

■ 研究紹介

T2K 実験 前置検出器 ND280 のアップグレード

KEK 素粒子原子核研究所

谷川 輝

tanigawa@post.kek.jp

KEK 素粒子原子核研究所

松原 綱之

tsuna@post.kek.jp

京都大学 理学研究科

木河 達也

kikawa@scphys.kyoto-u.ac.jp

2024 年 (令和 6 年) 9 月 10 日

1 はじめに

T2K 実験は、J-PARC 加速器で生成された大強度ニュートリノビームを、前置検出器と 295 km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) で測定する長基線ニュートリノ振動実験である。熾烈な国際競争の中で常に世界をリードし、多くの物理的成果を挙げてきた。高エネルギーニュースでも、2009 年のビーム運転開始以降、毎年のように検出器や物理解析の状況について記事を出してきたが、2016 年の記事 [1] を最後に 8 年近く記事を出していなかった。その間、我々はただ黙々とデータ取得や解析をしていた訳ではない。T2K 実験開始以降最大規模のプロジェクトが立ち上がり、2024 年 5 月について完成したのである。それが本記事のテーマである前置検出器 ND280 のアップグレードである。本記事では ND280 のアップグレードの発案から物理データ取得に至るまでを、エピソードを交えつつ紹介する。

2 前置検出器アップグレードの概要

ND280 は、ニュートリノ生成標的から 280 m 下流に位置するニュートリノモニター棟内に設置されている T2K 実験の前置検出器の一つで、ニュートリノ生成標的から見て SK と同じ方向に配置されている [2]。この検出器の主目的は、振動前のニュートリノビームのフラックスとニュートリノ-原子核反応の精密測定である。図 1 にアップグレード前の検出器構造を示す。ND280 は、CERN から寄贈された常伝導ダイポール電磁石の中に複数のシンチレーション飛跡検出器、Time Projection Chamber (TPC)、電磁カロリメータが配置された複合検出器である。T2K 実験は、ND280 の測定によってニュートリノビームとニュートリノ反応の不定性を大幅に削減することで、ニュートリノ振動測定を世界最高精度に押し上げてきた。最新の解析では、SK における電子ニュートリノ

ノ事象数に対する系統誤差を 17.4% から 4.9% に削減している。さらに、ND280 を用いたニュートリノ反応断面積の測定についての論文がこれまで 28 本発表されている。このように、これまでの ND280 はニュートリノ振動測定とニュートリノ反応断面積測定の両方で大成功だったと言える。では、どうしてアップグレードが必要になったのか。この問いに答えるには ND280 設計時と現在の状況の変化を説明する必要がある。

ND280 の基本設計は、T2K 実験開始前の 2004 年から 2005 年にかけて決定された。当時はニュートリノ混合角 θ_{13} が未測定であり、 $\sin^2 2\theta_{13}$ の上限値は 0.1 程度であった。T2K 実験の目標は、 $\sin^2 2\theta_{13}$ が 0.01 程度でも、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の測定によって θ_{13} を決定することであった。また、中性カレント π^0 生成反応が SK における電子ニュートリノ事象の主要なバックグラウンドとなっており¹、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$ の場合には電子ニュートリノ事象の信号と π^0 バックグラウンドが同程度になることが予測されていた。そのため中性カレント π^0 生成反応の精密な測定が ND280 の重要課題の一つであり、ND280 の有効体積のほぼ半分は π^0 detector (POD) と呼ばれる

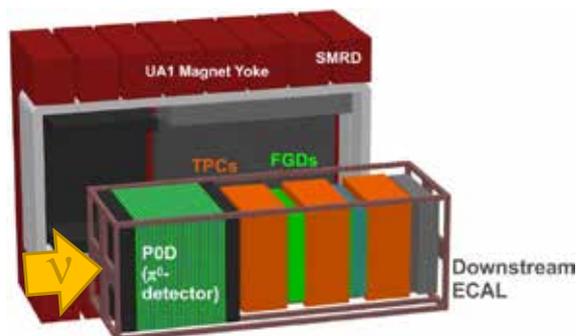


図 1: 実験開始から 2022 年までの ND280 検出器

¹ π^0 崩壊からの 2 つの γ 線の一方が正しく再構成されなかった場合に、もう一方の γ 線による電磁シャワーが電子ニュートリノ事象と誤認される。

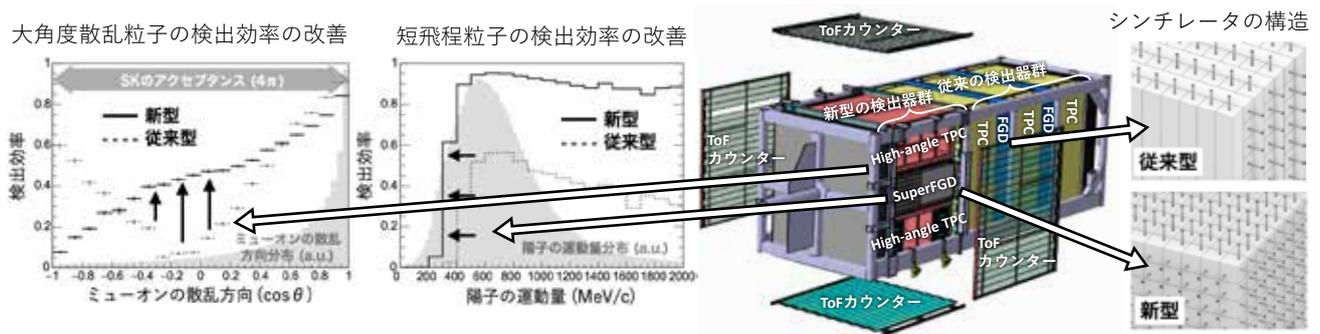


図 2: ND280 アップグレードの概念図と期待される測定精度の改善

中性カレント π^0 生成反応の測定に特化した検出器で占められた。しかし、2011年にT2K実験が θ_{13} が0でないことを示唆すると[3]、2012年には原子炉ニュートリノ実験によって $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.1$ と当時の上限値のすぐ下にあったとわかった。さらに2013年にSKの事象再構成アルゴリズムが大幅に改良され[4]、 π^0 バックグラウンドは従来の30%程度まで低減された。その結果、電子ニュートリノ事象の信号に対する π^0 バックグラウンドの比率は3%程度になり、中性カレント π^0 生成反応測定の重要度は低下した。

一方で信号となる荷電カレント反応は、実験が進むにつれて状況がシビアになっている。実験初期は統計誤差が圧倒的に大きいためニュートリノビームと荷電カレント反応の断面積の不定性を合わせて10%程度に抑えれば十分であった。当時のニュートリノ-原子核反応モデルは、原子核中の単体核子との相互作用のみを考慮しており²、相対論的フェルミガス模型という平均場近似を元にしたシンプルな原子核模型を用いていた。しかし、電子散乱やニュートリノ-原子核反応の測定が進むにつれて、既存の模型では説明できない原子核効果や原子核内での核子間相互作用に起因する複数核子とのニュートリノ反応があることが示唆され、ニュートリノ-原子核反応を十分に理解できていない現状が明らかになった。T2K実験では、統計量が増えるにつれて系統誤差の影響が大きくなり、中でもニュートリノ反応の不定性が系統誤差の主要因となっていた。我々はND280の解析を改良してこの系統誤差を低減してきたが、検出器性能の限界に直面していた。

ND280における荷電カレント反応測定のための主要検出器であるFine Grained Detector (FGD)は、棒状のプラスチックシンチレータをビームに対して層状に並べた飛跡検出器である。ニュートリノ反応からの荷電粒子がシンチレータ層に対して平行に散乱された場合、検出効率が著しく低い。また、FGDからの荷電粒子を精密に測定するTPCはFGDの側面をカバーしておらず、90度方向に散乱される粒子の検出効率が低い。一方、水

チェレンコフ検出器のSKは全方向に一定の検出効率があり、その違いにより系統誤差が相殺されずに残ってしまっていた。さらに、FGDで飛跡が再構成されるためには水平方向と鉛直方向に各3層の合わせて6層のシンチレータを通過する必要がある。そのため、ニュートリノ反応により生成される陽子の半分以上が検出できず、原子核効果や複数核子とのニュートリノ反応モデルに対して強い制限をかけられずにいた。加えて、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の精密測定のためには電子ニュートリノとミューニュートリノの荷電カレント反応断面積の違いの理解が必要となる。しかしND280では不十分な統計量と外からの γ 線によるバックグラウンドが原因で、電子ニュートリノの反応断面積の精密測定ができなかった。そのため、電子ニュートリノとミューニュートリノの反応断面積の違いは理論模型に依存していた。

こういった経緯から、ND280からPODを取り除き、その領域に図2のような3種類の新型検出器を導入する大規模なアップグレードが遂行された。

ニュートリノ反応標的となるSuperFGDは 1 cm^3 のキューブ状のプラスチックシンチレータ(ロシアUNIPLAST社製)を195万6864個積み上げた全感知型飛跡検出器である。シンチレータによる有感領域は約 $192\text{ cm} \times 182\text{ cm} \times 56\text{ cm}$ 、およそ2トンの質量を持つ。それぞれのシンチレータキューブ(以下、キューブ)には3方向から穴が明けられ、その穴に波長変換ファイバー(クラレ社製Y11(200)M 1.0mmD BSJ)を通す。シンチレーション光はファイバーの端面に設置された半導体光センサーMPPC(浜松ホトニクス社製S13360-1325PE)により検出される。総チャンネル数は5万5888チャンネルになり、CITIROC(フランスOMEGA社製)というMPPC専用のASICを用いて独自に開発したエレクトロニクスにより読み出される。MPPCと逆側のファイバー端面には、検出器の応答を監視するためのLED校正システムが設置されている。光学的に細分化された3次元構造によりSuperFGDは以下のような特長がある。

- あらゆる方向に散乱された荷電粒子の3次元飛跡を高効率で検出できる。

²原子核全体との可干渉性反応も考慮されているが割合は小さい。

- 飛程の短い低運動量の荷電ハドロン (主に陽子) も高効率で検出できる。
- 反跳陽子を用いて中性子を検出し、飛行時間からエネルギーを測定できる。
- 電子と γ 線の識別性能に優れ、電子ニュートリノを高精度で測定できる。

SuperFGD の下流にある従来の TPC に加えて、上下に新型の TPC (High-Angle TPC) を 2 台設置し、大角度方向に散乱した荷電粒子の正確な運動量測定や粒子識別を行う。この新型 TPC は既存の TPC の設計をベースとして、空間分解能を良くしたり、放電を防ぐための Micromegas の改良や、余計なエネルギー損失を最小化するために構造体を薄くする改良が施されている。さらにこれらの検出器全体の 6 面を高い時間分解能を持つシンチレーションカウンター (ToF カウンター) で取り囲む。これにより、粒子の飛来方向を同定し、外から SuperFGD 内に入ってくる荷電粒子によるバックグラウンドを除去する。この ToF カウンターには棒状のキャスト型シンチレータの両側に MPPC が取り付けられており、両側の時間情報を使ってシンチレータ中の光の伝搬時間を打ち消すことで、150 ps の時間分解能での測定を可能としている。このような ND280 のアップグレードにより、原子核効果や複数核子とのニュートリノ反応、電子ニュートリノ反応について理解を深め、T2K 実験における系統誤差を削減する。

次節以降で、このような構造の検出器に決まった経緯と日本グループが担当した SuperFGD 検出器の開発、建設、運転について時系列に沿って説明する。

3 構想段階 (2013~2015 年頃)

ND280 アップグレード計画は、2013 年 3 月に東京大学の横山将志氏が T2K グループ内で議論を提案したことから始まった³。T2K 実験は、CP 対称性の破れの検証に向けて翌年から反ニュートリノビームでの測定を始める転換期であり、アップグレードの実現には時間がかかること、そして将来のハイパーカミオカンデ計画への橋渡しの意味でも、このタイミングで議論を始めるのは合理的であった。

2013 年 7 月の会議を皮切りに、同年 9 月と 2014 年 1 月にグループ内でアイディアを出し合う会議が行われた。これらの会議では、後の Water Grid And SCIntillator (WAGASCI) 検出器 [5] や Intermediate Water Cherenkov Detector (IWCD) [6] のもとになる新型検出器の提案や重水標的や、水シンチレータ、高圧ガス TPC などの様々なアイディアが議論された。ニュートリノ

³2017 年前期まではいずれの著者も本プロジェクトに参加していなかったため、3 章と 4 章の情報は東大・横山将志氏からの情報提供とグループ内の会議記録による。

ビーム施設を持たない欧州諸国のコラボレータの関心は高く、European strategy 2013 の推奨を受けて日米での長期線ニュートリノ実験計画を支援する枠組みである Neutrino platform [7] が CERN に設置され、その支援のもと議論が進められることとなった⁴。

4 提案段階 (2015~2017 年頃)

T2K 実験グループは、2015 年秋に ND280 アップグレードのタスクフォースを結成し (コンビナー: Marco Zito 氏 (当時 Saclay), 横山氏), 検討結果を文書にとりまとめ、CERN SPSC に関心表明書を提出した [8]。また、ビーム強度増強と期間延長による T2K フェーズ 2 計画の提案書中で ND280 アップグレードの可能性に言及し、ニュートリノ振動の測定感度の向上を評価した [9]。2016 年 11 月には第一回の CERN でのワークショップ [10] を開催し、2020 年頃の設置を目標に掲げた。大角度方向をカバーする High-Angle TPC と ToF の配置が最終形に近いレイアウトとして提案され、設計を進める技術検討が始まった。一方、標的兼飛跡検出器はまだコンセプトの段階であり、WAGASCI 検出器をベースとした水標的とアクティブ標的の 2 タイプ検出器が共存する reference design が提案されていた。

SuperFGD が初めて提案されたのは、2017 年 3 月に行われた第二回ワークショップであった [11]。発案者は Davide Sgalaberna 氏 (当時 CERN) である。当初は技術的にも予算的にも困難であり、FGD と同じ棒状シンチレータを 3 次元的に配置した案などと並ぶ対案の一つであった。しかしながら、同年 5 月と 8 月に行われた第三、四回ワークショップでの議論を経て、第一案として進める方針となった。Yury Kudenko 氏らの努力によりロシアで安価にキューブを製作できる見通しが立ったことが大きな要因であった。また、期待される性能がシミュレーションによってある程度裏打ちされたことも支持を得た理由であった⁵。しかしながら、この時点ではまだ技術的な実現可能性の検討はほとんどなされていなかった。本当に実現できるかどうかわからないリスクを抱えたなか、野心的な検出器の実現に向けた挑戦が始まった。

5 開発・設計段階 (2017~2019 年頃)

この章では筆者らが主に担当した SuperFGD の開発と設計について記述する。大きなマイルストーンは 2018 年 11 月に J-PARC 実験審査委員会 (PAC) に提出した

⁴2018 年 1 月に提案書を CERN SPSC に提出。2018 年 12 月の技術設計書の提出を経て、2019 年 4 月に NP07 として正式に承認された。

⁵筆者の主観だが、野心的な検出器デザインが実験家の心をくすぐったことも理由の一つだろう。

技術設計書 (TDR) [12] であったが、その後も継続して行われた設計検討の内容も含める。また、後述する項目は相互に関連しており、実際の開発・設計は並行して進められたが、状況の整理のため分けて記述する。

5.1 シンチレータキューブ試作と性能評価

2017年中頃、ロシアグループによって1 cm 角のシンチレータキューブの試作品が製作され、宇宙線を用いた光量・クロストーク・時間特性の評価や機械寸法のばらつきなどが測定された。10月頃には、最初のプロトタイプ検出器 (5×5×5 キューブ) を用いたビーム試験が CERN で行われた [13]。また、ND280 の上流側検出器を入れ替える方針の決定を受け、SuperFGD の概念設計と構成部品のリストアップが進んだ。しかし、各国の予算獲得の見通しがまだ立っておらず、キューブサイズを1.5 cm 角や2 cm 角に大きくするオプションも検討していた。読み出し数の削減に加えて、後述するキューブ組み立ての困難さを軽減するためでもあった。

このころ日本グループの R&D も活発化した。2017年10月には東京大学の藤田亮氏が中心となり、キューブ試作品を用いた宇宙線の試験を開始した。最初はたった5つのキューブでの測定であったが、差しこむファイバーの本数による観測光量の変化から、ファイバーの影やキューブ構造による応答の非一様性が示唆された。東京大学の岩本康之介氏や都立大学の粟田口唯人氏とともに、2018年の6月と11月には東北大学・ELPH (現 RARIS) にて単一キューブ内の観測光量非一様性やキューブ間クロストークなどの詳細評価を行った。海外グループでも、2018年7月に CERN T9 ビームラインにて、中型のプロトタイプ (8×22×52 キューブ) を用いた試験を行い、陽子の Bragg peak の応答を評価するなどの成果を得た [14]。2020年には、ロスアラモス研究所の中性子ビームラインで Time-of-flight を利用した中性子検出能力を実証する試験も行った [15]。

5.2 キューブ組み立て方法の検討

この計画の最大の課題は、膨大な数のキューブをどのように組み立てるかであった。機械的に独立した部品が約200万個もあるため、例えば一つのキューブの外形精度を $\sigma = 100 \mu\text{m}$ とすると、200個のキューブを隙間なく並べた場合の全長のばらつきは $\sqrt{200}$ 倍の $\sigma = 1.4 \text{ mm}$ 程度となる。一方、1 mm 径のファイバーに対して1.5 mm のキューブの穴が動いて良い許容範囲はわずか $\pm 250 \mu\text{m}$ であり、単純には実現不可能であった。この課題についてグループ内では様々な検討を行った。まずはキューブ製造工程の見直しである。当初は押し出し成

形した棒状のシンチレータを切ってキューブ状にしていたが、製作精度の良い射出成形に切り替えた。ヒケなどの射出成形の特有の不良対策を行い、外形精度を $\sigma = 35 \mu\text{m}$ 程度まで抑制することに成功した。穴あけ加工についても、高性能切削マシンを導入するとともに、切り屑の常時吸い出しを行うキューブ固定ジグの設計などの最適化が行われた。これにより歩留まりを改善して安定した製造体制を構築した。

並行して組み立て方法の検討を行った。金属針やトレイを使用した整列、接着と研磨による一体化、果ては3D プリントによる一体成形⁶など多くの案を検討した。2018年11月の TDR では、釣り糸案と溶着案の2つの有望な案に絞り、ロシアと日本でそれぞれ検討する方針をとった。釣り糸案は1.3 mm の釣り糸を用いてキューブの穴を揃えて組み立てたのちファイバーと入れ替える手法である。実機のキューブ製造が進むにつれてスケラビリティの検証が進み、静的な状態でファイバーにかかる応力が小さいことを実証した。キューブが固定されないことによる局所的な損傷リスクは最後まで払拭できなかったものの、組み立て自体は可能と判断して、2019年11月の組み立て方法レビュー会議にて釣り糸案の採用を決定した。機械的強度に優れた対案として、 $100 \mu\text{m}$ のポリスチレンシートを超音波で溶着して多数のキューブをユニット化する溶着案も2020年6月頃まで検討された。本手法の鍵となるキューブ品質を担保するため、画像解析を用いて不良品の判定を瞬時に行うカメラとロボットアームを組み合わせた品質自動検査システムが京都大学の谷真央氏によって開発された⁷。釣り糸案が成功したため実際には使われなかったが、代替案としての手法が確立された。

5.3 検出器構造体の検討

検出器構造体に求められる機能は、195万6864個のシンチレータキューブを構造体の内側で拘束しつつ荷重を支えること、5万5888本の波長変換ファイバーを貫通させるための11万1776個の穴を持つこと、構造体の外側でファイバーの両端を MPPC や LED 較正システムと光学的に精度良く接続することである。また、これらに加えて、他検出器や支持体などと干渉しない構造や、低い物質質量かつ地震などの振動に耐える堅牢性などが求められる。設計はジュネーブ大学、スイス連邦工科大学チューリッヒ校、コロラド大学のメカニカルエンジニアが担当した。まず低物質質量で剛性のある素材として、2層の薄いカーボンファイバー板の間に低密度で厚みのある硬質フォームコア (Divinycell H250) を挟み、エポキシ系接着剤で接合した複合板が選ばれた。素材の厚みを

⁶技術的に興味深く、現在も R&D が続いている。

⁷第11回測定器開発優秀修士論文賞 (2020年) を受賞。

変えた簡易構造で有限要素解析を行い、荷重による底部のたわみを2~3 mm以下に抑えられるという結果を得た。カタナリー曲線に従う数 mm 程度のたわみであれば、1 キューブあたりのずれは数十 μm となり、構造体のたわみによってファイバーに損傷を与える可能性はほとんどないと考えられた。

ファイバーの損傷をもたらす別の潜在的な原因は、構造体内壁の貫通穴とシンチレータキューブの穴の位置ずれである。このリスクを緩和するため、元々3 mm 径としていた構造体内部の穴にテーパをつけ、内壁側の穴を5 mm 径と大きくした。また、キューブサイズのばらつきによってキューブ間に隙間が生じ、振動等でキューブが動くことも破損の原因となる。キューブを構造体で機械的に拘束する必要があるが、過剰な圧縮も破損リスクとなる。そのため、キューブを押さえる目的で直方体の構造体内部の壁3面にエチレンプロピレンゴム (EPDM) フォームを挟んで閉じることにした。最適な圧力を与えるフォームの厚みと柔らかさについて多くの議論があり、最終的に担当のメカニカルエンジニアが一番良いとする仕様を採用した。6枚の板をボルトで止めて直方体を作るため、硬質フォームコアの周縁にタップ加工されたアルミ合金製の枠が設けられた。構造体外壁の設計はMPPCやLED較正装置の検討の進展とともに確定し、高強度で加工性の良い樹脂板 (G-10) を接着して共に加工することとした。わずかに検出器が大きかったためビーム軸方向のキューブ数を減らす、また温度サイクルで複合板が剥離するのを防ぐため最終段階で設計を変更するなどの紆余曲折を経て、機械的構造が決まった。

5.4 MPPCとファイバーの設計の検討

従来のND280では、セラミックタイプのMPPCを使用し、専用開発したコネクタによってファイバーと光学的に接続していた。しかし、今回は多チャンネルを取り扱うため、安価で省スペースかつ低物質質量が期待される表面実装タイプのMPPCの採用を想定して検討を進めた。KEKの中平武氏の発案により、プリント基板上に表面実装MPPCをファイバーと同じピッチで配列する構造とした。プリント基板を光学アライメントに用いることができ、モジュール化によって検出器組み立て作業やチャンネルマッピングの簡易化が期待された。プリント基板の形状や実装精度を確認するため、5×5の基板を設計・製作して3次元形状測定器で測定した。プリント基板 (FR4) のそり・うねりが小さいこと、チップマウンターによるMPPCチップの位置、高さ、角度の実装精度が良いことを確認した。その後、KEKの小川智久氏と京都大学の栗林宗一郎氏が中心となり、光学接続

部の設計やファイバー端面の処理方法などの検討を進めた。ファイバーは構造体外壁から差し込んで組み立てる必要があるため、1本ずつ独立した構造とした。MPPCに接するファイバー側のコネクタの接着と端面の研磨には、実績のあるオプティカルセメント (EJ-500) とダイヤモンドカッター (FiberFin 4) を採用した。これらの仕様からSuperFGD用のファイバーコネクタの構造も確定した。

設計の最終段階では光学接続の精度が課題となった。MPPCの有感領域である1.3 mm角に1 mm径のファイバーを精度よく揃える必要がある。一方、構造体へのMPPC基板の取り付け位置やコネクタの製作精度によるファイバーの位置などによって読み出し面に平行な方向のばらつきが生じる。このばらつきを抑えるための公差を決め、コネクタの素材には形状変化が少なく黒色で加工性の良いABS樹脂を採用した。加えて、垂直方向のばらつきには、製造上生じるコネクタの角の曲率を吸収しつつファイバーをMPPCに押し付けるスプリングとして、長期安定性を評価したEPDMシートを導入した。MPPCと反対側の反射材の有無については、反射材なし、白ペイント、黒ペイント、アルミ蒸着のオプションを検討した。反射材による光量の増加は粒子識別性能には大きく寄与せず、費用対効果が得られないとわかった。また、端面研磨についてはニッパーを用いた切断のみで観測光量の個体差は少ないという試験結果が得られたため、作業性を考慮して研磨なしとし設計を完了した (図3)。

5.5 LED較正システムの検討

LED較正システムは、検出器の応答を迅速にチェックし、その安定性を長期間監視するために不可欠である。数光電子のパルス光を多くのチャンネルに均一に分配する機能とコンパクトかつ低物質質量である特長を持つ装置

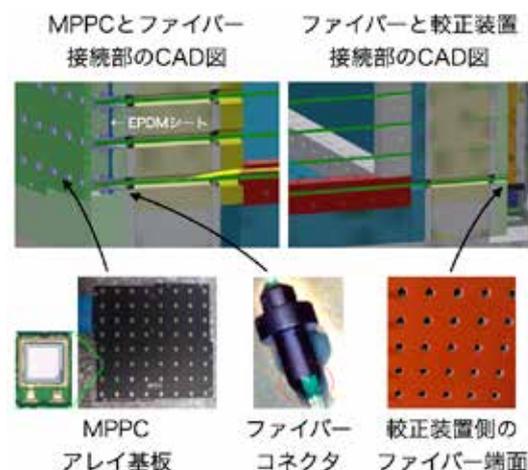


図3: MPPCとファイバー周りの設計と関連写真。

として、導光板の開発を行った⁸。導光板は照明装置に広く利用されているが、較正装置に応用したのはおそらく初めてである。LEDからの光は、導光板上にレーザー加工されたノッチによって垂直方向に散乱され、MPPC読み出しと逆側のファイバー端面で吸収されて再発光した光がファイバーを通してMPPCまで導かれる。側面を47枚、底面を46枚の導光板モジュールで覆うことで、651個のLED(1モジュールあたり7個のLEDアレイを使用)で全5万5888チャンネルをカバーする。最初の導光板は2018年11月頃に試作され、都立大学の在原拓司氏によって良い一様性や無視できるほど小さい光学的クロストークが示された。その後、製作技術(レーザードット方式やインクジェット方式)、ノッチの形状とピッチについて再検討し、小ロットでの試作を請け負ってもらえた株式会社プラスティックスと共に開発を続けた。何枚かの試作を経て、レーザー加工の位置や深さ、LEDの個数や位置、導光板と拡散板の厚みなどの光学設計を最適化した。また、設置時のたわみや熱膨張といった機械設計の最適化もなされ、最終的に8mmという薄さを可能とした。

5.6 エレクトロニクスの検討

当初はWAGASCI検出器と同じくSPIROC ASICによるFront-end board (FEB)を検出器表面のMPPCの近くに配置する案を検討していた。これは、一つのプリント基板の片側にMPPC、もう片側に直接またはメザニンボード上にASICを取り付ける構造だった。しかし、基板分の空間と物質量が測定に影響すること、FEB交換時に検出器本体を引き出す必要が生じること、冷却経路が複雑になることといった理由からこれらの案は除外された。2018年4月にスイス・ジュネーブ大とフランス・LLRグループが担当となり、両機関が人的リソースと予算を考慮した結果、BabyMIND検出器に用いられていたCITIROC ASICが採用された。これにより、検出器本体の脇に配置したクレートにFEBを設置する構造となった。最長2m程度のMPPC電源とアナログ信号用ケーブルには、ノイズ対策やコネクタの堅牢性を重視してSAMTEC社製の細線同軸ケーブルアセンブリを採用した。検出器全体を支える構造体のフレームの隙間にクレートが配置できたため、標的体積を大きくできるという恩恵も得られた。

合計222台のFEBは検出器左右8台ずつの計16台のクレートに収容され、クレートごとに1台ずつある電源供給や信号伝送を担うBackplane、デジタル化したデータやトリガーなどを伝送するOptical concentrator board (OCB)と合わせて使用する。FEB設計上の主

⁸当初はチェコのCALICEグループが開発していたノッチをつけたファイバーとグループ内で考案した導光板の2案があった。

要な課題は、FEB1台で256ch(CITIROC ASIC 8個とFPGA 1個)を賄うことになり、BabyMINDのFEB(96ch/台)より密な基板設計となることであった。2020年1月頃に基板上的コネクタ位置などの仕様が決まり、それ以降FEBの設計が急速に進んだ。検出器周りの細線同軸ケーブルの配線についても、モックアップを作って設計を最適化した。

5.7 データ取得ソフトウェアの検討

データ取得システムはSuperFGD単体で較正用のデータを取得することに加えて、ビームデータや宇宙線データの取得時にはその他の前置検出器と統合されたシステムとして制御やイベントビルドができなければならない。そのため前置検出器と同じMIDASと呼ばれるミドルウェアをベースに開発をした。データレートはビームデータは2Mbps、較正用のLEDデータは8Mbpsにもおよび、その安定したデータ転送が一つの課題であった。さらに検出器からの信号のデータ取得に加えて、温度計や電圧計の記録や制御をするSlow controlも同時に行う必要がある。SuperFGDのバックエンド基板であるOCBにはZynqと呼ばれるSystem-on-a-Chip (SoC)デバイスが搭載されている。ZynqはFPGAとCPUを搭載し、大容量高速通信と高度な情報処理が可能であるため、ZynqにLinuxをインストールし、MIDASのデータ取得とSlow controlのフロントエンド部をそこで動作させ、バックエンド部をデータ取得PCで動かすことで、ビームデータや宇宙線データの安定したデータ転送やSlow controlとの同時運用をすることにした。特にデータレートの高い較正用のLEDデータはイベントごとに転送するのではなく、Zynqでヒストグラム化したものをまとめて転送することにした。京都大学の栗林宗一郎氏、Jianrun Hu氏がZynqを搭載した市販の評価基板で原理検証を行い、期待通りのデータ転送が可能であることを実証した。

6 製造段階 (2019~2022年頃)

TDRの完成を受けて、2019年から設計が固まった部材の調達が始まった。しかし、多くの部材の製造は、2020年8月に結ばれたCERN Neutrino platformとの覚書(NP07 MoU)を待つ必要があった。コロナ禍による人流制限やサプライチェーンの混乱、不安定な世界情勢、製造段階で起きた問題など、ここでも多くの苦労があった。

6.1 シンチレータキューブの製造

シンチレータキューブの製造は2019年1月から2021年1月までの約2年間、ロシアの会社で行われた。射出成形により1日で約4,000個を成形し、薬品処理によって外側に白色の反射層を形成する。その後、穴あけ加工と目視検査を経て、ロシア科学アカデミー原子核研究所(INR)に納品された。キューブの製造と並行して、INRではキューブの品質検査と釣り糸を用いたレイヤー組み立てが行われたが、これが図4に示すように大変な手間であった。まず金属棒を用いてキューブを串刺しにし、整列したキューブの外径にガタがないかを目視で確認する。さらに横串を入れて15×15キューブ程度の平面を作り、金属棒をひとつずつ動かして負荷を確認する。過剰な負荷があった場合は、原因となるキューブを特定して交換する⁹。さらにキューブを90度回転し、垂直方向の穴についても同様に確認する。こうして検査をパスしたキューブ192個に釣り糸を通して1ストリングを作る。最後にそれらのストリングの直交方向にも糸を通して、4万個弱のキューブからなる1レイヤーの製作が完成する¹⁰。予備を含めて57レイヤーを作製した。

完成後のキューブレイヤーは、必要に応じて追加試験を行う意図もあり、INRに保管されていた。しかし、2022年2月のウクライナ侵攻によって突如輸送が危ぶまれる事態となった。そのため、KEK事務局と相談して関係各所に慎重に確認しながら適切な輸送方法を模索した。まず経済産業省の指定する輸入禁止物品でないことを通関業者を介して税関に確認した。また、ロシアから日本国内への輸送費支払いが不可となったため通関手続きと国内輸送の費用は日本側で負担することとし、2022年6月、無事にJ-PARCで受け取ることができた。

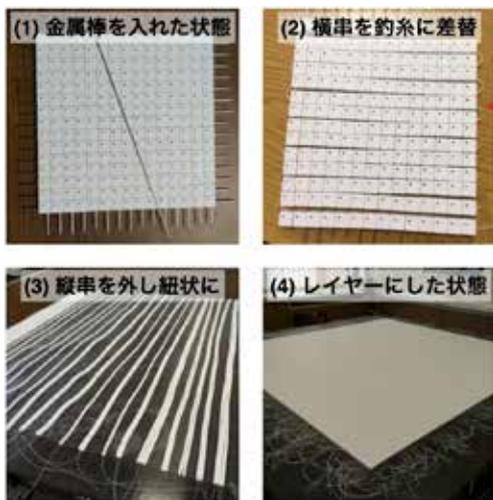


図4: キューブの品質検査とレイヤー組み立ての写真。

⁹ここで約5%のキューブが除外された。熟練度にもよるが、検査のスピードと質にはやはり個人差があったと言わざるを得ない。

¹⁰この1レイヤーの組み立てに4人で1週間かかる。

6.2 検出器構造体の製造

設計開発での工程の遅れを経て、2021年8月にグループ外有識者による検出器構造体の最終レビューが行われた。構造設計、取り合い、試作試験結果、振動解析、製作工程などの確認を経て、ようやく検出器構造体の製造が開始された。しかしながら、その後の製造工程も順調には行かず、検出器本体の組み立て作業開始時期に影響を与えた。まず、コロナ禍でのサプライチェーンの乱れによって資材調達が遅れた。加えて、ロックダウンによってスペインの製造工場が閉鎖されるなどの遅れも生じた。最終的に当初予定より半年ほど遅れた2022年8月にCERNに納品され、組み立て試験と荷重試験によって健全性が確認された。そして、2022年10月末にJ-PARCで受け取り、検出器組み立て段階に移行した。

6.3 MPPCとファイバーの製造

MPPCの調達・基板実装・検査は日本グループと米国・ルイジアナ州立大学が担当した。まず2018年10月から浜松ホトニクス株式会社製の表面実装MPPCの製造が始まり、2020年3月までに納品された。その後、米国のエレクトロニクスエンジニアの最終設計をもとに基板製作を行った。日本担当分として納品された約800枚のMPPCアレイ基板の検査には、東京大学の鞠谷温士氏が開発した装置を用いた。東京大学の中桐洗太氏とYoshimi Yoshimoto氏らが数ヶ月かけて検査を行い、不良品を排除して十分な数の良品を確保した。しかし、米国担当分の基板に問題が生じた。紆余曲折を経て日本の製造会社に実装を依頼したが、納品された200枚の基板のうち多数にMPPCチップの脱落や有感領域の傷が見つかった。トレイ梱包が国際輸送に適しておらず、基板同士が接触したことが原因であった。MPPCアレイ基板の不足が危ぶまれたが、なんとか必要数を確保して検出器建設工程への影響を回避した。

クラレ製の波長変換ファイバーの調達・加工はKEKの小川智久氏が主に担当した。クラレ製のファイバーは2020年3月までに全数納品された。通常はロール梱包だが、検出器の組み立て時に湾曲した形状が問題になると考え、直線状に切断された状態での納品とした。CERN担当分のファイバーコネクタが届いた2020年末からファイバーの接着と研磨作業を開始した。鉛直方向の短いファイバーの大部分は米国・ロチェスター大学が担当し、残りは日本グループが担当した。日本では、コネクタの寸法検査ジグ、オプティカルセメントが乾くまでコネクタとファイバーを保持する専用ジグ、研磨後のカメラ検査手法を開発した上で、ハヤシレピック株式会社に実作業を依頼した。熟練業者の工程管理や品質管理体制の学びを得つつ、2021年3月までの4ヶ月で予定通

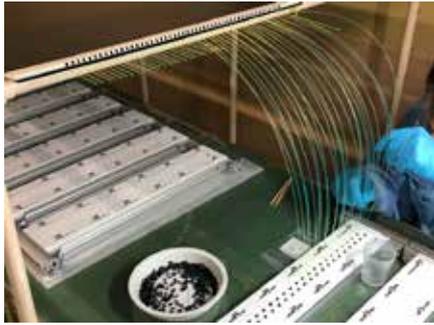


図 5: コネクタとファイバーの接着作業時の写真。

り約3万本の接着と研磨作業を完了した(図5)。米国分についてはコロナ禍で大学での組み立て作業が遅れたものの、検出器組み立て作業が始まるまでに J-PARC に送られた。

6.4 LED システムの製造

導光板モジュールの製造は、検出器構造体の設計が確定した後の2021年8月から11月に行われた。厳しい寸法確認に合格して納品されたモジュールは別途製造したLEDアレイ基板と組み合わせて組み上げられた。その後、都立大学の古藤達朗氏が開発した装置を用いて品質検査を行った。図6にあるように、12台のCMOSカメラで全ノッチの光量を一括で測定する装置であり、良い光量一様性が確認された。しかし、光量が試作品より低いという問題が発覚した。調査の結果、試作品で使用した拡散板素材が廃盤となり、透過率が低い別素材で量産されたためと分かった。適切な透過度を持つ拡散板で再検査を行い、設置作業までに93台の良品を選定した。

一方、LEDドライバはロシアのドゥブナ合同原子核研究所(JINR)が担当していた。試作機の開発は順調に進んだが、ロシア政府による禁輸措置によって日本に電子機器を送れなくなった。そのため、急遽日本側で予算を確保して量産した。コロナ禍によって半導体市場は狂乱的な動き¹¹の最中だったが、なんとか必要なFPGA等を調達した。製造の目処は立ったが、今度はエレクトロニクスとの統合試験を進める中で平均光量を上げる必要が生じた。都立大学の古井佑典氏が中心となり、LED保護抵抗の変更やLEDドライバのパルス出力の増強で対応し、2023年10月の検出器設置までに必要なLEDドライバの製造を完了した。

6.5 エレクトロニクスの製造

エレクトロニクスの製造スケジュールは主に世界的な半導体不足とコロナ禍によって律速された。試作が進ん

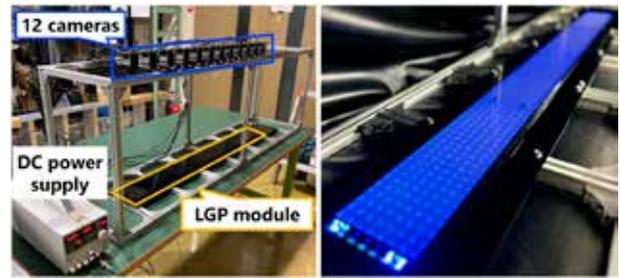


図 6: 導光板モジュールの品質検査時の写真。

でいた2021年9月頃にFEBの大量生産に必要なFPGAの納期が1年以上になると判明し、先行調達を開始した。また長納期部品を代替品にするなどの対応に迫られた。半導体不足とコロナ禍の影響は、試作品の製造、性能評価、設計改善や各段階のレビュープロセスに及び、単純な納期遅延以上の工程の遅れが生じた。このころ既に、検出器設置前の試運転は少数のチャンネルで行い、検出器設置後までに残りを用意するシナリオを想定していた。電子部品の価格高騰のため予算不足にはグループ全体で対応した。各エレクトロニクスの試作品は2021年末頃までに製造され、2022年前半はハードウェア動作検査とファームウェアの開発を進めた。日本ではKEKの坂下健氏と総研大のMahesh Jakkapu氏によって試験用信号の分配ボードが開発され、多数の読み出しチャンネルを伴うエレクトロニクス統合試験やFEB納品後検査に活用された。2022年10月のグループ内レビューとその後の統合試験を経て、エレクトロニクスの大量生産を順次開始した。2023年3月頃から毎週30台のFEBが納品され納品後検査が始まったが、直後に30%程度の不良率が見つかった。一部はハードウェアの問題でありチップ交換などで修理された。一方、Slow controlの信号ラインにノイズが乗る問題は設計に由来するもので、当初設計で隠れていた問題が量産前の配線ライン変更によって現れたものであった。ファームウェアの修正で対応したが工程に遅れが生じ、検出器本体の試運転計画に影響が出た。2023年4月に届いた3台に始まり、7月末には20%、9月中旬には50%、11月の初ビーム運転では80%とJ-PARCに届いたFEBを順次組み込み、検出器をフル稼働するためのエレクトロニクスが全て届いたのは2024年3月であった。

6.6 データ取得ソフトウェアの開発

データ取得システムの原理検証が完了してから、実機用のデータ取得ソフトウェアの開発は2年近く滞っていたが、2022年に東北大学のLukas Berns氏が参加すると開発と統合の方針を立てられ、京都大学のJianrun Hu氏、有元隼太氏と役割分担をして開発と試験が進められていった。エレクトロニクスの生産の遅れにより、

¹¹納期や価格の乱れだけでなく、偽物なども出回っていたそう。

実機基板がまだできていなかった 2022 年には市販の評価基板上で生成した疑似データを用いて開発や評価を進め、2022 年 8 月には SuperFGD のデータ取得システムのモックアップを作り、既存の ND280 のデータ取得システムとの統合試験に成功した。2023 年に入り SuperFGD のエレクトロニクスが部分的に J-PARC に届くと、実機のエレクトロニクスを用いた通信試験や機能の実装、デバッグ、システム統合を進め、地上での試運転、インストール後の地下での宇宙線試験、2023 年 11 月のビーム試運転を経て問題を洗い出し、2024 年 6 月の物理データ取得では ND280 全体で 96.1% のデータ取得効率を達成した¹²。

7 建設段階 (2022~2023 年頃)

構造体の到着を受け、2022 年 10 月から J-PARC のニュートリノ実験準備棟で組み立て作業を開始した。各工程での写真を図 7 に示す。組み立てが完了する 2023 年 4 月まで、国内外から多くのコラボレーターが作業のために J-PARC に滞在した。



図 7: (a) キューブ積層作業、(b) ファイバー挿入作業用架台への移設、(c) ファイバー挿入作業、(d) 検出器上面への MPPC 取り付け作業、(e) 較正装置取り付け後、(f) ケーブル取り付け後の検出器側面。

7.1 構造体の組み立てとキューブ積層

まずは構造体を組み立てる。直方体の構造体のうち底面と 2 枚の側面を組み合わせ、各面の貫通穴の相対的な位置がキューブのそれと一致するよう、金属ジグを用いて各面の位置を調整した。構造体底面の全ての貫通穴に下からアクセスできるよう、グリッド状の天板を持つ作業台が採用された。キューブレイヤーの積層は大変な作業であった。釣り糸で編まれたレイヤーは 35 kg と重くたわみやすいため、2 本の木製の棒を下から差し込み神輿のように担ぎ上げて高さ 1.2 m 程度の作業台へと運搬する。レイヤーが分解しないよう左右から釣り糸を握る役も含め、6 人程度の作業が必要だった。扱いに慣れていなかった初期は、棒から滑り落ちかけたレイヤーを間一髪で下に潜り込んで支える場面もあった。

およそ 4 週間の作業時間のほとんどを占めたのはキューブのアライメント調整である。釣り糸によって水平方向の穴の位置はよく揃っているが、全キューブレイヤーと構造体の間で鉛直方向の貫通穴の位置も揃える必要がある。2 層を積み上げるごとに長さ 20 cm 程度、1.2 mm 径の金属棒を上から差し込み、新たに積んだレイヤーの位置を調整した (図 7 (a))。キューブの反射層を傷つけないよう気をつけながらほとんど手探りで下層の穴を探り当てていくのだが、構造体の壁から遠い部分ではキューブの位置のずれが大きく、キューブ同士の隙間に金属棒を差してしまうこともしばしばであった。これらの金属棒は次のレイヤーを積む際には全て取り除く。加えて、1.2 mm 径のステンレス製 TIG 溶接棒を下から差し込むことでアライメントを保持した。キューブ組み立ての担当グループは当初 1,000 本程度しか用意していなかったが、これでは約 8 キューブおきにしかアライメントをとれず、実際に作業が始まると心許ない数だと判明した (筆者らは事前に指摘していた)。そのため、国内市場で入手可能な溶接棒をすべて買い集めてアライメントに使用した。この種の溶接棒 1 万本以上が約 3 ヶ月間市場から姿を消したため、国内の鉄工所などにご迷惑をおかけしたかもしれない。

7.2 ファイバーと MPPC の取り付け

5 万 5888 本のファイバーの挿入作業は建設において最も人力を要する部分である。2023 年 1 月から 3 月にかけて、常に 20 人以上のコラボレーターが入れ替わり立ち替わり J-PARC に滞在し、10 人ずつの朝夕 2 シフト体制で作業した。7 月から 8 月の作業を見込んで作業者と検出器の暑さ対策を検討していたが、構造体の製作が遅れたため冬季の作業となった上、建屋内の空調機の故障により作業場の寒さが問題となった。修理されるまで

¹² データロスの大半は電磁石の不具合によるもので SuperFGD のデータ取得システムは 99% 以上の期間で安定動作した。

作業中はコートを着込み、夜間は検出器をシートで覆って温度の低下を和らげる対応をとった。

初めに水平方向のファイバーから取り掛かった(図7(c))。釣り糸によるアライメント効果は大きく、ほとんど抵抗なくファイバーがキューブの貫通穴を歩いていく感覚は爽快であった。ファイバーの挿入と、釣り糸を引き抜き余剰分のファイバーを切り落とす役目とを分担して、それぞれの担当者を検出器の両側に配置することで効率化を図った。これらの挿入作業と同時に並行で挿入後のファイバーを検査する。検査システムは京都大学の川上将輝氏が開発したもので、ファイバーの一端から照射したLED光の強度を他端に設置したMPPCで測定することでファイバーの損傷を見つける。LEDを直流電流で強く光らせMPPCを線形領域で運用する方式で、室内光の下でも素早く検査ができるものだった。挿入作業のペースが想定より早く、検査が追いつかない事態となったため、作業を休止して検査のみに当てる日を設けて遅れを取り戻した。鉛直方向ファイバーの挿入作業では、キューブのアライメントが不十分でファイバーが通りづらい穴にしばしば遭遇した。ほとんどの場合は溶接棒を差し直すことで解決したが、まれにキューブの穴を先端部をヤスリのように粗くした棒で削って拡張しなければならないこともあった。既に設置された水平方向ファイバーを傷つけるリスクのある作業である。鉛直方向ファイバーの設置終了後に再度水平方向ファイバーの検査を行ったが、有意な損傷は見つからず胸を撫で下ろした。

検査が済んだチャンネルにはMPPCアレイを取り付ける(図7(d))。2種類ある4回対称なMPPCアレイを、位置に応じて正しい種類と向きで取り付け、シリアル番号と位置の対応を記録するという人的ミスの温床のような作業である。これらを統一的に管理するウェブGUIを東京大学の小林北斗氏が開発し、重宝した。

MPPCの取り付け後は古藤氏・古井氏が主導して導光板モジュールを取り付けた(図7(e))。構造体壁面にモジュールをねじ止めし、モジュールの隙間やネジ穴からの光漏れを防ぐために室温硬化ゴムを塗布した。この室温硬化ゴムはポリエステル製の遮光シートを検出器各面に接着するのにも用いられた。

7.3 ケーブルの取り付け・試験と宇宙線検出

信号用ケーブルは750mmから2270mmまで8通りの長さのものがあり、881枚のMPPCアレイそれぞれについてFEBまでの経路・距離を考慮して適切な長さのケーブルが割り当てられた。これらのケーブルを正しくラベル付けし、MPPCアレイ基板に取り付け、検出器上を這わせて最終的にFEB単位にまとめる(図7(f))。検出器上面・側面は何重にもケーブルで覆われる形とな

るが、これを外側の検出器やクレートとのクリアランス内に収めるのは煩雑で根気のいる作業であった。東京大学の児玉将馬氏がラベル付けや配線手法を確立してこれを取りまとめるとともに、FEB上のチャンネル番号と検出器上の位置とのマッピングを行った。

ケーブル取り付けと並行して、京都大学の對馬拓実氏が市販の読み出しエレクトロニクスを用いた試験を行った。LED較正システムを使ったデータ取得による導光板モジュール・ファイバー・MPPC・信号用ケーブルの動作検証と、外側からLEDランプで照らした状態でのノイズデータ測定による遮光試験が目的である。沖永和平氏ら東京大学の学生達を動員した地道な作業により、32チャンネル読み出しのエレクトロニクスたった4台で全5万5888チャンネルを試験し、2枚の不良MPPCアレイを発見して交換した。エレクトロニクスを欠いてはいたが、この試験をもって2023年4月に検出器本体の組み立てが無事完了した。

この段階では本来予定していなかったことだが、ノイズデータに含まれていた高い光量のイベントを詳しく調べた結果、對馬氏と児玉氏が初の宇宙線検出を成し遂げた。32チャンネル読み出しのエレクトロニクス4台を同期させて取得した宇宙線候補事象が図8である。エレクトロニクスの到着が遅れていたもどかしさの中での宇宙線検出に現場は沸き立った。



図8: 組み立て完了前の最終試験(左)とSuperFGDの初宇宙線候補事象(右)。側面の8×16チャンネル領域のみの読み出し。

8 設置、試運転、初イベント

地上での試運転を経て2023年10月にSuperFGDをND280に設置した(図9)。11月には初めてのビーム運転を迎えた。この時期は従来の検出器による安定したデータ取得が優先され、SuperFGDとHigh-Angle TPC, ToFを合わせた新検出器はDOG1と呼ばれる独立したDAQシステムで試運転を行なった。FEBに対するインターロックも未実装であったため、SuperFGDメンバーのみで24時間シフトを組んでデータ取得状況をモニターすることを余儀なくされ難儀した。初ビームは苦い経験と

なった。当初 DOG1 はビームトリガーを受けられず新検出器のビームデータ取得は当分先と思われていたところ、ある夜 DAQ グループが DOG1 へのビームトリガーの分配に成功し、翌朝にはすでに夜勤のメンバーが作った初ニュートリノ候補事象の図がグループ内に出回っていた。図 10 がその事象である。実に美しいが、見るたびに初ビームに立ち会えなかった悔しさを思い出す。その後、インターロックの実装、従来の検出器との DAQ 統合、FEB 全数設置などのマイルストーンを半年ほどかけて順調に達成していった。ところが、全チャンネルが読み出せるようになった時点で一つの導光板モジュールが全く機能していないことが分かった。原因は、敷設時に断線した 8 m の LED 駆動用同軸ケーブルであった。ケーブルは検出器と一体化しているため交換は不可能だったが、キャパシタンスを測定してみると幸い断線箇所は手の届く場所にあることが示唆された。そこで断線部分を切り落としてケーブルを接ぐという荒療治で、当該モジュールの機能を回復することができた。かくして 2024 年 6 月のビーム運転では全 FEB、全較正モジュールでの安定運転に漕ぎ着けた。

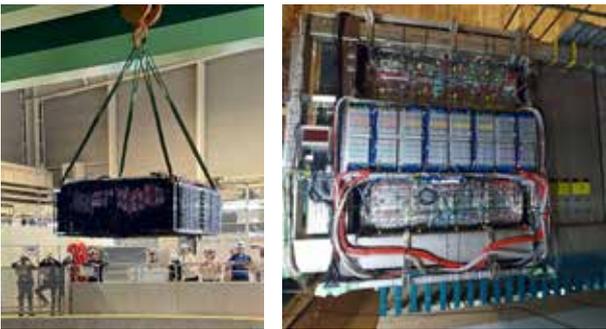


図 9: SuperFGD のインストール時 (左) と側面 ToF カウンター以外の検出器のインストール完了時 (右) の写真

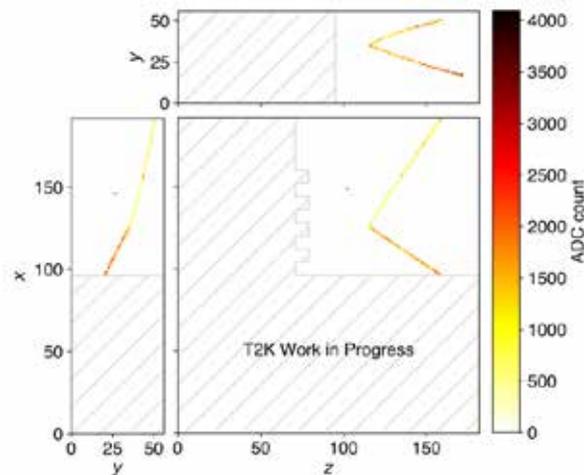


図 10: SuperFGD の初ニュートリノ候補事象。左がビーム上流側。斜線部は読み出されていなかった領域。

9 まとめと今後の展望

2013 年に提案された前置検出器 ND280 のアップグレードは、さまざまな困難を乗り越えて 2024 年 5 月について完成した。6 月の物理データ取得では前置検出器全体で 96.1% のデータ取得効率を達成した。現在は取得したビーム、宇宙線、較正用 LED データをもとに、データの品質評価、較正、検出器応答評価を進めており、2025 年に最初のニュートリノ反応断面積測定の結果を出すことを目指している。2024 年 11 月からビームデータ取得の再開を予定しており、今後は高統計データを用いて、ニュートリノ反応からのハドロンの測定や電子ニュートリノの測定などの高度な測定も進めていく。

ND280 は、2027 年開始予定のハイパーカミオカンデ実験においても前置検出器として使用される。ハイパーカミオカンデ実験においては統計量が飛躍的に増加し、数年のデータ取得の後には系統誤差が支配的になると見込まれている。そのため、T2K 実験以上に ND280 による系統誤差の抑制が重要になり、今回のアップグレードがより大きなインパクトを与えることになる。系統誤差をより抑えるために、将来的にさらに ND280 をアップグレードする議論もあり、活発に研究開発を進めている。

プロジェクトのサイクルが長期化して検出器建設の経験を積む機会が少なくなっているなか、この ND280 アップグレードは、学生のみならず筆者らにとっても貴重な経験となった。建設が成功したから言えることだが、精巧で大きなプラモデルを作る感覚で、楽しみながらプロジェクトを進められたと思う。本記事を通じて筆者らの経験を少しでも共有することで、将来のプロジェクト実施の一助になれば幸いである。

参考文献

- [1] 市川温子, 岩本康之介, 坂下健, 「T2K 実験 2016 年夏のハイライト」, 高エネルギーニュース 35-3, (2016).
- [2] 青木茂樹, 中家剛, 塚本敏文, 「T2K 実験 前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis」, 高エネルギーニュース 29-2, 57 (2010).
- [3] 奥村公宏, 亀田純, 中山祥英, 大谷将士, 中家剛, 「T2K 実験の最新結果」, 高エネルギーニュース 30-2 (2011).
- [4] 西村康宏, Mark Hartz, 家城佳, 「T2K 実験 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の「発見」」, 高エネルギーニュース 32-2 (2013).
- [5] T. Koga *et al.*, JPS Conf. Proc. **8** (2015) 023003.
- [6] K. Abe *et al.* (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration), arXiv:1805.04163.
- [7] CERN Neutrino Platform webpage; <https://home.cern/science/experiments/cern-neutrino-platform>
- [8] A. Blondel, M. Zito *et al.*, CERN-SPSC-2017-002 / SPSC-EOI-015.
- [9] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), arXiv:1609.04111.
- [10] Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs; <https://indico.cern.ch/event/568177/>
- [11] A. Blondel *et al.*, arXiv:1707.01785.
- [12] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), arXiv:1901.03750.
- [13] O. Mineev *et al.*, NIM A **923** (2019) 134.
- [14] A. Blondel *et al.*, JINST **15** (2020) P12003.
- [15] A. Agarwal *et al.*, Phys. Lett. B **840** (2023) 137843.