

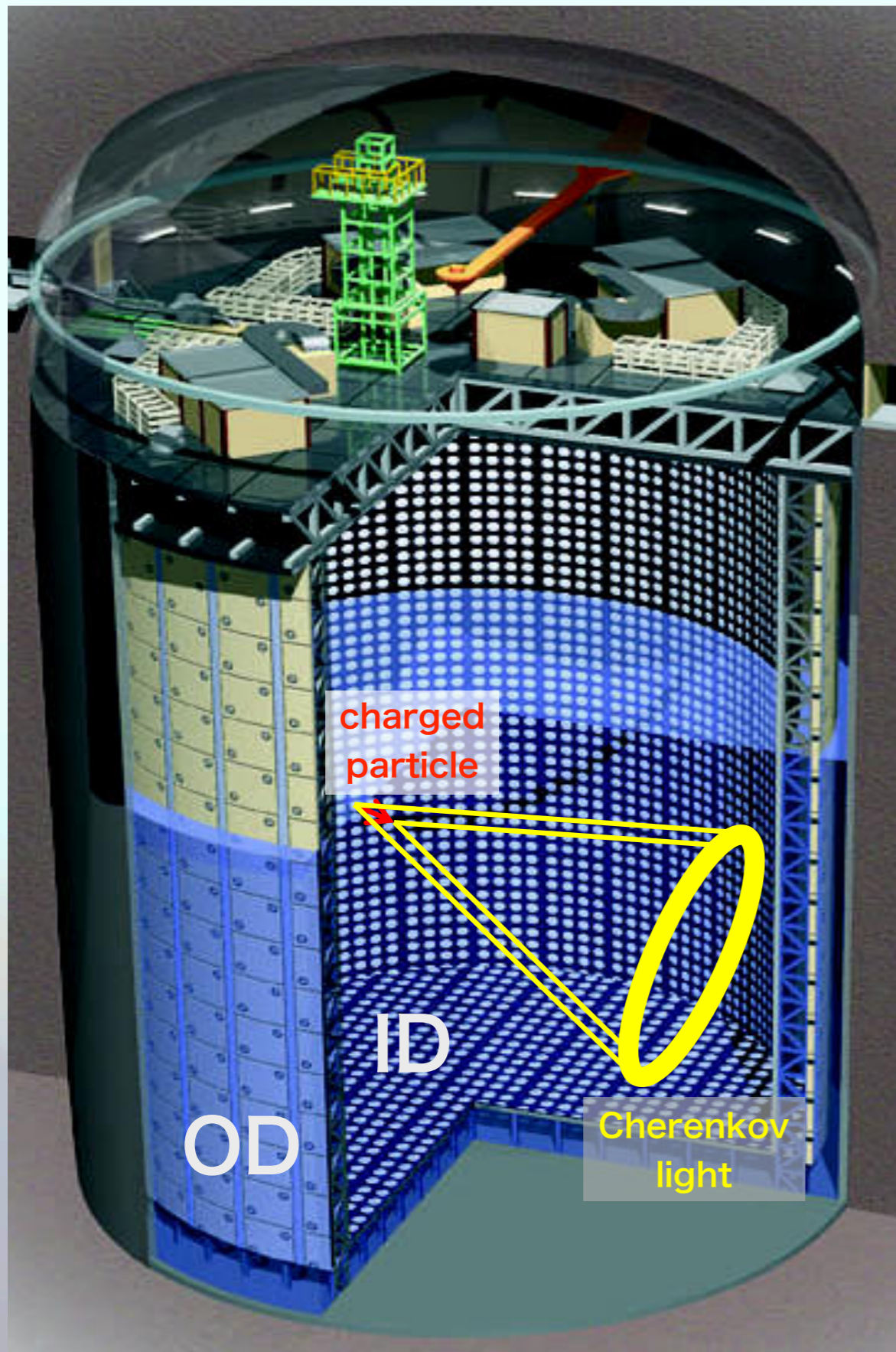
SK-Gdの Gd追加導入と現状

東京大学 宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設

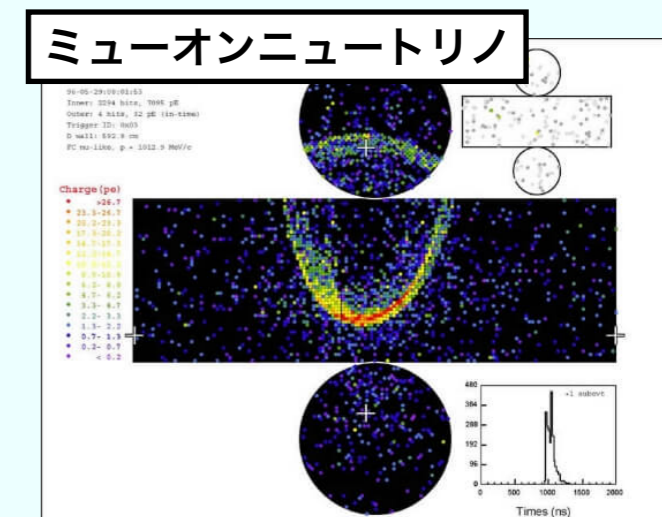
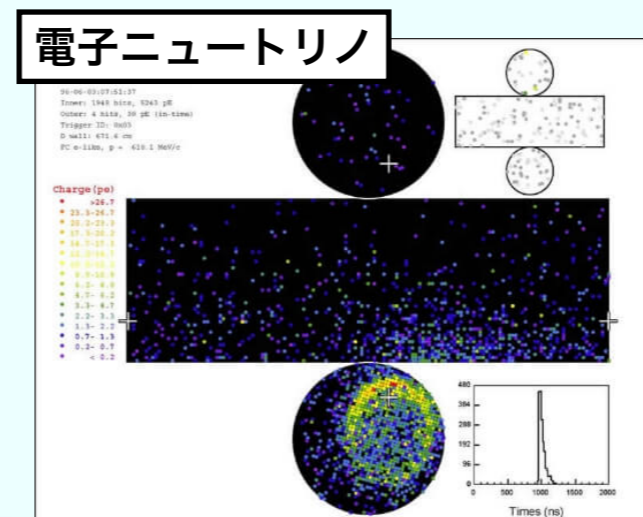
細川 佳志



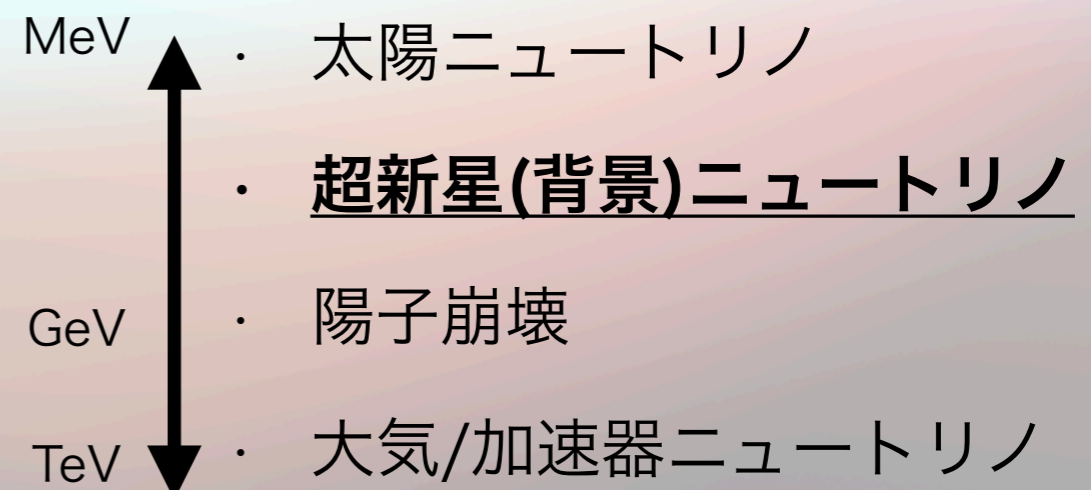
スーパーカミオカンデ (SK)



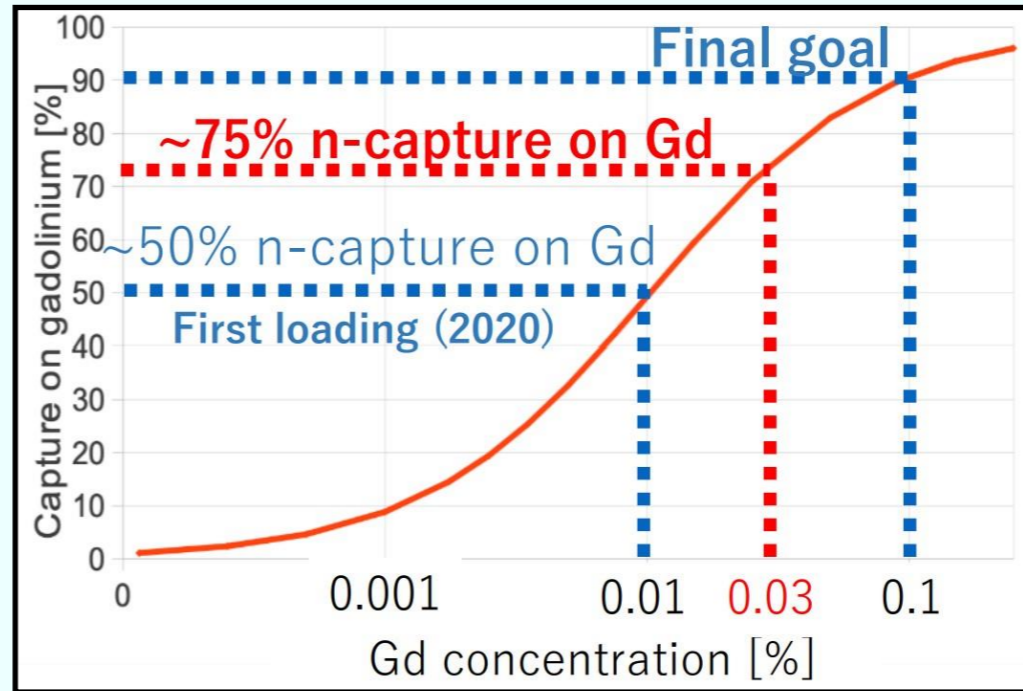
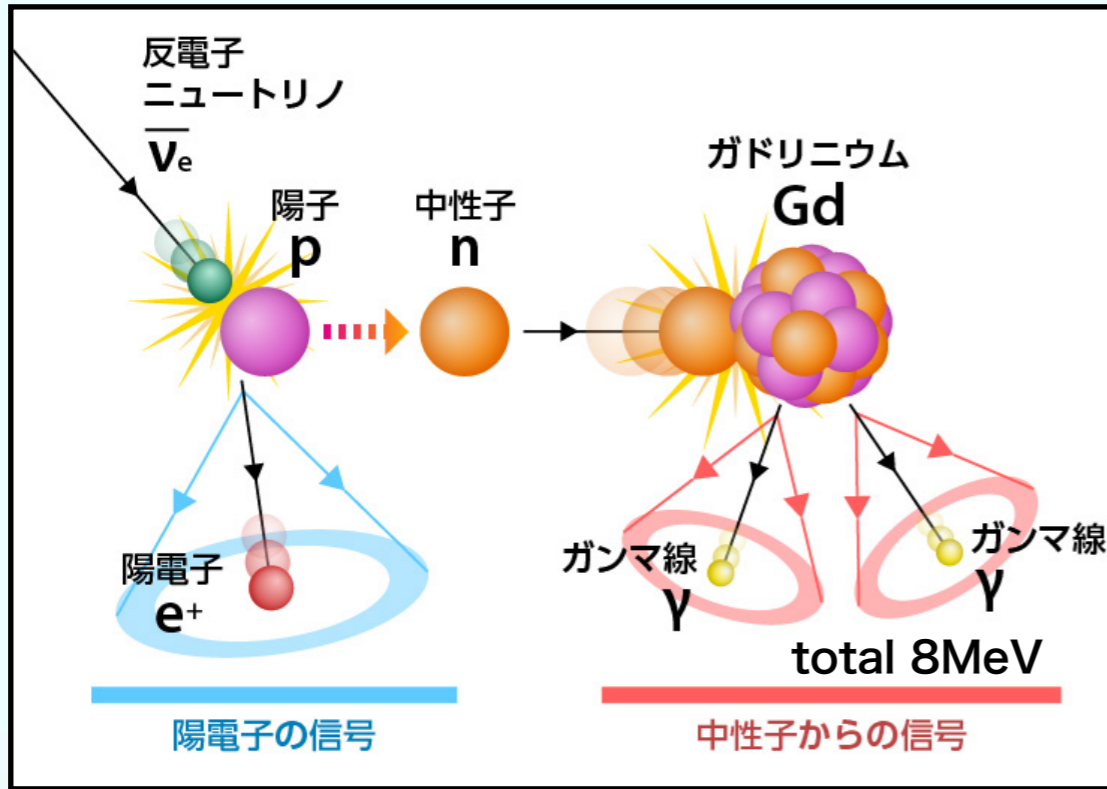
- 50ktonの大型水チェレンコフ検出器
 - 神岡地下1000m (2700m.w.e)
 - 内部検出器：11129個の20inch PMT
40%の光電被覆率 (SK-II 除く)
 - エネルギー, ニュートリノタイプ, 到来方向



- 幅広いエネルギー領域に対応

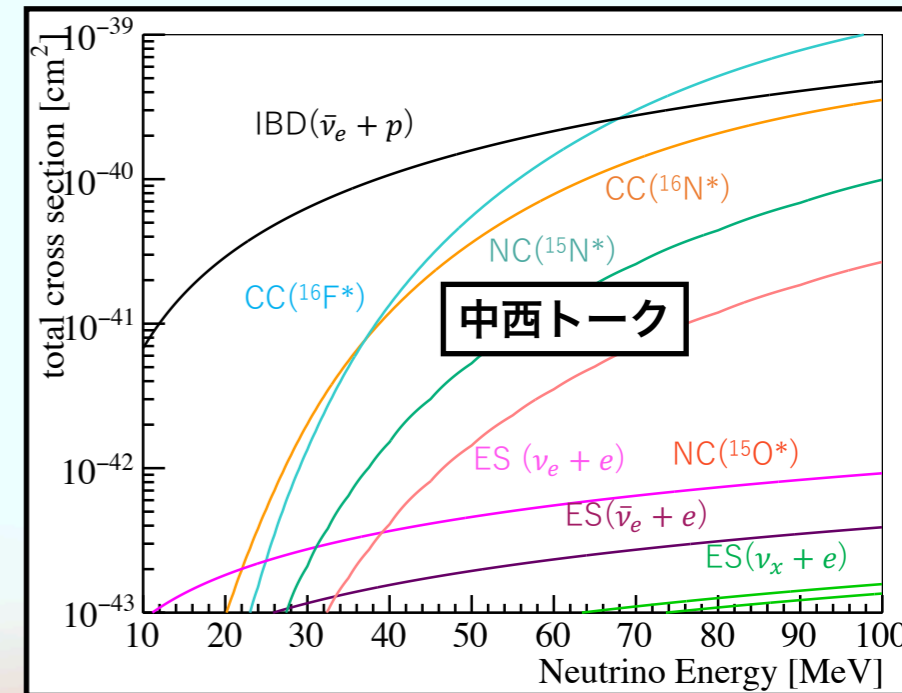


スーパーカミオカンデ-ガドリニウム (SK-Gd)



高い熱中性子捕獲効率

Isotope	Natural abundance ratio [%]	Thermal capture cross section [barn]
¹⁵² Gd	0.20	740
¹⁵⁴ Gd	2.18	85.8
¹⁵⁵ Gd	14.80	61100
¹⁵⁶ Gd	20.47	1.81
¹⁵⁷ Gd	15.65	254000
¹⁵⁸ Gd	24.84	2.22
¹⁶⁰ Gd	21.86	1.42
¹ H	99.99	0.33
¹⁶ O	99.76	0.0002
³² S	94.85	0.53



・ 硫酸ガドリニウム・8水和物 ($Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$)を

溶解させSKにGdを導入 (2020年7月から0.011%Gd)

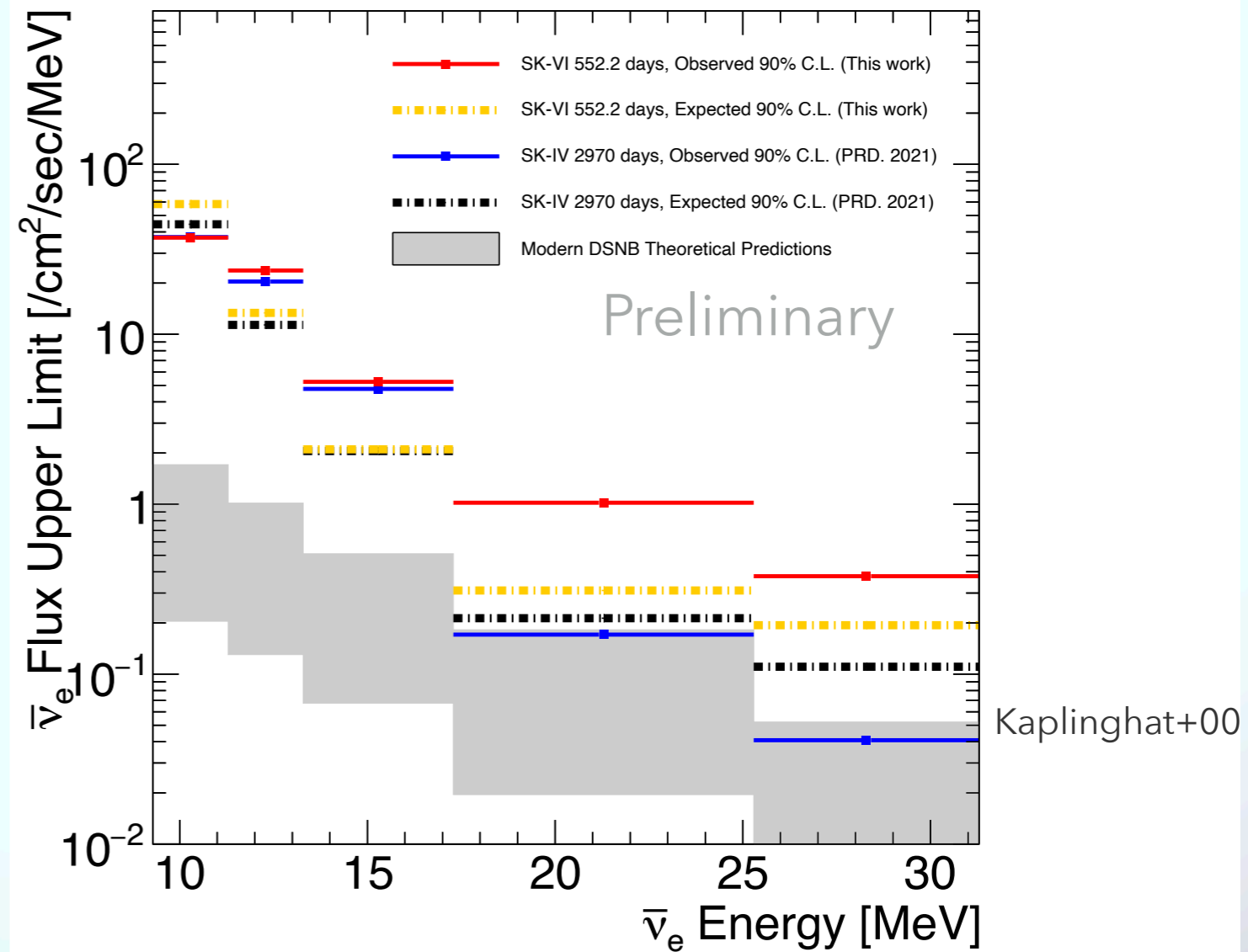
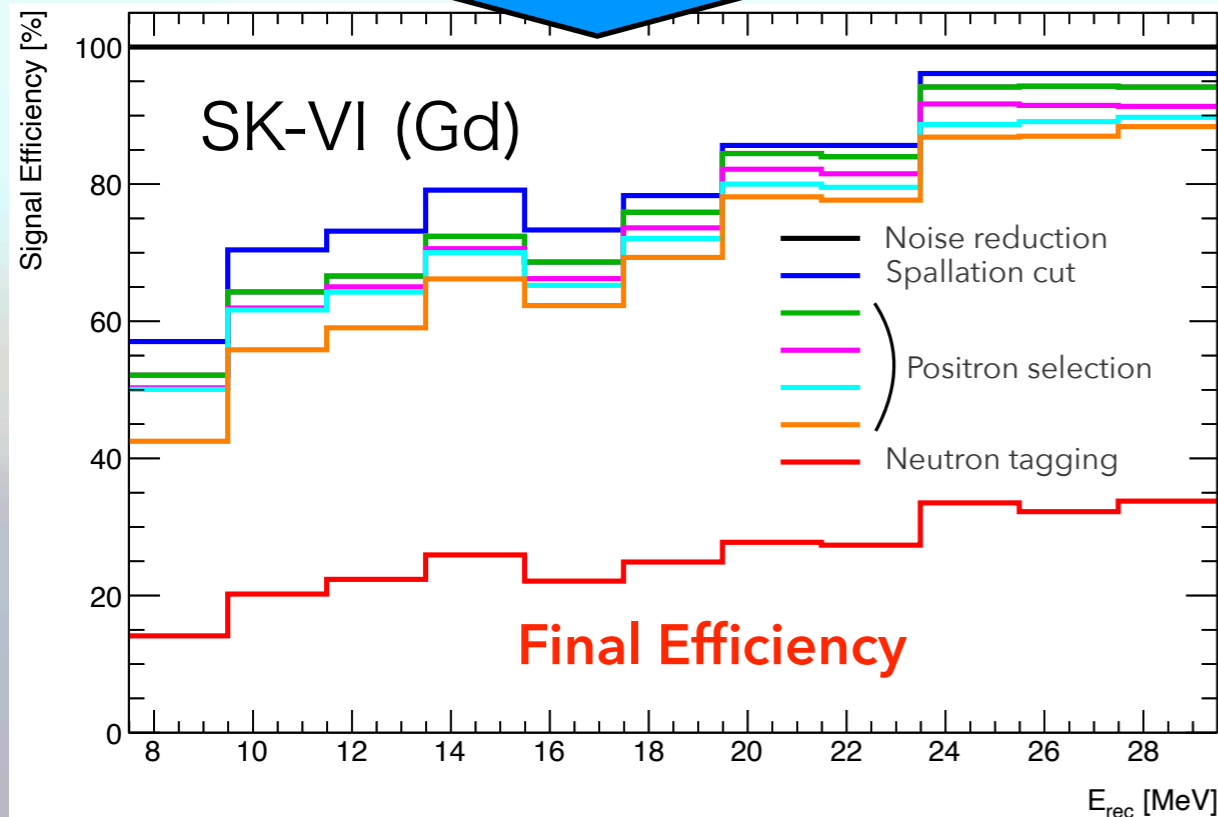
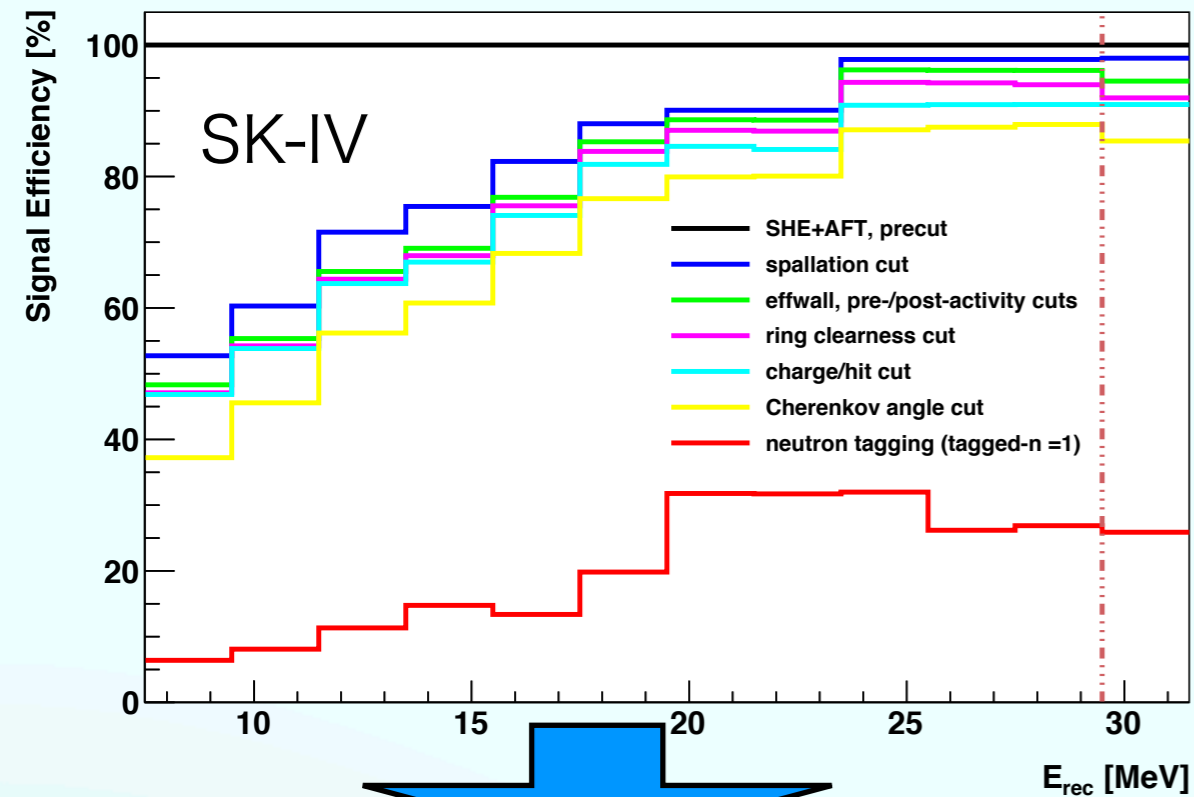
- 中性子検出効率向上により、信号検出/背景事象除去効率向上

・ DSNB初検出, 近傍SN位置分解能向上, 陽子崩壊BG除去 等を狙う

SK-Gd(0.011%)での探索状況

Preliminary

原田氏報告

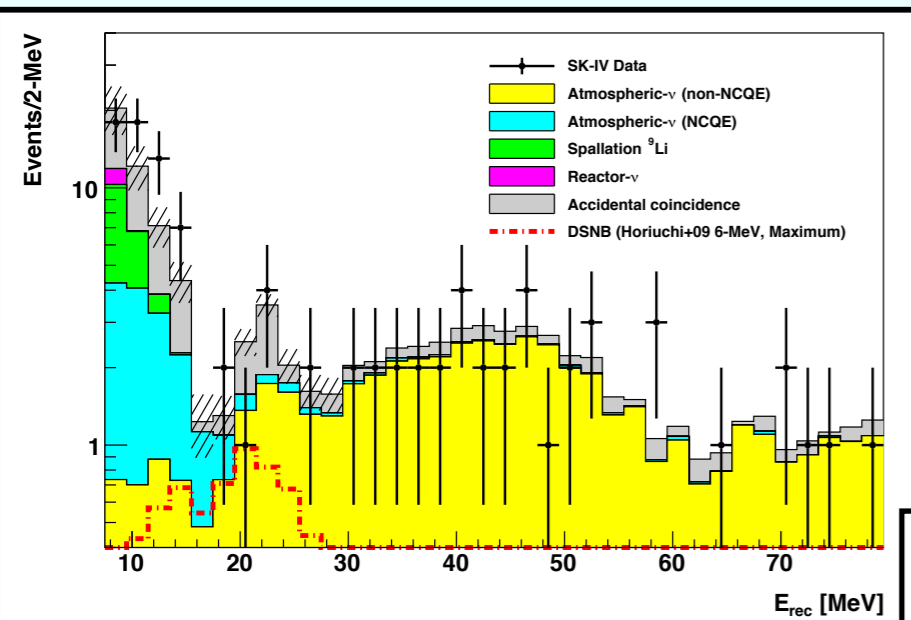


- ▶ Gd導入で中性子検出効率向上し
約2倍のsignal efficiencyを達成
- ▶ 既にSK-IVと同程度の感度達成
- ▶ Gd濃度を高めて検出効率を更に上げる

SK-Gd(0.011%)での探索状況

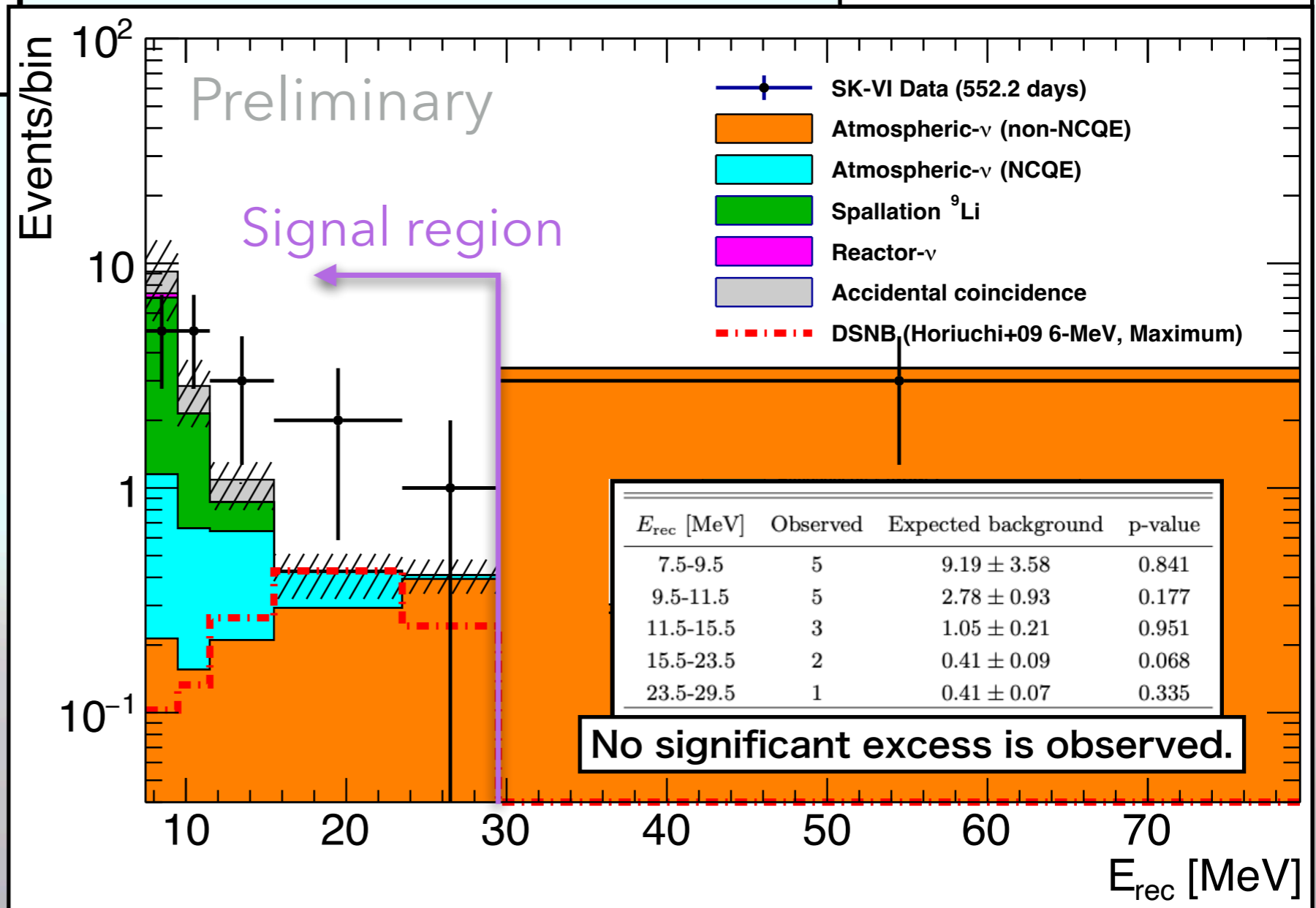
Preliminary

原田氏報告

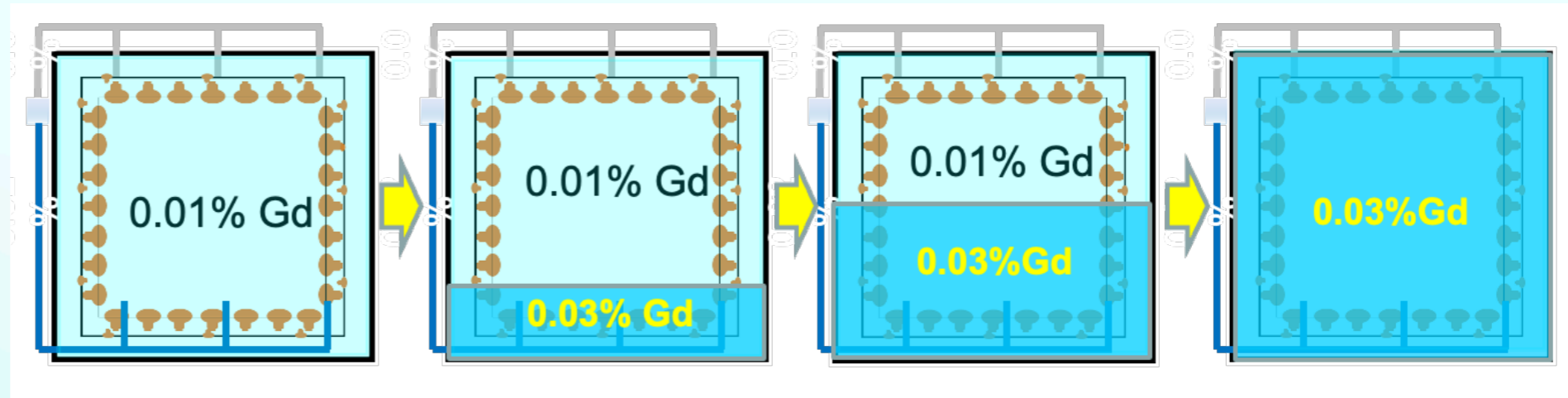
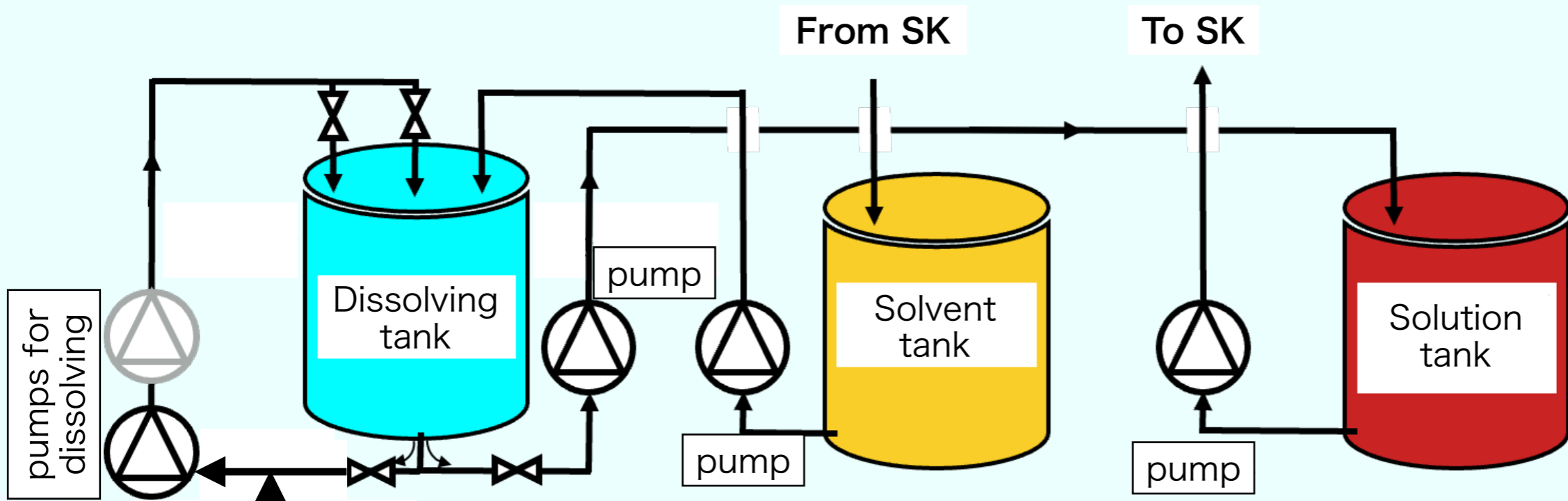


SK-IV(純水)

SK-VI(0.011% Gd)



Gd loading Procedure



硫酸Gd量 Gd濃度

2020/07

13ton

0.0111%

2022/06

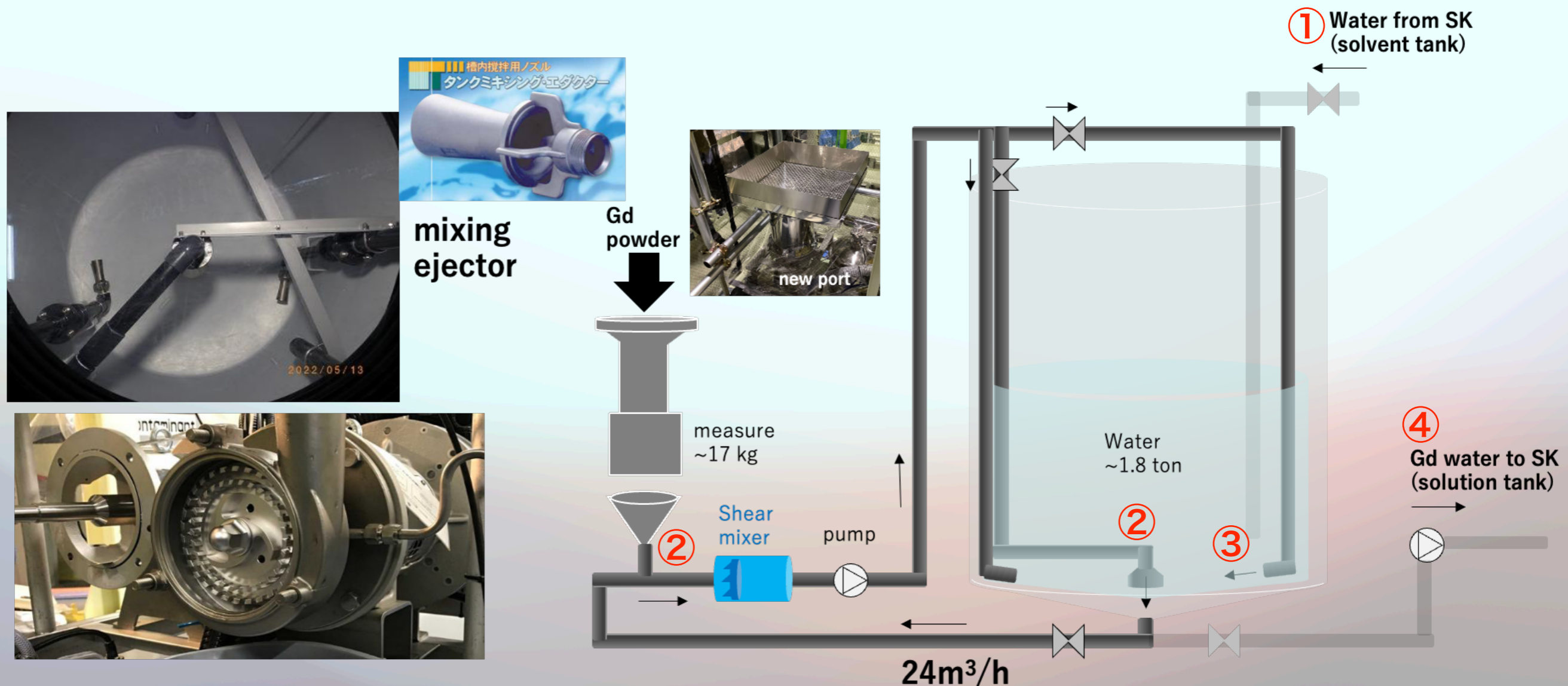
27ton

0.0333%

- 水温調整による密度差を利用し、SKタンク1巡で硫酸Gdを溶解
- 2022/06の導入は倍のペースが必要
- 硫酸Gd溶液は純化後、SKタンクに送液

Gd dissolving system upgrade

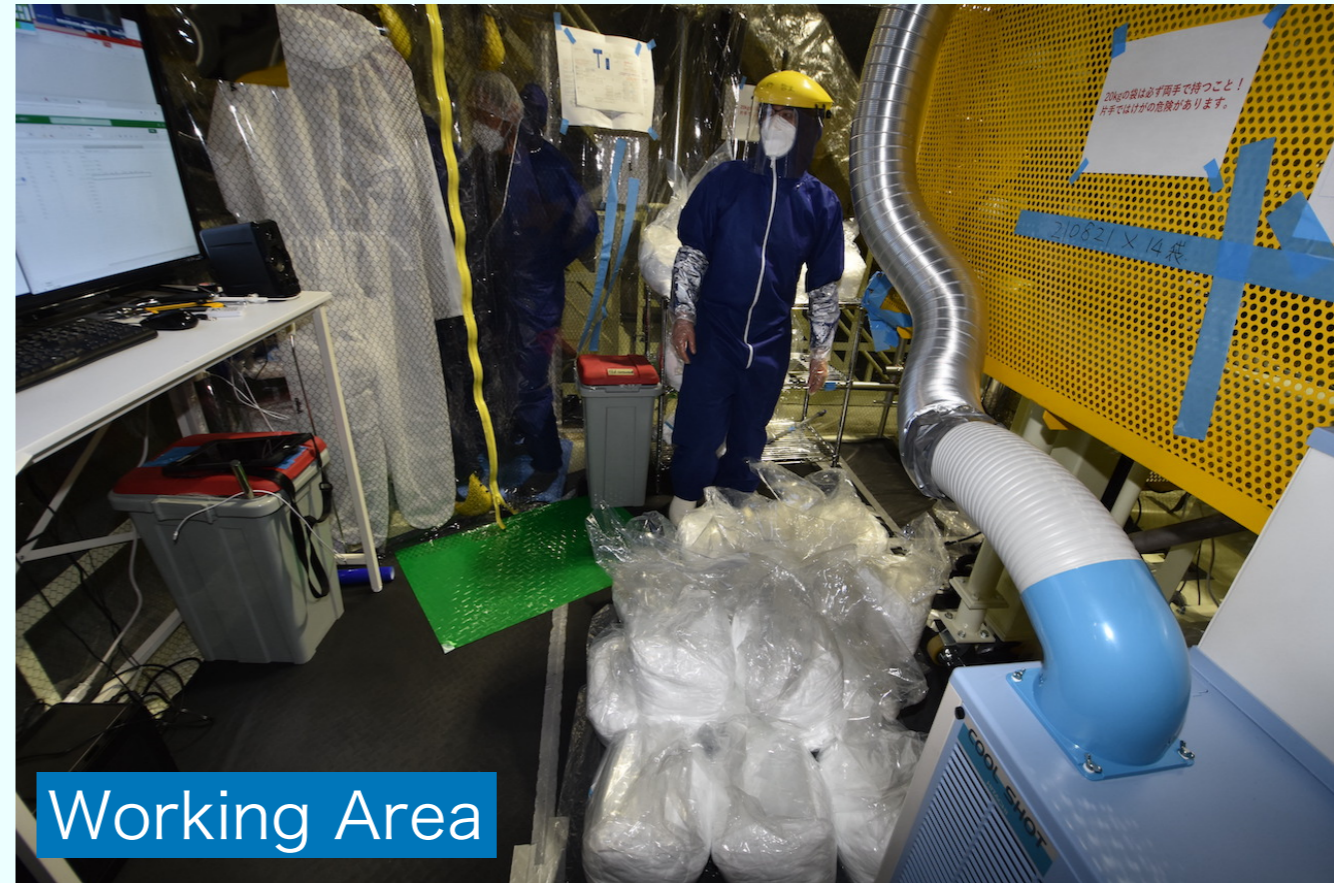
- ▶ 倍ペースでの導入のためにシステムを改造
 - 溶解タンクに張る水量を増加 (~0.9 ton→~1.8 ton)
 - シャーポンプで効率的に溶解するためのライン(②)を追加
 - 溶解タンク底部に硫酸Gdを残さない渦生成ライン(③)にイジェクター追加



On-site works



Preparing Gd powder to be dissolved



Working Area



Managing the process



Suppling the Gd powder

On-site works



Beginning of the dissolving work

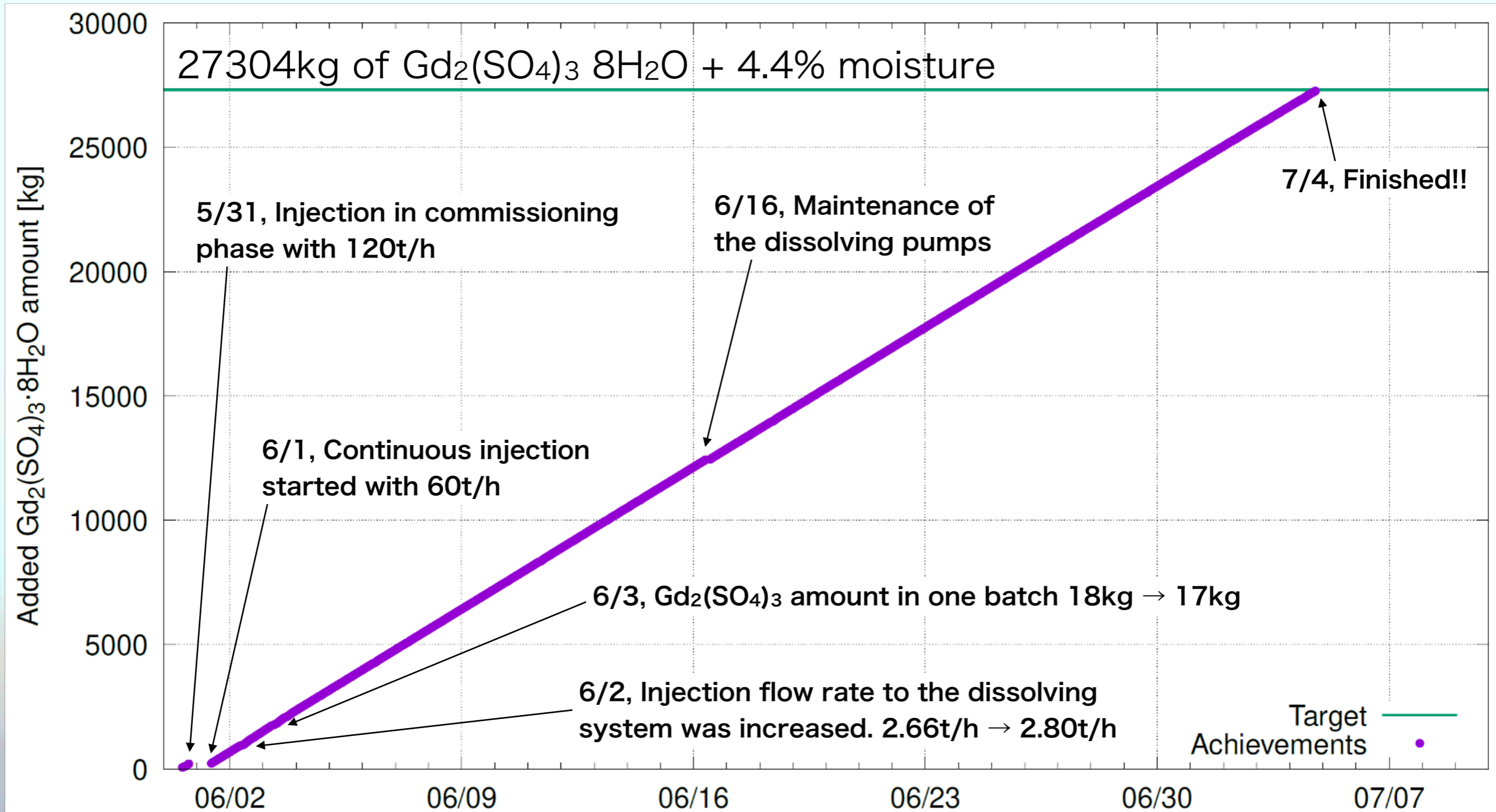


▶ 約1350個の硫酸Gdパックを溶解



End of the dissolving work

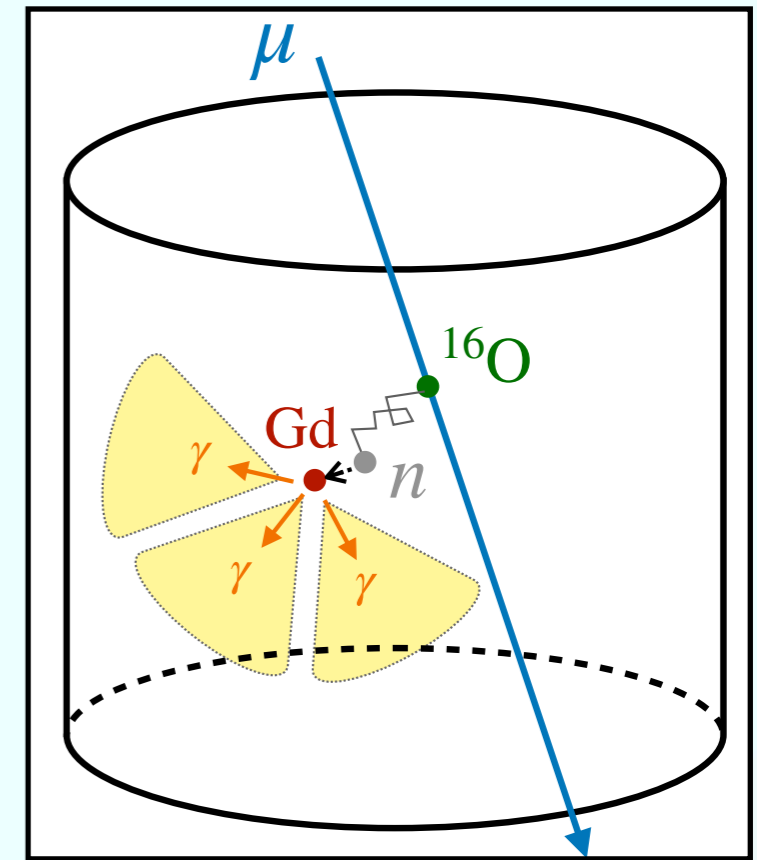
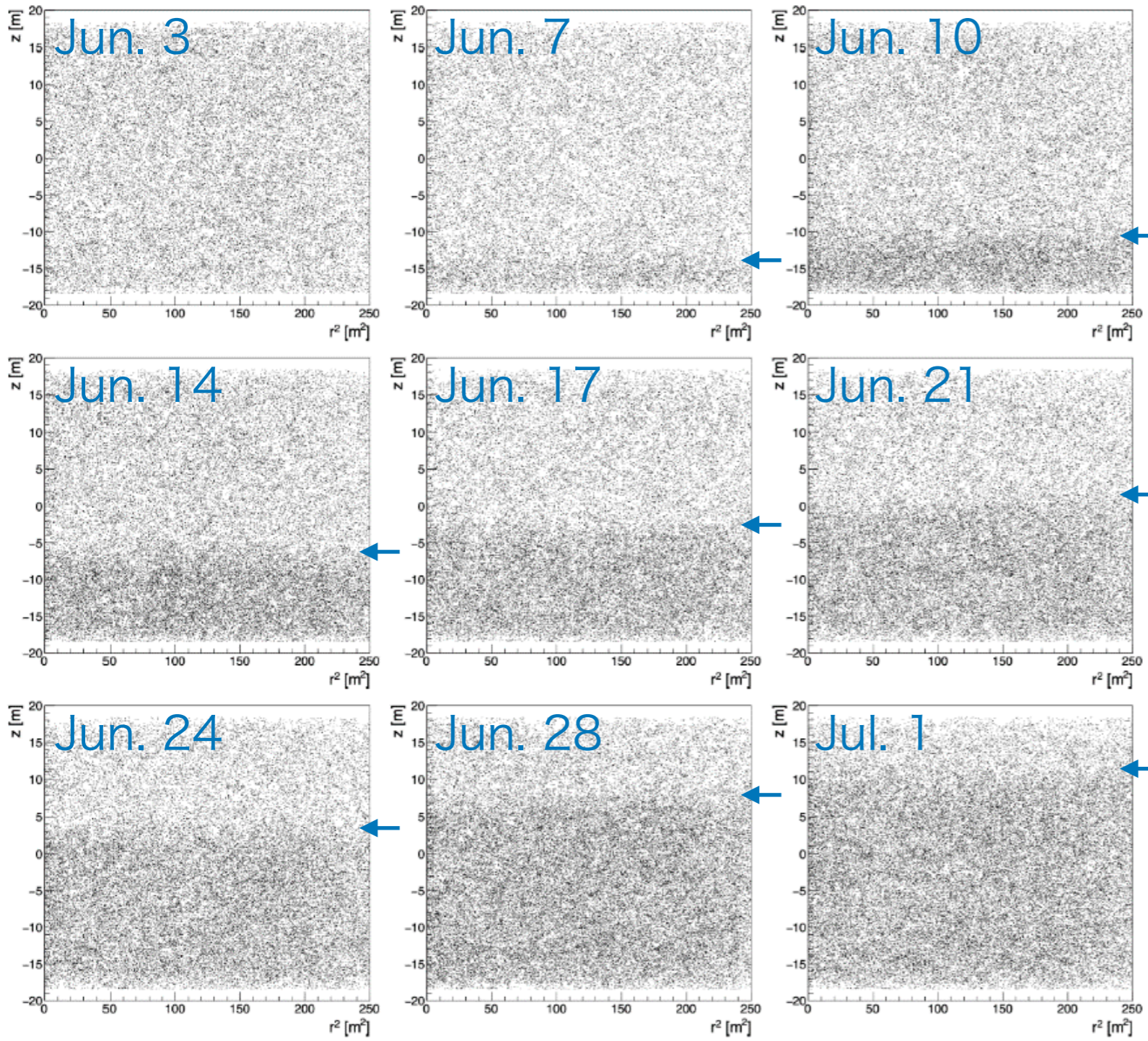
Amount of loaded Gd sulfate



大きな問題なく、36日で27トンの $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ を溶解

ミューオン核破砕事象を用いたGd濃度モニター

ミューオン核破砕による中性子捕獲事象の位置分布



- ▶ タンク底部から徐々に事象頻度が上昇
- 密度差を利用した層を期待通り保持し、効率よく溶解が進んだ

Total Gd amount

preliminary

硫酸Gd粉の重さから濃度計算

Gd amount

Molecular weight

Gd	Gd ₂	Gd ₂ (SO ₄) ₃	Gd ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O
157.25	314.5	602.69	746.81

- ②
- During SK-VI, Drained from the system
 - 11103.7L of 0.0260 % Gd₂(SO₄)₃·8H₂O = 11103.7L of 0.0110% of Gd water = 2.9kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O = 1.2kg of Gd
 - For 2-1,3-2 tank cleaning, Drained from the system
 - 5.5 tons of 0.0260% Gd₂(SO₄)₃·8H₂O water = 5.5 tons of 0.0110% of Gd water = 1.43kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O = 0.605 kg of Gd

SK-VI Lost amount

4.3kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O = 1.8kg of Gd

- ③
- T1.5 Added to the system
 - 27304kg Gd₂(SO₄)₃·8H₂O+4.4% water = 26115kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O
 - After T1.5, Remained in the system
 - 16.1kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O +4.4% water = 15.2kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O
 - After T1.5, Drained from the system
 - 700L of 1% [Gd₂(SO₄)₃·8H₂O+4.4% water] = 6.6kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O

T1.5 Net amount

26093kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O = 10988kg of Gd

① T1 Net amount
13212kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O+2.5% water
12884kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O = 5426 kg of Gd

④ The water in the tank and the water system
=49383000kg

SK-VII Gd amount ① - ② + ③

16412 kg of Gd
31451 kg of Gd₂(SO₄)₃
38973 kg of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O

SK-VII wt% concentration

(① - ② + ③)
/(13212-4.3+27304+49383000)

= 0.0332% Gd
= 0.0636% Gd₂(SO₄)₃
= 0.0789% Gd₂(SO₄)₃·8H₂O

Error~0.5%

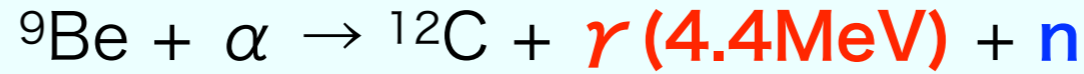
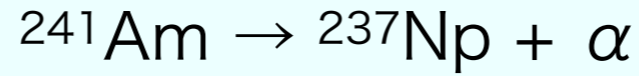
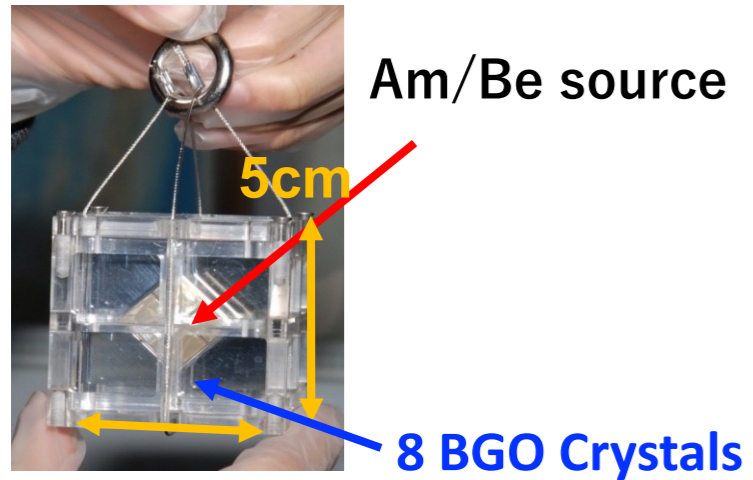
22

他の方法でもGd濃度を測定→誤差の範囲で一致

- サンプルした水を原子吸光分析(AAS) : 329 ± 1 ppm
- AmBe線源を用いた校正 : 327~340 ppm

Am/Be source calibration

preliminary

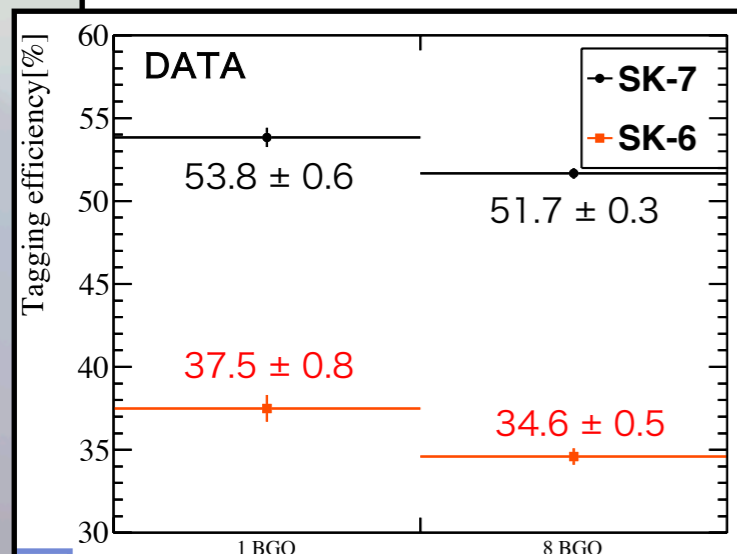
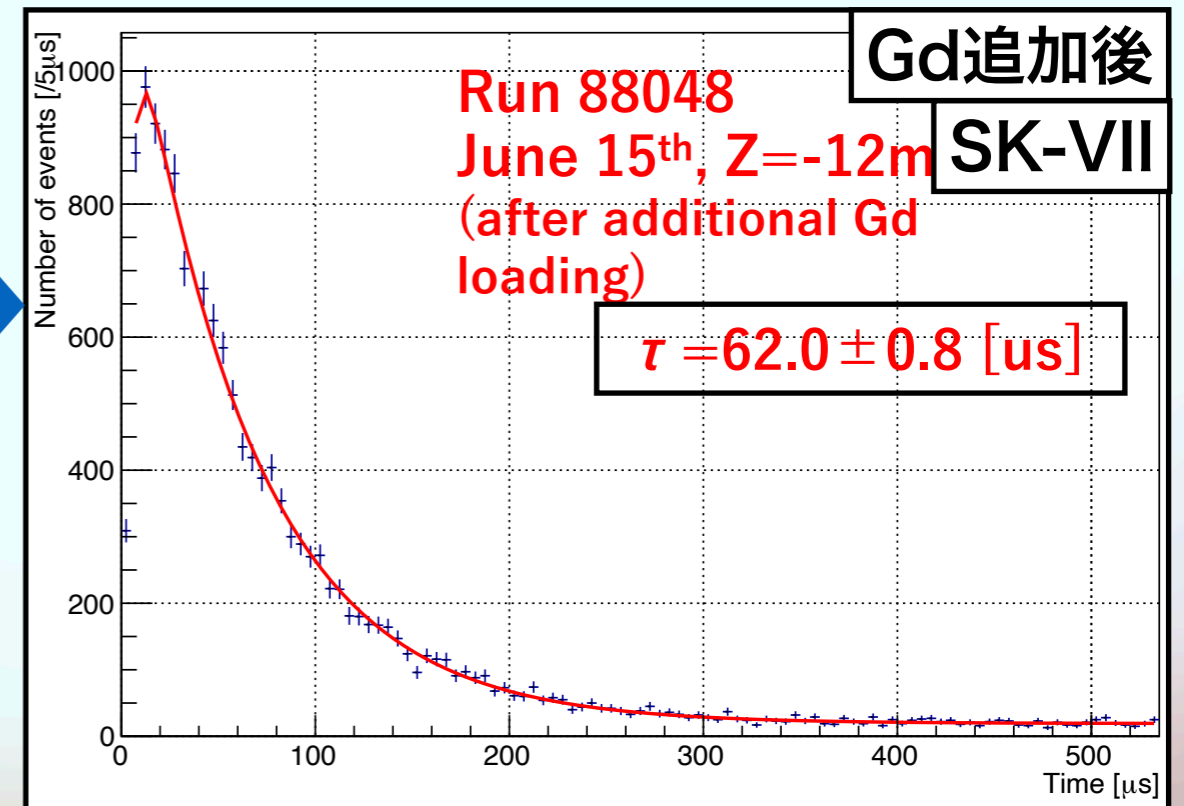
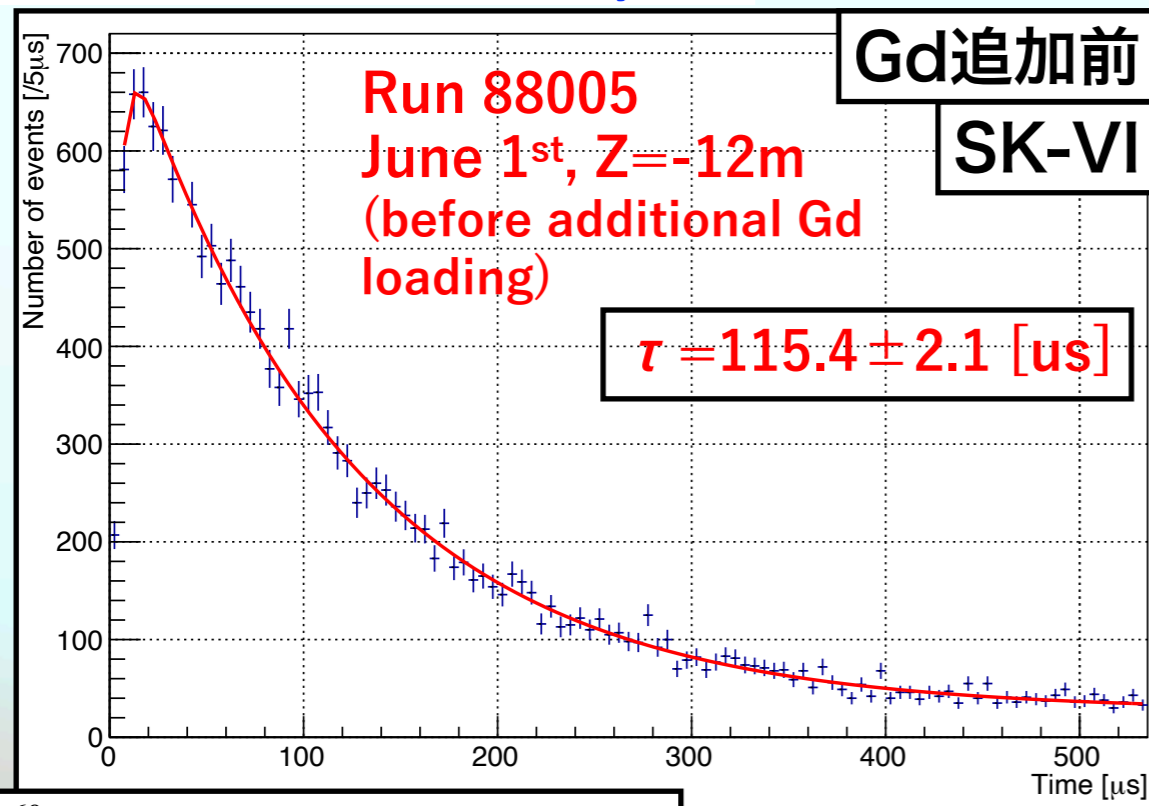


Scintillation in BGO

Prompt event (T=0)

Captured by Gd or p

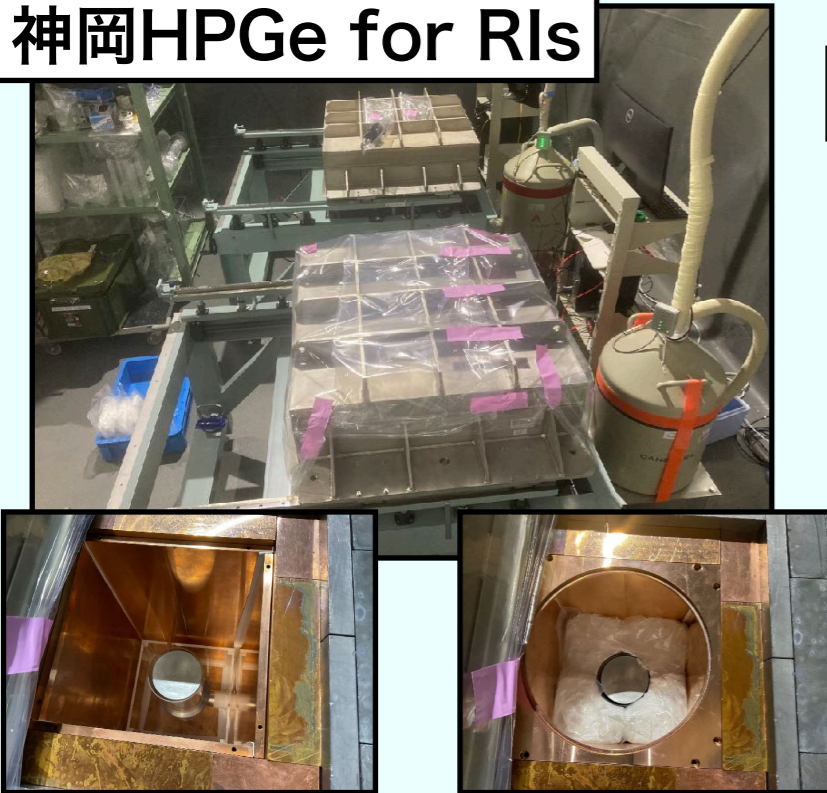
Delayed event



- AmBe線源を用いた較正でGd濃度上昇を確認
- 中性子捕獲の時定数からGd濃度を算出：約330ppm
- 中性子検出効率も期待通り上昇：37.5 → 53.8%

硫酸ガドリニウム内の不純物量測定

神岡HPGe for RIs

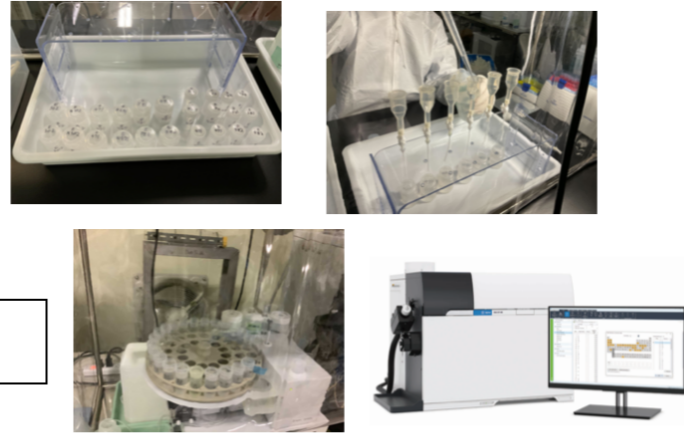


神岡ICP-MS for ^{238}U , ^{232}Th , Ce

U/Th concentration
by UTEVA® resin

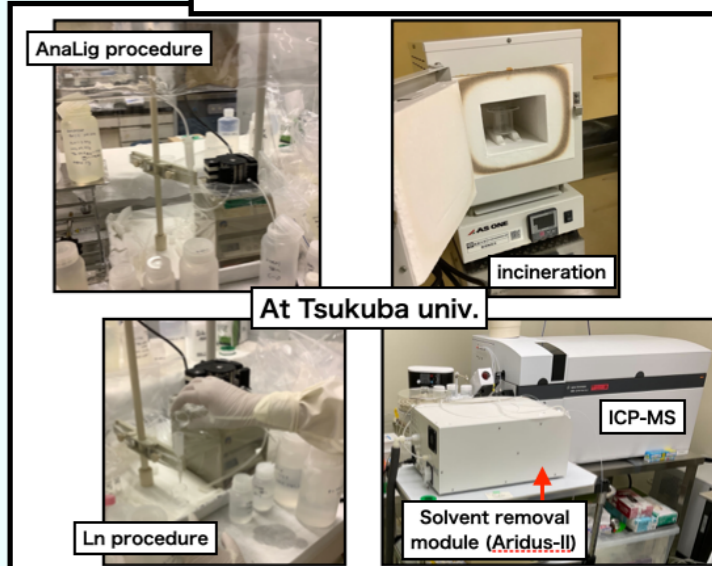
U/Th desorption
from UTEVA® resin

Measurement
by ICP-MS



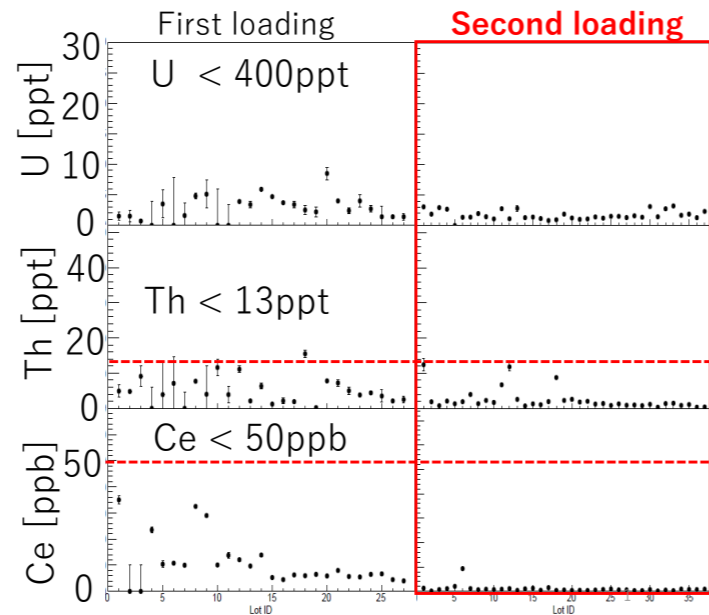
S. Ito et. al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 113H01

筑波ICP-MS for ^{226}Ra 高速測定

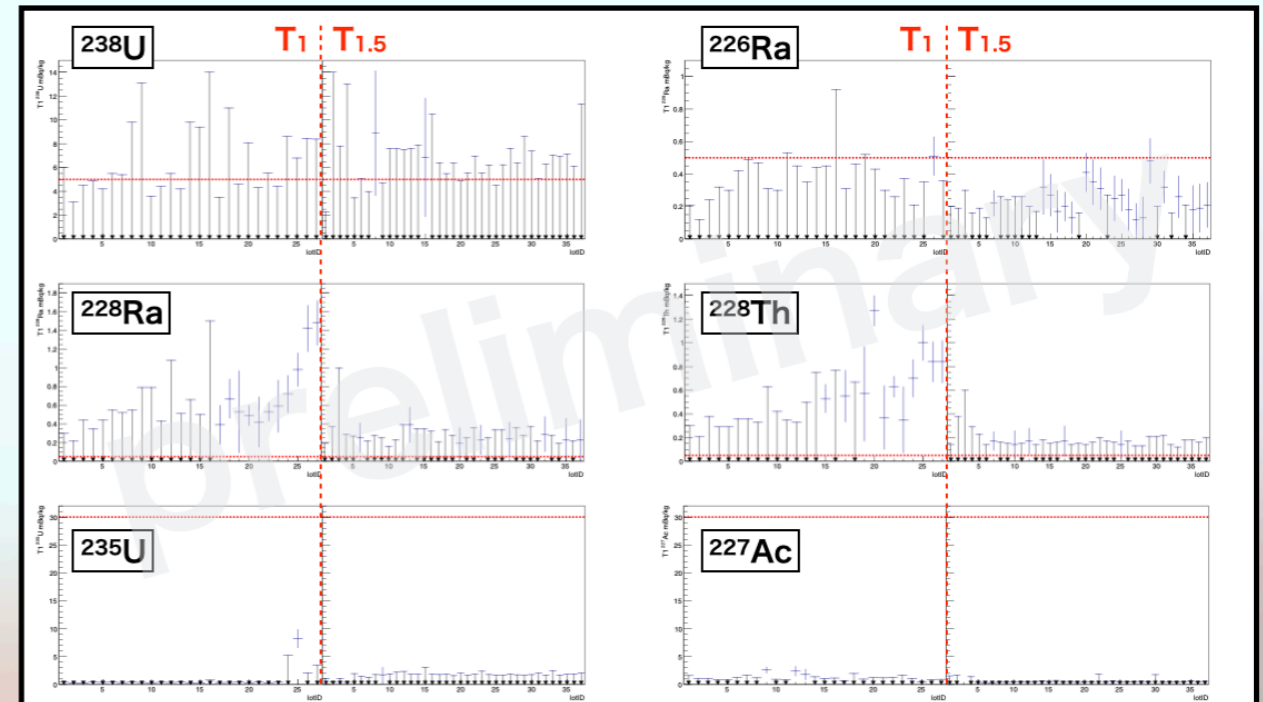


ICP-MS Screening results of Gd powder

Preliminary

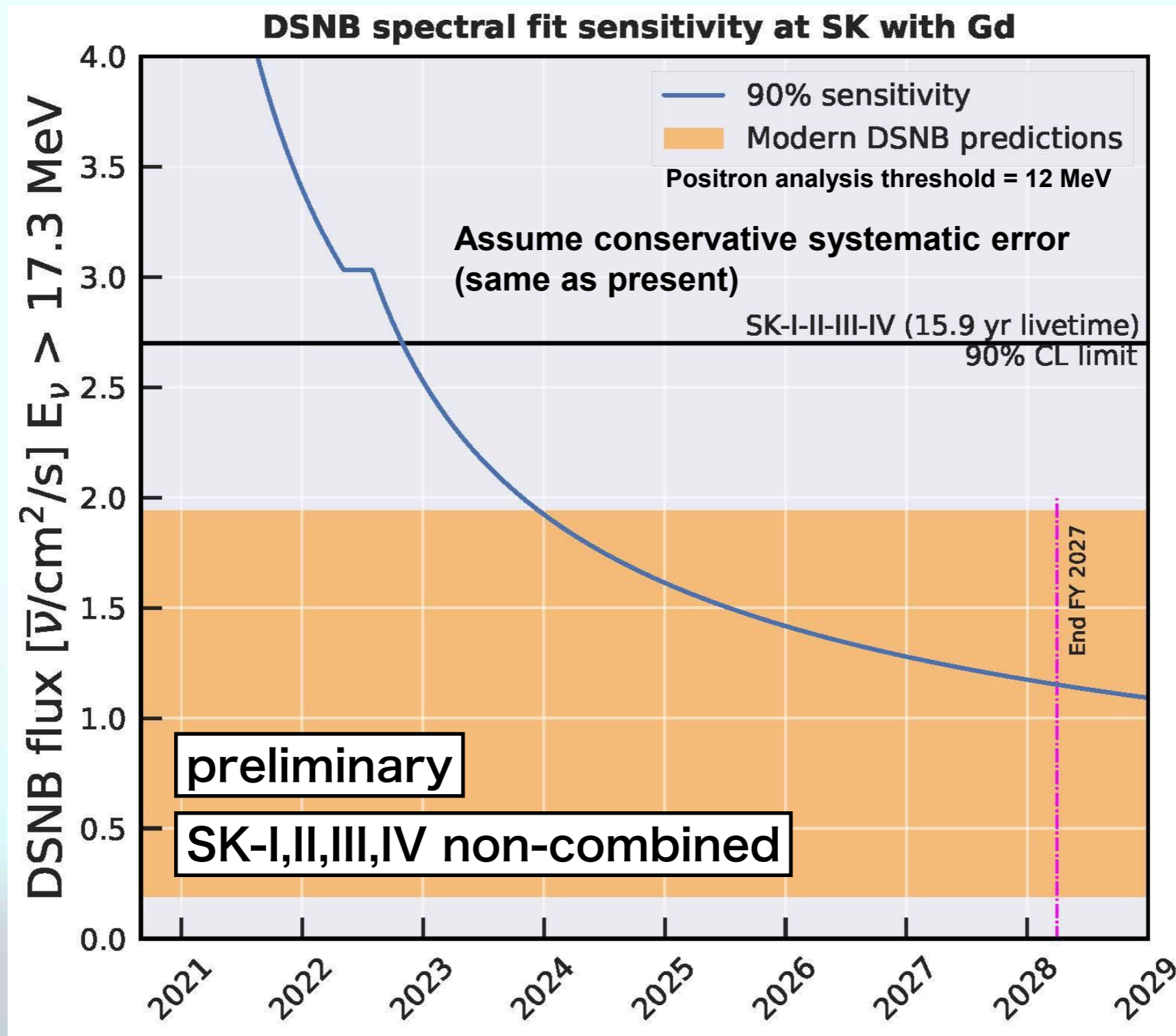


- We checked all 37 lots used in this loading.
- All lots meets our requirements
- More stable and clean than the first loading powder.



- 3種類の方法を用いて、溶解前に全37ロットの不純物量を測定
- 硫酸ガドリ追加後もBGの増加は見られず、太陽ニュートリノ解析に悪影響無し

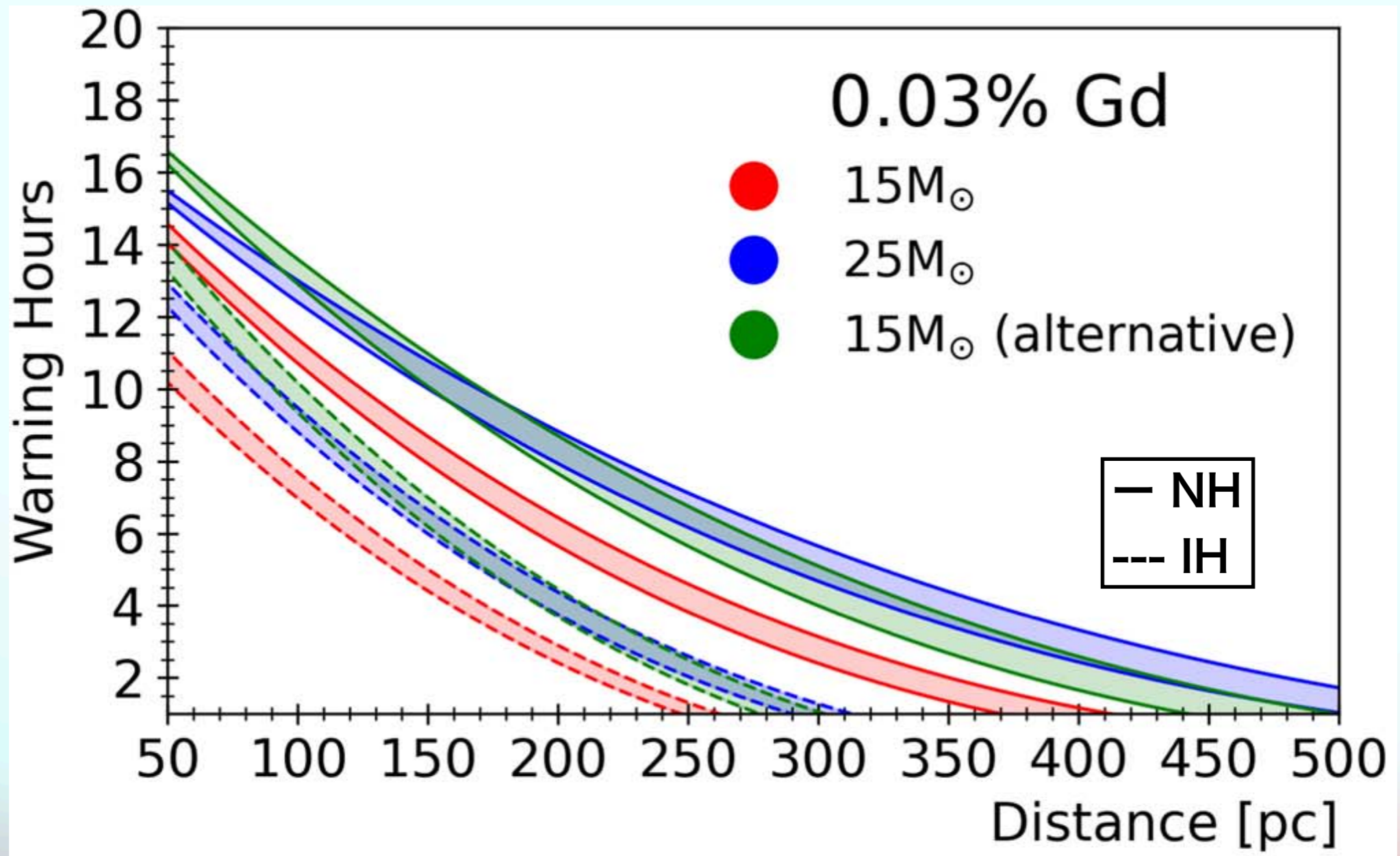
SK-Gd(0.03%) DSNB探索の展望



- ▶ HK運転開始予定までに、モデルが予想する領域を広く評価できる
- ▶ ${}^9\text{Li}$ 事象削減やNCQE系統誤差削減による更なる感度向上を目指している

原田トーク

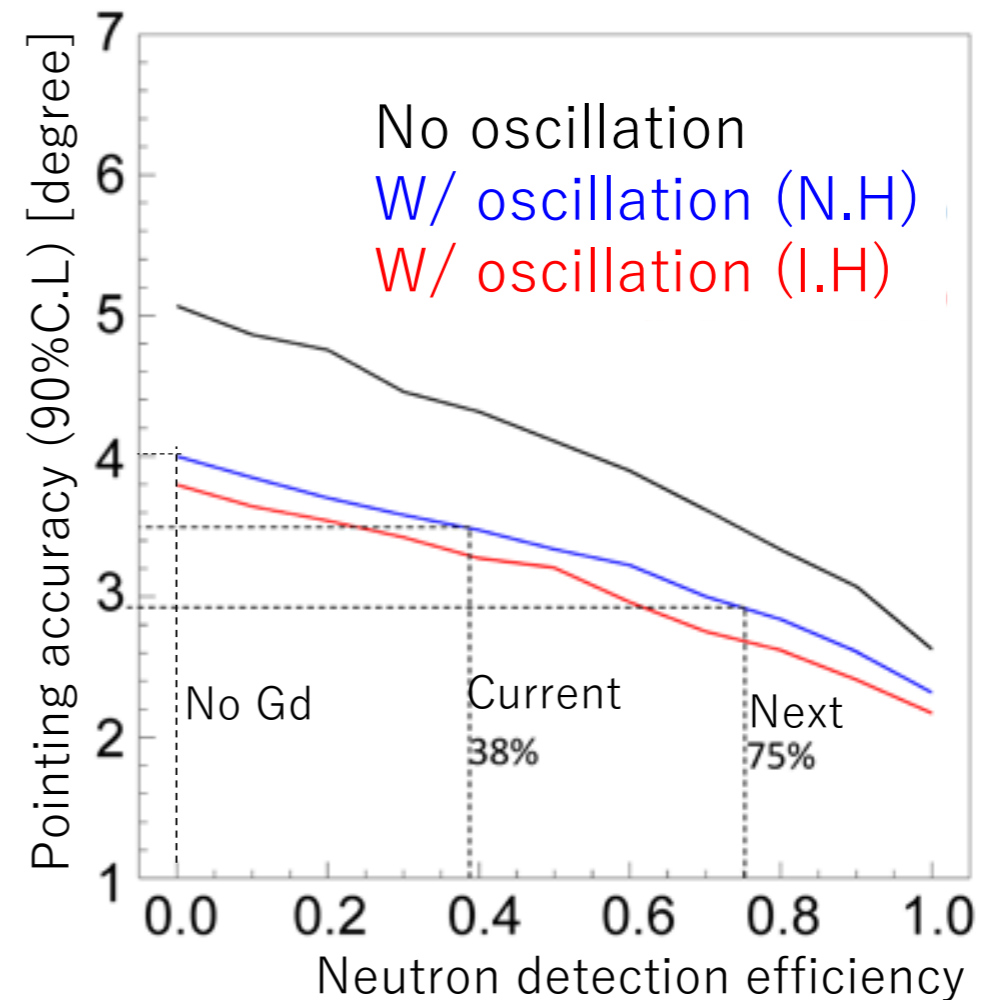
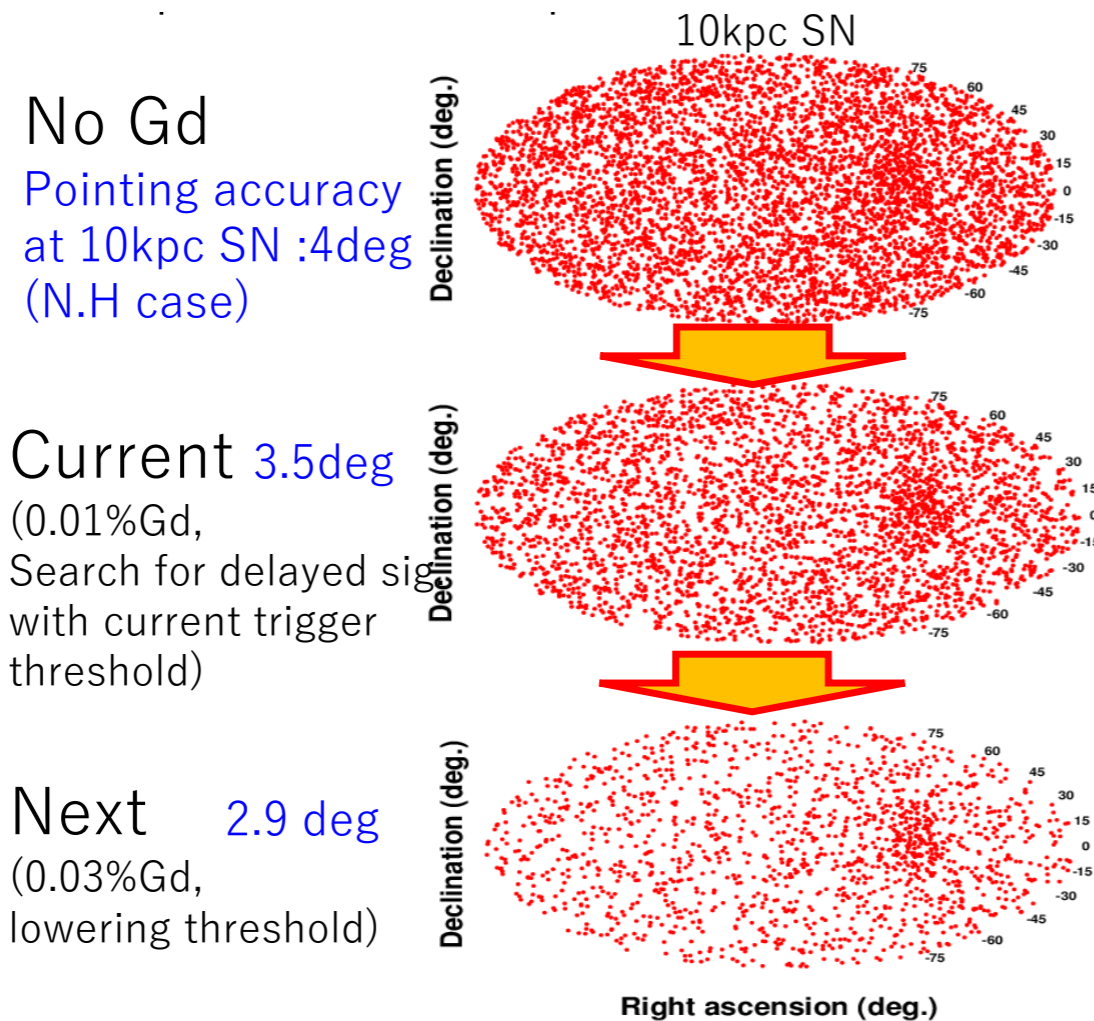
坂井・田野トーク



- ▶ Si burning phaseに放出される前兆ニュートリノによるIBD事象検出可能
 - ベテルギウスなら9時間前に発行可能
- ▶ KamLANDとMoU結んで、コインシデンスアラートの運用は準備中

超新星爆発ニュートリノの方向再構成の向上

中性子タグを用いて、方向情報を持たない逆ベータ反応を除去し
電子散乱選び出すことで方向精度を向上



結構古い絵です。詳しくは柏木トークで

まとめ

- ▶ Gdを増量して、DSNB信号検出効率を更に向上させたい
 - SK-VI(0.011% Gd)では、Gd導入により信号検出効率が倍程度向上
- ▶ 2022年6-7月、SK-GdのGd追加導入が無事完了
 - Gd濃度：0.011wt% → 0.033wt%
 - 中性子線源等を用いたデータ解析でもGd濃度の増加を確認
 - 低E領域の太陽ν解析で、追加導入によるBG増加は確認されず
- ▶ SK-VIIは0.033% Gd濃度でデータ取得中。DSNBの世界初観測を目指す