

2017年1月1日

新ニュートリノ検出器WAGASCIの製作
及び
それに用いられるプラスチックシンチレータの
クロストークの測定

井上 翼

概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) により生成されたニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデに照射し、ニュートリノ振動現象の詳細な理解を主な目的とする。この実験は off-axis 法を採用しており、ニュートリノビームの中心軸をスーパーカミオカンデから 2.5° ずらすことにより、スーパーカミオカンデにおけるニュートリノ振動の確率が最大となるようなニュートリノのエネルギー領域を選択している。T2K 実験においてはプラスチック標的の前置検出器と水標的のスーパーカミオカンデの二つの検出器が用いられており、これらの標的原子核の違いによ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。我々はこれを抑制するための実験、WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator) 実験を計画している。

WAGASCI 実験は炭素標的、水標的、MRD (Muon Range Detector) の三つの検出器を使用し、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を測定する。炭素標的と水標的の検出器を並べて配置し、ニュートリノ反応断面積比の測定におけるニュートリノフラックスに依存する系統誤差を抑制している。炭素標的と MRD は既存の検出器を使用し、水標的の検出器は 2016 年の夏から約一年かけて新たに製作した。水標的の検出器は 1280 本のプラスチックシンチレータにより三次元格子状に組み立てられ、ニュートリノ反応により生成される荷電粒子に対して立体角で 4π のアクセプタンスを持つ。これらの三つの検出器は前置検出器が設置されているホール内に設置される。WAGASCI 実験も off-axis 法を採用し、検出器の設置位置はニュートリノビーム軸から 1.5° ずれている。

一昨年、水標的の検出器と同じ構造をもつプロトタイプ検出器が製作されており、プラスチックシンチレータ間のクロストークが確認されている。これを抑制するため、今回製作した検出器のプラスチックシンチレータには黒塗料が塗布される。

本論文では、水標的の検出器の製作と製作過程における光量測定による性能評価や、この検出器に用いられるプラスチックシンチレータ間のクロストークの研究について述べる。

目次

1	ニュートリノ	1
1.1	ニュートリノ振動	1
2	T2K 実験	4
2.1	目的	4
2.2	J-PARC とニュートリノビームライン	5
2.2.1	陽子ビームモニター	7
2.2.2	off-axis 法	7
2.3	ニュートリノビーム方向の監視	8
2.3.1	MUMON (ミューオンモニター)	8
2.3.2	INGRID(Interactive Neutrino Grid)	8
2.4	off-axis 前置ニュートリノ検出器と後置検出器スーパーカミオカンデ	10
2.4.1	off-axis 前置ニュートリノ検出器 (ND280)	10
2.4.2	後置検出器 (スーパーカミオカンデ: SK)	12
3	WAGASCI 実験	14
3.1	動機	14
3.2	検出器概要	14
3.3	実験場所	14
3.4	WAGASCI 検出器	15
3.4.1	Proton Module	15
3.4.2	WAGASCI module	17
3.4.3	Muon Range Detector	17
3.5	目的	20
3.6	WAGASCI module の構成要素	21
3.6.1	プラスチックシンチレータ	21
3.7	波長変換ファイバー	21
3.8	MPPC(Multi Photon Counter)	23
3.9	波長変換ファイバーと MPPC 間のインターフェース	27
3.9.1	GOMI コネクタ (General Optical MPPC Injection Connector)	27
3.9.2	クッキー	27
4	WAGASCI Module の製作	28
4.1	プラスチック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	28
4.2	自動化システムの導入	28
4.2.1	机とアルミ台の設置	29
4.2.2	アルミ板へのシンチレータとファイバーの設置	29
4.2.3	接着剤と反射剤	30
4.2.4	ディスペンサーと電動アクチュエータ	32
4.2.5	乾燥と保管	33

4.3	プラスチックシンチレータの黒塗料塗布	33
4.4	プラスチックシンチレータによる格子状構造の組み立て	34
4.4.1	ABS フレーム	35
4.4.2	グリッドシンチレータとプレーンシンチレータの組み立て	35
4.5	sub-module 組み立て	39
4.6	WAGASCI module 組み立て	39
5	黒塗料塗布時の環境整備	44
5.1	黒塗料における危険有害性について	44
5.2	環境整備	45
6	WAGASCI module の性能評価	53
6.1	サンプリングによる光量測定	53
6.2	目的	55
6.3	セットアップ	55
6.3.1	GOMI コネクタの取り付け	57
6.3.2	MPPC	57
6.3.3	キャリブレーション	58
6.3.4	測定条件	58
6.3.5	解析方法	58
6.3.6	測定結果	60
6.4	黒塗料塗布前後の光量測定	62
6.4.1	目的	62
6.4.2	測定方法	62
6.4.3	測定結果	62
6.5	sub-module の光量測定及び解析	65
6.5.1	目的	65
6.5.2	測定装置	65
6.5.3	測定方法	66
6.5.4	測定結果	66
6.5.5	ヒットレート	69
6.6	WAGASCI module の光量測定	74
6.6.1	目的	74
6.6.2	測定結果	74
6.6.3	ヒットレート	75
6.6.4	イベントディスプレイ	75
7	クロストークの測定	79
7.1	目的	79
7.2	セットアップ	79
7.3	測定方法	81
7.4	測定結果	84

1 ニュートリノ

ニュートリノは重力相互作用と弱い相互作用のみが働く粒子であり、中性レプトンである。ニュートリノは1930年にW. Pauliにより存在が提唱され[1]、1953年にF. ReinesとC. Cowan[2]により存在が証明された。また、1962年にL.M. Lederman M. Schwartz J. Steinbergerにより、ニュートリノには一つ以上のフレーバーが存在することが証明され、そして1995年にニュートリノには ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ の三代が存在することがCERNのLEP(Large Electron-Positron collider)実験で確認された。ニュートリノの質量については長年測定されてきたが、上限値しか求まらず、その値も非常に小さかった。そのため、標準理論ではニュートリノの質量は0とされ、あるフレーバーから異なるフレーバーへの変化は許されなかった。しかし、1998年にスーパーカミオカンデでの大気ニュートリノの測定により時間変化に伴ってフレーバーが変化する、ニュートリノ振動が確認された。これにより、ニュートリノに質量があることが証明された。

1.1 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量を持ち、弱い相互作用の固有状態であるフレーバー固有状態と質量固有状態が異なり、3つの質量固有状態が一つに縮退しない場合に起こる。このとき、フレーバー固有状態は次のように表される。

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

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

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

$$= \begin{pmatrix} c_{12}s_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量固有状態の混合角である。また、 δ はCP(荷電とパリティ)非保存の位相である。

続いて、ニュートリノ振動の定式化のため、ニュートリノの時間発展について考える。まず、Schorödinger方程式は、ハミルトニアン H と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ のエネルギー E_i により、以下のように表される。

$$i \frac{d}{dt} |\nu_i(t)\rangle = H |\nu_i(t)\rangle = E_i |\nu_i(t)\rangle \quad (4)$$

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-E_i t} |\nu_i\rangle \quad (5)$$

質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ のニュートリノが真空中を移動するとき、 t 時間の時間発展の式は、上式 (4) の Schrodinger 方程式と MNS 行列から、以下のように表される (式 6)。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-E_i t} |\nu_i\rangle \quad (6)$$

ニュートリノの質量は極小であるため相対論的に考えられ、以下のように近似することができる。

$$\begin{aligned} E_i &= \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \\ &\simeq p + \frac{m_i^2}{2E_i} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 p は ν_i の運動量、 m_i は ν_i の質量である。よって、式 (6) は以下のように表される。

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{\frac{m_i^2}{2E} t} |\nu_i\rangle \\ &= \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{\frac{m_i^2}{2E} t} U_{\beta i}^\dagger |\nu_\beta\rangle \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 E はニュートリノのエネルギーであり、時間に依存しないパラメータとする。 ν_α が時刻 $t=0$ に生成され、時間 t 移動した後 ν_β になる確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \left| \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{\frac{m_i^2}{2E} t} U_{\beta i}^\dagger \right|^2 \\ &= \sum_{i,j} U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^\dagger e^{-\frac{i(m_i^2 - m_j^2)L}{2E} t} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ここで L を移動距離とすると、自然単位系では $L \simeq t$ とできる。また、 e^{-ipt} は振動確率の計算時は全体の位相を変えるだけなので無視できる。ここで、 $\sum_i U_{\alpha i}^\dagger U_{\beta i} = \delta_{\alpha\beta}$ を用いると、式 (9) は、

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \sum_{i,j} U^\dagger_{\alpha i} U_{\beta i} U_{\alpha j} U^\dagger_{\beta j} e^{-\frac{i\Delta m_{ij}^2 L}{2E}t} \\
&= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U^\dagger_{\alpha i} U_{\beta i} U_{\alpha j} U^\dagger_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right) \\
&\quad + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U^\dagger_{\alpha i} U_{\beta i} U_{\alpha j} U^\dagger_{\beta j}) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right)
\end{aligned} \tag{10}$$

と表される。ここで、 $\Delta_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ とした。反ニュートリノの場合は式(10)の第三項の符号が反転する。例として、二世代間の結合を考える。結合行列は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right) \tag{11}$$

となる。また、移動後も ν_α のままである確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right) \tag{12}$$

となる。式(11)や式(12)より、ニュートリノ振動の確率は Δm^2 や $\sin^2 2\theta$ をパラメータとし、移動距離 L やニュートリノのエネルギー E_ν の関数として表されることがわかる。後述する T2K 実験では、この振動パラメータの精密測定を行っている。

2 T2K 実験

T2K 実験は、茨城県東海村から約 295 km 離れた岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデに向けて大強度陽子加速器により生成したニュートリノビームを放つ、長基線ニュートリノ振動実験である (図 1)。T2K 実験では、ニュートリノビームをニュートリノ生成点から 280m 下流にある前置検出器群と後置検出器となるスーパーカミオカンデで測定し、比較することでニュートリノ振動パラメータを測定する。

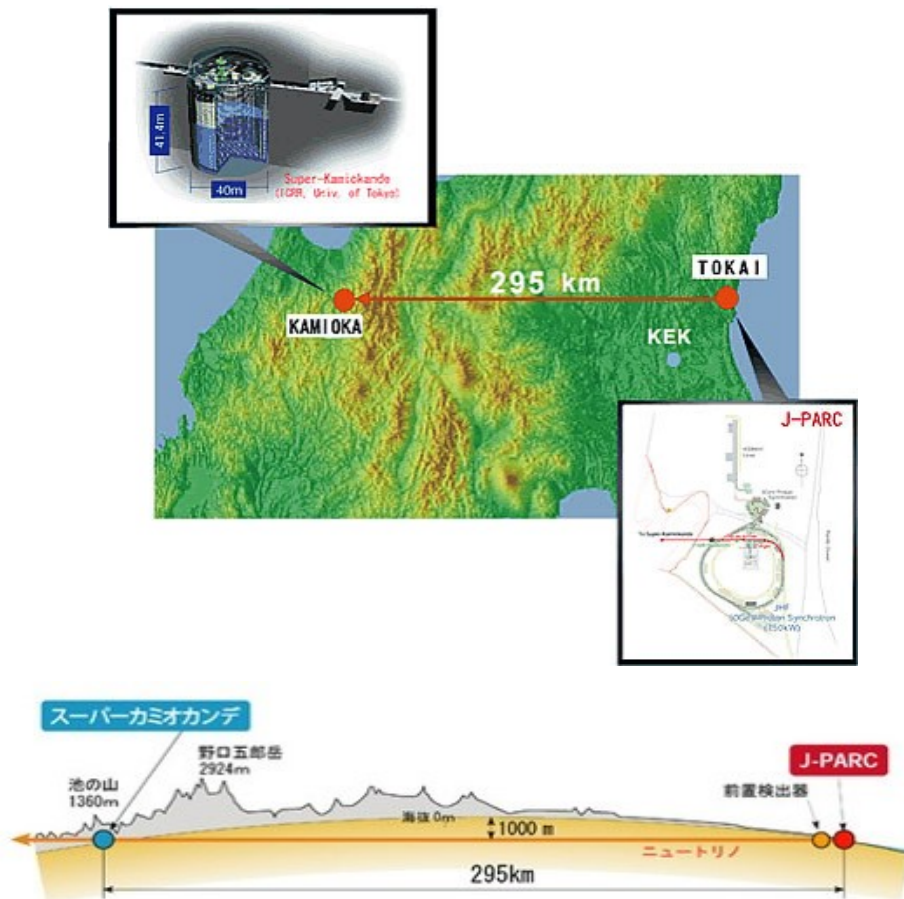


図 1: T2K

2.1 目的

- ν_μ 消失モードによる θ_{23} と Δ_{32}^2 の精密測定

K2K 実験 [3] 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 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\gamma$) の振動パラメータである混合角 θ_{23} と質量二乗差 Δ_{32}^2 の測定をより精密に行う。

- ν_e 出現モードによる θ_{13} と δ の精密測定

2011年に確認された ν_μ が ν_e に変化する ν_e 出現モードの振動パラメータである混合角 θ_{13} の測定を行う。また、 ν_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 δ の測定を行う。

T2K実験はこれらの振動パラメータの測定と、それによるレプトンセクターでのCP対称性の破れの探索が主な目的である。

2.2 J-PARCとニュートリノビームライン

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) [4](図2)の陽子加速器は上流からLINAC(LINEar ACcelerator)、RCS(Rapid-Cycling Synchrotron)、MR(Main Ring)の順に陽子を加速させる。LINACで陽子を400 MeVまで加速し、RCSで3 GeV、MRで30 GeVまで加速させる。その後、複合磁場型超伝導磁石(Superconducting Combined Function Magnet:SCFM)により神岡の方向に曲げられ、ニュートリノビームライン(図3)に送られる。ここへ送られる陽子ビームは図(4)のように、8バンチを1つの束とする時間構造を持ち、この束が2.48秒の周期で送られる。ニュートリノビームラインではまず、陽子ビームはTarget station内のグラフアイト(炭素)標的に照射される。そこで陽子はハドロン反応により π 中間子を生成し、三台の電磁ホーンにより前方に収束される。この π 中間子はDecay Volumeで以下のように崩壊する。



電磁ホーンの電流の向きを変えると π^- が収束するため、反ニュートリノビームを生成させることができる。反応しなかった陽子や崩壊しなかった π メソンはBeam Dumpで吸収される。

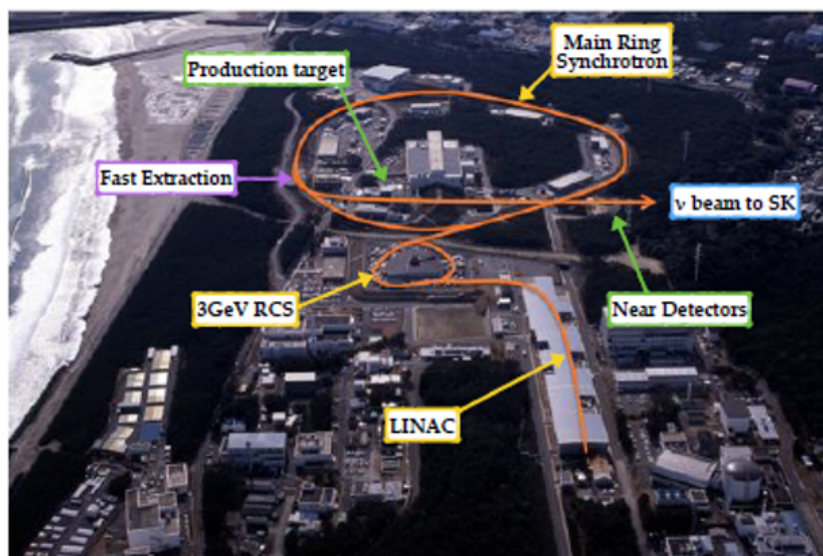


図 2: J-PARC ビームライン

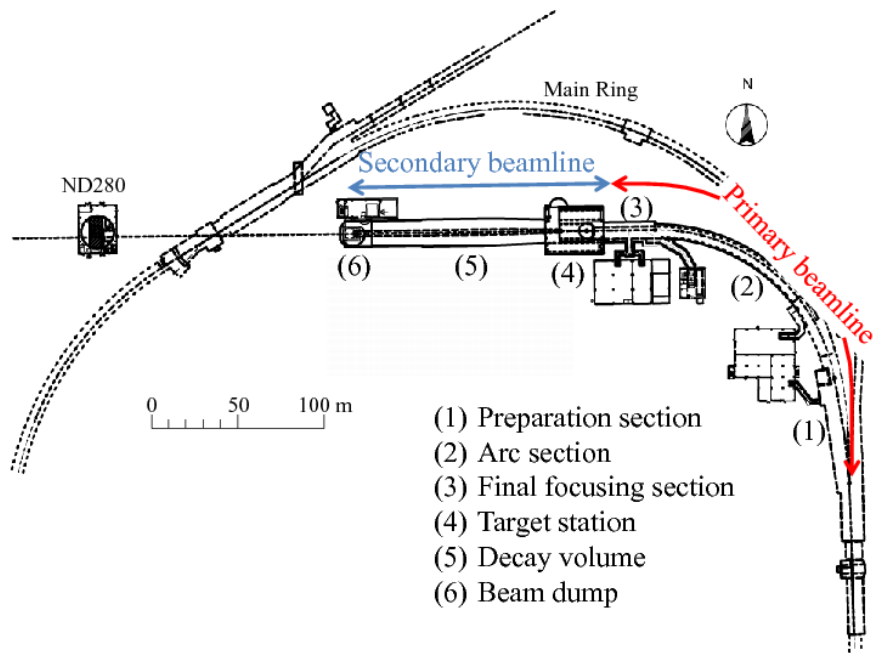


図 3: ニュートリノビームライン概観図

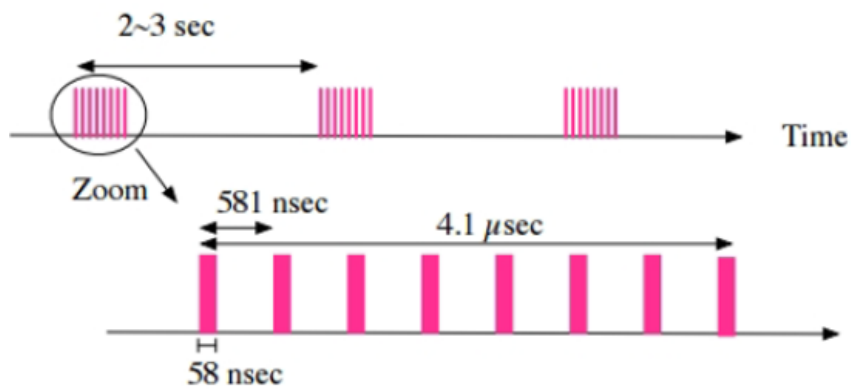


図 7 T2K 実験で用いる陽子ビームの時間構造

図 4: 陽子ビームの時間構造

2.2.1 陽子ビームモニター

Primary beamline ではビームを標的への確に当てるため、以下のようなビームモニター群が設置されている。

- ビーム位置モニター (ElectroStatic beam position Monitor : ESM)
- ビームプロファイルモニター
 - Segmented Secondary Emission Monitor : SSEM
 - Optical Transition Radiation (monitor): OTR
- ビーム強度モニター (Current Transformer : CT)
- ビームロスモニター (Beam Loss Monitor : BLM)

これらは、図5のようにビームラインに沿って設置されている。

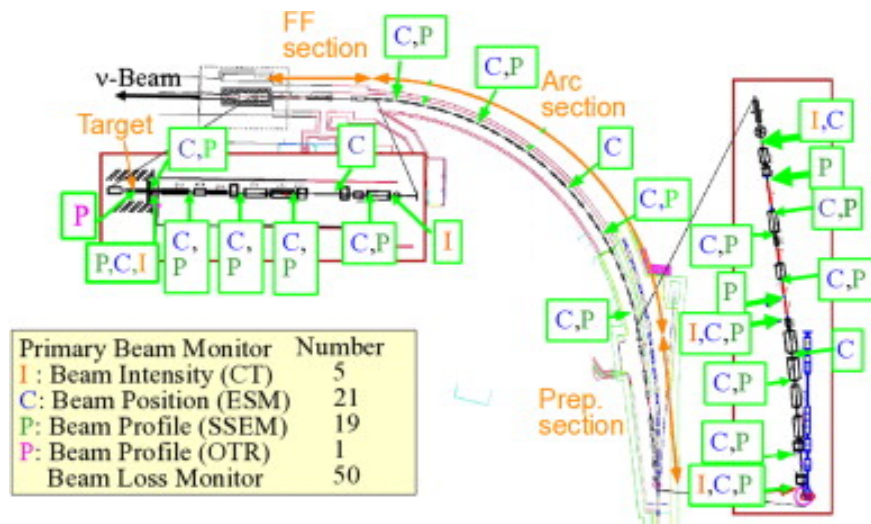


図 5: 陽子ビームモニターの設置位置と台数

2.2.2 off-axis 法

ニュートリノビームの方向をSKの方向から少しずらすことにより、ニュートリノのエネルギースペクトルに幅の狭いピークをもたせることをoff-axis法という。これにより、ニュートリノ振動の確率が最大になるようにエネルギースペクトルを調整することができる。式13による崩壊で生成されるニュートリノのエネルギー E_ν は、ニュートリノと π 中間子のなす角を θ 、質量を m_π 、エネルギーを E_π 、運動量を p_π とすると、以下のように表される。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\nu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (14)$$

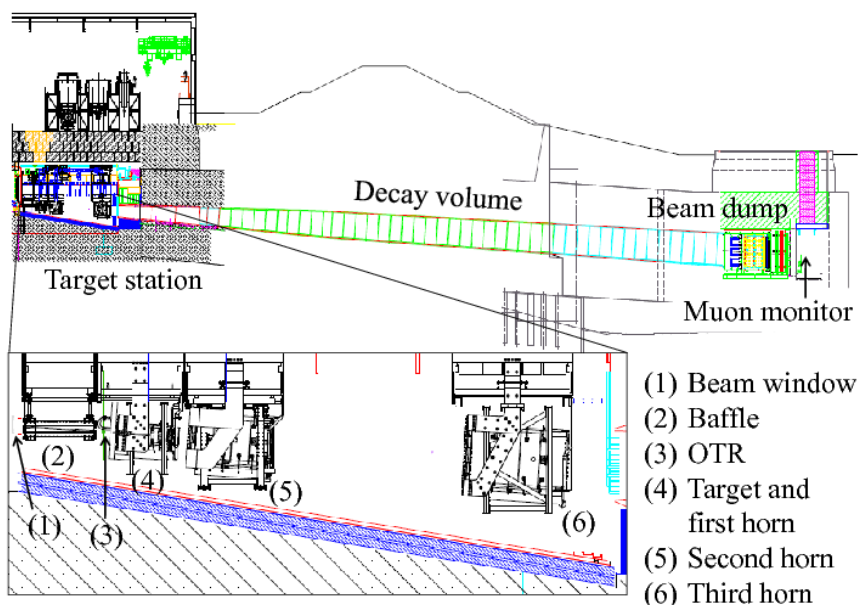


図 6: secondary ニュートリノビームライン概観図

T2K 実験は off-axis 角として 2.5° を採用している。この角度において、ニュートリノフラックスのビームエネルギーは約 0.7 GeV であり、このフラックスのピーク付近で μ_ν の残存確率が極小となる (図 7)。よって、ニュートリノ振動が起きやすいエネルギーにピークが来るようにできる。T2K 実験は off-axis 法を採用した世界初の実験である。

2.3 ニュートリノビーム方向の監視

off-axis 角のずれがないように INGRID や MUMON などの検出器を設置し、ニュートリノビームを高精度で監視している。ここでは、それらの検出器の概要を述べる。

2.3.1 MUMON (ミュオンモニター)

MUMON (図 8) は図 6 のように、ビームダンプ直後に設置されている [5]。 π 中間子の崩壊により生成したミュオンのプロファイルをリアルタイムで測定し、間接的にニュートリノビームの方向を監視している。シリコン PIN フォトダイオードとイオンチェンバーの二つの検出器により、測定可能なビーム強度の範囲を広めている。

2.3.2 INGRID (Interactive Neutrino Grid)

INGRID [6] はニュートリノのビーム方向と強度を高精度で監視することを目的とし、on-axis に設置されている検出器である。INGRID は Target station 内のグラフィイト (炭素) 標的から 280 m 下流にある前置検出器ホール (図 9) に設置されている。図 10 のように、縦に 7 台、横に 7 台のモジュールが並んでおり、他にビームの歪みを測定するために 2 台のモ

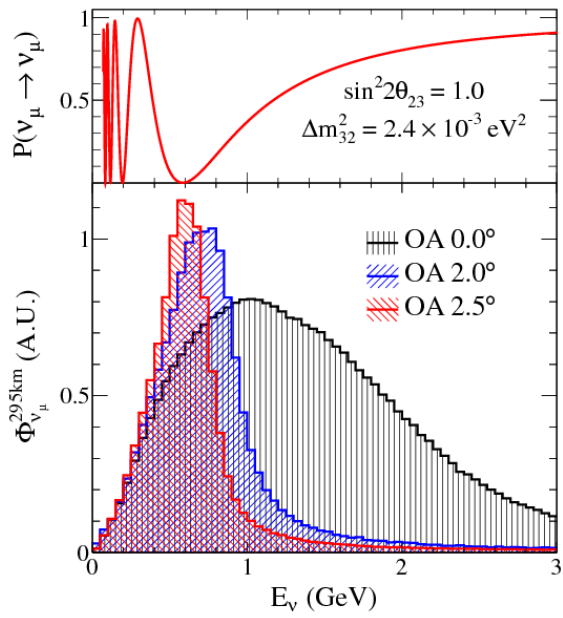


図 7: μ_ν の残存確率と off-axis 法によるニュートリノエネルギー分布

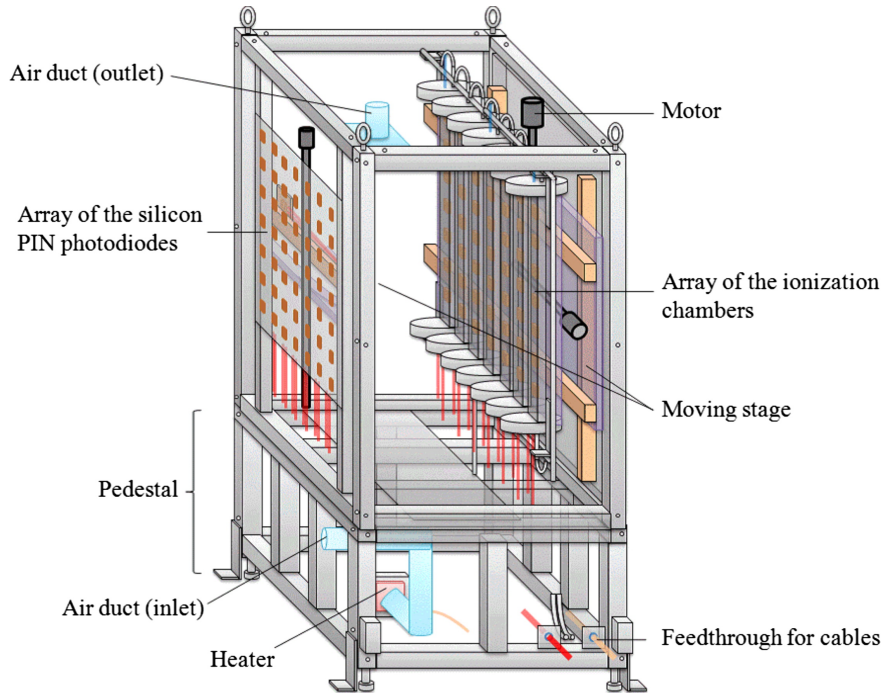


図 8: ミューオンモニター

ジュールが設置されている。モジュールは、9層の鉄と11層のシンチレータのサンドイッチ構造をしており、大きさは $1.2 \times 1.2 \times 0.9 \text{ m}^3$ 、重さは約7tある。鉄とニュートリノの反応により生成された荷電粒子をシンチレータで検出し、波長変換ファイバーと光検出器MPPCで読み出している。この14台のモジュールにより、ビーム中心から垂直、鉛直方向に $\pm 5 \text{ m}$ の領域を監視することができる。また、ビームの歪みを測定していた1台のモジュールは、後に説明するWAGASCI実験のMuon Range Detectorとして用いられている。

2.4 off-axis 前置ニュートリノ検出器と後置検出器スーパーカミオカンデ

2.4.1 off-axis 前置ニュートリノ検出器 (ND280)

off-axis 前置ニュートリノ検出器 (ND280) は、SKと同じくoff-axis上に設置された検出器であり、前置検出器ホールに設置されている。ニュートリノ振動が起きる前の、ニュートリノビームフラックスやエネルギースペクトルを測定している。以下に、ND280を構成している各検出器について簡単に説明する。

Magnet

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が用いられており、ニュートリノ反応により生成された荷電粒子を曲げ、運動量を測定する。

FGD(Fine Grained Detector)

FGD[7]は2台使用し、上流側は細分化されたプラスチックシンチレータから構成されており、下流側は水標的とシンチレータの領域をもつ構造をしている。上流側のシ

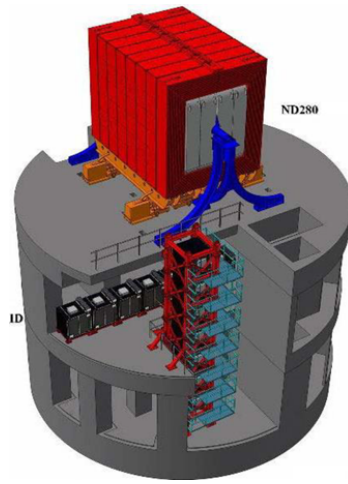
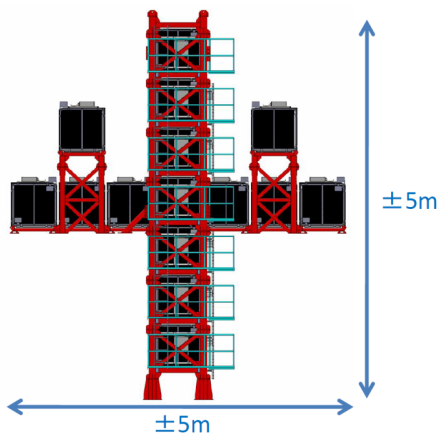


図 9: 前置検出器ホールと前置検出器群



(a) INGRID 概観図



(b) INGRID モジュール

図 10: INGRID

シンチレータがニュートリノ標的とニュートリノ反応点付近の荷電粒子の飛跡検出を担い、下流側で水とシンチレータの散乱断面積比を測定する。

P0D(π^0 Detector)

P0DはMagnet内の最上流部に設置されている π^0 検出器である。鉛薄膜、プラスチックシンチレータ、水標的のサンドイッチ構造からなる。シングル π^0 を生成する中性カレント反応の断面積を測定する。

TPC(Time Projection Chamber)

TPC[8]は3台用いられ、 π^0 検出器と2台のFGDの後ろに設置されている。ニュートリノ反応により生成された荷電粒子を同定し、その運動量を測定する。

ECAL(Electromagnetic Calorimeter)

ECALはMagnet内の最外殻にP0D、FGD、TPCを囲むように設置されている。鉛層とプラスチックシンチレータ層を交互に重ねた構造からなる。 π^0 などによる γ 線や、 ν_e の荷電カレント反応により生成された電子などを検出する。

SMRD(Side Muon Range Detector)[9]

マグネットヨークの隙間に設置されたプラスチックシンチレータにより、TPCに入射しなかったミューオンの運動量を測定する。

以下に各検出器の概略図を載せる(図11)。

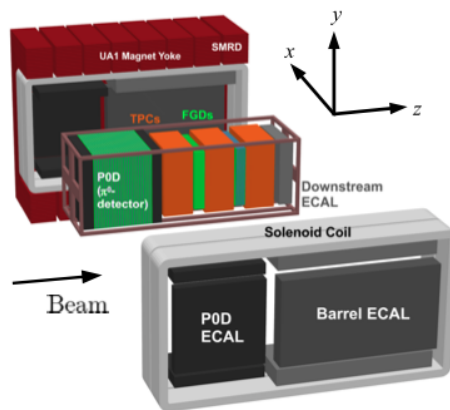
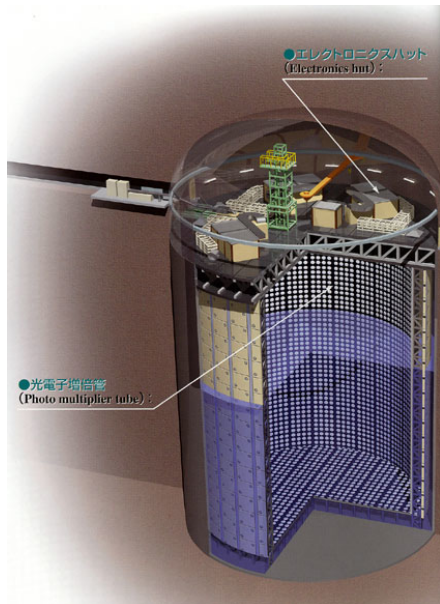


図 11: ND280 概略図

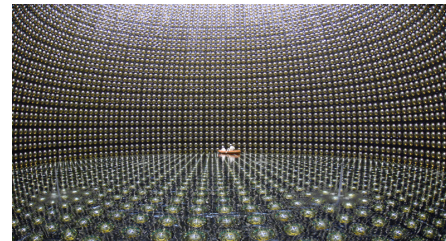
2.4.2 後置検出器 (スーパーカミオカンデ : SK)

後置検出器(図12)[10]は、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山の地下1000 mに設置されており、J-PARCから295 km離れた場所に位置する。また、この検出器は直径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り、そこに50 ktの純水が入れられている。検出器は内水槽のインナー検出器と外水槽のアウトター検出器に分かれている。インナー検出器に

は 11146 本の光電子増倍管が内向きに取り付けられ、アウター検出器には 1885 本の光電子増倍管が外向きに取り付けられている。大きさは前者が 20 インチ、後者が 8 インチである。ニュートリノ反応により生成された荷電粒子はチェレンコフ光を発生させ、検出器の壁にある大量の光電子増倍管により 1 つの大きなリングとして検出される。このリングをチェレンコフリング (図 13) と呼び、これを観測することで検出された粒子の種類や、荷電粒子のエネルギー、生成点、飛来方向の再構成をしている。

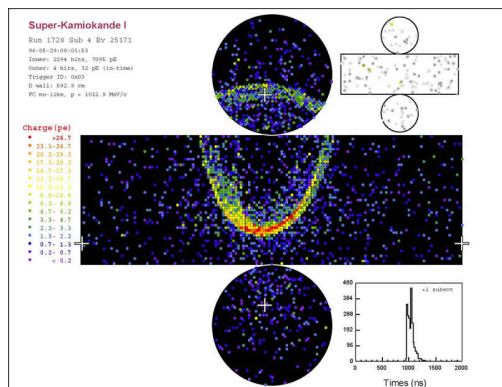


(a) スーパーカミオカンデ概観図

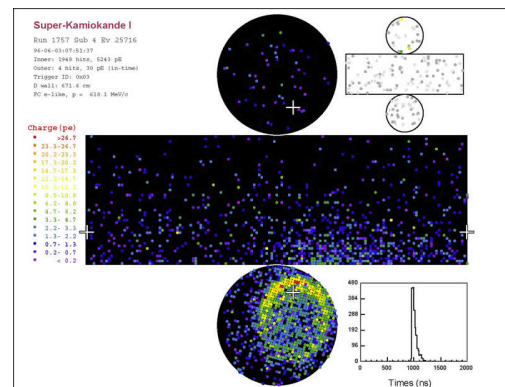


(b) スーパーカミオカンデ内部

図 12: SK



(a) ミューニュートリノが反応した例



(b) 電子ニュートリノが反応した例

図 13: チェレンコフリングのサンプル

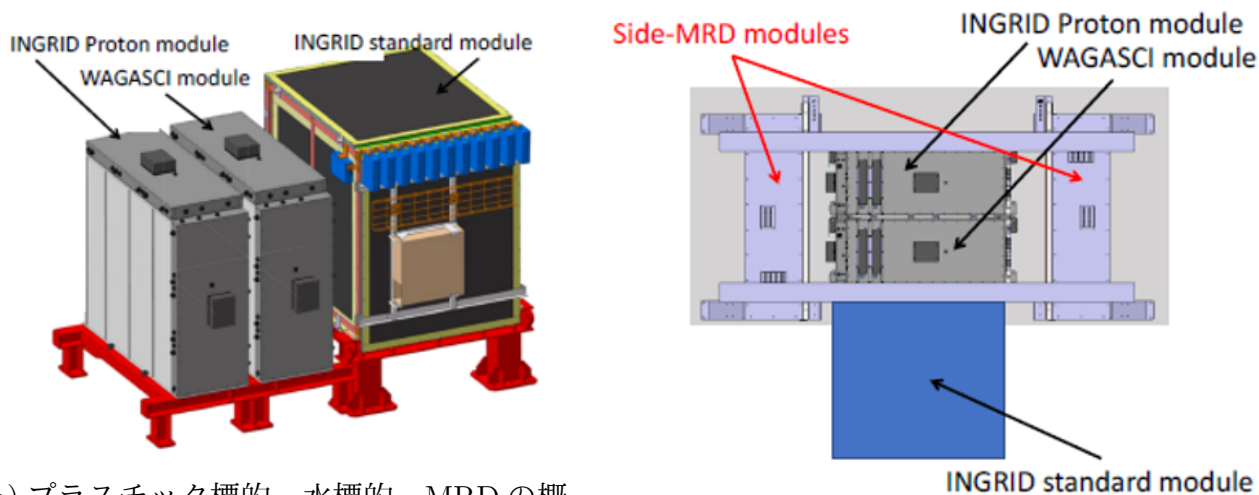
3 WAGASCI 実験

3.1 動機

T2K 実験は前述した off-axis 前置ニュートリノ検出器である ND280 により、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系統誤差を削減している。しかし、後置検出器 SK と前置検出器 ND280 の標的原子核が異なり、前者は主に水、後者は主にプラスチックである。これを起因とする系統誤差を削減する事は、ニュートリノ振動の高統計かつ精密な測定の実現のために大変重要である。さらに、後置検出器のアクセプタンスが 4π であるのに対して ND280 は前方方向のみである。この 2 点が起因となる系統誤差の削減のため、発足された実験が WAGASCI(WATER Grid AND SCIntillator) 実験である。WAGASCI 実験では、 4π のアクセプタンスを持つ三次元格子状構造の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目的としている。

3.2 検出器概要

検出器全体の概略図 (図 14) を以下に載せる。ニュートリノビームに沿って上流から順にプラスチック標的、水標的、ミューオン飛跡検出器 (以降 MRD:Muon Range Detector) が並び、それらを挟むように side MRD (以降 sMRD) が配置される。プラスチック標的の検出器と下流の MRD の検出器は既存の検出器を使用する。水標的については、2016 年の秋に製作を開始し、2017 年の 8 月に前置検出器ホールへのインストールを完了した。sMRD は建設中であり 2018 年 2 月に完成する予定である。



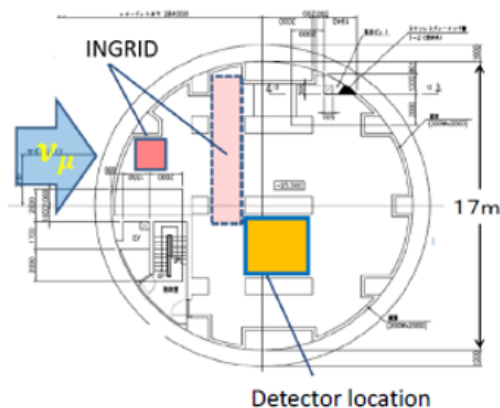
(a) プラスチック標的、水標的、MRD の概略図

(b) 上から見た各検出器の概略図

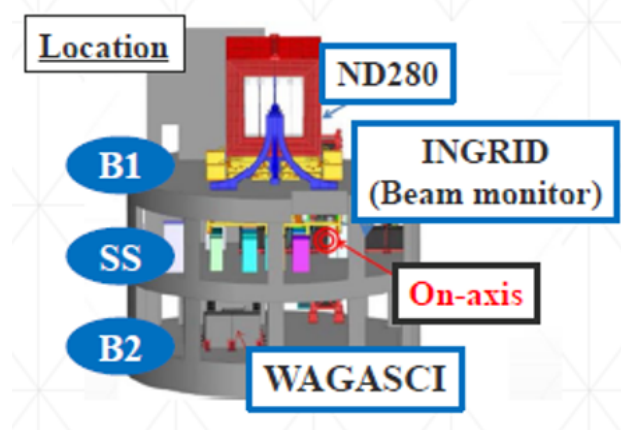
図 14: WAGASCI 実験で用いる検出器の概略図

3.3 実験場所

WAGASCI 検出器は図 15 のように、前置検出器ホールの地下 2 階に設置される。この設置位置は off-axis 角が 1.6° であり、ニュートリノフラックスが off-axis 前置検出器の位置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。



(a) 前置検出器ホール地下 2 階に設置される



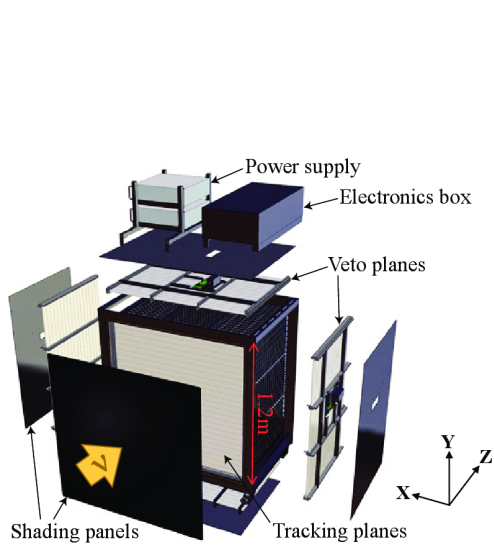
(b) 上から見た設置場所の概略図

図 15: WAGASCI 実験の実験場所

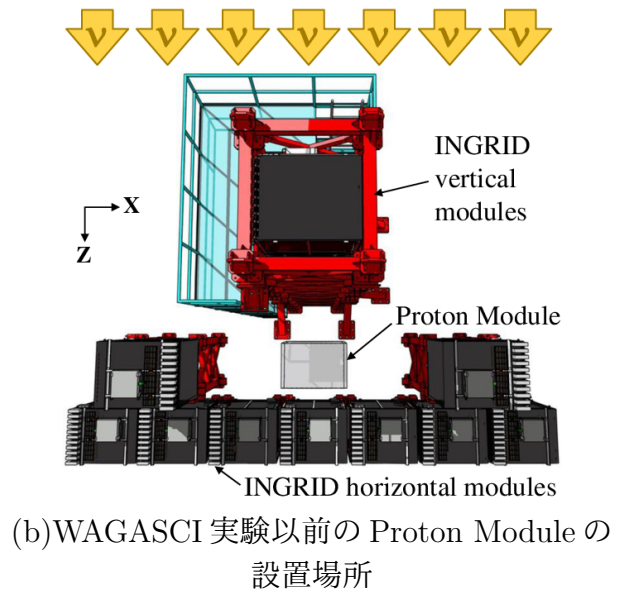
3.4 WAGASCI 検出器

3.4.1 Proton Module

INGRID はモジュールの構成上、陽子が鉄で止められてしまい、ミューオンのみしか検出することができない。よって Proton Module はミューオンと陽子を検出するために製作され、プラスチックシンチレータのみで構成された検出器である。2010 年に前置検出器ホールにインストールされ、当初は INGRID も用いることでニュートリノ反応により生成される陽子やパイオンの測定やニュートリノ反応断面積の測定をしていた。以下に Proton Module の概略図を載せる (図 16)。Proton Module で用いられるプラスチックシンチレータは 2 種類存在し、一つが INGRID でも用いられている $1\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 120\text{ cm}$ のシンチレータ、もう一つが K2K や SciBoone の SciBar 検出器で使用されている $1.3\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 120\text{ cm}$ のシンチレータである (図 17)。Proton module の内部構造としては、検出器の中心部に Scibar 型シンチレータを配置し、INGRID 型シンチレータで挟み込むようにしており (図 18)、中心部分の resolution をよくしている。総重量は 1.4 t (ニュートリノのターゲットとなるトラッキングプレーンの重量は 556 kg)、総チャンネル数は 1204 ch である。INGRID と同様、ニュートリノ反応により生成された荷電粒子をシンチレータで検出し、波長変換ファイバーと MPPC により検出する。上述した通り、Proton Module はプラスチックシンチレータのみで構成されるため、WAGASCI 実験ではプラスチック標的の検出器として使用する。よって、図 16 の Proton module の設置位置から、図 15 の WAGASCI 実験場所へ移動した。



(a) Proton Module の概略図



(b) WAGASCI 実験以前の Proton Module の設置場所

図 16: Proton Module

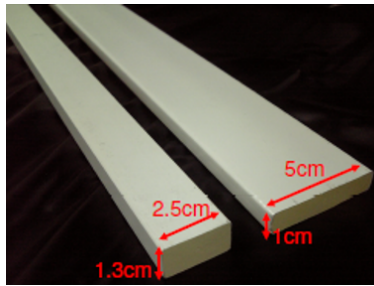
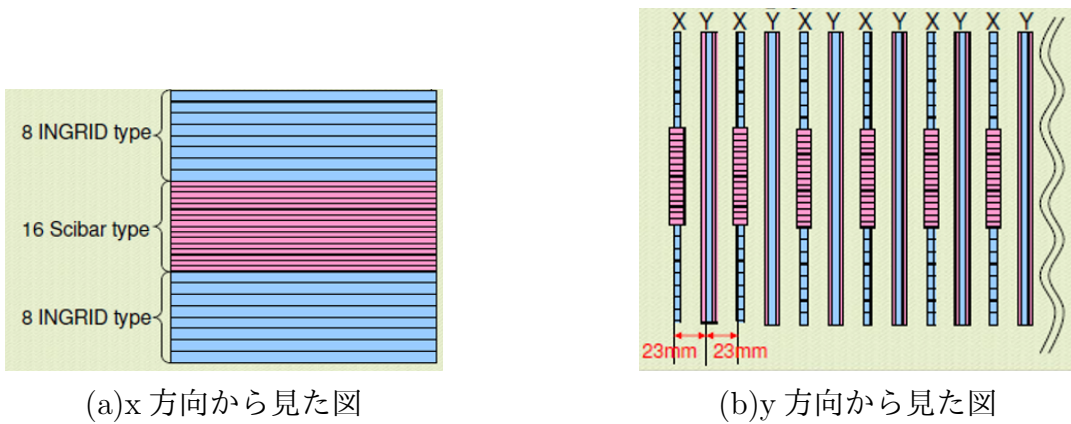


図 17: Proton Module で使用されるプラスチックシンチレータ



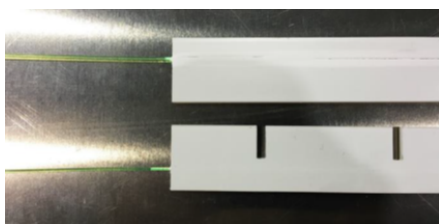
(a) x 方向から見た図

(b) y 方向から見た図

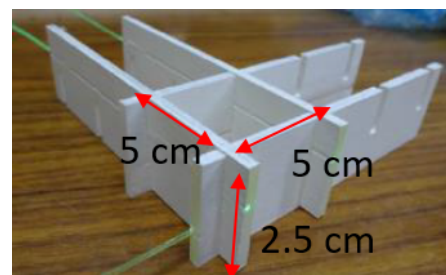
図 18: Proton module 内部のプラスチックシンチレータの構造

3.4.2 WAGASCI module

水標的となる新検出器は2016年から2017年まで約1年をかけて製作した。総チャンネル数は1280 ch、大きさはビーム方向に0.5 m、ビームと垂直な方向に縦横1 m、標的となる水の質量は0.5 tで全体としては約1 tになる。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が用いられ、スリットのあるもの(グリッドシンチレータ)とないもの(プレーンシンチレータ)2種類が存在する。これらを組み合わせることで3次元の格子状となる構造を成し、 4π のアクセプタンスを実現できる(図19)。格子の大きさは5.0 cm × 5.0 cm × 2.5 cmであり、この格子内に標的となる水を入れる。このように、三次元の格子状構造を持つ水標的の検出器をWAGASCI moduleと呼ぶ。水標的の検出器の概略図を以下に載せる(図20)。検出器の格子状構造について少し詳細を述べると、図21のように、ニュートリノビーム上流からプレーンシンチレータの層、次にグリッドシンチレータを組み合わせたグリッド構造を交互に並べる。グリッド構造の有無による検出器のイベントディスプレイを以下に示す。図22のグリッド構造がない場合は大角度方向のミュオンに対してほとんどヒットがないため、検出が難しいことがわかる。しかし、図23のグリッド構造がある場合は大角度方向のミュオンに対して多くのヒットが確認でき、検出がより容易であることがわかる。よって、三次元の格子状構造を作ることで 4π のアクセプタンスを実現することができる。そして、このような特徴的な構造を持つ水標的となるWAGASCI moduleとプラスチック標的となるProton Moduleを並べて配置し、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。



(a)2種類のプラスチックシンチレータ
上がプレーンシンチレータ
下がグリッドシンチレータ



(b)グリッドシンチレータを組み合わせた様子

図19: WAGASCI module で用いられるプラスチックシンチレータ

3.4.3 Muon Range Detector

MRD

INGRID は鉄の層も含んでいるため、下流のMRDとして使用する。INGRIDの概要については前章を参照されたい。

sMRD

sMRDは図14の右図のように、中心の検出器の両サイドに設置するため2つ存在する。鉄の層とシンチレータの層で構成され、ニュートリノ反応により生成された2次粒子のミュオンの飛跡を再構成し、エネルギーを測定する。1つのsMRDに1800

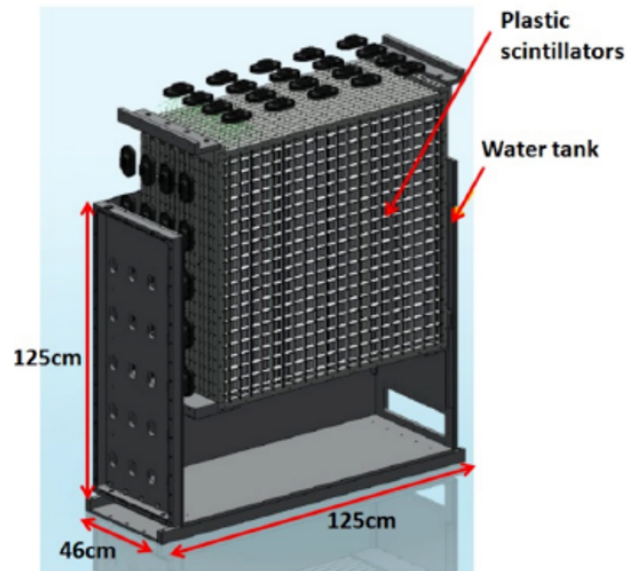


図 20: WAGASCI module の概略図

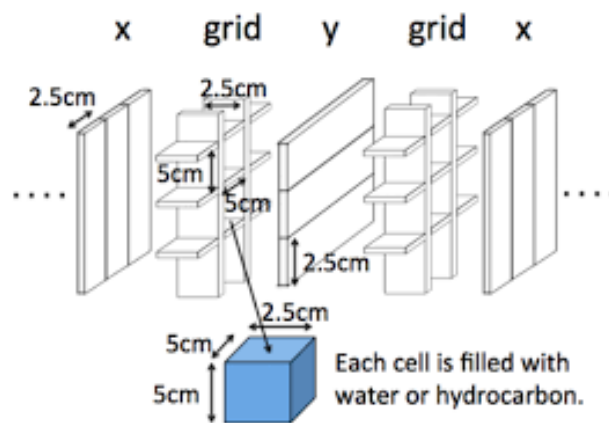


図 21: WAGASCI module の内部構造 (ビームは右から)

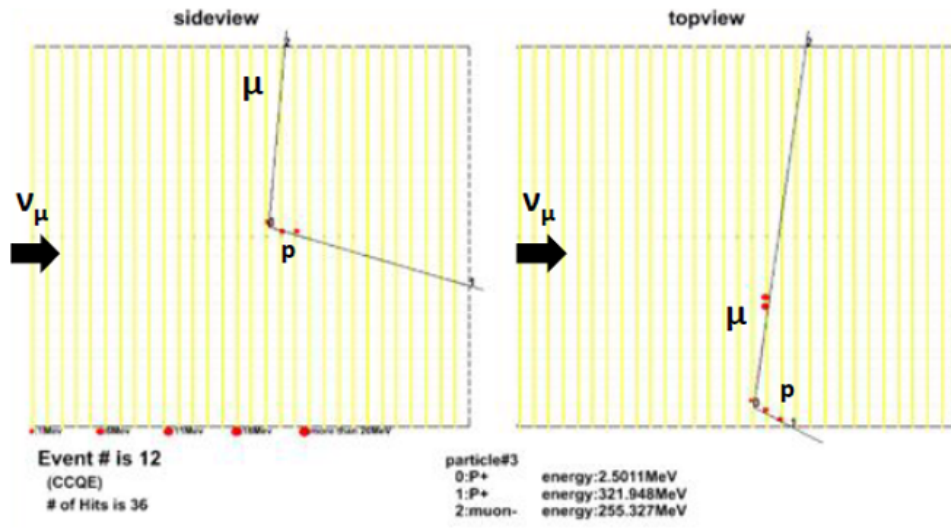


図 22: グリッド構造が無い場合の、WAGASCI module のシミュレーションによるイベントディスプレイ

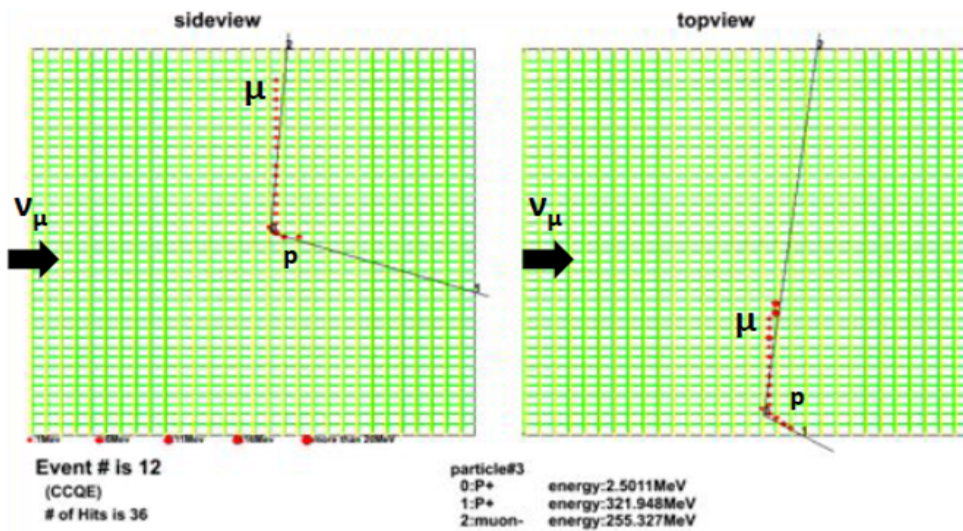


図 23: グリッド構造がある場合の、WAGASCI module のシミュレーションによるイベントディスプレイ

mm × 200 mm × 7 mm の大きさのシンチレータが80本、鉄の層が11個用いられる。鉄の層の間に8本ずつシンチレータを挿入する。読み出しについては、波長変換ファイバーと光検出器MPPCを使用する。図24のように、シンチレータは波長変換ファイバーをS字に埋め込んで接着しており、波長変換ファイバーが長くなるため両端で読み出せるようにしている。中心の検出器とsMRDのヒットタイミングの時間差により、荷電粒子の方向を測定する。これにより、壁や床、sMRD自身で反応して生成され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ことが可能となる。

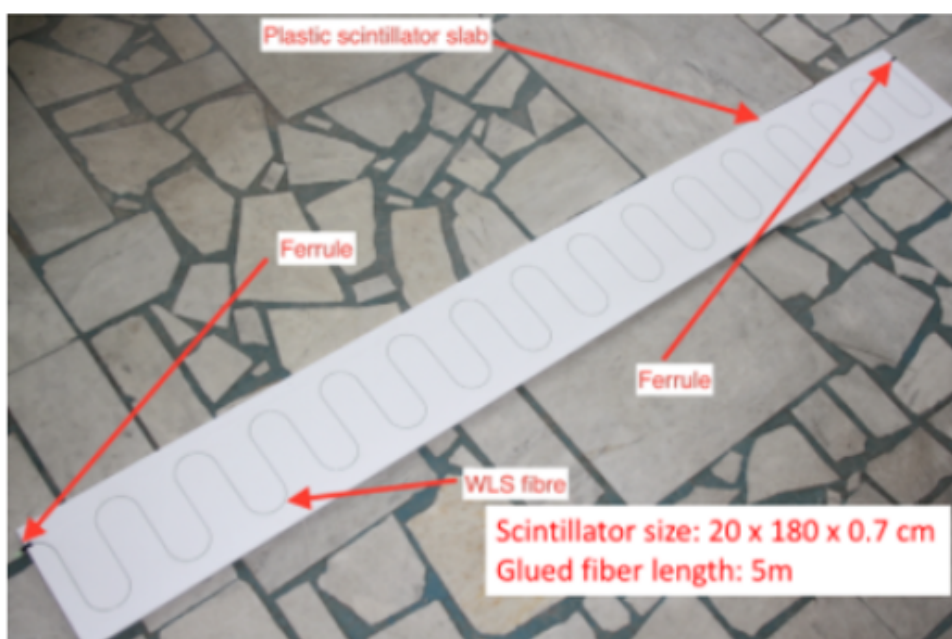


図 24: sMRD で用いられるシンチレータ

3.5 目的

WAGASCI 実験の目的は主に以下の通りである。

- 水とプラスチックそれぞれのニュートリノ反応断面積を誤差 10% の精度で測定
- 水とプラスチック間の反応断面積比を 3% の精度で測定

ニュートリノビーム生成過程におけるハドロン生成時の不定性などが起因となるニュートリノフラックスの不定性が 10% 以上存在するため、ニュートリノ反応断面積も同程度の大きさの誤差が存在すると考えられる。この不定性を抑制するため、Proton module と INGRID を用いた先行実験により、炭素と鉄のニュートリノ反応断面積比が 3% の精度で測定された [12]。

3.6 WAGASCI module の構成要素

WAGASCI module において、ニュートリノの検出まで具体的には以下のプロセスを経る。

- 水やプラスチックの標的の原子核と到来したニュートリノとのニュートリノ反応により荷電粒子が生成される。
- 荷電粒子がプラスチックシンチレータを通ることでシンチレーション光が発生する。
- プラスチックシンチレータに接着した波長変換ファイバーにより、シンチレーション光を吸収する。
- 吸収した光をファイバーの端面で光検出器 MPPC により検出し、電気信号に変換する。

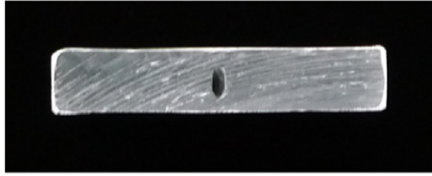
ここでは、WAGASCI module の構成要素である、プラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、MPPC についてまとめる。

3.6.1 プラスチックシンチレータ

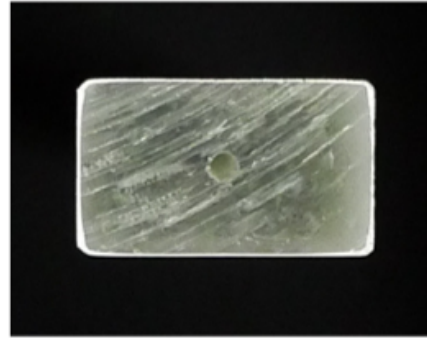
検出器全体で使用するプラスチックシンチレータは4種類ある。WAGASCI module 用の薄型シンチレータ、INGRID や Proton module で使用される INGRID 型シンチレータ、Proton module で使用される Scibar 型シンチレータ、MRD 用のシンチレータである。INGRID 型シンチレータは Fermi 国立加速器研究所により開発、製造された押し出し形のプラスチックシンチレータ [11] である。薄型シンチレータは WAGASCI 実験のために新たに開発された。これらのシンチレータの内、MRD 以外のシンチレータはポリスチレンをベースに質量比において蛍光剤となる PPO と POPOP がそれぞれ 1% と 0.03% が含まれている。表面は酸化チタン (TiO_2) ベースの反射剤でコーティングされている。Scibar 型シンチレータは INGRID 型シンチレータと同様に、押し出し形プラスチックシンチレータであり、大きさは前述した通り INGRID より厚く、幅が小さい。INGRID 型も Scibar 型も中央に波長変換ファイバーを通すために直径約 2 mm の穴が空けられている (図 25)。薄型シンチレータは厚さが 0.3 cm と非常に薄いため、INGRID 型のようにファイバーを通すための穴を空けることができない。よって、シンチレータの片面にはファイバーを通すために図のように片側から 8.5 mm 離れた位置に深さ 1.2 mm の溝が掘られている (図 26)。この溝に波長変換ファイバーをはめて接着し、その上に反射剤を塗布している。また、薄型シンチレータは前述したとおり、プレーンシンチレータとグリッドシンチレータの2種類存在する (図 19)。グリッドシンチレータは図 26 のように 5 cm おきに約 3.2 mm のスリットが空けられている。MRD 用のプラスチックシンチレータの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。前述したとおり、波長変換ファイバーは S 字に接着され、両側読み出しである。

3.7 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、外から入射してきた光を吸収し、そしてより長い波長で再発光し、その光を伝えていく光ファイバーである。WAGASCI 実験においても、波長変換ファイバーは荷電粒子がシンチレータを通り、発生したシンチレーション光を光検出器 MPPC まで伝え



(a) INGRID 型シンチレータ



(b) Scibar 型シンチレータ

図 25: 波長変換ファイバーを通すための穴

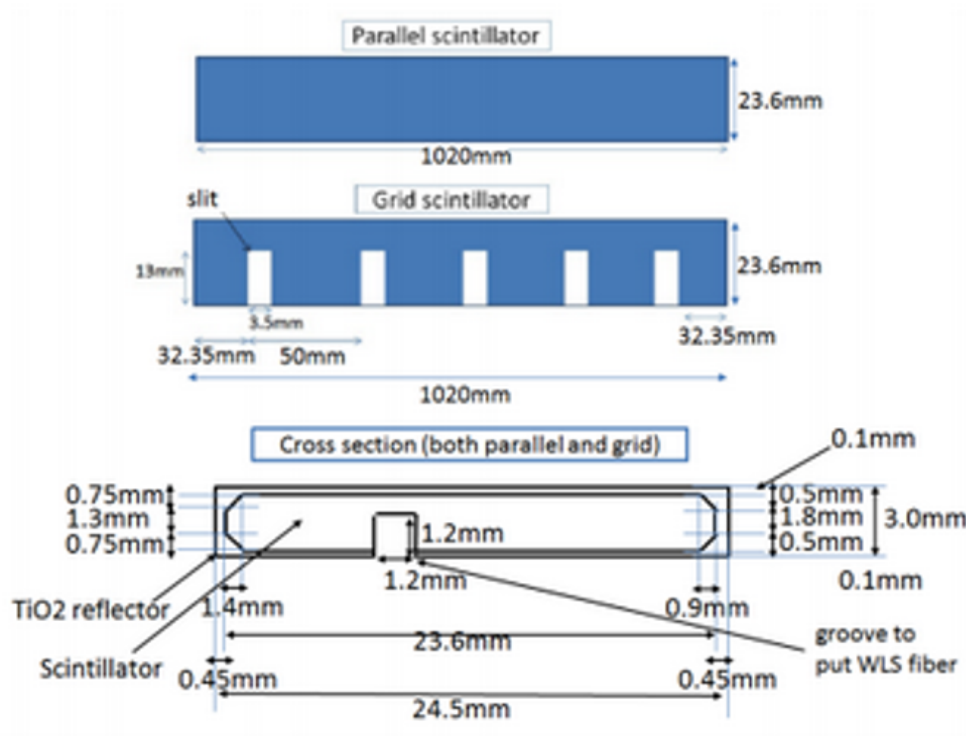


図 26: 薄型シンチレータの設計図

る役割を担う。WAGASCI実験では、波長変換ファイバーはクラレ社の Y11(200)MS を使用する (図 27)。Y-11 は波長変換材の種類を指し、(200) は変換材の濃度 [ppm] を表している。最後の MS はマルチクラッド S 型という意味である。ファイバーにはマルチクラッド型とシングルクラッド型が存在し、それぞれの吸収、再発光過程の模式図を図 28 に示す。マルチクラッド型はシングルクラッド型に比べ、ファイバー内部で再発光した光が全反射の条件を満たす角度が大きくなる。よって、マルチクラッド型はシングルクラッドより伝送される光量も大きくなる。また、S タイプはファイバーコアのポリスチレン繊維が揃っており、S タイプではない non-S タイプは繊維が揃っていないことを表している。よって、S タイプは non-S タイプに比べ曲げに強いことを示している。ファイバーの直径は 1.0 mm、吸収波長は 430 nm、発光波長のピークが 460 nm である。ファイバーの吸収波長については、シンチレータが発光するピーク波長である 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は MPPC の最大感度波長の 440 nm にほとんど一致している。以下に WAGASCI 実験で使用する波長変換ファイバーであるクラレ社の Y11(200)MS のカタログスペックを示す (表 1)。

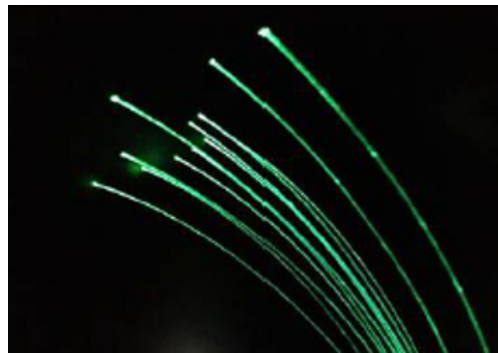


図 27: WAGASCI 実験で使用した波長変換ファイバー Y11(200)MS

表 1: 波長変換ファイバー Y11(200)MS のカタログスペック [13]

直径	1.0 mm
core の屈折率	1.57
inner clad の屈折率	1.49
outer clad 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

3.8 MPPC(Multi Photon Counter)

MPPC は浜松ホトニクス社により開発された新型光検出器であり、PPD (Pixelated Photon Detector) と呼称される半導体光検出器の一つである。MPPC の受光面は多数のガイガーモー

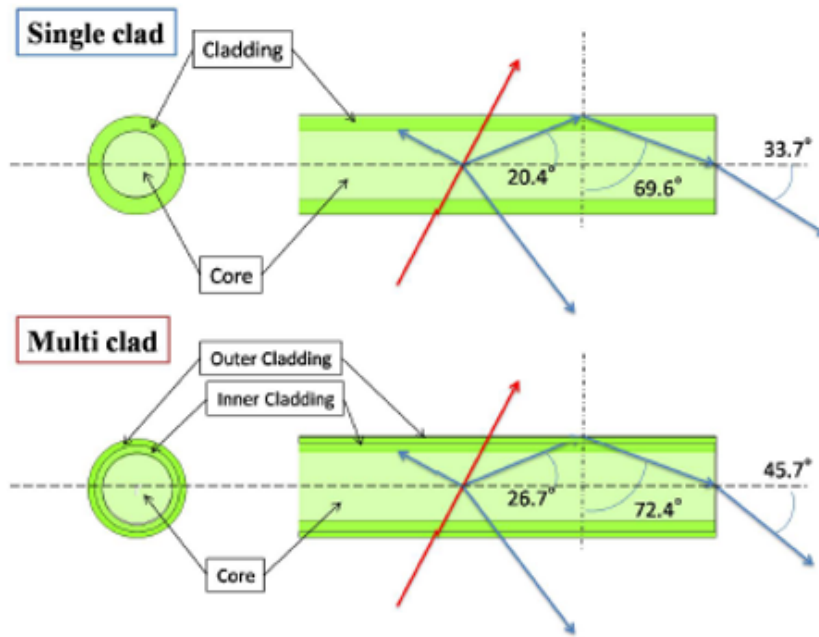
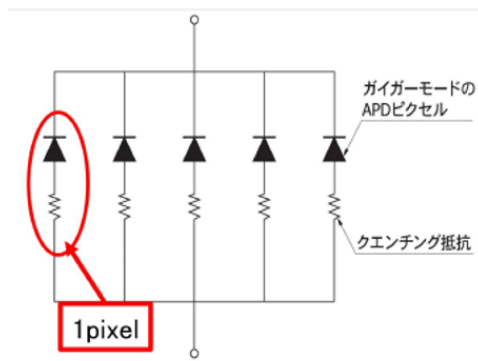


図 28: 波長変換ファイバーの断面図

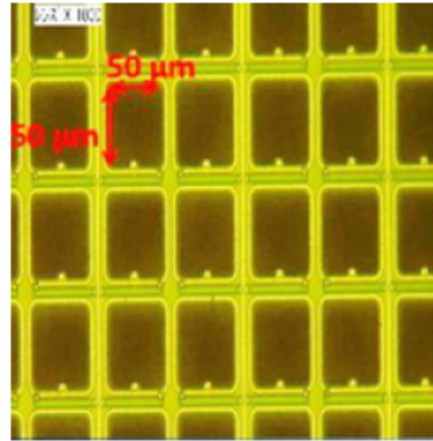
ド APD (Avalanche Photo Diode) ピクセルが並んだ構造をしている。以下に MPPC がもつ基本的な特性を挙げる。

- 優れたフォトカウンティング能力
- 磁場の影響を受けない
- 低バイアス電圧で動作 ($\sim 70V$)
- 高いゲイン ($\sim 10^6$)、光子検出効率
- コンパクトな形状

APD はノーマルモードとガイガーモードの二つの動作モードを持つ。これらのモードはある電圧を境に切り替わり、その電圧をブレイクダウン電圧と呼ぶ。APD に一定値を超える電圧をかけると、光子により生成された電子-正孔対が内部電場により加速される。そして、加速された電子-正孔対が電子雪崩をおこし、増幅した電気信号が出力される。この状態で動作させることをガイガーモードと呼ぶ。MPPC は図 29 [1] のように APD とクエンチング抵抗を多数の並列につなげた構造をしており、実際には図 29 [2] のようなピクセルからなる。光子がピクセルに入射すると図 30 のような波形が出力される。光子が入射したという情報を表す単位として p.e. (Photon Equivalent) が用いられ、光子が一つのピクセルに入射すると 1 p.e. となる。しかし、複数の光子が一つのピクセルに入射しても 1 p.e. となる。次に MPPC の基礎特性について以下に述べる。



(a) APD とクエンチング抵抗



(b) ピクセル

図 29: MPPC の構造

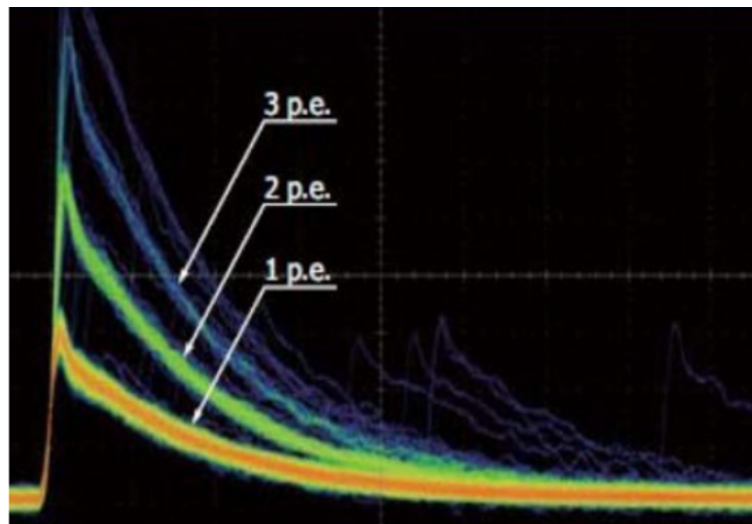


図 30: MPPC の出力波形

ゲイン

一つのピクセル内の APD における、ガイガー放電による電子の増幅率のことであり、以下の式 15 ように定義する。

$$Gain = \frac{1 \text{ ピクセルの電荷量}}{\text{素電荷}} \quad (15)$$

ダークカウント

入射光子とは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る。これは温度が高いほどおこりやすく、温度依存性が大きい。

クロストーク

電子雪崩の際、二次光子が生成され他のピクセルでそれが検出されてしまう現象である。本来 1 p.e. である信号が 2 p.e. 以上の信号として表れてしまう。

アフターパルス

電子雪崩により増幅された電子が格子欠陥に捕獲され、それが再び放出され雪崩を起こす現象である。本来のパルスより少し遅延した信号を出力する。

WAGASCI 実験で使用する MPPC は 2 種類あり、WAGASCI module の製作過程では図 31 のような 1 ch のみ読み出す MPPC を使用し、WAGASCI module 製作後は 32 ch 読み出せる array 型 MPPC を使用する。以下に WAGASCI 実験で用いる array 型 MPPC(S10943-4156) のカタログスペックを載せる (表 2)。



図 31: 1 ch 読み出しの MPPC

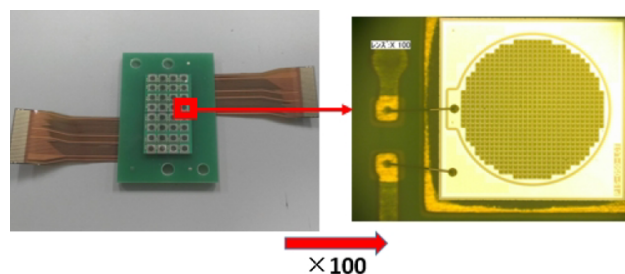


図 32: 32 ch array 型 MPPC

表 2: 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	$\phi 1.5 \text{ mm}$
ピクセル数/ch	716
ピクセルピッチ	$50 \mu \text{ m}$
最大感度波長	450 nm

3.9 波長変換ファイバーと MPPC 間のインターフェース

3.9.1 GOMI コネクタ (General Optical MPPC Injection Connector)

プラスチックシンチレータにファイバーを接着し、反射材と黒塗料を塗布した後、プラスチックシンチレータの光量測定を行う。その際に、前述したとおり単一の MPPC(S13081-050CS) を使用する。GOMI コネクタはファイバーの一端と MPPC を測定可能な位置まで近づけ、固定するためのプラスチック製のインターフェースである。GOMI コネクタは図 33 のように 2 種類のパーツに分けられる。片方のパーツにファイバーを通して接着し、MPPC を先に入れたもう一方のパーツに装着すると、図 34 のようになる。



図 33: GOMI コネクタの部品



図 34: 部品を組み立てた後の GOMI コネクタ

3.9.2 クッキー

クッキー (図 35) は、32 ch array 型 MPPC 用の波長変換ファイバーと MPPC 間のプラスチック製インターフェースである。フランスの LLR により、WAGASCI 実験用に設計された。クッキーには、array 型 MPPC が読み出せるチャンネル数 32 ch に合わせて、波長変換ファイバーが 32 本通るように 32 個の穴が裏表で貫通するように空けられている。表側のファイバー用の穴の真横の 2 つの穴は、MPPC を固定するための寸切りネジを通すためである。また、外側の 8 つの大きな穴は水タンクとクッキーを固定するためのネジ穴である。最も外側には、水タンクとクッキーの間から水が漏れないようにするため、O-リングを嵌める溝がある。



表側



(a)

裏側

(b)

図 35: クッキー

4 WAGASCI Moduleの製作

2016年の夏から約1年をかけて水標的となるWAGASCI Moduleを製作した(図36)。ここでは、その製作過程について述べる。

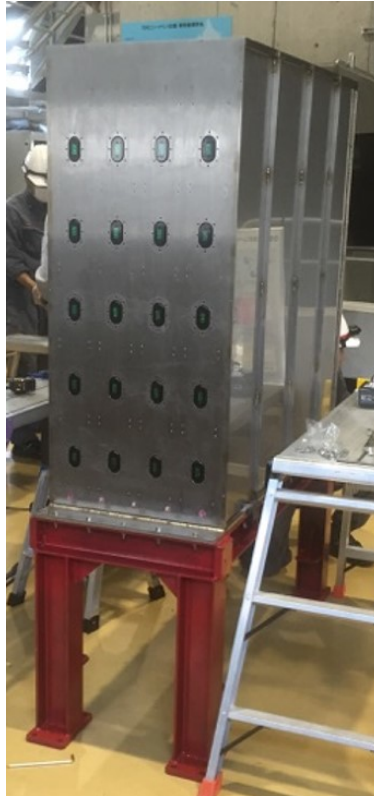


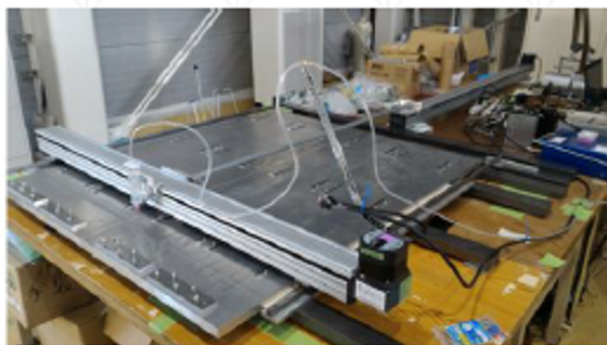
図 36: WAGASCI module

4.1 プラスチック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

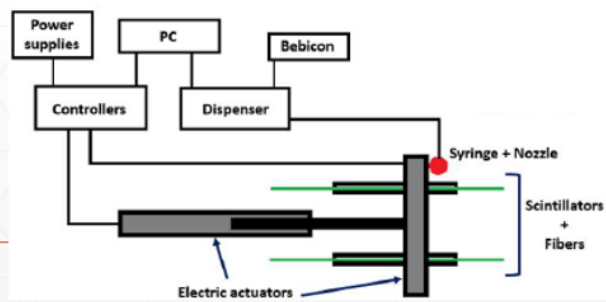
プラスチックシンチレータの溝にファイバーをはめ、固定した状態で波長変換ファイバーの接着及び反射剤の塗布をする。ファイバーを接着し、1日乾燥させた後、反射剤の塗布をする。

4.2 自動化システムの導入

実際の作業では自動化システムを導入し(図37)、一度に25本のプラスチックシンチレータに対して波長変換ファイバーを接着し、反射剤を塗布する。吐出する部分(シリンジとノズル)を接着剤用と反射剤用で交換することで、ファイバーの接着と反射剤塗布両方の自動化を可能としている。自動化システムの準備から、それを用いたファイバー接着と反射剤塗布の流れについて以下に述べる。



(a) 自動化システムの全体図



(b) 自動化システムの概略図

図 37: 自動化システム

4.2.1 机とアルミ台の設置

シンチレータの設置や接着剤、反射剤の準備などは手動で行う。図 37 のように、手元で作業ができるように机を並べ、その上に一枚の大きな分厚いアルミ台を置いている。机とアルミ台については水平になるように金属の板でレベリングが施されている。

4.2.2 アルミ板へのシンチレータとファイバーの設置

図 38 のようにアルミ板にファイバーを固定した 5 枚のシンチレータを並べ、そのアルミ板を大きなアルミ台の上に 5 枚並べることで自動化システム稼働前のシンチレータの設置が完了となる。アルミ板には、シンチレータ固定用の治具とファイバー固定用の治具が取り付けられている。前者はシンチレータの最長辺に沿って、シンチレータを挟み込むように両側に固定具が存在する。後者は、シンチレータの最長辺に対して垂直に、アルミ板の両端に設置されている。ここで、アルミ板へのシンチレータとファイバーの設置の仕方について詳細を述べる。

まず、シンチレータを固定具で固定する。次にファイバーの片側を治具で固定し、シンチレータの溝にはめる。溝からファイバーが浮かず、ファイバーが切れない程度にテンションを強くした状態で、もう片側の治具でファイバーを固定する。これを一枚の板につき 5 本のシンチレータに対して行い、その板を 5 枚アルミ台に並べる。これにより、一度に 25 枚のシンチレータに接着、反射剤の塗布ができる。



(a) プラスチックシンチレータをアルミ板へ
設置した様子



(b) 25 枚のプラスチックシンチレータを設置
した様子

図 38: アルミ台とアルミ板の設置

4.2.3 接着剤と反射剤

接着剤は Eljen Technology EJ-500 Optical Cement の主剤と硬化剤を 4:1 の質量比で混合させたものを使用する (図 39)。反射剤は Avian Technologies 社の Avian-D を使用 (図 40) し、主剤と硬化剤の質量比は 33:1 としている。接着剤と反射剤共に、上記の決まった質量比で主剤と硬化剤を混合させた後、真空ポンプ (図 41) により脱泡する。その後、それぞれ専用のノズル (図 42) を取り付けたシリンジに流し込み、最後にプランジャーを詰め込む。



(a) 主剤

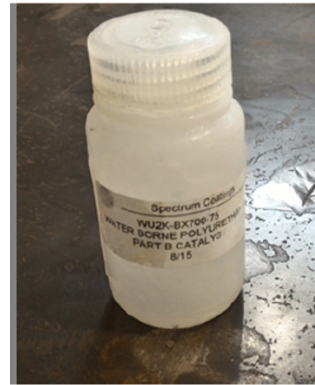


(b) 硬化剤

図 39: オプティカルセメント



(a) 主剤



(b) 硬化剤

図 40: 反射剤



図 41: 真空ポンプ



(a) 波長変換ファイバーの接着用ノズル



(b) 反射剤塗布用ノズル

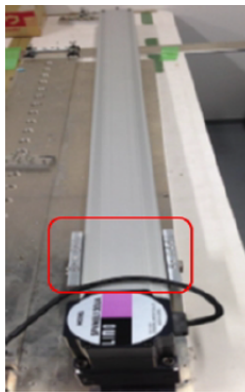
図 42: シリンジに取り付けるノズル

4.2.4 ディスペンサーと電動アクチュエータ

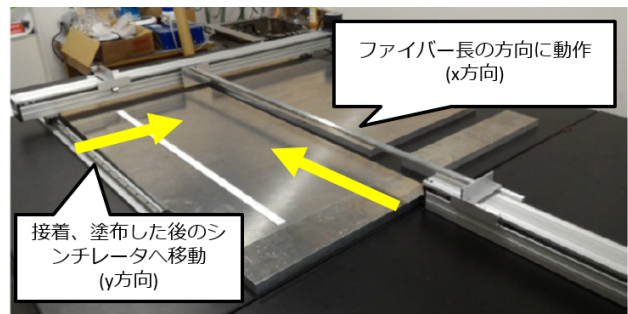
自動化により動作するものは接着剤や反射剤を吐出させるディスペンサーと、シリンジを移動させる電動アクチュエータである。ディスペンサー(図43)はコンプレッサーにより一定の圧力で吐出できる状態にし、各溶剤を詰めたシリンジに取り付ける。電動アクチュエータはファイバーに沿って(x方向)動くものと、塗布した次のシンチレータに移動するためにファイバー長に対して垂直に(y方向)動くものの2つ(図44)が存在し、それらはPCで制御される。後者のアクチュエータにシリンジの固定具(図45)が取り付けられている。また固定具はシリンジ(ノズル)とファイバー間の距離を緻密に調節できる。吐出する速さはPCで制御し、吐出する圧力をディスペンサーで設定することで、シンチレータに対する吐出量を調節する。設定した後はボタン1つで、シリンジの移動と溶剤の吐出が可能である。



図 43: ディスペンサー



(a) アクチュエーター



(b)x方向とy方向の2台を組み合わせた図

図 44: 電動アクチュエーター

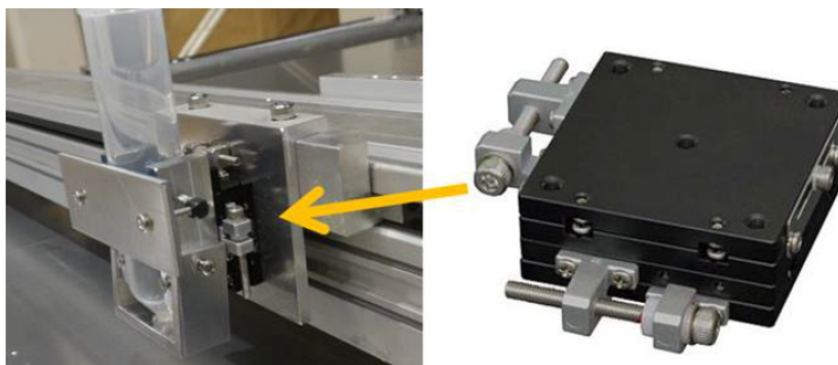


図 45: シリンジ固定具

4.2.5 乾燥と保管

1度接着した後は、アルミ板ごと保管棚(図46)に收容し乾燥させる。その日に接着されたシンチレータは次の日に反射剤を塗布し、その後再び保管棚で乾燥させる。接着剤と反射剤の完全乾燥には1日かかるため、半日をファイバーの接着、残り半日を前日にファイバーを接着したシンチレータに反射剤の塗布を行う。1日でファイバーの接着と反射剤塗布をそれぞれ約100本ずつ行った。



図 46: 保管棚

4.3 プラスチックシンチレータの黒塗料塗布

プラスチックシンチレータの格子内の光の反射によるクロストークを抑制するため、シンチレータには黒塗料が塗布される。作業現場の環境整備については次の章で述べるとし、ここでは黒塗料の塗布作業についてのみ述べる。黒塗料は市販のシリコンカラスプレー(図47)を使用した。反射材を塗布し終えたシンチレータの2.5 cm × 100 cm面の表裏に対して、それぞれ2度塗布する。一度の作業で黒塗料を塗布するシンチレータの本数は約100本である。机を4つ並べて作業をするため、机1つに対して約25本のシンチレータを並べ、まとめて塗布する。作業工程は単純に、シンチレータの表面の塗布2回と裏面の塗布2回の計4回

に分かれる。一回の塗布につき完全乾燥に必要な時間が約2時間あるため、各工程の間に2時間の乾燥時間を要する。実際に黒塗料を塗布している様子が図48である。



図 47: 黒塗料



図 48: プラスチックシンチレータに黒塗料を塗布している様子

4.4 プラスチックシンチレータによる格子状構造の組み立て

続いて、黒塗料を塗布した後のプラスチックシンチレータを図21のような三次元の格子状構造に組み立てていく。WAGASCI moduleは多数のプラスチックシンチレータ層から構成され、以下の種類に分けられる。

- プレーンシンチレータ 40枚を、ビーム軸に対して垂直なx方向に読み出し側を向けて並べたもの（以降、x方向のプレーンシンチレータ層）
- プレーンシンチレータ 40枚を、ビーム軸に対して垂直なy方向に読み出し側を向けて並べたもの（以降、y方向のプレーンシンチレータ層）
- グリッドシンチレータ 40枚のうち、20枚をx方向に読み出し側、残り20枚をy方向に読み出し側に格子状に組み合わせたもの（以降、グリッドシンチレータ層）

製作過程において、後述するABSフレームを用いることによりプレーンシンチレータ層とグリッドシンチレータ層を組み合わせた計80枚のシンチレータ群を一つの単位として扱う。そのため、これ以降はこのシンチレータ群をWAGASCI moduleとしての1層と呼ぶ。WAGASCI moduleの各層は以下のように種類分けされる。

- x方向のプレーンシンチレータ層とグリッドシンチレータ層を組み合わせた層
- y方向のプレーンシンチレータ層とグリッドシンチレータ層を組み合わせた層

これらの層を交互に計4つ重ねたものを sub-module と呼ぶ(図 49)。sub-module を4つ合わせることで WAGASCI module における全チャンネル 1280 ch の読み出し部分の完成となる。これを水タンクにインストールし、水タンクに純水を入れることで WAGASCI module が完成する(図 36)。この章では、WAGASCI module の製作について述べる。各図について、わかりやすいように黒塗料を塗布する前のプラスチックシンチレータを用いた図も使用している。

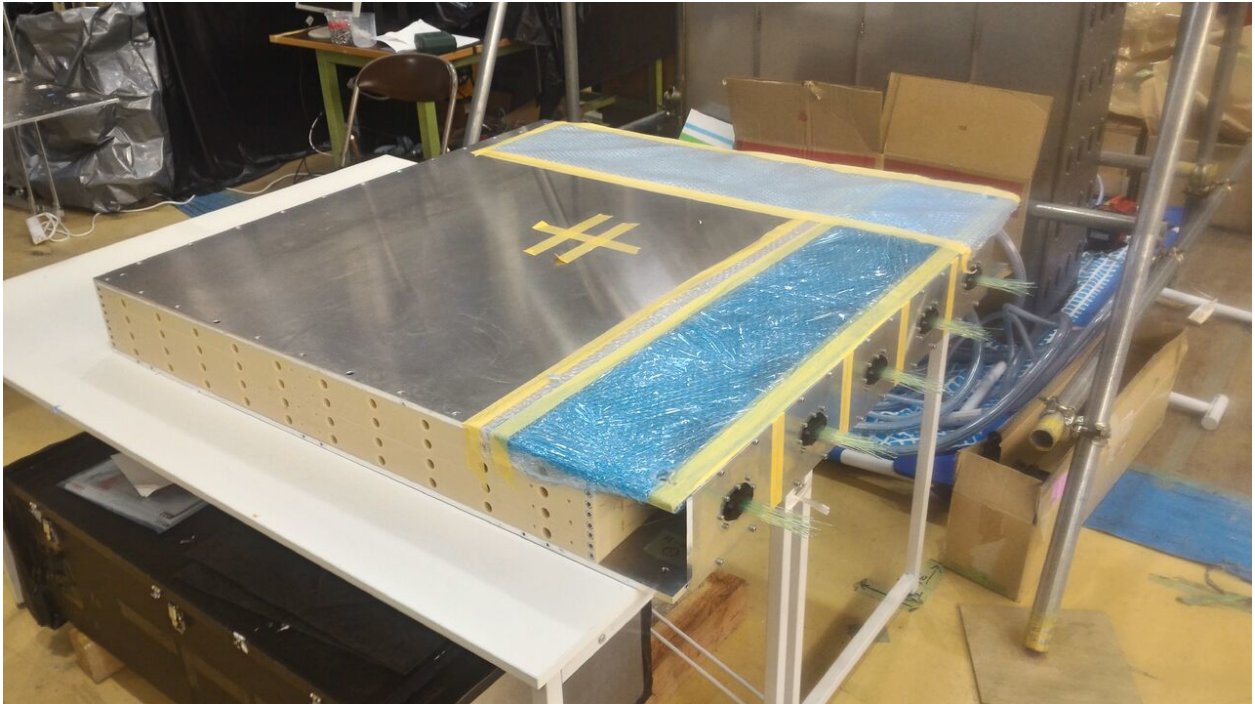


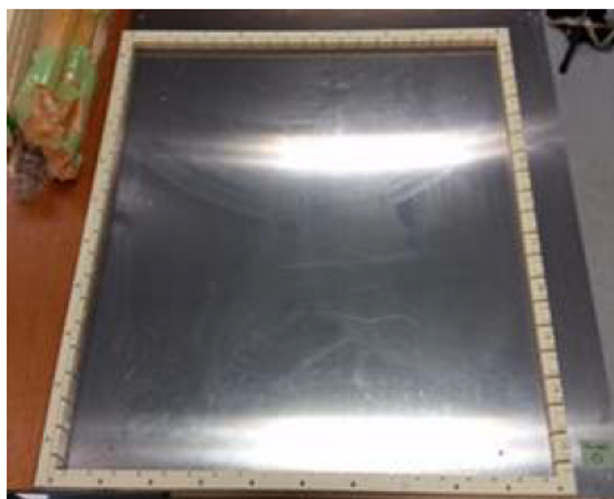
図 49: sub-module

4.4.1 ABS フレーム

まず、1層を組み上げるために ABS 樹脂でできたフレームを使用する(図 50)。スリットにグリッドシンチレータをはめることで、グリッドシンチレータが倒れないように固定しながら組み立てることができる。また、ABS フレームも動かないようにするため、予め鉄板とネジで固定している。最終的には、鉄板は取り除かれるが ABS フレームはそのままである。

4.4.2 グリッドシンチレータとプレーンシンチレータの組み立て

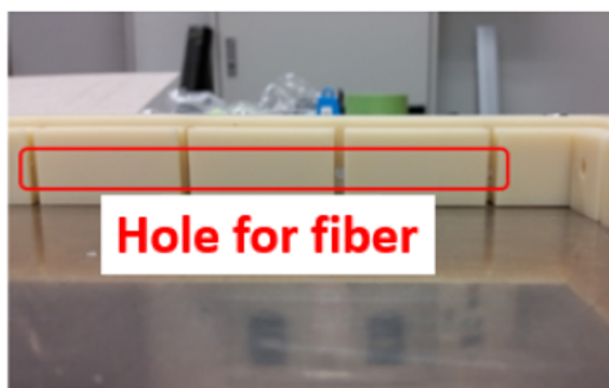
続いて、ABS フレームにグリッドシンチレータを取り付ける。図 51 のように、まず一方向にグリッドシンチレータを ABS フレームのスリットにはめていく。その後、はめたグリッドシンチレータに対して垂直方向にグリッドシンチレータをはめていく(図 52)。このとき、グリッドシンチレータのスリット同士が噛み合うように嵌めていく。うまく噛み合わない場合、波長変換ファイバー上の反射剤を塗りすぎていることが考えられる。よって今回は、全



(a)ABS フレームの全体図



(b) プラスチックシンチレータを通すためのスリット



(c) 波長変換ファイバーを通すための穴

図 50: ABS フレーム

でのグリッドシンチレータのスリット幅が約4.5mmになるようにやすりで広げている。ファイバー上の反射剤ではなく、グリッドシンチレータのスリットを削る理由は、反射剤の方を削るとファイバーが見えてしまい、さらにファイバーを傷つけてしまうためである(図53)。反射剤の方を削り、ファイバーがむき出しになったプラスチックシンチレータについて、削る前後での光量の変化を測定した(測定方法については性能評価の章を参照)。その結果が表3である。この通り、約5p.e.ほど光量が低下したことが確認できた。この結果を受け、反射剤の方ではなくスリットを削る。グリッドシンチレータをABSフレームに嵌め込んだ後、図54のように十字形に組み立てたアルミ板でグリッドシンチレータ全体を押さえ、シンチレータの浮きがないようにする。その状態でシリコングルーによりグリッドシンチレータをABSフレームに接着する。グリッドシンチレータを接着し終えた後、プレーンシンチレータを図55のように設置し、シリコングルーでグリッドシンチレータとABSフレームに接着する。接着を終えたものがWAGASCI moduleの1層となり、これを計16層組み立てる。

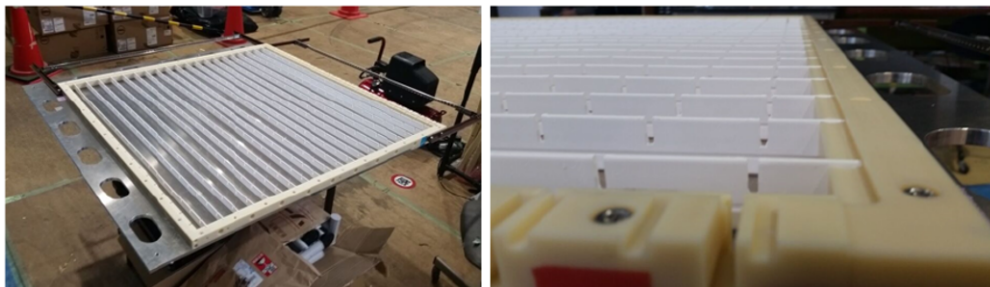


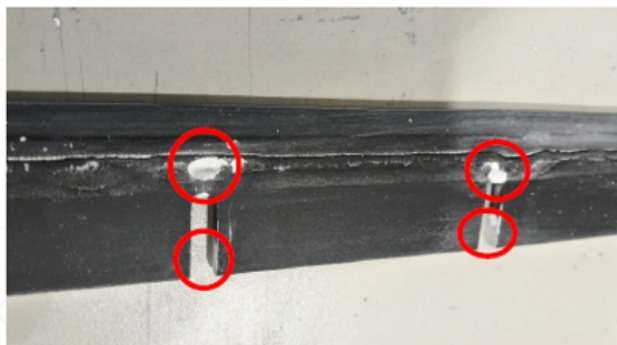
図 51: 一定方向 (x 方向) にグリッドシンチレータをはめた様子



図 52: y 方向にグリッドシンチレータをはめた様子

表 3: 反射剤を削った後 (ファイバーのむき出しがある) のプラスチックシンチレータの光量変化

sample	削る前の光量	削った後の光量
1	10.4p.e.	6.2p.e.
2	9.6p.e.	5.5p.e.



(a) 反射剤を削り、ファイバーが見えている様子



(b) 反射剤を削った部分の光漏れ

図 53: ファイバー上の反射剤を削った様子

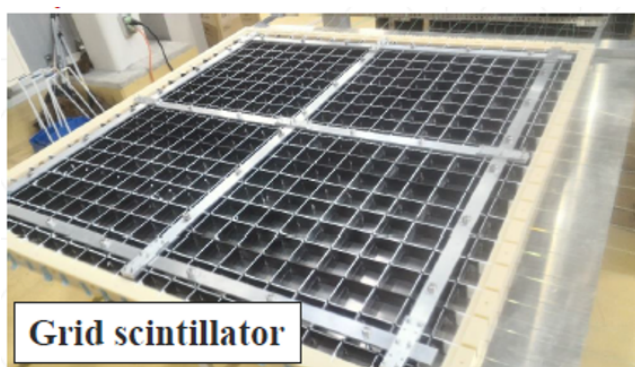


図 54: グリッドシンチレータを ABS フレームに接着する様子

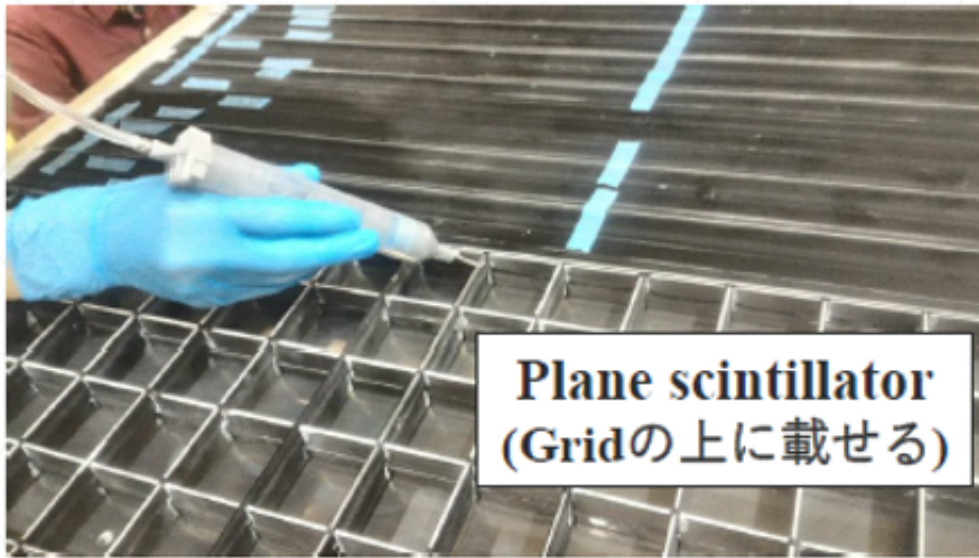


図 55: プレーンシンチレータを接着する様子

4.5 sub-module 組み立て

図 55 のプレーンシンチレータ全てを接着し終えた層を 4 つ組み合わせて sub-module とする (図 56)。各層の ABS フレームをネジで固定している。次にファイバーを 32 本ずつ束ねてクッキーの穴に通していく (図 57)。そして、クッキーに通したファイバーを光学セメントで接着する (図 58)。その際、図 59 のようなサポーターによりファイバー端面が上に来るように設置し、光学セメントがクッキー内部まで流れ込むようにする。光学セメントが完全に乾燥したら、ダイヤモンドカッターによりファイバー端面を研磨する (図 60)。このようにして、sub-module を計 4 台製作する。

4.6 WAGASCI module 組み立て

図 61 が sub-module を 4 つ組み合わせたものとなる。これを水タンクにインストールする様子が図 62 である。その後、前置検出器ホール内の実験場所に設置し、純水を水タンクに入れることにより WAGASCI module が完成となる。そして、WAGASCI 実験で使用する各検出器も実験場所に設置した。プラスチック標的、水標的、MRD を設置した様子が図 63 である。

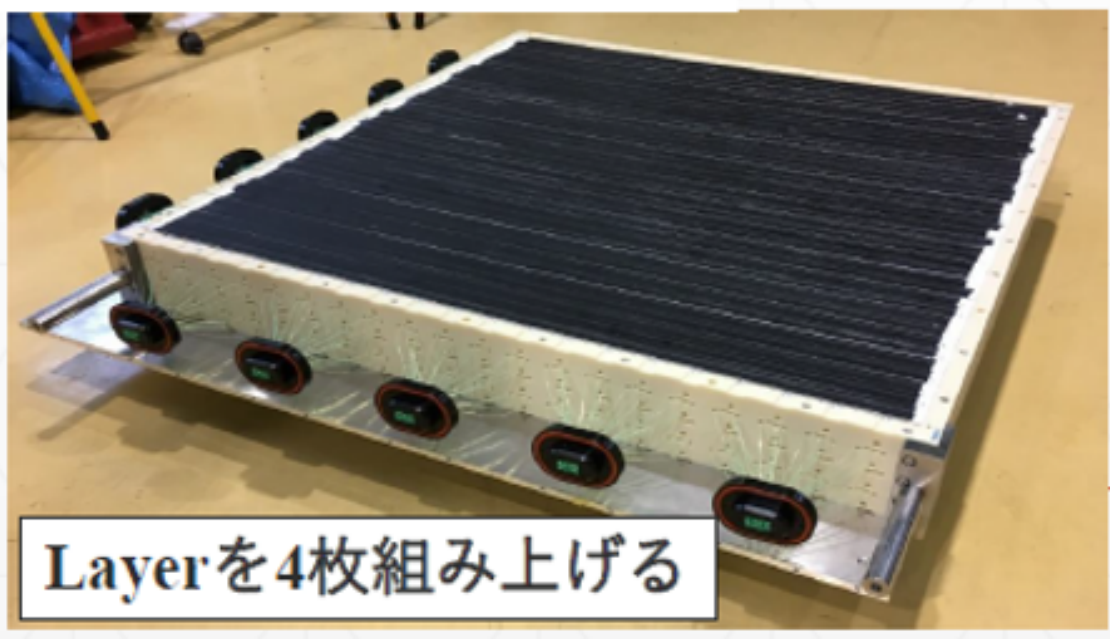


図 56: 4つのレイヤーを組み上げる様子

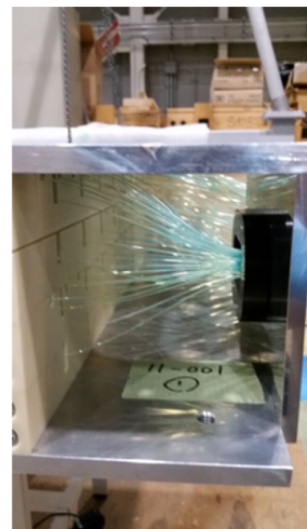
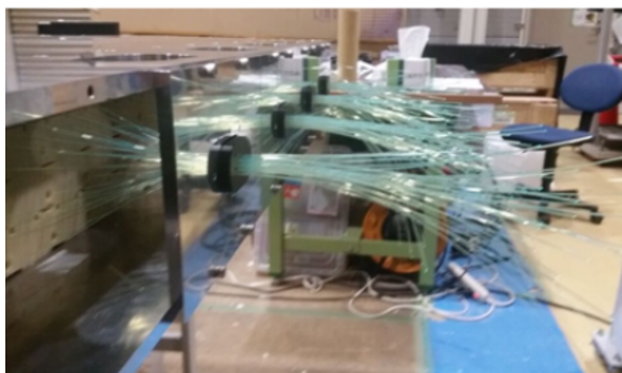


図 57: クッキーにファイバーを通した後の様子

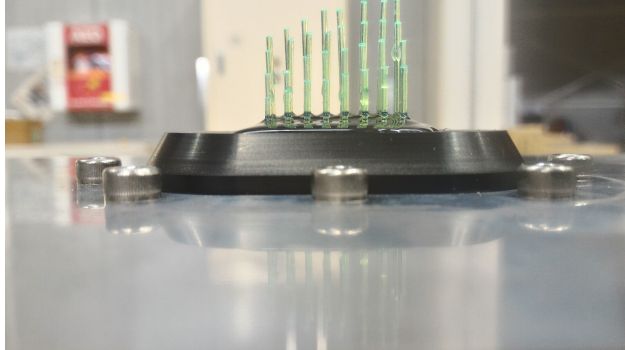


図 58: ファイバーを光学セメントで接着している様子



図 59: サポーターにより、ファイバー端面が上向きになるようにする

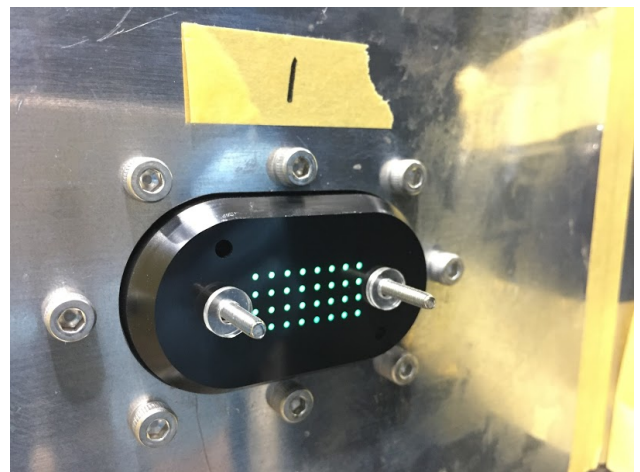
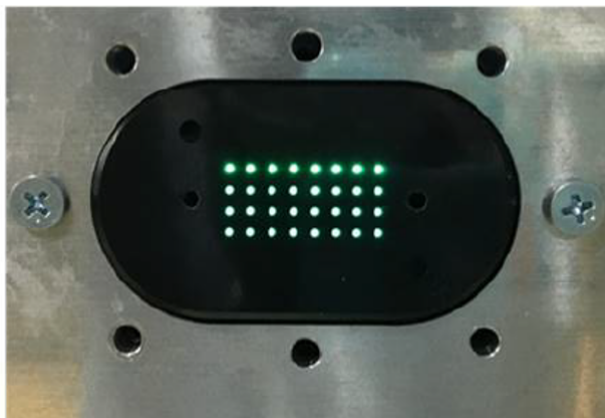


図 60: ファイバー端面を研磨した後の様子

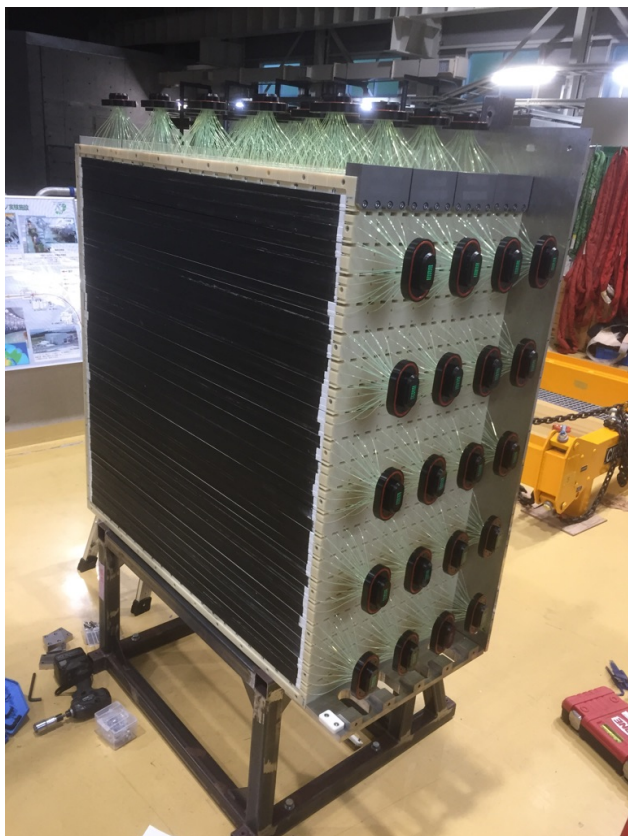


図 61: sub-module を 4 層組み合わせた様子



図 62: 組み合わせた sub-module を水タンクにインストールする様子



図 63: WAGASCI 検出器 (左からプラスチック標的 (Proton module)、水標的 (Wagasci module)、MRD(INGRID))

5 黒塗料塗布時の環境整備

使用する黒塗料には有機溶剤が含まれ、有機溶剤の種類によっては吸い込んでしまうと人体に悪影響を及ぼす危険性がある。その種類とは、労働安全衛生法施行令第6条ならびに有機溶剤中毒予防法規則において分類される44種類と、特定化学物質障害予防規則の特別有機溶剤に指定される12種類である。それぞれの規則で分類される有機溶剤は、有害性の高さに応じてさらに三つに分類される。有機溶剤中毒予防法規則では第一種有機溶剤、第二種有機溶剤...、特定化学物質障害予防規則では第一類物質、第二類物質...と分類される。これらは数字が小さいものから有害性が高いことを表している。これら以外にも様々な法令があり、今回使用する黒塗料の主な適用法令が以下の通りである。

- 労働安全衛生法
- 有機溶剤中毒防止規則：第二種有機溶剤等
- 高圧ガス保安法：適用除外（可燃性ガス、液化ガス）
- 消防法：指定可燃物 可燃性液体類 水溶性液体
- 船舶安全法：危険物（高圧ガス）
- 特定化学物質等障害予防規則：第二類物質
- PRTR法：該当物質で規定値（1%）以上含有するものはなし

PRTRとはPollutant Release and Transfer Registerの略であり、環境中の化学物質のリスク低減を目的とした制度である。PRTR法の該当物質とは、この塗料では特定化学物質等障害予防規則における第二類物質のことである。塗装会社などは、有機溶剤を用いた作業をする場合、これらの法的規制に対して作業可能な濃度（管理濃度）になるように環境を整えて作業をしなければならない。我々も有機溶剤を大量に扱うため、これを参考に安全に作業ができるように、気体の濃度測定による管理などの環境整備を行った。ここでは、黒塗料の危険性とそれに対する環境整備についてまとめる。

5.1 黒塗料における危険有害性について

WAGASCI実験で使用した黒塗料は、カンペハピオの水性シリコンカラー Sprey の黒色であり、種類としてはエアゾール型アクリル樹脂塗料である。この塗料における危険有害性について図64にまとめる。GHSは、「化学品の分類および表示に関する世界調和システム」(The Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)の略であり、化学品の危険有害性を世界的に統一された一定の基準に沿って分類している。また、製品のラベルにあるように絵表示により分かりやすく、また分類した結果による危険性を表示している。区分は急性毒性（経口）の区分を例として、表4のような意味を表している。LD₅₀(mg/kg)はMedian Lethal Dose(半数致死量)のLethal Dose, 50%を略した数値であり、投与した動物の半数が死亡すると推定される量である。区分は数字とアルファベットからなり、数字が優先して区分され、その数字に対してアルファベットによりさらに細かく区分さ

れる。数字は小さい値から有害性が大きいことを表し、アルファベットは A,B,C... の順に有害性が大きいことを表している。今回、使用する黒塗料に表示されている絵表示は図 65 の通りである。これらの絵の名称は、左から「炎」、「感嘆符」、「健康有害性」である。「炎」は可燃性のあるエアゾール等を表し、そのマークの下の「危険」とは極めて可燃性が高いことを示している。「感嘆符」は、急性毒性の区分 4 や眼に対する重篤な損傷や眼刺激性の区分 2A を表している。また、「健康有害性」のマークは呼吸器感作性、発がん性などの区分 1～2 を表している。この図のラベルは大雑把にわかりやすく表示したものであるため、黒塗料に含まれる全ての物質における有害性情報を図 66 に載せる。これらの危険性があることを踏まえ、以下のような環境整備を行った。

【GHS分類】	
可燃性／引火性エアゾール	区分1
引火性液体	区分3
急性毒性 経口	区分外
経皮	区分4
吸入 (ガス)	区分外
(蒸気)	区分4
(粉塵、ミスト)	区分外
皮膚刺激／腐食性	区分2
眼に対する重篤な損傷性／眼刺激性	区分2
呼吸器感作性 固体／液体	区分外
気体	分類できない
皮膚感作性	区分外
生殖細胞変異原性	区分外
発がん性	区分外
生殖毒性	区分2
授乳に対する、または授乳を介した影響	分類できない
特定標的臓器／全身毒性(単回ばく露)	区分2 (中枢神経系、肝臓、腎臓、血液、全身毒性)
特定標的臓器／全身毒性(反復ばく露)	区分外
吸引性呼吸器有害性	区分外
水生環境有害性(急性)	区分3
水生環境有害性(慢性)	区分3
オゾン層への有害性	分類できない

図 64: 危険有害性の要約

表 4: 急性毒性（経口）の区分

	区分 1	区分 2	区分 3	区分 4	区分 5
LD ₅₀ (mg/kg)	5	50	300	2000	5000
注意喚起語	危険	危険	危険	警告	警告
危険有害性情報	生命に危険	生命に危険	有毒	有害	有害のおそれ

5.2 環境整備

黒塗料を塗布する作業現場の環境整備は、安全管理会社により作業現場の安全性の確認と最終的な作業許可の判断のもと行った。黒塗料に含まれる組成物質の暴露濃度基準を図 67 に載



図 65: GHS ラベル要素

《組成物質の有害性及び暴露濃度基準》

物質名	皮	眼	呼	変	発	生	単	反	吸	水急	水慢	オゾン
酸化チタン		2B										
カーボンブラック					2			1				
酸化第二鉄							3	1				
フタロシアニンブルー												
塩素化フタロシアニングリーン												
エチレングリコールモノメチルエーテル	2	2A				2	1	3	2			
エチレングリコールモノメチルエーテル												
イソプロピルアルコール		2A-2B				2	1	3	2	2		
キシレン	2	2A				1B	1	3	1	2	2	2
エチルベンゼン	3	2B			2	1B	2	3	1	1	1	
アンモニア水	1A-1C	1					2		2	1	1	
フタル酸ジノルマルブチル			1			2	1	3	1	2	1	
ジメチルエーテル		2B										

略記号 皮:皮膚腐食性・刺激性 眼:眼に対する重篤な損傷・刺激性
 呼:呼吸器感受性または皮膚感受性 変:生殖細胞変異原性
 発:発がん性 生:生殖毒性
 単:特定臓器・全身毒性—単回暴露 反:特定臓器・全身毒性—反復暴露
 吸:吸引呼吸器有害性 水急:水性環境有害性—急性
 水慢:水性環境有害性—慢性

図 66: 黒塗料に含まれる物質における有害性情報

せる。ACGIH(TLV)とは、American Conference of Governmental Industrial Hygienists(アメリカ合衆国産業衛生専門官会議)により設定された許容濃度である。TLVはThreshold Limit Valueの略である。これらの物質に対して考えられる対策としては以下の通りである。

設備対策

- 蒸気が滞留しないように排気装置を設置する
- 作業する場所の近くに高温または発火源がないようにする
- 屋内塗装の場合、作業者が暴露から避けられるようにする
- 密閉場所で作業する場合、底部まで十分に換気する

保護具

- 呼吸系の保護具
- 手の保護具
- 目の保護具
- 皮膚および身体の保護

これらの対策は、使用する黒塗料の安全データシートを参考に行っている。以下にこれらの具体的な対策について述べる。

《組成物質の有害性及び暴露濃度基準》			
物質名	管理濃度	ACGIH(TLV)	その他の有害性
酸化チタン	—	10mg/m ³	—
カーボンブラック	—	3.5mg/m ³	LD ₅₀ (rat,経口): >15,400mg/kg
酸化第二鉄	—	5(Fe,Fume)mg/m ³	—
フタロシアニンブルー	—	—	—
塩素化フタロシアニングリーン	—	—	—
エチレングリコールモノブチルエーテル	25ppm	20ppm	LD ₅₀ (rat,経口): 530mg/kg
エチレングリコールモノベンジルエーテル	—	—	—
イソプロピルアルコール	400ppm	200ppm	LD ₅₀ (rat,経口): 5,045mg/kg
キシレン	50ppm	100ppm	LD ₅₀ (rat,経口): 4,300mg/kg
エチルベンゼン	20ppm	100ppm	LD ₅₀ (rat,経口): 3,500mg/kg
アンモニア水	—	25(NH ₃)ppm	LD ₅₀ (rat,経口): 350mg/kg
フタル酸ジノルマルブチル	—	5mg/m ³	LD ₅₀ (rat,経口): 8,000mg/kg
ジメチルエーテル	—	—	LC ₅₀ (mus,吸入): 385,940mg/30分

図 67: 黒塗料の組成物質の有害性と暴露判断基準

個室（ビニールハウス）の設置

作業現場には WAGASCI 実験関係者以外の様々な人が出入りするため、塗料が現

場に漏れないような個室が必要である。よって、作業スペースを考慮した大きさのビニールハウスを建設した（図 68(a)）。塗布作業はビニールハウス内に机を四隅に配置し、その上にシンチレータを並べて塗布する。濃度以前に、暴露しないことが最善であるため、ビニールハウスの天井から下半身まで届くカーテンを設置した（図 68(b)）。カーテンは家庭でも使われる一般的なテーブルクロスを使用した。カーテンにすることで、シンチレータを並べる際はカーテンを開けて効率的に作業ができる。机とカーテンによる仕切りにより、ほとんどの黒塗料の蒸気は机側のみに滞留するため、作業中の排気は机の上で行う。



(a) ビニールハウスの外観



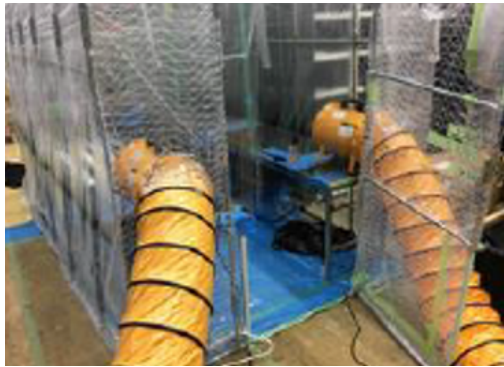
(b) ビニールハウス内のカーテン

図 68: ビニールハウス

電気送風機の設置

塗布作業中のビニールハウス内の排気は電気送風機により行う。ビニールハウス内の机の端に給気モードの電気送風機を設置し、ビニールハウス内の有機溶剤を屋外に逃がす。ビニールハウスの外には逃がせても、電気送風機だけでは屋内に蒸気が滞留してしまうため、電気送風機に取り付けたダクトにより蒸気を屋外へ逃がす（図 69）。電気送風機の反対側はビニールハウスに穴を空けている（図 71）。電気送風機が給気モードのため、ビニールハウスの外から空気を入れることができる。これにより、呼吸をするための空気の確保とビニールハウス内の換気が同時に可能である。

換気ができているかの目安として、風速測定を行った。机と電気送風機の配置の概略図が図 70 である。測定位置は電気送風機付近、その反対側の机、双方の中央（机 1 と 3 の間）の 3 点である。測定結果を以下の表 5 に示す。この結果より、どの位置でも 1.0 m/s 以上の十分な風速が確認できた。後述する濃度測定同様、定期的に風速を確認し、安全管理しながら作業を行った。



(a) 電気送風機にダクトを取り付けている



(b) ダクトを人気のない屋外まで伸ばす

図 69: ダクト

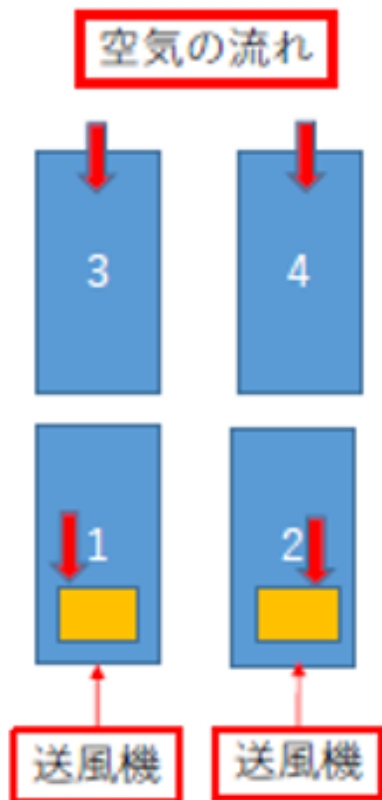


図 70: 机と電気送風機の配置



図 71: ビニールハウスに空けた穴

表 5: 風速測定結果

測定位置	風速 [m/s]
机 1	1.5
机 3	2.2
机 1 と机 3 の間	2.0

濃度測定

黒塗料に含まれる、有害物質については前述したとおり、その物質の濃度を測定し、ビニールハウス内の換気ができているか定量的に判断する。実際には図 67 にあるように、管理濃度が設定されているものについて測定した。管理濃度とは厚生労働省により定められた法的規制のある指標であり、主に労働の場の濃度を評価対象としている。許容濃度は、人への悪影響を最小限にすることを目的とし、人への暴露濃度を評価の対象とした指標であるが、法的規制はない。よって、測定した物質の濃度が管理濃度を満たしている場合、すべての物質について安全な濃度であるとする。シリコンスプレーに含まれる有機溶剤について、法的規制の対象となる気体を表 6 にまとめる。

表 6: スプレーに含まれる危険物

スプレーに含まれる気体	重量 (%)	管理濃度 [ppm]	許容濃度 [ppm]
イソプロピルアルコール	3	400	200
エチレングリコールモノブチルエーテル	6	25	20
キシレン	0.2	50	100
エチルベンゼン	0.2	20	100

WAGASCI 実験で使用しないシンチレータに対して塗布作業をしながら、表 6 の気体の濃度について気体測定器を用いて測定を行った。実際に用いた測定器はガステックの検知管式気体測定器の気体採取器 GV-100 型である (図 72)。測定したい気体の検知管 (図 73) を気体測定器に挿入して使用する。カーテンによる仕切りがあるため、人が作業するスペース (人間側) と、気体が溜まりやすく濃度が高くなると考えられる机の上 (机側) にわけて、濃度測定を行った (図 74)。濃度測定時は後述する保護具を身につけ、人間側での測定時は人が呼吸する高さの位置に測定器を持ってくることに注意した。

まず、イソプロピルアルコールとエチレングリコールモノブチルエーテルについて、カーテンの仕切りと電気送風機の有無における、気体の濃度測定を行った。使用した検知管は、イソプロピルアルコールが 113L、エチレングリコールモノブチルエーテルが 113LL である。エチレングリコールモノブチルエーテルは測定した濃度の値を (図 75) の換算スケールにより変換する。その結果を表 7 に示す。この結果から、電気送風機による換気効果が大きく、気体のほとんどが検出されなかった。さらにカーテンによる仕切りを加えることで、人間側の作業スペースにはほとんど気体が検出されなかった。電気送風機が無くカーテンの仕切りがある状態では、机側の方が濃度が高い



図 72: 検知管式気体測定器



図 73: 検知管

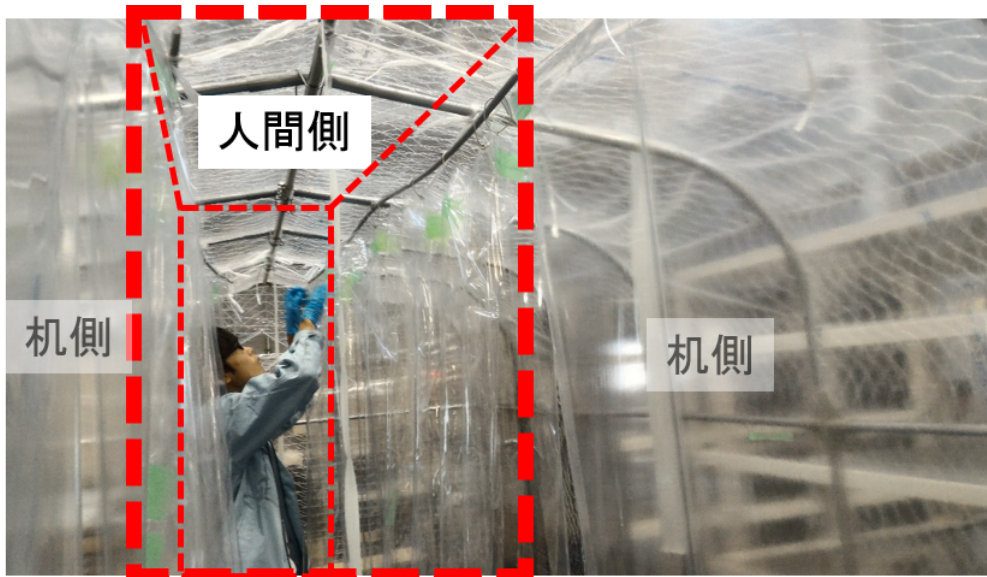


図 74: 換算スケール表

ことも確認できた。よって、電気送風機とカーテンの仕切りの双方に効果があり、作業環境がより改善されていることが確認できた。エチレングリコールモノブチルエーテルについて、カーテン有りで電気送風機が無い状態のとき 100 ppm の濃度が検出されているが、厳密には 113LL はイソプロピルアルコールも検出しているため、正味のエチレングリコールモノブチルエーテルの濃度とは限らない。この値は、イソプロピルアルコールが全くなく 100 %エチレングリコールモノブチルエーテルが検出された場合における、換算スケールにより算出した値である。

次にキシレンとエチルベンゼンについて、カーテンは無しで電気送風機の電源をつけた状態で濃度測定をした。キシレンは 123L、エチルベンゼンは 122L の検知管を使用した。この結果は全て検出できないほどの濃度 (2ppm 以下) であることがわかった。これらの結果から、カーテンによる仕切りと電気送風機により安全に作業ができることが確認できた。塗布作業が開始されたあとも、定期的に濃度測定を行うことで安全管理を行った。

換 算 ス ケ ー ル							
プロピルアルコール (ppm)	55	70	80	95	110	140	170
検知管 2 回吸引の読み値 (ppm)	20	40	60	80	100	150	200
エチレングリコールモノブチルエーテル (ppm)	60	100	150	250	400		
検知管 2 回吸引の読み値 (ppm)	20	40	60	80	100		
ガス名	換算係数	吸引回数 (n)	測定範囲 (ppm)				
エチレングリコールモノエチルエーテル	2.3	2	46~460				
エチレングリコールモノメチルエーテル	2.2	2	44~440				
1-メトキシ-2-プロパノール	1.3	2	26~260				

図 75: 換算スケール表

表 7: カーテンと電気送風機の有無による気体の濃度

測定した気体	測定場所	カーテンの有無	電気送風機の有無	測定濃度
イソプロピル- アルコール	人間側	有	有	20ppm 以下 (未検知)
	人間側	無	有	20ppm 以下 (未検知)
	人間側	無	無	20ppm
	机側	有	無	40ppm
	机側	有	有	20ppm (未検知)
エチレングリコール- モノブチルエーテル	人間側	有	有	20ppm 以下 (未検知)
	人間側	無	有	20ppm 以下 (未検知)
	人間側	無	無	20ppm 以下 (未検知)
	机側	有	無	100ppm
	机側	有	有	20ppm (未検知)

保護具

カーテンを使用することで作業可能な濃度に抑えられているが、カーテンの隙間か

ら漏れた場合など、瞬間的に吸い込んでしまうことがないように (図 76) のような保護具を身に着ける。また、これまでに挙げた環境整備に不備がないように図 77 のようなチェックシートで確認を行った。塗布作業をする際は必ずこのチェックシートに記入を行う。

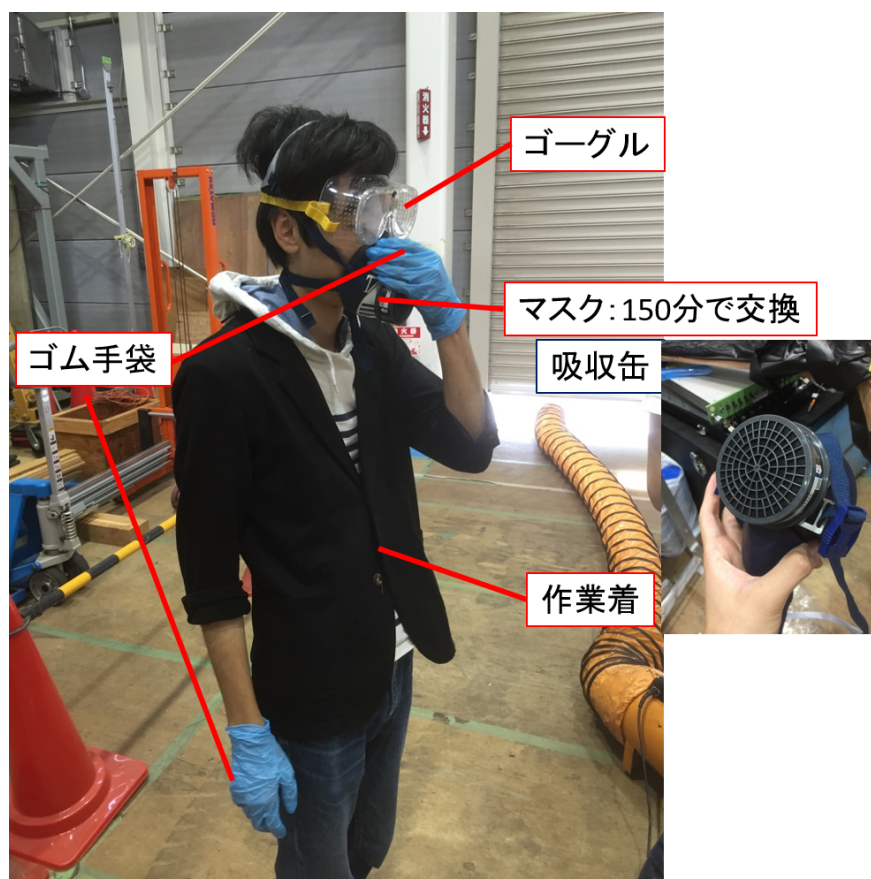


図 76: 装飾品

6 WAGASCI module の性能評価

この章では WAGASCI module の製作の過程と製作後に行った光量測定による WAGASCI module の性能評価について述べる。

6.1 サンプルングによる光量測定

WAGASCI module で使用するシンチレータの本数は 1280 本であるが、余裕をもたせて 1500 本のシンチレータに対してファイバーの接着から黒塗料の塗布まで施している。前章で述べたような、ファイバーのむき出し等により光量が低下したシンチレータは排除する必要

Date : _____

Worker : _____

Safety black painting check sheet

You can do shift work safely by checking according to this check sheet.

Preparation for painting

- ① **Ventilation**
 - Open the shutter.
 - Stretch ducts to outside.
 - Turn on the 2 ventilation blower power.
 - Check if no air leak around vinyl house.
- ② **Spray**
 - Bring 10 sprays from neutrino monitor management building and tape them management labels.
- ③ **Accessories**
 - Goggles
 - Mask
 - Gas filtering can (exchange for a new one)
 - Rubber gloves
 - Work clothes and shoes

There are 4 painting times so please check before starting to paint each times.

Before third painting

- ④ **Accessories**
 - Exchange gas filtering can for a new one.

After fourth (last) painting

- ⑤ **Accessories**
 - Put the goggle and mask back where it was.
 - Put the used gas filtering cans in the cardboard box under the table placed in greenhouse.
 - Throw away rubber gloves in a trash.
- ⑥ **Sprays**
 - Put them used in the fourth painting on the tables.
 - Put the run out of sprays in the cardboard box under the table.
- ⑦ **Ventilation**
 - Turn off the 2 ventilation blower power after waiting for 10minutes.
 - Fold ducts compactly to near the greenhouse.
 - Close the shutter.

Observer name : _____

図 77: 安全管理シート

があるからである。WAGASCI module の製作過程で起こり得る、シンチレータの光量が低下する原因は以下のことが考えられる。

- 反射材を塗布した際の反射剤の量が足りないことによるファイバーのむき出し
反射剤がない部分からシンチレーション光が漏れ出してしまう。
- ファイバーがシンチレータの溝から浮いている
シンチレーション光がうまくファイバーに伝達されない。
- ファイバー接着後のシンチレータの持ち運びによるファイバーの傷やクラックができてしまう
傷やクラックの部分から光が漏れ出してしまう。

格子状構造を組み立てると、シリコン接着剤でシンチレータを固定してしまうためシンチレータを取り外すことはできない。よって、製作途中のシンチレータの光量測定は不可欠である。1500 本すべてを光量測定するには時間がかかり、効率的でないためサンプリングにより光量測定をした。サンプルの抽出の仕方は、ファイバー接着および反射剤塗布の際の自動化システムにおいて、アルミ板に並べた 5 本のシンチレータ (図??) の内の 1 本を取り出す。このようにして、プレーンシンチレータとグリッドシンチレータそれぞれ 150 本のサンプルを抽出し、合計 300 本のサンプルの光量測定をした。一回の測定にサンプルのシンチレータを 2 本ずつ測定する。

6.2 目的

- シンチレータの平均光量を求める
ファイバーの接着、反射剤と黒塗料の塗布によるシンチレータの影響を光量測定により評価する。
- 光量の低いシンチレータの排除
サンプルの光量を測定し光量が低かった場合は、サンプルを含めサンプルと同じアルミ板に並んでいたシンチレータ 5 本 (図??) を取り除く。

6.3 セットアップ

サンプリングによるシンチレータの光量測定は宇宙線を用いて行う。図 78 に本測定のブロックダイアグラムを載せる。サンプルのシンチレータに対して上下でトリガーシンチレータで挟み (図 79)、トリガーシンチレータのコインシデンスを取ることでサンプルのシンチレータの光量測定を行う。トリガーシンチレータはプレーンシンチレータを使用する。各シンチレータはシンチレータ全体を覆うように暗幕が巻かれ、シンチレータ間の光の影響を取り除いている。遮光のため、暗箱 (図 80) の中にシンチレータと読み出し回路及び MPPC を入れて測定する (図 81)。また、図 82 の温度計を用いて、暗箱内の温度を監視しつつ測定を行う。

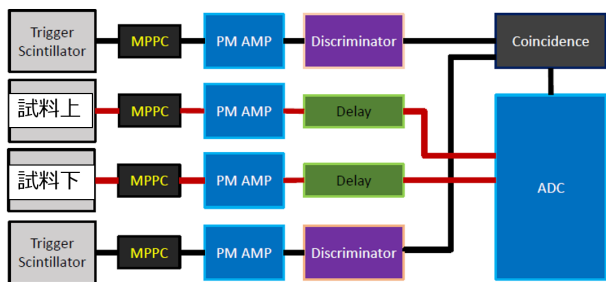


図 78: サンプルの光量測定時のブロックダイアグラム



図 79: シンチレータを重ねた様子



図 80: 暗箱

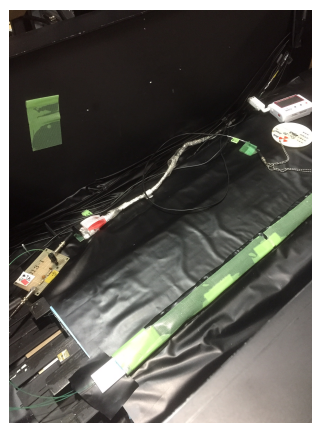


図 81: 暗箱の中の様子



図 82: 温度計

6.3.1 GOMI コネクタの取り付け

サンプリングによる光量測定は 1 ch 読み出しの MPPC で行うため、測定する各シンチレータのファイバーに GOMI コネクタを取り付ける。GOMI コネクタの二つのパーツの内、まずオス側のパーツにファイバーを通し、オプティカルセメントで接着する。オプティカルセメントが乾いた後、パーツから飛び出ているファイバーをニッパーで切断する。次に図 83 のように、紙やすりを用いてファイバー端面を磨く。その後、MPPC を入れた GOMI コネクタのメス側を取り付ける。やすりで研磨した後の様子が図 84 である。紙やすりは 4 種類使用し、粒度が荒いものから順に 320、1000、4000、10000 である (図 85)。

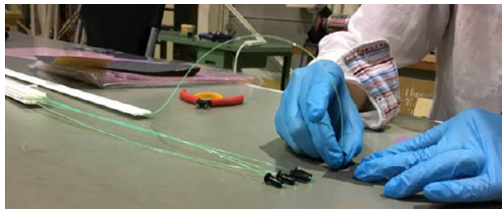


図 83: ファイバーを研磨している様子



図 84: 左図が研磨前。右図が研磨後。

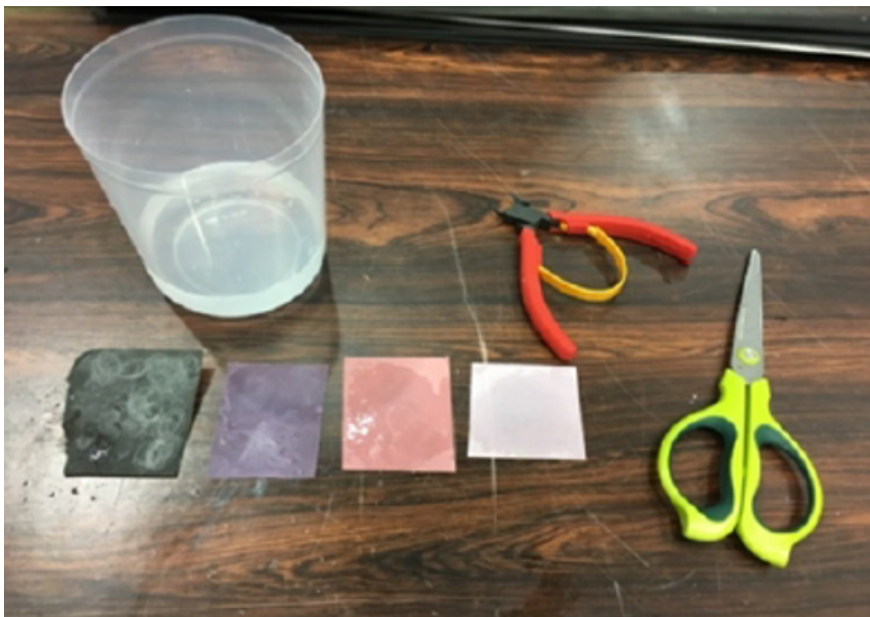


図 85: 紙やすりの種類 (左から粒度が 320、1000、4000、10000)

6.3.2 MPPC

MPPC は 1 ch 読み出しの S13081-050CS を使用する。読み出し基板は図 86 の通り、二段のローパスフィルターにより高周波ノイズを除去するような回路が組まれている。

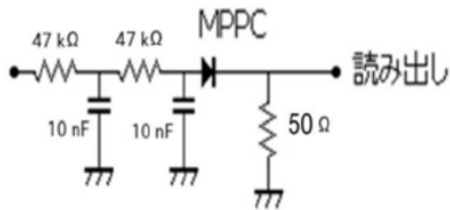
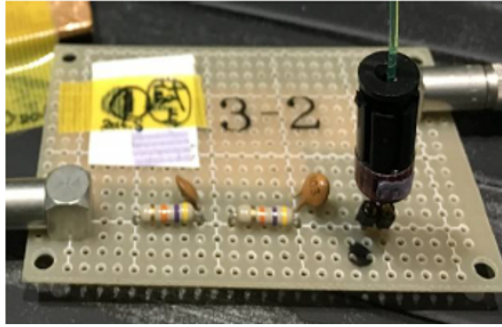


図 86: MPPC 基板



図 87: HV

6.3.3 キャリブレーション

本測定で使用する MPPC は図 87 の HV 電源により電圧を供給する。4 つのシンチレータに対して、1 つの HV 電源を使用する。各サンプルの光量測定の初めには、LED を用いたゲイン測定を行い、キャリブレーションを行う。ゲイン測定の際のブロックダイアグラムを図 88 に示す。図 89 が LED による光量分布である。ヒストグラムの各山が光量、つまり左から 0 p.e.(ペDESTAL)、1 p.e. ... を表しており、それぞれの山をガウス分布でフィットしている。フィットした値からペDESTAL とピーク間隔 (0 p.e. と 1 p.e. の差 (ADC Count 値)) を得る。

6.3.4 測定条件

MPPC のダークノイズや読み出し基板、同軸ケーブルからのノイズを抑えるため、Discriminator によりトリガーシンチレータの出力に対して閾値を設定する。オシロスコープによりシンチレータの出力波形を確認し、トリガーシンチレータの閾値を 3.5 p.e. に設定した。測定条件を以下の表 8 にまとめる。

6.3.5 解析方法

シンチレータの光量は以下のように定義する。

$$\text{光量} = \frac{\text{ADC 分布の値} - \text{ペDESTAL の値}}{\text{ピーク間隔}} \quad (16)$$

右辺の各因子の単位は ADC Count である。光量の平均値は 1.5 p.e. 以上のイベントの値の平均をとる。その理由は、以下の通りである。

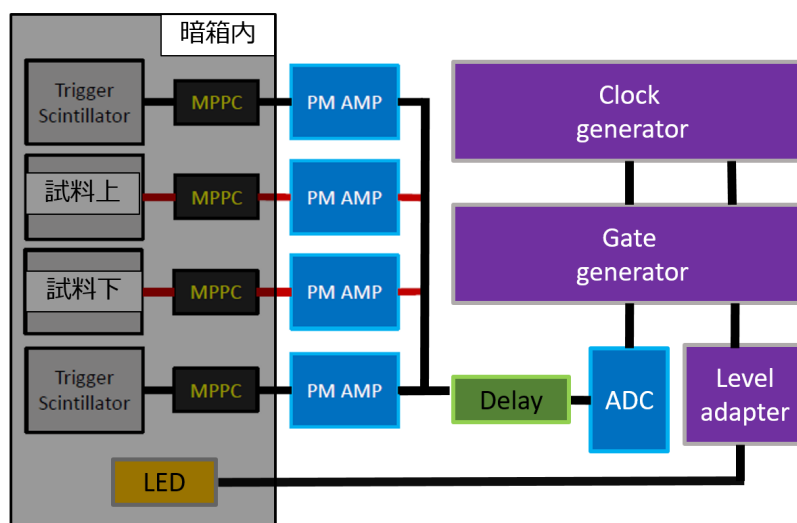


図 88: キャリブレーション時のブロックダイアグラム

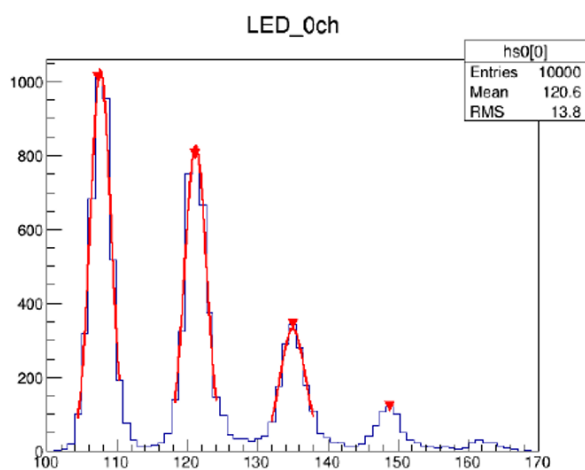


図 89: キャリブレーションにより得られたヒストグラムにガウス分布でフィットしている様子

表 8: サンプリングによる光量測定の場合。供給電圧とブレークダウン電圧の差を ΔV とする。

イベント数/測定	400
測定時間/測定	約 6 分
ΔV	3.5mV
トリガーシンチレータの閾値	3.5 p.e.
測定するシンチレータの本数	300 本

- 重ねたシンチレータのズレにより宇宙線が当たらない

宇宙線が上下のトリガーシンチレータを通った時、重ねたシンチレータのズレによりサンプルのシンチレータには宇宙線が通らない可能性がある。その場合、サンプルのシンチレータの光量はペDESTALとして測定されると考えられる。

- グリッドシンチレータ測定時、スリットの間隙に宇宙線が通ってしまう

サンプルのシンチレータがグリッドシンチレータの場合、上下のトリガーシンチレータには宇宙線が貫通するが、グリッドシンチレータのスリットをすり抜けてしまうことが考えられる。

これらの明らかに低い光量のイベントは除去するため、1.5 p.e. 以上の光量を持つイベントについて解析する。図 90 がサンプルのシンチレータの ADC 分布である。キャリブレーションの値を用いて、光量分布に換算したヒストグラムが図 91 である。このように得られるヒストグラムの平均値を、サンプリングしたシンチレータ 300 本に対して求める。

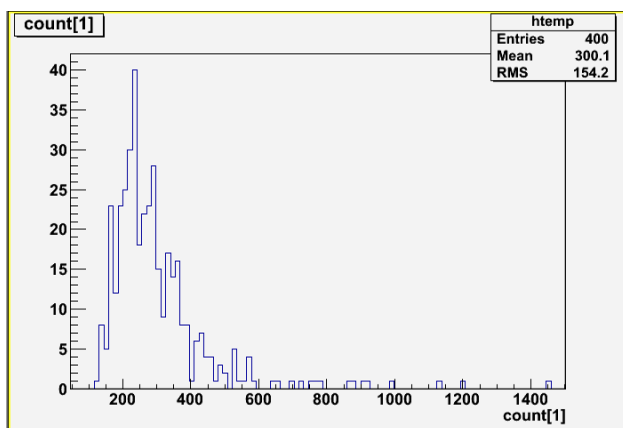


図 90: ADC 分布

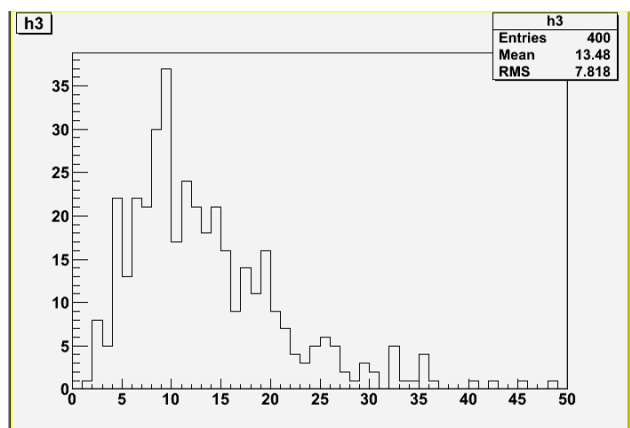
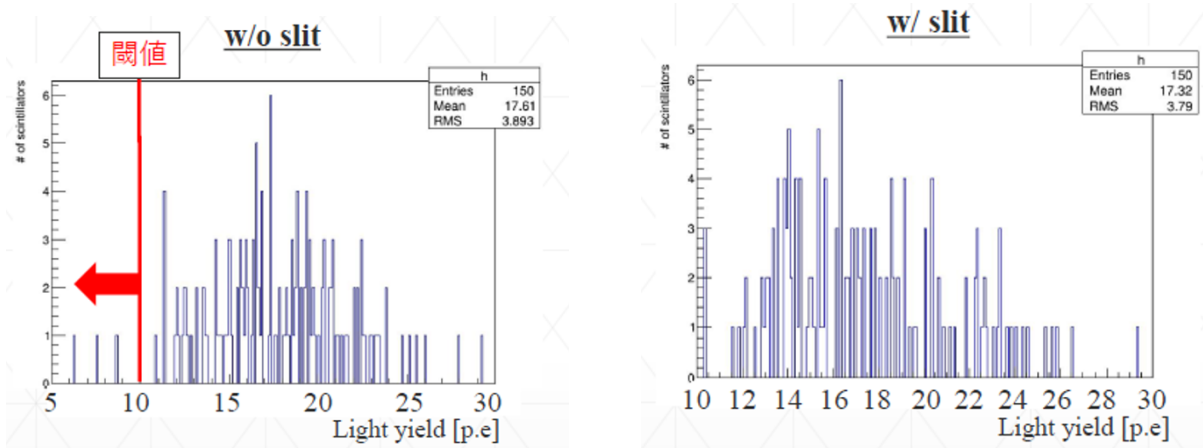


図 91: 光量分布

6.3.6 測定結果

サンプリングしたシンチレータ 300 本の光量測定の結果が図 92 である。300 本中 3 本が 10 p.e. を下回った。いずれのシンチレータもファイバーの浮き (図 93) があることが確認でき、これが低光量の原因だと考えられる。また、一昨年 WAGASCI module と全く同じ構造をもつ検出器を製作しており、同様にシンチレータの光量測定を行っている [?]。その結果 (表 10) と比較すると、WAGASCI module のシンチレータの平均光量が一昨年製作した検出器のシンチレータの平均光量よりも 2~3 p.e. ほど低い。WAGASCI module のシンチレータは黒塗料を塗布しているのに対し、一昨年のシンチレータは光量測定時には黒塗料が塗布されていない。黒塗料塗布による光量低下の原因は明らかになっていないが、黒塗料を塗布することによりシンチレータの光量が 2~3 p.e. 低下することがわかっている。黒塗料塗布による光量変化の測定については後述する。一昨年の検出器と今回の検出器の光量の差は、黒塗料塗布による光量の差と同程度であることから、これが主な原因だと考えられる。



プレーンシンチレータのヒストグラム

グリッドシンチレータのヒストグラム

図 92: 各サンプルの平均光量のヒストグラム



図 93: ファイバーが浮いている様子

表 9: サンプリングによるシンチレータの光量測定の結果

	Mean [p.e.]	RMS
プレーンシンチレータ	17.6	3.5
グリッドシンチレータ	17.3	3.8

表 10: 一昨年製作した検出器で使用しているシンチレータの光量測定の結果

	Mean [p.e.]	RMS
プレーンシンチレータ	20.08	5.5
グリッドシンチレータ	19.3	5.5

6.4 黒塗料塗布前後の光量測定

サンプリングによるシンチレータの光量測定と同じセットアップ(図 78)で測定する。

6.4.1 目的

- シンチレータ間のクロストークの抑制具合を評価する
- 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を評価する

前者のシンチレータ間のクロストークについてはプレーンシンチレータ 2 本、後者についてはランダムに選んだ 56 本のシンチレータをサンプルとして測定した。以下に前者と後者の目的にわけて、それぞれの測定についてまとめる。

6.4.2 測定方法

シンチレータ間のクロストークについては、黒塗料塗布前後のサンプルを図 94 のように暗幕の有無の 2 パターン測定する。そして黒塗料塗布前後で、暗幕の有無の測定結果を比較する。暗幕により遮光が完全に成されていると仮定し、黒塗料塗布によるクロストークの抑制具合を評価する。また、黒塗料塗布によるシンチレータの光量の変化については、塗布前後共にシンチレータに暗幕を巻いた状態で測定し、塗布前後の光量の差を求める。

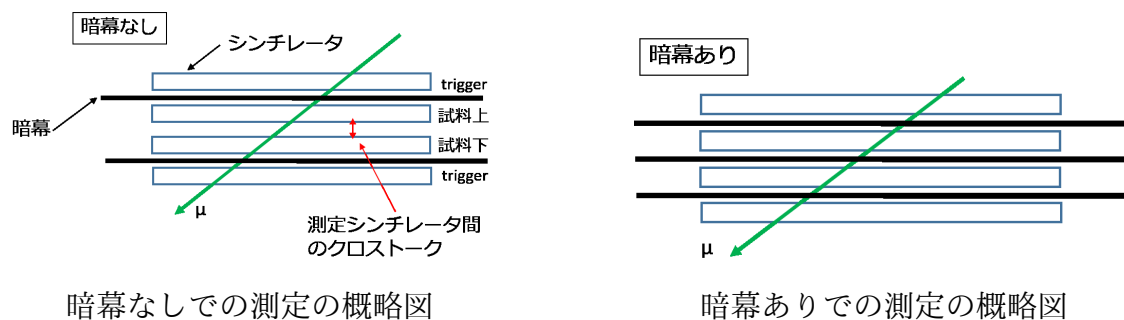


図 94: 暗幕の有無による測定の様子

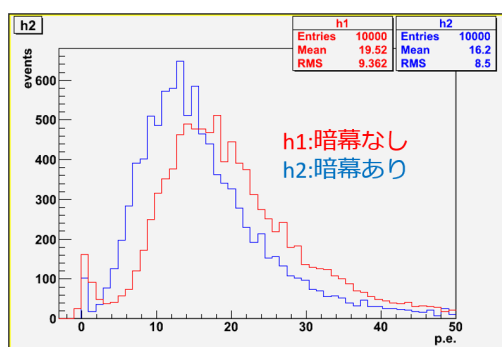
6.4.3 測定結果

シンチレータ間のクロストーク測定

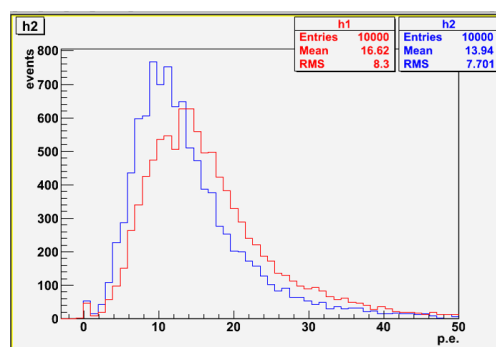
塗布前のヒストグラムが図 95、塗布後のヒストグラムが図 96 である。また、これから得られた結果を表 11 に示す。ヒストグラムからも、暗幕の有無による分布の変化の違いが黒塗料塗布前後で明らかに異なっていることがわかる。黒塗料塗布前では、暗幕がないときの方が光量分布が右にシフトしており、全体の光量が大きいことがわかる。黒塗料塗布後では、暗幕の有無による光量分布の違いがほとんどない。黒塗料塗布前の結果より、暗幕をすることでシンチレータの光量が 20 % 低下している。この光

量の変化分がシンチレータを重ねることによるシンチレータの表面からのクロストークであると考えられる。黒塗料塗布後の結果から、暗幕の有無による光量の変化は±2%以内であった。この結果から、黒塗料塗布により暗幕と同程度にクロストークが抑制されていることがわかった。

暗幕有りの結果を黒塗料塗布前後で比較すると、塗布後の光量が約±10%変化していることがわかる。これは、黒塗料を塗布することでシンチレータの光量が変化した可能性があると考えられる。これについての詳細は以下に述べる。

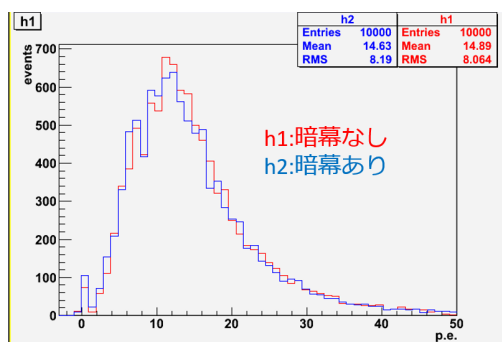


サンプル 1

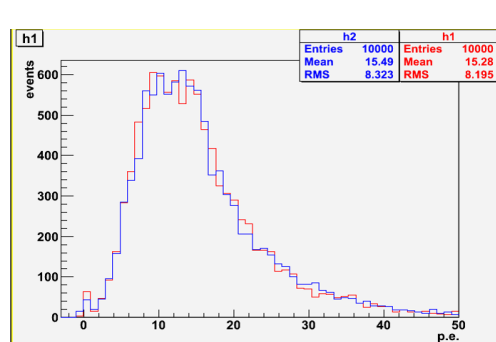


サンプル 2

図 95: 黒塗料塗布前の光量分布



サンプル 1



サンプル 2

図 96: 黒塗料塗布後の光量分布

黒塗料を塗布したことによる光量の影響

56本のサンプルについて、黒塗料塗布前後で暗幕を巻いたシンチレータの光量を測定した結果を述べる。黒塗料塗布前のシンチレータの光量に対するシンチレータの光量の変化量を表したのが図 97である。黒塗料塗布後の光量から塗布前の光量を差し引いたものをシンチレータの光量の変化量としている。この図から、黒塗料を塗布することでシンチレータの光量が約2 p.e.減少していることがわかる。また、塗布前の光量が高いシンチレータほど黒塗料塗布後の光量の減少量が多いことがわかる。この原因はまだ明らかになっておらず、この原因究明は後の課題である。

表 11: 黒塗料塗布前後のシンチレータの光量測定の結果。暗幕有りの状態を 100 %としている。

黒塗料塗布前	sample1 [p.e.]	sample2 [p.e.]
暗幕有り	16.2 (100 %)	13.9 (100 %)
暗幕無し	19.5 (120 %)	16.6 (120 %)
黒塗料塗布後	sample1 [p.e.]	sample2 [p.e.]
暗幕有り	14.6 (100 %)	15.5 (100 %)
暗幕無し	14.9 (102 %)	15.3 (99 %)

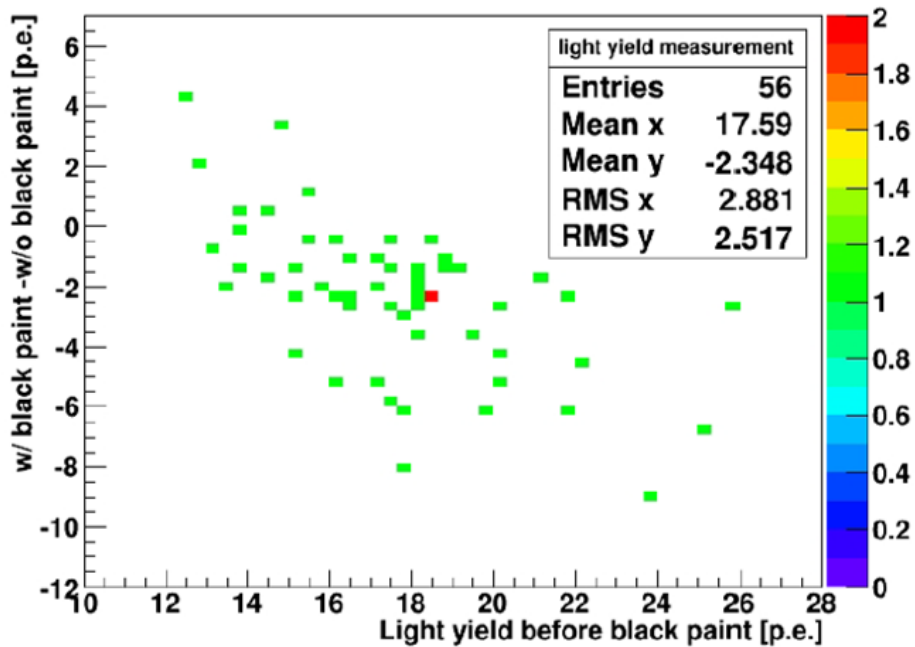


図 97: 黒塗料塗布によるシンチレータの光量変化

6.5 sub-module の光量測定及び解析

sub-module を組み立てた後のシンチレータの光量を宇宙線により測定した。ここでは、sub-module の光量測定について述べる。

6.5.1 目的

- sub-module の組み立てによるシンチレータ及びファイバーの影響を評価

6.5.2 測定装置

sub-module はファイバー 32 本の束をクッキーに取り付けた状態である。よって、MPPC は 32 ch array 型を使用する。クッキー、array 型 MPPC、PCB 変換ボードは図 100 のように、寸切りネジとナットにより取り付ける。MPPC の信号は多チャンネルの読み出しが可能な EASIROC モジュールにより読み取る。EASIROC(図 103) は 32 ch を同時に読み出すことができる MPPC 読み出し用 ASIC である。一つのボードに ASIC 及び ADC の二組が配置されているため、計 64 ch の読み出しが可能である。また、EASIROC はフラットケーブルにより MPPC からの信号を読み出すため、PCB コネクタを取り付けた変換ボードを MPPC に取り付ける。

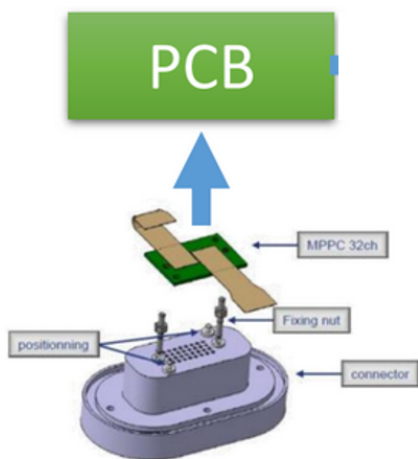


図 98: (a) 概略図

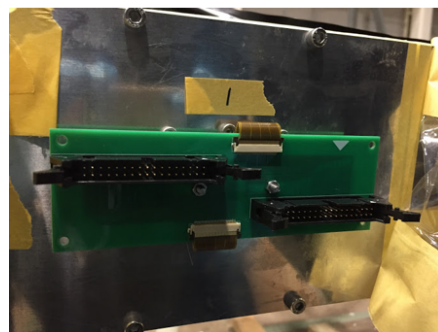
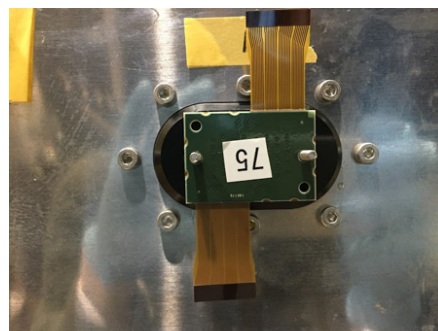


図 99: (b) 先にクッキーに MPPC を取り付ける [上] その上から変換ボードを取り付ける [下]

図 100: クッキーと MPPC を取り付ける様子



図 101: (a)EASIROC ボード

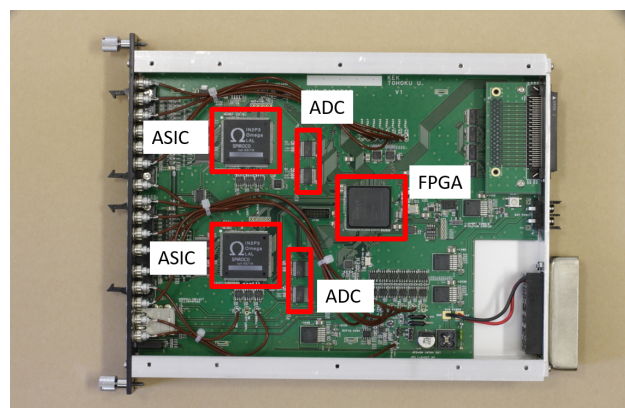


図 102: (b)EASIROC ボード内の回路の様子

図 103: EASIROC

6.5.3 測定方法

3台のEASIROCモジュールを用いて、図104のようなセットアップで測定した。EASIROCによる宇宙線取得の際の条件は以下の通りである(表12)。sub-moduleは暗幕で全体を覆い、外部からの光が入らないようにしている。

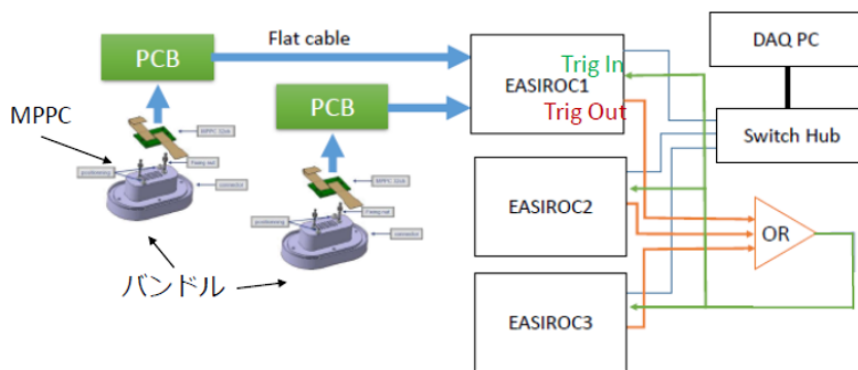


図 104: sub-module の光量測定時のセットアップ

6.5.4 測定結果

各sub-moduleにおける、全シンチレータの平均光量の平均値を図105に載せる。プレーンシンチレータとグリッドシンチレータにわけて測定結果を表13にまとめる。この結果から、グリッドシンチレータの平均光量の平均値がプレーンシンチレータと比べて大きいことがわかる。これは、宇宙線がシンチレータを通過する距離に起因すると考えられる。宇宙線の到来頻度の角度依存性は鉛直上向きを 0° とすると、宇宙線と鉛直方向をなす角 θ として

表 12: EASIROC による宇宙線取得の際の条件

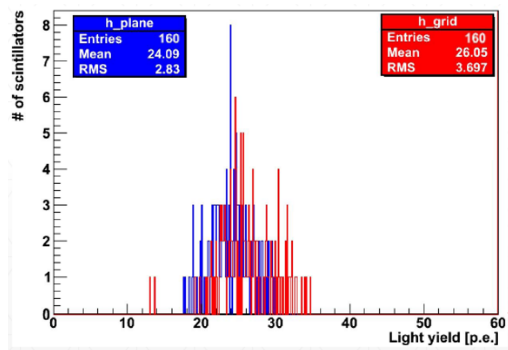
イベント数/測定	100000
測定時間/測定	約 20 分
ヒット数/EASIROC1 台 (64 ch)	4
トリガーシンチレータの閾値	2.5 p.e.
イベントレート	50 events/s

$\cos^2 \theta$ と表せる。 θ が小さくなるにつれて $\cos^2 \theta$ が大きくなることから、到来頻度は鉛直上向きからが多いと考えられる。宇宙線が鉛直上向きから飛来してきた場合、プレーンシンチレータの通過距離が 0.3 cm に対し、グリッドシンチレータは 2.5cm である (図??)。通過距離が大きいほどシンチレーション光を多く発するため、光量も大きくなる。これらの理由から、グリッドシンチレータの平均光量が大きくなったと考えられる。

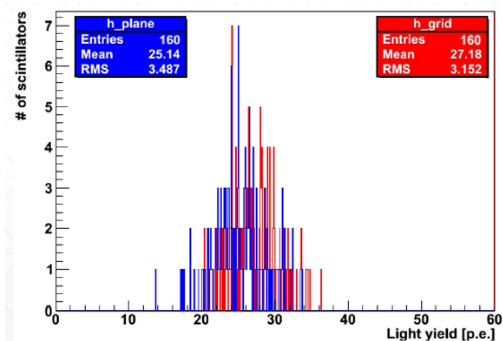
サンプリングでのシンチレータの光量測定と同様、一昨年製作した検出器における sub-module 建設後の測定結果と比較する。一昨年製作した検出器の結果が表 14 である。測定条件の違いは、今回の検出器のトリガーシンチレータの閾値が 2.5 p.e. であるのに対し、一昨年の検出器の閾値は 5.5 p.e. である。15 p.e. を目安として、この光量より低いシンチレータの本数は今回は 4 本、一昨年は 3 本と同程度であった。これは、sub-module 製作時にファイバーに傷が入ったことによる影響があると考えられる。この詳細については以下のヒットレートの節で述べる。

表 13: 各 sub-module におけるシンチレータの光量測定結果

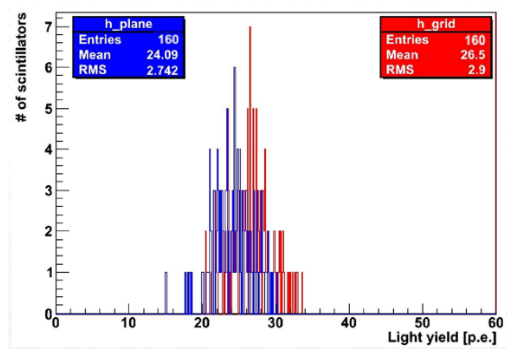
プレーンシンチレータ	各シンチレータの平均光量の平均値	15 p.e. より低いシンチレータの数
sub-module1	24.1 p.e.	0 本
sub-module2	25.4 p.e.	1 本
sub-module3	24.1 p.e.	0 本
sub-module4	23.5 p.e.	1 本
グリッドシンチレータ	各シンチレータの平均光量の平均値	15 p.e. より低いシンチレータの数
sub-module1	26.1 p.e.	2 本
sub-module2	27.2 p.e.	0 本
sub-module3	26.5 p.e.	0 本
sub-module4	26.0 p.e.	0 本



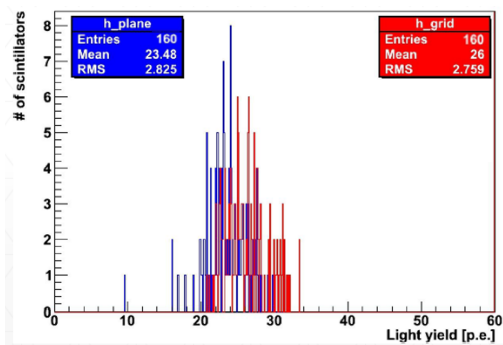
1 台目の sub-module の光量分布



2 台目の sub-module の光量分布



3 台目の sub-module の光量分布



4 台目の sub-module の光量分布

図 105: 各 sub-module の光量分布

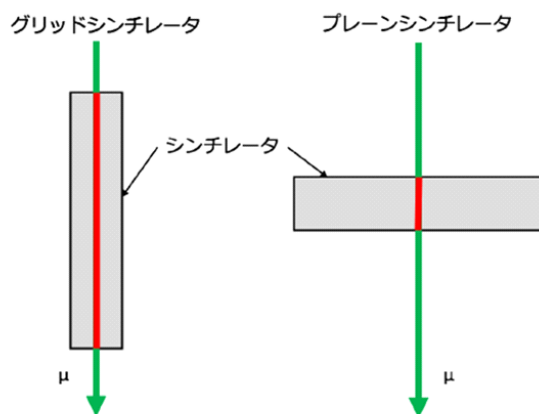


図 106: sub-module 測定時の宇宙線がシンチレータを通過する様子

表 14: 一昨年製作した検出器における sub-module のシンチレータの光量測定結果

1 台目の sub-module	各シンチレータの平均光量の平均値	15 p.e. より低いシンチレータの数
プレーンシンチレータ	22.8 p.e.	1 本
グリッドシンチレータ	27.6 p.e.	0 本
2 台目以降の sub-module	各シンチレータの平均光量の平均値	15 p.e. より低いシンチレータの数
プレーンシンチレータ	22.7 p.e.	1 本
グリッドシンチレータ	29.5 p.e.	1 本

6.5.5 ヒットレート

ここでは、全てのチャンネルのヒットレートについて述べる。便宜上、シンチレータ及びファイバーを一括りにして、チャンネルと呼ぶ。ヒットレートは以下のように定義する。

$$\text{ヒットレート} = \frac{\text{イベント (光量} > \text{閾値)}}{\text{全イベント}} \quad (17)$$

sub-module におけるプラスチックシンチレータの配置は図 107 の通りである。ビーム軸を Z 軸として、X 軸から見た図を side view、Y 軸から見た図を top view とする。また、sub-module 4 層の内、上の 2 層を plane 0、下の 2 層を plane 1 とする。また、図の番号は読み出し (ファイバー端面) が、見ている view に向いているチャンネルを表している。一つの plane の内、座標軸原点からプレーンシンチレータを 0 ch~39 ch、グリッドシンチレータの 1 層目が 40 ch~59 ch、2 層目が 60 ch~79 ch としている。よって、チャンネルの表し方の要素としては以下が挙げられる。

- 4 台ある sub-module の何台目か
- side view か top view か
- plane0 か plane1 か
- 何 ch か

以上を踏まえ、閾値 2.5 p.e. 以上をヒットイベントとしたときの各チャンネルのヒットレートが示したのが図 108 である。

各 plane、view のプロットを見ると、ヒットレートが周期的な構造を持っている。この理由は、宇宙線のイベント取得の条件において 64 ch のうち 4 イベント以上を要求しているからだと考えられる。図 109 のように同じクッキー内のチャンネルに注目すると、端のほうに宇宙線が通る場合は、4 イベントに満たずイベントが取得されない可能性がある。その場合、クッキーの端のほうにあるチャンネルのヒットレートは中央に位置しているチャンネルに比べ、低くなると考えられる。

次に、閾値 7.5 p.e. 以上をヒットイベントして、ヒットレートを求めたプロットが図 110 である。閾値 2.5 p.e. でのヒットレートと 7.5 p.e. でのヒットレートの差が 0.01 以上変化する

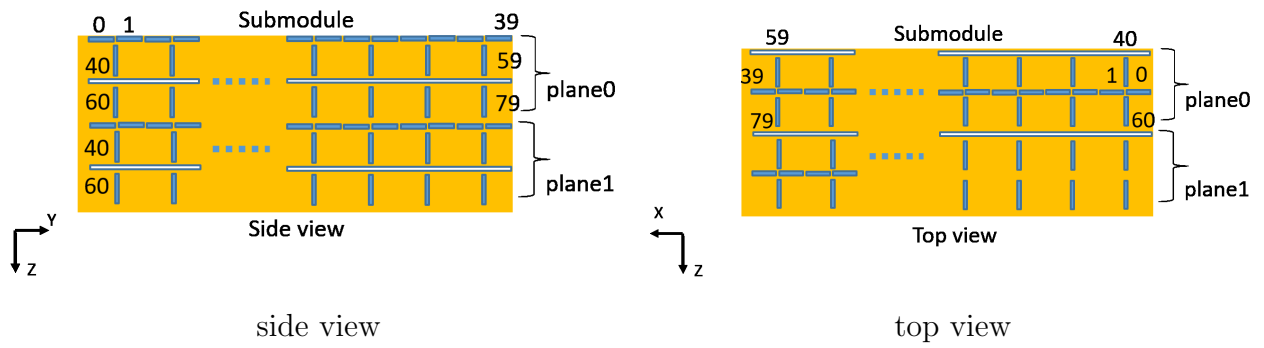


図 107: sub-module のチャンネルマッピング

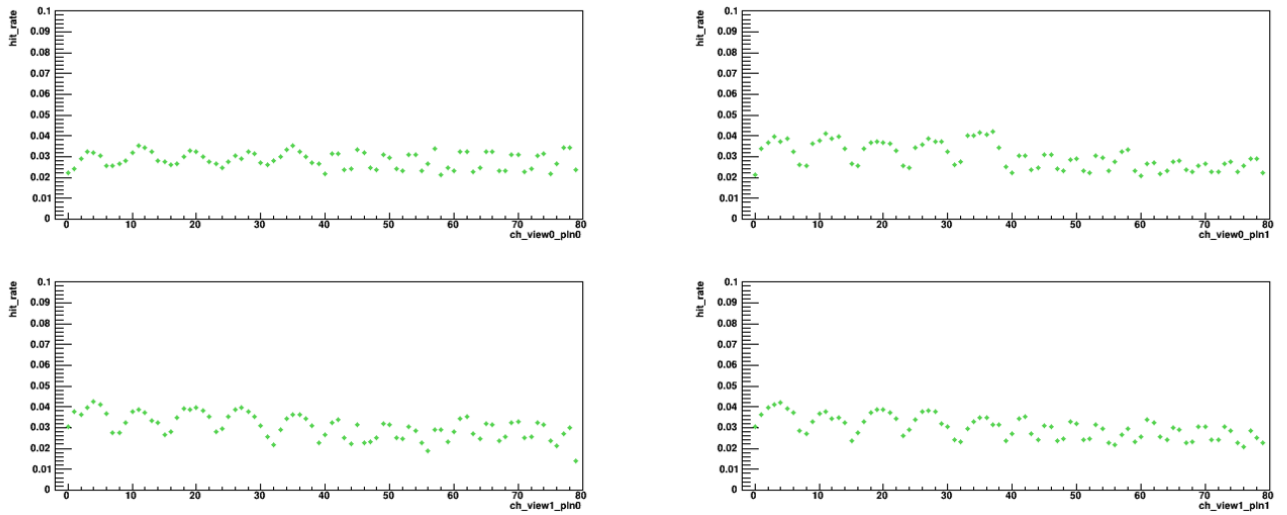


図 108: sub-module1 台目のヒットレート。閾値 2.5 p.e.

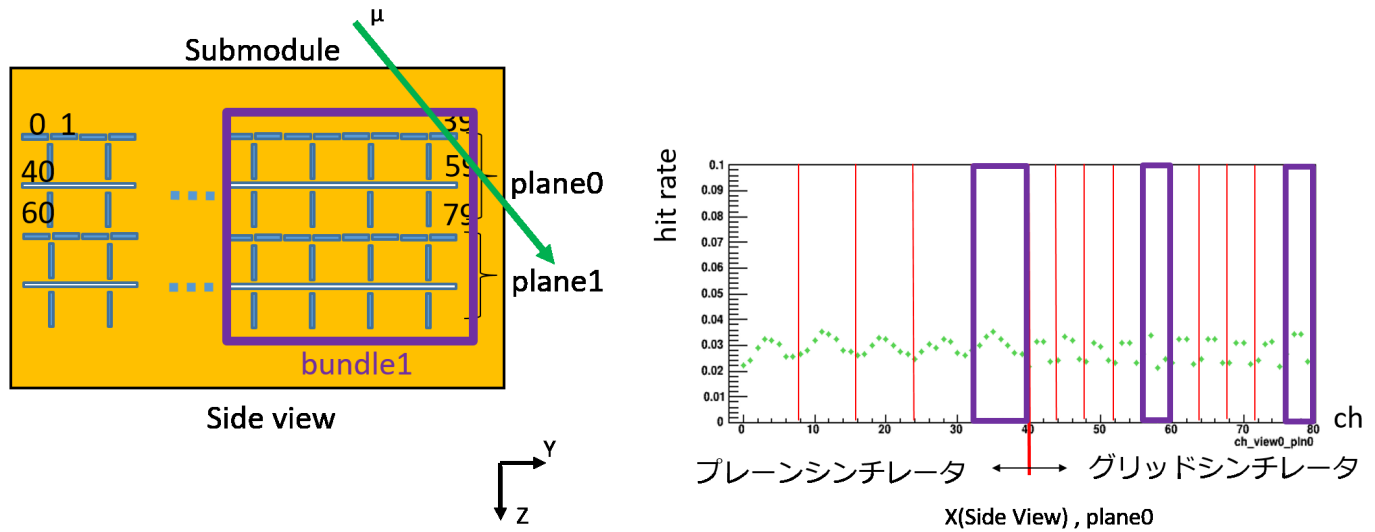


図 109: クッキー内の端でヒットした様子。(紫で囲った部分が左右で対応している。32 ch ~39 ch のプレーンシンチレータ層で一つの山を表し、55 ch~59 ch と 75 ch~79 ch の層それぞれで一つの山を表している。各層の中央付近ほどレートが高く、端はレートが低い。)

チャンネルがある。このチャンネルのシンチレータは 7.5 p.e. 以下の低い光量をもつイベントが多いと考えられる。各チャンネルに対する平均光量(閾値 7.5 p.e.)を図 111 に示す。ヒットレートの低くなったチャンネルと同様のチャンネルで平均光量も低いことが確認できる。このチャンネルの光量分布を図 112 に示す。この図より、全チャンネルの平均光量程度の光量があるチャンネルの分布と比較しても、ヒットレートが低いチャンネルの光量分布は光量が低いイベントが多く、分布の形が異常であることがわかる。このようにして、全チャンネルのヒットレートと光量分布を確認し、sub-module の製作によるシンチレータ及びファイバーへの影響を表 15 にまとめる。また、光量が低いチャンネルの位置を表 16 に示す。デッドチャンネルはシンチレータの光量分布がペDESTAL のみの分布の状態のものとしている。sub-module の製作において、デッドチャンネルはないことが確認できた。

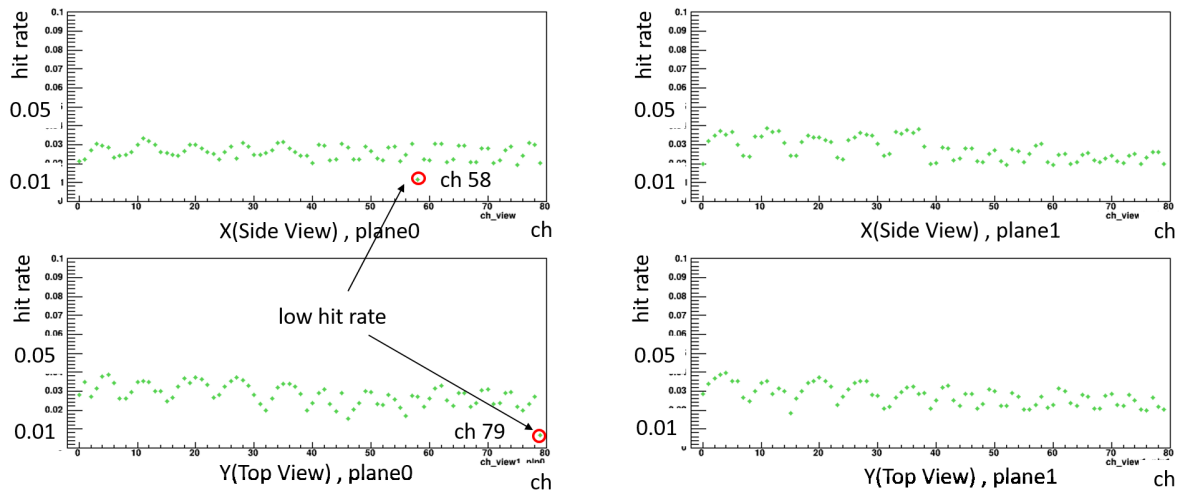


図 110: sub-module1 台目のヒットレート。閾値 7.5 p.e.

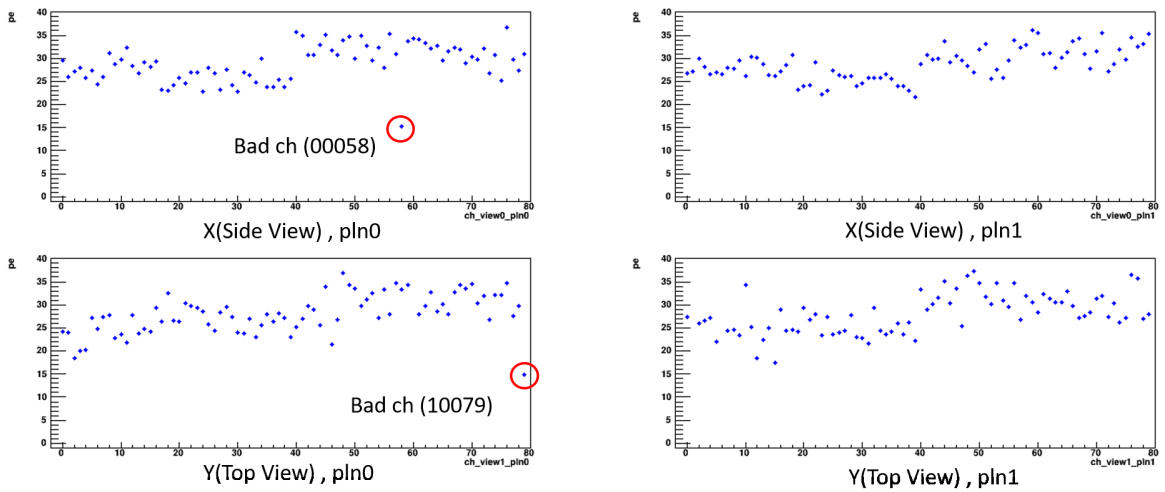


図 111: sub-module1 台目のチャンネルに対する平均光量(閾値 7.5 p.e.)

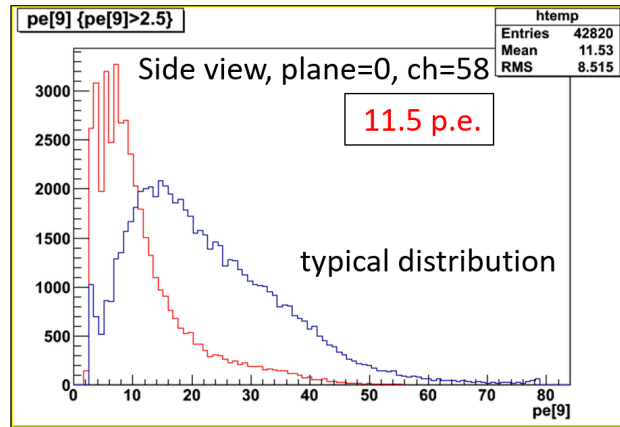


図 112: イベントレートが低いチャンネルの光量分布。1 台目の sub-module の内 side view から見た plane=0, ch=58 のチャンネル。

表 15: sub-module 製作による全チャンネルの影響のまとめ

正常なチャンネル	1274 本
15 p.e. 以下のチャンネル	1 本
光量分布が正常ではないチャンネル	3 本
デッドチャンネル	0 本

表 16: 光量が低いチャンネルの位置

	sub-module	view	plane	ch
15 p.e. 以下のチャンネル	3	top	1	4
光量分布が正常ではないチャンネル	4	side	1	36
光量分布が正常ではないチャンネル	1	side	0	58
光量分布が正常ではないチャンネル	1	top	0	79

6.6 WAGASCI module の光量測定

sub-module と同様に、WAGASCI module 建設後の宇宙線による光量測定について述べる。セットアップ、測定装置、測定方法は sub-module での測定時と同様である。

6.6.1 目的

- WAGASCI module 組み立てによるシンチレータ及びファイバーの影響を評価

6.6.2 測定結果

全チャンネルの光量測定の結果が図 113 である。sub-module の測定結果から、閾値 6.5 p.e. 以上のイベントを用いてヒストグラムとしている。プレーンシンチレータとグリッドシンチレータそれぞれの平均光量の平均値等の結果を表 17 に示す。平均値を比較すると、sub-module の測定結果とは逆にプレーンシンチレータの方が平均値が大きいことがわかる。これは、WAGASCI module は sub-module を立てた状態で組み立てているため、宇宙線の通過距離がプレーンシンチレータの方が 2.5 cm 側となりグリッドシンチレータの 0.3 cm よりも長くなったためだと考えられる (図 114 参照)。

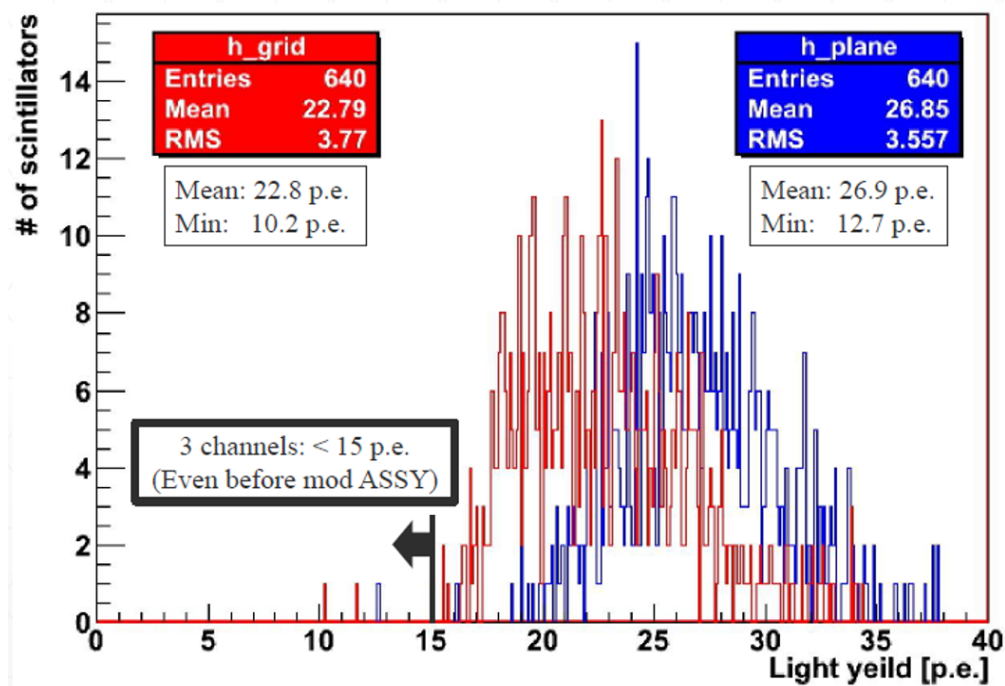


図 113: WAGASCI module 建設後の全チャンネルの平均光量

6.6.3 ヒットレート

sub-module の場合と同様の解析を行う。WAGASCI module は図 114 のように各シンチレータが配置されている。閾値 2.5 p.e. 以上をヒットイベントとして、この状態でのヒットレートの一例を図 115 に載せる。閾値 7.5 p.e. の場合が図 116 である。これらの図により、閾値の違いでヒットレートが 0.01 以上低下したチャンネルは sub-module の解析時と同様のチャンネル (sub-module1 台目、side view、plane0 において) であることが確認できる。このことは、他のチャンネルでも同様であり、表 16 と同じ結果が得られた。つまり、sub-module から WAGASCI module の建設において、新たに光量が低下したシンチレータがないことが確認できた。以上より、今回製作した WAGASCI module の内、平均光量が 15 p.e. 以下及び光量分布が異常であるバッドチャンネルの位置を図 117 に示す。

6.6.4 イベントディスプレイ

ニュートリノ反応により生成された粒子を飛跡構成する場合、シンチレータ (チャンネル) の位置をディスプレイに正しく配置し、表示する必要がある。また、クッキーへのファイバー接着において、ファイバーの付け間違いにより誤った飛跡を表示してしまう可能性がある。ここでは、イベントディスプレイを作成し、それを用いたこれらの確認について述べる。確認事項は次の 2 点である。

- 宇宙線の飛跡からズレた位置にヒットがないか

クロストークにより、ヒットがあった隣のチャンネルでもヒットが見えてしまうことがないように、ディスプレイするヒットの光量は 2.5 p.e. 以上とする。

- 全てのチャンネルで宇宙線の飛跡が見えるか

全てのチャンネルについて、宇宙線が通過しているヒットがあることを確認する。

異なる sub-module の隣り合ったクッキーに対してイベントディスプレイを目視し、約 100 イベントの宇宙線の飛跡の確認を全てのクッキーに対して行った。100 イベントである理由は、上記の確認事項の后者を確認するのに、どのクッキーに対しても約 100 パターンの確認で完了できたからである。sub-module1 台目と 2 台目の 5 つあるクッキーの内の真ん中の隣り合ったクッキーについて、宇宙線の飛跡が確認できたイベントディスプレイが図 118 である。他には図 119 のようにシャワーのようなものや、同時に入射したイベントのようなものが確認された。しかし、この図のようなイベントはチャンネルの配置の正しさの判断ができないため、飛跡が 1 つ見えるものについて宇宙線の飛跡が確認できるイベントとしている。

宇宙線のイベントレートについては、上記と同じクッキーの組を用いて 188 イベントを確認し、表 18 のような結果であった。宇宙線の飛跡と考えられるイベントを μ -like それ以外 (図 119) のイベントを other としている。イベントディスプレイを確認した内の約 8 割について宇宙線の飛跡が確認できた。このイベントレートのもと、全てのクッキーについて宇宙線の飛跡が確認でき、チャンネルの配置及びファイバーの位置が全て正しいことが確認できた。

表 17: WAGASCI module 建設後の全チャンネルの光量測定結果

	平均値 [p.e.]	RMS	平均光量が 15 p.e. 以下のシンチレータの本数
プレーンシンチレータ	26.9	3.6	1
グリッドシンチレータ	22.8	3.8	2

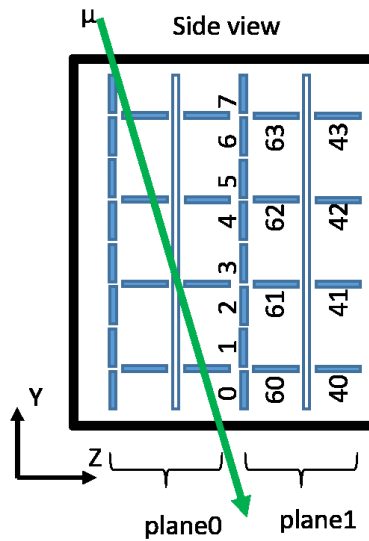


図 114: WAGASCI module のシンチレータの配置

表 18: イベントの種類分け

	μ -like	other	all
イベント数	145	43	188
イベントレート	77 %	23 %	100 %

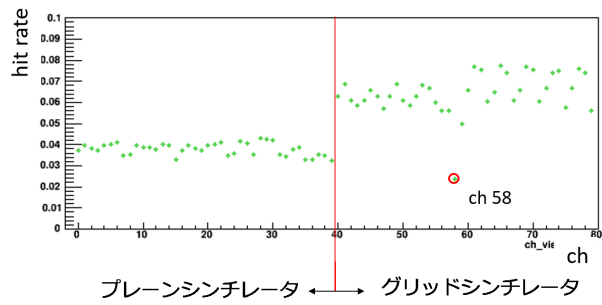


図 115: WAGASCI module の各チャンネルのヒットレート (閾値 2.5 p.e.)。sub-module1 台目、side view、plane 0 のチャンネル

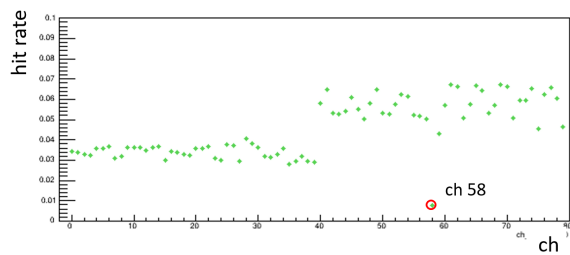


図 116: WAGASCI module の各チャンネルのヒットレート (閾値 7.5 p.e.)。sub-module1 台目、side view、plane 0 のチャンネル

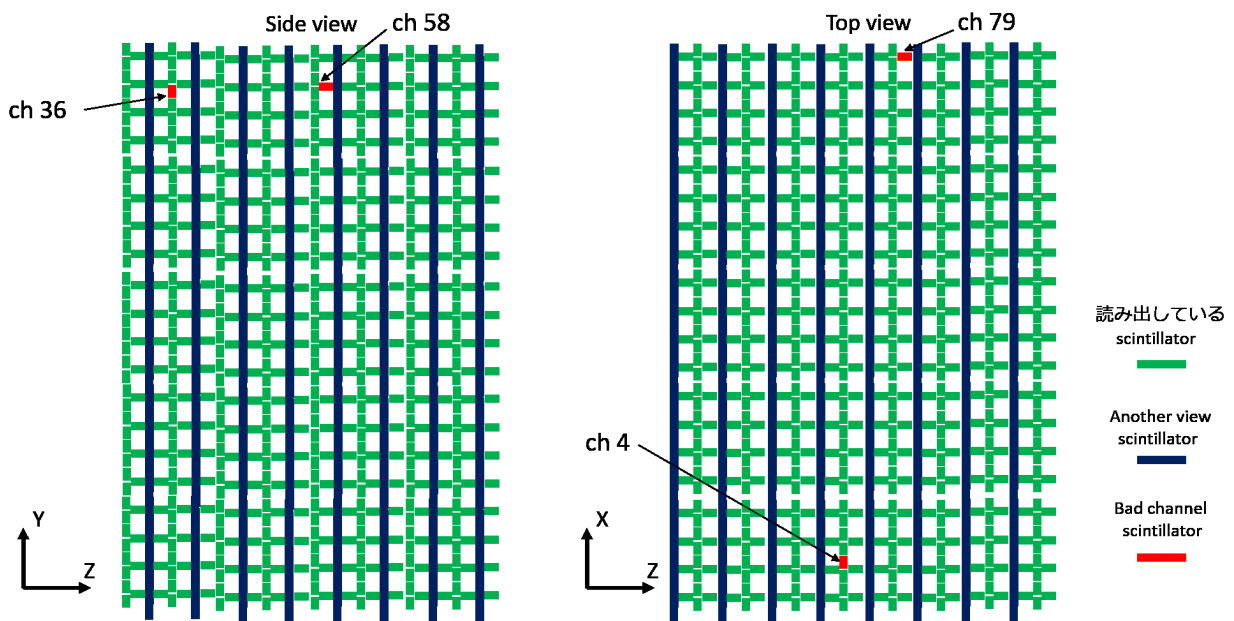


図 117: バッドチャンネルの位置

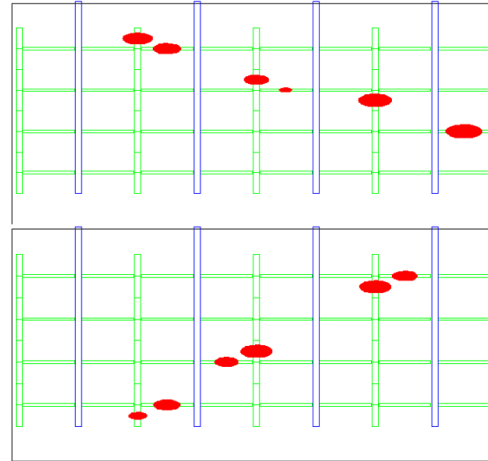
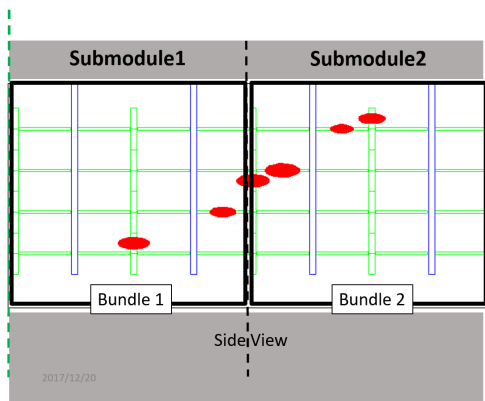
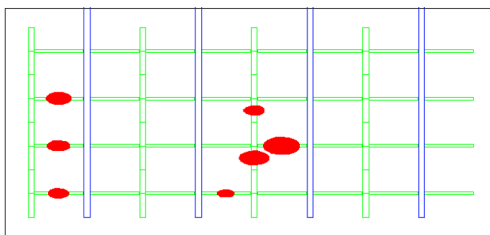
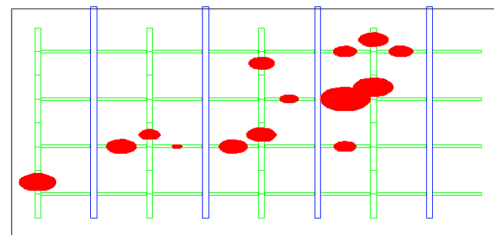


図 118: イベントディスプレイ



同時に二つの宇宙線が入射したようなイベント



シャワーのようなイベント

図 119: 宇宙線の飛跡とは考えにくいイベントの例

7 クロストークの測定

まず、WAGASCI moduleにおけるシンチレータ間のクロストークについて述べる。先に述べた黒塗料塗布前後の光量測定にあるように、重ね合わせることによるシンチレータの表面からのクロストークが確認されている。WAGASCI moduleはプレーンシンチレータとグリッドシンチレータによる格子状構造をもつため、格子内を光子が乱反射することによりクロストークが存在すると考えられる(図120)。ここでは、格子内のクロストークがどのようなメカニズムで起きているのか理解するための測定を行う。メカニズムの種類は以下が考えられる。

- プレーンシンチレータ間のクロストーク
 - 同じ層にある隣接したプレーンシンチレータ
 - 向かい合う層のプレーンシンチレータ
- プレーンシンチレータとグリッドシンチレータ間のクロストーク
- x方向とy方向のグリッドシンチレータ間のクロストーク
 - シンチレータ表面からのクロストーク
 - かみ合わせでのクロストーク

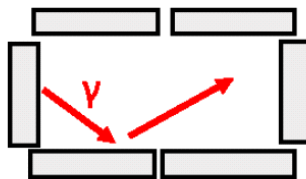


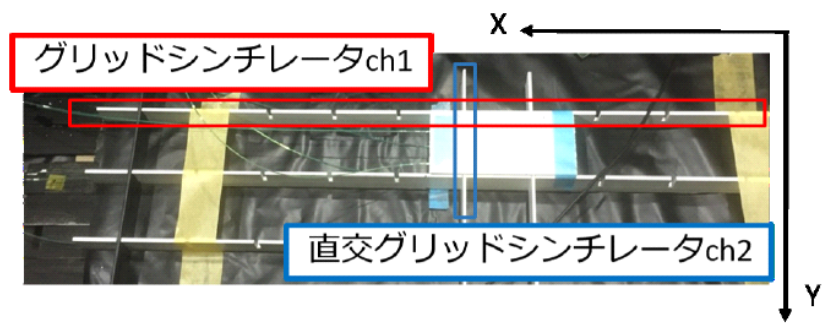
図 120: 格子内のクロストークのイメージ図

7.1 目的

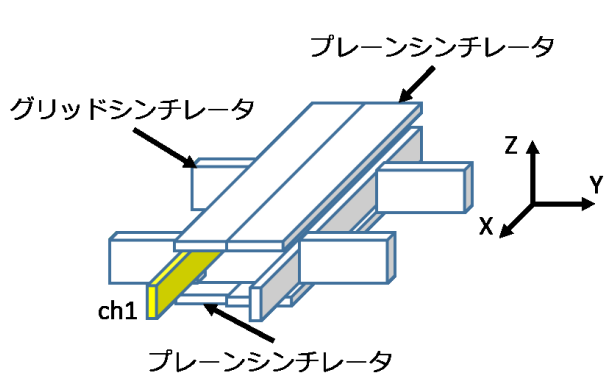
格子内のクロストークのメカニズムの理解

7.2 セットアップ

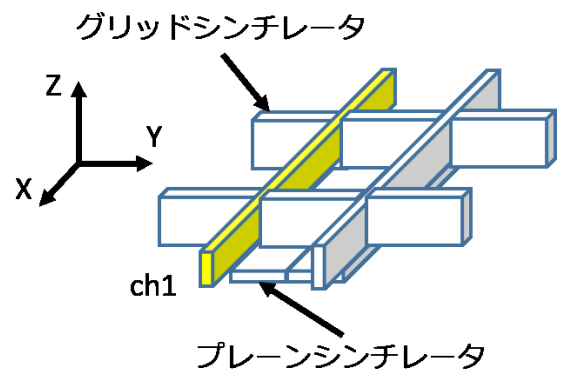
宇宙線を用いて測定するため、サンプリングでの光量測定と同様のセットアップ(ブロックダイアグラム、4つのMPPC、HV電源)で測定する。図121のような模型を作成し、1つの格子内で様々なパターンのクロストークを測定する。便宜上、クロストークを測定するシンチレータをch1、光源となるシンチレータ(光漏れするシンチレータ)をch2とする。残り二つのシンチレータは、光源となるシンチレータに対するトリガーシンチレータとして光量を読み出す。



(a) セットアップ



(b) 全体の概略図



(c) 上部のプレーンシンチレータを除いた図

図 121: 作成した模型の図

7.3 測定方法

クロストークを測定するため、以下の2つのパターンの測定をする。

- 宇宙線のみの影響を測定
- 宇宙線とクロストークの両方の影響を含めた測定

これらの測定により、宇宙線とクロストークを区別し、正味のクロストークを測定することができる。

あるパターンの測定を一つ例に取り、測定方法の詳細について説明する。例として、グリッドシンチレータの表面の間でのクロストークの測定を挙げる。図122のように、クロストークを測定するシンチレータがX view から見たch 1のグリッドシンチレータ、光源となるシンチレータがY view から見たch 2のグリッドシンチレータである。

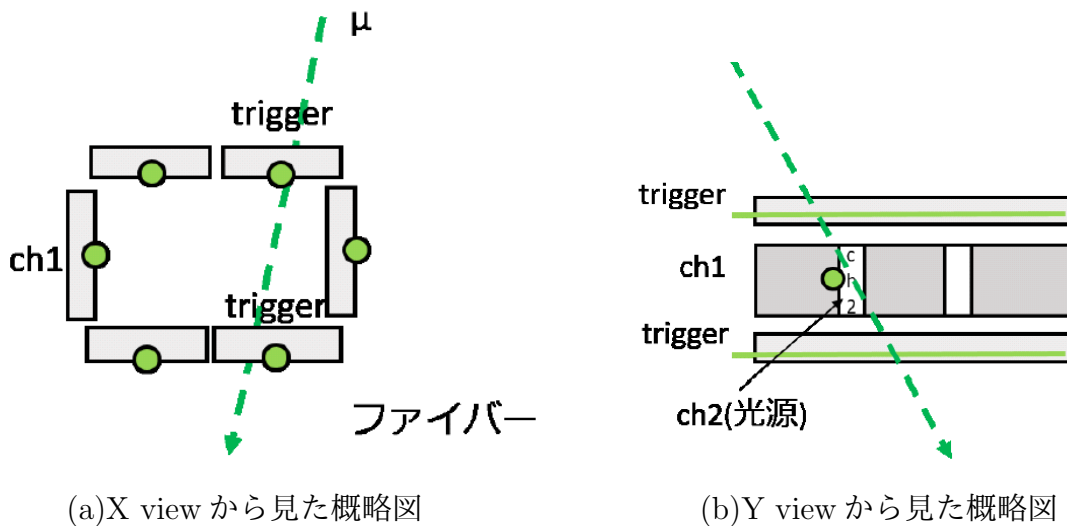


図 122: クロストークの測定例

まず、宇宙線のみの影響の測定については宇宙線とシンチレータの光を区別するため、暗幕によりシンチレータを覆った状態（図123）で測定する。グリッドシンチレータのかみ合わせは、暗幕の厚さがスリットの大きさに対して大きく、暗幕を挟むことができなかったため、アルミホイルを挟んでいる。格子内のグリッドシンチレータの表面はスリット間で分けて暗幕を巻いている。これにより、シンチレータからの光を遮断し、宇宙線のみ影響の測定が可能となる。光源となるシンチレータは確実に宇宙線が通るように、そしてクロストークを測定するシンチレータに宇宙線が通らないように、格子内のシンチレータ2本を選んでトリガーとする。図122のように、光源となるシンチレータがグリッドシンチレータ(ch 2)の場合、その上下のプレーンシンチレータがトリガーシンチレータである。この状態で、ch 2の光量に対するch 1の光量を測定する。その結果が（図124）である。横軸がch 2の光量、縦軸がch 1の平均光量を示している。各点のエラーバーについては、横軸方向のエラーバーが測定され得る光源の光量の大きさの範囲を表している。また、縦軸方向はその範囲内の光源の光量に対して測定したクロストークのRMSを、その範囲内での測定数で割った値である。

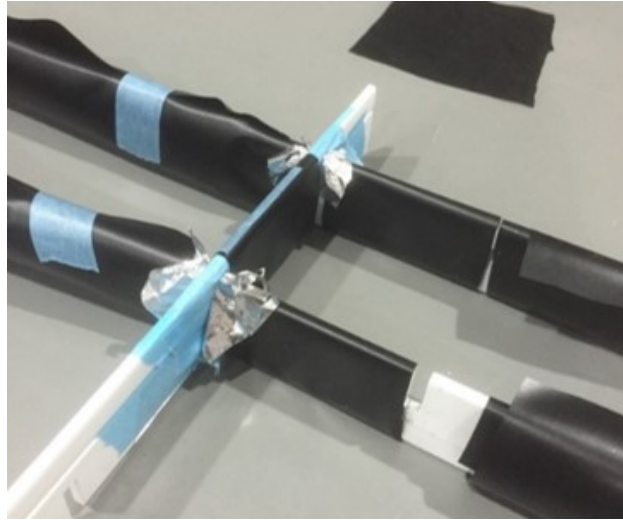


図 123: シンチレータに暗幕を覆っている様子

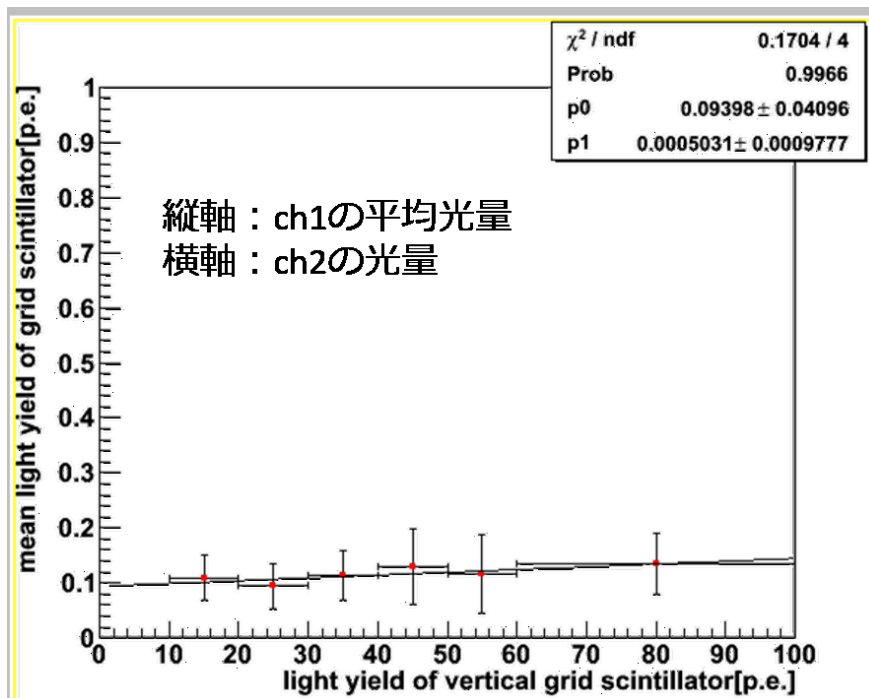


図 124: 宇宙線のみによる ch 2 に対する ch 1 の光量測定の結果

次に ch 1 と ch 2 のみ暗幕を外した状態 (図 125) で同様の測定を行う。その測定結果が図 126 である。このデータと宇宙線のためのデータを差し引くことで光源のみによる影響、つまりクロストークを求めることができる。後のクロストークの測定結果は、この過程を経て求めたものである。測定条件について、トリガーシンチレータの閾値は 4.5 p.e. としている。



図 125: ch 1 と ch 2 の暗幕を外した模型の様子

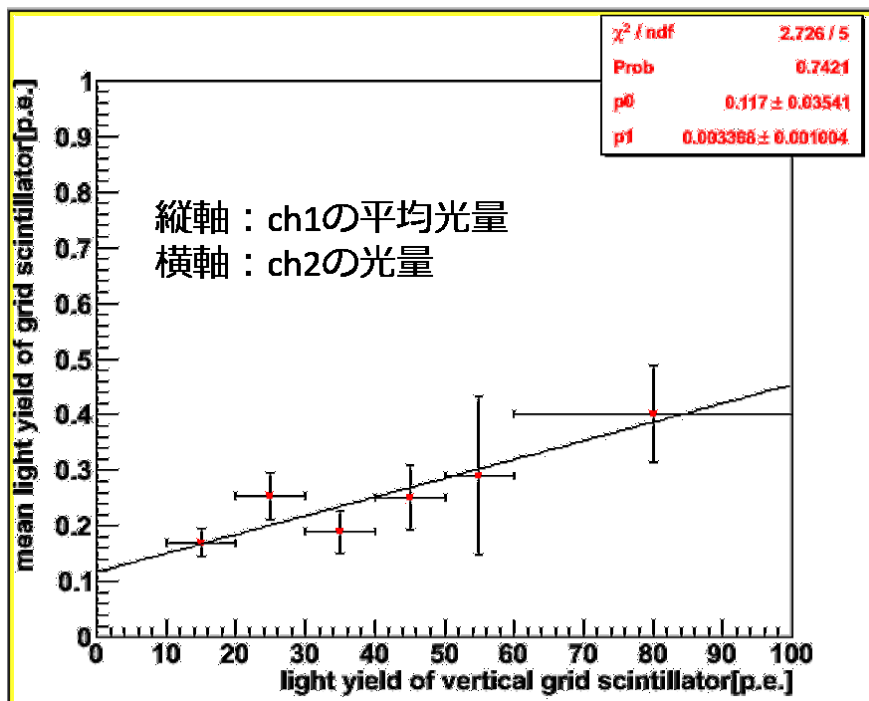


図 126: 宇宙線と光源による ch 2 に対する ch 1 の光量測定の結果

7.4 測定結果

宇宙線と光源による測定結果から宇宙線のための測定結果を差し引いたものが図 127 である。この図の傾きがクロストークとなる。表 19 に宇宙線のみによる測定結果、宇宙線と光源による測定結果、それらを差し引いた結果についてまとめる。この結果より、グリッドシンチレータ間の表面からのクロストークは約 0.3% であることがわかった。この測定結果は、図 122 のように光源となるシンチレータのファイバーが格子の外側に向いている状態である。ファイバーが格子の内側に向いている場合、クロストークは大きくなると考えられ、今後測定することが課題である。また、ここではクロストークのメカニズムの内、グリッドシンチレータ間の表面からのクロストークのみ測定しているため、他のパターンの測定も今後の課題である。

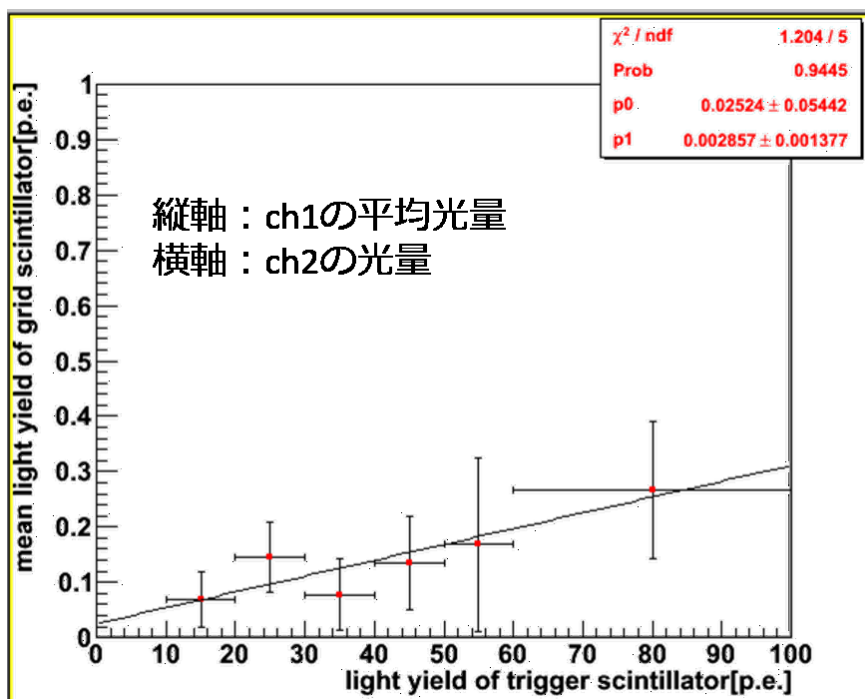


図 127: 宇宙線の影響を除いた ch 2 に対する ch 1 の光量測定の結果

	切片 [p.e.]	傾き [%]
宇宙線のみ	0.09 ± 0.04	0.05 ± 0.09
宇宙線と光源	0.12 ± 0.04	0.3 ± 0.10
光源のみ (クロストーク)	0.02 ± 0.05	0.29 ± 0.14

表 19: クロストーク測定結果

8 結論

WAGASCI実験は、T2K実験のニュートリノ振動解析における後置検出器(スーパーカミオカンデ)と前置検出器(ND280)の標的原子核の違いに関する系統誤差を抑制するため、水と炭素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的としている。そこで我々は、新たにプラスチックシンチレータによる三次元格子状構造を持つ水標的検出器を製作し、これと既存の検出器である炭素標的検出器とMRDを実験場所に建設した。本論文において、水標的検出器の製作過程における光量測定と解析により、検出器で用いられる全1280本のプラスチックシンチレータの平均光量が約25 p.e.であることがわかった。そして、製作過程でのファイバーの損傷が原因である4つのバッドチャンネルを確認した。また、プラスチックシンチレータ間のクロストークについて、暗幕の付けはずしでの光量測定結果を黒塗料塗布前後で比較すると、黒塗料を塗布することにより光量が20%抑制され、暗幕と同程度にクロストークが抑制されていることがわかった。そして、格子内のグリッドシンチレータ間のクロストークはかみあわせを通した影響を除いて約0.3%であり、非常に小さいことがわかった。

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] E.Aliu et al. [K2K Collaboration], "Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment", arXiv:hep-ex/0411038 (2005)
- [4] Y.Yamazaki et al. "Accelerator Technical Design Report for J-PARC" KEK-Report 2002-13;JAERI-Tech 2003-044 (2003)
- [5] K. Matsuoka et al. "Design and performance of the muon monitor for the T2K neutrino oscillation experiment" Nucl. Instrum. Meth. A 624, 591 (2010)
- [6] 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)
- [7] T. Lindner and the T2K-FGD group "The Fine Grained Detector for the T2K experiment" J.Phys.: Conf. Ser. 136 042035 (2008)
- [8] N. Abgrall et al. "Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors" arXiv:1012.0865 (2010)
- [9] M. Ziembicki et al. "The SMRD subdetector at the T2K near detector station" Acta-Phys.Polon. B 41, 1579 (2010)

- [10] Y. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "The Super-Kamiokande detector" Nuel. Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- [11] A. Pla-Dalmau et al. "FNAL-NICADD Extruded Scintillator. FERMILAB-PUB-05-344" (2005)
- [12] K. et al Abe. Measurement of the inclusive ν_μ charged current cross section on iron and hydrocarbon in the T2K on-axis neutrino beam. Phys. Rev., D90(5):052010, 2014
- [13] Kuraray 社 Scintillation Materials カタログ
- [14] 原田潤, "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", 大阪市立大学修士論文 (2017)
- [15] 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)
- [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)