

T2K 長基線ニュートリノ振動実験
ニュートリノビームモニター INGRID の
製作と性能評価

大谷 将士

2009 年 1 月 29 日

概要

本論文では、T2K 長基線ニュートリノ振動実験において重要な役割を占めるニュートリノビームモニター INGRID の実機製作ならびに実機性能評価試験を中心に報告する。

2009 年より開始される T2K(from Tokai to Kamioka) 実験は、ミューオンニュートリノ消失モードにおける振動パラメーターの精密測定および未発見の電子ニュートリノ出現モードの探索を主な目的とする長基線ニュートリノ振動実験である。この実験の最も大きな特徴の一つは、ニュートリノビームの軸を SK の方向から 2.5° ずらす「off-axis 法」を用いて、SK で観測されるニュートリノのエネルギーを振動確率が最大になるように合わせることである。しかし、ニュートリノビームの方向と SK に向かうニュートリノのエネルギーの間には強い相関があるため、ニュートリノビームの方向を 1mrad より良い精度でモニターすることが必要不可欠となる。この目的のために、ビーム軸上にニュートリノビームモニター「INGRID」を設置する。

INGRID は、鉄とシンチレーター層のサンドウィッチ構造で構成されるモジュール 16 個からなり、各モジュールをグリッド状に配置する。シンチレーター層はビーム軸に対して水平・垂直方向にセグメント化されており、鉄標的で荷電カレント反応によって生成される荷電粒子をトラッキングしてニュートリノを検出する。そして、各モジュールのニュートリノイベント数分布からビーム中心を再構成し、ビーム方向をモニターする。

INGRID の読み出しチャンネルは、シンチレーター・波長変換ファイバー・光検出器 MPPC からなり、チャンネル総数は 9592 個である。ビームのズレに対して 1mrad 以下の感度を持つためには、全チャンネルの検出効率を 0.5% 以内でモニターしなければならない。そこで、各チャンネルの光量が大きく、検出効率の変動が十分小さいことを保証しなければならない。

まず、高エネルギー加速器研究機構富士実験室 3GeV 電子ビームラインを用いて、実機で用いられるシンチレーターならびにシンチレーター層プロトタイプの実機照射試験を行った。それによって、実機用シンチレーターの検出効率が 99.9% 以上、個体差によるばらつきが 0.1% 以下で全てのシンチレーターが高い検出効率を持つことを確認した。また、シンチレーターの隙間による不感率を測定し、不感率は 2% 以下で小さいことを確認した。

次に、2008 年 8 月から 12 月にかけて、J-PARC LINAC 棟で、INGRID シンチレーター層の製作ならびに宇宙線による性能評価試験を行った。その結果、全てのチャンネルの光量が 8.0p.e. 以上で十分高いことを確認した。

最終的にこれらの試験結果を用いて、検出効率モニター期間中の温度変化が ${}^{+3.0}_{-5.0}$ C の時、検出効率の変動は 0.2% 以下であることを示した。

目次

第 1 章	ニュートリノ振動と T2K 実験	4
1.1	ニュートリノとニュートリノ振動	4
1.2	ニュートリノ振動実験の現状	6
1.3	T2K 実験	7
1.4	実験方法と実験施設ならびに検出器	7
1.5	前置検出器群	9
第 2 章	T2K 実験ニュートリノビームモニター INGRID	11
2.1	INGRID の概要と目的	11
2.2	INGRID の基本設計	12
2.3	INGRID のアクティブコンポーネント	15
第 3 章	電子ビームを用いた INGRID アクティブコンポーネント性能の評価	28
3.1	試験の目的	28
3.2	セットアップ	28
3.3	ビームプロファイルの測定	33
3.4	光量の測定	36
3.5	シンチレーターの隙間評価	37
第 4 章	実機トラッキングプレーンの製作	44
4.1	シンチレーターの大きさや重さの測定	45
4.2	ファイバー光量のチェック	47
4.3	シンチレーター層の製作	48
第 5 章	実機トラッキングプレーンの性能評価	51
5.1	試験の目的	51
5.2	セットアップ	51
5.3	MPPC ノイズシグナルの確認	52
5.4	宇宙線データの収集	53
5.5	宇宙線光量の測定	55

5.6	検出効率の測定	59
第 6 章	検出効率のモニター計画	67
6.1	概要	67
6.2	京都テストベンチ宇宙線試験における光量の温度依存性	67
6.3	モニター計画	70
結論		73
謝辞		74
付録 A	アクティブコンポーネントの製作過程	75
A.1	INGRID 用ファイバーの製作	75
A.2	INGRID トラッキングプレートの製作	76
付録 B	京都大学テストベンチでの予備実験	80
B.1	実験の目的	80
B.2	セットアップ	80
B.3	試験結果	81
参考文献		82

第 1 章

ニュートリノ振動と T2K 実験

この章では、ニュートリノ振動と T2K 実験の概要を説明する。

1.1 ニュートリノとニュートリノ振動

ニュートリノは電荷を持たないレプトンで、重力を除く 3 つの力のうち弱い力しか作用しない。ニュートリノには荷電レプトンに対応した三つの種類、つまり、 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ がある。

ニュートリノは唯一質量の分かっていない(表 1.1^{*1}) 素粒子で、現在の素粒子標準模型では質量は 0 となっている。しかし、ニュートリノ振動によってニュートリノは有限の質量を持つことが明らかになった。

表 1.1 現在までに分かっている各ニュートリノの質量上限値。

ニュートリノ	質量上限値	実験方法
ν_e	$< 2.3\text{eV}(95\% \text{C.L.})$	${}^3\text{He}$ β 崩壊 [1]
$\nu_e(\text{Majorana})$	$< 0.35\text{eV}(90\% \text{C.L.})$	${}^{76}\text{Ge}$ 二重 β 崩壊 [2]
ν_μ	$< 0.17\text{MeV}(90\% \text{C.L.})$	π 崩壊 [3]
ν_τ	$< 18.2\text{MeV}(95\% \text{C.L.})$	τ 崩壊 [4]

簡単のため、ニュートリノが 2 世代の場合を考える。ニュートリノが質量を持っている場合、フレーバーの固有状態 $|\nu_{\alpha\beta}\rangle$ と質量固有状態 $|\nu_i\rangle (i = 1, 2)$ は 2×2 のユニタリー行列によって以下のように結び付けられる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

^{*1} $\nu_e(\text{Majorana})$ はニュートリノが Majorana 粒子と仮定した時の質量上限値。Majorana 粒子とは粒子と反粒子が同一の中性フェルミオンのこと。

そこで、フレーバー固有状態の時間発展は次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle(t) \\ |\nu_\beta\rangle(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1(t)\rangle \\ |\nu_2(t)\rangle \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-ip_1 \cdot x} & 0 \\ 0 & e^{-ip_2 \cdot x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle(t=0) \\ |\nu_\beta\rangle(t=0) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.2)$$

ここで、 $e^{-ip \cdot x}$ はローレンツ不変な時間発展演算子である。今、時刻 $t=0$ で運動量 p 、フレーバー α のニュートリノが生成されたとすると、距離 L 進んだときの時間発展演算子は $e^{-ip \cdot x} = e^{-i\frac{L}{2p}m^2}$ となる。ここで、 $E \sim p + \frac{m^2}{2p}$ を用いた。よって、距離 L 進んだときにフレーバー α である確率 $P_{\alpha\alpha}$ とフレーバー β である確率 $P_{\alpha\beta}$ はそれぞれ、

$$\begin{aligned} P_{\alpha\alpha} &= |\langle \nu_\alpha | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{L}{4E} \Delta m^2\right) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \Delta m^2 [\text{eV}^2]\right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} P_{\alpha\beta} &= 1 - P_{\alpha\alpha} \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \Delta m^2 [\text{eV}^2]\right) \end{aligned} \quad (1.4)$$

となる^{*2}。それぞれの振動確率は図 1.1 のようになり、振幅が $\sin^2 2\theta$ 、波長が $\pi E / (1.27 \Delta m^2)$ で振動していることが分かる。そこで、 L/E を実験のパラメーターとして、振動前後のニュートリノの数を測定し、 Δm^2 と $\sin^2 2\theta$ を測定することになる。

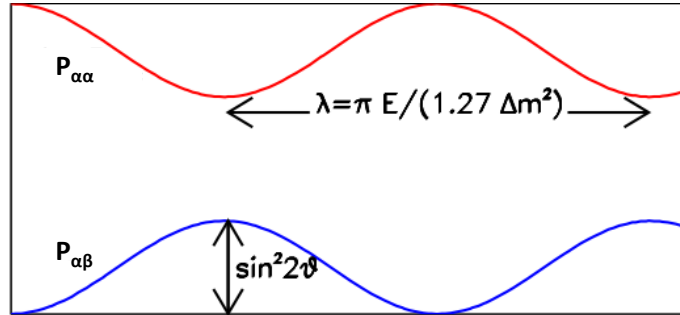


図 1.1 ニュートリノ振動確率。振幅 $\sin^2 2\theta$ 、波長 $\pi E / (1.27 \Delta m^2)$ で振動する。

3世代の場合、 3×3 ユニタリー行列 $U_{\alpha i}$ を用いて、確率 $P_{\alpha\beta}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{\alpha\beta} &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i \neq j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{L}{4E} \Delta m_{ij}^2 + 2 \sum_{i \neq j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin \frac{L}{2E} \Delta m_{ij}^2 \quad (1.5) \end{aligned}$$

^{*2}

$$\frac{L}{4E} \Delta m^2 = \frac{L[\text{m}]}{4E[\text{eV}]} \Delta m^2 [\text{eV}/c]^2 \cdot \frac{c^4}{\hbar c} = \frac{1000}{197 \cdot 4} \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \Delta (mc)^2 [\text{eV}]^2 = 1.27 \frac{L[\text{km}]}{4E[\text{GeV}]} \Delta (mc)^2 [\text{eV}]^2$$

$$\begin{aligned}
U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{1.6}$$

ここで、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ 、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ である。ニュートリノ振動は三つの混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} と二つの独立な質量自乗差 Δm^2 *4 ならびに 1 つの位相 δ によって記述される。*5。

1.2 ニュートリノ振動実験の現状

これまでの実験から分かっているニュートリノ振動のパラメーターについて簡単にまとめる。

- Δm_{23}^2 と θ_{23}
スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測 ($L/E = 1 \sim 10^5$ 、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) で発見され、K2K 実験において確立された。これらの実験から、 $1.5 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 $\sin^2 \theta_{23} > 0.92$ である [5]。
- Δm_{12}^2 と θ_{12}
スーパーカミオカンデ、SNO 等での太陽ニュートリノの観測 ($\nu_e \rightarrow \nu_x$) ならびに KamLAND における原子炉反ニュートリノの観測 ($L/E \sim 10^5$ 、 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$) の結果から、 $\Delta m_{12}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 、 $\tan^2 \theta_{12} \sim 0.5$ である [6]。
- θ_{13} と δ
CHOOZ 実験による原子炉ニュートリノの観測 ($L/E \sim 10^3$ 、 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$) から、 $\sin^2 \theta_{13} < 0.1$ という上限のみが分かっている [7]。 δ についての測定は未だなされていないが、 δ を測定するためには式 1.6 より θ_{13} が有意な値をもたなければならない。

θ_{13} が測定可能なモード

$L/E \sim \Delta m_{23}^2$ に調節すると、 $\Delta m_{23}^2 \sim \Delta m_{13}^2 \gg \Delta m_{12}^2$ より、 Δm_{12}^2 の影響は無視できる。そこで、式 1.5 から $P_{\mu e}$ を計算すると、

$$P_{\mu e} = 4s_{13}^2 c_{13}^2 c_{23}^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}\right) \tag{1.7}$$

*4 $\Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2 + \Delta m_{31}^2 = 0$

*5 δ は CP 対称性を破る。C は Charge、P は Parity を表す。CP 対称性は粒子・反粒子対称性を意味し、物質優勢の宇宙作りに重要な役割を果たす。

ニュートリノがマヨラナ粒子だった場合、式 1.6 の最後に $\begin{pmatrix} e^{-\alpha} & 1 & 1 \\ 1 & e^{-\beta} & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ が追加される。ここで、 α 、 β も CP 対称性を破るが、ニュートリノ振動で観測可能なものは δ だけである。

となり、 θ_{13} を測定することが可能である。これが加速器ニュートリノ振動実験の目指すモード ($\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$) である。

1.3 T2K 実験

東海-神岡間 (Tokai to Kamioka) 長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) は、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC でミュオンニュートリノビームを生成し、陽子ターゲットから 280m 離れた前置検出器と 295km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデでニュートリノを検出してニュートリノ振動の精密測定を行う実験 (図 1.2) であり、2009 年 4 月に開始する。

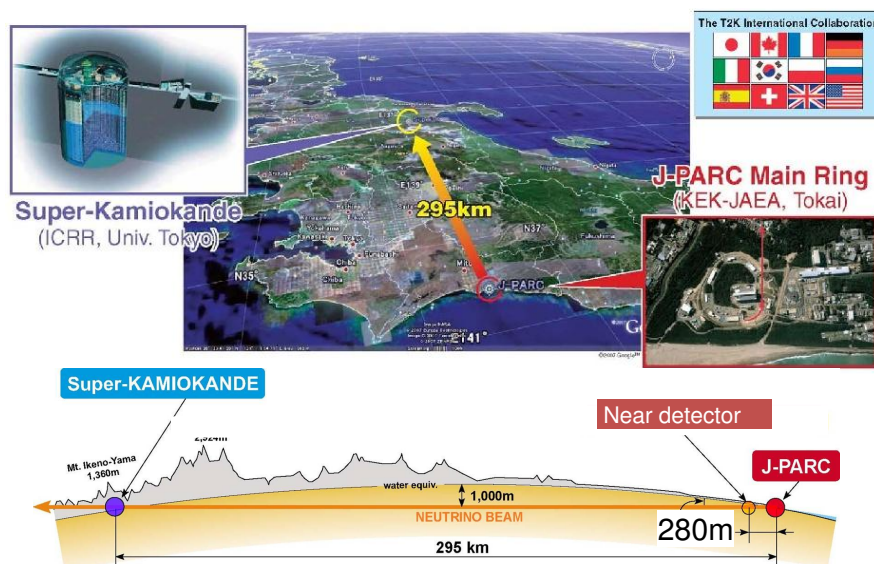


図 1.2 T2K 実験の概念図。

T2K の主な目的は次の二つである。

- 未発見の振動モードである $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ を発見し、振動角 θ_{13} を決定する。
- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_x$ の精密測定によって、振動パラメータ Δm_{12}^2 ならびに θ_{12} をより正確に決定する。

1.4 実験方法と実験施設ならびに検出器

1.4.1 J-PARC ニュートリノビームライン

J-PARC は線形加速器 (LINAC)、3GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、50GeV 陽子シンクロトロン (MR) の三つから構成される。生成される陽子ビームパラメーターを表 1.2 にまとめる。

MR で加速された陽子をグラフィット標的に照射して生成した大量の π 中間子を、三つの電磁ホーンによって収束する。その後、94m の崩壊領域で π 中間子が崩壊し、ミューオンニュートリノが生成される；



ビームに含まれる陽子、崩壊しなかった π 中間子および低エネルギーのミューオンは陽子標的から 110m 下流のビームダンプによって吸収される。

表 1.2 陽子ビームパラメーターのデザイン値

ビームエネルギー	50GeV
ビーム強度	0.75MW
スピル繰り返し	0.285Hz
スピル幅	5.6usec
スピル中の陽子数	3.3×10^{14}
バンチ数	8
バンチ幅	58nsec
バンチ間隔	約 700nsec

1.4.2 off-axis 法

式 1.8 の崩壊によるニュートリノのエネルギー E_ν は、親 π^+ 方向と成す角を θ 、親 π^+ の質量ならびにエネルギー、運動量を m_π 、 E_π 、 p_π として以下の様にあらわせる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\nu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (1.9)$$

図 1.3 に横軸を p_π 、縦軸を E_ν にして θ を変化させた時のグラフを示す。0 度の方向に放出される (on-axis) ニュートリノのエネルギーは親 π^+ の運動量に比例して増加するのに対し、親 π^+ の方向から僅かにずれた方向に放出される (off-axis) ニュートリノのエネルギーは親 π^+ の運動量に依らず一定になることが見て取れる。また、親 π^+ の方向からのずれ角度を変えることにより、ニュートリノエネルギーを変えることができる。

そこで、T2K 実験ではパイオンビーム軸を後置検出器スーパーカミオカンデに向かう方向から 2.5 度ずらすことによってニュートリノエネルギースペクトルを、295km 地点で振動確率が最大になるようにする (図 1.4、図 1.5)。これが off-axis 法で、実用化されるのは T2K 実験が世界初となる。

off-axis 法では、ニュートリノビーム方向とニュートリノエネルギースペクトルが強い相関を持つため、ビーム方向を精度よく監視することが必要不可欠となる。

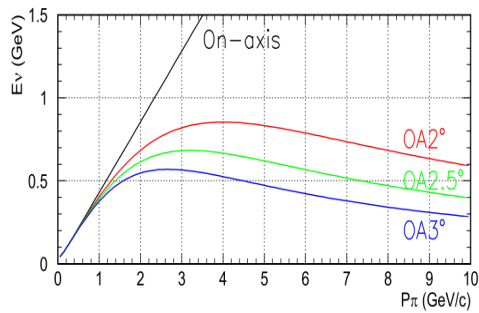


図 1.3 親 π 運動量とニュートリノエネルギー。親 π との成す角度が 0 度の時は π 運動量に比例してニュートリノエネルギーは増加するが、角度が僅かにずれるとニュートリノエネルギーは親 π 運動量に依らなくなる。

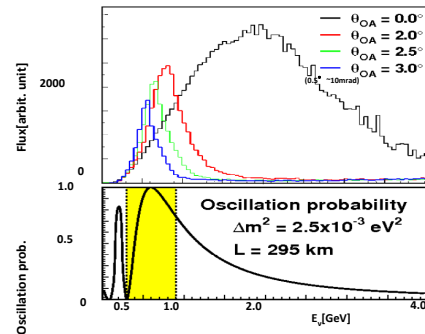


図 1.4 off-axis 法によって得られるニュートリノエネルギースペクトル。振動確率は最大になるようにビーム方向を調節する。

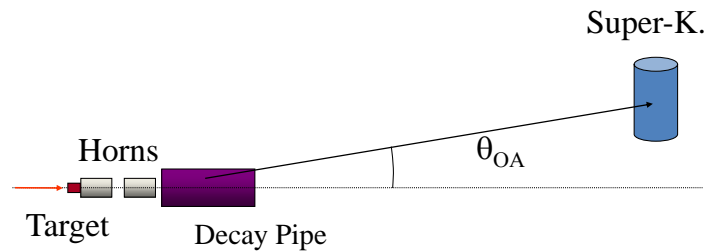


図 1.5 off-axis 法。ニュートリノビーム方向をスーパーカミオカンデ (Super-K) の方向からわずかにずらす。

1.4.3 ミューオンモニター

ミューオンモニター (図 1.6) はビームダンプ直後 (陽子標的の下流 110m) に設置され、ビームダンプを突き抜けてくる高エネルギーミューオンのプロファイルを測定し、ニュートリノビーム方向を間接的に測定する [8]。ミューオンモニターはバンチ毎にプロファイルを測定することができるため、リアルタイムでニュートリノビーム方向を測定することができる。

1.5 前置検出器群

1.5.1 on-axis 検出器 (ニュートリノビームモニター)

on-axis 検出器はビーム軸上に設置され、ニュートリノを直接測定してニュートリノビーム方向を測定する。on-axis 検出器は本論文の主題であり、詳細は次章を参照されたい。

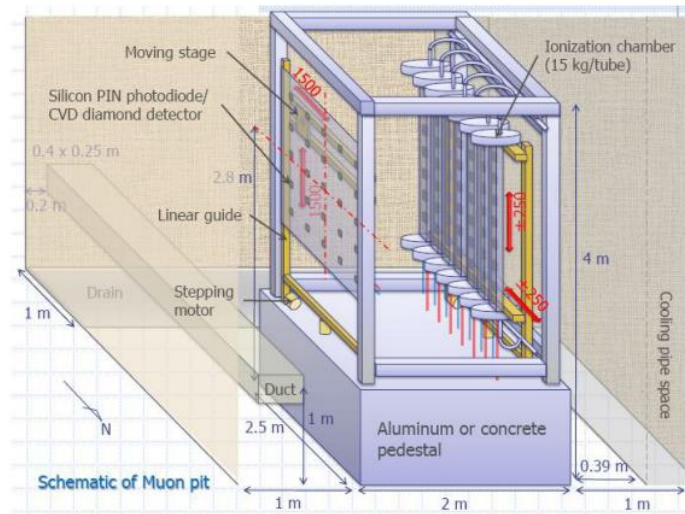


図 1.6 ミューオンモニター的设计。ガスチェンバーと半導体検出器からなる。

1.5.2 off-axis 検出器

off-axis 検出器は後置検出器スーパーカミオカンデに向かう方向に設置され、振動前のニュートリノフラックスならびにニュートリノエネルギーの測定を行う。その結果とシミュレーションを用いて、スーパーカミオカンデでのニュートリノスペクトルを予想する。

1.5.3 後置検出器スーパーカミオカンデ

後置検出器であるスーパーカミオカンデは、約 50kton(有効体積 22.5kton) の純水と約 1 万本の PMT(光電子増倍管) からなる大型チェレンコフ検出器である。スーパーカミオカンデで観測されたニュートリノエネルギースペクトルを、off-axis 検出器の測定から予想されるニュートリノスペクトルと比較することによって、ニュートリノ振動解析を行う。

第 2 章

T2K 実験ニュートリノビームモニター INGRID

本章では、On-Axis 前置検出器として重要な役割を担うニュートリノビームモニター INGRID の概要について述べる。

2.1 INGRID の概要と目的

2.1.1 INGRID に対する要請

T2K 実験では off-axis 法を使用するため、ビームニュートリノのエネルギー分布はビーム方向に強く依存する。よって、ビーム方向を高精度で監視することは必要不可欠である。そこで、陽子ターゲットから 280m 下流にニュートリノ検出器ホールを建設し、親パイオンビーム軸上にニュートリノビームモニター INGRID を設置する。INGRID はニュートリノ荷電カレント反応によって生じる荷電粒子を検出することでニュートリノビームプロファイルを再構成し、ビーム方向を測定する検出器である。

ニュートリノビーム方向を 1mrad 間違えると、ニュートリノエネルギースケールならびにニュートリノフラックスにそれぞれ約 2%、約 3% の誤差が生じる [9]。これらの系統誤差は 3% 以内に抑えれば、ニュートリノ振動パラメータの統計誤差よりも小さくすることができる。よって、ニュートリノビーム方向を 1mrad よりも十分良い精度で測定する必要があり、INGRID には $280\text{m} \times 1\text{mrad} = 28\text{cm}$ よりも十分良い精度で測定することが求められる。

28cm よりも十分良い精度で測定するための要請を以下にまとめる。

- ビームプロファイルを再構成可能な範囲をカバーしていること

図 2.1 にニュートリノ検出器ホールで予想されるニュートリノビームの水平方向プロファイルを示す。この図のように、ニュートリノビームは数 m 程度で非常に広く分布しているため、ビーム中心を決定するには最低でも $\pm 5\text{m}$ 程度の領域をカバーしなければならない。

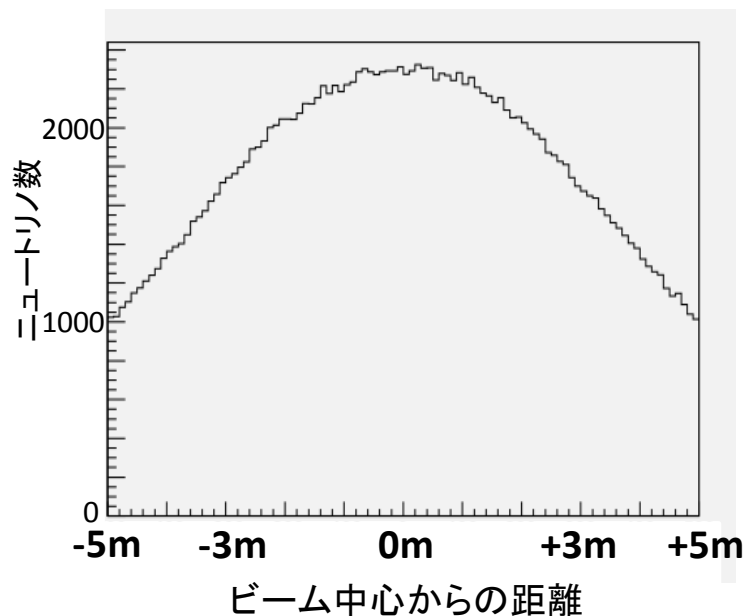


図 2.1 シミュレーションによるニュートリノ検出器ホールでのニュートリノビームの水平方向のプロファイル。±5m 領域に広く分布している。

- 大質量であること

INGRID では、ビーム強度がデザイン値の 1%(ビームコミッショニング時)の時に 1 カ月の統計量でビーム方向を測定することを目標とする。ビーム強度がデザイン値の 1% の時、図 2.1 の領域でニュートリノイベントは 2000 イベント/ton/month である。ニュートリノイベントの検出効率を 20% 程度とすると、統計誤差を数パーセント以下に抑えるためには、各観測点で数トンのターゲット質量が必要となる。

- 後置検出器で観測されるニュートリノと同じエネルギーの親パイオンからのニュートリノを観測できること

図 2.2 に SK に向かうニュートリノに崩壊する親パイオンの運動量分布を示す。この図から、6GeV/c 以下のパイオンが大半を占めることがわかる。ニュートリノは π^+ の二体崩壊 (式 1.8) により生成されるので、6GeV/c の半分の 3GeV/c 以下のニュートリノを検出すればよいことがわかる。

2.2 INGRID の基本設計

図 2.3、図 2.4 はニュートリノ検出器ホールに設置される INGRID 検出器の概観図である。ニュートリノ検出器ホールは地上部から深さ約 23m の B1 フロアー、29m の SS フロアー、33m の

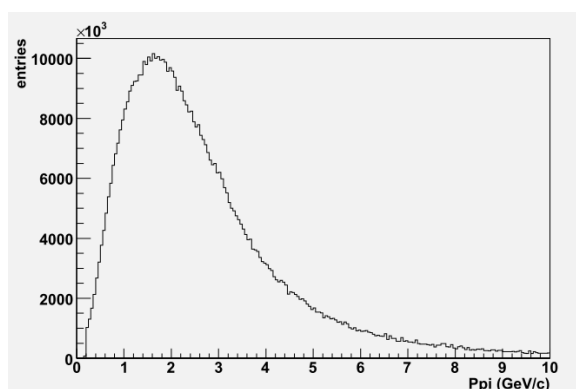


図 2.2 SK に向かうニュートリノに崩壊する親パイオンの運動量分布。6GeV 以下のパイオンが大半を占める。

B2 フロアーからなる。INGRID は 16 個のモジュールからなり、水平・垂直方向にそれぞれ 7 つ十字に配置しビーム中心から $\pm 5\text{m}$ の領域をカバーする (図 2.4)。さらに、残り 2 つのモジュールは対角線上に設置される (SS フロアーに 1 個、B2 フロアーに 1 個)。

各モジュールは約 $120\text{cm} \times 120\text{cm} \times 86\text{cm}$ の大きさを持ち、鉄とシンチレーター層のサンドウィッチ構造で (図 2.5)、鉄は 9 層でシンチレーター層は 11 層である。鉄はニュートリノ標的となり、1 モジュールあたり約 6.6 トンで、ビーム強度が 1% の時には約 $2000 \times 6.6 \times 20\% \sim 2600$ /モジュール/month のニュートリノイベントが見込まれる (ここでニュートリノイベントの検出効率を 20% と仮定した)。

シンチレーター層はビームに対して垂直平面上にセグメント化されており、鉄とのニュートリノ荷電カレント反応によって生成される荷電粒子の飛跡を再構成することができる。以下ではこのシンチレーター層をトラッキングプレーンと呼ぶ。

固定フレームも含めたトラッキングプレーンの概略図を図 2.6 に示す。シンチレーター 24 本 \times 2 層は、4 辺をアルミバーで固定され、両側面はそれぞれ 4 枚のアルミパネルと 1 枚の遮光用プラスチックパネルで覆われる。アルミパネルとプラスチックパネルの隙間ならびにアルミパネル間の隙間はゴム (EPDM) を接着して光漏れを防いでいる。シンチレーター層の読み出しチャンネルは 48 個で、モジュールは 11 個のトラッキングプレーン、INGRID は 16 個のモジュールからなるので、トラッキングプレーンの読み出しチャンネル総数は $48 \times 11 \times 16 = 8448$ チャンネルとなる。

また、各モジュールの側面は VETO 用のシンチレーター層で覆われており、1 層構造でシンチレーター 22 枚からなる。荷電粒子通過位置のビーム奥行き方向が分かるようにセグメント化されていて (図 2.7)、これによりビームニュートリノがニュートリノ検出器ホールの壁で反応を起こして出てくる二次粒子によるバックグラウンドを排除することができる。シミュレーションによるイベントディスプレイを図 2.8 に示す。図 2.8 の左図のようにビーム上流から見てトラッキングプ

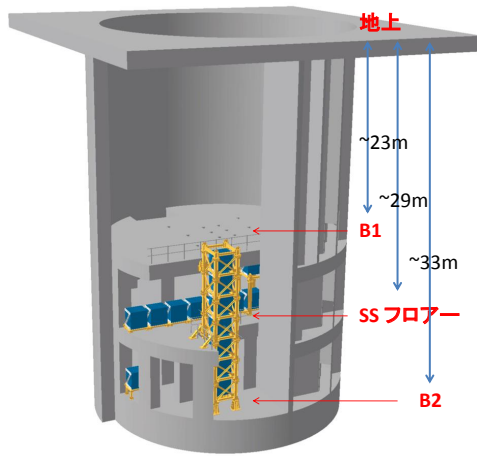


図 2.3 INGRID モジュールはニュートリノ検出ホールに設置する。水平方向の 7 個は SS フロアー、鉛直方向の 7 個は B1 から B2 にかけて設置し、残り 2 個は B1 と SS フロアーにそれぞれ設置する。

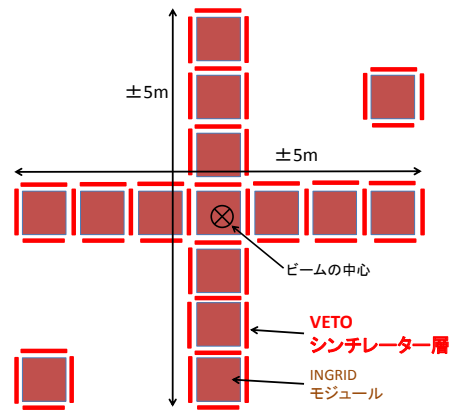


図 2.4 INGRID の概観図。水平・垂直方向に 7 つのモジュールを設置し、 $\pm 5m$ 領域をカバーする。モジュール間の赤線は VETO シンチレーター層をあらわす (真ん中のモジュールは 2 つあることに注意)。

レーンのシンチレーターが先に反応したイベントはモジュール内部でのニュートリノ反応である。図 2.8 の右図のようにビーム上流から見て VETO シンチレーター層が先に反応したイベントは外部からのバックグラウンドとなる。固定フレームも含めた VETO シンチレーター層のデザインはトラッキング用シンチレーター層と同じ (図 2.6) である。VETO シンチレーター層は隣り合うモジュール間で同じものを用いるので合計 52 枚になり (図 2.4 のモジュール間の赤線)、総チャンネル数は $22 \times 55 = 1144$ である。

INGRID は、各モジュールでニュートリノイベントの数を計測し、ビームプロファイルを再構成する。図 2.9 は、シミュレーション上でニュートリノ反応を起こした分布 (黒) に対して、「シンチレーター層を 3 層連続で突き抜ける」かつ「VETO シンチレーター層によるカット」という条件でイベントセレクションを行った時のニュートリノ数分布である (青)。ビーム中心の再構成精度をガウシアンピークのフィット誤差と定義すると、再構成精度は約 3cm で、28cm よりも十分に良い。

さらに、荷電粒子の飛跡情報から、SK に向かうニュートリノと同じエネルギーの親パイオンからのニュートリノ純度を上げることも可能である。ニュートリノのエネルギーが高いほど、ミュオンは前方に出やすいので、ミュオンの再構成角度が 20° 以上であることを要求すると、3GeV 以下のニュートリノの純度を上げることができる (図 2.10)。図 2.9 の赤点は、先ほどのカットに加えて「ミュオンの再構成角度が 20° 以上である」という条件を加えた時のニュートリノイベント数分布である。この条件で中心再構成精度は約 4cm で、この場合も 28cm より十分に良い。

前述のように、ビームコミッションには一か月に 2000/モジュールのニュートリノイベントが見込まれ、各モジュールの統計誤差は $\sqrt{2000}/2000 \sim 2\%$ である。そこで、系統誤差も 2% 以下に抑えることを目標にする。

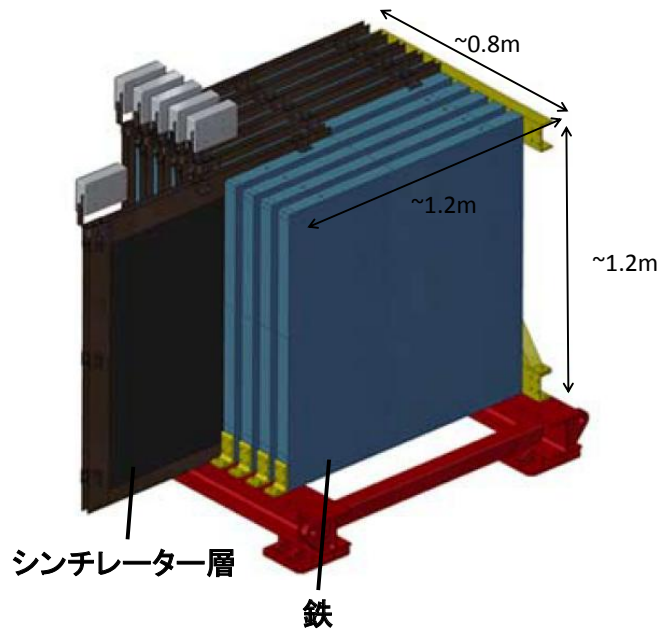


図 2.5 INGRID モジュール。鉄とシンチレーター層のサンドウィッチ構造からなる。シンチレーター層はビーム軸に垂直な面にセグメント化する。

系統誤差の要因として、主に次の 2 つがある。

- バックグラウンド含有率の不定性
- 検出効率の不定性

このうち、各モジュールにおけるバックグラウンド含有率は、シミュレーションからシグナルに対して 0.1% 以下であると見積もられており無視できる [10]。

次に、検出効率の不定性について考える。連続した 3 つのシンチレーターで荷電粒子をトラッキングする場合、各シンチレーターの検出効率の不定性を $x (\ll 1)$ とすると、3 つのシンチレーターで荷電粒子をトラッキングする場合、その不定性は $3x$ で近似できる。よって、 $x \sim 0.67\%$ となるので、各シンチレーターの検出効率の不定性を 0.5% 以下でおさえることを目標にする。

2.3 INGRID のアクティブコンポーネント

INGRID では、荷電カレント反応によって生成された荷電粒子がシンチレーターを通過する際に発生するシンチレーション光を、波長変換ファイバーで吸収・再発光して、半導体光検出器 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) まで伝送し光量を読みだす。このシステムをアクティブコンポーネントと呼ぶ。以下に各コンポーネントの概要とシステムとして求められる性能についてまとめる。

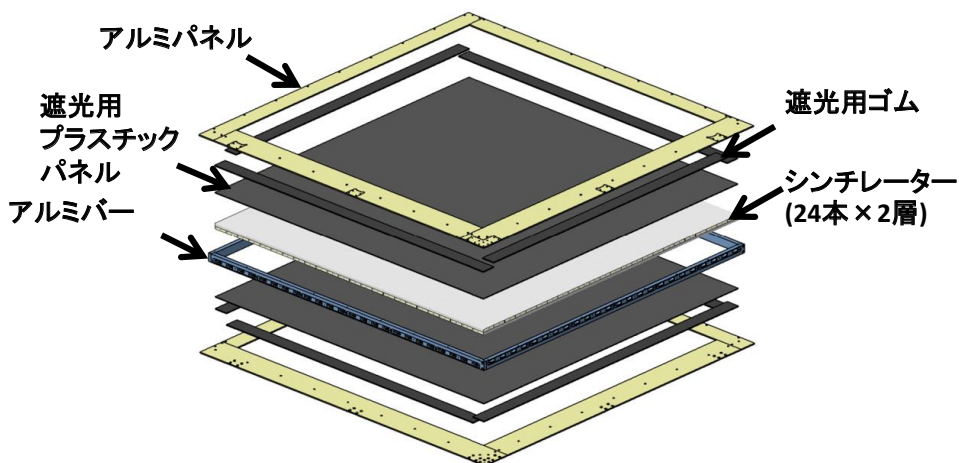


図 2.6 INGRID シンチレーター層のデザイン。トラッキングプレーンと VETO シンチレーター層で共通である。

2.3.1 プラスチックシンチレーター

INGRID に用いるシンチレーターは、アメリカのフェルミ国立加速器研究所で開発された、押し出し型シンチレーター [11] である。これはポリスチレンに PPO^{*1}、POPOP^{*2} を質量比でそれぞれ 1%、0.03% 混ぜたもので、発光量が最大となる波長は 420nm である。2007 年 12 月から翌年 2 月にかけて、INGRID 実機用シンチレーターが同研究所で製作された。その総数は予備を含めると 10272 本で、総重量は約 6.2ton である。

シンチレーターの大きさは、長さ 120cm、幅 5cm、厚み 1cm で、120cm × 5cm 面と 120cm × 1cm 面は製造の段階で酸化チタン (TiO₂) ベースの反射材がコーティングされている。さらに、トラッキングプレーンにインストールする前に、MPPC から最も遠い面である 5cm × 1cm 面に反射材 (ELJEN Techonology 社製の EJ-510) をコーティングした。シンチレーター中央には直径 3mm 程度の穴があいており、この穴に波長変換ファイバーを通す。

*1 2,5-diphenyloxazole

*2 1,4-bis(5-phenyloxazol-2-yl) benzene

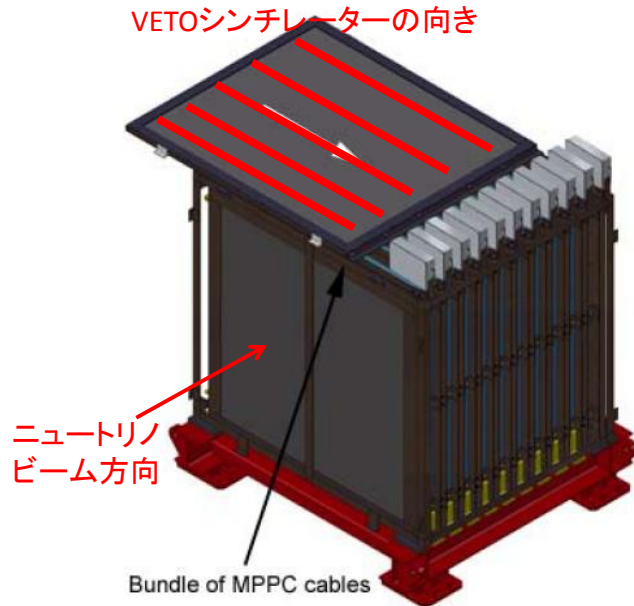


図 2.7 VETO 用シンチレーター層で 4 側面を覆う。VETO シンチレーター層はシンチレーターが 1 層構造で、ビーム上流と下流の区別がつくようにセグメント化される。

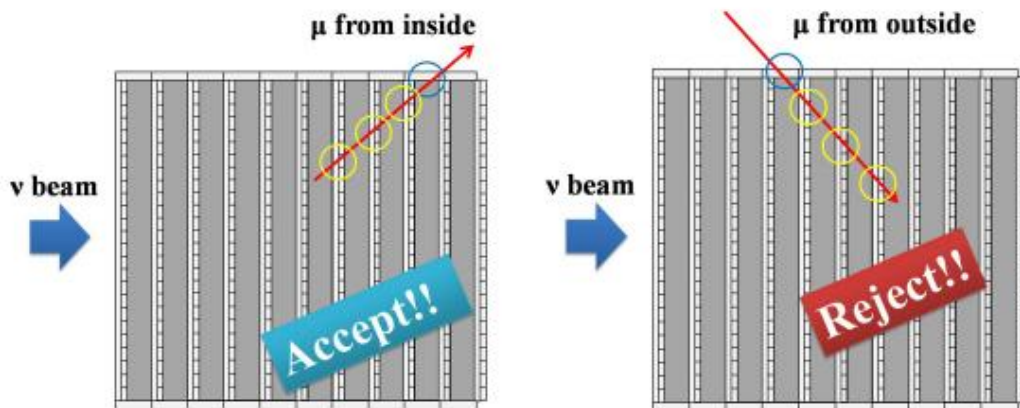


図 2.8 荷電カレント反応イベント。左がビームニュートリノ反応、右は外部バックグラウンド反応。VETO シンチレーターの向きを、荷電粒子の通過位置ビーム奥行方向が分かるようにセグメント化することで、ビームニュートリノ由来の外部バックグラウンドを除くことができる。

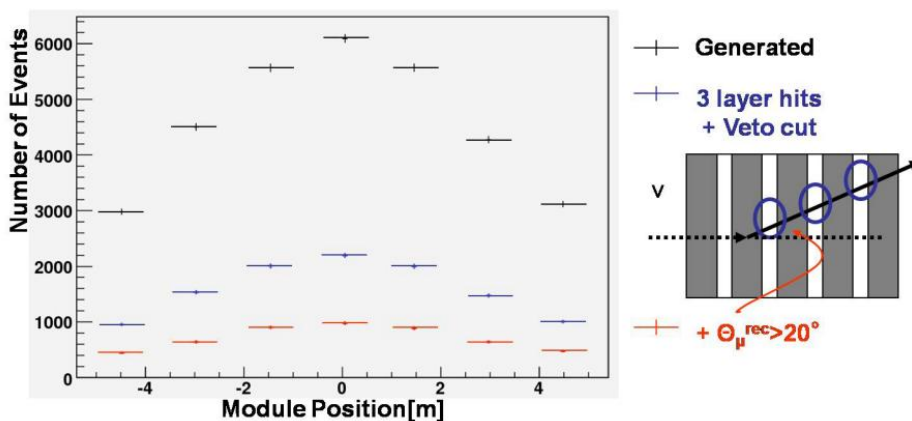


図 2.9 INGRID は各モジュールでのニュートリノイベント数からビームプロファイルを再構成する。横軸が各モジュール位置、縦軸が三つの方法で計測したニュートリノイベント数である。黒はシミュレーションで発生させたニュートリノ反応数、青がトラッカーカット+VETO カット、赤がさらにミュオンの再構成角度によるカットである (右図)。

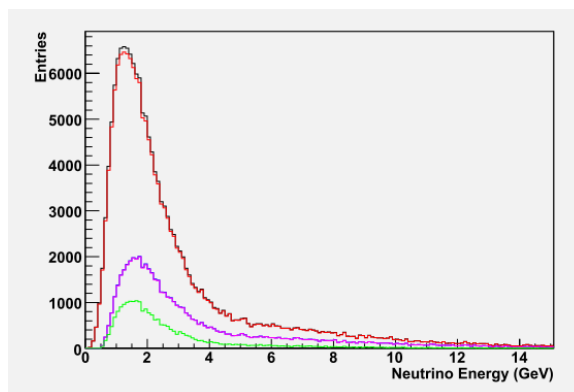


図 2.10 各イベントセレクションにおけるニュートリノエネルギースペクトル。赤がトラッカーカット、紫がトラッカーカット+VETO カット、緑がさらにミュオンの角度カット。紫に比べて緑は 3GeV 以下のニュートリノの割合が増加していることが分かる。

2.3.2 波長変換ファイバー

INGRID では、シンチレーション光を波長変換ファイバーで光検出器まで伝送する。波長変換ファイバーとは、コアに波長変換剤の溶かされたプラスチックファイバーで、側面から入射する光を波長変換剤によって吸収・再発光させて、全反射により伝送する。

我々が用いる波長変換ファイバーはクラレ社の Y-11(200)MS で直径は 1mm である。発光・吸収波長を図 2.11 に示す。吸収率が最大となる波長はシンチレーターの発行量が最大となる波長

(420nm) とほぼ一致していることが分かる。INGRID で用いられるファイバーの全長は約 12km である。

ファイバーはシンチレーターを同じ長さに切り、MPPC から遠い方の端面には反射材 (EJ-510) を塗布し、MPPC 側の端面には GOMI connector を接着剤 (ELJEN Techonology 社製 EJ-500 optical cement) で接着する。GOMI connector はプラスチック製の 2 パーツからなるコネクタで、ファイバー端面を MPPC セラミックパッケージへ押し付ける構造を取っており (図 2.13)、取り外しが容易で光量の再現性も高い。

ファイバーはシンチレーターと同じ長さに切り、シンチレーター層インストール直前に MPPC から遠い端面に EJ-510 を塗布して、MPPC 側端面には京都大学五味氏によって開発された GOMI connector (図 2.12) を接着剤 (ELJEN Techonology 社製 EJ-500 optical cement) で接着した。GOMI connector はプラスチック製の 2 パーツからなるコネクタで、ファイバー端面を MPPC セラミックパッケージへ押し付ける構造を取っている (図 2.13)。MPPC との接着面は、端面での光の反射を防ぎ、さらに再現性を高めるためにダイヤモンドカッター (FiberFin) によって研磨する。

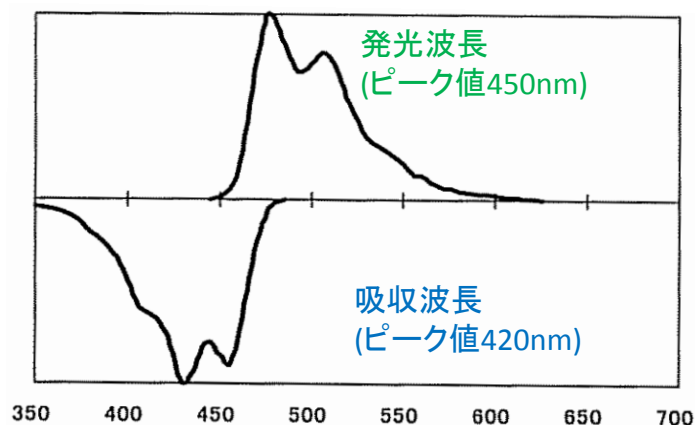


図 2.11 Y-11(200)MS の吸収・発光スペクトル。クラレ社のカタログから抜粋。

2.3.3 MPPC

MPPC (図 2.14) は近年開発された半導体光検出器で、非常にコンパクトな形状を持つ。中央の四角い面が受光面で、その拡大図が図 2.15 である。多数の APD ピクセル (四角の黒い部分) が並んでおり、各 1 ピクセルで 1 個の光子を検出することができる。APD ピクセルの総数は 667 個である。MPPC は優れたフォトンカウンティング能力を持っており、ADC 分布で各光電子数に対応したピークをはっきりとみることができる (図 2.16)。APD ピクセルはある電圧を境に動作モードが変化し、INGRID ではその電圧より大きい電圧を印加して MPPC を使用する。動作モードが変化する電圧はブレイクダウン電圧 V_{br} と呼ばれていて、MPPC に印加する電圧 V_{bias} とブレイクダウン電圧 V_{br} の差を ΔV と定義する；

$$\Delta V = V_{bias} - V_{br} \quad (2.1)$$

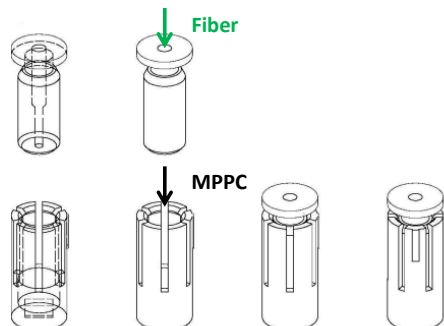


図 2.12 T2K 京都大学グループによって開発された GOMI connector。プラスチック製。

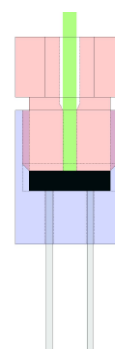


図 2.13 ファイバー・MPPC インストール時の GOMI connector。MPPC パッケージにファイバーが押し付けられる構造。

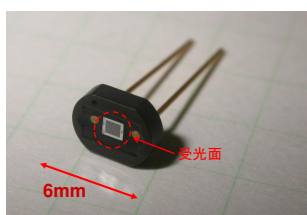


図 2.14 MPPC の写真。大きさは 6mm 程度で非常に小さい。中央の四角い部分が受光面。

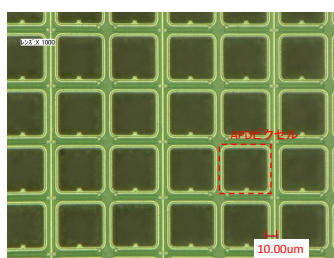


図 2.15 四角の黒い部分が APD ピクセル。一辺は 50um。

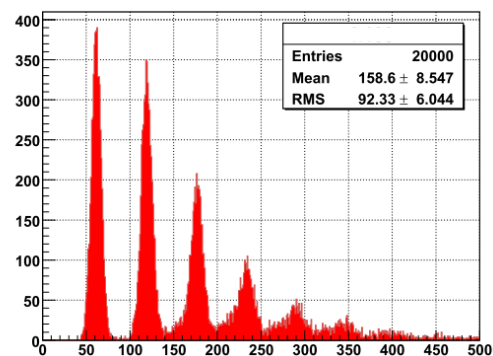


図 2.16 MPPC の ADC 分布。左から順にペDESTALピーク、1p.e. ピークではっきりとピーク構造を見ることができる。

次に MPPC の基礎特性について述べる。

- ゲイン

MPPC のゲインは、APD ピクセルの内部で発生した電子・ホール対が幾つに増幅されたかで定義される；

$$\text{ゲイン} = \frac{1 \text{ ピクセルが出す電荷量}}{\text{素電荷}} \quad (2.2)$$

実際には MPPC の ADC 分布 (図 2.16) のペDESTALピークと 1p.e.^{*3} ピークの差から算出する。本論文では、ペDESTALピークと 1p.e. ピークの差 [ADC counts] を MPPC ゲイン (ADC) と定義する。MPPC ゲイン (ADC) の単位は ADC counts である。

- クロストーク&アフターパルスレート

MPPC のシグナルが見かけ上増加してしまう現象に、クロストークとアフターパルスがある。前者はなだれ増幅過程で放出される二次的な光子が隣りのピクセルで検出される現象である。後者はなだれ増幅中に電子の一部が格子欠陥にトラップされて、ある時間経った後に放出され先のシグナルより遅れて同じピクセルからシグナルが放出される現象である。いずれも ADC 分布からはもとの信号と区別がつかないため、事前に測定しておいたクロストーク&アフターパルスレートを用いて、実際に検出された信号からその分を取り除く。

- ノイズレート

MPPC は熱による電子の励起、トンネル効果などによってもシグナルが検出される。ノイズレートは 20°C、 $\Delta V = 1.0$ において 500kHz 程度で、光子によって生成される電子・ホール対による信号と区別がつかない。

また、ADC 分布のみを見た場合、ノイズが前述のクロストーク&アフターパルスによって見かけ上増加して観測される場合がある。 $n(\geq 2)$ p.e. 以上のイベント観測率 $P_n(n \geq 2)$ は、ノイズレート N_1 とクロストーク&アフターパルスレート c ならびに ADC ゲート幅 G を用いて以下の様にあらわせる。

$$G \times (N_1 \times c^{n-1}) \quad (2.3)$$

例として、 $N_1 = 500\text{kHz}$ 、 $G = 200\text{nsec}$ 、 $c = 0.18$ 、 $n = 2$ の場合は 1.8% となる。

- PDE(Photon Detection Efficiency)

MPPC の光子検出効率 (PDE) は以下の式のように 3 つの要素から表すことができる；

$$\text{PDE} = \text{QE} \times \varepsilon_{\text{geom}} \times \varepsilon_{\text{Geiger}} \quad (2.4)$$

ここで、QE は量子効率で APD ピクセルに 1 光子が入射したときに電子-ホール対が生成される確率を表す。 $\varepsilon_{\text{geom}}$ は受光面に対する APD ピクセルの有感領域の占める面積の割合を表す。また、 $\varepsilon_{\text{Geiger}}$ は、生成された電子-ホール対がガイガー放電を起こす確率である。波長変換ファイバーの発光長 450nm に対する MPPC の PDE は $\Delta V = 1.5$ 付近で PMT の約 2 倍で、高い PDE を有する。

V_{br} は温度 T の関数で、15~25°C の領域で温度に比例して大きくなり、1.0°C あたり約 0.06V 変化する (図 2.17)。さらに M P P C の基礎特性のうち、ゲインと PDE は ΔV のみの関数となり、クロストーク&アフターパルスレートも強い温度依存性は見られない。ゲイン、クロストーク&アフターパルスレート、PDE を $\Delta V(= 1.1 \sim 1.8)$ に対して測定した結果をそれぞれ図 2.18、図 2.19、図

*3 photoelectron(光電子)の略。

2.20 に示す。いずれも ΔV に比例して増加していることが分かる。そこで、これらの ΔV 依存性を表 2.1 にまとめた。

表 2.1 MPPC の基礎特性と ΔV 依存性。 ΔV は 1.0°C あたり 0.06V 減少する。

	$\Delta V = 1.5$ での値	0.1V あたりの増加率
ゲイン	7.5×10^5	0.47×10^5
クロストーク & アフターパルスレート	0.18	0.023
PDE	2.1(×reference PMT)	0.11

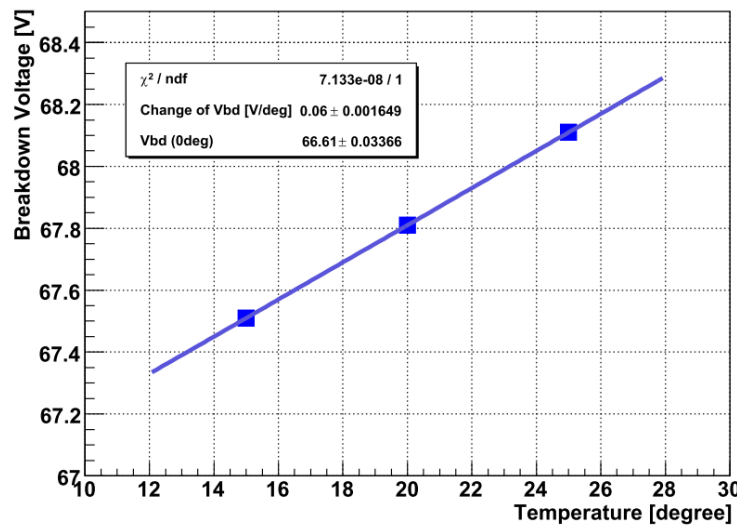


図 2.17 V_{br} の温度依存性。温度が 1°C 増加すると V_{br} は 0.06V 増加する。

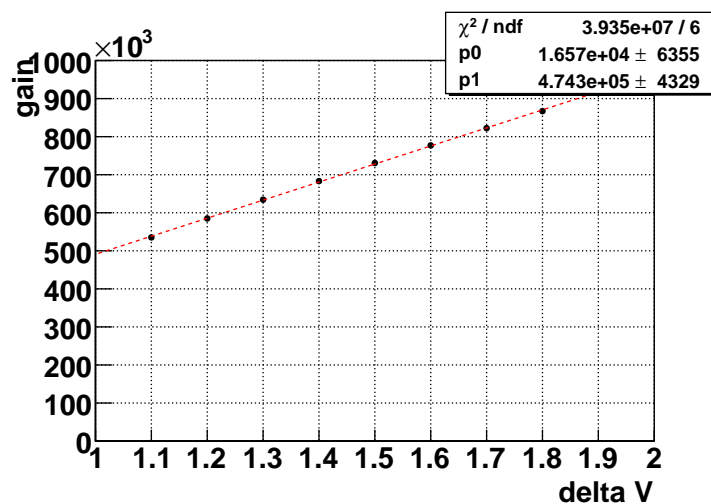


図 2.18 MPPC ゲインの ΔV 依存性。 $\Delta V = 1.5\text{V}$ の時ゲイン = 7.5×10^5 で 0.1V あたり 0.47×10^5 増加する。

2.3.4 アクティブコンポーネントに求められる性能

2.2 節で述べたように、我々は各アクティブコンポーネントの検出効率の不定性を 0.5% 以内に抑えることを目標にする。

検出効率は読み出し光量からポワソン分布を仮定して算出する。読み出し光量 LY は MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] と MIP の ADC 分布のピーク値 (ADC peak) ならびに MPPC のクロス

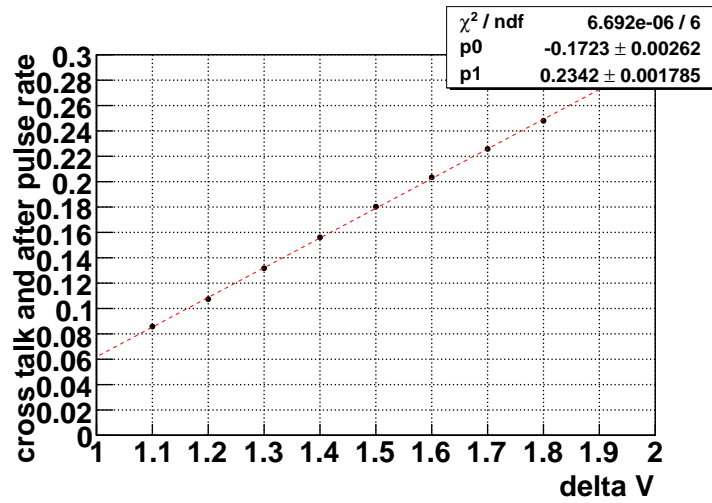


図 2.19 クロストーク&アフターパルスレートの ΔV 依存性。 $\Delta V = 1.5V$ の時 0.18 で 0.1V あたり 0.23 増加する。

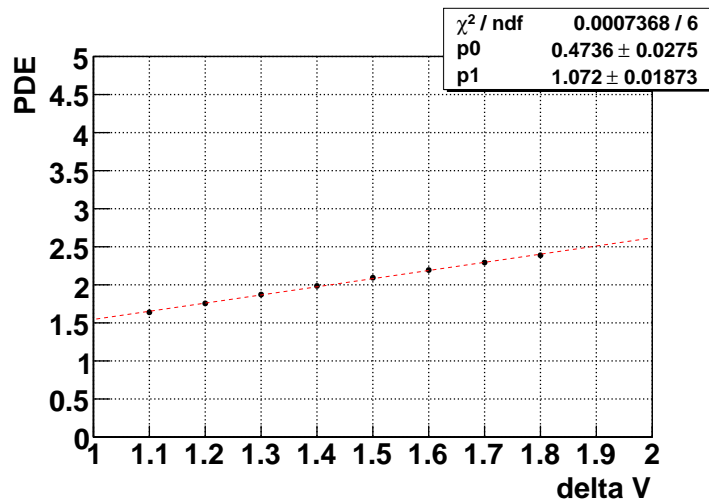


図 2.20 PDE の ΔV 依存性 (縦軸は \times PMT(Hamamatsu R1878) の PDE)。

トーク&アフターパルスレート c を用いて、

$$LY \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{ADC peak} - \text{pedestal}}{\text{MPPC ゲイン (ADC)}[\text{ADC counts}]} \times (1 - c) \quad (2.5)$$

と定義する (図 2.21)。この時、平均値 LY のポワソン分布 $P(LY, n)$ より閾値が th の場合の不感率 ε ならびに検出効率 $e = 1 - \varepsilon$ は、

$$\varepsilon = \sum_{k=0}^{k < th} P(LY, k) \quad (2.6)$$

$$e = 1 - \varepsilon$$

となる。以下では断わりのない限り、閾値 $th = 1.5p.e.$ とする。

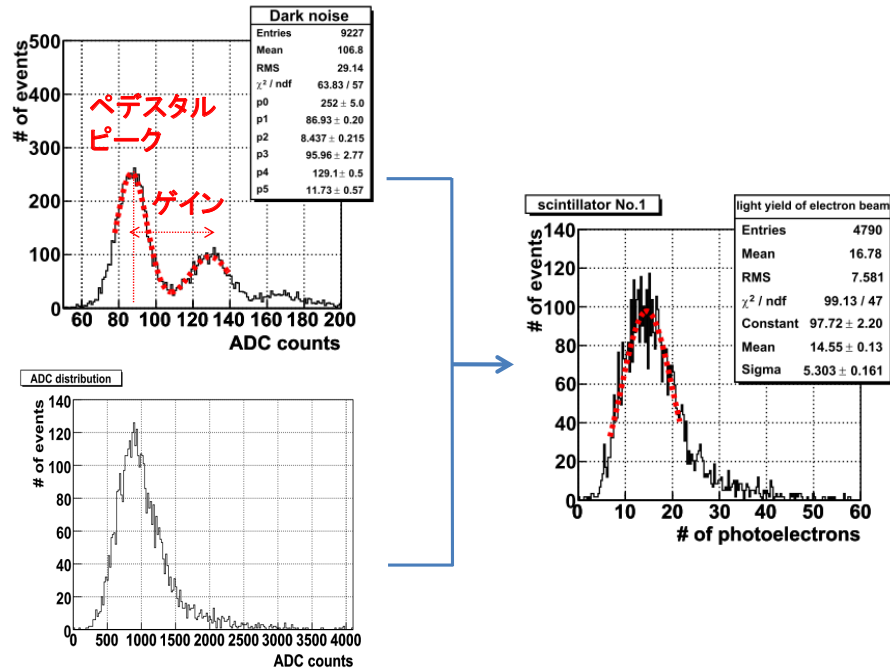


図 2.21 光量の定義。左上図から算出した MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] から ADC counts を光電子数に換算し、左下図の MIP の ADC peak から光量を定義する (右図)。

式 2.6 から計算した検出効率は図 2.22、表 2.2 のようになる。検出効率は光量によって変化し、光量が小さかった場合の方が光量が大きかった場合に比べて光量変化に対する検出効率変化率が大きくなる。よって、検出効率の不定性が小さいことを保証するために、光量が全てのチャンネルで大きいことを確かめなければならない。

表 2.2 各光量値に対応した検出効率

光量 [p.e.]	6	7	8	9	10	11	13	15
検出効率 [%]	98.265	99.270	99.698	99.877	99.950	99.980	99.997	99.999

そこで我々は、2007 年 11 月と 12 月に高エネルギー加速器研究機構富士実験室テストビームライン (第 3 章参照) において、製造されたプロトタイプシンチレーターのビーム照射試験を行い、光量・ファイバー減衰長・光量のシンチレーター位置の依存性を測定した [12]。その結果を以下にまとめる。

1. 光量測定

ビームが MPPC からの距離 50cm 位置を通過したときの光量は 15.0p.e. であった。光

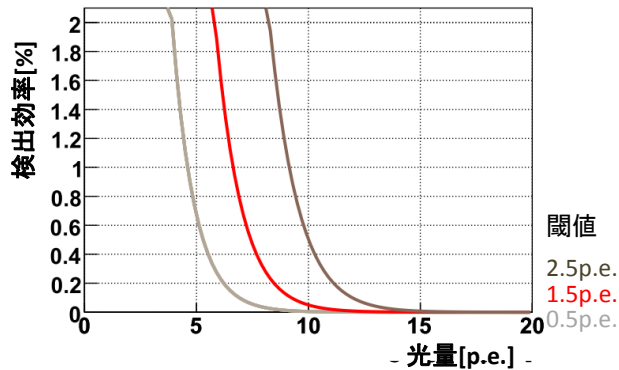


図 2.22 不感率の光量依存性

量が 15.0p.e. の時の検出効率は 99.999% で非常に高い。よって、光量が十分大きいことが分かった。

2. 光量のシンチレーター幅方向依存性

シンチレーター光はファイバーに吸収されるまでの間、シンチレーター内を伝搬する際に減衰する。そのため、読み出し光量は荷電粒子の通過位置、特にファイバーホール(シンチレーター中心)からの距離の関数になる。つまり、検出効率はファイバーホール付近からシンチレーター端に向かって減少する。

測定の結果、最も端の領域では中心付近に比べて約 15% 光量が減少することが分かった。よって MPPC からの距離が 50cm 位置でのシンチレーター端での光量は $15.0 \times 0.85 \sim 13\text{p.e.}$ となり、この時の検出効率は 99.997% で十分高い。

3. 光量のファイバー読み出しによる減衰

シンチレーション光はファイバーに吸収・再発光されて MPPC まで伝送される間に減衰する。一般に、読み出し光量 LY は MPPC から荷電粒子までの距離 x に対して減衰長 l を用いて以下のように指数関数で表せる。

$$LY = A \times \exp\left(-\frac{x}{l}\right) \quad (2.7)$$

ここで、 A は最も近い点での光量を表す。よって、シンチレーターの MPPC から最も遠い位置の方で検出効率が低くなる。過去のビーム照射試験から、

$$l = 241.7[\text{cm}] \quad (2.8)$$

で、 $A=18.1\text{p.e.}$ 、最も遠い点で 11p.e. となることが分かった。検出効率は最も近い点で 99.980%、最も遠い点で 99.999% 以上となり、検出効率は十分大きく、最も近い点と遠い点での差は小さい。

4. ファイバー穴の位置での光量減少

荷電粒子のエネルギー損失はシンチレーターを通過する距離に比例するので、ファイバー穴の位置では、他の位置に比べてエネルギー損失が小さく、その結果、読み出し光量も小さい。したがって、ファイバー穴の位置では、他の位置に比べて検出効率が低下する。過去のビーム照射試験によって、穴付近の 3.5mm 領域で、光量が 35~45% 損失することが明らかになった。そこで、MPPC からの距離が 50cm 位置をビームが通過した時、ファイバーホール付近での光量は $15.0 \times 0.5 \sim 8$ p.e. となり、その時の検出効率は 99.698% である。シンチレーター幅 (5cm) で平均すると、検出効率は 99.98% となって十分に大きい。

これらの結果を表 2.3 にまとめる。以上から、プロトタイプシンチレーターの全領域で光量は大きく、検出効率が十分高いことが分かった。

そこで、本論文第 3 章で実機用シンチレーター光量が十分大きいことを確認し、第 5 章では実際に製作された実機の全チャンネルが高い光量を持つことを確かめた。

表 2.3 アクティブコンポーネントの光量と光量・検出効率

	光量 [p.e.]	検出効率 e [%]
MPPC から 50cm 位置	15.0	99.999
シンチレーター減衰	13	99.997
ファイバー減衰	11.0~18.1	99.980 ~ 99.999
ファイバー穴	8	99.698

第 3 章

電子ビームを用いた INGRID アクティブコンポーネント性能の評価

トラッキングプレーンの全数製作に先立って、KEK 富士実験室の 3GeV 電子ビームラインを用いて、INGRID アクティブコンポーネントの性能評価試験を行った。試験期間は 5 日間である。

3.1 試験の目的

試験の目的は次の 2 つである。

- 実機用シンチレーターの光量測定
大量生産前にテスト用に少数製作したプロトタイプシンチレーターが十分な光量をもつことは以前のビーム照射試験で確認した。今回のビーム照射試験では、実機用に製作したシンチレーターのうち 4 本について光量を測定し、十分高い光量を持ち、なおかつ個体差がないことを確認した。
- シンチレーター間の隙間測定
アクティブコンポーネントを並べてトラッキングプレーンの試作機を組み立て、シンチレーター間の隙間による不感率を測定した。

3.2 セットアップ

3.2.1 富士テストビームライン (FTBL)

測定は KEK 富士テストビームライン (FTBL) の 3GeV 電子ビーム [13] を用いて行った。このビームラインの詳細は先行研究 [12] の第 4 章に譲り、ここでは簡単に述べる。

FTBL はこの論文の執筆時 (2009 年 1 月) では国内で唯一利用できる GeV クラスのテストビームラインで、KEKB 加速器リング富士実験室の地下三階に位置する (図 3.1)。

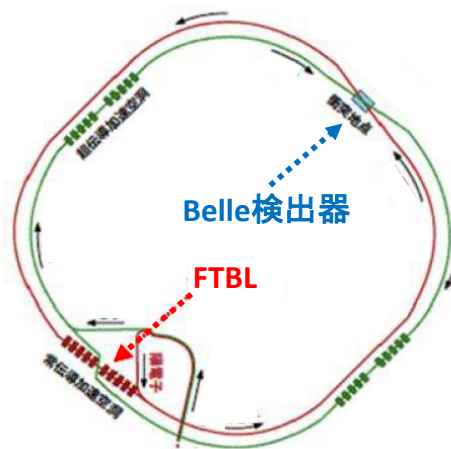


図 3.1 KEKB。FTBL は Belle 検出器の KEK 周上反対側にある。

KEKB 加速器の直線部で、制動放射によって生成された高エネルギー光子を約 5mm 厚のタンゲステンターゲットに入射して生成した電子を、8 個のベンディングマグネットと 4 個の Q マグネットによってビームテラス (図 3.2) に取り出している。

マグネットの電源値を調整することによって、取り出す電子ビームのエネルギーを 2~3GeV で変化させることができる。また、電子ビームの広がりも、Q マグネットの電源値を変えることにより調整することが可能である。設計上のビーム軌道中心で各 4cm×4cm 領域での 30 秒間のビームレート測定結果を図 3.3 に示す。最もレートの高い中央の領域で 13Hz 程度である。最もレートの高い領域付近の水平方向 1.5mm 幅のビームレート測定結果を図 3.4 に示す。図の青線は各位置でのカウント数をガウシアンフィットした結果であり、ビームの広がりは約 1.4cm であった。

3.2.2 測定に用いた検出器

基本的なセットアップを図 3.5 に示す。

- トリガーカウンター

断面積が 5cm×10cm で厚み 1cm のプラスチックシンチレーターを光電子増倍管で読みだした (図 3.6)。ビーム上流とビーム下流それぞれにトリガーカウンターを設置し、二つのコインシデンス信号でデータ収集を開始した。

- ホドスコープ

クラレ社のシンチレーションファイバー (SCSF-78SJ) を 16 本接着し、各ファイバーの端面を浜松ホトニクス社製マルチアノード PMT(H6568) の各チャンネルに接続して読みだした (図 3.7)。

各ファイバーの断面は 1.5mm × 1.5mm 角で、オフラインでビームスポットを絞った。

- INGRID シンチレーター

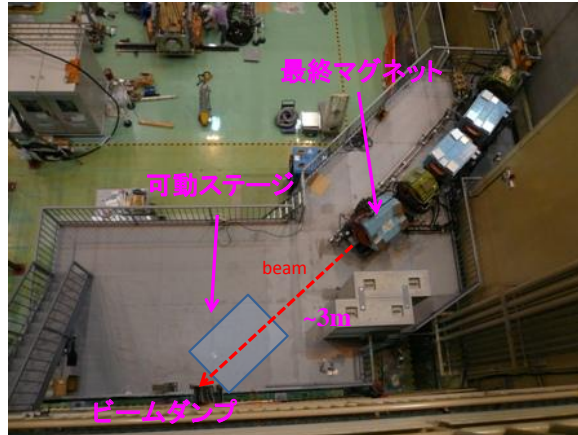


図 3.2 FTBL のビームテラス。ビーム軌道上に可動ステージを設置して実験を行った。

INGRID 実機用に制作されたものを用いた。大きさは、実機と同じ 120cm×5cm×1cm のものが 4 本と、ビームテストのために 50cm に切断したものが 4 本である。120cm のものはシンチレータ间隙測定に、50cm のものは光量の測定に用いた。

- 波長変換ファイバー

実機で用いられるものと同じ Y11 で、長さはシンチレータと同じ 120cm にカットした。MPPC 側端面に GOMI connector を接着し、ダイヤモンドカッター (Finber Fin) で研磨した。

- MPPC

実機と同じタイプのを 3 つ用いた。表 3.1 にこれらの基礎特性を示す。第 2 章で述べたように、MPPC の基礎特性は使用環境の温度と印加電圧によって変化するが、 ΔV の関数としては良く揃う。そこで、温度変化をモニターして $\Delta V=1.4$ となるように印加電圧を調整した。温度モニターには、T & D 社製のおんどとり TR71-U を用いた。データ収集の間の温度変化 (図 3.8) は 0.9°C 以内 ($T = 25.0 \sim 25.9^{\circ}\text{C}$) であった。

表 3.1 ビームテストで用いた MPPC の基礎特性。それぞれ、 25.0°C 、 $\Delta V = 1.4$ での値。

# of MPPC	ゲイン	ノイズレート [Hz]	クロストーク & アフターパルスレート	PDE[×PMT]
1	7.9×10^5	1.05×10^6	0.21	2.28
2	7.9×10^5	6.55×10^5	0.22	2.31
3	8.0×10^5	9.90×10^5	0.21	2.36

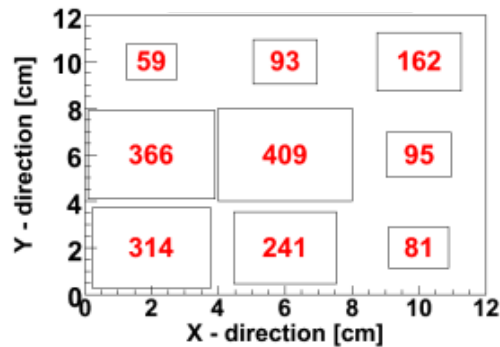


図 3.3 電子ビームの各 4cm×4cm 領域でのビームレート。計測時間は 30 秒。中央の領域で最もレートが高く、その値は 409/30 ~ 13Hz である。

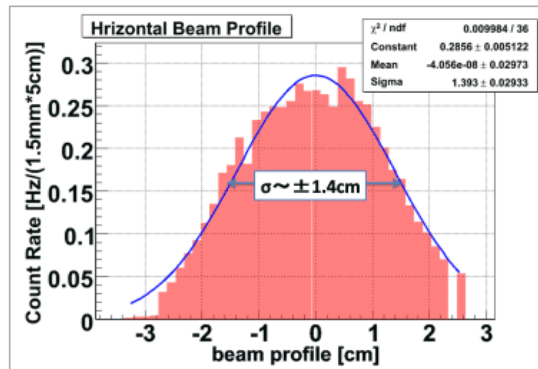


図 3.4 1.5mm 幅でのビームレート。ビームの広がりは $\pm 1.4\text{cm}$ である。

3.2.3 読み出し回路

上流・下流トリガーカウンターで ADC のゲートを開きデータ収集を行った。電荷積分型 ADC を用い、ゲート幅は 200nsec である。MPPC の信号は、ペDESTALピークと 1p.e. ピークを常時モニターできるように十分大きくするため、PMT AMP で約 100 倍に増幅した。図 3.9 に読み出し回路の概念図を示す。

また、本測定と同時に MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] の値をモニターした。ゲインモニターは 2 つの MPPC を用いて行う。まず片方の MPPC の 1p.e. ノイズを利用してゲートを開き、この時もう一つの MPPC ではペDESTALもしくはアクシデンタルに入ってくるノイズをそれぞれ記録する。さらにクロック振動との論理積を取ることにより、データレートを調整することが可能である (図 3.10)。この方法によってお互いにペDESTALデータと 1p.e. ノイズデータを、ビームデータとは独立に記録することができる。図 3.11 はこの方法によって得られる 2 つの MPPC の ADC 分

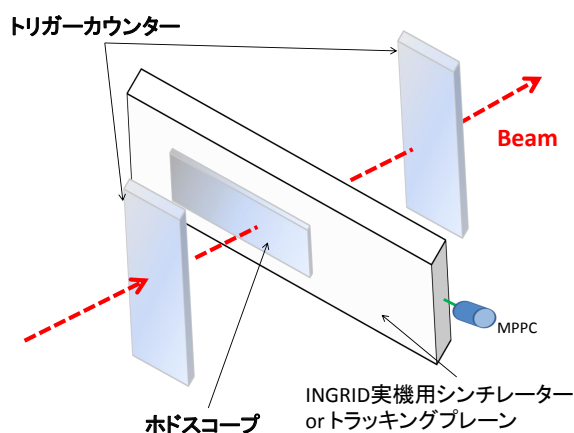


図 3.5 ビームテストの基本的なセットアップ。ビーム上流から上流トリガーカウンター、ホドスコープ、INGRID 実機用シンチレータ or トラッキングプレーン、下流トリガーカウンターを設置した。



図 3.6 トリガーカウンター。プラスチックシンチレータの断面積は 5cm×5cm である。

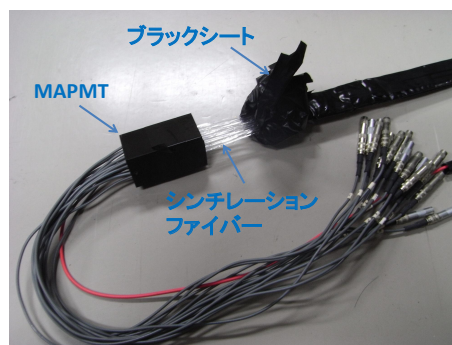


図 3.7 ホドスコープ。シンチレーションファイバー 16 本を MAPMT で読みだした。シンチレーションファイバーは 1.5mm×1.5mm 角。

布で、はっきりと pedestal ピークと 1p.e. ピークを見ることができる。

3.2.4 INGRID トラッキングプレーンプロトタイプ

図 3.12 に、トラッキングプレーンフレームのプロトタイプの写真を示す。第 2 章で説明したものとほぼ同じであるが、側面の遮光用プラスチック板の代わりに、アルミニウム板を用いた。

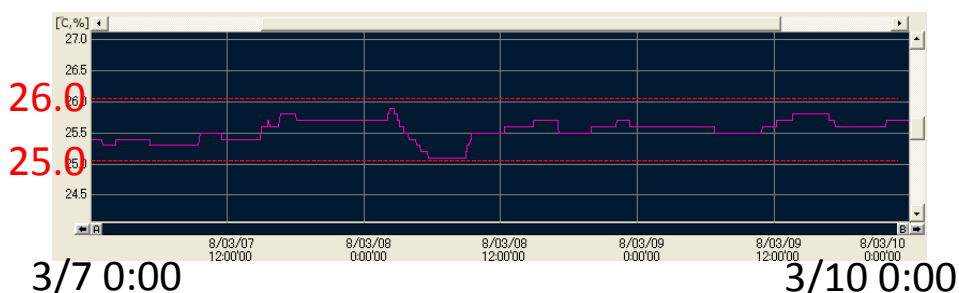


図 3.8 実験ステージ上の温度変化の様子。実験期間中の温度は 25.0 ~ 25.9°C であった。

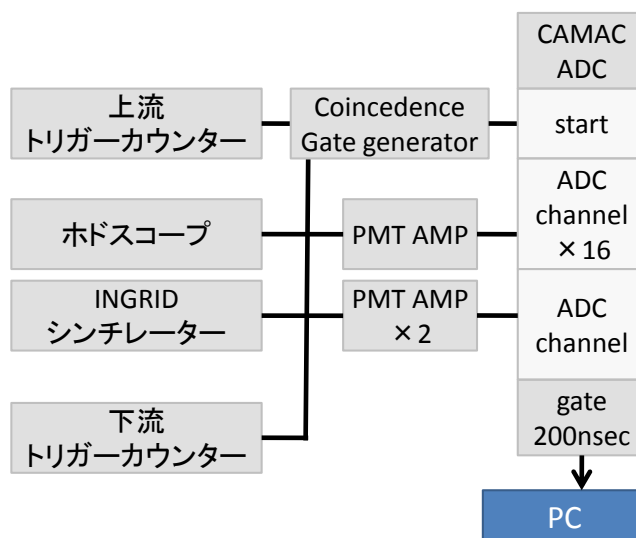


図 3.9 読み出し回路の概念図。上流・下流トリガーのコインシデンス信号によってデータ収集する。さらにホドスコープのデータを用いて、オフラインでビームスポットを絞った。

3.3 ビームプロファイルの測定

電子軌道に垂直にシンチレーターを設置して厚み方向 (1cm) の光量を測定するために、まずビーム電子軌道の測定を行った。測定には、トリガーカウンターとプロファイル測定用シンチレーターを用いた。

プロファイル測定用シンチレーターは、INGRID シンチレーターを削って縦 2.5cm×横 2.0cm×厚み 1.0cm にしたもので、それを PMT(R1398) で読みだした (図 3.13)。

まず、設計上のビーム軌道と垂直な向きになるように、プロファイル測定用シンチレーターならびにトリガーカウンターを可動ステージのビーム方向手前に設置した。次に、トリガーカウンター

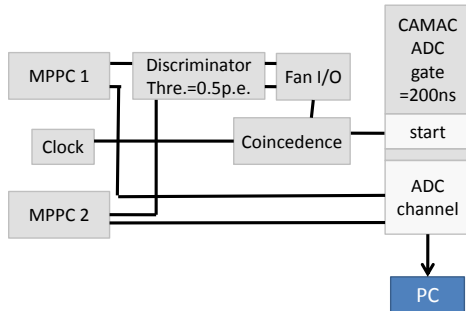


図 3.10 ゲインモニター用回路の概念図。

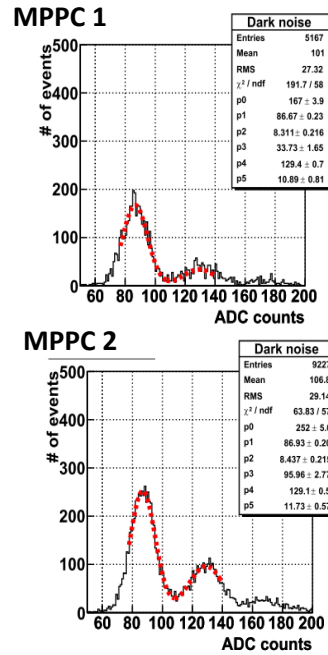


図 3.11 ゲインモニターによる ADC 分布。それぞれの MPPC でペDESTALピークと 1p.e. ピークを見ることができる。



図 3.12 トラッキングプレーンフレームのプロトタイプ。実機とほぼ同じであるが、側面の遮光用プラスチック板のかわりにアルミニウム板が用いた。

を固定したまま、ステップモーターを用いてプロファイル測定用シンチレータを、その大きさと同じ幅分だけ上下左右に動かしながら、二つのコインシデンスレータを 30 秒間測定した。コインシデンスレータの測定結果を図 3.14 に示す。ディスクリミネーターの閾値レベルは、ビームが来ている状態でコインシデンスイベントをオシロスコープで観測して決定した。その閾値レベル



図 3.13 ビームプロファイル測定用シンチレーターカウンター。INGRID シンチレーターを削ったものを PMT で読みだした。

で、ビームが来ていない状態でのコインシデンスレートは 0 だった。

最後に、トリガーカウンターはそのままでプロファイル測定用シンチレーターを可動ステージ上のビーム下流方向に移動して、先ほどと同じことを行った。その結果を図 3.15 に示す。

以上の結果から、ステージ手前と奥のコインシデンスレートの最も高かった $2.5 \times 2.0 \text{cm}^2$ の領域二か所とマグネット口を結んで、ビーム軌道中心とした。その軌道は設計上のビーム軌道とほぼ一致した。

最終マグネット口の広がりが約 40mm、測定領域が 25mm、測定領域とマグネット口の距離が 1500mm 程度なので、 $\arctan((40 + 25)/1500) = 2.5^\circ$ 以内でビーム電子の軌道を決定できたと考えられる。

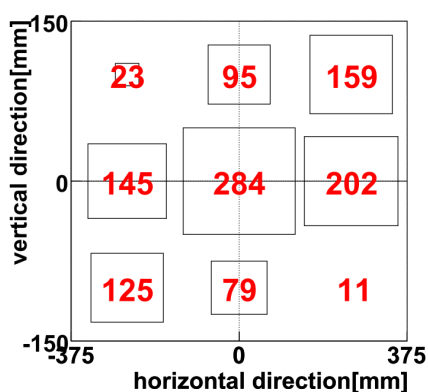


図 3.14 ステージ上手前のビームプロファイル。各 $2.5 \text{cm} \times 2.0 \text{cm}$ ブロックでの 30 秒間のコインシデンスレート。

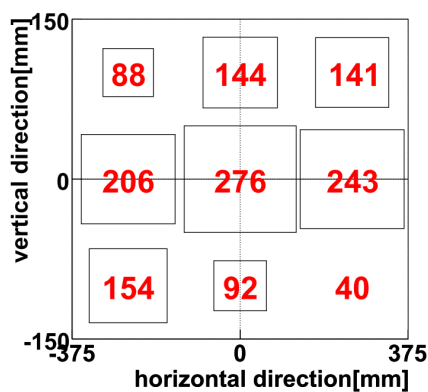


図 3.15 ステージ上奥のビームプロファイル各 $2.5 \text{cm} \times 2.0 \text{cm}$ ブロックでの 30 秒間のコインシデンスレート。

3.4 光量の測定

3.4.1 測定の動機

以前のビーム照射試験で製造時期が異なる 2 種類のプロトタイプシンチレーターの読み出し光量を比較したところ、読み出し光量が 15% 程異なっていた。よって実機用シンチレーターが十分な光量を持っているか確かめることは必要不可欠である。

さらに、実機用シンチレーター 4 つを比べて有意な個体差がないか確かめた。

3.4.2 測定のセットアップ

ビーム上流からトリガーカウンター、INGRID シンチレーター、トリガーカウンターをそれぞれの向きがビーム軌道に対して垂直になるように可動ステージ上の暗箱内に設置し、INGRID シンチレーターのみを順次交換して光量を測定した。ビーム上流・下流トリガーカウンター位置はビームスポットから MPPC までの距離が約 50cm の地点である。

3.4.3 測定結果

図 3.16 は、4 つのシンチレーターの ADC 分布である。縦軸はイベント数で横軸は光電子数である。4 つのシンチレーター測定には全て表 3.1 の MPPC#2 を用い、ファイバーも同一のものを用いた。4 つの ADC 分布に大きな相違は見られない。

また、各シンチレーターの光量を表 3.2 に示す。全てのシンチレーターについて光量は 14.55p.e. 以上で、光量が 14.55p.e. の時の検出効率は 99.999% である。よって、実機シンチレーターは十分大きい光量を持つ。

また、4 つのシンチレーター全てで検出効率は 99.999% 以上で検出効率に個体差は無かった。

以上から、実機シンチレーターが大きい光量を持ち、今回測定した 4 つのシンチレーターに個体差がないことが分かった。

表 3.2 各シンチレーターの光量ピーク値

ID of scintillator	光量 [p.e.]
1	14.55 ± 0.15
2	15.24 ± 0.13
3	15.34 ± 0.12
4	14.75 ± 0.13

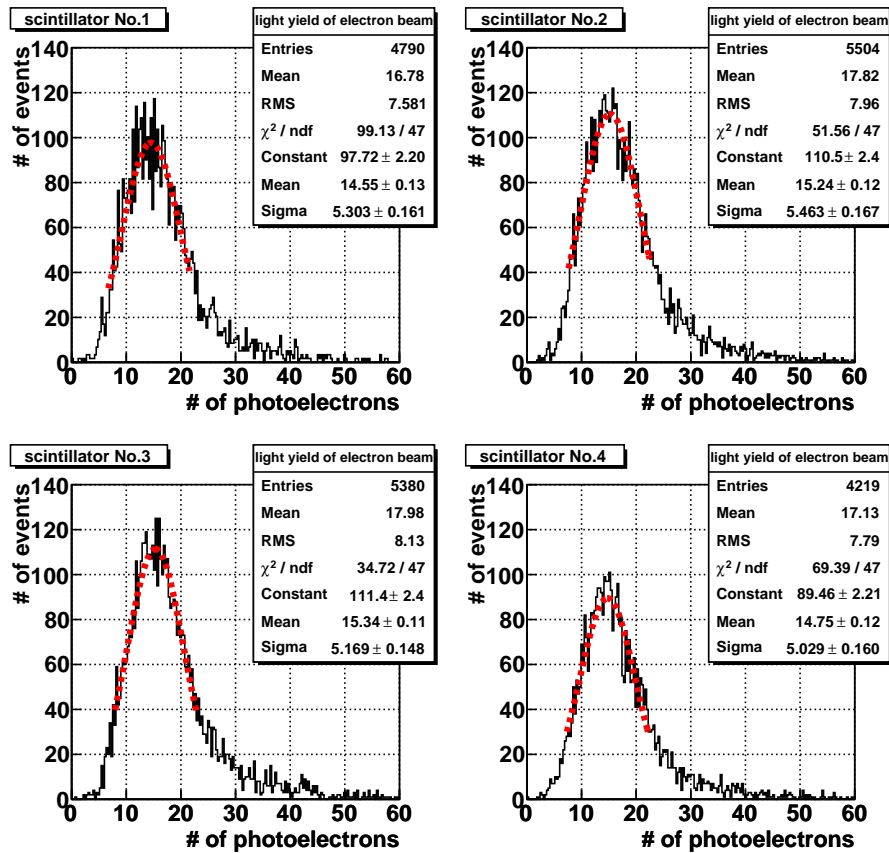


図 3.16 各シンチレーターの ADC 分布。四つの実機用シンチレーターについて測定を行った。分布に有意な差は見られない。

3.5 シンチレーターの間隙評価

3.5.1 測定の動機

第 2 章で述べたように、我々は検出効率の不定性を 0.5% 以内に抑えることを目標にした。そこで、シンチレーター間の間隙による不感率を測定して目標値である 0.5% と比較する。

3.5.2 測定のセットアップ

水平方向ならびに垂直方向の間隙測定セットアップを図 3.17、図 3.18 に示す。まず、ビームライン上にシンチレーター間の間隙がくるように、トラッキングプレーン、上流・下流トリガーシンチレーターならびにホドスコープを設置した。さらにステップモーターでホドスコープの位置を微調節して、ホドスコープの各チャンネルに対応した位置でのシンチレーター光量を測定した。

水平・垂直方向の間隙それぞれ 2 か所ずつ測定を行った。

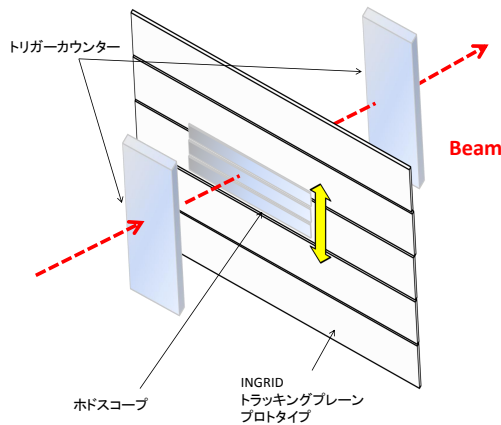


図 3.17 水平方向隙間の測定時のセットアップ

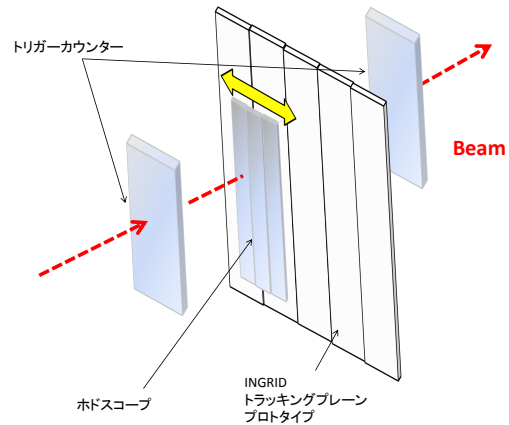


図 3.18 垂直方向隙間の測定時のセットアップ

3.5.3 測定結果

まず、1 つめの水平隙間の測定結果について述べる。水平隙間前後の 2 つのシンチレーターを甲、乙とし、ホドスコープによって 1.5mm 間隔でビームスポットを 5 つに分ける (図 3.19)。甲シンチレーターの ADC 分布をビームスポットが 1 ~ 5 の順に図 3.20~3.24 に示す。光量が図 3.20 から順に減少していき、図 3.23 では光量が 0 になっていることが分かる。また、乙シンチレーターの ADC 分布をビームスポットが 1 ~ 5 の順に図 3.25~3.29 に示す。甲シンチレーターとは逆に、位置 1 (図 3.25) では光量 0 であるが、位置 3 (図 3.27) から光量が増加していることが分かる。

次に各位置での不感率について考える。不感率はイベント数 N と 1.5p.e. 以上のヒットイベント数 N_{hit} を用いて以下のように定義する。

$$\text{不感率} = \frac{N - N_{hit}}{N} \quad (3.1)$$

各位置での不感率を図 3.30、表 3.3 に示す。隙間付近 $1.5\text{mm} \times 5 = 7.5\text{mm}$ 領域で $N = 7073$ 、 $N_{hit} = 6220$ より不感率は 12.1% であった。シンチレーターの全領域 50mm で平均すると、 $12.1 \times \frac{7.5}{50} = 1.8\%$ となる。検出効率は $100 - 1.8 = 98.2\%$ で十分に大きい。

同様に、もうか所の水平隙間についての不感率を、図 3.31、表 3.4、二か所の垂直隙間についての不感率を図 3.32、表 3.5、図 3.33、表 3.5 に示す。ここで、シンチレーター全体としての検出

効率はそれぞれ、

$$\begin{aligned}
 12.1[\%] \times \frac{7.5[mm]}{50.0[mm]} &= 1.81[\%] \\
 8.8[\%] \times \frac{7.5[mm]}{50.0[mm]} &= 1.32[\%] \\
 12.6[\%] \times \frac{7.5[mm]}{50.0[mm]} &= 1.89[\%] \\
 12.0[\%] \times \frac{7.5[mm]}{50.0[mm]} &= 1.80[\%]
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

となり、検出効率は 98.19 ~ 98.68% で十分に高い。

また、検出効率の差は最大で $1.89 - 1.32 = 0.67\%$ であった。これは我々の目標である 0.5% より大きいですが、シンチレータ-隙間による不感率はシンチレータ-光量に依存しないと考えられるので、あらかじめそれぞれのチャンネルでの不感率をおさえておけば良いことが分かる。実際には宇宙線によって不感率をモニターする。

表 3.3 1つ目の水平隙間付近の各位置での不感率

ビーム位置 [mm]	イベント数 N	ヒット数 N_{hit}	不感率 $\varepsilon[\%]$
-4.5~-3.0	1307	1307	$0.0^{+0.2}_{-0.0}$
-3.0~-1.5	1313	1292	1.6 ± 0.8
-1.5~ ±0.0	1558	900	42.4 ± 3.9
±0.0~+1.5	1555	1381	11.2 ± 2.0
+1.5~+3.0	1340	1340	$0.0^{+0.2}_{-0.0}$
-4.5~+3.0	7073	6220	12.1 ± 0.4

表 3.4 2つ目の水平隙間付近の各位置での不感率

ビーム位置 [mm]	イベント数 N	ヒット数 N_{hit}	不感率 $\varepsilon[\%]$
-4.5~-3.0	1385	1382	$0.2^{+0.3}_{-0.2}$
-3.0~-1.5	1295	1114	14.0 ± 1.6
-1.5~ ±0.0	1495	1118	25.2 ± 3.0
±0.0~+1.5	1369	1321	3.5 ± 0.9
+1.5~+3.0	1383	1382	$0.1^{+0.2}_{-0.1}$
-4.5~-3.0	6927	6317	8.8 ± 0.3

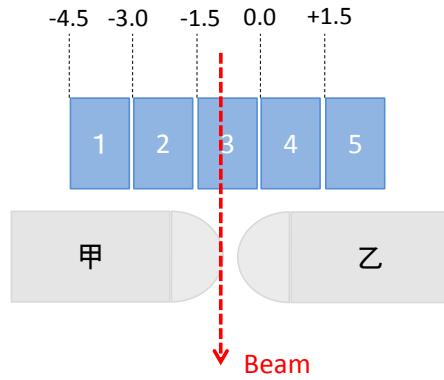


図 3.19 隙間測定時の概念図

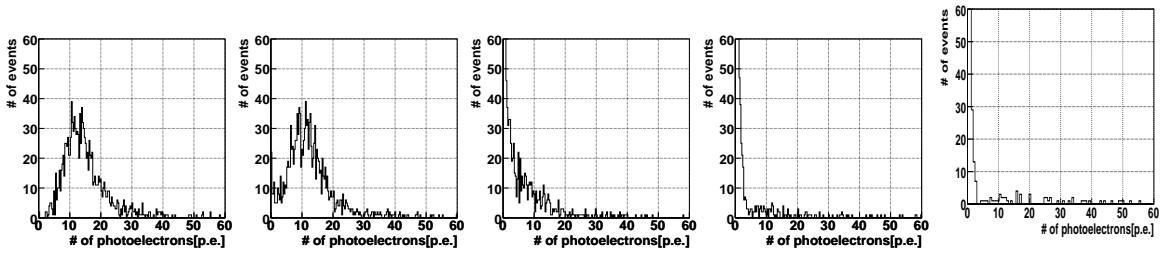


図 3.20 甲シンチレーターの-4.5~-3.0mm 領域

図 3.21 甲シンチレーターの-3.0~-1.5mm 領域

図 3.22 甲シンチレーターの-1.5~0.0mm 領域

図 3.23 甲シンチレーターの0.0~+1.5mm 領域

図 3.24 甲シンチレーターの+1.5~+3.0mm 領域

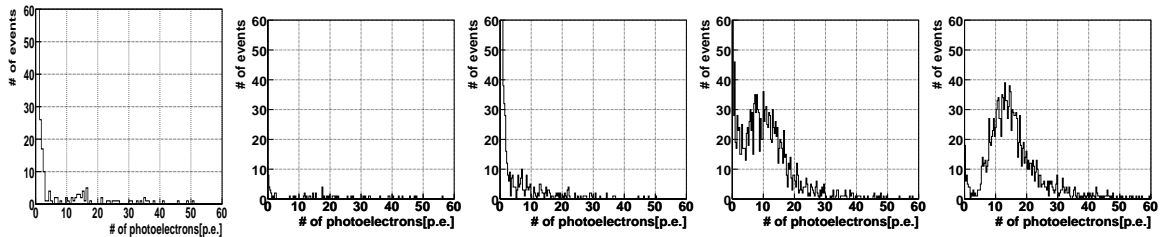


図 3.25 乙シンチレーターの-4.5~-3.0mm 領域

図 3.26 乙シンチレーターの-3.0~-1.5mm 領域

図 3.27 乙シンチレーターの-1.5~0.0mm 領域

図 3.28 乙シンチレーターの0.0~+1.5mm 領域

図 3.29 乙シンチレーターの+1.5~+3.0mm 領域

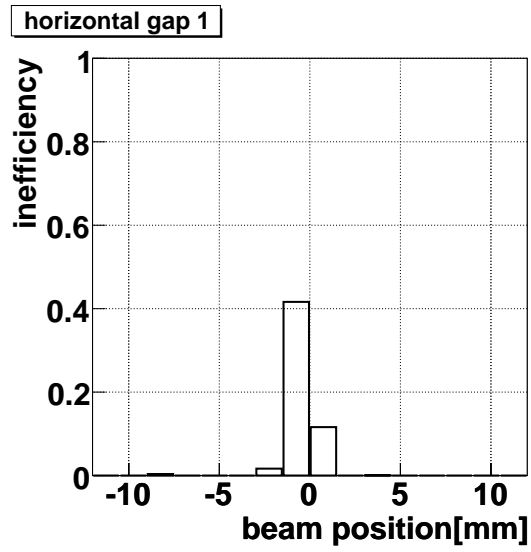


図 3.30 1つ目の水平方向の隙間付近の不感率

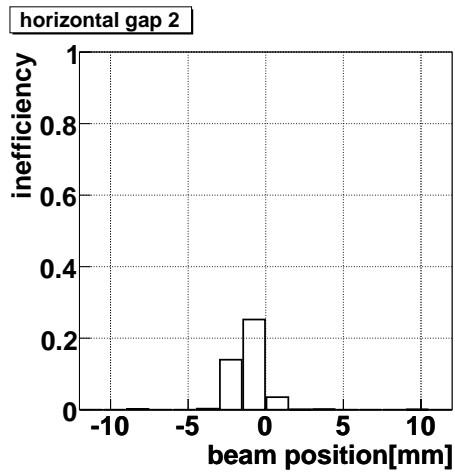


図 3.31 2つ目の水平方向隙間付近での検出効率

表 3.5 1つ目の垂直隙間付近の各位置での不感率

ビーム位置 [mm]	イベント数 N	ヒット数 N_{hit}	不感率 ε [%]
-6.0~-4.5	1059	1058	$0.1^{+0.2}_{-0.1}$
-4.5~-3.0	1114	1070	3.9 ± 0.7
-3.0~-1.5	881	604	31.4 ± 3.1
-1.5~ ±0	1362	959	29.6 ± 2.9
±0.0~+1.5	1444	1433	2.5 ± 0.9
-6.0~+1.5	5860	5124	12.6 ± 0.5

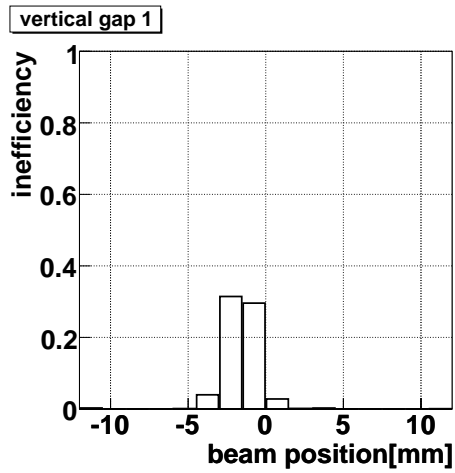


図 3.32 1つ目の垂直方向隙間付近での検出効率

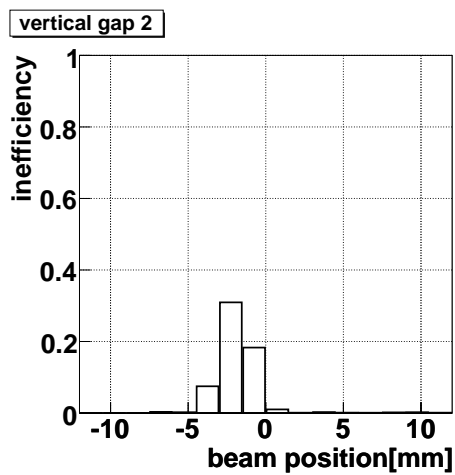


図 3.33 2つ目の垂直方向隙間付近での検出効率

表 3.6 2つ目の垂直隙間付近の各位置での不感率

ビーム位置 [mm]	イベント数 N	ヒット数 N_{hit}	不感率 ε [%]
-6.0~-4.5	917	915	$0.2^{+0.2}_{-0.1}$
-4.5~-3.0	950	879	7.5 ± 0.9
-3.0~-1.5	1115	770	30.9 ± 2.8
-1.5~ ±0	1153	942	18.3 ± 1.8
±0.0~+1.5	1193	1181	$0.2^{+0.2}_{-0.1}$
-6.0~-4.5	5328	4687	12.0 ± 0.5

表 3.7 それぞれの隙間付近 7.5mm 領域での不感率

隙間	隙間付近 6.0mm 領域での不感率 [%]
水平 1	12.1± 0.4
水平 2	8.8± 0.3
垂直 1	12.6± 0.5
垂直 2	12.0± 0.5

第 4 章

実機トラッキングプレーンの製作

図 4.1 に実機トラッキングプレーンの製作スケジュール (シンチレーター製作、ファイバー製作を含む) を示す。

まず、2007 年 11 月と 12 月に FTBL においてプロトタイプシンチレーターの光量試験が行い、光量が十分大きいことを確かめた。そこで、2007 年 12 月から 2008 年 2 月にかけてアメリカのフェルミ研究所で実機用シンチレーターが全数製作した。そのシンチレーターの光量試験ならびに隙間評価試験を 2008 年 3 月に行い、光量が十分大きいこと、個体差がないことを確かめられた (第 3 章)。その後、シンチレーターを 2008 年 7 月に J-PARC LINAC 棟に輸送し、シンチレーターの大きさならびに重さを測定して反射材を塗布した後、実機にインストールした。本章の第 1 節は、シンチレーターの大きさならびに重さ測定の結果について述べる。製作過程については付録 A を参照されたい。

次に、2008 年 5 月から 7 月にかけてファイバーの製作ならびに光量測定試験が行った。この章の第 2 節で、光量測定試験の結果について述べる。製作過程については付録 A にまとめた。

最終的に、2008 年 8 月から 12 月にかけて、INGRID トラッキングプレーンを全数製作した。本章第 3 節ではその制作過程について述べる。

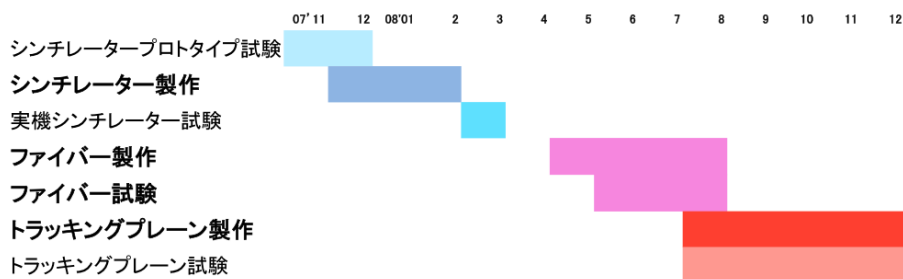


図 4.1 コンポーネント製作ならびに試験も含めたトラッキングプレーン製作スケジュール。

4.1 シンチレーターの大きさと重さの測定

INGRID シンチレーターのファイバー穴の大きさは直径が約 2 ~ 4mm 程度にばらついており、穴のあいていない不良品も存在する。そこで、J-PARC LINAC 棟に輸送後、ファイバー穴がシンチレーター全域を通してつながっていることを目視で確認した。また、全シンチレーターの約 2% にあたる 349 本の長さ・重さを測定して、シンチレーターの製作精度を調べた。

4.1.1 目視チェック

シンチレーターの一方向の端面からファイバー穴に光を当てて、もう一方の面からファイバー穴を覗いてその光が届いているかどうか確認した (図 4.2)。

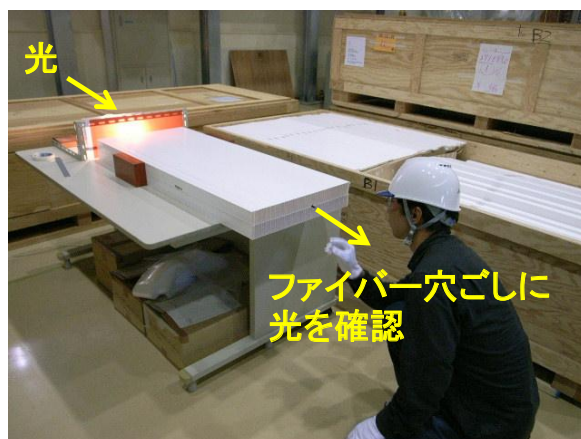


図 4.2 シンチレーターのファイバー穴チェックのセットアップ。一方の端面から当てた光が、もう一方の端面まで届いていることを確認する。

4.1.2 長さ・重さの測定

シンチレーターの縦・横長さの測定には、デジタルノギス (株式会社ミットヨ製の ABS デジマチックキャリパ) を用いた。繰り返し精度は 0.01mm である。長さはアナログノギスを用いて 0.5mm 精度で測定した。重さの測定にはデジタルはかり (株式会社 MonotaRO 製、品番 FKCP1000) を用いた。

測定は 1 日毎に行い、トラッキングプレーン (シンチレーター 48 枚) 毎に 2 枚のシンチレーターの縦・横・長さを測定した。特にトラッキングプレーン番号 74 ~ 172 に関しては、その日の測定前に規準となるシンチレーターの縦・横・長さ・重さの測定の後、その日の測定を行った。

規準となるシンチレーターの測定結果と、その日に測定したシンチレーターの測定結果の相関を図 4.3、図 4.4、図 4.5、図 4.6 に示す。図 4.3 が縦長さの測定、図 4.4 が横長さの測定、図 4.5 が長さの測定、図 4.6 が重さの測定結果である。各測定に相関は見られない。よって、基準となる測定

結果のバラつきを各測定の実測誤差とした。

規準となるシンチレーターの26回分の測定結果を表4.1に示す。この表から、縦長さ測定、横長さ測定、長さ測定、重さ測定の測定誤差はそれぞれ0.48%、0.11%、0.02%、0.08%であった。

シンチレーター349枚分(トラッキングプレーン170枚分)の結果を図4.7、図4.8、図4.9、図4.10に示す。図4.7が縦長さ、図4.8が横長さ、図4.9が長さ、図4.10が重さの測定結果で、それぞれの平均値とRMSを表4.2に示す。表4.1と比較すると、縦長ささと重さの測定が測定誤差以上にばらついており、それを個体差によるものとする、縦長さの個体差は $\sqrt{0.95^2 - 0.48^2} = 0.8\% \sim 0.8\text{mm}$ 、重さの個体差は $\sqrt{0.47^2 - 0.08^2} = 0.5\% \sim 1.2\text{g}$ となる。重さの個体差はファイバーホールの大きさによるものと考えられる。長さは1202.5~1203.5mmの範囲内、横長さは49.9~50.6mmの範囲内で、INGRID検出器に用いる上で特に問題にならなかった。

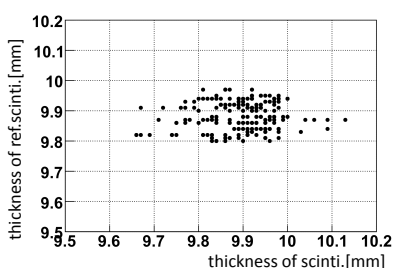


図4.3 各シンチレーターと規準となるシンチレーターの縦長さの測定の相関。

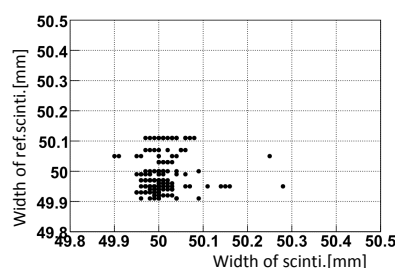


図4.4 各シンチレーターと規準となるシンチレーターの横長さの測定の相関。

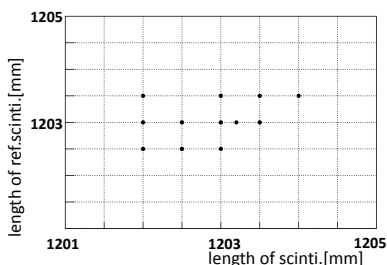


図4.5 各シンチレーターと規準となるシンチレーターの長さの測定の相関。

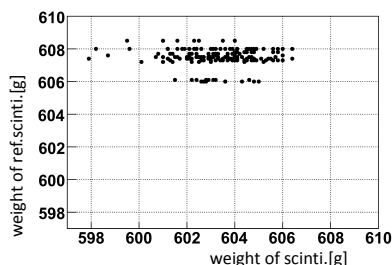


図4.6 各シンチレーターと規準となるシンチレーターの重さの測定の相関。

表4.1 規準となるシンチレーターの26回分の測定結果。

	縦 [mm]	横 [mm]	長さ [mm]	重さ [g]
平均	9.884	49.98	1203	607.5
RMS	0.047(0.48%)	0.054(0.11%)	0.241(0.02%)	0.527(0.08%)

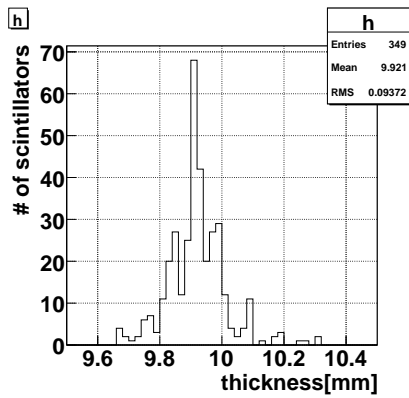


図 4.7 各シンチレーターの縦長さの測定結果

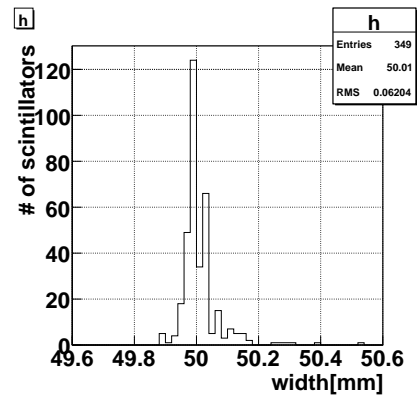


図 4.8 各シンチレーターの横長さの測定結果

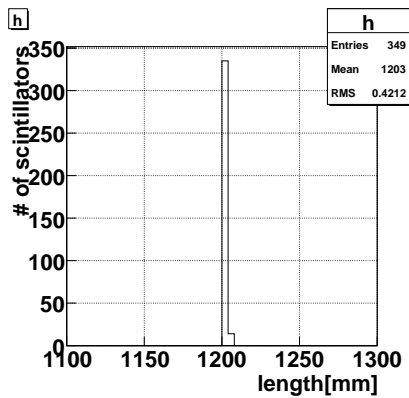


図 4.9 各シンチレーターの長さの測定結果

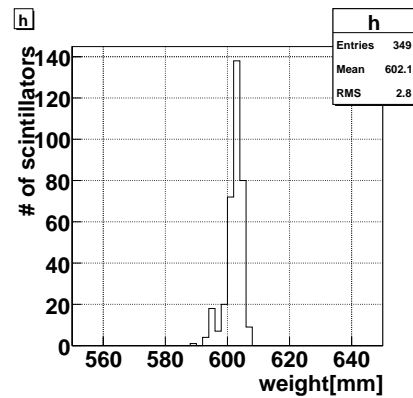


図 4.10 各シンチレーターの重さの測定結果

表 4.2 シンチレーター 349 枚分の試験結果

	縦 [mm]	横 [mm]	長さ [mm]	重さ [g]
平均 [mm]	9.921	50.01	1203	602.1
RMS[mm]	0.094(0.95%)	0.062(0.12%)	0.42(0.03%)	2.8(0.47%)

4.2 ファイバー光量のチェック

2008年5月から7月にかけて、京都大学で INGRID 用ファイバーを製作した。そしてファイバー 24 本ごとに光量チェックを確認し、ファイバー製作手続きに問題がないことを確認した。

4.2.1 セットアップ

ファイバー光量測定の設定アップの概略図を図 4.11 に示す。gate generator によって 500Hz で LED を点灯させて測定用・規準ファイバーに接続した MPPC の ADC データを記録した。測定用ファイバー位置に各ファイバーをセットして、規準用ファイバー (固定) との光量を比較した；測定用ファイバーに接続されている ADC のペDESTAL 値を P 、LED 光量の ADC 平均値を A 、レファレンス用のそれらを P_0 、 A_0 として、

$$R = \frac{A - P}{A_0 - P_0} \quad (4.1)$$

で定義した光量比 R によって、ファイバー光量の個性を比較した。

4.2.2 結果

各ファイバーの ADC 分布を図 4.12 に示す。この時の光電子数はそれぞれ約 35p.e. で、光量比は 1.06 である。

204 本分のファイバーの試験結果を図 4.13 に示す。光量比 R のバラつきは 8.4% であった。

また、測定誤差を見積もるために、測定用ファイバー位置に同じファイバーをセットしなおして 13 回測定を行った。その時の光量比 R のバラつきは 2.3% であった。

以上の結果から、光量比 R のバラつき ΔR は

$$\Delta R = \sqrt{(8.4\%)^2 - (2.3\%)^2} = 8.0\% \quad (4.2)$$

となる。この原因として、以下のようなものが考えられる。

1. GOMI connector 接着による不定性
2. ファイバー端面の研磨の不定性
3. ファイバー自体の個性

4.3 シンチレーター層の製作

2008 年 8 月から 12 月にかけてトラッキングプレーンの製作を行った。製作過程の詳細は付録 A に記した。ここでは全 9592 チャンネルに及ぶシンチレーター層 (トラッキングプレーンと VETO シンチレーター層) の製作スケジュールについて述べる。

製作人数は二人二組の計四人で、各組が一日に約 7 時間かけて 2 枚のシンチレーター層を完成させる (図 4.14)。以下にシンチレーター層製作の手続きをまとめた。

1. 側面のアルミバー、片側のアルミパネルならびに遮光用プラスチック板を組み立てる。
2. 遮光用プラスチック板に接着剤を塗布し、1 層目のシンチレータ (24 枚) を順次接着したシンチレーターの接着には、T2K の前身である K2K の SciBar 検出器で用いられたものと同

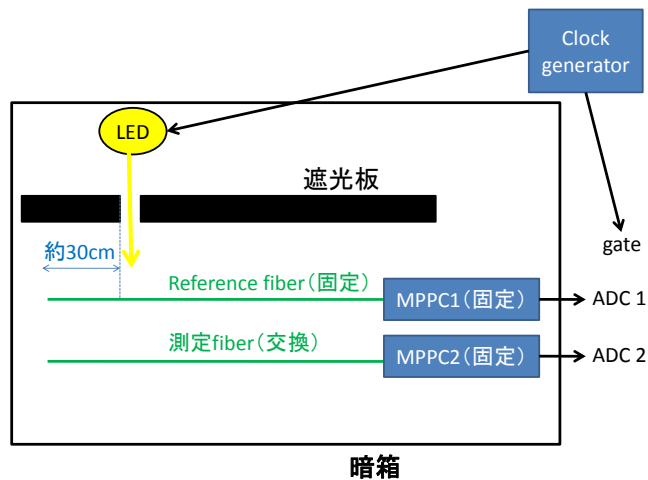


図 4.11 ファイバー光量のセットアップ。gate generator で LED を光らせて各ファイバーに接続した MPPC の ADC データを収集している。

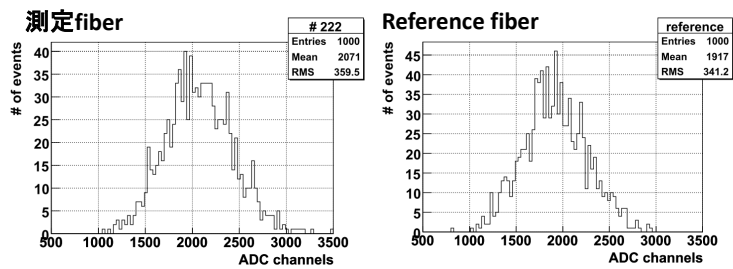


図 4.12 左が測定用ファイバー (交換)、右がレファレンスファイバー (固定) の ADC 分布。光量は共に約 35p.e.。

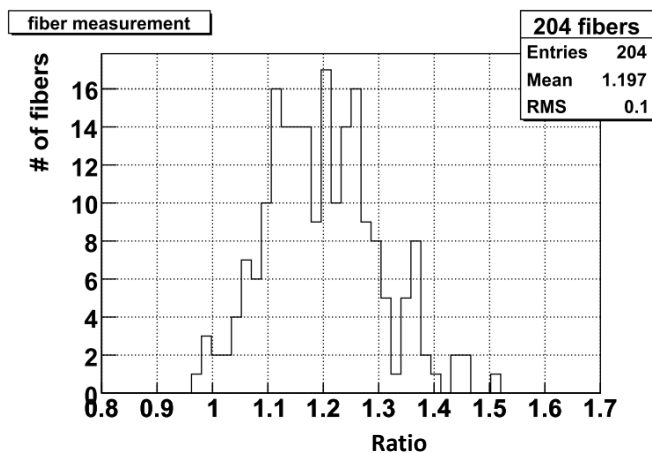


図 4.13 ファイバー 204 本分の測定結果。分布の広がり率は 8.4%。

	組み立て	試験
朝 (9:00-12:00)	ファイバー・MPPC インストール ケーブリング	宇宙線試験の解析
午後 (13:15-16:30)	シンチレーター 組立	MPPCノイズによる試験 宇宙線試験
その他 (16:30-9:00)	接着剤硬化	宇宙線データ取得

図 4.14 INGRID トラッキングプレーン製作の一日のスケジュール。

じセメダイン社の PM200 を用い、接着剤塗布用のローラーは大塚印毛社製のローラーを用いた。

3. 一層目のシンチレーター層の上に接着剤を塗布し、2 層目のシンチレーターを順次接着していく。
4. 2 層目のシンチレーターに接着剤を塗布し、遮光用プラスチック板を接着する。
5. もう一方の面の遮光用プラスチック板とアルミフレームを組み立てる。
6. 接着材が乾くまで半日放置する。
7. 接着剤の硬化後、まずシンチレーターにファイバーを通す。
8. GOMI コネクターを装着した MPPC を、ファイバーにつける。
9. MPPC にケーブルを取り付けてケーブリング作業を行う。

製作したトラッキングプレーンから随時クオリティチェックを行った。クオリティチェックは 1 ~ 2 人で行い、不備が見つかった場合はその場で修理して再チェックを行い、クオリティの回復を確認した。チェックの詳細は次章に示す。製作準備を 2008 年 8 月から 9 月上旬に行い、製作を 2008 年 9 月 8 日から 12 月 19 日まで行った。

第 5 章

実機トラッキングプレーンの性能評価

2008 年 8 月から 2008 年 12 月にかけて、INGRID トラッキングプレーンを全数製作した。さらに、製作が完了したプレーンから随時、宇宙線を用いて性能評価試験を行った。この章では、その試験結果を中心に述べる。

5.1 試験の目的

試験の目的は以下の 3 つである。

- **MPPC ノイズシグナルの確認**
宇宙線データ取得前に MPPC シグナルを確認して、シグナルケーブルに断線がないことを確認した。
- **宇宙線光量の測定**
宇宙線光量を測定し、光量の低いチャンネルは交換して全てのチャンネルが要求される性能を持つことを確認した。
- **検出効率の測定**
宇宙線に対する検出効率を測定し、光量から予想されるように高い検出効率を持つか確かめた。

製作過程の問題を早期に発見して改善するために、MPPC ノイズシグナルの確認ならびに宇宙線光量の測定は、製作が完了したシンチレーター層から随時試験した。

5.2 セットアップ

実機製作と同じ場所である茨城県東海村 J-PARC LINAC 棟で性能評価試験を行った。試験期間は 2008 年 8 月から 12 月にかけてで、これは実機製作期間と同じである。

トラッキングプレーンは読み出しボードである TFB(Trip-t Front-end Board) も取り付けられている。TFB1 枚でトラッキングプレーン 1 枚分(48 チャンネル)の ADC データを読むことができ、

RMM(Readout Merger Module) で一度に複数の TFB を読みだすことができる。しかし、今回の試験期間中にはまだ開発段階であったため、RMM1 枚で 4 枚の TFB をランダムトリガーで読みだすことしかできない。さらに RMM は一枚だけである。

一方、トラッキングプレーンは 1 日に 4 枚製作され、それらを随時クオリティチェックしなければならない。

そこで、その日にできた 4 枚のトラッキングプレーンを図 5.1 のように配置して、各トラッキングプレーンを他のトラッキングプレーンに対して宇宙線トリガーとして用いることにより、4 枚同時に試験するシステムを考案した。この配置で、まず MPPC ノイズシグナルの確認の後、ランダムトリガーで 4 時間データを取得しながらオフラインでデータリダクションして、最終的な解析の末に宇宙線イベントを選んだ。ADC ゲート幅は 250nsec である。

また、温度センサー (T&D 社製 TR-71U) で 5 分ごとに温度を記録し、データ取得中の 4 時間分の平均温度をモニターした。全試験期間中の温度変化は 3°C 以下であった。

5.3 MPPC ノイズシグナルの確認

宇宙線データ取得の直前に、MPPC ノイズによる ADC 分布 (図 2.16) の確認を行い、シグナルケーブルに断線がなく製作手続きに問題がないか確認した。各 MPPC に印加する電圧は、京都大学で事前に測定したデータを用いて 25.0°C でゲイン = 7.5×10^5 ($\Delta V = 1.5$) になるように 0.02V 精度で調節した。

試験項目は以下の 4 つである。

1. ペDESTAL・1p.e. ピークを確認し、シグナルケーブルに断線がないことを確認する。
2. ADC データから MPPC ゲインを算出し、MPPC 不良品ならびにチャンネルつけ間違いをチェックする。チャンネルが付け間違っていると、つけ間違った MPPC 間で ΔV が正しく設定されないため、ゲインが増加・減少する。例えば、二つの MPPC の V_{br} が 70V(MPPC1)、71V(MPPC2) の時に $\Delta V = 2$ にするためにはそれぞれの MPPC に印加する電圧は 72V(MPPC1)、73V(MPPC2) となる。ここでチャンネルを付け間違っていると、印加電圧は 73V(MPPC1)、72V(MPPC2) となり ΔV はそれぞれ 3V、1V となる。MPPC のゲインは ΔV に比例するから (図 2.18)、MPPC1 のゲインは予想の 1.5 倍、MPPC2 のゲインは予想の 0.5 倍になり、ゲインの増大・減少によってチャンネルのつけ間違いをチェックすることができる。チャンネルつけ間違いによるゲインの分布を図 5.3 に示す。横軸がチャンネル番号、縦軸が MPPC ゲイン (ADC)[ADC conuts] である。チャンネル 3 と 4 でチャンネルの付け間違いが起こっていることが分かる。
3. 京都大学で事前に測定したデータとノイズレートを比較し、50% 以上のズレがあった場合は MPPC を交換する。実際にノイズレートが 50% 以下だった時の結果を図 5.4 に示す。
4. ノイズレート < 1.6MHz をチェックする。1.6MHz は、浜松ホトニクス出荷時にチェックされる値と同じである。

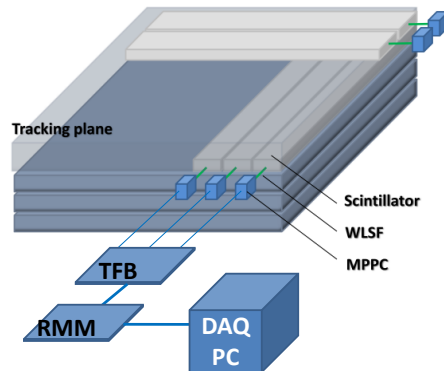


図 5.1 実機トラッキングプレーン宇宙線試験のセットアップ概略図。4 枚のトラッキングプレーンを重ねて一度に 4 枚のトラッキングプレーンの試験を行う。

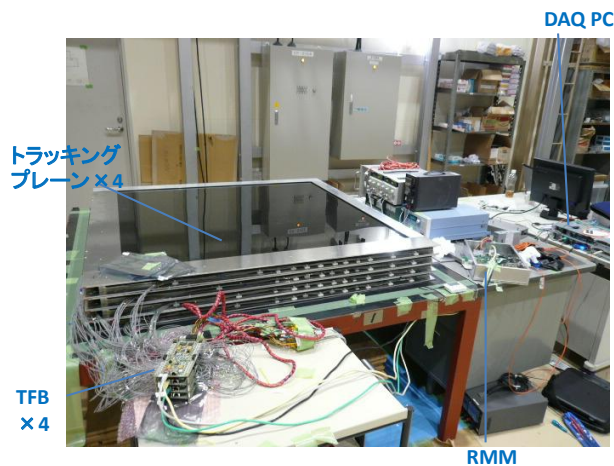


図 5.2 実機トラッキングプレーン宇宙線試験のセットアップ写真。

5.4 宇宙線データの収集

前述のように、データ読み出しに用いたボードは、開発段階のため 16kHz のランダムトリガーしか備わっていない。このランダムトリガーで取得したデータを全て保存した場合、データレートは 50G/h で膨大になる。そこで、ランダムトリガーでデータ収集を行うと同時に、1 時間ごとに随時データを解析しデータリダクションを行った (図 5.5)。以下でデータリダクションの方法について述べる。

まず、MPPC のノイズ×クロストーク&アフターパルス由来のイベントを減らし、かつ宇宙線イベントを効率的に選択するために、各シンチレーターのヒットを 4.5p.e. 以上とした。この時、ノ

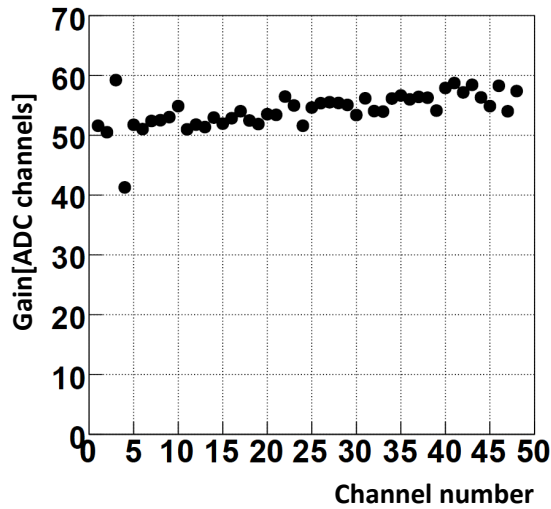


図 5.3 トラッキングプレーン 48 チャンネルの試験結果。チャンネル 3 と 4 がつけ間違っている。つけなおして再測定し MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] がそろっていることを確認したのち、宇宙線データ取得をスタートする。

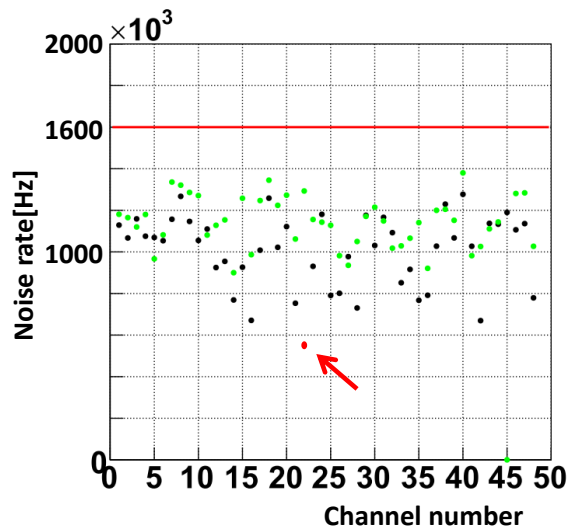


図 5.4 トラッキングプレーン 48 チャンネルの試験結果。緑点は事前キャリブレーションデータで、ズレが 50% 以上・ノイズレート < 1.6MHz をチェックする。チャンネル 22 が 50% 以下で、MPPC の交換後に再測定してチェックしたのち、宇宙線データ取得をスタートする

イズ由来のイベントがゲート内に入る確率は、式 2.3 より、

$$250 \times 10^{-9} \times 500 \times 10^3 \times 0.18^3 = 0.08\%$$

となる。ここで、 250×10^{-9} [sec] はゲート幅、 500×10^3 [Hz] は MPPC の典型的なノイズレート、0.18 はクロストーク & アフターパルスレートである。また、宇宙線イベントに対する不感率は式

2.6 で光量を 15p.e. として 0.1% 程度である。

次に、4 枚重ねたトラッキングプレーン (シンチレーター層 8 枚) を宇宙線が突き抜けるイベントを選択するために、1 層 24 枚のシンチレーターの論理和をシンチレーター層のヒットとして、5 層以上のヒットを要求した。24 枚のシンチレーターの論理和を取った場合、ノイズ由来のイベントがゲート内に入る確率は $0.08 \times 24 = 1.7\%$ となる。さらに 5 層の論理積を取ると ${}^8C_5 \times (1.7\%)^5 = 10^{-3}\%$ となる。

このカット条件によって、データ数・データ量ともに約 10^{-4} に抑える (~5M/h) ことができる (図 5.6)。以下に述べる光量ならびに検出効率の解析には、このリダクション後のデータを用いる。

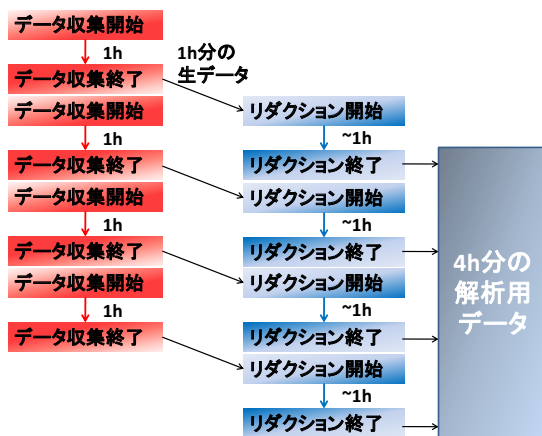


図 5.5 データリダクションのチャート図

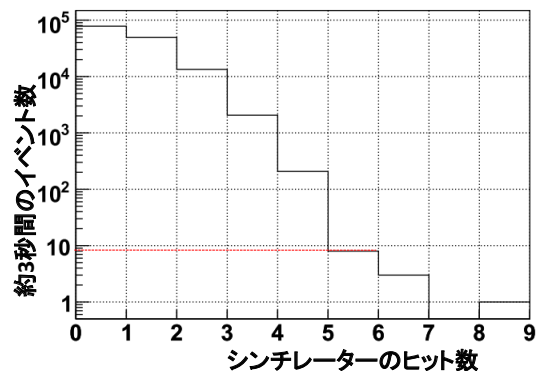


図 5.6 横軸はシンチレーターのヒット数、縦軸は約 3 秒間データ取得した場合のイベント数。5 層ヒットを要求することにより、イベント数は 10^{-4} に減少する。

5.5 宇宙線光量の測定

製作手続きにおける問題を早期に発見して改善するために、各トラッキングプレーンの製作直後に宇宙線光量によってチェックを行った。

5.5.1 イベントセレクション

各シンチレーターを宇宙線が通過したイベントを選択するために、まず自身から上二枚 (自身のトラッキングプレーンが上から数えて 1、2 番目だった場合は下二枚) のトラッキングプレーン中の同じ向きのシンチレーター層の隣り合う三つのシンチレーターの光量が 7.5p.e. 以上であることを要求する (図 5.7)。

この時の ADC 分布を図 5.9 に示す。ここで、赤色で示してあるものが今考えているシンチレーター、青色で示してあるのは配置的に関係のないシンチレーターである。赤色・青色ともに ~7p.e.

領域まで、MPPC のノイズ×クロストーク&アフターパルス由来のイベントが見える。そこで、自身の光量が 7.5p.e. 以上というカット条件を加えてノイズ由来のイベントを排除した。

また、シンチレーターの各位置における光量を求めるために、先ほどのカットに加えて上下の異なる方向のシンチレーター層を 4 枚ずつ 6 箇所に分けて (図 5.8) 4 枚のうちどれか少なくとも 1 枚の光量が 7.5p.e. 以上のイベントを選んだ。

これによって、シンチレーター全領域での光量と、シンチレーター各位置での光量を求める。

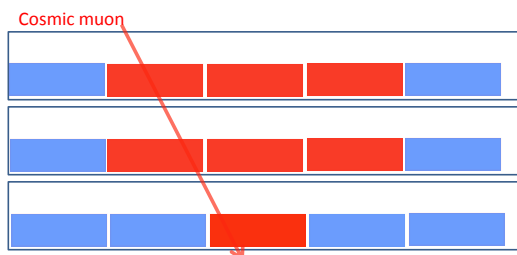


図 5.7 同じ向き of シンチレーター 2 層の隣り合う 3 つのシンチレーター光量が 7.5p.e. 以上であることを要求して、宇宙線イベントを選択する。

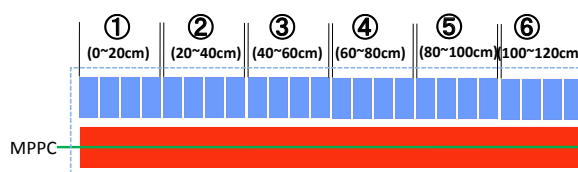


図 5.8 異なる向き of シンチレーターを 4 枚 6 グループに分けて、宇宙線が各位置を通過したイベントを選択する。

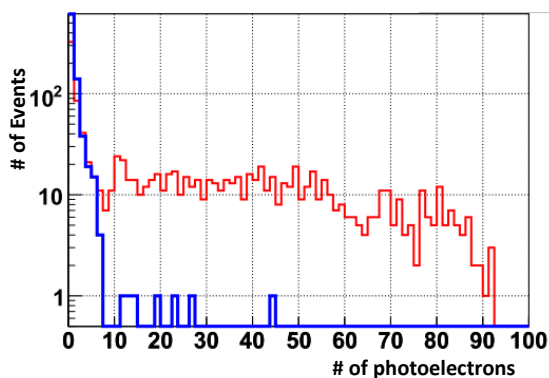


図 5.9 図 5.7 のカット条件による ADC 分布

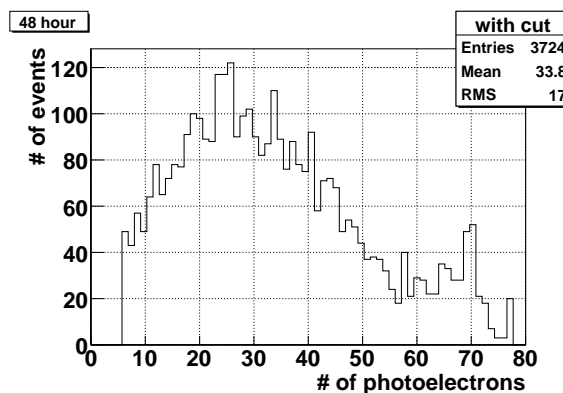


図 5.10 48 時間分のデータの ADC 分布。

5.5.2 試験項目

シンチレーター・ファイバー・MPPC に不良品がないか、またファイバー途中に傷がないか確認するために、シンチレーター全領域での光量と、シンチレーターの各位置 (図 5.8) での光量をチェックする。

ここでチェックに用いる閾値を決めるために長時間試験 (48 時間) を行った。シンチレーター全領域の ADC 分布を図 5.10 に示す。イベント数は 3724 で光量は 33.8 ± 0.3 p.e. であった。そこで、

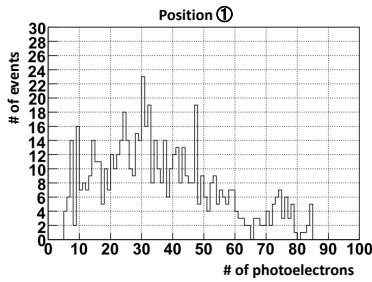


図 5.11 宇宙線が位置 0~20cm を通過した時の ADC 分布。

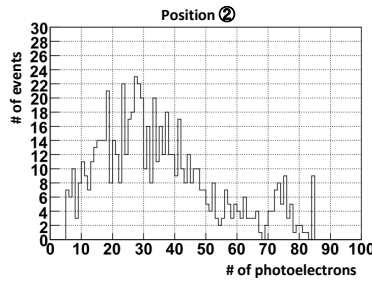


図 5.12 宇宙線が位置 20~40cm を通過した時の ADC 分布。

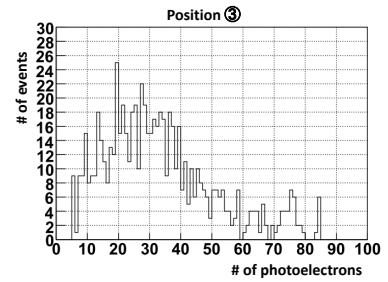


図 5.13 宇宙線が位置 40~60cm を通過した時の ADC 分布。

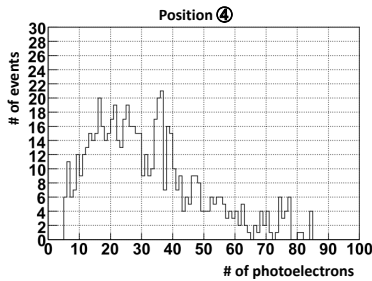


図 5.14 宇宙線が位置 60~80cm を通過した時の ADC 分布。

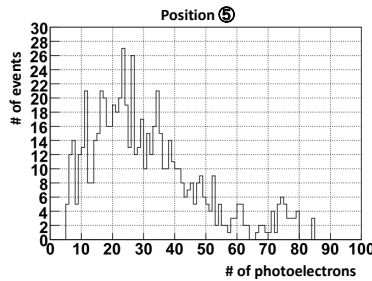


図 5.15 宇宙線が位置 80~100cm を通過した時の ADC 分布。

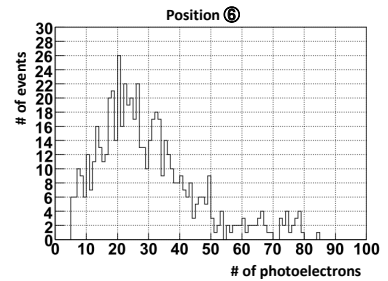


図 5.16 宇宙線が位置 100~120 を通過した時の ADC 分布。

その約 60% 程度である 19.0p.e. を閾値とした。

次に、シンチレーターの各位置における ADC 分布を図 5.11 ~ 図 5.16 に示す。図 5.11 が MPPC からの距離が 0 ~ 20cm 位置でのシンチレーター光量 (図 5.8 の位置 1)、図 5.12 が 20 ~ 40cm 位置... である。図 5.11(MPPC から最も近い位置) と図 5.16 (MPPC から最も遠い位置) を比較すると、明らかに前者の方が光量が大きく、光量のファイバー減衰をみることができる。

そこで、位置 0 ~ 20cm での光量に対する各位置の光量比を図 5.17、表 5.1 に示す。図の横軸はシンチレーターの各位置 (図 5.8)、横軸は光量比の対数表示である。また、図 5.17 の青点線は、前回のビーム試験で明らかになったファイバー減衰長 241.7cm (第 2 章参照) から予想される光量比であり、表 5.17 最右列に値を示した。ファイバー端面に反射剤を塗布しているので、光量は減衰長 241cm より緩やかに減少していく (表 5.1)。全チャンネルチェックの閾値は、表 5.1 の値の 70% を用いた (表 5.1 の最右列)。

以下に試験項目をまとめる。

チェック-1 シンチレーター全領域での光量が 19p.e. 以上。これによって、シンチレーター・ファイバー・MPPC の性能不良をチェックする。

チェック-2 シンチレーターの各 20cm 領域 (図 5.8) での光量と最も MPPC に近い領域での光量が

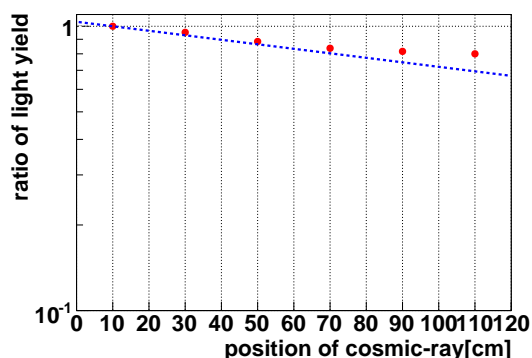


図 5.17 位置 0~20cm の光量に対する各位置の光量比。青色は減衰長を 241cm から予想される光量比。ファイバー端面の反射材によって、減衰長から予想されるほど減衰しない。

表 5.1 位置 0 ~ 20cm での光量に対する各位置での光量比。チェックの閾値として、

位置 [cm]	光量比	減衰長 241cm の場合	チェックに用いた閾値
0~20	1.00	1.00	/
20~40	0.95	0.92	0.66
40~60	0.88	0.85	0.62
60~80	0.84	0.78	0.59
80~100	0.82	0.72	0.57
100~120	0.80	0.66	0.55

予想される値 (表 5.1) の 70% 以上であることの確認。これによって、ファイバーの途中に傷がないかチェックする。

これらのチェックに合格しなかった場合、目視でファイバー・MPPC の受光面を観察して傷などがあれば交換後に再測定し光量の回復を確認した。目視で確認して傷がない場合もファイバーを交換後に再測定を行い、チェックに合格することを確認した。

5.5.3 試験結果

実際の試験時間である 4 時間分のデータを用いて得たシンチレーター全領域での ADC 分布を図 5.18 に示す。ファイバーが GOMI connector 根元で折れていた場合の ADC 分布を図 5.19 に示す。図 5.18 に比べて明らかに光量が低い。これはチェック-1 によって発見することができた。

全チャンネルをチェックした結果、チェックに合格せず問題のあったチャンネルの数を表 5.2 に示す。今回はシンチレーター不良による交換はなかった。

図 5.20 に、全トラッキングプレーン 8448 チャンネル分の光量 LY の分布を示す。一番光量の低

表 5.2 光量チェックによってファイバー又は MPPC が交換されたチャンネル数

理由	問題のあったチャンネル数
ファイバーの研磨ミス	11
ファイバークラック	6
ファイバー途中に傷	4
MPPC 受光面の汚れ	2

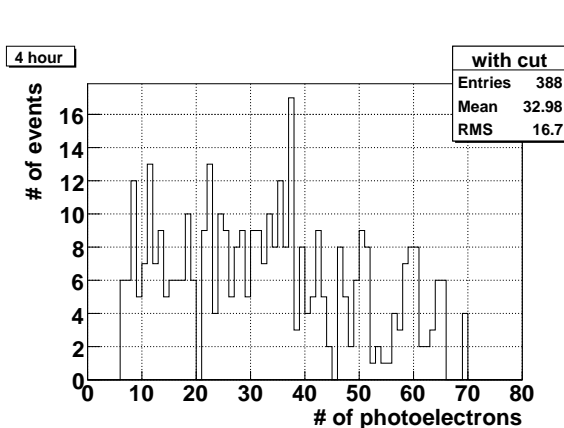


図 5.18 4 時間分のデータの ADC 分布。

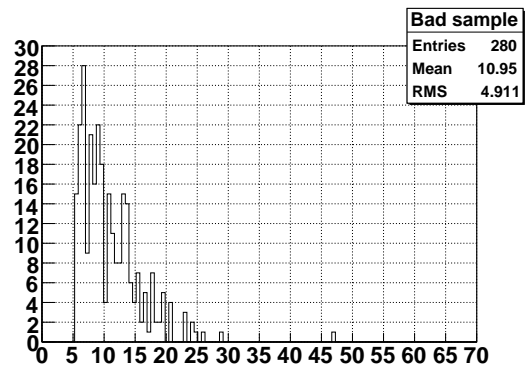


図 5.19 ファイバーが GOMI connector 根元で折れていた時の宇宙線 ADC 分布。明らかに光量が低い。

いチャンネルの光量は 19.4p.e. である。19.4p.e. は予想される光量の 60% であること、ファイバー端の反射材によって光量が 15% 増加することから、最も光量の低い地点での光量 LY_{\min} は、

$$LY_{\min} \geq 11.0 \times 0.6 \times 1.15 = 8.0[\text{p.e.}] \quad (5.1)$$

の品質が保証される。この時の検出効率 e は式 2.6 より 99.7% で十分に高い。

5.6 検出効率の測定

光量測定結果から、実機トラッキングプレーン全チャンネルの品質が 8.0p.e. 以上であることが示された。つまり、隙間付近を除いた全てのチャンネルで検出効率は 99.698% 以上であると考えられる。そこで、図 5.1 で真ん中の二つのプレーン位置で試験された 87 プレーンについて、光量から予想される通りの検出効率を持つかを確認した。

5.6.1 イベントセレクション

次のような手続きで各シンチレーター層の検出効率を求めた。

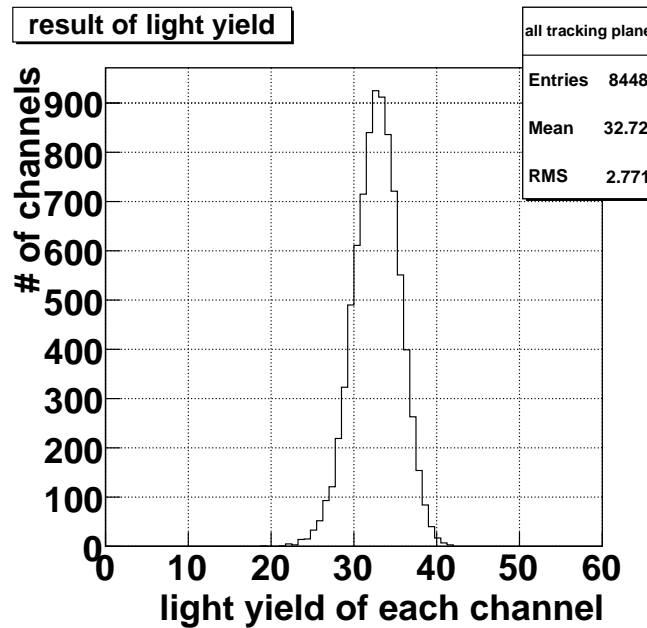


図 5.20 トラッキングプレーン全チャンネルの光量分布

1. 検出効率を算出するシンチレーター層を決定する。例として、ここでは上から二つ目のシンチレーター層を考える (図 5.21)。
2. 考えているシンチレーター層以外の 7 層でのヒットを要求する。ここで、シンチレーター層のヒットは、各層 24 チャンネルのうち 1 チャンネルのみが 9.5p.e. 以上の場合である。
3. 一番上と一番下のシンチレーター層のヒット場所に注目する (図 5.22)。
4. 一番上と一番下のシンチレーターヒット場所に挟まれた領域 (図 5.23 の赤点線) において、今考えているシンチレーター層以外のもう 1 つのシンチレーター層にヒットがあることを要求する。
5. その領域にヒットがあった場合を宇宙線イベントと定義する (図 5.24)。
6. 最後に、今考えているシンチレーター層 (上から二番目) で、先ほどのシンチレーター層のヒット場所と一番上のシンチレーター層のヒット場所に挟まれた領域に、ヒットがあった場合をヒットイベント、なかった場合をミスイベントと定義する (図 5.24)。ここでのシンチレーターヒットは 1.5p.e. を閾値とした。

この方法によって、あるシンチレーター層で平均した検出効率を求めることができる。

5.6.2 試験結果

48 時間分のデータを用いたシンチレーター層の解析結果を表 5.3 に示す。宇宙線イベント数 60588 に対してミスイベント数は 402(0.63%)で検出効率は $402/60588$ から 99.33%と高く、不定性

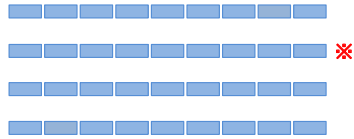


図 5.21 検出効率を解析するシンチレータ層を決定する。ここでは、例として上から二つ目のシンチレータ層を選ぶ。

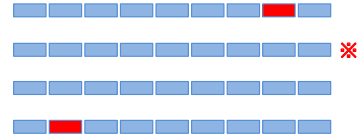


図 5.22 一番上と一番下のシンチレータ層のヒット場所に注目する。

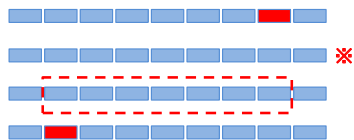


図 5.23 一番上と下のシンチレータ層のヒット場所に挟まれた領域で、ヒットがあるか調べる。

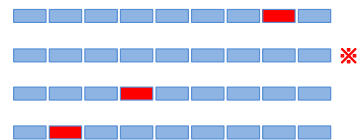


図 5.24 ヒットシンチレータに挟まれた領域にヒットがあった場合、宇宙線イベントとする。



図 5.25 ヒットシンチレータに挟まれた領域にヒット (閾値 1.5p.e.) があった場合をヒットイベント、なかった場合をミスイベントとする。

は $\sqrt{402}/60588$ から 0.03% で目標である 0.5% より十分良い精度で測定することができた。

402 のミスイベント中、384 イベントは着目しているシンチレータ層の前後でヒットシンチレータ層が一つだけ移動しているイベント (図 5.26) であった。これはシンチレータ層間の隙間を通ったイベントと考えられ、以下ではギャップイベントと呼ぶ。ギャップイベントによる不感率は $384/60588$ から 0.63% で十分に小さい。また、ビーム照射試験の結果よりも小さく、ある程度の

角度を持って入射する荷電粒子に対する隙間による不感率は 0.63% 程度であると考えられる。不感率の不定性は $\sqrt{384}/60588$ から 0.03% で、目標である 0.5% より十分に良い精度で測定することができた。

残りの 18 個のミスイベントについて述べる。まず、11 イベントは着目している三つのシンチレーター層から得られる宇宙線軌道は鉛直真っ直ぐで、着目しているシンチレーター層のヒット場所は予想される場所の隣、特に右方向にシフトしているイベントであった (図 5.27)。これは、シンチレーターの横の長さが 49.9 ~ 50.6mm でばらついていること (図 4.8)、トラッキングプレーンの積み重ねは手動で行われていたことから、シンチレーター層同士のシンチレーター相対位置がずれていたためと考えられる。また、18 イベント中 2 イベント (宇宙線に対する割合は $2/60588 = 0.003\%$) は図 5.28 のような kink イベントであった。同じイベントを方向の異なるシンチレーター層のヒット位置で見ると同様な kink イベントであったので、2 つの宇宙線が入射しそれぞれ側面から出ていったイベントであると考えられる。

残りの 5 イベントは図 5.29 のように宇宙線が鉛直下向きに入射しているにもかかわらずシンチレーターにヒットがない完全なミスイベントであった。そこで、この 5 イベントがシンチレーターの光量による不感率で生じたミスイベントとすると、不感率は $5/60588$ より $0.0083^{+0.0081}_{-0.0053}\%$ で光量から予想されるように十分小さい。

以上から、シンチレーター層全体としての検出効率は $99.33 \pm 0.03\%$ で十分に高く、シンチレーター間の隙間による不感率は 0.65% で十分小さいことを確認できた。

長時間試験を行った 3 つのシンチレーター層についての結果を表 5.4、表 5.5、表 5.6 に示す。それぞれのシンチレーター層の検出効率は、 $99.31 \pm 0.03\%$ 、 $99.29 \pm 0.04\%$ 、 $99.30 \pm 0.03\%$ で十分に高いことを確かめた。また、シンチレーター間の隙間による不感率はそれぞれ、 $0.65 \pm 0.03\%$ 、 $0.66 \pm 0.03\%$ 、 $0.68 \pm 0.03\%$ で十分に小さい。

表 5.3 長時間試験シンチレーター層 1

	数	宇宙線イベント
宇宙線イベント	60588	100%
ミスイベント	402	$0.68 \pm 0.03\%$
ギャップイベント	384	$0.65 \pm 0.03\%$
ズレイベント (図 5.27)	11	$0.018 \pm 0.005\%$
kink イベント (図 5.28)	2	$0.003^{+0.004}_{-0.002}\%$
真のミスイベント (図 5.29)	5	$0.008^{+0.08}_{-0.005}\%$

次に 170 枚のシンチレーター層 (長時間試験を行った 4 枚は除いた) の試験結果について述べる。試験時間はそれぞれ 4 時間である。

図 5.30 はシンチレーター層それぞれの結果の宇宙線イベント数とミスイベント数のプロットで

表 5.4 長時間試験シンチレーター層 2

	数	宇宙線イベント
宇宙線イベント	60163	100%
ミスイベント	414	0.69 ± 0.03%
ギャップイベント	389	0.65 ± 0.03%
ズレイイベント (図 5.27)	15	0.025 ± 0.007%
kink イベント (図 5.28)	4	0.006 ^{+0.07%} _{-0.02%}
真のミスイベント (図 5.29)	6	0.009 ^{+0.09%} _{-0.03%}

表 5.5 長時間試験シンチレーター層 3

	数	宇宙線イベント
宇宙線イベント	60087	100%
ミスイベント	426	0.71 ± 0.03%
ギャップイベント	406	0.66 ± 0.03%
ズレイイベント (図 5.27)	10	0.017 ± 0.006%
kink イベント (図 5.28)	4	0.007 ^{+0.07%} _{-0.02%}
真のミスイベント (図 5.29)	6	0.010 ^{+0.09%} _{-0.03%}

表 5.6 長時間試験シンチレーター層 4

	数	宇宙線イベント
宇宙線イベント	60440	100%
ミスイベント	421	0.70 ± 0.03%
ギャップイベント	408	0.68 ± 0.03%
ズレイイベント (図 5.27)	7	0.012 ^{+0.08%} _{-0.07%}
kink イベント (図 5.28)	2	0.003 ^{+0.03%} _{-0.02%}
真のミスイベント (図 5.29)	6	0.010 ^{+0.09%} _{-0.06%}

ある。宇宙線イベント数は約 6000、ミスイベント数は約 40 で、いずれも先ほどの長時間試験の 4 時間/48 時間 = 1/12 程度になっていることが分かる。

ミスイベント数/宇宙線イベント数 で算出したそれぞれのシンチレーター層の不感率を図 5.31 に示す。不感率は 1% 以下で十分に小さい。



図 5.26 宇宙線がシンチレータ層間の隙間を通った時のイベント例。下二層でのヒット位置と一番上の層でのヒット位置が一つずれており、着目しているシンチレータ層にヒットはない。



図 5.27 シンチレータ層間での相対位置がずれているために生じるイベント例。



図 5.28 宇宙線が同時に 2 つ入射していた場合のイベント例。下二層と上二層は異なる宇宙線であり、それぞれは四層全て突き抜けることなく側面から抜け出している。

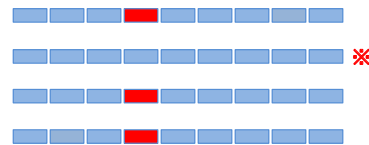


図 5.29 シンチレータ自身の不感率に由来するミスイベント。

さらに、ギャップイベントによる不感率(ギャップイベント数/宇宙線イベント数)、ミスイベントからギャップイベントを除いたイベントによる不感率(ミスイベント数 - ギャップイベント数/宇宙線イベント数)の不感率を図 5.32、図 5.33 に示す。ギャップイベントの不感率は 0.6% 程度で十分に小さい。また、ギャップイベントを除いた時の不感率は 0.15% 以下で光量から予想されるように小さい。

以上から、87 プレーン (174 シンチレータ層) 全てに対して検出効率が 99% 以上で十分に高く、光量から予想されるとおりであることが分かった。

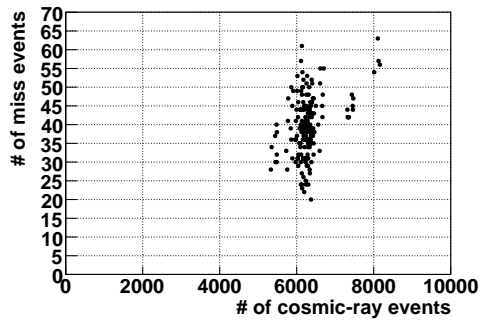


図 5.30 各シンチレーター層 (170 枚) 試験結果の宇宙線イベント数とミスイベント数

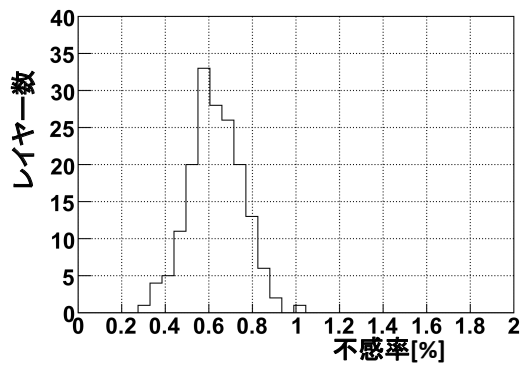


図 5.31 各シンチレーター層の不感率。横軸が各シンチレーターの不感率 [%] で縦軸がそのシンチレーター層の数。

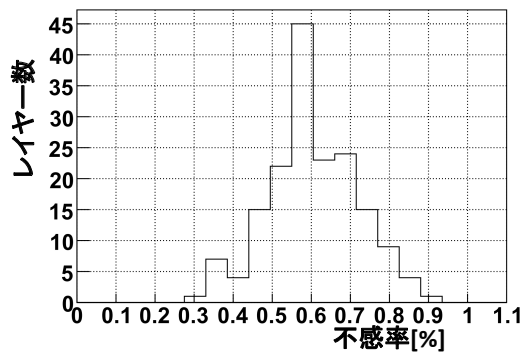


図 5.32 各シンチレーター層のギャップイベントによる不感率。横軸が各シンチレーターの不感率 [%] で縦軸がそのシンチレーター層の数。

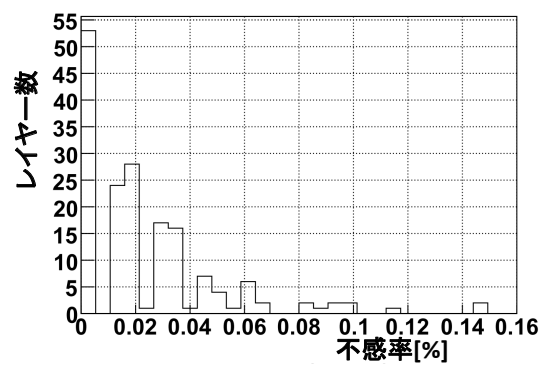


図 5.33 各シンチレータ層のミスイベントからギャップイベントを除いたイベントによる不感率。

第 6 章

検出効率のモニター計画

6.1 概要

第 2 章で述べたように、1mrad 以上の感度でビームのズレを感知するために各チャンネルの検出効率を 0.5% 以内で抑えることを目標にする。実際の実験期間中には宇宙線によって各チャンネルの検出効率をモニターする。そこで、モニター期間中に予想される検出効率の変動が少なくとも 0.5% 以内であることを保証しなければならない。

式 2.22 のように、検出効率 ε は光量 LY に依存する。一方、MPPC の PDE が ΔV を通じて間接的に温度に依存しているので (図 2.20、図 2.17)、光量は温度に依存する。よって、検出効率は温度の関数になる。そこで、光量の温度依存性を確認する実験を行った。

本章では、まずその試験について述べ、その試験結果から検出効率と温度の関係を明らかにした後、検出効率のモニター計画について述べる。

6.2 京都テストベンチ宇宙線試験における光量の温度依存性

京都大学テストベンチで、温度と INGRID アクティブコンポーネントの宇宙線光量を測定した。試験期間は 2007 年 12 月下旬から 2008 年 1 月中旬にかけて (596 時間) である。

6.2.1 セットアップ

アクティブコンポーネントを 4 つ重ねて一番上と一番下を宇宙線トリガーとして用いて、中央二つの光量を測定した (図 6.1、図 6.2)。MPPC の印加電圧は 22.0°C で $\Delta V = 1.5$ となるように調節した。

光量の測定と同時に、MPPC 付近に温度センサー (TR-71U) を設置して温度を測定した。

6.2.2 測定項目

トリガー用チャンネルが約 4p.e. 以上のイベントについて ADC の値を記録し、2 時間ごとにクロストーク&アフターパルス補正前の宇宙線光量 LY' を測定した。ここで、LY' は次の式で表される。

$$LY' = \frac{\text{ADC peak} - \text{pedestal}}{\text{MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts]}} \quad (6.1)$$

光量の測定と同時に温度センサーによって 30 分ごとの温度を記録し、2 時間ごとの平均気温を求めた。

また、図 3.10 のゲインモニター用回路によって 2 時間ごとに MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] もモニターした。

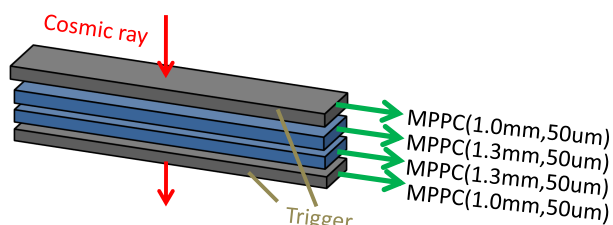


図 6.1 セットアップ図

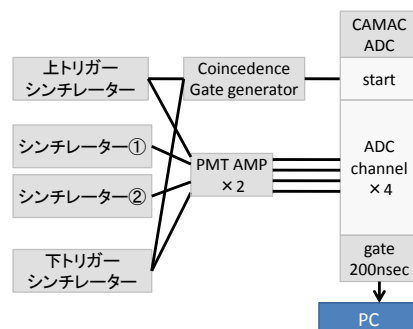


図 6.2 読み出し回路の概念図

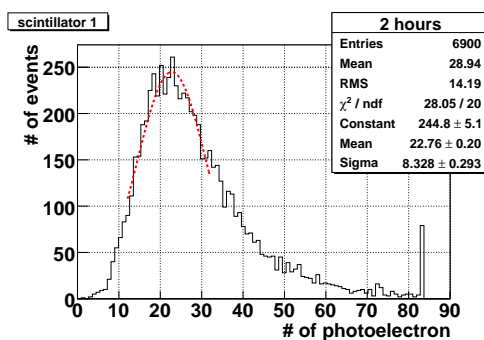


図 6.3 2 時間分の宇宙線 ADC 分布。

6.2.3 結果

2 時間分のデータの ADC 分布を図 6.3 に示す。この時補正前の光量は 22.8p.e.、補正後の光量は $22.8 \times (1 - 0.18) = 18.7\text{p.e.}$ で十分に高い。

596 時間分のデータについて、横軸を時間、縦軸を補正前の光量 LY'、MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts]、温度としたグラフを図 6.4、図 6.5、図 6.6 に示す。温度が上がると光量と MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] は下がり、温度が下がると光量と MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] は上がっていることが分かる。

そこで、横軸を温度、縦軸を MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] にしたものが図 6.7、縦軸を補正前光量 LY' にしたものが図 6.8(シンチレータ-1)、図 6.9(シンチレータ-2) である。MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] を温度の一次関数でフィットすると、温度 1.0°C あたり、MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] は 1.86 減少 (図 6.7 の赤点線) し、22°C における MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] が 45.3 から、変化率は $1.86/45.3 = 4.1\%$ となる。一方、MPPC の基礎特性 (表 2.1) から、 ΔV は 1.0°C あたり 0.06V 減少し、ゲインは 25°C、 $\Delta V = 1.5$ で 7.5×10^5 で 0.1V あたりの変化率は $0.47/7.5 = 6.27\%$ なので、1.0°C あたりの変化率は $6.27 \times 0.6 = 3.8\%$ となり、試験結果とほぼ一致する。

MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] の温度変化が MPPC の基礎特性 (表 2.1) から予想される通りだったので、補正前の光量 LY' も MPPC の基礎特性通りに変化すると考えられる。つまり、LY' は定数 A^{*1} を用いて、

$$LY' = A \times \frac{PDE}{1 - c} \quad (6.2)$$

のようにあらわされるので、表 2.1 より $\Delta V = 1.5$ を基準にして、

$$PDE = 2.1 + 1.1(\Delta V - 1.5) \quad (6.3)$$

$$c = 0.18 + 0.23(\Delta V - 1.5) \quad (6.4)$$

となる。一方、 ΔV は 1.0°C あたり 0.06V 減少し、今回の試験では 22.0°C で $\Delta V = 1.5$ となるよう印加電圧を調節していたので、

$$\Delta V = 1.5 - 0.06(T - 22.0) \quad (6.5)$$

と表せる。式 6.2、式 6.3、式 6.4、式 6.5 から、補正前の光量 LY' を温度 T の関数として表すと、

$$LY' = A \frac{2.1 - a(T - 22)}{0.82 + b(T - 22)} \quad (6.6)$$

となる。ここで、MPPC の基礎特性から予想される a と b の値は $1.1 \times 0.06 = 0.066 \stackrel{\text{def}}{=} a_0$ 、 $0.23 \times 0.06 = 0.0138 \stackrel{\text{def}}{=} b_0$ となる。実際には、式 6.6 を

$$\begin{aligned} LY' &\sim \frac{A}{0.82} (2.1 - a(T - 22)) (1 - b(T - 22)/0.82 + 2(b(T - 22)/0.82)^2) \\ &\sim A \left(\frac{2.1}{0.82} - \left(\frac{2.1}{0.82} b + a \right) (T - 22) + \frac{ab}{0.82^2} (T - 22)^2 \right) \end{aligned} \quad (6.7)$$

のように近似して、それぞれのシンチレータ-光量の結果を (図 6.8、図 6.9) フィットした。その結果を表 6.1 に、 $\Delta V = 0.1$ あたりの増加率に直したものを表 6.2 に示す。また、表 6.1、表 6.2 の最下

*1 受光面に到達した光子数に対応する。

列は MPPC の基礎特性から予想される値である。クロストーク & アフターパルスレートは誤差の範囲内で基礎特性からの予想と一致する。また、PDE は基礎特性から予想される値より小さく有意な違いが見られた。これはシンチレーターならびにファイバーの温度依存性によって説明できる可能性があり、今後の課題である。以下の議論では、今回の試験結果 $(0.0319 + 0.0335)/2 = 0.32$ と基礎特性から予想される値 0.066 から得られる PDE の変化率 1.52% と 3.14% の両方を用いて議論することにする。温度 1.0°C あたりの PDE の変化率を α とすると、光量 LY が温度 T_0 で $\text{LY}_0[\text{p.e.}]$

表 6.1 実験結果を式 6.6 でフィットした場合の各係数、 a 、 b は 1.0°C あたりの PDE、クロストーク & アフターパルスレートの増加率に対応する。最下列は MPPC の基礎特性から予想される値。

シンチレーター	A	a	b
1	9.73 ± 0.01	0.0319 ± 0.0157	0.0125 ± 0.0081
2	10.05 ± 0.01	0.0335 ± 0.0126	0.0130 ± 0.0057
基礎特性	/	0.066	0.0138

表 6.2 ΔV が 0.1V 増加したときの PDE、クロストーク & アフターパルスレート c の増加率。最下列は MPPC の基礎特性から予想される値。

シンチレーター	PDE	c
1	0.053 ± 0.026	0.021 ± 0.013
2	0.059 ± 0.022	0.022 ± 0.009
基礎特性	0.11	0.023

だった時、温度 T での $\text{LY}[\text{p.e.}]$ は、

$$\text{LY}(T) = \text{LY}_0 \times (1 - \alpha(T - T_0)) \quad (6.8)$$

と表せる。

6.3 モニター計画

式 2.6 と式 6.8 から、検出効率 $e = 1 - \varepsilon(T)$ は、

$$e = 1 - (1 + \text{LY}(T)) \exp(-\text{LY}(T)) \quad (6.9)$$

$$= 1 - (1 + \text{LY}_0 \times (1 - \alpha(T - T_0))) \exp(-\text{LY}_0 \times (1 - \alpha(T - T_0))) \quad (6.10)$$

となる。

図 2.22 から光量が小さいほど検出効率の変化率は大きいので、光量の一番小さい値を想定して検出効率の変化を抑えれば十分である。そこで、実機トラッキングプレーン宇宙線試験結果から光量 ≥ 8.0 p.e. が保障されているので $LY_0 = 8.0$ として議論を進める。

各温度に対応した $\alpha = 1.52\%$ 、 3.14% それぞれの場合の検出効率の変化量を表 6.3 に示す。温度が低くなると光量は増加するので検出効率は増加し、温度が高くなると検出効率は減少する。減少する方向の方が変化が激しいので、温度が高くなる場合の方が検出効率の変動が大きい。この表より、温度変化が $\pm 1^\circ\text{C}$ の時は検出効率の変化は 0.1% 以下、温度変化が $\pm 5^\circ\text{C}$ の時の検出効率の変化は 0.2% 以下であることが分かる。INGRID の設置されるニュートリノ検出器ホールには空調が整備され、さらに INGRID の各モジュールに温度センサー (30°C で精度 $\pm 0.33^\circ\text{C}$) を設置して温度をモニターする。よって温度変化は小さく、温度変化も容易にモニターできる。

また、各シンチレーターの検出効率を 0.5% 以内で測定するにはどの程度の時間を要するか考察する。実機トラッキングプレーン長時間試験では、宇宙線イベント数が約 60000 に対してギャップイベントも含めたミスイベント数が 400 であった。各チャンネルに一樣に宇宙線が通過していると仮定すると、各チャンネルの宇宙線イベント数ならびにミスイベント数はそれぞれ $60000/24 = 2500$ 、 $400/24 = 16.7$ となり、不感率は $0.67 \pm 0.16\%$ で不定性は 0.5% 以下である。そこで、宇宙線イベント数は 60000 で十分である。実際には 1 モジュールあたり 1Hz で宇宙線イベントを取得する。そこで、60000 イベントに必要な 2 時間程度と見積もる。

以上から、温度変化を $\pm 5^\circ\text{C}$ で監視し、温度がそれ以上変化した場合は印加電圧を調整する。

表 6.3 温度変化に対する検出効率の変化

温度変化 [$^\circ\text{C}$]	-5	-4	-3	-2	-1	± 0	+1	+2	+3	+4
検出効率変化 ($\alpha = 1.52\%$)[%]	0.16	0.14	0.11	0.08	0.04	0	0.05	0.10	0.17	0.24
検出効率変化 ($\alpha = 3.14\%$)[%]	0.20	0.18	0.15	0.11	0.06		0.08	0.17	0.29	0.43

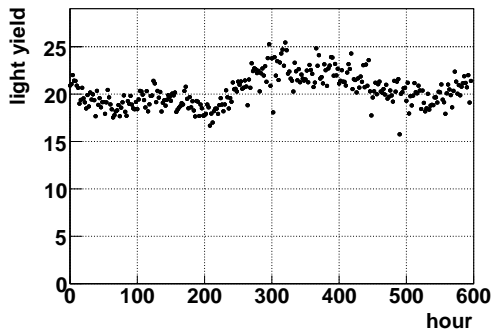


図 6.4 596 時間分の 2 時間ごとの補正前光量 LY' の変化。温度変化 (図 6.6) に対して負の相関が読み取れる。

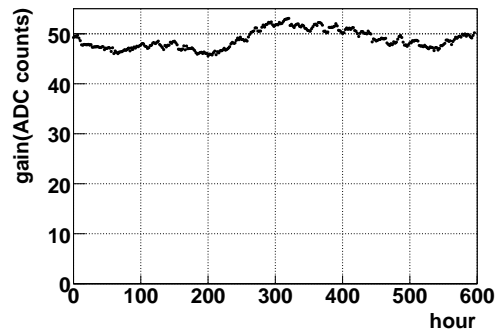


図 6.5 596 時間分の 2 時間ごとの MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] 変化。温度変化 (図 6.6) に対して負の相関が読み取れる。

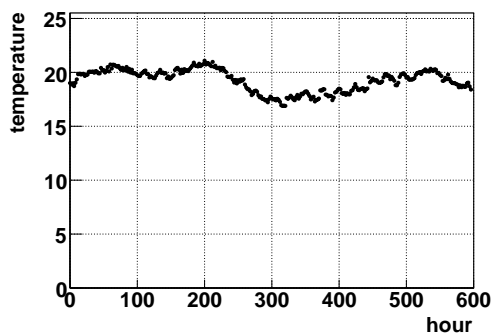


図 6.6 596 時間分の 2 時間ごとの温度変化。

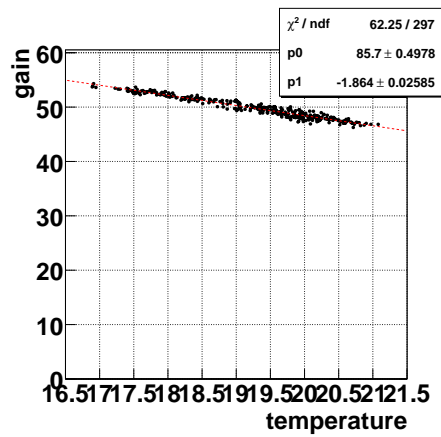


図 6.7 MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts](シンチレータ 1 に接続されている MPPC) と温度の相関図。1°C あたり LY' は 1.86[ADC counts] 減少する

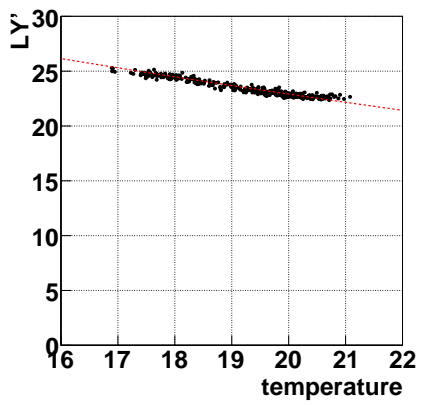


図 6.8 補正前光量 LY'(シンチレーター 1) と温度の相関図。1°C あたり LY' は 0.8 減少する。

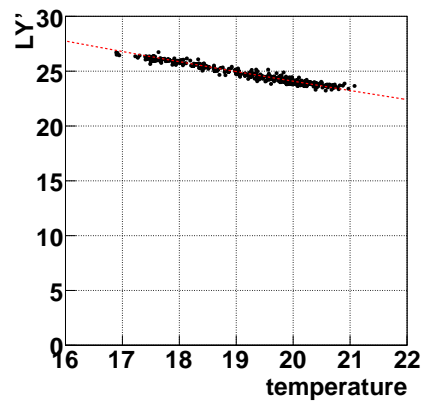


図 6.9 補正前光量 LY'(シンチレーター 2) と温度の相関図。1°C あたり LY' は 0.8 減少する。

結論

本研究では、2009年に開始される T2K 実験の前置検出器であるニュートリノビームモニター INGRID のシンチレーター層の製作ならびに性能評価試験を行った。INGRID は鉄とシンチレーター層からなるサンドウィッチ構造で構成されるモジュール 16 個からなり、各モジュールをグリッド状に設置する。これら一つ一つがニュートリノビーム標的となり、各モジュールで検出されるニュートリノイベント数分布からビーム中心を再構成し、ビーム方向を高精度で監視する役割を担う。

INGRID の個々のモジュールは、鉄とのニュートリノ反応によって生成された荷電粒子がシンチレーターを突き抜ける際に発生するシンチレーション光を、波長変換ファイバーと光検出器 MPPC を用いて読みだすチャンネル 528 個からなり、INGRID の総チャンネル数は 8448^{*2} 個である。ビームのズレを 1mrad 以上の感度で感知するには、全てのチャンネルの検出効率の不定性を 0.5% 以内でモニターしなければならない。よって、8448 チャンネル全ての光量が大きく、モニター期間中の検出効率の変動が小さいことを保証する必要がある。

まず、2008 年 3 月に高エネルギー加速器研究機構富士実験室 3GeV 電子ビームを用いて、実機シンチレーターの光量測定を行った。その結果、光量はビーム照射位置が MPPC から 50cm 位置で 15.0p.e. で十分高く (検出効率 99.9%)、シンチレーター個体差による検出効率の不定性は 0.1% 以下で小さいことを確認した。

次に、2008 年 8 月から 12 月にかけて、茨城県東海村 J-PARC で INGRID 実機シンチレーター層の製作を行った。そして、製作されたシンチレーター層から随時宇宙線による性能評価試験を行い、不良品は交換して全てのチャンネルの光量が 8.0p.e. 以上であることを保証した。また、各チャンネルの検出効率は 99.7% 以上で高い検出効率を持つことを確認した。

最終的に、実機トラッキングプレーン試験と光量の温度依存性から、検出効率モニター期間中の温度変化が ${}_{-5.0}^{+2.0}$ °C 以内の時、検出効率の変動は 0.2% 以下であることを示した。

*2 VETO シンチレーター層を含めると 9592 チャンネル。

謝辞

中家剛先生には、物理ならびに実験の知識はもちろんのこと、研究者としての姿勢を学びました。市川温子先生がビーム試験中の真夜中にやってきて激励してくれたことは忘れられません。横山将志先生には、検出器製作シフトマニュアルの執筆をはじめ、僕の拙い英語（と日本語）を粘り強く修正・指導していただきました。ありがとうございました。

新田和範氏にはファイバー製作をはじめとされていると迷惑をかけながらお世話になりました。南野彰宏氏には検出器の製作を取りしきっていただき本当にお世話になりました。ありがとうございました。

T2K ミューモングループ（松岡広大さん、久保一さん）には、ビーム照射試験のお手伝いをはじめ、いろいろとお世話になりました。T2K MPPC グループ（永井直樹くん、ダニエル=オームくん）には、MPPC キャリブレーションデータを提供していただきました、感謝いたします。

家城佳くん、村上明くんには、かなりの頻度で実験のお手伝いをしてもらいました。ありがとう。

T2K electronics グループの方々には、実機宇宙線試験用の読み出しエレキを用意していただきお世話になりました。特に Geoff Pearce 氏、Tim Nicholls 氏には、筆者の拙い英語メールに分かりやすく返信していただいたりして頭が上がりません。

シンチレーター製作においては、Anna Pla-dalmau 氏に様々なことを教わり、貴重な体験になりました。Thank you very much.

ビーム照射試験においては、川崎健夫先生をはじめとして様々な方に大変お世話になりました、ありがとうございました。

また、研究生活を支えてくれた家族と最愛の人に心からありがとう。

最後に、重複もありますが実機トラッキングプレーンの製作を手伝っていただいた以下の皆様（敬称略）への感謝の言葉で締めたいと思います。

Gonin.M、**Dinh.Tran**、ダニエル=オーム、家城佳、永井直樹、**Bronner.C**、田代一晃、**Magali.B**、尾崎称、**Drapier.O**、清水雄輝、**DeGleis.Y**、**Brugiere**、村上明、第一鉄工（株）、メカサポート（田井野さんご家族）
本当にありがとうございました。

大谷 将士

付録 A

アクティブコンポーネントの製作過程

A.1 INGRID 用ファイバーの製作

2008年6月から8月にかけて京都大学で INGRID 用ファイバーの切断・GOMI connector 接着を行い、光量チェックの後に J-PARC LINAC 棟に輸送した。LINAC 棟輸送後にファイバーの研磨・反射材塗布を行い、実機にインストールした。この節ではその制作過程について述べる。

A.1.1 ファイバーの製作過程 1(京都大学)

ファイバーは 1600m 分が直径約 1m のロールに巻きついた状態でクラレ社から納品される。そこで、シンチレーターと同じ長さに切断し GOMI connector を接着した。手順は以下の通りである。

1. ファイバーを、納品時の直径約 1m ロールから直径約 0.8m (円周 2.5m) ロールに巻きつけなおす (図 A.1)。
2. ファイバーを、ロールの 2ヶ所で切断する (一本の長さは 1.25m、トラッキングプレーンにインストールする直前に、実機用長さの 1.2m に切断される。)。
3. GOMI connector を接着剤 (ELJEN Technology 社の EJ-500) で接着し、一晩乾燥させる。
4. GOMI connector 側の端面 (MPPC 受光面に接する面) をダイヤモンドカッター (Fiber Fin) で研磨する。

A.1.2 ファイバーの製作過程 2(J-PARC LINAC 棟)

製作されたファイバーを J-PARC の LINAC 棟に輸送し、トラッキングプレーンにインストールする直前に 1.2m に切断して反射材で塗布した。手順は以下のとおりである。

1. ファイバーをシンチレーターと同じ 120.3cm にカットする。
2. 先ほどカットした端面をダイヤモンドカッター (Fiber Fin) で研磨する。
3. 反射材 (EJ-510) を塗布する。

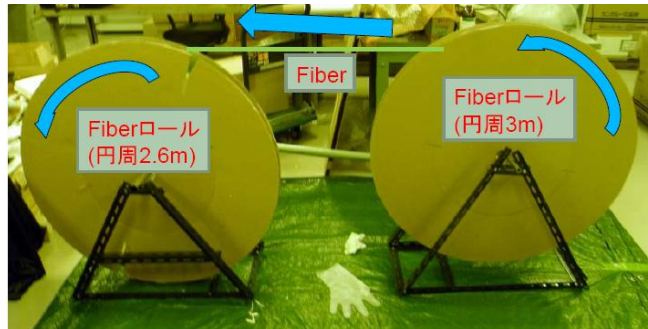


図 A.1 右が納品時のロール (円周 3m) で左のロール (円周 2.5m) に巻きつけなおす。

A.2 INGRID トラッキングプレーンの製作

2008 年 8 月から 12 月にかけて、INGRID トラッキングプレーン 176 枚を全数製作した。ここでは、トラッキングプレーンの製作方法について述べる。製作は二人一組で行った。

1. アルミパネルの厚み分の間隙を埋めるためのスペーサーを設置して、4 本のアルミバー、片側のアルミパネルならびにプラスチックパネルを組み立てる (図 A.2、図 A.3)。
2. 遮光ゴムをアルミパネルに接着する (図 A.4)。特にアルミパネルの間には、遮光テープも接着した (図 A.5)。
3. 遮光パネルを設置する (図 A.6)。
4. 遮光板にシンチレーター層の向きとは逆方向の「川」の字に接着剤を塗布し、1 層目のシンチレーター (24 枚) を順次接着した (図 A.7)。シンチレーターの接着には、T2K の前身である K2K の SciBar 検出器で用いられたものと同じセメダイン社の PM200 を用い、接着剤塗布用のローラーは大塚印毛社製のローラーを用いた。
5. 24 枚目のシンチレーターとアルミバーの隙間にゴムスペーサーを設置する (図 A.8)。
6. 一層目のシンチレーター層の上に、「田」の字に接着剤を塗布 (図 A.9) し、2 層目のシンチレーターを順次接着していく。
7. 2 層目のシンチレーターの方向と逆向きの「川」の字に接着剤を塗布し、遮光板を設置する。
8. シンチレーターの接着後、もう一方の面のプラスチックパネルとアルミフレームを組み立てる (図 A.10)。
9. 接着材が乾くまで半日放置する (図 A.11)。
10. 接着剤の硬化後、まずシンチレーターにファイバーを通す (図 A.12)。
11. GOMI コネクターを装着した MPPC を、ファイバーにつける (図 A.13)。
12. MPPC に基盤とケーブルを取り付けて (図 A.14)、サイドバーの穴に入れてふたをする。
13. ケーブリング作業を行う (図 A.15)。



図 A.2 4本のアルミバーは4つの頂点で2本のM4 × 12ネジで固定される。全てのネジ締めは電動ドライバー(リョービBD-70)によってトルク管理している(約1.0N・m)。

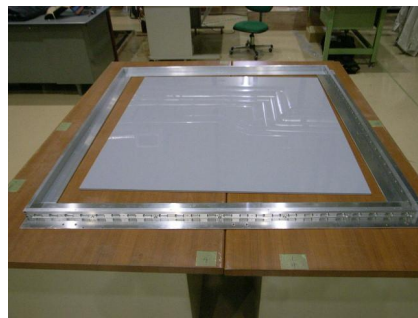


図 A.3 片側のアルミバー・アルミパネルの完成図。中央に置かれているのはスペーサー。

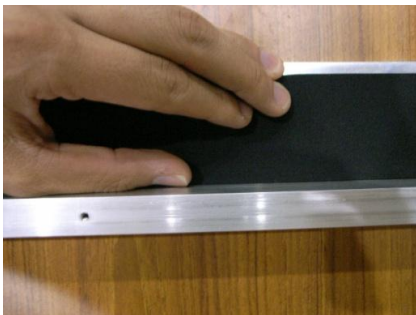


図 A.4 アルミパネルとアルミバーの間、遮光板とアルミパネルの間の隙間を埋めるために、遮光ゴムを接着する。

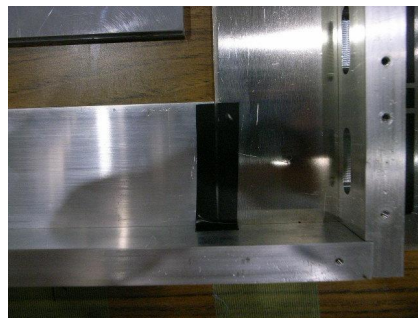


図 A.5 特に光漏れが気になる箇所には遮光テープを接着した。



図 A.6 遮光ゴム接着の後に、遮光板を設置する。

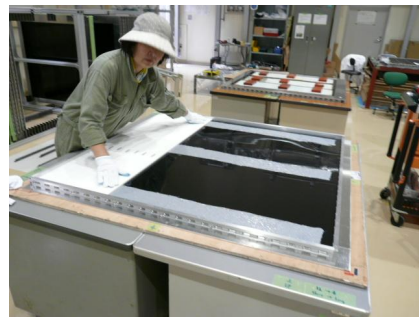


図 A.7 接着剤を「川」の字に塗布した後、順次シンチレーターを接着していく。

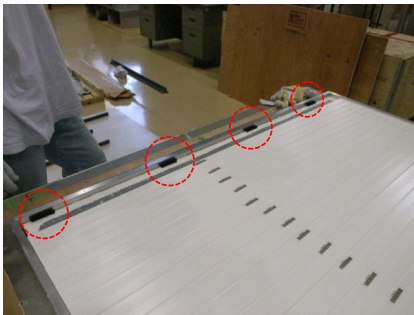


図 A.8 24 本目のシンチレーターとアルミバーの間には 4 つのゴムスペーサーが設置される。

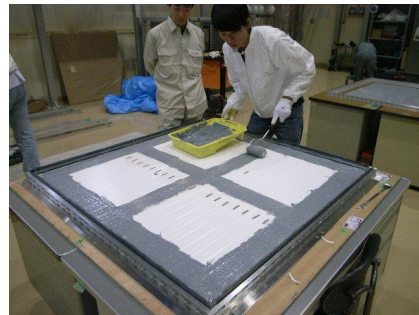


図 A.9 接着剤を「田」の字に塗布した後、2 層目のシンチレーターを接着していく。

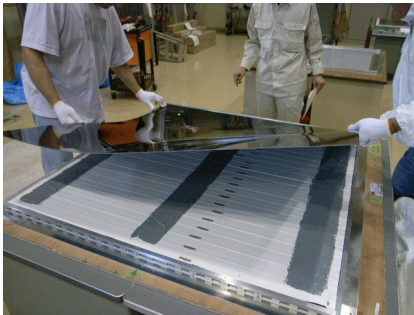


図 A.10 シンチレーターに接着剤を塗布した後、遮光用プラスチックパネルを設置する。

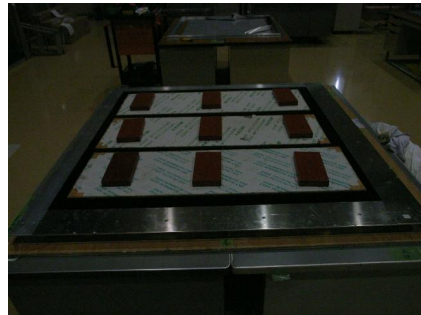


図 A.11 接着剤乾燥のために、重しを置いて一晚放置する。

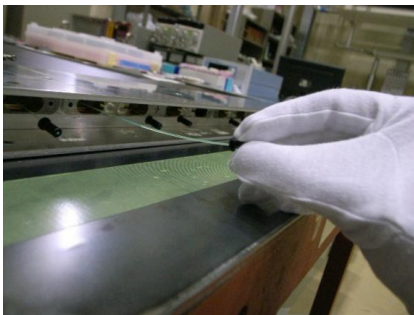


図 A.12 シンチレーター穴にファイバーを通す。

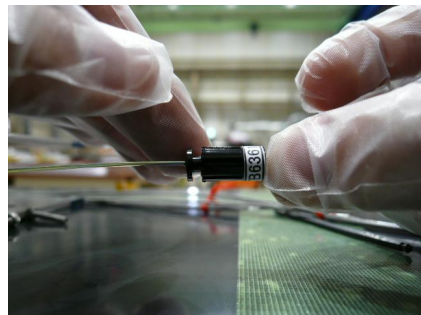


図 A.13 ファイバーに MPPC を付ける。

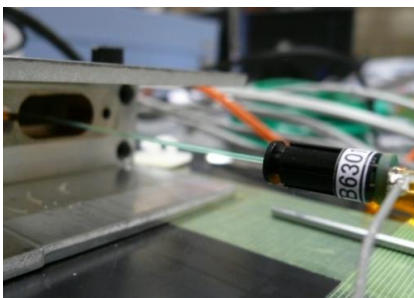


図 A.14 MPPC にケーブル基盤を取り付けた後、サイドバーの穴に収容する。



図 A.15 ケーブルタイで1層 24本のケーブルをまとめる。

付録 B

京都大学テストベンチでの予備実験

B.1 実験の目的

実機トラッキングプレーン宇宙線試験の結果がこれまでの試験結果と一致していることを確かめるために、京都大学テストベンチで宇宙線によって宇宙線光量 (式 2.5) を測定した。

B.2 セットアップ

実験のセットアップを図 B.1 に示す。シンチレーターはビーム照射試験 (第三章) の光量試験に用いた実機用シンチレーターを約 60cm に切断したものである。また、ファイバー端面には反射材が塗られてあり、MPPC は実機と同じ 1.3mm×1.3mm 受光面のものを使用した ; つまり、シンチレーターの長さを除いて、実機トラッキングプレーン宇宙線試験とまったく同じセットアップである。

また、データ読み出し回路を図 B.2 に示す。上下のシンチレーターが約 4.5p.e. 以上の時にデータ収集した。また、同時に MPPC ゲイン (ADC)[ADC counts] をモニターした。

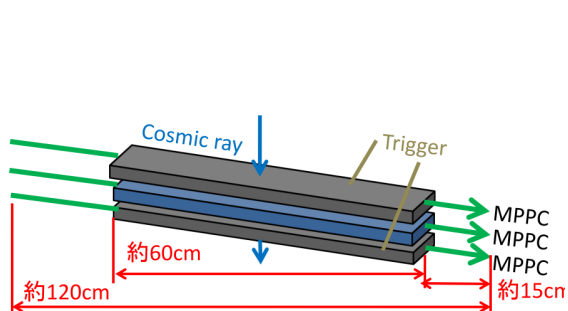


図 B.1 セットアップの概略図

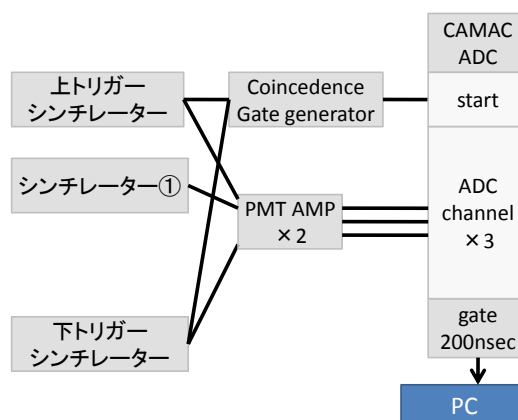


図 B.2 読み出し回路の概略図

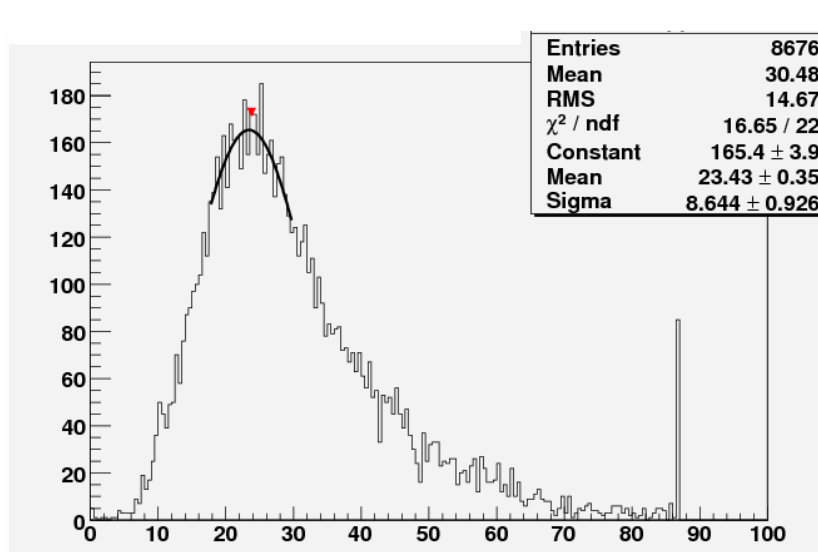


図 B.3 京都大学テストベンチにおける宇宙線試験結果。

B.3 試験結果

宇宙線 ADC データを図 B.3 に示す。横軸は光電子数、縦軸はイベント数である。これより、宇宙線光量 (式 2.5) は $23.4 \pm 0.4\text{p.e.}$ であり、実機トラッキングプレーン宇宙線試験結果の $24.1 \pm 0.6\text{p.e.}$ (図 5.10) と誤差の範囲で一致する。

よって、実機トラッキングプレーンの宇宙線試験結果は、これまでの試験結果と一致する。

参考文献

- [1] Ch.Kraus *et al.* Final Results from phase II of the Mainz Neutrino Mass Search in Tritium β Decay. *Eur.Phys.J.C*40.447-468,2005
- [2] H.V.Klapdor-Kleingrothaus *et al.*(HEIDELBERG-MOISCOW Collaboration). Latest Results from the Heidelberg-Moscow Double-Beta-Decay Experiment. *Eur.Phys.J.A*12.147-154,2001
- [3] K.Assamagan *et al.* Upper limit of the muon-neutrino mass and charged-pion mass from momentum analysis of a surface muon beam. *Phys.Rev.D*53.6065,1996
- [4] R.Barate *et al.* An upper limit on the τ neutrino mass from three- and five-prong tau decays. *Eur.Phys.J.C*2.395,1998
- [5] Y.Ashie *et al.* A Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillation Parameters by Super-Kamiokande I. *Phys.Rev.D*71.112005,1995
- [6] B.J.Rebela *et al.* measurement of the total active B-8 solar neutrino flux at the sudbury neutrino observatory with enhanced neutral current sensitivity. *Phys.Rev.Lett.*92,181301,2004
- [7] M.Apollonio *et al.* Search for neutrino oscillation with on a long base-line at the chooz nuclear station. *Eur.Phys.J.C*27,331,2003
- [8] 久保一.NuMI ニュートリノビームラインを用いた T2K 実験ミューオンモニターの長期試験 (FNAL T968 実験). Master's thesis,Department of Physics,Kyoto University,Jan 2008
- [9] 平出克樹.J-parc ニュートリノ振動実験のための off-axis 検出器の基本設計及び APD 読み出し系の開発. Master's thesis,Department of Physics,Kyoto University,Jan 2005
- [10] 栗本佳典.T2K 実験におけるニュートリノビームモニターの開発. Master's thesis,Department of Physics,Kyoto University,Jan 2006
- [11] A.Pla-Dalmau *et al.* FNAL-NICADD Extruded Scintillator. FERMILAB-PUB-05-344,Sep 2005
- [12] 川向裕之.T2K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノビームモニター INGRID に用いるシンチレーターと光子検出機 M P P C の性能評価. Master's thesis,Department of Physics,Kyoto University,Jan 2008
- [13] 川崎健夫. 富士テストビームライン始動. 高エネルギーニュース Vol.26,No.3