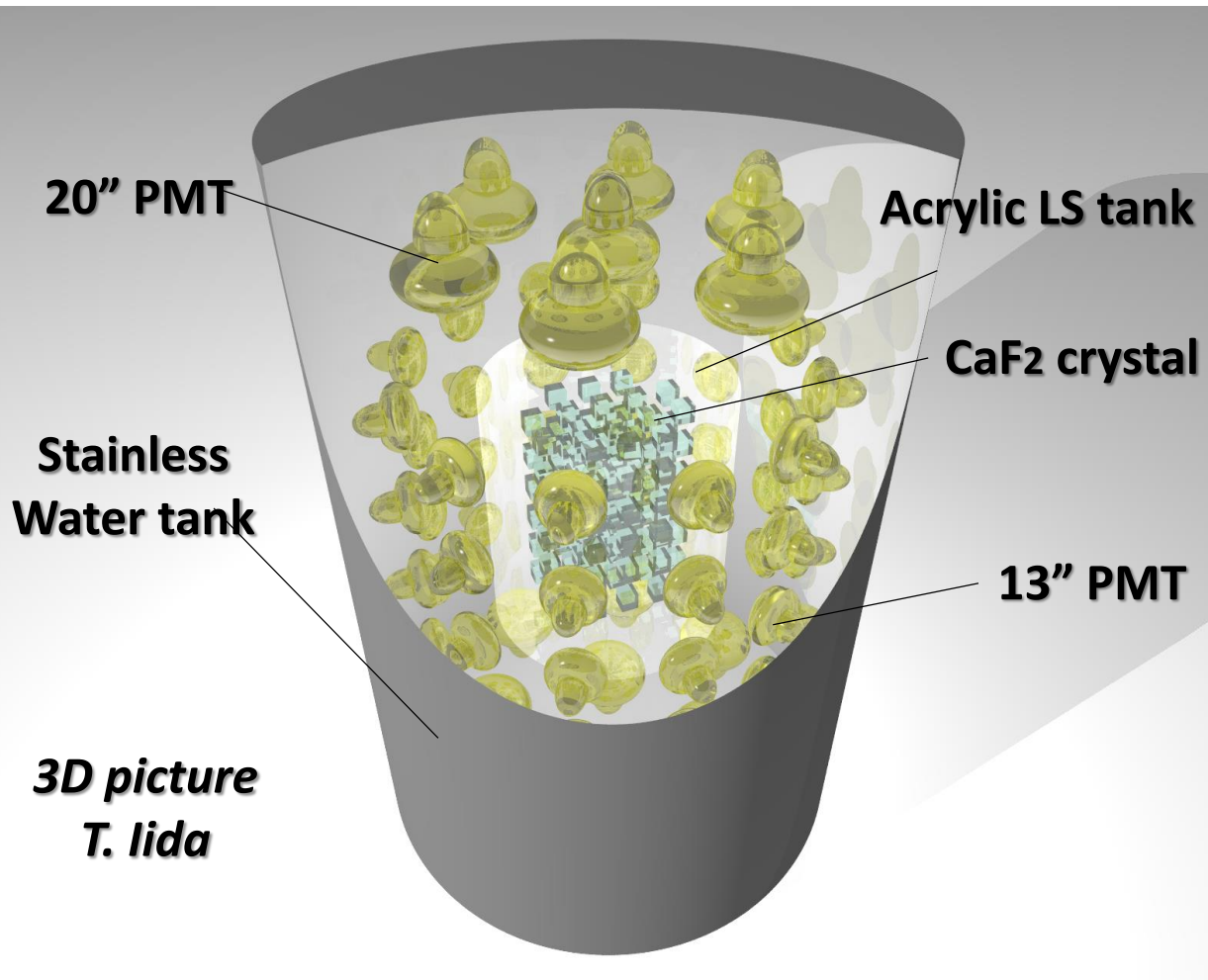


# 48Caの2重ベータ崩壊の研究



## Collaborating Institutions



2016 Dec. 9<sup>th</sup>

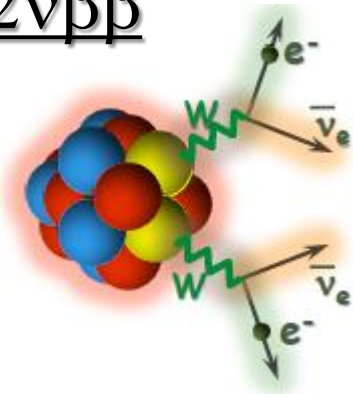
飯田崇史(大阪大学)

宇宙線研共同利用研究成果発表会 @柏キャンパス

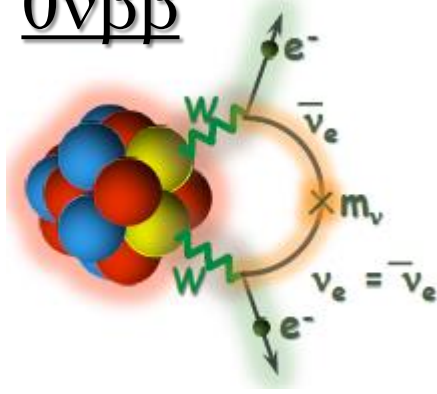


# 二重ベータ崩壊

2νββ



0νββ

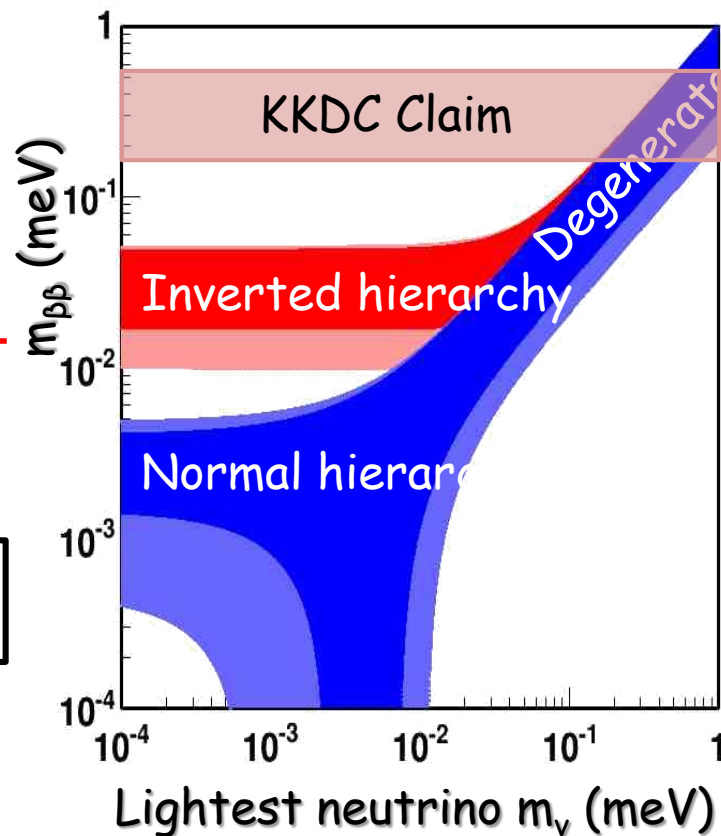


- 標準理論の枠内
- いくつかの核で既に発見済み
- 半減期:  $10^{18} \sim 10^{20}$  yr

- 標準理論を超える
- **ニュートリノのマヨラナ性の証明**
- 半減期:  $10^{26}$  yr 以上

$$0\nu\beta\beta\text{の半減期} : \frac{1}{T_{1/2}} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

## ニュートリノ振動実験からのニュートリノ質量制限



◎マヨラナニュートリノだったら、、、  
 軽いニュートリノ質量 (シーソー機構)  
 物質優勢宇宙 (レプトジェネシス)

# 二重ベータ崩壊に対する感度

## OKamLAND

$0\nu\beta\beta$  search with  $^{136}\text{Xe}$

**World best limit on  $0\nu\beta\beta$**

$T_{1/2} > 1.1 \times 10^{26}$  [year]

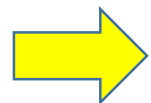
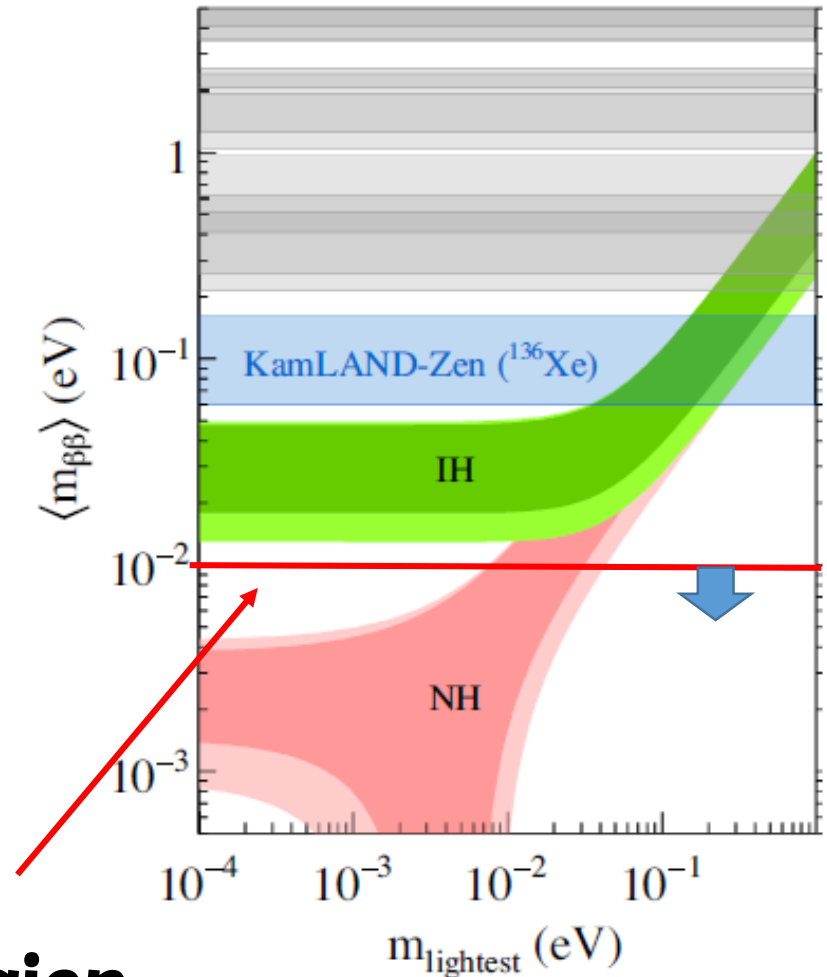
$\rightarrow m_{\beta\beta} < 61 - 165$  meV

## OCANDLES

$0\nu\beta\beta$  search with  $^{48}\text{Ca}$

Current sensitivity on  $0\nu\beta\beta$

$T_{1/2} \sim 10^{23}$  [year]



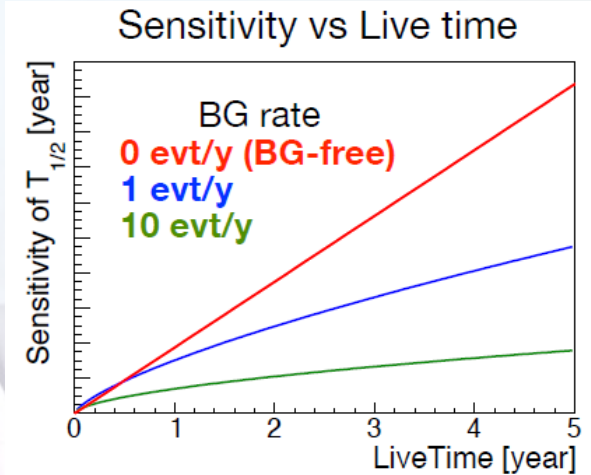
**Aim for below IH region**

**by making a *breakthrough* in future!!**



# What's breakthrough?

$0\nu\beta\beta$ 事象は非常に稀なため、以下の厳しい条件を満たす必要がある。



## ● 極低バックグラウンド(BG)環境

$^{48}\text{Ca}$ のQ値は4.27MeVと全 $0\nu\beta\beta$ 崩壊核中で最大。U/Th系列のベータ線・ガンマ線に比べ高く、BGに強い核である。加えて液体シンチレータによるアクティブ遮蔽+昨年鉛&ホウ素のシールド導入。

## ● 高エネルギー分解能

$0\nu\beta\beta$ と $2\nu\beta\beta$ を分離するために高分解能が必須。

現状のエネルギー分解能は $\sigma \sim 2\%$  @4.27MeV。

将来計画として“ $\text{CaF}_2$ ボロメータ” ( $\sigma \sim 0.3\%$ )を開発中。

## ● 大量の標的核

$^{48}\text{Ca}$ の自然存在比は0.187%と非常に少ない。

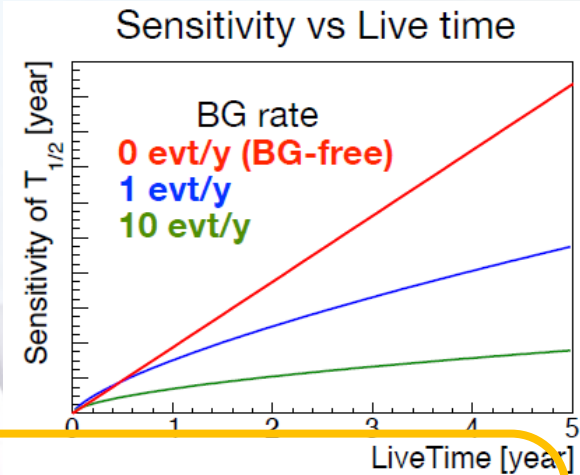
“ $^{48}\text{Ca}$ 同位体濃縮法”を開発中。(複数手法を検討)

現状、電気泳動法※を用いて6倍の濃縮度を達成している。



# What's breakthrough?

$0\nu\beta\beta$ 事象は非常に稀なため、以下の厳しい条件を満たす必要がある。



## ● 極低バックグラウンド(BG)環境

$^{48}\text{Ca}$ のQ値は4.27MeVと全 $0\nu\beta\beta$ 崩壊核中で最大。U/Th系列のベータ線・ガンマ線に比べ高く、BGに強い核である。加えて液体シンチレータによるアクティブ遮蔽+昨年鉛&ホウ素のシールド導入。

## ● 高エネルギー分解能

*Mainly focus on BG today!!*

$0\nu\beta\beta$ と $2\nu\beta\beta$ を分離するために高分解能が必須。  
現状のエネルギー分解能は $\sigma \sim 2\%$  @4.27MeV。  
将来計画として“ $\text{CaF}_2$ ボロメータ” ( $\sigma \sim 0.3\%$ )を開発中。

## ● 大量の標的核

$^{48}\text{Ca}$ の自然存在比は0.187%と非常に少ない。  
“ $^{48}\text{Ca}$ 同位体濃縮法”を開発中。(複数手法を検討)  
現状、電気泳動法\*を用いて6倍の濃縮度を達成している。



# CANDLES実験概要

Calcium fluoride for studies of Neutrino and Dark matters  
by Low Energy Spectrometer

- CaF<sub>2</sub> 結晶 ( $\tau \sim 1\mu\text{sec}$ )  
10 × 10 × 10 cm<sup>3</sup> × 96ヶ (計300 kg)
- 2m<sup>3</sup>の液体シンチレータ ( $\tau \sim 10\text{nsec}$ )

波形の違いでアクティブベトー！！

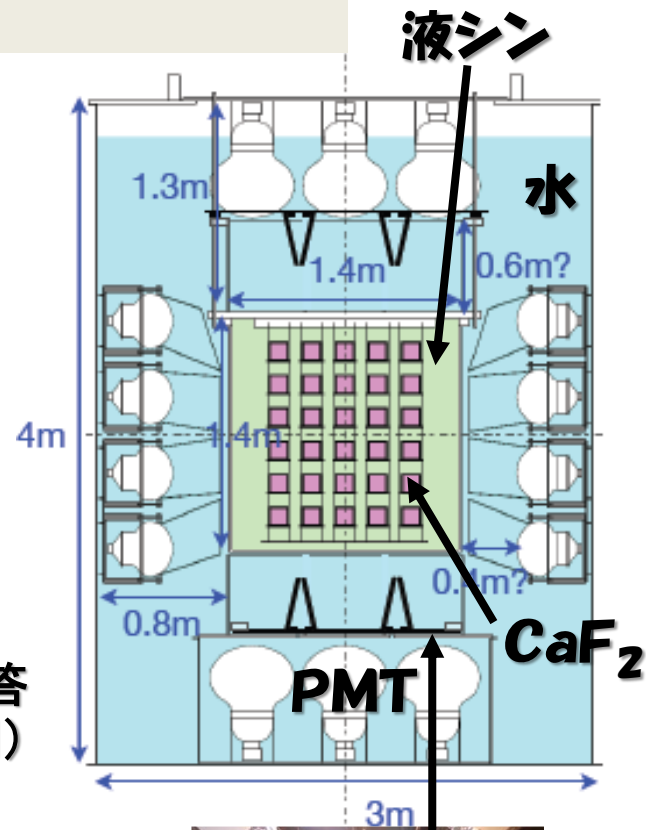
- 直径3m高さ4mの円筒形水タンク
- 62本の光電子増倍管(PMT)

10インチPMT (R7081) × 12本  
13インチPMT (R8055) × 36本  
20インチPMT (R7250) × 14本

高速応答  
(R&D用)

- 集光ガイド

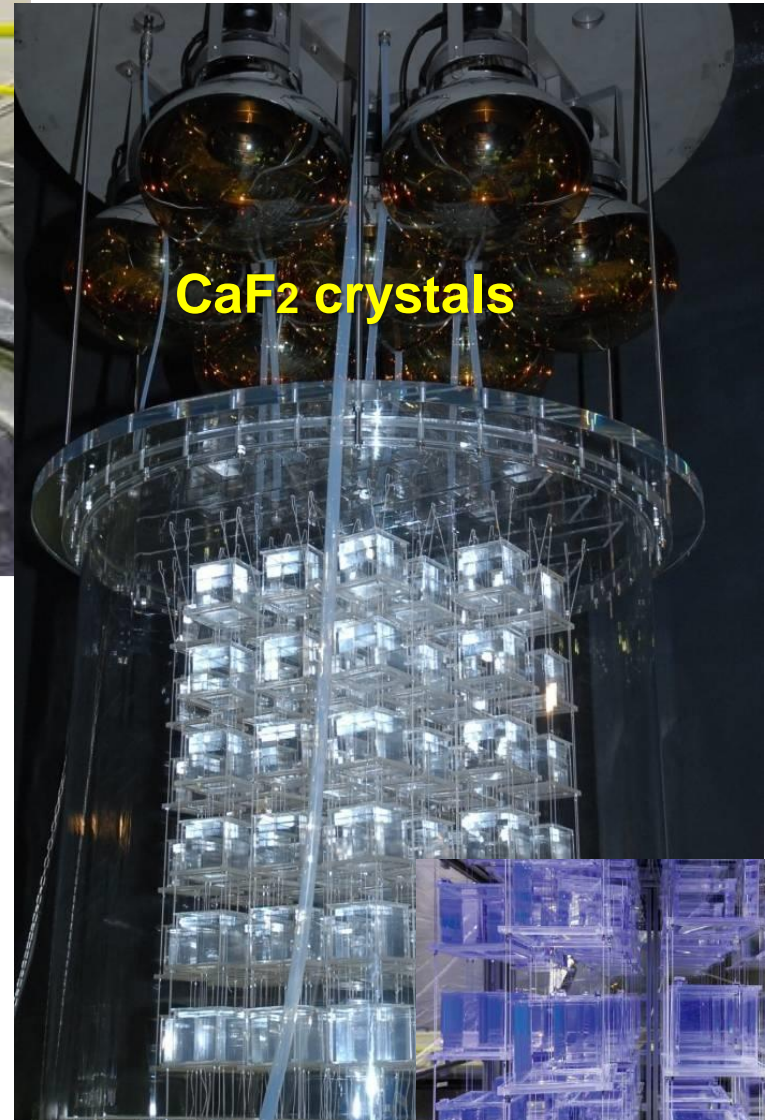
アルミシート: 反射率~93% @ 420nm



# The CANDLES III (U.G) detector in Kamioka observatory



**CANDLES III detector**



**CaF<sub>2</sub> crystals**



**PMT & Light pipe**

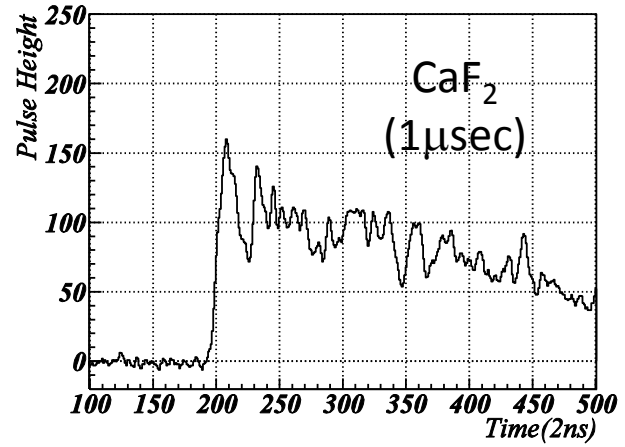




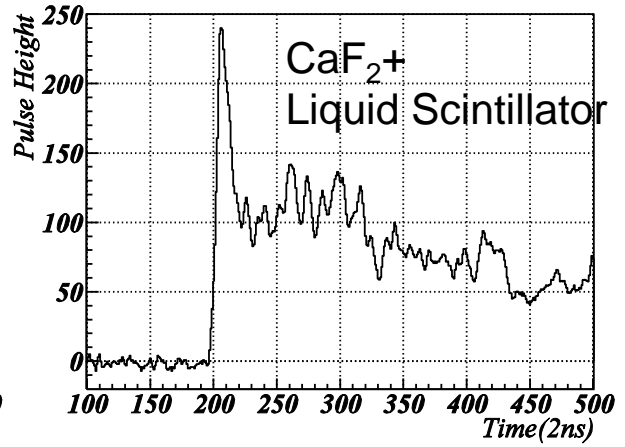
# 液体シンチレータを利用した 外部BGベトロー(PSD)

- 500 MHz Flash ADCを用いて各PMTの波形データを取得している。
- 波形解析によって結晶周囲の液体シンチレータ(LS)を光らせた事象を除去することで、外部ガンマ線のBGを大幅に低減している。
- またCaF<sub>2</sub>結晶内でも $\alpha/\beta$ は波形解析で弁別可能。

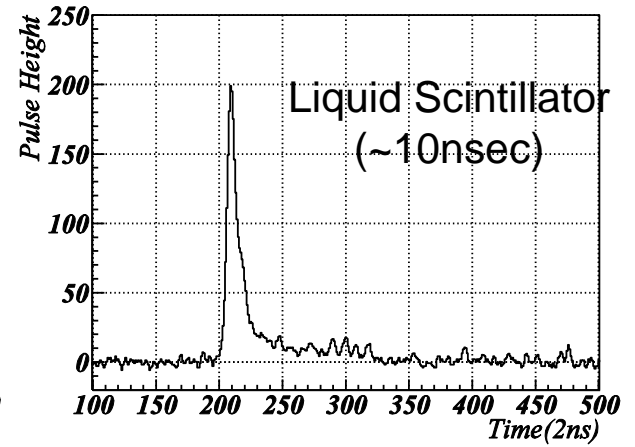
$\beta$  signal !?



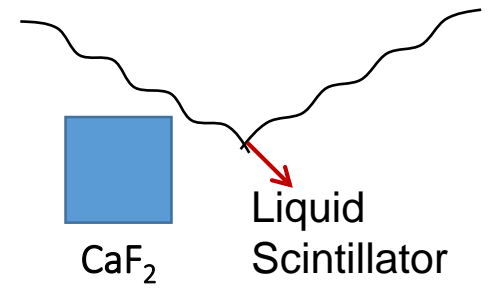
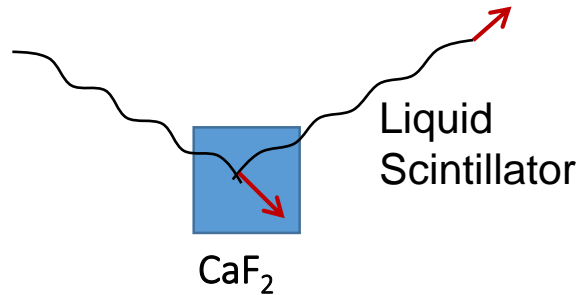
External  $\gamma$  BG



External  $\gamma$  BG

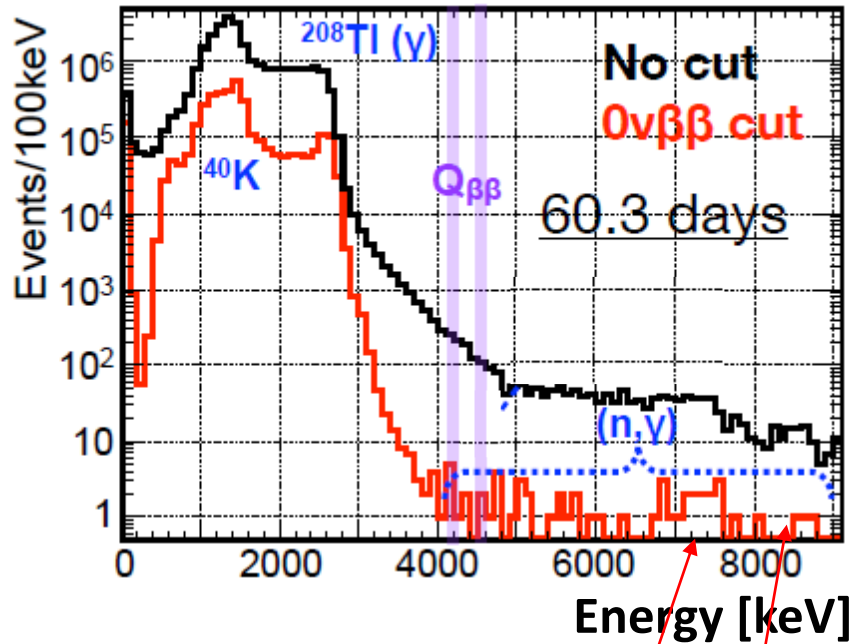


↑  $\beta$ -ray  
⋈  $\gamma$ -ray

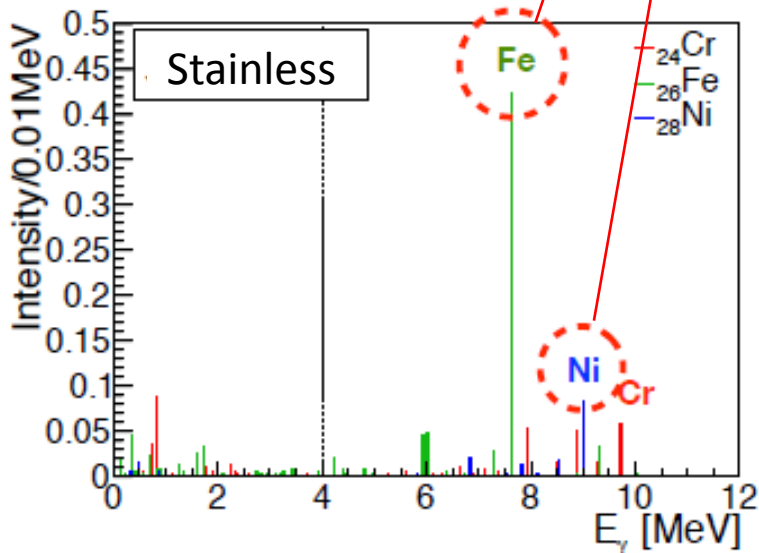




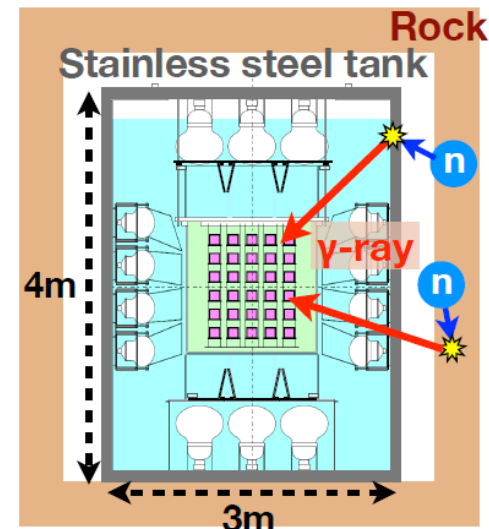
# CANDLESのバックグラウンドスペクトル



- LSカットをかけてBGを除去しても、4MeV以上に不明なBGが存在していた(図は2013年データ)。
- 7.5MeV付近にピークらしきものが見うけられる。
- 環境中性子が検出器周囲の物質に吸われて出るガンマ線ではないかと予想 → (n,γ)

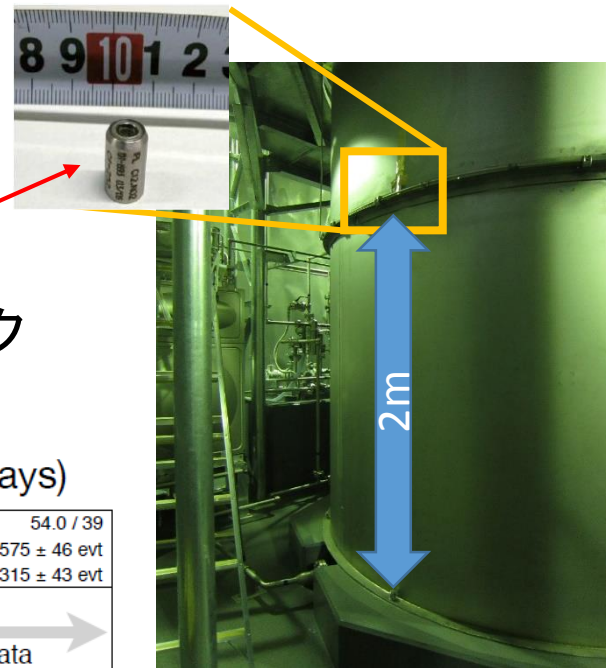


Schematic View of (n,γ) Reaction



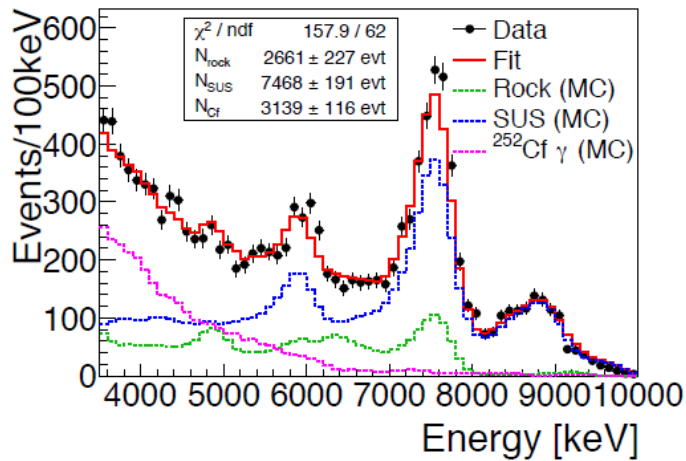


# 中性子線源を用いた BG調査

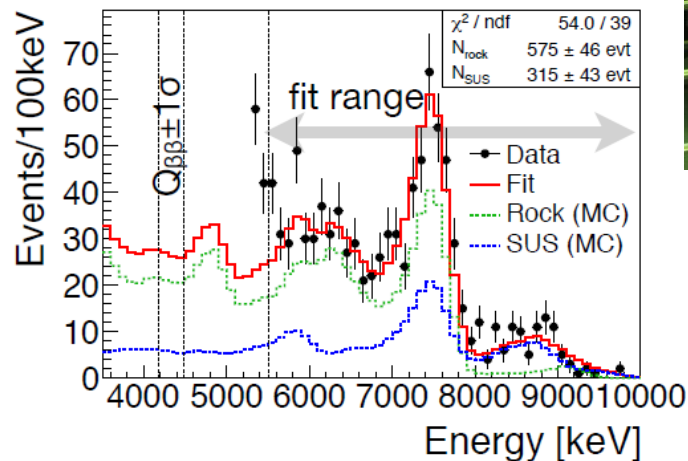


- BGが(n, $\gamma$ )であることを確かめるべく、 $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いて、検出器に中性子を照射。得られたスペクトルをBGデータと比較して検証を行った。

$^{252}\text{Cf}$  Run (3.1 hour)



Physics Run (88.1 days)



- 中性子線源Runと物理Runのスペクトルは5.5MeV以上で一致。
- (n, $\gamma$ )のシミュレーションは得られたスペクトルを良く再現した。

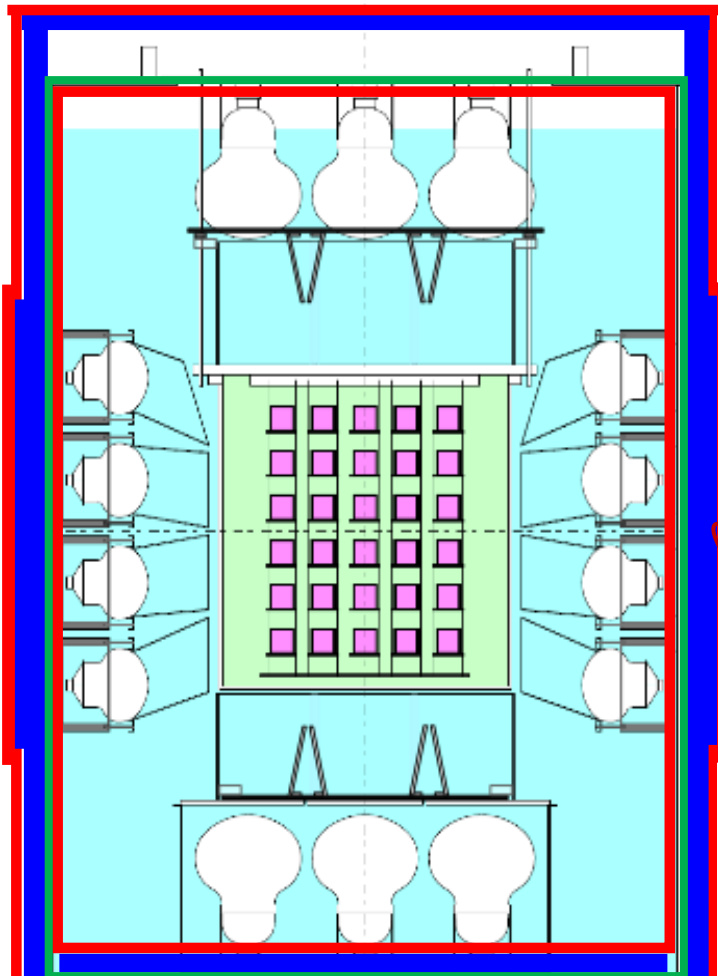


主要BGが(n, $\gamma$ )であると確認！

詳細をまとめて、論文を執筆予定

# (n,γ)事象低減のためのシールド

## CANDLES shield overview



— CANDLES tank

— Pb shield (7-12cm)

周囲の岩盤からの中性子捕獲ガンマ線を遮蔽。鉛そのものの(n,γ)反応は十分小さいことを計算で確認。

— Boron sheet (4-5mm)

ステンレス水タンクによる中性子捕獲を低減。高速中性子用に内側にもシートを入れた。

- シールドで(n,γ)が**1/80**になることがMCから期待。
- シールド後のBG期待値:

**岩盤 : 0.34 ± 0.14 event/year**

**タンク : 0.4 ± 0.2 event/year**



# 鉛遮蔽体構築工事

- 2015年から鉛ブロックを設置。
- 教授であろうとも馬車馬のごとく鉛運び☺
- 鉛総重量60トン以上。

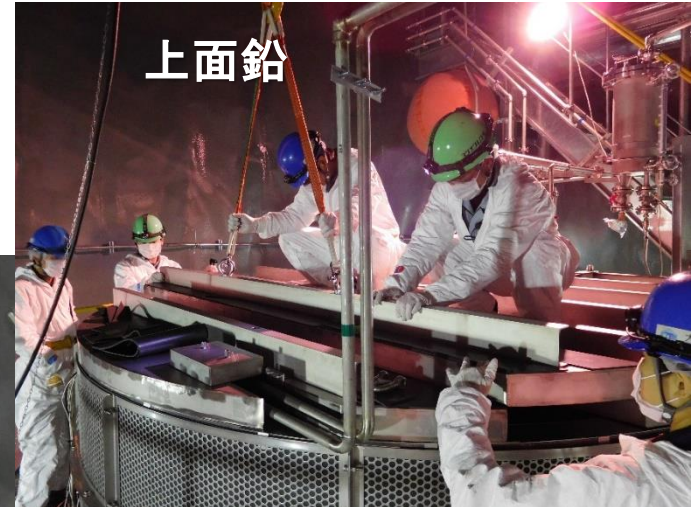


側面鉛

2015.11.12.1



2015.10.28.08.42



上面鉛



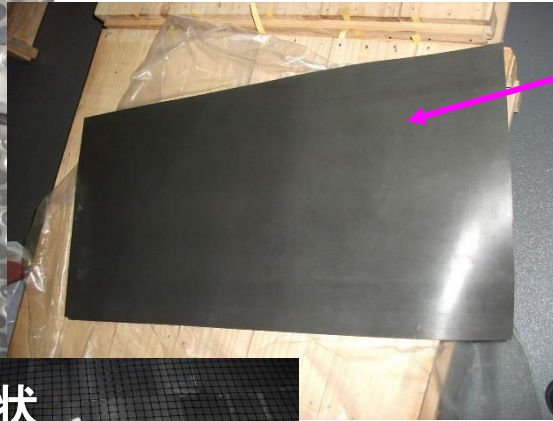
2015.10.28.12.11



底面鉛

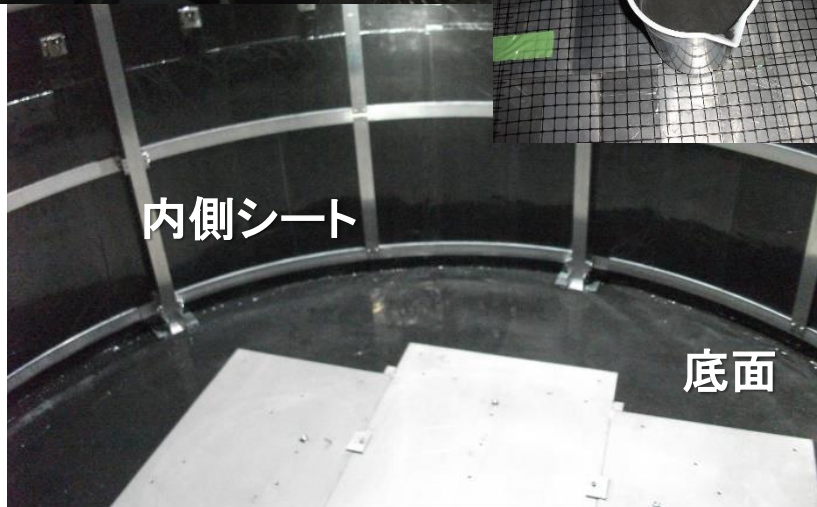
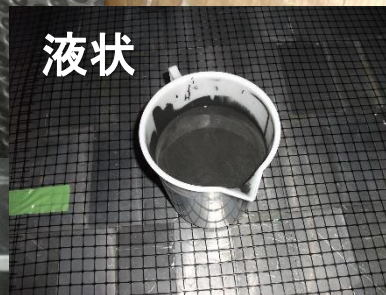
# 中性子遮蔽体構築工事

➤ 2015年11~12月で中性子遮蔽体の工事を完了。



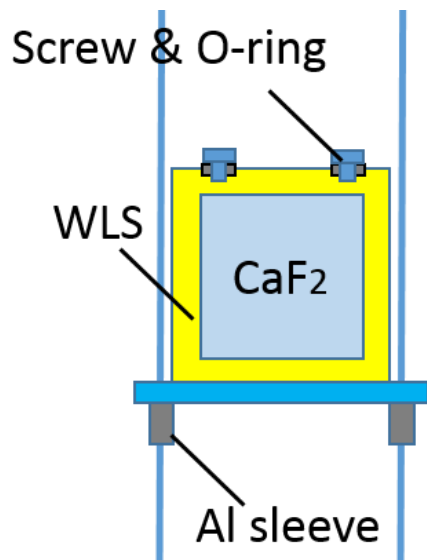
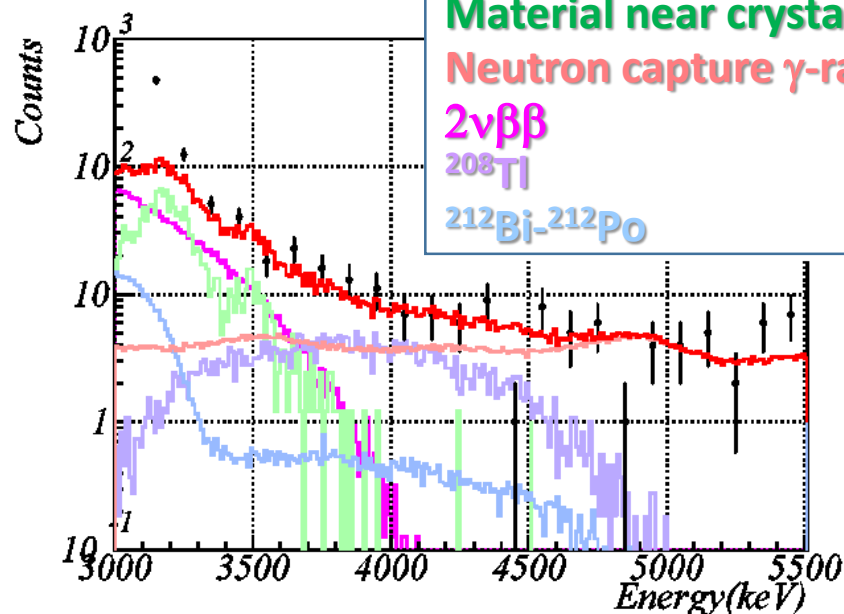
炭化ホウ素40wt%  
入りゴムシート  
(**Bシート**)

厚み4~5mm  
全部で100m<sup>2</sup>覆う

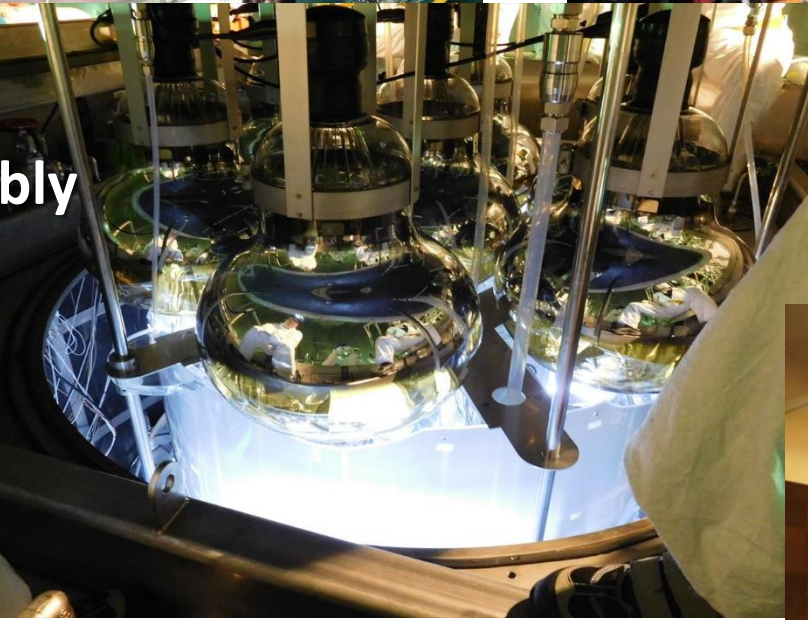
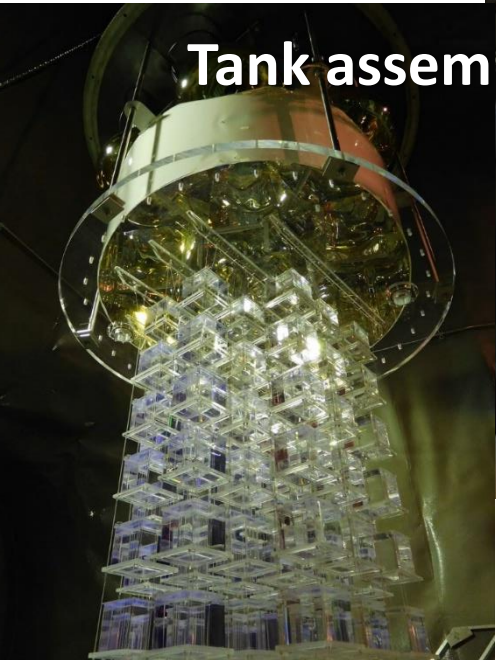
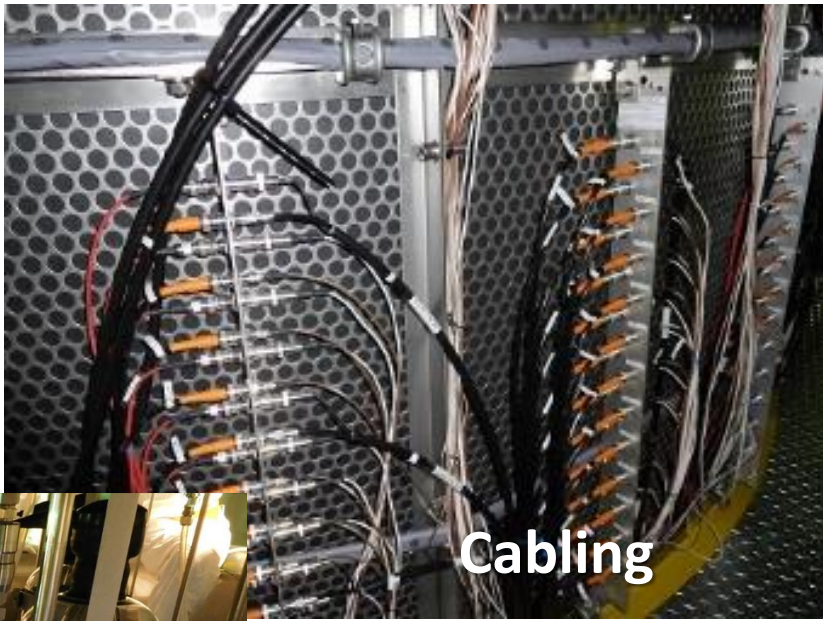


- 底面は同じ組成のものを液状で敷き詰めた鉛のうえから流し込んだ。
- **中性子遮蔽と鉛の防水**の両方を同時に行う！！
- ホウ素の溶け出しを減らすため、流し込んで固めた上から、B無しの液状ゴムでコーティング。
- B/Pb溶け出しを定期的にICP-MSで調査。

# CaF<sub>2</sub>結晶周りの改造



- Ge検出器による測定の結果、結晶周りの「**o-ring**」と「**Alスリーブ**」が不純物が多くBGとなっていることが判明した。
- シールド構築で結晶を取り出したついでに、それらを、より綺麗と期待されるものと交換。
- これにより、3 – 3.5 MeV領域のBGが半分以下に低減されることが期待される。



**Construction finished  
in May 2016 !!**



**CANDLES III → CANDLES III+**

**Construction finished in May 2016 !!**

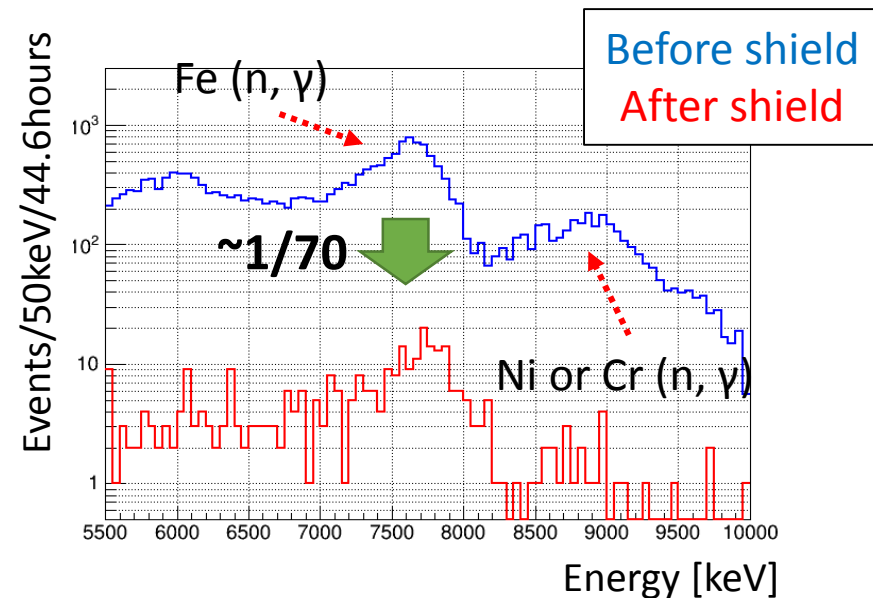
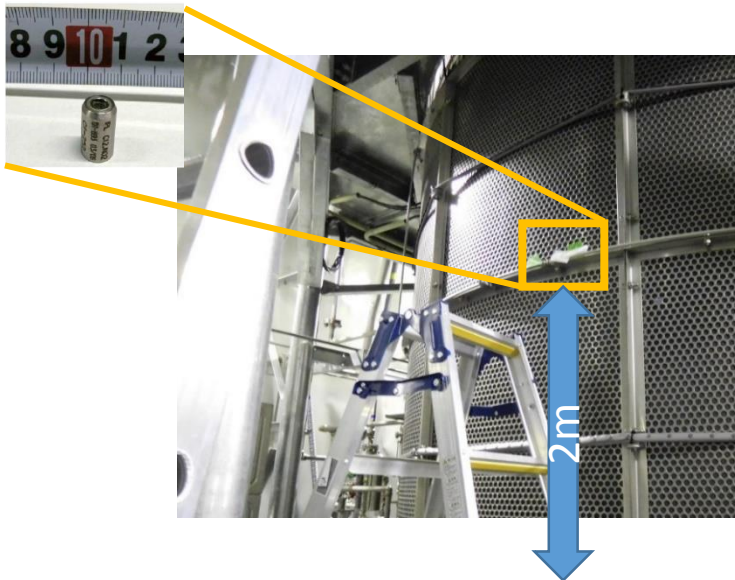




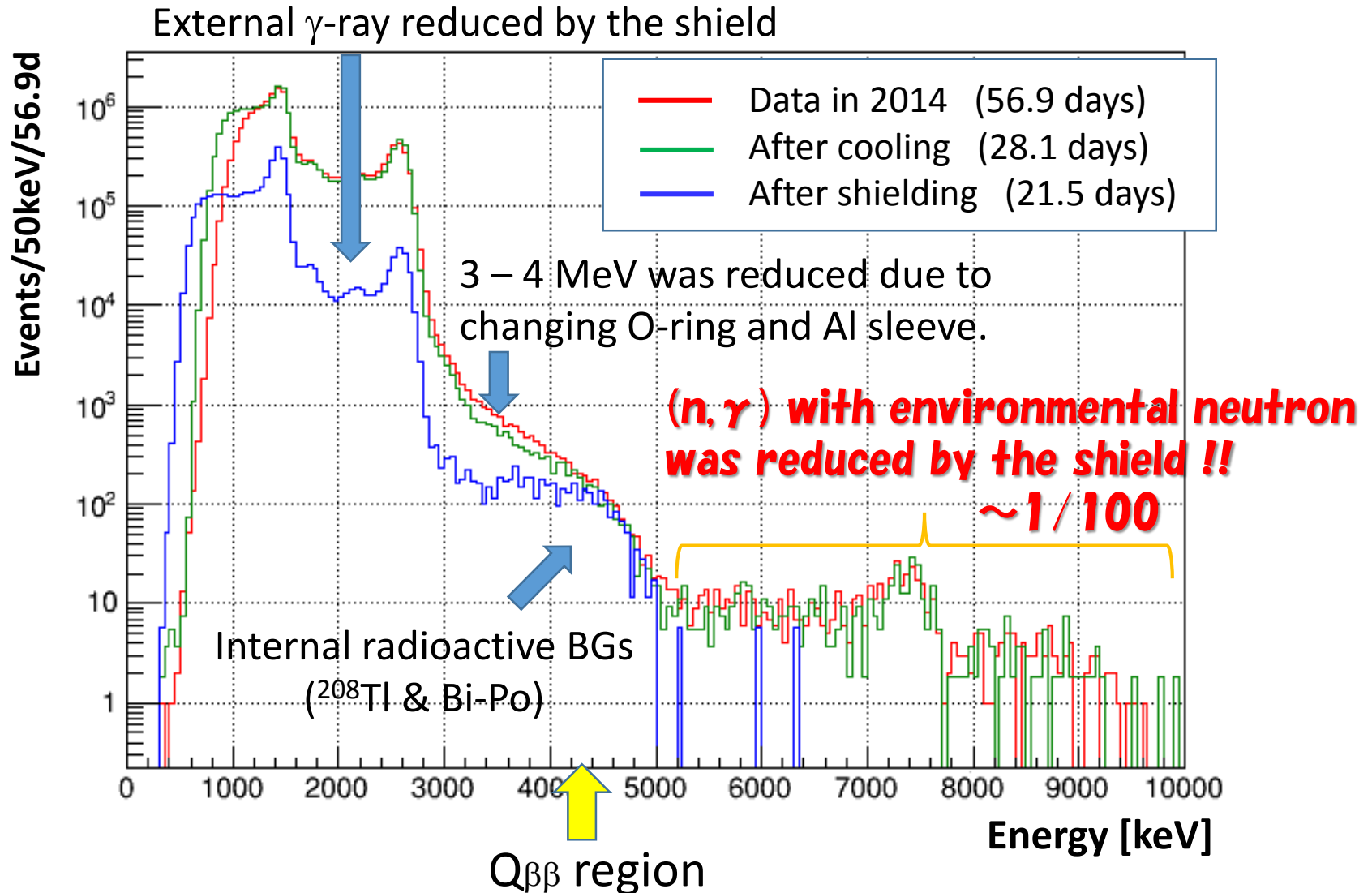


# シールドの性能調査(線源Run)

- シールドの完成後、その性能を調査するため、再度 $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いたデータ取得を行った。
- 高統計を得るため、緩いカット条件での比較をした。
- シールド構築の前後で、線源Runの $(n, \gamma)$ 事象は約 $1/70$ に減少した！！
- モンテカルロシミュレーションからの予想とほぼ一致。

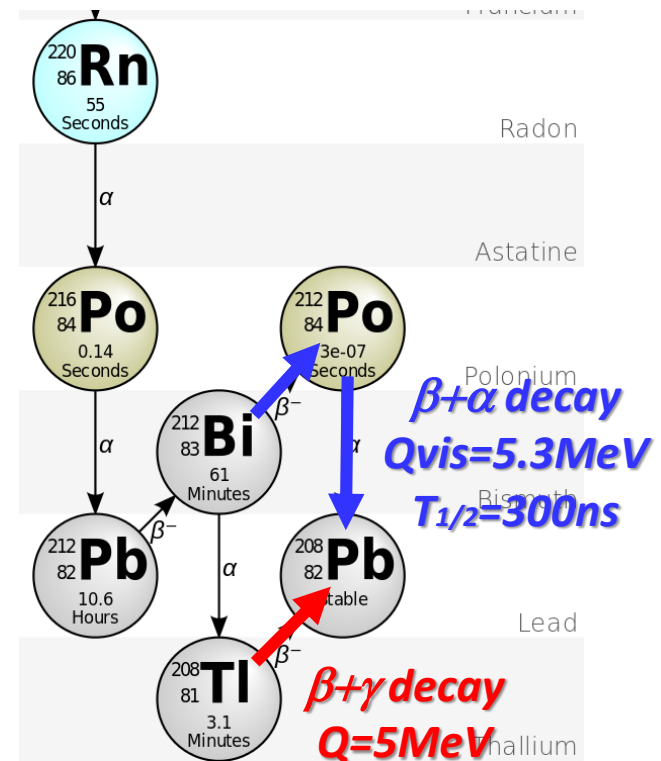


# 物理Runのスペクトル(シールド前後)



# 残ったバックグラウンドに関して

- シールドで外部からの(n, $\gamma$ )は2桁低減。
- Q値に残っているBGはCaF<sub>2</sub>結晶内部のTh系列放射性不純物(<sup>208</sup>Tlと<sup>212</sup>Bi-<sup>212</sup>Po)と $2\nu\beta\beta$ が考えられる。
- Bi-Poは連続で二つ来る波形が他と異なるため、波形解析で除去できる。
- $2\nu\beta\beta$ は現状は無視できる(ただし濃縮後はメインのBGとなりうる)。
- 残る主要なBGは<sup>208</sup>Tlと考えられる。



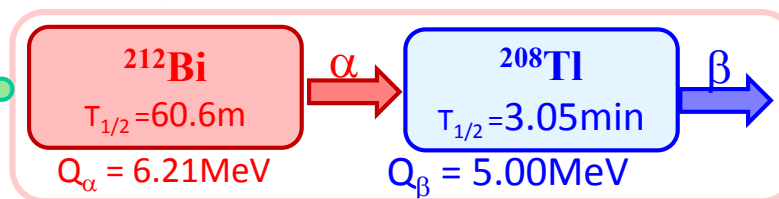
## 208Tl除去

Th系列

<sup>232</sup>Th

これをタグ

212Bi後12分間ベータして除去

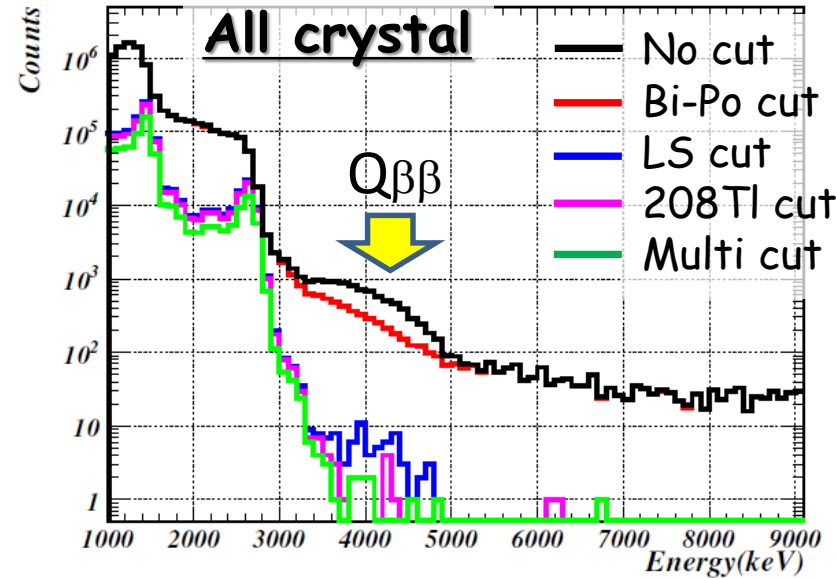


$\alpha$ - $\beta$ 崩壊

# $0\nu\beta\beta$ に対する感度

**BG期待値とシグナル効率から1年データを  
取得したときの感度を計算。**

データセット : 21.5 days after shielding  
 $Q_{\beta\beta}$ 領域: 4170 - 4480 keV ( $Q_{\beta\beta} -1\sigma +2\sigma$ )  
※27 crystal selection  $\rightarrow$   $<10\mu\text{Bq/kg}$



	27 crystals※	All crystals
# of ev @ $Q_{\beta\beta}$	1	5
Expected $^{208}\text{Tl}$	0.22	2.2
Expected (n. $\gamma$ )	0.01	0.04
Sig. eff.	0.46	
Sensitivity @1y	$0.7 \times 10^{23}$ [y]	$1.0 \times 10^{23}$ [y]

※残ったBGに関しては、今後詳細な解析を行っている。

**Sensitivity for  $0\nu\beta\beta$  after 1 year is  $\sim 10^{23}$  [year]**

# 将来のためのR&D

## ✓<sup>48</sup>Ca同位体濃縮法開発

- <sup>48</sup>Caの自然存在比は0.187%であり、濃縮が必須。複数の方法で同時並行に濃縮の手法を開発中。
- **電気泳動法**により、**6倍濃縮**を達成！
- これは<sup>40</sup>Ca / <sup>48</sup>Caのイオン移動度の違いを利用した手法。

詳細は論文参照



**PTEP**

Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 033D03 (10 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/ptv020

T. Kishimoto<sup>1,2,\*</sup>, K. Matsuoka<sup>2</sup>, T. Fukumoto<sup>3</sup>, and S. Umehara<sup>2</sup>

## ✓熱量蛍光検出器の開発

- 濃縮後、 $2\nu\beta\beta$ が主要BGとなり、高分解能で分離が必要。
- 10mKの低温下で、熱量の変化を見ることで高分解能を達成。

**Scintillator ( $\sigma \sim 2\%$ )** → **Bolometer ( $\sigma \sim 0.3\%$ )**

- 熱と蛍光を同時に見ることで、Q値付近の $\alpha$ 線BGも除去。
- 希釈冷凍機で2cm角結晶を約1Kまで冷却した。今後は10mKまでの冷却と、熱量蛍光シグナルの検出を目指す。

# まとめ

- **CANDLES実験**は神岡地下実験施設で行われている二重ベータ崩壊実験である。
- 2015年から2016年にかけて、BG低減のためのシールド導入作業を行い、今年5月からデータ取得再開。
- **主要BGであった $(n,\gamma)$ 事象が約二桁低減した。**
- **1年間データ取得した場合の期待されるSensitivityは、約 $10^{23}$  [year]であった。**
- 現在、解析手法の改善で残る内部不純物のBGを除去し、感度改善を試みている。
- 将来のためのR&Dも並行して行っている。

## ○共同利用経費(旅費)に関して:

配分額: 15万円 うち支出済み: 10万2千円

用途: 共同研究者の旅費 (e.g. 徳島→神岡)

残りの旅費も神岡への旅費で使わせて頂きます。

# New collaborative institute and Postdoc are now wanted!!



***Thank you very much !!***

# Backup slide

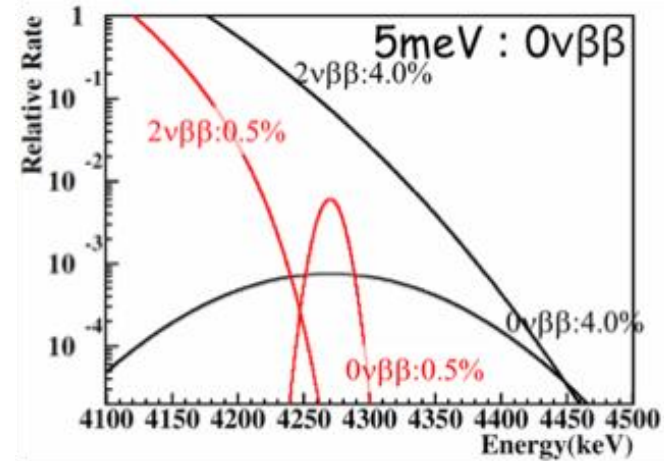
Thank you !!



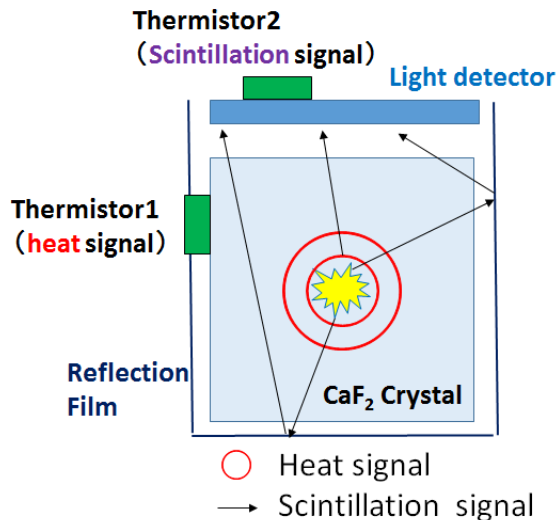


# Bolometer development

- Now  $^{208}\text{Tl}$  is dominant BG and  $2\nu\beta\beta$  is almost negligible in the current sensitivity.
  - However,  $2\nu\beta\beta$  will become main enemy for future after  $^{48}\text{Ca}$  enrichment.
  - Better energy resolution is necessary.
- Scintillator → Bolometer
- New BG appear in bolometer.



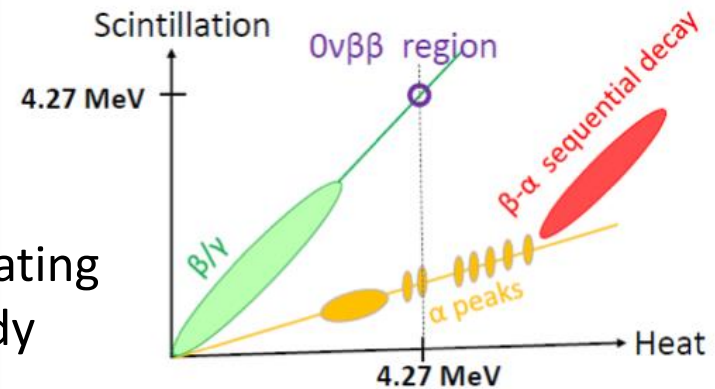
$^{48}\text{Ca}$   $Q_{\beta\beta}$ : 4268 keV /  $^{238}\text{U}$   $Q_{\alpha}$ : 4270 keV  
 Need particle ID → **Scintillating bolometer**



The technique of scintillating bolometer was already established.

→ CRESST-II ( $\text{CaWO}_4$ ), Lucifer, AMoRE

- Simultaneous measurement both heat and scintillation enables to identify the particle types ( $\alpha/\beta$  particle ID).



# Bolometer development

## Dilution refrigerator

- We will use the dilution refrigerator which was developed for the dark matter search with LiF by the Univ. of Tokyo, and was customized to low BG measurement.
- Cooling power is  $2\mu\text{W}$  @ 20mK

## Target

- 2cm cube of CaF<sub>2</sub> crystal (25 g) in the initial stage.
- Temperature rise at Q-value is  $1.43 \times 10^{-1}$  K at 10 mK.
- Neutron Transmutation Doped Germanium(NTD-Ge) thermistors borrowed from the Univ. of Tokyo.

## Schedule

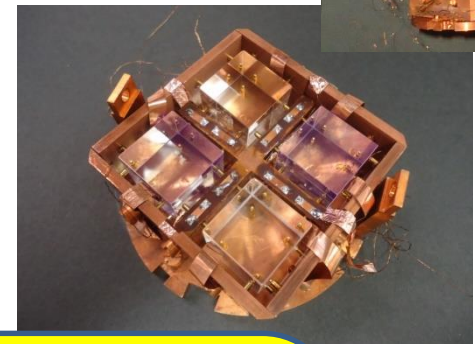
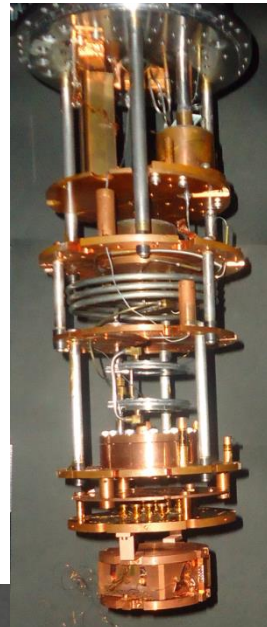
*Please see Tetsuno's poster*

2016

- Achieve low temperature (~a few K) **Done!!**
- Achieve ultra low temperature (~10mK)
- **Detect heat signal**

2017

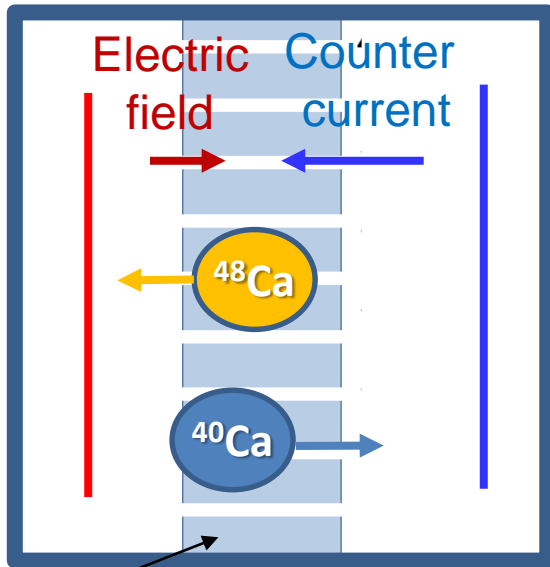
- Add a light detector to bolometer and achieve the simultaneous detection of heat and light signals
- Increase crystal size and number



# $^{48}\text{Ca}$ enrichment

- Natural abundance of  $^{48}\text{Ca}$  is 0.187%.
- Commercial  $^{48}\text{Ca}$  → too expensive (M\$/10g but kg-ton)
- Developing enrich technique of  $^{48}\text{Ca}$  is crucial for large volume DBD search.
- Challenges in CANDLES:
  - Crown ether resin + chromatography (Osaka, TIT...)
    - 1.3 times and costdown → *Journal of Chromatography A*  
Volume 1415, 9 October 2015, Pages 67
  - Crown ether + micro reactor (Osaka sangyo)
  - Laser separation (Fukui)
    - Good separation but smaller productivity
  - Multi-channel counter current electrophoresis (Osaka)

# Multi-channel counter current electrophoresis



BN plate 10 mm thick  
0.8mmΦ, every 4 mm

**PTEP**

Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 033D03 (10 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/ptv020

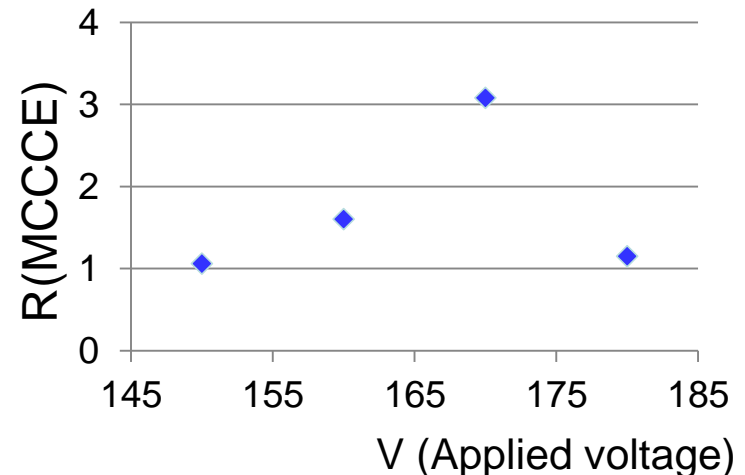
**Calcium isotope enrichment by means  
of multi-channel counter-current electrophoresis  
for the study of particle and nuclear physics**

T. Kishimoto<sup>1,2,\*</sup>, K. Matsuoka<sup>2</sup>, T. Fukumoto<sup>3</sup>, and S. Umehara<sup>2</sup>

- Separation using difference of migration speed between  $^{40}\text{Ca}$  /  $^{48}\text{Ca}$ .
- **Principle was demonstrated.**
- Further study on parameter optimization for,,,  
**High enrichment**  
**Large amount**

$$R(MCCCE) = \frac{43\text{Ca} / 48\text{Ca}(MCCCE)}{43\text{Ca} / 48\text{Ca}(\text{natural})}$$

Enrichment  
(43/40): 3.08  
**(48/40): 6**



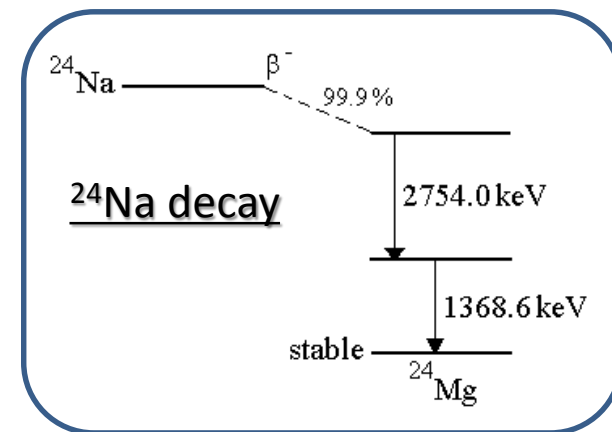


# $^{208}\text{Tl}$ multi-hit study



## - 公募研究D01: セルフトリガー可能な $^{24}\text{Na}$ 線源の開発と $\text{CaF}_2$ 検出器の低BG化 -

- Previous funding supported us to understand  $(n, \gamma)$  background and it's been reduced by additional shield.
- Now, **main BG is multi-hit event of  $^{208}\text{Tl}$ .**
- **New  $\gamma$ -ray source is developed with this funding to understand multi-hit BG.**
- NaI is activated by neutron ( $^{23}\text{Na} + n \rightarrow ^{24}\text{Na}$ )
- $^{24}\text{Na}$  undergo beta decay followed by two  $\gamma$ -rays with half-life of 15 hours.



**Beta signal is used for self-trigger and two  $\gamma$ -rays are used to making artificial multi-hit event.**

