

# 新ニュートリノ検出器 INGRID Water Module の製作 及び

## それによる飛跡再構成の研究

(Production of a new neutrino detector,  
INGRID Water Module, and  
study of track reconstruction with it)

理学研究科

数物系専攻

原田 潤



## 概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で生成したニュートリノを 295 km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデで検出し、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を行う長基線ニュートリノ振動実験である。この実験ではビーム軸を後置検出器のスーパーカミオカンデから  $2.5^\circ$  ずらす、off-axis 法という手法を用いていることも特徴の 1 つで、これによりニュートリノのエネルギー領域を振動確率が最大となるように合わせることが出来る。

T2K 実験では主にプラスチック標的をもつ前置検出器と水標的をもつ後置検出器を用いているが、この原子核標的の違いによって生じるニュートリノ-原子核反応断面積の不定性という系統誤差が存在する。そこで我々はこれを抑制するために、T2K 実験の前置検出器ホールに新しいニュートリノ検出器を設置し、水とプラスチック標的のニュートリノ反応断面積比を測定する WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator) 実験を計画している。

WAGASCI 実験で用いる新ニュートリノ検出器 WAGASCI はニュートリノ反応によって生じる荷電粒子に対して  $4\pi$  のアクセプタンスを持つようにシンチレータを三次元格子状に組み立てた構造をしている。この格子内の空間には水またはプラスチックを入れる予定である。なお、格子内に水標的を入れた検出器のことを INGRID Water Module と呼ぶ。WAGASCI 検出器ではこれと格子内にプラスチック標的を入れた検出器を交互に 2 台ずつ配置することにより、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比の測定においてニュートリノフラックスと検出器に依存する系統誤差を削減することが可能となる。また、WAGASCI 検出器も製作後は off-axis 法を採用してビーム軸より  $1.5^\circ$  ずらした場所に設置する予定である。

現在、WAGASCI 検出器の水標的部を 1 台作り上げており、2 台目の製作が行われている。この論文では WAGASCI 検出器の水標的の製作過程や製作後に行われた光量測定に関してまとめた内容を報告する。また、製作した 1 台の WAGASCI 検出器の水標的は性能評価を行うため、ビーム軸上に設置されている。なお、鉄とプラスチックシンチレータのサンドウィッチ構造をもつ既存のニュートリノビームモニター INGRID に対してビームの上流部に設置されていることから、これを INGRID Water Module と呼ばれている。そして、2 つの検出器を並べて設置している理由は、それらの検出器から得たヒット情報をもとに飛跡の再構成を行うことで、荷電粒子の識別が出来るからである。本論文では、実験を行う上で重要である INGRID Water Module 検出器とニュートリノビームモニター INGRID の飛跡の整合性を評価した結果についても報告する。

# 目次

1	ニュートリノ	1
1.1	ニュートリノ反応	1
1.2	ニュートリノ振動	2
2	T2K 実験	4
2.1	目的	4
2.2	J-PARC ニュートリノビームライン	4
2.3	前置検出器	9
2.4	後置検出器: スーパーカミオカンデ	14
3	WAGASCI 実験	17
3.1	概要	17
3.2	目的	23
3.3	検出器の構成要素	23
4	INGRID Water Module 検出器の製作	30
4.1	INGRID Water Module 検出器の製作工程	30
5	INGRID Water Module の性能評価	45
5.1	INGRID Water Module 製作過程での光量試験	45
5.2	黒塗料を塗布したプラスチックシンチレータの光量測定	58
5.3	黒塗料の塗布前後におけるプラスチックシンチレータの光量比較	62
5.4	Sub Module 組み立て後の光量試験	63
6	INGRID Water Module 検出器と INGRID 検出器のトラックマッチング	70
6.1	データ取得とトラッキング	71
6.2	トラッキングの整合性の確認方法	74
6.3	結果	74
7	結論	79

# 1 ニュートリノ

ニュートリノは1930年にW. Pauliにより存在が提唱 [1] され、1956年にF. ReinesとC. Cowanによりその存在が証明された [2]、重力相互作用と弱い相互作用をする中性レプトンである。よって、物質との反応頻度は非常に小さく、透過率が高いという特徴がある。また、ニュートリノには電子ニュートリノ  $\nu_e$ 、ミューオンニュートリノ  $\nu_\mu$ 、タウニュートリノ  $\nu_\tau$  の三世代とその反粒子が存在する。さらに、ニュートリノの質量は  $\beta$  崩壊や  $\pi^+$  の崩壊などを用いた直接測定が行われてきたが、質量の上限値しかわかっておらず、またそれらの値は非常に小さいためニュートリノの質量は標準理論では0とされていた。しかし、1998年にスーパーカミオカンデグループによってニュートリノ振動が観測された事によりニュートリノに質量があることが証明された。

## 1.1 ニュートリノ反応

ニュートリノ反応は荷電カレント反応 (CC : Charged Current 反応) と中性カレント反応 (NC : Neutral Current 反応) という2種類に大きく分類される。これらの反応の違いは反応を媒介する粒子の違いによる。CC反応は  $W^\pm$  ボソンを物質と交換する反応であるのに対して、NC反応は物質と  $Z^0$  ボソンを交換する反応である。以下に各反応例として、図1, 2ではCC反応である荷電カレント準弾性散乱 (Charged Current Quasi Elastic) と荷電カレント  $1\pi$  生成反応 (CC1 $\pi$ ) を、図3, 4ではNC反応である中性カレント弾性散乱 (NC elastic) と中性カレント  $\pi^0$  生成反応 (NC $\pi^0$ ) を挙げる。

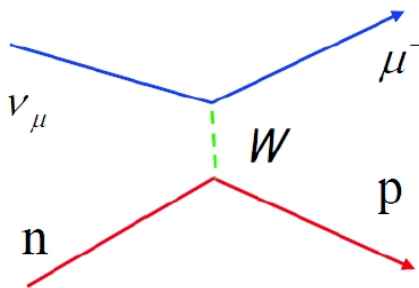


図1 荷電カレント準弾性散乱

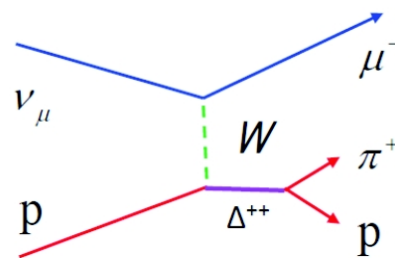


図2 荷電カレント  $1\pi$  生成反応

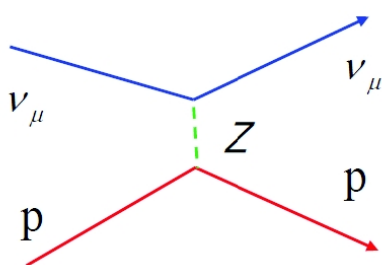


図3 中性カレント弾性散乱

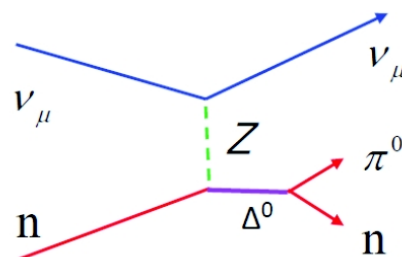


図4 中性カレント  $\pi^0$  生成反応

## 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノは標準理論においては質量が0とされているが、1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一によってニュートリノが質量を持ち、時間発展と共に  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  の型の間で変化するニュートリノ振動という現象を理論的に提唱された [3]。

ニュートリノ振動は、まずニュートリノが質量を持ち、弱い相互作用の固有状態を示すフレーバー固有状態  $|\nu_\alpha\rangle$  ( $\alpha = e, \tau, \mu$ ) と質量の固有状態  $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は異なっており、フレーバー固有状態は以下のように質量の混合状態として表せると仮定する。

$$\nu_\alpha = \sum_i U_{\alpha i} \nu_i \quad (1)$$

ここで  $U_{\alpha i}$  は牧・中川・坂田行列 (MNS 行列) と呼ばれる 3 行 3 列のユニタリー行列であり、以下のように表される。

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  であり、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  である。また、 $\theta_{ij}$  は混合角と呼ばれる質量固有状態の座標系とフレーバー固有状態の座標系がなす角度である。 $\delta_{CP}$  は CP 位相角である。 $\delta_{CP}$  が 0 と  $\pi$  でない場合、MNS 行列は虚部を含み、それは CP 非対称性を生むので、 $\delta_{CP}$  は CP 位相と呼ばれる。

次にニュートリノ振動の定式化のために、ニュートリノの時間発展について考える。質量固有状態が  $|\nu_i\rangle$  であるニュートリノが真空中を時間  $t$  だけ走った場合の時間発展の式は、Schrödinger 方程式と MNS 行列を使うことにより以下のように書ける。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-E_i t} |\nu_i\rangle \quad (3)$$

ニュートリノは相対論的であるので、次のような近似が出来る。

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E_i} \quad (4)$$

$E_i, p_i, m_i$  はそれぞれ  $\nu_i$  のエネルギー、運動量、質量を示している。よって、時間発展後のフレーバー固有状態の式は以下のように書ける。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}t} |\nu_i\rangle \quad (5)$$

ここで  $e^{-ipt}$  は振動確率の計算の場合は全体の位相を変えるのみなので無視できる。また、ニュートリノのエネルギーを固定されたものと考え  $E_i = E_\nu$  とした。式 (5) の右辺の質量固定状態の式をフレーバー固有状態の式に書き換えると、以下のように書き表せる。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{i\beta} U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_\nu}t} U_{\beta i}^* |\nu_\beta\rangle \quad (6)$$

よって、 $\nu_\alpha$  が時刻  $t = 0$  に生成され、 $t$  時間飛行した後に  $\nu_\beta$  になる確率は、以下のように書ける。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \quad (7)$$

$$= \left| \sum_i U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_\nu}t} U_{\beta i}^* \right|^2 \quad (8)$$

$$= \sum_{ij} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} e^{-i\frac{(m_i^2 - m_j^2)}{2E_\nu}t} \quad (9)$$

ここで  $L$  を飛行距離とすると、自然単位系では  $L \simeq t$  と書ける。また、 $\Delta_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  を用いて計算すると、以下のように書ける。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

このようにニュートリノ振動はニュートリノが有限の質量を持ち、弱い相互作用の固有状態と質量固有状態が異なり、さらに3つの質量固有状態が1つに縮退していない場合に起こり、3つの混合角  $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$  と2つの独立な質量二乗差  $\Delta_{ij}^2$  ならびに1つの位相  $\delta$  によって記述される。

## 2 T2K 実験

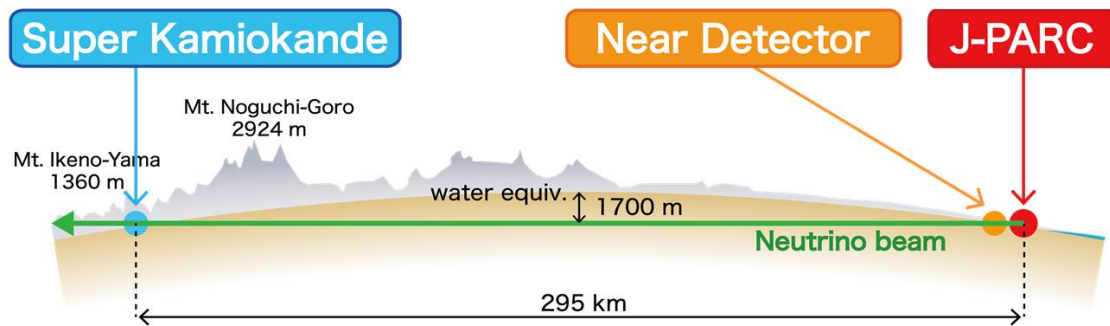


図5 T2K 実験

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、図5のように茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) [4] で生成したニュートリノビームを約 295 km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデまで飛ばす長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験では J-PARC で生成したニュートリノビームをニュートリノ生成点から 280 m 下流にある前置検出器群とスーパーカミオカンデで測定し、比較することによってニュートリノ振動のパラメータを測定する。

### 2.1 目的

T2K 実験の目標は以下の通りである。

- $\nu_\mu$  消失モードによる  $\theta_{23}$  と  $\Delta_{23}^2$  の精密測定

K2K 実験 [5] において確立されたミューオンニュートリノ消失モード ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ) の振動パラメータである混合角  $\theta_{23}$  と質量二乗差  $\Delta_{23}^2$  の測定をより精密に行う。

- $\nu_e$  出現モードによる  $\theta_{13}$  と  $\delta_{CP}$  の精密測定

実験が始まって2年後の2011年に  $\nu_\mu$  が  $\nu_e$  に変化する  $\nu_e$  出現モードを確認できたため、この出現モードの振動パラメータである混合角  $\theta_{13}$  の測定を行う。また  $\nu_e$  出現モードのデータと2014年から取得している  $\bar{\nu}_\mu$  が  $\bar{\nu}_e$  に変化する  $\bar{\nu}_e$  出現モードのデータから CP 位相角  $\delta_{CP}$  の測定を行う。

### 2.2 J-PARC ニュートリノビームライン

#### 2.2.1 ニュートリノビームの生成

図6のように J-PARC の陽子加速器は上流部から順に 400 MeV 線形加速器 LINAC (LINear ACcelerator)、3 GeV シンクロトロン RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)、50 GeV シンクロトロン MR (Main Ring) で構成されている。LINAC により生成された陽子ビームは MR まで加速



された後、ニュートリノビームラインへ送られる。ニュートリノビームラインへ送られる陽子ビームは、図7のような時間構造を持っており、1つの陽子ビームの塊をバンチと呼ばれ、8バンチの事をまとめてスピルと呼ぶ。その陽子ビームのパラメータについては表1にまとめる。

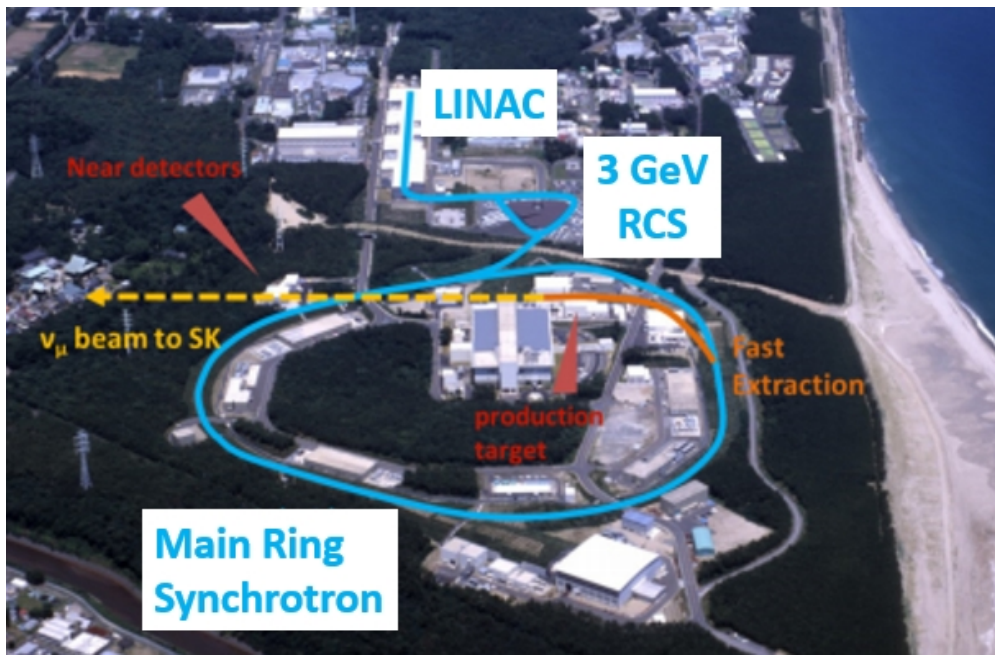


図6 J-PARC

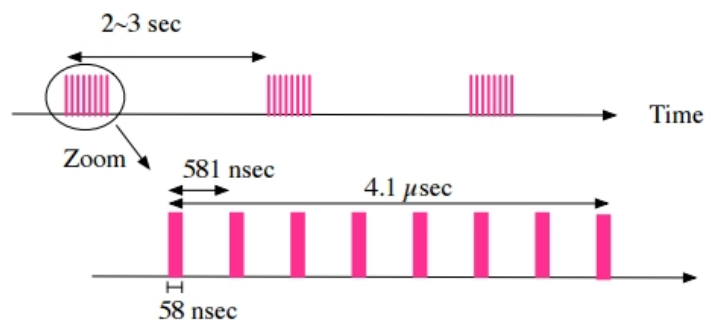


図7 T2K 実験で用いる陽子ビームの時間構造

表1 陽子ビームのパラメータ

	設計値	現在値
ビームエネルギー	50 GeV	30 GeV
ビーム強度	750 kW	435 kW
スピル中の陽子数	$3.3 \times 10^{14}$	$2.07 \times 10^{14}$
スピル幅	5.6 μsec	5.5 μsec
バンチ数	8 /spill	8 /spill
バンチ幅	58 nsec	58 nsec
バンチ間隔	約 700 nsec	581 nsec
周回周期	2.48 sec	2.48 sec

生成された陽子ビームは常伝導電磁石や超伝導電磁石で構成される 1 次ビームラインへ送られた後、神岡のスーパーカミオカンデの方向へ約 80° 曲げられて標的に導かれる。また図 8 のように、この 1 次ビームラインではビームを標的への的確に当てるために、ビームの位置や形状、強度、ロスなどの情報を測定するビームモニター群が配置されている。

#### ビーム位置モニター (ESM)

ESM (ElectroStatic beam position Monitor) は静電ピックアップ型のビーム位置モニターのことであり、ビームが電極に誘起する電荷の非対称性からビームの位置を求める。ESM は合計 21 台を設置している。

#### ビーム形状モニター (SSEM)

SSEM (Segmented Secondary Emission Monitor) は薄いチタン膜をストリップ状に分割したものを、水平方向と垂直方向に組み合わせた構造をしている。ビームがストリップを通過した際に放出される 2 次電子の量がビーム強度に比例することを用いて形状を測定する。測定の際はビームロスが発生するため、必要なときに限りビームライン上に挿入している。SSEM は合計 19 台設置している。

#### ビーム強度モニター (CT)

CT (Current Transformer) は強磁性体をコアにしたトロイダルコイルを用いた電流トランスであり、ビームが CT を通過する際にトロイダル地場が発生し、これによる誘導電流を読み出している。CT は輸送効率やビームの安定性、POT (Proton On Target) の測定に用いられており、5 台設置されている。

#### ビームロスモニター (BLM)

BLM (Beam Loss Monitor) はアルゴンがベースとなっているガスを用いたワイヤープロポーションナルカウンターで、各磁石の近傍に設置され、ビームロスの測定を行う。BLM は 50 台を設置している。

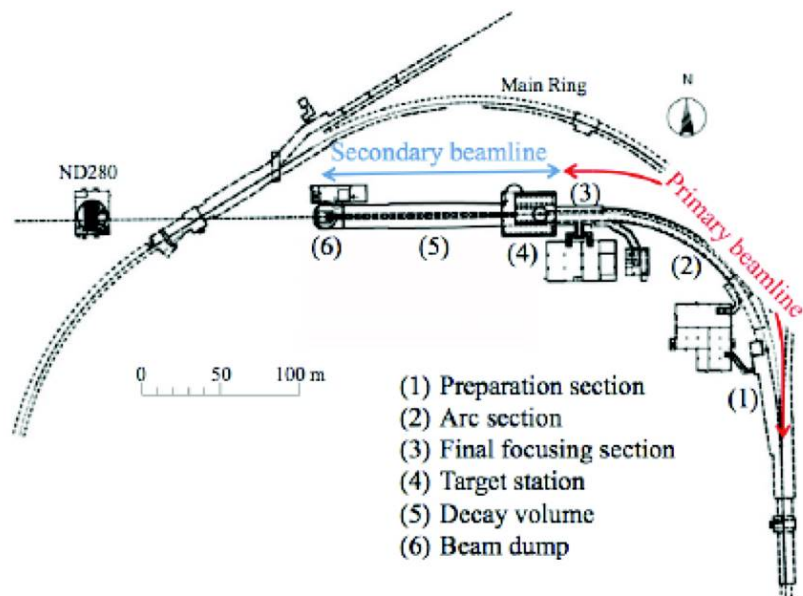


図8 1次、2次ビームラインに設置されたモニター群

陽子ビームは2次ビームラインに送られると、直径が26 mmで、長さが900 mmのグラファイト標的に照射され、ハドロン反応によってパイオンを含んだ多数のハドロンが生成される。生成されたパイオンは3台の電磁ホーンによって並行に収束される。パイオンは約100 mの崩壊トンネルの中で以下のような崩壊を起こし、これによってミューオンニュートリノが生成される。また図9は崩壊の模式図を示す。

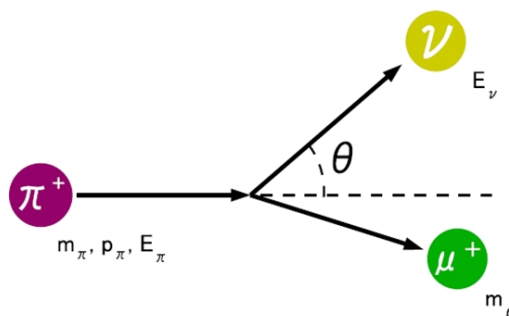


図9 パイオンの崩壊の模式図

また電磁ホーンの極性を反転させた場合は、崩壊トンネルの中では以下のような崩壊を起こして反ミューオンニュートリノが生成される。



トンネルの終端にはビームダンプが設置されており、陽子や崩壊せずに残ったパイオンなどのハドロン、低エネルギーのミューオンが吸収される。図10は2次ビームラインから後置検出器のスーパーカミオカンデまでの模式図である。

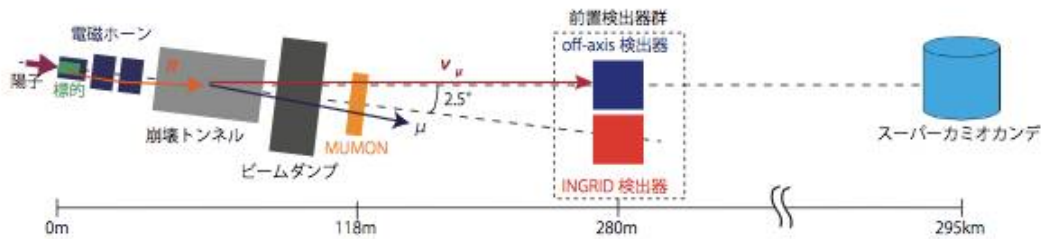


図 10 二次ビームラインで生成されたニュートリノが各検出器に到達するまでの模式図

### 2.2.2 off-axis 法

T2K 実験の大きな特徴としては off-axis 法を採用している事が挙げられ、この方法を用いた実験は T2K 実験が世界初である。off-axis 法とはビーム中心軸の方向を後置検出器であるスーパーカミオカンデからずらすことによりニュートリノが振動する確率が最大となるニュートリノのエネルギーを得る方法である。

式 (11) で表される崩壊によって生成されるニュートリノのエネルギー  $E_\nu$  は、ニュートリノと親粒子であるパイオンの成す角  $\theta$ 、パイオンの質量  $m_\pi$ 、エネルギー  $E_\pi$ 、運動量  $p_\pi$  を用いると以下のように書ける。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\nu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (13)$$

T2K 実験では off-axis 法として  $2.5^\circ$  を採用している。off-axis 角が  $2.5^\circ$  のときは、図 11 のように

ニュートリノフラックスのピークのエネルギーは約 600 MeV 付近であり、スーパーカミオカンデにおいてニュートリノの振動確率が最大となるエネルギー領域 (500~700 MeV) に一致している。

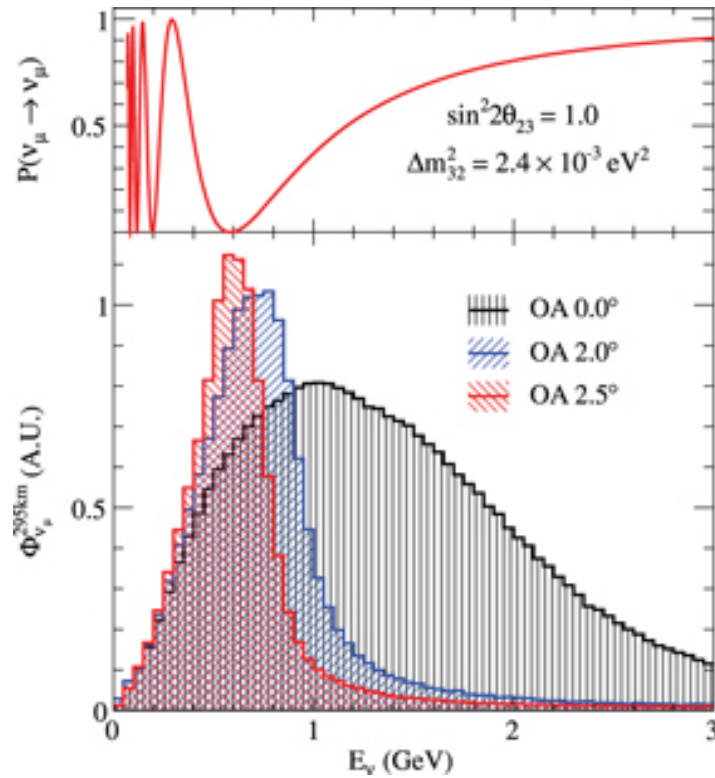


図 11 ニュートリノの振動確率 (上図) と off-axis 法によるニュートリノのエネルギー分布 (下図)

### 2.2.3 ミューオンモニター: MUMON

ミューオンモニター (MUMON) [6] はビームダンプ直後に設置され、ビームダンプを突き抜けてくる高エネルギーのミューオンビームのプロファイルを測定する。このプロファイルから間接的にニュートリノビームの方向と強度の安定性をモニターする役割を担う。ミューオンモニターはバンチごとにプロファイルを測定する事ができるので、リアルタイムでニュートリノビームの方向と強度の安定性を測定することが出来る。ミューオンモニターはふたつの検出器からできており、ビーム上流側ではシリコン PIN フォトダイオード、下流側ではイオンチェンバーが設置されている。ふたつの検出器を併用することで測定可能なビーム強度の範囲を広げている (図 12)。

## 2.3 前置検出器

T2K 実験では、グラファイト標的から 280 m 下流の地点に前置検出器を設置しており、これはビーム軸上に位置する on-axis 検出器 (INGRID、Proton Module) と、パイオンの平均崩壊地点とスーパーカミオカンデを結んだ直線上にある off-axis 検出器 (ND280) からなる (図 13)。

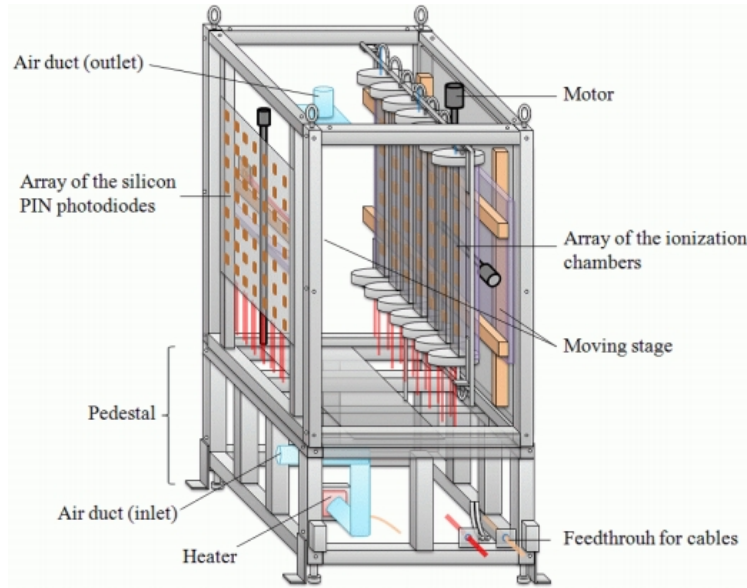


図 12 ミューオンモニター

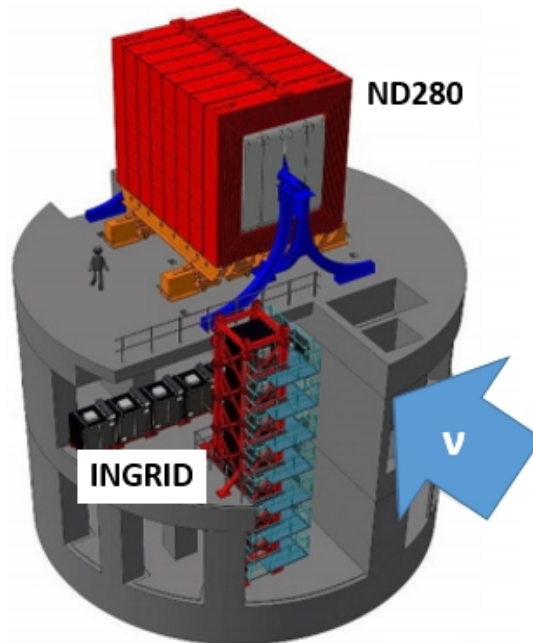


図 13 前置検出器の概略図

### 2.3.1 on-axis 検出器

#### INGRID (Interactive Neutrino Grid)

INGRID [7] は on-axis 上に設置されたニュートリノ検出器で、ニュートリノの方向と強度を高精度でモニタリングする事を目的とした検出器である。構造に関しては図 14 のように、 $x$  方向と  $y$  方向にモジュールを 7 台ずつ十字に配置されたようになっており、ショルダーモジュールと呼ばれる 2 台のモジュールが、横方向に配置した 7 台のモジュール群の上に設置されている。各モジュールは図 15 のように鉄の層が 9 層、シンチレータの層が 11 層のサンドイッチ構造をしており、大きさが  $1.2 \times 1.2 \times 0.9 \text{ m}^3$  で、重さは約 7 t である。この 14 台のモジュールを用いて INGRID はビーム中心から垂直方向、鉛直方向に  $\pm 5 \text{ m}$  の領域を

覆う。

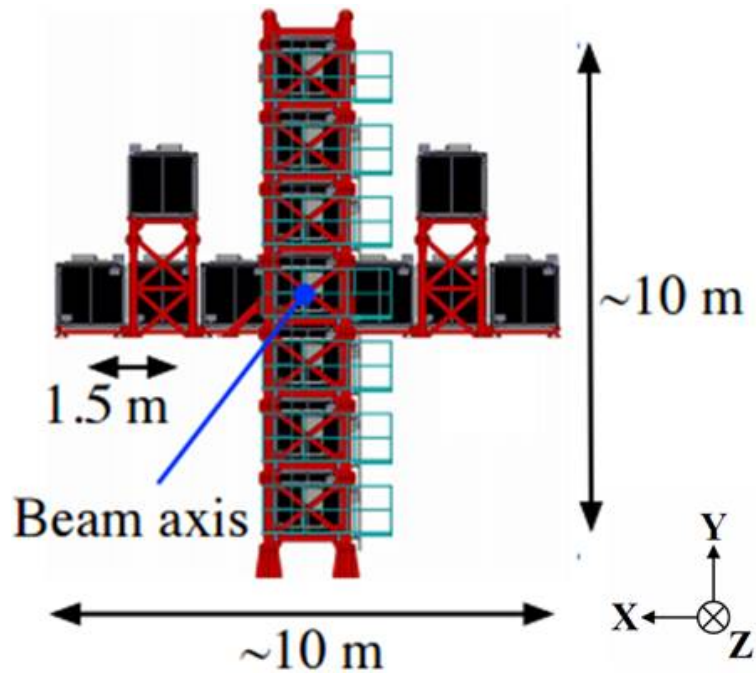


図 14 INGRID の全体図

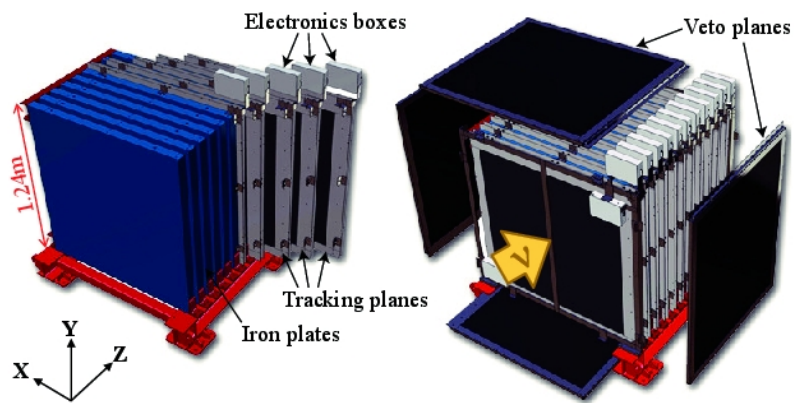


図 15 INGRID のモジュールの概略図

なお現在、2 台のショルダーモジュールの内の 1 台は図 16 のように B2 フロアに移動されており、B2 モジュールと呼ばれている。

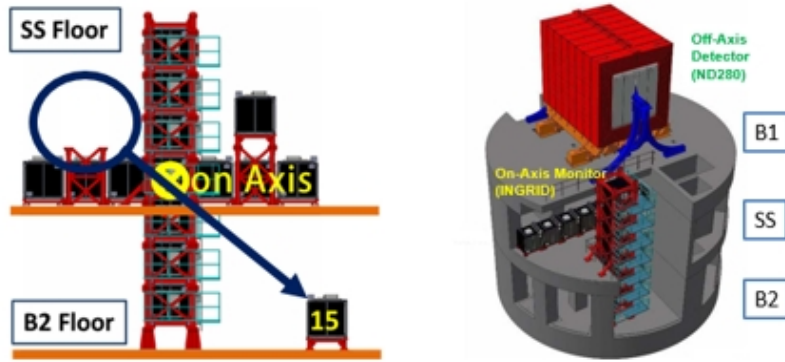


図 16 B2 モジュールの設置する様子と設置場所

### Proton Module

Proton Module はビーム軸を  $z$  方向として、プラスチックシンチレータを  $x$  方向 (水平方向) と  $y$  方向 (垂直方向) に並べた飛跡検出器であり、水平方向と鉛直方向に配置された INGRID の間に位置している。この検出器は、ニュートリノ反応で生成されるミュオンだけでなく陽子も検出できるようにデザインされている (図 17)。

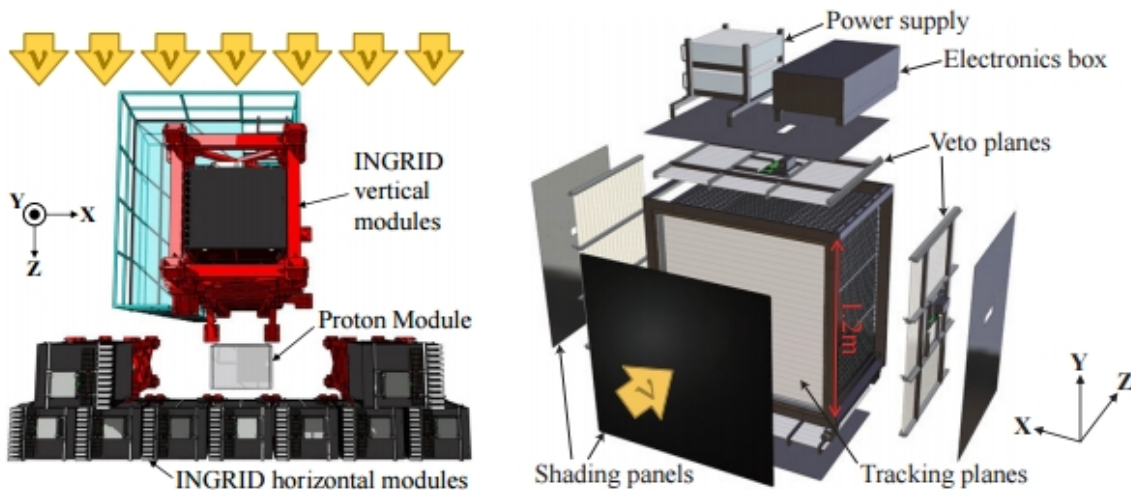


図 17 Proton Module (左: 設置場所、右: 内部構造)

### 2.3.2 off-axis 検出器: ND280

ND280 はスーパーカミオカンデ方向への生成直後のニュートリノビームのフラックスとエネルギー分布及び反応断面積を高精度で測定するための検出器である。ND280 は複合型検出器なので、以下より構成について述べる。(ビーム軸を  $z$  方向とする。)



#### UA1 Magnet

UA1 Magnet は 0.2 T の磁場を発生させることができるダイポール電磁石である。これはニュートリノ反応によって生成された荷電粒子を曲げ、運動量を測定するために検出器全体を覆っている。

#### P0D ( $\pi^0$ Detector)

P0D は  $x$  方向と  $y$  方向にプラスチックシンチレータを並べたトラッキング層と水標的層を交互に配置したサンドイッチ構造になっている。なお、プラスチックシンチレータを並べたトラッキング層の表面には鉛薄膜を被せている。P0D はシングル  $\pi^0$  を生成する中性カレント反応の断面積を測定する役割をもつ。

#### FGD (Fine Grained Detector)

FGD [8] はシンチレータを十字に組んだ構造をもつニュートリノ検出器であり、反応点付近における荷電粒子の検出を行う。この検出器はビームに対して垂直に設置している。また、ビームの上流側には細分化されたプラスチックシンチレータで構成される FGD と下流側には水標的部分とシンチレータのふたつから構成されている FGD が存在する

#### TPC (Time Projection Chamber)

TPC [9] はニュートリノ反応で生じた荷電粒子の、電荷、運動量、 $dE/dx$ などを測定し粒子識別を行う。

#### ECal (Electromagnetic Calorimeter)

P0D、FGD、TPC を囲むように設置しており、鉛層とプラスチックシンチレータ層を交互に重ねたもので構成されている。電子や光子の方向やエネルギーを測定する。

#### SMRD (Side Muon Range Detector) [10]

マグネットヨークの隙間にプラスチックシンチレータが設置されていて、大角度に散乱したミュオンの方向と運動量を測定する。

ここで、図 18 は off-axis 検出器の概観図を示す。

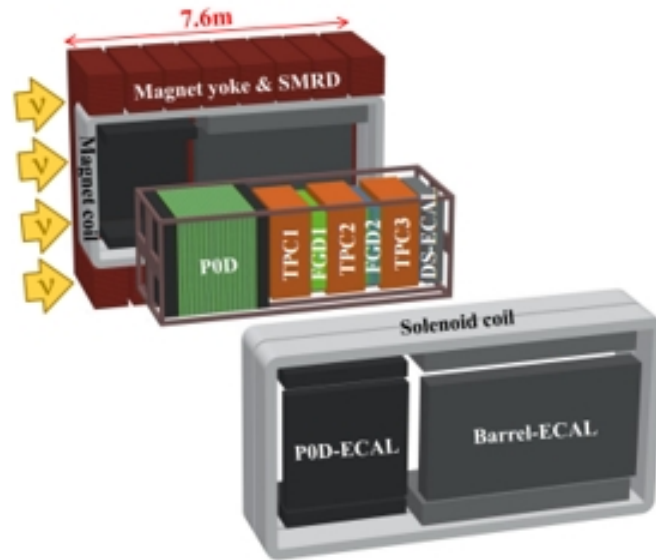


図 18 off-axis 検出器：ND280 の概観図

## 2.4 後置検出器: スーパーカミオカンデ

T2K 実験の後置検出器はスーパーカミオカンデ (図 19) [11] であり、これは J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山の地下 1000 m に建設された。またこの検出器は 50 kt の純粋を用いており、直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒形の水チェレンコフ検出器である。スーパーカミオカンデの内部 (図 20) はインナー検出器とアウター検出器という二層に大きく分かれており、インナー検出器には浜松ホトニクス製の 20 インチ光電子増倍管が内向きに 11146 本取り付けられている事に対して、アウター検出器には 8 インチ光電子増倍管が外向きに 1885 本取り付けられている。

ニュートリノ反応によって水中で生じた荷電粒子が、水中を光の速さより速く運動するとチェレンコフ光を放射する。またチェレンコフ光は円錐状の放射なので、スーパーカミオカンデの壁に設置された多くの光電子増倍管でそのチェレンコフ光を 1 つの大きなリング (チェレンコフリング) として検出し、ニュートリノ反応を捉える。このチェレンコフリングを観測することによってチェレンコフ光を出した粒子を同定し、反応したニュートリノの種類、生成点、荷電粒子のエネルギー、飛来方向を再構成する。ミュオンは電子に比べて質量が大きく直進するので図 21 のようなはっきりとしたチェレンコフリングが観測できるのに対して、電子は電磁シャワーを起こすので図 22 ぼやけたチェレンコフリングが観測される。

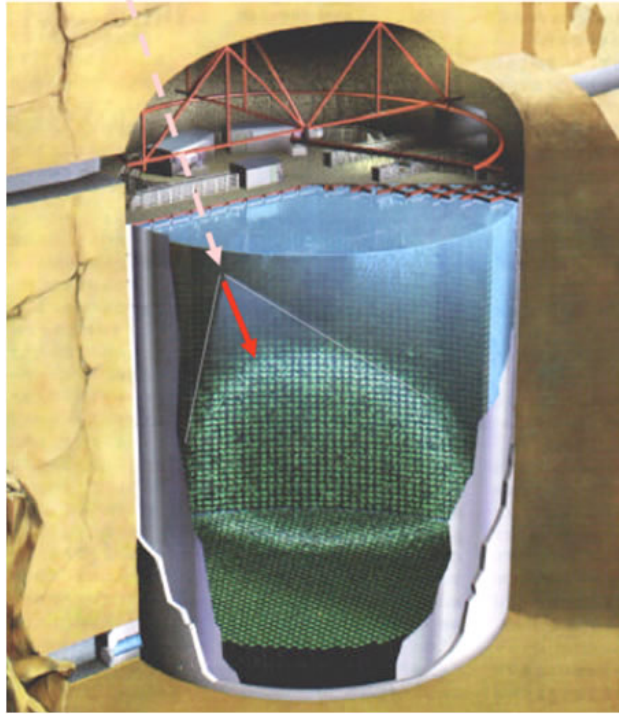


図 19 スーパーカミオカンデ

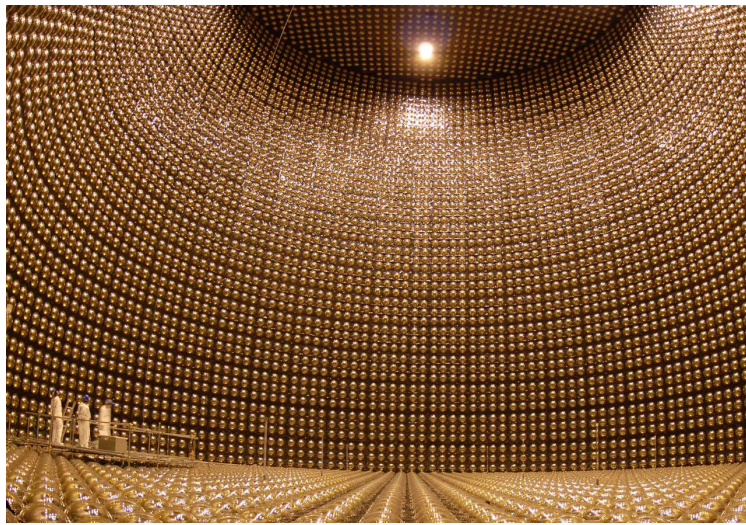


図 20 スーパーカミオカンデの内部の様子

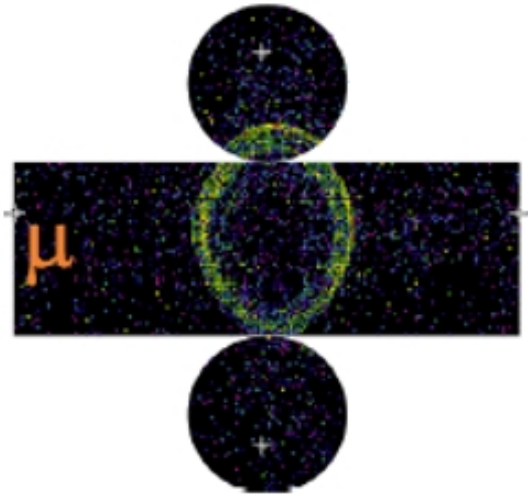


図 21 ミューオンが飛来した際のチェレンコフリング

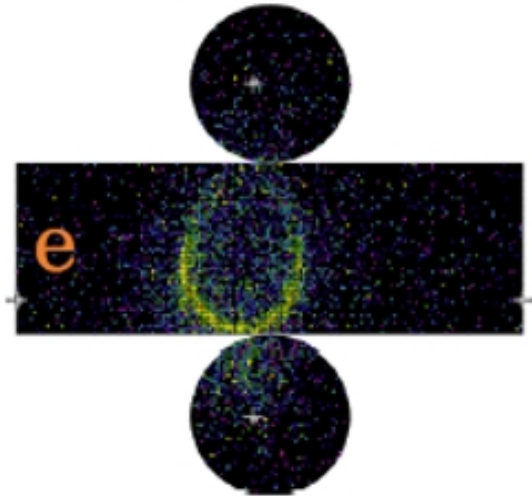


図 22 電子が飛来した際のチェレンコフリング

## 3 WAGASCI 実験

T2K 実験ではニュートリノ生成点直後に設置された前置検出器群を用いて、ニュートリノフラックスやニュートリノ反応断面積などの不定性による統計誤差を削減している。しかし、前置検出器ではニュートリノ標的をプラスチックを用いている一方、後置検出器のそれは水であるため、標的原子核の違いに起因する系統誤差が避けられない。これを削減することは、今後の高統計による精密な測定を実現するために重要である。そこで WAGASCI (WAter Grid And SCIntillator) 実験が発足した。

現在、off-axis 前置検出器群の中には水を標的としたものも存在するが、この検出器は構造上、ニュートリノ反応で生成された荷電粒子を検出できるアクセプタンスが前方方向のみに限られる。また水とプラスチックのニュートリノ反応断面積の違いはニュートリノ反応モデルからの予測では小さいとされているが、裏付けとなる実験は行われていない。よって、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を高精度で測定すれば、T2K 実験の系統誤差の削減につながるはずである。

そこで WAGASCI 実験では、 $4\pi$  のアクセプタンスを実現する三次元格子構造をもつ新型ニュートリノ検出器を製作し、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を 3% 以内の精度で測定することを旨とする。

### 3.1 概要

#### 3.1.1 検出器概要

図 23 のように、中心検出器 (Central detector) が設置されており、ビーム方向に沿って水標的層とプラスチック標的層が順番に 2 つずつ設置されている。また、中心検出器の周りには側面に 2 台、下流側に 1 台のミュオン飛跡検出器 (MRD : Muon Range Detector) を設置する予定である。中心検出器と MRD の間には約 50 cm の間隔を設け、中心検出器表面と MRD の内面に配置するプラスチックシンチレータ層によって得られる、荷電粒子の時間情報を用いて運動方向を決定し、バックグラウンドを除去する。また、図 24 のように検出器の最上流部には Front Veto として、プラスチックシンチレータを設置する。

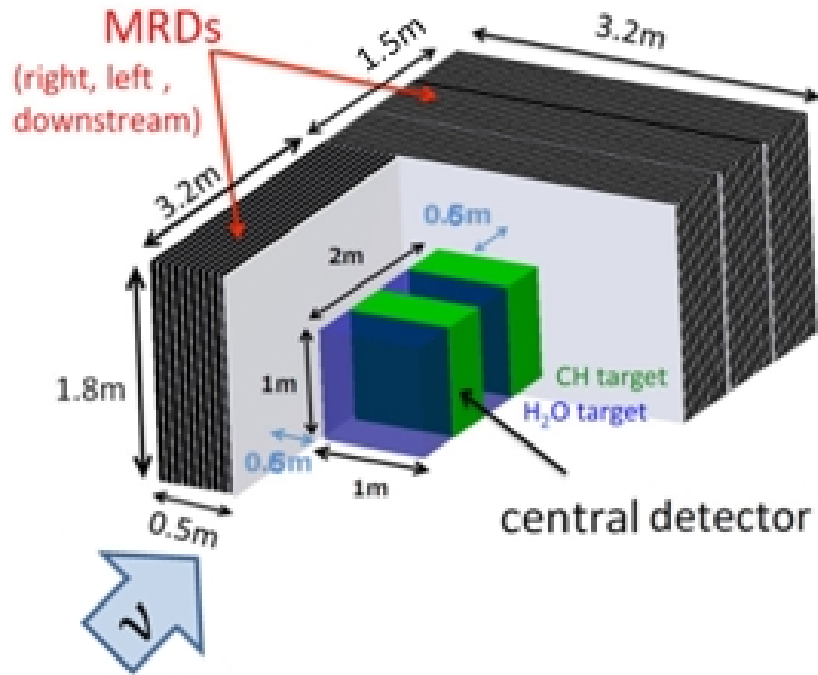


図 23 WAGASCI 検出器全体図

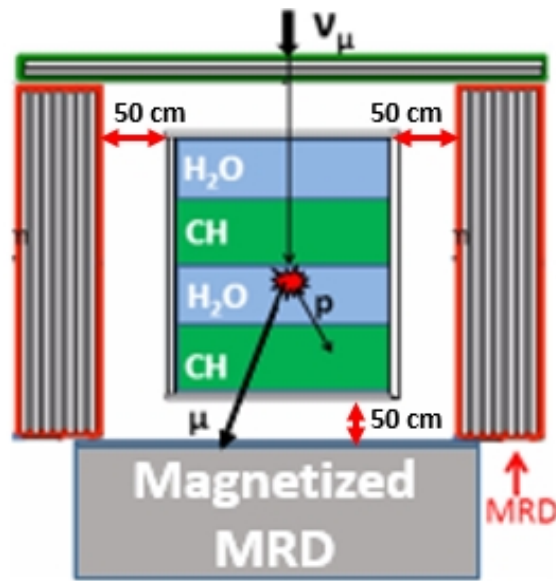


図 24 WAGASCI 検出器の上面図

### 3.1.2 実験場所

WAGASCI 検出器は図 25 に示したように、T2K 実験前置検出器ホール (NM) の地下 2 階に設置する。また設置場所は off-axis 角が  $1.6^\circ$  であり、そこでのニュートリノフラックスは off-axis 前置検出器でのニュートリノフラックスと似た分布をしている。よって、off-axis 前置検出器のニュートリノフラックスに近いエネルギースペクトルでの測定が可能である。

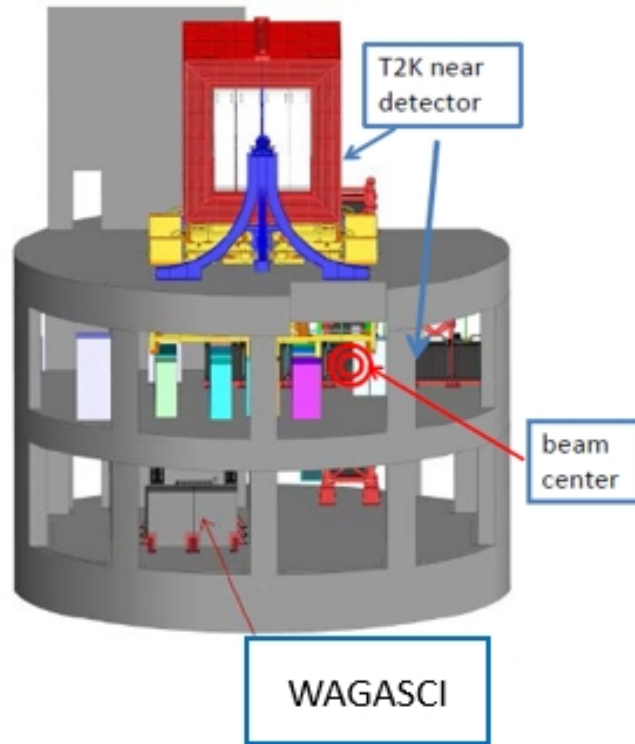


図 25 WAGASCI 実験の実験場所

### 3.1.3 中心検出器 (Central Detector)

中心検出器において水標的層とプラスチック標的層の質量は共に約 1 t であり、ビーム軸に垂直方向に 1 m、ビーム軸と並行に 0.5 m の大きさをしている。この検出器では厚さ 3 mm、幅 2.5 cm、長さ 1 m のプラスチックシンチレータを用いており、このシンチレータの中にはスリットをもつものもある。このスリットのあるプラスチックシンチレータ同士を格子状に組み立てることで三次元格子構造を成し、荷電粒子に対して  $4\pi$  のアクセプタンスを実現できる (図 26)。またプラスチックシンチレータは図 27 のようにビーム軸方向に対して、 $x$  方向 (水平方向)、グリッド構造、 $y$  方向 (鉛直方向)、グリッド構造、 $x$  方向という順番で並んでおり、グリッド構造の格子の大きさは  $5.0 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$  である。格子には各標的層に応じて水またはプラスチックを入れる。ビーム軸方向は 2.5 cm 間隔で  $x$  方向もしくは  $y$  方向のシンチレータ層があるので、ニュートリノ反応で生じた陽子や荷電  $\pi$  粒子などの短いトラックでも再構成が出来る可能性がある。また中心検出器では、プラスチックシンチレータで反応したニュートリノイベントはバックグラウンドになるので、薄型のシンチレータを使用しており、水またはプラスチック標的部分とプラスチックシンチレータ部分の体積比は 78.8:21.2 になる。なお、この検出器では合計 5120 ch のプラスチックシンチレータを用いている。

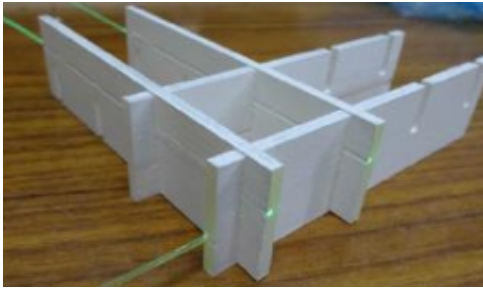


図 26 格子状にシンチレータを組んだ様子

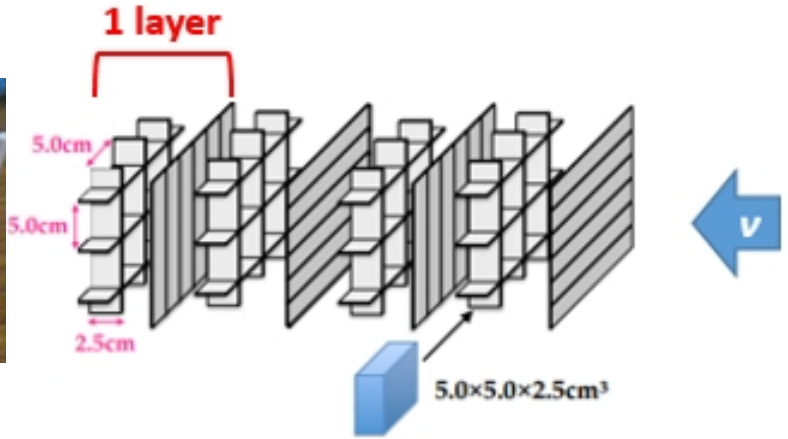


図 27 中心検出器の内部構造

水標的とプラスチック層を交互に並べている理由は、水標的とプラスチック標的でのニュートリノフラックスの違いを出来る限り小さくするためである。各ニュートリノ標的でのニュートリノフラックスが同じであるならば、反応断面積比を取ることでニュートリノフラックスによる系統誤差をキャンセルすることが出来る。図 28 に MC (モンテカルロ) で見積もった水標的とプラスチック標的におけるニュートリノのエネルギー分布を載せる。この図より各標的でのニュートリノフラックスはほとんど同じであり、反応断面積比を取る事で、ニュートリノフラックスの系統誤差がキャンセルさせる。

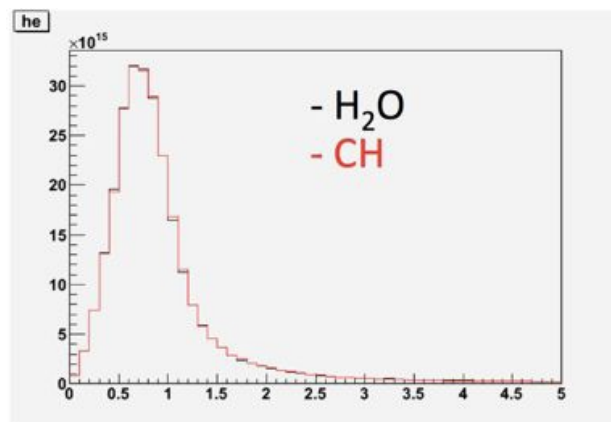


図 28 中心検出器の水標的とプラスチック標的のニュートリノフラックス (横軸はニュートリノのエネルギー)

図 29 はグリッド構造の有無に応じた中心検出器のイベントディスプレイを示している。図 29 左は中心検出器のグリッド構造を除いた際のイベントディスプレイである。この場合では大角度方向に飛んだミュオンに対してほとんどヒットがなく検出することが困難である。しかし、図 29 右のようにグリッド構造があれば、大角度方向に飛んだミュオンにたいして多くのヒットを検出することが可能になる。よって、中心検出器で三次元格子構造を作ること、 $4\pi$  のアクセプタンスを実現する事が出来る。



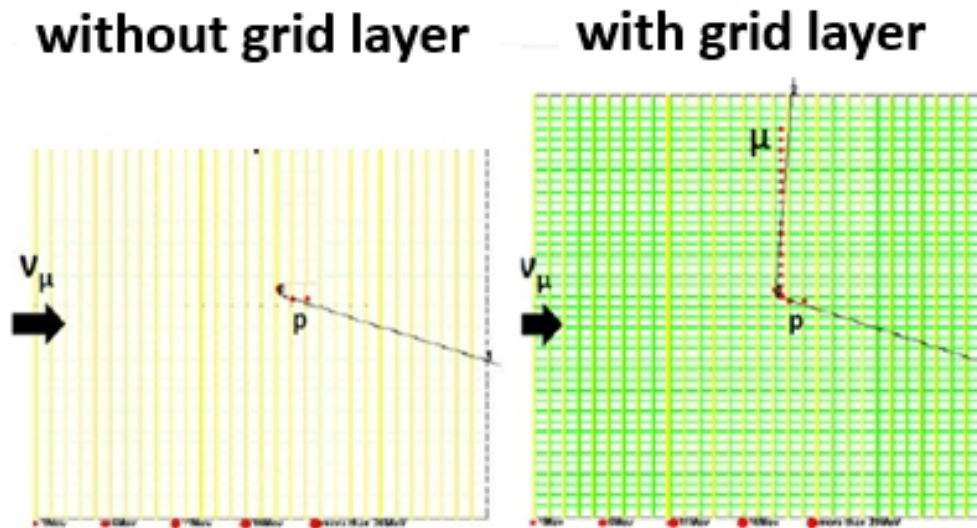


図 29 中心検出器のイベントディスプレイ (左: グリッド構造がない場合、右: グリッド構造がある場合)

前述のように中心検出器は 2 台の水標的層と 2 台のプラスチック標的層が交互に並べられて構成している。図 30 は水標的層 1 台の模式図であり、これは 1280 本のプラスチックシンチレータから構成されている。そして、このシンチレータ層を水槽に入れることによってシンチレータで構成する格子に水標的を満たす事が出来る。

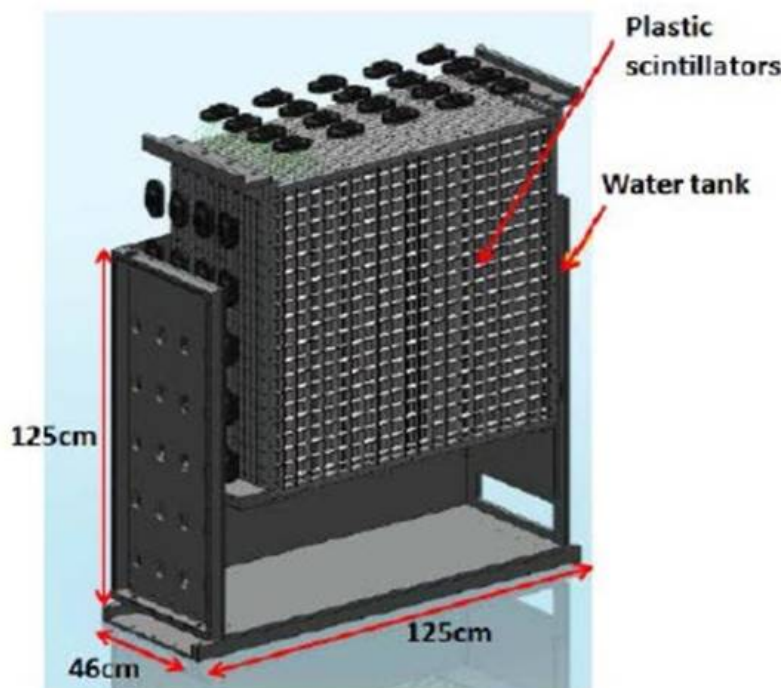


図 30 INDRID Water Module の模式図

1 台の標的層のシンチレータ層は 4 台の Sub Module を組み上げることで完成する。Sub Module は図 31 のように 320 本のシンチレータで構成されており、各 160 本のスリットのあるシンチレータとスリットのないシンチレータで構成されている。

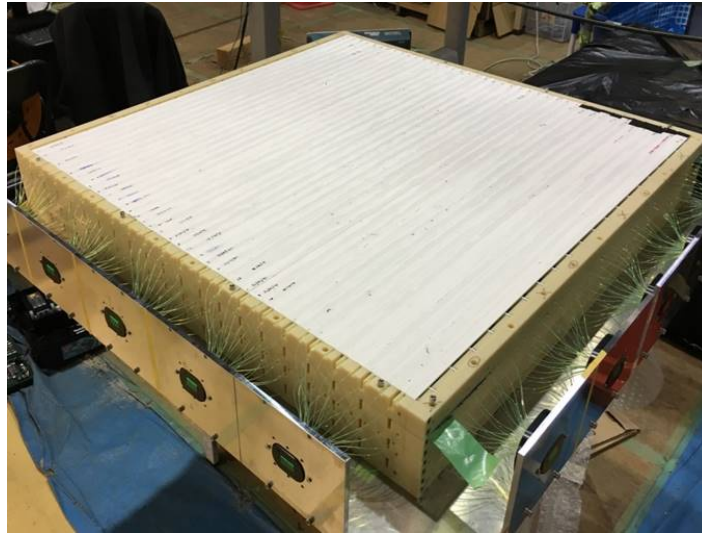


図 31 Sub Module

#### 3.1.4 ミューオン飛跡検出器 (MRD : Muon Range Detector)

MRD は鉄とプラスチックシンチレータのサンドイッチ構造を成す検出器であり、ミューオンの飛跡を再構成し、その運動量の測定を目的としている。この検出器は側面に二台 (Side MRD)、下流に一台 (Downstream MRD) 設置する予定である。Side MRD の大きさに関しては高さが 1.8 m、ビーム方向に垂直な長さが 3.2 m、厚さが 1.5 m であり、厚さが 3 cm の鉄板を 10 層分使用している。Downstream MRD の大きさに関しては高さが 1.8 m、ビーム方向に垂直な長さが 3.2 m、厚さが 1.5 m であり、厚さ 6 cm の鉄板を 5 層分使用している。ここで Side MRD に比べて Downstream MRD の厚さが大きいのは、高エネルギーのミューオンはビーム軸との角度が小さくなる事が多く、それらのミューオンを止めるためである。よって、Side MRD は約 1 GeV までミューオンの運動量を測定出来るのに対して、Downstream MRD は約 2 GeV まで測定可能となっている。

設置する MRD は中心検出器から 50 cm 離しており、中心検出器と MRD のヒットタイミングの時間差から、荷電粒子の方向を測定する。これによって、壁や床で反応した粒子や MRD 自身で反応した粒子などのバックグラウンドとなるイベントを取り除く事が出来る。

#### 3.1.5 Veto plane

中心検出器の周囲には MRD の表面と同様にシンチレータを設置する。中心検出器の上流と下流には長さ 1 m のシンチレータを縦横に 2 層ずつ、合計 4 層のシンチレータを設置する。また側面には長さ 220 cm のシンチレータを 3 層設置する。

#### 3.1.6 Front veto

中心検出器のビーム上流には MRD を設置せず、ヒットタイミングの時間差による荷電粒子のバックグラウンドが取り除けないため、これを除去するためにプラスチックシンチレータの層を設置する。設置場所は中心検出器からビームの上流側に 50 cm 離れたところで、縦横二層ずつプラスチックシンチレータの層を設置する。Front veto のカバー範囲は Downstream MRD と同様で

ある。

## 3.2 目的

WAGASCI 実験の目的は以下のとおりである。

- 水とプラスチックの間の反応断面積比を誤差 3% の精度で測定する
- 水とプラスチックそれぞれに対するニュートリノ反応断面積を誤差 10% の精度で測定する

## 3.3 検出器の構成要素

WAGASCI 実験で用いる中心検出器においては、到来したニュートリノと水標的やプラスチック標的の原子核の中性子とのニュートリノ反応によって生成された荷電粒子がプラスチックシンチレータを通過した際に発生するシンチレーション光を、シンチレータに接着した波長変換ファイバーが吸収する。またその吸収した光をファイバーの端面より半導体光検出器 MPPC が検出し、電気信号に変換する。この章ではプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、MPPC などについてまとめる。

### 3.3.1 プラスチックシンチレータ

WAGASCI 実験で使用するプラスチックシンチレータは大きく分けて 3 種類ある。中心検出器用の薄型シンチレータと INGRID 型シンチレータ、MRD 用のシンチレータである。

中心検出器用の 2 種類のシンチレータは Fermi 国立加速器研究所で製造された押し出し形のプラスチックシンチレータ [12] であり、ポリスチレンをベースに質量比で 1% の PPO と 0.03% の POPOP を混ぜており、表面は酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ ) ベースの反射剤でコーティングされている。図 32 INGRID 型シンチレータの大きさは長さ 120 cm、幅 5 cm、厚さ 1 cm であり、中央には波長変換ファイバーを通すために直径 2~3 mm 程度の穴が空いてある。薄型シンチレータはこの実験のために新たに開発されたもので、長さ 1 m、幅 2.5 cm、厚さ 0.3 cm の大きさであり、シンチレータの 2.5 cm × 1 m の片面には波長変換ファイバーを通すために 1 m の辺から 8.5 mm 離れたところで 1 m の辺に平行に深さ 1.2 mm の溝が掘られている。この溝には波長変換ファイバーを後述するオプティカルセメントで固定する。これによってシンチレータから生じるシンチレーション光はシンチレータの片側からファイバーを介して MPPC で検出される。(この検出方法を片側読み出しという。) また図 33 ように薄型シンチレータには 5 cm 間隔でスリットがあるシンチレータもあり、これは 3 次元立体構造をもつようにシンチレータをグリッド状に組み上げる必要があるからである。

MRD で用いるシンチレータは、長さ 1.8 m、幅 20 cm、厚さ 7 mm のものを用いており、組成は押し出し形ポリスチレンに POPOP と para-terphenyl を混ぜたものである。MRD ではこれを 16 枚用いて 3.2 m × 1.8 m の面で厚さ 7 mm の層を組み上げる。このシンチレータは薄さに対して幅が大きいので、波長変換ファイバーを波状に埋めこんでいる (図 34)。そのため、波長変換ファイバーの長さが長くなるので、MRD で用いるシンチレータに関しては両側読み出しである。また、MRD の内側表面には長さ 160 cm 又は 180 cm、幅 5 cm、厚さ 1 cm の INGRID 型シンチ

レータを用いて、4層のシンチレータの層を作る。(縦方向、横方向それぞれ2層ずつ)

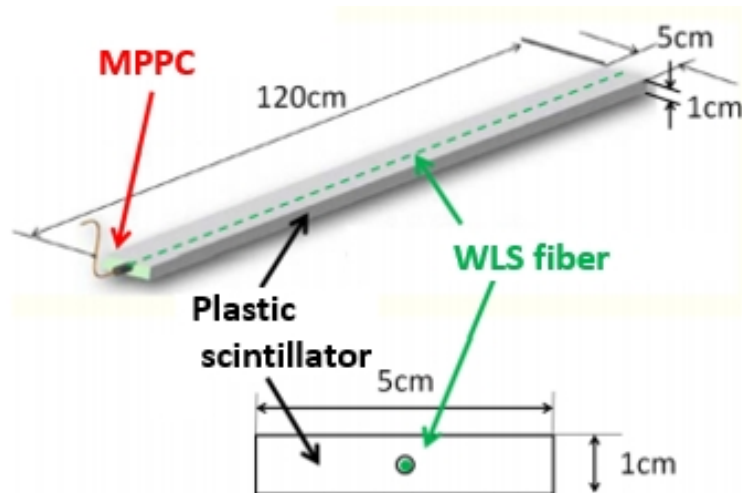


図 32 INGRID 用のシンチレータの模式図

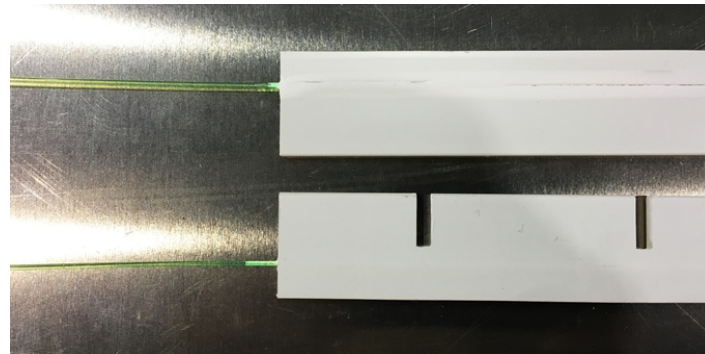


図 33 中心検出器用の薄型シンチレータ

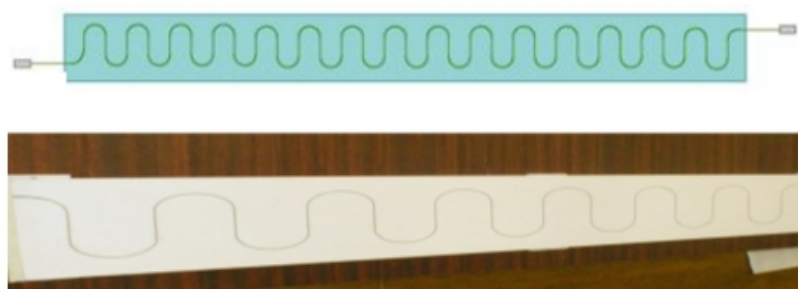


図 34 MRD 用のシンチレータとファイバー

### 3.3.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、外から入射した光を吸収した後に、より長い波長で再発光し、その光を伝える光ファイバーである。よって、WAGASCI 実験において波長変換ファイバーは荷電粒子がシンチレータを通過した際に生じたシンチレーション光を半導体光検出器 MPPC は光を導く役割を担っている。WAGASCI 実験で用いる波長変換ファイバーは Kuraray 社の Y11 (200) MS で

ありファイバーの直径は 1.0 mm のものである。吸収波長は 430 nm であり、シンレータの発光波長ピークである 420 nm にほぼ一致する。またファイバーの発光波長のピークが 460 nm となっていて、MPPC の最大感度波長 440 nm にほぼ一致している。以下の表 2 に Kuraray 社が製造する波長変換ファイバー (Y11 (200) MS ) のカタログスペックをまとめる。なお、図 35 が実際の写真である。



図 35 波長変換ファイバー

表 2 Y11 (200) MS の波長変換ファイバーのカタログスペック [14]

直径	1.0 mm
Core の屈折率	1.59
Inner cladding の屈折率	1.49
Outer cladding の屈折率	1.42
最大吸収波長	430 nm
最大発光波長	460 nm
減衰長	~3 m

### 3.3.3 クッキー (Fiber bundling connector) と MPPC

クッキーはシンチレータから伸びたファイバーを束ねるものである。これはフランスの LLR で WAGASCI 実験用に設計された。設計されたものは 32 ch array 型のクッキーで 32 本のファイバーを束ねることが出来る。また、束ねられたファイバーの光は 32 ch array 型 MPPC を用いて測定する。クッキーの斜め対角線上に位置する穴は MPPC を固定させるための穴で、クッキーの中心上にある穴は、MPPC のアライメント用の穴である。また、水漏れが起こらないように O-リングを装着できる用になっている。



図 36 クッキー (左: 表側、右: 裏側)

### 3.3.4 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

MPPC は浜松ホトニクス社によって開発された半導体光検出器である。特徴としては小型であり、低電圧での動作や光子カウント能力に優れており、磁場の影響を受けにくいなどが挙げられる (図 37)。MPPC の受光面にはガイガーモード APD (Avalanche PhotoDiode) ピクセルが並んでいる。APD に一定値以上の電圧をかけると、光子によって生成された電子-正孔対が内部電場によって加速される。その後、加速された電子-正孔対が電子雪崩を起こすことで増幅された電気信号が出力される。この現象が起こる状態をガイガーモード [15] と呼び、この現象が起こり始める電圧のことをブレイクダウン電圧と呼ぶ。

実際の MPPC の出力波形は複数のピクセルで発生したパルスの重ね合わせで出力される。MPPC の出力波形をオシロスコープで見ると図 38 のようになる。光子がピクセルに入射したかを表す情報として photon equivalent (p.e.) があり、この数値が出力したピクセルの数に相当する。しかし注意点として、複数の光子が同じピクセルに入射した場合 1 p.e. の出力になる。本論文の内容では MPPC の型番が S13081-050CS のものを使用した。

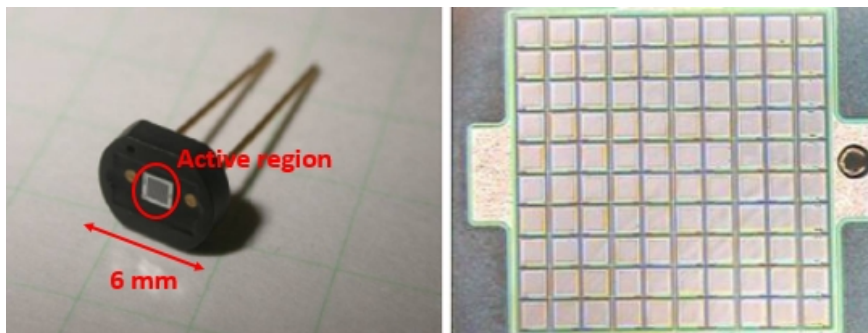


図 37 MPPC の概観 (左) と受光面の拡大図 (右)

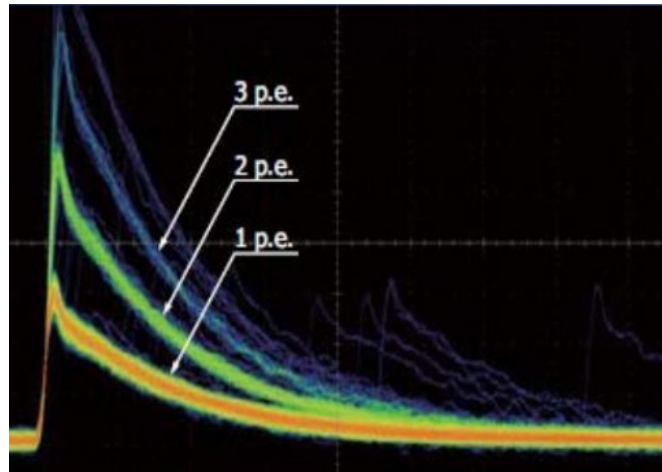


図 38 MPPC の出力波形

次に、MPPC の基礎特性について述べる。

#### ゲイン

一つの APD ピクセルのガイガー放電による電子の増幅率のことを示す。

$$\text{Gain} = \frac{\text{ピクセルが出す電荷量}}{\text{素電荷}}$$

#### ダークカウント

ノイズの 1 つで、入射光子と関係なく熱運動で励起された電子が電子雪崩を起こす現象であり、この現象は温度が高い程起こりやすく、温度依存性が大きい。

#### クロストーク

ノイズの 1 つで、電子雪崩の際に二次光子が生成されて、それが他のピクセルで雪崩を起こす。本来は 1 p.e. の信号が 2 p.e. 以上に見える現象。

#### アフターパルス

ノイズの 1 つで、電子雪崩で増幅した電子が光子欠陥に捕獲されて、それが再度放出されて雪崩を起こす現象であり、これは、図 39 本来のパルスより少し送れて信号を出す。

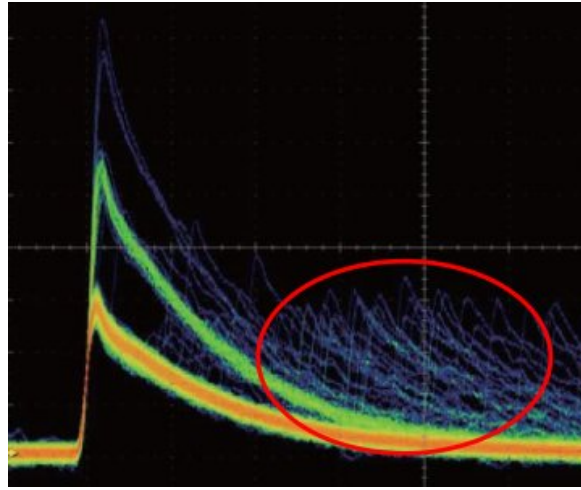


図 39 アフターパルス

WAGASCI 実験では数種類の MPPC を用いており、中心検出器では 32 ch の array 型 MPPC を用いる (図 40)。また以下の表 3 では、後述する Sub Module の光量測定において用いられた 32 ch array 型 MPPC のカタログスペックを載せる。

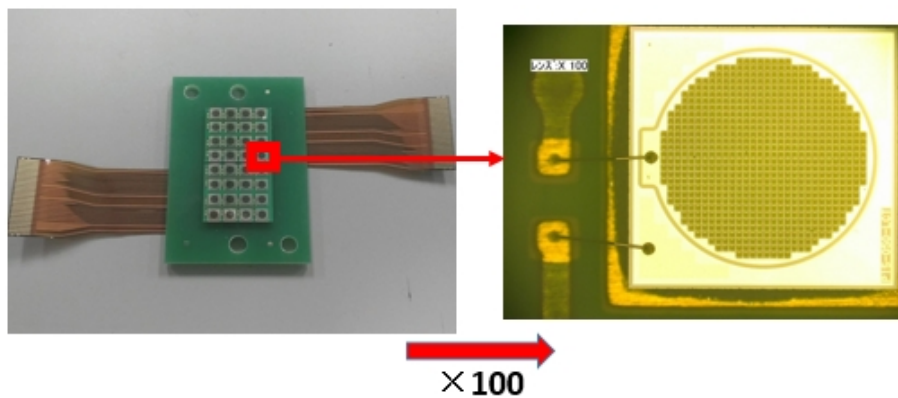


図 40 32 ch array 型 MPPC

表 3 32 ch array 型 MPPC S10943-4156 のカタログスペック

チャンネル数	32 ch
有効受光サイズ/ch	$\phi 1.5$ mm
ピクセル数/ch	716
ピクセルピッチ	50 $\mu$ m
最大感度波長	450 nm

### 3.3.5 GOMI コネクタ (General Optical MPPC Injection Connector)

GOMI コネクタは波長変換ファイバーと MPPC を接続するために開発された図 41 のようなプラスチック製のコネクタである。GOMI コネクタはファイバーを接着する部分と MPPC を収納する部分の 2 種類のパーツがあり、これらを組み合わせると図 42 のようになる。このとき、ファ



ファイバーの端面と MPPC の受光面は十分に近接するようになる。

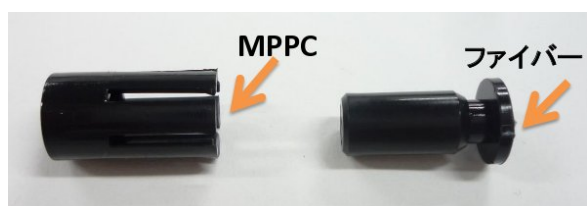


図 41 GOMI コネクタの各部品



図 42 組み立て後の GOMI コネクタ

## 4 INGRID Water Module 検出器の製作

WAGASCI 実験の中心検出器を構成する 1 台の水標的層を、2015 年夏から 2016 年春にかけて製作した。図 43 はこの検出器の実際の写真である。現在この水標的層は、その性能評価、あるいは既存の Proton Module や INGRID を共に用いたニュートリノ反応断面積測定を目的として、INGRID のビームの上流に設置されている。これを踏まえ、この WAGASCI 実験のために製作された最初の水標的層のことを INGRID Water Module と呼ぶ。この章では INGRID Water Module の製作についてまとめる。



図 43 INGRID Water Module 検出器

### 4.1 INGRID Water Module 検出器の製作工程

INGRID Water Module 検出器の製作工程を大きく分けると、以下のようになる。

- 1、シンチレータと波長変換ファイバーの接着及び反射剤塗布
- 2、シンチレータへの黒塗料塗布
- 3、サンプリングによるシンチレータの光量測定
- 4、レイヤーの組み立て

以下より、INGRID Water Module が出来るまでの各製作工程をまとめる。

#### 4.1.1 シンチレータと波長変換ファイバーの接着と反射剤塗布



図 44 自動接着システムの作業場

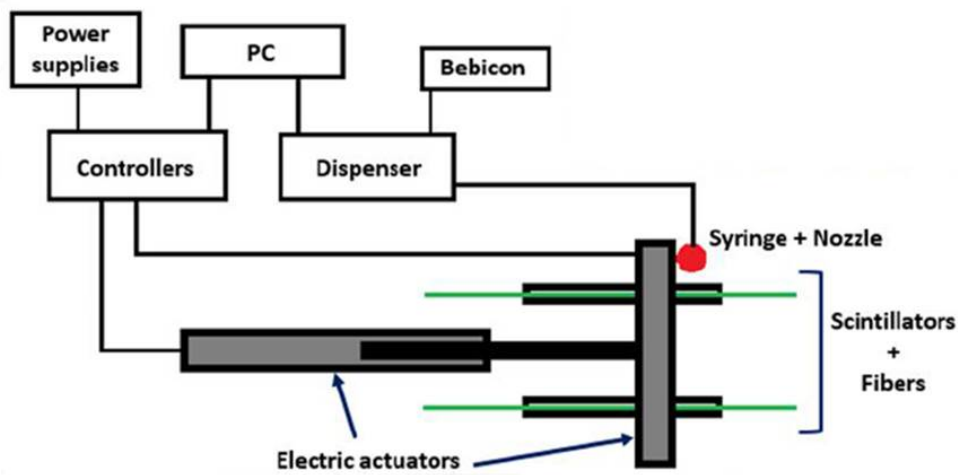


図 45 自動接着システムの概観図

図 45 のようなシステムを用いてシンチレータにファイバーを接着する。ここでの作業台は 4 台の机を用いており、各机の高さの違いは株式会社第一鉄工の作業によって同じ高さに調整されている。図 44、46 のように作業台には水平を保つための大きなアルミ板が置かれており、またその上に 5 枚の小さなアルミ板が並べられている。この小さなアルミ板には 1 枚に対して 5 本のシンチレータを乗せられるため、作業台には 1 度に 25 本のシンチレータが並べられる。またこのアルミ板はシンチレータとファイバーを固定したまま作業場から取り出すことが出来る。よって、オプティカルセメントや反射剤を塗布した後、この板ごと図 47 のようなシンチレータ保管棚に置いておくことで 24 時間の乾燥を待たずして他の小さなアルミ板を用いて次のシンチレータの塗布作業を連続して行える。



図 46 アルミ板にシンチレータを乗せた様子



図 47 接着や反射剤を塗布したシンチレータの保管場所

光学セメントはファイバーをシンチレータに固定する際に用いる接着剤で、WAGASCI 実験では図 48 のような Eljen Technology EJ-500 (Optical cement resin と Optical hardender) を主剤と硬化剤を 4:1 の質量比で混合する。この光学セメントは Kuraray 社の波長変換ファイバー (Y11 (200) MS) 透過率とほぼ一致するという特性がある。なお、GOMI コネクタをファイバーに接着する際も用いる。



図 48 オプティカルセメント (左: 主剤、右: 硬化剤)

反射剤は図 49 のように Avian Technologies 社の Avian-D を用いており、主剤と硬化剤を 33:1 の質量比で混合する。シンチレータの側面や、シンチレータの溝にファイバーが接着された後のファイバー周りに塗布される。これにより、シンチレータから生じたシンチレーション光が外部に漏れる事を抑制出来る。なお、シンチレータの側面やシンチレータの溝以外の部分は、Fermi 国立加速器研究所で製作する際に既に反射剤がコーティングされている。



図 49 反射剤 (左: 主剤、右: 硬化剤)

この自動接着システムでは 1 度に 25 本のシンチレータにオプティカルセメントや反射剤を塗布する事が可能で、それはアクチュエーター (図 50) を用いて実現している。2 本のアクチュエーター (稼働範囲が 150 cm と 120 cm がある) の内、1 本はシンチレータの溝にオプティカルセメントや反射剤を塗布するために、シンチレータに並行に設置しており、もう 1 本は複数のシンチレータの溝に移動して塗布するために、シンチレータに対して垂直に設置してある。

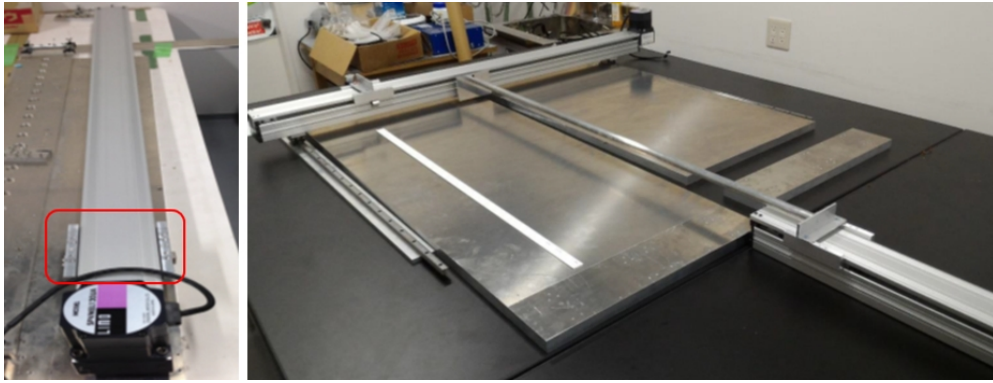


図 50 アクチュエーター (左) と 2 台のアクチュエーターを作業台に設置した様子 (右)

オプティカルセメントや反射剤の塗布はコンプレッサー (図 51) やディスペンサー (図 52) を用いて行っている。コンプレッサーはディスペンサーを介する事で一定の圧力を吐出することが出来、これによってオプティカルセメントや反射剤の吐出量を制御している。また図 53 左のように、ディスペンサーの先にはシリンジが装着出来るようになっており、オプティカルセメントを用いる際はノズル (図 53 右上) を、反射剤を用いる際は刷毛ノズル (図 53 右下) をシリンジの先に装着する。オプティカルセメントや反射剤は主剤と硬化剤を定められた質量比で混ぜた後に真空ポンプを用いて真空脱泡を行う。この作業では図 54 のような真空ポンプとアクリル製の小型真空容器を用いた。以下の図 55 のように大きな気泡が無くなるまで真空脱法を行う。気泡が無くなれば、シリンジに流し込んでプランジャーを詰め込む。このように塗料が詰められたシリンジはシリンジ固定具 (図 56) で固定した後、XY ステージでノズルとファイバーとの距離を調節する。なお、シリンジ固定具は図 50 左の赤い部分に装着されている。



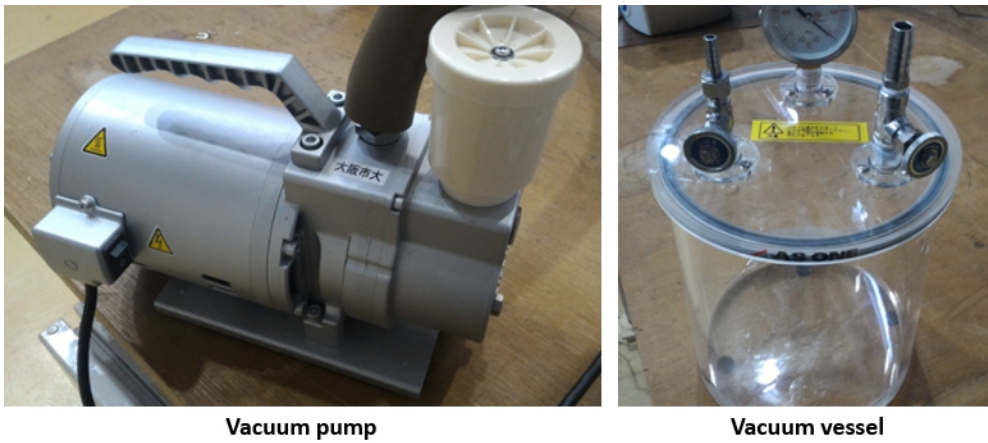
図 51 コンプレッサー



図 52 ディスペンサー



図 53 シリンジ (左) とシリンジに付けるノズルとプランジャー (右上) と刷毛ノズル (右下)



Vacuum pump

Vacuum vessel

図 54 真空ポンプ (左) と真空容器 (右)

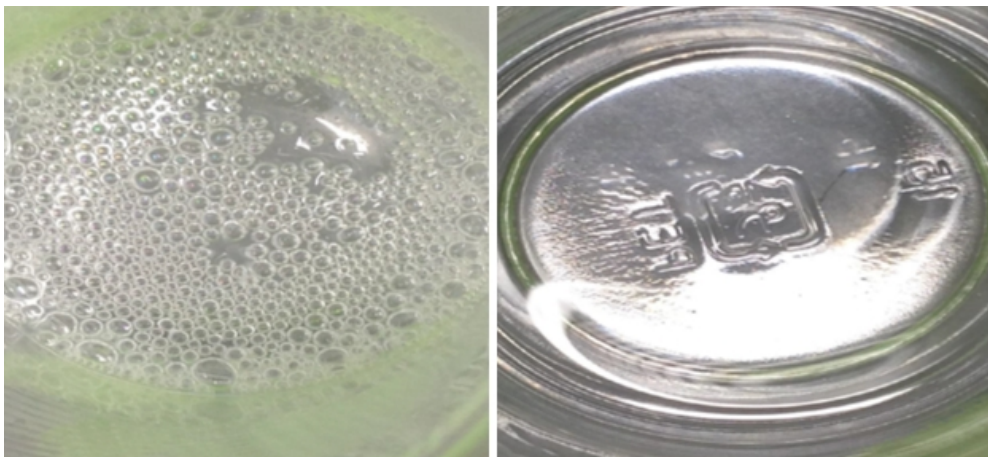


図 55 真空脱法中 (左) と真空脱法後 (右) のオプティカルセメント

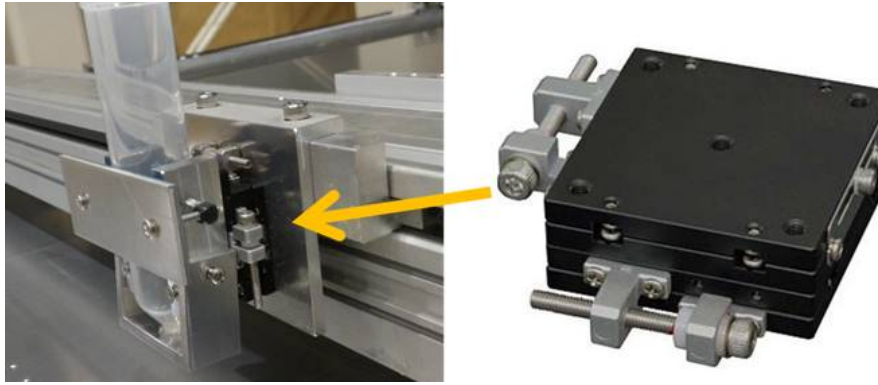


図 56 シリンジ固定具 (左) と XY ステージ (右)

図 57 のようにオプティカルセメントや反射剤を自動接着システムで塗布する際、不必要に塗料が付着して、アルミ板やファイバーが汚れることがないように適宜ラップを被せている。実際に塗布システムを動かす際は、システムに以上がないかを確認しながら塗布を行う。通常は 1 日に 100 本のシンチレータにファイバーを接着する作業と、ファイバーが接着された 100 本のシンチレータに反射剤を塗布する作業を各 4 サイクル行っている。また反射剤の塗布作業に関しては一度だけでなく、反射剤を塗布した翌日以降に、一度も塗られていない側面に塗布作業を行うと共に、塗料が少ない部分に対しても 2 度塗りを行い反射剤をしっかりと塗布する。



図 57 塗布を行わない部分をラップで覆う様子

#### 4.1.2 シンチレータへの黒塗料塗布

今回製作する INGRID Water Module は 3 次元格子構造であり、検出器の内部では図 58 のような複数のシンチレータで構成された格子が至るところに存在する。そして、後述する組み立て作業によって完成した 1 台の Sub Module において宇宙線を用いて光量測定を行った結果、あるシンチレータから漏れだしたシンチレーション光は格子内で乱反射を起こしてシンチレータ間でのクロストークになっていることがわかった。そこで我々は、それを抑制するためにシンチレータに反射剤をコーティングするだけでなく、さらに黒塗料を含んだスプレーを用いてシンチレータに塗布



する作業を行った。2015年度の INGRID Water Module の製作における黒塗料塗布に関しては作業の順序に則って次のレイヤー組み立ての説明の際にまとめる。

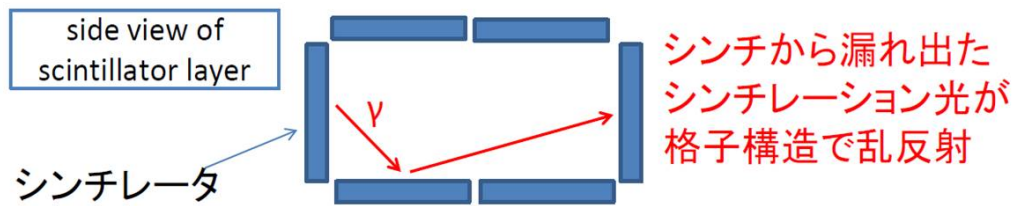


図 58 クロストークを増やす乱反射の様子

以下、2016年度に行った黒塗料の塗布作業についてまとめる。  
シンチレータへの黒塗料塗布は図 59 のビニールハウスの中で行う。ビニールハウスの中には作業台が 2 台ずつハウス内の両端に並んでいる。ビニールハウスの側面には、スプレーの使用時に作業者がスプレーに含まれる有害物質の中毒にならないように、図 60 のように通気口を用意している。その内の 2 つが吸気口、残りの 2 つを排気口になっている。排気口からは電気送風機に取り付けられたダクトがビニールハウスの外へと出ており、さらにこのダクトは作業を行う建物の外まで続いて有害物質が屋外に排気されるようになっている。また、スプレー塗布を行う者は図 61 のように防塵マスクと防塵眼鏡を着用している。



図 59 黒塗料を塗布したビニールハウス

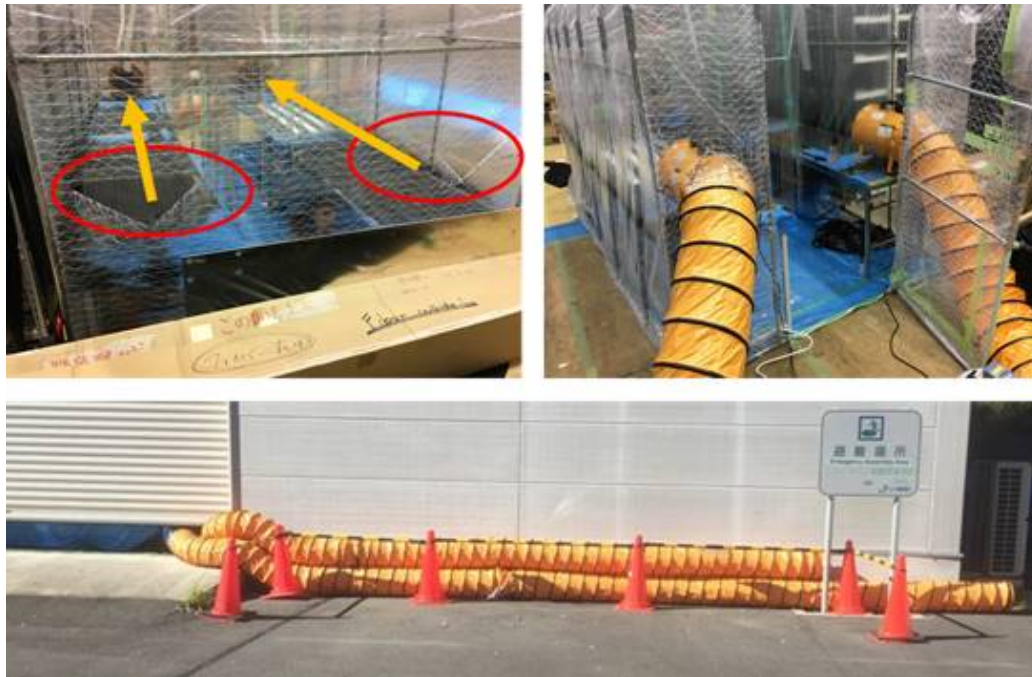


図 60 吸気口 (左)、排気口 (右)、屋外に延長したダクト (下)

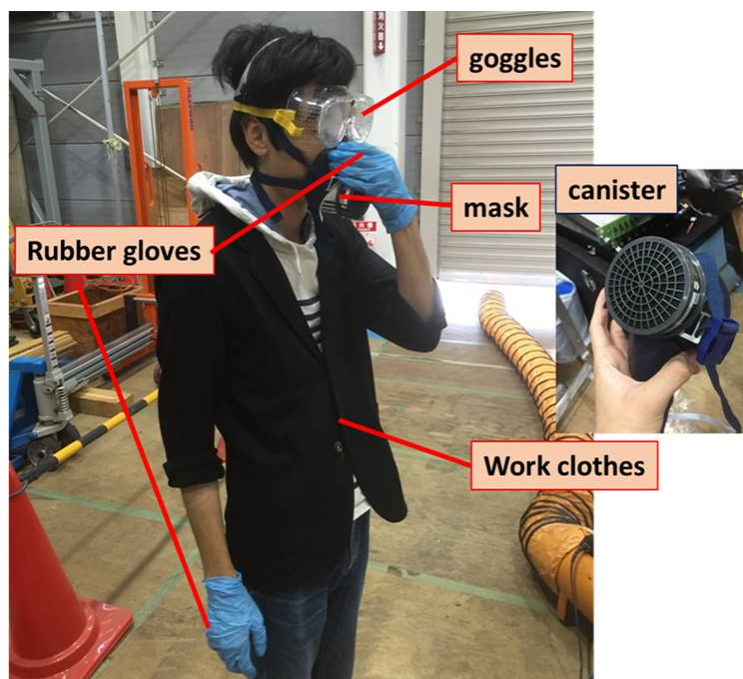


図 61 黒塗料を塗るときの格好

このような環境のもとで、図 63 のようにビニールハウス内の机にシンチレータを並べて黒塗料を塗布していく。図 62 は実際の黒塗料作業で用いた、Kanpe Hapio 社の水性シリコンカラスプレーを示す。塗布作業において再現性をもたせるために、1 本のシンチレータに対して約 6 秒で塗布することに注意する。また、図 64 のようにスプレー内の塗料が出やすくするためにスプレーを 30° から 50° 傾けて塗布することにも注意する。塗布は片面に対して 2 回ずつ行い、1 回目はスプレーをシンチレータから 15 cm ほど離して塗布を行う。そして 1 回目の塗布作業から 2 時間後に再度スプレーで黒塗料を上塗りする。2 回目の塗布作業では、スプレーはシンチレータから 10 cm ほど

離して塗布を行い、目視で白い部分がなくなるまで行う。さらにこの作業から2時間後にもう片方の面に対して同様の作業を行う。ビニールハウスには23本のシンチレータを置くことができる机が4脚あるので、1日で約100本のシンチレータに対して黒塗料を塗布することが出来る。



図 62 黒塗料スプレー

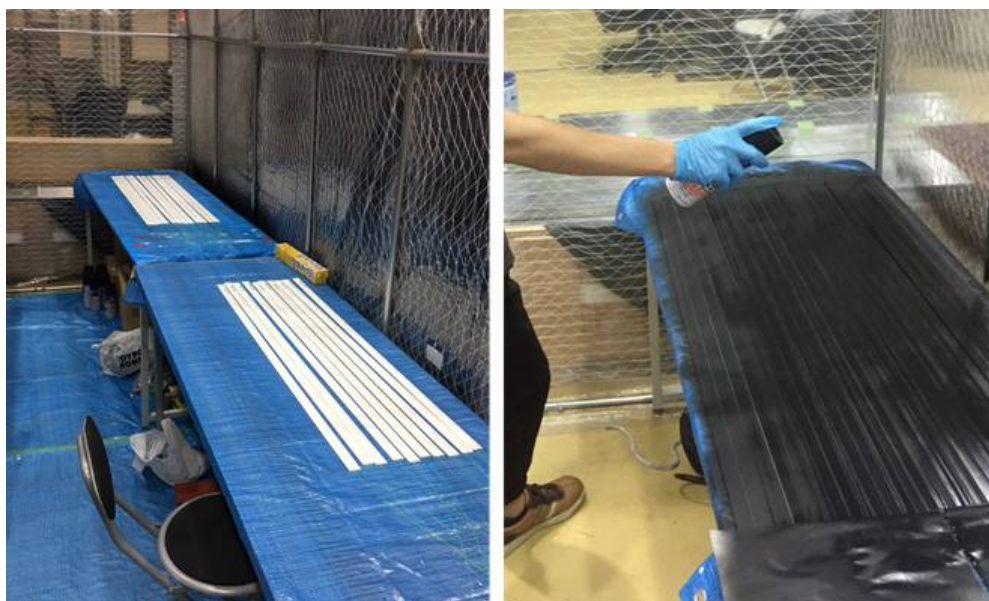


図 63 黒塗料を塗布する前 (左) と塗布後 (右)

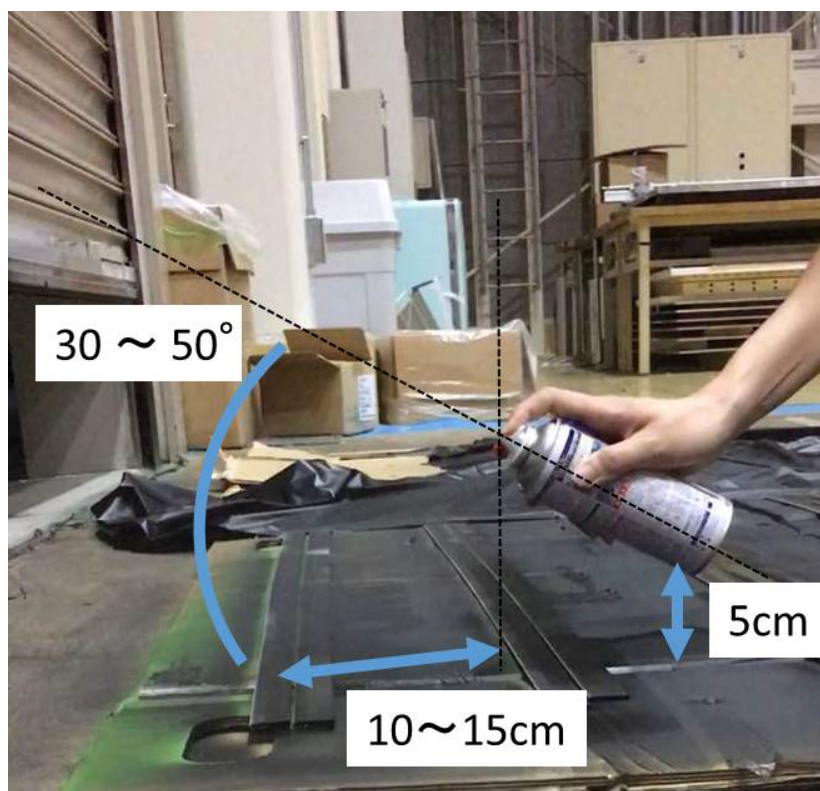


図 64 黒塗料を塗布する様子

#### 4.1.3 レイヤーの組み立て

ここではシンチレータを組み立てに関してまとめる。まず波長変換ファイバーを接着し、反射剤の2度塗りまで行ったシンチレータをABS樹脂で出来たフレームを用いて組み立てる。これによって、グリッドの層1つとビーム ( $z$  方向) に対して  $x$  または  $y$  方向に並べた層1つで構成されたレイヤーと呼ばれるものができる。図 65 のように ABS 樹脂フレームを作業台に固定したら、まずはスリットのあるシンチレータを用いてグリッド構造の層を組み立てる。またこの時、一度に双方のシンチレータを組むのではなく、図 66 のように1方向ずつシンチレータを組み立てていく。反射剤が多く塗られていてフレームやスリットに入らない際は、やすりを用いて入るようになるまで磨く。しかし、シンチレータの溝からのファイバーの浮きが目視で確認できるほど顕著な場合は今回の製作からそのシンチレータは取り除く。グリッド構造が出来上がると、図 67 左のようなシリコン接着剤を用いてフレームとシンチレータを固定する。この接着作業は図 67 右のように自動接着システムで用いた同型のシリンジを用いている。接着剤の吐出量はコンプレッサーにディスペンサーを接続して調節する。図 68 はシリコン接着剤を用いてシンチレータを固定した様子である。シリコン接着剤が乾燥した後はスリットのないシンチレータを用いてビーム方向 ( $z$  方向) に対して  $x$  または  $y$  方向に並べたシンチレータの層を組み立てる。これらのシンチレータもシリコン接着剤を用いてフレームに固定する。



図 65 ABS 樹脂で出来たフレーム (左) とそれにシンチレータを組み立てている様子 (右)

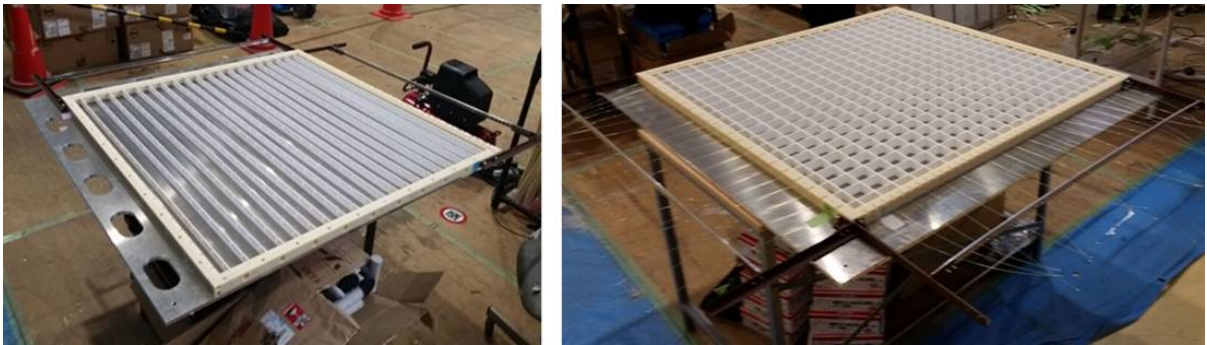


図 66 グリッド構造のシンチレータ層の組み立て



図 67 シリコングルー (左) とそれを詰めたシリンジ (右)

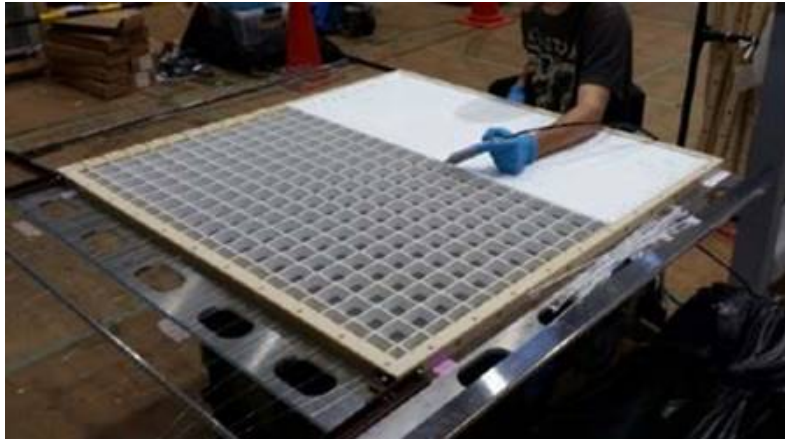


図 68 シリコン接着剤を用いてシンチレータを固定している様子



図 69 Sub Module (左) とファイバーをまとめたクッキー (右)

こうして出来上がったレイヤーを 4 つ重ねたものが Sub Module となる。次にフレームから飛び出したファイバーは 32 本毎に図 69 のようにクッキーに束ねられる。また束ねられたファイバーは図 70 のようにオプティカルセメントを用いてクッキーに接着された後、株式会社スズノ技研によってファイバーの端面が研磨される。

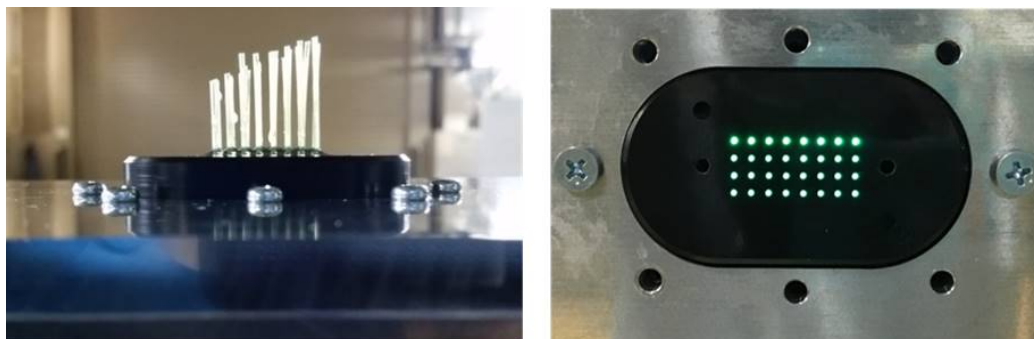


図 70 研磨前のクッキー (左) と研磨後クッキー (右)

なお、図 69 の Sub Module のシンチレータは組み立て後の様子であるが、1 台の光量試験をした結果からシンチレータ間での光の授受（クロストーク）が発見されたので、Sub Module の 2

台目以降は図 71 のようにレイヤー毎に黒塗料スプレーで塗布作業を行った後に、図 72 のように防草シートを補っている。なお、この防草シートは 90% 遮光することが出来る。図 73 は防草シートを補った箇所を示す。また、最初に製作した Sub Module はクッキーでファイバーが固定されており、レイヤーに分解することが出来なかったため、レイヤーのすき間から防草シートだけを補っている。そして、Sub Module を 4 つ重ねて水槽に入れることで INGRID Water Module が完成する。図 74 では 4 つの Sub Module を水槽に入れている様子を載せている。



図 71 黒塗料をレイヤー毎に塗布している様子

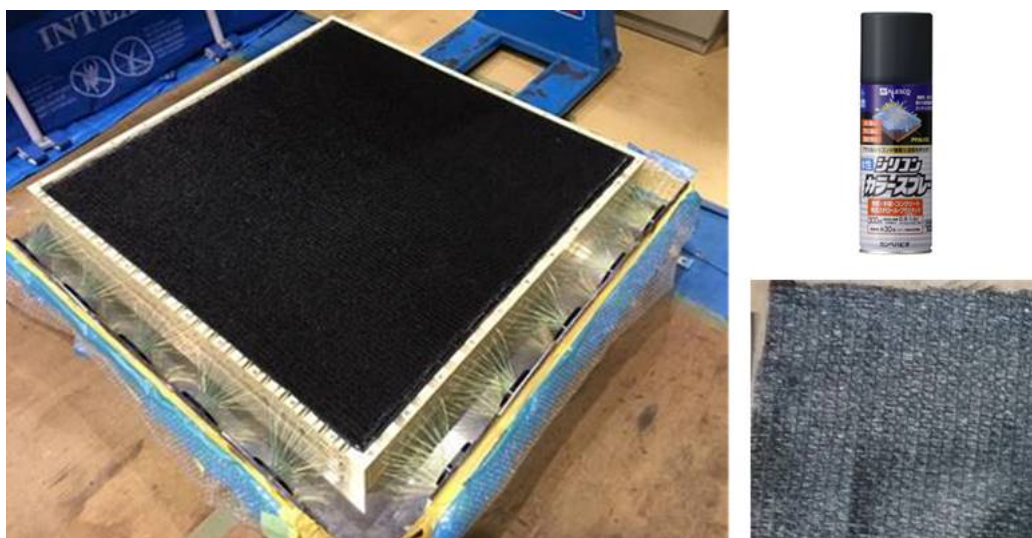


図 72 黒塗料スプレー (右上) と防草シート (右下) を用いた Sub Module (左)

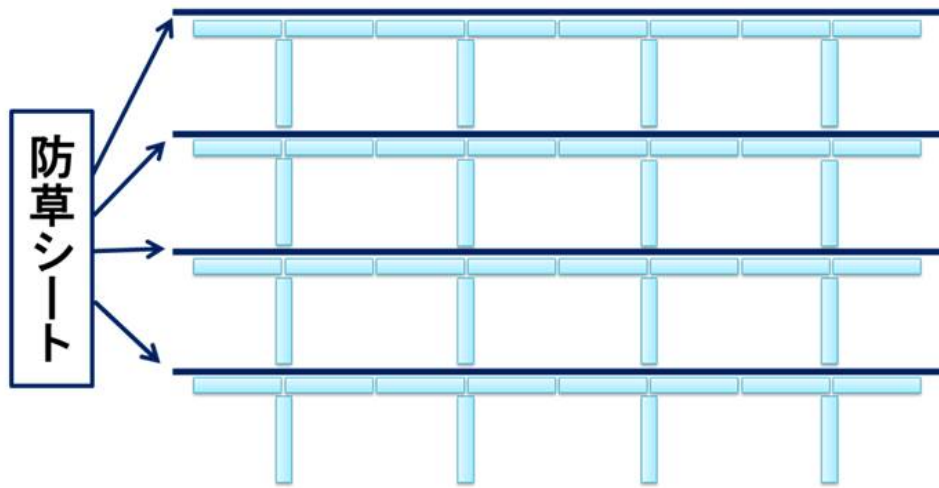


図 73 防草シートを補った箇所

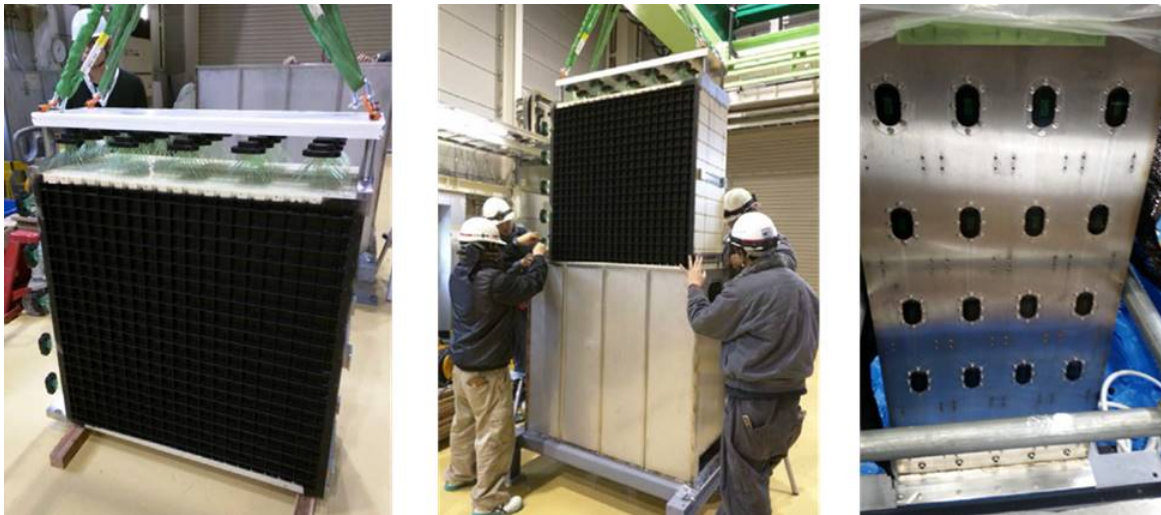


図 74 Sub Module を水槽に入れる様子



## 5 INGRID Water Module の性能評価

この章では INGRID Water Module 検出器の製作途中に行ったサンプリングによる光量測定や、製作後に行っていた性能評価についてまとめる。

### 5.1 INGRID Water Module 製作過程での光量試験

INGRID Water Module 検出器は合計 1280 本のシンチレータで構成されているが、この検出器は一度組み立ててしまうと光量の低いシンチレータが発見されても新しいものに取り替えることが出来ないため、作業途中でプラスチックシンチレータの光量測定を行い、光量が十分に出ているかを確認する必要がある。しかし、全てのシンチレータの光量測定を行うことは時間的に現実的ではないため、我々はサンプリングによる光量測定によって確認することにした。既に製作された INGRID Water Module に加え、現在、2018 年度の完成を目指して 2 台目の製作が進められている。以降、前者を IWM1、後者を IWM2 と略し、この 2 台の検出器を構成するシンチレータのサンプリングによる光量測定についてまとめる。

#### 5.1.1 目的

INGRID Water Module 製作過程での光量試験では以下の目的が挙げられる。

- シンチレータ全体の平均光量を求める

今回製作する INGRID Water Module のシンチレータには、前章で述べたようにファイバーが接着されており、その上から反射剤を上塗りされている。これらの作業を経たシンチレータの光量評価を、レイヤーの組み立ての前に行う必要があり、サンプリングによって確認する。

- 光量の低いシンチレータを検出器製作から抜き取る

サンプリングによる光量測定で光量の低いシンチレータを見つけ、そのシンチレータへのファイバー接着と同一工程内で接着作業を行ったシンチレータ群を取り除く。

#### 5.1.2 セットアップ

INGRID Water Module 検出器の製作過程での光量測定は J-PARC 構内にある NA 棟の作業場 (図 75) において宇宙線を用いて行われた。測定のセットアップは概略を図 76 で示す。暗箱内に図 77 のようにプラスチックシンチレータを 4 つ (IWM1 の際は 3 つ) 重ねている。一番上と一番下のシンチレータをトリガーシンチレータとしてその間の挟まれたシンチレータの光量を測定する。2 つのトリガーシンチレータの光を読み出している MPPC の信号は Coincidence module に送られ、データ取得のトリガーを生成する。なお、図 78, 79 は暗箱の概観と中の様子を載せており、図 80 は暗箱内の温度を測定・記録するための温度計である。



図 75 作業場

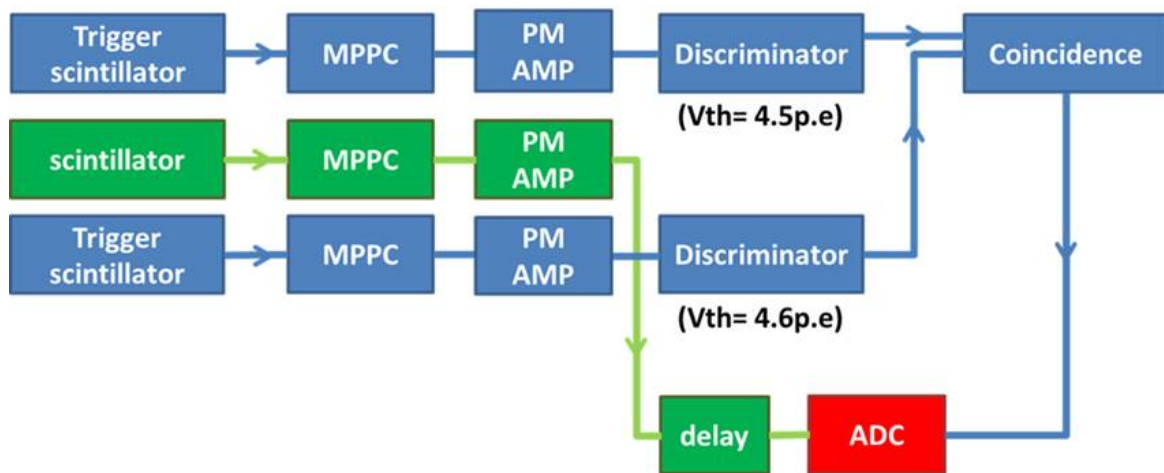


図 76 セットアップの概略図 (IWM1 の場合)

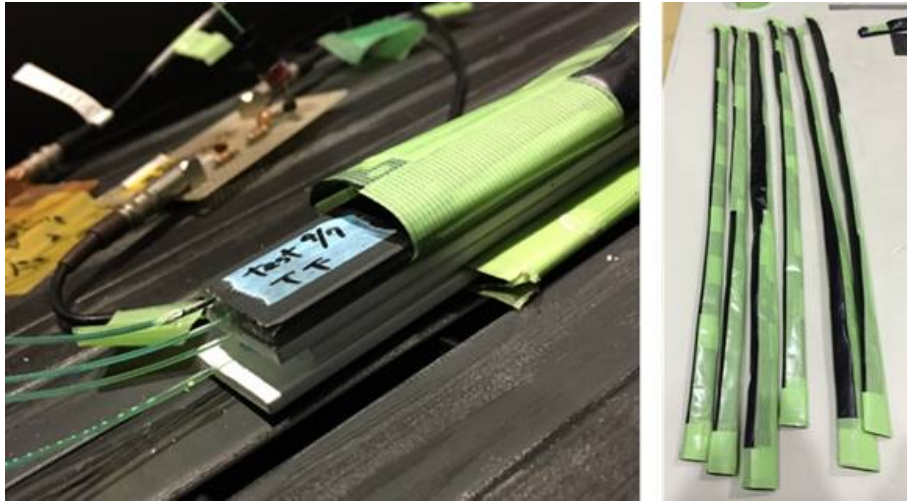


図 77 シンチレータを重ねた様子 (左) とシンチレータを包んでいるブラックシート (右)



図 78 暗箱の概観

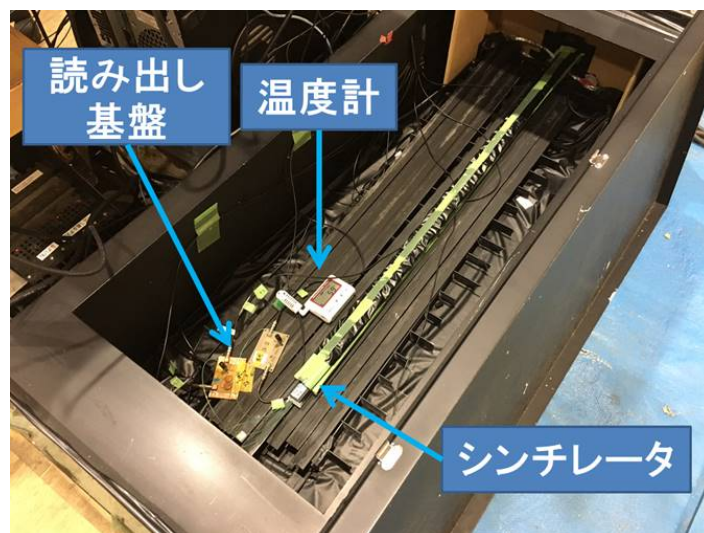


図 79 暗箱の中の様子

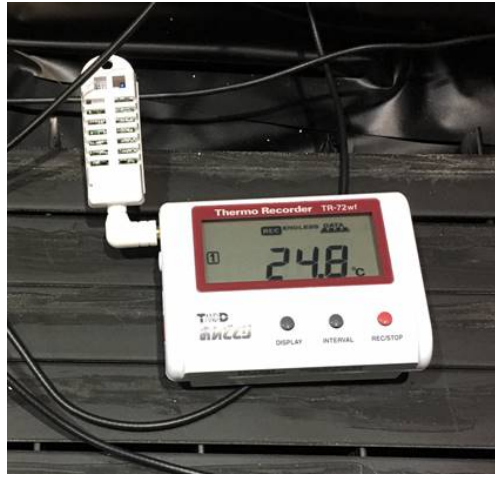


図 80 測定に用いる温度計

今回の光量測定ではサンプルだけでなくトリガーシンチレータも INGRID Water Module 検出器で実際に使用するプラスチックシンチレータを用いている。光量測定を行う際、図 81 のようにサンプルやトリガーシンチレータに固定された波長変換ファイバーに GOMI コネクタを光学セメントを用いて接着する。GOMI コネクタが接着された後、図 82 左下のように GOMI コネクタからはみだしたファイバーを 4 種類のやすり (図 83) を用いて研磨を行う。綺麗に研磨が出来ると図 82 右下のような端面になる。なお、やすりの粒度は粗い順に 320, 1000, 4000, 10000 のものを用いている。

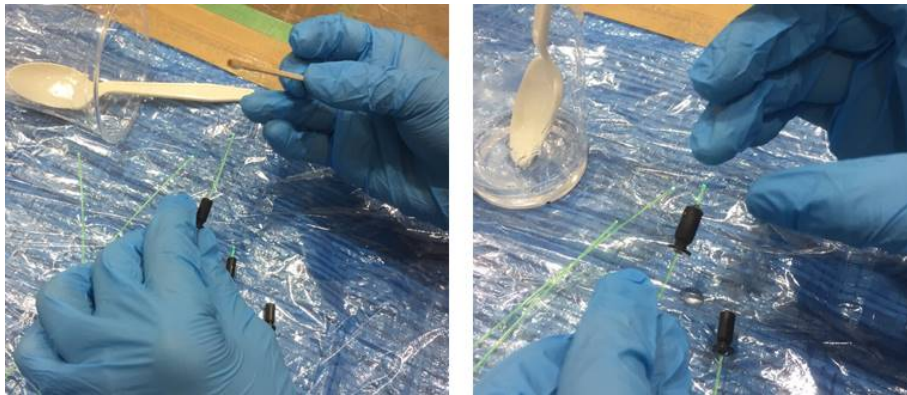


図 81 ファイバーに GOMI コネクタを接着している様子



図 82 研磨の様子 (上) とファイバーの端面の様子 (左: 研磨前、右: 研磨後)

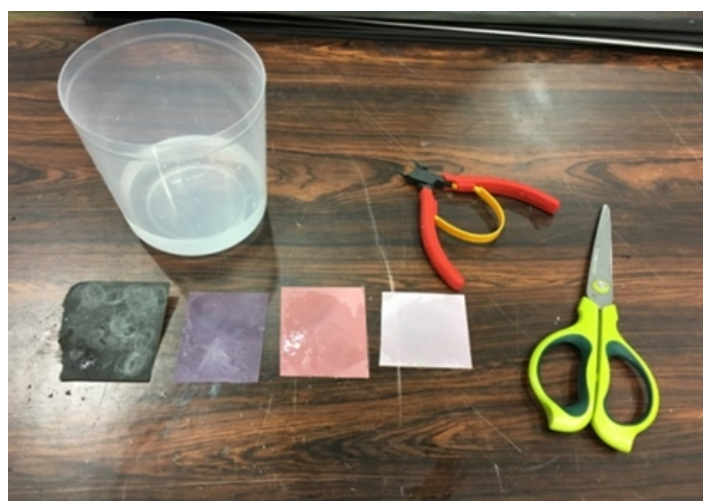


図 83 研磨に用いたやすり

次に GOMI コネクタによって接続された MPPC は図 84 のような回路を持つ読み出し基板に接続される。シンチレータは 1 本ずつブラックシートで包まれており、シンチレータ間での光の授受を抑えている。ただし、シンチレータはブラックシートの端から数 cm 程度外に出ている。現在はシンチレータ間のクロストークが確認されているため、クロストーク抑制の観点からはシンチレータ全てをブラックシートで覆うことが望ましい。しかしその場合、上下のシンチレータの重なり具合を確認することが困難になることや作業中にファイバーを折ってしまう恐れがあり、その回避を優先している。

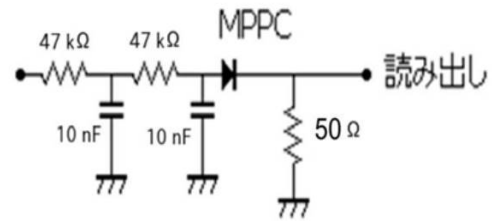
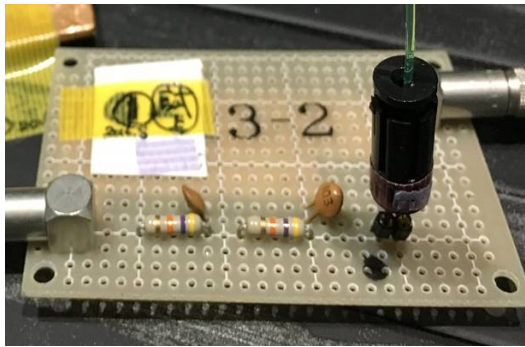


図 84 読み出し用基板と回路

### 5.1.3 キャリブレーション

INGRID Water Module 検出器の製作過程での光量測定では図 85 のような 1 つの高圧電源 (以降 HV と略す) のみを用いて複数の MPPC に電圧供給を行っている。MPPC は個々で少しずつブレイクダウン電圧が異なるので、全ての MPPC に対して共通の電圧をかけると個々の  $\Delta V$  (供給電圧とブレイクダウン電圧の差) が異なってしまふ。よって、ブレイクダウン電圧が類似するものを用いた。MPPC のブレイクダウン電圧は以下のように求められる。まず、図 86 のようにオシロスコープを用いて 1 p.e. の出力信号を確認し、その HV 依存性を測定する。その結果を図 87 のように 1 次関数でフィットし、得られた関数と  $x$  軸の交点に対応する電圧値が求める値である。



図 85 測定に用いる HV

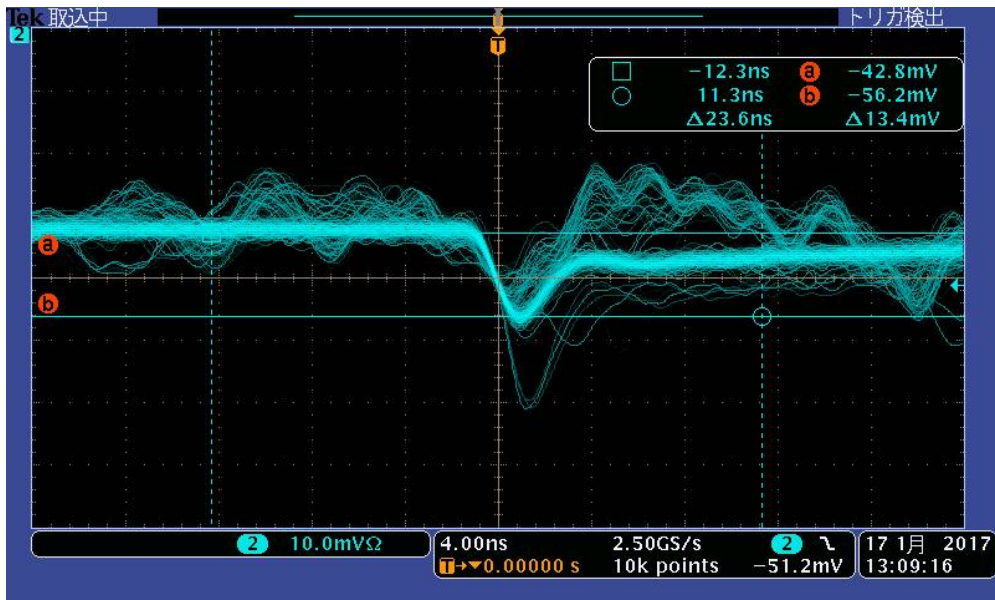


図 86 オシロで信号を図る様子

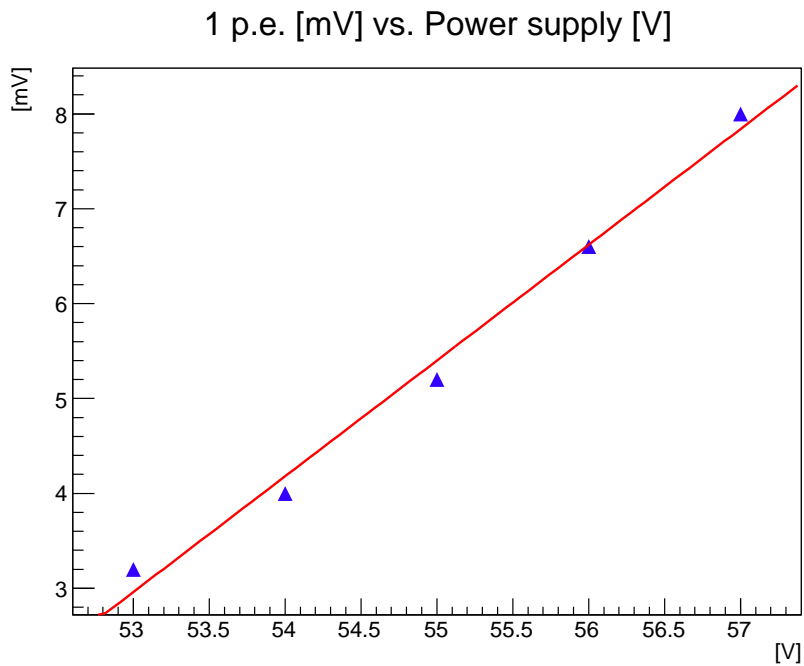


図 87 MPPC の出力信号 (1 p.e.) vs. HV のグラフ

次に LED を用いたゲイン測定を図 88 のようなセットアップで行う (IWM1 製作時は 1 日毎、IWM2 の際は測定毎)。図 89 は測定結果をヒストグラムにしたものであり、0 p.e. と 1 p.e. のピークの ADC Count の値をガウス分布でフィットして得る。また、これらの値からペDESTAL (0 p.e. のピークの ADC Count 値) とピーク間隔 (1 p.e. と 0 p.e. のピークに対応する ADC Count 値の差) を得る。

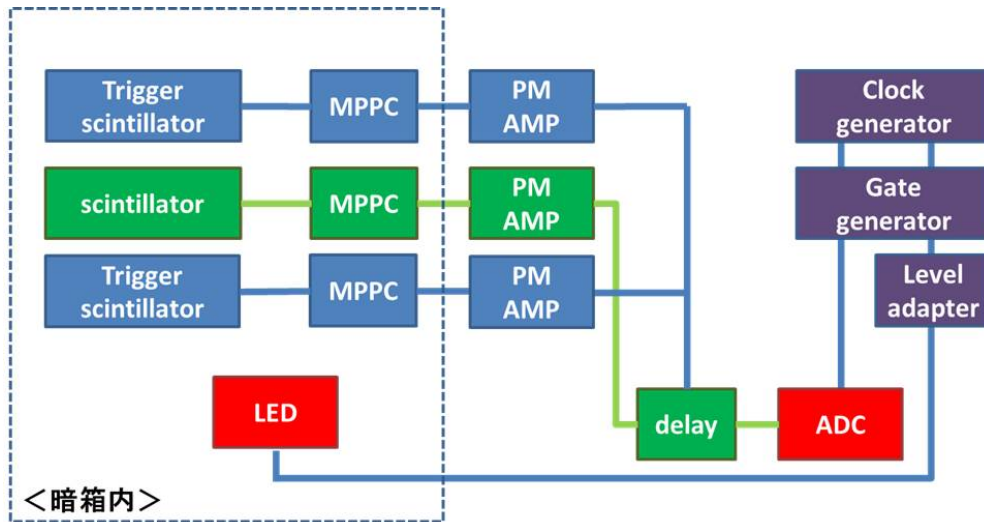


図 88 キャリブレーションのセットアップ

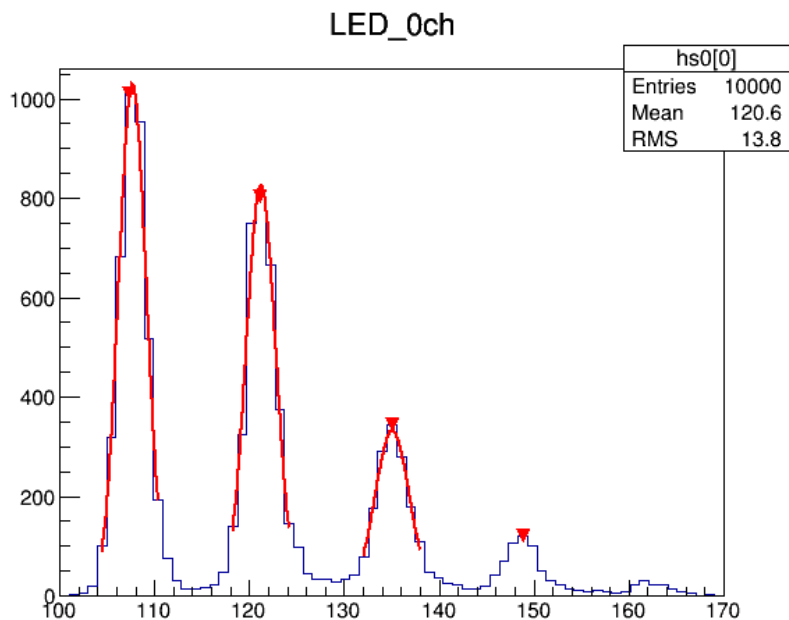


図 89 キャリブレーションのヒストグラムにフィッティングを行う様子

#### 5.1.4 しきい値の設定

測定されたイベントに対する MPPC のダークノイズ等の影響を抑えるために、トリガーシンチレータからの出力に対して Discriminator でしきい値を設定した。オシロスコープで実際の波形を確認すると、2 p.e. 程度のノイズや、読み出し基板あるいは同軸ケーブル等に由来する 2~3 p.e. 相当のノイズが確認できた。よって、3.5~4.5 p.e. をしきい値とした。

#### 5.1.5 測定方法

ここでは異なる時期に製作した 2 台の INGRID Water Module 検出器それぞれについて、宇宙線を用いたサンプリングによる光量測定の方法・条件を表 4 にまとめる。



表 4 測定方法と測定条件

	IWM1	IWM2
採取するイベント数/測定	100	400
サンプル数/測定	1	2
所要時間/測定	約 15 分	約 6 分
$\Delta V$	3.5	3.5
トリガーシンチレータへのしきい値	4.5 p.e.	3.5 p.e.

### 5.1.6 解析方法

ここでは実験によって得られたデータからプラスチックシンチレータの光量を求める方法についてまとめる。プラスチックシンチレータの光量は以下の式により求める。

$$(\text{光量}) = \frac{(\text{測定データの ADC 分布の平均値}) - (\text{ペDESTALの ADC Count 数})}{(\text{ピーク間隔})} \quad (14)$$

ここで、式中の「測定データの ADC 分布の平均値」としては、得られたデータについて 1.5 p.e. 以上の範囲の平均値を用いる。今回の測定方法において、シンチレータを重ねる際に数 mm のずれが生じてしまう可能性があり、その結果 2 つのトリガーシンチレータは貫通するが間に挟まれたシンチレータは貫通していないイベントが混入する。また、トリガーシンチレータはスリットの無いものであるため、間に挟まれたシンチレータがスリット付きのものである場合も同様な事が起こる。これらの明らかに低い光量のイベントを除去するために 1.5 p.e. 以上を要求する。図 90 は元データをヒストグラムにしたもので、図 91 はそのデータから 1.5 p.e. 以上の範囲のデータを用いてプロットしたヒストグラムである。ペDESTALの ADC Count 数とピーク間隔の値はキャリブレーション時に求めた値を用いる。

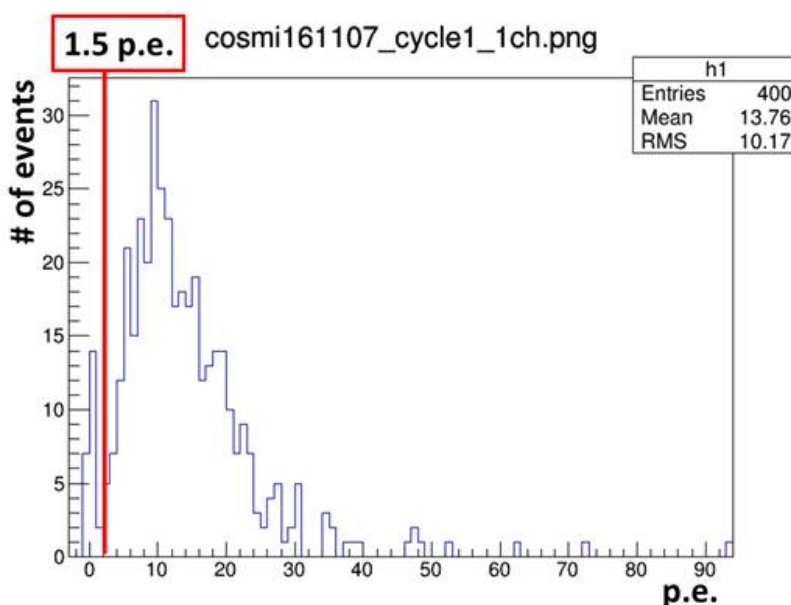


図 90 宇宙線を用いて測定したヒストグラム

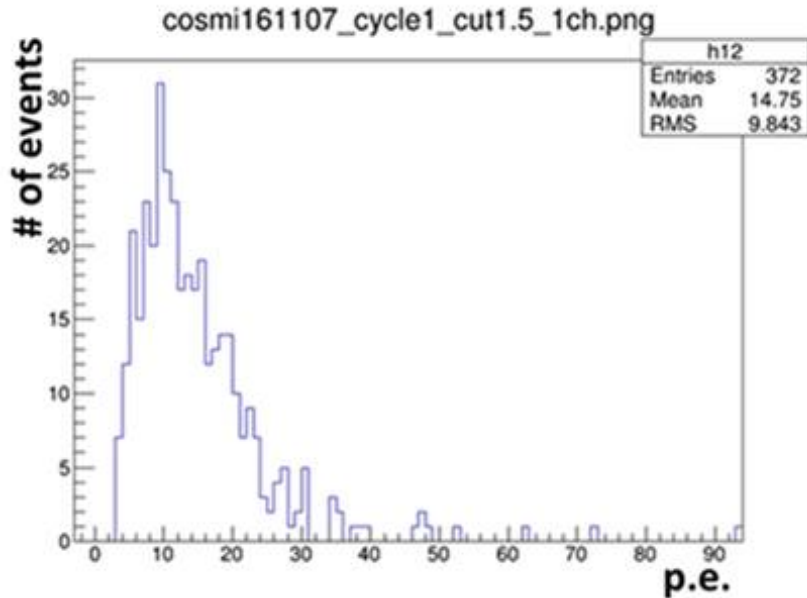


図 91 図 90 において 1.5 p.e. 以上の範囲だけをプロットしたヒストグラム

### 5.1.7 光量測定における再現性

今回のシンチレータの光量測定における作業は、測定毎に暗箱の開け閉めや複数のシンチレータを重ねる作業、ファイバーの端面の研磨などがあり、これらの再現性を確認する。また再現性の確認のために行った測定でもサンプリングによる光量測定の測定方法と同様に、同じ 2 枚のトリガーシンチレータと 2 つのサンプルを用いて行う。以下、調べた条件についてまとめる。

#### 1、実験環境を変えずに測定を行う

まずは何も環境が変わらない状況で再現性を調べる。ここで再現性がない場合は作業の仕方に問題があるのではなく、エレクトロニクス関係の機器やそれへの配線などに異常があると考え。1 回の測定で 400 events のデータを取得し、これを 4 回繰り返した結果、3% の再現性が確認できた。

#### 2、暗箱の蓋の開け閉め

今回用いた暗箱は金属性で蓋もしっかりと本体に固定できるが、以前から使用されていたものであるため再現性を確認する。1 回の測定で 400 events のデータを取得し、これを 4 回繰り返した結果、3% の再現性が確認できた。

#### 3、読み出し基板からの MPPC の抜き差し

光量測定時においてシンチレータ光を収光する MPPC は読み出し基板に接続される。また、MPPC は図 42 のようにファイバーの先に接着された GOMI コネクタの中にあるので、光量測定を終えたシンチレータを新しいものに取り替える際、図 92 のようにシンチレータの取り替えを行う度に読み出し基板から抜く必要がある。この読み出し基板からの MPPC の抜き差しによる再現性は 5% であることが確認されている。[16] なお、MPPC を読み出し基板から抜かずに済ませる方法として、MPPC を収納している GOMI コネクタの部分を

基板に付けたまま、ファイバーが接着されている部分のみを GOMI コネクタから引き抜くことも考えられるが、狭い暗箱の中での細かい作業となり、ファイバーを折る恐れがあるので採用しない。

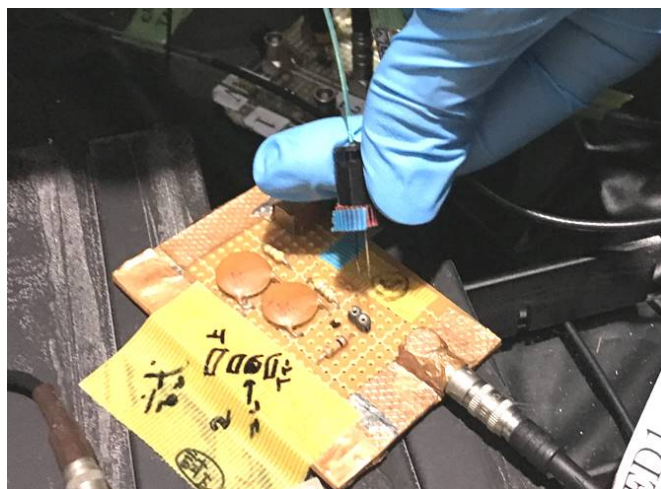


図 92 MPPC を抜き差ししている様子

#### 4、ファイバー端面の研磨

ファイバーの端面はやすりを用いて研磨を行っており、これによる再現性も確認する必要がある。1 回の測定で 400 events のデータを取得し、2 回繰り返した結果、3% の再現性が確認できた。他の再現性の確認のための測定回数よりも少ないが、この測定においては測定ごとに GOMI コネクタを切断して新しくコネクタを接着することが必要であり、これを 2 回以上行くと検出器の製作に必要なファイバーの長さを残すことが困難になることが理由である。

#### 5、シンチレータの重ね方

通常の測定では測定毎にサンプルのシンチレータを取り出し、新たなシンチレータをトリガーシンチレータの間に入れて図 77 のようにシンチレータを組み立てる作業を行う。その際は図 93 のようにシンチレータの位置を揃えており、この作業における再現性も確認するべきである。よって、MPPC は読み出し基板から外さず、重なったシンチレータを一度崩して再度揃える作業を行う。1 回の測定で 400 events のデータを取得し、3 回繰り返した結果、8% の再現性が確認できた。

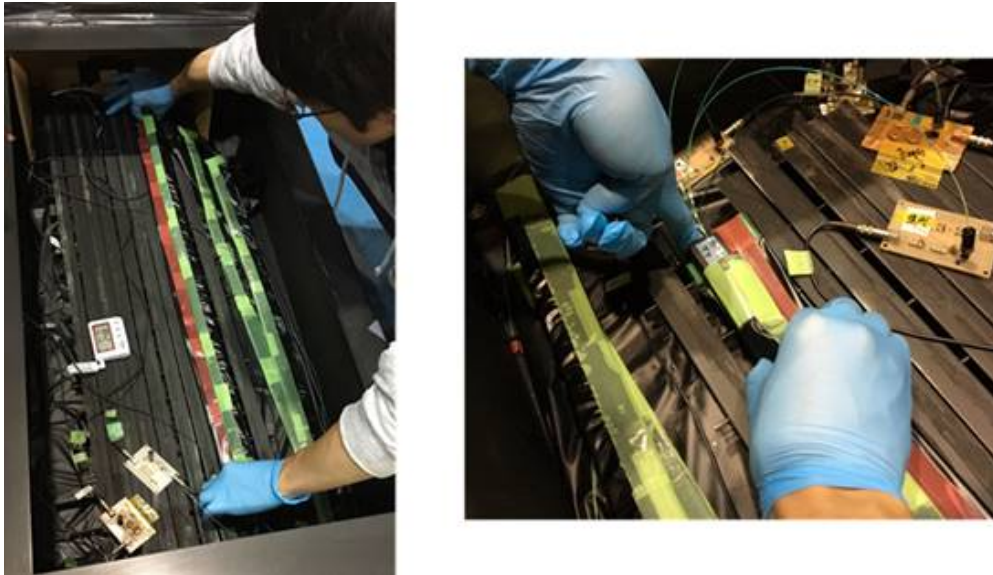


図 93 シンチレータの組み立ての際の位置の調節を行っている様子

次に、各項目に関して再現性を確認した結果を表 5 でまとめる。

表 5 サンプリングによる光量測定のリピータビリティ

項目	再現性
同じ環境での測定	3%
暗箱の蓋の開閉	3%
MPPC の抜き差し	5%
ファイバー端面の研磨	3%
シンチレータの重ね方	8%

#### 5.1.8 結果 (IWM1 について)

2015 年度に製作した IWM1 のサンプリングによる光量測定の結果が以下の図 94 である。この図は横軸が光量 [p.e.]、縦軸がシンチレータの数を示す。今回の結果よりサンプリング測定における全体のシンチレータの平均値は 21.0 p.e. であることが分かる。また 10 p.e. よりも低い光量を示すものがあるが、この原因としては MPPC 側の波長変換ファイバーの端面に傷がついていたり、シンチレータに接着されたファイバーが浮いていたりすることが挙げられる。これらの原因で光量が低いシンチレータは検出器の製作には使用せずに取り除いた。また、これらの原因ではなく、原因が解明出来ていない光量の低いシンチレータは、それと同一工程内でファイバーの接着作業を行ったシンチレータ群も含めて、検出器の製作に使用しなかった。また、図 95 はスリットの有無で分けたシンチレータの平均光量についてヒストグラムにまとめている。横軸と縦軸は図 94 と同様である。

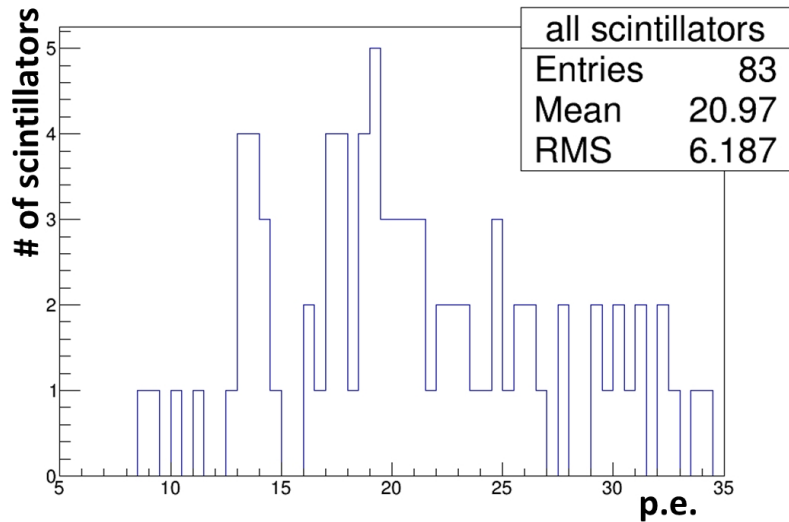


図 94 IWM1 のサンプリングによるシンチレータの平均光量

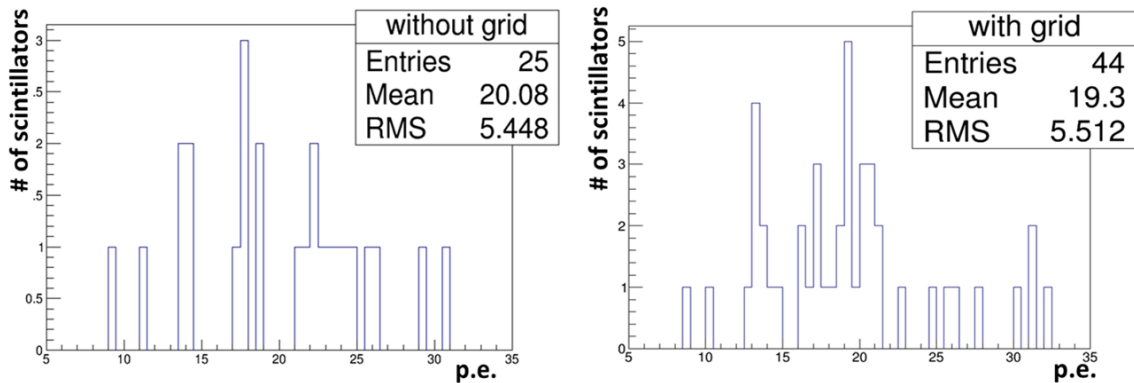


図 95 IWM1 のサンプリングによるシンチレータの平均光量 (左: スリットなし, 右: スリットあり)

### 5.1.9 結果 (2 台目の INGRID Water Module について)

2016 年度より製作している INGRID Water Module 検出器においてもサンプリングによる光量測定の結果をまとめる。2 台目の INGRID Water Module のサンプリングに関しては 1 台目のサンプルよりも数を増やし、全体の 20% にあたる 300 本の光量測定を行った。図 96 はその結果であり、横軸が光量 [p.e.]、縦軸がシンチレータの数を示す。この測定結果より全体のシンチレータの平均値は 17.5 p.e. であることが分かる。またこの値は IWM1 の平均光量と比較すると、約 2 p.e. 小さいこともわかる。この光量の違いは黒塗料の塗布が原因であると考えられる。後述する「黒塗料の塗布前後におけるプラスチックシンチレータの光量比較」より、黒塗料を塗布することによってシンチレータの光量は黒塗料の塗布前に比べて約 2 p.e. 減少していることがわかっている。これより、WM1 はサンプリングによる光量測定時に黒塗料が塗られていないことに対して、IWM2 は測定時に黒塗料が塗られていたため、IWM2 の全体のシンチレータの平均値が IWM1 のものに比べて小さい値になったと考える。また、図 97 はスリットの有無で分けたシンチレータの平均光量についてヒストグラムにまとめている。横軸と縦軸は図 96 と同様である。

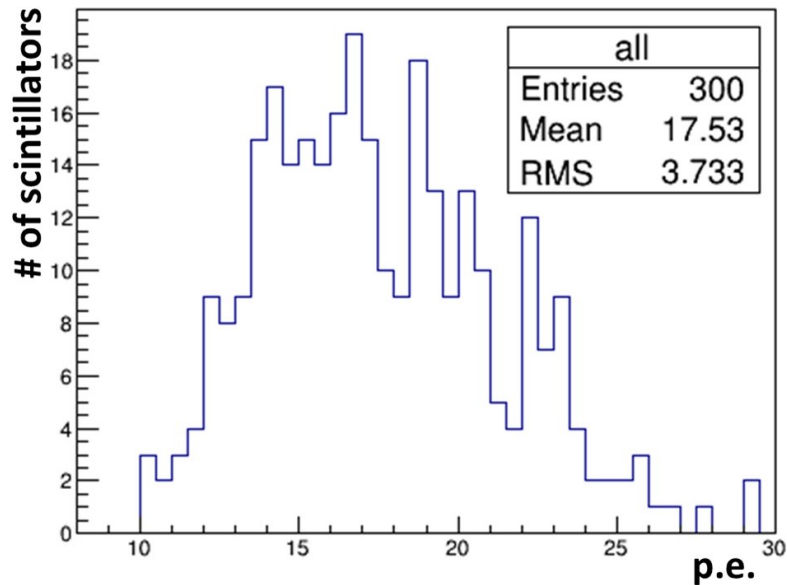


図 96 IWM2 のサンプリングによるシンチレータの平均光量

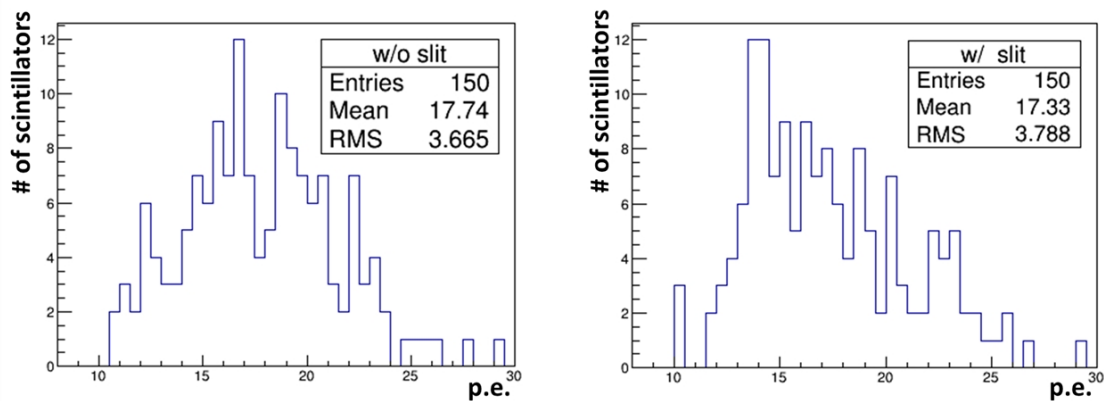


図 97 IWM2 のサンプリングによるシンチレータの平均光量 (左: スリットなし, 右: スリットあり)

## 5.2 黒塗料を塗布したプラスチックシンチレータの光量測定

前章で述べたように、IWM1 の 1 台目の Sub Module に対して光量測定を行った際、あるシンチレータから出たシンチレーション光が格子内で乱反射し、それが他のシンチレータに吸収されてシンチレータ間のクロストークとなることがわかった。よって我々は、2 台目以降にはシンチレータに黒塗料スプレーを用いてこれを抑制しようと考え、この黒塗料を塗布することによるシンチレータの光量への影響について、塗布前後の光量の変化を比較して調べた。また、後にこのシンチレータは水中で用いるため、黒塗料を塗布したシンチレータにおいて水中で光量測定を行い、光量の変化を確認した。

### 5.2.1 目的

黒塗料を塗布したプラスチックシンチレータにおいて光量測定を行う目的として以下のような項目が挙げられる。

- 黒塗料を塗布することによるシンチレータの光量を調べる
- 水中における黒塗料を塗布したシンチレータの光量の変化を調べる

### 5.2.2 セットアップ

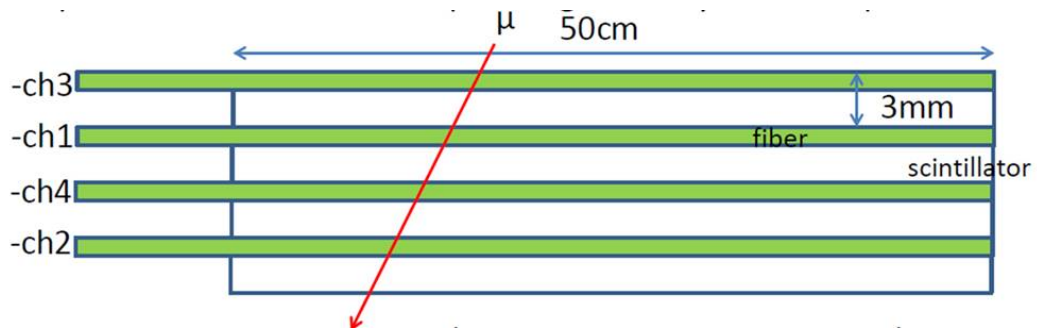


図 98 水中試験のセットアップ



図 99 水中試験の水槽の様子

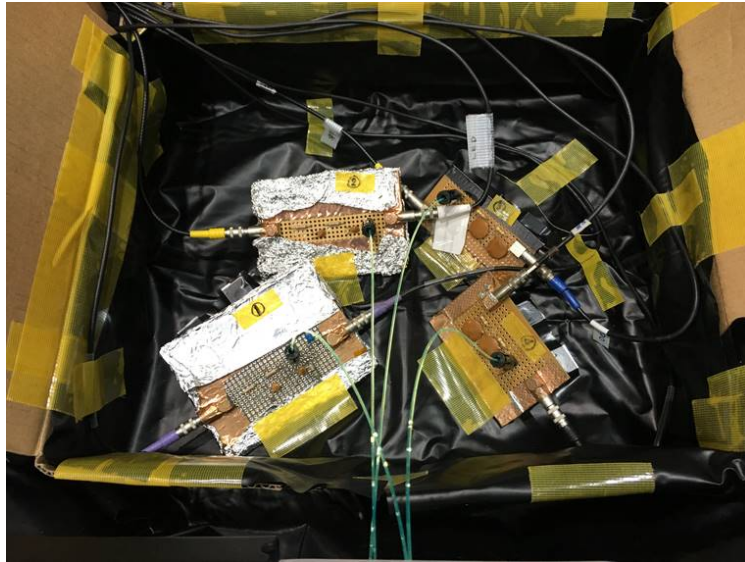


図 100 水中試験におけるエレクトロニクス関係の機器が入った暗箱の様子

まず、黒塗料の塗布前後での光量測定においては前述のサンプリングによる光量測定と同じセットアップ (図 76) で行い、水中試験は図 98 のようなセットアップで行う。図 99 は水中試験の水槽内の様子を示す。また、図 100 は水中試験におけるエレクトロニクス関係の機器が入った暗箱を示す。シンチレータ光を収光する MPPC 以下のセットアップはサンプリングによる測定のセットアップと同じである。また、一度に 4 本のシンチレータを用いた光量測定が可能であるため、2 本をトリガーシンチレータとして用いて、2 本のシンチレータの光量測定を行う。シンチレータを水槽に設置する際、水中では浮力がはたらくので、シンチレータを重ねた後、図 101 のようにおもりを乗せて固定する。なお、4 本のシンチレータはブラックシートをシンチレータ間に挟んだ後に 1 つにまとめられる。シンチレータの一端から出ているファイバーは図 102 のようにアクリルケースの側面に空けた穴より暗箱の読み出し基板につなぐ。



図 101 おもりでシンチレータを固定する様子



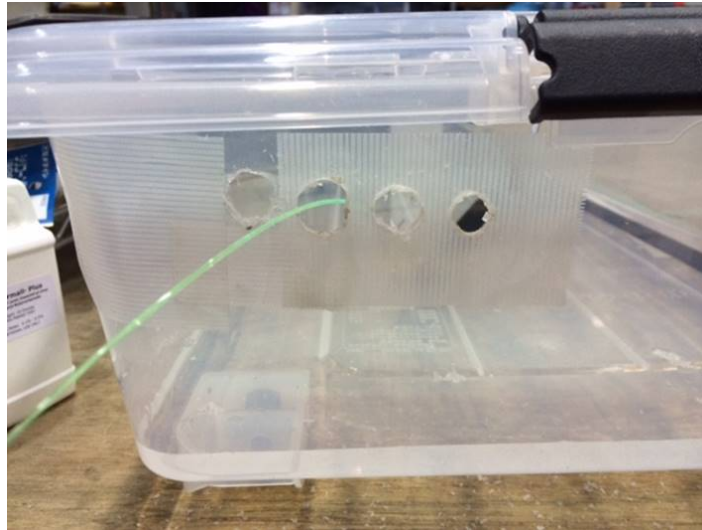


図 102 ファイバーを水槽の穴に通す様子

### 5.2.3 測定方法

ここでは水中試験での光量測定方法に関して以下の表 6 にまとめる。

表 6 水中試験の光量測定方法と測定条件

採取するイベント数/測定	5000
サンプル数/測定	2
$\Delta V$	3.0
トリガーシンチレータへのしきい値	3.5 p.e.
室温	$\pm 2$

### 5.2.4 測定結果 (アクリルシリコン塗料)

まず 3 本に黒塗料の 1 種であるアクリルシリコン塗料を塗布し、その内の 1 本はトリガーとして光量測定を行った。以下の表 7 では黒塗料塗布前後の平均光量をまとめる。なお、塗布前後において 2 回ずつ光量測定を行っている。

表 7 黒塗料塗布前後での水中試験による光量測定結果

	塗布前 1 回目	塗布前 2 回目	塗布後 1 回目	塗布後 2 回目
トリガー (no paint)	24.8	24.9	24.5	24.3
サンプル (silicon 1)	17.1	17.0	17.3	17.0
トリガー (silicon 2)	20.2	20.0	20.2	20.4
サンプル (silicon 3)	16.4	17.0	14.9	15.0

さらに黒塗料を塗布してから 10 日間にわたって水中での光量測定を行うことで、光量の安定性を確認した。図 103 がその結果である。

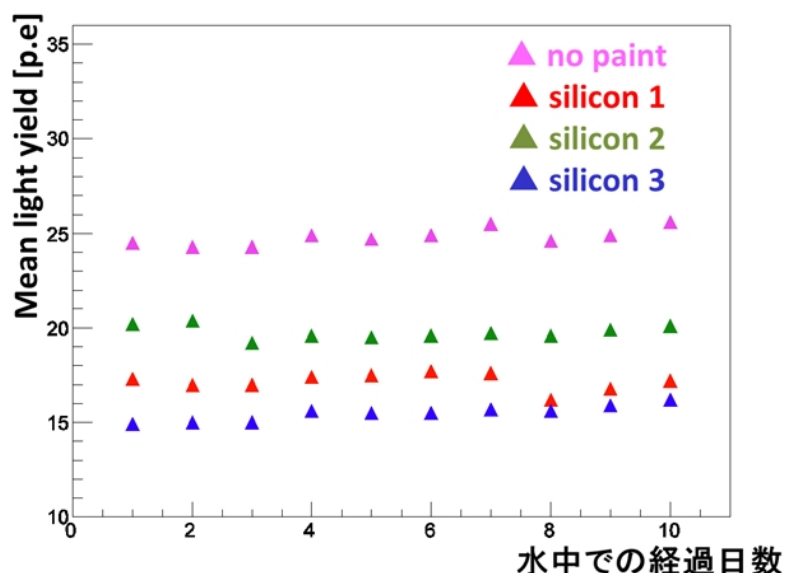


図 103 水中での経過日数による光量の推移

この結果からアクリルシリコンの黒塗料はシンチレータに塗布しても平均光量への影響も少なく、塗布後も安定して光量が出ている事が確認できる。よって、我々はこのアクリルシリコンの黒塗料スプレーを INGRID Water Module 製作に用いた。

### 5.3 黒塗料の塗布前後におけるプラスチックシンチレータの光量比較

ここでは黒塗料の塗布によるシンチレータの光量の変化を調べることを目的とする。シンチレータの光量の変化は黒塗料を塗布した後の光量から塗布前の光量を差し引いて求める。セットアップや測定・解析方法は IWM2 のサンプリング測定と同様である。図 104 は、黒塗料の塗布前におけるシンチレータの光量を横軸、黒塗料を塗布する前後におけるシンチレータの光量の変化 [p.e.] を縦軸としている。サンプルは 56 本のシンチレータを用いている。この図より黒塗料を塗布することで光量が約 2 p.e. 減少していることがわかる。また、塗布前においてシンチレータの光量が高いほど、塗布後の光量の減少量が多いことがわかる。

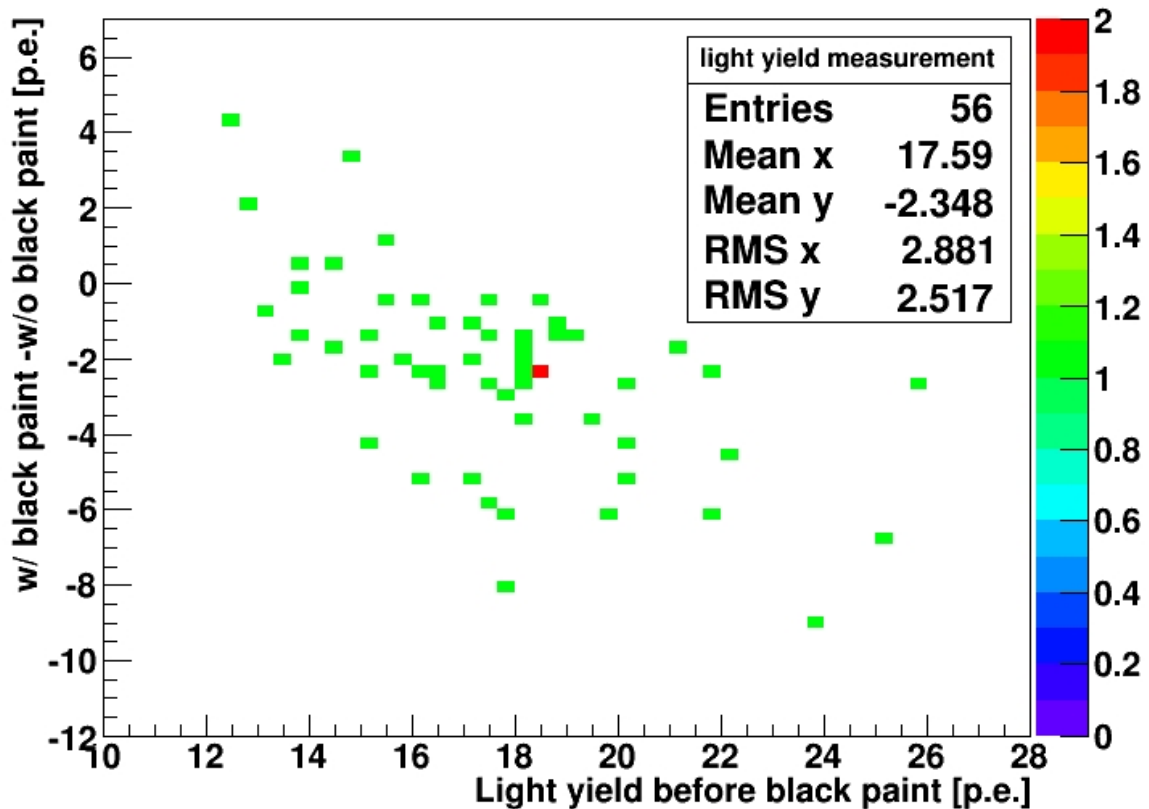


図 104 各シンチレータにおける黒塗料塗布前後の光量の変化

## 5.4 Sub Module 組み立て後の光量試験

INGRID Water Module は Sub Module 4 台を重ねて水槽に入れた検出器である。Sub Module 1 台は波長変換ファイバーが接着された 320 本のシンチレータで構成されており、またそれらのファイバーは 32 本ずつにクッキーに束ねられている。ここでは、このクッキーに対応する 32 ch array 型の MPPC を用いた。INGRID Water Module 組み立て後の光量測定について述べる。測定するシンチレータが多いため、多チャンネルを読み出す事が可能な NIM モジュールである EASIROC を用いる。なお、IWM2 は、2017 年 2 月現在モジュールとしてはまだ組み立てられていないため、以降は IWM1 について述べる。

### 5.4.1 目的

INGRID Water Module 製作後での光量試験では以下の目的が挙げられる。

- INGRID Water Module を構成する全てのシンチレータの光量を求める
- 光量の低いシンチレータを見つける

#### 5.4.2 セットアップ

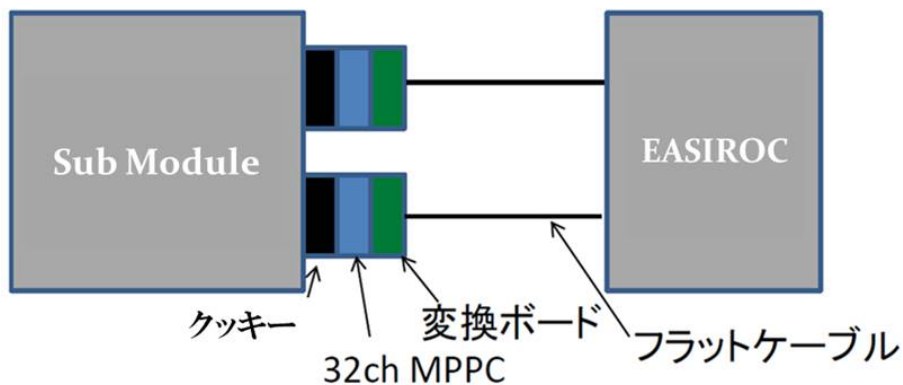


図 105 Sub Module の光量測定のセットアップ

Sub Module の光量測定は図 105 のようなセットアップで行った。プラスチックシンチレータに接着された波長変換ファイバーはクッキーに束ねられている。これに、1 つ 1 つのファイバーの端面に合うように MPPC が並んでいる 32 ch array 型 MPPC を光漏れが無いように密着させる。図 106 が密着させた様子の写真である。

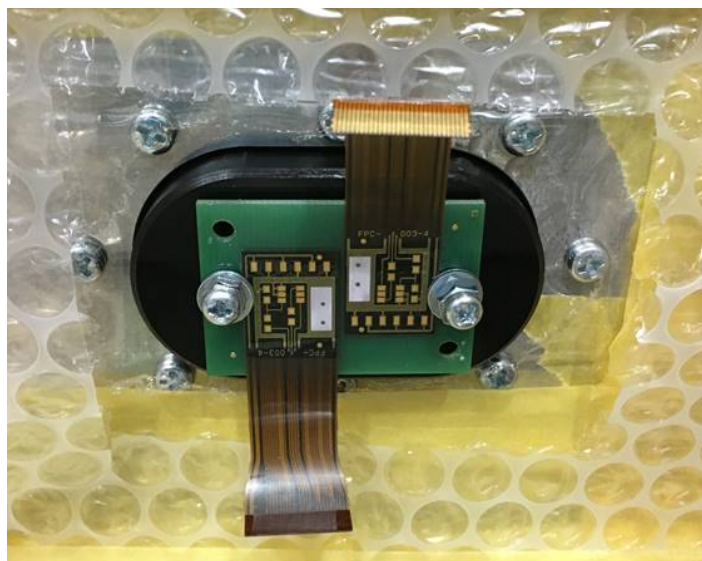


図 106 クッキーに MPPC Array を付けた様子

次に、32 ch array 型 MPPC を、フラットケーブルを介して EASIROC に接続する。EASIROC は多チャンネルの MPPC の読み出しが可能な NIM モジュールのことであり、EASIROC のみで MPPC のバイアス調整、アンプ、discriminator といった MPPC を読み出すための基本的な機能を備えている。また、MPPC 出力を 12 bit ADC で取得することも可能で、さらに MPPC 出力自身をイベントトリガーとすることも可能である。そして、PC で EASIROC を操作し、データの採取や保存を行う。

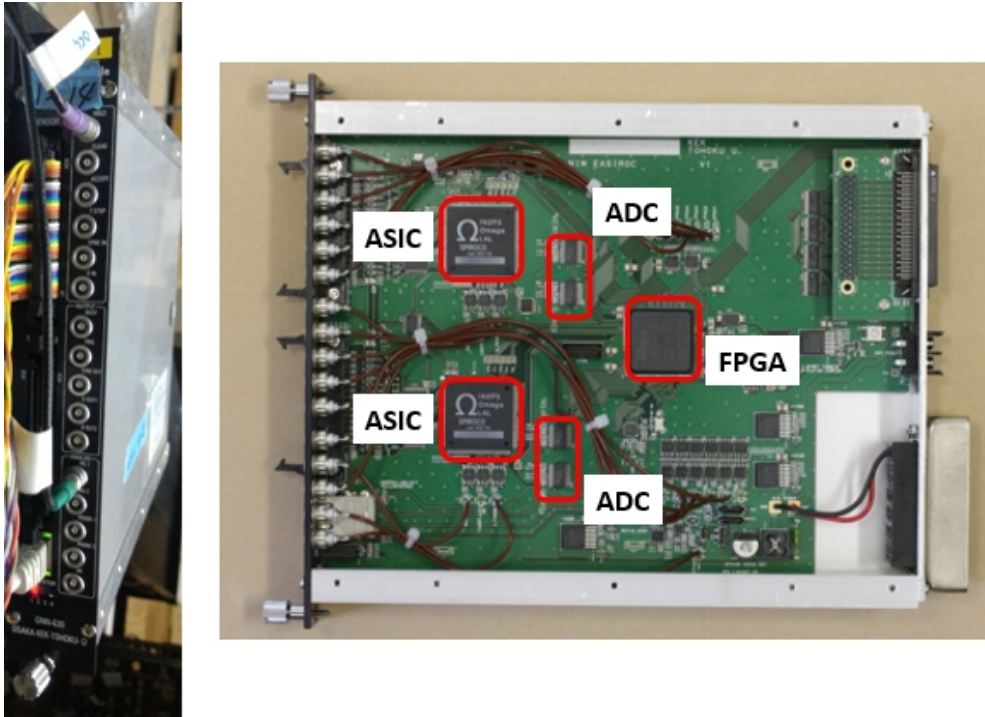


図 107 EASIROC

#### 5.4.3 測定方法

今回の測定は EASIROC を 1 台しか用意しなかったため、1 度に 64 ch のみ測定を行う。トリガーは 64 ch の MPPC 信号の内、1 つでも 7.2 p.e. より大きな信号をとらえたときに作動するようになっている。1 回の測定では 50 万イベントを取り、 $\Delta V$  は 4.0 V とする。以下に、測定方法に関して表 8 にまとめている。

表 8 測定方法と測定条件

Sub Module の光量測定	
採取するイベント数/測定	500000 (1 つ目の Sub Module は 2000000)
サンプル数/測定	64
$\Delta V$	4.0
トリガーシンチレータへのしきい値	7.2 p.e.

これらの測定条件のもと、図 108 のように遮光を施して光量測定を行う。



図 108 Sub Module を遮光した様子

#### 5.4.4 解析方法

光量測定を行うシンチレータ自身のみがトリガーになっているイベントには、トリガーのしきい値によるバイアスが存在する。したがって、それらを除くため、図 109 のように、1 つ以上の異なるシンチレータにおいて 10 p.e. を越える光量が測定されていることを要求する。こうして得られた図 110 のような ADC 分布において、5.5 p.e. に対応する ADC Count 数よりも大きい範囲で求められた平均値を用いる。この 5.5 p.e. という値は、得られた分布におけるノイズの寄与を抑えるように設定されたものである。サンプリングによる光量測定と比較して高い値になっている理由としては、多チャンネルの結果ノイズの大きさやレートが高いこと、またクロストークの影響などが考えられる。ちなみに、この宇宙線測定においては、ベDESTAL やピーク間隔を得るための LED を用いたキャリブレーションを行う必要はなく、測定データ自身の低光量付近の分布 (図 110) から求めることが可能である。また、EASIROC は数 V の範囲で供給電圧の調整が可能なので、64 ch の全ての MPPC のゲインを同じ値にしている。

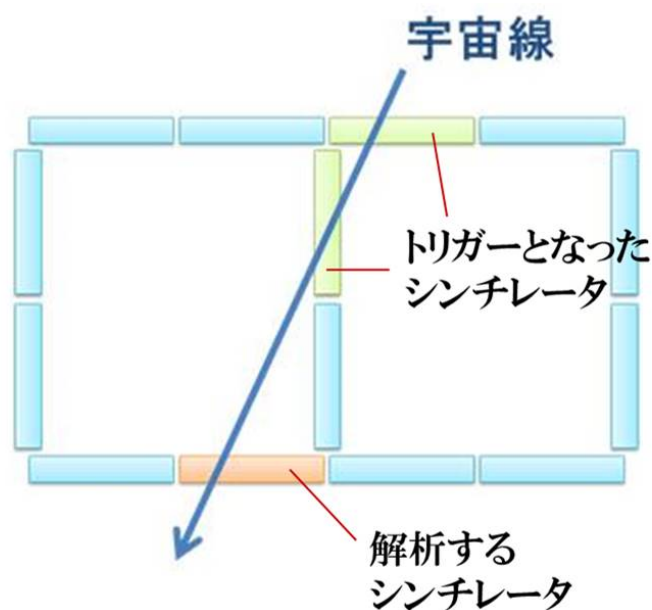


図 109 イベントの選び方

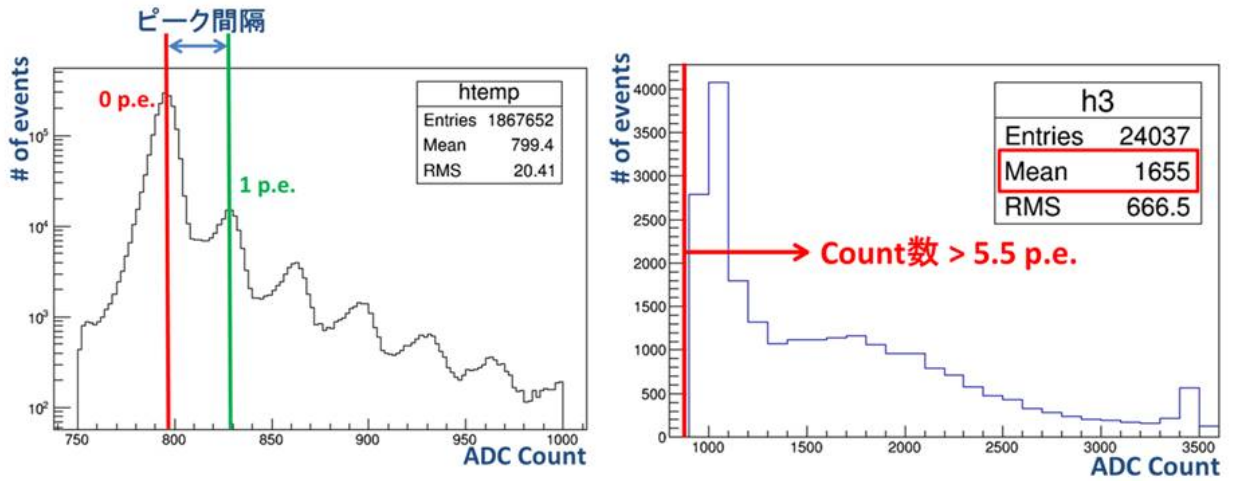


図 110 平均値を求めるためのイベントの範囲の選び方

次にベダスタルの ADC Count 数、ピーク間隔は、LED を用いてキャリブレーションは行わず、宇宙線による測定で得たデータから作成したヒストグラム上にある分布のピークに相当する ADC Count を求めるピークサーチという手法で求める。また、EASIROC は数 V の範囲で供給電圧の調節が可能なので、64 ch の全ての MPPC のゲインを統一する。

#### 5.4.5 結果

図 111, 112 が Sub Module の光量測定の結果であり、赤色がスリットのあるシンチレータのイベント、青色がスリットのないシンチレータのイベントを示している。各種類のシンチレータの平均光量の平均値とそのばらつきは以下の表 9, 10 のようになっている。

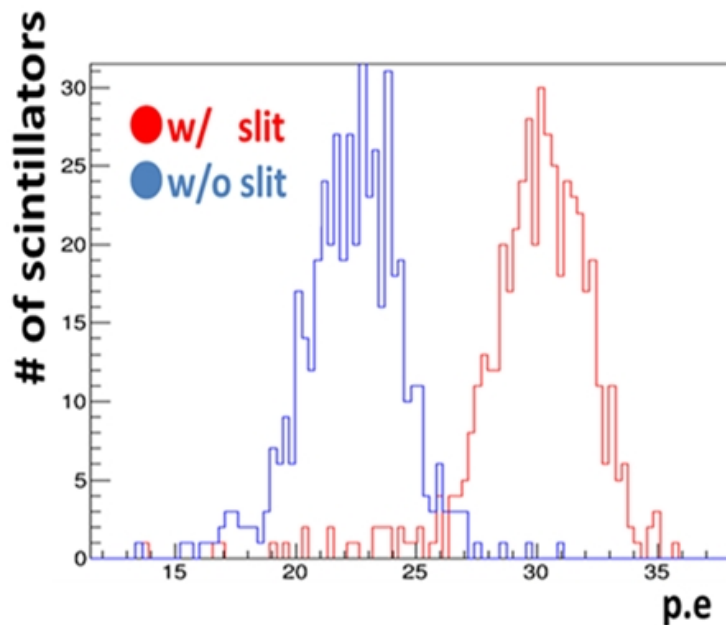


図 111 1 台目の Sub Module の各シンチレータの平均光量

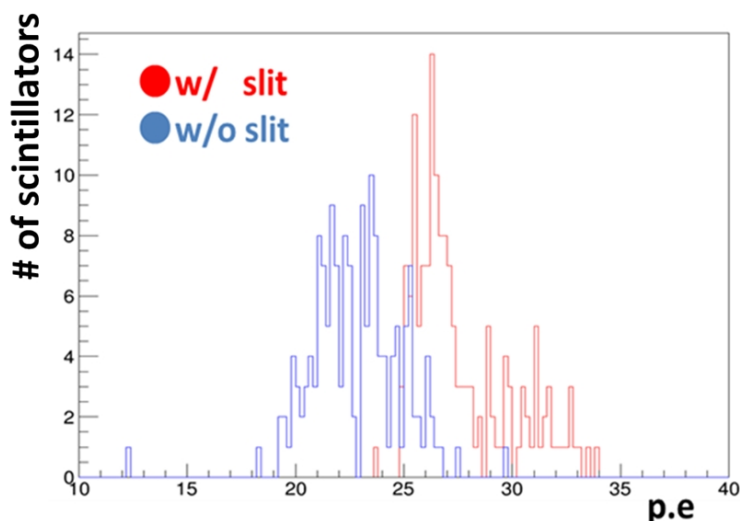


図 112 2 台目以降の Sub Module の各シンチレータの平均光量

表 9 1 台目の Sub Module を構成する各シンチレータの平均光量の平均値

scintillator type	平均光量 [p.e.]	RMS
w/ slit	27.63	2.29
w/o slit	22.80	2.10

表 10 2 台目以降の Sub Module を構成する各シンチレータの平均光量の平均値

scintillator type	平均光量 [p.e.]	RMS
w/ slit	29.52	2.96
w/o slit	22.69	2.72

この結果より、スリットのあるシンチレータの平均光量の平均値はスリットのないシンチレータの平均光量の平均値より高いことが確認できる。これは測定時のシンチレータの置き方に依存していると考えられる。図 113 のようにスリットのないシンチレータは最も面積の大きい面を水平にしているのに対し、スリットのあるシンチレータはその面を垂直に立てている（ただし、1m の辺は水平方向）。宇宙線の到来頻度の角度依存性は鉛直上向きを  $0^\circ$  と定義すると、鉛直方向と宇宙線のなす角  $\theta (< 90^\circ)$  を用いて  $\cos^2 \theta$  と書き示すことができる。またこれより、宇宙線の到来頻度はこの角  $\theta$  が小さくなるにつれて、大きくなるのがわかる。よって、宇宙線で光量測定を行った場合、スリットのないシンチレータの置き方よりもスリットのあるシンチレータの置き方がよりシンチレータ内を通過し、シンチレーション光を出す。その結果、スリットのあるシンチレータの光量が大きくなると考える。しかし、この結果と前節でまとめた IWM1 のサンプリングによる光量測定結果を比較すると、互いに測定時のシンチレータの置き方は同じであるが、スリットのないシンチレータの平均光量の平均値とサンプリングで得られた光量の誤差は  $2.6\sigma$  であった。このずれは 2 つの測定における測定条件の違いが原因だと考える。平均光量を求める時に用いる測定データの ADC 分布の平均値は、得られたデータの 5.5 p.e. 以上の範囲の平均値である。それに対して、IWM1 のサンプリングによる光量測定では 1.5 p.e. である。すると、Sub Module の光量測定では小さな光量がカットされる分、IWM1 のサンプリングによる光量測定大きな ADC 分布の平均値が得られることで、平均光量が大きくなる。これによってシンチレータの置き方が同じにも関わらず、これらの測定結果が平均光量の平均値の誤差が  $2.6\sigma$  になったと考える。



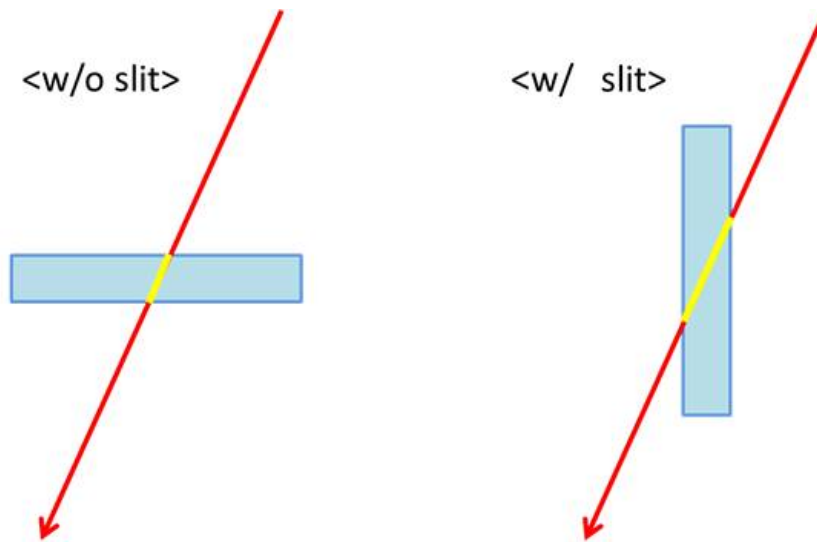


図 113 シンチレータの置き方と宇宙線の飛跡 (黄色がシンチレータ内を通過した宇宙線の飛跡を示す)

また図 111, 112 より、平均光量の低いシンチレータも確認できる。シンチレータにファイバーを接着する際、オプティカルセメントの吐出量が少なかったり、ファイバーの固定が十分ではなかったりする場合は、図 114 のようにファイバーがシンチレータから浮きあがることもある。これによってシンチレータに接する受光面が減少したことが、シンチレータの平均光量が低くなった最大の原因である。

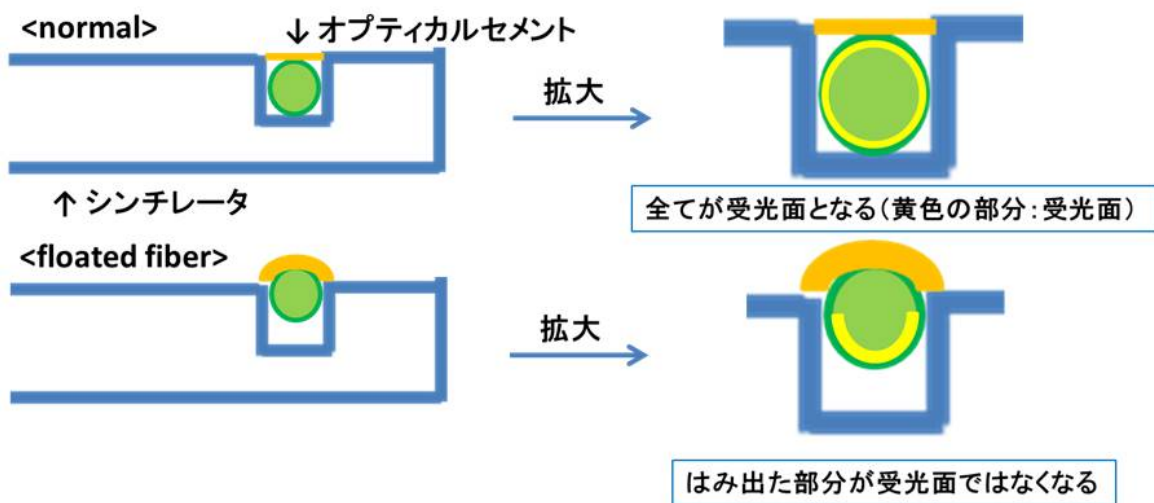


図 114 シンチレータからのファイバーの浮きによる受光面の影響

## 6 INGRID Water Module 検出器と INGRID 検出器のトラックマッチング

2015 年度に完成した INGRID Water Module 検出器は現在、図 115 のようにニュートリノビームモニターである INGRID の前 (ニュートリノビームの上流側) に設置されている。これは INGRID Water Module の性能評価だけでなく、WAGASCI 検出器を用いて行う WAGASCI 実験に先立って INGRID Water Module 検出器を用いた実験を行うためである。なお、INGRID は T2K 実験の前置検出器がおかれている建物内に設置されている。

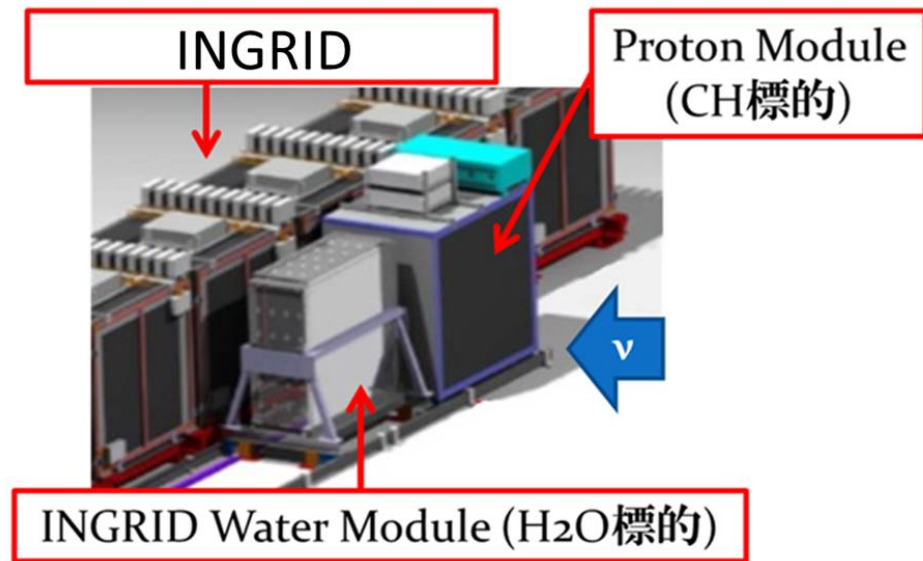


図 115 INGRID Water Module 検出器を用いた実験

この実験では INGRID Water Module 検出器だけでなく、プラスチックシンチレータのみで構成されている Proton Module 検出器も INGRID よりビームの上流に置いて測定を行う事で、2つの測定データより、WAGASCI 実験と同様に水標的とプラスチック標的の反応断面積比を測定しようと計画している。WAGASCI 実験が WAGASCI 検出器をビーム軸から  $1.5^\circ$  ずらして設置する off-axis 法を用いていることに対し、INGRID Water Module 検出器はビーム軸上に置く方法 (on-axis 法) を採用している。これにより、以下のような特徴をもつ。

- ニュートリノフラックスが大きいビームの中心領域で測定するので、off-axis 法に比べて高統計を取得することが可能
- WAGASCI 実験よりも高いエネルギー領域のデータが得られる

しかし、INGRID Water Module 検出器と Proton Module 検出器は、単体の標的の厚さではニュートリノ反応によって出てきた荷電粒子の識別ができない。よって、鉄とプラスチックシンチレータのサンドウィッチ構造をもつニュートリノビームモニター INGRID をそれぞれ単体の検出器の下流に置くことで荷電粒子の識別を行う予定である。このため、我々はニュートリノビーム用いた実験を行う前に新たに設置された INGRID Water Module と INGRID との飛跡の整合性を確認する必要がある。この章では INGRID Water Module と INGRID を貫く宇宙線を用い

て行ったトラックマッチング (各検出器で再構成した飛跡の整合性を確認すること) についてまとめる。

## 6.1 データ取得とトラッキング

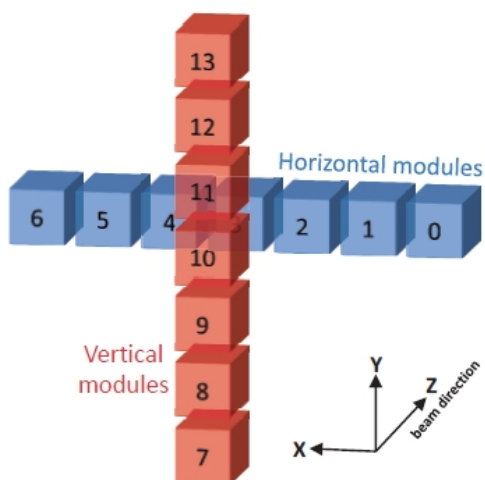


図 116 INGRID の Horizontal Module の位置

INGRID Water Module は図 116 に示した INGRID Horizontal Module の 1 つである Module 3 より 1.2 m だけビームの上流部に設置されている。なお、現在のシステムではトリガーを Module 単体にセットすることが出来なかったため、Horizontal Module に属する 7 つの Module を用いる。図 117 は Module の断面を示す。灰色の箇所は鉄の層である。緑の箇所はプレーン (Plane) と呼び、 $x$  方向に並べられたシンチレータ層と  $y$  方向に並べられたシンチレータ層を 1 層ずつビーム方向に重ねたものである。また、プレーンには番号が振り分けられており、定められた 4 枚のプレーンでヒットがある時に限りデータが取得されており、トリガーとなるヒットした 4 枚のプレーンの組み合わせは合計で 4 パターンある。今回はこのトリガーモードで 15 時間 (15200 events) のデータを取得した。

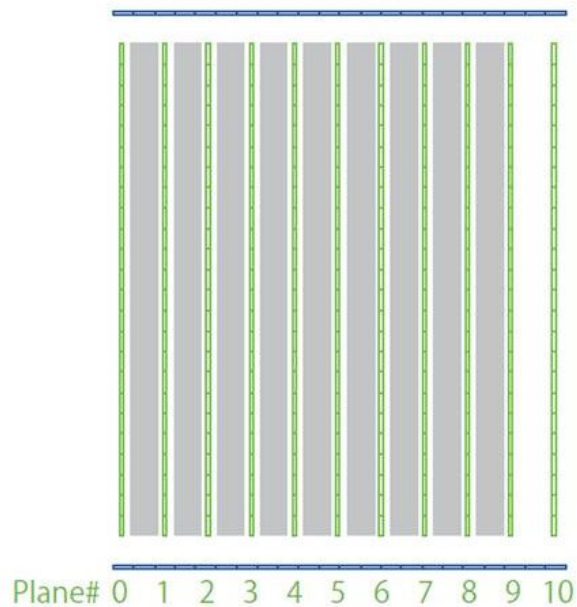


図 117 宇宙線トリガーのアルゴリズム

次に取得したデータより飛跡を再構成する。再構成する際にヒットとして定義されるのは INGRID では 2.5 p.e. 以上のもので、INGRID Water Module では 1.5 p.e. である。このような条件を満たす場合のみ飛跡を再構成する。2 つの検出器を通った荷電粒子の飛跡を再構成した例を図 118 に示す。なお、飛跡の再構成は 3 次元ではなく、図 119 のように検出器の横から見た方向 (Side view) と上から見た方向 (Top view) に分けた 2 次元で行った。

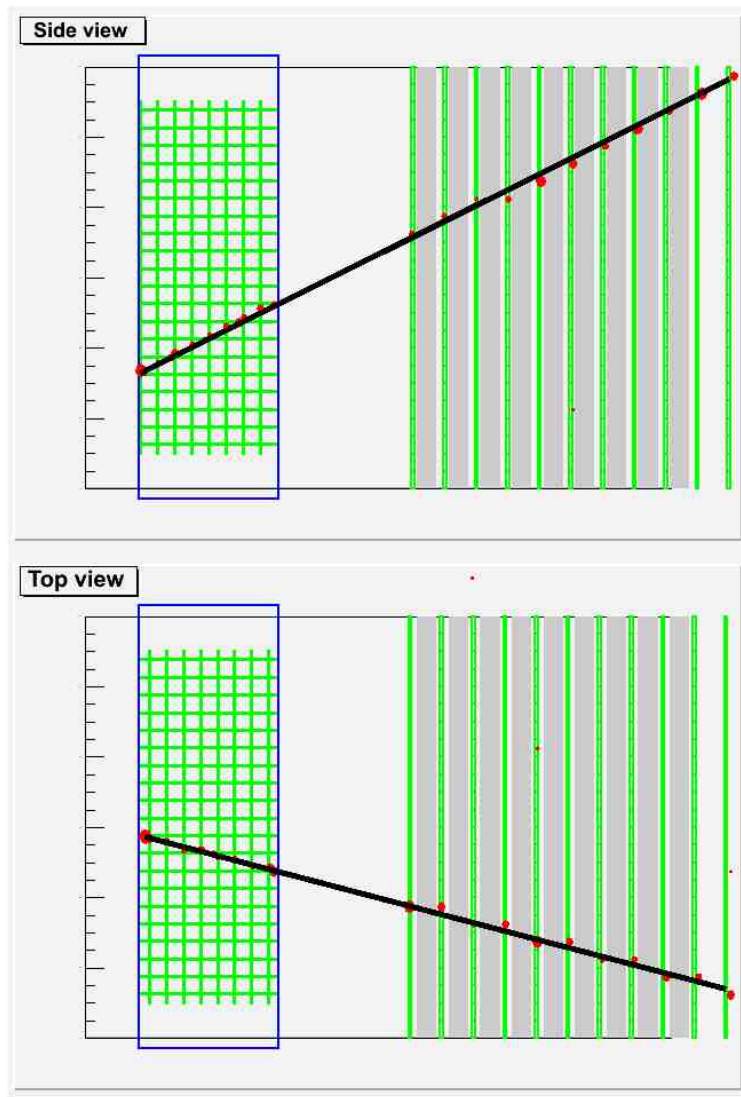


図 118 2つの検出器を通った荷電粒子の飛跡再構成

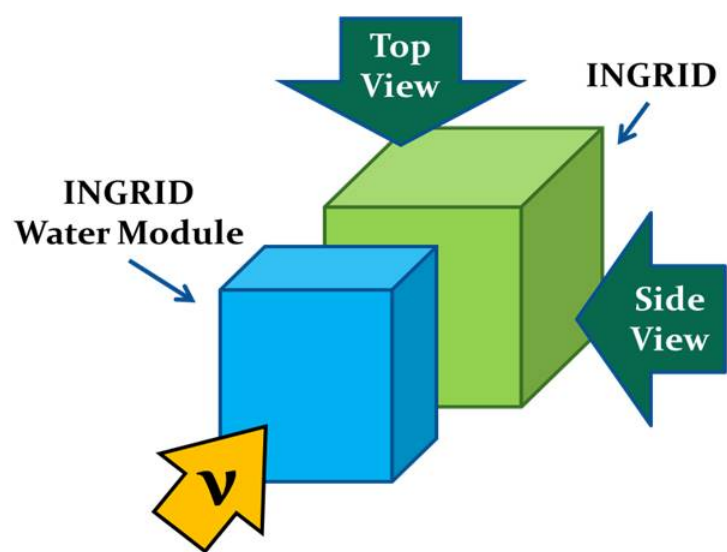


図 119 Top view と Side view の場所

## 6.2 トラッキングの整合性の確認方法

トラッキングしたイベントに関して、以下の各項目を確認した。なお、図 120 では各項目の比較方法をイラストで示す。

### 1、各検出器で再構成した飛跡の傾きを比較する

各検出器において再構成した飛跡の傾きを検出器の水平方向と垂直方向に分けて比較する。

### 2、各検出器で再構成した飛跡間の距離を比較する

各検出器において再構成した飛跡を 2 つの検出器の間まで延長し、そこでの飛跡間の距離を求める。この項目に関しても検出器の水平方向と垂直方向に分けて比較する。

### 3、各検出器で飛跡を構成するヒットの時間の平均値を比較する

ヒット情報には時間も含まれており、各検出器において飛跡を構成する全てのヒットより時間の平均値を求めて比較する。

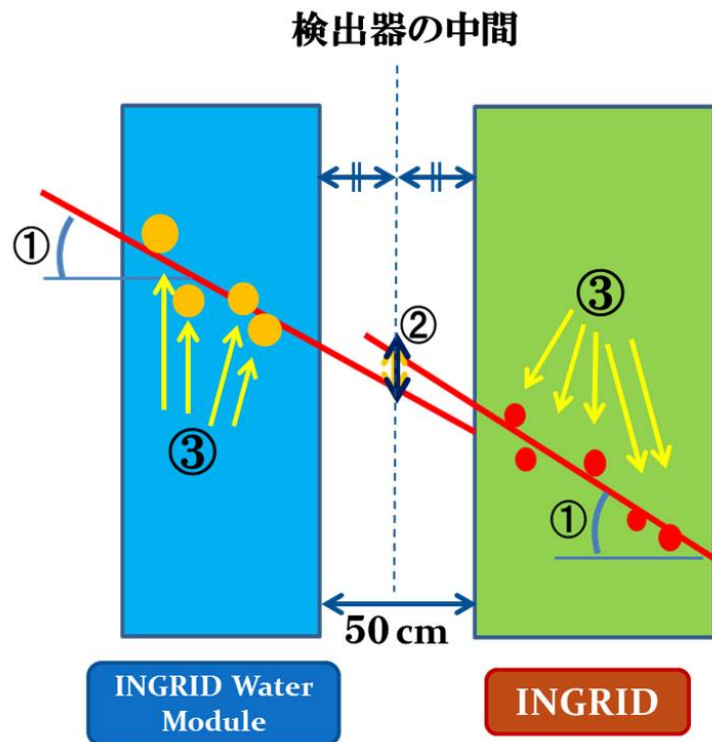


図 120 トラッキングの確認方法

## 6.3 結果

宇宙線でトラッキング出来たイベントに関して、以下の項目について確認した結果をまとめる。

- 各検出器で再構成した飛跡の傾きを比較する

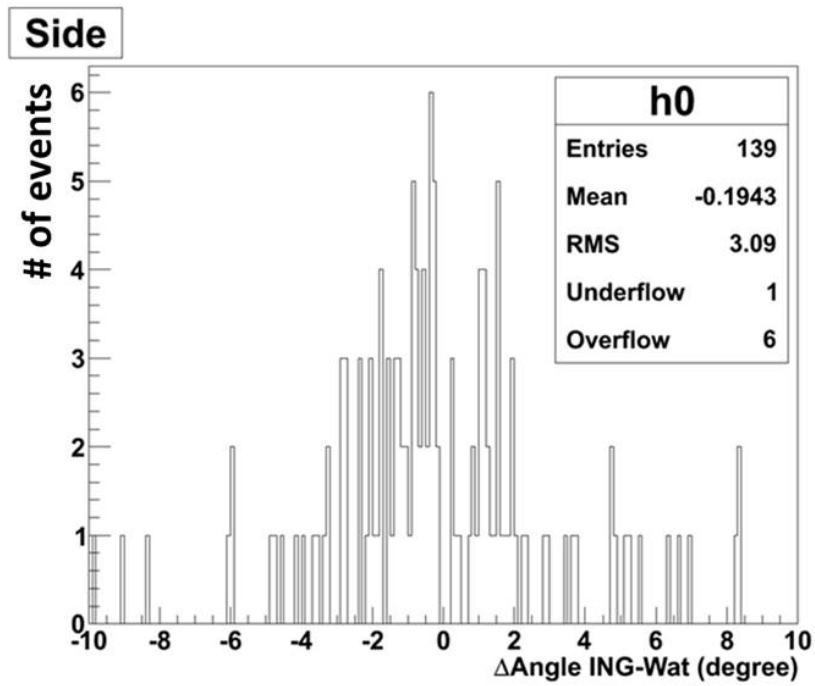


図 121 飛跡の傾きの差 (水平方向)

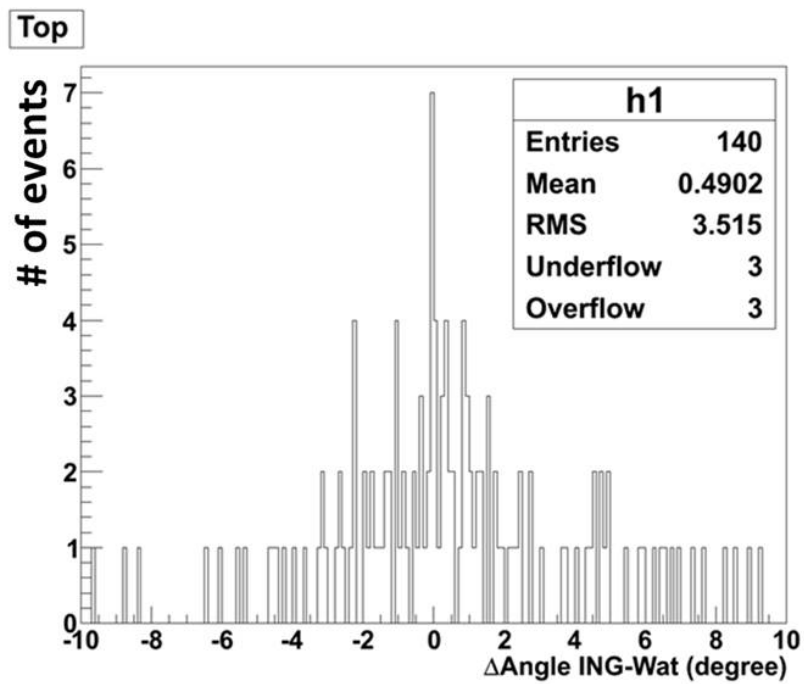


図 122 飛跡の傾きの差 (垂直方向)

表 11 各検出器において再構成した飛跡の傾きから求めた差の平均値

view	平均値 [degree]
Side view	$-0.19 \pm 0.26$
Top view	$0.49 \pm 0.30$

図 121、122 は各検出器で再構成した飛跡の傾きの差をヒストグラムにしたものである。ま

た、表 11 はその差の平均値を示す。Side view では  $1\sigma$  の誤差の範囲内で一致し、Top view では  $2\sigma$  の誤差の範囲内で一致していることがわかる。これらの分布から、2つの検出器において再構成された飛跡の整合性として  $\pm 10^\circ$  を要求することが妥当であると考えられる。

- 各検出器で再構成した飛跡間の距離の差を比較する

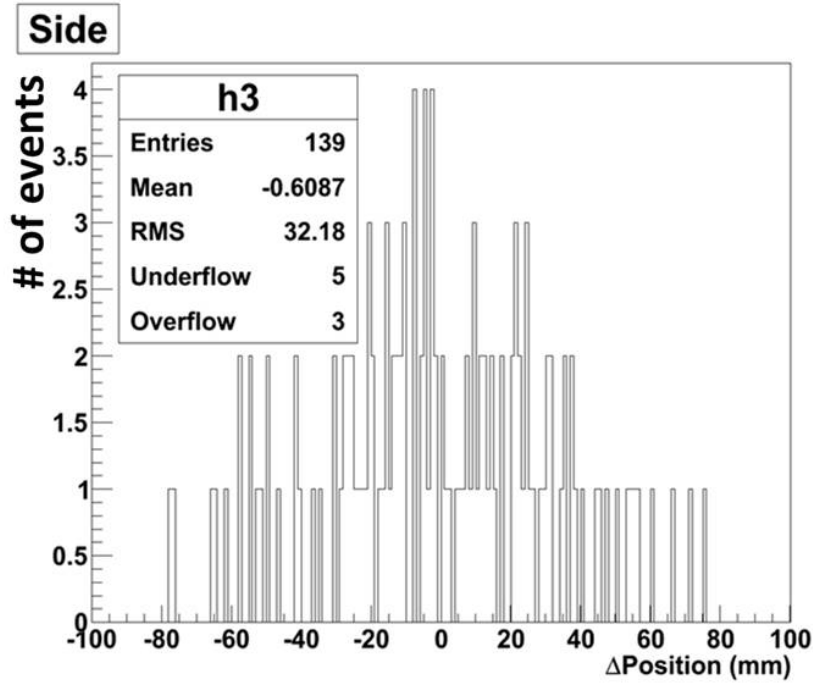


図 123 各検出器で再構成した飛跡間の距離の差 (水平方向)

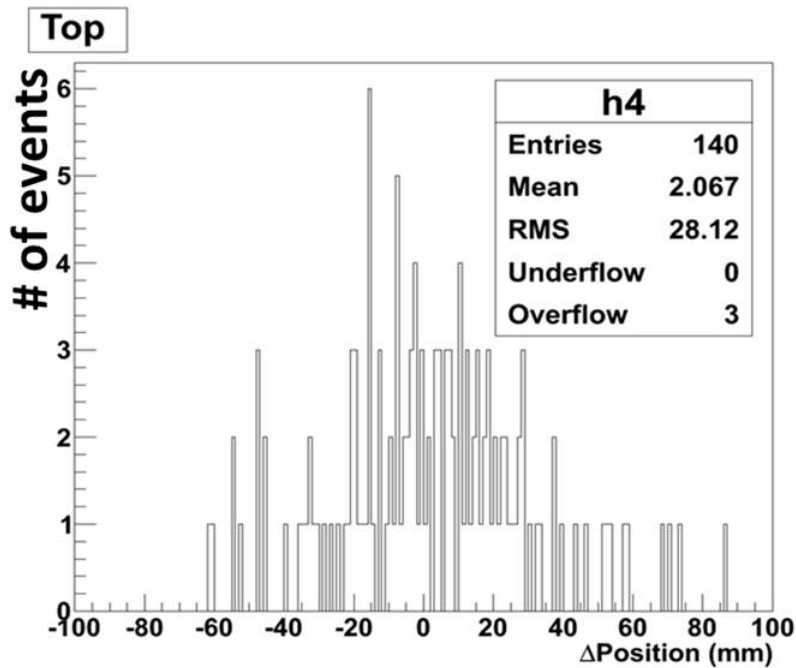


図 124 各検出器で再構成した飛跡の距離間の差 (垂直方向)



表 12 各検出器で再構成した飛跡間の距離から求めた差の平均値

view	平均値 [mm]
Side view	$-0.61 \pm 2.6$
Top view	$0.21 \pm 2.4$

図 123、124 は各検出器で再構成した飛跡間の距離の差をヒストグラムにしたものである。また、表 12 はその差の平均値を示す。Side view では  $1\sigma$  の誤差の範囲内で一致し、Top view でも  $1\sigma$  の誤差の範囲内で一致していることがわかる。また飛跡の角度の結果と同様に、これらの分布から、2 つの検出器において再構成された飛跡の整合性として  $\pm 90$  mm を要求することが妥当であると考えられる。

- 各検出器で飛跡を構成するヒットの時間の平均値を比較する

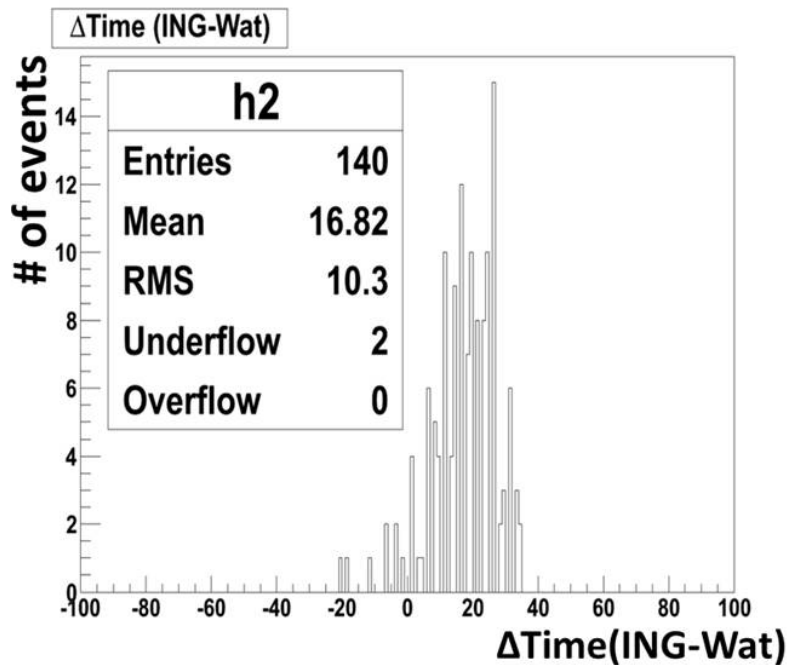


図 125 各検出器で飛跡を構成するヒットの時間の平均値の差

表 13 各検出器で飛跡を構成するヒットの平均時間から求めた差の平均値

平均値 [ns]
$16.82 \pm 0.63$

図 125 が各検出器におけるヒットの時間平均の差の結果である。また、表 13 はその差の平均値を示す。INGRID Water Module 検出器と INGRID それぞれの中心の距離は約 1.2 m であり、ミュオンは光速に近い速さで運動するため、INGRID Water Module 検出器と INGRID のヒット時間の差は約 4 ns と考えられる。また、検出器につながれているケーブルの長さは INGRID の方が INGRID Water Module によりも 10 m 短いことから、INGRID におけるヒット情報は 50 ns ほど早くなる。従って、その他の影響がない場合は

- 45 ns 程度の結果と予想できる。しかし、 $5\sigma$  以上のずれが生じている。現在、この原因は調査中だが、エレクトロニクス関係の機器の影響、例えばチャンネル毎に異なるオフセットが存在すること等が原因の1つである可能性がある。

また、ばらつきは60%であるが、これも十分には理解されていない。要因の1つには宇宙線の到来方向のばらつきが考えられる。これは図126のように水平に到来したものと斜めに到来したものでは各検出器でのヒット時間の差が18%変化するからである。

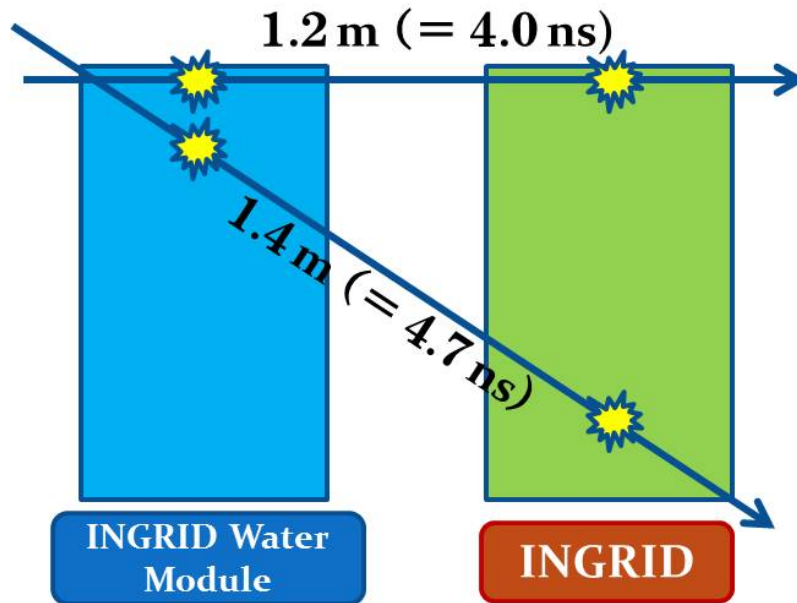


図 126 宇宙線の到来方向によるヒット時間の差

## 7 結論

WAGASCI 実験は、T2K 実験のニュートリノ振動解析における前置検出器と後置検出器の標的原子核の違いによる系統誤差を削減するために、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を 3% の精度で測定することを目指している。WAGASCI 実験で製作する WAGASCI 検出器はスリットのないシンチレータ層と、スリットのあるシンチレータをグリッド状にした層を交互に組み上げることで、 $4\pi$  のアクセプタンスを実現する 3 次元格子構造をもっている。これより、ニュートリノと標的原子核の中性子の反応によって生成されたミュオンや陽子が角度方向に散乱された場合でも飛跡再構成が可能であるという特徴がある。

本論文では WAGASCI 検出器の水標的モジュールの 1 つ、INGRID Water Module の光量測定を行った。その結果、この検出器で用いている 1280 本のシンチレータの平均光量は 20 p.e. 以上であり十分な光量があること、ばらつきは 10% 程度の妥当な値であることが確認された。またこれらの中には光量が低いシンチレータがあることがわかったが、この原因はシンチレータの溝からファイバーが離れて接着されていることである。

また、製作した INGRID Water Module をビームモニター INGRID よりもビームの上流側に設置して、性能評価を行うためにこれらの検出器の飛跡再構成の整合性を確認した。2 つの検出器から得られるヒット情報やそれにより再構成した飛跡より傾きや位置のずれは無かったが、各検出器のヒット情報の平均時間の差は実験環境などから予想した値  $-45$  ns よりも 60 ns 程遅い結果であった。よって、今後はこの原因を明らかにする必要がある。

## 謝辞

本論文の作成を通して、私の研究は周りの支えがあって進められた事を再確認しました。ここで私にご指導や支援していただいた方々に感謝の意を述べたいと思います。指導教員である、清矢先生には研究に行き詰まった際、昼夜問わずご指導いただいたことや、本論文や学会のスライド等の私の拙い文章や言葉に何度も目を通しては修正をしていただいたことを感謝しております。山本先生には普段のご指導だけでなく、私が滞りなく出張できるように迅速に手続きをしていただいたことを感謝しております。奥沢先生にはチームシフトや毎週のミーティングで大変お世話になりました。豊田先生には、物理や研究で用いる機器などの知識についてご指導いただきました。ありがとうございます。

T2K 実験、WAGASCI 実験では他大学のスタッフである市川先生、中家先生、南野先生、横山先生にはミーティングや出張先で研究の的確なアドバイスをいただき、大変お世話になりました。また、古賀さんをはじめ、林野さん、竹馬さん、細見さん、田村くん、Benjamin には WAGASCI 実験において、たくさんのご迷惑をかけましたが、その度親切にアドバイスやサポートしていただいたことを感謝しております。また T2K 実験では WAGASCI メンバーに加えて、中村輝石さん、仲村佳悟さん、芦田くん、中西さん、平本さん、婁くん、宇野くんにもチームシフトやコラボレーションミーティングなど、出張先において様々な場面でお世話になりました。

同じ研究グループに属し、同じ研究室である金くんには、研究グループに参加してから行動を共にすることが多く、わからないことはいつも丁寧に教えていただきました。ありがとうございます。また後輩である東くん、井上くんには私の研究に対して共に考えたり、作業のサポートをしていただいたりしたことを感謝しております。

振り返ると修士課程の2年間は、悪天候で外出ができず太田団地で過ごした休日を除くと、あっという間に過ぎてしまいましたが、OB・OG を含めた研究室の皆さん、研究グループの皆さんのおかげで充実した研究生活であったと思います。本当にありがとうございました。

最後にこの2年間、いつも優しく見守ってくれた家族や友人に深く感謝したいと思います。

## 図目次

1	荷電カレント準弾性散乱 . . . . .	1
2	荷電カレント $1\pi$ 生成反応 . . . . .	1
3	中性カレント弾性散乱 . . . . .	1
4	中性カレント $\pi^0$ 生成反応 . . . . .	1
5	T2K 実験 . . . . .	4
6	J-PARC . . . . .	5
7	T2K 実験で用いる陽子ビームの時間構造 . . . . .	5
8	1次、2次ビームラインに設置されたモニター群 . . . . .	7
9	パイオンの崩壊の模式図 . . . . .	7
10	二次ビームラインで生成されたニュートリノが各検出器に到達するまでの模式図 . . . . .	8
11	ニュートリノの振動確率 (上図) と off-axis 法によるニュートリノのエネルギー分布 (下図) . . . . .	9
12	ミュオンモニター . . . . .	10
13	前置検出器の概略図 . . . . .	10
14	INGRID の全体図 . . . . .	11
15	INGRID のモジュールの概略図 . . . . .	11
16	B2 モジュールの設置する様子と設置場所 . . . . .	12
17	Proton Module (左: 設置場所、右: 内部構造) . . . . .	12
18	off-axis 検出器: ND280 の概観図 . . . . .	14
19	スーパーカミオカンデ . . . . .	15
20	スーパーカミオカンデの内部の様子 . . . . .	15
21	ミュオンが飛来した際のチェレンコフリング . . . . .	16
22	電子が飛来した際のチェレンコフリング . . . . .	16
23	WAGASCI 検出器全体図 . . . . .	18
24	WAGASCI 検出器の上面図 . . . . .	18
25	WAGASCI 実験の実験場所 . . . . .	19
26	格子状にシンチレータを組んだ様子 . . . . .	20
27	中心検出器の内部構造 . . . . .	20
28	中心検出器の水標的とプラスチック標的のニュートリノフラックス (横軸はニュートリノのエネルギー) . . . . .	20
29	中心検出器のイベントディスプレイ (左: グリッド構造がない場合、右: グリッド構造がある場合) . . . . .	21
30	INDRID Water Module の模式図 . . . . .	21
31	Sub Module . . . . .	22
32	INGRID 用のシンチレータの模式図 . . . . .	24
33	中心検出器用の薄型シンチレータ . . . . .	24
34	MRD 用のシンチレータとファイバー . . . . .	24
35	波長変換ファイバー . . . . .	25
36	クッキー (左: 表側、右: 裏側) . . . . .	26
37	MPPC の概観 (左) と受光面の拡大図 (右) . . . . .	26

38	MPPC の出力波形	27
39	アフターパルス	28
40	32 ch array 型 MPPC	28
41	GOMI コネクタの各部品	29
42	組み立て後の GOMI コネクタ	29
43	INDRID Water Module 検出器	30
44	自動接着システムの作業場	31
45	自動接着システムの概観図	31
46	アルミ板にシンチレータを乗せた様子	32
47	接着や反射剤を塗布したシンチレータの保管場所	32
48	オプティカルセメント (左: 主剤、右: 硬化剤)	33
49	反射剤 (左: 主剤、右: 硬化剤)	33
50	アクチュエーター (左) と 2 台のアクチュエーターを作業台に設置した様子 (右)	34
51	コンプレッサー	34
52	ディスペンサー	34
53	シリンジ (左) とシリンジに付けるノズルとプランジャー (右上) と刷毛ノズル (右下)	35
54	真空ポンプ (左) と真空容器 (右)	35
55	真空脱法中 (左) と真空脱法後 (右) のオプティカルセメント	35
56	シリンジ固定具 (左) と XY ステージ (右)	36
57	塗布を行わない部分をラップで覆う様子	36
58	クロストークを増やす乱反射の様子	37
59	黒塗料を塗布したビニールハウス	37
60	吸気口 (左)、排気口 (右)、屋外に延長したダクト (下)	38
61	黒塗料を塗るときの格好	38
62	黒塗料スプレー	39
63	黒塗料を塗布する前 (左) と塗布後 (右)	39
64	黒塗料を塗布する様子	40
65	ABS 樹脂で出来たフレーム (左) とそれにシンチレータを組み立てている様子 (右)	41
66	グリッド構造のシンチレータ層の組み立て	41
67	シリコングルー (左) とそれを詰めたシリンジ (右)	41
68	シリコン接着剤を用いてシンチレータを固定している様子	42
69	Sub Module (左) とファイバーをまとめたクッキー (右)	42
70	研磨前のクッキー (左) と研磨後クッキー (右)	42
71	黒塗料をレイヤー毎に塗布している様子	43
72	黒塗料スプレー (右上) と防草シート (右下) を用いた Sub Module (左)	43
73	防草シートを補った箇所	44
74	Sub Module を水槽に入れる様子	44
75	作業場	46
76	セットアップの概略図 (IWM1 の場合)	46
77	シンチレータを重ねた様子 (左) とシンチレータを包んでいるブラックシート (右)	47
78	暗箱の概観	47
79	暗箱の中の様子	47

80	測定に用いる温度計 . . . . .	48
81	ファイバーに GOMI コネクタを接着している様子 . . . . .	48
82	研磨の様子 (上) とファイバーの端面の様子 (左: 研磨前、右: 研磨後) . . . . .	49
83	研磨に用いたやすり . . . . .	49
84	読み出し用基板と回路 . . . . .	50
85	測定に用いる HV . . . . .	50
86	オシロで信号を図る様子 . . . . .	51
87	MPPC の出力信号 (1 p.e.) vs. HV のグラフ . . . . .	51
88	キャリブレーションのセットアップ . . . . .	52
89	キャリブレーションのヒストグラムにフィッティングを行う様子 . . . . .	52
90	宇宙線を用いて測定したヒストグラム . . . . .	53
91	図 90 において 1.5 p.e. 以上の範囲だけをプロットしたヒストグラム . . . . .	54
92	MPPC を抜き差ししている様子 . . . . .	55
93	シンチレータの組み立ての際の位置の調節を行っている様子 . . . . .	56
94	IWM1 のサンプリングによるシンチレータの平均光量 . . . . .	57
95	IWM1 のサンプリングによるシンチレータの平均光量 (左: スリットなし, 右: スリットあり) . . . . .	57
96	IWM2 のサンプリングによるシンチレータの平均光量 . . . . .	58
97	IWM2 のサンプリングによるシンチレータの平均光量 (左: スリットなし, 右: スリットあり) . . . . .	58
98	水中試験のセットアップ . . . . .	59
99	水中試験の水槽の様子 . . . . .	59
100	水中試験におけるエレクトロニクス関係の機器が入った暗箱の様子 . . . . .	60
101	おもりでシンチレータを固定する様子 . . . . .	60
102	ファイバーを水槽の穴に通す様子 . . . . .	61
103	水中での経過日数による光量の推移 . . . . .	62
104	各シンチレータにおける黒塗料塗布前後の光量の変化 . . . . .	63
105	Sub Module の光量測定のセットアップ . . . . .	64
106	クッキーに MPPC Array を付けた様子 . . . . .	64
107	EASIROC . . . . .	65
108	Sub Module を遮光した様子 . . . . .	66
109	イベントの選び方 . . . . .	66
110	平均値を求めるためのイベントの範囲の選び方 . . . . .	67
111	1 台目の Sub Module の各シンチレータの平均光量 . . . . .	67
112	2 台目以降の Sub Module の各シンチレータの平均光量 . . . . .	68
113	シンチレータの置き方と宇宙線の飛跡 (黄色がシンチレータ内を通過した宇宙線の飛跡を示す) . . . . .	69
114	シンチレータからのファイバーの浮きによる受光面の影響 . . . . .	69
115	INGRID Water Module 検出器を用いた実験 . . . . .	70
116	INGRID の Horizontal Module の位置 . . . . .	71
117	宇宙線トリガーのアルゴリズム . . . . .	72
118	2 つの検出器を通った荷電粒子の飛跡再構成 . . . . .	73
119	Top view と Side view の場所 . . . . .	73

120	トラッキングの確認方法 . . . . .	74
121	飛跡の傾きの差 (水平方向) . . . . .	75
122	飛跡の傾きの差 (垂直方向) . . . . .	75
123	各検出器で再構成した飛跡間の距離の差 (水平方向) . . . . .	76
124	各検出器で再構成した飛跡の距離間の差 (垂直方向) . . . . .	76
125	各検出器で飛跡を構成するヒットの時間の平均値の差 . . . . .	77
126	宇宙線の到来方向によるヒット時間の差 . . . . .	78



## 表目次

1	陽子ビームのパラメータ . . . . .	5
2	Y11 (200) MS の波長変換ファイバーのカタログスペック [14] . . . . .	25
3	32 ch array 型 MPPC S10943-4156 のカタログスペック . . . . .	28
4	測定方法と測定条件 . . . . .	53
5	サンプリングによる光量測定の再現性 . . . . .	56
6	水中試験の光量測定方法と測定条件 . . . . .	61
7	黒塗料塗布前後での水中試験による光量測定結果 . . . . .	61
8	測定方法と測定条件 . . . . .	65
9	1 台目の Sub Module を構成する各シンチレータの平均光量の平均値 . . . . .	68
10	2 台目以降の Sub Module を構成する各シンチレータの平均光量の平均値 . . . . .	68
11	各検出器において再構成した飛跡の傾きから求めた差の平均値 . . . . .	75
12	各検出器で再構成した飛跡間の距離から求めた差の平均値 . . . . .	77
13	各検出器で飛跡を構成するヒットの平均時間から求めた差の平均値 . . . . .	77

## 参考文献

- [1] W.Pauli, Letter of 4 December to L.Meitner et al. (1930)
- [2] F.Reines and C.L.Cowan et al. “Detection of the Free Antineutrino” Phys. Rev. 117 (1960)
- [3] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata. “Remarks on the unified model of elementary particles” Prog. Theor. Phys. Vol. 28, p. 870 (1962)
- [4] Y.Yamazaki et al. “Accelerator Technical Design Report for J-PARC” KEK-Report 2002-13;JAERI-Tech 2003-044 (2003)
- [5] E.Aliu et al. [K2K Collaboration], “Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment”, arXiv:hep-ex/0411038 (2005)
- [6] K.Matsuoka et al. “Design and performance of the muon monitor for the T2K neutrino oscillation” experiment ” Nucl. Instrum. Meth. A 624, 591 (2010)
- [7] 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)
- [8] T.Lindner and the T2K-FGD group “The Fine Grained Detector for the T2K experiment” J.Phys.: Conf. Ser. 136 042035 (2008)
- [9] N.Abgrall et al. “Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors” arXiv:1012.0865(2010)
- [10] M. Ziembicki et al. “The SMRD subdetector at the T2K near detector station” Acta Phys.Polon. B 41, 1579 (2010)
- [11] Y.Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “The Super-Kamiokande detector” Nucl.Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- [12] A.Pla-Dalmau et al. “FNAL-NICADD Extruded Scintillator. FERMILAB-PUB-05-344” (2005)
- [13] 川向裕之, “T2K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノビームモニター INGRID に用いるシンチレーター及び光子検出器 MPPC の性能評価” 京都大学修士論文 (2007)
- [14] Kuraray 社 Scintillation Materials カタログ
- [15] 音野瑛俊, “ガイガーモードで駆動するピクセル化された新型半導体光検出器の基礎特性に関する研究”, 東京大学修士論文 (2008)
- [16] 吉田健人, “三次元格子構造をもつ新型ニュートリノ検出器 WAGASCI の開発”, 京都大学修士論文 (2015)
- [17] 金賢一, “Measurement of neutrino interactions at an off-axis angle 1.6 degrees using the near-detector INGRID and development of a new neutrino near-detector for the T2K neutrino oscillation experiment”, 大阪市立大学修士論文 (2016)
- [18] 若松慶樹, “T2K 長基線ニュートリノ振動実験におけるニュートリノビームモニター INGRID を用いた Off-axis 角 1.65 度でのニュートリノ反応の測定”, 大阪市立大学修士論文 (2015)
- [19] 大谷将士, “T2K 長基線ニュートリノビームモニター INGRID の製作と性能評価”, 京都大学修士論文 (2009)
- [20] 木河達也, “T2K 実験ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究”, 京都大学修士論文 (2011)
- [21] 市川温子, 関口哲朗, 中平武, “T2K 実験ニュートリノ生成機器”, 高エネルギー物理学研究者

