

Master Thesis

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器 MPPC の性能評価

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室
川向裕之

2008年1月31日

概要

2009年より開始される T2K(from Tokai to Kamioka) 実験は、前身となる K2K 実験の約 50 倍のビーム強度により、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後置検出器であるスーパーカミオカンデ (SK) の方向から 2.5° ずらす「Off-Axis 法」を用いることである。この off-Axis 法により SK にて観測されるニュートリノのエネルギー領域を振動確率が最大となるエネルギーに合わせる事が可能となる。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精度良くモニターできる検出器が必要不可欠となる。そこで我々はビーム軸上にニュートリノビームモニター「INGRID」の設置を考案、開発を行ってきた。INGRID は鉄とシンチレーター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。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モニターする役割を担う。

INGRID ではシンチレーション光の読み出しシステムとして、波長変換ファイバーと新型光検出器 MPPC(Multi Pixel Photon Counter) を用いる。本研究では、2007 年末より開始されたシンチレーターの大量生産に向けたプロトタイプシンチレーターの性能評価、及び MPPC を用いた読み出しシステムの評価の結果について述べる。我々は KEK 富士テストビームラインにおいて 3GeV の電子ビームを用いて 2 種類の異なるプロトタイプシンチレーターの基礎特性、及びプロトタイプ検出器の性能評価を行った。二つのシンチレーターから得られる光量は上述の読み出しシステムを用いた結果、光検出器までの伝送距離 50cm でそれぞれ $13.8 \pm 0.1 \text{ p.e.}$ 、 $15.9 \pm 0.1 \text{ p.e.}$ という結果を得た。次にシンチレーション光を伝送する際に生じる光量の減衰長を求め、 $241.7 \pm 10.6 \text{ cm}$ という結果を得た。この測定に際して、シンチレーターの端面で減衰曲線から予想される以上に光量が落ちる現象を観測し、その原因が端面からの光の散逸であることを確認した。反射材を塗ることで端面付近での光量の回復を定量的に評価し、減衰長の測定結果と合わせることで INGRID において予想される光量が 17.0 p.e. (near side, 伝送距離 5cm) - 10.0 p.e. (far side, 伝送距離 120cm) となることを示した。またポワソン統計より far side での検出効率が 99.7% 以上得られることを確認し、INGRID からの要求である 99.5% を満たすのに十分な値であることを確認した。またシンチレーションファイバーを用いた波長変換ファイバーに垂直な方向の光量の位置依存性、シンチレーターの重ね置きによるシンチレーション光のクロストークなど、実機において予想されるさまざまな状況に対するシンチレーターの応答を測定した結果、プロトタイプシンチレーターが INGRID において要求される性能を十分満たすことを示した。

目次

第1章	序論	4
1.1	ニュートリノ	4
1.2	ニュートリノ振動	4
第2章	T2K 実験	7
2.1	実験の概要	7
2.2	ニュートリノ振動現象の探索	7
2.3	T2K 実験の構成	8
2.3.1	Off-Axis 法とニュートリノ振動	8
2.3.2	J-PARC ニュートリノビームライン	10
2.4	前置検出器	12
2.4.1	On-Axis detector : INGRID	13
2.4.2	Off-Axis Detector	13
2.5	後置検出器:スーパーカミオカンデ (SK)	13
第3章	INGRID [Interactive Neutrino GRID detector]	14
3.1	INGRID の開発動機	14
3.2	INGRID に対する要請	14
3.3	INGRID 検出器の構造	16
3.3.1	全体図	16
3.3.2	ニュートリノ反応検出原理	18
3.3.3	シミュレーションからの要請	19
3.4	INGRID モジュール構成要素	21
3.4.1	押し出し型シンチレーター (Excluded Scintillator)	21
3.4.2	波長変換ファイバー	21
3.4.3	MPPC(Multi Pixel Photon Counter)	22
3.4.4	GOMI Connector	25
3.4.5	トラッキングプレーン	26
3.4.6	VETO カウンター	29
3.4.7	INGRID デザインまとめ	29
第4章	富士テストビームライン (FTBL)	31
4.1	テストビームライン発足経緯	31
4.2	富士テストビームライン (FTBL)	31
4.2.1	ビームライン概観図	31

4.3	電子ビーム生成過程・マグネット・実験ステージ	33
4.3.1	電子ビーム生成	33
4.3.2	マグネット	36
4.3.3	実験ステージ	37
4.4	ビームプロファイル測定	38
4.4.1	目的	38
4.4.2	プロファイル測定 (1)	40
4.4.3	プロファイル測定 (2)	43
4.4.4	考察とまとめ	45
第 5 章	INGRID シンチレーターの基礎特性の評価	46
5.1	ビームテスト概要	46
5.1.1	動機	46
5.1.2	測定のセットアップ	46
5.1.3	ゲインモニター	49
5.1.4	光量の定義	50
5.1.5	温度モニター	50
5.2	MPPC 電圧依存性測定	52
5.2.1	測定動機	52
5.2.2	クロストーク・アフターパルスによる光量の補正	52
5.2.3	MPPC V_{over} 測定結果	53
5.3	プロトタイプシンチレーターの光量測定	54
5.3.1	測定の動機	54
5.3.2	測定のセットアップ	54
5.3.3	測定結果	55
5.3.4	反射材の上塗りによる光量の増加	56
5.3.5	プロトタイプシンチレーターテストの結論	57
5.4	ファイバー読み出しによる減衰長測定	58
5.4.1	測定原理とセットアップ	58
5.4.2	減衰長の測定結果	60
5.4.3	検出効率の測定結果	61
5.4.4	考察	61
5.5	シンチレーター端面での光量測定と反射材による光量回復効果	62
5.5.1	測定動機	62
5.5.2	測定のセットアップ	63
5.5.3	シンチレーター端面探索	63
5.5.4	反射材塗布による端面での光量回復効果の測定結果	63
5.6	光量の幅方向依存性とファイバーホールの効果	66
5.6.1	動機と測定のセットアップ	66
5.6.2	測定結果	66
5.6.3	考察	69
5.7	シンチレータークロストーク測定	70

5.7.1	測定動機	70
5.7.2	シンチレータークロストーク測定 1	70
5.7.3	測定 1. の結果	70
5.7.4	測定 1:考察	73
5.7.5	シンチレータークロストーク測定 2	74
5.7.6	クロストーク測定:考察	79
5.8	INGRID シンチレーターの基礎特性の評価のまとめ	80
第 6 章	結論	81

第1章 序論

1.1 ニュートリノ

ニュートリノは重力相互作用を除き、弱い相互作用のみが働く中性の素粒子である。ニュートリノは β 崩壊におけるエネルギー保存則と角運動量保存則の破れを説明するために 1930 年に W.Pauli により予言され、1934 年には E.Fermi により理論的に定義づけられた。実験的にその存在が初めて観測されたのは、Pauli により予言されてから 20 年以上を経た後の 1956 年に Reines と Cowan が原子炉からの反電子ニュートリノを逆 β 崩壊過程によって捕えたことに始まる。その後 1962 年にミューニュートリノ、2000 年にタウニュートリノが直接検出され、近年 CERN で行われた LEP 実験において Z ボゾンの崩壊幅測定からニュートリノの世代数が 3 つであることが確認された。また現在ではニュートリノの質量に対して以下のような上限値が与えられている。

$$\begin{aligned}m_{\nu_e} &< 2.5\text{eV} \\m_{\nu_\mu} &< 170\text{KeV} \\m_{\nu_\tau} &< 18.2\text{MeV}\end{aligned}$$

標準理論ではニュートリノの質量は 0 とされているが、これらの結果からはまだニュートリノが有限の質量を持つことは言えない。しかし 1998 年にスーパーカミオカンデグループによって大気ニュートリノ異常の観測からニュートリノ振動が存在するという報告がなされたことにより、はじめてニュートリノに質量が存在することが証明された。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とはある種類(フレーバー)のニュートリノがその時間発展とともに他の種類のニュートリノに変化する現象で、ニュートリノに有限の質量が存在し、かつ世代間で混合している(フレーバー固有状態 $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ と質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) の混合角が 0 でない)という 2 つの条件を満たす場合にのみ起こる。ニュートリノ振動が起きるとき、フレーバー固有状態は質量固有状態の混合状態になっており、以下の式であらわされる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (\alpha = e, \mu, \tau; i = 1, 2, 3) \quad (1.1)$$

この式に表れる 3×3 行列はニュートリノの世代間の混合を表す行列で、クォークセクターにおける CKM(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) 行列に対応し、MNS(Maki-Nakagawa-Sakata) 行列と呼ばれる。

ここでまずある時刻に質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ にあるニュートリノの時間発展を考える。これは Schrodinger 方程式より $|\nu_i\rangle$ の静止系の時刻 τ_i を用いて、以下のように表わすことができる。

$$|\nu_i(\tau_i)\rangle = e^{(-im_i\tau_i)}|\nu_i(0)\rangle \quad (1.2)$$

ここで m_i は $|\nu_i\rangle$ の質量である。実験室系の時刻 t 、位置 L を用いると、

$$e^{-im_i\tau_i} = e^{iE_it - p_iL} \quad (1.3)$$

と書ける。 E_i 、 p_i はそれぞれ実験室系での $|\nu_i\rangle$ のエネルギーと運動量である。ニュートリノは極めて相対論的な粒子として振舞うことより、 $m_i \ll E_i$ とすると、

$$t \simeq L \quad (1.4)$$

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

となる。これより式 (1.2) は

$$|\nu_i(L)\rangle \simeq e^{-i(m_i^2/2p_i)L}|\nu_i(0)\rangle \quad (1.6)$$

と書ける。以上より時刻 $t = 0$ にフレーバー固有状態 ν_α で生成されたニュートリノが距離 L だけ伝搬した後、時刻 t にフレーバー固有状態 ν_α に変化している確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu(t) \rangle|^2 = \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-ipL} e^{-i\frac{m_i^2 L}{2p}} \right|^2 \quad (1.7)$$

$$= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu} \quad (1.8)$$

$$+ 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu} \quad (1.9)$$

$$(1.10)$$

と表される。ただし、 $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$ はニュートリノの質量二乗差、 E_ν はニュートリノのエネルギーである。また反ニュートリノの場合は式 1.10 の第 3 項の符号が反転する。

最も簡単な場合として 2 世代間の混合を考える。混合行列 U は 1 つの混合角パラメータ θ を用いて

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

とあらわされる。このとき、時刻 $t = 0$ にフレーバー固有状態 ν_α で生成されたニュートリノが距離 L だけ伝搬した後、時刻 t にフレーバー固有状態 $\nu_\beta (\beta \neq \alpha)$ に変化している確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_\nu [GeV]} \right) \quad (1.12)$$

またフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ のままでいる確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_\nu [GeV]} \right) \quad (1.13)$$

と書ける。上式より、ニュートリノ振動の確率 P は $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2)$ をパラメーターとして、飛行距離 L およびニュートリノ E_ν の関数として振動することがわかる。またこの式よりニュートリノ振動はフレーバー状態が異なる質量固有状態の混合状態になっていて ($\theta \neq 0$)、かつ質量固有状態が縮退していない場合 ($\Delta m^2 \neq 0$) のみに起こることがわかる。

したがって、例えばある距離のところでもとのフレーバーのニュートリノが消失 (Disappearance) するのを観測するか、または別のフレーバーのニュートリノが出現する (appearance) するのを観測すれば、混合 θ 及び質量二乗差 Δm^2 を求めることができる。

これまでの実験結果 (大気ニュートリノ観測、太陽ニュートリノ観測、原子炉ニュートリノ観測) から、2つの異なる質量二乗差 Δm^2 の領域に解が見ついている。すなわち3世代あるニュートリノのすべてのフレーバー間で混合が起こっていることを意味する。

現在 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ モードについては、上に挙げたスーパーカミオカンデグループによる大気ニュートリノの観測 [1] と加速器ニュートリノを用いた K2K 実験 [2] によりその存在がほぼ確実に確かめられた。2007年にはアメリカ Fermi 研究所で行われた MINOS 実験の結果より、振動パラメーターは $2.54 \times 10^{-3} eV^2 < \Delta m_{23}^2 < 3.18 \times 10^{-3} eV^2, \sin^2 2\theta_{23} > 0.87$ と報告されている [3](図 1.1)。また $\nu_e \rightarrow \nu_x$ ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 及び $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$) モードについてもスーパーカミオカンデ [4] や SNO 実験 [5] による太陽ニュートリノ観測、及び KamLAND 実験 [6] による原子炉ニュートリノの測定により確立された。この振動パラメーターは 1σ で $\Delta m_{12}^2 = 7 \sim 9 \times 10^{-5} eV^2, \tan^2 \theta_{e\mu} > 0.9$ である。一方で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ モードは未だ発見されておらず、T2K 実験によって明らかにされることが期待されている。

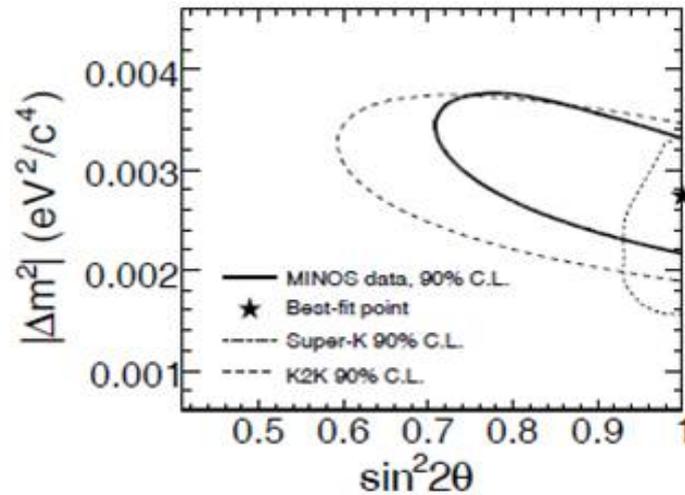


図 1.1: MINOS 実験、SK,K2K 実験から得られた $|\nu_\mu\rangle \rightarrow |\nu_\tau\rangle$ 振動パラメーターの許容領域。ベストフィットは $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.0, 2.74 \times 10^{-3} eV^2)$ 。

第2章 T2K実験

2.1 実験の概要

東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) は、前身となる K2K 実験の約 50 倍のビーム強度をもって、ニュートリノ振動パラメーター (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) を測定することを目的とした、加速器起源のニュートリノを用いた長基線ニュートリノ振動実験である。

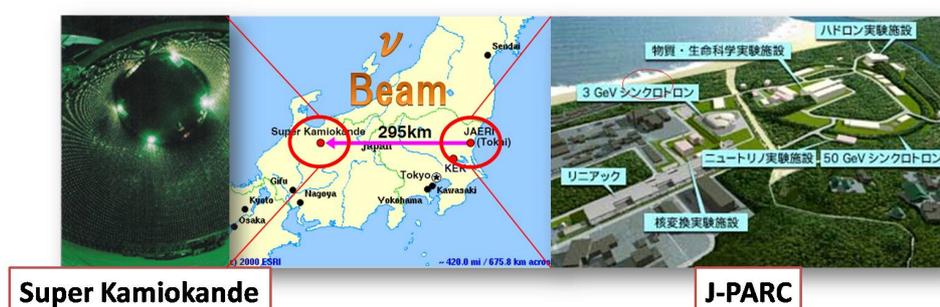


図 2.1: T2K 実験の概念図

本実験では、茨城県東海村に建設される大強度陽子加速器 (J-PARC) の 50GeV 陽子シンクロトロンで陽子を加速し、得られた高エネルギー陽子と標的とのハドロン相互作用によって大量の π 粒子を生成する。この π 粒子が飛行中に崩壊して生成されるほぼ純粋なミュオンニュートリノビームを、およそ 295km 離れた岐阜県飛騨市にある世界最大の水チェレンコフ検出器「スーパーカミオカンデ (以下、SK と表記)」に向けて射出する。ニュートリノは J-PARC 内の前置検出器により、生成直後のフラックスとエネルギー分布が測定され、SK で観測されるニュートリノ反応事象数、およびエネルギースペクトルの予想に用いられる。この予想値と実際に SK で観測されるニュートリノ反応との事象数、及びスペクトルを比較することでニュートリノ振動のパラメーターを測定する。

2.2 ニュートリノ振動現象の探索

T2K 実験で探索するニュートリノ振動現象を以下にまとめる。

- 電子ニュートリノ事象出現の探索

これまでに行われたニュートリノ振動実験において $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ モードは未だ発見されていない。T2K 実験では $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する感度は、 $\Delta m_{13}^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ において

$\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.006$ まで到達できると考えられている。これは現在までに観測されている上限値のおよそ 20 倍の感度である。

- ミューオンニュートリノ消失モードの精密測定
K2K 実験において確立されたミューオンニュートリノ消失モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) の振動パラメーター ($\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m_{23}^2$) のより精密な測定を行う。
- 相互作用をしないニュートリノ (ステライルニュートリノ: ν_s) の探索
ステライルニュートリノは通常のニュートリノのようにスピンの $1/2$ で電荷を持たない粒子であるが、弱い相互作用もしないという点で他のニュートリノと異なっている。T2K 実験では中性カレント反応事象数を計測する事で、相互作用しない ν_s に振動するモードを探す。

2.3 T2K 実験の構成

T2K 実験は J-PARC 50GeV 陽子シンクロトロン、ニュートリノビームライン、前置検出器、スーパーカミオカンデから構成される。また T2K 実験では Off-Axis 法を導入する。

2.3.1 Off-Axis 法とニュートリノ振動

T2K 実験では、加速器を用いたニュートリノ振動実験としては世界初の Off-Axis 法を導入する。これはニュートリノビームの方向を SK 方向から故意にずらすことで、SK に向かうニュートリノエネルギースペクトルに幅の狭いピークをもたせる方法である。このときの角度 (図 2.2 参照) を Off-Axis 角 (θ_{OA}) と呼ぶ。このエネルギースペクトルのピーク値は θ_{OA} を変えることで変化し、ニュートリノ振動確率が最大になるエネルギー領域に合わせることが可能となる。

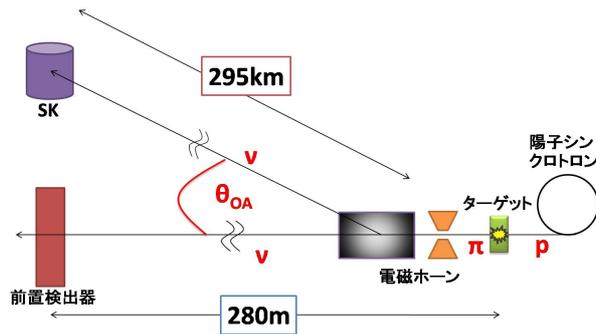


図 2.2: Off-Axis 法の概念図と Off-Axis 角 (θ_{OA})

ニュートリノビームは陽子ビームをグラフィット標的に照射し、生成したパイオンを崩壊トンネルで崩壊させて作る。パイオンは主にニュートリノとミューオンに崩壊し、この

ときのパイオンの進行方向とニュートリノの飛び出した方向のなす角度が θ_{OA} となる。この角度と発生するニュートリノのエネルギーの間には式 2.1 の関係がある。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - P_\pi \cos\theta_{OA})} \quad (2.1)$$

ここで m_π 、 E_π 、 P_π はそれぞれ親パイオンの質量、エネルギー、運動量を、 m_μ はミューオンの質量を表す。図 2.3 に θ_{OA} を 0° から 2.5° まで変化させたときの放出されるニュートリノエネルギーとその親パイオンの運動量との関係を示す。この図より、親パイオンの進行方向からの角度が大きくなるにつれてニュートリノのエネルギーは親パイオンのエネルギーに依らなくなってゆくことがわかる。これが Off-Axis 法で幅の狭いピークを持ったエネルギースペクトルとなる理由である。

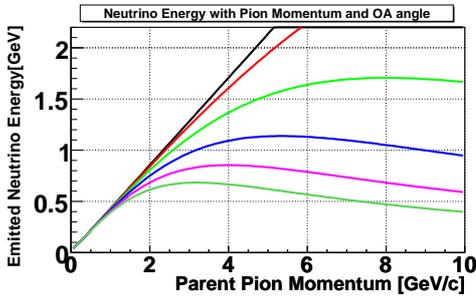


図 2.3: 親パイオンの運動量と θ_{OA} の方向に飛び出すニュートリノエネルギーの相関。黒い直線が 0° (進行方向) に飛び出す) ニュートリノエネルギーを示す。角度が大きくなるにつれて親パイオンのエネルギーのばらつきに対するニュートリノのエネルギーのばらつきが小さくなる。

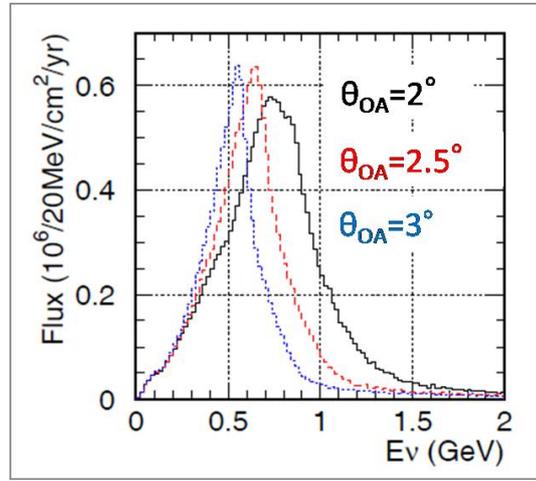


図 2.4: $\theta_{OA}=2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ$ のときに SK に向かうニュートリノのフラックス。

図 2.4 に θ_{OA} が 2° 、 2.5° 、 3° のときに SK で観測されるニュートリノエネルギーフラックスを示す。T2K 実験では θ_{OA} を 2.5° に設定している。このときのエネルギーピーク値は約 650MeV となり、 $\Delta m_{23}^2=2.8 \times 10^{-3}\text{eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta_{23}=1$ (K2K 実験でのベストフィット値 [7]) を仮定してニュートリノ振動確率を計算すると、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta_{\mu\tau} \sin^2 \left(1.27 \times (2.8 \times 10^{-3}) \left[\text{eV}^2 \right] \times \frac{295 \left[10^{-3} \text{km} \right]}{0.65 \left[10^{-6} \text{GeV} \right]} \right) \sim 1 \quad (2.2)$$

となる。このとき振動確率は最大となり、 ν_μ の disappearance、 ν_e の appearance にとって最適となる。

Off-Axis 法は長基線ニュートリノ振動実験においては上記のように有効な手法である。しかし角度がずれるとニュートリノエネルギーのピーク値もずれてしまい (図 2.4)、精密な測定が困難になってしまう。このためニュートリノビームの方向を精度良く測ることが重要となる。ニュートリノビームの方向のずれが及ぼす影響と要求される精度の定量的な値については、3.2 節で説明する。

2.3.2 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3つから構成される。(図 2.5)

生成される陽子ビームのビームパラメーター (デザイン値) を表 2.1 にまとめる。

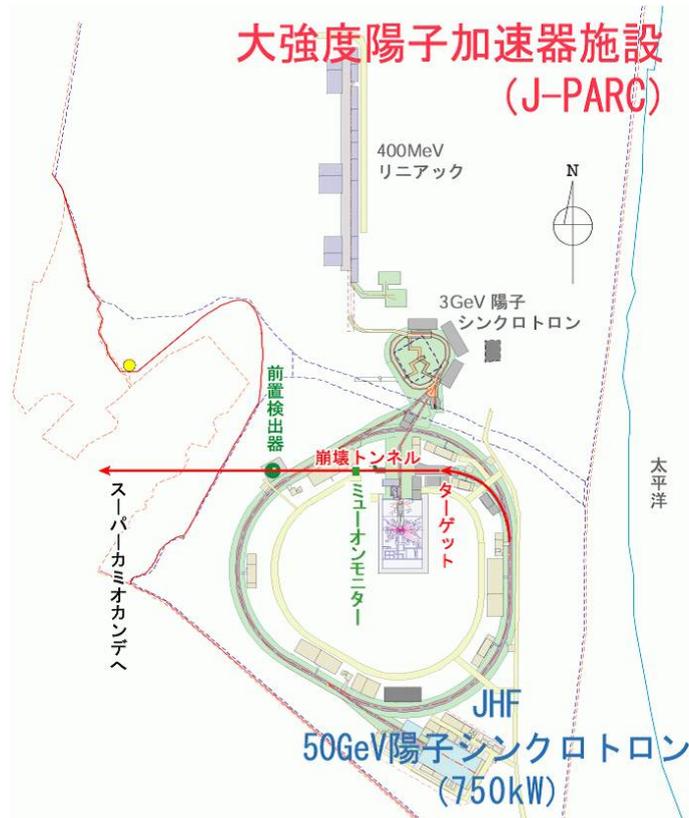


図 2.5: J-PARC ビームライン概観図

表 2.1 にあるように陽子ビームの時間幅は約 $5.6\mu\text{sec}$ でその周期は約 3.5 秒に一回である。この周期をビームスピルとよび、陽子ビームは 1 スピル中に 8 バンチ存在する。

グラファイト標的と電磁ホーン

MR で 30GeV^1 まで加速された陽子はニュートリノビームラインに入射後グラファイト標的に照射され、荷電 π 中間子を生成する。この荷電 π 中間子は 3 つの電磁ホーンで収束され、崩壊トンネルへと導かれる。図 2.6、図 2.7 にグラファイト標的と電磁ホーンをそれぞれ示す。

収束されたパイオンは崩壊トンネル内で式 (2.3) のように崩壊してニュートリノを生成する。



¹現在の現実的な加速器パラメーター

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

表 2.1: 陽子ビームのパラメータ (デザイン値)

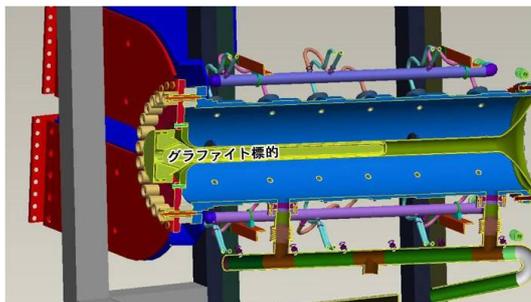


図 2.6: 第 1 電磁ホーンの断面図。内管の中心にグラファイト標的が挿入されている。



図 2.7: 第 1 電磁ホーン (プロトタイプ)

グラファイト標的から約 110m の距離にある崩壊トンネルの終端にはビームダンプが置かれる。ここで陽子やそれによって生成されたハドロン、崩壊せずに残ったパイオン、及び低エネルギーのミュオンなどを吸収する。

ミュオンモニター

ミュオンモニターはビームダンプ直後に設置され、ビームダンプを突き抜けてくる高エネルギーのミュオンのプロファイルを測定する。このプロファイルから間接的にニュートリノビームの方向をモニターする役割を担う。ミュオンモニターはバンチごと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の方向を測定することができる。また電磁ホーンのアライメントや電流量、標的に照射する陽子ビームのずれにも感度を持つため、通常ランだけではなくコミッショニング時においてもビーム調整のうえで重要な役割を担う。ミュオンモニターはシリコン PIN フォトダイオード、CVD ダイヤモンド検出器、平行平板型ガスチェンバーの3つからなる (図 2.8 参照)。

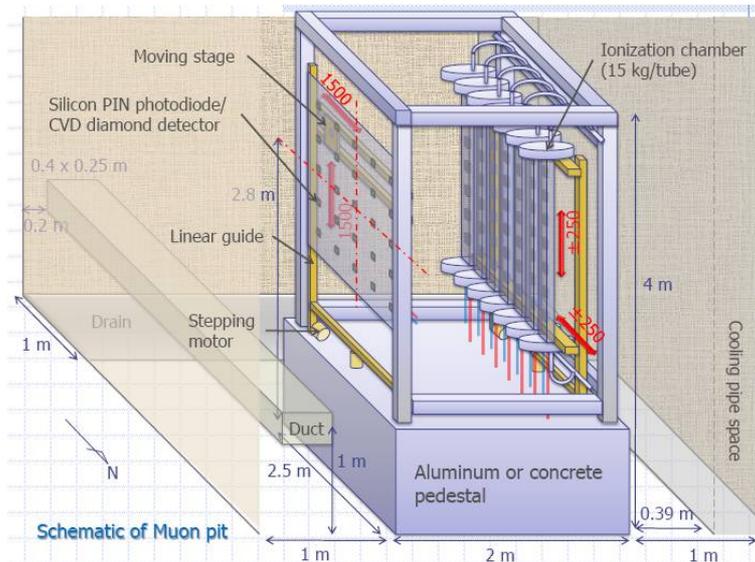


図 2.8: ミュオンピット内に設置されるミュオンモニターの図

2.4 前置検出器

グラファイト標的から 280m 下流の地点に前置検出器 (ND280) が設置される。ND280 はビーム軸上の On-Axis 検出器と、SK と崩壊トンネルでの親パイオンの平均崩壊地点とを結んだ直線上の Off-Axis 検出器からなる。

2.4.1 On-Axis detector : INGRID

本論文の主題である On-Axis 検出器 (INGRID) はそれ自身がニュートリノ標的となって直接ニュートリノ反応を検出し、ニュートリノビームの方向をモニターする役割を担う。ニュートリノの反応断面積は非常に小さいが、T2K 実験では大強度のニュートリノビームを生成するためコミッション時では1ヶ月、通常ラン (full intensity) では1日ごとのモニターが可能となる。第3章でニュートリノビームモニター INGRID について詳しく説明する。

2.4.2 Off-Axis Detector

Off-Axis 検出器は SK に向かう生成直後のニュートリノフラックスやエネルギーを精密に測定し、後置検出器である SK におけるフラックスやエネルギースペクトルを予測するための検出器である。Off-Axis 検出器には POD(π^0 検出器)、FGD(Fine Grain Detector)、TPC(Time Projection Chamber)、ECAL(Electromagnetic CALorimeter)、SMRD(Side Muon Range Detector) からなる。

2.5 後置検出器:スーパーカミオカンデ (SK)

T2K 実験ではニュートリノビームの後置検出器として、ニュートリノ生成点から 295km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデ (SK) を用いる。SK は K2K 実験でも後置検出器として用いられた、5 万トン大型水チェレンコフ検出器である。ここで観測されたニュートリノ反応の事象数とエネルギースペクトルを、Off-Axis 検出器の測定結果から予想される値と比較して、ニュートリノ振動パラメーターを測定する。図 2.9 にスーパーカミオカンデの図を示す。

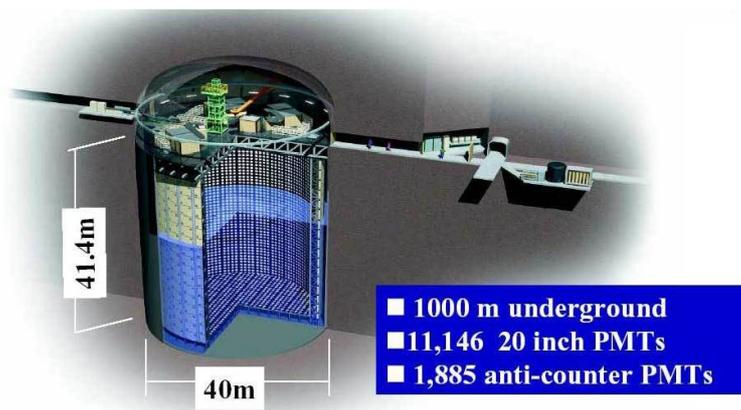


図 2.9: スーパーカミオカンデ

第3章 INGRID [Interactive Neutrino GRID detector]

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 について説明する。

3.1 INGRID の開発動機

T2K 実験においてニュートリノ振動パラメーターを高精度で探索するためには、ニュートリノビームの方向を正しくモニターすることが必要不可欠である。T2K 実験で導入する Off-Axis 法によって生成されるニュートリノは、エネルギーと角度の間に強い相関を持つ。そのため第2章で説明したように、もしビーム方向の測定を誤ると SK で検出されるエネルギー及びフラックスの値が変化し、振動パラメーターの測定を誤る原因となる。従ってビーム生成直後の前置検出器においてビーム方向を正しくモニターする必要がある。

そこで T2K 実験ではニュートリノビームの方向を測定するために2つの検出器を設置する。1つはビームダンプ直後に設置されるミュオンモニターである。ミュオンモニターでは親パイオンの崩壊からニュートリノとともに出てくるミュオンの位置プロファイルを測定することでニュートリノビームの方向と強度を間接的にモニターする役割を担う。しかしこの装置で検出されるミュオンの運動量は $5\text{GeV}/c$ 以上であり、SK で観測したい 1GeV 前後のニュートリノとは異なるエネルギー領域のニュートリノを見ていることになる。このため実際に測定すべきエネルギー領域のニュートリノのビーム方向を精度良くモニターできる検出器が必要である。

そこで我々は陽子ターゲット位置から 280m 離れた場所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 (On-Axis) にニュートリノビームモニター INGRID 検出器 (Interactive Neutrino GRID detector) を設置する。この検出器ではニュートリノ相互作用を介して生じる粒子を検出することで直接的にニュートリノビームのエネルギー及び方向を測定する。以下本章では、INGRID 検出器の詳細について説明する。

3.2 INGRID に対する要請

INGRID に対する要請は大きくわけて3つに大別できる。以下に順を追って説明する。

- ビーム方向に対する要請

INGRID の主な目的はビーム方向、すなわちニュートリノビームと SK との間の Off-Axis 角 (θ_{OA}) が決められた角度となっているかを定常的にモニターすることにある。

親パイオンの崩壊から発生するニュートリノのエネルギーと Off-Axis 角の間には強い相関があり、ニュートリノビームのエネルギースペクトルのピーク値及びフラックスは、グラフィット標的から見た 1mrad のずれに対してそれぞれ約 2%(エネルギースペクトルのピーク値に対して)、3% の変化を引き起こす [7]。これらはそれぞれ SK で測定するエネルギーと事象数予測に不定性を与えることになる。SK でのエネルギースケールの変化、事象数予測の不定性が振動パラメーター ($\sin^2 2\theta, \Delta m^2$) に与える影響はこれまでも研究されており [8]、この不定性がそれぞれ 3% 以内で抑えられれば、T2K 実験におけるミューオンニュートリノ消失モードの振動パラメーターの統計誤差 ($\delta(\sin^2 2\theta)=0.009, \delta(\Delta m^2)=5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$) よりも小さい系統誤差で抑えられる [7]。したがって INGRID では 1mrad よりも良い精度でビーム方向を測定する必要がある。1mrad はニュートリノ検出器ホールのある場所 (陽子標的から 280m) で 28cm のずれに対応する (図 3.1)。

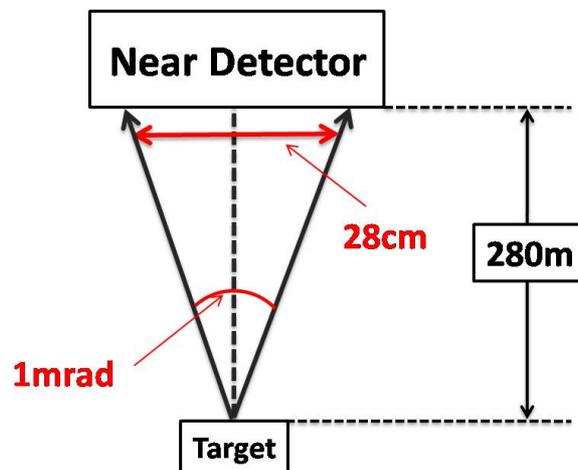


図 3.1: グラフィット標的からビーム軸に対して 1mrad のずれ。ニュートリノホールの位置では 28cm のずれに対応する。

- ビーム領域からの要請

図 3.2 に INGRID の設置される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。この図からもわかるようにニュートリノビームは広い分布を持って入射してくるため、ビーム中心を再構成するためには最低でも $\pm 5\text{m}$ の領域をカバーする必要がある。

- ビーム標的としての要請

INGRID ではニュートリノによる直接的な荷電カレント反応を検出する。このニュートリノ反応の断面積は $\sigma \sim 10^{-38} \text{cm}^2$ 程度と非常に小さいため、ミューオンモニターのようにバンチ毎にビームプロファイルを測定するといったことはできない。しかしビームコミッシング時において最低限、ビームのずれが物理結果に影響を及ぼさない程度であることを保証できるだけの性能が必要とされる。ビーム強度はコミッシング時でデザイン値の 1% 程度と想定されているため、INGRID にはこの強度で 1ヶ月間の統計量をもってビームプロファイルを上述の精度で測定できる

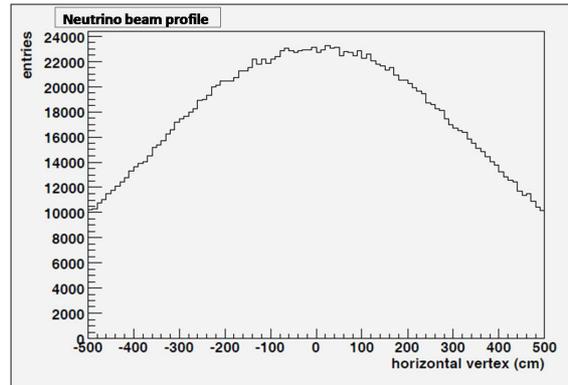


図 3.2: シミュレーションによるニュートリノ検出器ホールで反応を起こすニュートリノの水平方向プロファイル

ことが要求される。このときのニュートリノイベント数は、図 3.2 の領域において 2000 イベント/ton/month である。ビーム強度デザイン値が達成されてからは 1 日ごとにビーム強度や方向をモニターする。以下、コミッショニング時に想定されるニュートリノイベント数をもとに、必要なニュートリノビーム標的の質量を見積もる¹。まずニュートリノイベントの検出効率を 20%、そのイベント数の系統誤差を 2% と仮定する [7]。またプロファイル測定のためには、図 3.2 の領域において少なくとも 5~10 点程の観測点が必要である。次に各点での統計誤差が系統誤差と同程度で抑えられることを要求すると、ニュートリノ反応のイベントセレクションの後で 2000 イベント以上、反応数自体は 10000 イベント以上が必要となる。従って全観測点では 50000~100000 イベントが必要となり、ここから上記の領域でのイベント数 (2000 イベント/ton/month) を考えると、ニュートリノビーム標的として、25~50 トン級の質量が必要となる。

これらの要請を満たす検出器として、INGRID(Interactive Neutrino GRID detector) が開発された。

3.3 INGRID 検出器の構造

3.3.1 全体図

図 3.3 はニュートリノ検出器ホール内部に設置される INGRID 検出器の概観図である。INGRID は 16 のモジュールからなり、水平方向・垂直方向にそれぞれ 7 つを十字に配置し、対角線上の離れた地点に残り 2 つが配置される。一つ一つのモジュールは 120cm×120cm×86cm の大きさを持ち、これらをビーム軸を中心に図 3.4 のように並べることでビーム領域 (10m×10m) をカバーする。

¹ニュートリノ反応のイベント数としてはコミッショニング時のビーム強度で 1 か月の統計量の方が厳しい条件である。

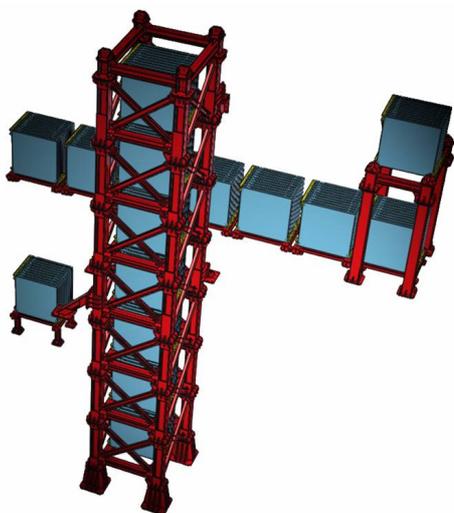


図 3.3: INGRID の概観図。水平・垂直方向に7つ、対角線上の浮島に2つを設置する。

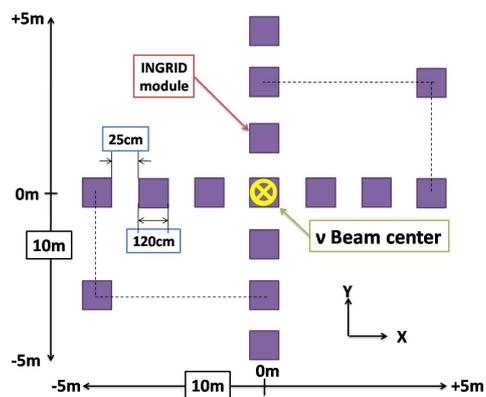


図 3.4: INGRID モジュールの配置図。

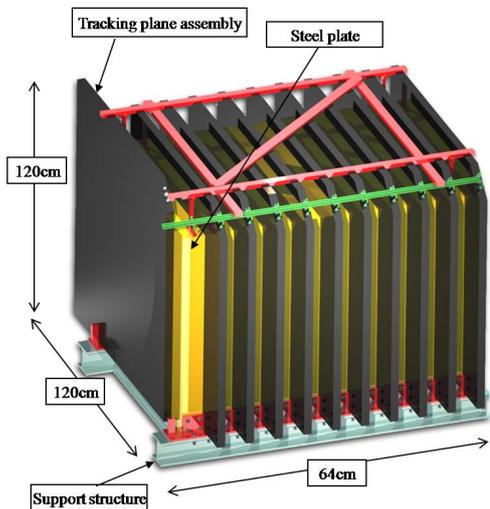


図 3.5: INGRID モジュール。鉄とシンチレーターのサンドウィッチ構造をとる。



図 3.6: Veto カウンターまで取り付けたときのモジュールの完成予想図。Veto カウンターにもシンチレーターストリップの層を適用する。

個々のモジュールのデザインを図3.5に示す。個々のモジュールは鉄層(120cm×120cm×6.4cm)とシンチレーター層(120cm×120cm×2cm)のサンドウィッチ構造からなる。ニュートリノ標的となる鉄は、1モジュールあたり約7.3トンになり、16モジュールすべてで計116トンの標的質量を達成する。またそれぞれのモジュールはバックグラウンドイベントを排除するために、まわりをVETOカウンターで囲む(図3.6)。

これらの各モジュールでイベント数を計測し、ニュートリノビームのプロファイルを再構成する。ニュートリノイベントの検出原理とビームプロファイルの再構成について、3.3.2節で説明する。

3.3.2 ニュートリノ反応検出原理

INGRID 検出器ではニュートリノと鉄原子核との荷電カレント反応によって生成される荷電粒子を捕まえる。荷電カレント反応は相互作用により生成される粒子の種類によって分類される。このうちシミュレーションの中で考慮されている反応を、それぞれの反応の形式とともに表3.1に示す[7]。また荷電カレント反応とは別に荷電粒子の生成を伴わない中性カレント反応も起きる。これらの反応によって生成された荷電粒子が、シンチレー

相互作用	生成される粒子	反応形式
荷電カレント準弾性散乱	e or μ	$\nu + N = l + N'$
荷電カレント 1π 生成反応	π	$\nu + N = l + N' + \pi$
荷電カレントコヒーレント π 生成反応	π	$\nu + {}^{16}\text{O} = l + {}^{16}\text{O} + \pi$
荷電カレント深非弾性散乱	π (多数)	$\nu + N = l + N' + m\pi$

表 3.1: ニュートリノ荷電カレント反応の種類。Nは核子、lはレプトン(e or μ)である。

ターを通過する際に生じるシンチレーション光を検出することでニュートリノイベントを同定し、各モジュールで計測されるイベント数の分布からビームプロファイルを測定し、その中心を再構成する。INGRIDモジュールにおいて、各シンチレーター層は水平・垂直方向にセグメント化(3.4節参照)されている。これにより突き抜けた荷電粒子の位置を特定し、飛跡を再構成することができる。また各モジュールは側面をさらにシンチレーターの層で覆われる。これはモジュールの外から入ってくる粒子によるバックグラウンドイベントを排除するためのVETOカウンター(図3.6)として用いられる。これらのVETOカウンターはビーム軸方向にセグメント化される。このVETOカウンターのセグメント化はニュートリノイベントセレクションにおいて重要な役割を果たす。

図3.7と図3.8はそれぞれモジュール内でのニュートリノ反応によるイベントと、バックグラウンド粒子(図ではミュオン)によるイベントを表す。両者はともにINGRIDモジュールのシンチレーター及びVETOカウンターを通過するイベントとして検出されるが、VETOカウンターがセグメント化されることで反応のあったシンチレーターとVETOカウンターの、ビーム上流から見た位置を比較することができるようになる。これにより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によるイ

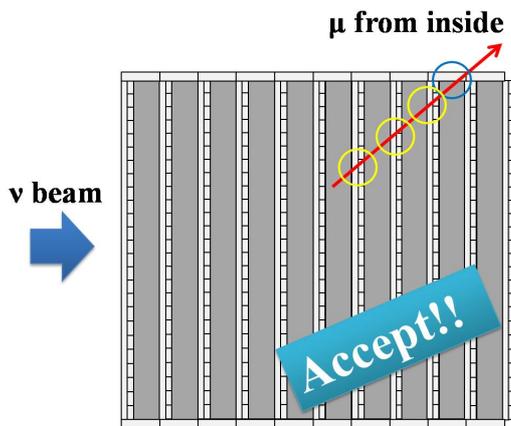


図 3.7: INGRID モジュール内部でのニュートリノ反応の例

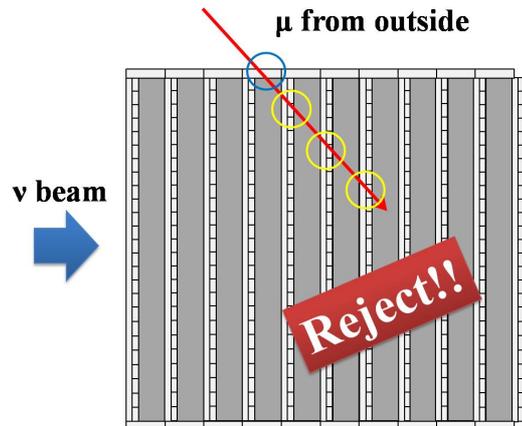


図 3.8: バックグラウンドミュオンによるイベント例

ベント、VETO カウンターが先に反応したイベントはバックグラウンドイベントであると判断できる。

3.3.3 シミュレーションからの要請

前節で示したモジュールのデザインを基に検出器シミュレーションによって、INGRID に必要とされる要請について説明する。図 3.9 にシミュレーションによるニュートリノイベントの様子を示す。

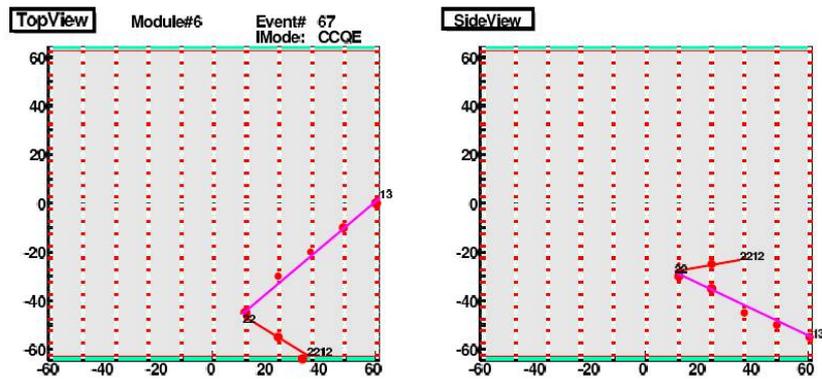


図 3.9: INGRID モジュールでの CC-QE 反応のイベントディスプレイ。図中の赤い点の大きさは粒子の落したエネルギーに比例する。

INGRID では図 3.9 に示されるように、 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ にセグメント化された $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ の領域 (576 ブロック) のどこを通過したかを記録することで、生成された荷電粒子の生成点・飛行方向・角度がわかる。

INGRID では各モジュールでニュートリノ反応が起きたイベント数を計測し、その数分

布からビームプロファイルを測定し、その中心を再構成する。図 3.10 にイベント情報からビームプロファイルを再構成したときの図を示す。図 3.10 では生成された粒子が荷電カレント反応によるミュオンのみである場合を考える。このとき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、「シンチレータ層を 3 層連続突き抜ける」かつ「VETO カウンターによるカット」という条件のイベントセレクションを行ったときの分布が青い点で示されている。このセレクションの目的はミュオンの飛跡を再構成することと、外部からのバックグラウンドイベントを除去するためである。また得られたミュオンの飛跡情報から、ニュートリノビームに対する生成角度を再構成 (θ_{rec}^{μ}) し、その大きさが 20° 以上のときを選んだ分布が赤い点で示されている。これはニュートリノのエネルギーとミュオンの散乱角には相関があり、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向かって飛び出しやすいことから、再構成した角度 (θ_{rec}^{μ}) が 20° 以上であることを要求することでモニターすべきエネルギー領域のニュートリノの純度を上げることができるためである。

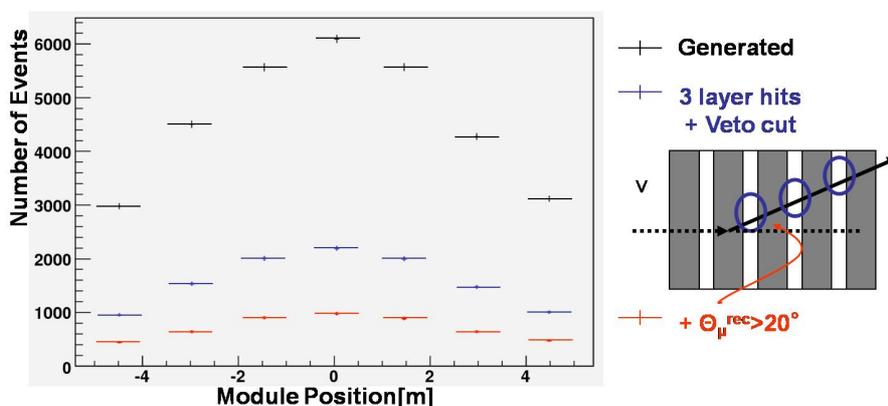


図 3.10: ビーム中心の再構成の図。イベントセレクションについては図中右に示してある。いずれのセレクションによっても要求される 28cm より十分良い精度で再構成が可能であると考えられる。

これらのカットに対して得られる各モジュールでのイベント数をガウス分布でフィットし、そのピークをビーム中心、フィットの誤差を再構成の精度とする。これまでの結果 [7] からビーム強度がデザイン値の 1% の強度としたときの 1 か月分に対応する統計量で、要求される精度 28cm よりも十分よい精度で中心を再構成できることが示されていることから、実機においても上記のイベントセレクションを用いてニュートリノイベントを計測する。

また検出器の系統誤差がニュートリノイベント数の見積もりに及ぼす研究もなされており [7]、各モジュールでのイベント数の系統誤差が 2% 以下に抑えられる必要があることが示されている。この系統誤差の要因として、バックグラウンド含有率の不定性、及びモジュールの検出効率の不定性に対する研究がなされている。このうちモジュールの検出効率は、本論文で性能を評価するシンチレータや光子検出器などに対する要請を与える上で重要であり、モンテカルロシミュレーションからニュートリノイベント数の系統誤差を 2% 以下に抑えるためには、モジュールの検出効率の不定性を 0.5% 以下に抑える必要がある。したがって次節で説明する INGRID モジュールの各コンポーネントには、全体として

99.5%以上の検出効率を要請する。各コンポーネントの性能評価の測定結果については、5章で詳しく説明する。

3.4 INGRID モジュール構成要素

INGRID ではニュートリノ反応によって生成された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と新型光検出器 MPPC(Multi Pixel Photon Counter) により読み出す。MPPC は光電子増倍管 (PMT) に代わる新型の光検出器として開発された。T2K 実験は MPPC を用いる世界初の素粒子実験である。以下に INGRID モジュールの構成要素であるシンチレーター、波長変換ファイバー、MPPC 及び MPPC-ファイバーコネクタ (GOMI Connector) と、それらを組み合わせたトラッキングプレーンについて説明する。

3.4.1 押し出し型シンチレーター (Excluded Scintillator)

INGRID に用いるシンチレーターはアメリカの Fermi 研究所で開発された押し出し型シンチレーターである。2007 年末より本実験に向けた大量生産がスタートし、現在も随時製造中である。本実験で用いるシンチレーターは $120\text{cm} \times 5\text{cm} \times 1\text{cm}$ の棒状で、1 本あたりの重量は約 600g である。トラッキングプレーン 1 層あたり水平方向・垂直方向にそれぞれ 24 本ずつ並べられる。これにより、 $120\text{cm} \times 120\text{cm}$ の領域を $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ を 1 ブロックとして 576 ブロックにセグメント化することができる。INGRID 1 モジュールでは $24(\text{本}) \times 2(\text{水平} \cdot \text{垂直}) \times 11(\text{層数}) = 528$ 本、全体では $528 \times 16 = 8448$ 本が必要となる。

シンチレーターの組成はポリスチレンをベースとして PPO、POPOP をそれぞれ質量比で 1%、0.01% 混ぜたもので構成されており、これは過去に MINOS 実験、K2K 実験で用いられた SciBar シンチレーターと同じ素材である。またシンチレーター表面には約 $250\mu\text{m}$ 厚の酸化チタン (TiO_2) ベースの反射コーティングが施される²。この反射材によりシンチレーション光の集光効率をあげることができる。また隣り合うシンチレーターへの光漏れを防ぐことができ、セグメント化が可能となる。シンチレーター中央には直径 $2\text{mm} \sim 3\text{mm}$ 程度の穴があいており³、この穴に波長変換ファイバーを通して集光する。

図 3.11 に実機で用いるシンチレーターのデザインを示す。

3.4.2 波長変換ファイバー

INGRID では荷電粒子の通過に伴って発生するシンチレーション光を、波長変換ファイバー (WLSF : Wave Length Shifting Fiber) を使って集光し、光検出器に伝送する。実機ではクラレ社の Y-11(200)MS を使用する。このファイバーの吸収波長のピークは 430nm で、シンチレーターの発光波長のピーク 420nm にほぼ一致する。図 3.12 にファイバーの発光・吸収波長を示す。

² TiO_2 ~15% 入りのポリスチレンの層をシンチレーターの押し出し形成時に同時に作る

³プロトタイプシンチレーターでは穴の大きさ・形状にバラつきがある。実機に用いるシンチレーターでは穴の大きさを揃える改善がなされている。

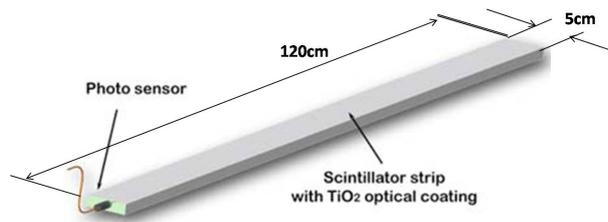


図 3.11: INGRID シンチレーターの模式図

Y-11 というのは波長変化材の種類を示しており、(200) は変換材の濃度 (単位は ppm) を表している。最後の MS は「マルチクラッド S 型」という意味である。マルチクラッド型はシングルクラッド型に比べてファイバー内部で再発光した光の全反射条件を満たす角度が大きくなる。このためシングルクラッド型に比べて伝送される光量も大きくなる。マルチクラッド型の core、inner clad、outer clad の屈折率はそれぞれ 1.57,1.49,1.47 である。図 3.13 にシングルクラッド・マルチクラッド型での吸収・再発光過程の模式図を示す。「S」タイプはファイバーコアのポリスチレン繊維が揃っており、繊維の揃っていない「non-S」タイプに比べ曲げに強いことを示している。ファイバーの径はさまざまな大きさのものがあるが、我々は $\phi=1\text{mm}$ のものを使用する。

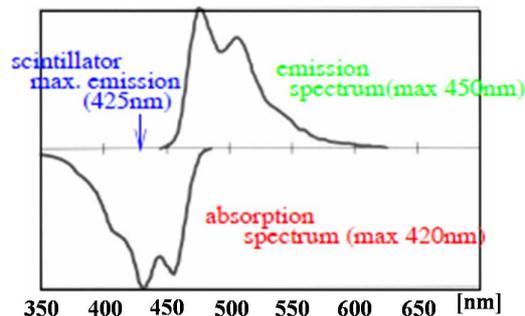


図 3.12: Y-11 の吸収・発光波長スペクトル。吸収波長はシンチレーション光の波長と、発光波長は MPPC の量子効率の高い波長にそれぞれ近い値を示す。

INGRID ではシンチレーターと同じく 1 モジュールあたり 576 本、長さにして約 690m が必要となり、全体では約 11,000m 以上のファイバーを必要とする。

3.4.3 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

ここでは新型光検出器である MPPC(Multi Pixel Photon Counter, 図 3.14) について説明する。MPPC は近年開発が進められている PPD(Pixeled Photon Detector) と呼称される半導体光検出器の一つであり、受光面に多数の APD(Abalanche Photo Diode) ピクセルが並んだ構造をとる (図 3.15)。以下に MPPC のもつ基本的な特性を挙げる。

- 優れたフォトンカウンティング能力をもつ

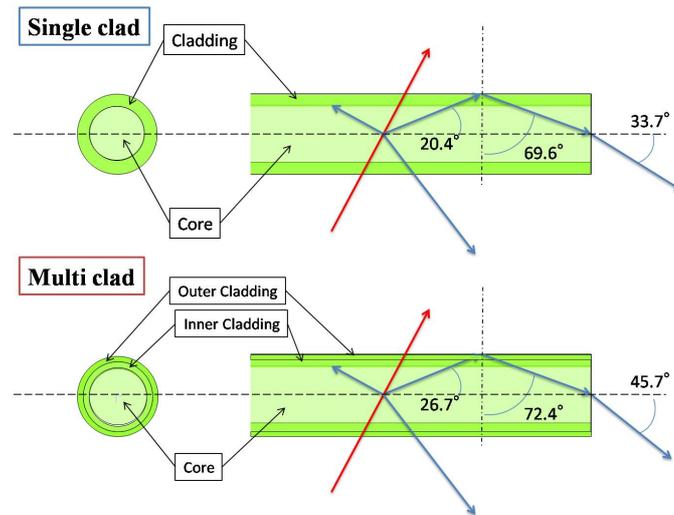


図 3.13: 波長変換ファイバーの断面図。シングルクラッド、マルチクラッドでのシンチレーション光の吸収・発光過程を示す。マルチクラッドの方が伝送効率が高い。

- コンパクトな形状
- 磁場の影響を受けない
- 低いバイアス電圧で動作する ($\sim 70\text{V}$)
- 高いゲイン ($\sim 10^6$)・光子検出効率をもつ

各 APD 素子はノーマルモード、ガイガーモードの二つの動作モードを持ち、それらはある電圧を境に切り替わる。この電圧をブレイクダウン電圧 (V_{bd}) という。MPPC で光子検出に用いられるのはガイガーモードのときである。MPPC にかけるバイアス電圧 (V_{bias}) とブレイクダウン電圧との差を V_{over} として以下の式で定義する。

$$V_{over} = V_{bias} - V_{bd} \quad (3.1)$$

個々の MPPC における基本的な性能はこの V_{over} の関数としてよく揃った応答を示す [9]。また MPPC は温度にセンシティブな検出器であり、MPPC の使用環境を考える上で V_{over} と温度のコントロールおよびキャリブレーションは必要不可欠である。

MPPC の基礎特性のうち、とりわけ INGRID において重要な項目はゲイン、クロストーク&アフターパルスレート、ノイズレートの 3 つである。ここではそれぞれの項目に関して簡単に説明する。(詳細については文献 [9] 参照。)

- ゲイン

MPPC のゲインは電子がガイガー放電によってどれだけ増幅されたかで定義される。これまでの数 100 個に及ぶサンプルの測定結果より、MPPC のゲインは $10^5 \sim 10^6$ 程度と、PMT の典型的なゲイン値 ($10^6 \sim 10^7$) にはやや劣るものの、実験に使用する上では十分な値である。

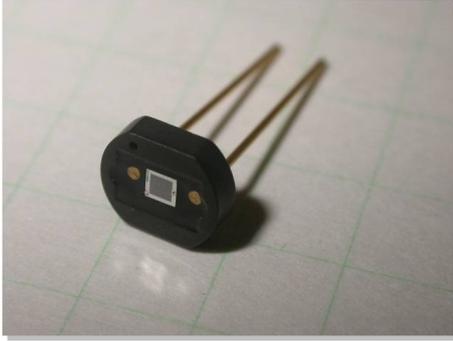


図 3.14: MPPC の写真。中央の正方形部分が受光面に相当する。

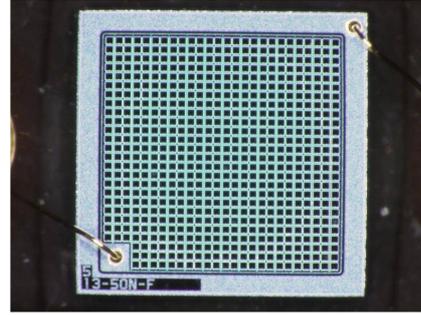


図 3.15: MPPC の受光面。受光面のサイズは $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 。一つ一つのピクセルが小型の APD となっている。

- クロストーク & アフターパルスレート (C.t&A.p rate)
クロストークとは、ある一つのピクセルでのガイガー放電によって発生した二次的な光子が隣接するピクセルのガイガー放電のトリガーとして作用し、結果放出されるシグナル量が本来の検出されるべきシグナル量に比べて見かけ上増加して見える現象である。これは MPPC の線形性やダイナミックレンジに悪影響を及ぼすこととなる。このクロストークの起こる確率をクロストークレートと定義し、典型的な数値として $0 \sim 30\%$ 程度となる。クロストークが複数のピクセル間で生じる現象であったのに対し、アフターパルスは同一のピクセル内で起きる現象である。これはガイガー放電によって増幅された電子のうち一部がピクセル内の格子欠陥にトラップされ、やや遅れてから放出されるときに再びガイガー放電のトリガーとなることに起因する。アフターパルスはクロストークと同じく検出光子数識別に悪影響を及ぼす。これら二つの現象はいずれも独立に発生するが、ADC 分布からはこの二つの影響を区別して見積もることは困難である。従って本論文ではこれら二つの効果をひとまとめにして評価する。T2K 実験において予定されている V_{over} の電圧領域では、クロストーク & アフターパルスレートの典型的な数値は $0 \sim 30\%$ 程度である。
- ノイズレート
MPPC の各 APD ピクセルにおいて、外部からの光子ではなくピクセル内部の熱電子由来の光子がガイガー放電のトリガーとなることがある。このとき得られるシグナルと通常の外部からの光子検出によるシグナルの間に差異はなく、2 つを識別することは不可能とされる。これらの熱電子ノイズは各 APD ピクセルで独立に、かつ全くのランダムに生じる。またノイズレートは V_{over} の上昇に伴って増加する。ノイズレートのシグナルの大きさは通常 $1 \sim 2\text{p.e}$ (photo-electron、電子数) であるが、INGRID においてこのノイズレートはイベント検出効率と大きく関わっており、可能な限り低く抑えることが重要である。

これら MPPC の諸特性は温度と V_{over} の関数として表わされる。各 V_{over} における MPPC の基礎特性の典型的な数値を表 3.2 にまとめておく。

V_{over} [V]	ゲイン	C.t&A.p rate	1p.e ノイズ [kHz]	2p.e ノイズ [kHz]
1.0	5.7×10^5	0.10	372	22.6
1.2	6.8×10^5	0.15	450	35.7
1.3	7.3×10^5	0.17	490	47.9
1.4	7.9×10^5	0.20	530	61.6
1.6	8.9×10^5	0.26	616	87.7

表 3.2: MPPC の 25°C での各基礎特性の典型的な数値

またこれらの項目とは別に、MPPC は高い光子検出効率をもつ。ここで等しい光量を PMT と 3.4.4 節で説明するコネクタを用いた状態での MPPC に入射させたとき (図 3.16) の、PMT に対する MPPC の相対的な光量比を表 3.3 に示す。

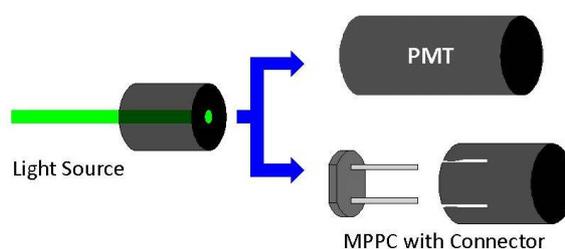


図 3.16: MPPC と PMT の相対的な光量比測定。同じ光源から検出される光量を比べる。

V_{over} [V]	1.0	1.2	1.3	1.4	1.6
PMT との相対的な光量比	1.78	2.13	2.27	2.40	2.62

表 3.3: MPPC の 25°C での PMT に対する相対的な光量比

実機で使用するものと同じコネクタを用いた状態での相対的な光量比の典型的な値は 2~3 となり、MPPC が PMT に比べて波長変換ファイバーからの光 (緑) に対して高い検出効率を有している。

INGRID では総数 10000 チャンネル以上の MPPC が必要となる。2007 年末には大量生産がスタートし、現在は個々の基本性能評価の試験が行われている。

3.4.4 GOMI Connector

GOMI Connector⁴は T2K 実験に向けて開発された、MPPC の受光面と波長変換ファイバーの端面とを正確に密着させることでファイバーからの光を効率的に MPPC に伝送させることを目的としたプラスチックコネクタである。コネクタに対する要請として、

⁴General Optical MPPC Injection Connector

1. ファイバー端面の中心と、MPPC 受光面の中心が正確に一致すること (横アラインメント)
2. ファイバー端面と MPPC 受光面が可能な限り近づけられること (縦アラインメント)
3. 再現性・遮光性が高いこと
4. 着脱が容易、かつコンパクトであること

などがあげられる。試行錯誤の結果、我々はキャップ式のプラスチックコネクタを開発した。図 3.17 に開発されたコネクタの写真を示す。



図 3.17: GOMI Connector の実物写真。左がファイバーコネクタ、右が MPPC コネクタとして使用される。

このコネクタの使用において最も重要な点は、アラインメントの再現性にある。実際に複数のコネクタサンプルに対して着脱による再現性のテストを、各回における光量を測定する方法で行った結果、コネクタの着脱による光量の誤差は 3% 程度 [10] である。この誤差が INGRID におけるニュートリノイベント同定に与える影響を考えると、十分無視できるレベルである。

3.4.5 トラッキングプレーン

3.3 節で述べたとおり INGRID の各モジュールは、シンチレータによるトラッキングプレーンと鉄標的を交互に並べた構成をしている。以下、トラッキングプレーンの構成について説明する。トラッキングプレーン 1 層は、シンチレータ 24 本 × 2 ・波長変換ファイバー 48 本 ・ MPPC48 個とエレクトロニクスボード及びこれらのサポートストラクチャーからなる。サポートストラクチャーまでを含めたトラッキングプレーンの構成を図 3.18 に示す。

図 3.19 は 2008 年 1 月にフランスで製作されたトラッキングプレーンのプロトタイプである。サポートストラクチャーまでを含めた 1 層の重量は約 80kg 程度である。また波長

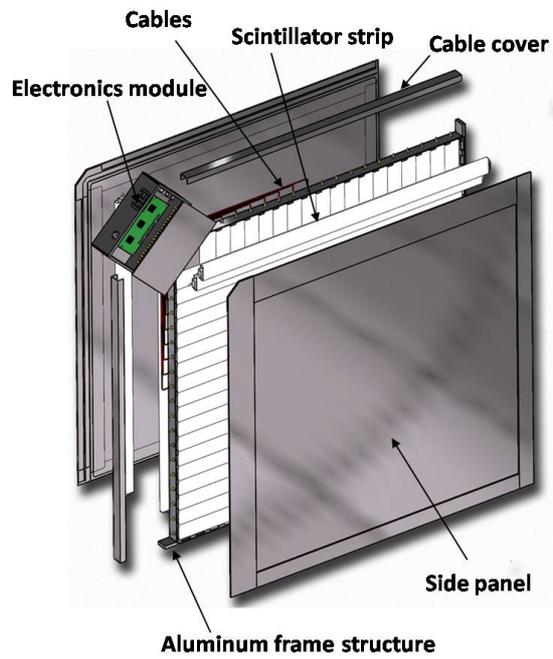


図 3.18: トラッキングプレーン 1 層の構成要素。



図 3.19: トラッキングプレーンのプロトタイプ。サポートストラクチャーまで含めて 80kg 近い重量がある。

変換ファイバーと MPPC は 3.4.3 節で説明した GOMI コネクターで接続されるが、これらの固定には図 3.20 のような専用のインターフェイスを用いる。

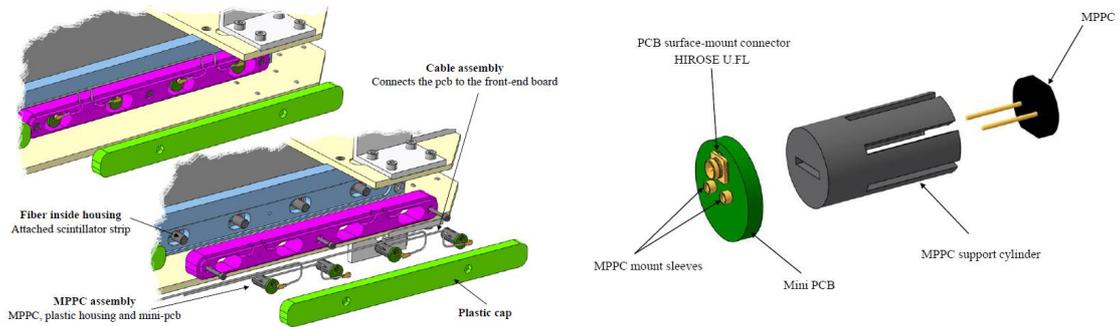


図 3.20: シンチレーター、ファイバー、MPPC を固定するインターフェイス。

図 3.21: ファイバー・MPPC と GOMI コネクターをエレキケーブルと接続するための Mini PCB。

3.4.6 VETO カウンター

3.3、3.3.2 節で説明したように、INGRID では各モジュールを VETO カウンターで囲むことで、ニュートリノイベントとバックグラウンドイベントを区別することができる。

VETO カウンターは各モジュールにおいて 3~4 か所に設置され、それぞれ 22 本のシンチレータを並べたもの 1 層としたプレーン (VETO プレーン) からなり、各モジュールの側面 (上下、または横) に配置される。VETO シンチレータの幅と厚さはそれぞれ 5cm と 1cm で、トラッキングプレーンのシンチレータと同じであるが、長さが異なる。VETO シンチレータの長さは short(112cm)、standard(120cm)、long(130cm) の 3 種類にわけられ、配置する場所によって大きさの異なる VETO プレーンが用意される。またモジュール前面と背面の VETO カウンターは他と異なり、図 (3.22) の左図に示すように、モジュールの上と横にそれぞれ 2 本ずつ配置する。また図 3.22 の右図に各プレーンの構造及び大きさを示す。

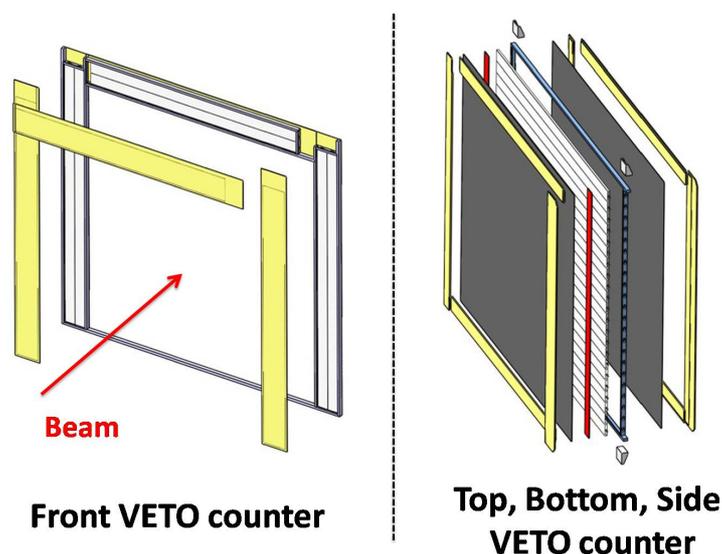


図 3.22: (左) 前面及び背面に配置される VETO プレーン。(右) モジュールの側面に配置される VETO プレーン。配置場所によって大きさが異なる。

3.4.7 INGRID デザインまとめ

最後に INGRID のデザインの基本的なパラメーターについてまとめたものを表 3.4、表 3.5 に示す。

これらの量に加えて、各コンポーネントは+5% 分の予備が用意される。

コンポーネント	トラッキングプレーン 1 層	1 モジュール	INGRID 全体
シンチレーター	48(24×2)	528(48×11)	8448(528×16)
MPPC	48	528(48×11)	8448(528×16)
ファイバー	57.6m(1.2m×48)	633.6m(57.6m×11)	10,137.6m(633.6×16)

表 3.4: INGRID における各コンポーネントの必要数 (デザイン値)

コンポーネント		VETO プレーン 1 層	INGRID 全体
シンチレーター	short(112cm)	22 or 2(前面、背面)	284
	standard(120cm)	4	128
	long(130cm)	22	924
MPPC		22	1336
ファイバー	112cm	26.88m	318.08m
	125cm	5m	160m
	135cm	28.6m	1247.4m

表 3.5: VETO カウンターにおける各コンポーネントの必要数 (デザイン値、前面の VETO 除く)

第4章 富士テストビームライン (FTBL)

本章では2007年10月から新たに稼働しはじめた富士テストビームライン発足の経緯からビームラインの現状までと、2007年11月にビームプロファイルを測定した結果について述べる。

4.1 テストビームライン発足経緯

2005年3月のKEK-PS(特に $\pi 2/T1$)のシャットダウンに伴い国内においてビームテストに使用できるGeVクラスのビームラインは事実上消滅した。これを受けて、新たに荷電粒子テストビームラインの建設が提起された [11]。その結果、KEKの富士実験室にKEKBの電子リングに併設した新たな電子ビームラインが作られた。これを富士テストビームライン (FTBL) と呼ぶ。INGRIDシンチレーターの性能評価をこのFTBLの電子ビームを使って行うために、このビームラインの立ち上げからビームコミッショニングに至るまでの建設作業に参加した。以下本章ではFTBLの概観図、ビームラインの詳細、各種ビームモニターの紹介と、2007年11月と12月に実験ステージ上でビームプロファイルを測定した結果について説明する。

4.2 富士テストビームライン (FTBL)

4.2.1 ビームライン概観図

KEKB加速器は電子リング (HER¹:8GeV) と陽電子リング (LER²:3.5GeV) の2リング構造をもつ、世界最高のルミノシティを誇る電子・陽電子衝突型加速器である (図4.1)。電子・陽電子の衝突により生成されるBおよび反B中間子の研究を行う Belle 検出器は筑波実験棟に設置されているが、そのちょうど反対側のHER直線部 (~100m) に富士実験室 (図4.1) がある。

この直線部では大量のフォトンが発生する。このうち大気中に抜け出てくるものをターゲットにあて、対生成により電子を生成する。この電子は角度を調整されたベンディングマグネットによって大きくカーブしながら、KEKBの2つの蓄積リングの下をくぐりぬける。この軌道は3次的に曲げてビームを取り出す非常にアクロバティックな軌道で、複数台のベンディングマグネットと四重極マグネットを組み合わせることで可能とした。各

¹High Energy Ring

²Low Energy Ring

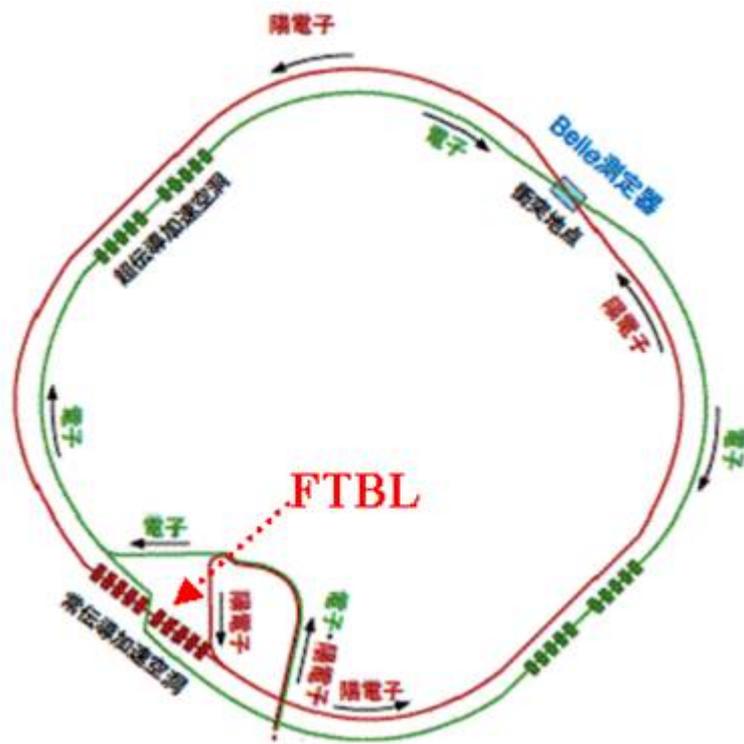


図 4.1: KEKB 加速器の構造

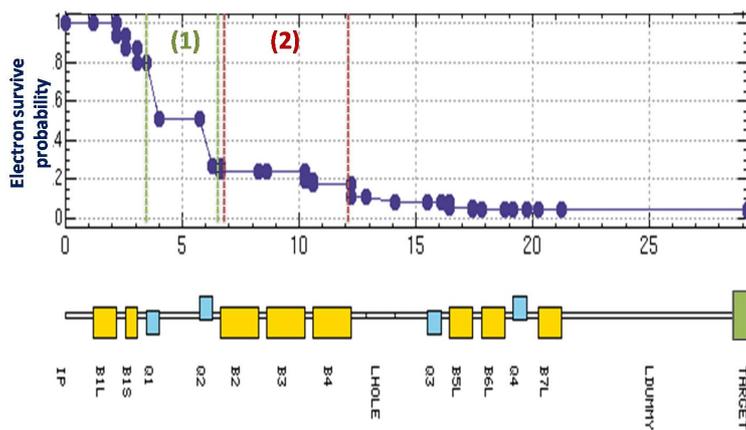


図 4.2: シミュレーションによる各マグネットを通過した後に電子の生き残る確率。領域 (1) では横運動量の大きいものが、(2) では選択された運動量以外のものが落ちる。

マグネットに流す電流は目的とする電子の運動量に合わせて変更が可能であるため³、選択された運動量以外の電子はマグネットを通過する際に大部分が落とされる。図 4.2 に各マグネットを通過した後に電子が生き残る確率を示す。ここで残った電子だけが KEKB リングと富士 B3 フロアとを仕切るコンクリートシールドに開けられた直径 10cm の穴を通り、FTBL 実験ステージへと導かれる。図 4.3 に FTBL の全体図を示す。

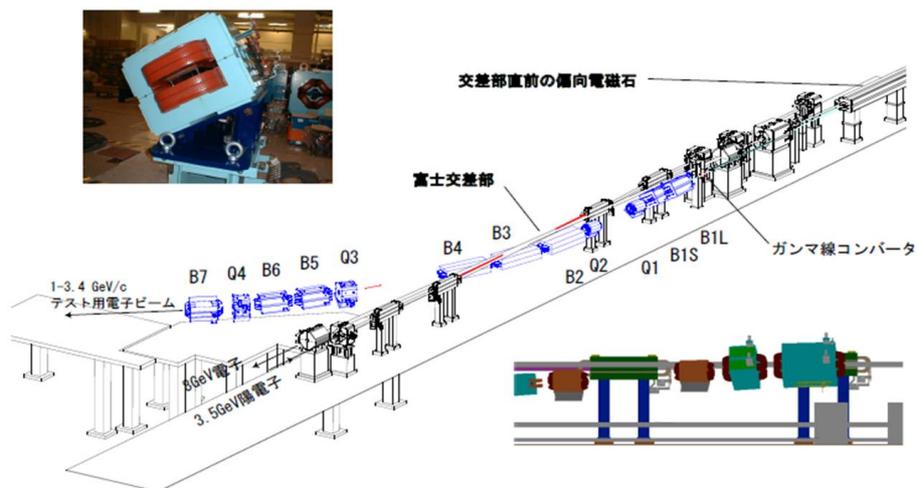


図 4.3: FTBL の全体図

次節では電子の生成過程からビームラインに設置された各マグネット、及び実験ステージの詳細について説明する。

4.3 電子ビーム生成過程・マグネット・実験ステージ

4.3.1 電子ビーム生成

富士実験室のある HER 直線部は非常に高い真空度 ($\sim 3 \times 10^{-8}$ Pa) を保っているが、最大 1.3A に及ぶ高電流のため、残留ガスとの相互作用から大量の Bremsstrahlung photon が非常に鋭くコリメートされて発生する。図 4.4 に、KEKB ビームパイプから大気中に引き出されたフォトンのエネルギー及び X,Y 方向の分布 [11] の様子を示す。これまではこのフォトンビームを下流のマグネットでダンプしていたものを電子生成に用いるために、KEKB マグネットの一部を改造し(図 4.5)、フォトンを通過させることにした。これによって最大 8GeV 程度のエネルギーを持つフォトンを取り出すことが可能となった。

取り出されたフォトンにはさらに下流に配置した約 5mm 厚のタングステンターゲット(図 4.6)に入射し、対生成により電子を発生させる。このとき発生する電子はシミュレーションから最大 8GeV のエネルギー、3.5mrad の広がりを持つと見積もられている(図 4.7)。

³すべてのマグネットが常時電流値を変更可能なわけではない。詳しくは後述のマグネットの磁場の項目を参照

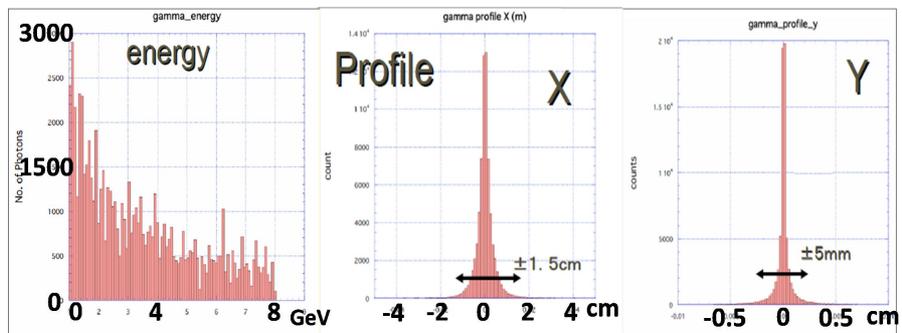


図 4.4: シミュレーションによる、大気中に取り出されるフォトンのエネルギー及び X,Y 方向の分布。よくコリメートされていることがわかる。

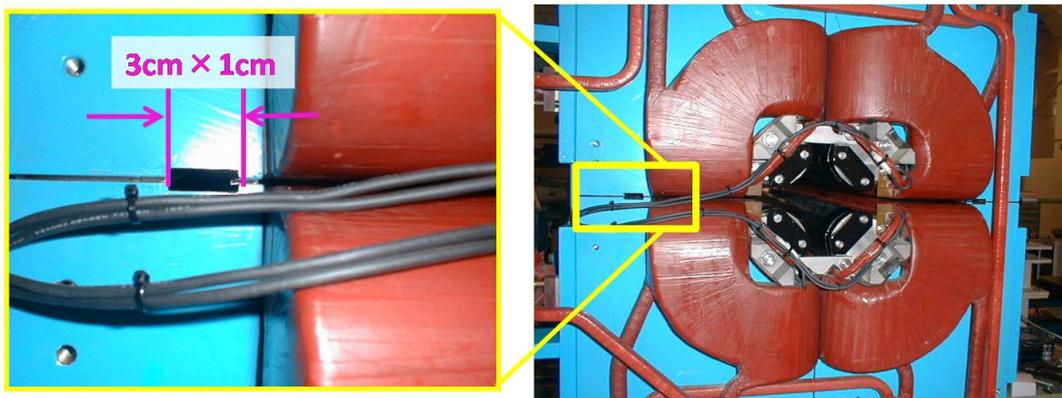


図 4.5: フォトンターゲットまで導くために小さな穴をあけた上流のマグネットの図

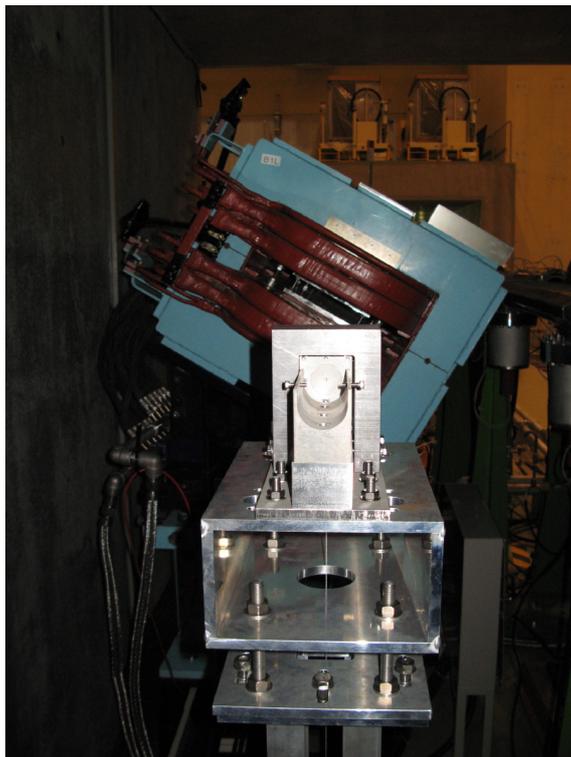


図 4.6: ビームライン最上流に設置されるタングステンターゲット。後ろに見えるのは最初のベンディングマグネットである BIL マグネット

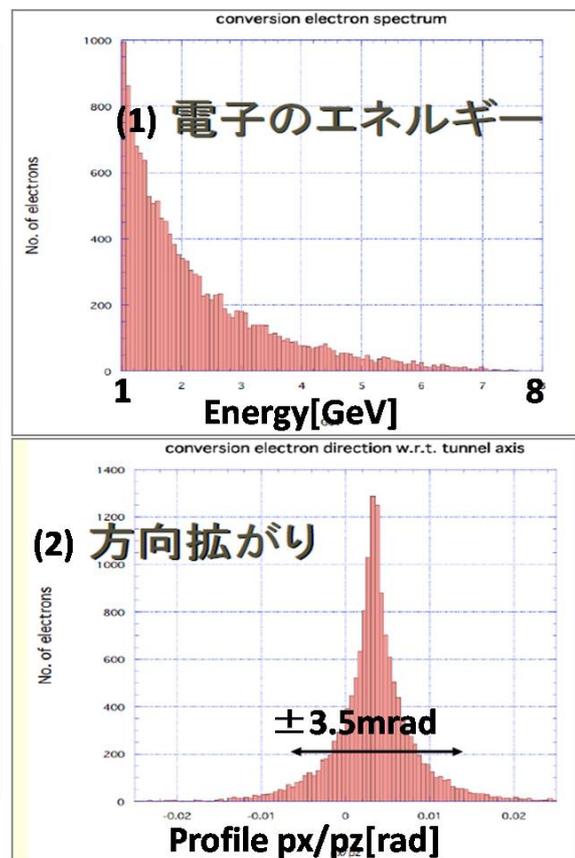


図 4.7: GEANT4 によるシミュレーション結果。ターゲット直後での対生成された (1) 電子のエネルギー、と (2) 角度拡がり。

4.3.2 マグネット

FTBL のビームラインを作るマグネットはベンディングマグネット・Q マグネット合わせて 12 個からなる。このうちコンクリートシールドを隔てた KEKB ライン側には B1L,B1S,Q1,Q2,B2,B3,B4 の 7 台、実験エリア側には Q3,B5L,B6L,Q4,B7L の 5 台のマグネットが配置される。それぞれのマグネットの位置は図 4.3 に示してある。これらのマグネットの制御用コンピューターと電源は実験ステージ下の富士 B4 フロアに設置されている (図 4.8)。



図 4.8: 富士 B4 フロアに設置されたビームラインマグネットの電源。

図 4.9 に各マグネットの磁場制御システムを示す。各マグネットの電源は独立に制御用コンピューターと接続されており、またこの制御用コンピューターは B3 コントロールルームに設置されたコンピューターと接続されている。図 4.10 にコントロールルームで用いる磁場制御ソフトのモニター画面を示す。このシステムにより、通常はコントロールルームからリモート操作によって各マグネットの磁場設定を独立に変更することができる (マグネットの磁場設定の詳細については [12] 参照)。

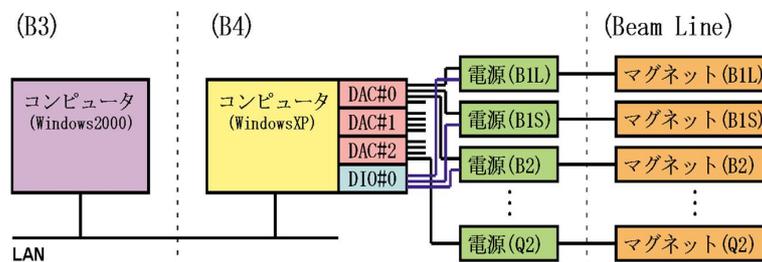


図 4.9: 磁場制御システム。各マグネットの設定は個別に行うことができる。

取り出したい電子の運動量が決まると各マグネットの磁場が決まり、そのデータから電流値が決定する。実際に磁場設定を変える時は、必要な電流値に変換して入力することに



図 4.10: マグネットのコントロールモニター。図では B1L に直接電流値を指示している。

なる。従って設定次第で取り出す電子の運動量を色々変更できるが、今回の測定では電子の運動量を 3GeV と設定し、このときに各マグネットに流す電流値をデフォルトの設定とした。

4.3.3 実験ステージ

実験ステージは富士 B3 フロアに新たに建設された。図 4.11 に現在のステージを上から眺めた図を示す。ステージ自体の大きさは 7m×4m、ビームライン上の有効領域 (検出器の設置に使える距離) は約 3m 程度 (図 4.11 の白線参照) である。

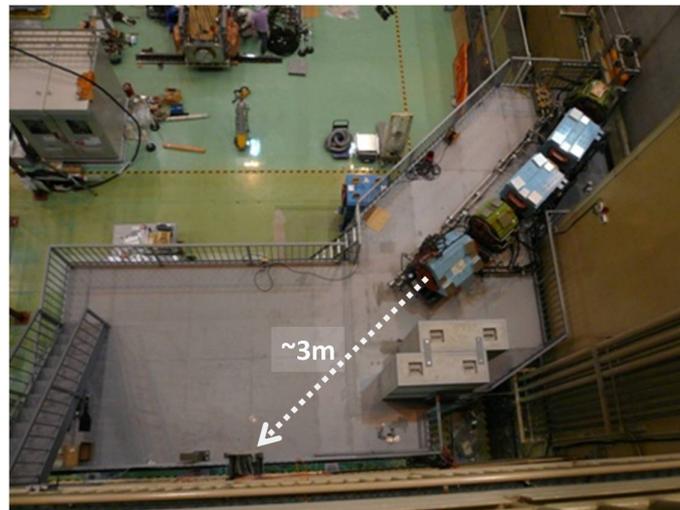


図 4.11: 実験ステージを上から見た図。現在はマグネットとの前にフェンスが取り付けられている。

4.4 ビームプロファイル測定

ここでは2007年11月のビームテストで行った、実験ステージ上でのビームプロファイル測定の結果について述べる。

4.4.1 目的

図 4.12 にシミュレーションによるステージ上でのビームスポット、及び運動量の広がりを示す。また図 4.13 に実際に測定されたビームプロファイルを示す。

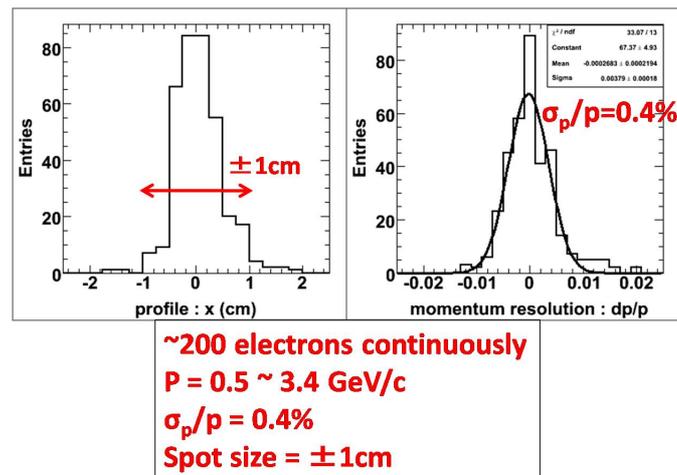


図 4.12: シミュレーションで計算されたビームスペック

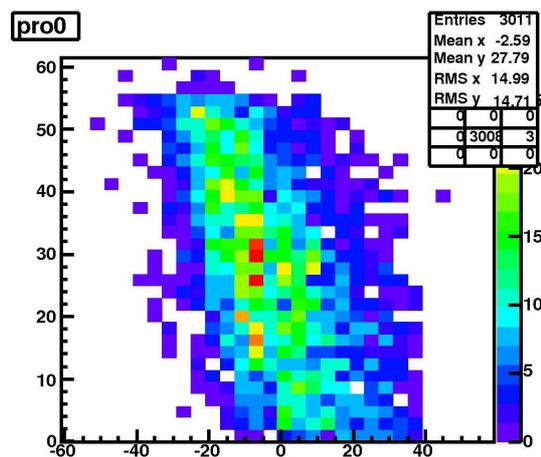


図 4.13: 筑波大によって測定されたステージ上でのビームプロファイル。X 軸、Y 軸の単位は mm。

第5章で述べる INGRID シンチレーターの性能評価のためには、自分達の用いる検出器を設置する場所でのビームプロファイルおよびビームレートを調べておく必要がある。我々は検出器の性能評価に移る前に次の2種類の方法でビームプロファイルを測定した。

- プロファイル測定 (1)
トリガーカウンター (5cm×10cm) による大まかな2次元スキャン
- プロファイル測定 (2)
1.5mφ ファイバーホドスコープを用いた水平方向の詳細なプロファイルスキャン

以下、測定に用いたトリガーカウンターとホドスコープについて説明する。

1. トリガーカウンター

トリガーカウンターには5cm×10cm×2mmのシンチレーターと2インチの光電子増倍管(PMT)を用いた。トリガーカウンターは上流と下流に一つずつ置き、それぞれT1・T2とした。測定(1)ではT1と30cm×30cm程度の大きさをもつもう一つのトリガーシンチレーター(ET1)を最終マグネット直後のフェンス前に設置し、このT1とET1のコインシデンスをビームトリガーとしてプロファイルを測定した。測定(2)ではT1とT2のコインシデンスをトリガーとしてホドスコープの各チャンネルごとのADC分布をを使ってプロファイルを測定した。

2. シンチレーションファイバー

シンチレーションファイバーはクラレ社のSCSF-78、角型1.5mm×1.5mm、シングルクラッドS型のものを用いた。実際の測定ではこれを16本並べて、2.4cm幅の領域を1.5mm間隔で読みだせるように揃えた。図4.14はMAPMTと接続するためのクッキーをつけた図である。MAPMTに合わせて16chを4×4chに分けてある。



図 4.14: クッキーを取り付けたシンチレーションファイバーのMAPMTとの接着面。

3. 16ch MAPMT

シンチレーションファイバーの読み出しには16chMAPMT(浜松ホトニクス社製、H8800)を用いた。これは2cm×2cmのアノードが16分割(4×4列)されたもので、それぞれに入ってきた光を独立に読み出すことができる。今回の測定では水平方向

・垂直方向を同時に読み出すことにしたので2つのMAPMTを使用した。表4.1に基本的な特性をまとめる。

カソード	バイアルカリ
有効波長領域	185-650(Max.420)nm
アノード	4×4 分割 (1ch:4mm×4mm)
供給電圧	-800V(推奨)
ゲイン	9.0×10^5
線形性 (2% 変動)	1.5mA/ch

表 4.1: 16chMAPMT の基本特性

4. ファイバーホドスコープ

ファイバーホドスコープは16本のシンチレーションファイバーと16chマルチアノード光電子増倍管(MAPMT)からなる。図4.15に完成したファイバーホドスコープの写真を示す。図の右側部分にビームを当てて、1.5mm間隔で通過した位置を特定できる。本番ではシンチレーションファイバー部分を暗幕とブラックテープを巻くことで完全に遮光した。

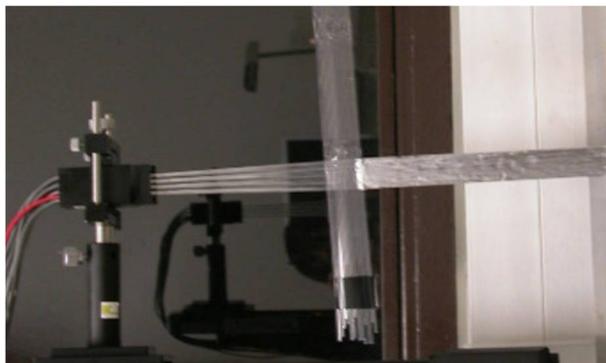


図 4.15: ホドスコープの図。

4.4.2 プロファイル測定 (1)

測定(1)ではトリガーカウンターを用いてステージ上の10cm×10cmの領域を9つのブロックにわけ、大まかなビーム2次元ビームプロファイル測定を行った結果について述べる。

本測定ではT1(5cm×10cm)ともう一つのトリガーET1(~30cm×30cm)を用いた。ET1トリガーは図4.16に示すように、最終マグネット(Q4)の直後にあるフェンスに開けられたビームスポットを完全に覆うように、フェンスに直接設置した。これでマグネットから出てくる電子を漏れなく捕まえることができる。またT1はビームラインの設計値に基づ

くビームレベル(高さ)とマグネットとビームダンプを結ぶ直線上の位置から、ステージ上で検出器を設置しやすい位置に設置した。

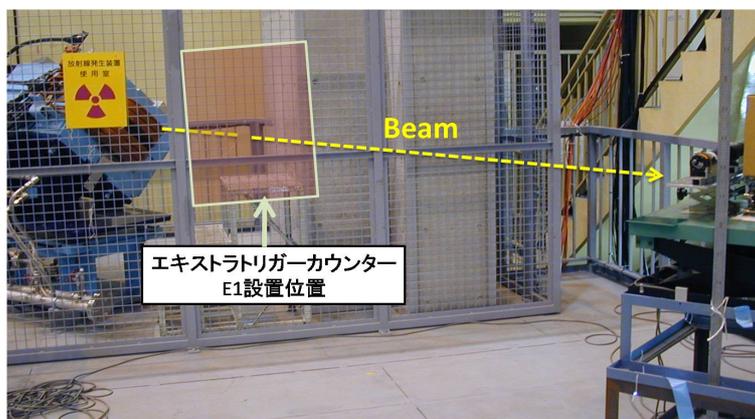


図 4.16: トリガー ET1 の設置場所。ビームの範囲を完全に覆うように設置。

プロフィール測定 (1):測定結果

測定は図 4.17 のようにビーム上流から見たステージ上の 12cm×12cm の領域を 9 ブロックに分けて、各ブロックでのコインシデンスレートから大まかなビームプロフィールを求めた。各ブロックは 4cm×4cm であるが、実際にはトリガーカウンターの大きさから 1cm~4cm の重なりがある。このとき T1 は水平方向に 10cm、垂直方向に 5cm の領域を覆うようにした。各ブロックには移動ステージを用いて固定し、ET1 とのコインシデンスレートを Visual Scolor でカウントした。

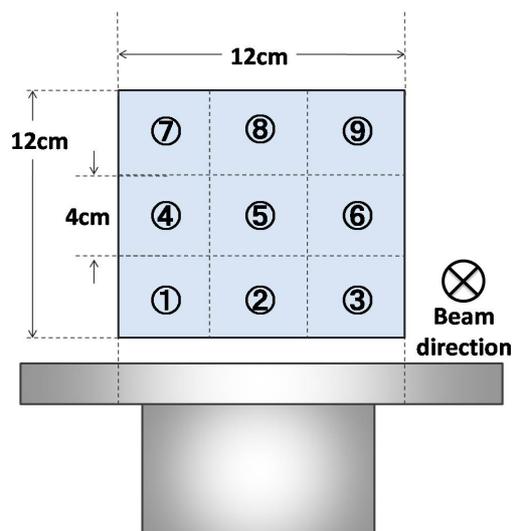


図 4.17: ビーム上流から見たビームステージ上のコインシデンスレート測定位置。

結果を図 4.18 に示す。各ブロックに示されている数値は 30 秒間でのコインシデンスレートである。このとき各マグネットに流した電流は、3GeV の電子を取り出すように調整した値であり、これをデフォルトの設定値とする。

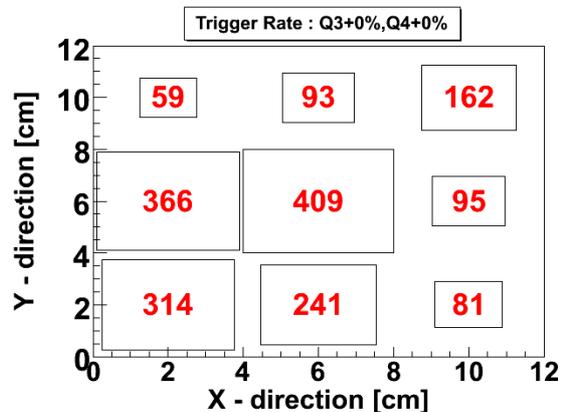


図 4.18: 3GeV に設定された電子ビームの各ブロックでのコインシデンスレート。各ブロックの数値は 30 秒でのカウント数。

図 4.18 より、ビームは上流から見て設定した中心 (中央のブロック) よりやや左側にプロファイル中心があることが見える。次に Q3、Q4 に流す電流値を調整させることでビームプロファイルが影響を受けるかを試した。Q3 は電子を垂直方向に収束させ、水平方向に発散させる働きを持つ (図 4.19)。Q4 は逆に水平方向に収束させ垂直方向に発散させる。

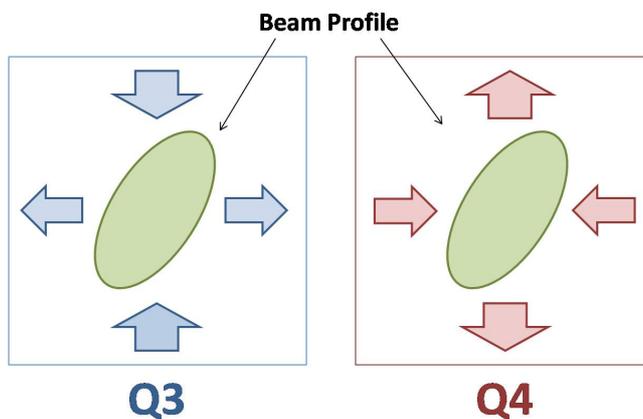


図 4.19: Q3,Q4 による収束・発散効果の概念図。

まず Q3・Q4 に流す電流をデフォルトの設定値からともに +15% 電流を増やした。結果を図 4.20 に示す。Q3 については最大カレントが +15% であるため、これ以上電流を流せない。そのため次は Q4 の電流のみをさらに +15% 増やした。このときの電流値は Q3+15%, Q4+30% である。結果を図 4.21 に示す。

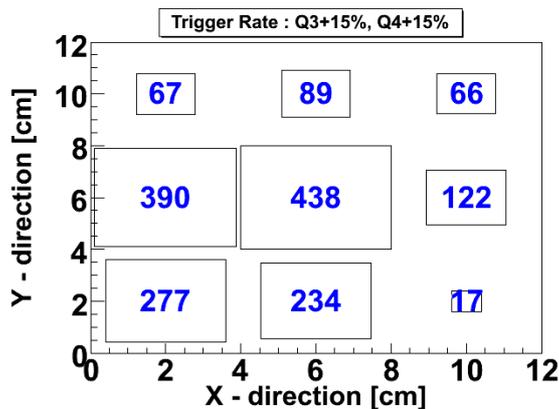


図 4.20: Q3+15%,Q4+15% に電流値を変更させたときのコインシデンスレート。

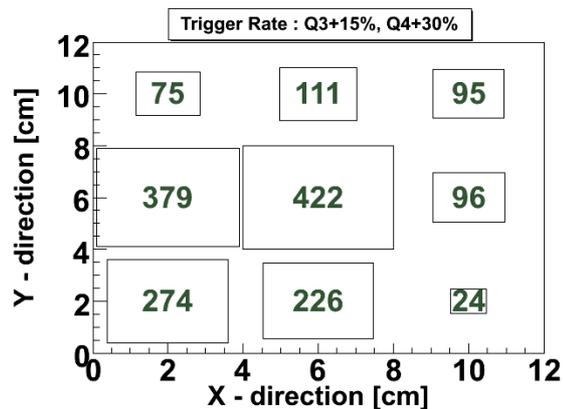


図 4.21: Q3+15%,Q4+30% でのコインシデンスレート。

図 4.20 より垂直方向に注目した場合、どの列を見ても中央のブロックでのレートが全体的に上がっており、逆にその上下のブロックのレートが下がっている様子がわかる。これはもともとデフォルト設定値でビームがやや縦長の形状であったこともあり、Q3 マグネットの垂直方向への収束効果が効いたためだと考えられる。

また図 4.21 より、さらに Q4 の電流値をあげても Q4 による水平方向への収束効果はさほど見えなかった。これより 3GeV のビームに対して、Q4 による効果は Q3 に比べて小さいことがわかる。

これらの結果からビームプロファイルの中心が、9 分割したブロックの中央を中心としてやや左側に寄っていることがわかる。また 5cm×10cm のトリガースポットでビームレートは Q3+15%、Q4+15% のときに最大で 14.6Hz 程度であった。また Q3、Q4 マグネットの電流値を制限の範囲内で変化させても、ビームプロファイル自体の形を大きく変えることはできないこともわかった。

4.4.3 プロファイル測定 (2)

測定 (2) では、ステージ上での水平方向のビームのプロファイルをホドスコープを用いて 1.5mm 間隔で調べた結果について述べる。本測定では Visual Scaler によるカウントレートではなく、各チャンネルごとの ADC データを解析してビームプロファイルをみた。トリガーには T1 と T2 (どちらも 5mc×10cm) の 2 つのトリガーカウンターのコインシデンスを用いた。

図 4.22 にステージ上での測定時のファイバーホドスコープのセットアップの概念図を示す。ファイバーホドスコープは移動ステージにのせ、2 μ m 単位の精度で動かした。測定 (1) の結果からビーム中心の目安をつけて、水平方向にそれぞれ ± 3 cm 程度の幅を測定した。ファイバーホドスコープの幅は 2.4cm しかないため、測定領域を 3 つにわけた。それぞれの測定領域を A,B,C とする (図 4.22)。各領域で 3mm 分 (シンチレーションファイバー 2 本分) ずつ重なるように配置し、各チャンネル (1.5mm×5cm) で 1000~3000 イベント程度の統計量となった。

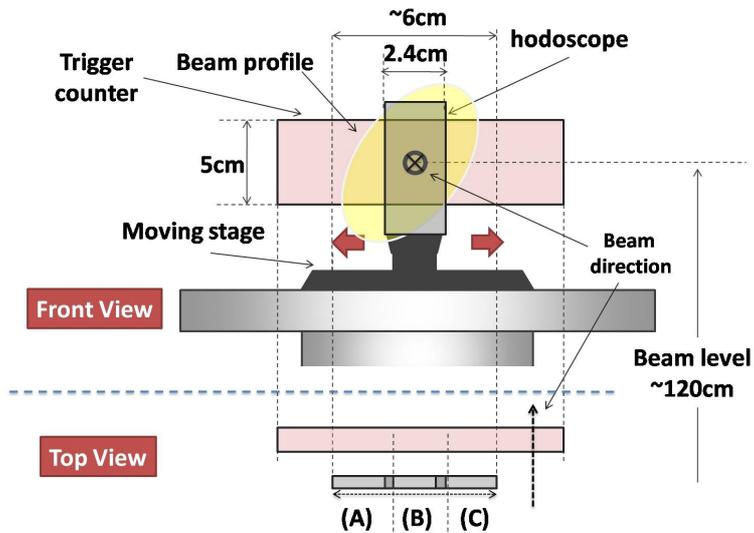


図 4.22: ステージ上でのファイバーホドスコープのセット図。(A)、(B)、(C) の位置において約 6cm 幅を測定。

プロフィール測定 (2):測定結果

まずファイバーホドスコープを通過した粒子によるイベントを選ぶ。図 4.23 に各チャンネルでの典型的な ADC 分布を示す。

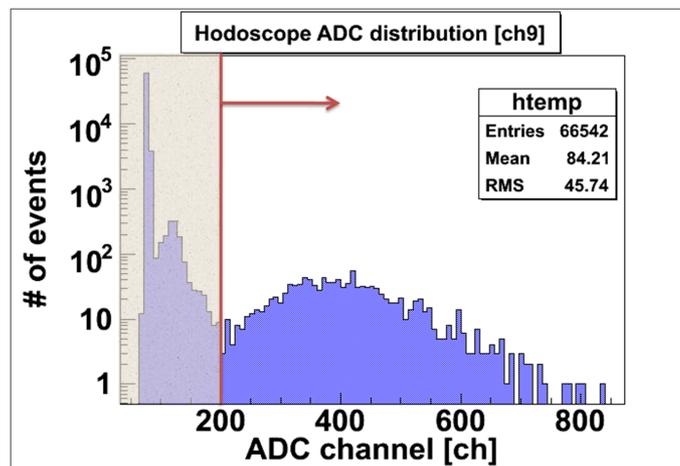


図 4.23: 各チャンネルにおける典型的なファイバーホドスコープの ADC 分布

各チャンネルごとに ADC 分布をチェックし、電子の通過によるイベントを選択するために図 4.23 に示される矢印の右側のイベントを電子の通過したヒットイベントとした (左側に見えるピークはペDESTALとファイバーホドスコープのクロストークによる)。図 4.24 は各ホドスコープポジションでの計測したヒットイベントを時間で割ったレートのヒストグラムで、水平方向のビームプロフィールを示している。ヒストグラムをガウシアンで

フィットした結果、ステージ上でのビームの水平方向の広がりは $\sigma \sim \pm 1.4\text{cm}$ 程度となり、図 4.13 にある筑波大の測定と矛盾しない結果が得られた。

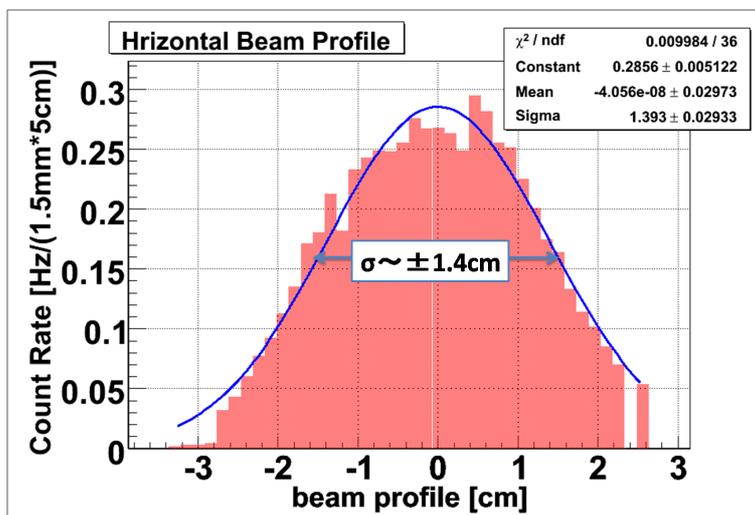


図 4.24: ステージ上における電子ビームの水平方向のプロファイル

4.4.4 考察とまとめ

本章でのビームプロファイル測定についての結果を以下にまとめる。

1. ビームの2次元プロファイルはビーム上流から見て右に傾いた縦長の楕円形
2. ビームの水平方向プロファイルは幅 1.4cm 程度のガウシアン形の分布
3. 3GeV 電子ビームでビームスポットを絞るためには下流側の Q3・Q4 マグネットの電流値を変化させるだけでは不可能。

このうち3つについては4.3.2節で触れたように、マグネット全体の磁場設定を変えることで取り出す電子の運動量を2GeVに下げることがある。これによりQ3・Q4マグネットの効果を大きくすることができ、下流側だけでビームの形状を変化させることができる可能性がある。また3GeVのままでも上流にあるマグネットのパラメーターを変化させることで上流からビームの形状を変化させることもできたが、その際KEKBに影響を及ぼす可能性が高く、パラメーター変更の際には注意が必要となるため今回は行わなかった。今後は上流での電流設定の変更の方法を含めて、さまざまな調整が必要である。5cm×10cmのトリガースポットに対して現状では~15Hz程度のレートであるが、今後本来のデザイン値である100Hz程度を目標に改善する予定である。

第5章 INGRID シンチレーターの基礎特性 の評価

本章では2007年末から予定されている INGRID 検出器のシンチレーターの大量生産に向けて、2007年11月と12月にそれぞれ2種類のプロトタイプシンチレーターの性能評価のために行ったビームテストの結果について述べる。

5.1 ビームテスト概要

5.1.1 動機

今回測定に用いたシンチレーターは2種類ともアメリカの Fermi 研究所において製造された押し出し型シンチレーターである。押し出し型シンチレーターは製造時期や製造方法によっても多少性能が異なる。我々はマスプロダクションに移る前にテストサンプルの作製を依頼し、それらが必要な性能を有しているか、以下の項目に絞って確認することにした。

- MPPC の電圧依存性測定
- プロトタイプシンチレーターの光量測定
- ファイバー読み出しによる減衰長測定
- シンチレーター端面での光量と反射材による光量回復効果
- 光量の幅方向依存性およびファイバーホール効果測定
- シンチレーター間クロストークの影響

5.1.2 測定のセットアップ

測定は KEK の富士テストビームライン (4章参照) の 3GeV の電子ビームを用いて行った。図 5.1 に測定の基本的なセットアップの概念図を示す。4章で説明したように、トリガーには2つのトリガーカウンター (5cm×10cm) を用意し、上流を T1、下流を T2 として両者のコインシデンス信号でトリガーをかけた。またトリガーカウンターとは別に4章でのビームプロファイル測定に使用した 250mm×24mm×1.5mm のホドスコープを用意し、これを十字に配置することでオフラインでのビームスポットを絞ることにした。シン

チレーター自身はブラックテープで3重に包まれており、外部からの光は完全に遮光されている状態である。ビームスポットから MPPC までの距離は 60cm である。

また、図 5.2 に測定の論理回路を示す。

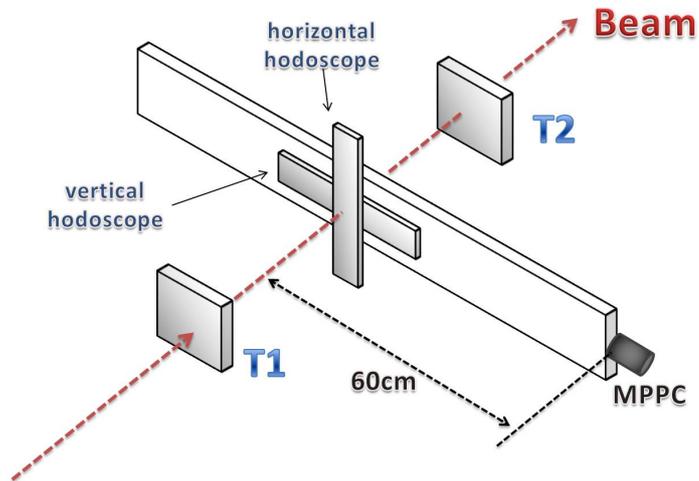


図 5.1: ビームテストにおける基本的なセットアップの概念図

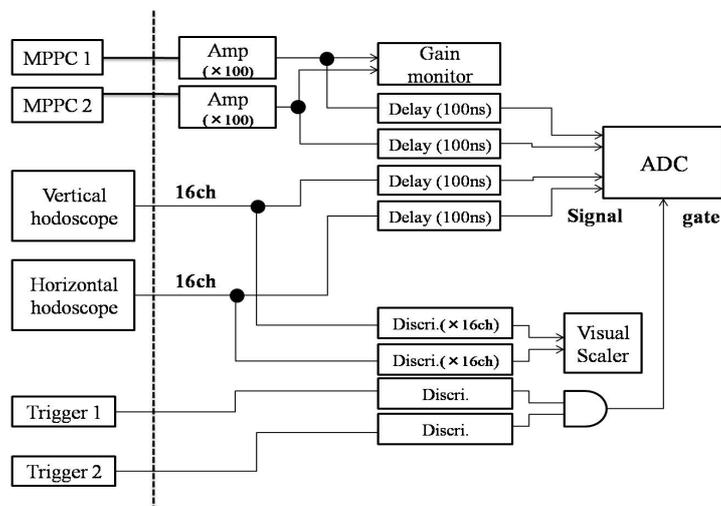


図 5.2: データ収集のトリガーロジック。ゲインモニターについては 5.1.3 節の説明を参照

測定に使用したシンチレータや波長変換ファイバー、MPPC について以下で説明する。

INGRID プロトタイプシンチレータ

製造時期の異なる 2 種類のシンチレータを用いた。2007 年 8 月に作製されたものをシンチレータ A(SA)、同年 11 月に作製されたものをシンチレータ B(SB) とする。SA に

は長さが 120cm のものと 40cm のものがある。SB は 40cm のもののみである。また SA、SB とともに幅 5cm、厚さ 1cm で、表面には反射材 (TiO₂) コーティングがなされている。反射材は SB の方が SA に比べてやや厚めに塗られている。SB は側面の形がややかまぼこ型になっており、K2K 実験で用いられた SciBar シンチレーターと類似の形状をしている。

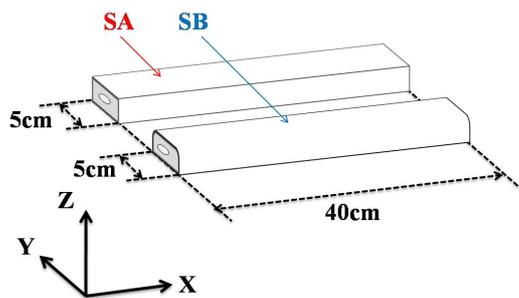


図 5.3: INGRID プロトタイプシンチレーター



図 5.4: プロトタイプシンチレーターの実物。手前が SB、奥が SA タイプとなる。SB タイプの片面がややかまぼこ型になっている。

波長変換ファイバー

実機で使用するものと同じクラレ社の Y-11(200)MS を用いた。ファイバー径は 1mm である。MPPC と接続するファイバー先端には GOMI コネクター (図 3.17) がついており、表面はダイヤモンドカッターで研磨されている。図 5.5 に測定に用いたコネクターとファイバーの写真を示す。



図 5.5: コネクターに接着したファイバーの図

MPPC

浜松ホトニクス製のMPPCを使用した。MPPCの基礎特性については第3章で説明したとおりである。今回使用したMPPCは3つで、すべて受光面が1.3mm×1.3mm、667pixelのものである。各 Over Voltage(以下 V_{over} と記す)でのゲイン、ノイズレート、クロストークレート & アフターパルスレート、PDE(Photo Detection Efficiency)の典型的な数値は表3.2の通りである。

5.1.3 ゲインモニター

本測定を通して、我々はMPPCのペDESTALピークチャンネルと1p.eピークチャンネルの差分をMPPCのゲインと定義する。3章で述べたようにMPPCのブレイクダウン電圧は温度によって変化するため、それに伴いゲインも変動する。温度によるゲインの変動率は0.6%/°Cである。INGRIDシンチレーターの光量を測定する上で、測定中にゲインが変動すると光量の見積もりを誤ることになる。そのためT2K実験で予定しているMPPCの作動電圧領域($V_{over} \sim 1.5V$)において、MPPCが高ゲインかつ高ノイズ(平均的な1p.eノイズレートは数100kHz程度)であることを利用して随時ゲインをモニターできるシステムを考案した。図5.6にこのゲインモニターシステムの概念図を示す。

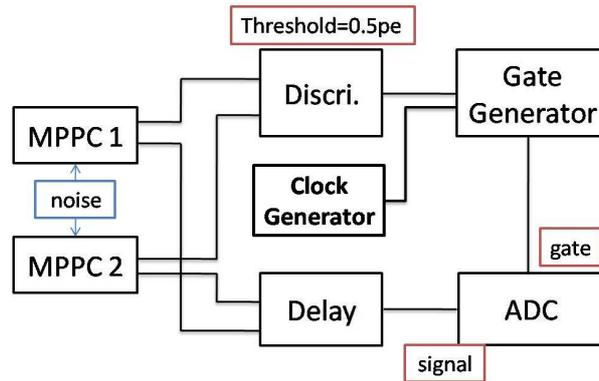


図 5.6: ゲインモニターのセットアップ概念図。

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、このときもう一つのMPPCではペDESTALもしくはアクシデンタルに入ってくる1p.eノイズをそれぞれ記録する。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によるデータとは独立に記録することができる。このシステムによって得られるペDESTALと1p.eピークの様子を図5.7に示す。各データ測定毎に同時にゲインをモニターすることで、温度変化などによるゲインのバラつきを随時較正することが可能となった。

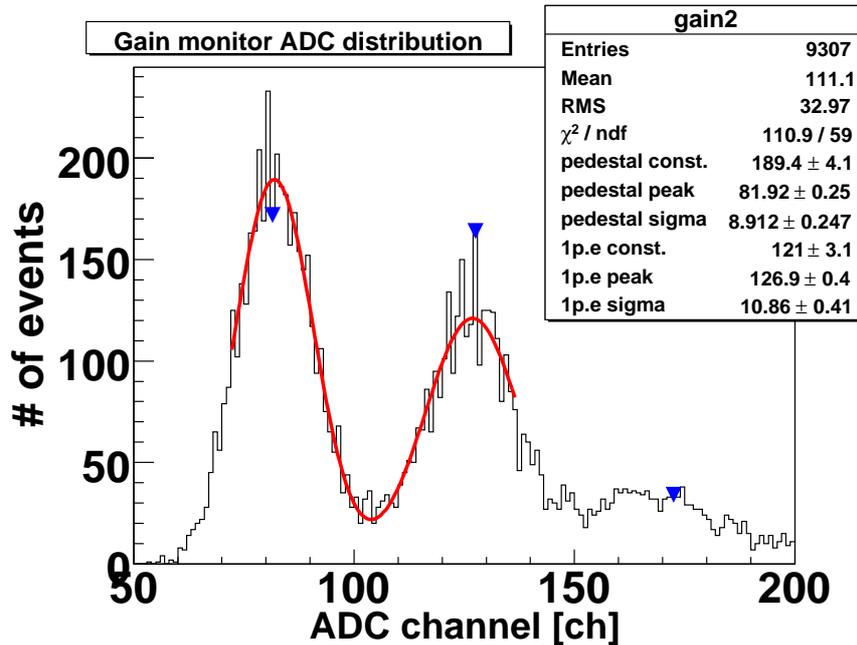


図 5.7: ゲインモニターによるペDESTALと 1p.e ピークの ADC 分布。フィッティングはそれぞれのピークをガウシアンでフィットした。

5.1.4 光量の定義

今回の実験では、光量を以下のように定義した。

$$\text{光量 (p.e)} = \frac{\text{ADC 分布のピーク}}{\text{ゲイン (1p.e の ADCch)}}$$

図 5.8 はゲインモニターから算出されるゲインを用いて得られる典型的な ADC 分布の図である。シンチレーターを通過する際に落とすエネルギーは通常光量の高い方にテールを引くランダウ分布となるが、今回の測定結果は特に断わりの無い限り、分布のピークをガウシアンでフィットすることで得られるピーク値をシンチレーターの光量と定義する。

5.1.5 温度モニター

MPPC の基礎特性は使用環境の温度変化に対して非常にセンシティブであるため、測定を行った富士 B3 フロアの温度変化を温度記録計を用いて測定した。図 5.9,5.10 はそれぞれ 11 月、12 月のビームタイム中の実験ステージ上の温度変化を表す。

図の青い部分の間がデータ収集に用いた時間である。これよりデータを採取していた間は平均 25°C (11 月時)、 26.1°C (12 月時) と、安定した温度環境であった。また図 5.9 と図 5.10 で平均の温度に差があるのは MPPC を置いていた場所が暗箱の中と外の違いによる。

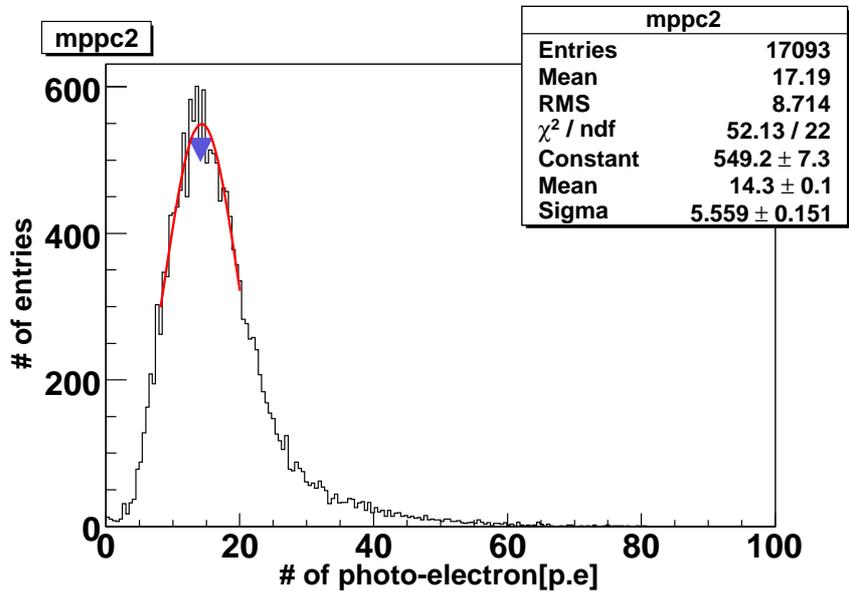


図 5.8: トリガーカウンターをビームが通過したことで得られるシンチレーション光の、典型的な ADC 分布の図。光量の大きい方にテールを引く形になっているが、ガウシアンでフィットしたピークの値を光量と定義する。

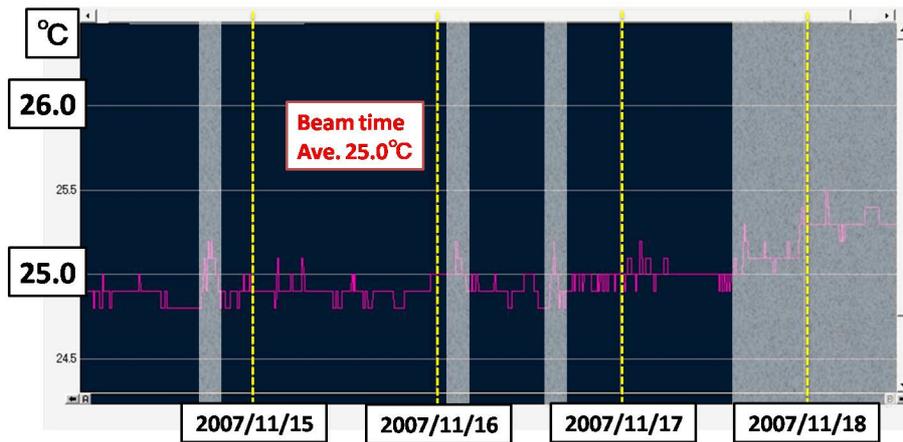


図 5.9: 2007 年 11 月の実験ステージ上の温度変化の様子。青い部分の間にデータ収集を行った。

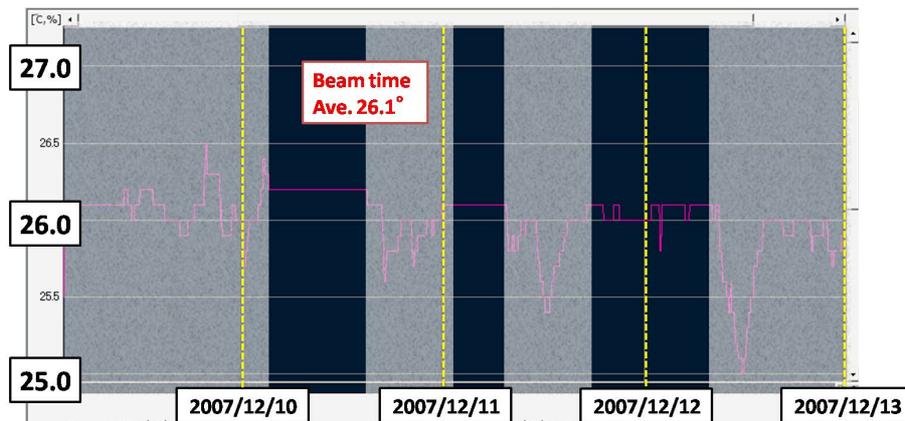


図 5.10: 2007 年 12 月の実験ステージ上の温度変化の様子。青い部分の間にデータ収集を行った。

5.2 MPPC 電圧依存性測定

5.2.1 測定動機

MPPC は第 3 章でも述べたように、Over Voltage(V_{over}) の上昇に伴い飛躍的にノイズレートが高くなる検出器である。T2K 実験では約 10000 チャンネルの MPPC に対して一定の閾値を設定し、その閾値を超えるシグナルに対してトリガーをかけるためあまり大きなノイズレートは好ましくない。従って測定に移る前に MPPC の V_{over} を変えながら光量を測定し、「低ノイズかつ大きな光量」が得られるように実験に最適な条件を探す必要がある。

5.2.2 クロストーク・アフターパルスによる光量の補正

ADC 分布から 5.1.4 節で定義した式に従って得られる光量は、3.4.3 節で説明したクロストークとアフターパルスの影響を含んでいるため、本来検出されるべき光量より見かけ上大きくなる。従ってシンチレーターの光量を正しく評価するためには、この効果を精確に見積もって補正する必要がある。補正係数は以下の式で定義される。

$$\text{補正係数} = 1 - (\text{クロストーク\&アフターパルスレート}) \quad (5.1)$$

ADC 分布から得られた光量に対して、式 5.1 で得られる光量かけたものが、本来検出されるべき正しい光量となる。表 5.1 に使用した MPPC の各 V_{over} でのクロストーク & アフターパルス (C.t&A.p) レートと補正係数を示す。

V_{over}	クロストーク & アフターパルスレート	補正係数
1.0	0.11	0.89
1.1	0.14	0.86
1.2	0.17	0.83
1.3	0.18	0.82
1.4	0.21	0.79
1.5	0.22	0.78

表 5.1: 使用した MPPC の 25°C でのクロストーク & アフターパルスレートと光量の補正係数

5.2.3 MPPC V_{over} 測定結果

図 5.11 は各 Over Voltage (V_{over}) での光量をプロットしたグラフである。緑色の点は ADC 分布から得られた光量、赤色の点はその値に MPPC のもつクロストークやアフターパルスの効果を補正 (表 5.1) した光量を示す。

検出効率は ADC 分布を用いて、以下の式で定義する。

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{\text{閾値でのカットをかけた後のイベント数}}{\text{トリガー (ホドスコープ) のイベント数}} \quad (5.2)$$

図 5.12 に各電圧での閾値以上の検出効率を示す。閾値は図の赤、緑、青色の点が 0.5p.e, 1.5p.e, 2.5p.e の閾値に相当する。

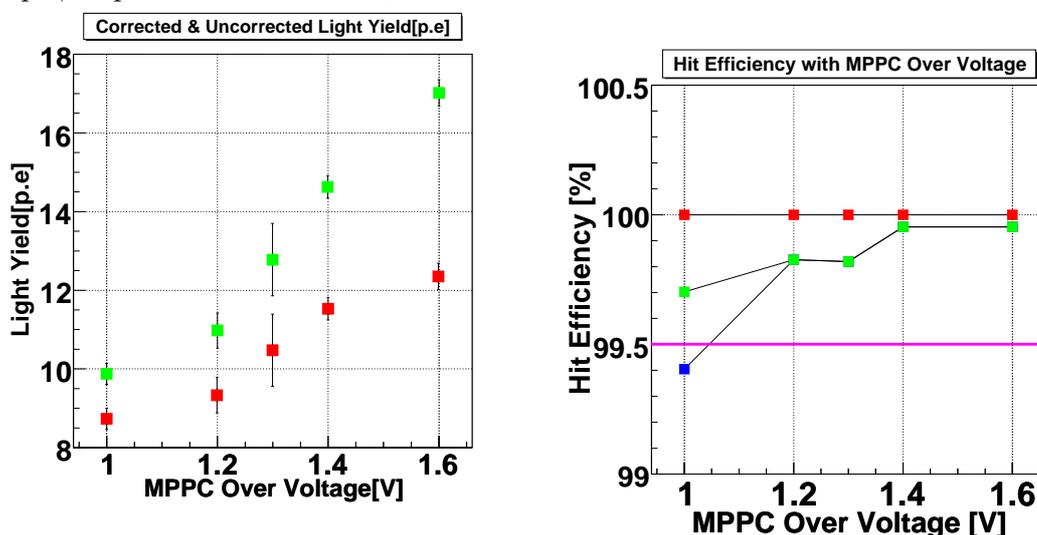


図 5.11: ADC 分布から得られる生の光量と、クロストーク・アフターパルスなどの効果を補正した実効的な光量

図 5.12: 25°C、光量の伝送距離 60cm で閾値を変化させたときの各 V_{over} における検出効率。図の赤、緑、青はそれぞれ閾値が 0.5, 1.5, 2.5p.e の時の検出効率を示す。

INGRID において検出効率の不定性がビーム方向の測定に及ぼす影響はこれまでに研究されており [7]、その結果からシンチレーターの検出効率が 99.5% 以上であれば要求を満たす。2つのグラフより $V_{over}=1.3V$ 以上であれば各閾値に対して得られる検出効率が要求を満たし、かつ十分大きな光量を示していることがわかる。そこで本測定ではすべて $V_{over}=1.4V$ で測定することにした。

5.3 プロトタイプシンチレーターの光量測定

5.3.1 測定の動機

本節では作製時期の異なる 2 種類のシンチレーター SA および SB の光量の違いを確認することを目的とする。両者で本質的に異なるのは反射材の厚みであり、SB は SA に比べて反射材の厚みが増している。これにより実効的な光量が増加すると考えられる。

5.3.2 測定のセットアップ

本測定のセットアップを図 5.13 に示す。今回の測定では暗箱を使用し、INGRID シンチレーターおよびトリガーカウンター T1・T2 の両方を暗箱内に設置した。各シンチレーターの表面には目印が記されており、水準器を用いて各装置の位置をあわせた。シンチレーター SA・SB とともにステージに対して垂直におき、ビームスポットから MPPC までの伝送距離は 50cm の地点で固定した。このときシンチレーターの間には (図に記されていないが) 暗幕をはさんである。これはシンチレーター間に発生するクロストークによって、光量が増加して見える現象を防ぐためである。シンチレータークロストークの影響については 5.7 節で説明する。

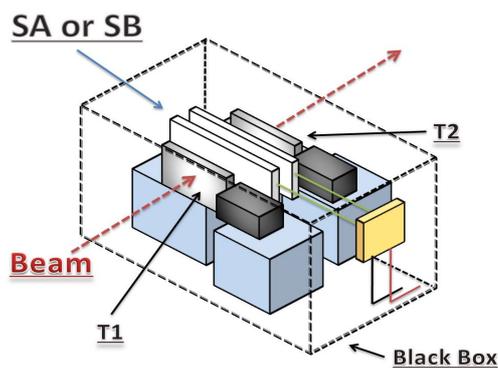


図 5.13: 光量測定のセットアップの概念図。T1・T2 もシンチレーターとともに暗箱の中に設置した。各シンチレーターの高さは水準器を用いて合わせてある。



図 5.14: 実際のセットアップの様子

5.3.3 測定結果

シンチレーター SA および SB についてそれぞれ 4 つ用意し、測定を行った。また波長変換ファイバーも 2 本用意 (F1、F2 とする) し、各シンチレーターに対して F1、F2 を取り換えたときの光量の変化を見た。図 5.15、5.16 に二つのシンチレーターでの典型的な ADC 分布を示す。また表 5.2 にファイバー F1 及び F2 を用いたときの補正前の各シンチレーターの光量を示す。

	SA1	SA2	SA3	SA4
F1	18.3±0.3	17.1±0.2	no data	17.6±0.2
F2	17.0±0.2	no data	17.8±0.2	17.4±0.3
	SB1	SB2	SB3	SB4
F1	19.8±0.2	22.2±0.2	19.8±0.2	20.8±0.2
F2	19.2±0.3	20.6±0.2	20.7±0.3	19.6±0.3

表 5.2: 25 °C、 $V_{over}=1.4V$ 、伝送距離 50cm でのシンチレーター SA、SB の光量。2 本のファイバー F1、F2 での結果を示してある。

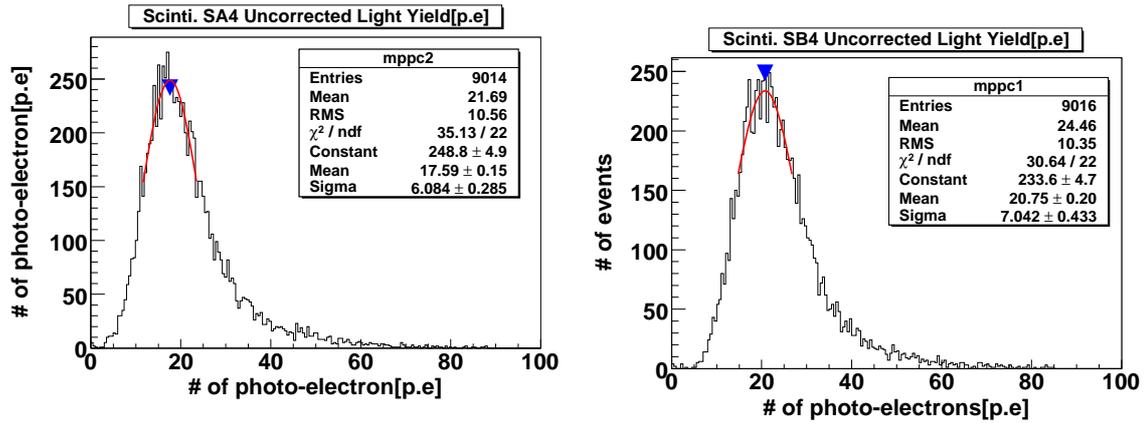


図 5.15: 温度 26.1 °C、MPPC $V_{over} = 1.4[V]$ 、伝送距離 50cm での SA4 の光量。

図 5.16: 温度 26.1 °C、MPPC $V_{over} = 1.4[V]$ 、伝送距離 50cm での SB4 の光量。

この結果より SA シンチレーター、SB シンチレーターの光量の平均は、

$$SA = 17.6 \pm 0.1 [p.e] \quad (5.3)$$

$$SB = 20.2 \pm 0.1 [p.e] \quad (5.4)$$

となり、SB タイプは SA タイプに比べて ~15 % 光量が増加している。この測定の間温度は 26.1 °C で安定している (図 5.10)。従って補正係数は 0.78 ~ 0.79 (表 5.1 参照) となるので、補正後の光量を $correctedSA$ 、 $correctedSB$ とすると、

$$correctedSA = 13.8 \pm 0.1 [p.e] \quad (5.5)$$

$$correctedSB = 15.9 \pm 0.1 [p.e] \quad (5.6)$$

となる。これが MPPC から得られる実際の光量である。

5.3.4 反射材の上塗りによる光量の増加

シンチレーター SA と SB で最も異なる点は反射材の厚みである。式 5.3, 式 5.4 より反射材の厚みが増したことでシンチレーター SB は SA に比べて有意に光量が増加していることが確認できる。この結果はまた、シンチレーター SA に対して反射材をさらに重ねて塗ることで SA の光量が増える可能性を示唆している。2つのシンチレーター SA に反射材を上塗りしたものを SAR1, SAR2 とする。反射材は ELJEN Technology 社の EJ-510 を用いた。図 5.17 に用いた反射材の写真と反射率の波長依存性を示す。EJ-510 はシンチレーターの発光波長 (~420nm) に対しておよそ 90~95% の反射率を持つことがわかる。

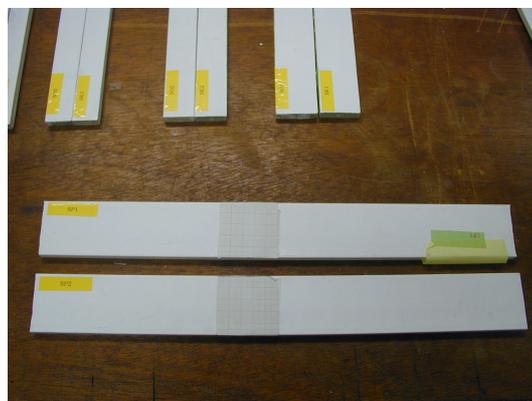
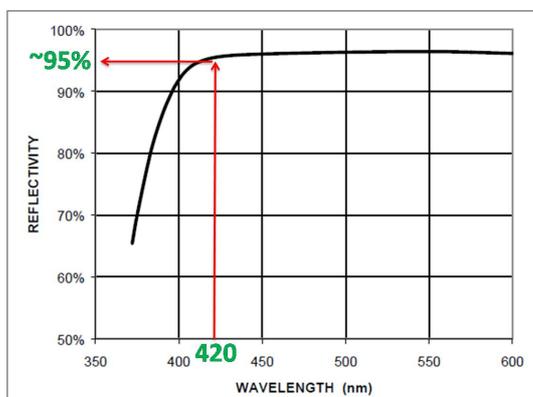


図 5.17: 上塗りに用いた反射材 (ELJEN Technology 社提供 EJ-510) の反射率スペクトル図。シンチレーターの発光波長 (~470nm) に対して約 95% の反射率を有する。

図 5.18: 反射材を上塗りしたシンチレーター SAR。SA で見えていた反射材跡が見えなくなる程度に、2、3 度塗り重ねてある。

図 5.18 は実際に反射材を上塗りしたシンチレーター SAR である。シンチレーター SA で光にかざすと見えた反射材の塗布跡などがなくなる程度、2~3 回塗り重ねた。このシンチレーターに対して同じように光量を測定した結果を図 5.19、表 5.3 に示す。

シンチレーター	SAR1[p.e]	SAR2[p.e]
F1	19.1±0.2	19.8±0.2
F2	18.3±0.3	18.7±0.1

表 5.3: SA シンチレーターに反射材を上塗りした SAR1 と SAR2 の光量。2 本のファイバーでそれぞれ測定した。

表 5.3 より補正前のシンチレーター SAR の平均光量は

$$SAR = 19.0 \pm 0.1 [p.e] \quad (5.7)$$

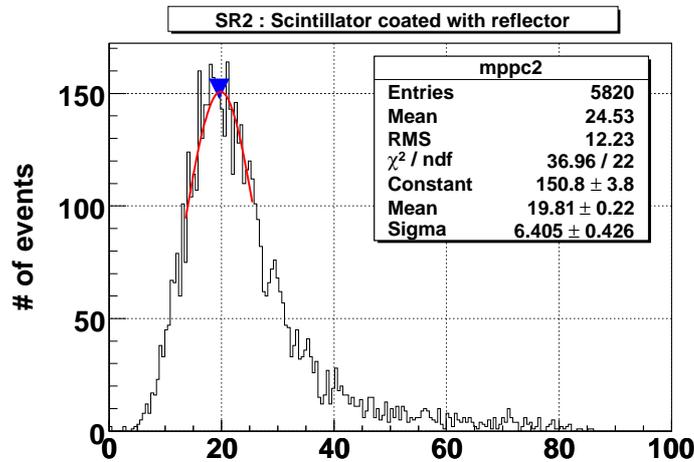


図 5.19: 温度 26.1°C、MPPC $V_{over}=1.4V$ 、伝送距離 50cm における反射材を上塗りしたシンチレーター SAR2 の光量分布図。ピーク、平均ともに反射材を塗る前 (図 5.15) に比べて 10% 程度増加している。

となる。この値に式 (5.1) で表されるクロストーク & アフターパルスの影響を補正すると、SAR の補正後の平均光量は

$$correctedSAR = 15.0 \pm 0.1 [p.e] \quad (5.8)$$

となる。この結果から、反射材の上塗りによって光量が増加することが確かめられた。

5.3.5 プロトタイプシンチレーターテストの結論

式 (5.5),(5.6),(5.8) より、補正後のシンチレーターの光量と、シンチレーター SA の光量を 1 としたときの光量比を表 5.4 にまとめる。

シンチレーター	SA	SB	SAR
光量 [p.e]	13.8 ± 0.1	15.9 ± 0.1	15.0 ± 0.1
光量比	1	1.15 ± 0.01	1.08 ± 0.01

表 5.4: SA、SB、SAR シンチレーターでの光量 (クロストーク & アフターパルスの補正後) と SA シンチレーターの光量を 1 としたときの光量比

表 5.4 より、3 種類のシンチレーターにおいて SB タイプが最も光量大きいことがわかる。したがって INGRID 実機のシンチレーターとして SB タイプのシンチレーターが最適であることを確認した。また SA と SAR を比べると SAR が 10% 程度光量が増加していることから、反射材の厚みを増したことによってシンチレーターから抜けてゆく光を再度吸収できていることがわかる。

5.4 ファイバー読み出しによる減衰長測定

一般にシンチレーション光はファイバーに吸収されてから検出器に伝送される間に減衰し、検出器までの距離が離れるほど減衰率も高くなる。INGRIDでは最も遠くで検出器から120cm離れた地点で発生した光を検出する必要がある。減衰の効果が大きいと検出される光量は小さくなり、結果として検出効率を悪化させる可能性がある。我々はシンチレーターのすべての領域で十分な光量が得られるかを確かめるために、ビームスポットを移動させながら光量を測定し、ファイバー伝送による光量の減衰長を求めた。

5.4.1 測定原理とセットアップ

ファイバー内を伝送するシンチレーション光の減衰の様子を記述する式はいくつかある[13]が、本論文では次式に従って減衰すると仮定する。

$$L.Y.(x) = A \times \exp(-x/\lambda) \quad (5.9)$$

ここで A は減衰する前の光量、 x はファイバー内で再発光した地点から光検出器までの距離 (単位は cm)、 λ は光が元の $1/e$ に減衰するまでの距離で定義される減衰長である。

測定は図 5.1 と同じセットアップで行った。今回の測定ではシンチレーター及びMPPC、読み出し基盤を移動ステージにのせ、 $10\mu\text{m}$ の精度でビームスポットの位置を調整した。ホドスコープは本測定においてもオフラインでの解析のみに用いた。イベントセレクションは図 4.23 で説明した方法と同じである。

測定はMPPC側の端面から10cm、20cm、35cm、60cm、85cm、100cm、110cmの7点の位置にビームスポットを移動させ、光量を測定した。またシンチレーター端面付近でも正しく光量が得られるかを確かめるために、MPPCと逆の端面から6cmの間で3点(116cm、118cm、120cm)での測定を行った。各ビームポジションでの光量の値を表 5.5 に示す。

シンチレーター	10cm	20cm	35cm	60cm	85cm
SA1 (p.e)	15.6 ± 0.4	14.1 ± 0.3	13.8 ± 0.3	11.7 ± 0.2	11.2 ± 0.2
SA2 (p.e)	18.9 ± 0.5	16.7 ± 0.6	15.2 ± 0.8	13.9 ± 0.3	13.6 ± 0.3
	100cm	110cm	116cm	118cm	120cm
SA1 (p.e)	10.1 ± 0.2	10.3 ± 0.2	7.8 ± 0.2	6.9 ± 0.1	5.8 ± 0.2
SA2 (p.e)	12.3 ± 0.3	12.4 ± 0.4	11.0 ± 0.3	9.6 ± 0.2	8.4 ± 0.2

表 5.5: 各ビームスポットでのシンチレーター SA1、SA2 の光量。表の光量は 5.1.4 節で定義したピーク値。

各測定点での光量を式 (5.9) を用いてフィットした結果と、フィットから得られる減衰曲線とデータ点のバラつきを図 5.20 に示す。ここで 116cm 以降のデータがフィット関数上から急激に落ちているが、これはファイバーの減衰によるものではなく、シンチレーターの端面からシンチレーション光が抜け出ているためだと考えられる。この効果につ

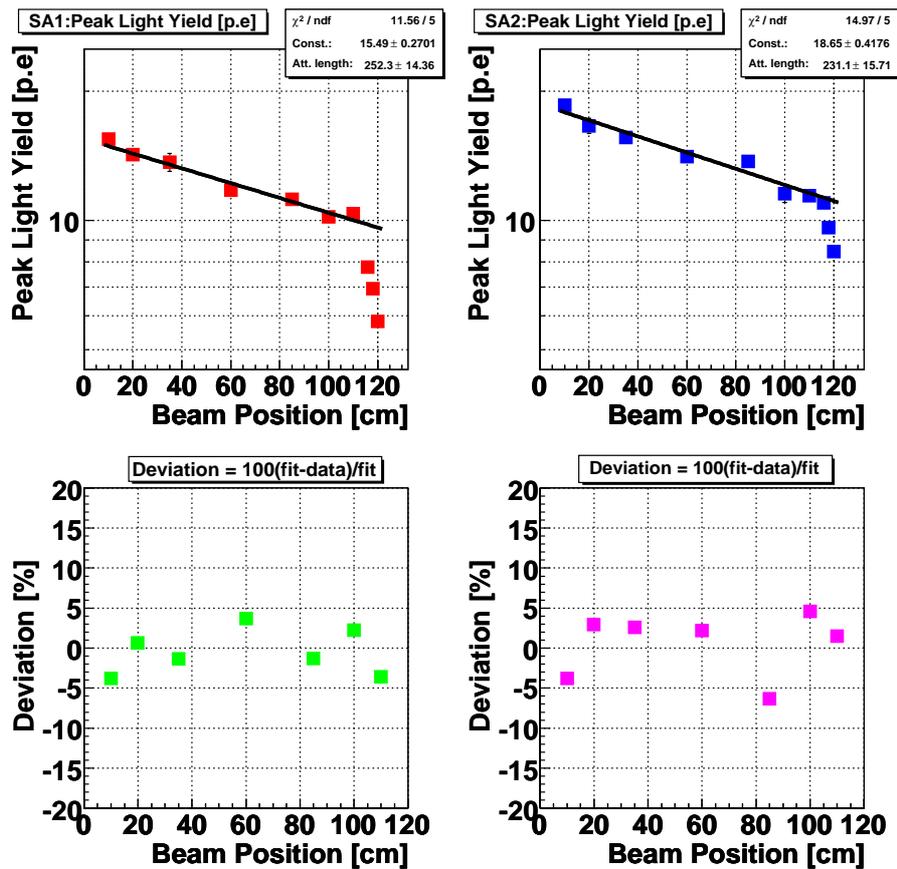


図 5.20: シンチレーター SA1 と SA2 の各点での光量 (上)、及びフィットで得られた減衰曲線とデータ点のばらつき。フィットは 10cm から 110cm までの間とした。ピーク値で定義された光量の誤差はフィットでの誤差のみとした。

いては 5.5 節で説明する。従ってフィットの際にはこの領域を除外し、110cm までのデータから減衰長及びフィット曲線からのばらつきを求めた。

また各点で得られたイベントに対して、閾値を 0.5p.e から 2.5p.e まで変化させたときの検出効率を求めた。

5.4.2 減衰長の測定結果

各測定から得られた減衰長を表 5.6 にまとめる。

シンチレーター	定数項	λ (減衰長 [cm])
SA1 peak	15.5 \pm 0.3	252.3 \pm 14.36
SA2 peak	18.6 \pm 0.4	231.1 \pm 15.71

表 5.6: 10cm~110cm の間での減衰長測定の結果。2 つの SA シンチレーターについて光量のピーク値から求めた。

このデータにおいて平均の減衰長 λ_{peak} は、

$$\lambda_{peak} = 241.7 \pm 10.6[\text{cm}] \quad (5.10)$$

となる。従ってこの λ_{peak} をファイバーの減衰長とする。

各点でのばらつきはおおむね $\pm 5\%$ 以内に収まっており (図 5.20)SA1、SA2 での RMS を計算すると、それぞれ 2.7%、3.7% となる。またすべての点の RMS を計算すると 3.2% となり、これが式 (5.9) の減衰曲線より得られる光量の補正に対する誤差になる。

これより、このシステムで得られる光量はシンチレーション光の発生位置から MPPC までの伝送距離 x (cm) の関数 $f(x)$ として、

$$\text{Peak : } f(x) = (17.05 \pm 0.25) \times \exp(-x/(241.7 \pm 10.6)) \quad (5.11)$$

と表すことができる。

5.3 節で測定した MPPC から 50cm の距離でのシンチレーター SB の光量 (式 (5.6)) と式 (5.11) から、実機において検出される光量を計算することができる。検出器から最も近い位置 (near side、伝送距離 5cm) と遠い位置 (far side、伝送距離 120cm) での光量はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \text{nearside : } f(5\text{cm}) &= 15.9 \times \frac{e^{-5/(241.5 \pm 10.6)}}{e^{-50/(241.5 \pm 10.6)}} \\ &= 19.15 \pm 0.61[\text{p.e}] \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \text{farside : } f(120\text{cm}) &= 15.9 \times \frac{e^{-120/(241.5 \pm 10.6)}}{e^{-50/(241.5 \pm 10.6)}} \\ &= 11.90 \pm 0.38[\text{p.e}] \end{aligned} \quad (5.13)$$

となる。ただしこの値は図 5.20 から明らかになった、シンチレーター端面付近での急激な光量の減少を考慮していない。従って実際に得られる光量は near side, far side とともに式 (5.13)、式 (5.14) よりも小さくなる。この結果は 5.4.3 節の検出効率の結果と合わせて端面付近での光量を大きくする方法を考えなければならないことを示している。

5.4.3 検出効率の測定結果

図 5.21 はシンチレーター SA1 において、閾値を 0.5p.e(緑), 1.5p.e(赤), 2.5p.e(青) と変えたときの各ビームポジションでの検出効率を示す。検出効率は式 (5.2) で定義したものと同一である。

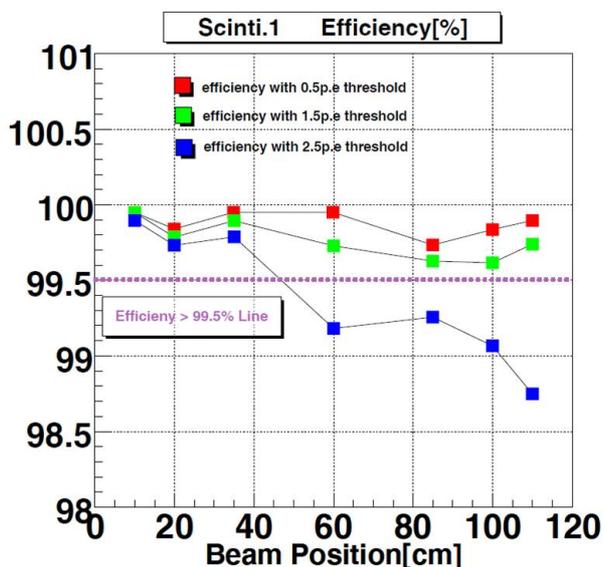


図 5.21: シンチレーター SA1 での各ビームポジション (110cm まで) での検出効率。赤・緑・青の順番に 0.5p.e, 1.5p.e, 2.5p.e threshold でのカットをかけた場合の検出効率を示す。

図 5.21 より 2.5p.e threshold では 60cm 以上遠く的位置を粒子が通過した時の検出効率が 99.5% を下回ることがわかる。従ってシミュレーションからの要求 (検出効率 $\approx 99.5\%$) に応えるためにはトリガーの閾値を 2p.e 以下にするか、シンチレーターの光量自身を大きくするなどの方法を考えなければならない。

5.4.4 考察

図 5.21 より閾値を 2.5p.e と設定した場合、検出器からの距離が 60cm 以上になると検出効率は 99.5% を下回り、3 章で示したシミュレーションからの要請 (検出効率 $\approx 99.5\%$) を満たせなくなる。

また実際にはシンチレーター端面から 4cm ~ 6cm 付近を境に、光量の減少度合いは上で求めた指数曲線から大きくずれることがわかった (図 5.20 参照)。これはシンチレーター端面付近でシンチレーション光が発生した場合、ファイバーに吸収される前に端面から大気中に抜け出ていってしまうためだと考えられる。INGRID ではシンチレーターの長さである 120cm すべてを粒子検出の有感領域として使用するので、端面付近での急激な光量の減少は端の方でのイベントの検出効率を下げることに繋がる。

この現象を回避するためには閾値を 2.5p.e より低く設定するか、シンチレーター端面での光量を増やすという方法などが必要となる。前者は MPPC のノイズレートとも関係し

ており、実機で用いる各 MPPC のノイズレートの測定後にどこまで許容できるかを検討する余地は残されている。後者について、我々はシンチレーター端面に反射材を塗ることで端面から漏れていた光を捕まえ、光量を回復させる方法を試した。この結果については 5.5 節で述べる。

5.5 シンチレーター端面での光量測定と反射材による光量回復効果

5.5.1 測定動機

5.4 節では伝送距離が 10cm~110cm での光量の減衰の様子について述べたが、本節ではシンチレーターの端面付近 (~5cm) での光量の振る舞いについて述べる。INGRID ではトラッキング平面の覆う 120cm×120cm の領域すべてが有感領域となるが、ファイバー及びシンチレーター端面と空気との境界付近を粒子が通過した場合、この付近で発生したシンチレーション光がシンチ中で広がることにより、ファイバーに吸収されずにシンチレーター端面から散逸してしまう可能性がある。(図 5.23 参照) この場合、検出器で得られる光量はファイバーでの伝送過程の減衰だけではなく、ファイバーに吸収されずにシンチレーターから抜けていく分だけ小さくなる。これが図 5.20 においてシンチレーター端面付近で実際に得られた光量が減衰曲線からおおきくはずれた理由だと考えられる。この影響を定量的にみつめるために、まず端面付近での光量の変動の様子をホドスコープを用いて 1.5mm 間隔で測定した。これにより光量が減衰長からの予想値よりも落ちていることを確認したあと、端面に反射材を塗ることで抜け出していた光をファイバーに吸収させることができるか検証した。

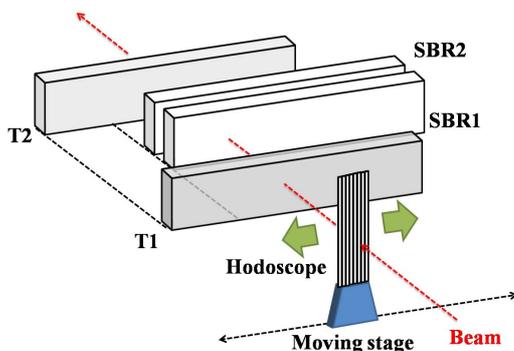


図 5.22: 端面での光量測定に用いたセットアップの概念図。トリガーカウンターとシンチレーターは 2cm ほどシンチレーターを内側にずらして設置してある。これはシンチレーター端面を理解する上で重要な意味を持つ。

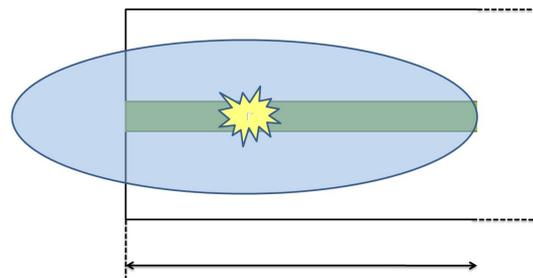


図 5.23: シンチレーター端面付近でのシンチレーション光の広がり とファイバーの関係。グリーンが波長変換ファイバー、青のハッチがシンチレーション光の広がり を示している。シンチレーション光の広がりをシンチレーターがカバーできなくなると、端面から散逸してしまい減衰曲線からはずれると考えられる。

5.5.2 測定のセットアップ

図 5.22 に本測定のセットアップの図を示す。シンチレーターは 5.3 節の結果を考慮して SB1、SB2 を用いた。測定はまず SB1、SB2 による反射材塗布前の端面での光量分布の様子を測定したのち、SB1、SB2 の端面に反射材を塗り重ねたもの (これをそれぞれ SBR1、SBR2 とする。) を用いて再度測定を行った。トリガーカウンター及びシンチレーターの配置は図 5.13 とほぼ同じだが、シンチレーターの位置がトリガーカウンター端面から 2cm ほど内側になるように設置した (図 5.24 参照)。また暗箱の前には遮光したファイバースコープを置き、ビームプロファイルに合わせて図 5.24 の (1)、(2)、(3) の位置に順番に移動させて測定を行った。

5.5.3 シンチレーター端面探索

セットアップ後ビームをあてて、まずシンチレーター端面で光量が落ちていることを確認した。図 5.24 に示されている三つの位置でそれぞれ各チャンネルごとに約 2000 イベント程度の統計をためた。この結果を図に示す。これを見るとトリガー端から約 2cm (図 5.24 の青い線) のところで、急激に光量が落ちていることがわかる。従ってこの点がシンチレーター端面であることがわかる。この結果は図 5.24 での幾何学的配置と矛盾しない。

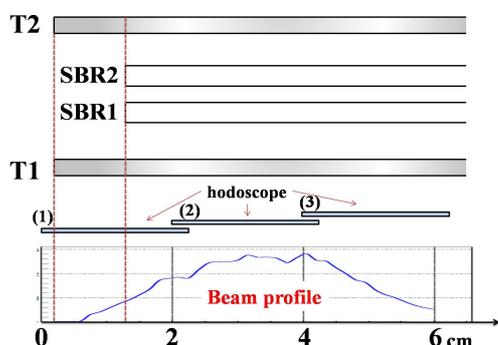


図 5.24: ビームプロファイルとホドスコープ設置位置の関係。(1)、(2)、(3) の各位置で約 2 時間、1000~3000 イベントの統計をためた。

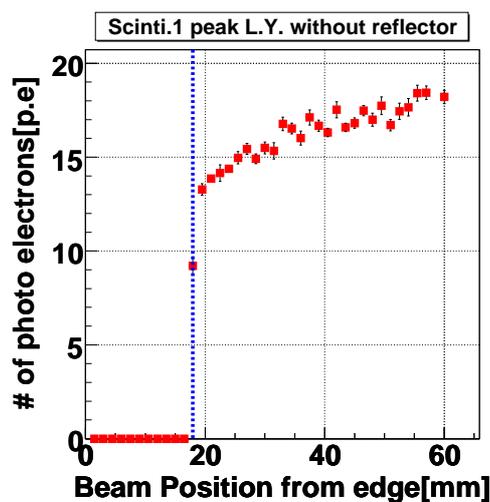


図 5.25: ファイバースコープの各チャンネルを通過した電子による、シンチレーター SB での光量分布 (クロストーク、アフターパルスの補正無し)。

5.5.4 反射材塗布による端面での光量回復効果の測定結果

図 5.26 はシンチレーター SBR1, 図 5.27 は SBR2 で、それぞれ反射材を塗る前と塗った後に測定した光量の分布図である。

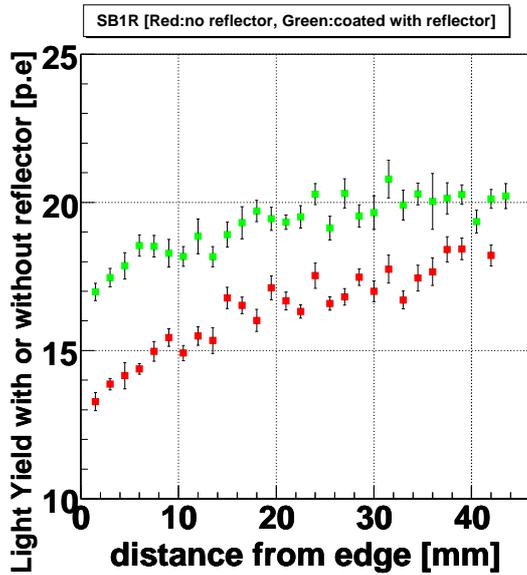


図 5.26: シンチレーター SBR1 の端面から 4cm の間の光量分布 (クロストーク、アフターパルスの補正なし)。赤は反射材なし、緑は反射材塗布後の光量を示す。

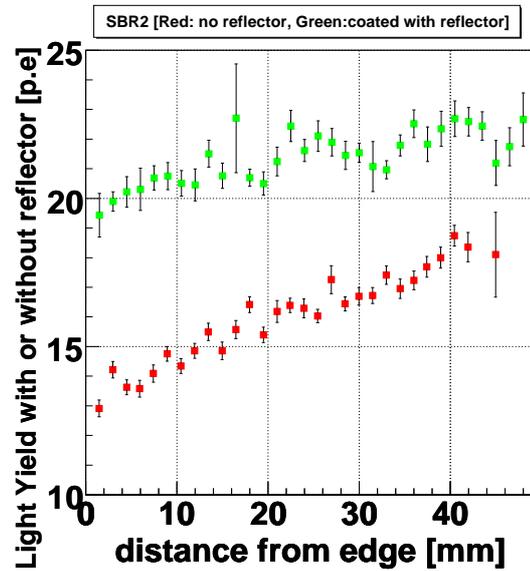


図 5.27: シンチレーター SBR2 の端面から 4cm の間の光量分布 (クロストーク、アフターパルスの補正無し)。赤は反射材なし、緑は反射材塗布後の光量を示す。

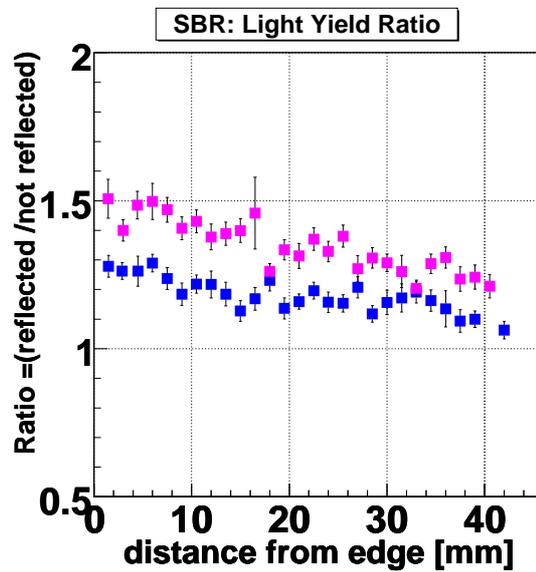


図 5.28: シンチレーター SBR1,SBR2 の反射材塗布前後の光量比。青は SBR1, ピンク色は SBR2 の光量比を示す。ともに端面付近では 30~50% 程度光量が増加しているが、内側に進むに従って増加率は減少していく。

図 5.26、図 5.27 より SBR1、SBR2 の両方とも反射材を塗ったことで端面付近での光量が増加している。また端面に近づくにつれて光量が減少していく様子も、反射材を塗ったあとの分布が塗る前に比べて傾きが緩やかになっていることからわかる。図 5.28 は SBR1、SBR2 のそれぞれで反射材を塗る前後の光量の比をプロットした図である。この図より、反射剤を塗ることで端面近傍では 30~50% 程度光量が増加していることが確認できた。またこの効果は内側に進むに従って小さくなり、すなわち予想通りシンチレーション光が端面近傍から散逸していた事実を裏付けるものとなった。

これまでの結果から、実機における端面での光量を予測することができる。式 (5.4) より、MPPC から 50cm の距離における SB シンチレーターの光量はクロストークとアフターパルスの補正無しで 20.2p.e 程度になる。また図 5.26 より端面から 1cm 程度では、MPPC までの距離が同じでも 13~14p.e 程度になることがわかる。これに反射材を塗ると少なくとも約 17~18p.e 程度までは光量が回復するため、正味の減少率は $1-17/20.2=0.158 \cdots 16\%$ 程度に抑えられる。

従って MPPC から最も離れた位置 (far side: 伝送距離 120cm) では、式 (5.11) を用いると、

$$120\text{cm} \text{ で得られる光量} = 20.2 \times \frac{e^{-120/241.7}}{e^{-50/241.7}} \times 0.84 \times 0.79 \quad (5.14)$$

$$= 10.0[\text{p.e}] \quad (5.15)$$

程度の光量となることが予想される。このとき検出される光子数がポワソン統計に従うことを仮定すると、0.5p.e, 1.5p.e, 2.5p.e を閾値としたときの検出効率は以下のように予想される。ここで $P(n,x)$ はポワソン分布で、 x を平均値としたとき n となる確率を表すものとする。

$$\text{Efficiency} = 1 - \sum_{k=1}^n P(k, 10.0) \quad (5.16)$$

$$= 0.9999 \cdots \simeq 99.9\% (\text{threshold} : 0.5\text{p.e})$$

$$= 0.9995 \cdots \simeq 99.9\% (\text{threshold} : 1.5\text{p.e})$$

$$= 0.9972 \cdots \simeq 99.72\% (\text{threshold} : 2.5\text{p.e}) \quad (5.17)$$

従って閾値が 2.5p.e でも 99.7% 以上の検出効率となり、INGRID に要求される 99.5% 以上の検出効率が得られることが期待される。

また同様に MPPC にもっとも近い位置 (near side: 伝送距離 5cm) の光量は

$$5\text{cm} \text{ で得られる光量} = 20.2 \times \frac{e^{-5/241.7}}{e^{-50/241.7}} \times 0.84 \times 0.79$$

$$\simeq 17.04[\text{p.e}] \quad (5.18)$$

となることが予想される。

これより INGRID で得られる光量の範囲は 17.04p.e (near side: 5cm) - 10.0p.e (far side: 120cm) となる。

5.6 光量の幅方向依存性とファイバーホールの効果

5.6.1 動機と測定のセットアップ

5.4 節ではシンチレーターの長さ方向の光量の補正について考えたが、シンチレーター内部の一様性を保証するにはファイバーに対して垂直な方向 (以下、幅方向と呼ぶ) に対する光量の位置依存性を知ることが重要である。また粒子がファイバーホールを通過した場合、通過距離は (穴の大きさにも依るが) 通常のシンチレーター部分を通過するときと比較して短くなるため、得られる光量も小さくなると予想される。

これらの影響を評価するために図 5.29 のようにホドスコープをシンチレーターのファイバーホールをまたぐようにして平行に設置し、光量の幅方向の位置依存性を測定した。シンチレーターは SA タイプのものを使用した。またビームスポットは MPPC から 60cm の位置である。

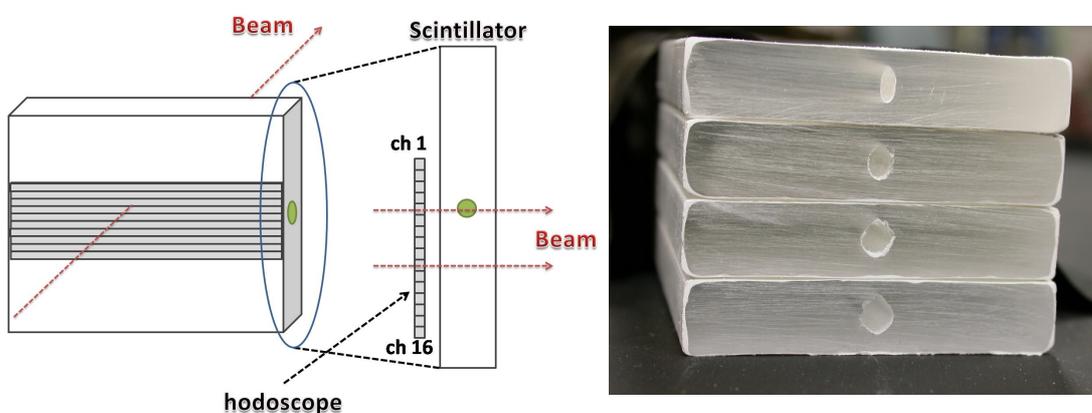


図 5.29: 幅方向の光量測定でのセットアップの概念図。ビームポジションは MPPC から 60cm の位置。

図 5.30: シンチレーターのファイバーホール。SA タイプ、SB タイプともに個体差はあるが、幅方向に約 3.5mm~4.5mm 程度の大きさを持つ。

5.6.2 測定結果

ホドスコープの ch5 がファイバーホールに重なるように設置したときの結果を図 5.31 に示す。ホドスコープの位置合わせは上述の移動ステージを用いて行い、 $10\mu\text{m}$ の精度で調整した。また各チャンネルごとの ADC 分布の図を 5.32 に示す。

図 5.31 より、ファイバーホール上に設置した ch5 を通過したイベントで大きく光量が落ちている。またファイバーとの距離が離れるに従って光量が減少していく様子も見れる。図 5.31 の下図は最も光量が大きかったチャンネル (ch7) と他のチャンネルとの光量比をとった図である。これよりもっとも離れた地点 (ch16、ch7 から約 15mm 離れる) で約 15% 光量が落ちることがわかる。またファイバーホールを通った場合には約 40% 程度光量が落ちている。ファイバーホールはシンチレーター毎に多少の個体差はあるものの、おおまかには 3.5mm~4.5mm 程度の大きさで揃っている (図 5.30 参照)。この光量の低下がファ

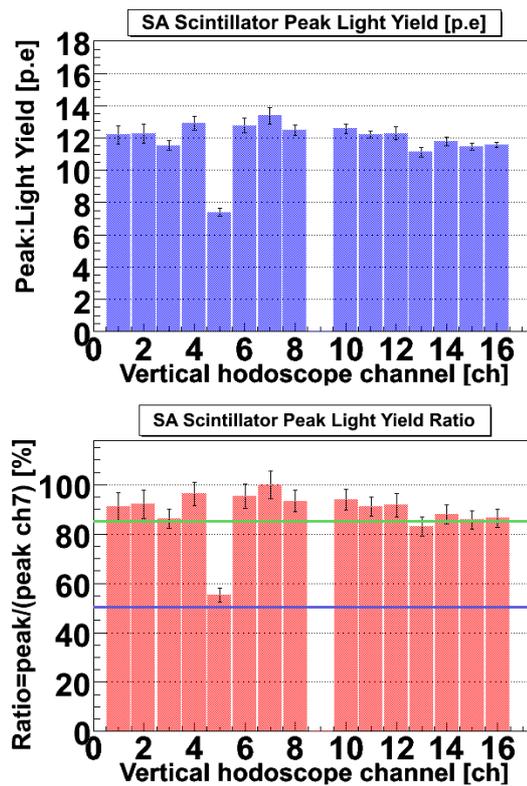


図 5.31: 25、 伝送距離 60cm、MPPC $V_{over} = 1.4V$ でのシンチレーター SA の幅方向に対する光量分布。クロストーク、アフターパルス効果は補正していない。1ch が 1.5mm 間隔に相当する。下の図は光量の最大値との比をとったもの。緑色、青色の横線はそれぞれ光量比が 85%、50% の線を示す。

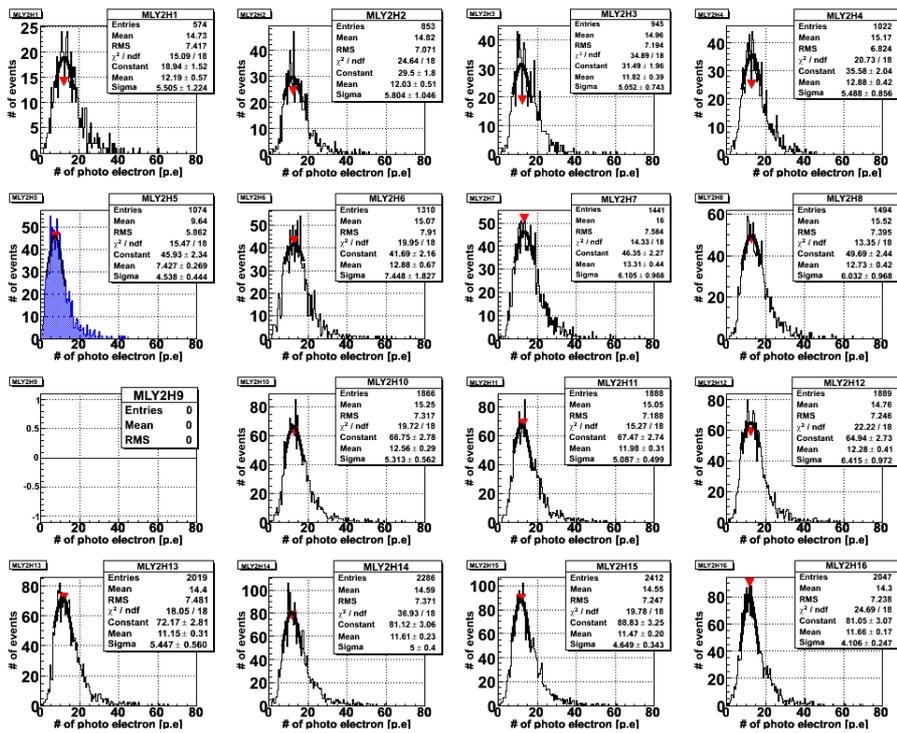


図 5.32: 25、MPPC $V_{over}=1.4V$ での各チャンネルごとの ADC 分布。ch9 は MAPMT のデッドチャンネル。ch5 の青いハッチはファイバーホールを通過した場合の ADC 分布を表している。

ファイバーホール通過によることを確認するため、さらにホドスコープを 3mm 下げた場合の光量の分布図を図 5.33 に示す。

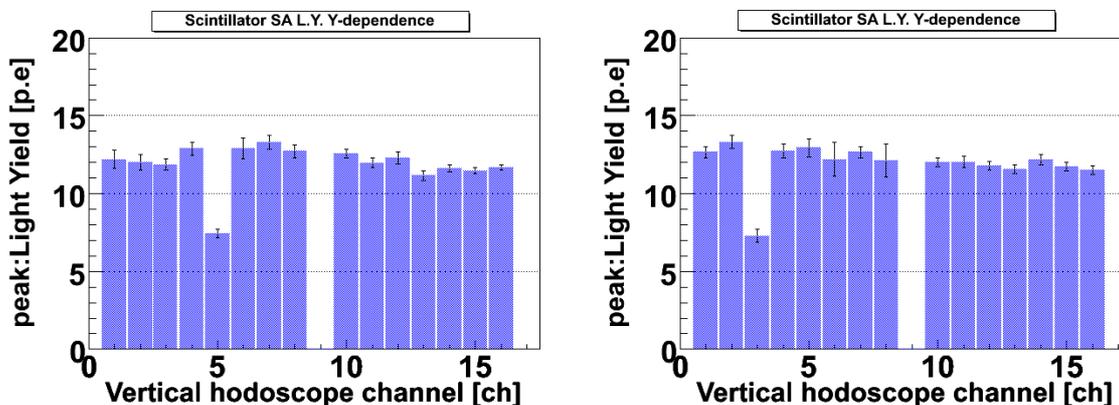


図 5.33: 図 5.29 のセットアップでの各チャンネルを通過したときの光量 (左図、補正なし) と、さらにホドスコープの高さを 3mm 下に下げたときの光量 (右図、補正なし)。ファイバーホールを示すチャンネルが 2 つ分移動し、ホドスコープの移動距離に一致している。

図 5.33 よりやはりファイバーホールを通過する場合は光量が大きく落ちることがわかる。ファイバーホールを通過する場合粒子がシンチレーター内を横切る距離は約 5mm~7mm 程度に減少する。検出される光量は粒子の通過距離に比例することから、この場合得られる光量は 35~45% 程度減少すると考えられるので、今回の測定結果と矛盾しない。

5.6.3 考察

本測定ではシンチレーターの幅方向に対する光量の位置依存性をみた。測定の結果、図 5.33 よりファイバーホールにもっとも近い点を通過した時とファイバーホールから最も遠い点を通過した時とで、約 15% の光量の低下が見られた。これよりシンチレーター内部で著しい光量の低下はなく、シンチレーターの一様性が確認された。またファイバーホールに最も近い点を通過した時とファイバーホールを通過した時とでは、40~45% の光量の低下が見られた。これはファイバーホールを通過する粒子がシンチレーターを通過する距離が変わることが原因であると考えられる。図 5.30 よりファイバーホールは幅方向に 3.5mm~4.5mm の大きさを持ち、垂直に入射した粒子がシンチレーター中を通過する距離は、他の領域に比べて約 35%~45% 短くなる。一般にプラスチックシンチレーター中を通過する粒子の典型的なエネルギー損失は 2MeV/cm[14] であり、通過距離に比例する。これよりファイバーホールでの光量の低下率と通過距離による損失率はほぼ一致し、ファイバーホールによる光量の損失率は 40% 程度であることがわかった。

5.7 シンチレータークロストーク測定

本節ではシンチレーターを重ねておいたときに生じるシンチレーター間のクロストークについて、2つの方法で定量的に評価した結果を述べる。

5.7.1 測定動機

これまでの測定はすべてシンチレーターを単体、もしくは間に暗幕をはさむ形で行ってきた。これはシンチレーターを重ねて配置したとき、シンチレーター間でクロストークが発生し見かけ上光量が増加して見えるのを防ぐためである。これはシンチレーター単体の光量や検出効率などの性能を評価する際に、測定結果に影響を及ぼす。しかし INGRID では必ずシンチレーターの重なる部分が生じるため、実際にどの程度のクロストークが生じるのかを見積もり、その影響の有無を知ることは重要である。本測定では2通りの方法でシンチレータークロストークの効果を確認し、定量的な評価を行った。

5.7.2 シンチレータークロストーク測定 1

図 5.34 に測定 [1] のセットアップの概念図を示す。本測定ではまずシンチレーター SA(120cm) の側面をビームに対して垂直に置き、その前後を 20cm 程度に切りだしたシンチレーター SA ではさんだ。このとき、以下の 3 通りの挟み方で測定を行った。

- (1) 間に何もはさまない。
- (2) 間に暗幕をはさむ。
- (3) 前後のシンチレーターをはずす。

上記三つのパターンで測定を行った。セットアップ変更の際、120cm のシンチレーターに接続されている MPPC およびファイバーは固定されたままとする。本測定より、(1) では中央のシンチレーターから得られる光量は前後を挟んだシンチレーターからの漏れ出る光量を含めた値が検出されはらずである。この結果を (2) の暗幕を置いた結果と比較することで、増加している光量を直接求めることができる。また (3) ではシンチレーターを単体で置くことにより、他のシンチレーターからのクロストークがない場合の光量が得られる。ここで (2) と (3) は、クロストークが暗幕でさえぎられるとすればどちらも中央のシンチレーター単体での光量を測定するはずなので、結果は誤差の範囲内で一致することが予想される。

5.7.3 測定 1. の結果

各セットアップでの光量と、(1) での光量を 1 としたときの光量比を表 5.7 に示す。表に示した光量は MPPC クロストーク & アフターパルスの効果の補正前の光量である。また (1)、(2)、(3) の補正前の光量の ADC 分布をそれぞれ図 5.35~5.37 に示す。

(1) の測定の結果、シンチレーターをはさむことで検出される光量が有意に増加していることがわかる。また (2) と (3) の結果が誤差の範囲内で一致していることから測定の

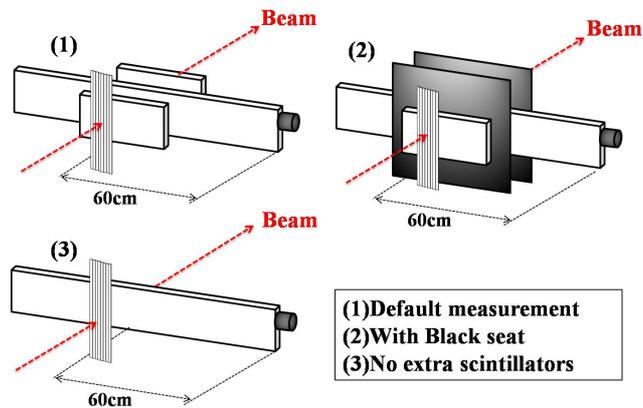


図 5.34: 測定 1 のセットアップ。(1) ではシンチレーターをそのまま密着、(2) では間に暗幕を挟んでクロストークを防ぐ効果を見る。中央のシンチレーター及び全体は暗幕で覆っている。

セットアップ	光量 [p.e]	光量比
(1)	14.15 ± 0.1	1.17
(2)	12.12 ± 0.1	1
(3)	11.98 ± 0.1	0.99

表 5.7: 測定 1. の各セットアップでの光量

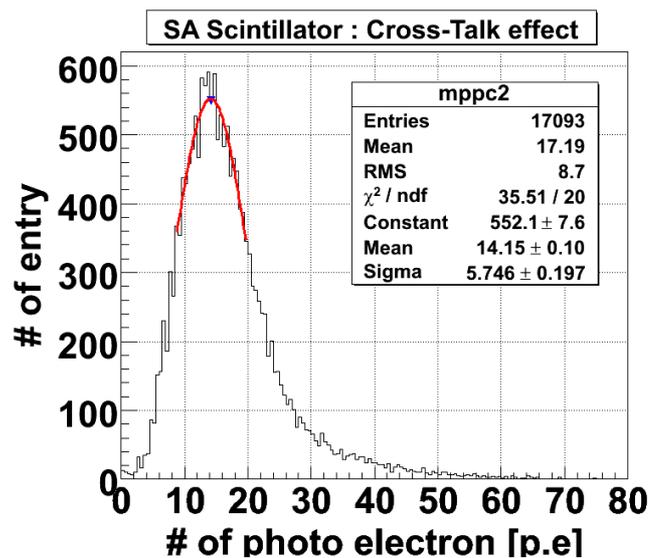


図 5.35: (1) での光量 (クロストーク & アフターパルスの補正なし) の ADC 分布図。

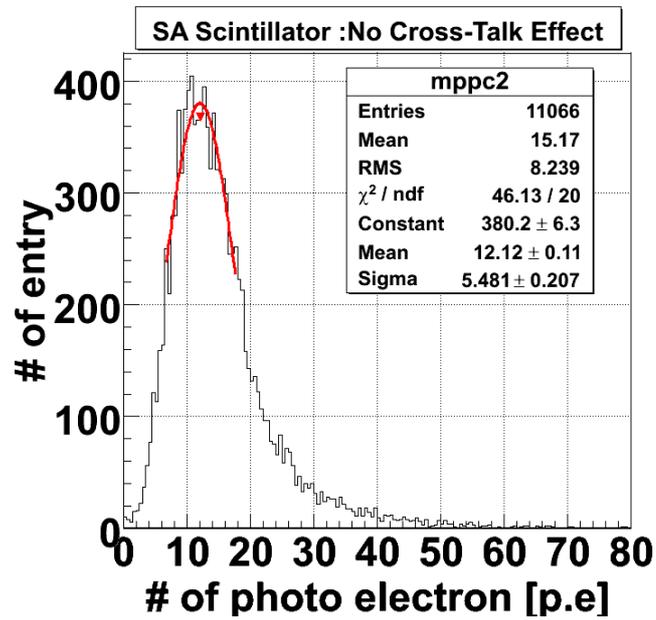


図 5.36: (2) での光量 (クロストーク & アフターパルスの補正なし) の ADC 分布図。

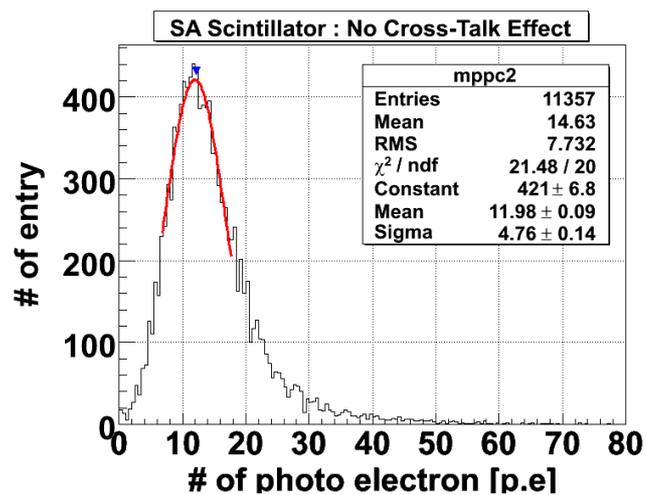


図 5.37: (3) での光量 (クロストーク & アフターパルスの補正なし) の ADC 分布図。

確からしさが保障される。したがってシンチレーターのクロストークが起きていることが確かめられた。

5.7.4 測定 1: 考察

測定 1 の結果について、シンチレーター側面からの光の漏れ方が図 5.38 のような漏れ方を仮定して考える。図 5.38 右下の図は図中の矢印の方向、つまりシンチレーター断面の方向から見たときに粒子の通過に伴って光が発生する様子を示している。

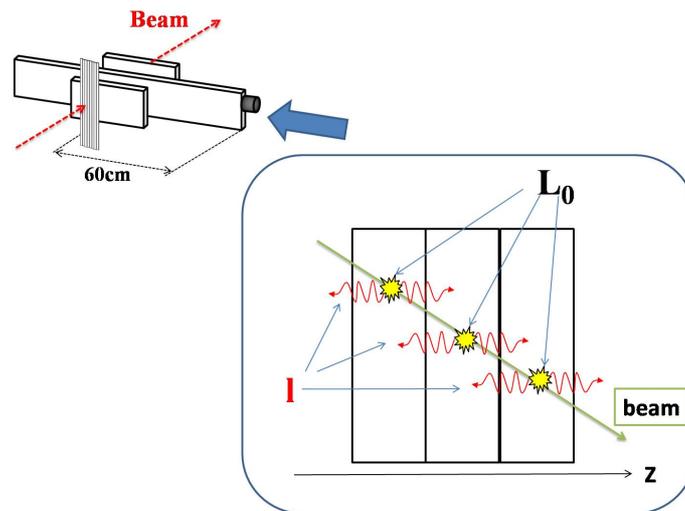


図 5.38: シンチレータークロストークの概念図

ここで各シンチレーターで発生した光はシンチレーターの両側面から一定の割合量だけ光が抜けていくとする。このときシンチレーターを重ねて配置した場合、あるシンチレーターから抜け出た光は隣り合うシンチレーターに再度入射することがある。従って各シンチレーターで検出される光量は、自分自身から抜け出ていく分と隣り合うシンチレーターから入ってくる分を含んだものになる。

本測定では、中央のシンチレーターとその両側を挟むように置かれたシンチレーターはともに SA タイプのシンチレーターである。従って粒子が通過したとき、通過距離が同じであれば発光量及び漏れ出る光量も等しくなると考えられる。このときの真の発光量を L_0 とする。ここでシンチレーターは光漏れを起こすが、このときシンチレーターの側面片側から漏れる光量を l とすると、実際に読みだされる光量 L は以下の式であらわされる。

$$\begin{aligned}
 \text{読み出される光量 } (L) &= \text{真の発光量 } (L_0) & (5.19) \\
 &- \text{クロストークによって漏れる光量 } (2 \times l) \\
 &+ \text{クロストークによって入ってくる光量 } (\text{接する面数} \times l)
 \end{aligned}$$

これより (1) と (2)・(3) での光量はそれぞれ $L_0, L_0 - 2l, L_0 - 2l$ となる。表 5.7 より、漏れ

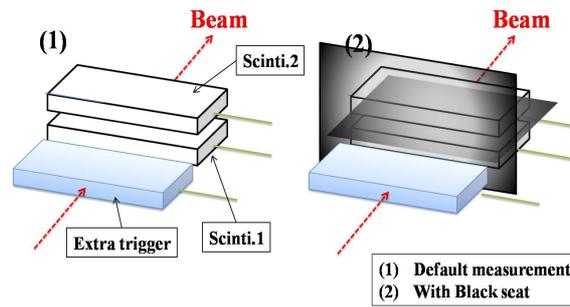


図 5.39: 測定 2. のセットアップ。シンチレーター側面をステージと並行になるように重ねて設置する。ビームスポットは前段の厚さ 1cm のトリガーシンチレーターを用いてオフラインでのカットに用いる。(2) では Scinti.2 を暗幕で囲むように配置した。

出る光量 l は、

$$l = (14.15 - 12.05)/2[(2) \text{ と } (3) \text{ の平均をとった}] \quad (5.20)$$

$$= 1.05[\text{p.e}] \quad (5.21)$$

となる。これより真の発光量に対して片面から漏れ出て、再度隣のシンチレーターに吸収される光量は $1.05 \div 14.15 = 7.4\%$ となる。従ってシンチレーターの片側側面から約 7.4% の光量がクロストークを起こすことがわかった。

5.7.5 シンチレータークロストーク測定 2

測定 2 では純粋にクロストークのみによる光量の増加を定量的に測定した。図 5.39 に測定 2 のセットアップの概念図を示す。

測定はシンチレーター SA(40cm) を 2 枚重ねた場合と、シンチレーター SB(40cm) を 2 枚重ねた場合の 2 種類のシンチレーターでそれぞれ行った。セットアップでは、シンチレーター側面がステージに平行になるように重ねておいた。下側を Scinti.1、上側を Scinti.2 とする。また下側のシンチレーターの前に同じ厚さ 1cm のトリガーシンチレーター TS を用意し、オフラインでの解析に使用した。測定全体のトリガーは Scinti.1 と Scinti.2 の前後におかれた T1 と T2(ともに遮光済み)で行った。また測定は全体を暗箱で遮光し、以下の 2 通りの方法で行った。

(1) 間に何もはさまない。

(2) Scinti.1 と Scinti.2 の間と Scinti.2 と前段の TS の間に暗幕をはさむ。

測定 2 では下に置いた Scinti.1 をビームが通過したイベントに対し、ビームが当たっていない上側の Scinti.2 からどの程度の光量が見えるか、すなわち純粋なクロストークによる「漏れ光量」を確認する。(2) では Scinti.2 をトリガーシンチレーター TS と Scinti.1 の両方から孤立するように暗幕を配置することで、Scinti.2 に対しビーム及び漏れ光量による影響を排除した結果をみた。

測定 2: シンチレーター SA での結果

測定 2 では Scinti.1, TS を通り、かつ Scinti.2 を通らないイベントを選ばなければならない。図 5.40、図 5.41、図 5.42 に暗幕を挟んでいない場合のシンチレーター SA および TS の ADC distribution を示す。

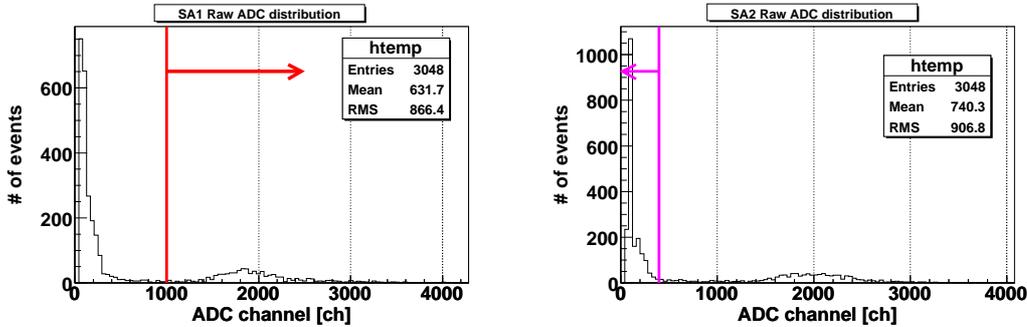


図 5.40: Scinti.1(SA) の ADC distribution。図 5.41: Scinti.2(SA) の ADC distribution。カットは ADC $ch \geq 1000$ でかけた。 カットは ADC $ch \leq 400$ でかけた。

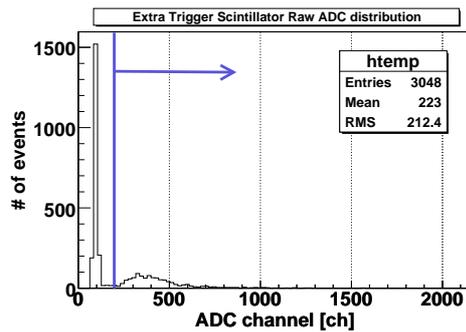


図 5.42: トリガーシンチレーター (TS) の ADC distribution。カットは ADC $ch \geq 200$ でかけた。

各図において示されている領域のイベントを選ぶことで目的とするイベントを得ることができる。図 5.43(左) にシンチレーター SA で暗幕のある場合と無い場合の Scinti.2 の光量分布を、図 5.43(右) にシンチレーター SB で暗幕のある場合と無い場合の Scinti.2 の光量分布をそれぞれ示す。

図 5.43 よりシンチレーター SA、SB の両方で暗幕による効果が見える。表 5.8 に各セットアップでの光量の平均値を記す。

光量の平均値を比べると暗幕を挟んだ状態から無しの状態に変えると、SA が約 4.4 倍、SB が 2.8 倍に増加している。暗幕を挟んだ状態では平均 1.3p.e しか出ていないことを考えると、上記のカットのかげかたで Scinti.2 を通過、もしくはかすめるようなイベントは排除できていると考えられる。しかし暗幕を取り外すと有意に光量が増加することから、

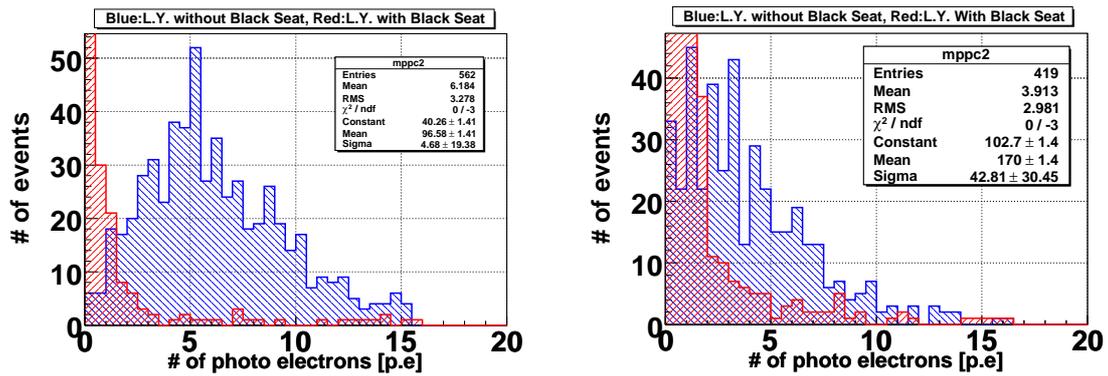


図 5.43: シンチレーター SA(左) と SB(右) での暗幕をはさまなかった場合 (青) とはさんだ場合 (赤) の Scinti.2 の光量分布図。暗幕をはさんだことで Scinti.1 から漏れ出ていた光が入ってこなくなったことがわかる。

Scinti.2	暗幕あり	暗幕無し
SA peak	–	5.8 ± 0.3
SA mean	1.4 ± 0.2	6.2 ± 0.1
SB peak	–	0.8 ± 1.3
SB mean	1.1 ± 0.1	3.9 ± 0.1

表 5.8: 暗幕あり、無しでの SA,SB シンチレーターの Scinti.2 で検出された光量

シンチレーター側面から光が漏れ、隣り合うシンチレーターがその光を拾っていることがわかる。すなわちシンチレーター間でクロストークが起きていることが確認できた。

測定 2:シンチレーター SA での考察

シンチレーター SA において、図 5.40~ 図 5.41 のカットから得られる暗幕が無い場合の Scinti.1 と Scinti.2 の光量分布をそれぞれ図 5.44 と図 5.45 に示す。

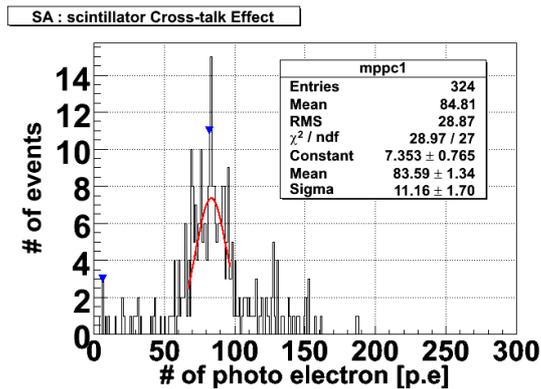


図 5.44: Scinti.1(SA) での光量分布図。ピーク、平均ともに 80p.e 以上出ている。

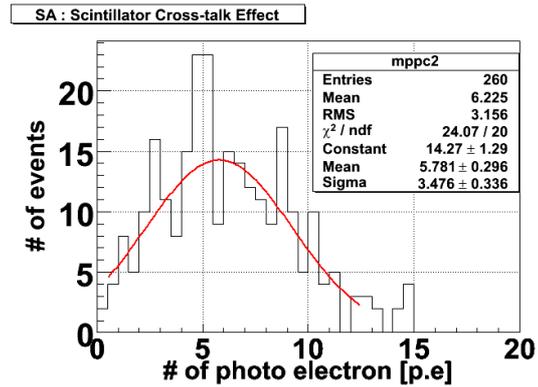


図 5.45: Scinti.2(SA) での光量分布図。シンチレータークロストークによる漏れ光量のピークが見える。

暗幕が無い場合の二つの SA シンチレーター Scinti.1 と Scinti.2 の光量のピークと平均を表 5.9 にまとめる。

シンチレーター	ピーク [p.e]	平均 [p.e]
Scinti.1(SA)	83.6 ± 1.3	84.8 ± 1.6
Scinti.2(SA)	5.8 ± 0.3	6.2 ± 0.2

表 5.9: クロストークを起こしている時の Scinti.1 と 2. のピークと平均の光量

このとき、Scinti.1 は両側面から光が漏れ、Scinti.2 は、Scinti.1 からの漏れ光量だけを拾っている。従って式 (5.20) における L, L_0, l のピーク値は、それぞれ、

$$L = 83.6[\text{p.e}] \quad (5.22)$$

$$L_0 = 83.6 + 2 \times 5.8 = 95.2[\text{p.e}] \quad (5.23)$$

$$l = 5.8[\text{p.e}] \quad (5.24)$$

となる。これより測定 2 における真の発光量に対する漏れ光量の比率は、 $5.8 \div 95.2 \sim 6.1\%$ となる。また平均で計算した場合の光量比は 5.2% 程度となる。これらのクロストーク率は測定 1 の時に比べて 1~2% 低い、ピーク及び平均値の誤差を考えるとこの違いは無視できるレベルである。

測定 2:シンチレーター SB での結果および考察

シンチレーター SB において、図 5.40~ 図 5.41 のカットから得られる暗幕が無い場合の Scinti.1 と Scinti.2 の光量分布をそれぞれ図 5.46 と図 5.47 に示す。

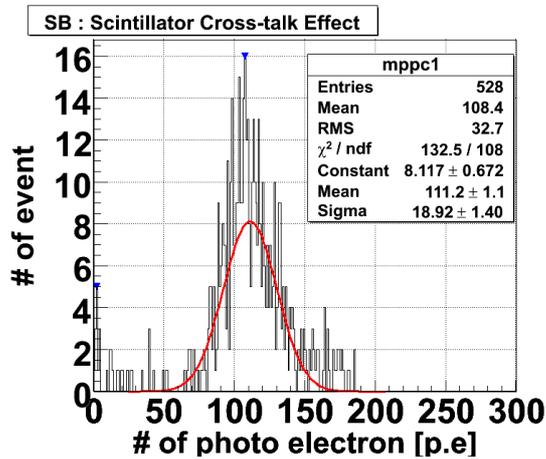


図 5.46: Scinti.1(SB) での光量分布図。ピーク、平均ともに 100p.e 以上出ている。

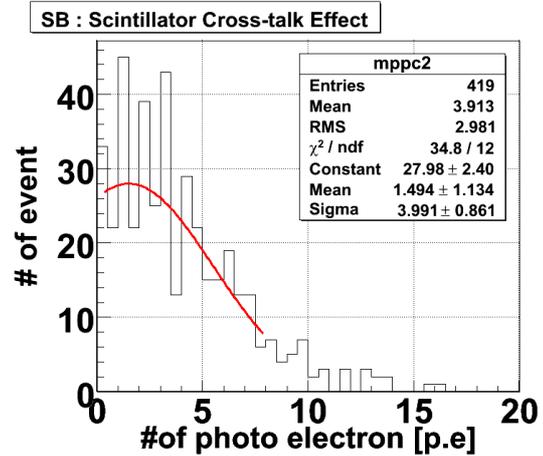


図 5.47: Scinti.2(SB) での光量分布図。SA のような明らかなピークは見えない。

図 5.46、図 5.47 の結果より、シンチレーター SB ではクロストーク率が大きく落ちていることがわかる。また暗幕が無い場合の二つの SB シンチレーター Scinti.1(SB) と Scinti.2(SB) の光量のピークと平均を表 5.10 にまとめる。

シンチレーター	ピーク [p.e]	平均 [p.e]
Scinti.1(SB)	111.1±1.89	108.4±1.39
Scinti.2(SB)	1.49±1.13	3.91±0.14

表 5.10: クロストークを起こしている時の Scinti.1(SB) と Scinti.2(SB) のピークと平均の光量

このとき、Scinti.1(SB) は両側面から光が漏れ、Scinti.2(SB) は、Scinti.1(SB) からの漏れ光量だけを拾っている。従って式 (5.20) における L, L_0, l のピーク値は、それぞれ、

$$L = 111.1[\text{p.e}] \quad (5.25)$$

$$L_0 = 111.1 + 2 \times 1.49 = 114.08[\text{p.e}] \quad (5.26)$$

$$l = 1.49[\text{p.e}] \quad (5.27)$$

となる。これより測定.2 における真の発光量に対する漏れ光量の比率は、 $1.49 \div 114.08 \sim 1.31\%$ となる。また平均で計算した場合の光量比は 2.5% 程度となる。

5.7.6 クロストーク測定:考察

測定.1、測定.2のどちらの結果からも、シンチレーター SA の側面部から 6~7% のクロストークが起こることが確認された。これは式 (5.5), 式 (5.6) において光量が 14.8% 増加していることと一致する。つまり反射材の厚みが増したことによってクロストークの効果が抑えられていることになる。これは測定 2 においてシンチレーター SB でのクロストークを測定した結果、漏れ光量の比率がピーク値で 1.3% と SA の場合に比べて 5 分の 1 程度に小さくなっていることから説明がつく。

最後にこのクロストークが INGRID に及ぼす影響を考える。INGRID において、X.Y 方向のシンチレーターによって作られる各ブロックでは必ず 5cm×5cm の面が一つ、5cm×1cm の面が 2 つ重なり合う。INGRID のイベントセレクションにおいて問題となるのは、図 5.48 のように A 点に入射した光が隣り合う B 点、C 点にクロストークを起こし、本来粒子の通過していない点で光量が発生してしまうことである。

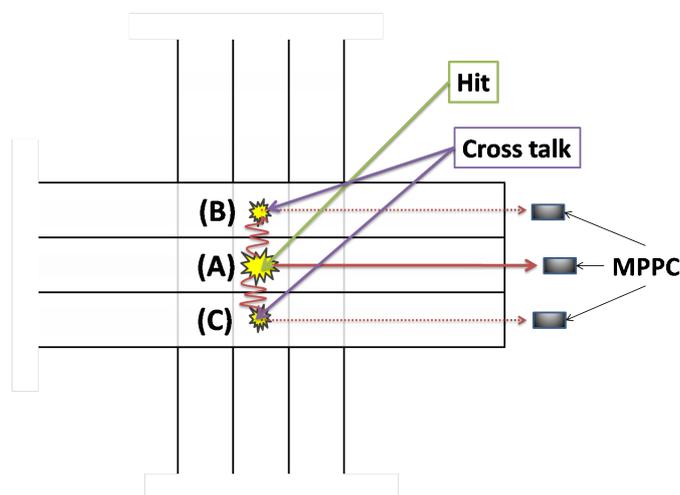


図 5.48: シンチレータークロストークの概念図 2

この漏れ光量が大きいとダミーのトラックが発生し、飛跡の再構成を間違える原因となり、結果ニュートリノ反応によるイベントを見誤ってしまう恐れがある。従ってクロストークによって実際にどの程度の光量が隣り合うシンチレーターに漏れるのかを見積もった。

測定 1、測定 2 の解析より、実機で用いるシンチレーター SB の 5cm×5cm の面積におけるクロストーク率が 1.3%(ピーク値での評価。平均での評価では 2.5%) と求められた。したがってクロストーク率が面積に比例すると考えると、5cm×1cm のブロックではピークでは 0.3%、平均では 0.5% 以下になることがわかった。

従って、シンチレーターのクロストークが INGRID でのイベント同定に及ぼす影響は無視できるレベルであることが示された。

5.8 INGRID シンチレーターの基礎特性の評価のまとめ

本章ではINGRIDのプロトタイプシンチレーターの基礎特性について、ビームテストでの結果を解析し、その性能を評価した。以下に測定項目と結果を簡潔にまとめる。

- MPPCの V_{over} の決定
MPPCまでの伝送距離60cmの地点でMPPCにかける電圧と得られる光量及び検出効率を測定した。シンチレーターの光量及び閾値を変化させたときの検出効率及び光量値より、測定に最適な電圧として $V_{over}=1.4V$ に決定した。以下の測定結果はすべてこの電圧のもとでの結果となる。
- プロトタイプシンチレーターSBによる実機で期待される光量
2種類のプロトタイプシンチレーターについて、伝送距離50cmの地点で光量を測定。シンチレーターSA、SBの結果はそれぞれ 13.8 ± 0.1 [p.e]、 15.9 ± 0.1 [p.e]となった。(MPPCのクロストーク・アフターパルスによる補正を含む。)これよりINGRIDに採用するSBタイプのシンチレーターが十分な光量を持つことを確認した。
- 波長変換ファイバー読み出しでのファイバー減衰長
シンチレーション光を波長変換ファイバーで読み出す場合のファイバー減衰長を測定した。2本のファイバーで試した結果、 241.7 ± 10.6 [cm]であった。
- シンチレーター端面における光量低下と反射材による光量回復効果
シンチレーター端面から4cm以下のところで、光量が上で求めた減衰曲線から大きく外れる形で減少する。シンチレーター端面に反射材を塗布することで端面から散逸していた光を捕まえ光量を回復させることができた。回復率は端面から1cm~4cmの距離で約40%~15%になる。この効果は非常に有効かつ重要であり、INGRID実機においても端面に反射材を塗ることを決定した。またこれらの結果から実機で得られる光量を見積もったところ、120cmの地点で少なくとも10p.e、検出効率は2.5p.eの閾値に対して99.7%以上が期待されることを示した。
- シンチレーター内部の一様性とファイバーホールの影響
光量のシンチレーター幅方向の位置依存性を調べた。ホドスコープを用いて1.5mm間隔で光量を測定した結果、ファイバーから約2cm離れた点で15%程度、ファイバーホールを通った場合は他の領域の平均に比べ約40%光量が低下することを確認した。
- シンチレータークロストーク
シンチレーターを重ねてビームに当てるとシンチレーター間でクロストークが起きることを確認した。測定の結果、シンチレーターSAタイプで約7%、SBタイプでは1.3%以下(ピーク値を用いた評価)であることを確認した。さらにINGRIDで懸念される隣り合うシンチレーターへのクロストーク率は、実機で用いるSBタイプで1%以下となり、無視できるレベルであることを示した。

第6章 結論

本研究では、2009年に開始する 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 において使用されるシンチレーター、及び新型光子検出器 MPPC の性能評価を行った。INGRID は鉄とシンチレーター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。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モニターする役割を担う。また長期的にはニュートリノフラックス等もモニターすることを視野に入れている。

INGRID の個々のモジュールでは、鉄原子核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層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 を用いて読み出す。このためニュートリノ反応を効率よく検出するためには、シンチレーター・ファイバー・MPPC の 3 つによる読み出しシステムによって得られる光量及び検出効率が、実験の要求に応え得る性能を持つことが必要不可欠である。本論文では、実機で用いる大量のシンチレーターを生産する前のプロトタイプに対して、KEK 富士に新たに建設された富士テストビームラインでビームテストを行い、これらが要求を満たす性能を有しているかの評価を行った。

ビームテストでは 3GeV の電子ビームを用いた。まずはじめにシンチレーター・ファイバー・MPPC からなる検出器に印加する電圧 V_{over} と光量の関係について調べた。MPPC は印加電圧の増大に伴ってノイズも増えるため、本実験において許容されるノイズレートと今回の測定に必要な光量とを考慮した結果、 $V_{over}=1.4V$ と決定した。

次に 2 種類のプロトタイプシンチレーター SA と SB の光量比較を行った。シンチレーターは 2 つともアメリカの Fermi 研究所内で製作された押し出し型シンチレーターであり、反射材の厚みが違うものを 2 種類用意した。便宜上反射材の薄い方を SA、厚い方を SB とする。MIP の電子に対してファイバーの光量伝送距離が 50cm の地点でビームを当て、MPPC のクロストークとアフターパルスの効果を補正した結果それぞれ $SA=13.8\pm 0.1p.e.$ 、 $SB=15.9\pm 0.1p.e.$ という結果を得た。これより反射材の厚みが増したことで絶対的な光量が増加していることが確認できた。

続いて波長変換ファイバー読み出しによる光量の減衰長を調べた。INGRID では最も検出器から離れた場所で 120cm の地点で発生した光量を読み出す必要がある。シンチレーターを検出器に近い側から反対側まで 7 点にわけて、各点でビームを当てて光量を測定し、減衰長を求めた。結果、2 本のファイバーと 2 つのシンチレーター SA から得られた減衰長は $241.7\pm 10.6[cm]$ となった。またシンチレーターの端面に近づくと、光量が減衰曲線から大きくはずれる現象が見られた。これはシンチレーター端面付近で発生したシンチレーション光の広がりをシンチレーターがカバーできなくなる領域まで広がることで、ファイバーに吸収されず大気中へ抜け出してしまふためだと考えられる。これに対してシ

シンチレーター端面に反射材を塗ることで端面からの光量の散逸を防ぐことを試みたところ、端面での光量は最大で40%程度回復し、著しい光量の低下を防ぐことができた。この結果端面でのシンチレーターの光量は、減衰距離が同じで、端面からの距離が十分にある位置で得られる光量の85%程度に回復させることができた。従って実機においてもシンチレーター端面に反射材を塗ることを採用する。

またこの効果と減衰長より、実機において得られる光量を見積もることができる。実機ではSBタイプのシンチレーターを用い、MPPCまでの距離が50cmの地点で15.9p.e(クロストーク、アフターパルスの補正含む)が検出された。この結果と反射材による端面での光量の回復率から、端面における正味の減少率が15%程度であることがわかった。MPPCから最もはなれた位置(far side:120cm)でも反射材を塗ることで同じ減少率で抑えられることを仮定すると、実機で期待される光量は少なくとも10p.e(クロストーク & アフターパルスの補正後)となることがわかった。この光量に対してポワソン分布を仮定したところ、閾値を2.5p.eに対して99.72%以上の検出効率が期待される。これはINGRIDに要求される検出効率(99.5%以上)を満たす。また反射材はMPPC側の端面にも塗ることになるため、MPPCに最も近い位置(near side:5cm)では17.0p.eが期待される。これより実機に採用するシンチレーターSBが必要な性能を満たしていることを示すことができた。

次に粒子がシンチレーターのファイバーホールを通過した場合、生じる光量が低下する現象を1.5mm幅のシンチレーションファイバーを並べたホドスコープを用いて測定した。またシンチレーターの幅方向での光量の位置依存性も測定した。これらの結果、シンチレーターの幅方向ではファイバーホールから2cm程度で~15%の低下、ファイバーホールを通過した場合は40%の低下を観測した。これよりシンチレーター内部の一様性が確認でき、また光量の幅方向の位置依存性は、INGRIDでの光量の読み出しには影響を及ぼさないことが確認できた。

最後にシンチレーターのクロストークについての測定の結果について述べる。シンチレーターを重ねておいたときにクロストークが発生し、シンチレーターから光量が漏れ出る現象を確認した。この影響をシンチレーターSAタイプとSBタイプの両方でそれぞれ定量的に評価した。結果、実機に用いるSBタイプでは重なる面積が5cm×5cmの場合、クロストーク率は光量のピーク値の1.3%(5cm×1cmの面積では0.3%)程度であることが確認された。これはINGRIDにおいては無視できるレベルであり、シンチレーター間のクロストークがニュートリノイベントの同定に影響を及ぼすことないことを示した。

以上の結果より、INGRIDプロトタイプシンチレーターと波長変換ファイバー、MPPCによる読み出しのシステムが要求を満たす性能であることを確認した。INGRID実機に用いられるシンチレーターとしてプロトタイプシンチレーターSBを採用し、またMPPCが実用に耐えうる検出器であることを確認できた。

参考文献

- [1] Y. Ashie et al. [Super-Kamiokande Collaboration]. Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillations. *Phys. Rev. Lett.* *93* 101801, 2004.
- [2] E. Aliu et al. [K2K Collaboration]. Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment. *Phys. Rev. Lett.* *94* 081802, 2005.
- [3] P. Adamson [The MINOS Collaboration]. Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment. arXiv:0711.0769v1 [hep-ex], Nov 2005.
- [4] S. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration]. Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of super-kamiokande-i data. *Phys. Lett. B* *539*,179-187, 2002.
- [5] S. N. Ahmed et al. [SNO Collaboration]. Measurement of the total active 8b solar neutrino flux at the sudbury neutrino observatory with enhanced neutral current sensitivity. *Phys. Rev. Lett.* *92*,181301, 2004.
- [6] T. Araki et al. [KamLAND Collaboration]. Measurement of neutrino oscillation with kamland:evidence of spectral distortion. *Phys. Rev. Lett.* *94*,081801, 2005.
- [7] 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, Feb 2006.
- [8] 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, Feb 2005.
- [9] 五味慎一. 半導体光検出器 mppc の性能評価システムの構築. Master's thesis, Department of Physics, Kyoto University, Feb 2008.
- [10] 川向裕之. T2k 実験におけるニュートリノビームモニターの開発 2:測定器コンポーネントの開発・評価. 日本物理学会 2007 年秋季大会 21pZB-7, Sep 2007.
- [11] 幅淳二, 森田昭夫. Kekb-富士テストビームライン (ftbl)(1)-その設計. 加速器学会誌 4 巻 2 号, pp. 131-135, july 2007.
- [12] 稲葉基. 富士テストビームライン 磁場制御プログラム 操作マニュアル. 筑波技術大学, Nov 2007.

- [13] et al. A. Maio. State of art of (green) wavelengthshifting fibers. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, pp. 214–221, Sep 1997.
- [14] Richard C. Fernow. *Introduction to experimental particle physics*. Cambridge University Press, 1986.

御礼の言葉

2年間にわたり本研究に携わるきっかけを与えてくださったと同時に多大なご迷惑を被ることとなった高エネルギー物理学研究室のみなさま、

2年間の間に幾度も訪れた苦悩の夜や挫折を支えてくださった友人と家族のみなさま、

そして2年間、最後までお世話になりっぱなしだった研究室の同回生のみなさま、

「2年間、ありがとうございました。」