

# KamLAND-Zen実験

丸藤祐仁

東北大学ニュートリノ科学研究センター

# はじめに

## これまでのニュートリノ振動実験

$\theta_{23}$

Super-Kamiokande

K2K

MINOS

T2K

OPERA

$\theta_{12}$

Homestake

GALLEX/GNO

SAGE

Super-Kamiokande

SNO

KamLAND

Borexino

$\theta_{13}$

T2K

Double Chooz

Daya Bay

RENO

**Sterile ?**

LSND, MiniBooNE, Gallium + neutrino source

Short baseline reactor experiments + New Reactor flux

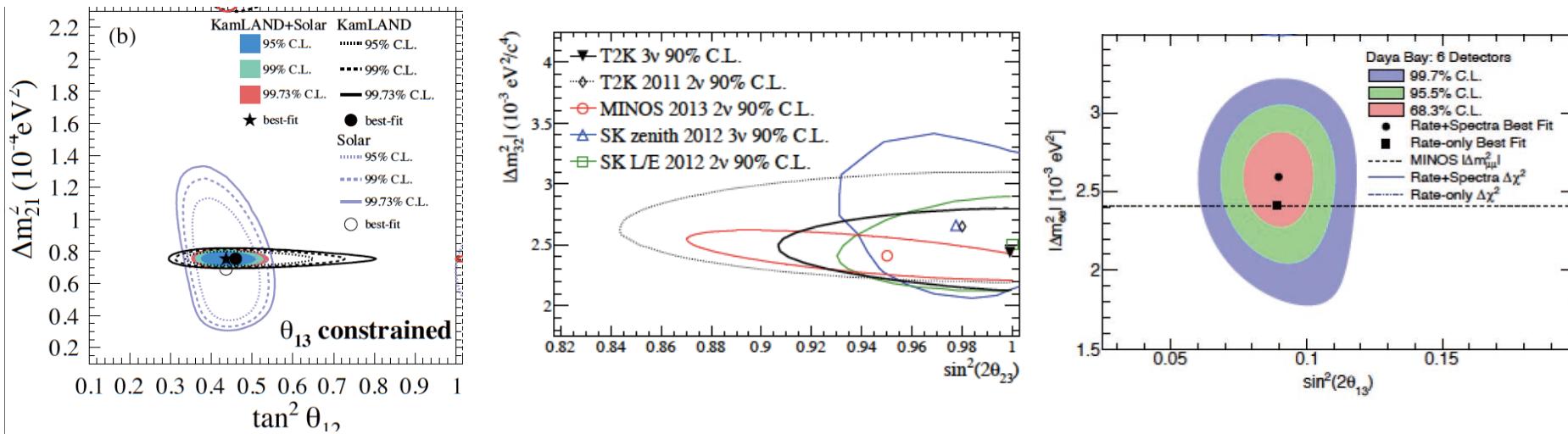
# はじめに

## ニュートリノ振動実験より

### 分かった事 (素粒子的に)

ニュートリノは**質量を持つ**(絶対値は不明)

ニュートリノ振動パラメータ( $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ ,  $\Delta m^2_{12}, \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{13}$ )



# はじめに

- ニュートリノ振動実験

分かった事 (素粒子的に)

ニュートリノ振動パラメータ ( $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ )

ニュートリノは質量を持つ (絶対値)

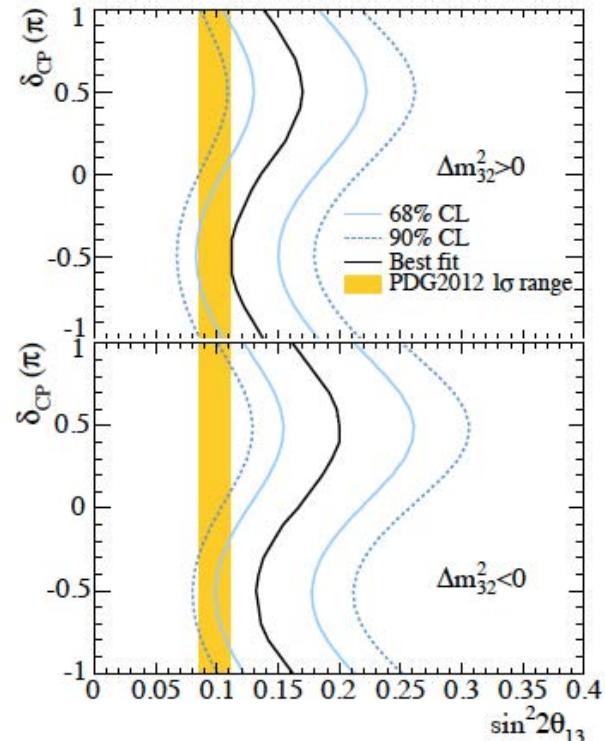
見つかった課題 (素粒子的に)

CP 対称性

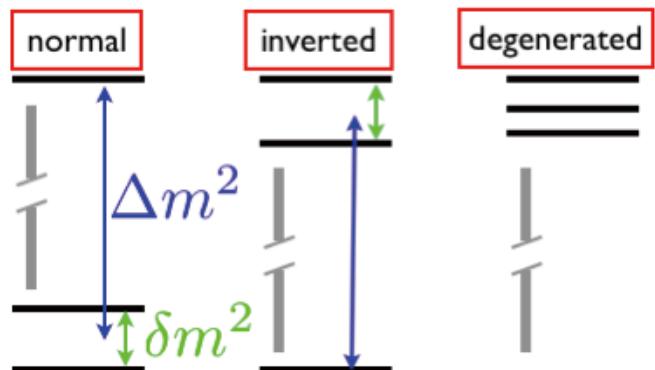
質量階層問題と質量の絶対値

$$2.31 < \Delta m^2 / 10^{-3} < 2.49 \text{ eV}^2$$

$$7.35 < \delta m^2 / 10^{-5} < 7.71 \text{ eV}^2$$



mass structure



# はじめに

- ニュートリノ振動実験

分かった事 (素)

ニュートリノ

ニュートリノ

(large angle MSW)

見つかった課題

CP対称性

質量階層問

謎が深まったもの (素粒子的に)

混合が大きすぎる

質量が小さすぎる

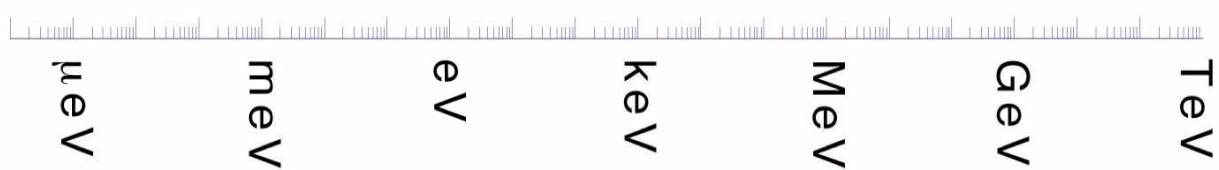
ステライルニュートリノがありそう (?)

fermion masses

d ● s ● b ●

u ● c ● t ●

e ● μ ● τ ●



# はじめに

- ニュートリノ振動実験

分かった事 (素粒子的に)

ニュートリノ振動パラメータ ( $\theta_{12, 23, 31}$   $\Delta m^2_{12, 23, 31}$ )

ニュートリノは質量を持つ (絶対値は不明)

見つかった課題 (素粒子的に)

CP対称性

質量階層問題と質量の絶対値

謎が深まったもの (素粒子的に)

混合が大きすぎる

質量が小さすぎる

ステライルニュートリノがありそう (?)

質量に関するもの

ただし、質量の絶対値のみを測定出来ても、値が不自然に小さい理由の説明にはならない

# ニュートリノ質量

- ・ニュートリノは質量を持つ
  - ・電荷は持たない
- } 粒子と反粒子が同じである可能性がある(マヨラナ粒子)

## ニュートリノの質量

ディラック

$$-\mathcal{L}_D = m_D (\bar{\Psi}_L \Psi_R + \bar{\Psi}_R \Psi_L) + h.c.$$

マヨラナ

$$-\mathcal{L}_M = \frac{m_L}{2} [(\bar{\Psi}_L)^c \Psi_L + h.c.] + \frac{m_R}{2} [(\bar{\Psi}_R)^c \Psi_R + h.c.]$$



$$-\mathcal{L}_{D+M} = (N_1, N_2) \left( \frac{m_L \ m_D}{m_D \ m_R} \right) \left( \begin{matrix} N_1 \\ N_2 \end{matrix} \right)$$

ニュートリノ質量項

## シーソーモデル

$$m_L = 0, \\ m_R \gg m_D, m_L$$

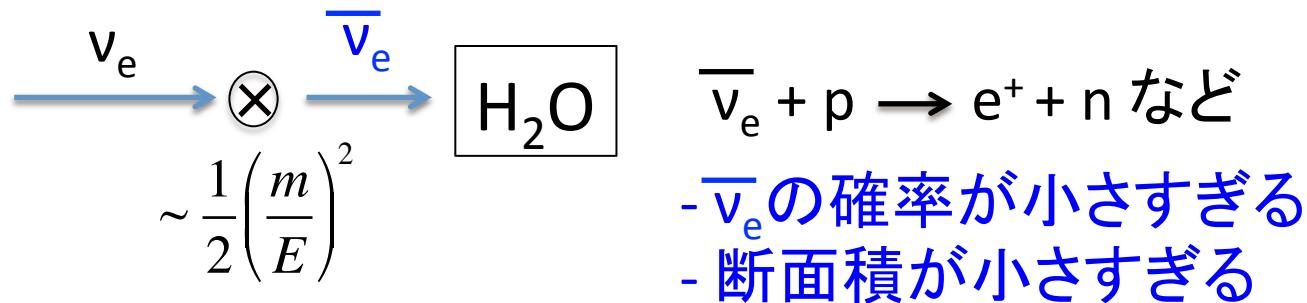


$$m_\nu = \frac{m_D^2}{m_R}$$

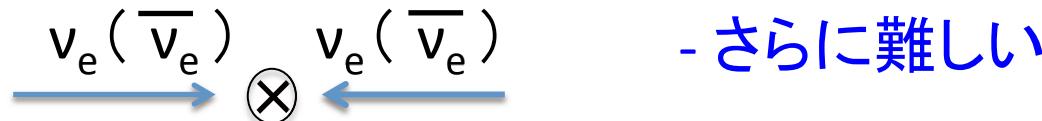
マヨラナ性が小さな質量を説明する鍵になる

# マヨラナをテストする

- ニュートリノを打ち込んで、反ニュートリノの反応を調べる  
( $v_R$ であれば何も反応しない)



- ニュートリノ(反ニュートリノ)同士を対消滅させる



- 非常に小さな空間に2つのニュートリノがあればいい

原子核内に同時に2つの  
反ニュートリノが発生する反応がある

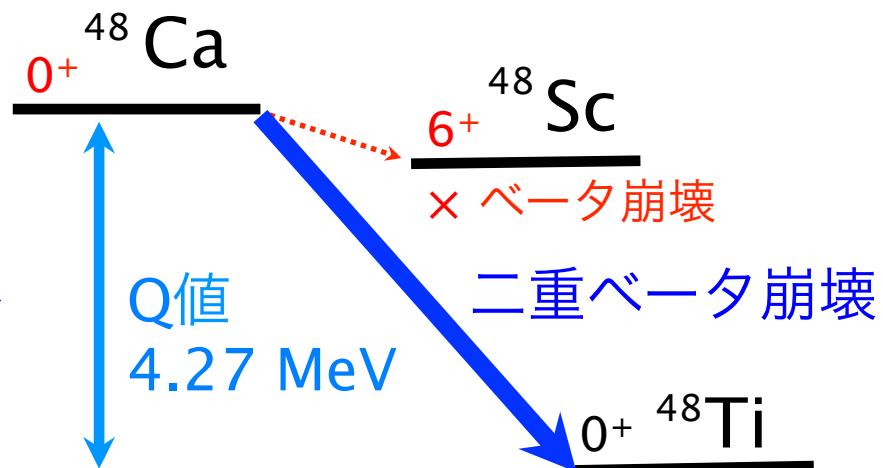
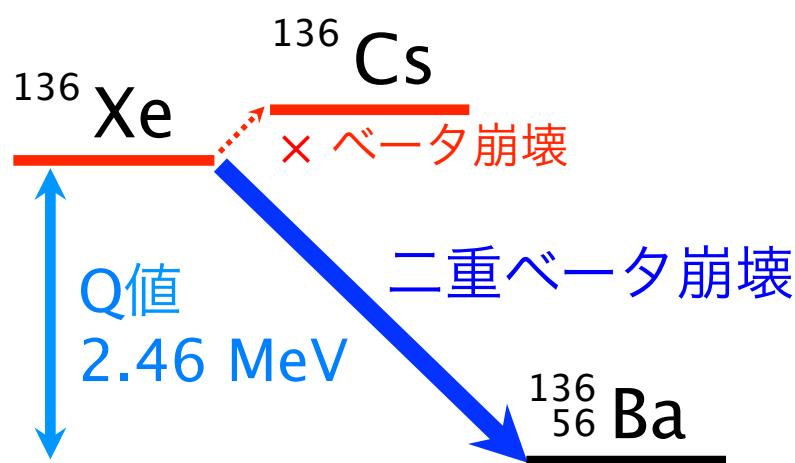
二重ベータ崩壊

# 二重ベータ崩壊

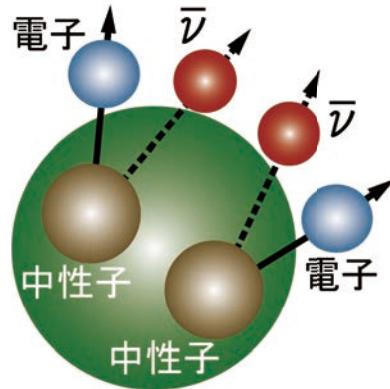
- $\beta$ 崩壊が  
エネルギー的に禁止されている  
スピン遷移則で強く抑制されている



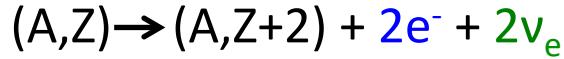
二重ベータ崩壊  
(弱い相互作用  
の2次の過程)



# 二重ベータ崩壊

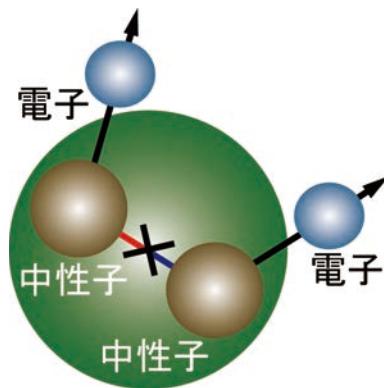


- 2νββ崩壊 (標準理論の枠内)



- 10種類以上の核種で観測済
- 半減期 :  $10^{18} \sim 10^{21}$  年

$$\left(T_{1/2}^{2\nu}\right)^{-1} = G^{2\nu} |M^{2\nu}|^2$$



- 0νββ崩壊 (標準理論を超える過程 )



- レプトン数非保存
- ニュートリノはマヨラナ
- 半減期の下限値 :  $10^{24} \sim 10^{25}$  年
- 半減期にニュートリノ有効質量の二乗が比例

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

# 0νββ崩壊

- 0νββの崩壊率

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

位相空間因子  
計算出来る

核行列要素  
理論計算  
**不定性大**

- ニュートリノの有効質量

ニュートリノの有効質量

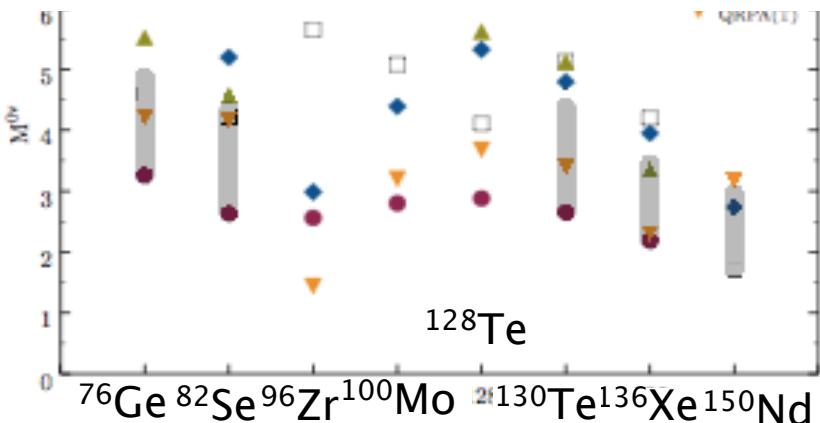
$$\langle m_\nu \rangle \equiv |U_{e1}^L|^2 m_1 + |U_{e2}^L|^2 m_2 e^{i\phi_2} + |U_{e3}^L|^2 m_3 e^{i\phi_3}|$$

$U$  : ニュートリノの混合角

$m$  : ニュートリノの質量

$\phi$  : マヨラナ位相

モデルによって 2 - 5 倍の差



絶対質量へのヒント  
ニュートリノ質量の階層構造

# 0νββ崩壊とニュートリノ有効質量

## 1. 有効質量

$$\langle m_\nu \rangle \equiv |U_{e1}^L|^2 m_1 + |U_{e2}^L|^2 m_2 e^{i\phi_2} + |U_{e3}^L|^2 m_3 e^{i\phi_3}|$$

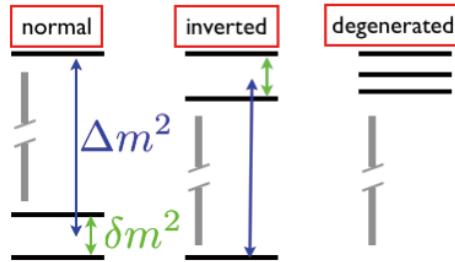
## 2. ニュートリノ振動パラメータ

$$2.31 < \Delta m^2 / 10^{-3} < 2.49 \text{ eV}^2$$

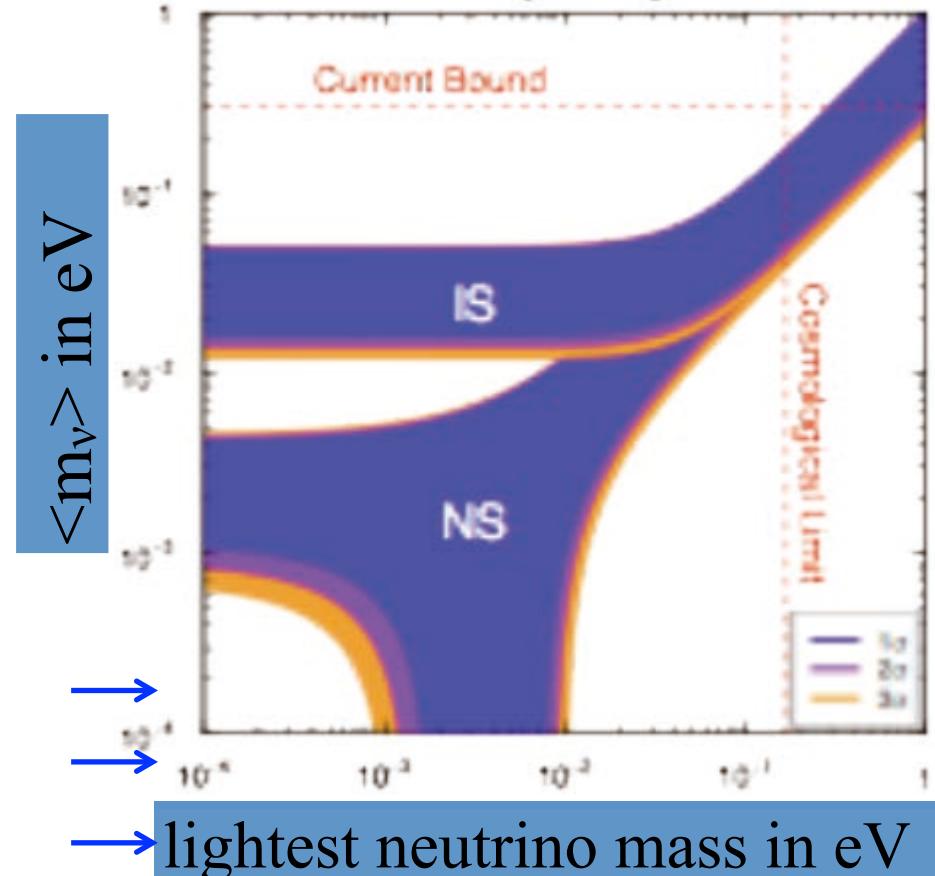
$$7.35 < \delta m^2 / 10^{-5} < 7.71 \text{ eV}^2$$

## 3. 正常階層 or 逆階層

mass structure



1.2.3. より 0νββ 崩壊探索の具体的な領域が計算される



# $0\nu\beta\beta$ 崩壊とニュートリノ有効質量

## 1. 有効質量

$$\langle m_\nu \rangle \equiv |U_{e1}^L|^2 m_1 + |U_{e2}^L|^2 m_2 e^{i\phi_2} + |U_{e3}^L|^2 m_3 e^{i\phi_3}|$$

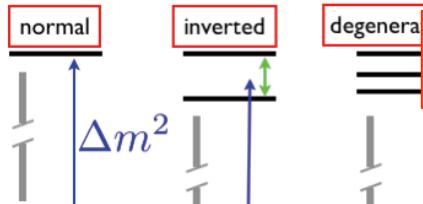
## 2. ニュートリノ振動パラメータ

$$2.31 < \Delta m^2 / 10^{-3} < 2.49 \text{ eV}^2$$

$$7.35 < \delta m^2 / 10^{-5} < 7.71 \text{ eV}^2$$

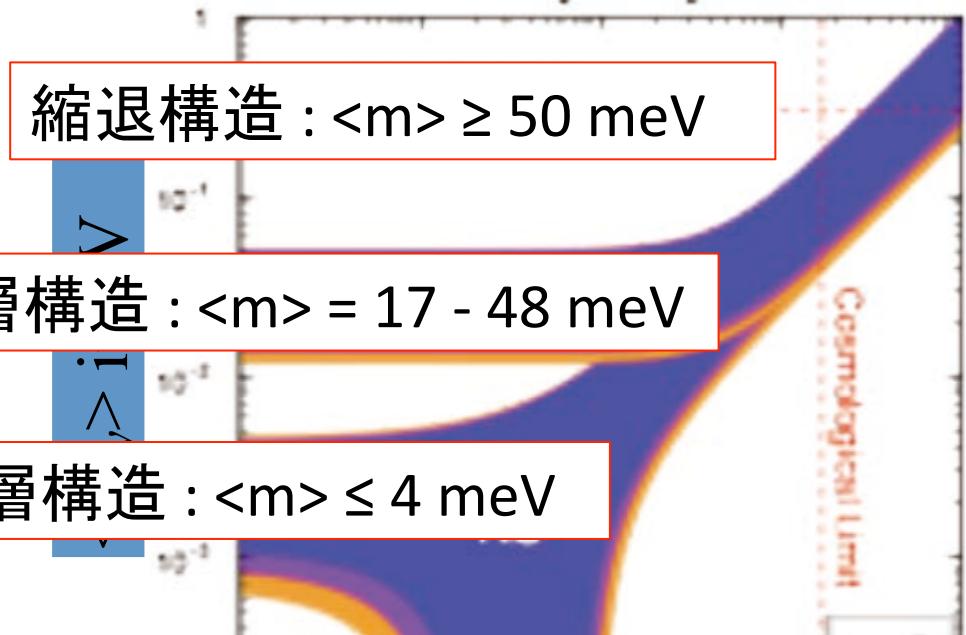
## 3. 正常階層 or 逆階層

mass structure



逆階層構造 :  $\langle m \rangle = 17 - 48 \text{ meV}$

正常階層構造 :  $\langle m \rangle \leq 4 \text{ meV}$

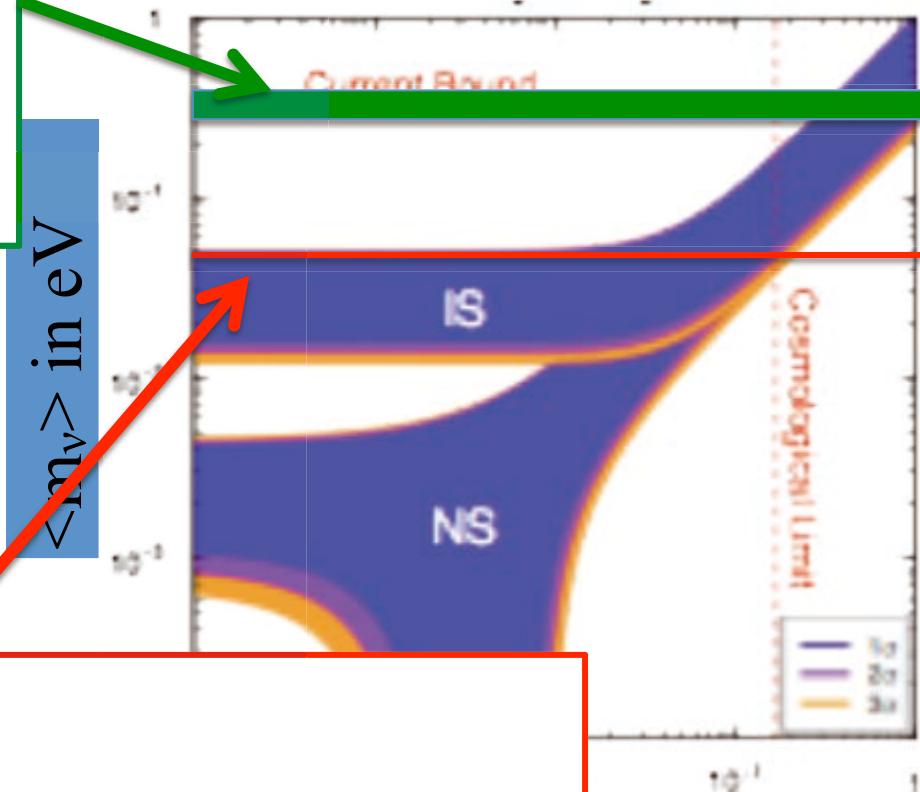


1. 縮退構造領域での検証 → 10 - 100kg の崩壊核
2. 逆階層構造領域での探索 → 100 - 1000kg の崩壊核
3. 正常階層構造領域での探索 → 1000 - kg の崩壊核

# $0\nu\beta\beta$ 崩壊とニュートリノ有効質量

## KK-claim

Heidelberg-Moscow 実験  
(Ge 11kg、濃縮 $^{76}\text{Ge}$ を使用)  
の一部の研究者による発見  
の主張 ( $\langle m \rangle = 0.32 \pm 0.03 \text{eV}$ )



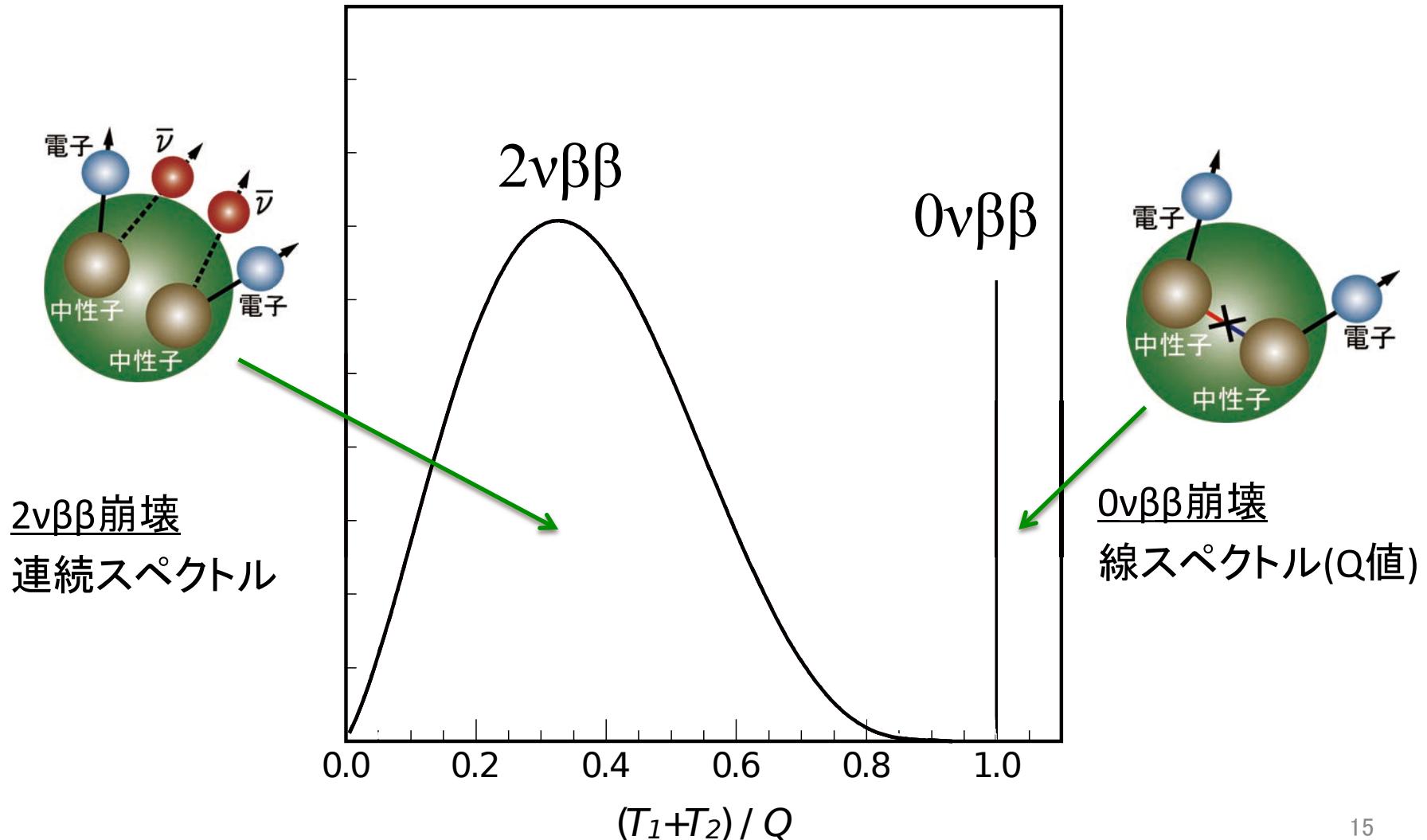
## 柳田予測@neutrino 2012

$$\langle m \rangle = 48 \pm 1 \text{ meV}$$

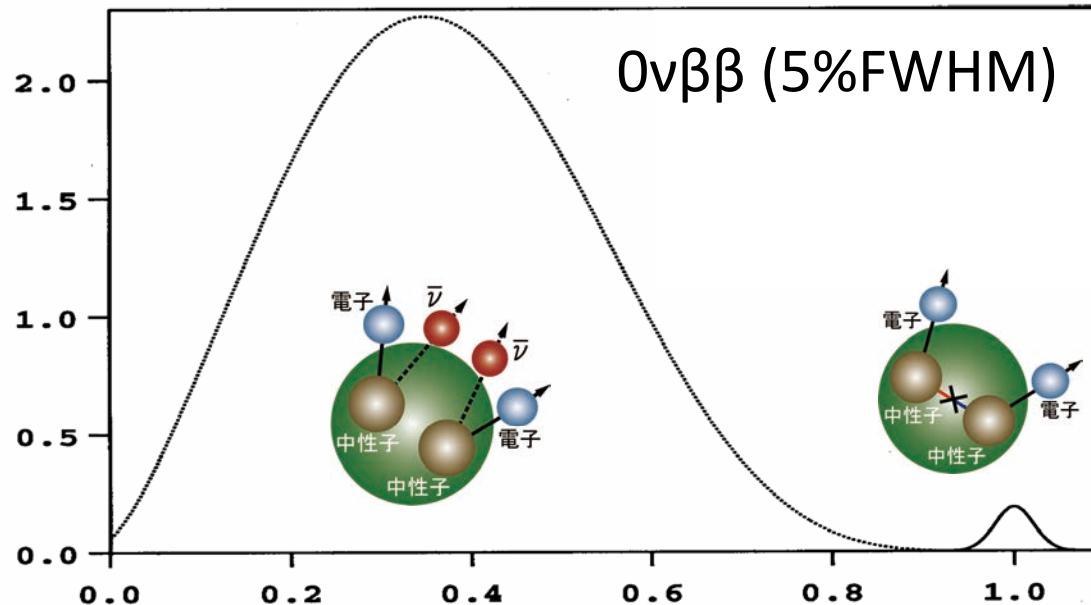
Keisuke Harigaya, Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida, arXiv:1205.2198

mass in eV

# 二重ベータ崩壊スペクトル



# 二重ベータ崩壊スペクトル



## 0ν $\beta\beta$ 崩壊探索に有利な崩壊核の条件

- Q値が環境放射線に埋もれないエネルギー領域にある
- $\beta\beta$ 崩壊核の自然存在比が高い、もしくは同位体濃縮が可能
- 純化が可能、もしくは低バックグラウンド化が可能
- 2ν $\beta\beta$ の寿命が長い

# 二重ベータ崩壊核種

核種	Q値 (keV)	自然存在比(%)	$T_{1/2}^{2\nu}$ (year)	メリット、デメリット
$^{48}\text{Ca}$	$4273.6 \pm 4$	0.19	$4.4 \times 10^{19}$	Q値最大、NA少、濃縮難
$^{76}\text{Ge}$	$2039.006 \pm 0.050$	7.6	$\underline{1.55 \times 10^{21}}$	2ν長
$^{82}\text{Se}$	$2995.50 \pm 1.87$	8.7	$9.6 \times 10^{19}$	
$^{96}\text{Zr}$	$\underline{3347.7 \pm 2.2}$	2.8	$2.35 \times 10^{19}$	Q値大
$^{100}\text{Mo}$	$\underline{3034.40 \pm 0.17}$	9.4	$\underline{7.1 \times 10^{18}}$	Q値大、2ν半減期短
$^{110}\text{Pd}$	$2017.85 \pm 0.64$	7.5	-	
$^{116}\text{Cd}$	$2813.50 \pm 0.13$	7.5	$2.8 \times 10^{19}$	
$^{124}\text{Sn}$	$2287.80 \pm 1.52$	5.8	-	
$^{130}\text{Te}$	$2527.01 \pm 0.32$	$\underline{34.1}$	$7.0 \times 10^{20}$	NA高
$^{136}\text{Xe}$	$2457.83 \pm 0.37$	8.9	$\underline{2.3 \times 10^{21}}$	2ν長、濃縮容易
$^{150}\text{Nd}$	$\underline{3317.38 \pm 0.20}$	5.7	$\underline{9.11 \times 10^{18}}$	Q値大、2ν短、濃縮難

# 二重ベータ崩壊核種

核種	Q値 (keV)	自然存在比(%)	$T_{1/2}^{2\nu}$ (year)	メリット、デメリット
$^{48}\text{Ca}$	$4273.6 \pm 4$	0.19	$4.4 \times 10^{19}$	Q値最大、NA少、濃縮難
$^{76}\text{Ge}$	$2039.006 \pm 0.050$	7.6	<u><math>1.55 \times 10^{21}</math></u>	2ν長
$^{82}\text{Se}$				
$^{96}\text{Ru}$				どれもこれも一長一短で完璧な崩壊核は無い
$^{100}\text{Ru}$				
$^{110}\text{Ru}$				それぞれ崩壊核の特徴と検出器の技術を
$^{116}\text{Ru}$				合わせて特徴的な実験を行っている
$^{124}\text{Ru}$				
$^{130}\text{Te}$	$2527.01 \pm 0.32$	<u>34.1</u>	$7.0 \times 10^{20}$	NA高
$^{136}\text{Xe}$	$2457.83 \pm 0.37$	8.9	<u><math>2.3 \times 10^{21}</math></u>	2ν長、濃縮容易
$^{150}\text{Nd}$	<u><math>3317.38 \pm 0.20</math></u>	5.7	<u><math>9.11 \times 10^{18}</math></u>	Q値大、2ν短、濃縮難

# 検出器のタイプ

## カロリメータタイプ

### ボロメータ

エネルギー分解能がよい  
高検出効率  
検出器素材が線源に近い

### シンチレータ

大容量化  
高検出効率  
使用可能な核種が限られる

## トラッキングタイプ

2本の $\beta$ 線の同定が可能  
複数の核種を使用可能  
エネルギー・角度相關の測定  
大型化が難しい

### 半導体検出器

エネルギー分解能がとてもよい  
大型化が難しい  
使用可能な核種が限られる

# 世界中の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験

## カロリメータタイプ

### ボロメータ

- CUORE ( $^{130}\text{Te}$ )
- LUCIFER ( $^{82}\text{Se}$ )
- ZnMoO<sub>4</sub> ( $^{100}\text{Mo}$ )
- AMoRE ( $^{100}\text{Mo}$ )

## トラッキングタイプ

- Super-NEMO ( $^{82}\text{Se}$ ) + カロリメータ
- MOON ( $^{100}\text{Mo}$ ) + カロリメータ
- DCBA(MTD) ( $^{150}\text{Nd}$ )
- NEXT ( $^{136}\text{Xe}$ ) + シンチレータ

## シンチレータ

- EXO ( $^{136}\text{Xe}$ ) + トラッキング
- KamLAND-Zen ( $^{136}\text{Xe}$ )
- CANDLES ( $^{48}\text{Ca}$ )
- SNO+ ( $^{150}\text{Nd}$ )
- XMASS ( $^{136}\text{Xe}$ )

## 半導体検出器

- GERDA ( $^{76}\text{Ge}$ )
- MAJORANA ( $^{76}\text{Ge}$ )
- COBRA ( $^{116}\text{Cd}$ ) + トラッキング

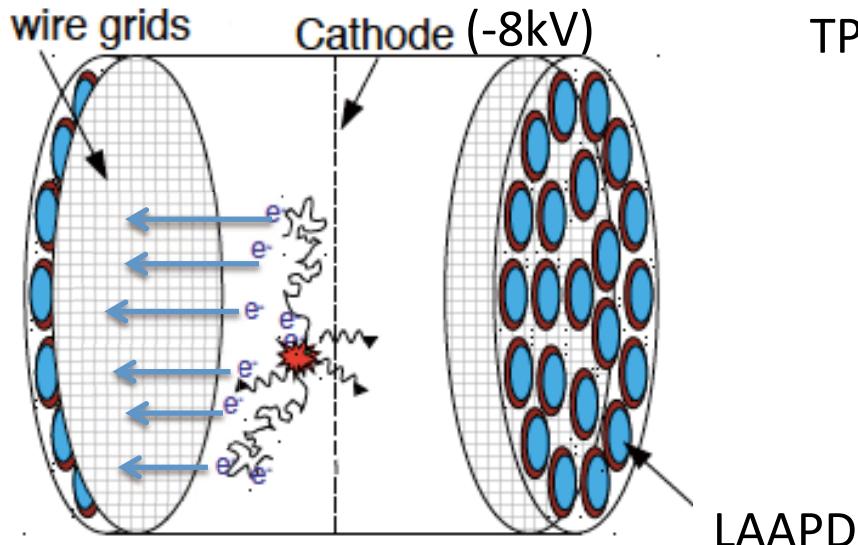
# それぞれの実験プロジェクト

# EXO ( Enriched Xenon Observatory )

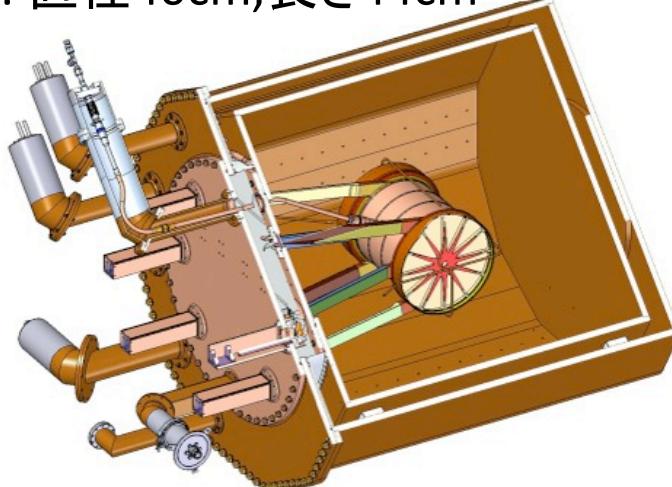
$^{136}\text{Xe}$ 、175kg 液体キセノン(80.6%濃縮)

WIPP ニューメキシコ、USA、1,600m w.e

検出器 : TPC + LAAPD (Large Area APD) × 250個



TPC: 直径40cm,長さ44cm

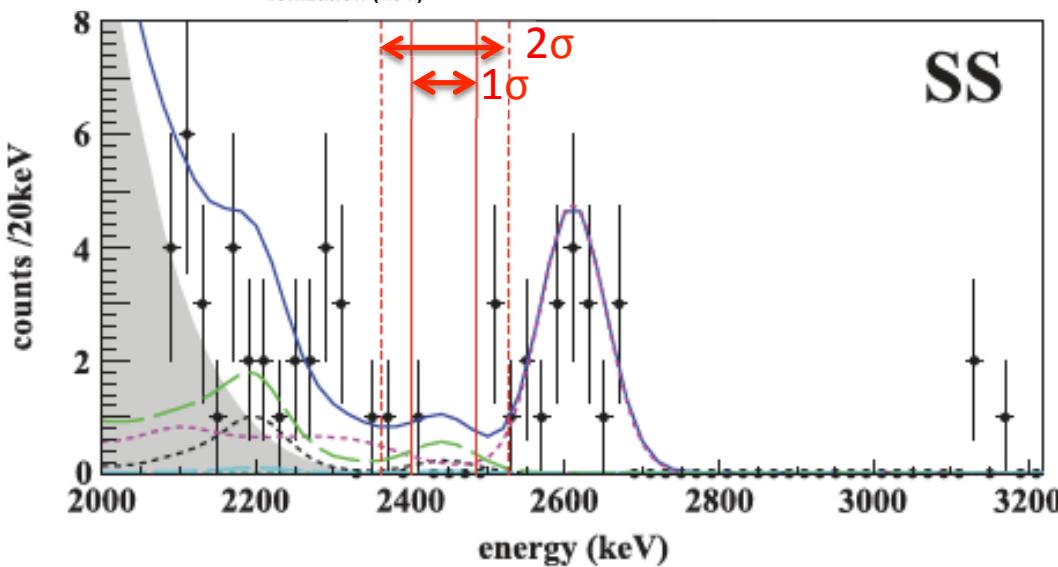
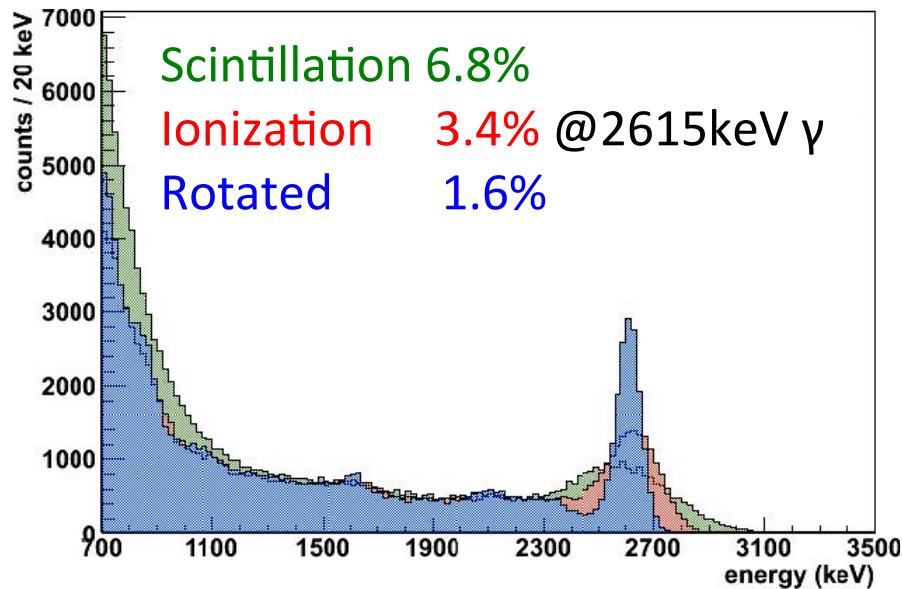
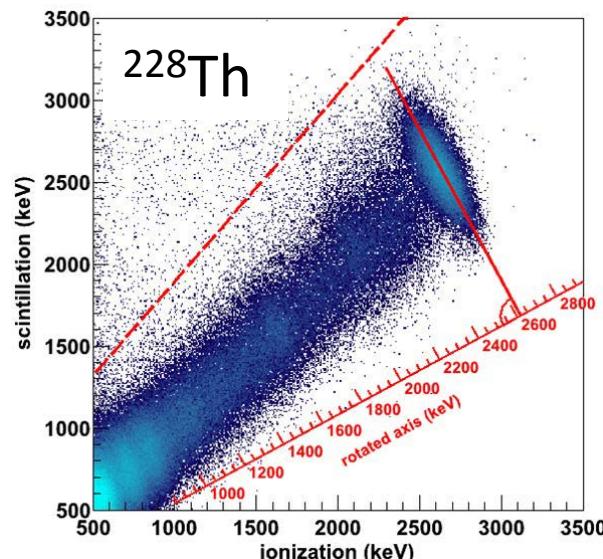


## 2種類の検出器

- シンチレーション
- Ionization

} エネルギー分解能向上(1.6%@2,615keV)  
Single(e<sup>-</sup>) / Multi( $\gamma$ )の識別、 $\alpha$ の分別

# EXO ( Enriched Xenon Observatory )



Live time : 120.7 days  
 Exposure : 32.5 kg•yr

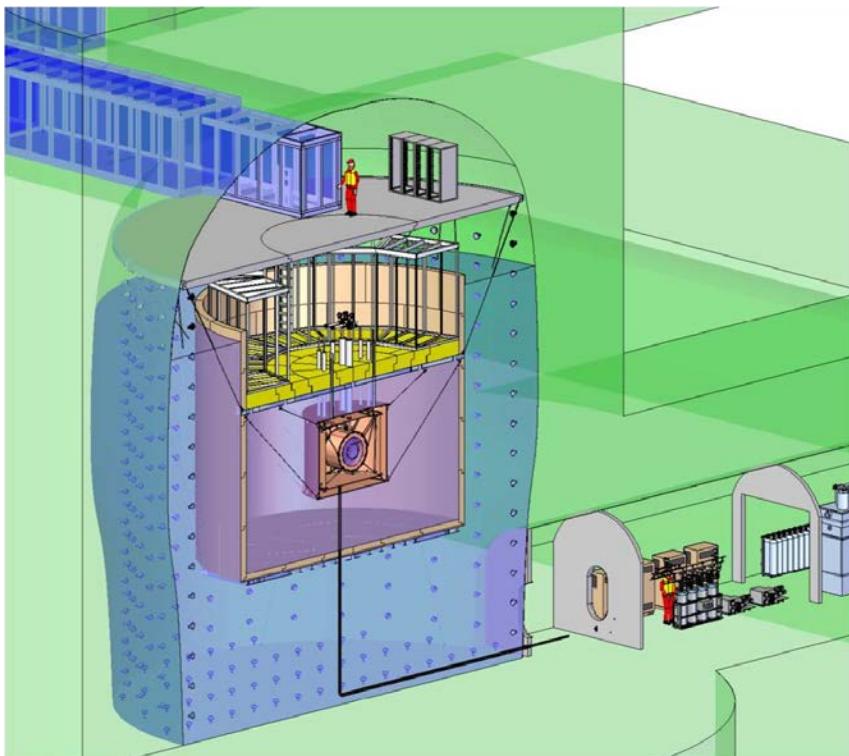
$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.6 \times 10^{25}$  yr  
 (90% C.L)

$\langle m_\nu \rangle < 140 - 380$  meV

# nEXO (next EXO)

EXO :  $^{222}\text{Rn}$ 除去システム, エレキアップグレード

2016年末までRunを行いたい。 $\langle m_\nu \rangle < 75 - 270\text{meV}$



nEXO (next EXO) @ SNO Lab.

キセノン 5 ton (4.5 ton fiducial)

第一期 : EXO-200の大型化

$\langle m_\nu \rangle < 11-30\text{ meV}$  (10年)

**逆階層構造をカバー**

第二期 : Baタギング

(Ba++測定する事によって  
B.G. フリー測定)

$\langle m_\nu \rangle < 4-10\text{ meV}$  (10年)

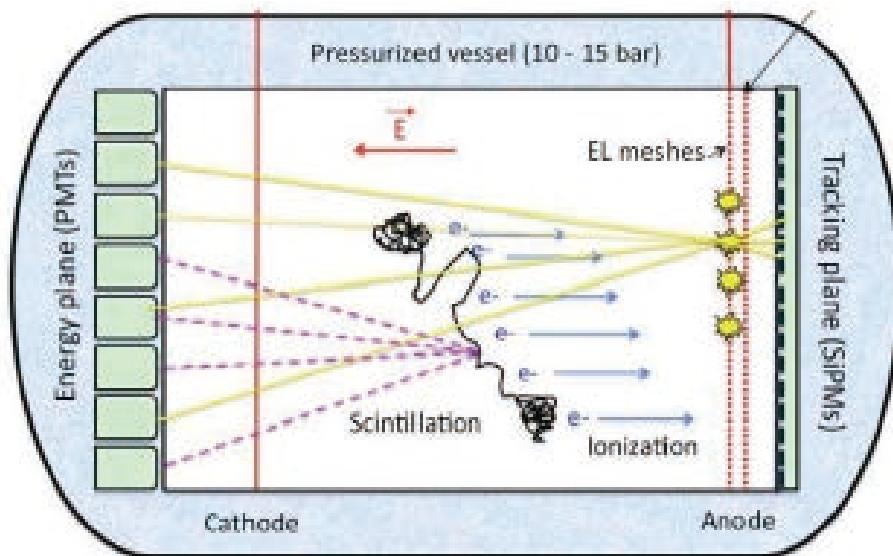
**正常階層構造へ**

# NEXT ( Neutrino Experiment with a Xenon Time-Projection Chamber )

$^{136}\text{Xe}$ 、100kg (90.1%濃縮)、最初は10kgから(stage-I)

Canfranc、スペイン、2,500m w.e

検出器：高圧ガスXe TPC + PMT (ionization + scintillation)



最初にシンチレーションで発光(S1)

次に電子がELメッシュで発光(S2)

PMTはS1とS2を検出(Eを測定)

SiPMはS2を検出(Trackを測定)

2014年から10kgのXeでスタート

エネルギー分解能の最終目標

: 0.21% ( $\sigma$  @ 2458 keV)

5年間測定の最終的な感度

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 5 \times 10^{26} \text{ yr}$  (90% C.L.)

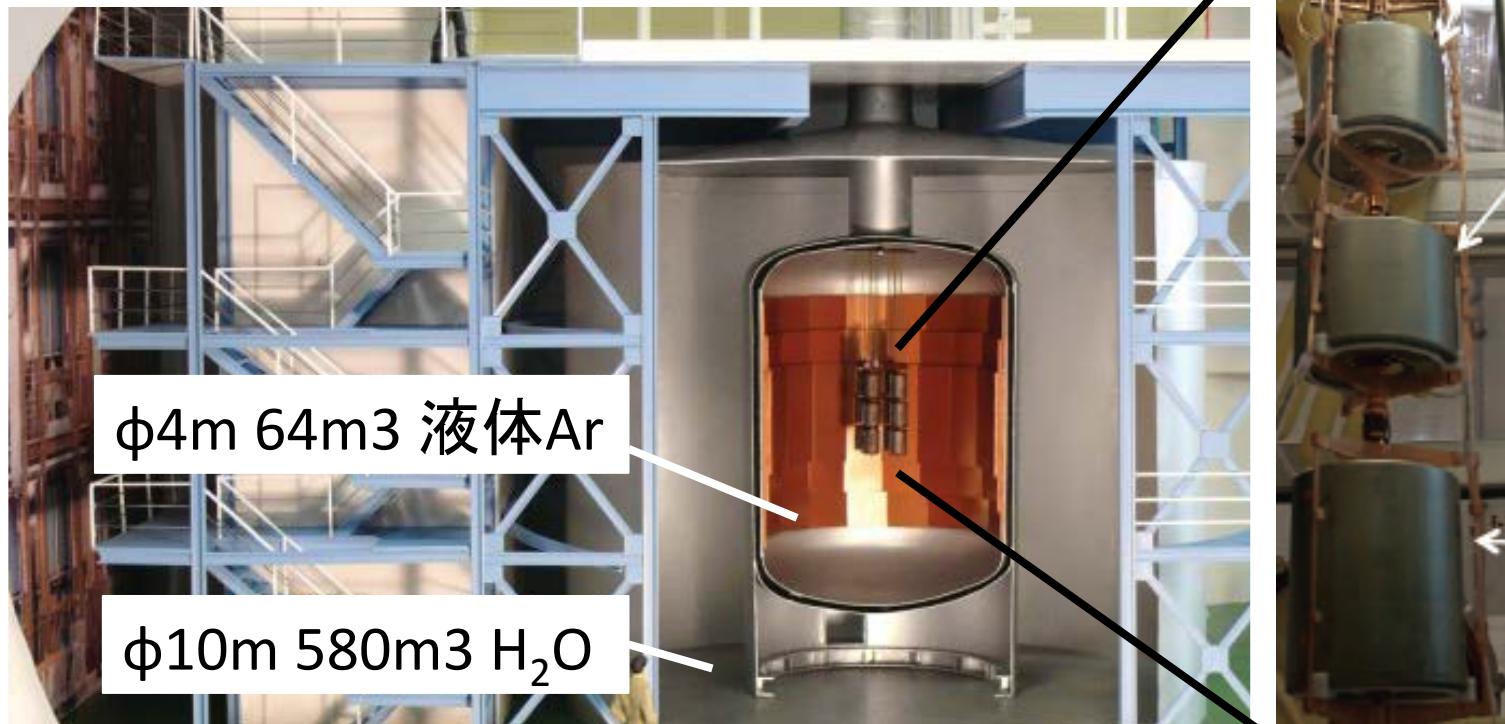
$\langle m_\nu \rangle < 25 - 67 \text{ meV}$

# GERDA (The GERmanium Detector Array)

Ge 14.66kg ( $^{76}\text{Ge}$  86%濃縮) + 20kg (Phase 2)

GranSasso イタリア、3,700m w.e

検出器 : Ge

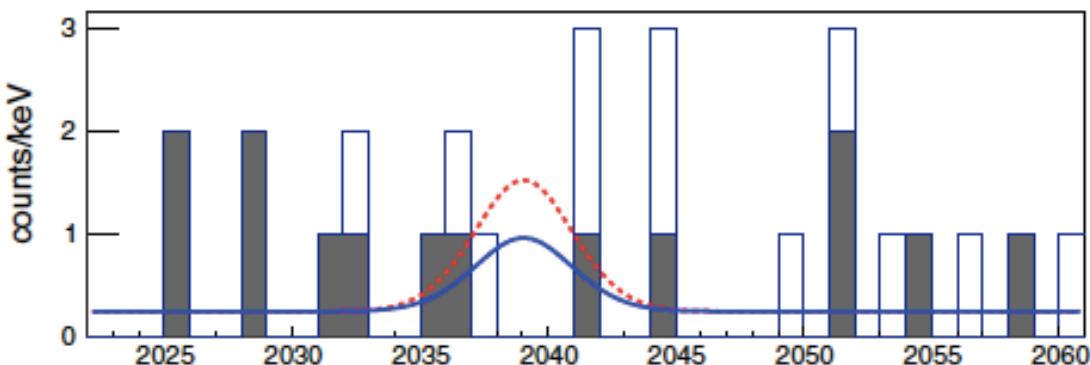


エネルギー分解能 : 4.5 keV(FWHM) @ 1,524.6 keV Phase 1  
3.1 keV(FWHM) @ 1,524.6 keV Phase 2

# GERDA (The GERmanium Detector Array)

Ge 14.6kg + 3.0kg (Phase 2)

21.6kg•yr



$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 2.1 \times 10^{25} \text{ yr}$$

(90% C.L)

GERDA+HdM+IGEX

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.0 \times 10^{25} \text{ yr}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 200 - 400 \text{ meV}$$

KK-claim を disfavored

## Phase 2

2013年秋-2014年春に開始予定

100 kg•yr での感度 (3年間以内に到達予定)

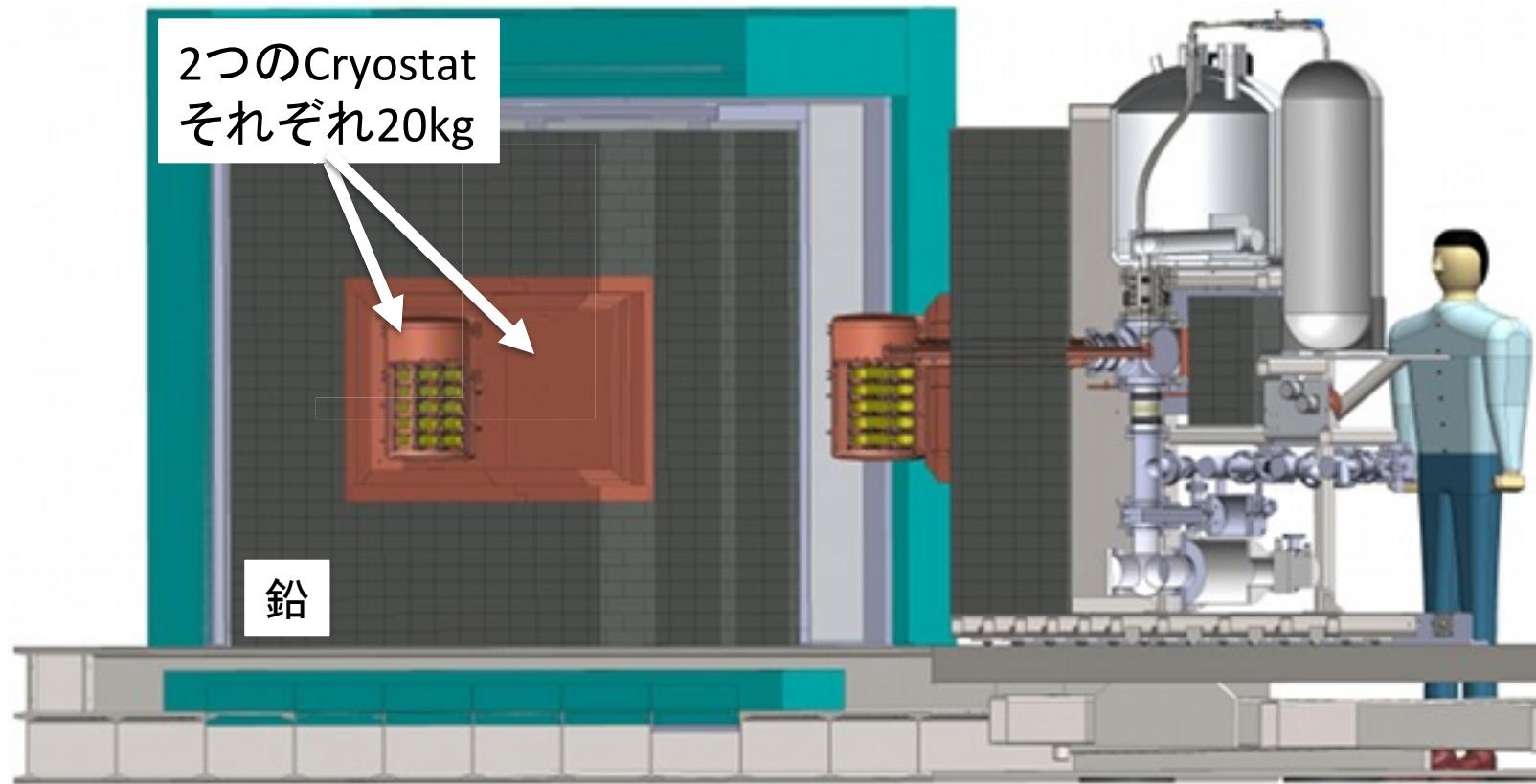
$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} < 1.4 \times 10^{26} \text{ yr} \quad \langle m_\nu \rangle < 90 - 150 \text{ meV}$$

# MAJORANA

Ge 30kg ( $^{76}\text{Ge}$  86%濃縮) + 10kg ( $^{\text{nat}}\text{Ge}$ )

Sanford Underground lab. サウスダコタ USA、4,300m w.e

検出器 : Ge



# MAJORANA

予定 (2013年の時点での話)

プロトタイプCryostat (2strings,  $^{nat}Ge$ )

現在進行中

Cryostat 1 (3strings  $^{76}Ge$  & 4 strings  $^{nat}Ge$ )

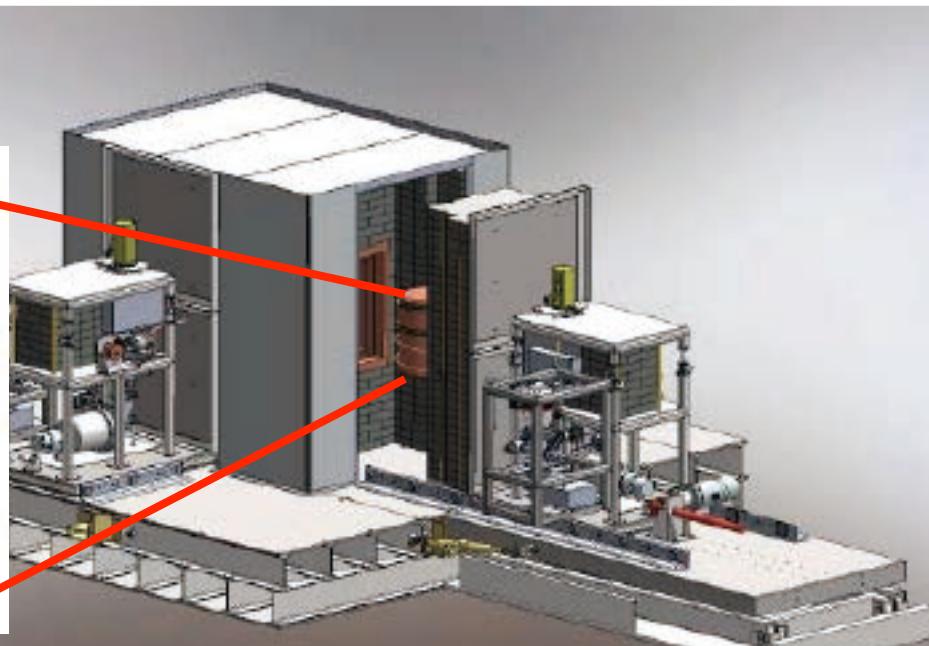
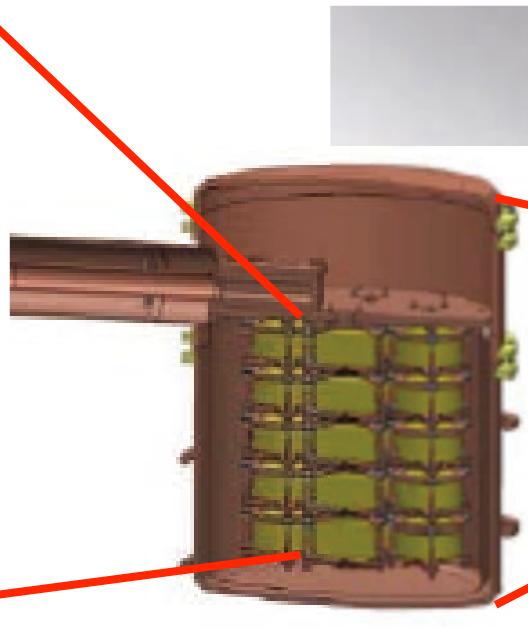
2014年始め

Cryostat 2 (7strings,  $^{76}Ge$ )

2014年後半



test string

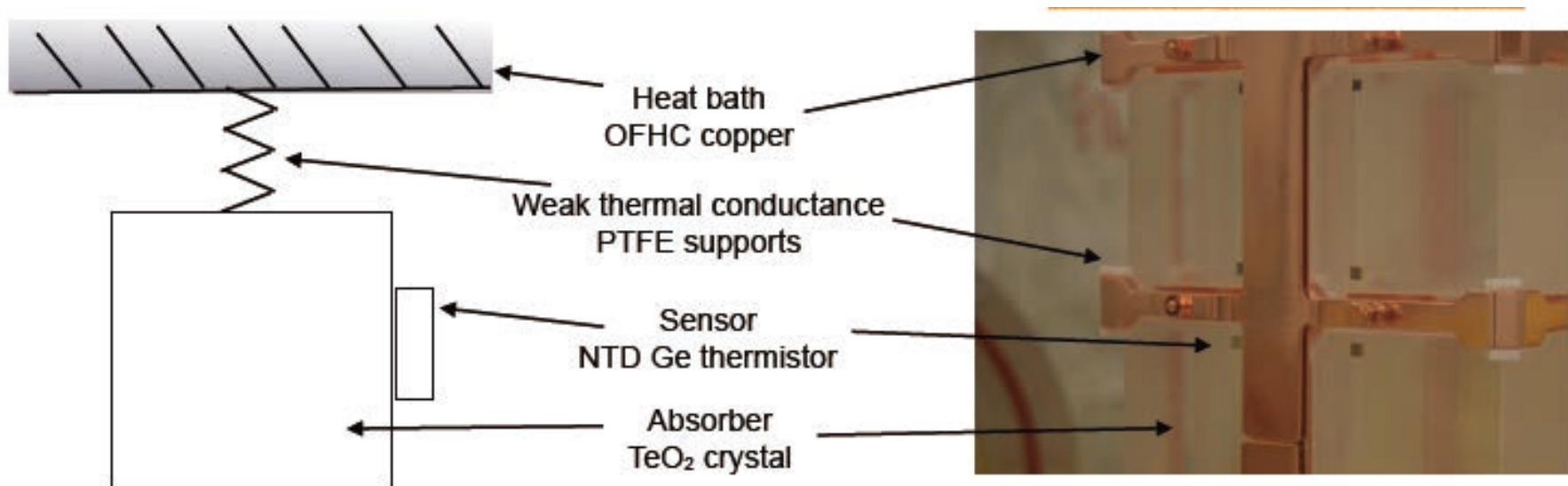


# CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events)

$^{130}\text{Te}$  206kg、 $\text{TeO}_2$  741 kg (同位体濃縮無し)、結晶988個

GranSasso イタリア、3,700m w.e

検出器：ボロメータ



CUORE0

エネルギー分解能 : 5.3 keV (FWHM) @ 2615 keV

# CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events)



Cuoricino  
2003-2008  
11.3kg  $^{130}\text{Te}$   
 $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 2.8 \times 10^{24} \text{ yr}$   
 $\langle m_\nu \rangle < 300 - 700 \text{ meV}$

CUOREO  
2012-2014  
11kg  $^{130}\text{Te}$   
B.G. 低

CUORE

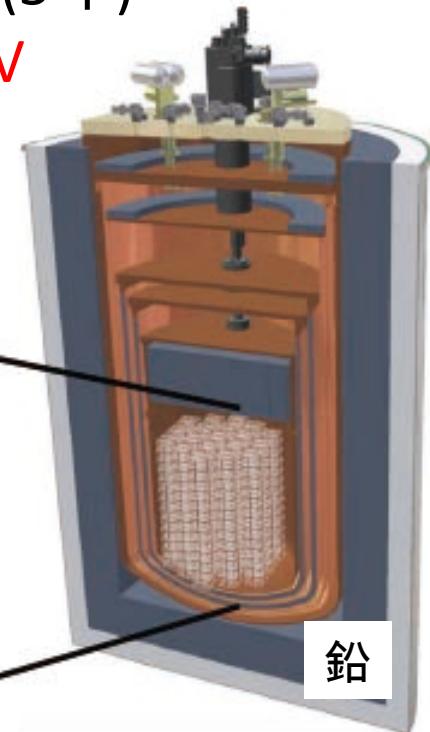
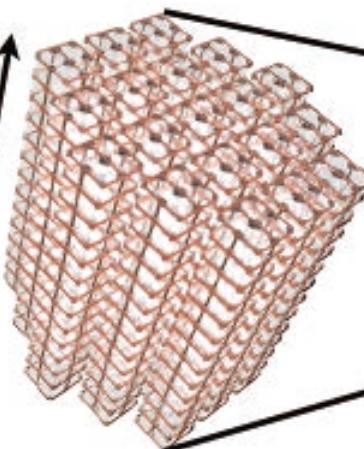
2014年末 -

206 kg  $^{130}\text{Te}$

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.6 \times 10^{26} \text{ yr (5年)}$

$\langle m_\nu \rangle < 41 - 95 \text{ meV}$

80 cm

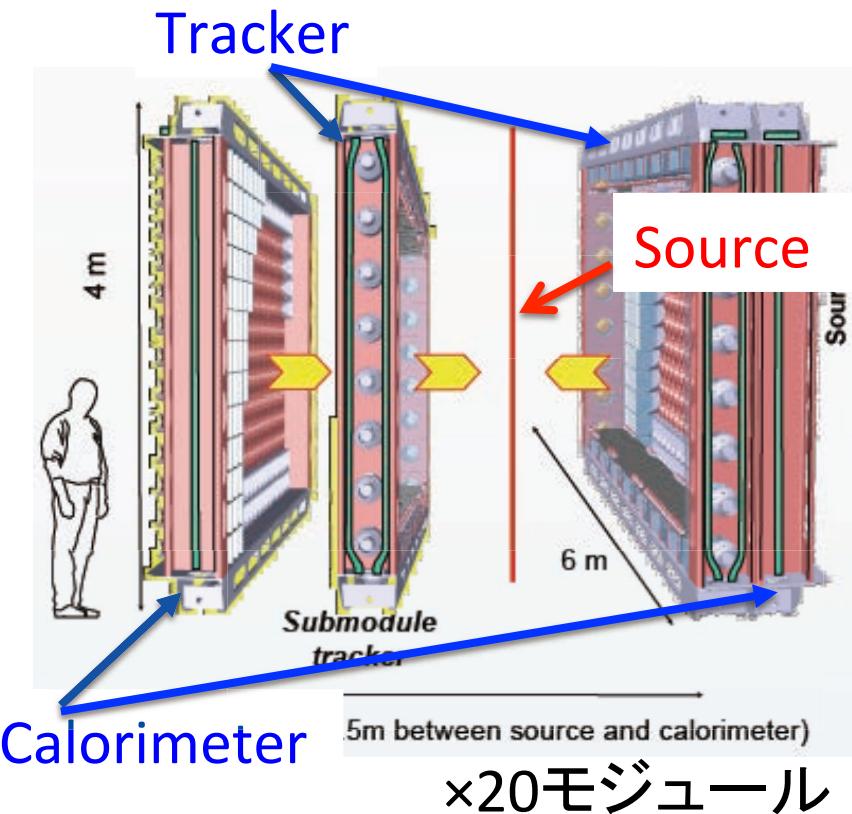


# SuperNEMO (Super Neutrino Ettore Majorana Observatory)

$^{82}\text{Se}$  100+kg (or  $^{150}\text{Nd}$  or  $^{48}\text{Ca}$ )

LSN Modane, フランス、4,800m w.e

検出器 : Drift chamber + Calorimeter



Drift chamber : 2,000 cell

Calorimeter : 500PMTs + Scintillator

e<sup>-</sup> の 2 track を測定する事でB.G.  
除去、角度相関が測定可能

Efficiency : ~ 30%

エネルギー分解能 : 4% @ 3MeV

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1 \times 10^{26} \text{ yr}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 40 - 100 \text{ meV}$$

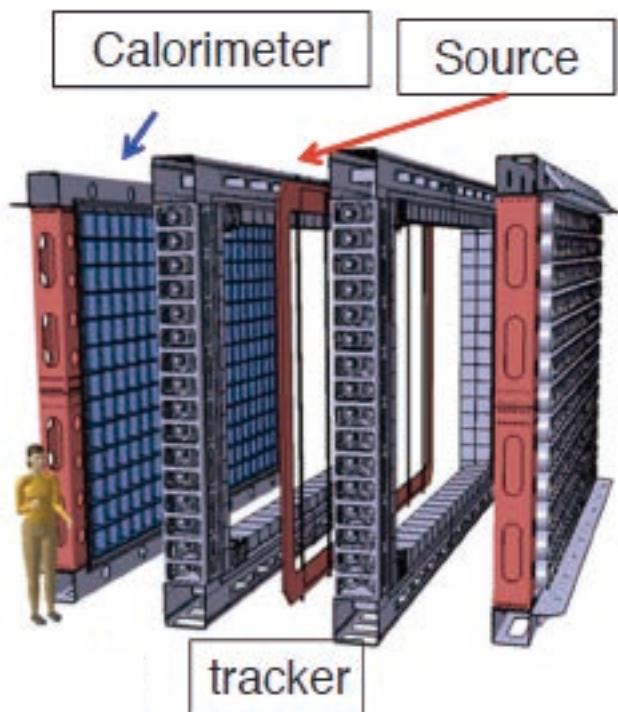
現在1モジュールの Demonstrator  
を建設中

# SuperNEMO Demonstrator Module

$^{82}\text{Se}$  7 kg

LSN Modane, フランス、4,800m w.e

検出器 : Drift chamber + Calorimeter (712PMTs + Scintillator)



Efficiency : ~ 30%

エネルギー分解能 : 4% @ 3MeV

21 kg•yr (7kg×3年間)

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 6.5 \times 10^{25} \text{ yr}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 200 - 400 \text{ meV}$$

2013年末に建設開始

2014年末に測定開始

SuperNEMOの最初のモジュール

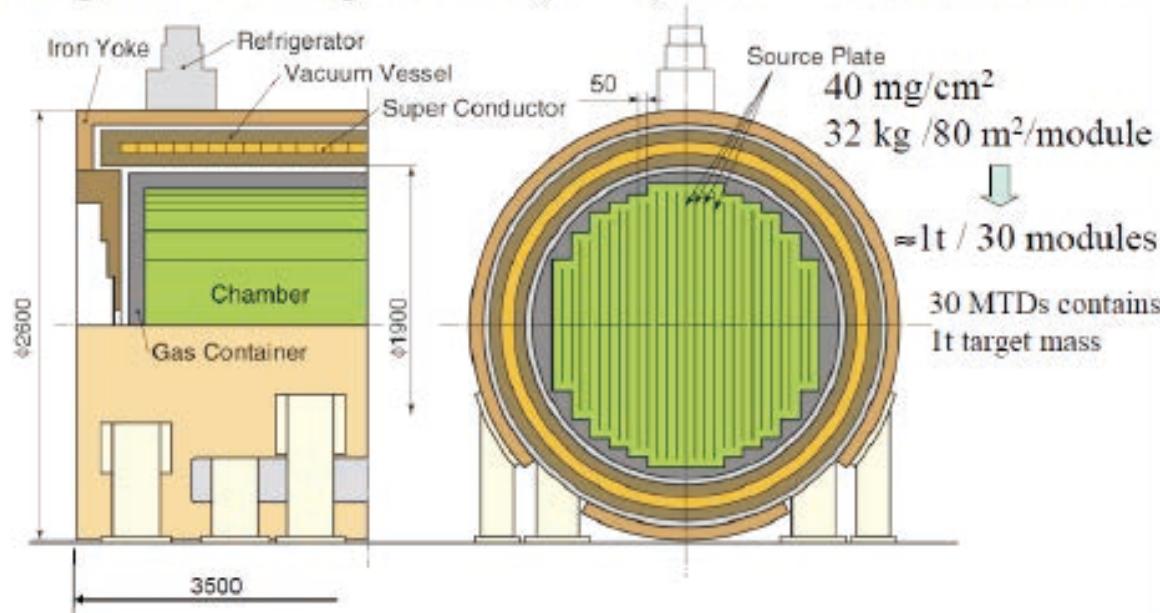
# MTD(DCBA)

$^{150}\text{Nd}$  50%濃縮 32kg ×30基 (1トン相当)

設置場所未定 (DCBAはKEKで実験中)

検出器 : Drift chamber

Magnetic Tracking Detector (MTD) based on DCBA-T2&T3



エネルギー分解能

: 3.4% (at  $^{150}\text{Nd}$ )

$\gamma$ 線に不感

電子・陽電子を分別  
放出角の測定

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1 \times 10^{26} \text{ yr}$

$\langle m_\nu \rangle < 40 \text{ meV}$

現在プロトタイプ

DCBAで実験中

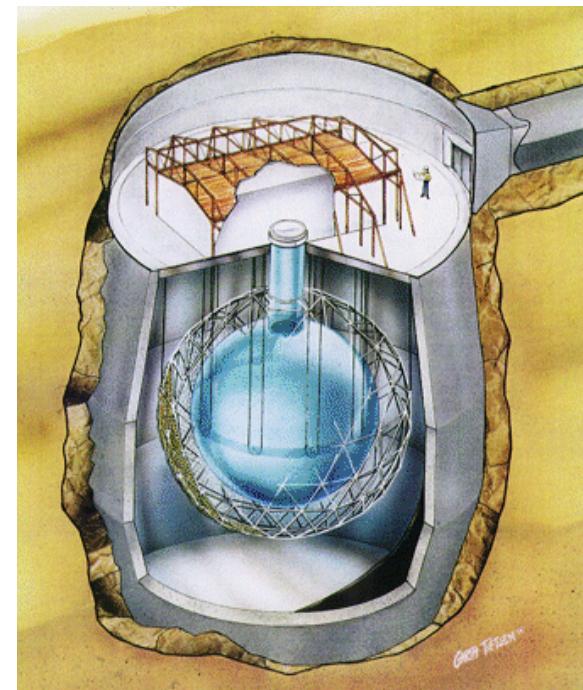
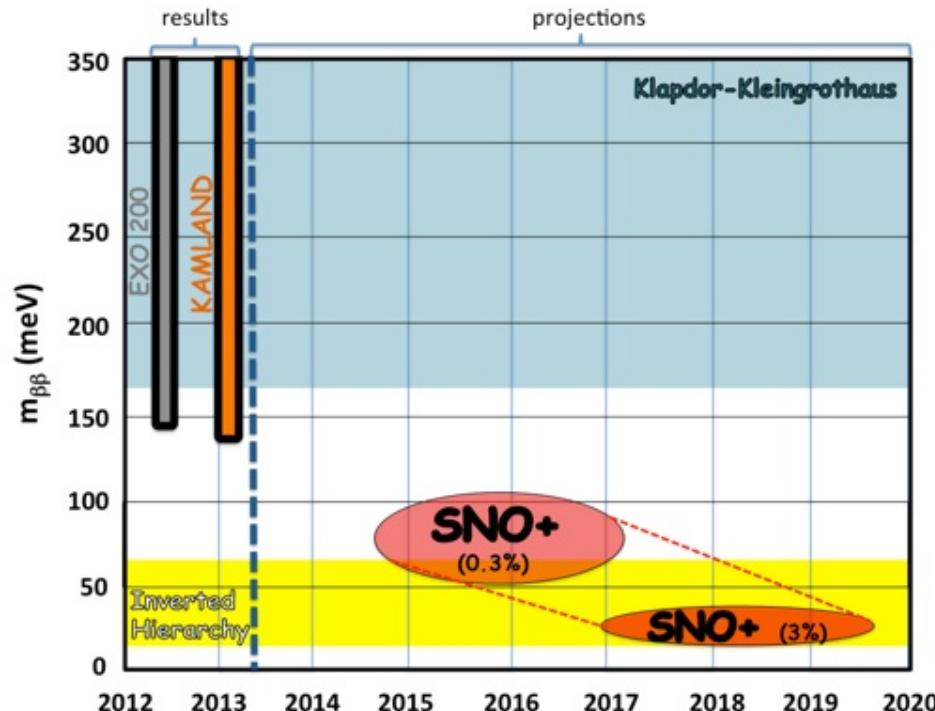
~ 2016年の予定

# SNO+ (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events)

$^{130}\text{Te}$  800kg in fiducial volume (0.3% in liquid scintillator)

SNO Lab. カナダ、6,010m w.e

検出器：液体シンチレータ(LS) + PMT 9500本



エネルギー分解能 : 4% (FWHMではなく $\sigma$ )

2014年中頃からLS送液、2015年初めにTe導入

# その他

COBRA

$^{116}\text{Cd}$ 、CdZnTe半導体 Array

(arXiv:arXiv:1211.6604, <http://www.cobra-experiment.org/>)

LUCIFER

$^{82}\text{Se}$ 、ZnSeシンチレーティングボロメータ

(arXive:1303.4080)

AMoRE

$^{100}\text{Mo}$ 、 $^{40}\text{Ca}^{100}\text{Mo}$ シンチレータ

(Yong-Hamb Kim@TAUP2013 など)

CANDLES

$^{48}\text{Ca}$ 、 $^{40}\text{CaF}_2$ シンチレータ



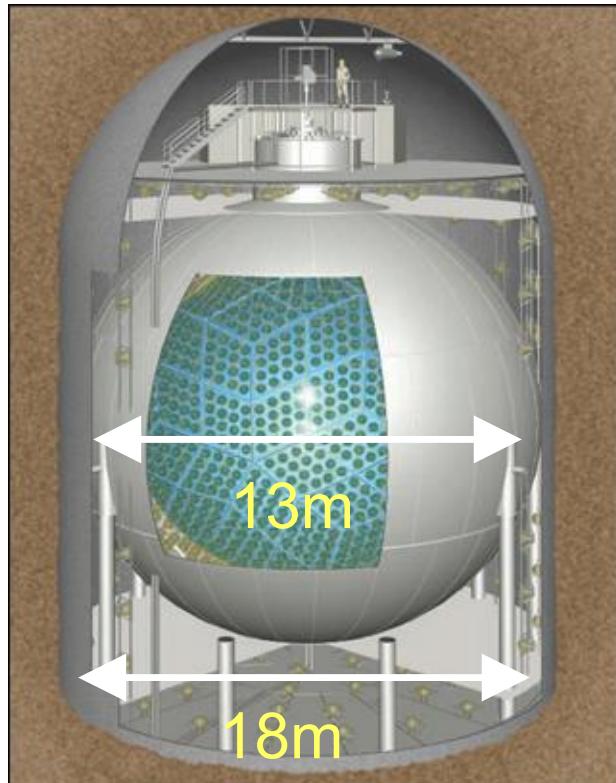
岸本先生のトーク



# KamLAND

神岡鉱山内カムランドエリア、2,700m w.e.

検出器：液体シンチレータ(LS) + PMT 1325(17inch) + 554(20inch)



LS : バルーン内に1000トン  
純水による液・液抽出洗浄  
蒸留・窒素パージによる純化

U :  $3.5 \times 10^{-18} \text{ g/g}$

Th:  $5.2 \times 10^{-17} \text{ g/g}$

バッファー層が外部からの $\gamma$ 線を遮蔽

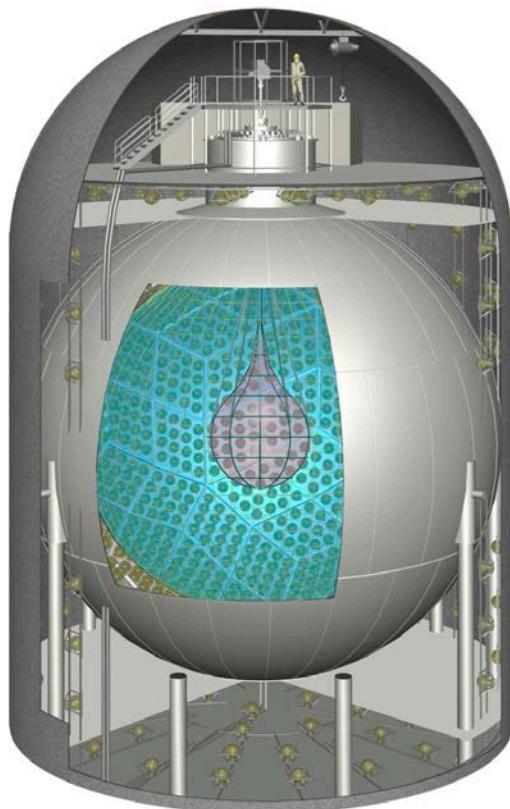
大容量 低バックグラウンド

約10年前から検出器は稼働中

アクティブシールドに最適

# KamLAND-Zen

ミニバルーン(約17m<sup>3</sup>、直径3.1m)にXe含有液体シンチレータ  
キセノンガス約320kg (<sup>136</sup>Xe 90.6%濃縮)



## キセノンガス

- LSに溶けて色が付かない
- LSに対し、体積比約2.5倍溶ける  
(最大約3.2 wt%)
- LSから取り出し・再利用・純化が可能

## ミニバルーン

- 低質量での製作可能(フィルムは約1kg)
- 宇宙線破碎事象(<sup>10</sup>C)、太陽νなど  
体積に比例するB.G.を抑える事が可能

# 内部バルーン(ミニバルーン)

## フィルム

- 厚さ25μmの6ナイロン
- 光透過度99.4%(@400nm)
- 放射性不純物  
 $(U,Th,40K) = (2,3,2) \times 10^{-12} \text{g/g}$
- 熱溶着で製作



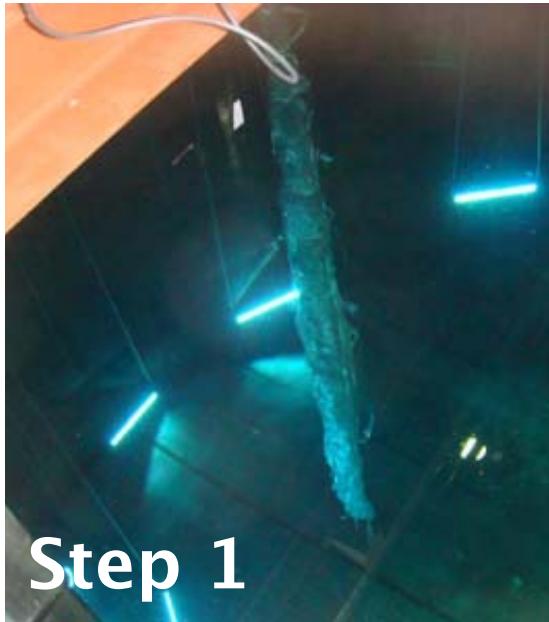
バルーン本体  
は12本の紐で  
支えている。



# ミニバルーン設置

- 外部バルーンを痛めないようにLSはそのまま
- 開口部は直径50cm

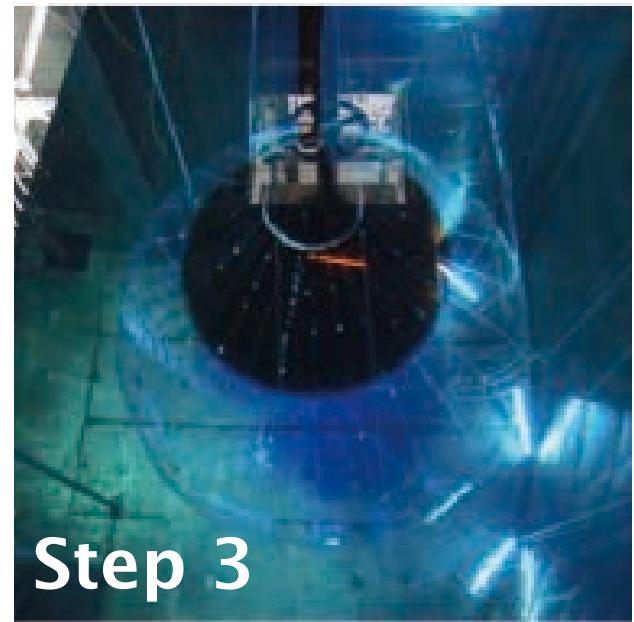
テスト@柏アトックス



Step 1



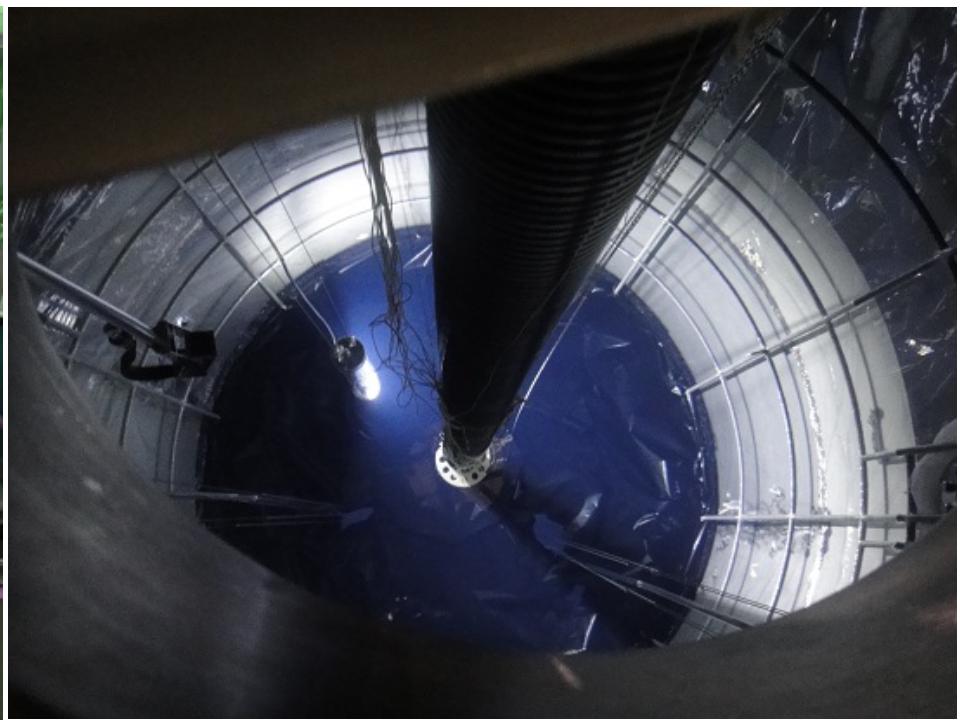
Step 2

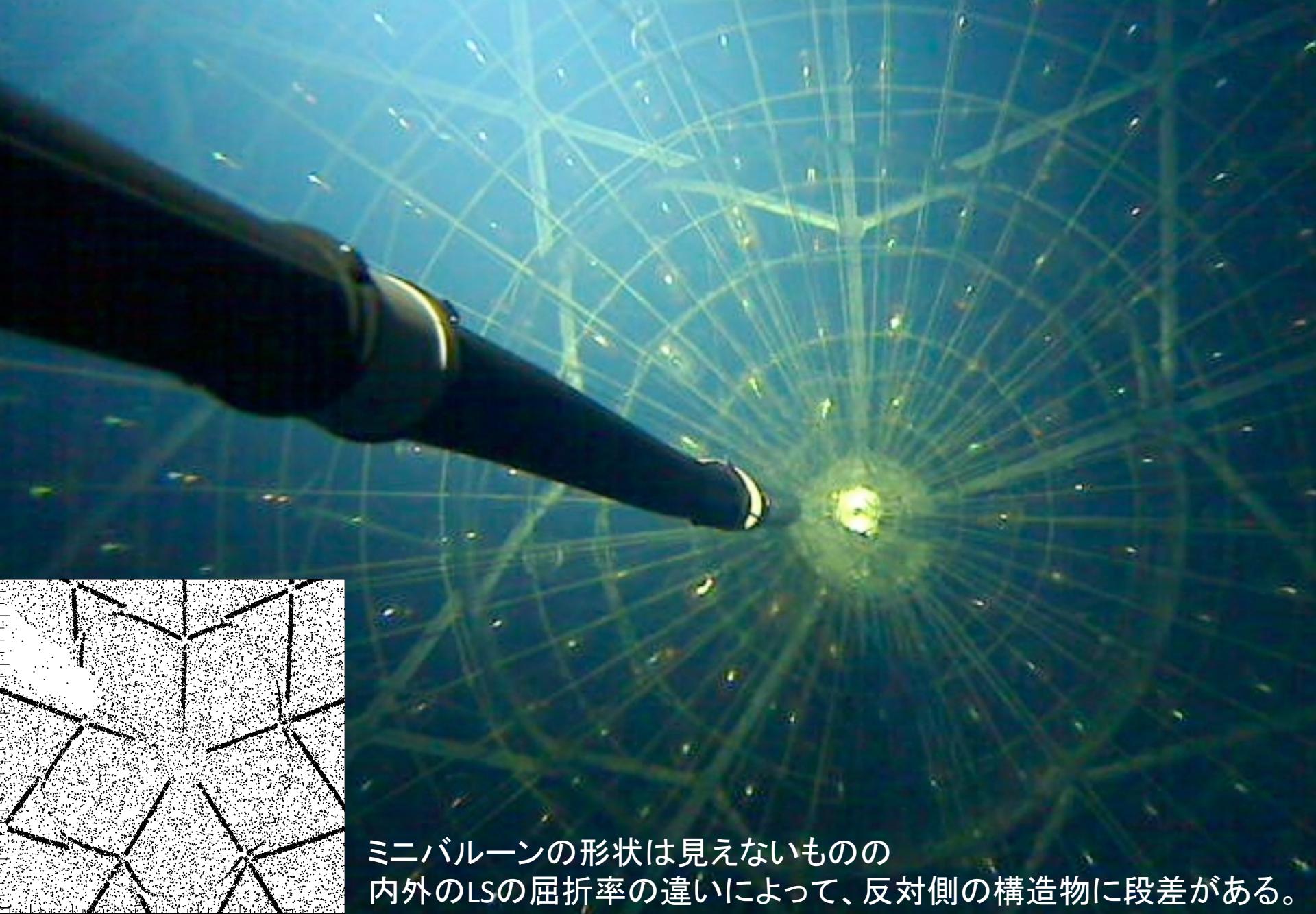


Step 3

折り畳んだミニバルーンを  
重いLSを入れながら挿入

キセノンを入れていない +0.02%の密度差をつけ  
LSを送液して拡張 たXe-LSに入れ替え

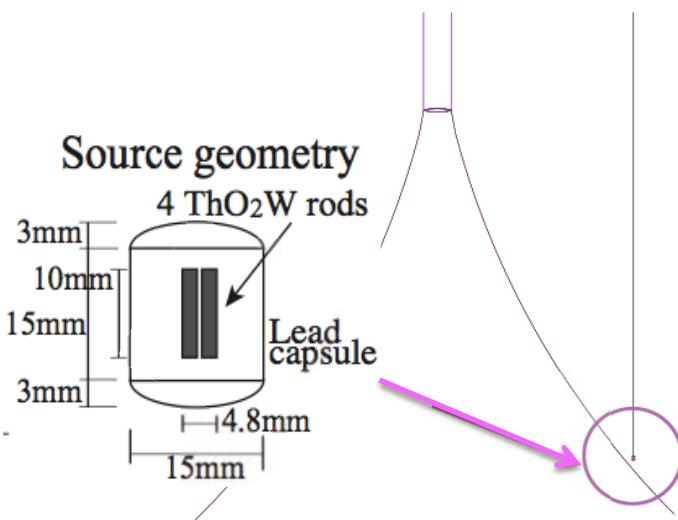
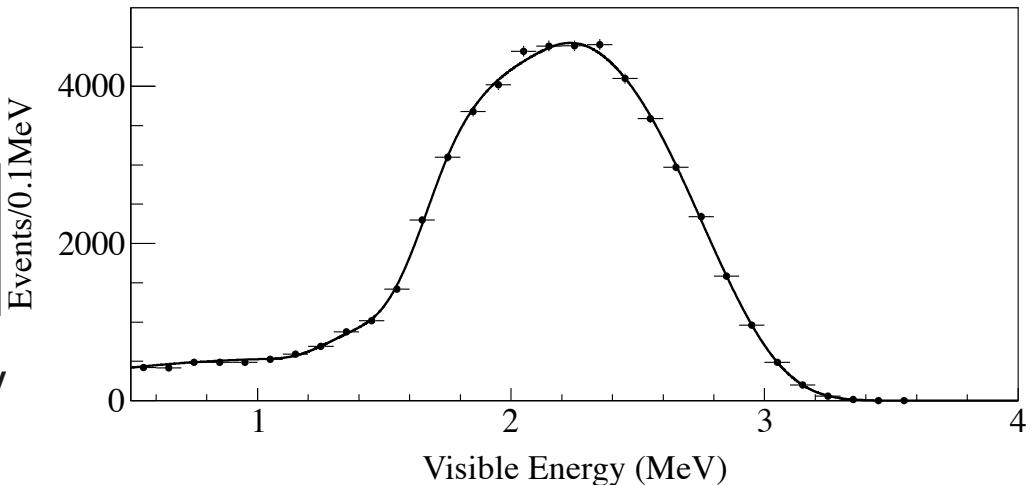
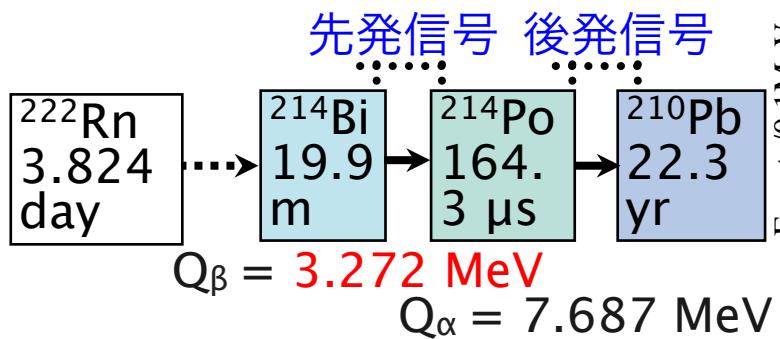




ミニバルーンの形状は見えないものの  
内外のLSの屈折率の違いによって、反対側の構造物に段差がある。

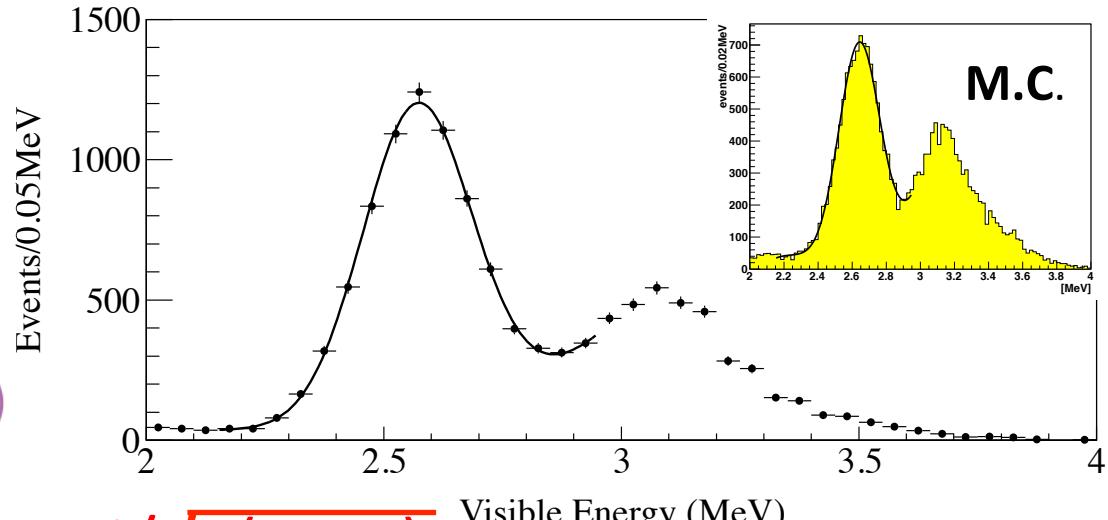
# 較正

$^{214}\text{Bi} (\beta+\gamma's)$  : Xe-LS送液時に混入した $^{222}\text{Rn}$ の娘核



エネルギー分解能 :  $\sigma_E = 6.6\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$

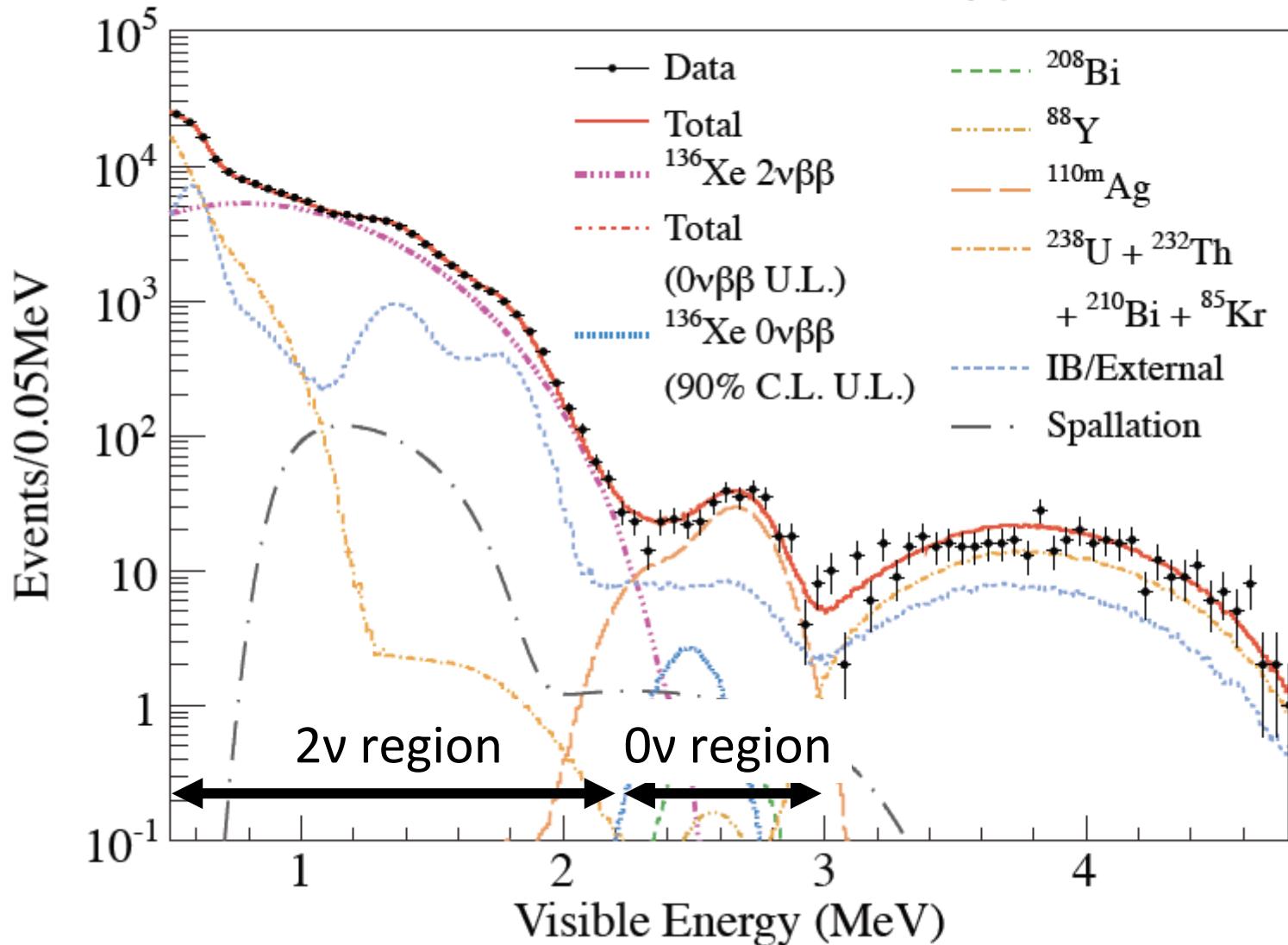
$^{208}\text{Tl}$  (2.6MeV  $\gamma$ 's) : 線源 ThO<sub>2</sub>-W (Th 4%)



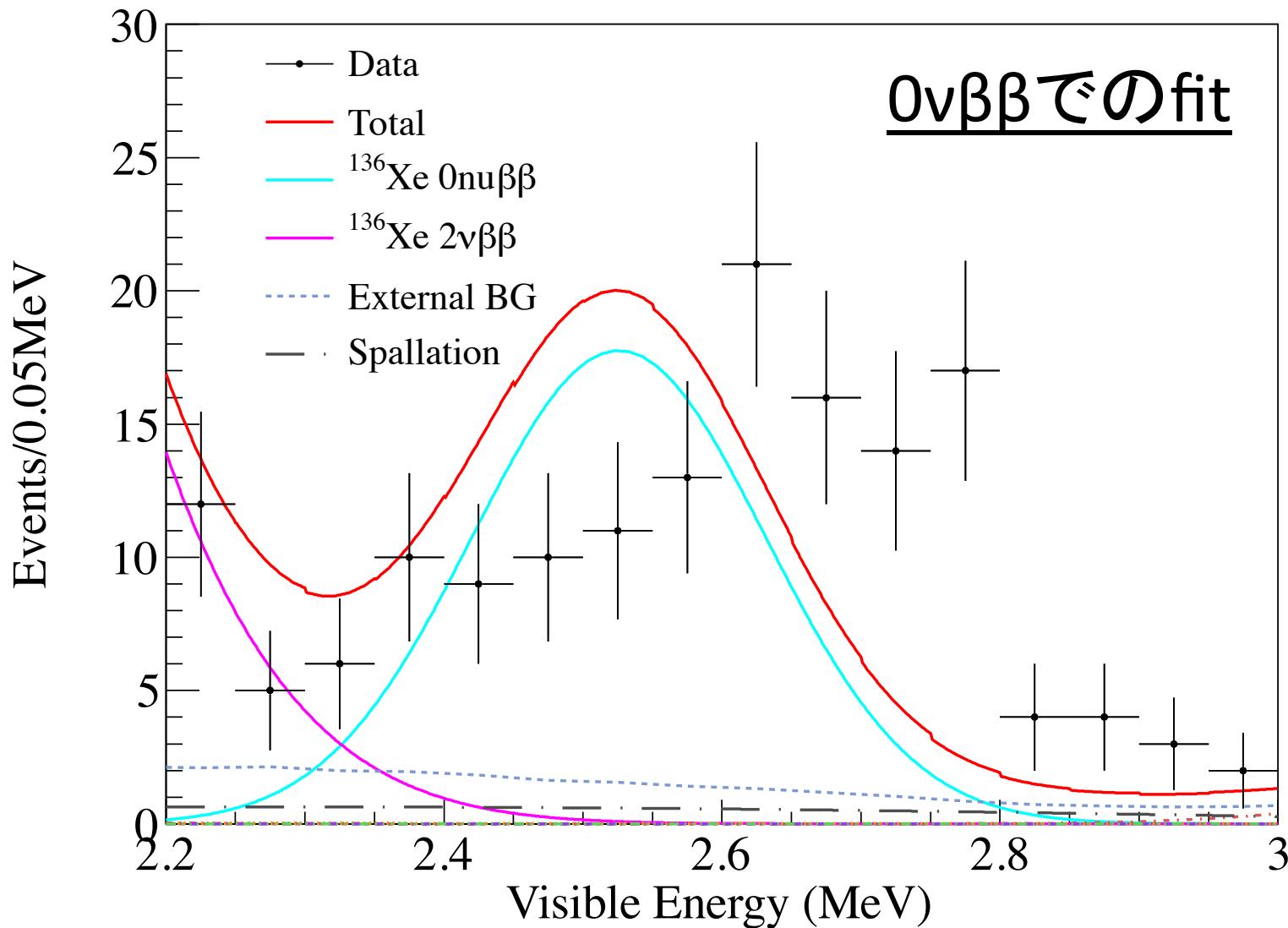
# Phase I の観測データ

~2012年6月14日

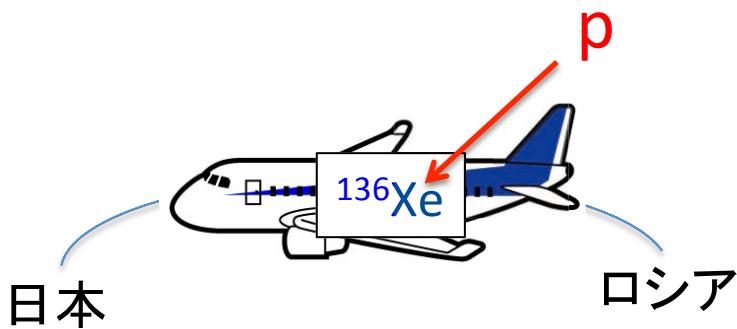
DS-1 + DS-2 : 213.4日



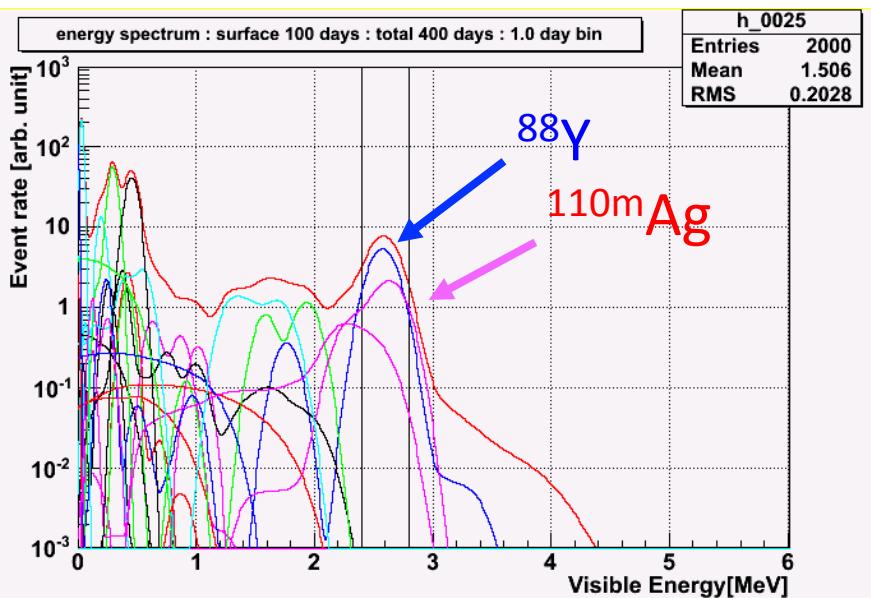
# Phase I の観測データ (前半 77.6 days)



# B.G.探し



地上100日、地下300日後の見積り



$^{136}\text{Xe} + 1\text{GeV proton}$  の反応  
断面積のデータを元にM.C.

## 福島第一原子力発電所事故の落下物



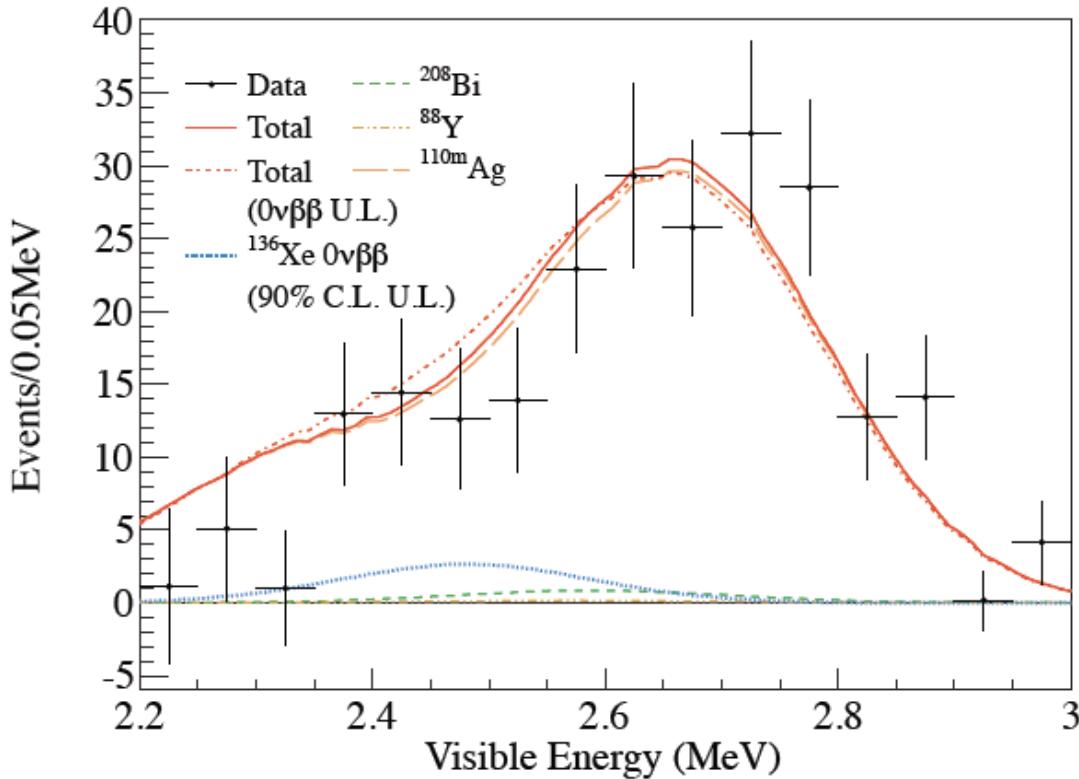
フィルム表面の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ は測定済

ENSDFの全原子核の崩壊を調査  
超寿命の候補は以下の4つ

$^{110m}\text{Ag}$  (250d)     $^{208}\text{Bi}$  ( $3.7 \times 10^5$ y)  
 $^{88}\gamma$  (107d)     $^{60}\text{Co}$  (5.27y)

# KamLAND-Zen phase I の結果

(213.4 days, exposure : 89.5 kg·yr of  $^{136}\text{Xe}$ )



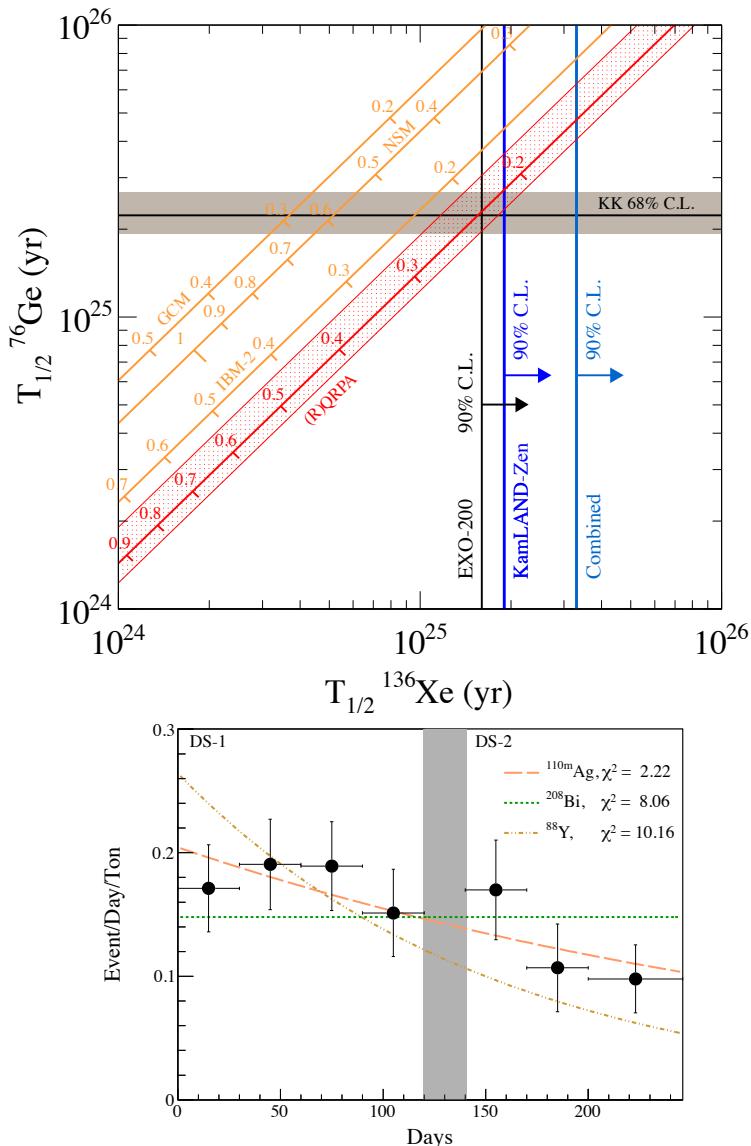
0ν $\beta\beta$   
+  
 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{208}\text{Bi}$ 、 $^{88}\text{Y}$ 、 $^{60}\text{Co}$   
で fitting

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.9 \times 10^{25} \text{ yr}$$

世界最高感度を達成

0ν $\beta\beta = 0$  が best fit

# KamLAND-Zen phase I の結果



KamLAND-Zen + EXO-200 combined

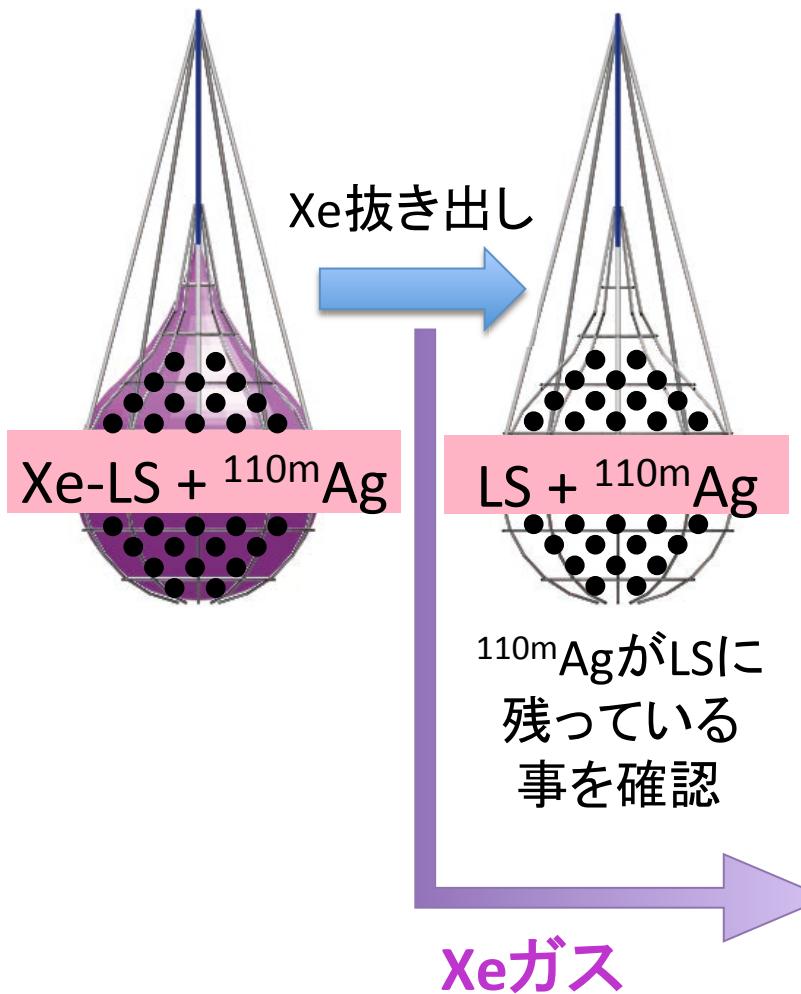
$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.4 \times 10^{25} \text{ yr}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 120 - 250 \text{ meV}$$

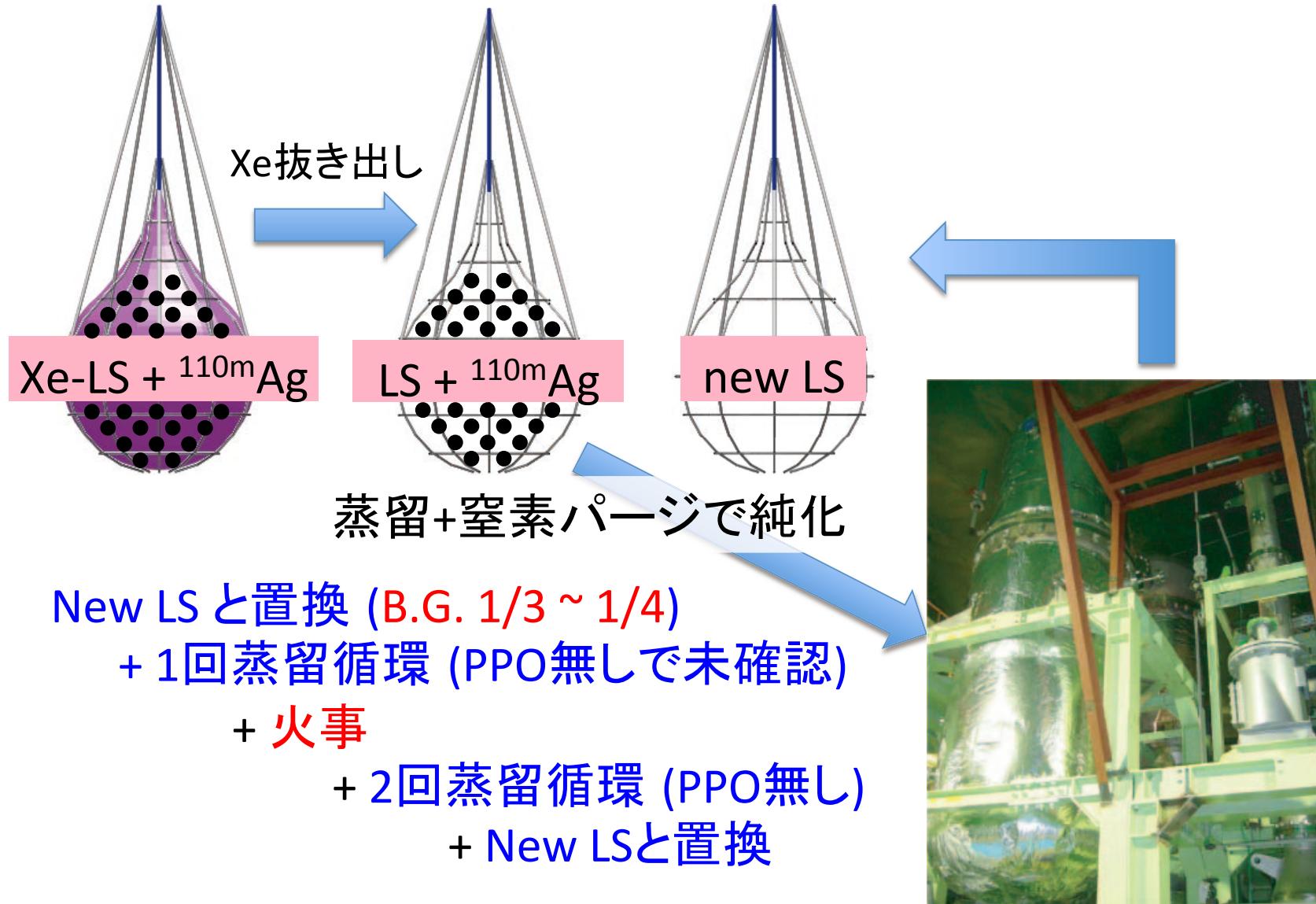
原子核の不定性を考慮し、  
97.5% C.L. で KK-claim を排除

長期観測で主要B.G.を $^{110\text{m}}\text{Ag}$ と特定  
純化作業に移る

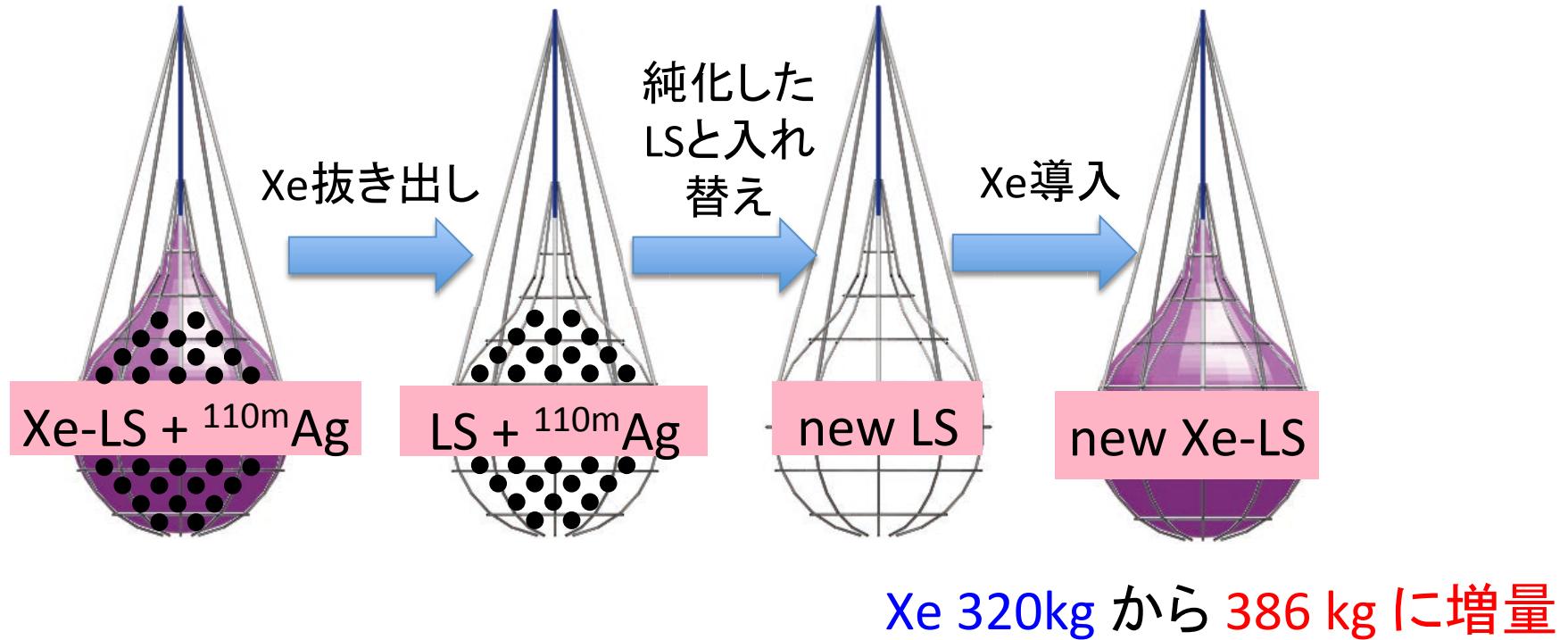
# 純化作業 (Xe)



# 純化作業 (LS)



# Xe-LS導入

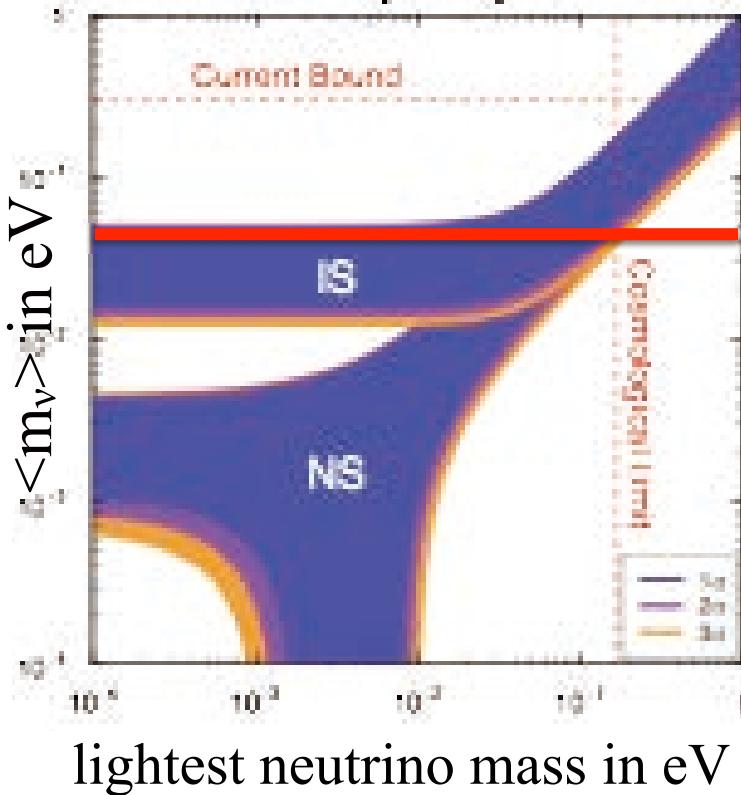


2013年11月Xe-LS入れ替え完了

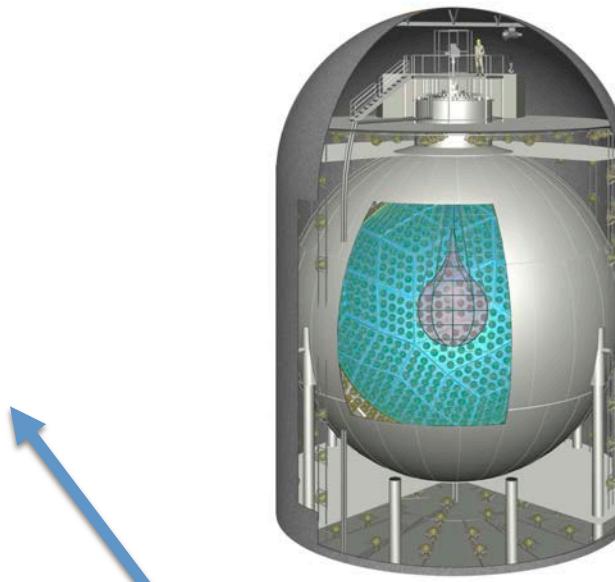
2013年12月送液チューブ撤収

KamLAND-Zen Phase II 開始 現在順調にデータ取得中

# 今後の予定

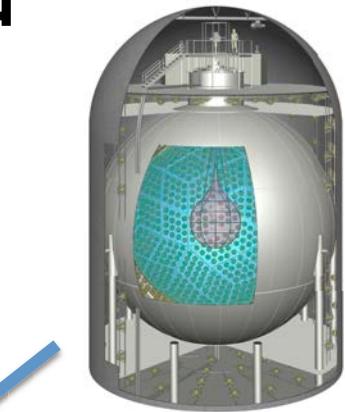
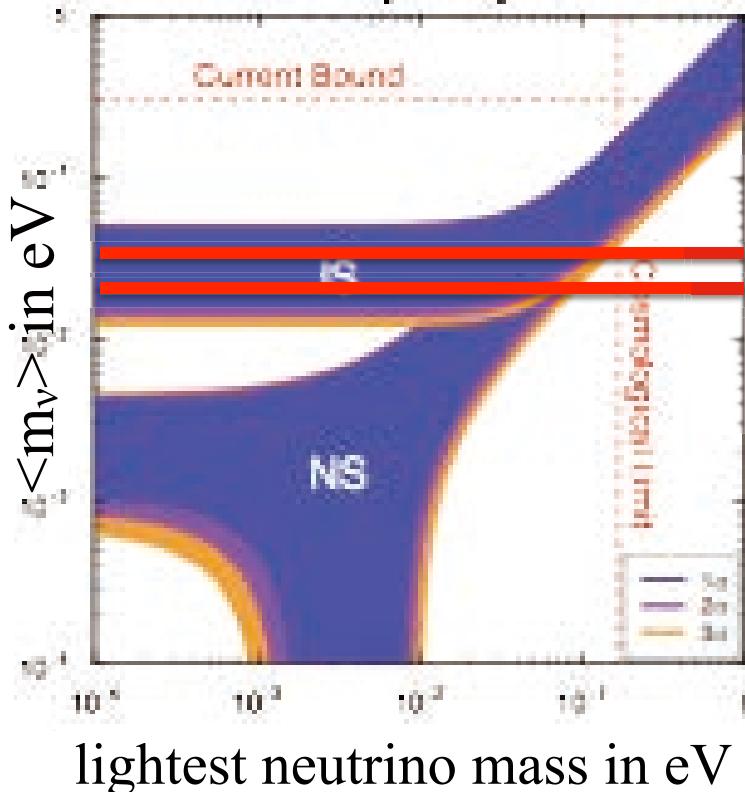


## 600kg フェーズ



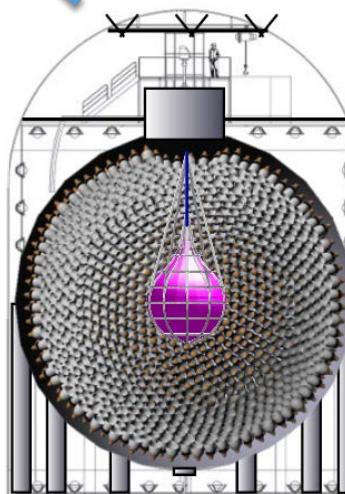
- 一回り大きなミニバルーン  
半径1.54m → 1.8m
- キセノン 600kg 使用予定
- Phase II の様子を見ながら  
準備開始
- 来年 or 再来年開始予定

# 近い将来の計画



## 加圧フェーズ

10mの深さ : 1.8気圧下  
体積に比例するB.G.を  
抑えながら Xe 800kg  
を導入可能



## KamLAND2-Zen

高発光LS (1.5倍)

+ 集光ミラー

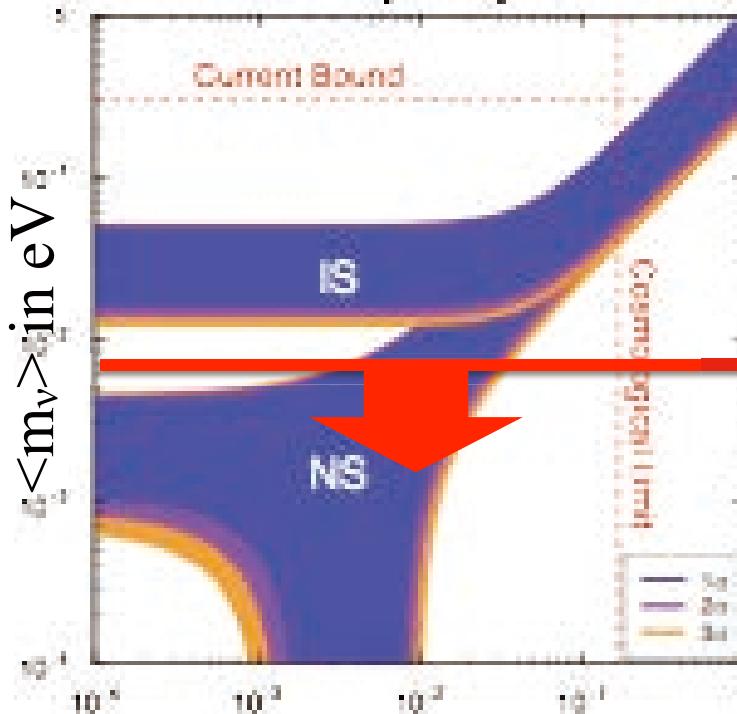
+ 高 Q.E. PMT

$\sigma_E$  (2.5MeV)

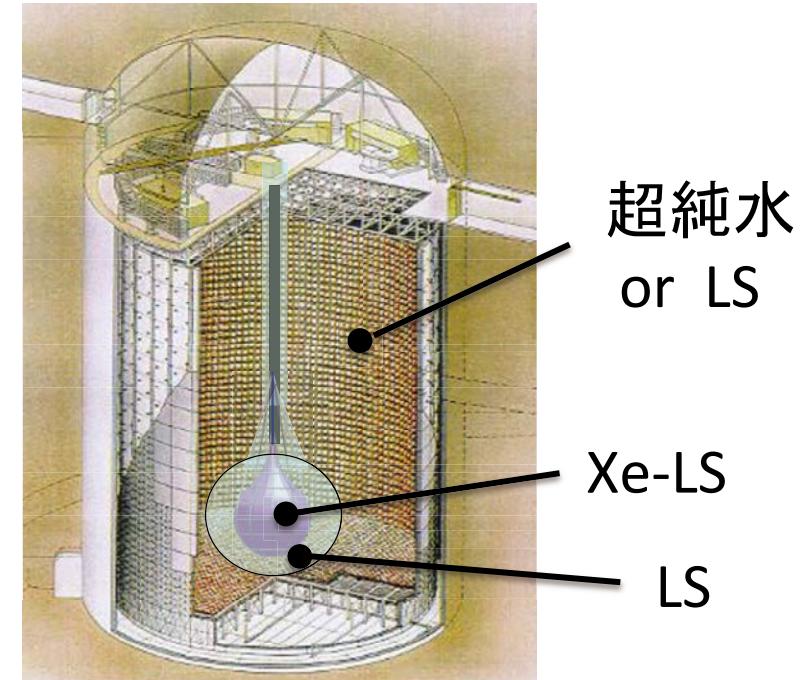
: 4% → 2.5%

発光性フィルムの導入  
2016年建設開始予定

# 夢(遠い将来の計画)



Super-KamLAND-Zen



# まとめ

- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験は、ニュートリノのマヨラナ性、質量階層構造と質量スケールを検証出来るためとても重要と考えられる。
- 逆階層構造領域の探索を目指した実験が、実験開始に向け建設中・計画中。
- KamLAND-Zen + EXO, GERDAによって KK-claim を排除。縮退構造領域を網羅するため実験継続中。
- 昨年末に KamLAND-Zen Phase II が開始。  
順調にデータ取得中。
- KamLAND-Zen collaboration は次の 600kg フェーズの準備、  
および将来計画に向けた開発研究を継続中。