

T2K 実験 前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis

神戸大学大学院 人間発達環境学研究所

青木 茂樹

aoki@kobe-u.ac.jp

京都大学大学院 理学研究科

中家 剛

t.nakaya@scphys.kyoto-u.ac.jp

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

塚本 敏文

toshifumi.tsukamoto@kek.jp

2010年8月22日

1 はじめに

T2K 実験は、これまで何度か高エネルギーニュースで取り上げられてきたが[1-8]，東海村に建設された大強度陽子加速器 J-PARC で生成した高強度ニュートリノビームを 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデで測定する長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験の特徴は、世界最大強度の加速器で生成される高強度ニュートリノビーム，高精度の前置ニュートリノ測定器，世界最大級(5万トン)の後置ニュートリノ測定器スーパーカミオカンデである。さらに，ニュートリノビーム生成には off-axis 法[1]を採用することで，ビームエネルギーをニュートリノ振動確率が最大となる値に一致させ，高統計かつ低バックグラウンドを実現し，世界最高感度でニュートリノ振動の研究を可能としている。

T2K 実験ではスーパーカミオカンデで観測したニュートリノ反応数とエネルギー分布を測定し，ニュートリノ振動がある場合の予想と比較することで振動パラメータを測定する。この予想にはニュートリノビームの特性やニュートリノ反応断面積の理解が重要で，前置ニュートリノ測定器でニュートリノビームの測定とニュートリノ反応断面積の研究を行う。前置ニュートリノ測定器は，J-PARC 敷地内ニュートリノ生成標的から 280m 下流にある ND280 実験ホールに設置されている¹。前置測定器にはニュートリノビームのモニターとビーム方向測定を主目的とする INGRID [8] と，ビームフラックス，エネルギースペクトル，ニュートリノ種類，ニュートリノ反応断面積の研究を主目的とする ND280 Off-Axis(以下 ND280OA と略)の 2 種類の検出器システムから構成されている(図 1 参照)。INGRID はビーム軸中心に設置されており，ND280OA はビームから見てスー

パーカミオカンデの方向，つまり off-axis 位置に設置されている。ここでは，T2K 実験の前置ニュートリノ測定器 ND280OA に関して，最新の建設・運転状況の紹介を交えながら簡単に報告する。

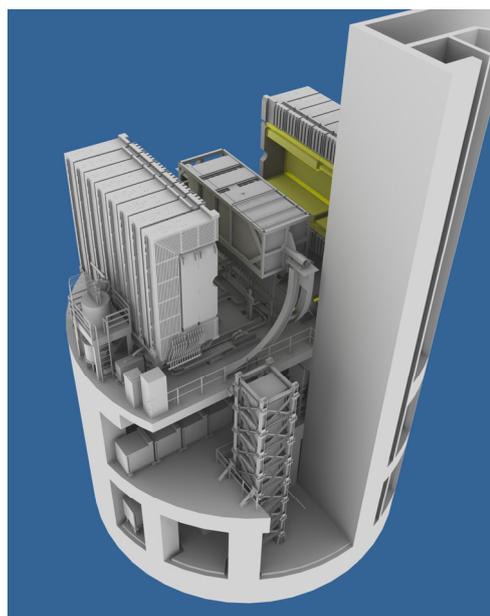


図 1 ND280 実験ホールに設置されている前置ニュートリノ測定器 INGRID と ND280OA の外観図

左下と中二階にタワー状と横一列に配置されているのが INGRID で，最上階に設置されているのが ND280OA。

2 前置ニュートリノ測定器概要

T2K 実験が 2004 年度に 5 ヵ年計画として承認され，それと同時に前置ニュートリノ測定器建設がプロジェクトとしてスタートした。2004 年 12 月にローマ大学でキックオフミーティングが開催され[9]，前置測定器建設のための組織，測定器デザインの基本方針，役割分担が決まり CDR[10]執

¹ ND280 の ND は Near Detector(前置測定器)の略。

筆²を開始し、それを元に各国への予算要求を行った。この後、主だった測定器(ECALを除く)は2009年秋までに建設を終え、2009年冬に測定器の設置を完了し、2010年初頭からニュートリノビームデータの収集を開始した。本原稿執筆中の2010年夏には残った測定器 ECAL の設置作業が進んでいる。

T2K前置ニュートリノ測定器ND280OAの詳細はCDR, TDR[11]に記述されているので、ここでは簡単にその目的をまとめ、デザインコンセプトと検出器の構成を紹介する。ND280OAの構成を図2-1に示す。

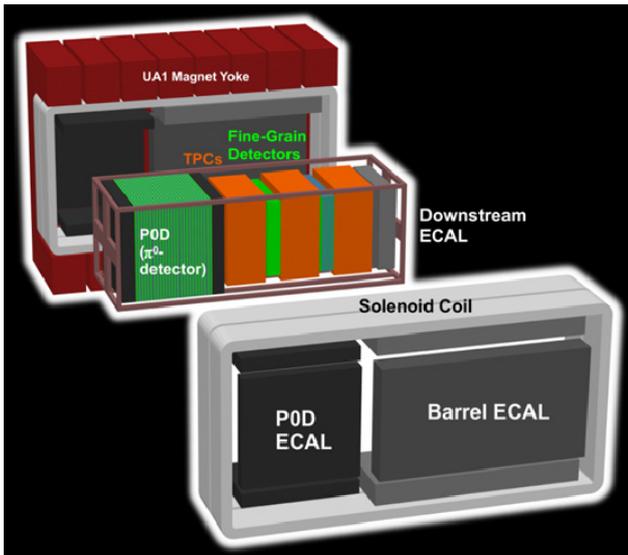


図 2-1 ND280OA の概略図

ND280OA に要求される性能としては：

1. ミューオンニュートリノフラックスを5%以下の精度で測定,
2. ミューオンニュートリノのエネルギー分布を、測定器のエネルギースケールの不定性2%以下で測定,
3. ビーム中の電子ニュートリノのフラックスを10%以下の精度で測定,
4. ニュートリノエネルギー測定の際のバックグラウンド反応である、荷電カレント非弾性散乱を10%以下の精度で測定,
5. 電子ニュートリノ測定のバックグラウンドとなる、非弾性散乱(主に中性カレント π^0 生成反応)を10%以下の精度で測定,

である。上記の要求を満たすために、荷電カレント反応で生成されるレプトンを大立体角にわたり高精度で測定でき

² 逸話であるが、CDR執筆のeditorはnative English speakerである英国人であったが、なかなか仕事が進まないの、結局それほど英語が得意でない日本人が担当することとなった。

るように、大型中空電磁石(ND280 Magnet:図2-1ではUA1 Magnetと記載されている)、3台のTPCを使ったトラッキング、細分割された高解像度ニュートリノ反応点検出器(FGD: Fine-Grained-Detector)、大立体角を覆う電磁カロリメータ(ECAL)とミュオン飛程検出器(SMRD: Side-Muon-Range-Detector)からなる。前置ニュートリノ測定器のタイプは後置測定器であるスーパーカミオカンデとまったく異なっているが、これはJ-PARC敷地内ではニュートリノビーム強度が強すぎ、一体型の大型水チェレンコフ測定器は多重イベントが発生し、うまく機能しないためである³。ND280OAでのレプトン(ミュオンと電子)識別にはECALのレスポンスとTPCでの dE/dx 測定が使われる。また、スーパーカミオカンデでは電子ニュートリノ探索時に中性カレント π^0 生成反応が主要なバックグラウンドとなるため、その測定のため π^0 検出器(POD)も設置されている。スーパーカミオカンデのニュートリノ反応標的が水であることから、FGDとPODは水標的を測定器内に持つ構造となっている。図2-2にT2K実験で観測したND280OAでのニュートリノ事象の一例を示す。

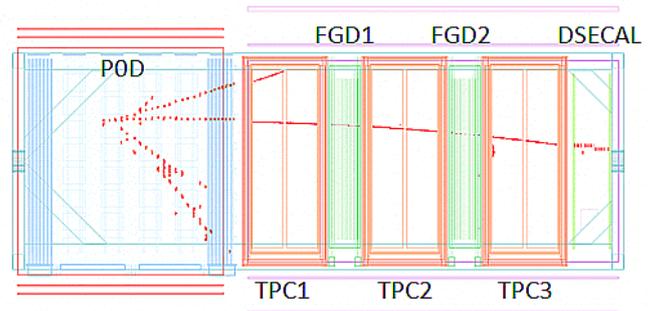


図 2-2 ND280OA で観測されたニュートリノ反応事象の側面図

図2-2では左からニュートリノが入射し、PODで反応を起こし、その後粒子の飛跡が、3台のTPC、2台のFGD、最下流のECAL(DSECAL)を通っているのが分かる。表1にND280OAで使われている測定器をまとめる。

ND280OAの中で日本の大学・研究所の担当はプロジェクト総括、施設関係全般、Magnet, FGD, SMRD, 各測定器の設置補助にわたる⁴。また、ND280OAのシンチレータを使った検出器ではシンチレータの波長変換ファイバー読み出し+新型半導体光検出器MPPC[12]を採用した。このMPPCの開発も主に日本人研究者が担当した[13]。

以下では、日本担当部分を中心にND280OAを紹介していく。T2K実験の測定器全般に関しては、[14]に簡単な紹介がある。

³ 小型の水チェレンコフ測定器は、ミュオンを検出器中で止められず運動量を測定できない、電磁シャワーが漏れエネルギーを測定できないなどで、うまく機能しない。

⁴ 外国の研究機関との共同担当部分を含んでいる。

表1 ND280OA の各測定器のまとめ

名前	種別	諸元
P0D	鉛(0.6mm) + シンチレータ	<ul style="list-style-type: none"> • 2.1×2.2×2.4 m³ • 16 トン • 10,400 チャンネル
TPC	TPC	<ul style="list-style-type: none"> • 2.5×2.5×0.9 m³ × 3台 • ガス 95% Ar+2% iso-C₄H₁₀ + 3% CF₄ • 124,416 チャンネル
FGD	シンチレータ トラッカー	<ul style="list-style-type: none"> • 2.3×2.4×0.37 m³ × 2台 • 1トン×2 • 8,448 チャンネル
ECAL	鉛(1.75mm) + シンチレータ	<ul style="list-style-type: none"> • DS-ECAL, Barrel-ECAL, P0D-ECAL で構成 • 74 トン(計 13 台) • 22,336 チャンネル
SMRD	鉄(48mm) + シンチレータ	<ul style="list-style-type: none"> • マグネットヨーク隙間に設置 • 4,016 チャンネル
Magnet	常伝導ダイ ポール電磁石	<ul style="list-style-type: none"> • 7.6×5.6×6.1 m³(内容量 88 m³) • 900 トン • 0.2 T

3 ND280 実験ホール

ニュートリノモニター棟(NM 棟)と呼ばれる建物に T2K 前置検出器は設置されている。NM 棟の基本的な考えかたは KEK/つくば での K2K 実験の前置検出器棟と同じで、建物といっても、前置検出器を設置するための地下の実験ホールが主な部分となっている。T2K ではニュートリノビームラインに沿った位置に設置するオン軸測定器 INGRID と、神岡のスーパーカミオカンデの方向に設置されるオフ軸測定器 ND280OA のふたつの測定器系のために、異なるレベルの地下階を用意しなければならない。そのため、実験ホールは、ND280OA が設置される地下約 23.1m の地下 1 階(B1)、INGRID の水平モジュールおよび読み出し機器などが設置される地下約 29.1m の架台床階(SS)、INGRID の垂直モジュールタワーの設置床となる地下約 33.5m の地下 2 階(B2)の三つの床レベルをもつ構造となっている。

ND280OA の電磁石は測定器が設置されるバスケットというフレーム構造体を二つに分割構成された電磁石で取り囲み、内部の測定器への設置・保守のために、分割された電磁石が移動する構造となっている。実験ホールの大きさ(直径 17.5m)は、この電磁石移動ができる最小の大きさ⁵に決められた。

⁵ ホールを大きくすると予算が高くなるため、マグネットが開閉できる最小の大きさとした。

4 ND280 Magnet

4.1 構成

ND280 Magnet は、かつて CERN の UA1 実験のために建設されたもので、CERN から寄贈された。UA1 実験の後、おなじく CERN の NOMARD 実験で使用されているので、T2K 実験で三度目ということになる。ND280 Magnet は Magnet 本体、電源、冷却水システム、制御系から構成され、また Magnet 本体はヨーク、コイル、移動システムから構成されている。スイス ETHZ の A. Rubbia 氏が責任者となったヨーロッパグループと日本グループが協力して Magnet の作業を行った。

4.2 Magnet 本体

ヨーク、コイル、架台、移動システムから構成される。ヨーク、コイル、架台は CERN で保管されていたものであるが、移動システムは DESY の ZEUS 実験で使用されていた油圧機器システムを再利用している。各機器・部材はヨーロッパグループが保守などを行い、輸送・設置作業は日本グループがヨーロッパグループと議論を重ねて進めた。

重量物・大型建造物の設置となるため、KEK の山岡広氏による耐震性にも配慮した構造解析が行われ、Magnet の固定方法、ヨークおよび架台への補強が決定された。ヨークは C 型(日本語だとコ型)と呼ばれる形状であるが、輸送コスト低減のため、これを分解、3 分割してコンテナ輸送し、J-PARC で組み立てて設置した。

C 型ヨークは一つ約 53 トンあり、実験ホール施設に巨大クレーンを設置して作業を行うと、そのための施設建設費用がばかにならないため、組み立て・設置は実験ホールが建設される前にクレーン車を使用して行った。(ちなみに、実験ホールには 10 トンクレーンが設置された。)

設置作業は 2007 年 4 月から 6 月の 3 ヶ月間をかけて行われた。最初に実験ホール B1 に架台システム(約 16 トン)などを設置し(図 4-1)、架台システムを担当しているドイツ Aachen グループによるシステムのテストを行い、その後にヨークの組み立て、設置を進めた(図 4-2)。ヨークに SMRD を挿入設置することから、設置精度として約 1mm 程度で作業が行われた。コイル設置では、クレーンでコイル(4 つで約 40 トン)をヨーク内部に移動すると、どうしてもゆれが起こってしまい、ヨーク内部におさめることが困難そうであったので、クレーンでコイルをしかるべき場所に吊っておき、ゆれがない状態でヨークの方を移動するという工夫をしている(図 4-3)。

Magnet 設置後も屋根がない状態のため、Magnet 全体をカバーで覆い、そのなかに除湿機を設置し、約 6 ヶ月後の(そのときは屋内となる)作業再開までの期間の養生を行った。



図 4-1 移動システムと架台

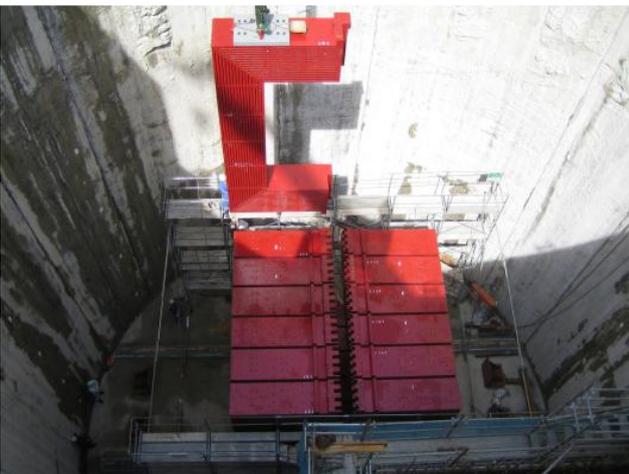


図 4-2 ヨークの設置
13 個目のヨークが降ろされている。

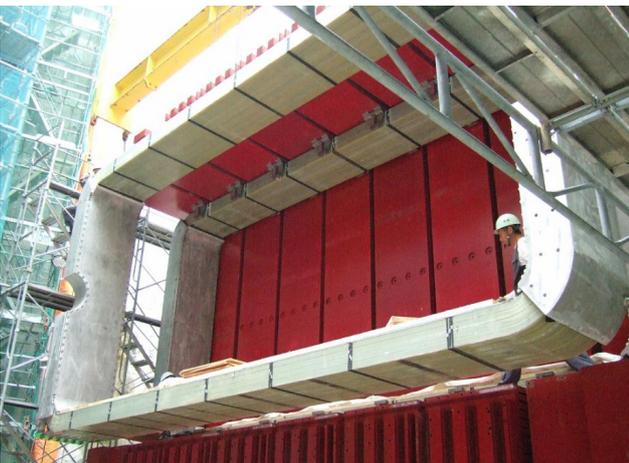


図 4-3 コイルの設置

ヨークの奥には一つ目のコイルが設置されている。コイルが吊られた状態でヨークを移動システムで移動し、ヨーク内部に設置。

4.3 Magnet 電源

Magnet 電源と Magnet コイルへの接続部分(バスバー)をフランスグループが担当し、機器の据付け、および AC, DC の配線を日本グループが現場の状況を説明し、Magnet

担当者と相談して行った。後述する冷却水システムと同じ 400 V 系に接続されていたが、Magnet 電源に起因する高調波成分が冷却水システムの制御系に問題となることがわかり、冷却水システムを別系統に接続し、Magnet 電源と 400 V を共有しないようにした。

400 V, 1000 A で定格 0.2 T 運転の計画であったが、1000 A の電力供給では 0.18 T 運転となってしまうことが判明したため、今年の夏のシャットダウン中に、現状の受電施設で許容される 1400 A に更新する。

4.4 冷却水システム

Magnet と Magnet 電源のために冷却水システムが設置されている。実験計画当初はチラーによるより冷たい冷却水が検討されていた。しかし、予算の面から冷却塔による約 30°C の冷却水に変更され、冷却塔方式が計画された。しかし、ND280OA では、TPC 内での温度勾配をおさえないこと、光検出器 MPPC の動作温度が高いとノイズが増えること、シンチレータ読み出し用の波長変換ファイバーが熱に弱いこと(推奨 25°C 以下)から、Magnet からの発熱がバスケット内の測定器に進入しないように熱遮蔽のシールドを設けるなどの措置が必要であった。そのようなことはシステムを複雑化するため、再度チラーによる冷却水システムを検討し、Magnet 担当のヨーロッパグループが価格をおさえてチラーによる冷却水システムを構築し、それを J-PARC に設置するという方法をとることとなった。チラーの冷却能力が高いため、冷凍保安関係の手続きなどが必要となり、KEK 低温グループの荻津氏、榎田氏の協力をいただいた。冷却水配管については冷却水システムの仕様にあわせた設計をヨーロッパグループが行い、日本グループと共同で現場での調整を行い設置した。

4.5 制御系

Magnet 電源、冷却水システムの制御および各種のモニターはヨーロッパグループが担当している。スペイングループがシステム全般を担当し、各機器の担当であるスイスグループ(Magnet および冷却水システム)とフランスグループ(Magnet 電源)と共同で制御系システムが構築されている。制御系機器本体は測定器読み出し機器が設置されている架台床(SS)に設置されている。

5 FGD

5.1 FGD のデザイン

FGD(Fine Grained Detector)は細分割された構造のシンチレータトラックで、ニュートリノ反応点検出と FGD 内で止まる低エネルギー粒子のトラッキングと識別を主目的とする。ニュートリノ反応ではミューオン、電子・陽電子、

陽子、中性子、 π 中間子、 γ 線が生成されるが、FGDは反応点に飛跡を残す荷電粒子の測定を主目的としている。そのため、FGDは荷電粒子に対して不感領域がないように、測定器の大部分がシンチレータのみで構成されている。この設計思想はK2K実験のSciBar測定器[15]のデザインを継承しており、SciBarよりもさらに細分割されたシンチレータを採用することで、より高解像度を達成できるようデザインされた。棒状シンチレータの形状は $0.96 \times 0.96 \times 184.3 \text{ cm}^3$ で、全数8,448本のシンチレータでFGD1とFGD2という2台の測定器を構成する。FGDの構造は図5-1に示すように、192本のシンチレータを並べて一層を形成し、その層をシンチレータ棒の縦方向と横方向を交互に変えた積層構造をしている。この構造から位置分解能 $0.96 \times 0.96 \text{ cm}^2$ の2次元イメージを側面図と上面図として記録できる。

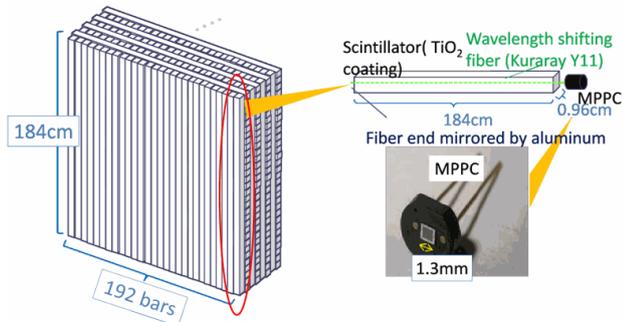


図 5-1 FGD 測定器の構成図

各シンチレータ棒は図5-2に示すように、中心に波長変換ファイバーを通す穴が空いていて、外側は酸化チタン(TiO_2)の反射材でコーティングされている。シンチレーション光は波長変換ファイバーの吸収・再発光過程を通して、光検出器MPPCで光量を記録する。

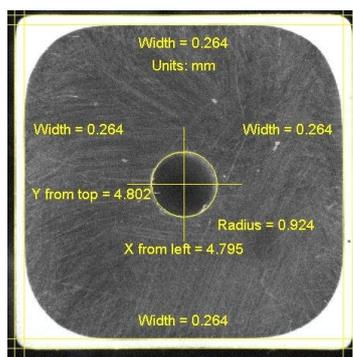


図 5-2 FGD シンチレータの断面図

大きさは $9.6 \times 9.6 \text{ mm}^2$ で中心に波長変換ファイバー用の穴が、外側に酸化チタンの反射材(白色)がある。

FGD1は計30層、合計5,760本のシンチレータで構成されている。FGD2は14層のシンチレータ層の間に厚さ2.5 cmの水標的層6層が組み込まれた構造(シンチレータ2層毎に水1層)をしており、ニュートリノと水の反応断面積を測定できるようデザインされている。2台のFGDは3台のTPC

に挟まれるように設置され、FGD1がビーム方向上流に位置する。

FGDのエレクトロニクスはT2K実験のTPC用にSaclayで開発されたAFTERチップを使用しており、信号は100 nsecの時定数をもつプリアンプで成形された後、50 MHz (20 nsec毎)で10 μsec にわたってサンプリングされる。エレクトロニクスは1チャンネル12ビットの分解能を持ち、信号を2分割し減衰比率を1:8に調整することで、実効15ビットの分解能を有している。また、事象毎にパルス波形をフィットすることで、3 nsecの時間分解能を達成する。

5.2 FGDの製作・テスト・移送・設置

FGDの制作は日本とカナダの研究者が協力して行った[16]。構造設計はTRIUMF研究所で、シンチレータ生産もカナダの企業とカナダの研究者が協力して行った。波長変換ファイバーはクラレ社製のY11を購入した。ファイバーの端面には米国フェルミ研で反射コーティングが施された。光検出器MPPCは日本で開発、購入、試験が行われ、その詳細は[8]の第4.1章「MPPCの大量試験」に詳しい記述がある。また、波長変換ファイバーとMPPCの接続方式も日本で開発した。FGDの制作は2008年に行われ、2008年秋からTRIUMF研究所のM11ビームラインでビーム試験を行った。

ビームテストでは100 ~ 400 MeV/cの電子、ミューオン、 π 、陽子を測定器に入射し、測定器のレスポンスの測定とエレクトロニクスのデバッグを主に行った。測定器のレスポンスとしては、MPPCのゲインと印加電圧、シンチレータ光量、ファイバーの減衰長、各粒子の飛程とエネルギー損失の測定が行われた。また、FGDのトラッキングアルゴリズムの開発も行われ、各シンチレータのヒットを時間でクラスタリングすることで、MPPCノイズを効率的に除去することにも成功した。ビームテスト時のFGDのイベントディスプレイを図5-3に示す。図5-3(右)ではヒットを時間クラスタリングすることで、効率的にノイズヒットが除去され、ビーム粒子によるヒットおよびそのトラックが明確に識別できる。

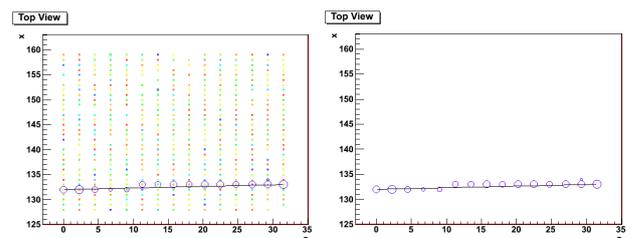


図 5-3 ビームテスト時のFGDのイベントディスプレイ
左図は時間クラスタリング前で、MPPCノイズヒットが多数見られる。右図は時間クラスタリングを行った後で、ビーム粒子の飛跡が明確に分かる。

ビームテストは2009年5月まで継続し、測定器のレスポンスの詳細な理解を進めた。その後2009年夏にFGDはTRIUMFからJ-PARCに移送され、2009年9月にND280ホールに設置された。図5-4、図5-5にJ-PARCに到着した時のFGDとND280ホールに設置される時のFGDの様子を示す。



図5-4 ND280アセンブリーホールでFGDを直立させた時の様子
写真上側の人物は京都大学院生の家城佳君、右側の人物はFGD責任者のUBCのScott Oser氏。



図5-5 ND280ホールでのFGDインストールの瞬間

5.3 FGDのデータ解析

ニュートリノビームデータの解析は第8章でまとめるので、ここではインストール前に行われたFGDのデータ解析を簡単に紹介する。FGDがJ-PARCに移設された直後に、全チャンネルのMPPCへの適正印加電圧の測定が行われ、それを元に各チャンネルのゲインを調整した。図5-6にFGDのチャンネルIDとゲイン(1光電子に対応するADC値)の相関を示す。すべてのチャンネルのゲインが40ADC値前後でよく調整されていることが分かる。また、この際に不良チャンネルのチェックと修理も行った。

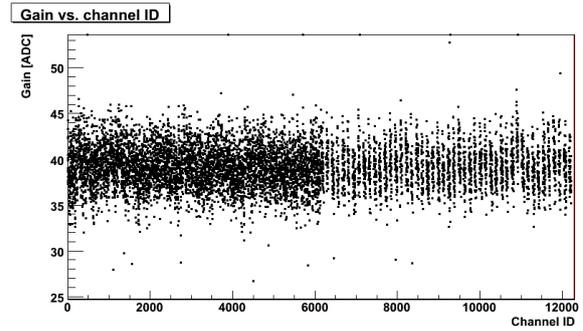


図5-6 FGDの各チャンネルのゲインの値

ND280ホールのマグネット内に設置後はFGD1とFGD2の同時トリガー事象を使って宇宙線データを取り、各チャンネルの光量、ゲインの最終確認を行った。

図5-7に宇宙線事象のイベントディスプレイを、図5-8に宇宙線イベントの横方向から見たイベント数分布を示す。FGD1、FGD2ともうまく機能していることが分かる。

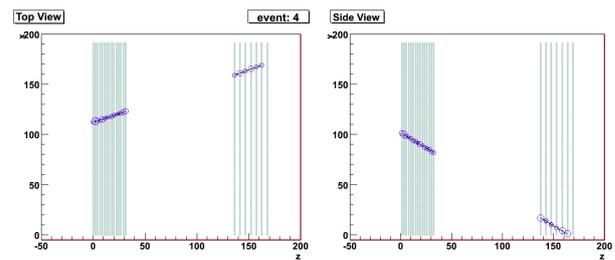


図5-7 宇宙線イベントの上面図(左)と側面図(右)

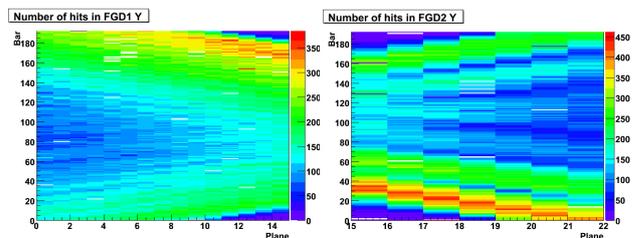


図5-8 宇宙線イベントの側面から見たイベント数分布
左がFGD1の、右図がFGD2のイベント数。

図5-7では、宇宙線が左上から入射し、右下に抜けていることがわかる。また図5-8で、ND280ホールの位置関係のため、FGD1上部からFGD2下部に抜けている宇宙線が多いことが分かる。この宇宙線データを使って、シンチレータの光量を確認し、シンチレータの応答時間の測定を行った。図5-9にFGD1とFGD2で測定した宇宙線事象の時間と、その宇宙線トラックの角度相関を示す。この図より、FGD1とFGD2の応答時間差は約10nsec(～3mの飛行距離に対応)、時間分解能は数nsecになっていることが分かる。また、宇宙線データを使って、各シンチレータの検出効率をシンチレータの入射位置毎に求めたのが図5-10である。

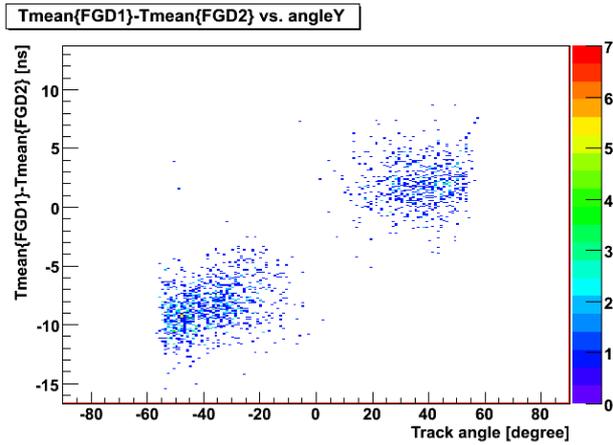


図 5-9 FGD1 と FGD2 で測定した宇宙線事象の時間とその宇宙線トラックの角度の相関

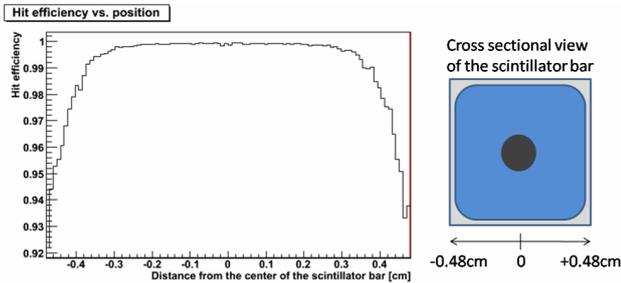


図 5-10 シンチレータの検出効率の位置依存性

シンチレータの中心部では 99.8% 以上の検出効率が確認でき、シンチレータ端でも 90% 以上の検出効率が確認できた。シンチレータ端で検出効率が落ちているのは酸化チタン層による不感領域のためである。

6 SMRD

6.1 SMRD のデザイン・開発

ND280OA の電磁石のリターンヨークは、厚さ 48mm の鉄板 16 枚を 1 層毎に 17mm のギャップを持たせて積層した構造となっている。この電磁石を最初に使用した CERN でのコライダー実験 UA1 では、このギャップにシンチレータを挿入してタワー型のハドロンカロリメータとして使用していた。

ND280OA では、ミューオンニュートリノの荷電カレント反応を集めて入射したニュートリノのエネルギースペクトルの再構成を行う。図 6-1 のように内側から 3 層目(場所によっては 6 層目)までの各ギャップに厚さ 7mm のプラスチックシンチレータをインストールして、ニュートリノ反応から発生する荷電粒子の粒子識別とエネルギー測定を行うためのミューオン飛程検出器とし、SMRD(Side Muon Range Detector) と名づけた。

各 C 型ヨークのビーム方向に沿った長さはどれも 87.6cm だが、シンチレータを挿入できるスペースの幅は、水平方向は 70cm、垂直方向は 91cm と異なるため、水平用には 16.7cm × 87cm のカウンターを 4 枚、垂直用には 17.5cm × 87cm のカウンターを 5 枚並べることにした。

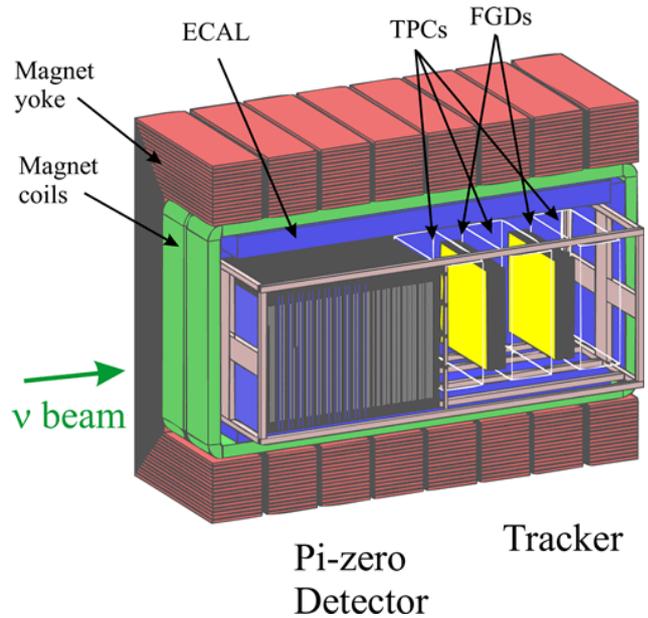


図 6-1 濃灰色(赤色)の C 型ヨーク内の淡灰色(水色)で表示した部分に SMRD シンチレータを実装した(磁石のヨークとコイルについては片側半分のみ表示している)。

プラスチックシンチレータの表面に彫った溝にクラレ社製 Y11 波長変換ファイバー 1mmφ を埋め込み、ファイバーの両端面からの光を浜松ホトニクス社製 MPPC で読み出す方式を採った。幅 16.7/17.5cm、長さ 87cm のシンチレータを 1 本の波長変換ファイバーで読み出すため、溝の形は図 6-2 のように S 字に蛇行する形にした。

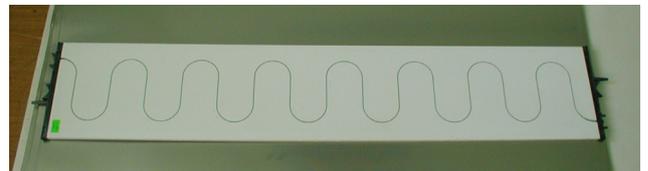


図 6-2 S 字状溝を彫った SMRD シンチレータ

S 字に蛇行する形状の波長変換ファイバーでの読み出しで、全面にわたって検出効率が確保できるかが鍵となるが、神戸大学における評価テストでは、最少電離粒子の通過に対して 7mm の厚さでも検出器全面にわたって MPPC で 10 光電子以上の信号量が得られ、十分な検出効率が確保できていることを確認した。さらにファイバーの両端から読み出した信号の時間差と 87cm の長さ方向に対する粒子の通過位置との相関を測定したところ、図 6-3 のような直線性のよい相関が得られ、約 6.5cm の精度で通過位置を特定できることも確認した。

MPPC の読み出しエレクトロニクスは、INGRID や ND280OA の ECAL や P0D と同じく、Trip-t Front-end Board(TFB)を使用した。MPPCからの信号の電荷量(ADC)およびタイミング(TDC)情報を収集できるようになっており、MPPC への印加電圧の調整・温度モニターなどの機能

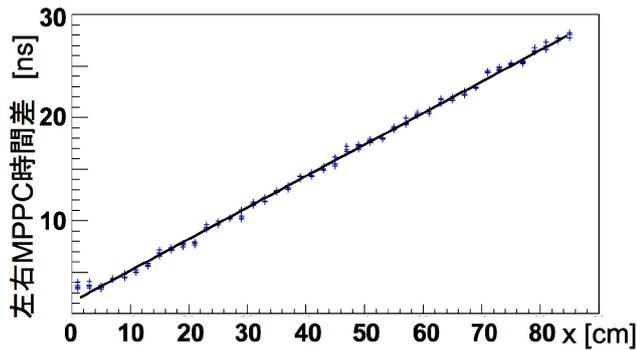


図 6-3 両ファイバー端で得られた信号の時間差と粒子の通過位置との相関

も備えている。SMRD では、チャンネル数の多い少ないにかかわらず一つのタワーにつき 1 枚の TFB(max.64 ch.) を割り当て、それぞれ 24 ~ 60 チャンネルの読み出しを行っている。

T2K での TFB を使用しての読み出しシステムについては、参考文献[8]を参照されたい。

6.2 SMRD の製作・設置

表面に白色乱反射層を作るためにエッチング処理を施したロシア製押出式シンチレータにロシアの INR グループが溝彫りの加工を行った。日本側から送ったクラレの波長変換ファイバーの埋め込みおよび遮光パッケージなどカウンターの製作も INR グループが行った。

ロシアから J-PARC に輸送されたカウンターを 4 ないし 5 個並べて、それぞれの間に断面が H 字型のアルミチャンネルの治具をはさんで一体化し、各カウンター両端面に MPPC と信号ケーブルを取り付け、これを設置作業のための 1 単位とし、SMRD モジュールと呼んでいる(図 6-4)。水平用・垂直用あわせて 2,008 個のカウンターを使用し、440 個の SMRD モジュールを製作した。アルミチャンネルの治具はインストール時の機械的なガイド・養生を兼ねて

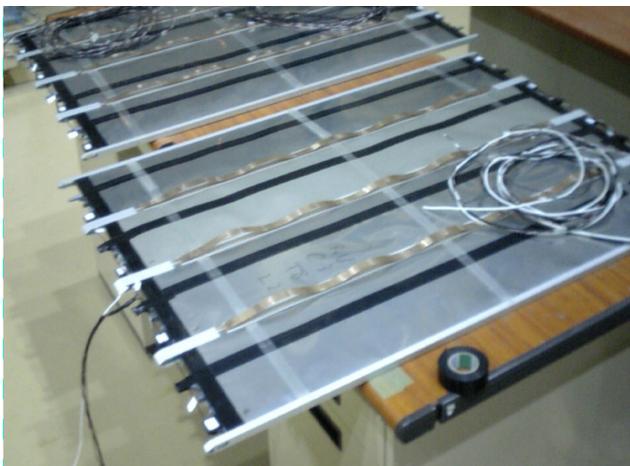


図 6-4 SMRD モジュール

複数のカウンターをインストール治具兼用アクセサリで一体化し、MPPC、信号ケーブルを装着した(この写真は水平用モジュール)。

おり、カウンターの遮光パッケージが傷つくことを避けるとともに、両端部がくさび型になっていることで C 型ヨークの段差で引っ掛かったりすることのないような工夫がしてある。この治具の実機のデザインおよび製作はポーランドのグループが行った。

第 4.2 章で述べた通り、電磁石の C 型ヨークの再組み立て作業および大型クレーン車で地下の実験ホールへ降ろして架台システムの上に並べる作業は、実験ホールの地上建屋を建設する前の露天での作業となる。これに対して、SMRD モジュールのインストール作業は、地上建屋も含めた実験ホールの完成後に行う。架台システムの上にすべての C 型ヨークを並べてしまうとヨーク相互の間隔はわずか 80mm しかない。このため、電磁石中央部の C 型ヨークのギャップ内に SMRD モジュールをインストールするには一番端の C 型ヨークのギャップから挿入して、隣の C 型ヨークへと順送りしながら設置するしかない。

隣接する C 型ヨークのギャップのアライメントがずれると、この順送りの際に途中で詰まることになる。アルミチャンネルの治具の端部をくさび型にしたことで、安全係数も含めて 2mm 程度の段差があっても乗り越えられるようになっている。C 型ヨークは 1 個で 53 トンという巨大重量物であるが、架台システムへの設置作業は、水平方向も垂直方向も約 1mm のアライメント精度が実現でき、予定していたすべてのギャップに SMRD モジュールを順調に設置することができた。

C 型ヨークは架台システムを含めると床から 8m 近くの高さにおよぶ一方で、一番端の C 型ヨークから実験ホールの壁面までの距離は、場所によっては 1m 程度しかない⁶。このような狭い場所で任意の高さのギャップに SMRD モジュールを挿入するため、図 6-5 のような高所作業車(シザースリフト)を使用することにした。この運転には資格が必要なため、設置作業を行う日本人、ポーランド人、アメリカ人は全員講習を受けて資格を取得することとなった。より内側の C 型ヨークのギャップに順送りするための専用ツールの設計・製作もポーランドグループが行った。

カウンターからモジュールへのアSEMBル作業にはロシア人も加わり、2009 年の 2 月~7 月にわたって、途中でメンバーの入れ替わりなどもあり、4 ヶ国のべ 25 人の多国籍部隊での作業を続けた。高所で大きなものを取り扱うため、緊張を強いられる作業が連日続くこととなった。全期間にわたって現地に常駐してコーディネータと陣頭指揮を執った神戸大大学院生の矢野孝臣君は、多国籍部隊のチームワークを高める意味からもオフの時間における交流なども意識的に行った。

⁶ 脚注 5 で述べたように、予算を抑えるために実験ホールは最小限の大きさになっている。



図6-5 シザースリフトと自作の専用ツールを使用してのインストール作業(この写真は垂直用モジュール)

以上のような有形無形の努力が功を奏し、SMRD の設置作業は大きなトラブルもなく当初のスケジュール通りに完遂することができた。

6.3 SMRD のデータ解析

インストールの作業と並行して、インストールが完了して DAQ システムへの配線作業が済んだものからデータの読み出しを開始した。バックグラウンドの頻度や波高分布に異常がないかをチェックすることで配線ミスやデバイスの故障の有無を確かめ、場合によってはリプレース作業などを行った。

全体のインストール作業完了後、SMRD や DS-ECAL をトリガーに使う宇宙線データの収集を開始した。図 6-6 にその一例を示す。

ニュートリノビームデータの解析については第 8 章にまとめられる。

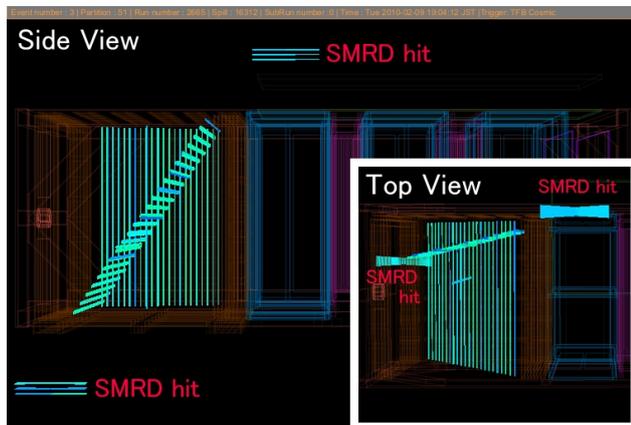


図 6-6 SMRD で捉えた宇宙線イベント

内部検出器のヒットとの対応が確認できる(磁場が OFF の時のイベント)。

7 TPC/P0D/ECAL

TPC, P0D, ECAL に関しては、測定器建設そのものの日本側研究者の責任分担がなかったため⁷,ここでは各検出器の性能を簡単に紹介するに止める。

7.1 TPC

TPC(Time Projection Chamber)はニュートリノ反応で生成された荷電粒子を識別し、その運動量を測定することが主目的の検出器である。TPC には水平方向に 0.2T の磁場が印加されており、通過する荷電粒子は鉛直方向に曲げられる。そして、TPC でその曲率を測定することで運動量が測定できる。また荷電粒子のエネルギー損失 (dE/dx) を測定することで、電子、ミューオン (π を含む)、陽子を識別することが可能である。

T2K 実験では外形、幅 2.5m、高さ 2.5m、奥行 0.9m の大型 TPC を 3 台制作した。ガスは拡散の少ない 95% Ar + 2% iso-C₄H₁₀ + 3% CF₄ を採用し、モジュール外層に CO₂ を満たすことで、不純物混入を抑えている。TPC 中、電子は磁場のかかっている方向(水平方向)にドリフトし(ドリフト長約 1m)、そのドリフト速度は 78.5mm/ μ sec である。電子のドリフト端かつ増幅部には最新の基盤技術で製作されたマイクロメガス (micromegas MICRO MESH GAS counter) を採用した。マイクロメガスは 1 モジュールの大きさが 36×34cm² で、6.9×9.7mm² のパッドが 1,728 チャンネルある。1 TPC モジュールには、片端 12 枚 (2×6)、両端で 24 枚のマイクロメガスを使用する。3 台の TPC では計 72 枚のマイクロメガス、合計 12 万チャンネルの読み出しパッドがある。ビーム方向に向かうトラックに対し、垂直方向に 0.6mm、水平方向(ドリフト方向)に 1.42mm の位置分解能を達成している。運動量分解能は 1GeV/c で約 7%⁸ を達成している。

データ収集システムは、Saclay 研究所で開発された AFTER チップをフロントエンド部に総数 1,728 個使用する。エレクトロニクスは 25MHz (40nsec 毎) で稼働し、20 μ sec にわたって信号をサンプリングできる。

7.2 P0D

P0D(Pi 0[Zero] Detector)は最上流に設置された π^0 生成反応測定のために特化した検出器である。P0D は 0.6mm 厚の鉛薄膜と厚さ 1.7cm 厚の分割シンチレータのサンドイッチ構造を採用したシンチレータトラッカーである。各シンチレータは幅 3.25cm、高さ 1.7cm、長さ 210cm (もしくは 223cm) の三角柱シンチレータ棒で、126 本(もし

⁷ TPC, P0D, ECAL に関して、ND280OA 全体としてのプロジェクトコーディネーション、移設補助、設置補助、技術選択・開発に関するアドバイスなどには、日本側研究者が深く関わっている。

⁸ TPC の運動量分解能は TPC 読み出しのパッドサイズ (6.9×9.7mm²) による位置分解能によって主に決まっている。

くは134本)で1層を構成する。P0Dは三角形シンチレータを採用することで、粒子の入射位置による光量依存性を測定し、シンチレータ内での粒子の通過位置を測定できる。P0Dは合計40層の鉛箔+シンチレータで構成され、外形は $2.1 \times 2.2 \times 2.4 \text{ m}^3$ 、総重量は16トンとなる。また各層の隙間には水標的層が組み込まれており、水標的での π^0 生成断面積が測定可能である。

7.3 ECAL

ECAL(Electromagnetic Calorimeter)はND280OAではマグネット内側の最外層に位置し、P0D、TPC、FGDで起こったニュートリノ反応で生成される電子と γ 線(主に π^0 起源)の電磁シャワーを捕え、エネルギーを測定する装置である。ECALは最下流に設置されるDS-ECAL(Down Stream ECAL)、P0Dの横を覆うP0D-ECAL、TPCとFGDの横側を覆うBarrel-ECALからなる。ECALはフェルミ研で製造された断面 $4 \times 1 \text{ cm}^2$ の抽出型シンチレータを採用している。鉛層はDS-ECALとBarrel-ECALは1.75mm厚、P0D-ECALは5mm厚である。DS-ECALは全34層で $11 X_0$ (放射長)、Barrel-ECALは全32層で $10.5 X_0$ 、P0D-ECALは6層で $4.5 X_0$ とデザインされている。P0D-ECALの厚みが薄いのは、P0Dそのものが電磁シャワーに対して厚みを持っており、漏れてくる電磁シャワーを捕えればよいからである。各モジュールの大きさはDS-ECALが $250 \times 250 \times 50 \text{ cm}^3$ で重量6トン、Barrel-ECALは、上下に設置するモジュールが $150 \times 400 \times 50 \text{ cm}^3$ で7トン、サイドに設置するモジュールが $250 \times 400 \times 50 \text{ cm}^3$ で10トンである。P0D-ECALも2種類あり、サイドモジュールが $250 \times 250 \times 30 \text{ cm}^3$ で4トン、上下モジュールが $210 \times 150 \times 30 \text{ cm}^3$ で3トンとなっている。

ECALはイギリスの予算の関係で、2009年中はDS-ECALのみが設置され、残りのモジュールは2010年夏にインストール中である。原稿執筆中の現時点で南側のBarrel-ECALとP0D-ECALがマグネットヨークに設置されている。2010年夏に設置されたBarrel-ECALの様子を図7-1に示す。



図7-1 2010年夏(8月時点)にマグネット内側に設置された直後のBarrel-ECAL

8 ニュートリノビームデータの解析

図8-1に示すように、ND280OAは2009年中にECALの一部のモジュールを除く全測定器の設置が完了し、2010年1月からニュートリノビームデータの収集を開始した。



図8-1 2009年に設置されたND280OA各測定器の様子

右上からP0D、TPC1、FGD1、TPC2、FGD2、TPC3、DS-ECALと続く。マグネットは片側だけが閉められている。SMRDはマグネットヨーク隙間に設置されている。

2010年データ収集開始直後、図8-2のようにND280OAで起こったニュートリノ事象が記録された。

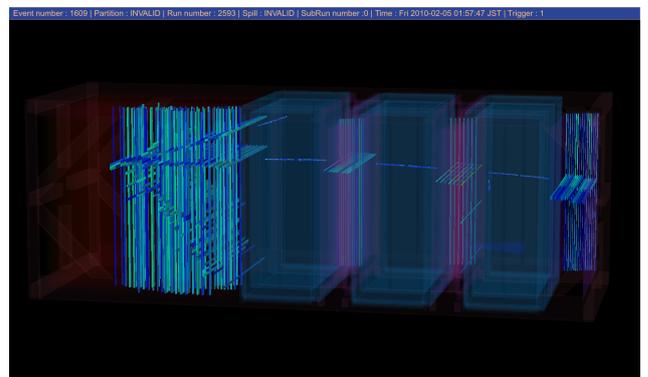


図8-2 ND280OAで観測されたニュートリノイベントの3次元イベントディスプレイ(図3はこの事象の2次元版)

実験データとしては、ランダムトリガー、各種宇宙線トリガー、ビームトリガーのデータを記録している。ビームトリガーはJ-PARCの速い取り出しのキッカーへの信号と同種のを遅延させて使用している。T2Kでは、ビームが発射された時点のイベントはニュートリノ反応の有無に関わらず、すべて記録する。T2K実験は現在581nsecサイクルの6バンチの陽子ビームでニュートリノ生成を行っている。図8-3と8-4にFGDとSMRD⁹で記録されたビームイベントのビーム発射時を基準としたイベントの時間分布を示す。陽子ビームの6バンチ構造に対応して、ニュー

⁹ SMRDの電子学であるTFBでのデータ収集は、そのタイミングに同期させ、ゲート時間480nsec、リセット時間100nsecとしてデータ収集を行っている。

トリノ事象が6バンチに均等に分布していることが分かる。また、ピークとピーク間のイベントの数からビーム起源の事象とそれ以外のバックグラウンド事象(主に宇宙線事象)のS/N比も極めてよいことが分かる。

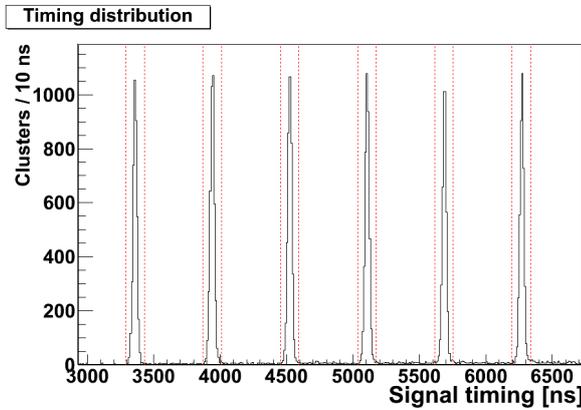


図 8-3 FGD で測定されたニュートリノ事象発生 の時間分布

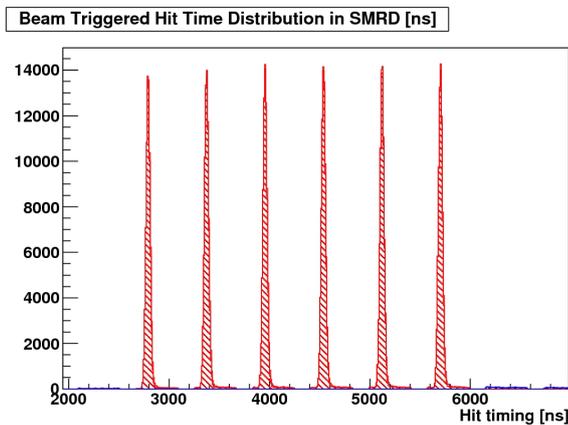


図 8-4 SMRD で観測されたヒットのビームサイクルに対する時間分布

次に図 8-5 と図 8-6 に FGD と SMRD で観測されたニュートリノ事象数を標的に入射した陽子数(POT Protons on Target)で規格化した値を示す。

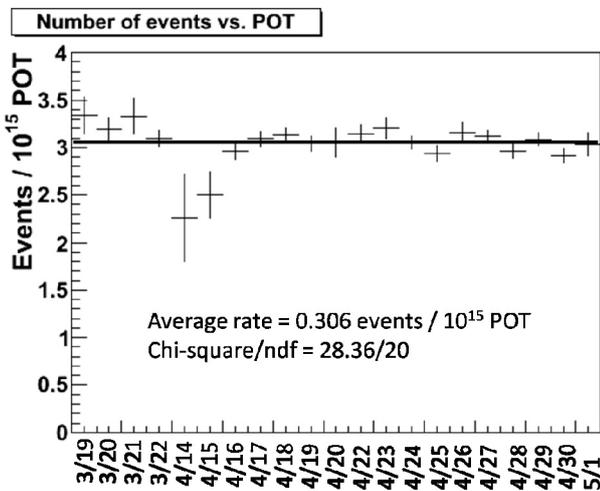


図 8-5 FGD のイベント数 標的当たりの陽子数(POT)で規格化している。

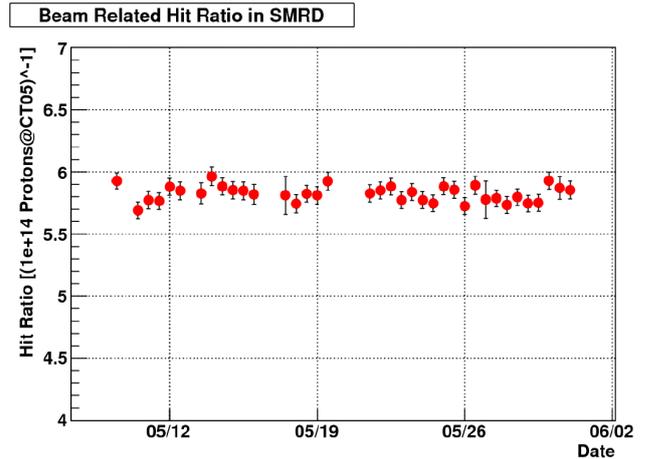


図 8-6 標的あたりの陽子数(POT)で規格化した SMRD でのヒット数

これより, ND280OA は安定してニュートリノビームデータを収集していることが分かる。これらの物理解析には, 京都大学の家城君と神戸大学の矢野君が大活躍している。

T2K 実験は 2010 年の 1 月から 6 月にかけて物理データを収集し, この間に 3.35×10^{19} POT のデータを記録した。図 8-7 に, T2K 実験 2010 年前半にニュートリノ生成標的に送られた陽子数を示す。

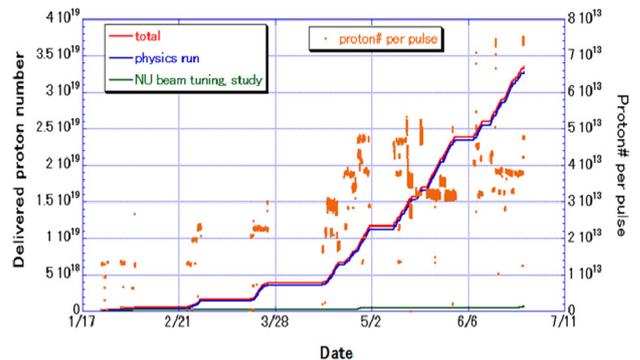


図 8-7 T2K 実験 2010 年前半にニュートリノ生成標的に送られた陽子数(折れ線: 左軸)と加速器で加速されたパルス当たりの陽子数(点: 右軸)

ND280OA の高度な解析は現在進行中で, まだ外部に出せる結果は出ていない。ここで, ND280OA の性能を示す結果として, ND280OA で記録したニュートリノビーム事象で, TPC で観測された荷電粒子の運動量と dE/dx の相関を図 8-8(負電荷トラック)と図 8-9(正電荷トラック)を示す。ニュートリノ反応で生成されるミューオンは主に負電荷をもち, T2K のエネルギー領域で主反応である準弾性散乱($\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$)で生成される陽子は正電荷をもち, ミューオンは minimum ionization で dE/dx が小さく, 逆に速度の遅い陽子は大きな dE/dx を持つことが図 8-8 と図 8-9 から見てとれる。また, 図 8-9 には π 中間子にくわえ, 運動量の小さいところに電磁シャワーでの対生成による陽電子も観測されている。図より, TPC が優れた粒子識別能力を有することが見てとれる。今後, さらに物理解析を進めていく予定である。

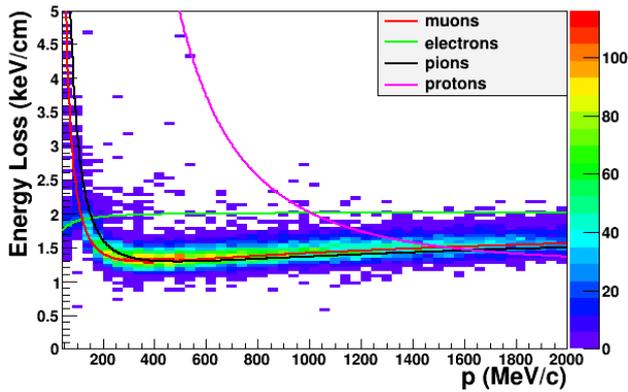


図 8-8 TPC で観測された負電荷トラックの運動量と dE/dx の相関図

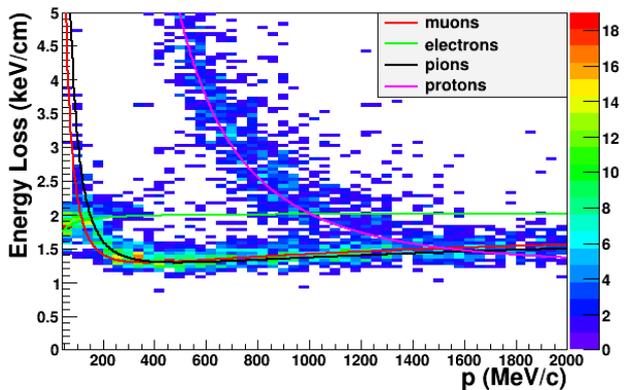


図 8-9 TPC で観測された正電荷トラックの運動量と dE/dx の相関図

9 まとめと今後

2004年に5ヵ年計画として承認された T2K 実験は、2009年4月に初のニュートリノビームの生成に成功し、2010年から物理ランを開始した。ND280 プロジェクトに関しては、日本で承認された2004年から、諸外国の測定装置の分担決定、予算要求、グループ結成が始まり、測定器のデザインの雛型ができたのが2005年、Technical Design Report に関しては2006年であり、その後約4年でこれだけ複雑な測定装置を国際協力で遅延なく建設できたことは、奇跡に近いと実感している。ND280 測定器の建設には T2K 実験参加国の内、11ヶ国(日米加仏英西伊独瑞波露)が参加し、総研究者数約300名強(概算)、総建設費は概算で約30億円¹⁰となる。この ND280 測定器を実現した T2K 共同実験者全員と T2K 実験をサポートして下さった方々に心から感謝の意を表したい。

T2K 実験は、今後より多くのデータを収集し、未発見のニュートリノ振動モードである電子ニュートリノ出現事象の発見にチャレンジする。そして、電子ニュートリノ出現事象を発見し3世代間のニュートリノ振動の枠組みを確立

した後は、ニュートリノ振動における粒子と反粒子の対称性の破れの研究を開始する予定である。これらの物理プログラムは始まったばかりであり、今後 J-PARC の大強度ニュートリノビームを軸に、ニュートリノ物理はより発展していくと考える。また、T2K 前置ニュートリノ測定器も、今後のニュートリノ物理に要求される、より高精度な測定を目指し、測定装置の性能を最大限引き出せるよう、装置較正、解析プログラムの開発を続けて行く。また、必要であれば、測定装置の改良およびアップグレードを視野に入れ、研究を進める予定である。今後、T2K 実験の進展と、そこからもたらされる結果に期待してもらいたい。

参考文献

- [1] 小林隆, 「T2K 実験の概要」, 高エネルギーニュース **28-2**, 62 (2009).
- [2] 藤井芳昭, 山田善一, 「ニュートリノ実験施設の概要」, 高エネルギーニュース **28-2**, 67 (2009).
- [3] 荻津透, 横田康博, 「J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導複合磁場電磁石システムの開発」, 高エネルギーニュース **28-2**, 76 (2009).
- [4] 柴田政宏, Nicholas C. Hastings, 石井孝信, 角野秀一, 「T2K実験の陽子ビームモニター」, 高エネルギーニュース **28-4**, 239 (2010).
- [5] 市川温子, 関口哲郎, 中平武, 「T2K 実験ニュートリノ生成機器」, 高エネルギーニュース **28-4**, 246 (2010).
- [6] 鈴木聡, 坂下健, 「T2K ニュートリノビームライン制御システム」, 高エネルギーニュース **28-4**, 255 (2010).
- [7] 松岡広大, 久保一, 横山将志, 「T2K 実験ミューオンモニターの開発」, 高エネルギーニュース **29-1**, 1 (2010).
- [8] 南野彰宏, 大谷将士, 「T2K 実験ニュートリノビームモニター(INGRID)」, 高エネルギーニュース **29-1**, 10 (2010).
- [9] T2K-ND280 Workshop in Rome, December 6-8 (2004): <http://www.roma1.infn.it/people/ludovici/meeting/nd280.html>

¹⁰ ND280 測定装置の建設費に関しては、各国で予算の勘定の仕方が異なるため、各国が独立にそれぞれの計算方法で行っており、建設費総額に関する公式な値はない。

- [10] T2K-ND280 CDR (Conceptual Design Report)
<http://www.nd280.org/documents/cdr.pdf>
- [11] T2K-ND280 TDR (Technical Design Report)
[http://www.nd280.org/convenors/
ND280 Review document 2006/tdr.pdf](http://www.nd280.org/convenors/ND280%20Review%20document%202006/tdr.pdf)
- [12] 横山将志, 魚住聖, 「Multi Pixel Photon Counter
の研究開発」, 高エネルギーニュース **26-3**, 216 (2007).
- [13] M. Yokoyama *et al.*, “*Performance of Multi-Pixel Photon Counters for the T2K near detectors*”, Nucl. Instrum. Meth. A **622**, 567-573 (2010).
- [14] 中家剛, 横山将志, 特集—「J-PARC 実験を支える
検出器(T2K ニュートリノ実験の検出器)」, 放射線 **36-3**,
117-130 (2010年9月).
- [15] 中家剛, 「K2K-SciBar 検出器」, 高エネルギーニュー
ス **22-4**, 124 (2004).
- [16] 家城佳, “*Construction and Performance of Fine
Grained Detector for T2K Experiment*”, 京都大学理学
研究科修士論文 2010年:
[http://www-he.sephys.kyoto-u.ac.jp/
theses/master/iekikei_mt.pdf](http://www-he.sephys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/iekikei_mt.pdf)