



修士論文

K^0 TO 実験
中性ビームプロファイルモニターを用いた
ビームラインコリメータのアライメント

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

高橋 剛

2011年2月15日

概要

K⁰TO 実験 [1] は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC[2] のハドロン実験施設で行われる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験である。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験は、その崩壊分岐比の測定により、CP 対称性の破れを表す CKM 行列の複素位相パラメータ η を決定することができ、さらにその理論的不定性の小ささから標準理論の精密検証が可能で、標準理論を越える物理のプローブになると期待されている。しかし、この崩壊分岐比の標準模型による理論的予言値は 2.5×10^{-11} [3] と極めて稀にしか起こらず、さらに始状態・終状態とも中性粒子しか含まないため実験的に困難であり、これまでに観測された例はない。

K⁰TO 実験では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の π^0 からの 2γ の位置とエネルギーを測定する。また、崩壊領域の全立体角を検出器で覆い、他に観測可能な粒子が生成していないことを確認する。入射 K_L はビーム軸直線上で崩壊すると仮定することで、測定された 2γ から崩壊位置と運動量を再構成する。そのため、K⁰TO 実験では細く絞った入射ビームが要求される。

入射ビームには K_L の他に γ 、中性子も含まれ、ビーム軸周りに広がって存在するハロー中性子と呼ばれるものが付随してくる。このハロー中性子は周りの検出器と相互作用し、 π^0 や η を生成することでバックグラウンドとなる。K⁰TO 実験のパイロット実験であった KEK の E391a 実験ではハロー中性子によるものが最大のバックグラウンドとなった [4]。非常に稀な崩壊である $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を観測するためにはハロー中性子の少ない K_L ビームを用意する必要があった。

このような K_L ビームを実現するためのビームラインがデザイン・建設された [5][6]。このビームラインは上流側と下流側の 2 本のコリメータから成り、それぞれの上流部・下流部が独立に動かせる仕組みになっている。ハロー中性子の少ない K_L ビームを実現するためには、これらのコリメータがデザイン通りの位置関係にあることが重要である。また、ハドロン実験施設の 1 次陽子ビームの標的は動かせず、ビームスポットも動かすことはないので、コリメータを動かすことで K_L ビーム位置を調節する。

コリメータの調節に対する K_L ビーム状態の応答を短時間で測定するための中性ビームプロファイルモニターを開発した [7]。この中性ビームプロファイルモニターはシンチレーティングファイバー、MAPMT(Multi-Anode PhotoMultiplier Tube)などを組み合わせたコンパクトな検出器システムであり、取り出された K_L ビームのプロファイルおよび時間構造を測定することができる。我々はこの中性ビームプロファイルモニターをインストールし、K⁰TO 実験で用いる K_L ビームの位置・プロファイルの測定を行った。また、コリメータの各部を積極的に動かし、ビームプロファイルに表れるこれらの影響を調べることで各コリメータがデザインされた通りの位置関係になっていることを確認した。加えて、大量に生成される K_L を有効に実験に使用するために重要となるビームの時間構造の測定も行った。

目次

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験の背景 | 1 |
| 1.1 | CP の破れ | 1 |
| 1.2 | $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の物理 | 1 |
| 1.3 | $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験の歴史 | 2 |
| 2 | K^0 TO 実験 | 4 |
| 2.1 | 実験原理 | 4 |
| 2.2 | 検出器 | 5 |
| 2.2.1 | CsI カロリメータ | 5 |
| 2.2.2 | Barrel Veto 検出器 | 6 |
| 2.2.3 | Charged Veto 検出器 | 6 |
| 2.2.4 | Collar Counters | 6 |
| 2.2.5 | Beam Hole Veto | 7 |
| 2.3 | イベントの再構成と選別 | 8 |
| 2.3.1 | π^0 再構成の手法 | 8 |
| 2.3.2 | 再構成された π^0 へのカット | 9 |
| 2.4 | ビームライン | 9 |
| 2.4.1 | 加速器 | 11 |
| 2.4.2 | T1 target | 11 |
| 2.4.3 | γ absorber | 11 |
| 2.4.4 | コリメータ | 12 |
| 2.4.5 | Sweeping magnet | 14 |
| 2.4.6 | Beam plug | 14 |
| 2.4.7 | ビームライン・シミュレーション | 15 |
| 3 | ビームプロファイルモニターの開発 | 16 |
| 3.1 | ビームプロファイルモニターの役割 | 16 |
| 3.2 | デザイン | 16 |
| 3.2.1 | 基本デザイン | 17 |
| 3.2.2 | ファイバー・ホドスコープ | 18 |
| 3.2.3 | MAPMT | 19 |
| 3.2.4 | RC 積分回路 | 20 |
| 3.2.5 | ADC ユニット | 21 |
| 3.2.6 | ビームプロファイルの再構成 | 22 |
| 3.2.7 | Time structure mode | 23 |
| 3.3 | クロストーク | 24 |
| 3.3.1 | PMT 光電面でのクロストーク | 24 |

| | | |
|-------|-----------------------------|----|
| 3.3.2 | ファイバー間での光の伝搬によるクロストーク | 24 |
| 3.3.3 | 粒子の散乱によるクロストーク | 25 |
| 3.4 | ディテクター・シミュレーション | 27 |
| 4 | コリメータ・アラインの手法 | 30 |
| 4.1 | 光源モデル・シミュレーションの概要 | 30 |
| 4.2 | コリメータ位置の変位に伴うビームプロファイルの変化 | 32 |
| 4.2.1 | C1U の変位に伴う Edge の変化 | 32 |
| 4.2.2 | C1D、C2U の変位に伴う Edge の変化 | 34 |
| 4.2.3 | C2D の変位に伴う Edge の変化 | 36 |
| 4.2.4 | コリメータ照準の変位による Yield の変化 | 38 |
| 4.3 | コリメータ・アラインの手順 | 40 |
| 4.3.1 | ビーム Edge、ビーム Yield の定義 | 40 |
| 4.3.2 | コリメータ角合わせの手順 | 41 |
| 4.3.3 | コリメータ照準の確認 | 42 |
| 4.3.4 | Fine tune | 43 |
| 4.3.5 | ビーム位置の修正 | 45 |
| 5 | ビームプロファイルの測定とコリメータスキャン | 46 |
| 5.1 | ビームプロファイルモニターのインストールと性能チェック | 46 |
| 5.1.1 | セットアップ | 46 |
| 5.1.2 | Calibration | 47 |
| 5.1.3 | PMT の HV の設定 | 48 |
| 5.1.4 | ダイナミックレンジ・線形性 | 49 |
| 5.1.5 | ビームプロファイル測定結果の再現性 | 50 |
| 5.2 | ビームプロファイルの測定とコリメータ位置の調節 | 51 |
| 5.2.1 | 前期セットアップ (X 方向) | 52 |
| 5.2.2 | 前期セットアップ (Y 方向) | 54 |
| 5.2.3 | 後期セットアップ | 55 |
| 5.2.4 | Y 方向プロファイルに見られる乱れ | 59 |
| 5.3 | シミュレーションとの比較 | 62 |
| 5.3.1 | モンテカルロ・シミュレーションとの比較 | 62 |
| 5.3.2 | 光源モデル・シミュレーションとの比較 | 62 |
| 5.4 | Time structure | 65 |
| 6 | まとめ | 68 |

1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験の背景

K^0 TO 実験は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設で行われる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験である。本章では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の背景について述べる。

1.1 CP の破れ

現在の素粒子物理学において、CP 対称性の破れは最も重要なテーマのひとつである。クォークセクターにおける CP の破れは 1964 年に Cronin、Fitch らにより、 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合で発見されて以来、K 中間子系、B 中間子系の崩壊で研究されてきた。CP の破れには、例えば $K^0 - \bar{K}^0$ 混合により引き起こされる「間接的 CP の破れ」がある。また、次式のように、弱い相互作用の固有状態が複素位相をもって各世代が混ざり合った状態であることから起こる「直接的 CP の破れ」がある。

$$\begin{pmatrix} b' \\ s' \\ d' \end{pmatrix} = V_{CKM} \begin{pmatrix} b \\ s \\ d \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$\simeq \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

標準理論では、弱い相互作用による荷電カレント反応のラグランジアンは次のように与えられる。

$$\mathcal{L}_{CC} = \frac{g}{\sqrt{2}} [\bar{u}_i V_{ij} d_j W^- + \bar{d}_i V_{ij}^* u_j W^+] \quad (1.4)$$

ここで、 $u_i = (u, c, t)$ 、 $d_i = (d, s, b)$ である。これに CP 変換を施すと

$$\mathcal{L}_{CC} \rightarrow \mathcal{L}_{CC}^{CP} = \frac{g}{\sqrt{2}} [\bar{d}_j V_{ij} u_i W^+ + \bar{u}_j V_{ij}^* d_j W^-] \quad (1.5)$$

となり、 $V_{ij} \neq V_{ij}^*$ のとき CP の破れは起こる。式 1.3 の場合、複素パラメータ η が CP の破れの大きさを表すことになる。

1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の物理

さまざまな実験により CKM 行列 V_{CKM} のパラメータが求められ、互いに矛盾しない結果を得ているが、現在のような物質優勢の宇宙を説明するためには標準理論の範囲での CP の破れだけでは説明できない。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定は、標準理論を越える物理の探索の手法として有力である。

図 1.1 は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊過程のファインマン・ダイアグラムである。ダイアグラム中のループは t クォークの寄与が支配的となり、崩壊振幅は

$$\mathcal{A}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td} \propto 2i\eta \quad (1.6)$$

となり、崩壊分岐比は η^2 に比例する。さらに、この崩壊モードは、すでに測定されている $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ 崩壊からアイソスピン対称の関係によってハドロン行列要素が正確に求められる。そのため崩壊分岐比を高い精度で計算することができる。標準理論で予言される崩壊分岐比は $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$ [3] である。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定によって直接的 CP の破れを小さい不定性で測定でき、標準理論の精密検証が可能である。また、図 1.1 のループ部分に未知粒子が関与することで崩壊分岐比は変わるため、標準理論を越えた新しい物理に対しての感度も持っている [8]。

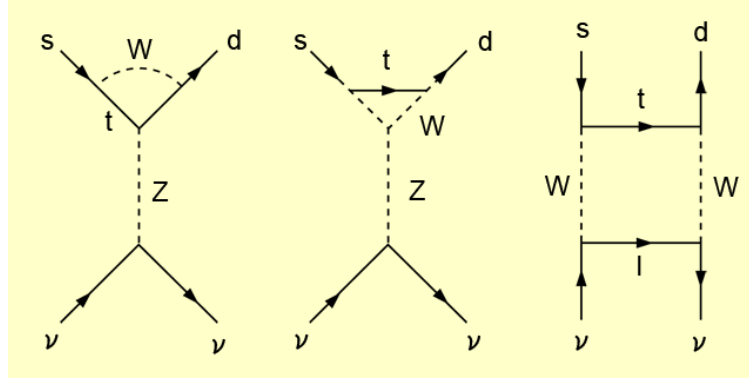


図 1.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のファインマン・ダイアグラム。

1.3 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験の歴史

これまでに $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索は、いくつかの実験で試みられているが、標準理論で予言されている崩壊分岐比は $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$ と大変小さい。また、始状態・終状態ともに中性粒子しか関与しないため実験は困難である。そのため、これまでにこの崩壊が観測された例はなく、崩壊分岐比の上限が与えられているだけである。

初めて上限値が与えられたのは Littenberg による

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 7.6 \times 10^{-3} \quad (90\% C.L.)$$

である。終状態の π^0 の同定には 2 つの試みがなされた。一方は $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ であり、他方は $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ である。前者の利点は e^+ と e^- の飛跡から π^0 の崩壊点を再構成できる点であり、 $e^+ e^- \gamma$ の不変質量が m_{π^0} と一致することを要求する。しかし、 $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ は分岐比が $\sim 1\%$ と acceptance は小さくなる。後者は分岐比が $\sim 1\%$ であり、acceptance を大きくとれるが力学的カットの制約は弱くなる。

米国フェルミ国立加速器研究所 (Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL) で行われた KTeV 実験では、 $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ と $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ の 2 通りの手法が試みられた。 $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ を用いた手法により与えられた崩壊分岐比の上限値は

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 1.6 \times 10^{-6} \quad (90\% C.L.)$$

である [9]。 $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ を用いた手法では

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 5.9 \times 10^{-7} \quad (90\% C.L.)$$

の上限値が与えられた [10]。

初めて $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索の特化した実験は日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の E391a 実験で行われた。この実験は K^0 TO 実験のパイロット実験としての役割もあり、基本的な実験方法は同じである。E391a 実験は RUN-1、RUN-2、そして RUN-3 の 3 期にわたるデータ取得がされた。RUN-1 での一部のデータを用いて最初に出された結果は

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.1 \times 10^{-7} \quad (90\%C.L.)$$

の上限值である [11]。RUN-2 のデータを使って出された結果は

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 6.8 \times 10^{-8} \quad (90\%C.L.)$$

であり [12]、RUN-2 と RUN-3 のデータを使って出されている現在の世界記録が

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8} \quad (90\%C.L.)$$

という上限値である [4]。

K^0 TO 実験では分岐比の上限値を更新し、さらには標準理論の予言する 2.5×10^{-11} の感度に到達し、世界で初めて $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を観測する計画である。

2 K^0 TO 実験

K^0 TO 実験は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設で行われる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験である。世界最大強度での運転が予定されている陽子シンクロトロンによって生成される多量の K_L を用いて、世界初の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の観測を目指し準備が進められている。本章では、 K^0 TO 実験の実験原理や実験手法、実験を行うための検出器および K_L ビームを供給するためのビームラインについて述べる。

2.1 実験原理

検出器の模式図を図 2.1 に示す。 K^0 TO 実験では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定を、 π^0 が崩壊してできる 2 つの γ の検出 ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊分岐比は 98.8%) によって行う。ニュートリノは物質とほとんど相互作用しないことから、 2γ 以外に粒子が観測されないことを条件とする。 π^0 からの 2 つの γ の位置とエネルギーを測定するための CsI 電磁カロリメータがメインの検出器である。また、 π^0 からの 2γ 以外に検出可能な粒子が生成していないことを確認するために K_L 崩壊領域全体を覆った veto 検出器群から成る。

CsI カロリメータで測定された 2 つの γ を用い、 K_L が入射ビーム軸上で崩壊すると仮定することで、 π^0 の崩壊位置と運動量が求まる。 π^0 の平均寿命は $\sim 10^{-16}$ 秒であることから π^0 の崩壊点を K_L の崩壊点と考える。CsI カロリメータに入射した γ の位置・エネルギーに対する制約、再構成された崩壊位置および π^0 に対する運動学的カットなどによりイベントの選別を行い、シグナル事象を同定する。

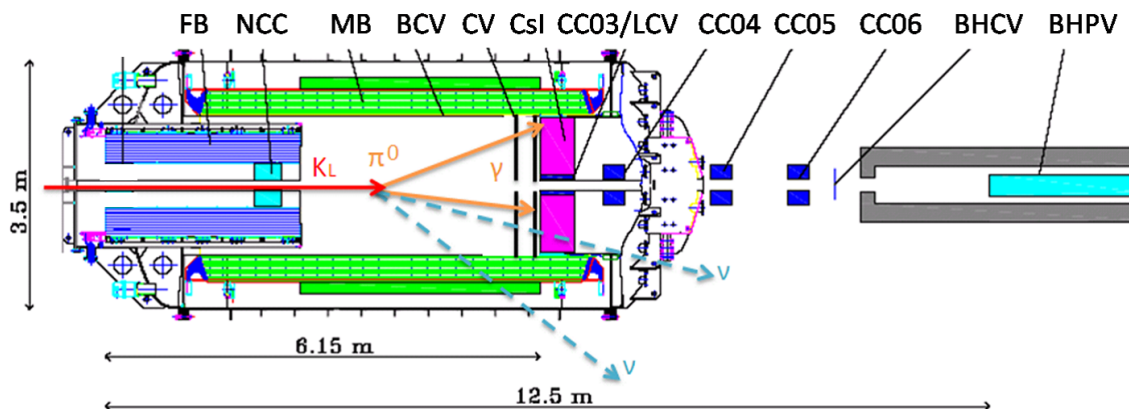


図 2.1 K^0 TO 実験の検出器模式図。

危惧されるバックグラウンドにハロー中性子による π^0 や η の生成がある。ハロー中性子とは K_L ビームに付随してビーム軸から広がって出てくる中性子であり、これがビーム軸付近の検出器と相互作用して π^0 や η を生成する。これらの粒子は 2 つの γ に崩壊するためシグナルと誤ってしまう。 K^0 TO 実験のパイロット実験であった KEK PS での E391a 実験ではハロー中性子によるものが最大のバックグラウンドとなった [4]。この経験から K^0 TO 実験ではハロー中性子の少ないビームラインのデザイン [6] や、このバックグラウンドを考慮した検出器のアップグレードが行われている。

2.2 検出器

K^OTO 実験の検出器は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊によってできた π^0 からの 2 つの γ を測定するための CsI 電磁カロリメータと、 π^0 以外に検出可能な粒子が生成していないことを確認するための veto 検出器群からなる。veto 検出器群は、その役割によって次の 4 つに大別される。

- π^0 以外に生成した余剰粒子を検出するため崩壊領域を囲む「Barrel Veto 検出器」
- CsI カロリメータに入射する荷電粒子を検出する「Charged Veto 検出器」
- ビーム軸に沿って検出器外へ出る粒子を検出するためビーム軸付近に設置された「Collar Counters」
- ビームホールを抜けて検出器外へ出る粒子を検出するためビーム軸上に設置された「Beam Hole Veto 検出器」

以下、CsI カロリメータとこれらの veto 検出器群について述べる。

2.2.1 CsI カロリメータ

π^0 からの 2 つの γ の測定は、純 CsI 結晶で構成される電磁カロリメータによって行われる。このカロリメータによって 2 γ のそれぞれのエネルギーとヒットした位置を測定する。

CsI 結晶の大きさは 2.5cm×2.5cm のものと 5.0cm×5.0cm の大小 2 種類のもが使用され、図 2.2 のように中心部に 2.5cm×2.5cm のものが 2240 個、外側に 5.0cm×5.0cm のものが 476 個が用いられる。結晶の長さは大小ともに 50cm である。中央にはビームを通すためのビームホールが開けられており、内側に CsI 結晶を支えるための構造体や別の veto 検出器 (CC03/LCV) が設置されることにより、最終的なビームホールの大きさは 14.9cm×14.9cm となる。また、外縁部にも鉛/プラスチックシンチレータによるカロリメータが設置され、CsI カロリメータ全体として直径 1900mm の円筒形になる。検出器内は、ビーム中に含まれる中性子と検出器内の残留ガスとの相互作用を防ぐために高真空に保たれる。そのため、発熱を抑えた低消費電力型の PMT ベース [14] が使用される。

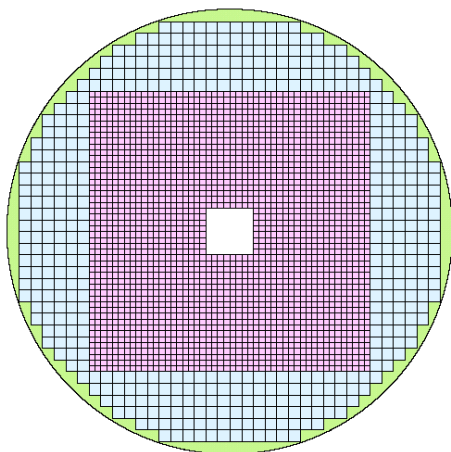


図 2.2 純 CsI 結晶などで構成される電磁カロリメータ断面図。

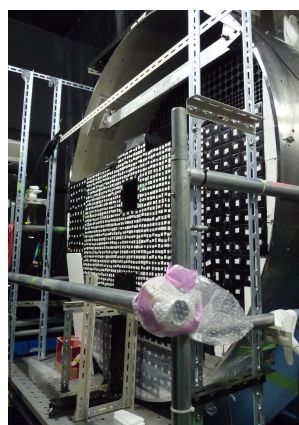


図 2.3 建設中の CsI カロリメータ。

2.2.2 Barrel Veto 検出器

Barrel Veto 検出器は K_L 崩壊で生じた余剰の粒子を検出するため崩壊領域を覆う検出器群で、崩壊領域上流部を覆う Front Barrel (FB) と崩壊領域を覆う Main Barrel (MB) および MB の内層に設置される Barrel Charged Veto からなる。FB、MB は鉛/プラスチックシンチレータ積層のサンプリングカロリメータであり、波長変換ファイバーを介して PMT で読み出し、余剰 γ を veto する。BCV は 2 層のシンチレータであり、荷電粒子の veto を行う。

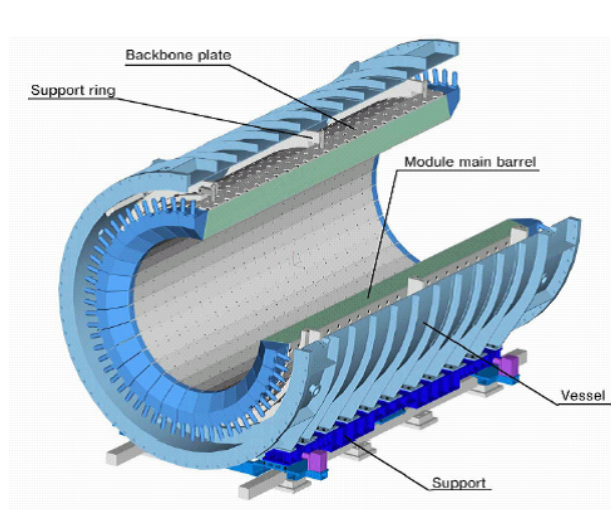


図 2.4 Main Barrel カット図。

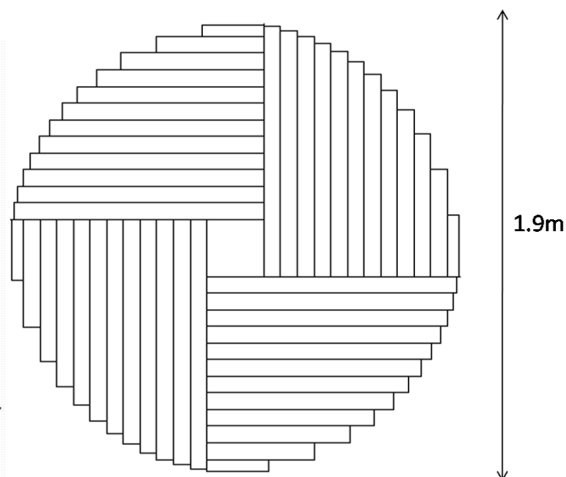


図 2.5 Charged Veto(CV) をビーム軸方向から見た図。CsI カロリメータの前面に設置される。

2.2.3 Charged Veto 検出器

Charged Veto 検出器 [15] は CsI カロリメータに入射する荷電粒子を検出するため CsI カロリメータ上流面に 2 層設置される。7cm 幅、3mm 厚のプラスチックシンチレータを図 2.5 のように配置することでプレーンが構成される。プラスチックシンチレータには波長変換ファイバーが埋め込まれ Multi Pixel Photon Counter (MPPC) で読みだされる。

2.2.4 Collar Counters

Collar Counters は軸に沿って検出器外へ出る粒子を検出するためにビーム軸付近に設置される検出器群である。FB 内側に設置される Neutron Collar Counter (NCC) [16]、CsI カロリメータ中心部に設置される CC03、およびその内層に設置される Liner Charged Veto (LCV) および CsI カロリメータ下流に設置される CC04~CC06 の総称である。NCC、CC03~CC04 は純 CsI 結晶で構成され、LCV は 3mm 厚プラスチックシンチレータからなる。いずれも PMT での読み出しとなるが、NCC と LCV は波長変換ファイバーを介しての読み出しとなる。

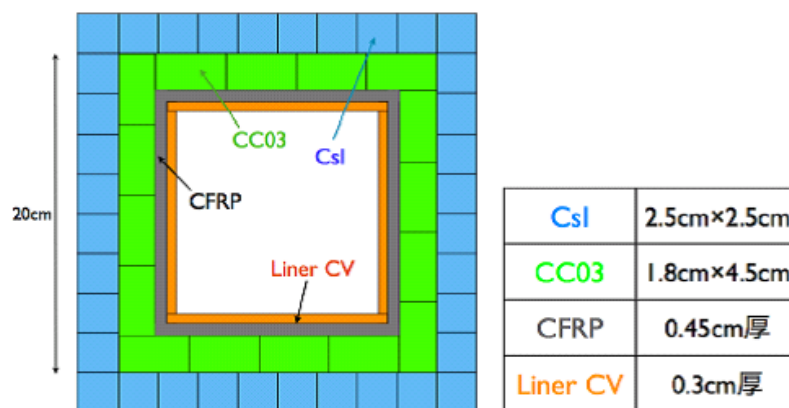


図 2.6 CC03、LCV (ビーム軸方向から見た図)。

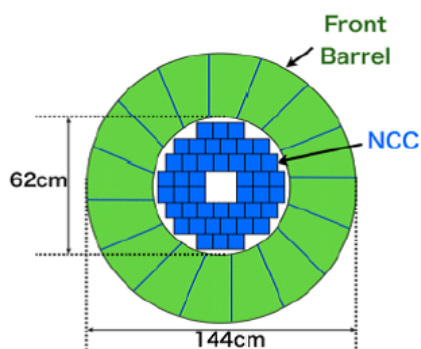


図 2.7 NCC (ビーム軸方向から見た図)。

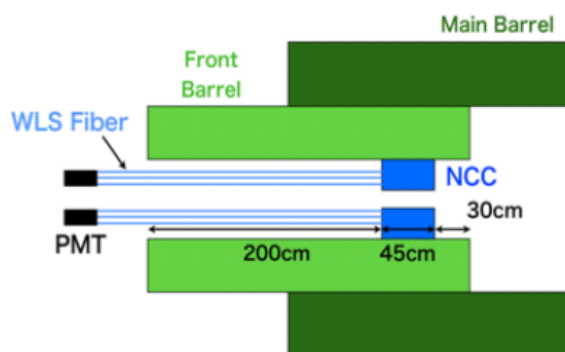


図 2.8 NCC (横方向から見た図)。

2.2.5 Beam Hole Veto

Beam Hole Veto 検出器はビームホールを抜けて検出器外へ出る粒子を検出するための検出器群である。これらの検出器はビーム軸上に設置されるため高いレート耐性が要求される。Beam Hole Veto 検出器には、ビームホールを抜けてくる荷電粒子を検出する Beam Hole Charged Veto(BHCV)[17] とビームホールを抜ける γ を検出する Beam Hole Photon Veto(BHPV)[18] が設置される。これらはともに検出器群の最下流部に置かれる。BHCV には中性子と γ に対して不感であることが要求され、2.5cm 幅、3mm 厚の板状のプラスチックシンチレータを並べて構成した検出器、またはガスシンチレーション比例計数管が使用される。BHPV には中性子に対して不感であることが要求され、鉛のコンバータとエアロジェルを用いたチェレンコフ光を利用した検出器が用いられる。読み出しにはともに PMT が用いられる。

2.3 イベントの再構成と選別

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象と判断するために、

- CsI カロリーメータに 2 つのみのクラスターの Energy Deposit が確認され、この 2 クラスターのエネルギーや位置などに対するいくつかの条件を満足し、かつ veto 検出器群に他の観測可能な粒子が検出されていないこと。
- および、CsI カロリーメータで測定された 2γ から再構成された π^0 の崩壊位置、運動量がある条件を満足すること。

といった選別を行う。 π^0 再構成の際には、入射 K_L はビーム軸上で崩壊するという条件を用いる。このような入射 K_L に対する条件を満たすために細く絞った K_L ビームとしている。

以下では、 2γ から π^0 の崩壊位置と運動量を再構成する方法と、それらにかかるカットについて述べる。

2.3.1 π^0 再構成の手法

π^0 の崩壊はビーム軸上で起こると仮定する。このとき図 2.9 のように崩壊点と 2 つの γ の入射位置を結ぶ線の長さを r_1 、 r_2 とし、これらの 2 線のなす角を θ とする。また、ビーム軸と 2 つの γ の入射位置を結ぶ線のなす角を ϕ 、2 つの入射位置の距離を r_{12} とする。

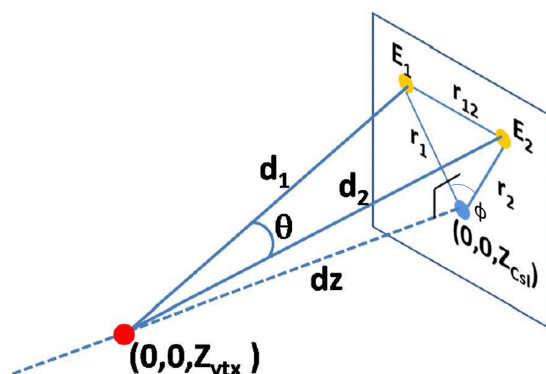


図 2.9 π^0 再構成の際に用いる各パラメータ。

さらに、入射した γ のエネルギーを E_1 、 E_2 とし、 π^0 の不変質量を M_{π^0} とすると、エネルギー・運動量保存則と幾何学的関係から

$$\cos \theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1 E_2} \quad (2.1)$$

を得て、 Z_{vtx} を求めることができる。従って、2 つの γ のエネルギーと入射位置から π^0 の崩壊点が求まり、崩壊点から 2 つの γ の運動量が求められる。また、 π^0 の運動量ベクトルが求まり、 π^0 の横方向運動量

$$P_t = \sqrt{(P_x^{\pi^0})^2 + (P_y^{\pi^0})^2} \quad (2.2)$$

が決定する。

2.3.2 再構成された π^0 へのカット

再構成された π^0 の崩壊点と横方向運動量に対してカットがかけられる。

前者は、NCC や CV などのビーム軸付近の検出器とハロー中性子の反応により生成した π^0 を排除するためであり、 $3000\text{mm} < V_{vtx} < 5000\text{mm}$ という条件が課せられる。

後者は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊において生成される π^0 は P_t の値を大きくもつ傾向にあるという特性を利用したものであり、 $130\text{GeV}/c < P_t < 250\text{GeV}/c$ という条件が課せられる。この特性は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊において関与する粒子が V-A 型相互作用で結合していること、および角運動量保存則からもたらされる。このような特性により $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ をはじめとするいくつかのバックグラウンド事象を排除できる。

図 2.10 は 3 年間^{*1}のデータ取得で見込まれるシグナル事象のうち、 π^0 の崩壊位置 V_{vtx} と横方向運動量 P_t に対するカット以外のカットを適用したものの分布を表している。横軸が再構成された π^0 の崩壊位置 V_{vtx} 、縦軸が P_t であり線で囲われた領域がこれらのパラメータに対するカットの制限を表す。

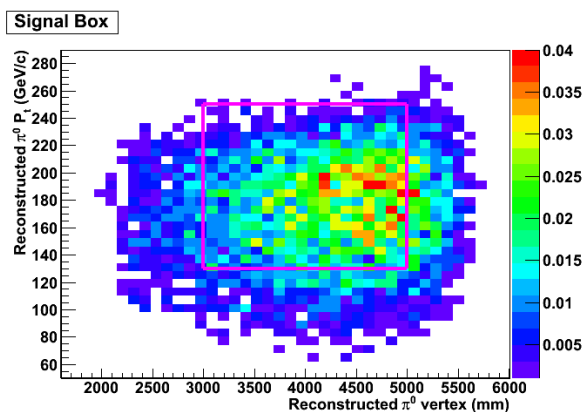


図 2.10 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ シグナル領域。

2.4 ビームライン

K^OTO 実験で用いる K_L ビームは、陽子シンクロトロンから取りだされる 1 次陽子ビームをハドロン実験施設に設置された標的に照射し、生成する 2 次粒子をコリメータで細く絞り、余剰粒子を排除することで得る。図 2.11 にその概略図を示す。標的で生成する 2 次粒子にはさまざまなものが含まれる。2 つのコリメータの間に Sweeping magnet と呼ばれる電磁石が設置してあり、荷電粒子はここで掃き出される。また、標的から 2nd コリメータ下流端のビーム取り出し口まで、およそ 20m と長いため、 Λ^0 、 η 、 K_S などの中性短寿命の粒子は途中で崩壊する。残る、 K_L 、中性子、 γ のうち 1st コリメータの上流に設置された γ absorber と呼ばれる鉛ブロックで γ を減らしている。

*1 J-PARC Full intensity で 3×10^7 秒

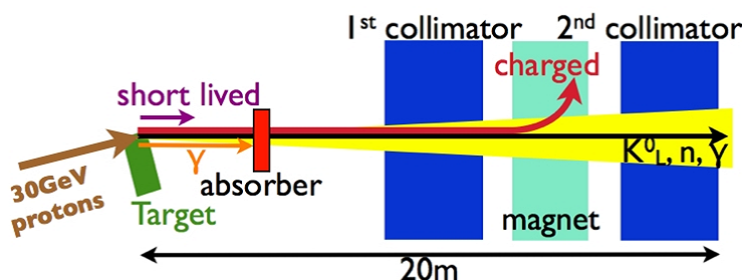


図 2.11 K_L ビームラインの概略図。1 次陽子ビーム軸に対して 16° 方向に位置する。

このビームラインの特徴として次の点が挙げられる。

- ビームサイズを小さく絞ったビームである。

K_L ビームの取り出し立体角は 7.8μ str とビームサイズを小さくしている。これはビームサイズを小さくすることでビームを通すために検出器に開けるビームホールを小さくし、崩壊領域からこのビームホールを抜けて検出されずに出て行ってしまふ粒子を減らすためである。加えて、測定される 2 つの γ から π^0 の崩壊位置を再構成するために、 K_L はビーム軸上で崩壊する、という仮定を用いるが、この仮定を保証するためにも入射ビームが細く絞られているという条件は必要である。

- ビームハローの少ないビームである。

前述のようにハロー中性子によりバックグラウンド事象が発生し、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊測定の脅威となる。ハロー中性子はビームライン中の物質で中性子が散乱されることにより生じる。このためハロー中性子を少なくする努力が各コンポーネントの位置や形状になされている。

K⁰TO 実験のビームラインは 1 次陽子ビーム軸に対して 16° 方向に位置する。厚みのあるビーム標的を 16° のやや横方向から見るかたちになるので図 2.12 のように水平方向に広がったビーム標的の像となる。鉛直方向には 1 次陽子ビームの広がり程度の像になる。そのためコリメータ光学系は水平方向 (X 方向) と鉛直方向 (Y 方向) で独立なデザインとして考えられている。また、コリメータ内壁での散乱によりハロー中性子が増えるのを防ぐためにコリメータの下流側は口が広がったテーパ状のデザインとされている。さらにコリメータ上流端での散乱粒子を取りこまないために、コリメータ上流側も口が広がったデザインとなっている。

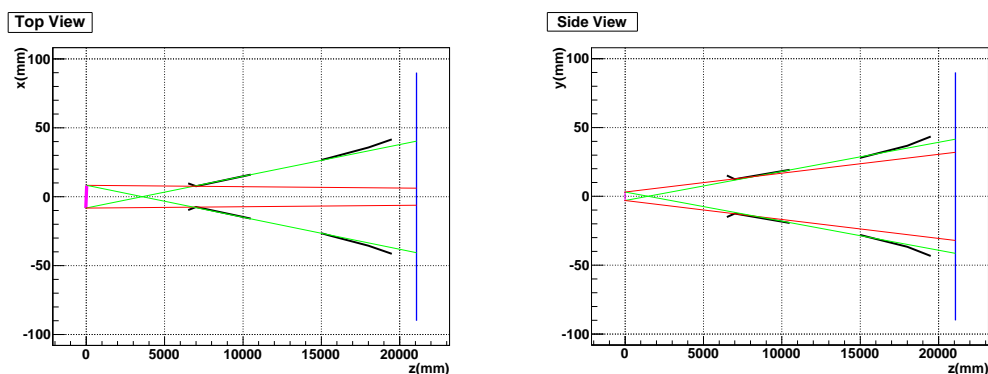


図 2.12 ビームラインコリメータの模型。左図の X 方向の場合では厚みのあるビーム標的を 16° の方向から見るために横に広がった標的の像となる。右図の Y 方向では 1 次陽子ビーム軸の広がりの分だけ広がった像となる。図中の赤線と緑線の意味は 4.1 で述べる。

2.4.1 加速器

J-PARC とは茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設のことである。リニアック（線形加速器）RCS（3GeV シンクロトロン）MR（50GeV シンクロトロン）の3段の加速器からなる。これらの加速器によって陽子を30GeVまで加速し、 K^0 TO 実験を行うハドロン実験施設に導く。ハドロン実験施設に導かれた加速陽子は後述するビーム標的に照射され、ビーム標的の1次陽子ビーム軸に対して 16° 方向に K^0 TO 実験の K_L ビームラインは位置している。

最終段のMRで加速された陽子はおよそ2s（将来的には0.7s）の時間をかけて連続的に取り出される。このような連続的な陽子の取り出しをスピル、またはショットと呼ぶ。1スピルで取りだされる陽子の数は 2×10^{14} 個が予定されている。ただし、2010年1月現在までのビーム強度はこれの1%程度に抑えられており、陽子数はおよそ 2×10^{12} 個となっている。スピルの周期は6s（将来的には3.3s）であり、ビームが取り出されないオフスピル時間は4sとなる。

2.4.2 T1 target

ハドロン実験施設に導かれた1次ビームはT1 targetと呼ばれる標的に照射される。T1 targetは図2.13に示すように、厚さの異なる5枚のニッケル製のディスクからなる。それぞれのディスクの厚さは21.7mm, 11.2mm, 8.3mm, 6.8mm, 5.9mmであり、その和は53.9mmである。T1 targetは高強度の陽子ビームにさらされるため底部に冷却水が張られており、ディスクが回転することで冷やされる。このT1 targetはハドロン実験施設共通のものとなっており、我々の実験の都合だけで1次陽子ビームのビームスポットを動かしたりすることはできない。そのため、後述する可動式のコリメータの位置を調節することで K_L ビームの方向を検出器に合わせる。

ただし、J-PARCのビーム強度が1%程度に抑えられている間は、このT1 targetではなく冷却水を伴わない小型のニッケル標的（断面積 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ ）あるいはK中間子の収量の点で有利な白金製のロッド（ $6\text{mm} \phi$ 、 6cm 長）が標的として使用されている。

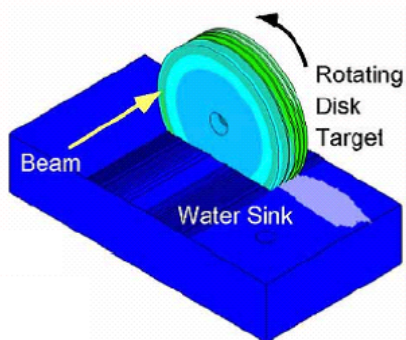


図 2.13 T1 標的。



図 2.14 γ absorber。

2.4.3 γ absorber

標的からの2次粒子で得られるビーム中には多量の γ が含まれる。この多量の γ を減らす目的のために γ absorber (Photon absorber)と呼ばれる鉛ブロックがビームライン中に設置されている。 γ absorberは K_L

や中性子を散乱してしまう。これはビームラインのコンセプトである、細く絞ったビームとハローの少ないビームであることを妨げる要因となる。そのため γ absorber はコリメータ・システムの上流側に離して置かれる必要がある。設置スペースなどの兼ね合いから、標的から 3.7m の地点に設置されている。鉛の厚さは 70mm、断面の大きさは 34mm×36mm のものが設置されている。これは可動ステージに搭載されており、90mm 厚の鉛も合わせて搭載されている（図 2.14）。これはビーム中の γ が予想以上に多く検出器が正常に動作しなかった場合に使用したり、あるいは γ スペクトルを調べるなどの目的で使用される。また鉛がビーム中から完全に外れている状態を作ることでもビームでターゲットイメージをはっきり見たい時などにこの状態を使用する。

2.4.4 コリメータ

コリメータは 2 段になっており、上流から 1st コリメータ、2nd コリメータと呼ばれる。これらのコリメータが K_L ビームの形状を決めることになる。コリメータには長方形のビームホールが開けられており、光学系を X 方向（水平方向）と Y 方向（鉛直方向）で独立にデザインしている。従って K_L ビームの形状も X 方向と Y 方向で独立な四角形状となる。1st コリメータは上流端、2nd コリメータは上流端・下流端のそれぞれ 500mm はタングステン、その他の部分は鉄で作られており、長さはそれぞれ 4000mm、5000mm である。コリメータ内壁のラインは中性子の多重散乱により生じるハロー中性子が少なくなるよう下流側の口が広がったテーパ状のデザインがなされている。

表 2.1 コリメータ形状のパラメータ

| Z position | Description | Material | Aperture X/Y |
|------------|-----------------------------|----------|------------------|
| 650cm | 1st collimator upstream end | Tungsten | 19.4mm / 30.2mm |
| 700cm | End of Tungsten part | | 15.2mm / 25.0mm |
| 1050cm | Downstream end | Iron | 31.8mm / 38.6mm |
| 1500 cm | 2nd collimator upstream end | Tungsten | 53.2mm / 56.0mm |
| 1550cm | End of Tungsten part | | 56.2mm / 59.0mm |
| 1800cm | Taper changing point | Iron | 71.2 mm / 73.4mm |
| 1950cm | End of Iron part | Tungsten | 83.0mm / 86.8mm |
| 2000cm | Downstrem end | | 87.0mm / 91.2mm |

これらのコリメータはそれぞれが、図 2.15 のように放射線耐性の高いステッピングモーターが組み込まれた 2 台の可動ステージに乗せられ、これらのステージは X 方向、Y 方向に動かすことができる。可動点は上流から C1U、C1D、C2U、C2D と呼ばれる（図 2.16）。前述のように、これらの可動ステージによってコリ

メータ位置を調節することで K_L ビームの位置を調節する。また、2つのコリメータの位置関係が歪んでいた、ずれていたりと内壁での散乱によりハロー中性子が増加する原因となる。従って、2つのコリメータの位置を精度よく並べる努力が必要であり、 $\pm 1\text{mm}$ の精度で位置を合わせることが要求される。

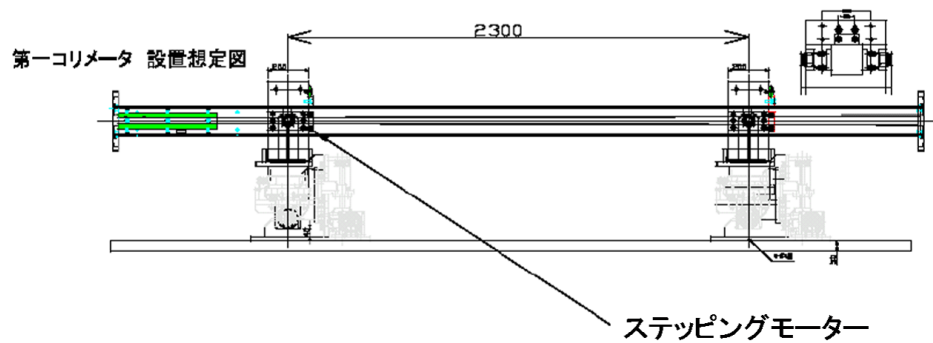


図 2.15 可動ステージに設置された 1st コリメータの図。コリメータの 2ヶ所に可動部分が設けられており、それぞれを X 方向、Y 方向に変位させることができる。

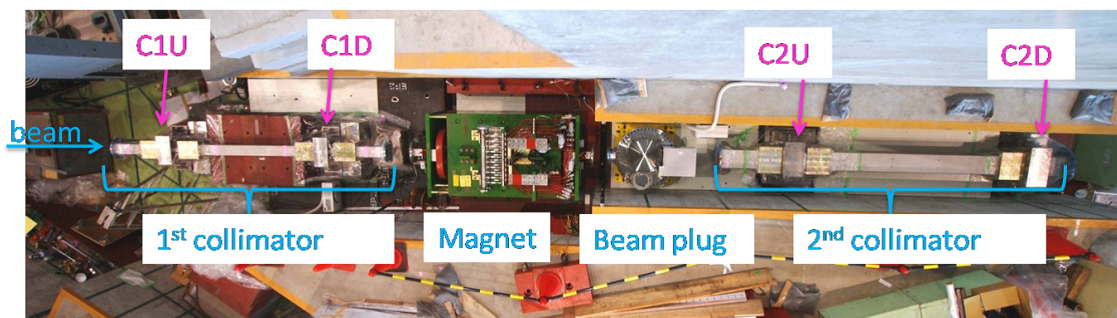


図 2.16 K_L ビームライン・コリメータの写真。左側がビーム標的、右側がビーム取り出し口となっている。

表 2.2 コリメータ可動点の T1 target からの距離

| Moving point | Z position |
|--------------|------------|
| C1U | 7350 mm |
| C1D | 9650 mm |
| C2U | 15925 mm |
| C2D | 19075 mm |

2.4.5 Sweeping magnet

1st コリメータと 2nd コリメータの間に電磁石が設置されており、ビームは 2T の磁場がかかった領域を通過する。これによってビーム中に含まれる荷電粒子を吐き出し、中性ビームを取り出す。

2.4.6 Beam plug

実験エリアへのアクセス時に K_L ビームを遮蔽するため、Sweeping magnet と 2nd collimator の間には Beam plug と呼ばれるタングステン製の回転式の弁が設置されている (図 2.17)。また、スライドによる開閉式のタングステン製のブロックが 1st コリメータ上流部に設置されたが、これは後に他の実験のビームライン建設の都合で 2nd コリメータ下流側に移動された。J-PARC MR のビーム強度を抑えて運転されている間はこれらの Beam plug により実験エリアへのアクセスが可能である。これらは低強度ビーム時の一時的な措置であり、今後はスライド開閉式のタングステン・ブロックは取り除かれ、T1 target に 1 次陽子ビームが照射されている場合はエリアにアクセスできなくなる。

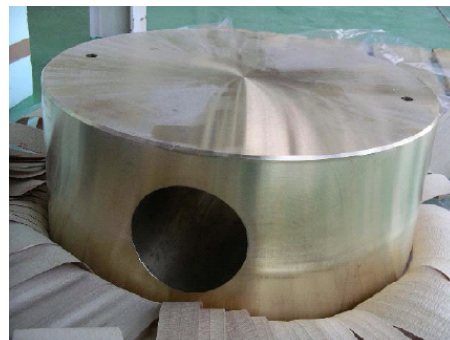
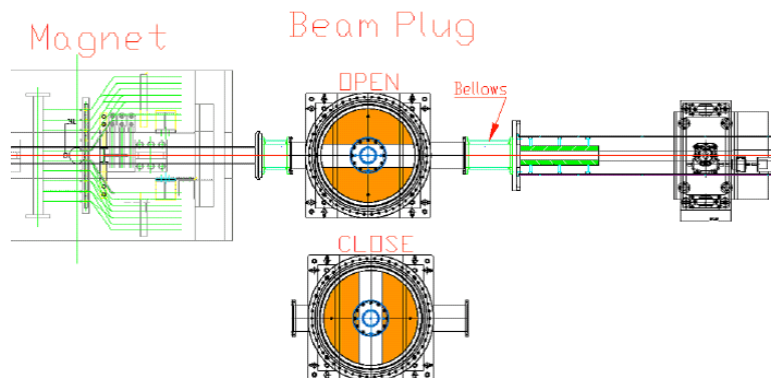


図 2.17 Beam plug。

2.4.7 ビームライン・シミュレーション

図 2.18、図 2.19 にビームライン・シミュレーションにより得られたビームプロファイルを示す。ともに T1 target から 21m 地点*2でのビームプロファイルであるが図 2.18 は 70mm 厚 γ absorber がビーム中に挿入されている場合、図 2.19 は γ absorber がビーム軸から外されている場合での結果である。シミュレーションで T1 target に打ち込んだ陽子の数は 70mm 厚 γ absorber の場合が 1.09×10^{13} 、 γ absorber なしの場合が 5.6×10^9 であり、21m 地点で得られた粒子数を J-PARC MR 最大強度の 1% の強度に相当する 2×10^{12} 個に換算した値にしている。また、10MeV 以上のエネルギーをもつ粒子をカウントしている。

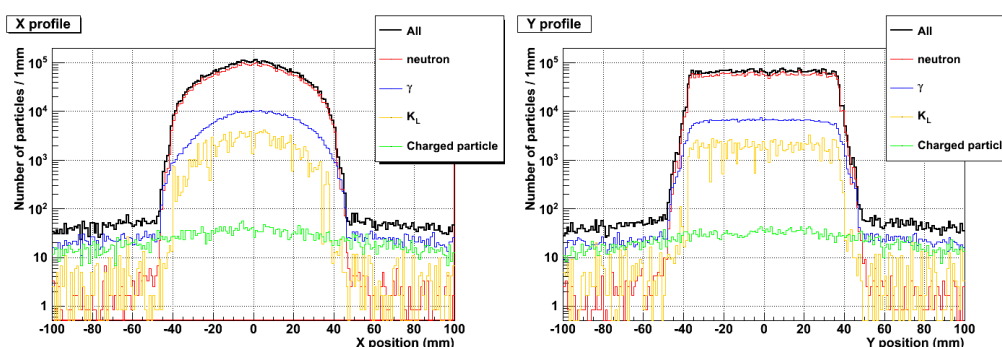


図 2.18 T1 target から 21m 地点でのビームプロファイル (γ absorber 70mm)。縦軸は T1 target に 2×10^{12} 個の陽子を入射した場合に K_L ビームラインで取りだされる粒子数で表示しており、黒が全粒子、赤が中性子、青が γ 、黄色が K_L 、緑が荷電粒子を表す。

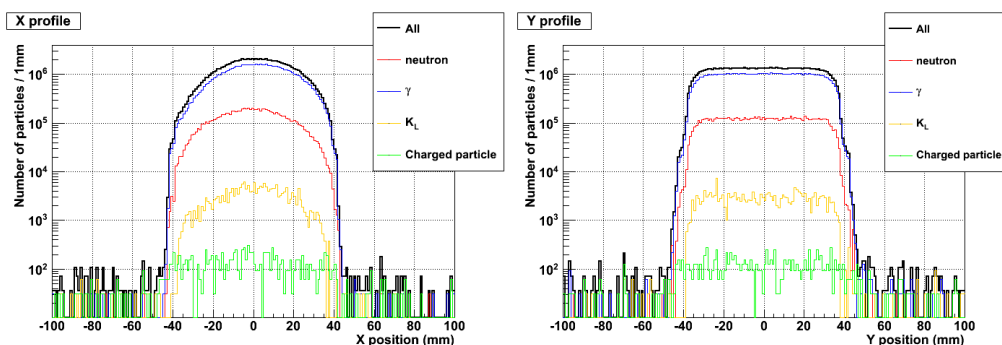


図 2.19 T1 target から 21m 地点でのビームプロファイル (γ absorber なし)。各色の線は上図と同様。 γ absorber なしのビームでは γ が主成分となる。

K^OTO 実験での本測定時には、ビーム中に γ absorber を入れた図 2.18 の状態のビームを使用するが、本研究のテーマであるコリメータ・アラインのためのビーム・プロファイル測定時には後述する光源モデルを反映し、ビーム標的の像をより鮮明に見るために γ absorber を使用しない図 2.19 のようなビームを使用する。

T1 target に入射する 1 次陽子ビームのビーム軸からの広がりには 10mm 程度あるが、厚みのある T1 target を、1 次陽子ビームに対して 16° の方向に取り出すため X 方向に広がったターゲット・イメージの光学系となる (図 2.12)。そのため X 方向と Y 方向でのビームプロファイルの形状は異なる。荷電粒子が含まれるのは、Sweeping magnet より下流で K_L の崩壊によって生じたものが含まれるためである。

なお、コリメータの位置を調節する際は、ターゲット・イメージを直接とらえるために γ absorber はビームから外した状態で測定を行う。以下、特にことわりがなければ γ absorber はビームから外した状態であることを前提とする。

*2 ビーム標的から 21m の地点は K_L ビーム取り出し口であり、ビームプロファイルモニターはこの地点に設置される。

3 ビームプロファイルモニターの開発

本章では、 K^0 TO 実験でのビームライン・コリメータの位置を調節する際において、 K_L ビームの形状・位置を診断するために必要となるビームプロファイルモニターの開発について述べる。

3.1 ビームプロファイルモニターの役割

2.4 で述べたように、 K^0 TO 実験では、細く、かつハロー中性子の少ない K_L ビームが必要である。これを実現するために、ハロー中性子を抑えたビームラインがデザイン・建設されたが、このビームラインが真価を発揮するためにはビームラインの構成要素であるコリメータがデザイン通りの位置に正しく設置される必要があり、1mm の精度で位置を合わせることを要求される。しかし、コリメータがインストールされた後にシールドのための重い鉄やコンクリートがビームラインの周りに敷設され、沈み込みや傾きの発生によりコリメータの位置関係は乱れる可能性がある。従って、 K_L ビームそのものを直接測定してやってコリメータの位置を調整することが必要である。我々はビームプロファイルに見られるビームの Edge の動きを調べることでコリメータの位置合わせを行う。また、ハドロン実験施設の T1 target は動かず、1 次陽子ビームのスポットも動かすことはないため、 K_L ビームの位置調整はビームラインのコリメータの位置を調節することで行う。以上のことから、コリメータ位置の変更に対してビームの状況がどう変わったかを診断しフィードバックをかけるため、短時間で測定し、即座に結果を表示することがビームプロファイルモニターの役割となる。

3.2 デザイン

上記のような役割を果たすビームプロファイルモニターとして、図 3.1 のようなシンチレーティングファイバー、Multi-Anode PhotoMultiplier Tube(MAPMT)、USB インターフェース付き ADC ユニットなどを用いたものをデザインした。1.5mm 角、45cm 長のシンチレーティングファイバーを 120 本並べ板状とし、2 個の MAPMT を用いて読み出す。これを 2 面用いてファイバー軸に対して直交させ、ビームの X 方向プロファイル、Y 方向プロファイルを測定する。以下、このようなデザインとした理由と各部の詳細を述べる。

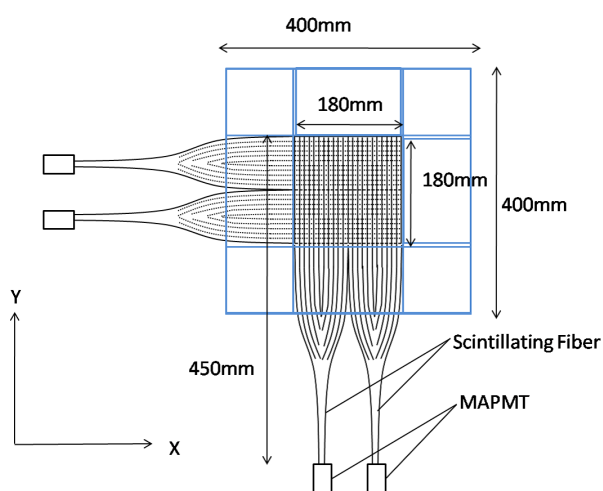


図 3.1 ビームプロファイルモニター略図。

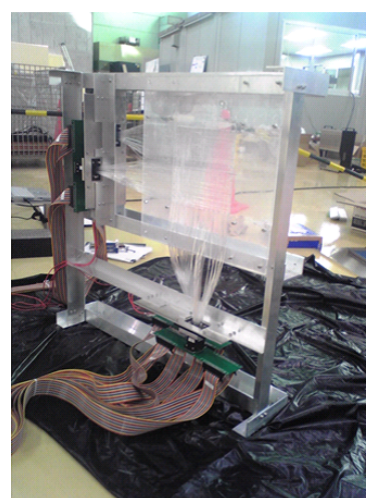


図 3.2 製作したビームプロファイルモニター。

3.2.1 基本デザイン

ビームプロファイルモニターは短時間でビームプロファイルを測定することが求められる。ビーム断面を検出器が移動しながらスキャンする方法では測定に時間がかかるため、狭い検出領域をもつ検出器を集合させ、それらでビーム領域全体を一度に測定する多チャンネル読み出しの方法を採用することにした。

2.4.4 で述べたようにビームライン・コリメータの光学設計は X 方向と Y 方向で独立に考えられるため、ビームプロファイル測定においても、2次元像ではなく X 方向、Y 方向に射影したものが得られれば十分である。このことから、細長いストリップ状の検出器を並列に配置した検出器で X 方向と Y 方向を独立に読み出すデザインとし、必要な空間分解能や扱いやすさの観点からシンチレーティングファイバーを使用することにした。飛来する粒子との相互作用（主に γ による電子・陽電子対生成とコンプトン散乱）に伴うシンチレーション光を多チャンネルの読み出しに適した MAPMT で検出する。

検出器の多チャンネル化に伴いデータ収集のための装置も大規模なものとなりコストが膨らんでしまう。そこで、チャンネルあたりのコストを低く抑えられる安価な ADC ユニットを用いることにした。使用する ADC ユニットはあるサンプリングレートで入力電圧値をデジタル値に変換するもので、多チャンネルの入力が可能、かつ小型である。また、USB インタフェース機能を備えているため、PC へのデータ転送も容易である。この ADC ユニットのサンプリングレートはあまり高くないため検出器からの信号を数百 μs ~ 数百 ms まで延す波形整形が必要である。この場合、次に来る粒子からの信号による pile up が起こり、飛来した粒子のタイミングや個々のパルスハイトの情報は失われてしまうが、ビームプロファイルを XY 方向で独立に測定するため、これらの情報は必ずしも必要ではなく、ビームスピル中の電圧の積分値、すなわち電荷量が求めればよい。PMT からの信号を RC 積分回路で図 3.3 のように引き延ばして pile up をさせてしまうことで、低いサンプリングレートでも電圧情報を読み取ることができる。この情報から各チャンネル出力の電荷量を割り出し、ビームプロファイルを構成する。この ADC ユニットを使用することで、コストを低く抑え、コンパクトな独立した読み出しシステムとすることができる。

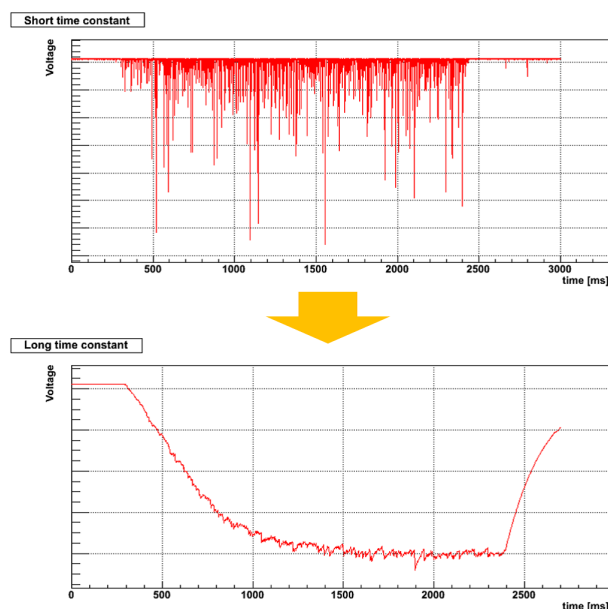


図 3.3 上段の図は信号の時定数を $200\mu\text{s}$ としたときの K_L ビーム様子。下段の図は時定数 220ms としたときの様子。パルスは pile up をさせてしまい、低いサンプリングレートでも読み取れるようにする。

3.2.2 ファイバー・ホドスコープ

ファイバー・ホドスコープの空間分解能、すなわちシンチレーティングファイバーの幅については、クラレ社製 SCSF-78SJ の 1.5mm 角のファイバーが手元にあったため、これが使用できるかを調べた。3.4 で述べるディテクター・シミュレーションの結果、1.5mm の分解能で Y 方向プロファイルの Edge の急激な立ち上がりが見えやすいためこのファイバーの使用を決定した。また、ビームプロファイルモニターを設置する、T1 target から 21m の地点^{*3}でのビームサイズ（およそ 90mm×90mm）を覆うため、180mm×180mm という検出領域を決定した。このことから、使用するファイバーは 1 面あたり 120 本、合計 240 本となる。このファイバーの伝搬光ピーク波長は 450nm であり、後述する MAPMT との相性もよい。

表 3.1 ファイバー・ホドスコープの仕様

| Parameter | Value | Remarks |
|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Number of planes | 2 | Horizontal and Vertical plane |
| Number of scintillating fibers | 120/plane | |
| Fiber size | 450 × 1.5 × 1.5 mm ³ | Square cross section |
| Fiber pitch | 1.5 mm | |
| Fiber materials | Single-clad scintillating fiber | Kuraray SCSF-78SJ |
| Emission wavelength peak | 450 nm | Blue |
| Decay time | 2.8 ns | |
| Attenuation length | 4.0 m | |

シンチレーションファイバーを並べた板状の構造を保持するために 1mm 厚のアクリル板にファイバーを貼り付け、MAPMT に接続する辺を除く 3 辺を別の 1.5mm 厚アクリル板で押さえる（図 3.4、図 3.5）。従ってファイバー・ホドスコープ全体の厚さは $(1\text{mm} + 1.5\text{mm}) \times 2 \text{面} = 5\text{mm}$ となる。Y 方向プロファイルの方がビーム Edge が鋭くなるため Y 方向測定用のファイバーを前面に配置することにした。

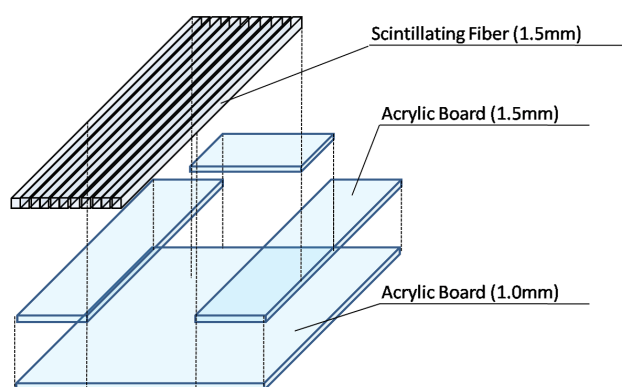


図 3.4 ファイバー・ホドスコープの構造。

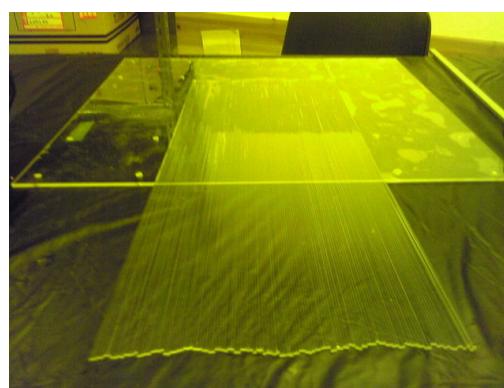


図 3.5 製作したファイバー・ホドスコープの 1 面。

製作したファイバー・ホドスコープは、デザインでは全ファイバーの幅は $1.5\text{mm} \times 120 \text{本} = 180\text{mm}$ である

*3 K_L ビーム取り出し口でビームプロファイルモニターが置かれる位置

が、実測したところ 1mm 程度の誤差があった。 K_L ビーム測定の際には、ビーム Edge の位置は検出器中心からおよそ 45mm の位置にくる。この製作誤差が、検出器の Edge 測定領域のファイバーに与える位置の誤差の寄与は $250\mu\text{m}$ 程度となるが、ファイバーピッチの 1.5mm に対して十分小さいため問題にはならない。

3.2.3 MAPMT

シンチレーティングファイバーからの光の検出は浜松ホトニクス社製 H7546 のパッケージを変更した H8804 を用いる。この MAPMT は 1 個あたり 64 チャンネルの多チャンネルの読み出しが可能であり、チャンネルあたりのコストを抑えることができ、小型 (30mm×30mm×45mm) であるためスペースを確保することも容易である。

Anode pixel は 8×8 の array となっており、ひとつの pixel のサイズは 2mm×2mm、隣の pixel とのマージンは 0.3mm である。これらの pixel にシンチレーティングファイバーの端面を光学接続させる。角の 4 つの pixel を除く 60 チャンネルを使用し、120 本のファイバーを 2 個の MAPMT で読み出す。光電面の量子効率は波長 420nm で最大 (20% 以上) となり、前述のシンチレーティングファイバーとの相性もよい。

表 3.2 64ch Multi-Anode PhotoMultiplier Tube H8804 の基本特性

| Parameter | Description/Value |
|-------------------------------|------------------------|
| Spectral response | 300 ~ 650 nm |
| Wavelength of maxmum response | 420 nm |
| Photocathode material | Bialkali |
| Window material | Borosillcate glass |
| Quantum efficiency | Typ. 21 % (at 390nm) |
| Anode size | 2mm × 2mm |
| Anode array | 8 × 8 |
| Dynode structure | Metal channel dynode |
| Number of dynode stage | 12 |
| Supply voltage | Max. -1000 V |
| Dark current per channel | Typ. 0.2 nA (max. 2nA) |
| Weight | Approx. 60 g |

この MAPMT の最大 Supply voltage は -1000V となっているが、高いレートでの入力に対して出力が飽和してしまうため -500V ~ -600V の低い gain でオペレートする。

ファイバーは両端面を鏡面に磨いた後、60 本ごとに MAPMT へ接続するための治具にまとめられ、MAPMT に固定されたホルダーに接続される (図 3.6、図 3.7)。これらの治具・ホルダーによりファイバー端面と PMT 光電面の各 pixel は 0.2mm の精度で位置合わせがなされる [13][19]。また、各ファイバーの端面が PMT 光電面で一致するように、各ファイバーは治具の固定位置からの距離に応じて長さに ~6mm の変化を持たせておく (図 3.5)。

PMT からの出力は専用の変換 board (図 3.8) によって 15 チャンネルごとに 34pin コネクタに分割され、それぞれが後述の RC 積分回路を通して各 ADC ユニットに送られる。

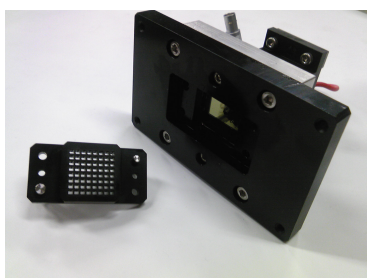


図 3.6 (左)ファイバーを束ねる治具と(右)治具を受けるホルダーに固定された MAPMT。

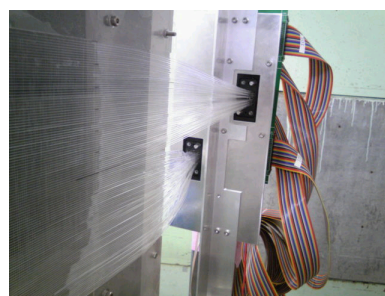


図 3.7 MAPMT に接続されたファイバー。

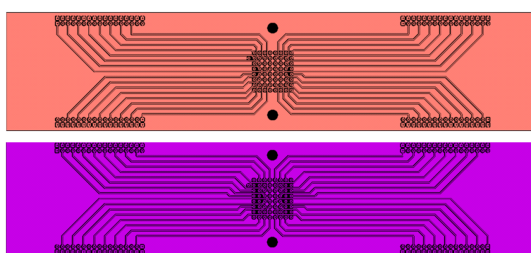


図 3.8 変換 board パターン (両面基板)。MAPMT からの出力を 15ch ごとに 4 つに分割し、34pin コネクタで積分回路に送る。

3.2.4 RC 積分回路

MAPMT の信号は図 3.9 の RC 積分回路を通して ADC ユニットに送られる。この回路の目的は PMT の信号を ADC のサンプリング間隔に適した時定数に引き延ばすことと信号の増幅である。

MAPMT の信号を引き延ばして ADC ユニットで読み取るにあたって、読み取った電圧情報から PMT の出力電荷を割り出す不定性を小さくするために ADC ユニットのサンプリング間隔に適した時定数 $\tau = RC$ を選択せねばならない。サンプリング間隔は後述する ADC ユニットの仕様から 1.5 ms となる。サンプリング間隔による不定性を 1% とするため、時定数 τ の値を 220 ms と設定した (図 3.10)。時定数を長くしすぎると、4s のオフスピル中に信号が下がり切らないため 220ms に留めている。また、電圧が大きい方が ADC での測定の不定性を小さくできるため、抵抗値 R を大きくして時定数 τ を稼ぎ、 $R=100M\Omega$ としている。MAPMT の gain を低く設定することからも R を大きく取りたいという要求がある。

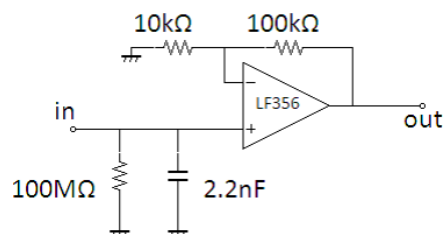


図 3.9 MAPMT 出力を受ける積分回路。PMT からの信号を 220ms の時定数に引き延ばす。

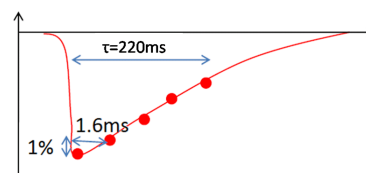


図 3.10 サンプリング間隔と測定の不定性。サンプリングのタイミングによる測定の不定性を 1% とするため時定数を 220ms と設定した。

表 3.3 LF356 の基礎特性

| Parameter | Value |
|-----------|-----------------|
| 入力段 | JFET |
| 入力バイアス電流 | 30 pA |
| 入力オフセット電流 | 3 pA |
| 入力インピーダンス | $10^{14}\Omega$ |
| 直流電圧利得 | 106 dB |
| スルーレート | 12V/ μ s |
| 帯域幅 | 5M Hz |

RC 回路で引き延ばされた信号はオペアンプで増幅される。これには次の 2 つの目的がある。

- 出力インピーダンスを小さくする。

ADC ユニットは内部にマルチプレクサーが内蔵されているが、このマルチプレクサーのスイッチング時にチャージ・インジェクションが起こる。チャージ・インジェクションはマルチプレクサーのスイッチに電荷が蓄えられたまま次のチャンネルに接続され、そのチャンネルに電荷が注入される現象である。ADC ユニットの入力端子が高いインピーダンスに接続されていると、放出される電荷が測定に影響を及ぼしてしまう。このためオペアンプを介すことで PMT の信号を電圧に変換している。

- PMT 信号を増幅することで PMT を低い gain で使う。

前述のように、PMT は高い gain で使用すると出力が飽和してしまうことがわかっている。このため飽和が起こらない低い gain でのオペレートが必要である。PMT での信号の増幅の制限を補うためにおよそ 10 倍増幅のアンプを挿入する。

オペアンプは、入力インピーダンスが PMT からの信号を受ける $100M\Omega$ よりも十分大きいものでなければならない。また、低ノイズであることやスルーレートが高いことなどからナショナル・セミコンダクタ社の LF356 を使用することにした。

また、後述する Time structure mode でビームプロファイルモニターを使用する際には、時定数を変更し $\tau = 200\mu$ s とする。このための RC パラメータの変更ができるように RC 素子はピンソケットにより基板に取り付けておき、取り換えが可能な状態にしておく。

3.2.5 ADC ユニット

RC 積分回路で引き延ばした信号の電圧情報の読み取りとデジタル化にはタートル工業社の TUSB-1612ADSM-2Z を使用する (図 3.11)。この ADC ユニットは電圧値を 12bit のデジタル値に変換するもので、そのサンプリングレートは最大 100kHz である。入力は 16 チャンネルあり、内蔵しているマルチプレクサーに接続するチャンネルのパターンを指示することで多チャンネルの読み出しを行う。従って、16 チャンネルでの読み出しを行う場合には、チャンネルあたりのサンプリングレートは $1/16$ となる。また、内蔵の 32K サンプル分のメモリに取得したデータを蓄えることができ、USB インターフェースによって蓄えたデータを PC に転送できる。ビームプロファイルモニターの読み出しには、この ADC ユニットの 16 台を用いる。使用するチャンネル数は 1 台あたり 15 チャンネルで、総数は $15 \text{ ch} \times 16 \text{ 台} = 240 \text{ ch}$ である。

J-PARC ハドロン実験施設のビーム取り出し時間はおよそ 2s、周期は 6s (今後、取り出し 0.7s、周期 3.3s となる予定) である。このことから ADC のサンプリング間隔を $100\mu\text{s}$ 、読み出しサンプル数を 27000 回とした。従って、ADC がデータをサンプリングする時間は $100\mu\text{s} \times 27000 = 2.7\text{s}$ となり、チャンネルあたりのサンプリング間隔は 1.5ms、サンプル数は 1800 となる。読み出しサンプル数を 27000 回と設定したのは、約 4s のオフスパイル時間に PC へのデータ転送時間を間に合わせるためである。



図 3.11 TUSB-1612ADSM-2Z (ADC ユニット)

表 3.4 TUSB-1612ADSM-2Z の仕様

| Parameter | Value |
|----------------------|---------------------|
| Number of channels | 16 |
| Number of bits | 12 |
| Conversion rate | Max. 100kHz |
| Input impedance | $1\text{M}\Omega$ |
| Input range | $\pm 2.5\text{V}$ |
| Internal memory size | 12 bit \times 32K |

3.2.6 ビームプロファイルの再構成

ADC ユニットは RC 積分回路後の各チャンネルの電圧を 1.5ms 間隔で 1800 回測定する。これらのデータからビームプロファイルを再構成するために必要な量の定義とプロファイルの構成方法について述べる。

- オフセット電圧の測定

ビームがない状態での各チャンネルの電圧レベルを 1.5ms 間隔で 1800 回測定し、平均値を求める。この操作を 10 回繰り返す、10 組の平均値を求める。この 10 組の平均値の平均値を各チャンネルのオフセット電圧 V_{off} 、10 組の平均値の r.m.s をオフセット電圧の誤差 ΔV_{off} と定義する。

- Calibration

ビームプロファイルモニターの各チャンネルの出力はファイバーの発光量や MAPMT との接続の個性、MAPMT の各 pixel の量子効率のばらつきなどで一様にはならない。そのため、各チャンネル間の出力の校正を行う。各チャンネルの校正は ^{90}Sr 線源の β 線を用いて、図 3.12 のように、ファイバーから一定距離を保ちながら順に線源を動かすことで、同じ線源強度に対する出力を記録し校正に利用する。

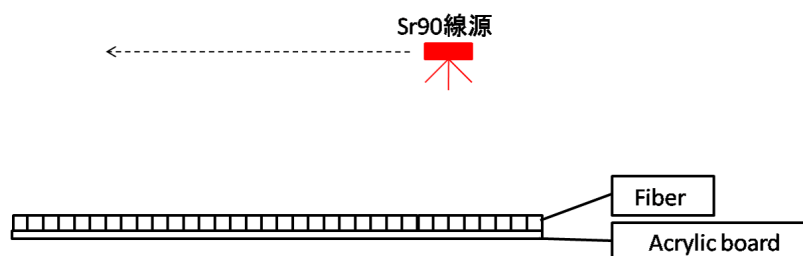


図 3.12 ビームプロファイルモニター校正の方法。ファイバーから一定距離に線源を保ち、同じ線源強度に対する各チャンネルの応答を調べる。

線源を照射した状態で線源の正面のチャンネルの電圧レベルを 1.5ms 間隔で 1800 回測定し、平均値 V_{source} を求める。また、オフセット電圧との差をとった $dV_{source} = V_{source} - V_{off}$ を記録する。この操作を 10 回繰り返し、10 組の dV_{source} を求める。この 10 組の dV_{source} の平均値を校正係数 f と定義する。また校正係数 f の誤差を Δf とし、これの評価方法は 5.1.2 で述べるが $\Delta f/f \sim 10\%$ となる。

- 各チャンネルの出力の評価

ビームプロファイルを測定する際、ADC ユニットは各チャンネルの電圧レベルを 1.5ms 間隔で 1800 回測定する。この 1800 回の測定データの平均値 V_{beam} として、各チャンネルの出力は次式で評価する。

$$(V_{beam} - V_{off}) / f$$

また、各チャンネルの出力の誤差は次式の通りとする。

$$\sqrt{2 \left(\frac{\Delta V_{off}}{f} \right)^2 + \left\{ \frac{(V_{beam} - V_{off})}{f} \cdot \frac{\Delta f}{f} \right\}^2}$$

ビームプロファイルは上記のように定める各チャンネルの出力によって構成する。ビームプロファイルの測定においては上式第二項の校正係数の誤差からくる寄与が支配的となる。

3.2.7 Time structure mode

多量の加速陽子を用いて生成される二次粒子を有効に活用するために J-PARC MR からハドロン実験施設へのビームの取り出しは「遅い取り出し」がされ、取り出し時間は約 2 秒 (将来的には 0.7s) である。しかし、大強度ビームを有効活用するためには取り出しが遅いだけでなく、ビーム強度の時間変動がないことが重要になる。粒子のカウンティングレートが瞬間的に高くなり、検出器の動作が不安定になったり、検出器への偶発ヒットによるシグナルの同定失敗などが起こり測定ロスが増えるためである。

ADC ユニットの読み取るチャンネルを 1 チャンネルのみに設定することでチャンネルあたりのサンプリングレートを上げ、ビームの時間構造を見ることができる。このような測定モードを Time structure mode と呼ぶ。Time structure mode では ADC のサンプリング回数を 30000 回とし、ビーム取り出し時間をカバーするため、サンプリング間隔を $100\mu\text{s}$ とし、測定時間を $100\mu\text{s} \times 30000 = 3.0\text{s}$ とする。サンプリング間隔 $100\mu\text{s}$ に合わせ、RC 積分回路の時定数を $\tau = 200\mu\text{s}$ とする。このような測定手法により、ビームの時間構造を $\sim 200\mu\text{s}$ 程度の細かさで測定することができる。

時定数を変更するため、RC 積分回路の RC 素子は取り換えが可能なようにソケットピンにより基板に取り付けられている。Time structure mode では $R=1\text{M}\Omega$ のものに取り換え、C は取り外される。このとき MAPMT のもつキャパシタンスによって時定数は $\tau = 200\mu\text{s}$ となる。

3.3 クロストーク

3.2 で述べたようなデザインのビームプロファイルモニターにおいて、チャンネル間のクロストークを次のように分類し、その見積もりを行った。

- PMT 光電面でのクロストーク
ファイバー端面に到達した光が PMT 入射窓や光電面などで散乱され、他の pixel に入ってしまうもの。
- ファイバー間での光の伝搬によるクロストーク
シンチレーティングファイバーと粒子の相互作用によって発するシンチレーション光はファイバーに添加されている波長変換材により吸収される。波長変換材により再発光された光がファイバー端に伝搬し、MAPMT で検出される。発光したシンチレーション光が隣のファイバーの波長変換材に吸収されることで、隣のファイバーの出力として検出されてしまうもの。
- 粒子の散乱によるクロストーク
ビーム中にさらされるファイバー、およびそれらを支えるアクリル板など検出器自身によって粒子が散乱され、他のチャンネルの出力となるもの。

以下、それぞれの見積もりについて述べる。

3.3.1 PMT 光電面でのクロストーク

PMT 光電面でのクロストークは以下の方法によって見積もりを行った。

ビームプロファイルモニター実機と同様のファイバー、MAPMT、およびそれらの固定用治具、ホルダーを使用してテスト用のファイバー・ホドスコープを作成した。ただし、テスト用のものはファイバーは 8 本のみの MAPMT の中央付近の 4×2 pixel を使用している。また、ファイバーをアクリル板に固定せずに、ばらばらのままにしてある。読み出しのための回路や ADC ユニットも実機と同様のものを用いる。

- 1 本のファイバーにだけ Sr90 線源からの β 線を照射し、残りのファイバーには β 線が入らないように遮蔽体で囲む。
- β 線を照射しているチャンネルの電圧レベルと他の pixel のチャンネルの電圧レベルを記録する。
- これらの値を、Sr90 線源を取り除いたときの電圧レベルとの差をとり、 β 線を照射しているチャンネルに対して、隣接する pixel のチャンネルへの寄与を評価し、クロストークの見積もりとする。

各ファイバーに対して、以上の操作を行った。

結果は、 β 線源を照射したファイバーの pixel と隣接する pixel へのクロストークは 3% 以下、斜め隣の pixel へは 1% 以下となった。ただし、これには光電面でのクロストークに加えて PMT 内部、回路、ADC ユニット、およびそれらをつなぐケーブルでのクロストークの寄与も含んでいる。

3.3.2 ファイバー間での光の伝搬によるクロストーク

ファイバー間での光の伝搬によるクロストークも上記同様テスト用のファイバー・ホドスコープによる見積もりを行った。ただし、ファイバーはばらばらのままではなく、実機同様に板状にして固定してある。

図 3.14 のように、ファイバー全体を遮光して 1 本のファイバーだけに紫外光が照射されるように $0.8\text{mm}\phi$ の穴を開けておく。紫外光を照射したときの各ファイバーの電圧レベルを記録し、紫外光を照射していないと

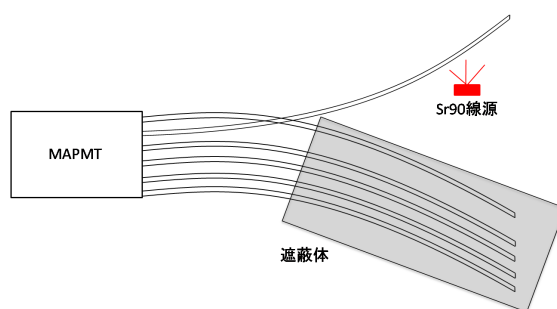


図 3.13 PMT 光電面クロストーク測定セットアップ。

きの電圧レベルとの差をとる。紫外光を照射し励起しているチャンネルに対して、ファイバーが接触しているチャンネルへの寄与を評価し、クロストークを見積もる。

結果は、ファイバーが接触しているチャンネルへのクロストークは 7% 以下であることがわかった。しかし、これには光電面でのクロストークの寄与、PMT 内部、回路、ADC ユニット、およびケーブルでのクロストークも含んでいる。なお、この測定においてもファイバーは接触していないが光電面で隣り合う pixel のチャンネルは上記の測定同様 3% 以下のクロストークが見られ、コンシステントな結果を得ている。

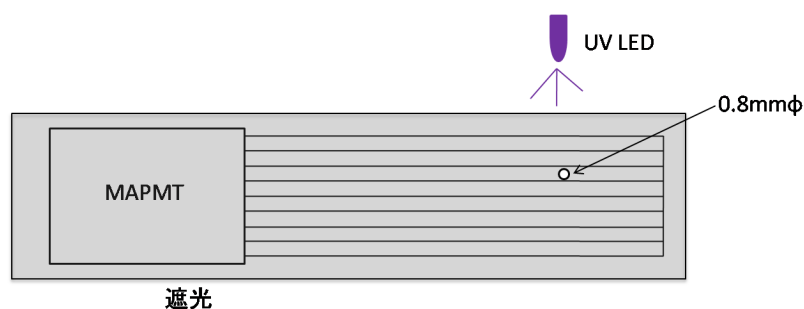


図 3.14 ファイバー間クロストーク測定セットアップ。

3.3.3 粒子の散乱によるクロストーク

検出器自身による粒子の散乱による寄与はシミュレーションにより見積もりを行った。

図 3.15 はビーム標的が白金ロッド、 γ absorber がビーム中から外されている場合での入射ビームのエネルギーのシミュレーション結果である。コリメータライン時のプロファイル測定は主にこの条件で行われる。ビームに含まれる粒子のほとんどは γ と中性子であり、ビームプロファイルモニターはこれらの粒子との反応を検出することになる。そこで、 γ と中性子のそれぞれ 1MeV、10MeV、100MeV の単色ビームに対して、検出器自身の散乱によって生じるクロストークを調べた。

図 3.16 は検出器自身の粒子の散乱によるクロストークの寄与を調べるためのシミュレーション上のセットアップの部分図である。実際の検出器同様、上流側に 1.5mm 角の Y 方向プロファイル測定用、下流側に X 方向プロファイル用のファイバー・ホドスコープを配置し、それぞれのファイバーを保持するための 1mm 厚の亚克力板も配置した。各ファイバー・ホドスコープの 120 本のファイバーには端から順に 1~120 の ID がつけられており、XY ともに 61 の ID のファイバーの中心にビームが入射するようにしてある。このときビームを照射しているファイバーに対して、他のファイバーにどれだけのエネルギー・デポジットがあるかを調べ

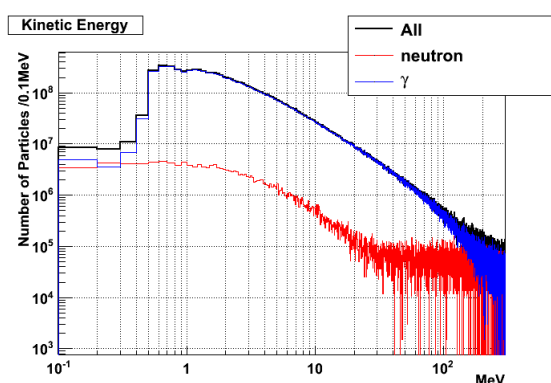


図 3.15 ビームライン・シミュレーションにより得られたビーム粒子の運動エネルギー分布。縦軸はビーム標的に 2×10^{12} 個の陽子を照射した場合に K_L ビームラインに取り出される粒子数を表す。黒が全粒子、赤が中性子、青が γ である。

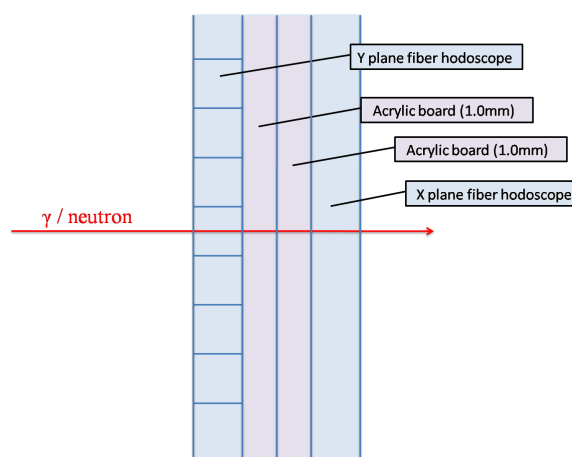


図 3.16 シミュレーション上の粒子散乱クロストーク測定セットアップ。

ることによってクロストークを評価する。

図 3.17 は各エネルギーの γ 、中性子をそれぞれ 10^6 回入射したときの各ファイバーのエネルギー・デポジットの総和を、ビームを照射しているファイバーのエネルギー・デポジットを 1 として規格化して示したものである。左列が γ 、右列が中性子を入射したもので、上から順に 1MeV、10MeV、100MeV のエネルギーの粒子を入射した場合である。赤線が前面の Y 方向測定用、緑線が後面の X 方向測定用のファイバーのエネルギー・デポジットの和を表す。

γ との相互作用は、10MeV 以下ではコンプトン散乱が支配的となり、散乱された電子によりクロストークが生じる。100MeV ではコンプトン散乱に加えて電子・陽電子対生成による反応も同程度起こる。いずれのエネルギーでも、クロストークは隣接するファイバーで 10% 以下、2 つ隣のファイバーで $\sim 1\%$ 程度となる。入射 γ のエネルギーが高くなるにつれ、散乱される電子や生成される電子・陽電子はビーム方向に運動量を持ちやすくなるため、クロストークの広がり小さくなっている。

中性子では、散乱された陽子が検出されることになるが、この陽子の散乱によってクロストークが生じる。10MeV 以下のエネルギーでは隣接するファイバーへのクロストークは 1% 程度、100MeV では 20% 程度となる。これは反跳陽子の飛程が 0.75cm を上回り、隣のファイバーに入る粒子が増えるためである。

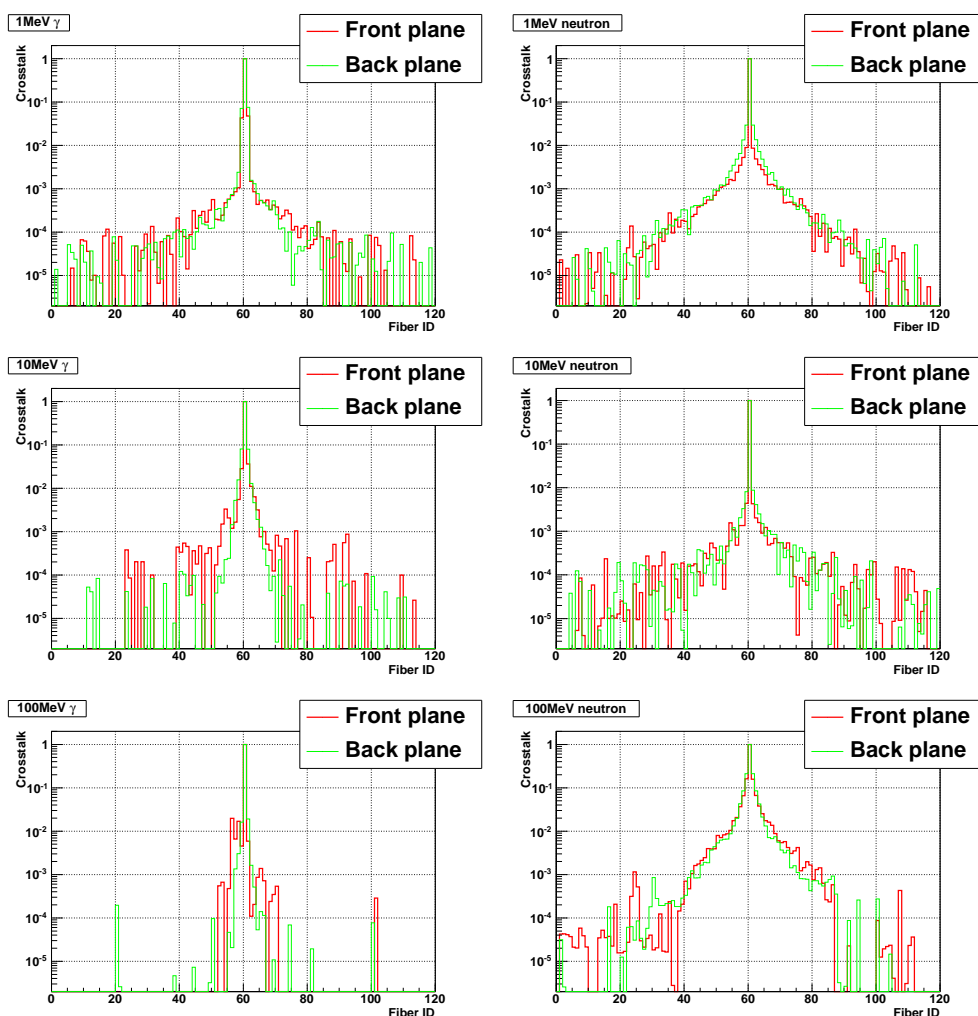


図 3.17 各エネルギーの γ 、中性子に対するクロストーク。中心のファイバーに中性子/ γ を 10^6 個入射させた場合の各ファイバーに残るエネルギー・デポジットの総和を表したものである。中心のファイバーを 1 として規格化している。赤は上流側、緑は下流側のファイバー・プレーンを表す。左列が γ を入射したとき、右列が中性子を入射したときのもので、上から順に 1MeV、10MeV、100MeV のエネルギーのものとなっている。

3.4 ディテクター・シミュレーション

このビームプロファイルモニターは粒子との相互作用によるファイバーへのエネルギー・デポジットを検出することになる。 K_L ビームによってビームプロファイルモニターのファイバーにどのようなエネルギー・デポジットがあるかを調べるためシミュレーションを行った。

図 3.18 は K_L ビームのプロファイルを飛来する粒子の数で表したもの（黒線）とファイバーに残るエネルギー・デポジットの和で表したもの（赤線）で比較したものである。最も粒子数、またはエネルギー・デポジットの和が多いチャンネルを 1 として規格化している。シミュレーション上でビームプロファイルモニターはビーム標的から 21.5m の地点（実際にインストールする位置とほぼ同じ）に配置した。

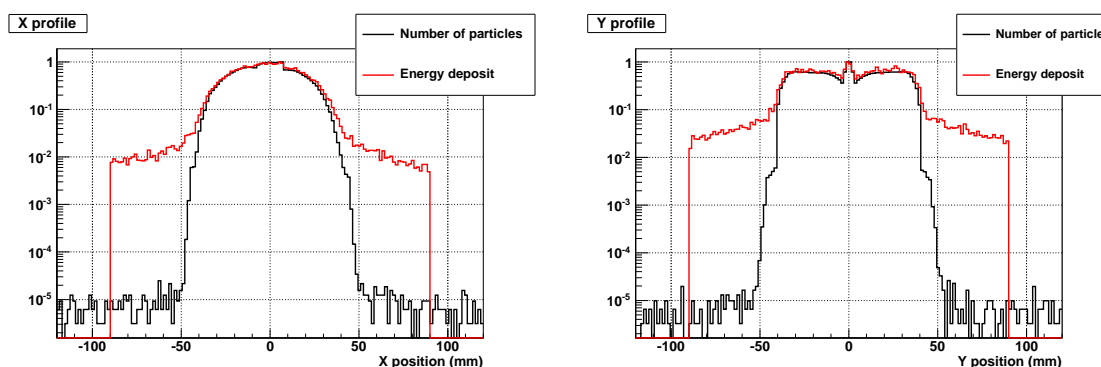


図 3.18 粒子数でのプロファイルとエネルギー・デポジットでのプロファイルの比較（シミュレーション）。黒が K_L 飛来する粒子の数を縦軸にとったもの。赤が、飛来した粒子とビームプロファイルモニターの反応によって、ファイバーに残るエネルギー・デポジットの和を縦軸にとったもの。どちらも最高値のチャンネルを 1 として規格化している。ビーム・ハロー領域（ビーム・コア領域の外側の領域）に飛来する粒子の数はビーム・コア領域に比べて 5 桁ほど少ないが、ビームプロファイルモニター自身との散乱によるクロストークなどによりエネルギー・デポジットで見るとプロファイルでは図の赤線のようになる。

飛来する粒子とビームプロファイルモニター自身との散乱によるクロストークのために、エネルギー・デポジットでのプロファイルはハロー領域（ビーム・コアの外側の領域）にも広がる。その結果、図 3.18 赤線のようなプロファイルになる。ビームライン中の真空を保つための 0.1mm 厚の鉄製の真空窓や、この真空窓からビームプロファイルモニターまでの間に存在する空気もシミュレーションに組み込んでいるが、これによる粒子の散乱の効果は小さい。PMT 光電面でのクロストークやファイバー間の光の伝搬によるクロストークの効果はこの結果には含まれていない。Y 方向プロファイルの中心付近に見られる構造は低エネルギーの γ によって表れており、GEANT3 の仕様起因するものである^{*4}。

図 3.19 は K_L ビームに対して各ファイバーに残るエネルギー・デポジットの大きさの分布を表した図であり、右図が上流側の Y 方向測定用のファイバー、左図が下流側の X 方向用のファイバーのものである。色のついた線はビーム取り出し口での粒子の種類によって分類したものを表している。上流側の Y 方向測定用ファイバーでも γ で最小電離粒子によるエネルギー損失ピークが表れているのは、真空窓や空気との反応で生じた電子などによるものである。真空窓や空気を取り除いてシミュレーションした場合は、Y 方向測定用ファイバーにはこのピークは表れない。最小電離粒子によるピークは $\sim 0.3\text{MeV}$ である。下流側の X 方向測定用ファイバーには最小電離粒子によるピークと、それに加えて、ちょうど 2 倍のエネルギー損失のピークも見られる。この 2 つ目のピークは Y 方向測定用ファイバーやファイバーを支えるアクリル板などとの反応で電子・陽電子対生成したものによるもので、10MeV 以上のエネルギーをもつ γ に対して主に起こる。ビーム中の γ のエネルギーは 1MeV \sim 10MeV が支配的であるため、コンプトン散乱により弾き出された電子によるエネルギー・デポジットの寄与が支配的となる。1MeV 以上の比較的大きなエネルギー・デポジットは中性子によって散乱された陽子によるものが多くなる。

図 3.20 はエネルギー・デポジットによるプロファイルを粒子の種類によって表示したものである。縦軸は、ビームによって各ファイバーに与えられるエネルギー・デポジットの総和を表したものである。中性子による

*4 GEANT3 では粒子の運動量を GeV/c で定義するが、6 桁までしか保証されない。そのため、例えば $1\text{MeV}/c$ の γ が 21m 進むのに対して 1cm だけ横にずらす場合、横方向の運動量は $5 \times 10^{-7} \text{GeV}/c$ となるが 0 として扱われてしまい、シミュレーションではこのような構造が表れている

陽子の散乱は大きなエネルギー・デポジットを残す傾向にあるが、ビームの成分は γ が圧倒的に多いため、エネルギー・デポジットによるプロファイルにおいては γ が支配的な寄与を持っていることがわかる。また、陽子の Quenching 効果によってシンチレーターの発光量がエネルギー・デポジットに比例しない場合があるが、 γ が支配的な寄与を持っていることからその影響は小さい。

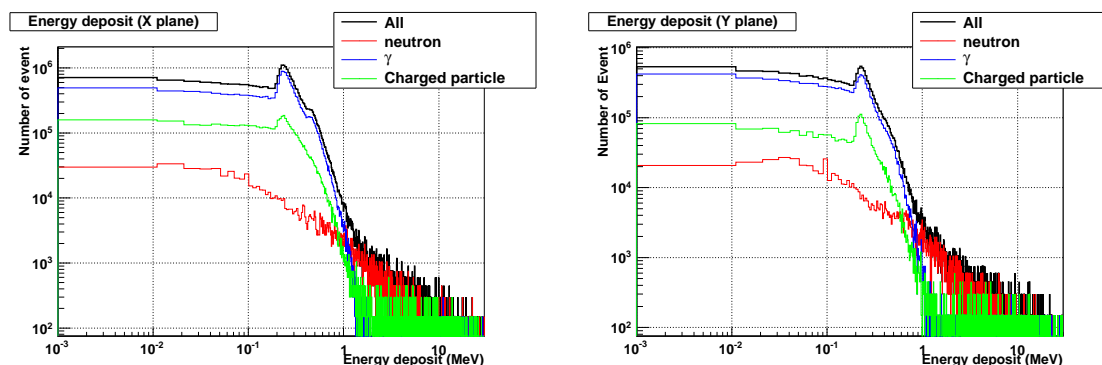


図 3.19 ファイバーへのエネルギー・デポジット (シミュレーション)。飛来する粒子との相互作用によるファイバーへのエネルギー・デポジットの分布。横軸はエネルギー・デポジット (MeV) 縦軸はそのエネルギー・デポジットがあったイベント数を表す。ビーム取り出し口時点での粒子の種類により色分けしている。黒が全粒子、赤が中性子、青が γ 、緑が荷電粒子である。ビーム取り出し口からビームプロファイルモニターの間にある真空窓や空気によって生じる電子などの寄与で、上流側のファイバーにも γ でも最小電離粒子によるピークは見えている。

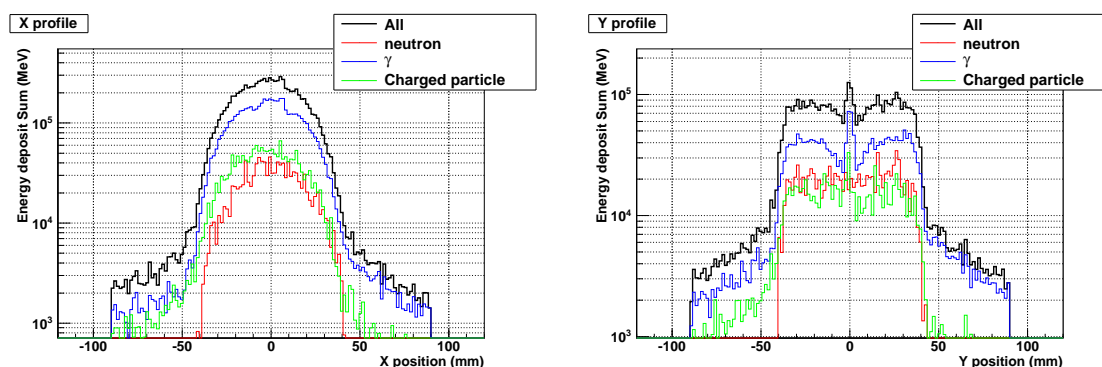


図 3.20 エネルギー・デポジットでのプロファイルの各粒子の寄与 (シミュレーション)。縦軸は、ビーム標的に 2×10^{12} の陽子を照射したときに得られる K_L ビームによって、ファイバーに残るエネルギー・デポジットの総和をとったものである。黒が全粒子、赤が中性子、青が γ 、緑が荷電粒子である。

以上のことから、ビームプロファイルモニターでは、ビーム中の γ によって弾き出された電子によるファイバーへのエネルギー・デポジットを主に見ることになる。我々はこのように測定されるプロファイルから、次章で述べるようにビームプロファイルの Edge や Yield の変化を調べることになる。図 3.20 のようなエネルギー・デポジットによるプロファイルでは、検出器自身の粒子の散乱によるクロストークでビーム Edge が落ち切るところを確認することはできないので、粒子数によるプロファイルと合いがよい領域でこれら进行评估する。これについての詳細は次章で述べる。

4 コリメータ・アラインの手法

2.4 で述べたように K^OTO 実験では、細く、かつハロー中性子の少ない K_L ビームが必要である。これを実現するためにはビームライン・コリメータの位置合わせが重要となる。コリメータの位置合わせは、コリメータの位置を積極的に動かし、これによるビームプロファイルの変化を調べることで行う。

本章では、ビームライン・コリメータの位置の変位に対するビームプロファイルの影響を簡便に理解するために導入した光源モデル・シミュレーションと、これを用いて確立したコリメータ・アラインの手順について述べる。

4.1 光源モデル・シミュレーションの概要

コリメータ可動点の各点での位置を変位させ、ビームプロファイルの変化を測定することになるが、どのようにビームプロファイルに変化が表れるのかを知っておく必要がある。ところが、4 点の可動点が独立に動くためコリメータ位置のコンディションを指定するパラメータの組み合わせの自由度が高く、GEANT などのモンテカルロ・シミュレーションによりあらゆるコリメータ・コンディションでのビームプロファイルを調べるには莫大な時間を要してしまう。そこで、短時間で任意のコリメータ・コンディションでのビームプロファイルを予測するために光源モデルによるビームプロファイルの予測を行うことにした。

光源モデルは粒子の崩壊や物質との相互作用を考慮せずビーム標的を光源として扱い、検出器の各位置に到達する光の量を計数することでビームプロファイルの概形を予測するものである。

光源は等方的に光を放つ点の集合で、ビーム標的の形状に分布しているものとする。コリメータ位置の調節のためのビームプロファイル測定時にはビーム標的には白金ロッド (2.4.2 参照) が使用されるため、その形状に合わせた光源を考えた。実際の 1 次陽子ビームに似せて $\sigma=10$ mm の正規分布でビーム軸からの距離に応じて点光源の「明るさ」を定義している。ビーム標的内のビームの散乱や発生した二次粒子との更なる反応などで実際の粒子の生成点の分布はさらに広がったり、ビーム軸方向に構造があったりすることが予想されるが、ここでの目的はビームプロファイルを完全に再現することではなく、コリメータ位置の変位により表れるビームプロファイルの変化を定性的に見るためなので簡便なモデルで考えている。

各コリメータ可動点の変位を変数として入力し、これらの値から表 2.1 のコリメータ各点の座標を求める。前述の各点光源の位置から検出器上の光の当たる領域を計算し、各チャンネルに光が照射される面積と光源の「明るさ」に応じた値を与えていく。これをすべての点光源に対して行い、それぞれのチャンネルの値からビームプロファイルを予測する。

図 4.1 はコリメータの模型である。座標系はビーム標的から検出器に向かう方向にビーム軸上に Z 軸を定め、鉛直上向きに Y 軸、右手系となるように水平方向に X 軸を定めている。光源からの光がコリメータ内壁に遮られることなく届く範囲を示したのが緑色の線である。光源はビーム標的の形状にあわせて大きさをもたせており、X 方向では特に横に広がった様に見える。そのため、ビームプロファイルモニターのファイバーに位置によっては、ビーム標的が部分的にしか見えない領域も存在する。中心付近のファイバーはビーム標的全体が見えるため、全ての点光源からの光が到達し、Yield が最も高くなる。このような領域を赤線で示しており、この領域を「全光源照射領域」という。従って、赤線の外側で緑線の内側の領域は一部の点光源からの光が届く領域で「部分光源照射領域」という。

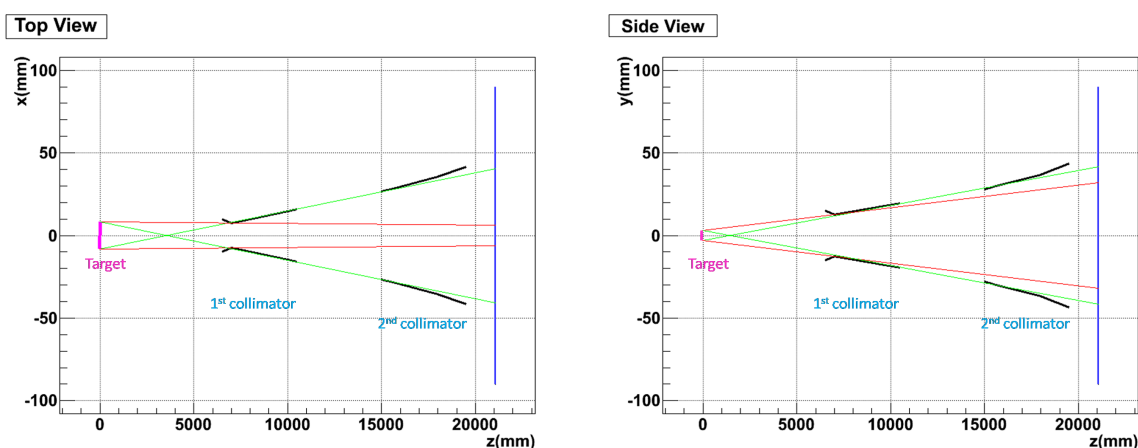


図 4.1 コリメータ模型。左図が X 方向プロファイル、右図が Y 方向プロファイルに対応する。緑線は検出器側からコリメータを通してビーム標的の一部、あるいは全体が見える領域を表す（部分光源照射領域）、赤線はビーム標的の全体が欠けることなく見える領域を表し（全光源照射領域）、この領域はビーム Yield が最も高くなる。左図の X 方向プロファイルの模型では緑線と赤線が離れているため、図 4.2 左図のように Edge の立ち上がりは滑らかになる。一方、右図の Y 方向プロファイルの模型では緑線と赤線が近いいため、図 4.2 右図のように Edge の立ち上がりは急激なプロファイルになる。

このような光源モデルによるシミュレーションで得られるビームプロファイル結果を図 4.2 に示す。赤線が光源モデルによる光源プロファイル、青線がモンテカルロ・シミュレーションによる飛来する粒子数で表したビームプロファイルである。ともに、Yield が最高値となるチャンネルの値を 1 として規格化してある。光源モデルによるビームプロファイル予測は、モンテカルロ・シミュレーションによるビームプロファイルのビーム・コア領域を再現できており、光源モデルによりコリメータ位置の変位によるビームプロファイルの変化を短時間で予測することが可能である。

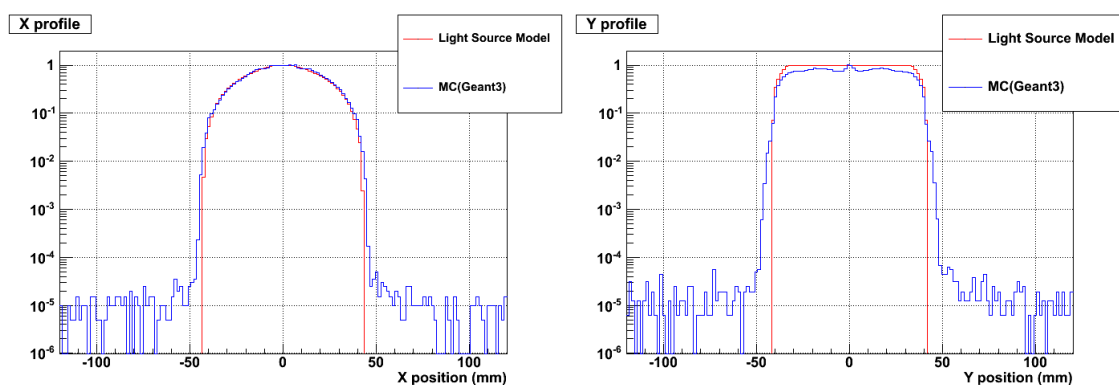


図 4.2 光源モデルとモンテカルロ・シミュレーションの比較（標的から 21m の地点）。赤が光源モデルによるプロファイル、青がモンテカルロ・シミュレーションによるビームプロファイルである。ビーム・コア領域で光源モデルによるプロファイルはモンテカルロによるプロファイルと一致している。モンテカルロ・シミュレーションによるプロファイルに見られるハロー領域（ビーム・コア領域の外側の領域）の粒子は、コリメータ内で K 中間子が崩壊してできた粒子である。こういった効果は光源モデルには組み込んでいないため、光源モデルでのプロファイルには表れない。

4.2 コリメータ位置の変位に伴うビームプロファイルの変化

コリメータ位置の変位により、コリメータ内壁が入り込むためビームプロファイルの Edge 位置が変位する。ここでは、光源モデルでの場合の光が届くチャンネルのうち最も外側を Edge と呼んでいる。また、コリメータ方向がビーム標的に正しく向いていないとビームの Yield、あるいは光源から到達するの光の量が減少する。コリメータのアラインメントの際には、ビームプロファイルに表れるビーム Edge の位置の変化や Yield の変化を調べることでコリメータの状態を確認することになる。以下、コリメータ位置の変位に伴うこれらの変化について述べる。

なお、コリメータ可動点は上流から順に C1U、C1D、C2U、C2D と呼ぶ(図 2.16 参照)。

4.2.1 C1U の変位に伴う Edge の変化

図 4.3 は C1U を +X 方向に 3mm 変位させたときのコリメータの様子である。1st コリメータ上流側がシフトするため図の 2 本の赤線と 1 本の緑線が大きく移動している様子がわかる。このことから X 方向のビームプロファイルは Yield の高い全光源照射領域が右側にシフトし、左側のビーム Edge も右にシフトすると予想できる。図 4.5 は C1U を +X 方向に 1mm、2mm、3mm 変位させたときの光源プロファイルの変化である。上記の通りの変化が表れている。

同様に、図 4.4 は C1U を +Y 方向に 3mm 変位させたときのコリメータの様子である。1 本の赤線と同じ側の緑線が大きく移動している。このことから Y 方向プロファイルは下側の Edge が上にシフトすると予想できる。図 4.6 は C1U を +Y 方向に 1mm、2mm、3mm 変位させたときの光源プロファイルの変化である。こちらも上記の通り、下側の Edge が上にシフトしている様子が表われている。

このように、C1U 位置の変位によってコリメータ内壁が入り込んでくる様子がビームプロファイルに表れることがわかる。また、X 方向プロファイルでは Yield が高い全光源照射領域もシフトすることからプロファイル全体が大きくゆがむ。

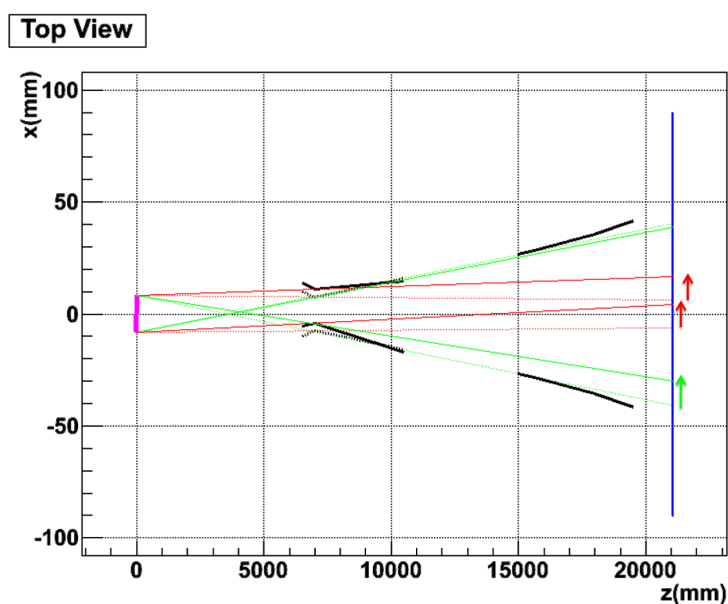


図 4.3 C1U を +X 方向に 3mm 変位した場合のコリメータの変化。点線はコリメータを変位する前のラインを表す。コリメータを動かすことによって緑線が内側に入り込む様子と 2 本の赤線が大きくシフトする様子が見られる。

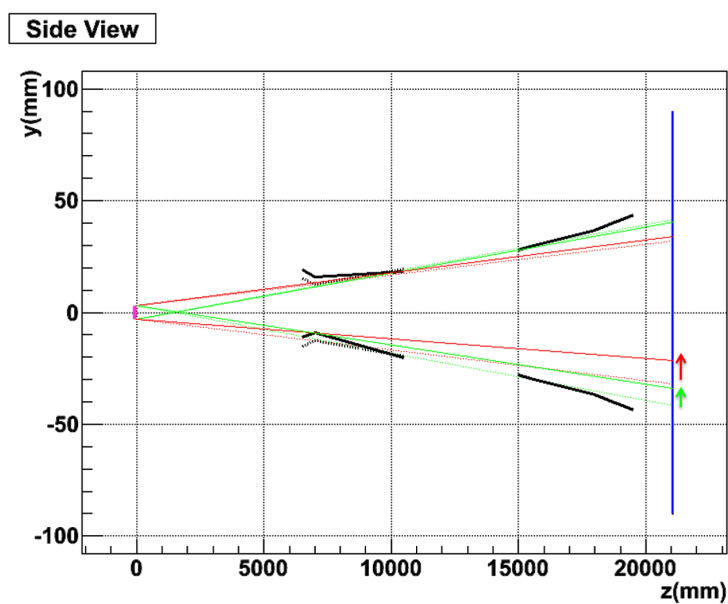


図 4.4 C1U を +Y 方向に 3mm 変位した場合のコリメータの変化。コリメータを動かすことで Edge が入り込む様子が見られる。

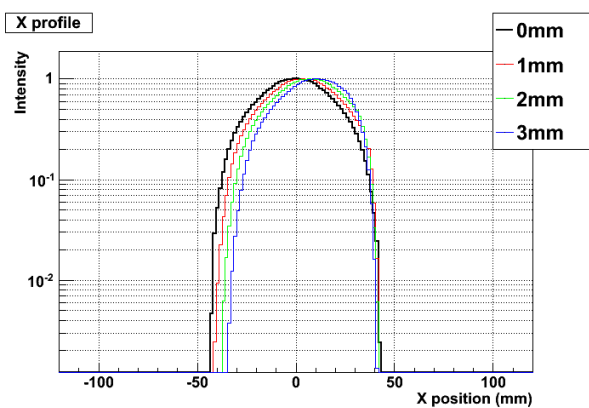


図 4.5 C1U を +X 方向に変位した場合のビームプロファイルの変化。Yield の領域が右側にシフトし、-X 側 (左側) の Edge も内側に入り込んでいる様子が表れている。

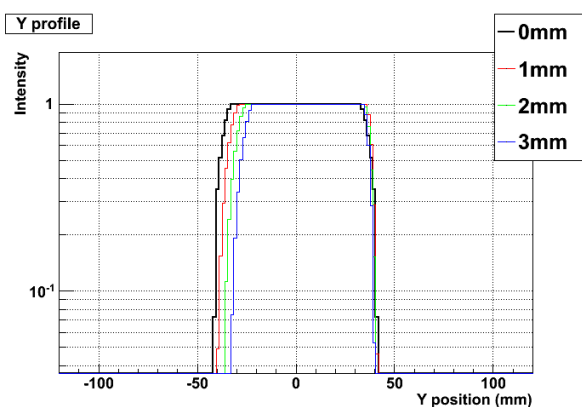


図 4.6 C1U を +Y 方向に変位した場合のビームプロファイルの変化。-Y 側の Edge が入り込んでくる様子が表れている。

4.2.2 C1D、C2U の変位に伴う Edge の変化

図 4.7 は C1D を +X 方向に 4mm 変位させたときの、図 4.8 は C2U を +X 方向に 5mm 変位させたときのコリメータの様子である。どちらも緑線のみが入り込んでいる。したがって C1D、C2U の変位に対する X 方向プロファイルは Yield が高い全光源照射領域に変化はないが、Edge のすそにあたる部分光源照射領域のみに変化が表れると予想される。

図 4.9 は C1D を +X 方向に 2mm、4mm、6mm 変位させたときの、図 4.10 は C2U を +X 方向に 3mm、5mm、8mm 変位させたときのプロファイルの変化である。部分光源照射領域にあたる Edge のすその部分のみに変化が表れている。ビーム標的からの距離が異なるために、C1D の変位よりも C2U の変位に対する変化は小さくなるが、定性的には同じ変化が表れる。

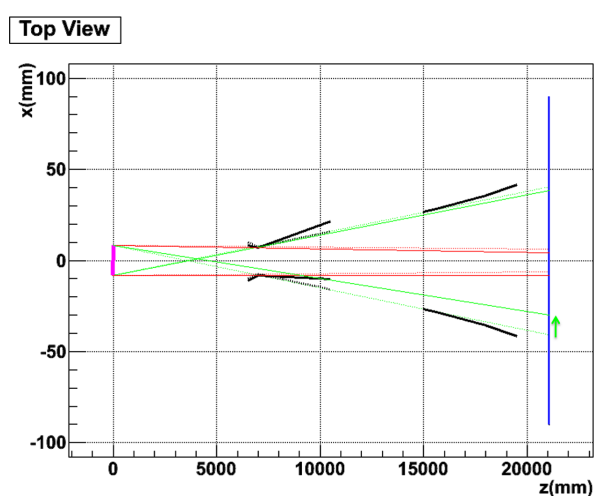


図 4.7 C1D を +X 方向に 4mm 変位した場合のコリメータの変化。緑線（部分光源照射領域）のみ変化する。

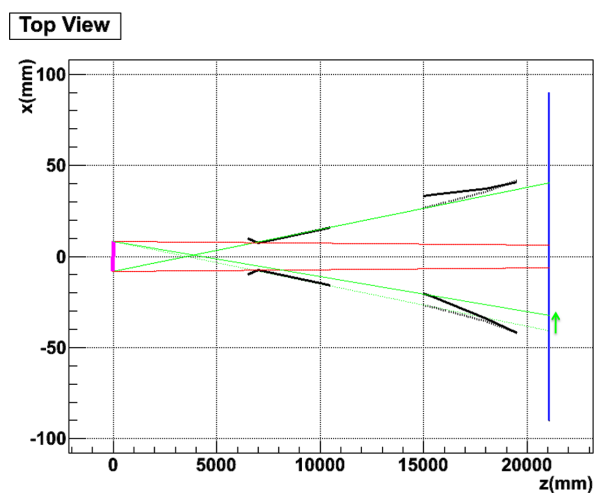


図 4.8 C2U を +X 方向に 5mm 変位した場合のコリメータの変化。図 4.7 と同様の変化が見られる。

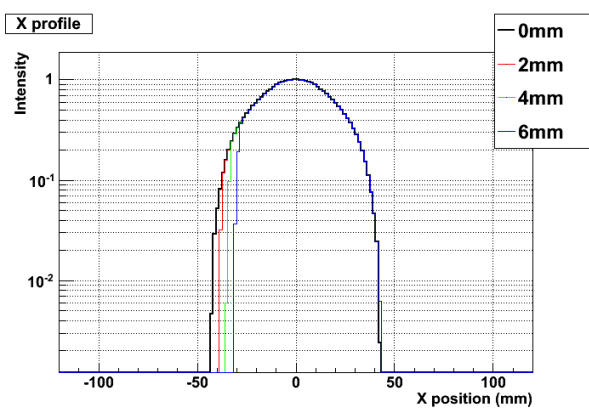


図 4.9 C1D を +X 方向に変位した場合のプロファイルの変化。Edge のすそにあたる部分光源照射領域にのみ変化が表れる。

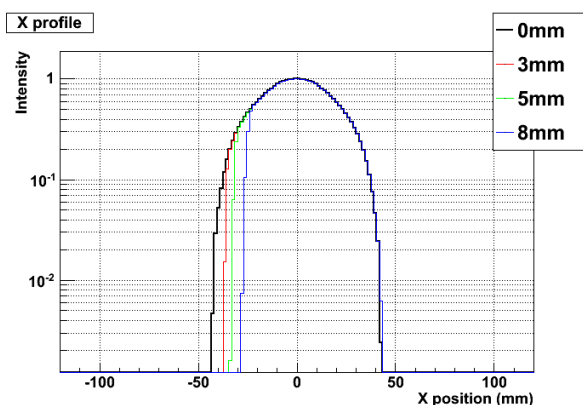


図 4.10 C2U を +X 方向に変位した場合のプロファイルの変化。図 4.9 と同様の変化が見られる。

図 4.11 は C1D を +Y 方向に 4mm 変位させたときの、図 4.12 は C2U を +Y 方向に 5mm 変位させたときのコリメータの様子である。コリメータを変位させることでコリメータが入り込み線がシフトするようすが表れており、図 4.13 の C1D を +Y 方向に 2mm、4mm、6mm 変位させたとき、図 4.14 の C2U を +Y 方向に 3mm、5mm、8mm 変位させたときのプロファイルの変化にもこれに対応する変化が見られる。

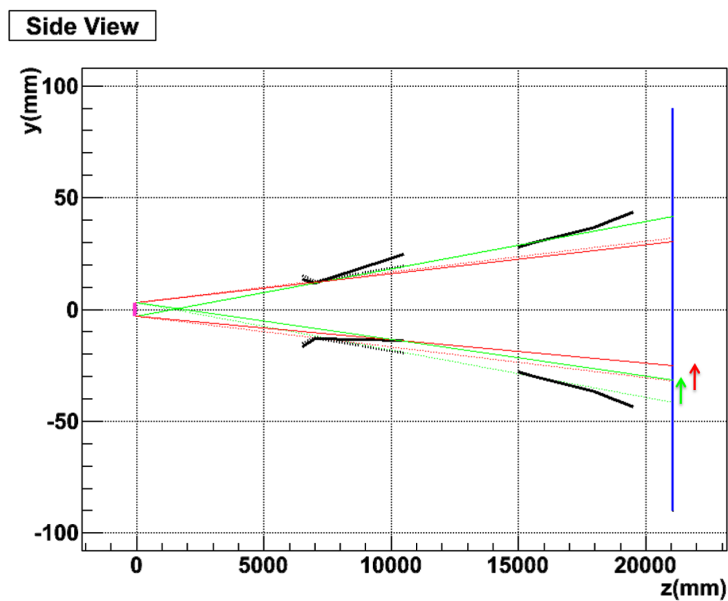


図 4.11 C1D を +Y 方向に 4mm 変位した場合のコリメータの変化。-Y 側の Edge が入り込む。

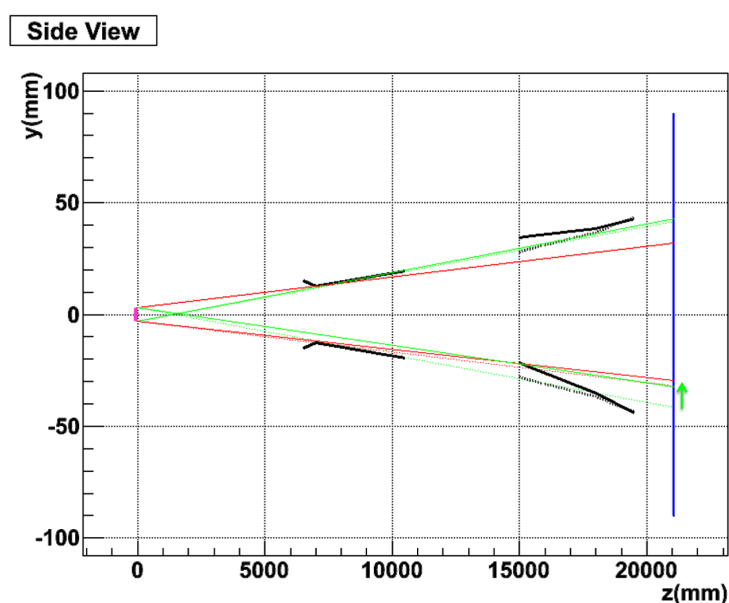


図 4.12 C2U を +Y 方向に 5mm 変位した場合のコリメータの変化。図 4.11 と同様の変化が見られる。

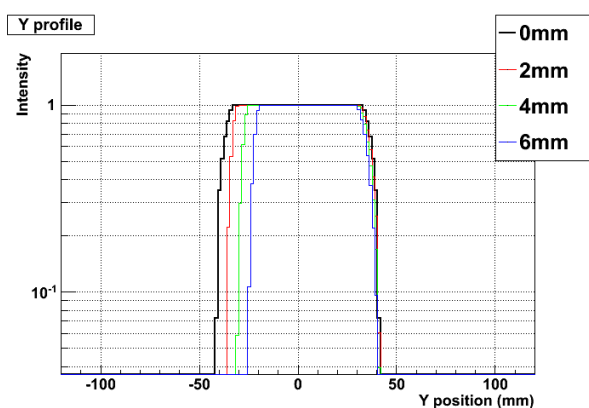


図 4.13 C1D を +Y 方向に変位した場合のプロファイルの変化。-Y 側の Edge が入り込む様子が表れている。

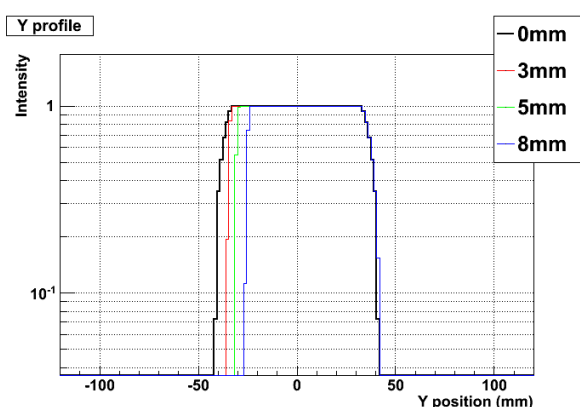


図 4.14 C2U を +Y 方向に変位した場合のプロファイルの変化。図 4.13 と同様の変化が見られる。

4.2.3 C2D の変位に伴う Edge の変化

図 4.15、図 4.16 は C2D を XY 方向にそれぞれ 10mm 変位させたときの様子である。2nd コリメータは下流側が広がった形状となっているため、コリメータ下流側の内壁が入り込まずプロファイルがほとんど変化しない範囲が存在する。コリメータ内壁が入り込む様子が表れるまで大きく C2D を変位させると、2nd コリメータ上流端が C2D の大きな変位のために動いてしまい、この変化もビームプロファイルに表れる。そのために両側の緑線が内側に入り込む様子が見えている。このような、2つのコリメータ可動点の一方を大きく変位させることで他方が煽りを受けて動き、その影響がプロファイルに表れる効果は 1st コリメータでも見られる。しかし、コリメータの変位が大きい場合はその影響は表れにくい。

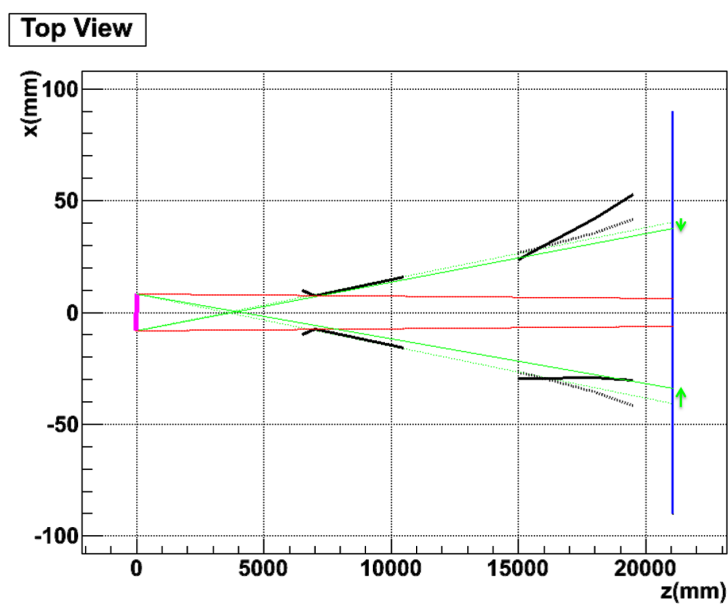


図 4.15 C2D を +X 方向に 10mm 変位した場合のコリメータの変化。両側の緑線が内側に入る様子が見られる。

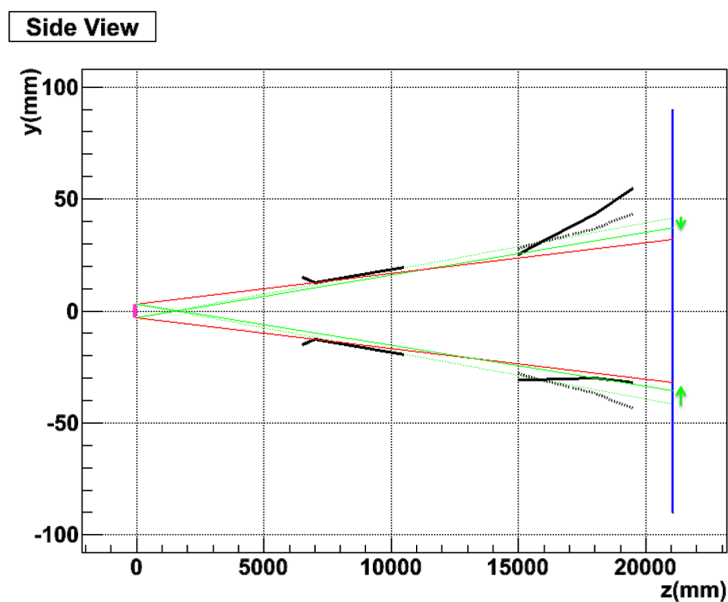


図 4.16 C2D を +Y 方向に 10mm 変位した場合のコリメータの変化。図 4.15 と同様、両側の緑線が入り込む様子が見られる。

図 4.17、図 4.18 は C2D を XY 方向にそれぞれ 5mm、10mm、15mm 変位させたときの光源プロファイルの変化である。C2D の変位に伴ってコリメータ内壁が入り込んでくる効果が表れているが、2nd コリメータ上流側が煽りを受けて動くことによって、他方の Edge を動かしている様子が表れるのが特徴である。

以上のように、コリメータ位置の変位によってコリメータ内壁が入り込む様子がビームプロファイルに表れる。特に、X 方向プロファイルにおいては Edge のすそ、部分光源照射領域の動きに注目せねばならない。コリメータの各位置の変位に対するビームプロファイルの変化を調べることで、コリメータの位置がずれていないかを確認できる。

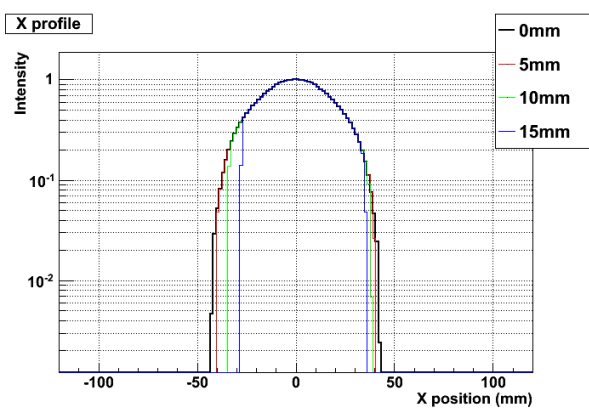


図 4.17 C2U を +X 方向に変位した場合のビームプロファイルの変化。2nd コリメータ上流側が反動を受ける効果で両側の Edge が動いている。

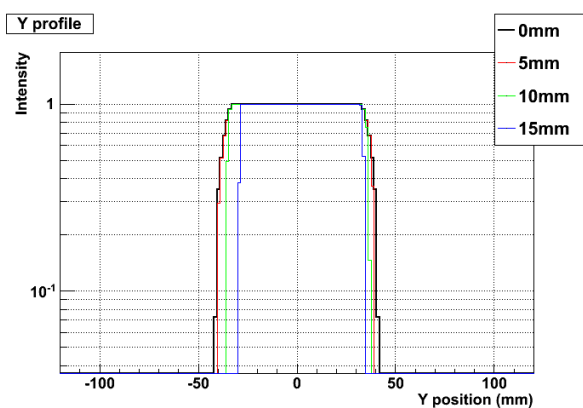


図 4.18 C2U を +Y 方向に変位した場合のビームプロファイルの変化。図 4.17 同様、両側の Edge が動いている。

4.2.4 コリメータ照準の変位による Yield の変化

図 4.19、図 4.20 はコリメータの照準が標的の中心からずれていた場合のビームラインの様子である。図 4.19 はコリメータ照準が標的の中心から、1 次陽子ビーム軸に沿って 15mm 下流側にずれていた場合。図 4.20 は標的の中心から上向きに 15mm ずれていた場合である。ビームプロファイルモニターの中心を回転軸として、コリメータ方向を変位させている。

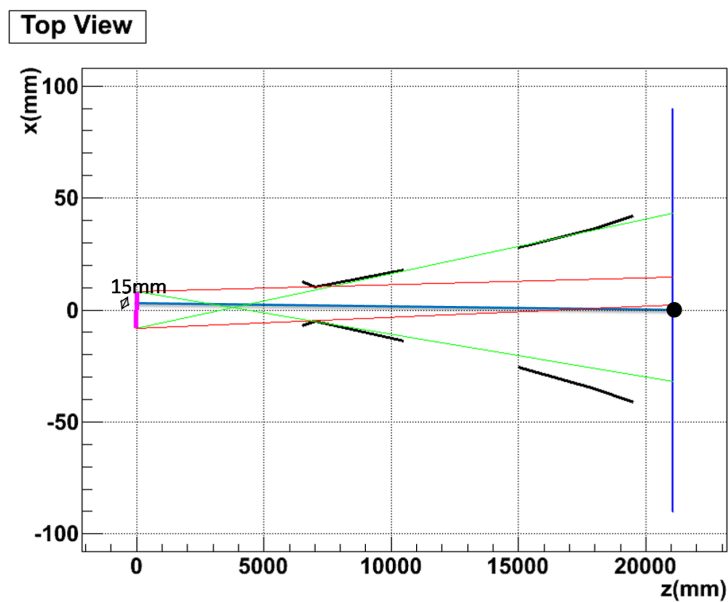


図 4.19 コリメータ照準が標的の中心から 1 次陽子ビーム方向に 15mm ずれていた場合。黒い点はビームプロファイルモニターの中心で、回転軸としている。青の直線がコリメータの中心線（照準）である。

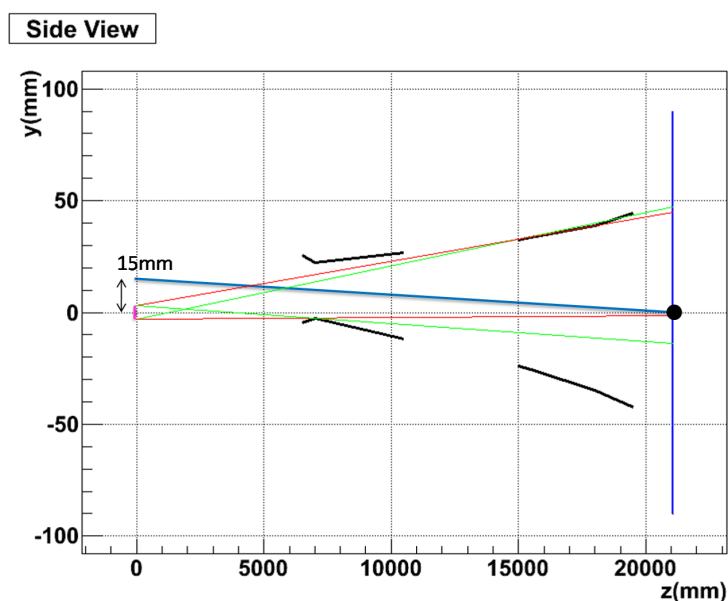


図 4.20 コリメータ照準が標的中心から上向きに 15mm ずれていた場合。黒い点はビームプロファイルモニターの中心で、回転軸としている。青の直線がコリメータの中心線（照準）である。

コリメータ照準がビーム標的中心からずれることで、ビームが照射される領域が狭くなりビームプロファイルの全 Yield は減少する。デザイン上、Y 方向プロファイルでは Yield の減少は特に顕著に表れる。図 4.21 はコリメータ照準がビーム標的中心からずれていた場合のビームの全 Yield（光源からの光の量）の変化である。それぞれ、コリメータが標的中心を向いていた時のビーム Yield を 1 として、コリメータ照準が 1 次ビーム軸に沿ってずれていた場合（左図）と鉛直方向にずれていた場合（右図）を表す。

このようにコリメータ方向の変位に対してはビーム Yield がよい指標となり、Yield が最大となる方向に合わせることでターゲット中心にコリメータ照準を合わせる。

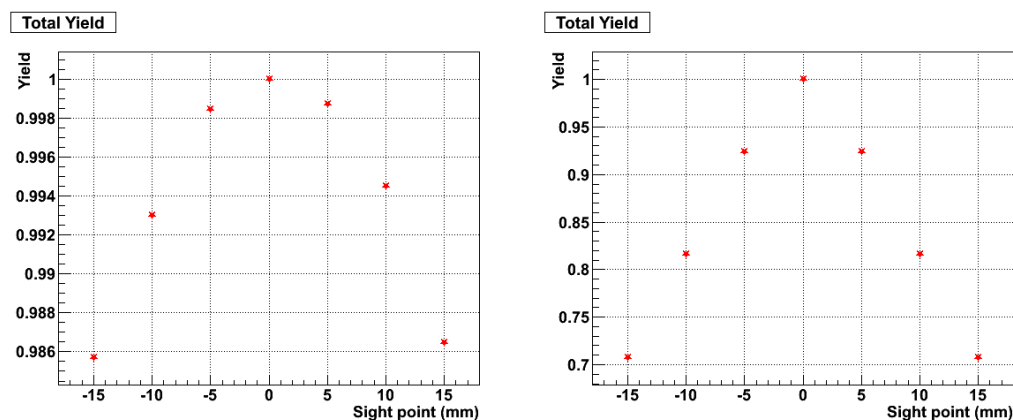


図 4.21 コリメータ照準が標的からずれていた場合のビームプロファイルの全 Yield の変化。ともに、コリメータ照準がビーム標的の中心を向いたときに Yield は最大となる。X 方向プロファイルでは、1 次ビーム軸に対して 16° 方向に K_L ビームラインは位置するためコリメータに対して標的像は斜めに配置されることになる。左図で Yield が横軸対称にならないのは、このためである。

4.3 コリメータ・アラインの手順

コリメータの位置や向きの変位によって表れるビームの Edge や Yield の変化をビームプロファイルモニターで観測することでコリメータの位置の調整を行う。これを次のステップに分けて行う。

- コリメータの角合わせ
1st コリメータの上流端、下流端および 2nd コリメータの上流端の内壁を一直線にそろえる作業であり、これら 3 点の相対的な位置関係を定める。
- コリメータ照準の確認
1st コリメータと 2nd コリメータの各可動点の相対的な位置関係を保ちながらビームプロファイルモニターの中心点を回転軸として、コリメータの照準をビーム標的まわりにふり、コリメータがビーム中心を向いていることを確認する。
- Fine tune
各可動点を積極的に動かし、左右あるいは上下の Edge の動きが対称になるように微調整を行う。
- ビーム位置の修正
ビーム位置がずれている場合は、ビーム標的中心を回転軸とし 2 つのコリメータを変位させることで K_L ビームの位置を調節する。

4.3.1 ビーム Edge、ビーム Yield の定義

実際のビームプロファイルモニターでは各ファイバーのエネルギー・デポジットによって出力される電荷情報によってプロファイルを構成する。4.2 で光源モデルによるビームの Edge や Yield の変化について述べたが、実際のビームプロファイルは検出器自身による粒子の散乱などにより、光源モデルでのプロファイルとビームプロファイルモニターで見えるプロファイルは異なる。図 4.22 は GEANT によるモンテカルロ・シミュレーションでビームプロファイルモニターの各ファイバーのエネルギー・デポジットによるプロファイル（赤線）と光源モデルでの各ファイバーに到達する光の量によるプロファイル（青線）である。ともに、最高値となるチャンネルの値が 1 となるように規格化してある。

コリメータ位置の変位に伴うプロファイルの変化は部分光源照射領域に表れるため、その領域の動きを調べたい。ところが、ビームプロファイルモニターで見えるビーム・コアの外側の領域は検出器自身との散乱による寄与で見えているもので、光源モデルでのコリメータ内壁の入り込みによる効果を調べるには適さない領域である。

そこで、光源モデルで調べた効果と同じものが見える範囲で、なるべくプロファイルの外側である部分をビームプロファイルモニターで見える Edge と定義することにした。X 方向プロファイルでは、出力が最大となるチャンネルの値に対して 10%、Y 方向プロファイルでは 25% となるラインを境に、それぞれ図 4.22 のように Left edge、Right edge、Downside edge、Upside edge と定義する。このように定義した Edge の位置はビームプロファイルモニターでのプロファイルと光源モデルでのプロファイルでは $\sim 1.5\text{mm}$ 程の差が生じる。しかし、コリメータの変位によって変化が表れるのは部分光源照射領域であり、また Edge 位置の絶対値ではなくその動きに注目するのでこのような定義とした。

コリメータ照準がビーム標的の中心を向いているかの指標となるビーム Yield についても、上で定義した Left edge と Right edge、または Upside edge と Downside edge によって挟まれる領域のチャンネルの出力

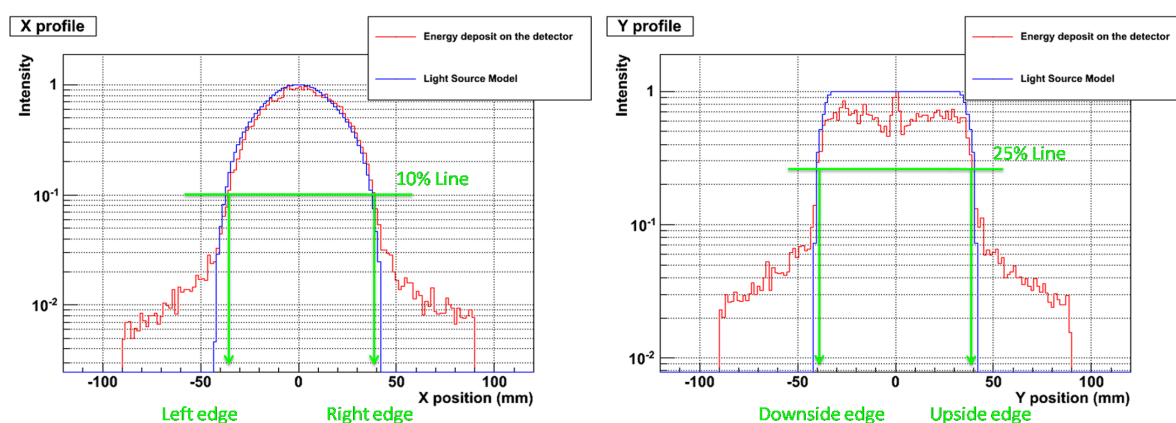


図 4.22 各ファイバーのエネルギー・デポジットによるプロファイル（赤）と光源プロファイル（青）の比較。最高値となるチャンネルを 1 として規格化している。このとき X 方向プロファイルでは最高値に対して 10% のラインによって Left edge、Right edge を定め、Y 方向プロファイルでは 25% のラインで Upside edge、Downside edge を定める。

の和とする。

また、Left edge と Right edge、または Upside edge と Downside edge の中点をビームのセンターと定義する。ビームプロファイルモニターに対する入射ビームの位置は、このビームセンターの値によって決める。ただし、X 方向プロファイルについては別の基準によりビーム位置を決める場合があるが、これについては後述する。

4.3.2 コリメータ角合わせの手順

この手順は、1st コリメータの上流端、下流端および 2nd コリメータの上流端の内壁を一直線にそろえ、これらの相対的な位置関係を決める作業である。2nd コリメータ下流側は口が広がった形状になっているため、これら 3 点とは事情が違い、この直線上にあわせる必要はない。2nd コリメータ下流側は後述の Fine tune のステップで最適化を行う。

ビームラインに鉄やコンクリートなどの遮蔽体によるシールドがなされた段階で、コリメータの位置関係がどう変わったかはわからない。コリメータの各可動点を積極的に動かし、プロファイルの Edge の変化を調べ、上で述べた 3 点の位置関係を知る手順を述べる。

図 4.23 は各コリメータ位置がランダムな状態の模型であり、シールド敷設後の初期状態を想定している。この状態で、あるコリメータ可動点を変位させ、Edge の動きを記録する。例えば、C2U を Y 方向に変位させ、Edge の動きを光源モデルによるシミュレーションで調べたものが図 4.24 である。初期状態での C2U の位置を 0mm としている。エラーバーはビームプロファイルモニターのファイバーピッチである 1.5mm としている。前述の定義により、ここでは光源モデルによるプロファイルの 25% のラインで Edge を決めている。Upside edge、Downside edge のどちらに注目してもよいが、ここでは Upside edge の動きに注目すると C2U を -2mm 変位させると上側のコリメータ内壁が入り込む効果が表れてくるのがわかる。従って、C2U を -2mm とした状態では Upside edge は 2nd コリメータ上流端が決めている、とすることができる（図 4.25）

C2U を -2mm とした状態で、C1D を Y 方向に変位させ、Edge の動きを調べる。光源モデルにより、その Edge の動きが図 4.26 である。C2U の変位で、Upside edge は 2nd コリメータ上流が決めている状態に

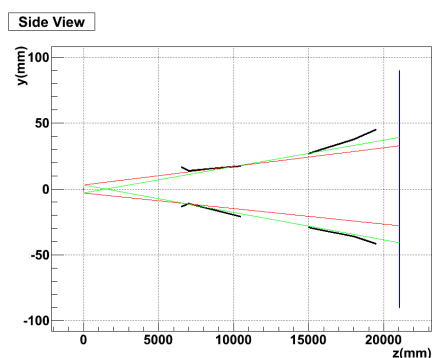


図 4.23 シールド敷設後の初期状態。コリメータ位置がランダムな状態になっている。

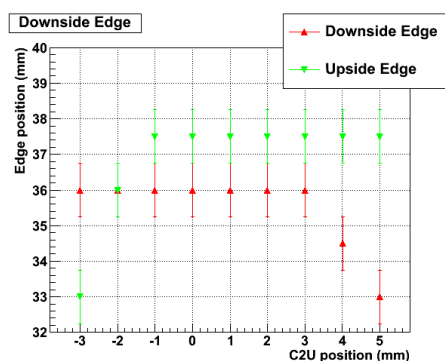


図 4.24 C2U の変位に対する Edge の動き。横軸がコリメータ位置の目盛を表し、縦軸が Edge 位置の検出器中心からの絶対値。-2mm の位置から Upside edge が入り込み始める。

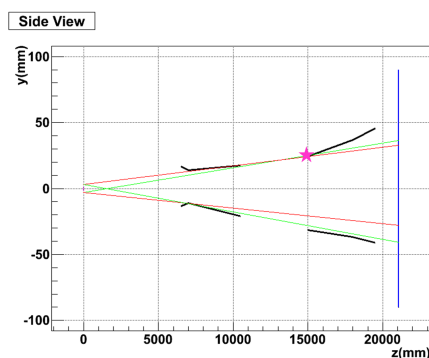


図 4.25 C2U を -2mm 変位させたときの模型。この状態では 2nd コリメータ上流側が Upside edge を決めている。

したので、ここでも Upside Edge の動きに注目する。C1D を -0.5mm 変位させたところからコリメータ内壁が入り込む効果が表れている。従って、C1D を -0.5mm とした状態では図 4.27 のように Upside edge は 2nd コリメータ上流端に加え、1st コリメータ下流端との 2 点が決めている、とすることができる。

続いて、C1U の変位に対する Edge の動きを調べる。C2U、C1D のときと同様、Upside edge の動きに注目し、図 4.28 でコリメータ内壁が入り込む効果が表れ始める -2.5mm の位置に C1U を変位させる。この状態で 1st コリメータ上流端も Upside edge を決めていることになり、1st コリメータ上流端、下流端および 2nd コリメータ上流端が一直線上に並んだ状態となる (図 4.29)。

以上が、コリメータ角合わせの手順であり、1st コリメータ上流端、下流端および 2nd コリメータ上流端の内壁を一直線にそろえるという作業が果たされる。なお、ここでは Y 方向プロファイルのみの説明を行ったが、X 方向でも手順は同じである。また、C2U からコリメータの変位と Edge の確認を行ったが順番に決まりはない。Downside edge に注目して左側のコリメータ内壁をそろえてもよい。

4.3.3 コリメータ照準の確認

次に、コリメータ照準をビーム標的中心に向けるための手順について述べる。コリメータ角合わせの手順によって、1st コリメータ上流端、下流端および 2nd コリメータ上流端の内壁が直線に並んだ状態にしたため、

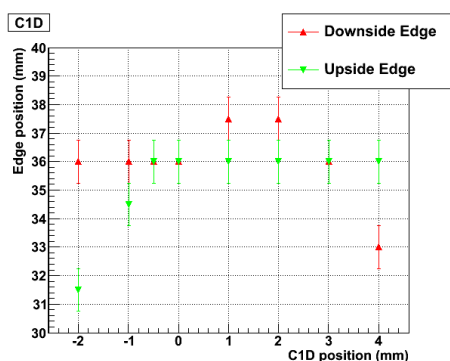


図 4.26 C1D の変位に対する Edge の動き。Upside edge が入り込み始めるのは -0.5mm を越えた点からである。

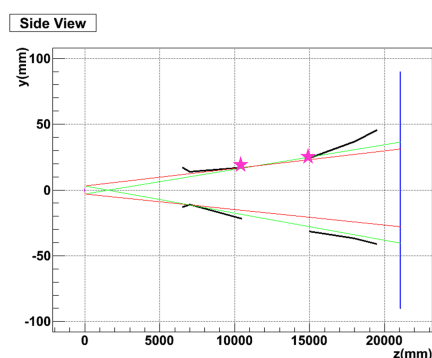


図 4.27 C1D を -0.5mm 変位させたときの模型。この状態では、2nd コリメータ上流側に加えて 1st コリメータ下流側も Upside edge を決めている。

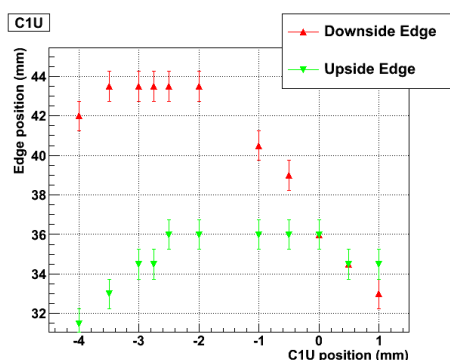


図 4.28 C1U の変位に対する Edge の動き。Upside edge が入り込み始めるのは -2.5mm を越えた点からである。

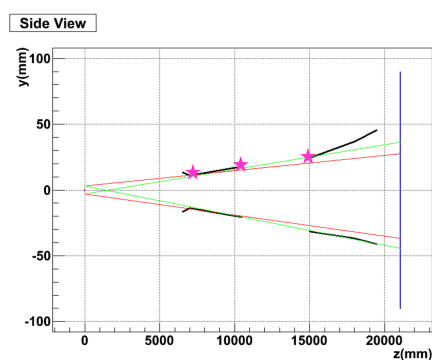


図 4.29 C1U を -2.5mm 変位させたときの模型。1st コリメータ上流側も Upside edge を決め、3 点が直線に並ぶ。

この直線を保ちながらコリメータの方向を変え、ビーム Yield の変化を調べることでビーム標的の中心に照準を合わせる。

先の光源モデルの例の続きで、図 4.29 の状態からの手順として例を示す。コリメータ照準の変位は図 4.30 のようにビームプロファイルモニターの中心点を回転軸とし、ターゲット位置での変化量を回転の中心点からコリメータ各可動点までの距離の比で変位させる。図 4.29 の状態を 0mm にとり、この状態からビーム標的の位置でのコリメータ照準の変位を図 4.31 の横軸にしている。

4.3.4 Fine tune

Fine tune はコリメータ各可動部を動かし、コリメータ内壁が入り込む効果が左右、あるいは上下対称になっているかを確認、微調整する作業である。また、この段階で C2D を動かし、2nd コリメータ下流側の最適化も行う。引き続き先の例で、この手順を示す。

C2D の変位に対する Edge の動きを図 4.32 に示す。C2D の位置が -10mm のとき Upside edge が入り込み、C2D の位置が 0mm のとき Downside edge が入り込む様子が表れている。従って、これらの中心点である -5mm の位置に C2D の中心位置を合わせる。2nd コリメータ上流側が反動で動き、両側の Edge が動いている様子が見えている。

次に、C2U の位置の Fine tune を行う。図 4.33 はより細かいステップで再度 C2U の位置を変位させ、Edge の動きを確認したものである。コリメータの角合わせの作業で C2U の位置は -2.0mm となっている。 -3.0mm の位置で Upside edge が入り込み、 -1.5mm で Downside edge が入り込んでいることから、これ

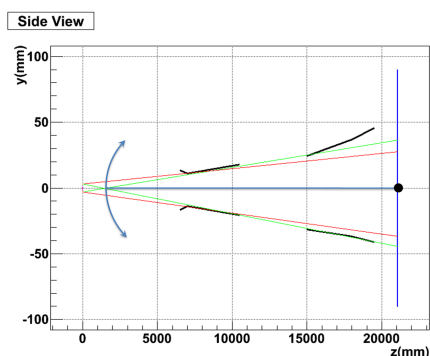


図 4.30 コリメータ照準の変位。ビームプロファイルモニターの中心を回転軸として、コリメータ照準を変位させる。

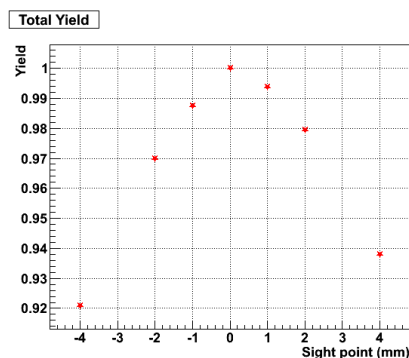


図 4.31 コリメータ照準の変位に対する Yield の変化。Yield が最大となる 0mm の方向に合わせる。

らの中間点である -2.25mm に微調整を行う。

同様に C1D、C1U の細かいステップでの変位に対する Edge の動きが図 4.34、図 4.35 である。それぞれ Upside edge と Downside edge の入り込む点の中間点を取り、C1D の位置は -0.5mm から -0.75mm へ微調整する。C1U の位置は厳密には -2.375mm という値になるが、実際にはここまでのコリメータ制御は困難なため -2.25mm のままとしておく。

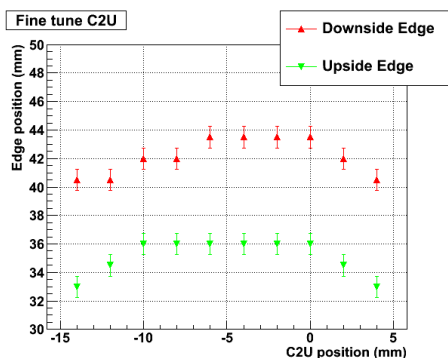


図 4.32 C2D 位置の Fine tune。Upside edge の入り込みは -10mm を越えた点から、Downside edge の入り込みは 0mm を越えた点からである。

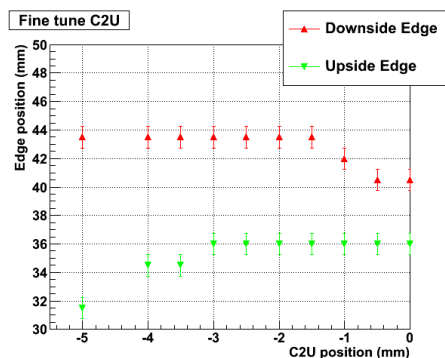


図 4.33 C2U 位置の Fine tune。Upside edge の入り込みは -3.0mm を越えた点、Downside edge の入り込みは -1.5mm を越えた点からである。

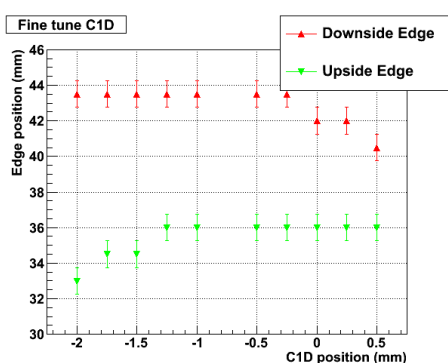


図 4.34 C1D 位置の Fine tune。Upside edge は -1.25mm 、Downside edge は -0.25mm を越えた点から入り込んでいる。

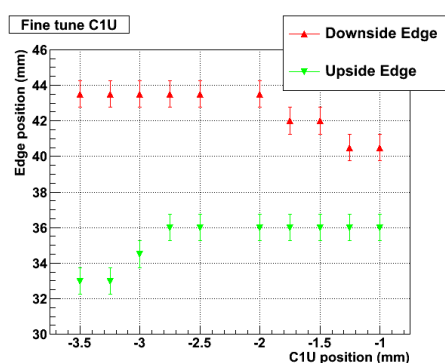


図 4.35 C1U 位置の Fine tune。Upside edge は -2.75mm 、Downside edge は -2.0mm を越えた点から入り込んでいる。

Fine tune の作業は一回の調整で終わるとは限らず、繰り返し行うほどコリメータ・アラインの精度は高まる。また、すでに C2D や C2U などの Fine tune を終えていても C1D や C1U などに大幅な調整があった場合は、再度調整し直す必要がある。これらは状況に応じて判断することになる。

4.3.5 ビーム位置の修正

ここまでの手順でコリメータの相対的な位置は最適化されているがビーム位置が要求された位置からずれている場合は修正せねばならない。ビーム位置の修正は、ビーム標の中心を回転軸としコリメータ各点の相対位置を保ったまま位置の変位を行う。コリメータ照準の最適化での手順と同様に、検出器位置での変化量を回転中心からコリメータ各可動点までの距離の比で変位させる。

先の光源モデルによる例でのプロファイルを図 4.36 に示す。定義に従い、25% のラインで定めた Left edge、Right edge の中点であるビームセンターは -3.75mm となる。ビームセンターが検出器中心になるように、各コリメータ可動部を変位させた場合の光源プロファイルを図 4.37 に示す。

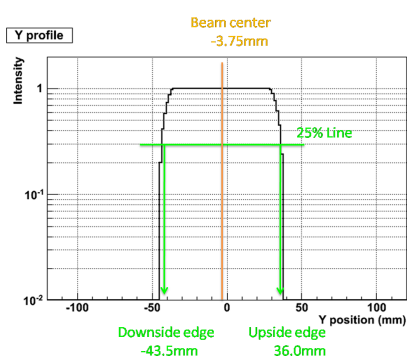


図 4.36 ビーム位置修正前の光源プロファイル。ビームセンターは -3.75mm で中心からずれている。

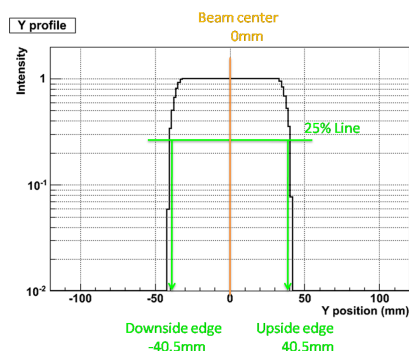


図 4.37 ビーム位置修正後の光源プロファイル。ビーム位置が修正され、ビームセンターが中心にきている。

ビーム位置修正後の各コリメータ可動部の変位はデザイン値に対して、C1U は 0.02mm 、C1D は 0.09mm 、C2U は 0.01mm 、C2D は 0.22mm の誤差で最適化することができている。これらの手順によって、図 4.23 のような初期状態から上記のような精度でコリメータの位置合わせをすることができる。

5 ビームプロファイルの測定とコリメータスキャン

K^OTO 実験を行う J-PARC ハドロン実験施設の実験エリアにビームプロファイルモニターをインストールし、ビームプロファイル、および時間構造の測定を行った。また前章の手法によりコリメータ位置の調整を行った。本章では、これらの結果について述べる。

5.1 ビームプロファイルモニターのインストールと性能チェック

5.1.1 セットアップ

本章で述べるビームライン・コリメータ位置の調節の手順は大きく分けて2つの時期に行っている。これら2つの時期でセットアップが多少異なり、「前期セットアップ」と「後期セットアップ」と呼ぶ。

前期セットアップではビーム標的を支えるステージの固定が外れていたため、ビーム標的は本来の位置から1次陽子ビーム軸の上流側に20mmずれている。この事実は前期セットアップでの測定開始時には知られておらず、ビームライン・コリメータはビーム標的が本来あるべき位置にあることを前提にセットされた。後期セットアップでの測定開始時にはビーム標的は正しい位置に修正された。

- 前期セットアップ

スライド開閉式の Beam plug は1st コリメータ上流側に置かれ、ビーム標的は水冷機構を備えない小型のニッケル標的、または白金ロッド(2.4参照)が用いられる。前期セットアップではRC積分回路の仕様が異なる。パラメータは $R=10\text{M}\Omega$ 、 $C=0.1\mu\text{F}$ となっており、時定数は $\tau=1\text{s}$ である。またアンプの倍率は1倍となっており、PMTのHVは -800V で使用している。

- 後期セットアップ

スライド開閉式の Beam plug は2nd コリメータ下流端のビーム取り出し口の下流に設置され、ビーム標的には白金ロッドが用いられる。RC積分回路は3.2で述べた通りである。PMTのHVについては後述する。

どちらのセットアップにおいてもビームプロファイルモニターはビーム取り出し口のすぐ下流側に置かれる(図5.1)。前期セットアップではビーム標的から21.1m、後期セットアップでは21.8mの地点である。ただし、ビーム取り出し口とビームプロファイルモニターの間にスライド開閉式 Beam plug が入るだけの距離はあり、後期セットアップではその間に Beam plug が設置されている。ビームプロファイルを測定しないときはビーム外に退避できるように、鉛直方向にスライドできる機構が用意されている。ビームプロファイルモニター自身の位置の確認は、ファイバーの位置と実験エリアに描かれている罫書線の位置を比較することで行った。ビームプロファイルモニターは鉛直方向には動かせるので、実験エリア罫書線とビームプロファイルモニター中心が一致する位置を記録し、その位置を再現できるようにしておく。水平方向には動かせないため、ビームプロファイルモニターの中心と実験エリア罫書線のずれを記録し、そのずれを補正してビームプロファイルを表示することにした。測定の結果、前期セットアップではビームプロファイルモニターはX方向に -4mm 、後記セットアップでは -6mm ずれていた。ビームプロファイルモニターの位置を確認した後は、遮光のため暗幕がかぶせてある。

図5.2は1プレーンの読み出しシステムの図である。3.2で述べたように、ひとつのプレーンの120本のファイバーは2つのMAPMTで読み出される。MAPMTで読み出された信号は15chごとに分割され、8組



図 5.1 実験エリアに設置されたビームプロファイルモニター（前期セットアップ）。

の積分回路と ADC ユニットに送られる。8 台の ADC ユニットは USB Hub によって 1 台の PC と接続されている。この読み出しシステムが 2 プレーン分、実験エリア内に設置される。ADC ユニットと接続されている PC は実験エリア外からアクセスができるように LAN に接続されており、実験エリア外のコンピュータからアクセスできる。

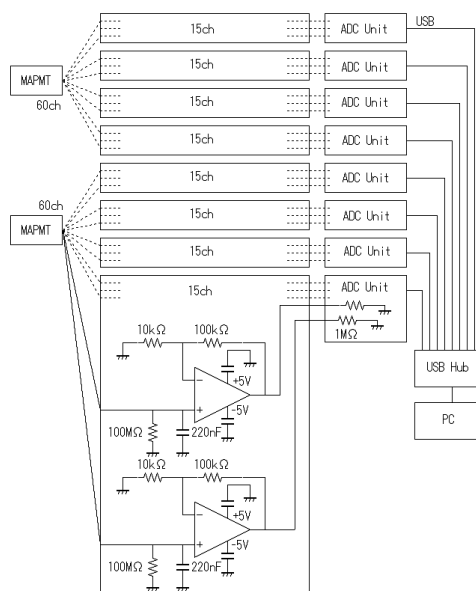


図 5.2 1 プレーンあたりの読み出しシステム。LAN によってエリア外から PC にアクセスする。

5.1.2 Calibration

ビームプロファイルモニターのチャンネル出力の校正は 3.2.6 で述べた方法で行った。ただし、線源をファイバーのピッチと同じ 1.5mm ずつ動かして 1 本ずつ校正しては時間がかかるので、線源を 1.5cm ずつ動かして 10 本ずつ校正を行った。線源の真正面の 10 本のファイバーに照射される β 線の強度は同程度であると仮定している。そのため ^{90}Sr 線源は 20cm ほど離して照射し、 β 線は広範囲に照射されるようにしている。また、Y 方向測定用のファイバーにはビーム上流側から、X 方向測定用のファイバーにはビーム下流側から線源を照射し、ファイバーを支えるアクリル板などの影響がないようにした。

図 5.3 は、Y 方向プロファイル測定用ファイバーの各チャンネルの校正後に、線源をビームプロファイルモ

ニターの中心付近に照射した場合、および線源を Y 方向に +60mm、+30mm、-30mm、-60mm ずらした場合のプロファイル測定結果の比較である。線源をずらした分は元に戻して表示してある。これらの各線源位置での β 線のプロファイルを、ビームプロファイルモニター中心付近に照射した場合のプロファイルの比で表したものが図 5.4 である。この図から、線源の位置を変えてもおよそ $\pm 10\%$ の精度で β 線のプロファイルを再現できていることがわかる。すなわち、この方法によって $\sim 10\%$ の精度で各チャンネルの校正ができているといえる。

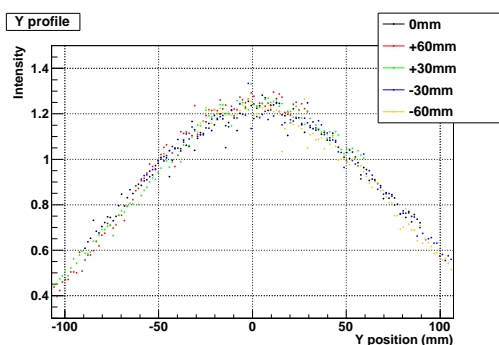


図 5.3 各線源位置でのプロファイルの比較。線源をずらしながら線源のプロファイルを取り、ずらした分の位置補正をして同じプロファイルが得られるかを確かめた。

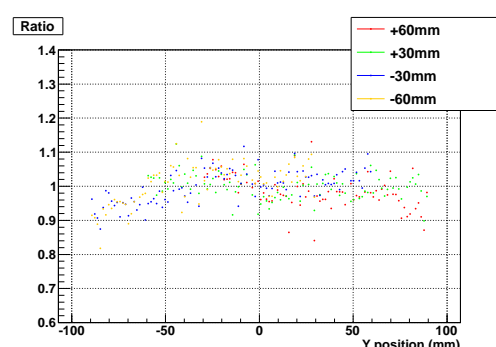


図 5.4 各線源位置でのプロファイル測定の再現性。各位置で測定した線源プロファイルの比を取ったもの。

5.1.3 PMT の HV の設定

MAPMT は高いレートでの入力に対して出力が飽和してしまうため、飽和しない低い gain 領域でオペレートする。図 5.5 は gain が高い領域での各 HV 値でのビームの X 方向プロファイルの測定結果の比較である。出力の飽和によってプロファイルが変わっている。図 5.6 は低い gain での各 HV でのビームプロファイルの比較である。これらの各 HV 値でのプロファイルの比をとると各チャンネルの出力が等倍になっており、PMT の出力が飽和していないことがわかる（図 5.7）。Y 方向測定用の MAPMT では -550V 、X 方向測定用の MAPMT では -500V でオペレートすることにした。X 方向プロファイル測定用のファイバーは下流側に位置するため反応する粒子数が多くなり、出力は高くなるので gain を X 方向よりも低くしている。

ただし、前期セットアップでの測定においては RC 積分回路の仕様が異っており、PMT は -800V でオペレートした。この領域は PMT の出力が飽和して、HV の設定によりプロファイルが変わる可能性がある。後期セットアップでは RC 積分回路を変更して、PMT を低い gain で使用する対策をしている。前期セットアップと後期セットアップでのプロファイルの見え方の違いを調べた。図 5.8 の黒で表したプロファイルは前期セットアップでのもの、赤で表したプロファイルは後期セットアップでのプロファイルである。どちらもビーム標的は白金ロッドを使用したときのもので、最も出力の大きいチャンネルを 1 として規格化している。ハロー領域でわずかに差がみられるのは、前期セットアップで PMT の出力飽和の影響が表れているものだと考えられる。しかしながら Edge を決める 10% (X 方向)、 25% (Y 方向) の領域では大差はなく、前期セットアップでのプロファイル測定結果も信頼できると判断した。

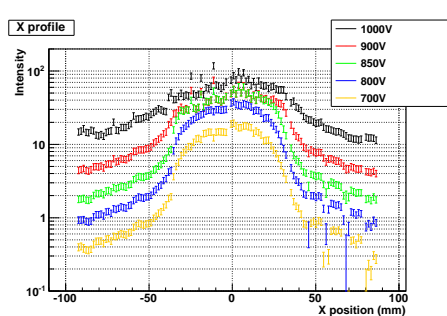


図 5.5 PMT の出力の飽和。HV に依存してプロファイルが崩れて行っている。

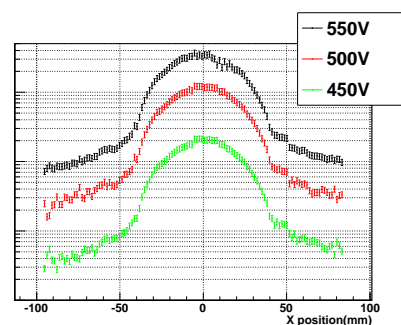


図 5.6 低い HV 領域でのプロファイルの比較。HV の値によってもプロファイルの形状は変わらない。

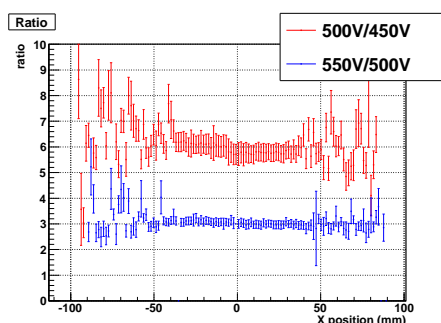


図 5.7 低い HV 領域でのプロファイルの比。低い HV 領域における各 HV でのプロファイルの ratio をとった。全チャンネルにわたって比が一定になっており、プロファイルは崩れていない。

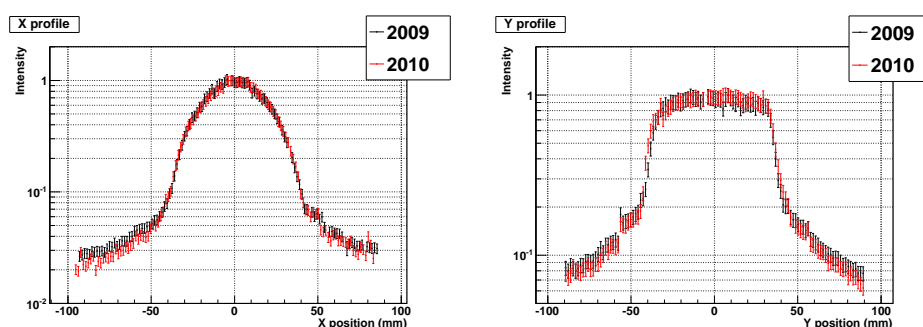


図 5.8 前期セットアップと後期セットアップのプロファイルの比較。黒が前期セットアップ終了時のビームプロファイル、赤が後期セットアップ終了時のビームプロファイル。

5.1.4 ダイナミックレンジ・線形性

図 5.6、図 5.7 から HV \sim 500V 付近で HV の値を変えてもプロファイルは崩れず、全チャンネルでほぼ等倍になっていることがわかる。このことから、少なくとも図 5.6 のビームプロファイルは全チャンネルの出力がダイナミックレンジ内に収まっており、また線形性も保たれているといえる。なお、このビームプロファイル

の最も高い出力と最も低い出力の比は ~ 30 倍である。

なお、オフセット電圧のゆらぎ ΔV_{off} (3.2.6 参照) の典型的な値は $\sim 0.9\text{mV}$ である。従って、平均 1.8mV 以上の電圧レベルとなるような入力に対してノイズとの区別が可能になる。ADC ユニットの測定レンジは $\pm 2.5\text{V}$ であるから $2.5\text{V}/1.8\text{mV} \sim 1400$ 倍ほどのダイナミックレンジを、回路のみに注目すれば、備えている。

5.1.5 ビームプロファイル測定結果の再現性

図 5.9 は連続する 4 ショットの K_L ビーム X 方向プロファイル (左) と Y 方向プロファイル (右) である。あるショットのプロファイルと他の 3 つのプロファイルの比をそれぞれとったものが図 5.10 である。ビーム・コア領域では 2% 以内の精度でプロファイルを再現できていることがわかる。ビーム・コアの外側の領域 (ハロー領域) では $\sim 15\%$ 程度とビーム・コアよりも大きくなっているが、これは出力が低くノイズや環境放射線、統計誤差による不定性などの影響を受けやすいためである。なお、コリメータ・アラインメントのためのビームプロファイル測定は 5 ショットのビームによる出力の積算値によって行う。

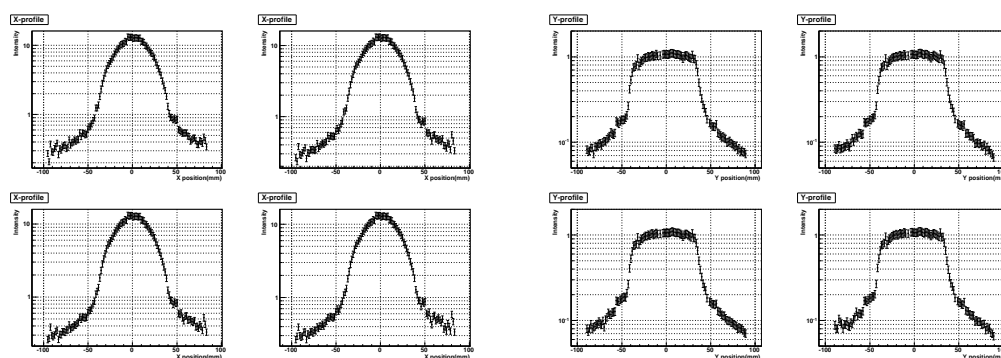


図 5.9 連続する 4 ショットの K_L ビームプロファイル。左の 4 つが X 方向プロファイル、右の 4 つが Y 方向プロファイルである。

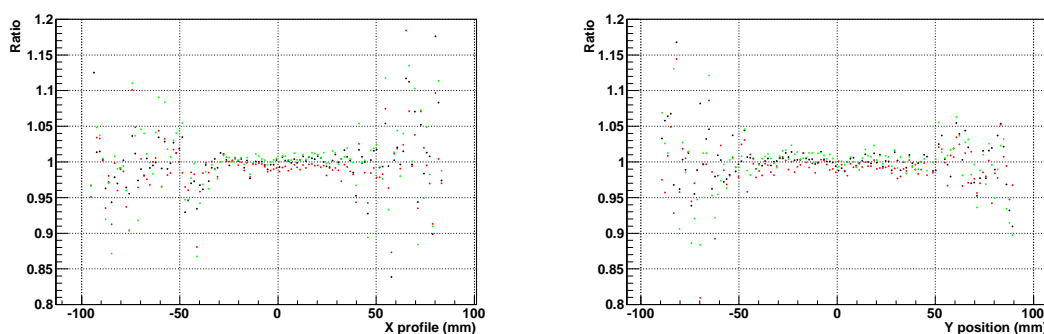


図 5.10 各ショットの K_L ビームプロファイルの比。図 5.9 の 1 つのプロファイルを基準に他のプロファイルの比をとった。

5.2 ビームプロファイルの測定とコリメータ位置の調節

J-PARC ハドロン実験施設に建設された K^0 TO 実験 K_L ビームラインのコリメータ位置の確認、調節を前章で述べた4つの手順に従って行った。

図 5.11 はあるチャンネルのビームによる出力の様子である。これの平均値の情報をもとにビームプロファイルを再構成する。図 5.12 は前期セットアップでのコリメータ位置調節のためのプロファイル測定開始時のビームプロファイルである。コリメータの位置は、ビームライン周りのシールド敷設前にデザインされた位置に合わせてあるが、シールド敷設による変位に加え、前期セットアップではビーム標的が1次陽子ビーム軸の上流側に20mmずれていたため、X方向プロファイルは大きくゆがんでいる。ビーム標的が本来の位置からずれている事実は、前期セットアップでの測定終了後に確認されたため、本来の位置からずれているビーム標的に対してコリメータの位置を合わせている。

前期セットアップでの測定、およびコリメータ位置の調整終了後、ビーム標的は1次ビーム軸の下流側に20mm動かされ、正しい位置に修正された。これに伴い、コリメータ位置も修正された。コリメータの相対的な位置関係を保ったまま、コリメータ照準を1次ビーム軸の下流側に20mmずらす操作がなされている。その後、後期セットアップでのビームプロファイルの再測定とコリメータ位置の再調整を行った。

以下、これらの結果について述べる。

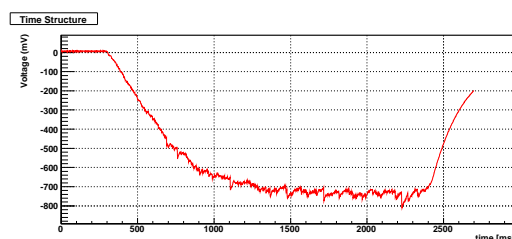


図 5.11 あるチャンネルの出力の様子。これを積分して電荷情報を得る。

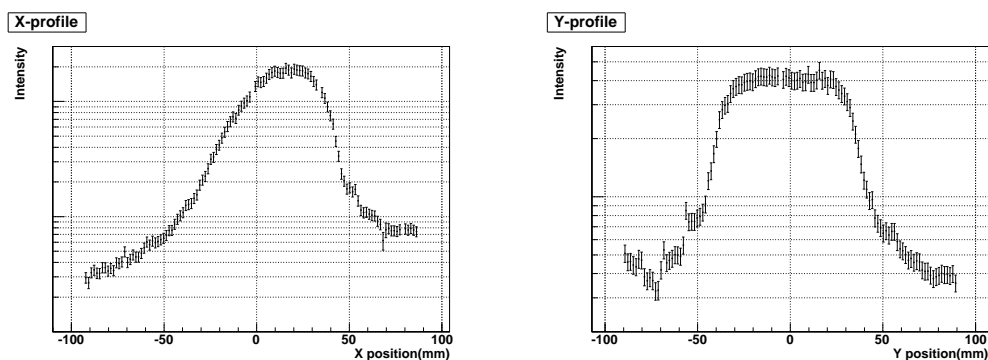


図 5.12 前期セットアップ測定開始時のプロファイル。ビーム標的が大きくずれていたため X 方向プロファイルはゆがんでいる。

5.2.1 前期セットアップ (X 方向)

まず、X 方向のコリメータの角合わせの手順から行った。この作業は小型のニッケル標的をビーム標的として使用している。

図 5.13 は C2U を X 方向に変位させたときの Edge の変化である。横軸はコリメータ・ステージの目盛の読み値、縦軸は実験エリア中心からのビーム Edge 位置の距離の絶対値。エラーバーの長さはファイバーピッチの 1.5mm としている。ビーム標的が本来の位置からずれている事実はこの時点では知られていなかったため、このビーム標的の位置で右側の Edge によって角合わせを行った。右側の Edge が入りこみ始める位置として C2U の位置を 0.57mm の位置にした。なお、横軸のコリメータ位置を表す数値は 0mm の点が必ずしも開始時の位置であるとは限らない。

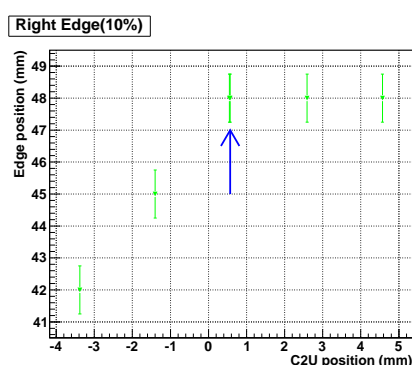


図 5.13 C2U の変位に対する Edge の動き (X 方向)。横軸はコリメータ・ステージの目盛、縦軸は実験エリア中心からビーム Edge の距離の絶対値を取っている。Right edge の動き始めの点 0.57mm に合わせた。

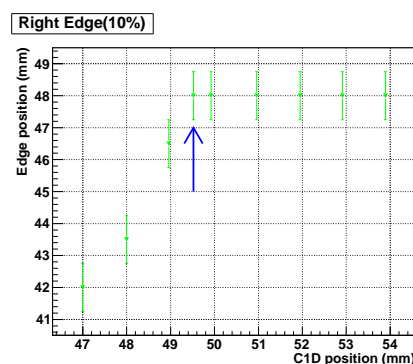


図 5.14 C1D の変位に対する Edge の動き (X 方向)。Right edge の動き始めの点 49.52mm に合わせた。

同様に、図 5.14 は C1D の変位に対する、図 5.15 は C1U の変位に対する Edge 位置の変化である。右側の Edge の入り込む位置として、C1D の位置を 49.52mm、C1U の位置を 47.7mm とした。

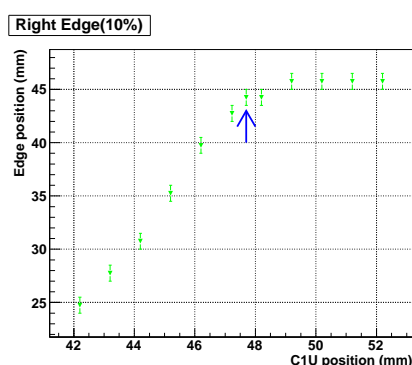


図 5.15 C1U の変位に対する Edge の動き (X 方向)。Right edge の動き始めの点 47.7mm に合わせた。

続いて、コリメータの向きを X 方向に変え Yield の変化を調べた。先のコリメータの角合わせの手順が終

了した状態のコリメータの方向を 0mm として、コリメータ照準がビーム標的の 1 次ビーム軸に沿ってどの位置を向いているかを表したものが図 5.16 である。4.3 で定義したビーム Yield の値を、SEC と呼ばれる値で割ったもので評価している。SEC とはハドロン実験施設に取り出される陽子の量を表す指数である。最高点が 1 となるように規格化して表示している。最も Yield が高い 0mm の点を最適点と判断した。

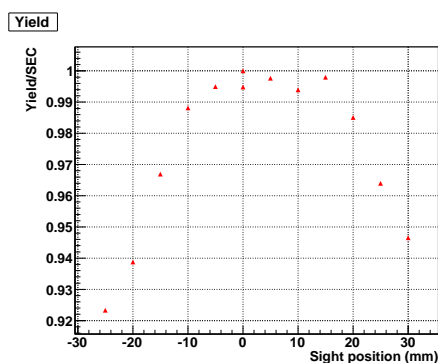


図 5.16 コリメータ照準の変位に対する Yield の変化 (X 方向)。最高点を 1 として規格化している。

その後、C2U、C1D のコリメータ位置を再度変位させ、Edge の動きが左右対称となるかを確認、微調整した。図 5.17、図 5.18 がその結果である。対称となる位置として、C2U を 0.59mm、C1D を 48.16mm とした。C1U については、コリメータ方向の最適化の手順で変更がなかったために微調整は省略している。また前期セットアップでは C2D 位置の操作も行っていない。

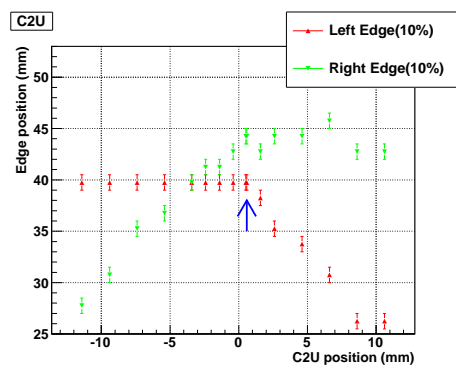


図 5.17 C2U 位置の微調整 (X 方向)。左右の Edge の動きが対称であることを確認する。

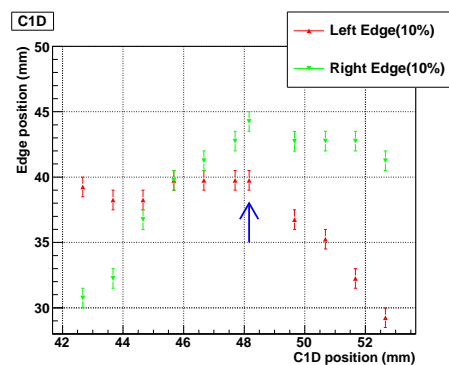


図 5.18 C1D 位置の微調整 (X 方向)。左右の Edge の動きが対称であることを確認する。

前期セットアップでの X 方向のコリメータ位置調節の作業は以上であり、調整前と調整後のコリメータ位置を表 5.1 にまとめる。前期セットアップではビーム標的のステージの固定が外れていたため本来の位置からずれていたために、以上の手順で X 方向のコリメータ位置は大幅に修正されている。前期セットアップでの測定終了後にビーム標的のずれは 20mm であったと確認されたが、コリメータ位置の修正とビーム標的のずれはコンシステントであった。

コリメータ調整後のビームプロファイルは図 5.19 のようになり、左図が小型ニッケル標的でのプロファイル、右図は白金ロッドでのプロファイルである。小型ニッケル標的の場合では 4.3 で定義したビームセンター

表 5.1 前期セットアップでの各コリメータ可動位置の読み値と初期位置からの変位 (X 方向)

| X direction | C1U | C1D | C2U | C2D |
|-------------|--------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| Before | 51.19 mm (0.0mm) | 50.01 mm (0.0mm) | 0.59 mm (0.0mm) | 1.34 mm (0.0mm) |
| After | 47.65 mm (-3.54mm) | 48.16 mm (-1.85mm) | 0.59 mm (0.0mm) | 1.56 mm (0.22mm) |

は中心にはなっていないが、白金ロッドではビームセンターが中心になっていることなどからビーム位置の修正は行っていない。

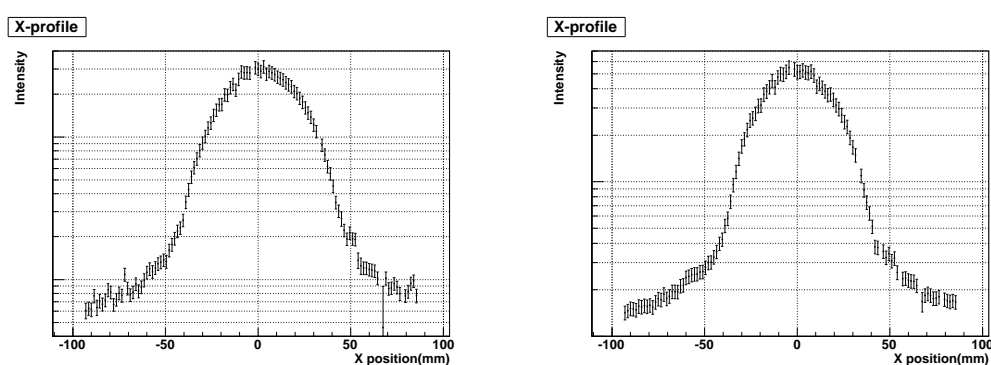


図 5.19 前期セットアップ終了時の X 方向プロファイル (左: Ni) (右: Pt)

5.2.2 前期セットアップ (Y 方向)

次に、Y 方向のコリメータの角合わせの手順を行った。この作業も小型ニッケル標的を使用している。

Y 方向のコリメータの角合わせは Upside edge をそろえた。図 5.20 は C2U を Y 方向に変位させたときの Edge の変化である。同様に、図 5.21 は C1D、図 5.22 は C1U の変位に対するものである。また、コリメータの照準を Y 方向に変位させた時の Yield の変化が図 5.23 である。横軸は、先のコリメータの角合わせの手順が終了した時点でのコリメータ方向を 0mm とし、コリメータ照準のビーム標的の位置での変位を表す。Yield が最大となる 0.83mm の方向にコリメータを合わせた。

その後、C2U、C1D、C1U のコリメータ位置を再度変位させ、Edge の動きが左右対称となるかを確認、微調整した。図 5.24、図 5.25、図 5.26 がその結果である。Edge の動きが対称になる位置として、C2U 位置は 0.76mm、C1D 位置は 51.92、C1U 位置は 49.69mm とした。前期セットアップでの Y 方向のコリメータ位置の変位を表 5.2 にまとめる。

図 5.27 左図はコリメータ調整後の小型ニッケルでのビームプロファイル、右図は白金ロッドでのプロファイルである。ビームセンターはともに -0.75mm となっており、ほぼ中心にあることからビーム位置の修正は行っていない。

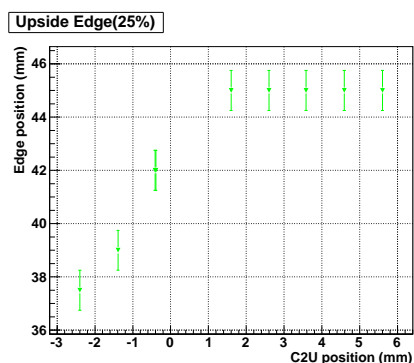


図 5.20 C2U の変位に対する Edge の動き (Y 方向)。Upside edge の動き出す点に注目した。

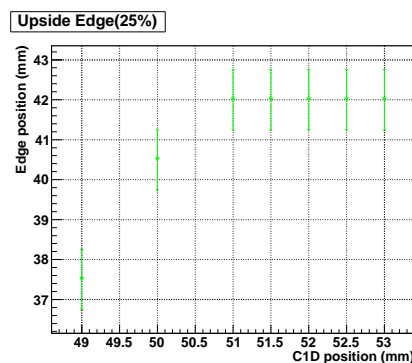


図 5.21 C1D の変位に対する Edge の動き (Y 方向)。

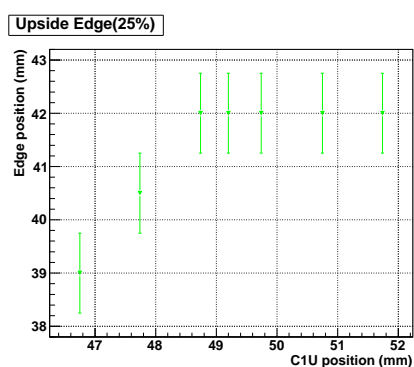


図 5.22 C1U の変位に対する Edge の動き (Y 方向)。

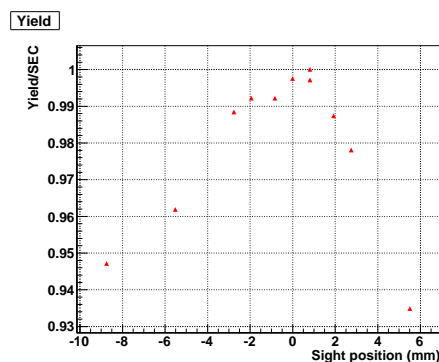


図 5.23 コリメータ照準の変位に対する Yield の変化 (Y 方向)。最高点を 1 として規格化している。

表 5.2 前期セットアップでの各コリメータ可動位置の読み値と初期位置からの変位 (Y 方向)。

| Y direction | C1U | C1D | C2U | C2D |
|-------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Before | 49.97 mm (0.0mm) | 53.06 mm (0.0mm) | 1.60 mm (0.0mm) | 4.64 mm (0.0mm) |
| After | 49.69 mm (-0.28mm) | 51.92 mm (-1.14mm) | 0.76 mm (-0.84mm) | 4.65 mm (0.01mm) |

5.2.3 後期セットアップ

すでに述べたように前期セットアップではビーム標的が 1 次ビーム軸上流側に 20mm ずれていたため、正しい位置に修正された。これに伴い、コリメータ照準も 1 次ビーム軸の下流側に 20mm ずらす操作がされた。後期セットアップでの測定開始時のコリメータ位置は表 5.3 の通りである。

図 5.28 は後期セットアップでの測定開始時のビームプロファイルである。ビーム標的は白金ロッドである。Y 方向プロファイルで $-50\text{mm}\sim 0\text{mm}$ 付近の領域でプロファイル結果に乱れが見られた。これはビームプロファイルモニターに異常があるためである (これについては後述する)。従って、Y 方向プロファイルの

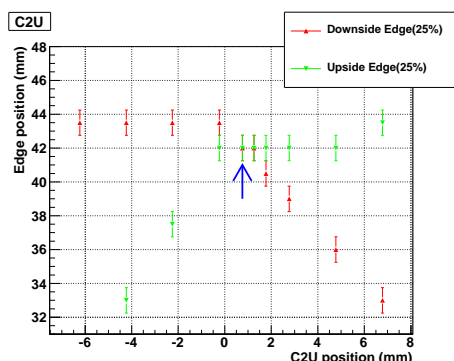


図 5.24 C2U 位置の微調整 (Y 方向)。上下の Edge の動きが対称であることを確認する。

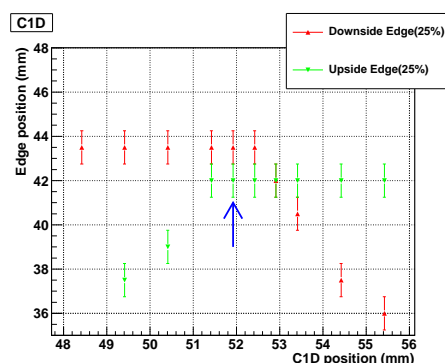


図 5.25 C1D 位置の微調整 (Y 方向)。

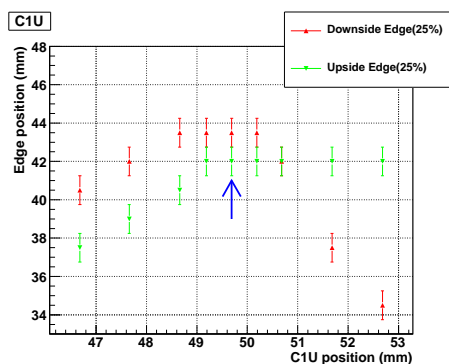


図 5.26 C1U 位置の微調整 (Y 方向)。

表 5.3 後期セットアップ測定開始時のコリメータ位置の読み値と初期位置からの変位。

| | C1U | C1D | C2U | C2D |
|-------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| X direction | 51.98 mm (0.79mm) | 50.9 mm (0.89mm) | 1.99 mm (1.40mm) | 2.03 mm (0.69mm) |
| Y direction | 49.81 mm (-0.16mm) | 51.98 mm (-1.08mm) | 0.84 mm (-0.76mm) | 4.70 mm (0.06mm) |

Downside edge の位置を正しく測定できていない可能性がある。この点に留意しながら測定を行った。

後期セットアップでは、ビーム標的が正しい位置に修正され、それに伴いコリメータ方向も変更させたため、コリメータ照準の最適化の手順と Fine tune の手順によりコリメータ照準がビーム標的を向いていることと各コリメータ位置の変位による Edge の動きが左右 (上下) 対称となっていることを確認、微調整した。また、前期セットアップで行わなかった C2D の位置の最適化も行った。

図 5.29、図 5.30 はコリメータ方向に対する Yield の変化である。図 5.29 が X 方向のコリメータ照準の変位、図 5.30 が Y 方向のものを表す。Y 方向プロファイルはビームプロファイルモニターの異常が見られるため、Yield を正しく測定できていない可能性がある。そのため、Y 方向へのコリメータ照準の変位の Yield の変化を調べるにあたって X 方向プロファイルの Yield の変化を見ることにした。コリメータ照準がビーム標

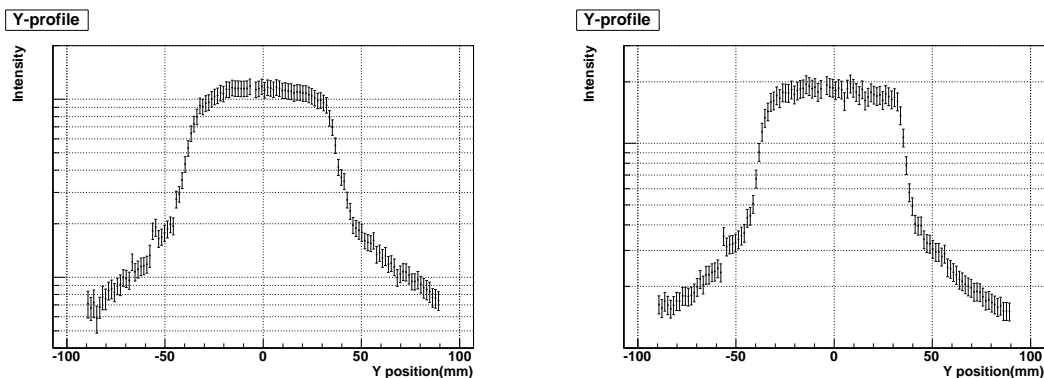


図 5.27 前期セットアップ終了時の Y 方向プロファイル (左: Ni) (右: Pt)

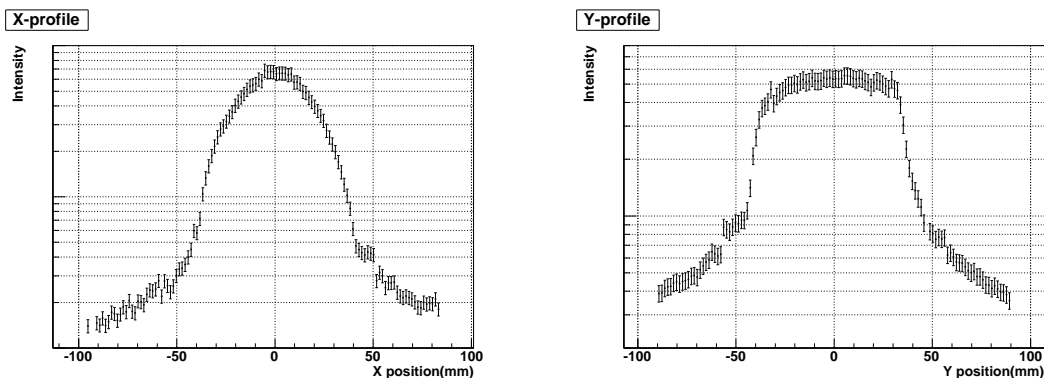


図 5.28 後期セットアップでの測定開始時のプロファイル (Pt)

的から外れることによる Yield の減少効果は X 方向、Y 方向どちらのプロファイルの結果にも表れるため、ここでは X 方向プロファイルの Yield を信用した。Y 方向へのコリメータ照準の変位に対する X 方向プロファイルの Yield の変化を表したものが図 5.31 である。

この結果から X 方向のコリメータ照準は 2.5mm の方向を最適点としコリメータ位置を修正、Y 方向は 0mm の方向を最適点としコリメータ照準がビーム標的を向いていることを確認した。

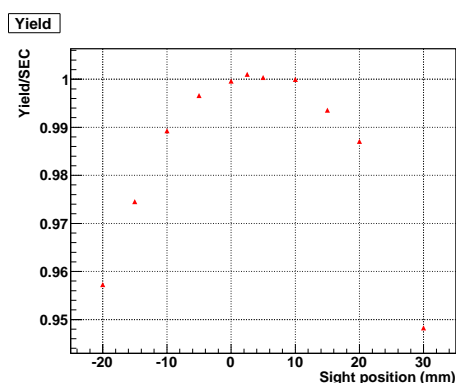


図 5.29 コリメータ照準の変位による Yield の変化 (X 方向)。最高点を 1 として規格化している。

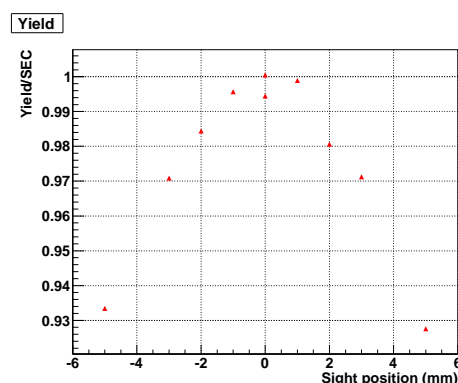


図 5.30 コリメータ照準の変位による Yield の変化 (Y 方向)。最高点を 1 として規格化している。

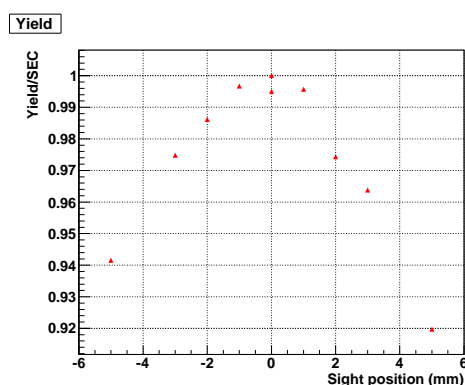


図 5.31 Y 方向へのコリメータ照準の変位に対する X 方向プロファイルの Yield の変化。最高点を 1 として規格化している。

図 5.32 の 4 つの図は各コリメータ位置を X 方向に変位させ、Fine tune を行ったときの Edge 位置の変化である。上流側のコリメータ可動点から順に測定を行い、C1U、は対称点となっていることを確認、C1D は 0.4mm、C2U は 2mm、C2D は 2mm の修正を行った。また、ビームセンターは中心となっていることを確認した。

図 5.33 の 4 つの図は各コリメータ位置を Y 方向に変位させ、Fine tune を行ったときの Edge 位置の変化である。Y 方向プロファイルの Downside edge の位置は正しく測定できていない可能性がある。しかしながら、Downside edge の位置の絶対値は信用できなくとも Edge が動き出す点、すなわち Downside edge 付近のプロファイルに変化が表れ始める点に見えるはずである。従って、定義通り最も出力の大きいチャンネルの 25% を下回る線の位置が変化し始める点に注目した。

C1U、C2U、C2D は上下の Edge の動き出す点が対称になっていることを確認、C1D は 0.5mm の修正を行った。ビームセンターについては Downside edge の位置が正しく測定できていない可能性があるため、判断できない。これについては次節で述べる。

後期セットアップでの作業でのコリメータ位置の変位を表 5.4 にまとめる。また後期セットアップでの調整後のビームプロファイルの測定結果が図 5.34 である。ビーム標的には白金ロッドを用いている。

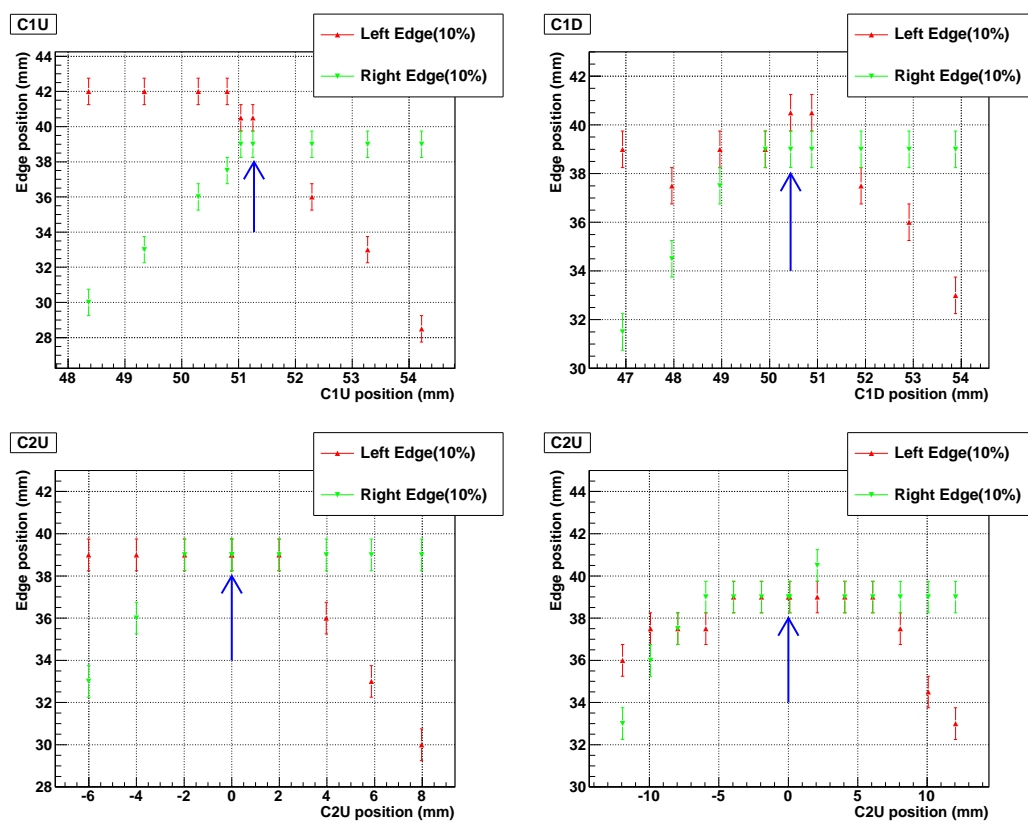


図 5.32 コリメータ各可動部の Fine tune (X 方向)。左右の Edge の動きが対称であるかを確認した。

表 5.4 後期セットアップでの各コリメータ可動位置の読み値と初期位置からの変位。

| X direction | C1U | C1D | C2U | C2D |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Before | 51.27 mm (0.08mm) | 50.90 mm (0.89mm) | 1.99 mm (1.40mm) | 2.03 mm (0.69mm) |
| After | 51.52 mm (0.33mm) | 50.84 mm (0.83mm) | 0.19 mm (-0.40mm) | 0.03 mm (-1.31mm) |

| Y direction | C1U | C1D | C2U | C2D |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| Before | 49.81 mm (-0.16mm) | 51.98 mm (-1.08mm) | 0.84 mm (-0.76mm) | 4.70 mm (0.06mm) |
| After | 49.84 mm (-0.13mm) | 52.46 mm (-0.60mm) | 0.83 mm (-0.77mm) | 5.67 mm (1.03mm) |

5.2.4 Y 方向プロファイルに見られる乱れ

後期セットアップでの Y 方向プロファイルの測定結果にはゆがみが見られた。このゆがみはビームそのものに原因があるのか、ビームプロファイルモニターに異常があるのかを判断するために、ビームプロファイル

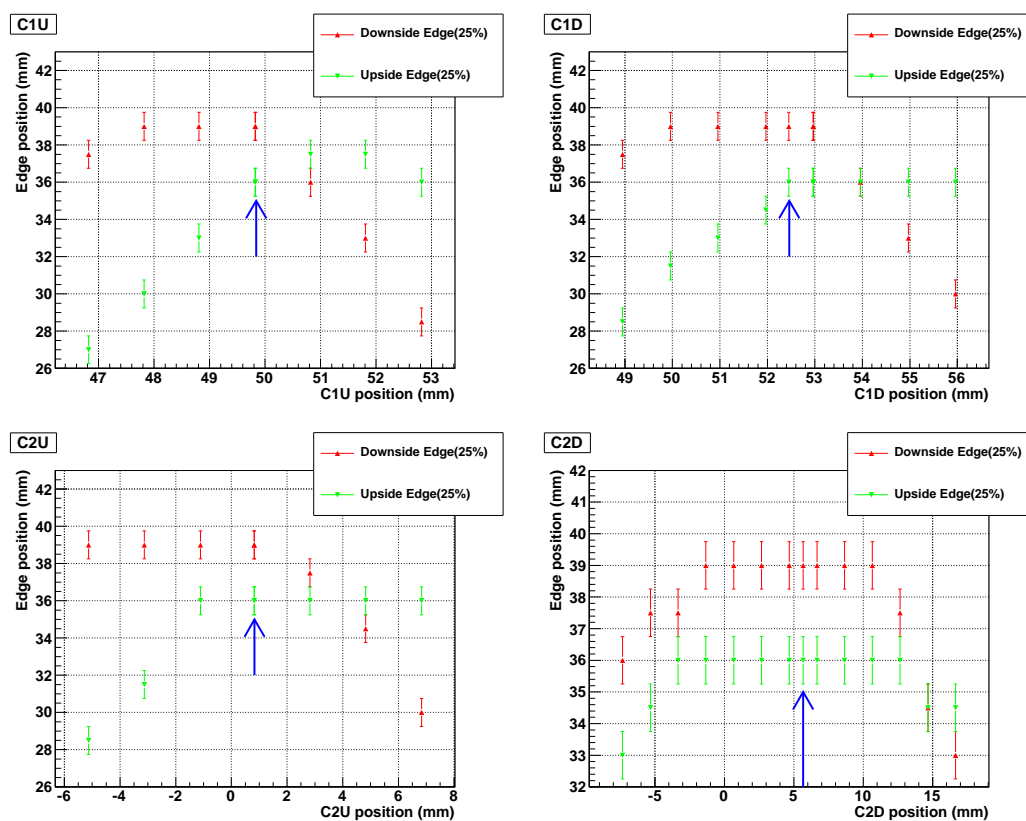


図 5.33 コリメータ各可動部の Fine tune (Y 方向) 上下の Edge の動きが対称であるかを確認した。

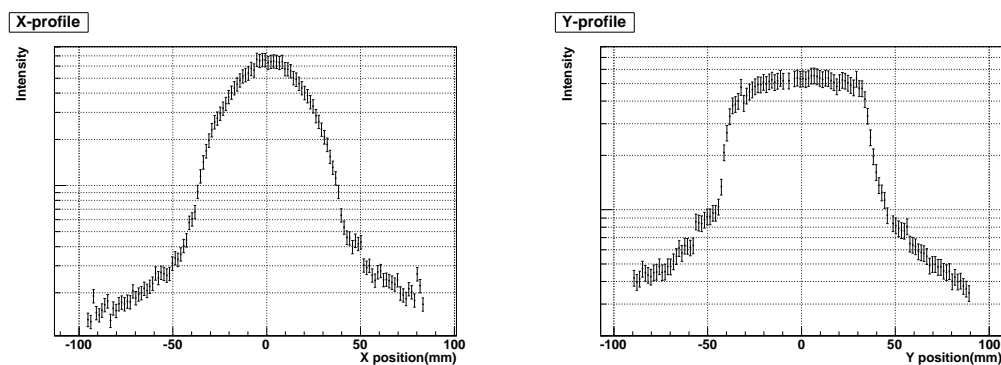


図 5.34 コリメータ位置の Fine tune 後のビームプロファイル

モニターを Y 方向にずらして測定し、プロファイル結果を比較した。

図 5.35 はビームプロファイルモニターの Y 方向中心を実験エリアの罫書線に合わせた状態でのプロファイル(黒)、Y 方向に -4.5cm (鉛直下向きに 4.5cm) ずらした状態でのプロファイル(赤)、Y 方向に -3.0cm ずらしたプロファイル(青)、Y 方向に 3.0cm (鉛直上向きに 3.0cm) ずらしたプロファイル(緑)を、ビームプロファイルモニターをずらした分だけ補正して比較したものである。この図から、ビームプロファイルモニ

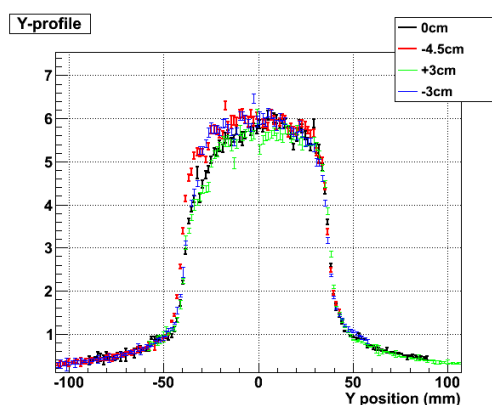


図 5.35 ビームプロファイル結果の位置依存性

ターのビームを当てる位置によって $-50\text{mm}\sim 0\text{mm}$ の領域でプロファイル結果が変わっていることがわかる。したがって、ビームプロファイルモニターに何らかの異常があると判断した。0mm (黒) と -4.5cm (赤) のプロファイルで最大で 1.6 倍の差が見られる。

図 5.36 は -30mm の位置のチャンネルの出力の様子である。ADC ユニットの測定レンジは $\pm 2.5\text{V}$ である。図 5.36 の出力はこのレンジにおさまっており、他のチャンネルにおいてもオーバー・フローは起こしていないことを確認している。

また、5.1.2 で述べたように ^{90}Sr 線源のプロファイルを、ビームプロファイルモニターの位置によってプロファイルが変わることはなく、後期セットアップでの測定前後で校正に問題がないことは確認している。

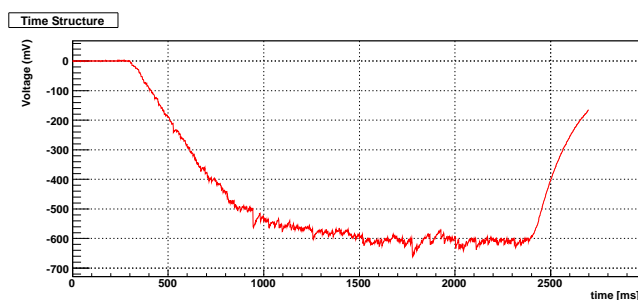


図 5.36 Y 方向 -30mm の位置のチャンネルの信号

さらに、図 5.37 の左図は γ absorber なし (赤) でのプロファイルと 7cm 厚 γ absorber 7cm がビーム中に入っているときのプロファイルの比較である。右図はこれら 2 つのプロファイルの比である。この図から $-30\text{mm}\sim 30\text{mm}$ の領域のチャンネルでは、 γ absorber の有無によってどのチャンネルも出力がおよそ 12 倍になっており、そのばらつきは $\sim 10\%$ 程度に収まっていることが分かる。したがって、プロファイルにずれが見られる $-50\text{mm}\sim 0\text{mm}$ のチャンネルを含む $-30\text{mm}\sim 0\text{mm}$ のチャンネルで、線形性が著しく崩れているということも考えられない。

Y 方向プロファイルがビームプロファイルモニターの位置によって違って見える原因は現段階ではわかっていない。しかしながら、後期セットアップでのコリメータ方向の最適化の手順では X 方向プロファイルの測定結果の Yield の変化を見ている。また、Fine tune の手順においても Downside edge 位置の絶対値ではな

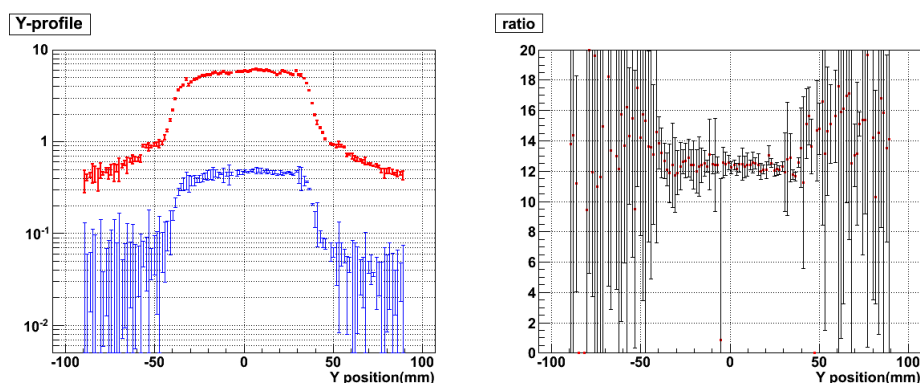


図 5.37 γ absorber 0cm/7cm のプロファイルとその比

く変化し始める点に注目していることから、これらの手順は正常にできていると考えている。Downside edge 位置の絶対値が求まらないため、ビームセンターが中心にあるかどうかの判断だけは不可能であった。この確認は、別の測定器でのビームプロファイル測定によって行われた。この測定器は PWO 結晶、プラスチックシンチレータから成る検出器をビーム断面を移動しながらビームプロファイルを測定するものである。この測定器でのプロファイル測定によって Y 方向プロファイルの中心線がずれていないことが確認されたため、ビーム位置の修正は行わなかった。また、この測定器によって Y 方向プロファイルにゆがみがないことも確認されている。

5.3 シミュレーションとの比較

5.3.1 モンテカルロ・シミュレーションとの比較

図 5.38、図 5.39 はモンテカルロ・シミュレーションでの、ファイバーに与えられたエネルギー・デポジットの和によるビームプロファイルとビームプロファイルモニターによるプロファイル測定データの比較である。最高値のチャンネルを 1 として規格化している。ハロー領域の出力が 2~3 倍、データとシミュレーションで合っていない。シミュレーションには PMT 光電面でのクロストークやファイバー間での光の伝搬によるクロストークの寄与は考えてない。これらの寄与も取り入れたモデルによってハローの出力の差を説明できるかなどの検討が必要である。X 方向ではビーム・コア領域での実験データとシミュレーションによるプロファイルはよく合っている。Y 方向は GEANT3 の仕様起因する低エネルギー γ がつくる特異な構造 (3.4 参照) によって、モンテカルロと実験データの比較が難しく今後の工夫が必要である。

10% ライン、および 25% ラインで定義する Left edge、Right edge、Upside edge、Downside edge の位置はモンテカルロによるエネルギー・デポジットでのプロファイルと実験データでのプロファイルでファイバー 1 本分の 1.5mm の差が見られるが、ビームプロファイルの変化による Edge 位置の動きを追従できていることは後述する光源モデルの追跡シミュレーションと実験データの比較から示される。

5.3.2 光源モデル・シミュレーションとの比較

後期セットアップでのコリメータ位置の調節で決定したコリメータ位置がデザイン通りの位置であると仮定する。そこを出発点にアラインメント手順をさかのぼることで、後期セットアップでのプロファイル測定の各手順のときのコリメータ位置を再現できる。光源モデル・シミュレーションにより予測されるビーム Edge、

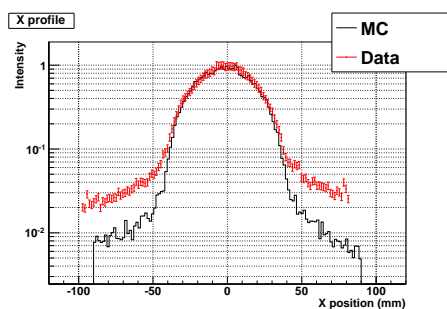


図 5.38 モンテカルロ・シミュレーションと実験データの比較 (X 方向)。黒が MC により、ファイバーのエネルギー・デポジットの和を縦軸としたプロファイル。赤は実験データ。

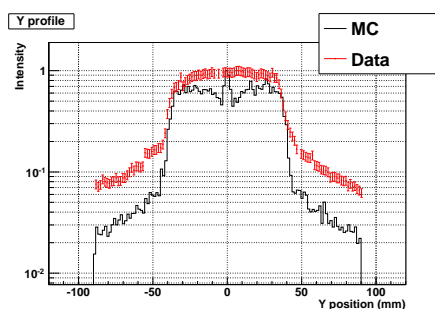


図 5.39 モンテカルロ・シミュレーションと実験データの比較 (Y 方向)。X 側と同様である。

Yield の変化の仕方が後期セットアップでの実際のビームの振り舞いと一致するかの確認を行った。このように、当時のコリメータ位置を光源シミュレーション上で再現し、実験データと比較を行うことを追跡シミュレーションと呼ぶことにする。

図 5.40、図 5.41 は、図 5.29、図 5.31 と同じ図であるが、光源モデルによる追跡シミュレーションの結果と比較したものである。光源モデルが予測するコリメータ照準の変位による Yield の変化と実験データはよく一致しており、最高点を 1 として規格化したときに、各測定点の光源モデルでの予言値と実験データは 1% 以内の精度で一致している。

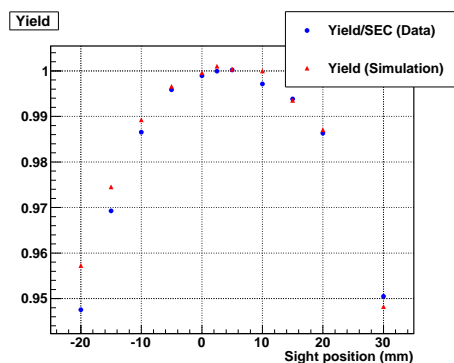


図 5.40 コリメータ照準の変位による Yield の変化 (X 方向) と光源シミュレーションの比較。最高点を 1 として規格化している。

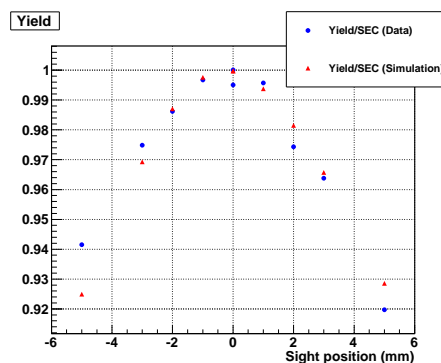


図 5.41 コリメータ照準の変位による Yield の変化 (Y 方向) と光源シミュレーションの比較。最高点を 1 として規格化している。

図 5.42 は後期セットアップでの各コリメータの Fine tune の手順を行ったときの光源モデルによる追跡シミュレーションと実験データの比較の 1 例である。上段は C1U の X 方向の Fine tune、下段は C1D の Y 方向の Fine tune についてである。光源モデルでの追跡シミュレーションでの Edge の位置は、実験データの Edge の位置と比べ 1.5mm~3.0mm 内側に位置する。これはビームプロファイルモニターのクロストークなどによって、得られるビームプロファイルが広がっているためだと考えられる。しかしながら、ビーム Edge の動きについては光源モデルでの Edge の動きとよく合っている。このことは、コリメータの変位によるビー

μ Edge 位置の変化の光源モデルによる予測の実用性の高さや光源モデルが予測する Edge の変化をビームプロファイルモニターで捉えることができていることを示していると言える。実験データと光源モデルによる追跡シミュレーションを比較して、左右（上下）の Edge が動き始める位置は 1mm 以内で一致している。コリメータのアラインメント 1mm 以内の誤差で合わせることができたと考えている。

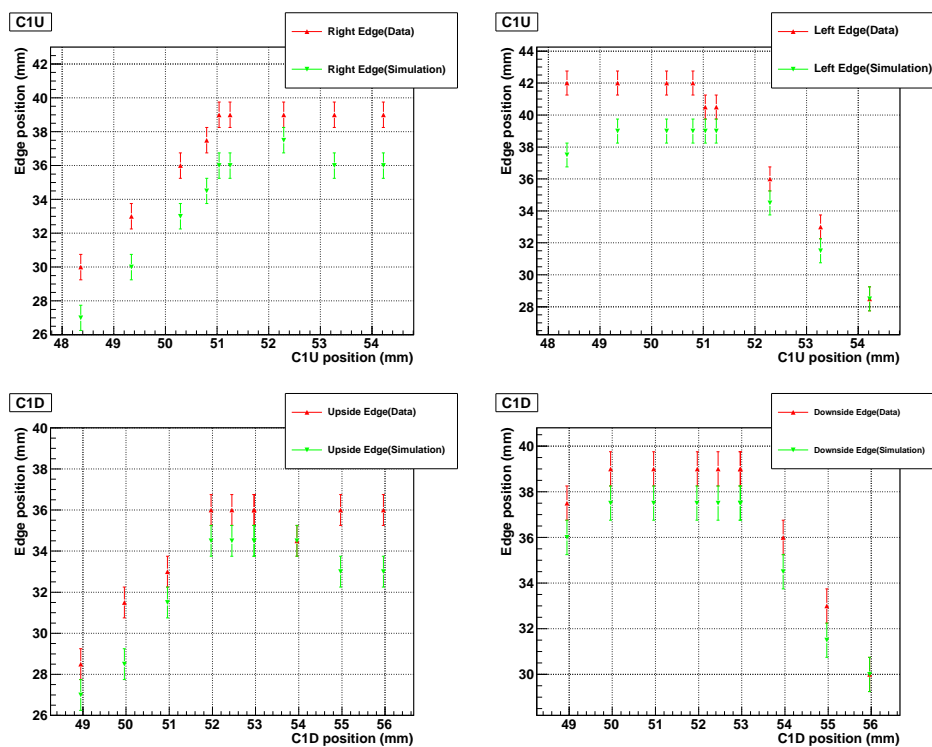


図 5.42 光源モデル・シミュレーションによる追跡シミュレーションと実験データの比較。赤が実験データ、緑が光源モデルによる追跡シミュレーション。Edge の動きをよく再現できており、光源モデルで予測したビーム Edge の変化を追従できていることを示している。

5.4 Time structure

J-PARC Main Ring からハドロン実験施設へのビームはおよそ 2s (将来的には 0.7s) かけて取り出される。加速陽子を用いて生成される大量の 2 次粒子を有効に使用するためには取りだされるビームの強度は時間変化を持たないことが望ましい。K^OTO 実験の K_L ビームラインで得られるビームの強度に数百 ns より長いレンジでの時間変動がある場合はビームプロファイルモニターの Time structure mode での測定で観測できる。以下、 K_L ビームの時間構造の測定について述べる。

時間構造測定のためにビームプロファイルモニターの積分回路の時定数を Time structure mode の設定に変更し、上流側の Y 方向測定用ファイバーの中心のチャンネルを選択した。PMT の HV は -700V としている。なお、 γ absorber は 7cm 厚のものを入れた状態にしている。

図 5.43 は ^{90}Sr 線源を照射したときの Time structure mode での測定結果である。 ^{90}Sr 線源からの β 線によって得られるパルス高は $\sim 30\text{mV}$ である。

一方、図 5.44 は 2 例の K_L ビームの時間構造 (左) と横軸の縮尺を変更した図 (右) である。パルス高は \sim 数百 mV のものが多く、ADC のサンプリング間隔である $100\mu\text{s}$ 内に複数の粒子が到来している。また、パルスとパルスの間隔も線源での測定結果に比べ周期的な構造が見られている。

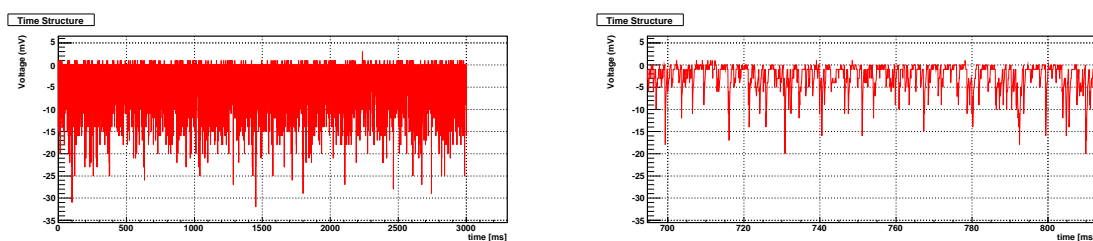


図 5.43 ^{90}Sr 線源照射時の時間構造 (左) とその拡大図 (右)

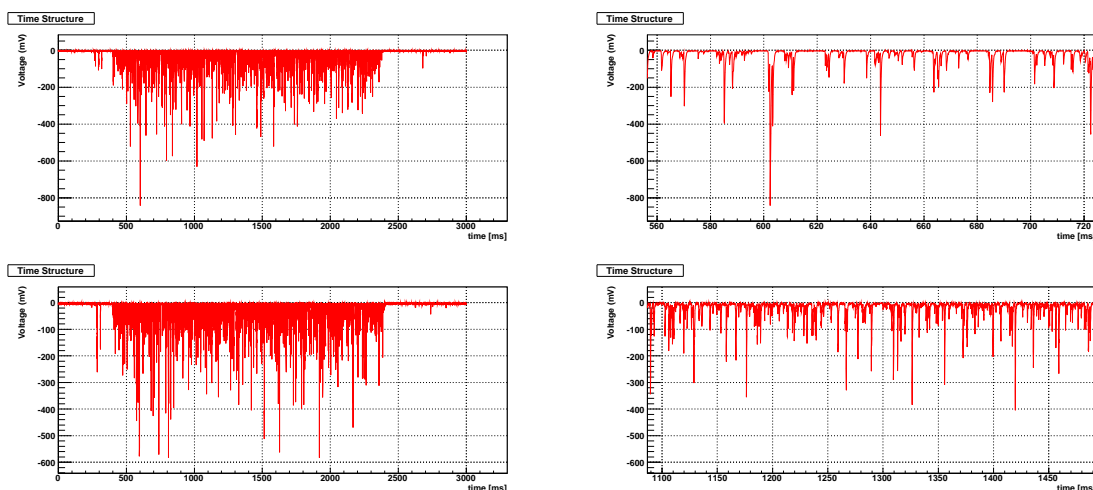


図 5.44 K_L ビームの時間構造 (左) とその拡大図 (右), 2010 年 11 月。 $D = 17.3\%$

このような、ビームに表れるスパイク状の時間構造は加速器のマグネットの電源リップルなどが原因で表れていると考えられており、加速器システムにいくつかの対策が講じられてきた。以下の図は各時期の K_L ビームの時間構造の遷移である。なお、縦軸は HV の設定が異なるため数値を記入していない。

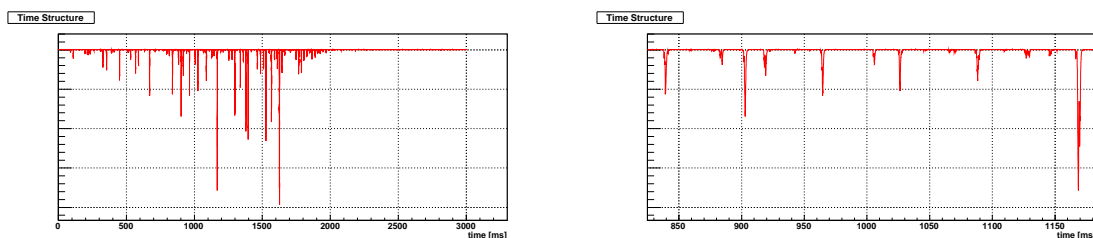


図 5.45 2009 年 11 月の K_L ビームの時間構造 (左) とその拡大図 (右), $D = 2.9\%$

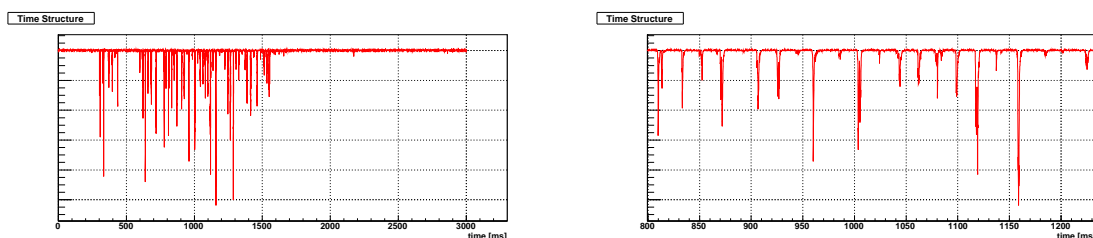


図 5.46 2009 年 12 月の K_L ビームの時間構造 (左) とその拡大図 (右), $D = 13.8\%$

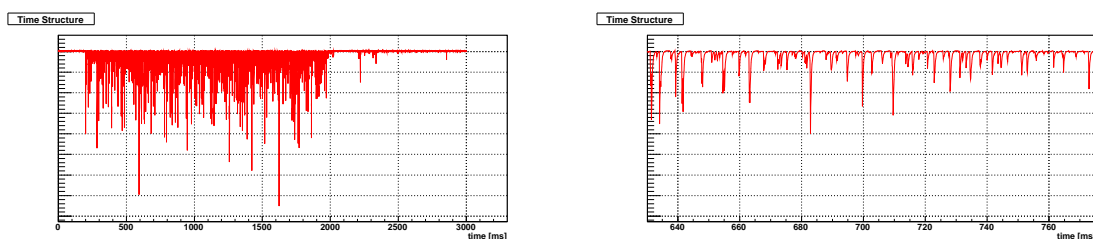


図 5.47 2010 年 2 月の K_L ビームの時間構造 (左) とその拡大図 (右), $D = 15.6\%$

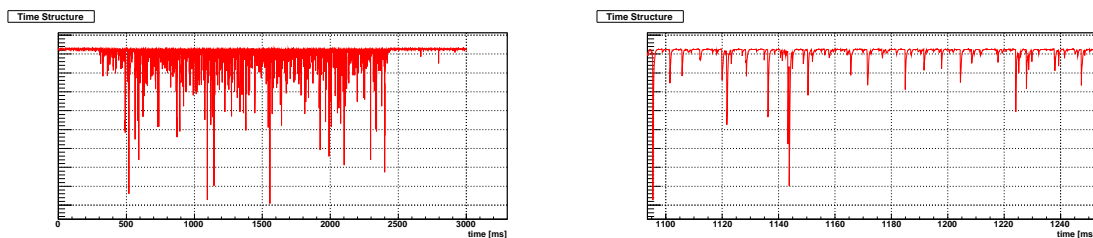


図 5.48 2010 年 10 月の K_L ビームの時間構造 (左) とその拡大図 (右), $D = 10.0\%$

これらビームの時間構造のスパイク構造の度合を数値的に評価するものとして、

$$D \equiv \frac{\left\{ \int_0^T I dt \right\}^2}{\int_0^T dt \times \int_0^T I^2 dt} \quad (5.1)$$

などがある。 I はビームの強度を時間 t の関数として表したものである。ビームプロファイルモニターの Time structure mode での測定の場合では、サンプリング回数を $N=30000$ 、ADC ユニットで読み取った電圧を v_i として、

$$D = \frac{\left\{ \sum_i v_i \right\}^2}{N \sum_i v_i^2} \quad (5.2)$$

となる。この数値は回路の時定数やサンプリング間隔に依存することもありビームの時間構造の評価方法については今後検討が必要であるが、図 5.45 では $D = 2.9\%$ 、図 5.46 では $D = 13.8\%$ 、図 5.47 では $D = 15.6\%$ 、図 5.48 では $D = 10.0\%$ 、図 5.44 では $D = 17.3\%$ とビームの時間構造が変化してきたことが表れている。

しかし、図 5.44 の拡大図からもわかるように依然として ADC のサンプリング間隔である $100\mu\text{s}$ の間に複数の粒子が到来しており、この $100\mu\text{s}$ 内にくる粒子群は、その時間内にどれだけ分散しているのかを知るためにはさらに高いサンプリングレートと短い時定数での測定が必要である。K⁰TO 実験では CsI カロリーメータに 2 つのクラスターのエネルギー・デポジットがあれば、その前後の時間に veto 検出器に反応があるか否かでイベントを選択する。この veto timing window 内に他の粒子が来る確率が高いとシグナル事象によって CsI に 2 つのクラスターのヒットがあっても veto 検出器が反応してしまいロスとなる。どの程度までのスパイク構造を、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験を行う上で許容しうるのかを見極めながら、ビームの時間構造の改善を要求していくことが今後の課題となる。

6 まとめ

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験である K^0 TO 実験では、細く絞った K_L ビームを用いる。また、バックグラウンドを生み出す「ハロー中性子」をできるだけ抑えることが実験を行う上での課題であった。このためのビームラインが J-PARC ハドロン実験施設に建設されが、このビームラインが真価を発揮するためにはビームライン・コリメータが精度よく並べられていなければならない。こういった背景の中で筆者が行った研究活動は次のようなものである。

- K_L ビームの形状、位置を測定するためのビームプロファイルモニターの開発。
- 上記のビームプロファイルモニターを用いた K_L ビームライン・コリメータのアラインメント方法の確立。
- ビームプロファイルモニターによるビームプロファイルの測定とこれによるビームライン・コリメータのアラインメント。

ビームライン・コリメータをアラインするにあたって、ビームの形状や位置を測定するためのビームプロファイルモニターが必要となる。ビームの形状や位置を測定しながらコリメータの調整にフィードバックをかけるため、ビームプロファイルを短時間で測定できることが要求される。これらの目的のためのビームプロファイルモニターの開発を行った。シンチレーティングファイバー、MAPMT (Multi-Anode PhotoMultiplier Tube) などを用いた多チャンネル読み出し式の検出器とし、短時間で測定ができるようにした。多チャンネル化に伴うデータ収集システムの大規模化やコストの増大を回避するために、チャンネルあたりのコストが低い ADC ユニットを採用するなどの工夫をしている。これにより、多チャンネル読み出し式のビームプロファイルモニターでありながら低コストでコンパクトな検出器システムとし、短時間でビームプロファイル測定を可能にした。ビームプロファイルモニターは 1.5mm 幅のシンチレーティングファイバーから構成される検出器であるが、検出器自身による粒子の散乱、MAPMT 光電面でのクロストークなどの寄与によって本来のビームプロファイルよりも 1.5mm~3mm 広がって見える。しかし、コリメータ位置の変位に伴うビームプロファイルの変化をとらえることができおり、これによるビームライン・コリメータのアラインメントを行った。

コリメータ位置の変位に対するビームプロファイルの変化を理解するために光源モデルによるシミュレーション方法を採用した。モンテカルロ・シミュレーションにより、あらゆるコリメータコンディションでのビームプロファイルを調べるには莫大な時間を要する。光源モデルによるシミュレーションによって、さまざまなコリメータのコンディションでのビームプロファイルの変化を短時間で調べ、コリメータアラインのための手順を確立した。確立したコリメータアラインの手法によって、シミュレーション上ではコリメータ各可動点を 0.3mm 以下の精度でアラインすることに成功している。

J-PARC ハドロン実験施設の K^0 TO 実験エリアにビームプロファイルモニターをインストールし、ビームプロファイル測定およびコリメータ位置の調整を行った。実験データとシミュレーションとの比較から、ビームプロファイルモニターは光源モデルによって予測される Edge の動きをよく捉えることができていることが示された。ただし、後期セットアップでの測定では Y 方向プロファイルがゆがんで見られた。このゆがみはビームプロファイルモニターの位置に依存して見られたため、ビームプロファイルモニターに何らかの異常があったと考えられるが原因はわかっていない。Y 方向プロファイルにゆがみは見られたが、コリメータ位置調節の手順はビーム Edge の絶対値ではなく、Edge が動き始める点に注目していることやビーム Yield は X 方

向プロファイルでの Yield の変化に注目したことからコリメータ位置は正しく調節できたと考えている。別の測定器によってビームの Y 方向プロファイルにゆがみがないことやビーム位置が中心にあることが確認されている。光源モデルによる追跡シミュレーションを行い、実験データと比較すると Edge が動き始める点が 1mm 以内の誤差で一致していることからコリメータのアラインメントを 1mm の精度でできていると考えている。

ビームプロファイルモニターは RC 積分回路のパラメータ変更や ADC ユニットの読み取りパターンの変更により、ビーム強度の時間構造を $\sim 200\mu\text{s}$ 程度の細かさで見ることができる。ビームの時間構造の測定により、加速器マグネットの電源リップルなどによるビーム取り出しにスパイク状の構造が緩和されていっている様子を見ることができている。しかしながら、依然としてスパイク状の時間構造は見えており、どの程度まで改善しなければ $K^0\text{TO}$ 実験に影響が出るのかを見極めることが今後の課題となる。

以上のように、 $K^0\text{TO}$ 実験を行う上での大前提となるビームライン・コリメータのアラインを行った。コリメータのアラインができなければ実験はもちろん、その準備のための様々な測定も行えないため大変重要な仕事であったと言える。また、J-PARC のビームタイムには限りがある。コリメータのアラインのためのプロファイル測定に時間を費やしては本末転倒である。本研究で開発したビームプロファイルモニターにより短時間でプロファイル測定を行い、実験を行える条件を整えている。本研究でのコリメータのアラインに続き、 $K^0\text{TO}$ 実験エリアでは取りだされる K_L の Yield や運動量の測定、建設が進む CsI カロリメータの性能評価テストなど重要な測定が行われてきた。今後、検出器群は順にインストールされ世界初の $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊観測に向けて実験が進められる。

参考文献

- [1] J.Comfort *et al.* "Proposal for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at J-Parc" [<http://j-parc.jp/NuclPart/>]
- [2] J-PARC [<http://j-parc.jp/>]
- [3] F.Mescia and C.Smith *Phys. Rev. D* 76 (2007) 034017
- [4] J.K.Ahn *et al.* "Experimental study of the decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ " *Phys. Rev.D* 81, 072004 (2010)
- [5] H.Watanabe *et al. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.,Sect.A* 545 (2005) 542
- [6] T.Shimogawa, *et al.* "Design of the neutral K_L^0 beamline for the *KOTO* experiment" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 623 (2010) 585
- [7] Goh Takahashi, *et al.* "Development of a Neutral Beam Profile Monitor" *to be published in JJAP* 50 (2011)
- [8] A.J.Buras, S. Uhlig, and F. Schwab *Rev. Mod. Phys.* 80 (2008) 965
- [9] J.Adams, *et al.*
"Search for the decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ " *Phys. Lett.B*447, 240 (1999), hep-ex/9806007
- [10] A.Alavi-Harati, *et al.*
"Search for the Decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ using $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ " *Phys. Rev.D*61, 072006 (2000), hep-ex/9907014
- [11] J. K. Ahn *et al.* [E391a Collaboration], "New limit on the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay rate," *Phys. Rev. D* **74**, 051105 (2006) [Erratum-ibid. *D* **74**, 079901 (2006)] [arXiv:hep-ex/0607016].
- [12] J. K. Ahn *et al.* [E391a Collaboration], "Search for the Decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$," *Phys. Rev. Lett.* **100**, 201802 (2008) [arXiv:0712.4164 [hep-ex]].
- [13] H.Maesaka *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 139 (2005) 289
- [14] 増田孝彦 "K^OTO 実験に用いる低消費電力型光電子増倍管ベースの開発" 修士論文 京都大学 (2009)
- [15] 内藤大地 "K^OTO 実験に用いる荷電粒子 Veto 検出器の開発" 修士論文 京都大学 (2010)
- [16] 河崎直樹 "K^OTO 実験のための Neutron Collar Counter のデザイン及び開発" 修士論文 京都大学 (2009)
- [17] 臼杵亨 "ガスシンチレーション比例計数管を用いた高い検出効率を持つ荷電粒子検出器の開発" 修士論文 京都大学 (2009)
- [18] 前田陽祐 "K^OTO 実験のための中性子不感型光子 veto 検出器の開発" 修士論文 京都大学 (2010)
- [19] 佐々木通 "新型ニュートリノ検出器 SiBar に用いる光電子増倍管の性能評価とゲイン測定" 修士論文 京都大学 (2003)
- [20] 塩見公志 "E14 実験におけるバックグラウンド事象についての研究" 修士論文 京都大学 (2008)