

# A02 : $^{48}\text{Ca}$ を用いたニュートリノのマヨラナ性の 研究と超高分解能技術の開発 -- CANDLES --

阪大  
岸本忠史

CANDLES Collaboration

大阪大学理学研究科

岸本忠史、吉田斉、鈴木耕拓、角畑秀一、Wang Wei、Chan Wei Min、Van Trang、  
石川貴志、田中大樹、田中美穂、土井原正明、前田剛、太畑貴綺、鉄野高之介

大阪大学RCNP

能町正治、味村周平、梅原さおり、中島恭平、飯田崇史、松岡健次

福井大工学部

玉川洋一、小川泉、川村篤史、富田翔悟、藤田剛志、原田知優、坂本康介、  
吉澤真敦、犬飼祐司

徳島大総合科学

伏見賢一

大阪産業大学

裕隆太、中谷伸雄

佐賀大学文化教育学部

大隅秀晃

# Candles



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



Candles

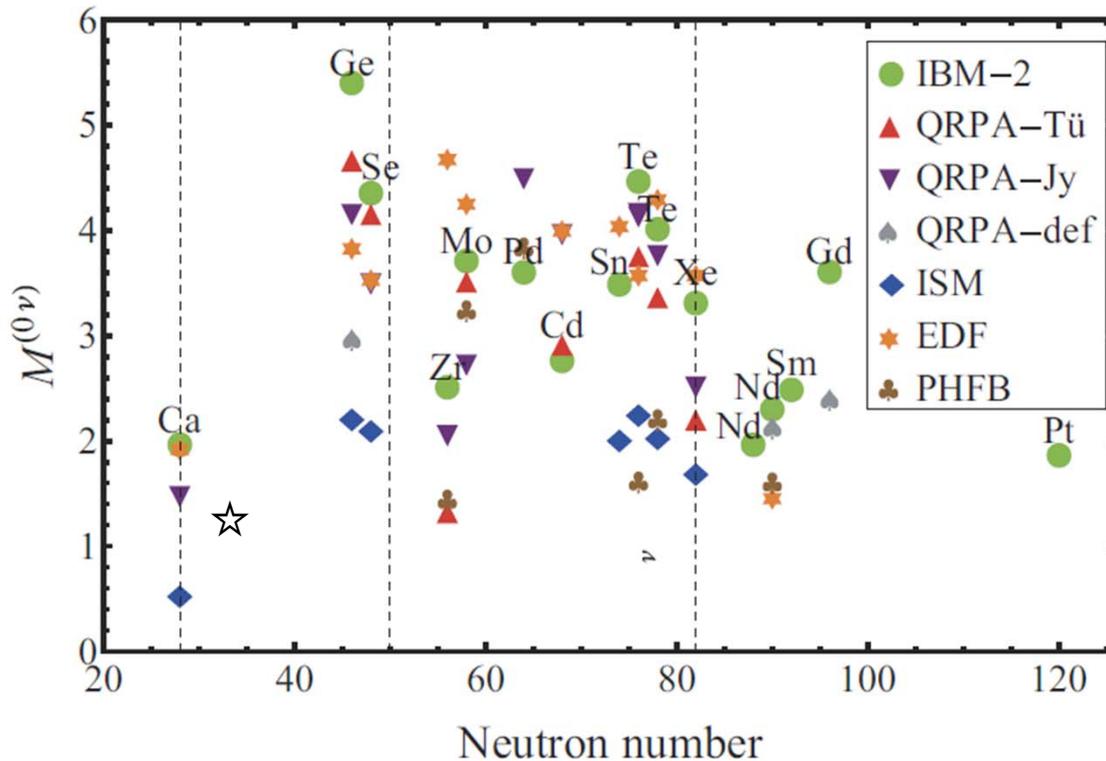
- Highest Q value (4.27 MeV,  $^{150}\text{Nd}$ : 3.3 MeV)
  - Large phase space factor
  - Little BG ( $\gamma$ : 2.6 MeV,  $\beta$ : 3.3 MeV)
- Natural abundance  $\rightarrow$  0.187%
  - Isotope separation  $\rightarrow$  expensive (no Gas)
- Next generation
  - $\langle m_\nu \rangle \sim T^{-1/2} \sim M^{-1/2}$  (no BG) M:物質質量
  - $\sim M^{-1/4}$  (BG limited)
  - $^{48}\text{Ca}$  (no BG so far)
- Beyond inverted hierarchy,  $^{48}\text{Ca}$  + enrichment + bolometer has a chance.

# 核行列要素 (NME)

## ● 理論的なモデル計算

- 不定性 ; ~ a few 倍 (rate で1桁も有り得る)
- モデル依存
- $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期測定 → モデル計算の妥当性? (最適化)

→ 複数の核種での測定



J. Barea, *et al.*,  
PRC 87 (2013) 014315

IBM  
Interacting Boson Model  
 $^{48}\text{Ca}$ で比較的大きな値

☆PRC 89, 045502 (2014)  
Shell model (Full 2<sup>nd</sup> order)

$^{48}\text{Ca}$ :  
ab-initio calculation (Shell model) 可  
NME は小さいと言われていたが



# Nuclear Matrix element

$$M'^{0\nu} = \left( \frac{g_A}{1.25} \right)^2 \langle f | - \frac{M_F^{0\nu}}{g_A^2} + M_{GT}^{0\nu} + M_T^{0\nu} | i \rangle$$

GT: usually considered

Fermi: none if isospin holds

Tensor: small

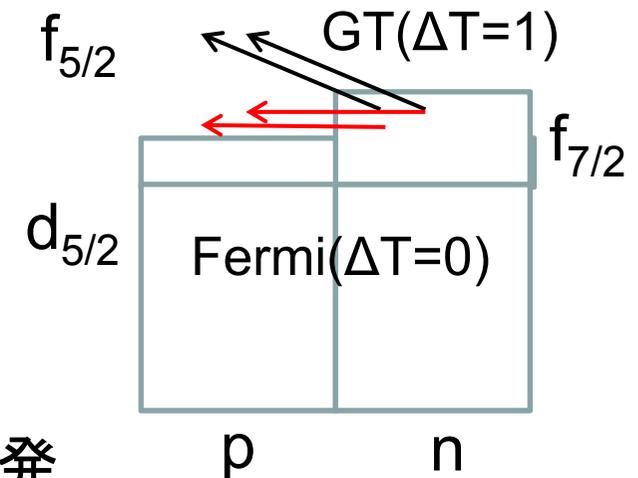
- $^{48}\text{Ca}$  Ab initio cal. (shell model) 2重閉殻

– lowest order = 0

- GT:  $n(f_{7/2}) \rightarrow p(f_{5/2})$  no GS
- Fermi:  $n(f_{7/2}) \rightarrow p(f_{7/2})$  IAS

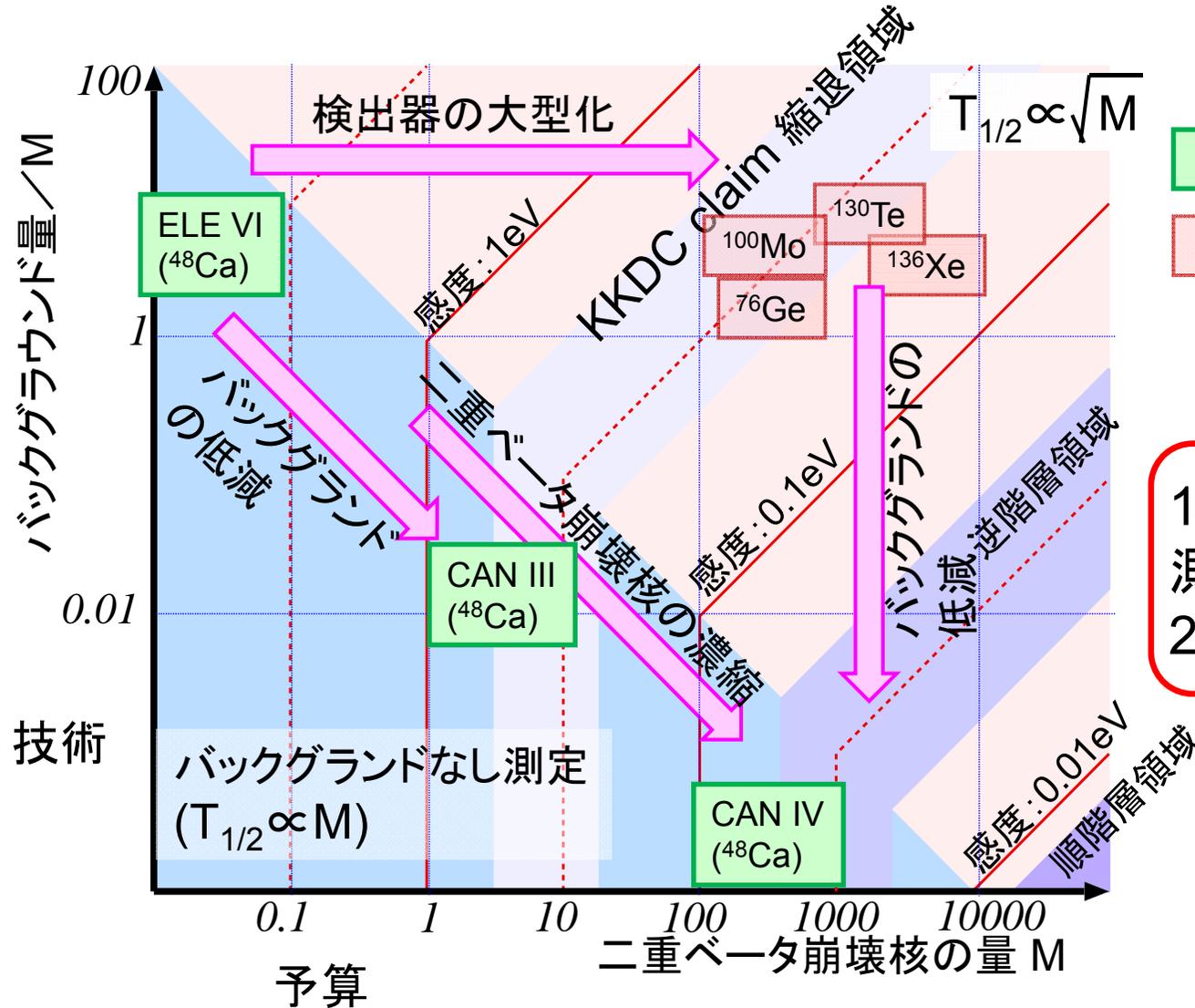
– 実際:  $2\nu\beta\beta$  観測

殻模型計算可: 芯を崩す事から出発  
最近は比較的大きい値



実験: 矢向さん

# CANDLES計画の特徴



- 1. 無バックグラウンド測定の実現、
- 2. それから大量化

我々の研究

世界の研究

# $^{48}\text{Ca}$ double beta decay by ELEGANT VI

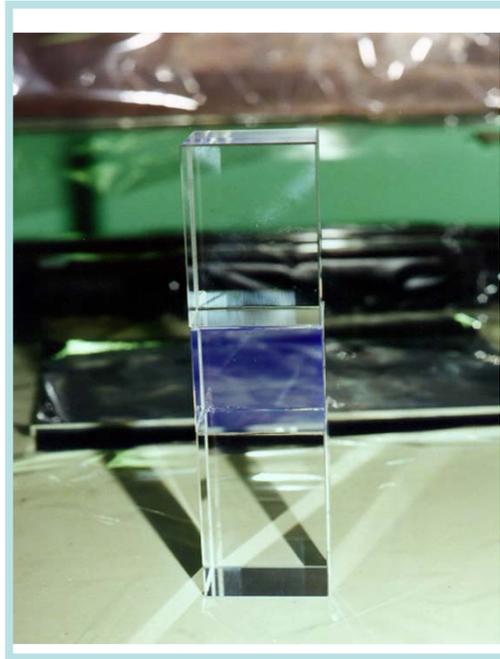


PRC78 058501('08) Candles

$\text{CaF}_2(\text{pure})$

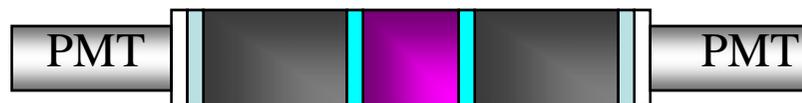
$\text{CaF}_2(\text{Eu})$

$\text{CaF}_2(\text{pure})$



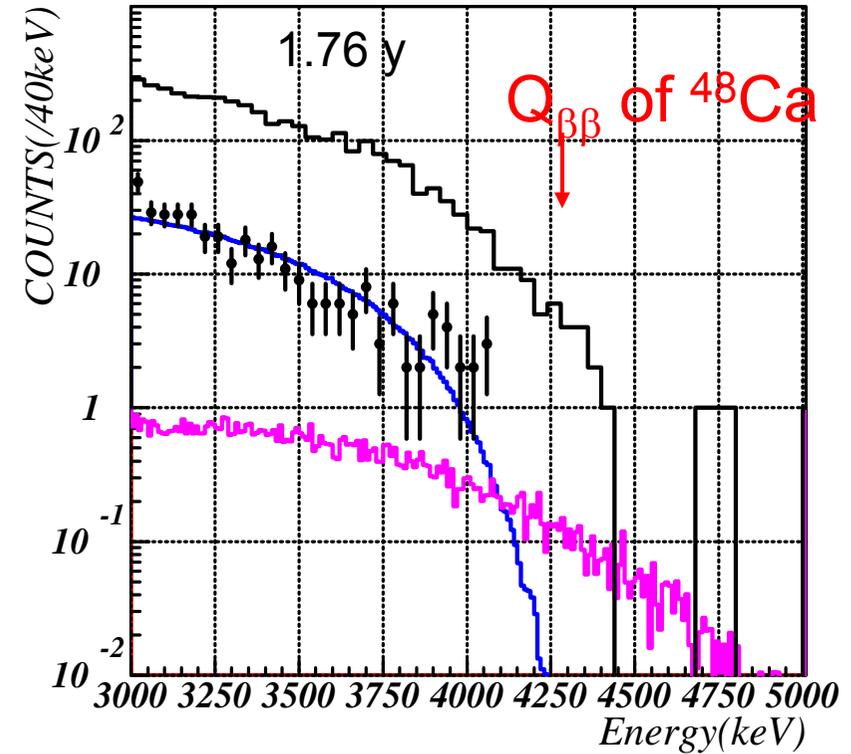
$\text{CaF}_2(\text{pure})$   
 $n = 1.47$

$\text{CaF}_2(\text{Eu})$   
 $n = 1.44$



Silicon oil  
 $n = 1.40$

Optical grease  
 $n = 1.47$



$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 5.8 \times 10^{22} \text{ year (90\% C.L.)}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 3.5 \sim 22 \text{ eV (90\% C.L.)}$$

**Not limited by backgrounds**

But only 6.4g of  $^{48}\text{Ca}$  6

# How to sense $m_\nu = 1 \sim 10^{-2} \text{eV}$



- Big detector
  - Huge amount of materials
- Low radioactive background
  - Active shield
  - Passive shield
  - Low background material
  - BG rejection by signal processing
- High resolution
  - Backgrounds from  $2\nu\beta\beta$  decay
- **CANDLES** is our solution

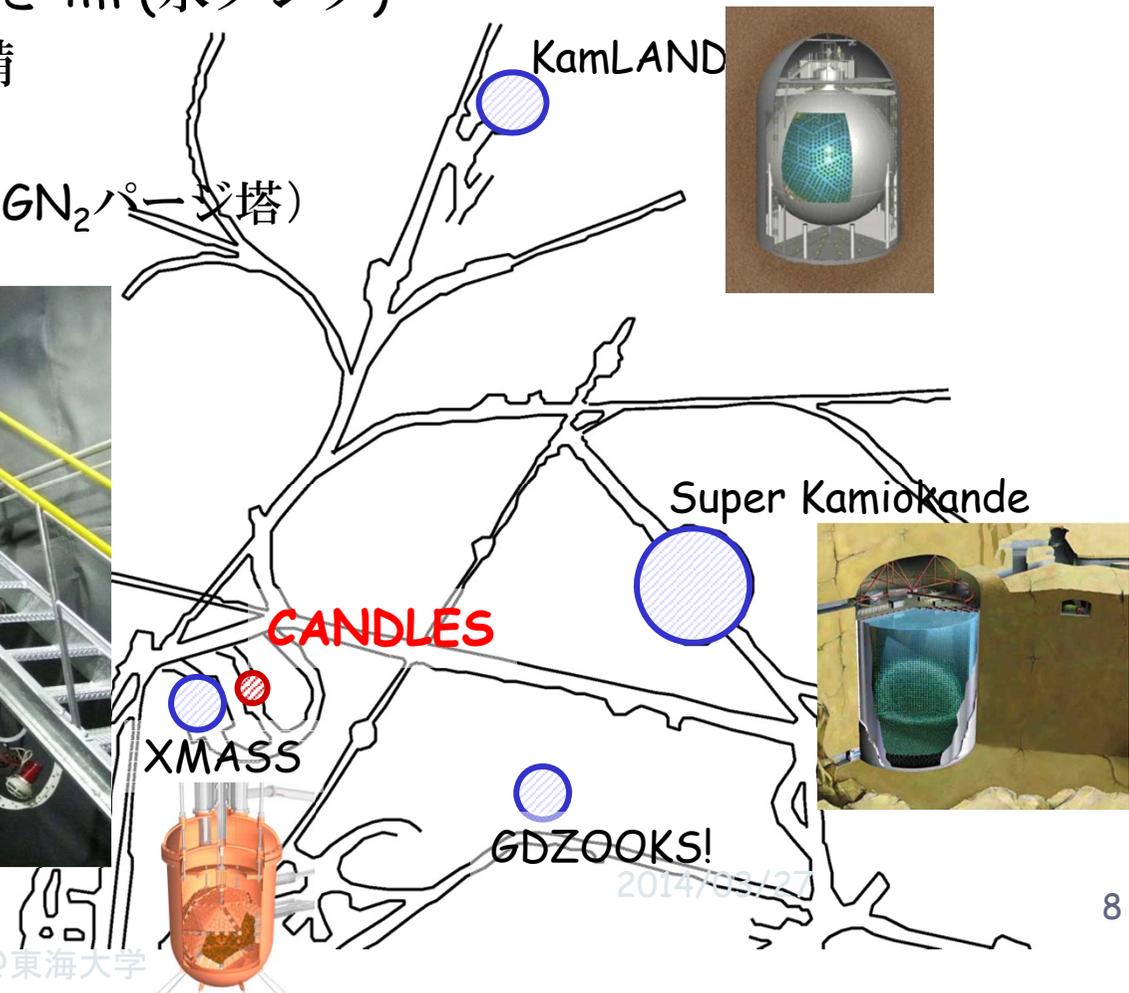


# CANDLES III @ Kamioka

## ● CANDLES III

- Site: 神岡鉱山地下 ~1000 m
- 検出器: 直径3m × 高さ4m (水タンク)
- 液体シンチレータ設備
  - リザーバタンク
  - 純化装置 (液々抽出、 $GN_2$ パーゴ塔)

## Kamioka Lab. Map

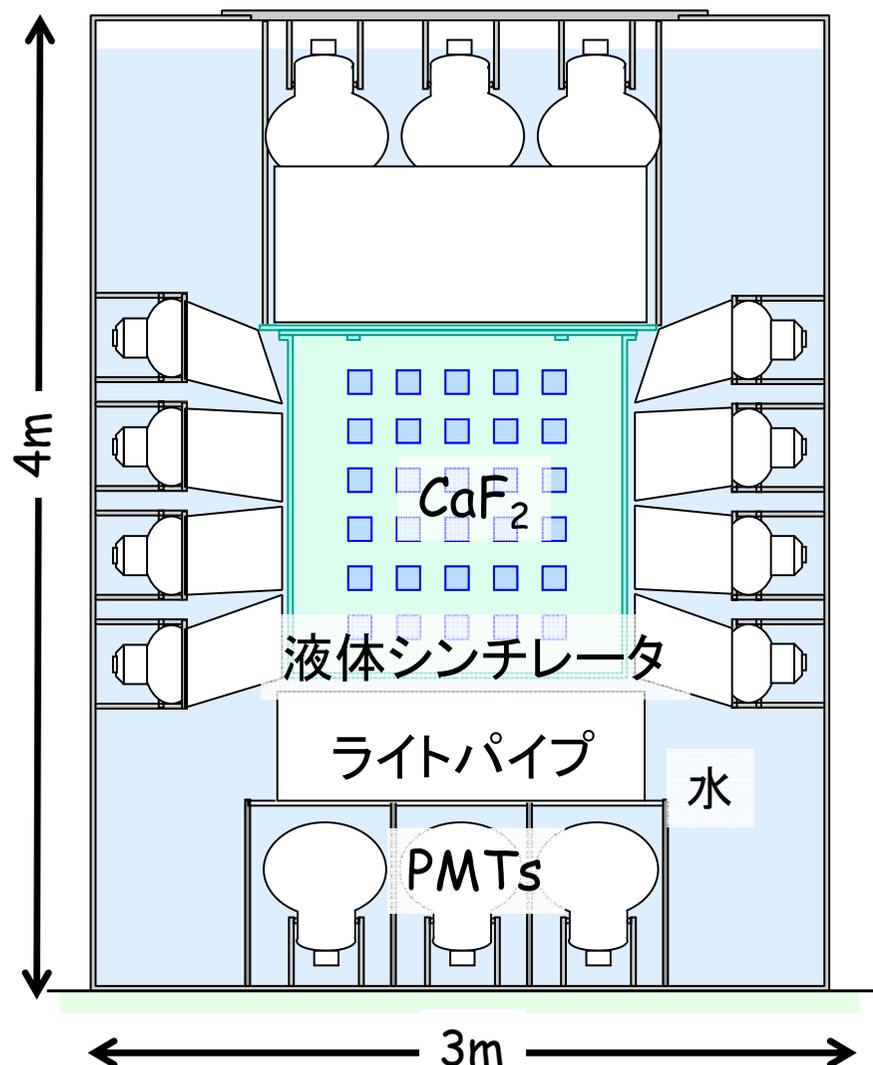


# CANDLES III(UG)



CANDLES at Kamioka underground laboratory

## CANDLES III



CaF<sub>2</sub> シンチレータ (CaF<sub>2</sub>(pure))

305 kg (96個 × 3.2kg)

$\tau \sim 1\mu\text{sec}$

液体シンチレータ (LS)

全方向ベトー検出器

体積2m<sup>3</sup>

$\tau \sim \text{数}10\text{nsec}$

光電子増倍管

13inch PMT × 48

20inch PMT × 14

ライトパイプ

集光効率改善：エネルギー分解能改善

ベトー検出器システム

波形の違いを利用

CaF<sub>2</sub>(pure) :  $\sim 1\mu\text{sec}$

Liquid scintillator : 数 10 nsec



# CANDLES III(UG)

CANDLES at Kamioka underground laboratory

## CANDLES III

### CaF<sub>2</sub> シンチレータ (CaF<sub>2</sub>(pure))

305 kg (96個 × 3.2kg)

$\tau \sim 1\mu\text{sec}$

### 液体シンチレータ (LS)

全方向ベトー検出器

体積2m<sup>3</sup>

$\tau \sim \text{数}10\text{nsec}$

### 光電子増倍管

13inch PMT × 48

20inch PMT × 14

### ライトパイプ

集光効率改善：エネルギー分解能改善

### ベトー検出器システム

波形の違いを利用

CaF<sub>2</sub>(pure) :  $\sim 1\mu\text{sec}$

Liquid scintillator : 数 10 nsec

CaF<sub>2</sub> シンチレータ  
(305kg)

液体シンチレータ  
タンク(2m<sup>3</sup>)

光電子増倍管  
ライトパイプ

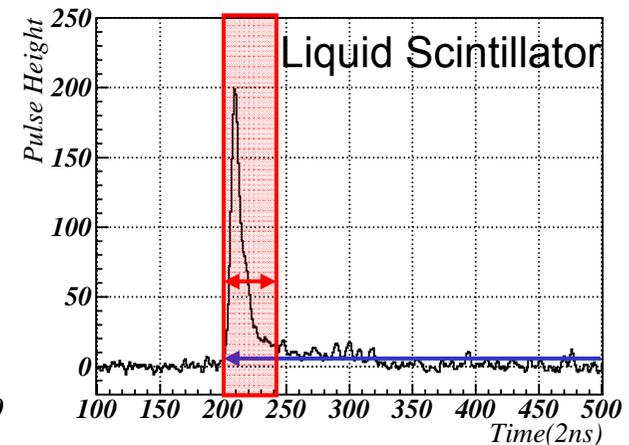
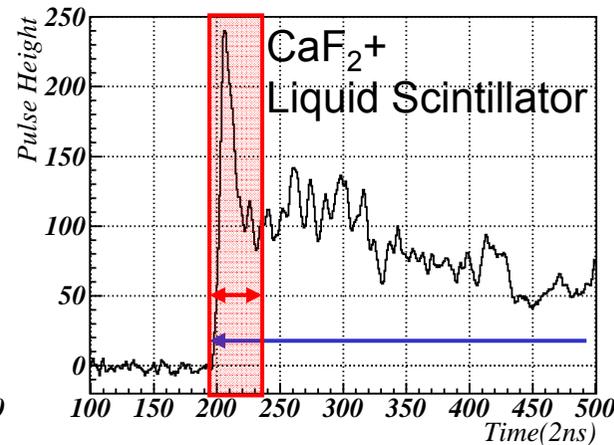
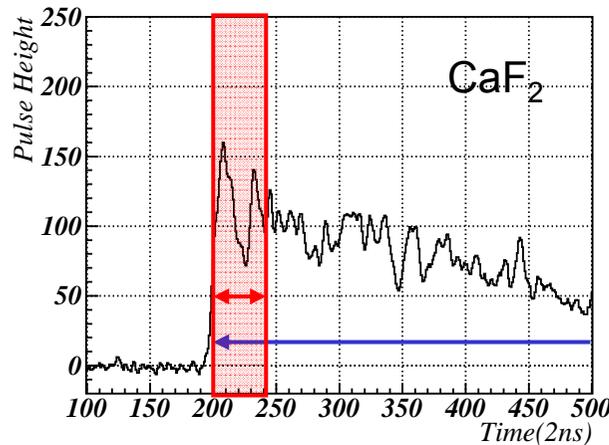
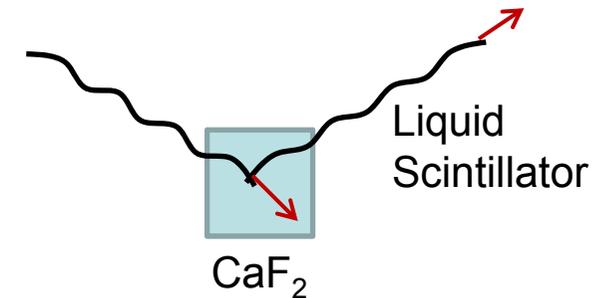


# 外部起源のBG

## Rejection of LS Events



- Pulse shape information by 500 MHz Flash ADC
  - Typical Pulse Shapes

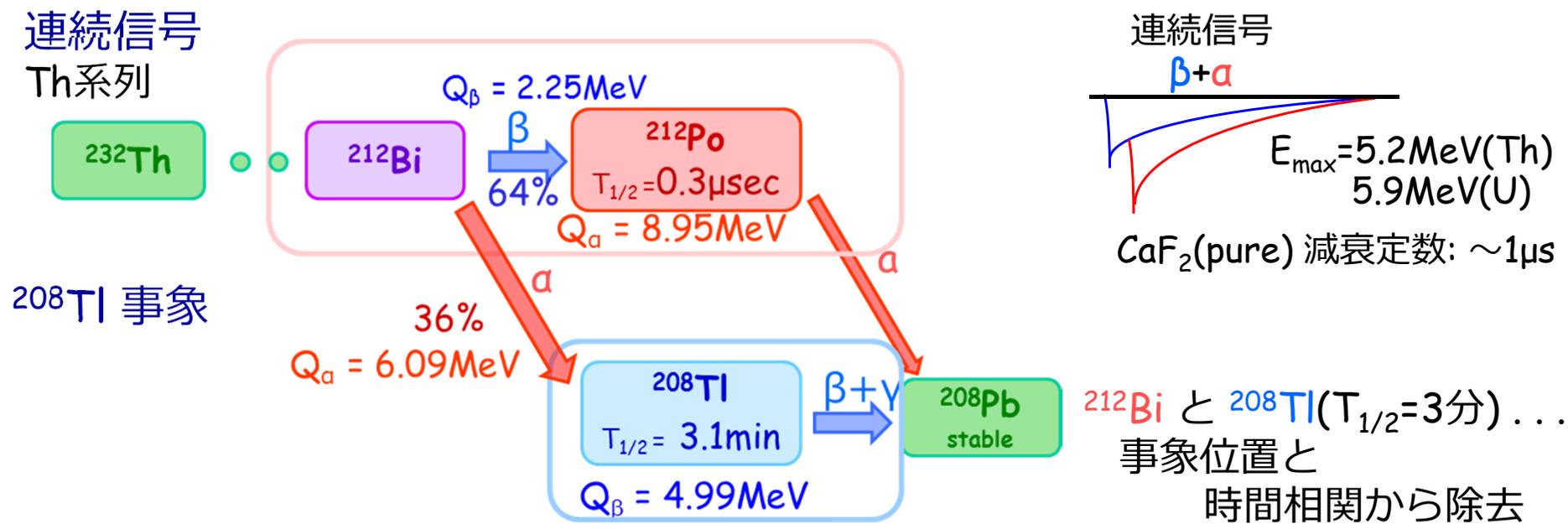


$$\text{Charge Ratio} = \frac{\text{charge in partial gate}}{\text{charge in full gate}}$$



# 内部起源のBG @ Q値領域

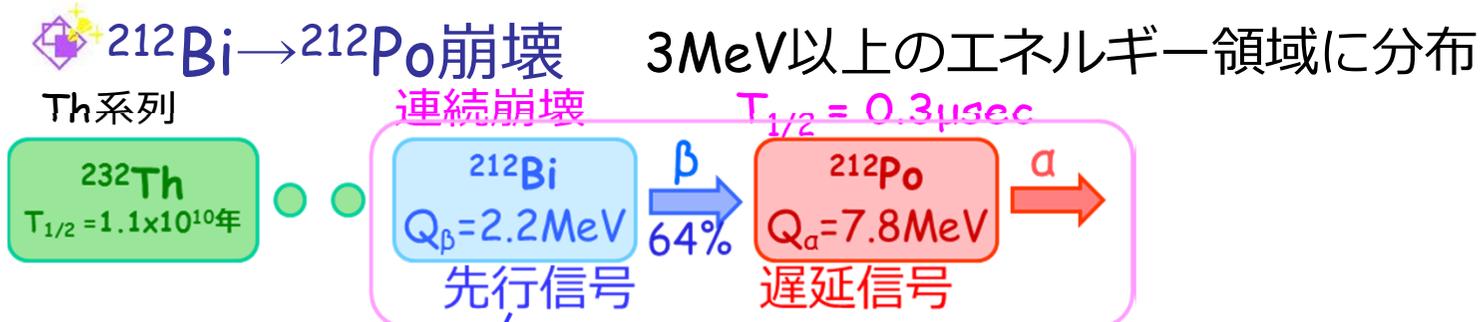
## CaF<sub>2</sub>不純物起源のバックグラウンド事象



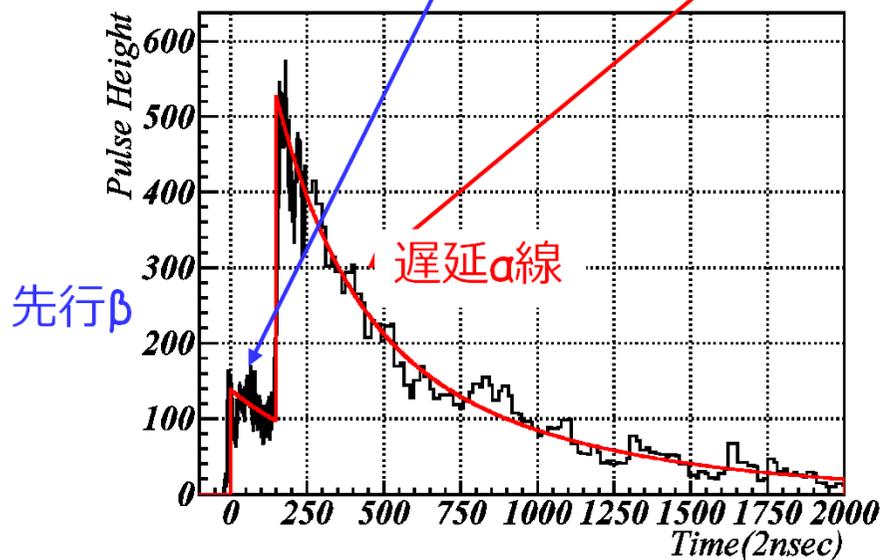
- バックグラウンド除去**
- 連続事象 : 時間差が長い事象→連続波形を識別  
時間差が短い事象→ $\alpha$ 線波形を除去
  - 208Tl事象 : 先行 $\alpha$ 信号(<sup>212</sup>Bi)との位置・時間相関



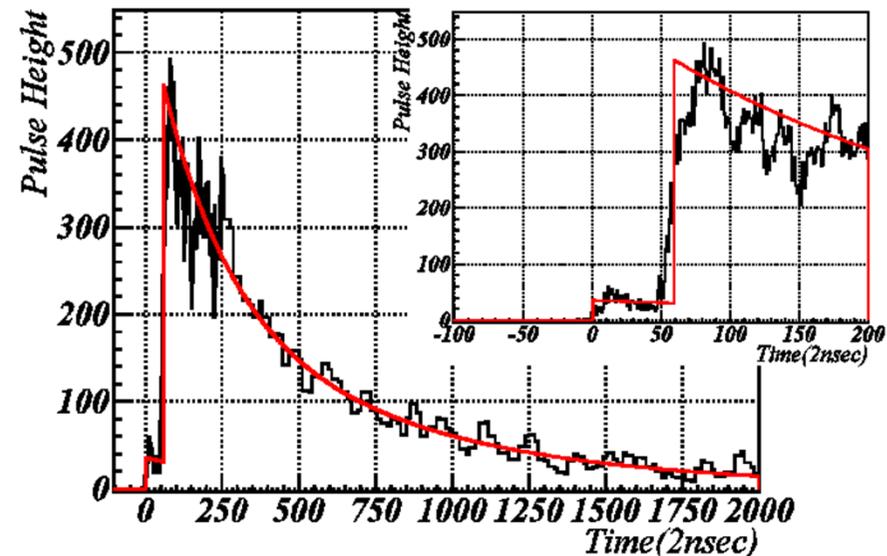
# 連続崩壊事象



典型的な連続崩壊波形



時間差が短い連続信号波形



2つの手法で除去する

- 1、時間差識別によって除去：95%以上の除去効率
- 2、 $\alpha$ 線波形弁別によって除去：次のスライド

62本PMTの足し合わせ波形

# 波形弁別 (α粒子の同定) -連続崩壊、<sup>208</sup>Tlの除去-

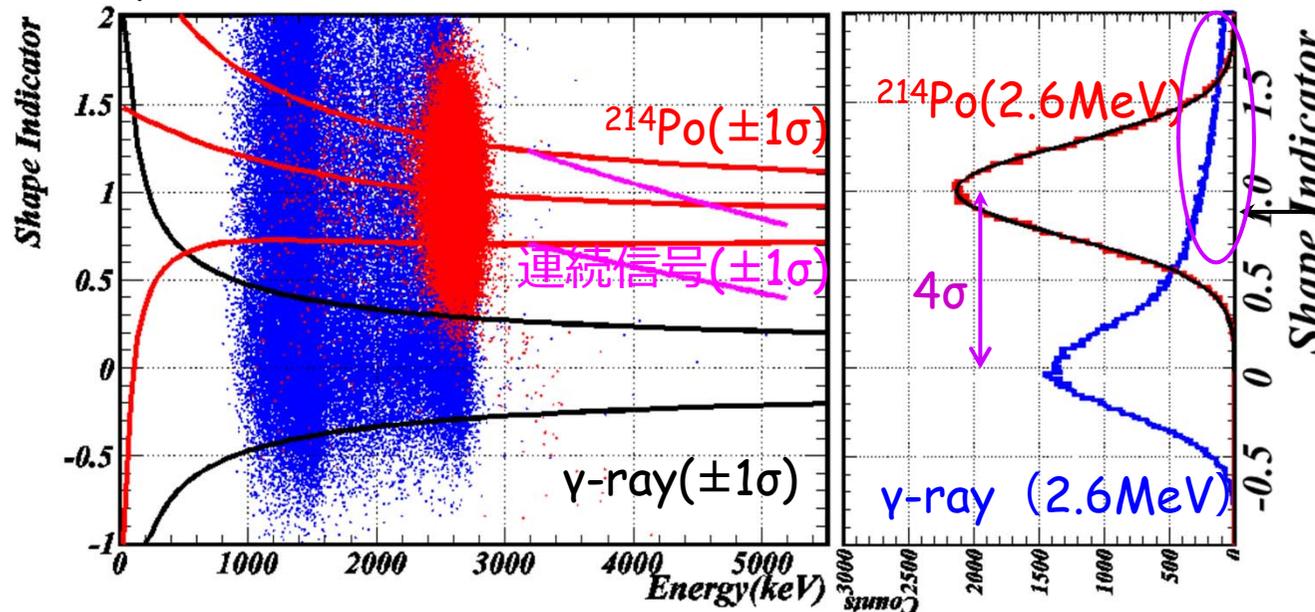


## 波形解析によるα-γ粒子弁別 : shape indicator(SI)

α線 : <sup>214</sup>Po 7.6MeV ( $E_e=2.6$ MeV)

γ線 : <sup>208</sup>Tl 2.6MeV

ref : Shape Indicator  
(PRC67(2003) 014310)



CaF<sub>2</sub> γ事象  
+小さな液体シンチ  
レータ信号

mean :-0.008(γ-ray)  
:1.005(α-ray)  
σ :0.260(α-ray)

“χ<sup>2</sup> フィット” : 液体シンチレータ信号除去  
“Shape Indicator” : α-γ弁別 (χ<sup>2</sup>フィットの補完解析)

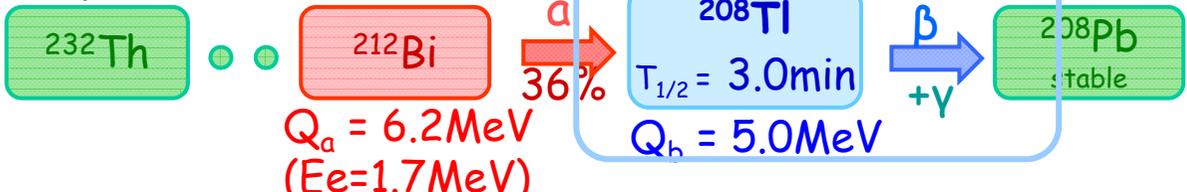
SIによるα線識別効率97% @ 2.6MeV (γ線:3%) 99%@4.3MeV  
<sup>212</sup>Bi選択時にはさらにγ線事象を低減するためにχ<sup>2</sup>も併用。



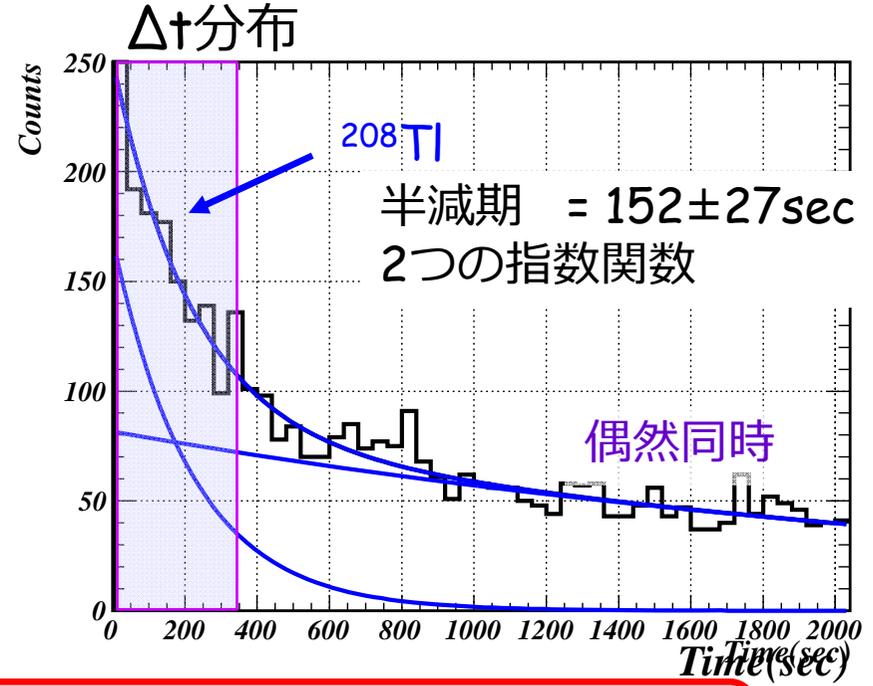
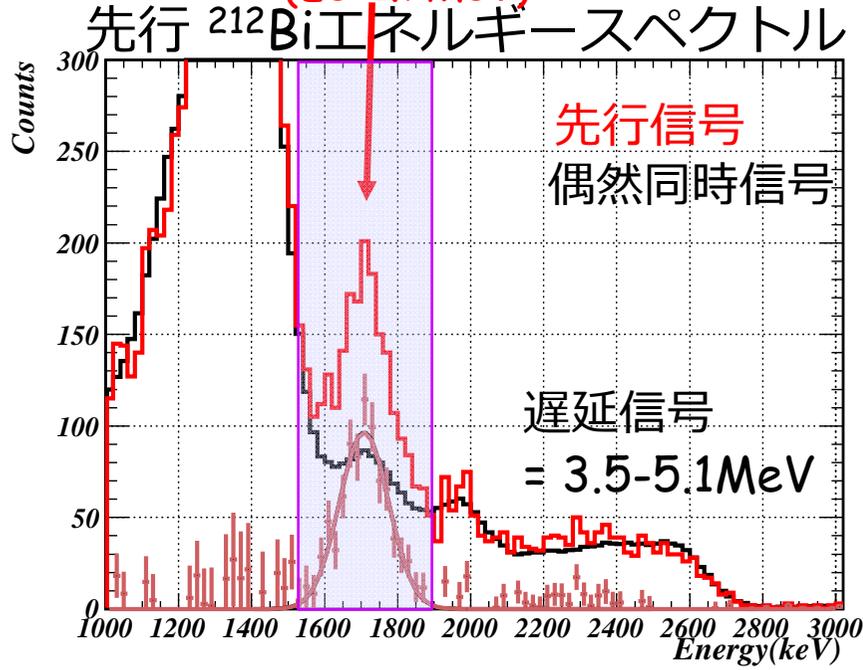
# 208Tl除去：先行212Bi信号



Th系列



$E_{\max} = 5.0\text{MeV}$   
 $^{212}\text{Bi}$  と  $^{208}\text{Tl}$  ( $T_{1/2} = 3\text{分}$ ) ...  
事象位置・時間相関解析



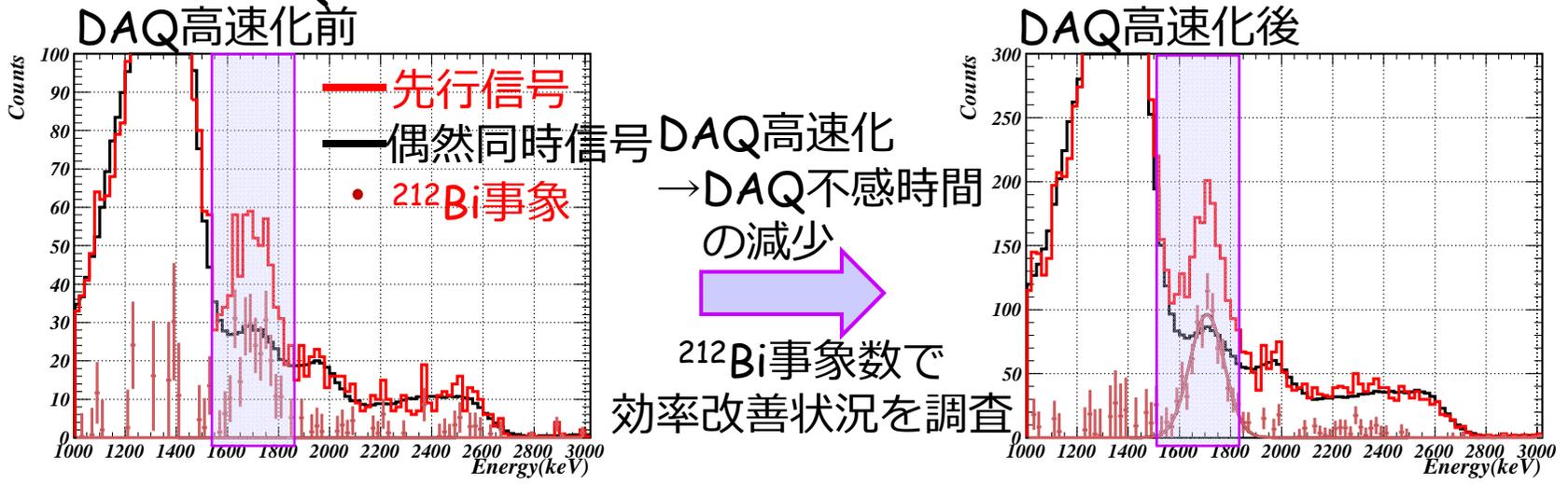
・  $^{208}\text{Tl}$ の半減期183秒を確認。  $^{212}\text{Bi}$ の $\alpha$ 線ピークを確認。  
→  $^{212}\text{Bi}$ の識別は可能



# 208TI : DAQ高速化

## 208TI の先行212Bi スペクトル

### DAQ高速化による212Bi識別能力の改善



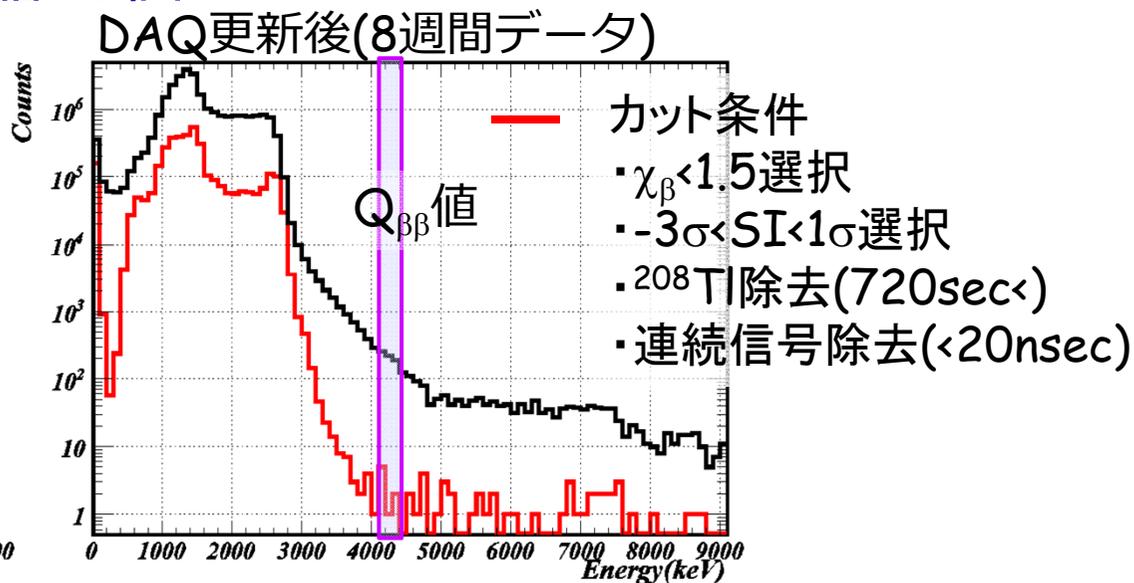
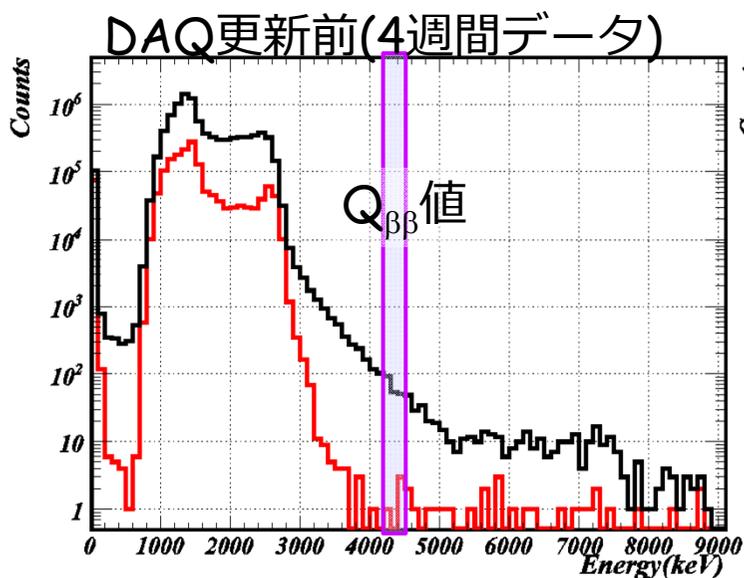
212Bi事象数比較	DAQ高速化前	DAQ高速化後
α線効率、DAQ効率	88.5%、79%	85.2%、98%
シミュレーション(212Bi数)	9.6事象/日 (259事象)	11.6事象/日 (702事象)
データ(212Bi数)	8.9±0.9事象/日 (240±24事象)	12.7±0.7事象/日 (769±43事象)

- DAQ高速化による212Biの識別効率改善を確認
- α線効率は、波形解析手法の最適化（温度依存補正など）で改善予定。
- 現在、除去率50(60)%、acceptance78(70)%。



# エネルギースペクトル

測定：純度が高い結晶26個



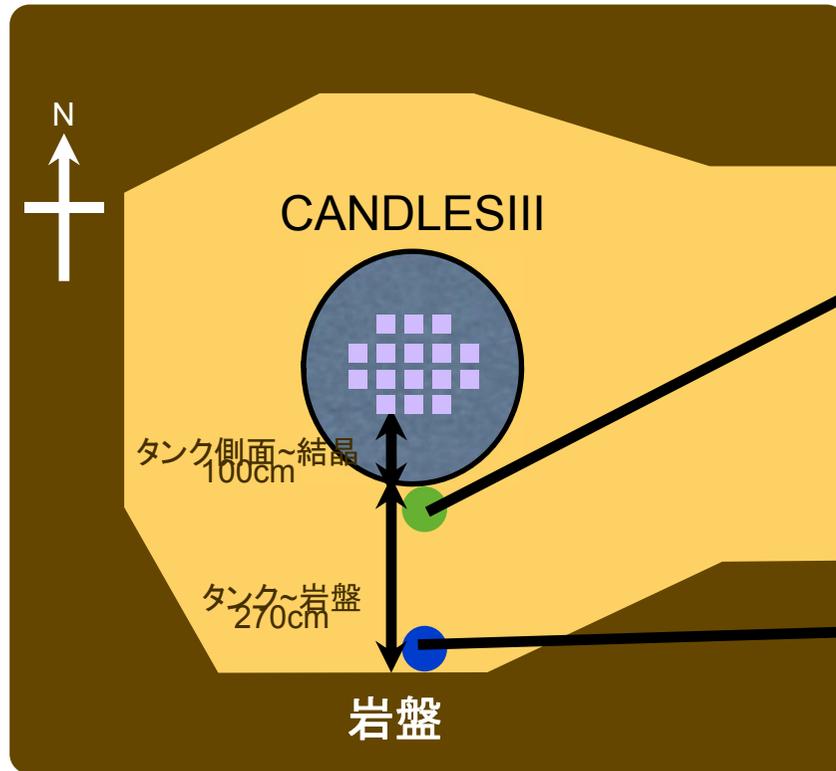
	DAQ更新前	DAQ更新後(現在解析進行中)
測定時間、検出効率	2241 kg · days、0.34	4987 kg · days、0.28
事象数	4	6
予想されるBG量	~0.5(結晶内)+1.5(中性子)	~1(結晶内)+3.4(中性子)
測定感度	$0.5 \times 10^{22}$ 年	$0.8 \times 10^{22}$ 年 <b>BG</b>

・測定感度：~ $1 \times 10^{22}$ 年

内部：当面OK  
外部：要対策

# バックグラウンド探索

## 中性子線源 ( $^{252}\text{Cf}$ ) を用いた測定



SUSの応答を見るための測定  
線源をタンクに貼付け  
タンクを見込む立体角 $\sim 2\pi$  (50%)

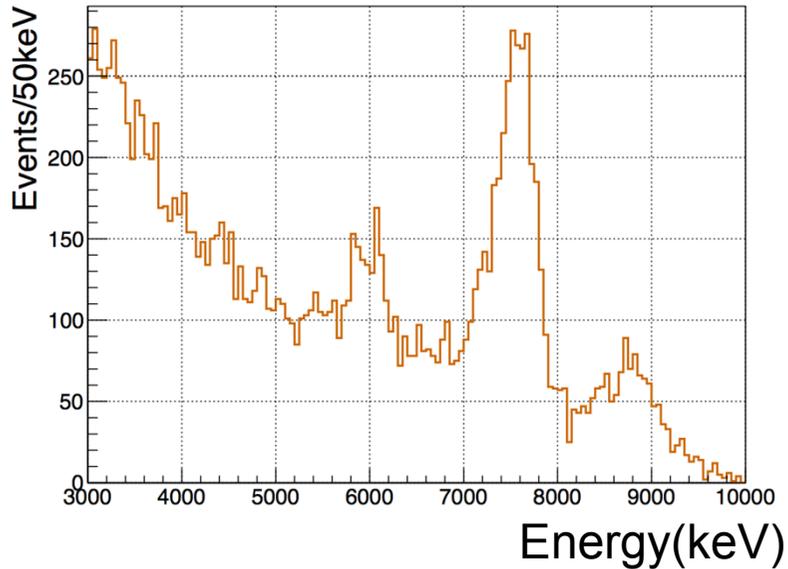
岩石の応答を見るための測定  
岩盤の壁近くで  
タンクを見込む立体角 $\sim 0.4\pi$  (10%)

実験室見取り図

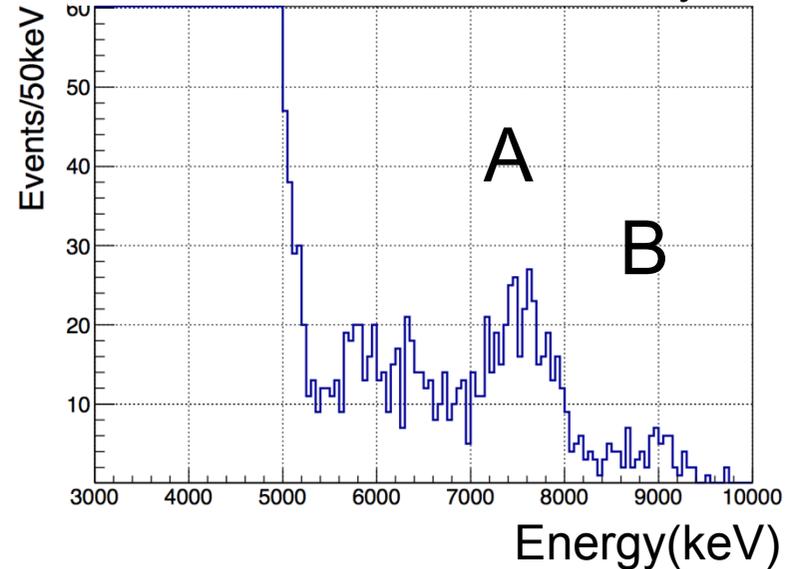
既知の高エネルギー $\gamma$ 線の応答を見るため  
Niボールを用いた測定で較正

# 測定スペクトル

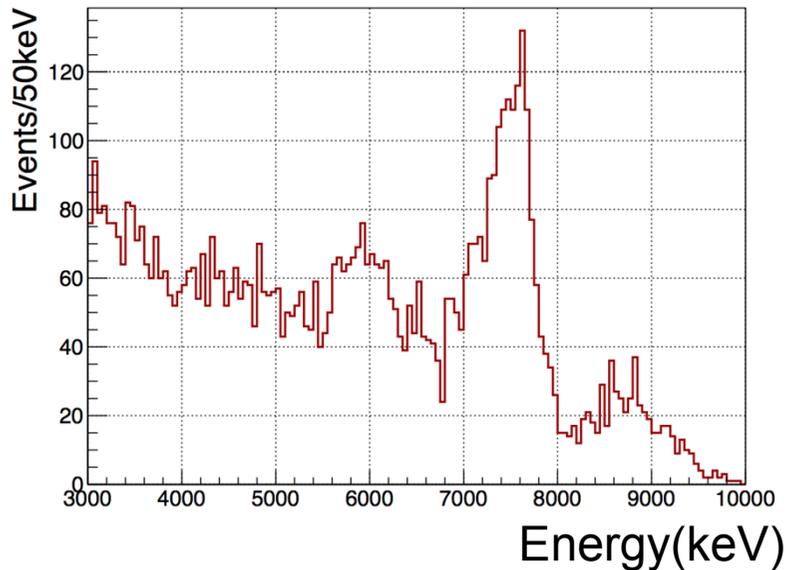
中性子 on SUS LiveTime 4hr



通常測定 LiveTime ~ 90days



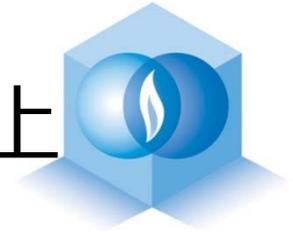
中性子 on rock LiveTime 8hr



	B/A	SUS : 岩石
通常測定	$0.32 \pm 0.03$	$28 \pm 7$ : $72 \pm 7$
線源(SUS)	$0.44 \pm 0.01$	$51 \pm 2$ : $49 \pm 2$
線源(岩石)	$0.38 \pm 0.01$	$40 \pm 3$ : $60 \pm 3$

中性子起源の高エネルギー $\gamma$ 線  
外部から → 遮蔽

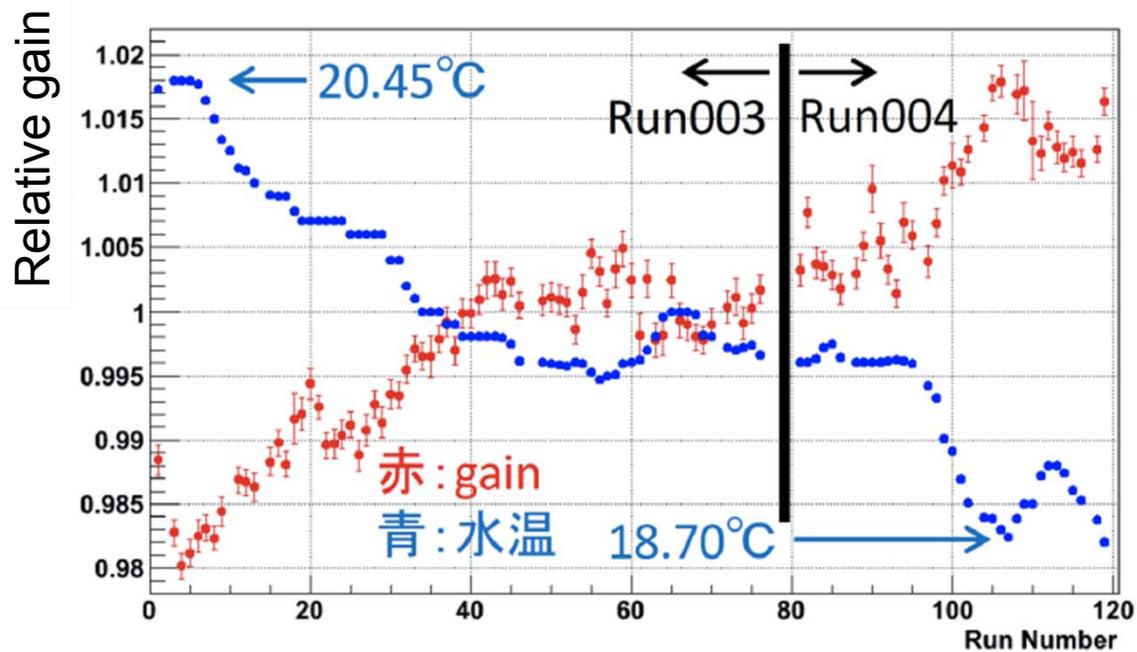
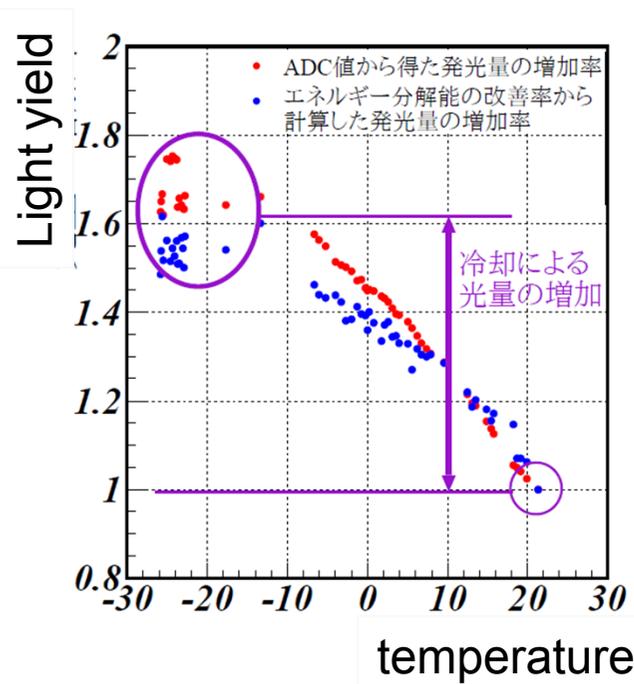
# CANDLES III : 冷却による性能向上



CaF<sub>2</sub>

Light yield increase at low temperature

Test experiment



Water temperature

Observed: 2%/deg. increase

Cool CANDLES III from 20 to 0 degrees.  
40% increase: This year



# 検出器冷却・温度安定化装置導入

## ◆ 検出器の冷却

◆ CANDLES IIIで冷却性能テスト

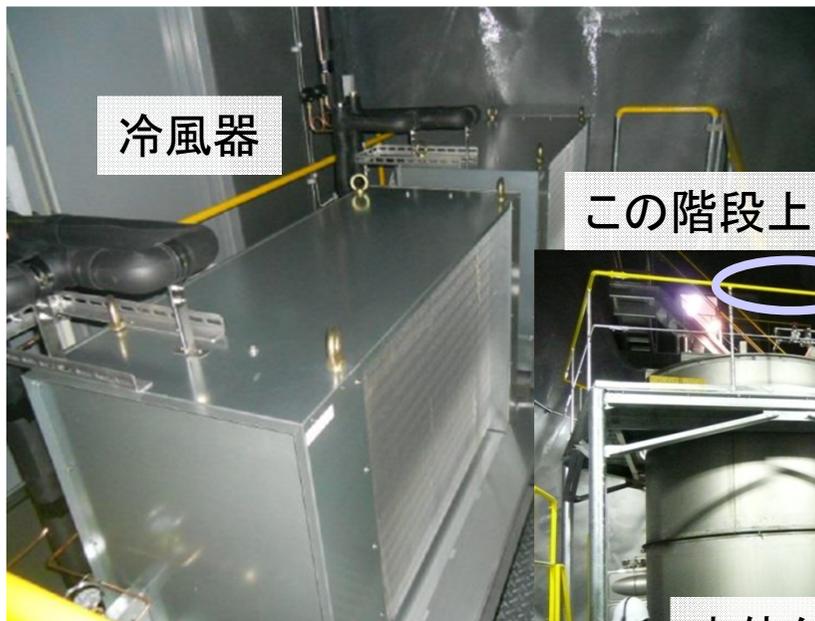
◆ 実験室全体を冷却して温度コントロール

◆ 到達温度：室温2℃、検出器3℃、温度変動±0.1℃

◆ インストールが終了し性能評価

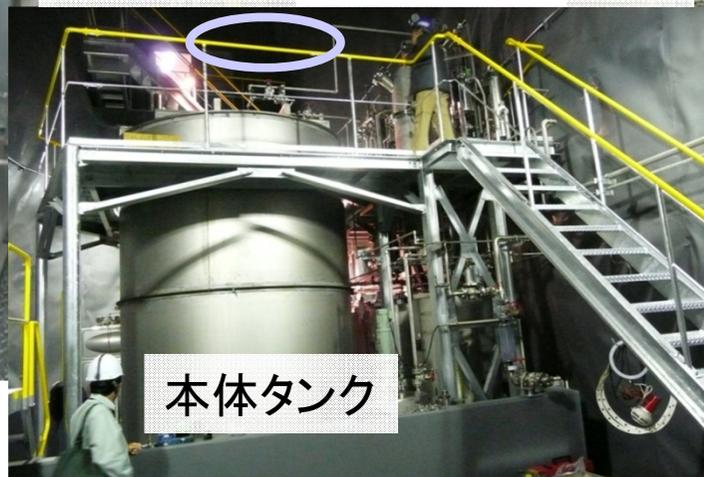
◆ + 地磁気補償コイル

$$\left. \begin{array}{l} 1.4 \\ 1.3 \end{array} \right\} = 1.8$$

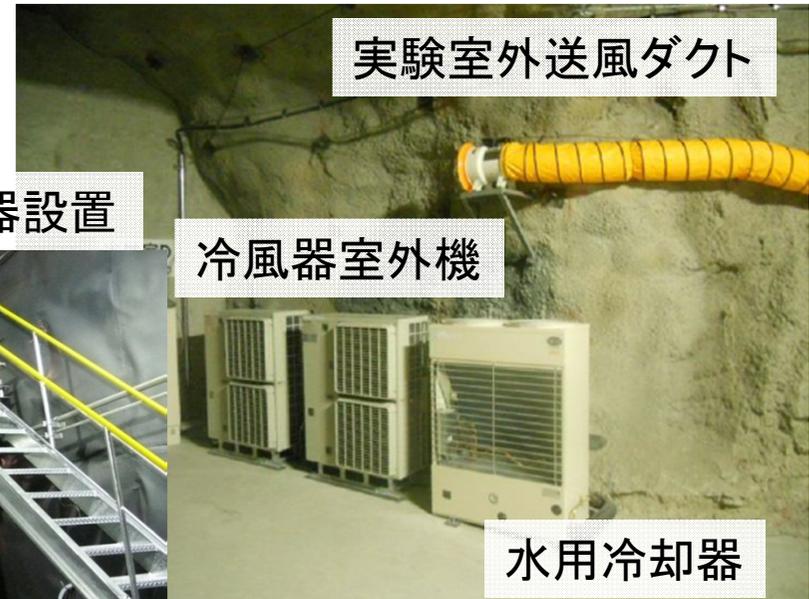


冷風器

この階段上部分に冷風器設置



本体タンク



実験室外送風ダクト

冷風器室外機

水用冷却器

# $^{48}\text{Ca}$ の濃縮

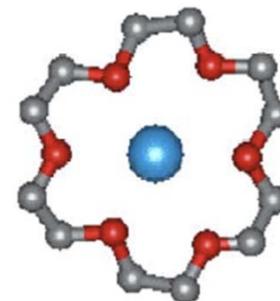


- 物理的方法
  - 遠心分離法: ガス(核燃料)
  - レーザー法: 開発されたが実用化されず
    - R&D 福井
  - 質量分析法:  $^{48}\text{Ca}$ 等、ガス化出来ない元素: 高価
- 化学的方法
  - 反応率の差: 重水素、ホウ素
  - クラウンエーテル(樹脂)法
    - 樹脂法: 梅原(藤井)
    - マイクロリアクター: 碓(佐久間)
- 電気泳動法(岸本)

# CANDLESとして



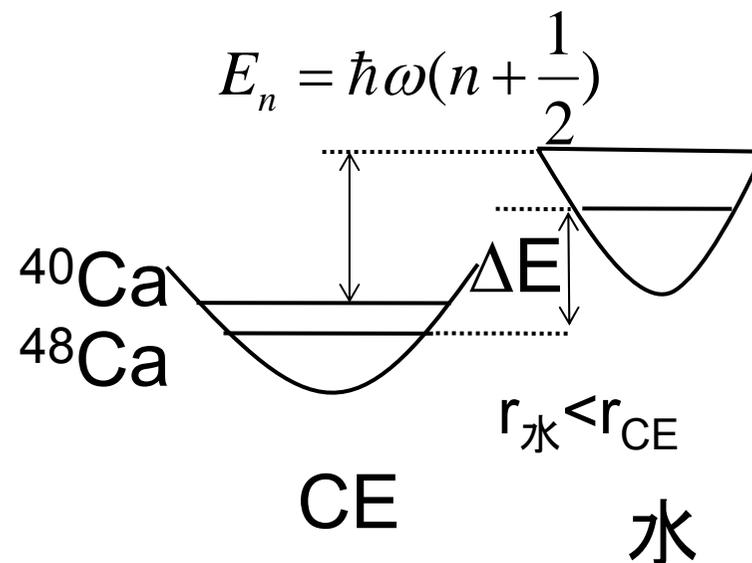
- クラウン・エーテル
  - 原理: クラウン・エーテルも水も
    - 極性分子



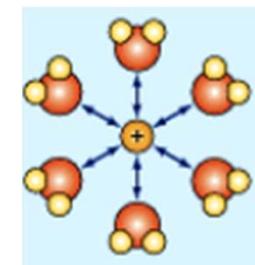
- 0点振動E準位と分配関数
- 調和振動子
- SW pot

$$\frac{\Delta E}{kT} = \frac{0.04 \text{ meV}}{25 \text{ meV}} \sim 0.2\% \quad (r \sim 1.5)$$

$$0.4\% \quad (r \sim 1.0)$$



- 進行中: 梅原、裕
- 効果: **水**、分離係数で最大倍程度



$$\Delta \hbar \omega_{\text{水}}$$

# CANDLES IV : $^{48}\text{Ca}$ 濃縮



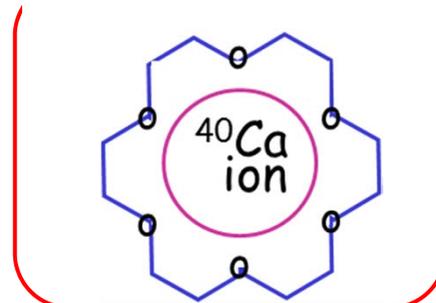
## CANDLESと $^{48}\text{Ca}$ 濃縮

- $^{48}\text{Ca}$ の利点を生かす：濃縮
- 検出器大型化→結晶入れ替え

## 濃縮実験セットアップ

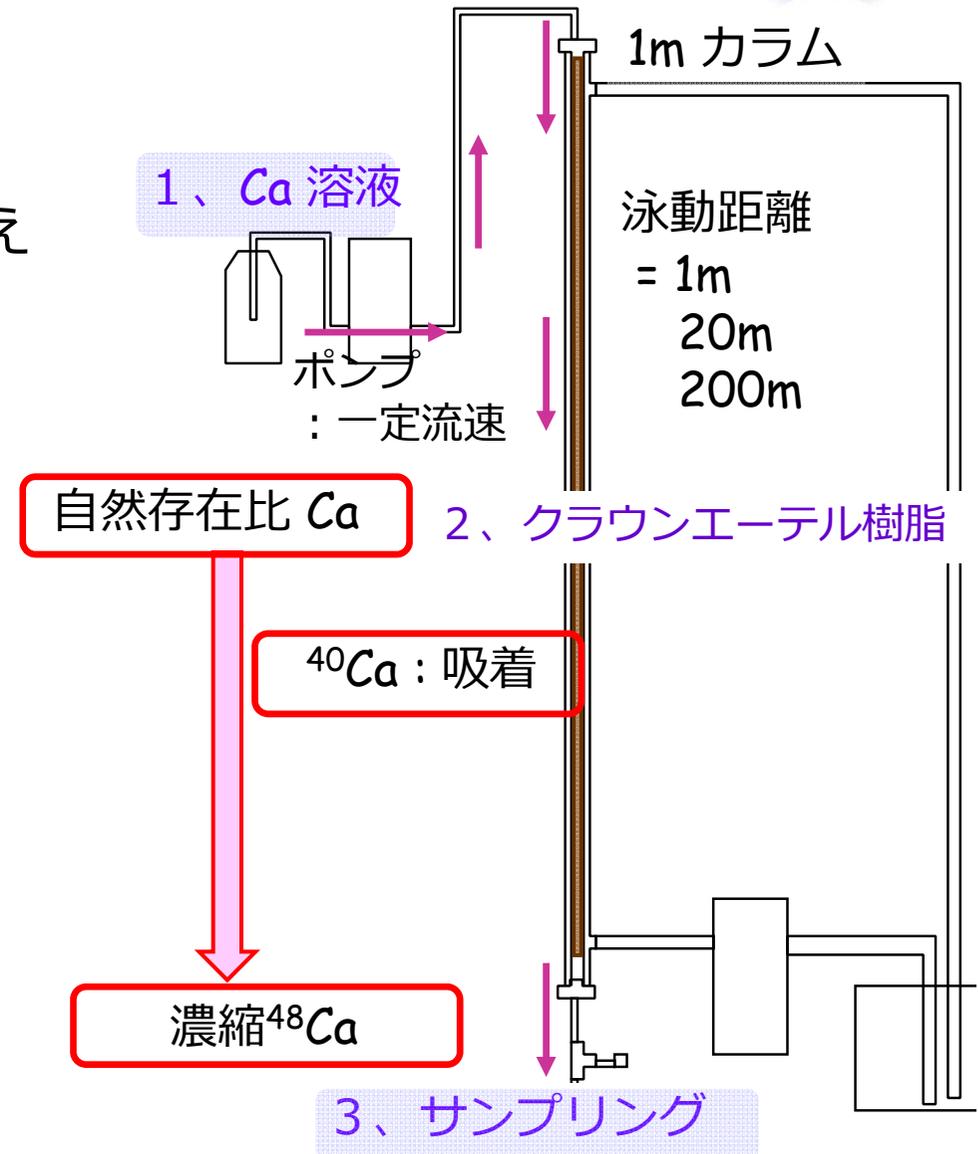
- 化学法  
ブレイクスルー法  
= 樹脂エリアに

カルシウム溶液を泳動  
クラウンエーテル



同位体比効果の測定

1m、20m、200m泳動カラム

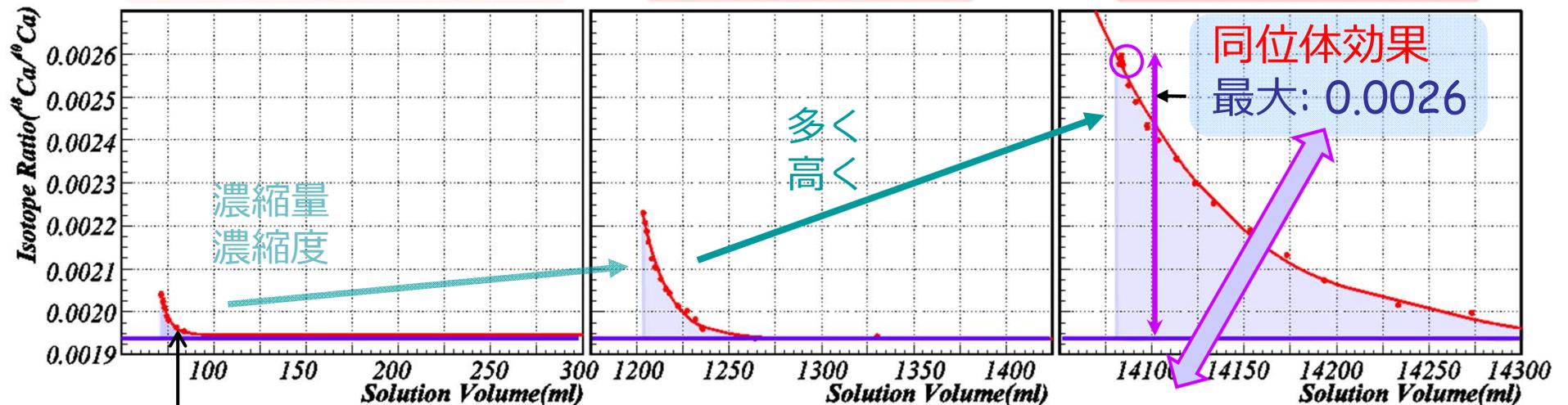


# CANDLES IV : $^{48}\text{Ca}$ 濃縮



## 同位体効果

~7時間 : 1m 泳動距離 → ~70時間 : 20m → ~250時間 : 200m



■ クラウンエーテルによる濃縮

自然同位体比  
= 0.0019

## 濃縮効果

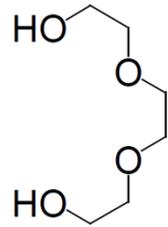
- 長い泳動距離 = 高い濃縮度
- $^{48}\text{Ca}$  大量化 → 現在、体積10~100倍システム  
大量化の際に想定される問題の洗い出し
- ただ、クラウンエーテルは非常に高価(5000円/g)。。。  
→自分たちで合成する技術を開発



# 濃縮：クラウンエーテル合成



## ✦ トリエチレングリコール～クラウンエーテル

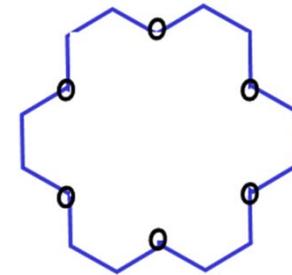


Triethylene glycol

トリエチレングリコール：  
安価で購入可能  
~0.3円/g



塩化チオニル  
カテコール  
など



使用するクラウンエーテル  
全原材料費用  
~5円/g

最近、合成に成功。

・ 試薬クラウンエーテル5000円/g → 原材料費 ~5円/g

＊ただし、濃縮性能は、試薬品より1-2割低い。

(カルシウム吸着量で評価)

・ 大量濃縮にむけて開発継続中。

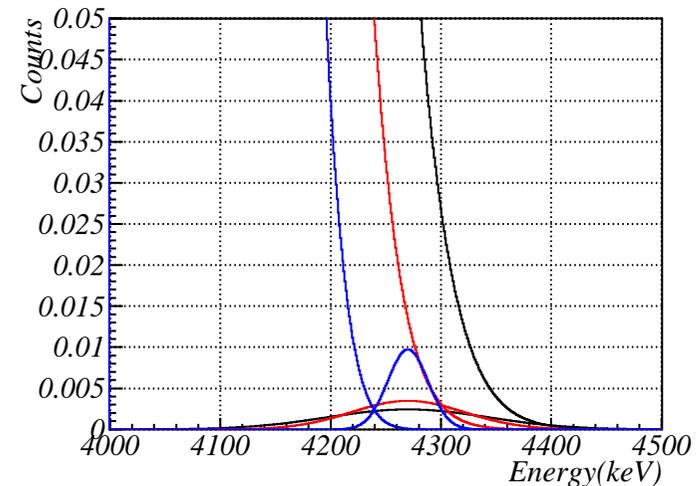
合わせて高濃度濃縮のための新しい技術開発も進行中。

# 2 $\nu\beta\beta$ decay: - the ultimate BG -



- 2 $\nu\beta\beta$  decay
  - エネルギー分解能
  - 1% or better to explore sub 10 meV region
- シンチレーター
  - 2.8%: our limit
    - Light collection
    - cooling
- ボロメーター: 0.5%
  - 結晶

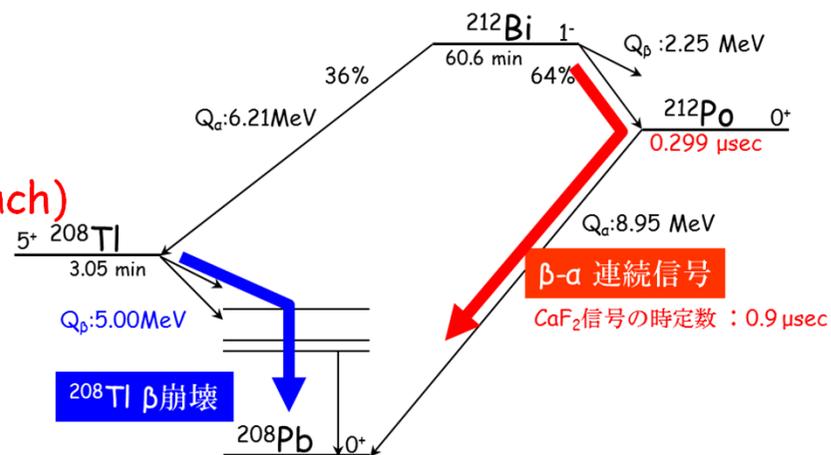
$\langle m\nu \rangle = 0.009\text{eV}$



エネルギー分解能4%  
エネルギー分解能2.8%  
エネルギー分解能1%

# Background 候補

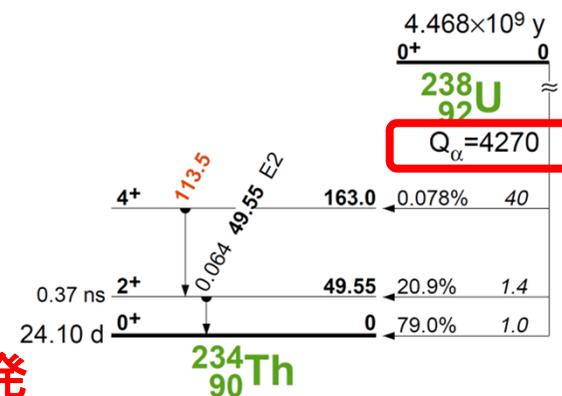
- $2\nu\beta\beta$  事象(Ultimate BG)
  - エネルギー分解能の改善 → Bolometer
- $\text{CaF}_2$  結晶内部の放射性不純物 (Th系列)
  - Th系列( $\beta$ - $\alpha$ 信号) → Bolometer (no quench)
  - Th系列( $^{208}\text{Tl}$ ) → 結晶細分化
    - ELEGANT-VIの経験から  
10cm立方結晶 → 小型化 (4~5 cmでOK)
  - 環境中性子起源 $\gamma$ 線
    - エネルギー分解能の改善 + 結晶小型化



Bolometer開発で**現在のBG源は大きく低減可能**

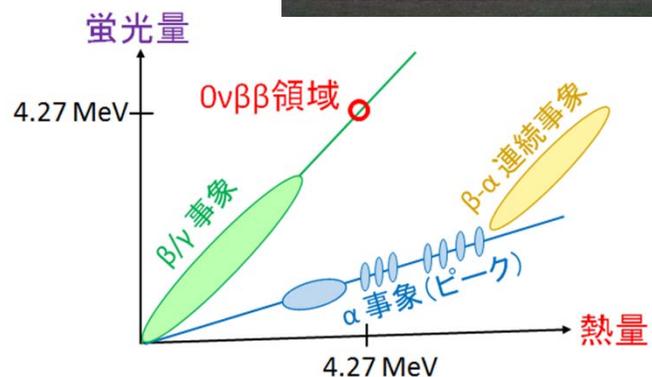
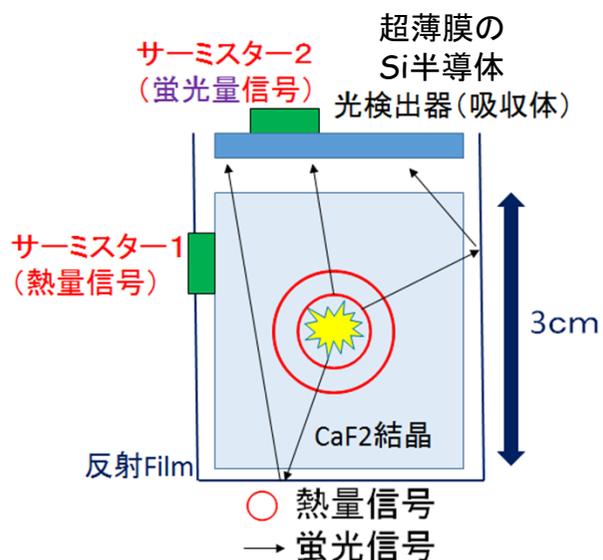
- しかし... 新しいBG候補
  - $^{48}\text{Ca}$ のQ値 : 4267.98(32) keV 最新値@ arXiv:1308.3815
  - $^{238}\text{U}$ のQ値 : 4270 keV

**分解能改善だけでは除去不可**  
**→ Scintillating Bolometerの開発**



# Scintillating Bolometerの原理

- 既に、いくつかの実験で実用化
  - CRESST-II ( $\text{CaWO}_4$ ), Lucifer, AMoRE
  - $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  NIMA386 (1997) 453  
結晶 (0.3 g)、粒子弁別分離能が小さい



- 熱量に加え、蛍光量も同時に測定することで、蛍光のα線クエンチング効果を用いたα/β粒子識別を行う
- 主なBackgroundである $^{238}\text{U}$ のα崩壊事象(Q値=4.27MeV= $0\nu\beta\beta$ 崩壊のQ値)を排除可能

# A02: scheme

ニュートリノ質量 数meV測定のための高分解能技術開発

[A02]ニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発

$^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊の測定 代表：岸本

