

T2K 実験の新型前置検出器 SuperFGD の
LED キャリブレーションシステムのインストールに向けた研究

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻
高エネルギー物理実験研究室 博士前期 2 年
21844415 古藤 達朗

2023 年 1 月 10 日

概要

T2K 実験は日本でされている長基線加速器ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある J-PARC からニュートリノビームを発射し、振動前のニュートリノを J-PARC に設置された前置検出器群で、振動後のニュートリノを 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に設置されたスーパーカミオカンデで観測する。現在、T2K 実験では 3σ の信頼度でのレプトンセクターでの CP 対称性の破れの発見を目的に T2K-II 計画が進行している。

CP 対称性の破れの発見のためには統計量の増加と系統誤差の削減が必要であり、T2K-II では、系統誤差 1 つであるニュートリノと物質との相互作用の不定性の削減を目指し、前置検出器 ND280 のアップグレードを行う。この ND280 のアップグレードでは、約 200 万個の 1cm 立方のシンチレーターキューブと約 6 万本の波長変換ファイバーと約 6 万個の光検出器 MPPC からなる SuperFGD という名称のニュートリノの標的兼飛跡検出器が新たに導入される。

東京都立大学は高エネルギー加速器研究機構とロシアのモスクワ州に所在するドゥブナ合同原子核研究所と共同で、SuperFGD のための LED キャリブレーションシステムを開発している。LED キャリブレーションシステムは、波長変換ファイバーの端面から LED 光を入射し、その信号を MPPC で読み出すことで、波長変換ファイバーと MPPC を含めた検出器の健全性の確認と、MPPC の増倍率の較正を行う装置である。

本研究では、LED キャリブレーションシステムの構成要素である LGP モジュールの設計の改良と、量産し組み立てた LGP モジュールの品質検査システムの開発を行った。また、LGP モジュールは 2023 年の 3 月に地上にて SuperFGD に取り付けられる予定であり、LGP モジュールのインストールに向けて、2022 年 12 月に量産された LGP モジュールの組み立てと開発した品質検査システムを用いての品質検査を J-PARC に行った。

目次

第 1 章	序論	7
1.1	ニュートリノ	7
1.2	ニュートリノ振動	8
1.3	T2K 実験	9
1.3.1	J-PARC 陽子加速器群	9
1.3.2	Off-axis 法	11
1.3.3	前置検出器群	12
1.3.4	スーパーカミオカンデ	15
1.4	T2K-II	15
1.4.1	T2K 実験の現状と T2K-II	15
1.4.2	前置検出器 ND280 アップグレード	17
第 2 章	SuperFGD	20
2.1	SuperFGD の概要	20
2.2	SuperFGD の構成要素	20
2.2.1	シンチレータキューブ	21
2.2.2	波長変換ファイバー	21
2.2.3	MPPC	21
2.2.4	信号読み出しエレクトロニクス	22
2.2.5	LED キャリブレーションシステム	24
2.3	期待される性能	24
第 3 章	LED キャリブレーションシステム	27
3.1	LED キャリブレーションシステムの概要	27
3.2	LED キャリブレーションシステムの構成要素	27
3.2.1	LGP モジュール	27
3.2.2	LED ドライバー	33
3.3	LGP モジュールと LED ドライバーの接続方法	34
3.4	LED キャリブレーションシステムを用いた MPPC への光子の分配方法	35
3.5	想定される LED キャリブレーションシステムの運用方法	36
3.6	LGP モジュールの問題点	38
3.7	研究の目的	38

第 4 章	LGP モジュールの改良	40
4.1	LGP モジュール改良の方針	40
4.2	LED 基板の改良	40
4.2.1	光量測定の設定アップ	40
4.2.2	保護抵抗の変更	41
4.2.3	光源の変更	42
4.3	コリメータの形状の改良	54
4.4	考察とまとめ	56
第 5 章	カメラを用いた LGP モジュールのための品質確認システムの開発	59
5.1	品質確認システムの開発の目的	59
5.2	開発した品質確認システムの概要	60
5.3	LGP モジュール撮影のためのセットアップ	61
5.3.1	LGP モジュールの撮影方法	61
5.3.2	カメラのセットアップ	63
5.4	光量の定量化手法の開発	64
5.4.1	画像処理を用いた品質評価の流れ	65
5.4.2	開発した Notch の光量の定量化手法	65
5.5	開発した検査システムの性能評価	65
第 6 章	J-PARC での LGP モジュールの組み立てと品質検査	68
6.1	J-PARC での量産された LGP モジュールの組み立て	68
6.1.1	導光板と拡散板の側面とネジ穴の処理	68
6.1.2	ライトを用いたケースの繋ぎ目の遮光の確認	69
6.1.3	LED 取り付け基盤が取り付けられる側のケースの溶着	70
6.1.4	LED 基盤・コリメーター・導光板・拡散板の取り付け	71
6.2	組み立て後の LGP モジュールの品質検査	72
6.2.1	LGP モジュールの品質の評価基準	72
6.2.2	検査システムを用いた LGP モジュールの健全性と品質の検査結果	73
第 7 章	結論と今後の展望	76
	参考文献	79

目次

1.1	標準模型の素粒子一覧	7
1.2	T2K 実験の概観図	9
1.3	J-PARC と陽子加速器群の概観図	10
1.4	RCS から MR へのビーム入射の概念図	11
1.5	ニュートリノビームラインの概略図	12
1.6	異なる OA でのニュートリノフラックスとニュートリノ振動確率のエネルギー依存性	12
1.7	INGRID の概略図	13
1.8	ND280 の概略図	14
1.9	FGD の XY モジュールのイメージ図	14
1.10	SK のスケッチ図	15
1.11	T2K 実験での δ_{CP} の暫定的な測定結果	16
1.12	MR のビーム強度の計画と POT の目標値	16
1.13	ND280 と SK での再構成された荷電レプトンの運動量と角度の分布	17
1.14	ND280 における陽子の検出効率と運動量分布	18
1.15	アップグレード後の ND280 の外観	19
2.1	SuperFGD の概略図	20
2.2	Y-11 波長変換ファイバーの特性	21
2.3	MPPC S13360-1325PE の写真と寸法	22
2.4	MPPC 基盤の写真	22
2.5	CITIROC チップのブロックダイアグラム	23
2.6	読み出しエレクトロニクス用のテスト用試作機の写真	23
2.7	LGP モジュールの外観	24
2.8	SuperFGD の MPPC 設置領域と LED キャリブレーションシステムの設置領域	25
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	25
2.10	SFGD と FGD の運動量と検出効率のシミュレーション結果	26
3.1	LGP モジュールの概略図	28
3.2	LGP モジュールの設置位置	29
3.3	導光板の概略図	29
3.4	導光板の写真 (LED 未点灯時)	29
3.5	導光板の写真 (LED 点灯時)	29

3.6	Notch の拡大写真 (LED 点灯時)	30
3.7	拡散板の写真	30
3.8	拡散板を装着した状態での LGP モジュールの写真 (LED 点灯時)	31
3.11	コリメータの写真と CAD モデル	32
3.9	LED 取り付け基板の写真	32
3.10	LED 取り付け基板の回路図	32
3.12	コリメータの写真	33
3.13	LED ドライバーの外観	33
3.14	LED ドライバー設置場所	34
3.15	同軸ケーブルと中間ボード	35
3.16	LGP モジュールを用いた MPPC への LED 光への分配方法の概略図	36
3.17	MPPC での検出光子の分布の例	37
3.18	検出光子数が極端に少ない場合の MPPC での検出光子の分布の例	37
4.1	MPPC と波長変換ファイバーの写真 (左) と DT5702 の写真 (右)	41
4.2	MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量測定のセットアップ	42
4.3	MPPC、波長変換ファイバー、CITIROC モジュールを用いた光量測定結果の例	42
4.4	保護抵抗を置き換えたときの光量の測定結果	43
4.5	緑色 LED を取り付けした LGP モジュールの写真 (拡散板未装着)	43
4.6	青色 LED と緑色 LED の光量の比較	44
4.7	ADC 測定のセットアップ図	45
4.8	測定に用いた富士フィルム社製の ND フィルター	45
4.9	青色 LED での ADC 分布測定結果	46
4.10	緑色 LED での ADC 分布測定結果	47
4.11	青色 LED での波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果	49
4.12	緑色 LED での波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果	50
4.13	青色 LED での波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量測定結果	51
4.14	長さ 2m のクラレ Y-11 波長変換ファイバーにおける読み出される光量の MPPC までの距離の依存性の測定結果	51
4.15	青色 LED での ADC 分布測定結果とそれぞれの設定での最小光量 λ_{min} の計算結果	52
4.16	緑色 LED での ADC 分布測定結果とそれぞれの設定での最小光量 λ_{min} の計算結果	53
4.17	板厚変更後のコリメータを装着した LGP モジュールでの光量測定結果	54
4.18	旧型コリメータと改良後のコリメータの写真	55
4.19	最終版コリメータの写真 (溶着後)	55
4.20	最終版コリメータの写真 (溶着前)	55
4.21	最終版コリメータと旧型コリメータの光量の比較	56
4.22	青色 LED(NSPB300B) の発光スペクトラム	57
4.23	緑色 LED(NSPGG300B) の発光スペクトラム	57
4.24	複数の光子が同じタイミングで MPPC に入射したときと、異なるタイミングで MPPC に入射したときの波形	58

4.25	LED 光を PMT で読み出したときの波形	58
5.1	量産された LGP モジュールのインストールまでの流れ	60
5.2	カメラを用いた検査システムの外観	61
5.3	検査システムを用いて撮影した LGP モジュールの写真	62
5.4	1mm 厚アクリル板製の治具をつけた LGP モジュールの写真	62
5.5	SuperFGD のガラスエポキシ (G10) 製の外壁の写真	63
5.6	検査システムに用いるカメラの外観	64
5.7	パラメータ調節前の LGP モジュールの画像の青色成分の 8 ビット値を詰めたヒストグラム	64
5.8	パラメータ調節後の画像の青色成分の 8 ビット値を詰めたヒストグラム	64
5.9	1 個の Notch の周辺のピクセルの 8 ビット値を詰めたヒストグラム	66
5.10	検査システムでの光量と MPPC での光量の比較	67
6.1	LED の反対側の側面を油性黒マーカーペンで塗る前の導光板	69
6.2	LED の反対側の側面を油性黒マーカーペンで塗った後の導光板	69
6.3	側面とネジ穴を油性黒マーカーペンで塗ったあとの拡散板の写真	69
6.4	ライトを用いたケースの遮光の確認の様子	70
6.5	LED 基盤が取り付けられる側のケースの写真	70
6.6	LED 基盤・コリメーター・導光板・拡散板の取り付けの流れ	71
6.7	組み立て後の量産品の Bottom LGP モジュールの写真	72
6.8	Wall LGP モジュールの検査結果	74
6.9	Bottom LGP モジュールの検査結果	75

第1章

序論

1.1 ニュートリノ

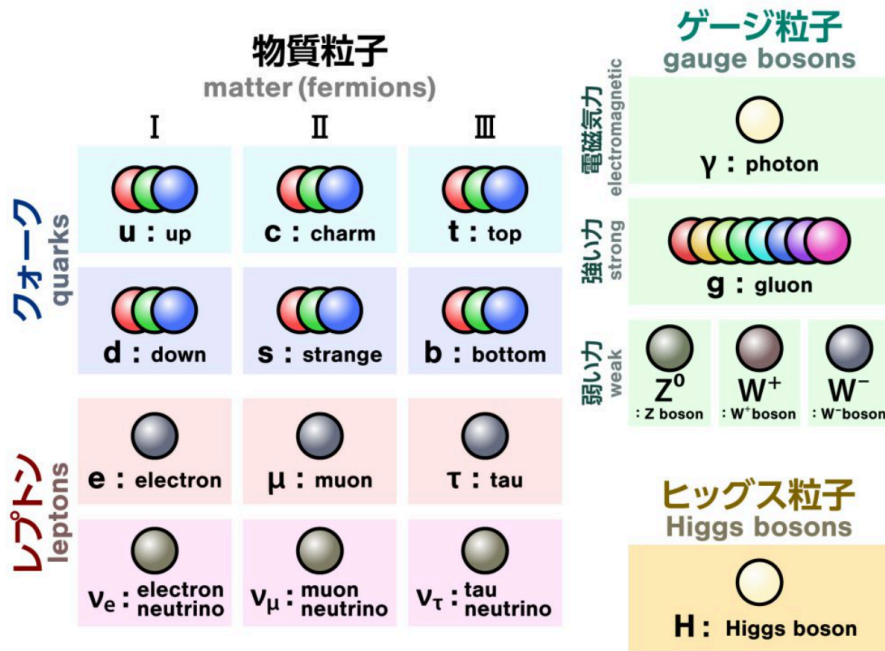


図 1.1 標準模型の素粒子一覧 [1]

ニュートリノは電荷を持たないスピン 1/2 のレプトンである。ニュートリノには 3 種類のフレーバーがあり、それぞれ電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノと呼ばれている。標準模型においてニュートリノは質量を持たないと仮定されていたが、1998 年のスーパーカミオカンデ (SK) での大気ニュートリノの観測によって、ニュートリノが別のフレーバーのニュートリノに変化するニュートリノ振動が確認され、ニュートリノが微小な質量を持つことがわかった。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが空中を伝搬する際に別のフレーバーのニュートリノに変化する現象である。ニュートリノのフレーバーが3種類のときのニュートリノの質量固有状態とフレーバー固有状態の関係は

$$\begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{\mu 1} & U_{\tau 1} \\ U_{e2} & U_{\mu 2} & U_{\tau 2} \\ U_{e3} & U_{\mu 3} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

で表される。

ここで $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ は質量固有状態、 $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$ はフレーバー固有状態を表す。行列 U はユニタリー行列であり、ポンテコルボ-牧-中川-坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれる。PMNS 行列は3つの混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ と CP 位相 δ で次のようパラメータ化される。

$$\begin{aligned} U &\equiv \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{\mu 1} & U_{\tau 1} \\ U_{e2} & U_{\mu 2} & U_{\tau 2} \\ U_{e3} & U_{\mu 3} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.2)$$

ここで、 $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}, c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ である。

真空中においてフレーバー α のニュートリノ ν_α がフレーバー β のニュートリノ ν_β に振動する確率は次で表せられる。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>k} \text{Re}(U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^*) \sin^2 \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{4E} + 2 \sum_{j>k} \text{Im}(U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^*) \sin \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2E} \quad (1.3)$$

ここで L と E はそれぞれニュートリノの伝播距離とエネルギーである。 $\Delta m_{jk}^2 \equiv m_j^2 - m_k^2$ は質量二乗差である。 Δm_{jk}^2 と E が定数のとき、ニュートリノのフレーバーが変化する確率がニュートリノの伝播する距離 L によって周期的に変化することから、ニュートリノ振動と呼ばれている。

1.3 T2K 実験

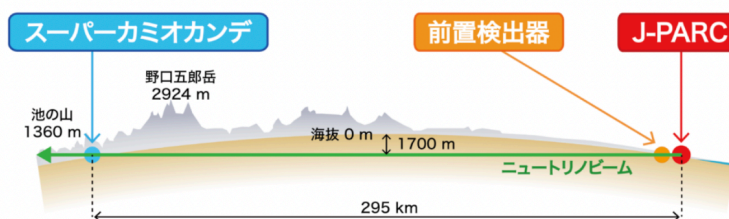


図 1.2 T2K 実験の概観図 [2]

T2K(Tokai to Kamioka) 実験は日本で行われている長基線加速器ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex: 大強度陽子加速器施設) の大強度陽子加速器で生成したニュートリノを 295km 離れた岐阜県飛騨市に設置されたスーパーカミオカンデ (SK) に向けて発射し、ニュートリノ振動を精密に測定する実験である。ニュートリノ生成標的から 280m 下流には前置検出器が設置されており、この前置検出器で振動前のニュートリノを、さらにそこから 295km 離れた SK で振動後のニュートリノをそれぞれ観測している。T2K 実験の主な目的は、ニュートリノ振動パラメータの高い精度での決定と未発見のレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見である。

1.3.1 J-PARC 陽子加速器群

T2K 実験では J-PARC にある陽子加速器群を用いてニュートリノを生成し、上流の前置検出器と下流の SK で検出する。ニュートリノの生成に用いる陽子加速器群は後述する LINAC、RCS、MR の 3 つの加速器で構成される。J-PARC は陽子加速器を用いた複合型実験施設であり、ニュートリノ実験施設の他にハドロン実験施設や中性子を用いた実験を行う物質・生命化学実験施設がある。

LINAC(LINear ACcelerator)

LINAC は陽子 1 個と電子 2 個からなる負水素イオンを加速させる線形加速器である。LINAC の全長は全長 330m であり、最終的な負水素イオンの運動エネルギーは 400MeV である。

RCS(Rapid-Cycling Synchrotron)

RCS は円周 348.333m のシンクロトロン加速器である。LINAC で加速された負水素イオンは、RCS への入射部で炭素の薄膜を通過し、電子が剥ぎ取られ陽子ビームとなる。陽子ビームは最終的に 3GeV まで加速される。加速された陽子ビームは物質・生命化学実験施設における中性子を用いた実験に利用される。また、ニュートリノ実験やハドロン実験に用いるするために使われる陽子ビームは後段の MR に送られる。

MR(Main Ring)

MR は RCS から受け取った陽子ビームを 30GeV まで加速させるシンクロトロン加速器である。MR は RCS から受け取った陽子ビームを 1.4 秒間で 30GeV まで加速させて大強度陽子ビームを生成する。MR には



図 1.3 J-PARC と陽子加速器群の概観図 [3]

加速した陽子を一挙に取り出す速い取り出し (FX) と 2 秒間で少しずつビームを取り出す遅い取り出し (SX) の 2 つの運転モードがあり、速い取り出しではニュートリノビームラインへ、遅い取り出しではハドロンビームラインへそれぞれ陽子ビームが射出される。現在のニュートリノビームラインの速い取り出しでの陽子ビームを取り出してから次の陽子ビームを取り出すまでの周期は 2.48 秒である。

ニュートリノビームライン

MR から射出された陽子ビームはニュートリノビームラインを通過して炭素標的に衝突し、そこで生じた荷電 π 中間子の崩壊を利用してニュートリノを生成する。ニュートリノビームラインは 1 次ビームラインと、2 次ビームラインの 2 つで構成される。MR から蹴り出された陽子ビームは、多数の超伝導電磁石やビームの強度・位置・形状を監視するビームモニターを軌道上に配列した 1 次ビームラインを通過して西向きに曲げられる。1 次ビームラインを通過した陽子ビームは、上流側からターゲットステーション、ディケイボリューム、ビームダンプが並んだ 2 次ビームラインに入射する。ターゲットステーションは陽子ビームを衝突させる炭素標的と電磁ホーンで構成され、陽子ビームが炭素標的に衝突して生じた荷電 π 中間子は電磁ホーンによって前方に収束される。生成された荷電 π 中間子はディケイボリュームと呼ばれる全長約 100m のトンネルを飛行中に

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.4)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.5)$$

のように崩壊する。電磁ホーンに流す電流の向きを変更することで、ビーム軸方向に収束させる荷電 π 中間子の電荷を選択することができ、 ν_μ ビームを生成するモードと $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成するモードを選択することができる。炭素標的と反応せずに通過した陽子や崩壊しなかった荷電 π 中間子は、炭素と鉄で構成されているビー

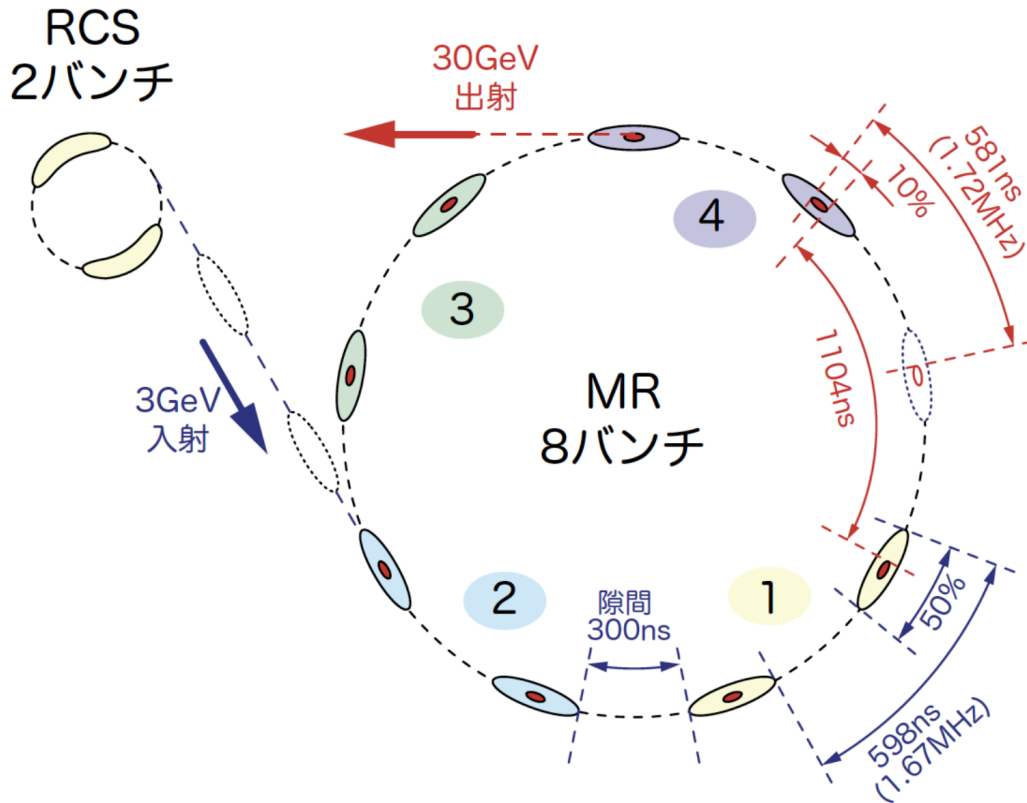


図 1.4 RCS から MR へのビーム入射の概念図 [4]。それぞれの束が陽子のバンチであり、9つ等間隔に並んでいるバンチのうち 8 つが使用される (9 つ目は空きバンチ)。

ムダンプで吸収される。

1.3.2 Off-axis 法

振動後のニュートリノを検出するニュートリノ生成部から 295km 離れた SK はニュートリノビームの中心軸から 2.5° の角度に位置する。ニュートリノビーム軸上に検出器を配置することを On-axis 法、ビーム軸上から少し離れた位置に検出器を配置することを Off-axis 法と呼ぶ。また、その角度を Off-axis angle(OA) と呼ぶ。図 1.6 に異なる OA でのニュートリノフラックスと、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率のエネルギー依存性のグラフを示す。ニュートリノはエネルギーと飛行距離によってニュートリノ振動の確率が変化するが、ニュートリノ生成部から SK まで 295km 離れた T2K 実験においては、図 1.6 に示すようにニュートリノのエネルギーが 0.6GeV 付近で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率がピークを持つ。一方で、検出器をビーム中心軸から 2.5° ずらすことでニュートリノフラックスのエネルギー分布は 0.6GeV 付近でシャープな分布となる。このように、T2K 実験では $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 事象と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 事象を観測しやすいようニュートリノフラックスのエネルギー分布が Off-axis 法を用いて最適化されており、T2K 実験は世界で初めて Off-axis 法を採用した長基線加速器ニュートリノ振動実験である。

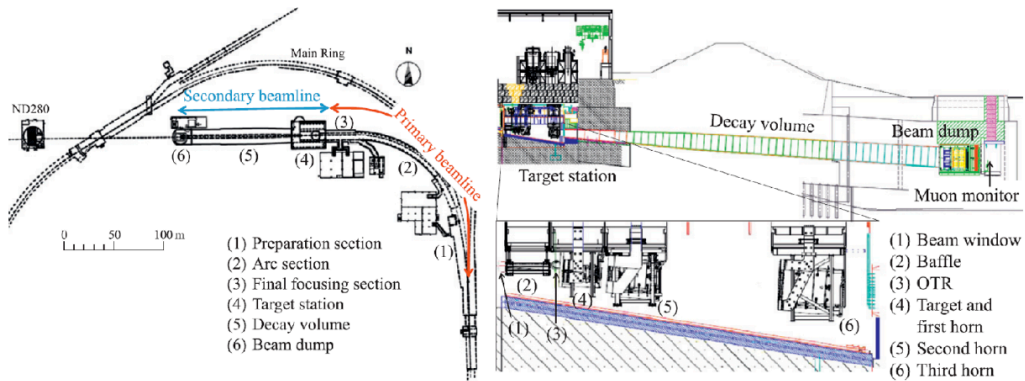


図 1.5 ニュートリノビームラインの概略図 [5]

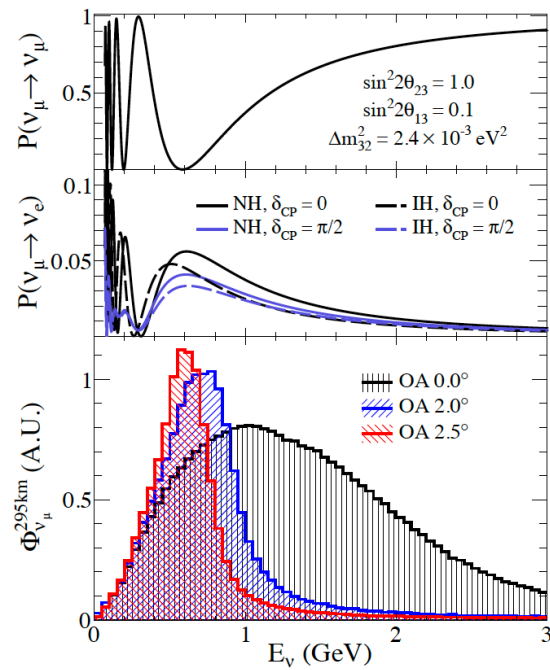


図 1.6 異なる OA でのニュートリノフラックスと、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率のエネルギー依存性 [6].

1.3.3 前置検出器群

T2K 実験の前置検出器群はニュートリノ生成標的から 280m 下流に位置しており、生成されたニュートリノビームをモニターしたり、ニュートリノと原子核の反応を測定することを目的としている。前置検出器群は、主にニュートリノビームの中心軸上に位置する INGRID とビームの中心軸から 2.5° ずれた位置にある ND280 の 2 つの検出器で構成されている。

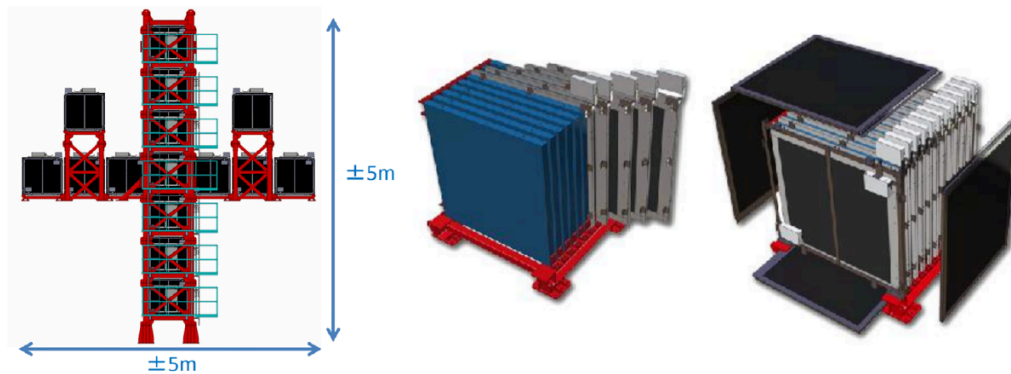


図 1.7 INGRID の概略図 [7]

INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) はニュートリノビームの方向及び強度をモニターすることを目的に、ビームの中心軸上に配置された On-axis 検出器である。図 1.7 に示すように、INGRID は 16 個のモジュールから構成されており十時型に配置されている。それぞれのモジュールはニュートリノの標的となる 9 枚の鉄製プレートと 11 層のシンチレータのサンドイッチ構造をしており、鉄とニュートリノの反応で生成した荷電粒子をシンチレータで検出する。

ND280

ND280 はビームの中心軸から 2.5° ずれた角度に位置する Off-axis 検出器である。ND280 の主な目的は、振動前のニュートリノのフラックスやニュートリノと原子核の反応を測定することで、SK での系統誤差を抑制することである。図 1.8 に示すように、ND280 は複数の検出器で構成されている。

P0D(π^0 detector) は ND280 の最も上流に位置する検出器で、水とニュートリノの反応で生じた π^0 粒子の検出に特化した検出器である。後述する ND280 のアップグレードで P0D は新しい検出器に置き換えられる予定である。

TPC(Time Projection Chamber) は P0D の下流に FGD とサンドイッチする形で置かれている飛跡検出器である。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。

FGD(Fine Grained Detector) は 3 つの TPC の間に挟まれる形で設置されているシンチレーターを用いたニュートリノの標的兼飛跡検出器である。FGD に用いられているシンチレーターは図 1.9 に示すような棒状のシンチレーター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。上流側の FGD(FGD1) はシンチレーター層のみ、下流側の FGD(FGD2) はシンチレーター層とその間の水標的層によって構成されており、FGD1 には 15 個の XY モジュールが、FGD2 は 6 つの水標的層を挟み込むように 7 個の XY モジュールが設置されている。

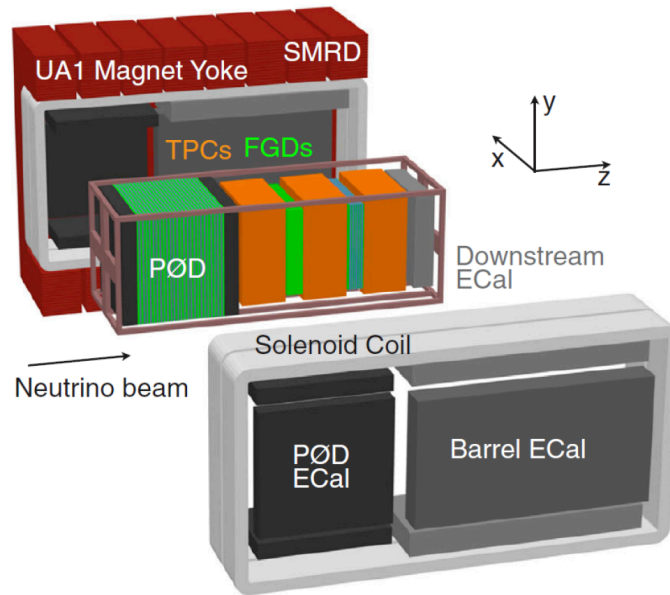


図 1.8 ND280 の概略図 [8]

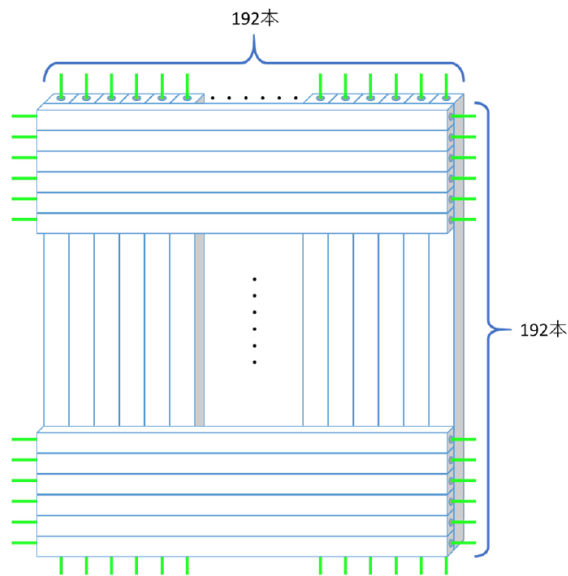


図 1.9 FGD の XY モジュールのイメージ図 [16]

FGD で用いられている棒状のシンチレーターには直径 1.8mm の穴が空けられ、波長変換ファイバーが通されている。波長変換ファイバーの端面には信号読み出しのための半導体光検出器 MPPC が設置されている。この構造により、FGD 内部のシンチレーターや水標的とニュートリノが反応して生じた荷電粒子がシンチレーターを通過するときに発生するシンチレーション光を読み出し、ニュートリノ反応で生じた荷電粒子の飛跡を検出することができる。

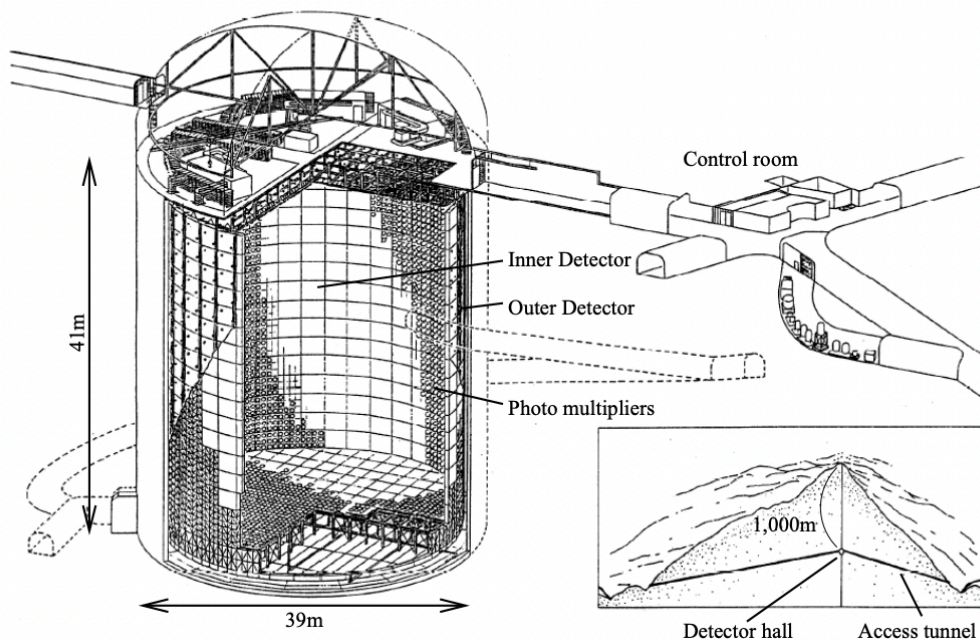


図 1.10 SK のスケッチ図 [9]

1.3.4 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande:SK) は高さ約 40m、直径約 40m の円筒型の水チェレンコフ検出器で、J-PARC から 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山に設置されている。SK は陽子崩壊の探索やニュートリノ検出に用いられており、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。SK の内部は約 5 万トンの純粋で満たされており、ニュートリノの測定に使用される内側 (inner detector: ID) と、宇宙線ミュオンや SK 外部の地中でのニュートリノ反応由来のミュオン等を測定し VETO として用いられる外側 (outer detector: OD) に分けられている。ID には直径約 50cm の光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: PMT) が約 1.1 万本、OD には直径約 20cm の PMT が約 2 千本設置されている。SK では、ニュートリノと水の反応によって生じた荷電粒子が水中の光速を超えるとリング状に発生するチェレンコフ光を PMT で検出し、荷電粒子の識別を行っている。

1.4 T2K-II

1.4.1 T2K 実験の現状と T2K-II

T2K 実験は 2010 年から 2020 年 2 月までに、 ν モードで 1.97×10^{21} POT、 $\bar{\nu}$ モードで 1.61×10^{21} POT (Proton on Target: 炭素標的に衝突させた陽子数) のデータを蓄積した。2020 年 2 月までのデータを用いた δ_{CP} の暫定的な結果を図 1.11 に示す。現状では $\delta_{CP} = 0$ は 2σ 、 $\delta_{CP} = \pi$ は 2σ 弱の有意度での排除となっているが、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れの有無は未確定である。CP 対称性の破れの発見のためにはさらなる統計量の増加と系統誤差の削減が課題である。

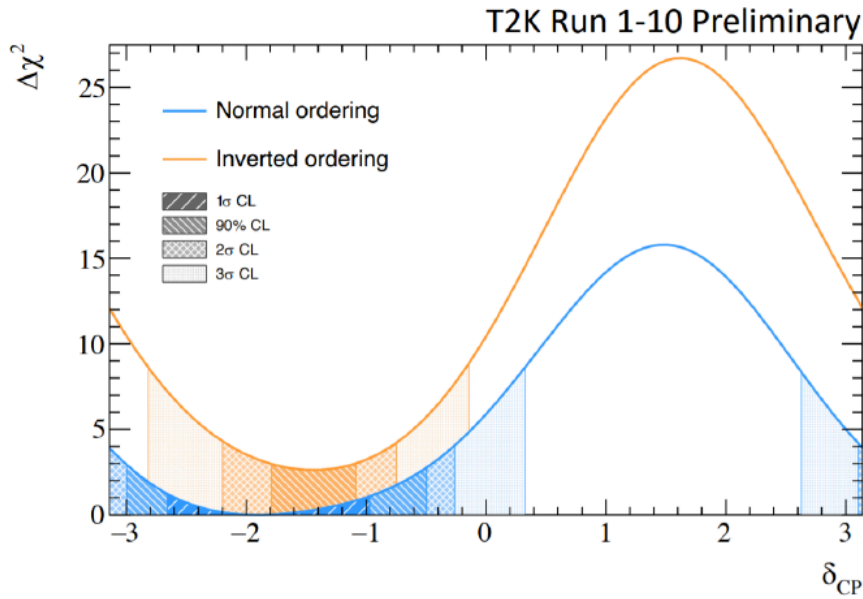


図 1.11 T2K 実験での δ_{CP} の暫定的な測定結果 [10]

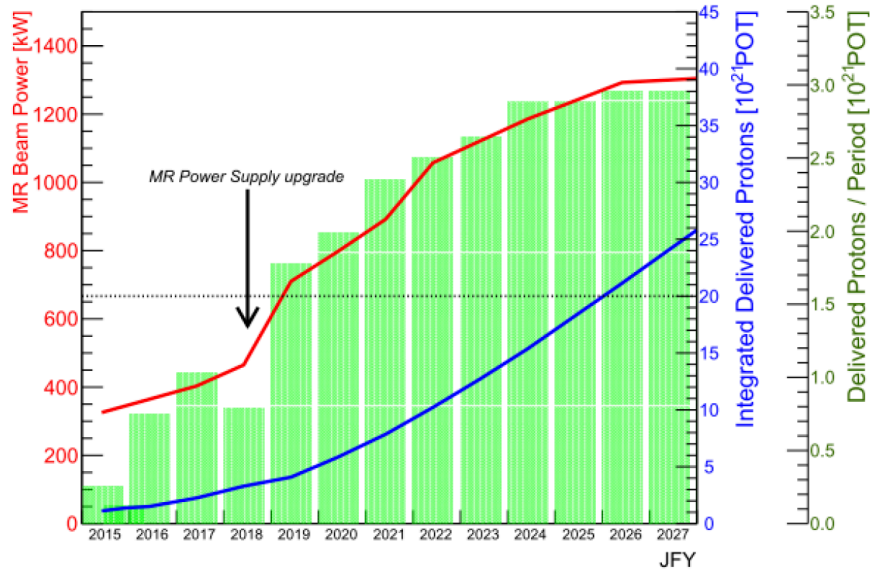


図 1.12 MR のビーム強度の計画と POT の目標値 [11]

T2K 実験は 3σ の信頼度での CP 対称性の破れの発見を目的に T2K-II 計画を進めている。T2K-II では、統計量の増加のために加速器のアップグレードを行い、ニュートリノビームの増強を図る他、系統誤差の削減のために前置検出器 ND280 のアップグレードを行う予定である。図 1.12 は T2K-II における MR のビーム強度向上の計画と POT の目標値である。MR はアップグレードによってビーム強度を現在の 500kW から徐々に上げていき、将来的には 1.3MW で運転する予定である。ND280 のアップグレードに関しては 1.4.2 節で述べる。

1.4.2 前置検出器 ND280 アップグレード

T2K-II では、加速器のアップグレードによるニュートリノビームの増強の他に、系統誤差の削減のために前置検出器 ND280 のアップグレードを行い、新しい検出器を導入する。以下では、現在の ND280 の課題とアップグレードで新たに導入される検出器について述べる。

ND280 の課題

ND280 のアップグレードで新たに導入される検出器について述べる前に、アップデート前の ND280 の課題について述べる。

現在の ND280 の課題として、ニュートリノビーム軸に対して大角度で散乱する荷電粒子のアクセプタンスが低いことと、低運動量の荷電粒子の検出効率が悪いことが挙げられる。

前者の課題を表しているのが図 1.13 である。図 1.13 の左が ND280 で再構成されたミューオンの運動量と角度の分布で、右が SK で再構成された電子の運動量と角度の分布である。横軸はミューオン、電子の運動量であり、縦軸は入射したニュートリノの運動量方向に対するミューオン、電子の角度である。両者を比較すると、SK が 0° から 180° までのアクセプタンスがあるのに対して、ND280 は 50° 以上でのアクセプタンスが低いことがわかる。これは ND280 の構造に由来する。現在の ND280 では、図 1.8 に示すように検出器の下流に設置された 3 つの TPC とそれに挟まれた 2 つの FGD で、ニュートリノ反応で発生した荷電粒子の運動量や電荷を測定する。したがって、FGD と TPC どちらも通るようなニュートリノビーム軸に対して小さい角度で運動する粒子に対しては高いアクセプタンスを持つが、FGD しか通らないような大角度で散乱する粒子に対してはアクセプタンスが落ちてしまう。図 1.13 で 50° 以上のアクセプタンスが落ちるのはこのためである。

後者の課題を表しているのが、図 1.14 である。図 1.14 の横軸は ND280 におけるニュートリノ反応で生じた陽子の運動量であり、縦軸はその検出効率である。赤いプロットで示されているのが現在の ND280 における陽子の検出効率であり、灰色のミュレーションでの陽子の検出効率である。赤いプロットを見ると、ND280 では陽子の検出効率が 500MeV 付近で急激に低くなっていることがわかる。これは、低運動量の陽子は飛跡が短く FGD 内で止まってしまうため、再構成することが難しいためである。

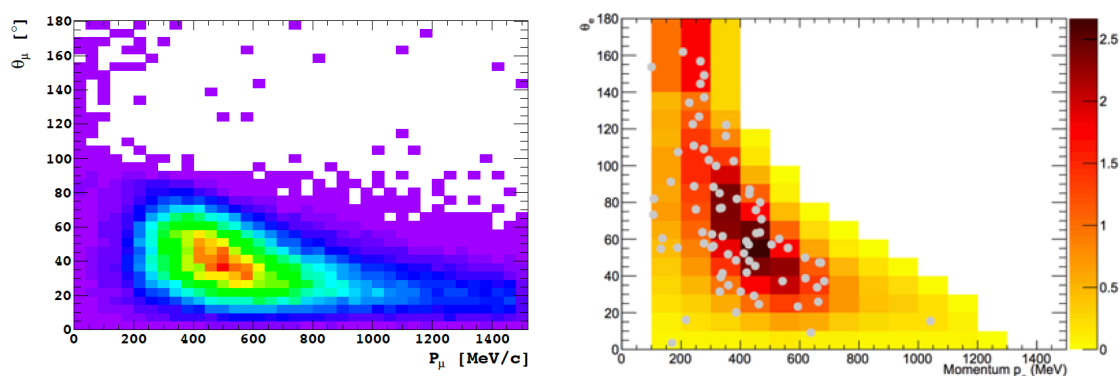


図 1.13 再構成された荷電レプトンの運動量と角度の分布 [12]。左が ND280 で再構成されたミューオン、右が SK で再構成された電子の運動量角度分布である。

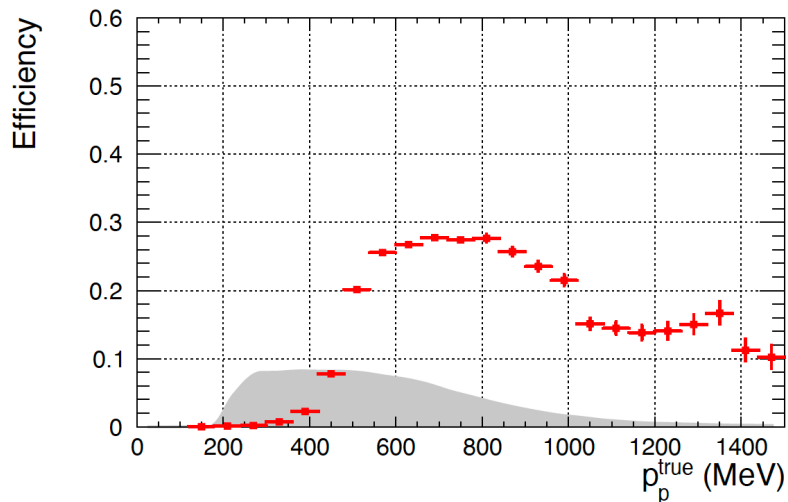


図 1.14 ND280 における陽子の検出効率と運動量分布 [12]。赤いプロットで示されているのが ND280 における陽子の検出効率であり、灰色のヒストグラムシミュレーションでの陽子の検出効率である。

新たに導入される検出器

ND280 のアップグレードでは上流の P0D を取り除き、空いたスペースに新たに SuperFGD(Super Fine Grained Detector)、HA-TPC(High Angle Time Projection Chamber)、TOF(Time Of Flight) の 3 種類の検出器を導入する。図 1.15 はアップグレード後の ND280 の外観である。SuperFGD は約 200 万個のシンチレータキューブから成るニュートリノの標的兼飛跡検出器であり、 4π のアクセプタンスを持つ。SuperFGD は ND280 の上流かつ中央に位置し、ニュートリノと標的の反応点付近での荷電粒子の飛跡検出を担う。SuperFGD の設計に関する詳細は第 2 章で述べる。HA-TPC は SuperFGD の上下に計 2 つ設置される検出器であり、大角度に散乱した荷電粒子の飛跡検出を担う。TOF は図 1.15 には描かれていないが、SuperFGD と HA-TPC の周囲を覆うように 6 面に設置される検出器で、通過した荷電粒子の位置と時間を記録する。

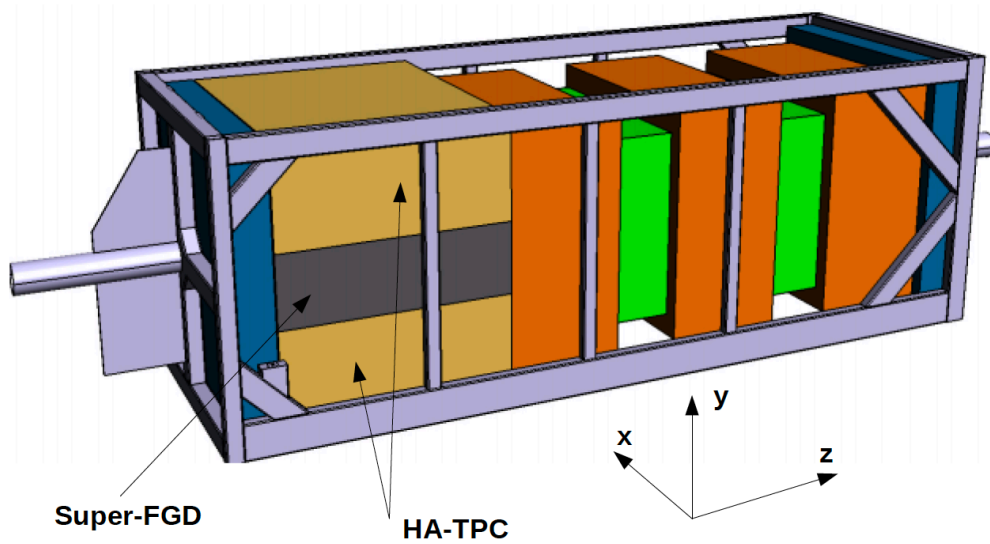


図 1.15 アップグレード後の ND280 の外観 [12]。この図に TOF は描かれていない SuperFGD と HA-TPC の周囲を覆うように 6 面に設置される。

第 2 章

SuperFGD

2.1 SuperFGD の概要

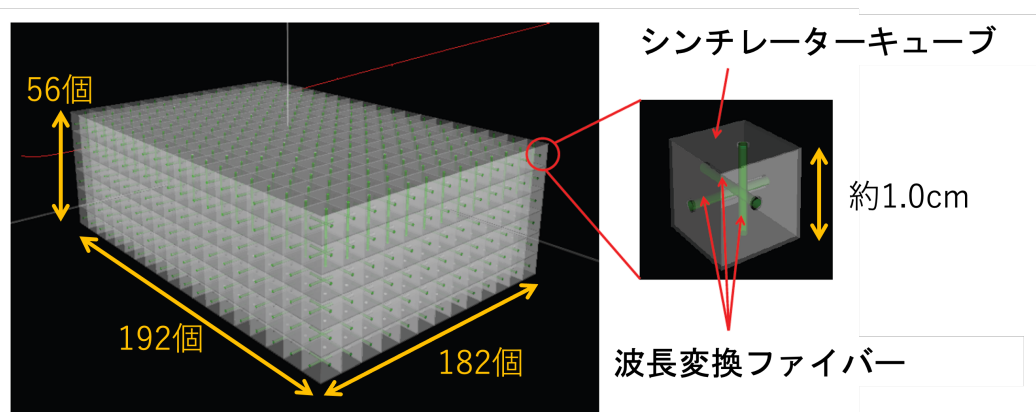


図 2.1 SuperFGD の概略図 [12]

SuperFGD は今回の ND280 のアップグレードで新たに導入される検出器であり、図 2.1 に示すような 1cm 立方のシンチレーターキューブを $192 \times 182 \times 56 = 1,956,864$ 個並べた標的兼飛跡検出器である。それぞれのシンチレーターキューブには直径 1.5mm の穴が空けられており、積層されたキューブを貫くように 3 方向から直径 1mm の波長変換ファイバーが通される。SuperFGD に用いられる波長変換ファイバーの本数は $192 \times 182 + 192 \times 56 + 182 \times 56 = 55,888$ 本である。波長変換ファイバーの片方の端面には信号読み出しのための半導体光検出器 MPPC が取り付けられ、もう片方の端面には LED キャリブレーションシステムが設置される。

2.2 SuperFGD の構成要素

SuperFGD の各構成要素について述べる。

2.2.1 シンチレーターキューブ

SuperFGD では 1cm 立方のプラスチックシンチレーターキューブを 1,956,864 個使用する。このシンチレーターキューブはポリスチレンに 1.5% の paraterphenyl(PTP) と 0.01% の POPOP(1,4-bis(5-phenyloxazol-2-yl)benzene) を添加したものである。キューブの表面は化学エッチングによって形成された厚さ 50-80 μm のポリスチレンの反射層で覆われている。この反射層は白色で、隣接するキューブにシンチレーション光が漏れることを防いだり、キューブ内での反射でシンチレーション光の収集効率を上げる効果がある。また、キューブには波長変換ファイバーを挿入するために直径 1.5mm の穴が直交するように 3 方向から空けられている。

2.2.2 波長変換ファイバー

SuperFGD で用いる波長変換ファイバーは kuraray 製の Y-11(200)M1 であり、55,888 本挿入される。波長変換ファイバーはある波長域の光を吸収し異なる波長の光を再発光する性質を持ち、シンチレーターと組み合わせてシンチレーション光を集める用途によく使われている。SuperFGD で用いる波長変換ファイバーは直径 1mm のもので、図 2.2 に示すように吸収波長のピークは 425nm、発光波長のピークは 475nm 程度である。

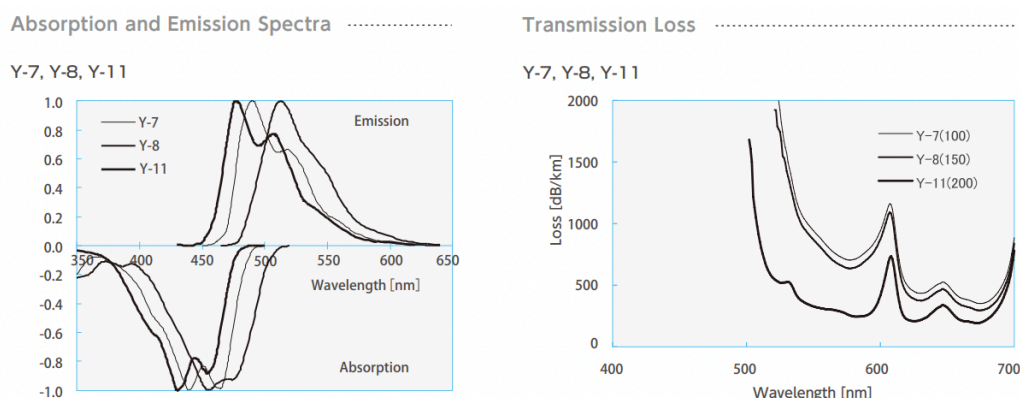


図 2.2 Y-11 波長変換ファイバーの特性。左が吸収・発光波長分布、右がファイバー中での減衰を表す。

2.2.3 MPPC

波長変換ファイバーで吸収されたシンチレーション光はファイバーの端面に取り付けられた半導体光検出器によって検出される。SuperFGD に用いられるのは浜松ホトニクス社製の MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)S13360-1325PE であり、図 2.3 に写真と寸法を示す。感度を持つ領域は 1.3mm \times 1.3mm で直径 1mm の波長変換ファイバーを覆うのに十分であり、現在の ND280 で用いられている MPPC と比較してピクセルピッチが小さくより大きなダイナミックレンジを得られる。また、SuperFGD では図 2.4 に示す 8 \times 8 個の MPPC が基盤に表面実装されたものを使う。この基盤はフラットケーブルでエレクトロニクスと接続され、MPPC への電圧供給と信号の読み出しが行われる。

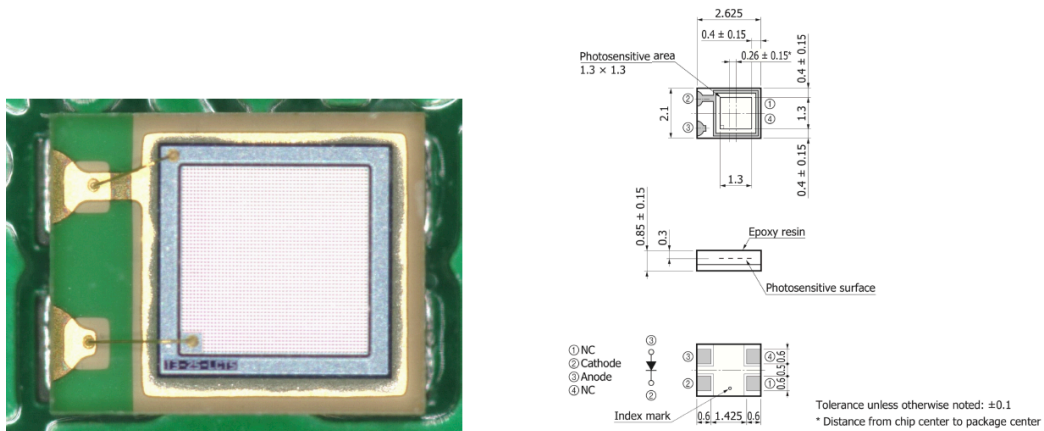


図 2.3 左が浜松ホトニクス社製 MPPC S13360-1325PE の写真、右がその寸法である [12]。



図 2.4 MPPC 基盤の写真 [14]。この基盤には 64 個の MPPC S13360-1325PE が表面実装されている。左が MPPC の受光面がある面、右がその裏面である。

2.2.4 信号読み出しエレクトロニクス

MPPC の信号の読み出しエレクトロニクスは、開発期間の短縮のために WAGASCI 実験の Baby-MIND 検出器で使われているものをベースに開発されている。Baby-MIND 検出器の読み出しエレクトロニクスでは CITIROC(Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip) チップと呼ばれる ASIC が用いられており、SuperFGD の読み出しエレクトロニクスでもこれを用いる。CITIROC チップは 1 つのチップで 32 チャンネルの信号を読み出すことができ、HG(High Gain) と LG(Low Gain) の 2 種類のプリアンプを備えている。CITIROC チップは MPPC からの信号が一定の閾値を超えるタイミングと一定時間内の最大波高値を出力し、それらは後段の ADC や FPGA で処理される。図 2.5 に CITIROC チップの内部の回路のブロックダイアグラムを示す。

図 2.6 に開発された SuperFGD の信号読み出しエレクトロニクスのテスト用試作機の写真を示す。中央の最も大きいボードが FEB(Front End Board) と呼ばれるエレクトロニクスで、8 個の Citiroc チップの他に

FPGA 等が表面実装されている。

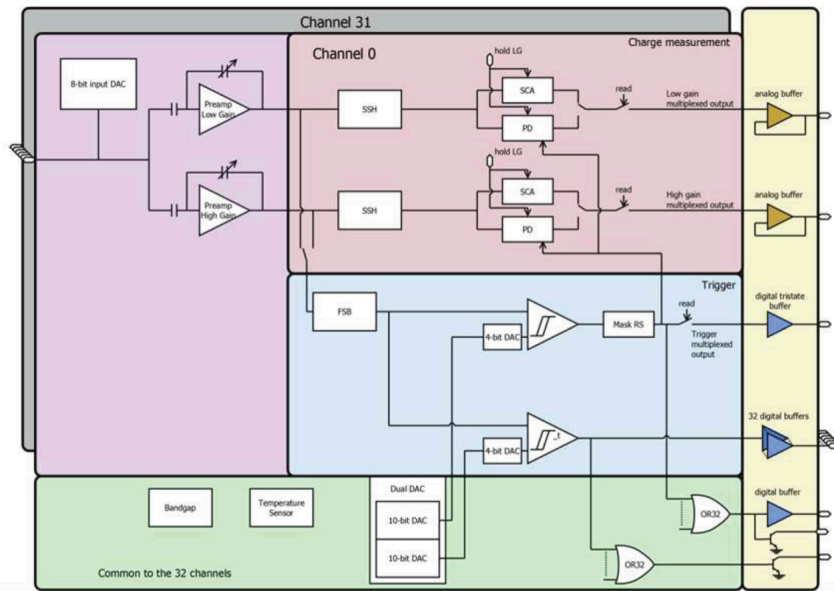


図 2.5 CITIROC チップのブロックダイアグラム [12]。

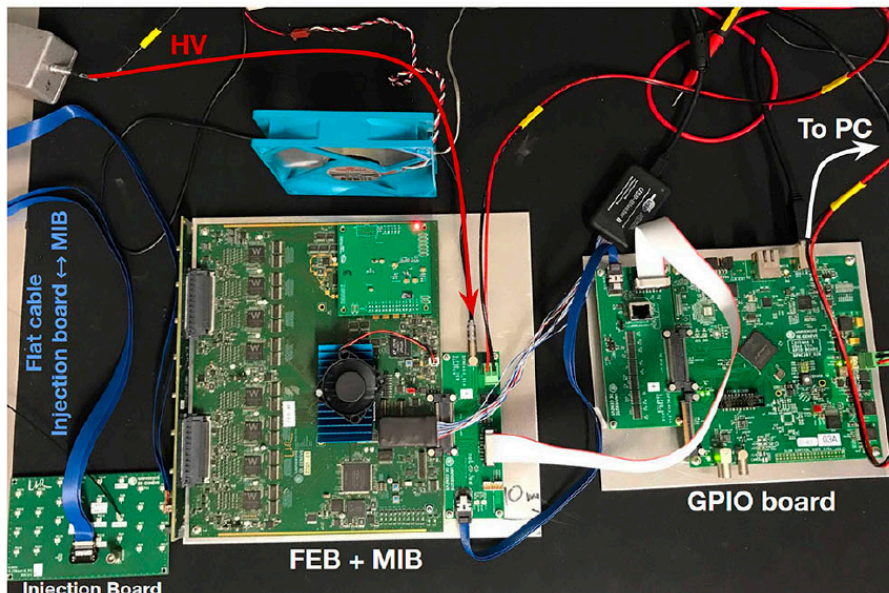


図 2.6 読み出しエレクトロニクス用のテスト用試作機の写真 [14]。中央の最も大きいボードが CITIROC チップを搭載した FEB(Front End Board) である。

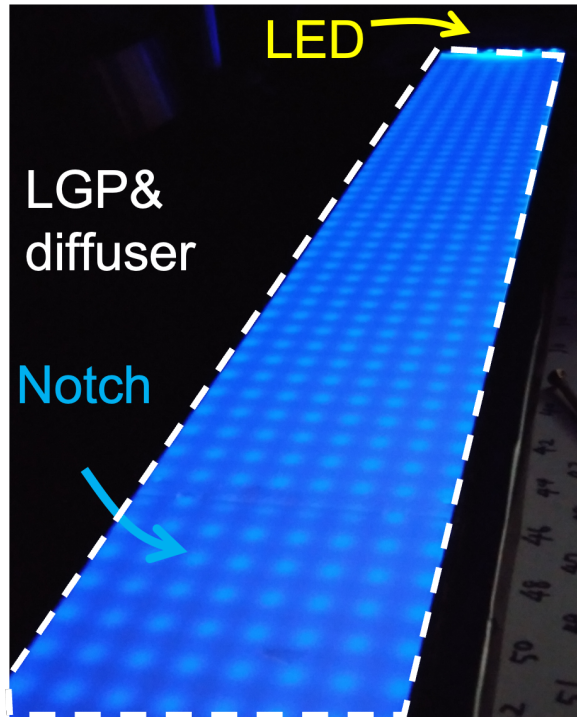


図 2.7 LED キャリブレーションシステムの構成要素の 1 つである LGP モジュールの外観

2.2.5 LED キャリブレーションシステム

LED キャリブレーションシステムは波長変換ファイバーの端面に LED 光を入射し、MPPC や波長変換ファイバーの健全性の確認と MPPC の増倍率の較正を行う装置である。図 2.8 に示すように、LED キャリブレーションシステムは MPPC 取り付け領域の反対側の面に SuperFGD を取り囲むように側面と底面に取り付けられ、LED キャリブレーションシステムの詳細は第 3 章で述べる。

2.3 期待される性能

SuperFGD に期待される性能として主に 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オンの角度である。点線が現行の ND280、実線がアップグレードされた ND280 を示している。図 2.9 から、SuperFGD を導入することで、大角度 ($0.4 < \cos\theta < 0.4$) で散乱するミュオンの検出効率が向上していることが読み取れる。

2 つ目は低運動量の荷電粒子の検出効率の改善である。図 2.10 は $1.9 \times 1.9 \times 0.6\text{m}$ の SuperFGD と同様の構造の検出器 (図中の青線の SuperFGD) と、それと同じ大きさで FGD と同様の構造の検出器 (図中の赤線の FGDZX) における陽子の運動量と検出効率のシミュレーション結果である。両者を比較すると、FGDZX では陽子をほとんど検出できない $400\text{MeV}/c$ の運動量領域でも SuperFGD は一定の検出効率を持っており、また、FGDZX と比較して全体的に検出効率が高いことが読み取れる。

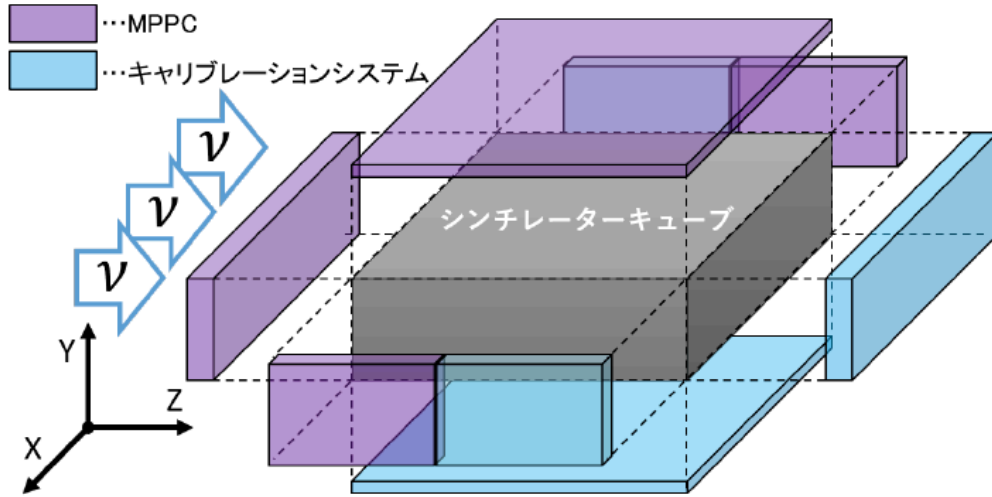


図 2.8 SuperFGD の MPPC 設置領域と LED キャリブレーションシステムの設置領域 [16]

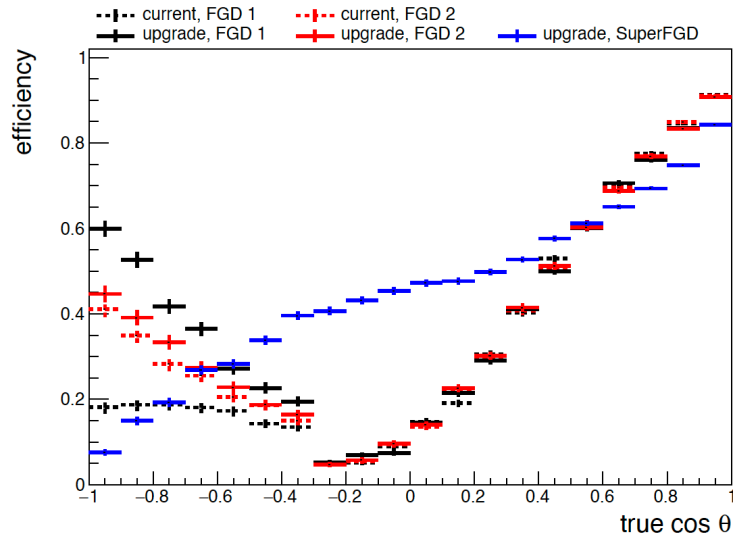


図 2.9 アップグレードの後の ND280 の ν_μ の CCQE イベントの検出効率のシミュレーション結果 [12]。点線が現行の ND280、実線がアップグレードされた ND280 を示している。色はどの検出器内で起きたニュートリノ反応かを表す。FGD は上流のものが FGD1、下流のものが FGD2 と呼ばれる。例えば、「upgrade, FGD1」はアップグレード後の ND280 の FGD1 でニュートリノ反応が起きたイベントだけを集めた検出効率の分布である。

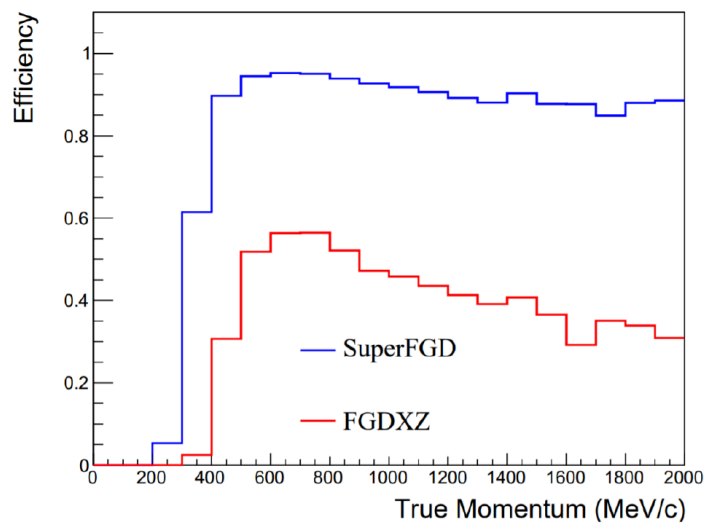


図 2.10 $1.9 \times 1.9 \times 0.6\text{m}$ の SuperFGD と同様の構造の検出器 (図中の青線の SuperFGD) と、それと同じ大きさで FGD と同様の構造の検出器 (図中の赤線の FGDXZ) における陽子の運動量と検出効率のシミュレーション結果である [13]

第3章

LED キャリブレーションシステム

3.1 LED キャリブレーションシステムの概要

LED キャリブレーションシステムは波長変換ファイバーを通して約5万6千チャンネルに及ぶ光検出器MPPCにLED光を分配し、SuperFGDの建設時および運用時における検出器の健全性の確認と、長期運用におけるMPPCの増倍率の較正を行うための装置である。

SuperFGDは、約200万個のシンチレーターキューブを積み重ね、それぞれのシンチレーターキューブに対して波長変換ファイバーを3方向に通すというこれまでに前例がない構造の検出器であり、建設時および建設後の地震などによって波長変換ファイバーの断裂やMPPCと波長変換ファイバーの間の接触不良などといったトラブルが生じることが懸念される。SuperFGDの建設時や試運転時および運用時に、LEDの光を全ての波長変換ファイバーとMPPCに分配し、その信号を読み出すことで検出器の健全性を迅速に確認することがLEDキャリブレーションシステムを導入する目的である。

また、SuperFGDにおいて、光子を検出したMPPCの位置やその検出光子数から、ニュートリノとシンチレーターキューブ内の原子核の反応で生じた荷電粒子の飛跡やエネルギー損失を推定し、荷電粒子の種類や運動量を測定する。このため、MPPCの増倍率の較正は各MPPCでの検出光子数の正確な測定のために欠かせない。検出器の長期運用において増倍率較正に適切な光子数を全てのMPPCに分配し、その増倍率を較正することがLEDキャリブレーションシステムを導入するもう一つの目的である。

都立大は高エネルギー加速器研究機構とロシアのモスクワ州に所在するJINR(Joint Institute for Nuclear Research: ドブナ合同原子核研究所)と共同で導光板(Light Guide Plate)を用いたLEDキャリブレーションシステムを開発している。本章ではLEDキャリブレーションシステムの概要とその諸特性について述べる。

3.2 LED キャリブレーションシステムの構成要素

LEDキャリブレーションシステムはLGPモジュールとLEDドライバーの2つの装置で構成される。3.2.1節でLGPモジュールの詳細について、3.2.2節でLEDドライバーの詳細についてそれぞれ述べる。

3.2.1 LGPモジュール

LGPモジュールは検出器の健全性の確認やMPPCの増倍率のモニターに適切な量のLED光を波長変換ファイバーを通してMPPCに分配する装置である。LGPモジュールは導光板、拡散板、LED、コリメータとそれらを収めるケースで構成され、それらを組み立てたものをLGPモジュールと呼ぶ。LGPモジュール

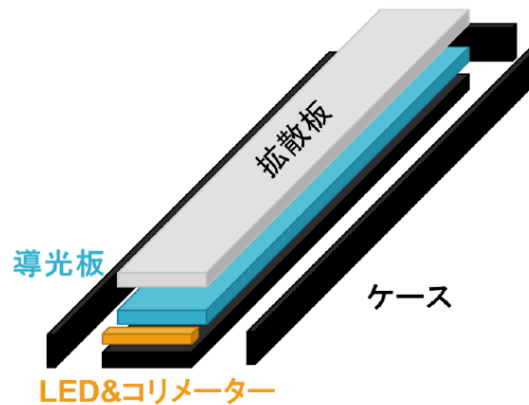


図 3.1 LGP モジュールの概略図 [16]。LGP モジュールは導光板、拡散板、LED、コリメーターとそれらを取り囲むケースで構成されている。

の構成の模式図を図 3.1 に示す。LGP モジュールは導光板と拡散板の 2 層構造になっており、モジュールの長手方向の片方の端面には LED と光量調節用のコリメータが設置されている。ケースは拡散板の上面以外の 5 面を覆う構造をしている。

LGP モジュールは長さの異なる Wall LGP モジュールと Bottom LGP モジュールの 2 種類がある。Wall LGP モジュールは SuperFGD を取り囲むように壁面に取り付けられ、Bottom LGP モジュールは SuperFGD の底面に取り付けられる。Wall LGP モジュールは 8×56 個の Notch(後述) が、Bottom LGP モジュールは 8×96 個の Notch が導光板の表面に付けられており、それぞれ 448 個と 768 個の MPPC に LED 光を分配することができる。

Wall LGP モジュールは 47 モジュール、Bottom LGP モジュールは 46 モジュール使用される。それぞれの LGP モジュールの設置位置を図 3.2 に示す。

以下に LGP モジュールの各構成要素について詳細を述べる。

導光板

LGP モジュールにおける導光板とは、厚さ 3mm 厚の透明アクリル板の表面に直径 3mm の円形の傷 (Notch) がつけられたものである。Notch は SuperFGD の波長変換ファイバーの端面の位置に来るようにレーザー加工機を用いて約 10mm 間隔で付けられている。図 3.3 に示すように、導光板の側面から入射した LED 光は光は導光板内を反射しながら進み、Notch に当たると散乱されて、反対側の面から光が放出される。

導光板に用いられる透明アクリル板は押し出しという板厚精度が優れた製法を用いて作られている。これはレーザー加工機でアクリル板表面に Notch を加工する際にアクリル板の板厚が変わると、レーザーの焦点がずれることで Notch の加工にばらつきが生まれることが懸念されるからである。Notch の加工のばらつきによって生じる散乱される光量のばらつきを抑えるために、導光板には押し出しによって作られたアクリル板を使用している。

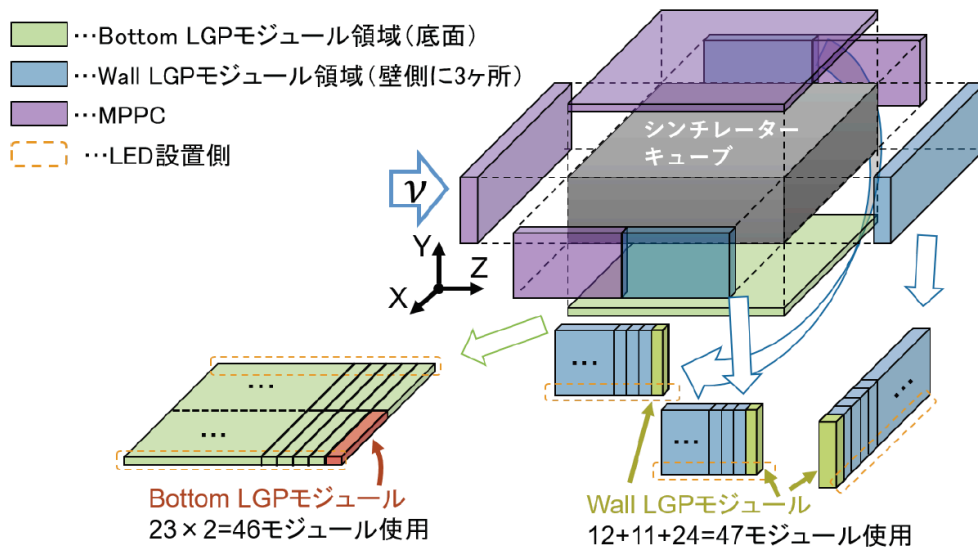


図 3.2 LGP モジュールの設置位置 [16]

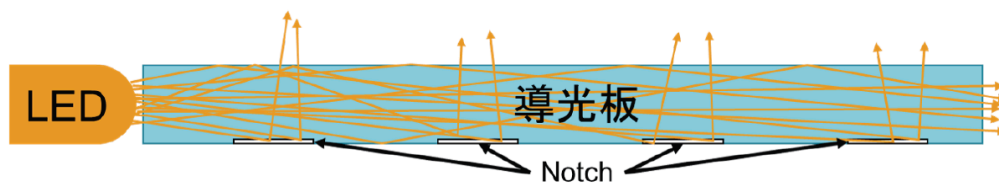


図 3.3 導光板の概略図 [16]

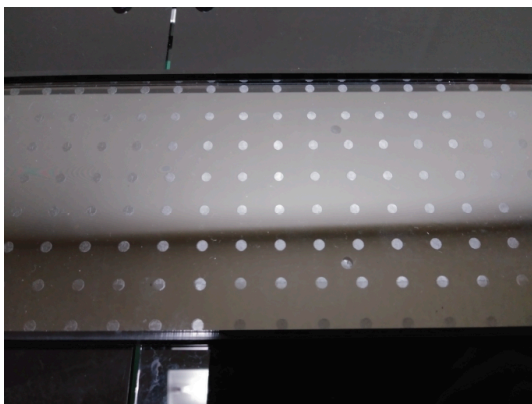


図 3.4 導光板の写真 (LED 未点灯時)[16]

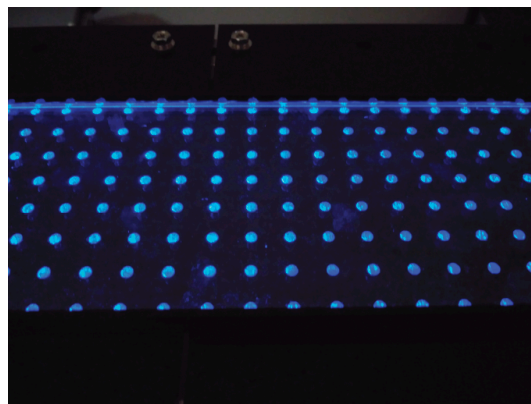


図 3.5 導光板の写真 (LED 点灯時)[16]

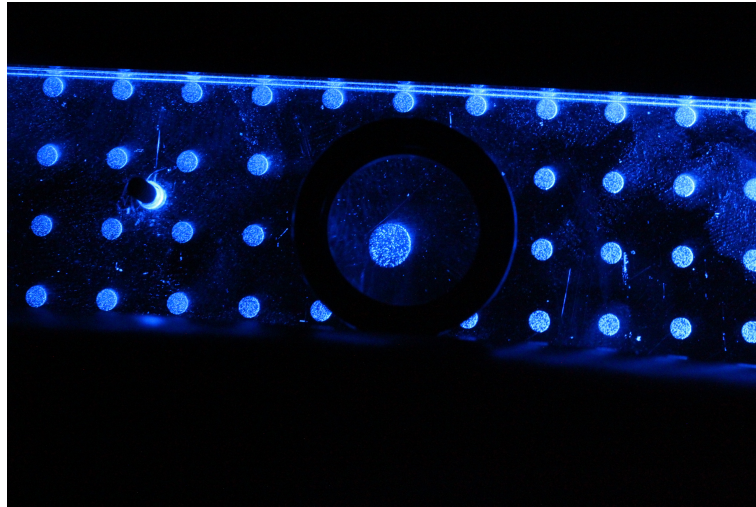


図 3.6 Notch の拡大写真 (LED 点灯時)。Notch の表面の状態が確認できるようにレンズを用いて拡大している。



図 3.7 拡散板の写真

拡散板

拡散板は図 3.7 に示すような乳白色の亚克力板であり、厚さは導光板と同じ 3mm である。拡散板は導光板の上部に設置され、導光板の表面の Notch で散乱された光は拡散板に入り、そこでさらに散乱される。拡散板を設置する目的は Notch で散乱された光を拡散することで、波長変換ファイバーが導光板に対して水平な方向にずれた場合の光量の変化を少なくすることである。

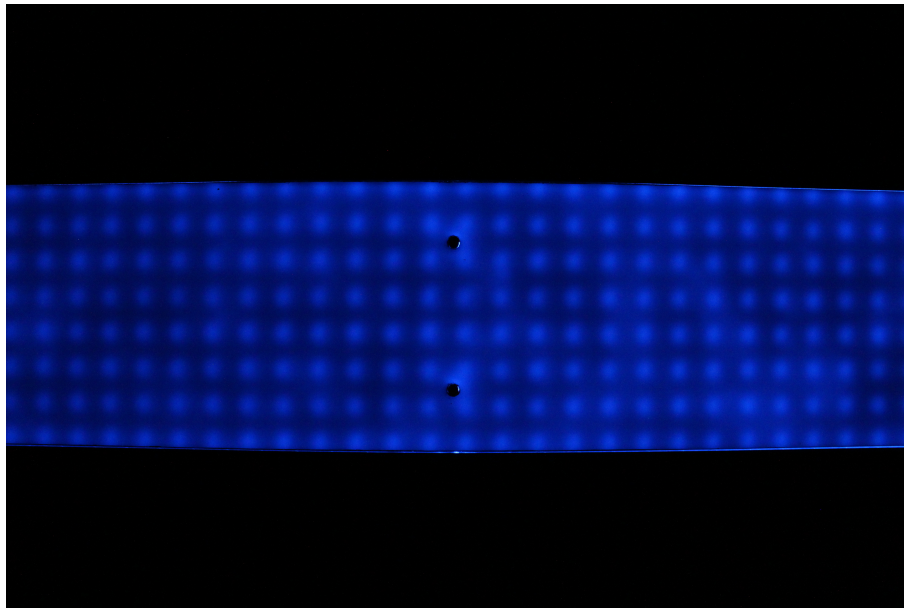


図 3.8 拡散板を装着した状態の LGP モジュールの写真 (LED 点灯時)

LED

LGP モジュールに使用されている光源は、日亜化学工業株式会社製の砲弾型 LED(NSPB300B)7 個を 1 枚の基板にハンダ付けしたものをを用いる。図 3.9 に LED 基板の写真を示す。また、LED 基板の回路図を 3.10 に示す。

それぞれの LED は図 3.10 に示すように 300Ω の保護抵抗と直列に接続されており、それらはさらにコネクタのグラウンドに接続されている。 300Ω の保護抵抗を LED に対して直列に挿入する目的は 2 つある。

1 つ目は LED に流れる電流を抑制し、LED 自体を保護することである。NSPB300B の定格は直流で 35mA 、パルスで 110mA であり [17]、それ以上の電流が LED に流れた場合 LED が損傷し、最悪の場合 LED 自体が壊れることが想定される。直列に接続した保護抵抗は、LED に矩形波を供給する LED ドライバーの想定外のトラブルにより大電流が流れたとしても、LED に流れる電流を抑制し LED を保護することを意図している。

2 つ目は LED のオン抵抗の個体差による LED から出る光量のばらつきを抑えることである。LED にかかる電圧を一定と仮定した場合、LED に流れる電流は LED 自体のオン抵抗と保護抵抗の抵抗値の大きさによって決まる。 300Ω の保護抵抗を挿入した場合、LED のオン抵抗より保護抵抗のほうが抵抗値が大きいため、LED に流れる電流は保護抵抗がより支配的である。そのためオン抵抗の個体差によって生じる個々の LED に流れる電流のばらつきを抑えることができ、光量のばらつきを抑えることができる。

本研究では、LED の種類および保護抵抗の見直しを行い、保護抵抗を 300Ω から 10Ω へと設計を変更した。その詳細は 4.2 節で述べる。

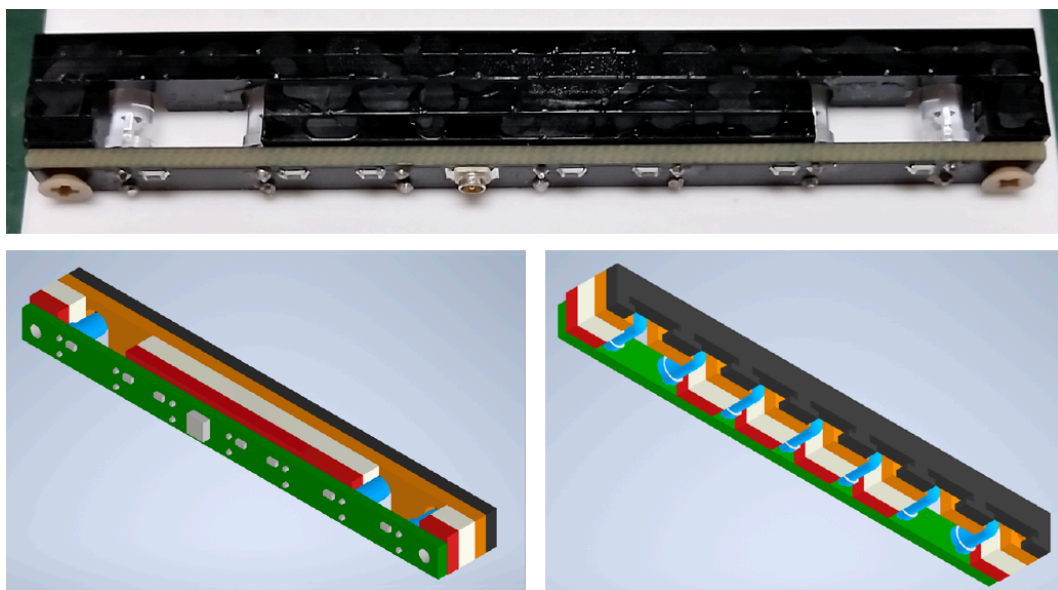


図 3.11 コリメータの写真(上)と CAD モデル(下)[16]。コリメータに用いるプレートの板厚は導光板に接する側 (CAD 図上の黒色のプレート) から順番に 2mm、2mm、3mm、2mm になっている。LED 基板に接する 2mm 厚のプレートには雌ネジが切られており、コリメータは M2 の樹脂製ネジを用いて LED 基板基盤と一緒にケースに固定される。



図 3.9 LED 取り付け基板の写真 [16]

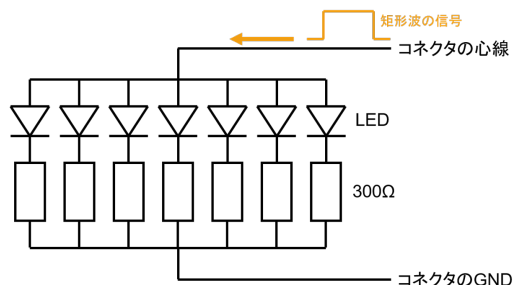


図 3.10 LED 取り付け基板の回路図 [16]

コリメータ

LGP モジュールにおけるコリメータは、導光板に入る LED の光量を調節し、Notch で散乱される光量の一樣性を高くするために導入される。コリメータの写真と CAD モデルを図 3.11 に示す。コリメータは加工した 4 枚の亚克力板を重ね合わせて溶着し作成し、使用する各プレートの板厚は導光板に接する側 (CAD 図上の黒色のプレート) から順番に 2mm、2mm、3mm、2mm となっている。また、LED 基板に接する 2mm 厚のプレートには雌ネジが切られており、M2 の樹脂製ネジを用いてコリメータと LED 基板をケースに固定する。

コリメータの形状は図 3.12 に示すような逆 T 字型の形状をしており、これは LED から距離の近い Notch での光量を抑えることで光量一樣性を高くするように最適化されている。

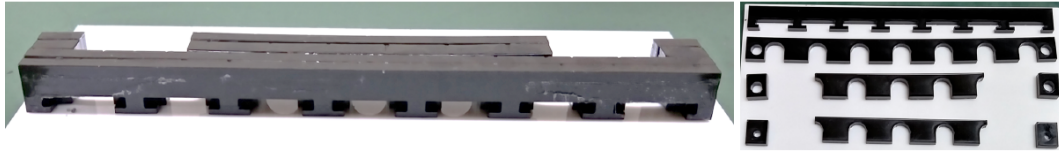


図 3.12 コリメータの写真。左が溶着後のコリメータを導光板側から見たときの写真で、右が溶着前の写真である。[16]

本研究ではコリメータの形状の改良を行なった。その詳細は 4.3 節で述べる。

3.2.2 LED ドライバー

LED ドライバーは LGP モジュールに備え付けられている LED を光らせるための矩形波の電気パルスを生じさせる装置であり、JINR において開発されている。LED ドライバーの外観を図 3.13 に示す。LED ドライバーは NIM モジュールになっており、NIM モジュール専用のクレートに挿入することで電源が供給される。LED ドライバーは FPGA とアナログ回路から構成され、FPGA で生成したデジタル信号を後段のアナログ回路で増幅することで最大で 6.5V の電圧のパルスを出力することができる。また、専用のソフトウェアを用いて出力する矩形波の電圧と信号幅をチャンネルごとに調節することができ、12 チャンネルの外部出力が備わっているため、1 台の LED ドライバーで 12 個の LGP モジュールを同時に運転することができる。93 個の LGP モジュール (Wall LGP モジュール 47 個、Bottom LGP モジュール 46 個) に対応するために、8 台の LED ドライバーがインストールされる予定である。

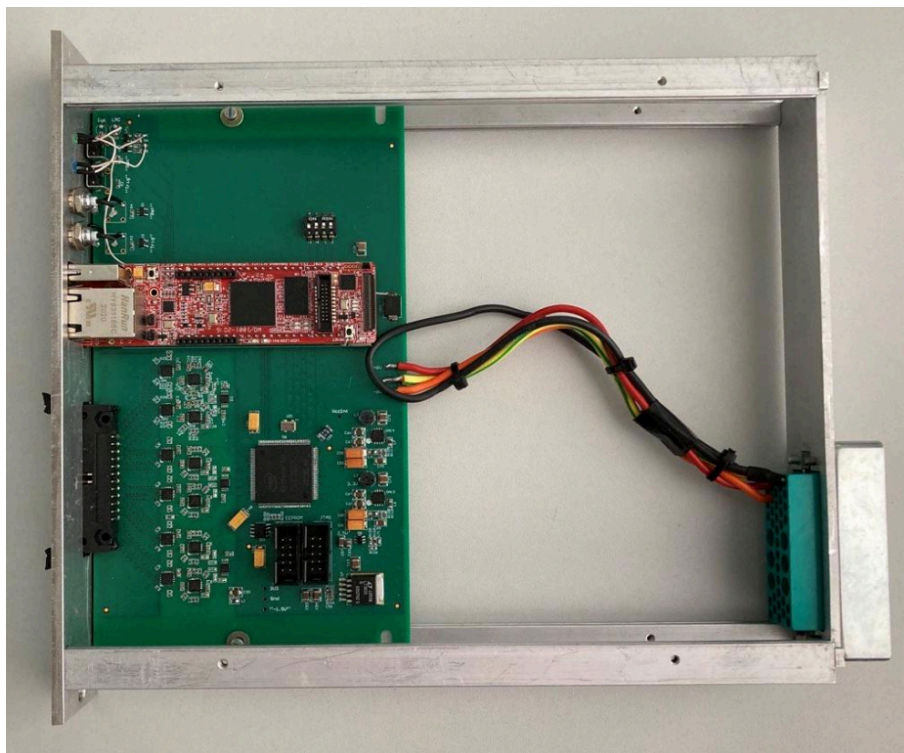


図 3.13 LED ドライバーの外観

3.3 LGP モジュールと LED ドライバーの接続方法

LED ドライバーと LGP モジュールの接続は同軸ケーブルを通して行う。接続に用いられる同軸ケーブルは FWS5030 というケーブルであり、外径は 1.13mm、特性インピーダンスは 50 Ω である。LGP モジュールが SuperFGD の側面と底面に取り付けられるのに対して、LED ドライバーは SuperFGD がインストールされるフロアの一つ下の SS フロアに設置された NIM モジュール専用のクレートにインストールされる。フロアを跨いで両者をケーブルで接続するために、長さ約 8m のケーブルと長さ約 23m のケーブルを用いる。長さの異なる 2 種類のケーブルを用いるのは SuperFGD インストールの際のケーブルの取り回しと作業性を改善するためであり、両者は中間ボードを用いて接続される。LED ドライバーで生成された矩形波は 23m ケーブル・中間ボード・8m ケーブルを通過したあと、最終的に LGP モジュールに到達し LED を発光させる。LED ドライバーの設置場所と接続の概念図を図 3.14 に示す。また接続に用いるケーブルと中間ボードを図 3.15 に示す。

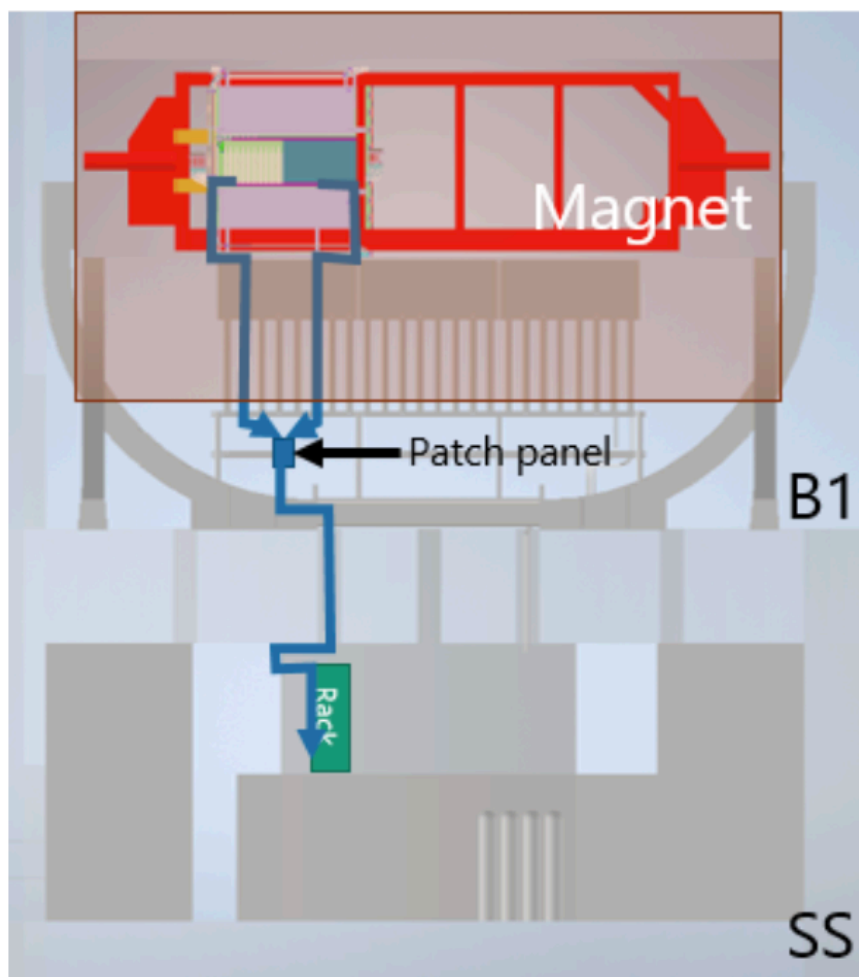


図 3.14 LED ドライバー設置場所の概念図

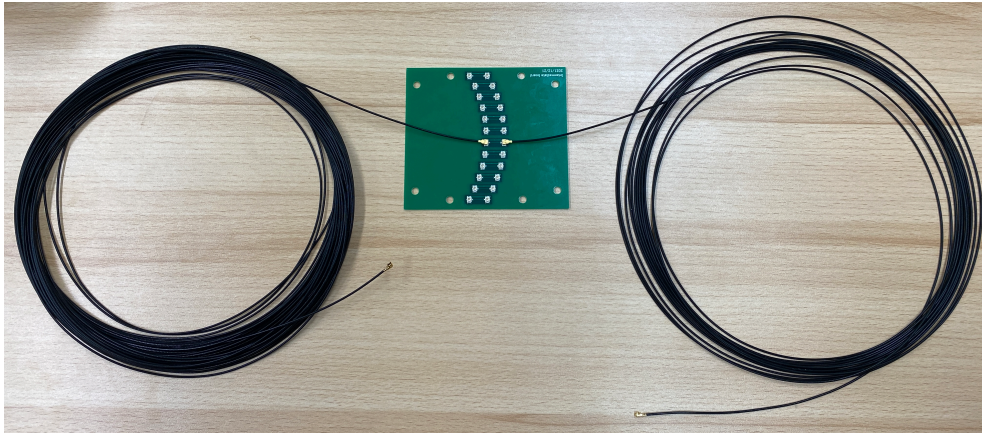


図 3.15 同軸ケーブルと中間ボード

3.4 LED キャリブレーションシステムを用いた MPPC への光子の分配方法

LED キャリブレーションシステムを用いて LED 光が波長変換ファイバーを通して MPPC に分配される流れは以下の通りである。

1. LED ドライバーから LED 発光のための矩形波を発生させる。
2. LED を発光させ、導光板の端面から光を入射する。
3. LED 光は導光板の表面で反射を繰り返しながら導光板内を進み、Notch に当たって波長変換ファイバーがある方向へ散乱される。
4. 導光板を出た光は拡散板に入射し、拡散される。
5. 一部の光は拡散板を飛び出し、波長変換ファイバーに吸収される。
6. 波長変換ファイバーで再発光した光の一部は、ファイバー内で反射しながら伝播し MPPC に入射する。

上記の導光板を用いて波長変換ファイバーを通して MPPC に LED 光を分配する方法を図示したものを図 3.16 に示す。

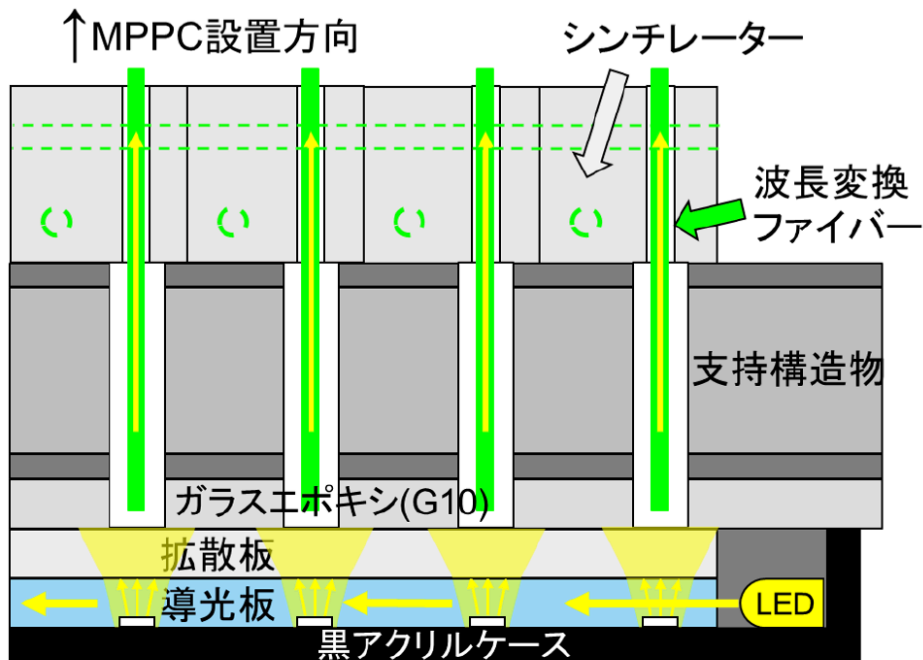


図 3.16 LGP モジュールを用いた MPPC への LED 光への分配方法の概略図 [16]

3.5 想定される LED キャリブレーションシステムの運用方法

LED キャリブレーションシステムは 2 種類の運用方法が想定されている。

1 つ目はニュートリノビームのビームスピル間に LED を発光させ、物理データ取得時に、常時 MPPC の増倍率較正用のデータを取得することである。MPPC で光を検出した際に出力される信号は読み出しエレクトロニクスで処理され、ADC 値と呼ばれる整数値として保存される。そのため、記録された ADC 値から MPPC に入射した光量 (光子数) を推定するためには、ADC 値を検出光子数へ変換する必要がある。図 3.17 のヒストグラムは MPPC での検出光子の分布の例であり、横軸は ADC 値から検出光子数に変換されている。図 3.17 のように各検出光子数に対応するピークを ADC 分布ではっきりと確認することができれば、それぞれの検出光子数のピークに対応する ADC 値を検出光子数に変換することができる。しかし、図 3.18 のヒストグラムのように、検出光子数が極端に少なくペDESTAL 意外のピークがほとんど検出できない場合は、ADC 値を検出光子数に変換することが困難になる。したがって、LED キャリブレーションシステムには MPPC の増倍率の較正に適した光子数を全ての MPPC に分配できることが要求される。

もう 1 つは、SuperFGD 建設時の試運転や検出器インストール後の長期運用におけるニュートリノビーム非照射時に、任意のタイミングで LED を光らせて検出器の動作確認を行うことである。特に、SuperFGD の建設時や運転初期においては、MPPC や波長変換ファイバーを含めた検出器全体の健全性を確認することが重要であり、任意のタイミングで MPPC に光を入射することができる LED キャリブレーションシステムは必要不可欠なものである。

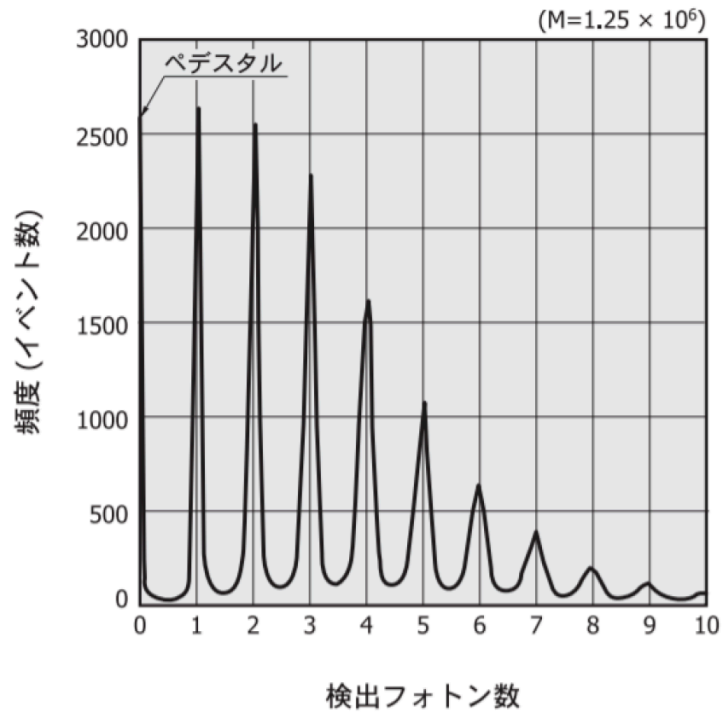


図 3.17 MPPC での検出光子の分布の例

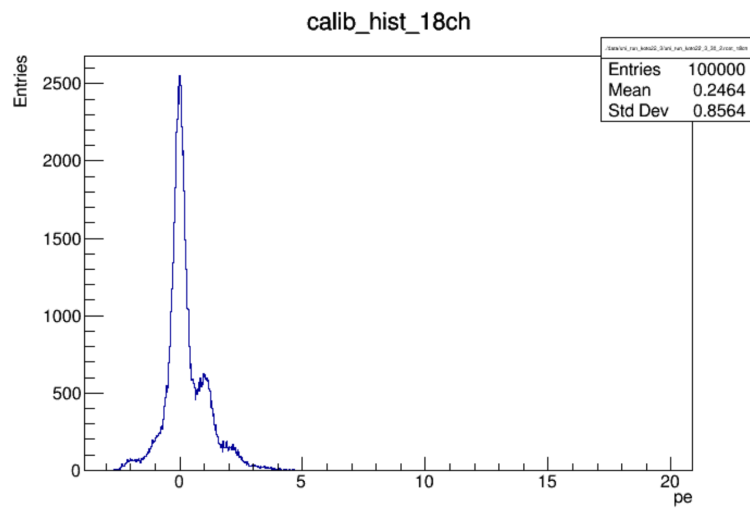


図 3.18 検出光子数が極端に少ない場合の MPPC での検出光子の分布の例

3.6 LGP モジュールの問題点

LED キャリブレーションシステムは SuperFGD の健全性の確認や MPPC の増倍率をモニターすることを目的に導入される。そのため LED はキャリブレーションシステムには、MPPC の増倍率の較正に適切な光子数を全ての MPPC に分配することが要求される。

LGP モジュールを設計時は MPPC の信号読み出しエレクトロニクスを外部トリガー、すなわち LGP モジュールの LED の発光に同期したタイミングで MPPC の信号を読み出すことを想定していた。信号読み出しエレクトロニクスを外部トリガーで運用する場合、ペDESTAL (エレクトロニクスの電氣的なノイズ) と 1 光子のピークさえ読み出すことができれば MPPC の増倍率の較正が可能であり、現状の LED キャリブレーションシステムのデザインでも MPPC の増倍率の較正に十分な光子数を分配できると考えられていた。

ところが、MPPC 信号読み出しエレクトロニクスの開発が進みその運用方法が明らかになったところ、LED キャリブレーションシステムを用いた MPPC の増倍率較正用データ取得時において、読み出しエレクトロニクスを外部トリガーではなくセルフトリガーで運用する方針が決定された。すなわち、読み出しエレクトロニクス側で閾値を設定し、その閾値を超えた信号だけを読み出すのである。実機の SuperFGD の環境において電氣的なノイズがどの程度発生するかは定量的な見積もりがなく、読み出しの閾値がどれくらいの値に設定されるかは決定されてはいない。しかし、電氣的なノイズや MPPC のダークカウントを読み出さないようにするためには閾値は少なくとも 1.5 光子以上に設定する必要がある。閾値を 1.5 光子と仮定した場合、LED キャリブレーションシステムを用いて MPPC の増倍率の較正のためには、少なくとも 3 光子ピークと 4 光子ピークを確認できるような光子数を分配する必要がある。また、閾値を 2.5 光子と仮定した場合、MPPC の増倍率の較正のためには少なくとも 4 光子ピークと 5 光子ピークを確認できるような光子数を分配する必要がある。

したがって、信号読み出しエレクトロニクスの運用方法の変更により現状の LGP モジュールでは MPPC の増倍率の較正に必要な光量を MPPC に分配することができない懸念が浮上した。

3.7 研究の目的

本研究の目的は 2 つある。

1 つ目はセルフトリガーでの信号読み出しでの MPPC 増倍率の較正に対応するために、LGP モジュールの設計を改良し MPPC に分配できる光量を可能な限り向上させることである。電氣的なノイズや MPPC のダークカウントを読み出さないようにするために信号読み出しの閾値は少なくとも 1.5 光子以上に設定されるため、LGP モジュールには閾値を超える光子数を MPPC に分配することが求められる。3.6 節で述べた懸念が浮上した時点で導光板と拡散板とケースの量産が終了していたため、それらの設計に変更を加えることはできない。本研究では、LGP モジュールが MPPC に分配できる光量を可能な限り向上させるために、LED 基板にハンダ付けされている LED の種類と保護抵抗の見直しとコリメーターの形状の変更を行った。LGP モジュールの設計変更に関する詳細は第 4 章で述べる。

2 つ目は、量産し組み立てた後の LGP モジュールの健全性や品質を確認するためのシステムの開発である。LGP モジュールに求められる健全性とは、MPPC の増倍率の較正をするために適切な光子数を全ての MPPC に分配できることである。LGP モジュールは予備も含めて 110 モジュールを量産し、そのうち 93 モジュールを SuperFGD にインストールされる。量産された LGP モジュールの性能は、導光板の表面に加工

された Notch や LED の光量の個体差によって、モジュールごとに差異が生じることが懸念される。もし、平均光量が極端に小さかったり、極端に光量が低い Notch があるために MPPC の増倍率較正に適さない LGP モジュールを検出器にインストールしてしまった場合、実際の LED キャリブレーションシステムの運用において、MPPC の増倍率の較正ができないという問題が生じることが懸念される。したがって、組み立て後の LGP モジュールの品質を定量的に確認するシステムを作成し、問題を抱えている LGP モジュールをインストールする前に未然に発見する必要がある。本研究では、組み立て後の 110 個の LGP モジュールの健全性や光量を迅速かつ定量的に評価するためのカメラを用いた検査システムを開発した。また開発した検査システムを用いて、組み立て後の LGP モジュールの大量検査を行った。検査システムの開発に関しては第 5 章、LGP モジュールの組み立てと大量検査に関しては第 6 章で述べる。

第 4 章

LGP モジュールの改良

4.1 LGP モジュール改良の方針

3.7 節で述べたように、MPPC 信号読み出しエレクトロニクスの運用方法が想定していた外部トリガーでの信号読み出しをする方法から、セルフトリガーで読み出す方法に変わったことにより、MPPC に分配可能な光量を向上させる必要がある。LGP モジュールは導光板、拡散板、LED 取り付け基板、コリメータとそれらを取り囲むケースで構成されているが、この問題が浮上した時点で導光板、拡散板、ケースの量産がすでに終了していたため、それらの設計に変更を加えることはできない。したがって、LED 基板の改良と光量調節のためのコリメータの形状の変更を試みた。

4.2 LED 基板の改良

図 3.9 と図 3.10 に示したように、LED 基板は日亜化学工業株式会社製の砲弾型 LED(NSPB300B) が 7 個並列にハンダ付けされており、それぞれの LED には 300 Ω の保護抵抗が直列に接続されている。MPPC に分配される光量を増やすために保護抵抗の変更と光源の置き換えを検討をし、測定を通してその性能を評価した。

4.2.1 光量測定のセットアップ

まず、LGP モジュールの Notch で散乱された光量の測定のためのセットアップについて述べる。測定に用いた LGP モジュールは第 3 章で述べたデザインのプロトタイプの LGP モジュールである。実際の SuperFGD に近い環境で光量を測定するために、波長変換ファイバーと MPPC を用いた。測定に用いた MPPC は浜松ホトニクス社製 MPPC,S13360-1325CE を用いた。これは SuperFGD で用いる表面実装型 MPPC(S13360-1325PE) のセラミックタイプの製品である。測定に用いた波長変換ファイバーも実際の SuperFGD で用いられるクラレ製の Y-11 を長さ約 20cm にカットしたものを使用した。MPPC への電源供給と信号読み出しには、CAEN 社製の DT5702DT5702(以後 CITIROC モジュールと呼ぶ)を使用した。DT5702 は SuperFGD の MPPC 信号読み出しエレクトロニクスでも使用する CITIROC 1A と呼ばれる ASIC を搭載した SiPM 用の読み出しシステムであり、32 チャンネルの SiPM の電源供給と信号読み出しが可能である。CITIROC モジュールはピークホールド型の信号読み出し装置であり、CITIROC チップで一定時間内の信号の最大波高値を読み取り、後段の内臓された ADC でデジタル化し、ADC 値として記録する。ピークホールドのタイミングは MPPC からの信号が設定した閾値を超えた場合(セルフトリガー)、もしくは



図 4.1 MPPC と波長変換ファイバーの写真 (左) と DT5702 の写真 (右)。左の中央が MPPC(S13360-1325CE)、その両側は波長変換ファイバーと光学接続のためのコネクタである。

は外部からの信号 (外部トリガー) によって決定される。図 4.1 は測定に使用した MPPC と波長変換ファイバー、CITIROC モジュールの写真である。

暗箱の中に LGP モジュール、MPPC、波長変換ファイバー、CITIROC モジュールを図 4.2 に示すように設置した。波長変換ファイバーは端面が拡散板の表面に接するように高さを調節し、また拡散板の上に設置した治具を用いて Notch の中央にセットする。MPPC は CITIROC モジュールと接続されており、電源の供給と信号の読み出しが行われる。ファンクションジェネレーターは LGP モジュールの LED 基板と CITIROC モジュールに接続されており、LED 発光用の信号とそれに同期した CITIROC のトリガー用信号を生成している。

以上のセットアップで測定した ADC 分布から光量を算出する方法は以下の通りである。まず、ADC 値のヒストグラムのペDESTAL と 1 光子ピークをガウスフィットし、ペDESTAL と 1 光子の ADC 値を求める。次に式 (4.1) を用いて ADC 値から光子数への変換を行う。最後に ADC 値から光子数に変換後のヒストグラムの平均値を測定光量とした。図 4.24 は MPPC、波長変換ファイバーと CITIROC モジュールを用いて光量を測定した結果の一例であり、左は横軸が ADC 値、右が ADC 値から光子数への変換後のヒストグラムである。

$$(\text{変換後の光子数}) = \frac{(\text{変換する ADC 値}) - (\text{ペDESTAL の ADC 値})}{(1 \text{ 光子ピークの ADC 値}) - (\text{ペDESTAL の ADC 値})} \quad (4.1)$$

4.2.2 保護抵抗の変更

元々の設計では保護抵抗は 300 Ω のものが実装されている。これは LED ドライバーの予期せぬトラブルにより LED に大電流が流れたときに LED に流れる電流を抑制し LED が壊れないように保護すること、LED のオン抵抗の個体差による LED の光量のばらつきを抑え、LGP モジュールの光量一様性を向上させることを目的としている。

この保護抵抗を 300 Ω よりも小さい抵抗に置き換えることで保護抵抗での電圧降下を抑え、LED に流れる電流の増加とそれに伴う光量の増加が期待される。LED の保護抵抗を小さい抵抗値のものに置き換えて光量がどの程度向上するかを確かめるために、1 つの LED 基板から保護抵抗だけを差し替えたものを LGP モジュールに実際に取り付けて、4.2.1 節で述べたセットアップと光量算出方法を用いて、Notch で散乱された光量を測定した。保護抵抗は 300 Ω、50 Ω、10 Ω で測定した。その結果を図 4.4 に示す。

LED を光らせる矩形波の電圧とパルス幅がそれぞれ 4.0V、40ns での測定結果を比較すると、保護抵抗を 300 Ω から 50 Ω、10 Ω に置き換えることで光量が増えることが確認できる。特に 10 Ω の場合、300 Ω の時に比べて光量が約 4.8 倍向上している。

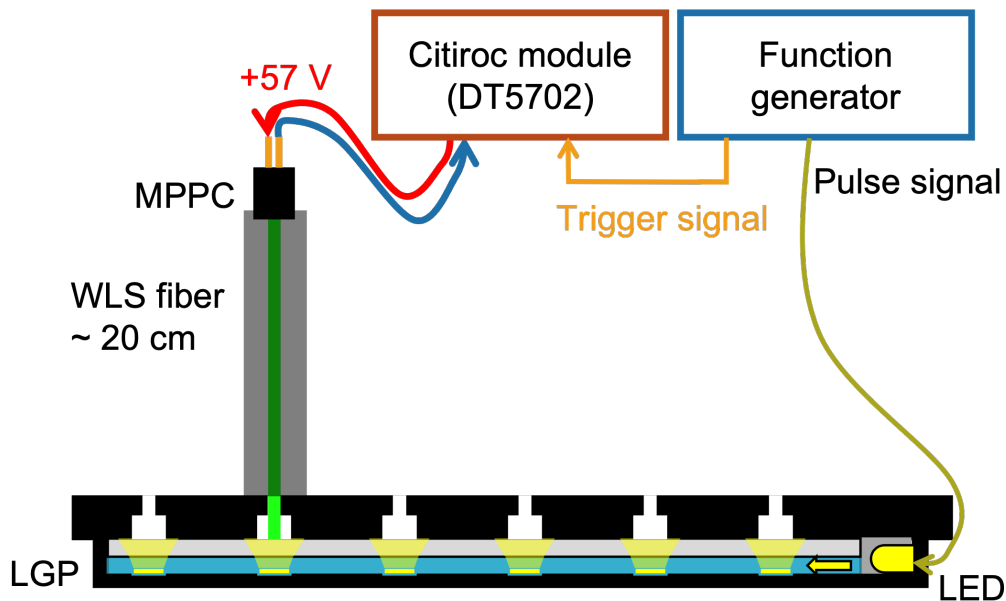


図 4.2 MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量測定の設定アップ

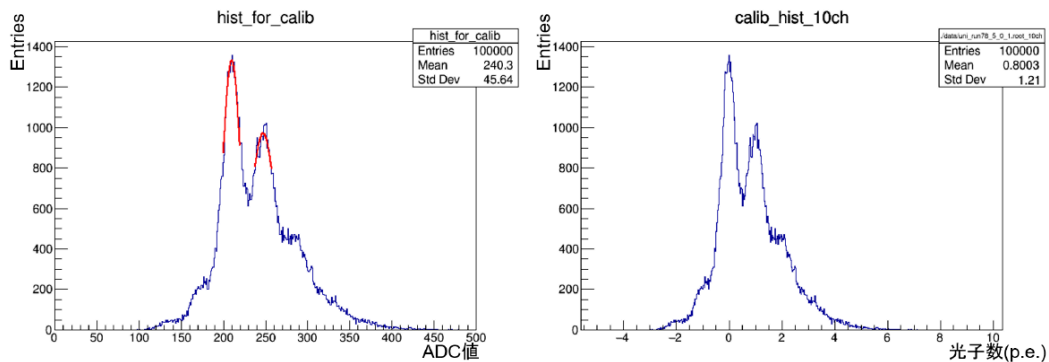


図 4.3 MPPC、波長変換ファイバー、CITIROC モジュールを用いた光量測定結果の例。左は横軸が ADC 値、縦軸がエントリー数の変換前のヒストグラムであり、右は横軸が光子数、縦軸がエントリー数の変換後のヒストグラムである。

この測定結果を踏まえて、LED 取り付け基板にインストールする保護抵抗は 300 Ω から 10 Ω のものに置き換えることに決定した。保護抵抗を 10 Ω のものに変更することで、本来の保護抵抗の役割である LED を保護する機能と LED のオン抵抗の個体差による光量のばらつきを抑える機能は小さくなるが、光量を向上させることのほうが優先度が高いと判断し、10 Ω の保護抵抗を採用した。

4.2.3 光源の変更

更なる光量の向上のために LED 取り付け基板に取り付ける LED を青色 LED から変更することを検討した。

使用するの LED の候補は日垂化学工業製の緑色 LED(NSPG300D) である。NSPG300D の特徴は、外気

Voltage (V)	Resistance (Ω)	Pulse width (ns)	LY (p.e.)
4.0	300	40	2.2
4.0	50	40	7.9
4.0	10	40	10.5 x4.8
4.0	10	60	19.1
5.0	10	40	19.6
5.0	10	60	33.9

図 4.4 保護抵抗を置き換えたときの光量の測定結果。Voltage と Pulse Width はそれぞれ LED を光らせる矩形波の電圧とパルス幅である。

温 25 °C で平均波長が約 520nm と可視光の緑色の波長領域を持ち、また順電流が 25mA のときの光度が元の青色 LED (NSPB300B) と比較して約 5.5 倍大きいため、最終的に MPPC に読み出される光量が増えることが期待される。また、青色 LED (NSPB300B) と同じサイズ、形状であり、LED 取り付け基盤のデザインを変更せずともコリメータ等に干渉せず、そのまま置き換えて使うことができる。[18]

緑色 LED に置き換えることで青色 LED と比較してどの程度光量が向上するか、また青色 LED と緑色 LED で ADC 分布を比較してどちらがより MPPC の増倍率較正に適しているかを調べるために、LGP モジュールに緑色 LED をはんだ付けした LED 基板を取り付けて、4.2.1 節で述べたセットアップと光量算出方法を用いて Notch で散乱された光量と ADC 分布を測定した。今後の測定における LED 基板の保護抵抗は全て 10 Ω である。

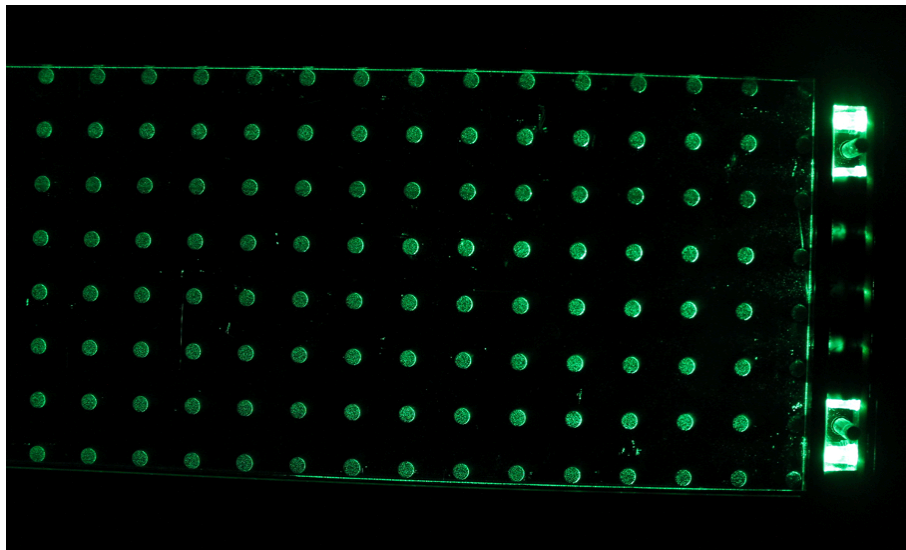


図 4.5 緑色 LED を取り付けした LGP モジュールの写真 (拡散板未装着)

	Voltage(V)	Measured LY(p.e.)
Blue LED	4.0	4.4
	6.5	22.6
Green LED	4.0	7.2
	6.5	37.0

図 4.6 青色 LED と緑色 LED の光量の比較。Voltage は LED を光らせる矩形波の電圧である。

緑色 LED での光量測定結果

LGP モジュールに緑色 LED をはんだ付けした LED 基板を取り付けて光量測定を行った。この測定では LED 発光用信号のパルス幅を 60ns とし、より実機に近い環境を再現するために、ファンクションジェネレータと LED の接続は図 3.15 に示した長さが合計で約 31m の同軸ケーブルと中間ボードを用いて行った。また、青色 LED と比較するために同じモジュールに青色 LED をはんだ付けした LED 基板を取り付けて同様の測定を行った。その結果を図 4.6 に示す。

この測定では電圧が 4.0V と 6.5V の両方で、緑色 LED は青色 LED と比較して光量が約 1.6 倍増加するという結果が得られた。

ADC 分布の形状とインストール後に見込まれる最小光量

青色 LED と緑色 LED の両方に対して LED 発光用信号の電圧とパルス幅を変えて ADC 分布を測定し、各検出光子数に対応するピークの形状と、SuperFGD に LED キャリブレーションシステムをインストールした際に見込まれる光量の 2 つの観点から青色 LED と緑色 LED のどちらがより MPPC の増倍率較正に適しているか評価を行った。

ピークの形状を評価するための ADC 分布測定では、図 4.7 に示すように ND(Neutral Density) フィルターを波長変換ファイバーと拡散板の間に挟むことで、異なる LED、異なる発光用信号の電圧・パルス幅でも MPPC で読み出される光量がおおよそ同程度になるように調整した。測定に用いた ND フィルターは、図 4.8 に示す一般には写真撮影等に用いられる富士フイルム株式会社製のものである。また本測定でもファンクションジェネレータと LED の接続は図 3.15 に示した長さが合計で約 31m の同軸ケーブルと中間ボードを用いて行った。

青色 LED での測定結果を図 4.9 に、緑色 LED での測定結果を図 4.10 に示す。LED 発光用信号の電圧は 5.5V、6.0V、6.5V、パルス幅はそれぞれの電圧に対して 40ns、50ns、60ns、70ns で測定を行った。青色 LED に関しては電圧が 5.5V での測定を省略した。これは後述する最小光量 λ_{min} が小さく、実際に SuperFGD での MPPC の増倍率の較正に適さないためである。

図 4.9 と図 4.10 から読み取れこととして、青色 LED と緑色 LED に共通して、LED 発光用信号のパルス幅が長くするほどピークの分解能が悪くなることが挙げられる。パルス幅が 40ns での ADC 分布とパルス幅が 70ns を比較すると、40ns での ADC 分布ではペDESTAL と 1 光子ピークと 2 光子ピークが明確に区別できるのに対して、70ns での ADC 分布は、発光タイミングがより異なる光子の信号を重ね合わせるようになるため各ピークが幅を持ち、特に 3 光子ピーク以上ではピークが区別ができない分布になっている。

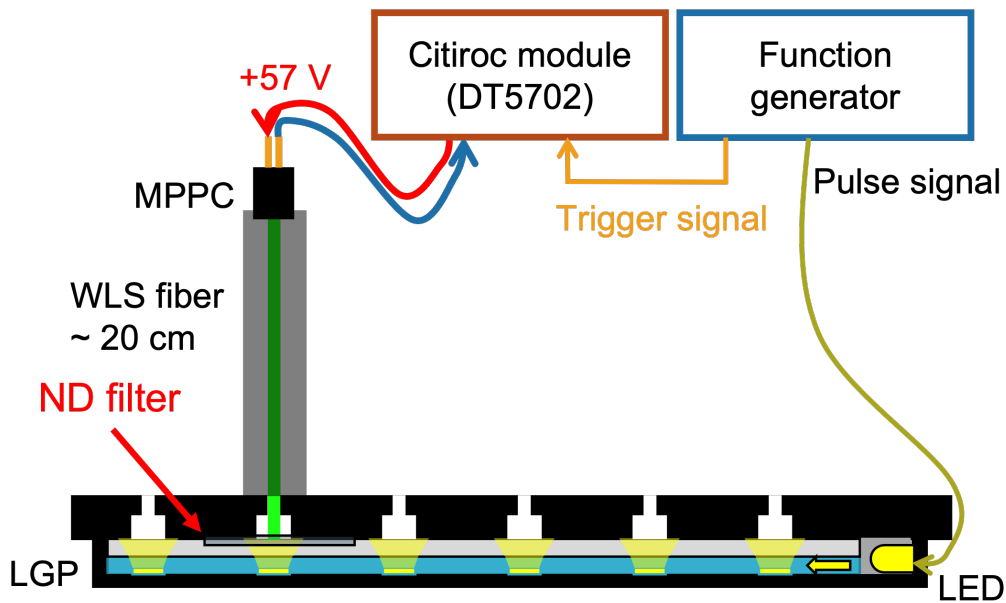


図 4.7 ADC 測定のセットアップ図。ND フィルターを波長変換ファイバーと拡散板の間に挟むことで波長変換ファイバーに入る光量を調節している。



図 4.8 測定に用いた富士フィルム社製の ND フィルター

一方で、青色 LED のパルス幅が 40ns での分布では 3 光子ピークと 4 光子ピークが明確に区別できるのに対して、緑色 LED のパルス幅が 40ns での分布ではピークの幅が広がり 3 光子ピークと 4 光子ピークの区別が難しくなっている。また、ピークの幅が広がりペDESTALと 1 光子ピークの分解能も悪くなっている。

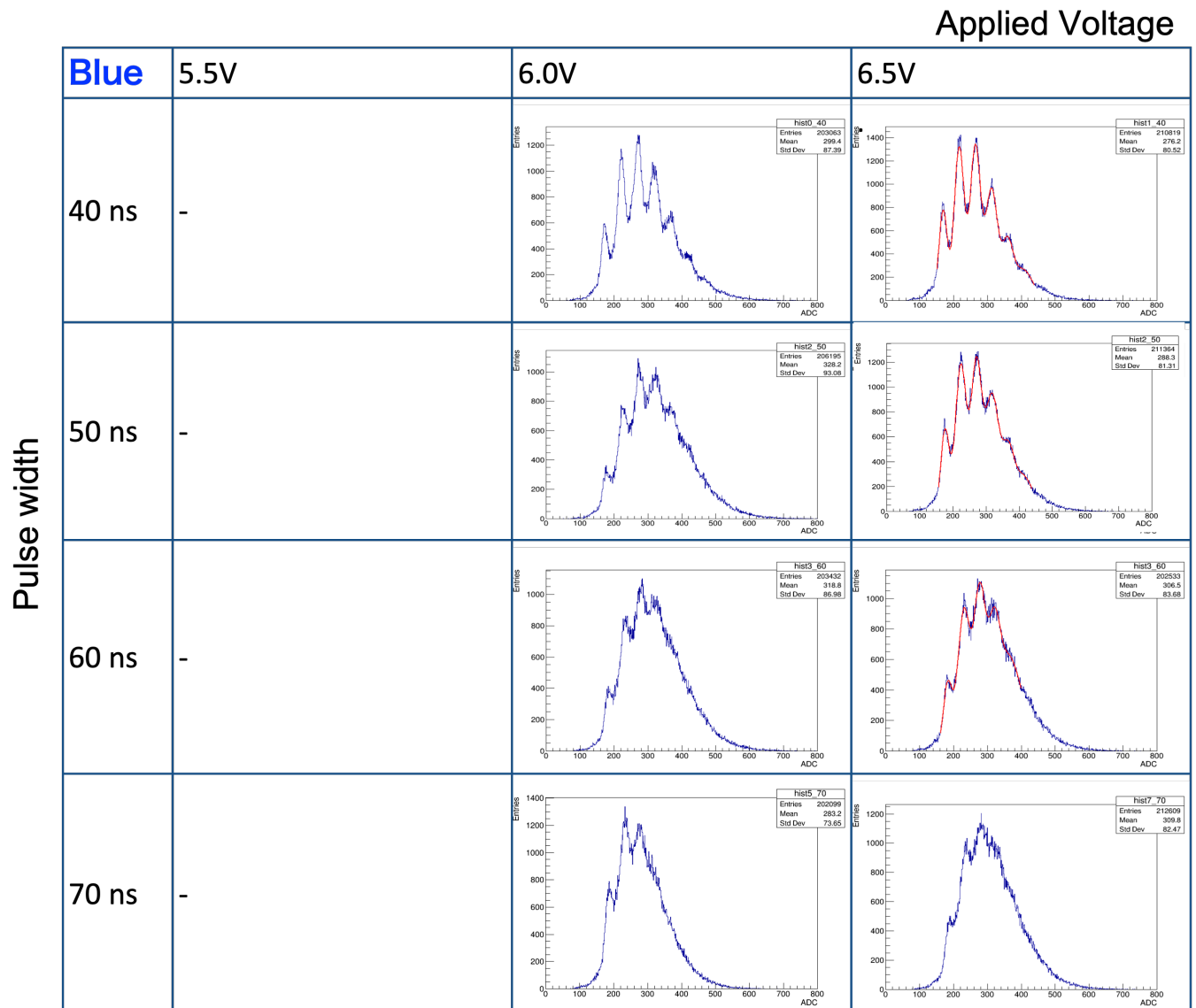


図 4.9 青色 LED での ADC 分布測定結果。表の横方向が LED を光らせる矩形波の電圧、縦方向が LED のパルス幅である。分布の平均値が同程度になるように測定ごとに透過率の異なる ND フィルターを用いて光量を調節している。

Applied Voltage

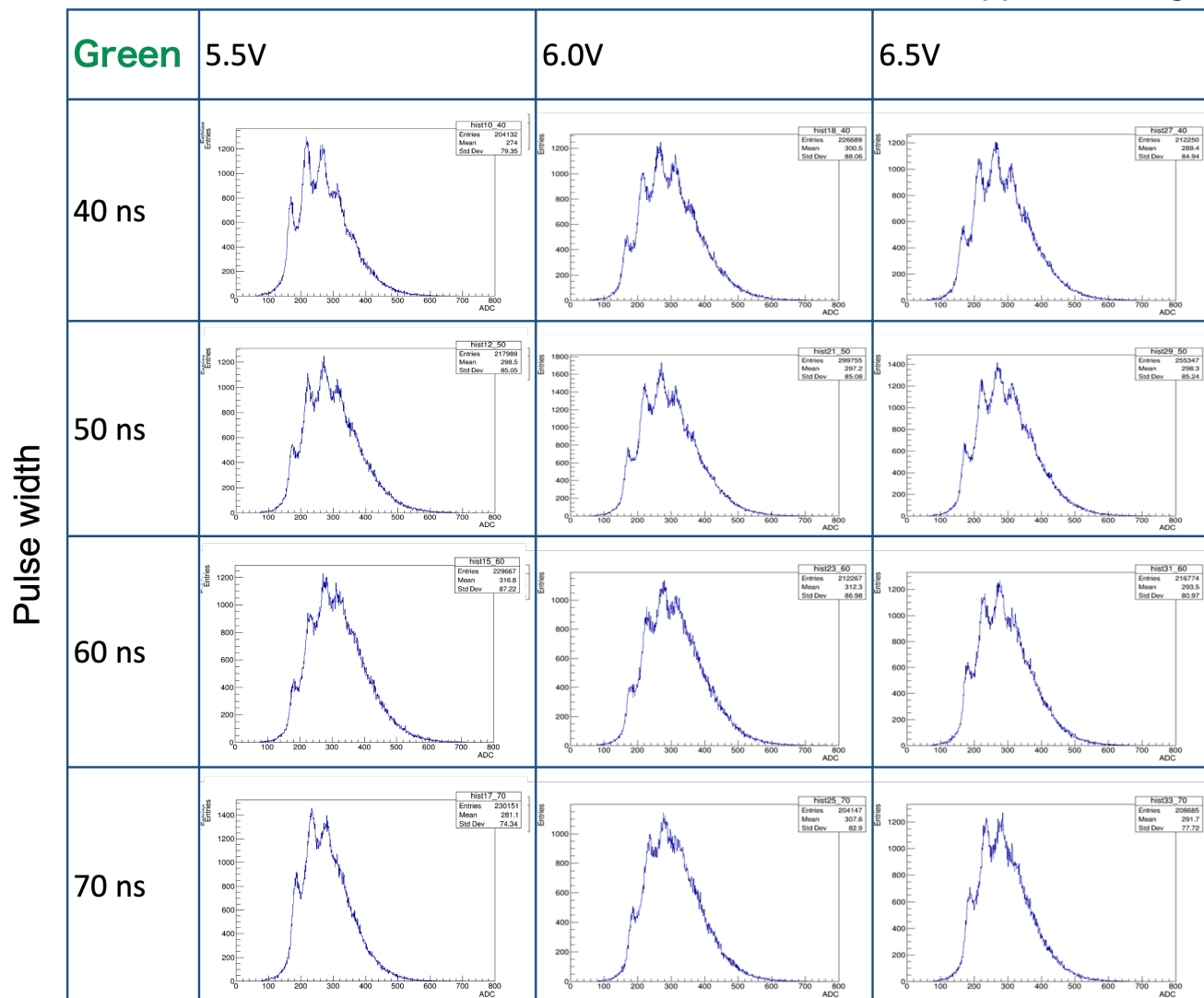


図 4.10 緑色 LED での ADC 分布測定結果。表の横方向が LED を光らせる矩形波の電圧、縦方向が LED のパルス幅である。分布の平均値が同程度になるように測定ごとに透過率の異なる ND フィルターを用いて光量を調節している。

また、測定で得られた光量から LED キャリブレーションシステムを実際にインストールした際に見込まれる最小光量 λ_{min} の見積りを行った。ここでの最小光量 λ_{min} は図 4.7 に示したセットアップで得られた光量に、Notch ごとの散乱される光量のばらつきと Notch と波長変換ファイバーの相対的なずれによる光量の減少と長さ 2m の波長変換ファイバーによる光量の減衰の効果を考慮したものである。測定で得られた光量から最小光量 λ_{min} を算出するために用いた式を次に示す。

$$\lambda_{min} = LY_m \times Uni \times disp_h \times disp_v \times WLS_{att} \quad (4.2)$$

ここで、 LY_m は各設定での測定光量であり、 $LY_{uni} \equiv 1/3, disp_h \equiv 0.8, disp_v \equiv 0.7, WLS_{att} \equiv 0.5$ である。以下では、それぞれの因子について説明する。

Uni は測定に用いた Notch の光量を、その LGP モジュールの最も光量が低い Notch の光量に焼き直すための因子である。Notch 自体の加工の際に生じる個体差や、Notch と LED からの距離、LGP モジュールのケースの壁面での反射や SuperFGD に LGP モジュールを取り付けるためのネジ穴での反射等の影響により、Notch で散乱されて波長変換ファイバーと MPPC に分配される光量にはばらつきがある。これまでの導光板を用いたキャリブレーションシステムの開発から最大最小光量比は 3 程度であるため、最も光量が低い Notch の光量は測定に用いた Notch の光量の 1/3 程度と仮定し、 $Uni = 1/3$ とした。

$disp_h$ は波長変換ファイバーが Notch の中心から水平方向に 1mm ずれた場合を仮定したときの光量の減衰を補正するための因子である。SuperFGD のキューブを収めるためのガラスエポキシ製のボックスの LGP モジュールを取り付ける面には、波長変換ファイバーが通る直径 3mm の穴が開けられている。波長変換ファイバーの直径が 1mm のため、LGP モジュールを SuperFGD にインストールした際には波長変換ファイバーが Notch の中心から最大で 1mm ずれることが予想される。図 4.11 は先行研究 [16] での青色 LED の場合の波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果である。図 4.12 は緑色 LED の場合の波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果を示す。青色 LED 緑色 LED の両方で、Notch の中心から 1mm 離れた LED 側の領域で光量が 20% 程度減衰していることから、波長変換ファイバーが Notch の中心から最大で 1mm ずれることを仮定し $disp_h = 0.8$ とした。

$disp_v$ は波長変換ファイバーが拡散板の表面から鉛直方向の方向に 1mm 離れた場合を仮定したときの光量の減衰を補正するための因子である。波長変換ファイバーの端面から Notch を見下ろしたとき、立体角は端面と Notch の距離の二乗に反比例して小さくなるため、図 4.13 に示すように波長変換ファイバーの端面が拡散板の表面から離れるほど光量が小さくなる。LGP モジュールを SuperFGD にインストールしたとき、ファイバーの端面が拡散板の表面からどの程度離れるかは、SuperFGD 建設時の波長変換ファイバーのカットの仕方や検出器全体の歪み等が影響するため正確な見積りが難しいが、波長変換ファイバーの端面が拡散板から 1mm 離れると仮定して、 $disp_v = 0.7$ とした。

WLS_{att} は長さ約 2m の波長変換ファイバーによる光量の減衰の効果を補正するための因子である。測定に用いた波長変換ファイバーの長さが約 20cm に対して、SuperFGD の水平方向の波長変換ファイバーの長さは約 2m であり、鉛直方向の波長変換ファイバーの長さは約 60cm である。したがって、LED を同じ電圧・パルス幅で光らせたとしても、LGP モジュールを SuperFGD にインストールしたときに読み出される光量は波長変換ファイバーでの減衰によって今回のセットアップと比較して小さくなる。図 4.14 は長さ 2m のクラレ Y-11 波長変換ファイバーにおける読み出される光量の MPPC までの距離の依存性の測定結果を示す。この測定では、シンチレーターキューブを通した 2m の波長変換ファイバーの片方の端面に MPPC を取り付け、キューブと MPPC までの距離を変えながらキューブに紫外線発光ダイオードを当てて、シンチレーション光

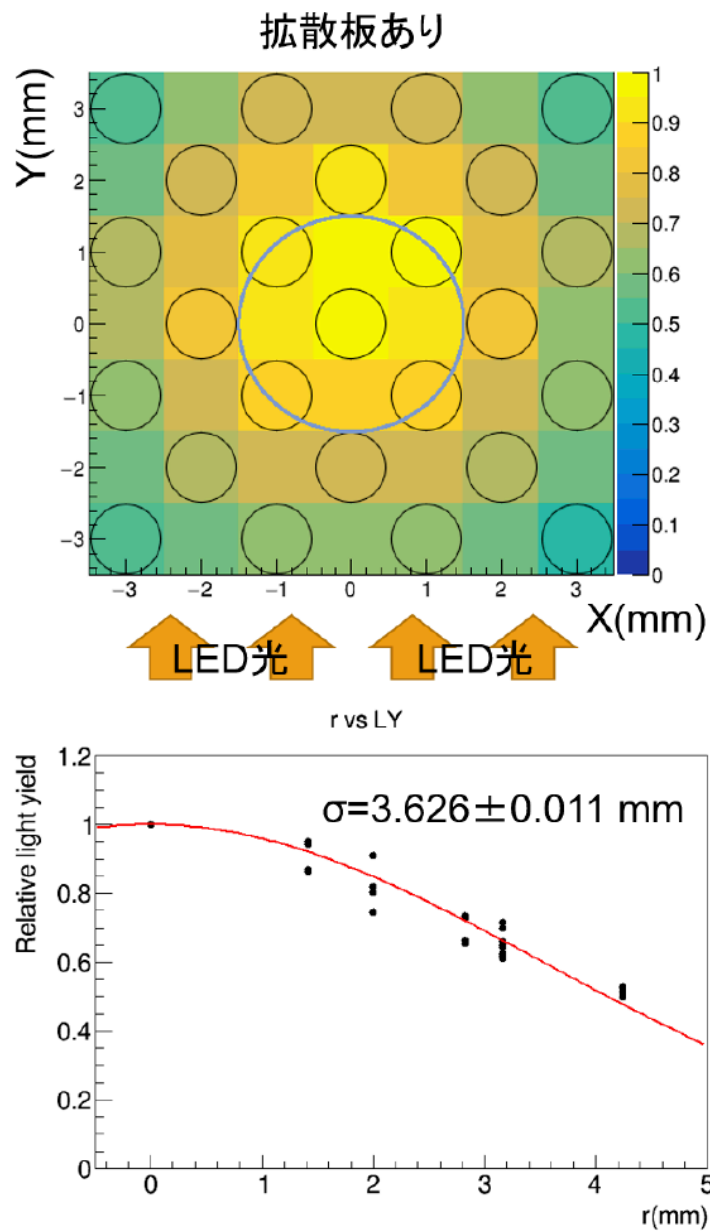


図 4.11 青色 LED での波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果。上の 2 次元分布の黒丸が各測定箇所であり、各測定箇所の光量をもとに他の領域を補完して 2 次元分布を作成した。淡い紫色の円が Notch の円周である。下のグラフは横軸が Notch の中心からの水平距離で縦軸が相対光量であり、ガウス分布の平均値を 0、最大値を 1 に固定し、フィットした結果である。[16]

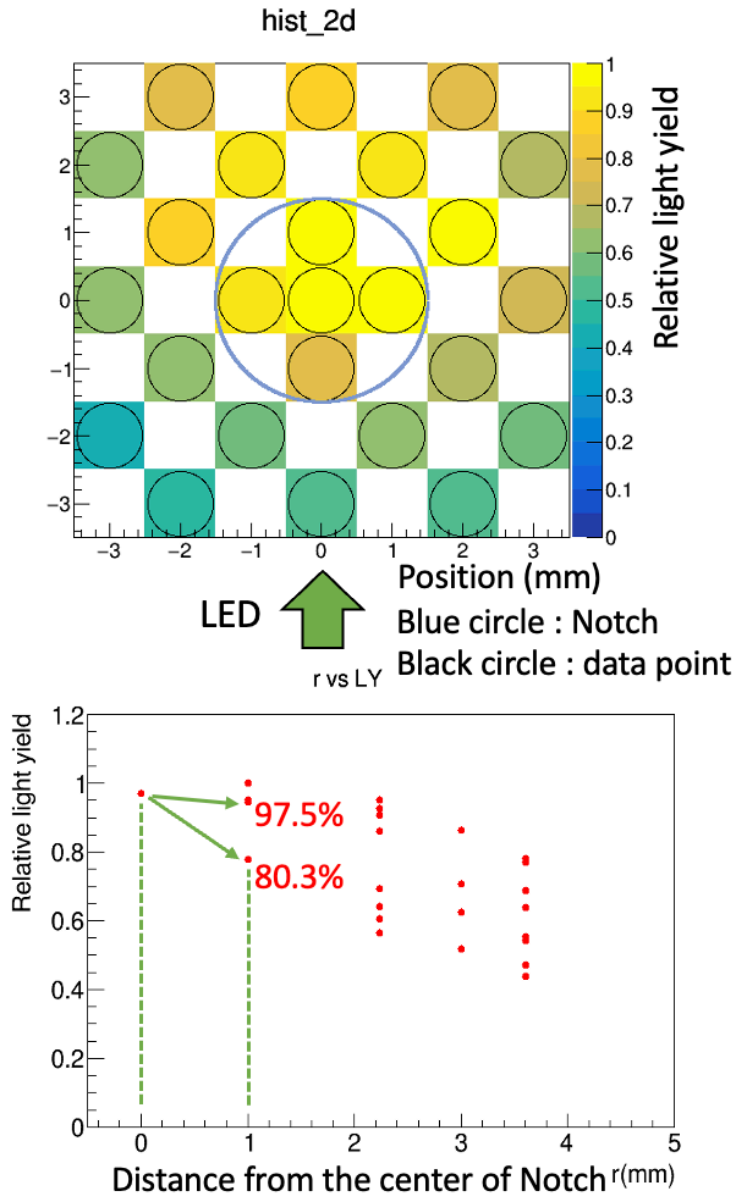


図 4.12 緑色 LED での波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果。上の 2 次元分布の黒丸が各測定箇所であり、下のグラフは横軸が Notch の中心からの水平距離で縦軸が相対光量である。

を波長変換ファイバーと MPPC で読み出している。青い線がファイバーの端が磨かれているだけの場合のプロットで、キューブから MPPC までの距離が 0.2m での光量と比較して、2m の場合では光量が 1/2 程度になっていることが読み取れる。今回は長さ約 2m 波長変換ファイバーによる光量の減衰の影響を受ける Wall LGP モジュールの場合を仮定し、 $WLS_{att} = 0.5$ とした。

青色 LED と緑色 LED の ADC 分布測定結果の図 4.9 と図 4.10 にそれぞれの LED の設定での最小光量 λ_{min} を追加したものを示す。

これらの ADC 分布の形状と最小光量の見積りの結果、LGP モジュールに用いる光源としてひ青色 LED を使うことを決定した。最小光量の観点では、青色 LED より光量を稼げる緑色 LED が優れている。しかし、

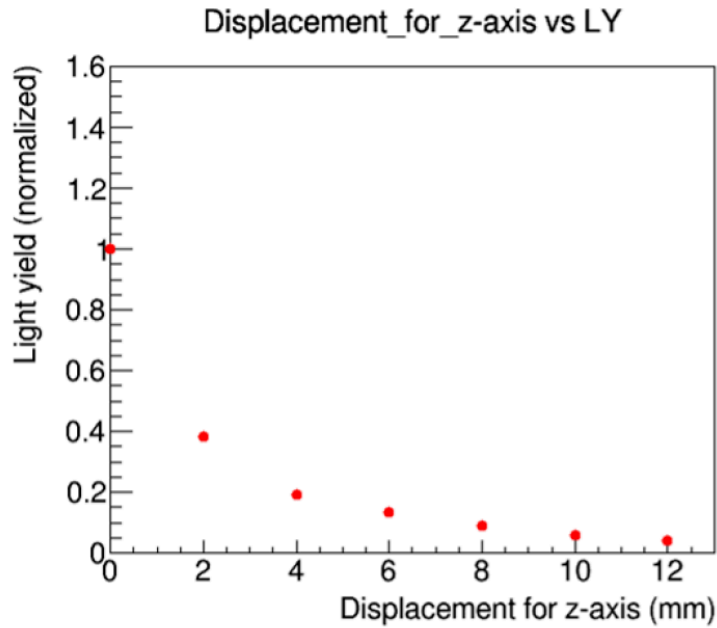


図 4.13 青色 LED での波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量測定結果。横軸が波長変換ファイバーの垂直方向のずれであり ($x=0$ が拡散板の表面)、縦軸が相対光量である。[16]

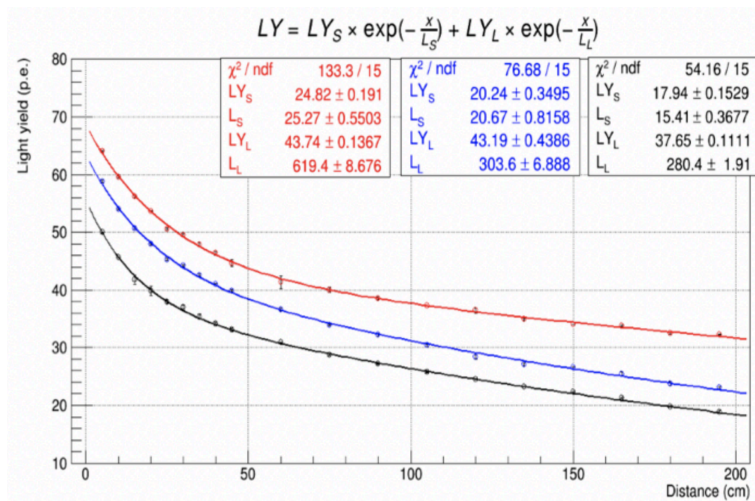


図 4.14 長さ 2m のクラレ Y-11 波長変換ファイバーにおける読み出される光量の MPPC までの距離の依存性の測定結果 [19] この測定では、シンチレーターキューブを通した 2m の波長変換ファイバーの片方の端面に MPPC を取り付け、キューブと MPPC までの距離を変えながらキューブに紫外線発光ダイオードを当てて、シンチレーション光を波長変換ファイバーと MPPC で読み出している。MPPC がついていない方の波長変換ファイバーの端面の処理はプロットごとに異なり、青いプロットはファイバーの端が単に磨かれているだけなのに対して、赤いプロットでは端面を磨いた後に反射材が塗られており、黒いプロットでは端面を磨いた後に黒く塗られている。実際の SuperFGD では波長変換ファイバーの端面は磨かれず、ニッパーで切断されたあとは何も処理されない。したがって、実際の SuperFGD の環境に近い青いプロットの測定結果を参照すると、キューブから MPPC までの距離が 0.2m での光量と比較して、2m の場合では光量が 1/2 程度になっていることが読み取れる。この結果から長約 2m のファイバーの減衰の影響を受ける Wall LGP モジュールの場合を仮定し、 $WLS_{att} = 0.5$ とした。

ADC 分布の形状という観点では、青色 LED と比較して緑色 LED では各光子数に対応するピークがより広がりを持つため、特に 3 光子ピーク以上の区別が難しくなっている。実際の MPPC の増倍率の較正では、読み出しエレクトロニクス側で閾値を設定しその閾値を超えた信号だけを読み出すというような運用を行うため、ペDESTAL と 1 光子ピークを読み出すことができない。代わりに 3 光子ピーク・4 光子ピーク・5 光子ピークがそれぞれ区別できるような ADC 分布が必要になるが、緑色 LED では 3 光子ピーク以上の区別が青色 LED より難しくなっており、明らかに MPPC の増倍率較正に適さない。一方で、青色 LED は最小光量では緑色 LED に劣っているが、3 光子ピーク以上が区別できるまで十分な統計を貯めることで光量の低さを補うことができる可能性がある。したがって、光源として緑色 LED は使用せず、青色 LED を引き続き LGP モジュールに用いることとした。

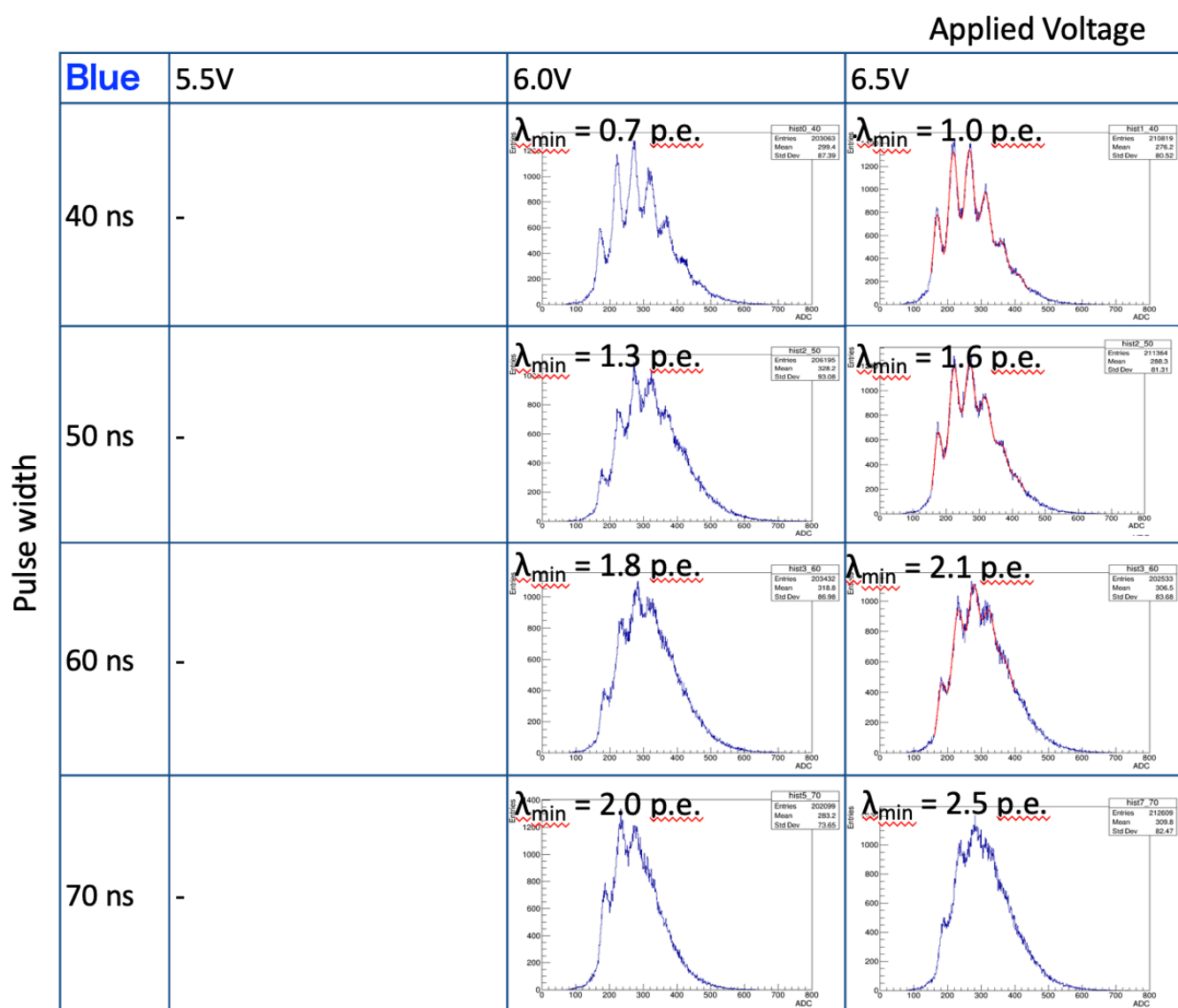


図 4.15 青色 LED での ADC 分布測定結果とそれぞれの設定での最小光量 λ_{min} の計算結果

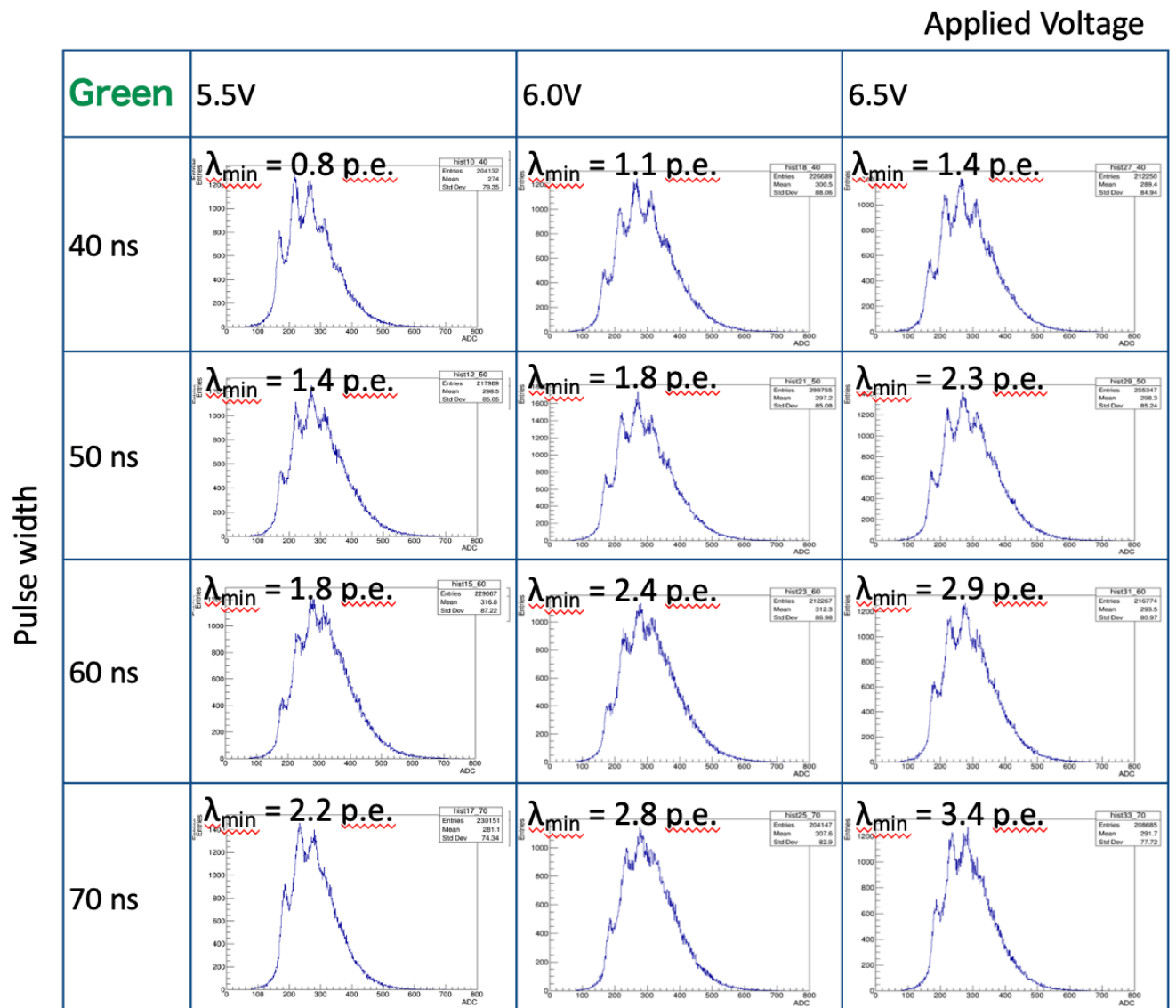


図 4.16 緑色 LED での ADC 分布測定結果とそれぞれの設定での最小光量 λ_{min} の計算結果

4.3 コリメータの形状の改良

コリメータは導光板に入る光量を調節するために導入され、その形状は光量一様性を良くするために最適化されている。

コリメータは図 3.11 に示すように、厚みの異なるアクリル板をそれぞれレーザー加工器で切り出しアクリル用接着剤で溶着した構造をしている。最初の設計ではコリメータに用いるアクリル板の板厚は導光板に接する側から順番に 2mm、2mm、3mm、2mm となっていたが、後に導光板に接する側から順番に 2mm、1mm、3mm、3mm に変更した。これは SuperFGD のキューブを収めるボックスの LGP モジュール取り付け用ネジ穴の位置が変更されたことによって、従来の設計の板厚ではコリメータと LGP モジュール取り付け用ネジが干渉してしまうからである。

この板厚の設計の変更によって図 4.17 に示すように、LED に近い Notch で光量が後段の LED から離れた Notch よりも意図せず小さくなってしまった。そこで、LED 付近の Notch の光量を増やすために、コリメータの形状の見直しを行った。

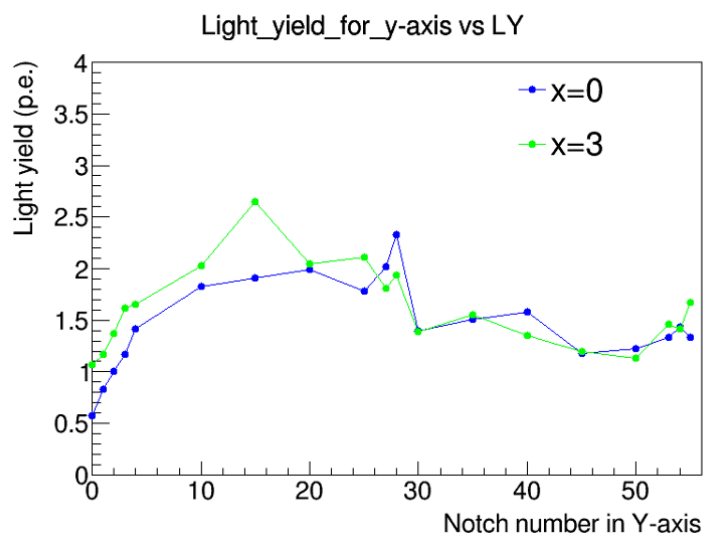


図 4.17 板厚変更後のコリメータを装着した LGP モジュールでの光量測定結果。縦軸が光量、横軸が Y 軸方向の Notch 番号であり、Y=0 が最も LED に近い Notch である。測定には Wall LGP モジュールのプロトタイプを用いた。Y=10 以降と比較して、LED に近い Y=0 から Y=4 の Notch では相対的に光量が小さいことが読み取れる。

最終版コリメータの設計

コリメータの形状の改良にあたっては、形状を修正したプロトタイプを作成し実際に LGP モジュールに取り付けてその性能を確認した。性能の確認方法として、LED を DC で光らせた状態での目視での確認と LED をパルスで光らせた状態で Notch で散乱された光量を MPPC を用いてフォトンカウンティングするという 2 種類の方法を行った。

最終版コリメータの写真を図 4.18 に示す。旧型のコリメータとの最も大きな違いは、導光板に接する方の

2mm厚の亚克力板の形状が従来の逆T字型からI字型に変更されている点である。LEDをパルスで光らせた状態でNotchで散乱された光量をMPPCを用いて測定した結果を図4.21に示す。旧型コリメータと最終版コリメータを比較するために、同じLGPモジュールに対してコリメータだけを付け替えて測定を行った。最終版では形状をI字型に変更することで導光板の側面から入るLED光の量を増やし、旧型で問題のあったLEDに近いNotchでの光量を増やすことに成功した。

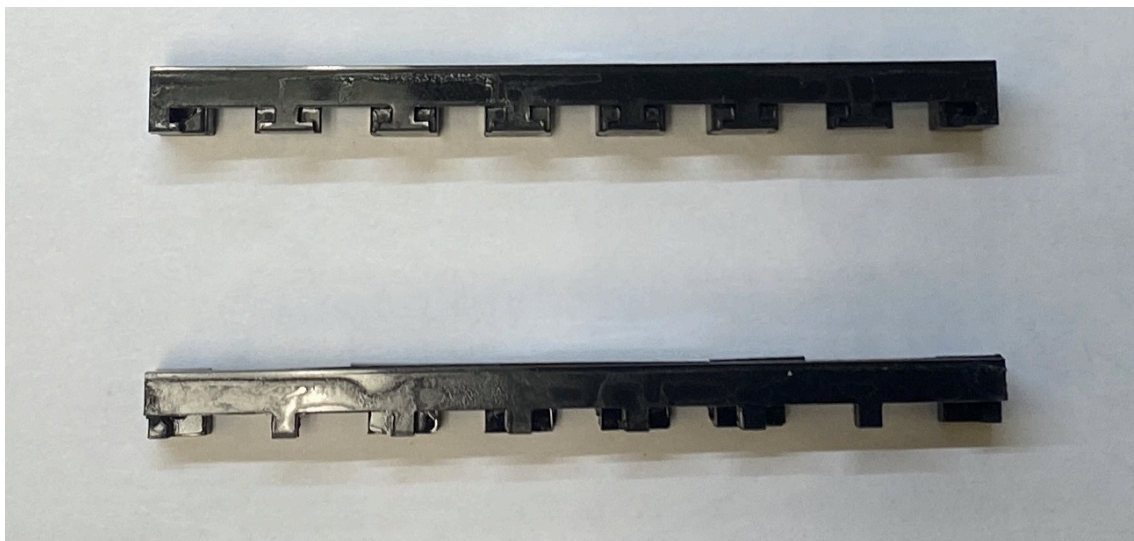


図 4.18 上がオリジナルの逆 T 字型コリメータ、下が改良後の I 字型コリメータである (導光板側から見た図)。



図 4.19 最終版コリメータの写真 (溶着後)

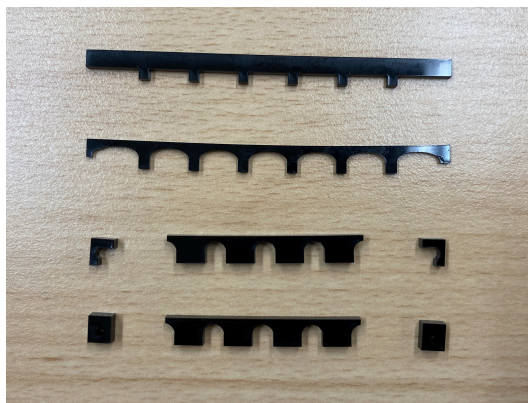


図 4.20 最終版コリメータの写真 (溶着前) 上から順番に導光板に近い方の亚克力板で、板厚はそれぞれ 2mm, 1mm, 3mm, 3mm である

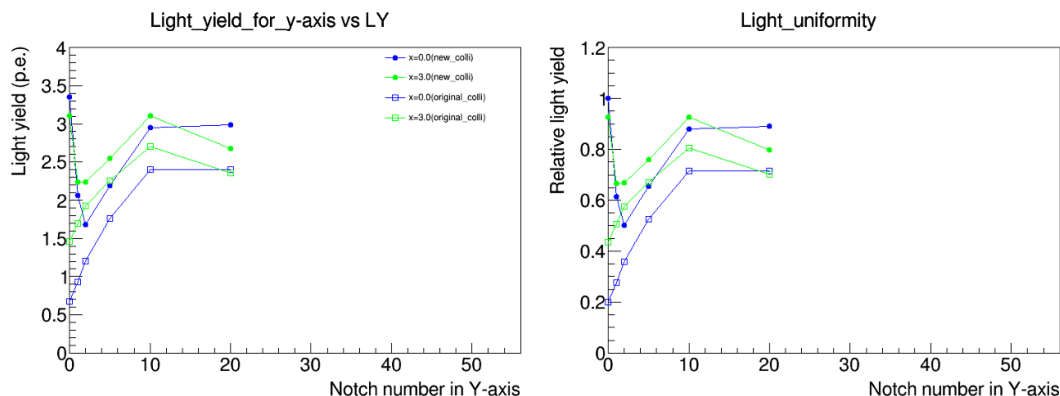


図 4.21 最終版コリメータと旧型コリメータの光量の比較。左の図では縦軸が測定光量、右の図では縦軸が相対光量である。横軸は Y 軸方向の Notch 番号であり、Y=0 が最も LED に近い Notch である。丸いマーカーのプロットが最終版コリメータ、四角いマーカーのプロットが旧型コリメータである。最終版コリメータでは LED に近い Y=0 付近の Notch で、旧型と比べて光量を増やすことに成功した。

4.4 考察とまとめ

Notch で散乱されて MPPC で検出される光量を増やすために、LED 基板の保護抵抗を 300 Ω から 10 Ω への変更を行い、また、LED から距離の近い Notch での光量を増やすために、コリメータの形状の変更を行った。

一方で、本研究では光源である LED を青色 LED から緑色 LED への変更も検討し、波長変換ファイバーと MPPC を用いた実験によって緑色 LED では青色 LED と比較して約 1.6 倍程度の光量の増加が期待できることを確かめた。しかし、緑色 LED での ADC 分布は青色 LED での分布と比較して各検出光子数に対応するピークがより幅を持ち、とりわけ 3 光子以上のピークでピークの分離が難しいため緑色 LED は MPPC の増倍率の較正に適さないという理由から、緑色 LED の採用は見送り、青色 LED を引き続き使用することを決定した。以下では、なぜ緑色 LED では約 1.6 倍しか光量が増えないのか、また、なぜ緑色 LED の ADC 分布は各ピークがより幅を持つのかの 2 点について定性的な考察を述べる。

まず前者について、これは波長変換ファイバーと LGP モジュール間の光学的な接続に由来すると考えられる。青色 LED を用いた場合、Notch で散乱された光のうち、波長変換ファイバーの端面や側面で吸収されて再発光した光や、ファイバーの中を全反射しながら伝播するような角度で端面に入射した光が MPPC で読み出される。図 4.22 と図 4.23 はそれぞれ青色 LED と緑色 LED の発光スペクトラムであり、青色 LED は波長約 460nm で、緑色 LED は波長約 520nm でそれぞれピークを持つことが読み取れる。一方で、Y-11 波長変換ファイバーの吸収スペクトラムは図 2.2 に示したものであり、図 2.2 から、Y-11 波長変換ファイバーは波長 460nm 付近では感度を持っているのに対して、波長約 520nm 付近ではほとんど感度を持たないことが読み取れる。したがって、緑色 LED の場合、波長変換ファイバーでの吸収再発光のプロセスがほとんど起こらず、MPPC で読み出される光は、ファイバーの中を全反射しながら伝播するような角度で端面に入射した光の割合が大きいと考えられる。これが、光度が青色 LED と比較して約 5.5 倍大きいのに関わらず、MPPC で読み出される光量が約 1.6 倍しか増加しない考えうる理由である。

発光スペクトル
Spectrum

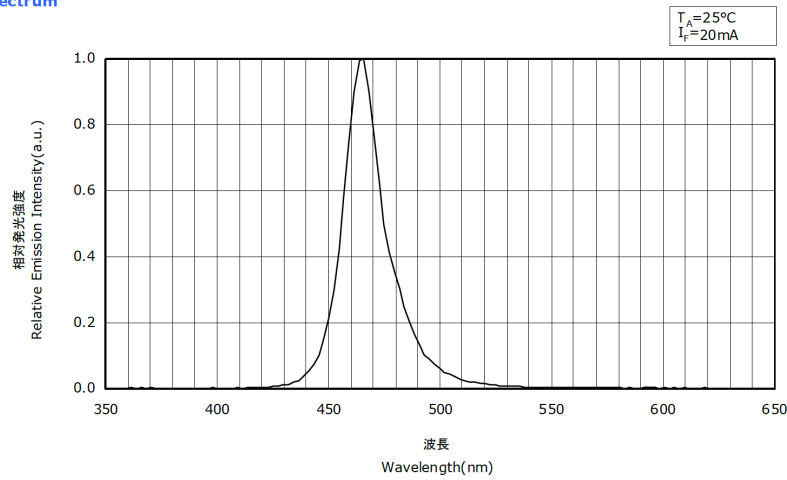


図 4.22 青色 LED(NSPB300B) の発光スペクトラム [17]

発光スペクトル
Spectrum

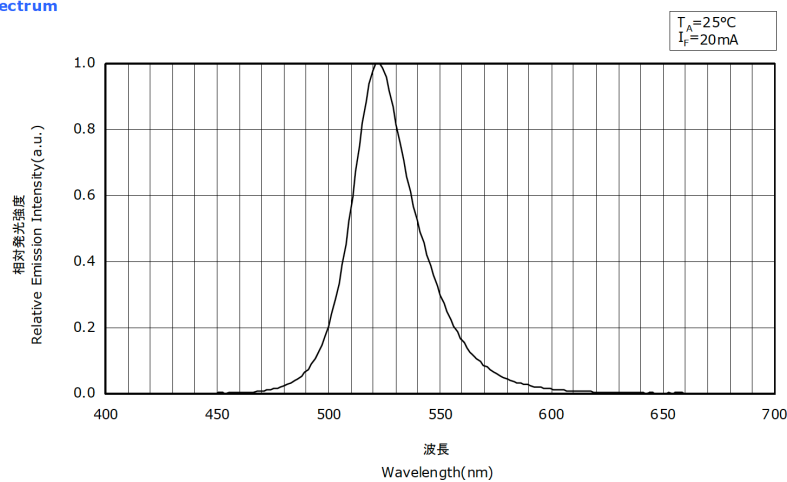


図 4.23 緑色 LED(NSPGG300B) の発光スペクトラム [17]

後者について、これは信号読み出しエレクトロニクスと LED の発光時間に由来すると考えられる。MPPC の信号読み出しに用いる CITIROC チップは、信号の波高を ADC 値として記録する。したがって、図 4.24 に示すように、2つの光子がほぼ同じタイミングで MPPC に入射した場合は正しく 2光子信号の波高を記録することができる。しかし、2つの光子が異なるタイミングで入射した場合、最初の信号のテール部で2つ目の信号が重なることで、その波高は理想的な 2光子信号の波高よりも低く記録される。また、図 4.25 は暗箱中で LED をパルスで光らせ、その光を光電子増倍管 (PMT) で読み出し、その波形をオシロスコープで記録したものであり左が青色 LED の波形で右が緑色 LED の波形である。LED 発光用信号は共には 6.5V、幅 60ns である。図 4.25 から明らかのように、同じ発光用信号で光らせているにも関わらず緑色 LED のほうが発光時間が長いことがわかる。したがって、緑色 LED では複数の光子が異なるタイミングで MPPC に入射し、その波高値が複数の光子がほぼ同じタイミングで MPPC に入射した場合の理想的な波高値よりも低く記

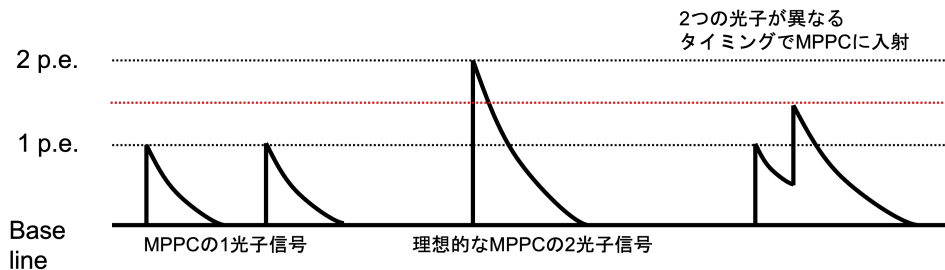


図 4.24 2つの光子がほぼ同じタイミングで MPPC に入射した場合は正しく 2 光子信号の波高を記録することができる。しかし、2つの光子が異なるタイミングで入射した場合、最初の信号のテール部で2目の信号が重なることで、その波高は理想的な 2 光子信号の波高よりも低く記録される。

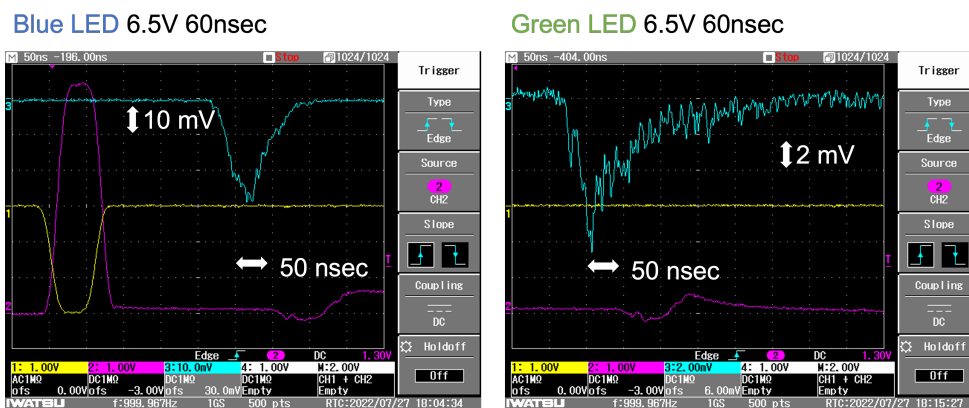


図 4.25 LED をパルスで光らせ PMT を用いて読み出したときの波形。左が青色 LED で、右が緑色 LED での測定である。

録されることで、ADC 分布が幅を持つと考えられる。

LED の発光時間を長くすればするほどピークが幅を持ち、各ピークと検出光子数の紐付けが難しくなることから、実際の SuperFGD での LED キャリブレーションシステムを用いた MPPC 増倍率校正用データ取得時においては、LED の発光用信号のパルス幅を 40ns 程度、もしくはそれ以下にする必要があると考えられる。実機の実環境では、LGP モジュールの光量や波長変換ファイバーの端面の状態等の個体差が最終的に MPPC に入射する光量に影響を及ぼす上、電気的なノイズの量も今回の測定と異なる可能性がある。したがって、SuperFGD 建設後の試運転の段階で LED キャリブレーションシステムを運転し、校正により適した ADC 分布が取得できるよう LED 発光用信号の電圧やパルス幅の微調節が必要である。また、LED 発光用信号のパルス幅が 40ns、電圧が LED ドライバーの最大定格である 6.5V のときの最小光量 λ_{min} は 1.0p.e. であるが、これは想定される信号読み出しの閾値が 1.5p.e. またはそれ以上であることを考慮すると、MPPC の増倍率の校正に十分な光量とは言えない。そのため、LGP モジュールの組み立て後の動作確認と健全性の確認の段階で、できるだけ光量の高い LGP モジュールを選別し、極端に光量が低い Notch があるモジュールやモジュール全体で光量が低いといった問題を抱えるモジュールは取り除く必要がある。

第5章

カメラを用いたLGPモジュールのための品質確認システムの開発

5.1 品質確認システムの開発の目的

LGPモジュールは長さの異なる2種類のモジュールがあり、SuperFGDの側面に取り付けられるWall LGPモジュールは47モジュール、底面に取り付けられるLGPモジュールは46モジュールの計93モジュールがSuperFGDにインストールされる。LGPモジュールは導光板、拡散板、コリメータ、LED取り付け基板とそれらを収めるケースで構成されており、それらを組み立てて一つのモジュールとして完成させた後に地上にてSuperFGDに取り付けられる予定である。その後はSuperFGD全体が遮光用のブラックシートで覆われるため、一度取り付けられたLGPモジュールは基本的には取り外すことができない。したがって、組み立て後のLGPモジュールの健全性を確認し、問題のあるLGPモジュールをSuperFGDへ取り付けの前に未然に発見することが重要である。

量産されたLGPモジュールにおいて起こりうるトラブルは無数に考えられるが、想定されるものの一つとして導光板と拡散板の表面に傷や汚れがあったり、導光板のNotchの加工ミスが挙げられる。また、導光板と拡散板とそれらを収めるケースの寸法が設計と異なることによってケースに導光板と拡散板が上手く収まらず、モジュールとして組み立てることができないことも想定される。そのため、導光板・拡散板・ケースの目視での傷・汚れ、Notchの加工ミスの有無の確認と治具を用いた寸法検査は、それらの量産を委託した生産会社で量産時に行った。

LGPモジュールの各構成要素の量産が完了した後はそれらを組み立てて1つのモジュールとして完成させる。組み立て後の全てのLGPモジュールは実際にLEDを光らせて動作確認を行う必要があるが、導光板の表面に加工されたNotchやLEDの光量、コリメータの形状の個体差、その他の想定外の問題により光量一様性や平均光量といった性能はモジュールごとにばらつくことが考えられる。中には光量一様性が平均的なモジュールと比較して極端に悪いモジュールがある場合が想定され、そうした問題を抱えるモジュールはSuperFGDへのインストール前に取り除く必要がある。LEDを光らせたとき、周囲のNotchと比較して相対的に極端に暗いNotchがあったり、複数のNotchがまとまって光量が低いといった問題は目視でも確認することができるが、そのモジュールの光量がNotchごとにどの程度ばらついているかを調べたり、異なるモジュール同士で光量一様性や平均光量といった性能を比較するためには定量的な検査手法を用いる必要がある。また、量産されたLGPモジュールはWall LGPモジュールとBottom LGPモジュールを合わせて予備も含めて110モジュールあり、Notchの数は合計で約7万個ある。そのため、検査は短時間かつ簡単に行え

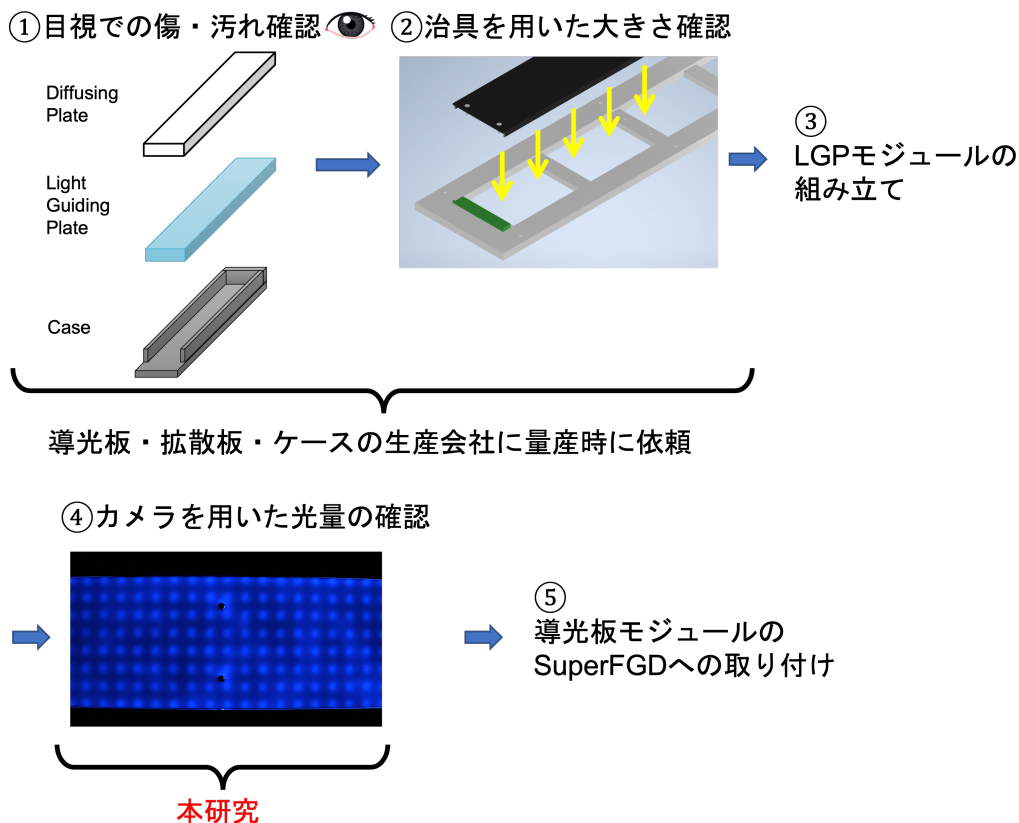


図 5.1 量産された LGP モジュールのインストールまでの流れ

ることが望ましい。

そこで、110 モジュール、約 7 万個の Notch の光量を定量的かつ迅速に検査し、健全性の確認と問題のある LGP モジュールを SuperFGD へ取り付けの前に未然に発見するために、カメラを用いた LGP モジュールのための大量検査システムを開発した。本章では、開発した検査システムの概要、Notch で散乱された光量の定量化手法の開発、実際の LGP モジュールを用いた検査システムの性能評価について述べる。

5.2 開発した品質確認システムの概要

本節では開発したカメラを用いた品質検査システムの概要について述べる。

110 モジュール、約 7 万個の Notch の光量を定量的かつ迅速に検査するために図 5.2 に示すような検査システムを開発した。アルミ製のフレームの上部には 12 台のカメラが、下部には LGP モジュールが固定されており、このカメラを用いて LGP モジュールを真上から垂直に見下ろす形で撮影できるようになっている。LED への電源の供給には直流安定化電源を用いており、LED 取り付け基盤との接続は同軸ケーブルを用いて行う。

この検査システムの基本的な方針は、カメラを用いて LGP モジュールを撮影し、記録した画像を画像解析を用いて解析して全ての Notch の光量を見積ることである。図 5.3 に検査システムを用いて撮影した LGP モジュールの画像を示す。画像解析を用いて Notch で散乱された光量を記録した画像から定量化する方法につ

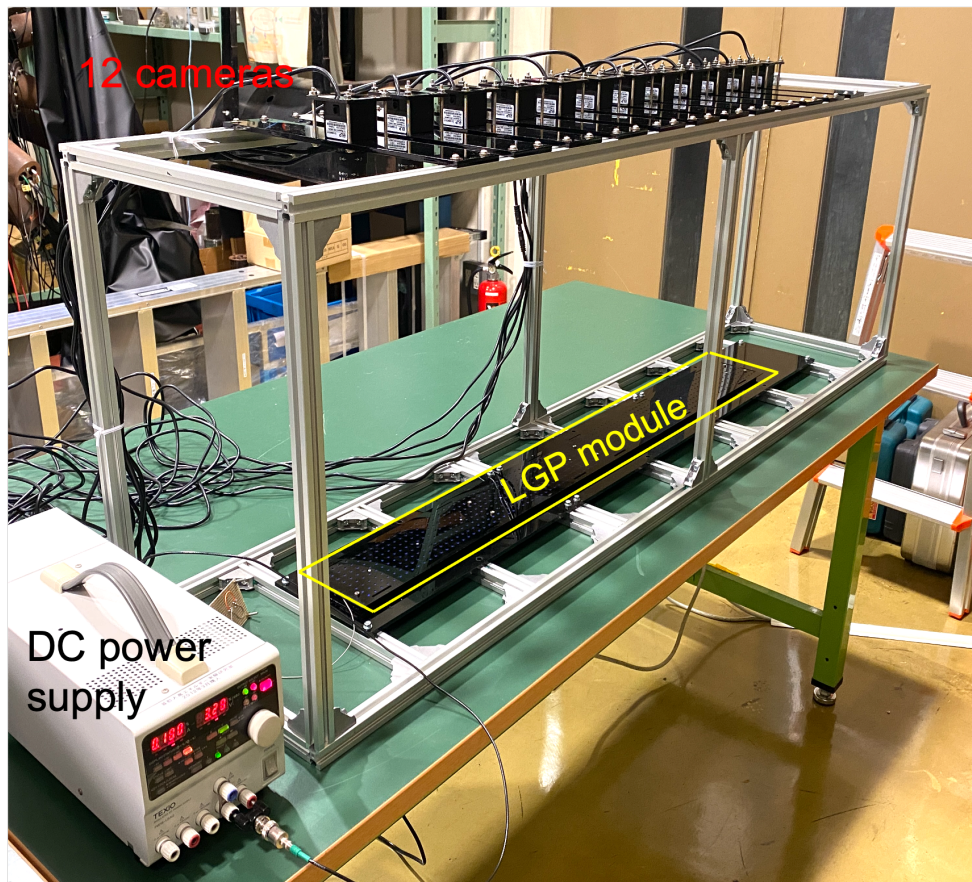


図 5.2 カメラを用いた検査システムの外観

いては 6.4 節で述べる。

5.3 LGP モジュール撮影のためのセットアップ

本章では、開発した検査システムのカメラのセットアップや実際の撮影方法について述べる。

5.3.1 LGP モジュールの撮影方法

LGP モジュールの撮影は、カメラの真下のモジュール固定用のステージに置き、LED を直流安定化電源と同軸ケーブルで接続した後に外部の照明がレンズに入らないよう暗幕をかけた状態で行う。この際に、図 5.4 に示す 1mm 厚の黒色アクリル板を加工して作成した治具を装着した状態で撮影する。このアクリル製の治具は Notch の位置に直径 3mm の穴が空けられており、LGP モジュールを SuperFGD に取り付けるための直径 3mm のネジを用いて固定できるようになっている。撮影時にこの治具を用いるのは、撮影時の環境を LGP モジュールを実際に SuperFGD に取り付けたときの環境に近づけるためである。

図 5.5 に示すように、SuperFGD のガラスエポキシ (G10) 製の外壁には波長変換ファイバーを通すための直径 3mm の穴が空けられており、挿入された波長変換ファイバーをニッパーで切断された後に、LGP モジュールがねじ止めされる。したがって、Notch で散乱された光のうち実際に MPPC で読み出されるのは、

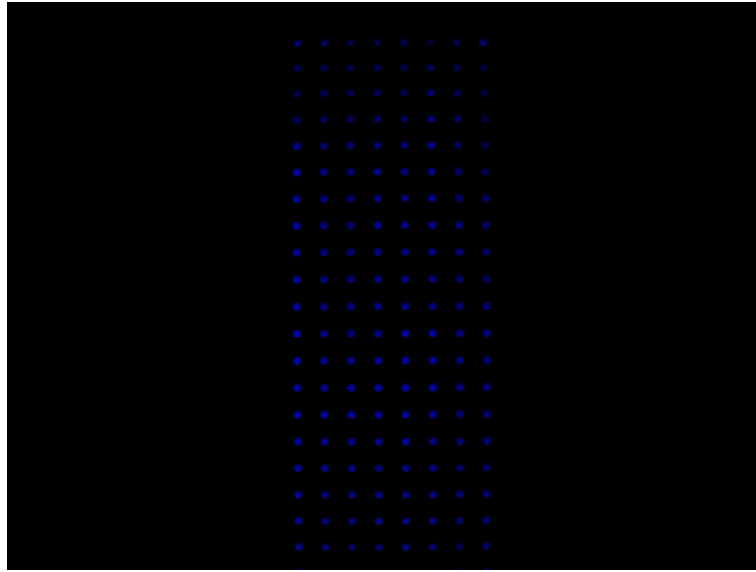


図 5.3 検査システムを用いて撮影した LGP モジュールの写真。写真の撮影は LED を点灯し暗幕をかけた状態で行う。中央に見える青い点が導光板の Notch で散乱された LED 光である。

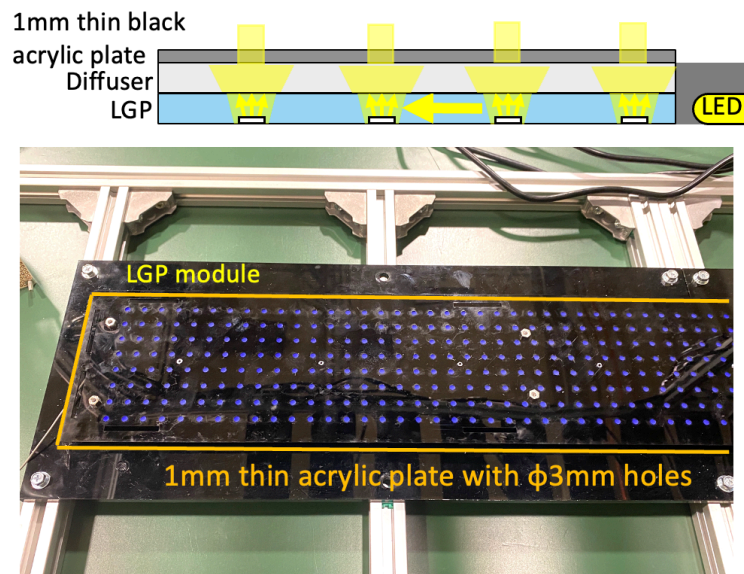


図 5.4 1mm 厚アクリル板製の治具をつけた LGP モジュールの写真。上は LGP モジュールを側面から見たときの概略図であり、Notch で散乱され、治具に空けられた直径 3mm の穴を通過した光をカメラで読み出す。

この直径 3mm の穴を通過し波長変換ファイバーの端面や側面で吸収された光である。撮影時に 1mm 厚のアクリル製の治具を装着するのは、Notch で波長変換ファイバーの端面がある方向へ散乱されて直径 3mm の穴を通過した光のみをカメラで読み出すためである。



図 5.5 SuperFGD のガラスエポキシ (G10) 製の外壁の写真。波長変換ファイバーを通すための直径 3mm の穴が空けられている。LED の光はこの穴を通過し、ファイバーの端面で吸収される。

5.3.2 カメラのセットアップ

検査システムに使用しているカメラは、図 5.6 に示す ELP 社製の ELP-USB8MP02G-SFV(5-50mm) という型番のデジタルカメラで、撮像素子として CMOS センサーを搭載している。1 台のカメラは $8 \times 8 = 64$ 個の Notch の光量を測定し、Wall LGP モジュールを撮影するときは 7 台、Bottom LGP モジュールを撮影するときは 12 台のカメラを用いる。このカメラはマニュアルのズームレンズを搭載しており、レンズの側面のつまみを手で回転させることで焦点距離と絞りとフォーカスを変えることができる。撮影時にはレンズの最も広角かつ絞りは最も明るい開放に設定し、フォーカスの設定はつまみを回しながら目視で行った。また、このカメラは USB ケーブルを使って PC と接続することができ、PC を用いて操作したり、露出やホワイトバランス等のパラメーターを変えることができる。撮影する画像の色味や明るさに関わるパラメータの値は V4L2(Video For Linux 2) と呼ばれる USB カメラ用のドライバを用いて調節した。

パラメーターの値を調節する際には、LGP モジュールを撮影した際に Notch 周辺のピクセル (画素) の色を表す 8 ビット値が飽和しないように注意した。デジタル画像はピクセルの集まりで構成されており、各ピクセルには青色・緑色・赤色の各成分の情報が 0 から 255 の 8 ビットの整数値で格納されている。この 8 ビット値の絶対値や青色・緑色・赤色成分の比によって、ピクセルの色味や明るさが決まる。図 5.7 と図 5.8 に示す 1 次元ヒストグラムは、撮影した LGP モジュールの画像の全ピクセルの青色成分の 8 ビット値を詰めたものであり、横軸が 8 ビット値、縦軸はその 8 ビット値を持つピクセルの個数である。左側の図 5.7 がパラメーター調節前、右側の図 5.8 がパラメーター調節後である。調節前の図 5.7 では、Notch 周辺の 8 ビット値が飽和しているため、横軸 255 のピンがオーバーフローしている。カメラを用いた検査システムの開発の目的は、



図 5.6 検査システムに用いるカメラ (ELP-USB8MP02G-SFV(5-50mm)) の外観。本検査システムでは同じ型番のカメラを 12 個用いる。

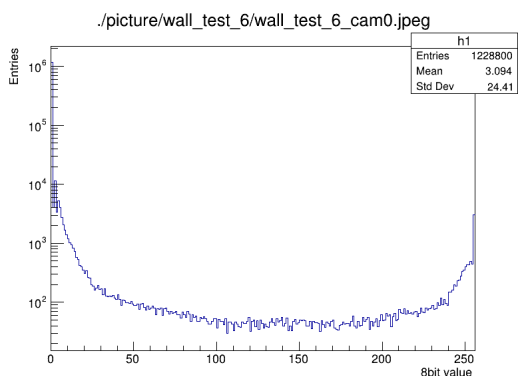


図 5.7 パラメータ調節前の LGP モジュールの画像の青色成分の 8 ビット値を詰めたヒストグラム。この設定では Notch 周辺のピクセルの 8 ビット値が飽和している。

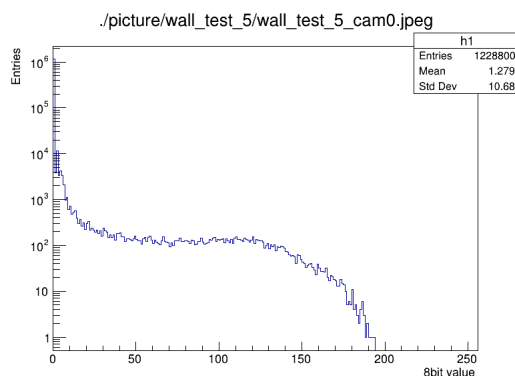


図 5.8 パラメータ調節後の LGP モジュールの画像の青色成分の 8 ビット値を詰めたヒストグラム。この設定では飽和しているピクセルがなく、また幅 50 程のマージンを確保している。

LGP モジュールの Notch で散乱される光量を Notch ごとに測定し、そのばらつきを定量化することである。図 5.7 の設定では、Notch 周辺のピクセルの 8 ビット値が飽和しているために、Notch ごとの光量のばらつきを過小に見積もってしまう可能性がある。それを避けるために、図 5.8 のように 8 ビット値の最大値が 200 程度かつ幅 50 程度のマージンが取れるようパラメーターを調節した。

5.4 光量の定量化手法の開発

本章では、開発したカメラで撮影した LGP モジュールの画像から個々の Notch で散乱された光量の定量化手法について述べる。

5.4.1 画像処理を用いた品質評価の流れ

撮影した LGP モジュールの画像から、LGP モジュールの品質を評価する流れは以下の通りである。

1. 撮影した画像の青色成分の 8 ビット値のみを抽出する。
2. 個々の Notch について、抽出した 8 ビット値を用いて光量を定量化する。
3. 定量化した Notch の光量から、LGP モジュールの光量一様性や平均光量といった品質を評価する。

撮影された LGP モジュールの画像は青色・緑色・赤色の各成分の情報がそれぞれ 0 から 255 の 8 ビットの整数値で格納されている。この 3 成分のうち Notch で散乱された光量の定量化のために青色成分のみを用いるのは、波長変換ファイバーの吸収波長に由来する。図 2.2 に示すように、SuperFGD で用いられる波長変換ファイバーの吸収波長のピークは 425nm であり、これは可視光の青色に相当する。このため、波長変換ファイバーの端面で吸収されて MPPC に読み出される光は、青色領域の波長を持った光が大部分を占める。したがって、画像から Notch で散乱された光量を定量化する際には青色成分の 8 ビット値のみを使用した。以後特に断りがない場合、8 ビット値とは青色成分の 0 から 255 の整数値のことである。

5.4.2 開発した Notch の光量の定量化手法

ここでは、開発した画像の 8 ビット値を用いた Notch の光量の定量化手法について述べる。図 5.9 はカメラを用いて撮影した LGP モジュールの画像から、1 つの Notch の周辺だけを切り取ったときの、その範囲にある全ピクセルの 8 ビット値を詰めたヒストグラムであり、Notch 周辺のピクセルの 8 ビット値は連続的に分布している。この Notch 周辺のピクセルでの 8 ビット値の分布からその Notch の光量を定量化するために、次に示す手法を開発した。

1. Notch の周辺のピクセルを 1 個ずつスキャンして、青色成分の 8 ビット値を取り出す。
2. スキャンした 8 ビット値の最大値に 0.3 をかけた値を閾値とする。

$$(\text{閾値}) = (\text{スキャンした 8 ビット値の最大値}) \times 0.3 \quad (5.1)$$

3. スキャンしたピクセルのうち設定した閾値以上の 8 ビット値を持つピクセルに関して、その 8 ビット値の平均を取る。これを Notch の光量とみなす。
4. 1 から 3 の工程を全ての Notch (Wall LGP モジュールの場合 448 個、Bottom LGP モジュールの場合 768 個) に対して行う。

5.5 開発した検査システムの性能評価

実際の SuperFGD での LGP モジュールの運用では LED をパルスで発光させ、Notch で散乱されて波長変換ファイバーに吸収された光量を MPPC で読み出す。一方、開発した検査システムでは LED を直流で発光させ、Notch で散乱された光をカメラで読み出し、その光量を 5.4 節で述べた手法で定量化する。したがって、開発した検査システムの性能を評価する上において、検査システムで測定した Notch の光量が MPPC と波長変換ファイバーを用いて測定した Notch の光量とどの程度相関があるかが 1 つの評価基準になる。

開発した検査システムの性能を確認するために、5.4.2 節で述べたカメラと画像処理を用いて定量化した

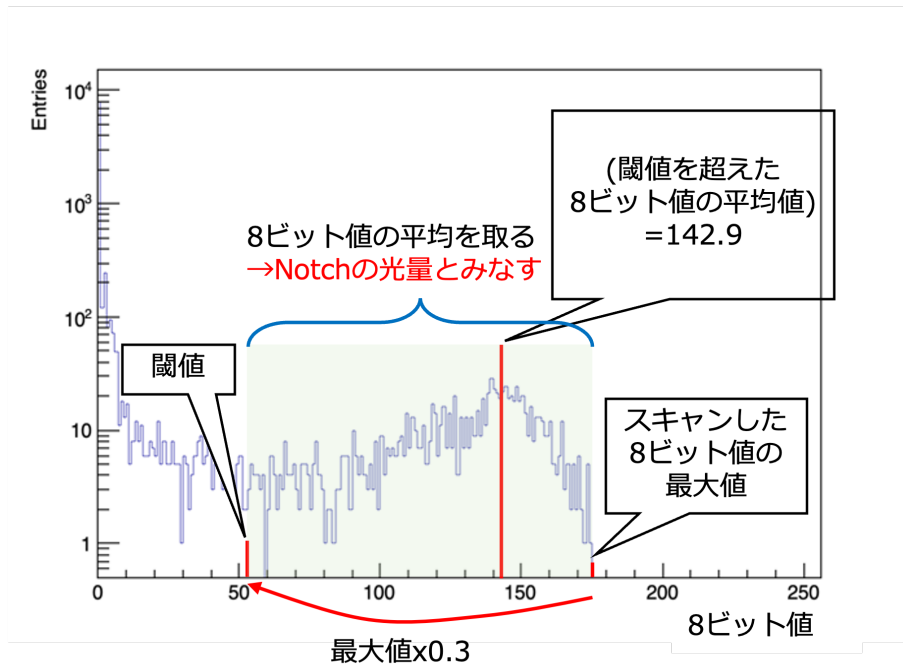


図 5.9 カメラを用いて撮影した LGP モジュールの画像から 1 つの Notch の周辺だけを切り取ったときの、その範囲にある全ピクセルの 8 ビット値を詰めたヒストグラムと、開発した Notch の光量の定量化手法。横軸が 8 ビット値、縦軸はその 8 ビット値を持つピクセルの個数である。

Notch の光量と、4.2.1 節で述べた図 4.2 の MPPC と波長変換ファイバーを用いたセットアップで測定した Notch の光量の比較を行った。図 5.10 は、横軸が波長変換ファイバーと MPPC で測定した Notch の相対光量、縦軸が検査システムを用いて測定した Notch の光量である。今回の比較のための測定では、Wall LGP モジュールのプロトタイプを用い、両者の測定で使用した導光板、拡散板、LED 基板、コリメーターは同一である。MPPC での測定は 44 個の Notch に対して行い、図 5.10 では 44 個の Notch に対してそれぞれの方法での光量をプロットしている。図 5.10 から読み取れることとして、第一に検査システムで測定した光量と MPPC で測定した光量には強い正の相関があり、最も光量大きい Notch と最も光量小さい Notch は両者の測定で一致している。また、最も光量大きい Notch での光量を最も光量小さい Notch の光量を割った値である最大最小光量比は、MPPC での測定が 2.18 に対して、開発した検査システムでの測定では 2.33 であり、両者は約 7% の精度で一致しており、開発した検査システムが、Notch の光量の相対的なばらつきを高い精度で測定できていることがわかる。

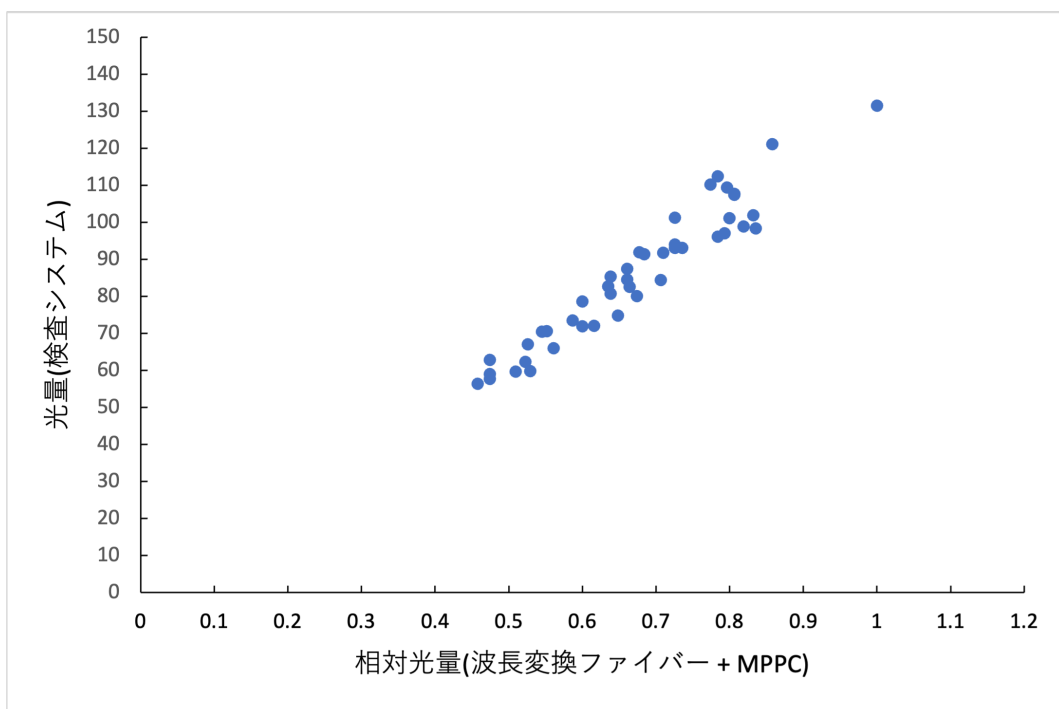


図 5.10 検査システムでの光量と MPPC での光量の比較。横軸が波長変換ファイバーと MPPC で測定した Notch の相対光量、縦軸が検査システムを用いて測定した Notch の光量である。MPPC での測定は 44 個の Notch に対して行い、測定した 44 個の Notch に対してそれぞれの方法での光量をプロットしている。

第6章

J-PARC での LGP モジュールの組み立てと品質検査

2022年の12月12日から23日にかけて量産されたLGPモジュールの組み立て作業と、第5章で開発したカメラを用いた検査システムを用いた組み立て後のLGPモジュールの品質検査をJ-PARCで行った。本章では量産されたLGPモジュールの組み立て作業についての詳細と、組み立て後の品質確認についてその成果を述べる。

6.1 J-PARC での量産された LGP モジュールの組み立て

納品されたLGPモジュールの導光板・拡散板・ケースはコリメーターは後述する導光板と拡散板の側面や取り付け用ネジが通るネジ穴を黒く塗る処理がされておらず、また、LED基板やコリメーターが装着されていないためそれらを取り付ける必要がある。LGPモジュールは2023年の3月に地上にてSuperFGDへ取り付ける予定であり、今回の作業ではWall LGPモジュール、Bottom LGPモジュールを予備分を含めてそれぞれ55モジュールずつ組み立てを行った。LGPモジュールの組み立ての流れは以下の通りである。

1. 導光板と拡散板の側面と、拡散板のネジ穴の内側を油性黒マーカーペンで塗る。
2. 照明を用いて目視でのケースの繋ぎ目の遮光の確認する。
3. LED基板が取り付けられる側のケースを溶着する。
4. 照明を用いてケースの繋ぎ目の遮光を再確認したあと、LED基板・コリメーター・導光板・拡散板の取り付ける。

以下、各工程の詳細について順に述べる。

6.1.1 導光板と拡散板の側面とネジ穴の処理

この工程では、導光板と拡散板の側面と拡散板に空けられているLGPモジュールをSuperFGDに取り付けるためのネジ穴の内側を黒色の油性マーカーペンで塗る。この作業を行うのは、ネジ穴や導光板の端面でのLED光の反射によって生じるネジ穴や導光板の端面付近のNotchでの光量の増加を抑え、光量一様性を向上させるためである。

油性黒マーカーペンで塗る作業を行うのは以下の箇所である。

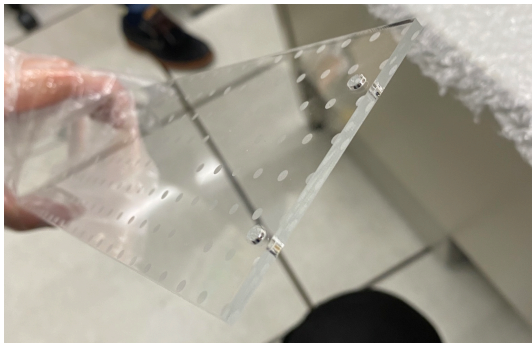


図 6.1 LED の反対側の側面を油性黒マーカーペンで塗る前の導光板

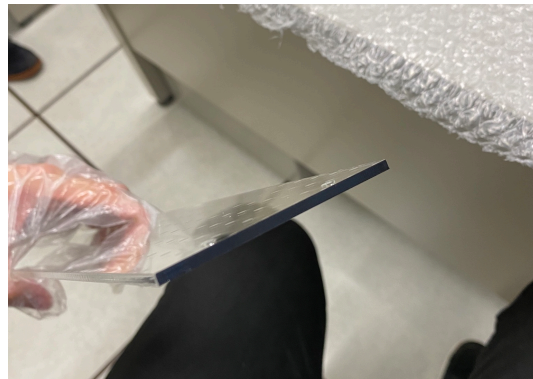


図 6.2 LED の反対側の側面を油性黒マーカーペンで塗った後の導光板。導光板はネジ穴を塗らず、かつ側面 4 面のうち黒く塗るのは LED と反対側に位置する 1 面だけである。

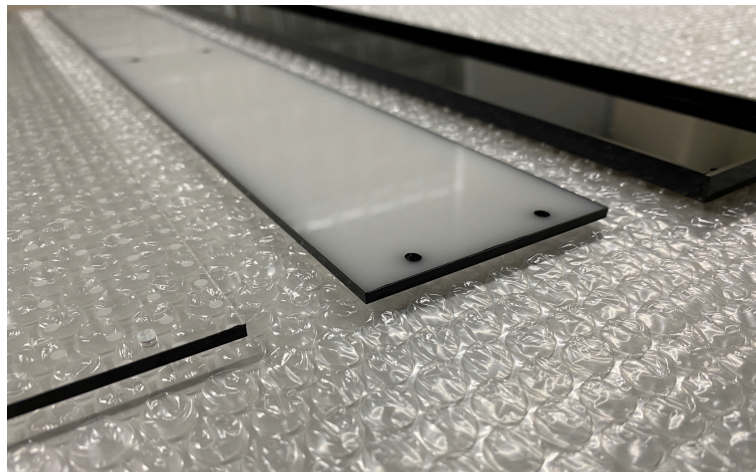


図 6.3 側面とネジ穴を油性黒マーカーペンで塗ったあとの拡散板の写真。拡散板は導光板と異なり、全ての側面とネジ穴を塗る。

- 導光板の側面の LED と反対側の 1 面
- 拡散板の側面 4 面と全てのネジ穴の内側 (Wall LGP モジュールでは 4 個、Bottom LGP モジュールでは 8 個)

6.1.2 ライトを用いたケースの繋ぎ目の遮光の確認

LGP モジュールのケースは 2mm 厚の黒アクリル板をレーザー加工器でカットして、部品同士をアクリル用溶着材で溶着することで製作される。この溶着作業はケースを量産する際に量産を委託した会社にて行ったが、溶着が不十分なために部品同士の接合部分に隙間が生じ、光漏れする懸念がある。とりわけ、Wall LGP モジュールは図 3.2 に示すように MPPC 設置領域に接する形で取り付けられるため、ケースの接合部から漏れた光が MPPC に入る懸念がある。この工程では、照明でケース同士の繋ぎ目を照らしながら隙間からの光漏れがないかを目視で確認を行った。

light leakage



図 6.4 ライトを用いたケースの遮光の確認の様子。ケースの接合部に隙間がある場合、目視で確認できるほどの光漏れが確認できる。



図 6.5 LED 基盤が取り付けられる側のケースの写真。

6.1.3 LED 取り付け基盤が取り付けられる側のケースの溶着

ここで述べる LED 基盤が取り付けられる側のケースとは、図 6.5 に示すもので、LED 基盤とコリメーター取り付け用のネジが通るネジ穴と、LED に電源を供給する同軸ケーブルが通るために穴が空けられている。

この工程では、LED 基盤が取り付けられる側のケースをアクリル用溶着材を用いて溶着する。溶着にあたっては、取り付けられる側のケースをセロハンテープで仮止めしてから溶着材を用いて溶着した。また、照明を用いた遮光確認で光漏れを確認した箇所についても、この工程で溶着材を光漏れがあった箇所に流し込むことで修正を行った。

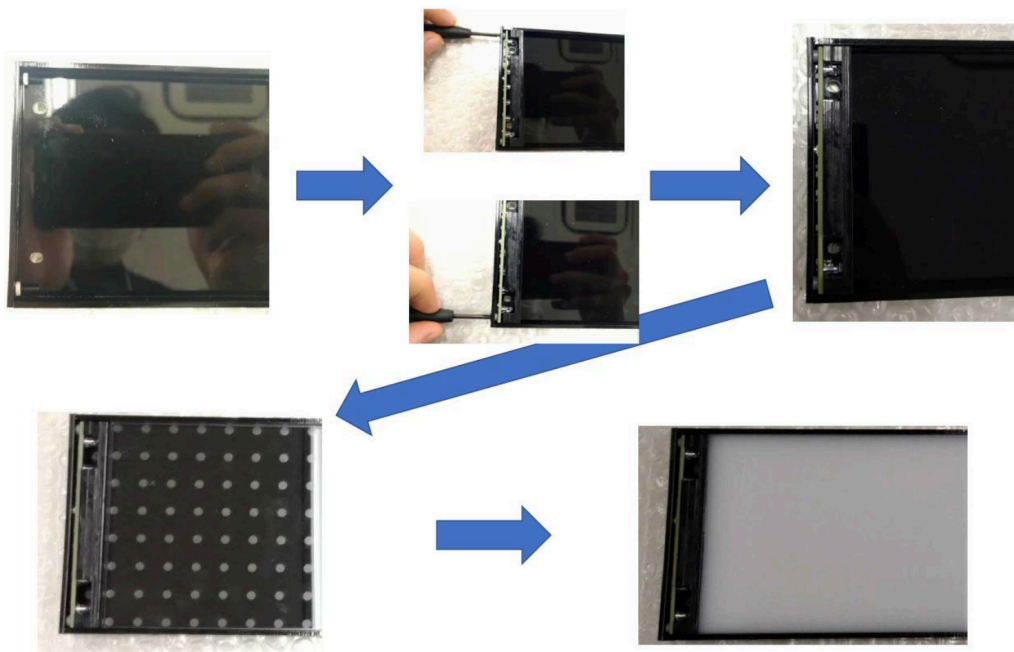


図 6.6 LED 基盤・コリメーター・導光板・拡散板の取り付けの流れ。上段真ん中がコリメーターと LED 基盤を取り付けている様子である。取り付け後は導光板、拡散板の順番で両者をケースにはめる。

6.1.4 LED 基盤・コリメーター・導光板・拡散板の取り付け

導光板と拡散板に塗った油性黒マーカーペンとケースに塗った溶着材が乾燥を待って、再度ライトを用いたケースの接続部の光漏れを確認したあとは、LED 基盤・コリメーター・導光板・拡散板をケースに取り付ける。この工程では、まず最初に LED 基盤とコリメーターを M2 の樹脂製ネジ 2 本を用いて固定する。その後は導光板、拡散板の順番でこれらをケースに収める。



図 6.7 組み立て後の量産品の Bottom LGP モジュールの写真。

6.2 組み立て後の LGP モジュールの品質検査

LGP モジュールの組み立て終了後、第 5 章で開発した検査システムを用いて組み立てた LGP モジュールの健全性と品質の確認を行った。本節では、検査における LGP モジュールの品質の評価基準と検査結果について述べる。

6.2.1 LGP モジュールの品質の評価基準

Wall LGP モジュールと Bottom LGP モジュールはそれぞれ 55 モジュール量産され、そのうち実際に SuperFGD にインストールされるのは Wall LGP モジュールで 47 モジュール、Bottom LGP モジュールで 46 モジュールである。したがって、検査によって相対的に健全性や品質に問題のないことを確認したモジュールを SuperFGD にインストールし、残りのモジュールは、SuperFGD の建設時にインストールする LGP モジュールを大破させてしまうといった万が一のトラブルに備えて予備モジュールとして保管する。

組み立てた 110 モジュールの品質の良し悪しを判断する上で、最も優先的にインストールの候補から除外すべきモジュールは最小光量が相対的に低いモジュールである。これは MPPC の増倍率の較正に由来する。SuperFGD において MPPC の増倍率の較正のためには、読み出しの閾値を越える光子数を MPPC に入射する必要があるが、光量が極端に低い Notch を持つ LGP モジュールでは、一部の MPPC で読み出しの閾値を越える光子数が分配されず、増倍率の較正ができないことが懸念される。したがって、最小光量が相対的に低

いモジュールはまず第一にインストールの候補から除外する必要がある。また、平均光量が相対的に低いモジュールも優先的にインストールの候補から除外すべきモジュールである。これは、平均光量が低いLGPモジュールでは多数のMPPCで読み出しの閾値を越える光子数が分配されない可能性があるからである。

6.2.2 検査システムを用いたLGPモジュールの健全性と品質の検査結果

図6.8に全WallLGPモジュールの検査結果を、図6.9に全BottomLGPモジュールの検査結果を示す。図6.8と図6.9の4つのプロットの横軸はモジュールのID番号であり、これは組み立て後のモジュールと検査結果を紐づけるためにWallLGPモジュールとBottomLGPモジュールでそれぞれ独立に割り振った番号である。WallLGPモジュールは1から57、BottomLGPモジュールは1から59までそれぞれ振られている。ただし、WallLGPモジュールのモジュールID23と39、BottomLGPモジュールのモジュールID25、29、35、56は組み立てなかったモジュールであり、空き番号である。

検査で問題が発覚したWallLGPモジュールはモジュールID4、6、43の3モジュールである。ID4と6のモジュールは最小光量がそれぞれその他のモジュールと比較して相対的に低く、またID43のモジュールに関してはNotchがプリントされている位置が全体的に0.5mm程度ずれていることを目視で確認した。

続いて、検査で問題が発覚したBottomLGPモジュールはモジュールID9、23、30、54の4モジュールである。まず、ID9と30のモジュールは最小光量がそれぞれその他のモジュールと比較して相対的に低く、ID30のモジュールではケースの大きさに対して導光板の寸法が大きいため導光板がケースに上手く収まらず、ケースから浮いていることを確認した。また、ID54のモジュールの平均光量は37.8と最も低く、ID30のモジュールと同様、ケースの大きさに対して導光板の寸法が大きいため導光板がケースに上手く収まらず、ケースから浮いていることを確認した。ID23のモジュールに関しては、最小光量と平均光量について問題が見られないが、SuperFGDへの取り付け用ネジ穴の側の4つのNotchで光量が極端に増えており、それが原因で最大最小光量比が悪化していることを確認した。これは組み立て時に拡散板のネジ穴を黒油性マーカーペンで塗るのをし忘れていた可能性があり、今後確認が必要である。

上記の7つのモジュール以外の107モジュールに関しては、健全性や品質に問題は確認できなかった。検査を合格した52モジュールのWallLGPモジュールと、51モジュールのBottomLGPモジュールのうち、47モジュールのWallLGPモジュールと46モジュールのBottomLGPモジュールを実際に実際にSuperFGDにインストールする。残りはSuperFGD建設時の万が一のトラブルに備えて、予備モジュールとして保管する予定である。

Wall LGPモジュール

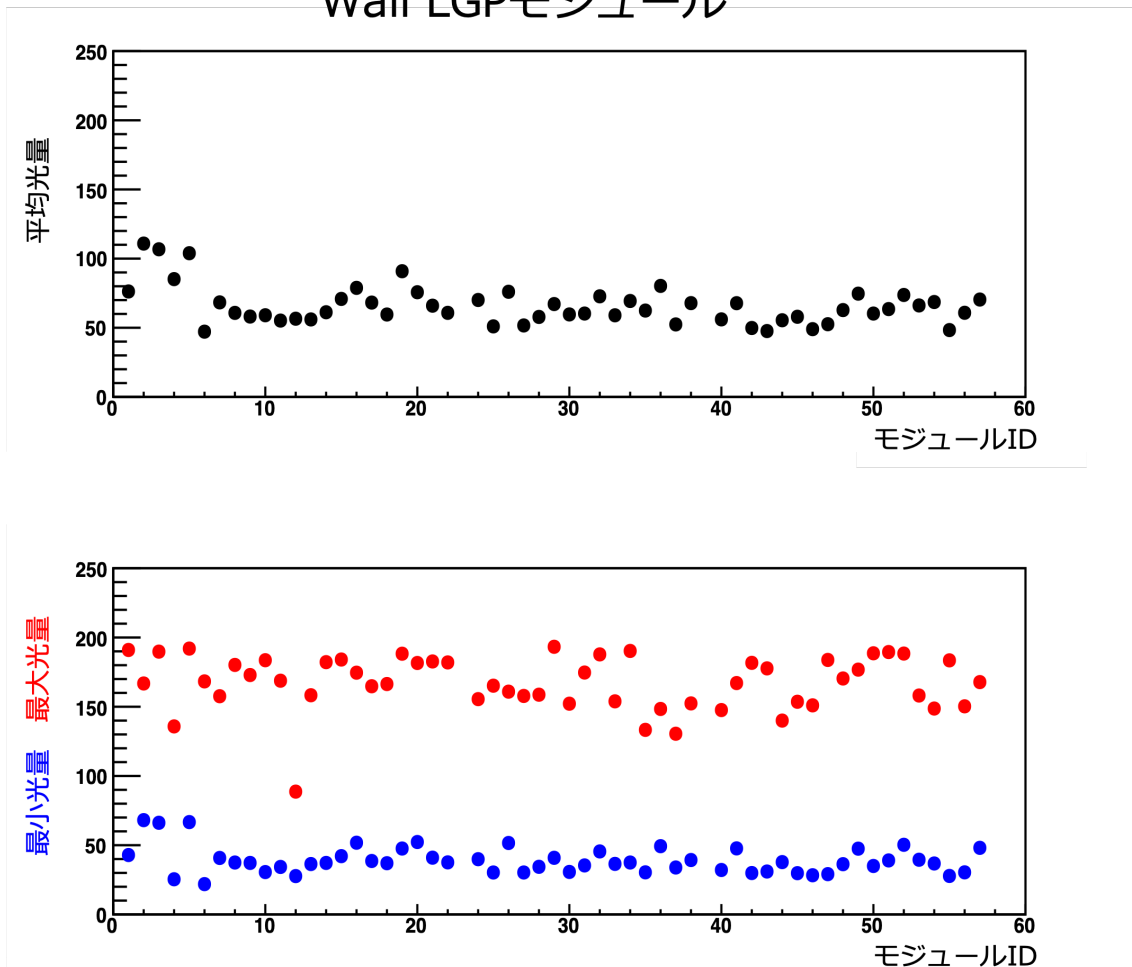


図 6.8 Wall LGP モジュールの全モジュールの検査結果。上からモジュールの平均光量、最大光量と最小光量をモジュール ID ごとにプロットしたものである。モジュール ID23 と 39 のモジュールは組み立ていないモジュールであり、空き番号である。

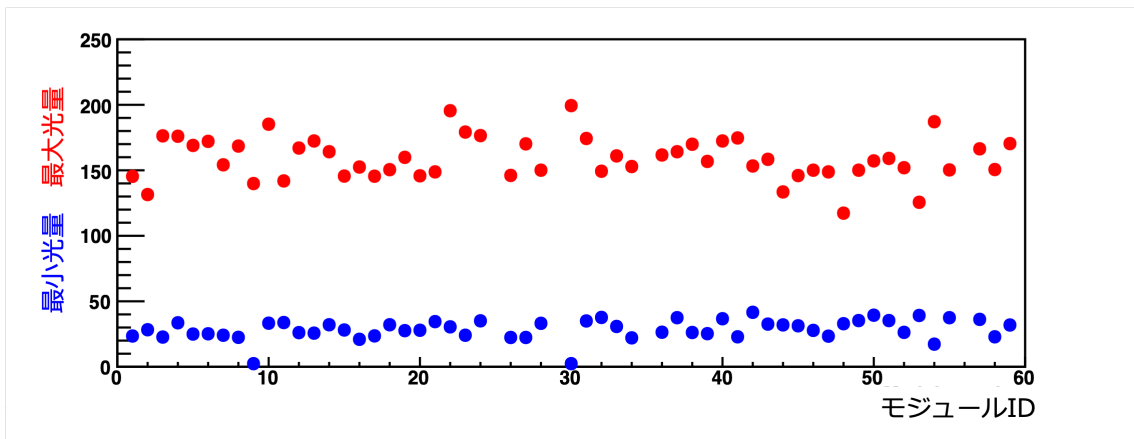
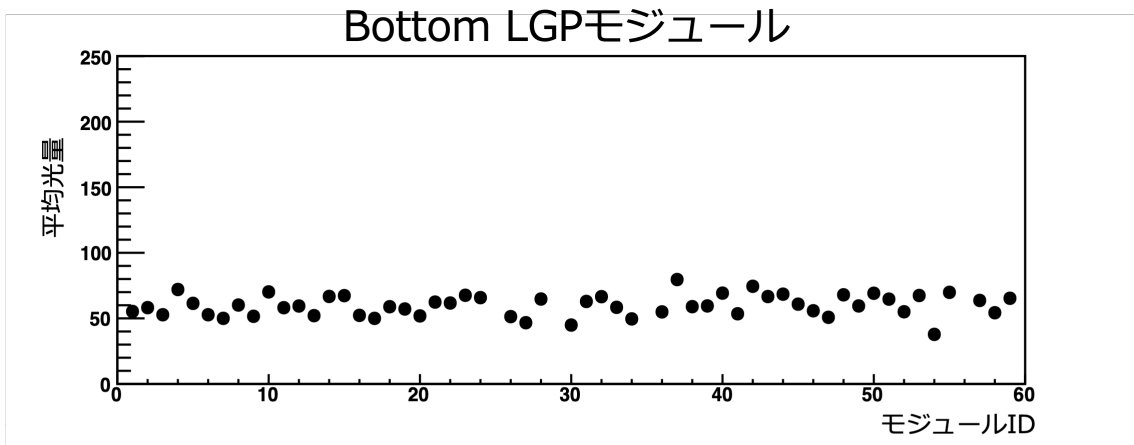


図 6.9 Bottom LGP モジュールの全モジュールの検査結果。上からモジュールの平均光量、最大光量と最小光量をモジュール ID ごとにプロットしたものである。モジュール ID25、29、35、56 のモジュールは組み立ていないモジュールであり、空き番号である。

第7章

結論と今後の展望

T2K 実験は茨城県東海村に位置する J-PARC の大強度陽子加速器を用いて生成したニュートリノを、生成標的から 280m 下流に位置する前置検出器群と、295km 離れた位置に設置されているスーパーカミオカンデ (SK) で観測する長基線加速器ニュートリノ振動実験である。T2K 実験の主な目的は、ニュートリノ振動パラメータの高い精度での決定と未発見のレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの発見であり、それらの更なる精度の向上には、統計量の増加と系統誤差の削減が課題である。

現在、T2K 実験では CP 対称性の破れを 3σ の信頼度で発見することを目標とした T2K-II 計画が進行している。T2K-II では、統計量の増加のために加速器のアップグレードを行い、ニュートリノビームの増強を図る他、系統誤差 1 つであるニュートリノと物質との相互作用の不定性の削減を目指し、前置検出器 ND280 のアップグレードを行う。

この ND280 のアップグレードでは新たに SuperFGD という名称のニュートリノの標的兼飛跡検出器が新たに導入され、2023 年の稼働を目指して現在建設が進んでいる。この SuperFGD は約 200 万個のシンチレータキューブと、約 6 万本の波長変換ファイバーと、約 6 万個の光検出器 MPPC からなる検出器で、SuperFGD の導入により、現在の ND280 の課題であるニュートリノビーム軸から大角度で散乱する荷電粒子と、低運動量の荷電粒子の検出効率の改善が期待されている。

東京都立大学では KEK と JINR と共同で、SuperFGD のための LED キャリブレーションシステムの開発を行っている。LED キャリブレーションシステムは、任意のタイミングで LED を光らせ、波長変換ファイバーを通して全ての MPPC に光を分配する装置で、SuperFGD の建設時の波長変換ファイバーと MPPC を含めた検出器の健全性の確認と、長期運用における MPPC の増倍率の較正を目的に導入される。LED キャリブレーションシステムは、SuperFGD の内部に取り付けられ LED 光を MPPC に分配する LGP モジュールと、LED を発光させるためにパルス信号を生成する LED の 2 つの装置からなる。

本研究では、実際の SuperFGD の MPPC の増倍率較正のために、LED キャリブレーションシステムが MPPC に分配可能な光量を可能な限り増加させることを目標に LGP モジュールの改良を行った。LED 基板に実装されている保護抵抗を $300\ \Omega$ から $10\ \Omega$ に変更し、コリメーターの形状を変更することで、LGP モジュールが MPPC に分配可能な光量を増加させた。また、量産され組み立て後の LGP モジュールの健全性や、光量一様性や平均光量といった性能を迅速かつ定量的に検査するためのカメラを用いた品質検査システムを開発した。この検査システムは 12 台のカメラを用いて LGP モジュールを撮影し、画像処理を用いて撮影した画像から Notch で散乱された光量を定量的に見積もることが可能である。

2022 年の 12 月に J-PARC にて、量産された LGP モジュールの組み立て作業と開発した検査システムを用いて組み立て後の LGP モジュールの健全性と品質確認を行った。組み立て作業では、Wall LGP モジュール

ルと Bottom LGP モジュールをそれぞれ 55 モジュール、計 110 モジュールの組み立てを行った。開発した検査システムを用いた品質確認では、Wall LGP モジュールで 52 モジュール、Bottom LGP モジュールで 51 モジュールが健全性や品質に問題がないことを確認し、予備も含めて十分な数のモジュールを確保することができた。

今後は、2023 年の 3 月に地上にて LGP モジュールの SuperFGD へのインストールを行い、SuperFGD の建設終了後は LED キャリブレーションシステムを用いた検出器の健全性の確認を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導とご協力をいただきました。

東京都立大学の高エネルギー物理実験研究室の先生方には、研究に際して様々なことをご教授いただきました。指導教員である角野秀一先生、汲田哲郎先生には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頂きました。何不自由することなく研究に専念できたのも、先生方が快適な研究環境を整えてくださったからです。厚く御礼を申し上げます。

研究室の先輩である在原さん、去年ご卒業された朴さん、渡辺さん、大島さん、安藤さんにも大変お世話になりました。とりわけ、在原さんはLED キャリブレーションシステムの開発者であり、研究を進めるにあたり数えきれないほどのご指導とご助言を頂きました。前向きに研究できたのも在原さんのおかげです。深く感謝申し上げます。同期の岩城さん、本橋さんにも感謝申し上げます。2人とは互いに異なる実験グループでしたが、楽しく研究室生活を送れたのは2人のおかげです。特任研究員の Thomas さんにも大変お世話になりました。Thomas さんのこれからの益々のご活躍とご家族の皆様のご健康をお祈り申し上げます。後輩の古井さん、北村さん、鮫島さん、加藤さん、黒川さん、望月さん、去年ご卒業された澤さん、竹淵さんにも大変お世話になりました。特に、同じ T2K 実験に所属している古井くんには様々な面で助けて頂きました。心より御礼申し上げます。

T2K 実験グループの方々からは研究に際して多くのご指導とご協力を頂きました。KEK の松原綱之先生、京都大学の木河達也先生、東京大学の横山将志先生、中桐洸太先生、東北大学の市川温子先生には大変お世話になりました。特に、松原先生には研究に関して親身に相談に乗ってくださり、J-PARC での活動に際しても沢山のサポートを頂きました。厚く御礼を申し上げます。T2K 実験の同期である東京大学の児玉さん、総研大の西森さん、楽しくお話して頂きありがとうございました。また、東京大学の小林さん、沖永さんは J-PARC での LGP モジュールの組み立てに際して作業に協力してくださりました。深く感謝申し上げます。

最後に、これまで支えてくれた家族に心からの感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] <https://higgstan.com/standard-model/>
- [2] <https://t2k-experiment.org/>
- [3] <https://j-parc.jp/c/for-researchers/accelerators.html>
- [4] <https://j-parc.jp>
- [5] K. Abe et al. (T2K Collaboration). The t2k experiment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 659, No. 1, pp. 106 - 135, 2011.
- [6] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Phys. Rev. D, Vol. 88, p. 032002, Aug 2013.
- [7] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Measurements of the t2k neutrino beam properties using the ingrid on-axis near detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 694, pp. 211 - 223, 2012.
- [8] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the t2k experiment with 6.6×10^{20} protons on target. Phys. Rev. D, Vol. 91, p. 072010, Apr 2015.
- [9] Y. Itow et al. The jhf-kamioka neutrino project, 2001.
- [10] Patrick Dunne. Latest neutrino oscillation results from t2k, Jul 2020.
- [11] K. Abe, et al. J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report. 8 2019.
- [12] K. Abe et al. T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report, 2019.
- [13] 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.
- [14] The T2K ND280 Upgrade Working Group, NP07: ND280 Upgrade project - SPSC Report, March 30, 2022
- [15] <https://www.kuraray.co.jp/>
- [16] 在原拓司, 東京都立大学, 修士論文
- [17] 日亜化学工業, NSPB300B 標準仕様書
- [18] 日亜化学工業, NSPG300D 標準仕様書
- [19] S. Fedotov, New 3D fine-grained scintillation detector for the T2K experiment