

修士論文

注型成形プラスチックシンチレータと波長変換 ファイバーを使った飛跡検出器の開発

東北大学理学研究科
物理学専攻

駒場はるか

2024 年

概要

ニュートリノにおける CP 対称性の破れを観測するために、J-PARC 加速器でニュートリノを生成し、神岡にある大型水チェレンコフ・ニュートリノ検出器で検出する取り組みが進められている。現在進行している T2K 実験では、ニュートリノ原子核反応を測定するために前置検出器のアップグレードで Super-FGD という名称のニュートリノの標的兼飛跡検出器が 2023 年に導入された。2027 年に稼働予定のハイパーカミオカンデ (HK) 実験に向けては、さらなる測定精度向上のため Super-FGD の体積の拡張が議論されている。これを実現するためには、組立工数の削減が必須である。

本研究では、Super-FGD のような検出器を、注型成形プラスチックシンチレータ EJ-290 を用いて作製する方法を開発した。EJ-290 は、型に流し込んで硬化させることで、固体プラスチックシンチレータと同様の性質を示す有機材料である。この性質を利用することにより、従来の組立方法を簡略化することを目的とする。検出器の製作にあたり 2 つの方法に取り組んだ。

1 つ目は、ファイバーを先に入れた状態でシンチレータを硬化させる方法である。波長変換ファイバーは硬化前の EJ-290 に溶けるため、波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティングを試みた。本研究では、コーティングを施すことで EJ-290 が波長変換ファイバーに与えるダメージを軽減し、溶けにくくなることを確認したが、完全に保護することはできなかった。

2 つ目に取り組んだ方法は、波長変換ファイバーの代わりにチューブを通しておき、シンチレータを流し込み硬化させた後にファイバーと入れ替える方法である。検出器製作試験の結果が良好だったため、本手法を採用し、品質向上を目指し改善を繰り返した。その結果、1.18 mm ϕ の PTFE チューブがファイバーとの入れ替えに最適であることが分かった。3D プリンタで 1 cm 平方に区分けされたポリアミドの格子型を作製し、シンチレータの流出を防ぐためにポリエチレンナフタレートフィルムで型を覆い、側面をアルミ板で押さえつける方法で検出器を製作した。この方法でキューブ 4 \times 4 個の大きさの検出器を 4 つ作製した。

製作したシンチレータを用いて宇宙線ミューオンを観測し、Super-FGD キューブを使用した場合と比較することで性能評価を行った。その結果、反射層を追加することで Super-FGD キューブと同等に近い光量が得られることが確認できた。

目次

第 1 章	序論	4
1.1	ニュートリノ	4
1.2	ニュートリノ振動	4
1.3	ニュートリノ原子核反応	6
1.4	加速器ニュートリノ振動実験	8
1.4.1	概要	8
1.4.2	ニュートリノビーム	8
1.4.3	前置検出器	10
1.4.4	後置検出器: スーパーカミオカンデ (SK)	11
1.5	ハイパーカミオカンデ実験	12
1.5.1	ハイパーカミオカンデ (HK)	13
1.5.2	IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector)	13
1.5.3	ND280 の更なるアップグレード	14
第 2 章	Super-FGD	15
2.1	検出器の概要	15
2.2	各構成要素	16
2.2.1	シンチレータキューブ	16
2.2.2	波長変換ファイバー	17
2.2.3	MPPC	17
2.2.4	信号読み出し回路	18
2.3	キューブ組み立て方法	18
2.4	期待される性能	20
2.5	本研究の目的	23
第 3 章	注型成形プラスチックシンチレータを使った飛跡検出器	24
3.1	注型成形プラスチックシンチレータ	24
3.1.1	波長変換ファイバーを先に入れる方法	25

	3.1.2	波長変換ファイバーを後から入れる方法	26
3.2		光信号の伝達	26
	3.2.1	波長変換ファイバー	26
	3.2.2	シンチレータキューブの反射材としての役割	27
第 4 章		波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング	28
4.1		波長変換ファイバーを先に入れる方法における課題	28
4.2		サイトップを用いたファイバーのフッ素薄膜コーティング	29
	4.2.1	コーティング方法の確立	29
	4.2.2	簡易セットアップによるサイトップコーティングの有用性の確認	30
4.3		コーティングしたファイバーの光量測定	32
	4.3.1	ファイバー内の光の伝搬	32
	4.3.2	光量測定のセットアップ	33
	4.3.3	ファイバーの着脱の再現性	35
	4.3.4	ファイバーの端面処理の再現性	36
	4.3.5	光量測定のためのコーティングの条件	37
	4.3.6	光量損失率の定義と誤差	37
	4.3.7	光量損失率の測定	37
	4.3.8	バックグラウンド測定	38
4.4		コーティングの効果	39
	4.4.1	キュアを行わなかった場合のコーティングの効果	39
	4.4.2	キュアを行った場合のコーティングの効果	41
	4.4.3	重ね塗りを十分に行った場合のコーティングの効果	43
第 5 章		注型成形プラスチックシンチレータの製作	45
5.1		製作方法	45
5.2		シンチレータ流出の対策と型の取り出し	47
	5.2.1	ブリキ缶	47
	5.2.2	ステンレス容器	48
	5.2.3	ポリエチレンナフタレートフィルム	48
5.3		チューブの選定	50
5.4		PTFE チューブの取り出し方法の確立	53
5.5		シンチレータの脱泡	56
5.6		シンチレータの収縮問題とその対策	56
5.7		Ar ガスの使用	58
5.8		水滴の混入対策	59

5.9	製作したシンチレータ	61
第 6 章	宇宙線を用いたシンチレータの性能評価	63
6.1	セットアップ	63
6.1.1	シンチレータ	63
6.1.2	波長変換ファイバー	63
6.1.3	MPPC	64
6.1.4	ファイバーと MPPC の接続	64
6.1.5	EASIROC モジュール	65
6.1.6	データ取得系	67
6.1.7	光量のキャリブレーション	67
6.2	宇宙線観測の測定結果	70
6.2.1	裸のシンチレータを用いた測定	70
6.2.2	テフロンテープを巻いたシンチレータを用いた測定	71
6.2.3	Super-FGD キューブを用いた測定	73
6.3	測定結果の比較	75
第 7 章	結論	78
付録 A	宇宙線測定における各チャンネルの測定結果	81
参考文献		83

第 1 章

序論

1.1 ニュートリノ

ニュートリノは電荷を持たないレプトンであり、スピン 1/2 のフェルミオンである。中性のレプトンであるために、弱い相互作用と重力相互作用のみ働く。そのため、物質とほとんど反応しないという特徴がある。図 1.1 に示すように、標準模型においてニュートリノは電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の 3 種類のフレーバーを持つ。標準模型では左巻きのニュートリノと右巻きの反ニュートリノのみが導入されており、右巻きのニュートリノと左巻きの反ニュートリノは導入されていない。標準模型においてニュートリノの質量は 0 と仮定しているが、後述するニュートリノ振動の発見から、ニュートリノは質量を持つことが分かっている。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノが質量を持つ場合、ニュートリノの 3 種類のフレーバーの固有状態 $|\nu_e\rangle$, $|\nu_\mu\rangle$, $|\nu_\tau\rangle$ は、それぞれ 3 種類の質量の固有状態 $|\nu_1\rangle$, $|\nu_2\rangle$, $|\nu_3\rangle$ の線形結合で式 (1.1) のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = U_{PMNS}^* \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ここで U_{PMNS} は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列と呼ばれるユニタリ行列であり、式 (1.2) で表される [2]。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Standard Model of Elementary Particles

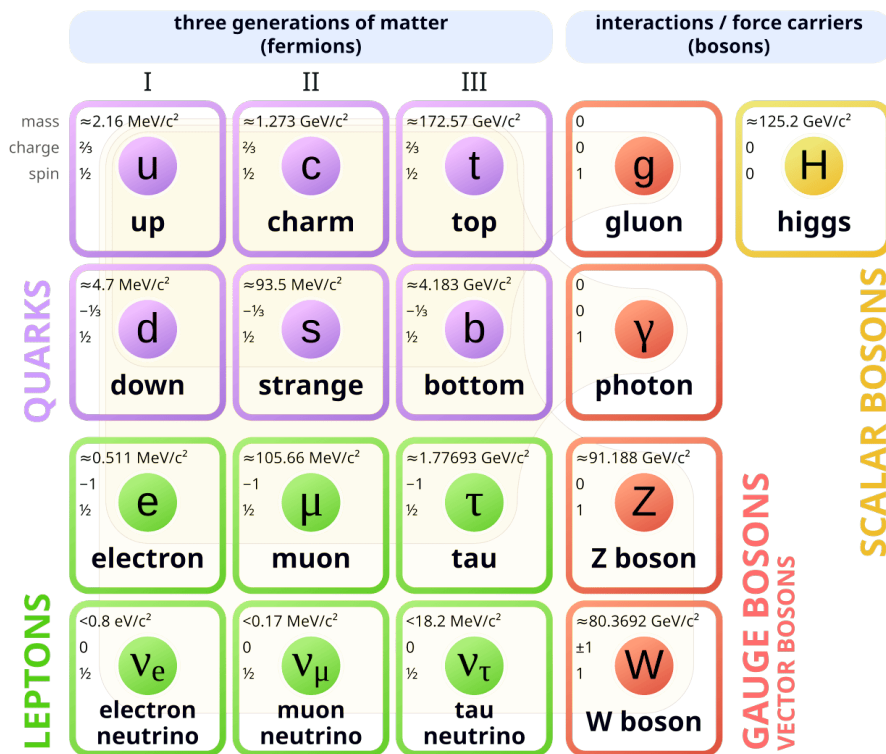


図 1.1: 標準模型における素粒子 [1]

式 (1.2) において、 θ_{ij} は混合角、 δ は CP 位相と呼ばれ $\delta \neq 0, \pi$ のとき CP 対称性が破れている。

次に、簡単のために $|\nu_e\rangle$ と $|\nu_\mu\rangle$ の 2 世代間のニュートリノ振動について考える。式 (1.1) と同様に各フレーバーの固有状態は質量の固有状態の混合状態であるとする、式 (1.3) で表せる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \\ -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

ν_i の時間発展は

$$|\nu_i(t)\rangle = |\nu_i\rangle e^{-i(E_i t - p_i x(t))} \quad (1.4)$$

であることから、 ν_μ の時間発展は

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle e^{-i(E_1 t - p_1 x(t))} + \cos \theta |\nu_2\rangle e^{-i(E_2 t - p_2 x(t))} \quad (1.5)$$

と表せる。ここで超相対論的なニュートリノを考えると、 $m_i \ll p_i$ であることから、 L を飛行距離として $t \simeq L$, $p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \simeq E_i - m_i^2/2E_i$ と近似できる。

$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ とすると、式 (1.5) は

$$\begin{aligned} |\nu_\mu(t)\rangle &= -\sin\theta|\nu_1\rangle e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} + \cos\theta|\nu_2\rangle e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} \\ &= e^{-i\frac{m_1^2}{2E}}(-\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle e^{-i\frac{\Delta m^2 L}{2E}}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

となる。よって、 $t = 0$ で生成された ν_μ が距離 L だけ飛行したときに ν_e に変化する振動確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ は

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

となる。ここまで $\hbar = 1, c = 1$ の自然単位系で考えていたが、SI 単位系で考えると式 (1.7) は

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 c^4}{4E\hbar c} L\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L [\text{eV}^2] [\text{km}]}{E [\text{MeV}]}\right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

となる。式 (1.8) から、仮にニュートリノが質量を持たないとすると、振動確率が時間によらず一定になり、ニュートリノ振動は起こらないことが分かる。逆にニュートリノ振動が観測されれば、ニュートリノは質量を持つことになる。1998 年にニュートリノ振動が実証され、標準理論を覆してニュートリノが質量を持つことが示された [3]。

1.3 ニュートリノ原子核反応

数 100 MeV 以上のニュートリノを観測する実験では、ニュートリノが物質中の原子核と反応して出てくるレプトンとハドロンを検出する。ニュートリノと原子核の反応は大きく分けて荷電カレント (Charged Current: CC) 反応と中性カレント (Neutral Current: NC) 反応に分けられる。荷電カレント反応では (反) ニュートリノが W^\pm ボゾン、中性カレント反応では Z ボゾンを介して反応する。J-PARC で生成される 0.5~0.7 GeV のニュートリノと原子核との主な反応の断面積を図 1.2 に示す。

CCQE (Charged Current Quasi Elastic) 反応

1 GeV 付近の低エネルギーニュートリノにおける最も主要な反応である。式 (1.9) のように、ニュートリノ (ないし反ニュートリノ) と原子核中の中性子 (陽子) が反

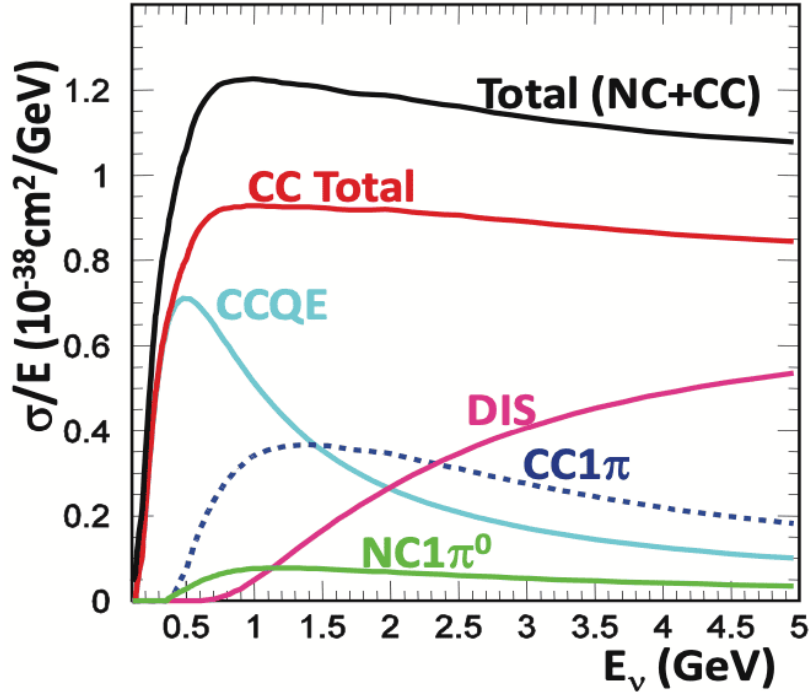


図 1.2: ニュートリノの反応断面積 [4]

応し、ニュートリノのフレーバーに対応する荷電レプトンと陽子 (中性子) が放出される。



1.4, 1.5 節で説明する加速器ニュートリノ振動実験では、この CCQE をニュートリノ反応のシグナルとして採用している。加速器生成ニュートリノの場合、加速器と検出器の位置関係から到来方向がわかることを利用し、CCQE 反応で生成された荷電レプトンの散乱角を θ_l 、エネルギーを E_l としてニュートリノのエネルギーを以下のように求めることができる。

$$E = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (1.10)$$

ここで、 m_N は核子の質量、 m_l, p_l はそれぞれレプトンの質量と運動量を表す。

CC (Charged Current) 1π 反応

1 GeV 程度のニュートリノにおける 2 番目に主要な反応である。式 (1.11) のように、ニュートリノが核子を励起させて共鳴状態を作り、共鳴核子から単一 π 粒子が生成される。CCQE のバックグラウンドであり、 π 粒子を検出できず誤って CCQE

として再構成することでニュートリノエネルギーを低く見積もってしまうことの原因となる。

$$\nu_l + N \longrightarrow l^- + N^* \longrightarrow l^- + N' + \pi^+ \quad (1.11)$$

NC (Neutral Current)1 π 反応

式 (1.12) のようにニュートリノが原子核と反応し、ニュートリノと中性パイ中間子が放出される。

$$\nu_l + N \longrightarrow \nu_l + N' + \pi^0 \quad (1.12)$$

π_0 は 2 つの γ に崩壊するが、このうち 1 つの γ しか検出されなかった場合に ν_e CCQE 反応と見分けがつかなくなる。これは、電子もガンマ線も検出器内で電磁シャワーを起こすためである。

2p2h (2particle2hole) 反応

ニュートリノが原子核内で強く対相関している二つの核子と相互作用し、核子 2 つが弾き出される反応である。終状態で出現する核子の運動量は数百 MeV と低く、プラスチックシンチレータ内における飛跡はせいぜい数 cm であるために検出が難しい。CCQE と誤認すると低くエネルギーを再構成してしまう。

1.4 加速器ニュートリノ振動実験

1.4.1 概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験とは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) で作られたニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にある水チェレンコフ型検出器であるスーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ実験である。図 1.3 は T2K 実験の概略図である。ニュートリノを 295 km 飛ばすことによりニュートリノ振動を観測することができ、振動パラメータ ($\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$) の精密測定やニュートリノの CP 対称性の破れの解明を目的としている。

1.4.2 ニュートリノビーム

J-PARC では図 1.4 の 3 種類の加速器で加速された陽子によってニュートリノビームが作られる。まず LINAC (LINear Accelerator) で負水素イオン H^- が 400 MeV まで加速され陽子に変換される。その後、RCS (Rapid Cycling Syn-

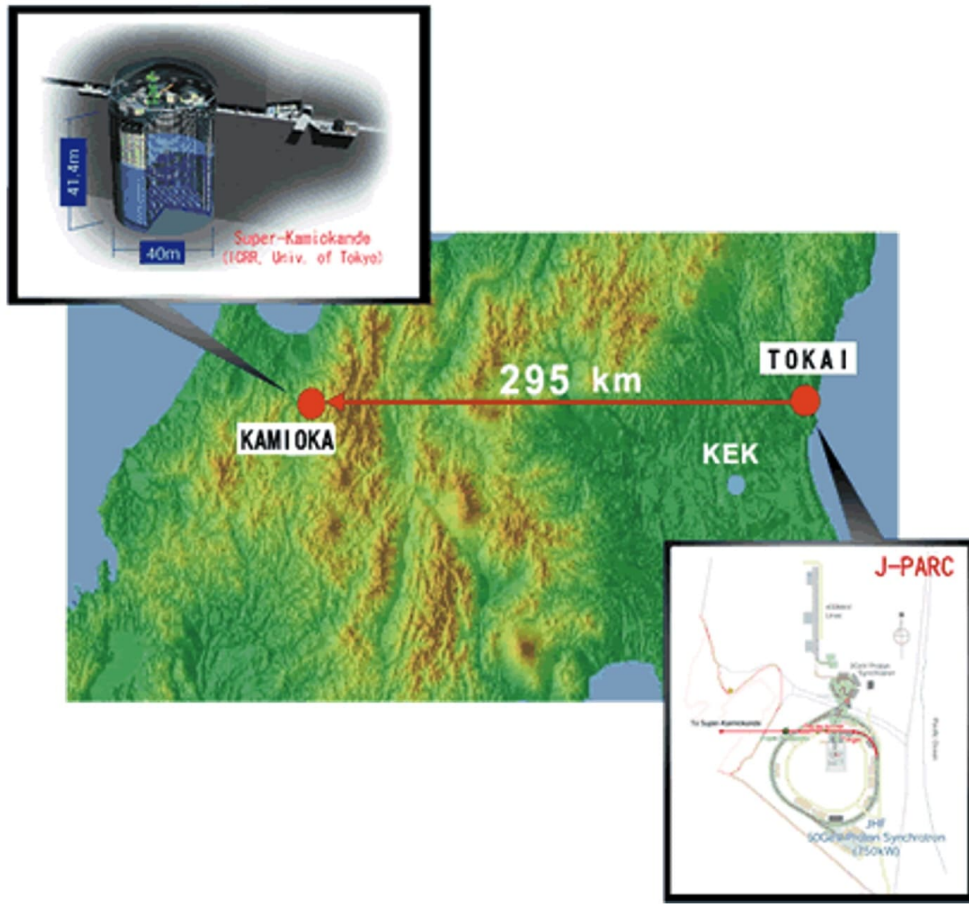


図 1.3: T2K 実験概略図 [5]

chrotron) で 3 GeV に、MR (Main Ring) で 30 GeV まで加速される。加速された陽子の塊はスピルと呼ばれる。各スピルは $4.1 \mu\text{s}$ の時間幅をもち、 58 ns の時間幅を持ったバンチが 583 ns の間隔で 8 つ連なっている。グラファイト標的に入射した陽子はハドロン反応により π 粒子を主としたハドロンを生成する。そのうち荷電 π 粒子は 3 台の電磁ホーンによって収束ないし分散され、標的から下流 94 m に渡るディケイボリュームで式 (1.13) のように崩壊する。



電磁ホーンの極性を切り替えることで π^\pm 粒子のどちらを収束させるか、すなわちニュートリノと反ニュートリノのどちらを取り出すかを選択することができる。



図 1.4: J-PARC 加速器 [6]

1.4.3 前置検出器

グラファイト標的から 280 m 下流の場所にはニュートリノ前置検出器群が配置されており、生成直後のニュートリノの情報を得る役割がある。ここでは、特に ND280 について説明する。

ND280

ND280 は、後述する後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) と同じくビーム中心軸から 2.5° ずれた方向に配置された Off-axis 検出器である。振動前のニュートリノのフラックスやニュートリノ反応を測定する役割を担っており、2023 年に系統誤差を抑制することを目的としてアップグレードが実施された。ND280 のトラック部分の概念図を図 1.5 に示す。これらのトラックが、電磁カロリメータやミュオンレンジカウンタと共に磁石の中に設置され、ND280 を構成している。

FGD (Fine Grained Detector) は 3 つの TPC (Time Projection Chamber) の間に挟まれる形で設置されているシンチレータを用いたニュートリノの標的兼飛跡検出器である。FGD は断面が $184 \text{ cm} \times 0.96 \text{ cm}$ の棒状のシンチレータを水平方向と鉛直方向にそれぞれ 192 本並べた XY モジュールで構成されている。TPC は磁場

によって曲げられたニュートリノ反応で生成された荷電粒子の飛跡を検出し、その曲率を測定することで荷電粒子の電荷や運動量を測定する。

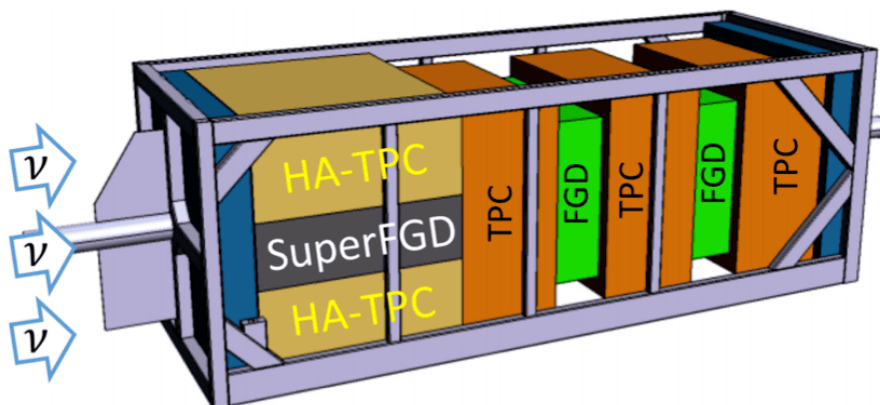


図 1.5: ND280 のトラック部分の概念図; これらの検出器が磁石の中に設置されている.[7]

2023 年 12 月よりシンチレータキューブを使用した検出器 Super-FGD (Super Fine Grained Detector) が導入された。Super-FGD は $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のシンチレータキューブ約 200 万個と波長変換ファイバーから成る標的兼飛跡検出器である。約 200 万個のシンチレータキューブの 3 方向の各面に空いた穴には波長変換ファイバーが通されており、ファイバーの端に設置された MPPC が信号を読み出す。Super-FGD の利点は、低エネルギーの粒子に対する感度が高いことと、3 方向の読み出しを行うことにより 4π 方向のアクセプタンスを実現したことである。Super-FGD の詳細については、第 2 章で述べる。

HA(High Angle)-TPC は Super-FGD の上下にそれぞれ 1 台ずつ設置された TPC であり、大角度に散乱した荷電粒子の飛跡を検出する。また、図 1.5 には描かれていないが、Super-FGD と HA-TPC の周囲を 6 面にわたって覆うように飛行時間測定器 TOF(Time of Flight) が設置されており、通過した荷電粒子の位置と時間を記録する機能を持つ。

1.4.4 後置検出器: スーパーカミオカンデ (SK)

J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町には、T2K 実験の後置検出器スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande: SK) が配置されている。SK は直径 39.3 m、高さ 41.4 m のタンクの中に 50 kt の純水 (現在はガドリニウム水) が満たされた世界最大の水チェレンコフ検出器である。SK の外観を図 1.6 の左側に示す。ニュートリノと標的物質の反応で生成された荷電粒子が水中での光の速さより速く運動すると、チェレンコフ光と呼ばれる光が円錐状に放射される。この光をタ

ンク壁面に設置された約 13,000 本（内壁 11,129 本、外壁 1,885 本）の光電子増倍管 (PMT) によって観測することで、荷電粒子のエネルギー、進行方向、位置、粒子の種類を測定することができる。図 1.6 の右側は SK での ν_e -like と ν_μ -like のイベントディスプレイである。荷電粒子が電子の場合、電磁シャワーを起こすことで観測されるチェレンコフ光のリングはぼやけるが、ミューオンの場合はまっすぐ直進するため綺麗なリングが観測される。この違いを用いて、荷電粒子を生成したニュートリノの種類を 99% の精度行うことが可能である。

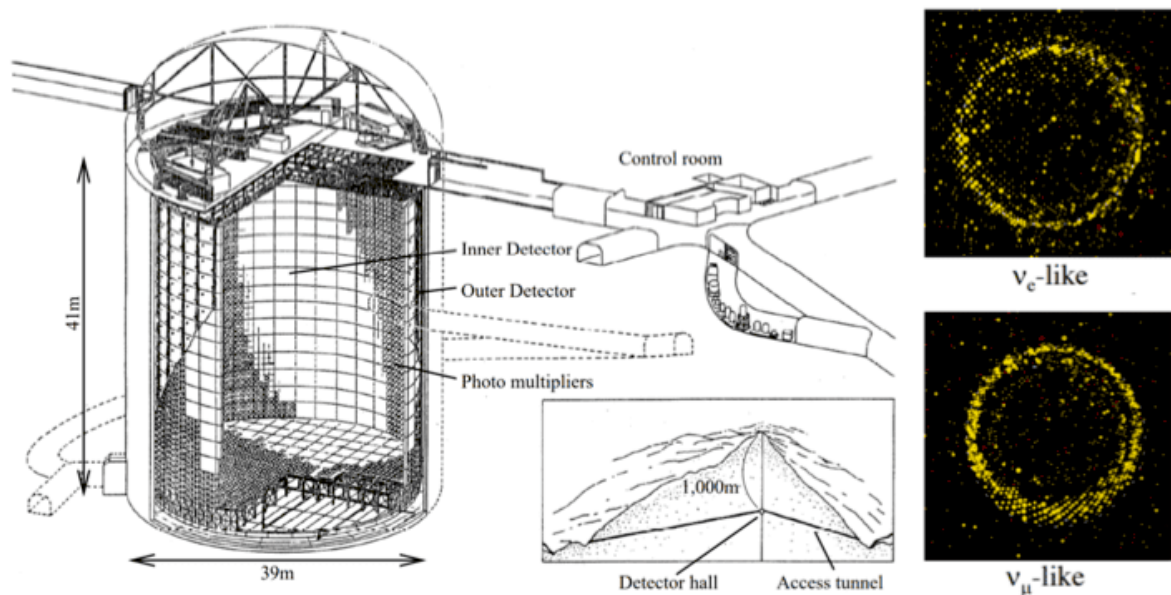


図 1.6: スーパーカミオカンデの外観 [8] とシミュレーションで生成された ν_e -like, ν_μ -like 事象のイベントディスプレイの例 [9]

1.5 ハイパーカミオカンデ実験

T2K 実験では後置検出器として SK を用いているが、2027 年にはハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande: HK) 検出器が建設され、これを後置検出器として用いる長基線ニュートリノ振動実験として加速器 HK 実験が始動する。本節では、HK 実験の概要とこれを後置検出器として用いる加速器 HK 実験、そしてその前置検出器について述べる。

HK 実験の主な目的は、大気・太陽・加速器ニュートリノの振動の観測によるニュートリノ振動パラメータの精密測定および CP 対称性の破れの測定、大統一理論の予言する陽子崩壊の探索、超新星ニュートリノの観測による超新星爆発の機構の解明の 3 つにまとめられる。本論文において HK 実験というときには、一つ目に

含まれる J-PARC からの加速器ニュートリノを用いた長基線ニュートリノ振動実験を指す。

1.5.1 ハイパーカミオカンデ (HK)

HK 検出器は岐阜県飛騨市神岡町に建設中の大型水チェレンコフ検出器である。図 1.7 は HK 検出器の概念図である。直径 68 m、高さ 71 m の円筒形水タンクは光学的に分離された 2 層構造をとり、それぞれ内水槽と外水槽と呼ばれる。内水槽の内壁には直径 50 cm の光電子増倍管 (PMT) 2 万本に加え、multi-PMT と呼ばれる複数の小型 PMT が集合したモジュール数千本が設置される予定である。また、外向きにも 7200 本の 10 cm 径 PMT を設置予定であり、外部から入射するミューオンなどの荷電粒子を VETO する役割を果たす。有効体積は、SK の約 8 倍となる 18.8 万 t である。

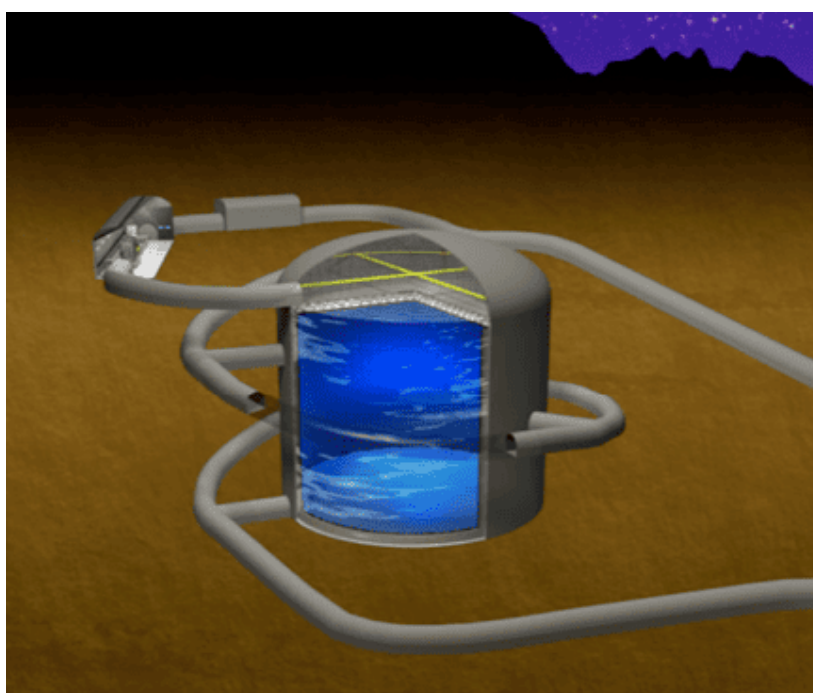


図 1.7: ハイパーカミオカンデの概念図 [10]

1.5.2 IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector)

1.4.3 節で述べた前置検出器群に加えて、ニュートリノ標的の約 1 km 下流に水チェレンコフ検出器 IWCD が設置される。IWCD は円筒形の空洞と、直径 8 m、高さ 6 m の円筒形の密閉された水槽で構成されており、水位を変化させることで水槽の高さを調整できる仕組みが特徴である。この仕組みにより、水槽を上下させるこ

とで異なるニュートリノ・フラックスにおける反応を測定することが可能である。IWCD の概要図を図 1.8 に示す。

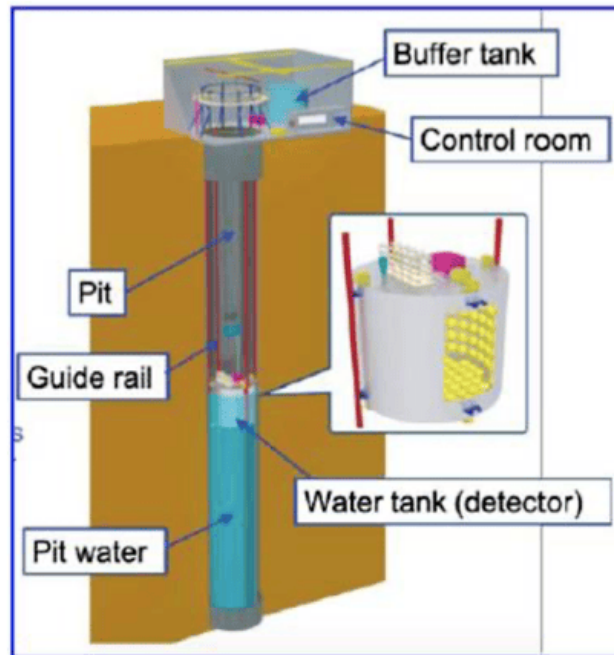


図 1.8: IWCD の構造; 水槽を上下させることでビーム中心軸からの距離を調整できる [11].

1.5.3 ND280 の更なるアップグレード

IWCD では、磁場がないために反ニュートリノ・ビーム測定時におけるニュートリノ反応の混入を測定するなど ND280 の測定は引き続き重要である。ND280 の位置は固定されていてニュートリノのエネルギー分布も固定された測定ではあるが、IWCD ではできない陽子などの飛跡を観測できて反応をより詳細に調べることができる。さらに、大統計を用いた誤差削減と電子ニュートリノ反応の観測のための体積拡張が重要となる。現在検討されているのは、FGD の代わりに Super-FGD のように短い飛跡が見え、 e/γ 分離、 4π アクセプタンス、中性子観測など高い性能を持つ検出器で置き換えることである。本研究では、Super-FGD の体積拡張に向けた新たな検出器製作方法を開発した。次章では、Super-FGD の概要について述べる。

第 2 章

Super-FGD

2.1 検出器の概要

Super-FGD (Super Fine Grained Detector) は、T2K 実験の前置検出器アップグレードで導入されたニュートリノ反応の標的と飛跡検出を兼ね備えた新型の検出器である。図 2.1 に示すように、FGD は層ごとに垂直に並んだ棒状のシンチレータバーで構成されているのに対し、Super-FGD は立方体状に積み重ねられた構造である。

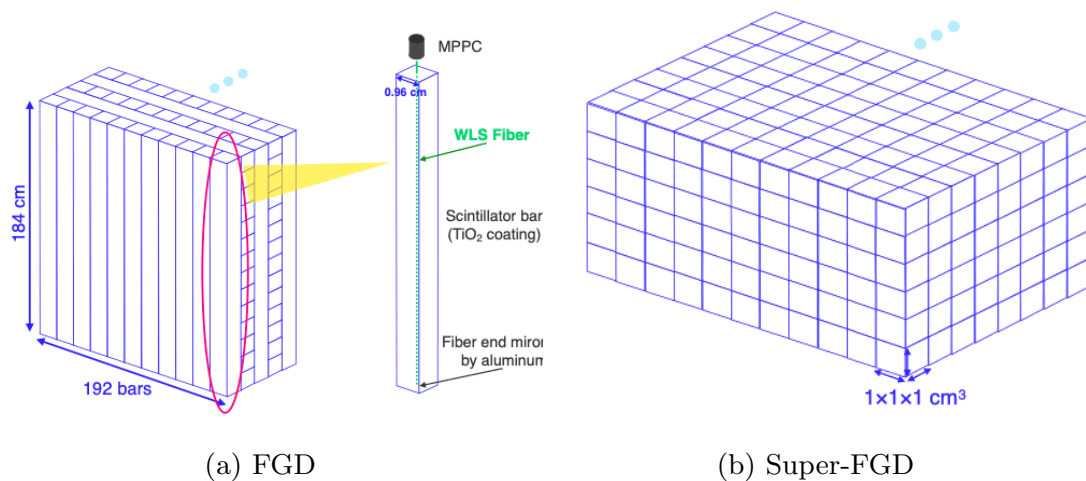


図 2.1: FGD と Super-FGD の概念図 [13]

Super-FGD の全体およびシンチレータ単体の概念図を図 2.2 に示す。1cm 立方のシンチレータキューブを x 軸方向に 192 個、 y 軸方向に 56 個、ビーム軸である z 方向に 182 個（合計 1,956,864 個）積載した構造である。それぞれのキューブには 3 方向に穴が開けられ、積載したキューブを貫くように波長変換ファイバーが設置されている。それぞれの波長変換ファイバーの一方の端には MPPC (Multi Pixel

Photon Counter) 光検出器が設置されている。荷電粒子がシンチレータキューブを通過するとシンチレーション光が発生し、3方向に通された波長変換ファイバーからMPPCに信号が送られる。この仕組みによって、荷電粒子の飛跡を3方向の射影として高精度で測定することができる。

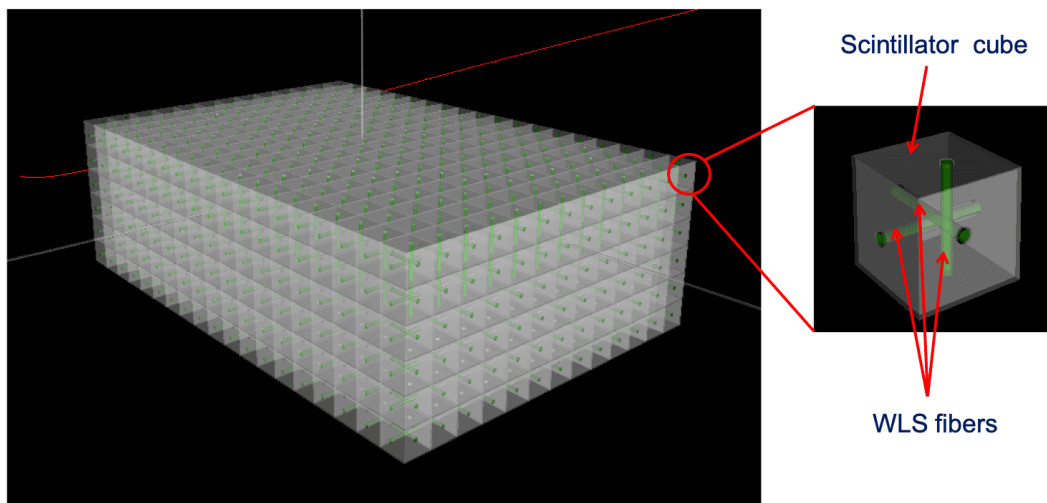


図 2.2: Super-FGD の概念図 [7]

2.2 各構成要素

2.2.1 シンチレータキューブ

Super-FGDで使用されているシンチレータキューブは、ロシアのUNIPLAST社で製造されたものを使用している。キューブの主な原料はポリスチレンであり、1次発光剤として1.5%のパラテルフェニル (para-terphenyl; PTP)、2次発光剤として0.01%のPOPOPが配合されている。POPOPの発光波長領域はおよそ380～430 nmである。キューブはケミカルエッチングで形成された白色の反射層に覆われており、隣接キューブへの光漏れを削減するとともにキューブ内での光量吸収率を向上させる役割を持つ。反射層形成後に、ドリルによって3方向にファイバーを通すための穴が開けられる。この穴の直径は1.5 mmで、穴の中心は図2.3のように端から3 mmの位置にあり、3方向から挿入されたファイバーが干渉しないようになっている。

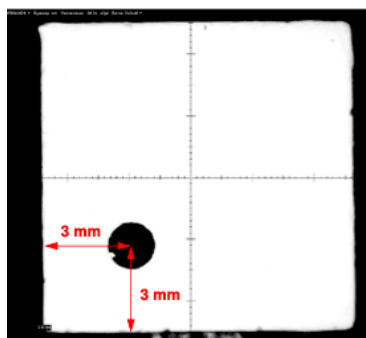


図 2.3: シンチレータキューブの穴開け位置イメージ図 [7]

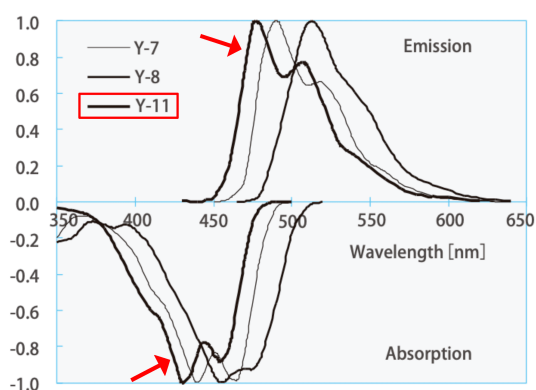


図 2.4: Y-11 波長変換ファイバーの吸収・発光スペクトル [22]

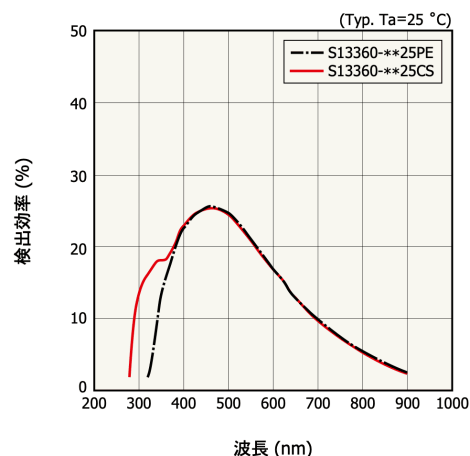


図 2.5: MPPC 検出効率の波長依存性

2.2.2 波長変換ファイバー

Super-FGD で使用される波長変換ファイバーは、クラレ社製の Y-11 (200) (Round, Multi cladding type)[22] で直径 1 mm ϕ の丸ファイバーである。この波長変換ファイバーで吸収される波長スペクトラムを図 2.4 に示す。図 2.4 から、波長変換ファイバーの吸収波長範囲が POPOP の発光波長の 380~450 nm と一致していることが分かる。また、波長変換ファイバーの発光波長は、図 2.5 に示す MPPC が感度を保つ波長領域と適合している。

2.2.3 MPPC

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) は、ガイガーモードで動作する複数の APD (Avalanche PhotoDiode) ピクセルを並列接続した構造をもつ SiPM (Silicon Photomultiplier) デバイスの 1 種である。MPPC の動作原理について簡単に説明する [12]。MPPC の各ピクセルには APD が搭載されており、逆バイアス電圧が印加

させることで APD の PN 接合部に形成された空乏層が形成され、ここに光子が入射すると電子-正孔対が生成される。逆バイアス電圧が十分に高い場合、このキャリアが加速される過程で結晶格子に衝突し、新たな電子-正孔対を次々と生み出し、キャリアは指数関数的に増加する。このアバランシェ増幅により、微弱な光信号を増幅して電気信号に変換することが可能である。ガイガーモードでは、光子が 1 つでも入射すれば一定の出力信号が得られ、出力は光子が入射したピクセル数に比例する。この特性により、MPPC は高い精度で光子カウントが可能である。

Super-FGD で使用されている MPPC の型番は S13360-1325PE である。S13360-1325PE の写真を図 2.6 に示す。感度を持つ領域は、直径 1 mm ϕ の波長変換ファイバーを覆うのには十分な 1.3 mm \times 1.3 mm である。8 \times 8 個の MPPC が 10.30 mm 間隔で表面実装された基盤が Super-FGD に取り付けられている。この基盤はフラットケーブルを介して信号読み出し回路と接続されており、MPPC への電圧供給や信号の読み出しを行っている。

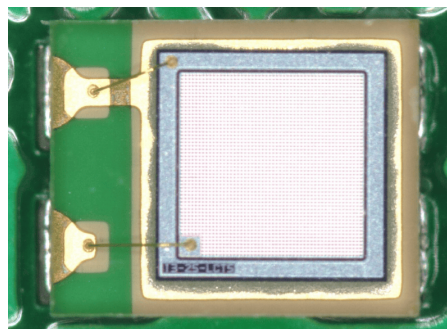


図 2.6: MPPC S13360-1325PE の写真 [7]

2.2.4 信号読み出し回路

MPPC からの信号読み出し回路には Weeroc 社製の ASIC である CITIROC を用いている。CITIROC は 1 チップで 32 チャンネルをカバーし、MPPC から入力された信号が一定の閾値を超えているタイミングと、一定時間内の最大波高値を出力する。この出力信号は、回路ボード上の後段に接続された ADC や FPGA で処理される。

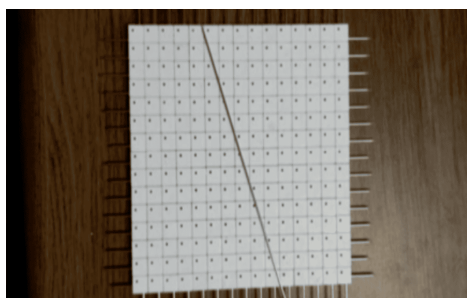
2.3 キューブ組み立て方法

キューブの組み立て作業では、約 200 万個の独立したシンチレーターキューブを組み上げ、それぞれに対して 3 方向に波長変換ファイバーを通す工程が行われた。これは非常に手間と時間がかかる作業であった。

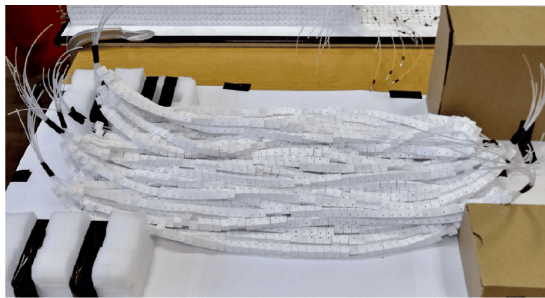
組み立ての手順は大きく3段階に分かれる。(1) 不良キューブを取り除き、(2) 波長変換ファイバーの代わりに釣り糸を用いて全てのキューブを組み立て、(3) 釣り糸を波長変換ファイバーに入れ替えることで完成した。

(1) の不良キューブの取り除きでは、金属棒をキューブに通して図2.7(a)のようにキューブを整列させ、キューブの穴を問題なく通過することと、外径にガタがないことを確認した。検査に問題があった場合は原因となるキューブを交換した。

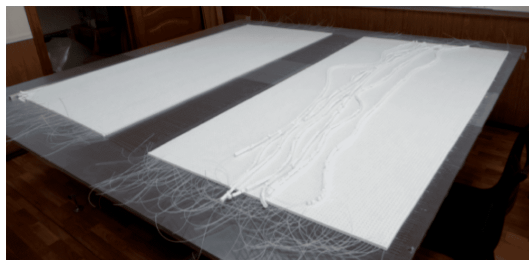
(2) の釣り糸を用いてキューブを組み立てる手順では、(1) で検査をパスしたキューブを釣り糸に通し、図2.7(b)のように1列にしたものを作成した。これを並べて平面状にし、直交方向にも釣り糸を通すことで、図2.7(c)のように1レイヤーの製作が完了する。こうして製作されたレイヤーは、キューブ制作元のロシアから日本に送られ、残りの組み立てはJ-PARC内で行われた。レイヤーを図2.7(d)のように重ね、この際には鉛直方向に金属棒が通された。全てのシートが重ねあがってから、最後に(3)の釣り糸を波長変換ファイバーと入れ替える作業が行われた。



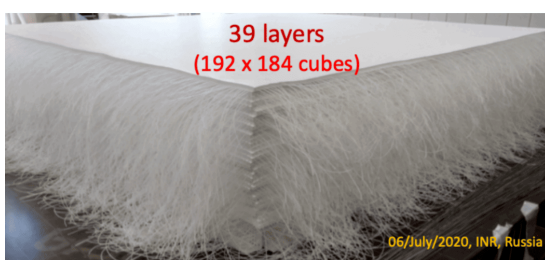
(a) 金属棒を通してシンチレータキューブのチェックを行う.[14]



(b) 釣り糸を通してシンチレータキューブを1列に並べる. [15]



(c) 釣り糸を通して1レイヤーのシンチレータキューブを製作する.[14]



(d) シート状のシンチレータキューブを積層する. [16]

図 2.7: 釣り糸を用いた方法でキューブを組み立てる手順

2.4 期待される性能

Super-FGD は ND280 のアップグレードとして 2023 年 12 月より導入された。2.1 節で述べたように、FGD が棒状のシンチレータバーで構成されているのに対して Super-FGD は立方体のキューブを積み重ねた構造である。それにより、同じ飛跡において再構成に必要な x, y, z の射影座標値をより多く取得することができる。

図 2.8 は、T2K 実験におけるニュートリノ相互作用事象のイベントディスプレイである。左側は検出器内での粒子の飛跡を、右側は粒子のエネルギーロス分布を表す。アップグレード後の ND280 検出器では、このようにニュートリノ事象が再構成される。

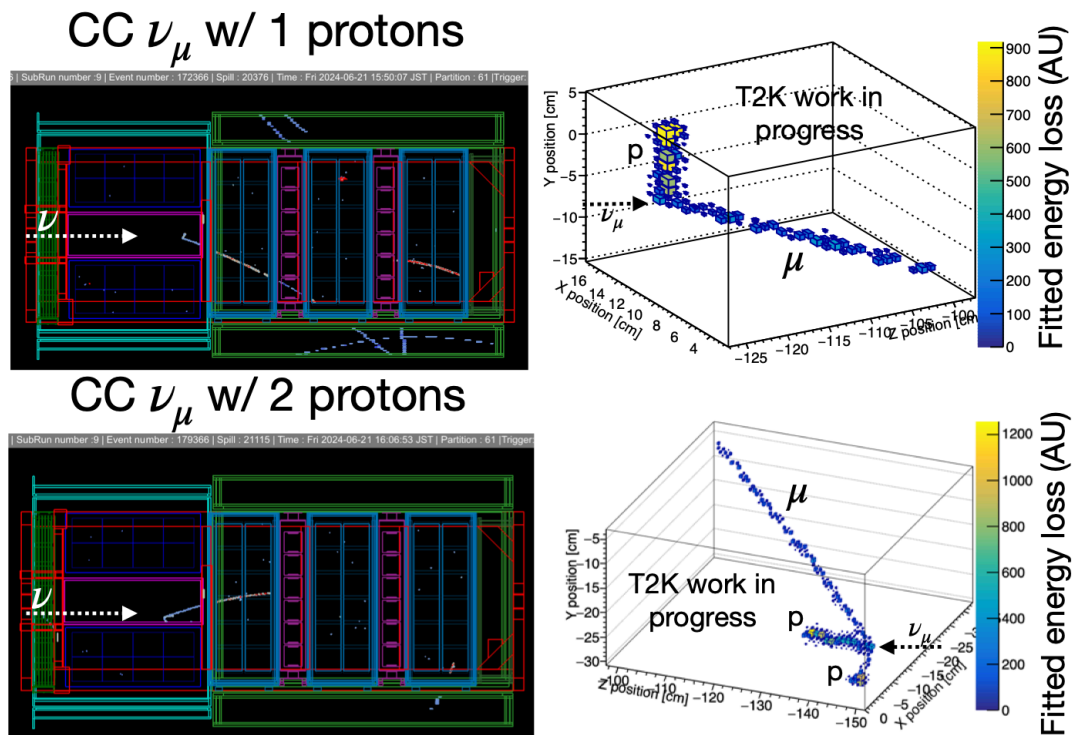


図 2.8: T2K 実験におけるニュートリノ相互作用事象のイベントディスプレイ; 上段はミューニュートリノの荷電カレント (CC) 相互作用によって生成された 1 個の陽子と μ 粒子の事象, 下段は 2 個の陽子と μ 粒子が生成された事象を示している. [17]

アップグレードで期待される性能は主に 2 つ挙げられる。1 つは大角度で散乱した粒子の検出効率の向上である。図 2.9 はアップグレードの後の ν_μ の CCQE イベントの検出効率のシミュレーション結果である。横軸はニュートリノ反応で生じるミューオンの角度である。点線で示したアップグレード前の ND280、と比べて、実線で示したアップグレードされた ND280 では大角度 ($0.4 < \cos \theta < 0.4$) で散乱

するミューオンの検出効率が向上しており、 4π の検出効率をもつ SK により近づく。これは FGD バーと並行に近い方向の飛跡におけるキューブ分割の効果に加え、High-Angle TPC の導入が貢献している。

2 つ目は低運動量の荷電粒子の検出効率の向上である。図 2.10 は $1.9 \times 1.9 \times 0.6$ m の Super-FGD のような構造の検出器と、それと同じ大きさで FGD のような構造の検出器における陽子の運動量に対する検出効率である。400 MeV/c の運動量領域では FGD タイプの検出器ではこのような飛跡の短い陽子をほとんど検出できないのに対し、Super-FGD ではキューブ構造によりおおよそ半分の長さの飛跡でも再構成が可能になるため一定の検出効率を持っており、全体的に検出効率が高いことが読み取れる。この運動量領域は特にニュートリノ反応における反跳陽子が多く放出される領域であるため、ニュートリノ反応について得られる情報が大幅に増えることになる。

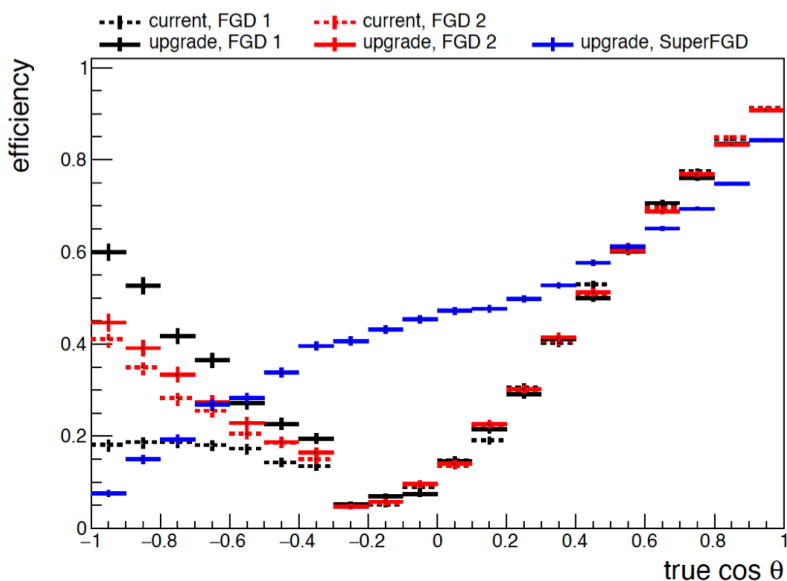


図 2.9: アップグレードの後の ND280 の ν_μ の CCQE イベントの検出効率のシミュレーション結果.; 点線が現行の ND280, 実線がアップグレードされた ND280 を示す。色はニュートリノ反応がどの検出器内で起きたかを示している。FGD1 は上流側, FGD2 は下流側の FGD を指す [18].

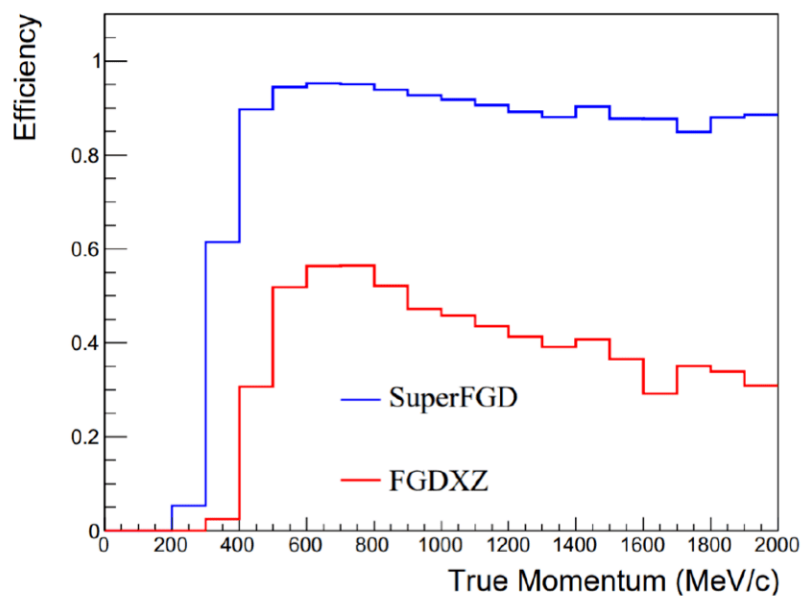


図 2.10: 陽子の運動量ごとの検出効率のシミュレーションによる予測; 青:Super-FGD と同様の構造の検出器, 赤:FGD と同様の構造の検出器, 検出器サイズ $1.9 \times 1.9 \times 0.6$ m の場合 [19].

2.5 本研究の目的

1.5.3 節で述べたように、HK 実験に向けた前置検出器のアップグレード候補の一案として、Super-FGD の体積拡張が挙げられる。Super-FGD は、約 200 万個の固体プラスチックシンチレータキューブそれぞれに波長変換ファイバーが通るための穴を三方向に開け、すべてのキューブを釣り糸を用いて組み立て、約 6 万本の波長変換ファイバーを通すことで作成している。これを手作業で行うには膨大な手間と時間がかかるため、組み立て工数削減による作業の効率化は必須である。そこで、本研究では工数削減を目的として、注型成形プラスチックシンチレータという材料を使った検出器の作製を試みた。

第3章

注型成形プラスチックシンチレータを使った飛跡検出器

3.1 注型成形プラスチックシンチレータ

本実験で使用した注型成形プラスチックシンチレータの材料は、Eljen Technology の EJ-290[21] である。EJ-290 は部分的に重合されたプラスチックシンチレータであり、触媒および溶媒を混ぜ合わせ鋳型に流し込み、水槽で 47 °C で 14 日間、80 °C で 8 時間温めることで硬化し、固体プラスチックシンチレータを作成できる。最終的な物理特性は、青色発光プラスチックシンチレータ EJ-212 と非常によく似ている [21]。

型として使用できる素材は限られており、本研究ではポリアミド、テフロン樹脂、フッ素樹脂、ポリエチレンナフタレート、ステンレス、アルミニウムを使用した。また、樹脂の重合は不活性ガス雰囲気中で行うことで最も良い結果を得ることができ [21]。本研究では Ar ガスを使用した。

本研究では、3D プリンタで 1 cm × 1 cm ごとに分けられた高さ 1 cm のポリアミドの型を作製し、鋳型として使用した。図 3.1 のように、型にはファイバーが通る穴を開けておき、波長変換ファイバーを 2 方向に通した 1 レイヤー分を作製することを目標としている。

最終的には図 3.2 のように高さを加えた複数のブロックに分割して作製し、それらを組み合わせることで大きな検出器を作成することを想定している。垂直方向に波長変換ファイバーが通る穴は、ドリルで開けることを想定している。

本研究では、注型成形プラスチックシンチレータを固める前に波長変換ファイバーを入れておく方法、注型成形プラスチックシンチレータが固まった後に波長変換ファイバーを入れる方法の二通りで検出器の作成を試みた。それぞれの製作方法について述べる。

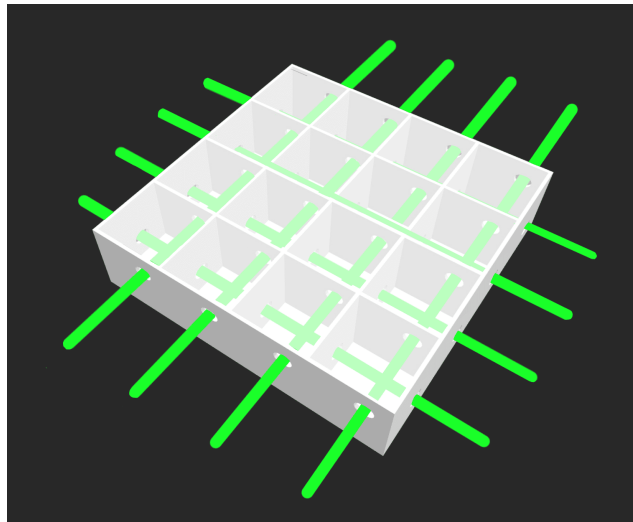


図 3.1: 検出器ジオメトリの例; キューブ径:10mm 型の厚み:0.5mm

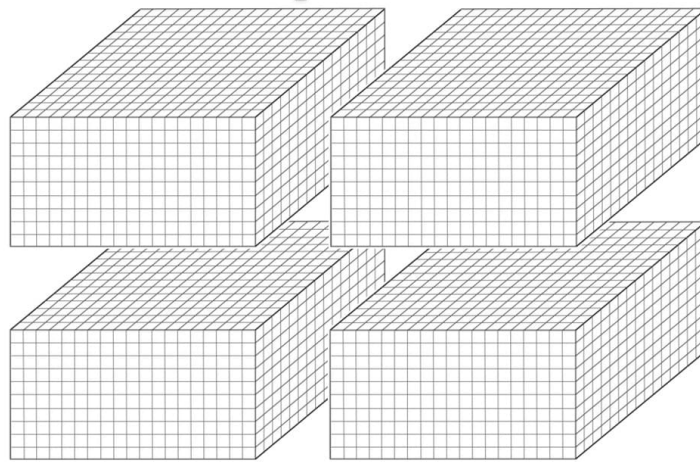


図 3.2: 大型検出器作成のイメージ図

3.1.1 波長変換ファイバーを先に入れる方法

波長変換ファイバーを先に入れる方法では、用意したポリアミドの型にあらかじめ波長変換ファイバーを通しておき、注型成形プラスチックシンチレータを流し込む。すなわち、中にファイバーが通った状態でシンチレータを固める方法である。この方法がうまくいけば、キューブの組み立て作業や後からファイバーを通す作業を短縮できるため大幅な工数削減につながるという利点がある。また、シンチレータとファイバーの間に空気の層ができなければ、ファイバーへの光伝搬性能を向上できる可能性がある。

3.1.2 波長変換ファイバーを後から入れる方法

波長変換ファイバーを後から入れる方法では、ファイバーの代わりにチューブなどの棒状のものをあらかじめ入れておき、注型成形プラスチックシンチレータを流し込んで固める。その後にチューブを引き抜き、ファイバーと入れ替える方法である。概念図を図 3.3 に示す。この方法ではチューブを引き抜きファイバーを差し込む作業工程は必要だが、キューブを一つ一つ組み立てる作業を短縮することができる。

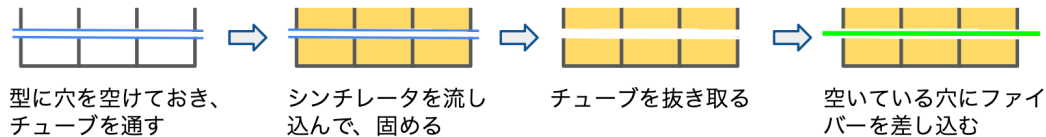


図 3.3: 波長変換ファイバーを後から入れる方法の概念図

3.2 光信号の伝達

3.2.1 波長変換ファイバー

EJ-290 の発光スペクトルを図 3.4 に、使用する波長変換ファイバー Y-11(200) の吸収波長スペクトルを図 3.5 に示す。EJ-290 の最大発光波長は 423 nm であり、波長変換ファイバーの吸収波長とよく一致している。

本研究では、Super-FGD と同様に波長変換ファイバーの一方の端に MPPC を設置して光を検出する。

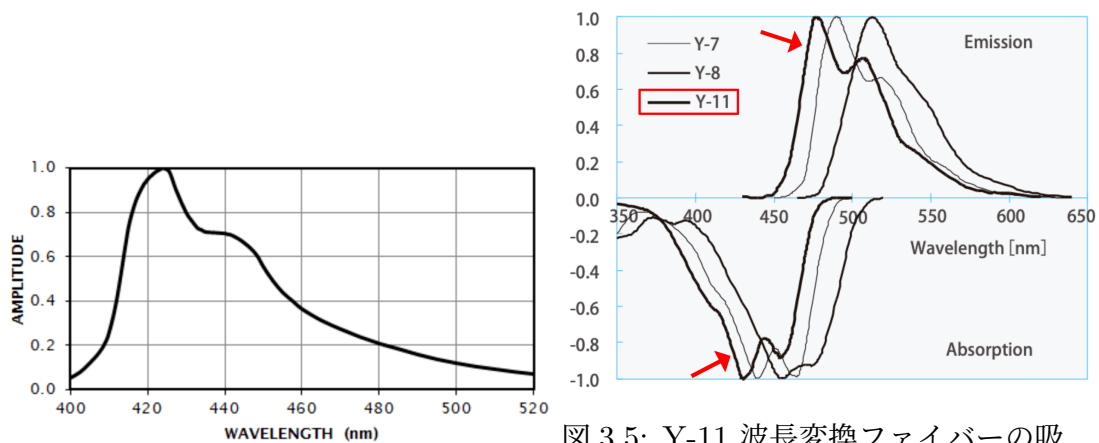


図 3.4: EJ-290 の発光スペクトル [21]

図 3.5: Y-11 波長変換ファイバーの吸収・発光スペクトル [22]

3.2.2 シンチレータキューブの反射材としての役割

2.2.1 節で述べたように、Super-FGD で使用しているプラスチックシンチレータキューブは図 3.6 のようにケミカルエッチングで形成された白色の反射層に覆われており、隣接するキューブへの光漏れを防ぎつつ、キューブ内での光量吸収率を向上させている。

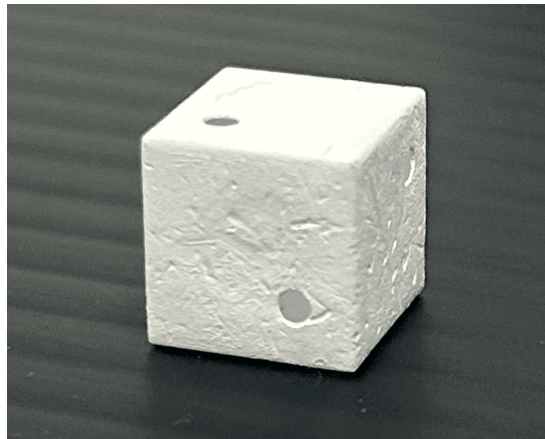


図 3.6: Super-FGD で使用されているプラスチックシンチレータキューブ

注型成形プラスチックシンチレータを使用した検出器の製作では、1 cm × 1 cm ごとに区分けした白色の格子状の型に同様の役割を期待する。また、低コスト実現のために型は 3D プリンターで造形することとした。したがって、EJ-290 で型として使用できる素材であること、反射材の役割を期待できること、かつ 3D プリンターで造形できることの三つの条件が要求される。これら三つの条件を満たす素材の候補として、Ultrafuse PA Natural Filament-1.75mm ナチュラル色 [20] を使用した。これは PA6 と PA66 の複合フィラメントであり、ナチュラルな透明度のあるカラーである。後節の図 5.1 にその写真を載せる。不透明な白色のフィラメントで使用できるものがあれば反射材として良い役割が期待できたが、条件を満たす白色のフィラメントは当時販売されているものでは見つからなかった。したがって、本研究ではナチュラル色の PA のフィラメントで格子状の型を作成することとした。なお、このフィラメントで作成した型では反射層の役割として不十分な可能性が高いため、隣接キューブ間の光漏れの影響が懸念される。

第4章

波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング

本章では波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティング方法の開発について述べる。

4.1 波長変換ファイバーを先に入れる方法における課題

波長変換ファイバーを先に入れる方法では、前章で説明した通り、波長変換ファイバーをポリアミドの型に通した状態で注型成形プラスチックシンチレータを流し込んで固める。

まず初めに、この方法で作製できるか確かめるために、一立法センチメートルの大きさの型を使って検証を行った。図4.1(a)のように、型の二面に穴を開けておき、そこに波長変換ファイバーを一本通した。このままでは穴からシンチレータが流出してしまうため、穴の部分は水中エポキシで塞いだ状態で、注型成形プラスチックシンチレータを流し込み、硬化させた。こうして作製したものを、図4.1(b)に示す。結果、無色であったシンチレータが黄色味がかっており、波長変換ファイバーはプラスチックシンチレータに完全に溶け込んでしまったように見える。なお、外に飛び出していた部分のファイバーは脆くなっていたためか、シンチレータが固まった後に少しの衝撃で接合面で折れてしまった。そのため、ファイバーを先に入れる方法では、波長変換ファイバーを注型成形プラスチックシンチレータから保護する必要があると判断した。その方法として、波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティングに着目した。

本実験では、サイトップ [24] というコーティング剤を使用した。サイトップは特殊な構造を有するフッ素樹脂であり、透明度が高く、多くの溶剤に対し不溶である。専用のフッ素系溶媒に溶解し、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の薄膜コーティングが可能である。サイ

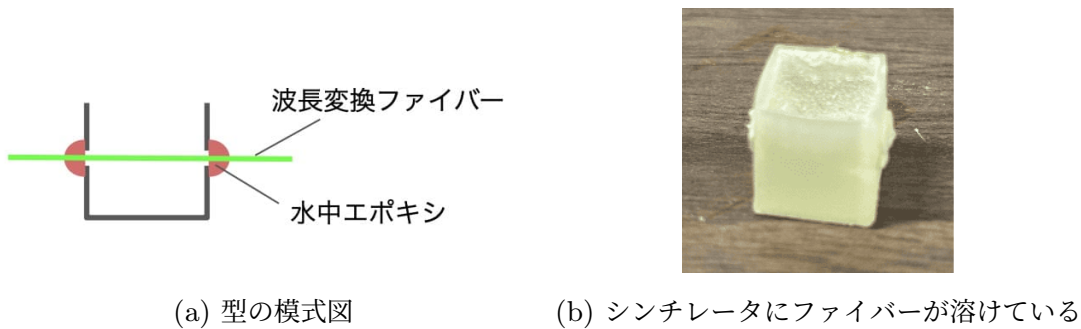


図 4.1: 1 キューブにファイバーを挿してシンチレータを固めた時の様子

トップでコーティングした波長変換ファイバーが注型成形プラスチックシンチレータ EJ-290 に対して不溶であること、コーティングが波長変換ファイバーの性能に悪影響を与えないことの二つの条件が揃えば、サイトップがコーティング剤として使える可能性がある。

4.2 サイトップを用いたファイバーのフッ素薄膜コーティング

4.2.1 コーティング方法の確立

本実験で使用するフッ素薄膜コーティング剤は、サイトップの CTX-109AE[24] である。また、溶媒として CT-SOLV100E を使用する。サイトップは専用フッ素溶媒に溶けるため、自在にコーティングが行える。本実験で使用する CTX-109AE は、末端官能基が $-COOH$ であり、シランカップリング剤併用で金属およびガラスに、また専用プライマー併用でプラスチックにコーティングが可能である。

本実験では、濃度 9% である CTX-109AE を溶媒で 1/2 倍希釈し、濃度を 4.5% として手動でディップコーティングを行なった。図 4.2 に、CTX-100AE シリーズのディップコート膜厚曲線を示す。参考値であるが、濃度 4.5% で 1 回ディップコーティングを行なった際の膜厚は、引き上げ速度を 60 mm/分としたときおよそ $0.3 \mu\text{m}$ であると推定される。また、膜厚を厚くするための複数回塗りが可能である。この場合、下地のサイトップを塗布した後、完全には乾燥させない状態 (70~120 °C で 1~10 分間) でその上に塗ればよい。

次に、サイトップのキュア条件を図 4.3 に示す。本実験で使用する CTX-109AE は、基材との密着性を高めるためにファイナルベークの工程が必要であり、80~200 °C で 30~60 分乾燥させる。

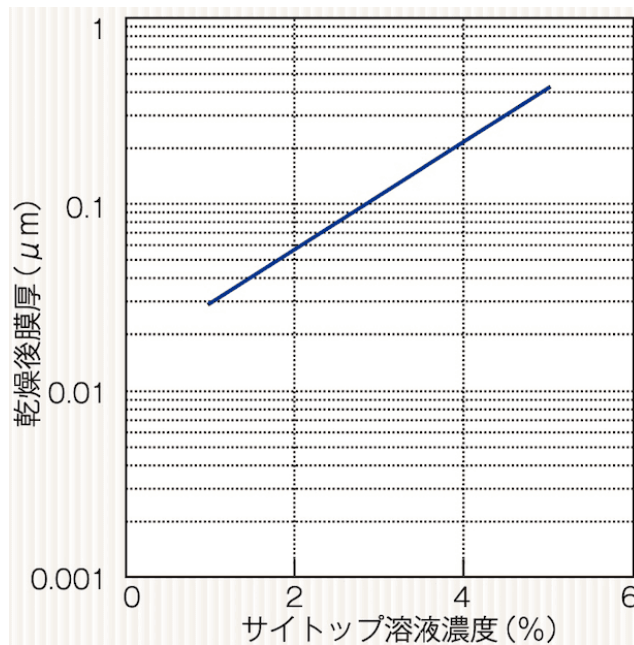


図 4.2: サイトップ CTX-100AE ディップコート膜厚曲線 [25]

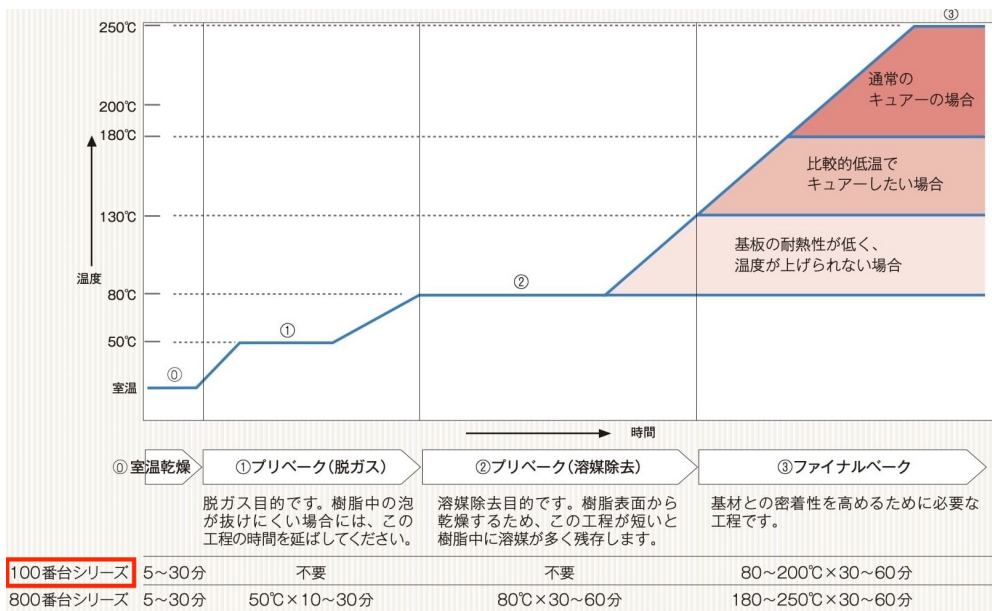


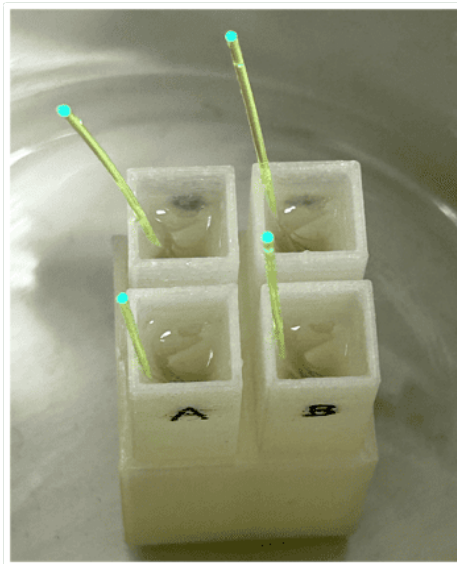
図 4.3: サイトップキュア条件 [26]

4.2.2 簡易セットアップによるサイトップコーティングの有用性の確認

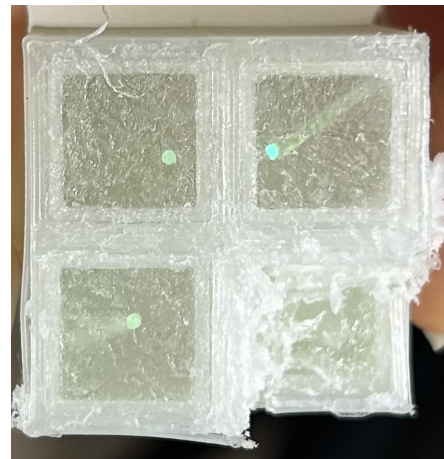
まず初めに、サイトップを用いたフッ素薄膜コーティングを施すことで、ファイバーをシンチレータから守ることができるのか確かめる必要がある。そのために、

長さ 10 cm 程度に切断した波長変換ファイバーを 4 本用意し、そのうち 3 本にコーティング回数 3, 6, 9 回の重ね塗りを施した。それら 3 本とコーティングしていないファイバーとの 4 本を、固まる前のシンチレータ EJ-290 に差し込んだ。この様子を図 4.4(a) に示す。その後常温でシンチレータが固まるまで放置して様子を見た。

この実験では、シンチレータを白い容器に入れており中の様子が見えなかったため、シンチレータが固まった後に容器の断面を切断してファイバーが残っているか確かめた。切断した断面の様子を図 4.4(b) に示す。ファイバーのコーティング回数は右下が 0 回（コーティングなし）、左下が 3 回、左上が 6 回、右上が 9 回である。コーティングをしていないファイバーはシンチレータを掘っても中にファイバーは見つからず、溶けていることが分かった。一方、コーティングをしたファイバーはシンチレータの中に残っており、コーティングの回数が多いほど端面の光が強く見えた。したがって、コーティングによってファイバーが溶けることを防ぐことができ、またコーティングの重ね塗りの回数によってファイバーを保護する性能に違いがあると考察した。加温しない簡易的な実験ではあるが、サイトップコーティングにはファイバーをある程度保護する効果があることが確認できた。



(a) シンチレータを固める前の様子



(b) シンチレータが固まった後の断面図；
右下：コーティングなし．ファイバーが溶けている
左下から時計回りに：コーティング回数 3, 6, 9 回．コーティング回数が多いファイバーがより明るい

図 4.4: 4 つの型にシンチレータを流し込みコーティングしたファイバーを挿した様子

4.3 コーティングしたファイバーの光量測定

フッ素薄膜コーティングをしたことでファイバーが損傷するなど、光学的性能に影響を及ぼす可能性がある。本節では波長変換ファイバーの片端から入射した LED 光をフォトダイオードで測定し、コーティング前後の光量の変化を測定し光量損失率を求めた。

実際に使用する波長変換ファイバーは直径 1 mmφ の円形であるのに対し、コーティングした波長変換ファイバーの光量測定試験においてのみ、1 mm 角のクリアファイバーを使用した。使用したファイバーはクラレ社の CLEAR-PSJ 1.0 mm SQ である。これらのファイバーは形状こそ違うものの、構成要素は同じであるため、角形ファイバーで光量変化に問題がなければ、円形ファイバーでも問題ないだろうという仮定のもとで実験を行った。

4.3.1 ファイバー内の光の伝搬

図 4.5 に示すように、ファイバーにはコア層と、それを覆うようにクラッド層がある。ファイバーを伝搬する光にはコアを伝わる成分であるコア光と、クラッドを伝わる成分であるクラッド光がある。コア光はファイバーのコアとクラッドの全反射によって伝搬し、長い減衰長をもつ。一方、クラッド光はクラッドと空気的全反射によって伝搬し、クラッド表面の傷や汚れなどが原因でより早く減衰する。

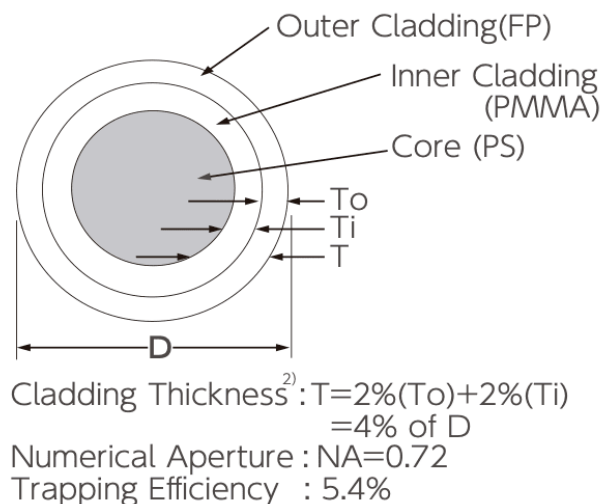


図 4.5: マルチクラッドプラスチックファイバーの材質と構造 [22]

波長変換ファイバー内の光減衰は、短い減衰長と長い減衰長をもつことを想定すると、次式のように表される [23]。

$$L = L_0 \cdot \left[\alpha \cdot \exp\left(-\frac{x}{A_L}\right) + (1 - \alpha) \cdot \exp\left(-\frac{x}{A_S}\right) \right] \quad (4.1)$$

ここで、 L_0 と L は入射光量と伝搬後の光量、 x は光を当てた位置から MPPC までの距離、 A_L 及び A_S はそれぞれ長い減衰長と短い減衰長、 α は長い減衰要素の割合である。レーザーを使用して測定された Y-11 の減衰長におけるパラメータの値 [23] を表 4.1 に示す。

表 4.1: パラメータの値 [23]

α	A_L (cm)	A_S (cm)
0.74 ± 0.02	494 ± 37	28 ± 6

短い減衰長は 28 ± 6 cm、長い減衰長は 494 ± 37 cm である。長い減衰長を持つ光はコア光であり、一方短い減衰長をもつ光はクラッド光と考えられる。今回の評価では、30cm の長さの Y-11 ファイバーを使用した。30 cm の長さにおける減衰を式に当てはめて計算すると、コア光がおよそ $99.7 \pm 0.1\%$ 、クラッド光が $0.3 \pm 0.5\%$ である。測定で使用したクリアファイバーの場合、コア光の減衰長はさらに長くなる。従って、長さ 30 cm のファイバーを使えば、コア光の光量を調べるのには十分な長さであると判断した。

4.3.2 光量測定のセットアップ

本研究で製作する検出器で実装予定の波長変換ファイバー Y-11(200) MSJ 1.00 mm の発光波長のピークは 475 nm 程度である (図 3.5)。光量測定試験では光源として波長 $\lambda = 470 \pm 5$ nm の青色 LED を DC 電源で駆動した。光検出器としては、浜松ホトニクス製のフォトダイオード S1336-5BQ を使用した [27]。このフォトダイオードの感度特性を図 4.6 に示す。 $\lambda = 190 \sim 1100$ nm と紫外から近赤外まで広い波長感度が特徴である。

フォトダイオードの読み出しには Graphtec 社のデータロガー GL100 と 4 ch 電圧/温度端子モジュール GS-4VT を使用した。測定はサンプリングレート 2 Hz で行った。

ファイバー端が LED やフォトダイオードから離れている場合や方向が逸れている場合、検出光量の低下やばらつきにより測定の精度が低下する。これを防ぐために、ファイバーの向きを毎回同じように揃えて光源や光検出器と接触させる必要が

■ 分光感度特性

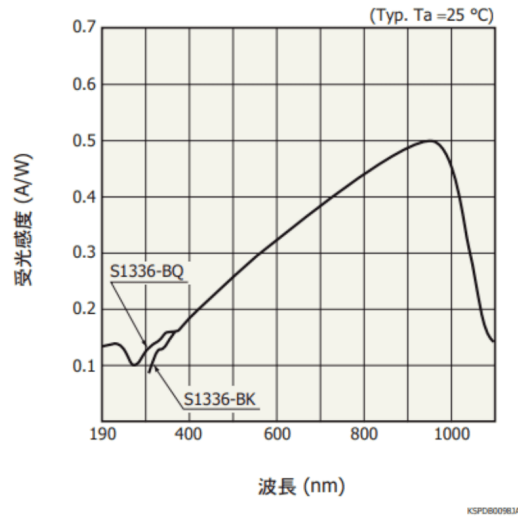


図 4.6: フォトダイオード S1336-5BQ の感度特性 [27]

ある。そこで、文献 [28] のセットアップと同様に、3D プリンタで造形した簡易なコネクタを使用した。測定時には、ファイバーが軽く固定されるようにシリコンゴムチューブをファイバーの両端に取り付けてコネクタに挿入した。ゴムチューブの位置をファイバー端に近づけすぎると光量が落ちたため、図 4.7 のようにファイバー端から 3 mm の位置に統一した。また、ゴムチューブの長さは 20 mm で統一した。角形ファイバーではゴムチューブに切れ目を入れて使用した。

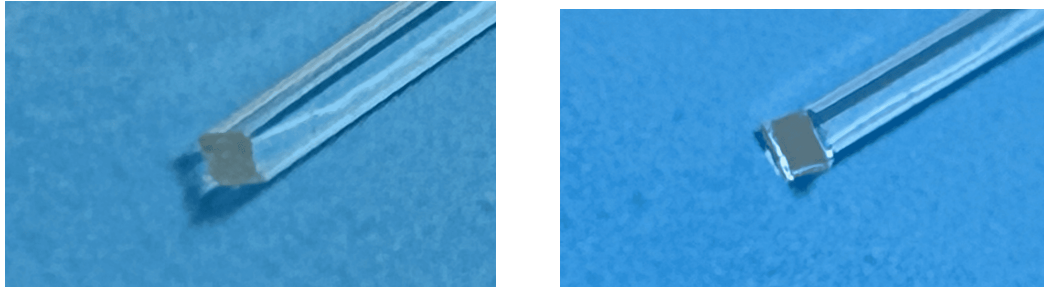


図 4.7: ファイバーに固定用のゴムチューブを取り付けた様子; ゴムチューブの長さ 20 mm, ファイバー端から 3 mm の位置に設置した。

ニッパーなどで切断したファイバーの端面は平坦ではないため、ファイバーを伝搬してきた光が散乱することで検出光量が減少する。そのため、検出効率を高く保つためにファイバー端面を平坦化する処理を行った。本研究では比較的簡易な端面処理方法としてはんだごてによる加熱処理を採用した [28]。これは熱した鉄板に押し当てることによりファイバー端面を平坦化する方法である。本研究ではホーザン

社の温調式はんだごて HS-51 とはんだごてピット HS-51K02 を使用し、150 °C に熱したピットを 5 秒間押し当てた。

図 4.8 に、端面処理前後のファイバー端面の様子を示す。処理前はファイバーから散乱した光が目に入るためファイバー断面が明るく見えるが、処理後は散乱光が減少し暗く見える。フォトダイオードの検出光量は、ニッパーで切りっぱなしにした時と比べて平均して 1.2 倍程度改善した。



(a) 端面処理前のファイバー端

(b) 端面処理後のファイバー端

図 4.8: ホットプレート法による端面処理の前後変化

4.3.3 ファイバーの着脱の再現性

LED とフォトダイオードに対して、長さ 30 cm のファイバーの着脱と測定を繰り返し、測定値のばらつきからコネクタとファイバーのカップリング再現性を調べた。着脱と測定を 5 回行った結果を図 4.9 に示す。誤差率 σ_r (標準偏差と平均値の比) は 1.21% であり、十分な再現精度が得られた。

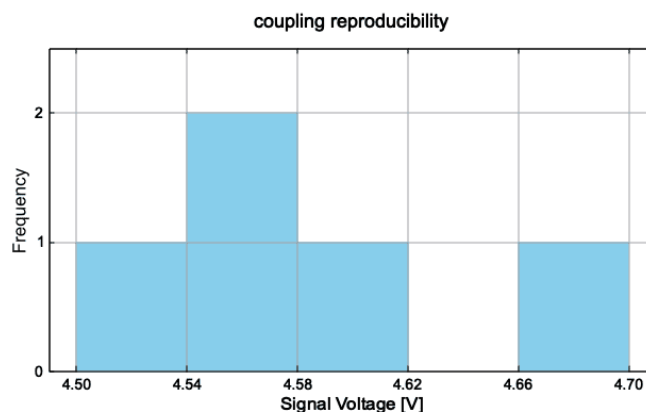


図 4.9: ファイバーの着脱の再現性; 5 回測定を行った際のフォトダイオードの出力分布.

4.3.4 ファイバーの端面処理の再現性

フッ素薄膜コーティングの評価では、波長変換ファイバーにコーティングを施した後にファイバーの端面処理を行い測定し、コーティング前の測定と比較する。そのため、ファイバーの端面処理の再現性を確認することが必要である。そこで、30 cm の長さのファイバーを用意し、端を 2 mm 程度ニッパーで切断し、端面処理を施し測定することを繰り返すことで、再現性の確認を行なった。LED および PD 側でそれぞれ 5 回の切断と測定を行った。

測定結果を図 4.10 に示す。誤差率 σ_r (標準偏差と平均値の比) は LED 側で 2.88%、PD 側で 0.0284% であった。双方とも十分な再現精度ではあるものの、LED 側でより端面処理による影響が大きいことが分かった。

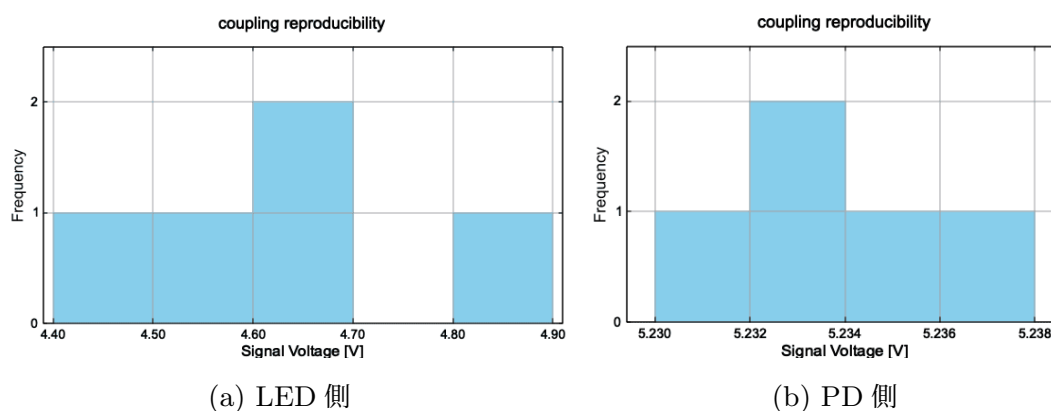


図 4.10: ファイバー端面処理の再現性; 5 回測定を行った際のフォトダイオードの出力分布.

4.3.5 光量測定のためのコーティングの条件

長さ 30 cm のファイバー 10 本について、それぞれコーティング回数を変えてファイバー端 10 cm に CYTOP でフッ素薄膜コーティングを施した。手動で行ったため正確性に欠けるが、引き上げ速度は 60 mm/min とした。コーティング回数は、0 (コーティングなし)、1, 2, 3, 4 回の 5 通りをそれぞれ 2 本ずつ用意した。測定結果は 4.3.7 節で述べる。

4.3.6 光量損失率の定義と誤差

ファイバーにコーティングを施す前の測定値を A、コーティング後の測定値を B とする。このとき、コーティング前後の光量差 $A - B$ をコーティング前の光量 A で規格化した量を光量損失率として定義する。

$$\text{光量損失率} = \frac{A - B}{A} = 1 - \frac{B}{A} \quad (4.2)$$

また、光量の測定値 A, B の誤差 σ_A, σ_B はそれぞれの測定値に 4.3.3 節で述べた再現性の誤差率 σ_r を乗じた値とした。このとき、光量損失率の誤差は、誤差の伝搬則から以下のようになる。

$$\sigma_{\frac{B}{A}} = \frac{B}{A} \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \quad (4.3)$$

$\sigma_A = A\sigma_r$, $\sigma_B = B\sigma_r$ であるから、式 (4.3) は

$$\sigma_{\frac{B}{A}} = \sqrt{2} \frac{B}{A} \sigma_r \quad (4.4)$$

となる。

4.3.7 光量損失率の測定

4.3.4 節の通り用意したそれぞれのファイバーについて、コーティングをした部分を LED 側、PD 側にした場合のそれぞれについて測定した。

横軸をコーティング回数、縦軸を相対光量 B/A とした結果を図 4.11 に示す。また、それぞれのコーティング回数における光量損失率 (%) の平均を表 4.2 に示す。コーティング回数に関わらず、光量損失率は 0.7% 以下であり、誤差の範囲内で無損失であるといえる。

また、コーティングを施したファイバーの端面をはんだごて処理しても変化は見られなかった。

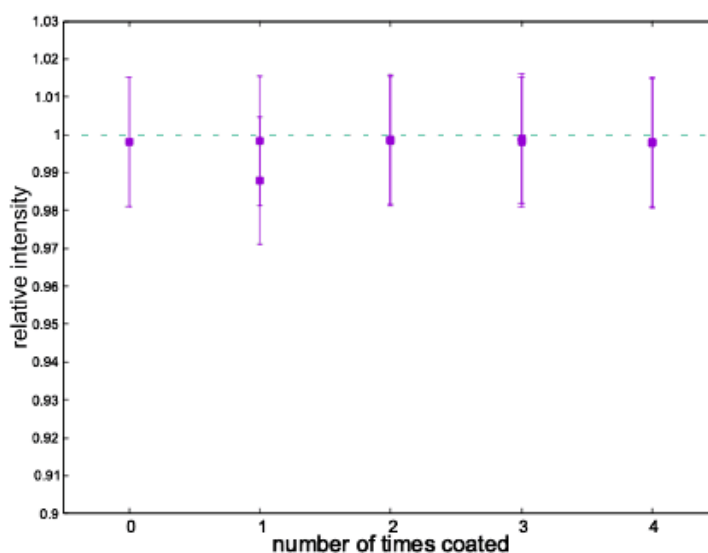


図 4.11: コーティング前後の相対光量

表 4.2: コーティング前後の光量損失率 (%); バックグラウンド差引前

コーティング回数	光量損失率 (%)
0	0.2 ± 1.8
1	0.7 ± 1.8
2	0.1 ± 1.8
3	0.2 ± 1.8
4	0.3 ± 1.8

4.3.8 バックグラウンド測定

前節で行なった実験で、LED を消灯した時のバックグラウンド電圧の測定をしていなかったため、後日バックグラウンド測定を行った。使用した 10 本のファイバーについて、光量測定前後における LED 消灯時の電圧値を測定した。電圧値および電流値、部屋の明るさなどの条件は変えていないものの、以前の測定から日数が空いたため同じ条件で測定することは不可能であった。そのため、LED 点灯時の測定値が前回の結果と大きく変わらないことを確認した上で、全ての測定バックグラウンド値の中で最大値が 0.036 V、最小値 0.022 V であることが確認できた。従って、前節の実験におけるバックグラウンド値が 0.022~0.036 V であることを想定した上で、光量損失率を再計算した。結果を表 4.3 に示す。バックグラウンドを考慮しても、平均の光量損失率は 0.7% 以下であり、誤差の範囲内で損失はないといえる。

表 4.3: コーティング前後の光量損失率 (%); バックグラウンド差引後

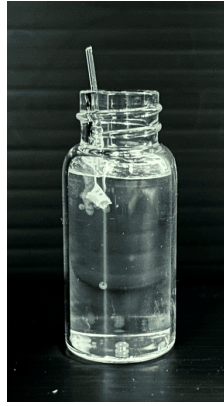
コーティング回数	光量損失率 (%)
0	0.2 ± 1.8
1	0.7 ± 1.8
2	0.1 ± 1.8
3	0.1 ± 1.8
4	0.2 ± 1.8

4.4 コーティングの効果

次に、EJ-290 の推奨硬化条件でのサイトップの効果について評価を行った。

4.4.1 キュアを行わなかった場合のコーティングの効果

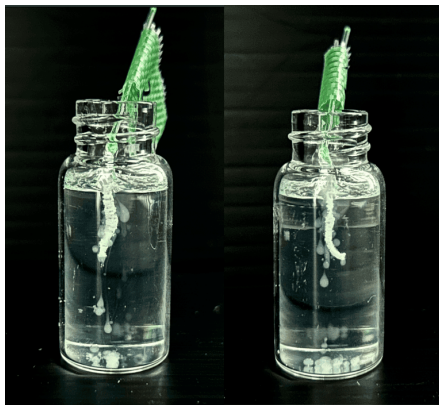
長さ約 18 cm の波長変換ファイバーを 10 本用意し、先端部分約 6 cm にサイトップコーティングそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5 回行った。コーティング間は、空気中で約 20 分間の自然乾燥をした。コーティング終了後は、空気中で 24 時間以上自然乾燥をした後、ファイバーのコーティングを施した部分の先端約 5 cm を切り取り EJ-290 を流し込んでおいたスクリー管瓶に切り取り口が浸からないように差し込み、水槽で温めて EJ-290 を硬化させた。その結果、温め始めて半日～3 日程度でファイバーがシンチレータの中で折れたように曲がり始め、次第に溶け出していった。コーティング回数によって溶け始める早さに違いは見られなかった。この時の様子を図 4.12 に示す。コーティング回数に関わらず、全てのファイバーがダメージを受けたことが確認された。コーティングをしていないファイバーは大部分が溶けていた。コーティングをしたファイバーは完全には溶けて無くなってはいないものの、表面がただれて中身が漏れ出しているように見えた。これは、サイトップによるコーティングの隙間からシンチレータが入り込み、内部を溶かしたためだと考えられる。溶け出した部分は球状になり、瓶の底面に落ちていったように見える。また、シンチレータが固まる際にファイバーが上に押し出され、特に図 4.12(f) の右の図では大部分が外に押し出されている。



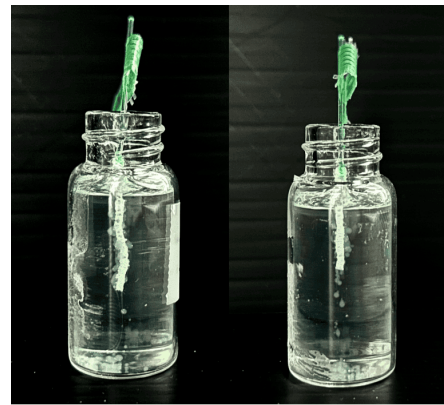
(a) コーティングなし; ファイバーの大部分が溶けてなくなっている



(b) コーティング 1 回;
右側: ファイバーは上に飛び出た部分も脆くなっており、弱い衝撃で折れてしまった。



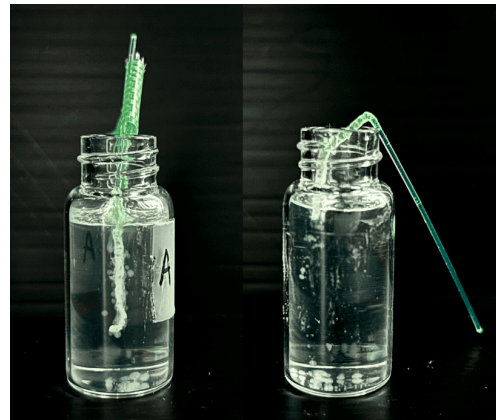
(c) コーティング 2 回



(d) コーティング 3 回



(e) コーティング 4 回



(f) コーティング 5 回; 右側: ファイバーが大きく上に押し出され、瓶の淵で折れて曲がった。

図 4.12: サイトップコーティング後、キュアをしていないファイバーを EJ-290 に入れて温めた時の様子

4.4.2 キュアを行った場合のコーティングの効果

4.4.1 節では、4.2 節で示した複数回塗りの条件と異なる温度・時間で乾燥させていることに加え、ファイナルベークのキュアを行っていなかった。本節では、サイトップメーカーの推奨条件に従って乾燥処理・キュアを施し、再度コーティング性能の評価を行った。ファイバーが溶ける条件を確かめるために、条件を変えて比較した。本実験で行ったコーティング間の乾燥およびキュアの条件を表 4.4 に示す。コーティング回数は 3 回に統一し、コーティング間の乾燥条件、キュア条件を網

表 4.4: サイトップコーティングの条件一覧

コーティング回数	コーティング間の乾燥条件	キュア条件	
		温度	時間
3回	70°C 10分	80°C	30分
	室温 30分		60分

羅する全ての条件における実験を行った。

その結果を図 4.13 に示す。4.4.1 節と同様、条件によらず全てのファイバーが一部溶けてしまった。また、コーティング条件によって、ファイバーが溶け始めるまでの時間や溶ける速さに目に見えるほどの違いは見られなかった。したがって、ファイバーにキュアを行っても、うまくコーティングができていなかったと考えられる。



(a) ファイナルバークキュア:80 °C 30 分;
コーティング間の乾燥条件: 左室温 30 分,
右 70 °C 10 分



(b) ファイナルバークキュア:80 °C 60 分;
コーティング間の乾燥条件: 左室温 30 分,
右 70 °C 10 分

図 4.13: コーティング後、キュアーを行ったファイバーを EJ-290 に入れて温めた時の様子

4.4.3 重ね塗りを十分に行った場合のコーティングの効果

ここまでの結果から、コーティングの隙間からシンチレータが侵食し、ファイバーの内部を溶かしているように見えた。そこで、コーティングの重ね塗り回数を十分に増やしコーティング膜を厚くすることで、ファイバーを守ることを検討した。

コーティング回数を大幅に増やし、3日間に分けて計21回行った。コーティング間の乾燥条件は70℃で10分、キュア条件は80℃で60分とした。1日目はコーティングを5回、2日目は6回、3日目は10回行った。また、各日コーティング後にキュアを行った。しかしシンチレータを温め始めてからおよそ8時間後に様子を見ると、すでにファイバーが溶け始めていることが確認できた。この時の様子を図4.14に示す。



図4.14: サイトップコーティングを21回したファイバーをシンチレータに入れて約8時間温めた時の様子

コーティング回数が少ない場合と比べるとファイバーの形状が残っているようにも見えるが、ファイバーの溶け方にある程度の差があることや、今回の実験ではシンチレータを温め始めて8時間で取り出したことから、コーティング回数を増やしたことによりダメージが軽減したとは言い切れない。いずれにせよ、本実験の範囲ではコーティング回数を増やしてもファイバーは溶けてしまうという結果となった。以下、その原因を考察する。

4.2.1節で述べたように、本実験で使用したCX-109AEは専用プライマー併用でプラスチックにコーティングが可能なコーティング剤であり、前処理をすることで基材との密着性が高まる。本研究におけるコーティング試験では、前処理によりファ

イバーが傷つくことを懸念し、前処理を行わずにコーティングを行った。その結果、基材とコーティング剤の密着度が低くシンチレータが侵食する隙間があったのではないかと考えられる。

適切な前処理を施すことでフッ素薄膜コーティングを実現できる可能性もあるが、波長変換ファイバーを後から入れる方法での検出器の作成で良い結果を得られたため、本研究では後者の方法で検出器を作成した。その方法について、次章で述べる。

第 5 章

注型成形プラスチックシンチレータの製作

5.1 製作方法

3 章で述べたとおり、本研究では 3D プリンタで図 5.1 のような 1 cm × 1 cm ごとに区分けされた高さ 1 cm のポリアミド (PA) の型を作製し、鋳型兼反射材の役割を期待して使用した。4 章で波長変換ファイバーにフッ素薄膜コーティングをすることが難しいことがわかったため、3.1.4 節で述べた波長変換ファイバーを後から入れる方法で検出器を作成した。型にはファイバーが通る穴を開けておき、波長変換ファイバーが通る位置にダミーとなるチューブなどを通しておく。この型に EJ-290 を流し込み、恒温水槽で 47 °C で 14 日間、80 °C で 8 時間温めて硬化させる。シンチレータが固まったことを確認した後に、ダミーチューブを引き抜き波長変換ファイバーと入れ替える。

本実験では、シンチレータを温めるための恒温水槽として、ヤマト科学社の容量 3.7L のウォーターバス [29] と三商社の 4L ウォーターバス [30] を使用した。写真を図 5.2 と図 5.3 に示す。識別のために、それぞれウォーターバス 1, ウォーターバス 2 と呼ぶこととする。

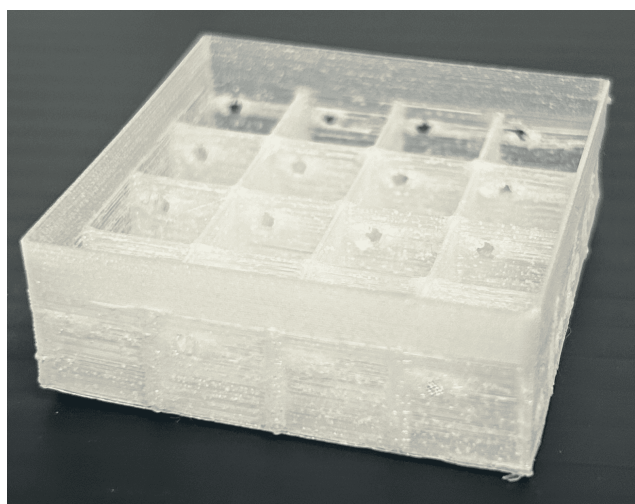


図 5.1: 3D プリンターで造形した格子状の型; 材質:PA, 型の厚み:0.5 mm. 1 cm × 1 cm ごとに区分けされている.



図 5.2: ウォーターバス 1; ヤマト科学,
3.7L



図 5.3: ウォーターバス 2; 三商, 4L

5.2 シンチレータ流出の対策と型の取り出し

シンチレータを流し込む格子状の型は、3D プリンタを用いてポリアミドのフィラメントで作成している。4.1 節では一立方センチメートルのキューブ一つ分の型を使用した。型をこれより大きくすると、流し込んだシンチレータが型の底面からにじみ出て流出してしまった。これは、3D プリンタで造形する際に底面の造形にかかる時間が長くなることで、フィラメントの温度が下がってしまい、密着度が弱まることの原因だと考えられる。恒温水槽で温める際にシンチレータの流出を防ぐ必要があるため、ポリアミドで造形した格子型を更に別の容器に入れ、シンチレータが水の中に流出しないようにした。

5.2.1 ブリキ缶

まず初めに用意したものが、大きさ約 6.5 cm × 6.5 cm のブリキ缶である。これの中にポリアミドで作成した格子型を入れたものを図 5.4(a) に示す。使用したブリキ缶は角部分が丸くなっていたため、その形に合わせて格子型を作成した。結果として、シンチレータの流出を防ぐことはできたが、格子型の取り出しは非常に困難であった。使用したブリキ缶は入り口の端面が図 5.4(b) のように内側に織り込まれていたため、固まったシンチレータが引っかかってしまい取り出すことができなかった。ブリキ缶を壊して剥がすことで、中身を取り出すことができた。これを図 5.5 に示す。



(a) ブリキ缶に格子型を入れた様子



(b) ブリキ缶の上端が内側に織り込まれている

図 5.4: 使用したブリキ缶

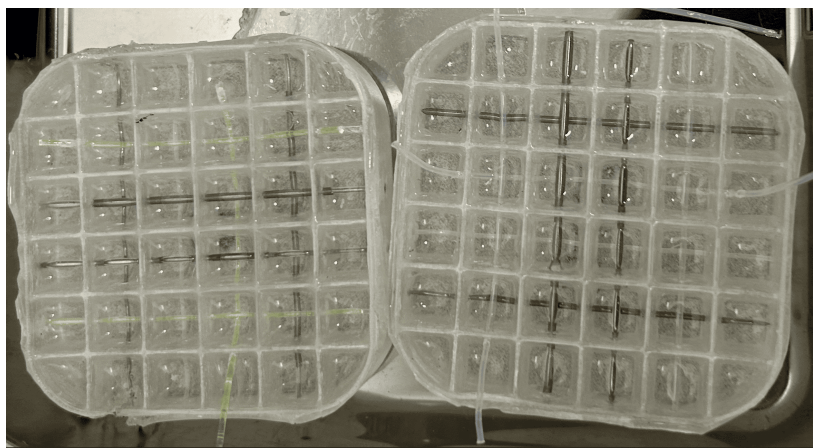


図 5.5: ブリキ缶を使用して作成したシンチレータ (6 × 6 キューブ)

5.2.2 ステンレス容器

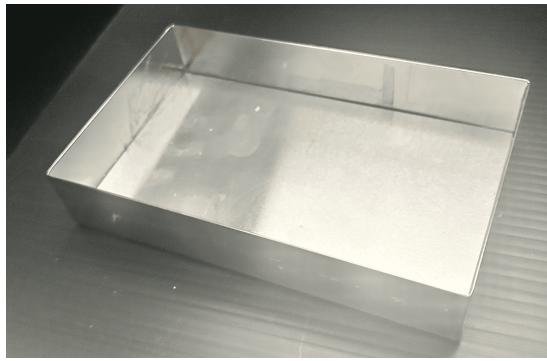
次に用意したものが、大きさ 160 cm × 100 cm のステンレス容器である。この容器を選んだ理由は、壁面に歪みが少なく平坦であるため固まったシンチレータを取り出しやすいのではないかと考えたからである。底面に少し歪みが見られたため、底面と同じ大きさで厚さ 2 mm のアルミ板を入れて平面にした。この時の様子を図 5.6(a) に、格子型を入れたものを図 5.6(b) に示す。中身を取り出しやすくするために格子型の下にスズメッキ線とテフロンテープを入れてある。

この容器を用いた実験は二度行った。一回目はテフロンテープを引っ張ることでうまく取り出すことができ、二回目は簡単には取り出すことができなかった。その原因として、二回目はシンチレータを水槽に入れて固める際に容器が傾いてしまい、シンチレータの高さが斜めに固まってしまったことが考えられる。二回目の実験でシンチレータが斜めに固まった様子を図 5.7 に示す。固まったシンチレータの高さは、図の手前側が低く、奥側が高くなっている。一回目の製作では、中で固まったシンチレータを少し斜めに動かすことで取り出すことができた。一方二回目では、シンチレータが斜めに固まってしまったことで高さが出てしまい、容器の中で傾けることができなかった。したがって、この方法では中で固まったシンチレータの取り出しが安定的に可能ではないと判断し、より確実な手法を考えることにした。

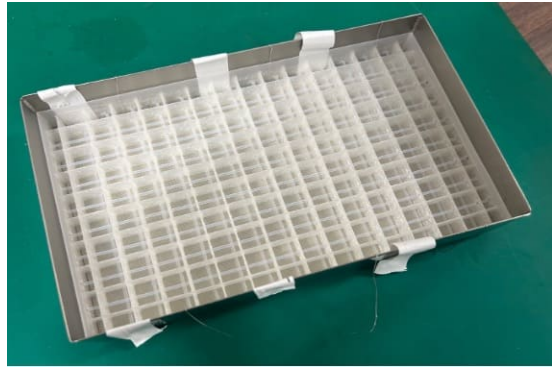
5.2.3 ポリエチレンナフタレートフィルム

次に、容器の壁面を底面に対して可動にすることで、格子型を簡単に取り出せないかと考えた。

しかし、容器の底面と壁面を切り分けてしまうと、僅かな隙間からシンチレータが



(a) ステンレス容器の底にアルミ板を入れた様子



(b) 容器に格子状の型を入れた様子

図 5.6: ステンレス容器を使用したセットアップ

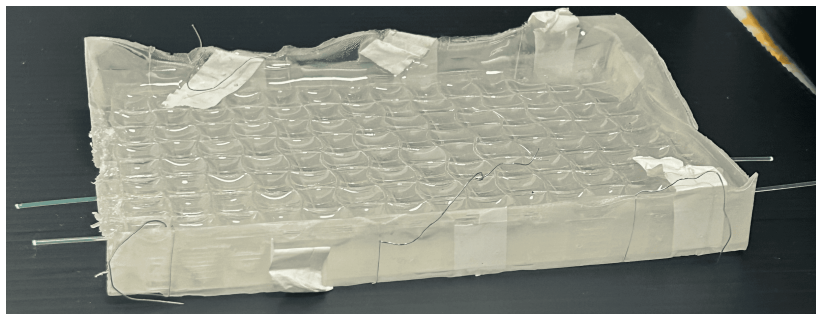


図 5.7: 二回目の製作でシンチレータが斜めに固まった様子

漏れ出してしまい、結局底面と壁面が固定されてしまう。そこで、格子型をポリエチレンナフタレート (PEN) フィルムで覆ってシンチレータが流れ出さないようにし、その上から更にアルミ板で押さえつけるセットアップを考えた。概念図を図 5.8 に示す。PEN フィルムは、暑さ $25\ \mu\text{m}$ のものを使用し、シンチレータが流れ出さないようにホッチキスで箱型に固定した。また、シンチレータの側面が平らに固まるように、側面をアルミ板で押さえつけた。実際のセットアップを図 5.9 に示す。以前使用したステンレス容器の一部を使い、 4×4 キューブの大きさのシンチレータを図の右下および左下で二つ同時に作成した。側面を押さえつけているアルミ板は容易に上方向に引き抜けるようになっている。

このセットアップで作成した結果、シンチレータが硬化した後も側面を押さえつけているアルミニウム板を容易に引き抜くことができた。また、PEN フィルムは手で簡単に引き剥がすことができた。このセットアップではシンチレータの製作を二度行っており、それぞれ二つ、計四つの 4×4 キューブのシンチレータを製作したが、全てにおいて容易にシンチレータを取り出すことができた。したがって、この方法では安定的にシンチレータの取り出しが可能であるといえる。

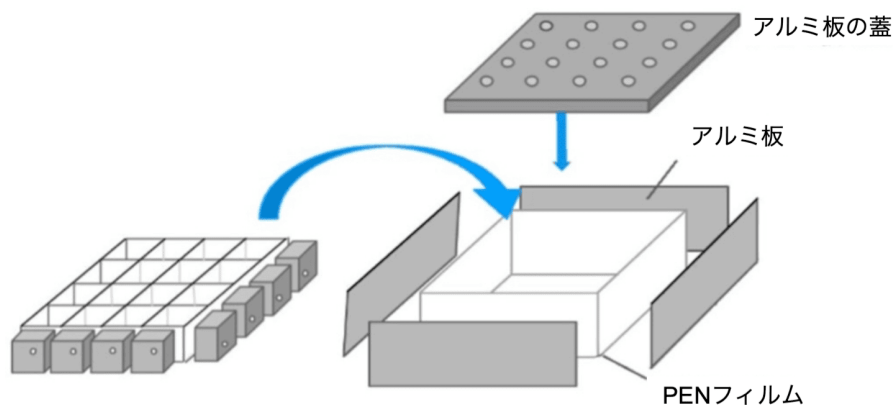


図 5.8: PEN フィルムを使用した製作方法の概念図; 格子型キューブの脇のブロックはチューブの引き出しのために、5.4 節で詳しく述べる. アルミ板の蓋は上面を平らにするためのものであり、5.6 節で詳しく述べる.



図 5.9: PEN フィルムを使用したシンチレータ製作のセットアップ; 左下と右下の二箇所ですべての大きさのシンチレータを作成.

5.3 チューブの選定

シンチレータが固まる前に入れておくダミーのチューブないし棒として、種類、素材、太さの観点で検証を行った。また、チューブのような柔軟な素材のものでは、図 5.10 のようにまっすぐ入れる方法、曲げて端をシンチレータの上に出す方法の二つの入れ方がある。まっすぐ入れる方法では、ファイバーを差し替えやすく、ファイバーが傷つきにくいという利点がある。曲げ入れる方法では、シンチレータが固まった後にチューブの先端が飛び出ているため、チューブを簡単に引き抜くことができる。

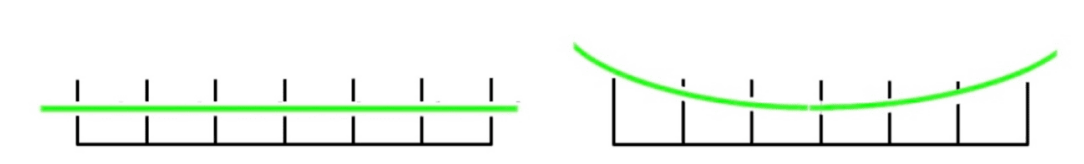


図 5.10: チューブをまっすぐ入れる方法と曲げて入れる方法

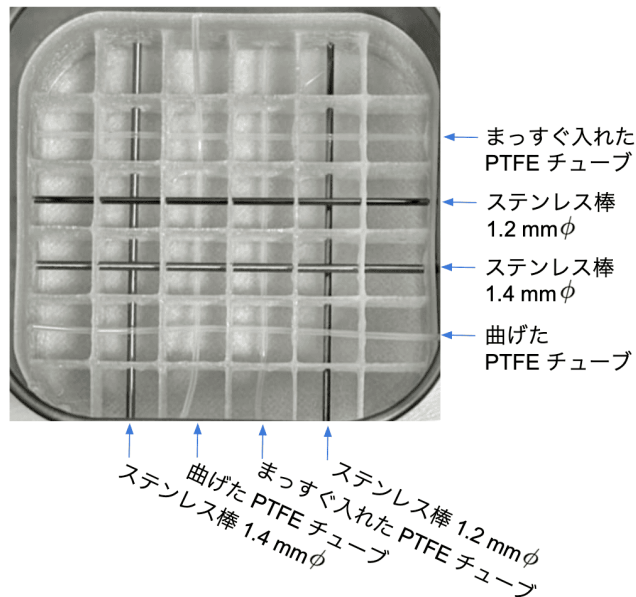


図 5.11: チューブの選定用セットアップ

まず初めに、ステンレス棒と PTFE チューブの二つの素材を用意した。ステンレス棒は 1.2 mm ϕ , 1.4 mm ϕ の 2 種類用意し、PTFE チューブは 1.0 mm ϕ のものをまっすぐ入れる方法と曲げて入れる方法の二通りを試した。この時のセットアップを図 5.11 に示す。このセットアップに EJ-290 を流し込み、硬化後にシンチレータを容器から取り出してチューブやステンレス棒を引き抜くことを試みた。

結果として、チューブはどちらも引き抜くことができたが、ステンレス棒は端を強く引っ張っても引き抜くことができなかった。また、チューブを曲げ入れる方法では、引き抜き後曲がった軌道にファイバーをスムーズに入れることができなかった。実際にファイバーを差し込んだ様子を図 5.12 に示す。空いている穴の直径が小さいことも原因の一つではあるが、ファイバーを差し込みにくいうえに、途中で何度か引っ掛かり、最後まで通すことはできなかった。シンチレータのサイズを拡大することを考えると、この方法ではファイバーがうまく入らないか、差し込む途中に傷つけてしまう可能性が高いと想定される。そのため、PTFE チューブをまっすぐ入れる方法でシンチレータを作成することにした。

次に、適切なチューブの太さを選定した。先程述べた実験で使用した 1.00 mm ϕ の

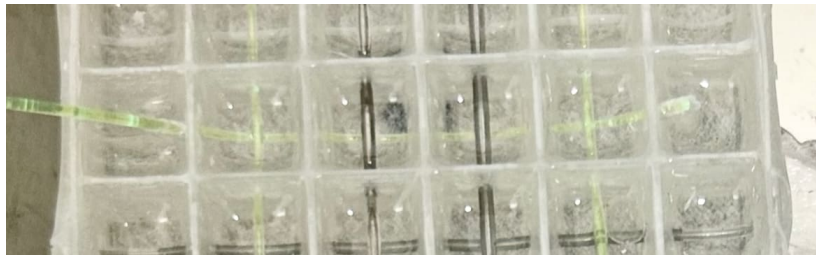


図 5.12: 曲げて入れた PTFE チューブを取り出したところにファイバーを差し込んである様子; 図の左側から右方向にファイバーを通したが, 途中で引っ掛かり最後まで通すことはできなかった.

チューブでは穴が小さくファイバーが入れにくかったため、1.18 mm ϕ のチューブを使用してシンチレータを作成した。使用したチューブは、アズワン社の PTFE AWG チューブである。このチューブは、外径 1.18 mm、内径 0.68 mm、肉厚 0.23 mm であり、中が空洞になっている。この時のセットアップを図 5.13 に示す。シンチレータのサイズが大きくなった際にチューブが引き抜きにくく、ファイバーが差し込みにくくなる可能性があるかを調べるために、キューブ 14 \times 8 個の大きさに拡張した。結果として、ファイバーの差し込みはスムーズにでき、シンチレータが大きくなったことによる悪影響もなかった。

これらの検証により、1.18 mm ϕ の PTFE チューブを採用することに決定した。

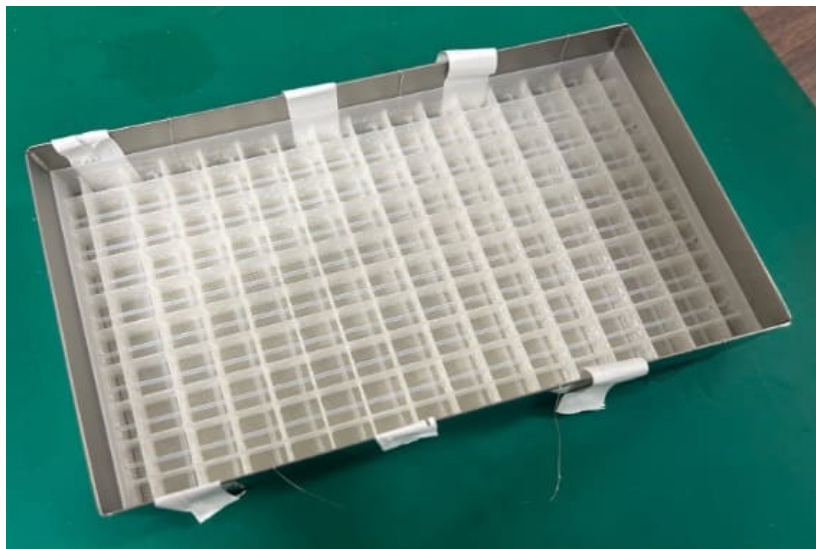


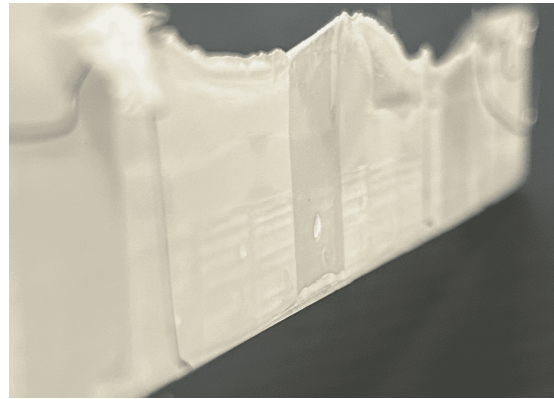
図 5.13: 1.18 mm ϕ の PTFE チューブを使用したセットアップ (14 \times 8 キューブ)

5.4 PTFE チューブの取り出し方法の確立

前節で述べたとおり、PTFE チューブをまっすぐ入れる方法で検出器を作成することにした。この場合、5.2 節で述べたシンチレータが漏れ出さないように周りを覆う方法では、チューブの端が図 5.14 のように埋め込まれてしまう。チューブの周りに穴を掘ることでチューブ端を掴み引き抜くことは可能であったが、非常に手間のかかる作業であった。



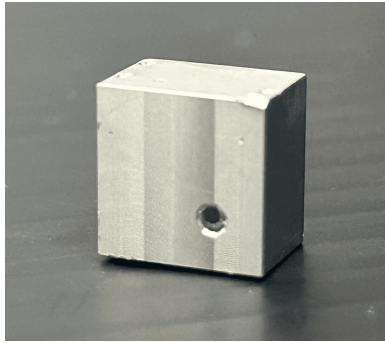
(a) シンチレータの壁面にチューブ端が見える。



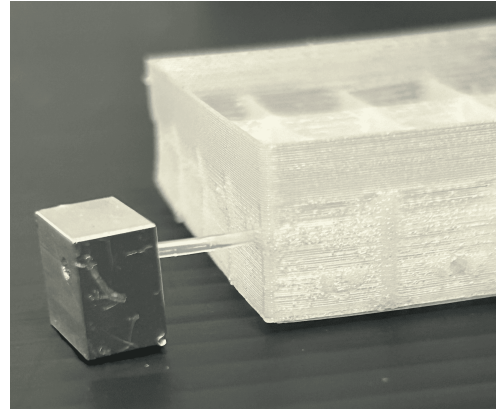
(b) 横から見た図; チューブの先はシンチレータに完全に埋まっており、引っ張ることができない。

図 5.14: シンチレータにチューブ端が埋まっている様子

ここで考案したのが、図 5.15 のように、チューブが通る大きさの穴を開けたブロックを用意して格子型の側面の横部分に配置し、チューブの端をそこに通しておく方法である。そこで、約 1 cm 平方の面積で厚みをもつアルミニウムと PTFE のブロックを用意した。使用したアルミニウムのブロックを図 5.15(a) に示す。このブロックに、図 5.15(b) のようにチューブの端を通した。全てのチューブの端にブロックを取り付けたセットアップを図 5.16 に示す。

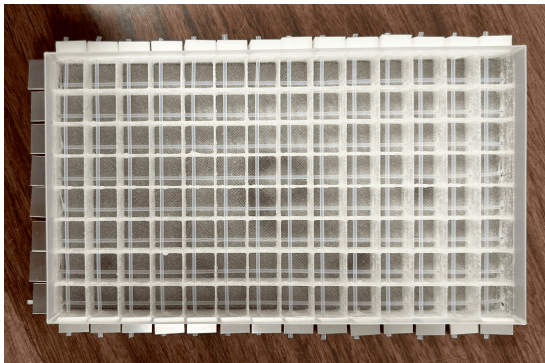


(a) チューブ引き抜き用アルミニウムブロック; 約 1 cm 平方の大きさで厚みは型の大
きさに応じる. 穴の大きさ:1.4 mm ϕ



(b) 格子状の型から飛び出たチューブの先端
をブロックの穴に通す.

図 5.15: シンチレータにチューブ端が埋まっている様子



(a) チューブ端をブロックの穴に通している.



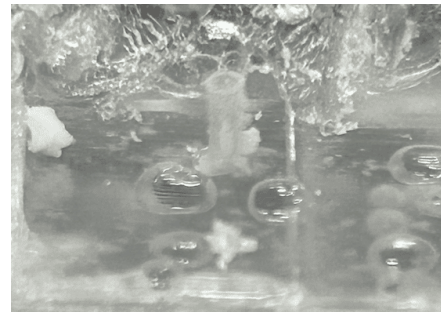
(b) チューブ端がブロックの穴から少し飛び
出す長さに調整した.

図 5.16: チューブ端にブロックを取り付けた様子

シンチレータを流し込んで固めた結果、格子状の型から漏れ出したシンチレータは図5.17(a)のようにブロックの周囲を覆うように固まった。ハンマーでブロックをうまく叩くと、ブロックは簡単に外すことができ、ブロックの穴部分に差し込まれていたチューブの端が図5.17(b)のように飛び出した。飛び出したチューブの端を掴んで引っ張ることにより、容易にチューブを引き抜くことができた。この作業は、ブロックを使用しなかった場合と比べてはるかに作業効率が良いという結果となった。また、PTFEのブロックがハンマーで叩いた際に変形しやすいのに対し、アルミニウムのブロックはより安定的にブロックを外すことができた。したがって、アルミニウムのブロックを端につけることで、チューブの容易な引き抜きを実現できたといえる。



(a) ブロックを包むようにシンチレータが固まっている



(b) ブロックを外すとチューブが飛び出た

図 5.17: ブロックを外し、チューブの端を飛び出させる工程

5.5 シンチレータの脱泡

本研究で使用した注型成形プラスチックシンチレータ EJ-290 は、既に述べた通り、レジンと触媒、溶媒を混合して製作する。このとき、多数の気泡が発生する。時間をおくことである程度の気泡を取り除くことができるが、気泡の数をより少なくするために型に流し込む前に真空引きを行った。型に流し込む際にシンチレータに僅かに気泡が生じることや、格子型の底面に気泡が残ることがあったため、型に流し込んだ後にも再度真空引きを行った。

しかし、EJ-290 を型に流し込んだ後に真空引きを行うことで生じる問題があった。本研究で使用している PTFE チューブは中が空洞になっている。真空引きを長時間行うことで、チューブ内の一部分で空気が抜けて潰れるという現象が起きた。この場合に生じる問題は二つある。一つは、チューブが脆くなることで、引き抜きの際に途中でちぎれやすくなるということである。本実験の範囲では、チューブを引き抜く際に途中で切れてしまうことはなかったが、アルミニウムのブロックをハンマーで叩いて外す際にその衝撃で何本かのチューブが切れてしまった。ブロックを外す作業を丁寧に行えばさほど問題はなかったが、検出器を拡張することを考えると、ブロックを一つ一つ丁寧に外す作業は手間がかかる。二つ目の問題は、チューブが潰れた箇所は穴が狭くなり、ファイバーが挿入しづらくなることである。本実験では全てのファイバーを差し込むことができたが、真空引きをしなかった場合に比べて差し込みにくくなったように感じた。そのため、もう少し太いチューブを使用するか、肉厚が大きく空洞部分が少ないチューブを使用することで改善の可能性がある。

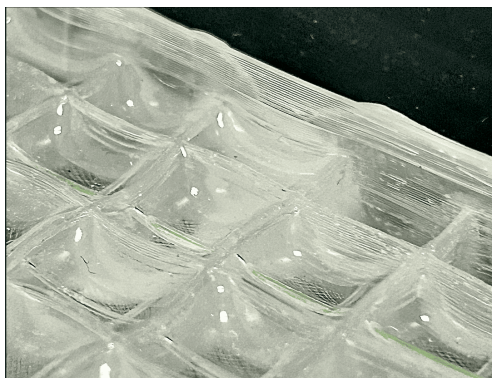
真空引きをした検出器の作成は、ポリエチレンナフタレートフィルムを使った実験で計二度行ったが、一回目と比べて二回目の実験の方がチューブの潰れとそれによる悪影響がよく見られた。実験の回数が少ないことから、本研究の範囲で真空引きによる悪影響を詳細に議論することは難しく、さらなる検証が必要である。

5.6 シンチレータの収縮問題とその対策

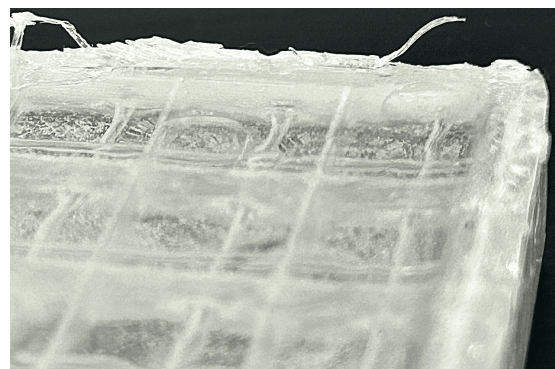
EJ-290 は、硬化する際に 20～30% の収縮が起きる。そのため収縮を考慮して分量を調整する必要がある。また、収縮する際の特徴として、図5.18(a)のように格子状の壁面に対して各々キューブの中心部分が低くなるように固まる傾向が見られた。格子型の容量に比べて収縮後のシンチレータの体積が小さかったために、表面が凹んだと考えられる。次に、シンチレータの量を増やして固めた場合の結果を図5.18(b)に示す。この場合、シンチレータの表面はやや凹凸はあるものの平らに近い状態で固まった。したがって、収縮した後の体積を考慮して分量を決めれば、中心部

分が凹む問題はさほど問題ないといえる。しかし、シンチレータは粘性が強いため体積を正確に測って型に入れるのは簡単な作業ではない。そのため、硬化するシンチレータの高さを調整するために、アルミニウムの板で蓋をして製作を試みた。アルミニウムはシンチレータより密度が高いため、格子状の型にぶつかった位置で固定される。シンチレータが固まった後にこの蓋を外せば、格子状の型と同じ高さを残すことができると考えた。また、この蓋には 2.5 mmφ の穴を開けておき、シンチレータが収縮する際に穴部分の液が下に流れていくようにした。セットアップの写真を図 5.19 に示す。

結果として、穴からうまくシンチレータが下に流れ、上表面を平らにすることができた。しかし、シンチレータの量が多かったため、図 5.20 のように一部では穴部分から飛び出るようにシンチレータが固まっている。このような部分は削る必要がある。本研究ではファイバーを 2 方向のみに通しているが、最終的には縦方向にドリルで穴を開け、ファイバーを 3 方向に通すことを想定している。そこで、縦方向にファイバーを通す位置に合わせてアルミ蓋の穴を開けておけば、穴をドリルで空ける際にシンチレータが飛び出した部分を除去できると考えた。ファイバーが通る穴の大きさに合わせるために、アルミニウム板に開ける穴の大きさを 1.5 mmφ に変更して次の実験を行った。この時のセットアップを図 5.21 に、シンチレータが固まった後に蓋を取り外した際の写真を図 5.22 に示す。穴を小さくした分、上に飛び出すシンチレータを小さくすることができた。



(a) シンチレータの量が不十分な場合; それぞれの枠内で中心が凹むようにシンチレータが固まった. ステンレス容器 1 回目の製作より.



(b) シンチレータの量が十分な場合; シンチレータの上面は比較的平らに固まった. PET フィルム 1 回目の製作 (アルミニウム蓋なし) より.

図 5.18: 収縮後のシンチレータの上面の平面度

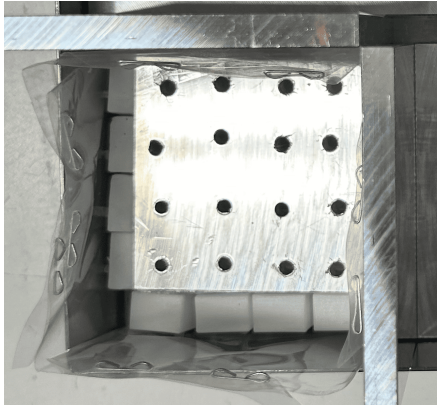


図 5.19: 4 × 4 キューブの格子型の上にアルミニウム板の蓋を乗せた; 穴の大きさ: 2.5 mmφ, 1 キューブに 1 つの穴が対応.

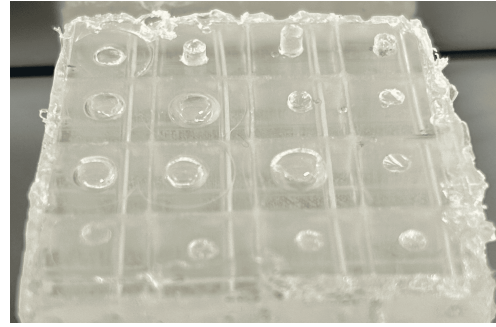


図 5.20: シンチレータが固まった後に蓋を取り外した様子; 穴が空いていた部分からシンチレータが飛び出すように固まった.

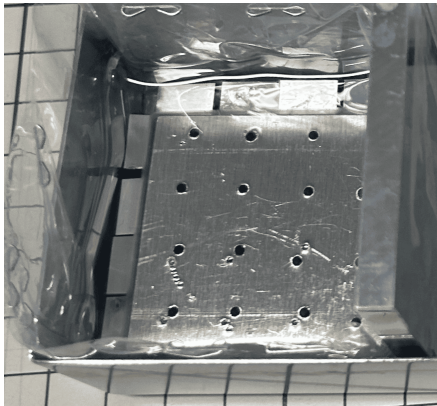


図 5.21: 4 × 4 キューブの格子型にシンチレータを流し込み、上からアルミニウム板の蓋を乗せた; 穴の大きさ: 1.5 mmφ, 1 キューブに 1 つの穴が対応.

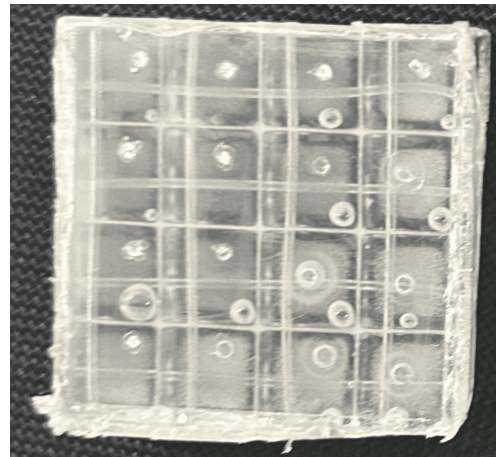


図 5.22: シンチレータが固まった後に蓋を取り外した様子; 穴が空いていた部分からシンチレータが飛び出すように固まった. 真空引きが不十分であったため気泡が残っている.

5.7 Ar ガスの使用

3.1 節で述べたように、EJ-290 は不活性ガス雰囲気中で実験を行うことが推奨されている。本研究では Ar ガスを使用した。ウォーターバス 1 には付属の蓋がなかったため、ガラス製の鍋蓋を使用した。図 5.23 のように、ガラス蓋に空いていた穴からナイロンチューブを通して Ar ガスを送った。実験前に空のウォーターバスに酸素

濃度計を入れた状態で Ar ガスを流し込み、酸素濃度 2.0% 以下を維持するために必要な流量を流量計を用いて測定した。多少の変動はあるものの、45 mL/min の流量を維持することで酸素濃度を 2.0% 以下で維持できるとの見込みが立った。実験時には酸素濃度計は使用せず、45 mL/min で Ar ガスを流した。

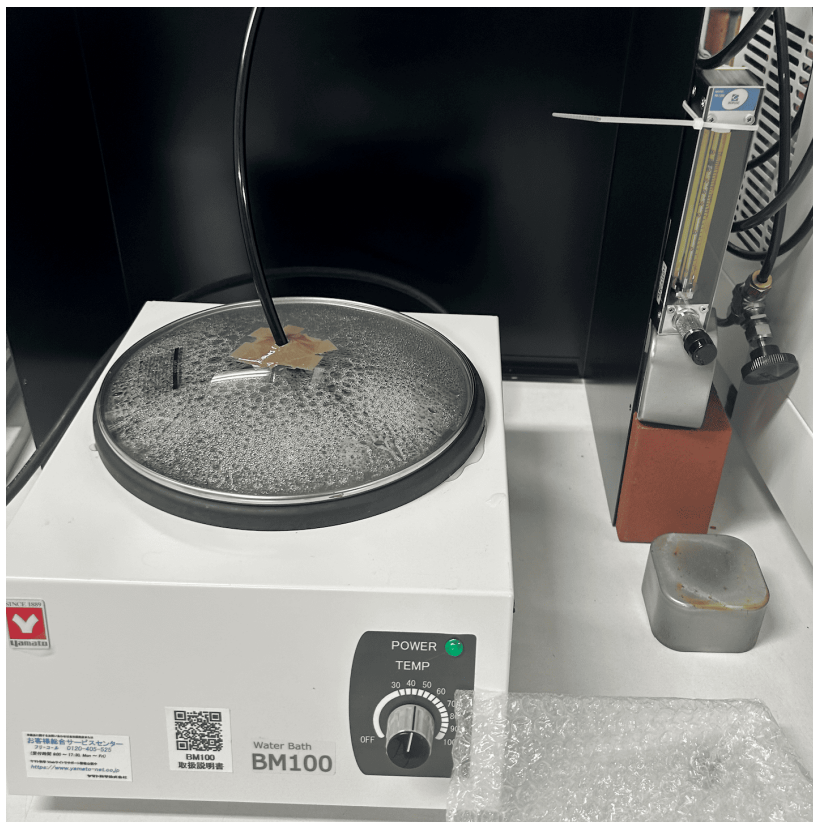
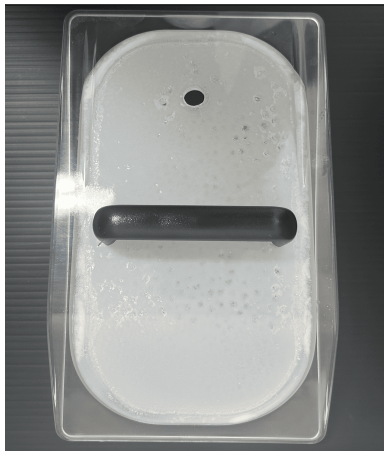


図 5.23: ウォーターバス 1 に Ar ガスを流している様子

ウォーターバス 2 では付属品であるアクリル製の蓋を使用したが、ガスを流しシンチレータを温め終えた後、蓋が傷んでいた。傷んだ蓋の写真を図 5.24 に示す。蓋の内側が傷んでいることに加え、白い物質が表面にこびりついていて、これは、EJ-290 の触媒を溶かすための溶剤であるビニルトルエンによる影響だと考えられる。それに対して、ウォーターバス 1 でガラス製の鍋蓋を使用した場合には蓋が傷んでいる様子は見られなかった。したがって、シンチレータを温める際には蒸発した溶剤が触れうる範囲における材質にも注意する必要があることが分かった。

5.8 水滴の混入対策

ウォーターバスの中に格子状の型を入れた容器を入れ、47 °C で 2 週間、80 °C で 24 時間温めることでシンチレータを硬化させる際に、ウォーターバスの蓋には水滴がつき、下に落ちていることが観測された。水滴がシンチレータの部分に落ちると、



(a) 蓋の外側



(b) 蓋の内側

図 5.24: シンチレータを温めた際に傷ついたウォーターバスの蓋; アクリル製. 蓋の内側が傷んでおり, 白い物質が表面にこびりついていた.

シンチレータに水が混入し、水滴が落ちた衝撃でシンチレータの表面に凹凸ができてしまった。実際に水滴が落ちた影響でシンチレータの表面に凹凸ができたものを図 5.25 および図 5.26 に示す。図 5.25 では、水滴が落ちたところが少し丸形に凹んでいる。図 5.26 は、ウォーターバス 2 を使用して作成した時のものである。シンチレータの上に多数の水滴が落ちたために、水がシンチレータと分離して集まり、大きな溝ができたように見える。

そこで、シンチレータに水が混入しないように蓋を被せることにした。使用したステンレス容器には蓋が付属していたため、これを使用した。図 5.27 のように蓋を被せれば水滴の混入は見られなかった。

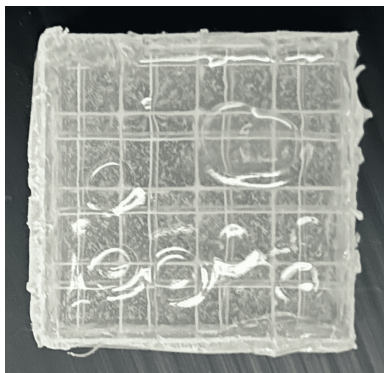


図 5.25: 水滴が落ちた影響でシンチレータの表面に小さな凹みができ

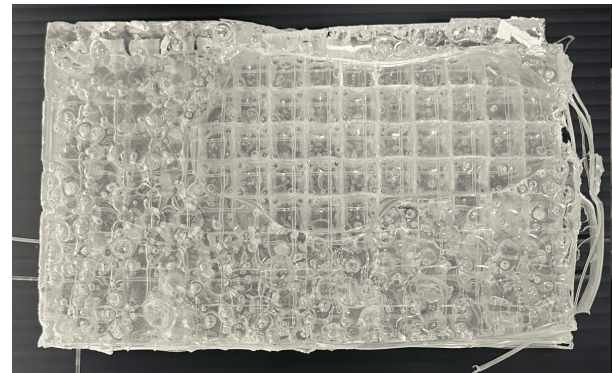


図 5.26: 水滴が落ちた影響でシンチレータの表面に大きな凹みができ

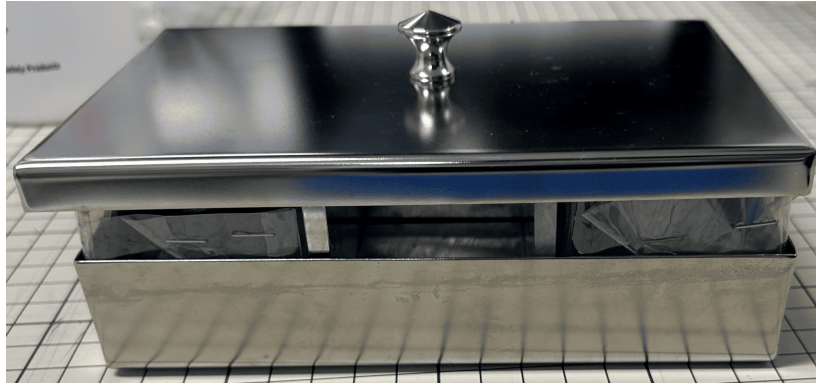
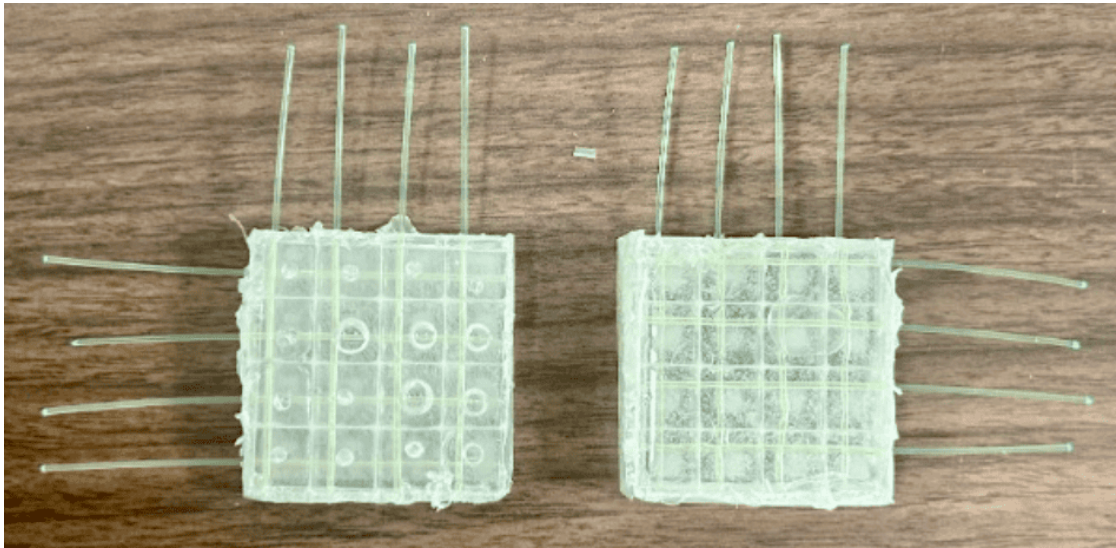


図 5.27: ステンレス容器に付属の蓋を被せた; 水滴の混入を防ぐことができた。

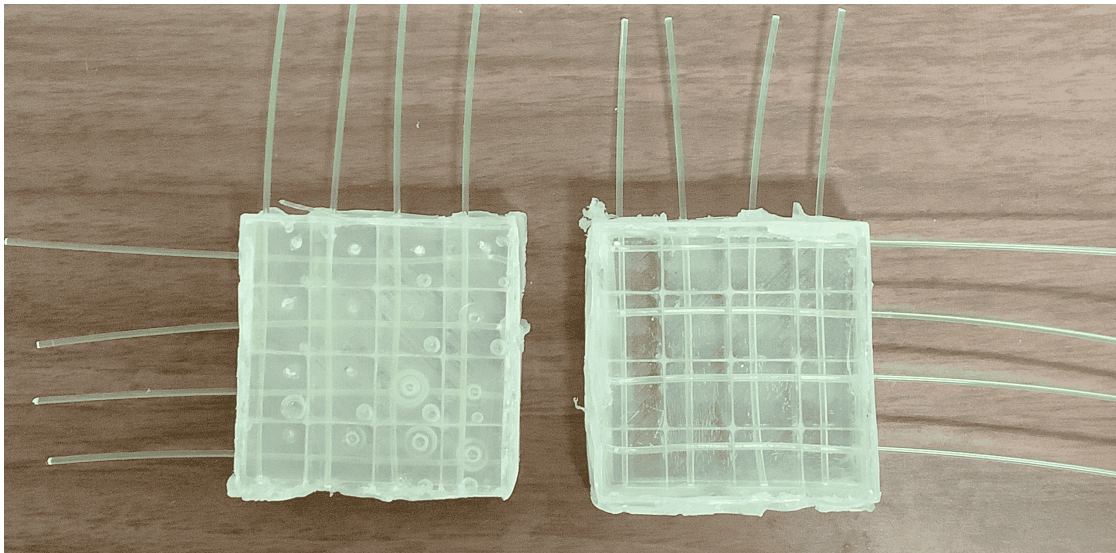
5.9 製作したシンチレータ

製作したシンチレータを図 5.28 に示す。いずれも PEN フィルムを使用したセットアップで製作した 4×4 キューブの大きさのシンチレータである。(a) の製作では図 5.27 の付属の蓋を乗せていなかったが、(b) の製作では蓋を乗せた状態でシンチレータを固めた。そのため、(a) はウォーターバスで温めている間に水滴が滴り落ち、一方 (b) では水滴の混入を防ぐことができた。

(a) でアルミ蓋を乗せて製作したものをシンチレータ①、乗せずに製作したものをシンチレータ②と呼ぶこととする。シンチレータ②は水滴が混入し上面に凹みが生じたが、シンチレータ①はアルミ蓋が水滴の混入をある程度防いでいるようであった。(b) でアルミ蓋を乗せて製作したものをシンチレータ③、乗せずに製作したものをシンチレータ④と呼ぶ。シンチレータ④は、水滴の落下がなかったため上面は比較的平らに固まった。



(a) 水滴防止のステンレス蓋を用いずに製作したシンチレータ;
 左側: シンチレータ①; 2.5 mm ϕ の穴を空けたアルミ蓋を使用
 右側: シンチレータ②; アルミ蓋を乗せていない, 水滴が混入した (図 5.25 と同一).



(b) 水滴防止のステンレス蓋を用いて製作したシンチレータ;
 左側: シンチレータ③; 1.5 mm ϕ の穴を空けたアルミ蓋を使用
 右側: シンチレータ④; アルミ蓋を乗せていない, 表面は比較的平らである.

図 5.28: 製作したシンチレータ (4 × 4 キューブ)

第6章

宇宙線を用いたシンチレータの性能評価

製作したシンチレータを使って、宇宙線ミュオンの観測を行った。また、Super-FGD で用いられているプラスチックシンチレータキューブを使用して同様の測定を行い、測定結果を比較することで製作したシンチレータの性能評価を行った。

6.1 セットアップ

6.1.1 シンチレータ

製作したシンチレータのうち、シンチレータ④を性能評価に使用した。シンチレータ④を選んだ理由は、シンチレータ中に気泡が少なく、水の混入もないため、最も性能評価に適していると考えたためである。図 6.1 のように、シンチレータ④をシンチレータ①と③で上下を挟むような形のセットアップを用意した。上下のシンチレータが光った時に真ん中のシンチレータが光っているかを見ることで、その性能を測る。それぞれのシンチレータには、波長変換ファイバーを1方向に通した。

宇宙線測定は3回行った。1回目は製作したシンチレータ④をそのまま使用した。2回目の測定では、シンチレータの周りに白いテフロンテープを巻き、シンチレータ光が表面で反射するようにした。3回目は比較用として、Super-FGD で使用しているキューブを4×4個並べたものを使用した。

6.1.2 波長変換ファイバー

今回の測定で使用した波長変換ファイバーは、Super-FGD で使用されているものと同じ Y-11(200) (Round, Multi cladding type) である。ファイバーの性能については、2.2.2 節で詳しく述べた。

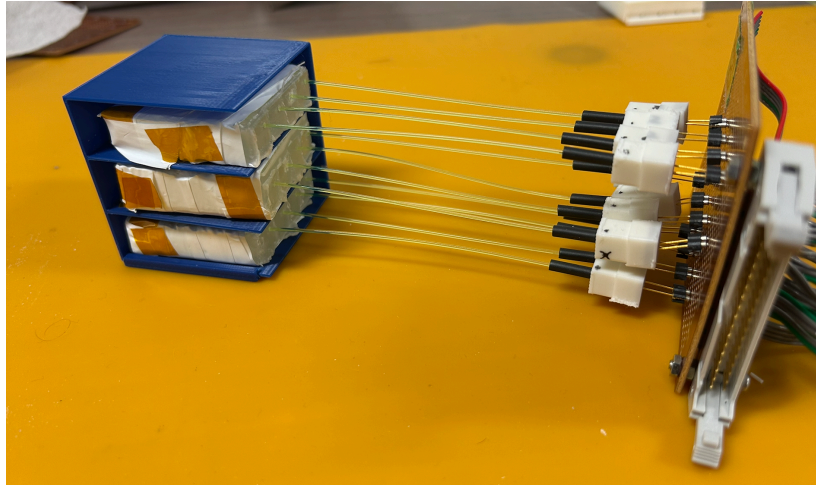


図 6.1: シンチレータの測定セットアップ

6.1.3 MPPC

今回の測定で用いた MPPC の型番は、測定評価の対象となる中段は S13360-1325CS である。研究室で所有していた MPPC の数の都合上、トリガーとして使用する上段と下段は、ピクセルピッチの異なる S13360-1350CS を使用した。

S13360-1325CS の波長特性は、2.2.3 節の図 2.5 に示した。S13360-1350CS の波長特性を図 6.2 に示す。いずれも S13360-1325PE と同様で、最大感度波長は波長変換ファイバーのピーク波長 476 nm に近い 450 nm である。今回は複数の測定を一度に行うために、図 6.3 のように 4×3 の 12 チャンネルの MPPC を配置した基板を製作した。図 6.3 に記載しているチャンネルは、後述する EASIROC ボードのチャンネルに対応している。中段の ch 6~9 には S13360-1325CS、上段の ch 10~13 と下段の ch 2~5 には S13360-1350CS を使用した。

6.1.4 ファイバーと MPPC の接続

波長変換ファイバーと MPPC の接続は、図 6.4 のような 3D プリンタで製作した簡易的なコネクタを使用した。測定時には、4.3.2 節と同様、ファイバーが軽く固定されるように長さ 20 mm のシリコンゴムチューブをファイバーの端から 3 mm の位置に取り付けてコネクタに挿入した。波長変換ファイバーの端には 4.3.2 節で述べた端面処理を施し、端面が MPPC と接触するようにした。

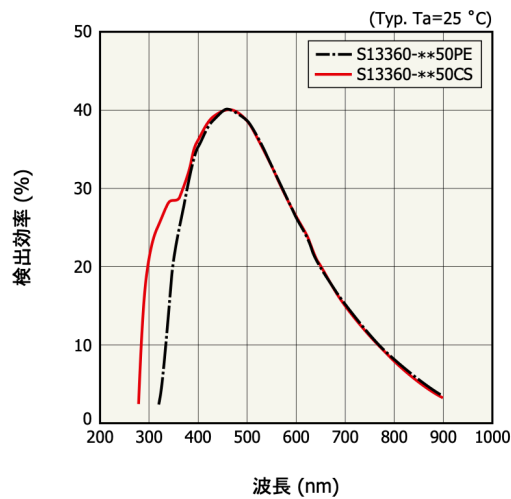


図 6.2: S13660-1350CS の波長特性

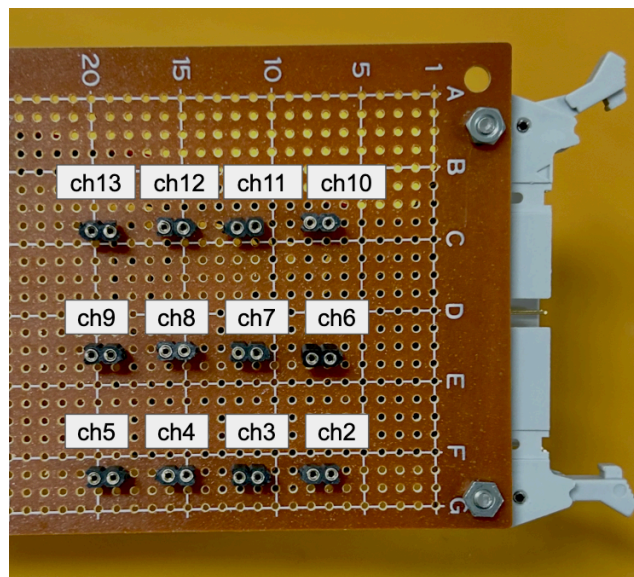
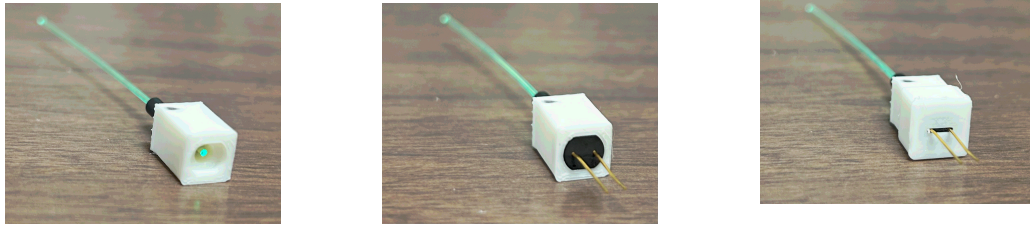


図 6.3: MPPC ボード

6.1.5 EASIROC モジュール

NIMEASIROC モジュールは 64 チャンネルの MPPC の信号読み出し装置である。モジュールの外観と、内部に 2 枚搭載されている Omega 社製の EASIROC チップの概要を図 6.5 に示す。EASIROC は、全チャンネルに一律に電圧を印加する。さらに MPPC のアノードに印加する電圧を個別に 0~4.5 V の範囲で調整できる。個別の電圧調整は 256~480 の値で設定し、全体設定の電圧から差し引かれる。480 では電圧は差し引かれず、値が小さくなるほど差し引かれる値が大きくなり、



(a) ゴムチューブを付けたファ (b) 反対側に MPPC を取り付
イバーを片側から差し込む ける
(c) MPPC が外れないように
コネクタの MPPC 側に蓋を取
り付ける

図 6.4: ファイバーと MPPC のコネクタの取り付け

256 で -4.5 V である。

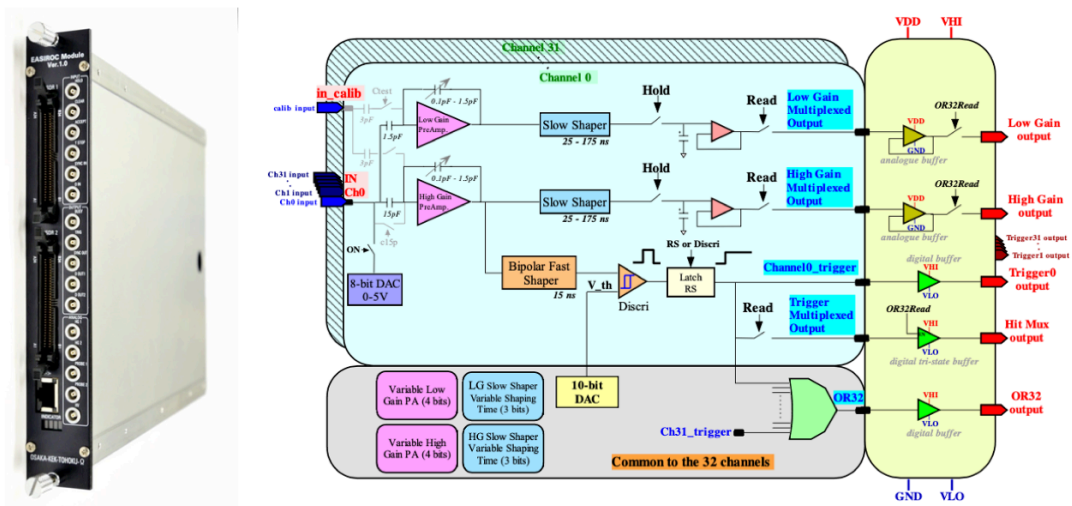


図 6.5: NIM EASIROC モジュールの外観 (左)[31] と EASIROC チップの回路の概
要 [32]

各チャンネルには、discriminator があり、ヒット判定をくさすことができる。今
回の測定では、閾値がおよそ 1.5 p.e. となるように設定した。なおチップ全体で
一つの共通な値のみ設定可能である。このヒット情報もモジュールに搭載されてい
る FPGA により論理演算トリガーを出力することができる。

EASIROC は信号の波高を HOLD して測定するが、外部から波高が最大となるタ
イミングで HOLD 信号を入力する必要がある。図 6.6 に示すように HOLD 信号の
タイミングが早い場合や遅い場合には正確な測定ができなくなってしまう。HOLD
信号のタイミングを波形のピークに調整するため、オシロスコープで MPPC の信号
を見ながら外部で 70 ns の Delay をかけた。なお、このボードには HOLD がある程
度の確率でうまくかからずにペDESTAL 付近の電圧に相当する測定値が出力される

不具合があることが知られており、実際に確認されたが、ソフトウェアでかけたイベント選別でこのような事象は基本的に棄却できているようなのでここでは特別な扱いはしない。

本研究では東大の竹馬さんが開発したファームウェア [34] を使用した。ファームウェアの都合上、HOLD 信号、T STOP 信号、ACCEPT 信号の順でモジュールに入力する必要がある。この時間差の設定値については次節で述べる。

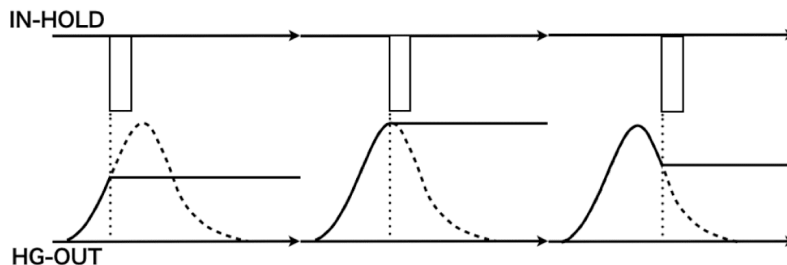


図 6.6: HOLD 信号の入力タイミング [33]. 中央はピークで波高保持ができていますが、左はタイミングが早く、右は遅い。

6.1.6 データ取得系

データ取得系の概念図を図 6.7 に示す。シンチレータが発光すると波長変換ファイバーを通して MPPC で検出され、電気信号がフラットケーブルを通じて EASIROC モジュールへと送られる。

今回の実験では上下のトリガーシンチレータのうち 2 チャンネルで閾値を超えた時にトリガーする。これは、斜めに入った宇宙線が隣り合ったセルを通過することに加え、製作したシンチレータは設計上隣のセルに光漏れすると期待されるためである。トリガーの信号をゲートジェネレータに入力し、HOLD, T Stop, Accept 信号を適当な時間遅延させて EASIROC モジュールに入力する。これにより、各チャンネルの波高がデジタイズされネットワークを通して PC へ送信される。

6.1.7 光量のキャリブレーション

EASIROC モジュールで読みだした ADC 値と photon equivalent (p.e.) の対応を確認するために、図 6.8 のように LED からの光を当てて光量のキャリブレーションを行った。LED からファイバーのまでの距離はおよそ 10~15 cm とした。使用した MPPC の推奨動作電圧は 54~58 V の範囲であったが、全体の電圧を一定より大きくするとデータ取得の際に EASIROC の電源が落ちてしまうことが確認された。この原因や条件は明らかにはならなかったが、全体の電圧を 57.8 V より大きく設定し

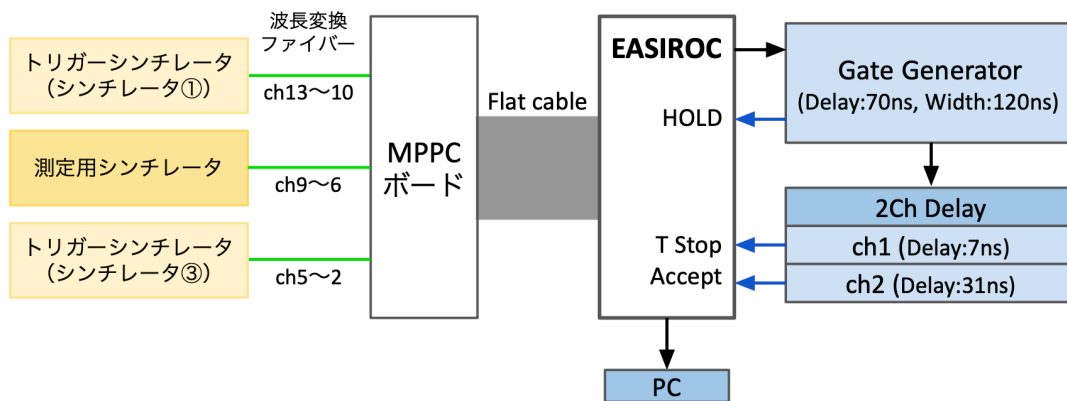


図 6.7: 宇宙線観測のデータ取得系の概念図

て測定することができなかつたため、全体の電圧設定値は 57.8 V とした。

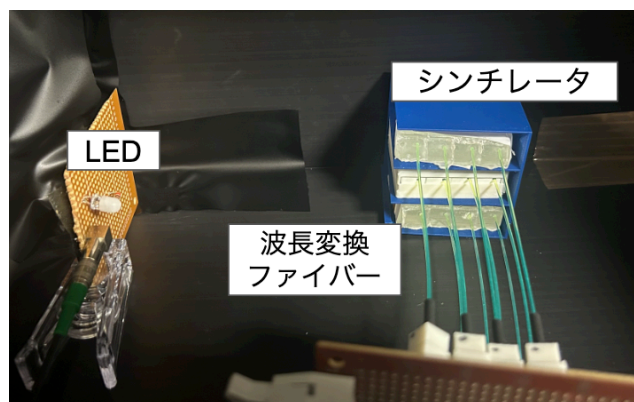


図 6.8: 光量のキャリブレーションのセットアップ

例としてチャンネル 4 の ADC 値の分布を図 6.9 に示す。ペDESTAL と 4 p.e. をガウシアンでフィットして 1 p.e. に対応するゲインとペDESTAL に対応する ADC 値を求めた。

個別電圧設定の DAC 値は、LED 光を当てた際の ADC 値分布を見ながら表 6.1 のように設定した。Input DAC 値に対応する電圧値は測定していないため、実際に印加した電圧の値は分かっていない。S13360-1325PE は 480, S13360-1350PE は 260 としたが、ch5 は他のチャンネルよりも明らかに信号が大きかったため印加電圧を他の MPPC よりも小さく設定し 256 とした。なお、個々の MPPC においてゲインの違いを確認したが、精密な電圧調整は行なっていないためゲインに差が出る可能性はある。

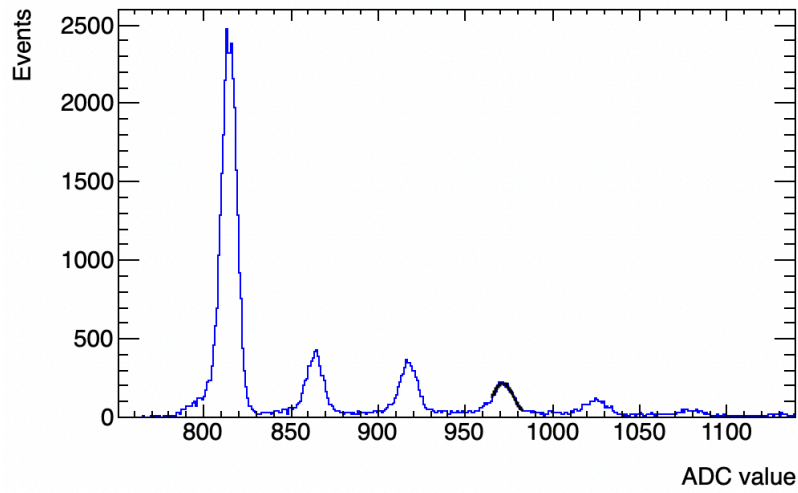


図 6.9: チャンネル 4 の MPPC に電圧を印加した際の光量分布; 一番左のピークはペデスタル, その右のピークは左から順に 1 p.e., 2 p.e. と続く. アノード電圧 57.8V, カソード電圧設定値 260.

表 6.1: 各チャンネルの個別電圧調整 Input DAC 値

チャンネル	Input DAC 値
ch2	260
ch3	260
ch4	260
ch5	256
ch6	480
ch7	480
ch8	480
ch9	480
ch10	260
ch11	260
ch12	260
ch13	260

6.2 宇宙線観測の測定結果

前節で述べたセットアップで宇宙線ミュオンを測定を行った。測定時間が約12時間となるようにそれぞれイベント数を設定した。本研究では、各段の合計 p.e. 値を元に解析を行う。

6.2.1 裸のシンチレータを用いた測定

シンチレータ④を使用して 50,000 イベントを取得した。イベントレートは約 1.0 Hz であった。

図 6.10 に上段と下段の二次元ヒストグラムを示す。

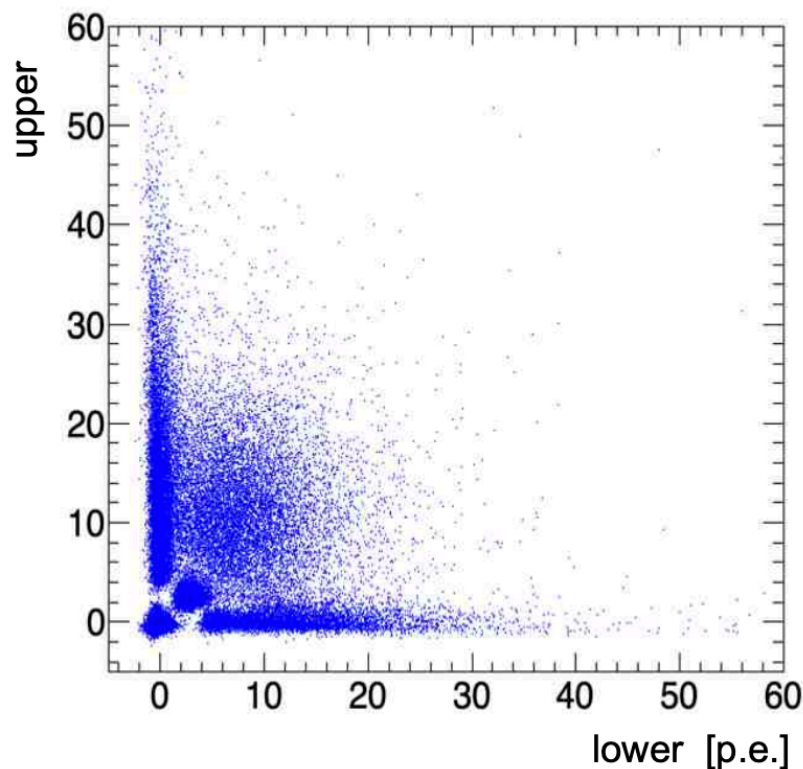


図 6.10: 2次元ヒストグラム（裸のシンチレータ④の測定結果）；横軸が下段, 縦軸が上段の総光量 [p.e.]

次に、上段と下段における総光量のヒストグラムを図 6.11 に示す。10 p.e. 付近のイベントが宇宙線ミュオンによるものと考えられる。それ以外のピークは原因不明だが、何らかのノイズであると考えられる。また、ペDESTAL領域には 6.1.5 節で述べた EASIROC の HOLD のバグ事象が含まれていると推測される。ミュオンイベントを選別するために、図 6.10 を見て上段および下段のチャンネルそれぞれ合

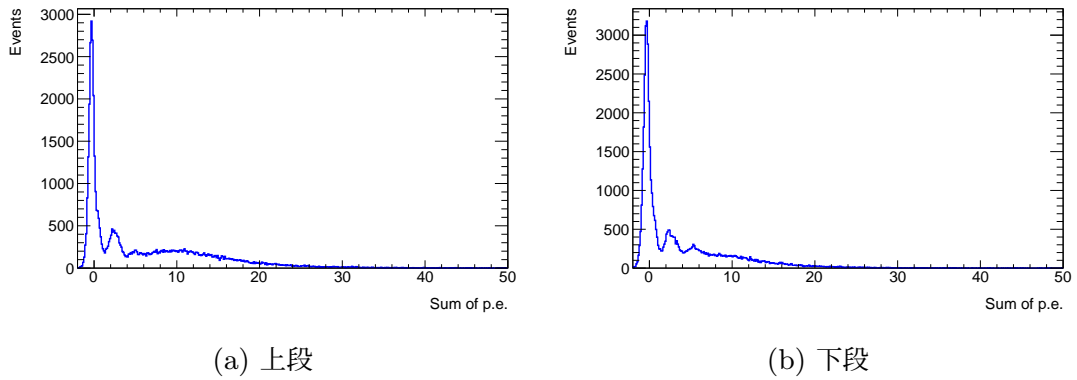


図 6.11: 上段と下段における総光量のヒストグラム（裸のシンチレータ④の測定結果）

計で 6 p.e. 以上であるイベントを選択した。

選別したイベントにおける、評価対象である中段のシンチレータの光量の測定結果を図 6.12 に示す。上段と下段を基準としたイベント選別をすることで、中段の光量分布もノイズ領域のイベントが大幅に少なくなり、ミューオンイベントがうまく選別されたように見える。

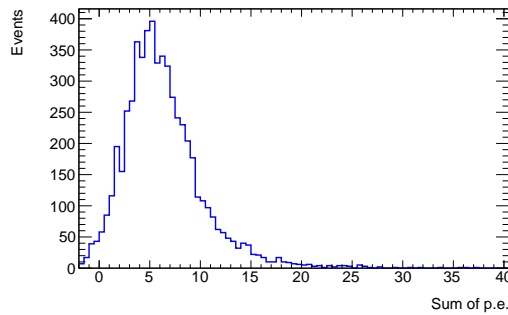
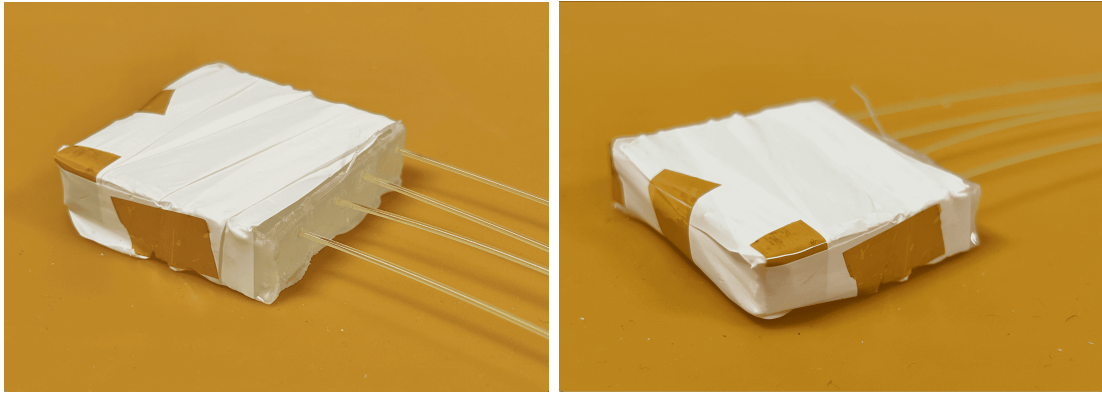


図 6.12: 宇宙線ミューオンイベントに対するシンチレータ④の光量分布

6.2.2 テフロンテープを巻いたシンチレータを用いた測定

前項の測定では、シンチレータの外に光が漏れてしまっていたと考えられる。そこで、測定に使用する 3 つのシンチレータに、図 6.13 のように反射用のテフロンテープを巻き、シンチレータ光が表面で反射するようにして測定を行った。テープを巻いたシンチレータ④を使用して 200,000 イベントを取得した。テープで周りを覆っていない場合と比べてイベントレートはおよそ 4 倍の約 4.0 Hz であった。

図 6.14 に上段と下段の光量の二次元ヒストグラムを示す。それぞれの値が 0 である付近に集まっているイベントに加え、横軸の下段では 50 p.e.、縦軸の上段で



(a) 前側

(b) 後ろ側

図 6.13: テフロンテープを巻いた状態のシンチレータ①

30 p.e. 付近を中心としてイベントが集まっていることが見て取れる。前者はノイズであると考えられ、後者は宇宙線ミュオンイベントであると考えられる。テフロンテープを巻いていない場合の図 6.10 と比べて光量が大きくなっており、ノイズ領域とミュオン事象の領域がうまく分かれている。

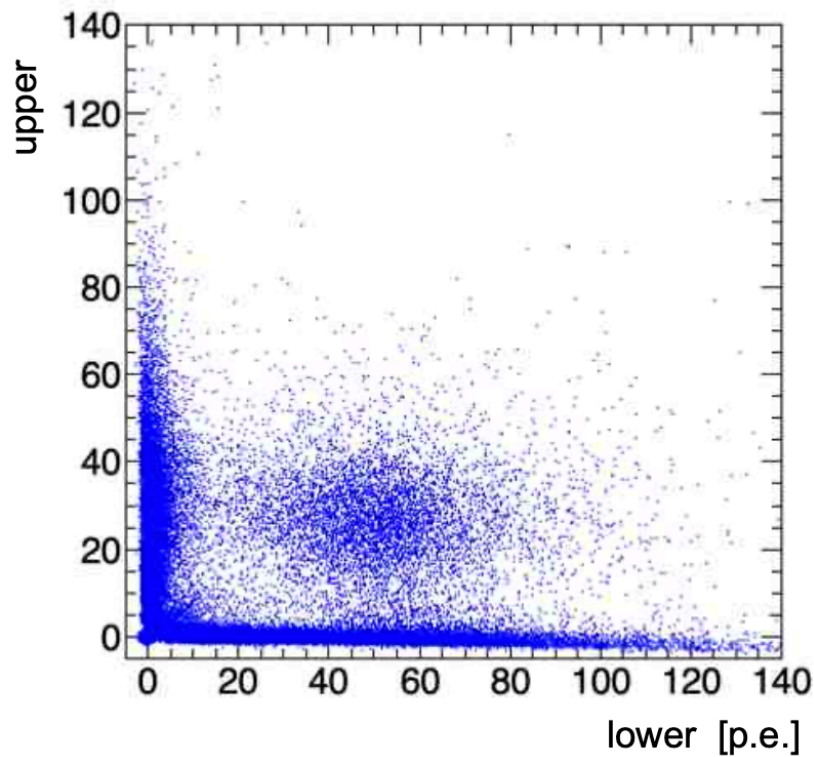
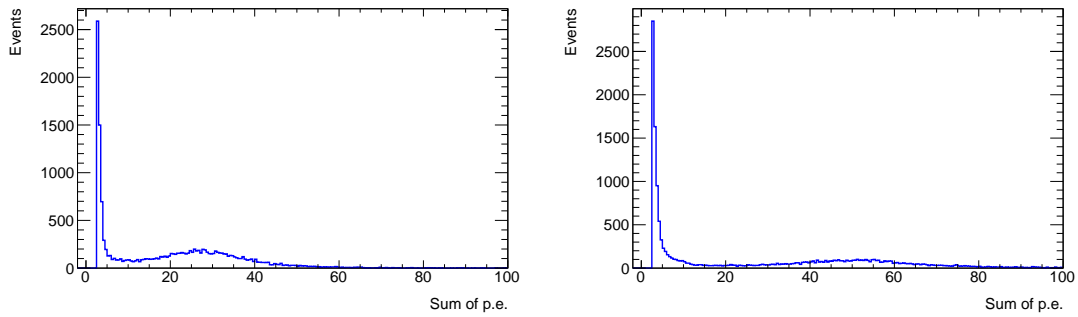


図 6.14: 2次元ヒストグラム（反射用テフロンテープを巻いたシンチレータ④の測定結果）；横軸が下段, 縦軸が上段の総光量 [p.e.]

上段と下段の光量分布を図 6.15 に示す。



(a) 上段

(b) 下段

図 6.15: 上段と下段における総光量のヒストグラム (テフロンテープを巻いたシンチレータ④の測定結果); イベント数が多いペDESTAL領域をカットすることでミュオンイベントの領域を見やすくするために, 合計 2.5 p.e. 以上であるイベントのみを示す.

ミュオンイベントを選別するために、上段は 10 p.e.、下段は 25 p.e. 以上のイベントを選別した。この条件のもとで、評価対象である中段の光量分布を図 6.16 に示す。

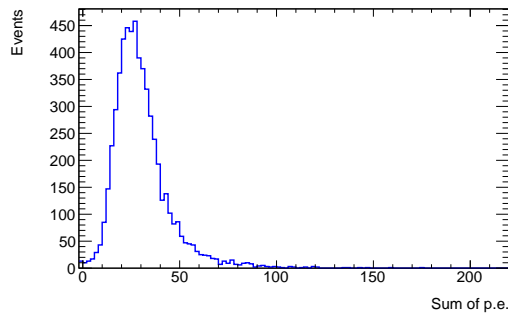


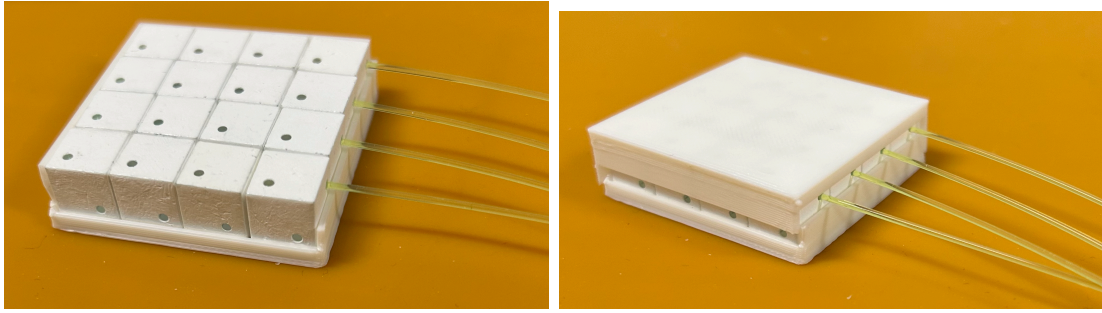
図 6.16: 宇宙線ミュオンイベントに対するテフロンテープを巻いたシンチレータ④の光量分布

6.2.3 Super-FGD キューブを用いた測定

比較のために、図6.17(a)のように Super-FGD キューブを 4×4 個並べて波長変換ファイバーを 1 方向だけに通したものを用意した。この状態ではキューブが動いてしまうため、図6.17(b)のように容器に入れることで位置を固定した。

中段のシンチレータをこれと入れ替え、200,000 イベント取得した。トリガーレートは約 4.0 Hz であった。中段の違いを除くセットアップは図 6.13 と同様である。

図 6.18 に上段と下段の光量分布の二次元ヒストグラムを示す。上段と下段におけ



(a) Super-FGD キューブを 4×4 個並べて (b) (a) に 3D プリンタで作成したケースを被
 ファイバーを 1 方向に通した せて入れて固定した.

図 6.17: Super-FGD で使用されているプラスチックシンチレータキューブを 4×4
 個並べたセットアップ

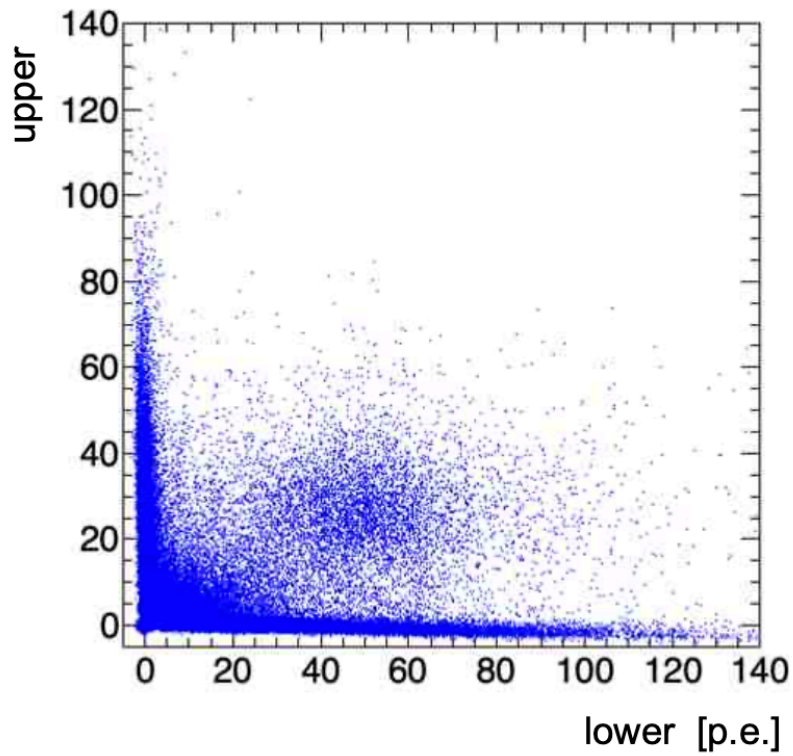
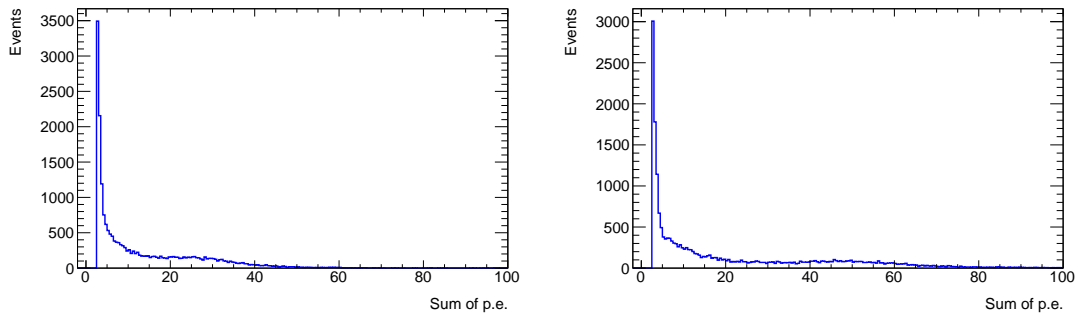


図 6.18: 2次元ヒストグラム (Super-FGD キューブの測定結果) ; 横軸が下段, 縦軸
 が上段の総光量 [p.e.].

る光量分布を図 6.19 に示す。ミューオンイベントを選別するために、上段は 10 p.e.、
 下段は 25 p.e. 以上のイベントを選別した。この条件のもとで、評価対象である中段
 の光量分布を図 6.20 に示す。



(a) 上段

(b) 下段

図 6.19: 上段と下段における総光量のヒストグラム (Super-FGD キューブの測定結果) ; ミューオンイベントの領域を見やすくするために, 合計 2.5 p.e. 以上であるイベントのみを示す.

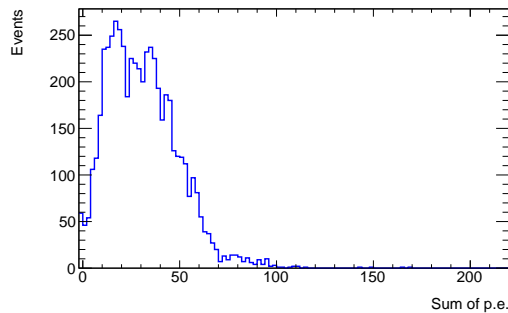


図 6.20: 宇宙線ミューオンイベントに対する Super-FGD キューブの光量分布

6.3 測定結果の比較

テフロンテープを巻いたシンチレータ④と Super-FGD キューブの測定結果を図 6.21、6.22に再度示す。

3つの測定の平均値と標準偏差をそれぞれ表 6.2 に示す。シンチレータ④では平均 6.39 p.e. と光量が少ないのに対し、テフロンテープを巻いたシンチレータ④は 30.2 p.e. と約 5 倍であった。これは、シンチレータ④にテフロンテープを巻いたことで側面で反射し、光が外に逃げなかったためだと考えられる。一方、Super-FGD キューブを用いた測定の平均は 30.9 p.e. であり、テフロンテープを巻いたシンチレータ④とほぼ同じであった。従って、注型成形プラスチックシンチレータを使って検出器を製作する際にはこのような反射の仕組みを導入する必要がある、それにより Super-FGD と同等の光量を得ることが期待される。なお、テフロンテープを巻いたシンチレータ④と比べて、Super-FGD キューブを用いた測定では分布の

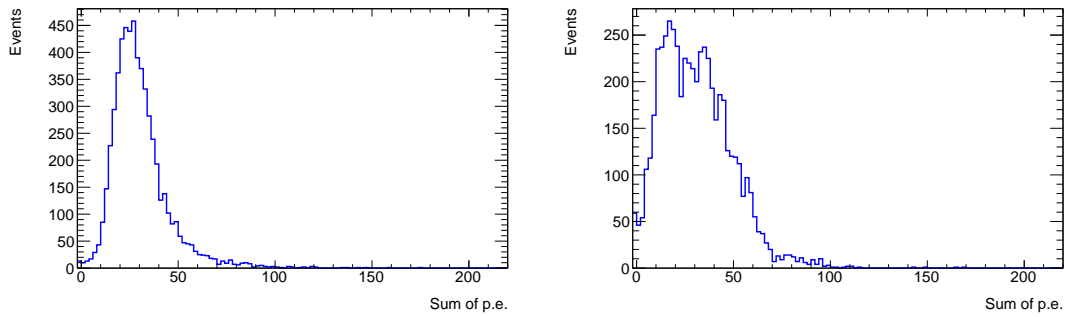


図 6.21: 総光量のヒストグラム (テフロンテープを巻いたシンチレータ④) 図 6.22: 総光量のヒストグラム (Super-FGD キューブ)

形状が明らかに異なる結果となった。ペDESTAL領域のイベント数に着目すると、Super-FGD キューブでは、およそ 50 イベントであり、上下のシンチレータが光った時に中段の Super-FGD キューブが光っていないイベントがあることが分かる。キューブの隙間が不感領域となっていたことが原因の一つとして考えられる。本研究で製作したシンチレータではこのような隙間がないことが一つの利点である。また、図 6.22 は図 6.21 に比べてピーク位置のイベント数が少ないが、これは付録 A に記載した図 A.3 の各チャンネルにおけるヒストグラムにおいて中段の (e)~(f) の MPPC の個体差が大きく、ミュオンイベントで得られた光量が各チャンネルで大きく違うことに起因すると考えられる。今回は同じ機種 of MPPC においては電圧を概ねそろえ、LED を用いて ADC から p.e. への変換式は個別に求めているが、これに加えて MPPC の個体差に応じて適切な電圧調整を行った方がより良い測定結果が得られたと思われる。

表 6.2: 選別したイベントの平均値と標準偏差

測定シンチレータ	平均光量 (p.e.)	標準偏差
シンチレータ④	6.39	4.28
テフロンテープを巻いたシンチレータ④	30.2	15.0
Super-FGD キューブ	30.9	18.2

本研究で使用したものと近い性能を持つ S13360-1325PE の MPPC を用い、また三方向にファイバーを通した Super-FGD キューブを使用した CERN のミュオンビームテストでは、ファイバーごとの平均光量は 50~60 p.e. であるという結果が得られている [35]。また、本実験では一方向にしかファイバーを通していないため、三方向のファイバーに分散していた光がひとつのファイバーに集中する分、ファイバーごとの平均光量が 1.5 倍程度増える [36] ことを考慮すると、本研究のセットアップ

における平均光量はおよそ 75~90 p.e. と見積ることができる。これに対し、本研究において Super-FGD を使用した測定結果は 30.9 p.e. とおよそ 1/2~1/3 の光量であった。光量が少ない原因として、MPPC の印加電圧が低かったことが考えられる。6.2.2 節で述べたとおり、光学キャリブレーションの際に全体の電圧を 57.8 V より大きくするとデータ取得の際に EASIROC の電源が落ちてしまうことが確認されたため、全体の電圧設定を 57.8 V として測定を行った。測定対象の中段で使った MPPC は、上段および下段で使っていた MPPC と比べて推奨動作電圧がおよそ 2~4 V 程度大きく 56~58 V 程度であり、推奨動作電圧に対して適切な電圧値に設定していたこととなる。光量が小さかった原因は不明であるが、測定セットアップに何らかの問題があったと考えられる。

結果として、製作した注型成形プラスチックシンチレータで Super-FGD キューブと同等に近い光量が得られることが確認できた。

第7章

結論

本研究においては、T2K 実験において 2023 年に導入されたニュートリノの標的兼飛跡検出器 Super-FGD と同様の検出器を、注型成形プラスチックシンチレータを用いて製作した。2027 年に稼働予定のハイパーカミオカンデ (HK) 実験に向けて、さらなる測定精度向上のため Super-FGD の体積の拡張が議論されており、これを実現するためには、組立工数の削減が必須である。注型成形プラスチックシンチレータは、型に流し込んで恒温水槽で温めることで硬化し、固体プラスチックシンチレータと同様の性質を示す有機材料である。この性質を利用することにより、従来の組立方法を簡略化することを目指した。検出器の製作にあたり 2 つの方法に取り組んだ。

1 つ目は、ファイバーを先に入れた状態でシンチレータを硬化させる方法である。まず初めに、波長変換ファイバーを固まる前の EJ-290 に入れるとファイバーが溶けてしまうことを確認した。そのため、波長変換ファイバーを EJ-290 から保護する必要があると考え、波長変換ファイバーのフッ素薄膜コーティングを試みた。そして、コーティングを施すことで EJ-290 が波長変換ファイバーに与えるダメージを軽減し、ファイバーが溶けにくくなることを確認した。しかしながら、本研究で行った実験ではファイバーを完全に保護することはできず、コーティングを施してもファイバーはダメージを受けてしまう結果となった。なお、本研究ではプライマー剤による前処理を行わずにコーティングをしており、適切な前処理を施すことで密着性が高まりコーティングがうまくいく可能性がある。一方、フッ素薄膜コーティングをしたことによるファイバーの光伝達効率への悪影響はなかった。

2 つ目に取り組んだ方法は、あらかじめ波長変換ファイバーの代わりにチューブ等を通しておき、注型成型プラスチックシンチレータを流し込み硬化させた後にチューブとファイバーを入れ替える方法である。検出器製作試験の結果が良好だったため、本手法を採用し、高い品質精度の検出器製作を行うための改善を繰り返した。3D プリンタで 1 cm 平方ごとに区分けされた格子状のポリアミド (PA) 型を作製し、鋳型

兼反射材の役割を期待して使用した。この型に注型成形プラスチックシンチレータを流し込むと底面からシンチレータが流出してしまうことが確認できたため、ウォーターバスで温める際にシンチレータが流出することを防ぐ方法を考えた。ポリエチレンナフタレートフィルムを箱型に成形して格子型を覆い、外側をアルミ板で押さえつける方法がうまくいき、この方法で検出器を製作した。格子状の型の上にアルミ板を乗せてシンチレータを固めることで、検出器の上面を平らにすることができた。また、波長変換ファイバーの代わりにあらかじめ通しておくチューブとして、1.18 mm ϕ の PTFE チューブが適切であるという結果が得られた。穴の空いたアルミブロックをチューブの端に通すことでチューブ端を簡単に掴むことができるセットアップを考案し、チューブの引き抜きを容易にした。この方法で、キューブ 4 × 4 個の大きさの検出器を 4 つ作成した。

製作したシンチレータを用いて宇宙線ミュオンを観測し、Super-FGD キューブを使用した場合と比較することで性能評価を行った。その結果、白いテフロンテープでシンチレータの周囲を覆い、シンチレータ光が表面で反射するようにすることで Super-FGD キューブと同等に近い光量が得られることが確認できた。

今後、格子型における光漏れの対策を中心に、更なる改良を行っていく。また、本研究では試験的に小サイズの検出器製作を行なった。組立工数の削減を実現するため、一度に大型の検出器を製作する手法の確立を目指していく。

謝辞

本研究を遂行し修士論文をまとめるにあたり、多くの方々からご指導とご協力をいただきました。

指導教員である市川温子教授には、研究活動全般にわたって大変お世話になりました。研究に関する助言や論文の添削、研究室での生活等あらゆる面でサポートしていただきました。市川教授のご指導と温かいお心遣いがあったからこそ、本研究を円滑に進め、本論文をまとめることができました。ここに甚大なる謝意を表します。

Berns Lukas 助教には、特にソフトウェアの面や、論文の作成にあたり非常に大きなご助力をいただきました。解析方法やプログラムの書き方等、親身になって教えていただきました。宇宙線測定においては、EASIROC モジュールを使用した測定や解析にあたり非常に手厚くサポートしていただきました。心より感謝申し上げます。

また、KEK の松原綱之先生、京都大学の木河達也先生には、ご提供いただいた資料やご助言のおかげで研究を進めることができました。厚く御礼を申し上げます。

本研究室を昨年卒業された若林さんには、ファイバーの光量測定セットアップをご提供いただき、研究において様々なご指導とご助言をいただきました。同期の浦野君と矢野君とは、日々楽しくお話しさせていただき、研究生活における大きな支えでした。深く感謝申し上げます。

最後に、これまで支えてくれた友人達と家族に心からの感謝を申し上げます。

付録 A

宇宙線測定における各チャンネルの測定結果

宇宙線測定における各チャンネルの測定結果をそれぞれ図 A.1、A.2、A.3 に示す。各プロットの配置は各チャンネルの空間的配置に相当する。ch13~10 が上段のトリガーシンチレータ、ch9~6 が中段の測定用シンチレータ、ch5~2 が下段のトリガーシンチレータである。なお、チャンネルによってはペDESTALのイベントレートが大きいことで、ミューオンイベント領域のイベントが見えなくなることから、2.5 p.e. 以上のイベントのみ示している。

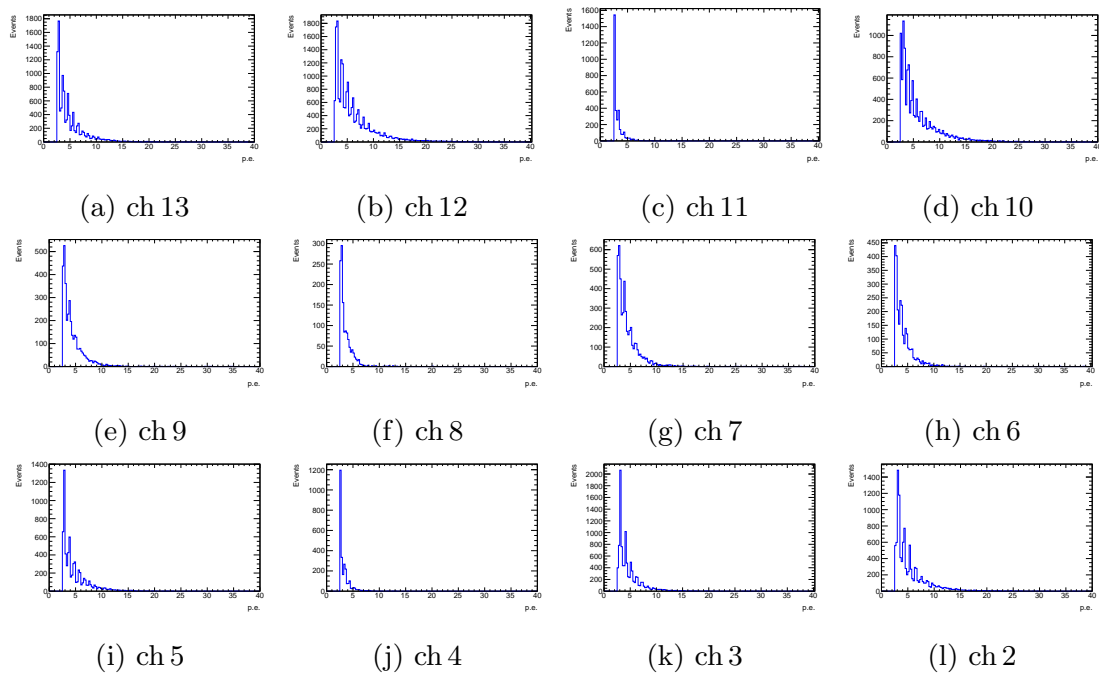


図 A.1: シンチレータ④の測定結果

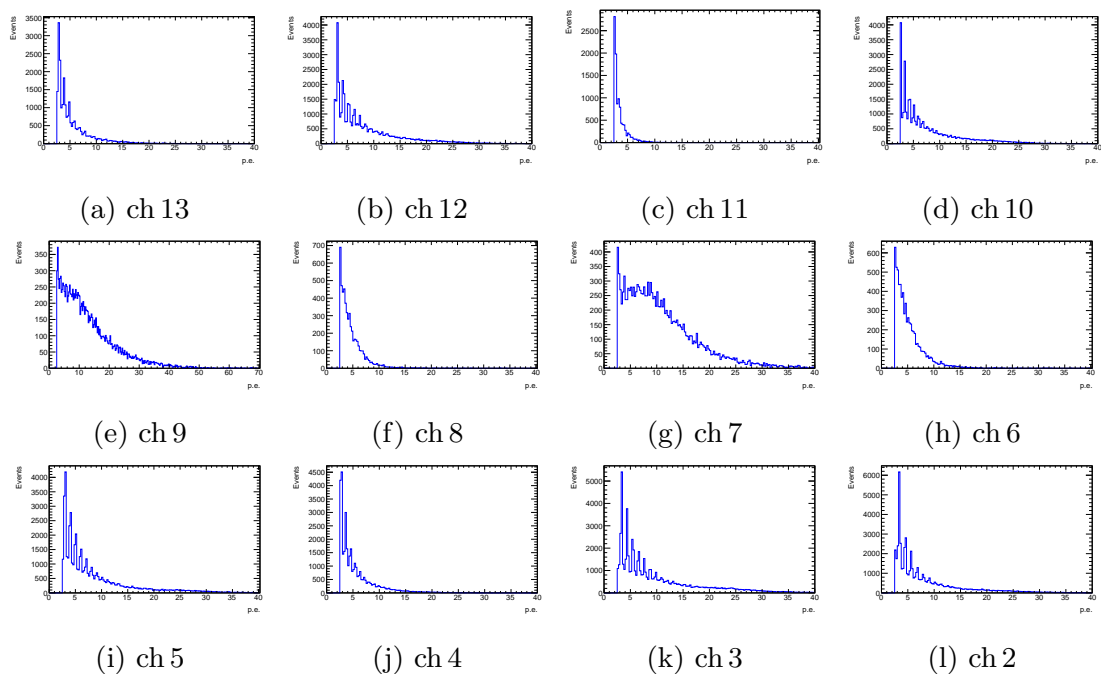


図 A.2: 反射用テフロンテープを巻いたシンチレータ④の測定結果

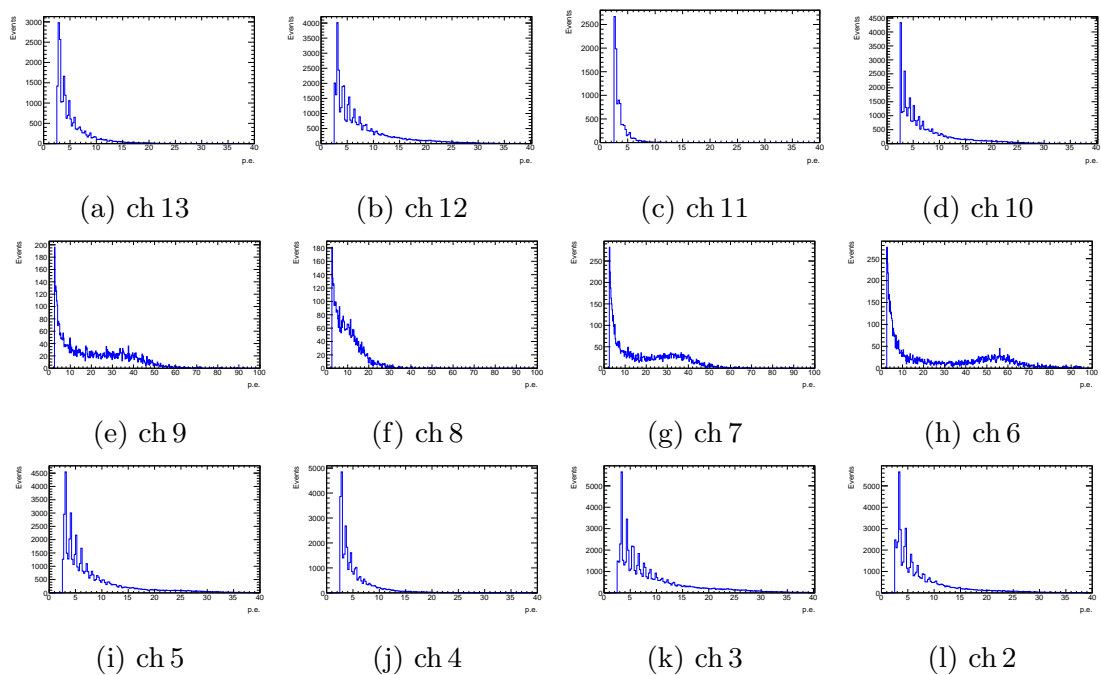


図 A.3: Super-FGD キューブの測定結果

参考文献

- [1] File:standard model of elementary particles.svg., https://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg. Accessed on 12/10/2024
- [2] Mark Thomson, “Modern Particle Physics”, United Kingdom : Cambridge University, 2013 Press.
- [3] Y.Ashie et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation” , Phys. Rev. Lett. 93, 101801, 2004.
- [4] 木河達也. “T2K 実験新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”. Master’ s thesis, 京都大学, 2011. <https://t2k-experiment.org/ja/>
- [5] The T2K Experiment <https://t2k-experiment.org/ja/>
- [6] J-PARC 大強度陽子加速器施設 <http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>
- [7] K. Abe et al. “T2K ND280 Upgrade – Technical Design Report”, 2019.
- [8] Y. Itow et al. “The jhf-kamioka neutrino project”, 2001.
- [9] K. Abe et al. (T2K Collaboration). “Constraint on the matter-antimatter symmetry- violating phase in neutrino oscillations”, 2019.
- [10] K. Abe et al., “Hyper-Kamiokande Design Report” , arXiv:1805.04163 [physics.ins-det]
- [11] Y. Kudenko, ” Hyper-Kamiokande” , JINST 15 C07029, 2020.
- [12] 浜松ホトニクス株式会社, MPPC(SiPM)/MPPC アレイ. https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html#anchor05
- [13] Ryo Fujita, Department of Physics, University of Tokyo, “Research and development of a new fine-grained scintillator tracker for the upgrade of T2K near detector”.
- [14] Claudio (LPNHE Paris) Giganti, Thorsten (IFAE Barcelona) Lux, and

- Masashi (University of Tokyo) Yokoyama. “NP07: ND280 Upgrade project”. Technical Report CERN-SPSC-2020-008. SPSC-SR-267, CERN, Geneva, Mar 2020.
- [15] K. Abe et al. “T2K ND280 Upgrade – Technical Design Report”, 2019.
- [16] Davide Sgalaberna. “The t2k nd280 upgrade”, Jul 2020.
- [17] Ciro Riccio “T2K Analysis Status and Plan”, Jan 2025.
- [18] K. Abe et al. “T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report”, 2019.
- [19] A Blondel, M Yokoyama, and M Zito. “The T2K-ND280 upgrade proposal”. Technical Report CERN-SPSC-2018-001. SPSC-P-357, CERN, Geneva, Jan 2018. This proposal is the follow-up of the Expression of Interest EOI-15 submitted to SPSC in January 2017.
- [20] BASF, Ultrafuse PA Natural Filament <https://ultrafuseff.jp/product/ultrafuse-pa/?srsltid=AfmB0opG-hVRdldrSnmIw9d2FSop-PHxn6T-kY4HAKVPGG59Zo3In2br>
- [21] EJ-290 <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-290>
- [22] Kuraray Plastic Scintillating Fibers 製品情報 https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf
- [23] Shoma Kodama, Hokuto Kobayashi, Wataru Okinaga, Kota Nakagiri, Yasuhiro Nakajima, and Masashi Yokoyama, “Performance of New Kuraray Wavelength-shifting Fibers with Short Decay Time”, 2023. <https://academic.oup.com/ptep/article/2024/5/053H01/7644353>
- [24] サイトトップ™ 製品情報 <https://www.agc-chemicals.com/jp/ja/fluorine/products/detail/index.html?pCode=JP-JA-F019>
- [25] サイトトップ® のコーティング特性 https://www.agc-chemicals.com/file.jsp?id=jp/ja/fluorine/products/cytop/download/pdf/Cytop_tech5_JP.pdf
- [26] サイトトップ® のキュア条件参考例 https://www.agc-chemicals.com/jp/ja/fluorine/products/cytop/download/pdf/Cytop_tech7_JP.pdf
<https://arxiv.org/pdf/2311.07297>
- [27] 浜松ホトニクス株式会社, Si フォトダイオード s1336-5bq. <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1336-5BQ.html> Accessed on 12/12/2024
- [28] 若林大貴. “ハイパーカミオカンデ実験に向けた水標的新地レーティングファイバートラッカーの開発”. Master’s thesis, 東北大学, 2024.

- [29] ヤマト科学株式会社, ウォーターバス BM100. <https://www.yamato-net.co.jp/product/show/bm100/>
- [30] 株式会社 三商, 4L ウォーターバス N3-4. <https://san-web.co-sansyo.co.jp/sanweb/d/44-0597>
- [31] 汎用 MPPC 読み出しモジュール <https://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public>
- [32] Omega, “EASIROC DATASHEET Version:5” April 2011.
- [33] 石島直樹・仲居勇樹, “EASIROC MODULE User Guide”, 2014.
- [34] 竹馬匠泰. “ニュートリノ反応断面積測定実験のためのミュオンレンジ検出器および読み出しエレクトロニクスの研究開発”. Master’s thesis, 東北大学, 2016.
- [35] A. Blondel et al 2020 JINST 15 P12003 DOI: 10.1088/1748-0221/15/12/P12003 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/12/P12003>
- [36] T2K collaboration 内部資料.