

# PIKACHU実験による<sup>160</sup>Gdの二重ベータ崩壊探索

## ～高純度GAGG結晶の性能評価～

石舘正太郎, 飯田崇史, 大森匠, 石上元直

他PIKACHU collaboration

学術変革「地下稀現象」領域研究会



筑波大学

University of Tsukuba



### Introduction

○先行研究：2インチGSO( $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ )シンチレータ

<sup>160</sup>Gdの2 $\beta$ 探索ではウクライナでの実験が世界最高感度

↳結晶内のU/Th系列の $\alpha$ 線BGが感度を制限

感度を一桁ほど高めれば、2 $\nu$ 2 $\beta$ を発見できる可能性が！

| U/Th系列不純物量 |                    |                    |                   |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| mBq/kg     | <sup>238</sup> U上流 | <sup>238</sup> U下流 | <sup>232</sup> Th |
| Cr#0       | 911 ± 10           | 73.5 ± 15.3        | 289 ± 20          |
| Cr#1       | 119 ± 1            | 1.71 ± 0.24        | 11.5 ± 0.5        |
| Cr#1原料     | <16.3              | <1.19              | 1.66 ± 0.41       |

○PIKACHU実験：GAGG( $\text{Ce:Gd}_3\text{Ga}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ )単結晶

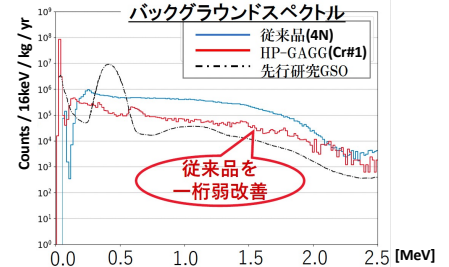
(Pure Inorganic scintillator experiment in Kamioka

for Challenging Underground sciences)

↳従来の結晶4N(Cr#0)は先行研究より一桁高いBGレベル

↳Cr#1では原料の純化をして作製、4Nより低いBGレベルを達成

→Cr#3, Cr#4では原料レベルの純度を目指す

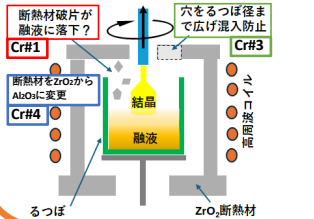


### PIKACHU 実験

○結晶育成方法

育成中の断熱材混入を懸念

→断熱材の穴を拡大(Cr#3)→材質の変更(Cr#4)



|     | Cr#1                        | Cr#3                          | Cr#4                           |
|-----|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| サイズ | 5.4 cm $\phi$<br>× 5.2 cm L | 5.95 cm $\phi$<br>× 8.08 cm L | 6.85 cm $\phi$<br>× 10.05 cm L |
| 質量  | 0.784 kg                    | 1.468 kg                      | 2.436 kg                       |



2024/06 Cr#3

・水漏れや、るつぼの変形によりに3度の作り直し

・加工過程で大きなクラックができてしまった

2024/11 Cr#4

・育成炉上部の断熱材をZrO<sub>2</sub>からAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に変更



アルミナ断熱材

○セットアップ

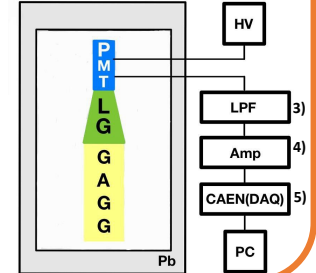
1) GAGG結晶に反射材をまきLight Guide(LG)、光電子増倍管R6231-100(PMT)を接続

2) 厚み5cmの鉛シールドと暗幕で遮光

3) ノイズ除去のためLow Pass Filter(LPF)を導入

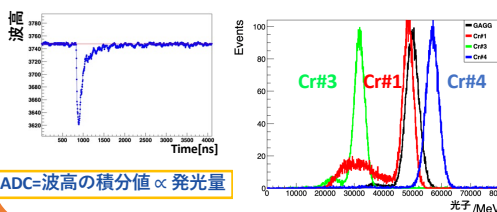
4) Amp(10倍)

5) CAEN FADCでデータ収集



### 発光量・エネルギー分解能

Cs線源を用いて662keVの光電ピークから  
GAGG結晶の発光量およびエネルギー分解能を算出



ADC=波高の積分値 × 発光量

※一般的なGAGGの発光量を50,000光子/MeVと仮定し算出

|                 | Cr#3        | Cr#1        | 市販GAGG      | Cr#4        |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 発光量<br>[光子/MeV] | 31,737      | 48,435      | 50,000      | 56,839      |
| 分解能 [%]         | 5.88 ± 0.02 | 3.61 ± 0.02 | 3.33 ± 0.02 | 3.95 ± 0.02 |

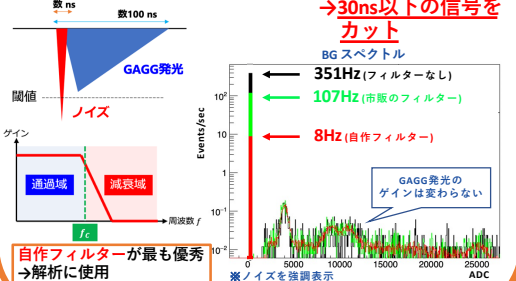
発光量はCr#4が最も良い性能を示すが、  
分解能はCr#1に劣る

Cr#3の発光量が低い  
→ノイズ除去が必要

→ LPFの導入

### LPF(Low Pass Filter)

LPF周波数の高い信号をカットする役割  
自作のフィルターと  
市販のフィルター(PE8723)の性能を比較



### 波形弁別能

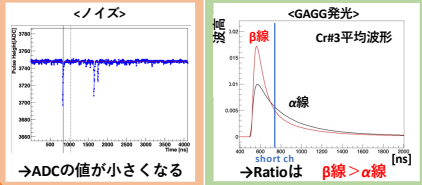
○波形弁別 PSD (Pulse Shape Distinguishing)

GAGGの波形によって $\alpha$ 線と $\beta$ 線を弁別

結晶内部のU/Th不純物量評価のため $\alpha$ 線BGを抽出

→波形弁別を利用

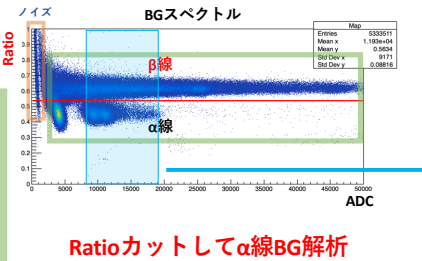
Ratio=pulse前半(short chまで)の積分値 / ADC



→ADCの値が小さくなる

→Ratioは  $\beta$ 線 >  $\alpha$ 線

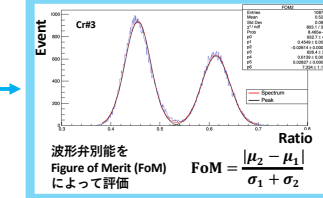
Ratioカットして $\alpha$ 線BG解析



○波形弁別能

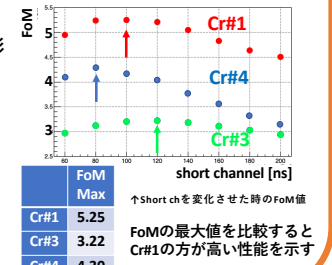
$\alpha$ 線と $\beta$ 線の間離能を評価

U/Th系列 $\alpha$ 線を含む領域をRatio軸に射影



波形弁別能を  
Figure of Merit (FoM)  
によって評価

FoM =  $\frac{|\mu_2 - \mu_1|}{\sigma_1 + \sigma_2}$



short channel [ns]

FoM Max

Cr#1 5.25

Cr#3 3.22

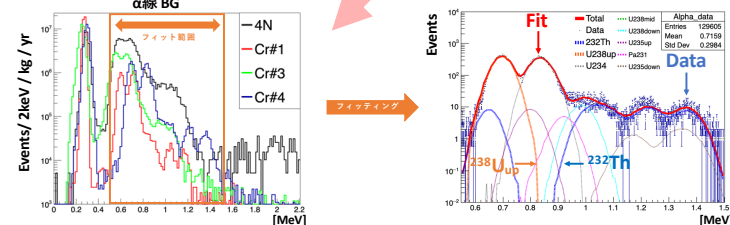
Cr#4 4.30

FoMの最大値を比較すると  
Cr#1の方が高い性能を示す

### U/Th系列不純物量

○U/Th不純物量評価

GEANT4でGAGG内のU/Th系列の崩壊をシミュレーション→実験値のエネルギー分解能、消光曲線を用いて補正



| mBq/kg | <sup>232</sup> Th | <sup>238</sup> U上流 |
|--------|-------------------|--------------------|
| Cr#1   | 11.5 ± 0.5        | 119 ± 1            |
| Cr#3   | 49.5 ± 5.4        | 502 ± 3            |
| Cr#4   | 36.1 ± 1.1        | 272 ± 2            |

Cr#1に対してCr#4の  
不純物量が約2.3倍に

### まとめと展望

○Cr#4評価

育成炉を見直して作製したCr#4であったが、  
大型化の影響もあり、発光量はCr#1よりも高い性能  
を示した。しかし、エネルギー分解能、波形弁別能、  
U/Th系列不純物量においては、Cr#1よりも低い性能  
を示した。

○今後の結晶について

・Cr#7: Cr#4と同サイズで断熱材を高純度Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に  
差し替えて作製