



SK-Gdプロジェクト: SK-Gdの準備状況と将来計画

岡山大学 伊藤慎太郎

For the Super-Kamiokande Collaboration

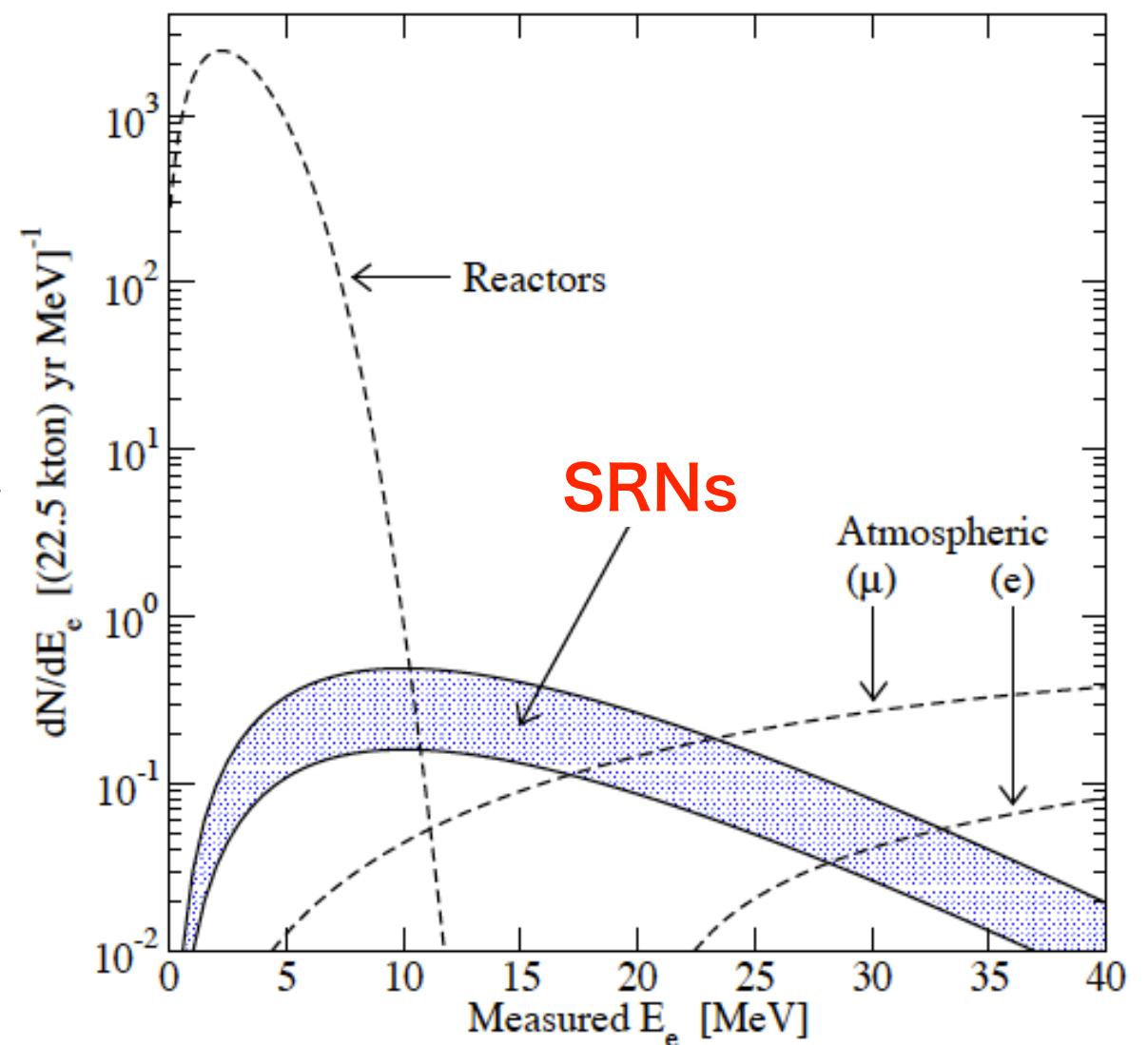
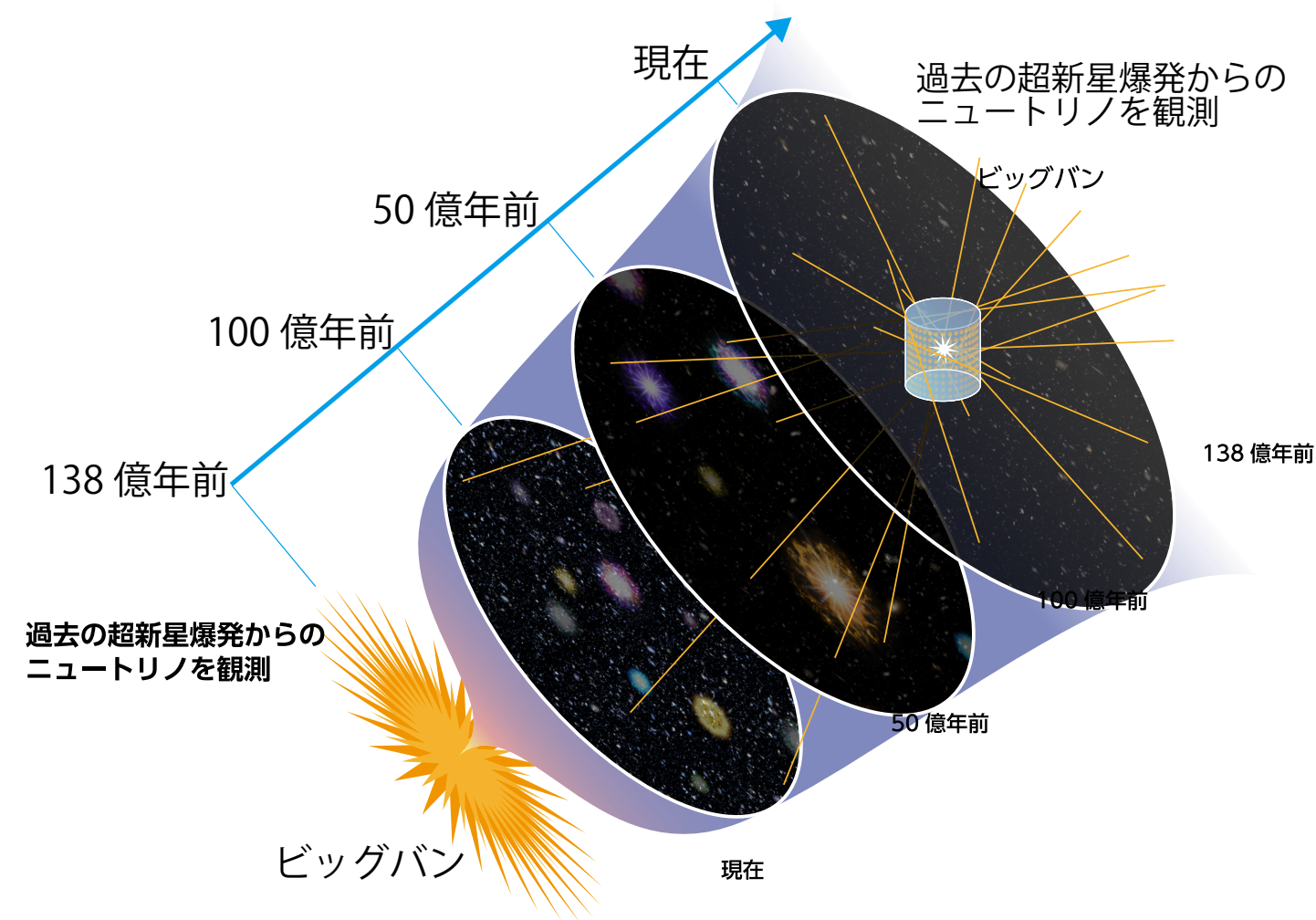
目次

- インTRODクシヨン —SK-Gdプロジェクト—
- タンクオープン作業
- SKの止水作業完了について
- SK観測の現状
- まとめと今後



イントロダクション —SK-Gdプロジェクト—

- Super-Kamiokande (SK): 5万トンの超純水チェレンコフ検出器。
→ 様々なニュートリノの観測や陽子崩壊の探索を行ってきた。
- **超新星背景ニュートリノ (SRNs)**: 未だ観測されていない。
→ 大気ニュートリノ起源のバックグラウンドが支配的。



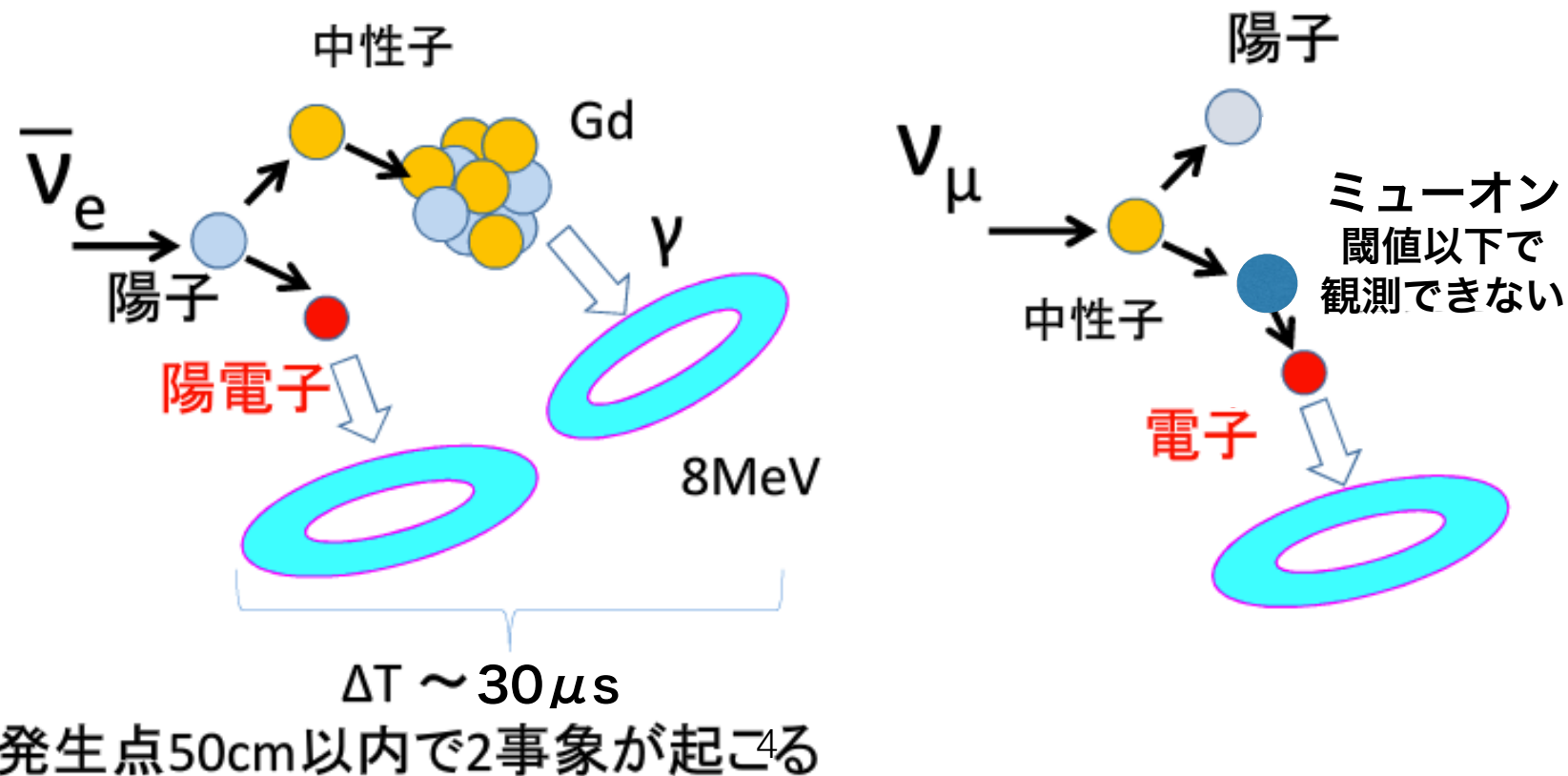
予想されるエネルギースペクトル

イントロダクション —SK-Gdプロジェクト—

- SKに高純度の**硫酸ガドリニウム**を溶解させる(SK-Gd)。
 - ガドリニウム(Gd)と中性子との反応断面積は大きい(~49,000b)。
 - 逆ベータ反応($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)より発生する陽電子と、Gdと中性子との反応より発生する γ 線との遅延同時計測を可能にさせる。
 - これにより、支配的だったバックグラウンドを除去できる。
- 0.2%の高純度の硫酸ガドリニウムを溶解させることで(Gdで約0.1%)、**約90%の中性子捕獲効率が得られる。**

超新星背景ニュートリノ (SRN) 事象

バックグラウンド事象

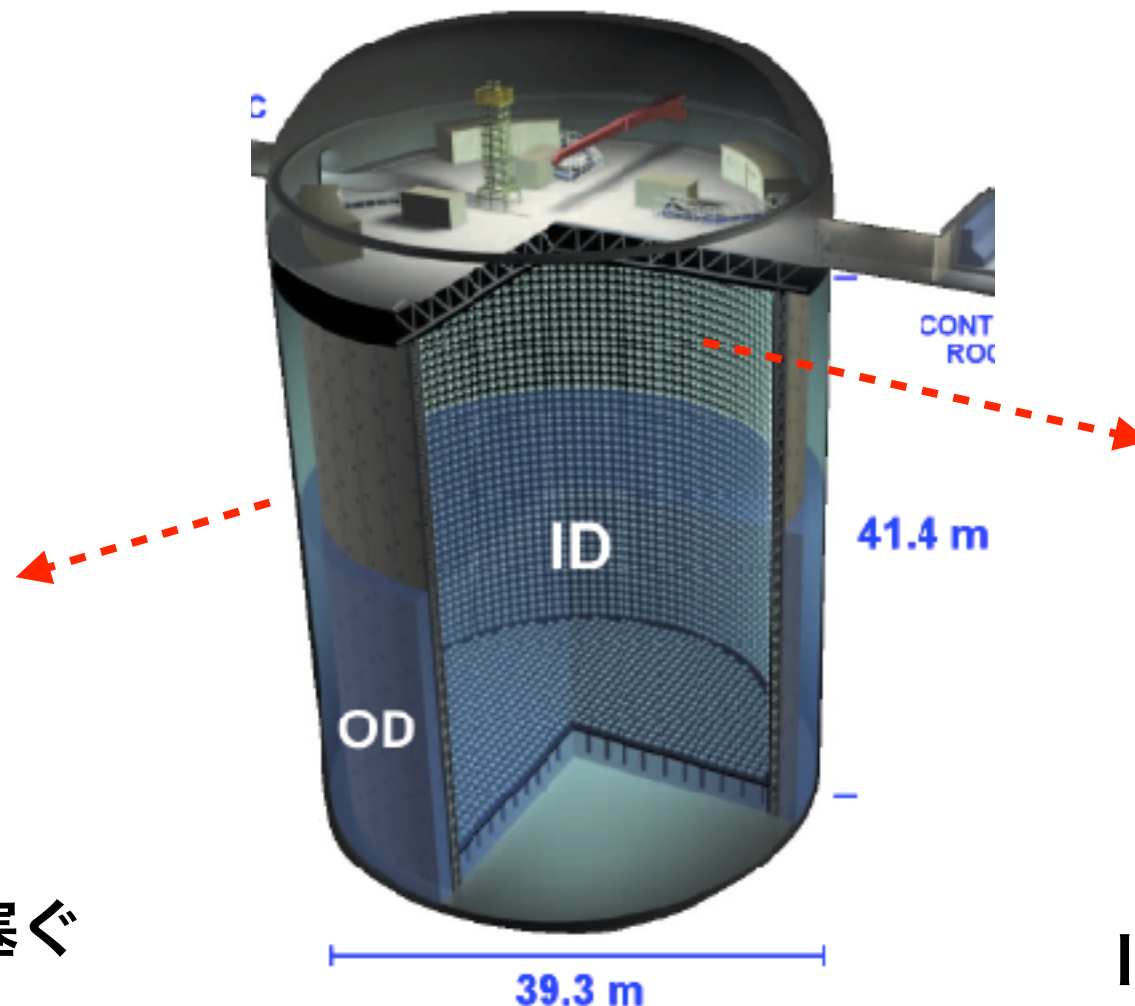


タンクオープン (前回までのおさらい)

- これまで、SKは水漏れ(約3トン/day)があった。
- 環境へのGdの漏れを防ぐため、Gdを溶解させる前に、**SKタンクの水漏れを修繕しなければならない(目標:<0.03 トン/day)**。
- 2018年5月31日、SKでのニュートリノ観測を中断し、約12年ぶりにSKタンクを開けて改修工事、不具合のあるPMTの交換、クリーニング、配管増強作業などを行った。



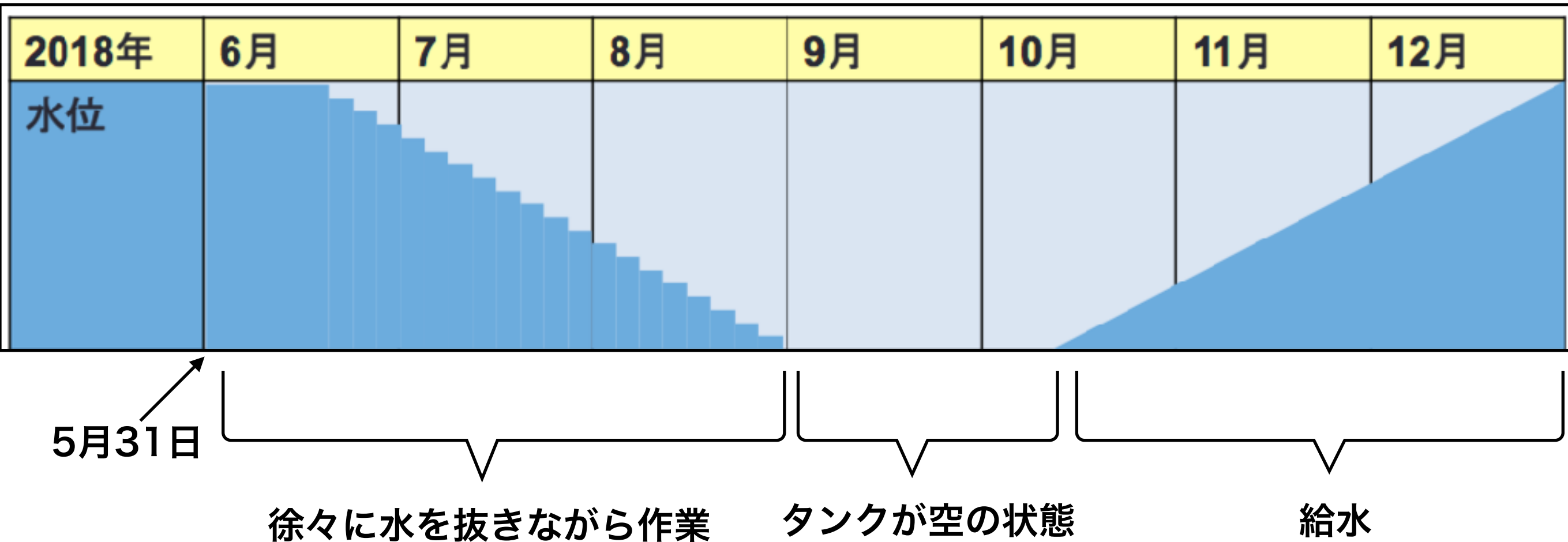
止水剤での溶接部を塞ぐ



ID:浮床に乗って、PMTの交換

タンクオープン

- ・ 5月末から5万トンの水を抜きながら側面の作業を行い、8月末に水全てを抜き終え、底部分の作業を行った(前回はこちらまで)。
- ・ 10月中旬に給水を開始した。
- ・ 2019年1月29日に満水になり、全ての作業が完了した。
- ・ タンクを閉じて、観測の再開と水漏れの量の測定を開始した。



水漏れの量の測定

- 止水工事が完了したので、実際に水漏れがどれだけ抑えられたのかを測定した。
- 1/31 11時30分より、給水・循環を止めて、水位のモニターを開始した。
- 水漏れを精度良く観測するため、0.1mm(0.12トンに相当する)の精度の水位計をSKに導入した(改修工事前は約3 mm/day)。
- 2/7 15時52分まで測定を行った(合計 7日4時間22分)。

水漏れの量の測定

- 止水工事が完了したので、実際に水漏れがどれだけ抑えられたのかを測定した。
- 1/31 11時30分より、給水・循環を止めて、水位のモニターを開始した。
- 水漏れを精度良く観測するため、0.1mm(0.12トンに相当する)の精度の水位計をSKに導入した(改修工事前は約3 mm/day)。
- 2/7 15時52分まで測定を行った(合計 7日4時間22分)。
 - 有意な水位の減少が見られなかった。
 - 水漏れ量の上限値: <0.017 トン/day (目標: 0.03 トン/day)
 - タンク改修工事前と比べて $<1/200$ 。
- これで、予定通りSKに硫酸ガドリニウムを導入することができる。

SK collaborationのOfficial statement

Currently we do not observe any water leakage from the SK tank within the accuracy of our measurement, which is less than 0.017 tons per day. This is less than 1/200th of the leak rate observed before the 2018/2019 tank refurbishment.

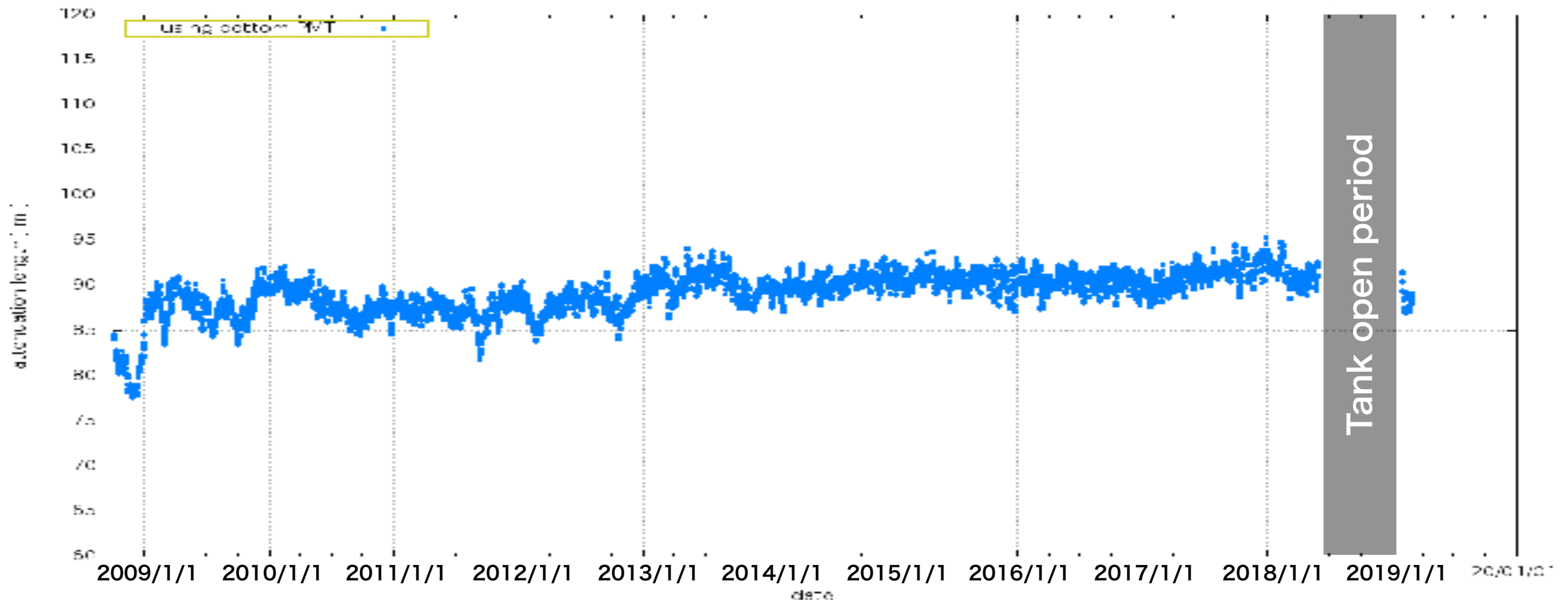
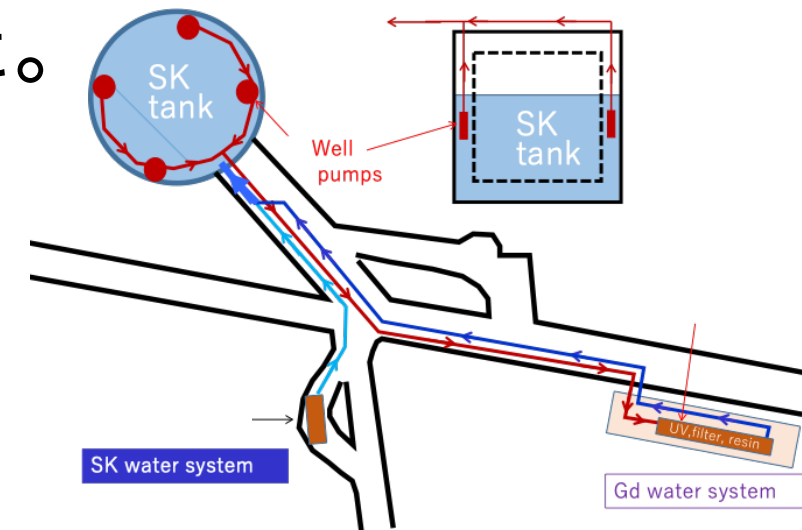
環境へのGdの漏れのモニター

- 止水の目標を達成したとは言え、環境へのGdが漏れていないかをモニターすることは大変重要である。
- pptレベルのGdの濃度をモニターする必要がある。
→ **2台目のICP-MS (Agilent 7900)を昨年12月に神岡に導入。**
- SK周辺の湧水を分析して、Gdの濃度をモニターする予定。
- よりGdの分析感度を上げるため、水溶液中からGdを抽出・濃縮する手法を開発中。
- SK-Gd開始に向けて、着々と準備が整ってきた。



SK観測の現状

- 水漏れの測定と並行して、SK観測も開始した。
- 給水中に循環も同時に行ったため、**タンクオープン前と同等の超純水の透過率**で観測を開始することができた。
- 2月中は検出器のキャリブレーションやPMTのHVの調整なども行っていた。
- SK観測も順調に開始することができた。



宇宙線ミュオンによる水の透過率

まとめと今後

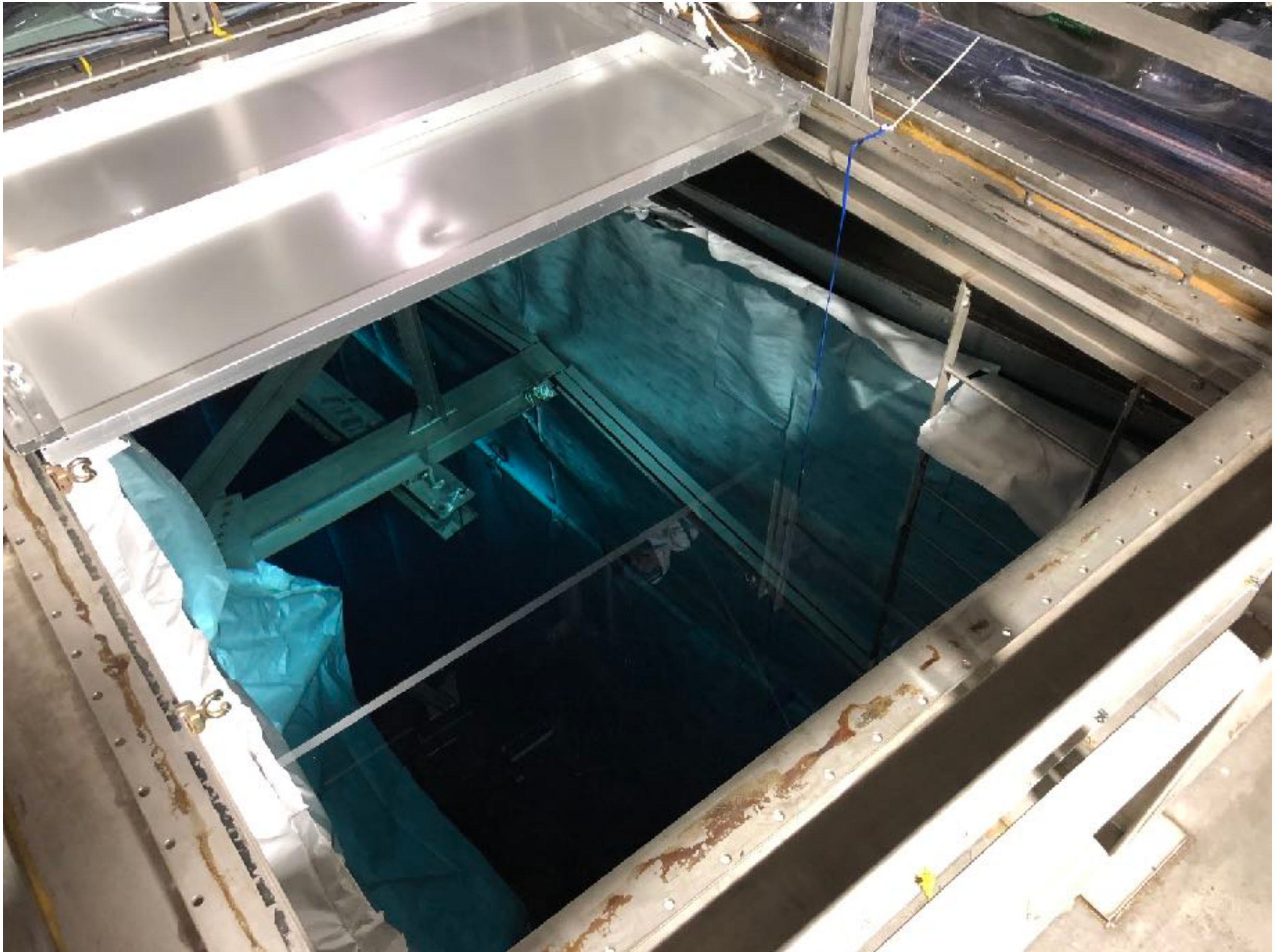
- SRNsの観測を目指したSK-Gdプロジェクトが進行中。
- Gd導入に向けて、SKタンクの補修工事を行った。
- 水漏れの測定の結果、**有意な水漏れは観測されなかった。**
 - 上限値: **0.017 トン/day** (目標:0.03 トン/day)
 - 補修工事前と比べて、**<1/200.**
- 2台目ICP-MSも導入し、Gd漏れのモニターの研究も行っている。
- 水の透過率も、タンクオープン前と同等であり、SK観測も順調に再開された。

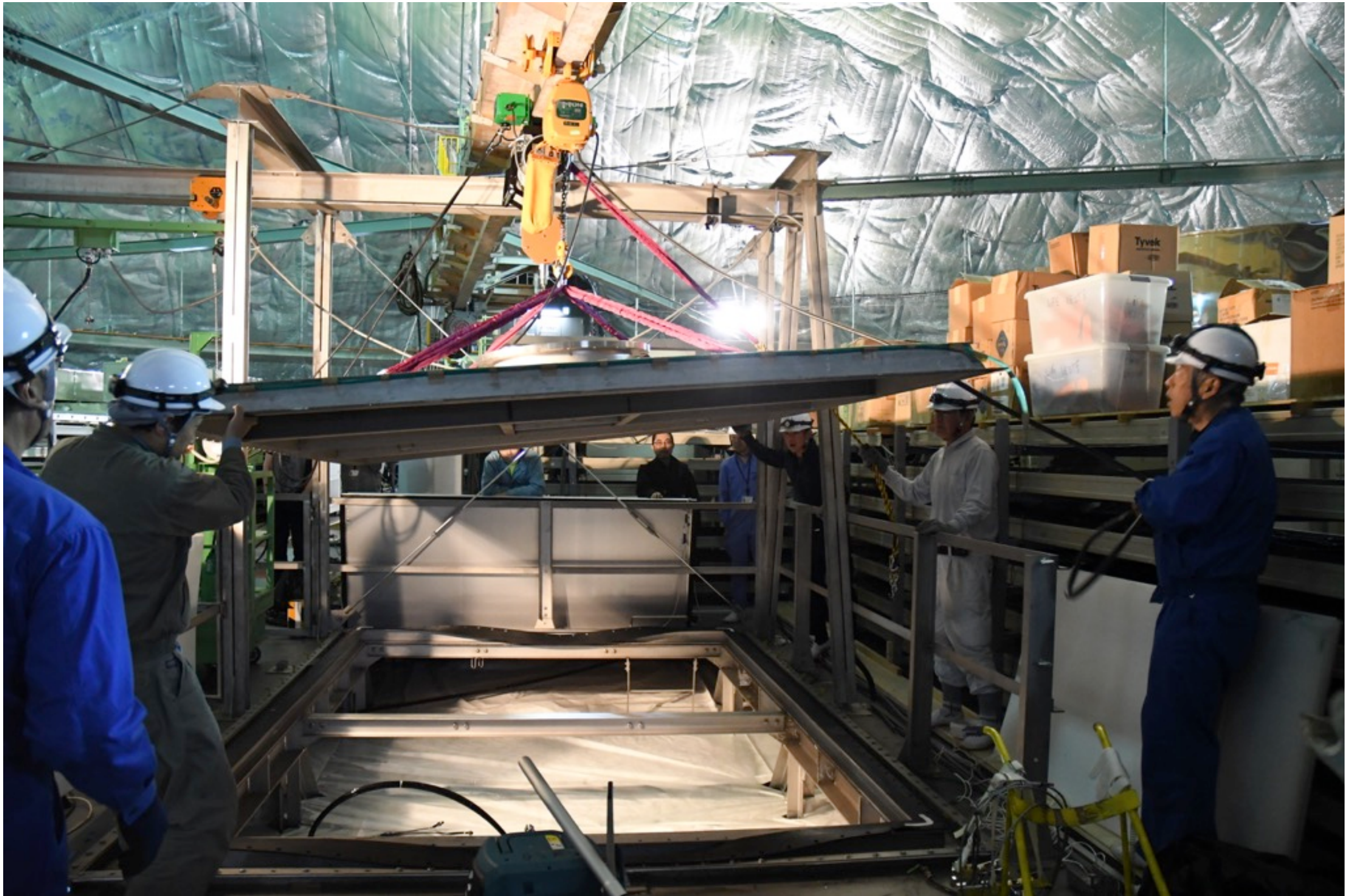
今後

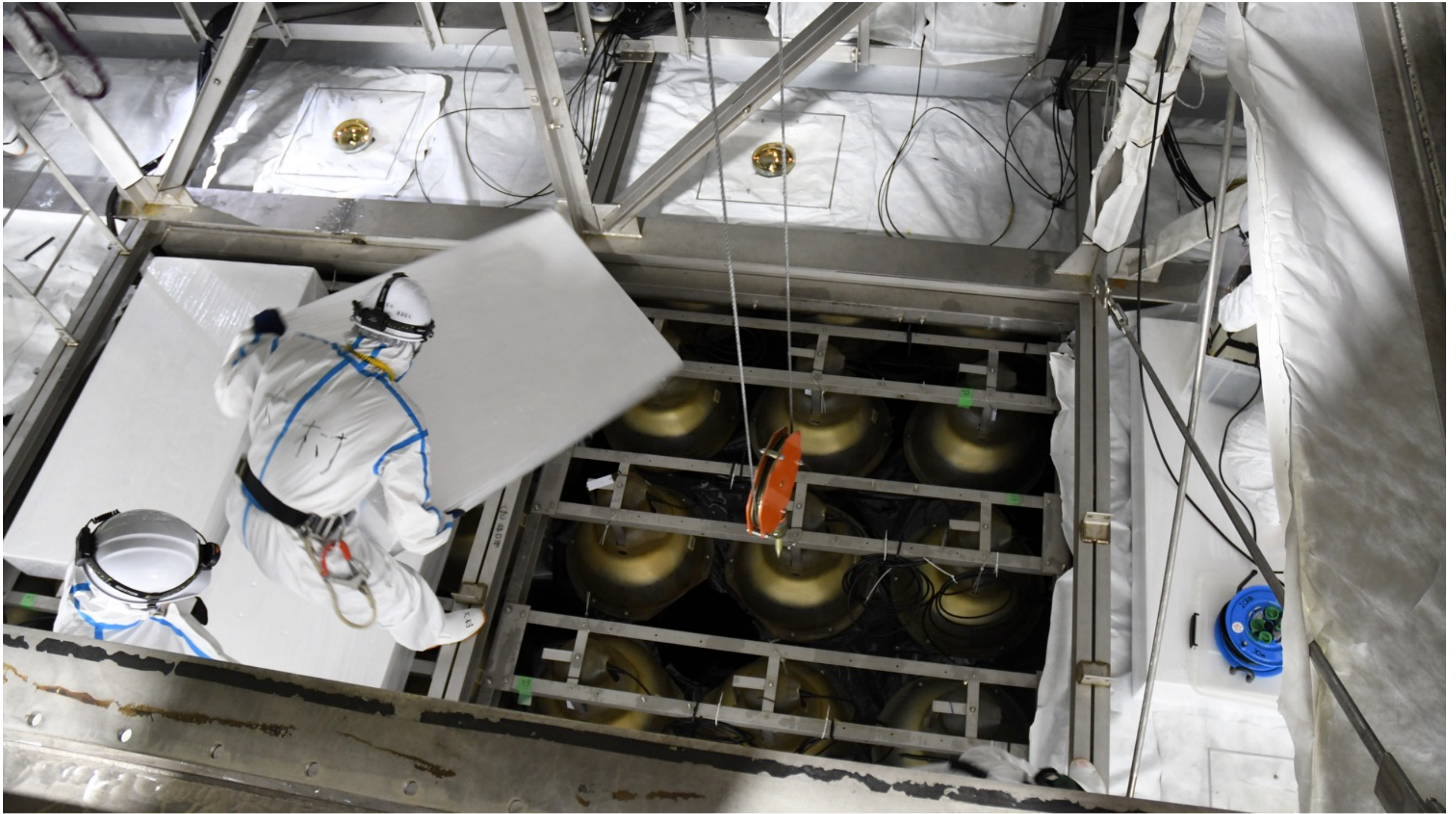
- しばらくは超純水で観測を続ける。
- 10トンの硫酸ガドリニウム(Gdで0.01%相当、中性子捕獲効率50%)をSKに溶解させ、2019年度中にSK-Gdを開始させる予定。
- 0.01%でしばらく走らせ、将来残りの90トン(Gdで0.1%相当、中性子捕獲効率90%)をSKに導入する計画。

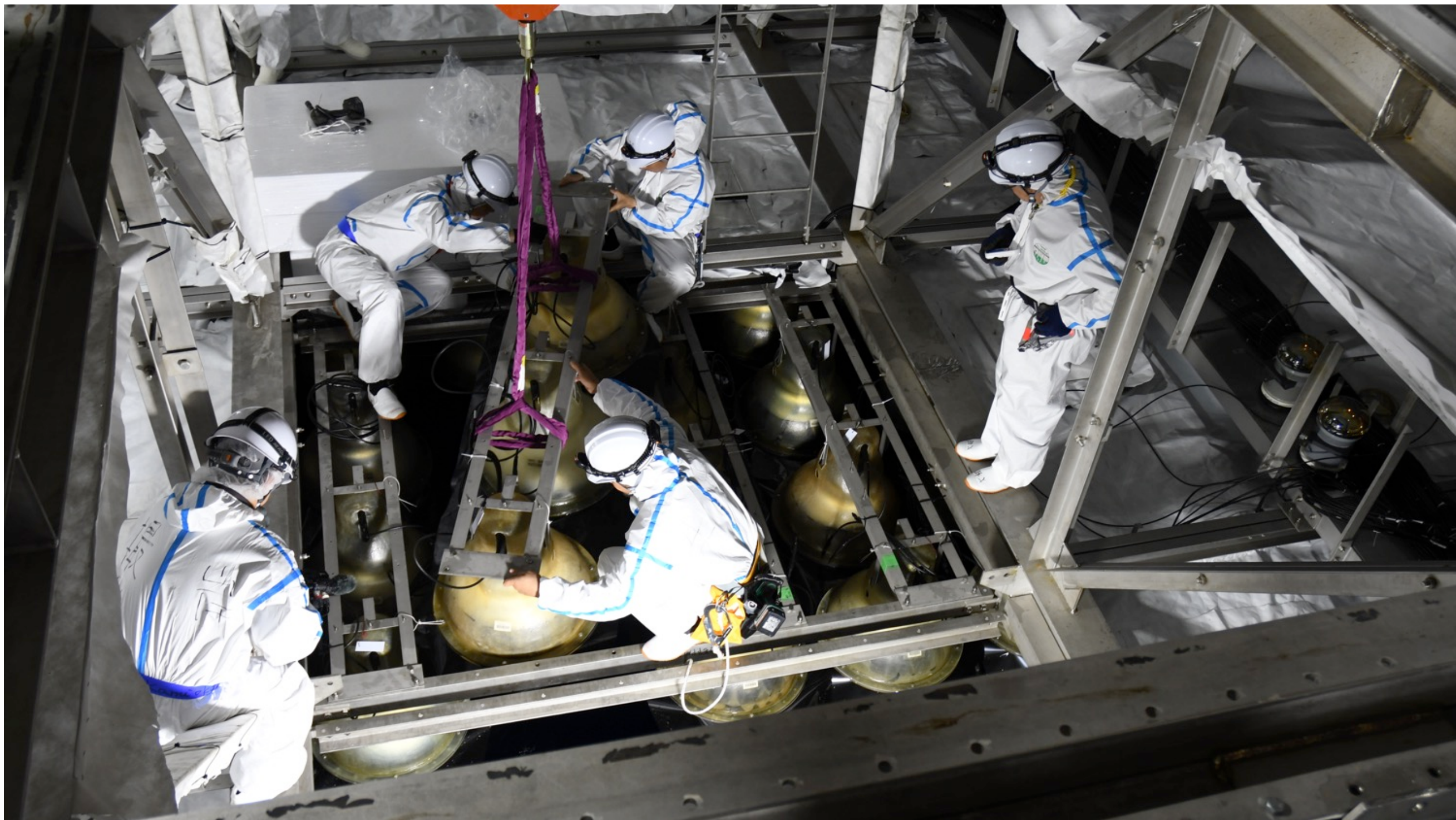
バックアップ







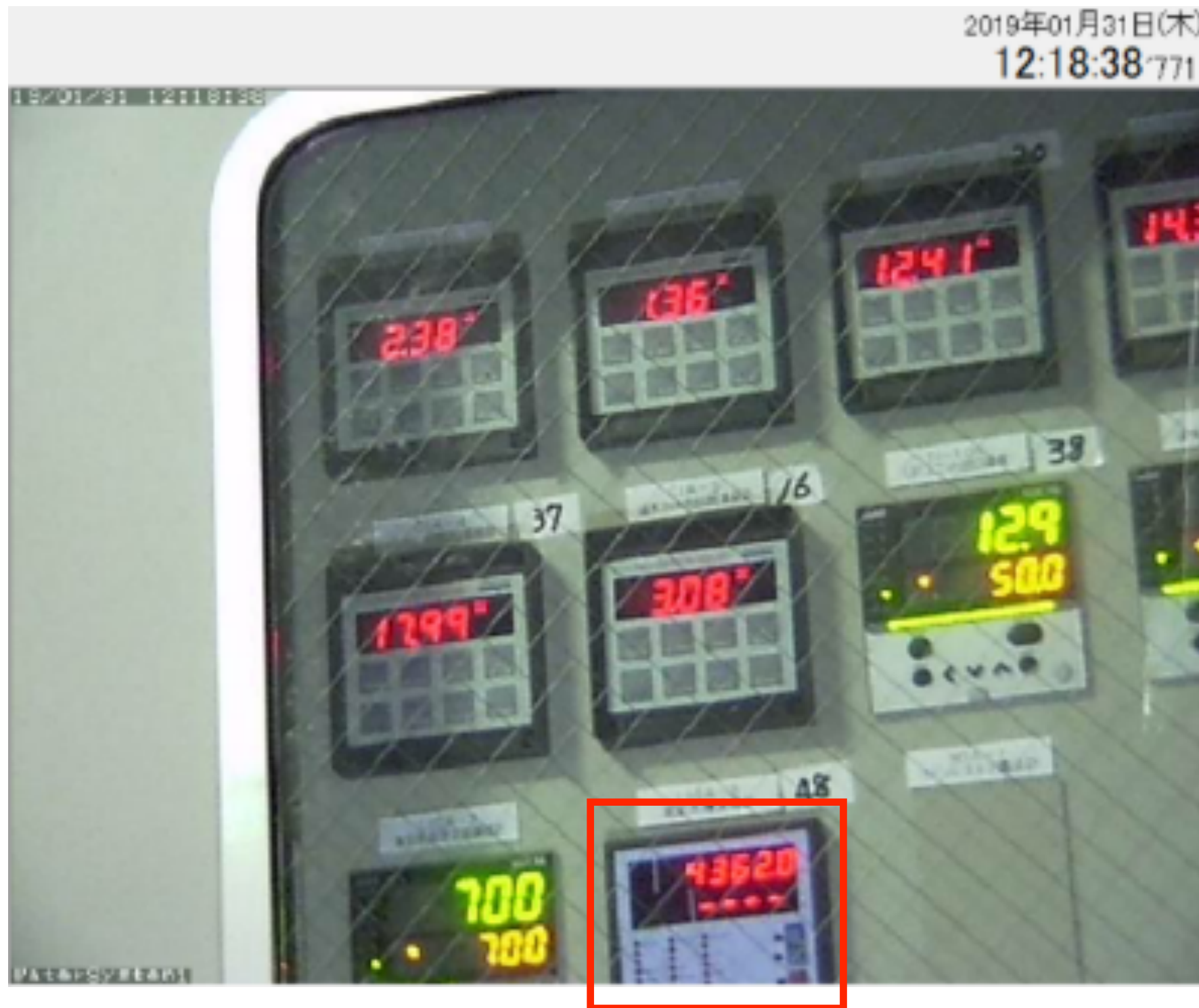








1/31 12:18



2/4 9:18



2/7 15:46



考察 (Page 1)

- 3日強あたり0.1mmの水位上昇は、熱による水の膨張によるものと考えられる。

- ✓ 熱量～13kW: 光電子増倍管の高電圧(6.5kW)、磁気補償コイル(6.56kW)

- ✓ $1.3 \times 10^4 \text{ J/秒} \times 3600 \text{ 秒} \times 24 \text{ 時間} = 1.1 \times 10^9 \text{ J/日} = 2.7 \times 10^8 \text{ cal/日}$

- ✓ タンク内の水 : $50000 \text{ トン} = 5 \times 10^{10} \text{ g}$

- ✓ $2.7 \times 10^8 / 5 \times 10^{10} = 5.3 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{日}$

- ✓ 温度1°Cあたりの水の密度変化(13°C):
 $(999.418 - 999.284) / 999.284 = 1.34 \times 10^{-4}$

(<https://www.ryutai.co.jp/shiryou/liquid/water-mitsudo-1.htm>)

(次ページへ続く)

考察 (Page 2)

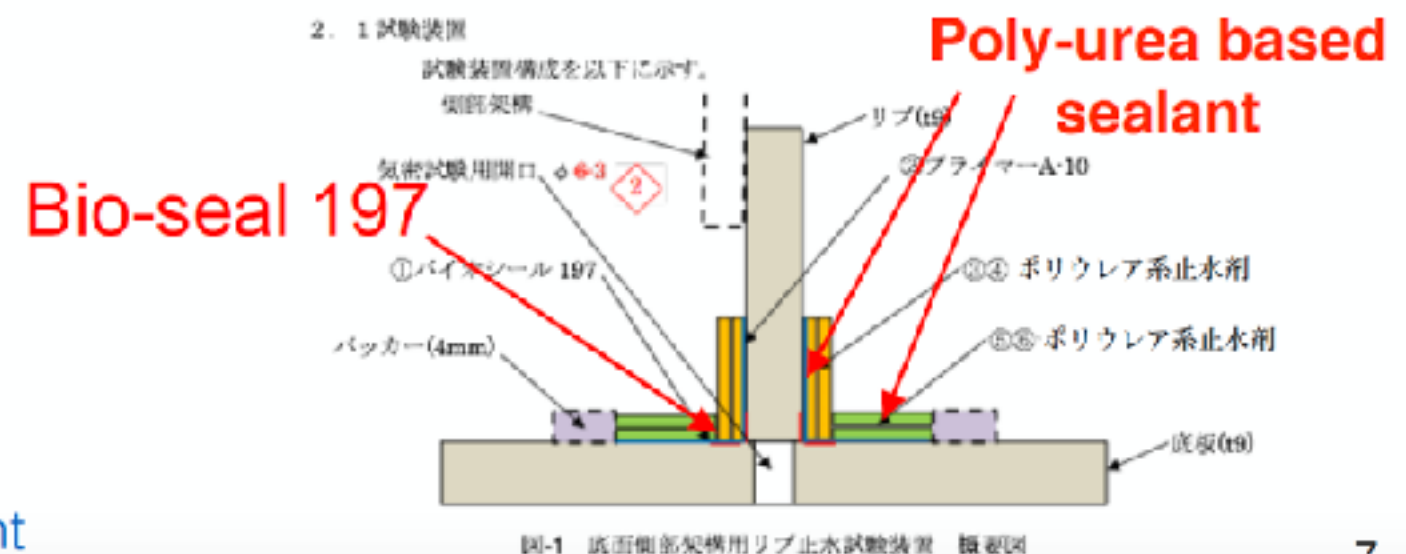
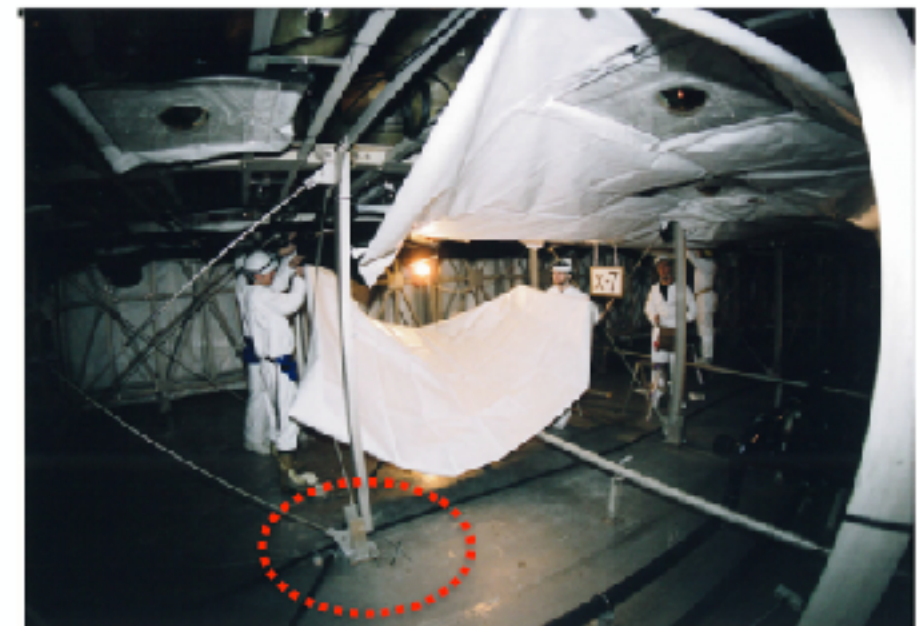
(前ページより)

- ✓タンク内の水の1日あたり $5.3 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ の温度変化は $5.3 \times 10^{-3} \times 1.34 \times 10^{-4} = 7.2 \times 10^{-7}$ の体積割合変化に相当する。
- ✓50000トンの水の体積変化は $50000 \times 7.2 \times 10^{-7} = 0.036 \text{ トン/日} = 36 \text{ リットル/日}$ となる。
- ✓タンクにおける 0.1mm の水位は、
 $20\text{m} \times 20\text{m} \times 3.14 \times 0.001\text{m} = 0.12\text{m}^3 = 0.12 \text{ トン}$ に相当
- ✓0.1mm の水位上昇には $0.036 / 0.12 = 3.3$ 日かかることになる。
- ✓これは今回の水位上昇時間と概ね一致する。

Leak-fixing plan

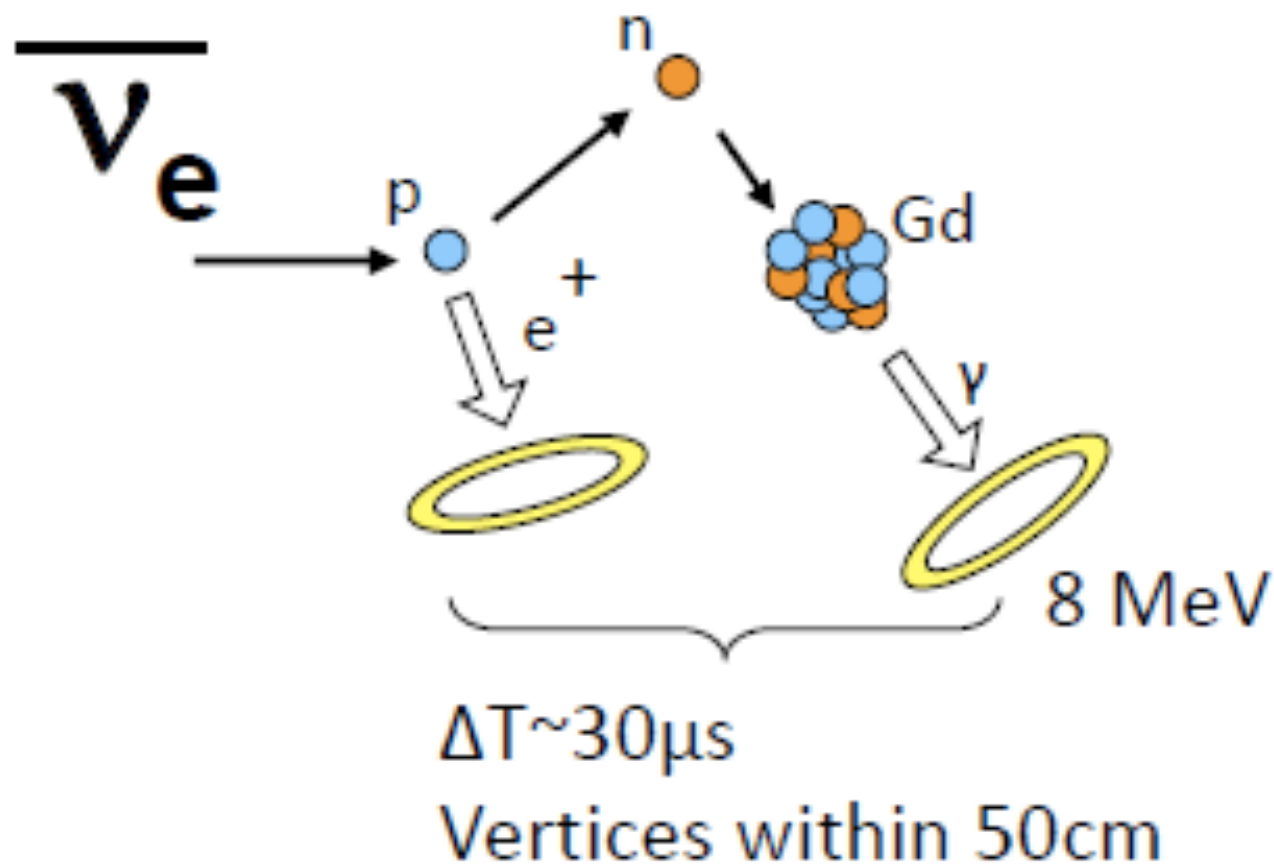
- Paint all the welding lines with sealing materials
 - **Bio-seal 197**: Fill pinholes and cracks in steel plates
 - **Poly-urea based sealant**: Newly-developed, flexible and low-background material.
- The poly-urea based sealant:
 - Mechanical strength
 - No problem after applying 5 atm pressure in Gd-loaded water for 5 months so far
 - Passed the JIS standard for attachment strength
- Soak-test
 - Effect in light yield less than 2.4%
- Radon emanation
 - $\sim 0.3 \text{ mBq/m}^2 \rightarrow \sim 80 \text{ Bq / SK}$

No problem for solar ν measurement

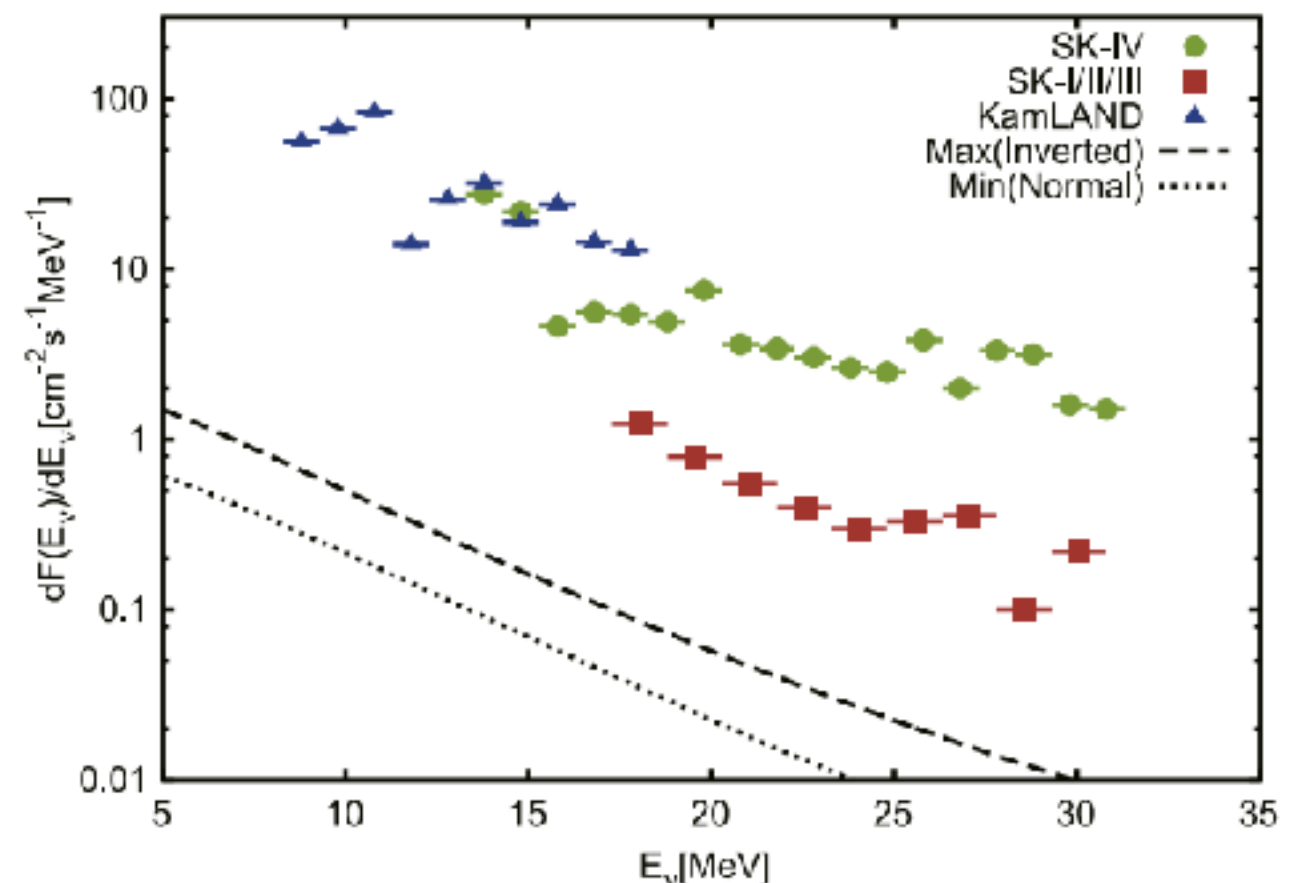


SK-Gd

- SK-Gd: Introducing **0.2% $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (~0.1% Gd)** into SK to identify inverse beta decay using **neutron tagging**.
- ➔ Discover SRNs and study the star formation history of the universe.
 - **~90% efficiency** for neutron tagging. (Phys. Rev. D 79, 083013)
 - Backgrounds (e.g. atmospheric ν_μ) could be reduced.
 - Aim to improve the sensitivity by an order of magnitude.

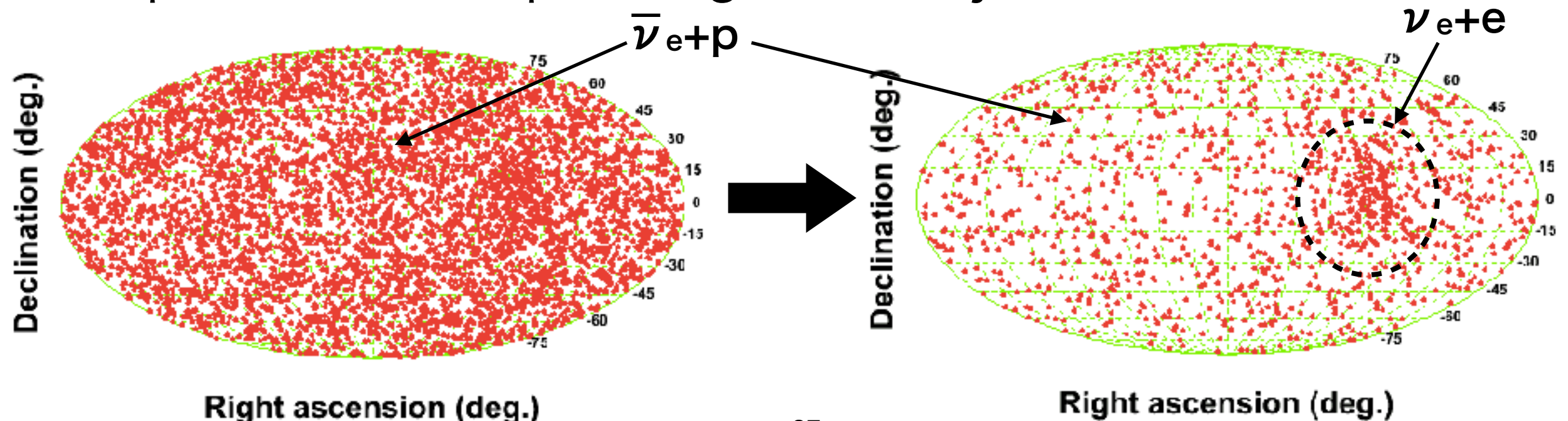


Inverse beta decay



Benefits on Other Measurements

- Atmospheric neutrino analysis.
 - Better separation between neutrinos and anti-neutrinos.
- Proton decay search.
 - More backgrounds (e.g. atmospheric neutrinos) could be rejected.
- Solar neutrino analysis.
 - Spallation due to the cosmic rays could be reduced.
- Galactic supernovae.
 - Early warning.
 - Improvement of pointing accuracy.



Purified $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

- To continue solar neutrino measurement, the radio-impurities (U, Th, Ra) in $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ should be minimized before loading.
 - ➔ Some companies produced specially purified $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.
- We developed methods to precisely measure radio-impurities.
 - Long lifetime, ^{238}U , ^{232}Th : ICP-MS (Kamioka)
 - ➔ S. Ito et al. PTEP 2017 113H01
 - Short lifetime, ^{226}Ra : Ge detector (Canfranc in Spain, Kamioka)
 - ➔ S. Ito et al. arXiv:1808.03376 (Accepted by PTEP)

Preliminary		[mBq/kg]		
Radio-impurities	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	
Commercial	50	100	5	
Our goal	<5	<0.05	<0.5	
Company A	<0.04	0.02 ± 0.01	<0.25	
Company B	<0.04	0.06 ± 0.01	<0.18	
Company C	0.64 ± 0.10	1.77 ± 0.27	0.7 ± 0.4	

Finally pure $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ was produced