

^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究

梅原さおり

umehara@km.phys.sci.osaka-u.ac.jp

研究代表者: 岸本忠史、CANDLES collaboration
大阪大学、福井大学、京都産業大学、佐賀大学、
徳島大学、広島大学、東北大学

Candles



Outline



◆ 二重ベータ崩壊

◆ ^{48}Ca のベータ崩壊の測定

◆ ELEGANT VI システム (先行システム)による測定結果

◆ CANDLES システム

◆ $\text{CaF}_2(\text{pure})$ シンチレータ + 液体シンチレータの複合型システム

◆ CANDLES III (地上) システム

◆ CANDLES III (地下) システム

◆ 今後

◆ ^{48}Ca の濃縮

◆ まとめ



二重ベータ崩壊



◆ ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊

◆ 標準模型内; 実験的に確認済み

◆ ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊

◆ 未確認 $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} \geq 10^{25}$ years

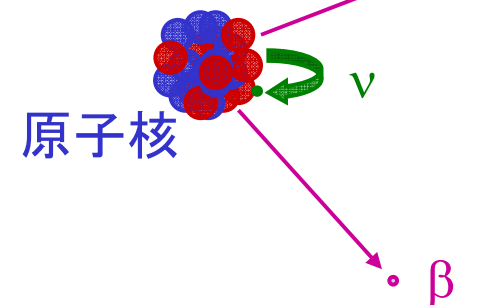
◆ cf. H.V. Klapdor-Kleingrothaus *et al.*

◆ 確認されると

◆ ニュートリノは **マヨラナ粒子**

◆ 崩壊率 $T_{1/2} \propto 1/m_\nu^2$

ニュートリノを放出しない
二重ベータ崩壊



二重ベータ崩壊

二重ベータ崩壊の測定のためには ...

大量の二重ベータ崩壊核
数kg ~ 数ton

低バックグラウンド測定

$$1/m_{\nu} \propto T^{1/2} \propto M_{\text{detector}}^{1/2}$$

$$1/m_{\nu} \propto T^{1/2} \propto M_{\text{detector}}^{1/4}$$

バックグラウンド事象がない時

バックグラウンド事象がある時

さまざまな二重ベータ崩壊核と実験

たとえば ...

^{76}Ge

: Klapdor et al., IGEX

$^{100}\text{Mo}, ^{82}\text{Se}$ etc.

: NEMO3 → SuperNEMO

^{130}Te

: Cuoricino → Cuore

^{48}Ca

: 我々のグループ

(ELEGANT VI → CANDLES)



^{48}Ca の二重ベータ崩壊



なぜ ^{48}Ca ?

高いQ値(4.27MeV) ...

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

→低バックグラウンド

Q値がBGよりも高い

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

3.3MeV(^{214}Bi , β 線)

^{48}Ca を用いて

バックグラウンドのない測定をめざす

CaF_2 を用いた ^{48}Ca の二重ベータ崩壊

ELEGANT VI システム

↓
大型化

CANDLES シリーズ

梅原さおり, 2009年12月18日, ICRR共同利用研究発表会

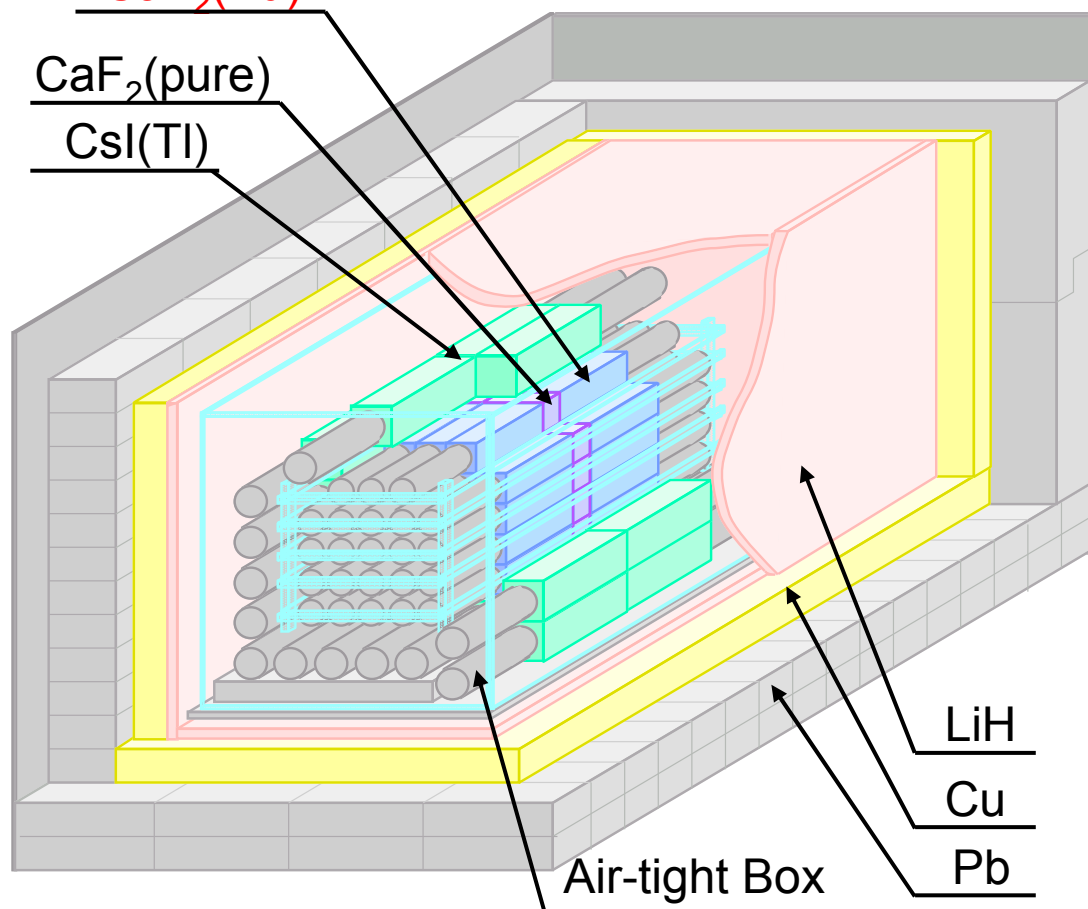


ELEGANT VI



ELEGANT VI
CaF₂(Eu)

ELEGANT VI
ELEctron GAMMA-ray NEutrino TELESCOPE



CaF₂(Eu): メインシンチレータ
結晶23 個(45 × 45 × 45cm³:290g)
二重ベータ崩壊核: ⁴⁸Ca
(Q_{ββ}=4.27MeV)

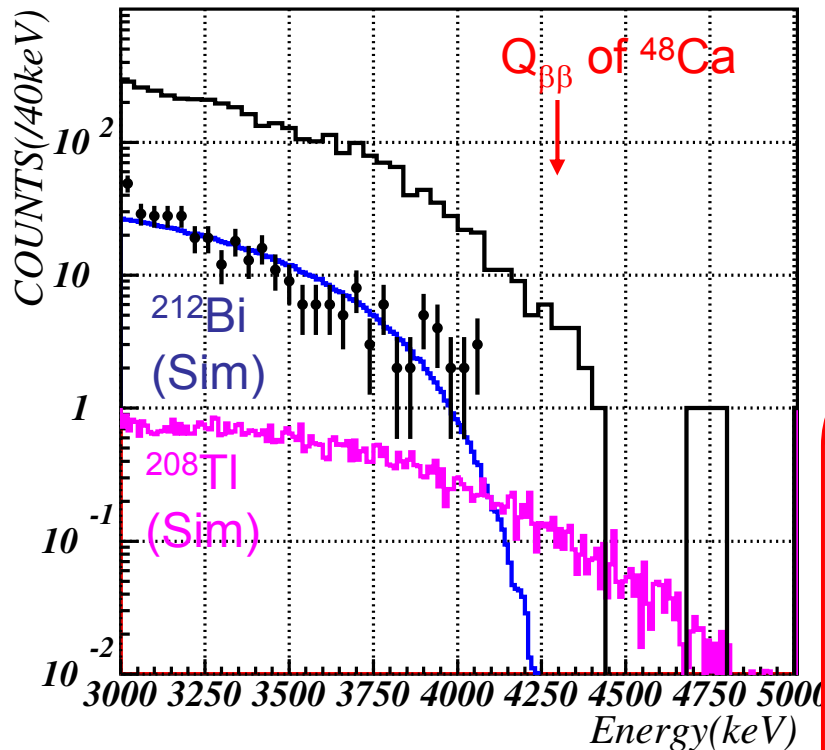
ベータ用シンチレータ
46本のCaF₂(pure)+38本のCsI(Tl)
→ 全方向ベータ検出器システムへ

シールド
γ線用、中性子用シールド
Cu : 5cm, Pb : 10cm などなど

測定結果

エネルギーースペクトル

測定時間: 3394 kg·day



- 測定データ(FADCカット後)
- 測定データ(FADCカット前)

$0\nu\beta\beta$ 領域(4.17-4.37MeV)内に
イベントは観測されていない

ELEGANT VIシステム

- ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ の半減期:

> 5.8×10^{22} year (90% C.L.)

FADC導入前の測定結果もあわせて
(測定時間: 4947 kg·day)

$\langle m\nu \rangle < (3.5-22)$ eV (90% C.L.)

- バックグラウンド除去

^{48}Ca 核、

全方向ベータ検出器システムは有効

ELEGANT VIからCANDLES

内部バックグラウンド対策

	ELEGANT VI CaF ₂ (Eu)		CANDLES III(地下) CaF ₂ (pure) 準備済み
CaF ₂ 量	6.7kg	×45	305kg
高純度結晶開発	1.2mBq/kg(U) 0.11mBq/kg(Th)	1/30 for U 1/4 for Th	0.039mBq/kg(U) 0.026mBq/kg(Th)
BG事象の解析的除去	特徴的BG事象の除去 (100MHzFADCを使って90%~)	BG Rej. =1/1000	<ul style="list-style-type: none"> 特徴的BG事象の除去 (500MHzFADCを使って98.8%) α線とγ線の波形弁別(99.7%)
ニュートリノ質量に対する感度	(測定結果:3.5-22eV)		0.5eV (~3 × 10 ²⁴ year)

CANDLES システム

ELEGANT VIのバックグラウンド除去技術をもとに、
スケールアップ

プロトタイプシステムで達成

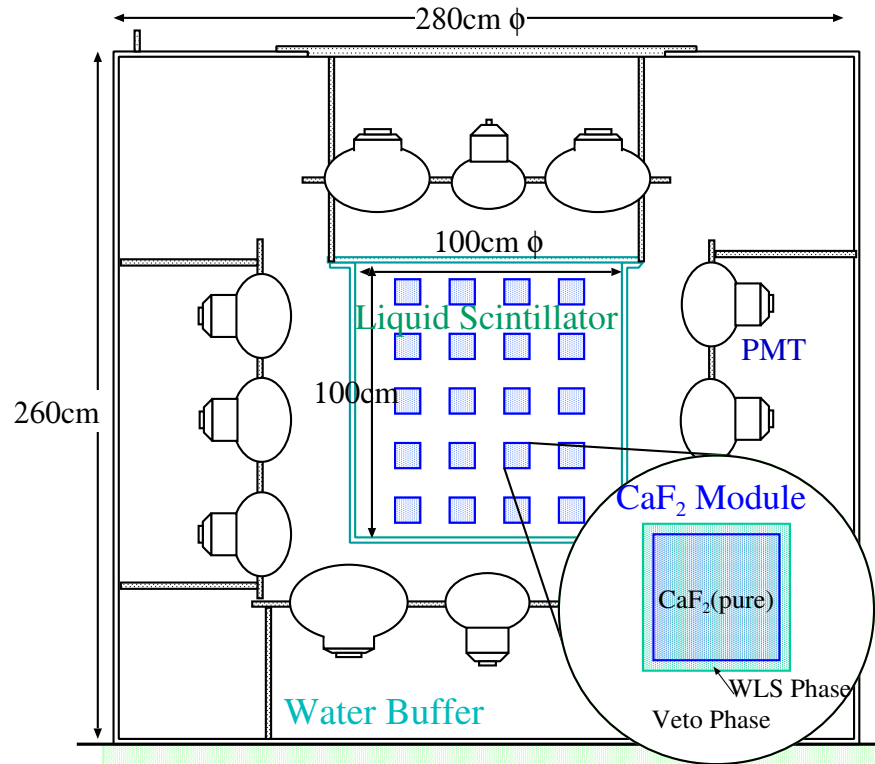
18日, ICRR共同利用研究発表会



CANDLES III



CANDLES III(地上)



地上でのCANDLES III 測定
 →バックグラウンド除去能力を調査
 ・ LS信号除去、位置再構成、
 エネルギー分解能
 etc.

シンチレータ

◆ $\text{CaF}_2(\text{pure})$ シンチレータ (CaF_2)

10cm角 × 59結晶

58結晶 : 高純度結晶

(約 $30\mu\text{Bq/kg}$)

1結晶 : 高不純物結晶

リファレンス結晶として使用

65mBq/kg(U系列)

28mBq/kg(Th系列)

◆ 液体シンチレータ(LS)

ベトーカーンタとして使用

光電子増倍管

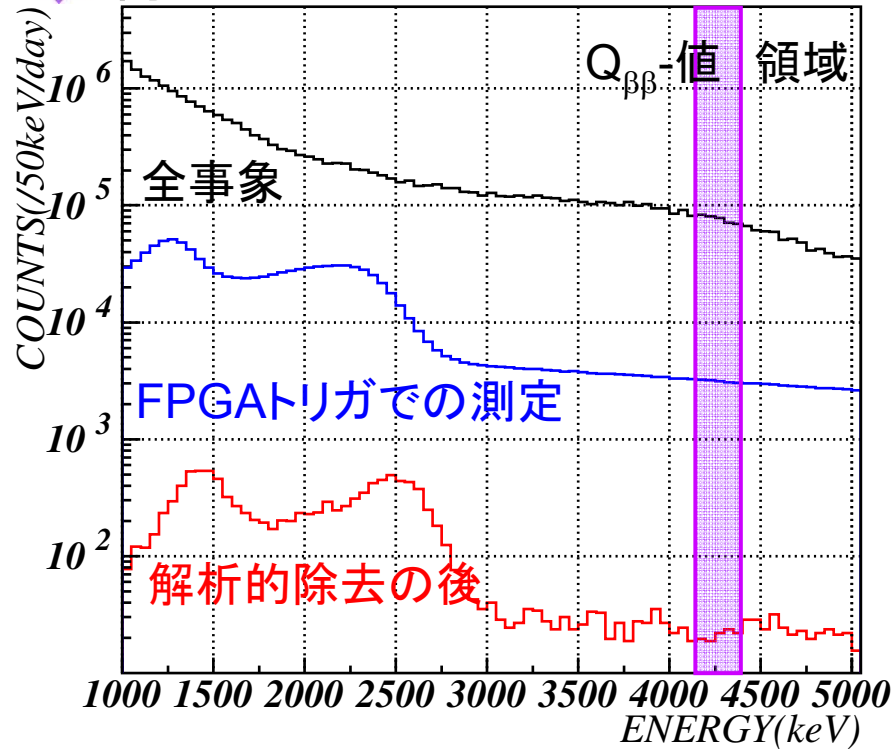
◆ 13inch PMTs × 32

◆ 15inch PMTs × 8

エネルギースペクトル

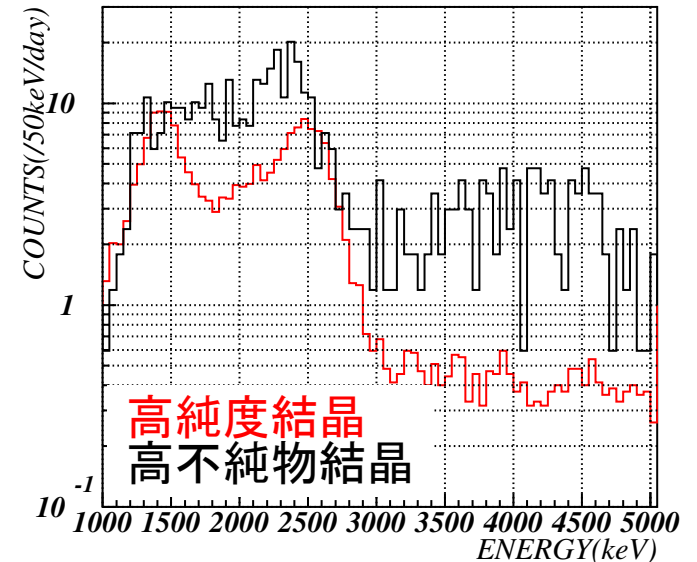
地上実験室での測定

得られたスペクトル



FPGAトリガ：
CaF₂らしい信号を選択
解析：
波形解析
事象位置による除去
CaF₂ ID 高純度結晶は含まず
下段結晶

高純度結晶、高不純物結晶の
エネルギースペクトル



地下実験室では宇宙線の影響が
減ることを考えると目標はクリア
更なる大型化に向けて
宇宙線起源バックグラウンド調査



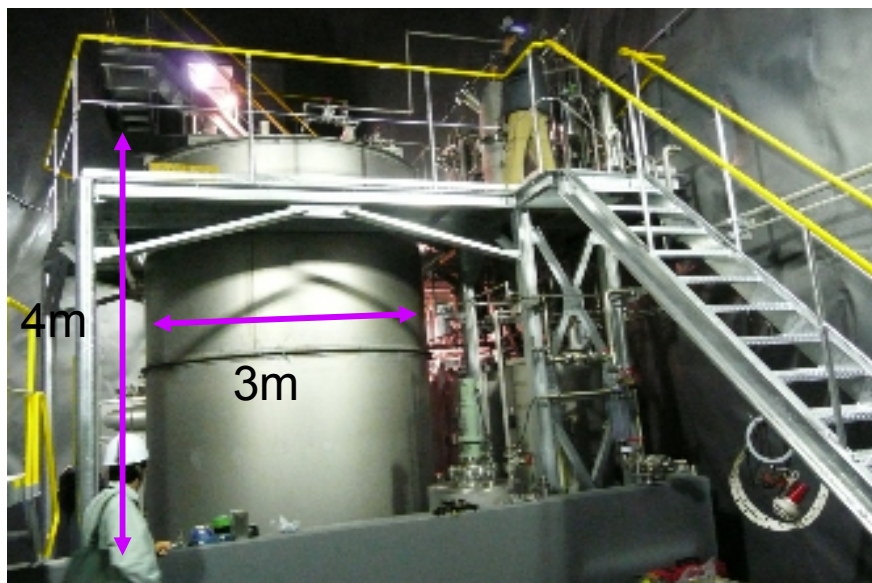
CANDLES III(地下)



◆ 神岡研究施設: 実験室D

◆ CANDLES III(地下)を建設中

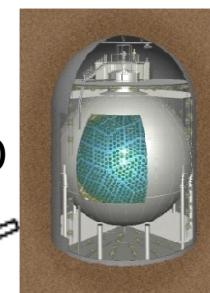
◆ 直径3m × 高さ4m



CANDLES III(地下)

神岡実験室

KamLAND



Super Kamiokande

CANDLES





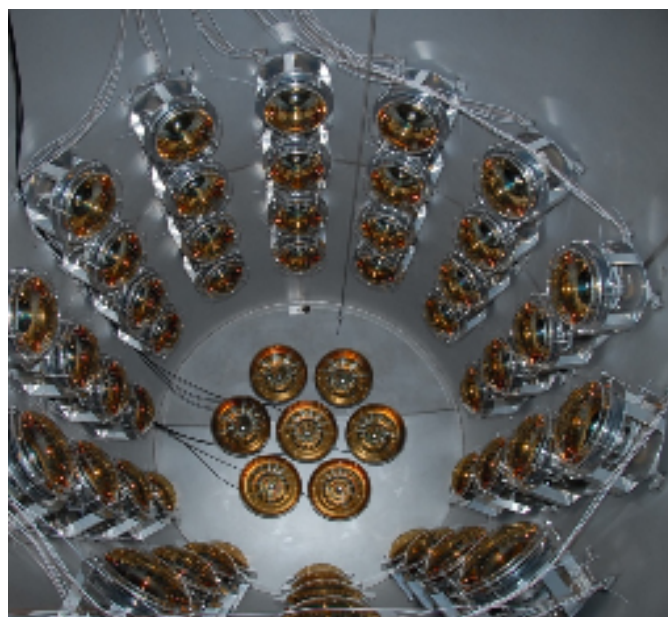
CANDLES III(地下)



✦ CANDLES III(地下)

- ✦ 光電子増倍管62個
 - ✦ 96 CaF_2 (pure) シンチレータ
- ... 来年には測定開始予定 ...

結晶モジュール
(CaF_2 シンチレータ)



本体タンク内部





R&D: ^{48}Ca 濃縮



^{48}Ca $0\nu\beta\beta$ 測定の高感度向上のため...

大量の ^{48}Ca (~10kg)が必要

→1st Step : 検出器の大型化: 300kg(現在) ~ 数tonの CaF_2

→2nd Step : ^{48}Ca 濃縮 (~2% ⇔ 自然存在比0.187%)

^{48}Ca 濃縮技術

ガス拡散 ... ×

ガス遠心分離 ... ×

化学法 ... ○

← ガス化合物がないため



クラウンエーテルを用いたCa濃縮

	天然同位体比
^{40}Ca	96.941%
^{42}Ca	0.647%
^{43}Ca	0.135%
^{44}Ca	2.086%
^{46}Ca	0.004%
^{48}Ca	0.187%

クラウンエーテル樹脂

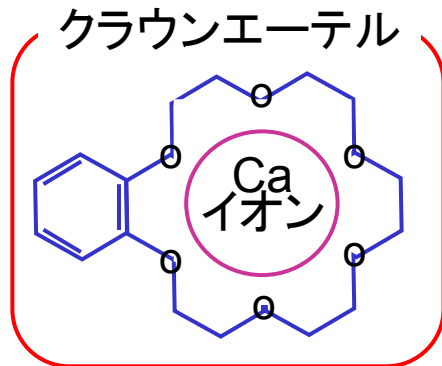
濃縮方法

クラウンエーテルを用いた濃縮

クラウンエーテルがCaを吸着

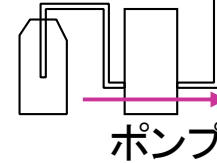
^{40}Ca の保持が優勢

樹脂にカルシウム溶液を流して濃縮
樹脂側に ^{40}Ca が濃縮、
水溶液側に ^{48}Ca が濃縮



ベンゾ18クラウン
~3.2 Å

2、Ca溶液供給



1、樹脂充填

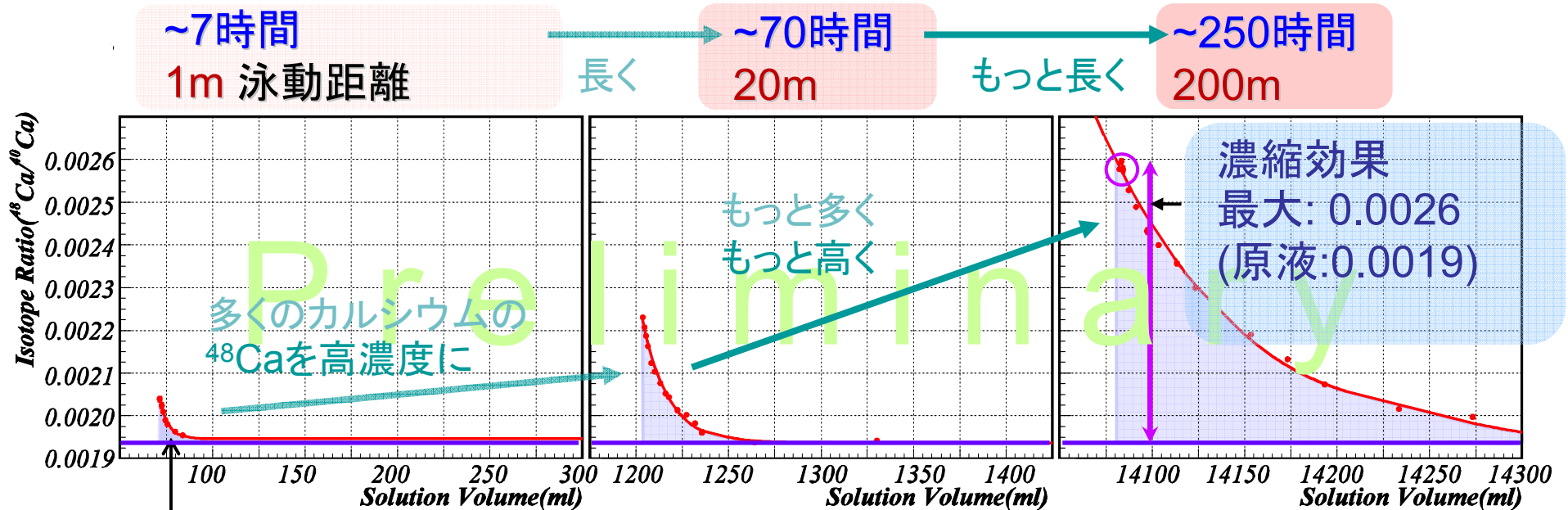
泳動距離：1m、20m、200m

3、サンプリング

^{48}Ca が濃縮された
カルシウム溶液

濃縮結果

長距離泳動実験による濃縮の結果



濃縮効果

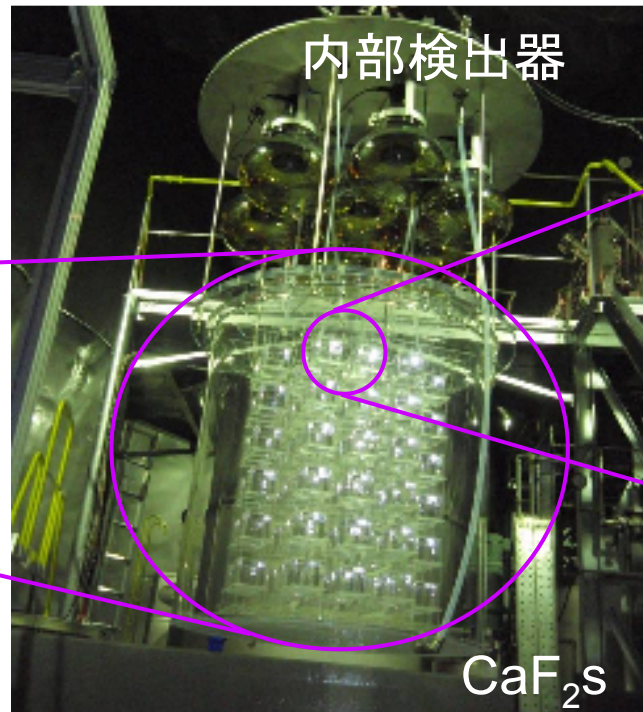
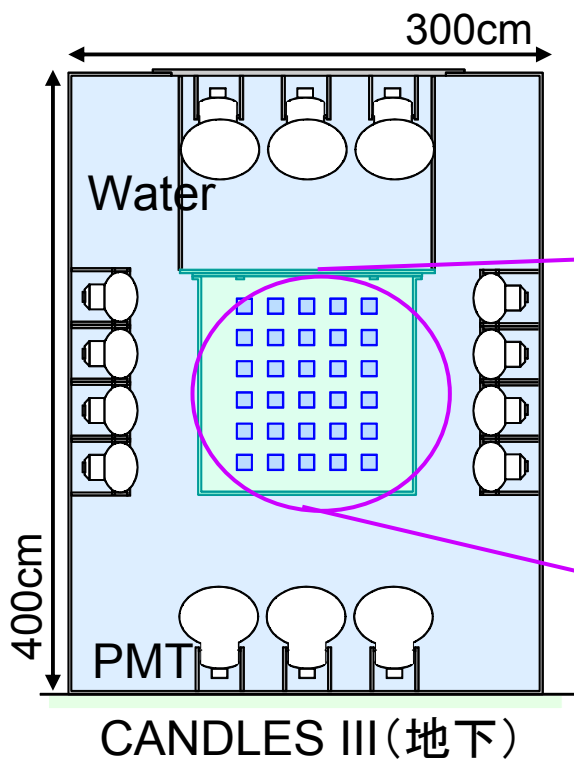
- ・明らかな濃縮効果を確認
- ・泳動距離(泳動時間)をのぼすことで
より高い同位体比、より大量のカルシウムを得られる
~7時間(1m) → ~250時間(200m)
カルシウム量: ×17、同位体比の増加: ×8

将来:

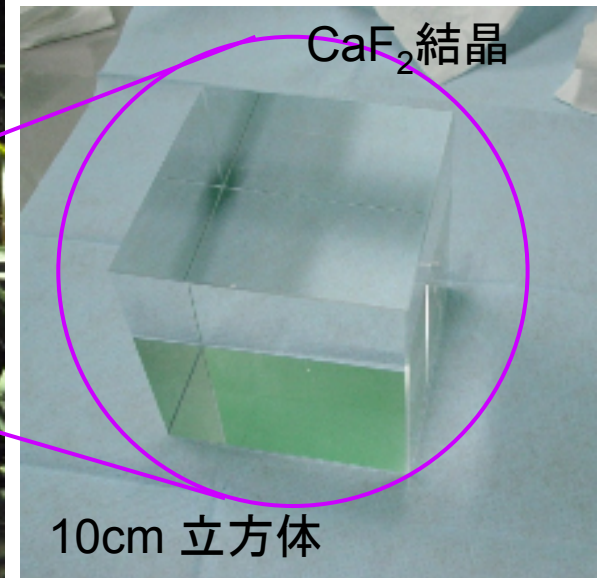
0 $\nu\beta\beta$ 測定のための検出器システム

CANDLESシステム

Nat. CaF₂(pure)シンチレータ
液体シンチレータ



メイン検出器CaF₂を...



... ⁴⁸CaF₂ (~2%)に!

同じ検出器サイズで、
大量の⁴⁸Ca



CANDLESシリーズ



✦ ELEGANT VI (大塔コスモ観測所)

✦ 7kgのCaF₂(Eu) シンチレータ

✦ $T_{1/2} > 5.8 \times 10^{22}$ 年 (< 3.5-22 eV)

✦ CANDLES III (神岡研究施設)

✦ 300kgのCaF₂(pure) シンチレータ

✦ 予想される感度 : 0.5 eV for $\langle m_\nu \rangle$

現在

← 来年、測定開始予定

✦ CANDLES IV

✦ 3 tonのCaF₂(pure)シンチレータ

✦ 感度 : ~0.2 eV

✦ CANDLES V

✦ ⁴⁸CaF₂(pure)シンチレータ

✦ 感度 : ~0.05 eV



まとめ



◆ ELEGANT VI

◆ 半減期 $T_{1/2} > 5.8 \times 10^{22}$ years

◆ バックグラウンドなしの測定

◆ CANDLES

◆ 現在CANDLES III(地下)を建設中

◆ CANDLES III(地下)の感度 = 0.5 eV

◆ 今後

◆ 来年CANDLES IIIの測定開始予定

◆ ^{48}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

◆ 19万円... 神岡⇔大阪、福井、広島、徳島他の旅費として使用予定