



C01超新星背景ニュートリノの高感度観測で せまる宇宙星形成の歴史

---SK-Gdの現状とこれから---

東京大学宇宙線研究所 関谷洋之

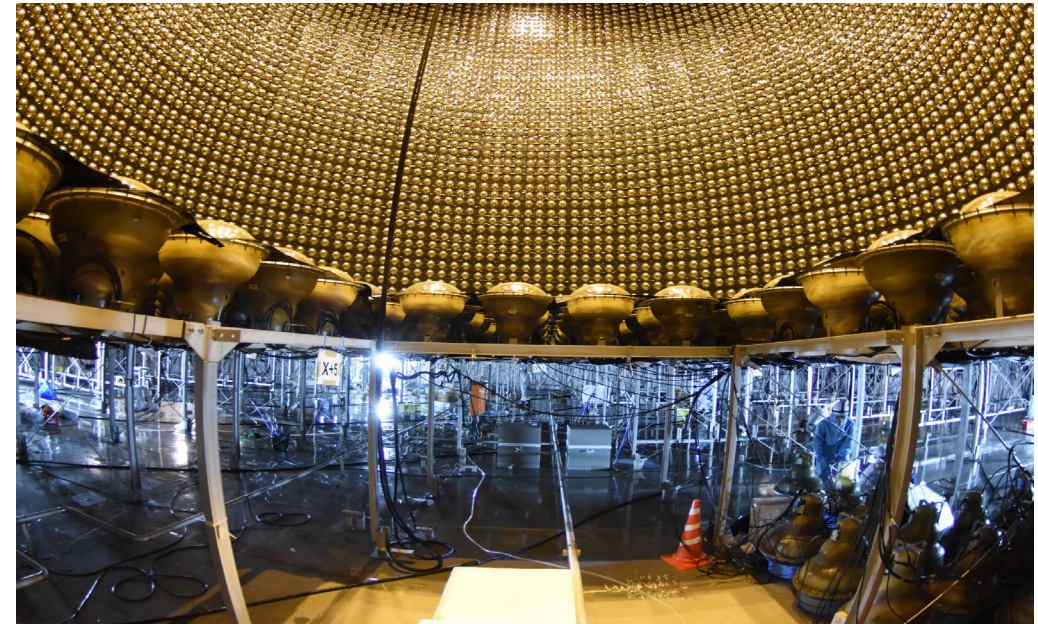
新学術「地下宇宙」領域研究会

2019.8.24 大阪大学豊中キャンパス



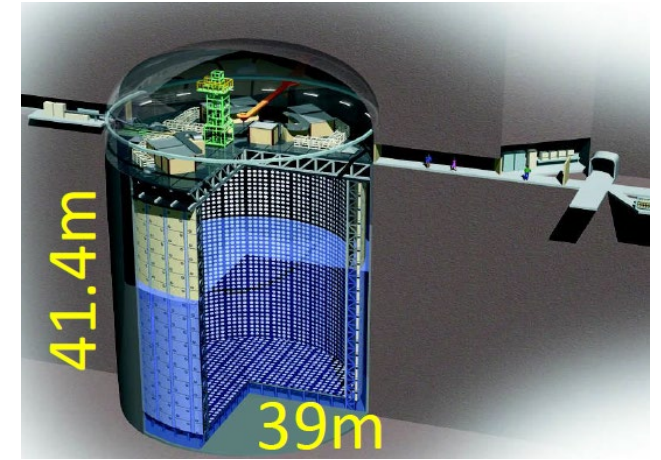
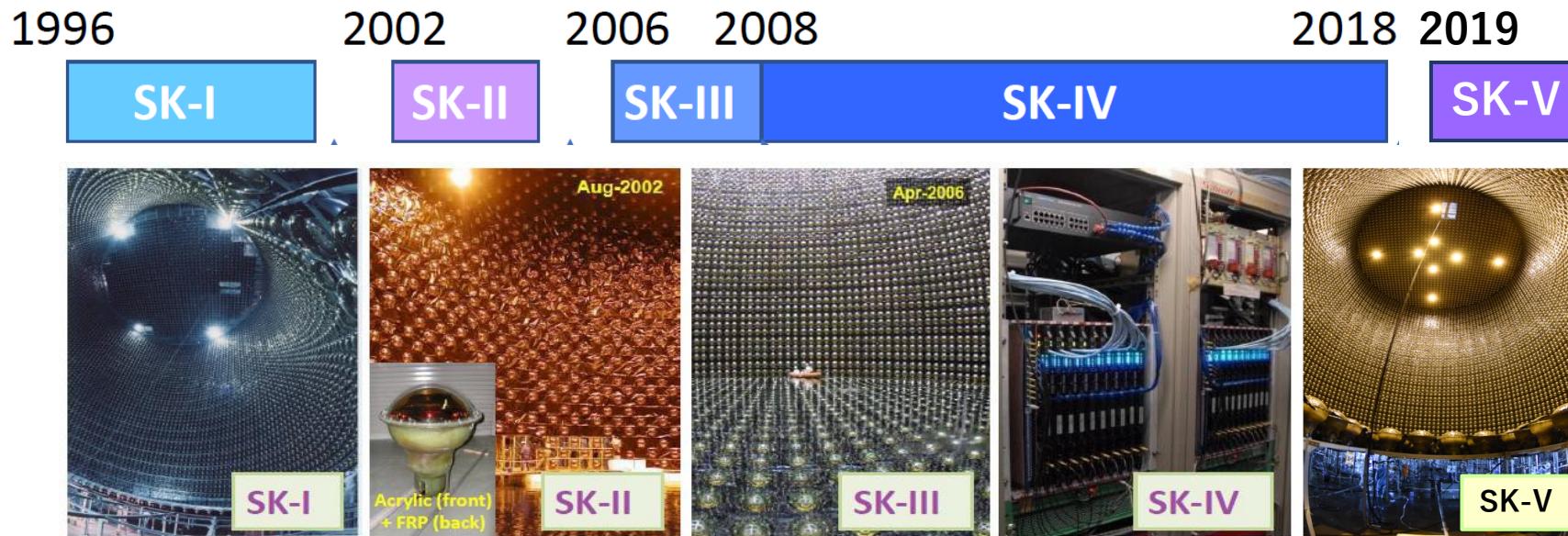
Contents

- SK-Gd project
- Physics motivations
- Tank refurbishment 2018-2019
- Towards first Gd loading
- C01 activities
- Summary



Super-Kamiokande

- 50kton ring imaging pure water Cherenkov detector
- 1km (2700 mwe) underground in Kamioka

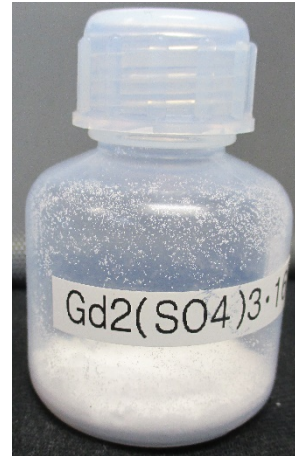
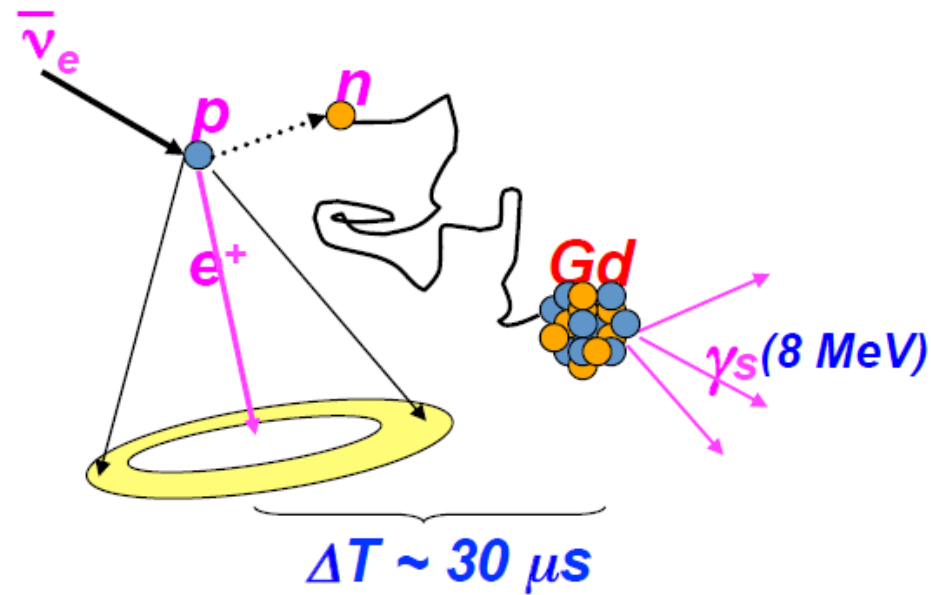


SK-III and later
11129 50cm PMTs
in Inner Detector
1885 20cm PMTs
in Outer Detector

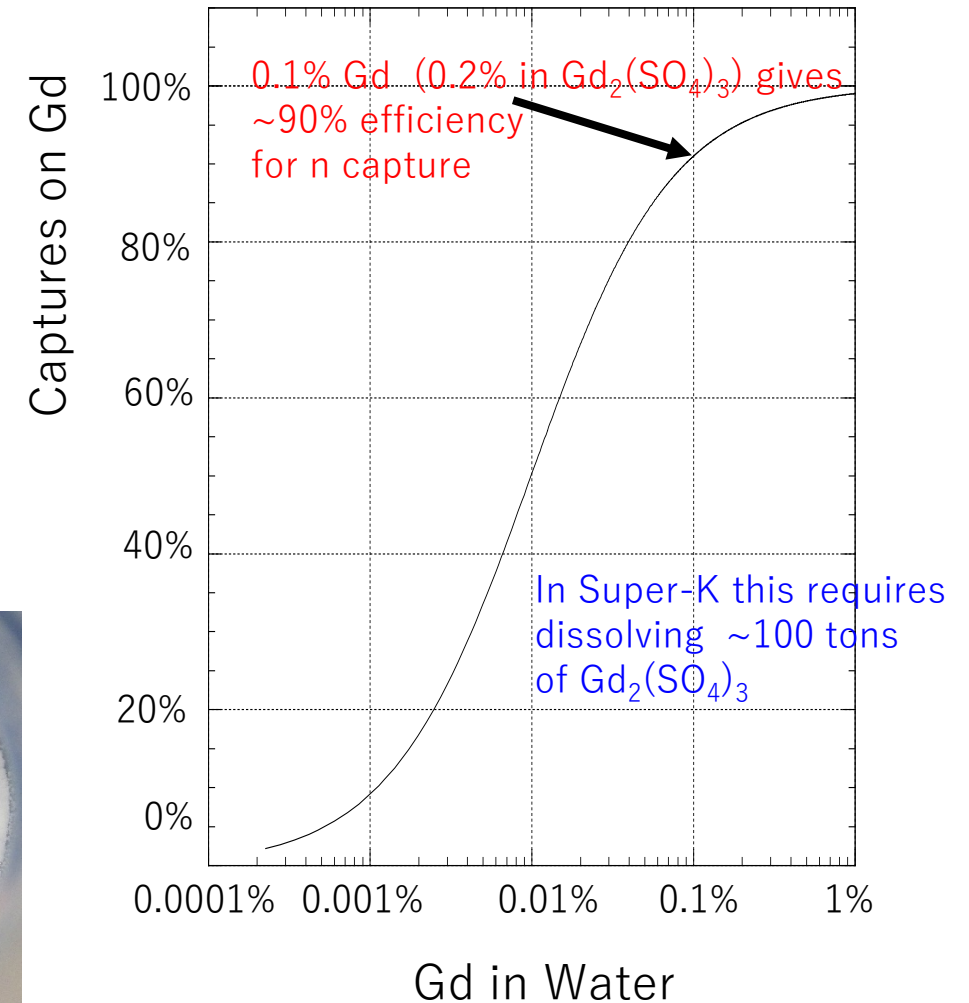
- SK-V has just started on January 29, 2019
 - After the tank refurbishment work for SK-Gd

SK-Gd project

- Identify $\bar{\nu}_e p$ events by neutron tagging with Gadolinium.
- Large cross section for thermal neutron (48.89kb)
- Neutron captured Gd emits 3-4 γ s in total 8 MeV
- $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ was selected to dissolve.



Beacom and Vagins PRL93,171101 (2004)



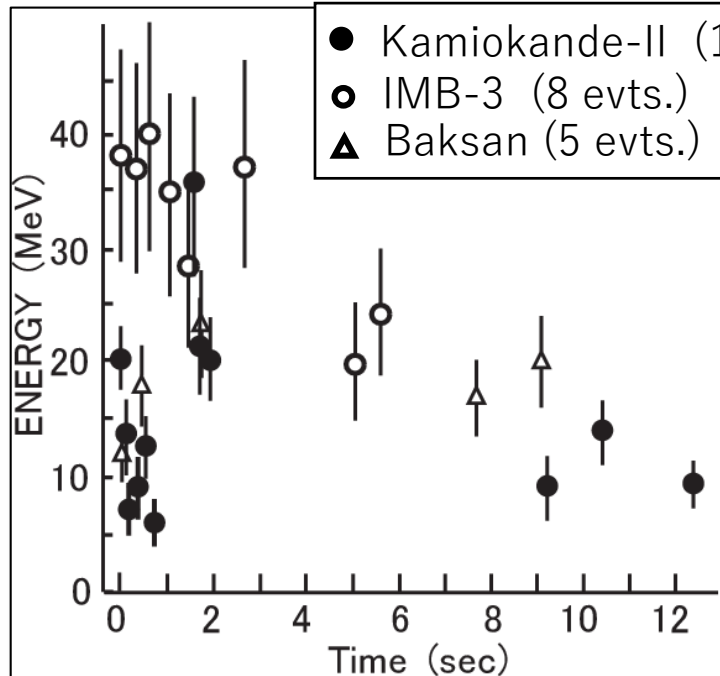


Goals of SK-Gd

- First observation of Supernova Relic Neutrinos
- Improve pointing accuracy for galactic supernova
- Precursor of nearby supernova by Si-burning neutrinos
- Reduce proton decay background
- Neutrino/anti-neutrino discrimination (Long-baseline and atm nu's)
- Reactor neutrinos

Supernova neutrinos

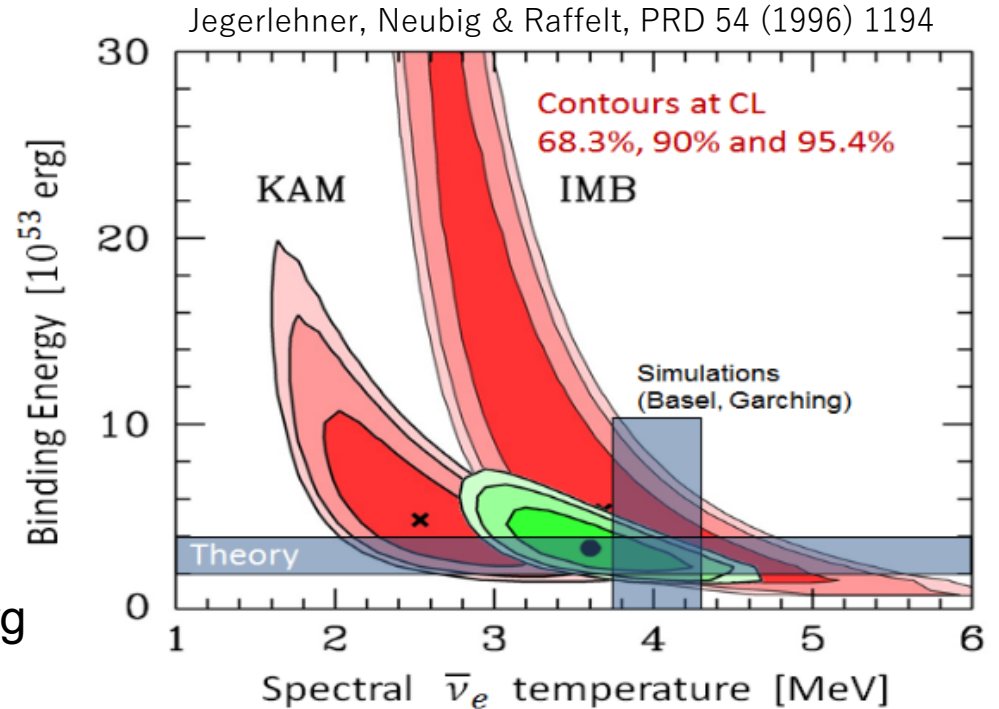
- The only detected SN neutrinos are from SN1987A; LMC (50 kpc)



24 ($\bar{\nu}_e$) events in total.

Total energy

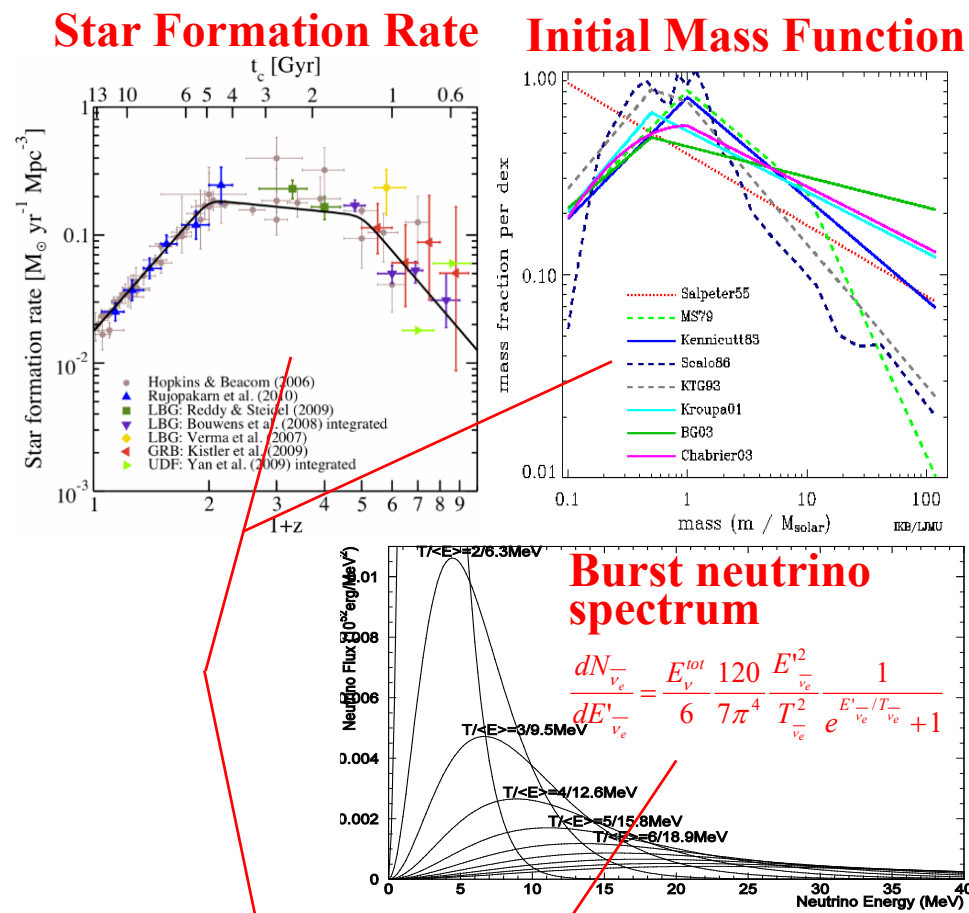
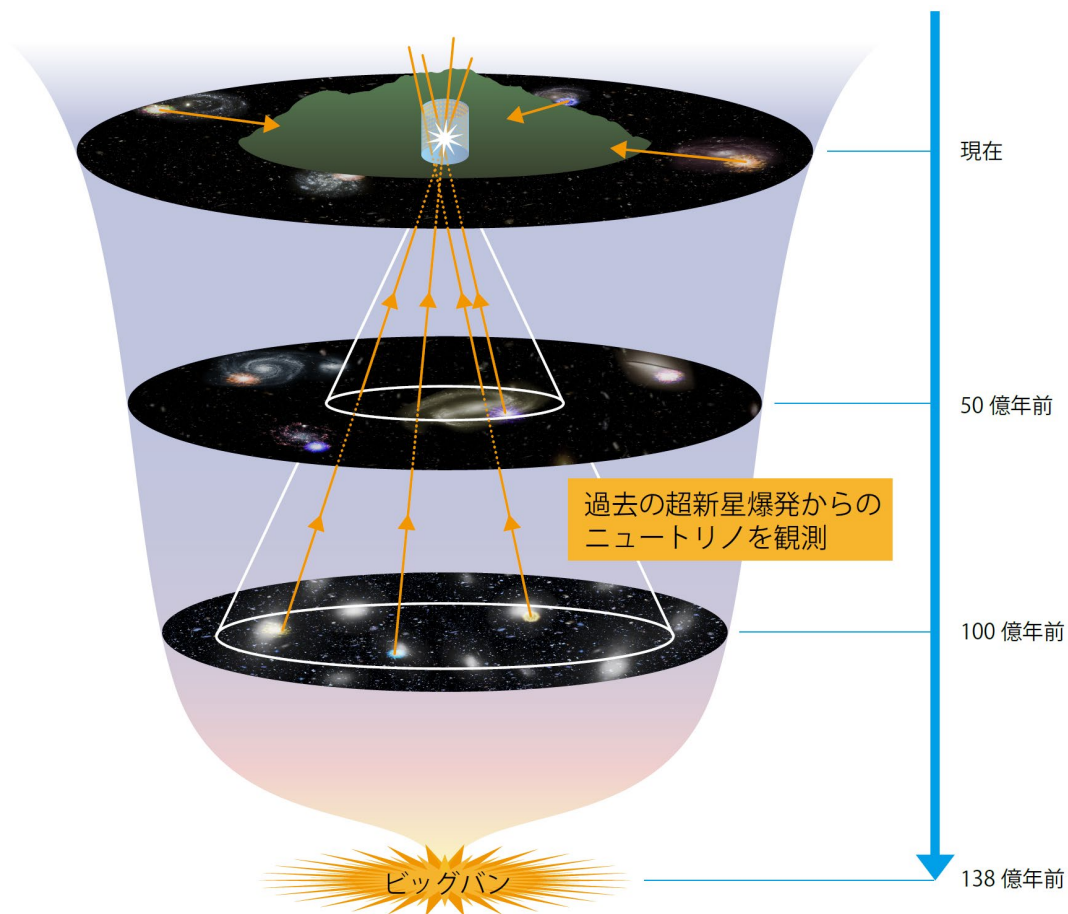
released by $\bar{\nu}_e$: $\sim 5 \times 10^{52}$ erg



- The obtained binding energy is almost as expected, but large error in neutrino mean energy. No detailed information of burst process. We need energy, flavor and time structure.
- After waiting for 30 years without new burst, we are now actively trying to detect supernova neutrinos**

Supernova Relic Neutrinos

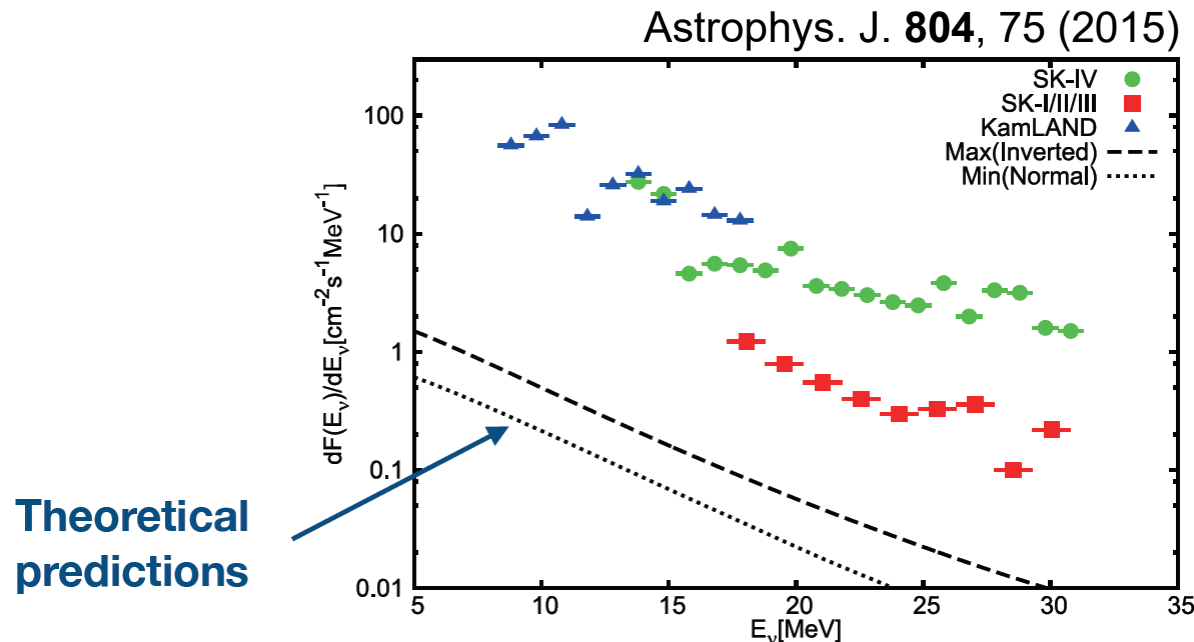
- 宇宙には 10^{22-23} 個の恒星 ($\sim 10^{11}$ 個の銀河 $\times \sim 10^{11-12}$ 恒星/銀河)
- 現時点では 10^{17} 個の超新星爆発からのニュートリノを受けていることになる。



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

Status of SRN search

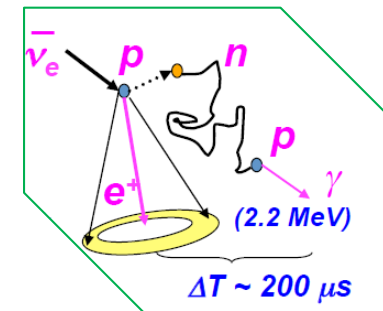
- Super-K holds the current best limits for the SRN flux
- Sensitivity limited by backgrounds
 - However, only one order magnitude above theoretical predictions.
- Should be within Super-K's reach, once we were able to reduce background!



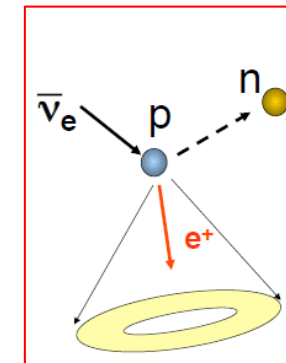
Comparison with expected $\bar{\nu}_e$ signal

Theoretical flux prediction : $0.3 \sim 1.5 \text{ /cm}^2/\text{s}$

Current best limit by SK: $2.8 \sim 3.1 \text{ /cm}^2/\text{s}$
($>17.3 \text{ MeV}$)



SK-IV



SK-I+II+III

SK-IV n tagging efficiency (by proton) is low...

Expected signal

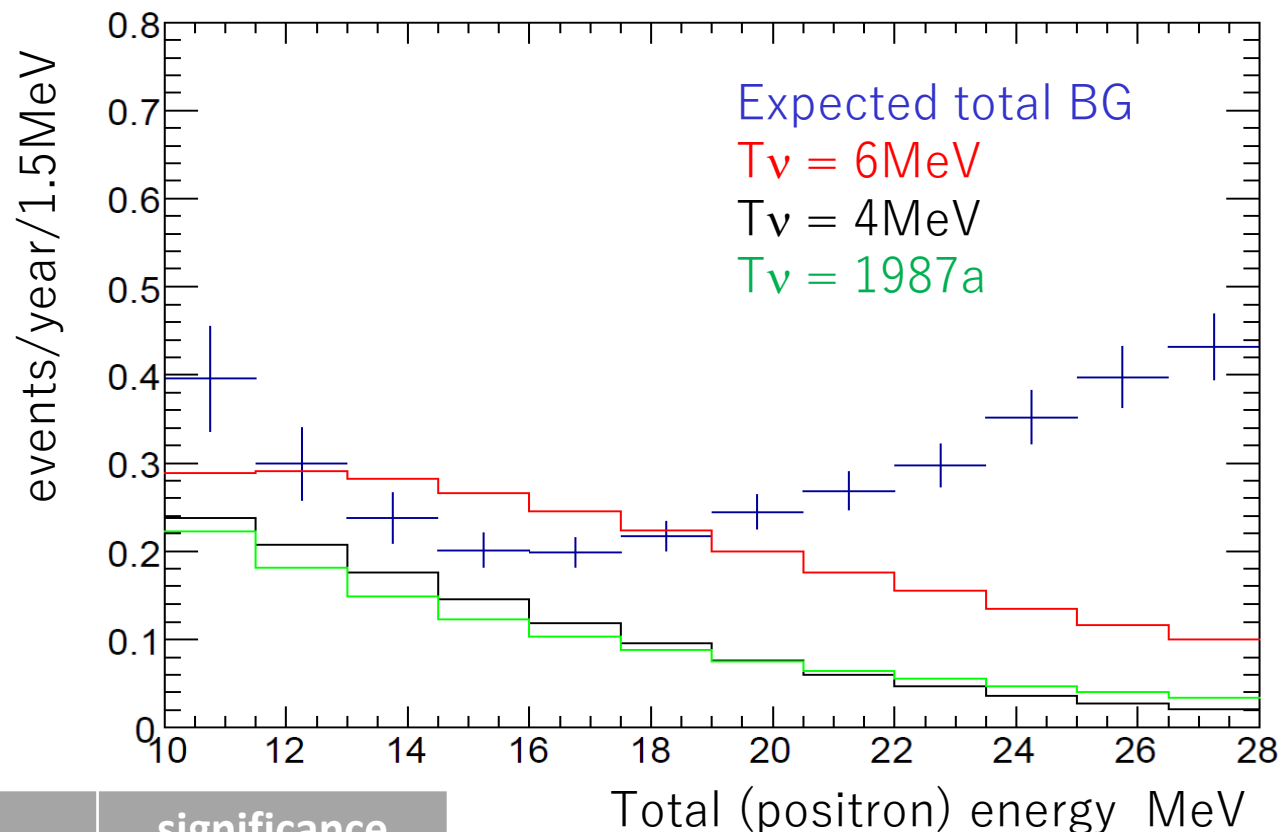
- It depends on typical/actual SN emission spectrum

SRN flux: Horiuchi, Beacom and Dwek, PRD, 79, 083013 (2009)



SRN events number with 10 years observation

HBD models	10-16MeV (evts/10yrs)	16-28MeV (evts/10yrs)	Total (10-28MeV)	significance (2 energy bin)
$T_{\text{eff}} 8\text{MeV}$	11.3	19.9	31.2	5.3σ
$T_{\text{eff}} 6\text{MeV}$	11.3	13.5	24.8	4.3σ
$T_{\text{eff}} 4\text{MeV}$	7.7	4.8	12.5	2.5σ
$T_{\text{eff}} \text{SN1987a}$	5.1	6.8	11.9	2.1σ
BG	10	24	34	----

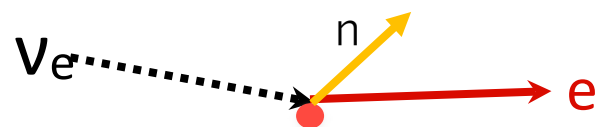


- First observation is within SK-Gd's reach!

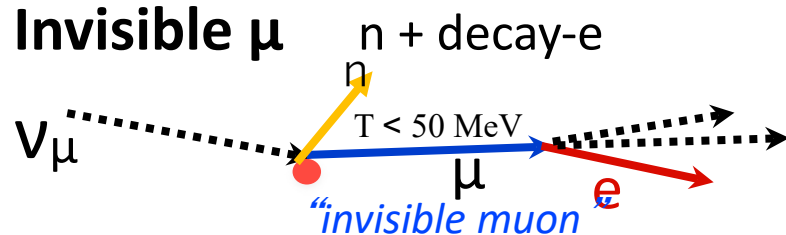
BG source: atmospheric neutrino

- CC

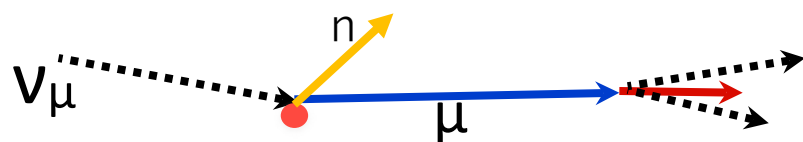
(anti-) ν_e CC



Invisible μ



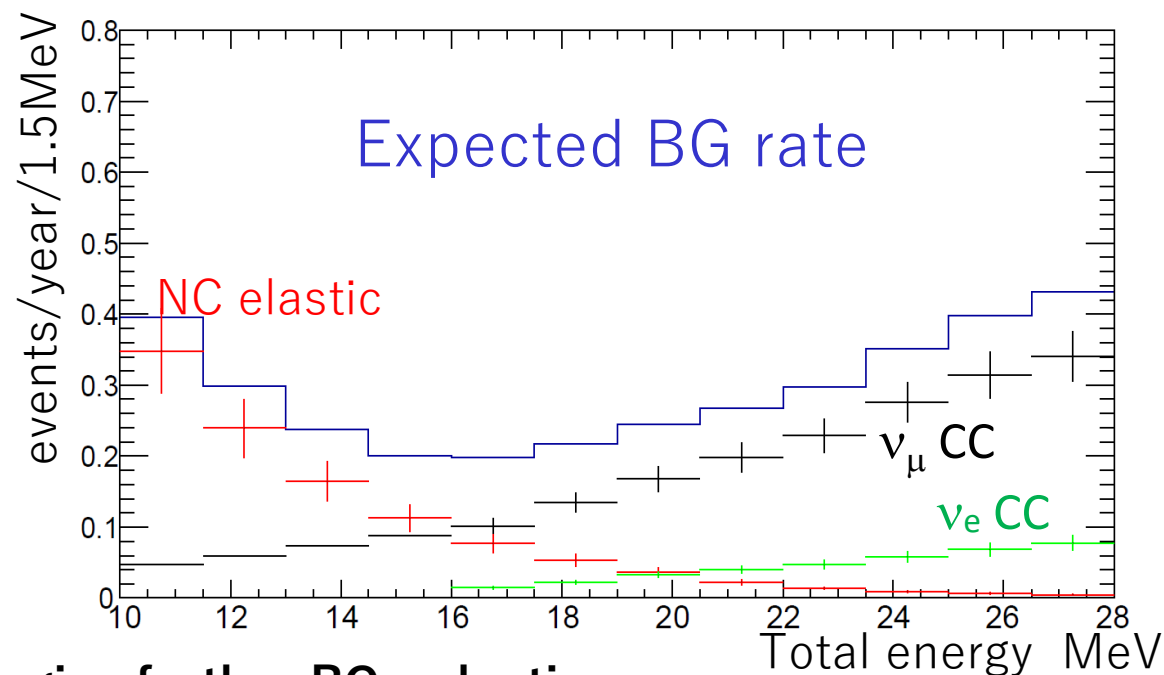
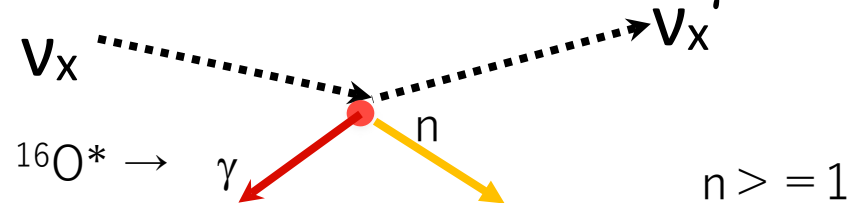
μ generation



- NC

NC elastic

de-excitation γ



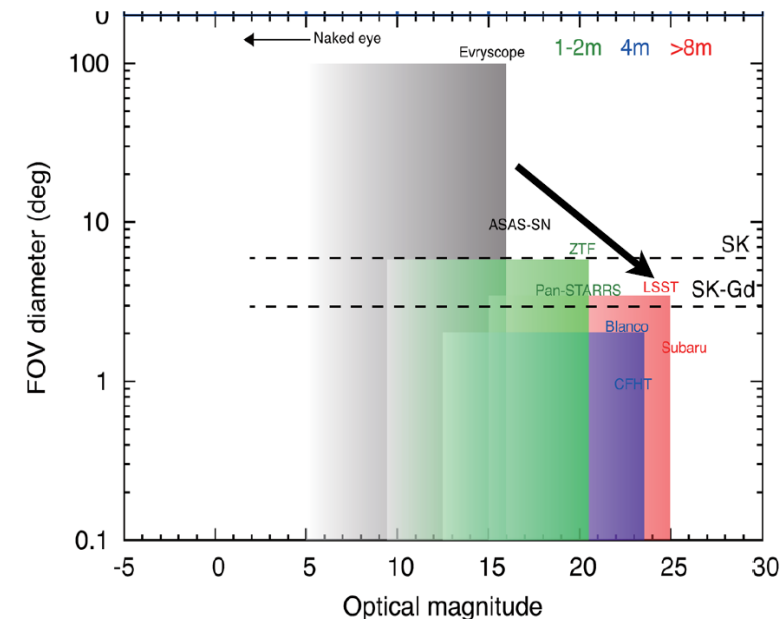
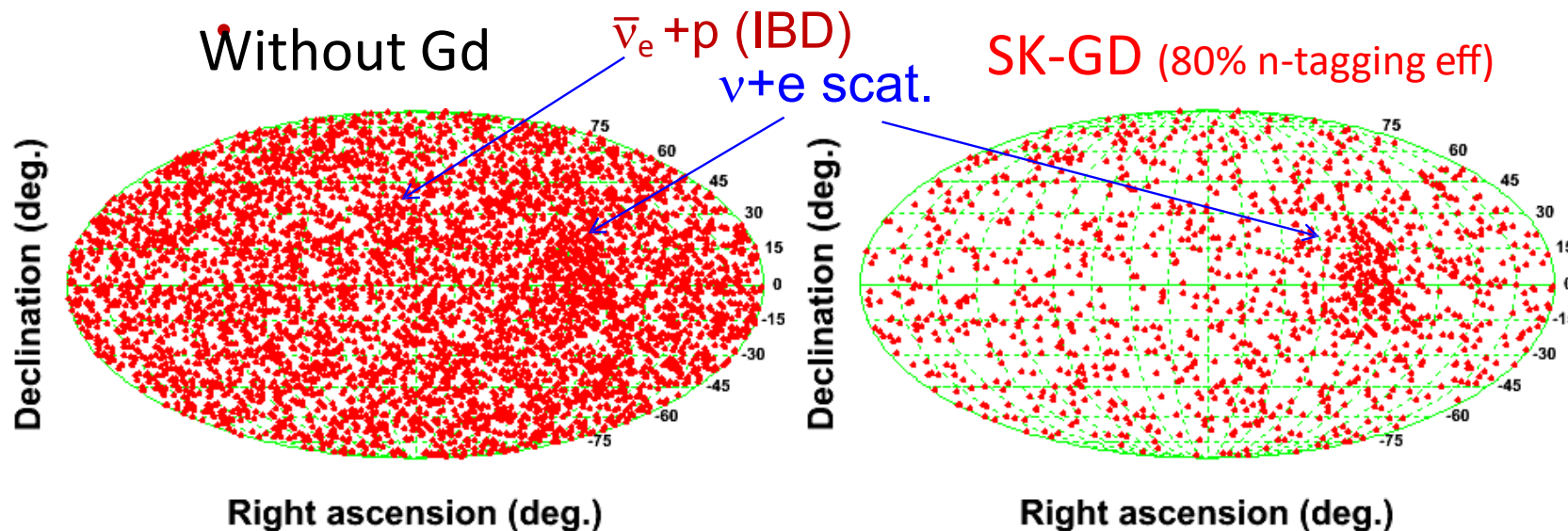
Neutron multiplicity and vertex information give further BG reduction

→ 本研究課題の1つ

Improving pointing accuracy for supernova burst neutrinos

- By tagging IBD events with Gd (which does not have directional information), extract $\bar{\nu}_e + e$ elastic scattering events from SN
- Pointing accuracy for SN at 10 kpc: $4 \sim 5^\circ \rightarrow 3^\circ$ (90%CL)
 - Helps finding coincidence with optical observation

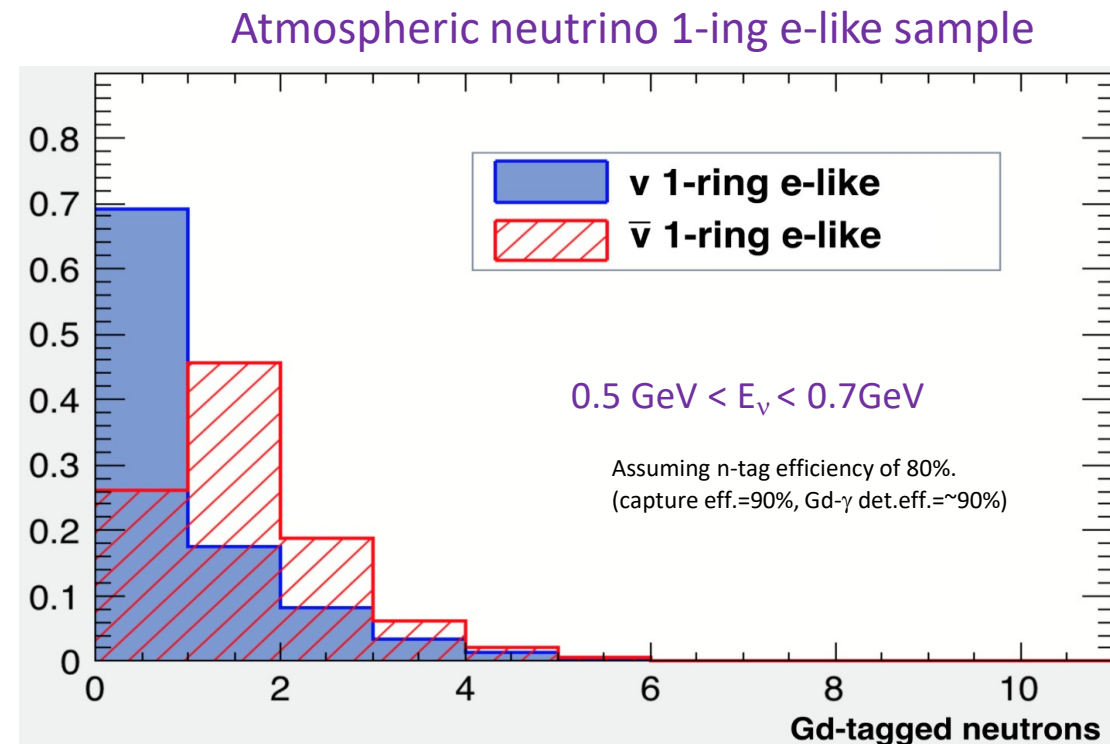
Simulation of SN at 10kpc



Improved accelerator and atmospheric neutrino measurements

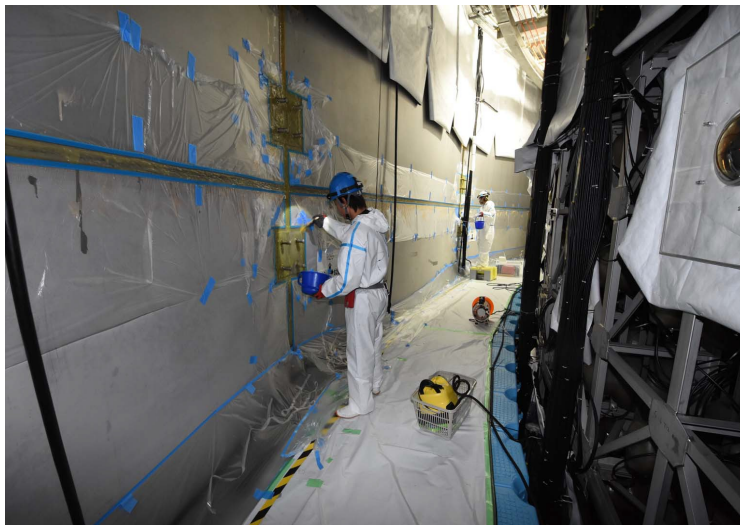
- Neutron information can improve measurements of $\sim\text{GeV}$ atmospheric and accelerator neutrinos
 - Energy reconstruction improvements
 - Neutrino/Antineutrino separation
- Various potential physics impacts:
 - Improved neutrino interaction modeling
 - Improved neutrino oscillation measurements

Feedback to SRN analysis

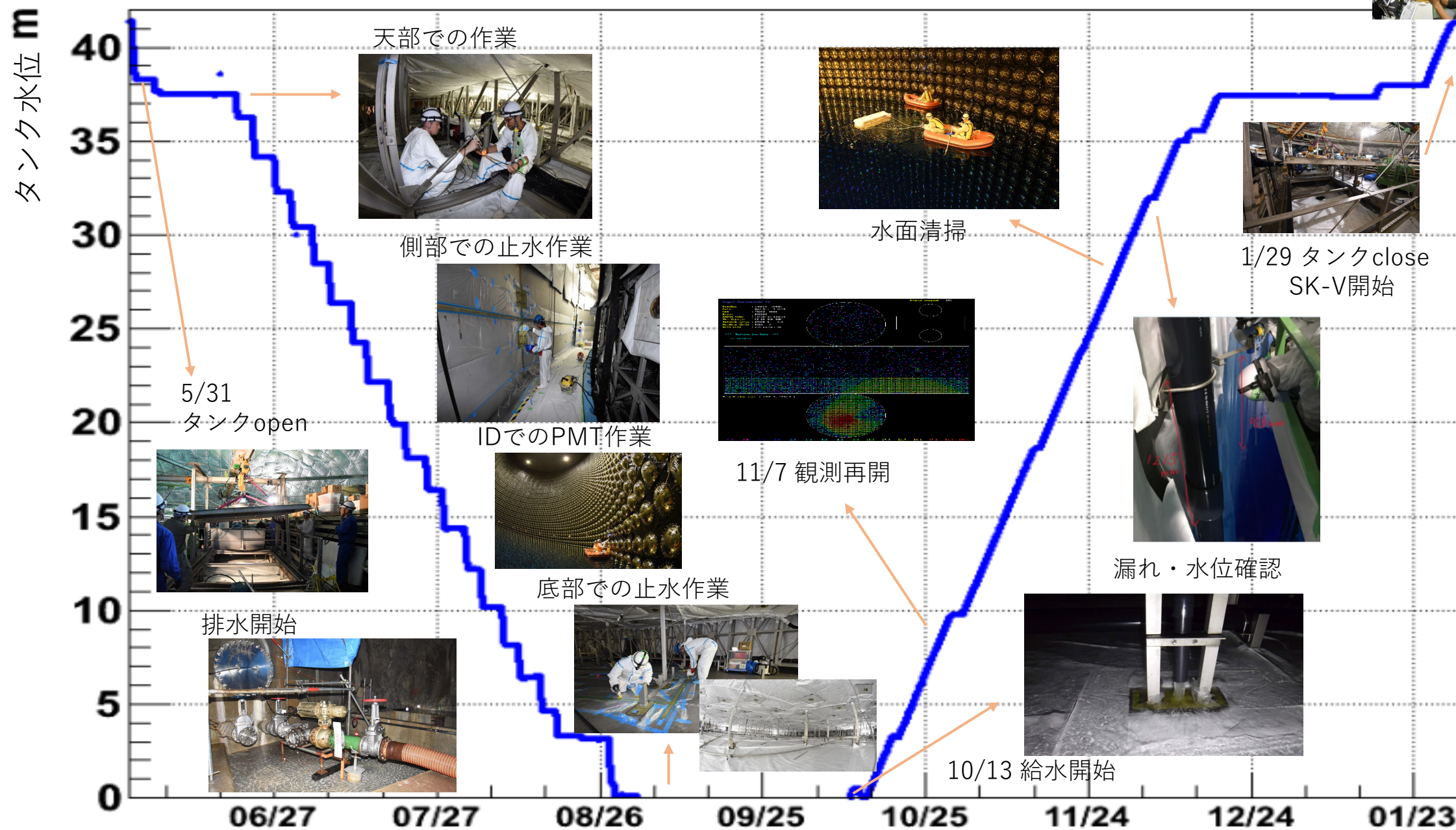


Super-K Refurbishment 2018-2019

- Super-K has undergone a major refurbishment works from May 31, 2018 to Jan 29, 2019
- **Make the tank water-tight** in order not to leak Gd to the environment.
- **Improve water plumbing** to increase the flow rate from 60 t/h to 120 t/h with better flow control.
- **Replace a few hundred faulty PMTs** and install 136 Hyper-K type 20" B&L PMTs.



2018年度改修工事の全容

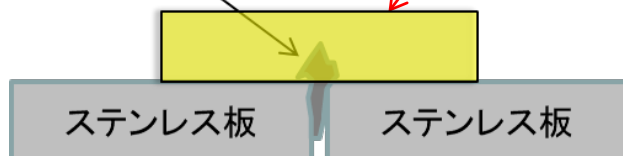


SKタンクの止水工事:前新学術の成果

補強方法

溶接線

伸縮性に富む止水
材料で覆う。



タンクの汚れがひどく、掃除工程を追加

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



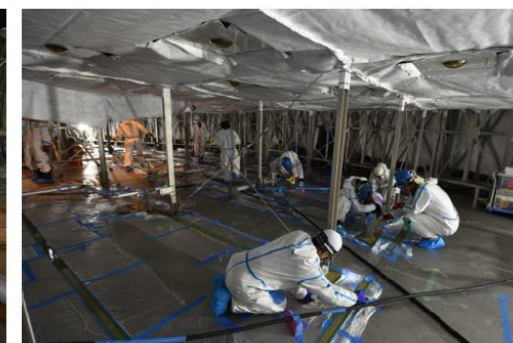
Primer painting



Mixing two materials
(main and curing agent)



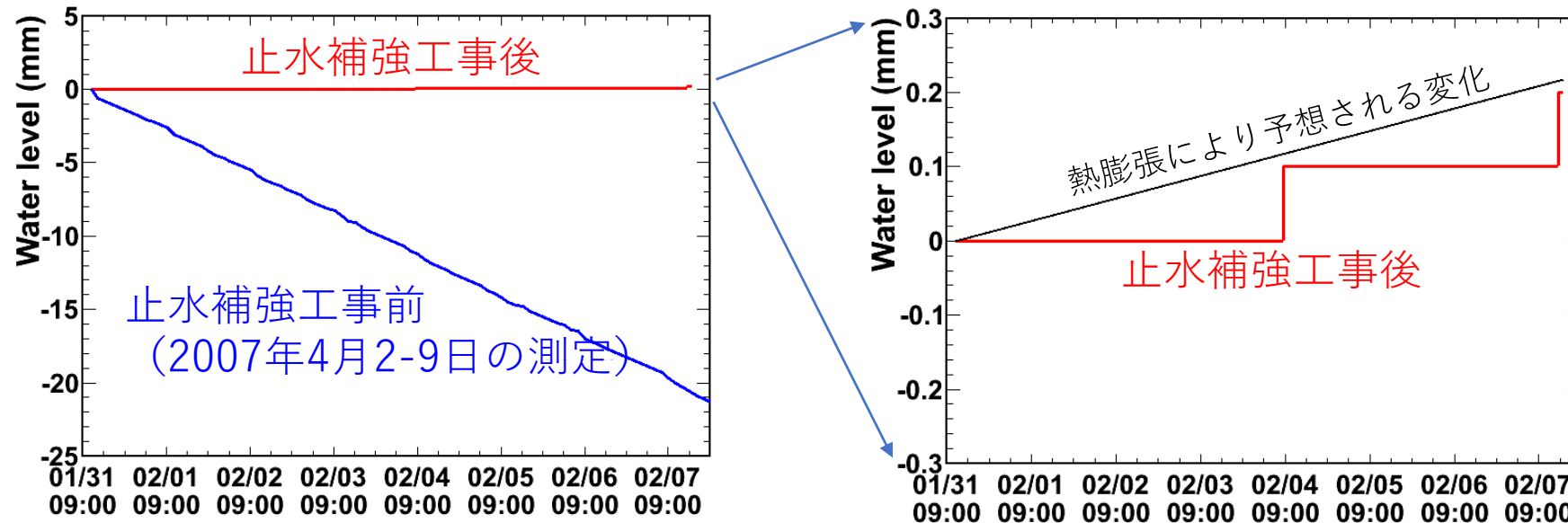
Mine-guard painting



Checking and correction

止水工事の成果

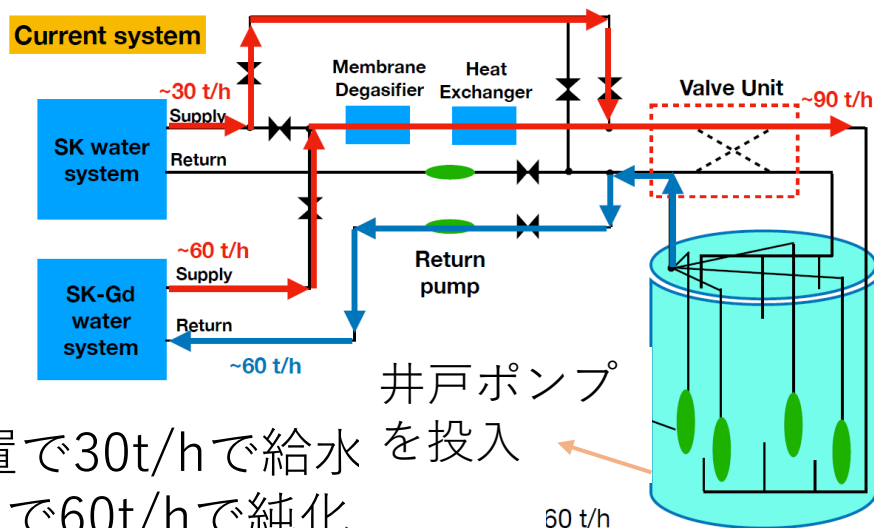
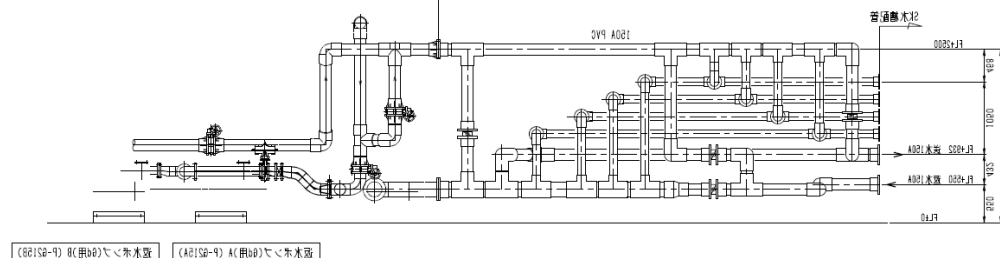
- 工事終了後、タンクに超純水を給水した。タンクが満水になった後、水漏れ試験をおこなった。2019年1月31日11:30から2月7日15:52にかけてタンクの水位の変化を測定。（7日4時間22分の試験時間）



- 止水補強工事後は有意な水漏れはみられない（一日あたり17L以下）
- 以前の水漏れ量と比べると、これは200分の1以下。

配管改良と純水装置

- 120 t/hでの循環に対応
 - 配管の上下対称性を大きく改善
 - より精密な流量コントロールが可能に
- 送水・返水逆転用バルブユニット

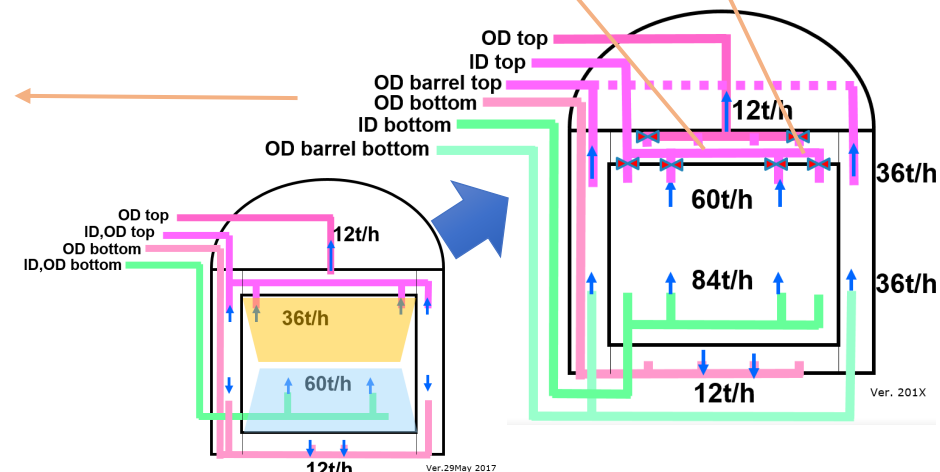


- SK純水装置で30t/hで給水
- SKG d 装置で60t/hで純化

120t/h用配管



個別流量調整バルブ

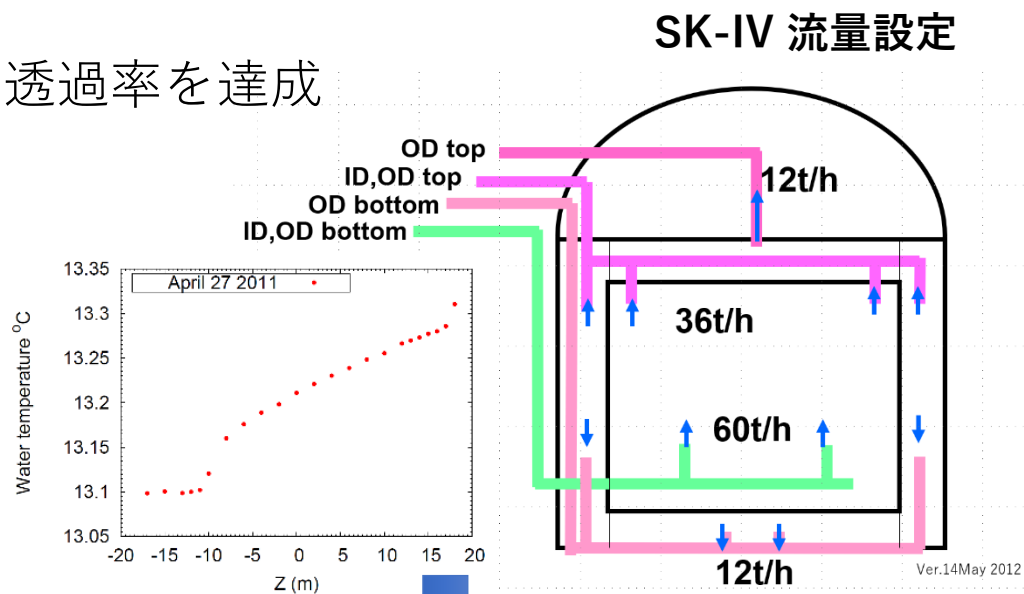
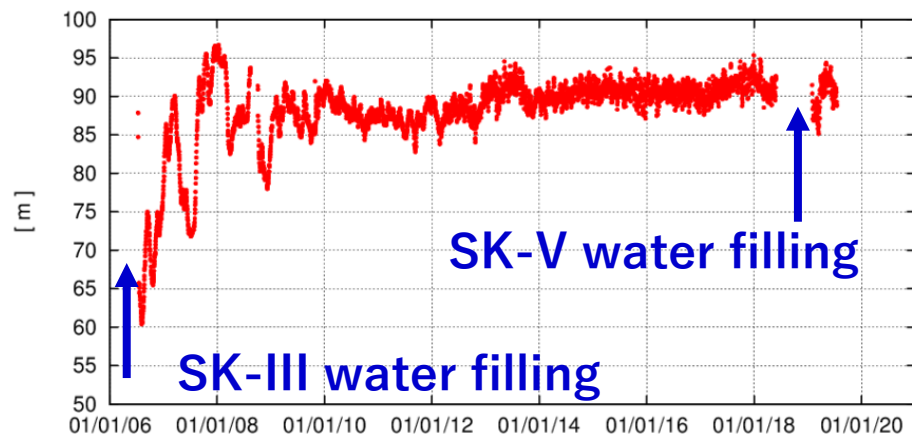


Gd純化装置を用いた給水循環

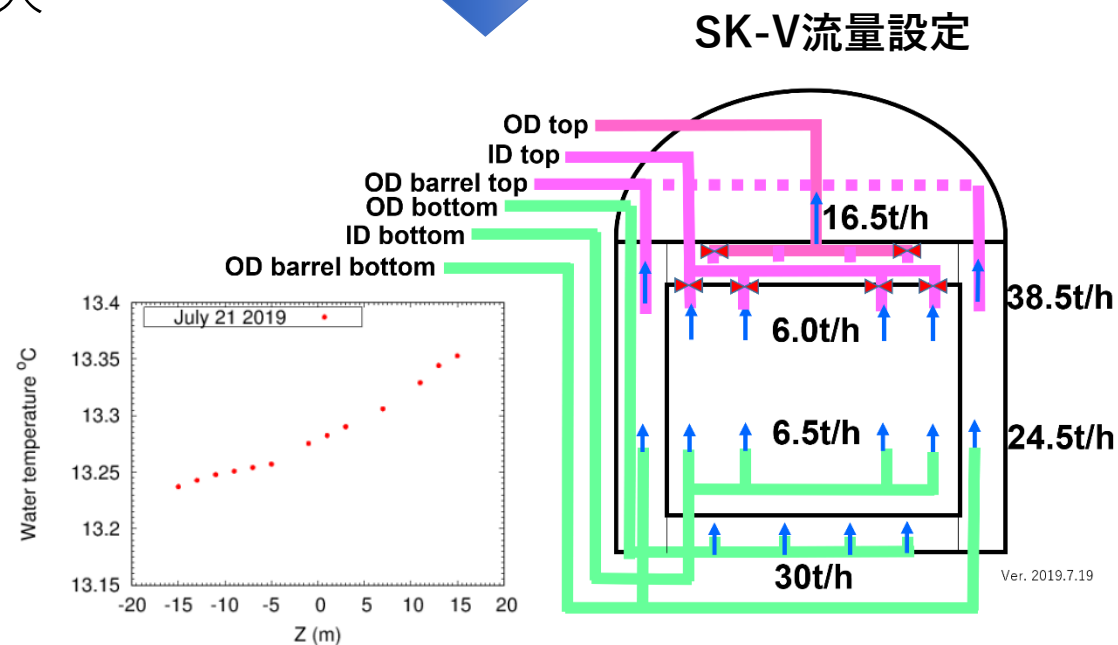
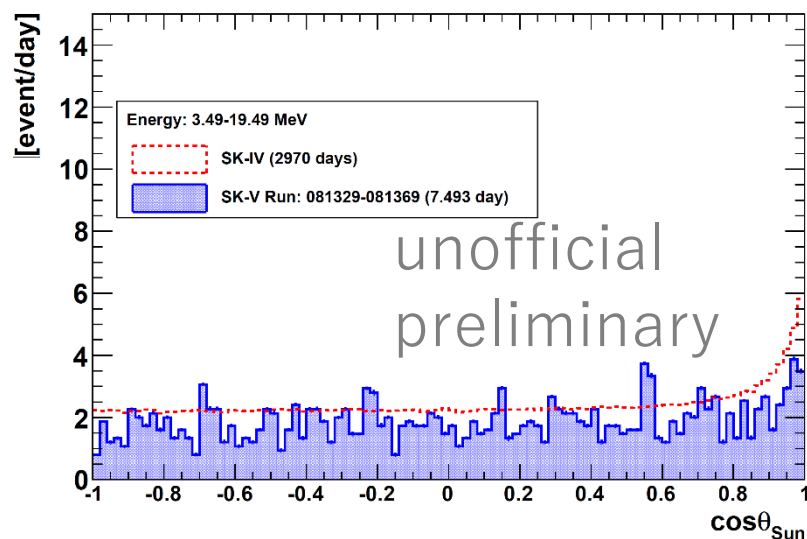
- 給水時の滞留による水質悪化防止
- Gd装置に純水用樹脂を用いて循環純化を行う

配管改良の成果

- 給水循環によりSK-V初日から物理解析可能な透過率を達成



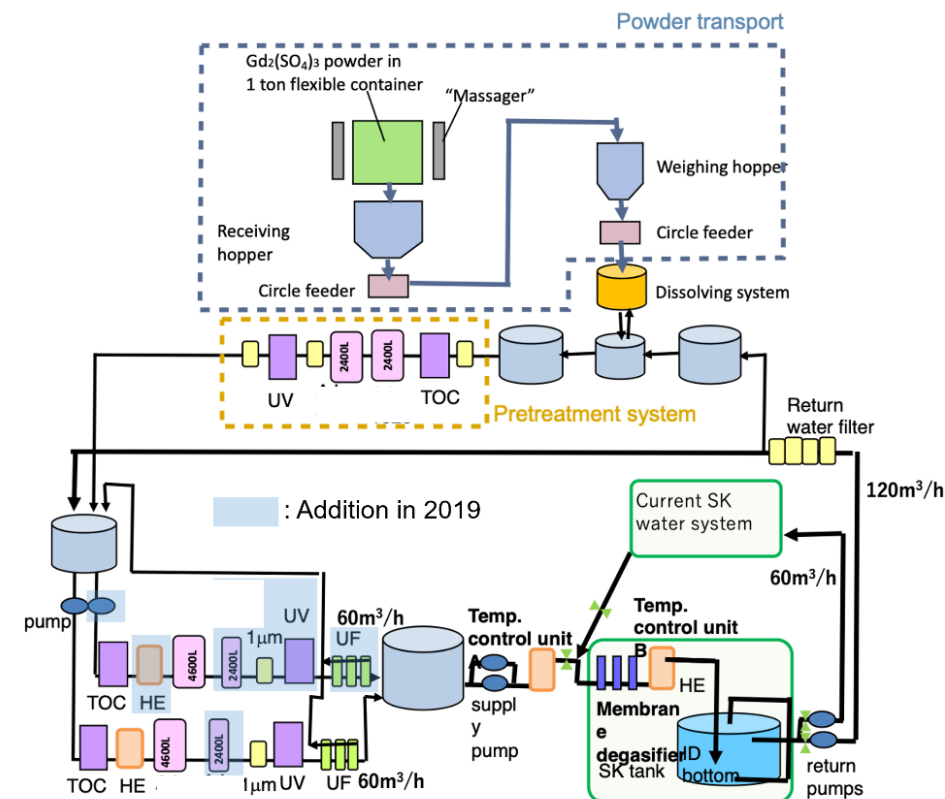
- 流量調整により低エネルギー有効体積も拡大
 - 低バックグラウンド実現



Gd導入準備状況:前新学術成果

- Gd導入装置および純化循環装置の準備
 - 溶解部のシーケンス確認、試運転の準備中
 - Gd対応のイオン交換樹脂の製造中(本新学術)
 - 完全120t/h循環へのユニット増強中
- 高純度Gd準備の準備
 - 9月末に13tの硫酸ガドリニウム納品予定
 - すでに1/3以上納品済み、業者の出荷調査での仕様は確認（右図赤字のロット）
 - Canfranc(スペイン)Boulby(イギリス)と共同で随時確認中

坑内クリーンブース内の納入済
フレコン入り硫酸ガドリニウム
～4 t

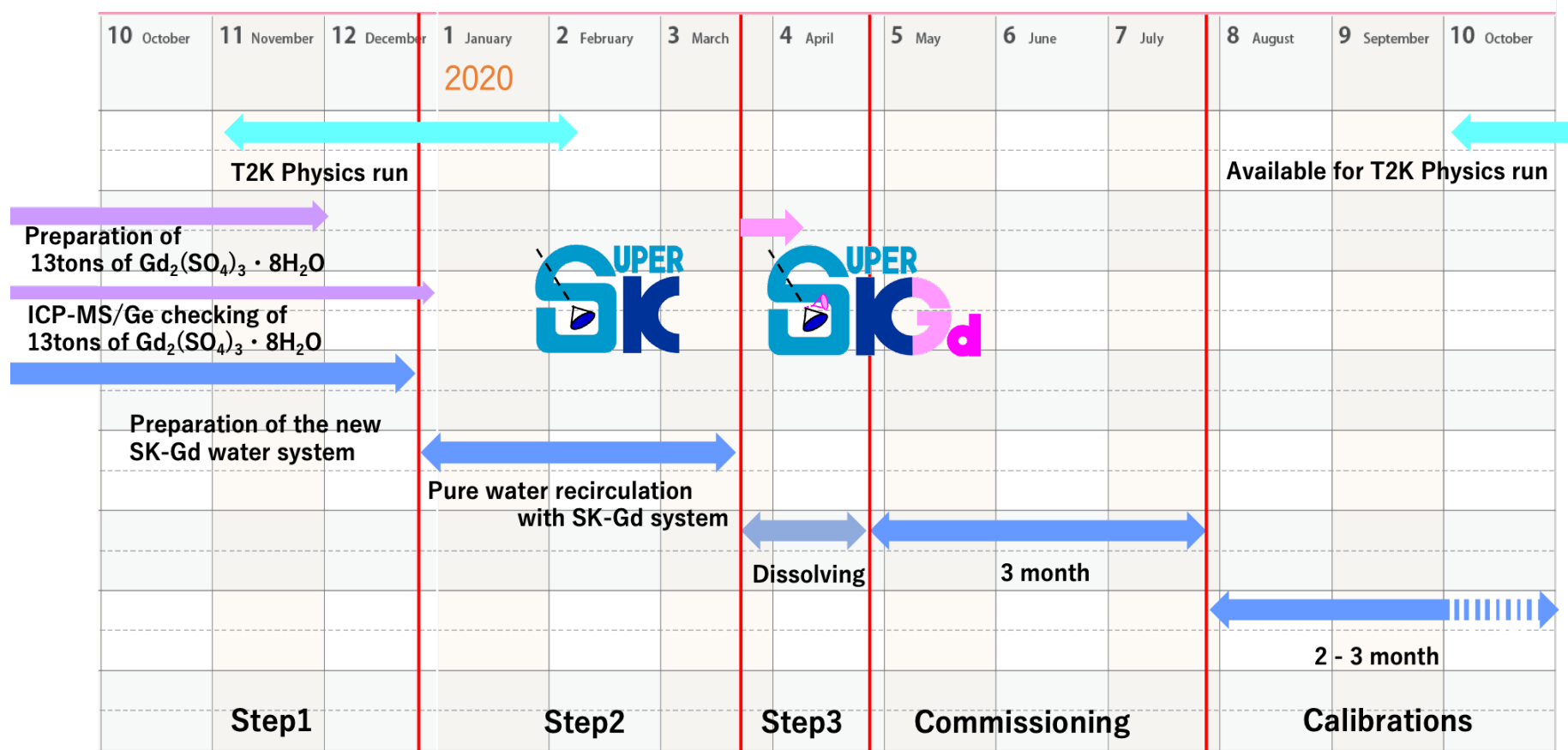


硫酸ガドリニウムの製造納品状況

Lot(500kg)	Ce	U	Th
Target	< 50 ppb	<0.4 ppb (5mBq/kg)	<0.013ppb (0.05mBq/kg)
1	27	<0.4	<0.013
2	10	<0.4	<0.013
3	9	<0.4	<0.013
4	11	<0.4	<0.013
5	11	<0.4	<0.013
6	11	<0.4	<0.013
7	12	<0.4	<0.013
8	48	<0.4	<0.013
9	47	<0.4	<0.013
11	49	<0.4	<0.013
12	28	<0.4	<0.013
13	14	<0.4	<0.013
14	12	<0.4	<0.013

来年度にかけての予定

- 2020年3月の0.01%のGd導入を目指している



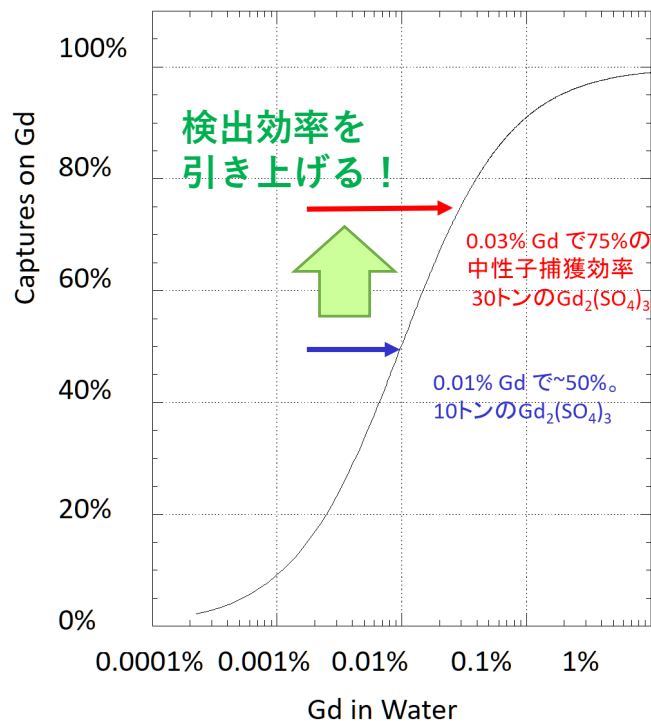
Step1 新システムの準備 Step2 新システムの純水での運用 Step3 導入
Gd 導入後 5-6か月のcommissioning と calibration期間を予定

0.01%ではものたりない

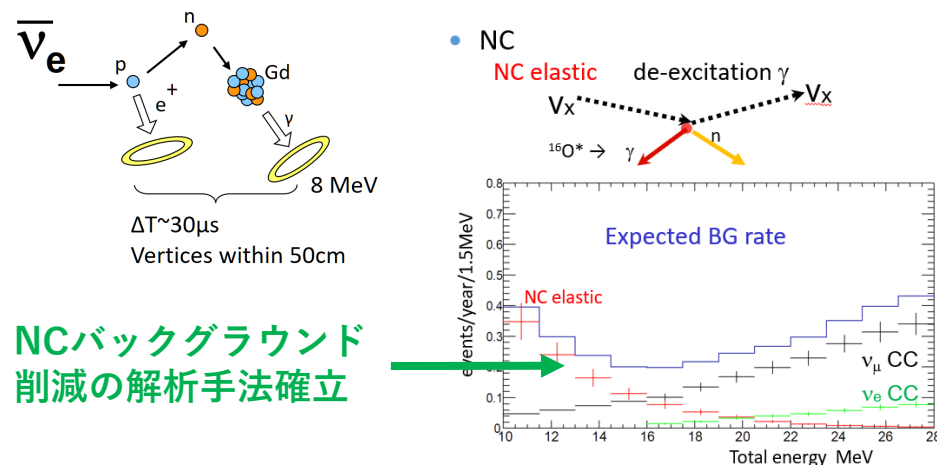
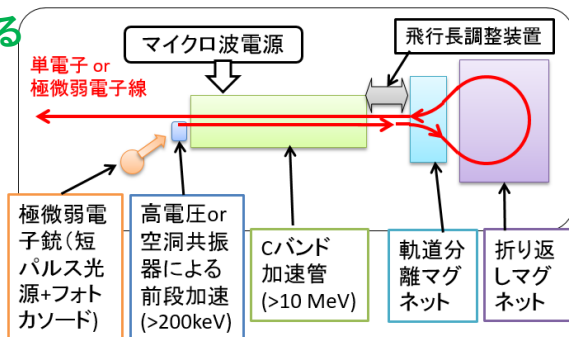


C01超新星背景ニュートリノの
高感度観測でせまる
宇宙星形成の歴史

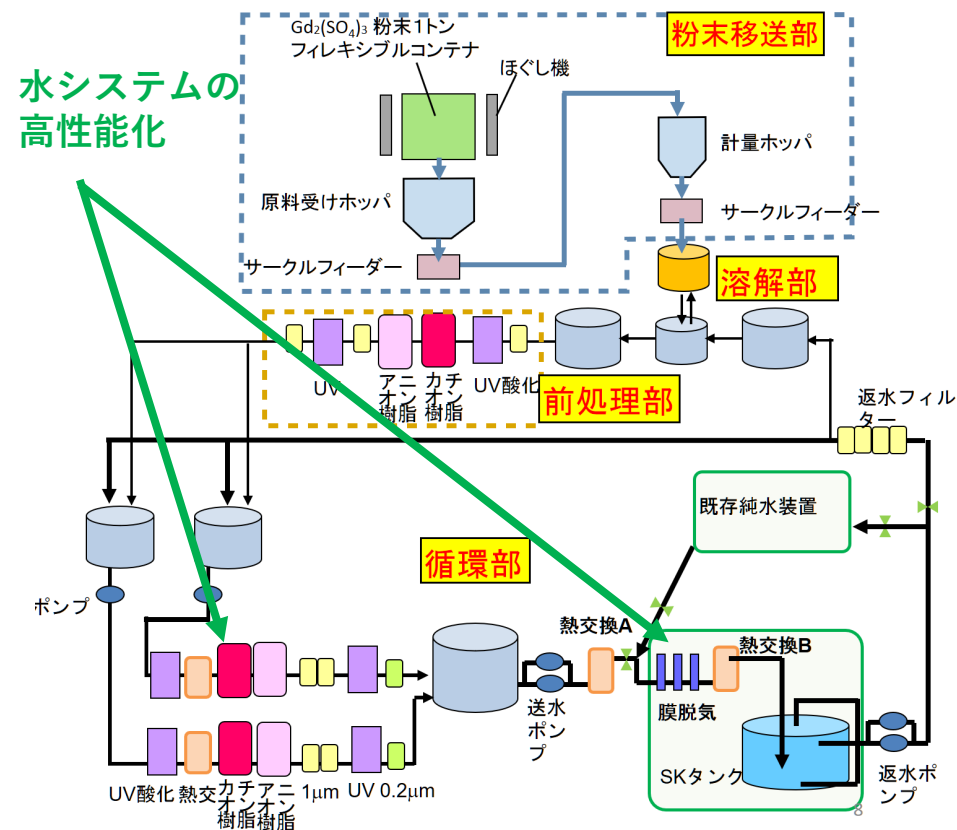
SK-Gdの高感度化



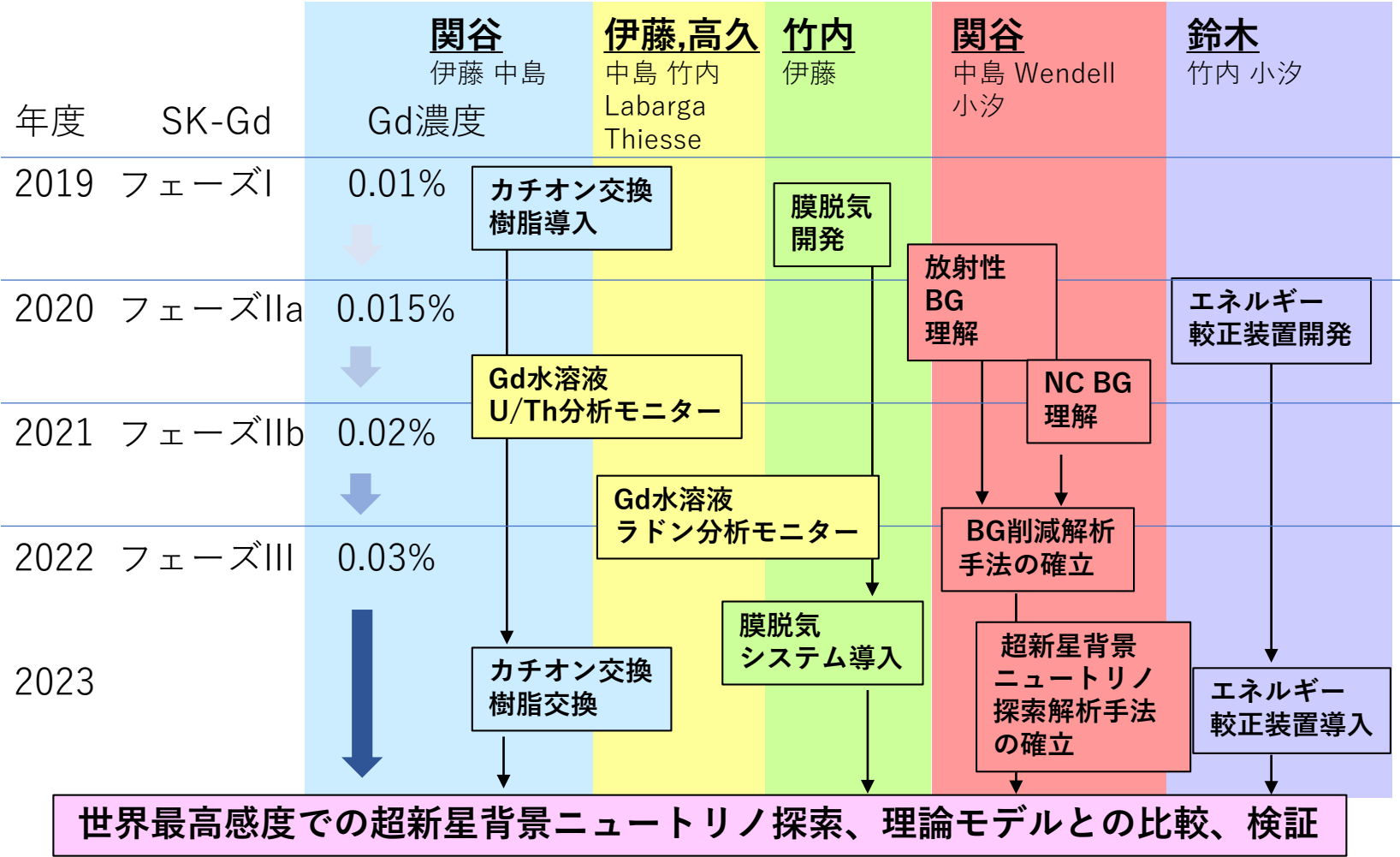
新電子加速器による
エネルギー較正
系統誤差の抑制



NCバックグラウンド
削減の解析手法確立



研究計画(申請額での)、組織と役割



C01 超新星背景ニュートリノの高感度観測でせまる宇宙星形成の歴史

- 組織：[代表]関谷洋之（東大宇宙線研）
[分担]竹内康雄（神戸大）伊藤慎太郎(岡山大)鈴木良一(産総研)高久雄一（環境研）
[協力]中畑雅行（東大宇宙線研）小汐由介（岡山大）Roger Wendell（京大）中島康博（東大宇宙線研）
- 概要：スーパーカミオカンデにガドリニウムを加え、超新星背景ニュートリノを探索するSK-Gdが始まろうとしている。検出器を一段と高性能化することにより、超新星背景ニュートリノに対する感度を上げた観測を行うことで、宇宙の星形成の歴史とそこで重要なニュートリノの役割を明らかにする。
- 目的：1) **世界初の超新星背景ニュートリノの検出を目指す**
2) 得られたフラックスやスペクトルから超新星爆発やその後のcoolingへ至るプロセスの理解
3) Star formation rate 等、宇宙星形成史モデルの妥当性を詳しく評価・議論する**(E02と連携)**
- 手法：1) ガドリニウム水純化装置の高性能化・低放射能化を進める**(D01と連携)**
2) 硫酸ガドリニウム濃度を3倍に高め、反電子ニュートリノ感度を高める
3) T2K実験から得られるデータや大気ニュートリノデータを詳細に解析、超新星背景ニュートリノの最大のバックグラウンドとなる中性カレント事象の排除手法を確立する
4) 校正装置の硫酸ガドリニウム対応を進めるとともに、検出器応答を一層理解するため、超新星背景ニュートリノのエネルギーレンジである $\sim 20\text{MeV}$ での校正装置として電子線形加速器を新たに導入する。



Extra slides

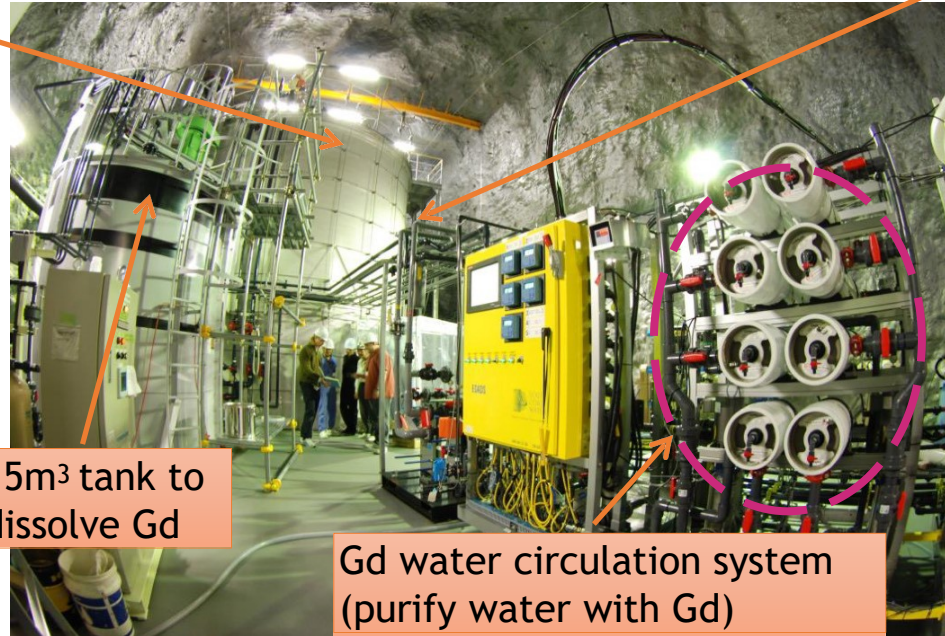
Tests with the EGADS (200t tank) demonstrator

Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems

200 m³ tank with 240 PMTs

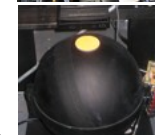


15m³ tank to dissolve Gd



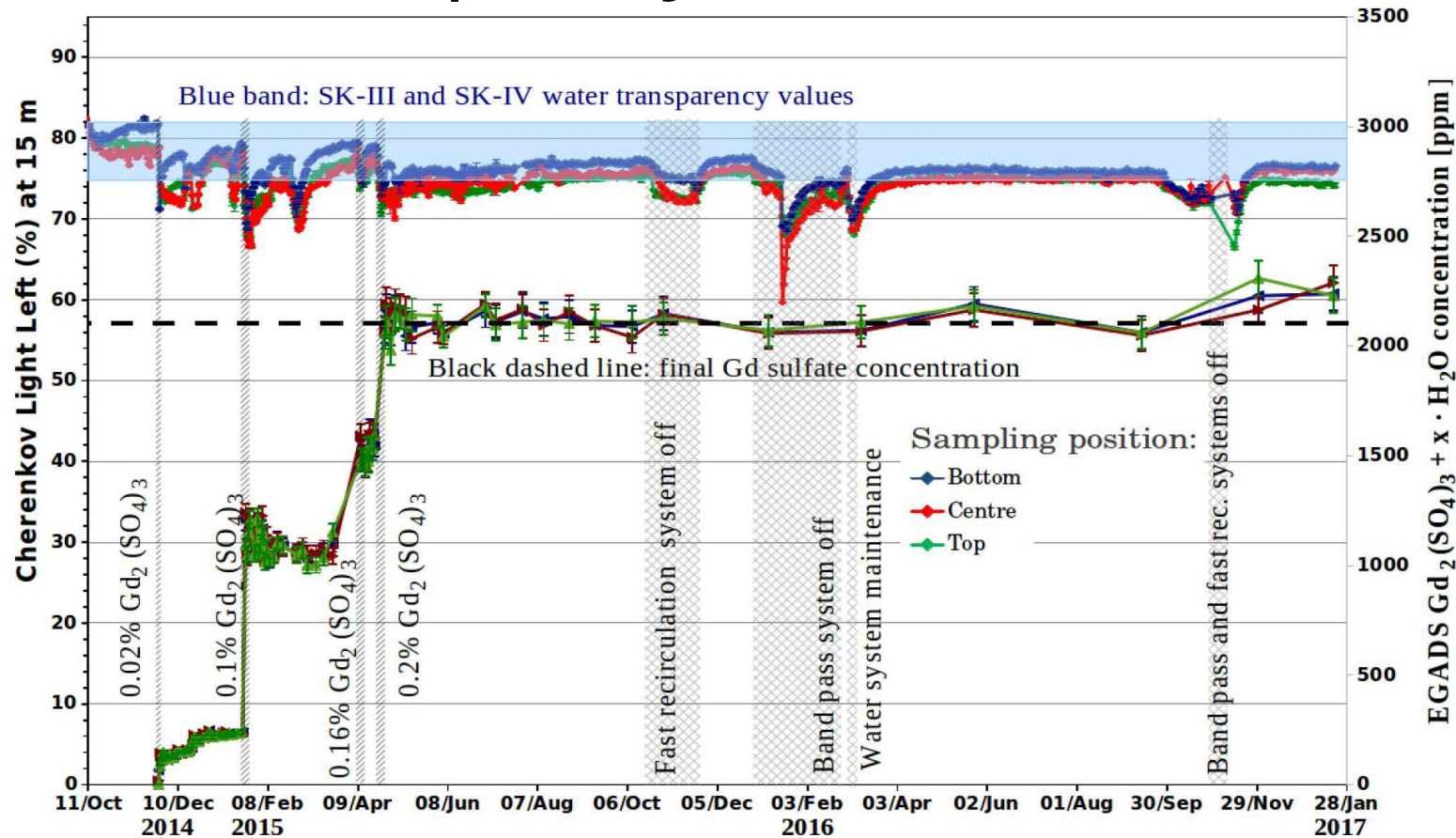
Gd water circulation system (purify water with Gd)

Transparency measurement (UDEAL)



- Studying Gd water quality with actual detector materials used in SK
Also testing 13 HPDs for Hyper-K
- Have been operating with full (0.2%) $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ loading since 2015

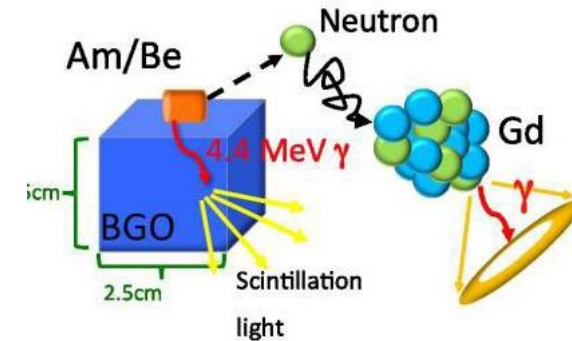
EGADS water quality



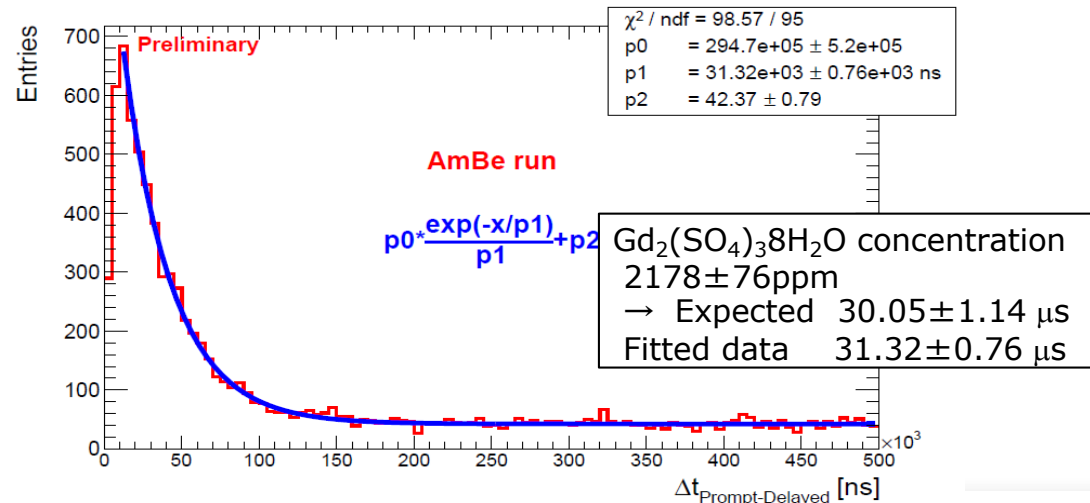
- The light left at 15 m has been stable at ~75% for 0.2% $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$, corresponds to ~92% of SK-IV average.
- No loss of Gd: >99.99% of Gd remains after circulating the water system for more than 350 times

Neutron Calibrations in EGADS

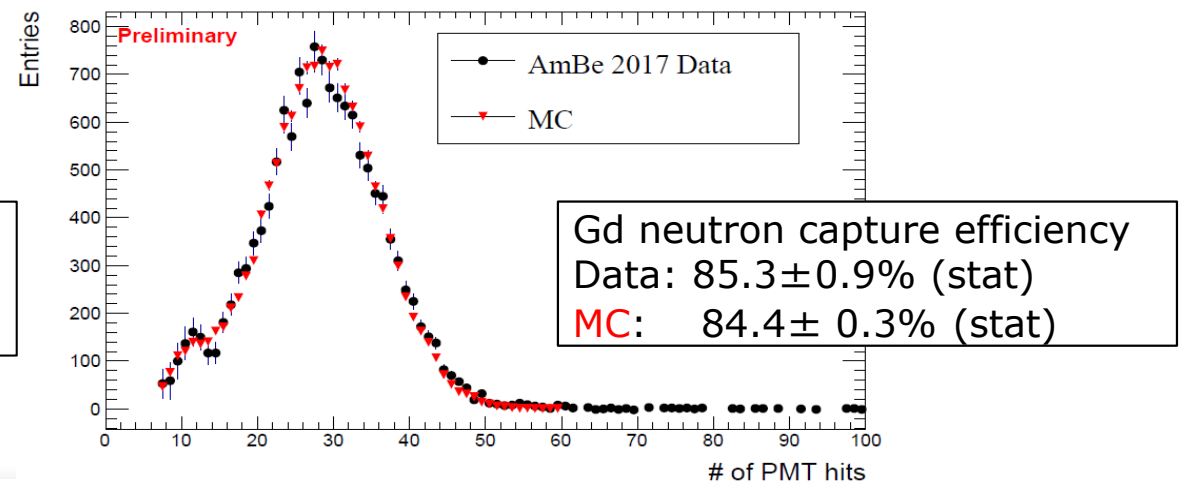
- Calibration done w/ AmBe neutron source
- BGO crystal used to detect 4.4 MeV “prompt” γ signal
- Decay time constant consistent w/ expectation
- Energy distribution well reproduced by MC



Time to delayed signal



Delayed signal spectrum



Demonstrated neutron detection with Gd in water Cherenkov detectors