



逆階層領域での ニュートリノの マヨラナ性の研究

2019年8月24日

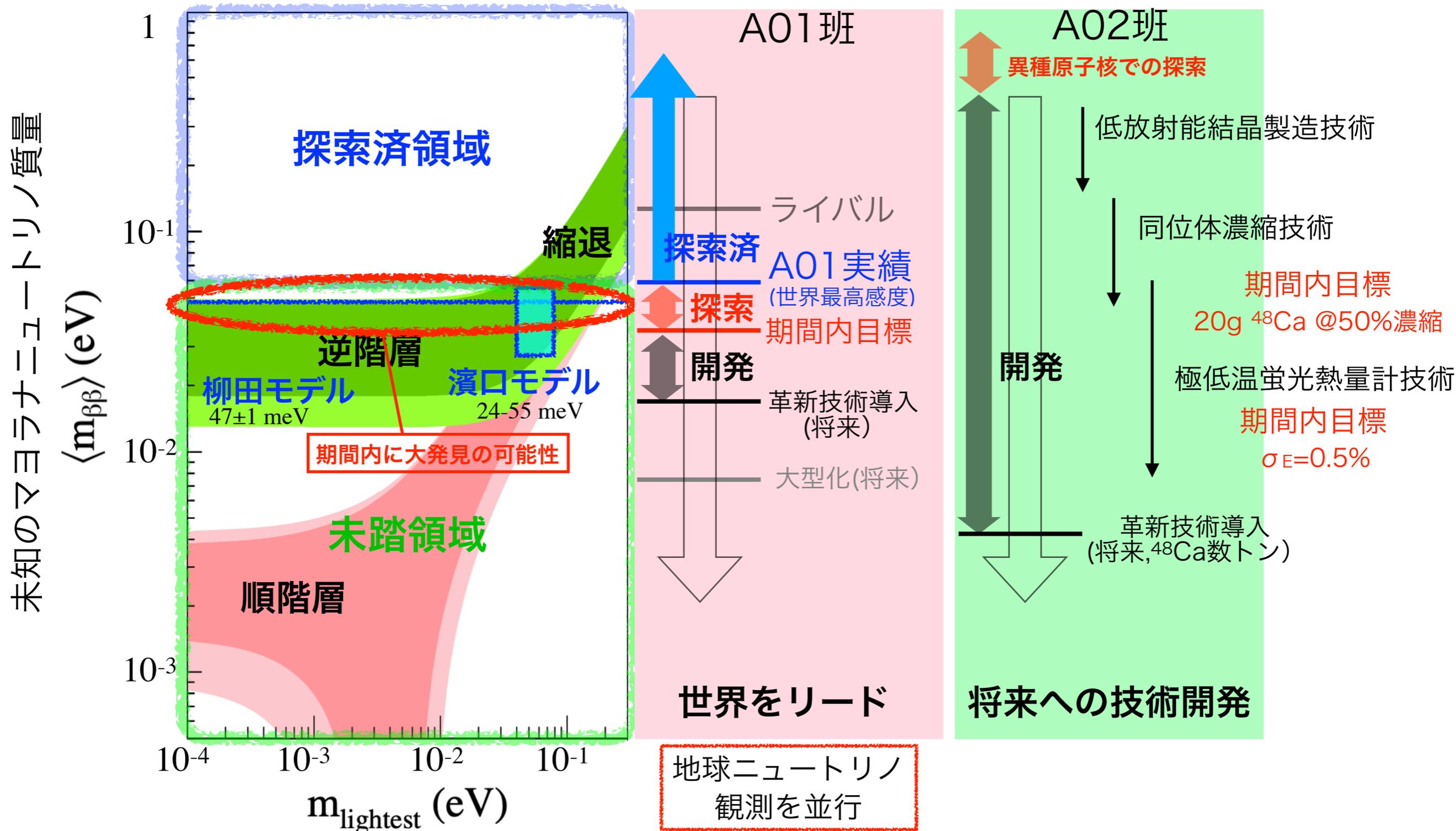
東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

目指す世界初発見

マヨラナ性の検証

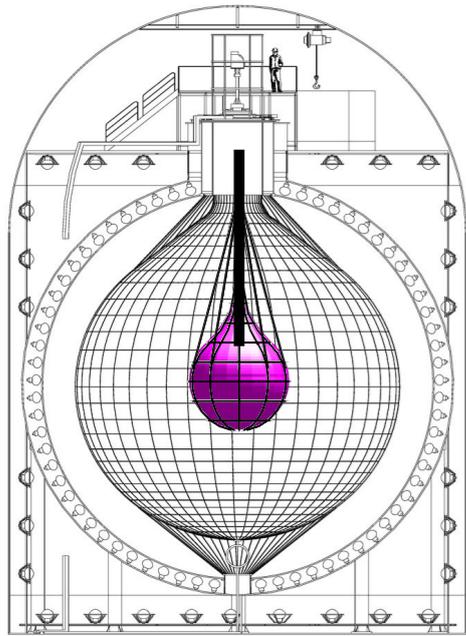
A班
計画

世界をリードする性能を発展させつつ、次世代の革新技術を育成する。
最初の発見を目指し、複数原子核、複数技術も担保する。

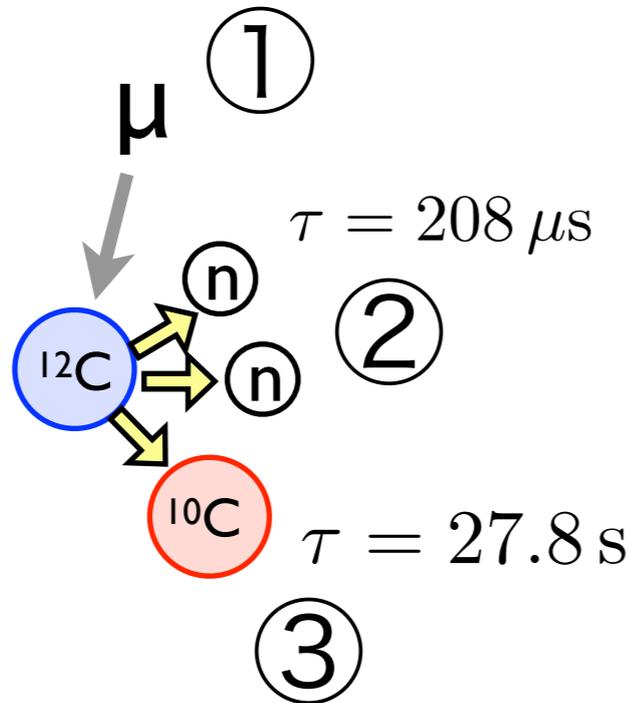


計画研究の目標とシナジー効果

A01 ^{136}Xe 含有液体シンチレータ KamLAND-Zen 800



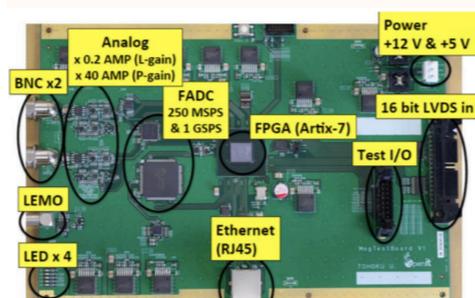
主要バックグラウンド



本年1月末
745kgで探索開始

^{10}C の除去 課題

1. 新型電子回路で除去率
64%→99%
2. ニューラルネット解析
50%除去

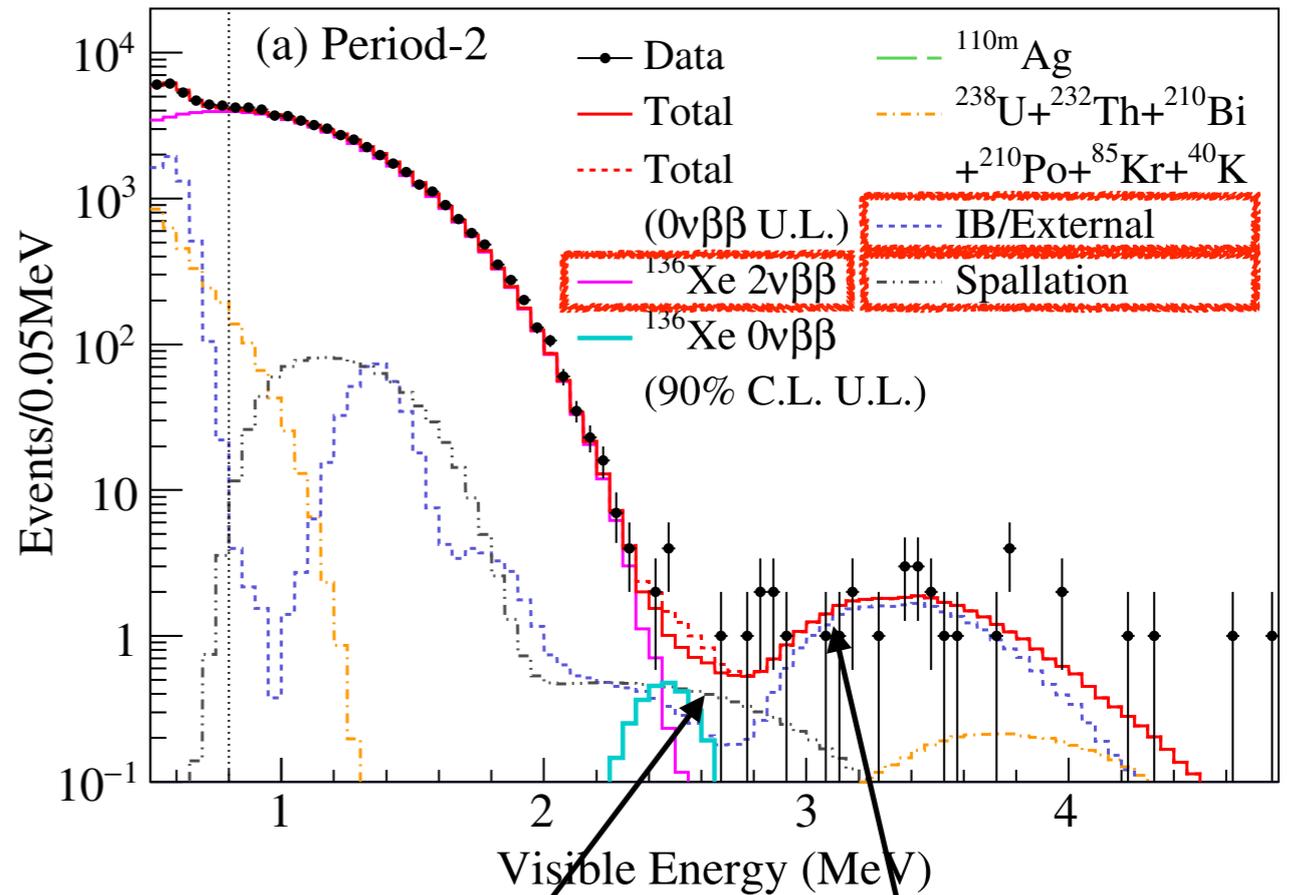


プロトタイプ電子回路

革新技术と基盤環境 シナジー

集光ミラー、高量子効率PMT、蛍光バルーン、大光量LS、低放射能スクリーニング

KamLAND-ZenでのBG状況



新しい電子回路で
99%除去する。

新学術での連携で
1/10に低減できた。
(これは低減前のデータ)

期間内目標

40meVを切る感度達成で理論モデル検証！
20meVを切るための開発も実施！

地球ニュートリノ観測

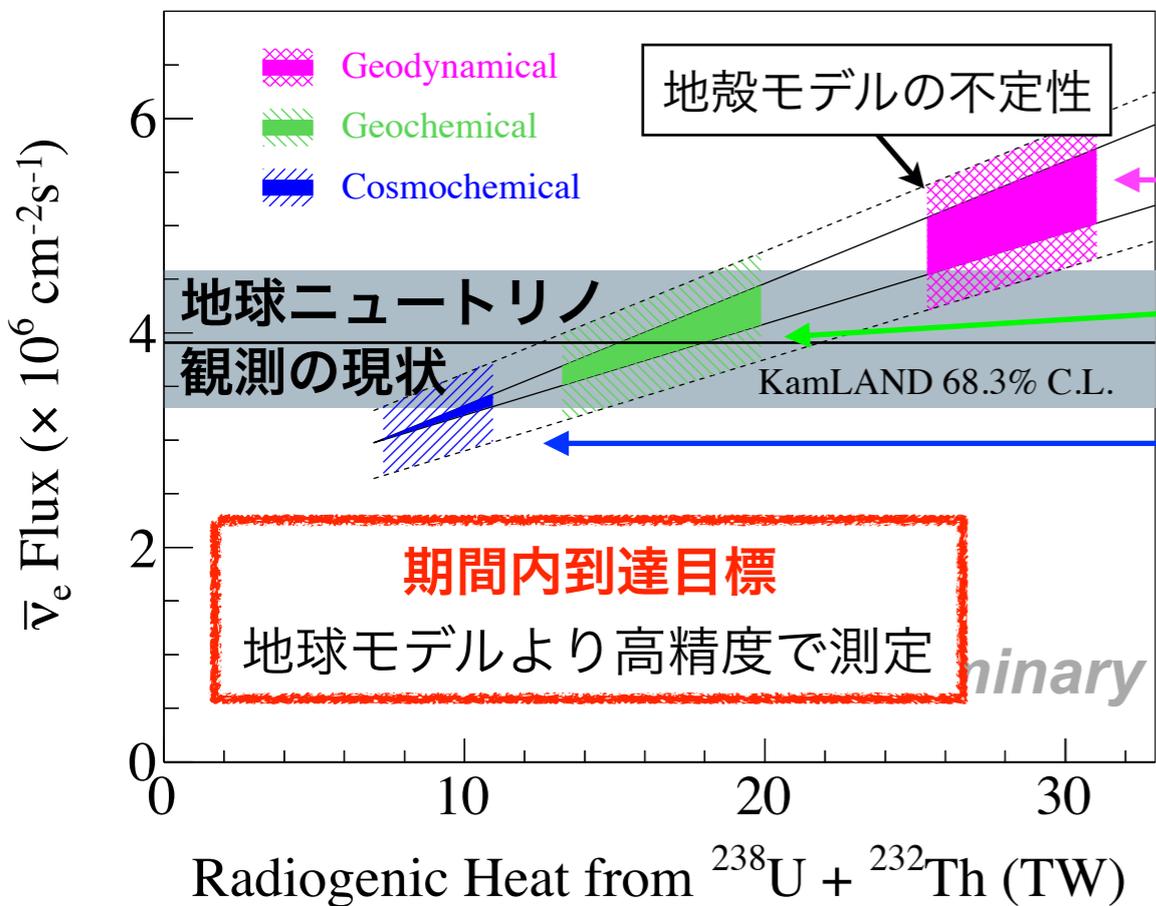
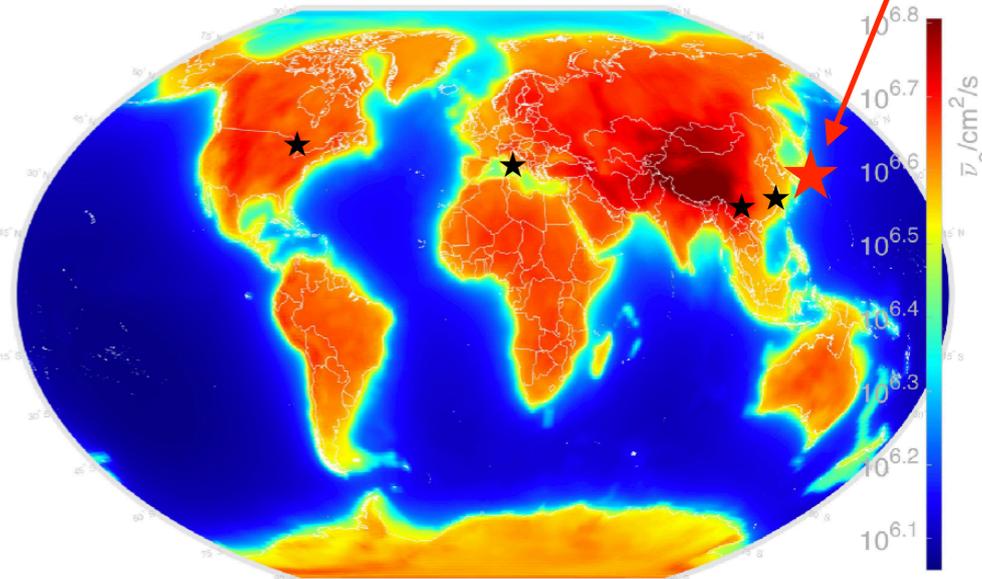
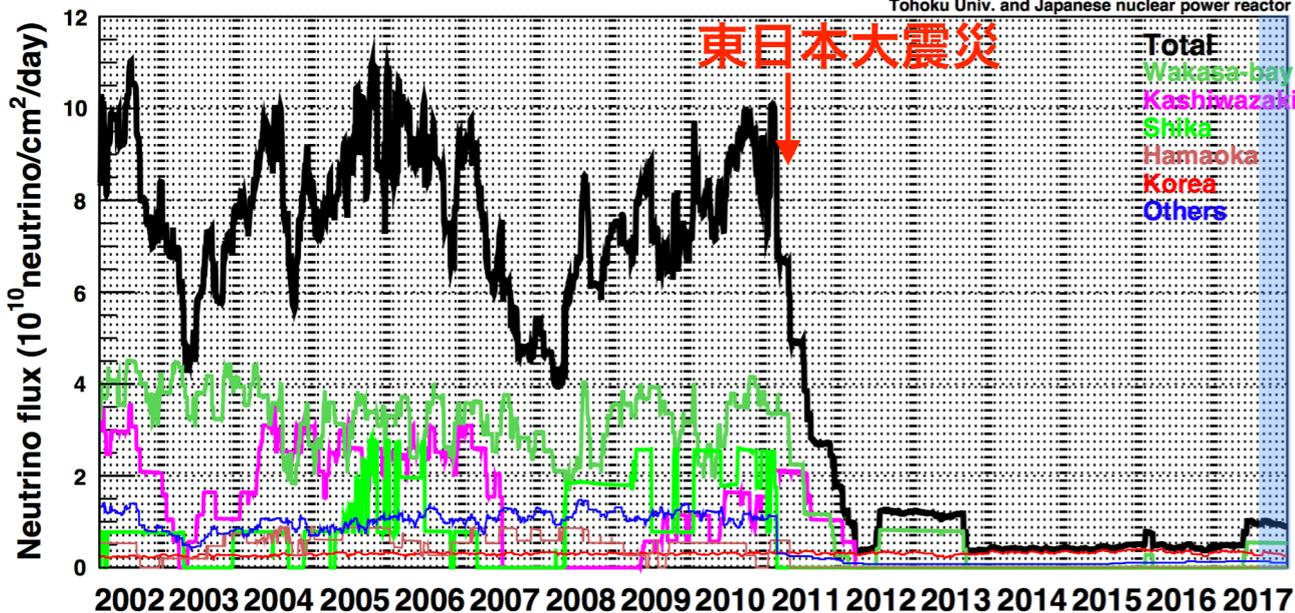
今後も 地球ニュートリノ
観測ネットワークで最重要

唯一大陸プレートの端

BG源となる原子炉の運転状況

Data provided according to the special agreements between Tohoku Univ. and Japanese nuclear power reactor operators.

原子炉νフラックス



マントル対流の謎



地球物理モデルは
一層対流
他の地球化学モデルは
多層対流

地球始源隕石の謎



元素比の一致する
C1コンドライト
(地球化学モデル)



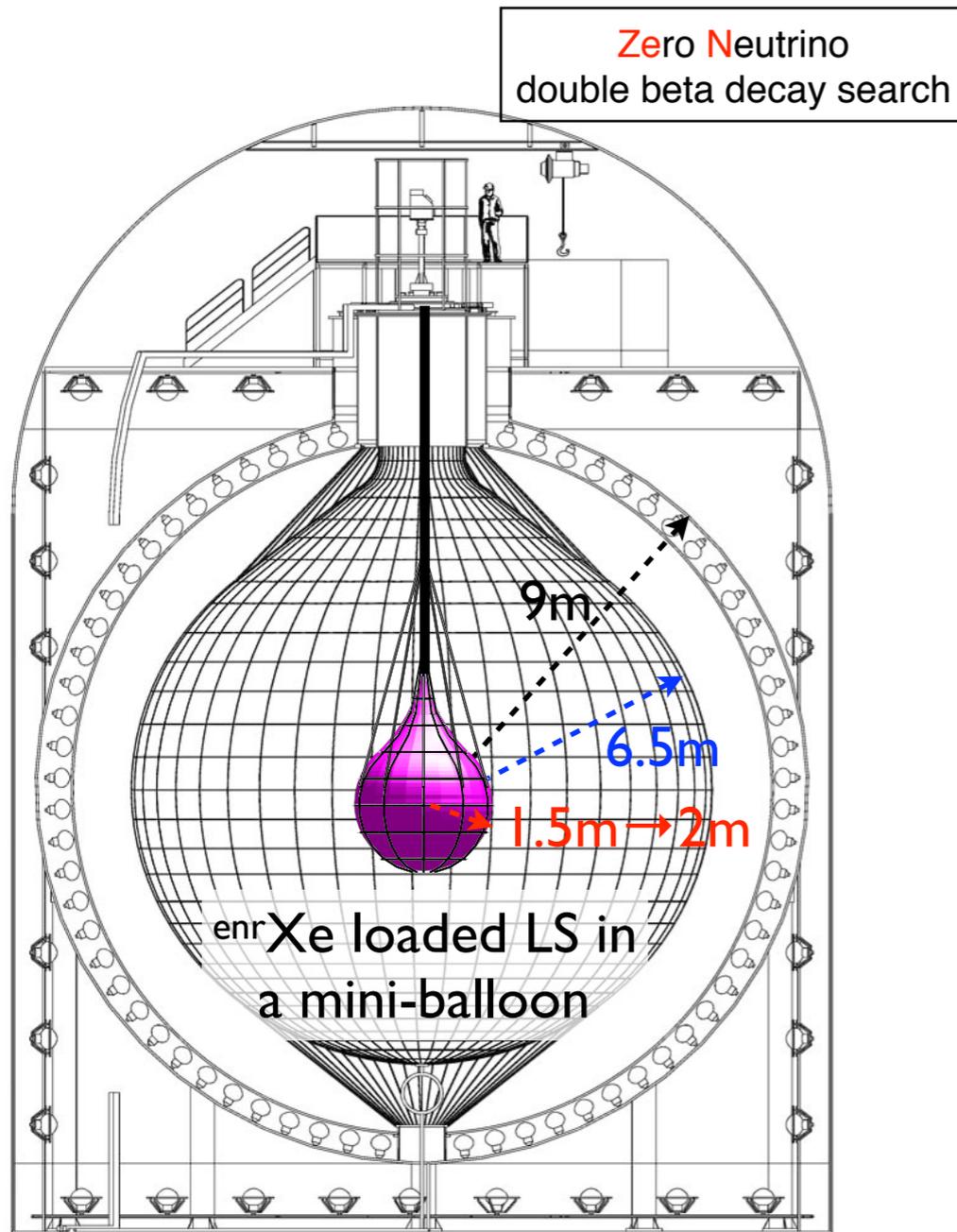
同位体比の一致する
エンスタタイト
コンドライト
(地球化学モデル)

長く論争の続く

地球の始源隕石やマントル対流
を地球ν観測で解明できる!!!

液体シンチレータに約3重量%も溶ける ^{136}Xe を選択

KamLAND-Zen



^{136}Xe

希ガス

遠心分離による同位体濃縮が可能

$Q_{\beta\beta} = 2459 \text{ keV}$

(^{208}Tl 3198-5001 keV が問題にならない)

KamLANDを活用する利点

① 低コスト・迅速

(稼働中の検出器)

① バックグラウンドが特定できる

(有感で厚い液体シンチレータ)

② その場での純化が可能

(液体)

③ オン・オフ測定が可能

(キセノンは脱気可能)

④ 多目的で堅い成果

(地球ニュートリノ観測など)

⑤ 拡張性が高い

(ミニバルーン)

90% 濃縮 ^{136}Xe

320kg for phase-I

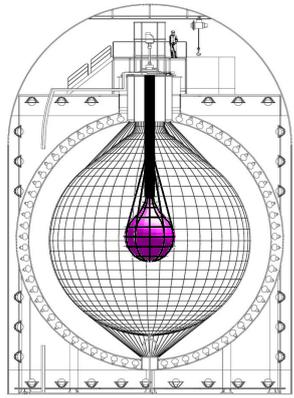
380kg for phase-II

745kg for Zen 800 (1月22日開始)

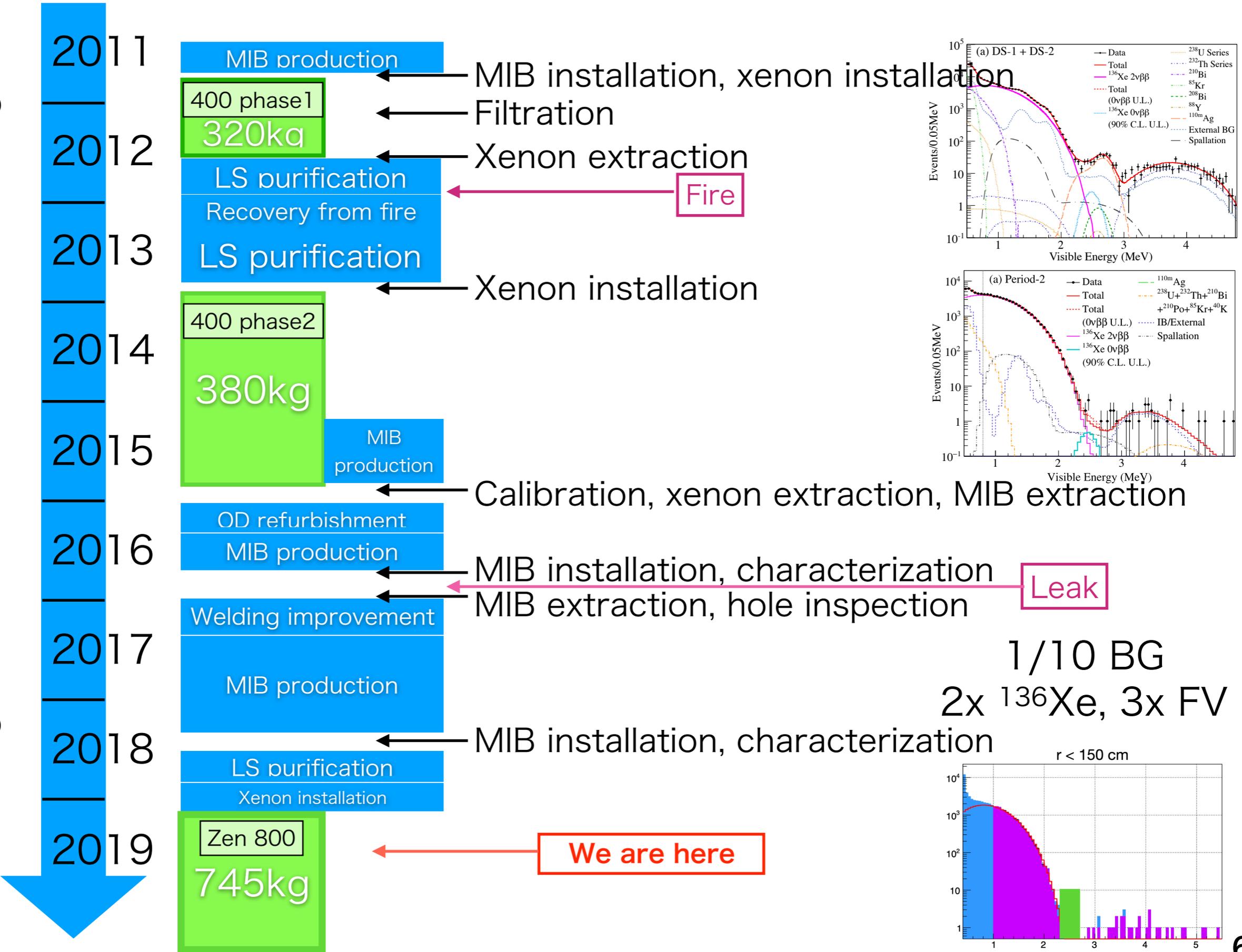
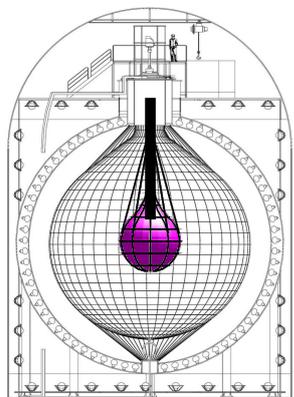
世界最大量の
二重ベータ崩
壊核

Timeline of KamLAND-Zen

KamLAND-Zen 400



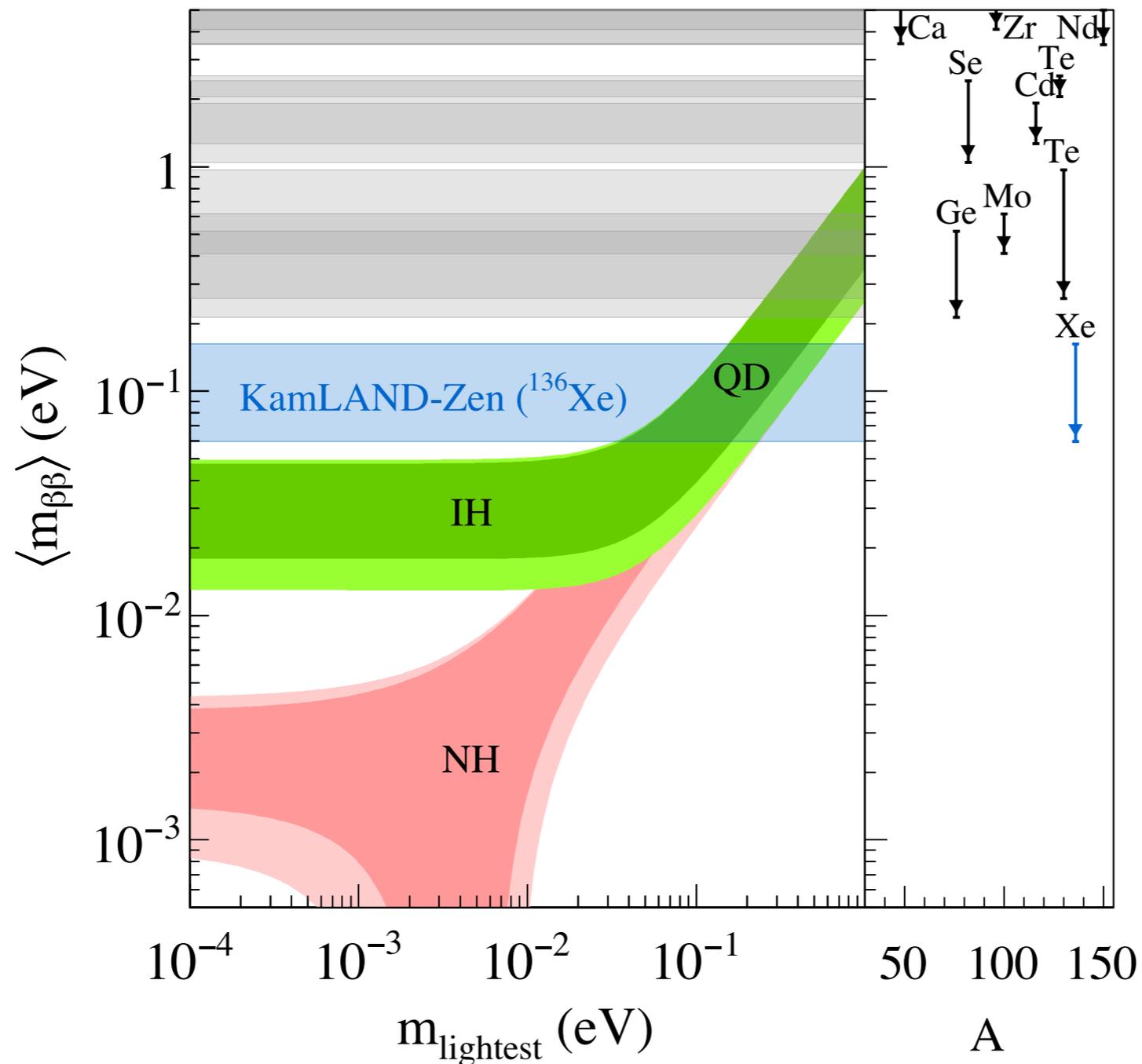
KamLAND-Zen 800



KamLAND-Zen 400 Phase 1+2 combined

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$$

(sensitivity $5.6 \times 10^{25} \text{ yr}$)



It also provides
upper limit of
 m_{lightest} at
180-480 meV.

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (61 - 165) \text{ meV}$$

PRL117, 082503 (2016)

Big leap toward IH region !

サイズアップミニバルーンの製作



cleaning, cleaning and
cleaning as usual



作業改良の例

before



after



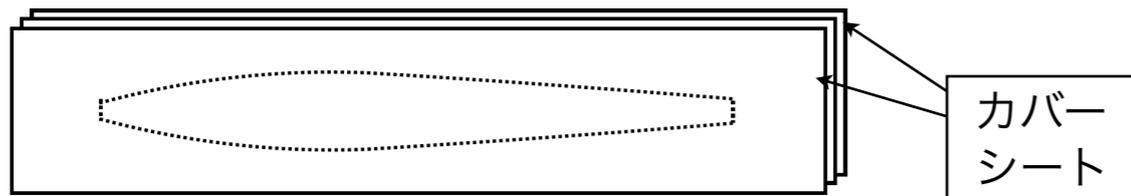
クリーン
下着



クリーン
ルームで
再着替え



半日毎に洗濯



カバー
シート

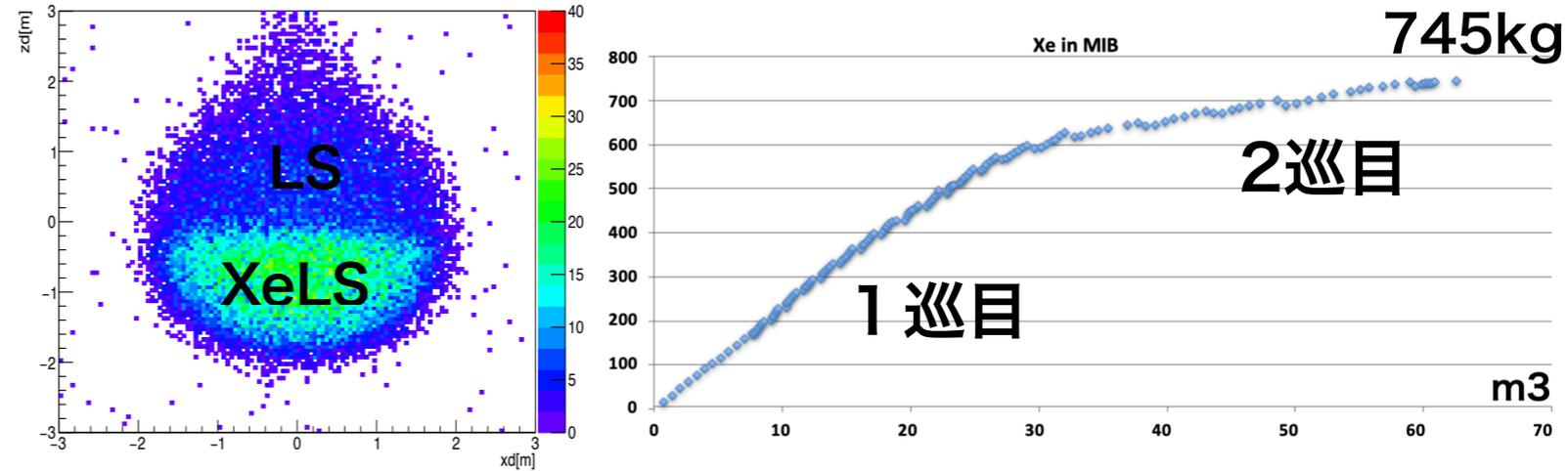
群がらない
ゴーグル
溶着機導入
カバーシート
二重手袋
半日毎に洗濯
クリーン下着
クリーンルーム内更衣室
埃可視化
静電気除去装置
...

現状

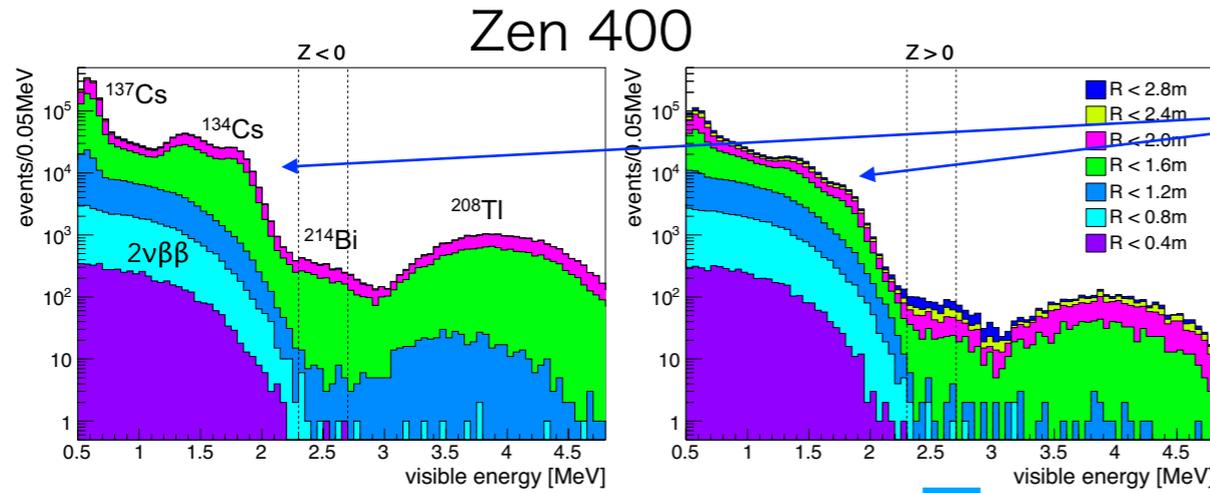
約745kg (以前は380kg)

を導入し、

2019年1月22日に探索を開始



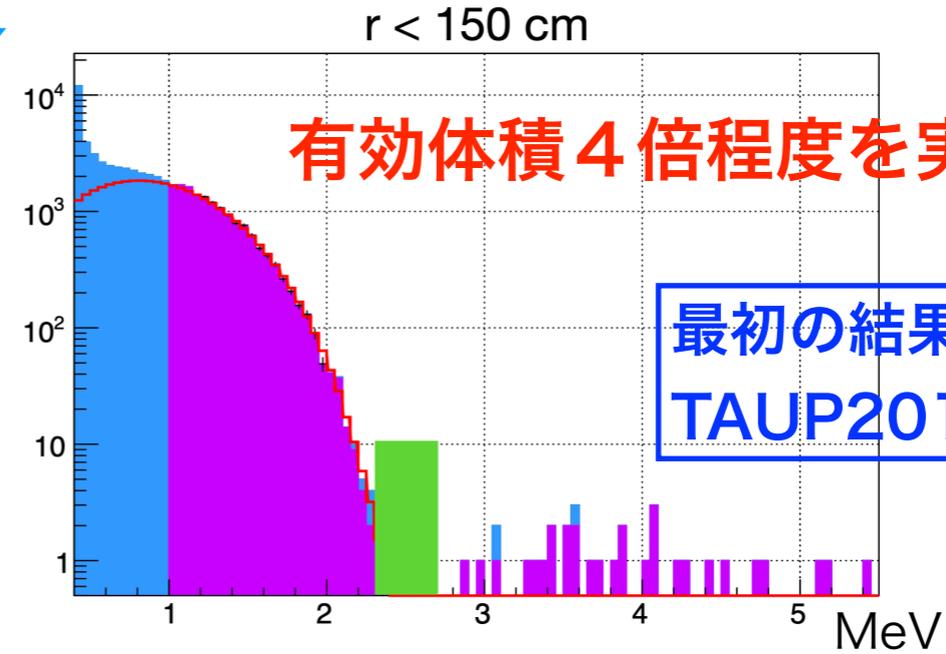
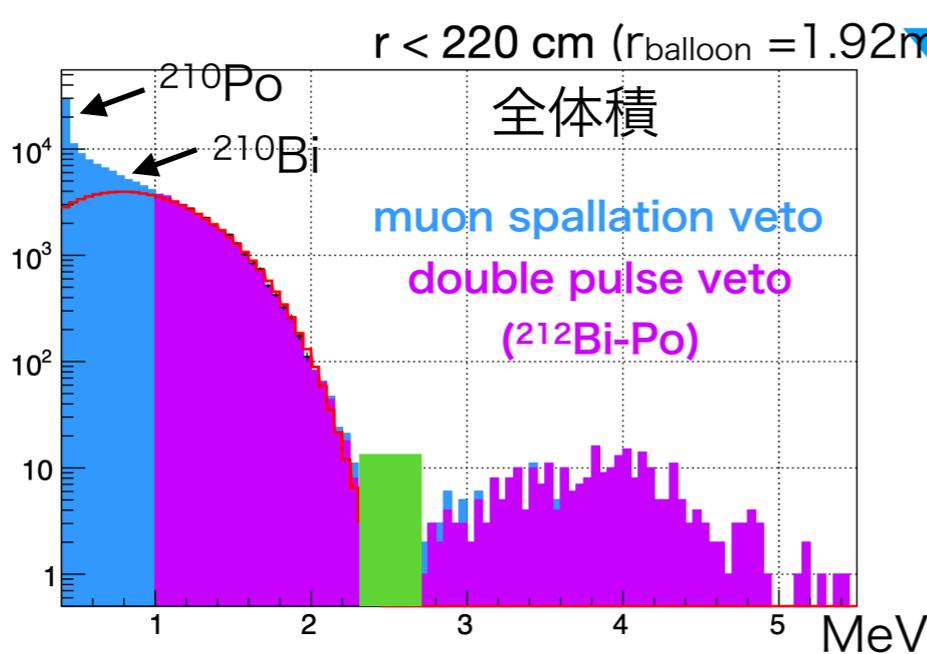
以前



西澤センターでの作業にも関わらず
表面に福島原発のフォールアウトが付着

クリーン化を強化して再製作

現状



最初の結果は
TAUP2019で発表予定

“KamLANDを活用する利点”を全て実証;

① 低コスト・迅速

(稼働中の検出器)



2年で開始

② バックグラウンドが特定できる

(有感で厚い液体シンチレータ)



^{110}mAg を特定

③ その場での純化が可能

(液体)



^{110}mAg を除去

④ オン・オフ測定が可能

(キセノンは脱気可能)



^{110}mAg を脱気で
確認

⑤ 多目的で堅い成果

(地球ニュートリノ観測など)



地球νでリード
他にも色々

⑥ 拡張性が高い

(ミニバルーン)

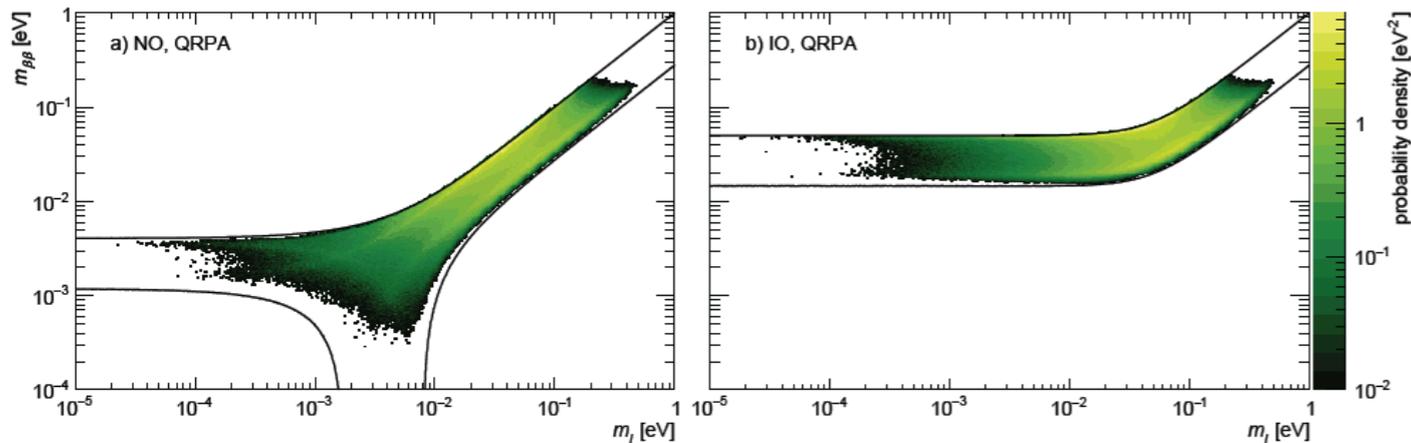


倍量化に成功

期間内の感度目標40meV

NH vs IH

Posterior distribution



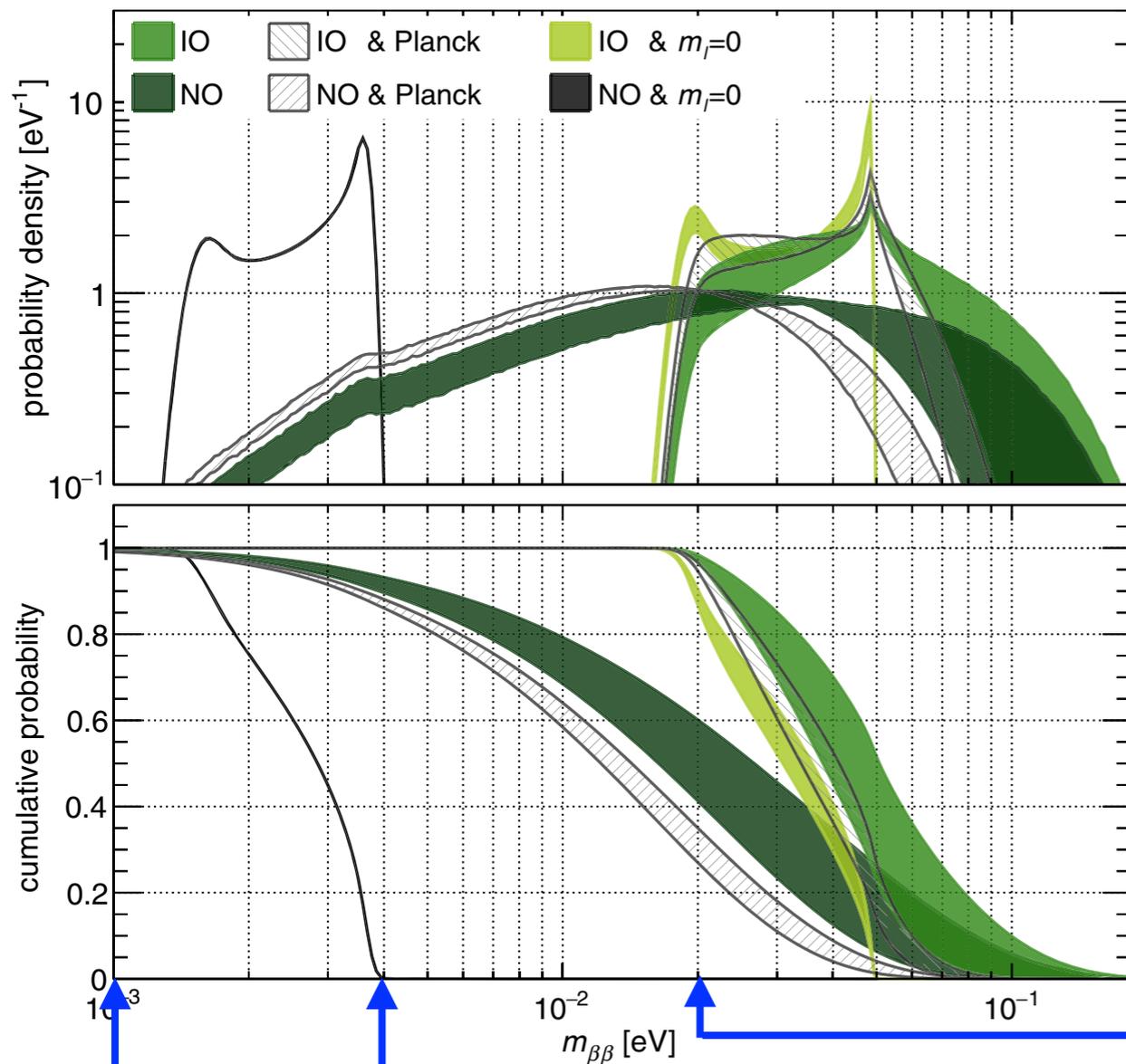
Prior choice

PRD96,053001 (2017)

$$\underbrace{\{\Sigma, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2 \text{ or } \Delta m_{23}^2, \theta_{12}, \theta_{13}, \alpha_{21}, (\alpha_{31} - \delta)\}}_{\text{logarithmic}} \underbrace{\quad}_{\text{flat}}$$

Likelihood test

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | \Delta m_{21}^2) \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | \Delta m_{31}^2 / \Delta m_{23}^2) \\ & \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | s_{12}^2) \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{osc}} | s_{13}^2) \\ & \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{Troitsk}} | m_{\beta}) \cdot \mathcal{L}(\mathcal{D}_{0\nu\beta\beta} | m_{\beta\beta}) \end{aligned}$$



40meV covers >50% of IH

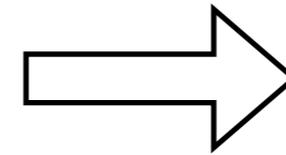
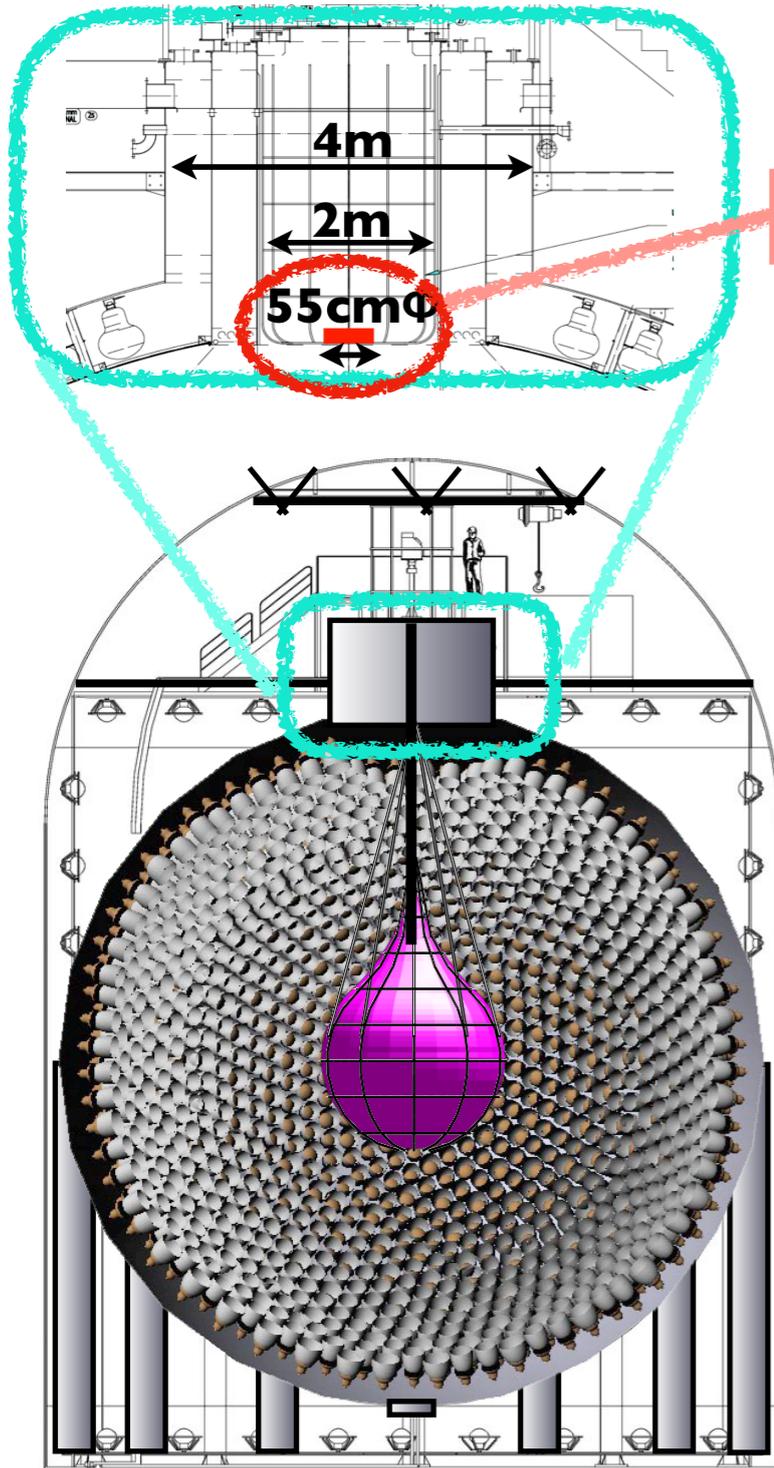
20meV covers 95% of IH and 50% NH

1meV

No coverage above 4meV, if NH & m_min=0.

高性能化計画

2νバックグラウンド低減にはエネルギー分解能の改善が必要



KamLAND2-Zen

導入口拡大



集光ミラー

光収集量 ×1.8

高量子効率PMT

17" ϕ \rightarrow 20" ϕ $\epsilon = 22 \rightarrow 30+\%$

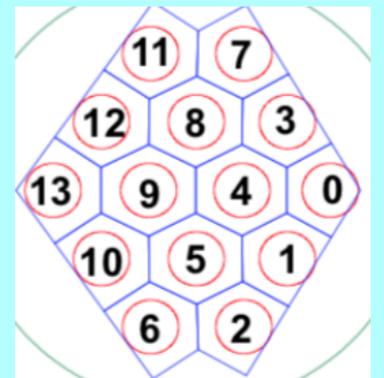
光収集量 ×1.9

新型シンチレータ

(高透過率)

光収集量 ×1.4

こんなミラー配置
なら x2.4



エネルギー分解能 $\sigma(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow \sim 2\%$

目標感度 20 meV

半減期 2×10^{27} 年以上

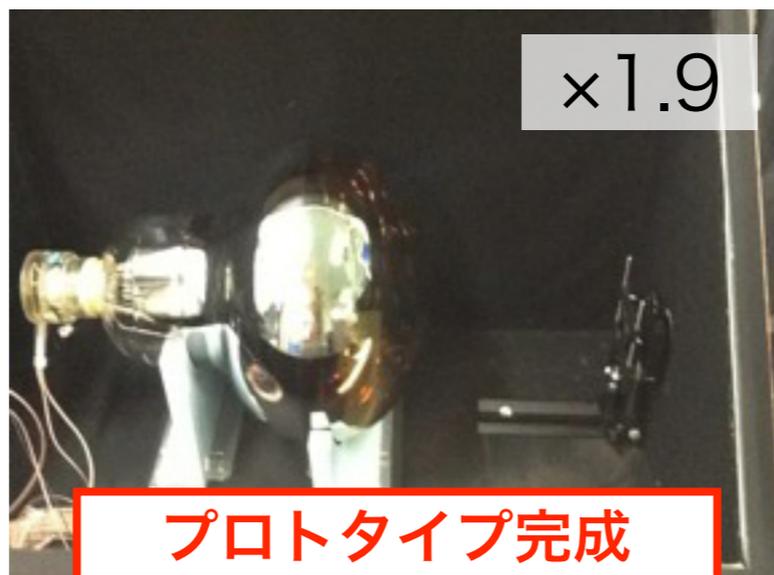
1000+ kg xenon

高性能化のための開発状況

○ 集光ミラー



○ 光量子効率PMT



○ 新型シンチレータ

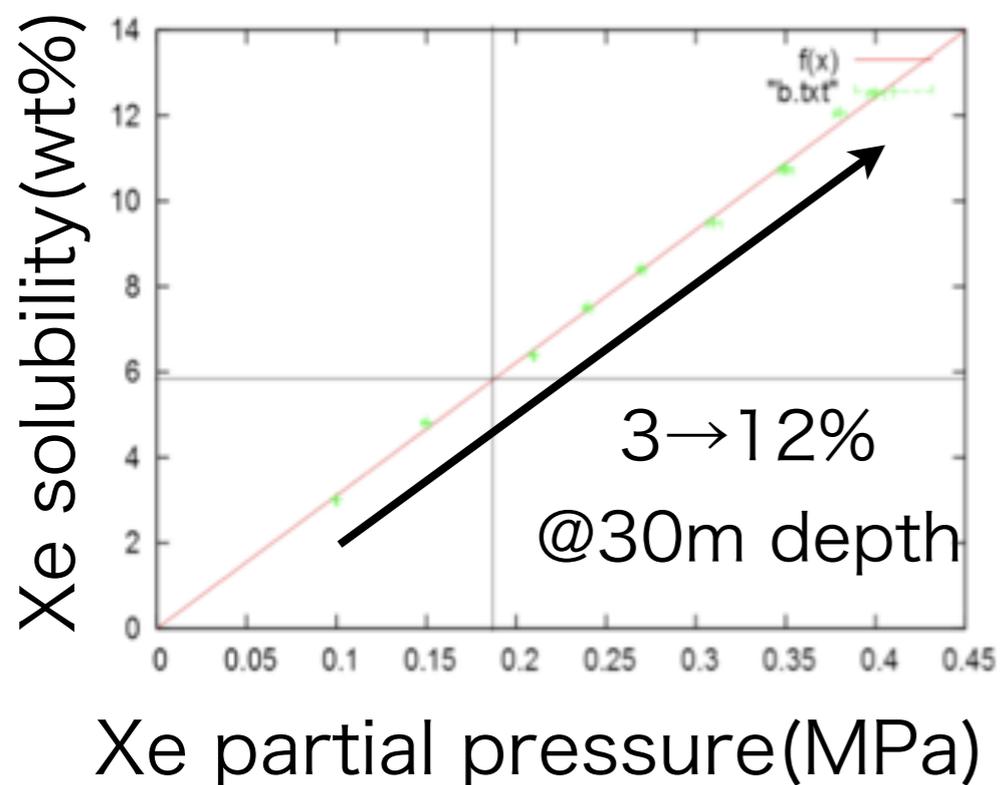
LAB (Linear Alkylbenzene)

$$\text{H}_3\text{C}(\text{CH}_2)_x \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{C}(\text{CH}_2)_y \text{CH}_3$$

x1.4

活性炭での高透過率化成功

○ キセノン高濃度化



原理検証完了

○ 蛍光フィルム

tag α in the film

^{214}Po ^{214}Bi reduction

PEN
polyethylenenaphthalate

OC(=O)c1ccc2c(c1)ccc3c2c()C(=O)OCC

プロトタイプ完成

○ ^{10}C タグ

μ ①

^{12}C $\tau = 208 \mu\text{s}$

^{10}C $\tau = 27.8 \text{ s}$

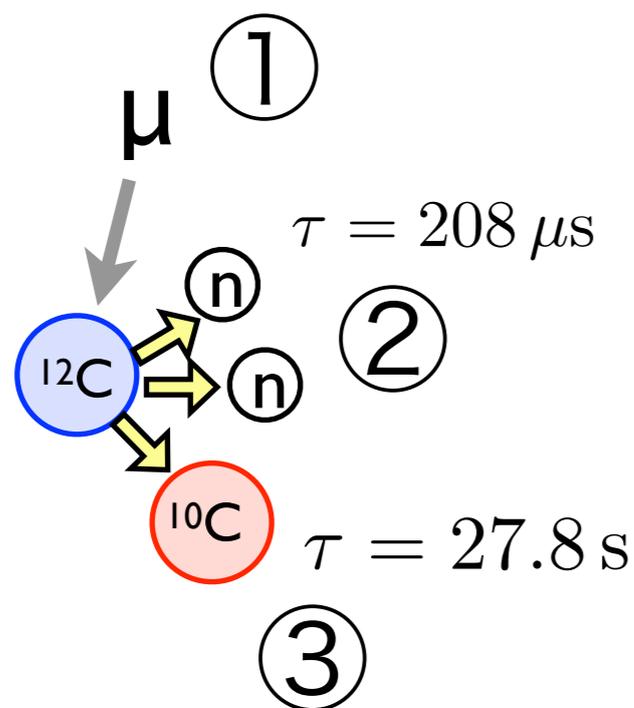
②

③

2Chプロトタイプ

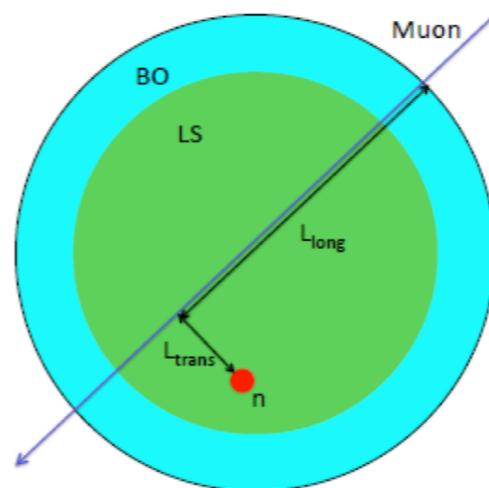
^{10}C の低減手法

1. 中性子タグ

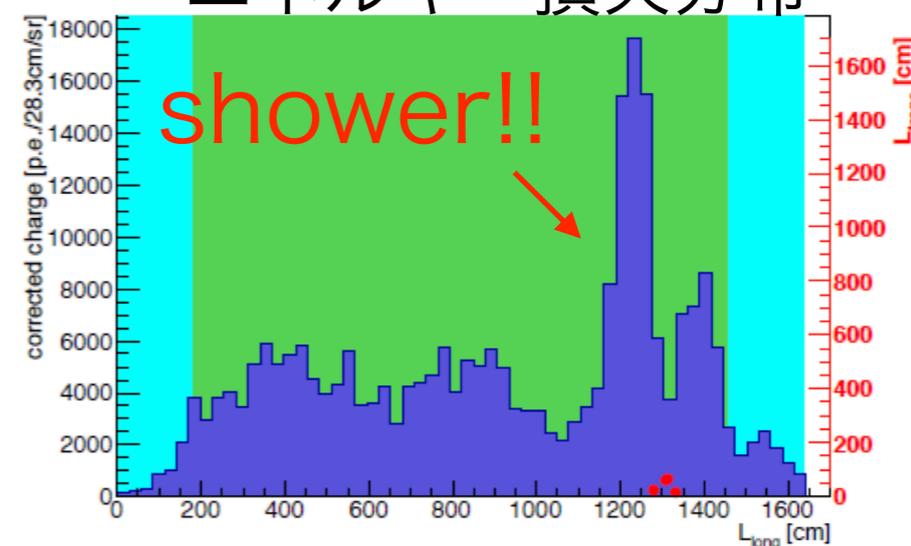


中性子検出効率が重要

2. シャワータグ



トラック沿いのエネルギー損失分布



中性子が生成しない場合でも有効

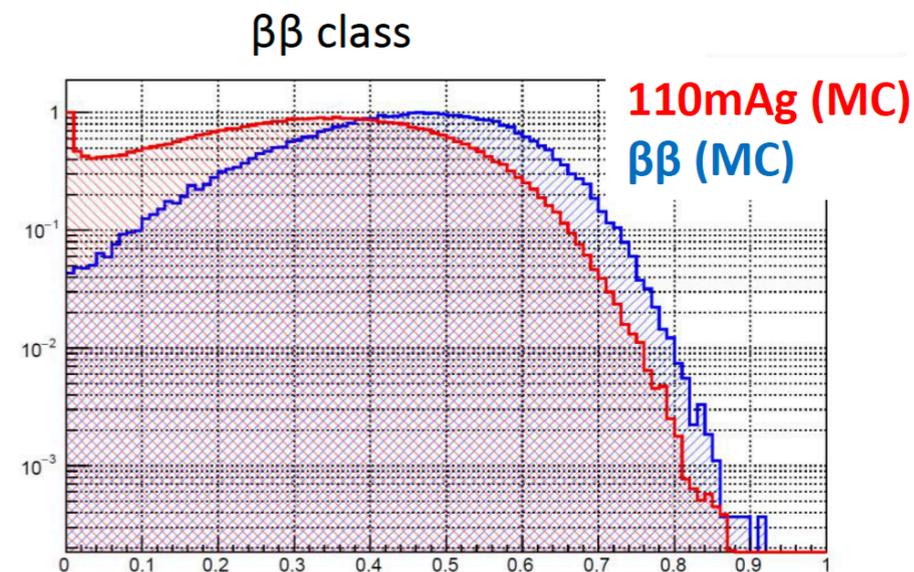
3. マルチバーテックスによる時間分布の広がりを使った粒子識別

実績:

^{10}C を ~55%除去 (@20% inefficiency)

^{214}Bi , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{212}\text{Bi-Po}$ pileup, ^{60}Co など

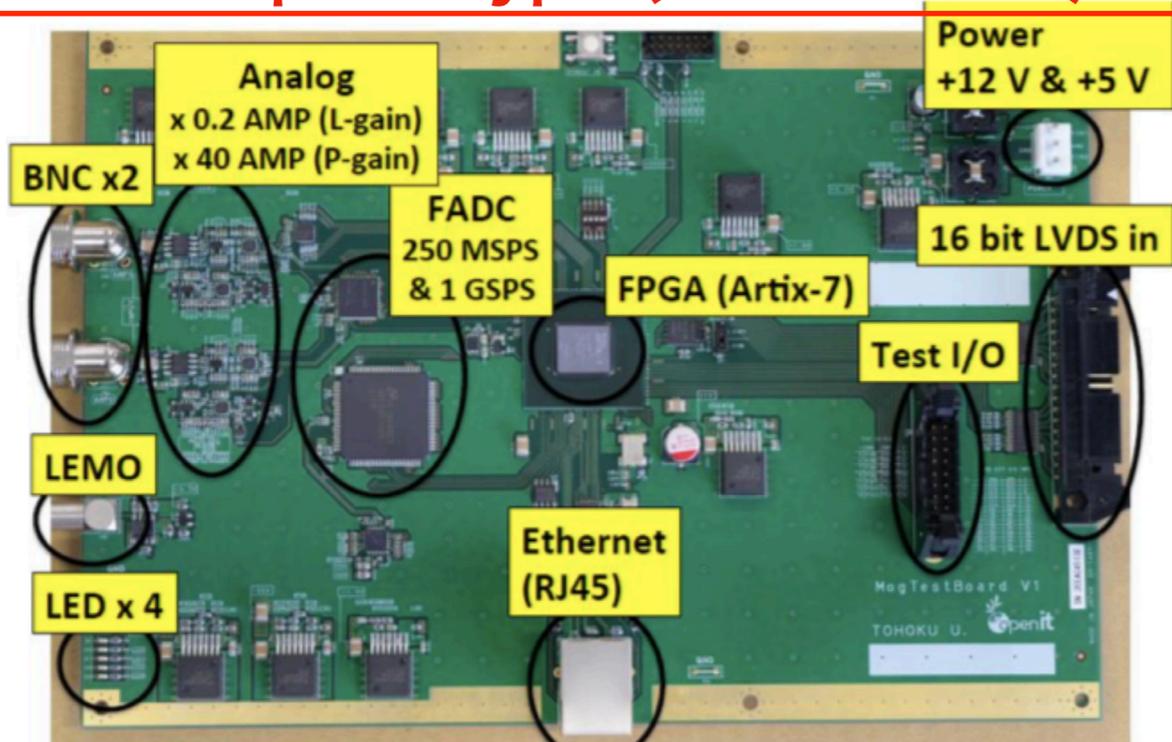
γ 、 $\beta+\gamma$ のほとんどのBGに有効



Softmax output

Hayashida PhD thesis 2019

2 ch prototype (real is 16ch)



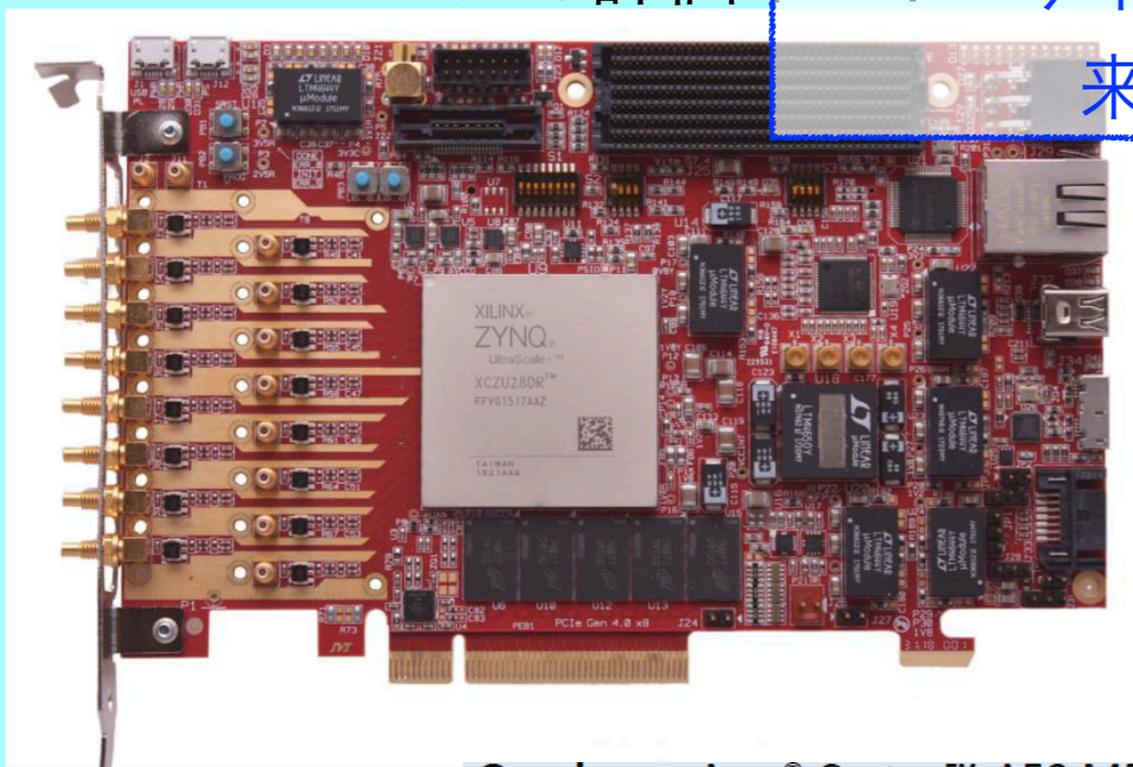
Wide range, low noise, fast data transfer (Digital BLR)

10C除去率が64%から99+%に

Zen 800でも先行導入!

RFSoc評価ボード 今年度中にデザイン決定

来年度から順次導入



Quad-core Arm® Cortex™-A53 MPCore™ up to 1.3GHz, Dual-core Arm Cortex-R5 MPCore up to 533MHz

XILINXのRFSocを使った回路も検討中

RFSoc 1 chip の性能

| | | |
|---------------------|--------------------------------|----------------|
| 12-bit RF-ADC w/DDC | # of ADCs | 16 |
| | Max Rate (GSPS) | 2.220 |
| 14-bit RF-ADC w/DDC | # of ADCs | — |
| | Max Rate (GSPS) | — |
| 14-bit RF-DAC w/DUC | # of DACs | 16 |
| | Max Rate (GSPS) | 6.554 |
| | SD-FEC | |
| | RF input Freq max. GHz | 5 |
| | Decimation / Interpolation | 1x, 2x, 4x, 8x |
| | System Logic Cells (K) | 930 |
| | CLB LUTs (K) | 425 |
| | Max. Dist. RAM (Mb) | 13.0 |
| | Total Block RAM (Mb) | 38.0 |
| | UltraRAM (Mb) | 22.5 |
| | DSP Slices | 4,272 |
| | GTY Transceivers | 16 |
| | PCIe® Gen3 x16 | 2 |
| | PCIeGen3 x16/Gen4 x8 / CCIX | — |
| | 150G Interlaken | 1 |
| | 100G Ethernet MAC/PCS w/RS-FEC | 2 |
| | System Monitor | 1 |

Conceptual design

Rough extrapolation of BG estimation & sensitivity

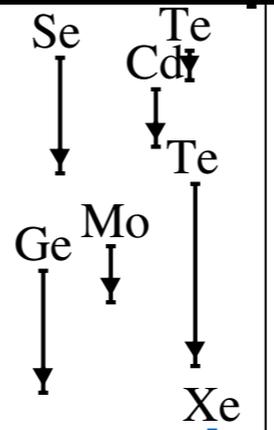
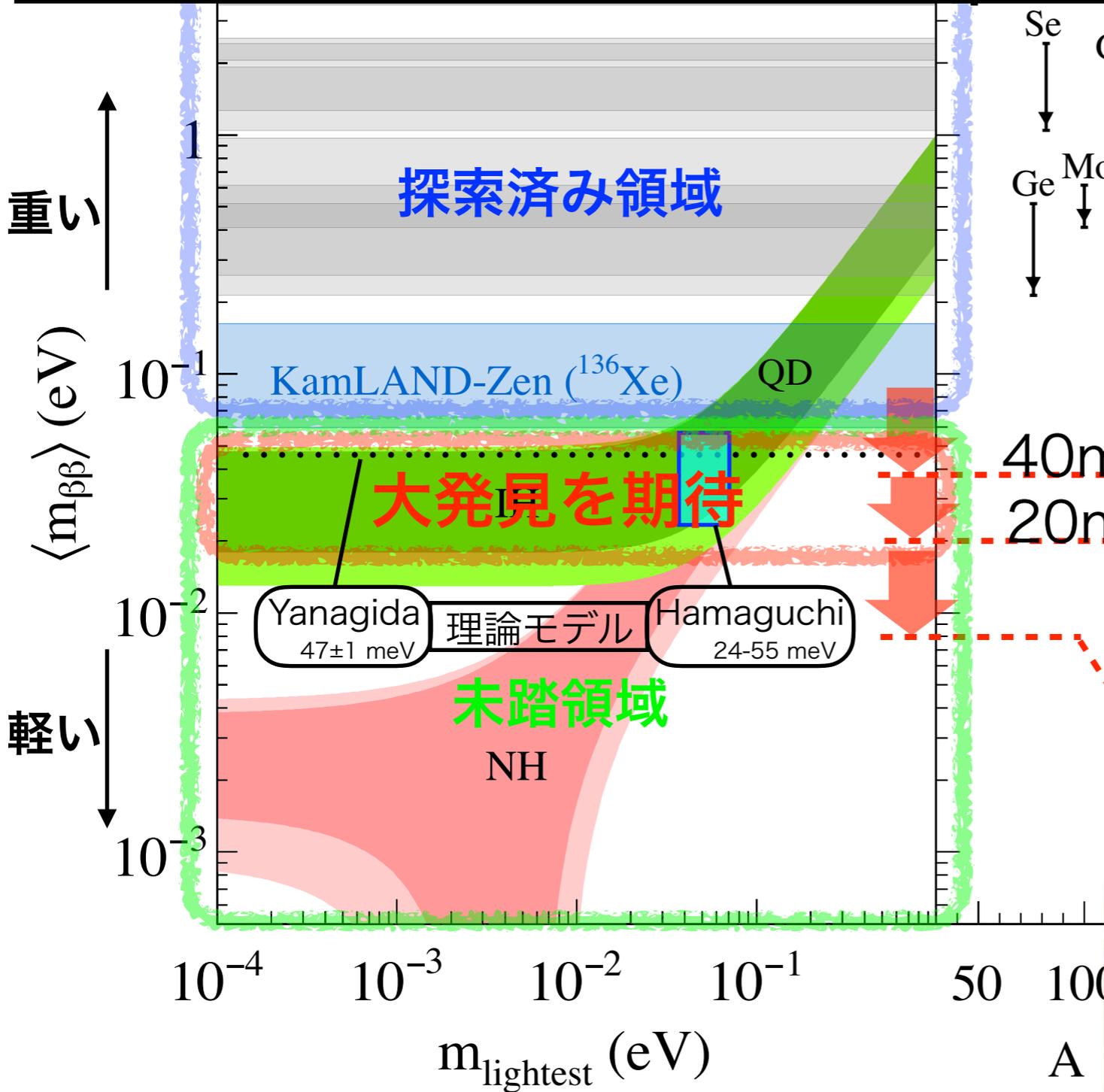
| | KamLAND-Zen 400 | KamLAND-Zen 800 | KamLAND2-Zen 2.38-2.58 MeV | KamLAND2-Zen High P |
|---------------------------------|---|--|--|---|
| $2\nu 2\beta$ [/100kgXe/y] | 7.4 | 7.4 | $\xrightarrow{\sigma_E}$ <0.15 | <0.15 |
| ^{10}C [/100kgXe/y] | 1.3 | $\xrightarrow{\text{analysis}}$ 0.18 | $\xrightarrow{\sigma_E}$ 0.09 | $\xrightarrow{1.8 \text{ atm}}$ 0.05 |
| $^8\text{B}\nu$ [/100kgXe/y] | 0.33 | 0.33 | $\xrightarrow{\sigma_E}$ 0.16 | $\xrightarrow{1.8 \text{ atm}}$ 0.09 |
| FV (loading) [kgXe] | 100 (380) | 300 (750) | $\xrightarrow{\text{PEN}}$ 1000 (1000) | 1000 (1000) |
| (Expected) reach | 61-165 meV $1.07 \times 10^{26} \text{yr}$ | 40 meV $5 \times 10^{26} \text{yr}$ | 20 meV $2 \times 10^{27} \text{yr}$ | <20meV $>2 \times 10^{27} \text{yr}$ |

↑
baseline

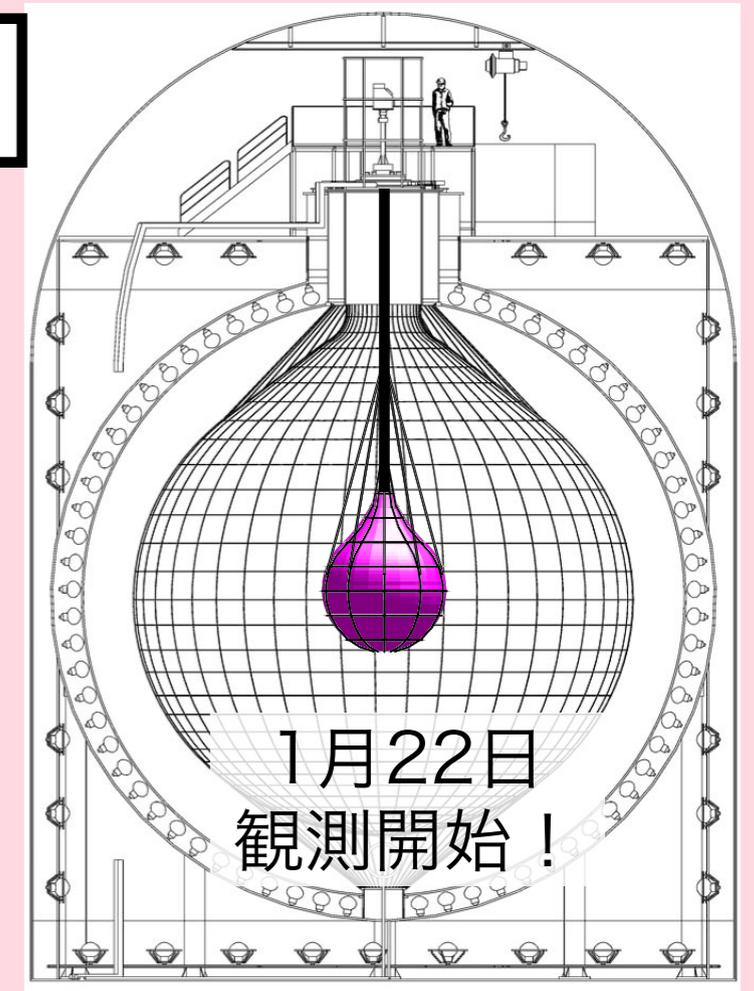
伸び代としての
のオプション

- ・ 高圧でのキセノン高濃度化によるS/N向上
- ・ 撮像による β/γ 識別によるBG低減
- ・ チェレンコフを使った $\beta/2\beta$ 識別

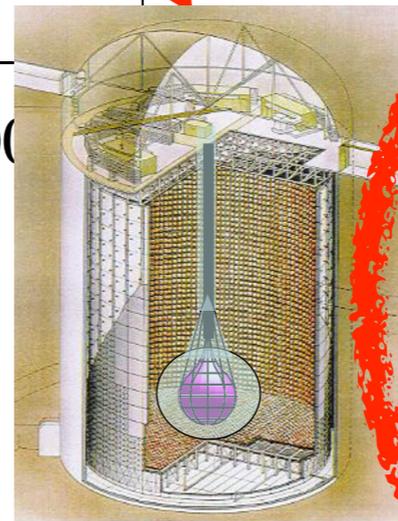
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索



40meV
20meV



low BG film, 750 kg xenon
KamLAND-Zen 800
 $5 \times 10^{26} \text{ y}$ (5y)



大発見の確率
95%(IH)
50%(NH)

高分解能化
蛍光フィルム
KamLAND2-Zen
 $2 \times 10^{27} \text{ y}$ (5y)

いつ発見しても不思議でない。
発見に最も近いのはカムランド禅

Schedule

2019 KamLAND-Zen 800

installation of new electronics
planned during Zen 800

2020

Environmental and
peripheral preparation

Purchase enriched Xenon(200kg)
Installation of MoGURA2
Clean room fabrication
Clean air system installation
Purification system upgrade
Light concentrator production
Large balloon production

2021

2022

2023

KamLAND upgrade

Purchase HQE-PMT
LS drain
Expansion of entrance
PMT replacement/mirror attachment
Large balloon installation
Refurbishment of N2 system
New LS production
LS filling
Development of calibration system

2024

No observation

2025

2026

KamLAND2 start

Mini-balloon installation
Xenon installation

2027

KamLAND2-Zen start

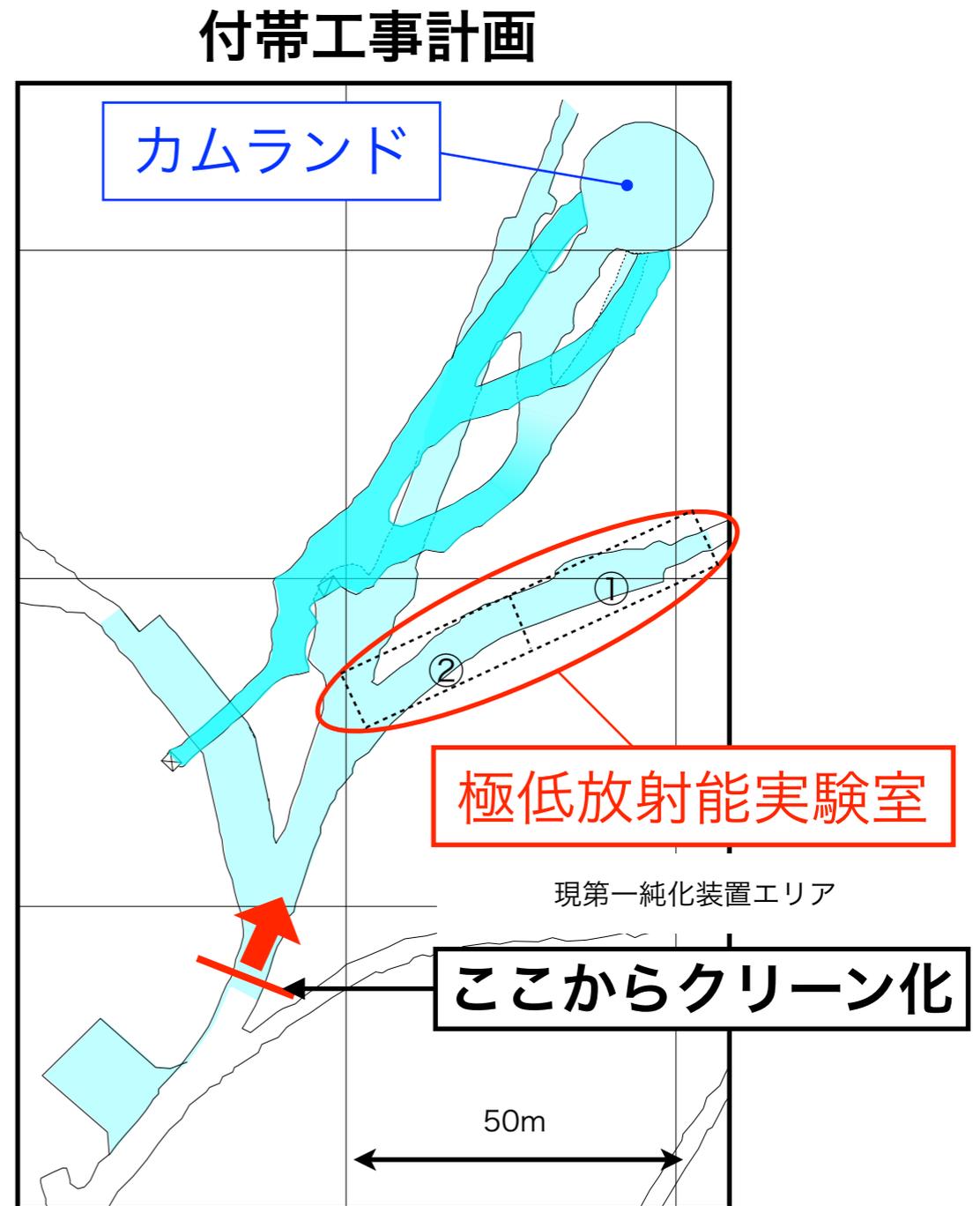
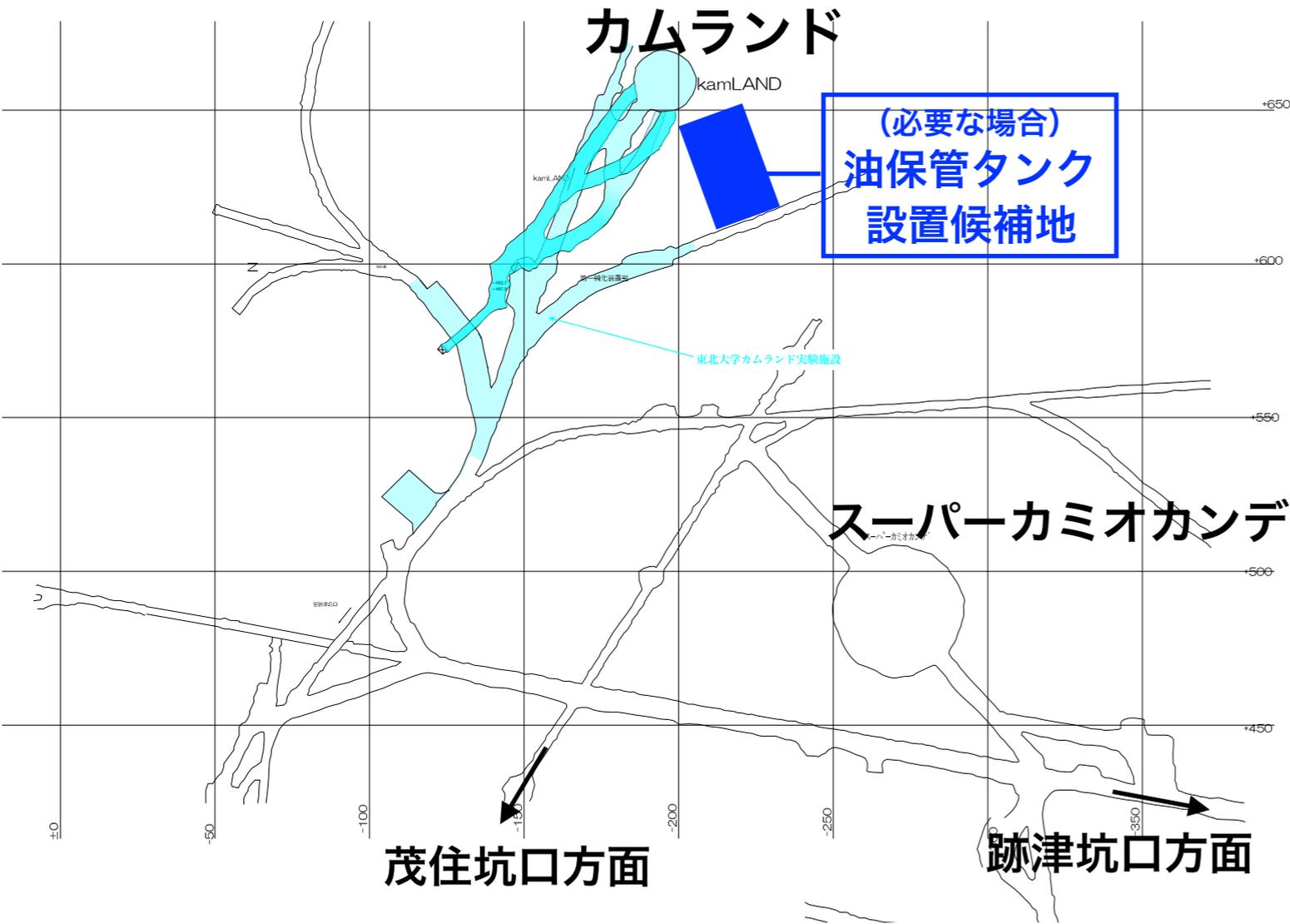
2028

Geo-neutrino
observation

Investigation of
Majorana nature

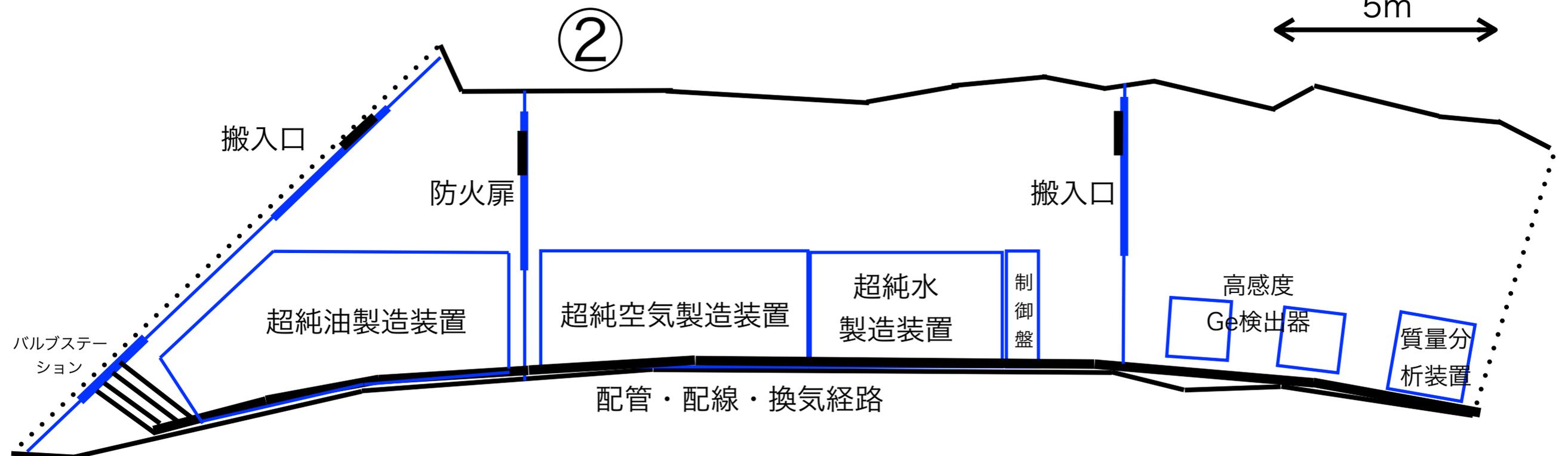
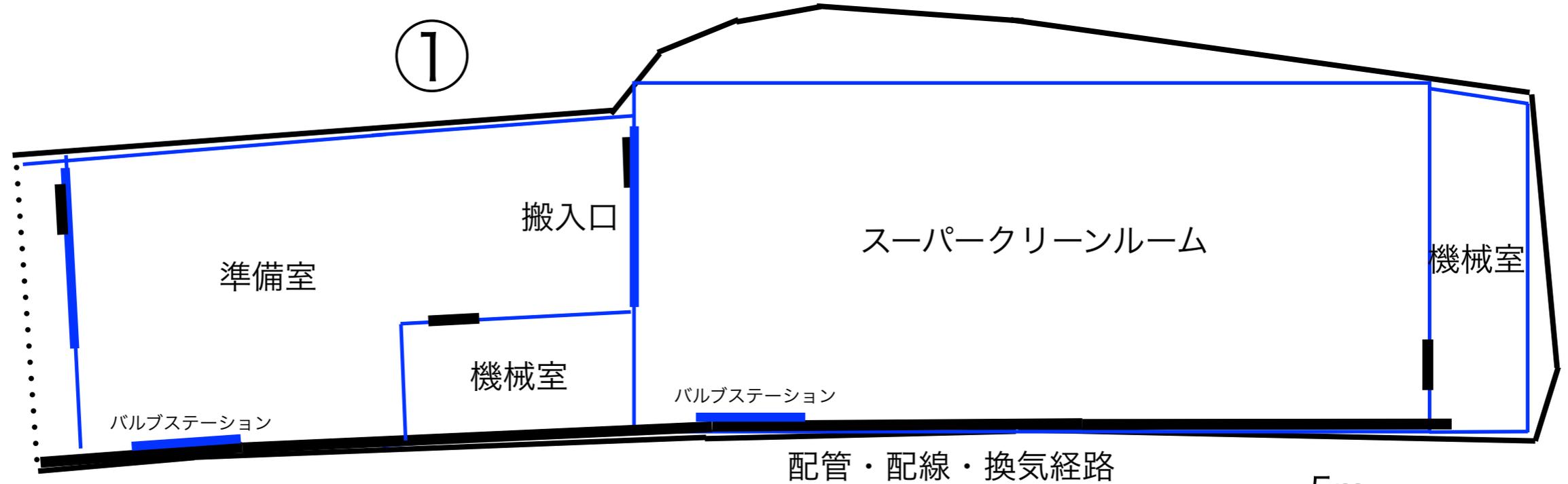


地下1000m観測装置配置図



極低放射能実験室

地下1000mの東北大学カムランドエリアに、超純空気・超純水・超純油を供給できるクラス1スーパークリーンルームを設置し、低放射能素材を選別する高感度Ge検出器・質量分析器とあわせて、極低放射能検出器の開発・製作を可能にする。地下素粒子原子核研究コミュニティを中心に全国共同利用することで、宇宙素粒子研究を強力に推進する。



まとめ

- KamLAND-Zen 800 が2019年1月22日にスタート
- ミニバルーンの低BG化に成功し、有効体積は3~4倍に増加
- 最初の結果はTAUP2019で発表予定
- 地球ニュートリノ観測も並行、最新結果は“neutrino geoscience”で発表予定
- 期間内に40meV程度の感度に達する予定で、初めての逆階層領域でのニュートリノのマヨラナ性の研究
大発見の可能性も小さくない。複数の理論モデル。
逆階層のパラメータ空間で50%カバレッジ！
- 新型電子回路と解析の改善で ^{10}C を大幅低減し、さらに感度向上
- KamLAND2の開発も進行、エネルギー分解能の大幅改善で
感度目標は 20meV
逆階層のカバレッジ 95%、順階層でも 50%!!
- 汎用地下クリーンルームを構築予定