

# PIKACHU・結晶・純化中！！

～ GAGG結晶純化の現状と展望 ～

Ce: Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>  
(GAGG) Crystal

Pikachu

160Gd

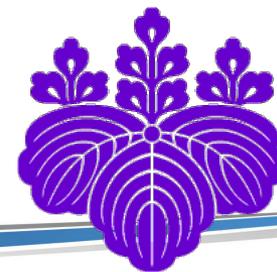
2026 Mar. 6<sup>th</sup> (Fri.)

飯田崇史 (筑波大)

**For the PIKACHU collaboration**

T. Omori, S. Ishidate, M. Ishigami,  
M. Yoshino, K. Kamada, Y. Shoji,  
A. Gando, K. Hosokawa, K. Fushimi,  
K. Mizukoshi, K. Nakajima,  
N. Hinohara, T. Kishimoto

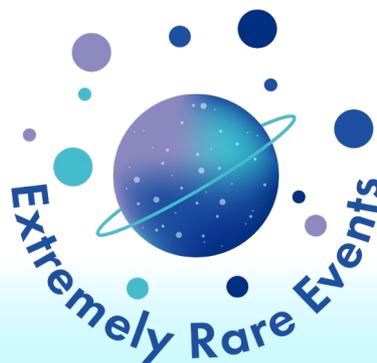
# もくじ



1. イントロダクション
2. PIKACHU実験概要
3. 結晶純化の現状
4. 今後の展望



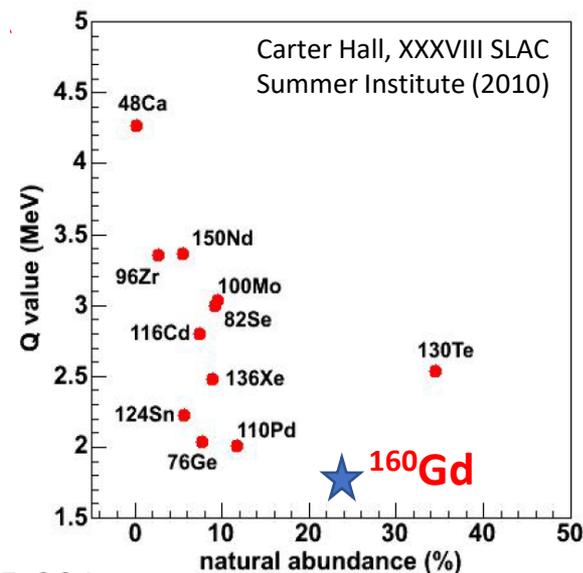
2024年12月のPhase 1  
立ち上げの様子



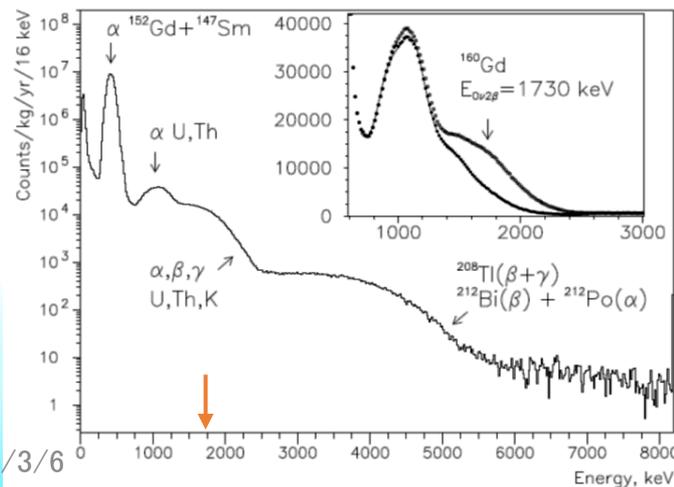


# $^{160}\text{Gd}$ の二重ベータ崩壊

- $^{160}\text{Gd}$ は二重ベータ崩壊核の一つ。  
 ✓ Q値= 1730 keV  
 ✓ 自然存在比= 21.8%
- $0\nu\beta\beta$ 、 $2\nu\beta\beta$ 共に未発見
- $^{160}\text{Gd}$ の $\beta\beta$ 探索では、2インチのGSOシンチレータを用いたウクライナでの実験[1]が世界一。



[1] F.A.Danevich et al., Nucl. Phys. A, Vol. 694, Iss. 1-2, 2001, Pages 375-391



## 現在の $^{160}\text{Gd}$ 二重ベータ最高感度

検出器	GSOシンチレータ
$^{160}\text{Gd}$ の量	100g
データ取得日数	約2年
主要BG	U/Thのアルファ PMTのガンマ
$0\nu$ 半減期リミット*	$> 2.3 \times 10^{21}$ 年
$2\nu$ 半減期リミット*	$> 2.1 \times 10^{19}$ 年

# $^{160}\text{Gd}$ $2\nu\beta\beta$ 半減期理論予想



- 2種の理論で約一桁異なる  $2\nu\beta\beta$  半減期予想。

$$T_{1/2}^{2\nu} \sim 6.02 \times 10^{21} \text{ yr [2] (pseudo-SU (3) model)}$$

$$T_{1/2}^{2\nu} \sim 4.7 \times 10^{20} \text{ yr}^* \text{ [3] (QRPA model)}$$

\* using same phase-space factor as ref. [2]

## Theoretical description of the double beta decay of $^{160}\text{Gd}$

Jorge G. Hirsch,\* Octavio Castaños,<sup>†</sup> and Peter O. Hess<sup>‡</sup>

*Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-543 México 04510 D.F.*

Osvaldo Civitarese<sup>§</sup>

*Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata, c.c.67; 1900, La Plata, Argentina*

[2] J. G. Hirsch et al., Phys.Rev. C 66, 015502 (2002)

[3] N. Hinohara et al., Phys. Rev. C 105, 044314 (2022)

## Global calculation of two-neutrino double- $\beta$ decay within the finite amplitude method in nuclear density functional theory

Nobuo Hinohara<sup>1,2,\*</sup> and Jonathan Engel<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577, Japan

<sup>2</sup>Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8571, Japan

<sup>3</sup>Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina 27516-3255, USA

**先行研究より約一桁の感度向上で発見の可能性！！**

# PIKACHU実験



**$^{160}\text{Gd}$ の $2\nu\beta\beta$ 発見を目指して2020年に「PIKACHU実験」を立ち上げた。**

*Pure Inorganic scintillator experiment in  
KAmioka for CHallenging Underground sciences*

高純度 $\text{Ce}:\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}$ 単結晶シンチレータ(GAGG)  
を使った $^{160}\text{Gd}$ の二重ベータ崩壊実験



## ○実験の目標

- Phase 1 (2024年～)  
先行研究の感度更新
- Phase 2 (202X年?～)  
さらに一桁感度を上げて、  
 **$2\nu\beta\beta$ 発見！！**



# PIKACHU共同研究グループ



筑波大、東北大を中心に6機関、14名の研究者が協力！！

名前	所属	担当
飯田崇史	筑波大	全体統括 他
筑波大生 3名	筑波大	解析、シミュレーション
日野原伸生	筑波大CCS	理論への反映
吉野将生	東北大金研	データ解析、性能評価
鎌田圭	東北大金研	結晶育成、加工
庄子育宏	東北大金研	結晶育成、加工
細川佳志	東北大RCNS	原料純度測定
水越慧太	東北大RCNS	データ解析(機械学習)
寺島亜寿紗	帯広畜産大	神岡地下実験室関連
伏見賢一	徳島大	結晶原料純化
中島恭平	福井大学	結晶内不純物評価
岸本忠史	阪大RCNP	同位体濃縮

*New collaborator is WELCOME!!*



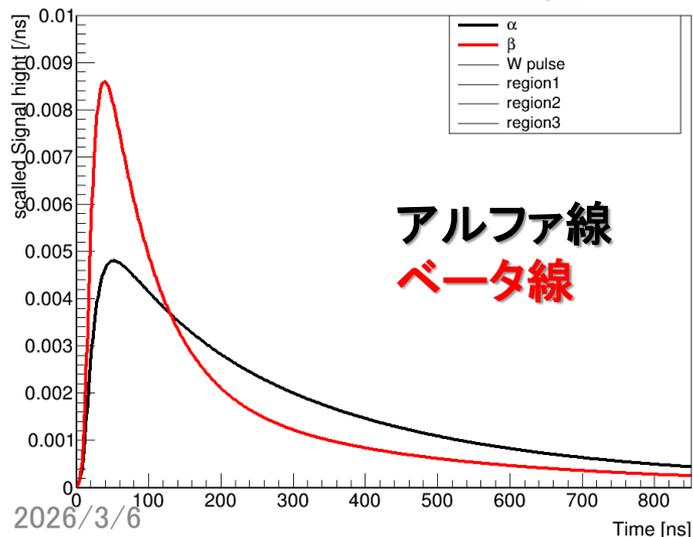
**新規参加者  
募集中！**

# PIKACHUの強み



- **大型結晶**: 1結晶で先行研究の3~4倍。3つ置けば簡単に一桁増。
  - **大発光量**: 数倍の発光量で、分解能が改善。
  - **粒子識別能**:  $\alpha$ 線と $\beta$ 線は波形情報からほぼ100%分離可能(PSD)。
  - **低BG技術**: 当時は無かった低放射能PMTの開発等
- ◆あとは、**結晶内部のU/Th系列の放射性不純物を落とす必要がある**。

GAGGの平均波形( $\alpha/\beta$ )



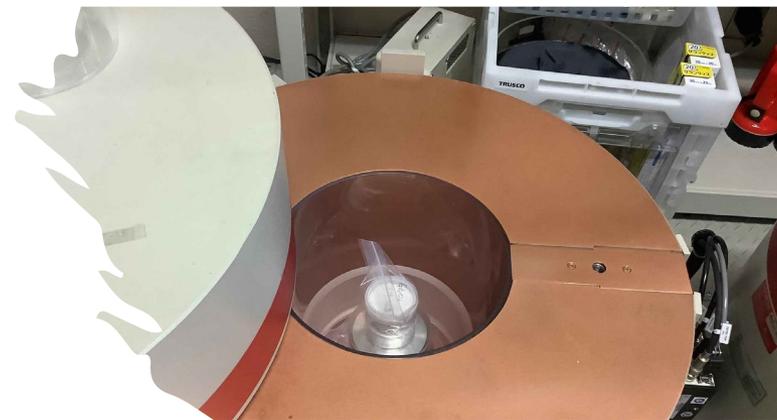
	ウクライナ	PIKACHU
検出器	GSOシンチレータ	GAGGシンチレータ
$^{160}\text{Gd}$ の量	100 g	1 kg (3結晶)
発光量	10,000 ph./MeV	60,000 ph./MeV
データ取得	約2年	2-3年
BGレベル	[1]参照	PSDで一桁改善
半減期リミット	$T^{0\nu} > 2.3 \times 10^{21}$ y $T^{2\nu} > 2.1 \times 10^{19}$ y	目標: 一桁以上改善、 $2\nu\beta\beta$ 発見



# Geによる原料測定

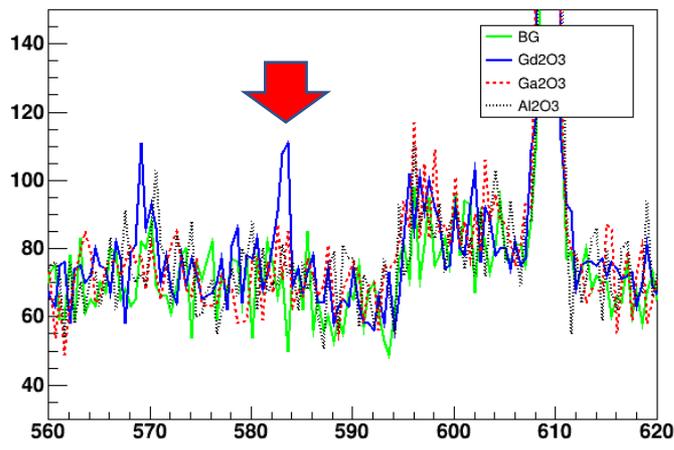
- 現在の結晶はU/Th系列不純物が多い。
- 結晶を育成するのに用いた主要原料について、不純物量を調査。

## Ge検出器 @ 筑波大



1. 酸化ガドリニウム ( $Gd_2O_3$ )
2. 酸化ガリウム ( $Ga_2O_3$ )
3. 酸化アルミニウム ( $Al_2O_3$ )

**酸化ガドリニウム**が汚染されていることが判明し、SK-Gdの硫酸ガドリニウムを作っている日本イットリウム社に依頼して、高純度 $Gd_2O_3$ を入手。



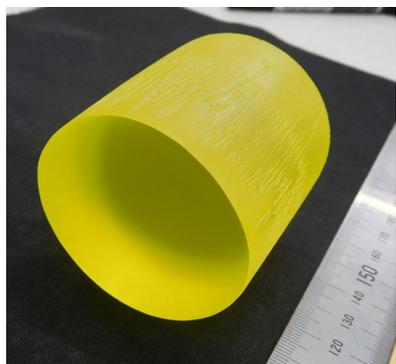
	$Gd_2O_3$ (新)	$Al_2O_3$ (新)	$Gd_2O_3$ (旧)	$Al_2O_3$ (旧)
$^{238}U$ 系列	< 16.3	< 28.3	$1750 \pm 221$	$476 \pm 43.5$
$^{232}Th$ 系列	$1.66 \pm 0.41$	$5.85 \pm 2.80$	$270 \pm 12$	$16.0 \pm 24.3$
$^{40}K$	< 0.27	< 36.5	$84.8 \pm 28.7$	< 96.5

単位は [mBq/kg]

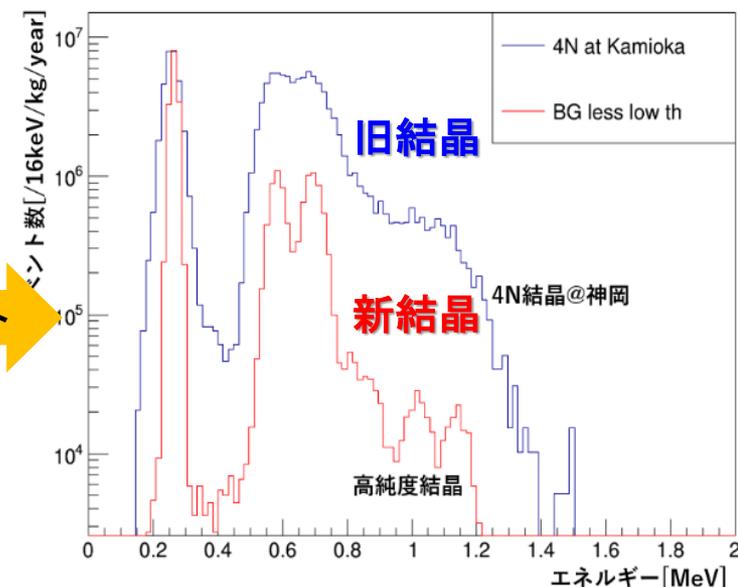
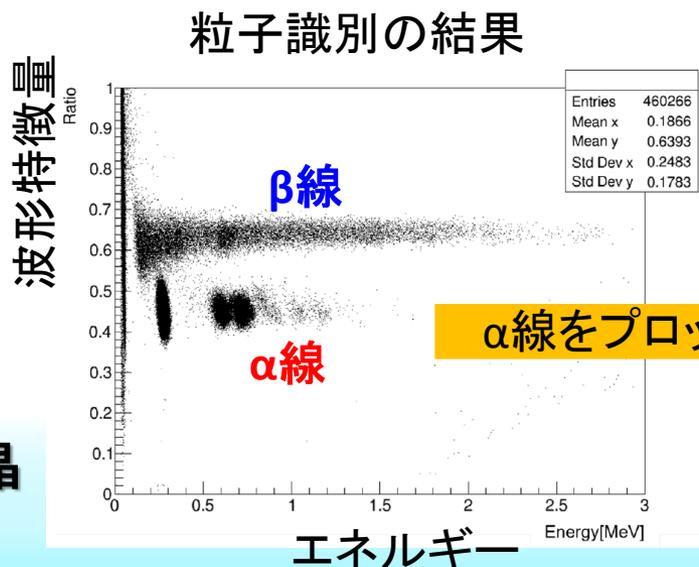


# 高純度GAGG結晶 (Cr#1)

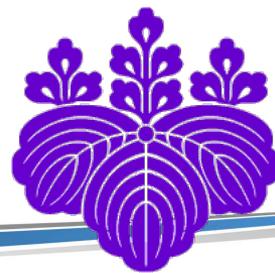
- $Gd_2O_3$ と $Al_2O_3$ に関して、原料を純化および選別。
- 高純度原料で2インチのGAGG結晶を育成@東北大金研
- 2023年に高純度GAGG結晶 (Cr#1)が完成。神岡でBG調査。
- アルファ線レートで約一桁のU/Th低減に成功！



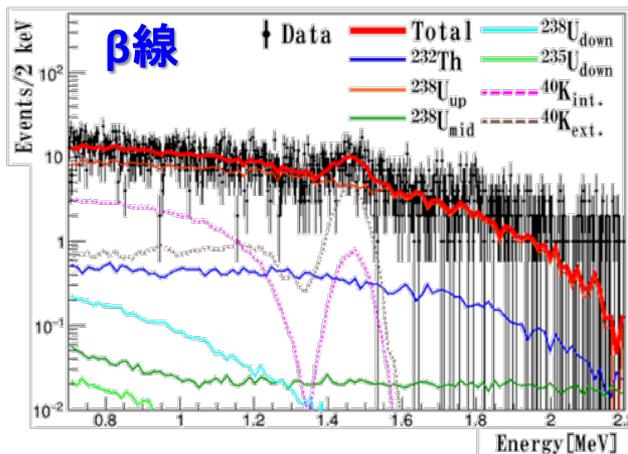
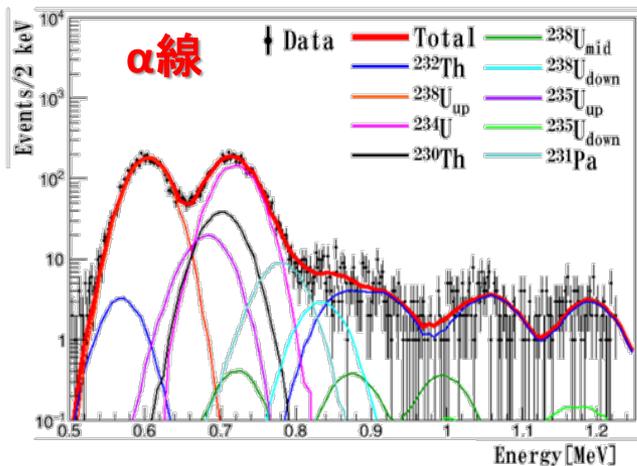
高純度GAGG単結晶  
(Cr#1)



# シミュレーションによるBG理解



- U/Th系列の放射性バックグラウンドをGEANT4シミュレーションでBGのエネルギースペクトルを再現。データにフィット。



シミュレーション  
でBGの再現に  
成功!

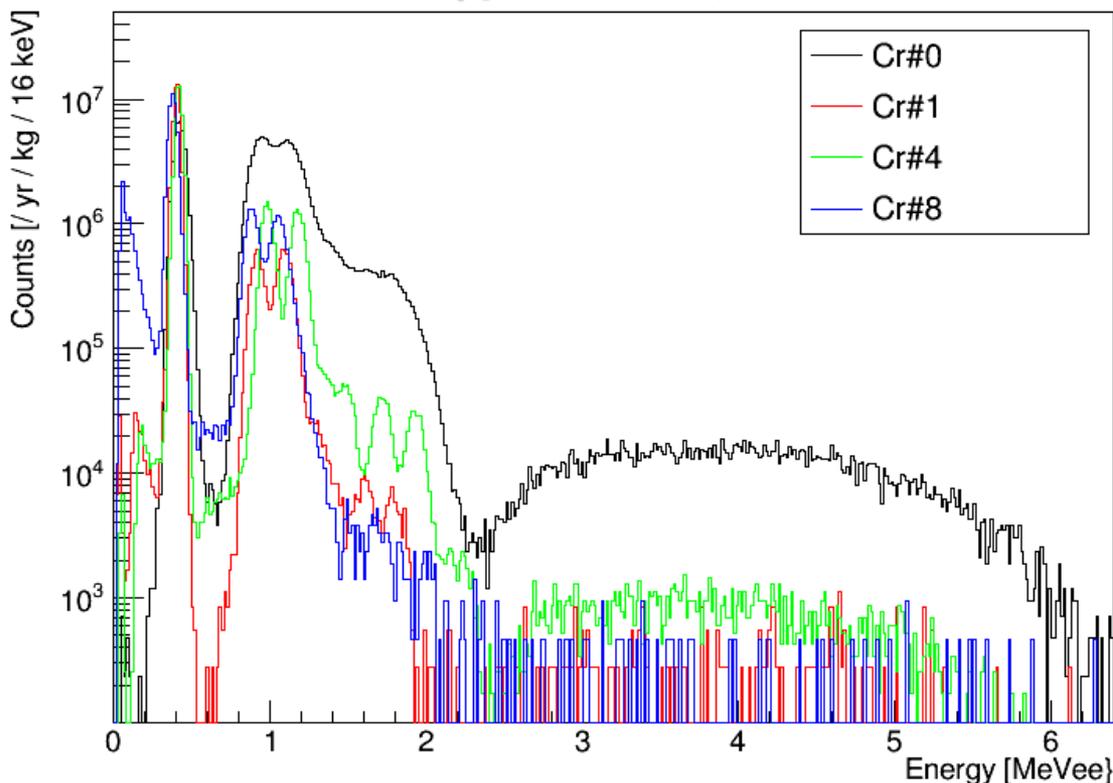
mBq/kg	<sup>238</sup> U上流	<sup>232</sup> Th
旧結晶	911 ± 10	289 ± 20
新結晶	<b>125 ± 2</b>	1.9 ± 0.1

- 定量的な議論が可能となった。
- また、主要BGが<sup>238</sup>U上流であることが判明した。
- 新結晶は、従来の結晶よりも<sup>238</sup>Uを1/7以下に低減。

# その後の結晶開発の経緯



## α線BGスペクトル



- ✓ 現在、**Cr#1**、**Cr#4**でPhase 1実験を遂行中。
- ✓ 並行して結晶の純化を進めている。

**Cr#0:** 従来結晶  
C&A社製 市販品



**Cr#1:** 高純度  
原料高純度化  
BG一桁低減！



**Cr#4:** 大型 & 高純度  
Cr#1と同じ手法で  
大型化。約3倍。



**Cr#8:** 再現性確認  
サイズを戻して、Cr#1  
の再現を目指した。





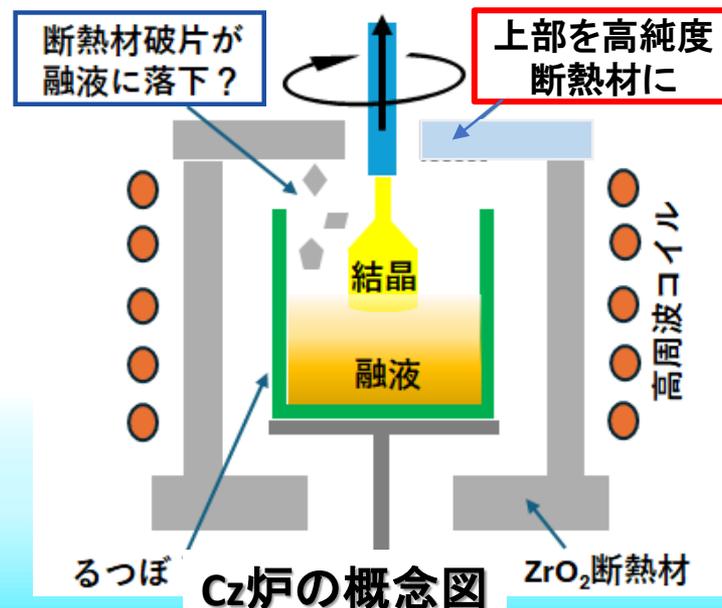
# GAGG結晶のさらなる純化

- 結晶内のU/Th不純物量は原料と比較すると多い(左表)。
- 結晶はCz法で育成(右図)。るつぼ周りのジルコニア断熱材がU/Th不純物を大量に含んでいることが分かっている。
- 断熱材の破片などが育成中にメルトに混入している？
- 結晶端材のICP-MS測定でも Zr が検出されている。

新旧結晶と原料の不純物比較

	$^{238}\text{U}$ 上流	$^{232}\text{Th}$
旧結晶	911 ± 10	289 ± 20
新結晶	<b>125 ± 2</b>	10.2 ± 0.4
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 原料	<b>&lt; 16.3</b>	1.66 ± 0.41

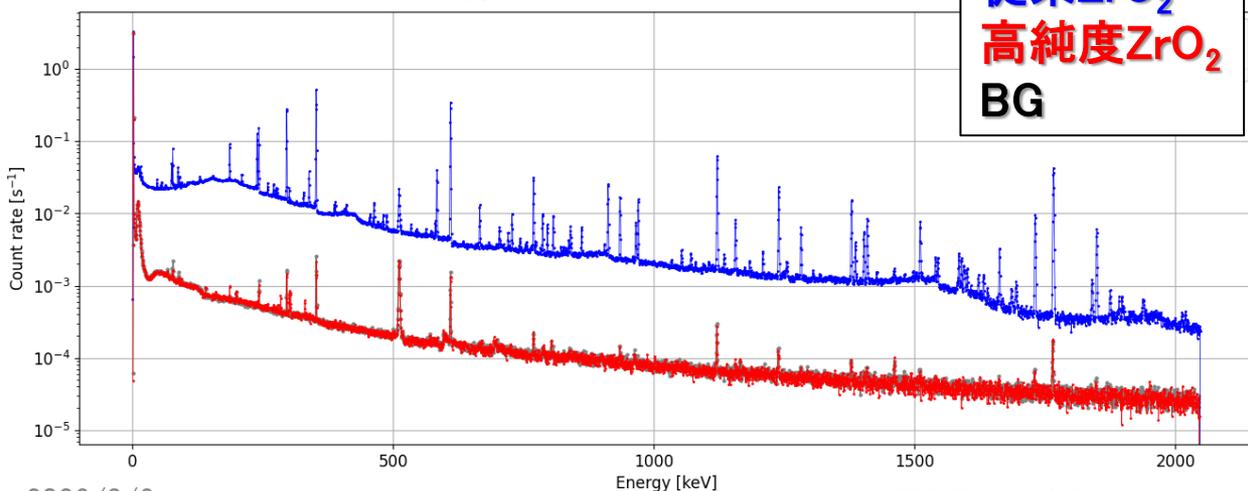
[mBq/kg]



# 高純度ZrO<sub>2</sub>断熱材開発

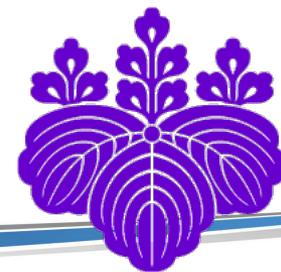
- ジルコニア (ZrO<sub>2</sub>) 断熱材のコンタミが疑わしい。
- 企業((株)三幸)と協力して高純度断熱材を開発中。
- 一般的な断熱材向け乾式ZrO<sub>2</sub>は不純物が多いため、  
電子材料向けの湿式ZrO<sub>2</sub>を購入してGe検出器で選別 → 試作。
- 高純度なZrO<sub>2</sub>原料で作った試作品が完成(2026年2月)
- **3ケタ以上の高純度化に成功!!** → 次回、これで結晶育成。

Ge測定@筑波大

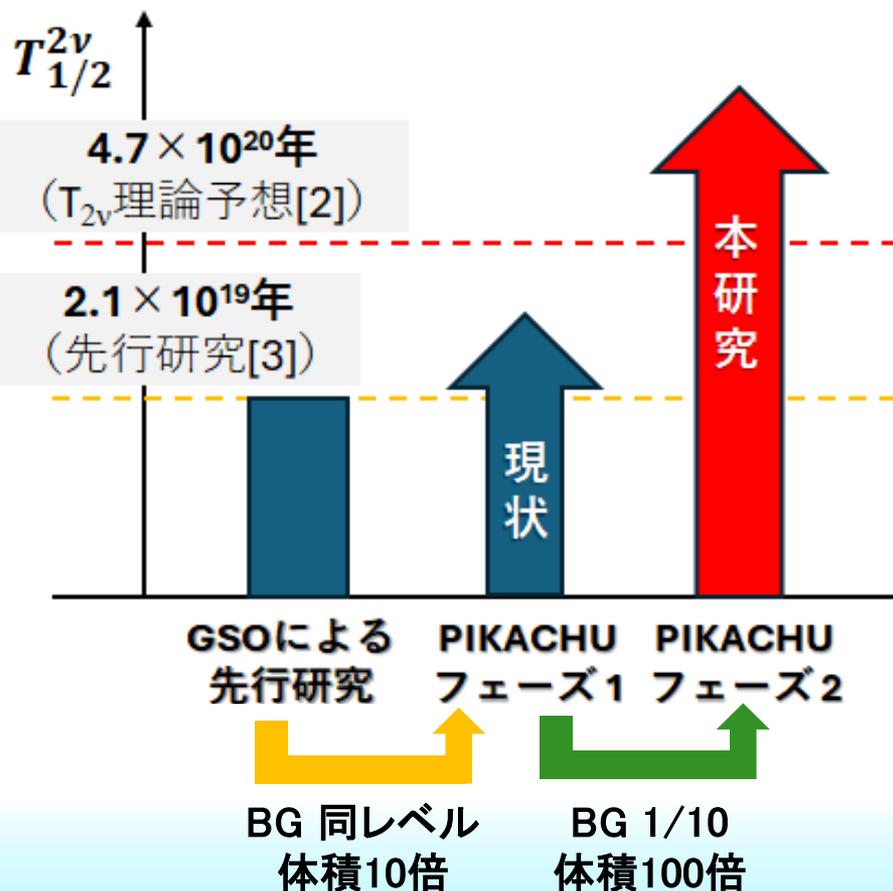


○断熱材Ge測定の結果

	試作品	従来品
<sup>238</sup> U <sub>up</sub>	< 0.43	2000 ~ 3000
<sup>235</sup> U	0.031	-
<sup>40</sup> K	0.17	-



# PIKACHU実験の今後



- 現在のPhase 1で先行研究の感度を更新。
- Phase 2で理論予想に到達し、 $^{160}\text{Gd}$   $2\nu\beta\beta$ 発見を目指す。
- 現在、結晶純化のR&D中。

## 目標感度

$$T_{1/2}^{2\nu} > 2.1 \times 10^{19} \text{ yr @Phase 1}$$

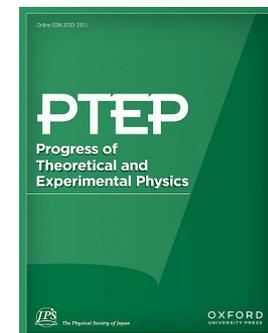
$$T_{1/2}^{2\nu} > 4.7 \times 10^{20} \text{ yr @Phase 2}$$

# 論文の宣伝



## First Study of the PIKACHU Project: Development and Evaluation of High-Purity $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}:Ce$ Crystals for $^{160}Gd$ Double Beta Decay Search

Takumi Omori, Takashi Iida , Azusa Gando, Keishi Hosokawa, Kei Kamada,



PTEP, Vol. 2024, Iss. 3, March 2024, 033D01

高純度結晶開発

## Simulation tool development and sensitivity analysis of $^{160}Gd$ double beta decay search by the PIKACHU project

T. Omori <sup>a,\*</sup>, T. Iida <sup>b,\*</sup>, N. Hinohara <sup>c,b</sup>, K. Takahashi <sup>a</sup>, K. Fushimi <sup>d</sup>, A. Gando <sup>e,f</sup>,

NIM-A, Vol.1082, Part 2, February 2026, 171023

BGシミュレーション、感度計算

今日の話の詳細が書かれています！



# まとめ



- **PIKACHU**は $^{160}\text{Gd}$ の二重ベータ崩壊探索実験。
- 従来より一桁きれいなGAGG結晶開発に成功。
- 2024年12月よりPhase 1を開始、今後2年+ $\alpha$ で世界最高感度到達を目指す。
- 並行して $^{160}\text{Gd}$ の $2\nu\beta\beta$ 発見に向け、一桁純度を高めた超高純度GAGG結晶を作ろうとしている。

共同研究や飲みのお誘いはこちらへ！

→ [tiida@hep.px.tsuba.ac.jp](mailto:tiida@hep.px.tsuba.ac.jp)

