

T2K 実験ニュートリノビームモニター(INGRID)

京都大学大学院理学研究科

南野 彰宏, 大谷 将士

minamino@scphys.kyoto-u.ac.jp, masashi.o@scphys.kyoto-u.ac.jp

2010年5月28日

1 はじめに

2009年4月に開始した東海-神岡間 長期線ニュートリノ振動実験(以下 T2K 実験)は、茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC の 50 GeV シンクロトロンを用いて生成したほぼ純粋なミューオンニュートリノビームを、295 km 離れた岐阜県飛騨市の5万トン水チェレンコフ検出器, スーパーカミオカンデ(Super-K)で観測する実験である。大強度ニュートリノビームと後述する off-axis 法により, 世界最高の精度でニュートリノ振動の測定を行う[1]。

T2K 実験では, ビーム軸をスーパーカミオカンデ(以下 SK)に向かう方向から数度ずらす off-axis 法を採用する。この手法を用いると SK 方向にシャープなエネルギー分布を持つニュートリノビームを作ることが可能となり, そのピークエネルギーは off-axis の角度によって調整できる。SK での振動確率が最大となるエネルギー領域のフラックスを増やし, ν_e 事象探索時のバックグラウンドとなる高エネルギー領域のフラックスを減少させるために, T2K 実験では, off-axis の角度として 2.5 度を選択した。この手法では, 実験がビーム方向のずれに非常に敏感になるため, ニュートリノビームの方向・安定性の測定・監視を行うシステムが必須である。この目的のために陽子標的から 280 m 下流の前置検出器ホールにニュートリノビームモニターを設置した(図 1-1)。

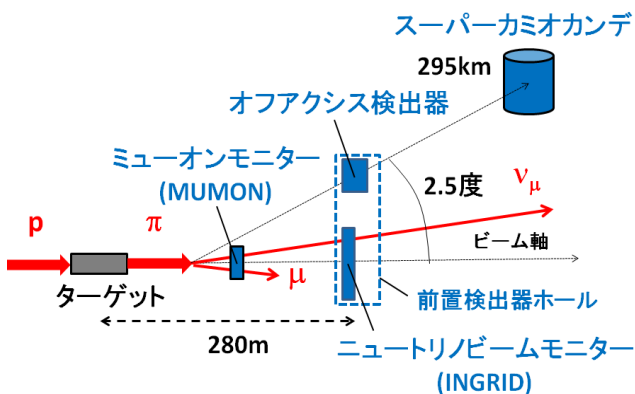


図 1-1 Off-axis 法とニュートリノビームモニター

ニュートリノビームモニターの開発は, 京都大学, フランス Ecole Polytechnique, 高エネルギー加速器研究機構, 大阪市立大学が中心となって行った。2005 年に R&D を開始し, 2008 年 4 月から 2009 年 8 月の間に検出器の製作および設置を完了し, 2009 年 4 月から 12 月のビームコミッションングを無事終え, 現在は 2010 年 1 月から始まった物理ランの最中である。本稿では, ニュートリノビームモニターの開発の経緯と現状について紹介する。

2 ニュートリノビームモニター(INGRID)

2.1 目的

ニュートリノビームモニターの目的は, ニュートリノを直接測定し, その空間的な広がりを観測することで, T2K 実験で要請される 1 mrad よりもよい精度でニュートリノビームの方向を測定・監視することである。

T2K 実験では, ニュートリノビームの方向を測定するもう一つの検出器として, ミューオンモニター(以下 MUMON)がある[2]。MUMON はミューオンニュートリノと共に生成されるミューオンの分布を測定することで, ニュートリノビームの方向を即時に監視できる装置であるが, ビームダンプを通過できる高エネルギーのミューオンしか観測できないため, ニュートリノビームのごく一部にのみ感度がある。一方でニュートリノビームモニターは, 反応率の低いニュートリノ反応を使用するため, 必要な統計を得るためにしばらくデータを蓄積する必要があるが, ニュートリノビームを直接監視できる装置であり, MUMON とは互いに相補的な関係にある。

T2K 実験では, 陽子ビームラインモニター[3], MUMON, ニュートリノビームモニターを用いて, ビームを常時監視しながら実験を行う。

2.2 要請

ニュートリノビームモニターは陽子標的から 280 m 離れた位置に, ビーム軸を中心に設置される。図 2-1 は, 陽子

標的から 280m の位置で相互作用したニュートリノのシミュレーションで予想されるプロファイルである。この図からニュートリノビームは広く分布しており、そのプロファイルから中心を再構成するにはビーム軸の周り $\pm 5m$ の領域を覆う必要がある。これが一つ目の要請である。ニュートリノビームモニターは、デザイン強度 (750kW) が達成されてからは 1 日毎にビーム強度や方向の安定性をモニターする必要がある、数十トン級のニュートリノ標的が必要である。これが二つ目の要請である。

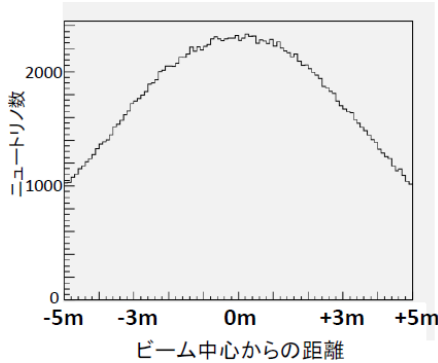


図 2-1 シミュレーションによる前置検出器ホール(陽子標的から 280m の位置)で相互作用したニュートリノビームの、ビーム軸から水平方向 $\pm 5m$ 、垂直方向 $\pm 50cm$ の領域でのイベントプロファイル

2.3 検出器の構成

上記の要請を踏まえて、図 2-2、2-3 のように比較的扱いやすい大きさ ($1.2m \times 1.2m \times 0.9m$) のモジュール 14 台をビーム軸中心 $\pm 5m$ の領域に十字型に配置し、ビーム方向を測定する方法を採用した。その結果、ビームプロファイル全体を巨大標的で覆うデザインに比べて、読み出しチャンネルや標的の量を大幅に減らすことができた。そして検出器には、数個の格子 (GRID) からなるという構成から、Interactive Neutrino GRID (INGRID) という名前をつけた。

INGRID の各モジュールは図 2-3 のように、6.5cm 厚の鉄ターゲット 9 枚とトラッキングプレート 11 枚のサンドイッチ構造からなる。鉄ターゲットは 1 モジュールあたり約 7.1 トンで、14 台で約 100 トンの大質量ターゲットを実現している。トラッキングプレートは、それぞれ縦横にセグメント化された 2 枚のプラスチックシンチレーター層からなる。そのシンチレーション光は、波長変換ファイバーと新型半導体光検出器 (MPPC : Multi-Pixel Photon Counter) で読み出される。

INGRID は図 2-4 のように、ニュートリノの荷電カレント反応により鉄ターゲットで生成されたミューオンの軌跡をトラッキングプレートで捕えることにより、ニュートリノイベントを同定する。そして各モジュールのニュートリノイベント数分布からニュートリノビーム中心を再構成し、その方向を測定する。

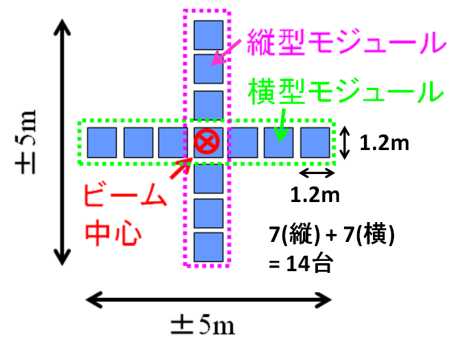


図 2-2 ニュートリノビームモニターの構成

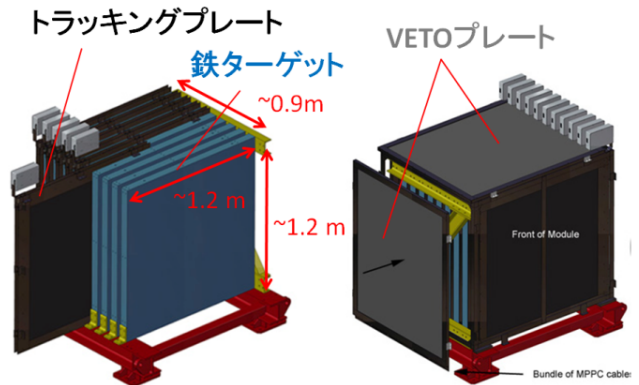


図 2-3 モジュールの模式図

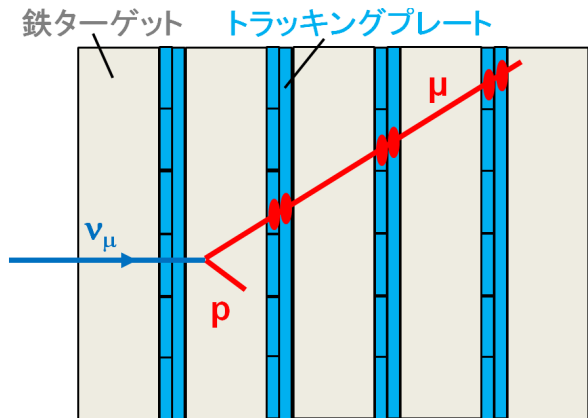


図 2-4 INGRID で観測されるニュートリノイベントの模式図

3 検出器概要

この章では、トラッキングプレートの構成要素(プラスチックシンチレーター、波長変換ファイバー、新型半導体光検出器、トラッキングプレート本体)と DAQ システムについて、その概要を述べる。

3.1 プラスチックシンチレーター

INGRID に用いるシンチレーターは、アメリカのフェルミ国立加速器研究所で開発された、押し出し成型シンチレーターである。これはポリスチレンに PPO、POPOP を質量比でそれぞれ 1.0%、0.03% 混ぜたもので、発光量が最大となる波長は 420nm である。INGRID 用シンチレーターは、

2007年12月から2008年2月にかけて、同研究所で製作された。その総数は予備も含めると10,272本で、総重量は約6.2トンである。

シンチレーターの大きさは、長さ120cm、幅5cm、厚み1cmである。表面には、製造の段階で酸化チタン(TiO_2)ベースの反射材がコーティングされている(1cm×5cmの切断面を除く)。図3-1にあるように、シンチレーター中央には直径3mm程度の穴があいており、この穴に波長変換ファイバーを通して、シンチレーション光を読み出す。検出器製作の際に、MPPCで光量を読み出す面とは逆側の面(1cm×5cmの切断面)に反射材(ELJEN Technology社EJ-510)を塗布し、シンチレーション光が外に漏れるのを抑えている。

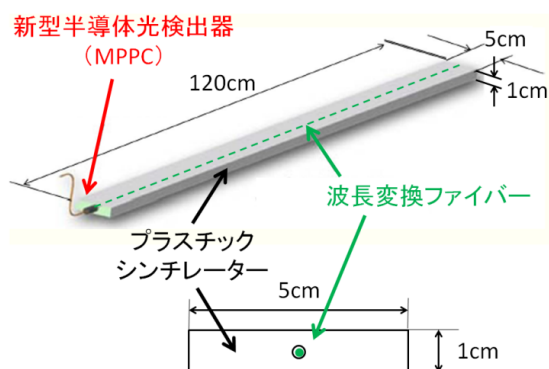


図3-1 INGRIDのプラスチックシンチレーターの模式図

5cm×1cmの面の中央には直径3mm程度の穴が逆側まで空けてあり、ここに波長変換ファイバーを通す。

3.2 波長変換ファイバー

INGRIDで用いる波長変換ファイバーは、クラレ社のY-11(200)MSで、その直径は1mmである。このファイバーで吸収率が最大となる波長は、INGRID用のシンチレーターの発光量が最大となる波長(420nm)とほぼ一致している。INGRIDで用いられるファイバーの全長は約12kmである。

ファイバーはシンチレーターと同じ長さにかットし、MPPC読み出し側には五味慎一氏(京大)によって開発されたオプティカルコネクタ(GOMI connector)をオプティカルセメント(ELJEN Technology社製EJ-500 optical cement)で接着した。GOMI connectorは、図3-2にあるように、プラスチック製の2パーツからなるコネクタで、ファイバー端面とMPPCのセラミックパッケージとを密着した形で接続することができ、光漏れを防ぐ構造をしている[4]。このコネクタは、着脱が容易で、接続面での光量の損失も小さい。ファイバーのMPPCとの接続面については、光量の損失を減らすために、ダイヤモンドバイトを用いたファイバー仕上げ工具(Fiber Fin社)で研磨する。ファイバーのMPPCから遠い側の端面は、シンチレーション光をそこで反射させる目的で、ダイヤモンドカッターで研磨後、反射材(ELJEN Technology社EJ-510)を塗布した。

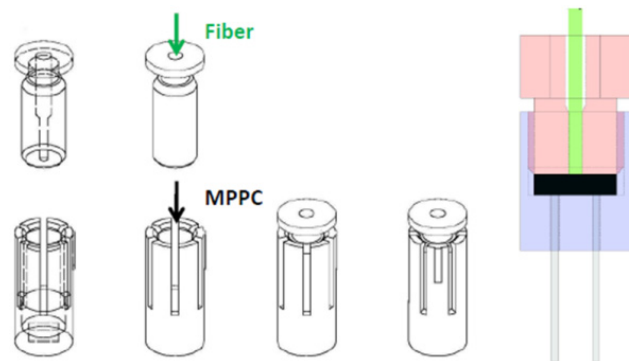


図3-2 MPPCと波長変換ファイバー間のオプティカルコネクタ(GOMI connector)

3.3 新型半導体光検出器(MPPC)

INGRIDを含むすべてのT2K前置検出器で、シンチレーション光の読み出しに新型半導体光検出器(MPPC: Multi-Pixel Photon Counter)を用いている。MPPCは、コンパクトで高増幅率、磁場中で動作可能、比較的低コスト、低い動作電圧、高い光検出能力といった特徴を持ち、前置検出器に最適な光検出器である[5]。2005年8月にコラボレーションにより採用が決定された後、京都大学、浜松ホトニクス、KEK測定器開発室、他の実験への実用化を目指す他大学で共同開発を行ってきた。そして表3-1にあるT2K前置検出器の要請を満たす製品(S10362-13-050C)の開発に成功し、2008年から大量生産を開始した。図3-3と表3-2が、その写真と仕様である。MPPCの納入は順調に進み、2009年2月に前置検出器全体に必要な約63,500個(予備を含む)の納入が、約1年という短期間にスケジュールどおりに完了した。MPPCを実際の大型実験に採用したのはT2K実験が世界初である。

表3-1 T2K前置検出器のMPPCに対する要請

	INGRID	オフアクシス検出器
ピクセル数	> 100	> 400
ゲイン	> 5×10^5	$\sim 10^6$
ノイズレート	< 1.5 MHz	< 1.5 MHz
光子検出効率	> 10%	> 10%
チャンネル数	10,000	50,000

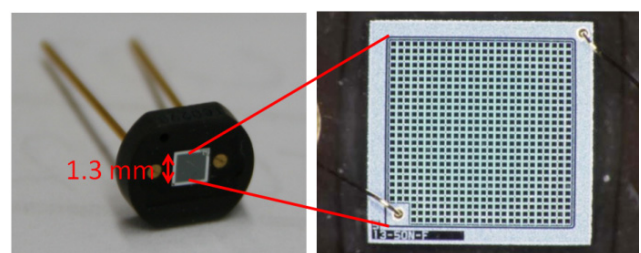


図3-3 T2K実験前置検出器用MPPC(S10362-13-050C)

表 3-2 T2K 実験前置検出器用 MPPC(S10362-13-050C)の仕様

項目	仕様
有感領域	1.3×1.3mm ²
ピクセルサイズ	50×50μm ²
ピクセル数	667
動作電圧	70 V (typical)
ゲイン	7.5×10 ⁵
光子検出効率	~ 30%
ダークノイズ (ゲイン = 7.5×10 ⁵ の時)	< 1.35 Mcps (閾値 0.5 p.e.) < 0.135 Mcps (閾値 1.5 p.e.)
デバイス数(予備を含む)	63,500

3.4 トラッキングプレート

トラッキングプレートの48本のプラスチックシンチレーターは、荷電粒子のトラックを再構成できるように、ビームに対して垂直平面内に、24本を一方向(x方向)に敷きつめた後、残りの24本を先ほどの方向と垂直になる方向(y方向)に敷き詰める。固定フレームを含めたトラッキングプレートの概略図を図3-4に示す。シンチレーター24本×2層は、接着剤(セメダイン社 PM200)で接着された上で、4辺をアルミバーで固定され、両側面はそれぞれ4枚のアルミパネルと1枚の遮光用プラスチックパネルで覆われる。パーツの隙間には遮光ゴム(EPDM)を接着し、光漏れを防いでいる。トラッキングプレートの読み出しチャンネルは48個で、モジュールあたり11枚のトラッキングプレートが取り付けられる。INGRID全体は14モジュールからなるので、トラッキングプレートの読み出しチャンネルの総数は48×11×14 = 7,392チャンネルとなる。

各モジュールの側面は、VETO用のシンチレーター層(VETOプレート)で覆われていて、最前面のトラッキングプレートとともに、宇宙線や前置検出器ホール壁でニュートリノが反応して生成された荷電粒子によるバックグラウンドイベントを排除する。VETOプレートのデザインは1層構造でシンチレーター22枚からなる。VETOプレーンは、

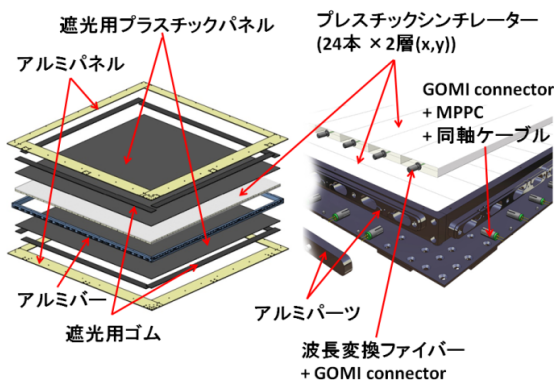


図 3-4 トラッキングプレートの模式図

パーツの隙間を遮光ゴム(EPDM)で塞ぐことにより、トラッキングプレート内部は外部から遮光されている。

粒子通過位置がわかるように、ビーム方向にセグメント化されている。隣り合うモジュール間では一つのVETOプレートを共通で用いるため、VETOプレートの総数は14モジュールで44枚になり、読み出しチャンネルの総数は22×44 = 968チャンネルである。

表 3-3 に INGRID の読み出しチャンネルの総数をまとめた。

表 3-3 INGRID(14モジュール)の読み出しチャンネルの総数

項目	チャンネルの総数
トラッキングプレート	7,392
VETOプレート	968
合計	8,360

3.4 DAQ システム

INGRIDのDAQシステムは、他の前置検出器と共通(FGDとTPCを除く)で、イギリスのラザフォード研究所、インペリアル大学、オックスフォード大学が中心となり開発を行った。

図3-5にあるように、INGRIDの電子学はFront End Board(FEB)と Back End Board(BEB)の二つに分けられる。

FEBの Trip-t Front end Board(TFB)は、アメリカのフェルミ国立加速器研究所で開発された Trip-t chip を4枚用いて、最大で64個のMPPCの読み出しを行える。INGRIDでは、トラッキングプレート毎にTFBを取り付け、1枚で48個のMPPCの読み出しを行っている。TFBとMPPCは同軸ケーブルで接続される。TFBはFPGA(Xilinx Spartan-3 XC3S2000)で制御され、おもに次のような機能を持つ。

- 電荷量のデジタル化(ADC)
- ヒット時間のデジタル化(TDC)
- 各MPPCへの印加電圧の調整
- TFBの入力電圧や温度のモニター

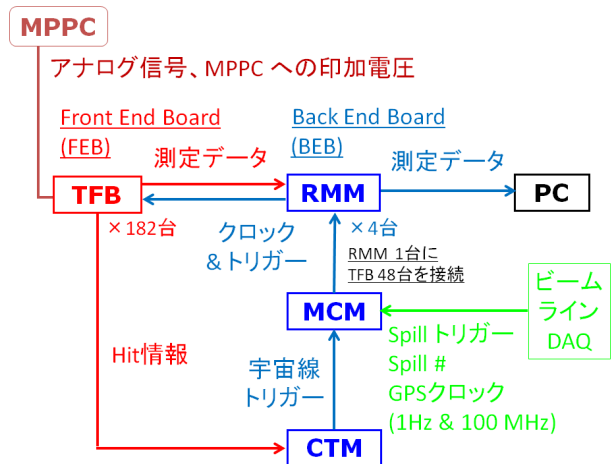


図 3-5 DAQ システムの概略図

表 3-4 に TFB の仕様をまとめた。TFB は、ビームスピルトリガーを受け取ると、ゲートとリセットからなるサイクルを 23 回繰り返し、そのデータをバッファに保持する。T2K 実験は現在 581nsec 間隔の 6 バンチの陽子ビームを標的に照射してニュートリノビームを生成している(将来は 8 バンチに増強予定)。そこで、DAQ システムのサイクル間隔とニュートリノビームのバンチ間隔が等しくなるように、TFB のゲートを 480nsec、リセットを 100nsec に設定し、バンチのタイミングに合わせてゲートが開くように、トリガーの遅延時間を調整した。

表 3-4 Trip-t Front end Board(TFB)の仕様
(MPPC のゲインが 5×10^5 5×10^5 の場合)

パラメータ	値
ADC のダイナミックレンジ	0 ~ 500 p.e.
ADC のノイズレベル	< 0.21 p.e.
ADC の非線形性	< 5%
TDC の時間分解能	2.5 nsec
MPPC 印加電圧の調整能力	0 - 5 V (調整範囲) 20 mV (分解能)

BEB は、Readout Merger Module(RMM), Master Clock Module(MCM), Cosmic Trigger Module(CTM)からなり、それぞれ次のような機能を持つ。

- RMM : 1 台に最大で 48 台まで TFB を接続できる。接続された TFB から読み出されたデータを統合して DAQ PC に送る目的で利用する。また、他の BEB や DAQ PC から送られてくるトリガー信号、クロック信号、制御信号を TFB に分配する目的でも利用する。INGRID では、4 台の RMM を用いて、182 台の TFB を制御している。
- MCM: ビームライン DAQ からはビームスピルトリガー、ビームスピル番号、GPS クロック信号を受け取り、CTM からは宇宙線トリガーを受け取る。トリガーやクロック信号は、RMM を通じて TFB に送られる。
- CTM : TFB から hit 情報を受け取り、宇宙線トリガーを作る。

RMM, MCM, CTM は同一のボードを用いており、FPGA のファームウェアを書き換えることにより、どの用途にも使用できる。またシステムのバグや更新には、ファームウェアのアップグレードで対応できるという利点がある。

4 検出器の製作・設置

2008 年 4 月から INGRID の製作が本格的に始まった。この章では各コンポーネントの準備、モジュールの製作および検出器ホールへの設置について紹介する。

4.1 MPPC の大量試験

INGRID で用いる約 10,000 個の MPPC は、京大に準備したテストベンチを用いて基礎性能を確認後、検出器にインストールを行った。MPPC は性能に大きな温度依存性を持つため、恒温槽を用い 15°C, 20°C, 25°C で基礎性能(ゲイン、ブレイクダウン電圧、暗電流、アフターパルスとクロストーク率、光検出効率)を測定し、99.93% のサンプルが要求性能を満たすことを確認した。残りの 0.07% のサンプルは、順バイアス電圧をかけてもまったくシグナルを返さないため、信号線または電圧線が切れていると考えられる。このサンプルはまた、浜松ホトニクスでの試験を通過したため、出荷当時はシグナルを返していたが、その後の数カ月間において故障したと思われる。

このテストベンチは、1 セット 64 個の MPPC を測定するのに約 1.5 時間が必要で、一日に約 4 セット(256 個)の測定が可能である。2008 年 5 月から大量試験を開始し、約 5 カ月間で INGRID と他の前置検出器に用いる約 18,000 個の MPPC を試験した。この測定は長時間一人で行うとミスが増えるため、測定シフトを組み、負担が集中しないように気を配った。

4.2 波長変換ファイバーの準備と試験

2008 年 5 月から 7 月にかけて、京都大学で INGRID に用いられる波長変換ファイバーの準備を行った。作業は、ファイバーのカット、オプティカルコネクタ(GOMI connector)の接着、前述のファイバー仕上げ工具による両端の研磨、MPPC から遠い側の端面への反射材の塗布からなる。ファイバーは 24 本ごとに LED を用いて光量チェックを行い、問題がないことを確認しながら作業を進めた。

4.3 トラッキングプレート の製作

2008 年 6 月頃に、押し出し成型シンチレーター約 10,000 本がフェルミ研究所から J-PARC に届いた。この頃から J-PARC で INGRID 製作の準備を始めた。その後、京都大学、Ecole Polytechnique、大阪市立大学、東京大学、University of Lyon の研究者・技術者でシフトを組み、2008 年 9 月から 12 月の約 3 ヶ月でトラッキングプレート(と VETO プレート)228 枚を製作した(図 4-1)。制作後のトラッキングプレートには、MPPC の暗電流と宇宙線データを使った動作試験を行い、ケーブルの疵、ケーブルリングの間違い、ファイバーの疵、不良 MPPC などの問題を見つけ、対策を施した。

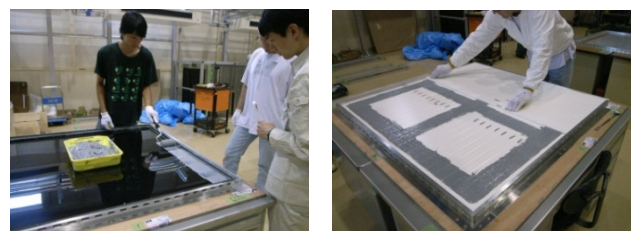


図 4-1 シンチレータートラック層の製作

その結果、全 9,592 チャンネルが正常に動作していることを確認できた。図 4-2 は、宇宙線データにおけるトラッキングプレート全チャンネルの平均光量分布で、もっとも平均光量が低いチャンネルで 19.4 p.e. と、十分な光量が得られていることが確認できた。こうして、2008 年 12 月にトラッキングプレートの製作および試験が無事スケジュールどおり完了した。

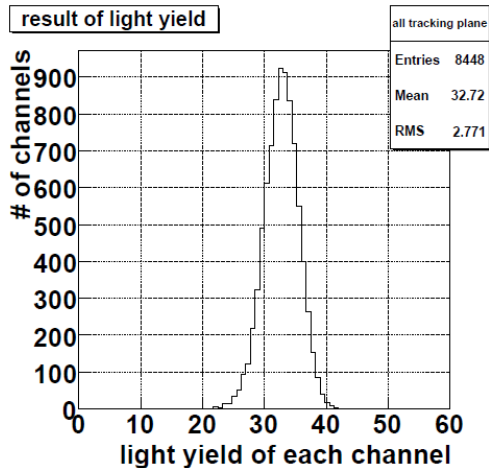


図 4-2 宇宙線データにおけるトラッキングプレート全チャンネルの平均光量分布

4.4 モジュールの製作と設置

当初は、2009 年 1 月から 3 月に全 14 モジュールの製作および設置を行う予定だったが、鉄構造体(鉄ターゲットとモジュールフレームからなる)のフランス側での製作が大幅に遅れたため、1 モジュールだけを製作、設置し、2009 年 4 月のビームコミッショニングに臨むことになった。この 1st モジュール用の鉄構造体は、3 月のインストールに間に合わせるためにフランスから空輸され、2009 年 2 月 7 日に J-PARC に到着した。この鉄構造体には、鉄ターゲット間のスペースが狭すぎてトラッキングプレートが入らない場所がある、ネジ穴が錆びている、といった問題があることが分かった。これらの問題については、ただちにフランスに連絡し、残り 13 台のモジュール用の鉄構造体には、日本に送る前にフランスで対策を施した。

1st モジュールの製作は、2 月 10 日に完了した(図 4-3)。最初のモジュールの製作だったので、いろいろと問題(上記の鉄構造体の問題を含む)が見つかったが、一つ一つ現場で問題を解決していくことにより、残りのモジュールを製作する上でよい経験になった。

製作後の 1st モジュールには、MPPC の暗電流と宇宙線データを使った動作試験を行い、ケーブルの疵、ファイバーの疵、不良 MPPC などの問題を見つけ、対策を施した。その結果、全 594 チャンネルが正常に動作していることを確認できた。この動作試験は、3.4 節で紹介した DAQ システムを用いて行われた。このシステムでデータ収集をするの

は INGRID が初めてだったので、動作試験を進める内にいろいろなシステムのバグを発見し、ラザフォード研究所の研究者と一緒に、そのバグへの対策を施した。

動作試験後の 1st モジュールは、2009 年 3 月 12 日に前置検出器ホールに設置された。設置は、設置場所にアンカーボルトを打ち、クレーンでモジュールを地下まで運び、チルローラー(チルコーポレーション社)を使ってモジュールを設置場所まで移動し、アンカーボルトで固定する、という作業からなる。この 1st モジュールによるビームコミッショニングの結果については、5 章で述べる。



図 4-3 1st モジュール

残りのモジュール用の鉄構造体は、横型モジュール用 6 台が 2009 年 6 月 24 日に、縦型モジュール用 7 台が 2009 年 7 月 29 日に、J-PARC に到着した。この 13 台のモジュールは、日本とフランスの研究者・技術者でシフトを組み、製作を行った。1st モジュールの経験があったため、この作業は比較的スムーズに進み、横型モジュール 6 台が 2 週間、縦型モジュール 7 台が 2 週間、計 4 週間で製作できた。

製作後の 13 台のモジュールには、1st モジュールと同じように動作試験および問題への対処を行った。その結果、全 7766 チャンネルが正常に動作していることを確認できた。この動作試験も 1st モジュールの経験があったため、比較的スムーズに行えた。

動作試験後の 13 台のモジュールは、横型モジュール 6 台が 2 週間、縦型モジュール 7 台が 2 週間、計 4 週間をかけて前置検出器ホールに設置し、2009 年 8 月 11 日にすべての作業が無事完了した(図 4-4)。横型モジュール 6 台の設置作業は、クレーンが使えない場所であったため、7 トン以上のモジュールを、チルローラーを用いて移動させた。最後の 1 台の横型モジュールは、設置済みの横型モジュールの間に設置する必要があった。この時、このモジュールと両隣のモジュールとの隙間は数 mm しかなく、作業は困難を極めた。しかし、最終的にはすべての横型モジュールを、±2mm の精度で目的の場所に設置できた。

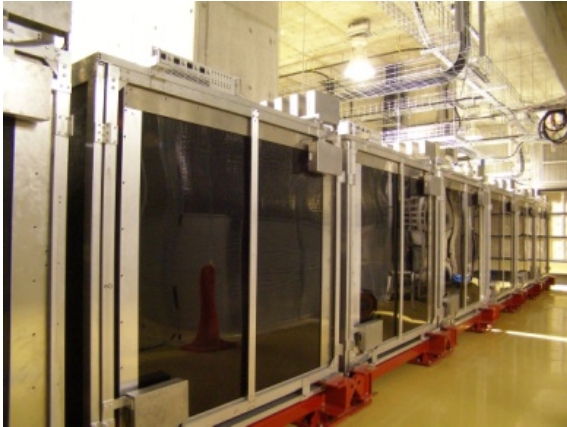


図 4-4 横型モジュール(上)と縦型モジュール(下)の写真
各立方体が1モジュールに対応している。

5 運転からニュートリノ観測まで

2009年4月23日のファーストビームから、2009年11月22日の INGRID でのニュートリノ観測までの経緯を表 5-1 にまとめた。以下では、この期間の様子を紹介する。

表 5-1 ファーストビームからニュートリノ観測まで

2009年4月～5月	ファーストビーム ビームコミッショニング
2009年6月～10月	夏の加速器運転休止期間 残りの13モジュールの建設・設置 検出器コミッショニング
2009年11月	ビームコミッショニング INGRID でニュートリノを観測

5.1 ビームコミッショニング

2009年4月から5月に T2K 実験はビームコミッショニングを行った。おもな目的は、ビームラインの各機器の動作確認とビームラインモニターおよびMUMONを用いたビーム軌道の調整であるが、INGRID でもニュートリノイベン

トの観測を試みた。このビームコミッショニング時はビーム強度が弱く、ビームタイムも限られていたため、INGRID でのニュートリノ反応数は1より小さいと予想された。このような数少ないニュートリノ反応を見つけるためには、すべてのスピルを漏れなく探索することが必要であった。そのために、インストールからビームコミッショニング開始までの一ヵ月余りの間、読み出しシステムの動作確認、宇宙線などを用いた検出器の動作確認、検出器の状態をリアルタイムで監視するためのオンラインプロットの整備、解析ソフトウェア準備を行った。この結果、ビームデータを長時間安定に取得し、そのデータをすぐに解析できる準備が整った。

上記の準備も終わり、コミッショニング開始まであと少しという時に、多数のチャンネル(多い時は半数以上)で信号が不安定になるという問題が発生した。様々な可能性を検討した末に、雨の日にこの問題が起こりやすいことを発見した。さらに原因を追究すると、前置検出器ホール内の異常な湿度の高さ(90～100%)により、MPPCと同軸ケーブルを接続するのに使っているプリント基板が結露し、そこに表面電流が流れることが原因であることが分かった。そこで、モジュールをブルーシートで覆い、その中に除湿器を導入した(図 5-1)。これによって、ビームコミッショニングの期間中、上記の問題が起こることなく、安定してデータを取得することができた。その後、この前置検出器ホールの湿度問題への根本的な対策として、INGRID が設置されているフロアをビニールシートで他の前置検出器ホールと隔離し、その中に大型除湿機を設置した。その結果、湿度は約50%付近で安定しており、それ以降上記の問題は起こっていない。



図 5-1 INGRID モジュール

左図：2009年4月から5月のビームコミッショニング直前のもの。
右図：前置検出器ホール内の異常な湿度の高さが問題になったために、モジュールをブルーシートで隔離し、内部に除湿器を設置した。

こうして万全の状態を迎えたビームコミッショニングであったが、残念ながらニュートリノイベントは観測できなかった。念のため、全ビームスピルトリガーのイベントディスプレイをアイスキャンしてみたが、結果は同じであった。ちなみに、このコミッショニング時に INGRID で期待されたニュートリノ反応数は約0.2であった。

5.2 ニュートリノイベント観測

夏の加速器運転休止期間の2009年6月から8月に残り13台のモジュールの建設・設置を行い、8月から11月に前置検出器ホール内で14台のモジュールを用いた試運転を行った。2009年11月にビームコミッションを開始し、2009年11月22日午後8時25分、INGRIDはついにT2K実験初のニュートリノ事象を観測した。その事象のイベントディスプレイを図5-2に載せる。イベントディスプレイ中の様々な大きさの点はシンチレーターのヒットを表わしており、その大きさは観測されたエネルギーに対応している。ビームは紙面左から右方向で、ビームニュートリノが6番目の鉄層で反応して荷電粒子が二つ発生したイベントだと考えられる。

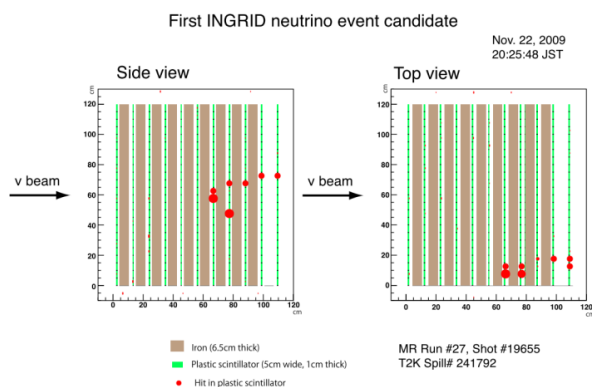


図5-2 INGRIDで観測したT2K実験初のニュートリノ事象

全14台あるモジュール中の1モジュールで観測された事象で、左図がモジュールを横から見た図、右図がモジュールを上から見た図。図中の様々な大きさの点は、シンチレーターで信号が検出されたチャンネルで、その大きさは観測された光量に対応している。ビームは紙面左から右方向で、その方向にトラッキングプレートと鉄ターゲットの層が交互に繰り返されている。

6 現状

表6-1にINGRIDでのニュートリノ観測から現在までのおもなイベントと、2010年前半の物理ラン終了までの予定をまとめた。

表6-1 ニュートリノ観測から2010年前半の物理ラン終了まで

2009年11月	INGRIDでニュートリノ観測
2009年12月	Off-axis検出器でニュートリノ観測
2010年1月	物理ランスタート
2010年2月	後置検出器スーパーカミオカンデでニュートリノイベント観測
2010年6月	2010年前半の物理ラン終了

2009年12月には、off-axis検出器でニュートリノを観測した。2009年1月に物理解析に用いるデータの取得が始まり、現在(2010年5月)はビームタイムの最中である。2010年2月24日には、後置検出器スーパーカミオカンデで待望の初ニュートリノ事象を観測した。今後は、2010年6月までのビームデータを用いて、最初の物理結果を発表することを目標にしている。

この章では、2009年11月から2010年4月までに得られた、INGRIDの性能評価試験とビームデータの解析結果について述べる。

6.1 性能評価試験

図6-1に、宇宙線データを用いた各チャンネルの検出効率の測定結果を載せる。シンチレーター表面の反射剤や隣のシンチレーターとの隙間といった不感領域によって若干検出効率が下がるものの、全チャンネルの平均検出効率が99.0%と十分な性能を持つことが分かった。INGRIDは、スピルとスピルの間の約3.5秒の時間に、宇宙線トリガーによってデータを取得している。この宇宙線データに同様の解析を行うことによって、ビームデータ取得時の検出器の性能を保証する。

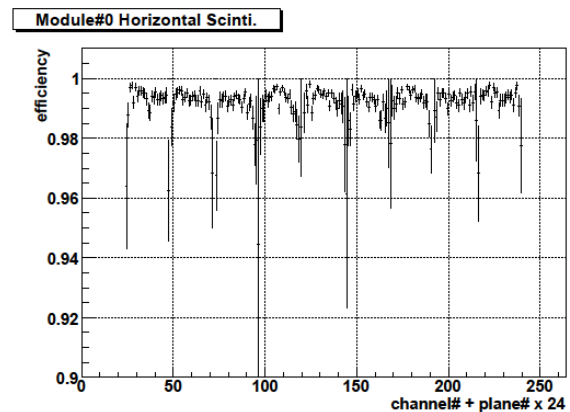


図6-1 1番目のモジュール各チャンネルにおける宇宙線トラックの検出効率

横軸はチャンネルの番号、縦軸は宇宙線トラック検出効率。

6.2 ビームデータの解析結果

2010年1月から4月の物理ランにおいて、INGRIDは、ビームスピルトリガー173,049発のうち、99.9%以上の取得に成功した。このようにINGRIDは、ビームデータを安定に取得している。物理ランの期間中に陽子ビームの強度は徐々に上がってきており、4月末の時点で約40kWで安定にニュートリノビームを生成している。

図6-2はINGRIDにおいてニュートリノ事象選択後に残った事象のタイミング分布である。繰り返しになるが、T2K実験では、現在581nsec間隔で6バンチの陽子ビームを生成標的に照射してニュートリノを生成している。INGRIDは、この6バンチに対応する時間に、期待通り6つのピークを観測した。ピークから離れた時間にある事象は、宇宙線や、壁でニュートリノが反応してできた中性子やガンマ線が起源のバックグラウンドが原因だと考えている。これらのバックグラウンドの数はニュートリノ事象選択を行うことで、ニュートリノ事象候補の数の3ケタ以下に抑えることができる。

ニュートリノビームに対するビームトリガーのタイミングが変化すると、DAQシステムの不感時間にニュートリノ事象が入ってしまい、正しくデータを取得できない。そのためINGRIDはニュートリノ事象の時間分布を常にオンラインでモニターして、正しくデータが取れていることを確認している。

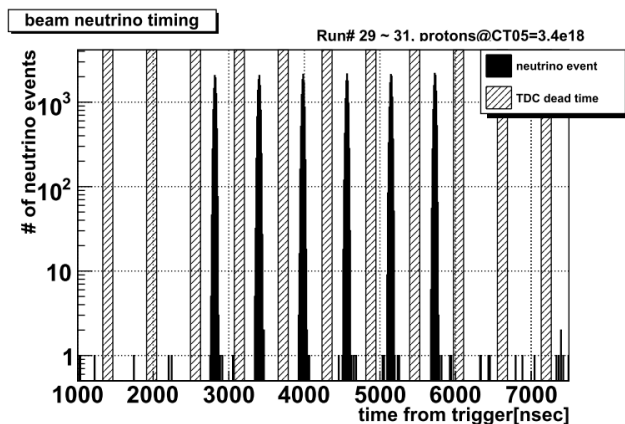


図 6-2 ニュートリノ反応事象選択後の事象のタイミング分布
横軸はビームトリガーからの時間[nsec]、縦軸は事象数。6 バunchの陽子ビームに対応する 6 つのピークが観測された。斜線部分はDAQシステムの不感時間である。バックグラウンド事象の数は、ニュートリノ事象候補の数の3ケタ以下に抑えられている。

図 6-3 は各日のニュートリノ事象選択後の事象数を、陽子ビーム強度モニター(CT5)で測定された陽子数で規格化した分布である。平均値は陽子数 10^{14} 個あたり1.5事象で、各日ともに誤差の範囲内で一致しており、ニュートリノビームを安定して生成できていることが分かる。

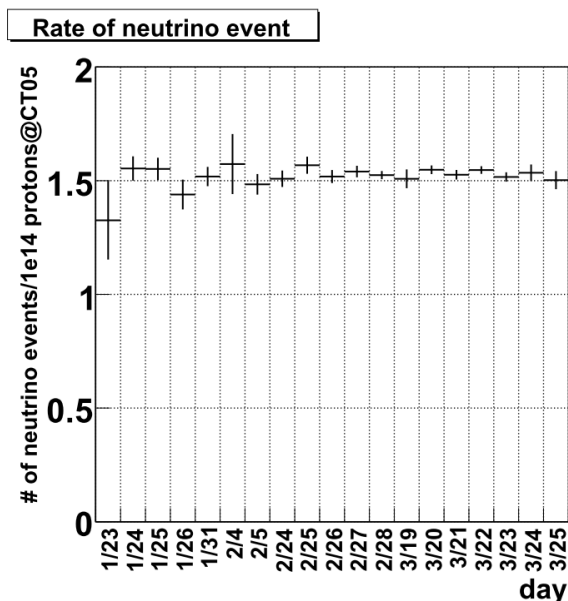


図 6-3 ニュートリノ事象選択後の事象数を、各日に供給された陽子数で規格化した数の推移

各日ともに誤差の範囲内で平均値は陽子数 10^{14} 個あたり1.5事象に一致しており、安定してニュートリノビームを生成できていることが分かる。

図 6-4 は、2010年3月に取得したデータによる、横型モジュール7台におけるニュートリノ事象選択後の事象数である。ここで誤差は統計誤差しか含んでおらず、系統誤差は見積り中である。後述するとおり、この測定データからニュートリノビーム中心の再構成を行い、INGRIDでのニュートリノ反応数を計算する。

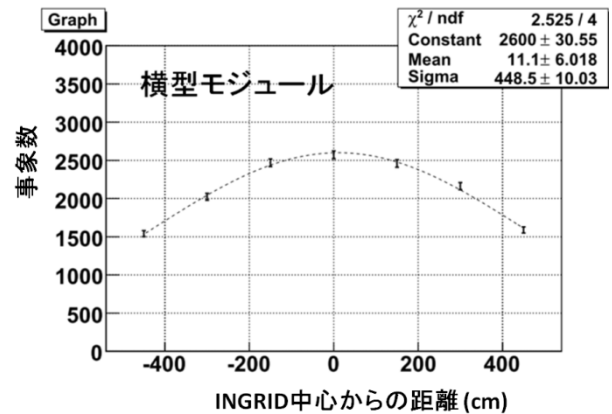


図 6-4 横型モジュール7台におけるニュートリノ事象選択後の事象数

横軸は INGRID 中心からの距離[cm]、縦軸はニュートリノ事象選択後の事象数。

ニュートリノ事象を観測する上で一番のバックグラウンドは、ニュートリノが前置検出器ホールの壁と相互作用した結果生じるミューオン、中性子、ガンマ線である。今後は、測定データとシミュレーションから、現在のニュートリノ事象選択後のサンプルにどの程度これらのバックグラウンドが混在しているかを見積り、必要であれば事象選択方法をよりよいものに改善する。その後、シミュレーションと、宇宙線データから求めた各チャンネルの検出効率を用いて、ニュートリノ事象に対する各モジュールの検出効率を計算する。これらの結果から各モジュールにおけるニュートリノ反応数を系統誤差込みで計算し、このプロファイルからニュートリノビーム中心の再構成を行い、T2K実験で要請される1mradよりもよい精度で、ニュートリノビーム方向の測定・監視する予定である。(INGRIDは陽子標的から約280m下流にあるので、ビーム方向が1mradずれると、中心位置が28cmずれることになる。)そして、INGRIDでのニュートリノ反応数をビームシミュレーションで外挿し、後置検出器であるスーパーカミオカンデで期待されるニュートリノ反応数を計算し、ニュートリノ振動解析を行い、物理結果としてまとめる予定である。

7 今後の予定

INGRIDは、ハードウェアのアップデートとして、2010年夏から秋に図7-1にあるoff-diagonalモジュールとprotonモジュールの製作および設置を行う。Off-diagonalモジュール

ルはINGRID モジュールと同一の構造で、ニュートリノビーム形状の対称性を評価するために、十字型に配置された既存のモジュールに加え、非直交の位置に計 2 台設置する。Proton モジュールは、細かな構造の違いはあるが基本的には鉄ターゲットのない INGRID モジュールで、プラスチックシンチレータをニュートリノターゲットとして用いる新型検出器である。Proton モジュールは鉄ターゲットの層を持たないため、ニュートリノ反応で生成される陽子やパイ中間子といったすべての荷電粒子を検出でき、INGRID モジュールでは困難であったニュートリノ反応モードの区別を行うことができる。この情報を用いて、on-axis のエネルギー領域でのニュートリノ反応断面積の測定を行い、物理結果としてまとめる予定である。

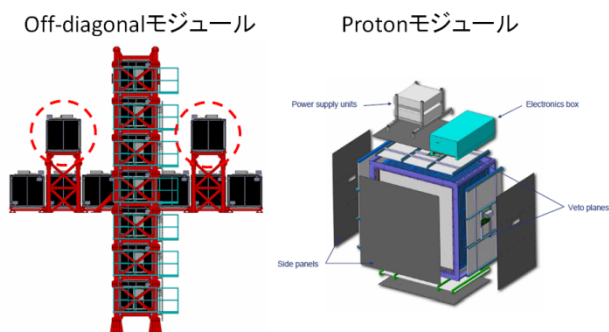


図 7-1 Off-diagonal モジュールと proton モジュールの模式図

T2K 実験は、2010 年 1 月に物理ランが開始されたばかりで、これからが本番である。INGRID は引き続き安定運転に努め、T2K 実験の全期間にわたりニュートリノビームの測定・監視を行う予定である。われわれはその測定のデータを用いて、ニュートリノ振動およびニュートリノ反応の研究を行う予定である。

謝辞

元 KEK 技官の田井野光彦氏とご家族には、J-PARC での検出器の製作を、最初から最後まで手伝っていただきました。また日鈴精機工業株式会社の鈴木茂正社長には、トラッキングプレートの固定フレームの製作時に、材料選定や加工方法について相談にのっていただき、それを格安で製作していただきました。そして第一鉄工株式会社の後藤亮一氏と社員の皆様には、非常にタイトな日程でモジュールを安全にインストールしていただきました。この他にも、沢山の方々のご協力のおかげで、なんとかニュートリノビームの測定を開始できました。サポートしていただいた皆様に、心よりお礼申し上げます。

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] 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).
- [3] 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).
- [4] H. Kawamuko, T. Nakaya, K. Nitta and M. Yokoyama, “Fiber Connector for MPPC”, Pos **PD07**, 043 (2007).
- [5] 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).