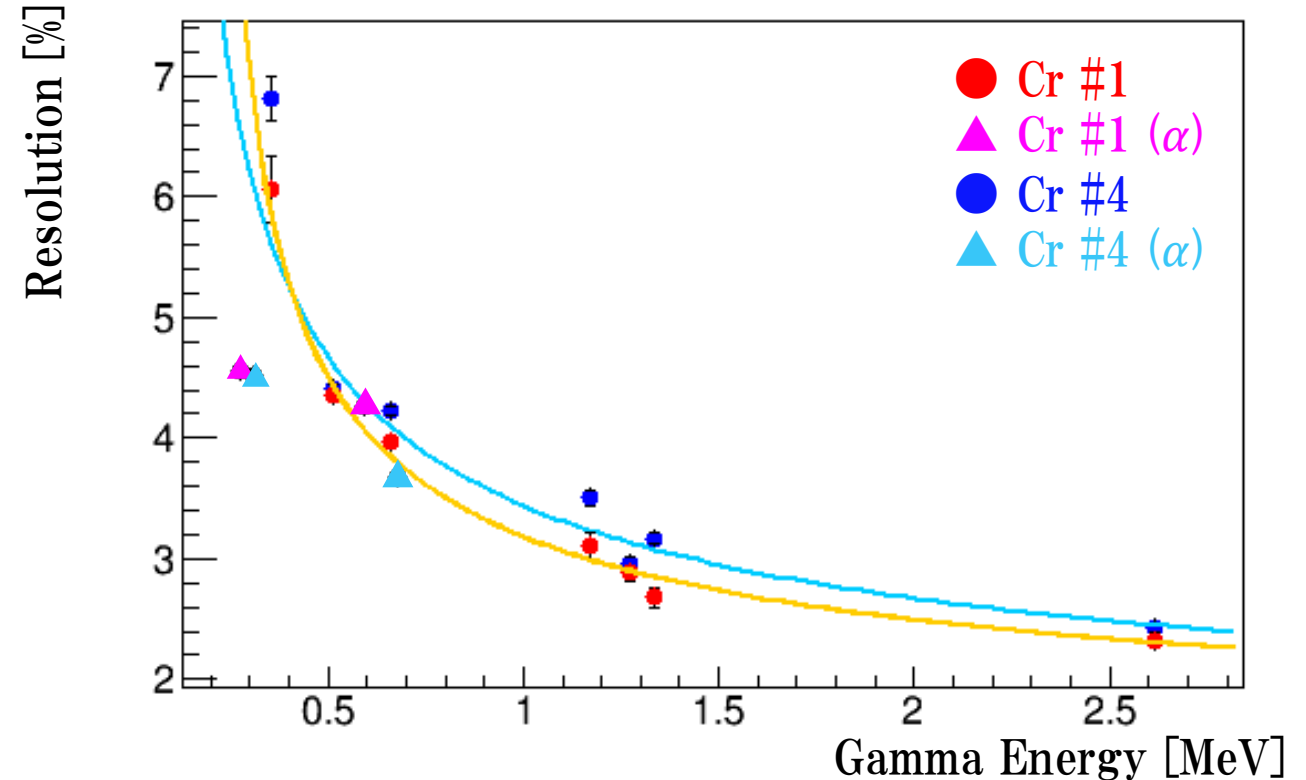
エネルギー分解能

◆ α 線と $\beta(\gamma)$ 線に対するエネルギー分解能に違いが見られる

✓ α 線 BG スペクトル



✓ γ 線源に対するエネルギー分解能



◆ シンチレータの発光機構？発光体の非均一分布？崩壊位置依存性？

◆ BG モデルに重要なパラメタのため、今後理解が必要
(アドバイス等あればよろしくお願いします)

PIKACHU 実験のまとめ

□PIKACHU 実験は GAGG を用いて ^{160}Gd の $2\nu 2\beta$ 発見を目指す

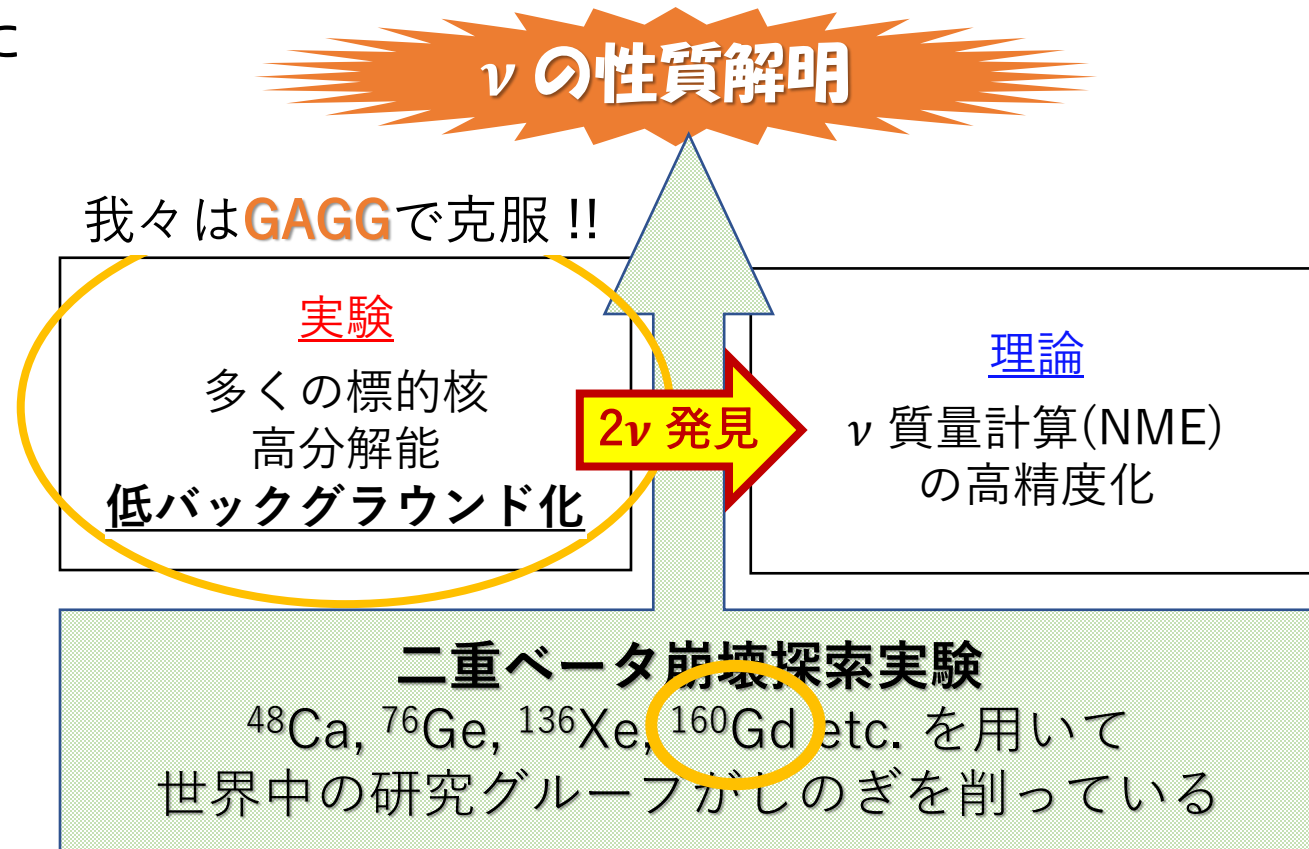
□U/Th 系列を約 1 桁低減した高純度 GAGG を開発
→性能評価から感度更新を見積もった

□2024 年 12 月に Phase 1 を開始

- 〔
 - 小型の高純度 GAGG 結晶
 - それより 2 ~ 3 倍汚い大型結晶
 - 現在まで安定したレート・ゲインでデータ取得中

⇒ 感度更新には大型高純度GAGGが必要

- ^{160}Gd の最高感度更新まで継続する予定



今後の展望

□並行してPhase2 に向けた R&D を行う

- Phase 2 ($2\nu 2\beta$ 発見)には結晶純化と光検出器由来のBG低減が必須

結晶純化

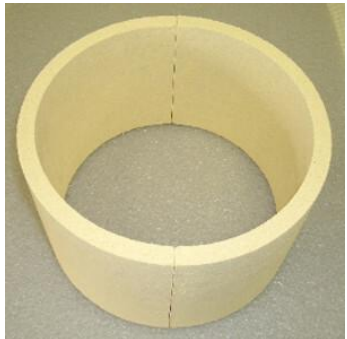
□目標: 原料レベル

□原料は少なくとも結晶より 1 桁キレイ

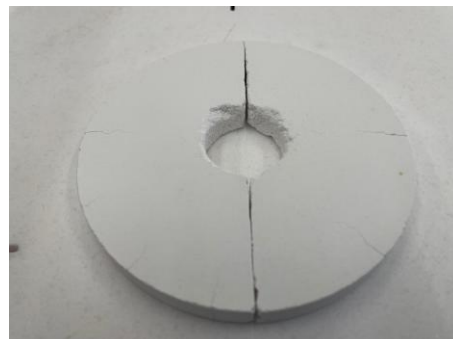
□炉内断熱材の混入を疑っている

- 炉内構造の最適化
- 高純度断熱材の開発

現在用いている
ジルコニア断熱材



きれいなジルコニア
で焼成した断熱材



低BG な光検出器

□目標: 可能な限り低減

□低放射能 PMT (既製品) ← Now used

- Kフリーガラスを使用
- 従来の約 1/5 の 40K 含有量

□LG を長くして, $^{40}\text{K}_{\text{ext.}}$ γ 線の検出効率を下げる

□MPPC array を用いた読み出し

等々...

目標に及ばなくても

得られた成果は Phase 1 に活用する

バックアップ

14



4N/高純度結晶原料

原料	Gd_2O_3	Ga_2O_3	Al_2O_3	CeO_2
結晶作製の質量比	1	0.53	0.2	0.004

新結晶	Gd2O3	Ga2O3	Al2O3
^{238}U -chain (upper)	< 81.9	< 38.75	< 147.52
^{238}U -chain (mid.)	< 1.56	< 2.49	< 12.23
^{235}U -chain (late)	< 5.36	< 9.57	< 17.19
^{232}Th -chain (early)	4.31 ± 2.04	< 7.56	< 31.36
^{232}Th -chain (late)	< 2.66	< 2.75	< 12.9
^{40}K	20.9 ± 11.2	< 27.6	136.9 ± 77.9
^{60}Co	< 0.45	< 0.72	< 3.98

旧結晶	Gd2O3	Ga2O3	Al2O3
^{238}U -chain (upper)	1750 ± 221	< 69.17	476 ± 43.5
^{238}U -chain (mid.)	< 4.55	< 9.86	< 4.92
^{235}U -chain (late)	130 ± 40	< 8.54	< 13.04
^{232}Th -chain (early)	270 ± 12	< 10.76	15.95 ± 24.37
^{232}Th -chain (late)	293 ± 10	< 8	54.64 ± 5.95
^{40}K	84.8 ± 28.7	< 76.7	< 96.5
^{60}Co	< 1.14	< 1.57	< 1.15

暫定的な内部不純物量評価まとめ

※上限値は90% C.L.

✓ U/Th 系列

※ROOT解析はunixtime<10000secをカットしている

mBq/kg	^{232}Th	^{238}U 上流	^{238}U 中流	^{238}U 下流	^{235}U 上流	^{235}U 下流	^{231}Pa	^{234}U
Python	13.5 ± 0.9	123 ± 2	1.14 ± 0.94	2.34 ± 0.47	10.4 ± 1.9	< 2.24	8.10 ± 0.73	144 ± 2
ROOT(個別)	13.1 ± 1.2	124 ± 2	1.30 ± 0.82	2.18 ± 0.52	12.4 ± 2.1	< 0.90	7.46 ± 0.79	144 ± 3
ROOT(同時)	8.14 ± 1.0	121 ± 2	1.27 ± 0.68	1.22 ± 0.46	10.6 ± 2.1	0.57 ± 0.50	6.89 ± 0.69	143 ± 3

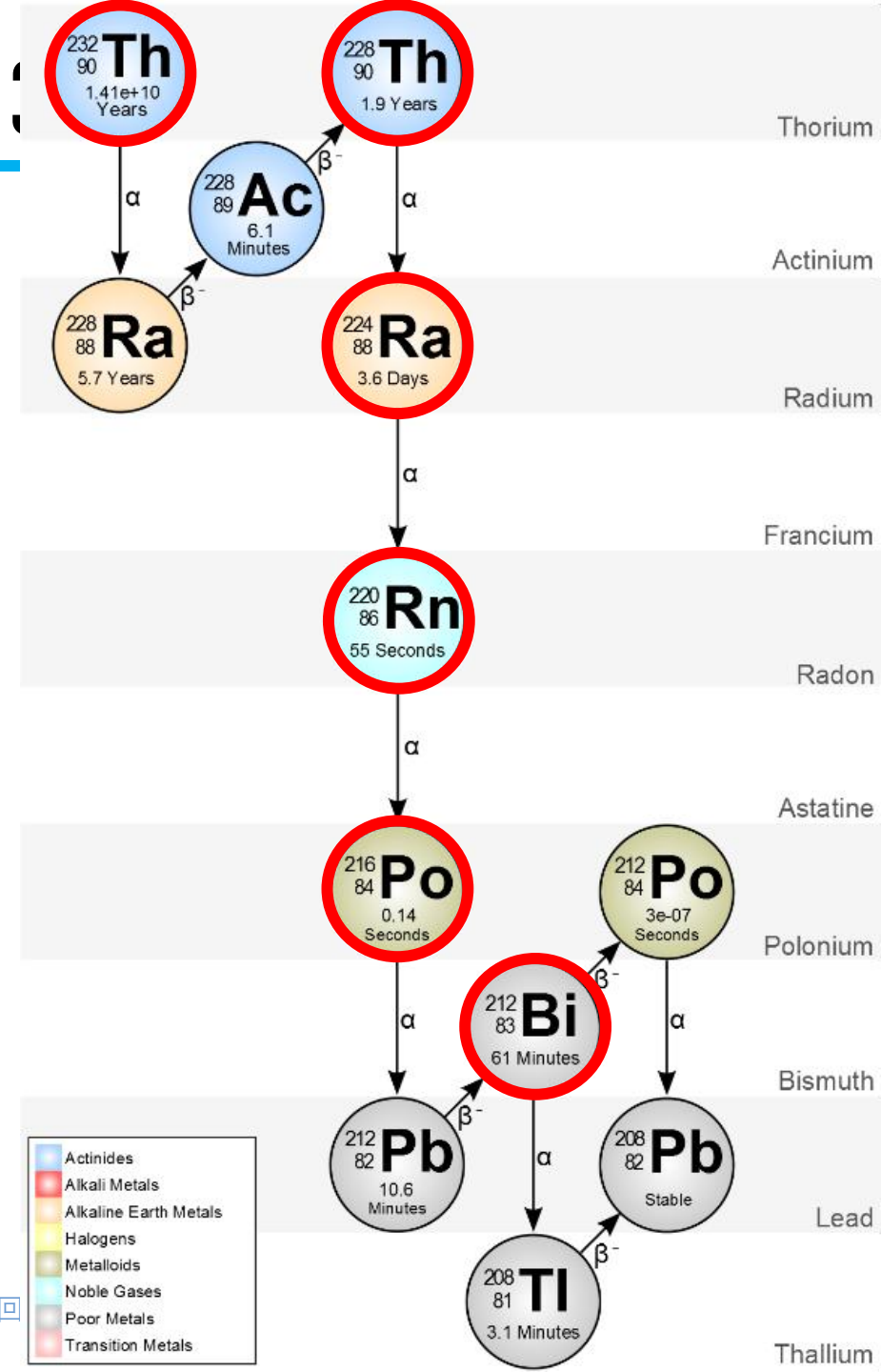
✓ ^{40}K

	^{40}K [mBq/kg]	$^{40}\text{K}_{\text{out}}$ [10^{-3} counts/kg /sec]
Python	44.6 ± 3.0	11.0 ± 1.1
ROOT(個別)	34.5 ± 3.1	9.8 ± 1.2
ROOT(同時)	25.7 ± 3.2	7.1 ± 1.1

崩壊系列一覽

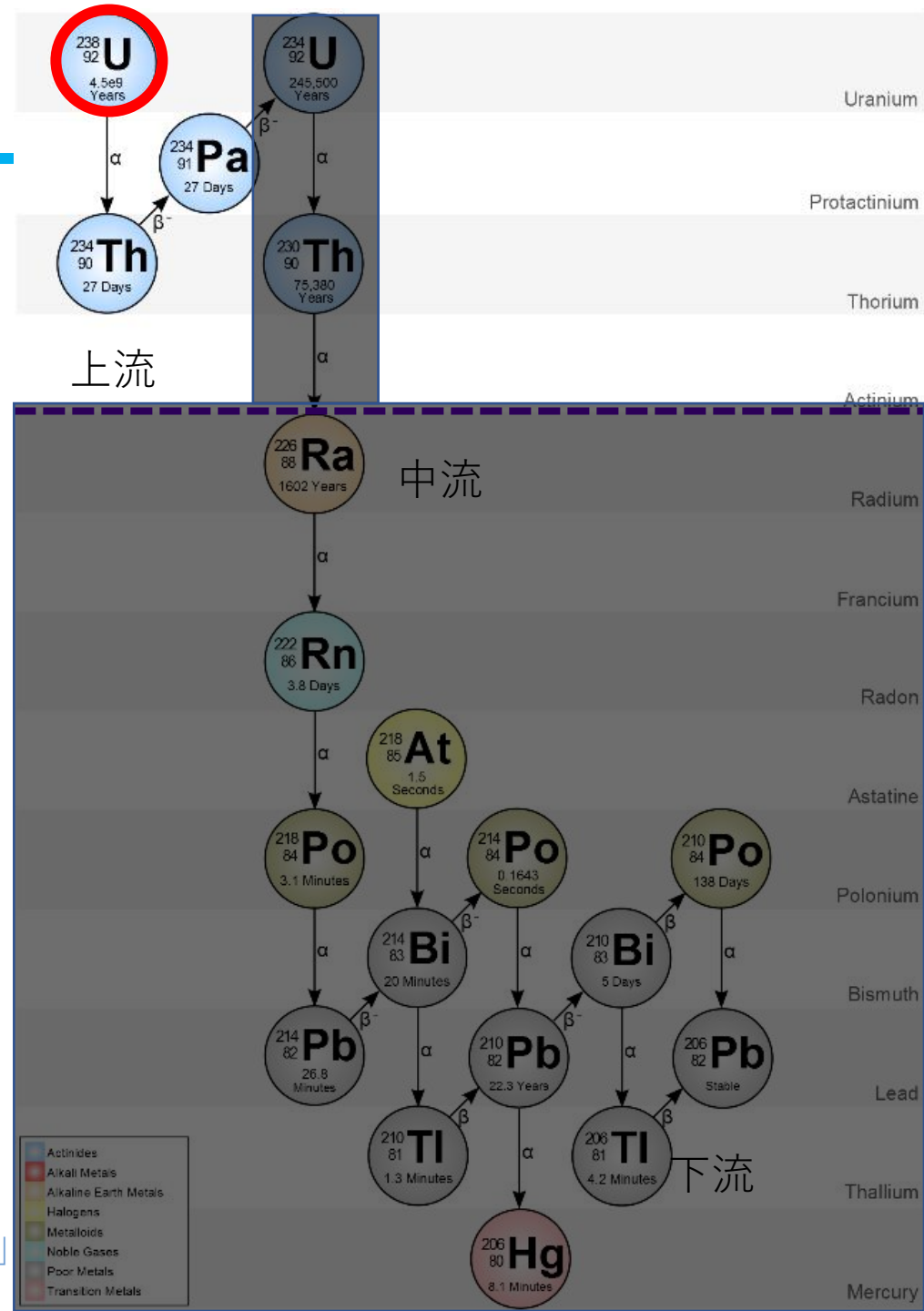
データセットの修正 (2)

- Th232
- Th228
- Ra224
- Rn220
- Po216
- Bi212(sum_eDep<8MeV)



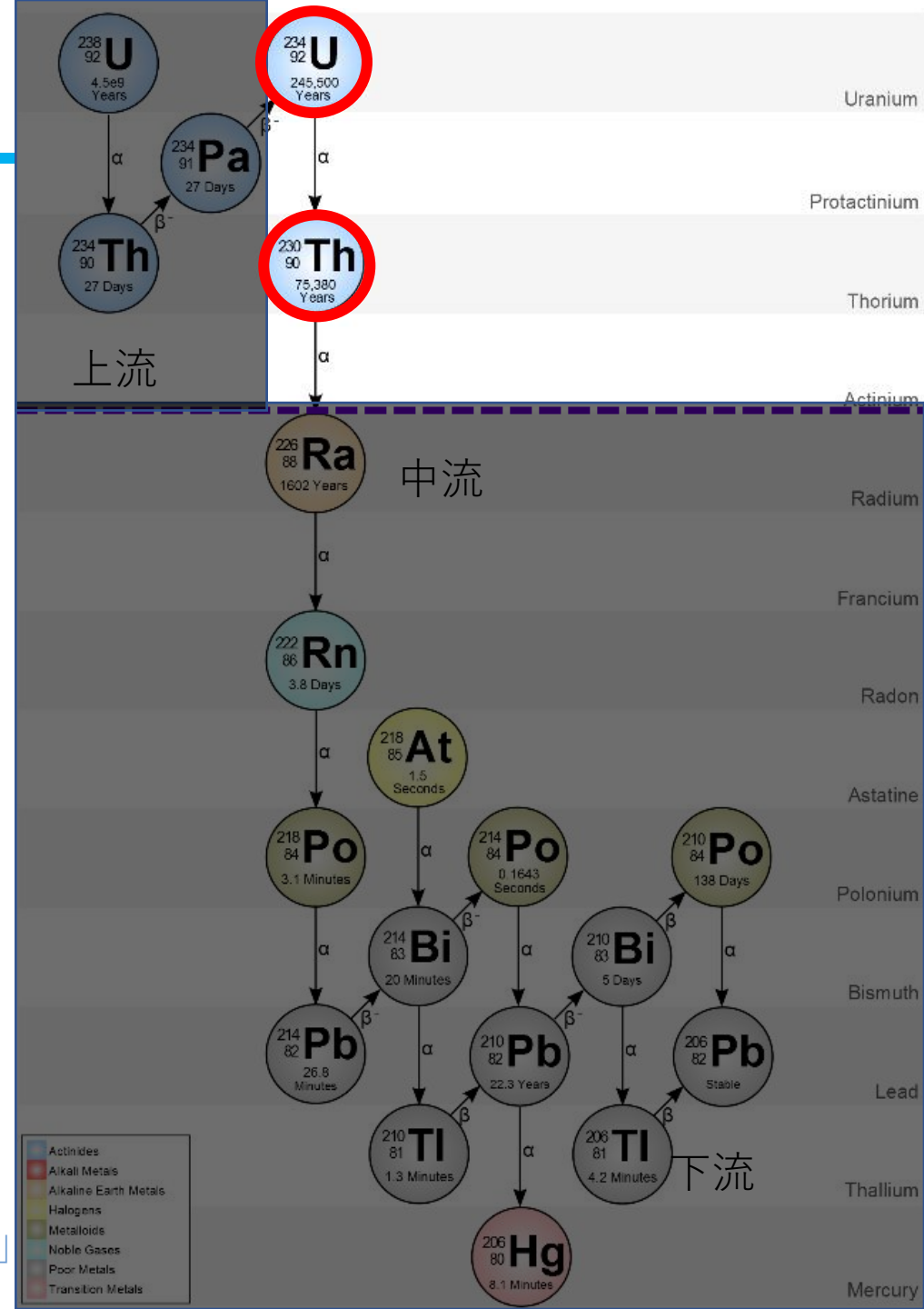
データセットの修正 (238Up)

- U238



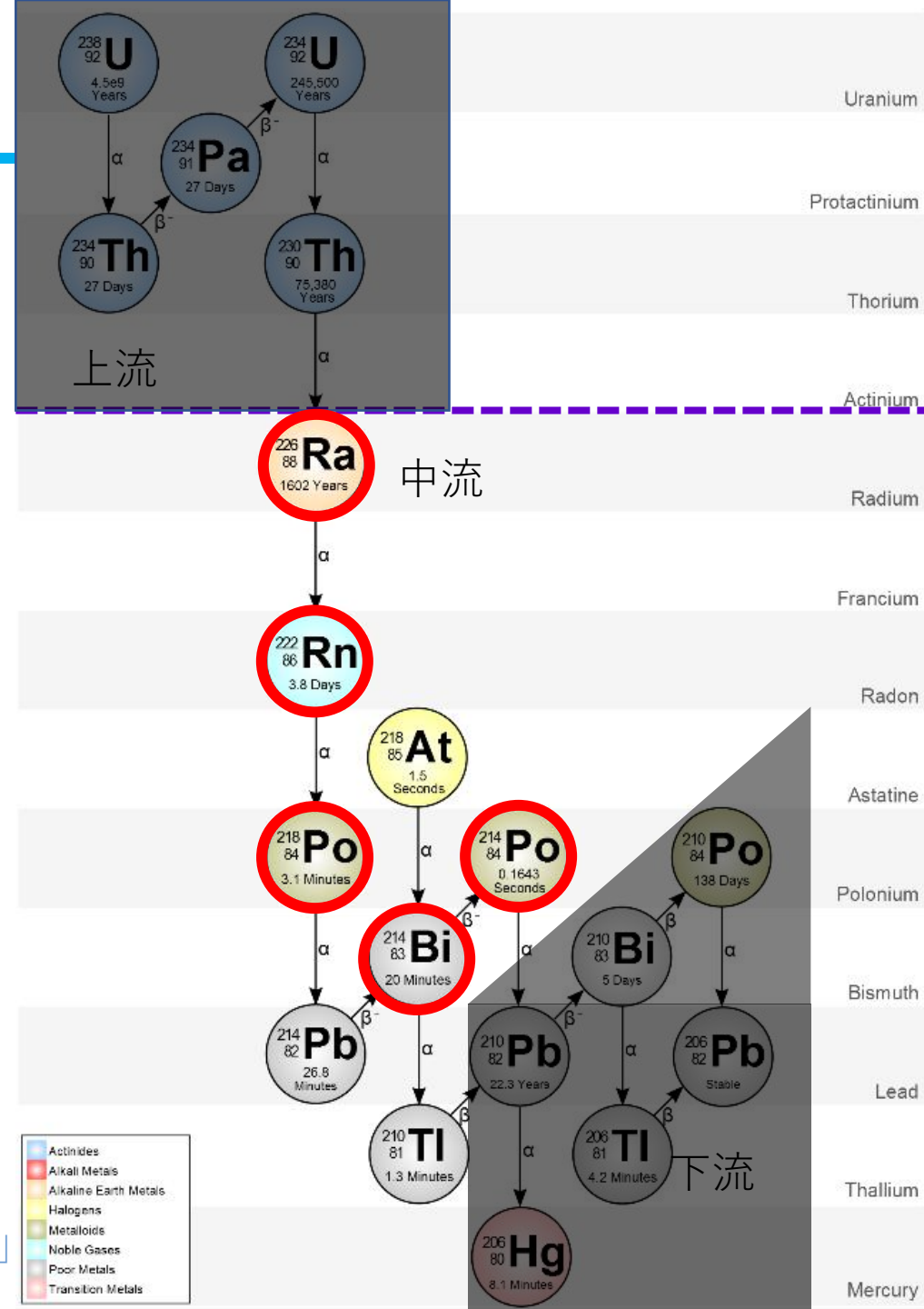
データセットの修正 (234U)

- U234
- Th230



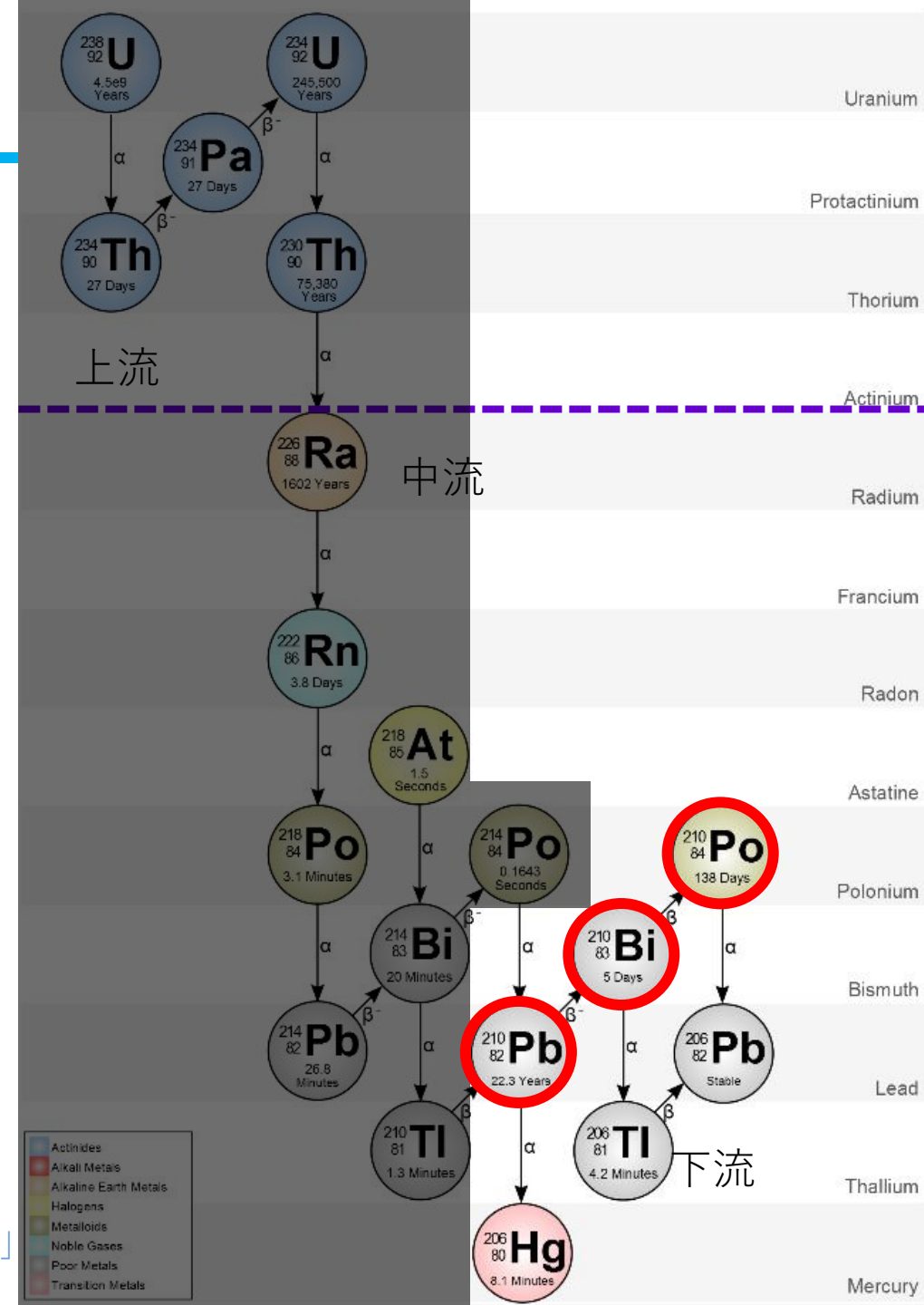
データセットの修正 (238Umid)

- Ra226
- Rn222
- Po218
- Po214
- Bi214(sum_eDep>5.5MeV)



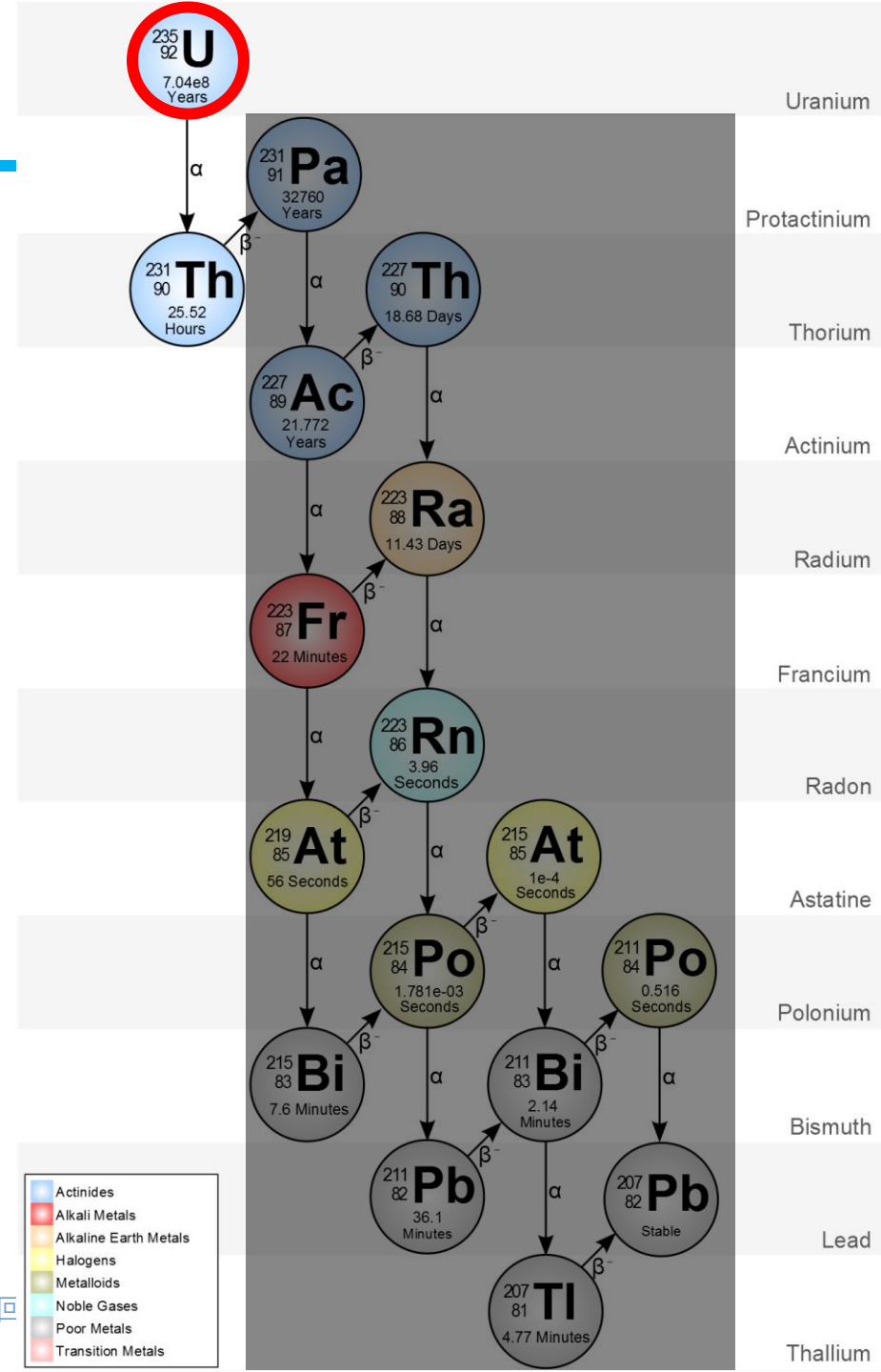
データセットの修正 (²³⁸Udown)

- Po210
- Pb210(sum_eDep>3.5MeV)
- Bi210(sum_eDep>4.5MeV)



データセットの修正(235Uup)

- U235



データセットの修正(235Udown)

- Pa231
- Ac227(sum_eDep>5MeV)
- Ra223
- Po215
- Th227
- Rn219
- Bi211(sum_eDep>6MeV)

Schéma de désintégration de l'uranium-235 (^{235}U) – Série de l'actinium en $4n+3$
Decay scheme of uranium-235 (^{235}U) – Actinium series type $4n+3$

