

# $^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊の研究

梅原さおり

大阪大学核物理研究センター

[umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp](mailto:umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp)

研究代表者: 岸本忠史

CANDLES collaboration

大阪大学、福井大学、徳島大学、広島大学

佐賀大学、京都産業大学

# Candles



# Outline



## ✦ CANDLES III システム

✦  $^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊の測定

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

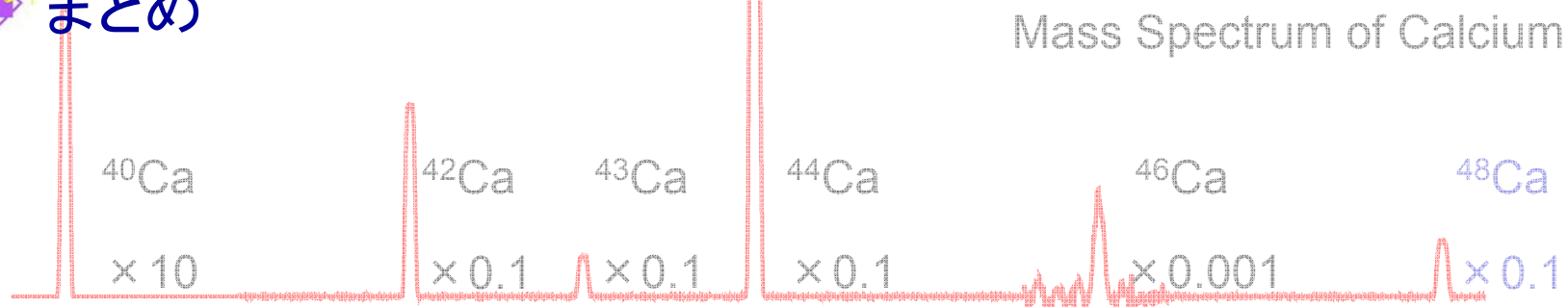
✦ CANDLES III (地下) システム

## ✦ テスト測定

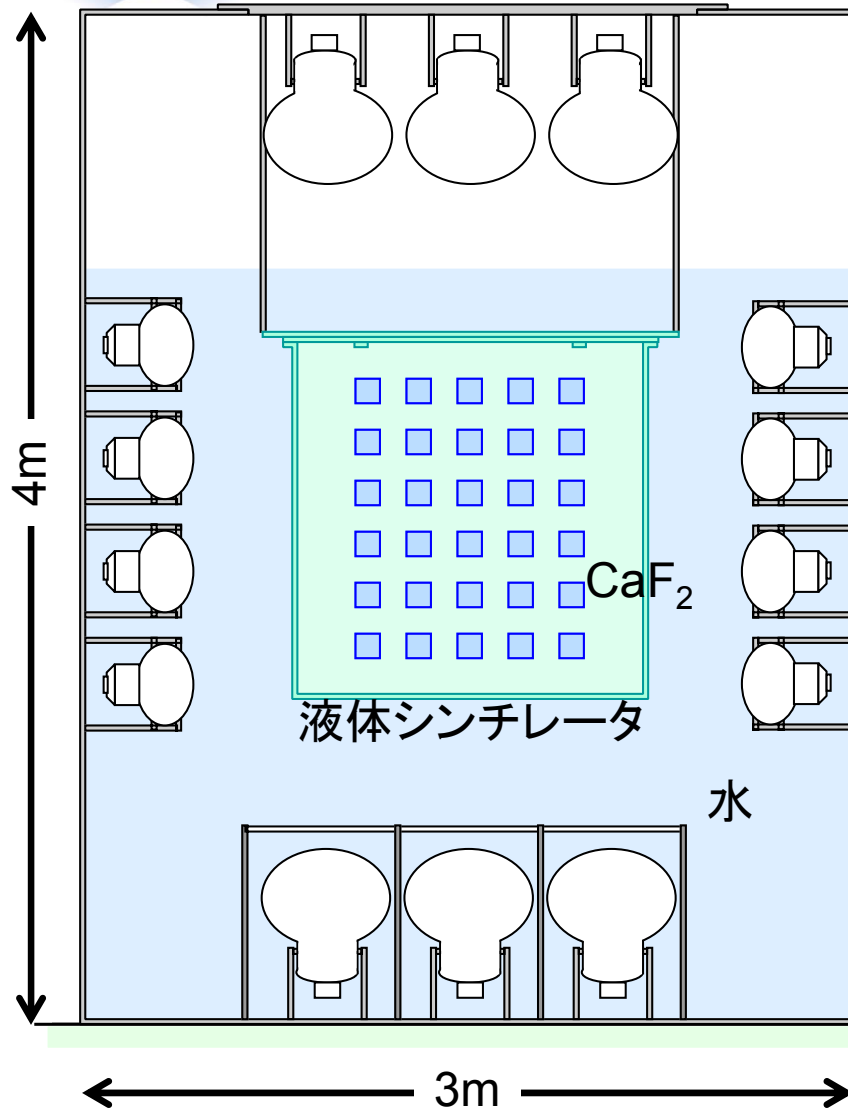
✦ 基本性能

✦ 遅延同時計数測定

## ✦ まとめ



# CANDLES III(地下、今測定)



## シンチレータ

- ✦  $\text{CaF}_2$ (pure) シンチレータ ( $\text{CaF}_2$ )  
10cm角 × 96結晶(16個 × 6段)=305kg  
(先行検出器ELE VIの46倍)
- ✦ 液体シンチレータ(LS)

## 光電子増倍管

- ✦ 13inch PMTs × 48
- ✦ 17inch PMTs × 14
- ✦ 今回の測定  
PMT coverage : 20%  
注水7割



# CANDLES III(地下、今測定)



## シンチレータ

- ✦  $\text{CaF}_2$ (pure) シンチレータ ( $\text{CaF}_2$ )  
10cm角 × 96結晶(16個 × 6段)=305kg  
(先行検出器ELE VIの46倍)
- ✦ 液体シンチレータ(LS) = 2m<sup>3</sup>

## 光電子増倍管

- ✦ 13inch PMTs × 48
- ✦ 17inch PMTs × 14

## ✦ 今回の測定

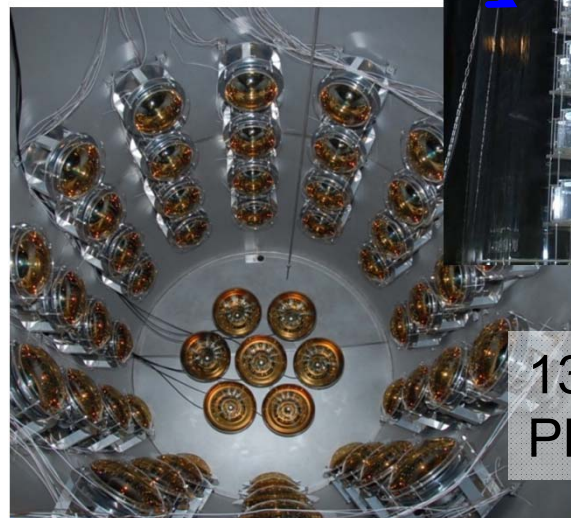
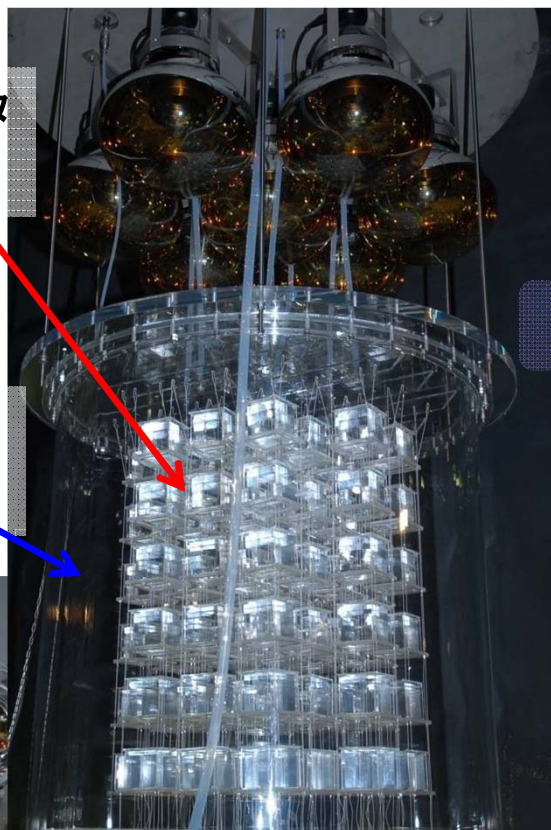
PMT coverage : 20%  
注水7割

## for CANDLES III system

- ・CANDLES用FADC  
CaF<sub>2</sub> 波形 ( $\tau \sim 1\mu\text{sec}$ )  
液体シンチレータ波形 ( $\tau \sim 10\text{nsec}$ )
- ・CaF<sub>2</sub>のためのトリガ

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>)



13inch、20inch  
PMTs



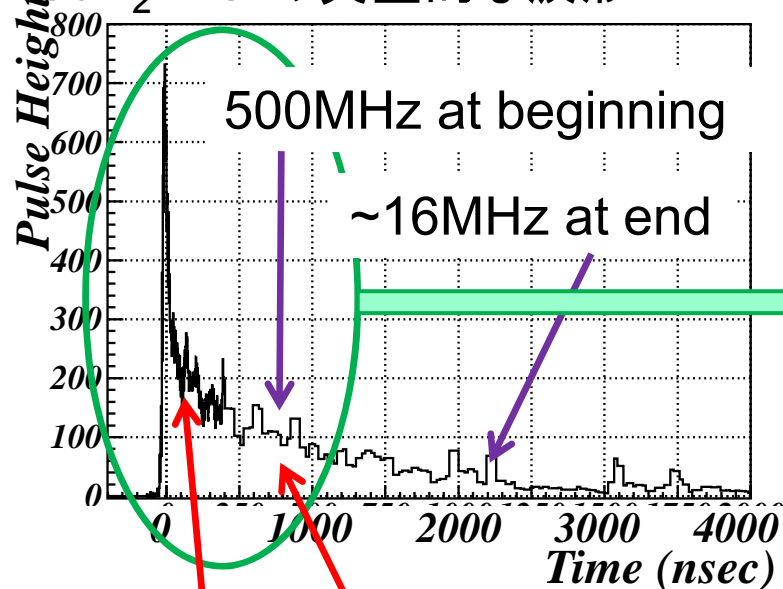
# CANDLES用FADC



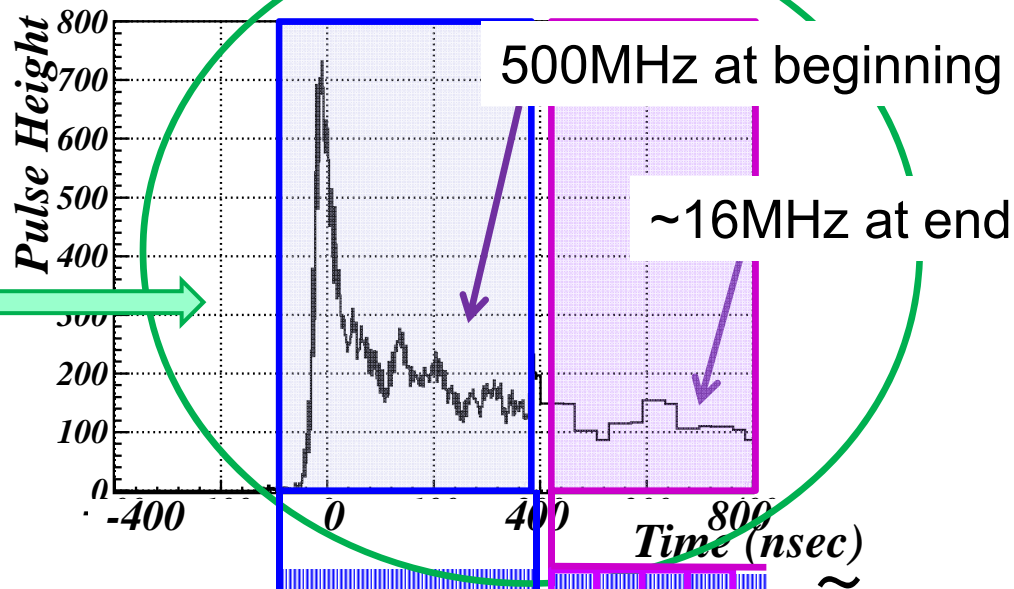
CaF<sub>2</sub>波形、LS波形 ... データサイズ縮小のため

波形の最初は高サンプリング, 終わりは低サンプリング

CaF<sub>2</sub>+LS の典型的な波形



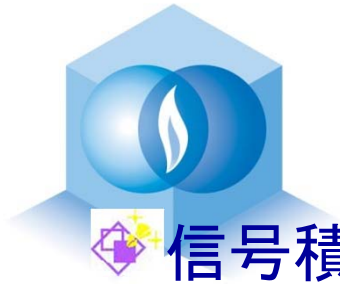
LS 波形    CaF<sub>2</sub> 波形



500MHz × 256    16MHz × 128  
(Sum at FPGA)

CaF<sub>2</sub> と 液体シンチレータの波形

- ・データサイズ縮小している状態で弁別可能
- ・500MHz × 2048data → 500MHz × 256data + 16MHz × 128data



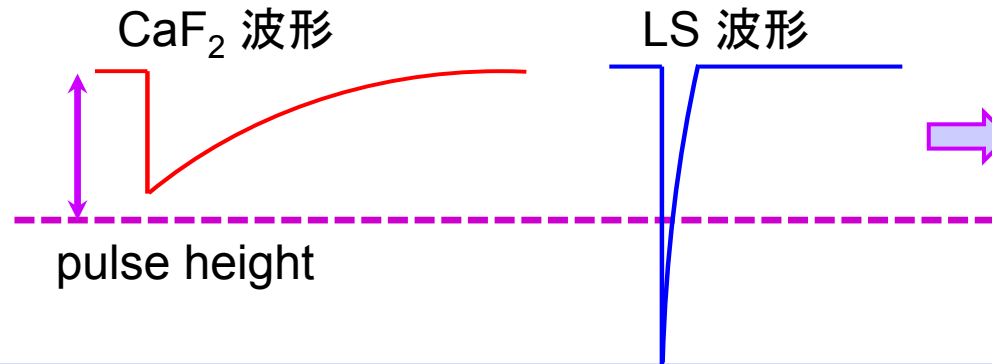
# CaF<sub>2</sub>トリガー



信号積分したものへの閾値

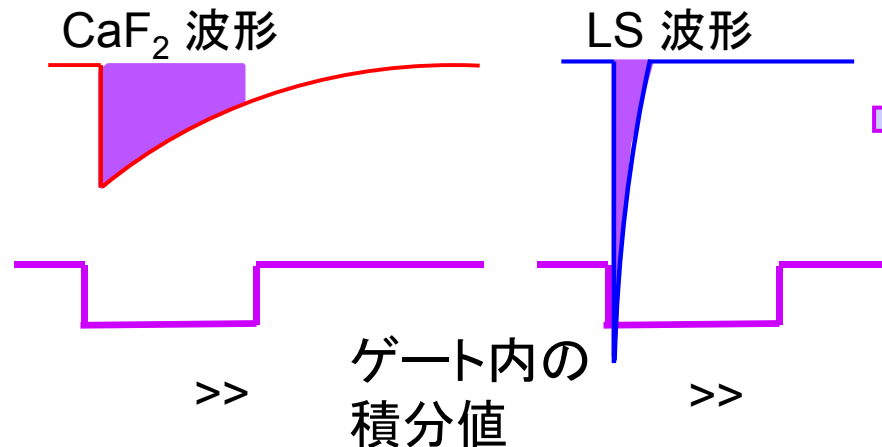
CaF<sub>2</sub> :  $\tau = 1\mu\text{sec}$ , LS :  $\tau = \text{a few } 10\text{nsec}$

波高にたいして  
感度あり



トリガー  
CaF<sub>2</sub> < LS

積分値に対して  
感度あり



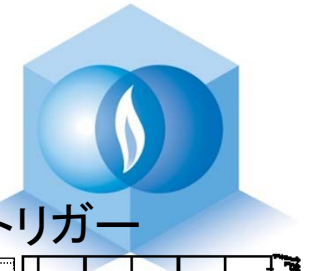
トリガー  
CaF<sub>2</sub> > LS

移動ゲート内の積分値をチェック  
= デッドタイムレストリガ





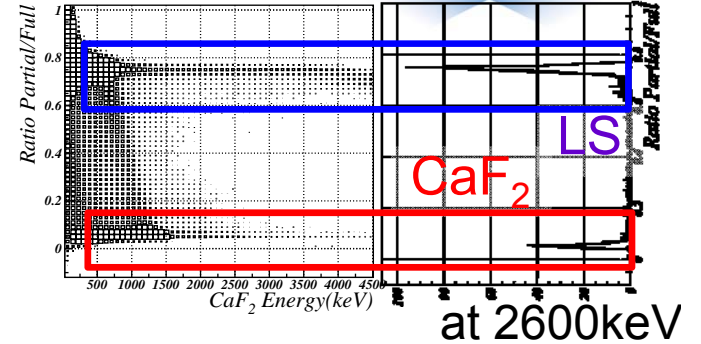
# CaF<sub>2</sub>トリガー



通常トリガー

CaF<sub>2</sub>のための選択的トリガー

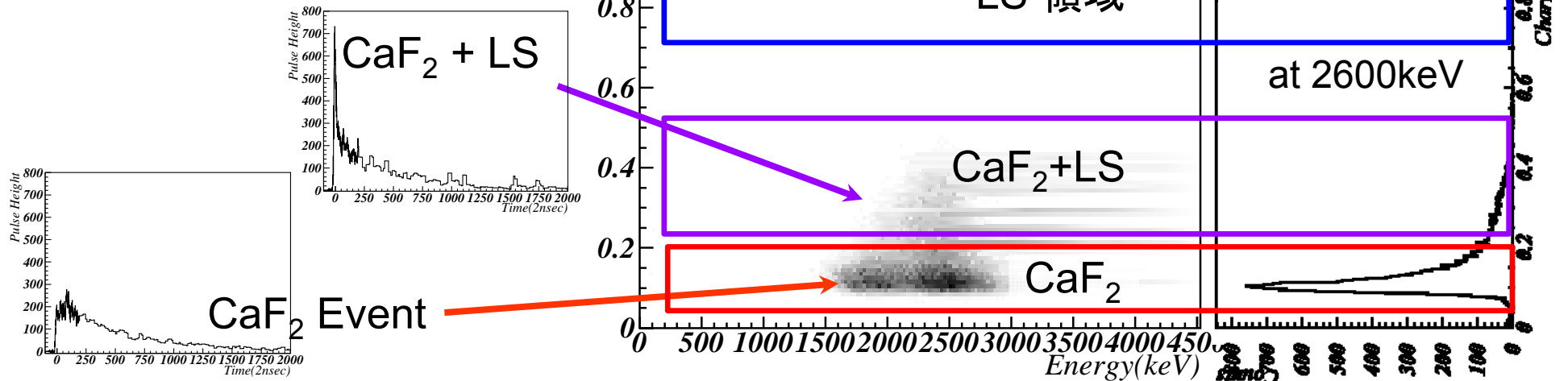
積分閾値を使用



LS イベント領域

イベントはない  
= CaF<sub>2</sub>トリガーは効果的

CaF<sub>2</sub>トリガーでのイベント分布



- CaF<sub>2</sub>トリガーによって、効率よい測定が可能



# 解析：場所再構築

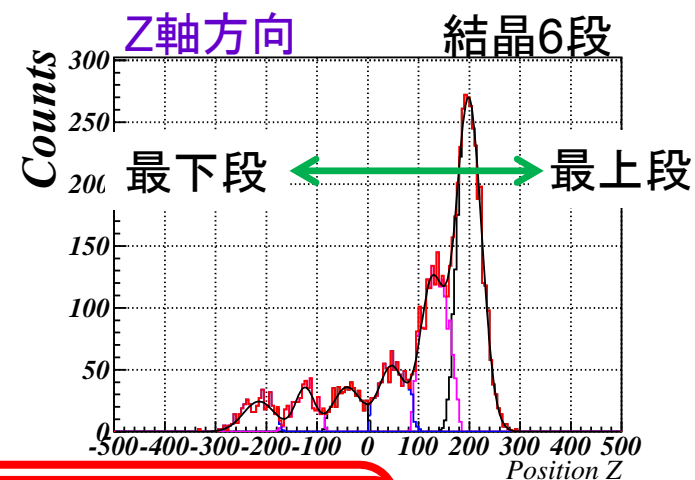
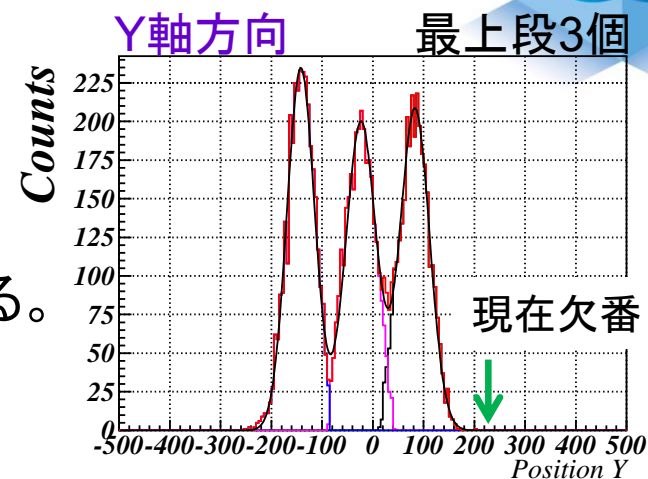
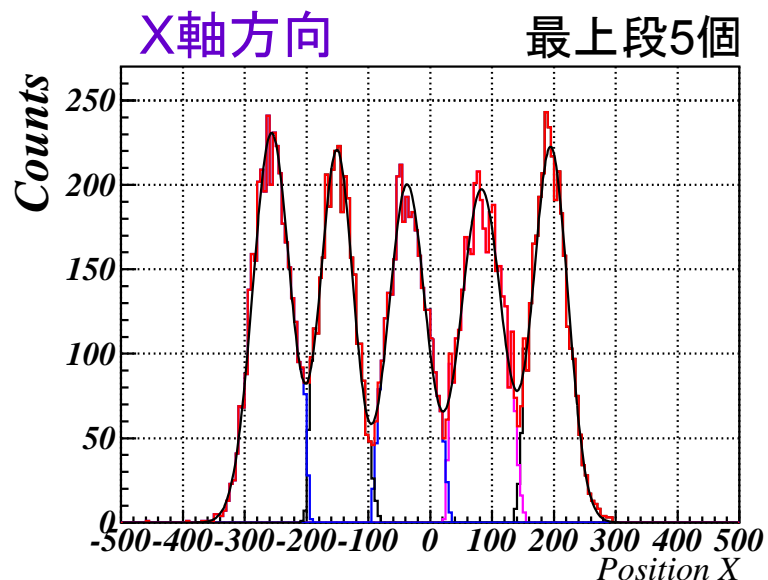


## 各段、各列ごとで結晶弁別

各PMTの光量から場所再構築

結晶番号:

すべての事象に対して事象位置を決める。



- ・それぞれの結晶位置が確認できる。
- ・隣の結晶への漏れ込みは10-20%。



# ゲイン補正

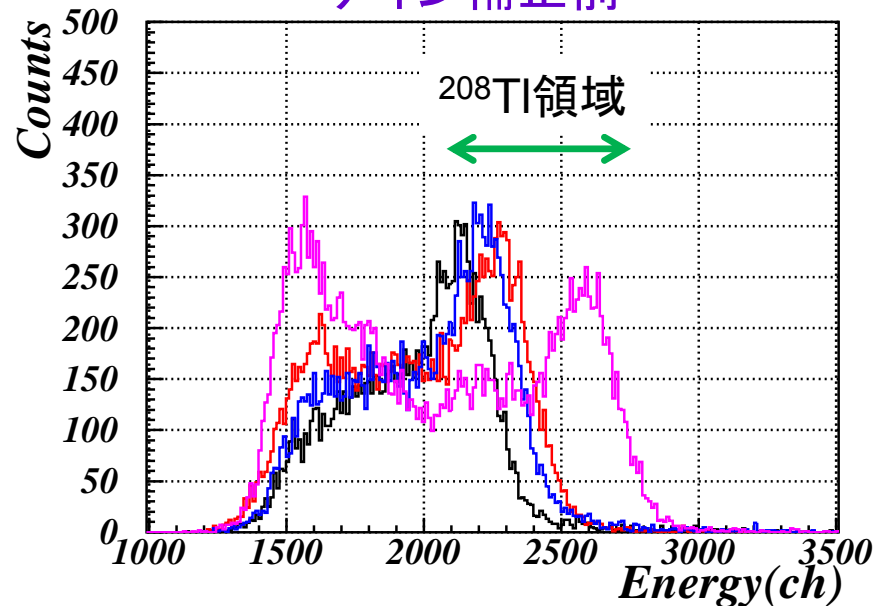
## 結晶モジュールごとのゲイン補正

結晶モジュールごとのバックグラウンドエネルギースペクトル

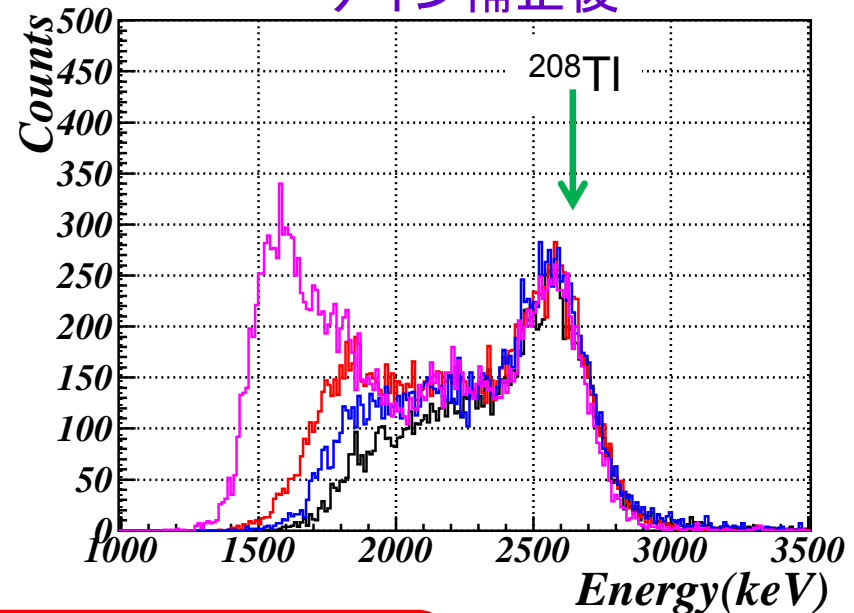
CaF<sub>2</sub>5、CaF<sub>2</sub>8、CaF<sub>2</sub>10、CaF<sub>2</sub>15のエネルギースペクトル

<sup>208</sup>Tl 2.6MeVで補正

ゲイン補正前



ゲイン補正後



・補正前のゲイン差=~20%  
→<sup>208</sup>Tl 2.6MeVで補正  
→~2~%

# テスト測定

## 測定

標準線源をもちいたエネルギー較正

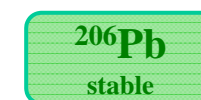
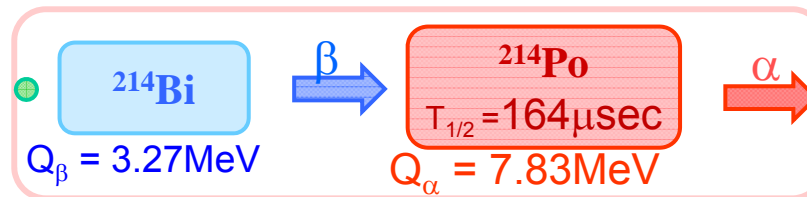
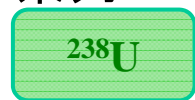
α線解析: 不純物が多い結晶を使用

$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$  (ウラン系列:  $\beta$ - $\alpha$ 崩壊)

$^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po}$  (アクチニウム系列:  $\alpha$ - $\alpha$ 崩壊)

$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$  (トリウム系列:  $\alpha$ - $\alpha$ 崩壊)

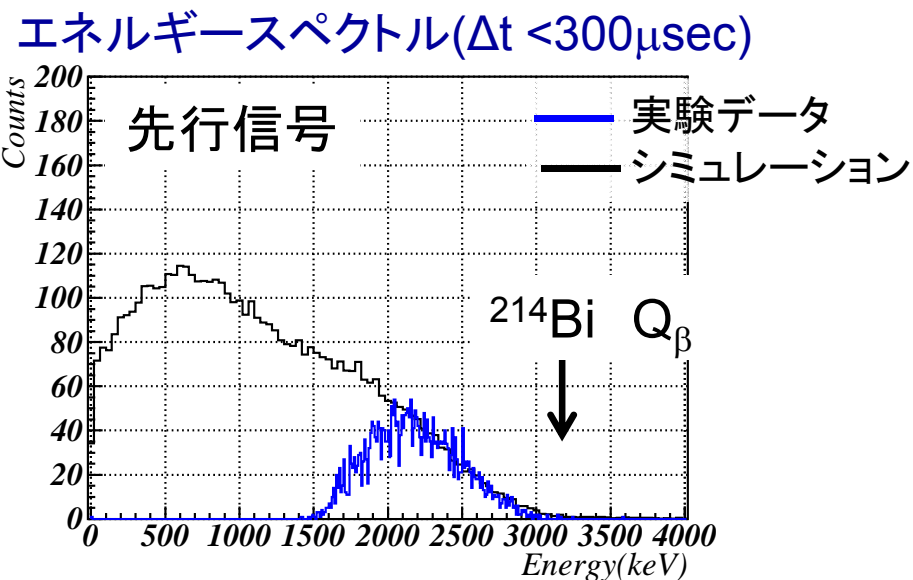
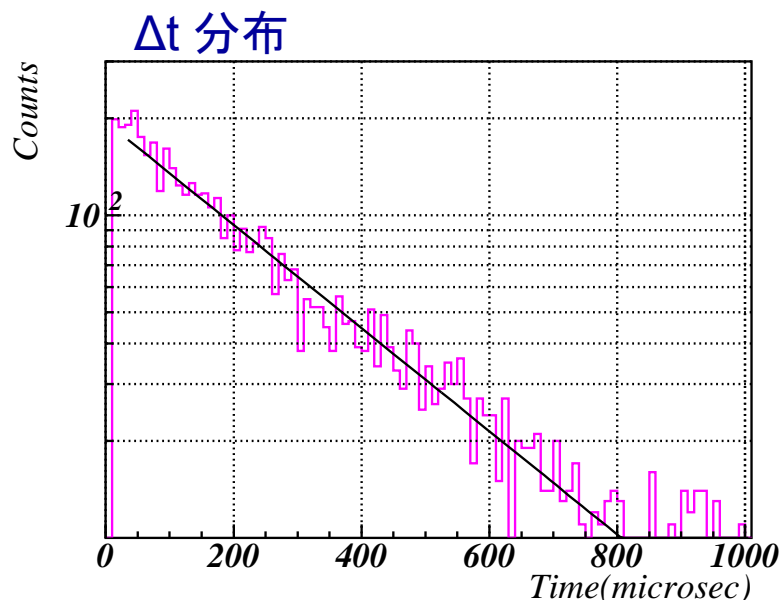
U-系列



$\beta$ - $\alpha$  崩壊

# 遅延α線解析

$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ 崩壊 ( $\beta \rightarrow \alpha$ 崩壊、ウラン系列)



半減期:  $175 \pm 10\mu\text{sec}$  ( $164\mu\text{sec}$ )

エネルギー閾値:  $\sim 1.8\text{MeV}$

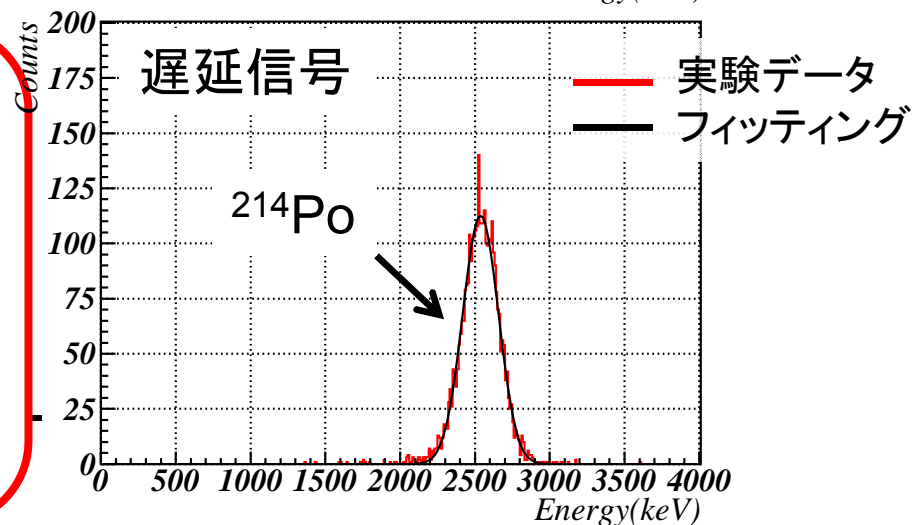
エネルギー分解能:  $\sigma = 4.3\%$

$\alpha$ ピーク位置:  $2540\text{keV}$

不純物量:  $61 \pm 9(\text{syst.})\text{mBq/kg}$

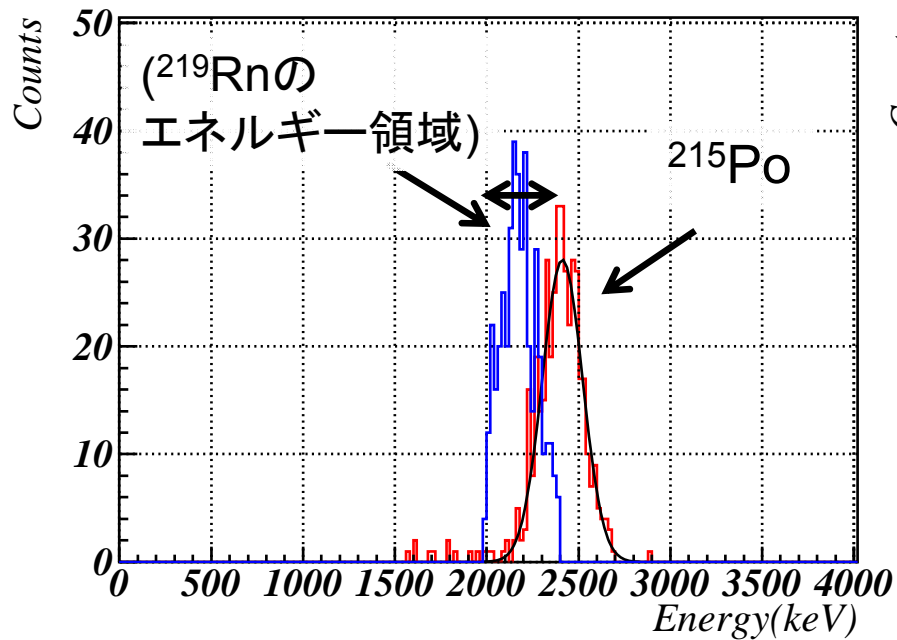
(事前測定  $65\text{mBq/kg}$ )

対象事象を選択できている



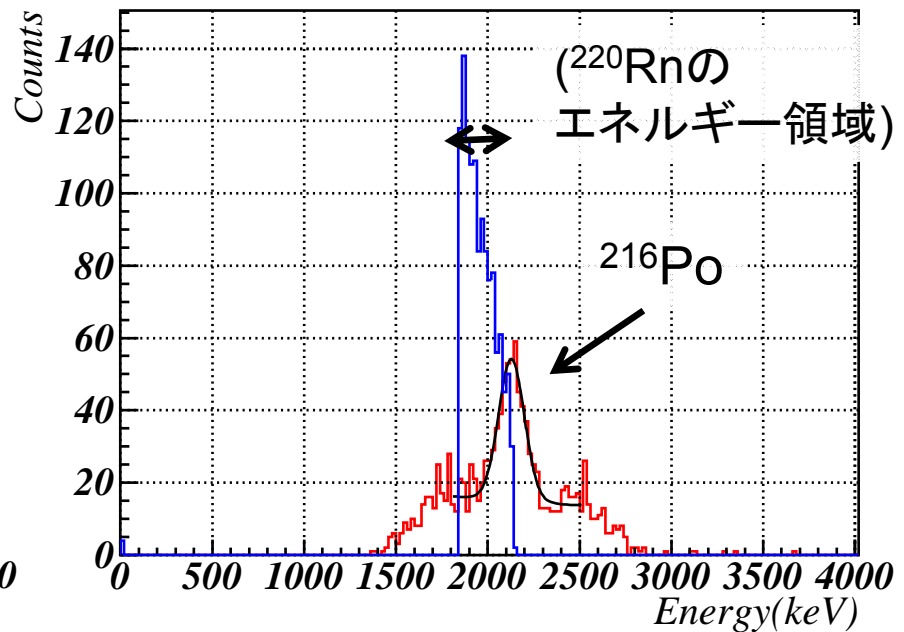
# 遅延α線スペクトル

$^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po}$ 崩壊  
( $\alpha$ - $\alpha$ 崩壊、アクチニウム系列)



エネルギー分解能 : 4.5% ( $\sigma$ )  
ピーク位置 : 2410keV  
半減期 :  $1.71 \pm 0.24$  msec

$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$ 崩壊  
( $\alpha$ - $\alpha$ 崩壊、トリウム系列)



ピーク位置 : 2130keV

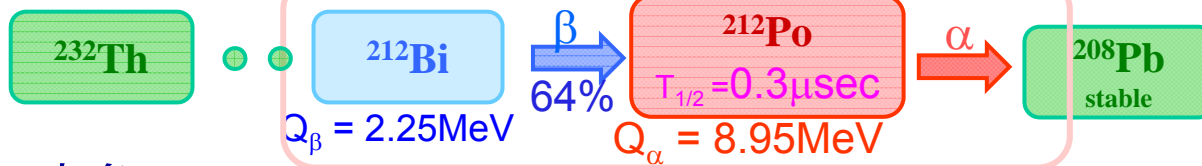
- ・事象選択は可能。
- ・ $\alpha$ 線のエネルギーが低いほど、クエンチングが大きいことを確認。

# バックグラウンド解析

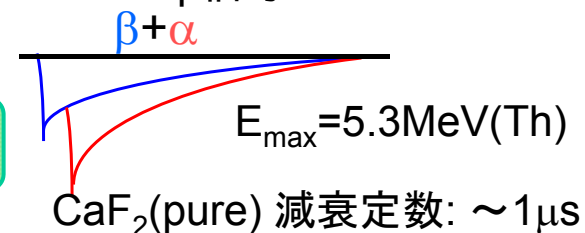
結晶内部に含まれる不純物起源のバックグラウンド事象

連続信号

Th系列

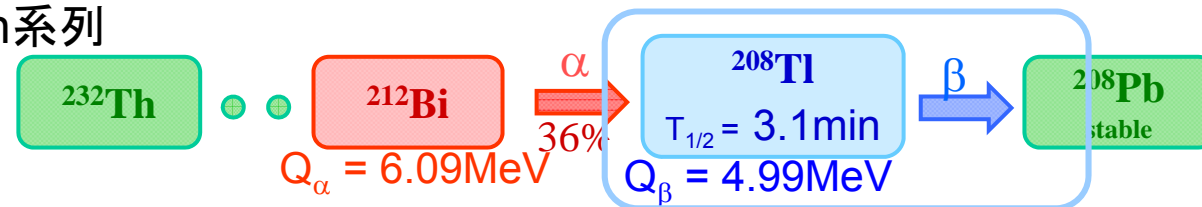


Pile-up信号



208Tl 事象

Th系列



212Bi と 208Tl ( $T_{1/2}=3\text{min}$ ) ...  
事象位置と  
時間相関から除去

バックグラウンド低減のための解析

連続信号 : 波形情報をもちいた除去

→ 簡易的に行った結果を報告

208Tl事象 : 位置と時間相関解析、 $\alpha$ 線弁別

→ 遅延同時計数による除去についてはあらためて。

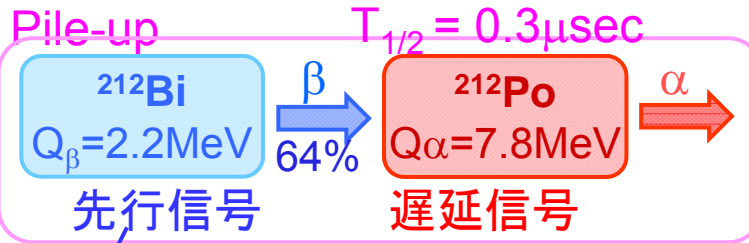
# 連続崩壊事象



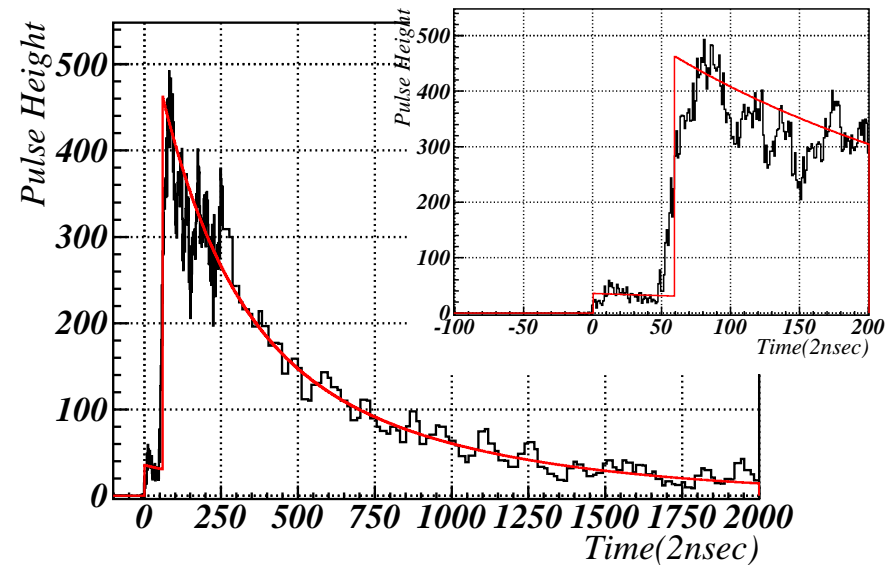
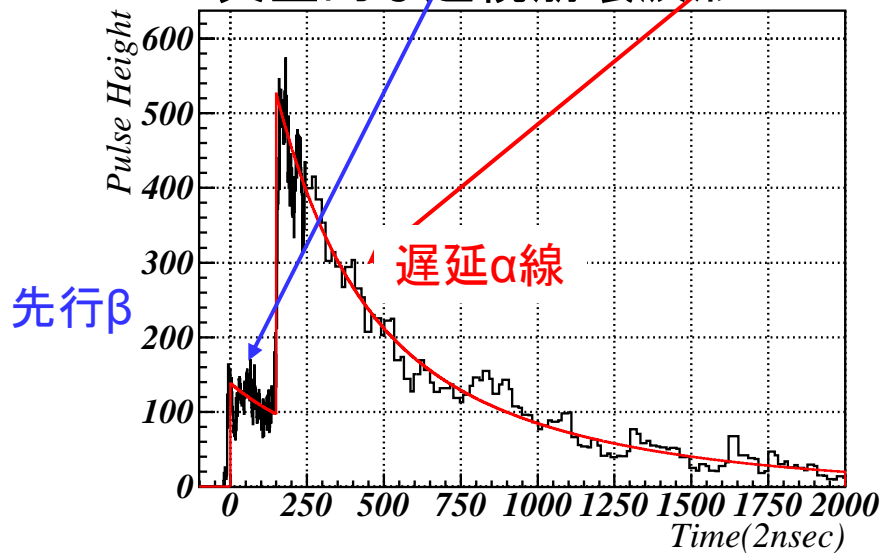
$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$  崩壊 3MeV以上のエネルギー領域に分布

Th-Chain

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



典型的な連続崩壊波形



62本PMTの足し合わせ波形





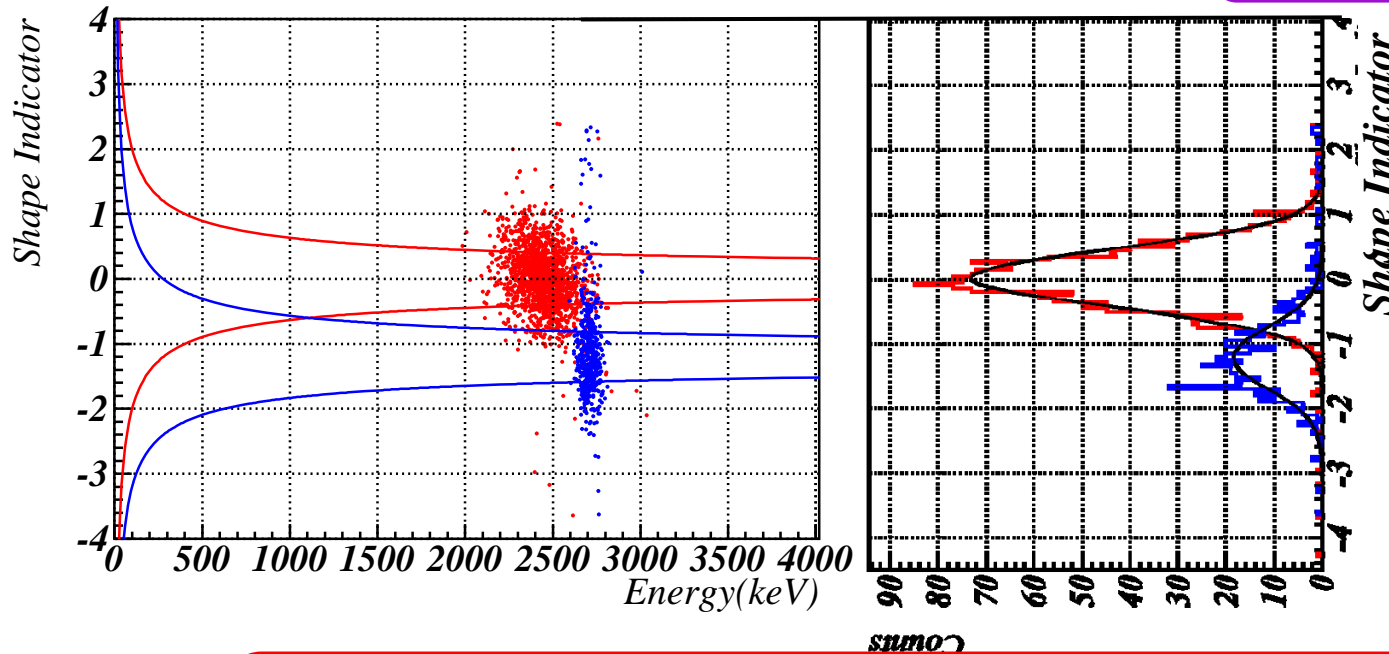
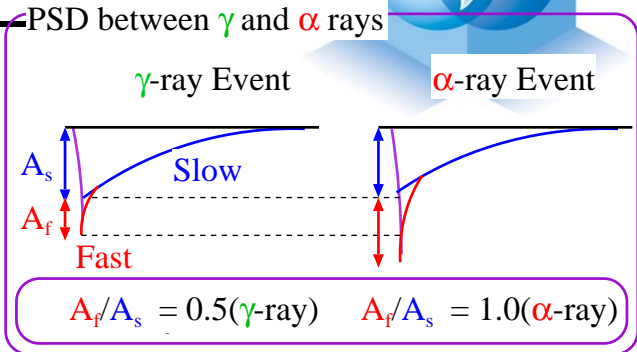
# 解析：波形弁別



## 波形弁別

α線 :  $^{214}\text{Po}$ を利用(2.5MeV)

γ線 :  $^{208}\text{Tl}$ を利用(2.6MeV)

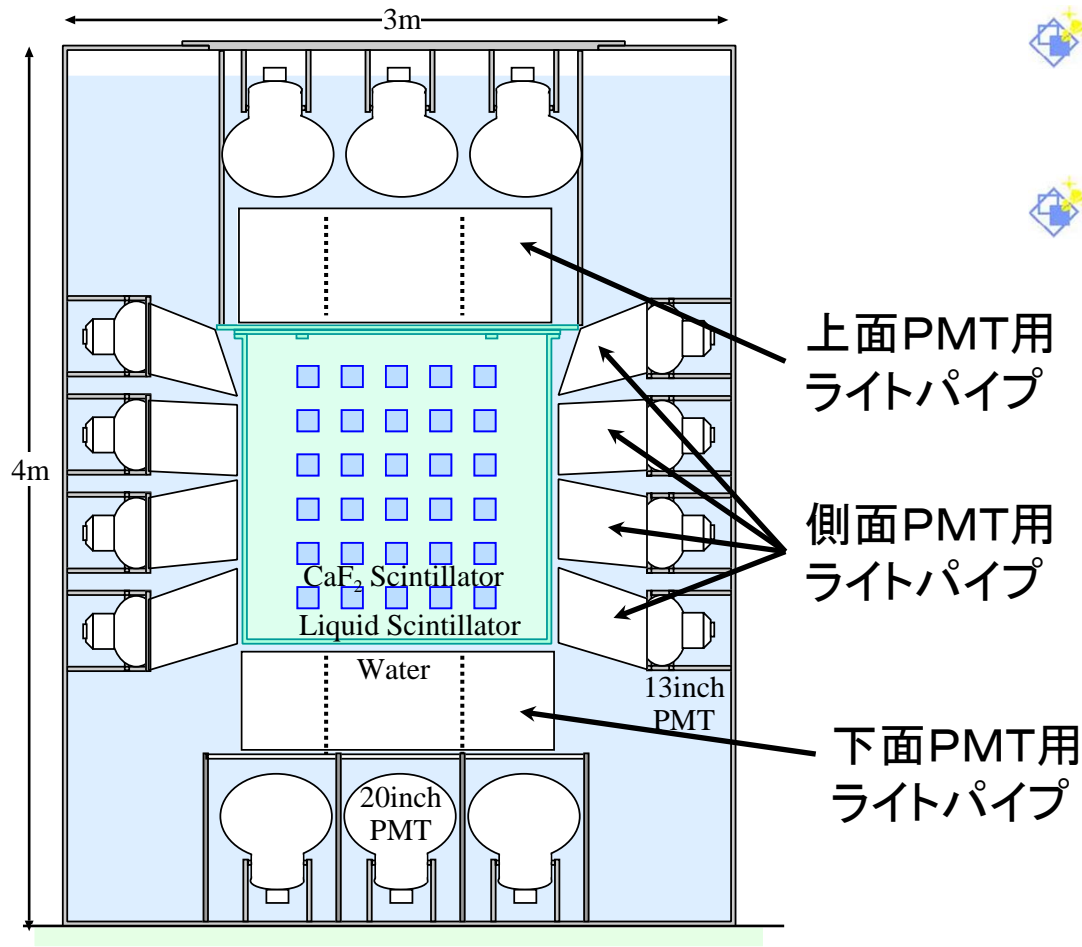


中心値 : 0 (α線)  
 -1.2 (γ線)  
 幅 : 0.42( $\sigma$ )

- ・2.4-2.7MeVで除去効率97% (γ線85%)
  - 1.7MeV ( $^{212}\text{Bi}$ ) でα弁別効率85%(γ除去効率91%)
  - 4.27MeVで( $\beta+\alpha$ )除去効率95% (γ線85%)

# 年明け早々の改造予定

## ライトパイプの導入



反射材を内側に固定した筒  
:PMT coverage ~20%~を改善

スケジュール  
年明けに増築予定

↓  
Q値でのエネルギー分解能  
4%(FWHM)達成予定。



# まとめ

---



## ◆ CANDLES

- ◆ 現在CANDLES III(地下)
- ◆ 液体シンチレータありの測定
  - ◆ 性能は想定通り

## ◆ 今後

- ◆ 年明けにCANDLES IIIの改造予定
- ◆  $^{48}\text{Ca}$ 濃縮をすすめ、いずれは結晶入れ替え
  - ◆  $\text{nat. CaF}_2(\text{pure}) \rightarrow ^{48}\text{CaF}_2(\text{pure})$

## ◆ 共同利用研究予算

- ◆ 20万円... 神岡⇔大阪、徳島他の旅費として使用