

A02 : ^{48}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}Ca



Candles

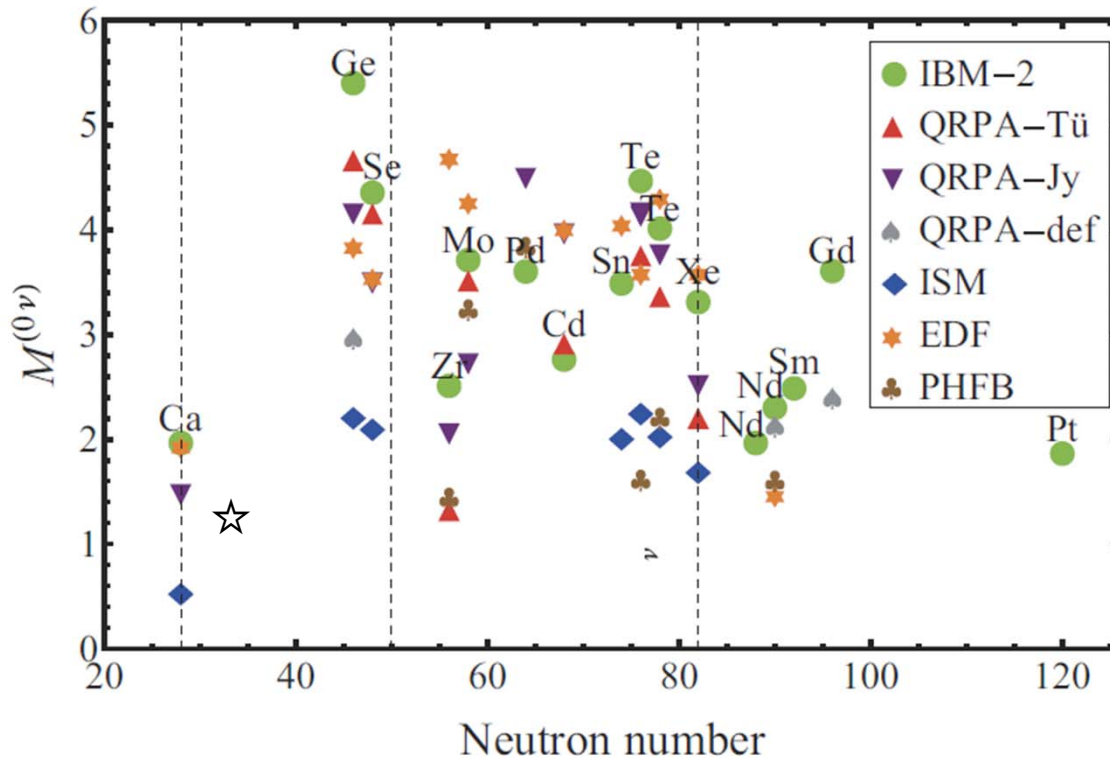
- Highest Q value (4.27 MeV, ^{150}Nd : 3.3 MeV)
 - Large phase space factor
 - Little BG (γ : 2.6 MeV, β : 3.3 MeV)
- Natural abundance \rightarrow 0.187%
 - Isotope separation \rightarrow expensive (no Gas)
- Next generation
 - $\langle m_\nu \rangle \sim T^{-1/2} \sim M^{-1/2}$ (no BG) M:物質質量
 - $\sim M^{-1/4}$ (BG limited)
 - ^{48}Ca (no BG so far)
- Beyond inverted hierarchy, ^{48}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}Ca で比較的大きな値

☆PRC 89, 045502 (2014)
Shell model (Full 2nd order)

^{48}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

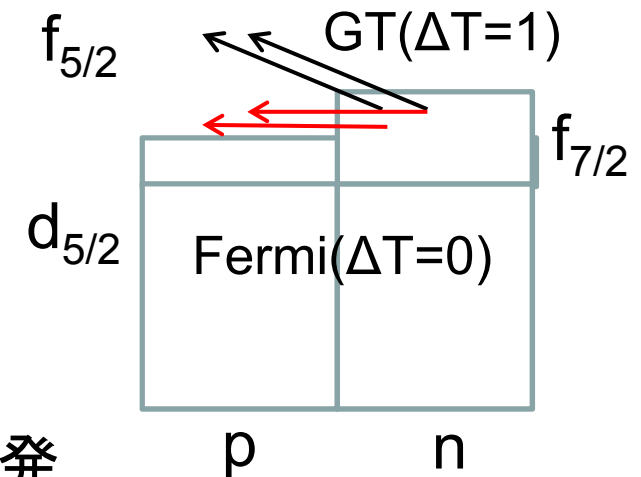
- ^{48}Ca Ab initio cal. (shell model) 2重閉殻

– 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

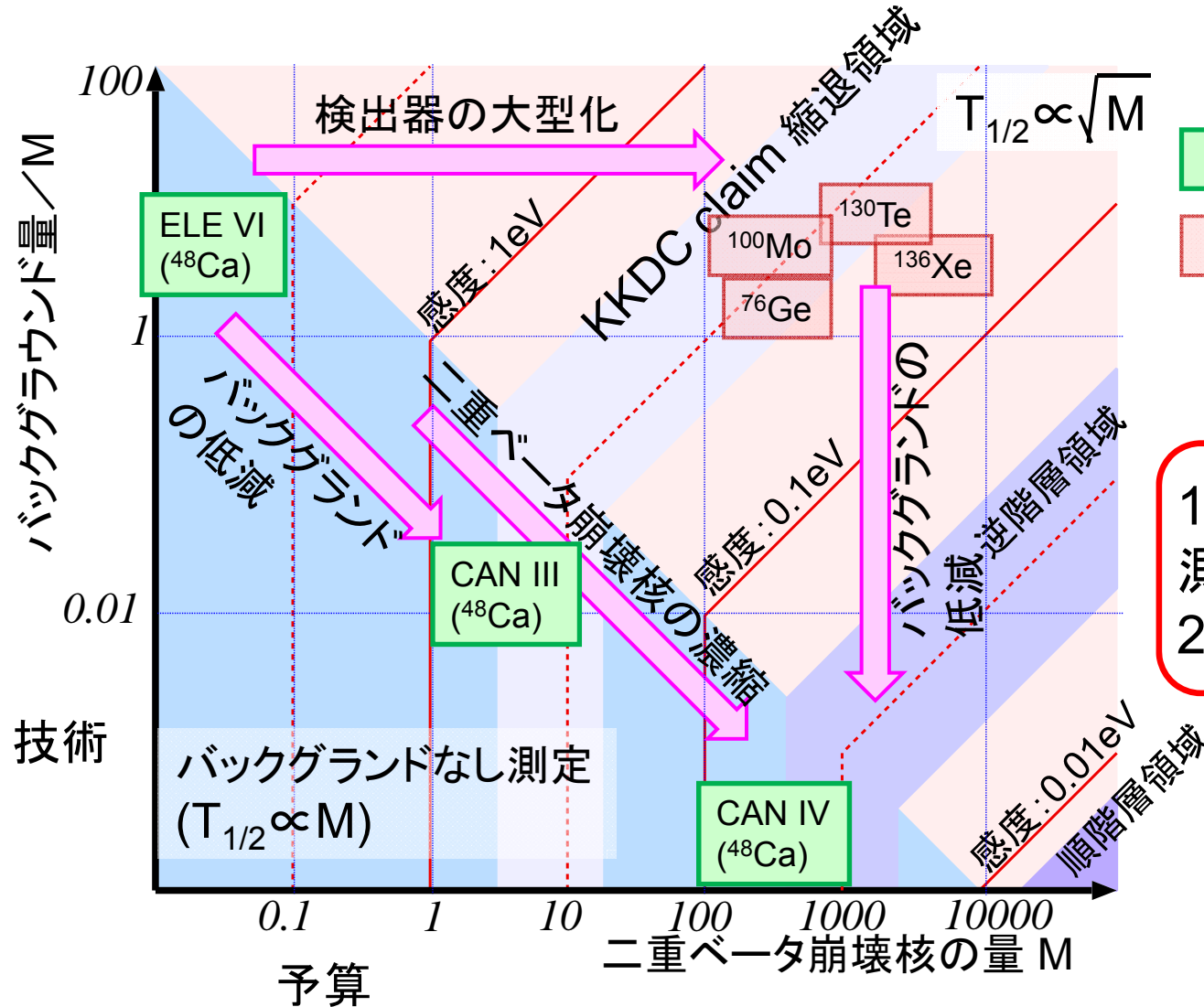
– 実際: $2\nu\beta\beta$ 観測

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}Ca double beta decay by ELEGANT VI

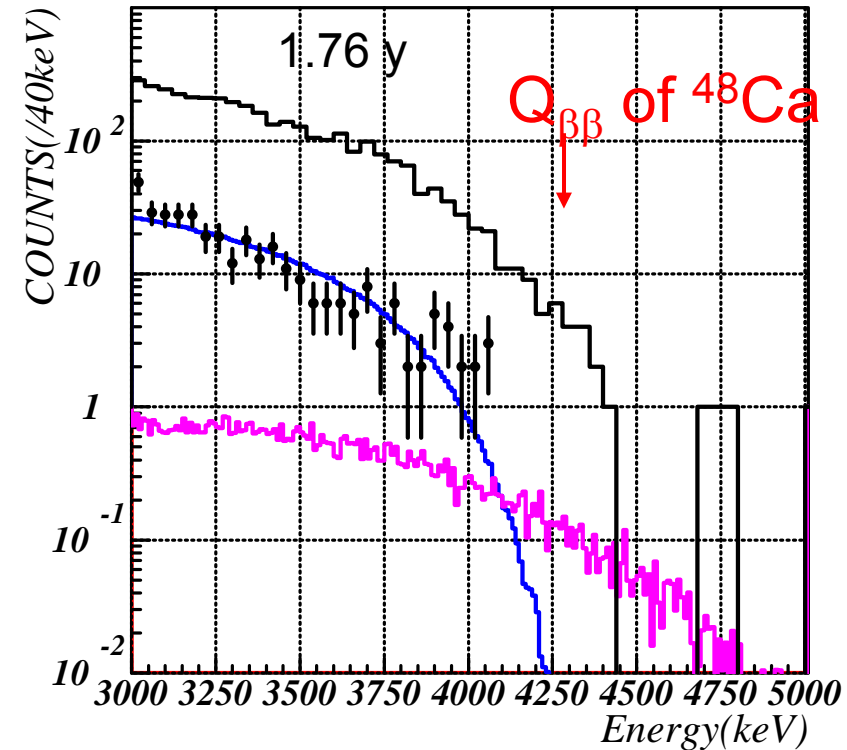
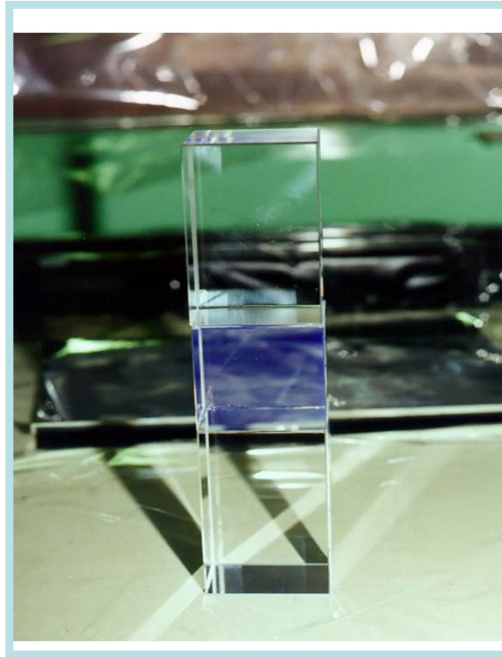


PRC78 058501('08) Candles

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

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

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



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

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

Not limited by backgrounds

But only 6.4g of ^{48}Ca 6

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

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



Silicon oil
 $n = 1.40$

Optical grease
 $n = 1.47$

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

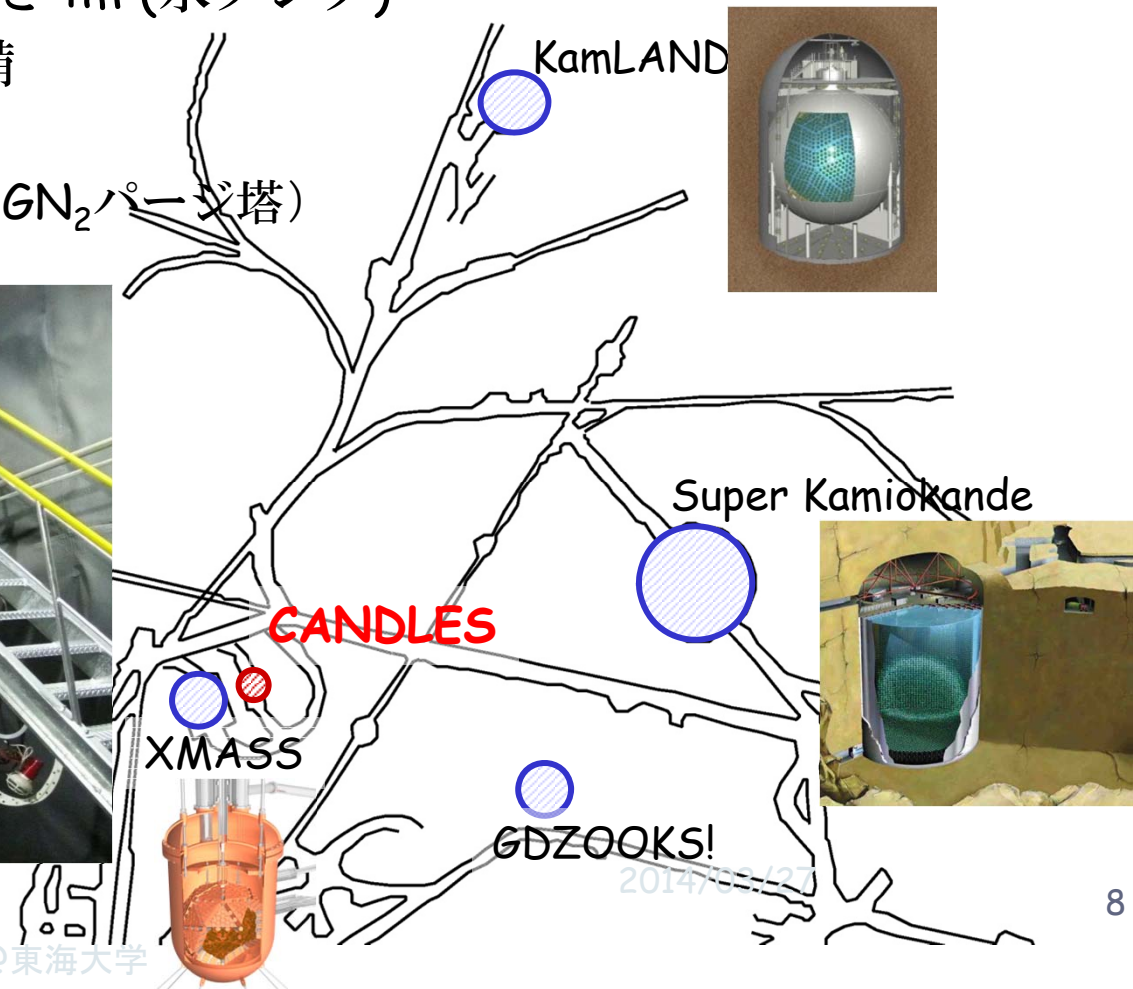


CANDLES III @ Kamioka

● 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、GN₂パーゴ塔)

Kamioka Lab. Map

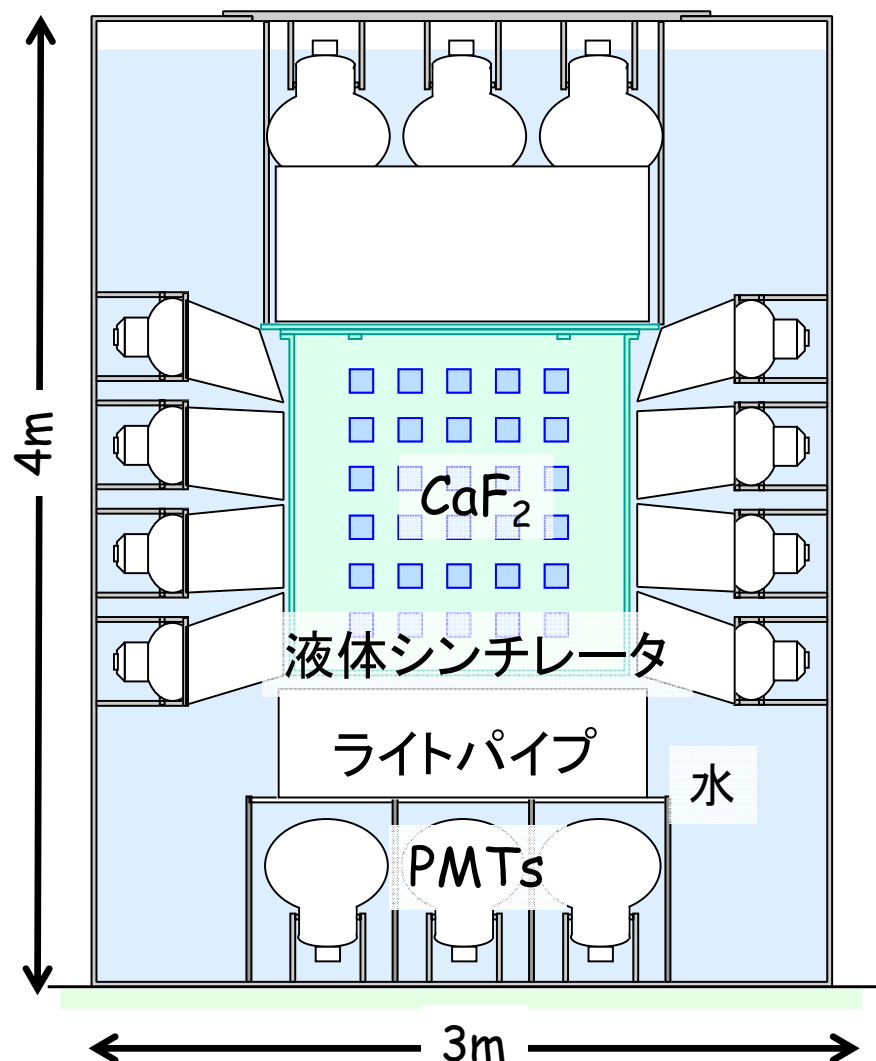


CANDLES III(UG)



CANDLES at Kamioka underground laboratory

CANDLES III



CaF₂ シンチレータ (CaF₂(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2m³

$\tau \sim \text{数}10\text{nsec}$

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

CaF₂(pure) : $\sim 1\mu\text{sec}$

Liquid scintillator : 数 10 nsec



CANDLES III(UG)

CANDLES at Kamioka underground laboratory

CANDLES III

CaF₂ シンチレータ (CaF₂(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2m³

$\tau \sim \text{数}10\text{nsec}$

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

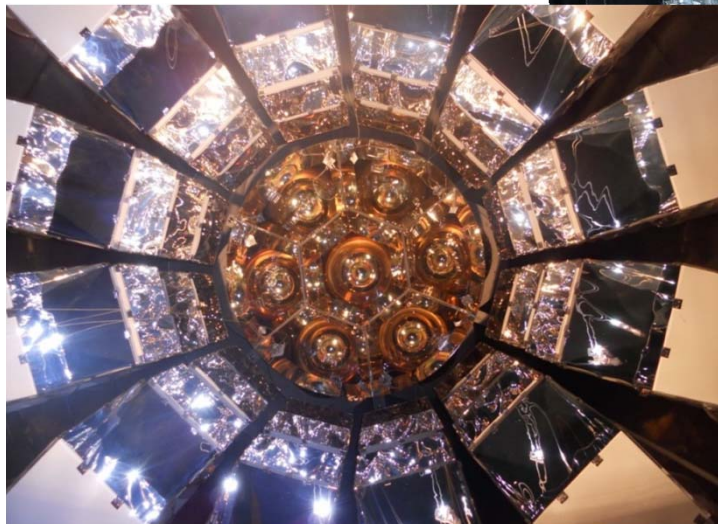
CaF₂(pure) : $\sim 1\mu\text{sec}$

Liquid scintillator : 数 10 nsec

CaF₂ シンチレータ
(305kg)

液体シンチレータ
タンク(2m³)

光電子増倍管
ライトパイプ

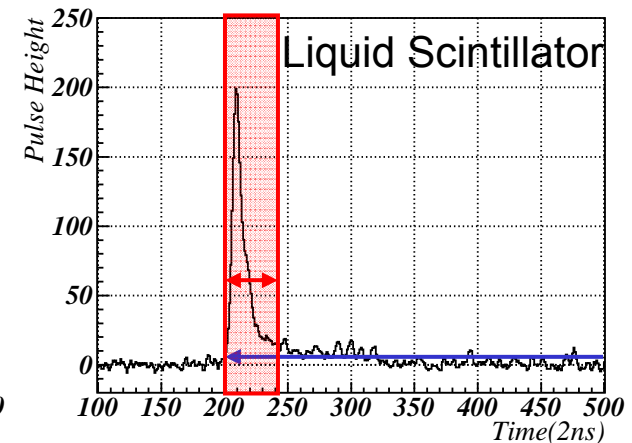
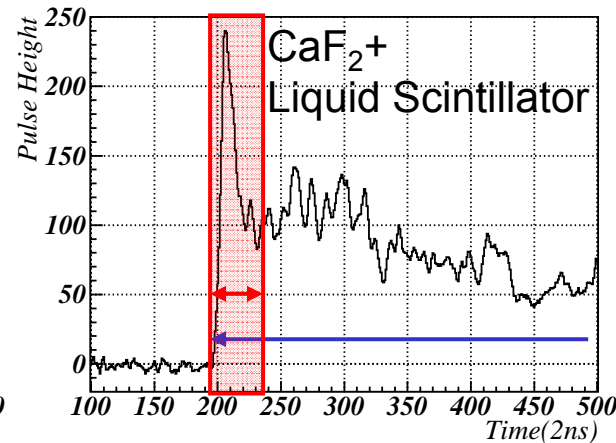
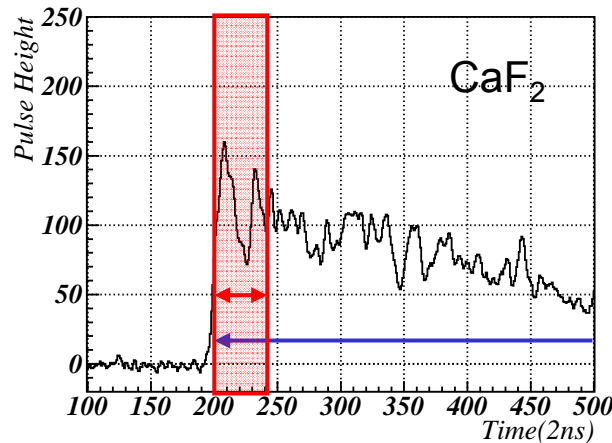
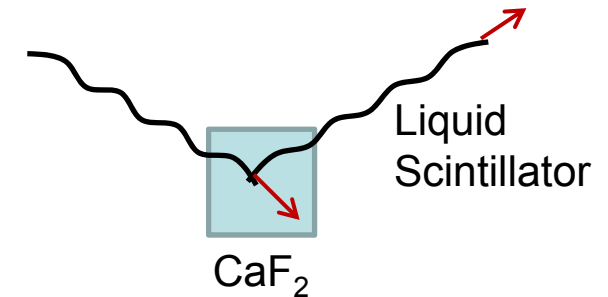


外部起源のBG

Rejection of LS Events



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

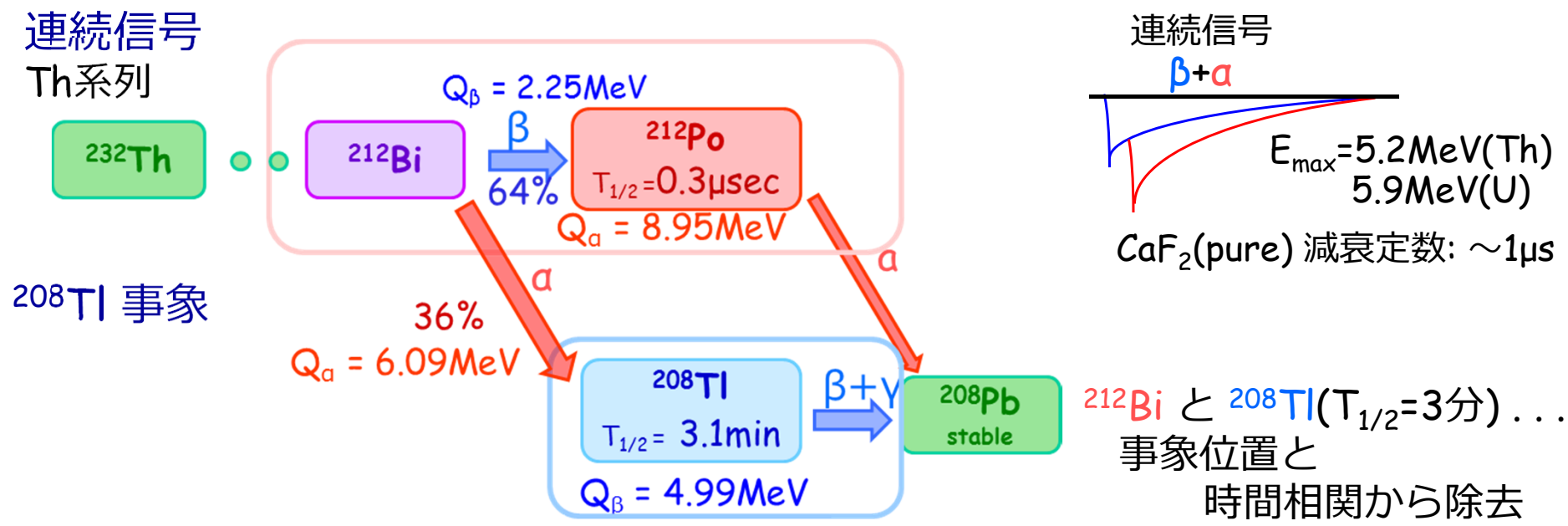


$$\text{Charge Ratio} = \frac{\text{charge in partial gate}}{\text{charge in full gate}}$$



内部起源のBG @ Q値領域

CaF₂不純物起源のバックグラウンド事象



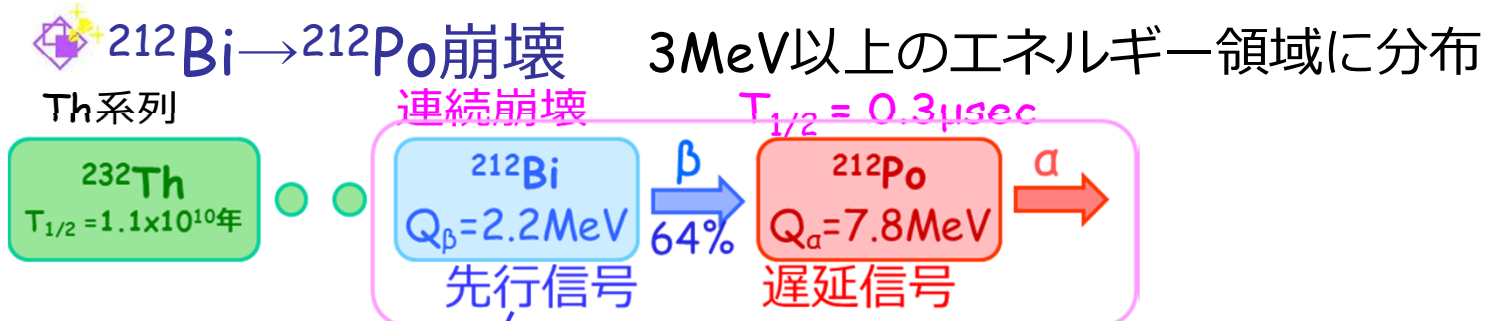
先行 α 線を α - γ 波形解析で識別 (偶然同時計数を低減)
→時間差解析

バックグラウンド除去

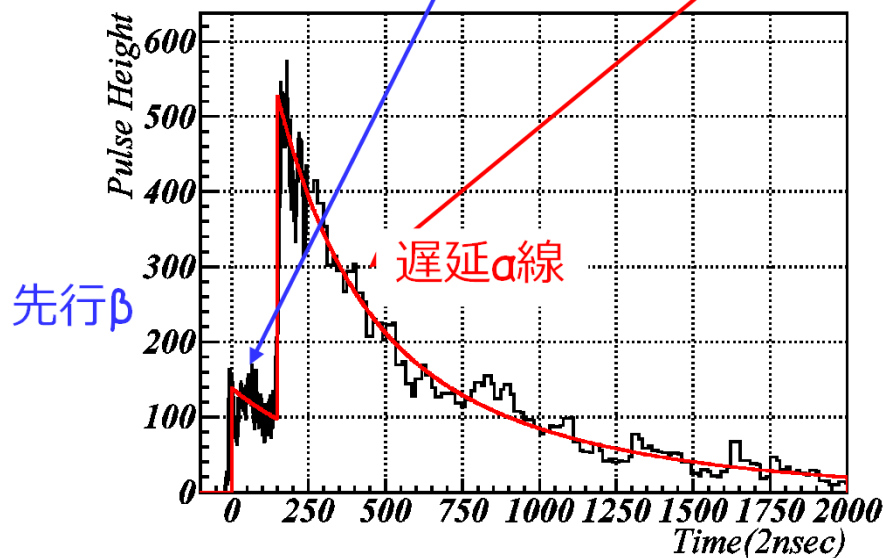
- 連続事象 : 時間差が長い事象→連続波形を識別
時間差が短い事象→ α 線波形を除去
- 208Tl事象 : 先行 α 信号(²¹²Bi)との位置・時間相関



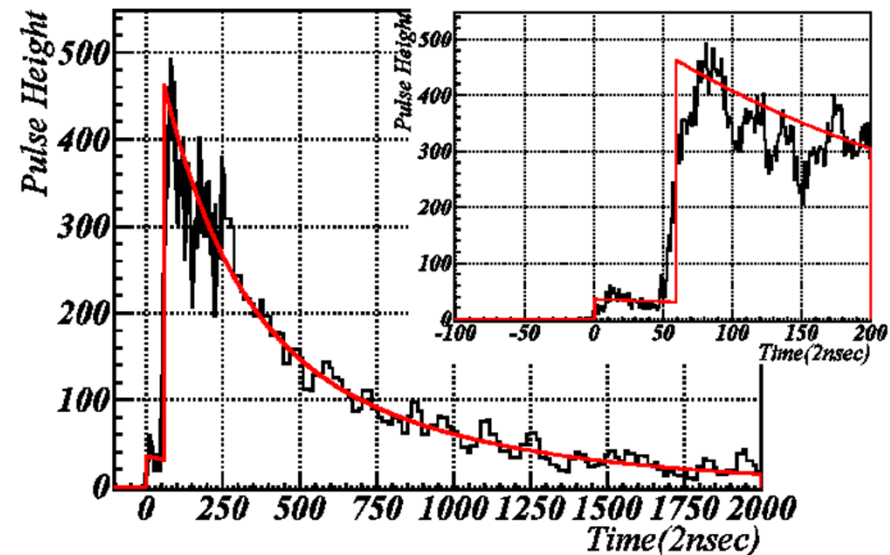
連続崩壊事象



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、 α 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、²⁰⁸Tlの除去-

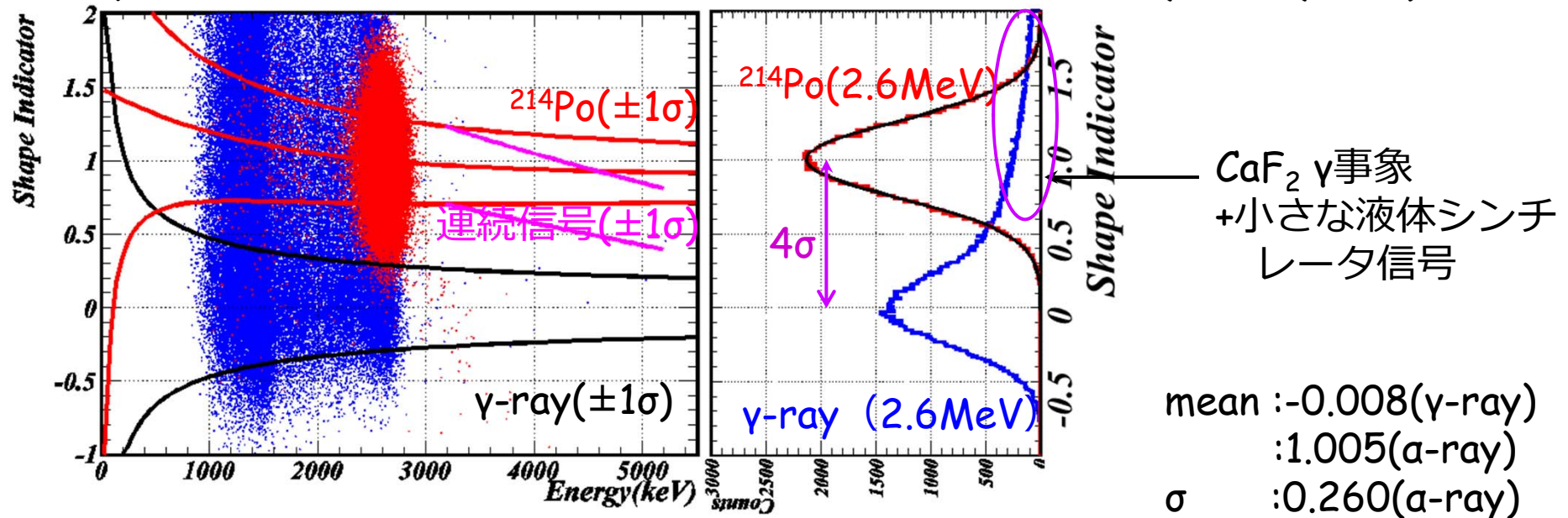


波形解析によるα-γ粒子弁別 : shape indicator(SI)

α線 : ²¹⁴Po 7.6MeV ($E_e=2.6$ MeV)

γ線 : ²⁰⁸Tl 2.6MeV

ref : Shape Indicator
(PRC67(2003) 014310)



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

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

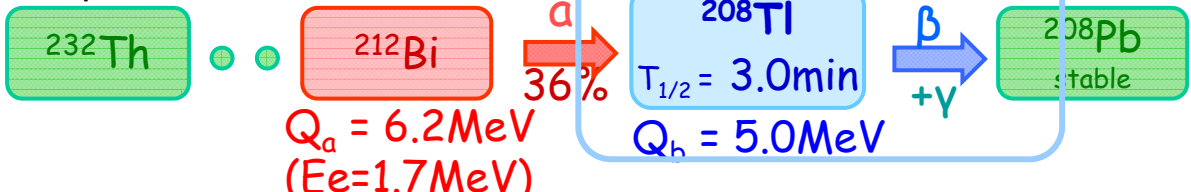
SIによるα線識別効率97% @ 2.6MeV (γ線:3%) 99%@4.3MeV
²¹²Bi選択時にはさらにγ線事象を低減するために χ^2 も併用。



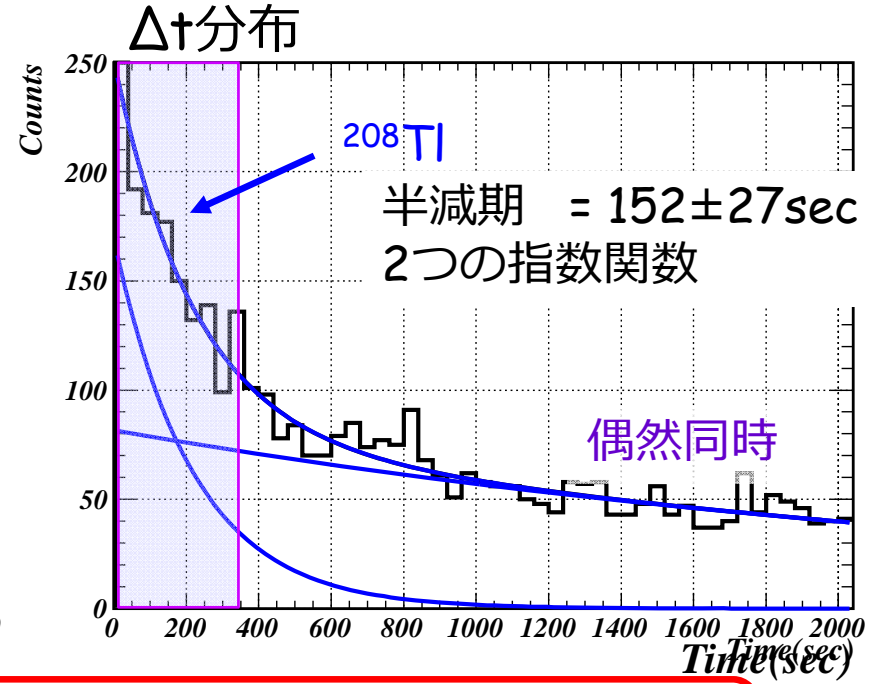
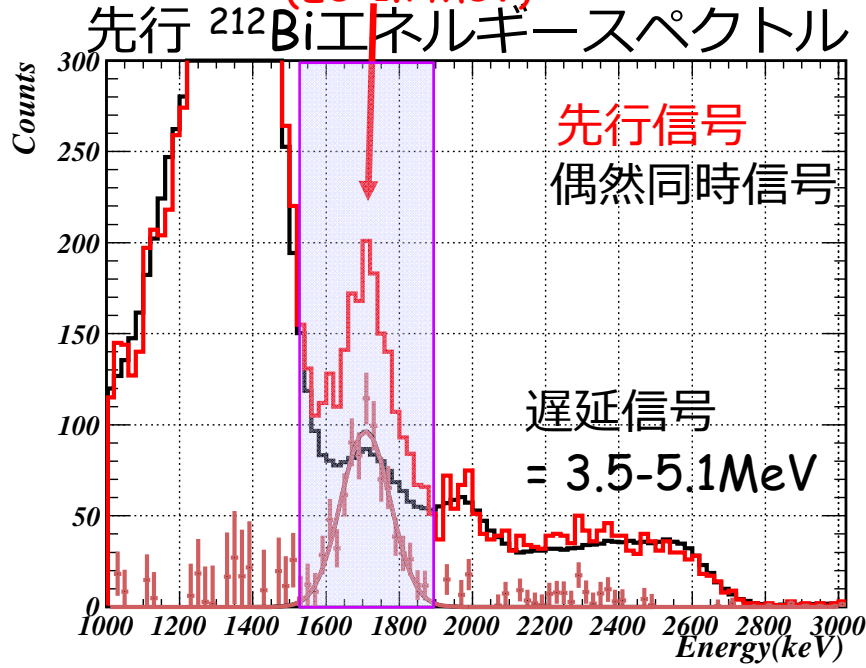
208Tl除去：先行212Bi信号



Th系列



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



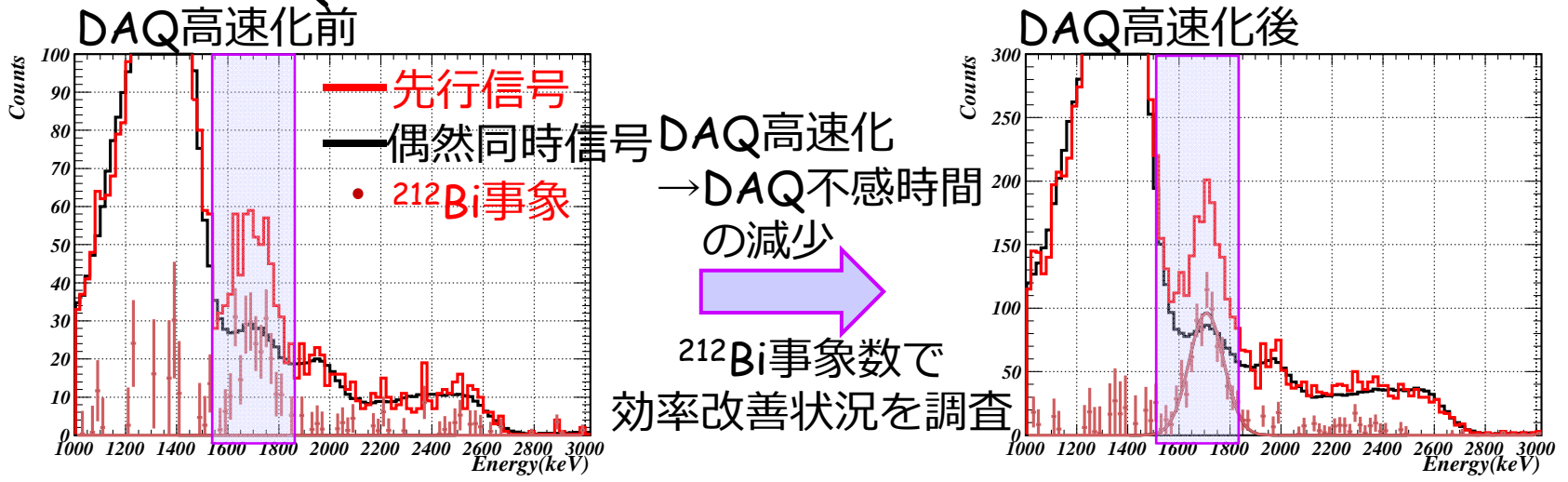
• ^{208}Tl の半減期183秒を確認。 ^{212}Bi の α 線ピークを確認。
→ ^{212}Bi の識別は可能



208Tl : DAQ高速化

208Tl の先行²¹²Bi スペクトル

DAQ高速化による²¹²Bi識別能力の改善



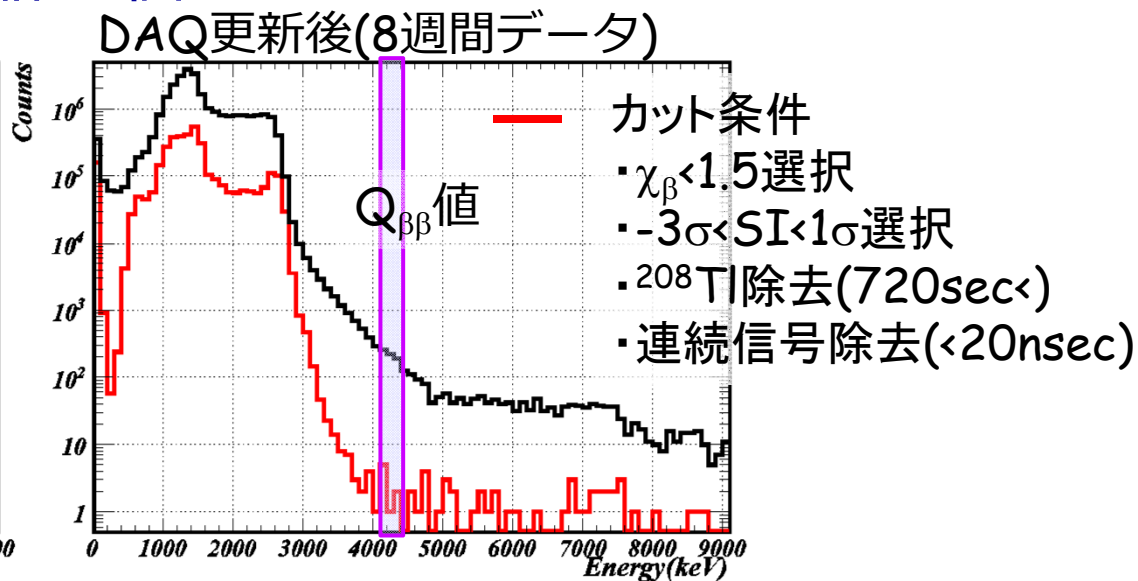
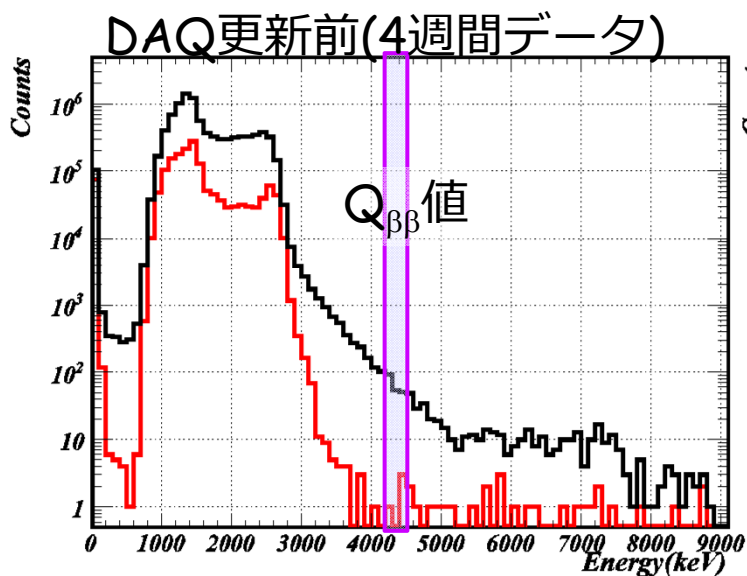
²¹² Bi事象数比較	DAQ高速化前	DAQ高速化後
α線効率、DAQ効率	88.5%、79%	85.2%、98%
シミュレーション(²¹² Bi数)	9.6事象/日 (259事象)	11.6事象/日 (702事象)
データ(²¹² Bi数)	8.9±0.9事象/日 (240±24事象)	12.7±0.7事象/日 (769±43事象)

- 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



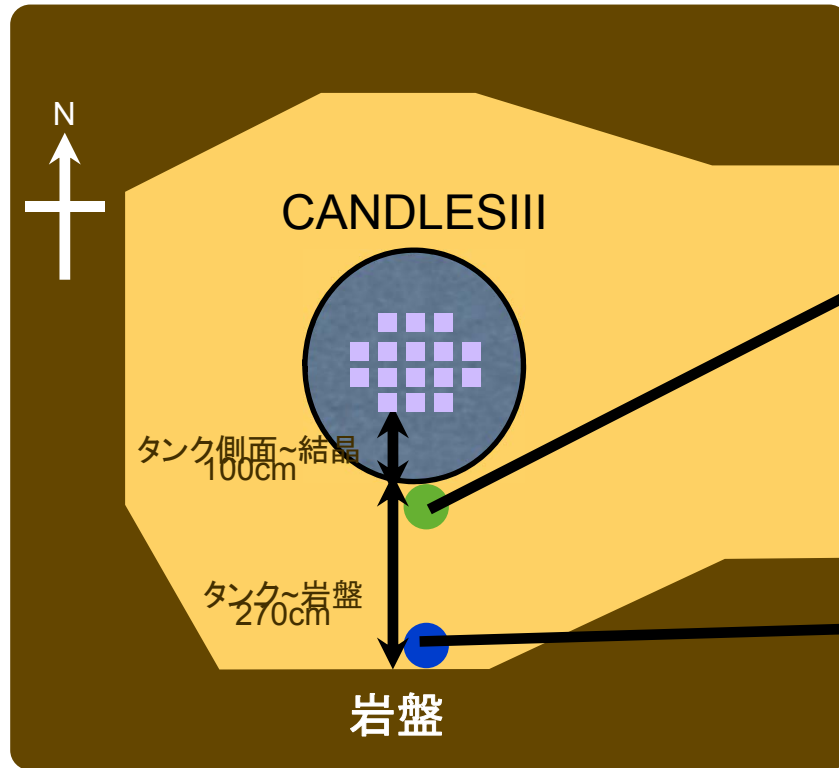
	DAQ更新前	DAQ更新後(現在解析進行中)
測定時間、検出効率	2241 kg · days、0.34	4987 kg · days、0.28
事象数	4	6
予想されるBG量	~0.5(結晶内)+1.5(中性子)	~1(結晶内)+3.4(中性子)
測定感度	0.5×10^{22} 年	0.8×10^{22} 年 BG

・測定感度：~ 1×10^{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}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%)

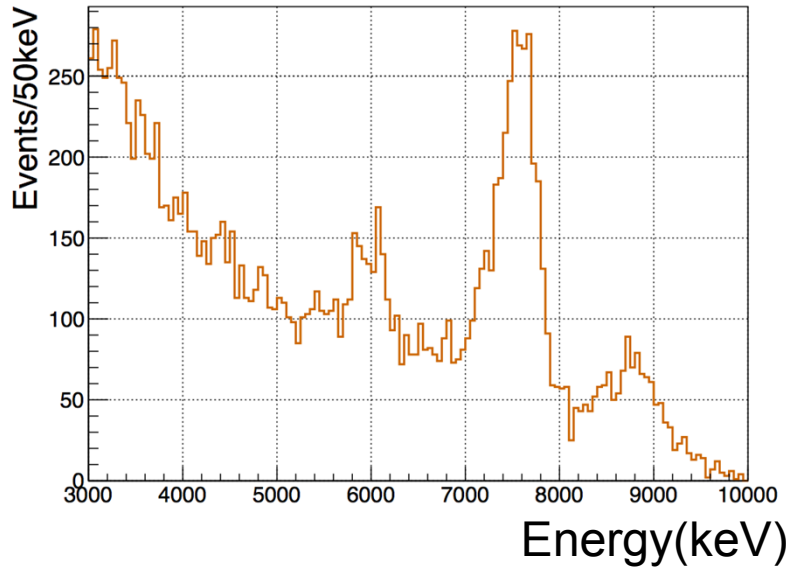
岩石の応答を見るための測定
岩盤の壁近くで
タンクを見込む立体角 $\sim 0.4\pi$ (10%)

実験室見取り図

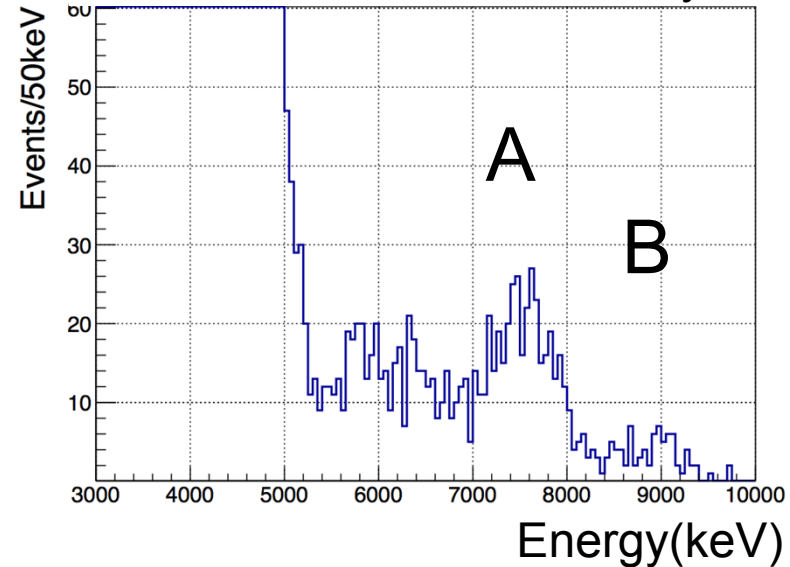
既知の高エネルギー γ 線の応答を見るため
Niボールを用いた測定で較正

測定スペクトル

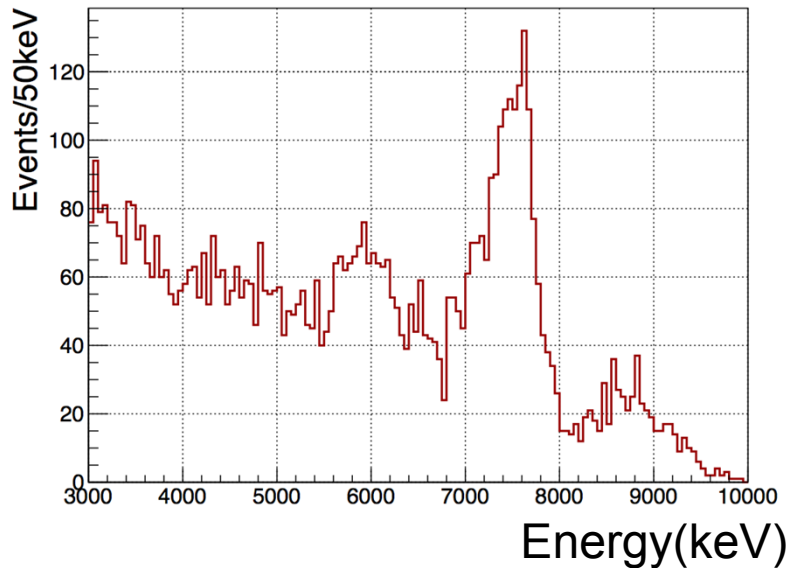
中性子 on SUS LiveTime 4hr



通常測定 LiveTime ~ 90days



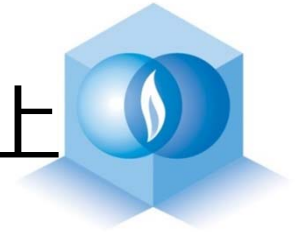
中性子 on rock LiveTime 8hr



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

中性子起源の高エネルギー γ 線
外部から → 遮蔽

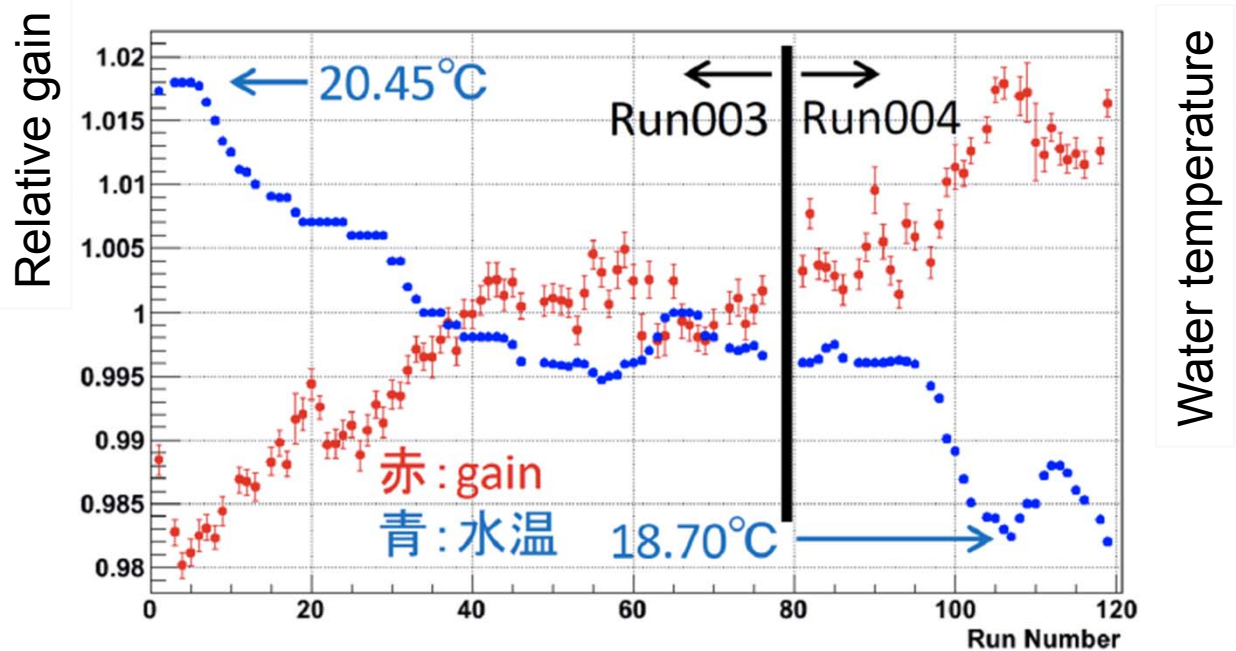
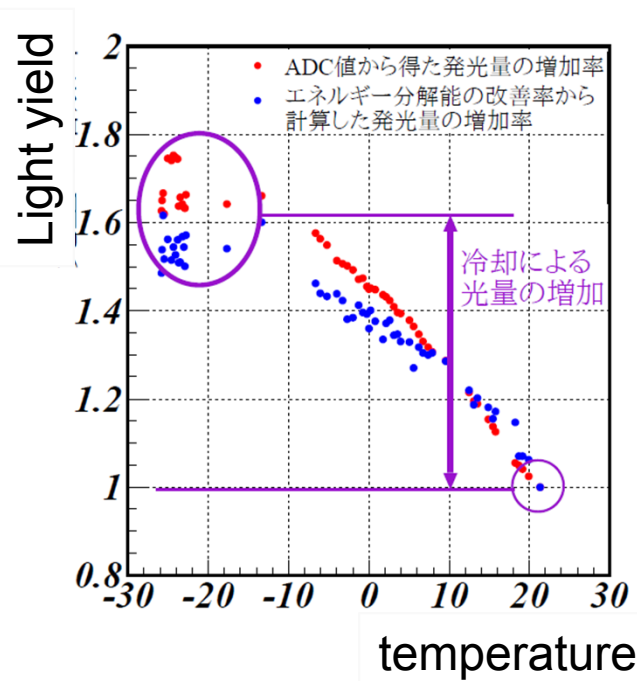
CANDLES III : 冷却による性能向上



CaF₂

Light yield increase at low temperature

Test experiment



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

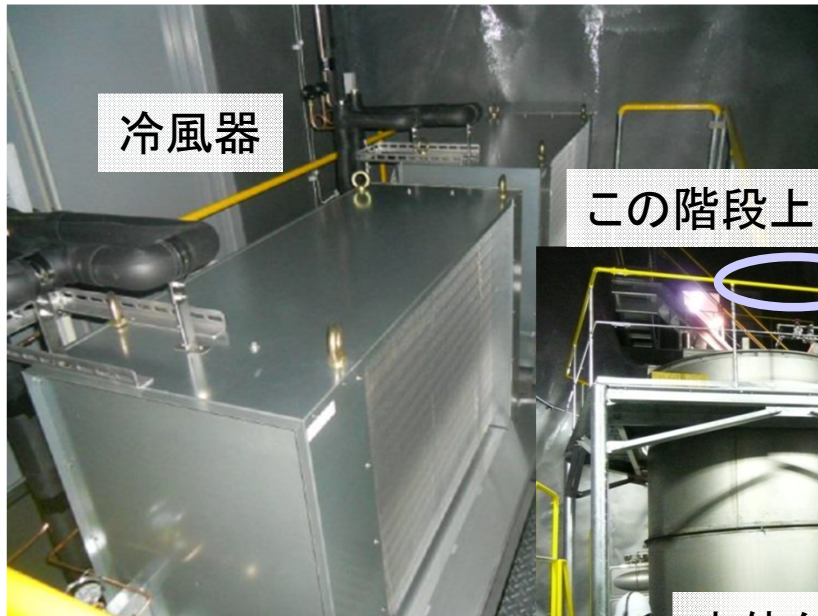
◆ 実験室全体を冷却して温度コントロール

◆ 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

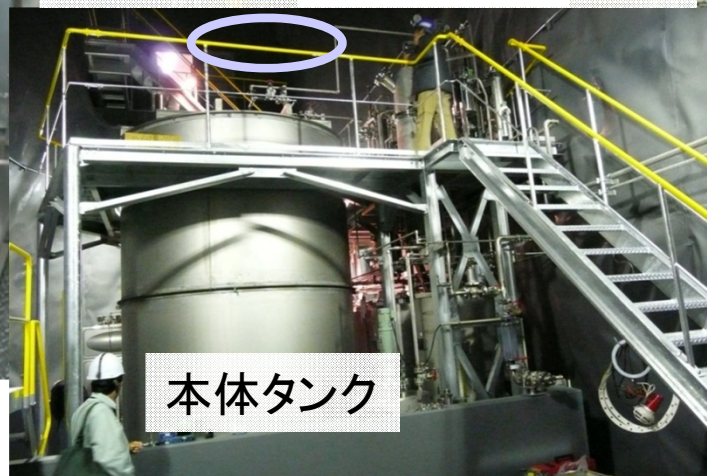
◆ + 地磁気補償コイル

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

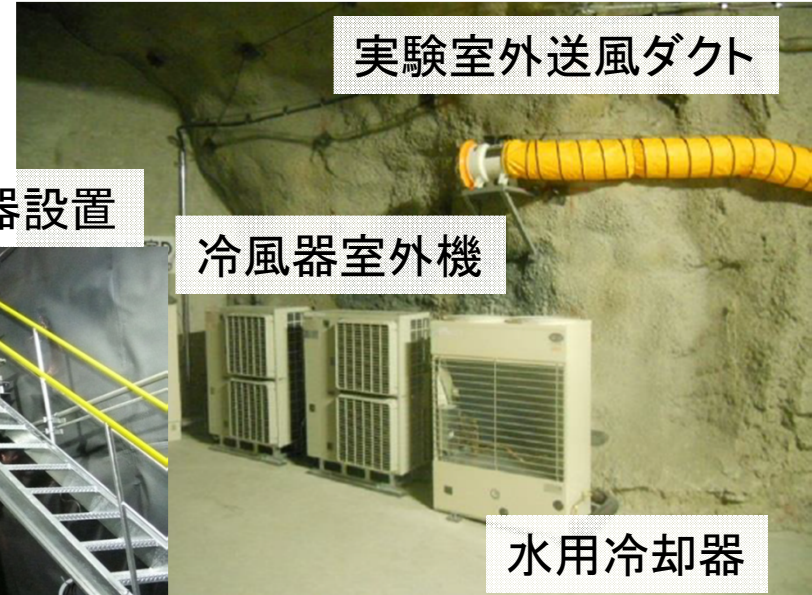


冷風器

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}Ca の濃縮



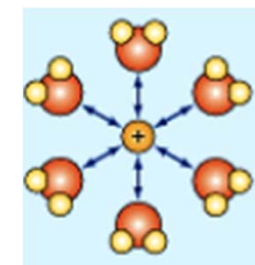
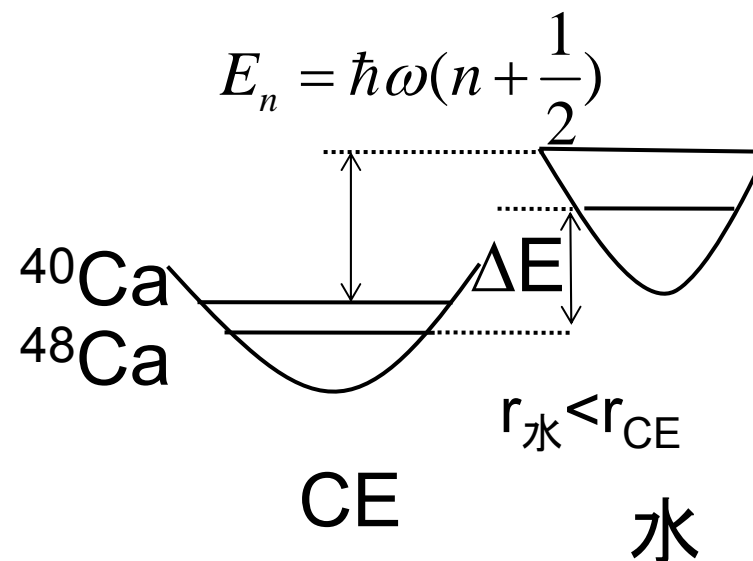
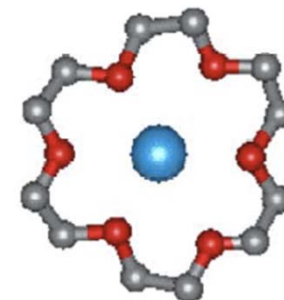
- 物理的方法
 - 遠心分離法: ガス(核燃料)
 - レーザー法: 開発されたが実用化されず
 - R&D 福井
 - 質量分析法: ^{48}Ca 等、ガス化出来ない元素: 高価
- 化学的方法
 - 反応率の差: 重水素、ホウ素
 - クラウンエーテル(樹脂)法
 - 樹脂法: 梅原(藤井)
 - マイクロリアクター: 碓(佐久間)
- 電気泳動法(岸本)

CANDLESとして



Candles

- 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
 - $\frac{\Delta E}{kT} = \frac{0.04 \text{ meV}}{25 \text{ meV}} \sim 0.2\% (r \sim 1.5)$
 - 0.4% ($r \sim 1.0$)
 - 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}Ca 濃縮



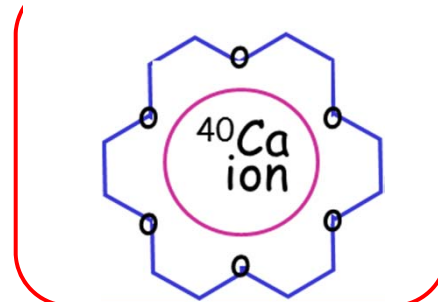
CANDLESと ^{48}Ca 濃縮

- ^{48}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

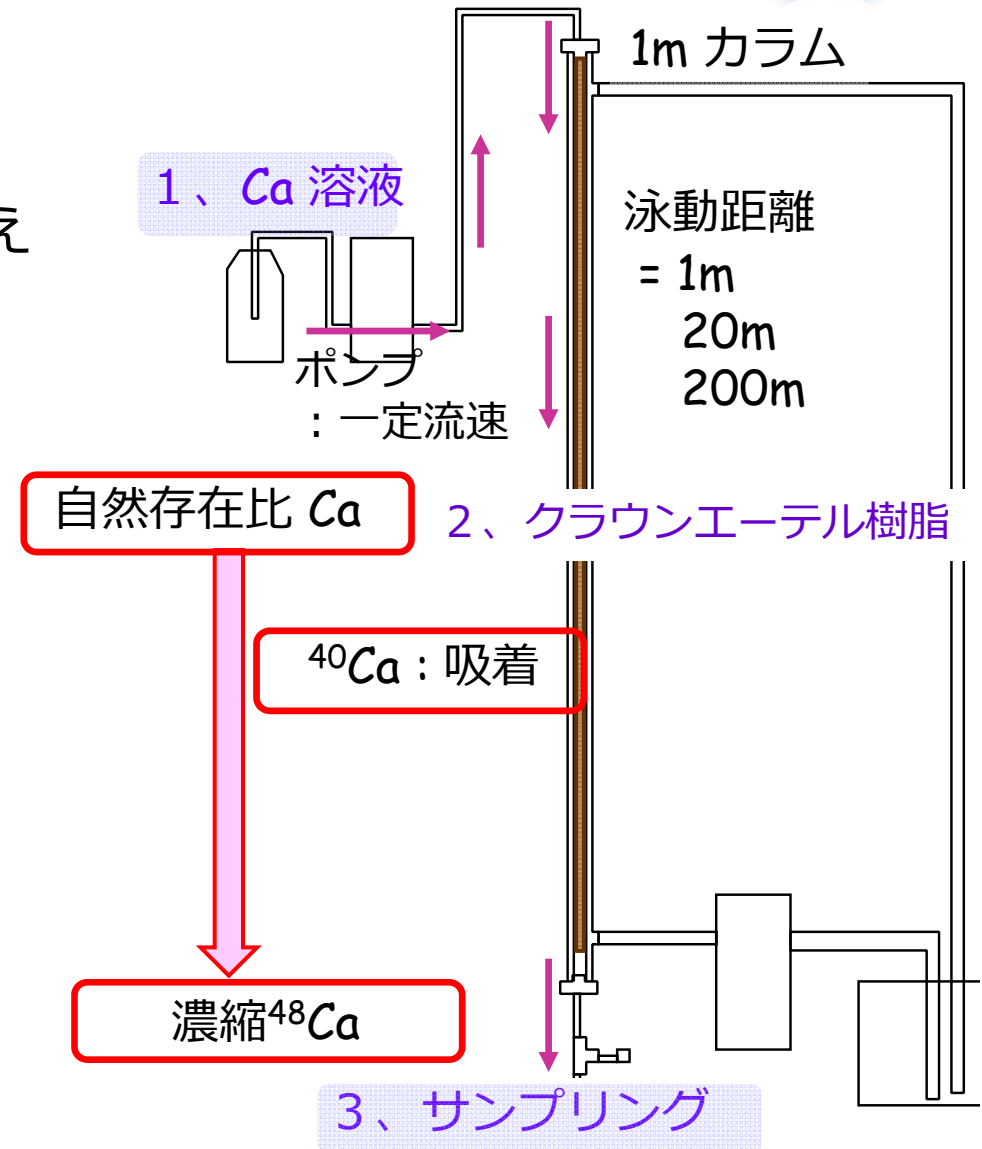
- 化学法
ブレイクスルー法
= 樹脂エリアに

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}Ca 濃縮

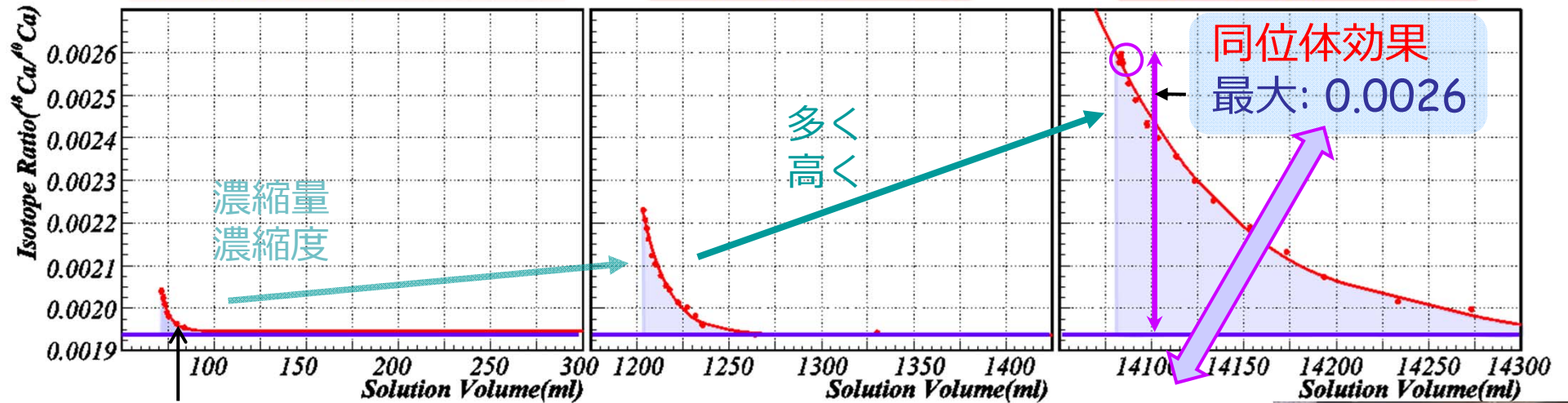


同位体効果

~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

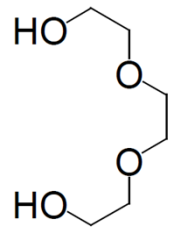
- 長い泳動距離 = 高い濃縮度
- ^{48}Ca 大量化 → 現在、体積10~100倍システム
大量化の際に想定される問題の洗い出し
- ただ、クラウンエーテルは非常に高価(5000円/g)。。。
→自分たちで合成する技術を開発



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

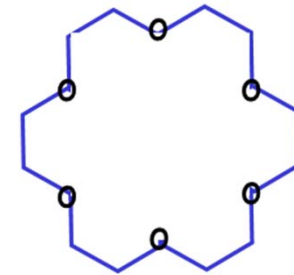


Triethylene glycol

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。

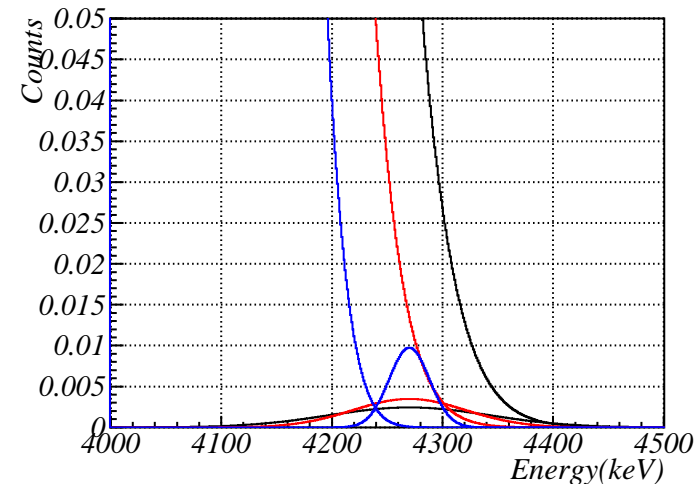
合わせて高濃度濃縮のための新しい技術開発も進行中。

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

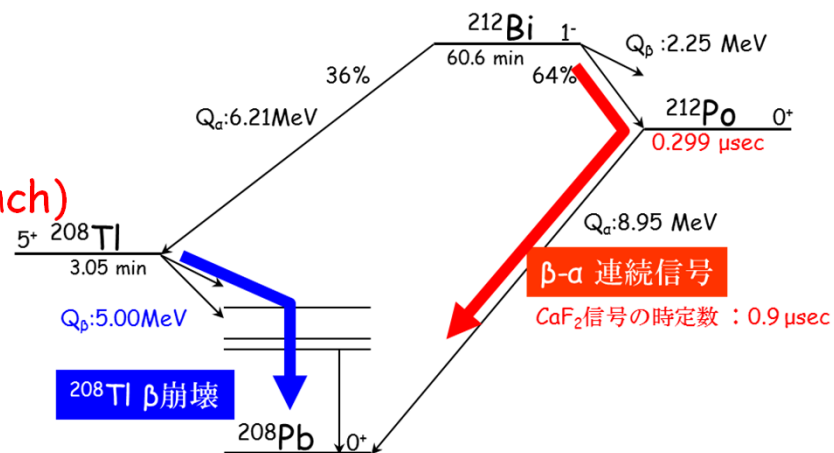
$\langle m\nu \rangle = 0.009\text{eV}$



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

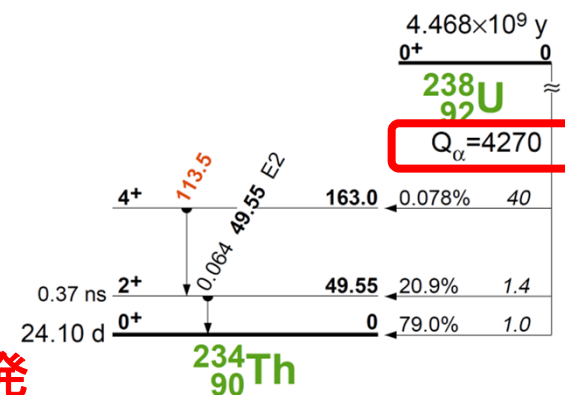
- $2\nu\beta\beta$ 事象(Ultimate BG)
 - エネルギー分解能の改善 → Bolometer
- CaF_2 結晶内部の放射性不純物 (Th系列)
 - Th系列(β - α 信号) → Bolometer (no quench)
 - Th系列(^{208}Tl) → 結晶細分化
 - ELEGANT-VIの経験から
10cm立方結晶 → 小型化 (4~5 cmでOK)
 - 環境中性子起源 γ 線
 - エネルギー分解能の改善 + 結晶小型化



Bolometer開発で**現在のBG源は大きく低減可能**

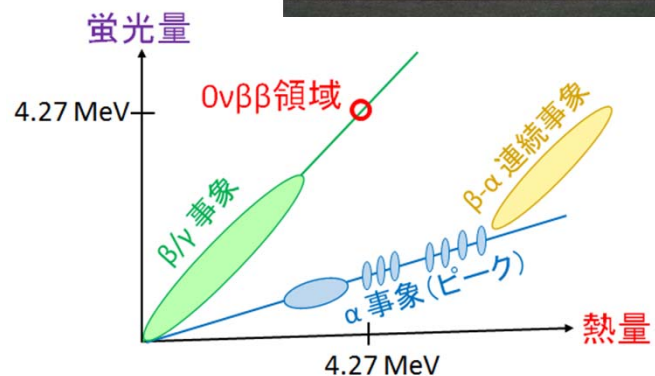
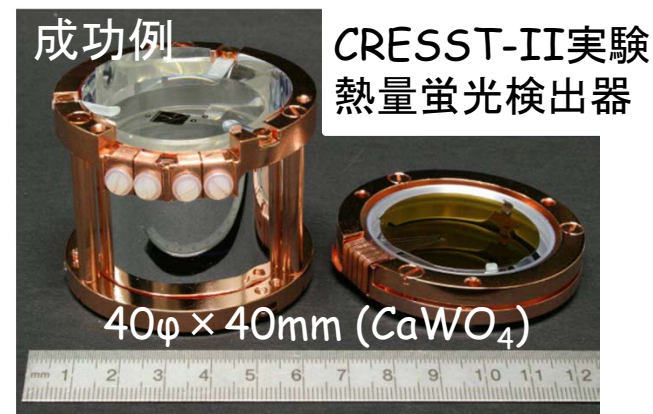
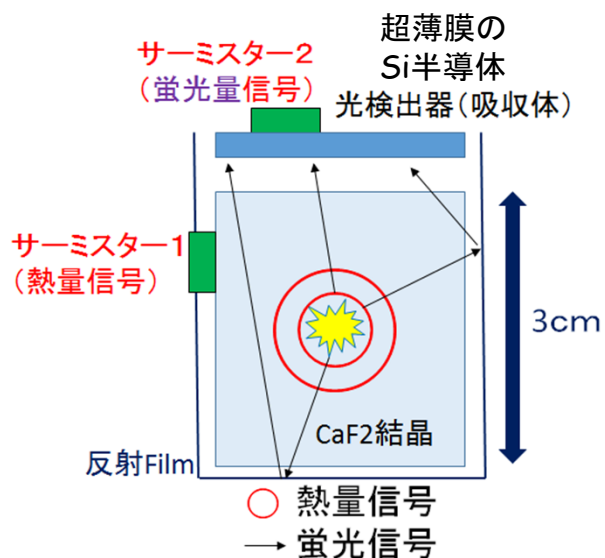
- しかし... 新しいBG候補
 - ^{48}Ca のQ値 : 4267.98(32) keV 最新値@ arXiv:1308.3815
 - ^{238}U のQ値 : 4270 keV

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 (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}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}Ca の二重ベータ崩壊の測定 代表：岸本

