

## ■ 研究紹介

# JSNS<sup>2</sup> 始動！

東北大学 ニュートリノ科学研究センター

日野 陽太

[hino@awa.tohoku.ac.jp](mailto:hino@awa.tohoku.ac.jp)

大阪大学 核物理研究センター

菅谷 順仁

[sugaya@rcnp.osaka-u.ac.jp](mailto:sugaya@rcnp.osaka-u.ac.jp)

KEK 素粒子原子核研究所

Jungsic Park, 丸山 和純

[jspark@post.kek.jp](mailto:jspark@post.kek.jp), [takasumi.maruyama@kek.jp](mailto:takasumi.maruyama@kek.jp)

2020 年 (令和 2 年) 11 月 19 日

## 1 はじめに

2013 年に JSNS<sup>2</sup> (J-PARC Sterile Neutrino Search at J-PARC Spallation Neutron Source) 実験を J-PARC PAC に提案 [1] してから 7 年、また、前回、実験関連記事が高エネルギーニュースに掲載されてから ([2]) はや 5 年が経過した。今回のこの稿では、この間のステライルニュートリノ探索の世界情勢の変化、我々が行った検出器建設や実験準備作業（技術設計書 [3] も参照のこと）を紹介する。更に、2020 年 6 月に初めて行った 10 日間の検出器コミッショニングについて解説する。この中ではデータ取得前後の液体シンチレータ充填・抜取り作業、データ取得、また、そのデータ解析について紹介する。

### 1.1 実験の目的

前回の記事にて強調されていたように、我々の実験の動機は、LSND 実験結果の直接検証である。LSND 実験では、反ミュー型ニュートリノから反電子型ニュートリノへの転換を短基線 (30 メートル) で観測したと主張している [4]。LSND 実験の観測が本当にニュートリノ振動であれば、この現象は通常のニュートリノ振動では記述されない短基線でのニュートリノ振動が起こっていることになり、(第 4 または更にたくさんの) 別の質量固有状態があることになる。LSND の結果は、有意性は  $3.8\sigma$  と高いのだが、系統誤差の理解等に誤りがあるのではないか、との指摘もあり、完全なコミュニティからの支

持を受けていない。JSNS<sup>2</sup> 実験のセットアップについてはこの後の節で詳述するが、我々の実験では、LSND 実験と同一のニュートリノ源（ミューオン静止崩壊からの反ミュー型ニュートリノ）、ニュートリノ相互作用標的（水素内陽子）、検出原理（逆ベータ崩壊）を用いている。他方、J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) に供給される短パルス (800 ns の幅の中に 100 ns バンチが 2 つ)・低繰り返し (25 Hz) の低 duty factor 陽子ビームと最新のガドリニウム入り液体シンチレータ (GdLS) を用いている。このことにより、LSND 実験と比較して桁違いにアクシデントナルな背景事象数を減らした直接検証を行うことができる。

表 1 に、LSND と我々の実験の違いを再掲した。

### 1.2 世界情勢の変化

この 5 年間で JSNS<sup>2</sup> 実験以外の様々な実験が結果を出している。ここでは紙面の関係上全て触ることはできないので、参考文献 [5] 等を参照していただきたい。非常にざっくりとしたサマリーを私見混じりで述べると、最近までランが続いていた MiniBooNE 実験が新たな結果を出して、(反) ミュー型から (反) 電子型ニュートリノへの転換の観測と称する有意性は 5 年前より上がった [6]。

また、前回の高エネルギーニュース記事掲載時には原子炉ニュートリノを用いた反電子型ニュートリノからステライルへの振動示唆もあった。この振動示唆を更

表 1: LSND 実験と JSNS<sup>2</sup> 実験の違いについて

	JSNS <sup>2</sup>	LSND
ニュートリノ標的重量	17 tons	167 tons
基線	24 meters	30 meters
陽子ビームエネルギー	3 GeV	0.8 GeV
陽子ビーム duty Factor	0.8/40000 (Synchrotron)	1/14 (Linac)
静止 $\mu^-/\mu^+$ 比	$1.7 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-4}$
液体シンチレータの特徴	Gd-loaded 高シンチレーション発光量	non Gd-loaded (水素捕獲が主) 低いシンチレーション発光量 (チェレンコフ光を見るため)
逆ベータ崩壊後発信号	$E_{tot}: 8 \text{ MeV}, \Delta T: \sim 30 \mu\text{s}$	$E_{tot}: 2.2 \text{ MeV}, \Delta T: \sim 200 \mu\text{s}$
エネルギー分解能	2.4% @ 45 MeV	7% @ 45 MeV
中性子識別方法	波形弁別法	チェレンコフを使用

に探るため、原子炉から 10 m の軸の距離にトンスケールの液体シンチレータを設置する実験もいくつか行われ ([7, 8, 9] 他), Neutrino-4 という実験ではステライルニュートリノが存在する場合に起こるニュートリノ振動の存在に肯定的な結果 [10] が、他の実験では否定的な結果が出ている。

(反) ミュー型ニュートリノの消失実験ではほとんどが否定的な結果を出している (例 [11, 12])。

最近は Planck 衛星の宇宙背景放射等の観測を用いて、宇宙論からニュートリノの質量や世代数に制限をかけようという試みも目覚ましい進展をとげている (例 [13])。今のところ、LSND や MiniBooNE 実験の結果と宇宙論的な観測を標準模型+ニュートリノ振動でうまく両方とも説明するような模型は構築できていないように見えるが、こちらも様々な議論が継続している。

基本的には、LSND 異常とも呼べるこの現状は、20 年経とうとしている今もまだ混沌としており、JSNS<sup>2</sup> が LSND 自身の結果の直接的・究極的な試験を行うことに、世界のニュートリノコミュニティの科学者の多くが賛同していると言って良い。2020 年 6 月～7 月に行われた Neutrino 2020 という会議の発表でも大きな反響があった [14]。また、万が一ニュートリノ振動以外の原因で (反) ミュー型から (反) 電子型への転換 (のみ) が起こるような模型があったとしても、我々の実験で観測もしくは否定することができることは強調しておきたい。

### 1.3 データ取得までの経緯

2015 年までの実験経緯は前回の JSNS<sup>2</sup> 実験の高エネルギーニュースの記事 [2] を参照されたい。幸いなことに、その後 2016 年には、科研費の基盤研究 (S) が採択・交付され、すぐにステンレスタンク [15] やアクリル容器

のデザインを決め、作製を始めた。時をほぼ同じくして韓国から RENO 実験 [16] という原子炉実験を行っていた研究者数十人が共同研究者になった。彼らがガドリニウムを含まない液体シンチレータ (LS)30 トンを作製 [17] し、日本へ運搬した。また、彼らが 120 本の光電子増倍管のうち 70% を供給した (他 30% は日本グループから) [18]。これらは大きな実験の推進力となった。更に英国のサセックス大学のグループが高速 LED を使った較正システム供給を約束して共同研究者となったり、米国ミシガン大学のグループも電子回路のアップグレードの資金を得るなど、怒濤の展開を見せた。また、共同実験研究者ではないが、中国の Daya-Bay 実験グループが 2019 年に我々の実験の鍵となる 17 トンのガドリニウムを含む液体シンチレータを JSNS<sup>2</sup> に寄贈した。実際の検出器建設作業がどのようなものであったかは、後述するのでそちらを参照されたい。

## 2 実験のセットアップ

図 1 に MLF の鳥瞰図及び我々の実験のセットアップを示す。右側の矢印に沿って加速された 3 GeV の短パルス陽子ビームが中央矢印の先にある水銀標的に衝突する。その際、物質・生命科学研究のための中性子が生成されるが、それと一緒に  $\pi$ , K 中間子または、ミュー粒子の静止崩壊から生成されるニュートリノ群も生成される。JSNS<sup>2</sup> 実験では、MLF3 階の水銀標的から 24 m の地点に 50 トンの液体シンチレータ検出器 (120 本の光電子増倍管を含む) を設置し、ステライルニュートリノが存在する場合に見える可能性がある (水銀標的内ミュー粒子の静止崩壊から生成される) 反ミュー型ニュートリノから反電子型ニュートリノへの 24 m での振動現象の有無を探る。ちなみに、水銀標的内では K 中間子も生成さ

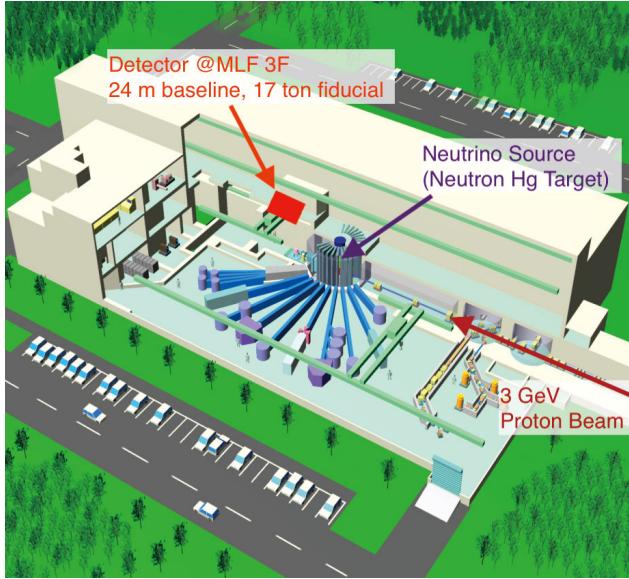


図 1: MLF 建屋の鳥瞰図。

れるため、その静止 2 体崩壊の際放出される 236 MeV の単色エネルギーのミュー型ニュートリノを使用した、物質とニュートリノの相互作用の断面積測定も行う予定である。

50 トン液体シンチレータ検出器については、液体シンチレータの発光を光電子増倍管で読み出すという方法をとった。図 2 に検出器の概念図を示した。従来の原子炉からのニュートリノ測定で広く用いられてきた手法であるが、液体シンチレータ、アクリル容器、光電子増倍管等は 2011 年から結果を出し続けてきた、Daya-Bay 実験 [19], RENO 実験 [16], Double-Chooz 実験 [20] 等で使用された最新の技術を用いている。

中心のアクリル容器（直径 3.2 m、高さ 2.5 m（煙突部を除く））の中には、検出器の心臓部であるガドリニウム (Gd) を含む液体シンチレータ (GdLS) 17 トンが充填され、ステライルニュートリノ探索の信号事象である逆ベータ崩壊 ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ) が発生し、検出される。この反応では、陽電子が反応直後に生成される先発信号として検出される。また、生成した中性子が熱化した後約 30  $\mu s$  後に Gd に吸収されて総計 8 MeV の gamma 線（後発信号）として検出される。そのため、両者を遅延同時計測法を用いて検出することで、背景事象を大きく減少させることができる。

アクリル容器は直径 4.6 m、高さ 4 m のステンレスタンクに入れられており、ステンレスタンクの内壁には 120 本の 10 インチ光電子増倍管が設置され、我々が粒子のエネルギーや反応点をカロリーメータとして測定することを可能とする。アクリル容器の外側は、Gd を含まない液体シンチレータで満たされているが、図 2（上図）の説明を見てもらうと分かるとおり、光学分離板として黒アクリル板を設置し、ニュートリノ反応等で起こるエ

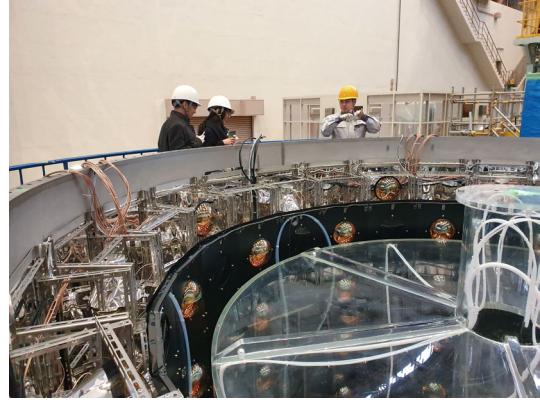
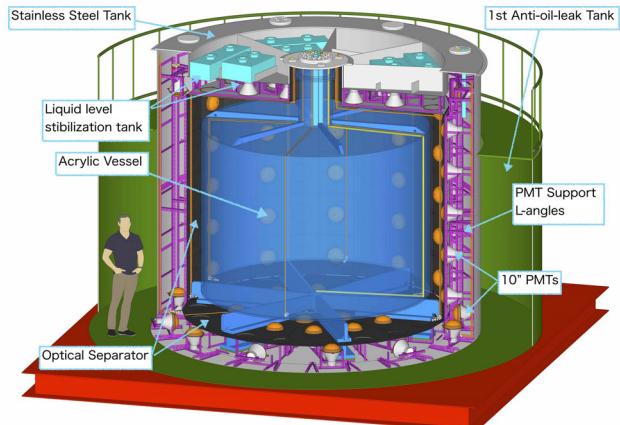


図 2: 検出器概念図（上）と写真（下）。アクリル容器設置直後の写真では検出器中央に設置されたアクリル容器が見える。また、そのすぐ外側には光電子増倍管、遮光用黒アクリル板、光電子増倍管サポート用の L アングルなどが見える。

ネルギーの漏れを補償するバッファ層 (Gd 捕獲  $\gamma$  線検出層: 内側) と、宇宙線等の荷電粒子ベトー領域（外側）とに分けられている。ベトー領域の中に、光電子増倍管の支持部を構成する L アングルもある。96 本の光電子増倍管は、アクリル領域および Gd 捕獲  $\gamma$  線検出層でのシンチレーション光を見るために黒アクリル板の中に光電面が存在するよう設置され、24 本はベトー領域の光を検出するため、ベトー層に設置されている。

話は変わるが、我々の検出器が設置されている MLF の 3 階は、水銀標的やビーム機器のメンテナンスエリアであるため、毎年 7 月から 10 月のビームがない長期シャットダウン中は他のメンテナンス作業のため、検出器を MLF から搬出し、他の建屋に保管しなければならない。図 3 にも示したが、これはとりもなおさず、6 月の搬出前には検出器に入った液体シンチレータ 60,000 L を国際標準の ISO-tank に抜き取って、そのタンクを業者の危険物保管エリア（神奈川県川崎市）に運搬・保管するとともに、空になった検出器を建屋に搬送する必要があるということである（もちろん、実験開始前 11 月にはこの逆の過程が必要となる）。本節以降の記述で液

体シンチレータ取扱に関する記述が多いのは、これが最も苦労した点だからだ。また、余談になるが、世界でも毎年このような充填・抜取りオペレーションを行う液体シンチレータ検出器を使った実験はなく、世界で初めてであり、液体シンチレータの質の保証も含めて、液体シンチレータのオペレーションは実験の命運を握る。

文面で書くと簡単に聞こえるが、この背後で行わなくてはならない作業（消防法許可等も含む）は膨大で、ここで各々を詳述すると全部この紹介になってしまうためほとんどを割愛する。一つ注意点は、法的・実務的な許可を得ない限り、検出器がたとえ建設されても実験開始できないことだ。このため、液体シンチレータの（法的・実務的）取り扱いや検出器下に設置するガンマ線遮蔽体の設置に関して、（PAC を除いて）J-PARC センター長直下諮問委員会（2回）、PAC 下安全委員会（FIFC）2回、J-PARC 一般安全特別委員会（3回）、MLF 内部安全審査会（2回）、と安全に関するものだけでも 2017 年に 4 回、2018 年に 3 回、2019 年に 2 回正式な委員会が実験前に開催され、厳しい審査・議論が行われた。これらの J-PARC 内の審査をクリアし、最終的に消防からの許可も得た（2020 年 4 月）。

### 3 検出器建設・実験準備

基本的な実験・検出器設計については、参考文献 [3] にまとめられているため、参照されたい。ここでは、筆者が特に関わった、光電子増倍管の設置、液体シンチレータの作製とその安定・安全な運転に関わる部分、また、エレクトロニクスに関する準備等について記述する。もちろん、ここには紙面の関係上記述されない詳細な努力の積み重ねによって実験開始に至ったことは言うまでもない。

#### 3.1 光電子増倍管及び内部構造

検出器骨格であるステンレスタンクの建設 [15] や光電子増倍管とその支持構造の設置は J-PARC で行われた。前述の通り、JSNS<sup>2</sup> 検出器はアクリル容器外の Gd 無液体シンチレータ層を光学的に分割することで内外を Gd 捕獲  $\gamma$  線検出層、荷電粒子ベトー領域として独立に利用する。このため、黒アクリル板が設置され光電子増倍管の光電面以外の領域の遮光を担っている。遮光板と光電子増倍管の間には必然的に隙間ができてしまうが、これは 3D プリンターによって製作した遮光リングを用いることで支持と遮光を両立しながら解決することができた。また、光電子増倍管には形状に合わせた遮光カバー、磁気シールド及び反射カバーを取り付けている。遮光板の外面とステンレスタンク内面も同様に反射シートで覆

われ、荷電粒子ベトー領域の収光量の増加による事象検出効率を高めている（図 4）。各種カバーやシートの製作は切り出しも含め実験グループ総出で行われた。ここでも 3D プリンターを駆使して切り出し用の型を用意することで誰でも同程度の品質で製作することができた。思いついたら即座にできる 3D プリンターは非常に便利で導入コスト以上の働きをしてくれたと JSNS<sup>2</sup> 共同研究者の誰もが納得しているだろう。すべてのインストール作業が完了したのは 2020 年 1 月半ばとステンレスタンクの完成から約 2 年が過ぎてしまっていたが、インストール自体のスケジュールは予定通りに終えることができた。これはインストールが簡単であったということではなく、むしろ遮光機構のおかげで終盤ほど手が回らなくなり困難を極めたわけだが、設計者本人たちがインストール一切を担当したことと組み立てなどの他の部分で実験グループの協力があった結果である。

#### 3.2 液体シンチレータ

前述のとおり、検出器中央に設置されたアクリルタンク内には GdLS 17 トンを使用し、アクリルタンク外・ステンレスタンク内の Gd 捕獲  $\gamma$  線検出層と荷電粒子ベトー層には Gd 無の LS 30 トンを使用した。GdLS は 2017 年から Daya-Bay 実験と交渉を始め、2019 年 8 月に日本の税関を通過し、寄贈された。この寄贈には、JSNS<sup>2</sup> 共同研究者の中に Daya-Bay 実験の GdLS を作製したブルックヘブン研究所の共同研究者がいたことによる寄与も大きい。LS は前述したように、2017 年から実験に加わった韓国の共同研究者が、RENO 実験施設の液体シンチレータ作製施設で作製を行った [17]。筆者の一人は、RENO 実験の GdLS、LS を実際に作製した実績がある。今回も作製時の数ヶ月間（2018 年 9 月から 11 月）、韓国 RENO 実験サイトに詰めて滞在し、日本への運搬を担う ISO-tank に充填するまでの工程を主導した。

GdLS と LS は現地での充填後、それぞれの ISO-tank (GdLS1 台、LS2 台) に入れて日本に運搬され、実験がない間は神奈川県川崎市にある保管場所で保管している。ちなみに、GdLS については、テフロンコートした ISO-tank を使用して運搬・保管するのが世界標準であるが、我々の実験では参考文献 [21] にあるように、不動態化されたステンレスタンクの中で GdLS が保管可能であることを証明し、通常のステンレスタンク製の ISO-tank を使用して保管し、大幅なコスト削減を達成している。

#### 3.3 液体シンチレータ液面と液面計

液体シンチレータ充填・抜取り時の注意点として、GdLS、LS の各液体シンチレータ（アクリルタンク内

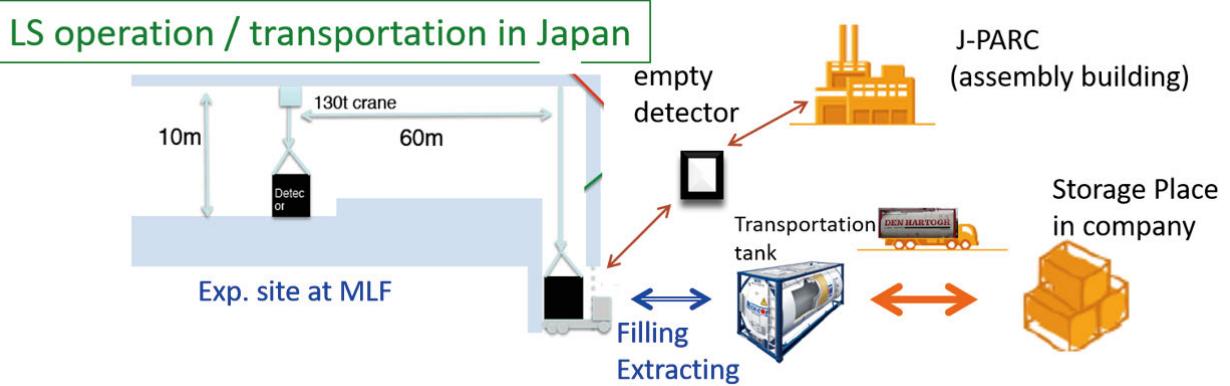


図 3: JSNS<sup>2</sup> 実験液体シンチレータオペレーション。長期シャットダウン前（6月）に、検出器を MLF1 階にクレーンで移動し、液体シンチレータを抜き取った後、空になった検出器は敷地内の他の建屋へ、抜き取った液体シンチレータは運搬・保管用タンク（ISO-tank）で神奈川県川崎市まで運搬されて専用の保管場所にて保管される。長期メンテナンスが終わった後（11月）は、その逆の手順で液体シンチレータを検出器に充填し、24 m 地点に設置される。

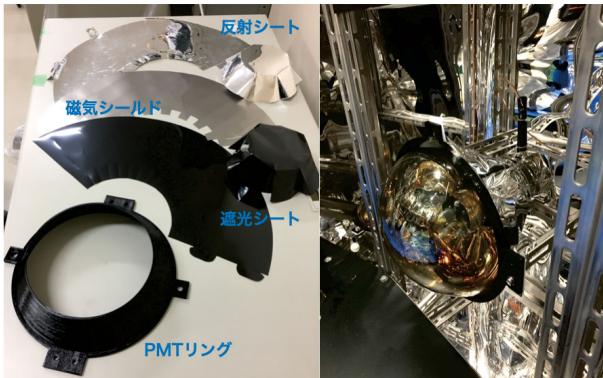


図 4: 光電子増倍管に取り付けたカバー類と遮光・支持用のリング（左）と検出器に設置された光電子増倍管（右）。最後に穴の開いた遮光板を取り付けて完成する。

外）の液面高さの差を、アクリル容器の強度計算に基づいた許容範囲にしながら充填・抜取りを行う必要があることが挙げられる。本実験の許容範囲はアクリル厚を考慮して計算すると、容器本体円筒部に関する条件なし、中央煙突部については許容液面差が 15 cm となった。これは、接着面が大きいアクリル容器の蓋部について最も注意が必要であることを示している。このため液面高さを正確に測定するため、超音波型液面計をアクリル容器の煙突部上に位置するフランジと側面荷電粒子ベトー部の上のフランジに設置した。我々の使用した超音波液面計は長距離用（1 m～6 m 程度まで）と短距離用（0.3 m から 1.2 m 程度まで）の 2 つがある。充填・抜取り時のうち、液面がステンレスタンク蓋部に近い場合のみ短距離用の液面計を使用し、それ以外の際は、長距離用の液面計を設置・使用した [22]。

### 3.4 液面安定化容器

MLF3 階は空調が弱いため、観測として例年 1 月には 18 度程度まで屋内気温が降下し、6 月には 30 度近くまで気温が上がる。また、液体シンチレータの充填・抜取りを行う 1 階大型物品搬入口は外気と扉一枚で接しているため、3 階よりも建屋内の気温の寒暖差が激しい。このため、充填・抜取りの際のみならず、データ取得の際にもだが、検出器周りの空気の温度変化が起こると、液体シンチレータ温度も変化する。液体シンチレータの熱膨張係数は  $\Delta V/V \sim 9 \times 10^{-4}/\text{度}$  であるから、GdLS 17 トンについては、約 17 L/度の体積変化が発生することとなる。アクリル容器煙突部の直径 42 cm を考慮すると、12 cm/度の液面変化が予想され、前述した通り、煙突部周りでの液面高さの許容範囲は 15 cm であることも考慮すると、1 度温度変化しただけでもアクリル容器破損に近づく可能性がある。前述のとおり MLF 内の 1 年間温度変化は 10 度以上であるため、少なくともこの温度変化には対応しなければならない。JSNS<sup>2</sup> では液面安定化容器と呼ばれる 8 個の小型アクリル容器を作製して、検出器の上に設置し、それぞれの小型容器を 1/2 インチの配管で連結し、これを更に 1/2 インチの配管を使用してサイフォンを作製し、アクリル大型容器煙突部と安定化容器の液体シンチレータを連結させることで、実効的な断面積を増加させた。実際に設置した際の写真を図 5 に示す。この安定化容器のおかげで、煙突部周りの実効的な断面積は 2.5 m<sup>2</sup> になり、1 度の温度変化で 0.7 cm/度の液面変化まで抑え込める。液面安定化容器が高さ 24 cm であることを考慮し、充填の最後までに半分の高さまで液体シンチレータを入れると仮定すると、±17 度まで対応できる。また、別途検出器内の温度変化を知るため、宇宙線ベトー領域の 8 か所（ $\phi$  方向が 90 度

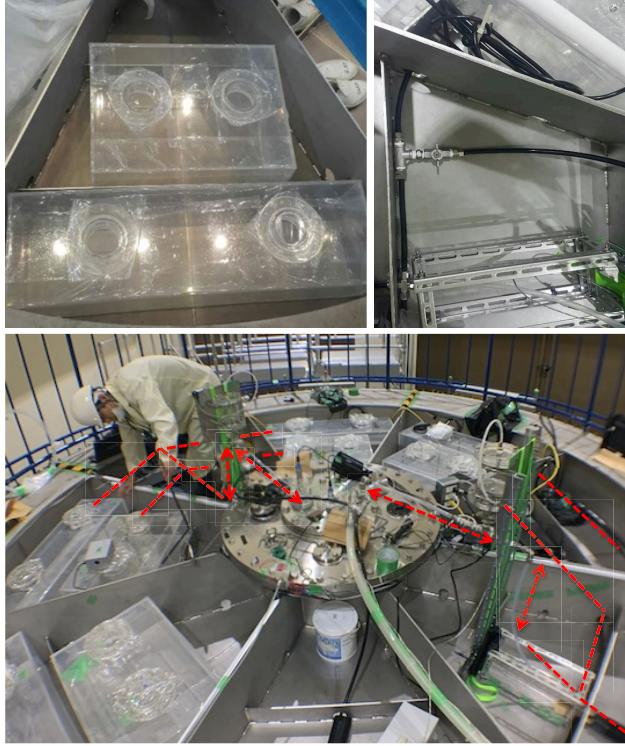


図 5: 配管前の液体安定化容器（左上）と配管の一部（右上）。仕上げた二つの逆サイフォン系（下）。下写真赤い点線は配管を示す。

毎に 1 つ、高さ方向が上下で 2 か所）液体シンチレータ内に熱電対温度計を設置した。また、液面安定化容器内の液面を測定するため、追加の短距離用液面計 2 個を容器上部フランジ部に設置した。

### 3.5 スロー制御とそのモニタ、高電圧制御とモニタ

JSNS<sup>2</sup> 実験のスロー制御とそのモニタの詳細については、参考文献 [22] を参照されたい。ここでは、簡単な説明だけを行っておく。我々の実験では、前述の液面計、熱電対温度計、圧力計、流量計等のセンサーを使っており、これらのセンサーからの出力を簡便に読みこむために、National Instrument (NI) の cDAQ-9178 クレート [23] と電流、電圧、熱電対用のモジュールを準備した。上述した液面計も電圧モジュールでの読み込みが可能である。NI の DAQ クレートは NI が開発した LabVIEW プログラム [24] を用いて簡単にデータ取得できる。取得したデータは LabVIEW プログラムのライブラリーを使ってグラフとして表現すると同時に MySQL[25] データベースに転送する。LabVIEW の不便な点は、ある一定時間以上古い履歴は即座に確認できない点である。そのため Grafana[26] というグラフィックツールを用いて MySQL データベースから直接にデータを読んでグラフ化する方法を選択した。更に Grafana ではしきい値

をセットして警報を出すこともできる。警報が出た場合は、その場での画面の変化とともに、Grafana から e-mail と LINE メッセージがオンラインシフトの人々に送付される。

HV クレートは CAEN の SY1527LC [27] で、CAEN の OPC サーバーを通じて LabVIEW プログラムとコミュニケーションができる。各光電子増倍管ごとに印加する HV 値をデータベースに入れておいて、実際の印加値と比較して異常があるかどうかを視覚的に確認できる LabVIEW プログラムを作成した。また、各光電子増倍管毎の実際の印加 HV 値と HV モジュールの温度も定期的にデータベースに書き込む。他のセンサーと同じ方法で Grafana で警報を出せるようなセットにした。

### 3.6 エレクトロニクス

ここでは光電子増倍管からの信号処理および高電圧電源について述べる。また、すでに論文があるので是非参考にしてもらいたい [28]。我々の実験では、1 光電子測定まで行い光電子増倍管の増幅率の較正を行う。また、波形弁別法を用いて信号波形によって中性子背景事象をニュートリノ信号による事象と区別するので、信号のテール部分電荷の分解能が重要である。その結果、14 bit 分解能、500 MHz サンプリングレートのフラッシュ ADC が要求される。

唐突ではあるが、我々の共同実験者には Double-Chooz 実験の参加者がいて、その実験のフラッシュ ADC とアンプが我々の実験でも使えるのではないかとの情報を得た。そのフラッシュ ADC は 8 bit 分解能ではあるのだが、その前段のアンプが光電子増倍管の信号に対し高増幅と低増幅率の 2 つの信号を出力する。それぞれのアンプ出力をフラッシュ ADC で読み出して、14 bit 相当にする。増幅値の変更の回路修正はあったが、テストパルスによるゲイン調整、液体シンチレータと光電子増倍管を使った測定を経て我々の実験に使用できることが分かった。Double-Chooz 実験にはこのフラッシュ ADC やアンプだけでなく高電圧電源、光電子増倍管からの信号と高電圧を分けるスプリッタ、光電子増倍管自身の一部などを寄贈もしくは、貸与していただきなど多大な協力をいただいた。この場を借りて、謝意を表したい。光電子増倍管 120 本の読み出しは VME が 2 クレート、光ファイバー 4 本、PC 一台で行うことができ、比較的コンパクトに収まった。この PC はデータ収集のみに集中する。その後データはネットワーク経由でデータクオリティモニター用 PC に転送され、その質が確認される。さらにそこからデータはつくばにある高エネルギー加速器研究機構の中央計算機システムに送られ保存、オフライン解析される。



図 6: J-PARC 内を移動中の検出器、最大の横幅 6.6 m。2 車線をいっぱいに使う必要があるため、移動中は交通誘導を実験グループが行なった。

アンプからは 1 モジュール内 8 チャンネル分足されたアナログ信号も出力される。それらを使用したアナログサム、加速器からやってくるビームタイミング信号、ビーム有無を教えてくれるカレントトランスファーの信号から NIM のモジュールでトリガー信号を作った。

比較的昔ながらの手法を用いたシンプルなデザインである。その一方で現在ミシガン大学では共同実験者によって、14 bit 分解能 500 MHz サンプリング、より高速読み出し可能で複雑なトリガーに対応したフラッシュ ADC システムが完成間近であることを最後にお伝えしたい。

## 4 第 1 回 JSNS<sup>2</sup> オペレーション

### 4.1 概要

具体的な設置時の作業は、(1) 検出器下にあるガンマ線遮蔽体（鉄・鉛）の設置を行い（今回は 2020 年 1 月から 5 月）、(2) 別途検出器を別の建屋から MLF1 階に搬入・仮設置し（2020 年 2 月（図 6））、(3) その間に ISO-tank3 台を神奈川県川崎から MLF1 階に搬入・仮置きし、(4) 液体シンチレータを充填し、(5) 液を入れた検出器を 3 階に移動し（図 7）、データ取得を行う。となっている。また、撤去の際は、この逆の作業を行う。今回は（3）以降の作業をコロナ禍の中、緊急事態宣言解除後の 2020 年 5 月半ばから 6 月末の 1.5 か月の間に撤去までの工程を全てこなしつつ、データの質も保ってデータ取得する、という初めてにしてミスが許されない作業を行わなくてはならなかった。



図 7: MLF3 階でのクレーンを使った検出器移動時の写真。一番下に見える矩形が第二防油堤、その上の円柱が第一防油堤。その上の円柱がステンレスタンク。



図 8: 配管を連結して充填する際の写真。ISO-tank が右手に、検出器が奥に見える。

### 4.2 液体シンチレータの充填・抜取り

2 種類の液体シンチレータ（GdLS, LS）を同時に検出器に充填・抜き取るために最大流量 100 L/分のポンプ 2 台を準備した。流量を合わせるためにそれぞれのポンプの電源にインバーターを準備し、周波数を落とすことでポンプの回転数を調整した。さらに LS 用のポンプ・配管には流量計を設置し充填速度の基準とした。検出器と ISO-tank 3 台を MLF 1 階に仮置き後、1 インチパイプ (PVDF/PFA 製) で作成した配管を連結して 36 L/分の速度で充填した。実際の写真は図 8 に示す。液面と流量の測定値は前述したとおり LabVIEW プログラムによってデータ取得し MySQL データベースに転送し Grafana の画面で状況を確認する。液面の時間変化を確認しつつインバーターを調整して 2 つの液体シンチレータの充填速度を合わせ込んだ。1 日の作業が終わると、安全なオペレーションのためにバルブを全部閉めて夜間シフトを立てて Grafana の画面を定期的に見て問題が発生しな

いかを確認した。

液体シンチレータ充填は思った以上に無事に進み、三日目でアクリルタンクの煙突部下に到達した。ここからはGdLSのポンプでの直接充填は止めて、前述した液面安定化容器の10 cm高さまでGdLSを入れた。そして液面安定化容器と煙突部を逆サイフォン系を通じて連結した。GdLSの流量はバルブで微調整して充填を継続し、LSはポンプでの充填を継続した。なんと4日目には充填を完了した。液体シンチレータを用いた原子炉ニュートリノ実験では1か月よりも長い期間をかけて充填を行ったと聞いていたので、無事に作業を終えることが出来て本当に良かった。

10日間のデータ取得が終わった後、抜取り作業を始めた。全体の配管はほぼ同じで、各々ポンプの入力部と出力部だけ入れ替えた。GdLSの最初の抜き取り作業はアクリル容器煙突部から始まるので、特に注意深く行う必要がある。最初のうちはGdLS液面とISO-tankの高さの差があるからGdLSとISO-tankの間に自動的に逆サイフォンシステムが作られるので、GdLSの流量は配管のバルブで微調整してアクリルタンクの煙突部の下まで抜いた。そこからは充填と同様にポンプを使用して抜いた。LSは最初からポンプを使用した。抜取り時は充填の経験から、抜く速度を44 L/分に上げ、なんと充填より更に早い三日で作業を完了した。ちなみにデータベースでの液面の変化を図9に示した。充填・抜取り前後の液面高さが一致している。

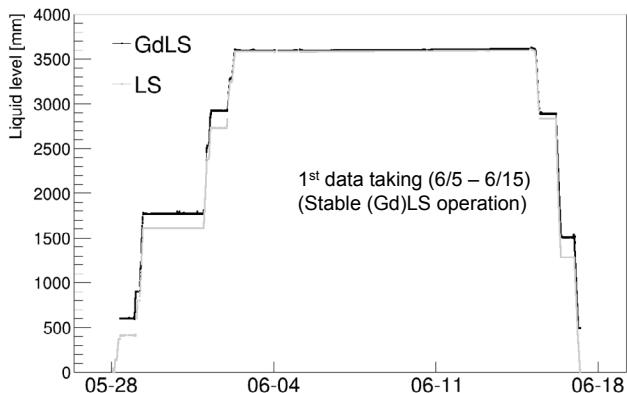


図9: 液体シンチレータ充填・抜取り時の液面の変化の様子。横軸は日付。GdLSはアクリルタンクの底がステンレスタンクの底よりも0.55 m程度高いので、それが反映されている。

総じて、更にもっと時間がかかることを想定していたが、PACや安全委員会等での様々な助言もあって、滞りなくかつ安全に、充填・抜取りを終えることができた。

### 4.3 データ取得

液体シンチレータ充填後、6月5日に実験エリアであるMLF3階、水銀標的から24 mに初めて検出器が本設置された。7年の念願が成就された瞬間で、設置参加者の中には、思わず深い嘆息をしたものもいた。その日の夜には早々データ収集が開始され、わずか10日間のコミッショニングではあったがビームや較正に関する有益なデータが取得できた。簡単な結果については次節に示すことにする。

今回のデータ取得において、大きく分けて3種類のトリガーを使用した。一つは前述の各光電子増倍管からの信号を足し合わせて生成したアナログサム信号を用いた、検出器内でアクティビティがあるときに発行されるシンプルなセルフトリガーで、主にビーム相関のない事象のデータと線源や光源を用いた較正データを取得する際に使用した。トリガー発行時に500 nsのゲートを開き波形を取得するため空データがないという意味では効率は良いが、どうしても高レート故にデッドタイムが発生してしまう都合上全てのビームスピルを拾うことはできないため、一番大事なビーム相関事象の取得には向かない。そこでビーム事象の取得には、加速器からMLFに送られてくるパルス型電磁石の励起などのタイミング調整に使われるスケジュール信号（MLFで通常使われている呼称「キッカートリガー信号」を本稿では用いる）を基に、ビームタイミング周辺に10または25  $\mu$ sの長いゲートを開き、まるごと波形を取得することでビーム直後に生ずる事象を余すことなく取得する方式をとった。ゲート長が10  $\mu$ sの際は任意のディレイ幅後にゲートをもう一つ開くようにしており、ディレイ幅を変えてデータを取得することで遅延同時計測で必要となる先発信号後100  $\mu$ sの領域を走査できるようにした。

表2に取得したデータの概要をまとめて示した通り、ほとんどのビームタイムを主たる物理と背景事象測定用のデータ取得に当てた。図10に示したように、今回のビームタイムでは約  $9 \times 10^{20}$  POT (= proton on target) 分になっており、これはJ-PARC PACで設計技術書を議論し、実験認可時に認められたビームタイムの約0.8%に相当する。またラン中には、加速器メンテナンスのための24時間のビームオフがあったため、セルフ・キッカートリガーを用いてビームオフ時の背景事象の取得に約半日を当てることができた。残る半日は、高速LEDシステムを用いた光電子増倍管の増幅率と信号タイミング測定や線源データの測定に回した。特に $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いた測定では、検出器応答の位置依存を調査するため鉛直方向に線源位置を変えながら複数点で較正データを取得することもでき、事象位置とエネルギー較正に有用なデータを得られた。

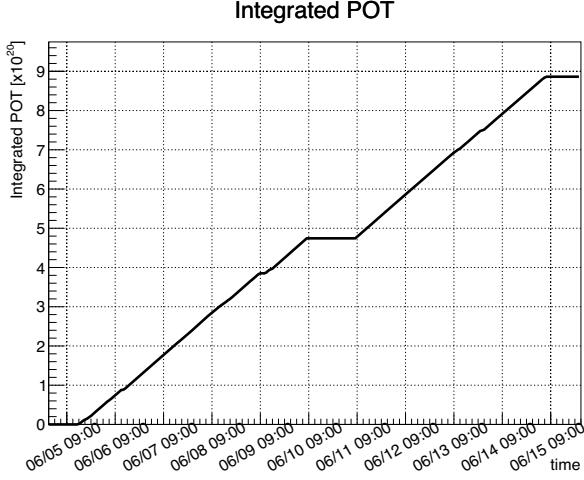


図 10: 本コミッショニングラン中の積算 POT の時間変化。

## 5 結果

前述の通り今回のランでは基本的に、物理データを取得することはもちろんのことであるが、期間が短いこともあり主に検出器応答の確認や実機における背景事象の把握などに重きをおくこととなった。今回のビームタイムで得られたデータのうち、検出器および取得したデータの健全性を表す部分を紹介する。

まず、本検出器の健全性を確認するために最も分かりやすいのは、Gd の熱中性子捕獲で生成される  $\gamma$  線事象をみることである。これは前述した逆ベータ崩壊反応で生成する中性子が起す Gd 吸収反応の検出器応答を確認するためにも重要である。本検出器のようなシンチレーション検出器では、光電子増倍管で得られた信号電荷を足し上げることで事象再構成を行わずとも粒子が検出器中で落としたエネルギーを大まかに把握することができる。Gd の熱中性子捕獲  $\gamma$  線は合計約 8 MeV と単色で電荷分布にピークを作るため、Gd が確かに液体シンチレータに含有されていることを示すわかりやすい根拠となる上にエネルギー較正に非常に有用である。図 11 は、本ラン中に行われた中性子線源  $^{252}\text{Cf}$  を用いた較正の結果で、線源を挿入していない状態と線源を検出器中央に配置した際の信号電荷のスペクトルを示している。図から明らかなように、中性子線源を配置したことによる熱中性子捕獲事象の超過がピークとなって現れており、予想通りの検出器応答を得られていることを示している。このような線源データを検出器の鉛直方向に位置を変えて複数点分取得しており、事象再構成に役立てる予定である。

また、本実験は加速器ニュートリノ実験であるから、検出器の応答ももちろんあるが、ビームに同期した事象を正しく取得していることが非常に重要である。図 12

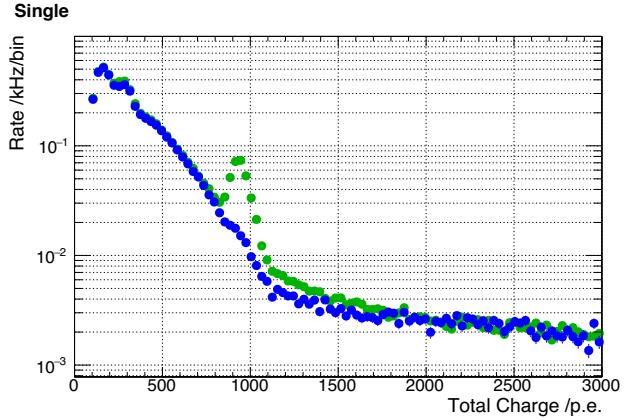


図 11:  $^{252}\text{Cf}$  線源を検出器中央に設置した際の検出器応答（薄（もしくは緑））と設置しなかった際の応答（濃（もしくは青））を比較した図。横軸は 96 本の光電子増倍管からの信号電荷の和を光電子数に直したもので、検出した総光量に相当する。線源ありのスペクトルではきれいな超過ピークが見えていて、これが Gd による約 8 MeV の熱中性子捕獲  $\gamma$  線事象に対応する。

は、加速器から送られてくるビームタイミングと検出器内で起こった事象との時間差を横軸に、光電子増倍管からの信号電荷の総和を縦軸にとってプロットしたものである。0 ns 以降に二つのバンチ構造が認められるが、これは MLF へ送られる陽子ビームの 2 バンチ構造を反映したもので、主に水銀標的中で生成された高速中性子による事象である。水銀標的内のミュー粒子静止崩壊からの反ミュー型ニュートリノを用いるステライルニュートリノ探索にとって重要なのはミュー粒子の長い寿命を利用して、高レートになるオンバンチ部分を外した後ろの部分になる。ただし、前述のような  $K^+$  中間子が静止崩壊して生成する単色エネルギーを持ったミュー型の Kaon Decay-At-Rest (K DAR) ニュートリノはむしろオンバンチに信号をつくるためこちらの情報も物理的に重要なである。

K DAR ニュートリノは主に液体シンチレータ中の炭素原子核と反応し  $\mu$  粒子と陽子を作り、これらの荷電粒子が検出器中で 100 MeV 程度のエネルギーを落とし先発信号を作る。また  $\mu$  粒子は検出器にエネルギーを落としきると約 2.2  $\mu\text{s}$  の寿命の後、静止崩壊していわゆる Michel 電子を生成し、~53 MeV までを上限としたエネルギーを検出器に落とす。これが後発信号となり遅延同時計測が可能となる。ここでは、簡単な選別条件を課して選んだ事象候補の信号波形とイベントディスプレイを図 13 に示すことにとどめる。この事象は、先発信号がビームオンバンチタイミング (0 から 1  $\mu\text{s}$ ) にありかつ後発信号との時間差が約 2  $\mu\text{s}$  と K DAR 事象のタイミング構造を満たし、さらに先発信号は 50 MeV、後発信号に

表 2: 第一回データ取得のまとめ

ラン種類	目的	日数 /日
ビームデータ	先発信号領域と後発信号領域の一部（物理 + 主にビーム由来背景事象）の取得	約 8
ゲート走査	主に後発信号とビーム由来偶発後発信号の次ビームスピルまでの 40 ms 間の走査	0.5
較正	LED（ゲイン, タイミング較正）と $^{252}\text{Cf}$ 線源（エネルギー, 事象位置較正）	0.5
加速器オフデータ	先発信号領域と後発信号領域の一部（主に自然由来背景事象）の取得	0.5
その他	調整用データ取得, 次期キャリブレーションシステム試験など	0.5

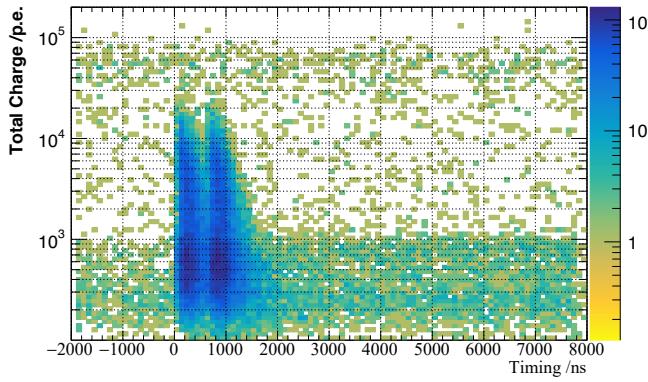


図 12: ビームオンバンチとその周辺の事象。横軸がビームからの時間, 縦軸が総光量。0 から 2000 ns に J-PARC 陽子ビームの 2 バンチ構造を反映したアクティビティが確認できる。

は 20 MeV 相当以上の信号電荷を要求している。また、宇宙線  $\mu$  粒子事象とは異なりベトー領域の信号電荷が小さいことが特徴である。このような事象が 30 事象/日程度（不定性は数 10% と大きいが）期待されているため、本ランの全データを用いてさらに解析を進めることで反応断面積測定などの統計的な議論も可能になると期待している。

## 6 一回目のランのまとめと展望

今回の物理（試運転）ランは、元々は液体シンチレータの充填後に数ヶ月のデータ取得等の安定オペレーションを行った後、抜取りを行うという比較的余裕があるプランだったものが、新型コロナウイルスの感染拡大等で急遽これを 1.5 か月に全てを濃縮して行うという、急転直下の展開で行われたため、特に後半の抜取り部の心構えと準備がやや足りない状況だったのは否めない。このような状況下、毎日消防署とのやり取りを行い、緊急事態宣言解除直後に液体シンチレータを神奈川県から J-PARC に運搬できるか、等を検討するなど、人生の中でもそれほど経験がない濃度の高い時間を過ごすことができた。このシビアな状況下でも、「何とかデータを取るんだ」、という闘志とモチベーションでオペレーション参加者全

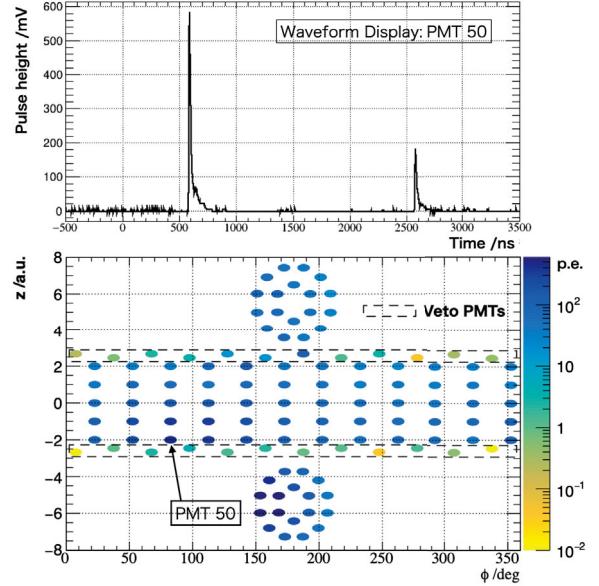


図 13: K DAR ニュートリノ事象候補の信号波形（上）とイベントディスプレイ（下）。上図：横軸原点をビームタイミングにとった時のある光電子増倍管の信号波形（下図の矢印で示した）。先発信号と後発信号の 2 つの波形が約 2  $\mu\text{s}$  の時間差で記録されている。下図：検出器内側を円柱の展開図で表しており、色付きの丸マーカーは光電子増倍管を、色は信号強度を表している。上下にある丸四角の枠線で囲まれているのはベトー領域にある光電子増倍管である。

員が実験を支え、何とかデータの質を保ちながら最後まで乗り切ることができた。

今回、新型コロナウイルスの感染拡大という未曾有の危機の中でも、10 日間とは言えデータ取得を行えたことは、当然のことながら実験にとって大きな収穫となつた。みなさんも経験されているように、（シミュレーションだけでなく）実データを見ながら実験を語ることができることは、実験に大きな知見を与えるとともにデータを見る目を養うという意味でも、海外も含めた実験に関わっている共同研究者に大きな変化を与え始めている。

次回の J-PARC MLF の陽子ビームは 2020 年の 11 月半ばから利用できる予定であり、我々の実験の本格運用もその時点から始まる予定である。そのため、我々は現在取得されたデータの精査を進め、今回のランの問題点

を洗い出している。また、オペレーションに関しても、どうすれば更なる効率化を図れるか、活発な議論を行っている最中である。これらの議論を基に実験を更に深化させ、J-PARC PAC から許可された MW 強度ビーム ×15000 時間のデータを蓄積し、図 14（横軸：振動確率、縦軸：第 4 の質量固有値と他の固有値の差の 2 乗）に相当する結果を出し、ほとんどの LSND 実験の示唆領域に関する結論を得る。

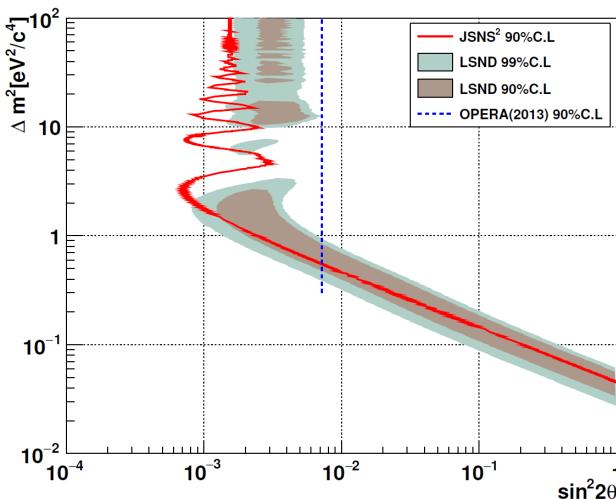


図 14: JSNS<sup>2</sup> 実験の 1 基での感度（1 MW 陽子ビーム強度と 15000 時間を仮定）[3] と LSND 実験の結果が振動である場合の示唆領域（濃い部分が 90% 信頼度、薄い部分が 99% 信頼度の許容領域）。横軸が反ミュー型ニュートリノと反電子型ニュートリノの振動確率、縦軸が第 4 の質量固有値と他の固有値の差の 2 乗。

また、2020 年 8 月現在、ここまでコミッショニングデータ取得等の成果も踏まえ、科研費特別推進研究の交付内定という嬉しいニュースがあった。この科研費では、新しい検出器の設置、液体シンチレータ・エレクトロニクスの改良、陽子ビームの最終段での収束能力の向上を行う。また、NA61 実験 [29] に参加しニュートリノ親粒子の生成断面積の不定性を減らす。以上により、特に図 14 の低い  $\Delta m^2$  の LSND 示唆領域でありながら JSNS<sup>2</sup> 感度不感領域の感度を向上させる。いよいよ LSND 異常有無に関する完全決着の時が近づいている。

## 7 謝辞

この実験を支援してくださっている J-PARC、高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、他の様々な方々に感謝いたします。特に、物質・生命科学実験施設の方々、安全セクション、加速器グループの皆様に心から感謝いたします。安全への対応、消防法への施設の一部の登録や、液体シンチレータの搬入、質の高いビームの供給など、本実験は施設の方々の支援がなければ実

験は遂行不能です。エレクトロニクスや光電子増倍管等を寄贈していただいた Double-Chooz 実験日本グループの方々、スペアの光電子増倍管等の寄贈をしていただいた RENO 実験、17 トンの GdLS を寄贈していただいた Daya-Bay 実験にも謝意を表します。また、本研究は科研費（16H06344,16H03967,20H05624）と J-PARC・高エネルギー加速器研究機構の予算サポートを受けています。

最後に、実験と共に立ち上げた故西川公一郎元 J-PARC 副センター長（兼 元高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所所長）に感謝を表しつつ、そのご冥福を心からお祈りします。

## 参考文献

- [1] M. Harada, *et al.*, arXiv:1310.1437
- [2] 岩井瑛人, 末包文彦, 古田久敬, 丸山和純, 高エネルギーニュース (vol.34 No.1) (2015)
- [3] S. Ajimura, *et al.*, arXiv:1705.08629
- [4] A. Aguilar, *et al.*, Phys. Rev. D **64**, 112007 (2001).
- [5] M. Dentler, *et al.*, JHEP **08** 010 (2018), arXiv:1803.10661 (2018)
- [6] A. A. Aguilar-Arevalo *et al.*, (MiniBooNE Collaboration) Phys. Rev. Lett. **121**, 221801 (2018)
- [7] Y. J. Ko, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 12, 121802
- [8] J. Ashenfelter, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 25, 251801
- [9] H. Almazán, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 16, 161801
- [10] A. P. Serebrov, *et al.*, arXiv:1809.10561 (2018)
- [11] P. Adamson, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 9, 091803
- [12] K. Abe, *et al.*, Phys. Rev. D 99 (2019) 7, 071103
- [13] See Knox, Lloyd's presentation in Neutrino 2020 for example. <https://indico.fnal.gov/event/43209/timetable/> (June-24)
- [14] See JSNS<sup>2</sup> presentation in Neutrino 2020. <https://indico.fnal.gov/event/43209/timetable/> (July-2)

- [15] Y. Hino, *et al.*, JINST **14** (2019) no.09, T09001
- [16] J. K. Ahn, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 191802
- [17] J. S. Park *et al.*, JINST **15** (2019) no.09, T09010
- [18] J. S. Park *et al.*, JINST **15** (2020) no.07, T07003
- [19] F. P. An, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 171803
- [20] Y. Abe, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 131801
- [21] Y. Hino *et al.*, JINST **14** (2019) no.09, P09007
- [22] J. S. Park *et al.*, arXiv:2005.01286
- [23] <https://www.ni.com/ja-jp/support/model-cdaq-9178.html>
- [24] <https://www.ni.com/ja-jp/shop/labview.html>
- [25] <https://www.mysql.com/jp/>
- [26] <https://grafana.com/>
- [27] [http://www.caen-group.com/jsp/Template2/CaenProd.jsp?idmod=491\\$&\\$parent=20](http://www.caen-group.com/jsp/Template2/CaenProd.jsp?idmod=491$&$parent=20)
- [28] J. S. Park *et al.*, JINST **15** (2020) no.09, T09002
- [29] <https://cds.cern.ch/record/2309890?ln=en>