

新生スーパーカミオカンデがもたらす超新星研究の新展開
スーパーカミオカンデアップグレード

arXiv:2109.00360

2021.9.17

宇宙線研究所 関谷洋之

日本物理学会2021年秋季大会

宇宙線・宇宙物理領域素粒子論領域，素粒子実験領域合同一般シンポジウム



まずい！
全45ページ
もある

The background of the slide is a photograph of the interior of the Super-Kamiokande detector. It shows a large, spherical volume filled with thousands of photomultiplier tubes (PMTs) arranged in a grid. The tubes are illuminated from above, creating a bright, blue, starry pattern. The overall appearance is that of a vast, complex scientific instrument.

Super-Kamiokande



Super-Kamiokande Gd

検出器内の見た目は変わっていないけど、
SK史上最大のアップグレードをしたお話



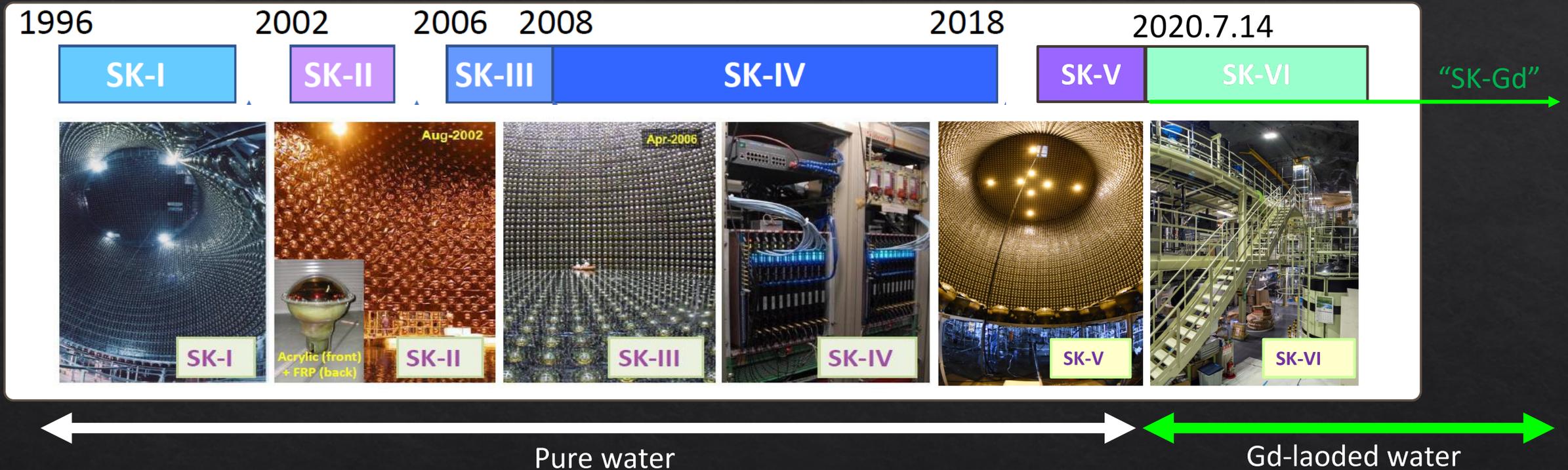
Super-Kamiokande



Super-Kamiokande Gd

水システム完全入れ替え

Super-Kamiokande experimental phases

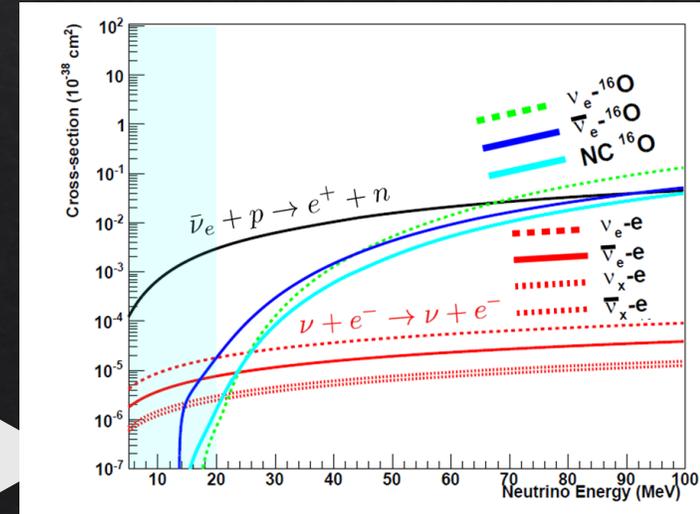
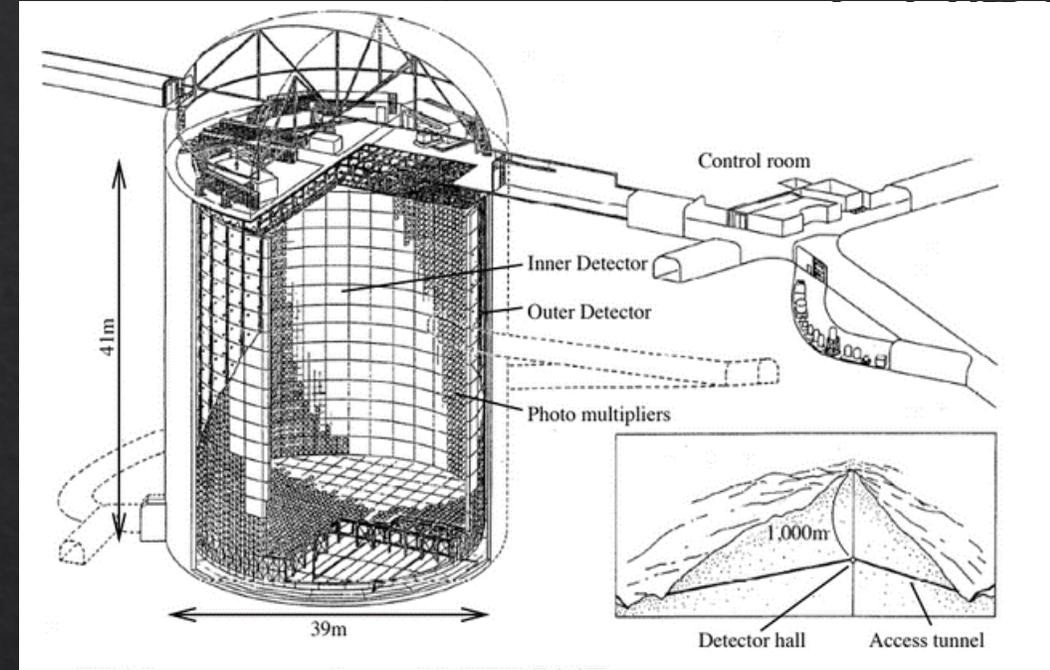


“SK-Gd is a broad and general term for the experiment after the start of the Gd-loading”

◇ SK-VI, SK-VII,... という実験フェーズの呼び方を継続する

Super-Kamiokande VI

- ◇ Ring imaging Gd-doped water Cherenkov detector
 - ◇ 49.5k m³ of pure water with 5.4 ton of Gd (0.011 w%)
 - ◇ ~50% Neutron capture efficiency
 - ◇ Target volume 32k m³ for SN ν
 - ◇ 11129 50cm PMTs for Inner detector
 - ◇ 1885 20cm PMTs for outer detector
- ◇ 1km (2700 mwe) underground in Kamioka
- ◇ Measurable: Energy, neutrino types, and direction
- ◇ Most sensitive to SN $\bar{\nu}_e$ through inverse beta decay.



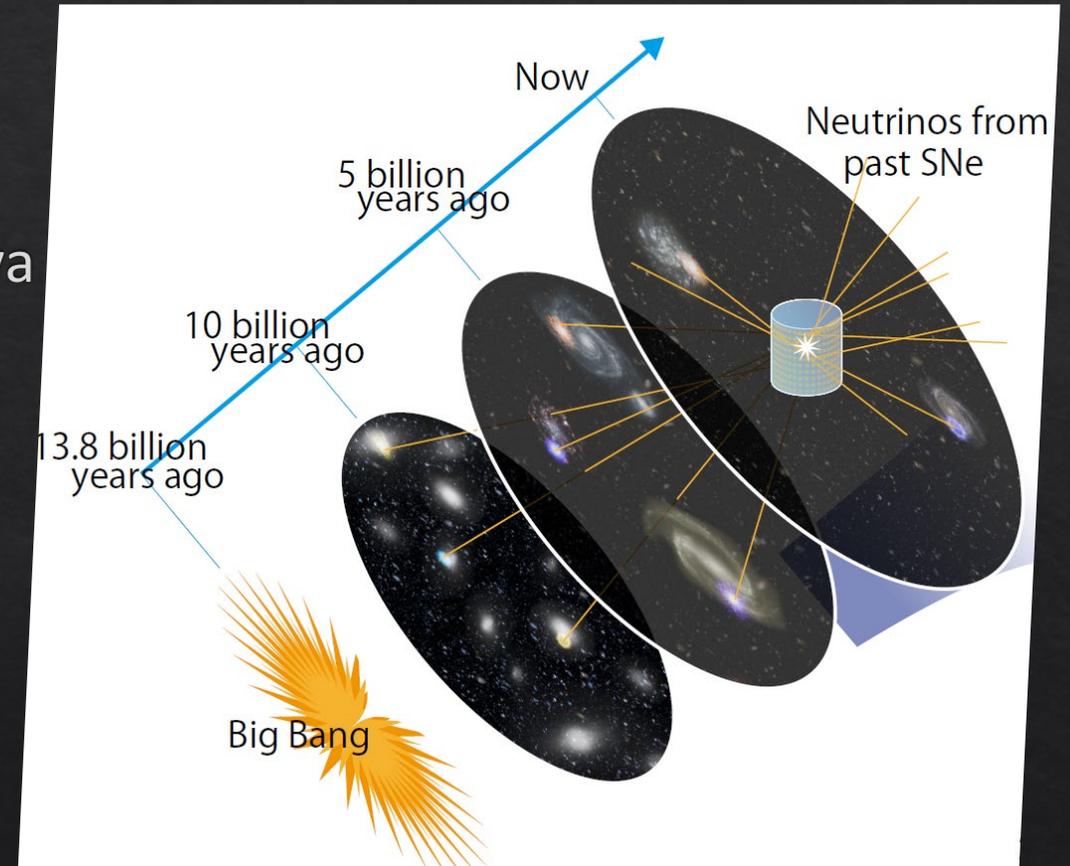
Physics targets of SK-Gd project

Supernova

- ◇ Precursor of nearby supernova by Si-burning neutrinos
- ◇ Improve pointing accuracy for galactic supernova
- ◇ **First observation of Supernova Relic Neutrinos (or Diffuse Supernova Neutrino Background)**

Others

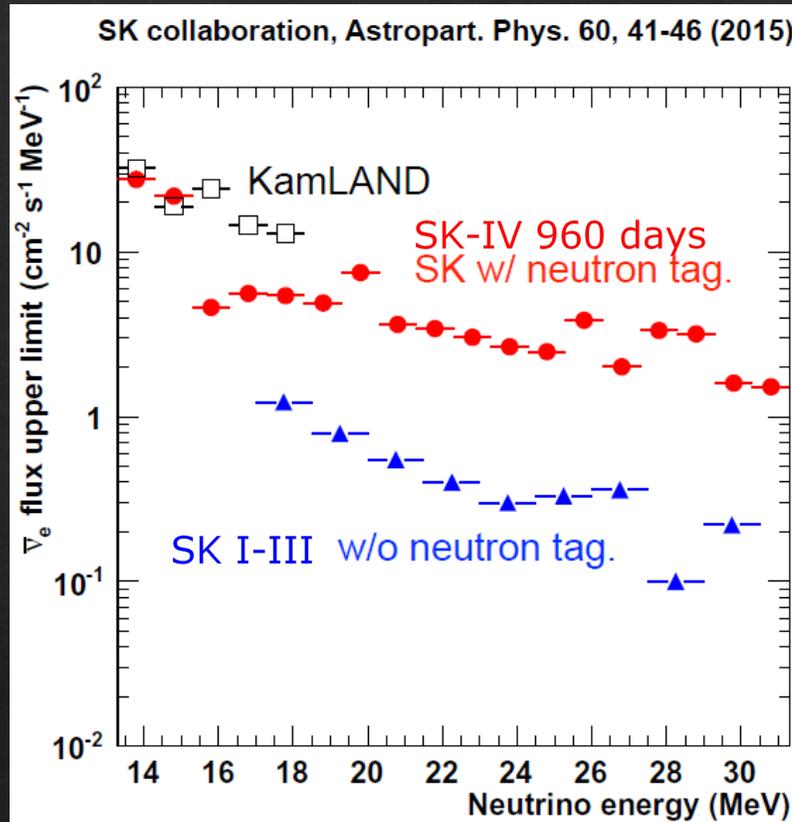
- ◇ Reduce proton decay background
- ◇ Neutrino/anti-neutrino discrimination (For T2K and atmospheric ν 's analyses)
- ◇ Reactor neutrinos



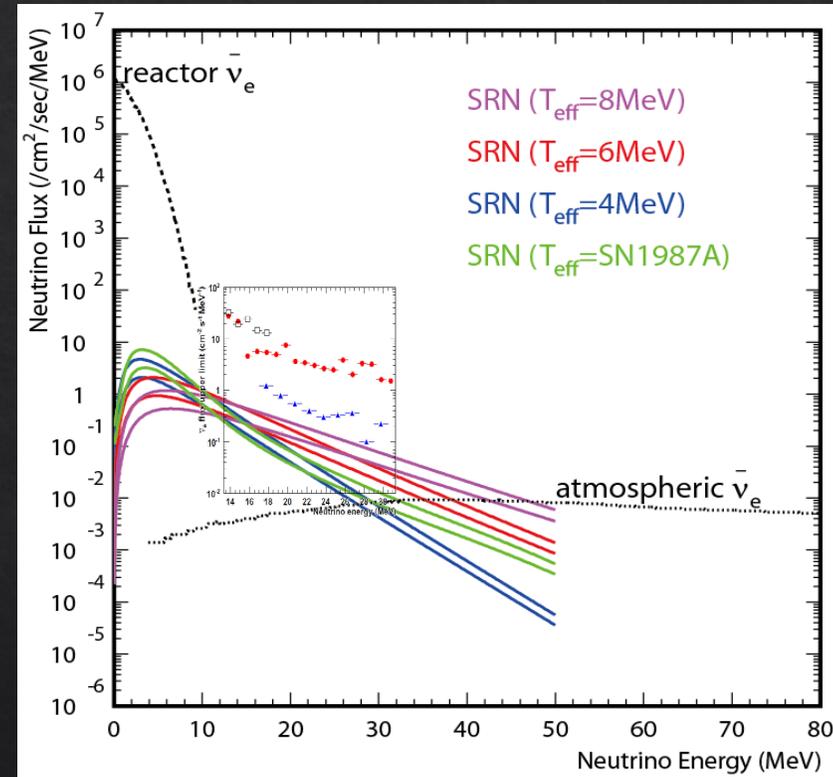
$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

Status of DSNB search(2015)

最新のSK(とKamLAND)の結果, Model については
中島発表17pW1-3



Comparison with expected $\bar{\nu}_e$ signal

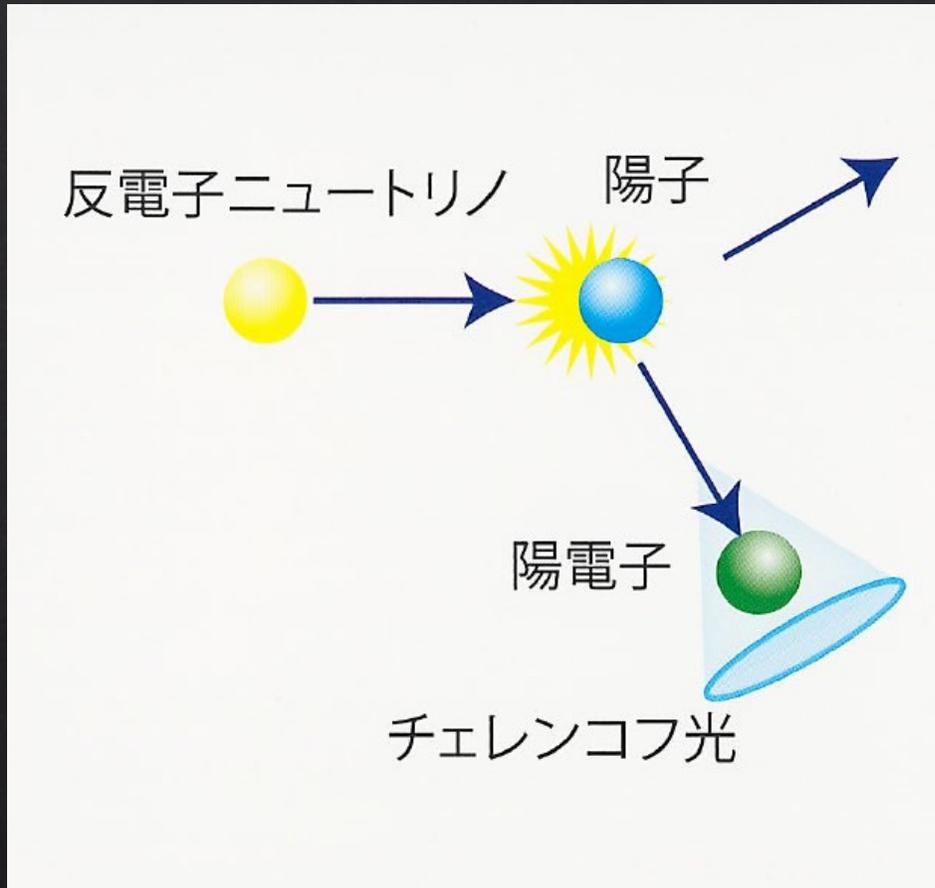


Horiuchi, Beacom and Dwek, PRD, 79, 083013 (2009)

Flux predictions : $0.3 \sim 1 / \text{cm}^2/\text{s}$ ($>17.3\text{MeV}$)

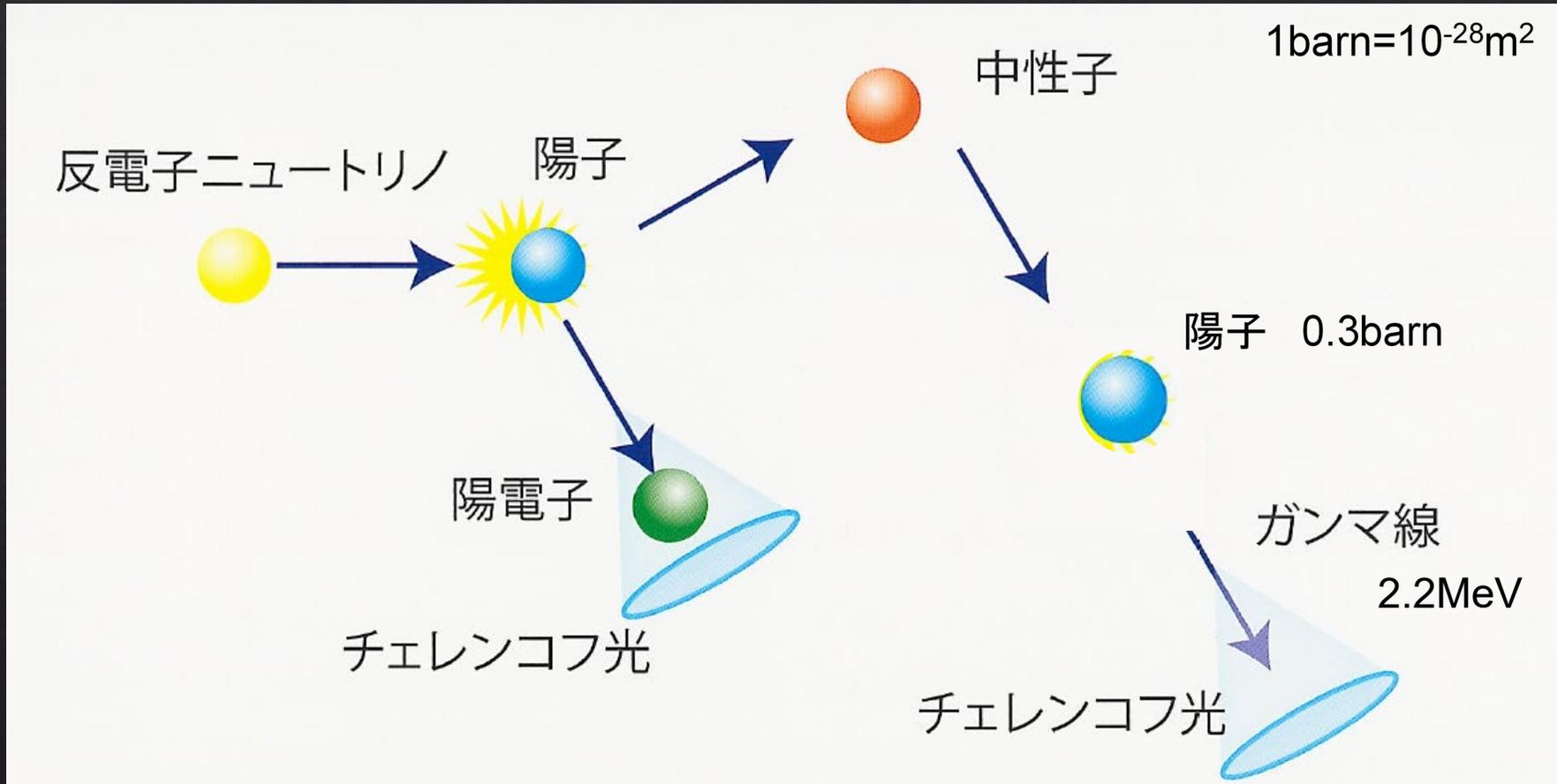
- ◇ Limited by backgrounds
- ◇ More than 1 order BG reduction is needed!

Super-Kamiokande I,II,III



◇ このチェレンコフ光を観測しているが、電子ニュートリノや電子、ガンマ線とも区別ができない

Super-Kamiokande IV,V



- ◇ 陽子の中性子捕獲に基づくdelayed-coincidence が利用できるが20%程度の効率にとどまる

なにか使える物質はないか？

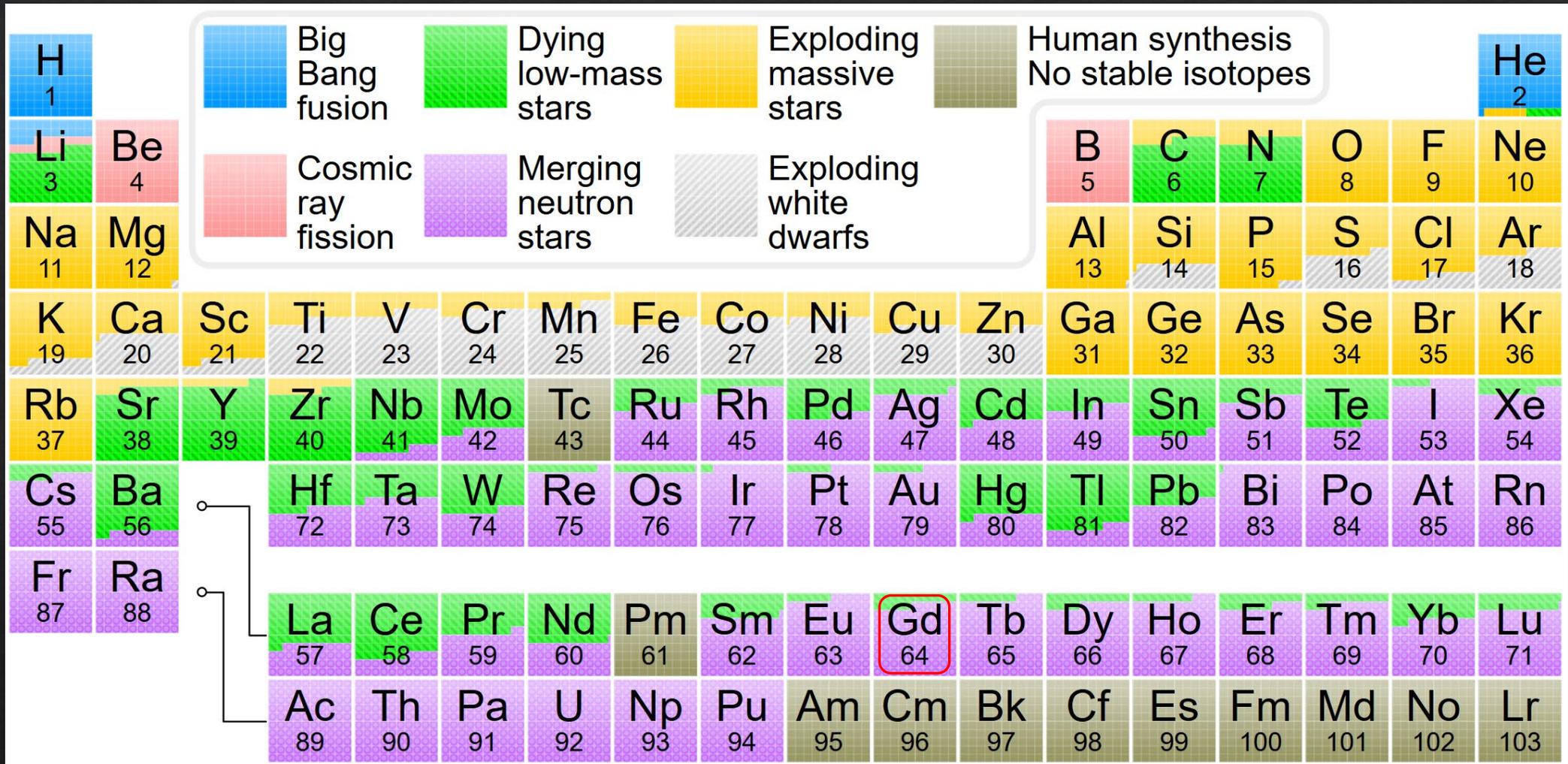
◇ 陽子よりも中性子を捕まえやすく、強いガンマ線を出す物質



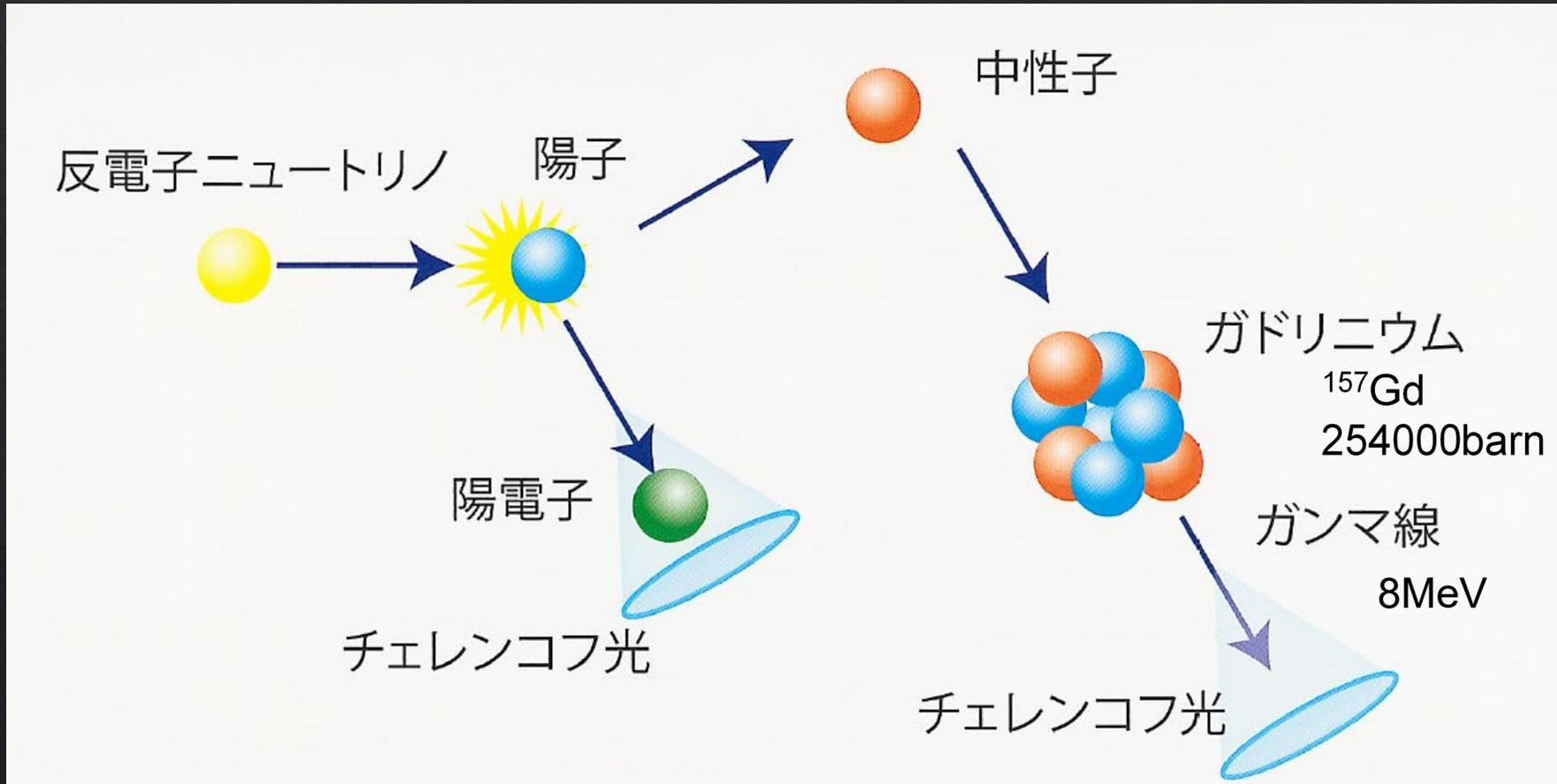
医療診断用MRIの画像強調剤
熱中性子ラジオグラフィ
 (金属や植物の内部透過検査法)
 磁気冷凍に用いる磁性材料

ガドリニウム 157.3
64 Gadolinium

こちらを示すべきか



Super-Kamiokande Gd

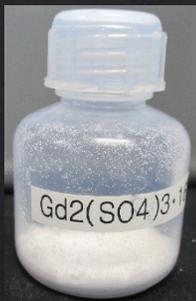


- ◇ ガドリニウムは中性子を陽子より100万倍捕まえやすい上、4倍の光を出す！2つ目のチェレンコフ光もちゃんととらえられる！

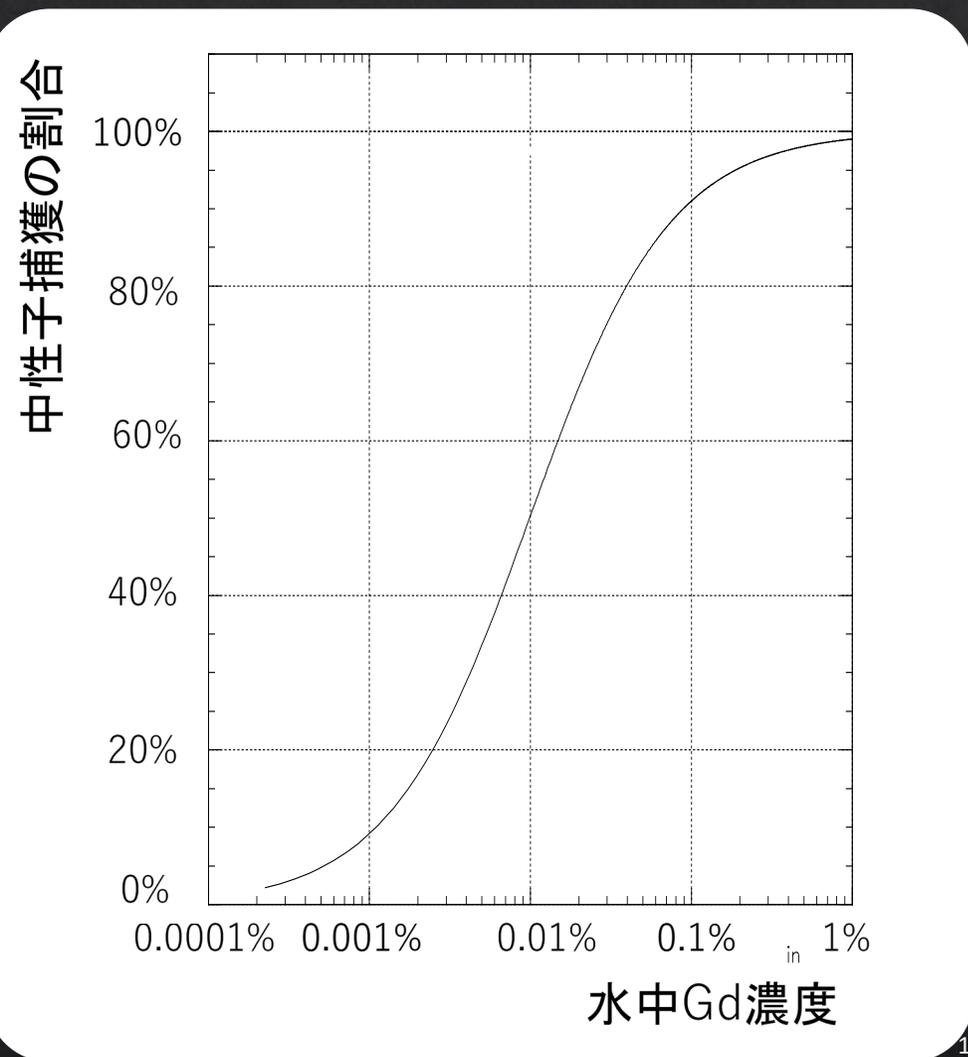
実現するのはとても大変

そもそもGdはそのままでは水に溶けない

- ◇ 硫酸ガドリニウム $Gd_2(SO_4)_3$
 - ◇ 塩酸ガドリニウムはSUSタンクでも錆びる
 - ◇ 硝酸ガドリニウムはチェレンコフ光が通らない



- ◇ 0.2%濃度で90%,0.02%でも50%の中性子捕獲
 - ◇ ただし、0.2%=100トン, 0.02%=10トンの $Gd_2(SO_4)_3$



そのまま入れても純水装置で取られて終わり

◇ これまでは超純水装置で循環純化

◇ いかにかH₂O以外の不純物を取り除くかに注力していた

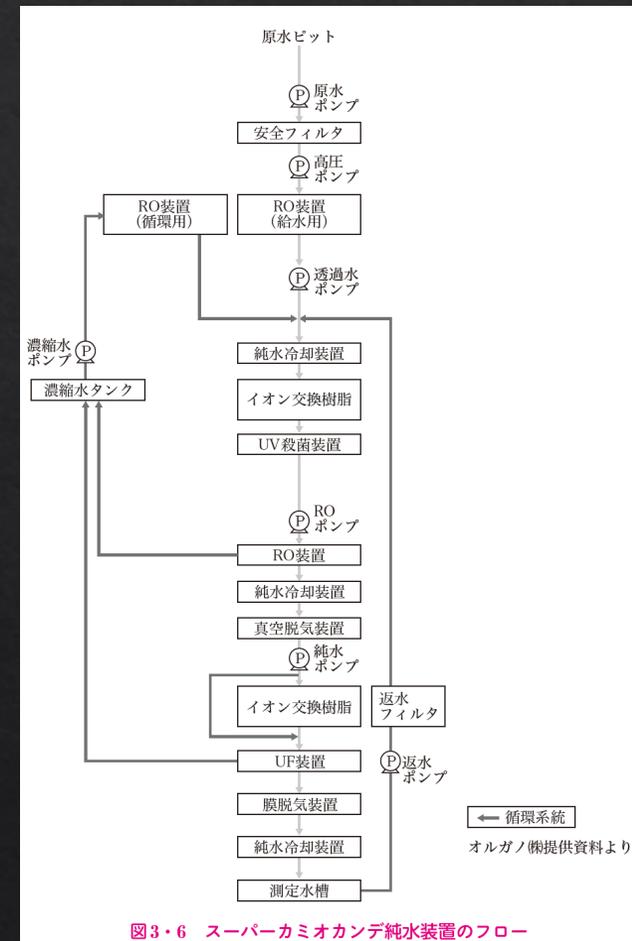
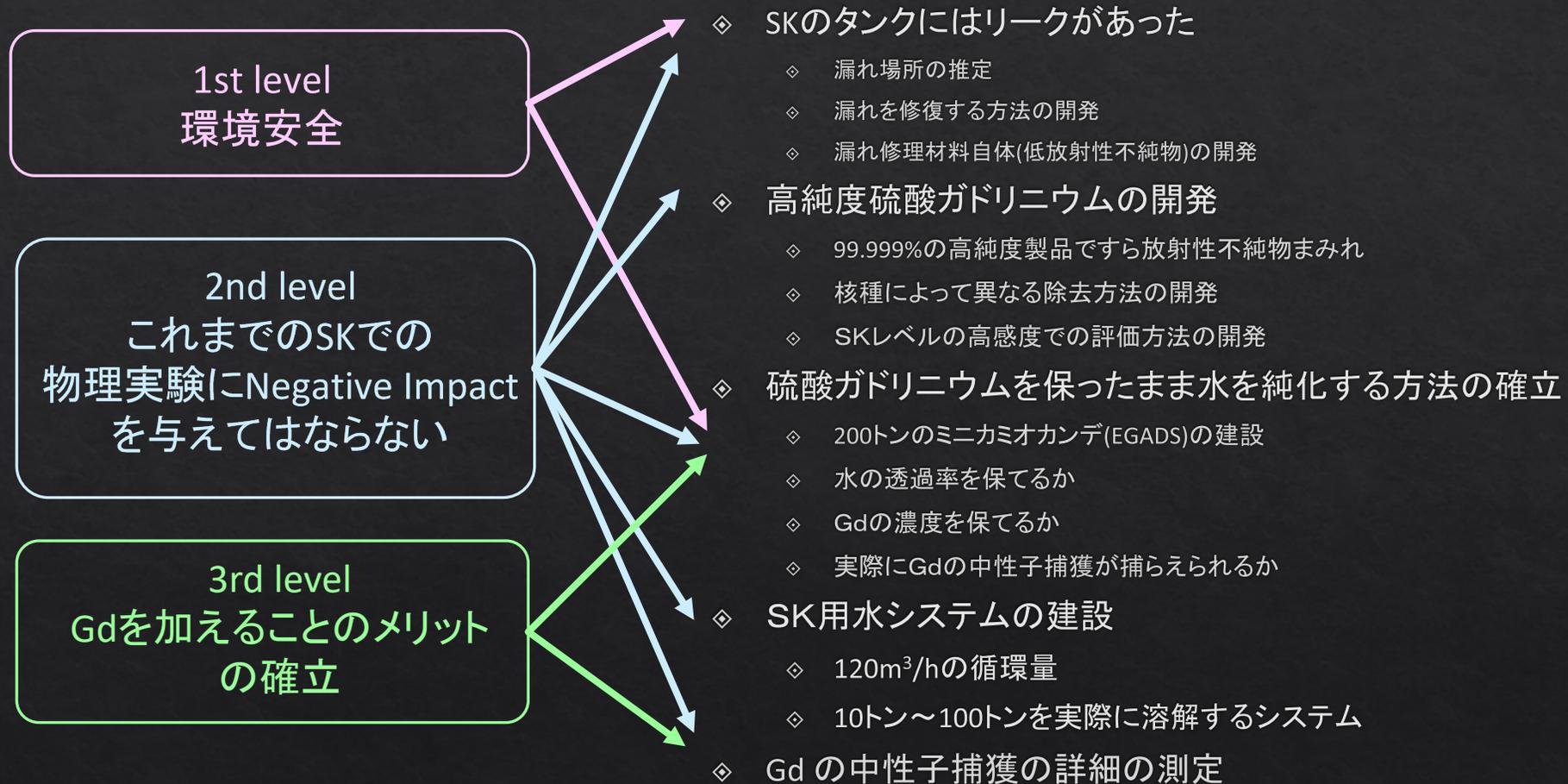


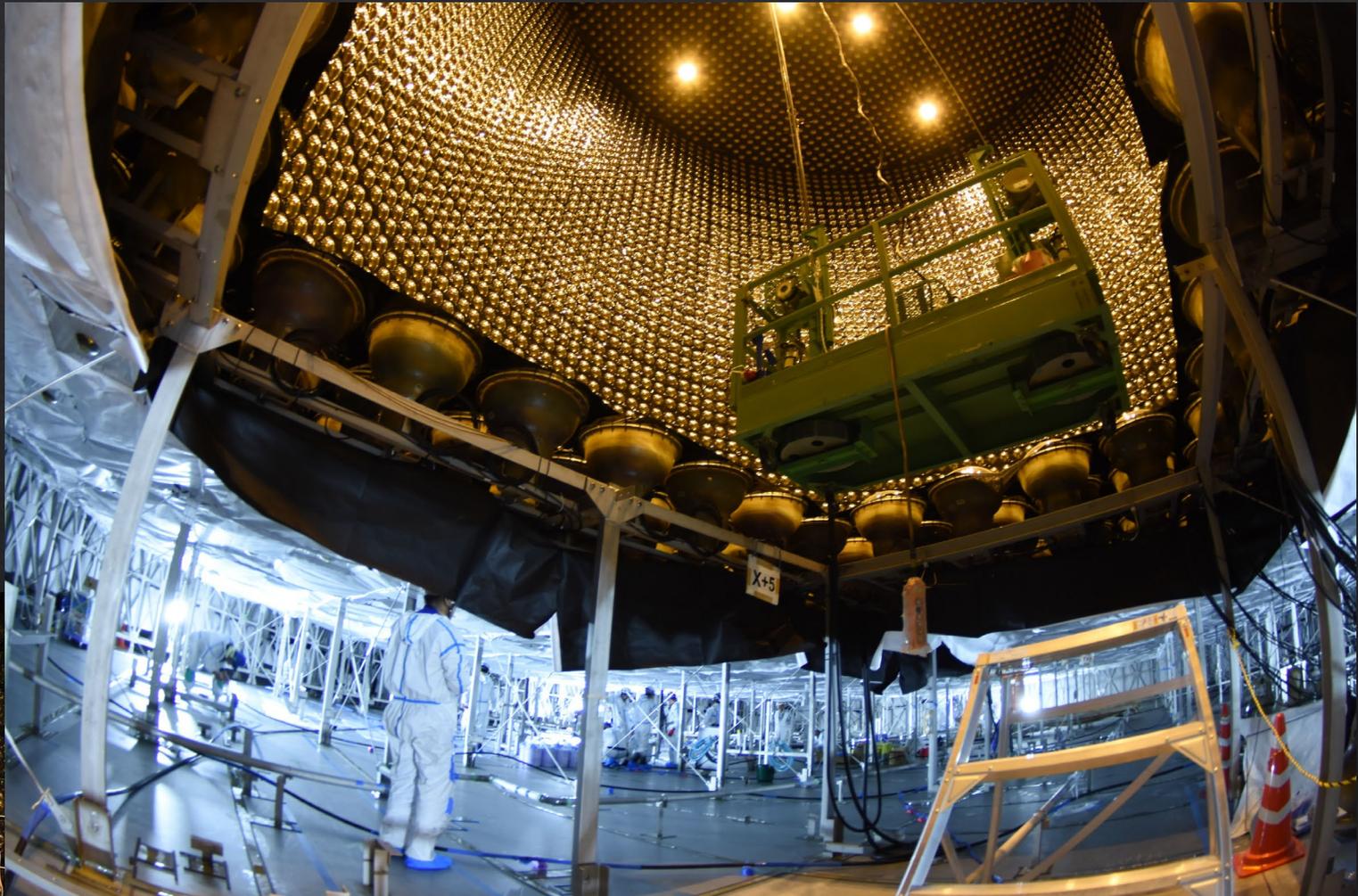
図3・6 スーパーカミオカンデ純水装置のフロー

R&D項目 SK-Gdまでの道のり



SKの大改修 in 2018

- ◇ 主に裏側での作業
 - ◇ タンク水漏れ修理
 - ◇ 水配管の増強
 - ◇ $60\text{m}^3/\text{h} \rightarrow 120\text{m}^3/\text{h}$
 - ◇ 故障PMTの交換
 - ◇ 136本Hyper-K PMTの導入



SKタンクの止水工事

補強方法

溶接箇所での漏れ

伸縮性に富む止水材料で覆う。

ステンレス板

ステンレス板



溶接部に塗る樹脂を業者とともに開発

- Gd水溶液中への溶出が少なく、水の透過率を低下させないもの
- ラドンの放出が少なく、低エネルギーBGを増やさないもの



Primer painting



Mixing two materials
(main and curing agent)



Mine-guard painting



Checking and correction

止水材の開発

◇ MineGuard™ : 神岡やカナダSNO Labなど地下施設で使用実績

Wall of SK area



Lining of SNO detector

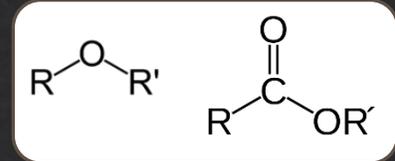


◇ ポリウレタン

◇ エステル/エーテル結合

◇ 加水分解してしまう！

◇ 化学会社とポリウレアベースの開発を行った



◇ 放射線不純物の低減

◇ 特にRnの放出が問題

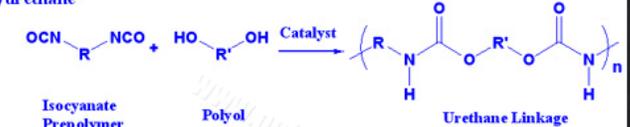
◇ Geによるスクリーニングによる原料吟味

◇ 増粘剤: 炭酸カルシウム→石英

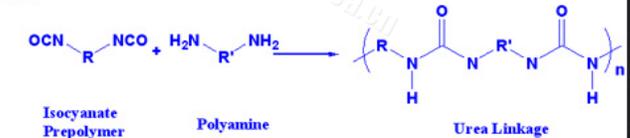


Chemical reactions: Polyurethane and Polyurea

Polyurethane

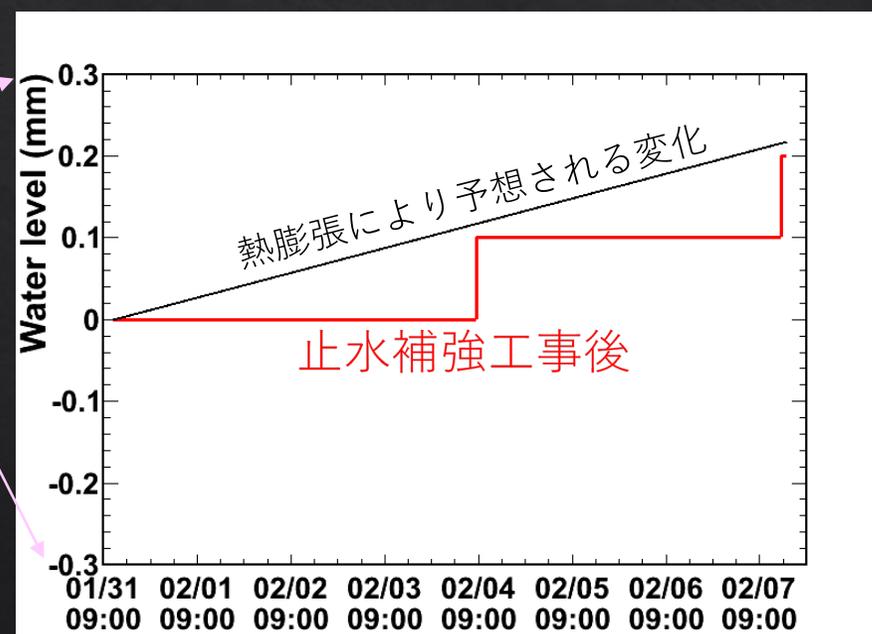
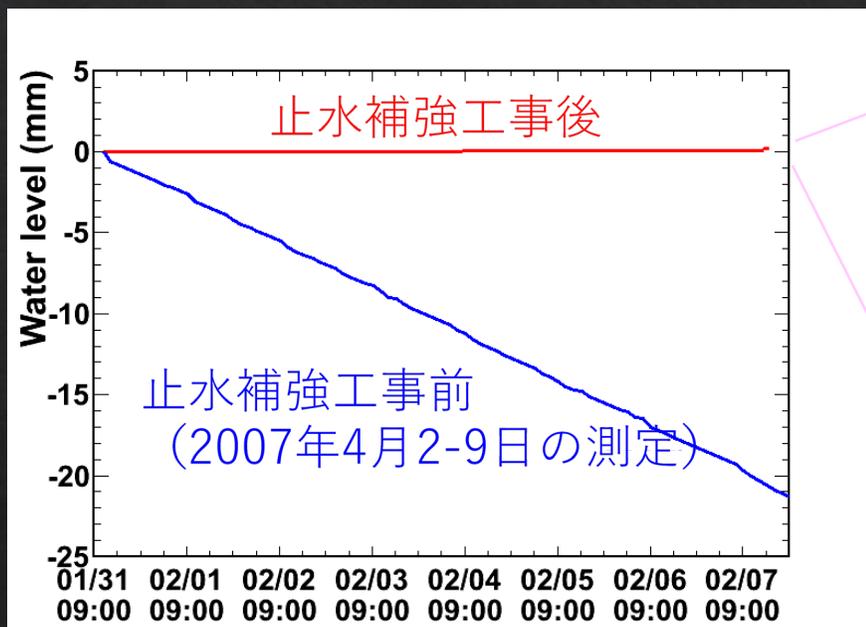


Polyurea



止水工事の成果

- ◇ 工事終了後、タンクに超純水を給水した。タンクが満水になった後、水漏れ試験をおこなった。2019年1月31日11:30から2月7日15:52にかけてタンクの水位の変化を測定。(7日4時間22分の試験時間)



- ◇ 止水工事後は有意な水漏れはみられない

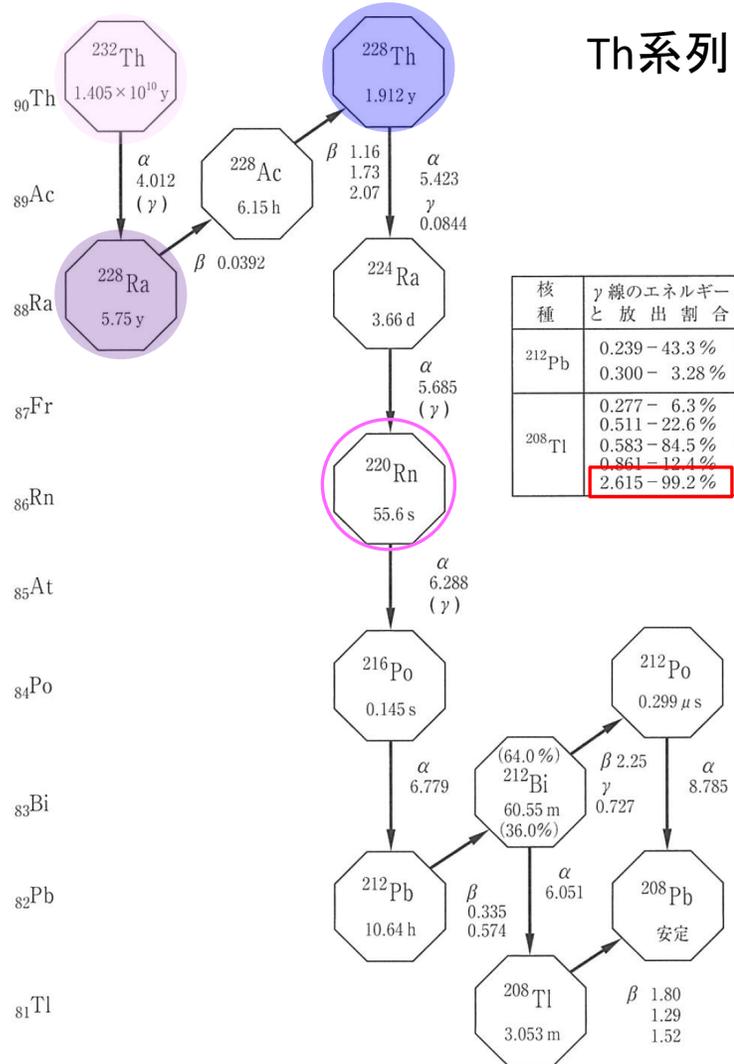
天然放射性不純物とBG

アイントープ手帳 10版より

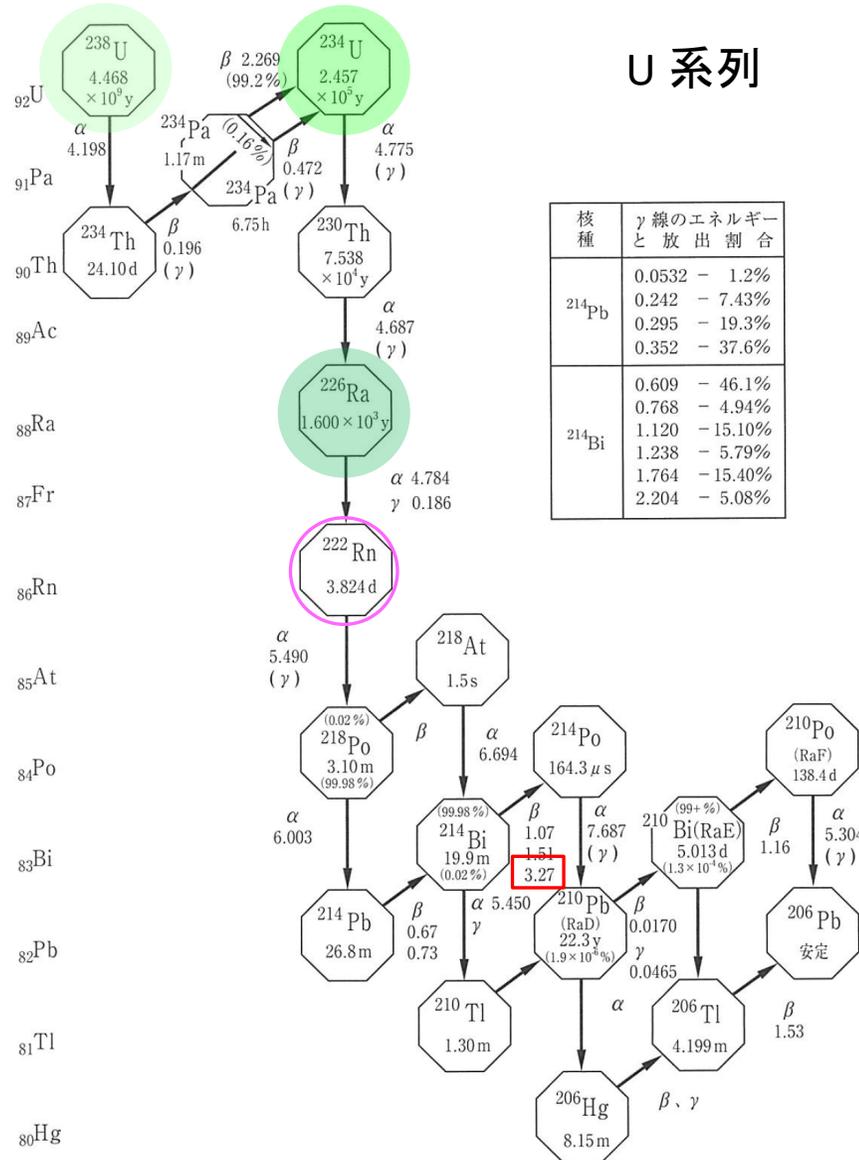
放射性壊変系列

半減期と放射線のエネルギー(MeV)は Evaluated Nuclear Structure Data File (1999年 8月)による

Th系列



U 系列



- 自発核分裂による中性子
- 気体のRn
- ²⁰⁸Tl 2.6MeV γ
- ²¹⁴Bi 3.27MeV β



太陽ニュートリノ観測のBG

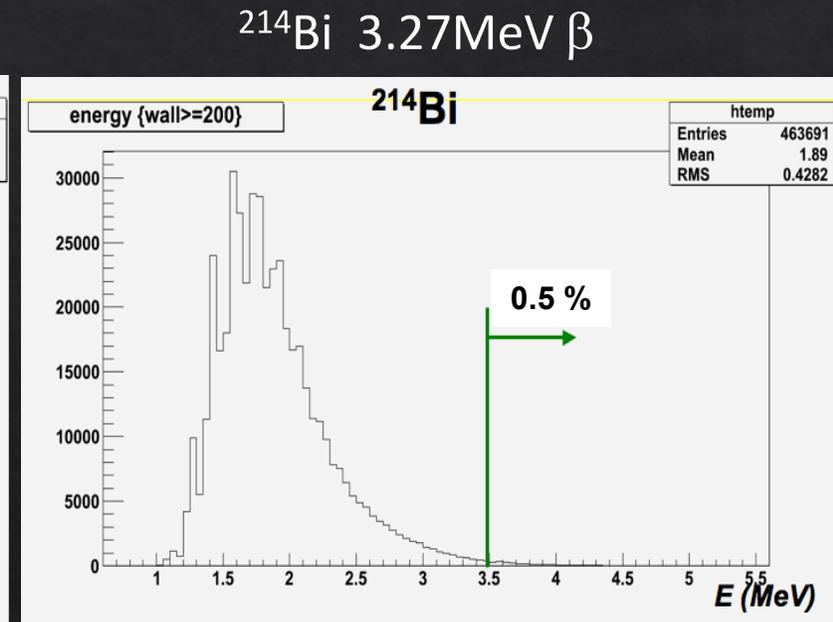
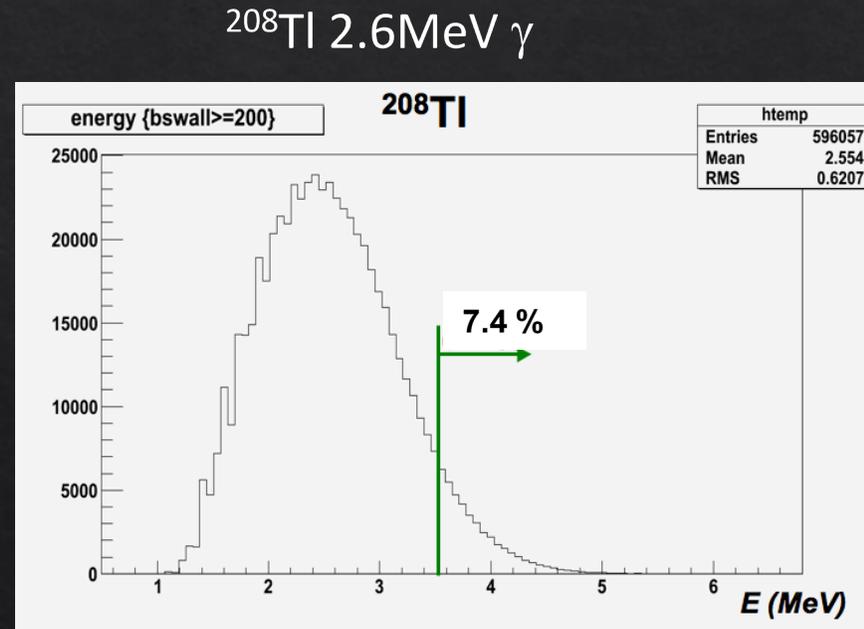
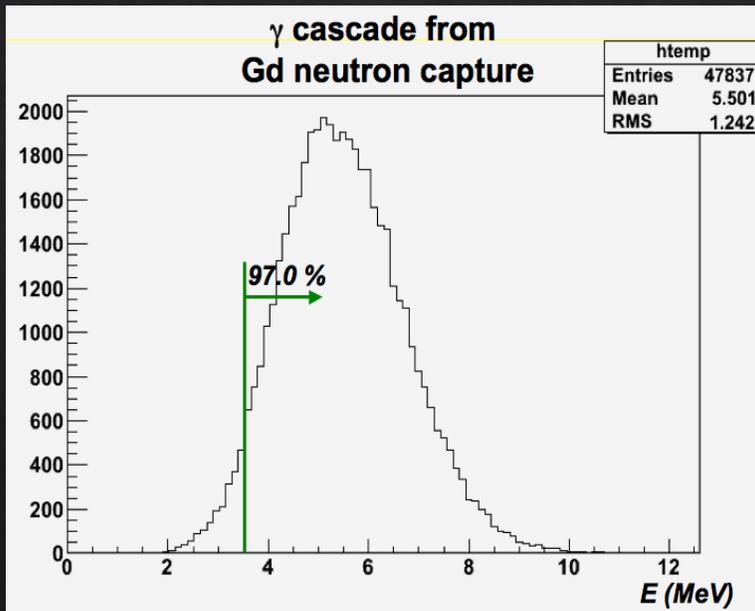
核種ごと化学的性質が異なるから除去方法も別々

太陽ニュートリノ解析への影響

◇ SK太陽ニュートリノ解析の閾値 3.5MeV

放射性不純物のSKでの応答: ←Super-Kでのエネルギー分解能

中性子→Gd(n,g)Gd



Gd₂(SO₄)₃に要求される天然放射性不純物低減

普通の高純度Gd₂(SO₄)₃

Chain	Main sub-chain isotope	Radioactive concentration (mBq/kg)
²³⁸ U	²³⁸ U	50
	²²⁶ Ra	5
²³² Th	²²⁸ Ra	10
	²²⁸ Th	100
²³⁵ U	²³⁵ U	32
	²²⁷ Ac/ ²²⁷ Th	300

- ◇ ²³⁸U 50mBq/kg
 $= 50e-3 * 2.03419e17 * 238 * 1.67e-27 / (1) / (1e-9)$
 $= 4 \text{ ppb}$
- ◇ ²²⁸Th 100mBq/kg
 $= 100e-3 * 6.3967e17 * 232 * 1.67e-27 / (1) / (1e-9)$
 $= 25 \text{ ppb}$

太陽ニュートリノ観測のBG ~200events/day/FV

- U (n) ~320events/day/ FV

More than 1 order reduction

- Th/Ra (β,γ) ~3 x 10⁵ events/day/ FV

More than 3 orders reduction

要求されるRILレベルは

$$^{238}\text{U} < 5\text{mBq/kg} = 400 \text{ ppt}$$

$$^{232}\text{Th} < 0.05\text{mBq/kg} = 13\text{ppt}$$

- 難しいのは
- 10トンオーダーで製造
 - 評価の手法

1袋 500kg入り
26袋



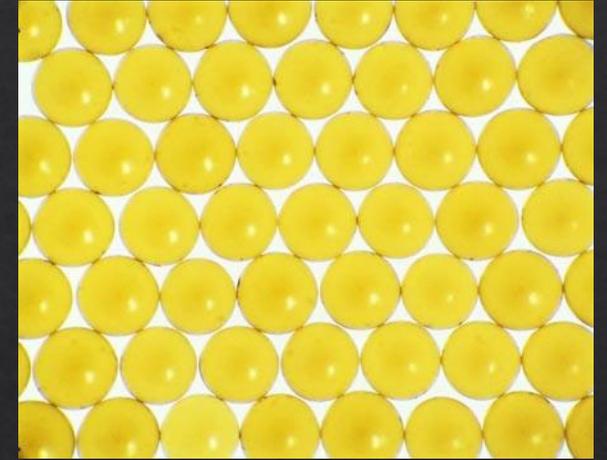
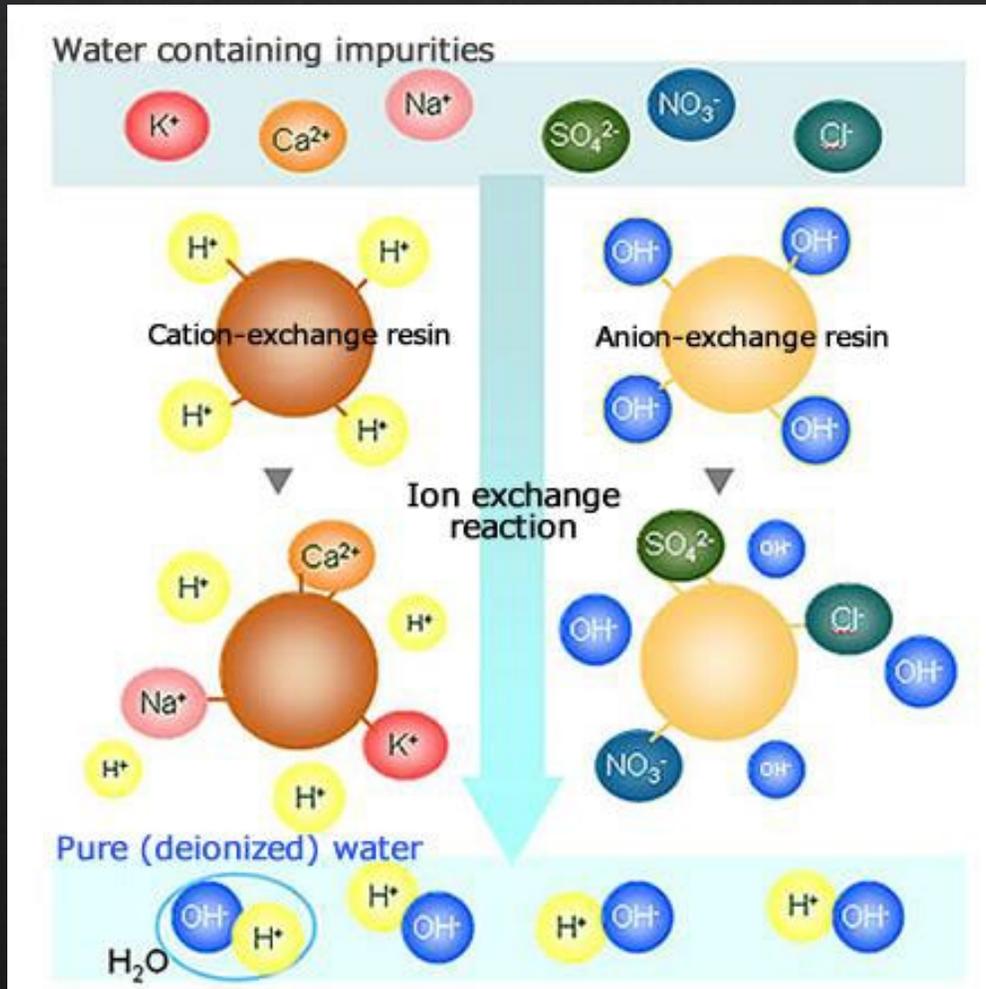
$\text{Gd}_2(\text{SO}_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 溶解・循環純化装置

◇ ~10トンの硫酸ガドリニウムを溶解し， $120\text{m}^3/\text{h}$ で循環するシステム



イオン交換樹脂

超純水製造の必需品



硫酸ガドリニウム用の特殊樹脂の開発を行った

- ◇ アニオン交換樹脂 $OH^- \rightarrow SO_4^{2-}$
- ◇ カチオン交換樹脂 $H^+ \rightarrow Gd^{3+}$

放射性不純物も取り除く

Ra は $Gd_2(SO_4)_3$ 水溶液中で Ra^{2+}
U は $UO_2(SO_4)_3^{4-}$

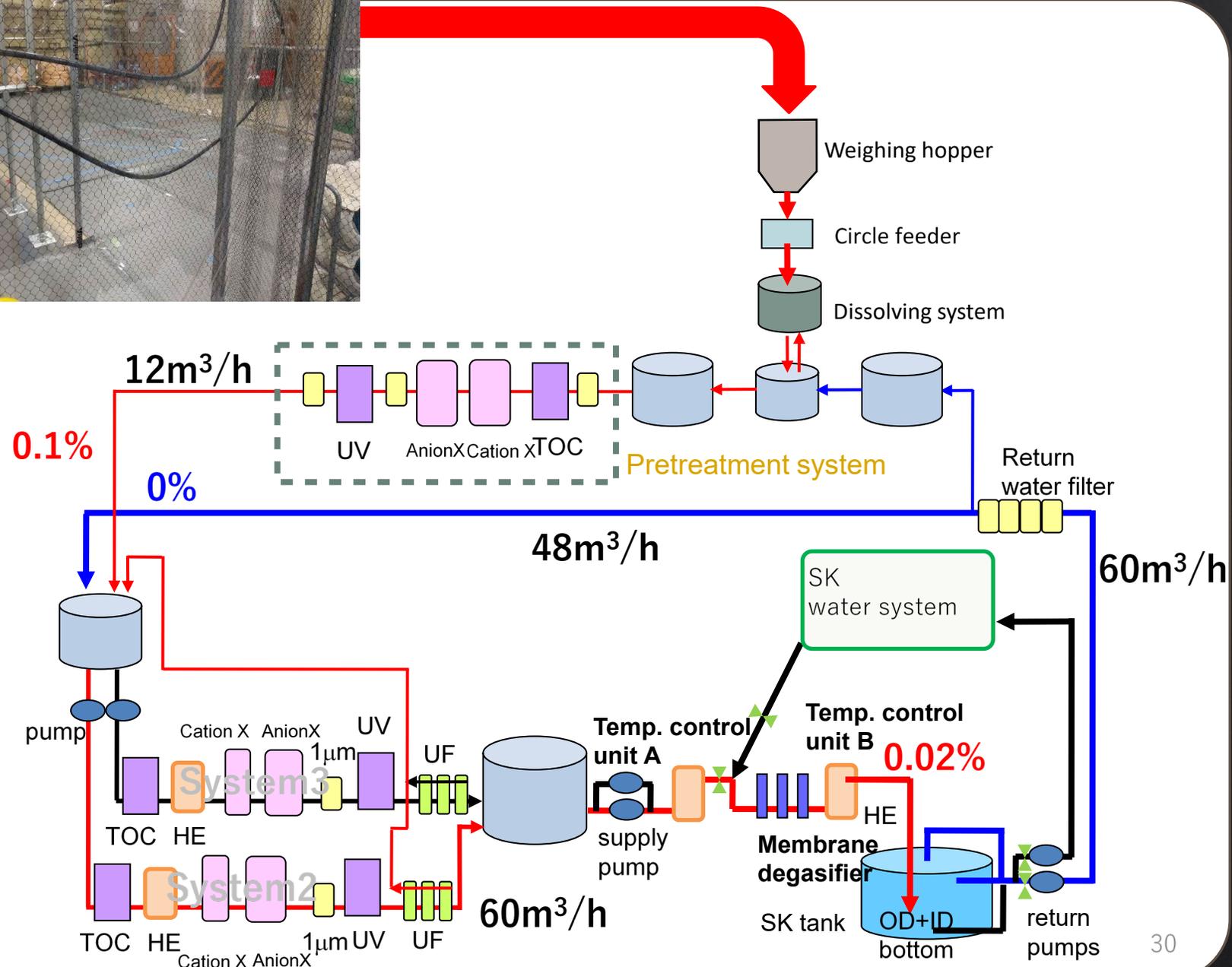
2020年8月17日
導入完了



8水和物で 13.2トン
 $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$

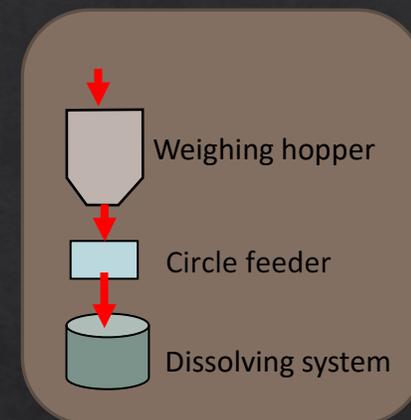
SKタンク内の純水を上
からとって、
0.02% $Gd_2(SO_4)_3$
にして下から戻す

5万トンを60 m³/hで
入れ替えるのに
35日かかる





バケツとシャベル（笑） あと密



8.2kg の $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ を加えた直後



10分後



実際の様子

1回あたり
8.2kg(→8.7kg) を 768L に溶かす
30分毎に繰り返し24時間35日連続

実際の様子

On Aug 17
finished loading 13212 kg of
“ $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O} + 2.5\% \text{ water}$ ”
=12884kg of $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

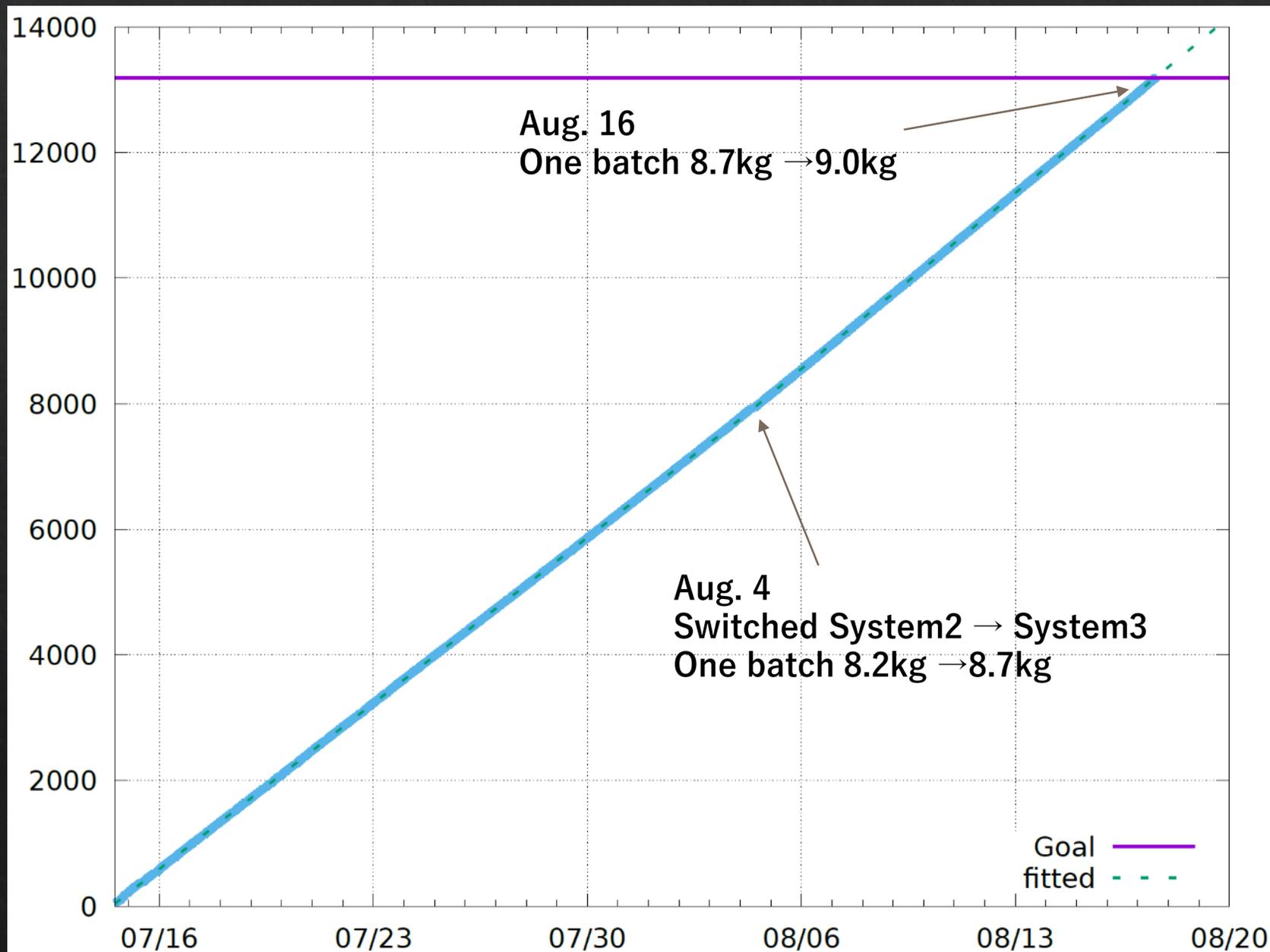
The water in the tank and
the water recirculation
system
=49468000kg

=0.0260% $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

=0.0210% $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$

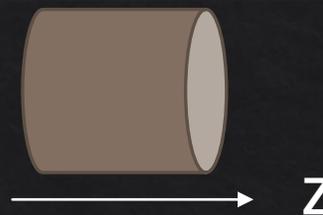
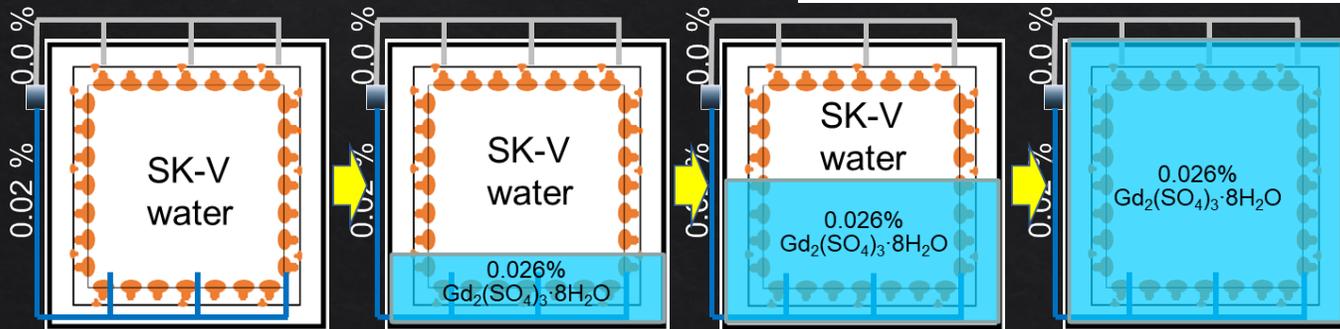
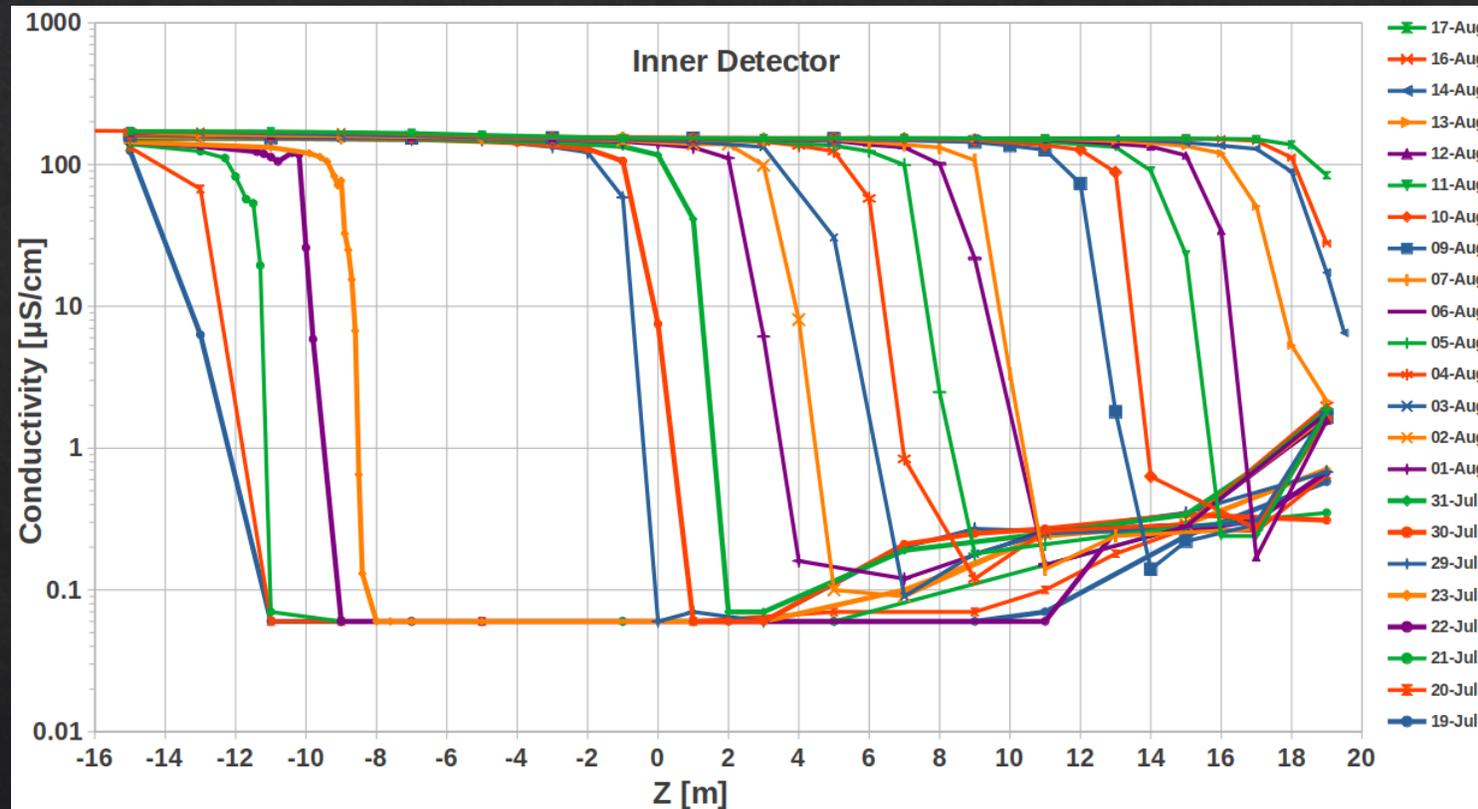
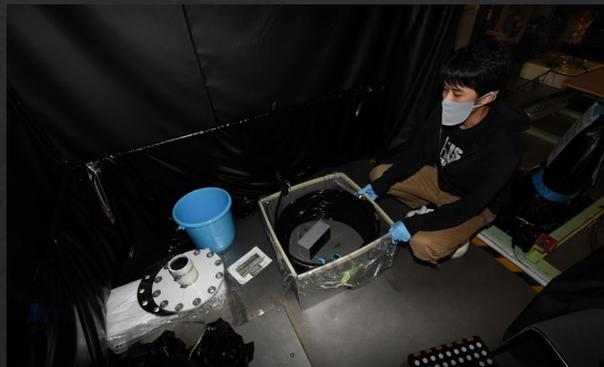
=0.0110% Gd

$\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O} + 2.5\% \text{ water (kg)}$



Gd 濃度の電気伝導率による確認

タンクにチューブを入れて、毎日直接サンプリング



タンク底から積み上がっている様子が確認できる

Gd濃度と中性子捕獲時間

Number of captures in Δt

$$\frac{dN_n(t)}{dt} \Delta t \propto - (n_{Gd} \sigma_{Gd} + n_p \sigma_p) v_n \Delta t N_n(t)$$

$N_n(t)$: number of neutron

v_n : neutron velocity

$n_{Gd} n_p$: number of nuclei in unit volume

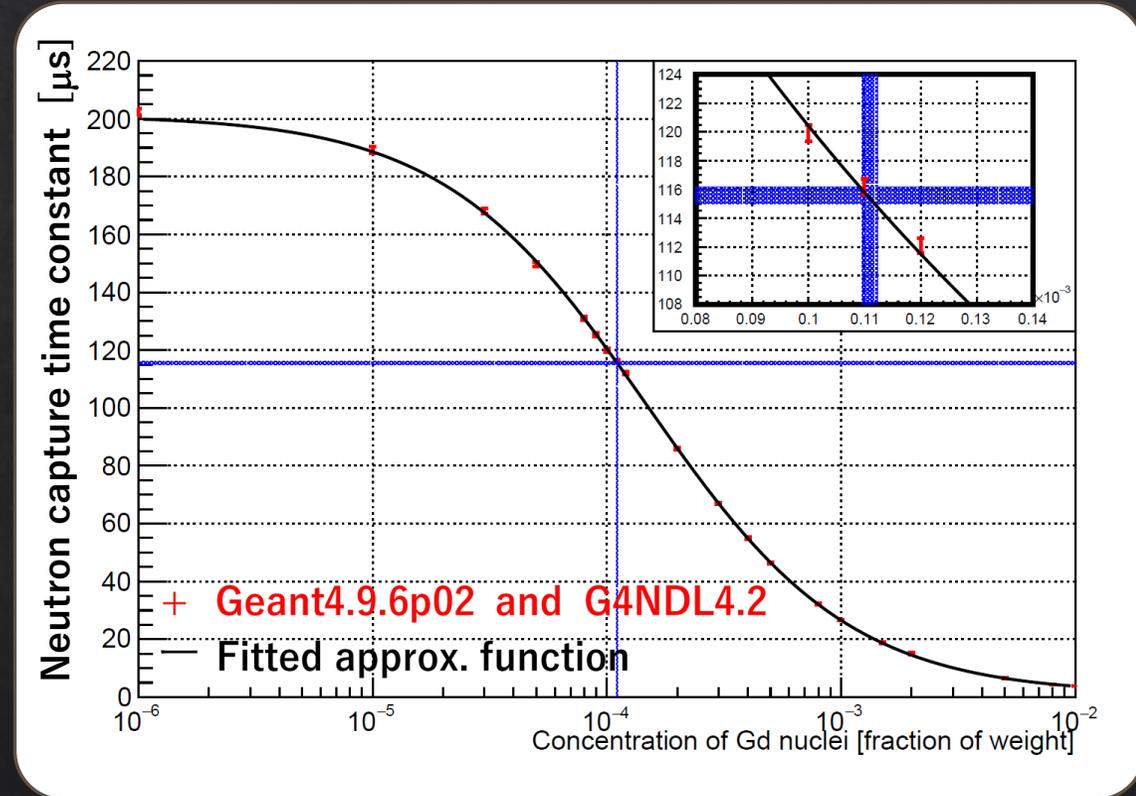
$\sigma_{Gd} \sigma_p$: capture cross section of Gd

Once neutrons are thermalized, v_n becomes \sim constant

$$N_n(t) \propto \exp(- (n_{Gd} \sigma_{Gd} + n_p \sigma_p) t)$$

$$\tau \propto \frac{1}{n_{Gd} \sigma_{Gd} + n_p \sigma_p}$$

Gd concentration \nearrow

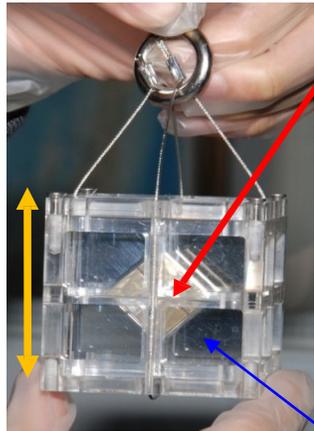


Approx. function

$$c_{Gd} \approx \left(\frac{8.19}{\tau [\mu s]} - 0.0371 \right) \times \frac{1}{310} \times 100 [\%]$$

Am/Be中性子源による測定

原田さん 14aW1-8



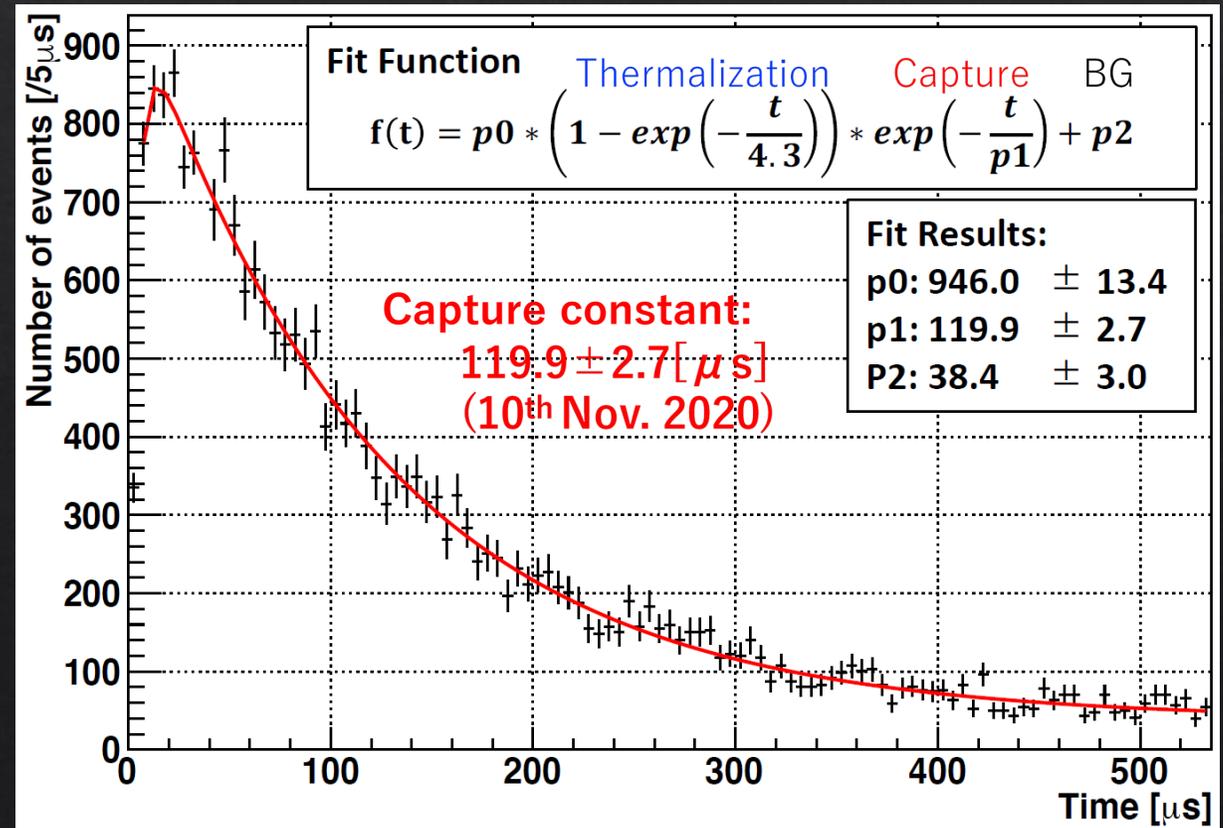
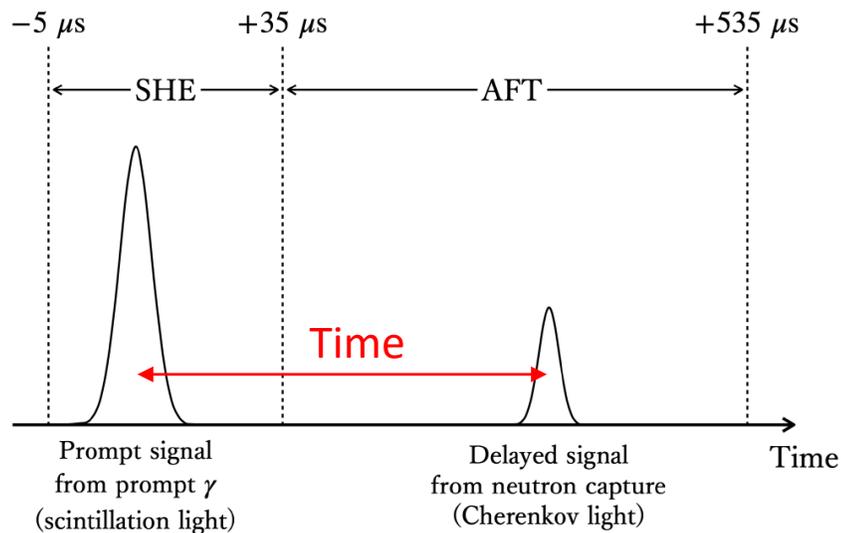
Am/Be source

100~200 neutrons/s

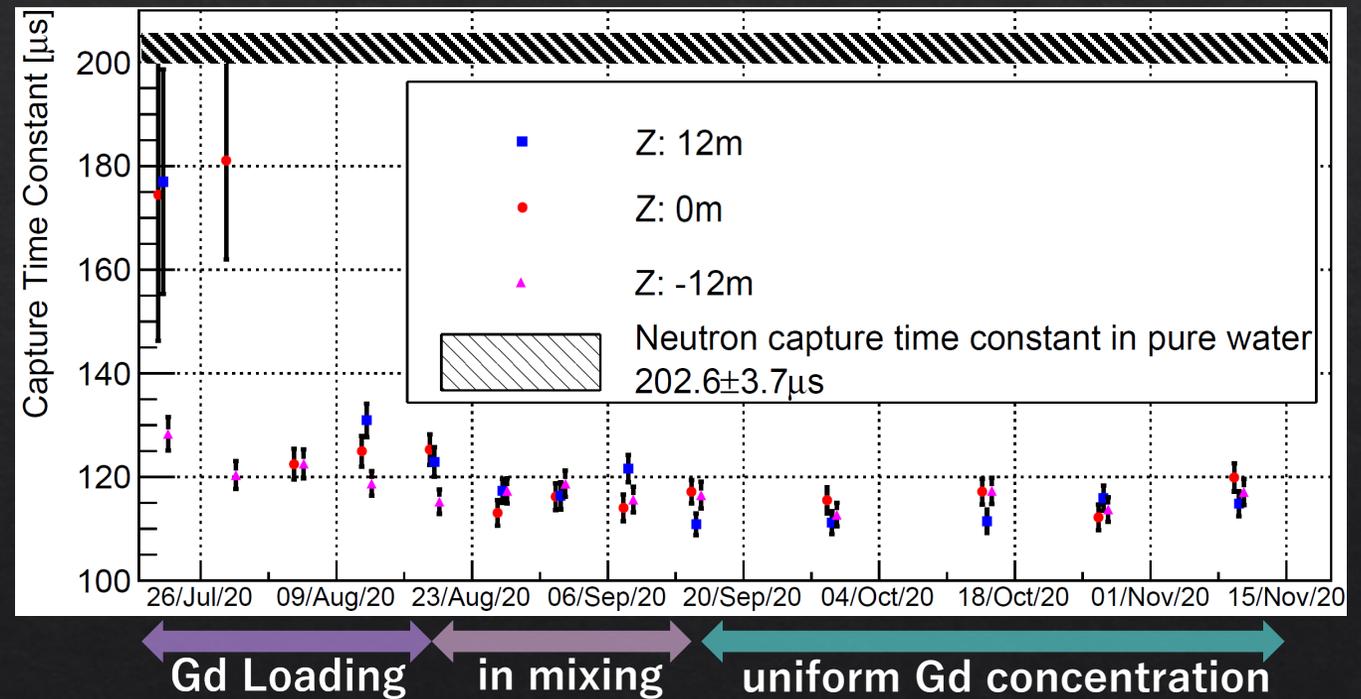
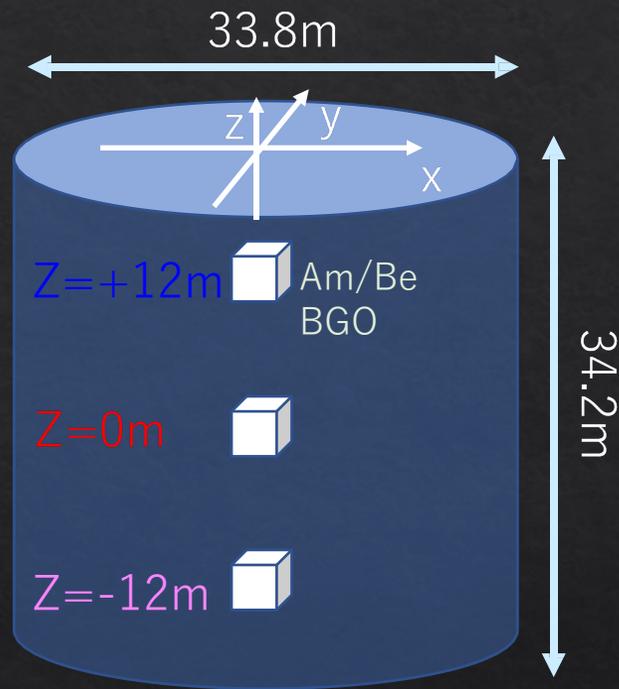


8 BGO Crystals

- ◇ 4.4MeVの γ 線によるBGOシンチレーションをPromptトリガーとする
- ◇ Triggerがかかると、500 μ sec分のデータを取得する



Am/BeによるGd濃度モニタリング

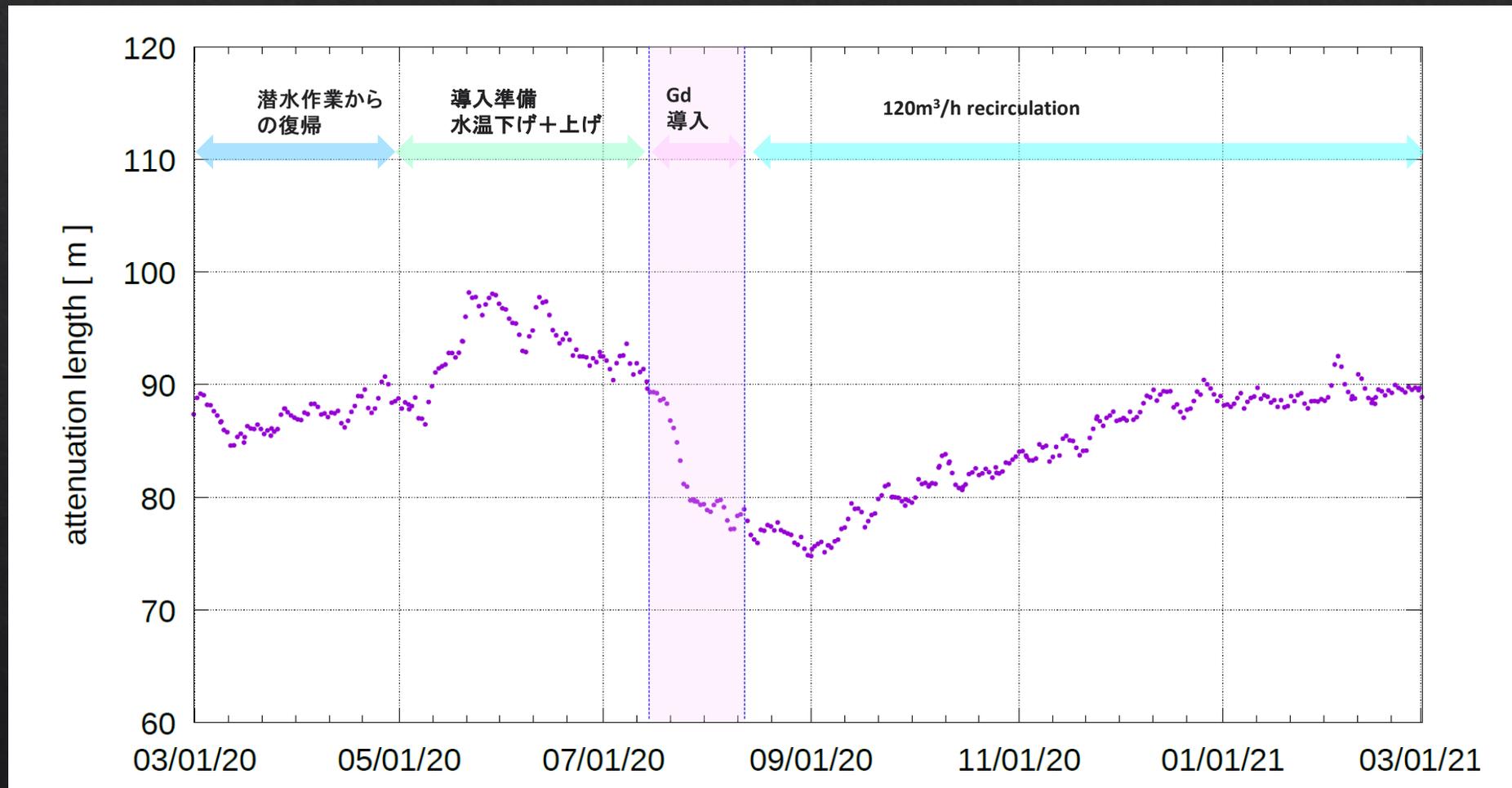


◇ 2020年9月以降

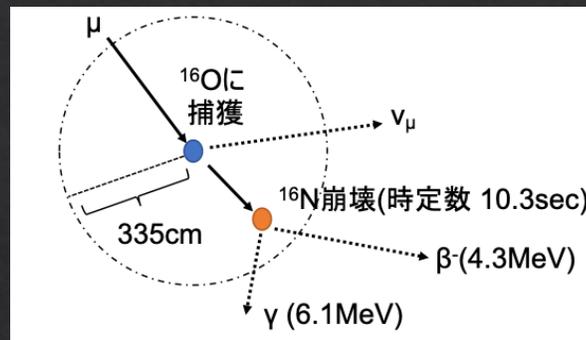
$115.6 \pm 0.6 \mu\text{s} \rightarrow$ Gd濃度 $110.9 \pm 1.4 \text{ ppm}$ 入れた量と一致

水の透過率(Throguh- μ で測定した光の減衰長)

◇ $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ を加えて純水時と同等

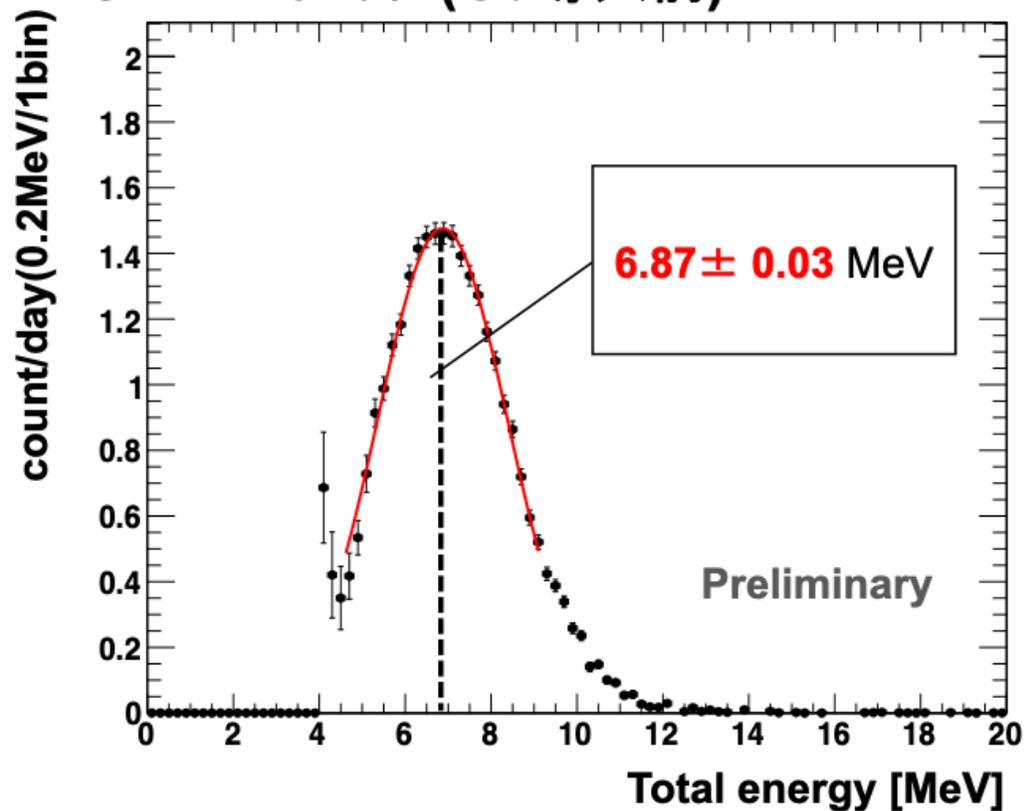


μ^- 捕獲由来の ^{16}N による エネルギースケールの確認

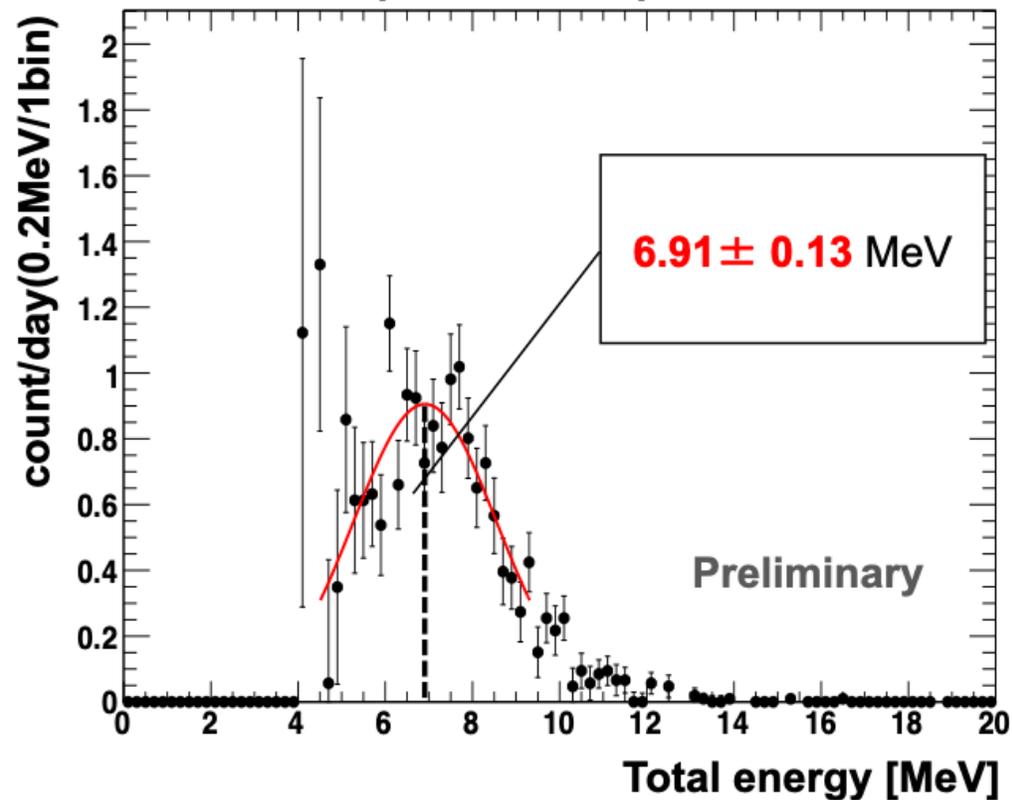


兼村さん
14aW1-11

SK-IV 2970日(Gd導入前)

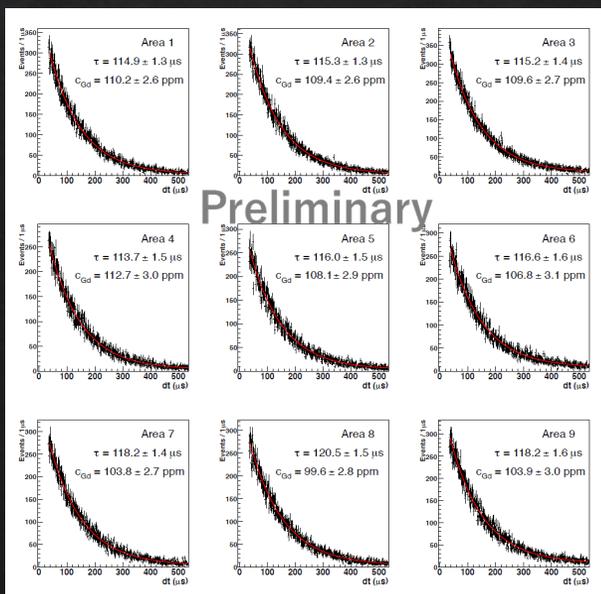
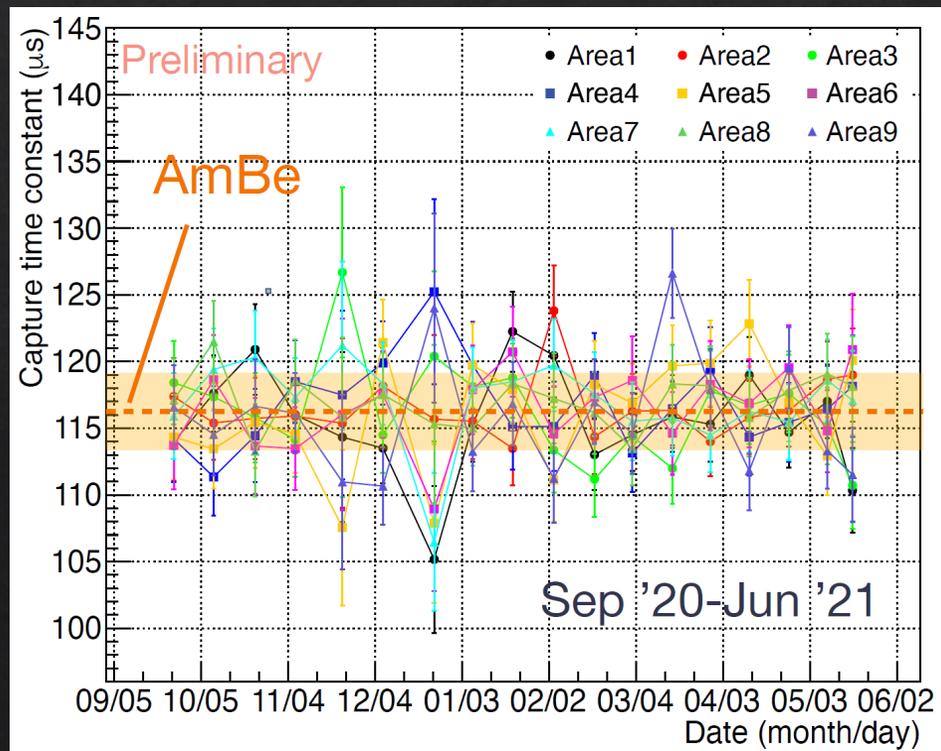
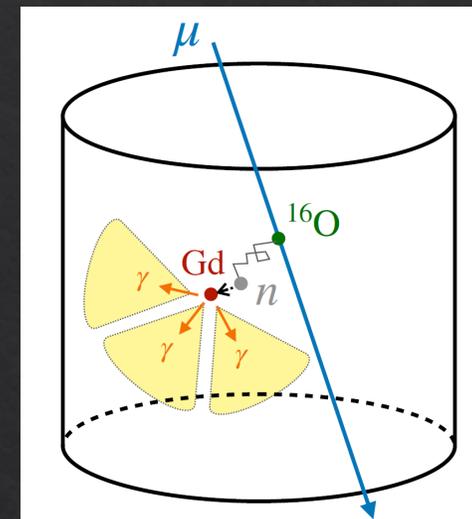
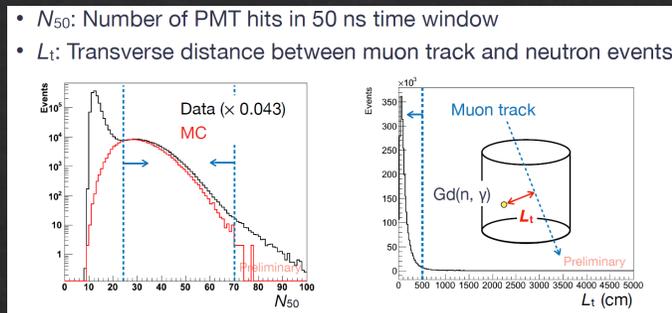
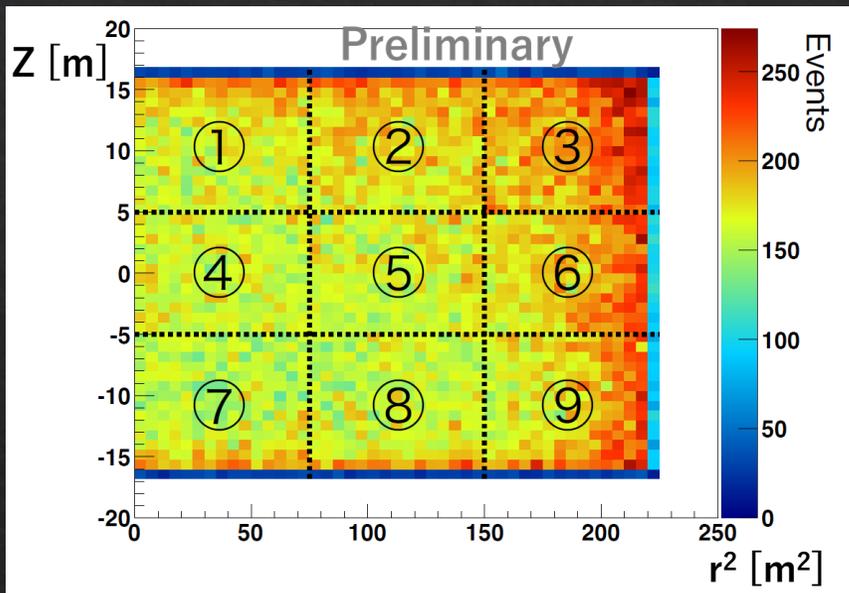


SK-VI 106日(Gd導入後)



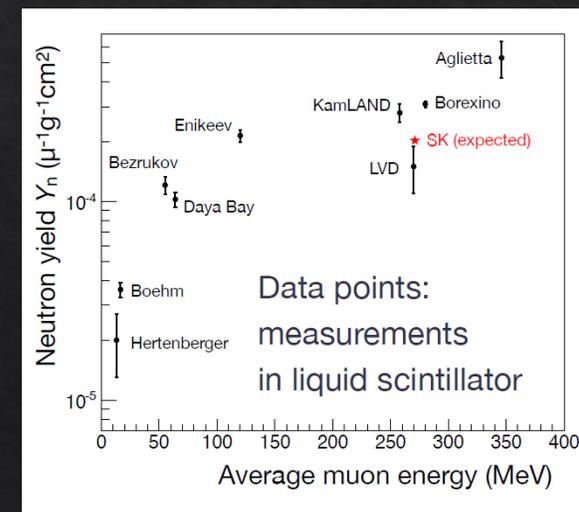
宇宙線 μ による酸素原子核破砕中性子

前回学会 篠木さん15pW1-3



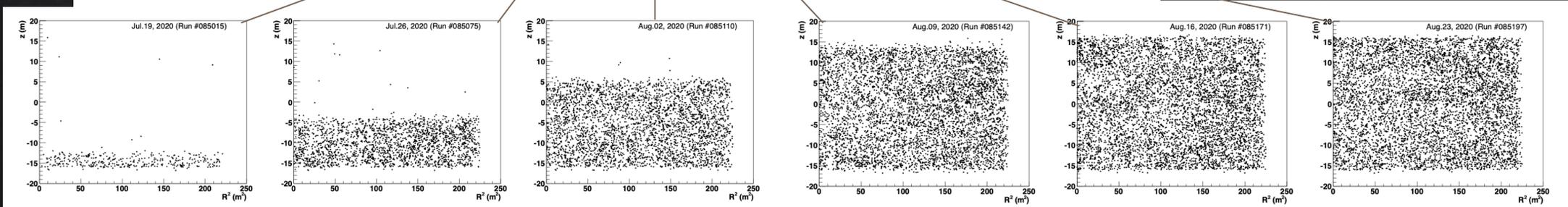
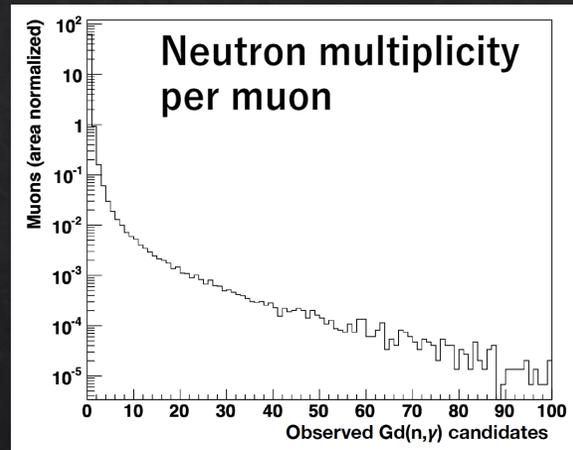
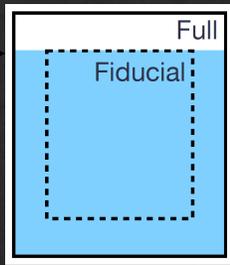
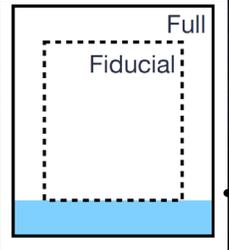
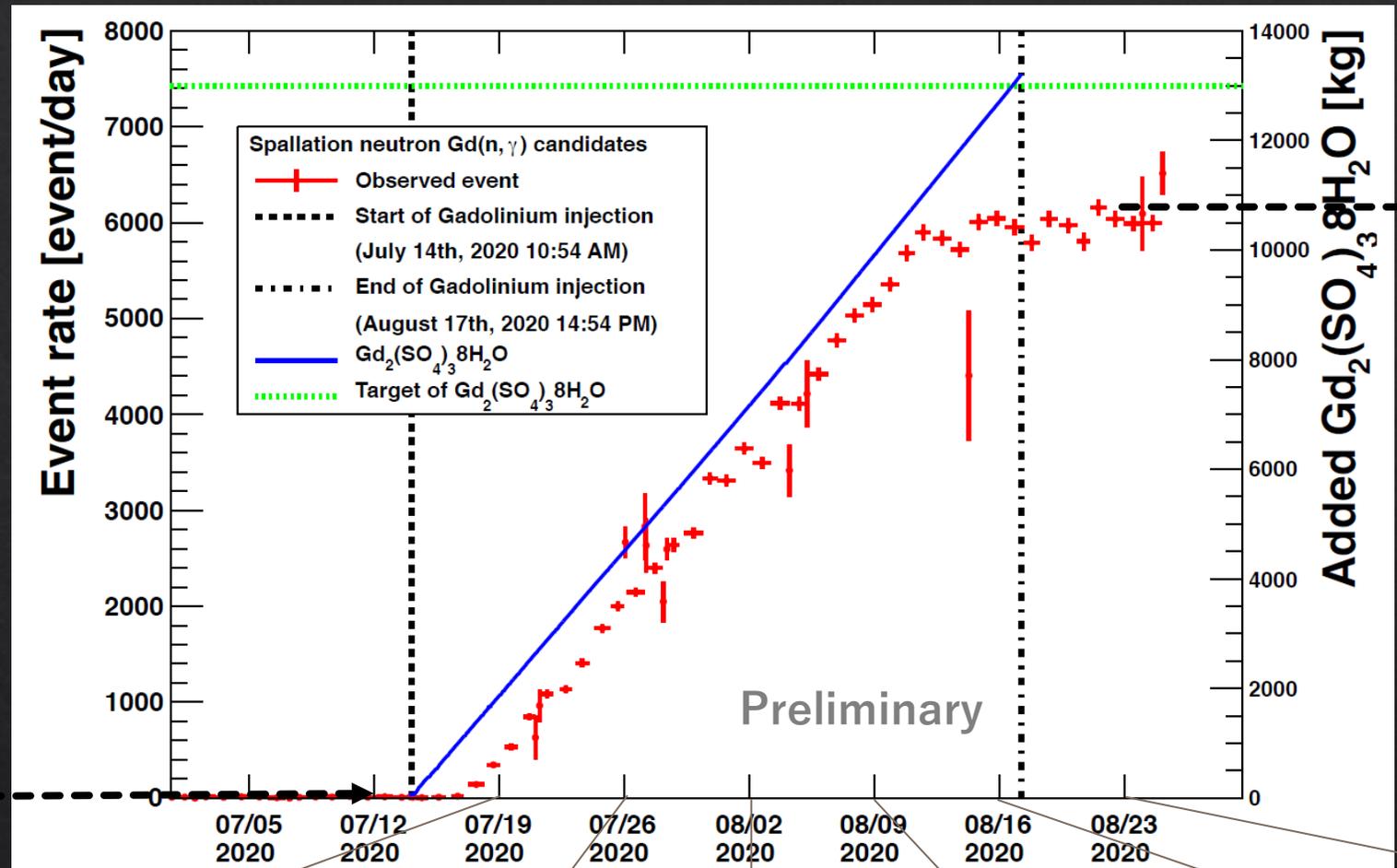
S.Li and J.Beacom, Phys. Rev. C 89, 045801 (2014)

Isotope	Half-life (s)	Decay mode	Yield (total) ($\times 10^{-7} \mu^{-1} g^{-1} cm^2$)
n			2030



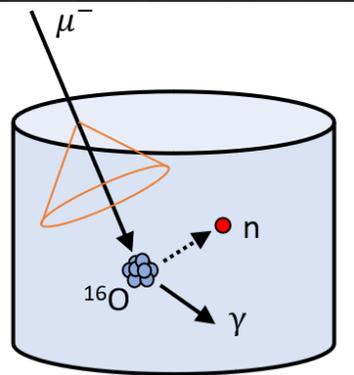
SKタンク全体に渡ってGdによる中性子捕獲時定数が一様であること確認

Gd導入時の核破砕中性子イベントレート



酸素原子核の μ 捕獲由来の中性子による検出効率

- ◇ ≥ 3 MeV の脱励起ガンマ線を伴う過程では $\sim 98\%$ で中性子を1個出す(残りの2%は中性子2個)
Nucl. Phys. A 408, 573 (1983), Physics Reports 354, 243 (2001)



候補事象中で真に脱励起ガンマ線を伴う事象数は
 $11053 - 3374 - 215 = 7464.$ ← 発生した中性子数
 候補数 崩壊電子 ノイズ

- ガンマ線の候補事象中で、SK の中性子検出ツール (JPS 2021年3月講演番号12aT2-4 参照) により 3718 個の中性子信号が検出された。
- 捕獲時間の分布の exponential フィットにより、偽信号を除いた真の中性子信号数を 3367 と推定。

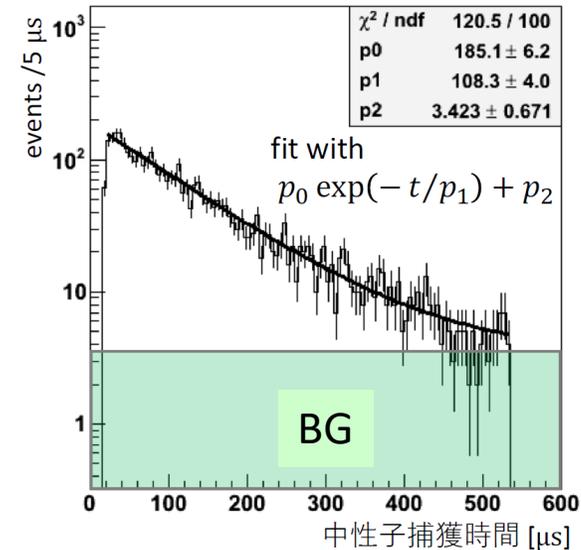
→ 中性子検出効率 = $\frac{3367}{7464} = 45.1\%$

- 系統誤差も見積もり、中性子検出効率を

$45.1^{+2.4}_{-3.7}\%$

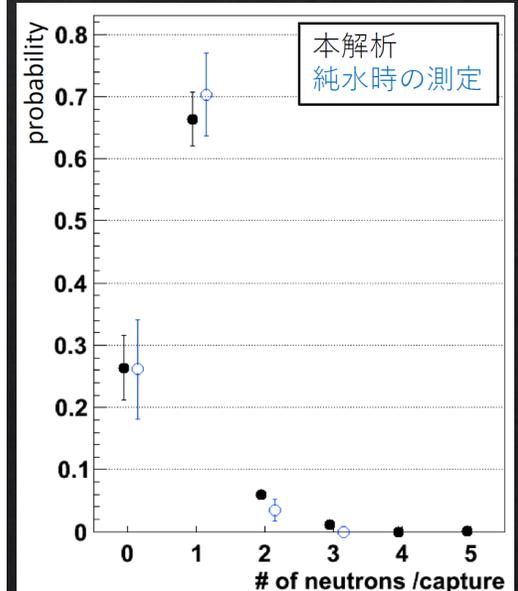
と測定した。

- AmBe 中性子線源による較正では $41 \sim 44 \pm 4\%$ (位置依存性あり) であり、比較して妥当な値が得られている。



系統誤差要因	不確かさ	相対誤差
崩壊電子混入数の見積もり	-2.3%	-5.2%
定常ノイズの見積もり	-1.3%	-2.9%
中性子捕獲時間フィット	$\pm 2.4\%$	$\pm 5.4\%$
中性子2個が生じる反応	-0.5%	-1.2%

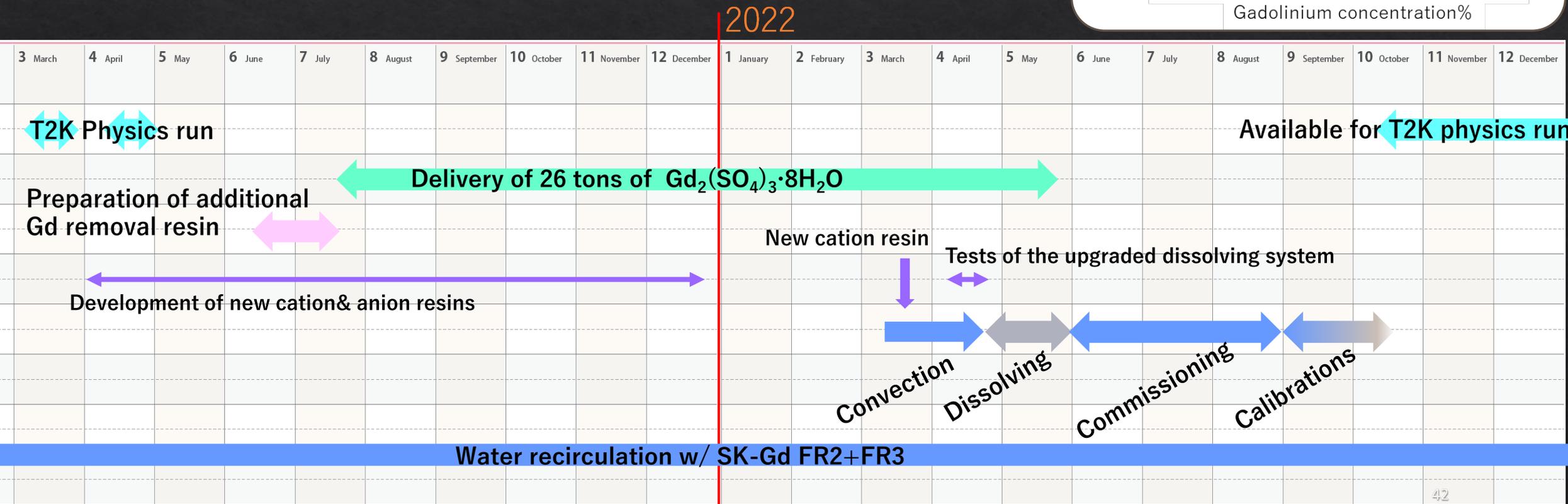
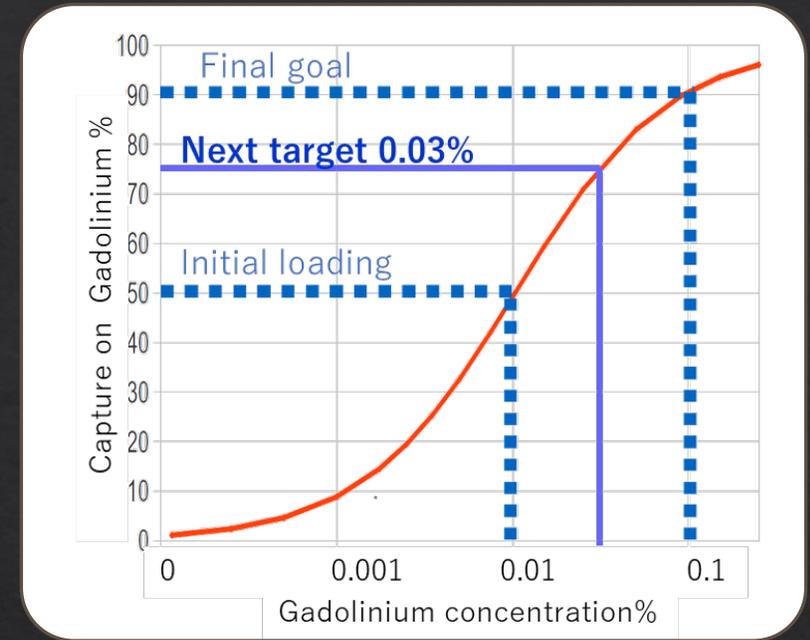
μ 捕獲反応における
放出中性子数分布
も初測定



今後の計画

2022年5月 追加で ~26 tons $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ を導入する計画

- Gd 濃度 0.03% (現状 0.011%)
- 中性子捕獲効率: 75% (現状 ~50%)



Gd₂(SO₄)₃·8H₂O 続々入荷中



◇ 入手できる原料の質が悪化したが、純化プロセスを追加することで以前より均質の硫酸ガドリニウムが実現している

	U-238 early	U-238 late	Th-chain Ac-228 (=Ra-228)	Th-chain late	U-235 early	U-235 late
210301 New Gd ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	<2.8	<0.36	<0.28	<0.10	<1.44	<1.88
190302 For first loading	<9.8	<0.32	<0.35	<0.29	< 0.42	< 0.92



実験終了の準備(Gd回収樹脂)

230m³のカチオン交換樹脂

20tトラック 2台 × 1週間 で名古屋港から運搬 (2021年8月第1週)



まとめ

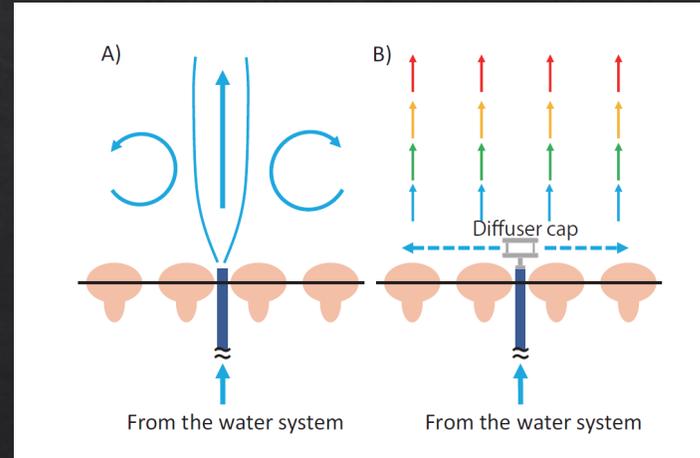
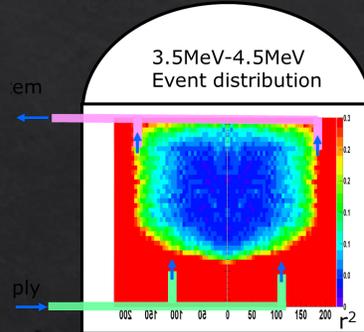
- ◇ 四半世紀純水で観測してきたSuper-Kamiokandeに硫酸ガドリニウムを入れた
 - ◇ SK-Gd開始から1年経過、中性子タグによる検出器理解が進みGd濃度は一様であること確認
- ◇ Super-Kamiokandeに硫酸ガドリニウムを溶かすのは大変
 - ◇ 本当はそれぞれのページを30分間話さないと伝わらない
 - ◇ 天文でも物理でもなく、化学(有機・無機化学、放射化学)が主に必要
 - ◇ 生物も必要、法律、政治、経済も
- ◇ 2022年5月に中性子捕獲効率75%を実現し、
 - ◇ 長期観測による超新星背景ニュートリノ初検出をめざす。
 - ◇ 銀河内で重力崩壊型超新星爆発が起きた場合は方向情報を伴ったアラートを準備 (Guillaume 14aW1-7)

Thank you !

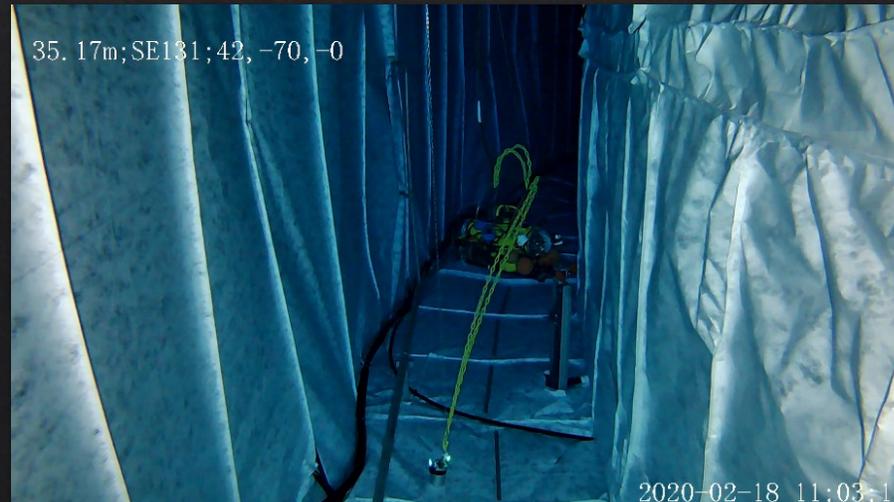
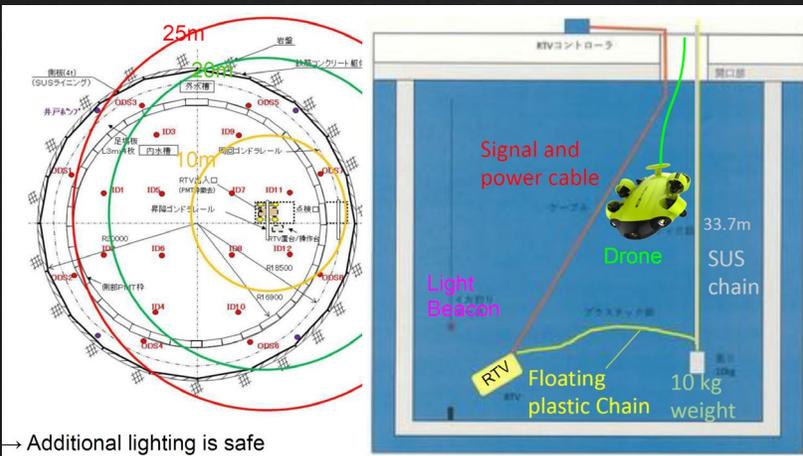
IDタンク底水出口配管形状の変更 (2020. Feb)

◇ 循環量を120m³/hに倍増するにあたり、水の勢いを抑制する必要があった。

◇ 対流で、タンク底のRnを巻き上げるのを避ける



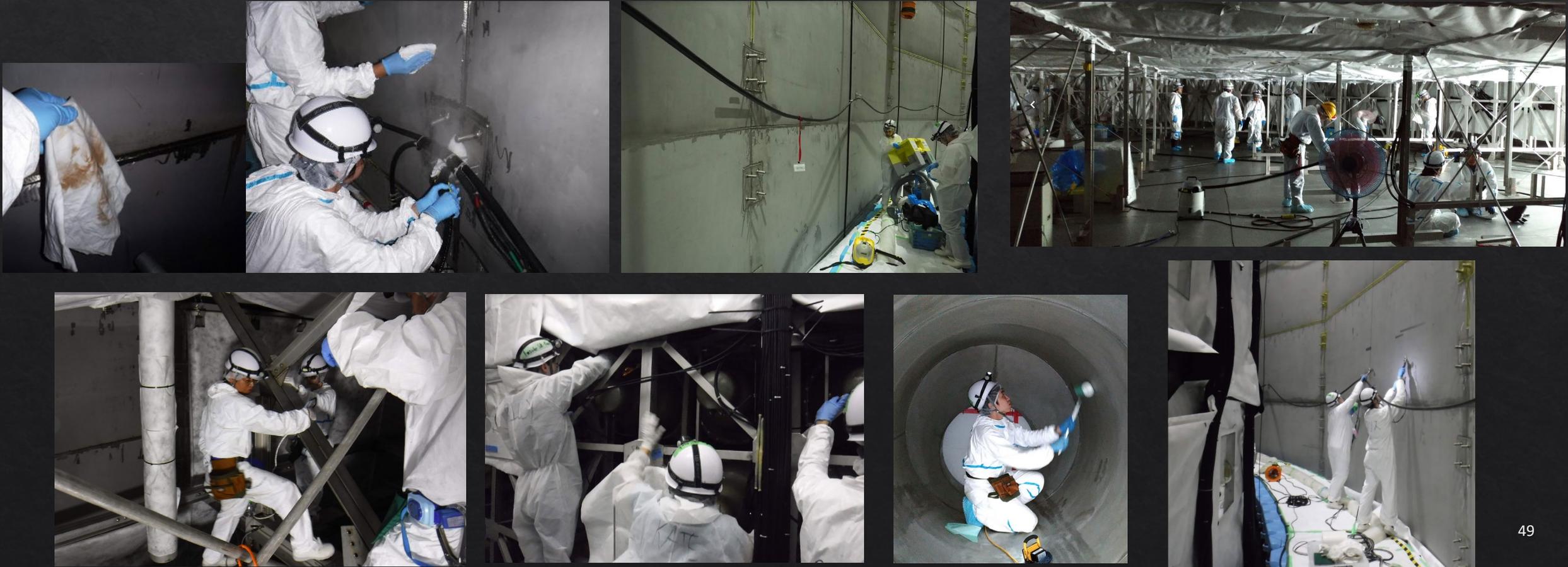
◇ 潜水ロボットでCapをかぶせた



大掃除

◇ 世界中のコラボレータ+ボランティアで40mタンクの大掃除

◇ コーディネートが非常に大切



硫酸ガドリニウム評価手法1

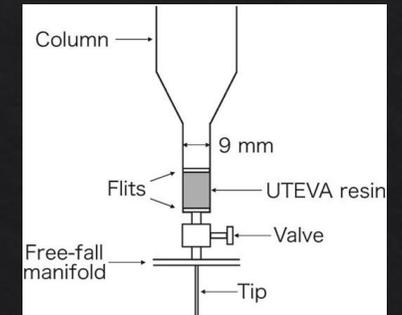
PTEP 2017 113H01

- ◇ ICP-MS: Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry 誘導結合プラズマ-質量分析装置
- ◇ ICPMSの特徴
 - ◇ 高精度で測定できる: Th/Uは25ppt
 - ◇ Geでは測定が難しい寿命の長い元素に感度が出る。
- ◇ 高濃度Gd中での分析の困難
 - ◇ 目的物質(Th/U)よりも高濃度の物質(Gd)によって、イオン化が妨害されると感度が下がる:マトリックス効果
 - ◇ 目的物質に近い質量をもつ多原子イオンによる干渉



化学分離により、Th/Uを硫酸ガドリニウムから取り出す必要がある

- ◇ 高機能選択樹脂を用いた化学分離。
 - ◇ Gdを1/50に減らすことに成功。
 - ◇ U/Thを90%以上回収することに成功



硫酸ガドリニウム評価手法2

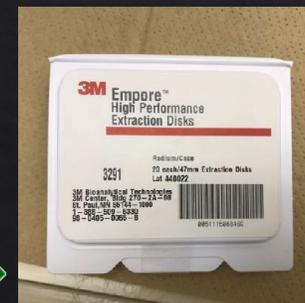
◇ Ge検出器

PTEP 2020 093H02

- ◇ 寿命の短い元素に感度が出る。
- ◇ 検出器自体のBGが低くなければいけない
- ◇ 測定に時間がかかる 1サンプル~2週間



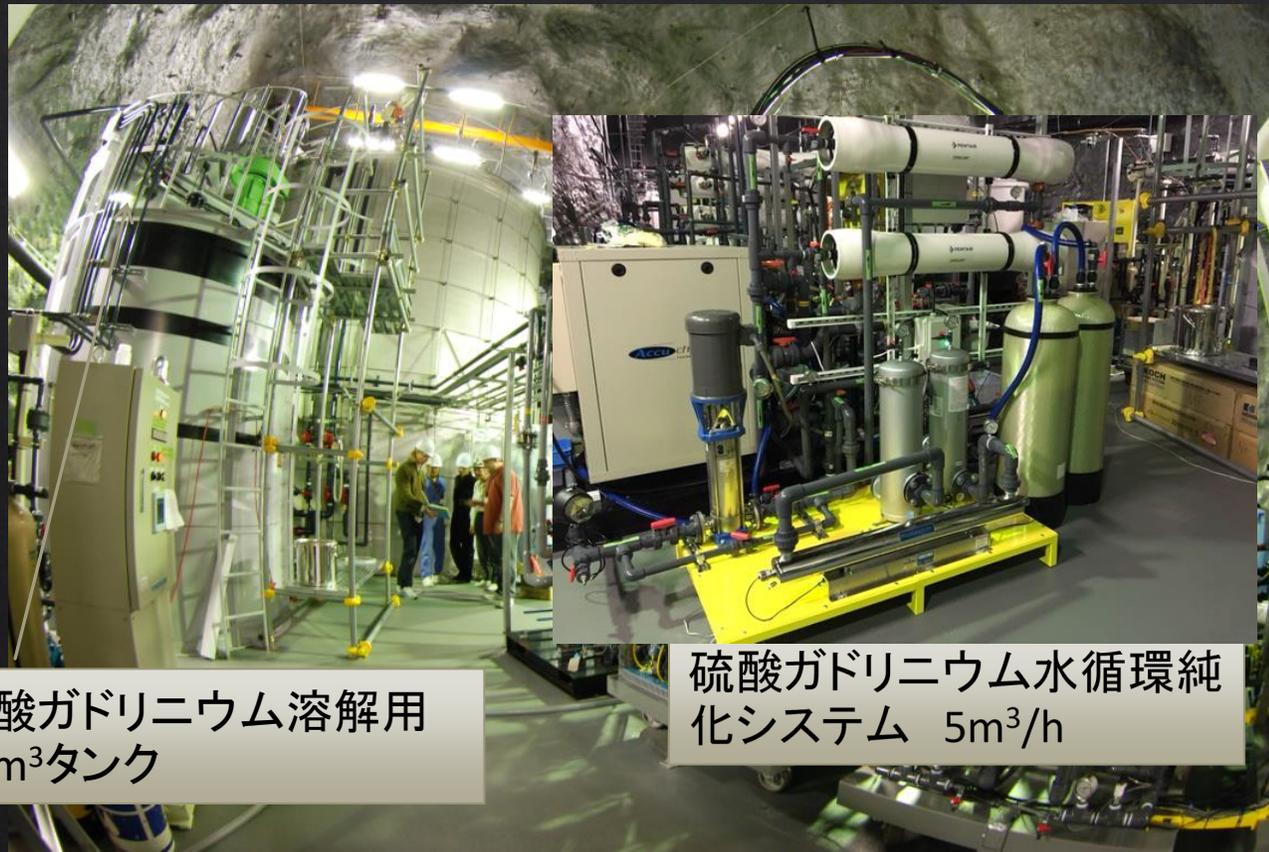
- ◇ ICP-MS同様濃縮が必要 Ra濃縮により~0.5mBq/kg
- ◇ 低バックグラウンドGe検出器の開発
- ◇ 神岡だけでなく、世界の地下実験施設とGe検出器の協力
 - ◇ スペイン Canfranc
 - ◇ イギリス Boulby



EGADS

Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems

- ◇ 200トンのMini Kamiokandeを建設して完全にsimulation. SUS frame, PMT and PMT case, black sheets, etc. すべてSKと同じ



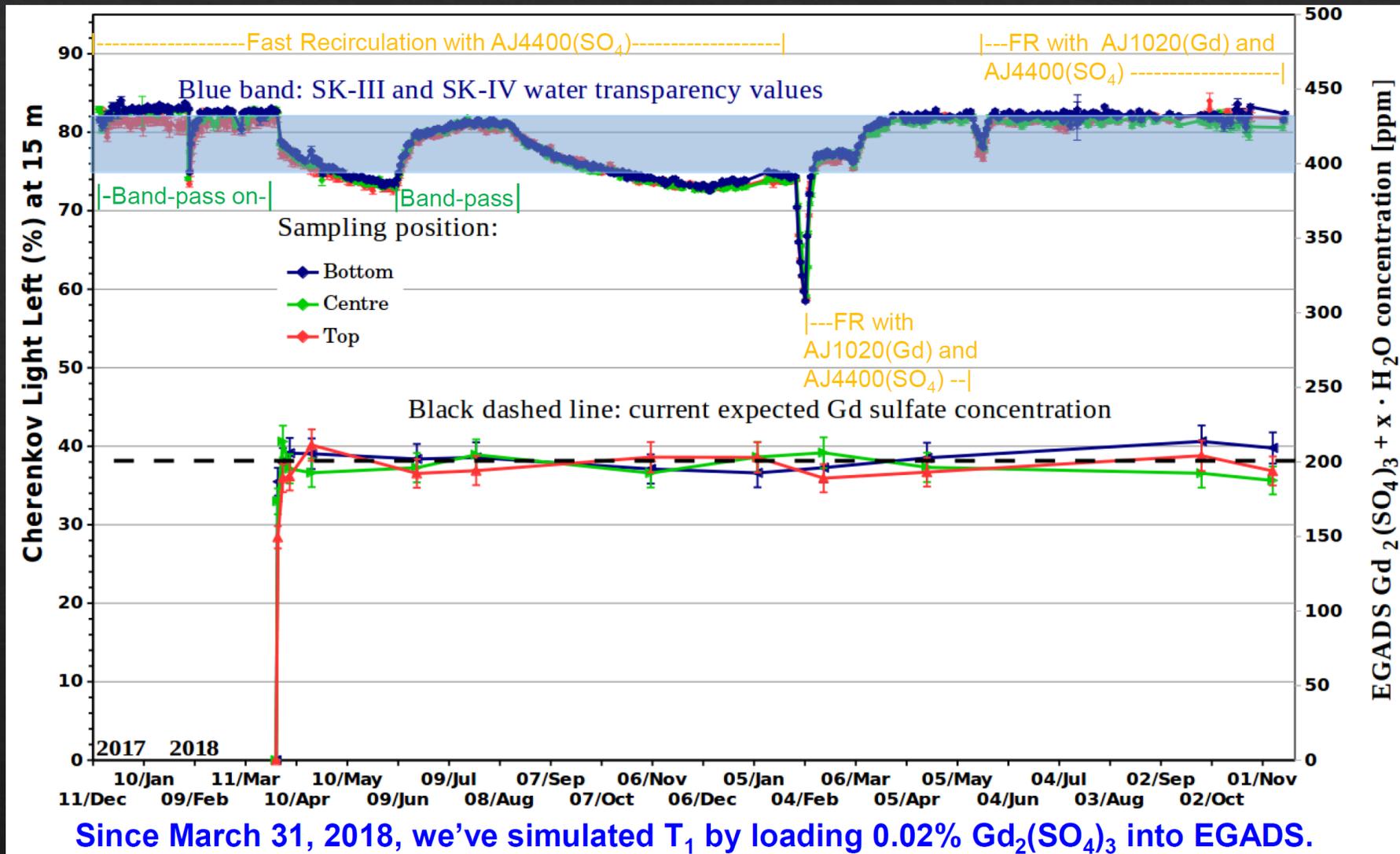
硫酸ガドリニウム溶解用
15m³タンク

硫酸ガドリニウム水循環純
化システム 5m³/h



200 m³ tank with 240 PMTs

EGADS水透過率とGd濃度



◇ 硫酸ガドリニウム濃度を保ったまま超純水と同レベルの水透過率を確認