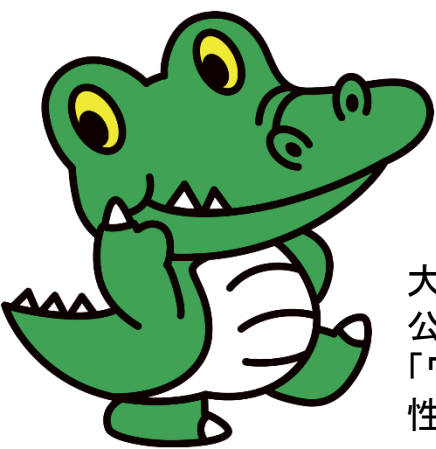


CANDLES実験における 結晶内部バックグラウンドの研究

太畑 貴綺 (阪大理)

for the CANDLES Collaboration



大阪大学
公式マスコットキャラクター
「ワニ博士」
性別:オス 誕生日:5月3日

CANDLES Collaboration

36 people
6 institutes

- **大阪大学**

岸本忠文、吉田齊、Wang Wei、Van T T Trang、Chan Wei Min、太畑貴綺、
鉄野高之介、前田剛、上原拓真、李曉龍、Temuge Batpurev、芥川一樹、
片桐誠也、四ツ永直輝

- **大阪大学 RCNP**

能町正治、味村周平、梅原さおり、飯田崇史、松岡健次

- **福井大学**

玉川洋一、小川泉、中島恭平、
野代祥平、増田旭、森下剣、
鷲野将臣、高橋成企、寺西叶、
堂角史弥、檜山太旗

- **徳島大学**

伏見賢一、森健太郎

- **大阪産業大学**

碓隆太

- **若狭湾工不研**

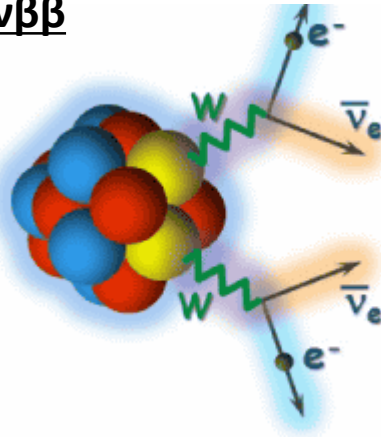
鈴木耕拓

2016/2/27



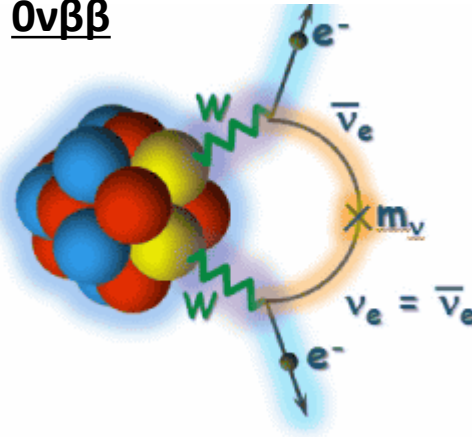
二重ベータ崩壊と観測目的

$2\nu\beta\beta$



- 標準理論内
- すでに観測済み
- $T_{1/2}: 10^{18} \sim 10^{20}$ yr

$0\nu\beta\beta$



- 標準理論を超える
- ニュートリノと反ニュートリノが同じ性質 (マヨラナ性)
- 未観測
- $T_{1/2}: > 10^{25}$ yr

つまり、二重ベータ観測の目的は？

1. 粒子数の破れの観測 (物質と反物質が転換可)
2. ニュートリノ質量の絶対値測定

世界中で競争が激化！！！！

二重ベータ崩壊観測の戦略

- $0\nu\beta\beta$ は非常に稀な事象
 - $T_{1/2} : > 10^{25} \text{ yr}$
- 以下の3つが重要となってくる
 1. 低バックグラウンド環境
 2. 高いエネルギー分解能
 3. 大量の二重ベータ崩壊核

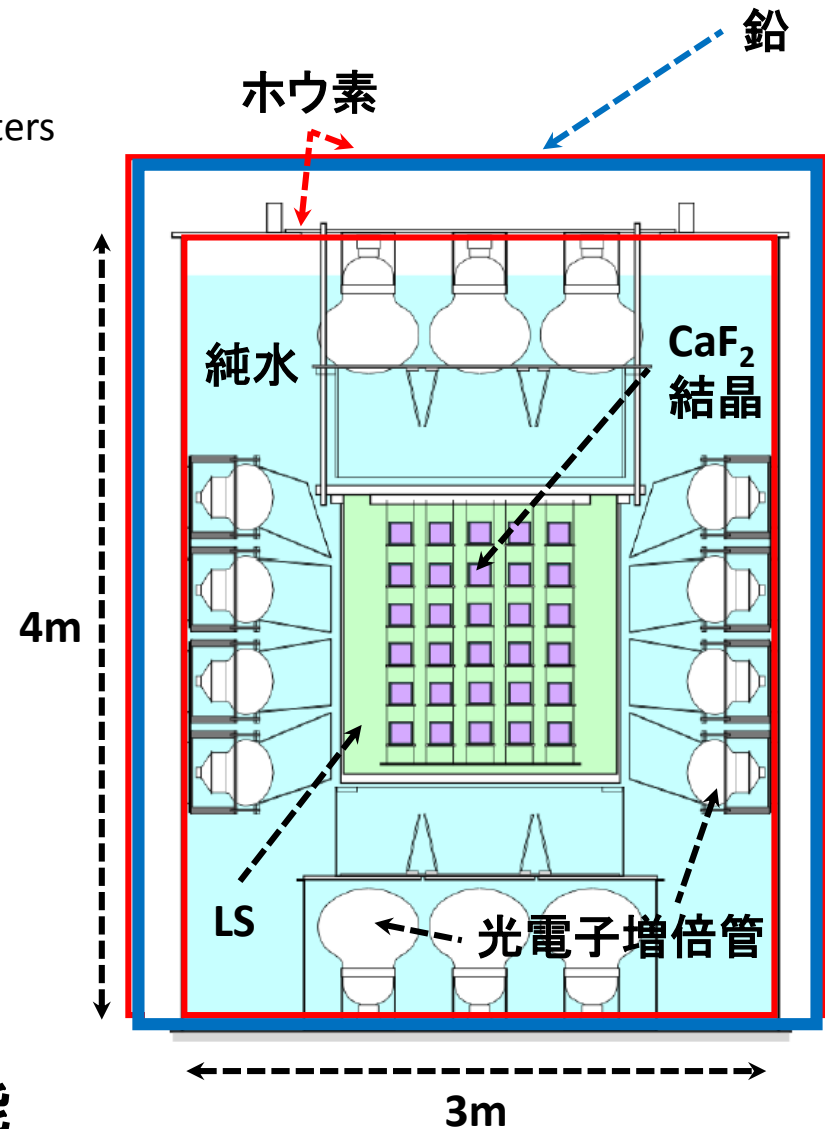


検出器概要

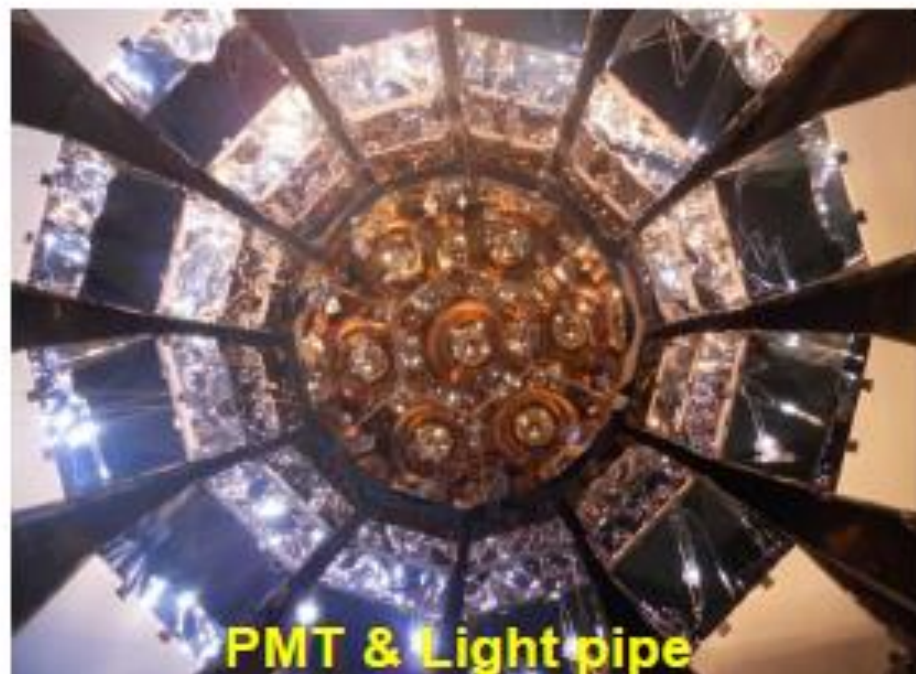
CAlcium fluoride for studies of Neutrino and Dark matters
by Low Energy Spectrometer

- 96個の CaF_2 (pure)結晶
 - ^{48}Ca 最大のQ値(4.3 MeV)
- 環境 γ 線の影響を低減
- 液体シンチレータ(LS)
 - アクティブシールド
- 鉛, ホウ素のシールド
 - 工事中
 - 外部からの高エネルギーの γ 線を遮蔽

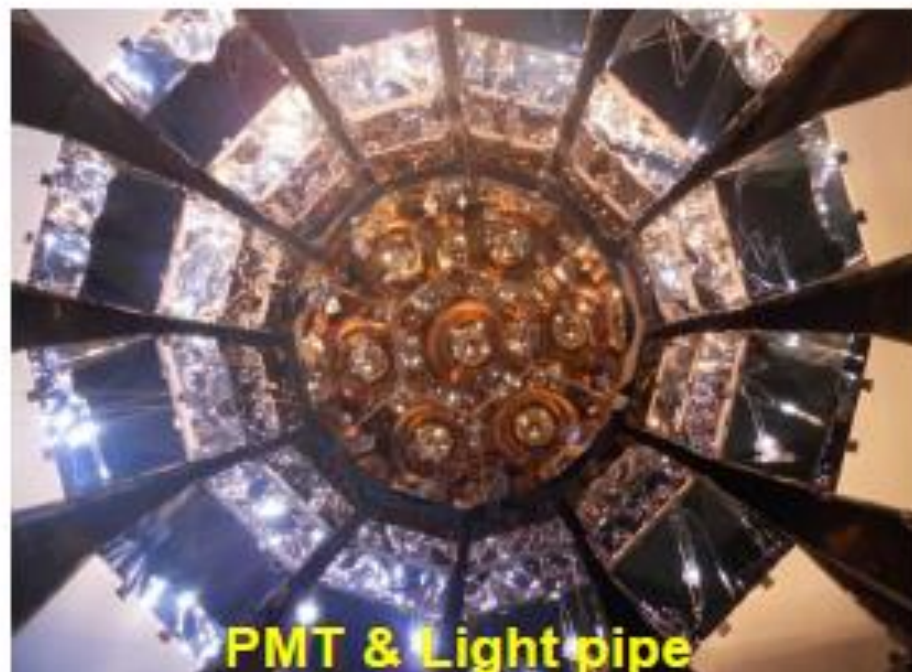
→ 外部バックグラウンドは低減可能



CANDLES検出器 断面図
@ 神岡地下1000 m



2016/2/29

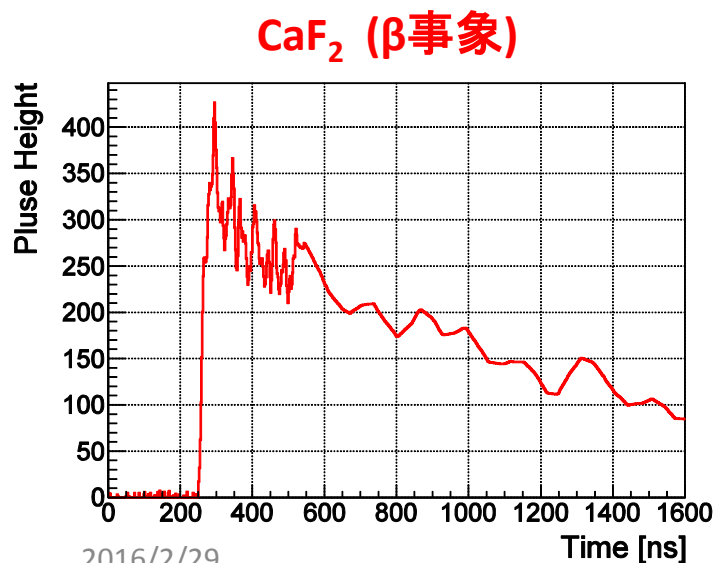


2016/2/29

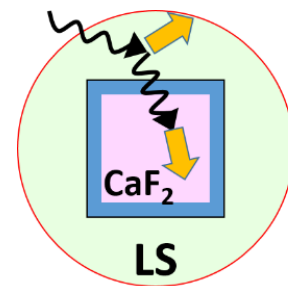
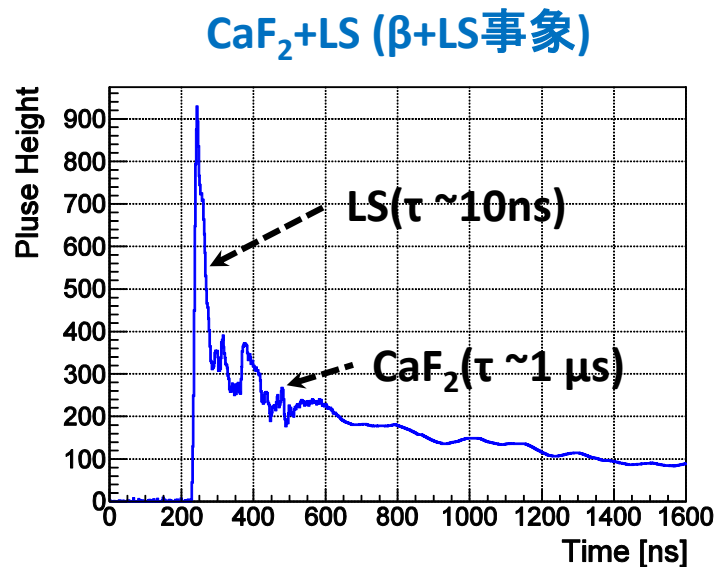


液体シンチレータのアクティブベトー

- FlashADCで波形情報を取得
 - 前半256chを2ns 後半を36nsでサンプリング
- CaF_2 とLSの波形は時定数が異なる
 - CaF_2 : $\sim 1 \mu\text{s}$, LS: $\sim 10\text{ns}$
- 時定数の差で CaF_2 事象を選択できる



2016/2/29



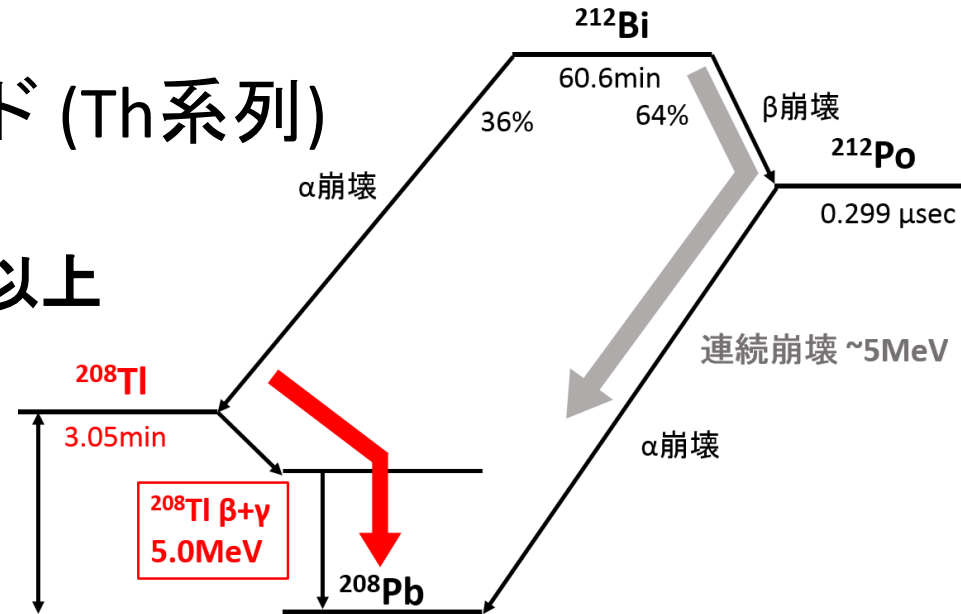
バックグラウンド候補

1. 結晶内部バックグラウンド (Th系列)

- ^{212}Bi - ^{212}Po
 - 波形解析によって90%以上除去可能

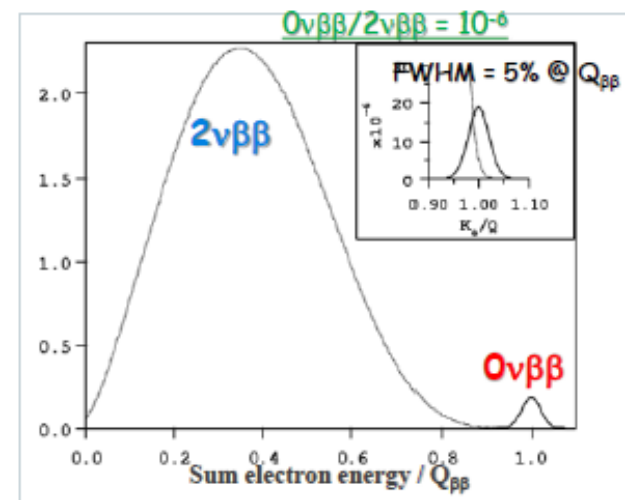
- ^{208}Tl のベータ崩壊

- 現在の除去率: ~60%
- 除去方法: 親核 ^{212}Bi α 線 検出 $\rightarrow$ 後続の事象をベト
- 親核と同一の結晶を12分間ベト

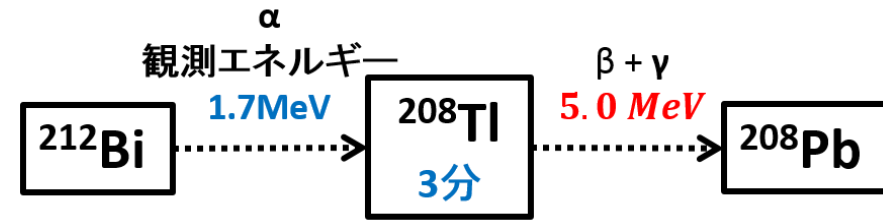


2. $2\nu\beta\beta$ 事象

- エネルギー分解能の改善



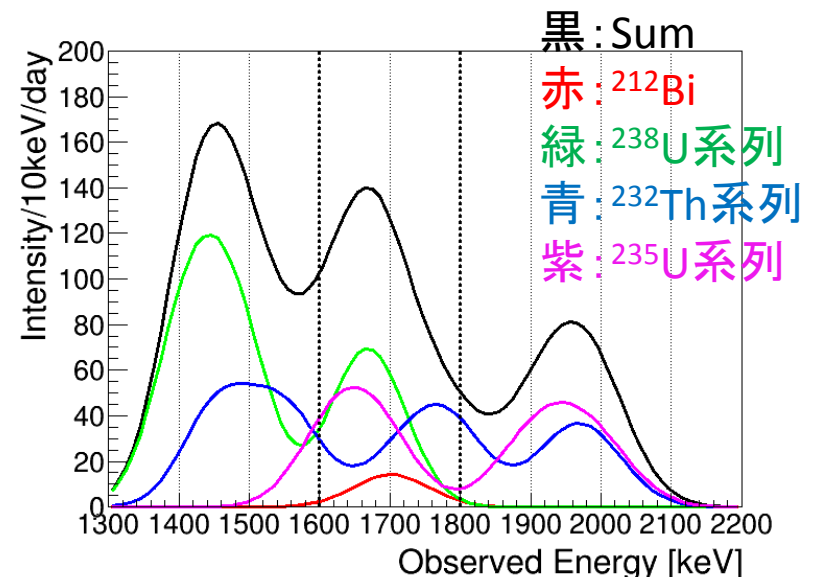
^{208}Tl のベータ崩壊



- 親核 ^{212}Bi α 線のエネルギー領域には偶発事象が存在
 - 偶発事象: $\beta + \text{LS}$ 事象 (例えば ^{40}K の γ 線)、他の α 事象
- 後続の事象をベトーによってデッドタイムが生じる
 - $0\nu\beta\beta$ の検出効率が低下

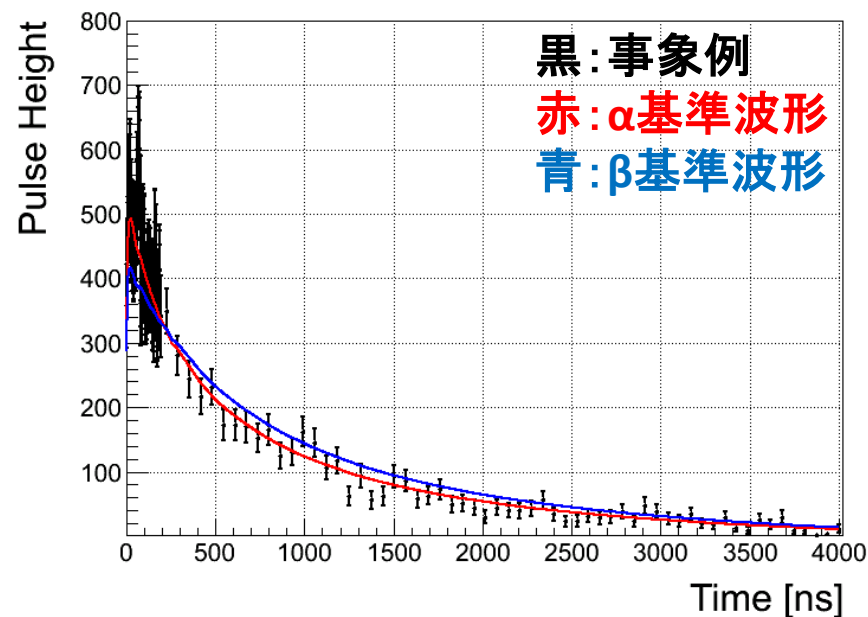
改善時に要求されることは...

- α 線検出効率向上
 - > 90%
- 偶発事象のしみ込み低減、
- $0\nu\beta\beta$ 検出効率の向上
 - > 90%



波形弁別法 (Pulse Shape Discrimination)

- 現在の手法
- 取得データから α 線、 β 線、LS事象を集め、基準波形を作成
- イベントごとに基準波形をフィットし、カイ二乗の値を計算
- α 事象らしさ: χ^2_{α}
- β 事象らしさ: χ^2_{β}
- β +LS事象らしさ: $\chi^2_{\beta+LS}$

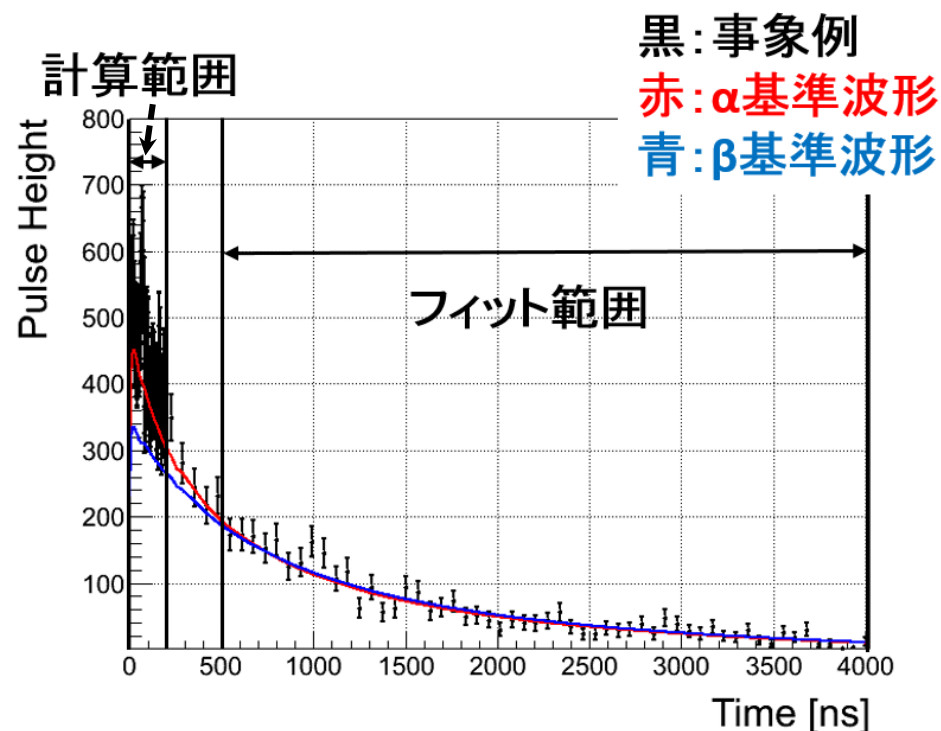


波形弁別法 (Pulse Shape Discrimination)

- α , β 波形の差をより強調できる方法に変更
 - フィット方法: 波形後半のみで最適化
 - カイ二乗計算: 波形前半のみで基準波形との差を計算

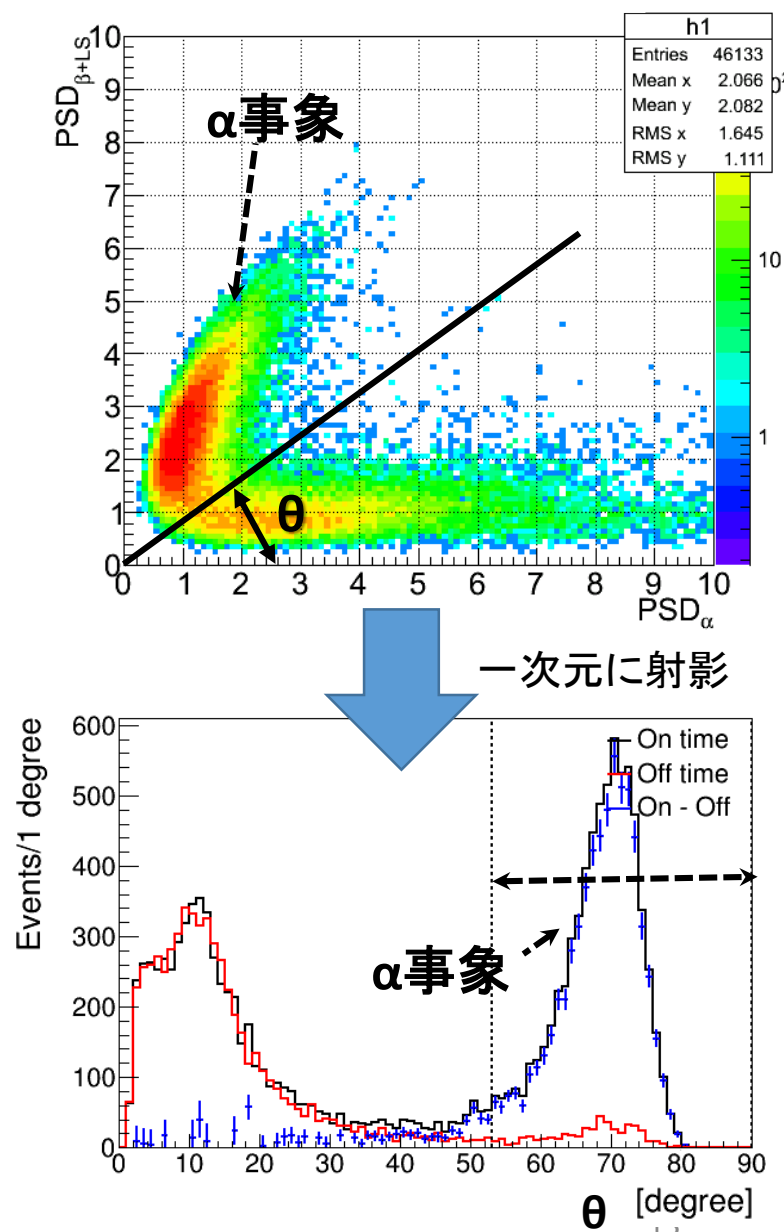
- α 事象らしさ: PSD_α
- β 事象らしさ: PSD_β
- β +LS事象らしさ: $\text{PSD}_{\beta+\text{LS}}$

→ BG除去について評価



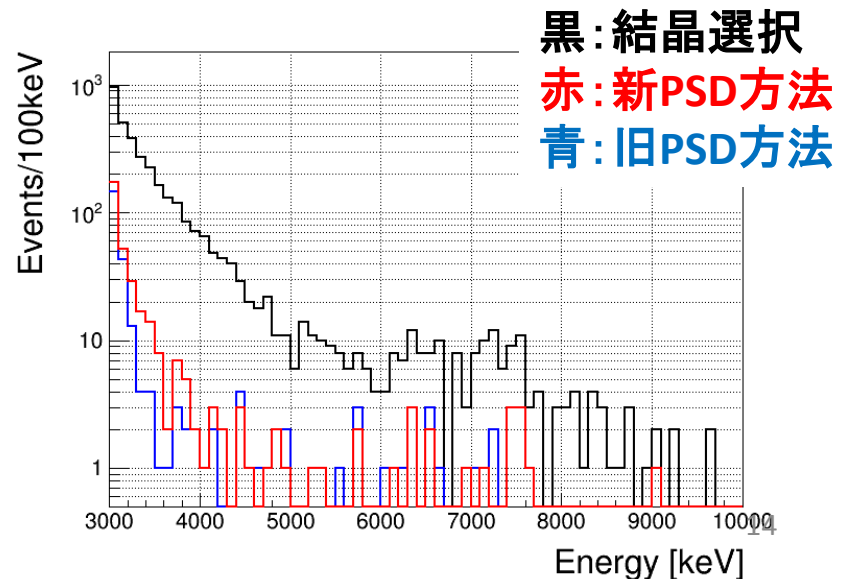
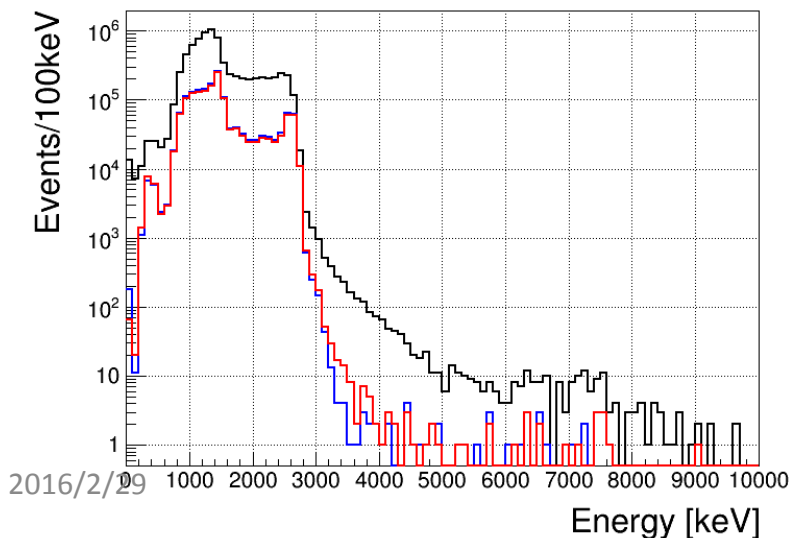
α 線検出方法と効率

- PSD_{α} , $PSD_{\beta+LS}$ の二次元分布を作成
- 各イベントの横軸からの角度を計算
一次元のヒストグラムに変換
- 角度の大きい部分に α 事象が分布
- 矢印の範囲を選択することで、 α 事象を抜き出す
- 検出効率: 93.2%
 - $52 < \theta < 90$
 - S/N比が最小となるような最適なカットにする予定



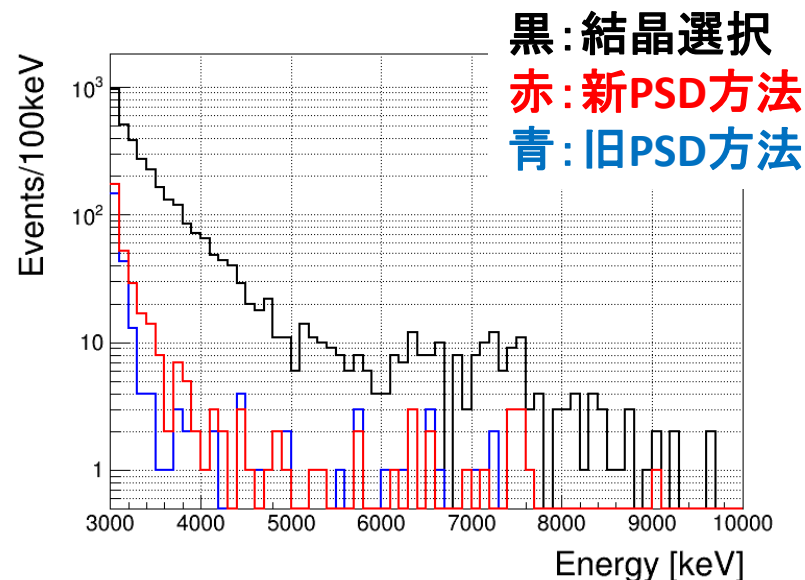
エネルギースペクトル

- 冷却後のデータを使用 (26.2日)
- 不純物量が少ない結晶を選択
 - 27個選択
- 従来のPSD方法と比較を行う
 - PSDによる β 線を選択
 - ^{212}Bi - ^{212}Po の連続崩壊除去
 - ^{208}Tl のベトー
- 新旧で同じ検出効率になるように揃え比較



BG数とベトーによるDead timeの比較

- 各エネルギー領域で事象数比較
- 5MeV以上は新PSDの方が事象数が少ない
 - β , β +LSの分離が向上している為
- 3~4MeVでは旧PSDの方が事象数が少ない
 - 次ページで詳細



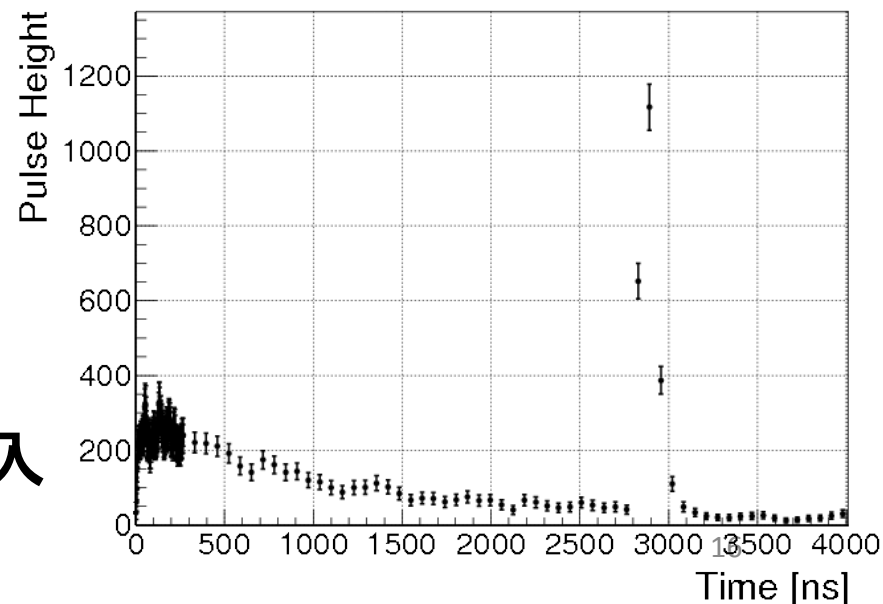
- ^{208}Tl ベトーによるDead timeがわずかに減少
 - 新PSD: 18.3%, 旧PSD: 19.2%

	新PSD方法	旧PSD方法
3~4MeV	311 counts	220 counts
4~5MeV	14 counts	14 counts
5~ MeV	20 counts	29 counts

3~4MeVに存在する事象

- 波形後半にLS波形の事象が存在
 - 旧PSDは全体の情報を用いるのに対し、新PSDは前半情報のみを用いる為
- 波形後半の64nsサンプリング領域を用いてカイニ乗検定を行う
 - 通常のイベントは1付近に分布
 - 右図イベントはとても大きな値となるはず

→ このパラメータを $0\nu\beta\beta$ サーチに導入



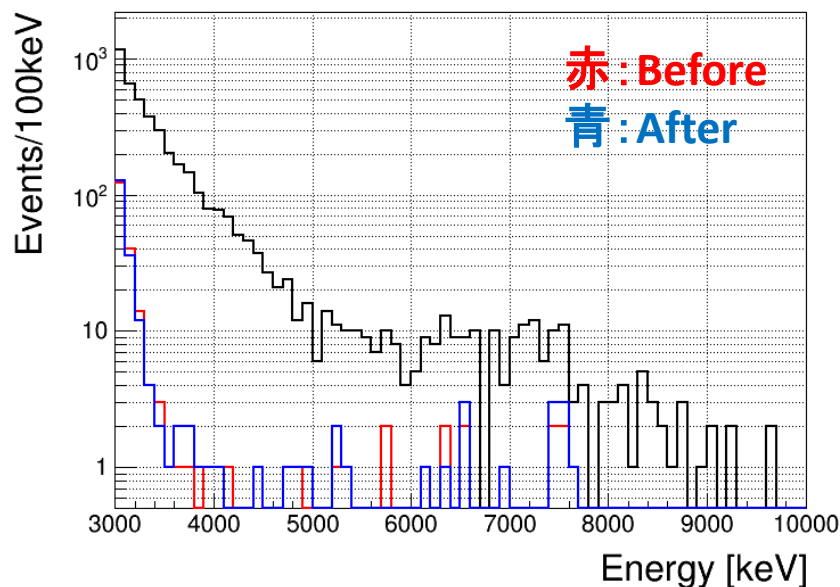
BG histogram (# of event)

- before

- 3~4 [MeV] : 187 events
- 4~5 [MeV] : 5 events
- 5~ [MeV] : 15 events

- After

- 3~4 [MeV] : 188 events
- 4~5 [MeV] : 5 events
- 5~ [MeV] : 16 events



- 同程度の能力は出せるが、効率はどうか。
 - ただ、カットが簡単になる

まとめ

- 各エネルギーにおいて、新旧の波形解析でバックグラウンド数を比較
 - 冷却システム導入後のデータ
- Q値周辺のBG解析に新PSDは有効そうである
- ^{208}Tl ベトーによるDead timeがわずかに減少
 - カットの効率について評価が必要

- (内部事情だが)カットが簡単に

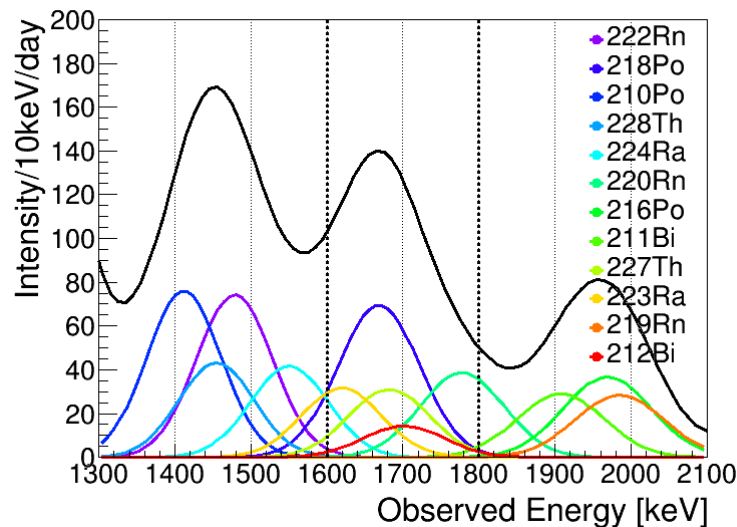
	現在	目標
α 検出効率	93.2%	>90%
$0\nu\beta\beta$ 検出効率	81.7%	>90%
DAQによるデッドタイム	95.5%	>90%
結晶ベトー	77%	~99%

今後

- ^{212}Bi のエネルギー領域に存在するほかの α 事象
- 周囲の結晶へ γ 線が逃げた場合(マルチヒット事象)

今後の問題点

1. ^{212}Bi のエネルギー領域にいくつかの α 事象が存在
2. 周囲の結晶で γ 線がエネルギーを落とした場合
→解析的に除去するために工夫が必要



Target event: Tl-208
Multi-crystal hit event

Tl-208 beta
($Q_{\text{obs}} = 1.7\text{MeV}$)



Tl-208 gamma
($Q_{\text{obs}} = 2.6\text{MeV}$)

Total observed energy
is 4.3MeV ($=Q_{\beta\beta}$)

Back up

二重ベータ崩壊候補核

核種	Q値 [keV]	自然存在比	長所 / 短所
^{48}Ca	4274	0.19%	Q値最大、NA小、濃縮難
^{150}Nd	3367	5.7%	濃縮難
^{96}Zr	3348	2.8%	
^{100}Mo	3034	9.4%	
^{82}Se	2996	8.7%	
^{116}Cd	2814	7.5%	
^{130}Te	2527	34.1%	NA大
^{136}Xe	2458	8.9%	濃縮容易
^{124}Sn	2288	5.8%	
^{76}Ge	2039	7.6%	
^{110}Pd	2018	7.5%	

Q値大 → バックグラウンド小 (^{208}Tl の2.6 MeVより大きいのが重要)
 ^{48}Ca を選択 (世界でCANDLES実験のみ)

CANDLESの軌跡 その1

2013

- DAQアップデート

- DAQによるデッドタイム低減

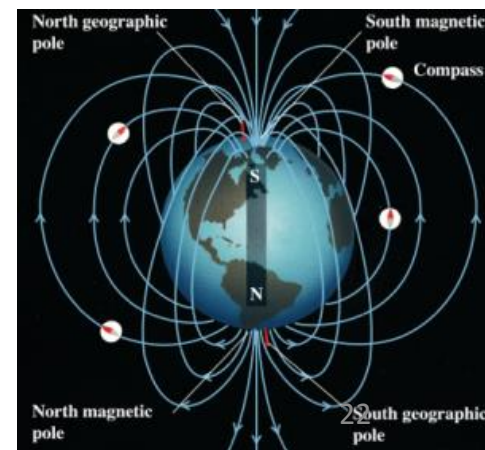
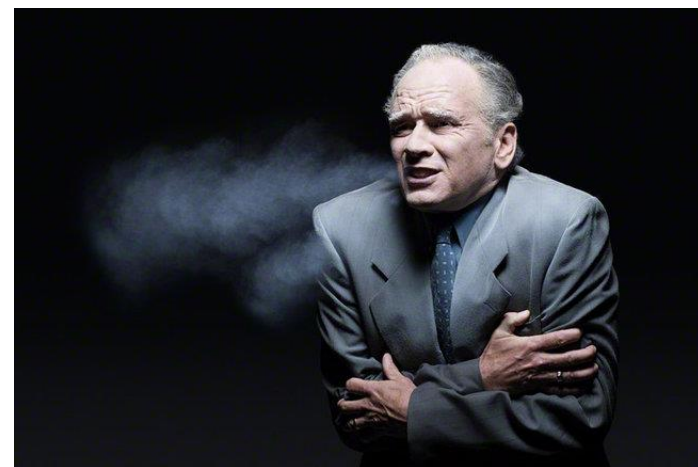
- データの取得 (Run005, 006)

- 冷却システムの導入
- PMT用地磁気補償コイルの設置

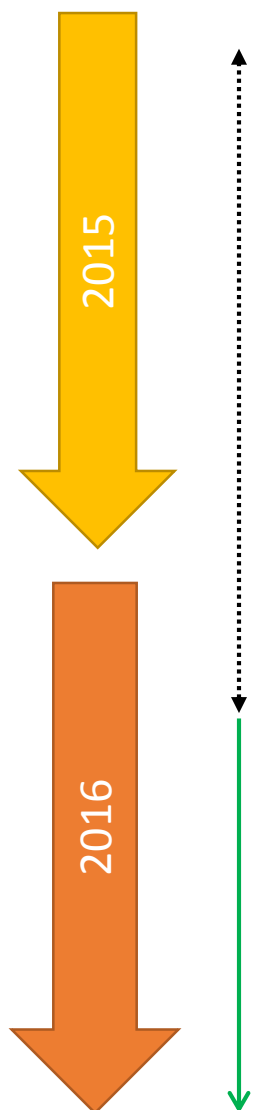
→ 高E分解能環境へ！

- データの取得 (Run007, 008)

2014



CANDLESの軌跡 その2

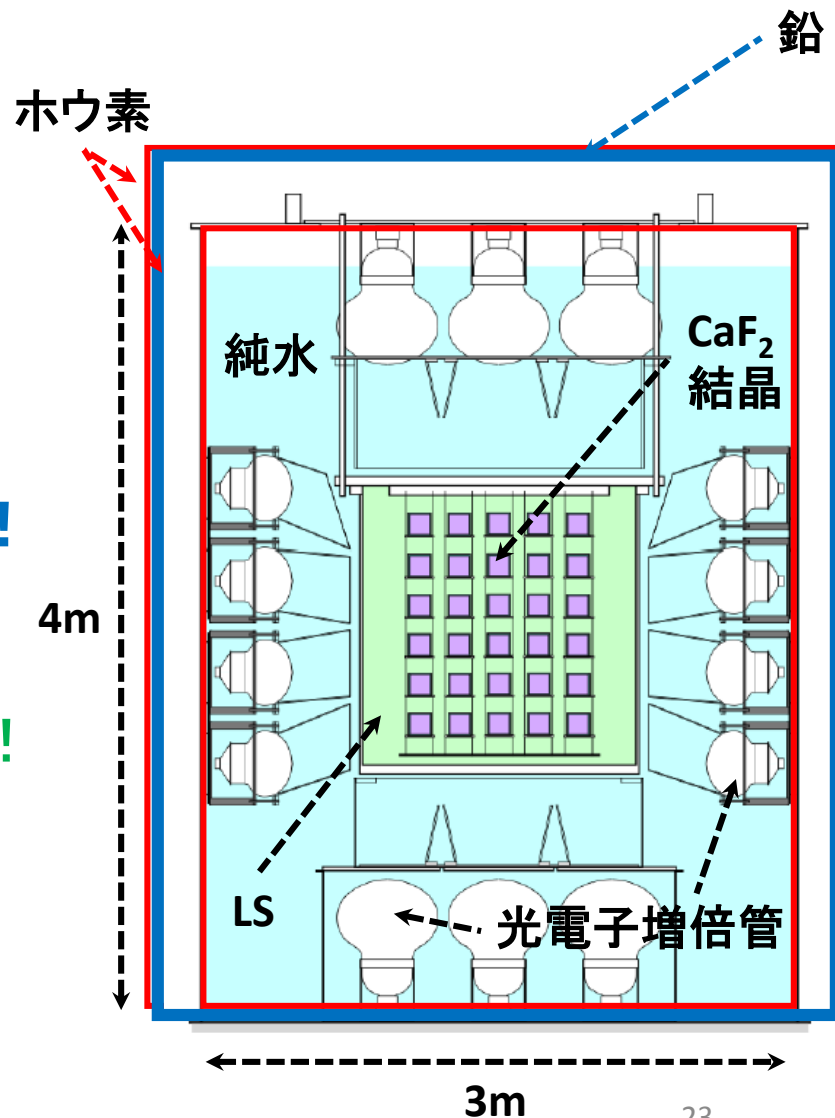


- 外部バックグラウンド対策に中性子、 γ 線の遮蔽物を構築
 - 中性子遮蔽: Bシート
 - ガンマ線遮蔽: Pbブロック

→ 低BG環境を手に入れた！

- 念願のデータ取得開始！
(3月頃？)

→ 世界最高感度へ！



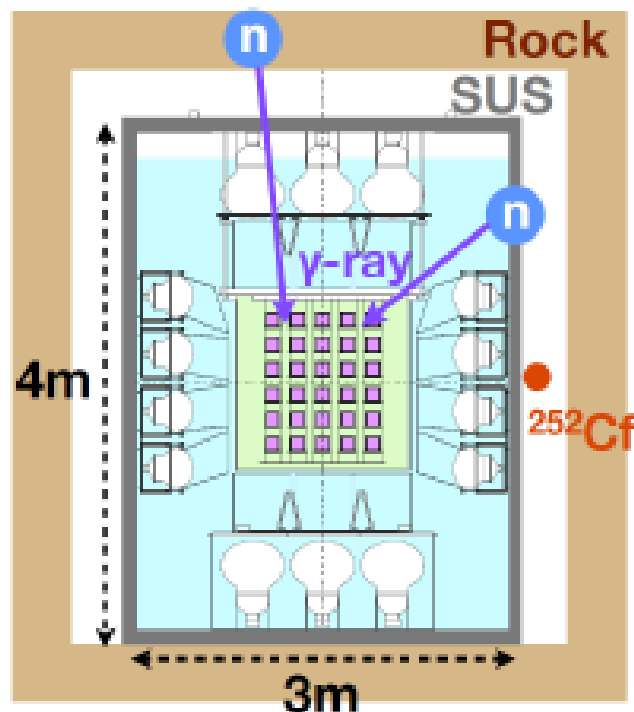
BG源と要求される遮蔽性能

(n, γ) BG除去の目標

- 現在の(n, γ) BGレート: ~ 75 events/year/96crystals

- 岩盤起因: ~ 60 events $\xrightarrow{\times 1/120}$ 目標: 0.5 events
- ステンレス起因: ~ 15 events $\xrightarrow{\times 1/30}$ 目標: 0.5 events

- 年間1事象以下に(n, γ)事象を抑えて、低BG観測を実現する。



目標感度: ~ 0.5 eV

2種類のシールドによる遮蔽

- ▶ 岩盤からの γ 線は鉛シールドで遮蔽
- ▶ ステンレスタンク表面における(n, γ)反応は中性子シールドで遮蔽

Added PSD_64ns

- 事象選択
 - $1300 < \text{Energy}$
 - 結晶内の事象選択
 - 波形情報によるベータ線選択
- $\text{PSD}_{64\text{ns}} < 3$ を用いる
 - ベータ線検出効率はほぼ100%となる

