

# ガドリニウム添加に向け改修工事を進める スーパーカミオカンデー12年ぶりのタンクオープン

森山 茂栄 もりやま・しげたか  
Kavli IPMU主任研究員

関谷 洋之 せきや・ひろゆき  
東京大学宇宙線研究所 准教授、Kavli IPMU 科学研究員

マーク R. ヴェイギンズ Mark R. Vagins  
Kavli IPMU主任研究員

## はじめに

岐阜県飛騨市神岡町の鉱山中に設置されたスーパーカミオカンデー（以下、Super-K、あるいはSKと略記）は1996年にデータ取得を開始しました。最初の2年間に収集されたデータを用いて、宇宙線研究所長でKavli IPMUの主任研究員を兼ねる梶田隆章氏が大気ニュートリノ振動の発見により2015年のノーベル物理学賞を受賞しました [1]。Super-Kは宇宙や加速器からのニュートリノの観測 [2]、装置内での陽子崩壊事象の探索 [3]等、現在でも世界最高レベルの研究成果を出し続けています。

EGADSプロジェクトの研究開発段階が成功裏に終了したこと [4]に伴い、スーパーカミオカンデーはKavli IPMUの旗艦実験計画の一つを進めるため、5万トンの純水にガドリニウム (Gd) の化合物である硫酸ガドリニウム100トンを添加 [5-7]して熱中性子とそれを発生させた反電子ニュートリノの検出性能を向上させる準備を進めています。これから開始されるSKのこのフェーズは、正式にはSK-Gdと呼ばれています。

図1に示されるような改修工事のためのタンク内作業が開始されたのは2018年5月31日のことで、それまでの12年間SKは連続して観測のために運転されてきました。この改修工事には、次の4つの主要作業項目があります。

(1) Super-Kタンク内の小さな水漏れの修理。

(2) 前回2006年に行われたタンク内復旧工事以降に故障した光電子増倍管(総数13,000本中の数百本)の交換。

(3) 1996年にSuper-K測定器が完成して以来、内部に蓄積された錆とその他の汚れ全ての除去。

(4) 水の全流量を増やして循環精製能力を向上させるため、およびタンク内の流れの向きをより良く制御できるようにするための配管の追加。

2018年10月中旬に測定器タンクに純水の導入を開始しました。現在(2018年12月)、数千人・日を要したタンク内作業は生まれ変わった測定器の長期にわたる実り多い運転開始を目指し、完了を目前にしています。本稿では、これまで半年に渡って進められてきた波瀾万丈の作業風景と、ガドリニウム添加の実現により今後SKに期待される新たな物理について述べたいと思います。

## SK-Gd の狙う物理

SK-Gd計画は、反電子ニュートリノと陽子が反応した際に生成される陽電子と中性子とをいわゆる遅延同時計測法によってより効率よく検出できるようにするSKのアップグレード計画です。ニュートリノを発見したライネスとコワンが使用した手法 [8]でもあり、彼らは中性子捕獲原子核としてカドミウム (Cd) を用いましたが、私たちは最近の液体シンチレータによる原子炉ニュートリノ実験 [9]と同様

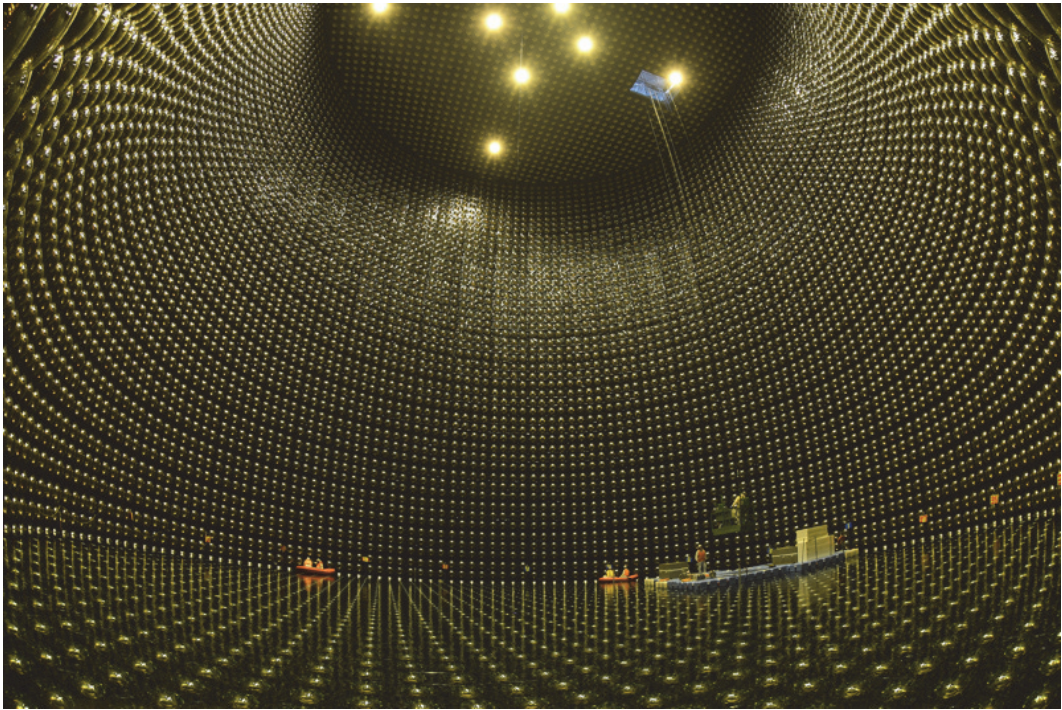


図1 スーパーカミオカンデのタンク内作業（2018年8月18日撮影）。

に、Cdの代わりにGdを用います。天然に存在するGdは熱中性子の吸収断面積が49,000バーンと安定な元素の中で最も大きな物質であり、かつ吸収後にカスケード的にガンマ線を放出し、そのエネルギーは合計で8 MeVになります。そのためGd添加により、水チェレンコフ測定器においても中性子を検出できるようになります（図2参照）。

SK-Gdの最大の目的は、過去の超新星爆発からのニュートリノ（超新星背景ニュートリノ supernova relic neutrino [SRN] あるいはDiffuse Supernova Neutrino Background [DSNB] と呼ばれている）の世界初検出です。宇宙には $10^{22-23}$ 個もの恒星があります。これらの恒星のうち太陽質量の8倍以上の星は超新星爆発を起こすと考えられています。放出されたニュートリノは宇宙に拡散して行きますが、まだ観測されていません。超新星爆発によって生まれるエネルギーの99%はニュートリノによって星から放出されるため、DSNBを観測することは、超新星爆発のエネルギーの深い理解に繋がります。また、DSNBは宇宙の始めから今までに起きた超新星爆発から放出されたニュートリノの蓄積なので、宇宙における重い元素の起源とその源である大質量星の歴史とについても探ることが

できます。

図3は理論から予想されるDSNBのエネルギー分布を示しています。フラックス（強度）はモデルによって違いはありますが、数個/cm<sup>2</sup>/sec程度であり、10年間の観測で3 $\sigma$ レベル以上の有意度でDSNBの検証が可能であると見積もられています。

反電子ニュートリノの同定は、ニュートリノの到来方向情報を保たない事象を排除することで方向決定精度を向上させ、私たちの銀河でおこる超新星爆発の検出にも役立つし、中性子検出により「超新星爆発の予知」ができる可能性も示唆されています[11]。この他にも、SK-Gdの実現によって、東海-神岡長基線ニュートリノ振動実験（T2K）の反電子ニュートリノビーム事象選別や、陽子崩壊探索時のバックグラウンド低減、（後に述べるようにタンクの清掃のおかげで放射性不純物が除去できたことによる）太陽ニュートリノ観測でのバックグラウンド低減等、SKで遂行してきた実験の感度向上が期待されています。

## タンクオープン作業

ここから、タンクオープン作業について詳しく説明し

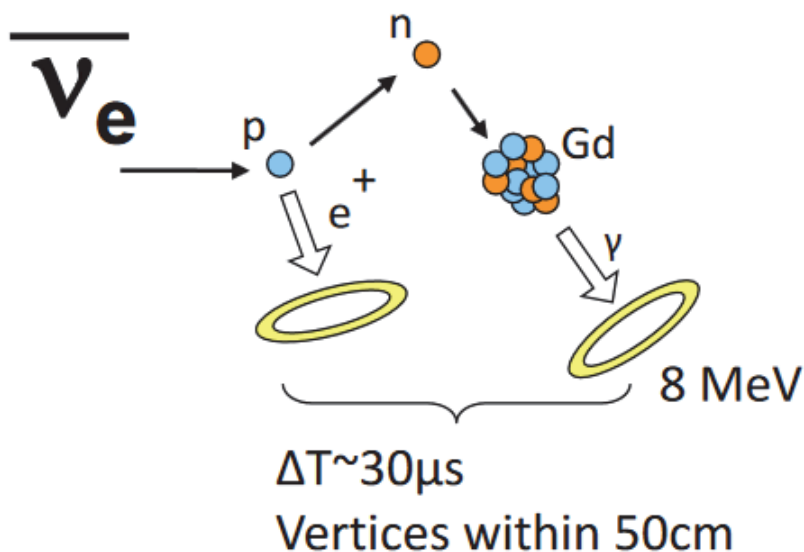


図2 水チェレンコフ測定器におけるGdによる反ニュートリノ遅延同時計数法の原理

ます。図4に示すように、ほぼ円筒形のSKタンク内には、上下面や壁面から2 mの位置に光電子増倍管（以下、PMT）を取り付ける構造体（2重の点線）が存在します。そこに、内向きに内水槽用のPMTが11,129本、外向きに外水槽用のPMTが1,885本取り付けられています。構造体の内側にはブラックシートと呼ばれる反射を抑えるPET膜、外側にはタイベック反射膜が張られています。ただし、内水槽と外水槽の水は行き来できるため、水面は一致しています。

後出のように水面に浮床と呼ばれる足場を用意し、3日に一度タンクの水を2 mほど排水します。排水した部分は浮床の上に立つ作業者の手が届くため、その部分の止水工事や、PMTの交換などを行います。この方法は、カミオカンデ時代に小柴昌俊氏が始めた手法で、通常の足場などに比べれば遥かに安価に作業ができる方法として重宝しています。

SKタンクはおよそ直径40 m、高さ42 mもある容量5万トンの水タンクです。側面は高さ2 m、幅6 m、厚み4 mmのステンレス板をぐるりと20枚、高さ方向に20枚つなげて作られている20角柱をなしています。底面もステンレス板を張り合わせており、表面積は6,000 m<sup>2</sup>以上、溶接線の総延長は6.2 km程にも達します。さらに側面にはボルトの貫通部が3,200箇所以上、底面にはアンカーのための貫通部が150箇所以上、PMT 1個あたり60 kgの浮力に打ち勝つための埋設物の貫通部が230箇所以上あります。およそサッカー場の広さがある、継いで作ったステンレス板に、一滴の水漏れもないとは想像がつかない

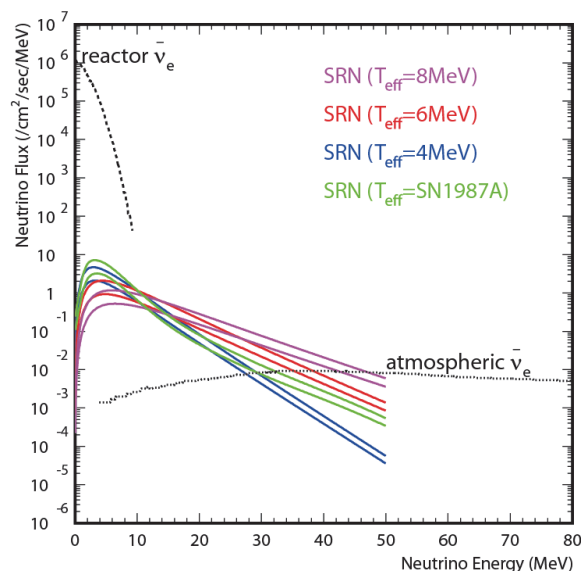
でしょう。実際にSKタンクには少々の水漏れがありました。これまで1日あたり約1トンの漏れが見られましたが、純水であれば毎分700 ccなので大したことはありません。Gdを添加した水にも環境基準は無いのですが、環境に放出することがないように止水の必要があります。また、大きな地震に備えた溶接部の止水補強が必要です。これが冒頭で述べた目的（1）に相当します。

この止水工事のため、SKでは特別なシーラント材を開発してきました。求められた特性は、柔らかく弾力性があり、伸びにも耐えること、純水を汚すことがないこと、長期に渡って純水にさらされても劣化しないこと、ステンレス板に十分な強度で付着できること、ラドンなど放射性不純物を発生しないこと等でした。これらの条件を満たすシーラント材とプライマーの開発そのものには、本稿の限られたスペースではとても説明しきれない長年の努力の積み重ねがありました。

図5は、実際の施工時の写真です。溶接線など、止水するべき場所のまわりにはバッカー材とよばれる「土手」を貼り付け、シーラント材は刷毛や左官さんが使うコテなどを使ってバッカー材の厚さまで塗り込みます。塗りは2層としてあるので、塗作業時にピンホールが開いてもそのまま水が漏れることはありません。

事前に高湿度の環境下でモックアップ試験を行ったため、業者の作業に問題はありませんでした。ただしステンレス面が周辺岩盤の温度である摂氏13度程度と冷たい一方、作業スペースは人の熱気やLED照明の熱、湿度の放出のため苦勞することになりました。極端な場合、壁面に

図3 DSNBの予想されるエネルギースペクトルと他のニュートリノ（原子炉/大気ニュートリノ）との比較。論文 [10] に基づく。



水が凝結し、バッカー材が張れない事態が生じたこともありました。換気や通風を改善することでなんとか乗り切ることができました。

特殊な手法で作られているシーラント材は、製造した後時間が経つと粘性が落ちる特性があり、壁面に塗ろうとすると垂れてしまって作業性が悪くなります。そのため生産の最小ロット量と搬送、消費のペースをうまく作り上げるといふ地味な問題も解決してきました。排水を行う毎に16名程のメンバーで清掃作業を行い、そのあとに10名程の業者の作業員が止水工事を行うサイクルを20回繰り返すことになりました。

この間なんといっても苦労したのは、壁面の汚れでした。SKは超純水で20年近く運転してきましたが、タンクオープン前に内部の状況を知るのには難しいことでした。推測はいろいろありましたが、実際に開けてみると汚れが壁面や構造体を覆っていることが判明し、急遽清掃作業の増強を行って対応しました。汚れがあると、止水材がステンレスに十分付着できず、作業全体が無駄に終わってしまう可能性があるからです。特にタンク最上部においては、SKの建設工事のうち1994~1995年の作業において避けられなかった排ガスや粉塵の付着が残っていたせいか、布で拭き取ると真っ黒でした。下手な清掃具を用いるとかえってチリを増やし、止水とSKの運転再開後の水質に悪影響を与えるので、研究者が様々な清掃道具を試し、組み合わせ、開発し、清掃を進めました。掃除も大事な研究テーマであると実感したものです。

これらの清掃のおかげで、止水材はしっかり付着する

ことができた上、大量の放射性不純物も除去できました。ゲルマニウム検出器での評価によると、少なくともラジウムは100ベクレル程度除去できました。これから発するラドン量はPMTから発するラドン量に匹敵するため、今回の掃除は今後の太陽ニュートリノ観測のバックグラウンド低減に大きく寄与できたと考えられます。

(2) のPMT交換については、これまで実績はあるものの、PMT交換により止水作業が遅延しないように進める必要があり、最初からトップスピードでの作業が求められました。特にアメリカグループ担当の外水槽のPMT交換はタンク開放直後の作業立ち上げが難しく、作業遅延の心配もしましたが見事予定通りに完了しました。一方内水槽のPMTの交換は、重量がある上慎重に扱う必要があります。内水槽用のPMTは、2001年に生じたような連鎖的な破損事故を起こさないために、防爆ケースと呼ばれるFRPとアクリルの容器に収めて使用します。PMTの交換作業のたびに、早朝タンクを遮光してPMTの動作と電気的接続を確認しましたが、担当グループは常に時間に追われて苦労しました。

(3) の腐食金属源の撤去の殆どは、上記清掃作業の間に実行できました。タンク内にはステンレス材しかないはずなのに、稀に見つかるサビで覆われていた鉄製のボルト、ナットを除去しました。12年前に使われた鉄製のクランプがタンク内で発見されたこともありました。ステンレスへの「もらい錆」も多数ありました。どんなに錆を除去してもまた出てくると業者から聞かされましたが、できる限りの錆を取るようにはしました。そもそも錆の存在は今後

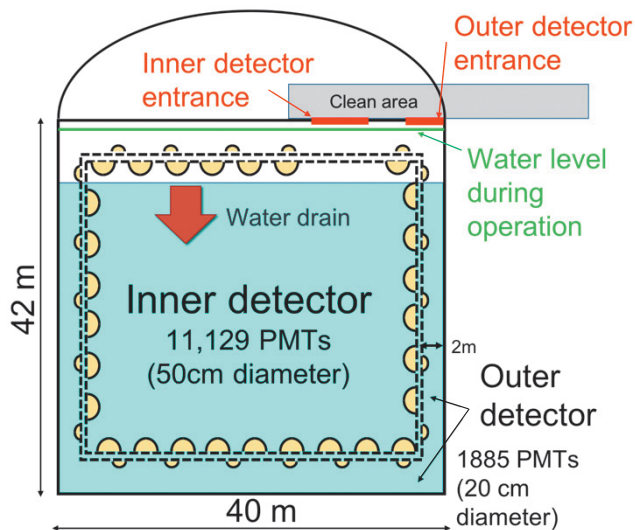


図4 タンク断面の説明図。水を段階的に抜きながら手の届く範囲の作業を進めてゆく。

の運転に悪影響があることが懸念されたため、作業に先立って若い研究者らが様々なツールの調査、検討を重ねてきました。SKの水の透過率はこれまでも高かったのですが、さらに高い透過率が得られるよう、そしてGdを添加しても無事に運転できるよう、丁寧に作業を行いました。

外水槽のタイベックシートの取り付けも大きな作業でした。内水槽は光の到着時間をもとに反応点を再構成するため、反射の少ないブラックシートで覆っている一方、外水槽は時間情報よりも入射ミュオン検出効率を確保するため、反射材であるタイベックシートで覆っています。高さ40 mの壁に1 m幅のシート120枚をゴンドラで順次引き上げ、隣り合う部分をホチキスで留め、底面には止水工事後にタイベックシートを敷き込みました。底面作業は、若手の日本人研究者とアメリカグループのリーダーが協力して進めました。止水作業後のシーラントにダメージを与えずに作業するためには、慎重な準備と作業が必要だったためです。

これらのシフト数は延べ2,683人となりました。9月半ばまで、日曜日を除き毎日総数40~50名ほどのシフトとエキスパート、監督、そして業者が作業を行いました。シフトにはSKメンバーを中心に、T2Kや、次世代大型水チェレンコフ実験計画ハイパーカミオカンデ（HK）に属する世界中の研究者が含まれています。これらに属さないボランティアにも多数協力を頂き、心から感謝しています。この間安心して作業できるシフトアレンジ等様々な努力を行いました。例えば神岡施設の宿舍の室数には限りがあるため、車で30分程離れた富山市のアパートを数室借り上げ

た上、毎朝毎夕の車での送迎や、そのドライバーの確保などをシフト担当者が腐心して成し遂げました。

大量のシフト作業者が効率よく作業するために最も苦労したのはゴンドラの運行です。掃除や止水作業のため、外水槽に30名以上の作業者が入る必要がありますが、容量300 kgのゴンドラが1台だけなので、何もしないと長蛇の列ができます。作業場所が底面に近くなると1往復20分かかるため、作業者の種類ごとに入坑、出坑時間をずらし、業者とかち合わないようアレンジするのはパズルのようでした。

作業においては作業者の安全確保が第一優先であり、安全教育や注意喚起についても、現地到着前に行うe-learningを準備し、シフト開始時にガイダンスを行いました。また、作業者への聞き取りや、毎朝の作業チームリーダーの打ち合わせで行う安全に関する報告を基に、作業環境の改善を続けました。作業者に対しては事故を起こさないよう教育をするだけでは駄目で、気になったこと、起きたことは遠慮せず即座に共有するよう徹底することが重要であると改めて感じさせられました。

## 純水装置と今後

今回、タンク内の清掃と止水工事、PMT交換に加え、もう一つの大きな改造工事としてタンク内配管を含む水システムを一新しました。SKの純水装置は、当初30 m<sup>3</sup>/hの処理能力で給水・循環させることを前提として作られ、タンク内の配管も内水槽と外水槽を区別することなく、か



図5 外水槽におけるタンク壁面の止水工事の様子。青い浮床の上で作業。右側には口径20 cmのPMTが見えている。

なり「適当」に作られていました。その後2001年の事故前後や、2005~2006年の完全再建の際にもタンク内配管は本質的には改善されず、その後開始されたSKフェーズIII (SK-III) の途中から純水装置の循環レートは $60 \text{ m}^3/\text{h}$ に引き上げられていました。そこで今回の作業に際し、図6に示すように内水槽、外水槽の配管を切り分けるだけでなく、外水槽の側部、天部、底部をすべて独立に流量を調整できるように改良することにしました。これまで太陽ニュートリノ解析用の有効体積はバックグラウンドとなるラドンの流入によって制限されてきましたが、この改良でタンク内の水の流れの制御と最適化が可能になりました。ここから得られる知見はHKのデザインにも生かされています。

ところで、タンク内の水位が下がり底面のPMTの隙間から突き出た内水槽給水用の配管が顔を出したところで、衝撃的な事実が判明しました。アクリルでできているはずの12本の配管のうち、中心付近の3本が実は通常の透明塩化ビニル管でできていたのです。2008年から開始されたSK-IVの解析で、底部の配管に対応する位置にイベントのhot spotが3ヶ所あることが分かり、これまで流量バランスが崩れている説や、ラドン源である割れたPMTガラスが配管に詰まっている説などが唱えられてきましたが、実はラドン放出や放射性不純物が多い「塩ビ」が使用されていたのです。どうも2001年の事故で3本の配管が壊れ、その後修理の際、手元にある材料で復旧されたが、2005年の完全再建の時にはこのことが忘れ去られていたようです。改めて、記録して伝承することと、測定器をち

ゃんと目で見て確認することの大切さを実感しました。

さて、高純度硫酸ガドリニウム水溶液を製造するだけなら、ある意味今流行の「機能水」の一種ですので、「〇〇水」同様、超純水に硫酸ガドリニウムを混ぜればよいだけです。ところがSKの純水装置は循環純化方式で、水以外の不純物をすべて取り除くように設計されているため、硫酸ガドリニウムを溶かしてそのまま運用すると必要なイオンまで全部除去されてしまいます。従って、水とガドリニウムイオンと硫酸イオンだけを保ち、それ以外の不純物を取り除く純化装置を開発しなければなりません。

やはり本稿の限られたスペースではその詳細に触れることはできませんが、超純水製造技術を応用して、2014年から小型試験装置を建設して実証実験を行い、2016年度からSK-Gd用の新しい装置を建設し、タンクオープン作業と並行して立ち上げ作業を行ってきました。処理流量は $120 \text{ m}^3/\text{h}$ とSK-IVまでの純水装置の2倍で、これに合わせてタンク内配管も増強されています。

さらに今回、これから挑戦することがあります。タンクへの給水はこれまでの超純水製造装置を用いて $30 \text{ m}^3/\text{h}$ の流量で行いますが、満水までは2.5ヶ月かかってしまいます。これまではタンクに給水された水は純化されることがなかったため、給水後、水の透過率が改善し観測開始できるまでさらに2ヶ月程度かかっていました。そこで新たに建設した純化装置の中身に通常の純水装置用の機能材を投入し、タンク内水循環用の純水装置として運用することで、給水しながら循環させ、満水と同時に観測開

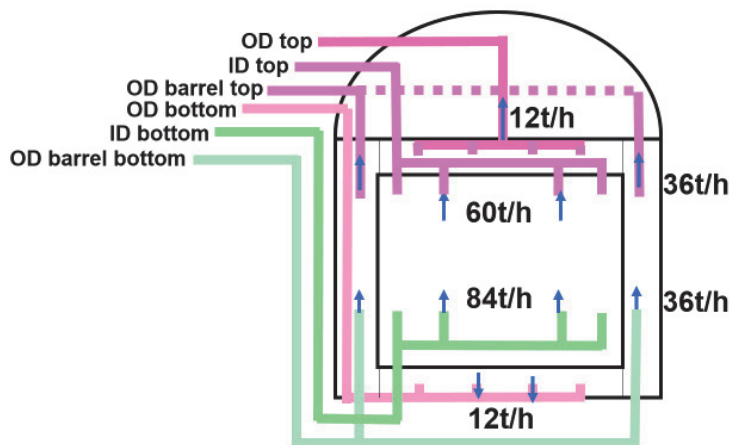


図6 タンク内の水の流れを改善するため、配管を一新。

始でける透過率を実現させる予定でいます。その後、純化装置の中身を硫酸ガドリニウム対応の機能材へ入れ替え、純水のまま運用して透過率を保持できることを確認します。そして、T2K実験側とも相談しながら2019年度中に硫酸ガドリニウムの導入を行う予定でいます。

## おわりに

タンクオープン作業の間、台風や大雨のため作業を中止することが3度ありました。その理由は、SKにアクセスする国道が積算雨量120 mmを超えると通行止めになって帰宅不能になるためです。そしてまた深刻なのは停電に伴うSKタンクの破壊の恐れです。SKは坑内の水位レベルより深いところに位置しているため、SKの水を抜くときにはSKの周りの水もポンプで排水しています。もし悪天候等による停電でこのポンプが止まると、タンクに外水圧がかかり、タンクを破壊する可能性があります。そのため、電源は別システムを用意し、発電機も用意し、緊急入坑のための段取りも行ってきました。2018年12月までにはほぼ満水に近づいていますが、今後大雪で停電が起きないことを祈っています。12月と2019年1月に残りのタンク内作業を行い、その後タンクをクローズし、本作業の完了、そして新たな物理成果を導くデータ収集が、いよいよ始まります。

- [1] The Super-Kamiokande Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562 (1998).
- [2] The Super-Kamiokande Collaboration, *Astrophys.*

*J. Lett.* **857**, L4 (2018); The T2K Collaboration, *Phys. Rev. D* **96**, 092006 (2017).

- [3] The Super-Kamiokande Collaboration, *Phys. Rev. D* **96**, 012003 (2017).
- [4] M. R. Vagins, “ミッション R&D 完了、EGADS 新たな未来へ,” *Kavli IPMU News*, No. 43, September 2018, pages 32-35.
- [5] J. F. Beacom and M. R. Vagins, “GADZOOKS! Anti-neutrino spectroscopy with large water Cherenkov detectors,” *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171101 (2004) [hep-ph/0309300].
- [6] M. R. Vagins, “Kavli IPMUのニュートリノ予報:概ね晴れ、超新星の可能性大,” *Neutrino Forecast: Mostly Sunny, with a Good Chance of Supernovas*,” *Kavli IPMU News*, No. 19, September 2012, pages 32-37.
- [7] 関谷洋之, “スーパーカミオカンデーガドリニウムプロジェクトの現状報告,” *ICRR News*, **96** (2016), pages 1-9.
- [8] C. L. Cowan, F. Reines et al., *Science* **124** (1956) 103-104.
- [9] F. P. An et al., *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 171803.
- [10] S. Horiuchi et al., *Phys. Rev. D* **79** (2009) 083013.
- [11] A. Odrzywolek, M. Misiaszek and M. Kutschera, *Astropart. Phys.* **21** (2004) 303-313.