

# スーパーカミオカンデ SK-Gdによる 超新星ニュートリノ探索、太陽ニュートリノ

2025年1月29、30日

令和6年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会

東京大学柏キャンパス

日野陽太

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

# Contents

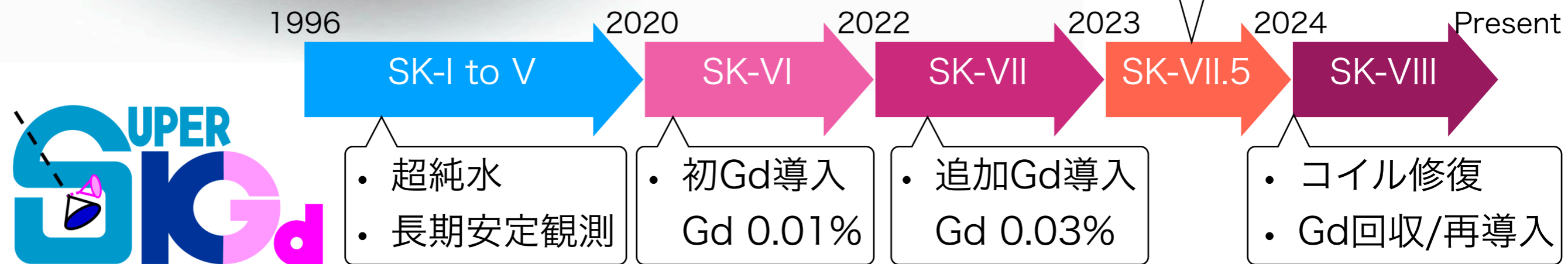
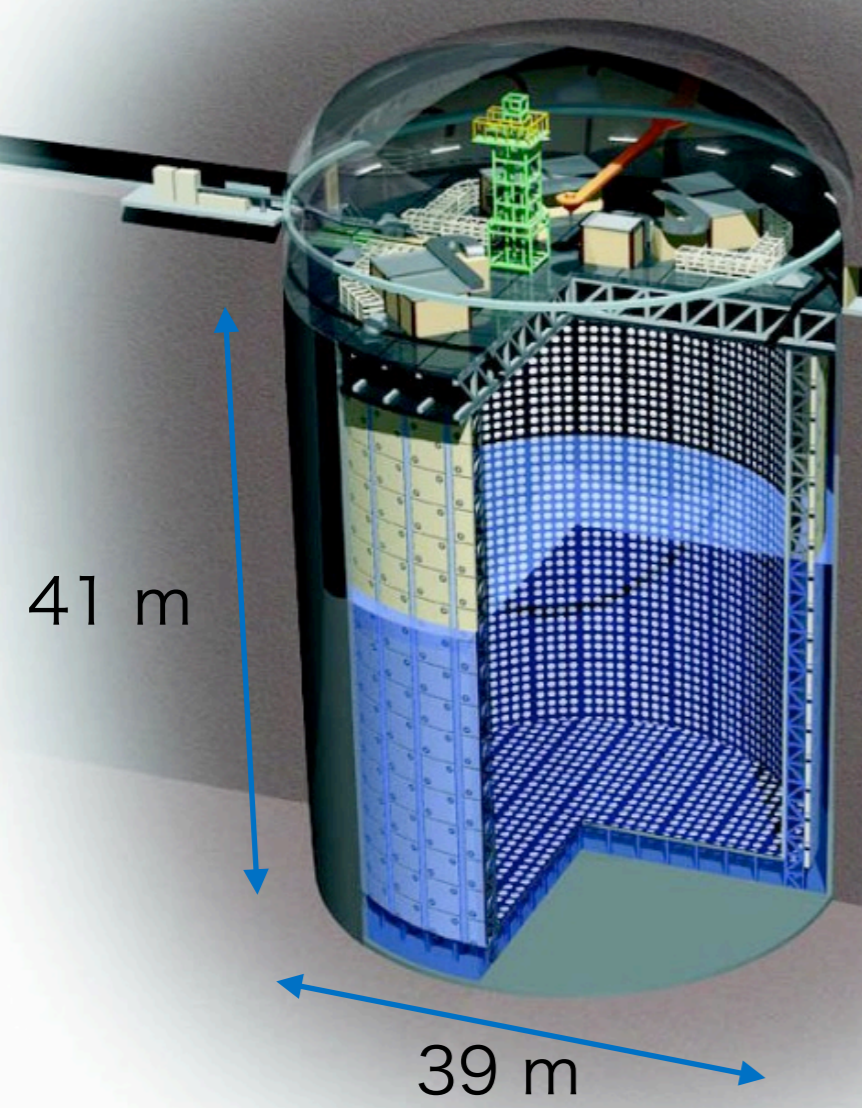
- SK-Gdによる超新星ニュートリノ探索、太陽ニュートリノ
  - SK検出器の状況:  
磁気補償コイルの修復、Gd回収・補填
  - ニュートリノ探索・観測:
    - ▶ 超新星背景ニュートリノ探索
    - ▶ 原子炉ニュートリノの初観測
    - ▶ 太陽ニュートリノ観測

**Super-Kamiokande Collaboration: >200 collaborators, 55 institutes, 11 countries**



# Super-Kamiokande

- 50 kton water Cherenkov detector
  - ID: 11129 × 20 inch PMTs
  - OD: 1885 × 8 inch PMTs
  - 1 km underground  
-> 2600 m.w.e overburden
- A new phase began with 0.01% Gd water in 2020 (**SK-VI**).
- Additional Gd loading in 2022.  
-> **SK-VII** has begun w/ 0.03%.

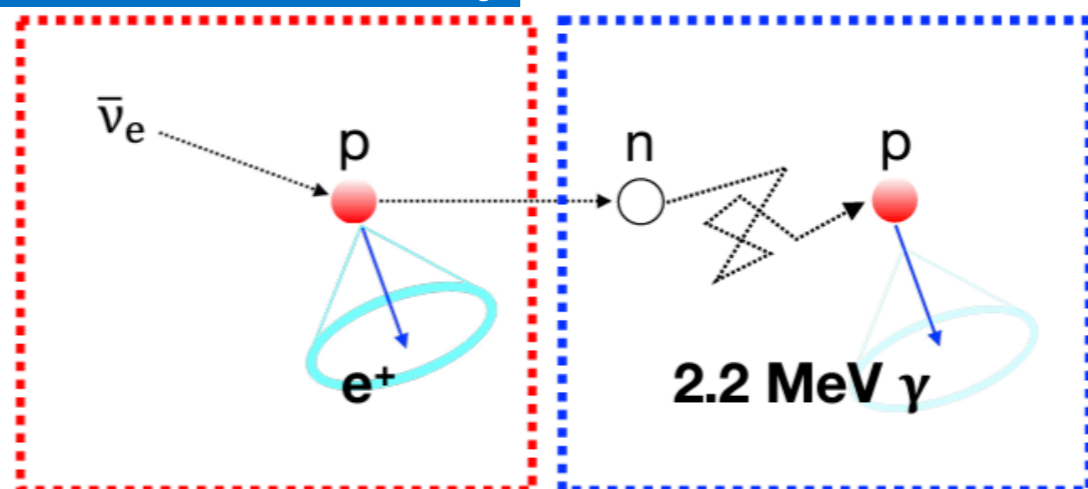


# SK-Gd Project

- Dissolving Gd to enhance detection capability of neutrons from  $\nu$  interactions.

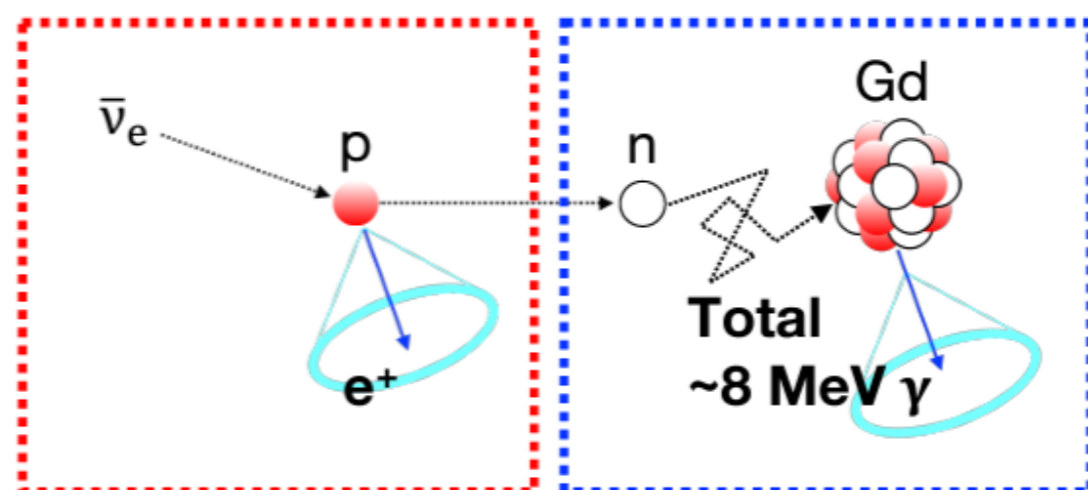
J. Beacom and M. Vagins, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 171101

## Inverse beta decay



Prompt event  $\longrightarrow$  Delayed event

$\sim 200 \mu\text{sec}$



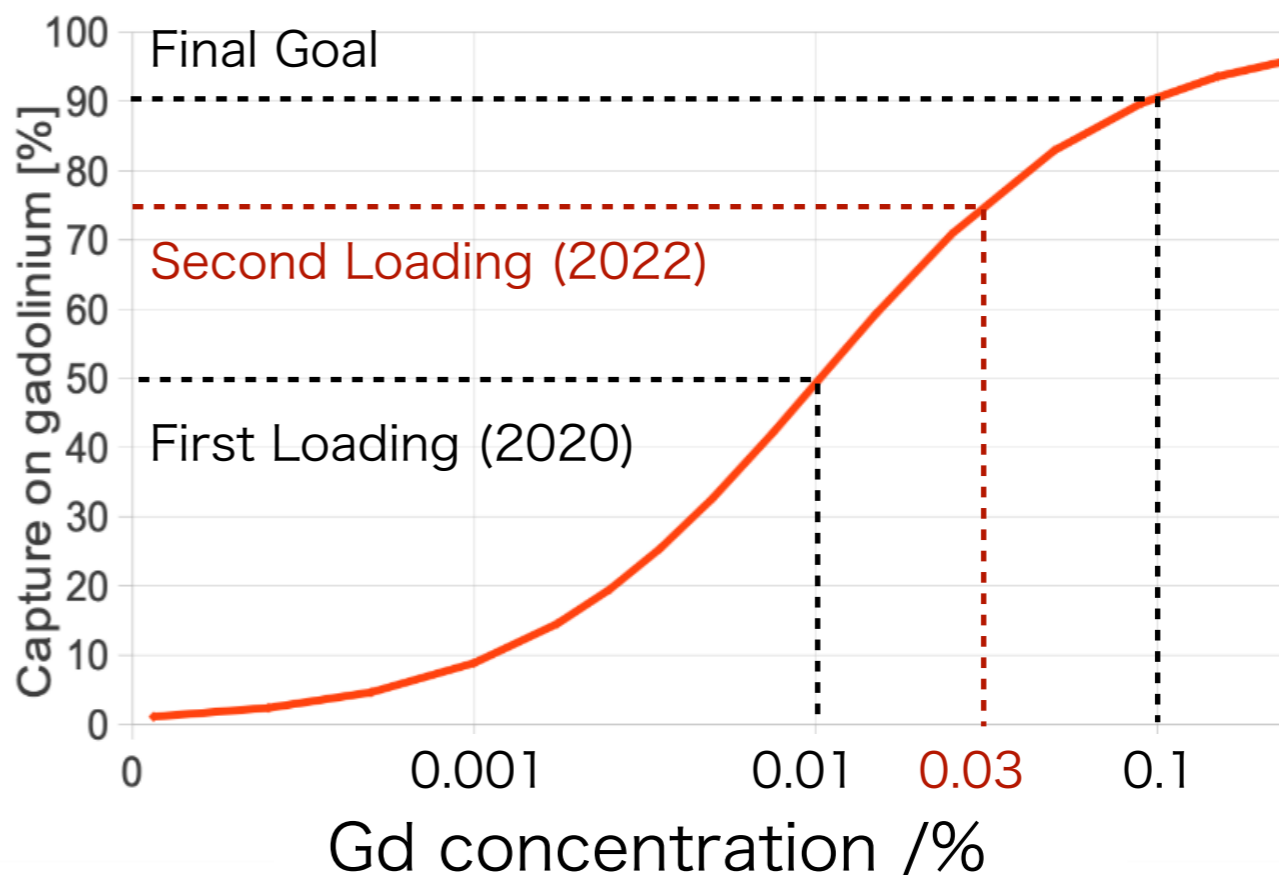
Prompt event  $\longrightarrow$  Delayed event

$\sim 110 \mu\text{sec}$  at Gd 0.01%

$\sim 60 \mu\text{sec}$  at Gd 0.03%

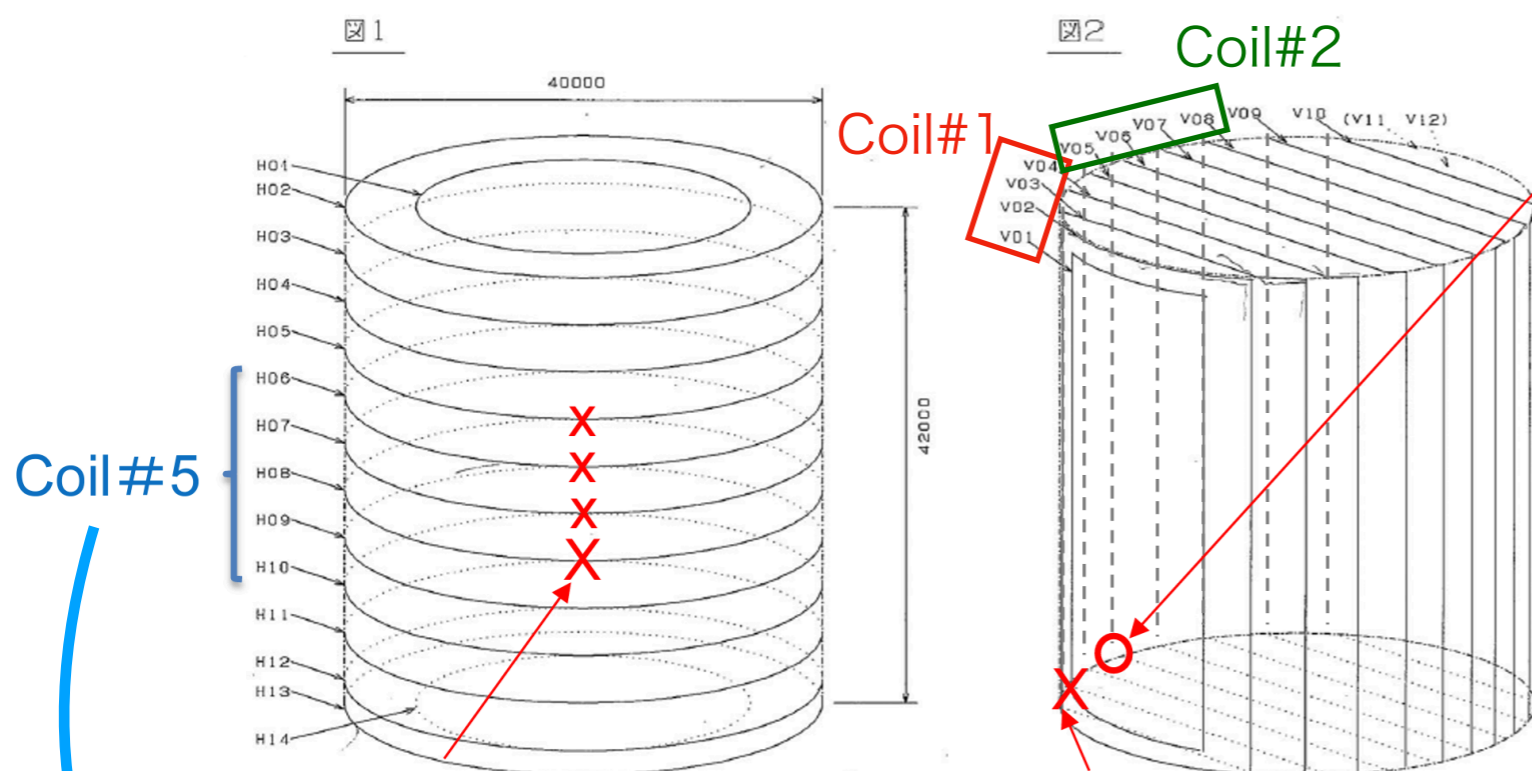
## $\bar{\nu}_e$ IBDの遅延同時計測

- 先発-後発信号に強い時間・空間相関
- Gd捕獲による高いエネルギーの後発信号  
→ S/Nの大きな改善!

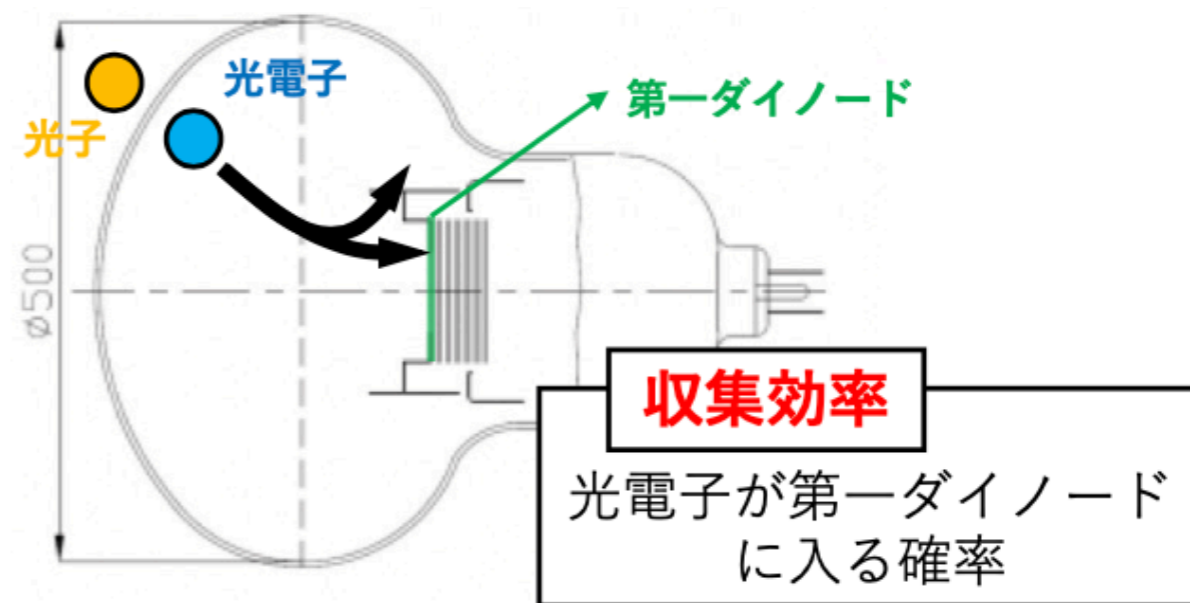
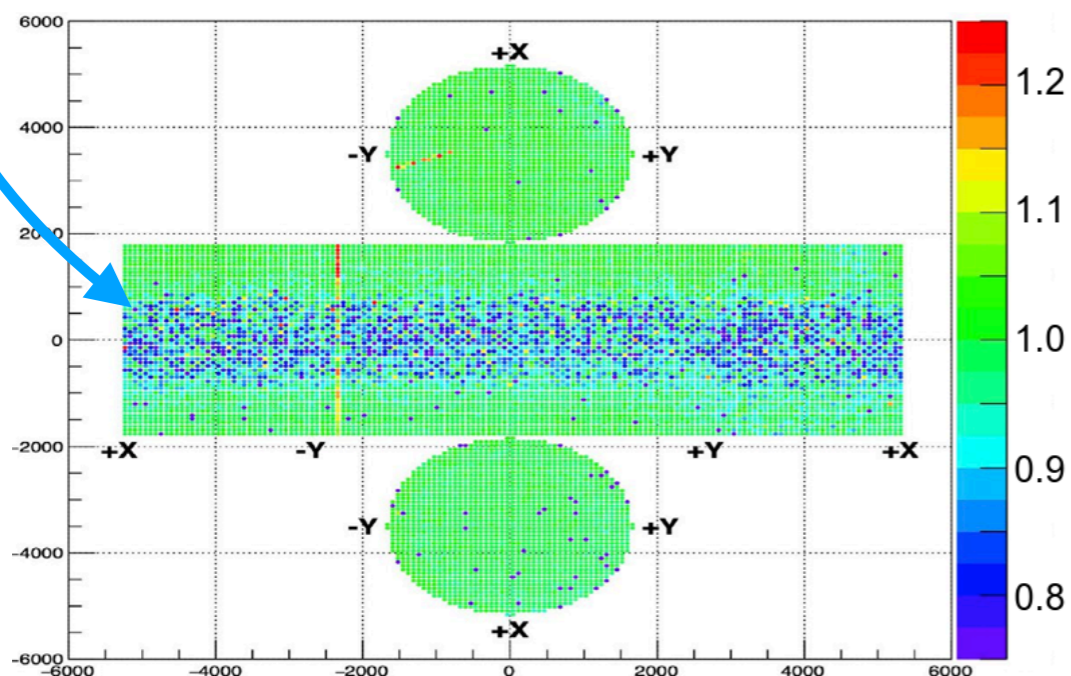


# Coil Failure

- 2023年11月から12月にかけて3箇所の磁気補償コイルが故障。

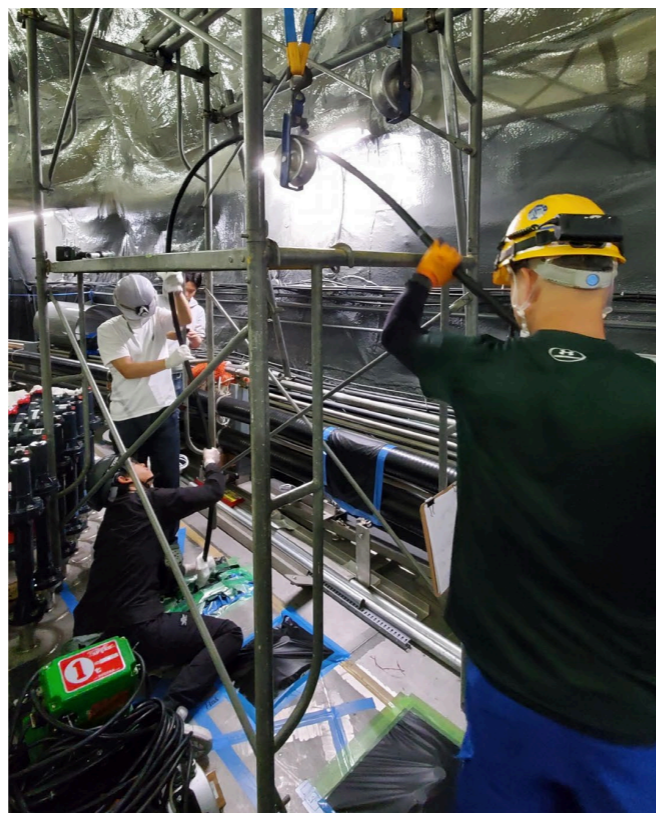
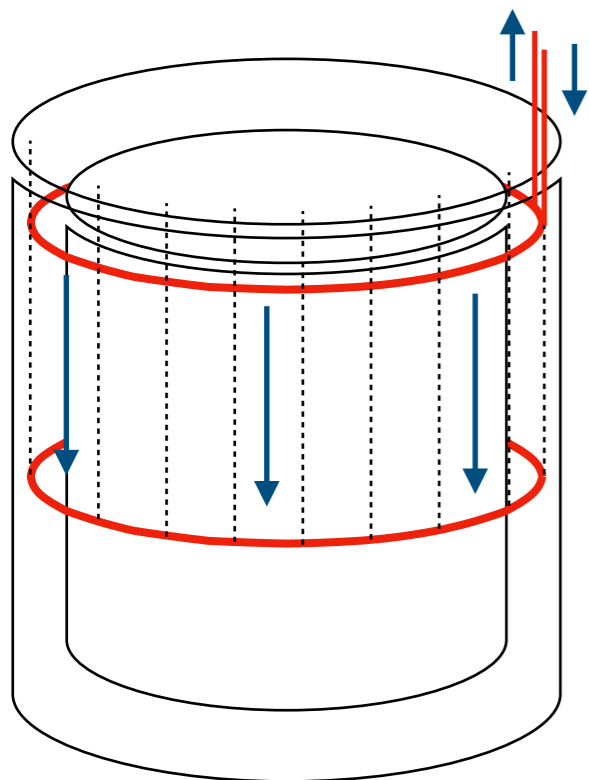


- 4本1組で通電
- Coil#1と2では実際に切れたV01とV06を迂回して通電することでそれぞれ対処した。
- Coil#5は検出器外から対処できなかった。→ 2024年7月までCoil#5 offで運転 (SK-VII.5)
- 新たに水平・垂直コイルを設置するコイル修理を7-8月に行った。

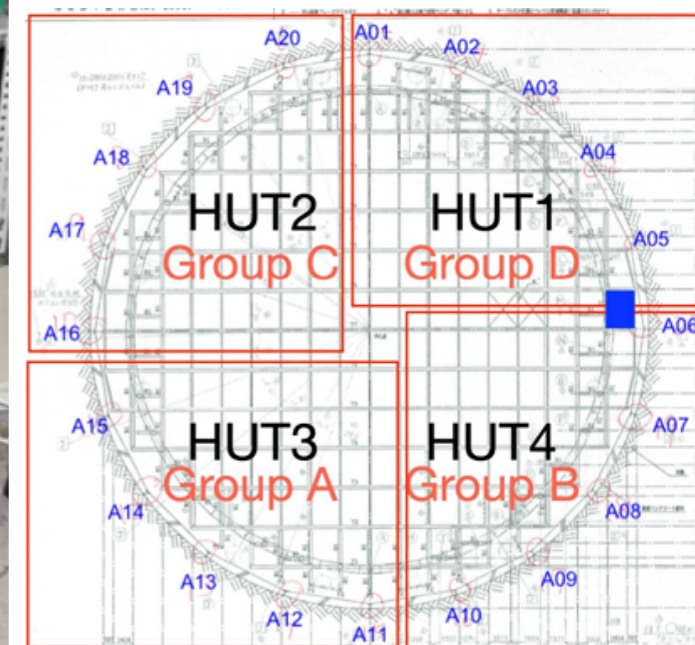
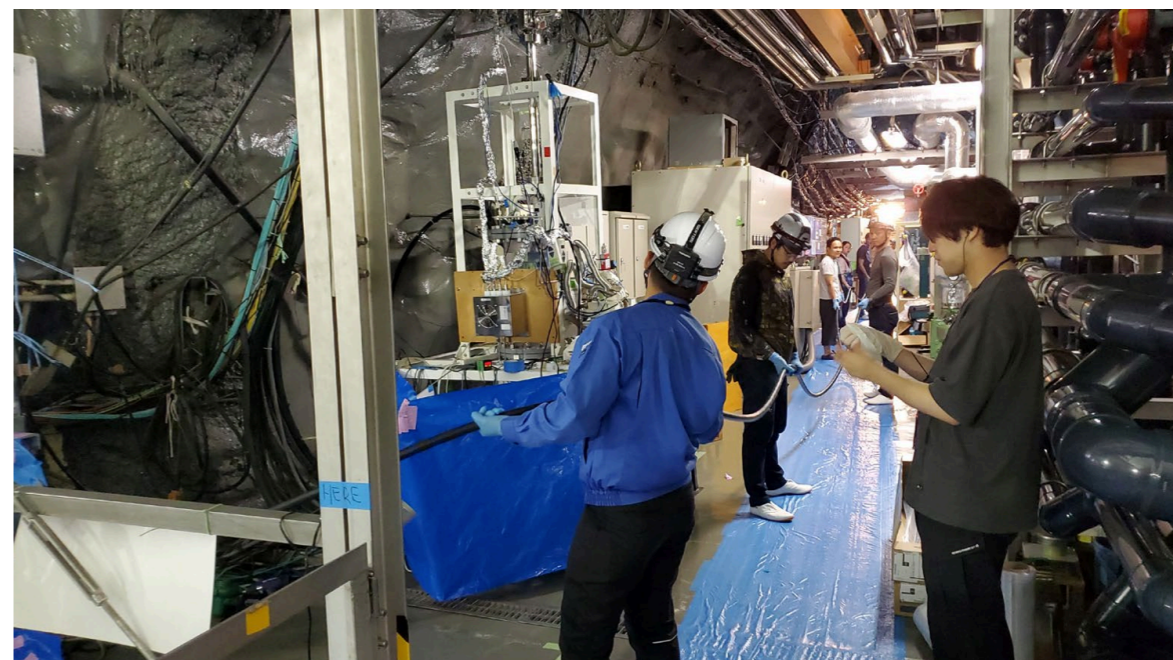


# Coil Repair Work

- 一本の長いケーブルを検出器外から内へ通して吊り下げ、収縮しないようにSUS管で固定。



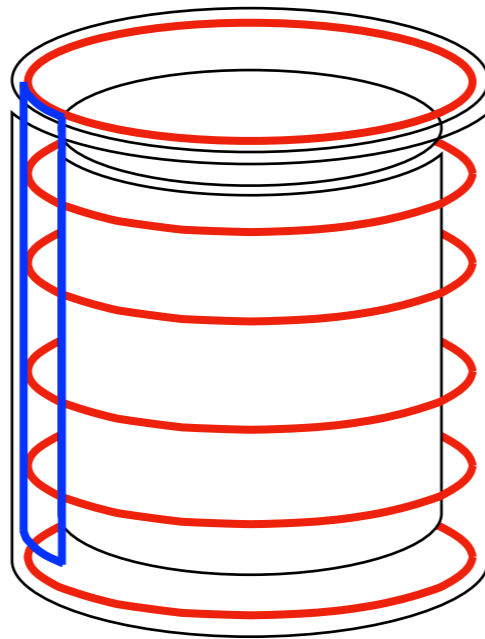
- 吊っている20箇所ですべて同時に降ろす。
- 1コイル/日で作業。



# Coil Repair Work

- 6つの水平コイル、1つの垂直コイルを設置
- SK、T2Kメンバーから多数のシフトが参加
  - 水平コイル: 30人
  - 垂直コイル: 14人

一番下は暗くて見えないが、  
水面下に4つのコイルが設置  
されている



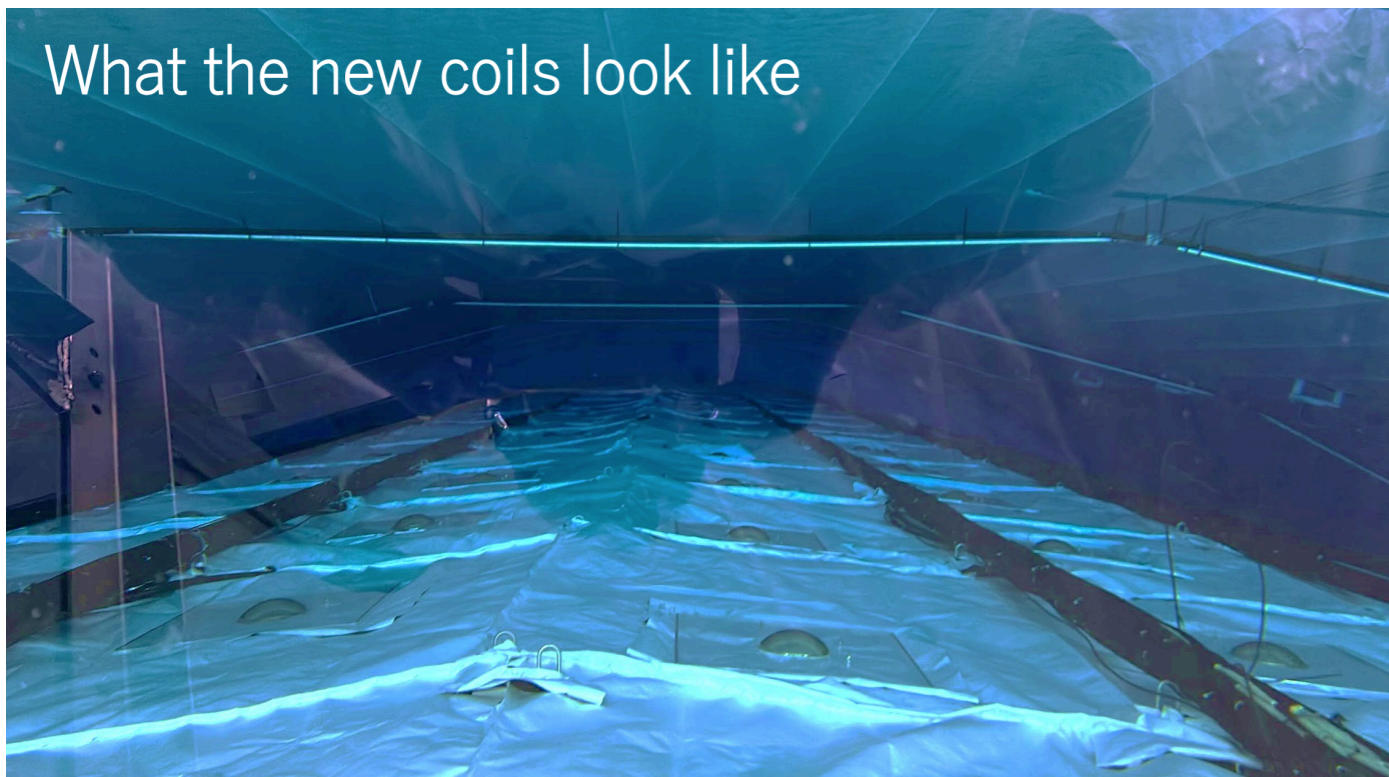
Horizontal Coil Team



Vertical Coil Team



What the new coils look like

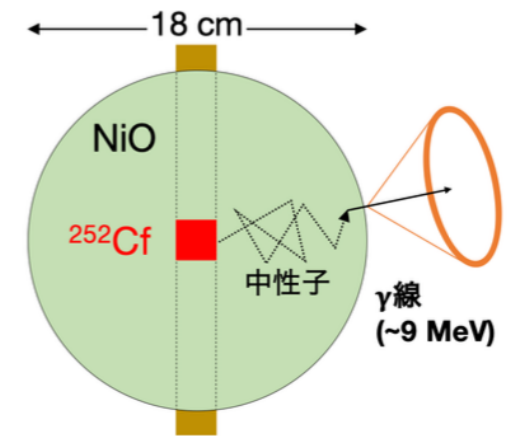


# Geomagnetic Compensation Back!

- コイル修理前後の検出器の均一度をNiCf校正データから評価。
- コイル破損前との相対的なcollection efficiencyをPMTごとに測定。

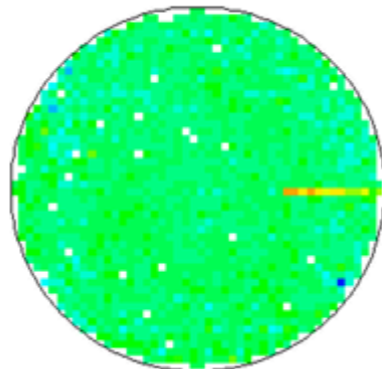
-> 一様なCEの回復を確認！

$$R_{CE} = \frac{\epsilon'_{CE}}{\epsilon_{CE}} = \frac{N'_{NiCf}}{N_{NiCf}}$$

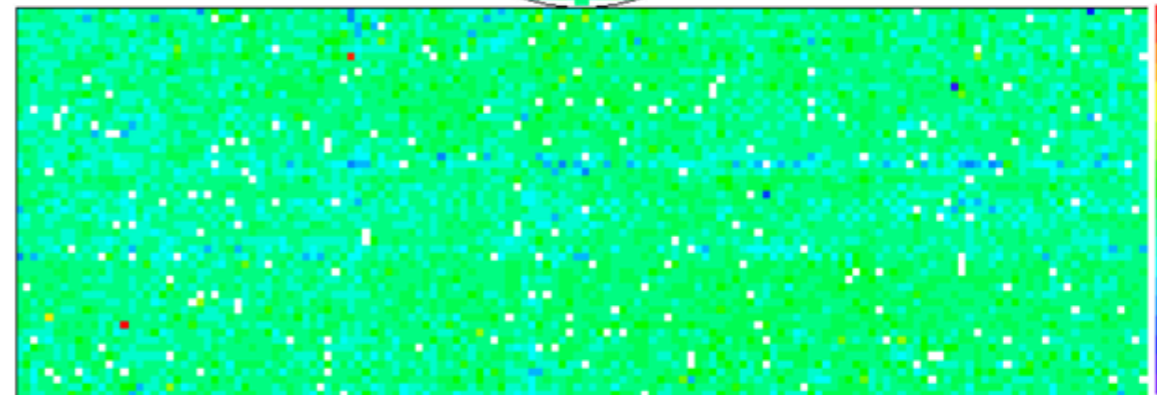
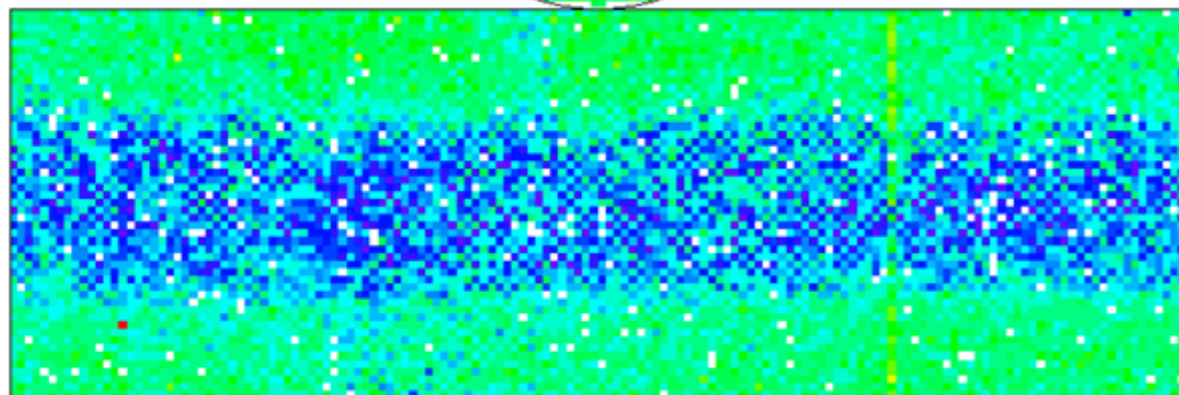
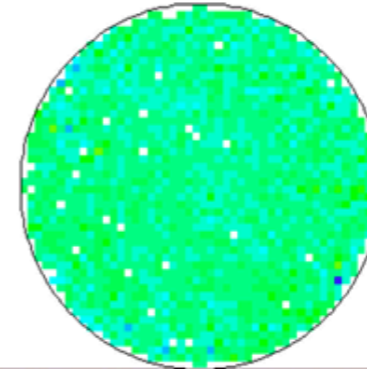


一様等方な低光量源

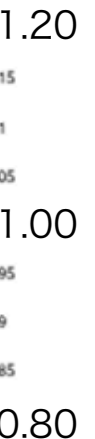
Coil#5 OFF



After Repair



Relative CE





# Diffuse Supernova Neutrino Background

超新星背景ニュートリノ (DSNB):

過去の超新星爆発で放出され現在の宇宙を漂うニュートリノ

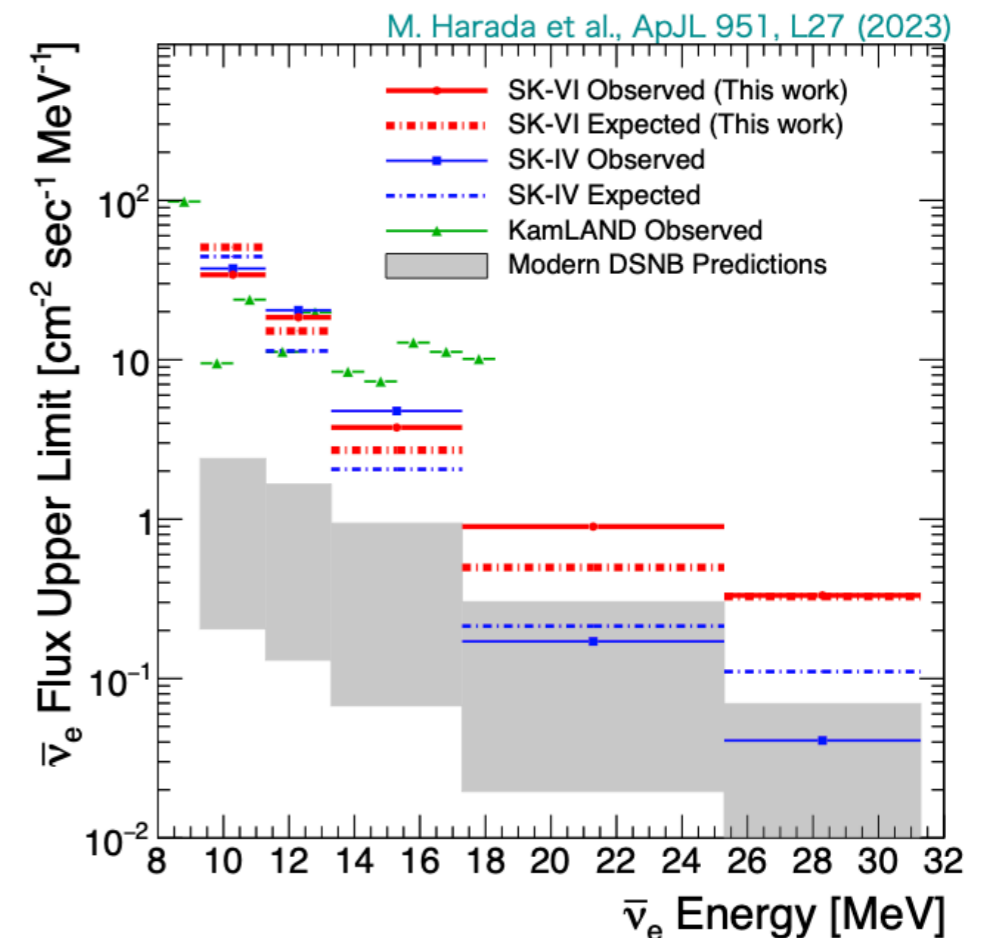
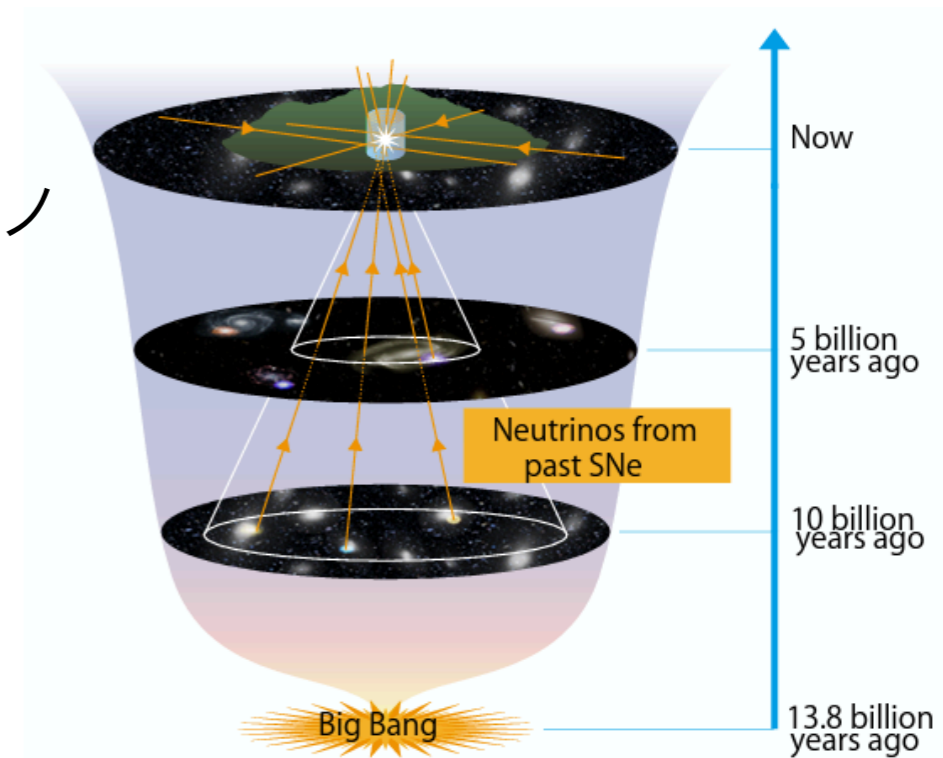
Red shift

$$\Phi_{\text{DSNB}}(E) \propto \int R_{\text{SN}}(z) \frac{dF_{\bar{\nu}}(E, z)}{dE} \left| \frac{dt}{dz} \right| dz$$

Supernova Rate SN  $\nu$  emission

- 宇宙の星形成の歴史を反映したスペクトルをもつ
  - 星形成率の時間変化
  - 超新星爆発ニュートリノフラックス
  - ブラックホールになる超新星の割合など
- 観測・理論からなる多数のモデルが提唱されている
- SKではこれまで
  - SK-VI (Gd 0.01%) 552.2日を用いた初期解析から、SK-VI 2970日の観測に匹敵する感度を得ている。

M. Harada et al, ApJL 951, L27 2023



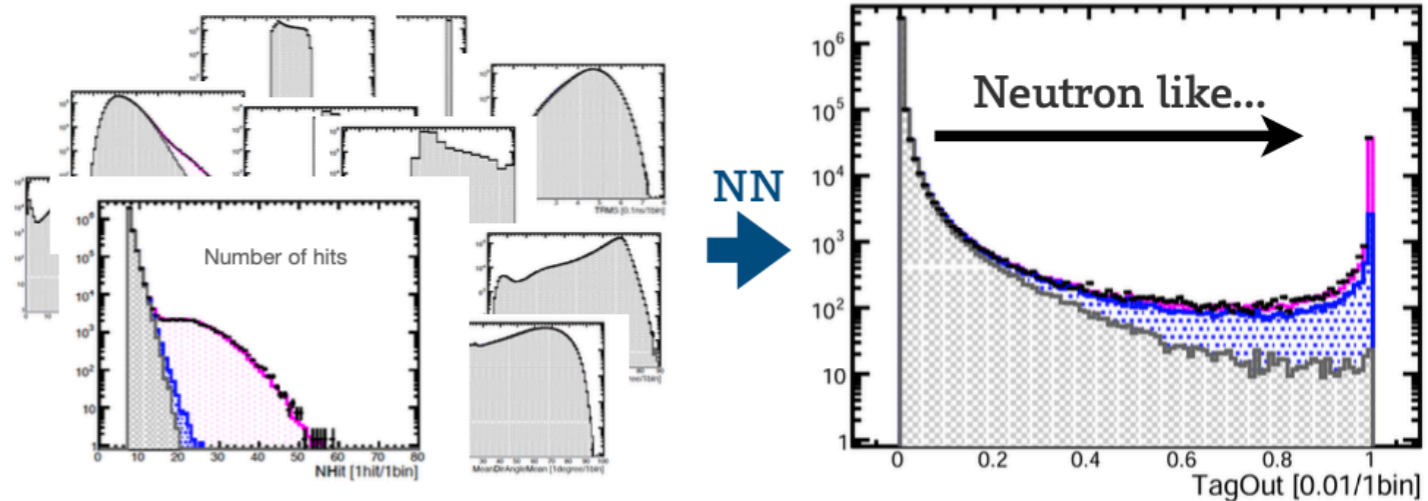
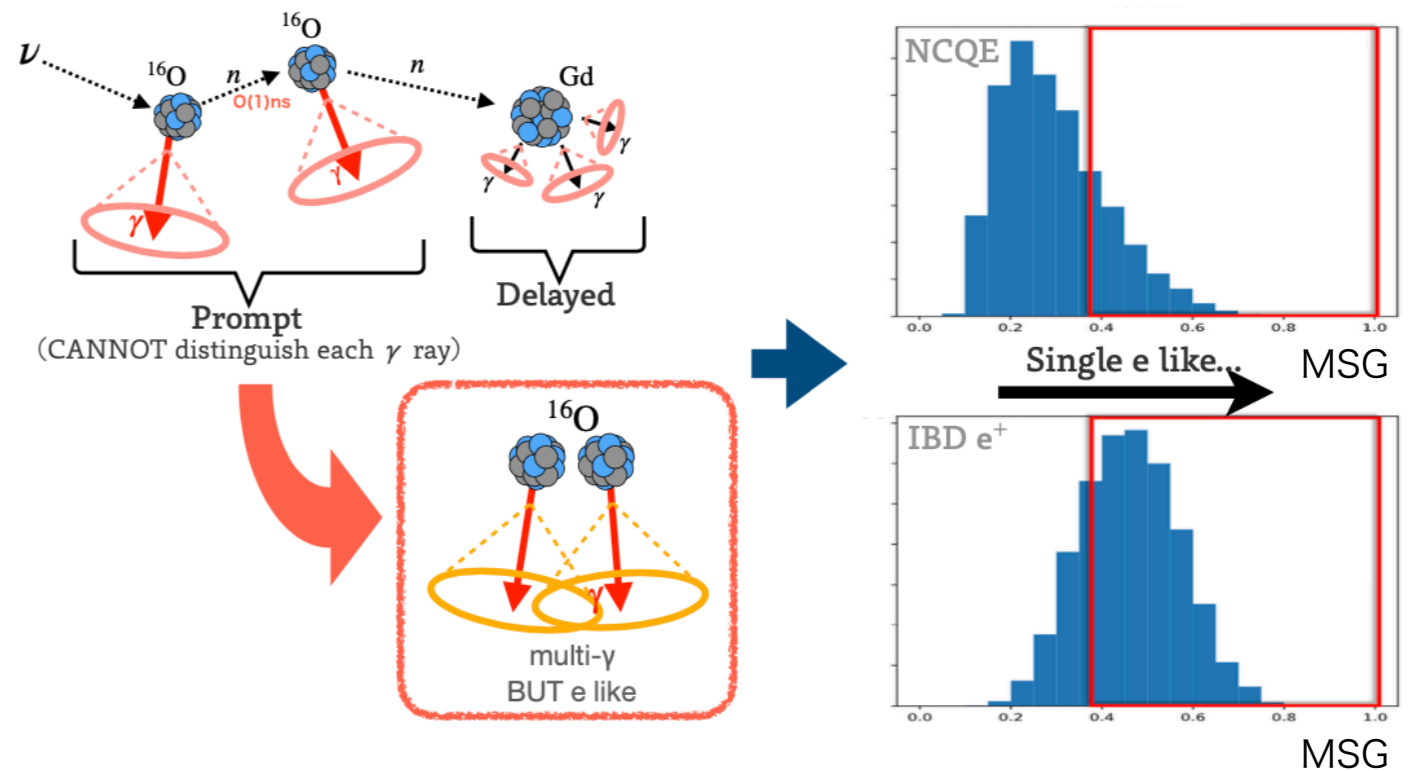
# DSNB Search Update

## 統計の向上:

- SK-VII (Gd 0.03%) 404.5日分のデータを追加  
-> Gd濃度向上による信号効率の上昇で、SK-VI 552.2日分に匹敵する統計量

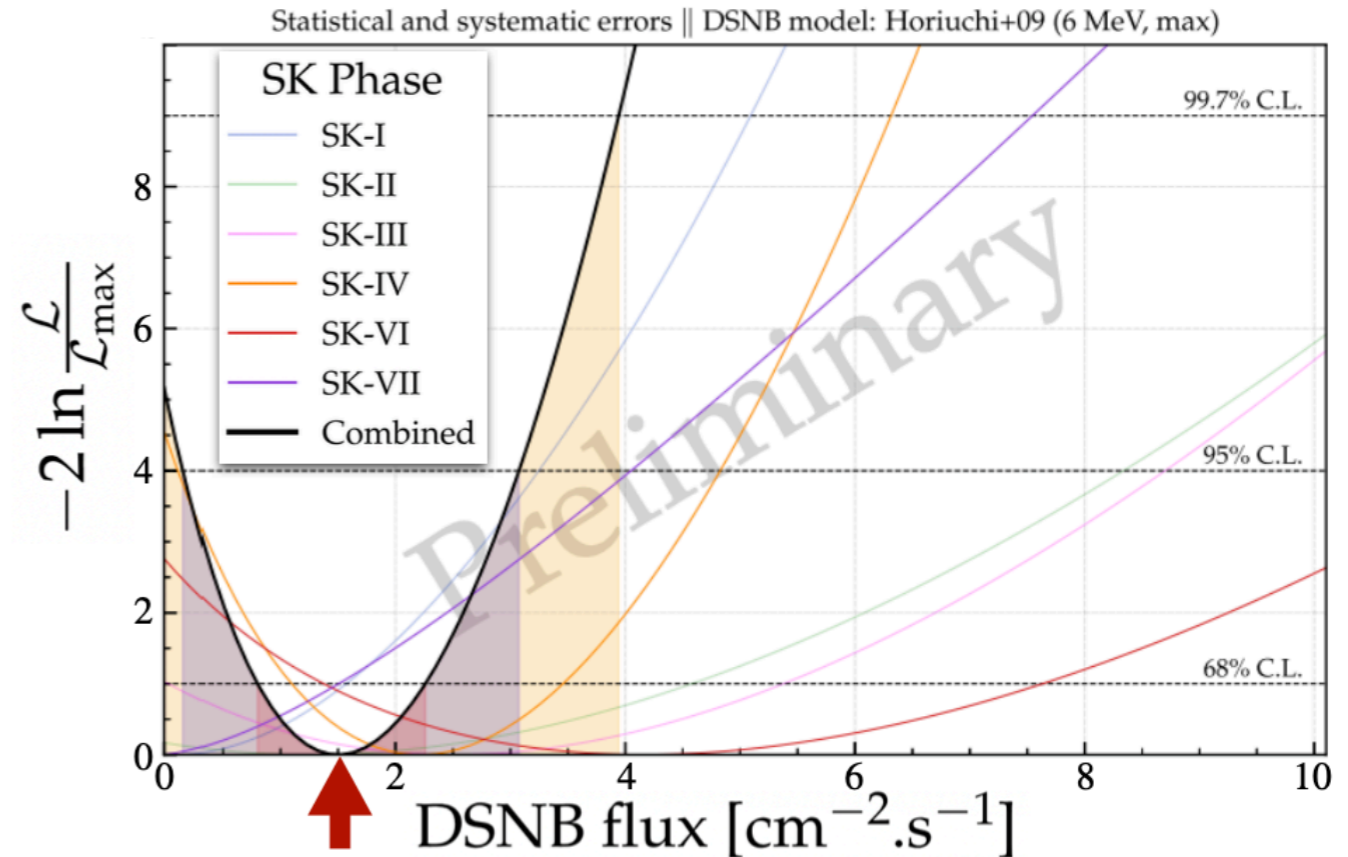
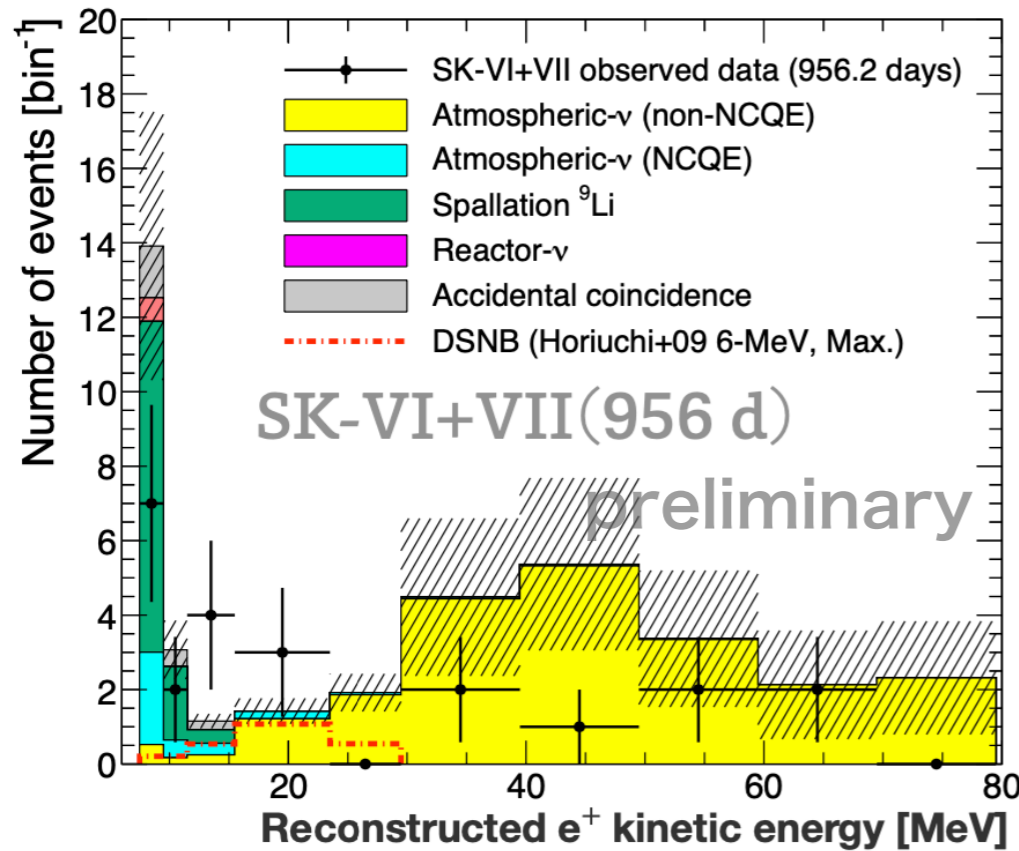
## 解析手法の改善:

- 大気ニュートリノ由来中性カレント反応(NCQE)の削減手法の開発
  - 電子多重散乱度によるガンマ線事象との分離  
-> NCQEを~90%削減
- 中性子検出アルゴリズムの刷新
  - ニューラルネットワークを用いた多変量解析手法の開発  
-> 従来手法から~1.2倍の中性子検出効率を達成

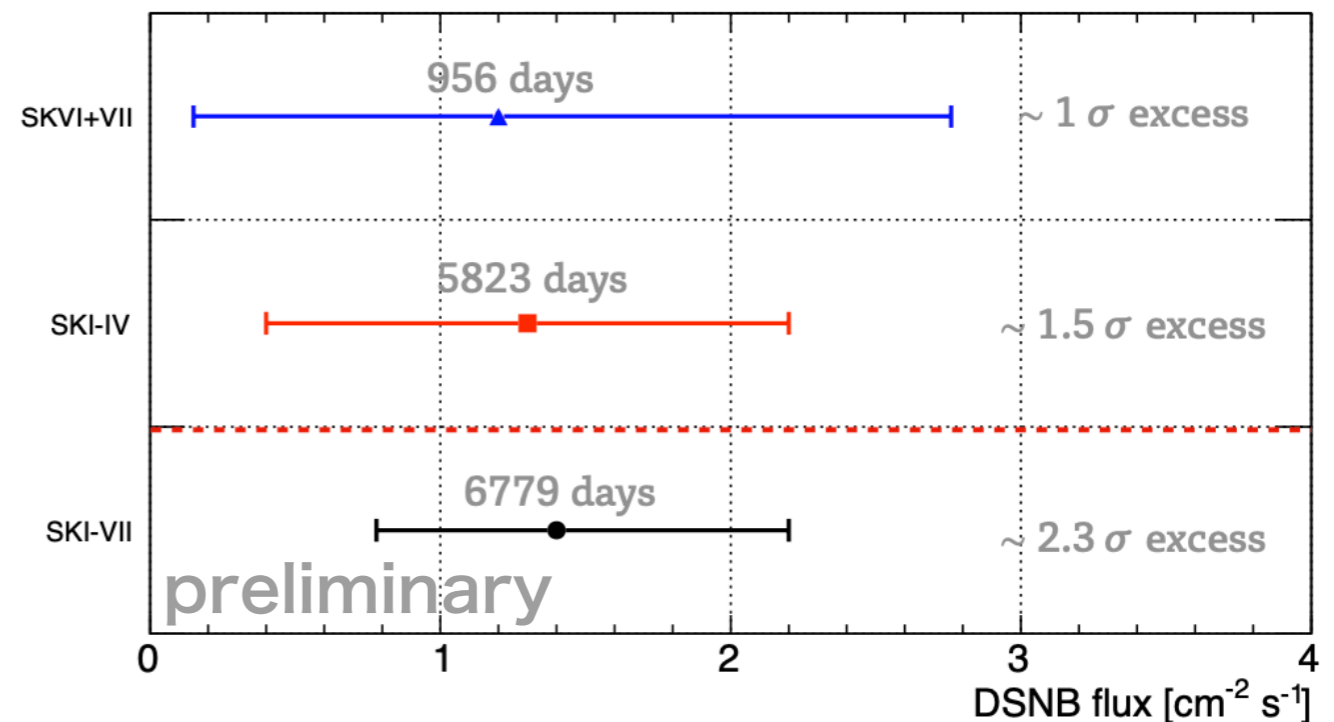


# Latest Result: DSNB

M. Harada, NEUTRINO2024

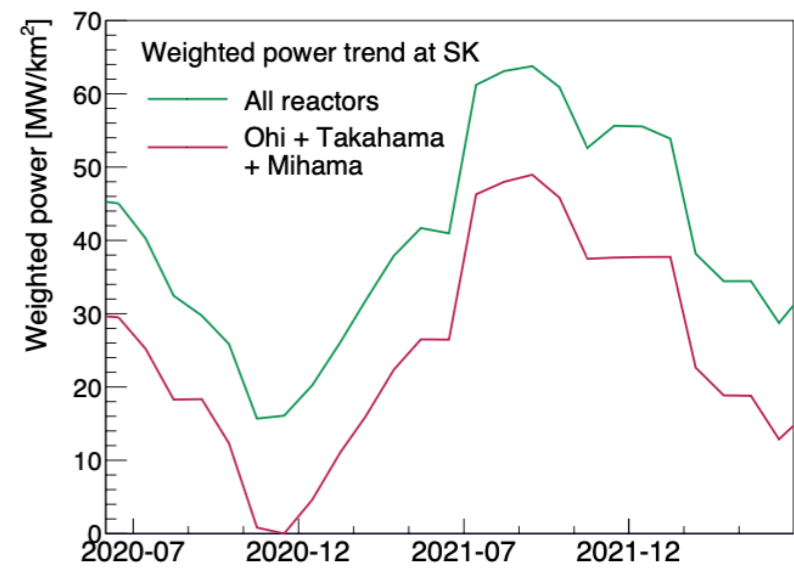
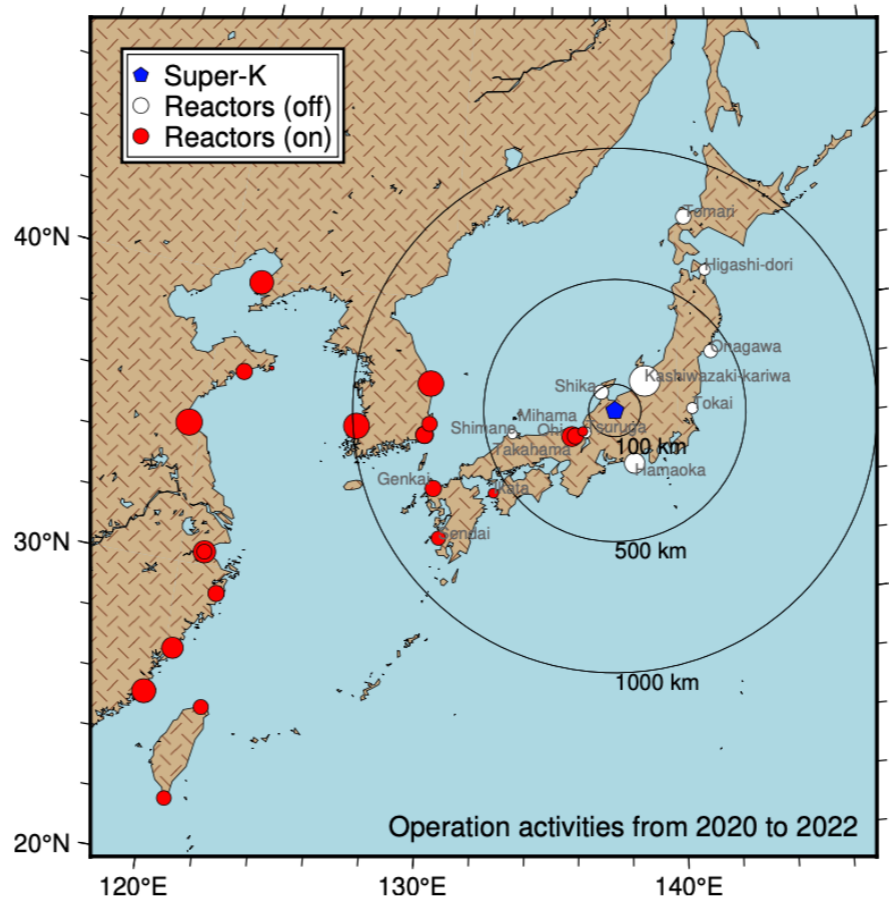
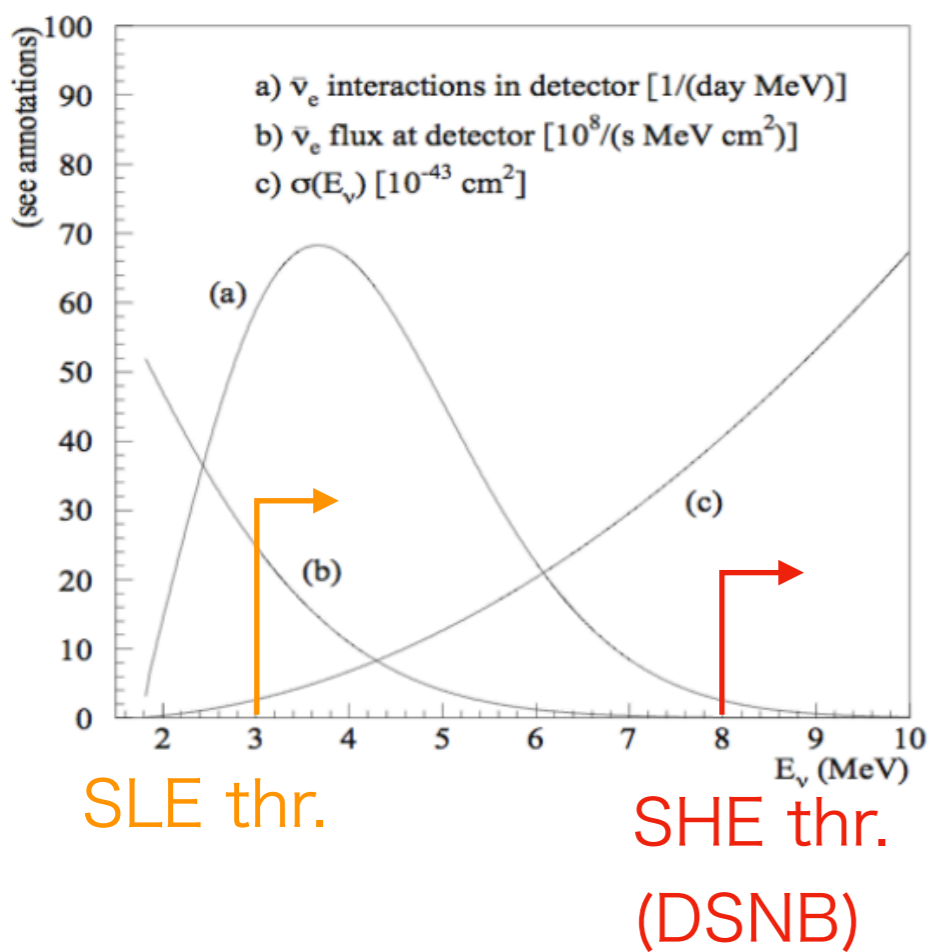
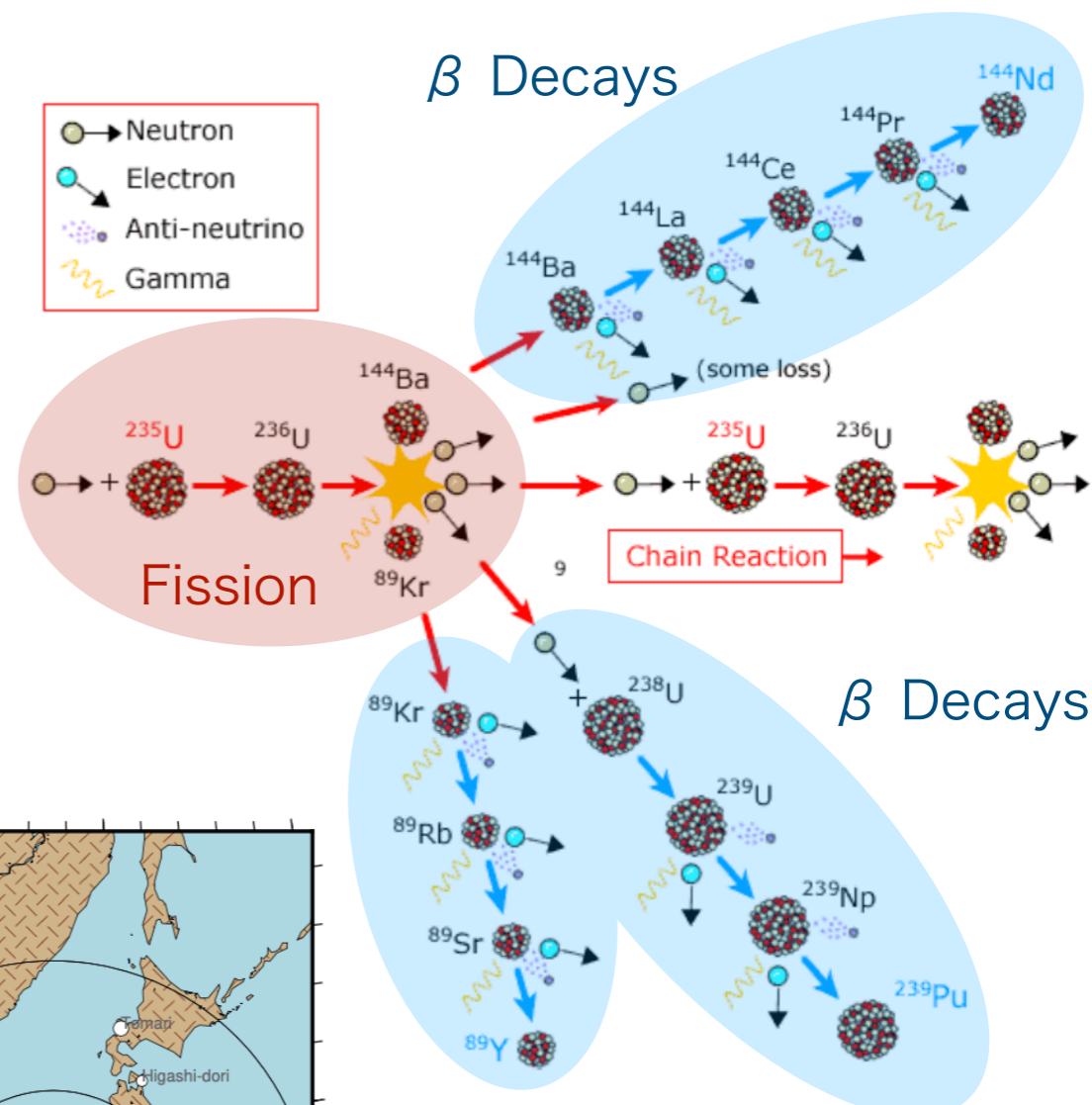


- スペクトルフィッティング解析による DSNB発見感度の見積り
  - SK-Gd ~1000日で純水期 ~6000日に迫る感度を達成。
  - 全フェーズ合同で2.3σ信頼度で「背景事象のみ」の帰無仮説を棄却。
- SK-Gdでは解析閾値を下げられる可能性
  - > 解析改善で感度の向上を目指している



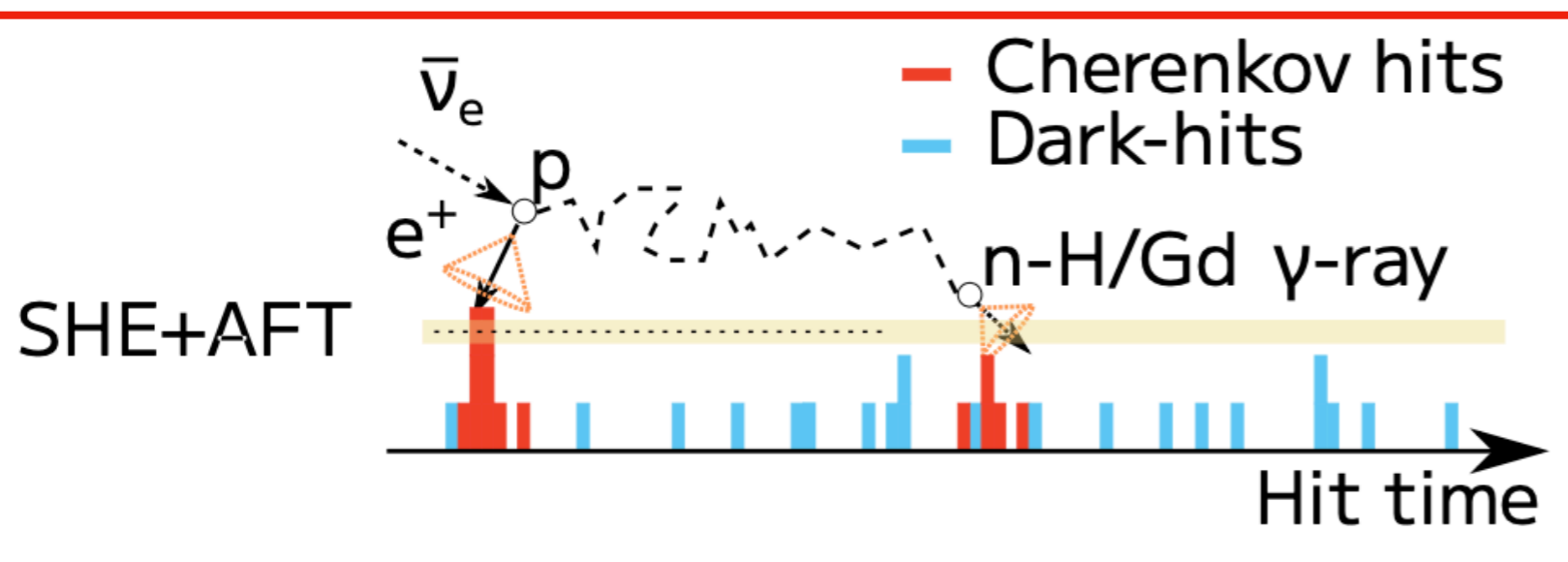
# Reactor Neutrino

- 原子炉内の核分裂反応過程で $\beta$ 崩壊が起こる。  
-> 等方的で純粋な $\bar{\nu}_e$ 源。
- 平均放出エネルギー:  $\sim 200$  MeV/fission  
->  $\bar{\nu}_e$ は $\sim 2 \times 10^{20}$  個/sec/GWth 出てくる。
- SKでは大飯、高浜、美浜原発の運転に同期したニュートリノ信号量が期待される。

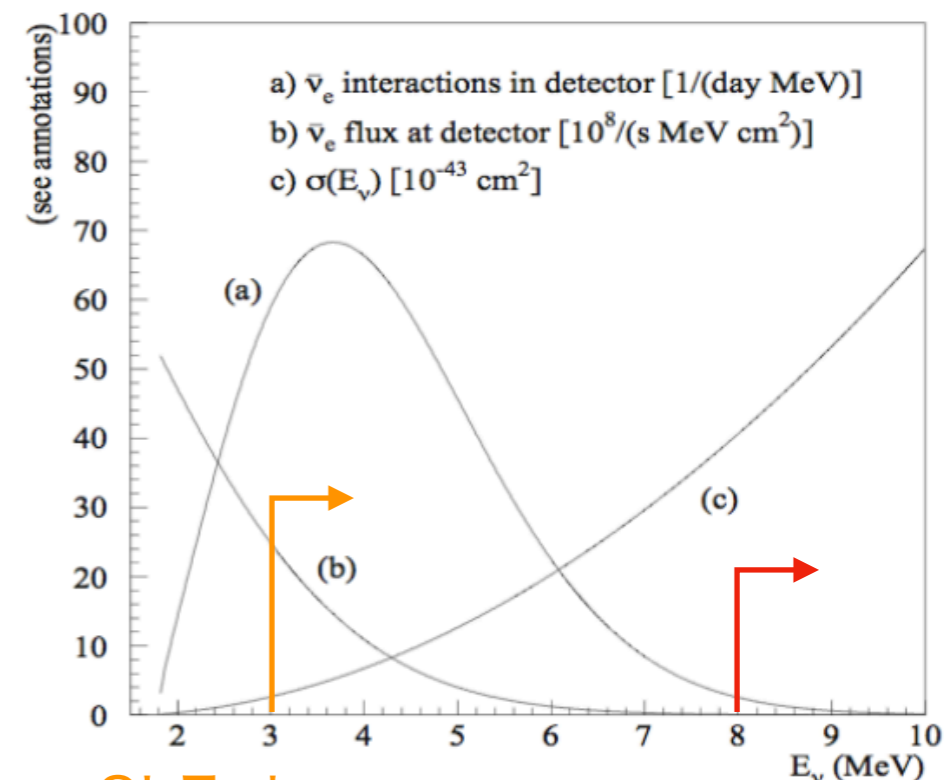
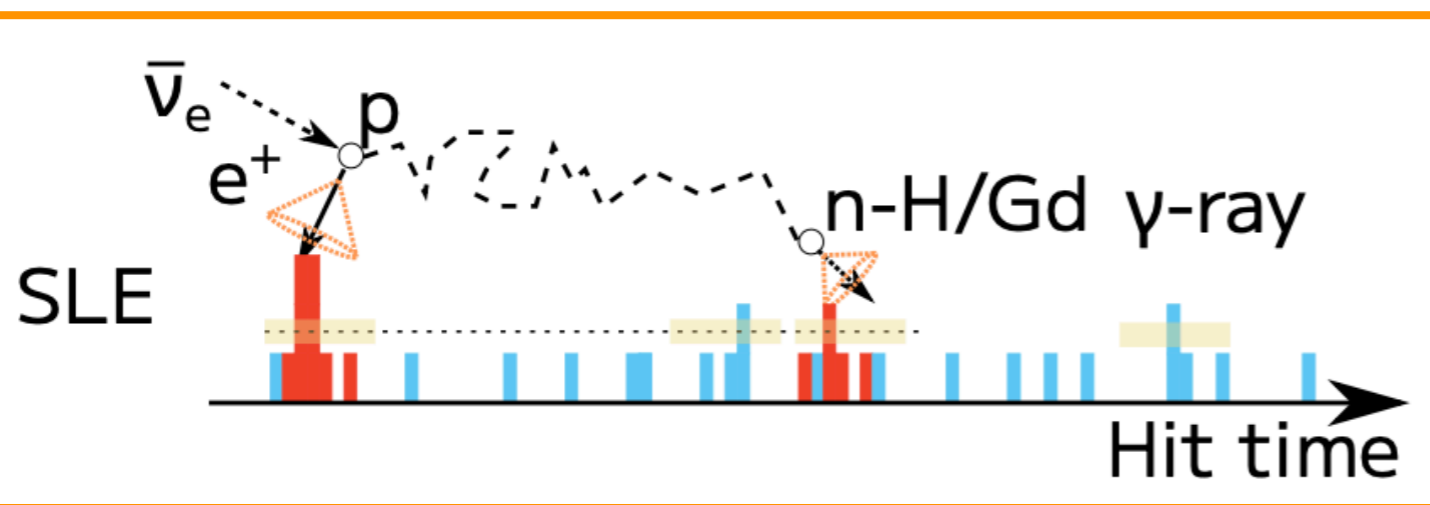


# SLE Delayed Coincidence

- SHE+AFT: 長いゲート (~500 us)を開いて全てのヒット情報を保存。IBDの陽電子と中性子を同時に取得。  
-> DSNB解析で使用。ただし閾値↑



- SLE: 事象ごとに短いゲートを開ける。先発信号、後発信号を個別にトリガーすることでIBDを取得できる。



SLE thr.

SHE thr.  
(DSNB)

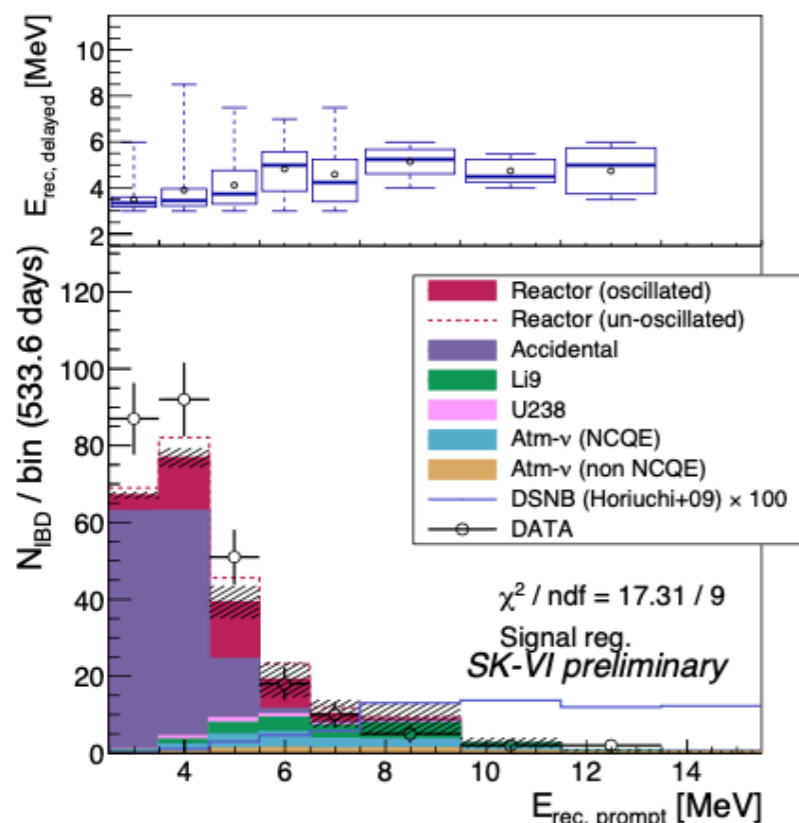
- Gdの恩恵で3 MeV閾値でのIBD探索が可能に！

	SHE/AFT	SLE
Thr.	7.5 MeV	3 MeV
n-H	○	×
n-Gd	○	○

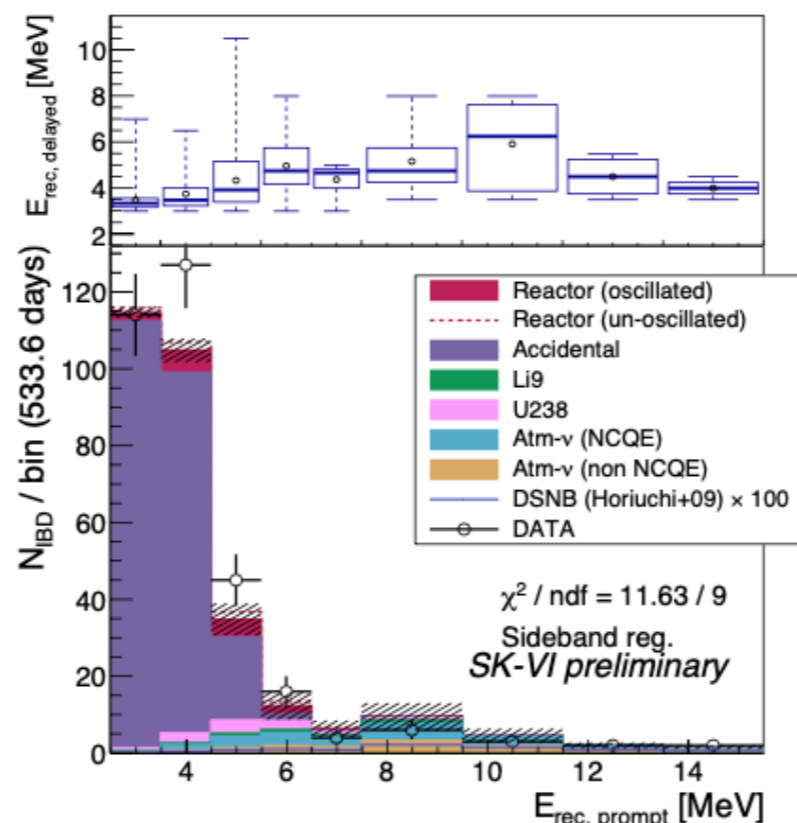
# First Observation in SK: Reactor $\nu$

## SK-VI 552.5日の解析結果

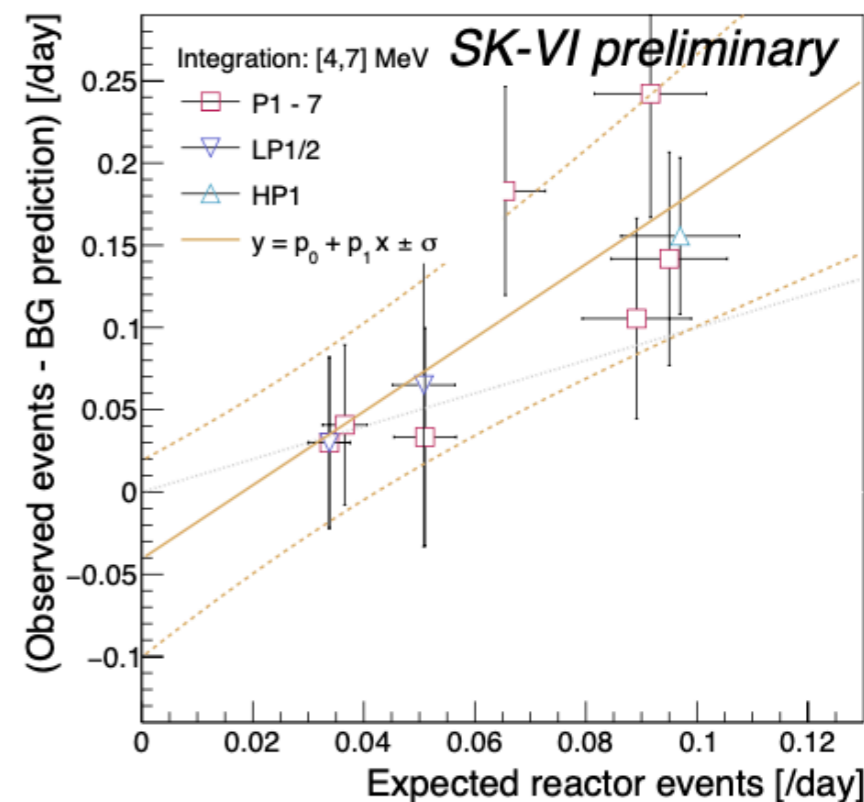
S. Izumiya, NEUTRINO2024



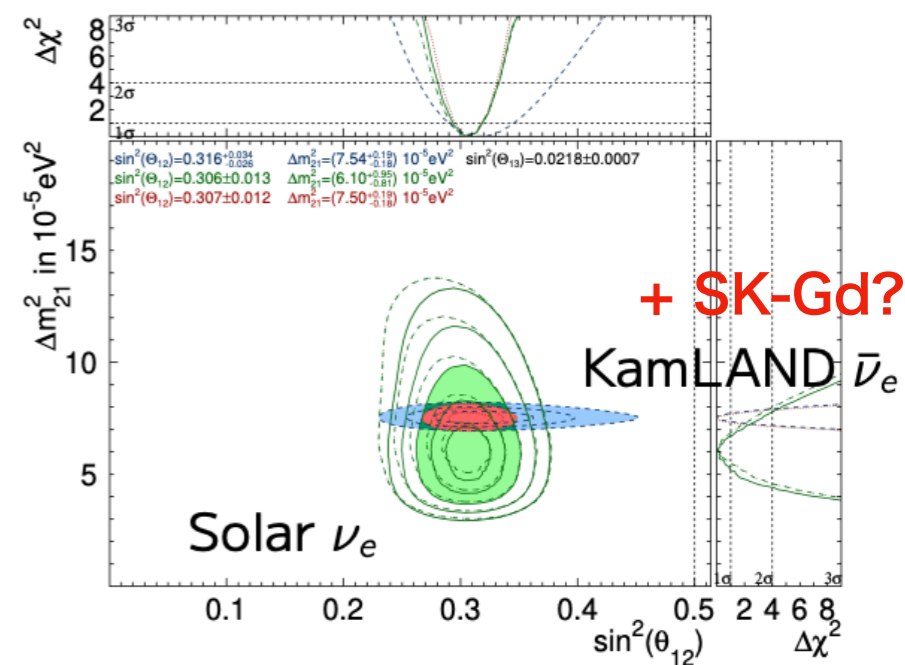
Signal Dominant Sample



Background Dominant Sample



- “Null-reactor neutrino”仮説を  $>3\sigma$  で棄却。
- 原子炉稼働状況から期待される事象数と正の相関。  
ただしわずかに多く観測されている。  
-> Trigger efficiencyや背景事象見積りをさらに詰める。
- SK-VIIの解析も進行中。



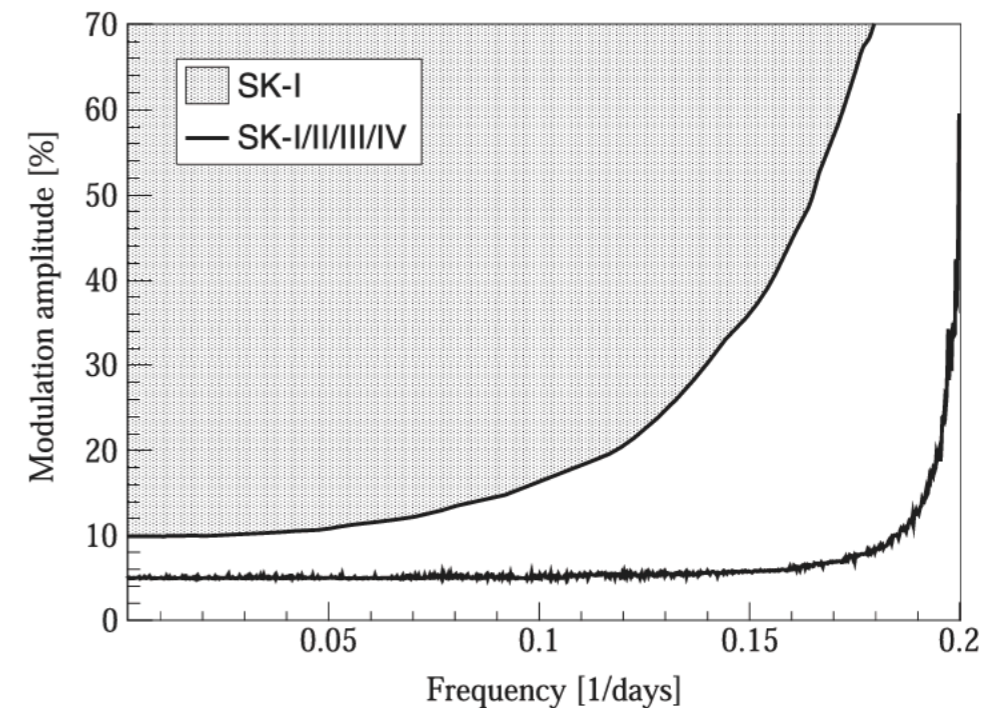
# Solar Neutrino

昨年度から太陽ニュートリノに関する2つの論文が出版された。

- Periodic time variation of  $^8\text{B}$  solar  $\nu$  flux:

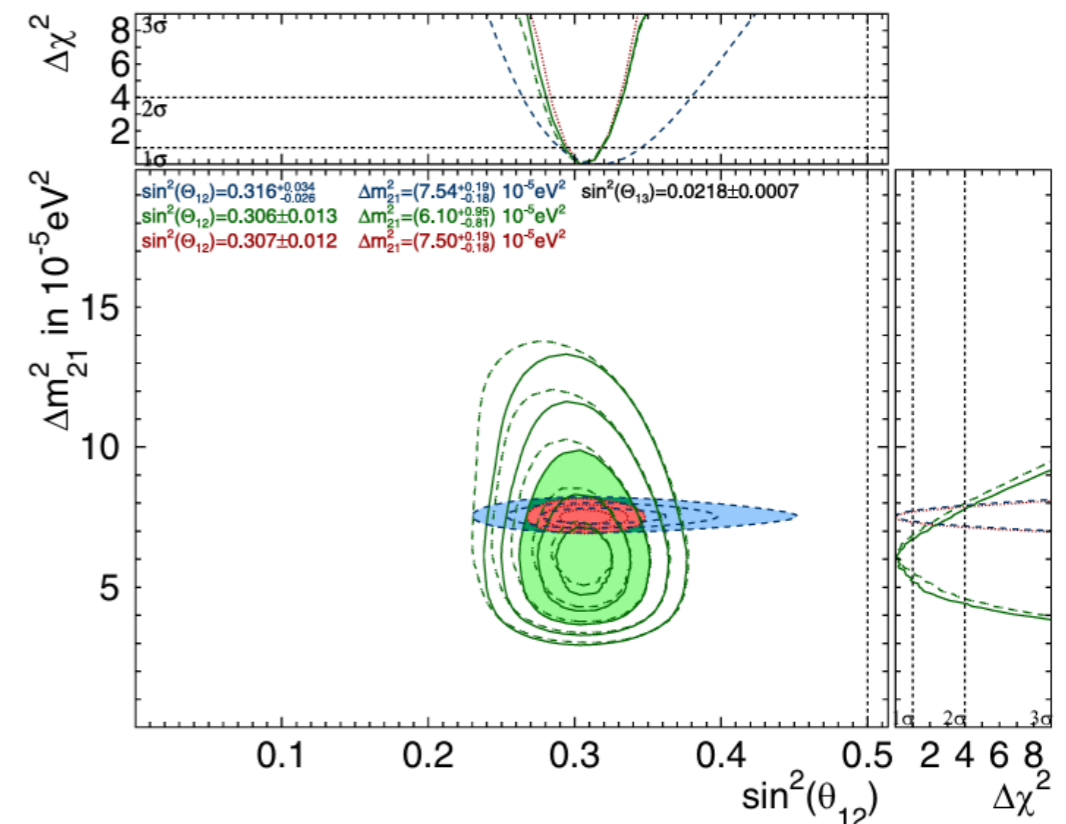
Phys. Rev. Lett. 132, 241803

- 太陽公転による事象数の変動から、公転軌道の離心率  $1.53 \pm 0.35\%$  を測定。
- フラックスそのものには有意な変動は見られなかった。Modulation amplitudeの上限値を更新。



- Solar  $\nu$  measurement using SK-IV full data: Phys. Rev. D 109, 092001

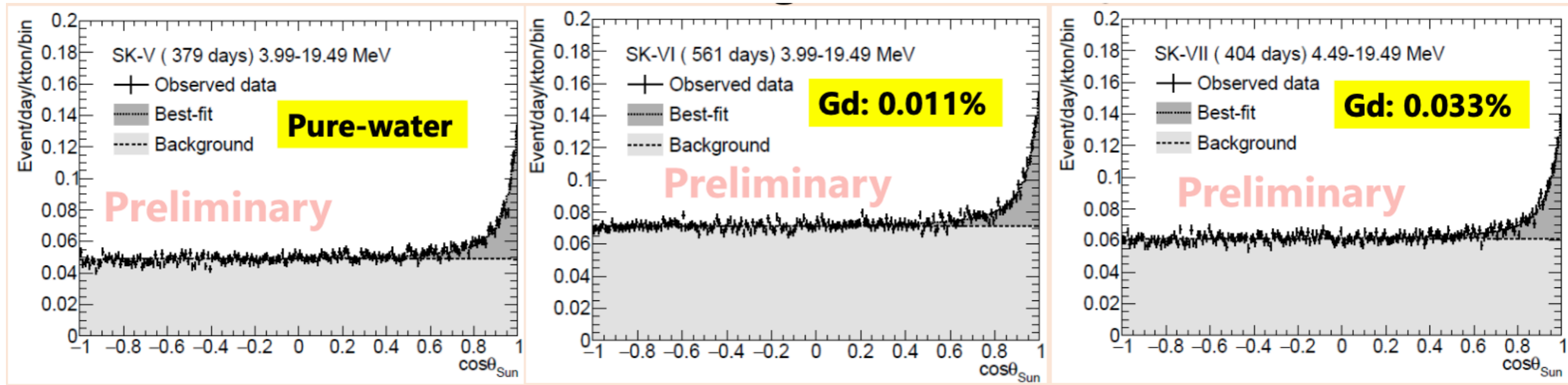
- SK-IV2950日を含む純水期5805日を用いた最新結果
- SK+SNOの振動解析では、KamLANDに対して小さい $\Delta m_{12}^2$ をfavor ( $1.4\sigma$  tension)



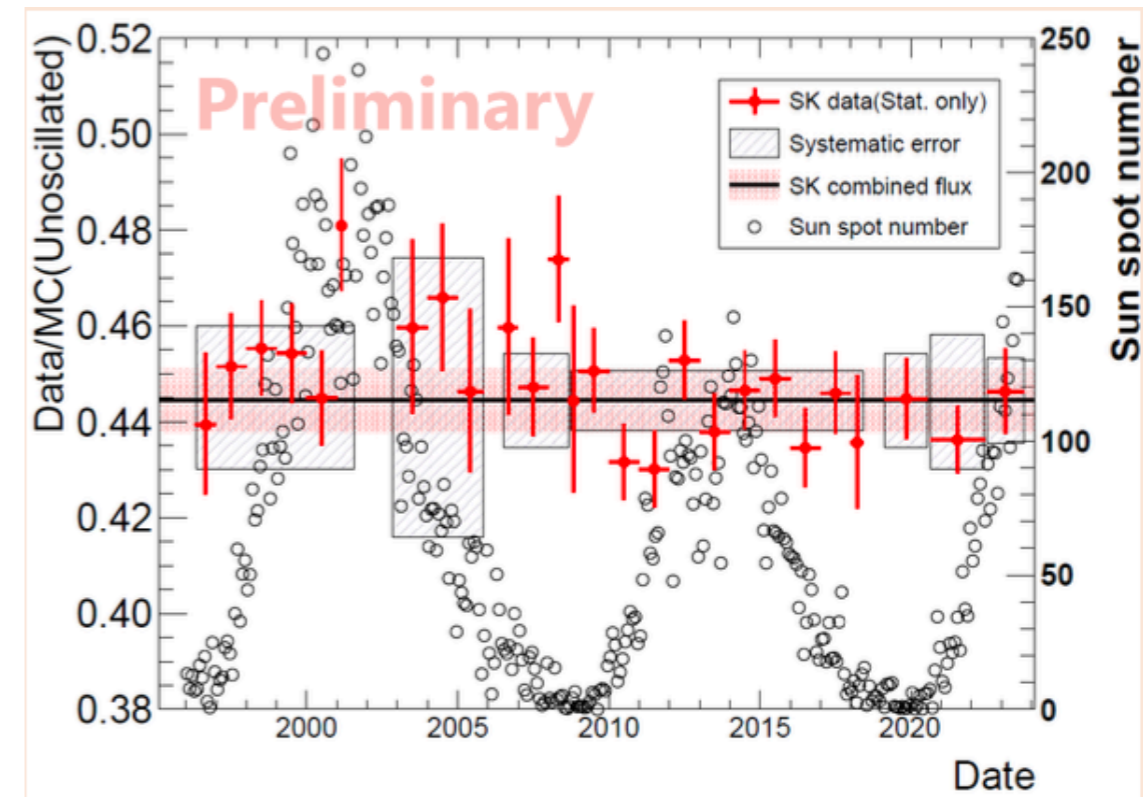
# Solar $\nu$ since SK-V

- SK-VからSK-Gd期間の太陽ニュートリノ観測

Y. Nakano, NEUTRINO2024



- Gd導入後も太陽ニュートリノ解析の背景事象は大きく変化していないことを確認。  
↑ 厳しいGd Screeningの成果。
- 測定されたフラックスは過去の測定結果とconsistentな結果が得られている。





# Summary

- 最新のSK検出器状況
  - 磁気補償コイル修理 (2024年7-8月)
  - キャリブレーションから磁気補償を確認: Collection efficiencyのuniformity
  - 修理時に失ったGdを補填してSK-VIIIとして稼働中
- 低エネルギーニュートリノ観測・探索
  - DSNB探索

SK-VII (Gd 0.03%) 404.5日の追加に加え、背景事象削減、中性子検出効率の向上など解析の改善を行った。全SKフェーズ合同で $2.3\sigma$ 信頼度でDSNB帰無仮説を棄却。
  - 原子炉ニュートリノ観測

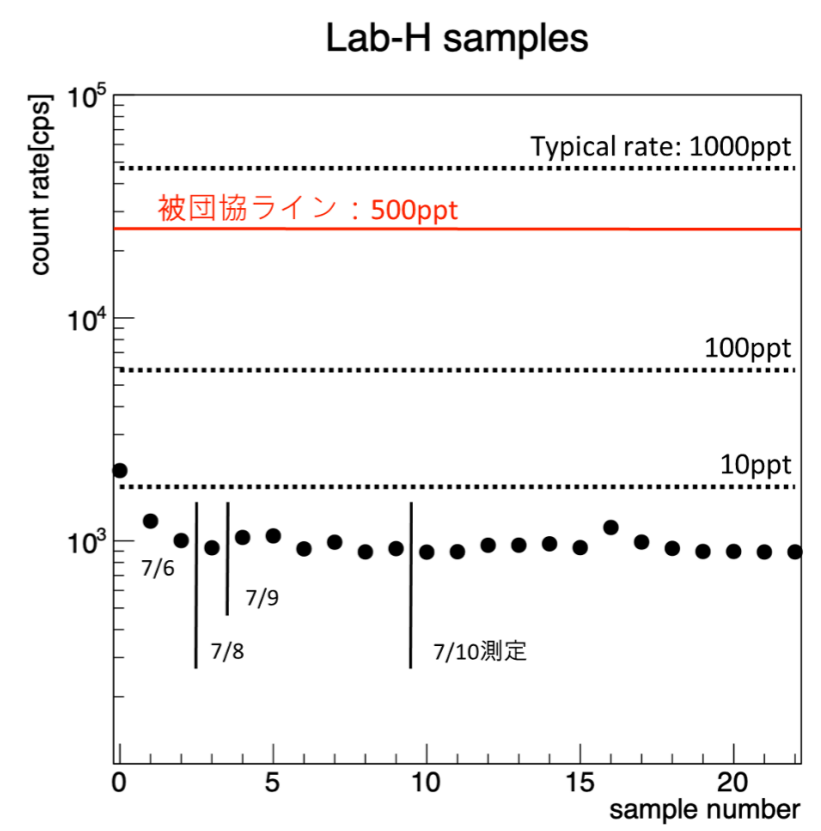
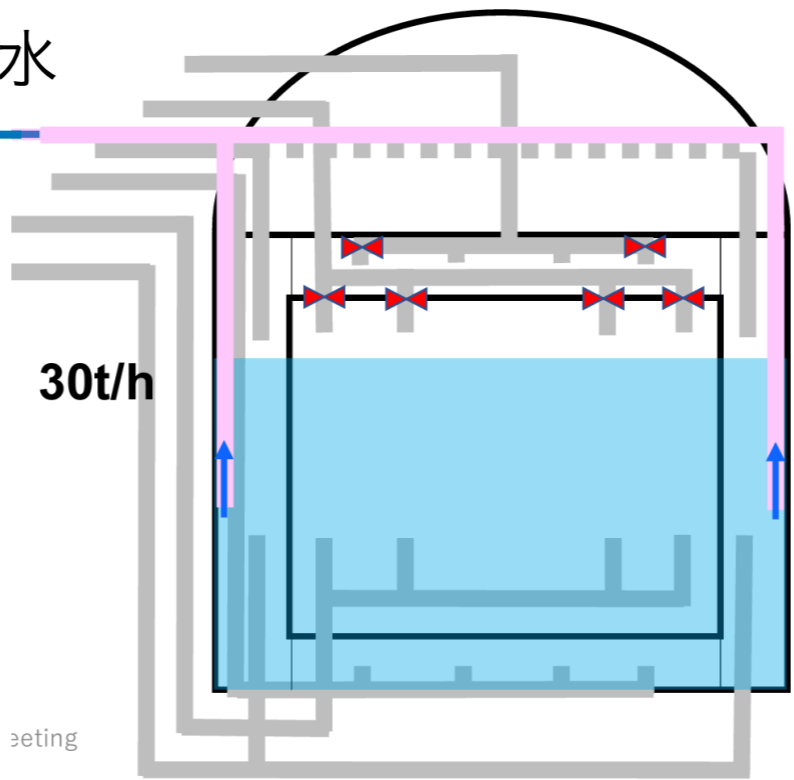
Gd捕獲事象を使った低閾値のIBD遅延同時計測が可能になった。SK-VI (Gd 0.01%)のデータから $> 3\sigma$ で原子炉ニュートリノ信号を観測したことが示唆されている。
  - 太陽ニュートリノ観測

Gd導入後も太陽ニュートリノ解析の背景事象は大きく変化していないことが確認できている。また、フラックス測定でも過去の測定とconsistentな結果が得られている。

# Backups

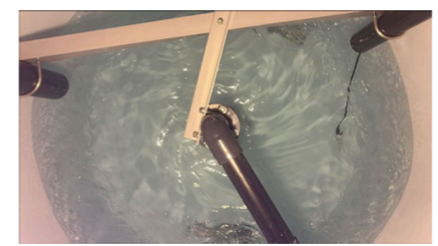
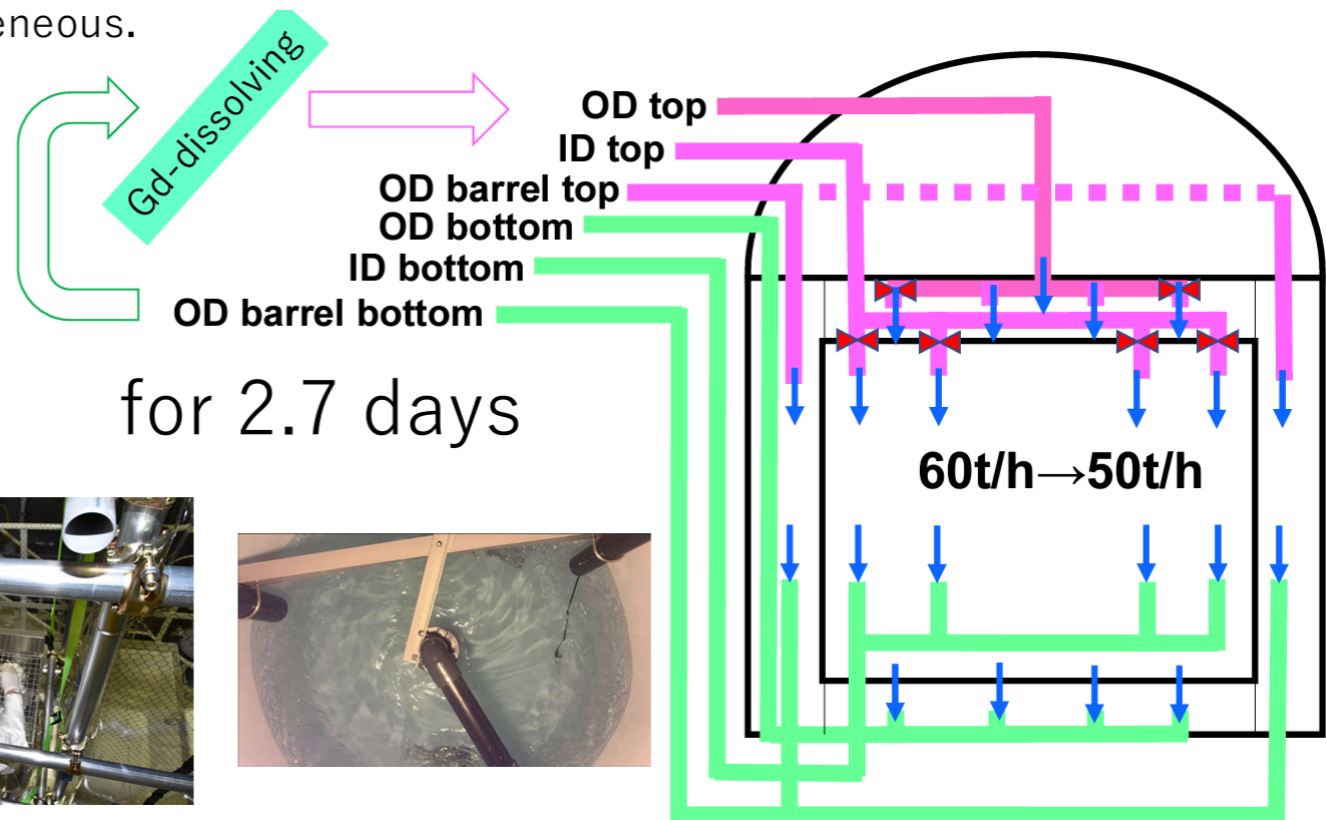
# Gd Removal/Re-loading

- 作業のため、Gd水を2 m分排水  
-> Gdの回収と再導入



- Lab-Hの回収システムを稼働
- 処理した水のGd含有量をモニター  
-> Gdの漏洩なし
- 失った分のGd (~2 ton)を導入
- 上から (冷たい) 高密度のGd水を入れ、対流を起こして均質に。

homogeneous.



**➡ SK-VIII began!**

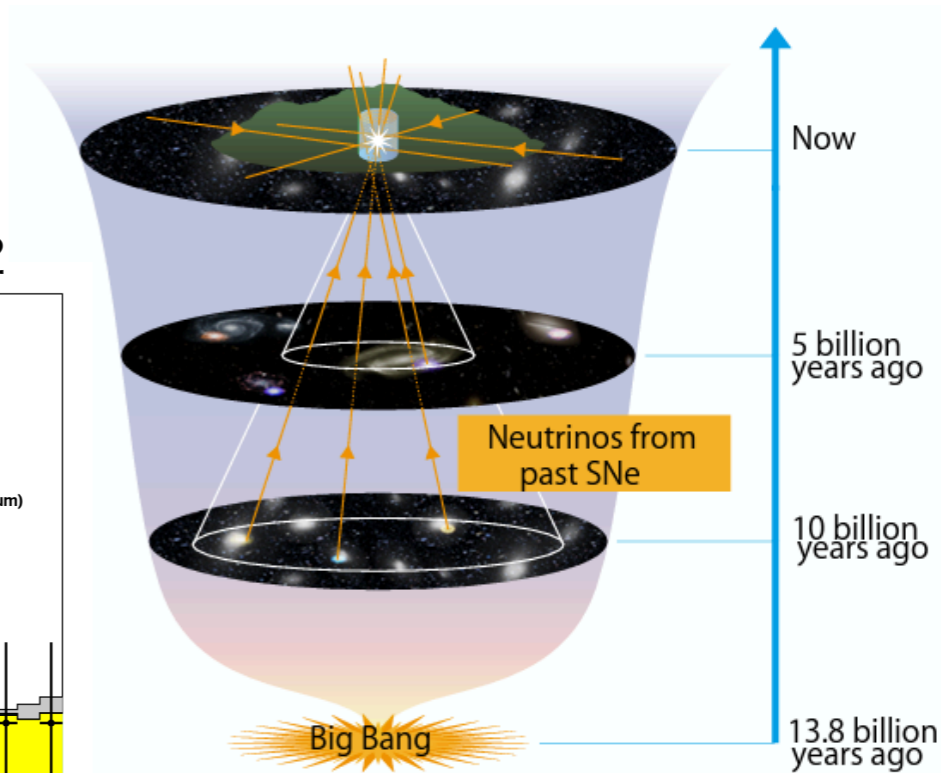
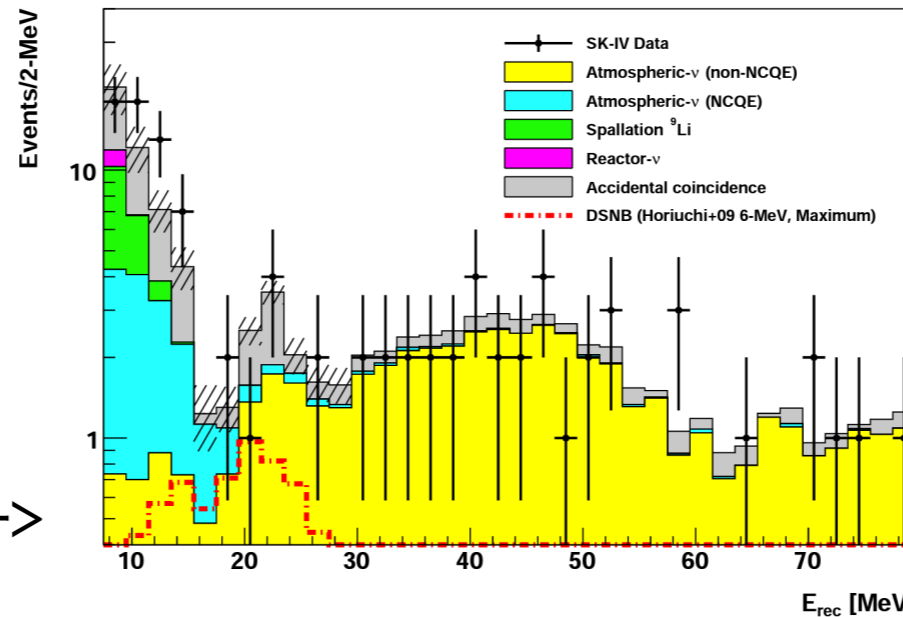
# Physics in SK-Gd

- Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB)

- accumulated flux of  $\nu$  from past CCSNe
- both sig. eff. and BG rejection will be improved by Gd n tag
- > further sensitivity towards discovery.

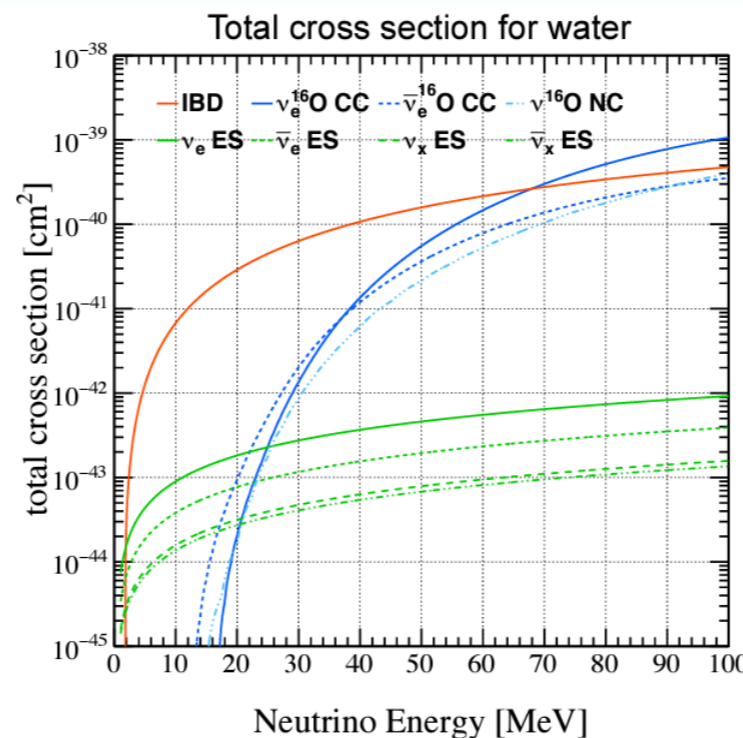
pure water ~10 years ->

Phys. Rev. D 104, 122002

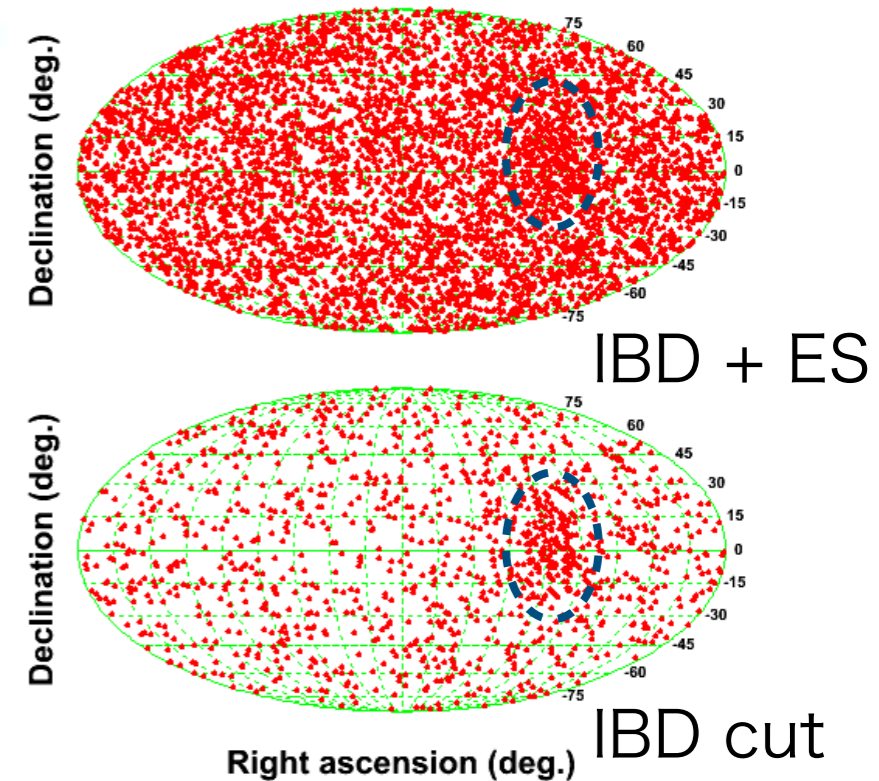


- Galactic Supernovae (e.g., SN burst Pointing)

- elastic scattered  $e^-$  keeps directionality of incident  $\nu_e$ .
- IBD will be BG due to loss of directionality in IBD  $e^+$ .
- > Removing IBD by neutron tagging improves SN burst pointing accuracy.

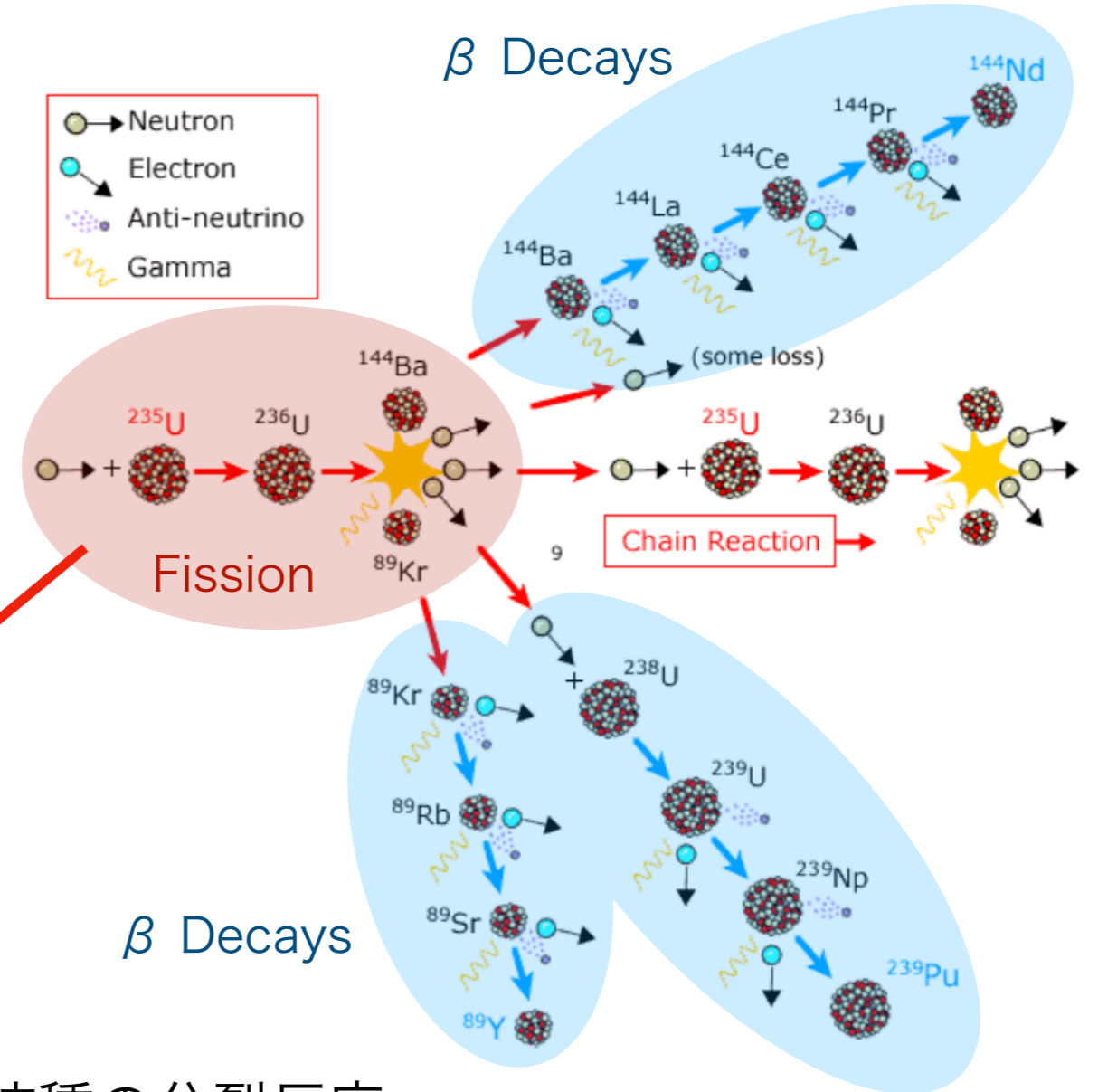
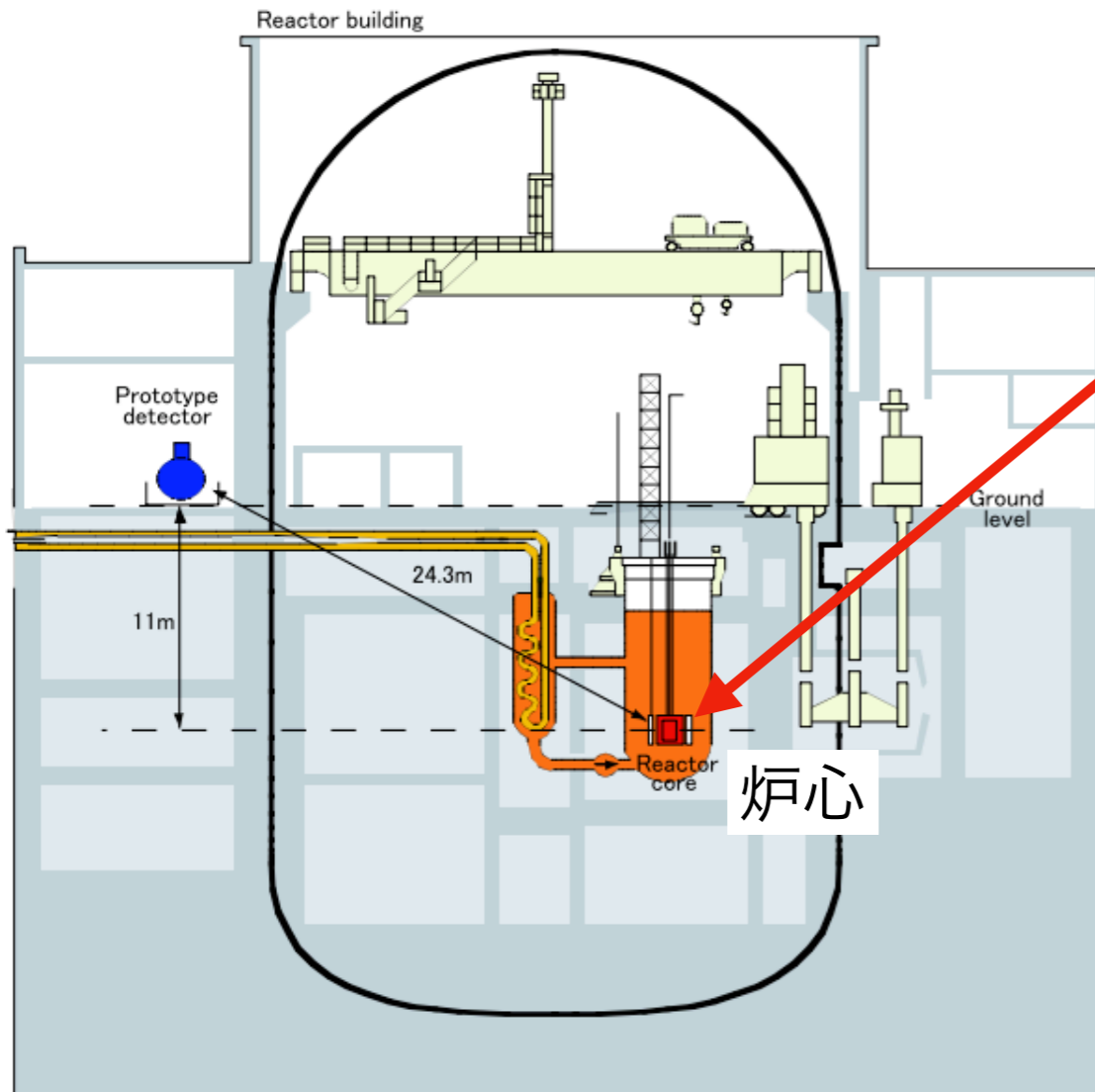


## SN Burst Pointing

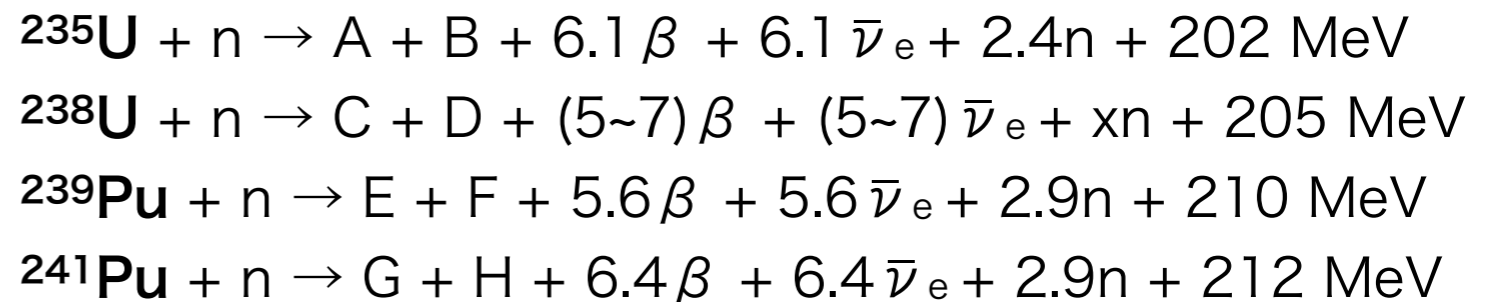


# Neutrinos from Reactors

- 原子炉内の核分裂反応過程でβ崩壊が起こる。  
-> 等方的で純粋な  $\bar{\nu}_e$  源。
- 平均放出エネルギー: ~ 200 MeV/fission  
->  $\bar{\nu}_e$  は ~  $2 \times 10^{20}$  個/sec/GWth 出てくる。



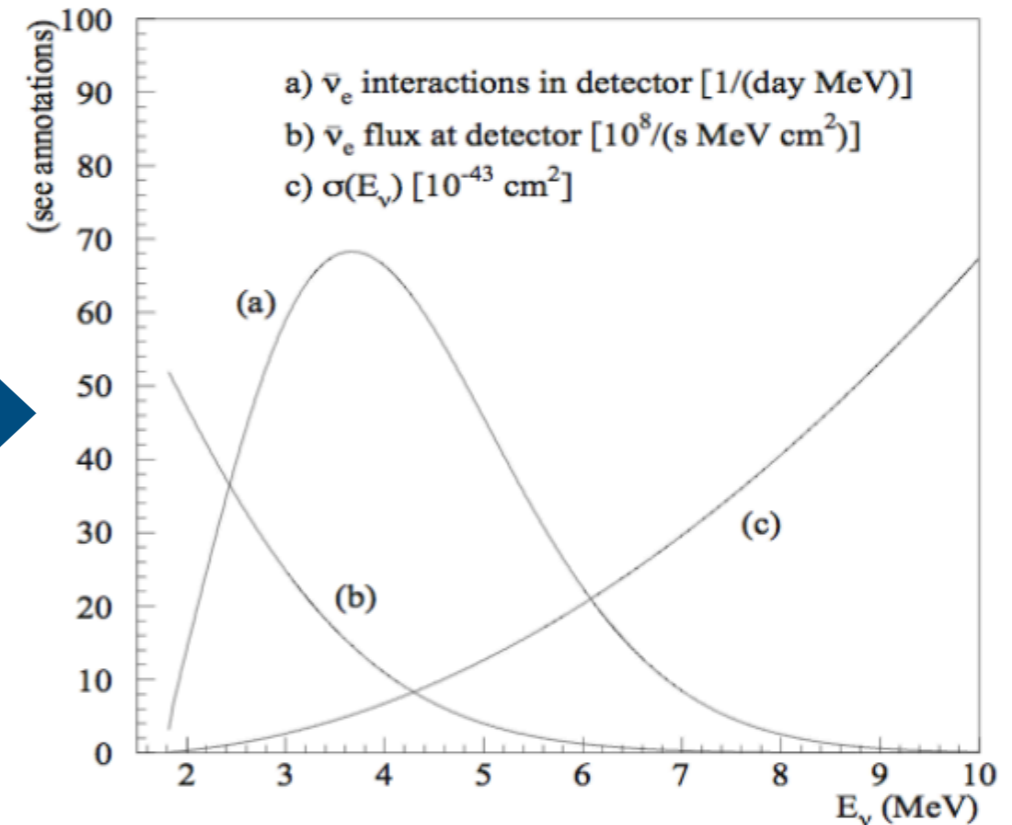
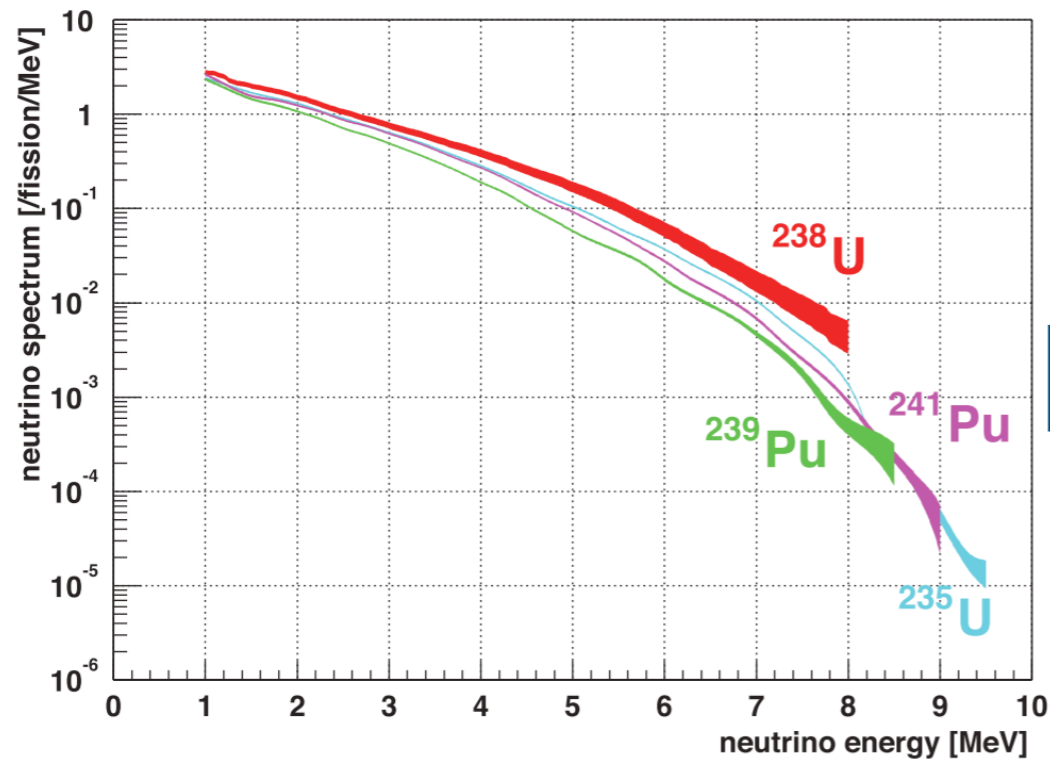
核燃料核種の分裂反応



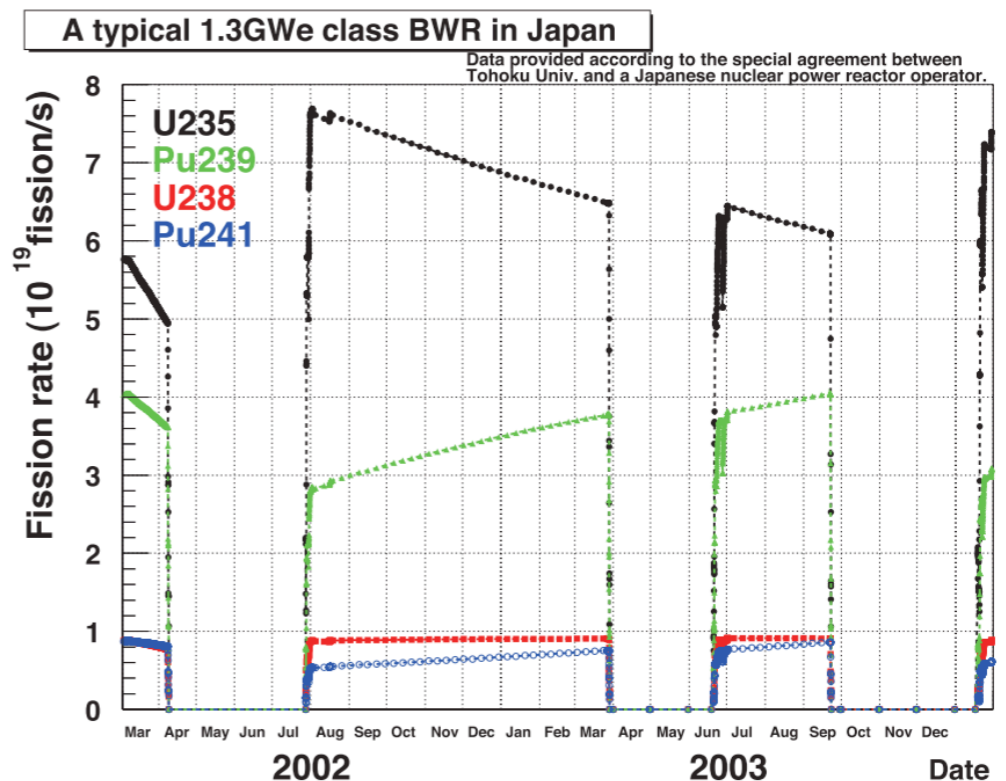
-> 平均  $6 \bar{\nu}_e$ /fission

J-PARC sterile neutrino search at J-PARC Spallation Neutron Source

# Characteristics of Reactor $\bar{\nu}$



- 実験室で核分裂後の核種のベータ崩壊を測定  
-> 分岐比と $\beta$ のスペクトルから、 $\bar{\nu}$ スペクトルを計算している。(238Uだけデータベース)
- 検出にInverse Beta Decay (IBD)を使う場合、得られるスペクトルは4 MeVあたりにピークを持つ。
- 実際には、燃焼にともなって時間発展する。



# Reactor $\nu$ Experiments

## 1950s: Cowan and Reines

- 自由  $\nu$  検出
- LS + CdCl<sub>2</sub> aq

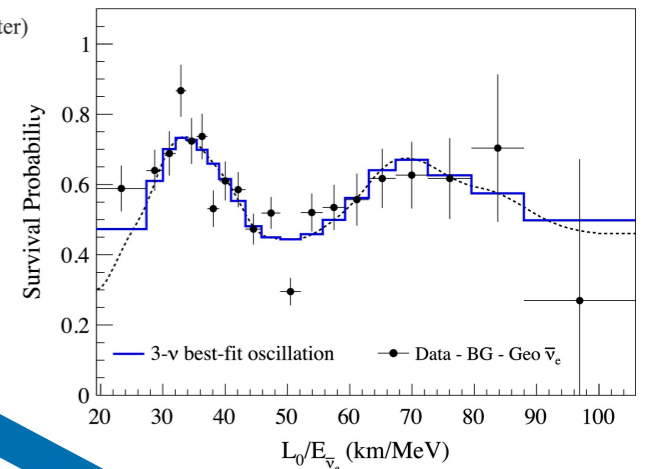
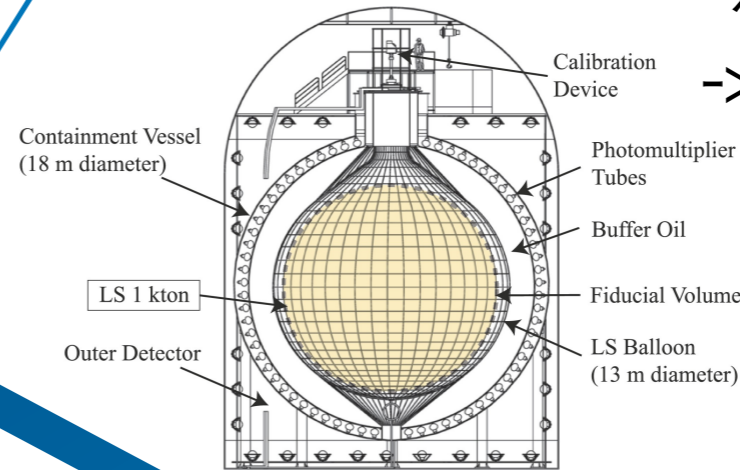


## 2000s: KamLAND

- $\Delta m^2_{21}$ 、 $\theta_{12}$ 測定
- 太陽  $\nu$  欠損問題の解決
- LMA解

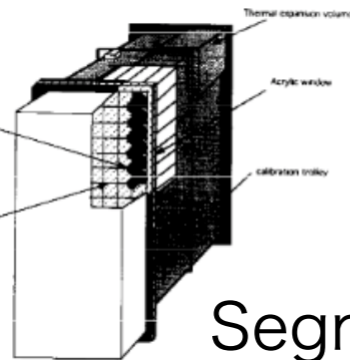
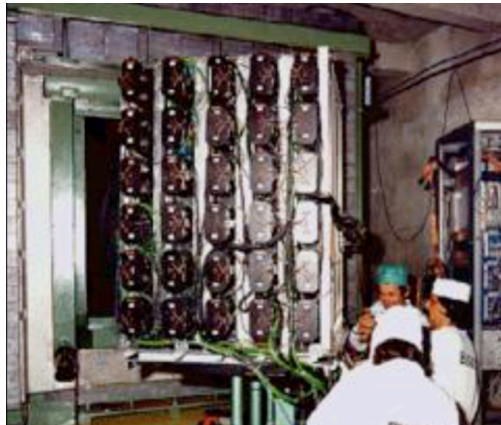
今は原子炉OFF

-> 地球  $\nu$ 、 $0\nu 2\beta$  探索 (KamLAND-Zen)



## 1980s: Bugey

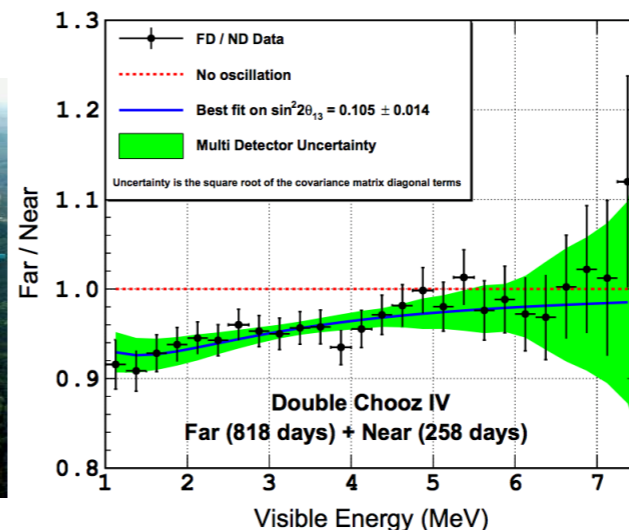
- 短距離、flux測定



Segmented LiLS

## 2010s: Daya Bay, RENO, Double Chooz

- $\theta_{13}$  精密測定、Multi Detector



**INS<sup>2</sup>**  
 Sterile Neutrino Search  
 ARC Spallation Neutron Source