

# J-PARC E16実験のためのハドロンブラインド 検出器運用安定化に向けた検出器開発

柳井 祥吾

2026年2月

## Abstract

QCD 真空ではカイラル対称性が自発的に破れ、クォーク対が凝縮している。クォークの複合粒子であるハドロンの質量の大部分は、クォーク凝縮との相互作用により生ずると考えられている。また、NJL 模型の計算では、高温・高密度環境でカイラル対称性の破れが部分的に回復し、クォーク凝縮が減少すると予想されており [1]、これに伴ってハドロンの質量が減少すると考えられる。J-PARC E16 実験では高密度環境での  $\phi$  中間子の質量スペクトル測定を行う。QCD 和則を用いて、ストレンジネス凝縮量と  $\phi$  中間子の質量変化間の関係が計算されている [2] ため、測定した  $\phi$  中間子の質量変化からクォーク凝縮量を導出することが可能である。

E16 実験では、 $\phi$  中間子の崩壊により生ずる電子・陽電子対の飛跡情報を用いて  $\phi$  中間子の質量スペクトルを求める。レプトンである電子対は強い相互作用の影響を受けないため、中間子の質量を測定するための手段として適している。ハドロン反応において多数発生する  $\pi$  中間子を除去し、粒子識別の目的で用いられる検出器の一つがハドロンブラインド検出器 (Hadron Blind Detector, HBD) である。HBD はガスケレンコフ検出器であり、検出器内で輻射されたチェレンコフ光を光電面で電子に変換した後、3 段ある電子増幅装置 (GEM) により増幅した信号を検出する。

2026 年 1 月現在まで、E16 実験では 5 回のコミッショニングランが行われてきた。コミッショニングランで HBD を運用する際、ビーム強度の揺れによる一時的な高計数率によって HBD 内の GEM が導通し、電子増幅の機能を失うケースが多く見られた。これを受け HBD の運用安定化のため、GEM 間の間隔を広げることで導通による破損を抑制する試みを行った。

GEM 間の間隔を広げたことで運用が安定化すると考えられる一方で、GEM 間の電場が弱められることが懸念される。電場の低下に伴い、電子増幅性能が低下し、電子対検出効率に影響を与える恐れが存在していた。そこで本研究では、HBD1 モジュール間における検出効率の比較を行い、上記の構造変更が検出器性能に与える影響について評価した。ビームの時間構造の問題により、解析対象のランでは評価にあたり十分な量の電子のデータを得ることができなかったため、電子の代わりに  $\pi$  中間子検出効率を求め、評価を行った。増幅元の電子がチェレンコフ光によるものか  $\pi$  中間子によるガスの電離によるかを問わず、GEM を通り増幅される機構は同一であるため、電子増幅効率を調べる上では問題ないと判断した。

性能評価の結果、両モジュールの  $\pi$  中間子の検出効率は誤差の範囲で一致した。構造変更は HBD の電子増幅率に影響を与えないことが確認され、行った施策が HBD の運用安定化のために有用であると示された。

# Contents

<b>1 序論</b>	<b>5</b>
1.1 ハドロンと量子色力学	5
1.2 クォーク凝縮とハドロン質量	5
1.3 QCD 和則	6
1.4 先行研究	7
1.5 J-PARC E16 実験	10
1.6 本論文の目的及び構成	13
<b>2 実験装置</b>	<b>14</b>
2.1 実験施設 J-PARC	14
2.2 E16 実験スペクトロメータ	16
2.2.1 FM 電磁石	20
2.2.2 シリコンストリップ検出器 (STS、Silicon Tracking System)	20
2.2.3 GEM 飛跡検出器 (GTR、GEM Tracker)	20
2.2.4 ハドロンブラインド検出器 (HBD、Hadron Blind Detector)	22
2.2.5 鉛ガラスカロリメータ (LG、Lead glass)	23
2.3 標的	25
2.4 トリガー	25
<b>3 ハドロンブラインド検出器</b>	<b>27</b>
3.1 動作原理	27
3.2 GEM	28
3.3 要求性能	28
<b>4 安定化運用に向けた開発</b>	<b>30</b>
4.1 構造の最適化	30
<b>5 性能評価</b>	<b>32</b>
5.1 概要	32
5.2 使用データ	32
5.3 イベント・トラック選択	32
5.3.1 トラック	36
5.3.2 鉛ガラスカロリメータとトラックの相関	37
5.3.3 運動量及び入射角	39
5.3.4 運動量と STS の ADC	42
5.4 解析	44
5.4.1 HBD の残差分布	44
5.4.2 検出効率	46
<b>6 議論および今後の展望</b>	<b>47</b>
6.1 性能評価の議論	47
6.2 Run1a での運用結果	47
<b>7 まとめ</b>	<b>49</b>

A 付録 A	50
参考文献	53

# 1 序論

## 1.1 ハドロンと量子色力学

ハドロンは、素粒子であるクォーク間に強い相互作用が働くことによって、クォークが結合した粒子である。クォークを結びつける作用である強い相互作用は、フレーバー SU(3) ゲージ対称性を持つ場の量子論である、量子色力学 (quantum chromodynamics、QCD) によってよく説明される。図 1.1 は QCD における、強い相互作用の結合定数  $\alpha_s$  のエネルギースケール依存性を示す。

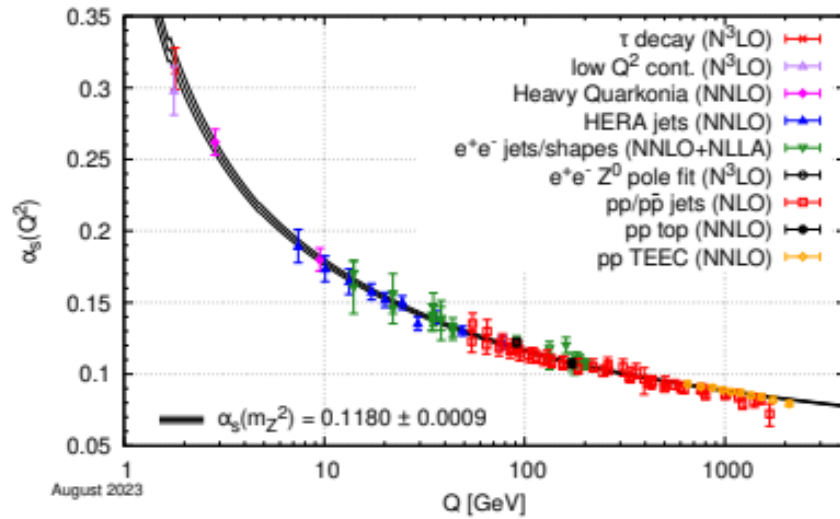


図 1.1: 強い相互作用の結合定数  $\alpha_s$  のエネルギースケール依存性を示す図。[3]

エネルギースケールが高いとき、結合定数  $\alpha_s$  は減少し、漸近的自由性を持つので、摂動論による計算が可能である。一方、低エネルギースケールでは  $\alpha_s$  が増大し、カイラル対称性の自発的破れをはじめとした、非摂動論的現象が見られる。このような現象について摂動論的アプローチで計算することは困難であると考えられており、格子 QCD やハドロン有効模型などの理論を用いた試みが行われている。

## 1.2 クォーク凝縮とハドロン質量

QCD における低エネルギー領域での特徴的な現象としてクォーク対の凝縮が挙げられ、クォーク凝縮はハドロン質量と密接な関係にあると考えられている。

クォーク単体の質量はヒッグス機構により説明される一方、その複合粒子であるハドロンの質量はヒッグス機構によって与えられる値と比べて顕著に大きい。QCD 真空においてはカイラル対称性が自発的に破れ、クォーク対の凝縮が存在する。ヒッグス機構で説明することができないハドロンの質量の大部分は、凝縮したクォーク対との相互作用により生ずるとされる。ハドロン有効模型の一つで

ある NJL 模型による計算によると、カイラル対称性は高温・高密度環境下において一部回復し、クォーク凝縮が減少するとされている [1]。温度、密度依存性を示す計算結果の図を図 1.2 に示す。

よって、高温・高密度環境の元でハドロンの質量を測定する実験を行うことにより、カイラル対称性の自発的破れとハドロンの質量の間にある関係を調べることができる。

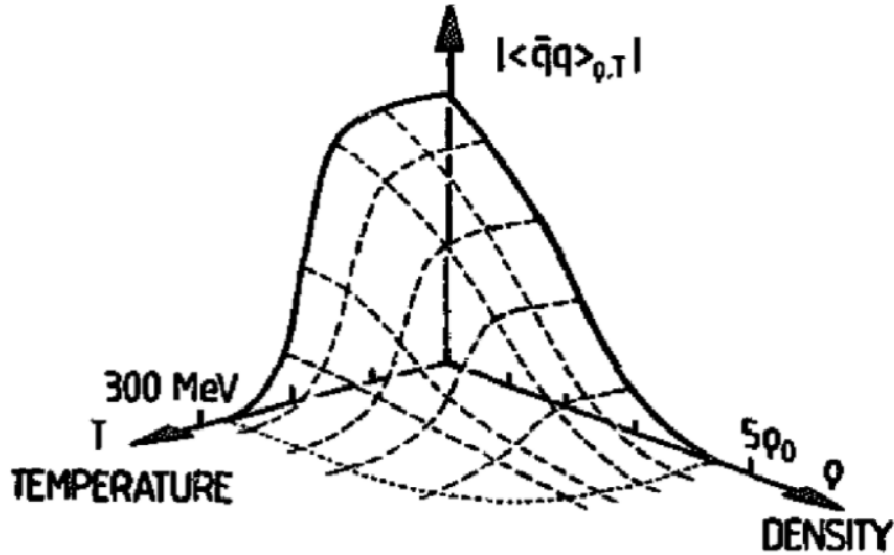


図 1.2: クォーク凝縮  $\langle q\bar{q} \rangle$  の温度依存性及び密度依存性 [1]。

### 1.3 QCD 和則

QCD 和則は、クォーク凝縮  $\langle q\bar{q} \rangle$  の量と、測定可能な物理量であるハドロンの質量間を説明する理論であり、1979 年に Shifman, Vainshtein, Zakharov により提唱された [4]。QCD 和則によると、密度  $\rho$  下でのストレンジネス凝縮  $\langle \bar{s}s \rangle_\rho$  は、以下の通りとなる。

$$\langle \bar{s}s \rangle_\rho = \langle \bar{s}s \rangle_0 + \langle N|\bar{s}s|N \rangle \rho \quad (1)$$

また、Gubler, Ohtani による、最大エントロピー法を利用した QCD 和則の計算 [2] により、ストレンジネス凝縮と  $\phi$  中間子の質量変化間の関係が計算された。その結果を図 1.3 に示す。この結果を用いることで、測定した  $\phi$  中間子の質量変化からクォーク凝縮量を導出することが可能となる。QCD 和則は、このようなクォーク凝縮量をモデルに依らず決定できるという点において強力である。

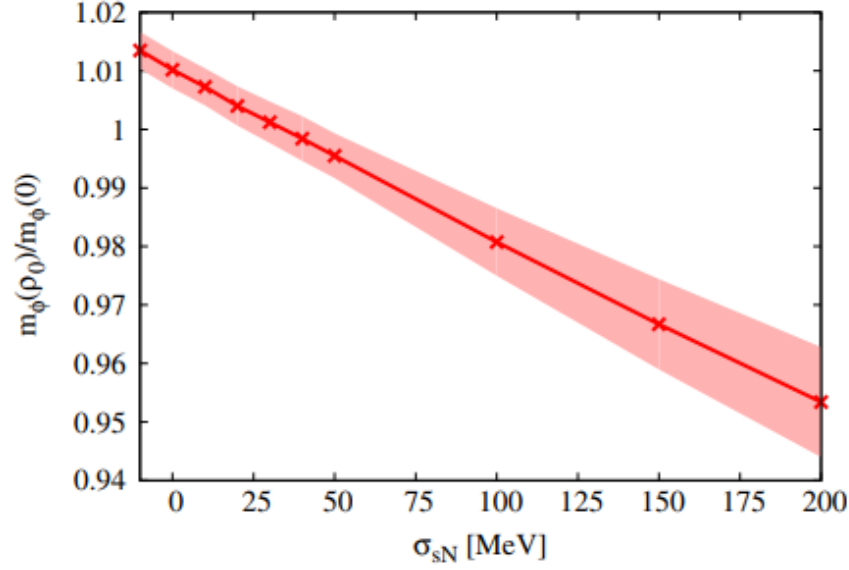


図 1.3: 密度  $\rho$  下と真空下にある  $\phi$  中間子質量比の  $\sigma_{sN} = m_s \langle N|\bar{s}s|N \rangle$  依存を示す図 [2]。色帯は計算の不定性を示す。

#### 1.4 先行研究

現在まで、カイラル対称性の破れとハドロン質量の変化に関する複数の先行研究が行われている。CERN の SPS で行われた CERES 実験 [5] はその 1 つである。CELES 実験では、S-Au の重イオン衝突により高温環境を作り、中間子を經由して生じる電子対を測定した。その結果、 $\rho$  中間子の質量付近に超過が見られたが、S-Au 衝突のデータが限られており、明確な結論を出すには至らなかった。

また、主要な先行研究として、原子核密度でのベクター中間子の質量測定を行った KEK-PS E325 実験が挙げられる。E325 実験においては、薄い炭素、銅を標的として、KEK-PS シンクロトロン の 12 GeV の陽子ビームを衝突させ、p+A 反応によって中間子を発生させた。1 スpill (spill) は 2 秒であり、ビームの強度は  $10^9/\text{spill}$  であった。スpill は、ビームの 1 パルスの時間幅を指す。そして、生成された  $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\phi$  中間子の質量スペクトルを、それらの中間子の崩壊によって生じた電子対を調べることで測定した。図 1.4 及び図 1.5 に、E325 実験によって得られた不変質量スペクトルを示す。

それぞれ図 1.4 では  $\omega$  中間子の低質量側で、図 1.5 では低速である  $\beta\gamma < 1.25$  での Cu 標的で、 $\phi$  中間子の低質量側に超過が見られた [6][7]。実験で得られた質量スペクトルのデータを説明するため、以下の二式 [8] を仮定したモンテカルロモデルによる計算 [8] が行われた。ここで、 $\rho_0$  は通常の原子核密度、 $k_1, k_2$  はそれぞれ質量変化と崩壊幅変化のパラメータを表す。

$$\frac{m(\rho)}{m(0)} = 1 - k_1 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

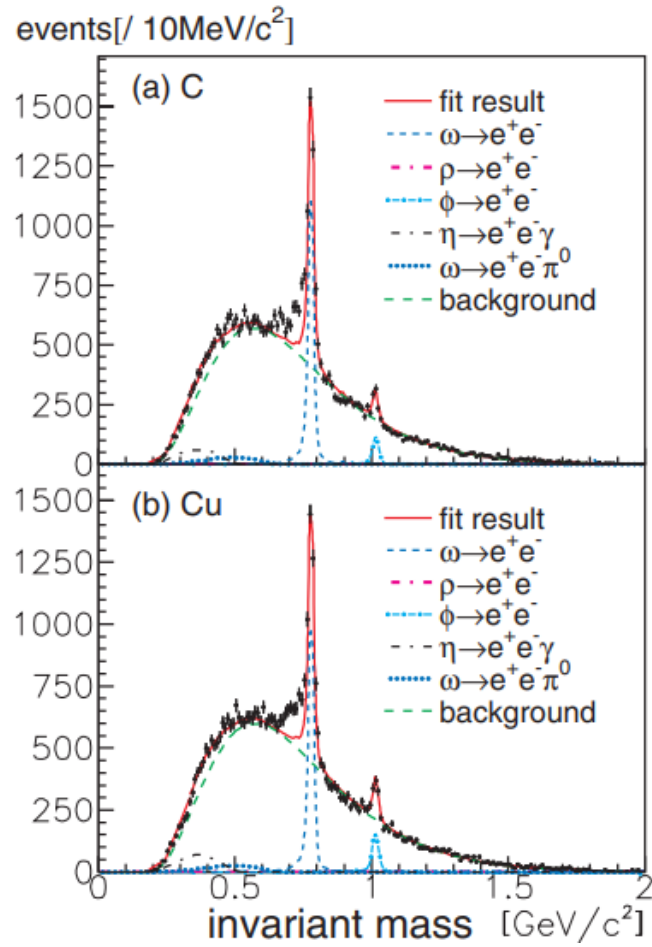


図 1.4: E325 実験より得られた電子対の不変質量スペクトル [6]。赤線はイベントミキシング法によって得られたバックグラウンドと 5 種類のハドロンの崩壊を足し上げてフィッティングした結果。

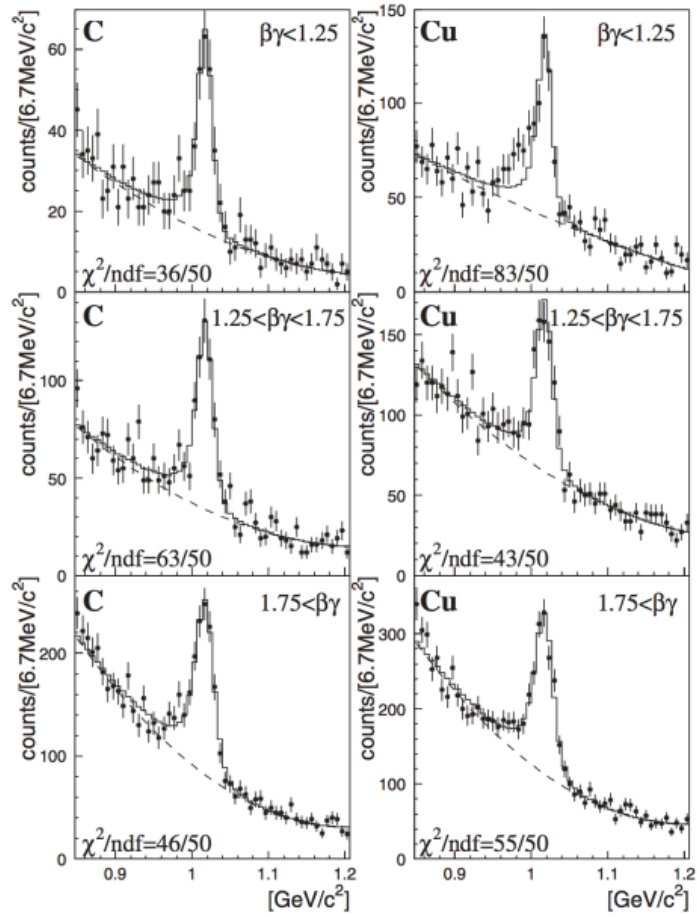


図 1.5:  $\beta\gamma$  の値で場合分けされた電子対の不変質量スペクトル [7]。黒点はデータ、実線はフィット結果、破線がバックグラウンドを示す。

$$\frac{\Gamma(\rho)}{\Gamma(0)} = 1 + k_2 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3)$$

モデルを用いてフィッティングを行った結果、パラメータはそれぞれ、 $k_1 = 0.034$ 、 $k_2 = 2.6$ となった。これは、原子核密度下における $\phi$ 中間子の3.4%の質量減少を示す。また、モデル計算により $\rho$ 、 $\omega$ 中間子では原子核密度下で9%の質量減少が示された[6]。E325実験では、統計量の不足により、 $\phi$ 中間子では $3\sigma$ での発見に留まった一方、 $\rho$ 、 $\omega$ 中間子の質量減少に対しては $5\sigma$ 以上の確度を以って観測に成功した。しかし $\rho$ 中間子の質量幅は大きく、また $\rho$ 、 $\omega$ 中間子の質量は近いので分離が困難である。したがって、原子核密度におけるハドロン質量変化の存在を確定づけるには、 $\phi$ 中間子の質量減少がより高い確度で観測される必要がある。

この先行研究を踏まえて、統計量及び分解能を強化した上で $\phi$ 中間子の質量測定を行う、J-PARC E16実験が計画された。

## 1.5 J-PARC E16 実験

J-PARC E16実験では、茨城県東海村に位置するJ-PARCの30 GeVシンクロトロンを用いたp+A反応によって $\phi$ 中間子を生成し、 $\phi$ 中間子の崩壊による電子対の飛跡を分析することで、原子核内外での $\phi$ 中間子の質量を測定する。 $\phi$ 中間子の電子対への崩壊分岐比は $2.964 \times 10^{-4}$ [3]と極めて小さいが、電子対はレプトンであり強い相互作用の影響を受けないため、 $\phi$ 中間子の質量を測定する手段として適している。スペクトロメータとして、電子対の飛跡検出器を2種、粒子識別のための検出器を2種、合わせて4種類の検出器を含む。各検出器については2.2節で述べる。

E16実験は先行研究であるE325実験と比べ、約2倍の質量分解能を持ち、陽子ビームやアクセプタンスの強化により、約100倍の統計量を得る。 $\phi$ 中間子の質量変動を巨大な統計量を以って観測し、1.1節で述べたクォーク凝縮とハドロン質量の理論を実証することがE16実験の目的である。E16実験で得られると予想される $\phi$ 中間子の分散関係を図1.6に示す。E325ではデータの不足から1点のみを得るに留まったが、E16実験においては分散関係を得ることが可能である。また、図1.7にE16実験で得られると予想される $\phi$ 中間子の質量スペクトルを示す。この図では、標的は鉛とし、 $\beta\gamma < 0.5$ を満たす $\phi$ 中間子のみを対象としている。原子核内で電子対崩壊し、クォーク対との相互作用が相対的に小さい $\phi$ 中間子が低質量側のピークを形成し、一方で原子核外の真空中で崩壊した $\phi$ 中間子が高質量のピークを成すと考えられる。

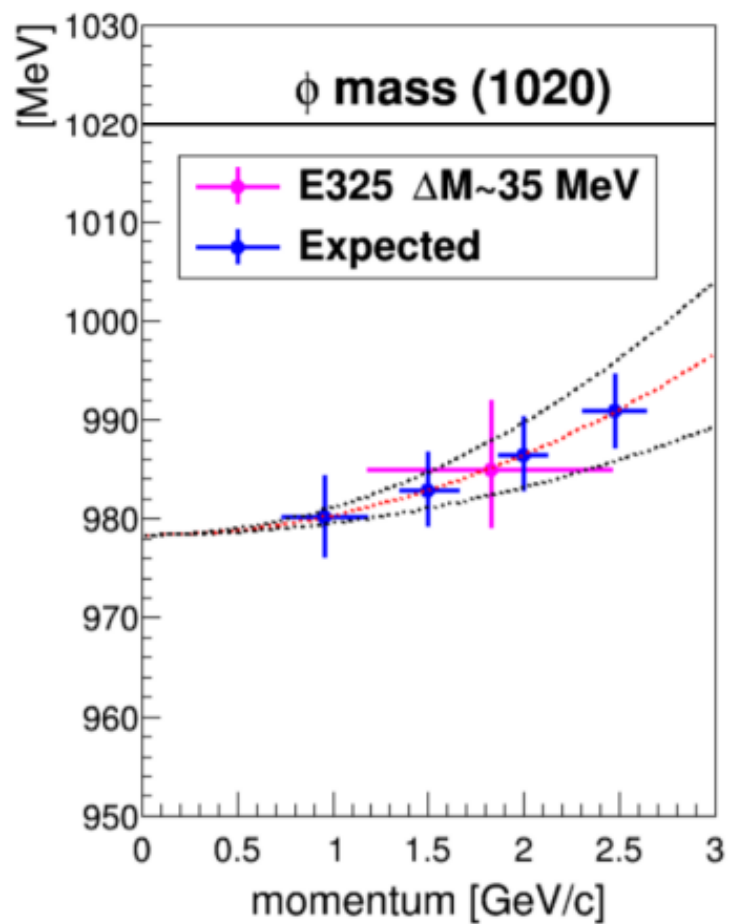


図 1.6: E325 実験で得られた (マゼンタ)、または E16 実験で得られると予想される (青) $\phi$  中間子の分散関係。縦軸は質量を、横軸は運動量をそれぞれ示す。点線は理論計算の結果を示す [9]。

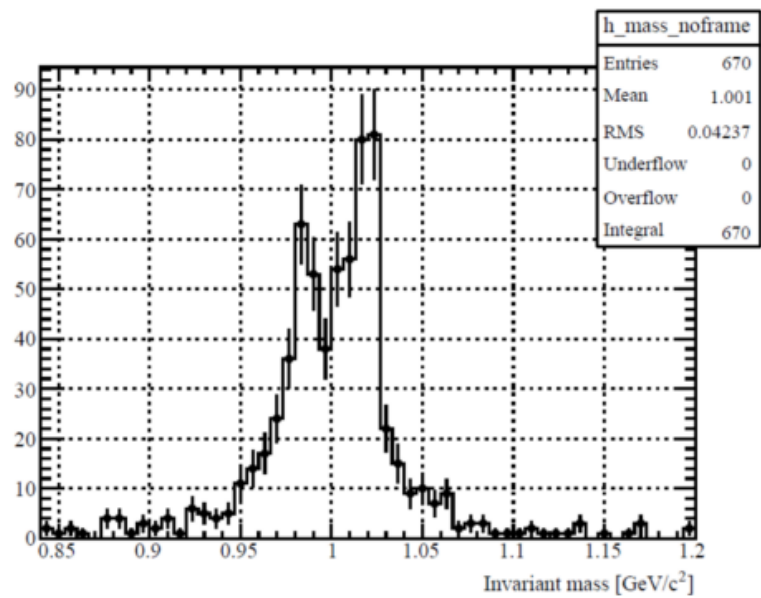


図 1.7: E16 実験で予想される  $\phi$  中間子の質量スペクトル。鉛標的で、 $\beta\gamma < 0.5$  とする。低質量側にピークは核内で崩壊した成分、高質量側は核外で崩壊した成分に相当する。

2026年1月現在まで、E16実験ではコミッショニングランが5回 (Run0a Run0e)、物理データ測定ランが1回 (Run1a) 実施されている。表 1.1 でこれまで行われたランについてまとめる。今後も更なる物理データ取得のためにランを行う予定である。

表 1.1: 行われた E16 実験のランの詳細

Run 名	時期	目的
Run0a	2020/06/04 - 2020/06/20	コミッショニング
Run0b	2021/02/11 - 2021/02/18	コミッショニング
Run0c	2021/05/29 - 2021/06/09	コミッショニング
Run0d	2023/06/19 - 2021/06/22	コミッショニング
Run0e	2024/04/19 - 2024/06/09	コミッショニング
Run1a	2025/11/10 - 2025/11/26	物理データ測定

## 1.6 本論文の目的及び構成

J-PARC E16 実験で用いるスペクトロメータの中で、ハドロブラインド検出器 (HBD) は粒子識別, 特に  $\pi$  中間子の除去のために用いられる検出器である。E16 実験で大きい統計量を得るにあたり、高計数率かつ長時間の計測に耐えうる HBD の安定運用の実現が不可欠である。このことを踏まえ、HBD の内部構造を調整し、耐久性を高めるための試みを行った。実験を計画通り進める上で、構造の変更に伴う検出器性能への影響を理解することが非常に重要である。よって本論文では、この HBD 運用安定化に向けた施策について説明し、変更後の検出器と未変更の検出器を比較するための性能評価を行う。

本論文の構成について、第二章では J-PARC E16 実験が行われる実験施設とスペクトロメータについて述べ、第三章ではハドロブラインド検出器の原理及び性能について説明する。第四章ではハドロブラインド検出器の安定運用に向けた開発について述べ、第五章では性能評価を行う。第六章では性能評価を踏まえた議論や今後の展望について述べ、第七章にて本論文の総括を行う。

## 2 実験装置

本章では、実験施設 J-PARC について述べた後、E16 実験で用いられるスペクトロメータ及び DAQ システムについて説明を行う。

### 2.1 実験施設 J-PARC

J-PARC は、茨城県東海村に立地する大強度陽子加速器施設である。J-PARC は高エネルギー加速器機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) の共同事業として提案、及び建設された。J-PARC の加速器は直線型加速器であるリニアックと、シンクロトロンである RCS、MR の 3 台から成る。J-PARC の上空から見た配置を図 2.1 に示す。



図 2.1: J-PARC 施設の配置 [10]

陽子ビームの生成にあたり、まず水素ガスから生じた水素化物イオンがリニアックにより 400 MeV まで加速される。その後 RCS によってイオンが陽子に変換され、3 GeV まで加速された陽子ビームの一部が最後に MR に送られ、30 GeV まで加速される。また、MR には 5  $\mu$  秒で全て取り出す早い引き出し (FX)、2 秒かけて取り出す遅い引き出し (SX) の二つのモードがあるが、過剰な量の反応が重なって発生し、解析が困難になることを防ぐため、E16 実験を含むハドロン実験では SX を採用する。図 2.2 は SX による入射後の陽子数の時間変化を示す。

E16 実験では、J-PARC 内にあるハドロン実験施設の高運動量ビームラインを用いる。MR を通りハドロン実験施設内の一次ビームラインを流れる 30 GeV

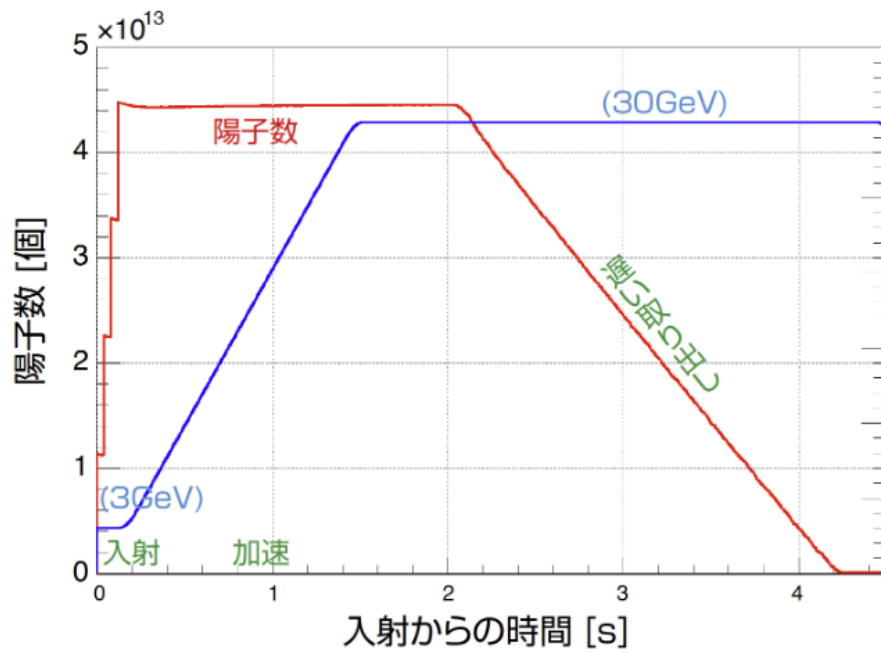


図 2.2: 遅い取り出しにおける陽子数とビーム強度の入射後の時間変化 [11]

陽子ビームの一部 (1/1000~1/10000 程度、 $10^9 \sim 10^{10}$  個/spill) を、ランバートソン磁石によって分け高運動量ビームラインに送る。図 2.3 は MR からハドロン実験施設までのビーム輸送図を示す。

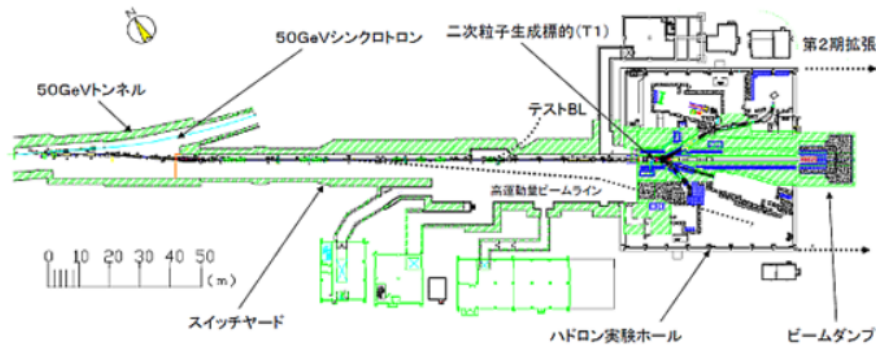


図 2.3: 遅い取り出し部及びハドロン実験ホールの図 [12]

## 2.2 E16 実験スペクトロメータ

E16 実験では、シリコンストリップ検出器 (STS)、GEM 飛跡検出器 (GTR)、ハドロンブラインド検出器 (HBD)、鉛ガラスカロリメータ (LG) の 4 種類の検出器を用いて、 $\phi$  中間子の崩壊によって生じた電子陽電子対の飛跡を検出する。図 2.4 に示す通り、これらの検出器はスペクトロメータの内側から STS、3 つの GTR、HBD、LG の順に配置されている。

この 6 つの検出器をまとめて 1 つのモジュールとし、1 モジュールで水平、鉛直方向を  $30^\circ$  ずつカバーする。現在の E16 実験では 8 つのモジュールが標的を囲むように設置され、ビームが通過する 1 モジュール分を除いた  $-135^\circ \sim 135^\circ$  をカバーしている。図 2.5 に立体の上面図を、図 2.6 に 1 モジュールの構造、図 2.7 にスペクトロメータをビーム上流側から撮影した写真をそれぞれ示す。本論文では図 2.5 の通り、各モジュールに 101~109 の名前を割り振り、以下それに従って呼ぶこととする。

また、本実験では荷電粒子の飛跡を曲げる際に FM 電磁石を用い、全ての検出器が電磁石の作る磁場下に入るように設置される。

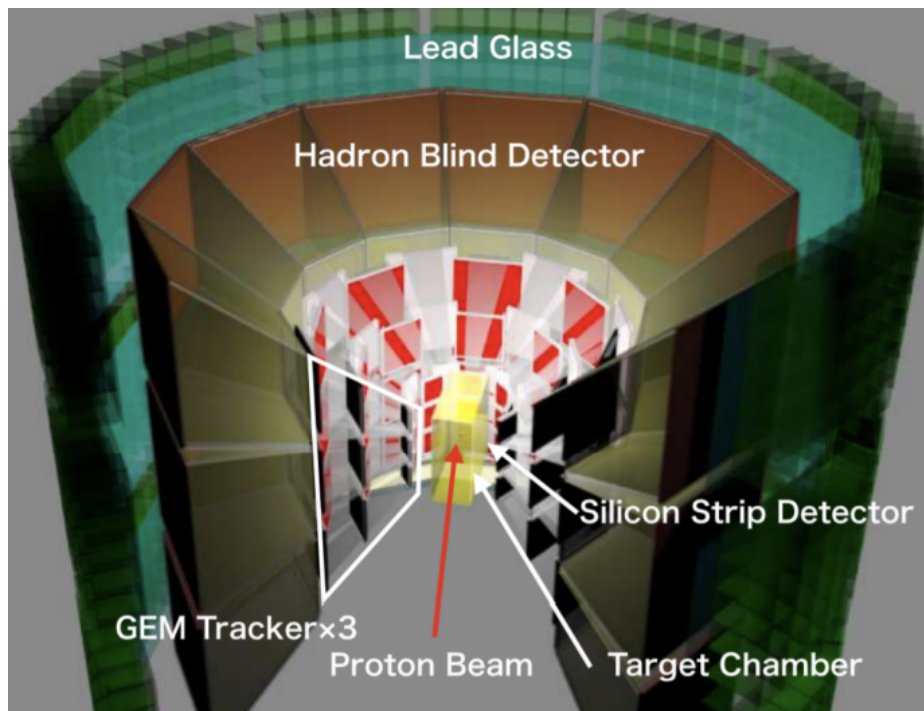


図 2.4: E16 実験スペクトロメータの立体的概略図。現在は中段のみがセットアップされている。Silicon Strip Detector はコミッショニング当初用いられていた検出器で、現在では STS になっている。

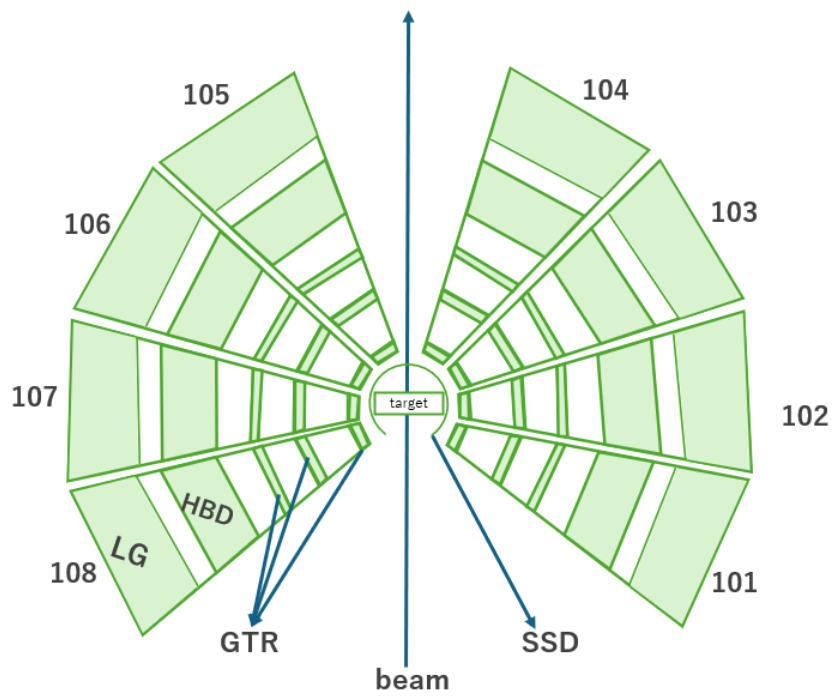


図 2.5: E16 実験のスペクトロメータの上面図

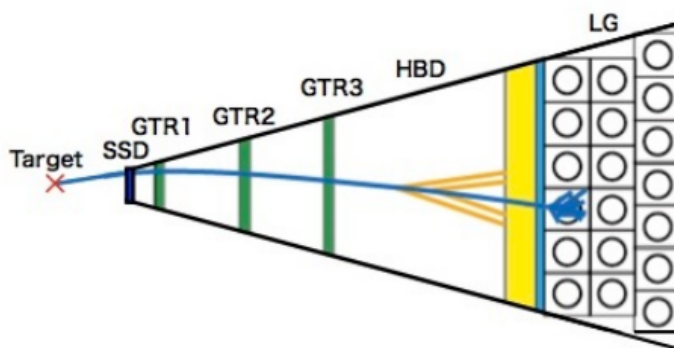


図 2.6: E16 実験スペクトロメータの 1 モジュールの構造

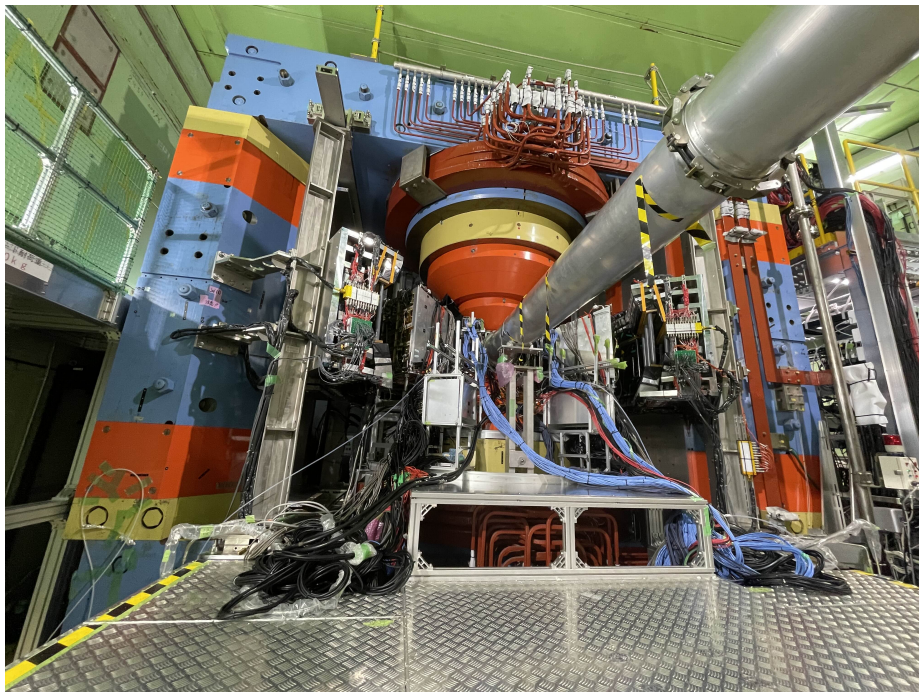


図 2.7: E16 実験スペクトロメータの写真

### 2.2.1 FM 電磁石

E16 実験において利用する FM 電磁石は、先行研究である E325 実験で用いた双極電磁石と同一である。コイルの巻き数は 168 である。2450A の電流が印加され、中心部では 1.7T の磁場を作る。

### 2.2.2 シリコンストリップ検出器 (STS、Silicon Tracking System)

シリコンストリップ検出器 (Silicon Tracking System、STS) は、荷電粒子の飛跡を検出する装置であり、位置、時間分解能 (それぞれ E16 実験では  $30 \mu\text{m}$ 、 $4 \text{ ns}$ ) 及び磁場放射線耐性に優れている。検出原理としては、荷電粒子がシリコン板を通った際に生じる電子・正孔を電場によって集め、検出する。E16 実験では電流を読み出すためのストリップを垂直方向に並べた STS を用い、最も標的に近い内側に設置される。

### 2.2.3 GEM 飛跡検出器 (GTR、GEM Tracker)

GEM 飛跡検出器 (GTR) は、電子増幅器である GEM を用いて、入射粒子によってガスから電離した電子を検出する位置検出器である。GEM については 3.2 節で後述する。E16 実験では、標的に近い順にそれぞれ一辺  $100 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm}$ 、 $300 \text{ mm}$  の正方形の形状をした GEM を持つ GTR が 3 層設置される。また、GTR 内部は Ar が 70%、 $\text{Co}_2$  が 30% のガスにより満たされる。GTR の構造を図 2.8 に、写真を図 2.9 に示す。まず、入射した粒子によりガスが電離し、生じた電子はメッシュ-GEM 間にかけてられている電場によって GEM へと誘導される。その後、3 層の GEM によって電子が増幅され、読み出しフォイルによって x 軸、y 軸での読み出しが行われる。

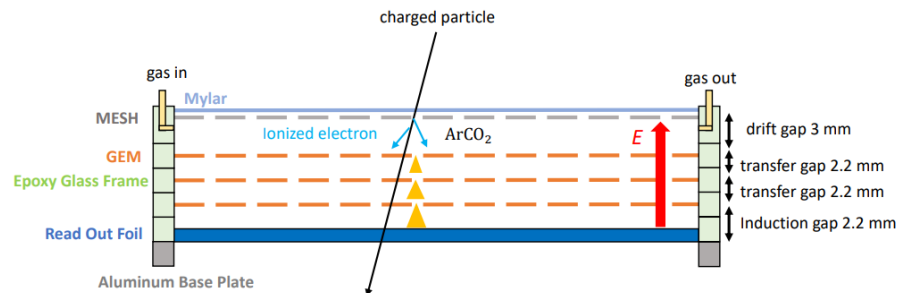


図 2.8: GTR の構造 [13]



図 2.9: 仮取り付けされた GTR[13]

#### 2.2.4 ハドロンブラインド検出器 (HBD、Hadron Blind Detector)

ハドロンブラインド検出器 (HBD) は、ハドロンを除去し電子対を識別する役割を果たすガスチェレンコフ検出器であり、RHIC の PHENIX 実験において最初に開発された。HBD の外観と内部の写真をそれぞれ図 2.10 と図 2.11 に示す。動作原理は 3.1 節にて述べる。

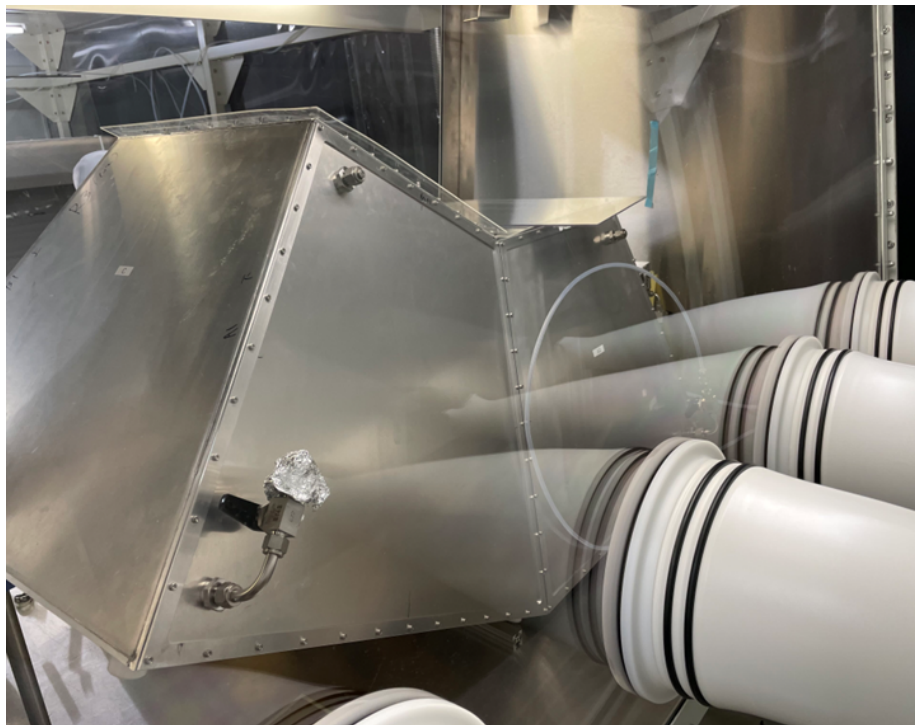


図 2.10: グローブボックス内の HBD の写真

HBD の内部はメッシュ、3 枚の GEM、読み出し用パッドから成り、 $\text{CF}_4$  で満たされている。また、図 2.10 の通り、メッシュ、GEM、読み出し用パッドを積み重ねたスタックを四つ敷き詰め、一つの HBD モジュールが構成されている。HBD の GEM には Cu の金属膜が用いられている。ただし、最も上流側にある、CsI が蒸着されている GEM は銅薄膜の上から Ni、その上に Au の金属膜が蒸着されている。これは、CsI の蒸着工程での Cu を含む不要な化学反応を防ぐためである [14]。また、トリガー信号は最も下流側の GEM から発信される。実験時以外では、CsI の潮解を防ぐために内部を  $\text{N}_2$  を流し続け、満たされた状態で保管する。

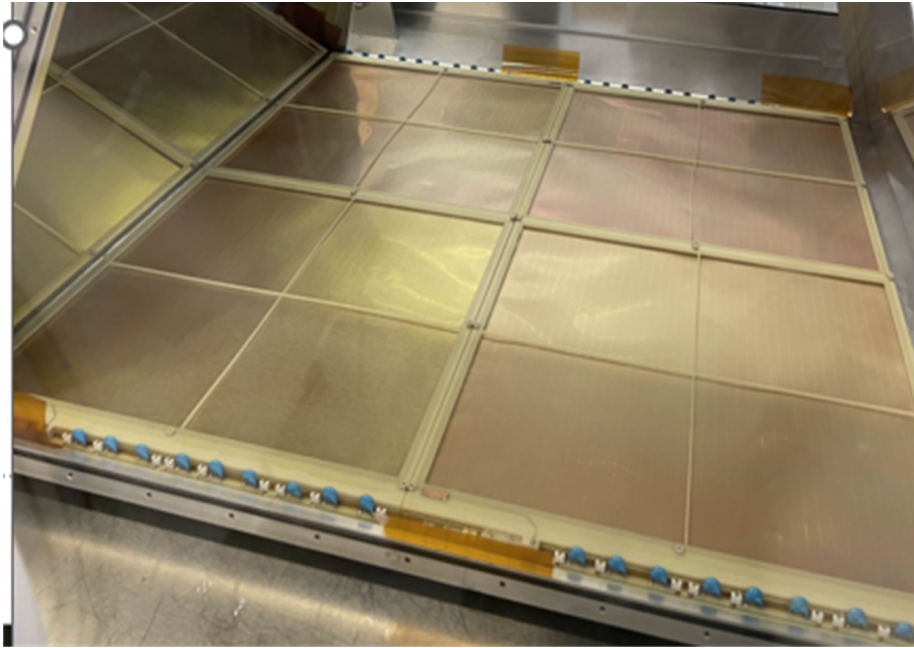


図 2.11: HBD の内部の写真

### 2.2.5 鉛ガラスカロリメータ (LG、Lead glass)

鉛ガラスカロリメータ (LG) は、粒子識別のために用いられる電磁カロリメータで、E16 実験スペクトロメータにおいて最も外側に位置する。LG に入射した電子は、制動放射により光子を生成する。次に光子によって電子対生成が起こり、再度制動放射が発生する。LG ではこのサイクルによる電磁シャワーのチェレンコフ光の信号を検出する。電磁シャワーによる信号と  $\pi$  中間子によるチェレンコフ光は、光量の違いを利用して識別する。LG の 1 モジュールは 38 個のセグメントに分けられている。1 セグメントのサイズは、幅 122 mm、奥行き 135 mm、長さ 153 mm から 160 mm である。図 2.12 に LG を撮影した写真を示す。

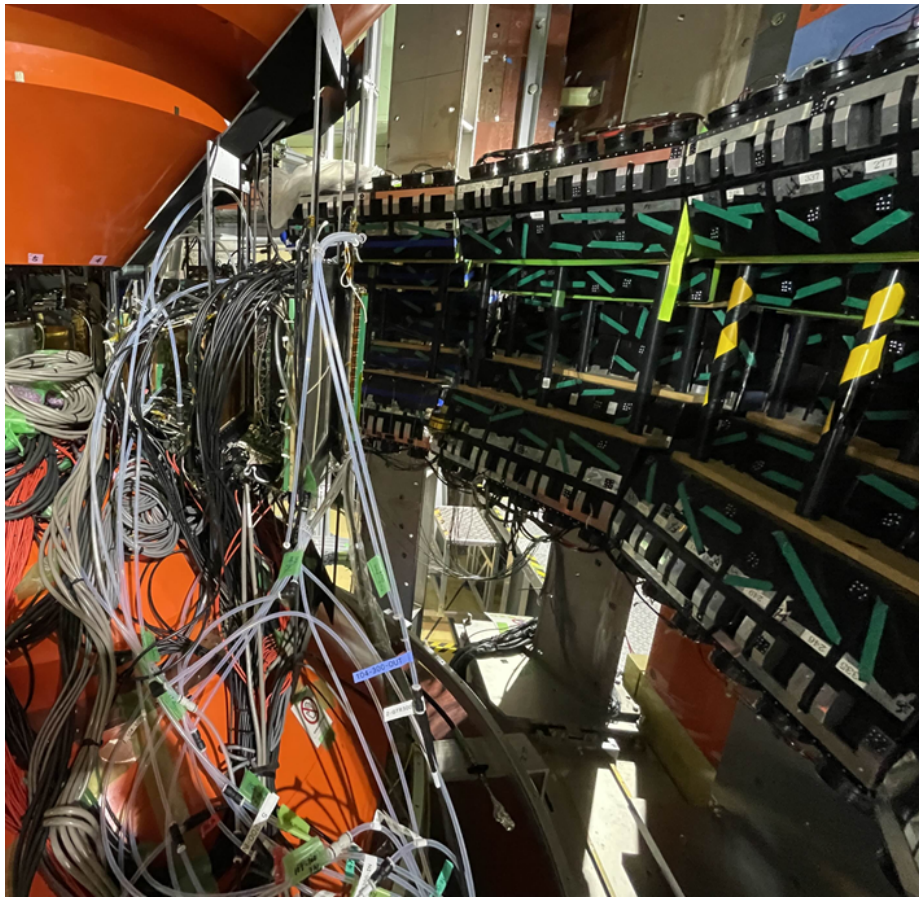


図 2.12: LG の写真

## 2.3 標的

E16 実験では標的として、銅の  $80 \mu\text{m}$  薄膜を 2 枚と炭素の  $400 \mu\text{m}$  薄膜を 1 枚使用する。 $\gamma$  線の電子対生成を抑えるため、薄膜 1 枚の厚さは放射長の  $0.5\%$  以下となるように設定した。全体の相互作用長は  $0.2\%$  である。実験の際は、ビームが 3 枚の薄膜を通過するように並べて運用される。図 2.13 にチェンバー内の標的の写真を示す。

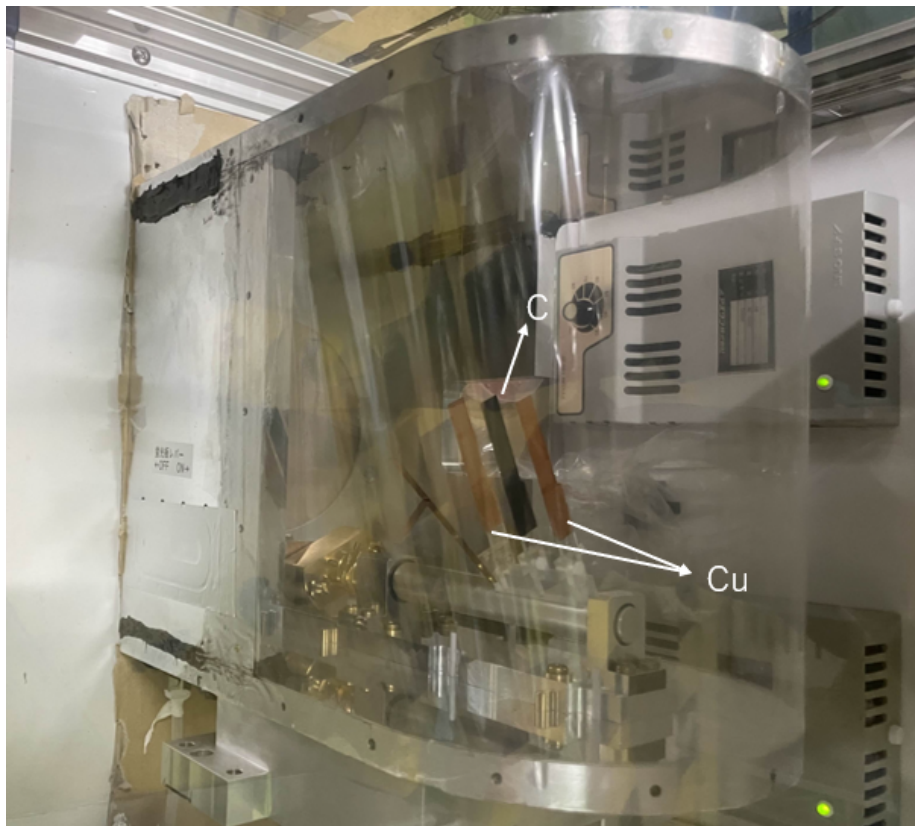


図 2.13: E16 実験で用いられる標的。チェンバーは He で満たされる。

## 2.4 トリガー

図 2.14 に E16 実験で用いられる DAQ システムの全体図について示す。トリガーを出すチャンネルの総数は 2620 ch、信号読み出し用のチャンネルの総数は 148740 ch となっているが、これは将来的に上段、下段にモジュールを増設した場合の数値であり、中段のみの現在はこの  $1/3$  程度のチャンネル数である。300 mm 平方の GTR(3 層目の GTR)、HBD、LG の 3 つの検出器がトリガーを生成し、 $\phi$  中間子の電子対崩壊を測定する際は 3 つ全てのトリガーを必要とする。また、電子対の開き角が  $60^\circ$  以上であることもトリガーの条件となる。これは、開き角が

小さい  $\pi^0$  中間子の電子対崩壊の検出を防ぐためである。これにより、10 MHz の粒子計数率から 1 kHz のトリガーレートまで減じることができる。

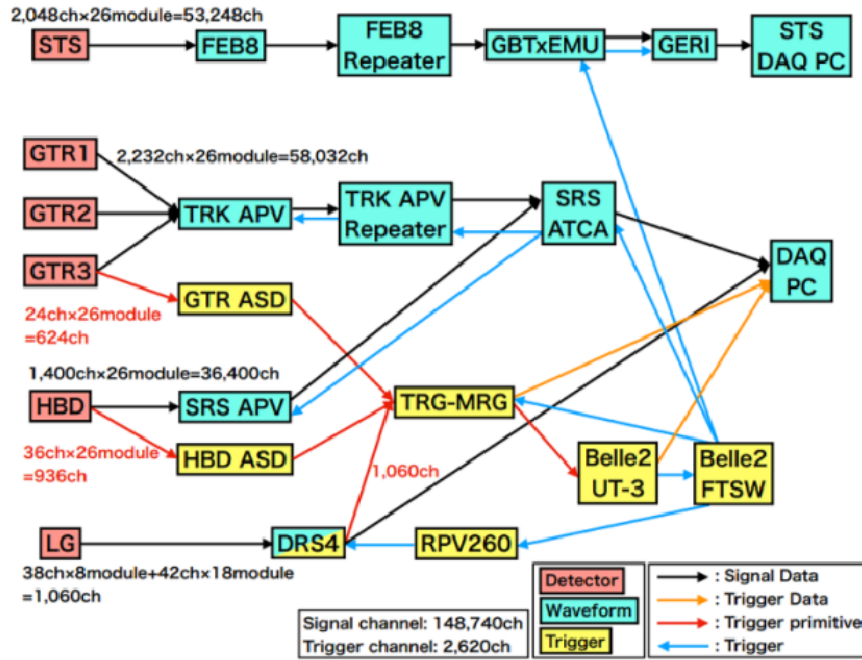


図 2.14: E16 実験における DAQ システムの全体図



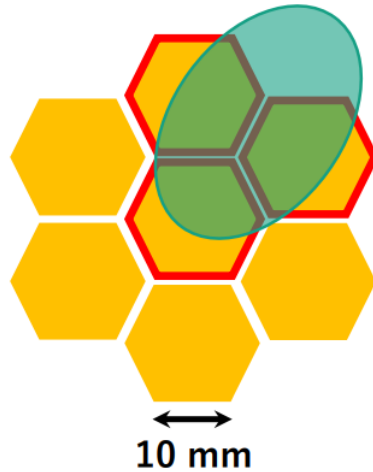


図 3.2: 読み出しパッドの模式図。青い楕円は電荷分布を、赤枠で囲まれた六角形は信号検出するパッドを示す。

を積極的に検出することができる。また、チェレンコフ光の光電効果による電子は、ガスの電離による電子と比べ、検出される信号の高さと広がり大きいことを利用し粒子識別を行う。

### 3.2 GEM

GEM(Gas Electron Multiplier)はCERNで開発された、電子増幅のための装置である。GEMは絶縁体の薄膜を金属の薄膜で挟んだもので、直径 $70\mu\text{m}$ 程度の微細な穴が多数空いた構造を持つ。金属の薄膜間に $500\text{V}$ 程度の電圧をかけ、穴に強い電場を作り、穴を通った電子が加速されるようにする。そして、加速した電子がガスを電離させ、電離で生じた電子が加速され新たな電離を引き起こすということを繰り返す。GEMはこの電子雪崩によって電子の増幅を行う。図3.3にGEMの拡大写真を示す。

### 3.3 要求性能

HBDのプロトタイプで既に示されている性能として、オンラインレベルでの電子の検出効率が $63\pm 3\%$ のとき $\pi$ 中間子の rejection power は $4.3\pm 0.5\%$ である。ここで rejection power は除去されず残る粒子の割合を示す。オフラインレベルでの性能は電子の検出効率が $61\pm 4\%$ のとき、 $\pi$ 中間子の rejection power は $0.9\pm 0.2\%$ となっている [17]。これらの値をHBD実機における要求性能とする。また、HBDとLGを組み合わせた際の総合性能として、電子の検出効率が $56\%$ の下、オンラインレベルでは $99.8\%$ 、オフラインレベルで $99.97\%$ の $\pi$ 中間子除去率が要求される。モンテカルロ・シミュレーションにおいて、この除去率は $\phi$ 中間子の質量変化を検証する上で十分であると示されている [18]。

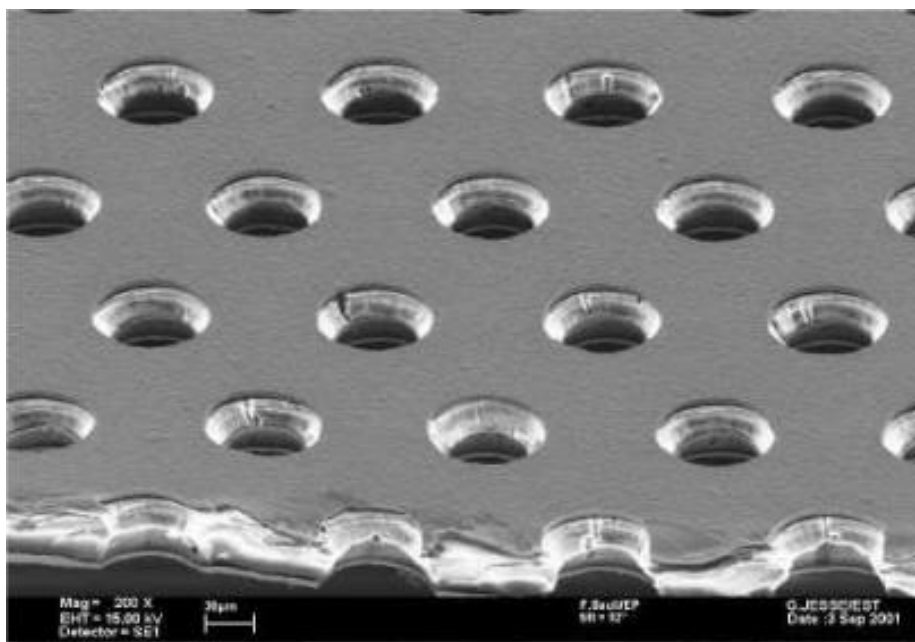


図 3.3: GEM の拡大写真 [16]。左下のスケールは  $30\mu\text{m}$  を示す。

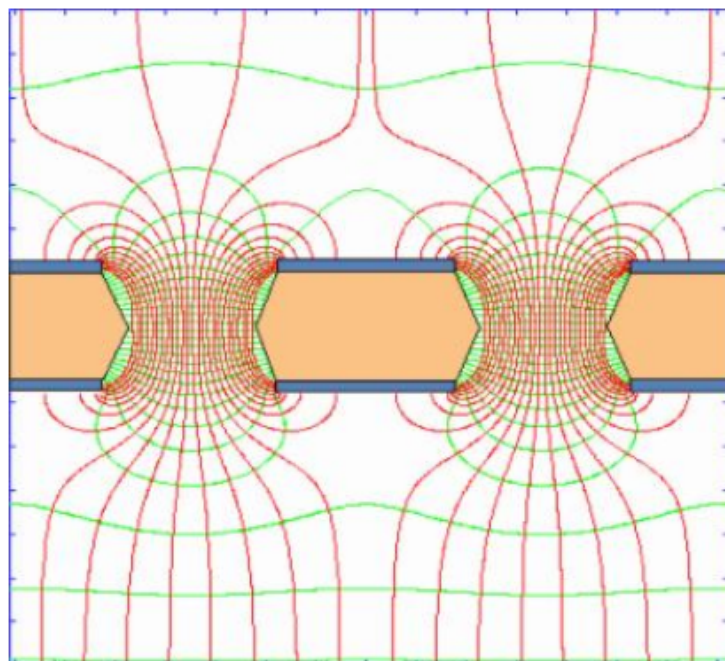


図 3.4: GEM における電場及び等電位線 [16]

## 4 安定化運用に向けた開発

本章では、E16 実験におけるハドロブラインド検出器の安定化運用に向けて行った施策や、用いた器具について説明する。

### 4.1 構造の最適化

E16 実験では表 1.1 に示す通り、現在まで 5 回に及ぶコミッショニングランを行ってきた。コミッショニングランにおいて HBD を運用する際、一時的な高計数率により HBD 内の GEM 間が導通、破損し、電子増幅の機能を失うケースが度々存在した。特に、ビームが出た直後に HBD の増幅率が高くなる場合が多く、現在まで多数の HBD スタックが破損し、交換する必要に迫られてきた。これを受けて、HBD を長期的に安定して運用するため、GEM 間の間隔を広げ、放電による破損の発生を抑制する試みを行った。間隔を広げる方法として、スペーサーを上から 2 枚目の GEM と 3 枚目の GEM 間に設置した。図 4.1 に追加されたスペーサーを含む HBD の構造を示す。

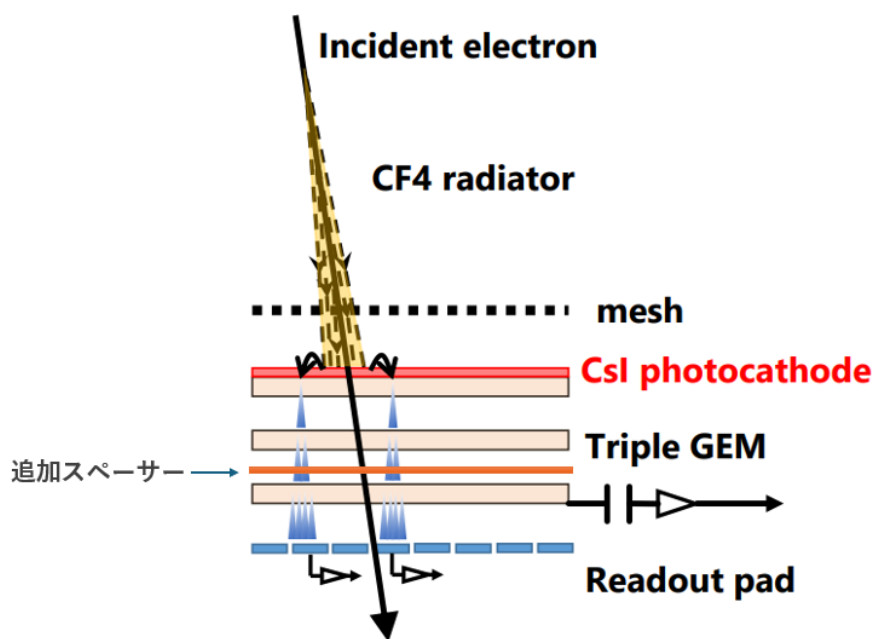


図 4.1: 追加されたスペーサーを含む HBD の構造

間隔を広げることにより、GEM 間にあるガスの電離による電子数の増加が想定されるが、上から 1 枚目と 2 枚目の GEM 間にスペーサーを置いた場合、増えた電子が 2 枚目、3 枚目の 2 枚の GEM により増幅され  $\pi$  中間子の除去性能の悪化に繋がる恐れがある。したがって 2 枚目と 3 枚目の GEM 間だけにスペーサーを追加した。スペーサーの材質はガラスエポキシ樹脂である。また、形状は一辺 305.1 mm の正方形の枠であり、厚さは 0.6 mm である。板厚公差は  $\pm 0.1$  mm で

ある [19]。性能評価の対象である Run0e では、図 2.6 におけるモジュール 108 の全体、及びモジュール 101、102 の一部スタックの構造を変更したうえで運用された。

上記の通り GEM 間の間隔を広げた際、GEM 間の電場が弱まることで電子の加速が抑えられ、電子増幅および電子検出効率の低下が懸念される。先行研究により、GEM 間の電場と輸送効率の関係が調べられている [14]。図 4.2 に、電場と相対的な輸送効率間を示す。2 枚目と 3 枚目の GEM 間距離は、スペーサーの追加前が 1.5 mm、追加後では 2.1 mm となる。GEM 間の印加電圧を典型的な値の 500 V とすると、電場はそれぞれ 333 V/mm、238 V/mm となる。この値を図 4.2 に適用すると、10%の輸送効率低下が見込まれる。以上を踏まえ、性能評価では樹脂スペーサーの有無が電子増幅率に与える影響について分析する。

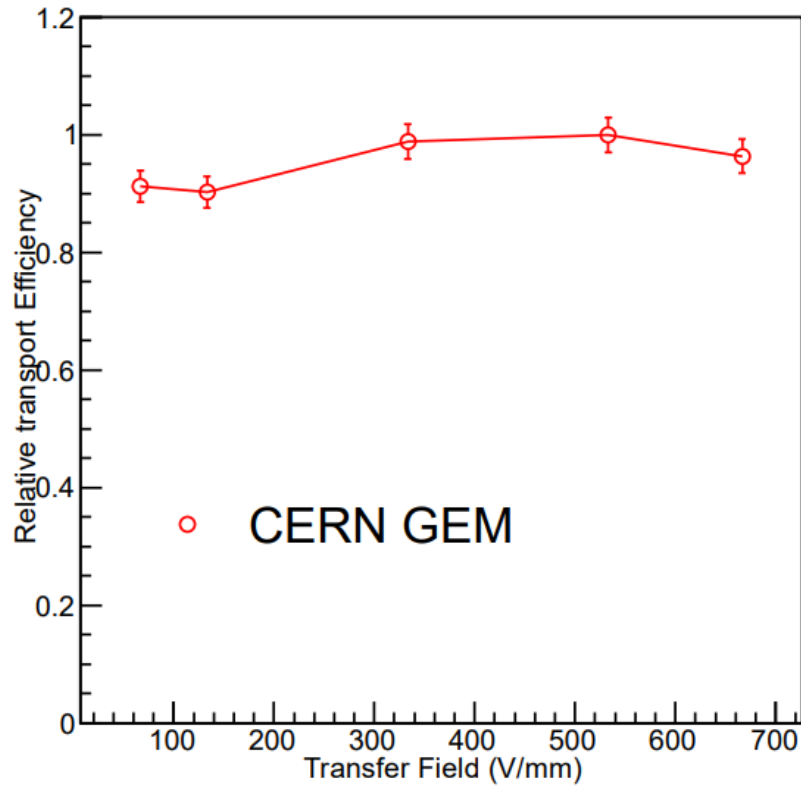


図 4.2: HBD の GEM 間電場と相対的な輸送効率の関係 [14]

## 5 性能評価

本章では、HBD の性能評価の際に用いた手法とその結果について示す。

### 5.1 概要

前章で述べた、GEM 間の間隔を広げる構造変更が HBD の性能へ及ぼす影響を調べるため、性能評価を行った。懸念されるのは電子増幅率、電子検出効率への影響であるが、ビームの時間構造の問題により、解析対象のランである Run0e では評価にあたり十分な量の電子のデータを得ることができなかった。したがって、電子の代わりに  $\pi$  中間子の検出効率を求め、比較することで評価を行った。増幅元の電子がチェレンコフ光によるものか  $\pi$  中間子によるかを問わず、GEM を通り増幅される機構は同一であるため、電子増幅効率を調べる上では問題ないと判断した。

また、検出効率の評価を行う対象として図 2.6 におけるモジュール 107、モジュール 108 の Run0e 時に破損していないスタックを選択した。4.1 節で述べた通り、モジュール 108 は GEM 間の間隔を広げたモジュールである一方、モジュール 107 には変更を加えていない。よって、この隣接する 2 モジュールでの検出効率を導出し比較することで、構造変更が与える性能への影響を評価した。

### 5.2 使用データ

解析にあたり、2024 年 4 月から 6 月にかけて行われたコミッショニングランである Run0e で得たデータを使用した。表 5.1 に解析に使用したデータのラン番号、イベント数、トリガーについて示す。ここで、トリガーの GTR×LG は、GTR と LG のトリガーの同時検出をトリガーとすることを指す。HBD の性能評価が本解析の目的であるため、電子対取得の際とは異なりトリガーに HBD のヒット情報は含まれていない。また、下記の全てのランで、メッシュと GEM 間に電子増幅と逆向きの電圧を印加する、リバースバイアス (RB) を適用した。

表 5.1: 本解析で使用した run0e の Run 番号、イベント数、トリガーデータ。

ラン番号	イベント数	トリガー	ビーム強度 (陽子数/spill)
51347	90836	GTR x LG	$5 \times 10^9$
51348	598479	GTR x LG	$5 \times 10^9$
51349	488450	GTR x LG	$5 \times 10^9$
51359	310524	GTR x LG	$5 \times 10^9$
51375	81132	GTR x LG	$5 \times 10^9$

### 5.3 イベント・トラック選択

性能評価にあたり、イベント及びトラックを限定して解析を行った。標的の相互作用長が合計で 0.2% であり、データ取得時のビーム強度が  $5 \times 10^9$ /spill、1 spill

が2秒のため、計数率は5MHzと高い値になる。計数率に伴いヒットやトラックの多重度が高くなるので、データの確度を上げるためにイベント・トラック選択を行うことは重要である。ヒットの多重度を表すものとして、図 5.1、5.2 に、それぞれモジュール 107、108 における 1 イベントに含まれる HBD 上のクラスター数分布を示す。また、図 5.3 に 1 イベント内のトラックの多重度分布を示す。加えて図 5.4、図 5.5 に、モジュール 107、108 における HBD クラスターの ADC 分布を示す。データの確度のため、2p.e. 以下のクラスターは解析に使用しなかった。検出器上でヒットが検出されたパッドが隣接している時、それらのパッドをまとめて1つのクラスターとしている。本節ではイベントやトラックを選択した方法について述べる。

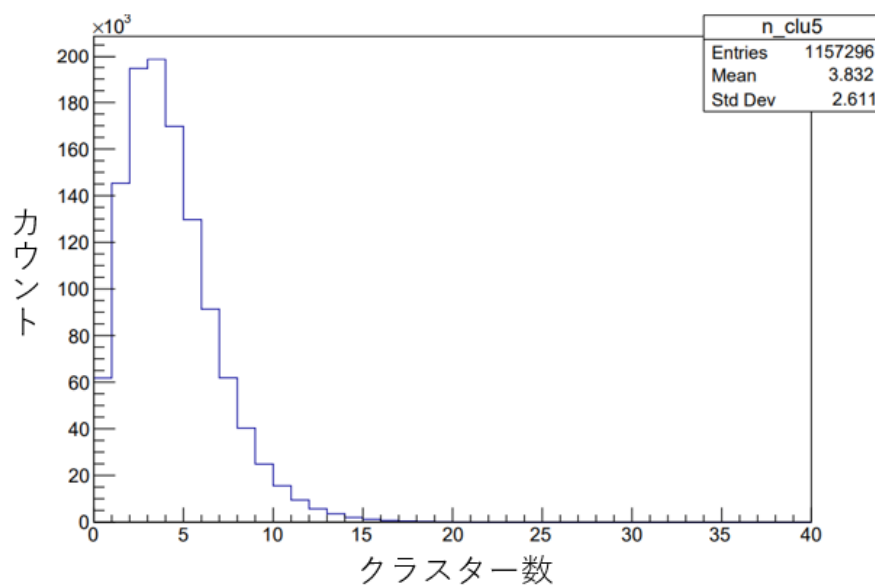


図 5.1: 1 イベントに含まれる、モジュール 107 の HBD 上のクラスター数分布。

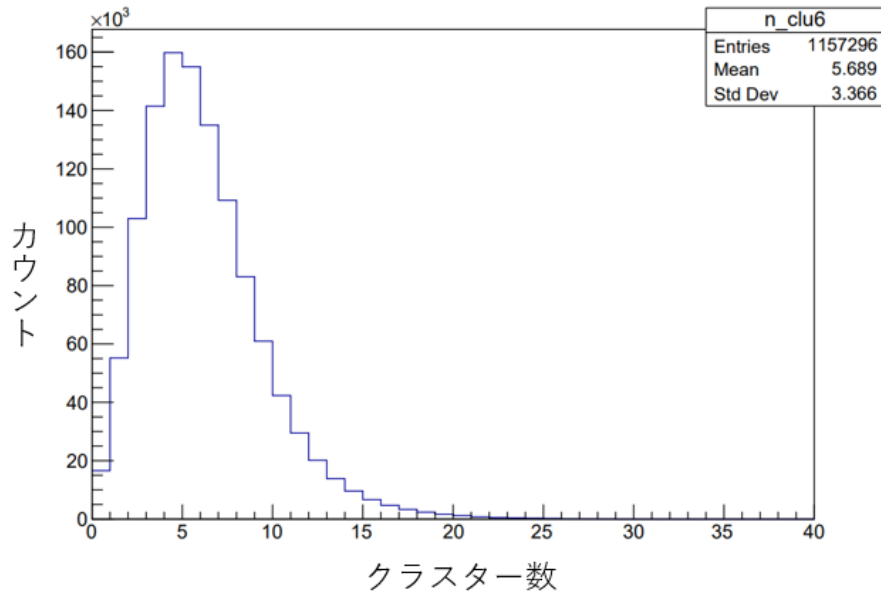


図 5.2: 1 イベントに含まれる、モジュール 108 の HBD 上のクラスター数分布。

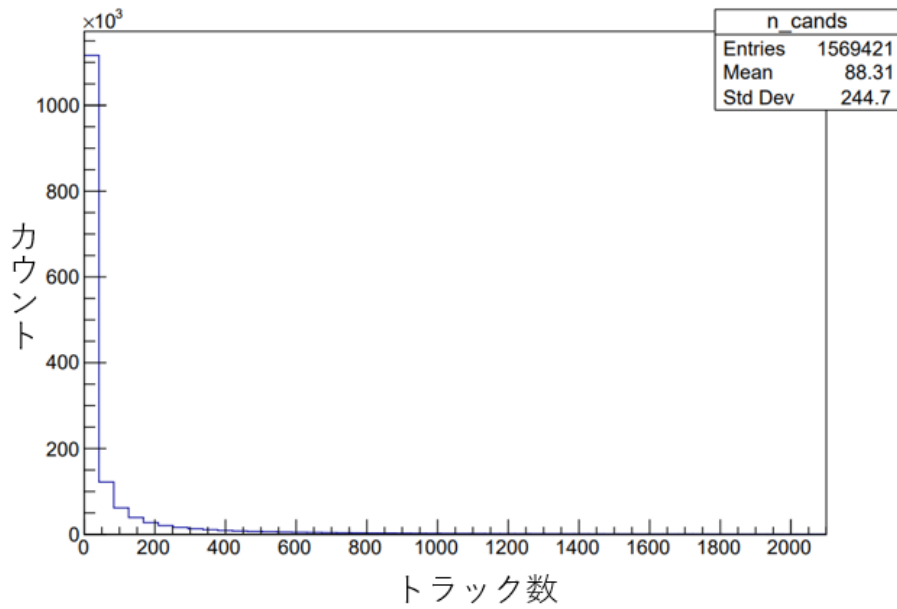


図 5.3: 1 イベント内のトラックの多重度分布

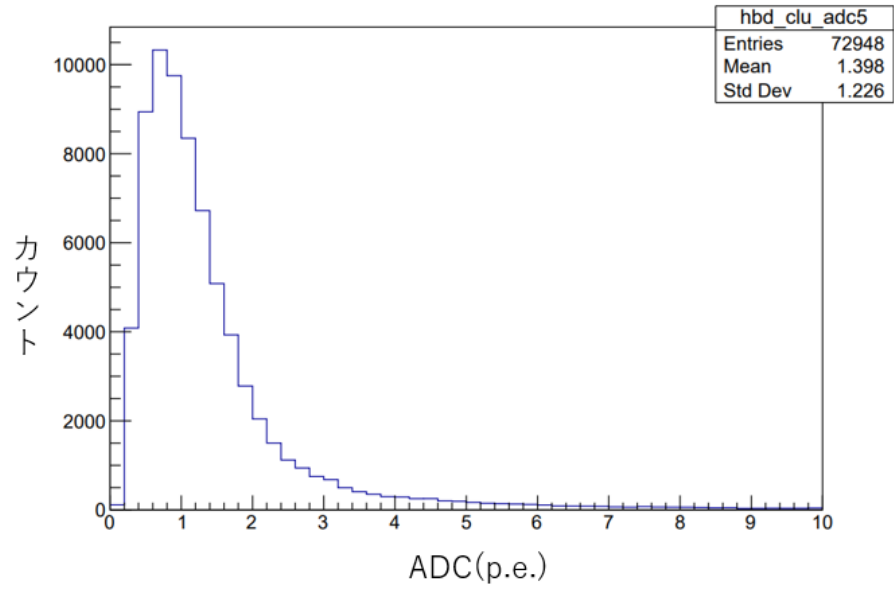


図 5.4: モジュール 107 における HBD クラスターの ADC 分布。

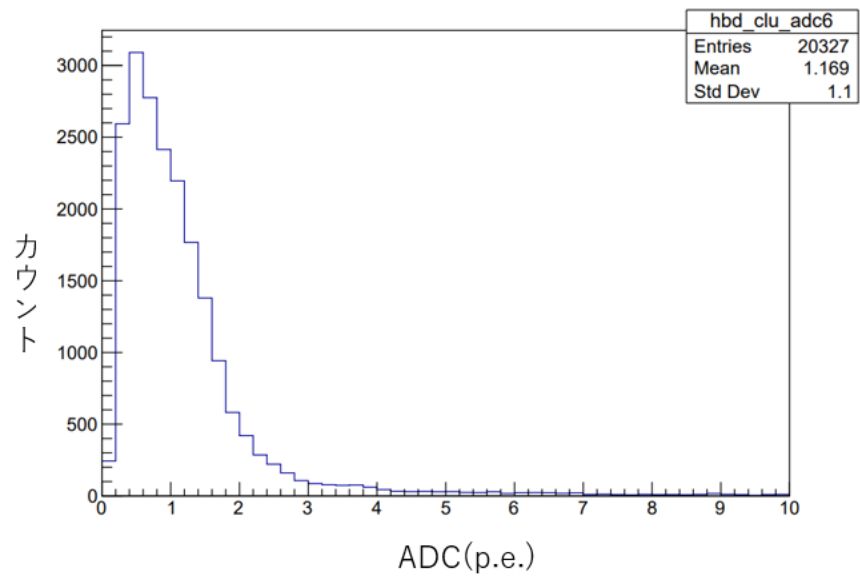


図 5.5: モジュール 108 における HBD クラスターの ADC 分布。

### 5.3.1 トラック

E16 実験ではシリコンストリップ検出器と 3 台の GEM 飛跡検出器を用いてトラック作成を行う。トラックと測定されたデータの間で  $\chi$  二乗値が計算されるが、その  $\chi$  二乗値が 10 未満のトラックに絞って解析した。HBD モジュール 107、108 を通るトラックの  $\chi$  二乗値分布について図 5.6、図 5.7 で示す。また、1 イベントに含まれるトラックが 1800 個を超えるようなイベントは除外した。これは、複数の事象が 1 イベントに含まれ、解析が複雑になり困難になることを防ぐためである。

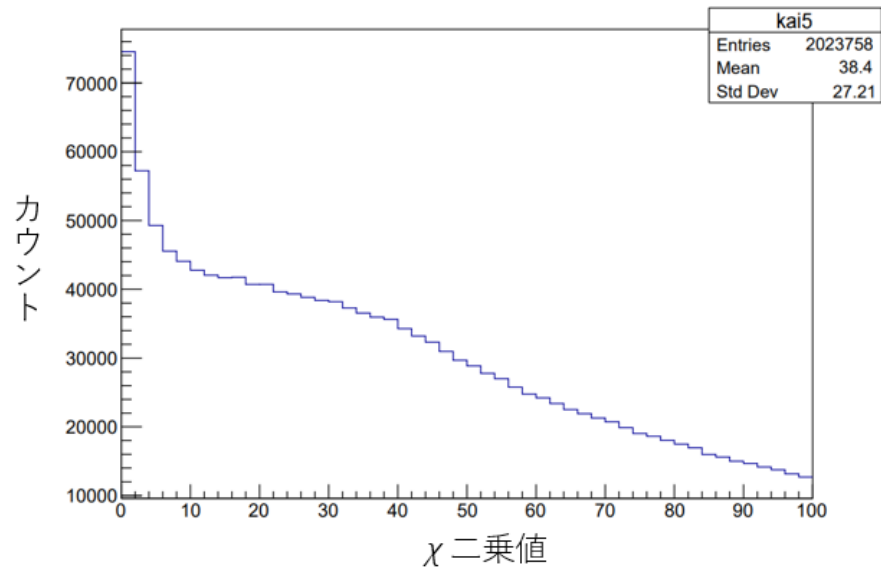


図 5.6: モジュール 107 の  $\chi$  二乗値分布

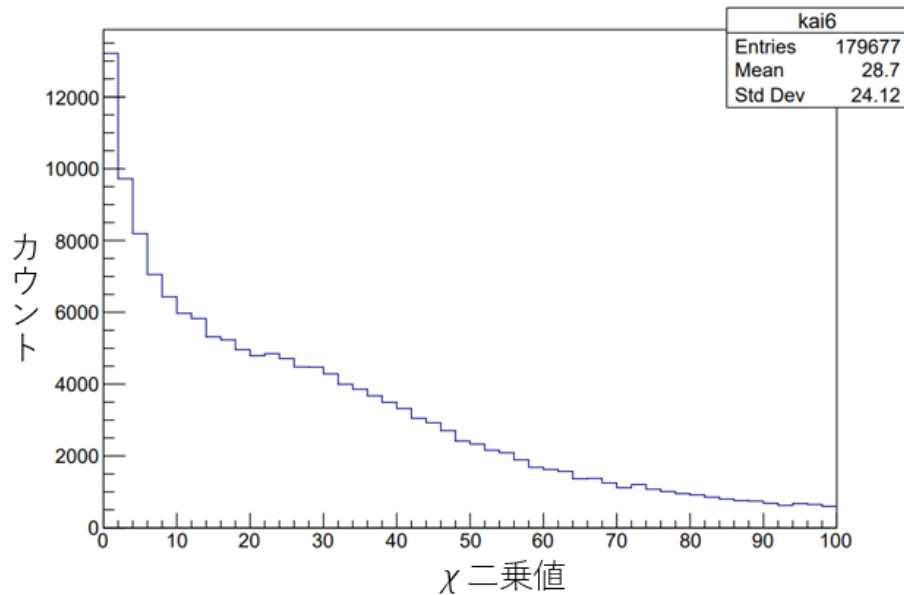


図 5.7: モジュール 108 の  $\chi$  二乗値分布

STS で垂直方向に、3つの GTR では水平、垂直方向に並べられた読み出し用ストリップには番号が割り当てられており、トラックにはそれぞれの検出器でどの番号のストリップを通過したかの情報が含まれる。性能評価において、1 イベントに多数のトラックが含まれ、ある検出器における番号が重複する時、その中で最も  $\chi$  二乗値が小さいトラックのみを採用する。

### 5.3.2 鉛ガラスカロリメータとトラックの相関

スペクトロメータの最も外側にある鉛ガラスカロリメータ (LG) は、HBD と共に粒子識別の役割を果たす電磁カロリメータである。解析にあたり真に  $\pi$  中間子がヒットしたデータを採用するため、LG のヒットが存在することも条件とした。加えて、イベント選択を行う際、LG の残差分布のデータを用いた。残差分布は、同一イベントにおける、ある装置で実際に検出された信号の位置と、トラックキングによって予測される検出器上における粒子位置の残差である。図 5.8 に 1 モジュールの LG におけるローカルな x 方向、y 方向の定義を示す。LG においても粒子が検出されているような事象について調べるため、LG の残差分布が x 方向、y 方向それぞれ  $-50$  mm 以上、 $50$  mm 以下となるトラックを選択した。図 5.9、図 5.10 にモジュール 107,108 における LG の残差分布を示す。これらの図より、残差分布のピークが  $-50$  mm 以上、 $50$  mm 以下の部分に存在することがわかる。図の赤線はイベントミキシング法によって得られた残差分布である。イベントミックス法は、検出された信号位置とトラックでの位置データを 1 イベント分ずらし、算出する手法である。両データが相関を持たないときの値を算出することにより、バックグラウンドを求める。イベントミックス法ではトラックと検出器の信号が対応しないため、ピークは確認されない。

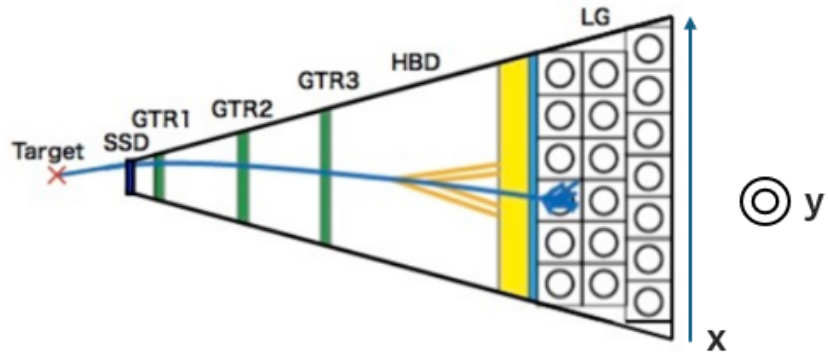


図 5.8: 上から見た時の、1 モジュールの LG におけるローカルな x 方向、y 方向の定義。

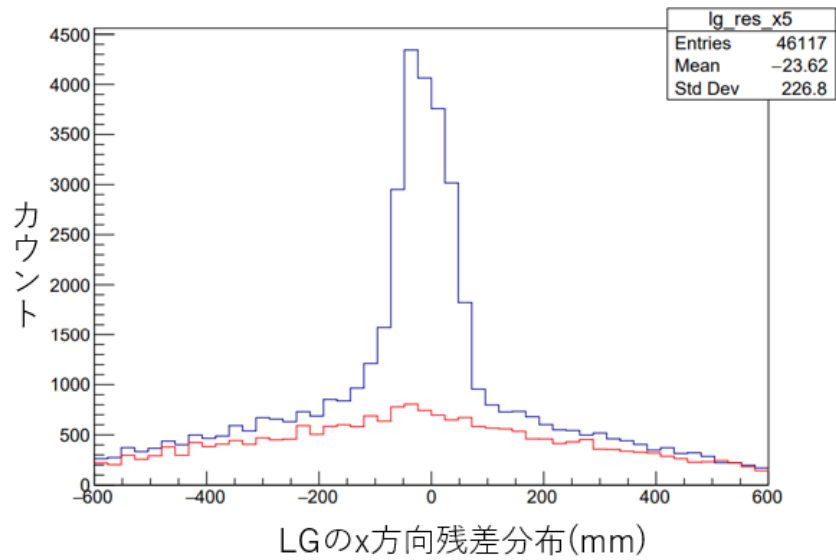


図 5.9: モジュール 107 の LG の x 方向の残差分布。赤線はミックスイベント法による。

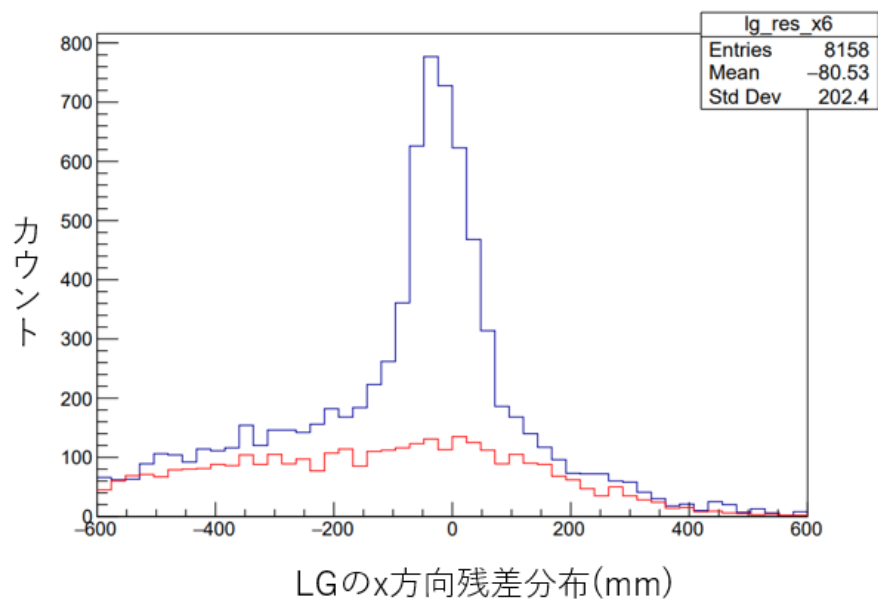


図 5.10: モジュール 108 の LG の x 方向の残差分布。赤線はミックスイベント法による。

### 5.3.3 運動量及び入射角

HBD の粒子検出効率は、運動量や入射角に依存して変動することが知られている。検出効率を計算する際、運動量や入射角依存性による影響を抑えるため、それらの量が一定の範囲にあるトラックのみを選定した。検出効率については 5.3.2 節にて述べる。図 5.11、図 5.12 にモジュール 107、108 での運動量分布を図 5.13、5.14 に入射角の正接分布を示す。トラックの運動量の絶対値は 0.5 GeV 未満とし、x 方向の運動量を z 方向の運動量で割ることにより求めた、入射角の正接が 0 より大きく 0.2 より小さいことを条件にした。これらの閾値は、モジュール 107、108 のデータ数が過度に小さくならないよう範囲を絞ることを考え設定した。

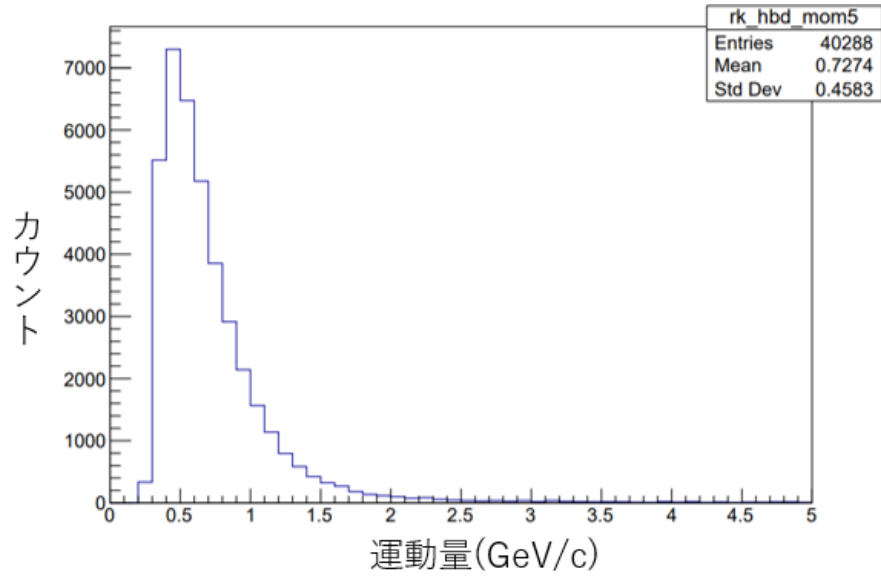


図 5.11: モジュール 107 での運動量分布

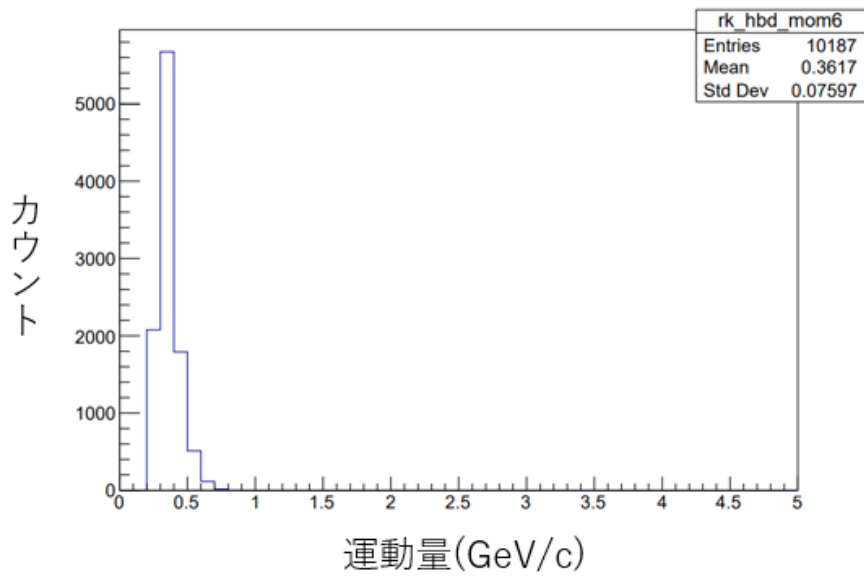


図 5.12: モジュール 108 での運動量分布

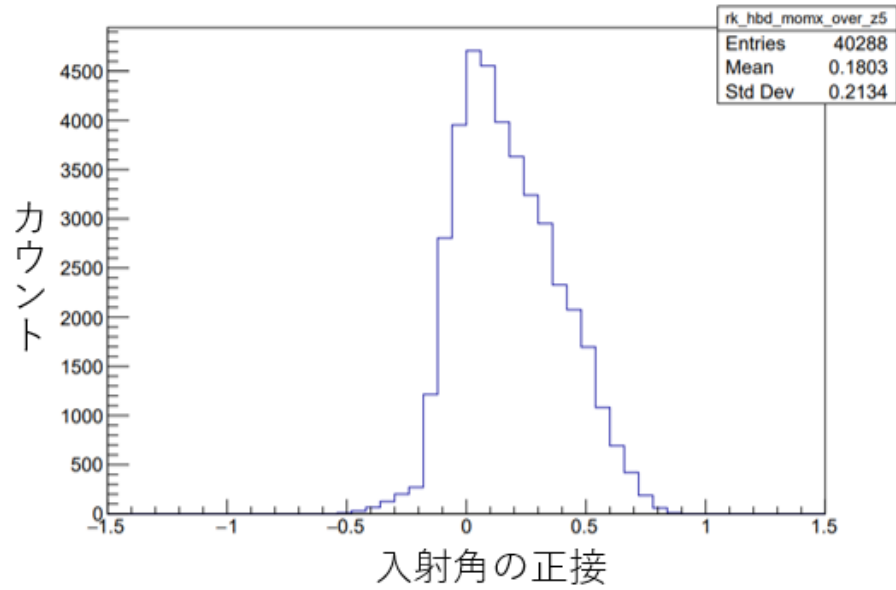


図 5.13: モジュール 107 での入射角の正接分布

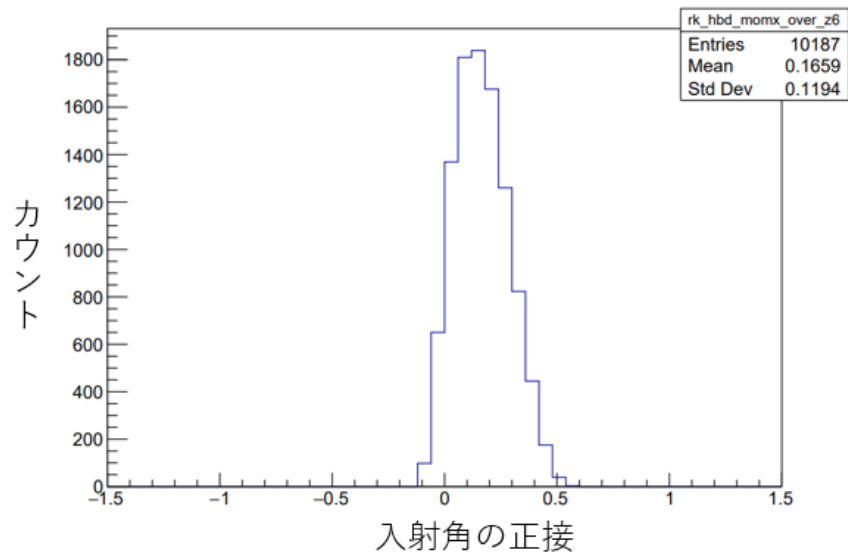


図 5.14: モジュール 107 での入射角の正接分布

### 5.3.4 運動量と STS の ADC

図 5.15 に、トラックでの運動量と STS の ADC のチャンネルのグラフを示す。STS の ADC チャンネルは、STS におけるエネルギーデポジットを示す。ここで、ADC のチャンネルが 10 以下の低エネルギー領域にあるデータが  $\pi$  中間子を表し、その上部にある反応が陽子である。5.3.2 節で述べる通り、解析では  $\pi$  中間子を対象としているため、陽子に対応するトラックは取り除く必要がある。そのため、図 5.15 の中央の赤線を閾値として、赤線より下部にあるトラックのみ採用した。また、 $\pi$  中間子と陽子のエネルギーの差は高運動量領域で小さく低運動量領域で大きい。

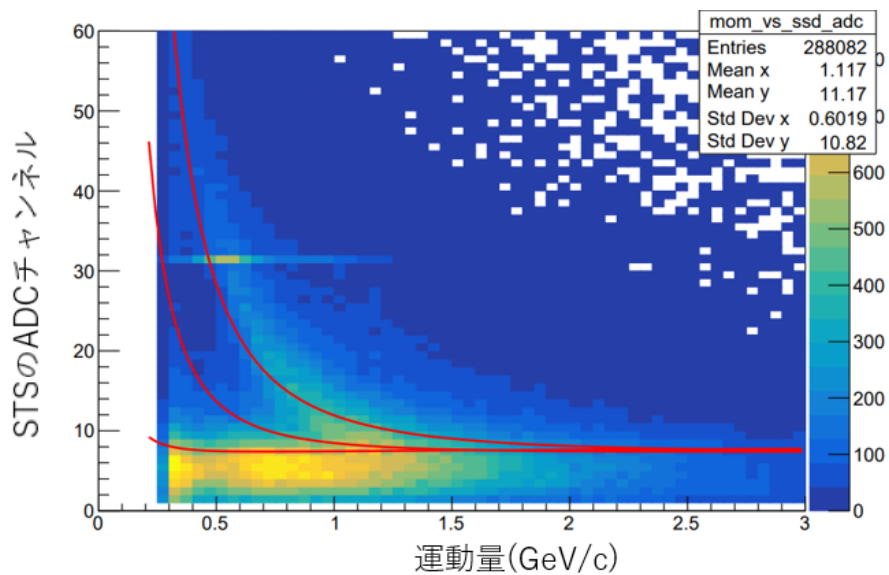


図 5.15: トラックでの運動量と STS の ADC のグラフ。x 軸は運動量を (単位 GeV/c)、y 軸は STS の ADC のチャンネルを表す。上部の赤線は陽子イベント、下部の赤線は  $\pi$  中間子にイベントに対応し、中央の赤線は  $\pi$  中間子と陽子を分離するために用いた境界を示す。

5.2.3 節の通り、0.5 GeV 以下の低運動量領域に絞って解析するため、 $\pi$  中間子と陽子はよく分離される。図 5.16、図 5.17 にそれぞれ HBD モジュール 107、108 を通過するトラックでの STS のクラスター ADC チャンネルの分布を示す。両方の図で低エネルギー領域、高エネルギー領域にピークが見られ、それぞれ  $\pi$  中間子、陽子によるピークであると考えられる。これらの図では 31ch のカウントが突出しているが、これは STS の ADC のチャンネルが 0 から 31ch までしかなく、超過するデータは 31ch として扱われるためである。なお、対応する HBD の信号が存在するトラックにおける STS の ADC チャンネル分布を付録 A に示す。

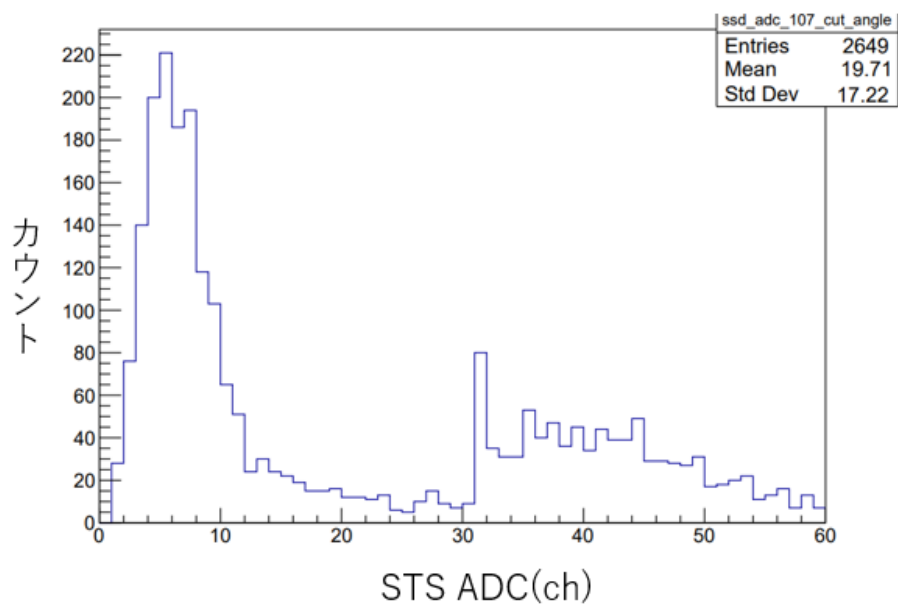


図 5.16: モジュール 107 を通過するトラックにおける STS の ADC チャンネル分布。横軸が ADC チャンネル、縦軸がカウントを示す。

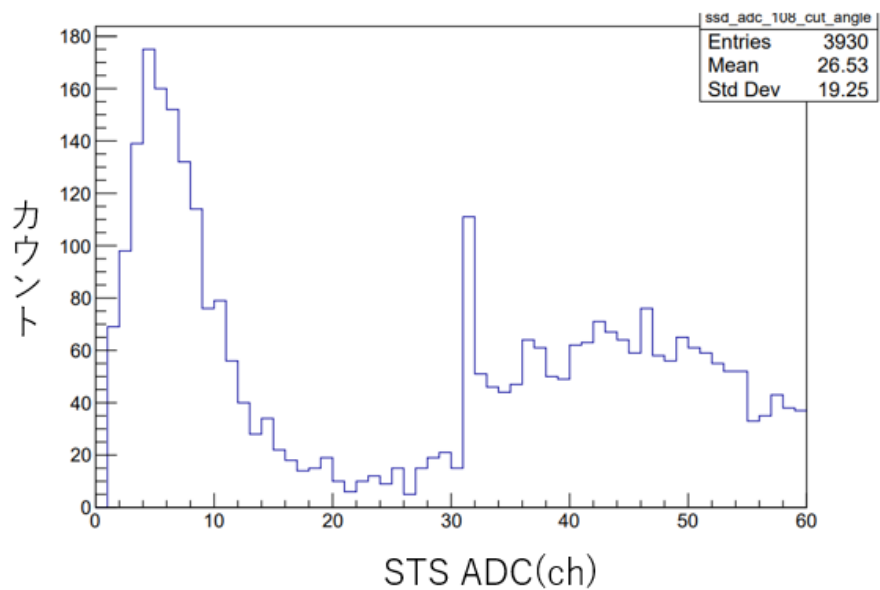


図 5.17: モジュール 108 を通過するトラックにおける STS の ADC チャンネル分布。横軸が ADC チャンネル、縦軸がカウントを示す。

## 5.4 解析

### 5.4.1 HBD の残差分布

図 5.18 に 1 モジュールの HBD におけるローカルな x 方向、y 方向の定義を示す。x 方向は検出器面に沿った水平方向、y 方向は鉛直方向である。それぞれ図 5.19、図 5.20 に、モジュール 107、108 での HBD の x 方向の残差分布を示す。ただし、y 方向の残差分布が  $-50 \text{ mm}$  以上、 $50 \text{ mm}$  以下であるデータに絞られている。図中の赤線はミキシングでの結果を示す。どちらも  $-50 \text{ mm} < x < 50 \text{ mm}$  の範囲にピークが存在し、ピークの高さはミックスイベントのグラフと比較して十分に高い。このことから、HBD で検出された信号とトラックがよく対応していることが示される。

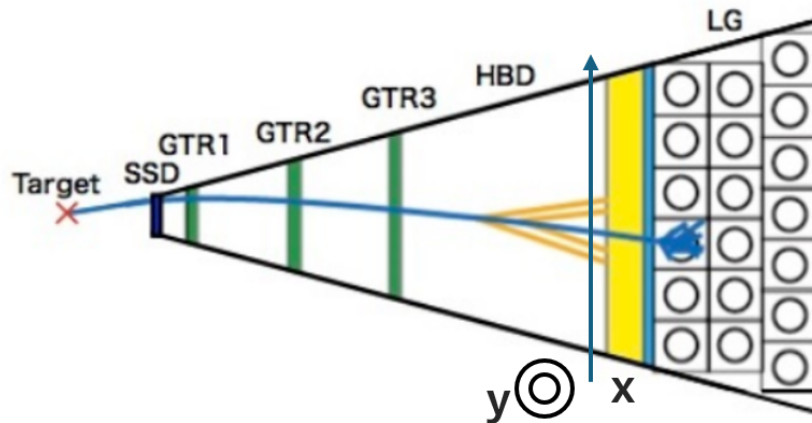


図 5.18: 上から見た時の HBD におけるローカルな x 方向、y 方向の定義。

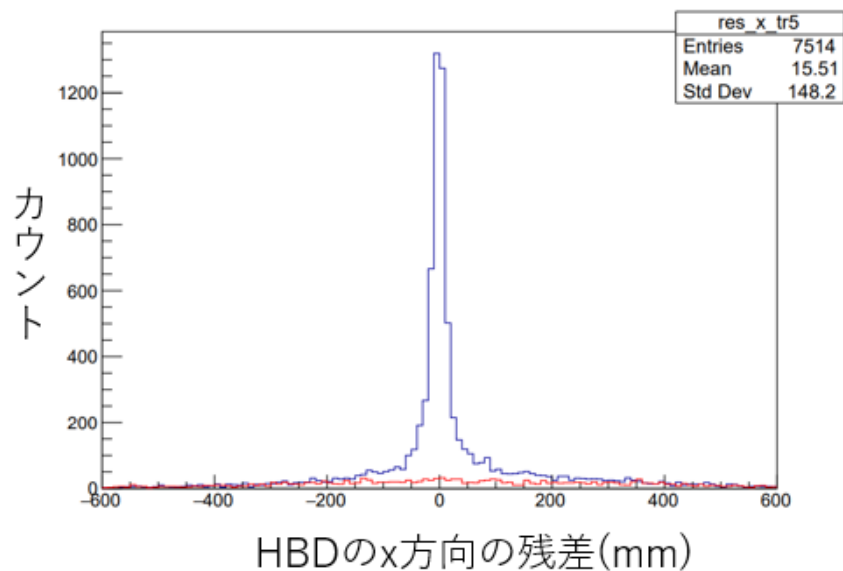


図 5.19: モジュール 107 の HBD の x 方向残差分布。横軸の単位は mm。赤線はミックスイベント法による。

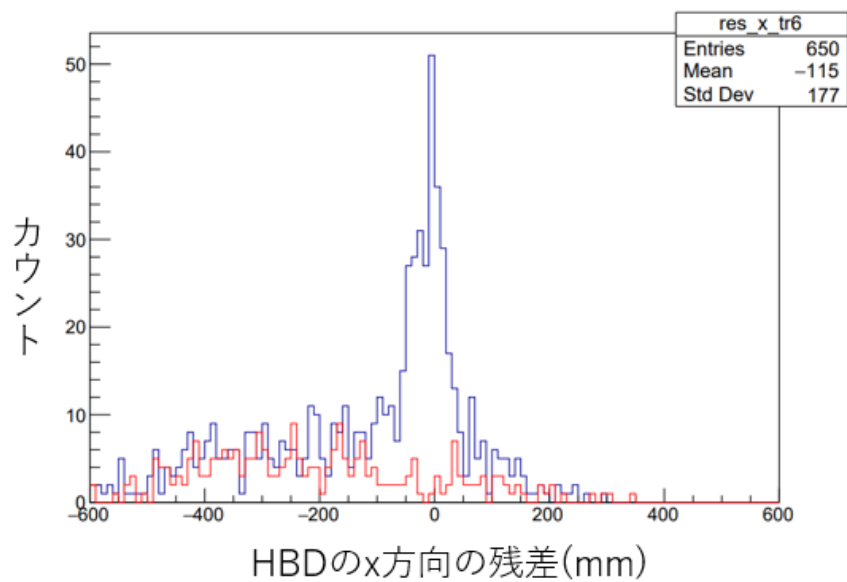


図 5.20: モジュール 108 の HBD の x 方向残差分布。横軸の単位は mm。赤線はミックスイベント法による。

#### 5.4.2 検出効率

HBD の電子増幅の性能評価を行うにあたり、 $\pi$  中間子の検出効率によって評価を行う。残差分布の絶対値が小さくなる、つまり同一イベントで検出された信号とトラックでの検出器上の粒子の位置が一定範囲に入るとき、そのトラックと信号は対応していると考えられる。検出効率を、全トラックの内、対応する信号が存在するトラックの割合で評価した。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{対応する信号が存在するトラック数}}{\text{トラック数}} \quad (4)$$

ここで、モジュール上 x 方向、y 方向の残差分布の絶対値が共に 30 mm を下回る場合、トラックと信号が対応するとして評価に用いた。電子増幅によって閾値を超えた事象のみが信号として検出されるので、検出効率の高さは電子増幅の効率を示す。よって、スベサーを追加する施策を行ったスタックとそうでないスタックでの検出効率の比較により、GEM 間の間隔を広げることによる電子増幅率への影響を検証することができる。

しかし、Run0e の時点では、ビームに時間構造があり、瞬間的に非常にビーム強度が高くなるという事象が多数発生していた。このため電子のデータサンプルが不足しており、電子の検出効率の比較を行うことは困難である。したがって、 $\pi$  中間子によるガス電離からの信号を用いて検出効率の見積もりを行った。GEM の電子増幅の過程は検出対象が電子か  $\pi$  中間子に依らないため、 $\pi$  中間子の検出効率を用いた評価に問題はないと判断した。表 5.2 に、上記で説明した方法で算出した、モジュール 107、108 における各スタックでの検出効率を示す。モジュール番号 107、108 の後に続く数字はスタックの番号を示す。ただし、Run0e 時に破損していたスタックや、データ数の不足により性能評価に至らなかったスタックは除外している。

108-3	107-4	107-3
$9.7 \pm 1.0\% (82/845)$	$11.5 \pm 0.9\% (145/1265)$	$15.5 \pm 1.2\% (133/858)$

表 5.2: モジュール 107、108 における  $\pi$  中間子の検出効率。誤差は  $1\sigma$  の範囲である。モジュール番号の後に続く数字はスタックの番号を示す。

## 6 議論および今後の展望

### 6.1 性能評価の議論

5.3.2 節では、モジュール 107、108 における  $\pi$  中間子の検出効率を算出した。図 5.12 で、データ数が多く、かつスペーサーの有無による比較が可能なスタック、107-3、107-4、108-3 に着目する。図 6.1 に、HBD モジュール 107、108 における  $\pi$  中間子検出効率のまとめを示す。図中の 107 全体は 107-3、107-4 をまとめて算出した、モジュール 107 における全体の結果を指す。ここで、108-3 と 107 全体の検出効率は、誤差  $3\sigma$  の範囲で一致している。また、同モジュールである 107-3、107-4 間の検出効率の差はスタックの個体差による系統誤差だと考えられるが、108-3 と 107 全体の間の検出効率差は現在得られている系統誤差および統計誤差の範囲に収まっている。以上より、スペーサーの追加による電子増幅効率への影響はないと考えられる。

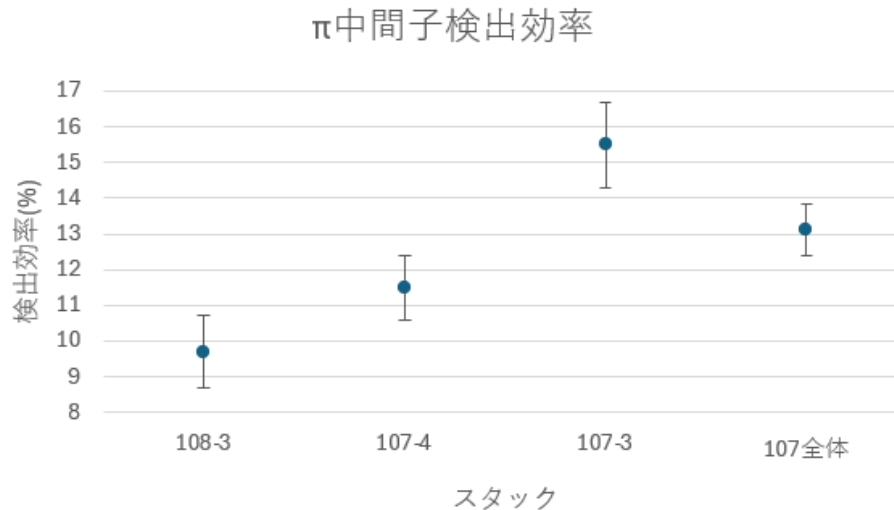


図 6.1: HBD モジュール 107、108 における  $\pi$  中間子検出効率。エラーバーは  $1\sigma$  の範囲を示す。

### 6.2 Run1a での運用結果

2025 年 11 月に行われた、初の物理データ取得のためのランである Run1a では、GEM 間の間隔を広げ、構造を変えた HBD モジュールを追加で製作し運用した。製作過程については J-PARC E16 実験内部資料に記す [20]。Run1a 終了時における HBD のスタックの状況を図 6.1 に示す。Run1a では、モジュール 101、102、108 の全体及びモジュール 109 の一部スタックで、スペーサーを加えた状態で実機としてインストールした。Run1a のビームタイムでは、スペーサーを追加したスタックは 1 箇所破損し、スペーサーを追加していないスタックでは新たな破損は見られなかった。Run1a で破損した箇所がスペーサーの有無を問わず少な

い理由の一つとして、Run1a ではビームの安定性が他のランと比べて高かったことが挙げられる。結果として、Run1a ではスタックの破損数は1つに抑えられ、コミッシュニングランと比較して安定した運用をすることに成功した。

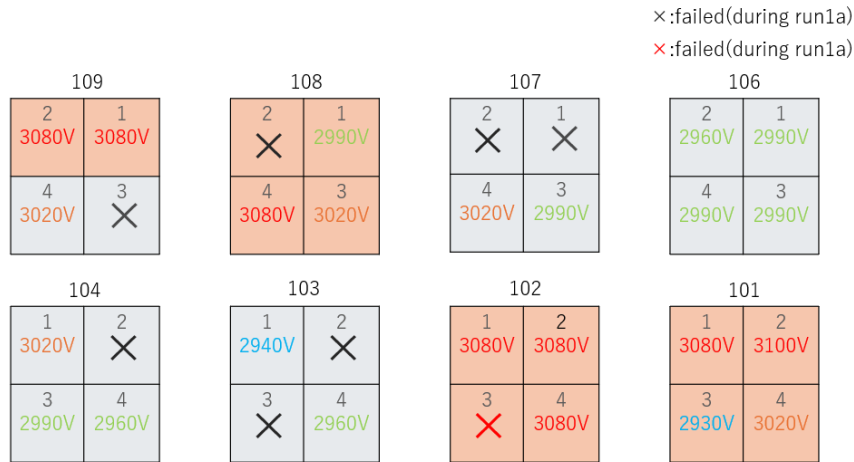


図 6.2: Run1a 終了時におけるスタックの状況。灰で塗られている部分はスペーサー無し、橙色で塗られている部分はスペーサー有りを示す。黒の × は Run1a 以前より破損している GEM が含まれているスタックを、赤の × は Run1a 中に破損した GEM が含まれているスタックをそれぞれ示す。スタック番号の下は掛けられている電圧を示す。

なお、Run1a では各スタックでの電子増幅効率を揃えるため、HBD の GEM に掛ける電圧をオンラインレベルで適宜調整した。このとき、ビーム強度は  $10^{10}$  である。図 6.1 に示すように、スペーサーを入れたスタック、特にモジュール 102 や 109 ではスペーサーを追加していないスタックと比べ全体的に高い電圧が掛かっている。しかしながら、ラン終了時まで安定的な運用を行うことができた。増幅率の違いについては、スタックの個体差や、運動量や入射角への依存性、本解析では無いと仮定した  $\pi$  中間子と電子の信号増幅機構の差など、様々な原因が考えられるが、Run1a のデータを用いたオフライン解析は未だ行われておらず原因の特定には至っていない。今後、Run1a で新たに得た電子サンプルのデータを用い、運動量情報を加えたオフライン解析により調査を行う予定である。

## 7 まとめ

J-PARC E16 実験は、カイラル対称性の自発的破れとハドロン質量の結びつきを示す理論を実証するために進められている実験である。E16 実験では、シンクロトロンによって  $\phi$  中間子を生成した後、中間子の電子対崩壊による電子対の飛跡を解析することによって、原子核内外における  $\phi$  中間子の質量スペクトルを測定する。

HBD(ハドロンプラインド検出器)は、E16 実験で用いられるガスチェレンコフ検出器であり、粒子識別の役割を果たす。過去にビームタイム中に HBD を運用するにあたり、高計数率や高電圧の影響で HBD 内部の GEM が導通、破損し、電子増幅の機能が失われる場合が存在した。これを受け、HBD の安定運用のため、一部スタックの GEM 間にスペーサーを追加し間隔を広げ、放電による破損を抑える試みを行った。

コミッシュニングランである Run0e で、スペーサーを追加した 108 モジュールと、それと隣接したスペーサーを入れていない 107 モジュールに対して性能評価を行い、スペーサーの有無による影響を調べた。 $\pi$  中間子の検出効率を両モジュールの隣接したスタックについて比較した結果、スペーサーの追加による電子増幅率への影響が運用上問題ないことが示された。

Run0e の後行われた Run1a では、より多くの HBD のスタックにおいて、スペーサーを追加した状態で運用された。Run1a のビームタイムで破損した HBD のスタックは全体のうち一か所のみと軽微であった。これはスタックの構造最適化に加え、Run1a でのビームの安定性が以前のコミッシュニングランと比べ高かったことも要因であると考えられる。今後、Run1a のデータによるオンライン解析や追加の Run での運用を通じてスペーサー追加による影響をより正確に調べることで、E16 実験でのさらなる HBD 安定運用を目指す。

## A 付録 A

5.3.4 節では、モジュール 107、108 の STS の ADC チャンネル分布を示した。その内、対応する HBD の信号が存在するトラックにおける STS の ADC チャンネル分布を図 A.1、図 A.2 に示す。

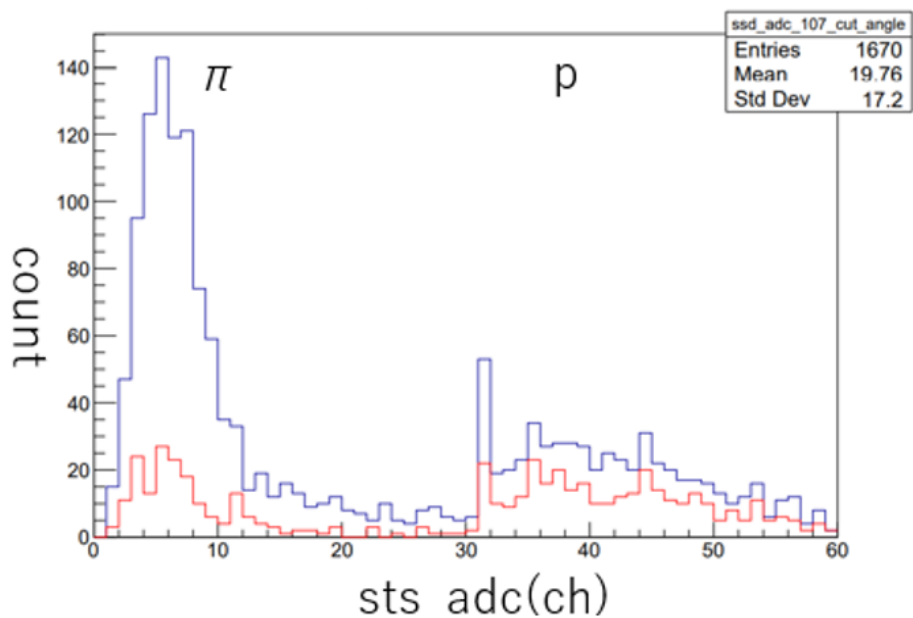


図 A.1: モジュール 107 を通過するトラックにおける STS の ADC チャンネル分布 (青線)。赤線はその内、対応する HBD の信号を持つトラックにおける分布を示す。横軸が ADC チャンネル、縦軸がカウントを示す。

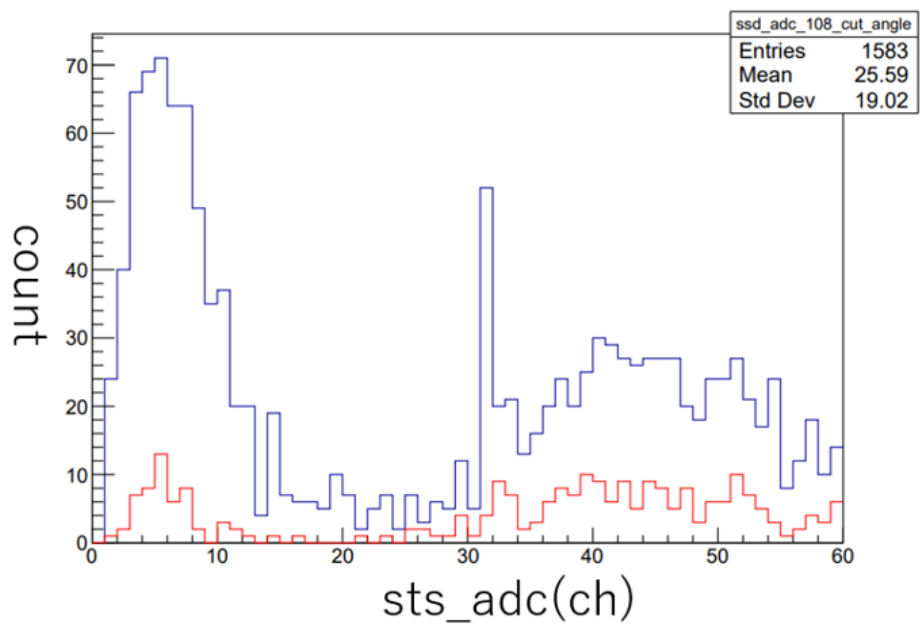


図 A.2: モジュール 108 を通過するトラックにおける STS の ADC チャンネル分布 (青線)。赤線はその内、対応する HBD の信号を持つトラックにおける分布を示す。横軸が ADC チャンネル、縦軸がカウントを示す。

## 謝辞

本論文の作成に当たり、多くの方からのご指導、ご支援をいただきました。

指導教員の成木恵教授には、長期間にわたり研究の全てにおいて熱心なご指導をいただき、本論文執筆の際に度々多大な助言をいただきました。また、研究やその他のことについてご迷惑をおかけすることが度々ありましたが、常に親切に取り計らってくださいました。心の底から深く感謝申し上げます。

理化学研究所の四日市悟専任研究員には、HBDの機構含む様々な実験の事柄について丁寧にご指導いただきました。特にGEMの交換作業やRun1aのビームタイムの際に大変お世話になりました。青木和也講師には、STSについて多くのことを教えていただきました。

京都大学の中須賀さとみさんには、実験の広い範囲について教えていただきました。特にHBDの原理やGEM交換作業に関して長期間にわたり丁寧にご指導いただきました。また、論文執筆中含め、研究に関する質問に対して親切に対応してくださいました。心より感謝いたします。京都大学の市川真也さん、長房俊之介さんには、特にJ-PARC滞在時大変お世話になり、実験の理論やDAQについて詳しく教えていただきました。

他の原子核ハドロン物理学研究室のメンバーや、E16実験グループの方々にも大変お世話になりました。深謝申し上げます。

最後に、私を長年支えてくれた家族に深く感謝の意を示します。

## 参考文献

- [1] W.Weise, Nucl. Phys. A553 (1993) 59c-79c.
- [2] P.Gubler and K.Ohtani, Phys. Rev. D 90, 094002 (2014).
- [3] S. Navas et al., Phys. Rev. D 110, 030001 (2024) and 2025 update.
- [4] M.A. Shifman, A.I. Vainshtein and V.I. Zakharov, Nucl. Phys. B 147, 385(1979).
- [5] G. Agakichiev et al., Phys. Rev. Lett. 75, 1272(1995).
- [6] M.Naruki et al., Phys. Rev. Lett. 96, 092301 (2006).
- [7] R.Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98, 042501 (2007).
- [8] T.Hatsuda and S.H.Lee, Phys. Rev. C 46, R34 (1992).
- [9] S.H. Lee, Phys. Rev. C 57, 927 (1998).
- [10] <https://j-parc.jp/public/Hadron/ja/facility.html>
- [11] <https://j-parc.jp/c/facilities/accelerators/mr.html>
- [12] <https://j-parc.jp/public/Hadron/ja/index.html>
- [13] 東京大学 村上智紀 修士論文 (2020).
- [14] 東京大学 菅野光樹 修士論文 (2013).
- [15] 京都大学 中須賀さとみ 修士論文 (2020).
- [16] <https://gdd.web.cern.ch/gem>
- [17] S.Yokkaichi et al., Addendum-2 to the J-PARC E16 Technical Design Report(2024).
- [18] 京都大学 足利 沙希子 修士論文 (2018).
- [19] P 板.com 社, <https://www.p-ban.com/quality/spec.html>
- [20]:”E16HBDの製作”, E16HBDの製作\_2026\_02.pptx, 理化学研究所 indico