

卒業論文

HK 実験の前置検出器 ND280++ のための SciFi-WSL 変換効率測定、 およびハイドロゲル薄型水標的の開発

東北大学 理学部 物理学科 素粒子実験 (加速器) 研究室
C2SB2121 渡邊一輝

2026 年

概要

CP 対称性の破れの発見を目指す T2K 実験では、後置検出器がハイパーカミオカンデ (HK) へとアップグレードされることに伴い、前置検出器である ND280 のアップグレードも計画されている。現在の ND280 は主たる標的として炭素を用いているが、HK との共通の標的である水へと変更することで、相互作用の相違に起因する系統誤差を低減する必要がある。そこで本研究では、将来的なアップグレード計画 (ND280++) における「Water Tracker」の開発に向け、SciFi-WLS の波長変換効率の測定、およびハイドロゲルを用いた薄型水標的の開発を行った。SciFi-WLS の変換効率測定においては、新たなセットアップを構築することで変換効率の位置依存性を評価し、最大で約 25% の変換効率を得られることを明らかにした。ハイドロゲルの開発においては、封止フィルムの有無による乾燥プロセスの違いおよび自重による重心変化を測定した。その結果、フィルムによる高い乾燥抑制効果を確認するとともに、自重による水移動 (重心変化) が生じないことを実証し、検出器へのハイドロゲル実装に向けた明確な見通しを得た。

目次

第 1 章	ニュートリノ	3
1.1	ニュートリノとは	3
1.2	ニュートリノ振動	4
1.3	CP 対称性の破れ	5
第 2 章	加速器ニュートリノ振動実験	7
2.1	T2K 実験	7
2.1.1	ニュートリノビーム	7
2.1.2	前置検出器	9
2.1.3	後置検出器：スーパーカミオカンデ (SK)	11
2.2	ハイパーカミオカンデ (HK) 実験	13
2.2.1	ハイパーカミオカンデ (HK)	13
2.2.2	Intermediate Water Cherenkov Detector(IWCD)	14
2.2.3	前置検出器：ND280++	15
第 3 章	SciFi-WLS の変換効率測定	17
3.1	SciFi と WLS を用いたシンチレーション光の読み出しの最適化	17
3.2	測定の初期セットアップ	19
3.2.1	初期セットアップの構成	19
3.2.2	SciFi と WLS	20
3.2.3	MPPC	21
3.2.4	EASIROC 等の読み出しシステム	22
3.3	MPPC の較正	23
3.3.1	ダークカウントの測定	24
3.3.2	LED を用いた較正	25
3.3.3	線源を用いた較正	27
3.4	初期セットアップによる変換効率の測定と課題	30
3.4.1	測定方法	30
3.4.2	測定結果と考察	31

3.4.3	初期セットアップの課題と改善方法	32
3.5	新セットアップの作成	32
3.5.1	新セットアップの概要	32
3.5.2	ファイバー側	32
3.5.3	MPPC 側	33
3.6	新セットアップによる変換効率の測定	34
3.6.1	新セットアップによる測定の概要	34
3.6.2	測定結果と MPPC の較正	35
3.6.3	変換効率の算出と考察	38
第 4 章	ハイドロゲル薄型水標的の開発	40
4.1	水標的の選択肢とハイドロゲルの利点	40
4.1.1	水標的の選択肢	40
4.1.2	ハイドロゲルの利点と課題	40
4.2	フィルムの有無によるハイドロゲルの蒸発抑制	41
4.2.1	方法	41
4.2.2	結果考察	43
4.3	ハイドロゲルの重心変化の評価	45
4.3.1	方法	45
4.3.2	結果考察	46
第 5 章	今後の展望	47
5.1	SciFi-WLS の伝送最適化	47
5.2	ハイドロゲルの乾燥防止策の検討と強度向上策の実装	48
第 6 章	結論	49
6.1	SciFi-WLS の変換効率測定	49
6.2	ハイドロゲル薄型水標的の開発	49
参考文献		53

第 1 章

ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

ニュートリノは標準模型におけるレプトン的一种で、電荷を持たない素粒子である。ニュートリノには弱い相互作用と重力相互作用のみが働くため、物質のほとんどと反応しない。ゆえに、ニュートリノはまれにしか検出できない。図 1.1 に示すように、荷電レプトンである電子 (e)、ミューオン (μ)、タウオン (τ) に対応して、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) と 3 世代存在する。標準模型においては、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。ゆえにニュートリノは質量を持たないとされてきた。これは、現在まで右巻きのニュートリノや左巻きの反ニュートリノが観測されていないことに基づいている。しかし、後述するニュートリノ振動の観測により、ニュートリノが質量を持つことが示されおり、標準模型の枠組みでは説明できない新しい物理の存在を強く示唆している。

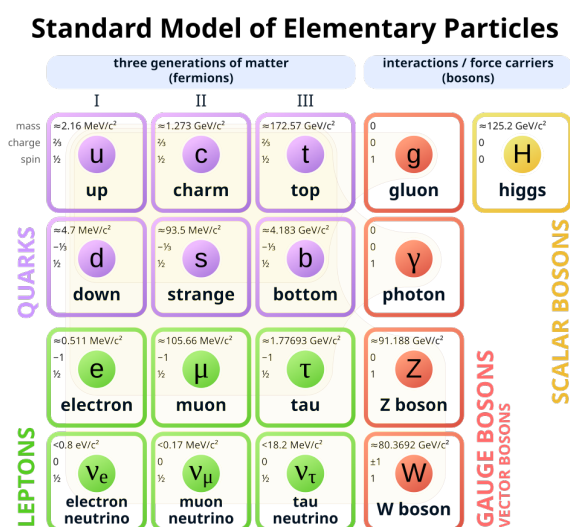


図 1.1: 標準模型における素粒子一覧 [1]

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とはニュートリノが飛行中にそのフレーバーを周期的に変える現象である。これはニュートリノがわずかに質量を持ち、フレーバー固有状態 $|\nu_l\rangle$ ($l = e, \mu, \tau$) と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) が混合しているために起こる。この現象は 1962 年にポンテコルボや牧・中川・坂田によって提唱された。[2]

フレーバー固有状態と質量固有状態の混合は 3×3 のユニタリ行列を用いて

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

と表される。 U_{PMNS} は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) 行列と呼ばれ、

$$\begin{aligned} U_{PMNS} &= \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.2)$$

と表される。ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ で、 θ_{ij} は i と j の世代間の混合角である。 δ_{CP} は複素位相角を表し、(1.3) 節で述べるように $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ であれば CP 対称性が破れることを意味する。

続いて、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を考える。式 (1.1) と同様にフレーバー固有状態と質量固有状態の混合は 2×2 のユニタリ行列を用いて、

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

と表される。質量固有状態の時間発展は Schrödinger 方程式を解くことで、自然単位系で

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.4)$$

となる。ここで、 E_i は質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の固有エネルギーである。また、ニュートリノの質量は非常に小さいため、

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.5)$$

と近似できる。 p と E はそれぞれ時刻 t におけるニュートリノの運動量とエネルギーである。ま

た、 $p \gg m_i$ と近似したため、 p_i を p や E と近似することができる。フレーバーの固有状態の時間発展は式 (1.3) に式 (1.4) を代入することで、

$$\begin{pmatrix} |\nu_e(t)\rangle \\ |\nu_\mu(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta |\nu_1(0)\rangle \exp(-iE_1t) + \sin\theta |\nu_2(0)\rangle \exp(-iE_2t) \\ -\sin\theta |\nu_1(0)\rangle \exp(-iE_1t) + \cos\theta |\nu_2(0)\rangle \exp(-iE_2t) \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

となる。ニュートリノが $|\nu_e\rangle$ の状態で生成され、時間 t 後に $|\nu_\mu\rangle$ の状態に遷移する確率は、途中で式 (1.5) を適用することにより、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 \quad (1.7)$$

$$= |(-\sin\theta \langle \nu_1 | + \cos\theta \langle \nu_2 |) \cdot \{\cos\theta |\nu_1\rangle \exp(-iE_1t) + \sin\theta |\nu_2\rangle \exp(-iE_2t)\}|^2 \quad (1.8)$$

$$= |\sin\theta \cos\theta \{\exp(-iE_2t) - \exp(-iE_1t)\}|^2 \quad (1.9)$$

$$= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos\{(E_1 - E_2)t\}] \quad (1.10)$$

$$= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{|m_1^2 - m_2^2|t}{2E}\right) \right\} \quad (1.11)$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right) \quad (1.12)$$

となる。ここで、 $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ である。さらに、ニュートリノが飛行距離 L を移動するのにかかる時間 t は、ニュートリノの速度を光速 c と近似して $L = ct$ と表すことができるため、

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L [\text{eV}^2] [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}\right) \end{aligned} \quad (1.13)$$

のように変形できる。この式より、仮にニュートリノが質量を持たないとすると $\Delta m^2 = 0$ ゆえ、ニュートリノのフレーバーは変化しない、つまりニュートリノ振動が起こらないことがわかる。翻って、1998年にニュートリノ振動が観測された事実は、ニュートリノが質量を持つことを示した [3]。

1.3 CP 対称性の破れ

素粒子物理学の未解決問題の一つに、宇宙における物質と反物質の非対称性というものがある。宇宙の初期には物質と反物質は同量存在していたと考えられているが、現在の宇宙では物質が圧倒的に多く存在している。1967年にアンドレイ・サハロフはこのような非対称性が存在するためには、

- バリオン数の非保存
- C および CP 対称性の破れ
- 熱平衡状態からの逸脱

の 3 条件が必要であると提唱した。[4]

その中でも CP 対称性の破れは、物質と反物質の振る舞いが異なることを意味する。1.2 節後半においては、2 世代間のニュートリノ振動を考えたが、実際は 3 世代間でのニュートリノ振動が起こる。3 世代のニュートリノ振動においては式 (1.2) で示したように、PMNS 行列には複素位相角 δ_{CP} が存在する。例えば $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率は

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 \\
 &= \left| \sum_i U_{ei} \exp\left(-i \frac{m_i^2 L}{2E}\right) U_{\mu i}^* \right|^2
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

$$\begin{aligned}
 P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) &= |\langle \bar{\nu}_e | \bar{\nu}_\mu(t) \rangle|^2 \\
 &= \left| \sum_i U_{ei}^* \exp\left(-i \frac{m_i^2 L}{2E}\right) U_{\mu i} \right|^2
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

のように表される。反粒子においては式 (1.2) の複素共役によって固有状態が混合されるため、 δ_{CP} が 0 や π でない場合、ニュートリノと反ニュートリノで振動確率が異なってしまうのである。実際に 2 章で述べる T2K/HK 実験では、この反応の δ_{CP} の値を測定し、CP 対称性の破れを探索することが目標の一つである。

第 2 章

加速器ニュートリノ振動実験

2.1 T2K 実験

T2K(Tokai to Kamioka) 実験とは茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) の加速器から生成されたニュートリノビームを、約 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデ (SK) で検出する長基線ニュートリノ振動実験である。ニュートリノ振動の観測によって CP 対称性の破れの発見や振動パラメータ (θ_{23} や Δm_{32}^2) の精密測定を行うことを目的としている。



図 2.1: T2K 実験の概略図 [5]

2.1.1 ニュートリノビーム

T2K 実験では、J-PARC の加速器から生成されたニュートリノビームが使用される。その J-PARC では図 2.2 の 3 種類の加速器で 30 GeV までに加速された陽子によってニュートリノビームが生成される。1 つ目の加速器、LINAC(LINear Accelerator) は直線型加速器であり、負水素イオン H^- を 400 MeV まで加速する。次に 2 つ目の加速器、RCS(Rapid Cycling chrotron) はシンクロトロン加速器である。RCS は LINAC からの H^- を受け取り、炭素薄膜で電子を剥

がして陽子に変換した後、陽子のエネルギーを 3GeV まで加速する。最後に 3 つ目の加速器、MR(Main Ring) もシンクロトロン加速器である。MR は RCS からの陽子を受け取り、さらに加速して 30 GeV まで加速する。



図 2.2: J-PARC の加速器 [6]

この陽子ビームはグラファイト標的に入射されて、ハドロン反応によって π^+ 中間子や K^+ 中間子などの粒子を生成する。このうち生成された π^+ 中間子は電磁ホーンと呼ばれる装置によって収集され、



のように崩壊して ν_μ のニュートリノビームを生成する。逆に電磁ホーンに流す電流の向きを反転させることによって、 π^- 中間子が収集され、



のように崩壊して $\bar{\nu}_\mu$ の反ニュートリノビームを生成することもできる。

Off-axis 法

このようにして生成されたニュートリノビームは、その中心軸が 2.5° だけスーパーカミオカンデに対してずらしてある。これを Off-axis 法と呼ぶ。式 (1.13) より、J-PARC から約 295 km 離れたスーパーカミオカンデで $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動が最大になるエネルギーは約 0.6 GeV である。

Off-axis 法は、このエネルギーでニュートリノビームのエネルギースペクトルがピークになるようにする方法である。さらに、2 体崩壊の運動学的な制約により、角度を大きくするほどパイオンのエネルギーに関わらず、ニュートリノのエネルギーが抑制されるため、Off-axis 法はニュートリノのエネルギースペクトルを狭めることができるという利点もある。

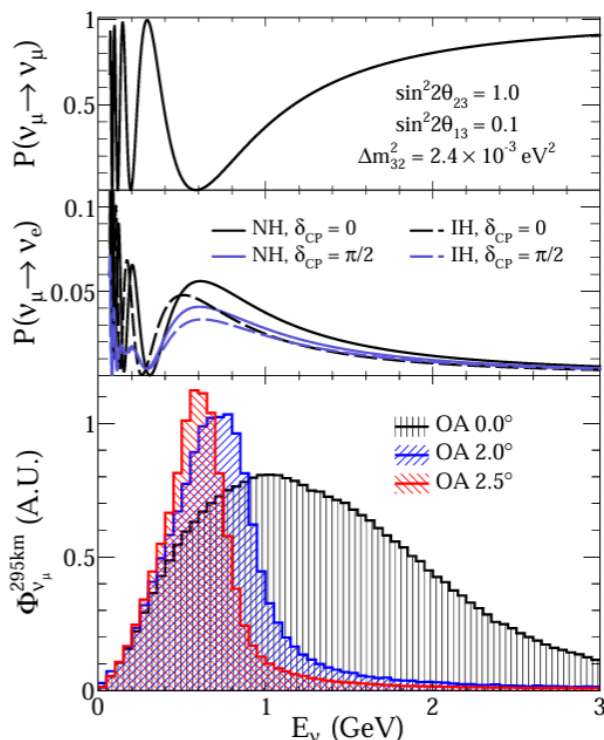


図 2.3: ニュートリノビームの Off-axis 角による違い (下図) とニュートリノの振動確率 (上図)[7]

2.1.2 前置検出器

前置検出器はニュートリノが振動する前のニュートリノビームをモニターする検出器である。T2K 実験の前置検出器はビーム下流 280 m のところに配置されており、Off-axis 角によって主に 3 種類ある。具体的にはビーム軸上にある INGRID(Interactive Neutrino GRID) と、 1.5° の角度にある WAGASCI(WAter Grid And SCIntillator detector)、SK との軸上つまりビームに対して 2.5° の角度にある ND280 である。INGRID は主にニュートリノビームのビームのプロファイルをモニターするために用いられ、WAGASCI は水とプラスチックのニュートリノとの反応断面積比を測定することが目的である。この節では特に ND280 について詳らかに述べる。

ND280

前述のとおり、ND280 はニュートリノ生成標的の下流 280 m に Off-axis 角 2.5° の位置に配置されている T2K 実験における前置検出器である。振動前のニュートリノフラックスやニュートリノの原子核との反応の測定などが目的である。現在の ND280 の概略図を図 2.4 に示す。検出器全体を磁石 (UA1 Magnet) が覆っており、0.2T の磁場を印加することで曲げられた粒子の軌跡から運動量や電荷を測定することができるようになっている。

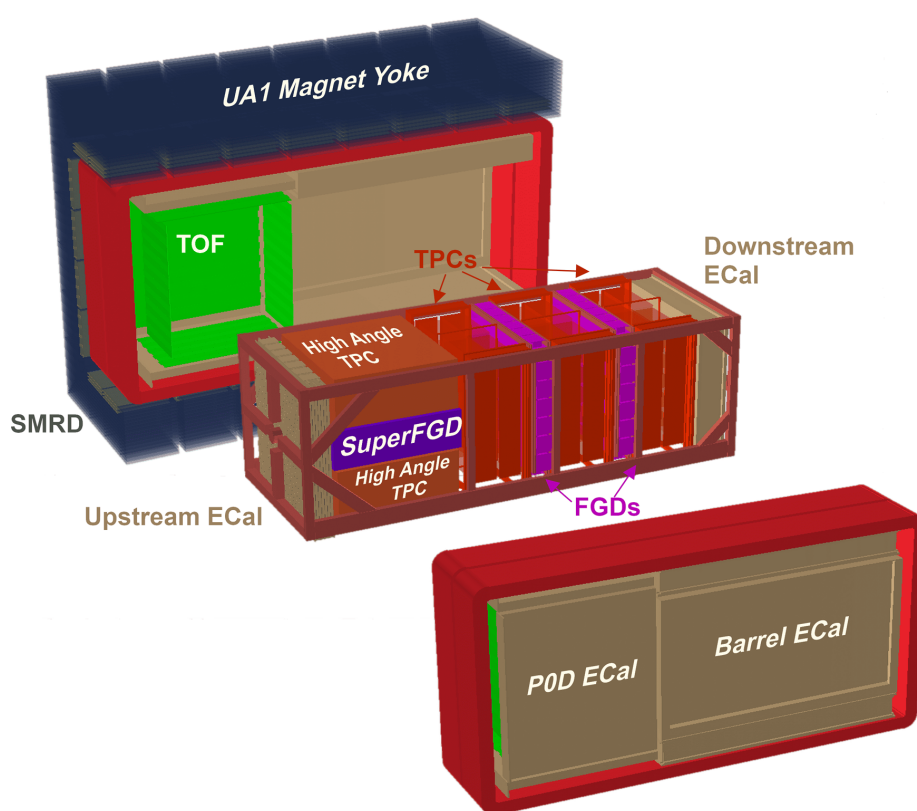


図 2.4: ND280 の概略図。ニュートリノは図左から入射される。

検出器の内部のうちニュートリノビームの下流方向には TPC(Time Projection Chamber) と FGD(Fine Grained Detector) が交互に配置されている。TPC はガス検出器であり、ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子を磁場によって曲げ、その飛跡を検出することによって電荷や運動量を測定する。FGD はプラスチックシンチレータのみからなる上流部側のもの、水とシンチレータの相互が交互になっている下流側のものがある。それぞれのシンチレーター層は内部に波長変換ファイバーを通した 1 cm 角の棒状のシンチレーターから構成される。これらは、隣接する層と軸方向が互いに直行するように積層されている。

上流部に関しては、2023年に系統誤差を削減することを目的にND280-upgradeとして改良がされ、SFGD(Super - Fine Grained Detector)とHA-TPC(High Angle - Time Projection Chamber)、そしてそれらを取り囲むTOF(Time of Flight)に更新された。SFGDは1 cm角のプラスチックシンチレータのキューブを $56 \times 192 \times 182$ に約200万個並べた検出器であり、各キューブに3本の波長変換ファイバーを通すことで粒子の飛跡を3次的に再構成することが可能である。HA-TPCは大角度に散乱された粒子を測定するためにSFGDの上下におかれたTPCである。TOFは入射粒子の位置や時間を測定することによって、入射方向を決定することができる。これはSFGDのバックグラウンドの除去に寄与する。

これらの検出器の外周にはECal(Electromagnetic CALorimeter)が配置され、内側の検出器では静止しきれなかった荷電粒子や線のエネルギーを測定している。また、UA1Magnetの鉄ヨークの間にはSMRD(Side Muon Range Detector)と呼ばれるシンチレータ検出器が設置されており、内部の検出器で発生した大角度へ放出されたミュオンや背景事象となる宇宙線ミュオンの測定を行っている。

2.1.3 後置検出器：スーパーカミオカンデ (SK)

スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande:SK) は岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山地下約1000 mにある世界最大の水チェレンコフ検出器である。SKは陽子崩壊の探索やニュートリノの検出によるその性質の解明や宇宙の観測を目的としており、T2K実験においては振動後のニュートリノを観測する後置検出器である。その水タンクは直径39.3 m、高さは41.4 mの円筒型であり、5万トンの超純水が蓄えられている。水タンクはニュートリノ測定に用いられる内水槽と、宇宙線ミュオンや地中由来のミュオン等の背景事象を除去するための外水槽に分かれている。内水槽には直径約50 cmの光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube: PMT) が約11000本、外水槽には直径約20 cmのPMTが約2000本設置されている。(図 2.5)

ニュートリノが原子核や電子と反応し生成された荷電粒子は、水中の光速よりも速く進んだ時、円錐形にチェレンコフ光と呼ばれる光を放出する。このチェレンコフ光をSKの壁に取り付けられたPMTが観測することによって、荷電粒子のエネルギーや進行方向、粒子の種類を同定することができる。荷電粒子が電子の場合は電磁シャワーによって測定されるチェレンコフ光のリングは不明瞭になるが、ミュオンの場合はまっすぐ飛ぶため、明瞭なリングが測定される。この違いによって、電子とミュオンは99%以上の精度で識別することが可能である。(図 2.6)

2020年には観測精度のさらなる向上を目指し、SKの超純水へ微量のガドリニウムを添加する改修が行われた(SK-Gd)。ニュートリノと原子核の反応によって生じる中性子をガドリニウムが捕獲すると線を出す。そしてこの信号と陽電子が放出された直後の光の信号をセットでとらえることで、ノイズと区別し、反電子ニュートリノの反応を高い精度で識別することが可能になった。

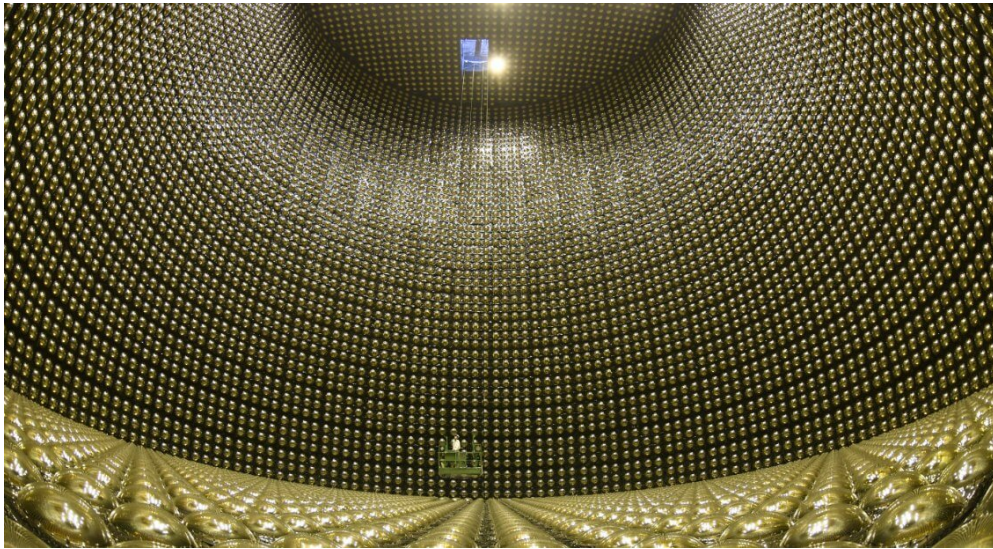


図 2.5: SK の内部の様子。多数の光電子増倍管が並ぶ。[8]

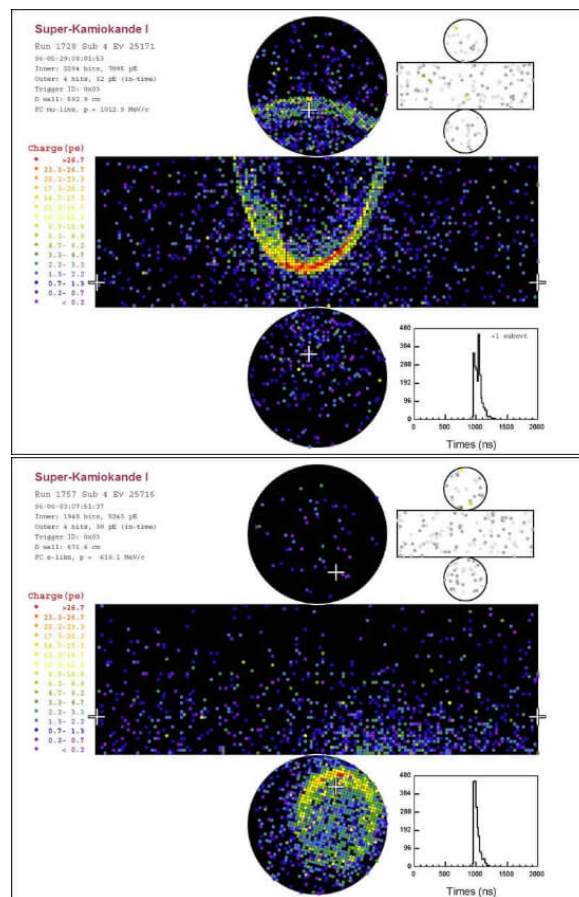


図 2.6: SK のイベントの例。上図は ν_μ によるイベント、下図は ν_e によるイベント。ミュオンのリングが鮮明であるのに対し、電子の場合はぼやけていることがわかる。[9]

2.2 ハイパーカミオカンデ (HK) 実験

現在、T2K 実験においては SK が後置検出器として用いられている。ポスト T2K 実験としては、2028 年に観測実験開始を目指すハイパーカミオカンデ (HK) を後置検出器として用いる HK 実験が計画されている。HK 実験では CP 対称性の破れの測定以外にも、大気、太陽や加速器ニュートリノを観測することで、ニュートリノの質量順番の決定や陽子崩壊の探索、さらには超新星爆発の解明などの天文学といった目的がある。HK 実験の長基線ニュートリノ振動実験では、後置検出器として新たに建設される HK のほかにニュートリノビームの増強、ND280 の更新、さらには中間検出器 (IWCD) の建設が行われる予定である。

2.2.1 ハイパーカミオカンデ (HK)

ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande:HK) は SK の後継となる検出器で、SK と同様に Off-axis 角 2.5° 上に配置されている水チェレンコフ検出器である (図 2.7)。大きさは直径 68 m、高さ 72 m の円筒形であり、その有効体積は SK の約 8 倍の約 19 万 t になる。HK も SK 同様に内水槽と外水槽に分かれており、内水槽の内壁には直径 50 cm の PMT が初め約 20000 本、外水槽には直径 20 cm の PMT が約 7200 本設置される予定である。さらに内水槽には通常の PMT に加えて、複数の小型 PMT が集合したモジュールである multi-PMT を数千本導入する予定である。

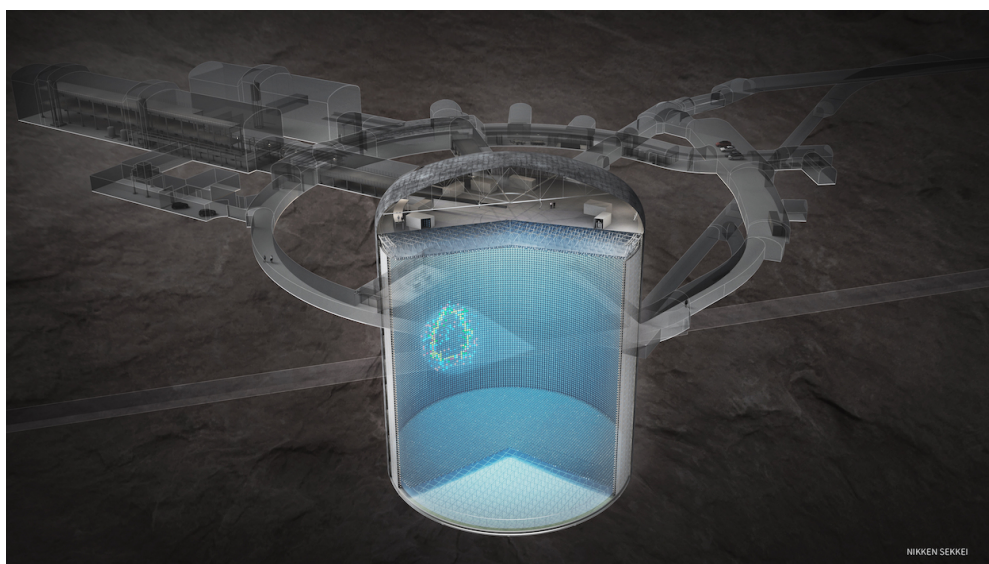


図 2.7: HK の概念図 [10]

2.2.2 Intermediate Water Cherenkov Detector(IWCD)

中間検出器 (Intermediate Water Cherenkov Detector: IWCD) は HK 実験において、前置検出器に加え、振動前のニュートリノを測定するために導入される検出器である。J-PARC のニュートリノ生成標的から HK に向かって約 850m 離れた地点に新しく設置予定で 2028 年の観測開始を目指して、2025 年に着工した。検出原理は SK/HK と同様に水チェレンコフ光を用いることであり、検出原理を共通化することにより系統誤差を削減することが期待される。検出器自体の大きさは直径 9 m、高さ 12 m の円筒形で純水で満たされている。チェレンコフ光は、HK でも一部導入される multi-PMT によって検出される。それは 19 本の約 8 cm の PMT が集合した構造で、HK の約 50 cm の PMT よりも精細に光を検出することが可能である。IWCD の最大の特徴は、直径 10 m、高さ 50 m の円柱型の地下空洞に水を張ることによって、検出器全体を垂直方向に移動させる昇降機構を備えている点である。これにより、Off-axis 角を 1.5° から 4.0° まで変化させて測定することが可能となっている。

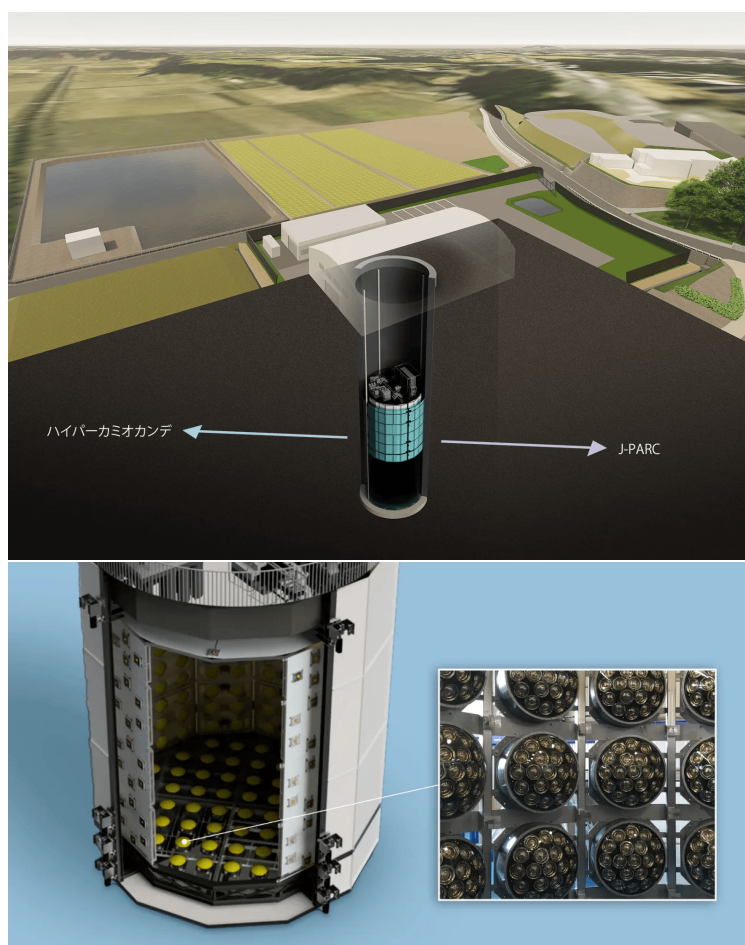


図 2.8: 上図は IWCD の概念図、下図は検出器内部の multi-PMT の様子を示す。[11]

2.2.3 前置検出器：ND280++

HK 実験に向けて、ND280 の上流部は 2.1.2 節で述べた通り SFGD 等に置き換えられたが、さらに下流部も新たな検出器に更新し、ND280++ とすることが計画されている。SFGD は使われているシンチレーションキューブの組成は主に炭素であるため、炭素原子核をターゲットとしたニュートリノ反応の測定が中心となる。それに対して HK は水標的であるため、いかに高精度な測定を行っていても原子核の違いによる反応断面積の違いが系統誤差として残る。この誤差は HK になり統計量が増大した際はより顕著で、削減すべき誤差である。IWCD も水標的の検出器であるが、ND280++ は磁場を印加するため、電荷の識別や運動量測定が可能であり、さらに飛程の短い陽子も観測できるという利点がある。現在検討されている検出器案を図 2.9 の左側に示す。ND280++ として更新される部分は、Water Tracker、HFGD、SciFi、TPC、ECal である。

HFGD、SciFi

HFGD(Hyper-FGD) は SFGD のように波長変換ファイバを通したキューブを用いて 3 次元的な飛跡再構成を行う。SFGD ではプラスチックシンチレータのキューブであったが、HFGD では水にシンチレーターを混ぜた WbLS(Water based Liquid Scintillator) をキューブの中に入れる予定である。

SciFi(Scintillating Fibers) は、ファイバー自体がシンチレーション光を出す標的であり、そのファイバーは 0.5 mm 角のものを使うことによって低運動量の陽子の飛跡までもをトラッキングすることが可能となる。

Water Tracker 及び、本研究との関連

Water Tracker の具体的なデザインを図 2.9 の右側に示す。WbLS と違い、水自体は発光しないため、その代替として SciFi を水中に配置し、そのファイバが光ることにより粒子の飛跡をトラッキングすることを可能にしている。具体的なファイバーの配置としては図 2.10 のようになっている。一つのファイバーシートに対して隣接するシートが互いに直交するように配置されており、2 面の信号を組み合わせることで 3 次元的な再構成が可能な構造となっている。

本論文では、検出器内における水の比率を高めた検出器の開発を目指し、次の 2 点について研究を行った。1 つ目は SciFi に波長変換ファイバー (Wave Length Shifting fiber:WLS) を加えた構造の読み出し方法の検討のために、SciFi-WLS の変換効率の測定である。2 つ目はハイドロゲルを用いた薄い水標的の開発である。

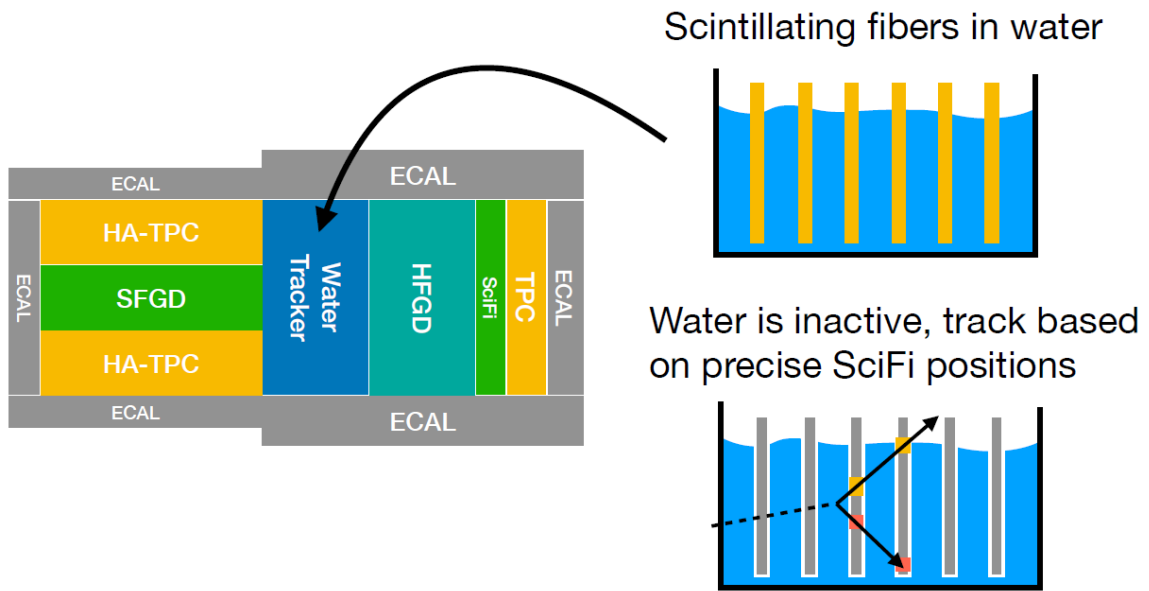


図 2.9: ND280++ の全体の検出器案 (左) と Water Tracker の概念図 (右)

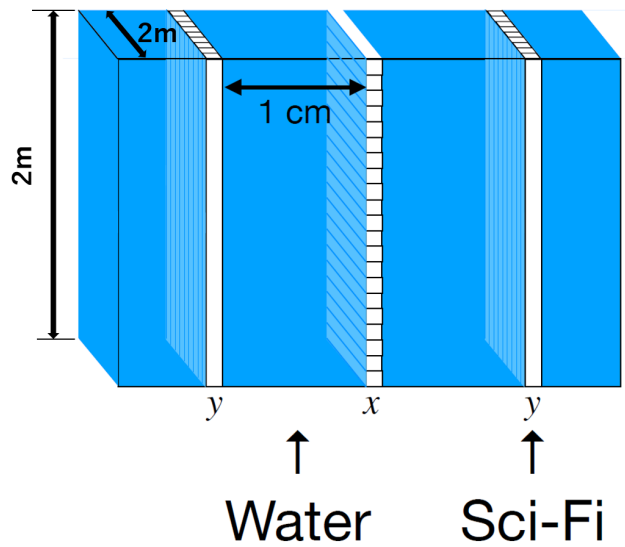


図 2.10: Water Tracker のファイバーの配置の様子

第 3 章

SciFi-WLS の変換効率測定

3.1 SciFi と WLS を用いたシンチレーション光の読み出しの最適化

2.2.3 節で述べた Water Tracker の初期構想では、水中に配置するファイバーは SciFi のみであった。この時、粒子の飛跡は X 方向と Y 方向の 2 層の信号を組み合わせることによって 3 次的に再構成される。また、SciFi 内で伝搬する光は、粒子が通過したときに発生したシンチレーション光のうち ~5 % 程度に過ぎない。

そこで、多くの光が SciFi から漏れ出すことを利用するために、SciFi のシートの表面に WLS を一定間隔に直交するように配置する構造を考えることができる。これにより、水以外の物質をあまり増やすことなく 1 層を通過しただけで 3 次元的な再構成が可能となる。具体的な検出器の構造を図 3.1 に示す。

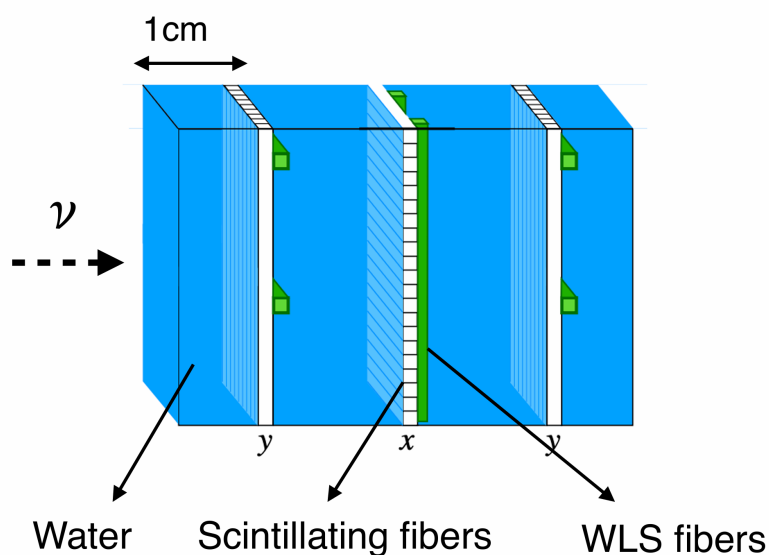


図 3.1: WLS と SciFi を組み合わせた Water Tracker の概念図

次にこの検出器に粒子が通過した際の光の伝搬の様子を図 3.2 に示す。SciFi から漏れ出した光は通常、全方位に対して拡散してしまう。これを防ぎ集光率を高めるために、SciFi と WLS の外側を PTFE(polytetrafluoroethylene) で被覆するという構造を採用する。PTFE は非常に高い光の反射率を持つ物質で、SciFi から漏れ出した光を内部で反射させ、効率的に WLS まで伝搬させる役割を担っている。

この方式を設計する上で、ファイバーの種類 (SciFi の発光スペクトルと WLS の吸収スペクトルの整合性) の選定は極めて重要である。さらに、1 種類の WLS では吸収しきれなかった光や WLS から漏れ出した光に対し、吸収波長帯の異なる別の WLS を組み合わせることで、変換効率をさらに高められる可能性がある。

本研究では、このような SciFi と WLS を組み合わせたシンチレーション光の読み出し方式の最適化に向けた初期段階として、単一の SciFi-WLS 間における光の変換効率の測定を行った。

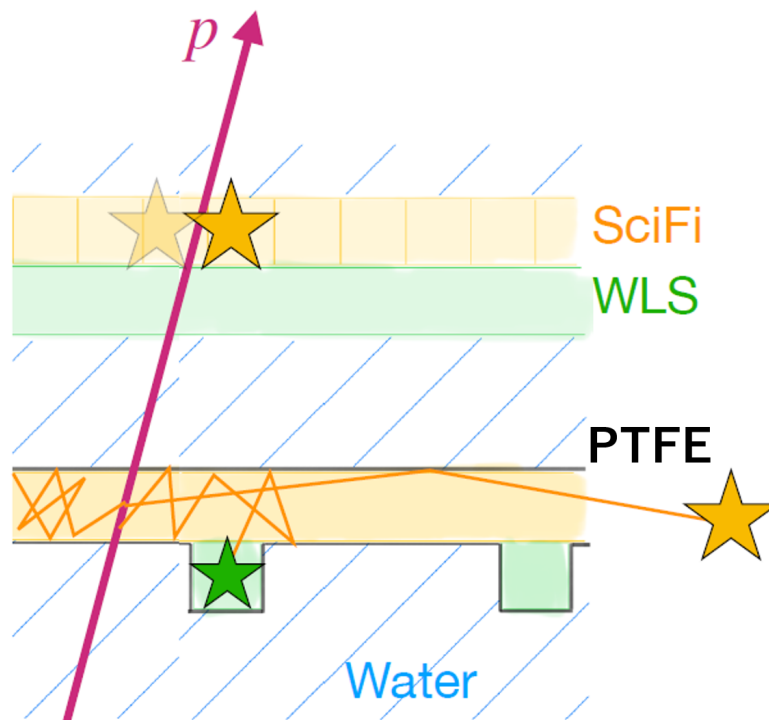


図 3.2: WLS と SciFi 中の光の伝搬の様子。外側に PTFE テープを巻いてある。SciFi で発生した光が PTFE で何度か反射され、WLS に伝搬している。

3.2 測定の初期セットアップ

3.2.1 初期セットアップの構成

初期セットアップは文献 [12] の第 6 章で用いられている構成をベースとして、ファイバーの部分を本研究のために改良したものである。MPPC とファイバーの接続で用いられている治具や基板等は同文献を参照されたい。セットアップの外観を図 3.3 に示す。図の左側には白い PTFE のテープが巻かれたファイバー群が確認できる。それぞれのファイバーの端面は MPPC に接続されている。MPPC を実装した基板は EASIROC などを用いた読み出しシステムに接続されており、信号の処理及びデータの収集を行っている。これらのセットアップは暗箱の中に入れられ、測定時は外からの光が入らないようにしている。

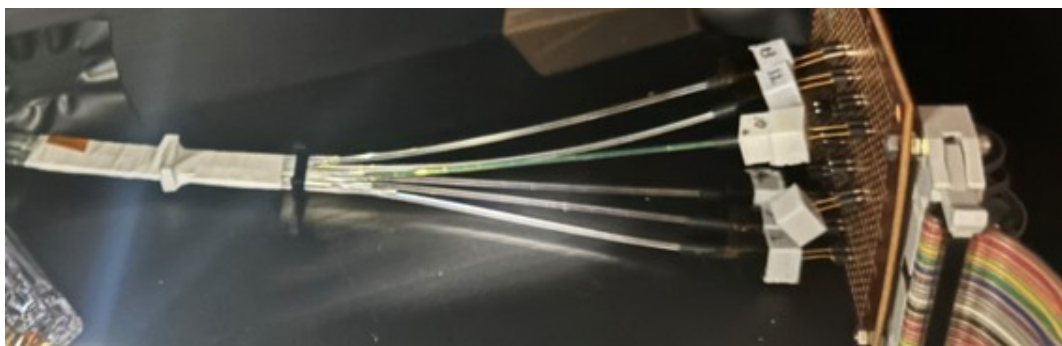


図 3.3: 初期セットアップの外観

図 3.4 には PTFE に被覆されている部分のファイバの配置と EASIROC で読み出す際の各ファイバーに対応する MPPC のチャンネル番号を示す。前節 (3.1 節) で提案した検出器構造では WLS は SciFi と直交するように配置されているが、本実験ではそれらを平行に配置している。これは本実験が SciFi と WLS の変換効率、およびその WLS からの距離への依存性を測定することが目的だからである。また、SciFi の間に一部 Clear ファイバーを配置しているのは、単に SciFi の不足を補うためである。次節より、各構成要素について詳しく述べる。

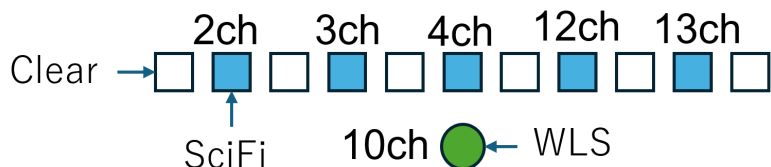


図 3.4: 初期セットアップのファイバーの配置とチャンネル番号

3.2.2 SciFi と WLS

本研究で用いた SciFi(シンチレーションファイバー) はクラレ社製のもので、型番は SCSF-78 の 1 mm の角ファイバーである。また、WLS(波長変換ファイバー) も同社のもので、型番は Y-11(200) の 1 mm の丸ファイバーである。構造は PS(polystyrene) でできたコアと呼ばれる芯の部分と、それを覆う PMMA(Polymethyl methacrylate) でできたクラッドと呼ばれる部分からなるシングルクラッド構造である。図 3.5 にシングルクラッドのファイバー内での光の伝達のメカニズムを示している。発生した光は、全反射の条件を満たしたものが伝搬され、端面において約 30° の範囲で放出されることがわかる。また、シングルクラッドの Trapping efficiency は丸ファイバーで 3.1%、角ファイバーで 4.2% となっている [13]。

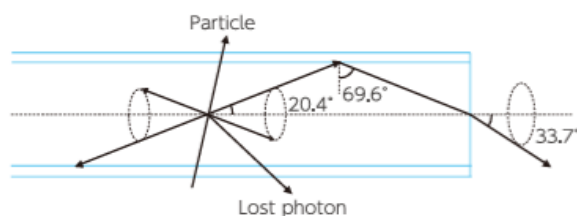


図 3.5: シングルクラッドのファイバーの光伝達 [13]

本研究で用いた SciFi のシンチレーション光のスペクトル及び WLS の発光、吸収スペクトルを図 3.6 に示す。SciFi のシンチレーション光の波長のピークは 450nm の青色である。また、WLS(Y-11) の吸収の波長のピークは 476 nm の青色であり、発光の波長のピークは 455 nm の緑色である。吸収スペクトルに対して発光スペクトルが長波長側に移動しており、波長変換性を有していることが確認できる。SciFi の発光スペクトルと WLS(Y-11) の吸収スペクトルはどちらも青色であり、SciFi-WLS の伝搬は可能であるが、スペクトルが完全に一致はしていないのである程度の変換ロスがあると予測できる。さらに、吸収した光に対してどの程度発光するかを表す量子効率 (Quantum yield) も考慮する必要がある。

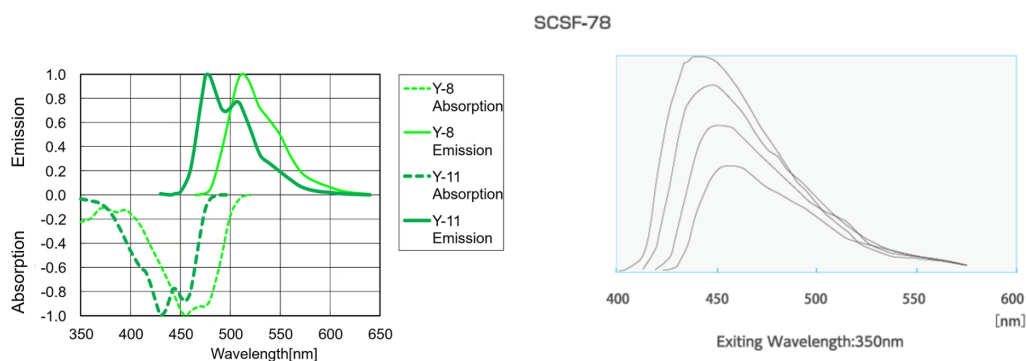


図 3.6: SciFi と WLS の発光及び吸収スペクトル [13]

3.2.3 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は、SiPM(Silicon Photon Multiplier) の一種であり、ガイガーモードで動作する複数の APD(アバランシェ・フォトダイオード) のピクセルを並列接続させた構造を持つ光子計数のためのデバイスである。ガイガーモードでは光子が 1 つでも 1 つのピクセルに入射すれば一定の信号が得られ、出力は光子が入射したピクセル数に比例する。1 ピクセルに同時に複数の光子が入射しない(飽和しない) 程度の低光量以下であれば、MPPC の出力が入射光子数に比例し、光子数を 1 光子単位で計数可能である。また、入射光子がない場合でも、熱励起によるキャリアの発生に起因して信号を出力することがある。この発生率をダークカウントといい、その値は種類によって異なる。

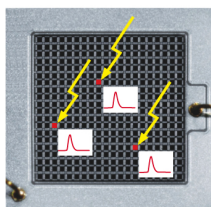


図 3.7: MPPC による光子計数のイメージ [14]

本研究で用いた MPPC は浜松ホトニクス社製のものである。初期セットアップに用いた型番は S13360-1325CS と S13360-1350CS の 2 種類である。また、後述する新セットアップでは S13360-3050CS を採用した。これらの型番において、ハイフン直後の 2 桁の数字は正方形である受光面の 1 辺の大きさを示しているが、実際には「13」は 1.3 mm、「30」は 3 mm に対応している。続く 2 桁の数字は正方形の 1 ピクセルの 1 辺の大きさを示しており、単位は $[\mu\text{m}]$ である。

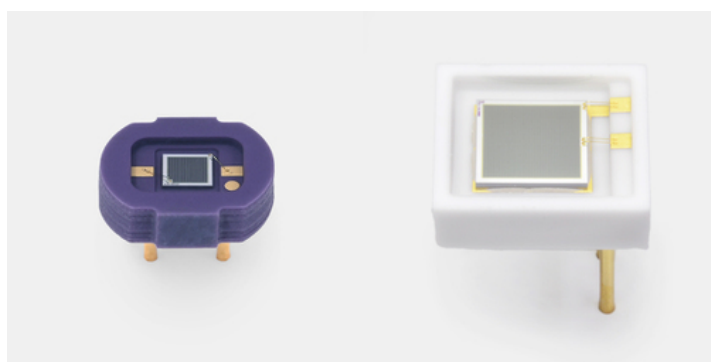


図 3.8: MPPC の外観。左が S13360-1325CS,-1350CS であり右が S13360-3050CS である。

MPPC の特性について、ゲイン (増幅率) や検出効率はピクセルピッチが大きいほど大きくなり、ダークカウントは受光面のサイズが大きくなるほど大きくなる。具体的な値については文献 [15] を参照されたい。図 3.9 にはピクセルピッチが 25 μm の場合と 50 μm の場合における MPPC の波長特性を示す。どの MPPC でも最大感度波長は 450 nm であり、WLS(Y-11) の発光スペクトル (図 3.6) のピークである 476 nm の波長と良く整合している。

■ 検出効率-波長 (代表例)

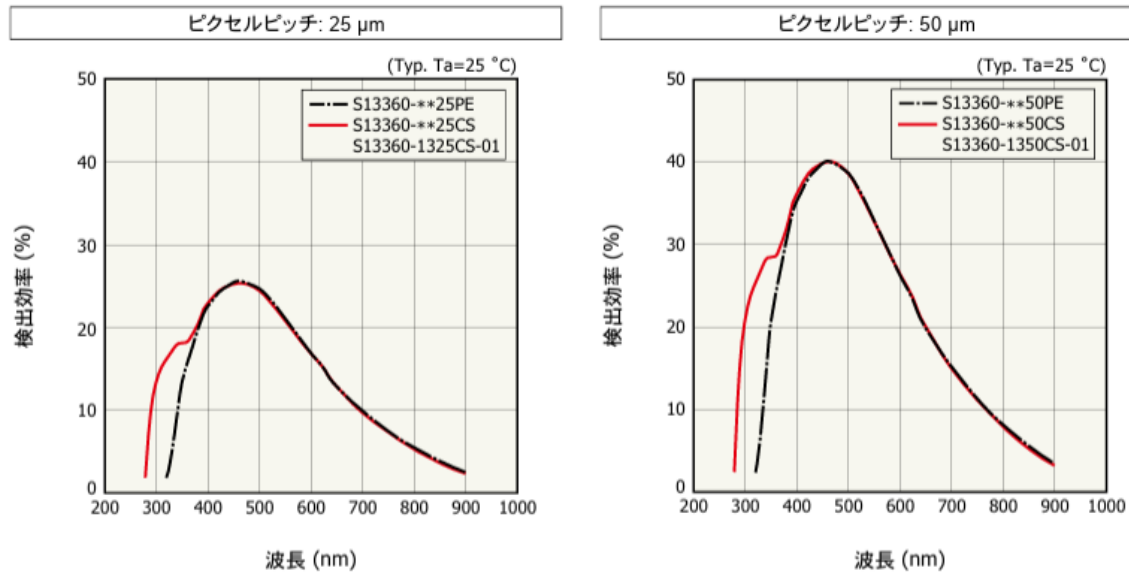


図 3.9: S13660 シリーズ MPPC のピクセルピッチごとの MPPC の波長特性 [15]

初期セットアップにおける読み出しチャンネルの構成については、図 3.4 の 2,3,4,10 ch には S13360-1350CS を用い、12,13 ch には S13360-1325CS を用いた。

3.2.4 EASIROC 等の読み出しシステム

MPPC への電圧印加、信号の処理およびデータの収集は主に NIM-ASIROC モジュールを用いて行った。そのほかに、EASIROC からの内部トリガー用の信号を処理して、HOLD 信号として入力するために GATE GENERATOR モジュールを用い、また、単純にトリガー信号を計数するために 8ch VISUAL SCALER モジュールも用いた。

EASIROC モジュールは 64 チャンネルの MPPC 読み出し装置である。内部には 2 枚チップがあり、一つ当たり 32ch の処理を行う。EASIROC の内部の回路図を図 3.10 に示す。全チャンネルに対して一律に電圧を印加することができるほか、各チャンネルの 8bitDAC を調整することで 0 ~ 4.5V の範囲で電圧をオフセットさせることが可能である 8bitDAC の値は 256 480 の値で設定し、256 で 4.5V, 480 で 0V が差し引かれる。各チャンネルにはディスクリミネーターがあり、信号が閾値を超えた際のヒット判定結果が、モジュール正面パネルの Trigger 端子から出力される。なお、チップ 1 枚で一つの共通の値のみ設定が可能となっている。EASIROC は信号の波

形を HOLD して測定する。このために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。本研究では、内部トリガーによる自己トリガー測定のために、Trigger 信号を GATE GENERATOR に入力し、その出力を EASIROC に入力した。このとき、波高が最大の位置で HOLD されるようにオシロスコープで観察しながら GATE GENERATOR の delay を適切に調整した。また、信号が HOLD された際にはすべてのチャンネルでデータ取得が同時に行われる。

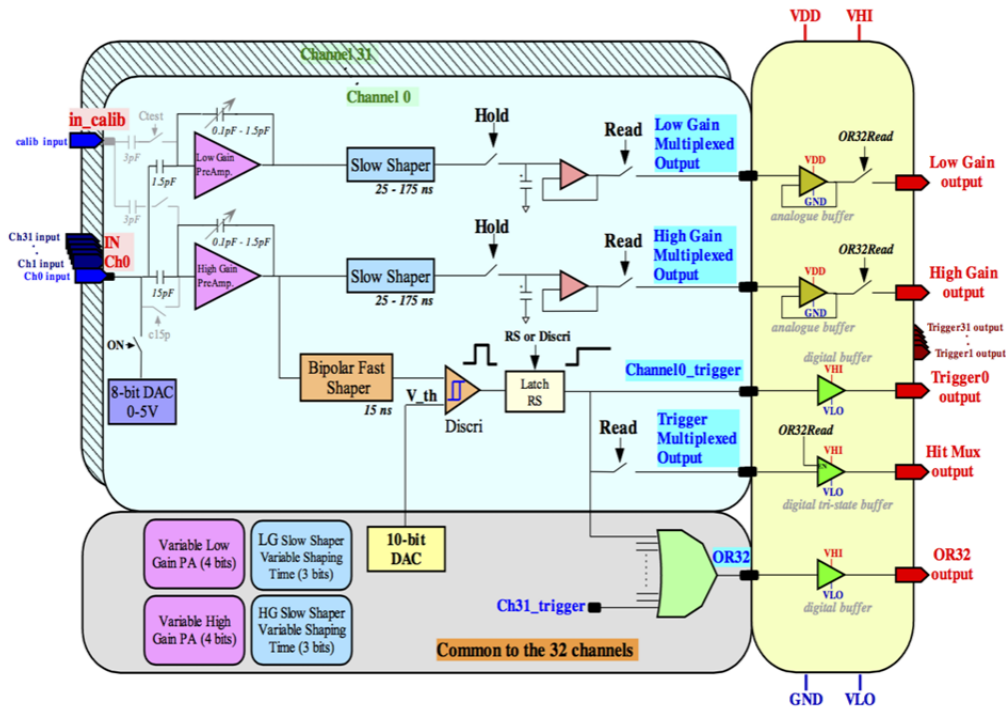


図 3.10: EASIROC の回路図の概要 [16]

3.3 MPPC の較正

MPPC でファイバーの光量を測定し、EASIROC で読み取った際に得られる値は電荷量に比例した ADC (Analog-to-Digital Converter) の値であり、入射光子数そのものではない。そのため、ADC 値と光子数 (photon equivalent:p.e.) の対応関係を特定するキャリブレーションが必要である。信号が入力されていない状態でもデータが取得されたときはある ADC 値が記録される。これをペDESTALという。キャリブレーションにおいては各 MPPC のペDESTALの決定、および 1p.e. の間隔を測定することが目標となる。本節では、LED や放射線源を用いたキャリブレーション、およびディスクリミネーターの設定と p.e. の関係の理解のための MPPC のダークカウントの測定について述べる。

3.3.1 ダークカウントの測定

EASIROC のディスクリミネーターの値を 700 から 870 まで 10 ごとに変化させながら、MPPC(10,12,13ch) のダークカウントを約 120 秒間計数した。MPPC に印加した電圧は 57V であり、8bitDAC の値はすべて 260 にした。印加電圧は以降の初期セットアップにおける測定では共通である。

測定結果を図 3.11 に示す。横軸はディスクリミネーターの値、縦軸はダークカウントの計数率 (対数スケール) を示している。

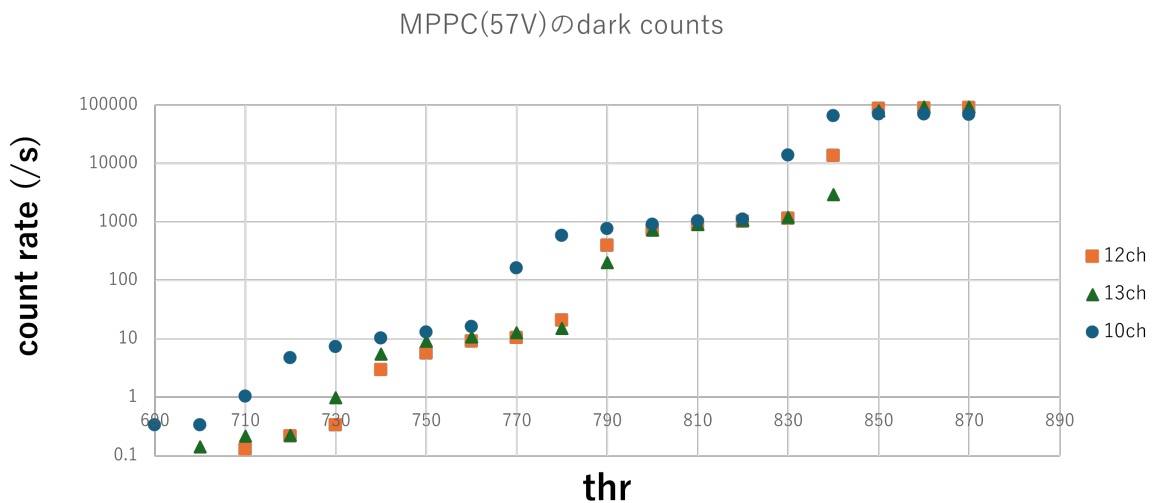


図 3.11: 10,12,13ch のディスクリミネーターの値と MPPC のダークカウント。縦軸は対数スケールの計数率。thr の値が上がるごとに閾値が下がり、ダークカウントが増加している。光子数ごとのプラトーが見られる。

10ch はほか二つの異なった挙動であるが、これはピクセルピッチが 12,13ch は $50 \mu\text{m}$ であるのに対し、10ch は $25 \mu\text{m}$ であることに起因する。thr の値が上がるごとに閾値が下がり、ダークカウントが増加していることがわかる。さらに、階段状のプラトーの構造がみられ、1 段下がることに観測できる光子数が 1 p.e 分小さくなると予想できる。具体的には、860thr 付近のプラトーでは 1 p.e. 以上の光子数がみれ、810thr 付近のプラトーでは 2 p.e. 以上、760thr 付近では 3 p.e. 以上の光子数がみれる。浜松ホトニクス の MPPC のデータシート [15] によると、 $25 \mu\text{m}$ ピッチの場合のダークカウント (0.5 p.e. の閾値) は 70kcps、 $50 \mu\text{m}$ ピッチの場合は 90kcps であり、これは図の 1 p.e. 以上の領域のダークカウントとおおむね一致する。この測定によって、任意の光子数以上を選択的に測定するために必要なスレッシュホールドの設定値を決めることが可能となった。

3.3.2 LED を用いた較正

続いて、LED を用いた測定を行った。LED は Function Generator を用いて光らせた。Function Generator の出力は矩形波で、周波数は 1 kHz、振幅は 0 ~ 5 V の 5 V である。矩形波一つ当たりの時間幅は LED とファイバーの距離に応じて適切に設定する必要があり、おおむね 16 ~ 32ns の幅で用いた。

初めに WLS の繋がっている 10ch に対して 760thr(3 p.e. 以上) の内部トリガーをかけて測定を行った。その時の 10ch の光量分布を図 3.12 に示す。一つ目の山が 3 p.e. を表しており、その後の山が 4 p.e.、5 p.e. と続く。また、同様の設定で LED を消灯した際の光量分布を図 3.13 に示す。

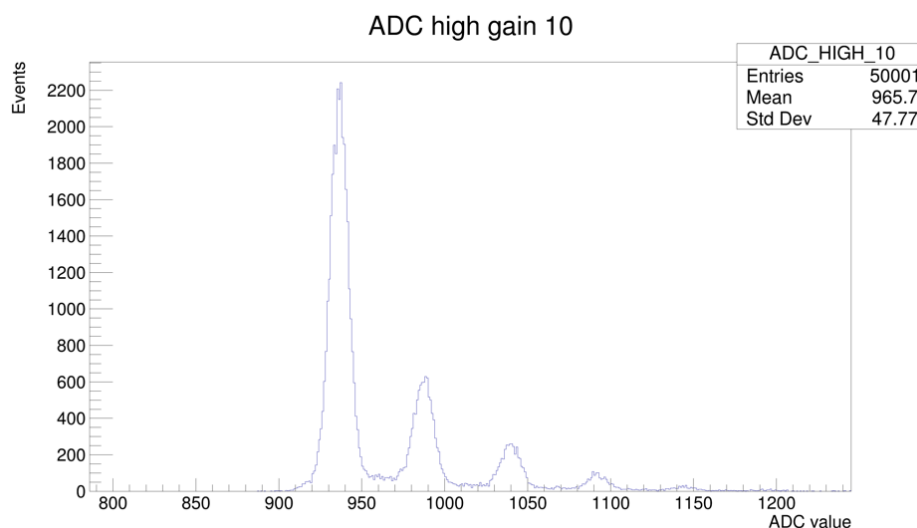


図 3.12: LED を用いた際の光量分布。10ch(WLS) に対して 760thr(3 p.e. 以上) の内部トリガーがかかっている。

ダークカウンターの分布である図 3.13 と LED を当てた際の図 3.12 を比較すると、総イベント数が異なるので縦軸の値は異なるものの、前半部 (3,4,5 p.e.) の分布の形状は非常に類似している。これは LED の光量が極めて微弱であり、低光量側のトリガー事象が主にダークに起因していることを示唆している。一方、LED を用いた場合には 6 p.e. 付近に微小な山が確認でき、これが LED による寄与であると考えられる。

さらに、同じ閾値にもかかわらず、3 p.e. の立ち上がりの ADC 値を見ると両方で 50 ほど解離がある。これをおおよそ 1 p.e. に対応するずれである。これは光が当たっている場合の MPPC の電荷量増加がベースラインに影響していると考えられる。また、ディスクリミネーターの値がこの ADC 値の絶対値ではなく、相対的に決定させるということを示している。

次に、図 3.12 を図 3.13 に対してスケールと 3p.e. の山の立ち上がり位置を合わせてプロットした図が図 3.14 である。

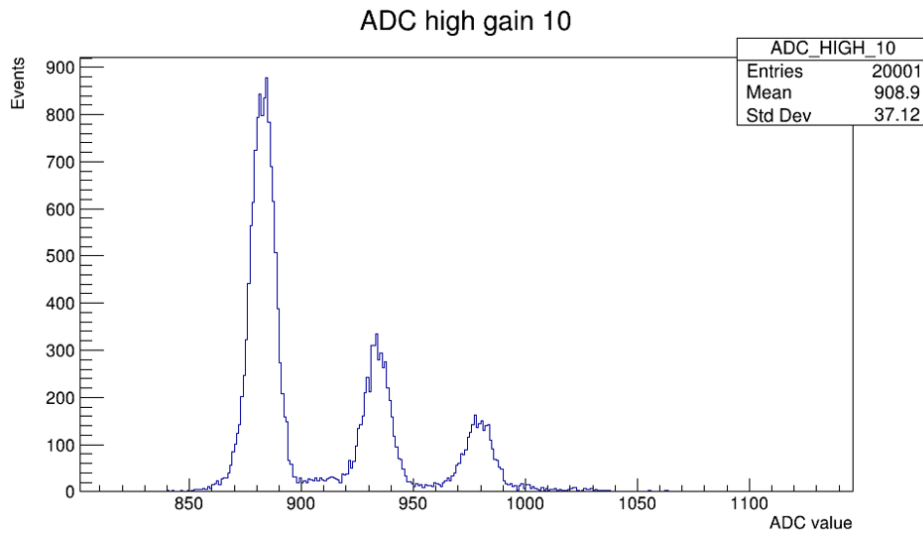


図 3.13: LED を消灯した際の光量分布。10ch(WLS) に対して 760thr(3 p.e. 以上) の内部トリガーがかかっている。

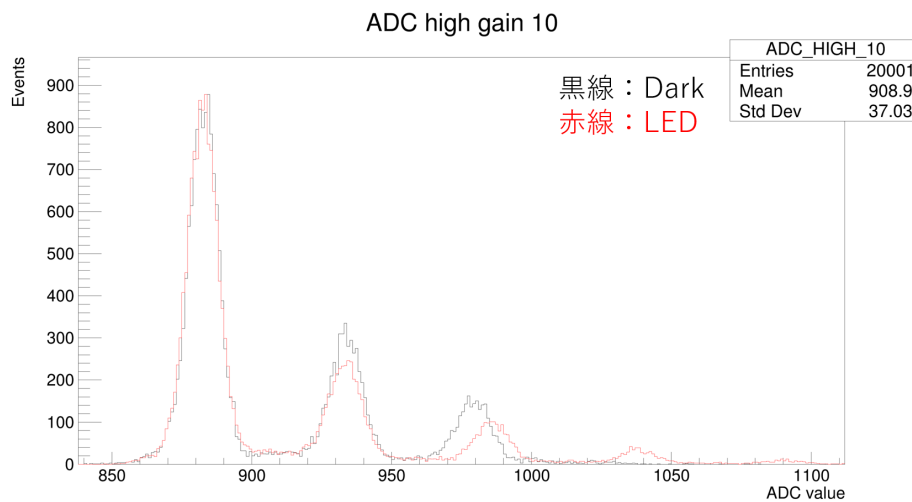


図 3.14: LED を用いた際の光量分布と LED を消灯した際の光量分布の比較。3p.e. の山を合わせて比較したもの。赤線が LED を用いた際の光量分布、黒線が LED を消灯した際の光量分布。

図 3.14 を見ると、同設定でも 3 つ目の山の間隔が違ってくる。これは MPPC の温度変化によるゲインの変化に起因するものと考えられる。この測定は寒い時期 (10,11 月) の測定で、ずっとエアコンがついているわけではなかったため測定中に温度が変化した可能性がある。

最後に、LED を光らせる信号を EASIROC に外部トリガーとして入力することも試してみた。しかし、delay を調整してもオシロスコープ上では HOLD された信号が観測されたが、データを取得すると図 3.15 のように pedestal のみが見える結果となった。

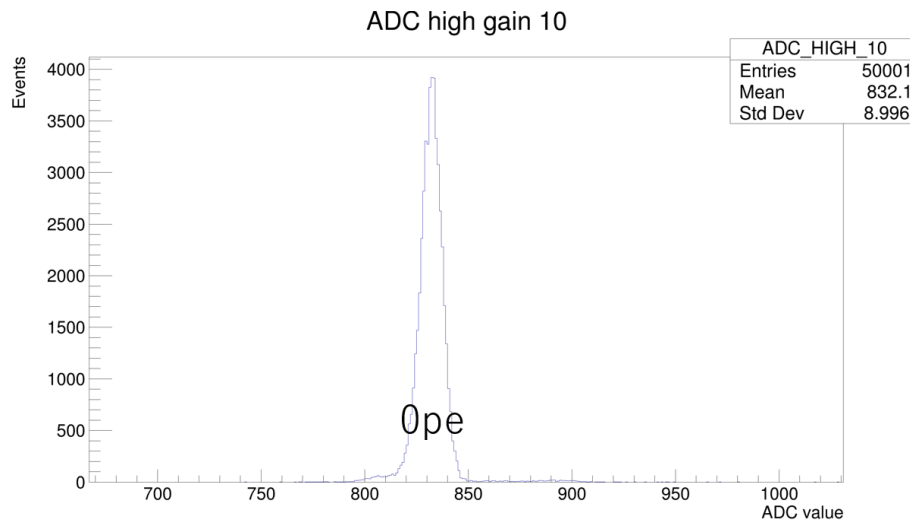


図 3.15: LED を光らせる信号を EASIROC に外部トリガーとして入力した際の光量分布。うまく同期させることはできなかった。

3.3.3 線源を用いた較正

次に、放射線源を用いた測定を行った。放射線源は Sr-90 であり、線を出す。線源を図 3.16 のように PTFE が被覆されている部分に直接置き、光量分布を測定した。



図 3.16: 放射線源を用いた測定の外観。線源が PTFE で被覆されている部分に置かれている。

初めに、10ch に (WLS) に 760thr(3 p.e. 以上) の内部トリガーをかけて測定を行った。このときの 10ch の光量分布及び同時に測定された 12ch(SciFi) の光量分布を図 3.17 に示す。

この測定は WLS に 3 p.e. 以上が入ったときに、ほかの SciFi の光量も同時に測定されたものである。一般に WLS ファイバー自体は放射線に対して直接的なシンチレーション光をほとんど発しない。したがって、WLS が光ったときは周りの SiFi から漏れ出した光を収集しているということになる。12ch の分布においてペDESTALが支配的なのは、12ch が多数ある SciFi のファイバーのうちの一つに過ぎないためである。すなわち、12ch 以外の SciFi の光に由来する 10ch の信号の場合、同時に記録された 12ch は信号がないということである。一方で、12ch はトリガーをかけた測

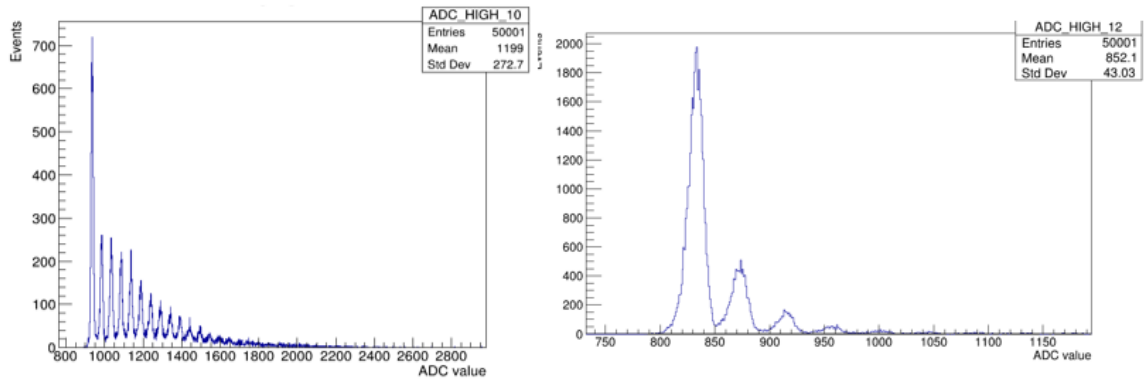


図 3.17: 線源を用いた測定で 10ch にトリガー (760thr) をかけた時の 10ch(左図),12ch(右図) の光量分布。

定ではなく、ダークカウントは約 100 keps であり、EASIROC の HOLD の時定数 (数百 ns) を考慮すると、光量分布においてダークをひっかけている可能性は低い。つまり、12ch の光量分布における 2 目以降の山 (1 p.e. 以上) は SciFi で光ったものが WLS に伝搬された光であると結論付けることができる。

次に、12ch に (SciFi) に 760thr(3 p.e. 以上) の内部トリガーをかけて測定を行った。このときの 12ch の光量分布及び同時に測定された 10ch の光量分布を図 3.18 に示す。

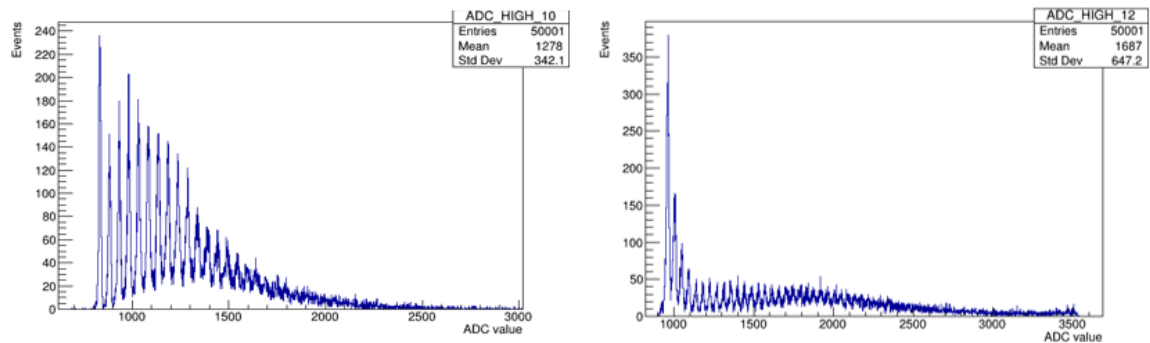


図 3.18: 線源を用いた測定で 12ch にトリガー (760thr) をかけた時の 10ch(左図),12ch(右図) の光量分布。

本測定は 12ch の SciFi に 3 p.e. 以上が入ったときに、WLS の光量も同時に測定されたものである。WLS の光量分布が十分高い領域まで存在しているため、SciFi が光ったとき、その光が WLS まで伝搬していることがわかる。しかしこの WLS における光量は 12ch の SciFi 単体による寄与とは考えにくい。なぜならば、線が他の ch の SciFi を貫通して、その光も拾っている可能性が高いからだ。Sr-90 の線の最大エネルギーは 2.28MeV よりプラスチック中での飛程は約

10mm である。さらに直接線源をファイバーの上においているため、線が SciFi が並んでいる方向に対しても速度を持ち、複数の SciFi を貫通するという算段だ。実際、図 3.19 に示す通り、12ch にトリガーをかけた際に 4ch でも光量は高くなっている。

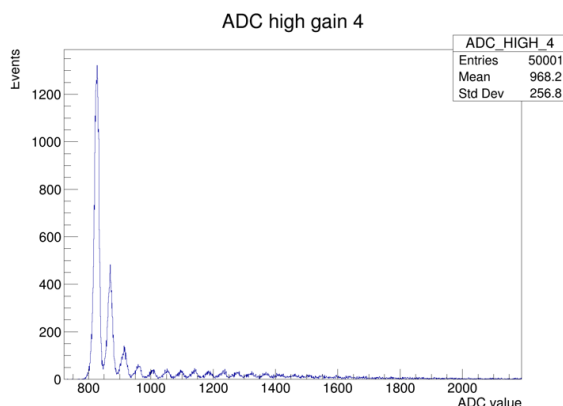


図 3.19: 線源を用いた測定で 12ch にトリガー (760thr) をかけた時の 4ch の光量分布。線がトリガー ch 以外にも同時に入射していることがわかる。

二つの測定の結果、特定の SciFi(12ch) と WLS(10ch) の応答には強い相関があることが確認された。WLS が近傍の複数の SciFi から光を収集しているため、個別の SciFi トリガー時には高い集光量が、WLS トリガー時には特定チャンネルのペDESTALの占有が観測された。これは、WLS ファイバーを用いた読み出し系が、広範囲の SciFi 層を効率的にカバーし、かつ光量を集約できていることを示している。

ADC 値と p.e. の対応の決定

前述した二つの測定 (10ch,12ch トリガー) を用いて、各チャンネルにおけるペDESTAL値および 1 p.e. 間隔の測定を行った。表 3.1 に、各チャンネルにおけるペDESTAL値および 1 p.e. 間隔の測定結果を示す。10ch は 12ch トリガーの測定を用いたのに対して、そのほかのチャンネル (2,3,4,10,13) は 10ch トリガーの測定を用いた。ペDESTALは、トリガーがかかっていないチャンネルにおいて、一番下の山に対してガウス関数でフィッティングを行い、その平均値を採用した。1 p.e. 間隔は、2,13ch は 0 p.e. と 1p.e. の山をそれぞれガウス関数でフィッティングし、それぞれの平均値の差を採用した。その他の ch の 1 p.e. 間隔は、1 p.e. と 2 p.e. の間隔も同様に測定し、0 p.e. と 1 p.e. の間隔の差と平均をとった値を採用した。

表 3.1 をみると、12,13ch の 1 p.e. の間隔が他より小さい。これはピクセルピッチが他より小さい 25 μ m であるため、各ピクセルのキャパシタンスが小さく、それに比例するゲインも小さくなることに起因すると推測する。しかし、ピッチが 50 μ m であるはずの 2ch も 1 p.e. 間隔が小さくなっている。これは ch の個体差によるものなのか、MPPC の温度差によるものなのか不明である。

この較正の結果、ADC 値を p.e. に変換することができ、各チャンネルに何光子が来たのかを同じ尺度で表現することができるようになった。

表 3.1: 各チャンネルにおけるペDESTAL値および 1 p.e. 間隔の測定結果

チャンネル番号	ペDESTAL [ADC]	1 p.e. 間隔 [ADC/p.e.]
2ch	825.10	38.80
3ch	831.41	43.35
4ch	826.30	44.15
10ch	833.40	49.60
12ch	833.30	41.15
13ch	829.10	38.60

3.4 初期セットアップによる変換効率の測定と課題

3.4.1 測定方法

前節までの較正結果等を用いて、本節では、線源を用いた変換効率の測定について述べる。線源を用いた変換効率測定の様子は、図 3.20 に示す。線源は、ファイバー面から 88 mm 離れた台座 (紙コップを加工した治具) に置かれている。

線源をあえて離れた理由は次の 2 点である。一つ目は、線の照射強度の均一性の確保である。ファイバーの中心の WLS から一番端の SciFi までは約 5 mm である。線源の強さは、線源の中心からの距離の逆二乗に比例するとすると、この配置における中心部と端部の強度差は計算上 0.3% まで抑えることができる。これによりファイバーごとの幾何学的な受光の誤差を最小限にとどめることができるようになった。二つ目は複数のファイバーに線が通ることを抑制するためである。3.3.3 節で述べた、線が一つのファイバーのみを通らず複数のファイバーを通して光る問題に対し、線源を離すことは有効な対策である。線源を離すことで、線をファイバーの並列方向に対してほぼ垂直に入射させることができ、単一ファイバーのみに貫通させることができる。これは変換効率の位置依存性を測定するうえで重要である。



図 3.20: 線源を用いた変換効率測定の様子。線源が紙コップの台の上に置かれている。

3.4.2 測定結果と考察

ある SciFi に 760thr(3 p.e. 以上) をかけ、5 万イベントを取得する測定を、すべての SciFi に対して行った。その際のイベントレートを表 3.2 に示す。線源を離して、放射線強度の均一化を図ったのにも関わらず、イベントレートにばらつきがみられる。12,13ch に関しては、MPPC ピクセルピッチが他と異なっており、検出効率が低くなっていることからイベントレートが低くなっている可能性が高い。このイベントレートと表 3.1 を比較すると、イベントレートと 2,3,4ch はおおむね 1 p.e. の山の間隔が対応しているように見える。つまり 760thr でトリガーをかけている p.e. の位置が 2 と 3,4ch で異なっているのではないかと考えられる。いままでは MPPC の種類が同じならば同様の thr の挙動をすることを仮定し、10ch のダークレートの測定に基づいた thr の値を一律に設定していた。しかし実際は、皆同じ p.e. でトリガーをかけていなかったと考えられる。12,13ch のイベントレートが低いのも検出効率のみではなく、閾値のずれの寄与も大きいと推測される。

表 3.2: 各チャンネルにおけるイベントレート (thr = 760 を各 ch に設定して測定)

	2 ch	3 ch	4 ch	12 ch	13 ch
Event rate [Hz]	88	335	476	35	25

次に具体的な光量分布の一例として、12ch に (SciFi) に 760thr(3 p.e. 以上) の内部トリガーをかけたときの 10ch,12ch の光量分布を図 3.21 示す。10ch はほぼペDESTAL であり、SciFi で発行が生じトリガーがかかった事象でも、WLS を経て MPPC まで光が十分に伝搬していないイベントが大半を占めていることがわかる。12ch に関しても本来ならば 3.18 のような線のエネルギー付与に従った広がりを持つランダム分布が観測されるはずであるが、現状の分布はそのようでない。これは、系の MPPC までの光収集率が低いため、10 Hz オーダーのダークカウント (図 3.11) に埋もれてしまっているためであると推測できる。結果として、本測定ではダークカウントと SiFi の信号の分離が困難なことから、定量的な変換効率の測定には至らなかった。

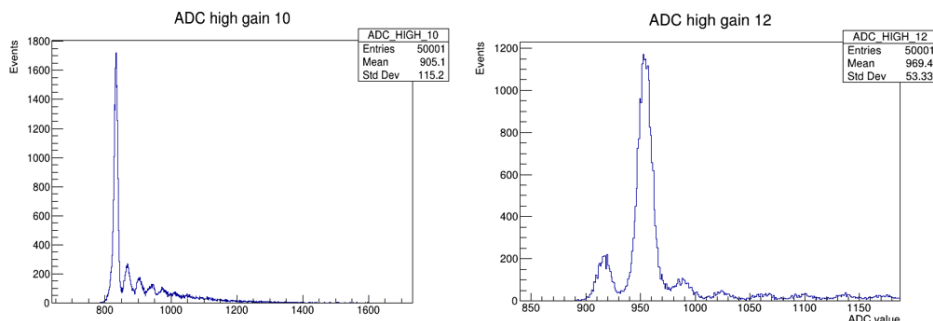


図 3.21: 変換効率測定で 12ch にトリガー (760thr) をかけた時の 10ch,12ch の光量分布。10ch はほぼペDESTAL であることがわかる。

3.4.3 初期セットアップの課題と改善方法

本測定によって、現状のセットアップにおいては変換効率の位置依存性の測定に必要である十分な光量と線 SciFi への均一的な照射の両方の条件を満たすことは不可能であることがわかった。

光量不足の原因として考えられる一番の要因はファイバーを通った光を MPPC が十分に収集していないという点である。ファイバー端面における光の広がりをは図 3.5 より約 30° である。直径 1 mm のファイバーの光を 1.3 mm 角の MPPC がすべて収集する場合、中心軸が完全に揃っていたとしても、許容できる Fiber-MPPC 間の距離 d は幾何学的に以下の制約を受ける

$$1.0 \text{ mm} + 2d \tan(30^\circ) \leq 1.3 \text{ mm} \quad (3.1)$$

これを d について解くとわずかに約 0.26 mm となり、きわめて厳密なアライメントが要求される。一方で、MPPC を 3 mm 角のものに変えることでこの許容距離は約 1.7 mm まで改善される。初期セットアップではこの精度のアライメントは困難なため、著しいイベントレートの低下をもたらしたのだと考えられる。

さらに機能的な面でも初期セットアップには問題がある。初期セットアップの外観 (図 3.3) をみてわかる通り、ファイバーが独立して MPPC に繋がっているため、ファイバーを動かすと MPPC の足が損傷する可能性があるという点だ。また、今後 WLS を変えて測定する際にも、MPPC とファイバーが治具で接続されているため、MPPC を動かす必要があり、これも MPPC に負荷がかかる。これを解決するためには、MPPC とファイバーを分離してそれぞれが一体化しているようなセットアップに作り直す必要がある。

3.5 新セットアップの作成

3.5.1 新セットアップの概要

前節 (3.4.3 節) で述べた初期セットアップの課題を解決するために、3D プリンタを用いて図 3.22 のような治具を作成した。本治具はファイバー保持部と MPPC 保持部の 2 ユニットから構成される。図の表側から、治具をつけたファイバーを挿入し、図の奥側の治具の表面配置した MPPC と光学的に結合する。MPPC の足は治具裏側から出して EASIROC につながるケーブルに接続する。ファイバー側と MPPC 側の詳細および改良した点を次節以降に示す。

3.5.2 ファイバー側

ファイバー側では、図 3.22 の手前側のファイバーの治具とそれを差し込むための四角い穴からなる。ファイバーの差込口は 4×5 の計 20 個まで差し込むことができる。ファイバーの治具は T 字型をしており、抜き差ししやすいようにした。

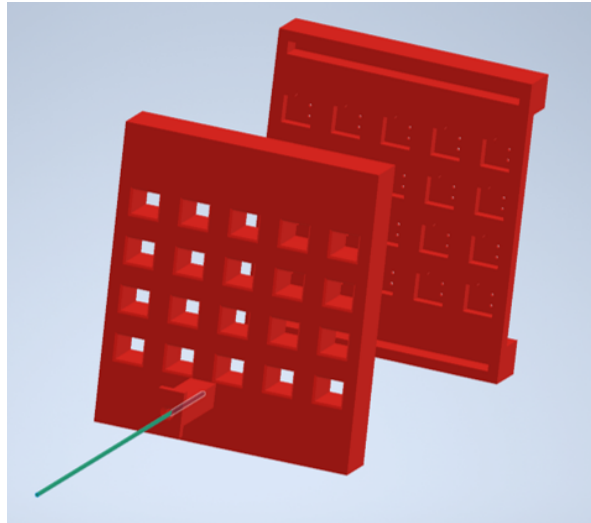


図 3.22: 新セットアップの治具

ファイバーに関しては、文献 [17] のファイバーの端面処理方法を参考にし、150℃ に熱したはんだごてにファイバーを 5 秒間押し当てた。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、光が散乱してしまうが、この処理によって簡易的に平坦化させた。端面処理後のファイバーの様子を図 3.23 に示す。左図を見ると、熱で処理したことで端面の直径が少し大きくなっていることが確認できる。これを利用して、右図のようにファイバーの治具の端で引っかかるようにし、接着剤などで固定しなくてもよくなるようにした。また、このファイバーの治具の大きさを微調整することで、これを差し込む穴に対してはめ込みのみで固定できるようにした。

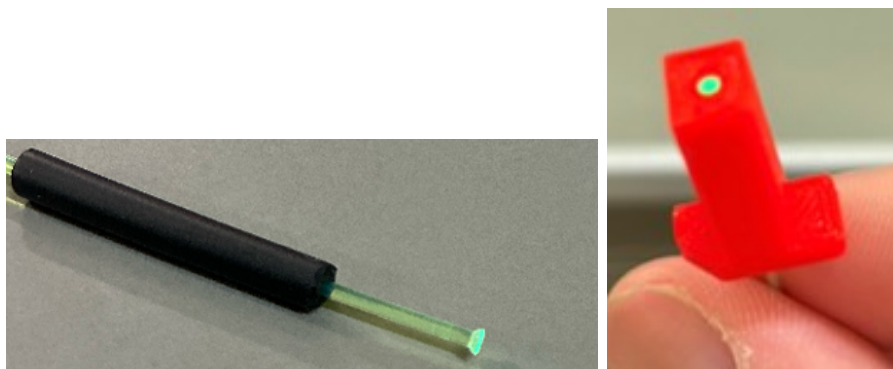


図 3.23: ファイバーの端面処理 (左) とファイバーの治具 (右)

3.5.3 MPPC 側

MPPC は初期セットアップで使用していたものを一新し、すべて S13360-3050CE のものにした。これにより、受光面が 3 mm になり、ファイバーからの光を拾いやすくなる。MPPC の治具は

はファイバー側の穴の開いた治具と組み合わせることが可能となっており、一度設置した MPPC は変更させずにファイバーの交換が可能となっている。

MPPC とケーブルの接続部は、図 3.23 の右図のように、MPPC の足にケーブルに接続するためのソケットをつけた小さな基盤を差し込む形になっている。この基盤に対してケーブルの端子をはんだづけることで接続することが可能となる。MPPC の足は従来より短く、ソケットに挿入するとほぼ埋まるので、MPPC に負荷がかかりにくい構造となっている。

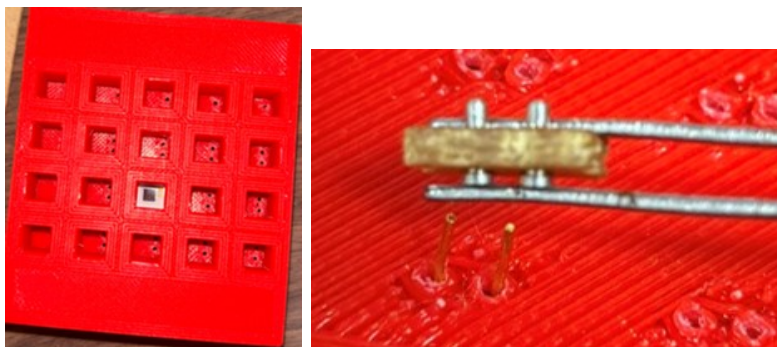


図 3.24: MPPC を乗せた様子 (左) と MPPC とケーブルの接続部 (右)

3.6 新セットアップによる変換効率の測定

3.6.1 新セットアップによる測定の概要

3.5 節に示した新セットアップを組み立て、測定する状態となった完成図をを図 3.25 に示す。初期セットアップ同様に、ファイバーの一部には PTFE のテープが被覆してある。ファイバーに乗っている銀色の箱は単にファイバーの浮き上がりを防ぐための重しである。

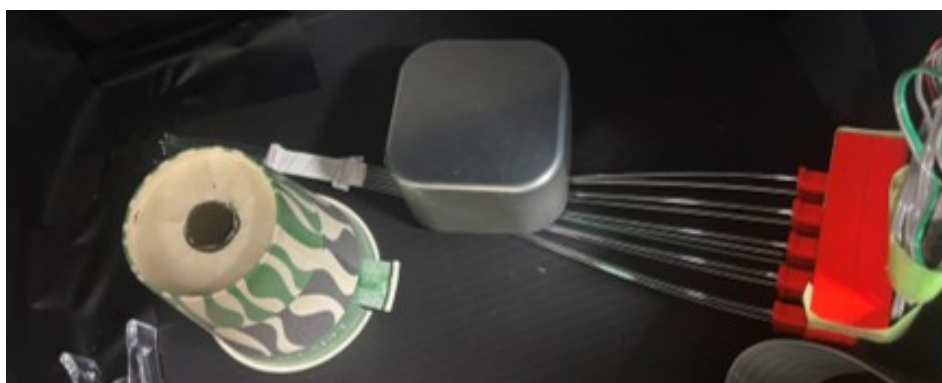


図 3.25: 新セットアップの外観

ファイバーの配置図とそれらのチャンネル番号を図 3.26 に示す。用いた SciFi や WLS の種類は、初期セットアップと同種である。初期セットアップは SciFi の間にクリアファイバーを挟んで

いたが、新セットアップにおいてはすべて SciFi とした。また、MPPC の電圧は 58 V が一斉にかけられており、8bitDAC の値はすべてのチャンネルで 256(4.5 V 相当) に設定した。

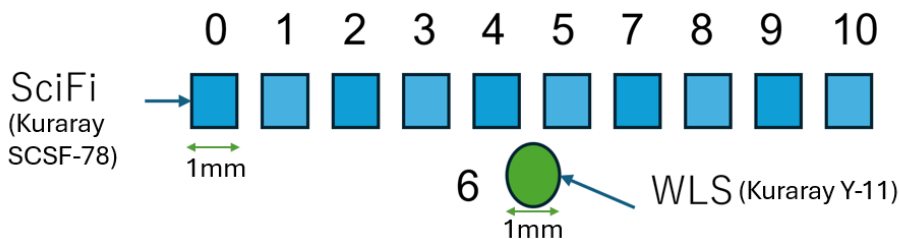


図 3.26: 新セットアップのファイバー配置図とチャンネル番号

このセットアップに対して、図 3.20 のように Sr-90 線源を離して置いた。次節以降、この線源を用いたセットアップで MPPC の較正及び、変換効率の測定を行った。

3.6.2 測定結果と MPPC の較正

ダークカウント及びイベントレートの測定

初めに、thr の値と p.e. の閾値の関係を調べるために、6ch において thr の値を 650 から 870 まで 10 ごと増加させながらそれぞれ 10 秒間ダークカウントを計数した。(線源は除いた。) その結果を図 3.27 に示す。ダークカウントの挙動は 3.3.1 節とほぼ同様である。一番右のプラトートのダークレート 300 kcps は 1 p.e. 以上であると予想され、これは浜松ホトニクス の MPPC のデータシート [15] によるダークレート 500 kcps(0.5 p.e. の閾値) とおおむね一致する。

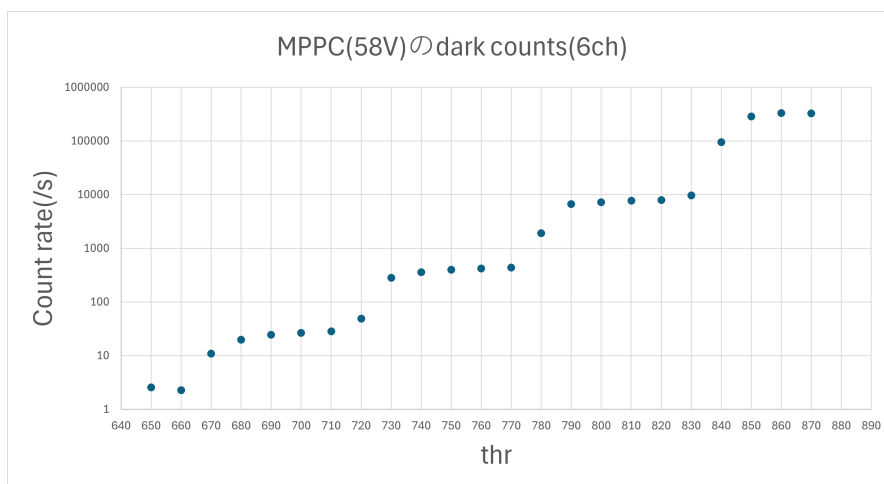


図 3.27: 6ch のディスクリミネーターの値と MPPC のダークカウント。縦軸は対数スケールの計数率。thr の値が上がるごとに閾値が下がり、ダークカウントが増加している。光子数ごとのプラトーが見られる。

次に線源を戻し、各チャンネルに対して thr を 660(5p.e. 以上) に設定してそれぞれ約 10 秒間計数をして、イベントレートを測定した。結果が表 3.3 である。3.4.2 節ではチャンネルによるイベントレートの差異が見られてたため、thr の値をチャンネルごとに調整するべきと述べた。しかし、今回の結果では、すべての SciFi のチャンネルで同じ設定に対して、20 Hz 前後のほぼ均一なイベントレートが得られた。これにより、個別で閾値設定を行わずとも一律に 660thr を用いれば、安定した測定が可能であることを確認した。また、660 thr におけるダークレートは約 2 Hz でありこれはイベントレートに対して十分小さい値となるので、5 p.e. 以上でトリガーをかけるのは適切である。

表 3.3: 新セットアップにおける各チャンネルのイベントレート。thr は 660 である。10ch は WLS のためカッコにしている。

チャンネル番号	イベントレート [Hz]
0 ch	29.7
1 ch	24.8
2 ch	21.5
3 ch	19.1
4 ch	17.9
5 ch	20.9
(6 ch)	(44.1)
7 ch	18.5
8 ch	22.5
9 ch	22.7
10 ch	18.4

本測定

最後に、変換効率測定のために、ある SciFi に 660 thr(5 p.e. 以上) をかけ、25000 イベントを取得する測定をすべての SciFi に対して行った。測定結果の一例として、10ch にトリガーがかかっているときの 10ch,6ch の光量分布を図 3.28 に、9ch,8ch の光量分布を図 3.29 に示す。

図 3.28 の 10ch の高光量部分には、線のランダウ分布が見え、3.4.2 節ではほぼダークカウントだったのに対して新セットアップが正しく測定できていることを示唆する。グラフの左端の立ち上がりの部分はランダウ分布とは異なり、5 p.e. に大きなピークが見られる。これは 5 p.e. 以上に閾値を設けている関係上、そのダークカウントが支配的になっているからであると考えられる。6ch の光量分布は伝搬された光を表しており、WLS から最も遠い 10ch にトリガーをかけたとしても、ペDESTALのみではないことが確認できる。

図 3.29 の 9ch にはトリガーをかけたチャンネルの隣の SciFi の光量分布が、8ch にはその隣の SciFi の光量分布が見られる。9ch はペDESTALが支配的というわけではなく、数光子数の分布が存

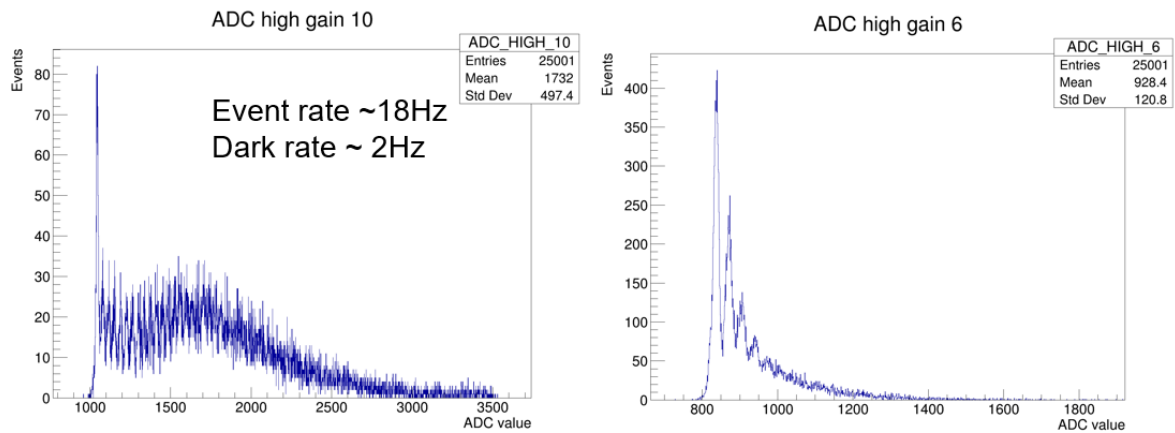


図 3.28: 新セットアップでの変換効率測定で、10ch にトリガー (660thr) をかけた時の 10ch(左図) と 6ch(右図) の光量分布。

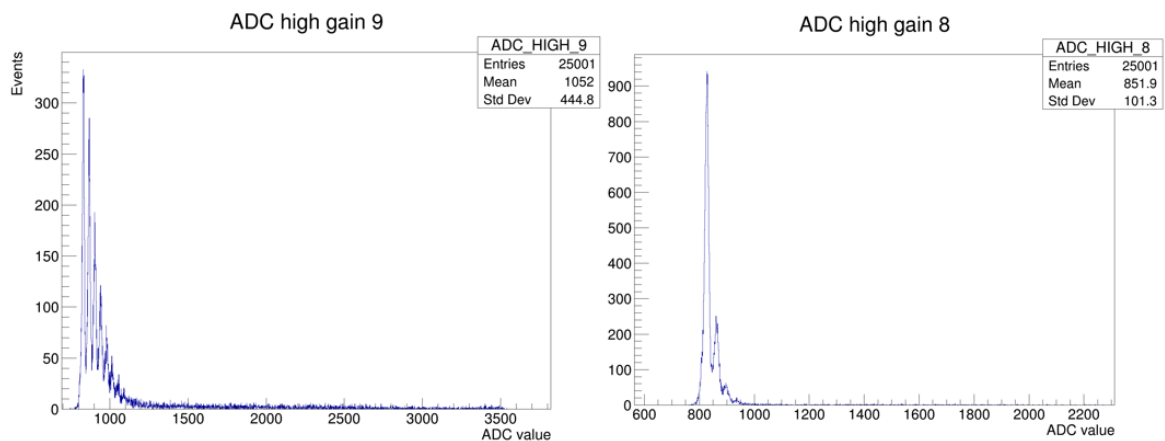


図 3.29: 新セットアップでの変換効率測定で、10ch にトリガー (660thr) をかけた時の 9ch(左図) と 8ch(右図) の光量分布。

在する。これは、たとえ線源を離れたとしても 線が隣の SciFi にも通過している事象があるということである。このようなイベントは WLS への総光量を押上げ、変換効率を過大評価する要因となる。そのため、実際の解析においては 9ch がある光子以下のイベントのみを選別して変換効率を計算する必要がある。一方 8ch はペDESTAL が支配的になっており、これ以上の広がりは無視できるので、変換効率を計算するときに考慮する必要はないと判断した。

最後に、ADC の値と p.e. の対応を計算した表が表 3.4 である。較正定数の算出にあたっては、各チャンネルの 0 p.e. から 2 p.e. までのピークをガウス関数でフィッティングし、0 p.e. と 1 p.e. の間隔の差と 1 p.e. と 2 p.e. の間隔の差の平均値を 1 p.e. の間隔として採用した。較正に用いた

データの選び方は、あるチャンネルがトリガーされたとき、その両隣にあるチャンネルに対して較正を行うようにする方式である。(重複部はどちらかで行っている。)

表 3.4: 新セットアップにおける各チャンネルの較正定数 (ペDESTALおよび 1 p.e. 間隔)

チャンネル番号	ペDESTAL [ADC]	1 p.e. 間隔 [ADC/p.e.]
0 ch	831.3	36.55
1 ch	824.3	35.40
2 ch	826.0	34.50
3 ch	828.0	35.05
4 ch	827.2	32.35
5 ch	829.6	34.10
6 ch	838.3	34.05
7 ch	826.7	35.25
8 ch	828.2	34.80
9 ch	829.5	37.25
10 ch	828.8	36.60

3.6.3 変換効率の算出と考察

SciFi-WLS の変換効率の測定結果を図 3.30 に示す。横軸は 4ch と 5ch の中心を 0 としたときの位置を示しており、位置方向に対する誤差はファイバーの大きさである ± 0.5 mm をつけている。縦軸は SciFi から漏れた光が PTFE によって反射され幾何学的に WLS に届き、さらに波長変換された割合を示している。波長変換の際には SciFi のシンチレーション光のスペクトルの WLS の吸収スペクトルの一致度合いと、吸収された際にどの程度発光されるかを示す量子効率 (Quantum yield) の積が関係する。

解析においては、まずはトリガー ch の光量分布に対して、ノイズが支配的であると考えられる 10 p.e. 以下のイベントをカットした。さらにトリガー ch の隣の ch の光量が 1 p.e. 以上であるイベントに対しても同様の処理を行った。残ったイベントについてトリガー ch (SciFi) と 6ch (WLS) の光量分布の平均を出し、SciFi から漏れ出した光に対する WLS に伝搬する光量の割合を計算した。丸ファイバーと角ファイバーの Trapping efficiency (3.1 節) の違いについても、微量ではあるが考慮に入れた。

まず、結果として SciFi の発光位置に相関した信号を WLS でも見ることができた。WLS がある付近のみ変換効率が突出して高いのは、SciFi の光が PTFE に反射されずに直接に入射される割合が高いからと考えられる。一方で、直接入射されにくい位置の SciFi にでも一定の変換率があることから、ある程度の範囲までは PTFE の反射によって WLS まで伝搬することが可能であるといえる。

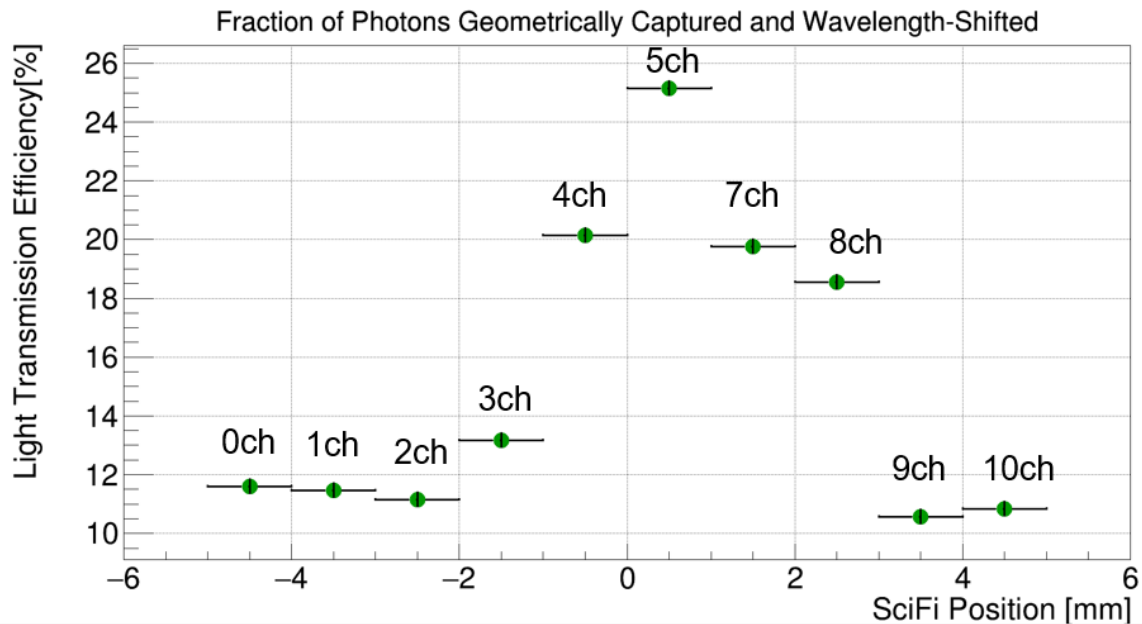


図 3.30: 変換効率の位置依存性。横軸は 4ch と 5ch の中心を 0 としたときの位置。縦軸は SciFi から漏れた光が幾何学的に WLS に届き、さらに波長変換された割合。各データの近傍にチャンネル番号を付記した。

WLS に隣接した SciFi においても、幾何的に WLS に伝搬され、さらに波長変換される割合はわずか約 25% である。シンチレーション光と WLS の吸収スペクトルの一致度合いは、Y-11 の WLS においては 58.7% であり、量子効率は 87% である。このことから、波長変換に起因するロス約 51% であり、残りの約 50% はジオメトリによるロスであると考えられる。

MIP(最小電離粒子) が SciFi を通過した際の SciFi のチャンネルで期待される光量を約 20 p.e. と仮定する。例えば、検出器において WLS の配置間隔を 3mm とした場合、測定された位置依存性 (図 3.30) から最も効率が低下する領域においても約 15 ~ 20% の効率が期待される。平均的な効率を 25% と見積もれば、WLS 側で約 5 p.e. の光量が期待でき、これはノイズと十分に分離可能なものと考えられる。また、この配置における位置分解能は、光量の重心による位置の推定を行わず不確かさを一様分布とすれば、 $\sigma = 3\text{mm}/\sqrt{12} = 0.87\text{mm}$ となる。

一方で、低エネルギーの陽子 ($\sim 500 \text{ MeV}/c$) の場合は dE/dx が大きく、SciFi において約 90 p.e. の光量が期待される。この場合、WLS の間隔を 1 cm まで広げて、変換効率が約 10% 程度に低下したとしても、約 9 p.e. の光量が得られる計算となる。1 cm まで間隔を広げたとしても、SciFi-WLS の系としては十分に陽子は観測可能ということが言える。

第 4 章

ハイドロゲル薄型水標的の開発

4.1 水標的の選択肢とハイドロゲルの利点

4.1.1 水標的の選択肢

図 2.10 のような構造の Water Tracker を考えた時、ファイバーの間を埋める水標的をどう設置するかは選択肢としていくつかの候補がある。最もシンプルな方法として、大きな水槽の中に SciFi を入れる方式である。WAGASCI のシンチレーターで仕切られた領域に水を入れた方式での読み出しでは、多チャンネル化したときに構築が難しく、水漏れの恐れがある。そこで、光が透過可能な水槽に SciFi を入れて読み出す方式が検討されている。

他の方法としては、ファイバー間に薄型のタンクを配置する構造である。ファイバー自体は水につからないが、水圧に耐えるための数 mm の壁厚が必要となり、有効な水標的の割合が低下する問題がある。この問題を解決する手段として、ハイドロゲルを用いる方法を検討した。

4.1.2 ハイドロゲルの利点と課題

ハイドロゲルの利点としては、固体の水として扱うことができるので、水漏れのリスクを低減できるという点にある。さらに、水の中にファイバーを入れないため光学系の読み出しが容易である。また、水圧に耐えるための分厚い容器を用意する必要はなく、約 100 μm の壁厚を実現できる可能性があるため、水標的の割合を高めることが可能となる。

一方で、ハイドロゲルを検出器で用いるにあたっていくつかの特有の課題も存在する。第一には、表面からの水分の蒸発や下部からの漏れである。図 4.1 に示すのは、密閉された箱の中に 6 か月間放置されたハイドロゲルの状態である。ゲルの構造自体は残っているものの、水はほとんど抜けていて、触れると弾力のある状態になっている。

第二に、大型化した際の力学的安定性である。実際に検出器に、ハイドロゲルを導入する場合、1 cm ほどの厚さで面積 $2\text{m} \times 2\text{m}$ という薄型かつ大面積のゲルを直立状態で保持することを想定している。ゲル自体は非常に柔らかいので、設置時の振動や、数年間にわたる自重による変形や崩壊について対策を講じる必要がある。

本研究では、これら課題解決に向けたハイドロゲルの特性理解のために、次の二つの実験を行った。

- 蒸発抑制の検証：フィルムによる有無がゲルの質量変化（水保持率）に与える影響を評価した。
- 形状の安定性の検証：ゲルを直立させた状態での重心変化を調べ、自重による変形の有無を調査した。

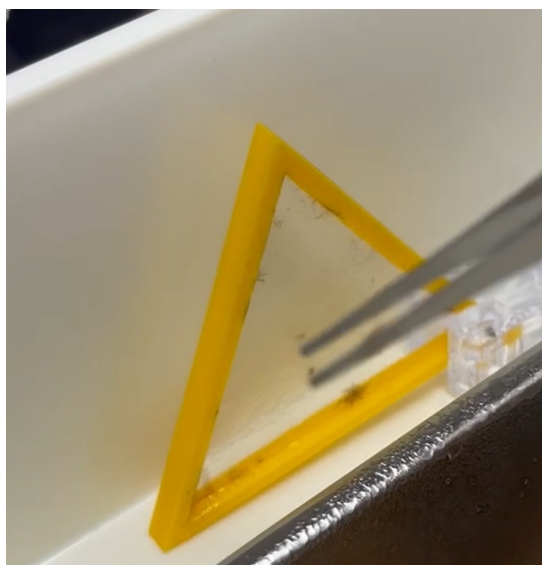


図 4.1: 6 か月密閉空間に放置されたゲル

4.2 フィルムの有無によるハイドロゲルの蒸発抑制

4.2.1 方法

本研究で用いたゲルはジェリクル株式会社より提供されたテトラゲルであり、均一な網目構造を持ち、約 97% の水含有率を持つ。ハイドロゲルの作り方はまず BufferA 9 mL、S 粉 180 mg、防カビ液 18 μ L を混合し A 液とする。次に BufferB 9 mL を、M 粉 180 mg を、防カビ液 18 μ L を混合し B 液とする。この A 液と B 液を混合し、図 4.2 に示した枠 (90 (mm) \times 40 (mm) \times 5 (mm)) の中にゲルを入れた。およそ 15 分でゲルは凝固した。この枠に対してゲルを入れたものをもう一組作成し、片方だけに厚さ 50 μ m の PET フィルムを両面に貼付した。

このようにして作ったゲルを初め、図 4.2 のように密閉できる箱の内部に直立させておき、約 2 か月間、定期的に取り出して質量と重心の位置を測定した。また、質量減少の速度を遅らせるために水の入った容器を入れてある。重心の位置の測定方法を及び結果は 4.3 節で詳しく述べる。箱の大きさは 210 (mm) \times 100 (mm) \times 320 (mm) であった。

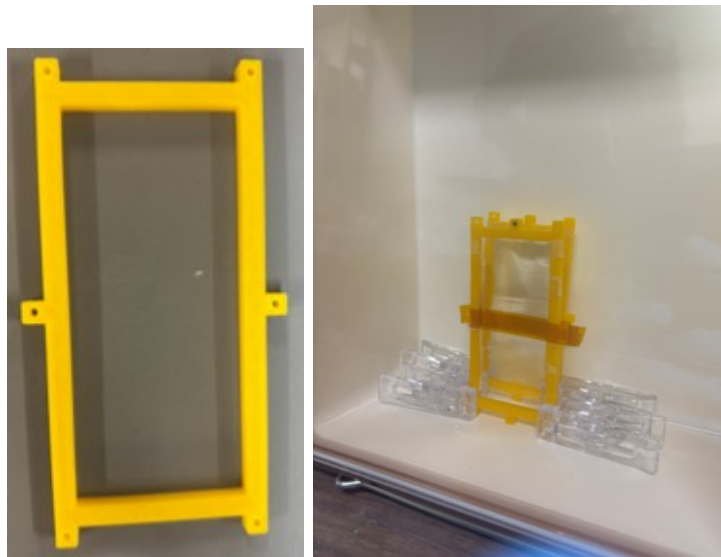


図 4.2: ゲルを保持しておくフレーム (左) と箱の中で実験中のゲルの様子 (右)

実験の途中でいくつか条件を変更した。ゲル作成時から 16 日後から 18.9 日後の間には図 4.3 のように温湿度計を箱の内部に入れて箱内外の温湿度を測り、その様子をタイムラプスで撮影した。また、22 日後から 27.1 日後の間には図 4.3 のようにフィルムのないゲルのみを箱ごと恒温槽に入れて 25 に設定しておいた。一方、フィルム有の場合は 22 日後以降は箱の外から出して放置した。

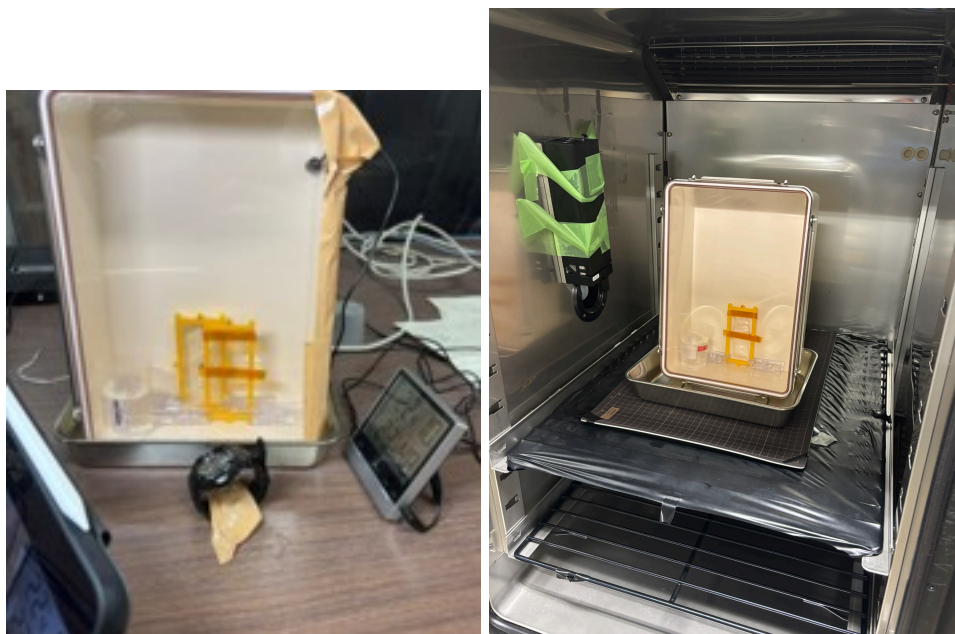


図 4.3: 箱の内部の温度室の測定の様子 (左) と恒温槽に設置されたゲルの様子 (右)

4.2.2 結果考察

まず、制作した小型のものであれば2か月間の直立状態での保持は可能であった。図4.4に質量変化の様子を示す。フィルム有のゲルは箱の内外での減少率の違いがよく見え、そのほかの特徴的な部分はない。

フィルム無しについて、温湿度計を入れた時(16日後から18.9日後)は急激に減少していることがわかる。図4.3の左図を見るとわかる通り、測定器を箱の外側から入れた影響でガムテープで覆っているものの、そこから水が抜けてしまい乾燥が進んでしまったのだと考えられる。実際、測定器を取り外す際にガムテープには多くの水滴が付着していた。温度についてはほぼ外気と変わらず、湿度は入れてから30分後には飽和していた(タイムラプスの時間幅の関係上、30分刻みでしか観測できなかった)。温湿度の測定後、再び箱を密閉して実験を続けたが、その後も減少率は温湿度を測定しているときと変わらず急激であった(18.9日後から22日後)。これは、温湿度計を入れているときの急激な乾燥の結果、ゲルの構造が変化し、水分保持能力が恒久的に低下した可能性が示唆される。

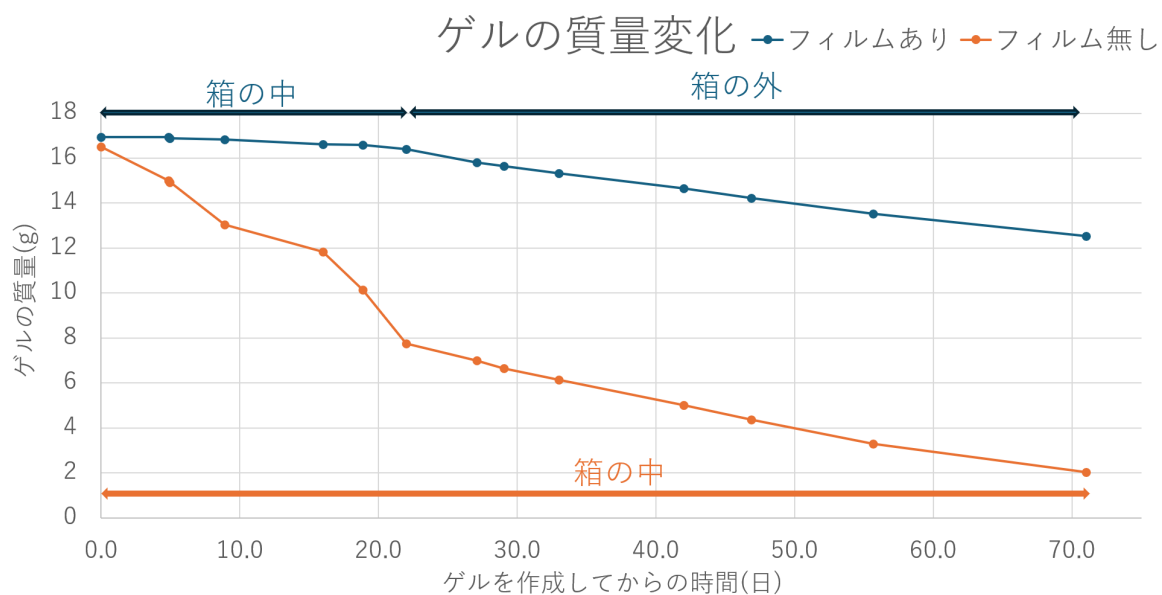


図 4.4: ゲルの質量変化

フィルム有について、箱の中のゲルがの減少率が低いのは、箱の中の水蒸気量がすぐに飽和し、ある程度乾燥した状態が続く外側に比べて蒸発量が抑えられるためと考えられる。箱の中が常に飽和していると考えられるのに、水分量が減少しているのは定期的に箱からゲルを取り出して測定をしているからだと考えた。実際に、箱内を飽和させるのに必要な水分量を計算すると、外気の湿度が10%で21であったとすると $1.1 \times 10^{-1} \text{g}$ である。しかしながら、ゲルを作成して5日後の初回測定時のフィルム無しのゲルの質量減少量は1.5gであった。この理論値との差の理由として、

測定のたびに水滴が箱の下面に付着していたので、箱の壁面の部分的な温度の低さが結露のように水を凝結させ、再度蒸発したとしてもゲルには戻らないからと考えることができる。

このゲルの水分蒸発の経路について検証するために箱ごと恒温槽に入れた(22日後から27.1日後)。恒温槽に入れた時の減少率は、それ以前に比べて低下していることがわかる。しかしその後、恒温槽から取り出し後の減少率も恒温槽に入れた時とほぼ同じである。これは恒温槽に入れる前までにある程度水を蒸発しきってしまい、ゲルの状態が変化したためであり、恒温槽による寄与はほぼなかったと推測できる。

最後に、質量変化をフィルム有無しそれぞれに対してフィッティングした結果を図4.5に示す。フィッティングは指数関数で行っており、オフセットはS粉とM粉の質量の和を下限としている。フィッティング範囲については、フィルム有はゲルを箱の外に出した後、フィルム無しは蒸発挙動が安定して以降を対象とする。

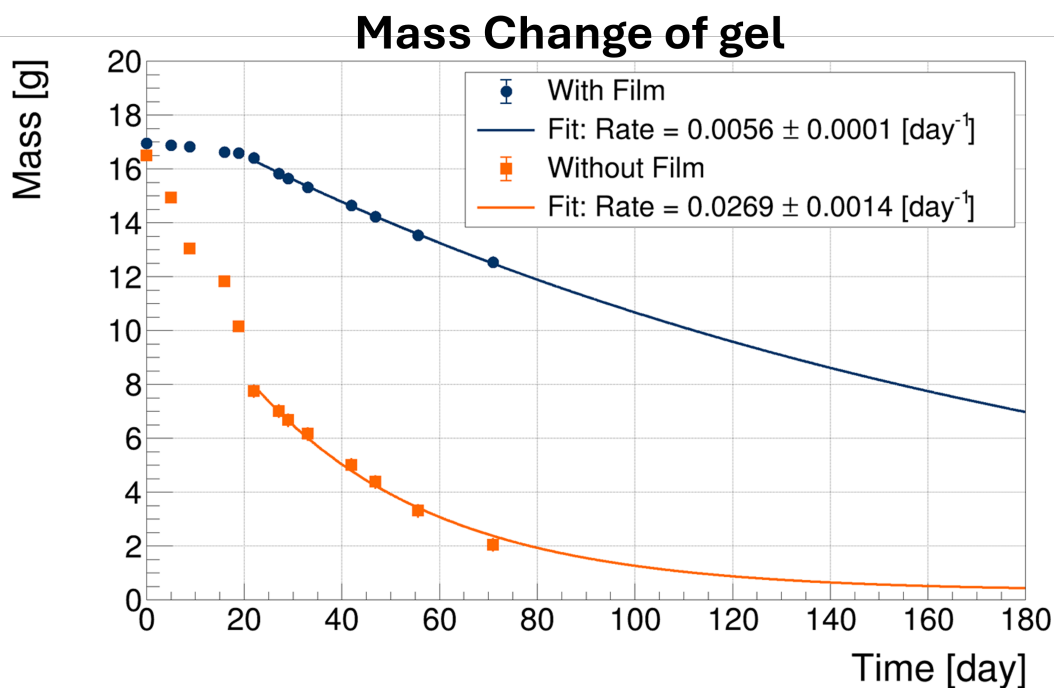


図 4.5: ゲルの質量変化とフィッティングによる将来予測

フィルム無しについては、6か月後にはほぼ質量はなくなっている。図4.1のような状態では弾力は少しあったので、幾分か水分は残っているはずである。現在は減少率が安定しているが、いずれ減少率が緩和される可能性があると考えられる。つまり、ゲルを維持するのに最低限必要な水分量があり、その水分は6か月では蒸発されないことが示唆される。

フィルム有については、6か月後には約半分程度水が抜けてしまっている。現在使用されているフィルム (PET, 50 μm) では、フィルム無しに比べて減少率は約 $1/5$ に低下させることはできたものの、数年間の運用のためには別の素材を考える必要がある。

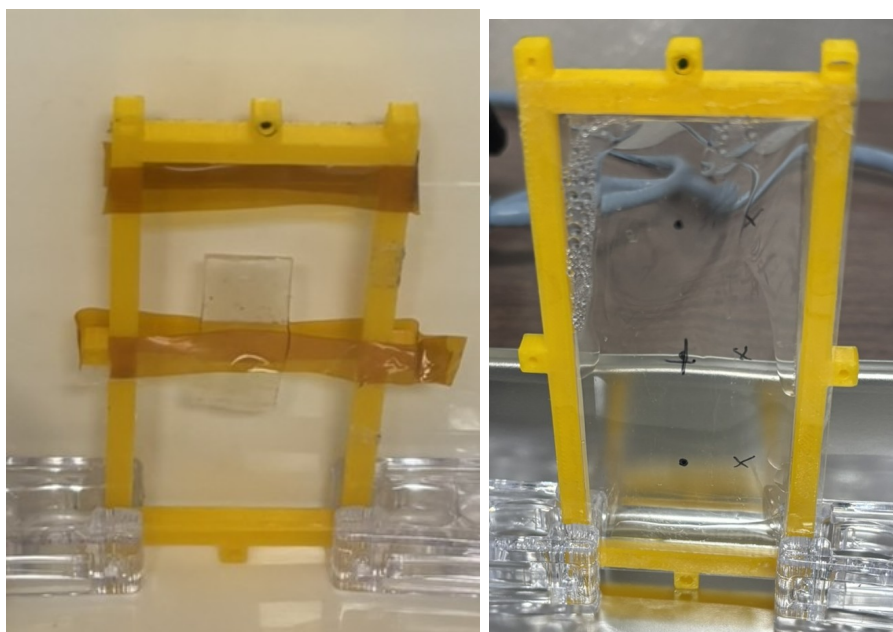


図 4.6: 現在 (ゲル作成から約 3 か月後) のゲルの様子。左側はフィルム無し、右側はフィルム有。フィルム無しの場合は水が抜け完全に縮んでいる。フィルム有の場合も枠とゲルの間に隙間ができ、結露している。

4.3 ハイドロゲルの重心変化の評価

4.3.1 方法

前節 (4.2 節) において、フィルム有の場合について、質量測定と同時に重心の測定も行った。重心の測定には力のモーメントを用いた方法を採用した。まず、ゲルが中心軸にたいして左右対称であると仮定する。その軸方向のゲル全体の長さを L 、端の支点から重心までの距離を l とする。端の支点と逆方向の端にはかりを置き、その測定値を F とすると、 F は垂直抗力に比例する。ゲル全体の質量を W と置くと力のモーメントのつり合いより次の式が成り立つ。

$$W \times l = F \times L \quad (4.1)$$

この式を用いて重心を求めることができる。この重心測定の原理の概念図を図 4.7 に示す。実際の測定の様子を図 4.7 に示す。測定による誤差を減らすために、ゲルの左右を入れて二回測定を行い、その平均値を重心位置として採用した。

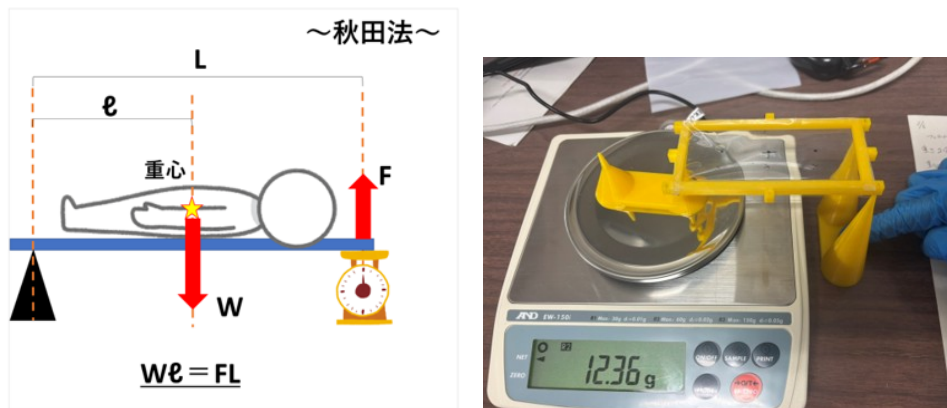


図 4.7: 重心測定の原理 (左)[18] と重心測定の様子 (右)

4.3.2 結果考察

ゲルの重心変化の様子を図 4.8 に示す。重心位置は直立した状態の上端からの距離であり、ちょうど真ん中は 50.5 mm である。測定の誤差については、ある一度の測定に対して、測定値が 12.16 g から 12.45g まで揺らいたので、その誤差をもとにして重心位置の誤差も算出した。

本測定は、重心測定のためにゲルを水平に静置して行うため、短時間で復元するような一時的な変形ではなく、直立状態で生じる長期的な内部水分の偏りを反映している。測定の結果、2 か月では誤差の範囲内でゲルの内部での重力による長期的な水の移動はないということがわかった。この事実は、ゲル中の水の減少は重力に起因する水の移動による下部からの漏れではなく、表面からの蒸発が支配的であるということを示す。したがって、適切にゲルを封入して乾燥を防止することが可能であれば、検出器としての水の漏れを防止することが可能ということがわかった。

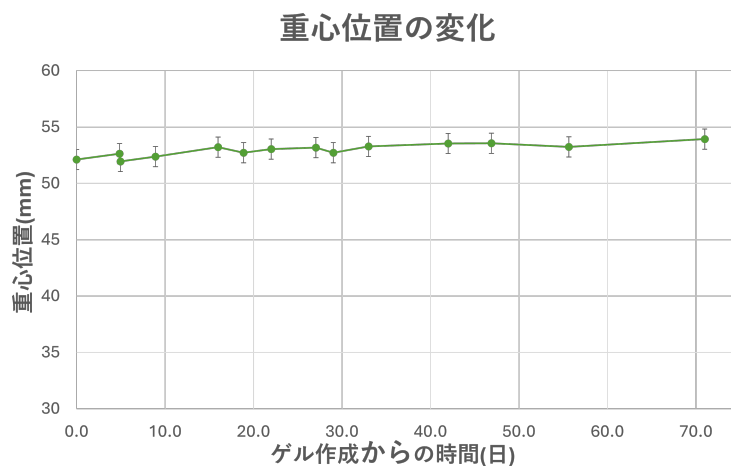


図 4.8: ゲルの重心変化

第 5 章

今後の展望

5.1 SciFi-WLS の伝送最適化

外部トリガーの導入

本研究における SciFi-WLS の変換効率測定では、各 SciFi に 660 thr (5 p.e. 以上) のトリガーを課した。しかし実際には、SciFi の発光における低光子数側のイベントを逃しているため、変換効率が比較的大きく算出されている可能性がある。そこで、ファイバーの下部にシンチレータとそれを読み取る WLS を配置することにより、SciFi を通過した後の β 線によるシンチレータの発光を外部トリガーとしてイベントを選択することが可能となる。

また、EASIROC において LED を外部トリガーとして導入した際は、うまく同期させてデータを取得することができなかった (図 3.15)。しかし、新たにシンチレータを導入する場合は EASIROC の内部ディスクリミネーターを用いるため、他の SciFi チャンネルと同様に同期させることが可能となる。

読み出し系の最適化

本研究では、WLS として直径 1 mm 丸ファイバー Y-11 を用いた。3.2.2 節で述べたようなスペクトルの相違による変換ロスや量子効率による変換ロスは WLS の種類によってさまざまである。それらの変換効率は図 3.6 のようなスペクトルの差に量子効率を乗じれば得られる。しかし実際に変換効率の測定を行うことで、実効的な変換効率を調べることができ、本当に最適な組み合わせを選ぶことができる。また、SciFi を 0.5mm 径にすることができればより高い位置分解能を得ることができる。そのほかの選択肢として SciFi をシングルクラッドではなく、マルチクラッドにすることで Trapping efficiency 等を上げたり、丸ファイバーにすることもできる。これらの選択肢の中から最適なものを選ぶ必要がある。

さらに、読み出しを最適化する方法として、WLS から漏れた光をもう一つの WLS で拾うことによる光量増加も期待できる。この手法に関しても WLS の発光、吸収スペクトルやファイバーの配置について検討しなければいけない。

5.2 ハイドロゲルの乾燥防止策の検討と強度向上策の実装

本研究では、ハイドロゲルの乾燥防止のために PET フィルムを用いた。今後の研究としては、東レフィルム加工株式会社のバリアロックス [19] を用いることにより、数年間の運用に対して乾燥を防げるかどうかを検討する。検証方法としては、恒温槽に入れて温度を上げることによる加速劣化試験を考えている。バリアロックスはアルミナ蒸着フィルムであり、一般的な乾燥防止フィルムであるアルミフィルムに比べて、透明であるので内部のゲルの様子を逐次確認できる利点がある。

本研究では、小型の薄型ゲルであれば 2 か月間保持できることが確認されたが、大型化した際は、保持できない可能性が高い。そこで、ゲルの中に構造体として不織布を用いることによって補強することを検討したい。具体的な不織布の導入方法としては、フィルムの付近にのみ入れて、フィルムとゲルを接続する方法、ゲルの中心に粗い網目状の不織布を入れて、その構造にゲルを支えてもらうことにより補強する方法などが考えられる。

第 6 章

結論

6.1 SciFi-WLS の変換効率測定

本研究では、SciFi-WLS の変換効率の測定にあたって、新しくセットアップを構築し、その変換効率を測定することに成功した。そのセットアップを利用して、SciFi-WLS の幾何学的かつ波長変換による変換の効率の位置依存性を求めることができた。変換効率は最大で約 25% であり、MIP であれば WLS の間隔を 3mm にするとどの位置でも約 25% の割合、5p.e. 以上の光量が期待できる。一方陽子 ($\sim 500\text{MeV}/c$) の場合では WLS の間隔が 1cm で効率が 10% だとしても約 9p.e. の光量が期待できるという結論を得た。

6.2 ハイドロゲル薄型水標的の開発

検出器としてハイドロゲルを用いる際の課題である「乾燥」と「自重による崩壊」を防ぐ解決策を講じるにあたり、本研究ではまずハイドロゲルの基礎特性を理解するための実験を行ったその結果、ハイドロゲルを PET フィルムに封止することにより蒸発率が約 1/5 に抑制することを確認した。また、重心測定により自重により水移動が生じないことも確認した。以上のことから、適切にフィルムに封入すれば、ハイドロゲルの水漏れや乾燥を防止することができるという明確な見通しを得ることができた。

目次

1.1	標準模型における素粒子	3
2.1	T2K 実験の概略図	7
2.2	J-PARC の概略図	8
2.3	off-axis 法	9
2.4	ND280	10
2.5	SK の内部の様子	12
2.6	SK のイベントの例	12
2.7	HK の概念図	13
2.8	IWCD の概念図	14
2.9	ND280++	16
2.10	Water Tracker のファイバーの配置	16
3.1	WLS と SciFi を組み合わせた Water Tracker の概念図	17
3.2	WLS と SciFi の中の光の伝搬	18
3.3	初期セットアップの外観	19
3.4	初期セットアップのファイバーの配置	19
3.5	シングルクラッドのファイバーの光伝達	20
3.6	SciFi と WLS の発光及び吸収スペクトル	20
3.7	MPPC による光子計数のイメージ	21
3.8	MPPC の外観	21
3.9	MPPC のピクセルピッチごとの波長特性	22
3.10	EASIROC の回路図の概要	23
3.11	ダークカウントの測定結果	24
3.12	LED を用いた際の光量分布	25
3.13	LED を消灯した際の光量分布	26
3.14	LED を用いた際の光量分布と LED を消灯した際の光量分布の比較	26
3.15	LED を光らせる信号を EASIROC に外部トリガーとして入力した際の光量分布	27
3.16	放射線源を用いた測定の外観	27

3.17	線源を用いた測定で 10ch にトリガーをかけた時の 10ch,12ch の光量分布	28
3.18	線源を用いた測定で 12ch にトリガーをかけた時の 10ch,12ch の光量分布	28
3.19	線源を用いた測定で 12ch にトリガーをかけた時の 4ch の光量分布	29
3.20	線源を用いた変換効率測定の様子	30
3.21	変換効率測定で 12ch にトリガーをかけた時の 10ch,12ch の光量分布	31
3.22	新セットアップの治具	33
3.23	ファイバーの端面処理とファイバーの治具	33
3.24	MPPC の治具	34
3.25	新セットアップの外観	34
3.26	新セットアップのファイバー配置図とチャンネル番号	35
3.27	新セットアップのダークカウントの測定結果	35
3.28	新セットアップでの変換効率測定でトリガー ch と WLS の光量分布	37
3.29	新セットアップでの変換効率測定で、トリガー ch の隣とその隣の光量分布	37
3.30	変換効率の位置依存性	39
4.1	6 か月密閉空間に放置されたゲル	41
4.2	ゲルを保持しておくフレームと箱の中で実験中のゲルの様子	42
4.3	箱の内部の温度室の測定の様子と恒温槽に設置されたゲルの様子	42
4.4	ゲルの質量変化	43
4.5	ゲルの質量変化とフィッティングによる将来予測	44
4.6	現在のゲルの様子	45
4.7	重心測定の原理と重心測定の様子	46
4.8	ゲルの重心変化	46

表目次

3.1	各チャンネルにおけるペDESTAL値および 1 p.e. 間隔の測定結果	30
3.2	各チャンネルにおけるイベントレート (thr = 760 を各 ch に設定して測定) . . .	31
3.3	新セットアップにおける各チャンネルのイベントレート。thr は 660 である。 10ch は WLS のためカッコにしている。	36
3.4	新セットアップにおける各チャンネルの較正定数 (ペDESTALおよび 1 p.e. 間隔)	38

参考文献

- [1] File:Standard Model of Elementary Particles.svg. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg. (参照: 2026-04-24).
- [2] Ziro Maki, Masami Nakagawa, and Shoichi Sakata. Remarks on the Unified Model of Elementary Particles. *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 28, No. 5, pp. 870–880, 11 1962.
- [3] Y. Ashie, et al. Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 93, p. 101801, 2004.
- [4] A. D. Sakharov. Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe. *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, Vol. 5, pp. 32–35, 1967.
- [5] About T2K. <https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>. (参照: 2026-04-29).
- [6] J-PARC センター. 加速器施設. <https://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>. (参照: 2026-04-29).
- [7] K. Abe, et al. Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam. *Phys. Rev. D*, Vol. 88, p. 032002, Aug 2013.
- [8] スーパーカミオカンデ概要. <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/outline/>. (参照: 2026-05-02).
- [9] 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設. スーパーカミオカンデ公式サイト - 検出器について. <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/detector/>. (参照: 2026-05-04).
- [10] ハイパーカミオカンデ公式サイト - ハイパーカミオカンデ概要. <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/about/outline/>. (参照: 2026-05-05).
- [11] KEK/J-PARC ニュートリノグループ. 中間検出器. <https://www-neutrino.kek.jp/project/iwcd/>. (参照: 2026-05-05).
- [12] 駒場はるか. 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. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科, 2024.
- [13] 株式会社クラレ. Plastic scintillating fibers 製品カタログ. <https://methacrylate.kuraray.com/content/dam/methacrylate/ja/documents/psf.pdf>. (参照: 2026-05-06).

- [14] 浜松ホトニクス株式会社. MPPC とは. https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html. (参照: 2026-05-06).
- [15] 浜松ホトニクス株式会社. MPPC S13360 シリーズ データシート. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf. (参照: 2026-04-19).
- [16] OMEGA Group. [EASIROC Data Sheet], 2011.
- [17] 若林大貴. ハイパーカミオカンデ実験に向けた水標的シンチレーティングファイバートラッカーの開発. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科, 2023.
- [18] 重心ってどこにあるのか? (重心の場所と求め方). <https://sprint-condition.info/category33/entry365.html>. (参照: 2026-05-13).
- [19] 東レフィルム加工株式会社. バリアロックス ®. <https://www.toray-taf.co.jp/products/barrialox.html>. (参照: 2026-05-13).