



# KamLAND-Zen 800の準備状況

第7回 高エネルギー春の学校  
東北大学 ニュートリノ科学研究センター  
D1 尾崎 秀義

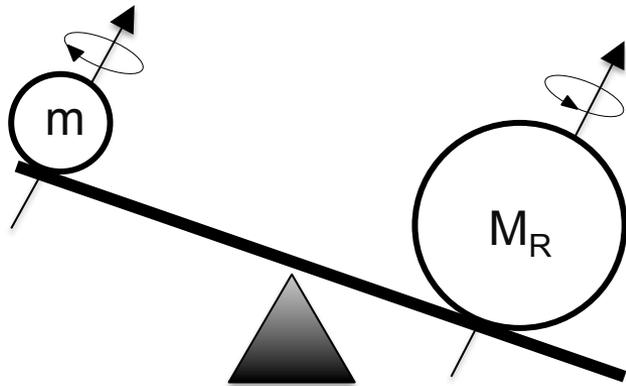
# マヨラナニュートリノ

- ニュートリノはディラック粒子かマヨラナ粒子か決まっていない。
- ニュートリノ振動から**ニュートリノは有限な質量をもつ**ことが判明。
- しかし、他のレプトンに比べニュートリノは極端に軽い。

→ **ニュートリノはマヨラナ**であることが有力。

シーソー機構による軽い質量の説明

宇宙物質優勢の謎の解明



どちらも  
ニュートリノがマヨラナ  
であることが鍵!

なぜ宇宙には物質が  
多いのか?



レプトジェネシス:  
重い右巻きニュートリノの崩壊がバ  
リオン数を作るのではないか?

重い右巻きニュートリノを仮定することで  
自然とニュートリノ質量を軽くできる!

- では、マヨラナ性を検証する方法は？ →  **$0\nu 2\beta$  崩壊**

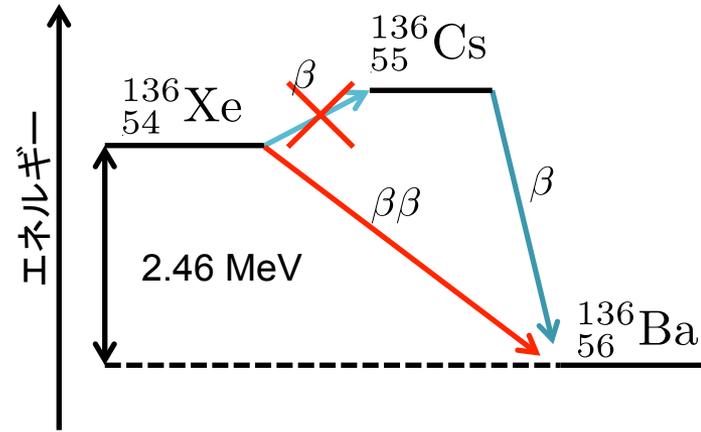
# 2β崩壊

- β崩壊がエネルギー的に禁止される限られた原子核で起こる。

(Ca, Ge, Se, Zr, Mo, Cd, Te, Xe, Nd など)

- 2β崩壊は**非常に稀な現象!!**

(Xeだと、 $T_{2\nu 2\beta \ 1/2} \sim 2 \times 10^{21}$  yr)

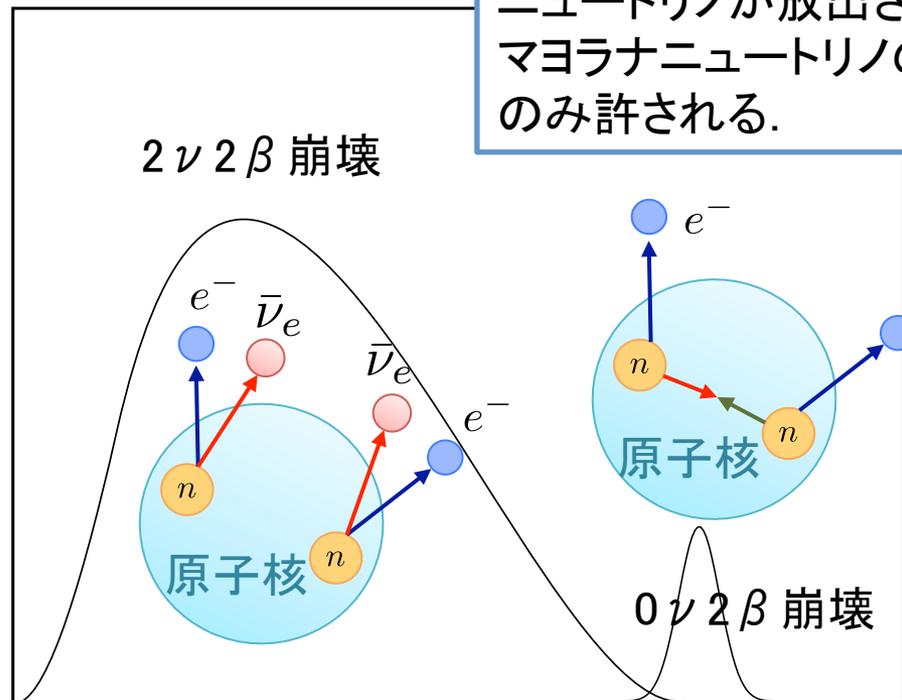


- $0\nu 2\beta$ 崩壊は未発見,  
 $2\nu 2\beta$ よりも**さらに希少な現象**.

(Xeだと、 $T_{0\nu 2\beta \ 1/2} > 10^{26}$  yr)

- 観測できたら**ニュートリノがマヨラナである証拠!**

# of events



ニュートリノが放出されない。  
マヨラナニュートリノの場合のみ許される。

0ν2βの観測半減期

# 0ν2β崩壊探索

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} (g_{A,\text{eff}}/g_A)^4 |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

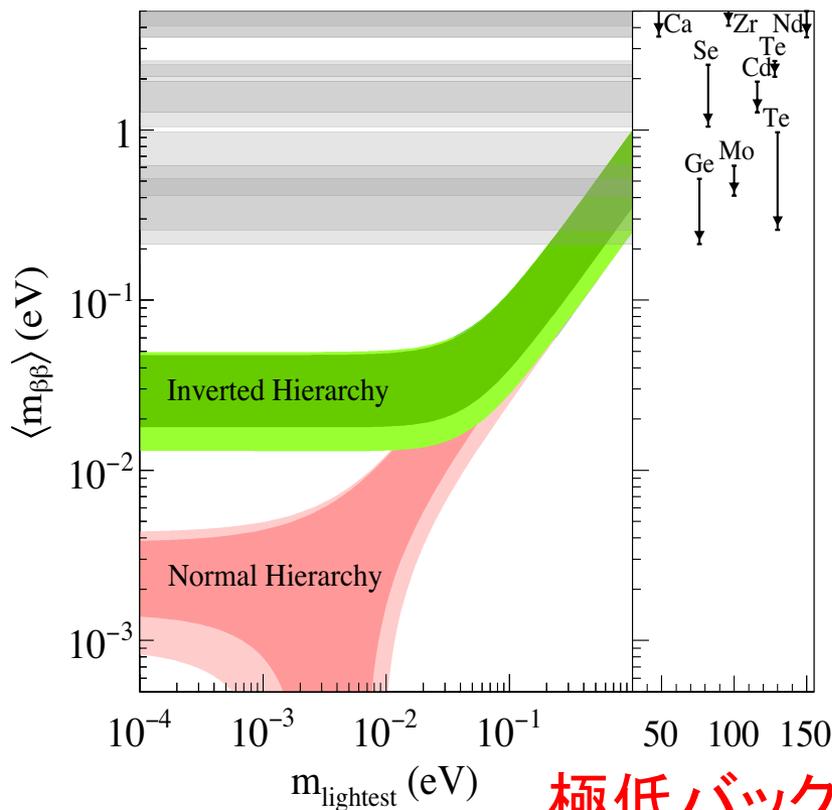
位相空間因子

核行列要素

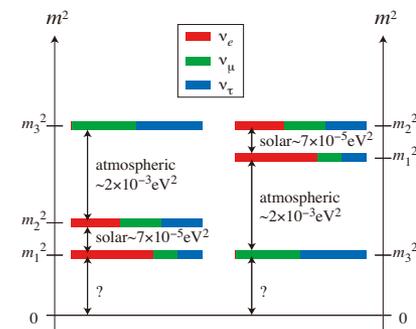
軸性ベクトル結合定数

マヨラナニュートリノの有効質量

不定性が大きい



現在の  
各実験からの制限



質量縮退構造 <math>< 10^{27}</math> 年

逆階層構造 <math>10^{27} \sim 10^{28}</math> 年

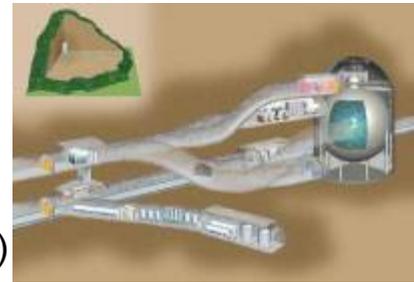
崩壊核 100 ~ 1000 kg

標準階層構造 > <math>10^{28}</math> 年

極低バックグラウンド & 大量の崩壊核が重要

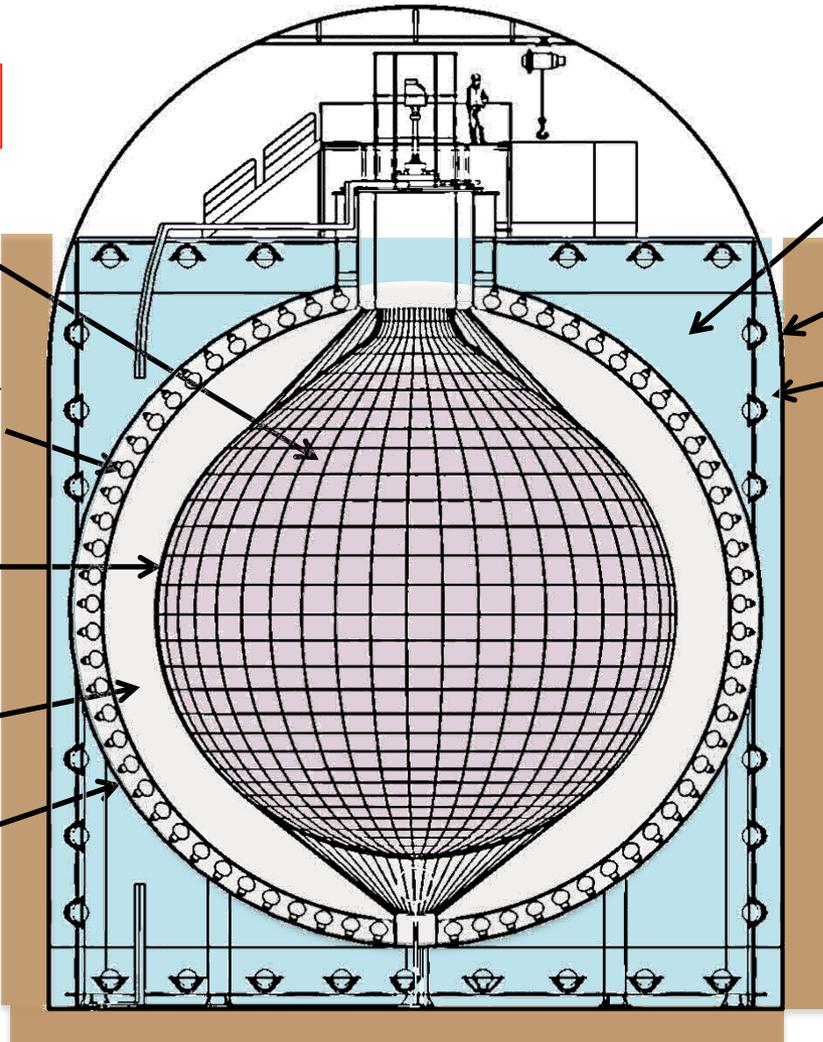
# Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector

岐阜県飛騨市神岡町「池の山」山頂より地下 1,000 m (2,700 m w.e.)



## 内部検出器(ID)

- 液体シンチレーター (約 1 kton)
- 1325 17inch PMT & 554 20inch PMT
- バルーン (直径 約13 m)
- バッファーオイル (光らない)
- ステンレスタンク (直径 18 m)



## 外部検出器(OD)

- 純水 (3.2 kton)
- Tyvekシート(反射材)
- 140 20inch PMT

## カムランドの物理

- 原子炉ニュートリノ
- 地球ニュートリノ
- 超新星ニュートリノ
  
- $0\nu 2\beta$ 崩壊探索 (カムランド禅)
  
- などなど

約20m

# KamLAND-Zen

Zero neutrino double  
beta decay search,  
Xenon



KamLAND:

地下実験宇宙線 $\mu$ 地上の  $\sim 1/10^5$   
極低放射能の環境

$^{238}\text{U} \sim 5.0 \times 10^{-18} \text{ g/g}$ ,  $^{232}\text{Th} \sim 1.3 \times 10^{-17} \text{ g/g}$

大量の崩壊核を使用可

On/off 実験可

→ 稀な現象を探すのに適してる!

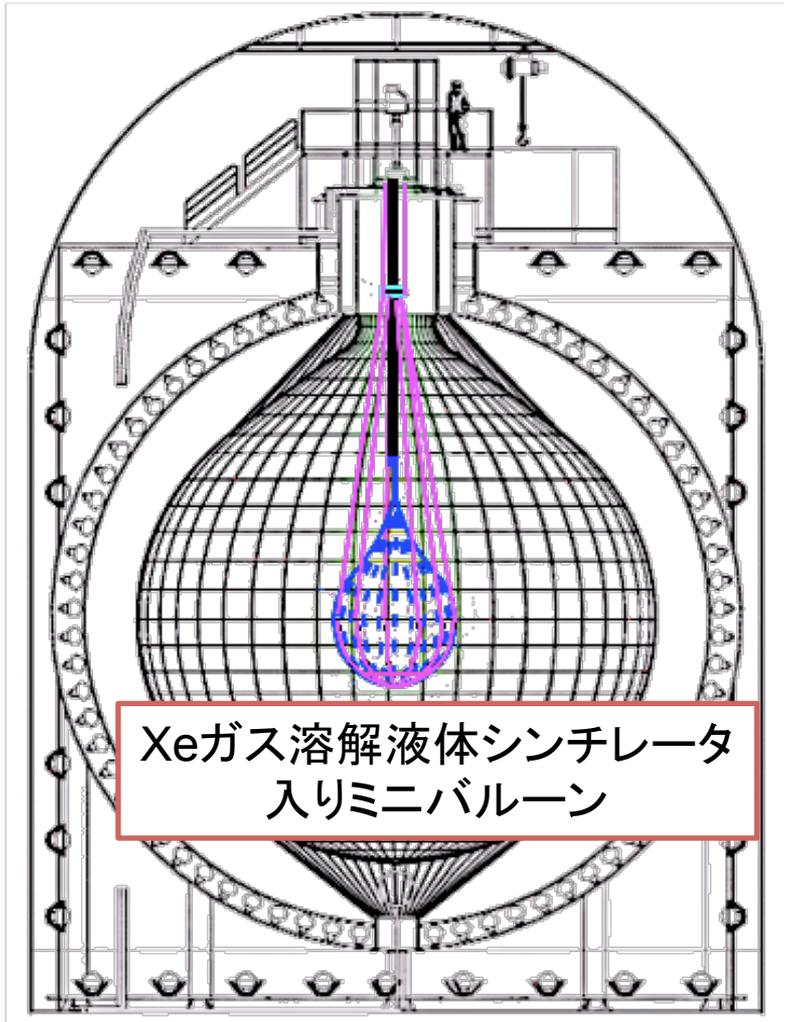
$^{136}\text{Xe}$ :

Q値 2.46 MeV

LSによく溶ける  $\sim 3 \text{ wt\%}$ , 安定

$2\nu 2\beta$  の半減期が長いので、  
 $0\nu 2\beta$  領域への染み出しが少ない

→ KamLANDにあってる!

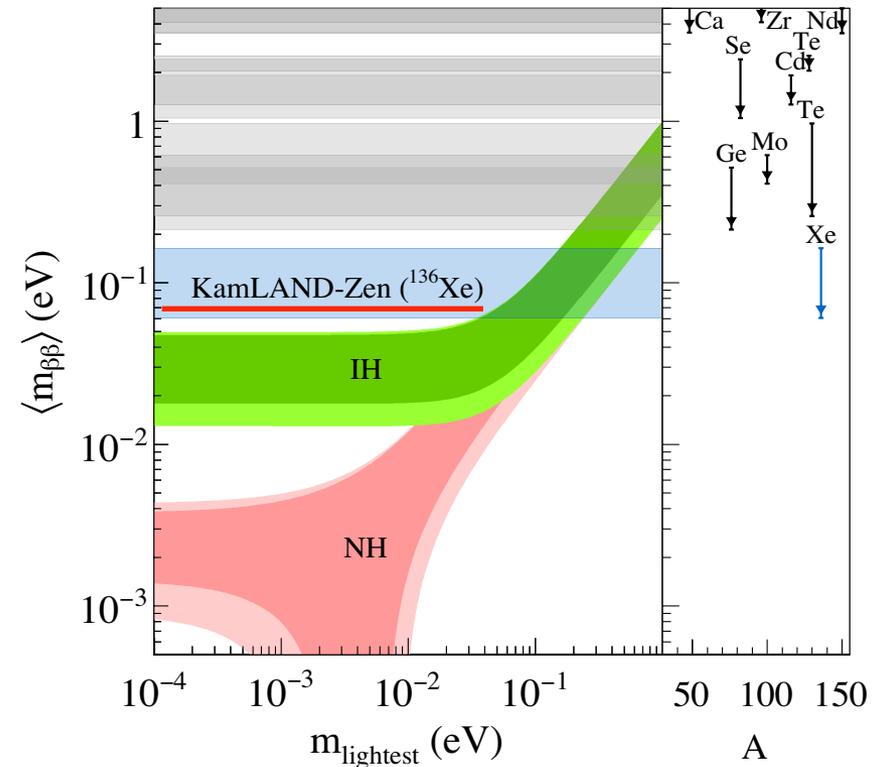
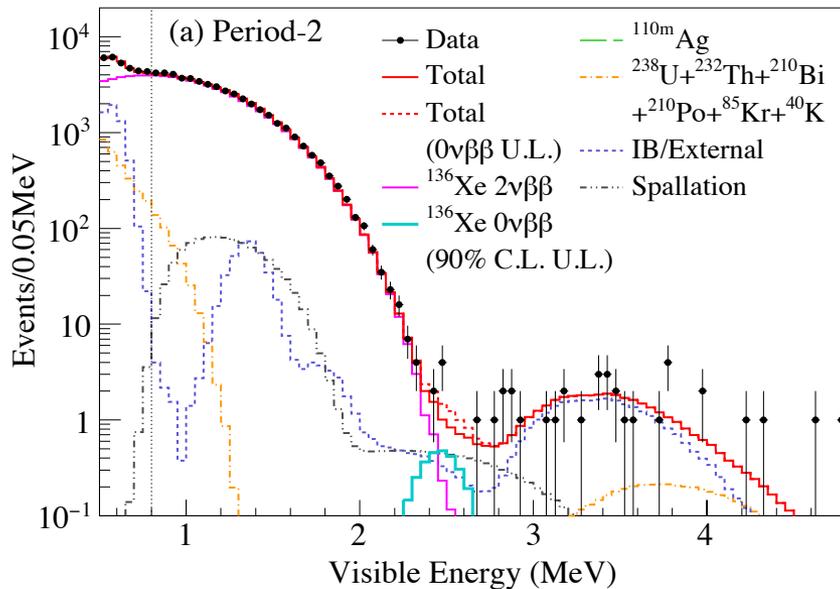


Xeガス溶解液体シンチレータ  
入りミニバルーン

← 約20m →

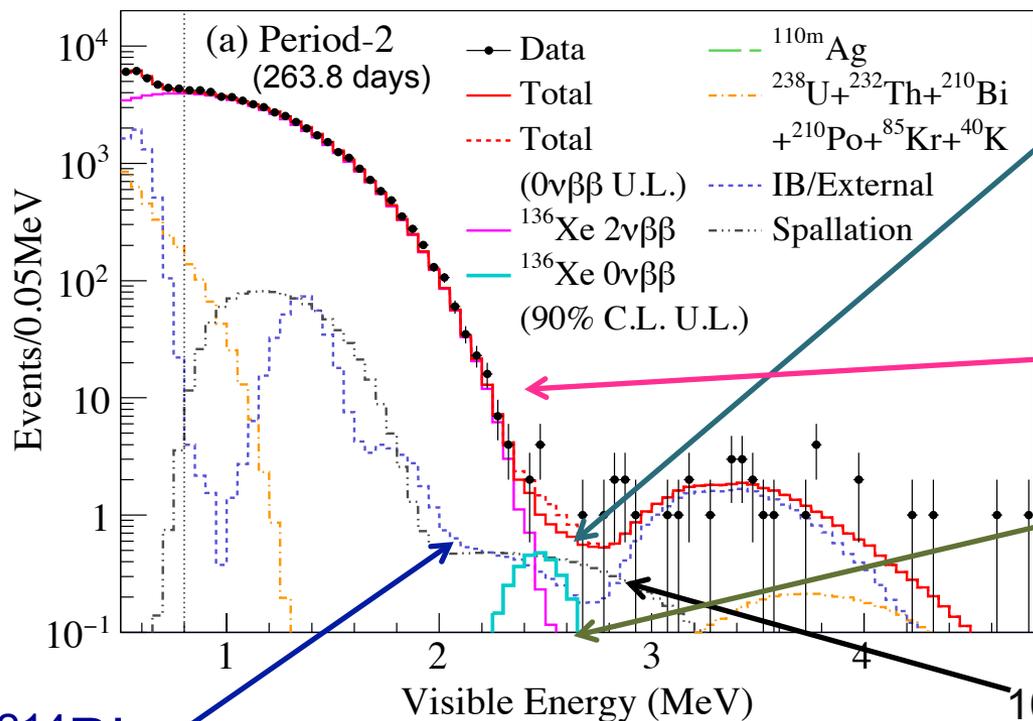
# KamLAND-Zen 400

- 2011年9月より観測開始
- Xe 約400 kg ( $^{136}\text{Xe} \sim 90\%$ )
- 最新結果(Phys. Rev. Lett. 117, 082503)
  - $\langle m_{ee} \rangle < 61-165 \text{ meV}$  (90% C.L.)



現在、マヨラナニュートリノ有効質量に対して世界で最も  
 厳しい上限値!!

# KamLAND-Zenの背景事象



信号  $0\nu 2\beta$ 崩壊 (best fit 0 event)

$2\nu 2\beta$ 崩壊 (5.29 eV)

- エネルギー分解が原因で  $0\nu 2\beta$ 領域に侵入
- 分解能  $\sim 7\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$

$^{110\text{m}}\text{Ag}$ (0 eV)

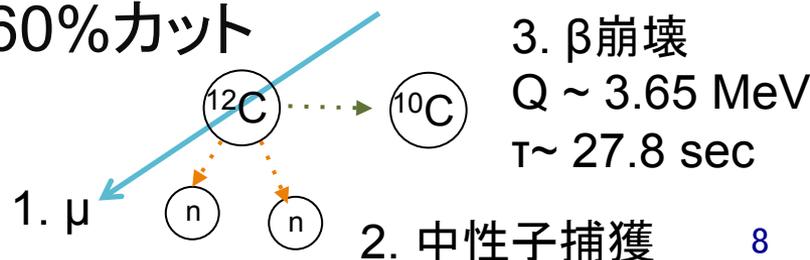
液体シンチレータの純化で除去できた!

$^{214}\text{Bi}$  (2.45 eV)

- Bi-Poの遅延同時計測で除去 (LS中: 99.95%カット)
- バルーン付近ではPoがフィルムに吸収される, 除去率  $\sim 50\%$

$^{10}\text{C}$  ( $\sim 2.7$  eV)

- 宇宙線 $\mu$ の原子核破砕で生成
- 3事象同時遅延計測で除去  $\sim 60\%$ カット



17/05/20

$^{238}\text{U}$ 系列 ...



# KamLAND-Zenの将来計画

信号  $0\nu 2\beta$ 崩壊 (best fit 0 event)

- 崩壊核の増量
- BGの低減

$2\nu 2\beta$ 崩壊 (5.29 eV)

- エネルギー分解能の向上

$^{214}\text{Bi}$

- 今より更にクリーンなバルーンを製作する!

$^{10}\text{C}$

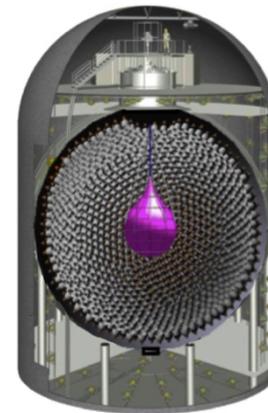
- 解析方法の改善で良くなる可能性あり
- ミューオン後のPMTアフターパルスやオーバーシュートを改善する

クリーンで大きなバルーンと  
約800 kgのXe  
KamLAND-Zen 800

容積 16.7 m<sup>3</sup>  
から ~ 30 m<sup>3</sup>へ



光量アップのための  
自体の改造  
KamLAND-Zen



HQE PMT  
LAB LS  
集光ミラー  
新型エレキ  
発光性バルーン

# KamLAND-Zen 800

- 仙台の西澤センタークリーンルームにてバルーン製作.

(クラス1以下の環境) 屋外はクラス~10万以上

クリーンなバルーンを製作するために

- 二重手袋
- インナーウェア
- クリーンルームでクリーンスーツに
- ゴーグル

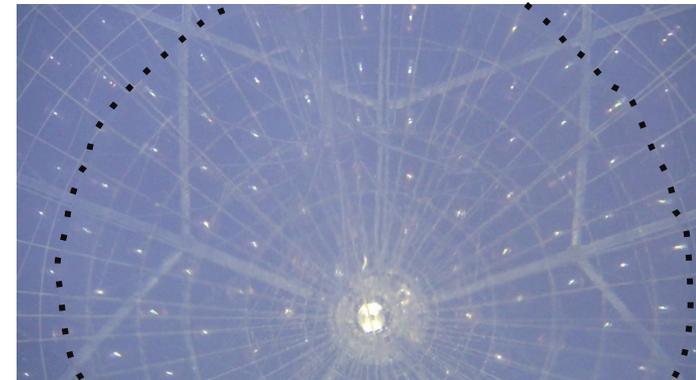
before (Zen 400 の作業の様子)



after (今回の作業の様子)



2016年夏に完成,インストールしたのですが...

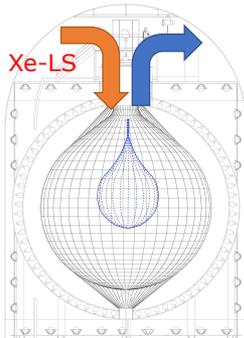
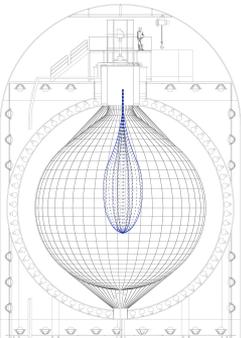


# バルーンにリークを発見

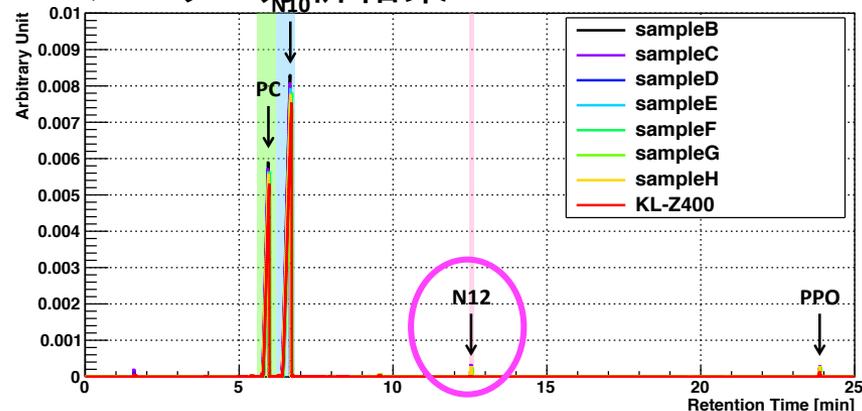
① balloon install

② dummy-LS filling  
Xeなし

③ Xenon dissolve



ガスクロ分析結果



監視用カメラ、吊り紐にかかる重さのモニターデータ、 $^{222}\text{Rn}$ の半前期のずれの解析、 $^{210}\text{Po}$ のイベントレート解析などから $O(10)$  L/dayのリークが示唆される

ミニバルーンの中から外側の液体シンチレータ成分が検出されたことでリークが決定的に。

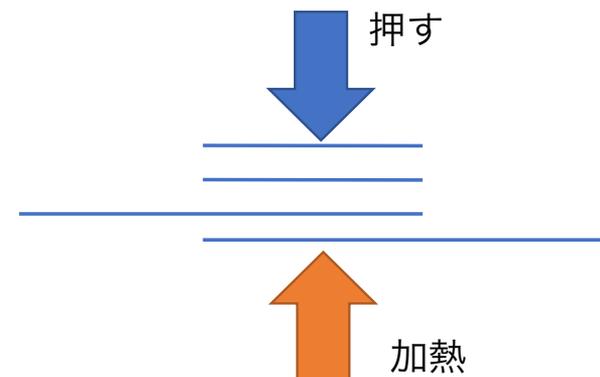
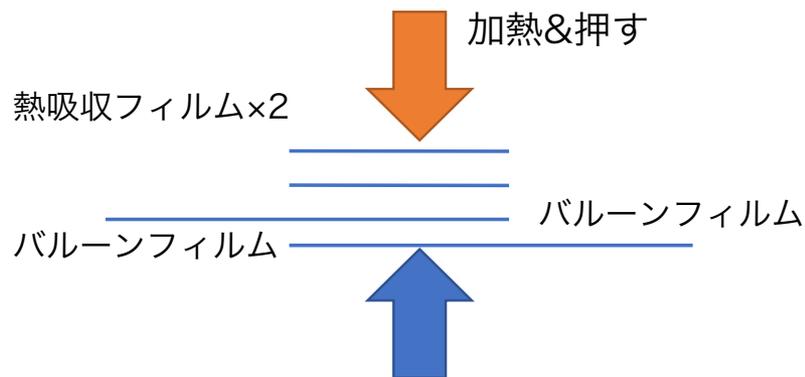
- 引き抜き後のバルーンのHeリークチェックでは5箇所リークを発見。
- 強度の弱い部分があった。
- 溶着方法の違いが原因ではないか？

良かった点

ミニバルーンのクリーン化には成功した!

# KamLAND-Zen 800に向けて

- KamLAND Zen 400バルーン製作では,
  - プロによる手溶着
  - 上押し上加熱
- 一方、KamLAND Zen 800バルーン製作は,
  - 特注の溶着機で溶着
  - 上押し下加熱



→上押し、上溶着の特注溶着機を導入。  
フィルムの強度や溶着についてのさらなる研究、開発!!

# 現在の準備状況

1年間でミニバルーンを再製作しインストールする!!

- クリーンルームにて物品の洗浄作業
- 新しい溶着機のパラメータ等のスタディ
- 作業効率化
  - フィルム洗浄やリークチェックなどの作業の工程を見直す。



Blue box



# まとめ

- KamLAND-Zenはマヨラナニュートリノ発見を目標とした、 $0\nu 2\beta$ 崩壊探索実験
- マヨラナ有効質量に対して世界で最も厳しいリミット
- KamLAND-Zen 800はXe約800 kgとよりクリーンなバルーンを導入して行う $0\nu 2\beta$ 崩壊探索
- バルーンのクリーン化には成功したが、リークがあったため再度バルーン製作中
- 今年度中のスタートを目標に準備をしている