

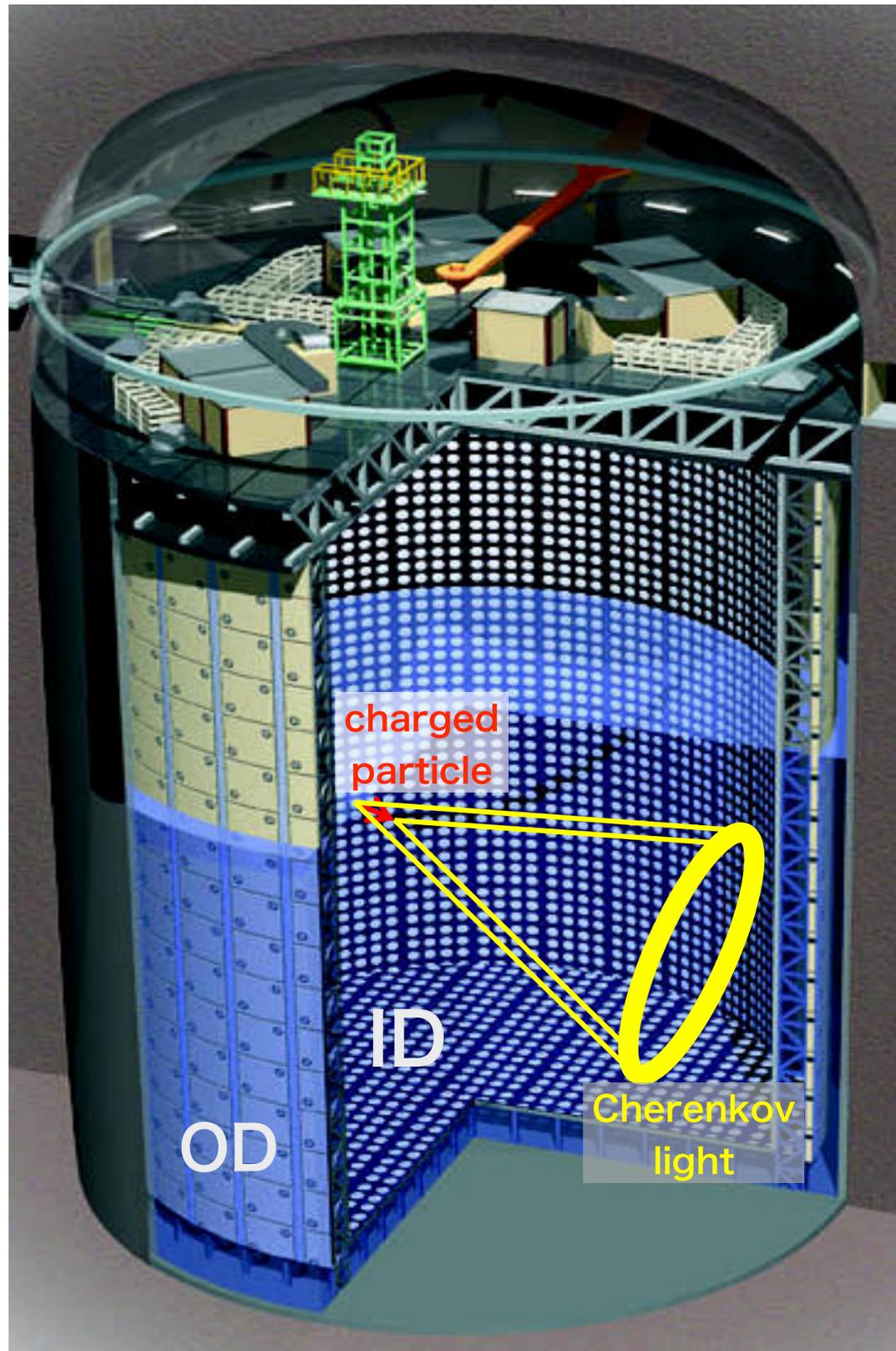
SK, SK-Gd 報告

2022/1/6, SN研究会@早稲田

東京大学 宇宙線研神岡

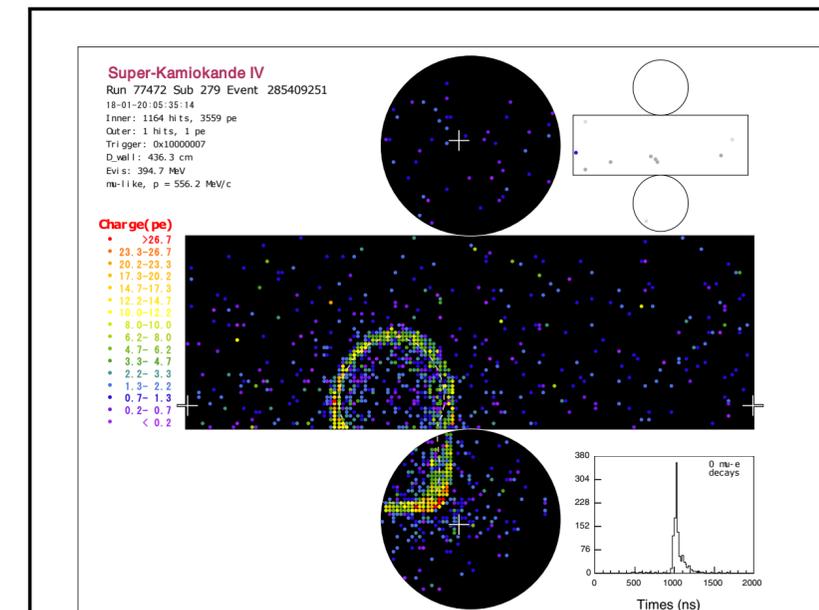
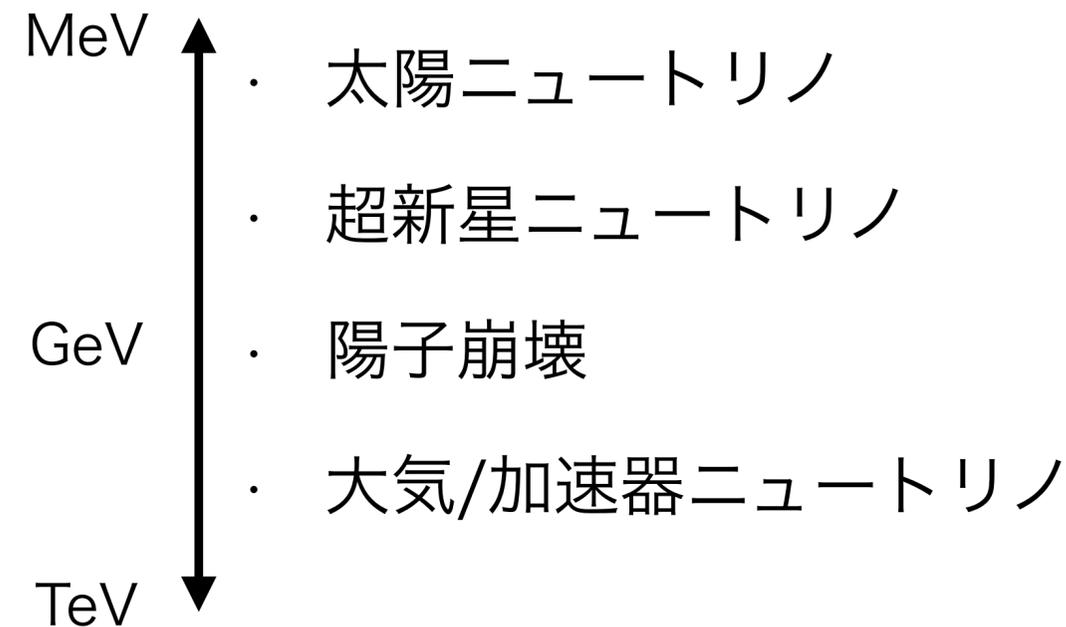
細川佳志

スーパーカミオカンデ (SK)



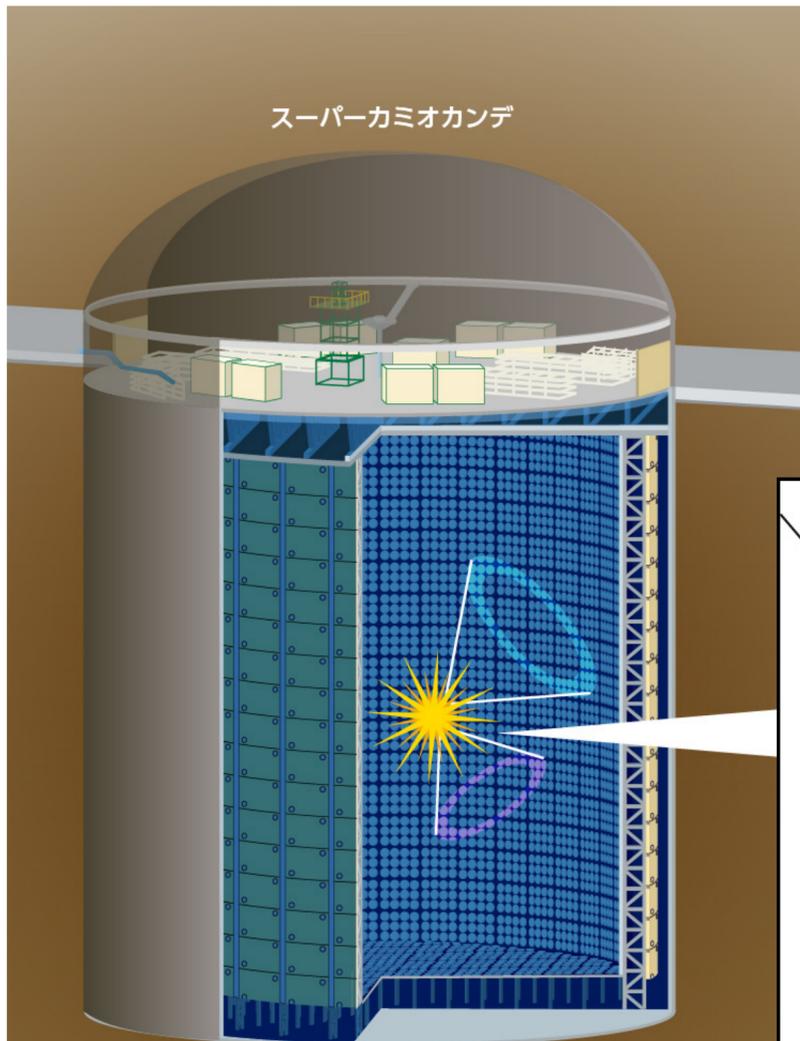
- ▶ **50 ktonの超純水**を用いた, 大型水チェレンコフ検出器
 - 神岡地下1000m (2700m.w.e)
 - 11129個の20inch PMTを配置した内部検出器
40%の光電被覆率 (SK-II期間のみ20%)
 - エネルギー, ニュートリノタイプ, 方向に感度を持つ

- ▶ 幅広いエネルギー領域のニュートリノや物理現象を検出可能

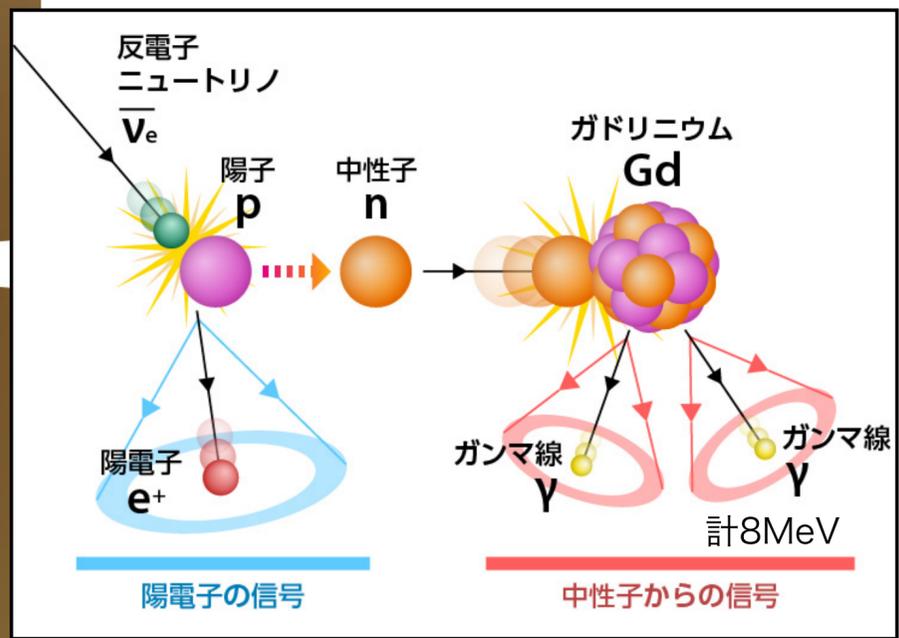


SKで観測されたニュートリノ事象例

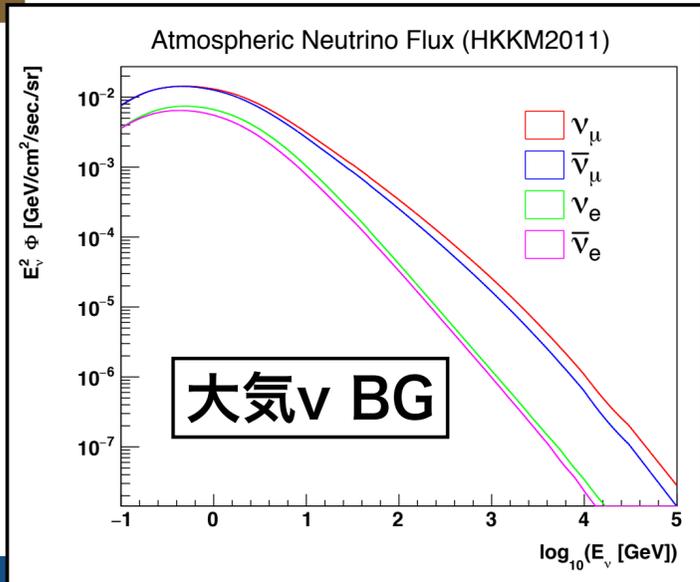
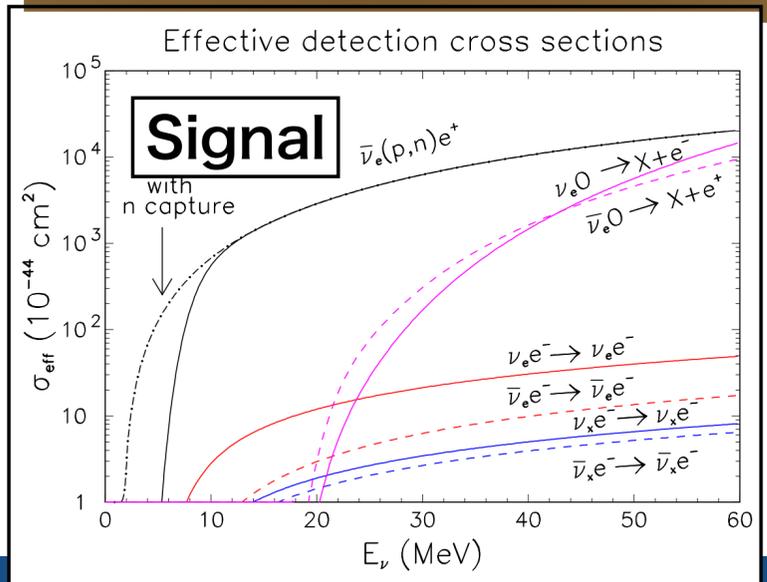
スーパーカミオカンデ-ガドリニウム (SK-Gd)



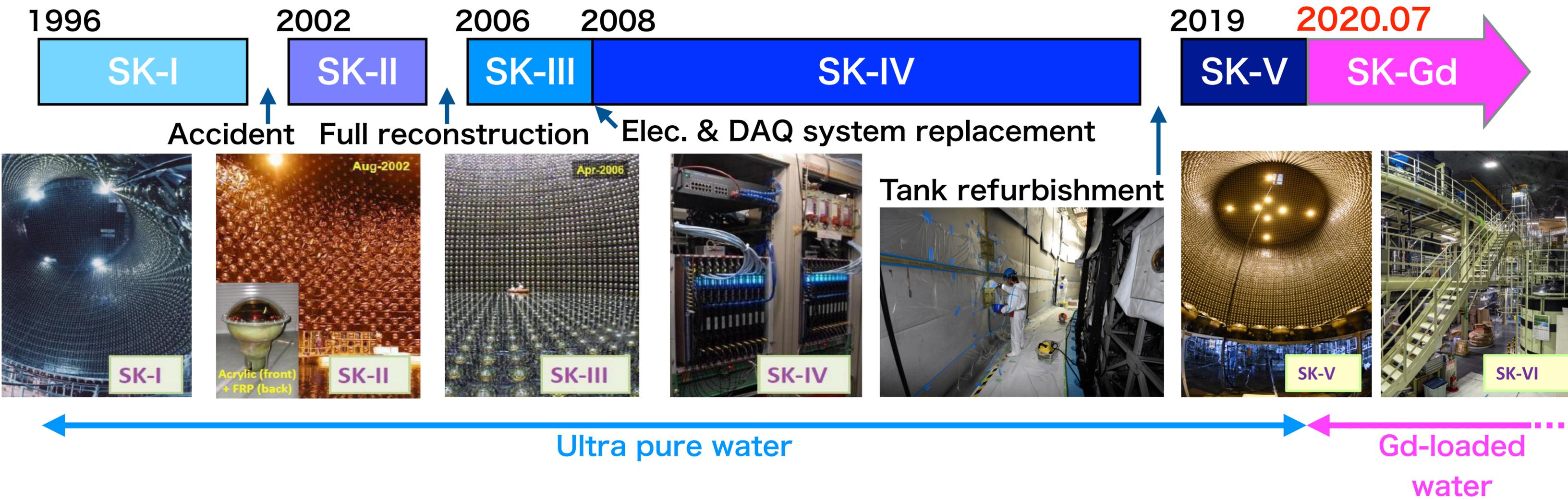
Isotope	Natural abundance ratio [%]	Thermal capture cross section [barn]
¹⁵² Gd	0.20	740
¹⁵⁴ Gd	2.18	85.8
¹⁵⁵ Gd	14.80	61100
¹⁵⁶ Gd	20.47	1.81
¹⁵⁷ Gd	15.65	254000
¹⁵⁸ Gd	24.84	2.22
¹⁶⁰ Gd	21.86	1.42
¹ H	99.99	0.33
¹⁶ O	99.76	0.0002
³² S	94.85	0.53



- ガドリニウムを導入した大型水チェレンコフ検出器
 - SK純水に硫酸ガドリニウム・8水和物を溶解 (現状13ton 0.026w%, 0.011w% Gd)
 - 中性子検出効率を上げ, 背景事象除去/信号検出効率上昇
 - 0.011w% Gd → 50% neutron tagging
 - 0.033 w% Gd → 75% neutron tagging
- 目指す物理
 - 超新星背景ニュートリノ (SRN, DSNB) の初検出
 - 近傍超新星の位置同定能力向上
 - 陽子崩壊の背景事象除去
 - ニュートリノ/反ニュートリノ識別 など



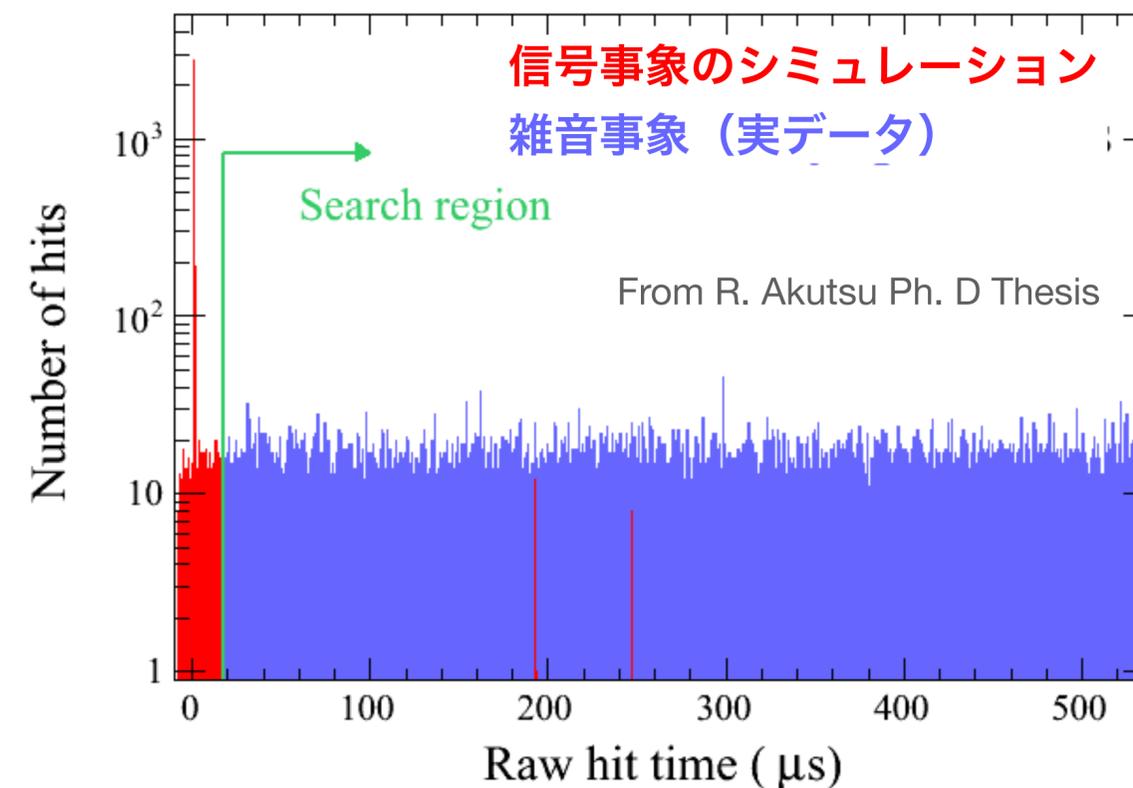
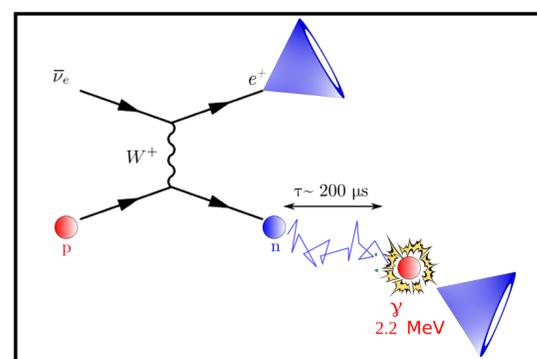
History of Super-Kamiokande



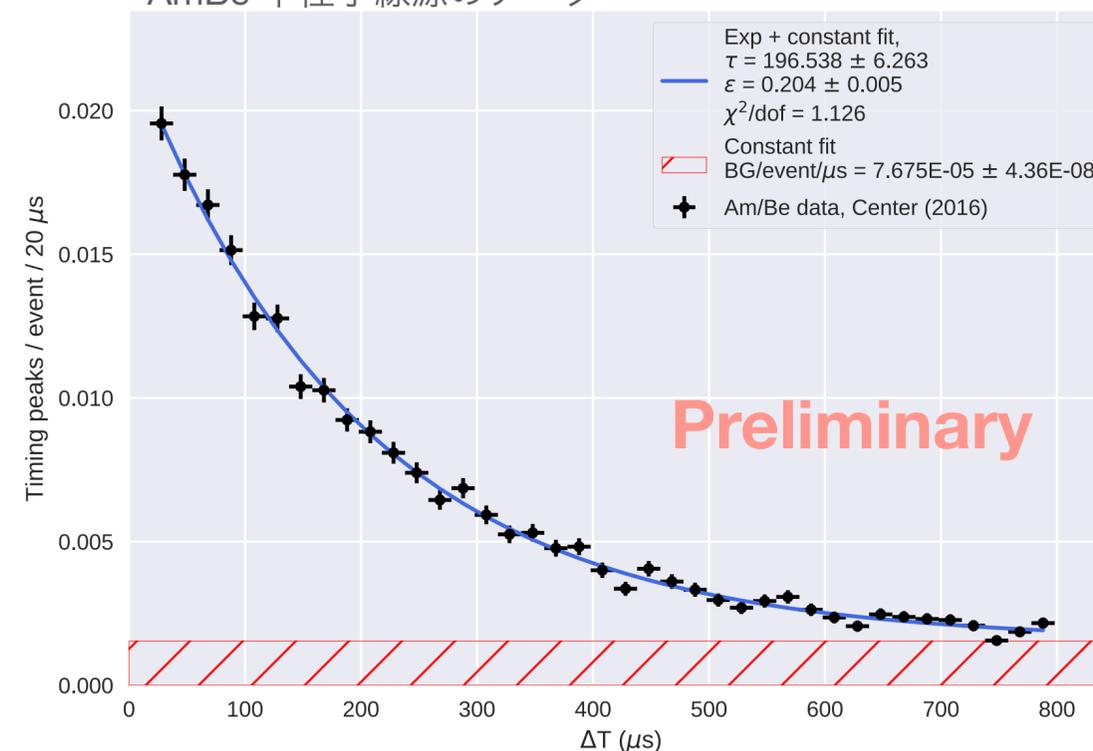
「SK-Gd」以降もSK-VI, SK-VIIという実験フェーズの呼称を継続する

純水中での中性子検出

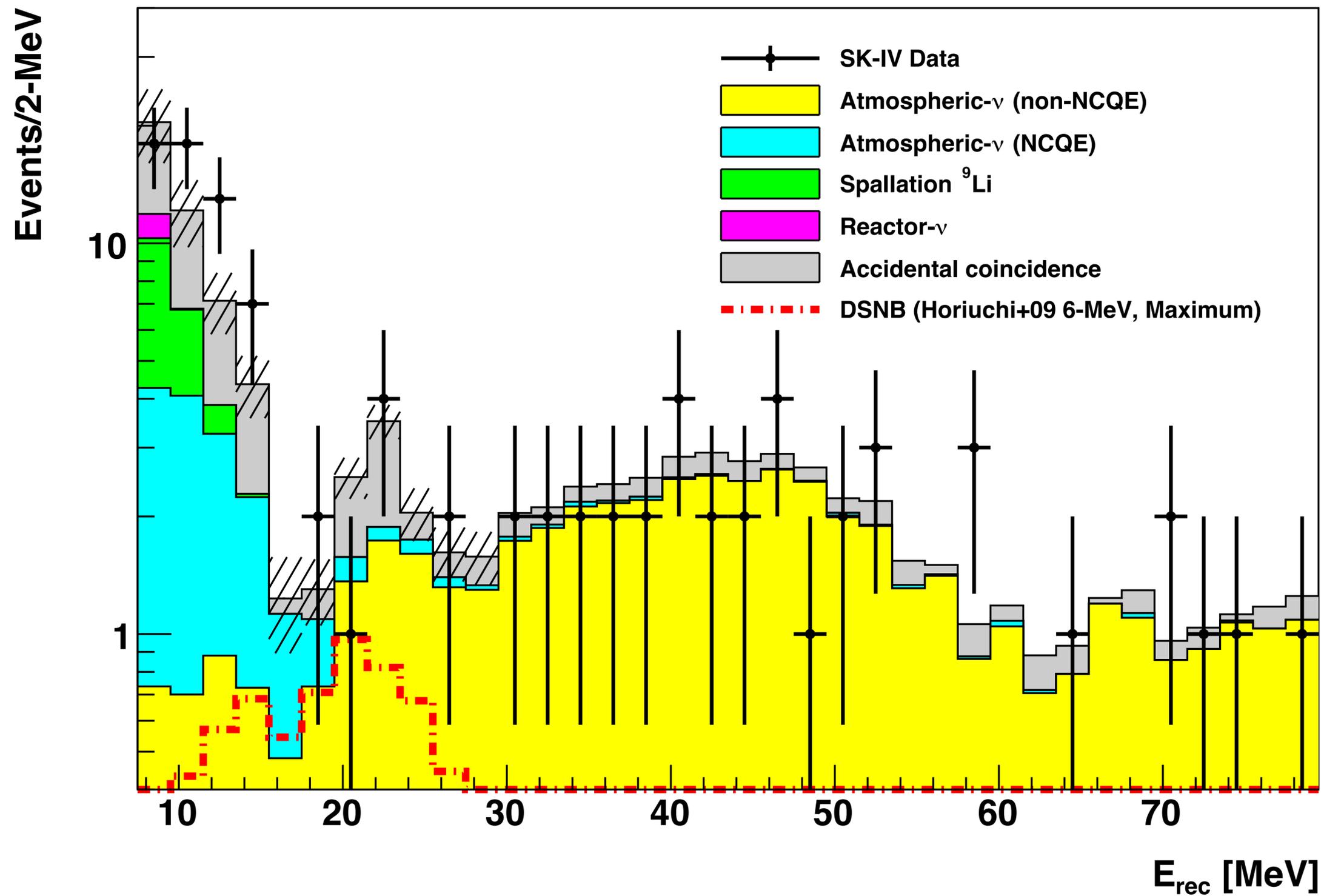
- スーパーカミオカンデ(純水中)での中性子の信号：
 - 中性子の水素原子核による吸収:
 $n + H \rightarrow D + \gamma(2.2 \text{ MeV})$
 - 平均7PMTヒット (11,000本中)
 - 環境放射線等のノイズに埋もれている
- ~9 MeV以上のイベントがあった場合、その後約500 usの間の全てのヒットを記録
- 機械学習を使った、中性子選択アルゴリズムを開発
 - 18-30%の信号検出効率と0.2-3%の誤検出率を達成



AmBe 中性子線源のデータ

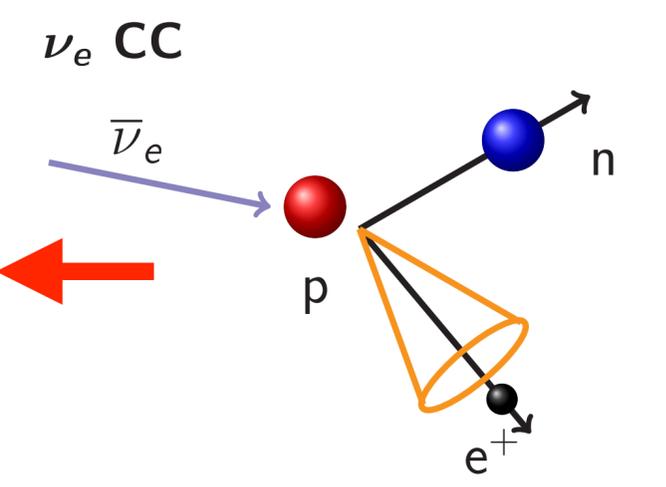
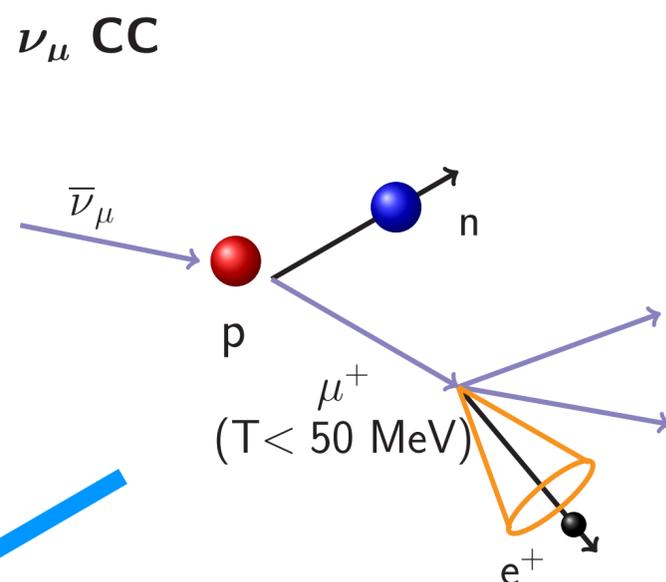
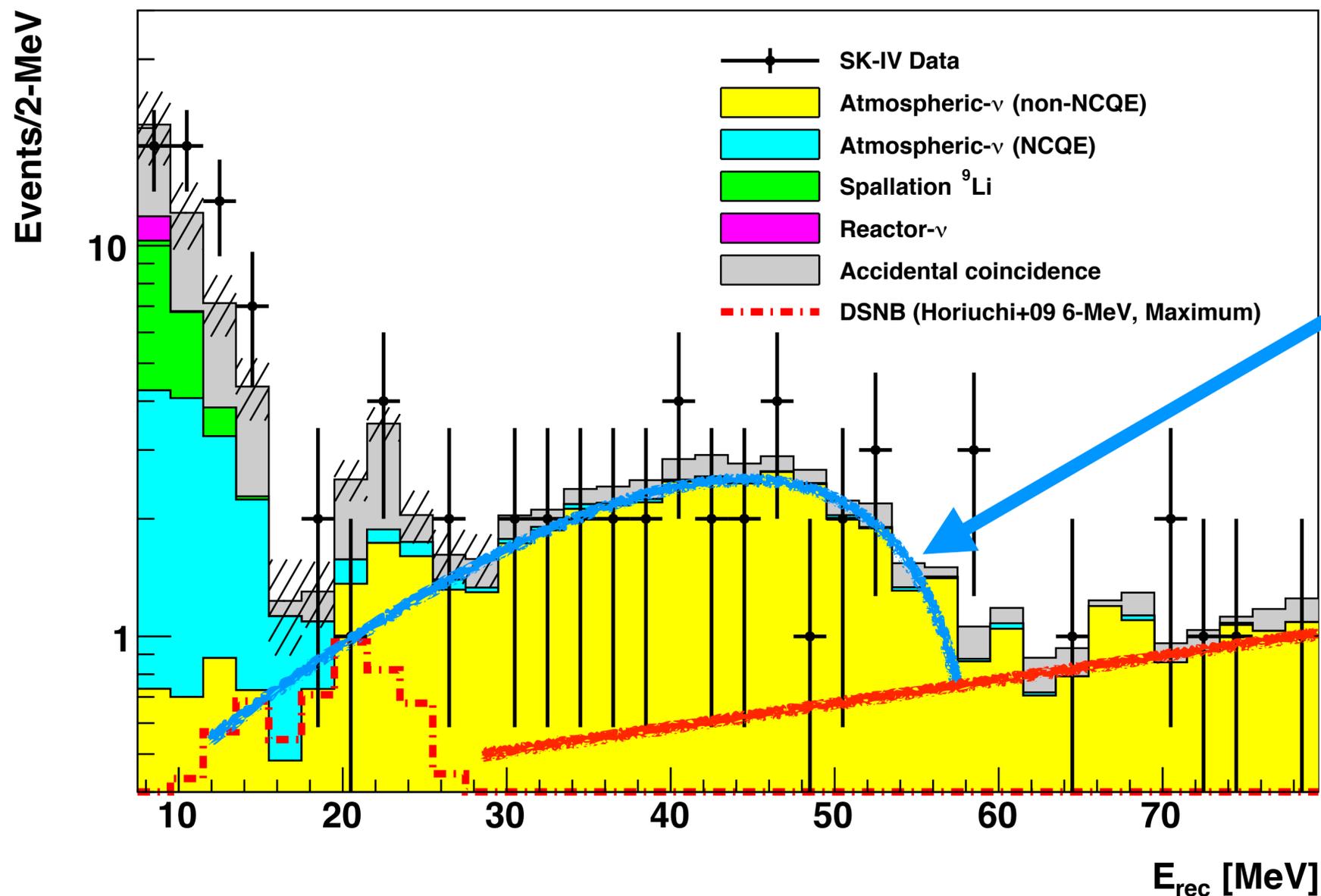


SK-IVでの探索結果



▸ [Phys. Rev. D 104, 122002](#)

バックグラウンド：大気ニュートリノCC反応

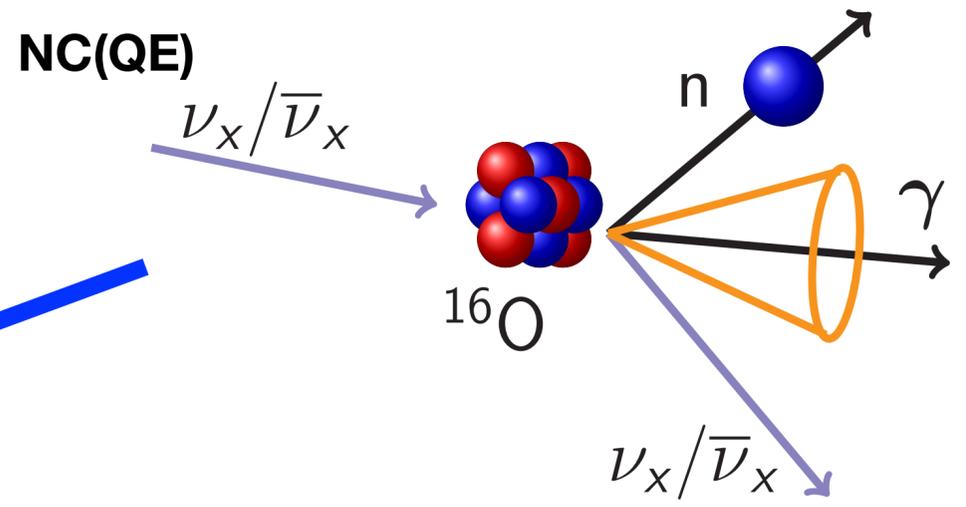
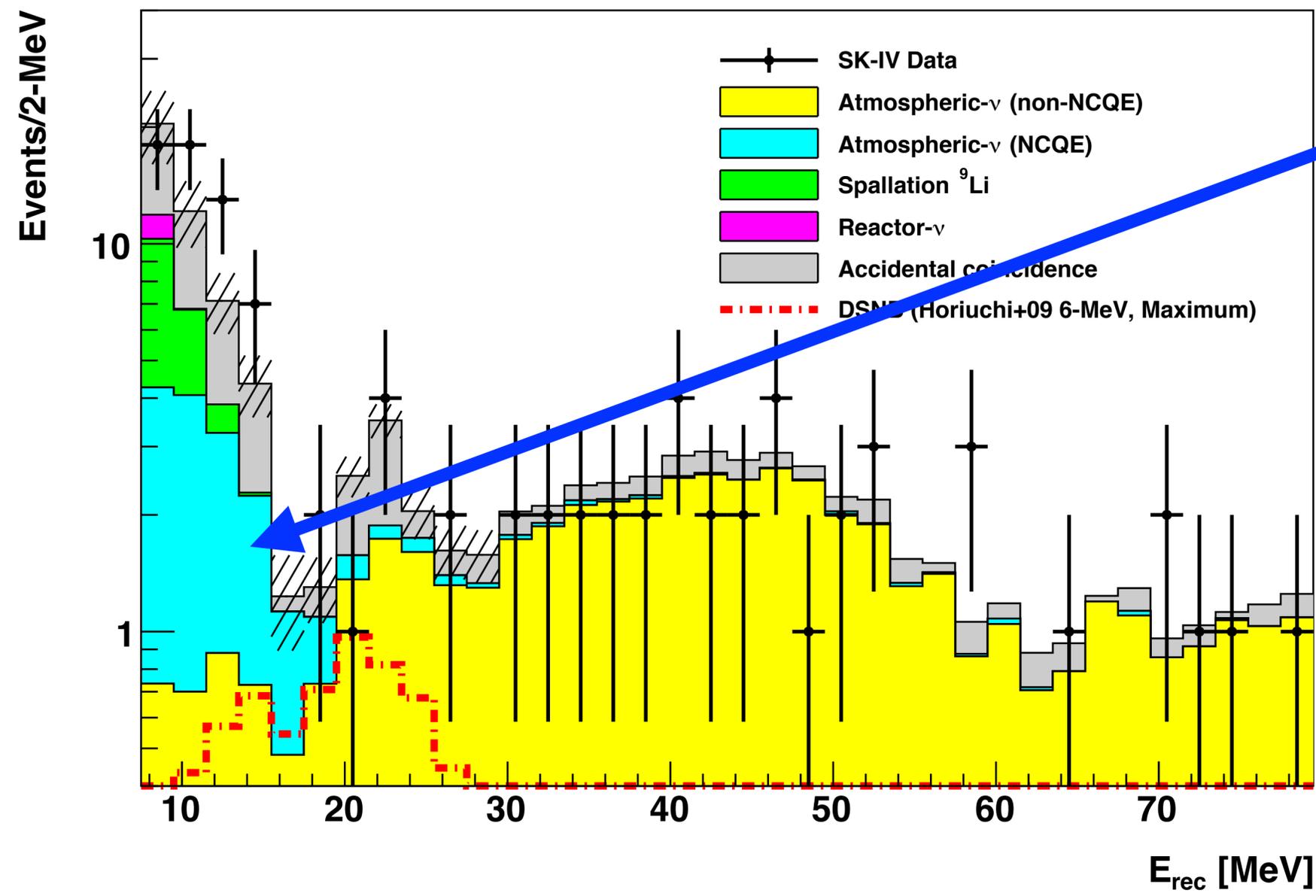


- ミューオンがチェレンコフ閾値以下で見えず崩壊電子のみが観測される
- エネルギー分布はよく知られたMichael spectrumになる
- 50 MeV以上の主要な成分
- DSNB領域の寄与は小さい

これらのバックグラウンドを
30 MeV以上のイベントを用いて制限
系統誤差: ~20%

Phys. Rev. D 104, 122002

バックグラウンド：大気ニュートリノNC(QE)反応



- 反応数やスペクトルに大きな不定性

不定性の要素:

(大気ニュートリノフラックス)

X (NCQE 反応断面積) ← T2K実験の測定から制限

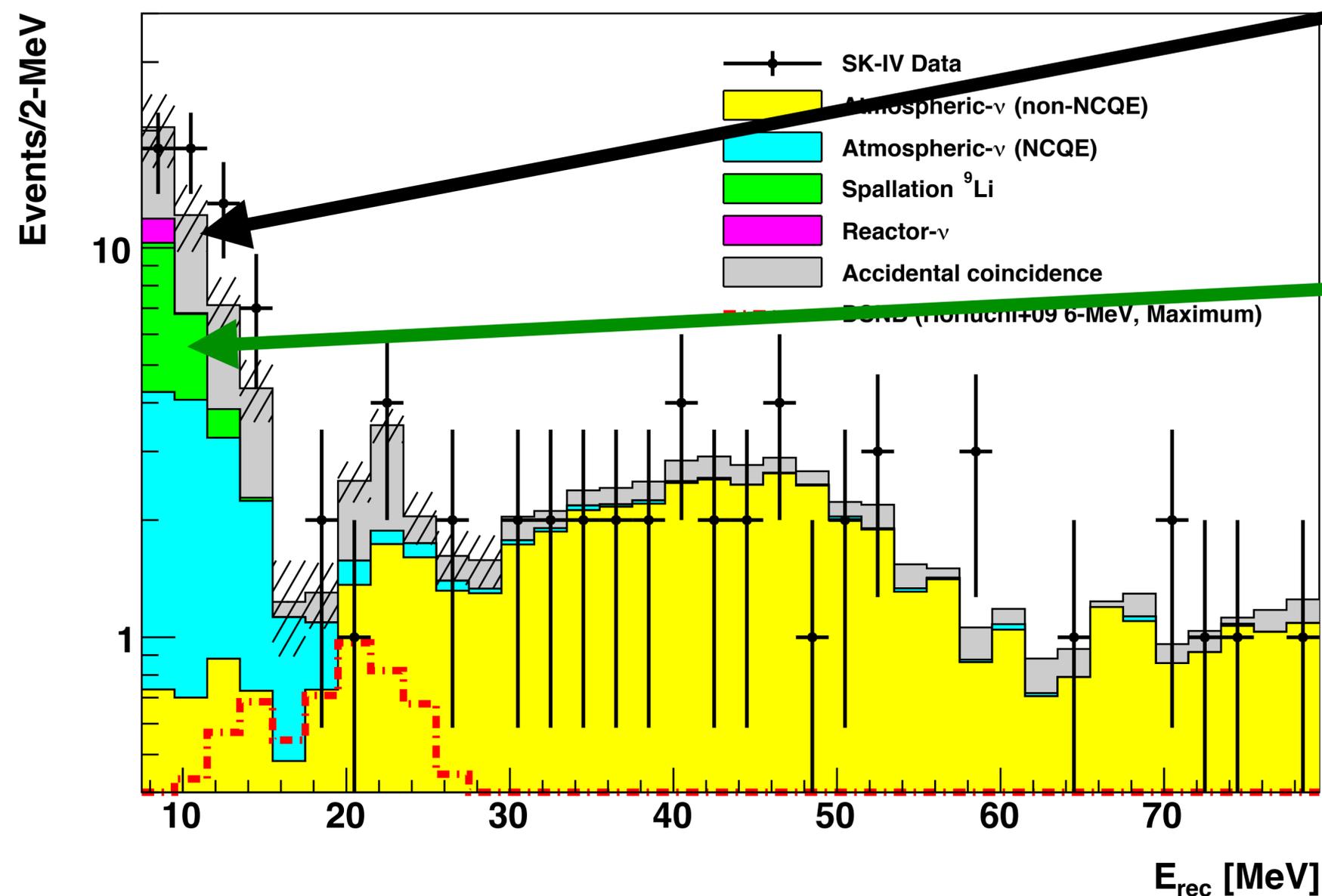
X (中性子生成数) ← T2K実験のCC測定から評価

X (中性子検出効率) ← AmBe中性子線源を用いた測定結果から評価

系統誤差: 60-80% (エネルギーに依存)

これを理解して削減することが今後の最大の課題

バックグラウンド：AccidentalとSpallation

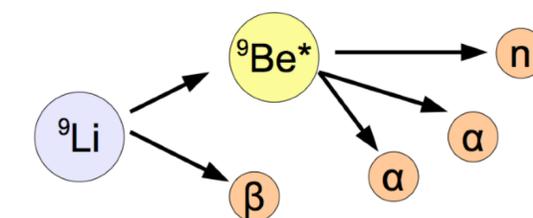


Accidental:

- 主に(中性子を伴わない) 核破砕事象 + fake neutron

Spallation ${}^9\text{Li}$:

- Beta + n崩壊をすることで信号とトポロジーが同じ
- Spallation cutのみが武器



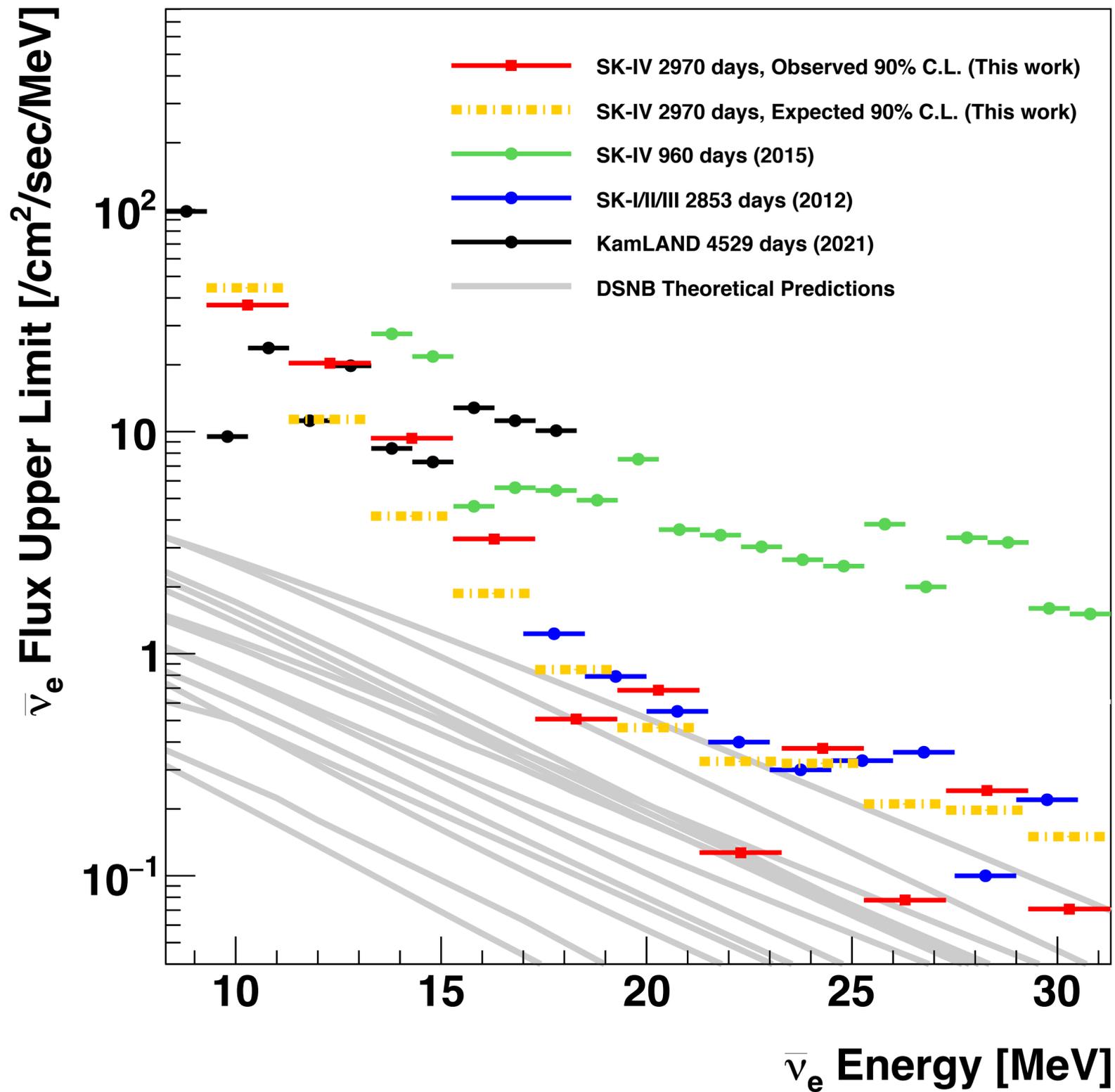
いずれもSpallation cutと中性子検出条件を厳しく設定することで減らすことができるが
信号事象の検出効率とのトレードオフ

→エネルギー毎にカット条件を最適化

Phys. Rev. D 104, 122002

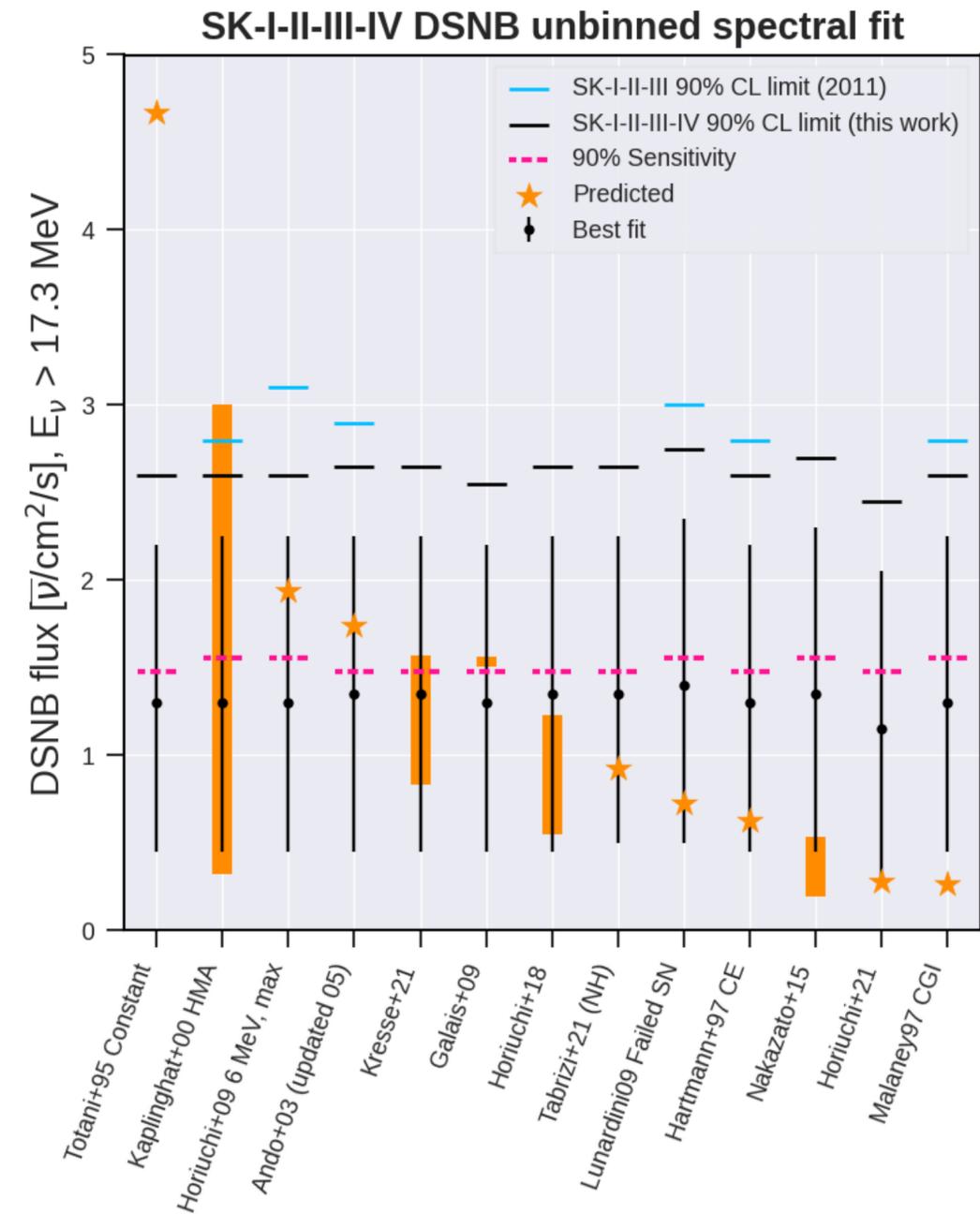
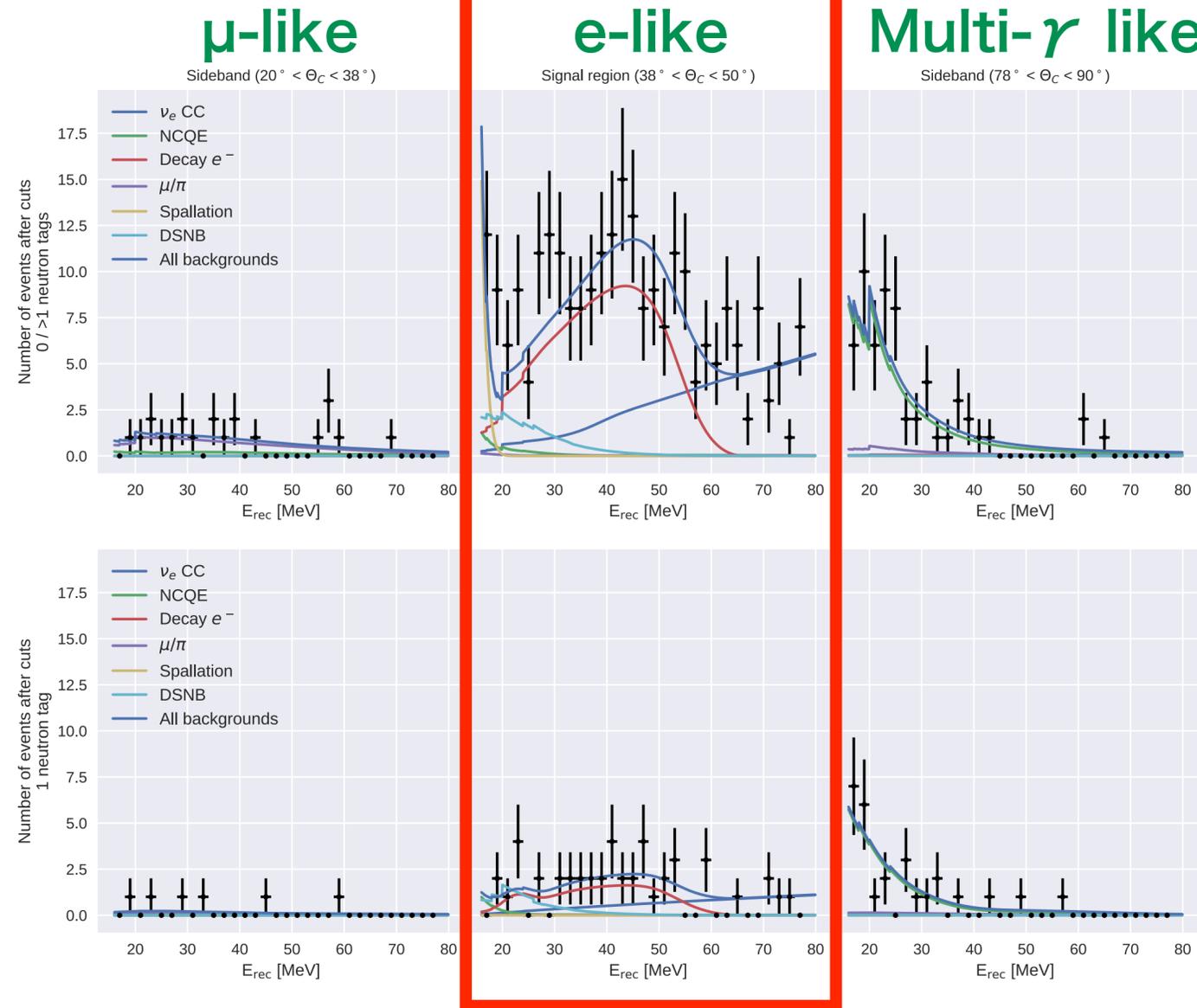
Model-independent limit

Phys. Rev. D 104, 122002



- ▶ $E_{\nu} > 15\text{MeV}$ で最も強い制限
- ▶ いくつかのモデルに既に感度到達している

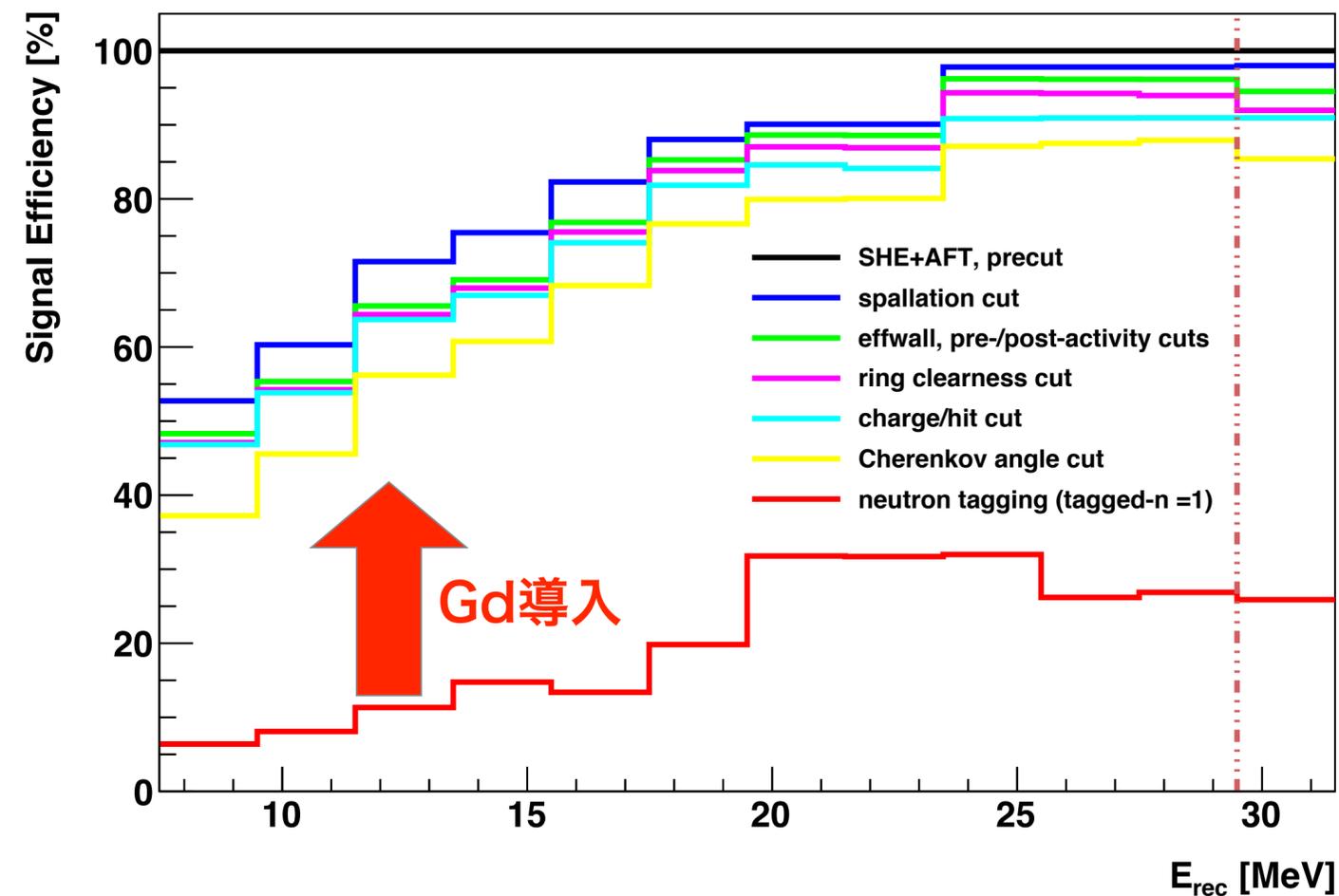
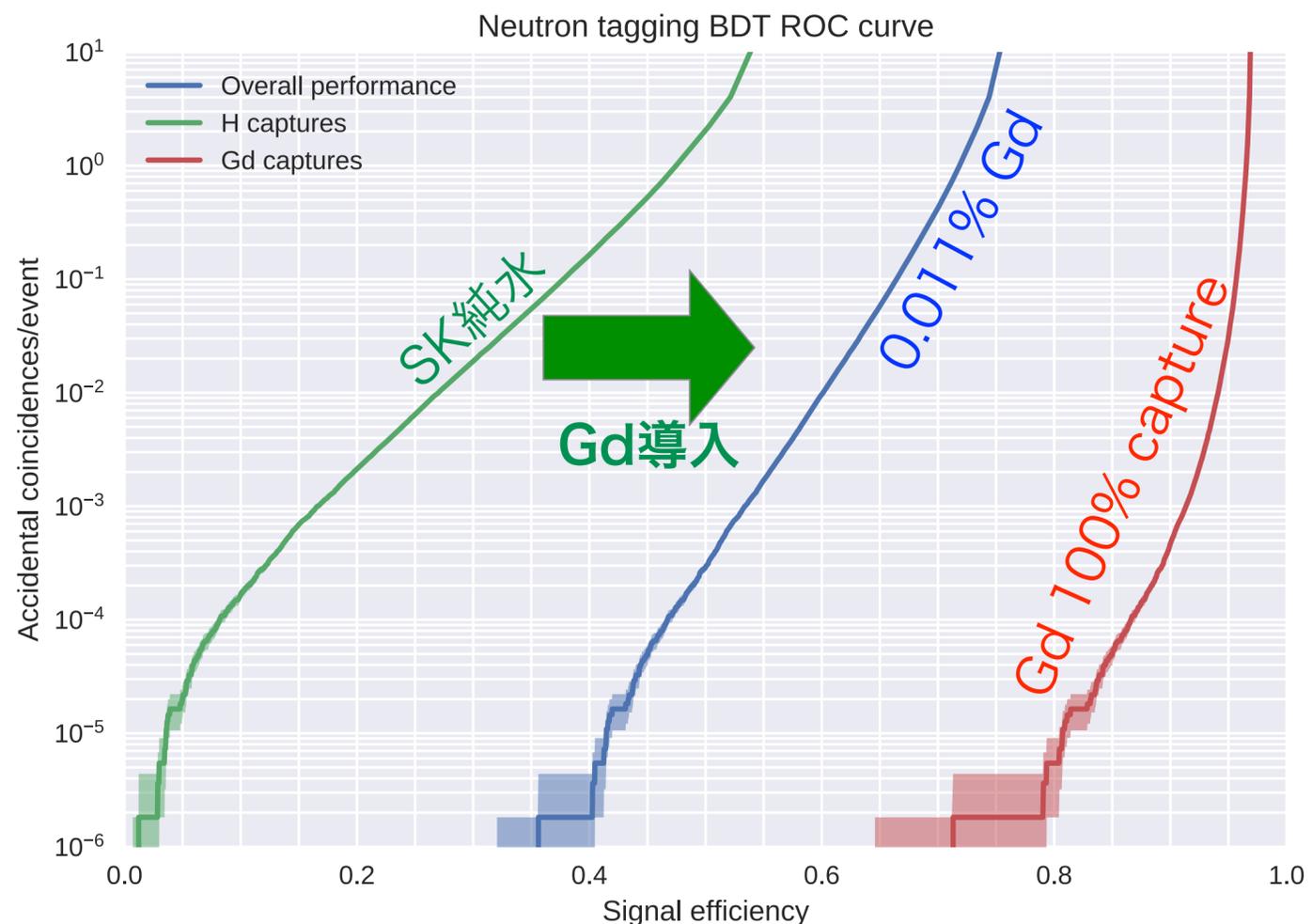
信号領域



- SRNモデル毎に、エネルギースペクトルをフィットして、超新星背景ニュートリノのフラックスを検証
- チェレンコフ光のリングパターンを用いて分離した sideband領域を同時にフィット

- 90% C.L. sensitivity は複数のモデル予測より下に到達
- 今後、SK-Gdの観測で大半のモデルが検証可能に！
- 超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指す！

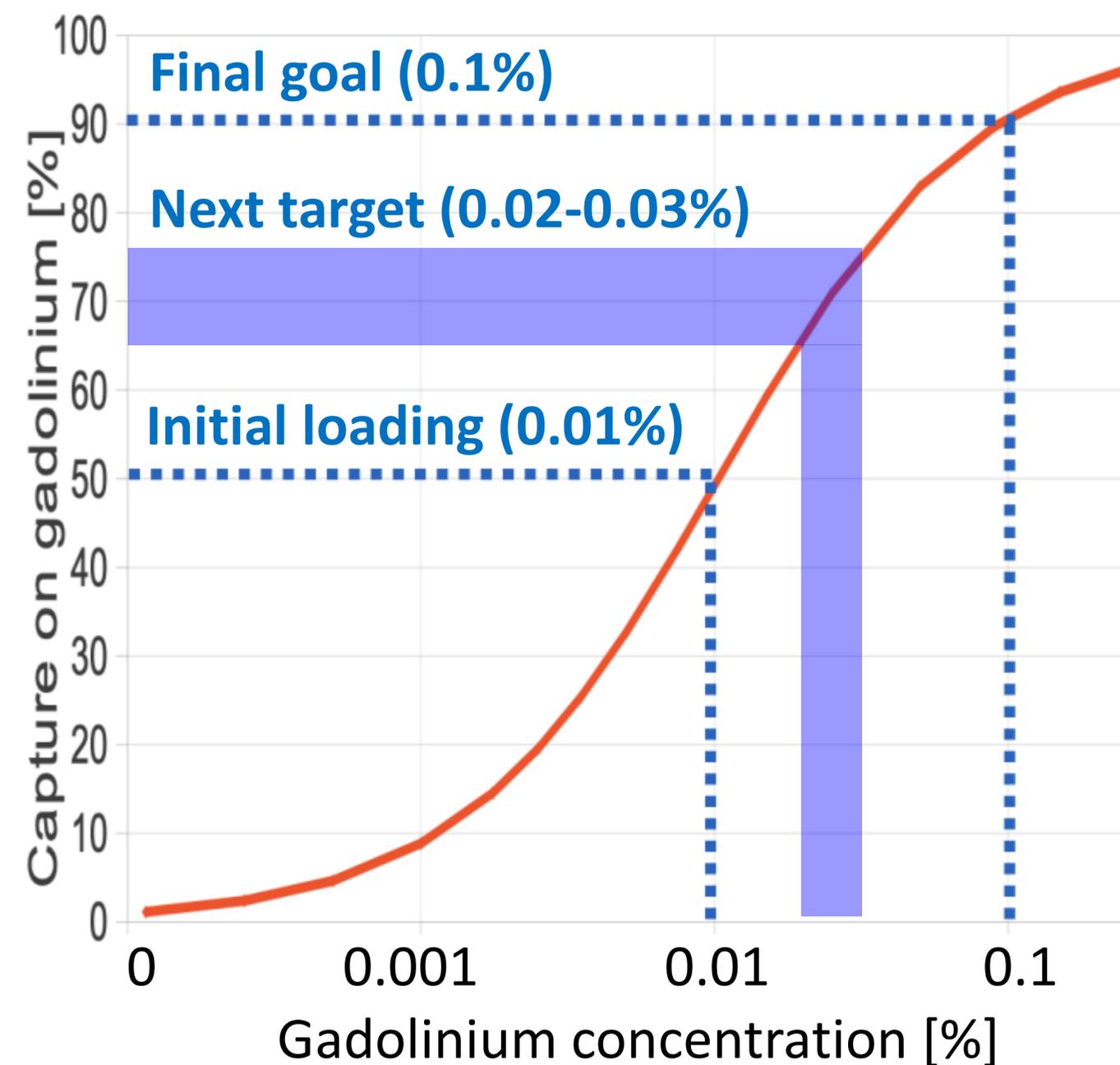
SK-Gdによる探索の展望



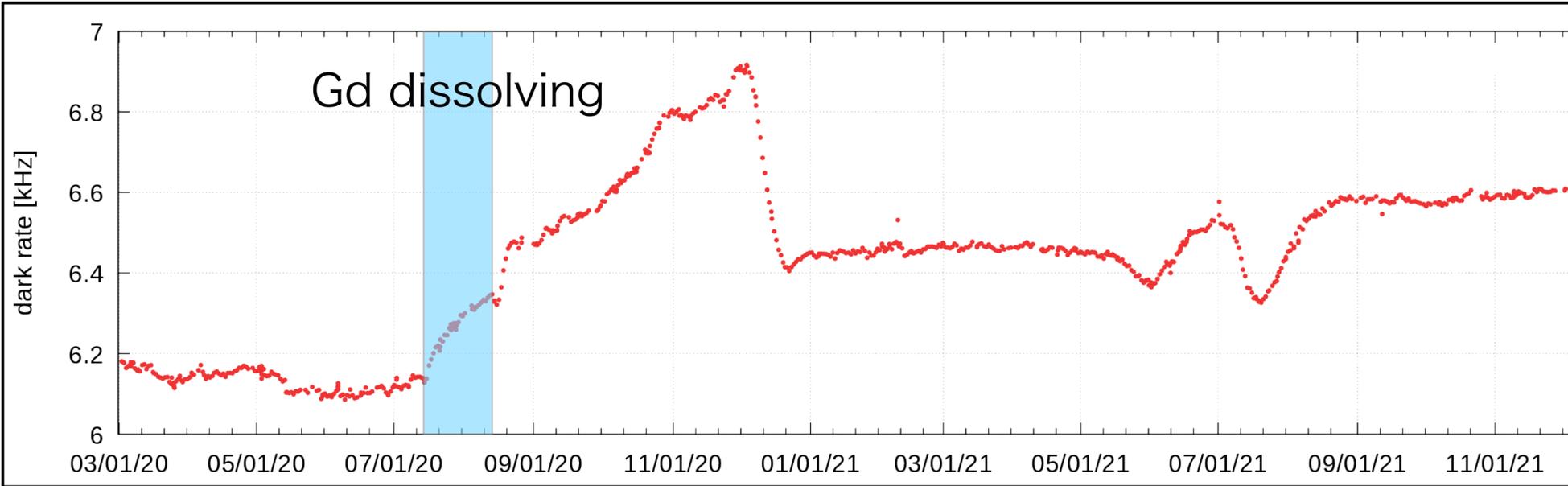
- ▶ Accidental BGの大幅な削減（およそ1/10以下）
 - 純水では，中性子を誤検出することによるAccidental coincidenceが無視できない量残っていた
 - Gd導入により，検出効率を高く保ったまま，Accidentalの大幅削減が可能に
- ▶ 中性子検出効率の増加による信号事象の統計量増加（数倍程度）

SK-Gd アップグレード

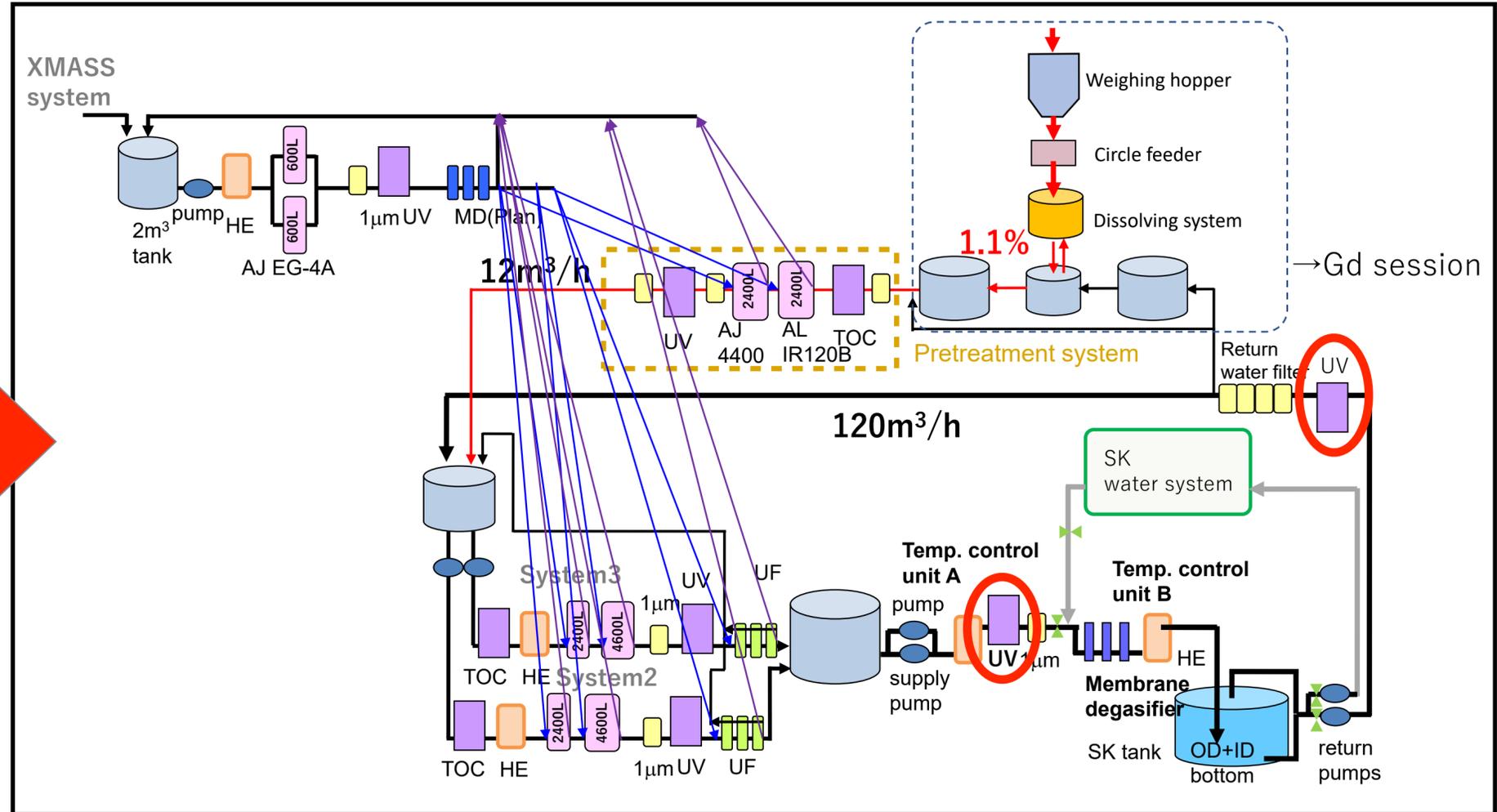
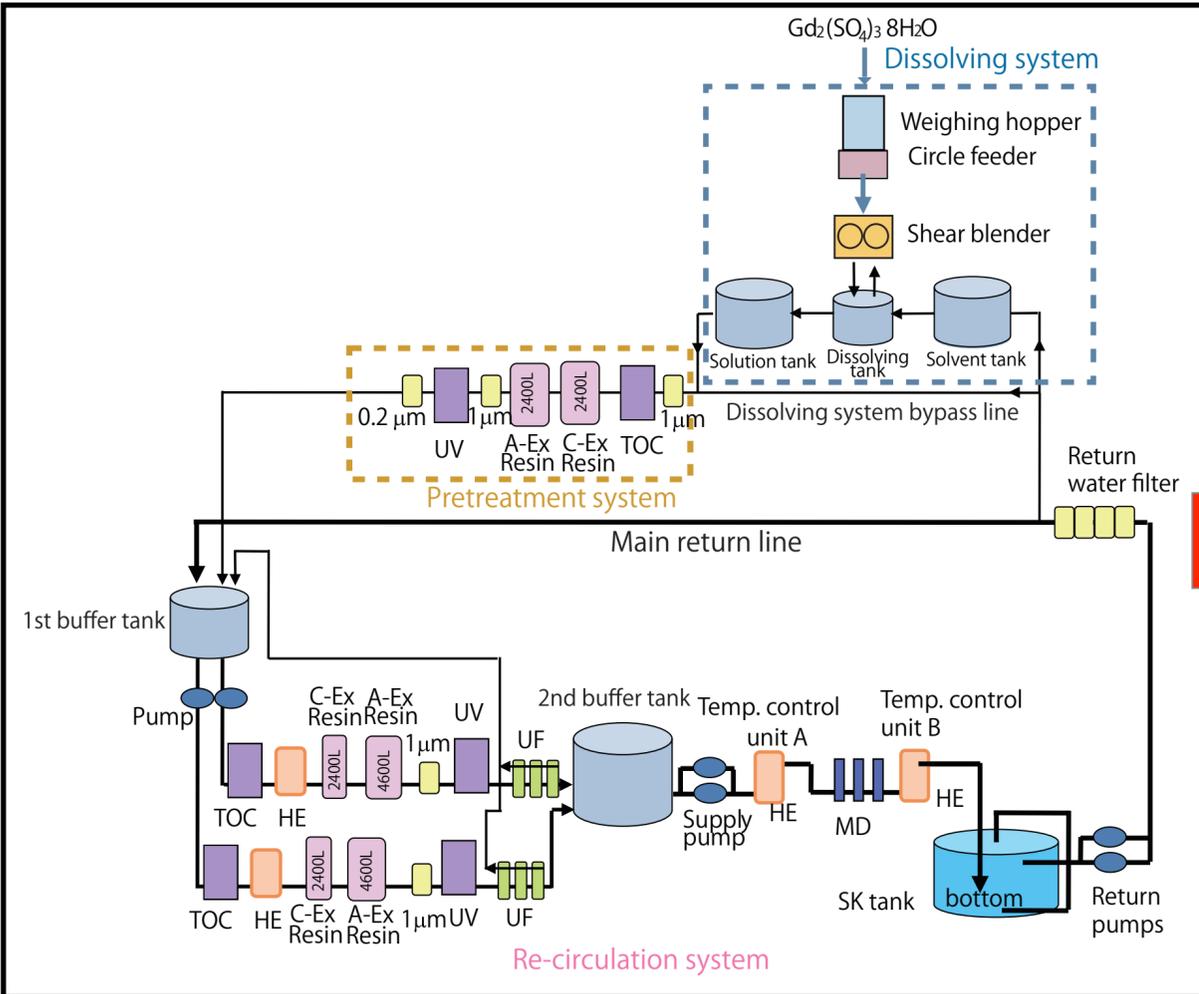
- ▶ Gd導入量を3倍に
 - 中性子検出効率 **50%**(0.026% GdSO, 0.011% Gd) → **75%**(0.078% GdSO, 0.033% Gd)
- ▶ 装置のアップグレードを計画・実行中
 - **ダークレート対策**
 - **多数の樹脂・フィルタ交換**
 - **前回の倍の硫酸Gdを溶かすため溶解槽を改造**
など



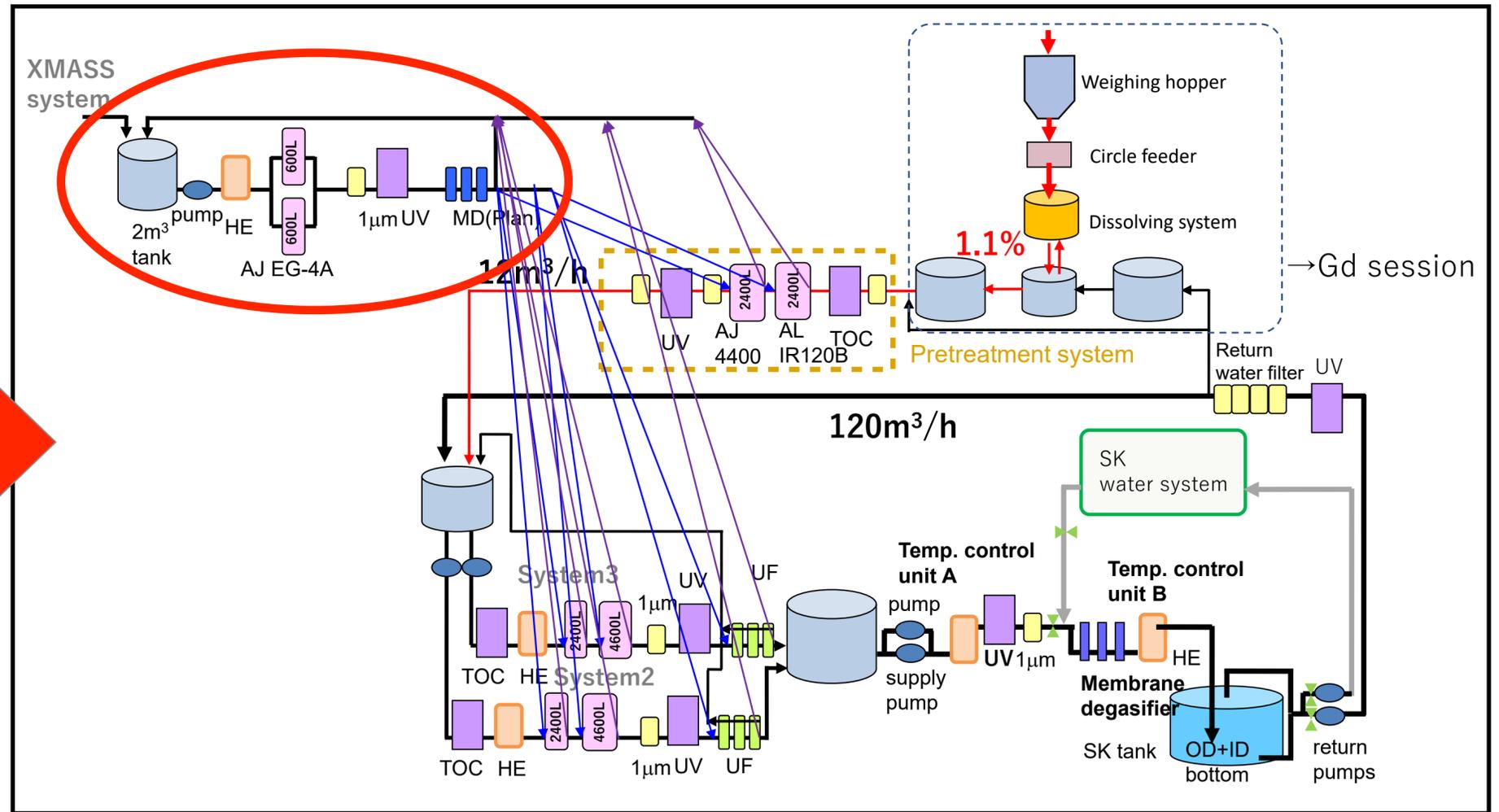
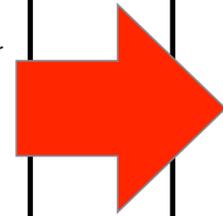
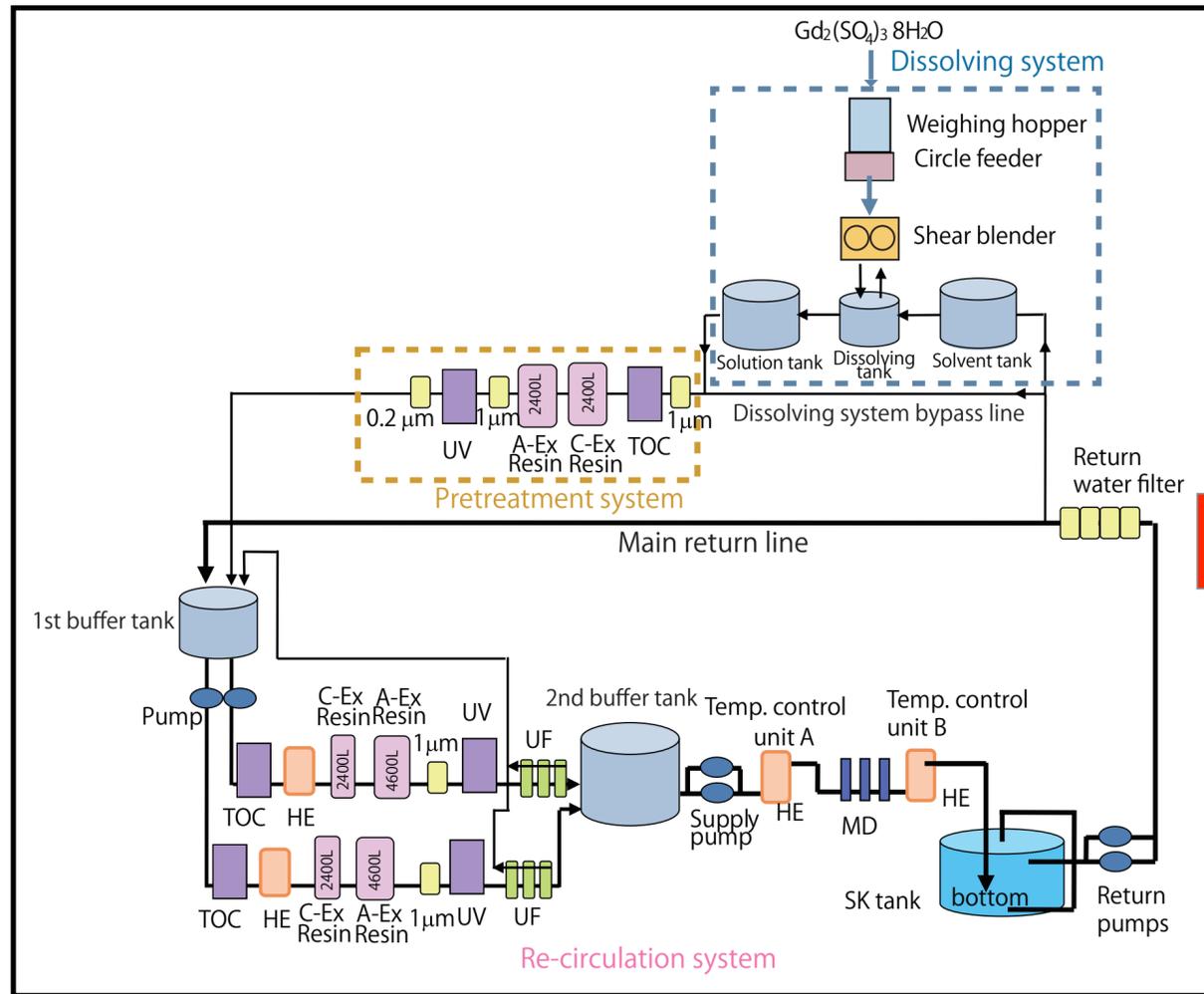
SK-Gd アップグレード



- ・ Gdを入れて以来、
ダークレートが上がっている
- バクテリアが原因か？
→ 殺菌用UV増設



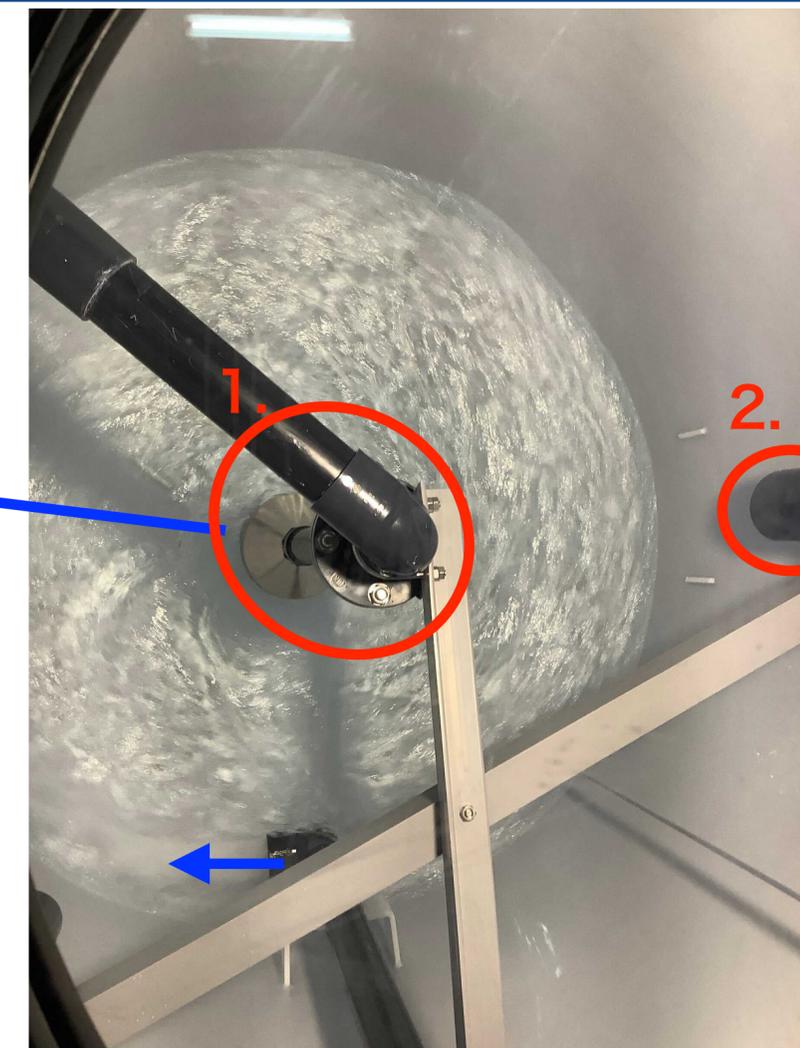
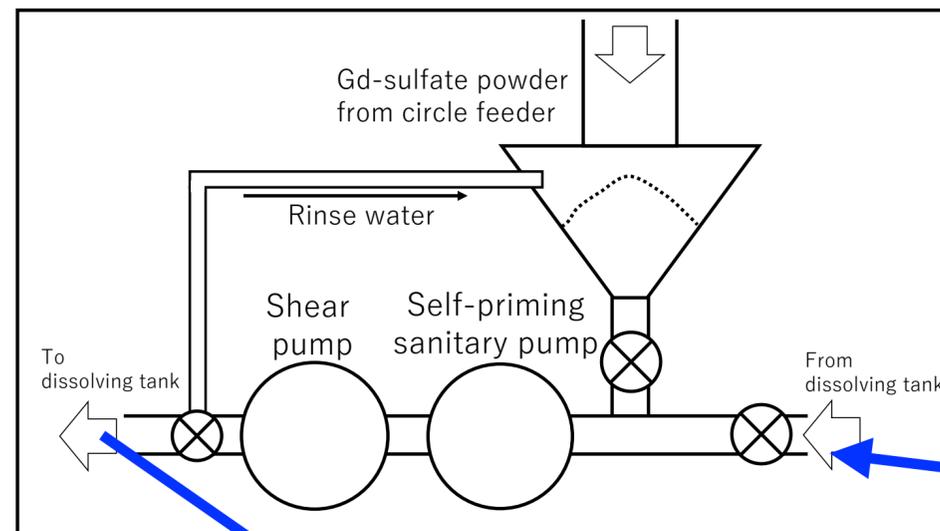
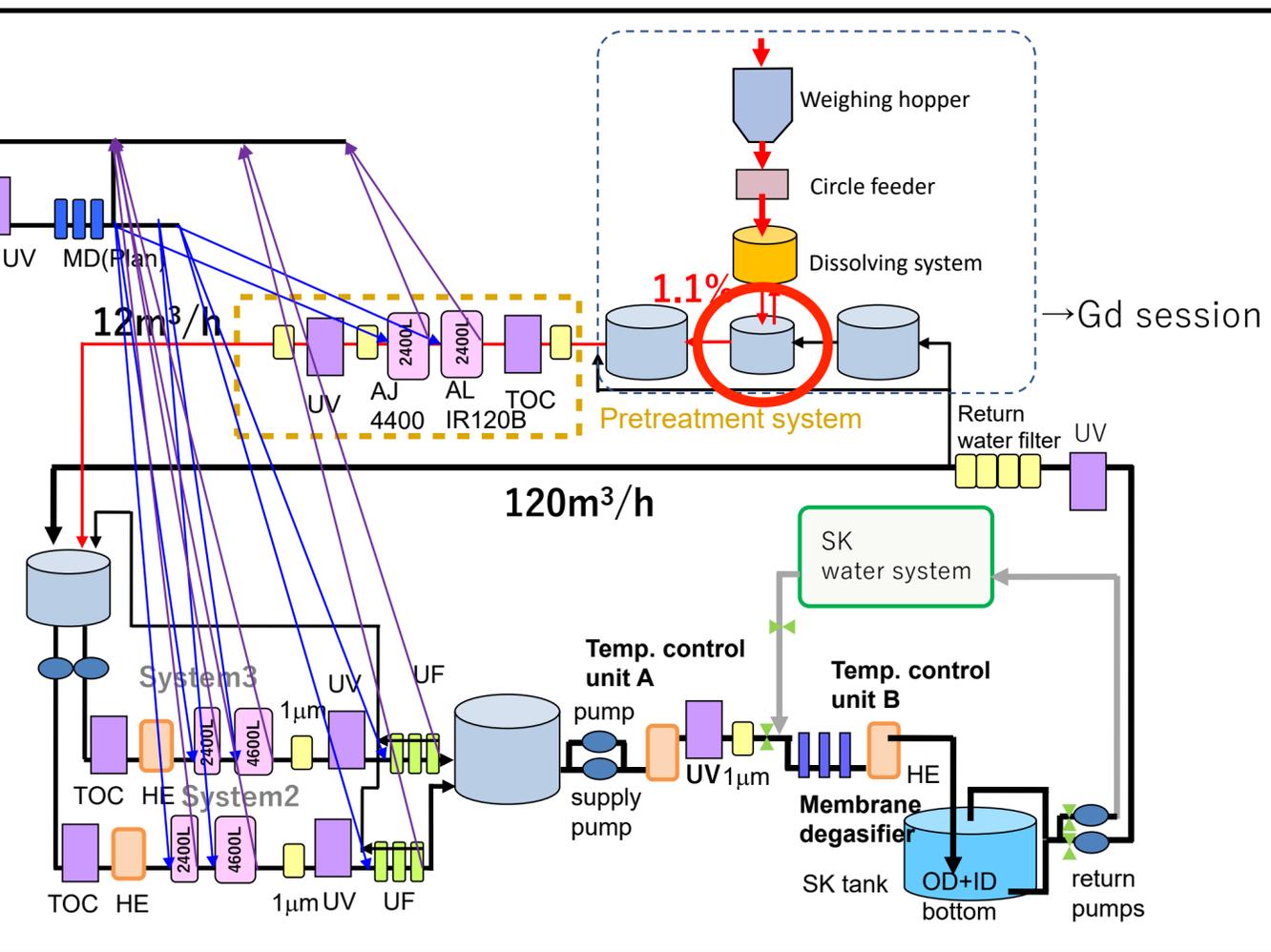
SK-Gd アップグレード



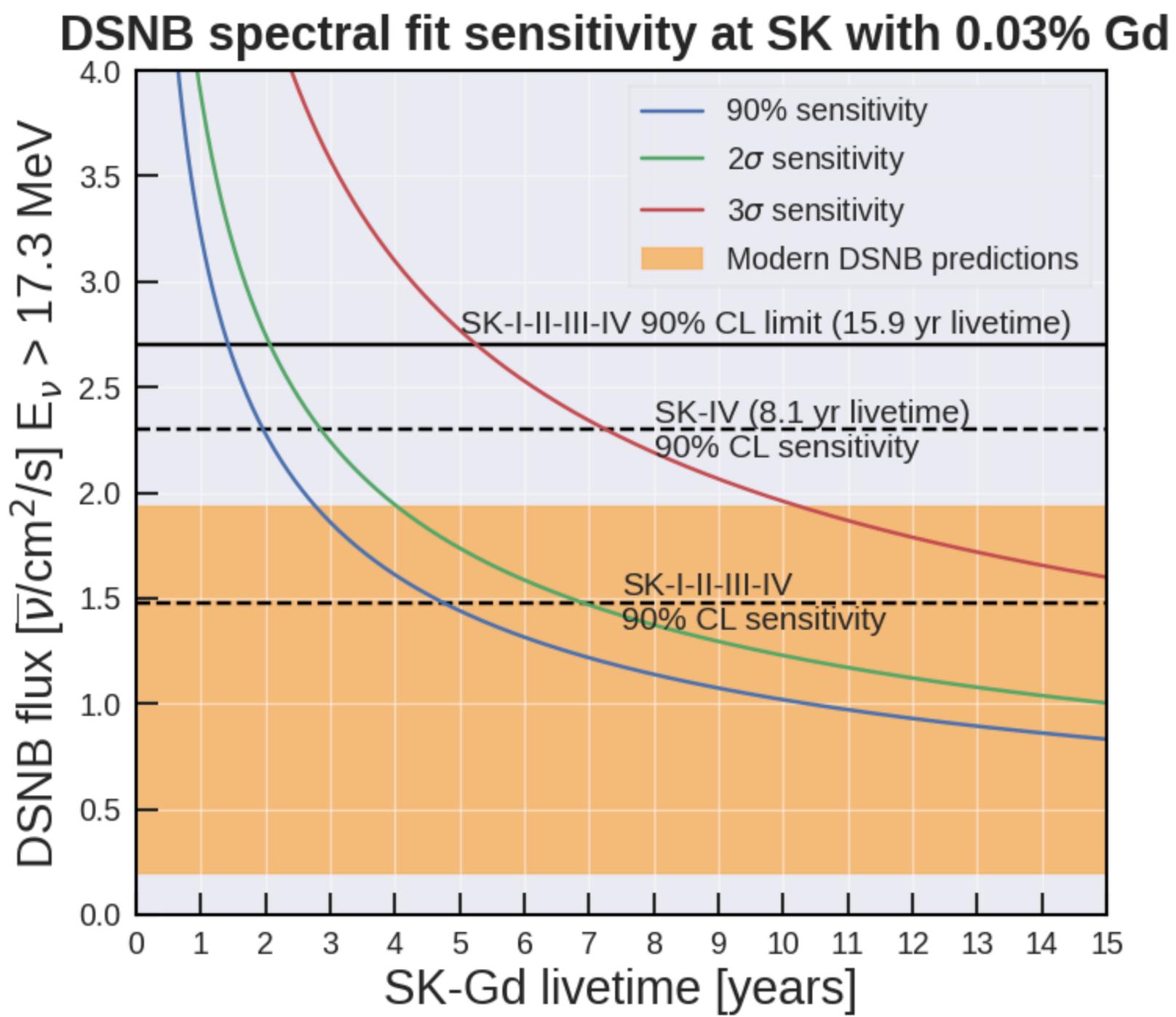
・ 多数回のイオン交換樹脂・フィルタ交換

- Gd水作製・純化装置室内で超純水を作成する事で、各モジュールを容易にフラッシング可能に

SK-Gd アップグレード



- ▶ 前回の倍の硫酸Gdを溶かすため、バッファとして使っている溶解槽を改造
 - 前回、溶けきらない粉が底にたまってしまっていた。溶解槽に粉がたまらないようにテーパ一部に押し流す渦を作り、できる限り回避していたが、倍量の水で渦を作るのは困難。。。
 1. テーパー下部のタンク出口近くに粉を直接送る
 2. 渦を作るのに邪魔になる配管をカット

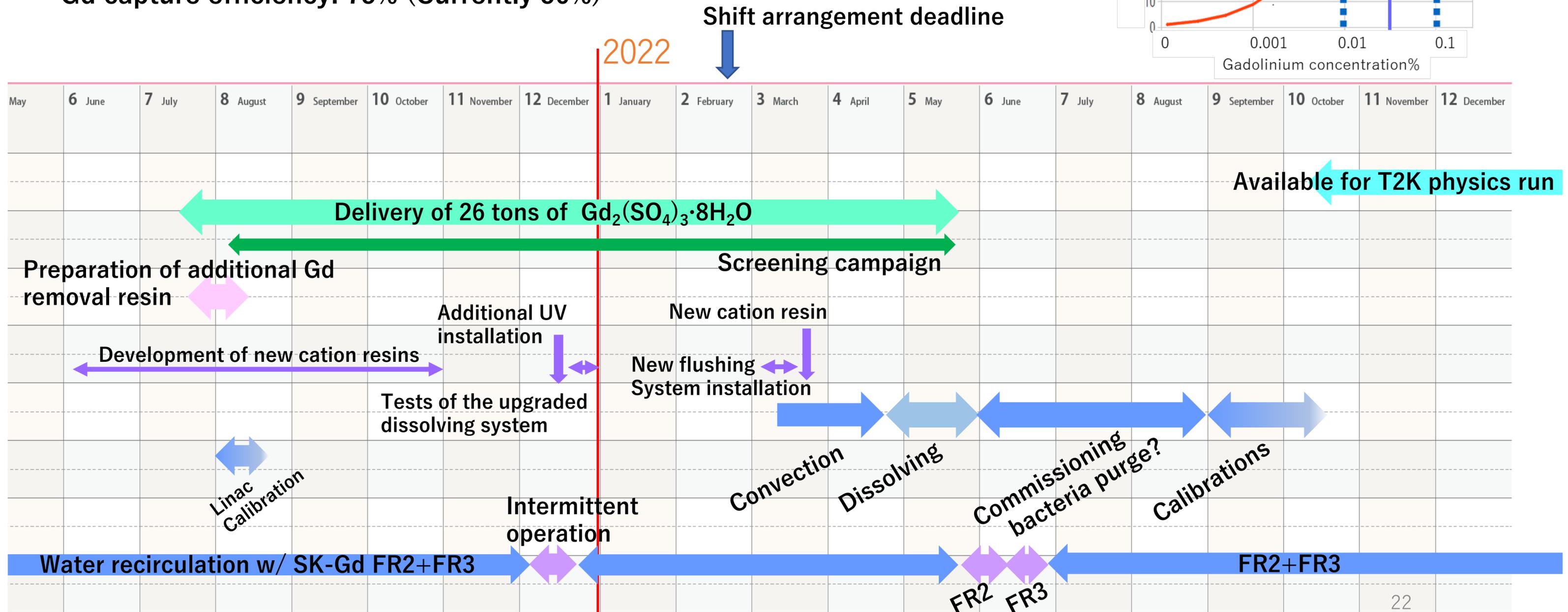
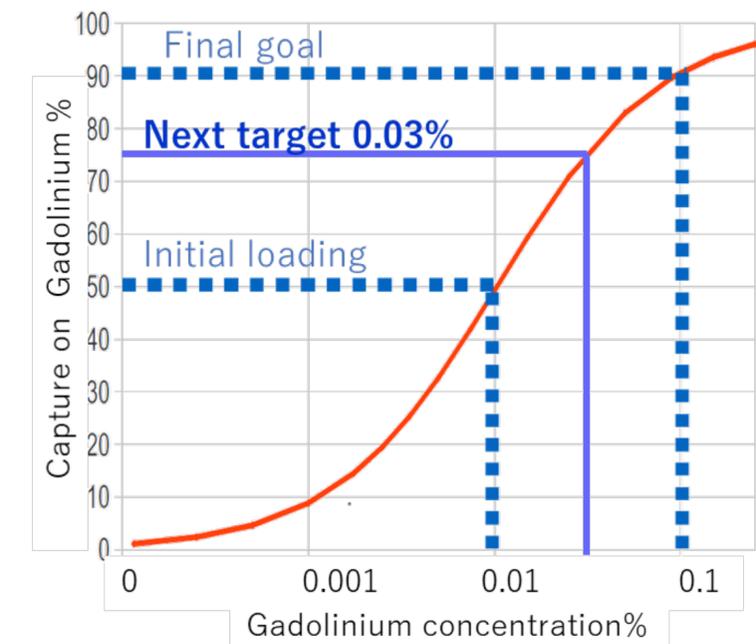


0.03% Gd水を用いた探索で、DSNBモデルのモデル領域に大きく踏み込める！

Schedule for T1.5

Dissolving additional 26 tons of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ in May 2022 starting from GW?

- Target Gd concentration: 0.03% (Currently 0.011%)
- Gd capture efficiency: 75% (Currently 50%)



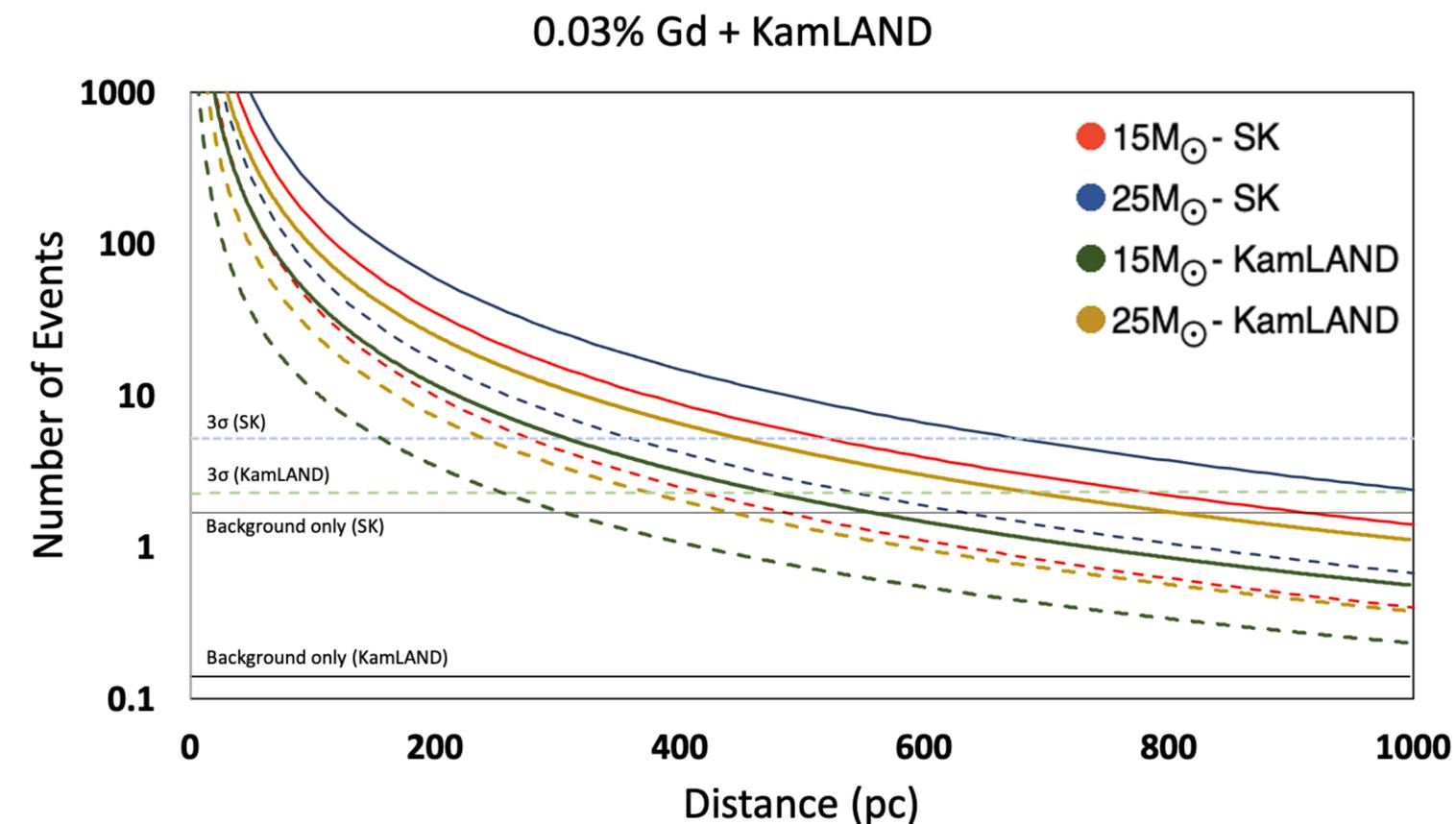
SK Supernova alert on GCN

SK Supernova alert on GCN Notice

- Since April 2021, SK supernova alert is now published on GCN (The Gamma-ray Coordinates Network) with the machine-readable format, too.
- An alert will be automatically published within some minutes from the detection of a neutrino burst by SK if the signal is significantly large. A bit lower significance signal generates an alert after expert check (<~ 1 hour)
- Almost 100% detection efficiency for core-collapse supernovae upto SMC. The typical error of SN direction is a few degree for SN in our galaxy.
- The notice (SK_SN) can be received with the same framework as other GCN notices; GRB, GW and high energy neutrino alerts. A dummy (test) alert is published for test every month (on 1st day of the month).
- For more details about SK_SN Notice, refer to https://gcn.gsfc.nasa.gov/sk_sn.html

An example of SK_SN Test Notice (1 per month) Distributed with binary and VOEvent formats

```
////////////////////////////////////  
TITLE: GCN/SK_SN NOTICE  
NOTICE_DATE: Mon 01 Nov 21 00:00:14 UT  
NOTICE_TYPE: SK_SN TEST  
TRIGGER_NUMBER: SK_SN 10030  
SRC_RA: 254.4000d {+16h 57m 36s} (J2000),  
254.6087d {+16h 58m 26s} (current),  
253.9223d {+16h 55m 41s} (1950)  
SRC_DEC: +31.2600d {+31d 15' 36"} (J2000),  
+31.2275d {+31d 13' 39"} (current),  
+31.3360d {+31d 20' 10"} (1950)  
SRC_ERROR68: 0.64 [deg radius, stat-only, 68% containment]  
SRC_ERROR90: 0.91 [deg radius, stat-only, 90% containment]  
SRC_ERROR95: 1.04 [deg radius, stat-only, 95% containment]  
DISCOVERY_DATE: 19518 TJD; 304 DOY; 21/10/31 (yy/mm/dd)  
DISCOVERY_TIME: 82816 SOD {23:00:16.74} UT  
N_EVENTS: 64124 (Number of detected neutrino events)  
ENERGY_LIMIT: 7.00 [MeV] (Minimum energy of the neutrinos)  
DURATION: 10.0 [sec] (Collection duration of the neutrinos)  
DISTANCE: 2.16 - 2.95 [kpc] (low - high as SN1987A like SNe)  
COMMENTS: The position error is statistical only, there is no systematic added.  
COMMENTS: All numbers are preliminary.  
COMMENTS:  
COMMENTS: NOTE: This is a TEST Notice.  
COMMENTS:
```



- ▶ SK-Gdによる超新星爆発アラームをGCNへ発行可能になった！
 - さらに、中性子検出によるIBD事象タグによって方向決定精度が向上
- ▶ 近傍超新星爆発(Betelgeuse@~200pcなど)では、シリコン燃焼による前兆信号(Pre-SN)も観測可能
 - SK内部では、Pre-SNアラームの運用も既に開始している
 - 今後、カムランドアラームと合わせてGCNに送れるよう、調整中

- ▶ 超新星背景ニュートリノ初観測を目指したSK-Gd実験が進行中
 - SK純水データを用いた解析ではいくつかのモデルで予言される領域に到達
 - Gd水データでは、高い信号検出効率と低いアクシデンタル頻度が期待される
- ▶ ガドリニウム導入量を0.03%に上げたSK-Gdのアップグレード計画が進行中
 - 初夏のGd追加導入に向けた、装置のアップグレードを計画・実行中
- ▶ 超新星背景爆発前兆ニュートリノの、GCNへのカムランドと合わせたアラーム発行を目指している