



CANDLES

梅原さおり

umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp

CANDLES collaboration

Candles



概要



◆ CANDLES システム

= $\text{CaF}_2(\text{pure})$ シンチレータ + 液体シンチレータ

検出器=二重ベータ崩壊核 一体タイプ

◆ ^{48}Ca 二重ベータ崩壊

◆ CANDLES III システム (神岡に建設)

◆ バックグラウンド低減

◆ 測定感度

◆ 今後

◆ CANDLES IV、V

◆ ^{48}Ca 濃縮、 CaF_2 冷却

◆ まとめ

^{48}Ca の二重ベータ崩壊

なぜ ^{48}Ca ?

高い $Q_{\beta\beta}$ 値 (4.27 MeV) ...

^{76}Ge (2.0 MeV), ^{100}Mo (3.0 MeV), ^{130}Te (2.5 MeV)

→ 低バックグラウンド

$Q_{\beta\beta}$ 値がバックグラウンド事象よりも高い

$E_{\max} = 2.6 \text{ MeV}$ (^{208}Tl , γ -ray)

3.3 MeV (^{214}Bi , β -ray)

バックグラウンドフリー測定のための検出器開発

$1/m_\nu^2 \propto T_{1/2} \propto M_{\text{detector}}$ バックグラウンドフリー

CaF_2 シンチレータを用いた ^{48}Ca の二重ベータ崩壊測定

ELEGANT VI : $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ シンチレータ

→ バックグラウンドフリー測定を実現

CANDLES シリーズ : ELEGANT VI から大型検出器へ



CANDLES III



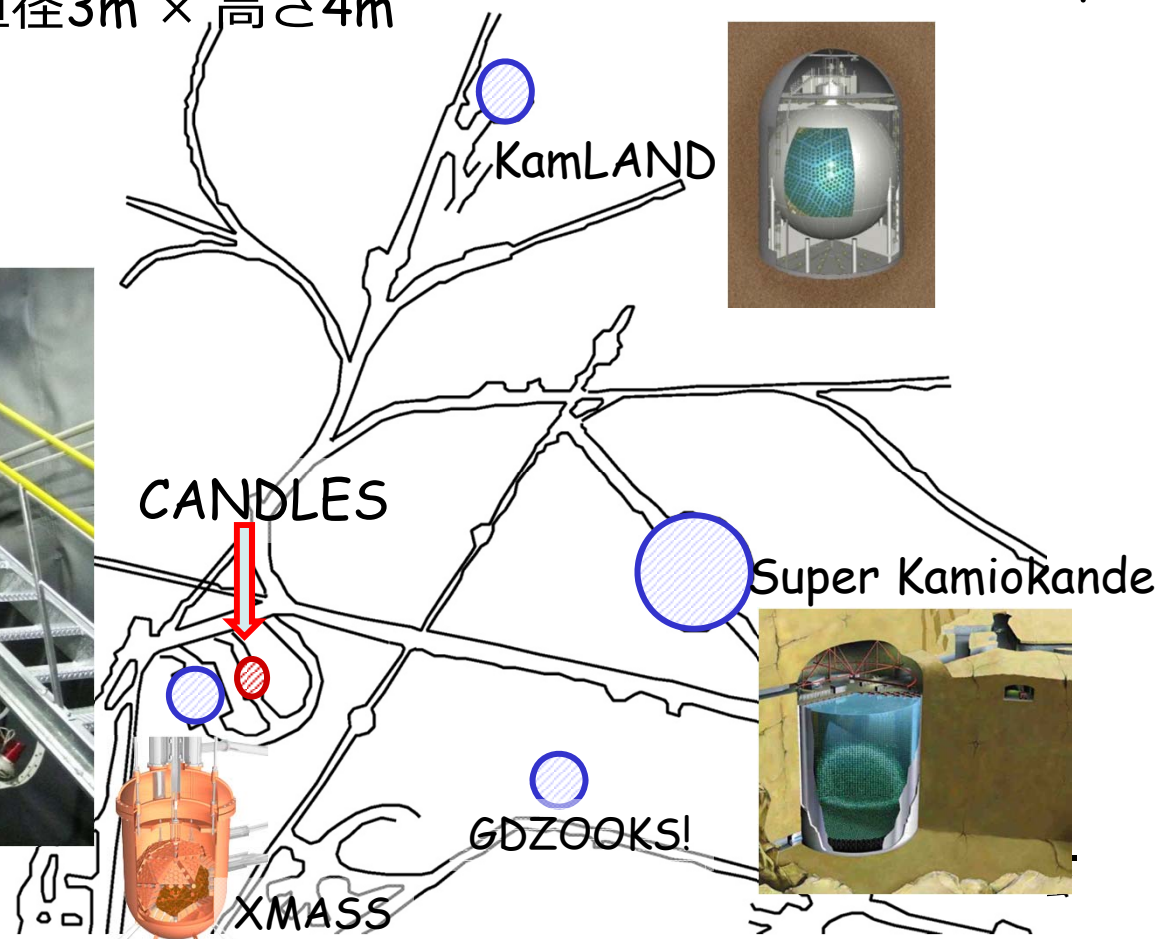
CANDLES at 神岡実験室

CANDLES III

水タンクサイズ：直径3m × 高さ4m

Kamioka Lab. Map

CANDLES III



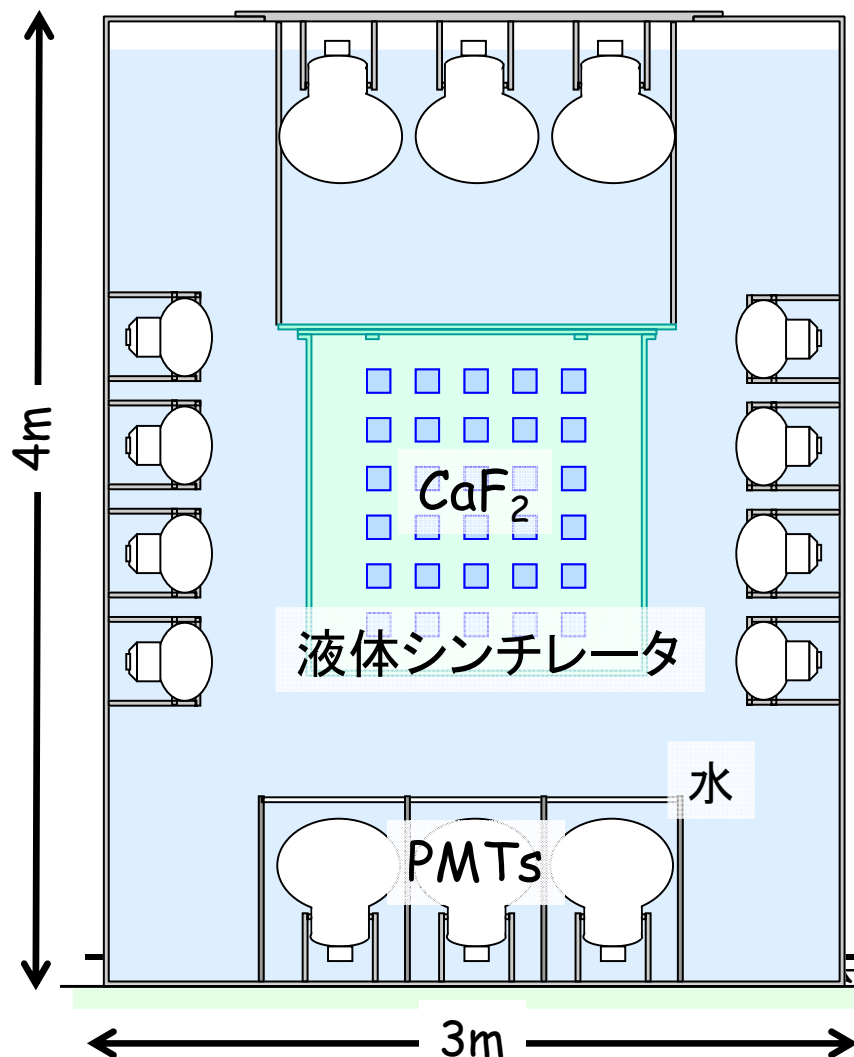


CANDLES III



CANDLES at Kamioka underground laboratory

CANDLES III



✦ CaF₂ シンチレータ (CaF₂(pure))
305 kg (96 modules × 3.2kg)
 $\tau \sim 1\mu\text{sec}$

✦ 液体シンチレータ (LS)
4 π アクティブシールド
体積 : 2m³
 $\tau \sim$ 数 10 nsec

✦ 大型光電子増倍管
13インチPMT × 48
20インチPMT × 14

あり、2013年4月23日、極低バックグラウンド懇談会



CANDLES III

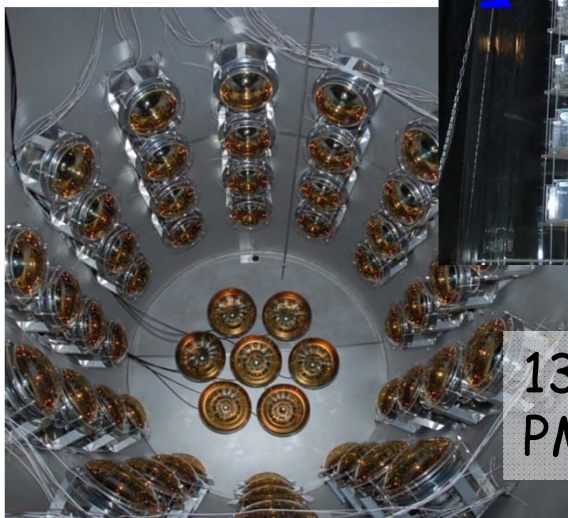
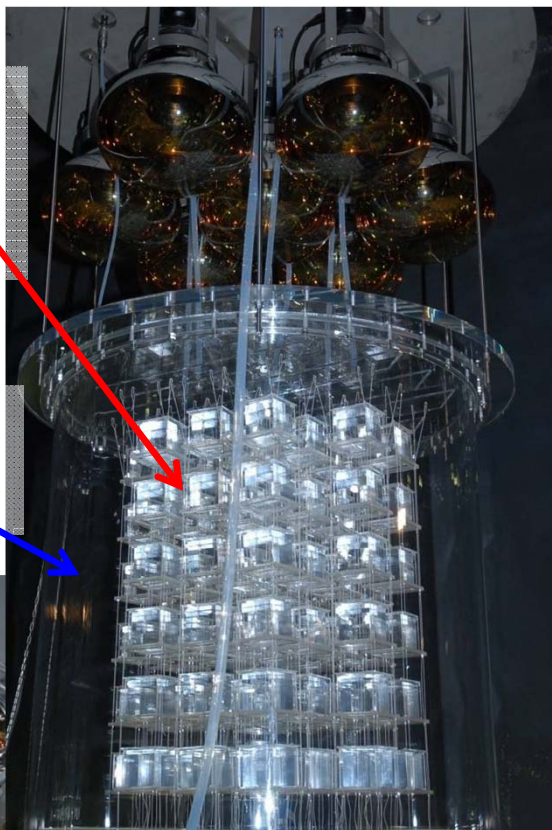


CANDLES at Kamioka underground laboratory

CANDLES III

メイン検出器
CaF₂ シンチレータ
(305kg)

液体シンチレータ
タンク(2m³)



13インチ、20インチ
PMTs

CaF₂ シンチレータ (CaF₂(pure))
305 kg (96 modules × 3.2kg)
 $\tau \sim 1\mu\text{sec}$

液体シンチレータ (LS)
4 π アクティブシールド
体積 : 2m³
 $\tau \sim$ 数 10 nsec

大型光電子増倍管
13インチPMT × 48
20インチPMT × 14

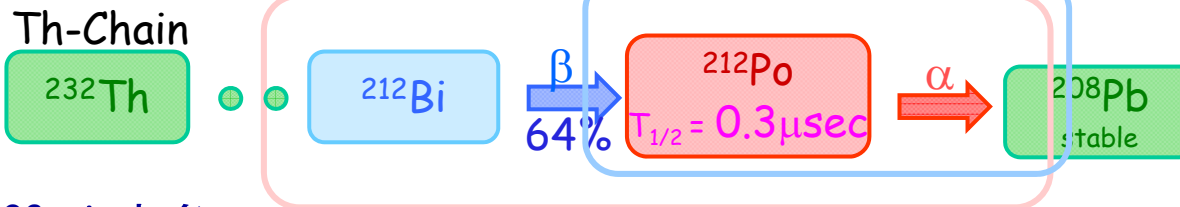
バックグラウンド

外部起源のバックグラウンド
液体シンチレータ信号の除去で低減

$2\nu\beta\beta$ 事象
エネルギー分解能改善で低減が可能 (~4% at 4.27MeV)

CaF_2 結晶内の放射性不純物

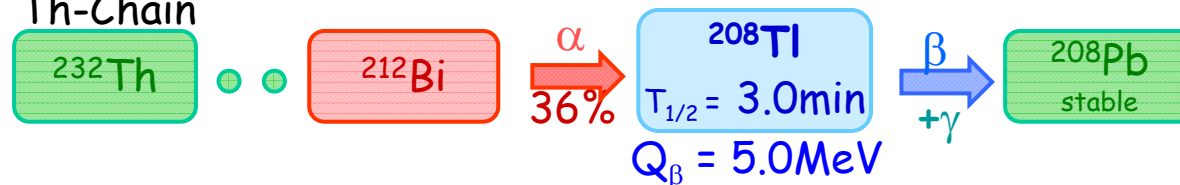
連続崩壊事象



Pile-up
because of
 τ of CaF_2 signal = $1\mu\text{sec}$

$E_{\text{max}} = 5.3\text{MeV}$ (Th-chain)

^{208}Tl 事象
Th-Chain



$E_{\text{max}} = 5.0\text{MeV}$
 ^{212}Bi and ^{208}Tl ($T_{1/2} = 3\text{min}$) ...
Space-Time Correlation Cut



CANDLES R&D



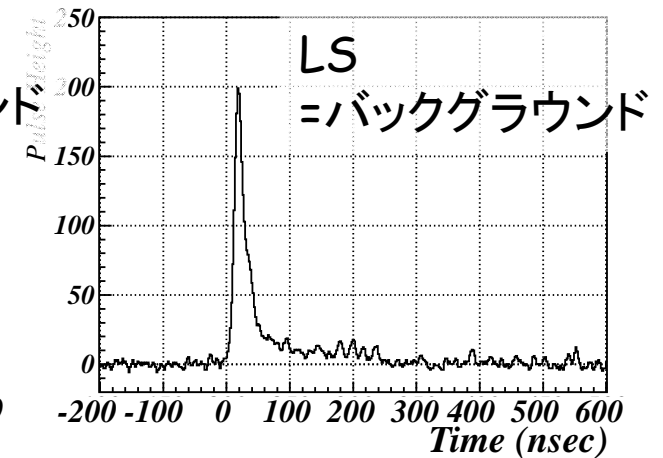
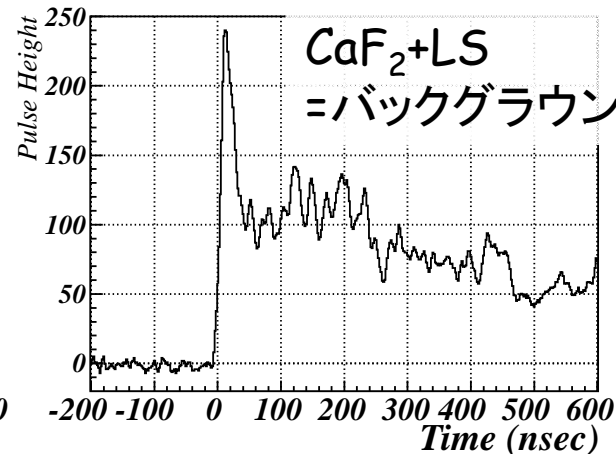
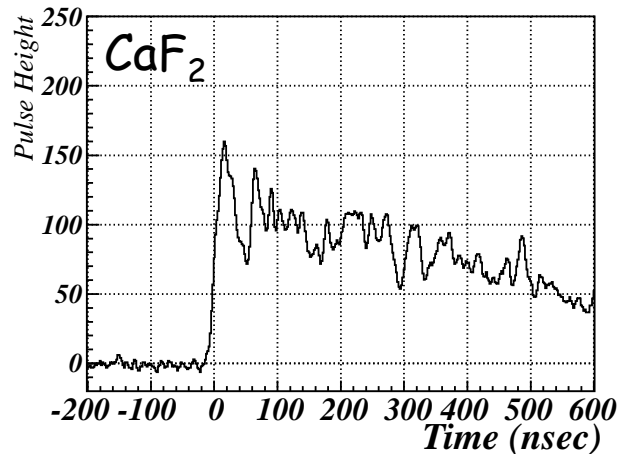
- ✦ バックグラウンド低減
 - ✦ 液体シンチレータ信号の除去 (DAQ)
:外部起源のバックグラウンド
 - ✦ 高純度 CaF_2 (検出器)
:TI 事象、連続事象
 - ✦ よいエネルギー分解能 (検出器)
:2v $\beta\beta$ 他
 - ✦ 位置再構成 (解析)
: ^{208}Tl 事象
 - ✦ CaF_2 事象の波形解析(解析)
:連続崩壊事象

LS信号の除去

CANDLES システムで想定される波形

3つの典型的波形

τ of $\text{CaF}_2 = \sim 1000\text{nsec}$
LS = $\sim 20\text{nsec}$



トリガーレート : 低い >>>> 高い
(検出器体積: 1 for CaF_2 : 20 for LS)

For CANDLES system ...

- ・短い波形(液体シンチレータ=数10ns)と長い波形($\text{CaF}_2 = \sim 4\mu\text{sec}$)
- ・ CaF_2 の選択的トリガー



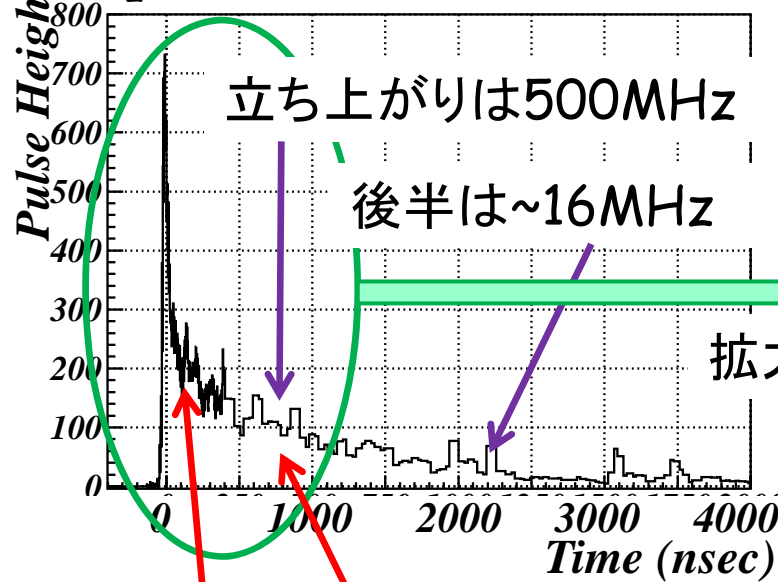
LS信号の除去： CANDLES用FADC



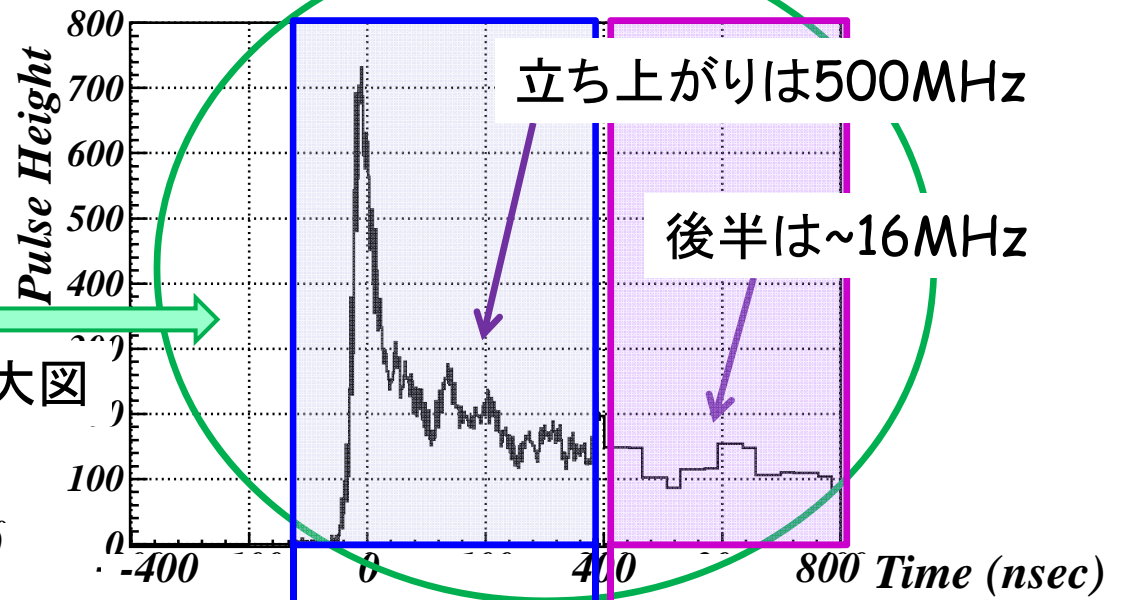
データ量低減

立ち上がり：高サンプリングレート、後半：低いサンプリング

CaF₂+LS の典型的波形



LS 波形 CaF₂ 波形



500MHz × 256 16MHz × 128
(FPGAで積分)

- ・LS信号とCaF₂が確認でき、かつ、データ量の低減
- ・500MHz × 2048data → 500MHz × 256data + 16MHz × 128data

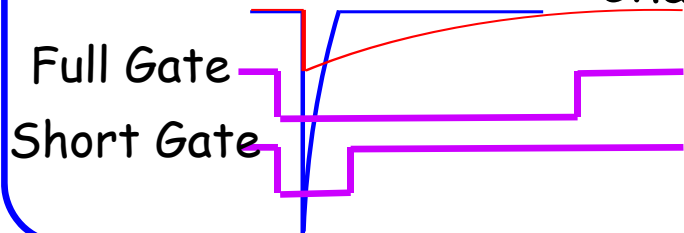


LS信号除去・選択的トリガー



Charge ratio 分布

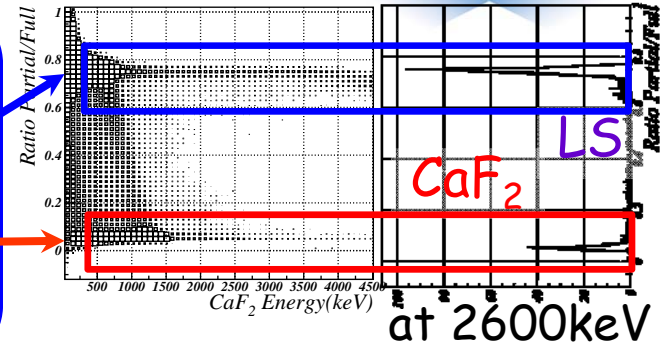
$$\text{Charge Ratio} = \frac{\text{Charge in Short Gate}}{\text{Charge in Full Gate}}$$



0.8 for LS

0.1 for CaF₂

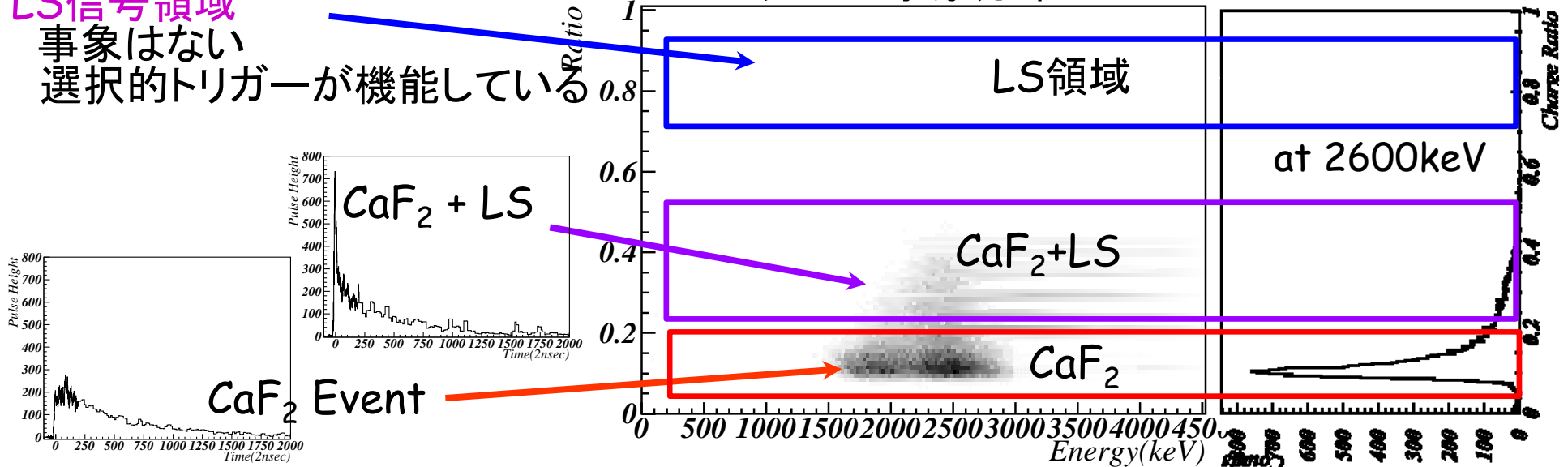
通常トリガー



LS信号領域

事象はない
選択的トリガーが機能している

CaF2トリガー: 事象分布



- ・LS信号弁別は可能
- ・CaF₂ 信号に対して高いトリガー効率、LSに対して低いトリガー効率



CANDLES R&D



バックグラウンド低減

液体シンチレータ信号の除去 (DAQ)

:外部起源のバックグラウンド

高純度 CaF_2 (検出器)

:TI 事象、連続事象

よいエネルギー分解能 (検出器)

: $2\nu\beta\beta$ 他

位置再構成 (解析)

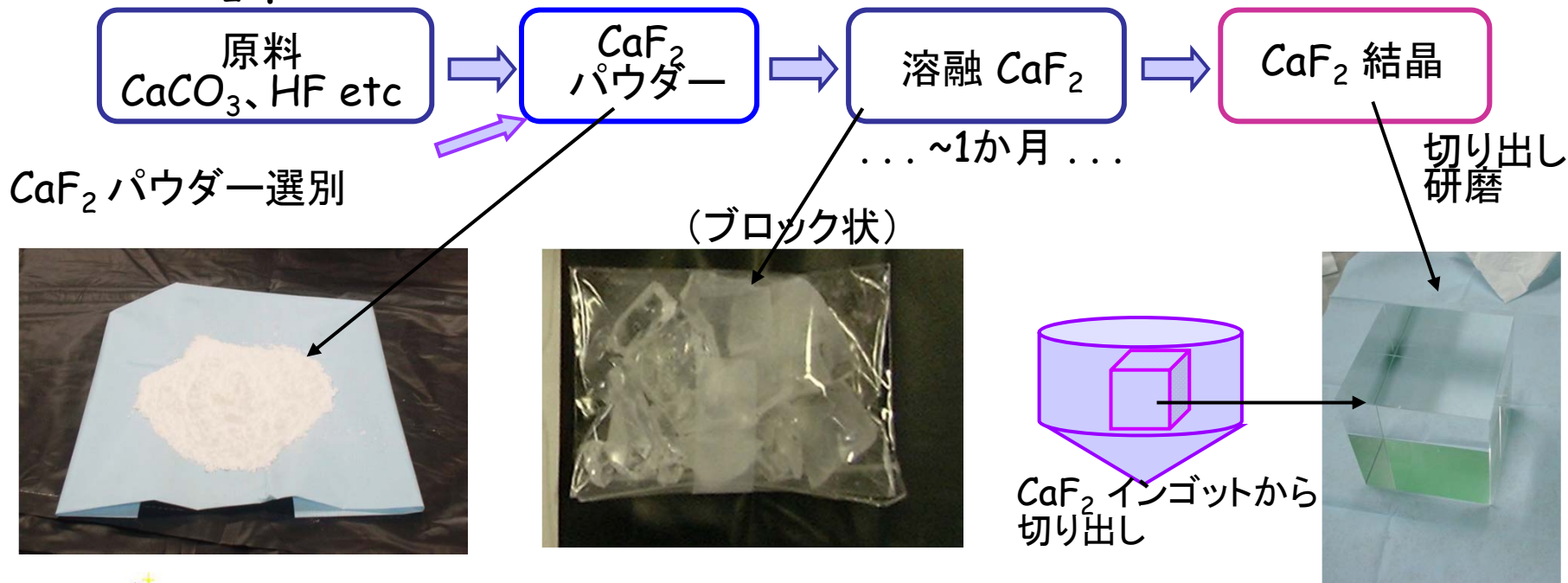
: ^{208}Tl 事象

CaF_2 事象の波形解析(解析)

:連続崩壊事象

高純度結晶

CaF₂(pure) 結晶成長過程



高純度結晶...

CaF₂ パウダーの不純物量

Ge半導体検出器(γ線) ↔

粉末選別 → 高純度化

結晶の不純物量
α線測定

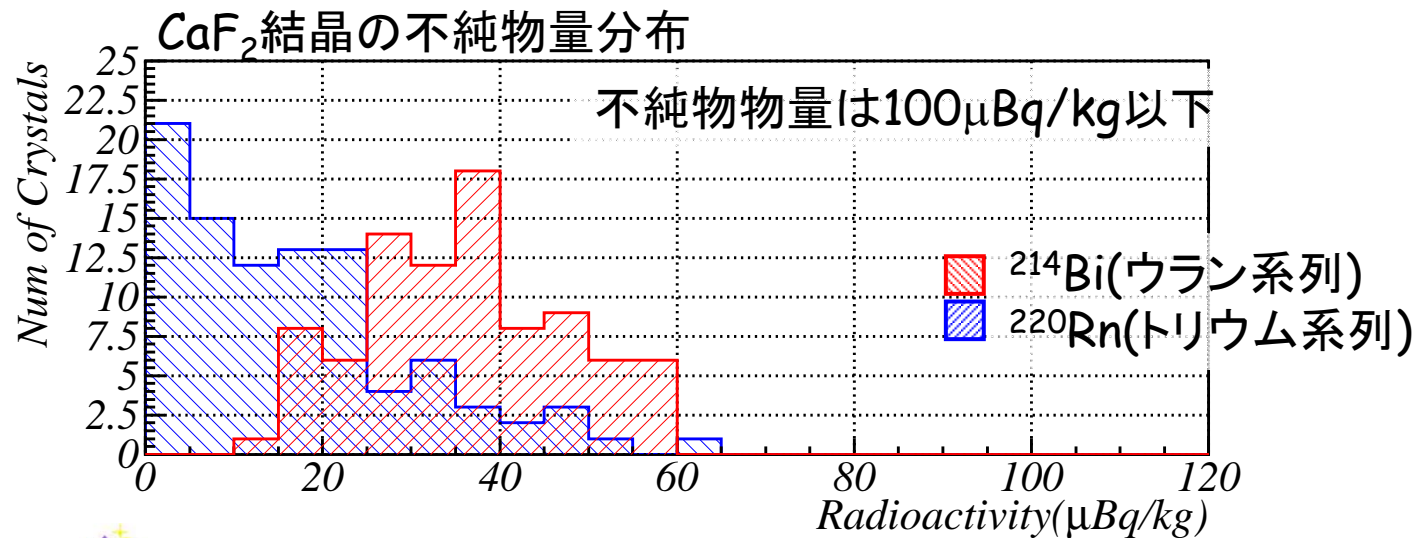


CaF₂結晶



CaF₂結晶 ...

業者個別に原料CaF₂を指定し結晶成長→不純物測定



放射性不純物量 ...

原料指定のみ

214Bi(ウラン系列)... 平均 36μBq/kg

220Rn(トリウム系列)... 平均 17μBq/kg

CANDLES IIIの要求を満たしている



CANDLES R&D



✦ バックグラウンド低減

✦ 液体シンチレータ信号の除去 (DAQ)

:外部起源のバックグラウンド

✦ 高純度 CaF_2 (検出器)

:TI 事象、連続事象

✦ よいエネルギー分解能 (検出器)

: $2v\beta\beta$ 他

✦ 位置再構成 (解析)

: ^{208}Tl 事象

✦ CaF_2 事象の波形解析(解析)

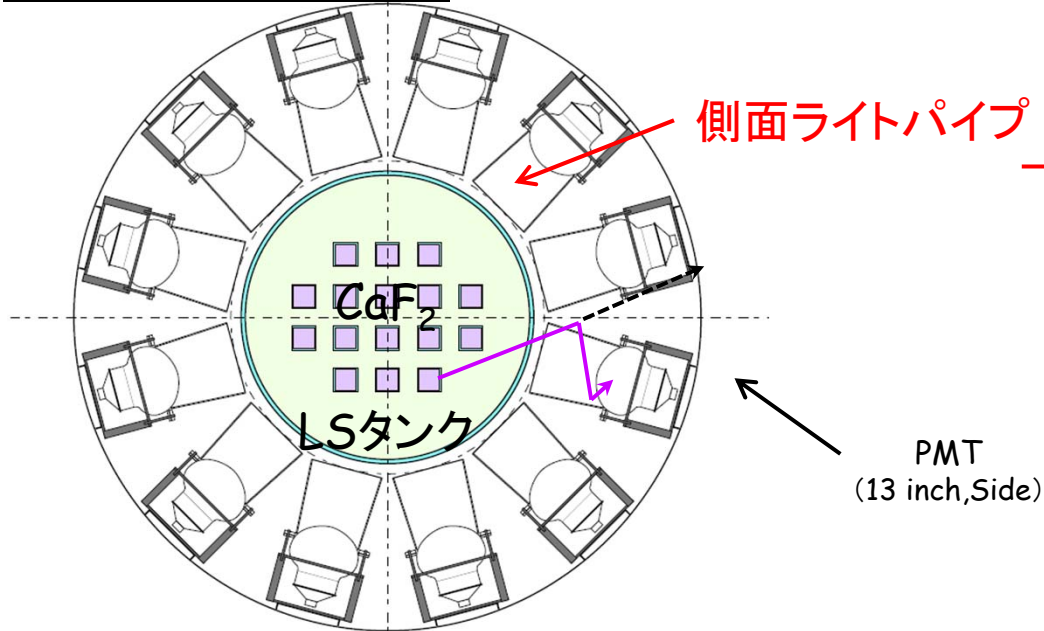
:連続崩壊事象

ライトパイプシステム

✦ 集光効率改善のため

- ✦ PMTs-シンチレータ間の光ガイド
- ✦ 反射フィルム使用：
反射率 ~93% @ 420nm

CANDLES上から見た図



ライトパイプシステム =
内面に反射フィルムを張った筒

導入前



導入後

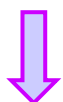


ライトパイプ

集光システム

α線ピーク位置で調査

2500ch (導入前)



×1.8

4600ch (導入後)

光電子数

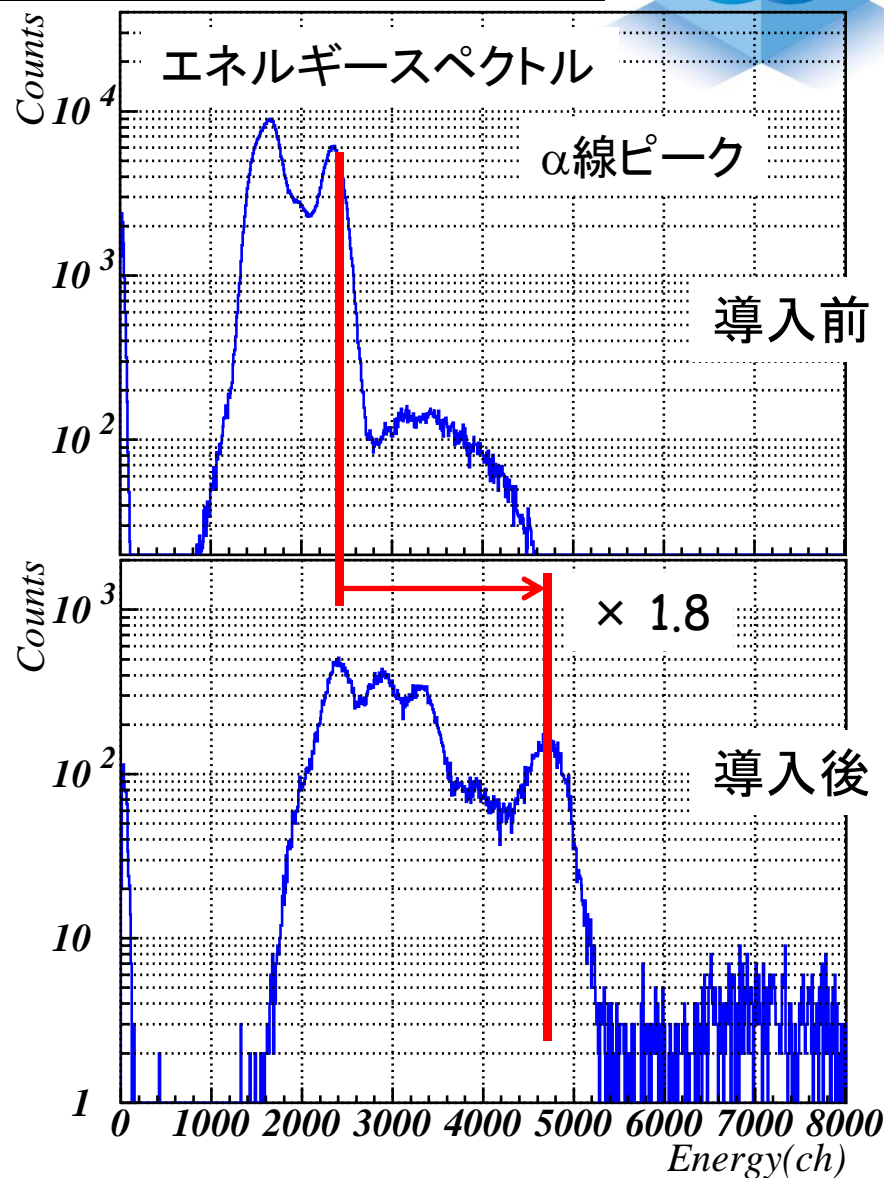
=0.9p.e./keV

~ 1 p.e./keV

=CANDLES IIIの要求値

集光効率：導入前の1.8倍に改善

梅原さおり、





CANDLES R&D



バックグラウンド低減

液体シンチレータ信号の除去 (DAQ)

:外部起源のバックグラウンド

高純度 CaF_2 (検出器)

:TI 事象、連続事象

よいエネルギー分解能 (検出器)

: $2\nu\beta\beta$ 他

位置再構成 (解析)

: ^{208}Tl 事象

CaF_2 事象の波形解析(解析)

:連続崩壊事象

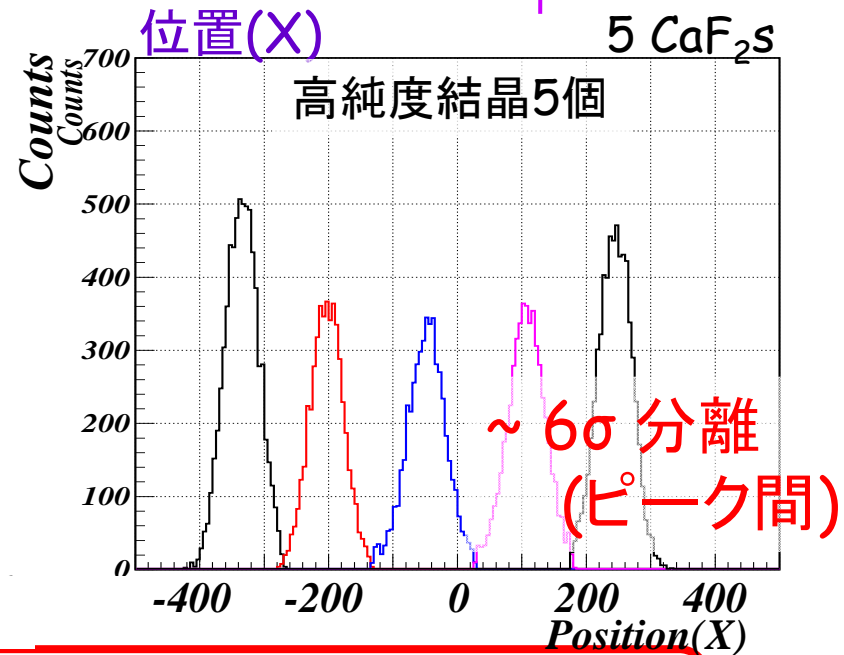
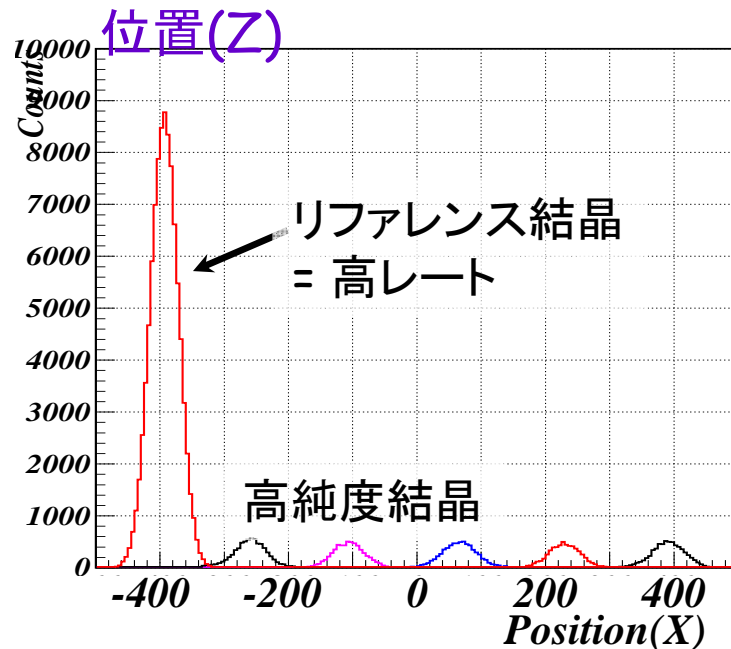
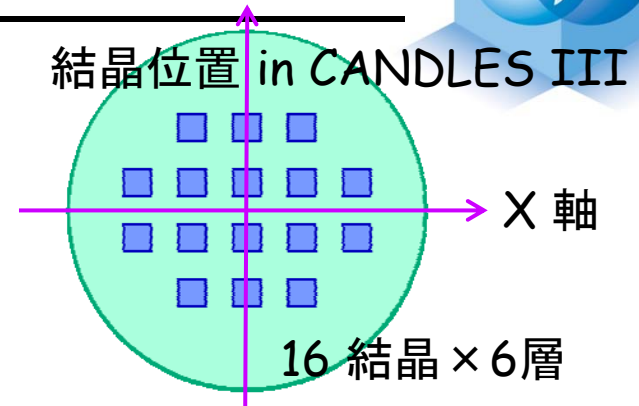


事象位置再構成



位置再構成

- CaF₂ 波形に対して再構成
- CaF₂ 位置の識別のため
- 95高純度結晶と1個のリファレンス結晶



位置再構成：CANDLES IIIでの要求は満たしている
γ線のシングルサイト、マルチサイト事象の弁別：R&D

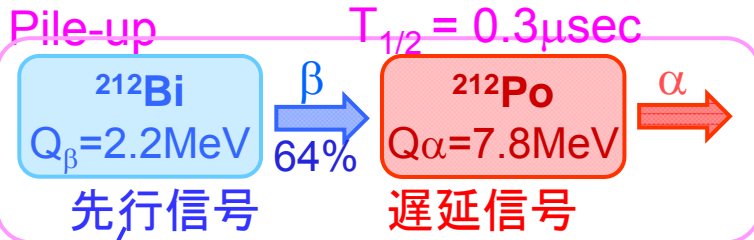
連続崩壊事象



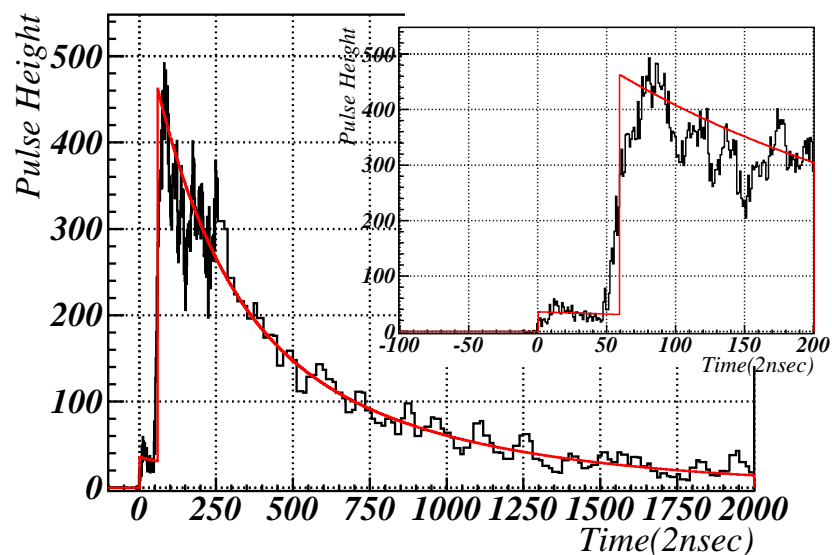
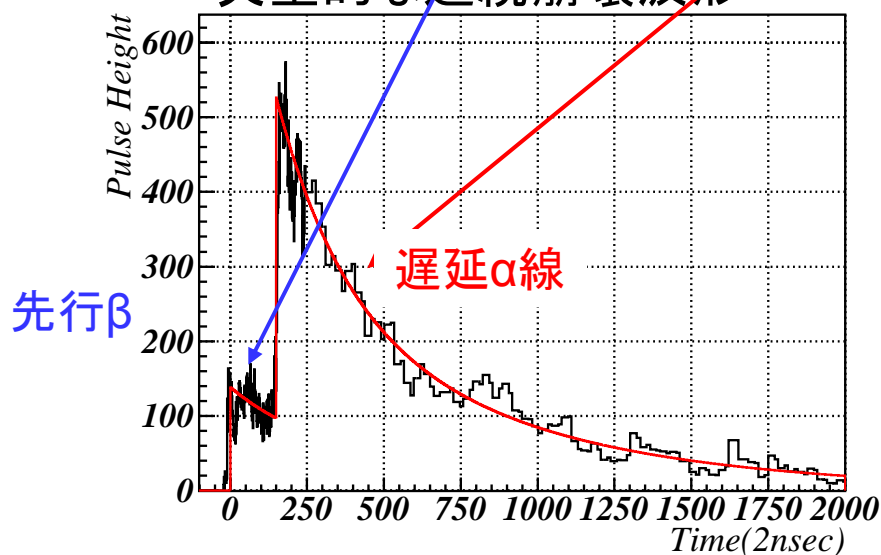
$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$ 崩壊 3MeV以上のエネルギー領域に分布

Th-Chain

^{232}Th
 $T_{1/2} = 1.1 \times 10^{10}\text{year}$



典型的な連続崩壊波形



- 2つの手法で除去する
- 1、時間差識別によって除去
 - 2、 α - γ 波形弁別によって除去

62本PMTの足し合わせ波形

極低バックグラウンド懇談会



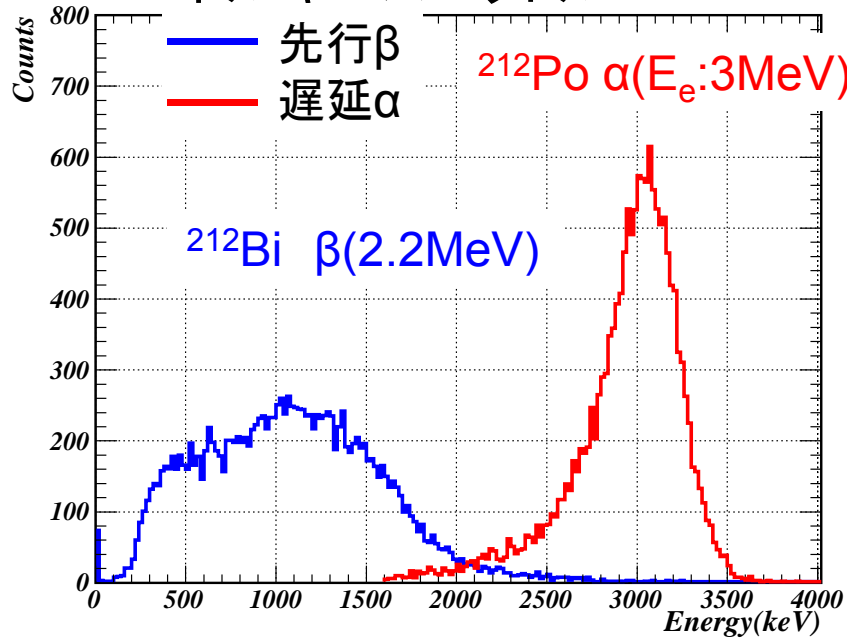
連続崩壊事象除去—時間差—



$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$ 崩壊 (半減期295nsec)

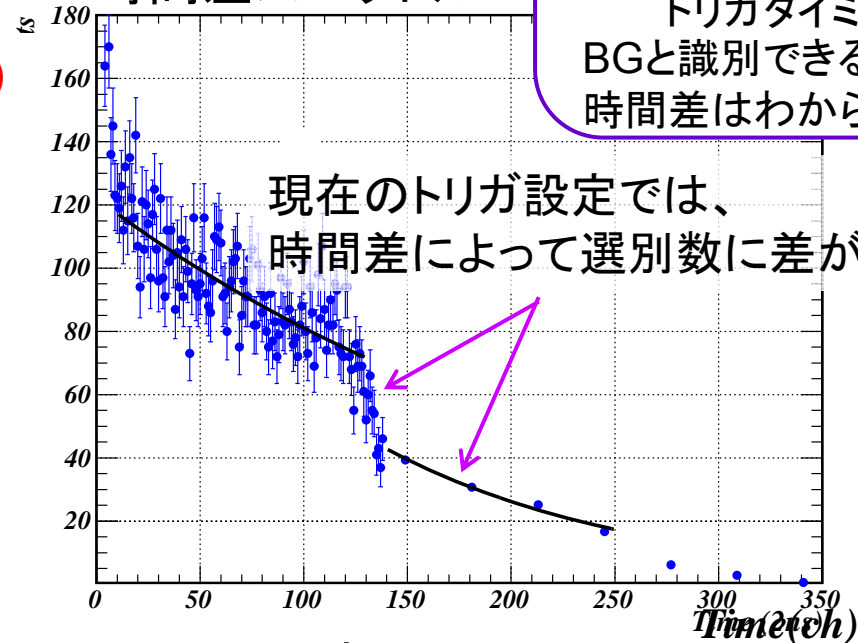
時間差解析による除去

エネルギースペクトル



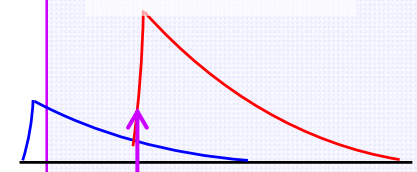
Aピークの識別可能。
(なお、 $^{214}\text{Bi} (3.3\text{MeV}) \rightarrow ^{214}\text{Po} (2.6\text{MeV})$ も含む。)

時間差スペクトル



半減期(フィット): $334 \pm 22\text{nsec}$
(前半部分)

FADCデータ



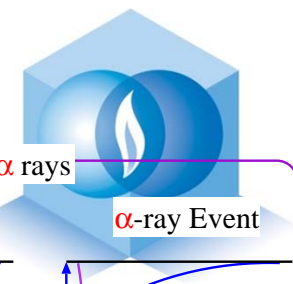
トリガタイミング

BGと識別できるが、
時間差はわからない。

- ・ ^{212}Po ピーク、 ^{212}Bi β スペクトルを確認。
- ・時間差は、 ^{212}Bi の半減期と矛盾なし。
- ・連続信号95%除去 (acceptance=99%)

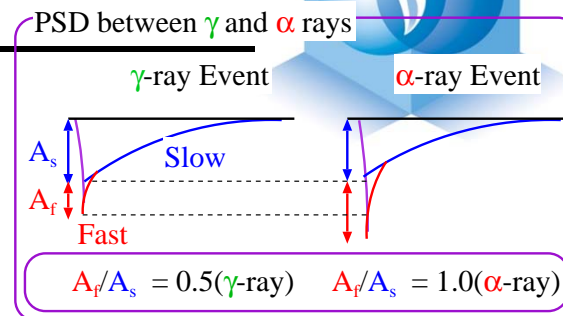


連続信号除去—α線—

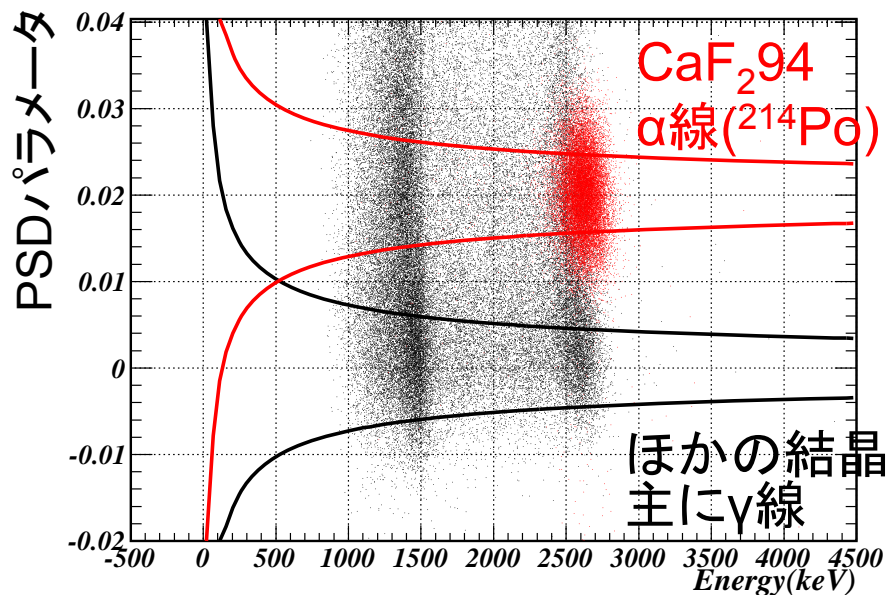


212Bi → 212Po 崩壊

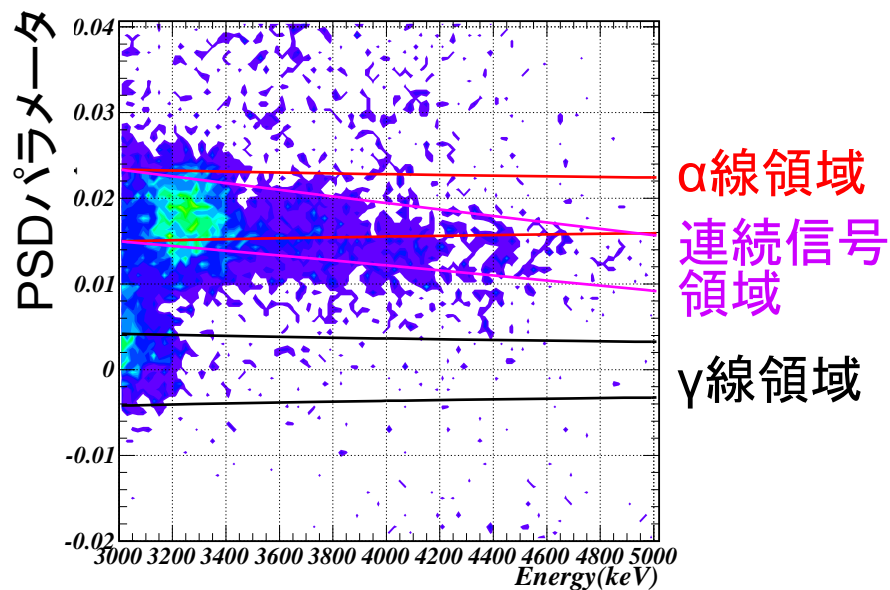
時間差が短い連続信号を、α 風波形として除去



PSDパラメータ分布



不純物が多い結晶(高エネルギー)



- ・ピンクの領域に信号を確認できる。
- ・α線除去のPSDで、連続信号除去できる。
- ・α-γ弁別による除去率、97%以上

— γ領域(1σ)
— α領域(1σ)
— 212Bi+212Po領域(1σ)



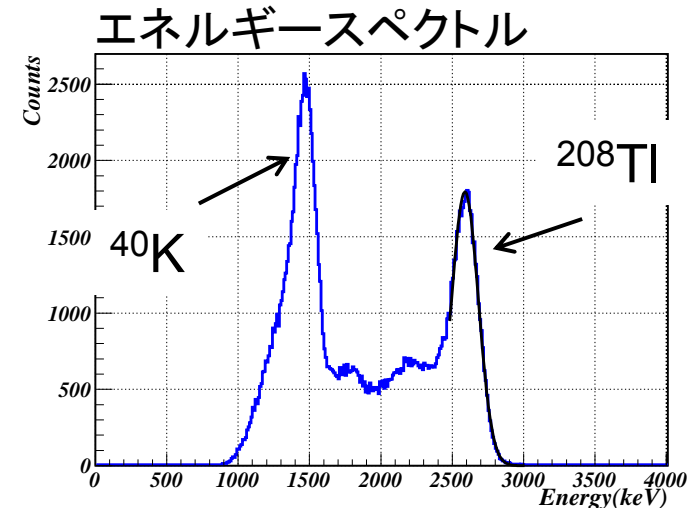
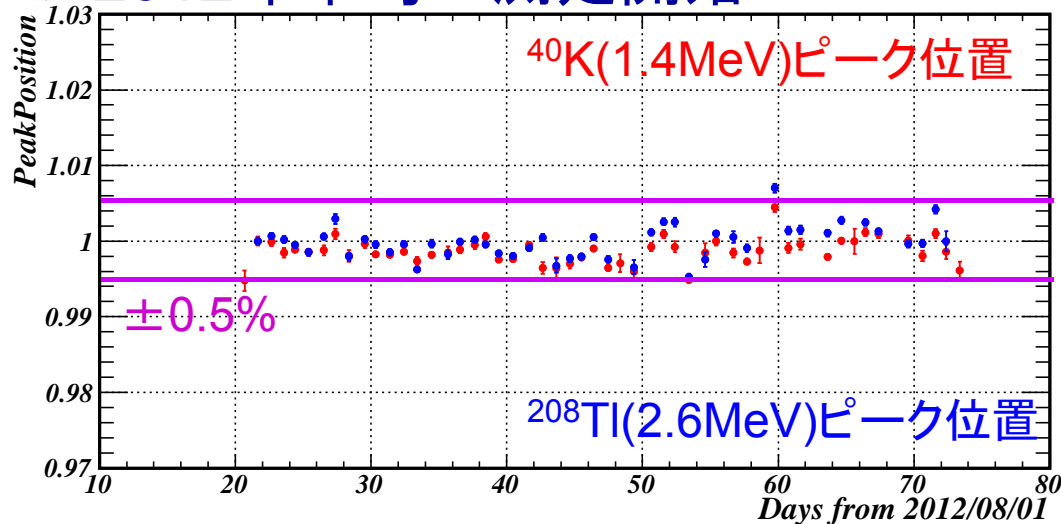
測定状況（トリガー）



測定

- 2012年8月初め PMTからの信号ケーブルを交換
- 2012年10月中旬 新トリガーモジュール導入
- 2012年12月末 測定中断、壊れたPMT交換、新DAQ導入

2012年中旬～測定開始



細かい作業(閾値変更ほか)を行いつつ測定

・安定して測定継続 測定時間 : 34日
 実測定時間 : 27日



概要



◆ CANDLES システム

= CaF_2 (pure) シンチレータ + 液体シンチレータ

◆ ^{48}Ca 二重ベータ崩壊

◆ CANDLES III システム (神岡に建設)

◆ バックグラウンド低減

◆ 測定感度

◆ 今後

◆ CANDLES IV、V

◆ ^{48}Ca 濃縮、 CaF_2 冷却

◆ まとめ



CANDLES測定感度

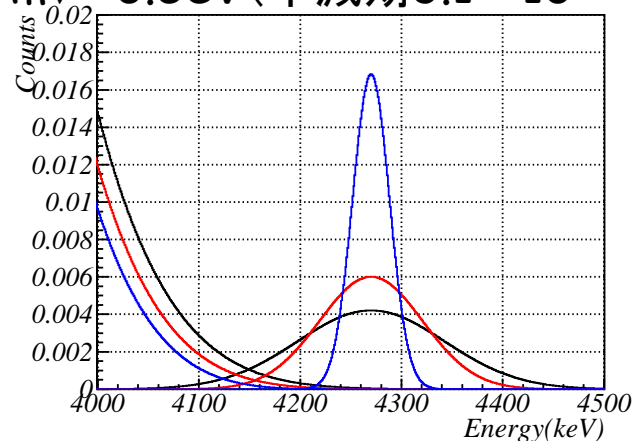


◆ 現行検出器 : CANDLES III

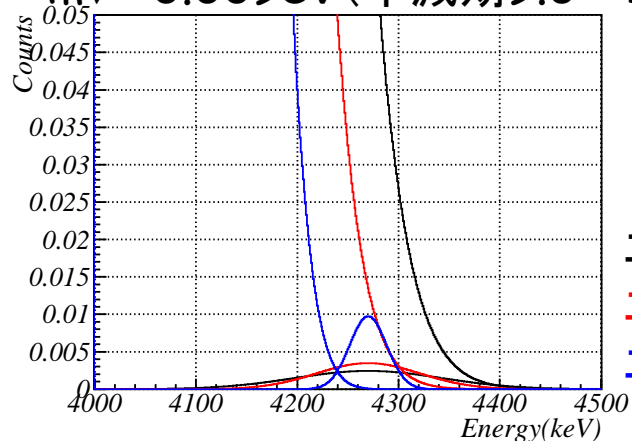
- ◆ CaF₂量 : 305kg
- ◆ エネルギー分解能 : 4%
- ◆ 測定感度 : 0.5eV

◆ 2νββ事象量とエネルギー分解能

<mv>=0.5eV(半減期 3.1×10^{24} 年)



<mv>=0.009eV(半減期 9.6×10^{27} 年)



- 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%

現行検出器0.5eVの測定感度
将来検出器0.009eVの測定感度

→エネルギー分解能4%
→エネルギー分解能1%



CANDLES測定感度



CANDLES シリーズ

	CANDLES III	CANDLES IV	CANDLES V
結晶 CaF ₂ 量(⁴⁸ Ca量)	3.2kg × 96 crystals 305kg(350g)	2% ⁴⁸ CaF ₂ 2 ton(25kg)	50% ⁴⁸ CaF ₂ 2 ton(610kg)
エネルギー分解能	(4.0%)	2.8%	1.0%(Req.)
2νββ	0.01/年	0.1	0.01
²¹² Bi, ²⁰⁸ Tl	0.26/年	~0.1	~0.01
予想されるBG量	0.27/年	<0.7 /3年	< 0.2 /9年
$\langle m_\nu \rangle$	0.5 eV	0.08	0.009
測定期間	2013年~	2017年~	
	神岡で測定 現行装置	結晶高純度化、 ~2% ⁴⁸ Ca、 CaF ₂ 冷却システム	~50% ⁴⁸ Caと、 ボロメータ &シンチレータ

現行検出器で0.5eV感度
濃縮&冷却シンチレータ で、80meV感度。
濃縮&ボロメータ で、9meV感度。

CANDLES IV : 高純度化

高純度化

CANDLES III用

: 平均17 μ Bq/kg

1/10に低減をめざす

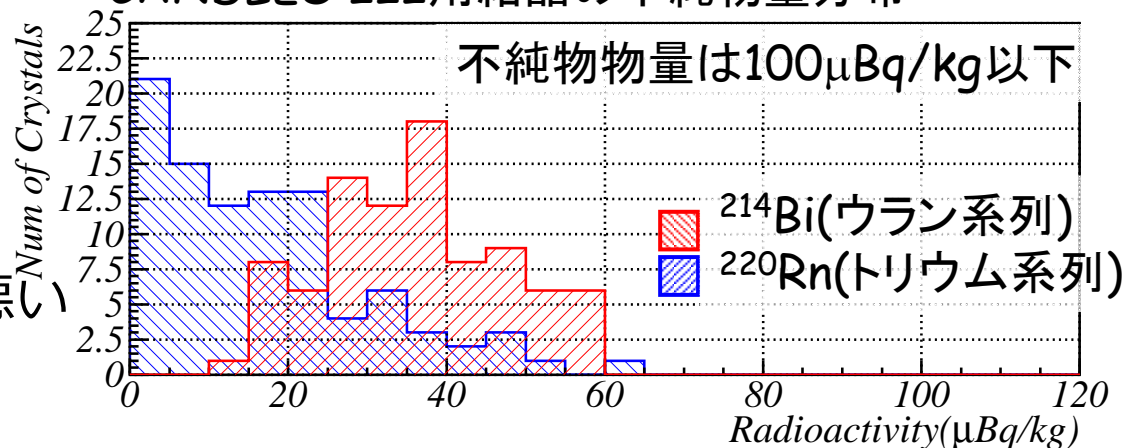
現状では歩留りが悪い

原料選定: CAN III

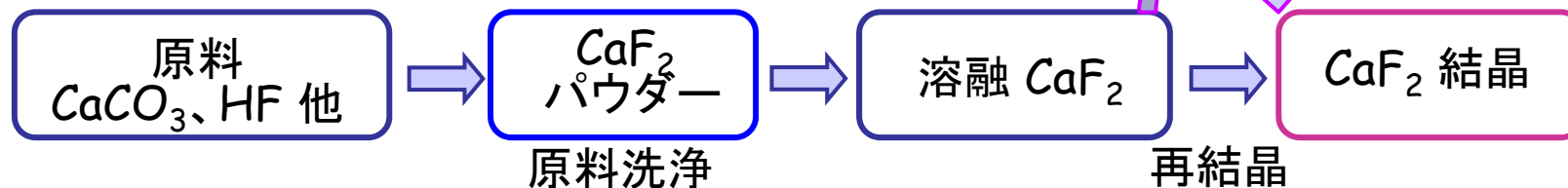
原料洗浄

再結晶

CANDLES III用結晶の不純物量分布



結晶成長過程



不純物量の低減

・高純度化過程を追加し、歩留りの改善。

バックグラウンド懇談会

CANDLES IV : ^{48}Ca 濃縮

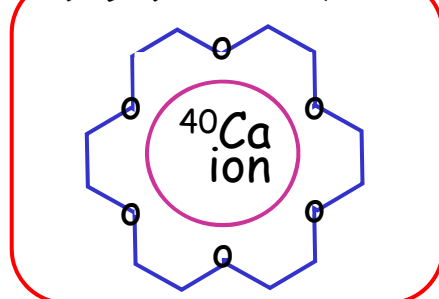
CANDLESと ^{48}Ca 濃縮

- ^{48}Ca の利点を生かすためには濃縮
- 検出器大型化→結晶入れ替え

実験セットアップ

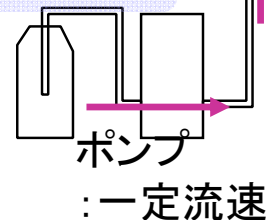
- 化学法
ブレークスルー法
= 樹脂エリアに
カルシウム溶液を泳動

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

1、Ca 溶液



1m カラム

泳動距離
= 1m
20m
200m

自然存在比 Ca

2、クラウンエーテル樹脂

^{40}Ca : 吸着

濃縮 ^{48}Ca

さおり、2013年4月23日

3、サンプリング

シンド懇談会

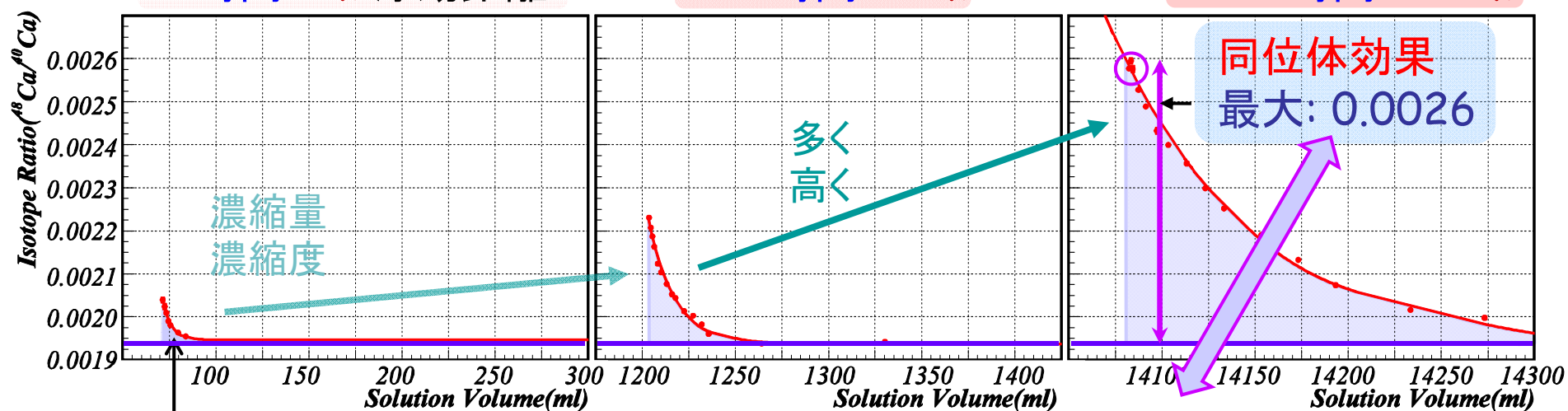
CANDLES IV : ^{48}Ca 濃縮

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量

自然同位体比
= 0.0019

濃縮効果

- ・長い泳動距離 = 多い濃縮量と高い濃縮度
- ・ ^{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





CANDLES IV : 冷却による光量変化



CaF₂

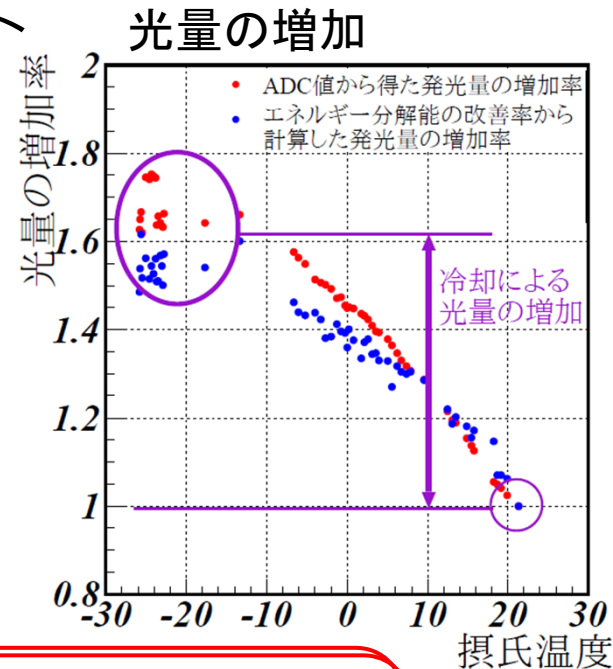
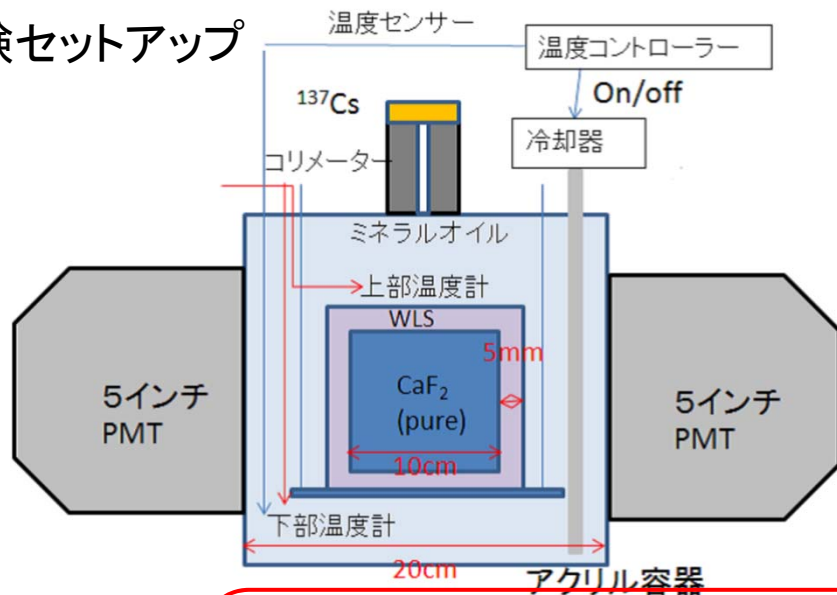
低温環境における光量増加

テスト実験

結晶+波長変換層を用いたテスト

和田真理子, 2009, 修士論文
田窪一也, 2012, 修士論文

実験セットアップ



光量増加

- ・ 20度~-20度では6割増加
- = エネルギー分解能にして25%改善
- CANDLES IIIでテスト、IVに導入予定

CANDLES V : ボロメータ

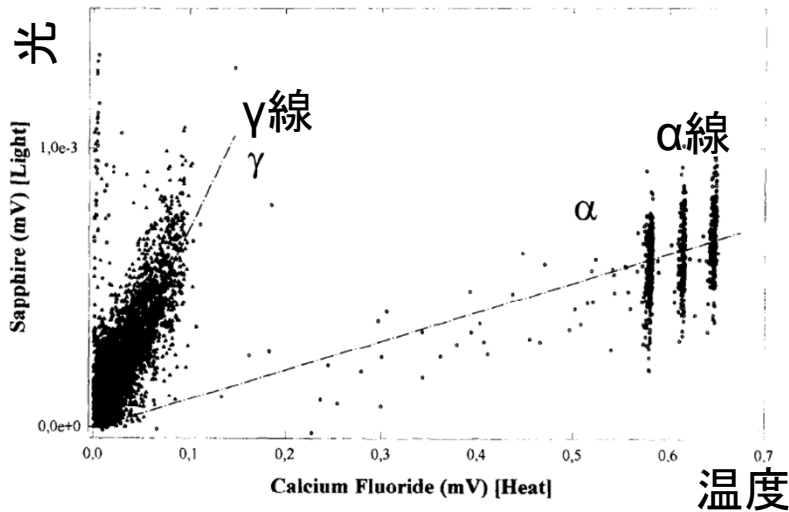
◆ 今後開発が必要

◆ 経験ある人求む

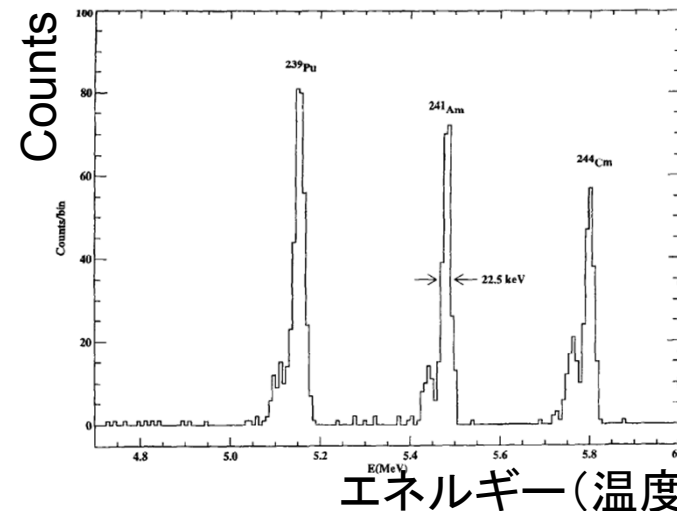
◆ 過去の実験

◆ $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ をボロメータとして使った例あり

信号の温度上昇vs光量分布



エネルギースペクトル



CaF₂ボロメータ

CaF₂(Eu)は過去に使用例あり

エネルギー分解能0.5%相当 at 5.5MeV

NIM A386(1997)453





日、極低バックグラウンド懇談会






まとめ



CANDLES III

-  各種バックグラウンド低減のための解析
-  現在、CANDLESIIIで測定を開始
-  測定感度0.5eV
-  現在測定中

CANDLES IV、CANDLES V

-  大型化 : 現状CANDLESのCaF₂の7倍体積
-  濃縮 : ⁴⁸Ca 2~50%
-  ボロメータ