

# A01: KamLANDとKERNELの現状

---

第11回「極低放射能技術」研究会  
2026/03/06@神戸大学

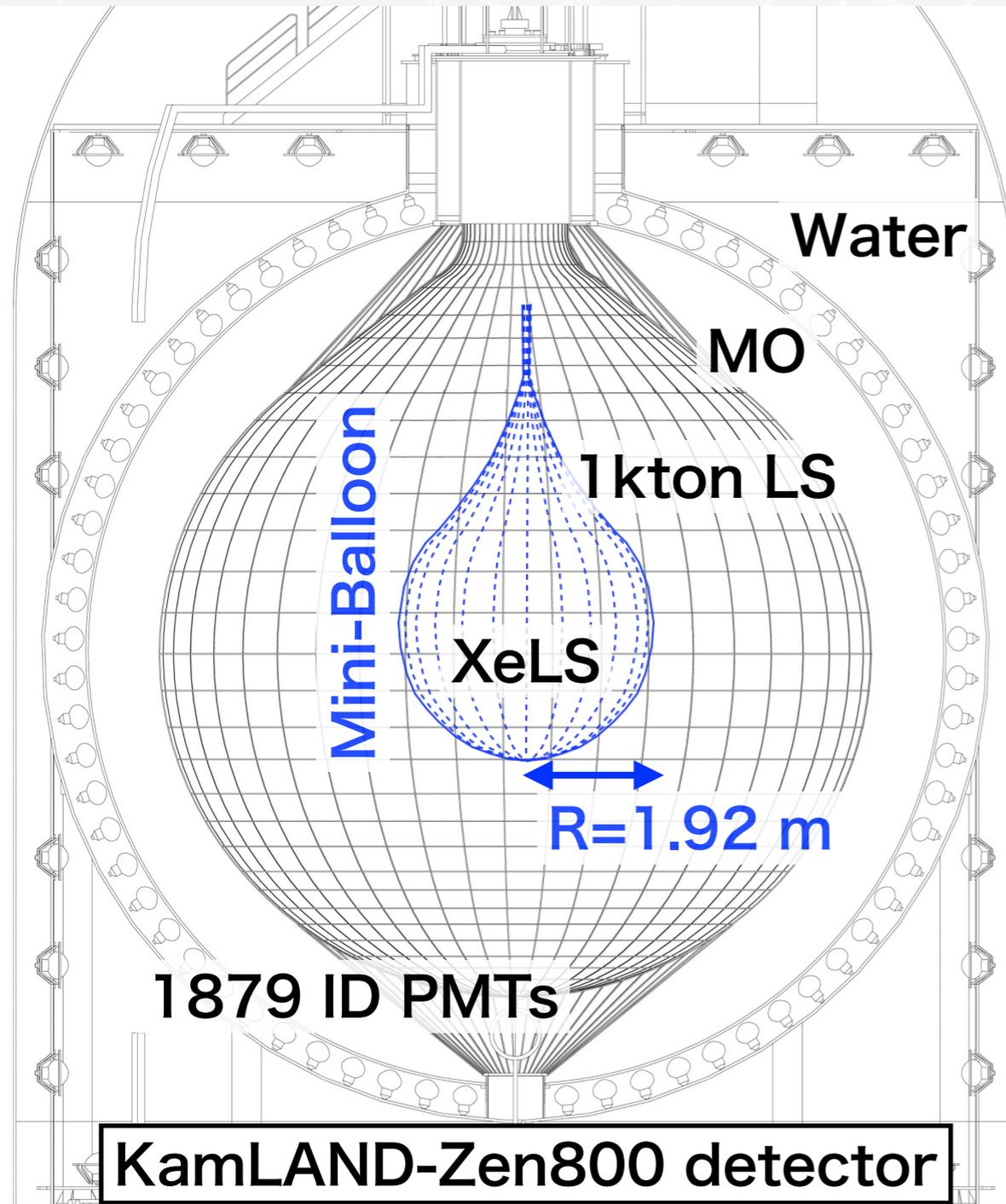
東北大学 ニュートリノ科学研究センター  
細川佳志

# カムランド禅プロジェクト

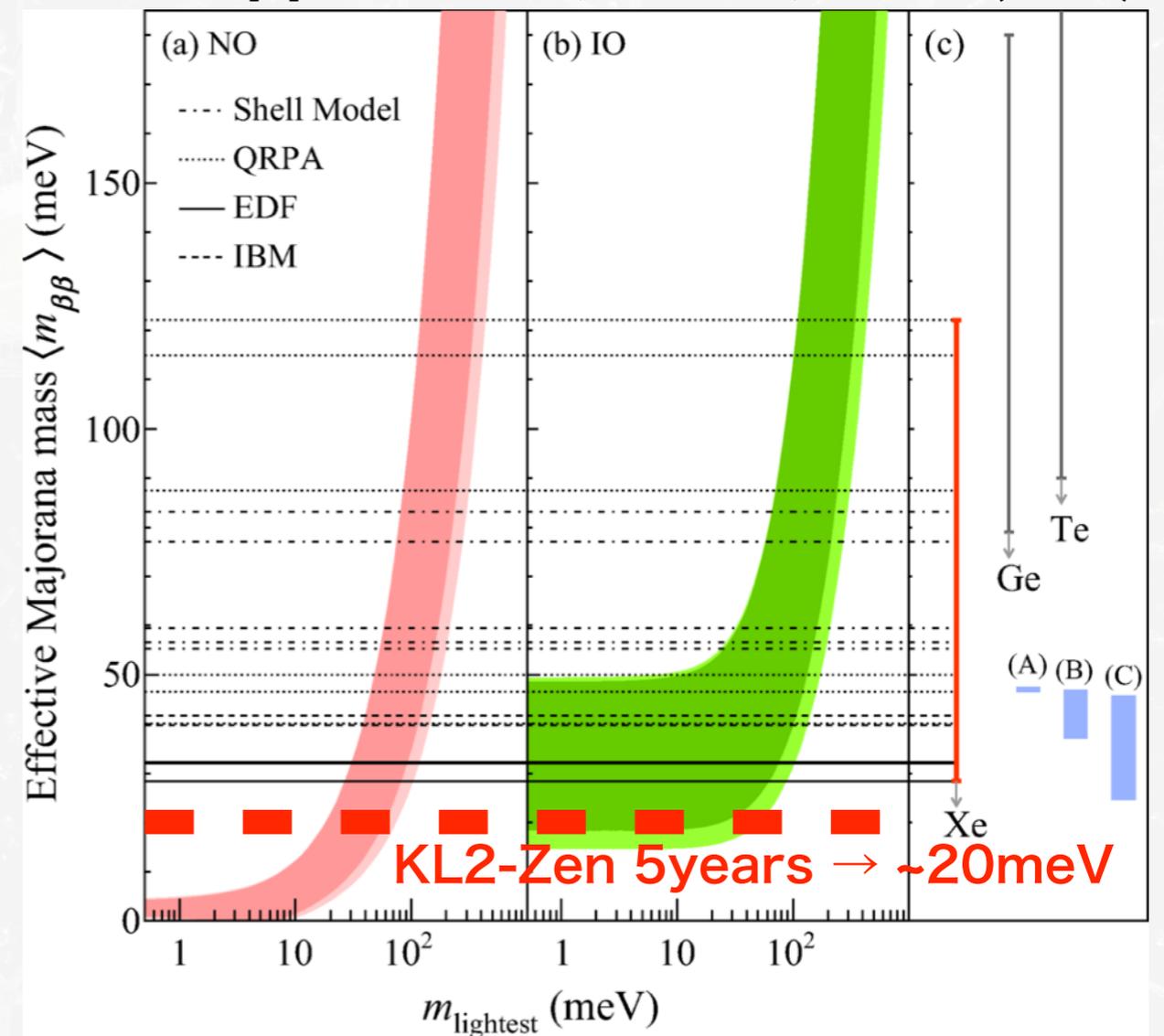
$$0\nu\beta\beta \text{ 探索感度} : T_{1/2}^{0\nu} \propto \begin{cases} \sqrt{\frac{M \times t}{B \times \Delta E}} & (\text{w/ BG}) \\ Mt & (\text{w/o BG}) \end{cases}$$

$M$  ... 崩壊核の量,  $t$  ... 観測時間,  $B$  ... BG rate,  $\Delta E$  ... energy resolution

- ▶  $0\nu\beta\beta$  decay search experiment
- ▶ 750 kg Xe (90% enriched  $^{136}\text{Xe}$ )
- ▶ Zen800 has entered into the IO region [1].
- ▶ KL2-Zen will cover almost all IO region.



[1] S. Abe et.al., PRL 135, 262501 (2025)



PHYSICAL REVIEW LETTERS **135**, 262501 (2025)

## Search for Majorana Neutrinos with the Complete KamLAND-Zen Dataset

S. Abe<sup>1,\*</sup>, T. Araki<sup>1</sup>, K. Chiba<sup>1</sup>, T. Eda<sup>1</sup>, M. Eizuka<sup>1</sup>, Y. Funahashi<sup>1</sup>, A. Furuto<sup>1</sup>, A. Gando<sup>1</sup>, Y. Gando<sup>1,2</sup>, S. Goto<sup>1</sup>, T. Hachiya<sup>1</sup>, K. Hata<sup>1</sup>, K. Ichimura<sup>1</sup>, S. Ieki<sup>1</sup>, H. Ikeda<sup>1</sup>, K. Inoue<sup>1</sup>, K. Ishidoshiro<sup>1</sup>, Y. Kamei<sup>1,†</sup>, N. Kawada<sup>1</sup>, Y. Kishimoto<sup>1</sup>, M. Koga<sup>1,3</sup>, A. Marthe<sup>1</sup>, Y. Matsumoto<sup>1</sup>, T. Mitsui<sup>1,‡</sup>, H. Miyake<sup>1,4</sup>, D. Morita<sup>1</sup>, R. Nakajima<sup>1</sup>, K. Nakamura<sup>1,§</sup>, R. Nakamura<sup>1</sup>, R. Nakamura<sup>1</sup>, J. Nakane<sup>1</sup>, T. Ono<sup>1</sup>, H. Ozaki<sup>1</sup>, K. Saito<sup>1</sup>, T. Sakai<sup>1</sup>, I. Shimizu<sup>1</sup>, J. Shirai<sup>1</sup>, K. Shiraishi<sup>1</sup>, A. Suzuki<sup>1</sup>, K. Tachibana<sup>1</sup>, K. Tamae<sup>1</sup>, H. Watanabe<sup>1</sup>, K. Watanabe<sup>1</sup>, S. Yoshida<sup>5</sup>, S. Umehara<sup>6</sup>, K. Fushimi<sup>7</sup>, K. Kotera<sup>8</sup>, Y. Urano<sup>8,||</sup>, B. E. Berger<sup>9</sup>, B. K. Fujikawa<sup>3,9</sup>, J. G. Learned<sup>10</sup>, J. Maricic<sup>10</sup>, Z. Fu<sup>11</sup>, S. Ghosh<sup>11</sup>, J. Smolksy<sup>11</sup>, L. A. Winslow<sup>11</sup>, Y. Efremenko<sup>3,12</sup>, H. J. Karwowski<sup>13</sup>, D. M. Markoff<sup>13</sup>, W. Tornow<sup>3,13</sup>, S. Dell’Oro<sup>14</sup>, T. O’Donnell<sup>14</sup>, J. A. Detwiler<sup>3,15</sup>, S. Enomoto<sup>3,15</sup>, M. P. Decowski<sup>16</sup>, K. M. Weerman<sup>16</sup>, C. Grant<sup>17</sup>, Ö. Penek<sup>17</sup>, H. Song<sup>17</sup>, A. Li<sup>18</sup>, S. N. Axani<sup>19</sup>, M. Garcia<sup>19</sup> and M. Sarfraz<sup>19</sup>

(KamLAND-Zen Collaboration)

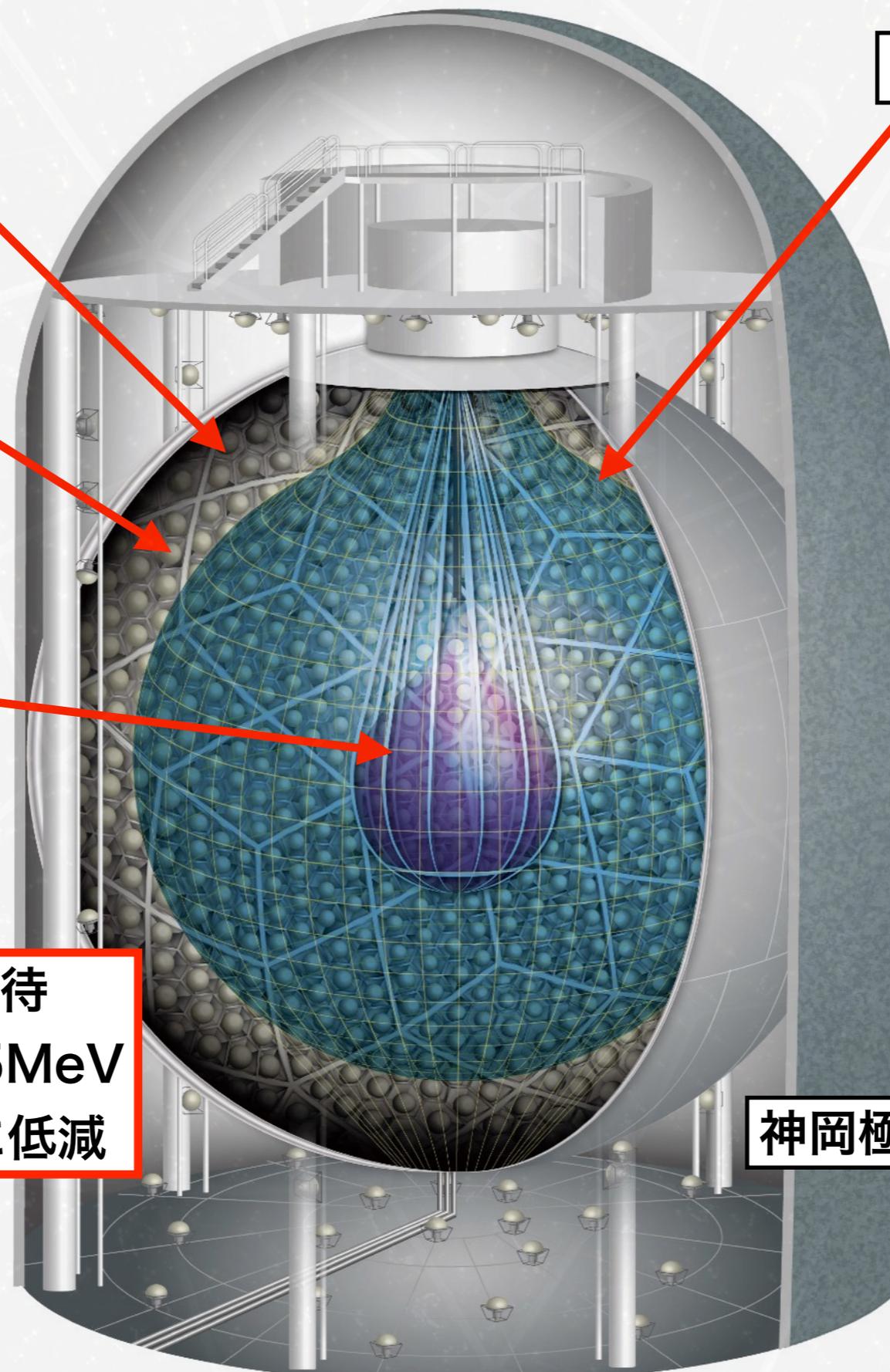
<sup>1</sup>*Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan*

<sup>2</sup>*Department of Human Science, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro, Hokkaido 080-8555, Japan*

<sup>3</sup>*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo Institutes for Advanced Study*

・ フルデータセットを使った  $0\nu\beta\beta$  探索 paper

# カムランド2, カムランド2禅



集光ミラー

集光量x1.8

高量子効率PMT

集光量x1.9

新液体シンチレータ

集光量x1.4

よりクリーンなバルーン

小幡捺：若手, P5

ニュートリノ物理

江田智弘：若手, P6

ミューオン物理

齊藤恵汰：若手, P23

窒素中クリプトン除去

蜂谷尊彦：P36

PID

戸田 溪斗：P35

神岡極稀現象研究拠点 KERNEL

D. Chernyak：P10

見上万葉：若手, P11

太田幸寿：P22

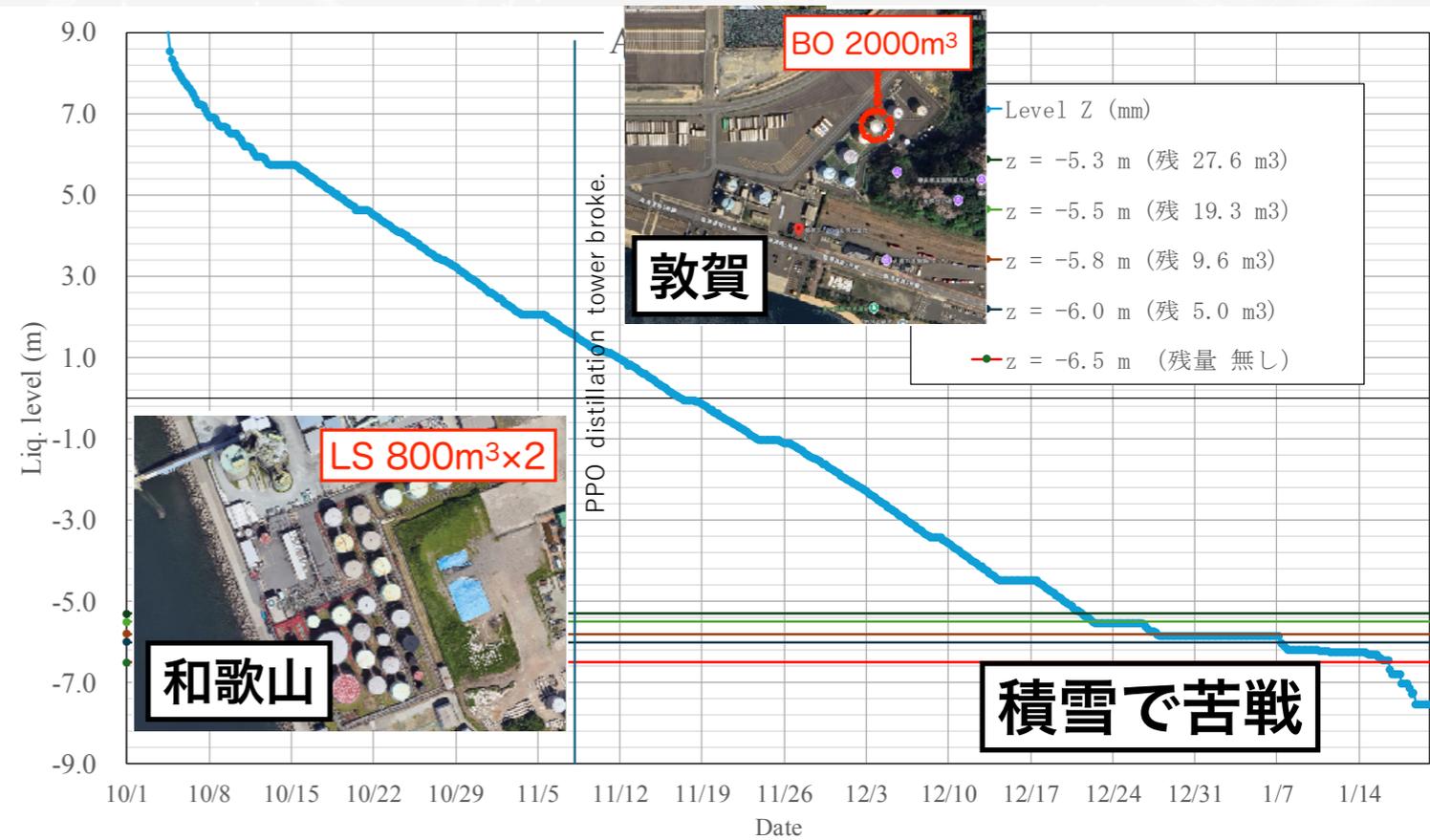
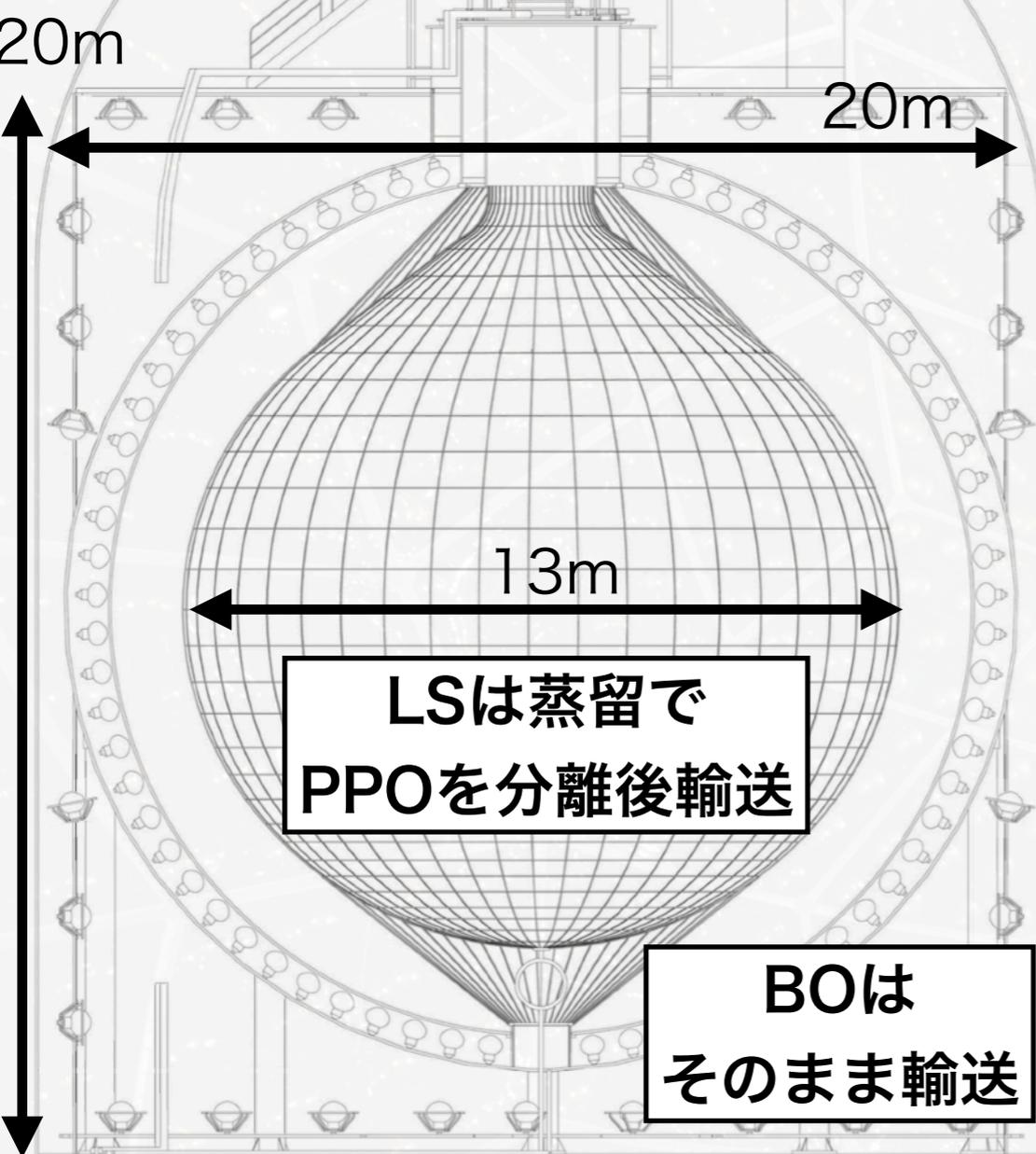
約5倍の集光量を期待

$\sigma_E$ : 4%  $\rightarrow$  2% @ 2.45 MeV

$2\nu\beta\beta$  は  $\sim 1/100$  に低減

2024/05 ミニバルーン引抜き

2024/8/27 データ取得完了



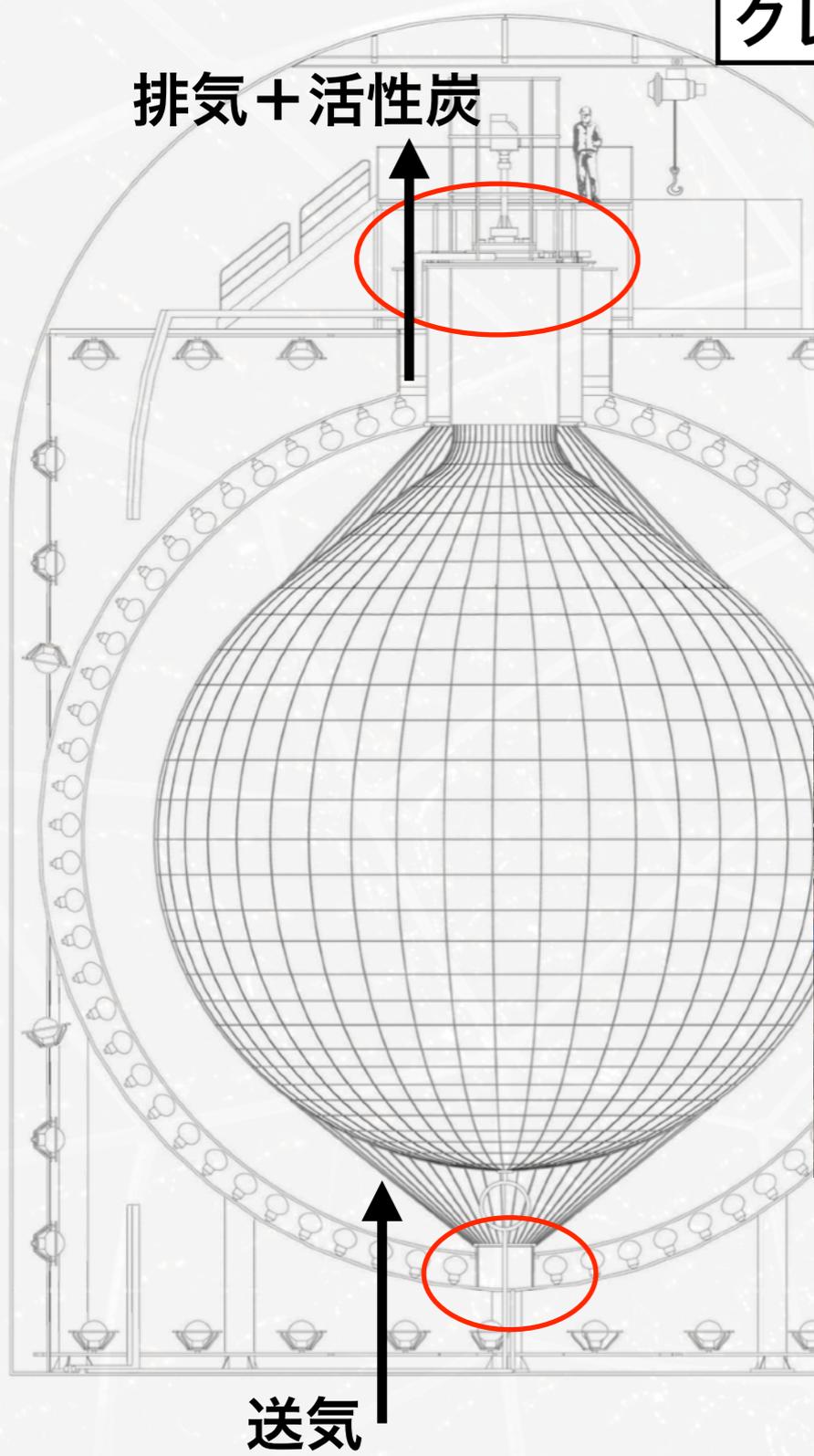
## Removing PMTs (Ring6,5,4)



Very efficient work yielded 40 PMTs removal in only half a day!!

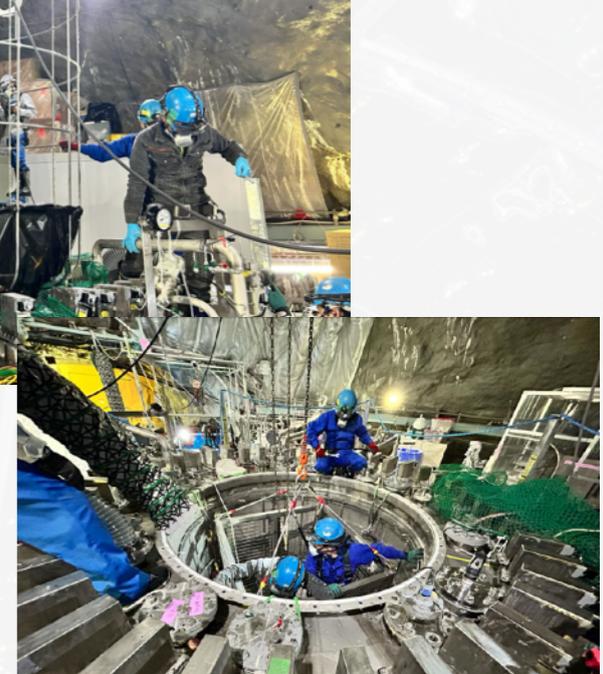
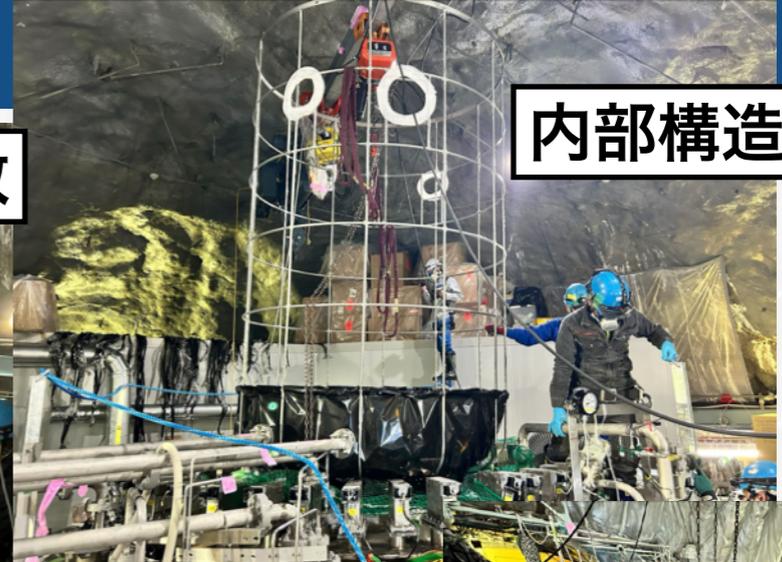
- 2024/10~2025/01の間, 液面差を出さずにLS 1200m<sup>3</sup>とBO 1800m<sup>3</sup>を液抜き
- 水漏れ軽減を狙った吹き付けのため, ODを解体

# 蓋開け



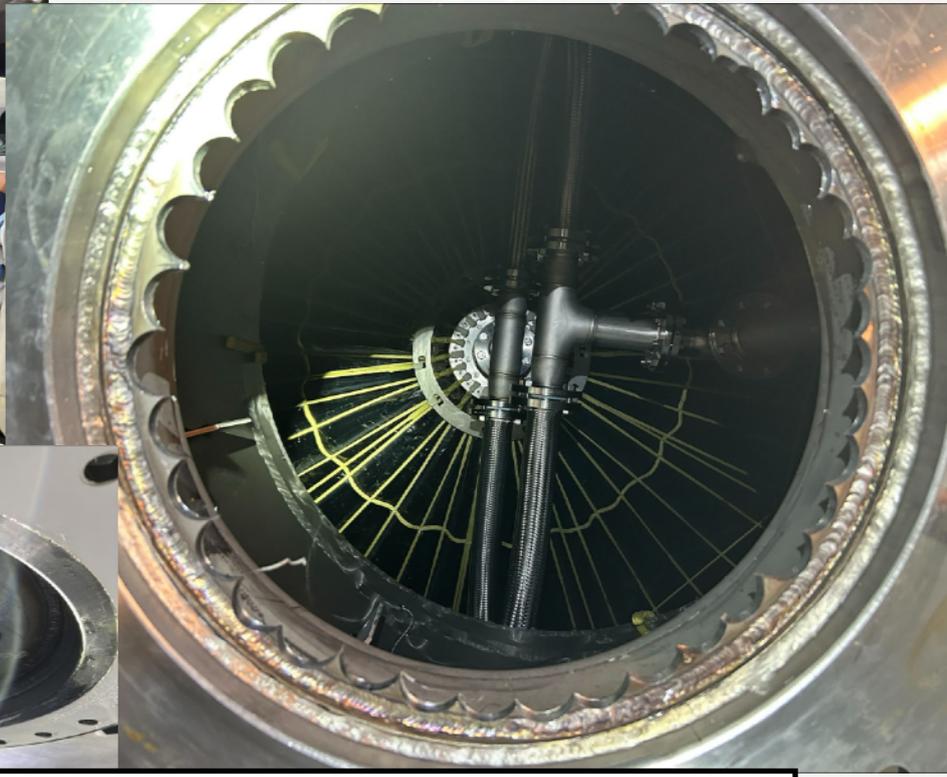
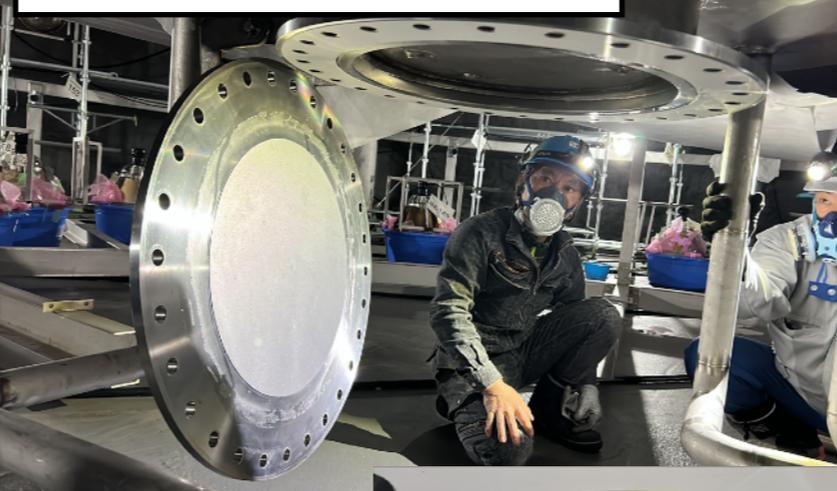
クレーン等を使って上蓋開放

内部構造物を除去



下部マンホール開放

ゴンドラで進入



溶接閉止板をホールソーで除去

2025/02 蓋を開け，中を乾燥。排気は活性炭で油分吸着

# バルーン引き抜き

萎ませる



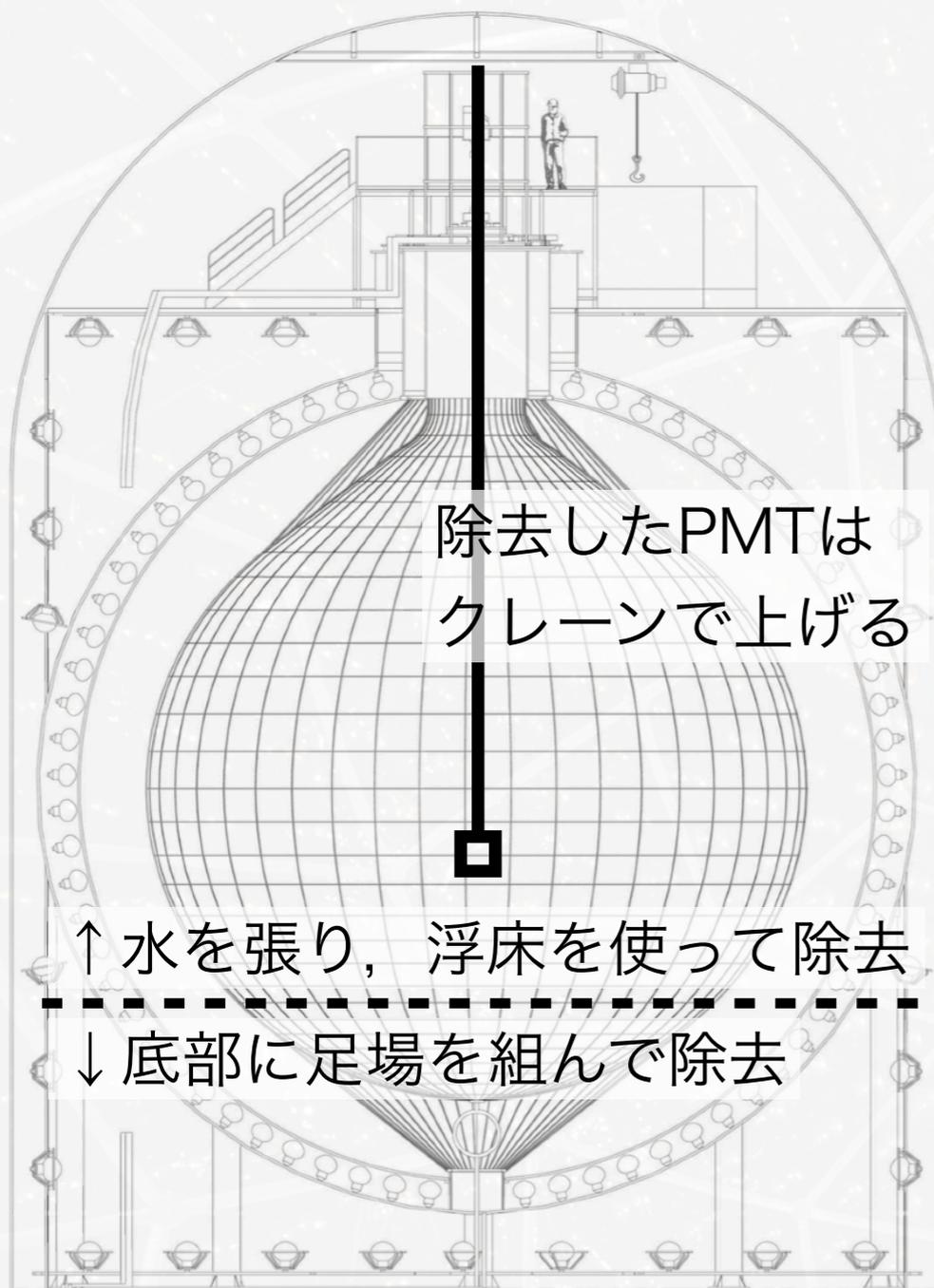
クレーン+ウインチ+人力で引き抜き



仙台で畳み方等試験

- ▶ 2025/05 油乾燥後, バルーンを引き抜き
- ▶ 引き抜き後は仙台で広げて遊んだ

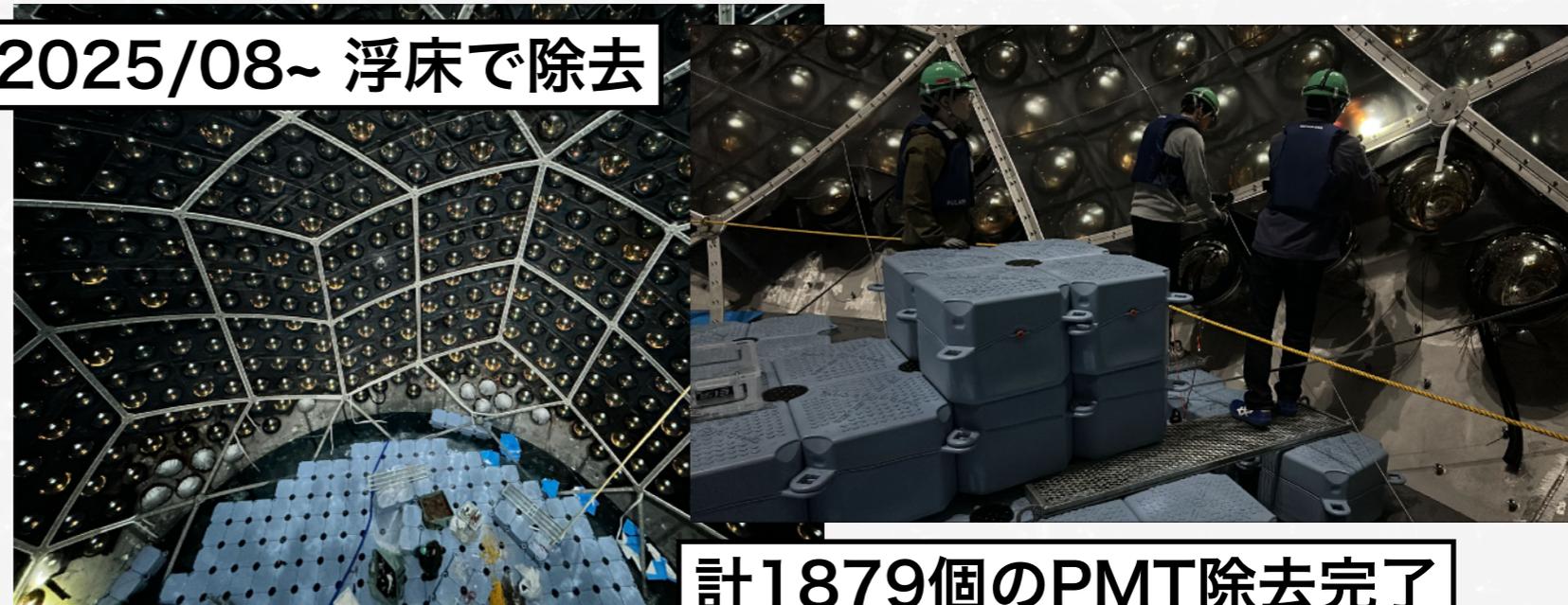
# PMT取外し



2025/07 底部除去



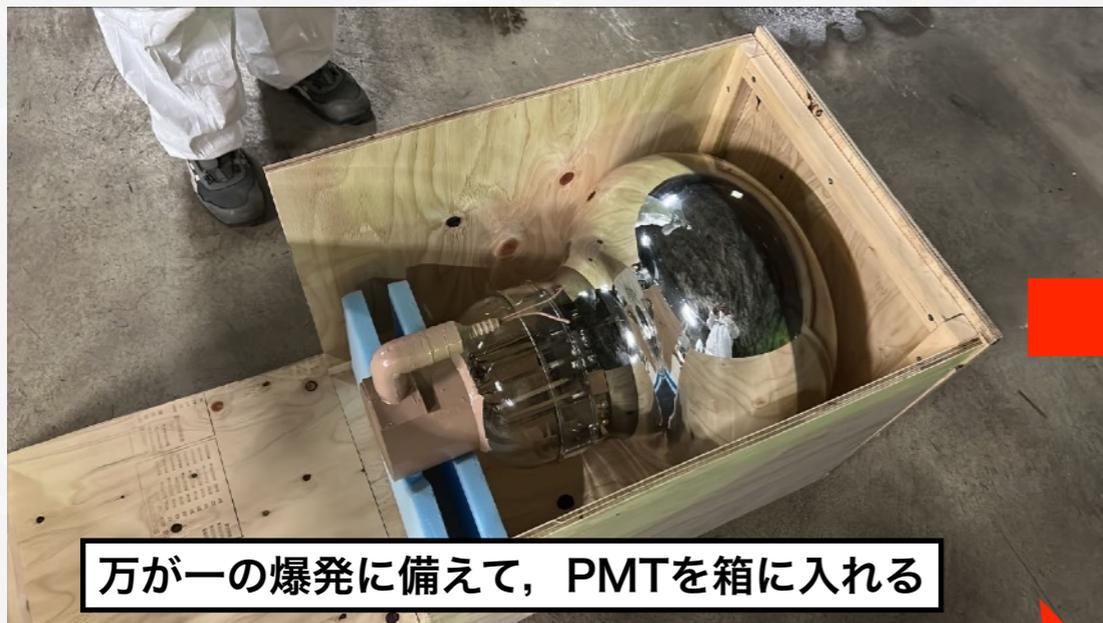
2025/08~ 浮床で除去



計1879個のPMT除去完了

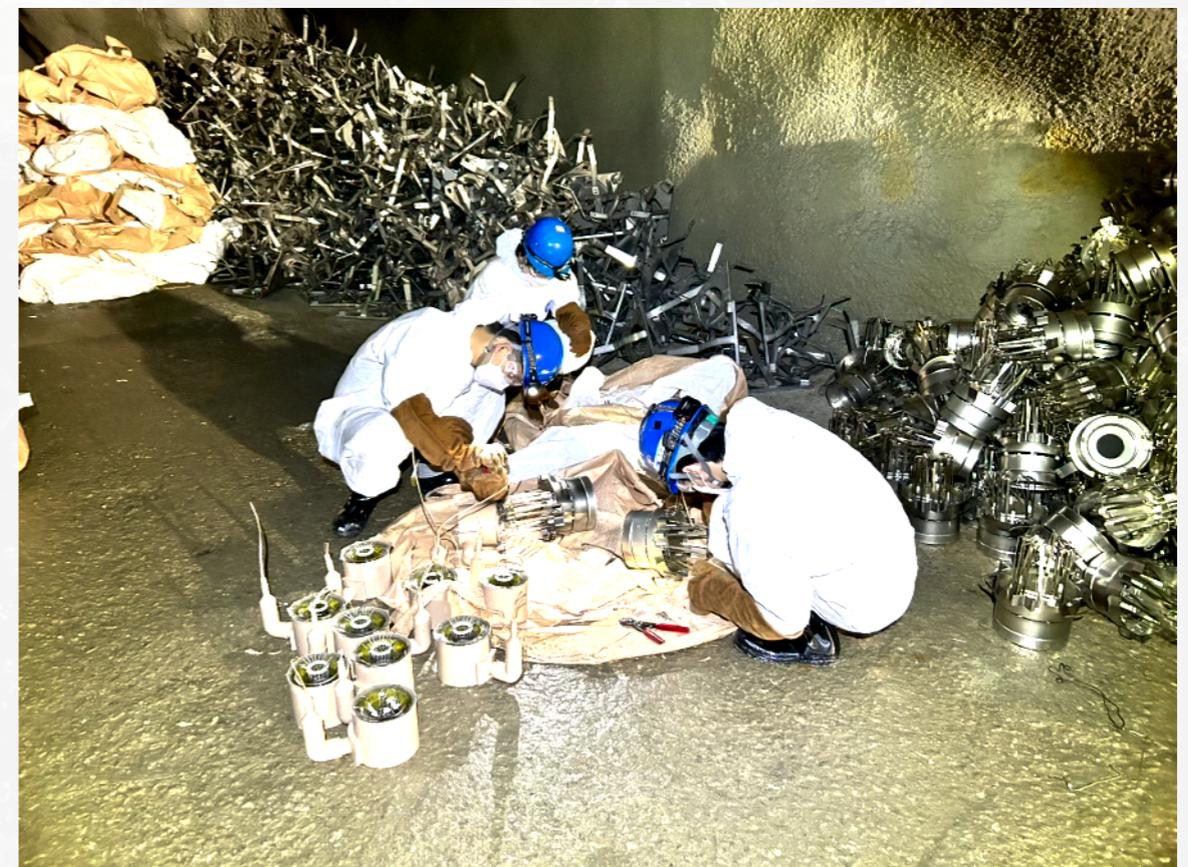
- ▶ 2025/07 底部PMT335本を除去。45度程度の傾斜部分まで除去した
- ▶ 2025/08/18~10/02 浮床を使ってPMT除去。40~80PMTs/day

# PMT破壊

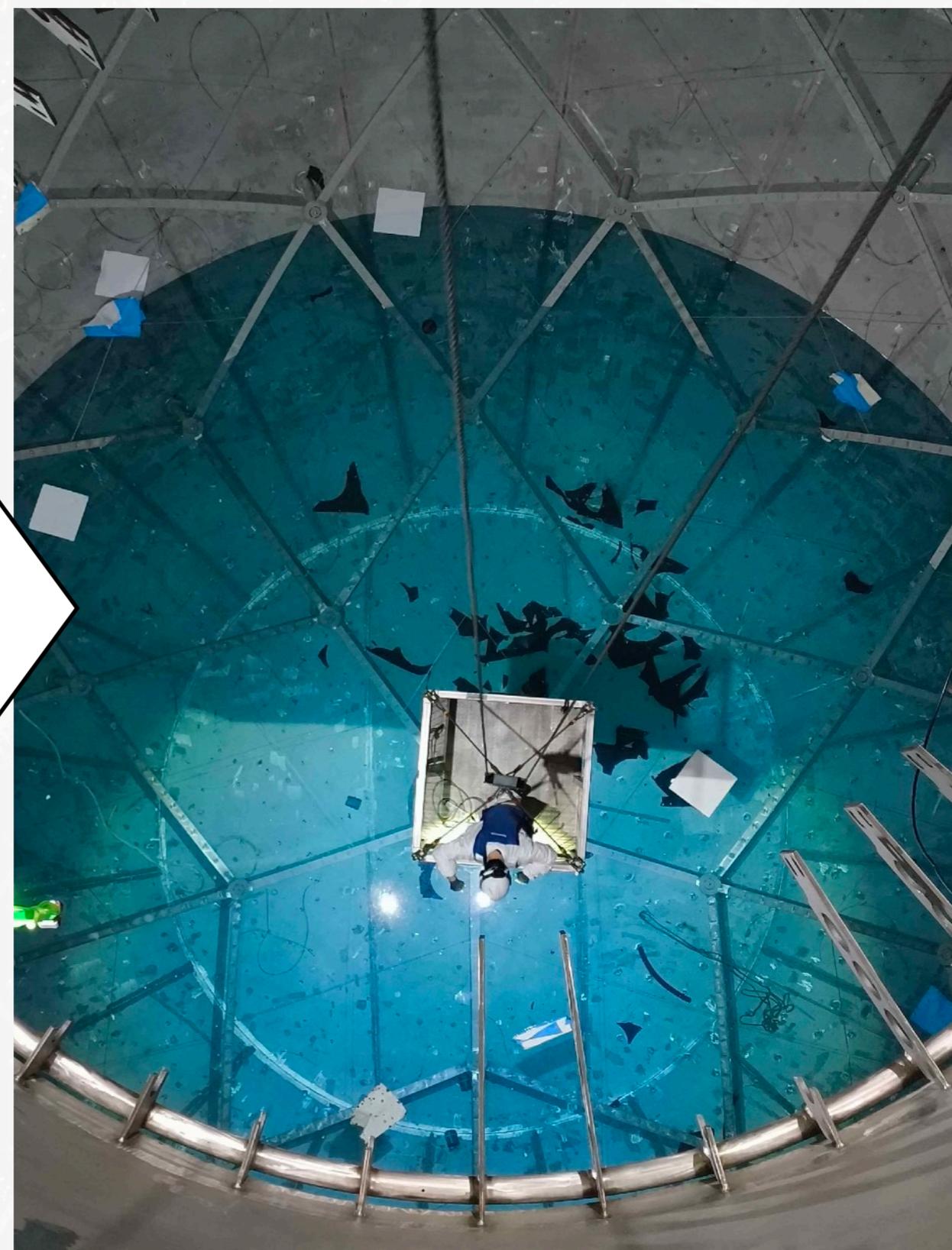
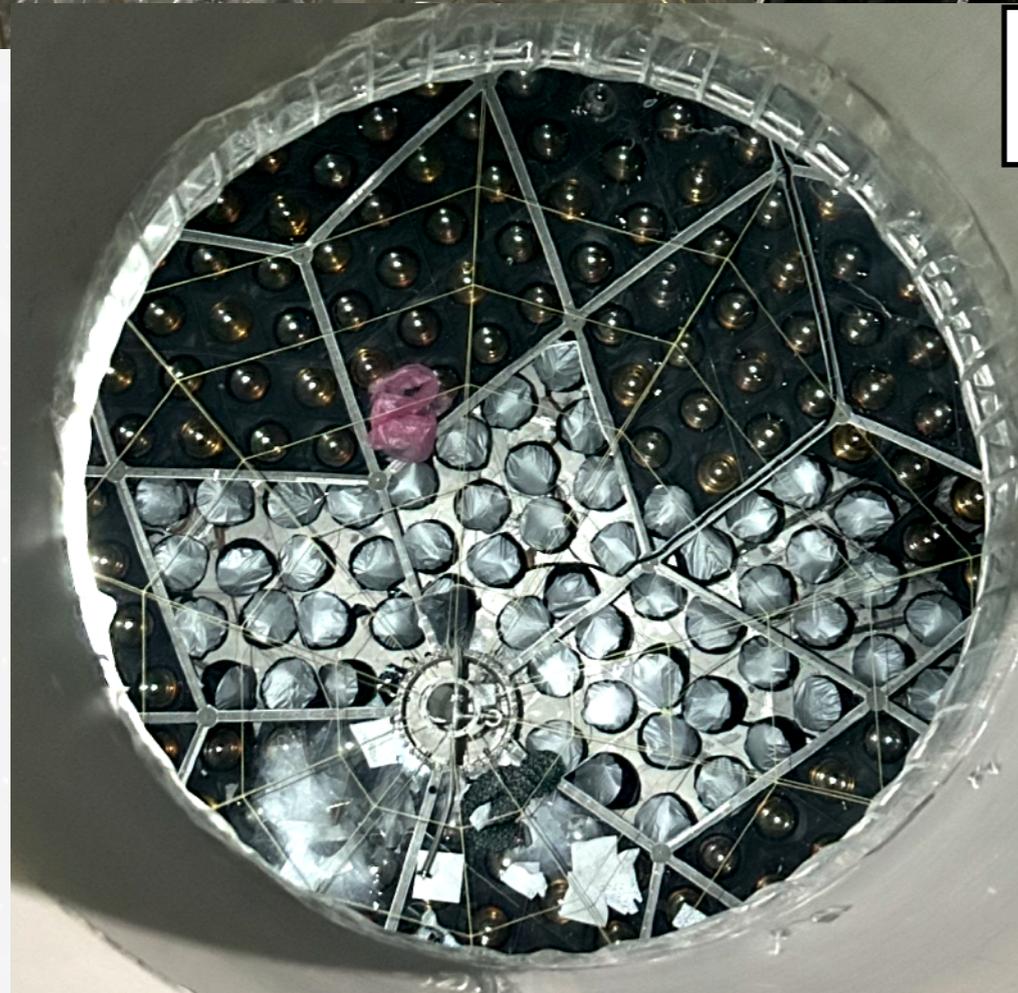


- ▶ 安全なPMTリーク手法を開発した
- ▶ ~70個/dayのハイペース

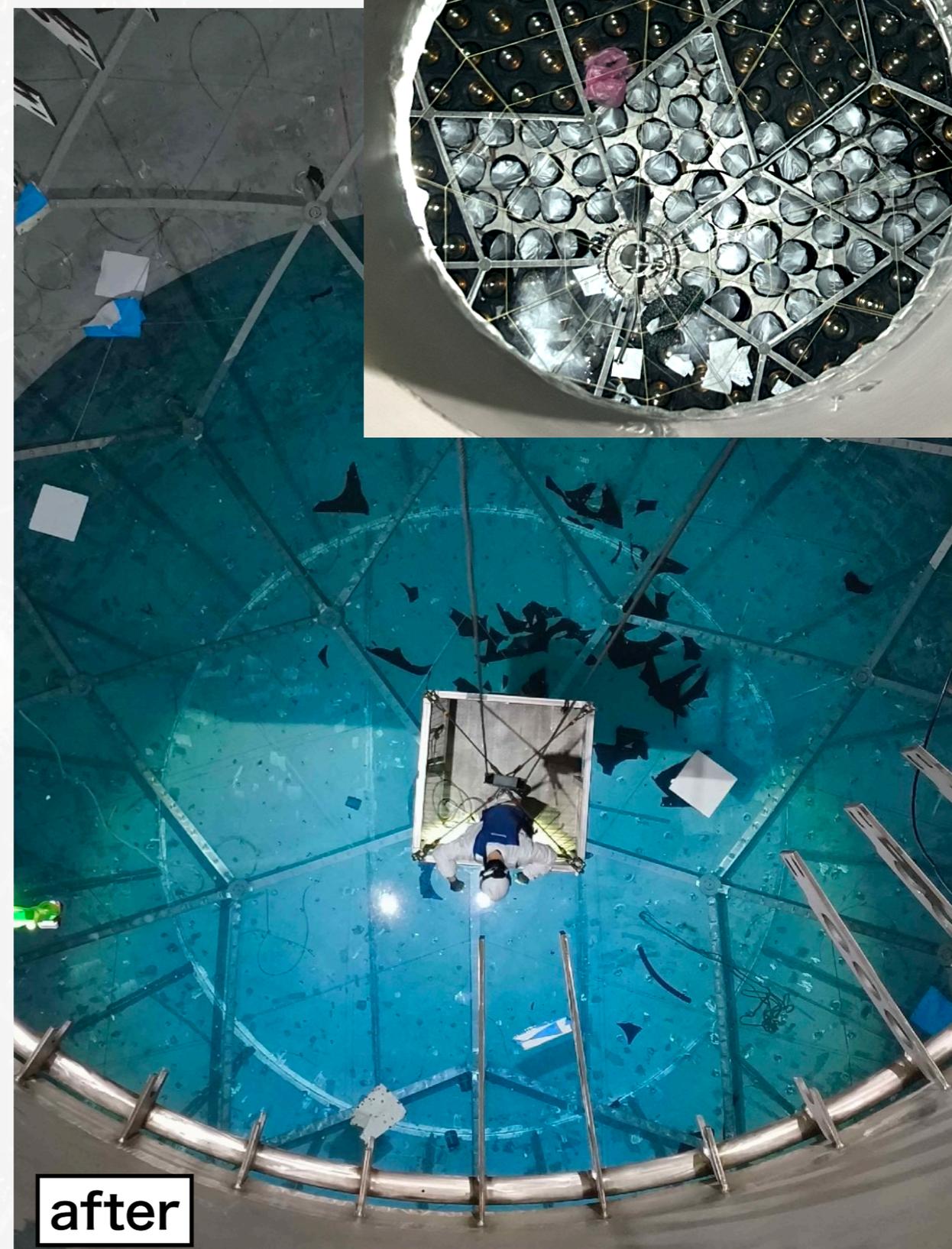
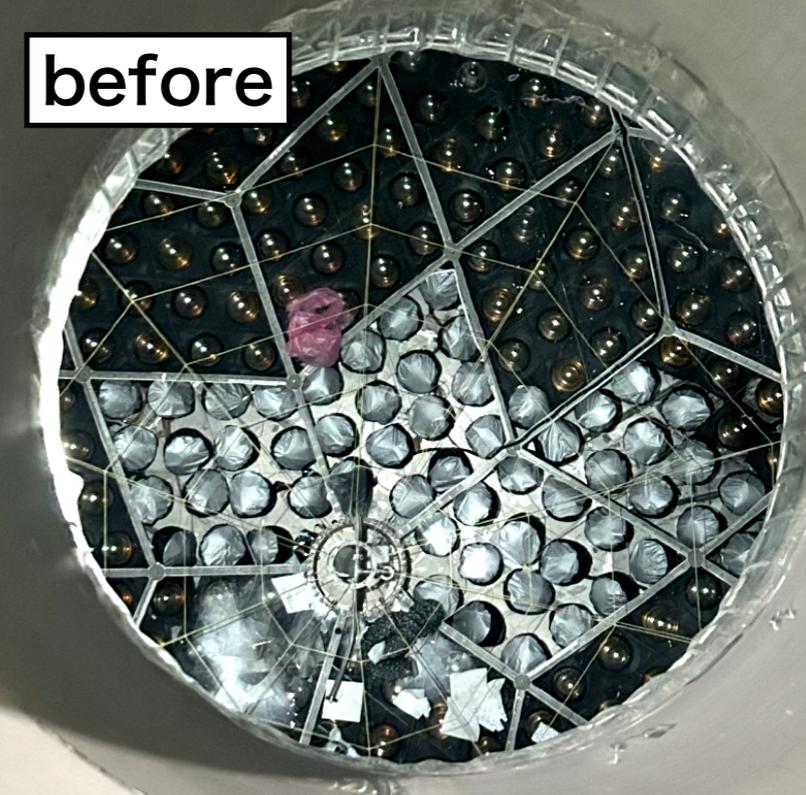
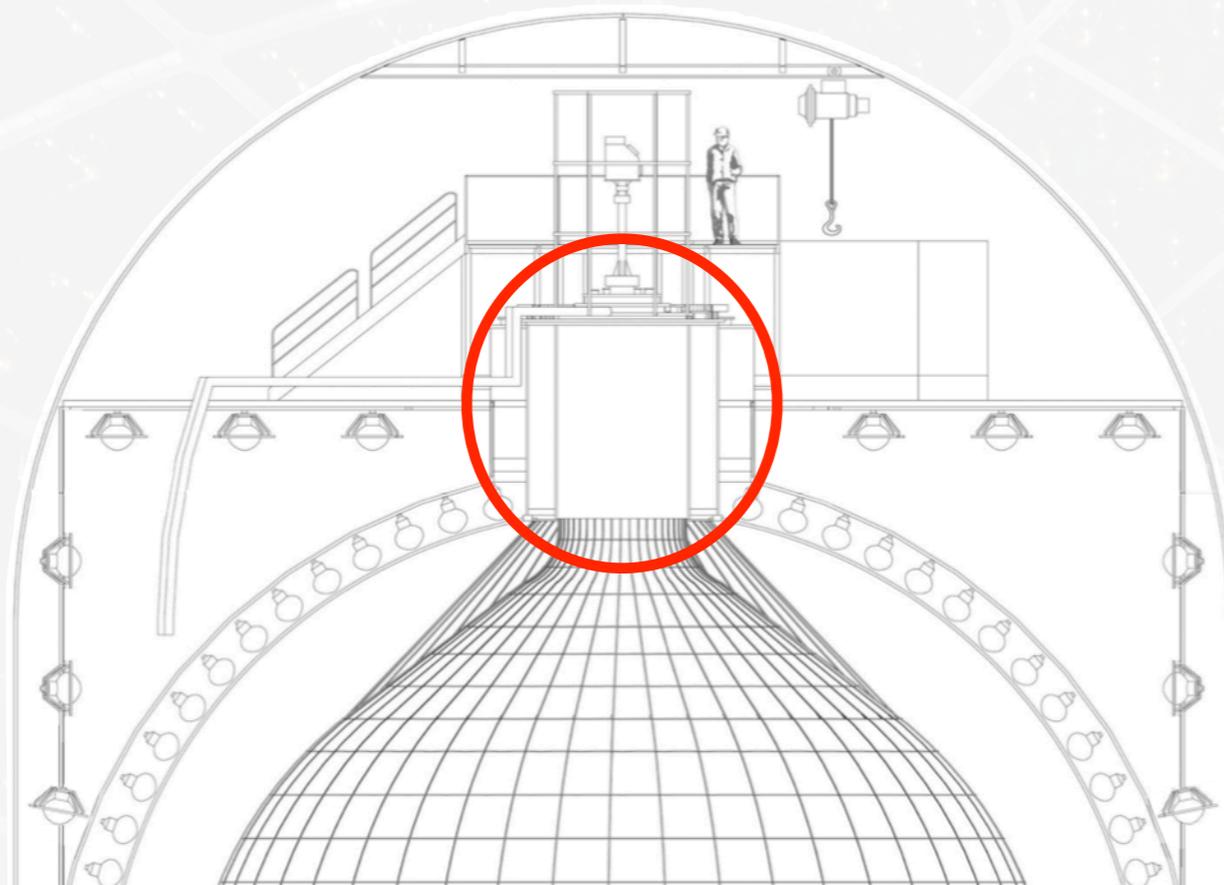
# PMT破壊作業の様子



# PMT取外し完了

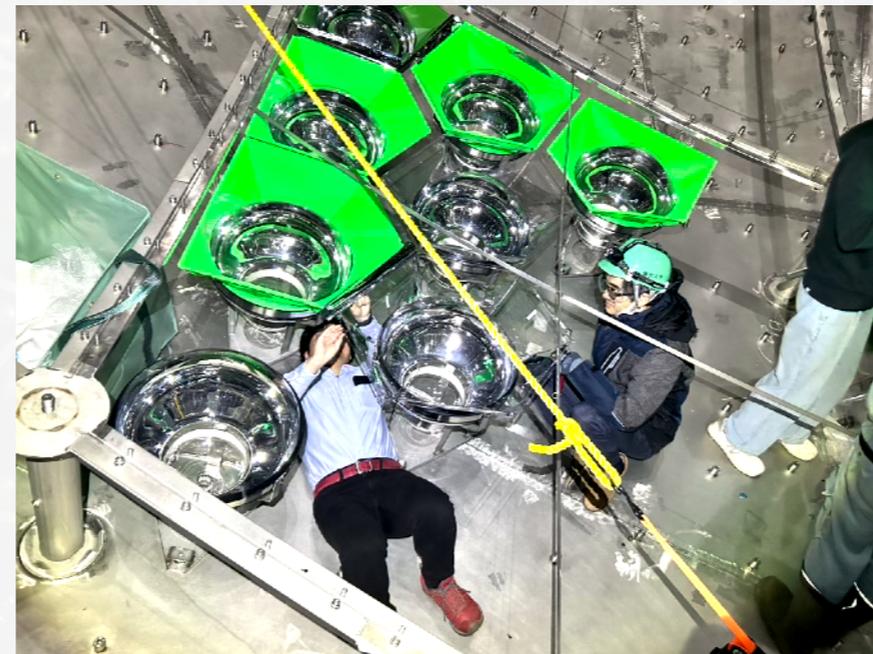
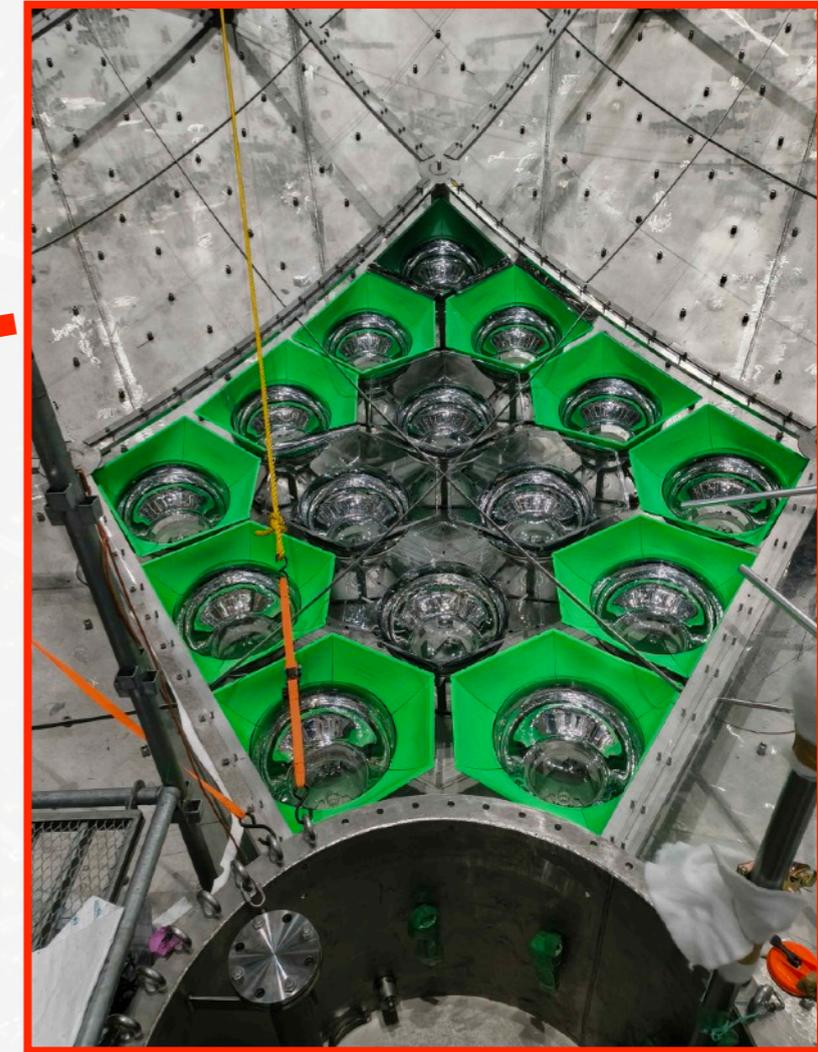
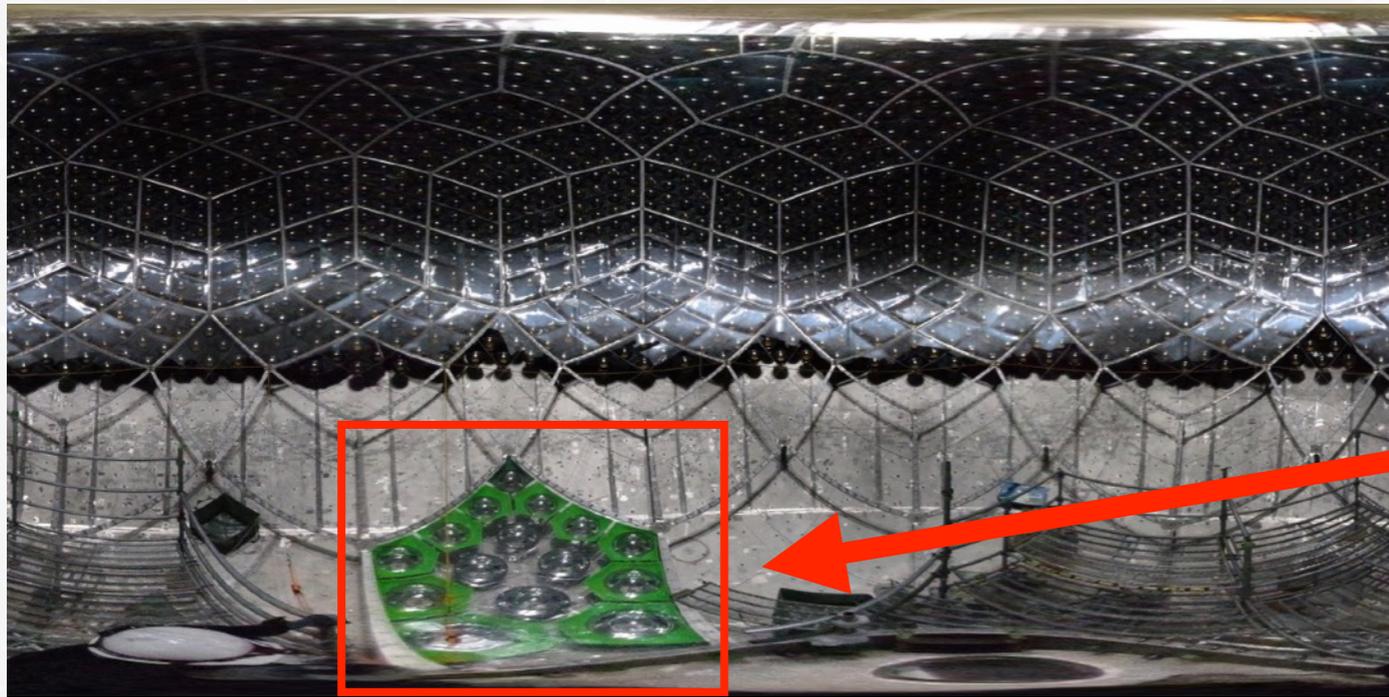


# チムニーの除去



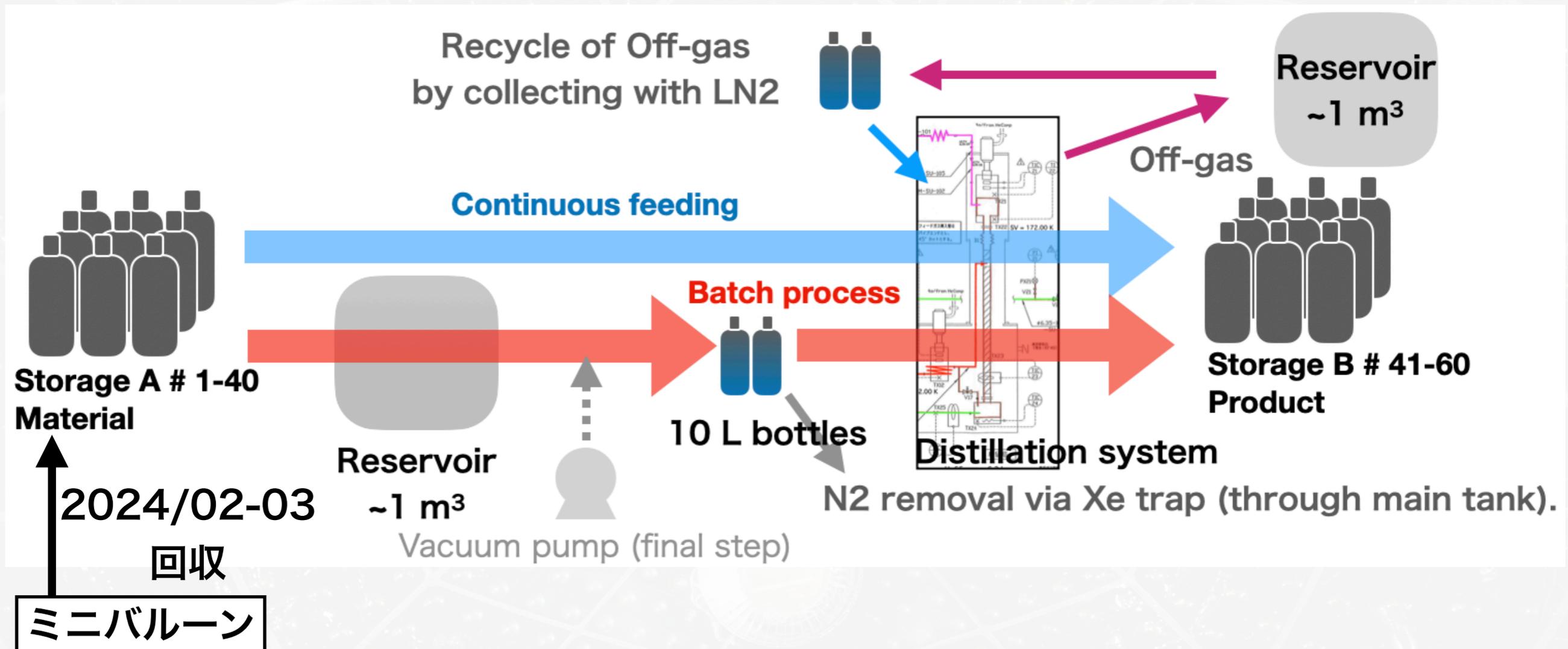
- ▶ KLチムニーは2m,3m,4mの3層構造
- ▶ PMT等取付時に3mの開口部が必要
- ▶ そのため, 2mチムニーを一旦撤去
- ▶ PMT付け後, バルーン設置前に再生

# PMT+ミラー取り付け試験



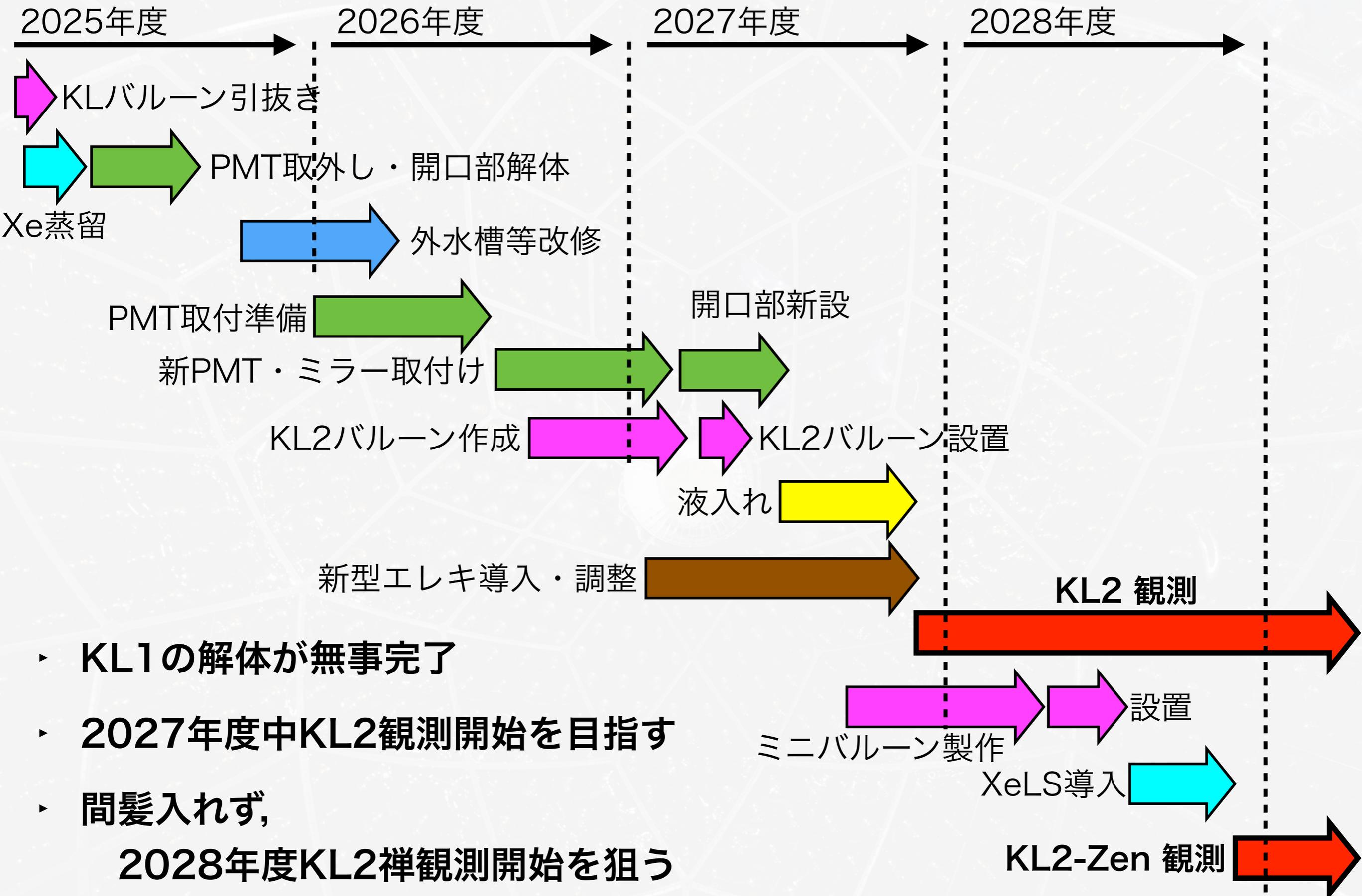
- ▶ KL2 PMT形状のガラス玉とミラー模型の取付試験
- ▶ 体勢がかなりきついが、概ね成功！

# キセノン蒸留



- ▶ カムランド禅800から回収した濃縮キセノンを蒸留
- ▶ 予期せぬキセノン損失はなく，回収・蒸留は大成功！
  - カムランド禅800開始時  $\sim 769.5^{+3.5}_{-3.6}$  kg  
→ 蒸留後  $\sim 768.5 \pm 1.1$  kg

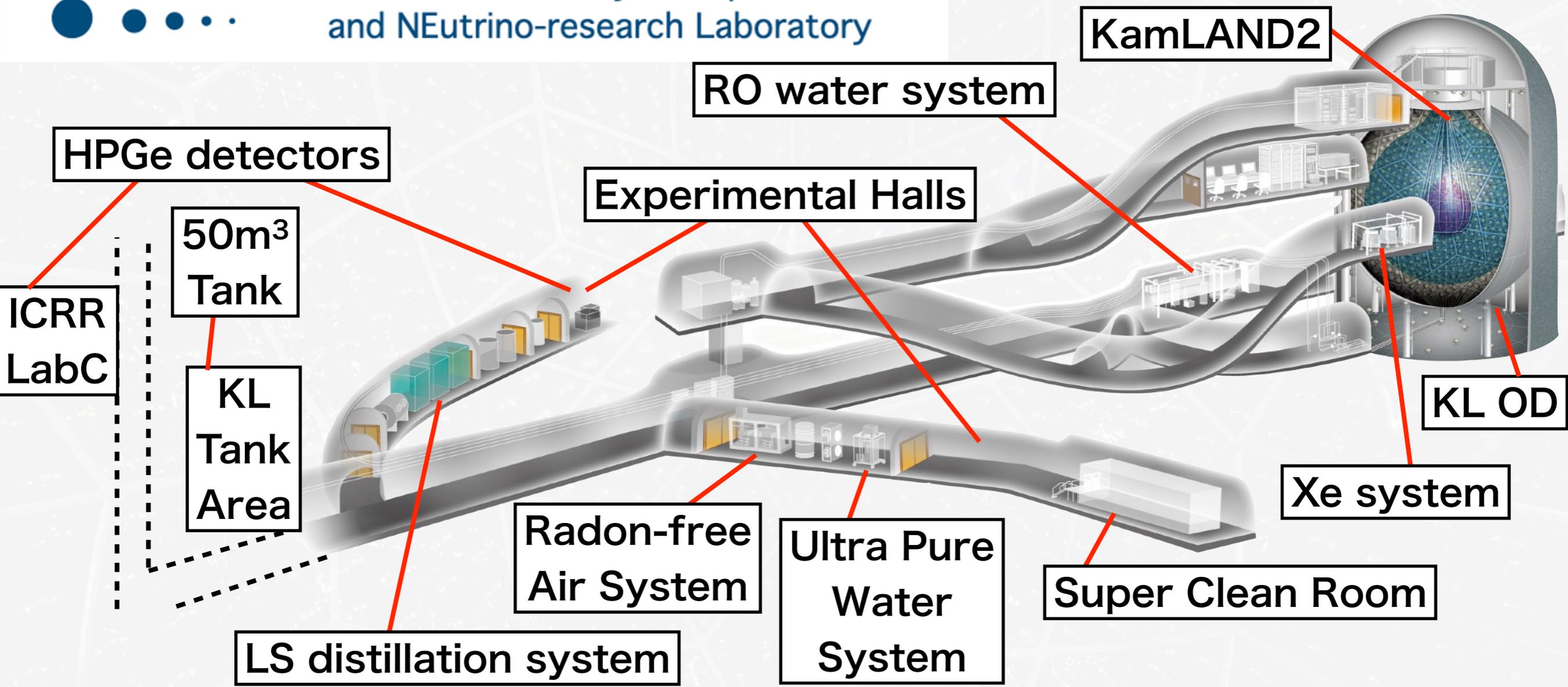
# KL2完成までのスケジュール





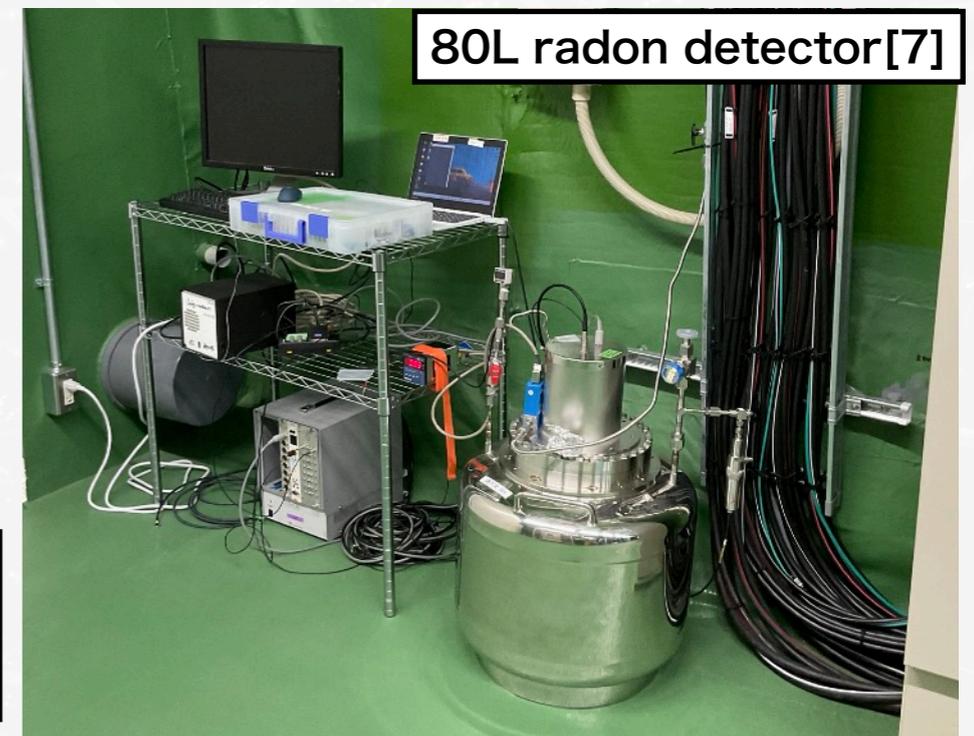
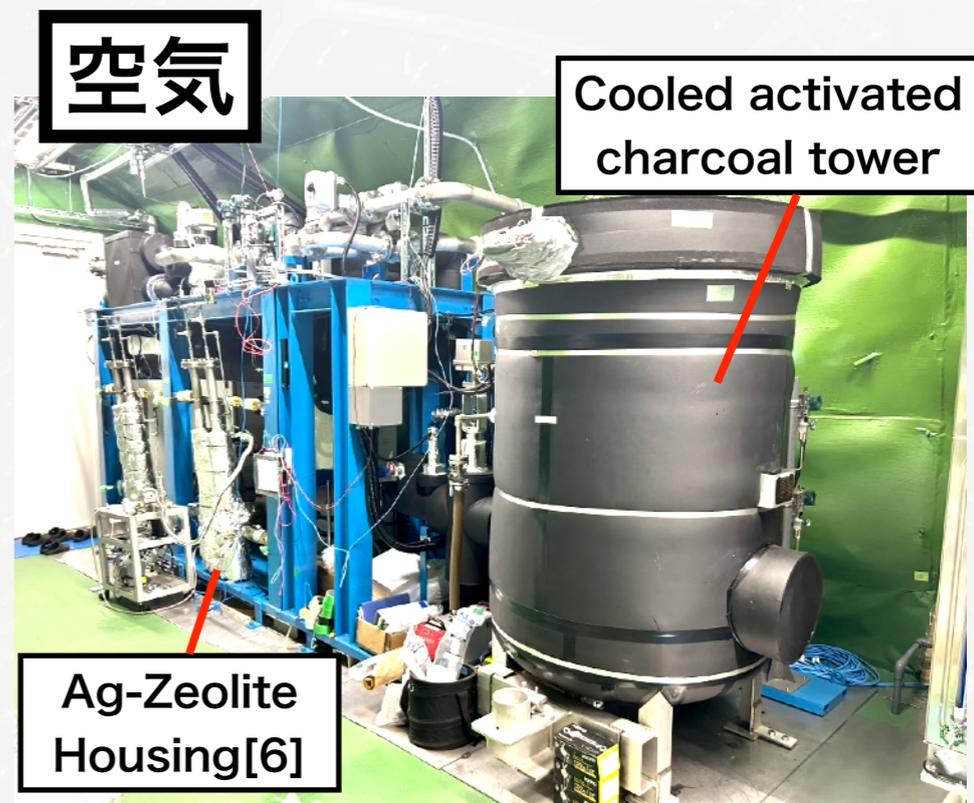
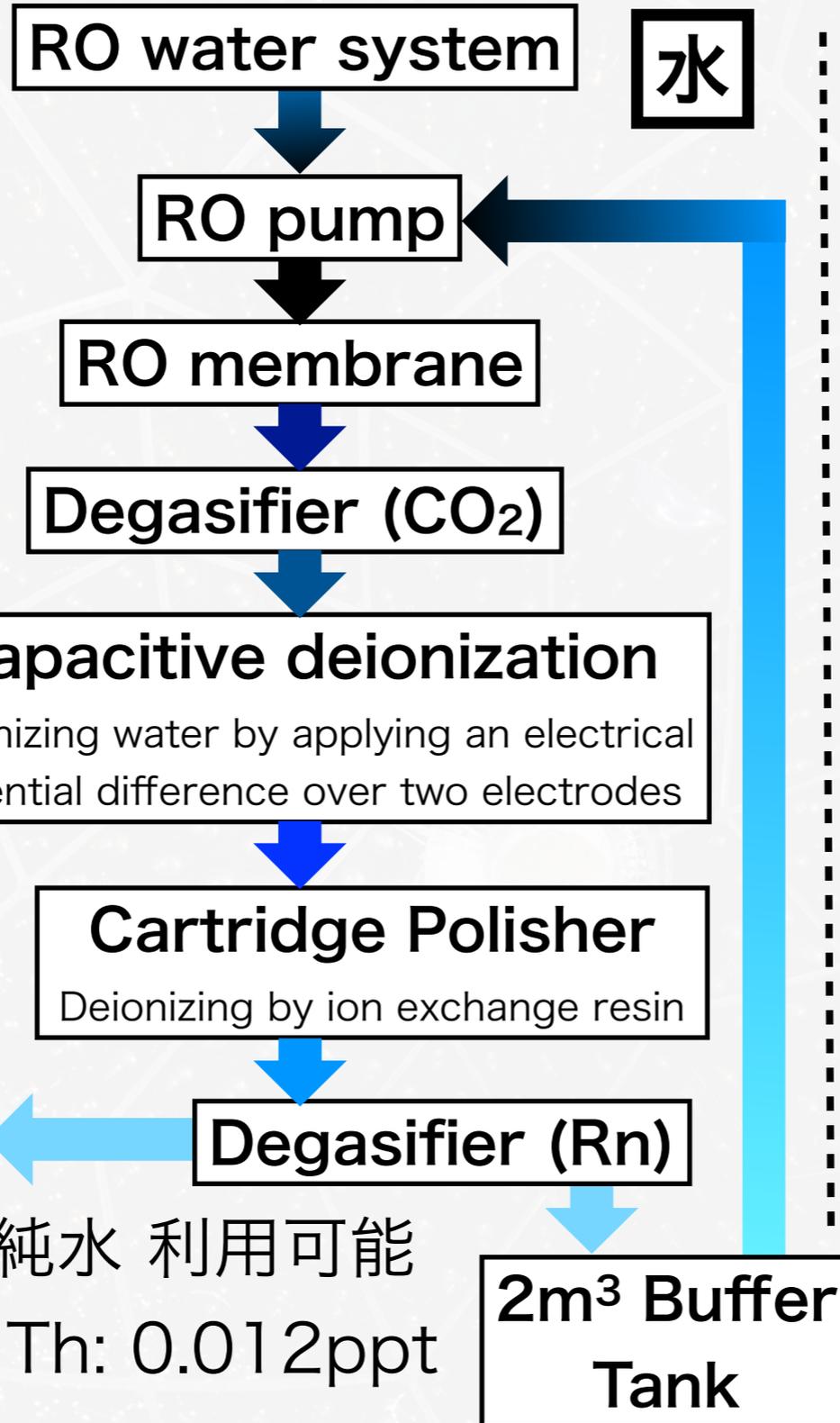
# KERNEL

Kamioka Extremely Rare-phenomena  
and NEutrino-research Laboratory



・ 神岡坑内カムランドエリアを中心とした、様々な装置と技術を有する新拠点

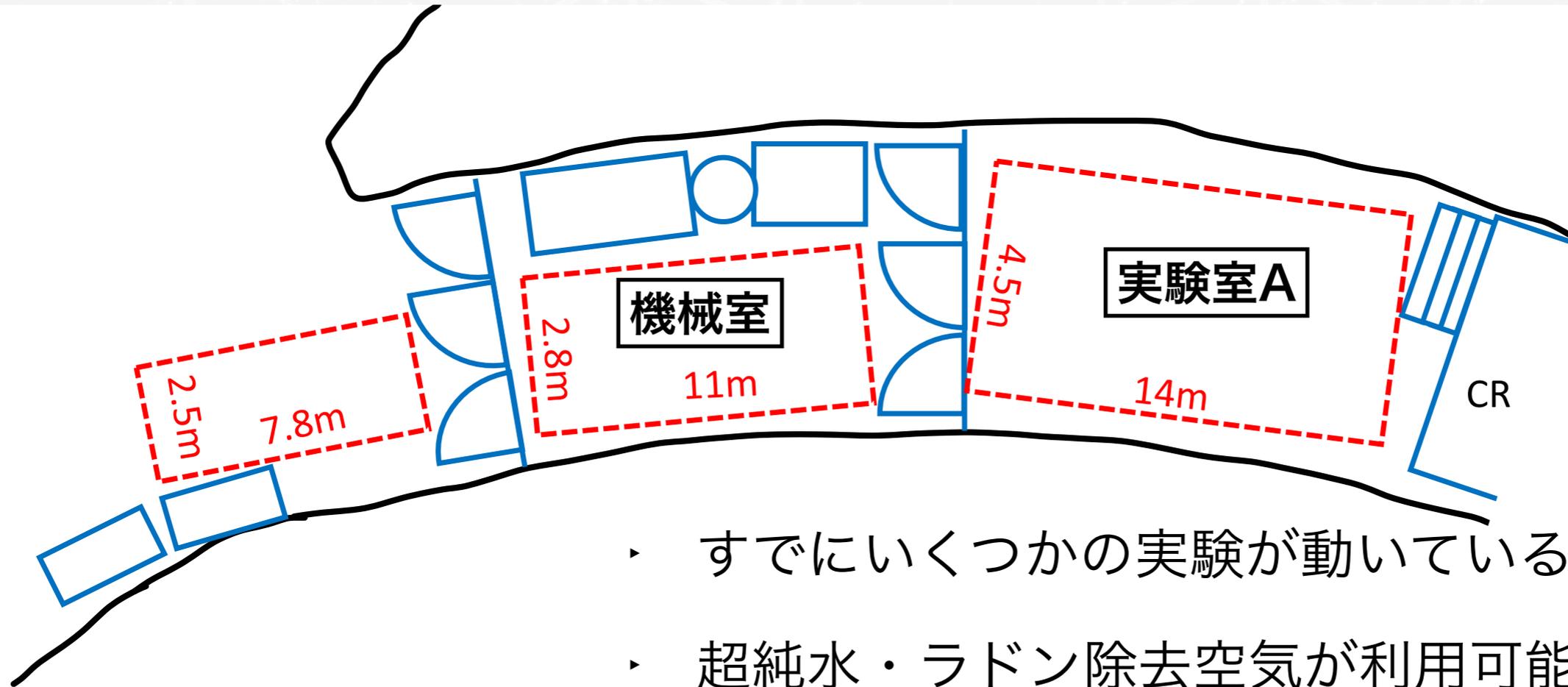
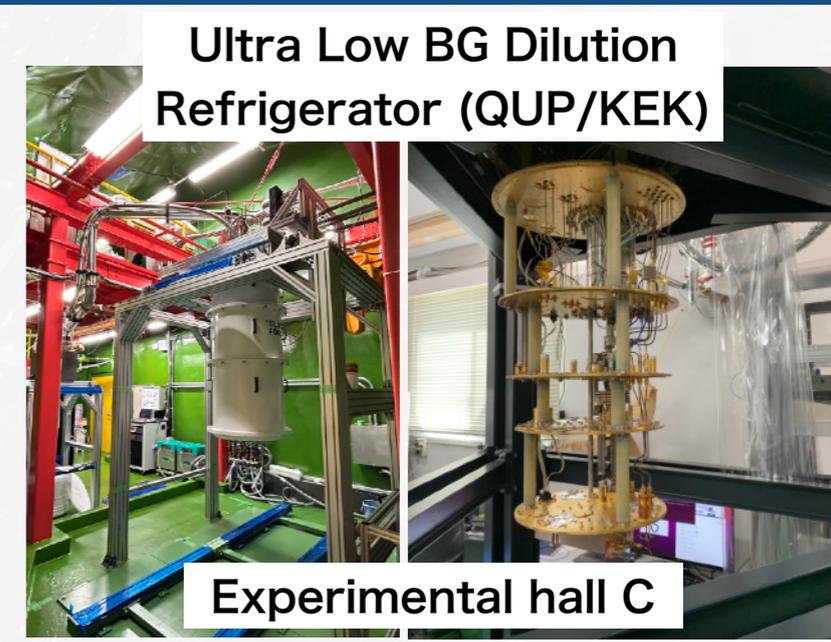
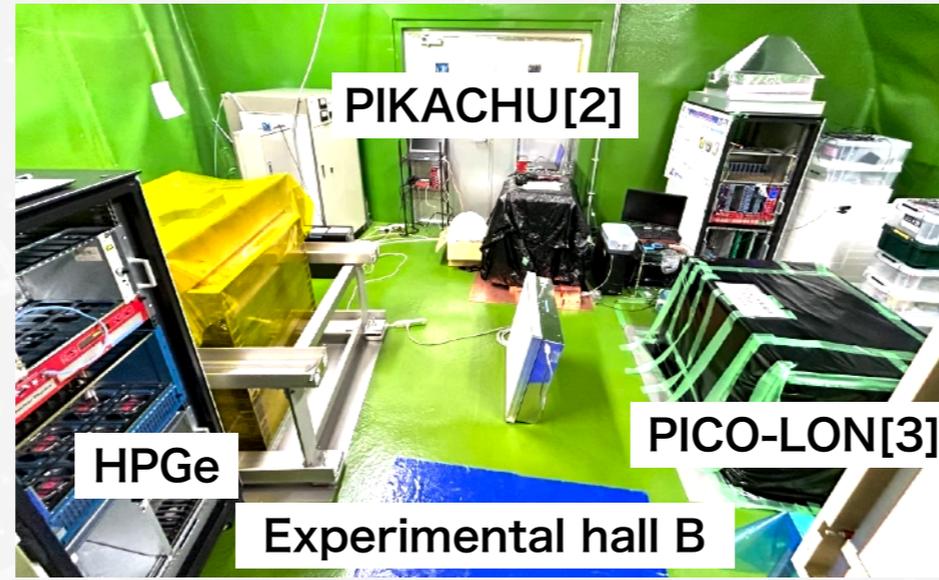
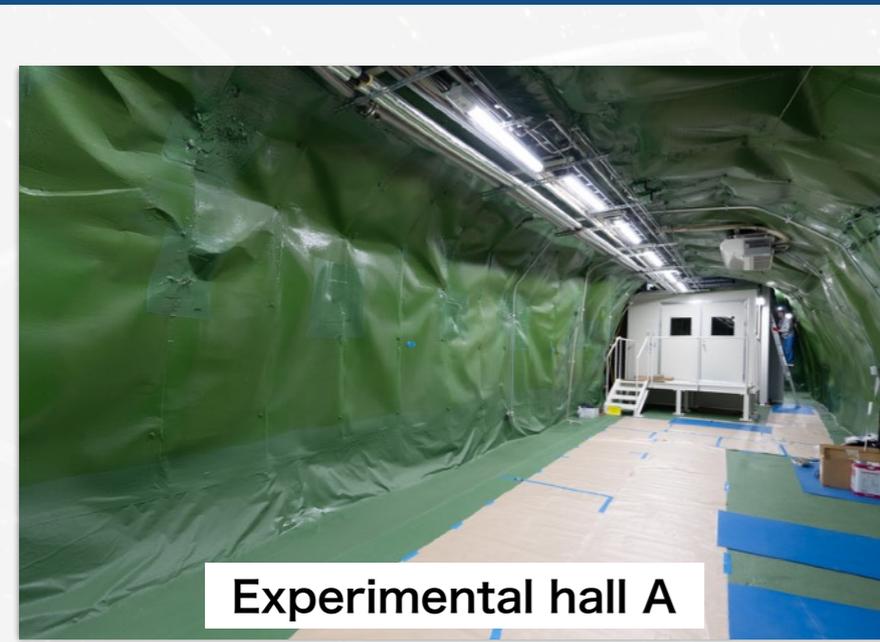
# Ultra Pure Water and Radon-Free Air Supply



- ▶ >18.2MΩ·cmの超純水 利用可能  
U: 検出限界値未満, Th: 0.012ppt
- ▶ <sup>222</sup>Rn <1mBq/m<sup>3</sup>の空気を  
50m<sup>3</sup>/h以上の流量で供給する系を構築中

[6] T. Sone et.al., PTEP 013H01 (2025)  
[7] K. Hosokawa et.al., PTEP 033H01 (2015)

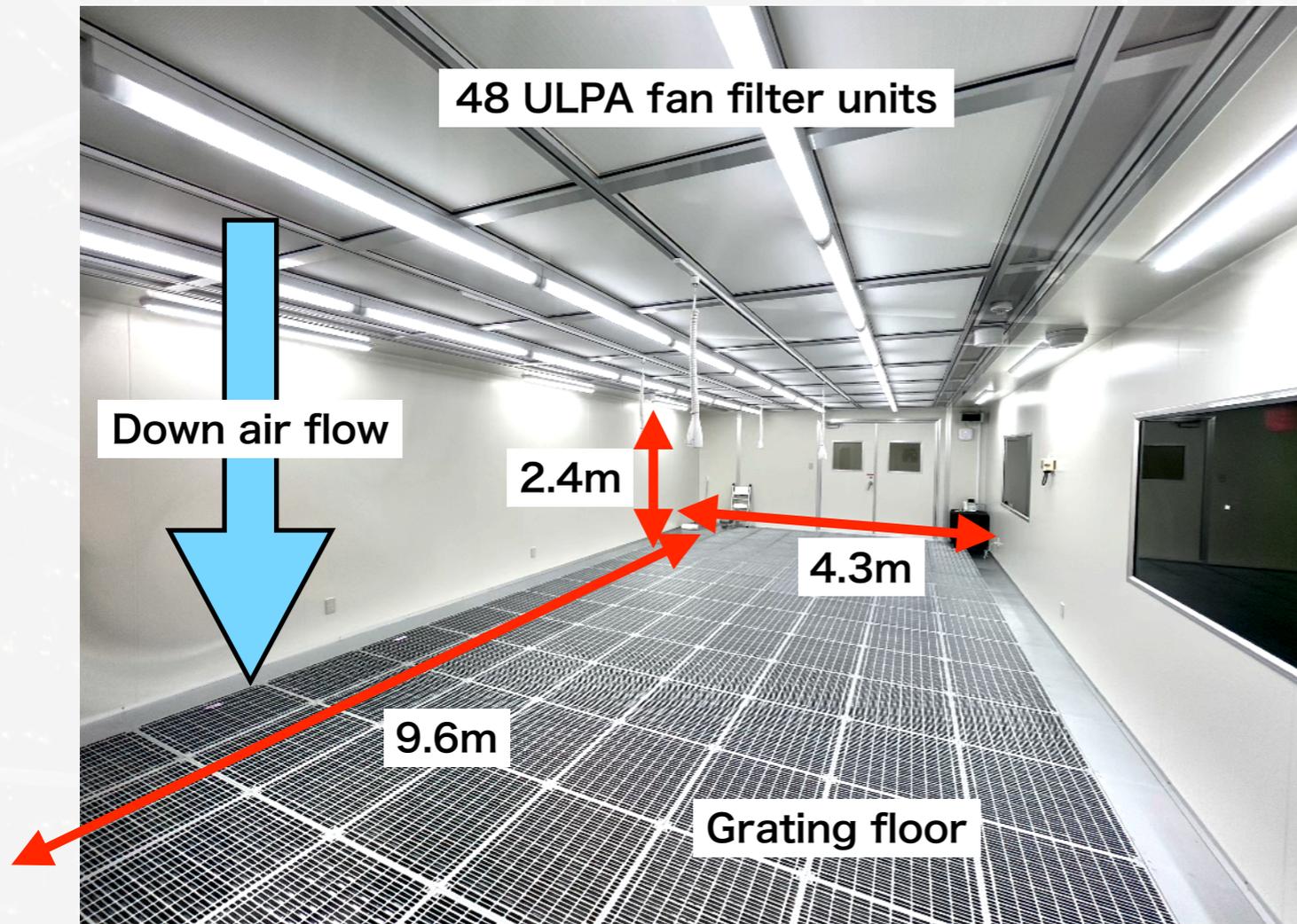
# 実験環境



- ▶ すでにいくつかの実験が動いている
- ▶ 超純水・ラドン除去空気が利用可能になる予定
- ▶ 共同利用公募公開に向けて最終調整中

[2] T. Omori et.al., PTEP 033D01 (2024) [3] K. Kotera et.al., PTEP 123F01 (2025)

# スーパークリーンルーム



ISO 14644-1	0.5 $\mu\text{m}$ [particles /m <sup>3</sup> ]	0.1 $\mu\text{m}$ [particles /m <sup>3</sup> ]
Class 8	3,520,000	
Class 7	352,000	
Class 6	35,200	1,000,000
Class 5	3,520	100,000
Class 4	352	10,000
Class 3	35	1,000
Class 2	0	100
Class 1	0	10

- ISO14511-1 Class1の世界最高レベルのクリーンルーム
- 地下1000m級環境のClass1クリーンルーム設置は世界初

## Application examples



Cleaning detector materials[4]

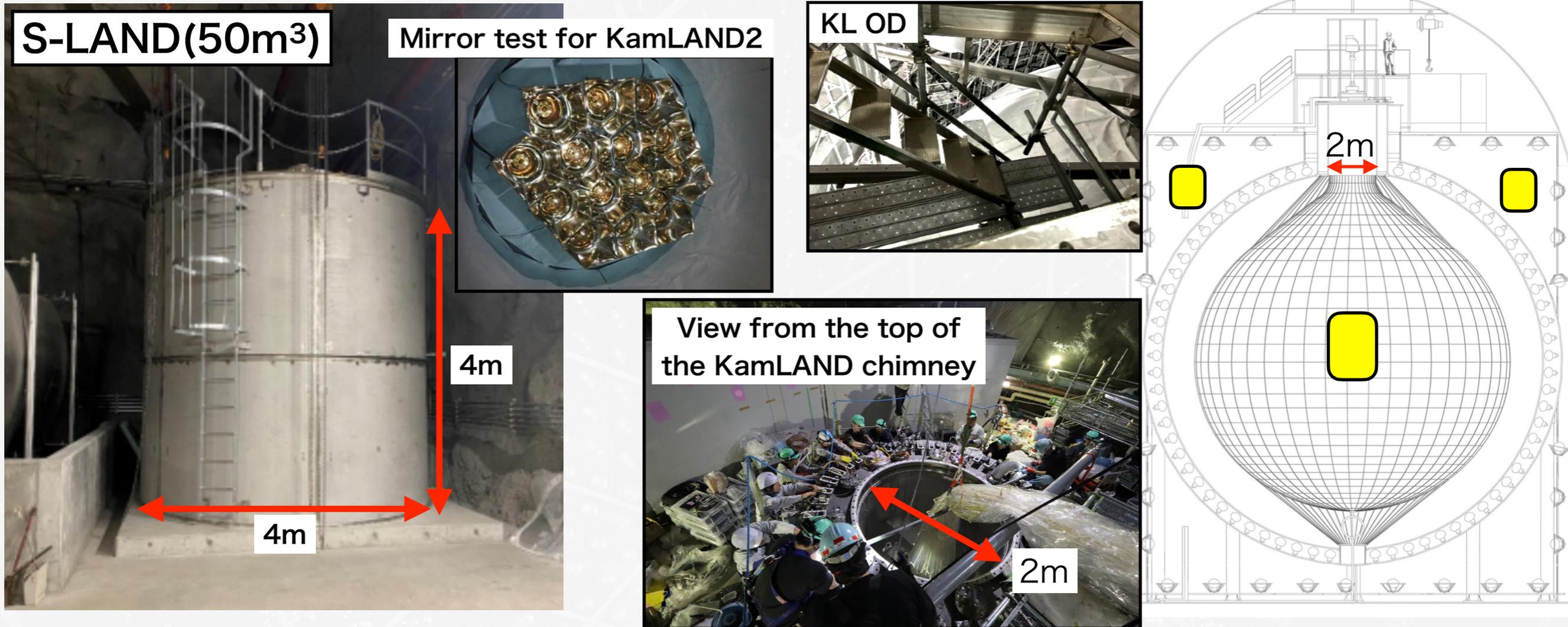


Development of the ultra-low background detectors[5]

[4] Y. Gando et.al., JINST 16 P08023(2021)

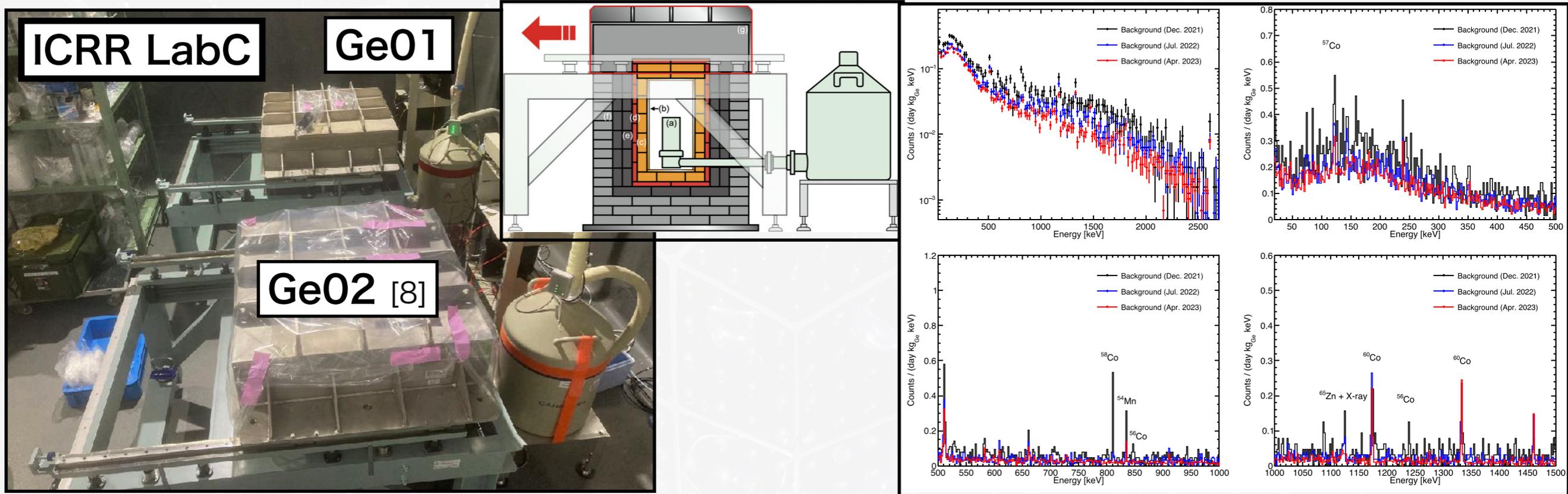
[5] K. Fushimi et.al., PTEP 043F01 (2015)

# Active Veto Tanks

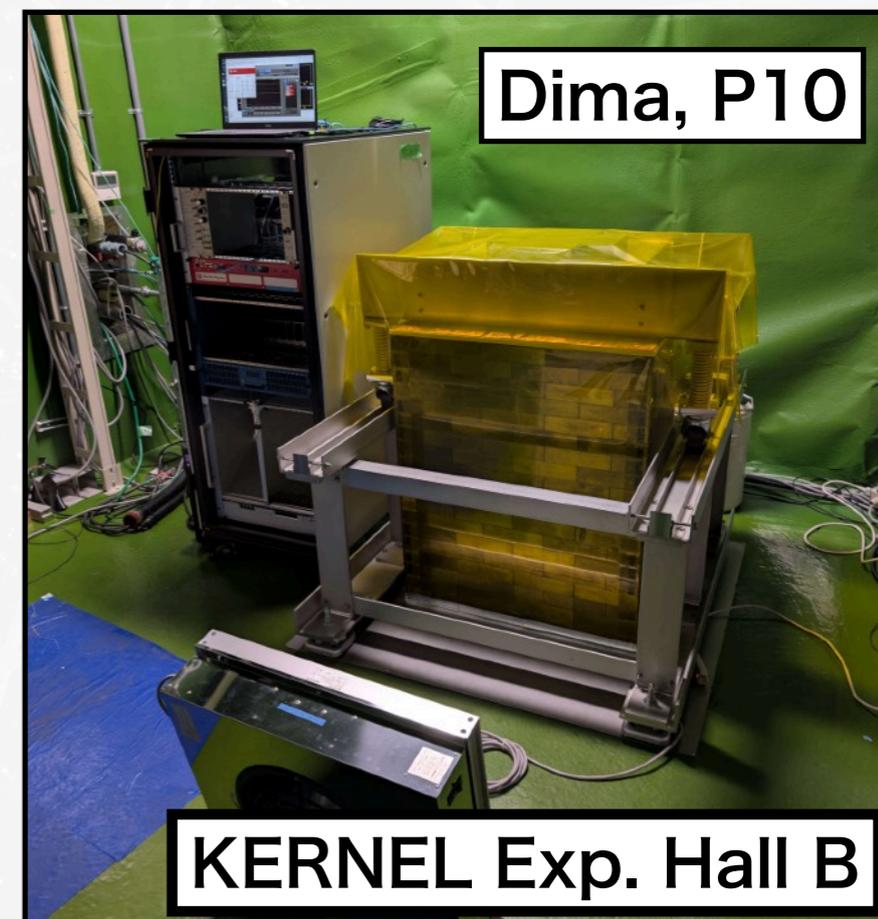


- ▶ カムランド2試作機のS-LAND：50m<sup>3</sup>タンク
  - KL2液入れ後， water shield等として利用可能
- ▶ カムランド Outer Detector: RO water Cherenkov detector
- ▶ カムランド2禅終了後は， ID中心の極低放射能環境も利用可能

# HPGe detectors

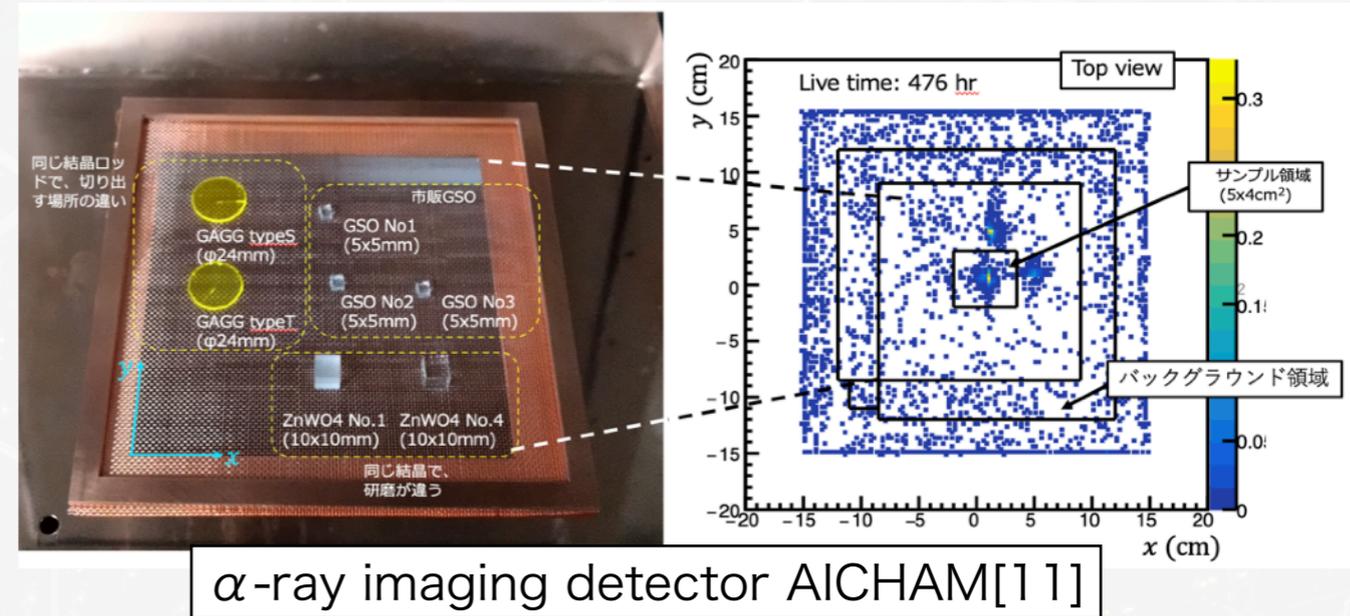


- ▶ 高純度ゲルマニウム検出器を地下実験室に設置
- ▶ 高分解能のガンマ線エネルギー検出で  
RI特定と定量が可能
- ▶ これまでにKL, SK, HKを含む  
様々な実験の検出器部材中RI測定に利用
- ▶ 世界最高レベルのHPGe検出器を保有 [8]



[8] K. Ichimura et.al., PTEP 123H01 (2023)

## ▶ 新技術の導入・開発



## - 高圧キセノンTPC技術開発→NO領域の $0\nu\beta\beta$ 探索へ！

[9] This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 25K01022.

[10] Y. Sakakieda et.al., PTEP 103H01 (2023) [11] H. Ito et.al., NIM.A 953 163050 (2020)

## ▶ 技術のコミュニティへの提供を継続

### - KERNELの共同利用公募公開に向けて最終調整中

## ▶ 若手への技術継承

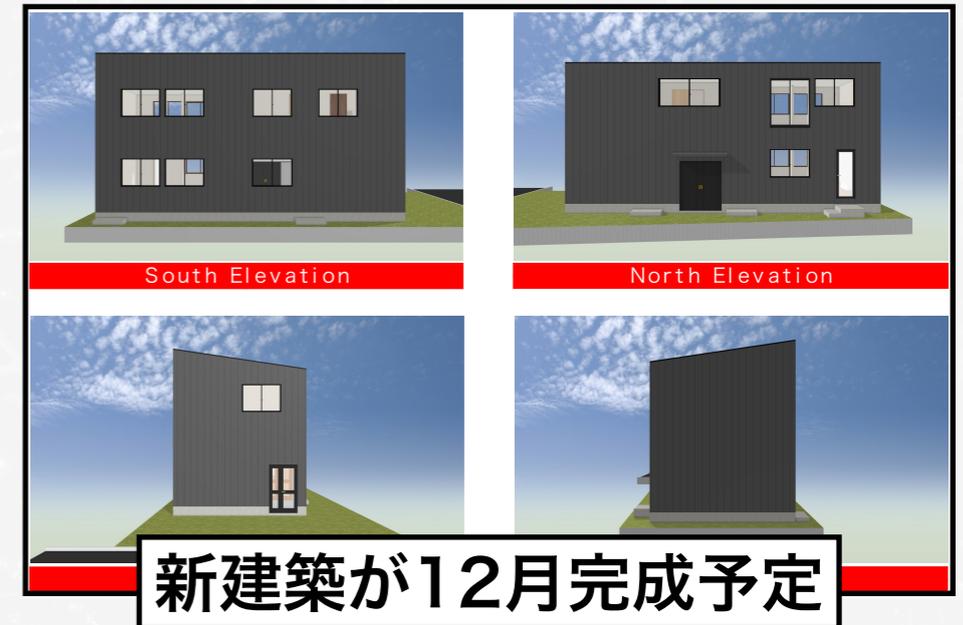
### - 地下実験コミュニティが培ってきた技術を継承，新開発できる人材を！

### - KERNEL's Future ≡ Mozumi's Future ?

# 人員・インフラの拡張



増員に伴う駐車場の拡充



- ▶ 2024/8 時点で2人だった神岡教員数が現在9人。今後も増えます
  - 若手の皆さん，一緒にやりませんか？
- ▶ 増員対応と実験環境構築のため，駐車場を拡充し，建物の増築も検討中

# まとめ

## ・ カムランド2

- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索にはエネルギー分解能が重要
- カムランド2禅では，集光量アップのため様々な技術を導入
  - ・ 高量子効率PMT，集光ミラー，新液体シンチレータ
- カムランド2建設のため，カムランド検出器解体作業が完了
- 2026年度にPMT取付，2027年度に液入れ後データ取得開始予定！！
- 間髪入れずにミニバルーン導入し，2028年度の $0\nu\beta\beta$ 探索開始を目指す

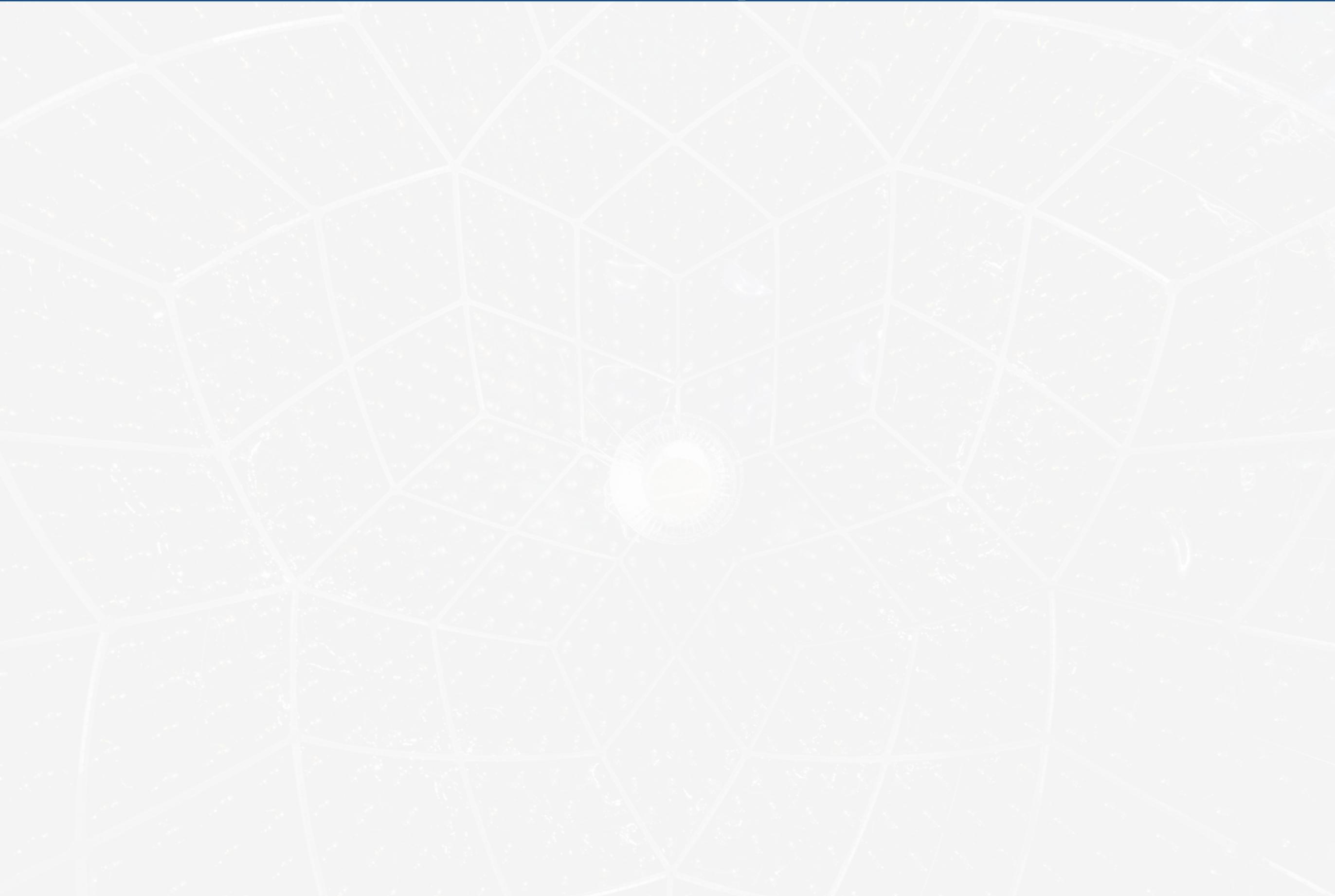
## ・ KERNEL

- Super Clean Room，超純水装置・超純空気装置等 設備拡大中
- 近い将来から50m<sup>3</sup>のタンクも利用可能。KL-ODも？
- 今後もより良い設備・技術を導入/開発予定
- KERNELの共同利用公募公開に向けて最終調整中





**Thank you!!**



# ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊

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

観測量:  $T_{1/2}^{0\nu}$     Nuclear Matrix Element    マヨラナ質量

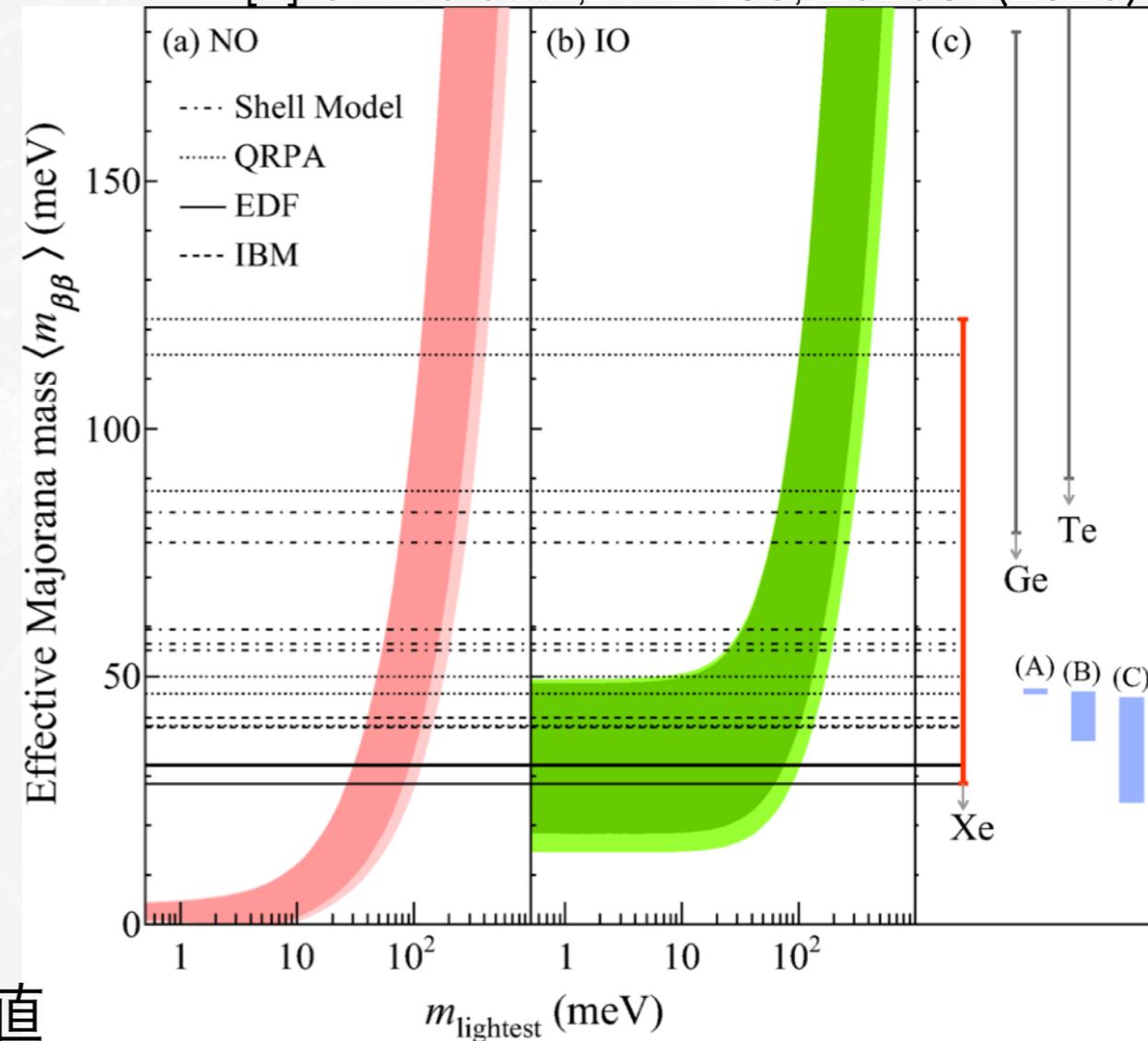
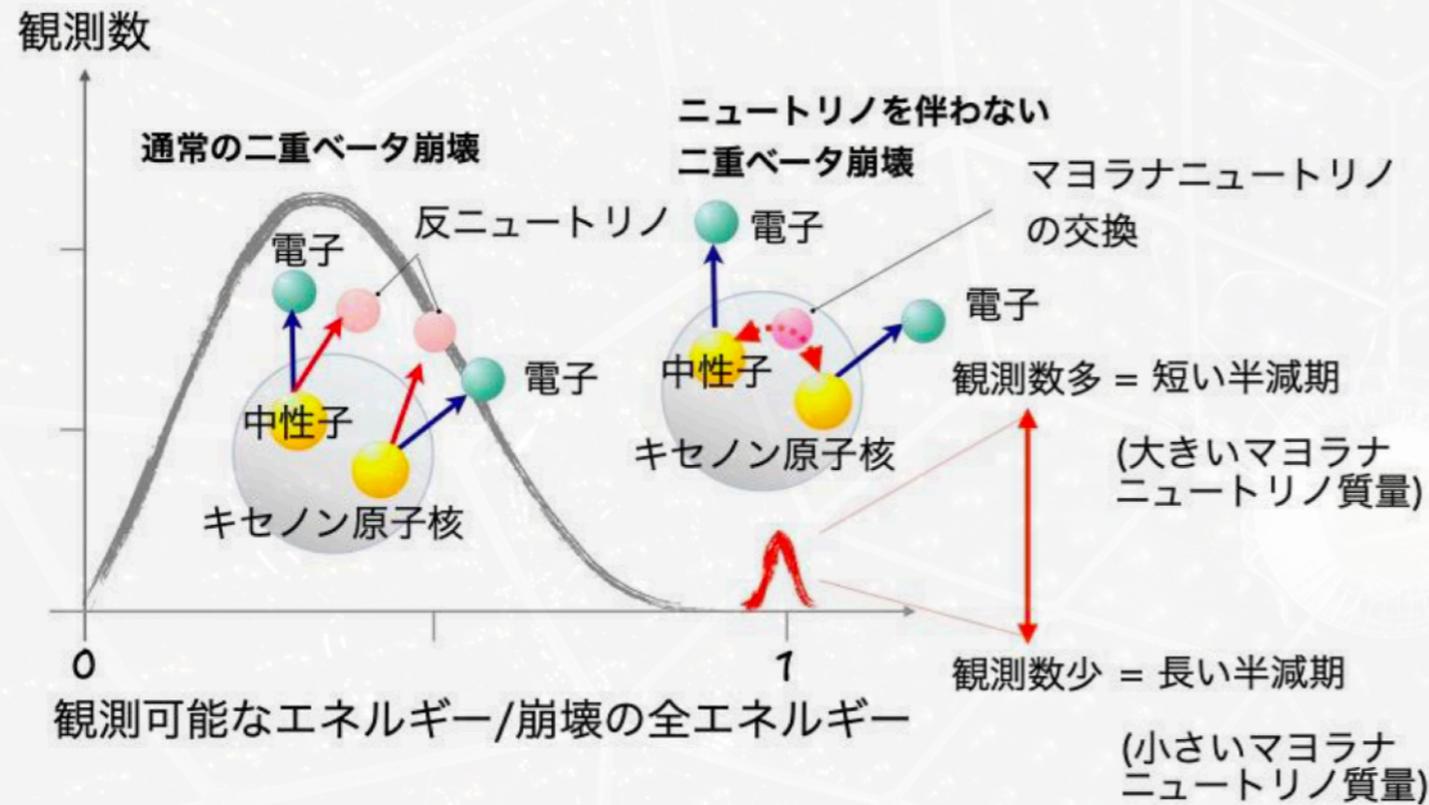
Phase space factor

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

実験の感度:  $T_{1/2}^{0\nu} \propto \begin{cases} \sqrt{\frac{M \times t}{B \times \Delta E}} & (\text{w/ BG}) \\ Mt & (\text{w/o BG}) \end{cases}$

$M$  ... 崩壊核の量,  $t$  ... 観測時間,  $B$  ... BG rate,  $\Delta E$  ... energy resolution

[1] S. Abe et.al., PRL 135, 262501 (2025)



- 物質優勢宇宙, 軽い $\nu$ 質量などの鍵
- 半減期観測でマヨラナ有効質量の絶対値
- エネルギー分解能が非常に重要 → カムランド2禅で集光量アップ!!