

2024 年度 修士論文

4 枚フォイルを用いた GEM 飛跡検出器の開発
(Development of GEM tracker using four foils)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
小沢研究室

修士課程 2 年
学籍番号 35-236026

角永 丈

2025 年 1 月 27 日

概要

ハドロンの質量は量子色力学 (Quantum Chromodynamics: QCD) の特徴的な性質である「カイラル対称性の自発的破れ」に深く関連しているとされているが、これを示す直接的な実験結果は未だ限定的である。そこで理論が示唆している、有限密度媒質中でのハドロンの質量分布の変化を捉えようと J-PARC E16 実験が計画されている。J-PARC E16 実験では、J-PARC の 30 GeV 高強度陽子ビームを用いて、原子核中に ϕ 中間子を生成し、その質量分布を大統計で測定することを目的としている。特に、本実験では先行実験である E325 実験の成果と比較して、100 倍の統計量を達成するために 1×10^{10} protons/2seconds という高強度のビームを用いる。そのため最大 5 kHz/mm² の高計数率環境下で動作可能な検出器の開発が必要であった。

そこで本実験では、高計数耐性を特徴とした Gas Electron Multiplier (GEM) を用いた GEM 飛跡検出器 (GTR) を開発した。GTR は Ar+CO₂ (70:30) ガスで満たされており、 ϕ 中間子の崩壊で生じた電子、陽電子が検出器を通過した際に生じる電離電子を 3 枚の GEM で増幅することで位置を検出する。

J-PARC E16 実験では、2020~2024 年にかけてスペクトロメータの性能評価および調整を目的としたコミッションングランが複数回行われた。このコミッションングランにおいて、GTR のいくつかの GEM のストリップに、放電を原因とする導通がみられ、GTR の安定性が課題となった。そこで提案されたのが GTR の GEM フォイル枚数を 3 枚から 4 枚に変更させた 4 枚 GEM 飛跡検出器 (4 枚 GTR) の開発であった。本論文では、この 4 枚 GTR を製作し、性能評価を行うことでその有効性を検証した。

行った性能評価項目はゲイン、検出効率、位置分解能の 3 つである。GEM 一枚あたりの電圧を変動させながら、これらの性能評価を行い、4 枚 GTR の必要性および、実際のデータ収集で運用する際の最適な電圧配分を決定した。テスト結果から、4 枚 GTR は、従来の 3 枚 GTR より 40 V 以上低い GEM への印加電圧によって十分なゲインである $\sim 1 \times 10^4$ 倍以上を達成し、その時の検出効率と位置分解能が要求性能である 96% および 100 μ m を示すことが検証できた。このことから、4 枚 GTR の必要性証明するために必要であった、「従来よりも GEM に印加する電圧が低い条件で同等以上の性能を示す」という内容が十分に示された。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	カイラル対称性の自発的破れ	1
1.1.2	QCD 真空の温度・密度依存性	2
1.1.3	QCD 和則	3
1.2	先行研究	3
1.3	J-PARC E16 実験	6
1.4	研究目的と本論文の構成	6
第 2 章	GEM 飛跡検出器	7
2.1	J-PARC E16 実験	7
2.1.1	スペクトロメータ	8
2.1.2	コミッショニングラン	11
2.2	GEM 飛跡検出器	11
2.2.1	原理	11
2.2.2	構造	14
2.3	4 枚化計画	19
2.3.1	動機	19
2.3.2	実験概要	20
2.3.3	検出器	20
第 3 章	ゲイン測定	24
3.1	測定方法	24
3.2	評価手法	25
3.3	結果	27
第 4 章	ビームテスト	30
4.1	PF-AR テストビームライン	30
4.2	目的	31
4.2.1	検出効率	32

4.2.2	位置分解能	32
4.3	実験方法	32
4.3.1	検出器	32
4.3.2	DAQ システム	36
4.3.3	データセット	37
4.3.4	ビーム条件	37
4.4	解析方法	38
4.4.1	ペDESTAL補正	38
4.4.2	電荷重心による位置の測定	39
4.5	結果	40
4.5.1	$V_{\text{GEM}}(V_{\text{GEM}1} = V_{\text{GEM}234})$ 依存性	41
4.5.2	$V_{\text{GEM}}(V_{\text{GEM}1} \neq V_{\text{GEM}234})$ 依存性	42
4.5.3	V_{drift} 依存性	43
4.5.4	V_{transfer} 依存性	44
4.6	議論・考察	45
4.6.1	クーロン多重散乱	46
4.6.2	各ギャップでの考察	47
4.6.3	まとめ	50
第 5 章	結論	51
付録		53
A	幾何平均による位置分解能の補正	53
B	PF-AR テストビームラインのビーム強度の換算	54
謝辞		55
参考文献		56

目次

1.1	カイラル対称性の特徴を表す有効ポテンシャル	2
1.2	QCD 真空におけるクォーク凝縮量の温度・密度依存性	2
1.3	ϕ 中間子質量と σ_{sN} の関係	3
1.4	KEK-PS E325 実験の結果 1	4
1.5	KEK-PS E325 実験の結果 2	5
2.1	ハドロン実験施設	7
2.2	E16 実験のスペクトロメータの概念図	8
2.3	スペクトロメータを構成する 1 モジュール	8
2.4	E16 実験のスペクトロメータの各検出器の写真	9
2.5	実験エリアにインストールされたスペクトロメータの写真	10
2.6	GEM の構造	12
2.7	実際に使用される GEM の写真	12
2.8	GTR の原理	13
2.9	本実験で用いる GEM の各パラメータ	15
2.10	リードアウトの構造	16
2.11	APV25 chip の出力信号	17
2.12	APV25 chip を 2 枚載せたプリアンプカード	17
2.13	SRS の写真	18
2.14	ASD の回路図	18
2.15	ASD と ASD-sub の写真	19
2.16	放電し GEM の表裏が導通する様子	20
2.17	300GTR の HV 供給基板の回路図	21
2.18	HV 供給基板の写真	22
2.19	4 枚 GTR の組み立て	22
2.20	完成した 4 枚 GTR の写真	23
3.1	ゲイン測定のセットアップ概念図	25
3.2	ゲイン測定のセットアップ	26
3.3	X 線入射時の 4 枚 GTR の様子	27

3.4	$G_{\text{conversion}}$ 計算のためのテストパルス信号	28
3.5	ゲイン測定の結果	29
4.1	PF-AR テストビームライン実験エリア	30
4.2	残差分布を求め方	31
4.3	検出器のセットアップを水平方向から見た概念図	33
4.4	検出器のセットアップ写真	33
4.5	各シンチレーション検出器の写真	34
4.6	100GTRu の写真	35
4.7	DAQ システムの概念図	36
4.8	ペDESTAL補正された波形	39
4.9	0 度, X 軸方向の残差分布	40
4.10	0 度, $V_{\text{GEM1}} = V_{\text{GEM234}}$ の結果	41
4.11	0 度, V_{GEM234} 一定のときの V_{GEM1} 依存性	42
4.12	0 度, V_{GEM1} 一定のときの V_{GEM234} 依存性	43
4.13	0 度, $V_{\text{GEM1}}, V_{\text{GEM234}}$ 一定のときの V_{drift} 依存性	44
4.14	0 度, $V_{\text{GEM1}}, V_{\text{GEM234}}$ 一定のときの V_{transfer} 依存性	45

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 カイラル対称性の自発的破れ

量子色力学 (Quantum Chromodynamics: QCD) は、強い相互作用を支配する基礎理論であり、クォークとグルーオンの振る舞いを記述する。この理論は、標準模型の一部として素粒子物理学の中核を成している。QCD では、クォークとグルーオンが SU(3) カラー対称性に基づくゲージ理論によって相互作用を行う [1]。クォークとグルーオンによって構成される複合粒子がハドロン（陽子、中性子など）である。これらの粒子は、強い相互作用により束縛され、通常の物質の基本構成要素を成している。特に、ハドロンの質量は QCD の特徴的な性質である「カイラル対称性の自発的破れ」に深く関連している。

カイラル対称性とは、質量のない粒子に対して成り立つ対称性であり、カイラリティの異なるクォーク状態が独立してそれぞれの内部自由度の空間で持つ。QCD ラグランジアンでは、近似的にクォーク質量を無視できるため、カイラル対称性が成立する。しかし、系のエネルギーが最小となる QCD 真空ではクォークと反クォークの凝縮（クォーク凝縮）が起こり、この対称性は自発的に破れる。これがカイラル対称性の自発的破れである。

図 1.1 にカイラル対称性の特徴を表す図を示す [2]。このように、カイラル対称性の自発的破れは有効ポテンシャルの形状で視覚的に表現できる。左側の図は、カイラル対称性が成立している状態を示し、ポテンシャルが円対称である。ここでは、真空状態における場の期待値 $\langle\sigma\rangle$ がゼロであり、カイラル対称性が保持されている。一方、右側の図では、 $\langle\sigma\rangle$ が非ゼロとなり、ポテンシャルの円対称性が破れている。この破れに伴い、 π 中間子が南部・ゴールドストーン粒子（ほぼ質量ゼロの粒子）として現れる [3]。こうしたカイラル対称性の自発的破れにより、ハドロンが質量を持つようになる。この対称性の破れは、真空のエネルギー構造を変化させる非自明なプロセスであり、QCD の非摂動的性質を反映している。

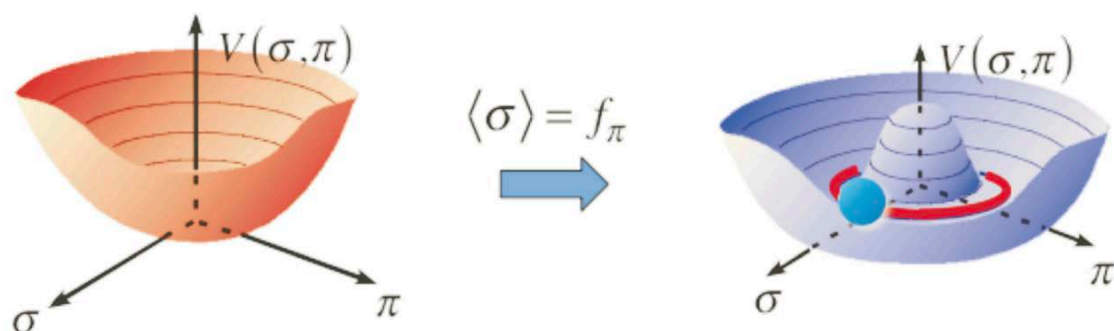


図 1.1 カイラル対称性の特徴を表す有効ポテンシャル. 左：対称性が成立している状態. 右：対称性が破れた状態 [2].

1.1.2 QCD 真空の温度・密度依存性

有限温度や有限密度環境下では、カイラル対称性が部分的に回復し、それに伴いクォーク凝縮量が減少することが理論的に予測されている [4]. QCD の有効理論である NJL (Nambu-Jona-Lasinio) 模型を用いたクォーク凝縮の真空期待値の温度・密度依存性は、図 1.2 で表される [5]. 温度や密度が高まると、クォーク凝縮の絶対値が減少し、ハドロン質量が低下する可能性がある. これにより、質量スペクトルが変化し、QCD 真空の性質が変わることが期待されている. こうした現象を実験的に検証することは、QCD の非摂動的性質やハドロン質量生成の起源を理解するための重要なステップである.

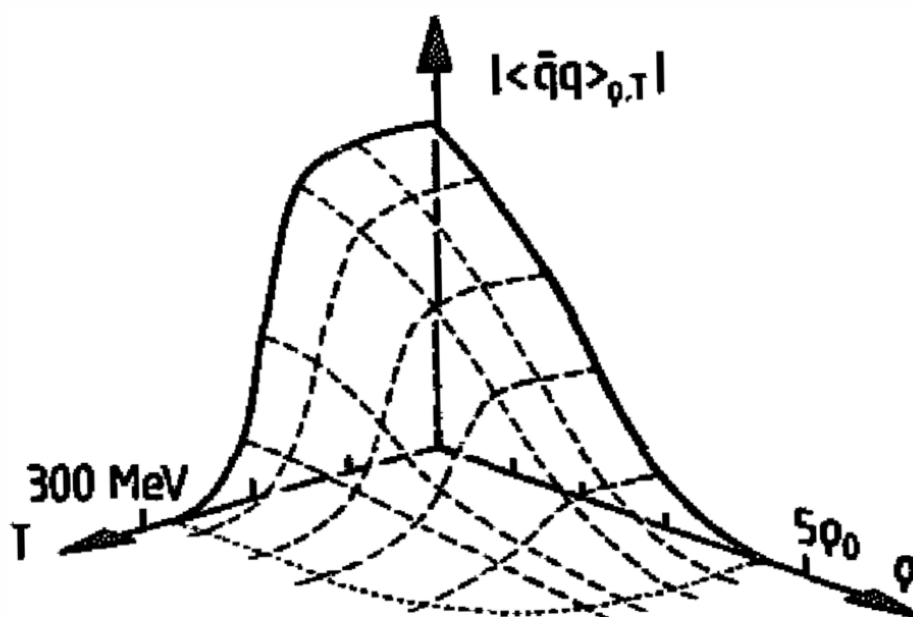


図 1.2 QCD 真空におけるクォーク凝縮量の温度・密度依存性 [5].

1.1.3 QCD 和則

クォーク凝縮量と測定可能な物理量を結びつける理論として、Shifman らによって提唱された QCD 和則の手法が挙げられる [6]. この手法により、実験結果からクォーク凝縮量を評価できる. QCD 和則とは、分散式と演算子展開を用い、ハドロンの質量とクォーク・グルーオン凝縮との関係式を与える非摂動的な計算手法である. また、Gubler, Ohtani らは、この QCD 和則に最大エントロピー法を組み合わせることで、核子中のストレンジネス凝縮量 $\langle \bar{s}s \rangle$ と ϕ 中間子質量の関係式を導出した [7]. ここにパラメータ $\sigma_{sN} = m_s \langle N|\bar{s}s|N \rangle$ を用いて ϕ 中間子質量と σ_{sN} の関係は図 1.3 に表される. なお、 m_s はストレンジネスクォークの質量である. この関係により、 ϕ 中間子の質量スペクトルから原子核中のストレンジネス凝縮量が分かる.

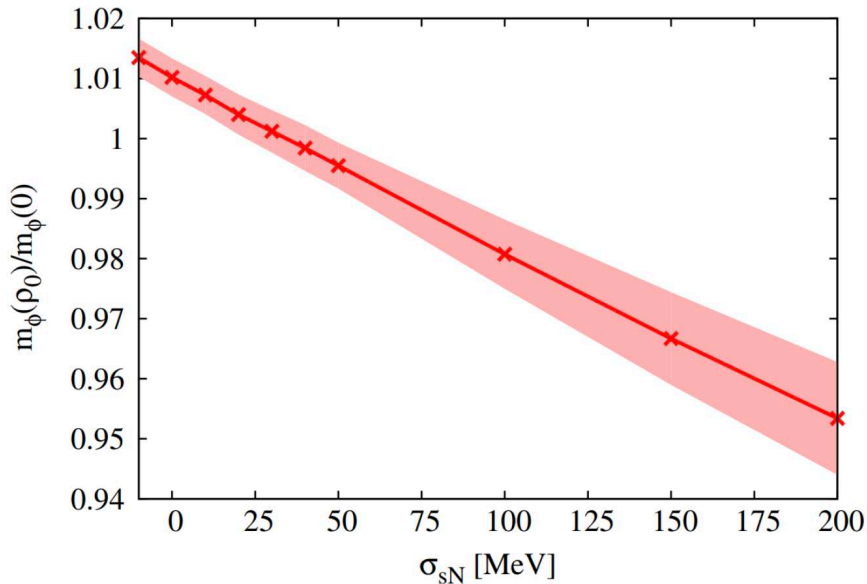


図 1.3 ϕ 中間子質量と σ_{sN} の関係. 横軸が $\sigma_{sN} = m_s \langle N|\bar{s}s|N \rangle$, 縦軸が原子核中の ϕ 中間子質量と真空中の ϕ 中間子質量の比 [7].

1.2 先行研究

有限密度環境下でのハドロンの質量変化を調べるための先行実験として、KEK-PS E325 実験がある [8]. この実験では、12 GeV 陽子ビームを用いて軽いベクトル中間子 (ϕ 中間子や ρ/ω 中間子) を C, Cu 標的中に生成し、その質量分布を電子陽電子対崩壊チャンネルで測定している. その結果、核媒質中での ρ/ω 中間子では質量減少を、 ϕ 中間子では質量減少および崩壊幅が広がる兆候が観測された [9][10]. 詳細の結果を図 1.4 および図 1.5 に示す. ϕ 中間子については、質量 3.4% 減少、幅 3.6 倍と求められた. ρ/ω 中間子については、9% の減少が見られた. これらの結果は、カイラル対称性の回復を支持するものであり、有限密度環境における QCD の新たな性質を示唆している.

しかしながら、E325 実験にはいくつかの課題が存在した.

- データの統計量の不足

統計量は、質量分布の変化とカイラル対称性の自発的破れを直接的に結びつけるには不十分であった [11]. 原子核大きさ依存性や ϕ 中間子の運動量依存性を解析するためのデータ量が不足しており、系統的な議論を展開することが難しかった [12].

- 質量分解能の限界

質量分解能は $11 \text{ MeV}/c^2$ であり、核内の中間子の質量分布を明確に測定することは困難であった.

た [11]. これにより、質量スペクトルの変化をカイラル対称性の破れや回復現象に結びつけることが困難であった.

- 検出器とデータ取得の制限

より高統計を目指すには、ビーム強度を増加する必要があったが、検出器、データ収集システム共に限界であった.

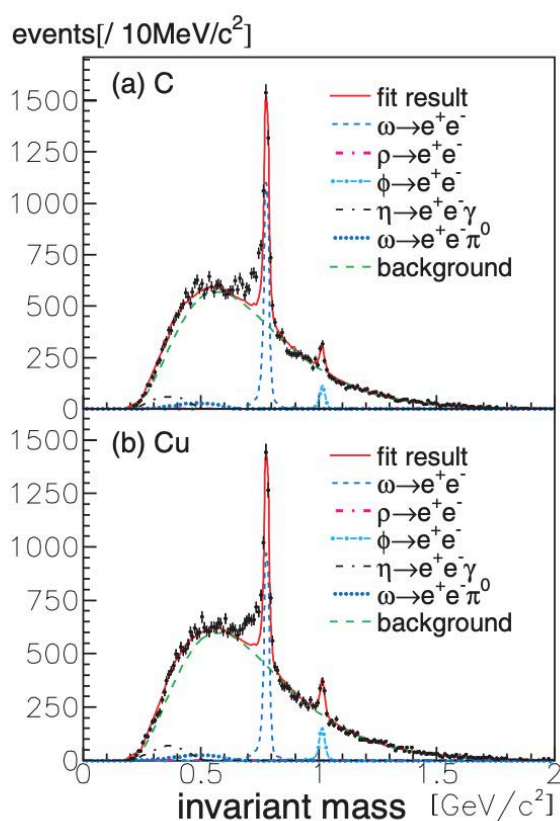


図 1.4 KEK-PS E325 実験で得られた、全質量領域における電子陽電子対の不変質量スペクトル. 12 GeV の陽子ビームを (a) 炭素および (b) 銅の標的に衝突させた際の測定結果. 実線が全体のフィッティング結果, その他の各破線は個別の粒子崩壊 (例えば $\rho \rightarrow e^+e^-$, $\omega \rightarrow e^+e^-$ など) やバックグラウンドを表す. ω 中間子の低質量側に収量の超過がみられる [9].

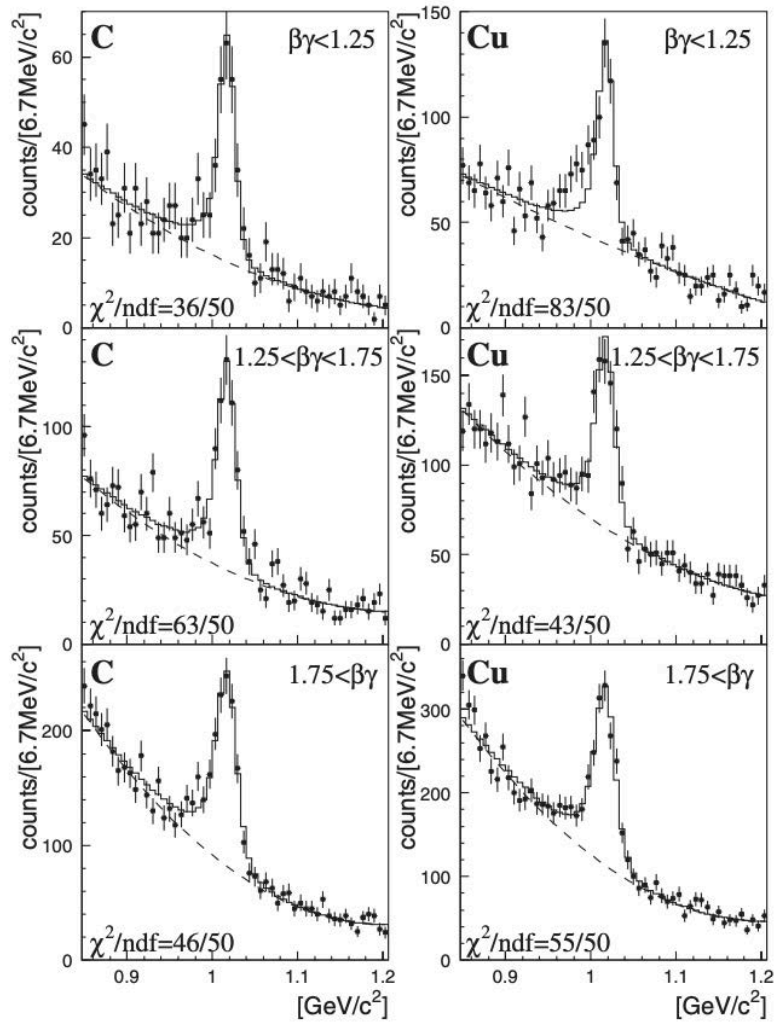


図 1.5 KEK-PS E325 実験で得られた、 ϕ 中間子質量付近の不変質量スペクトル。 $p + A \rightarrow \phi \rightarrow e^+e^-$ 反応における ϕ 中間子の質量スペクトルを炭素および銅の標的で比較している。低速度領域 $\beta\gamma < 1.25$ で ϕ 中間子の低質量側に収量の超過がみられる [10]。

KEK-PS E325 実験以外にも、QCD 相構造を解明するための多くの実験が行われている。その中でも、CERN の NA60 実験 [13] や GSI の HADES 実験 [14] では、中間子の質量スペクトルの変化が確認されているが、これらの結果がカイラル対称性の回復と直接的に関連しているかどうかは、依然として明らかではない。また、CLAS 実験 [15] や CBELSA-TAPS 実験 [16] では、原子核中における中間子の質量変化が測定されているものの、これらの結果もカイラル対称性の回復現象を決定的に証明するものではなかった。

これらの背景を受けて、J-PARC E16 実験が提案された。この実験は、E325 実験の成果を基盤に、その課題を克服し、核物質中の ϕ 中間子の質量スペクトルを高精度で測定することを目指している。

1.3 J-PARC E16 実験

J-PARC E16 実験は, 30 GeV 高強度陽子ビームを用いて, 有限密度環境下でのハドロン質量変化を精密に測定することを目的としている. E16 実験では, E325 実験の成果に対して次のような目標が設定されている.

- 100 倍の統計量
 - J-PARC の大強度シンクロトロンを使い, ビーム強度を 10 倍にする.
 - 大立体角の新スペクトロメータを開発し, アクセプタンスを 5 倍にする.
 - ビームのエネルギーが 30 GeV に増加することにより, ϕ 中間子の生成断面積が 2 倍になる.
- 半分の質量分解能である $5 \text{ MeV}/c^2$
- ビーム強度の増加にともなう, 高計数率環境下で動作可能な検出器の開発

1.4 研究目的と本論文の構成

本研究の目的は, J-PARC E16 実験で使用される GEM 飛跡検出器の開発, 製作, および性能評価を行うことである. 特に, GEM 飛跡検出器の GEM フォイル枚数を 3 枚から 4 枚に変更させた 4 枚 GEM 検出器 (4 枚 GTR) の有効性の検証である. この GEM 検出器の改良により, GEM の放電による導通確率を減少させることが期待される.

本論文は以下の構成で記述されている.

- 第 2 章: J-PARC E16 実験の紹介, GEM 検出器の概要と構造, GEM フォイル 4 枚化の動機および構造.
- 第 3 章: 4 枚 GEM 検出器の性能評価項目の一つ, ゲイン測定実験の詳細.
- 第 4 章: ビームテストによる 4 枚 GEM 検出器の性能評価.
- 第 5 章: 以上を総括した結論.

第 2 章

GEM 飛跡検出器

2.1 J-PARC E16 実験

E16 実験は、大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) で行われる。J-PARC は、リニアック (直線型加速器)、RCS (Rapid-Cycling Synchrotron: 高速周回型シンクロトロン加速器)、MR (Main Ring: 陽子シンクロトロン加速器) の陽子を加速する 3 台の大型加速器を有している [17]。そのうち E16 実験を実施するハドロン実験施設では、MR から取り出した陽子を用いて実験する。ハドロン実験施設の概観を図 2.1 に示す [18]。ハドロン実験施設の一次陽子輸送ビームラインへ送られた陽子ビームは、ハドロン実験ホール内にある二次粒子生成標的に照射され、生成された K 中間子や π 中間子等の二次粒子がそれぞれの実験エリアで使用される [19]。

E16 実験では、30 GeV の一次陽子ビームの一部を切り出し、直接原子核標的に照射する [20] ことで ϕ 中間子を生成する。そして、その崩壊生成物である電子陽電子対を識別し、質量スペクトルを再構築する。原子核標的としては C, Cu が用いられ測定される。標的は、ヘリウムガスが充填されたチェンバーの中に設置される。

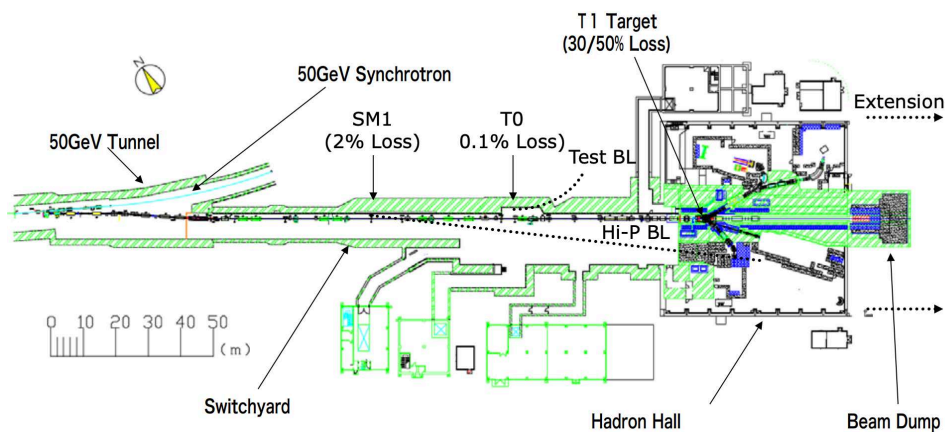


図 2.1 ハドロン実験施設 [18].

2.1.1 スペクトロメータ

スペクトロメータの概観図を図 2.2 に示す。図 2.3 に示すようにスペクトロメータの 1 モジュールが構成される。

E16 実験のスペクトロメータは内層から順番に、以下のような構成要素から成り立っている。各検出器の写真を図 2.4 に、実験エリアにインストールされたスペクトロメータの図を図 2.5 示す。

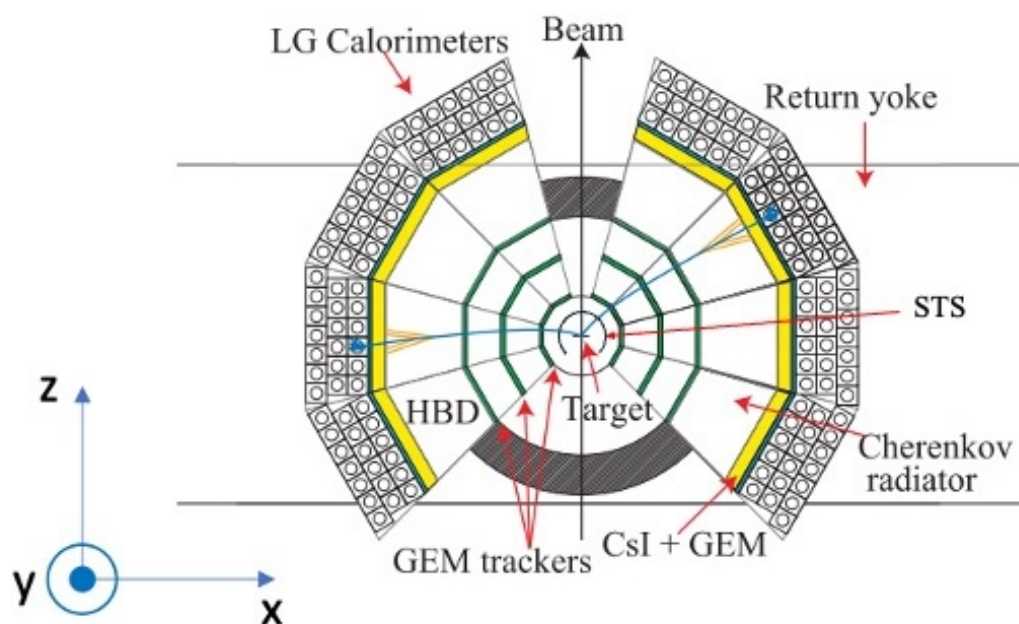


図 2.2 E16 実験のスペクトロメータの概念図.

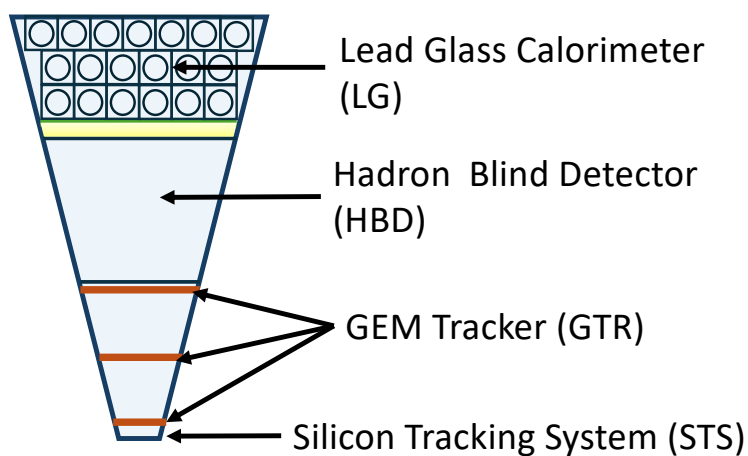


図 2.3 スペクトロメータを構成する 1 モジュール.

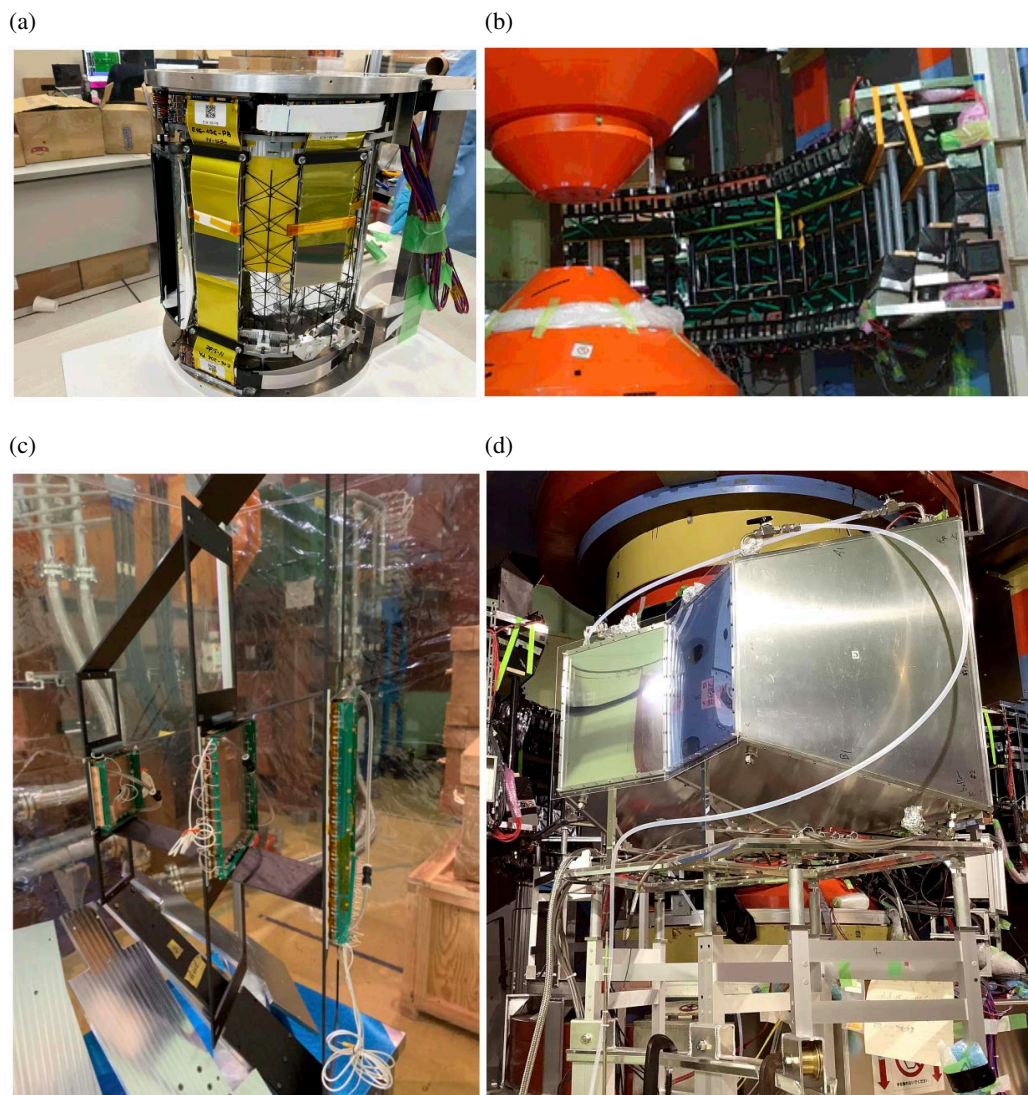


図 2.4 E16 実験のスペクトロメータの各検出器の写真. (a)STS. (b)LG. (c)GTR. (d)HBD.

1. FM 電磁石

検出器群は FM 電磁石と呼ばれる磁石内に設置される。実験時にコイルに流れる電流は 2450 A, 中心磁場は 1.77 T である。

2. STS: シリコントラッキングシステム

STS (Silicon Tracking System) は, シリコン半導体によって構成される飛跡検出器を用いたシステムである。ドイツ GSI-FAIR の CBM 実験と共同で開発された。GTR と共に飛跡検出を担い, 高い位置分解能, 放射線耐性を持つ。

3. GTR: GEM 飛跡検出器

GTR (GEM Tracker) は, STS と共に飛跡検出を担うマイクロパターンガス検出器である。GEM (Gas Electron Multiplier) によって構成される。詳細は 1.2 で後述する。

4. HBD: ハドロンプラインド検出器

HBD (Hadron Blind Detector) は π 中間子を除去し, 電子識別を行うガスケレンコフ検出器である. GTR と同じく GEM が用いられる.

5. LG: 鉛ガラスカロリメータ

LG (Lead-Glass Calorimeter) は, 最外層に位置する電磁カロリメータである. 電子に対して高感度であり, HBD と共に電子識別を担う.

これらの検出器群により, E325 実験の 100 倍の統計量を達成可能にする広い立体角をカバーする大アクセプタンスと高分解能を実現している.

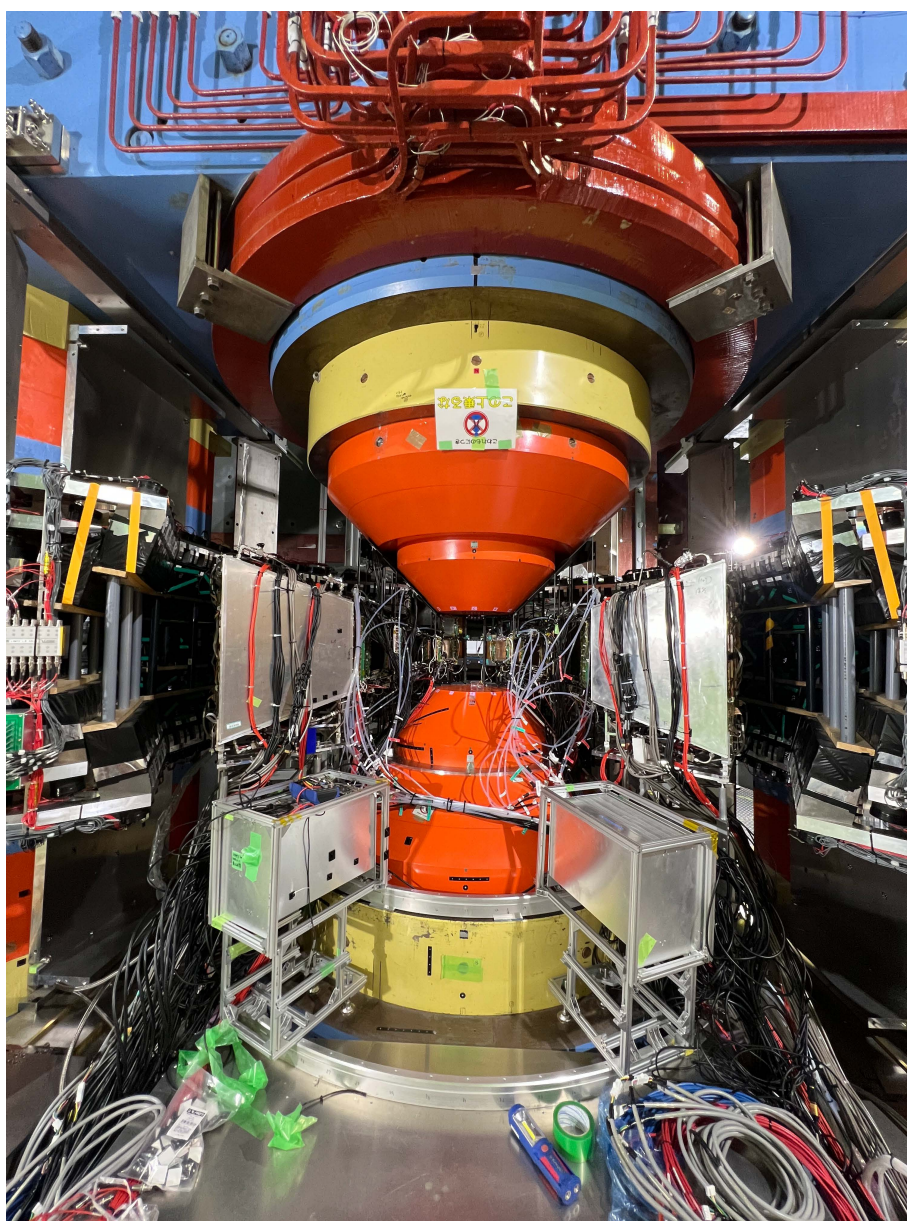


図 2.5 実験エリアにインストールされたスペクトロメータの写真.

2.1.2 コミッショニングラン

J-PARC E16 実験では、2020~2024 年にかけてスペクトロメータの性能評価および調整を目的としたコミッショニングランが複数回行われた。各ランの名称およびその期間とモジュール数についてまとめたものを表 2.1 に示す。現在はコミッショニングラン Run-0 を終え、各検出器の性能やデータ収集システムの機能が確認された。2025 年には物理ラン Run-1 が控えている。コミッショニングラン中に GTR の安定性が課題となり、本論文の研究動機となった。

表 2.1 ランの名称およびその期間とモジュール数

名称	開始時期	ビームタイム	標的	SSD+GTR+HBD+LG
Run-0a	2020 年 1 月	159 時間	C×2, Cu	6+6+4+6
Run-0b	2021 年 2 月	110 時間	C×2, Cu	6+8+4+6
Run-0c	2021 年 5 月	134 時間	C×2, Cu	6+8+4+6
Run-0d	2023 年 1 月	11 時間	C×2, Cu	10+8+8+8
Run-0e	2024 年 4 月	206 時間	C×2, Cu	10+8+8+8
Run-1	2025 年春以降	1280 時間 (予定)	C×2, Cu	10+8+8+8
Run-2	未定	2560 時間 (予定)	C,Cu,Pb,CH ₂	26+26+26+26

2.2 GEM 飛跡検出器

J-PARC E16 実験で STS と共に飛跡検出を担う検出器が、GEM 飛跡検出器 (GEM Tracker: GTR) である。入射した荷電粒子によってガス中の電子を電離・増幅させることで信号を読み出すガス検出器の電子増幅部に GEM (Gas Electron Multiplier) を用いたのが GTR である。これまで GTR は GEM のフォイル数を 3 枚で設計し開発・運用をしてきたが、GEM の導通確率の減少を期待して 4 枚の GEM フォイルによる GTR (4 枚 GTR) を考案した。ここで導通確率とは、HV による放電で絶縁が破壊され検出器として動作しなくなる確率である。本節では、GTR の原理や構造を述べたうえで、4 枚 GTR 導入の背景や具体的な構造を記述する。

2.2.1 原理

GEM: Gas Electron Multiplier

Gas Electron Multiplier (GEM) は、1997 年に CERN で F. Sauli によって開発されたマイクロパターンガス検出器の一種である [21]。ガス中を通過する荷電粒子によって生成される一次電子を効率的に増幅し、位置情報を取得することができる。

GEM フォイル (以下単に GEM と呼ぶ) には、絶縁体であるポリイミド基板の両面に銅が蒸着され、そこにケミカルエッチング法によって多数の微細な孔が開けられている。GEM の構造の概念図を図 2.6 に示す。孔はダブルコニカル構造を持ち、銅表面では直径 $55 \pm 5 \mu\text{m}$ 、ポリイミド層の

最も狭い部分では $35 \pm 5 \mu\text{m}$ 程度の直径となっている。孔は一辺が $140 \mu\text{m}$ の三角格子状に配置されている。実際に GTR に実装される GEM の写真は図 2.7 である。図 2.6 のように GEM の表裏に $300 \sim 400 \text{ V}$ 以上の電位差を作ると、孔に高電場が生成される。これにより、孔を通過する電子が増幅される。

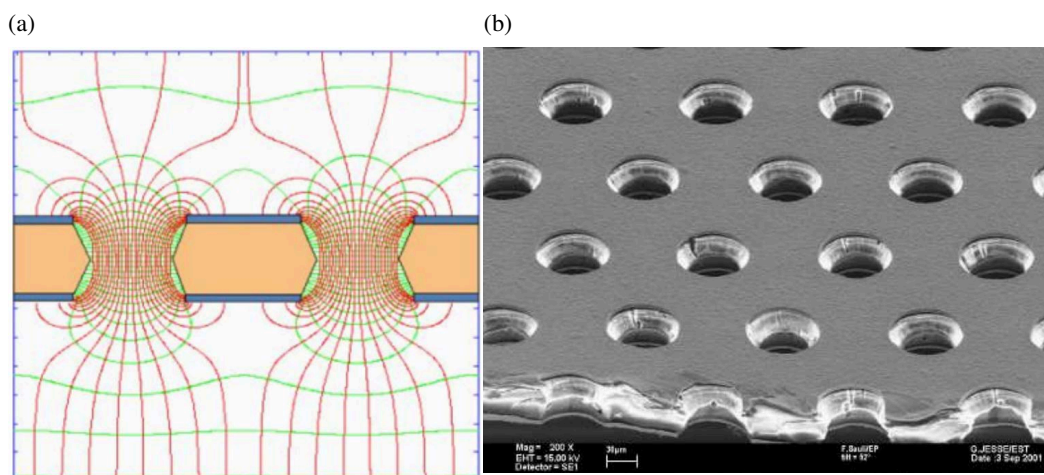


図 2.6 GEM の構造. (a)GEM の電磁力線の概念図. (b)GEM の写真 [22].

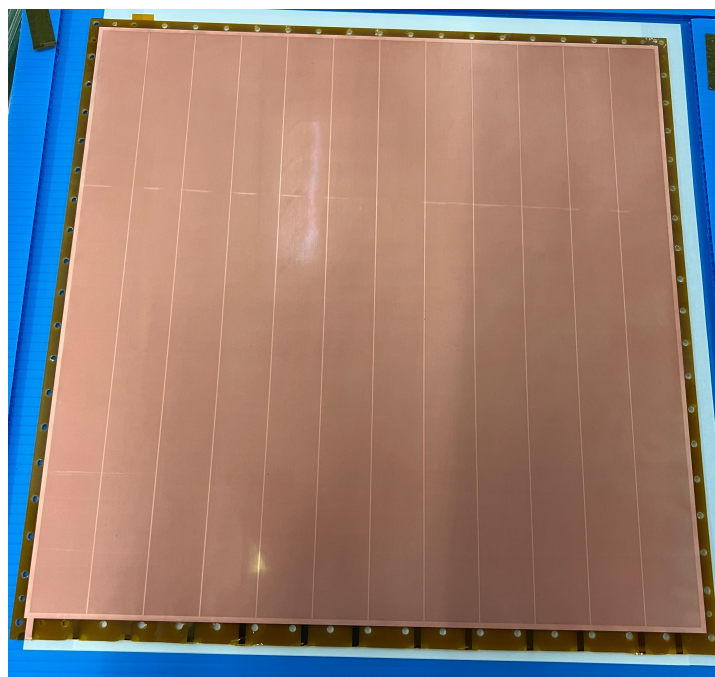


図 2.7 実際に使用される GEM の写真. $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ の GEM である。

一般的に GEM を用いた検出器は、GEM を 2~4 枚重ねることで 10^4 倍のゲインを達成することができる。GEM はその特徴に高計数耐性があり [23], E16 実験で予想される最大 $\sim 5 \text{ kHz/mm}^2$ の要求性能を満たしているために採用されている。

GTR

GTR の概念図を図 2.8 に示す。各ギャップの名称と距離を表 2.2 にまとめる。なお、GEM は上から順に GEM1, GEM2, GEM3 とよび、トランスファーギャップには上から 1,2 と番号をつけている。動作原理を各ギャップに分けて以下にまとめる。GTR のチェンバー内にはガス Ar+CO₂ が、その比 Ar/CO₂ = 70/30 で満たされている。

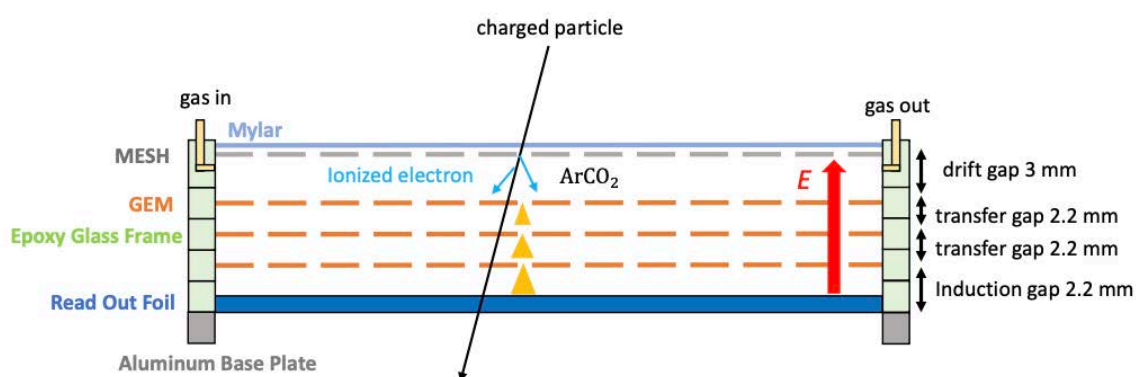


図 2.8 GTR の原理.

表 2.2 各ギャップの名称と距離

名称 [V]	説明	距離 [mm]
ドリフトギャップ	MESH-GEM1 間	3
トランスファーギャップ	各 GEM 間	2.2
インダクションギャップ	GEM3-リードアウト間	2.2

1. ドリフトギャップ

荷電粒子が入射し、アルゴンに衝突する。衝突の結果、アルゴンに結合していた電子が引き離され、一次電子が生成される。ドリフトギャップには、荷電粒子とは逆方向の電場（ドリフト電場）が印加されており、一次電子は GEM1 の孔へと誘導される。

2. GEM1

GEM1 の表裏に印加された電位差により、孔内には非常に強い電場が形成されており、一次電子が加速される。この電子が再びアルゴンと衝突し、さらなる自由電子が生成される。この過程により、1つの一次電子から 10~20 程度の電子が生成され、GEM の孔からトランスファーギャップへと移る。これを二次増幅とよぶ。

3. トランスファーギャップ 1

トランスファーギャップに印加された電場により、増幅された電子は GEM2 へと誘導される。

4. GEM2, トランスファーギャップ 2, GEM3

GEM2,3でも増幅を繰り返し、~10,000倍に増幅された電子が、GEM3の孔からインダクションギャップへと飛び出す。

5. インダクションギャップ

逆方向に印加された電場により、電子が読み出しフォイル (Read Out フォイル: リードアウト) に到着する。

6. リードアウト

リードアウトの電極に集められた電子が信号として取得される。

2.2.2 構造

前章で述べたように、GTRは現在8モジュール設置済みである。この1モジュールを構成するのが、100mm×100mm, 200mm×200mm, 300mm×300mmのサイズの異なる3種類のGTRである(それぞれ100GTR, 200GTR, 300GTRと呼ぶ)。これらがCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) フレームに取り付けられることでFM電磁石内へインストール可能となる。サイズの異なる各GTRのチェンバーの基本構造は、リードアウトを除き(後述する)同じである。本項でその構造を述べる。

チェンバー

GTRのチェンバーの構造は図2.8にも示されるように、主に以下の要素から構成されている。

1. ドリフトプレーン:

マイラー (Mylar) と MESH によって構成される。マイラーは GTR の窓材の役割を果たす高強度の PET フィルム。MESH は、金属の格子状をした薄膜であり、電離により生成された一次電子を GEM フォイルに向けてドリフトさせるための電極である。MESH とマイラーを同電位にするためにアルミニウムテープを貼付している。また、ガスの出入り口はドリフトプレーンの枠につながっている。

2. GEM:

電子増幅を担い、ドリフトプレーンとリードアウトの間に配置される。通常、3枚の GEM が積層され、それぞれに等しい電位差が印加される。GEM は、片面もしくは両面の銅膜が分割されており、分割パターンによって名前がついている。A, B, T タイプの3種類あり、300GTR では、A タイプの表面が 12 ストリップ、B タイプの裏面が 12 ストリップ、T タイプは両面が 24 ストリップ、それぞれ分割されている。100GTR および 200GTR には T タイプがない。T はトリガーの意であり、300GTR のみにトリガーの役割があるためである。200GTR は、A タイプの表面が 4 ストリップ、B タイプの裏面が 4 ストリップに分割されている。100GTR はいずれの GEM も分割がされていない。また、GEM の種類ごとの各パラメータを図 2.9 および表 2.3 に示す。

3. リードアウト:

増幅された電子を信号として検出するための電極フォイル。x 方向と y 方向に直行するスト

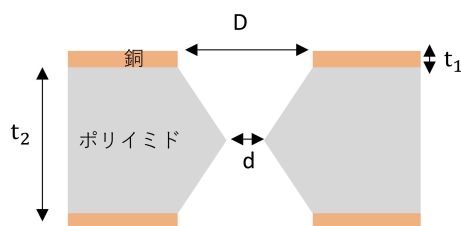


図 2.9 本実験で用いる GEM の各パラメータ.

表 2.3 GEM タイプと各パラメータ

パラメータ [μm]	100GTR		200GTR		300GTR		
	A	B	A	B	A	B	T
分割面	表	裏	表	裏	表	裏	両方
分割数	-		4		12		24
D			65 \pm 5				55 \pm 5
d			25 ⁺¹⁵ ₀		25 ⁺¹⁵ ₋₅		25 ⁺¹⁰ ₋₅
t_1			5				
t_2			50				

リップ状に配置され、二次元的な位置情報を取得する。各ストリップのピッチは、X ストリップが 350 μm 、Y ストリップが 1400 μm に設計されている。リードアウトには Blind Via Hole (BVH) タイプと PI-removed タイプの 2 種類あり、100,200GTR に BVH タイプ、300GTR に PI-removed タイプが使用される。各構造を図 2.10 に示す。

4. HV 供給基板:

MESH, GEM へ HV (高電圧) 供給は、抵抗分割基板を用いて行われる。MESH と GEM で供給経路が分離されている。放電対策のために GEM のストリップごとに保護抵抗が実装されており、各回路は並列に接続されている。

5. ストリップ読み出し基板:

リードアウトから信号を読み出す基板。この基板から後述する APV へ信号が送られる。

上記のうち、ドリフトプレーン、GEM、リードアウトには枠組み (図 2.8 の薄緑色の部分) としてエポキシガラスが使われている。これら 3 つに加えアルミベース (Aluminum Base Plate) を積層し、各枠組み間にはゴムシートを挟むことでチェンバーが組み立てられる。各 GEM の枠組みにネジ穴、アルミベースにタップが開けられており、積層の際に PEEK ネジ (Polyether Ether Ketone ネジ) によって固定している。また、これに HV 供給基板とストリップ読み出し基板を接続して GTR チェンバーが完成する。

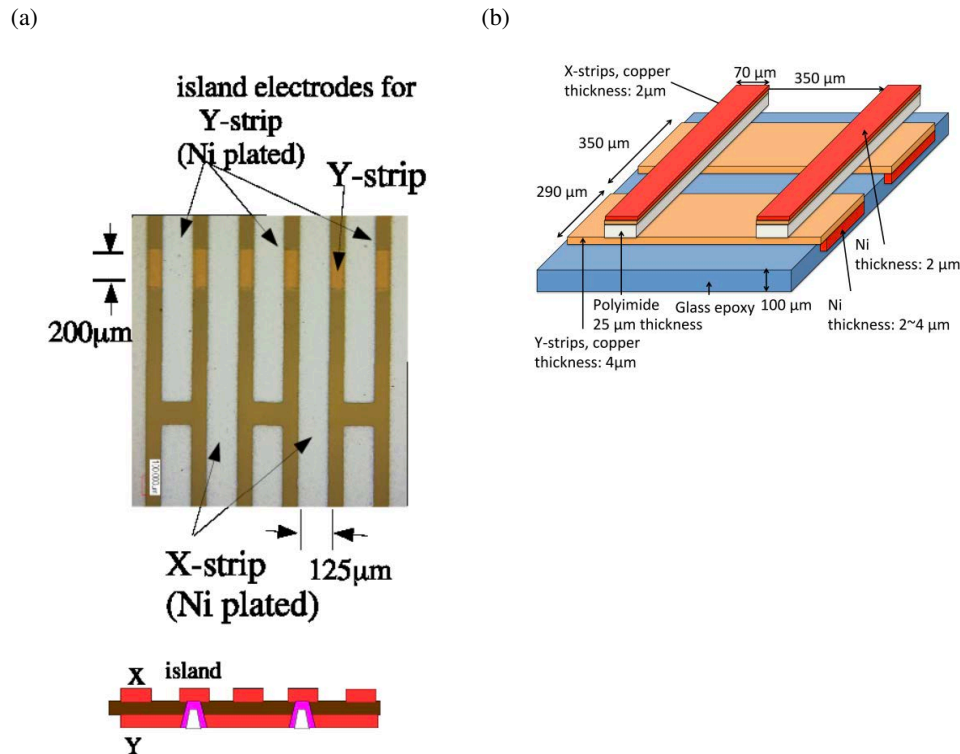


図 2.10 リードアウトの構造. (a)BVH タイプ. (b)PI-removed タイプ.

データ読み出しシステム

データの読み出し回路には、APV25 chip (単に APV と呼ぶ) が用いられる。APV は CMS により開発された [24]、高計数耐性、高分解能、小物質量等の特徴を持つ読み出し回路である。1 チップには、128 の読み出しチャンネルがある。GTR では、APV はリードアウトに接続されるストリップ読み出し基板と KEL 極細同軸ケーブルによって接続されており、リードアウト 1 チャンネルごとに読み出しが行われている。APV は以下のように動作する。

1. リードアウトから読み出された積分信号が増幅・整形される。
2. 増幅信号がクロック信号 40 MHz に同期されてサンプリングされる
3. 波高情報が一時的にアナログパイプラインへ蓄積される。
4. 外部のトリガーを受信すると、波高情報がシリアル化されて出力される。

このような動作を、1 つの信号に対して複数回行うことで、波形解析が可能となる。APV によって取得された波形を図 2.11 に示す [25]。本論文においては 1 イベントで 25 ns に 24 回サンプリングが行われている。

また、E16 実験では省スペースのために、APV25 chip を載せたプリアンプカードを開発した (図 2.12)。一つのカードに対して 2 チップが取り付けられている。

APV の制御は Scalable Readout System (SRS) [26] によって行われる。SRS の写真を図 2.13

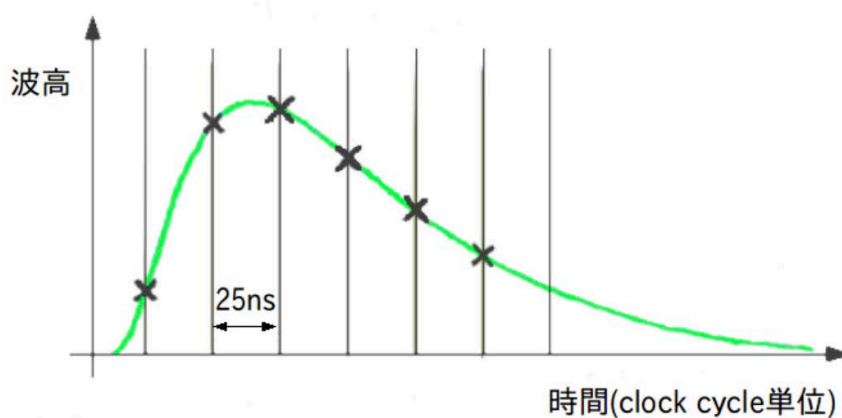


図 2.11 APV25 chip の出力信号 [25].

に示す。スロウコントロール、信号の ADC 変換、および PC のデータ送受信が主な役割である。SRS のフロントエンド DAQ により、APV chip16 枚分のアナログデータを 8 チャンネルの HDMI ポートから受信し、12bit、40Hz でデジタル変換し、データ転送が行われる。



図 2.12 APV25 chip を載せたプリアンプカード。

トリガーシステム

300GTR の GEM3 (T タイプ) によって GEM からトリガー用の信号が出力される。本研究では、この信号を増幅度 (ゲイン) の測定に用いた。GEM3 は表裏の銅箔が 24 ストリップに分割されており、増幅された電子が GEM3 を通過した後に GEM の裏に誘起される正電荷を読み出すことでトリガー信号が出力される。この信号は、Analog Shaper Discriminator (ASD) と呼ばれる本実験で開発したチップによって積分増幅・整形している。ASD の回路図および写真を図 2.14、図 2.15 に示す。ASD は、Application Specific Integrated Circuit (ASIC) と呼ばれる集積回路で

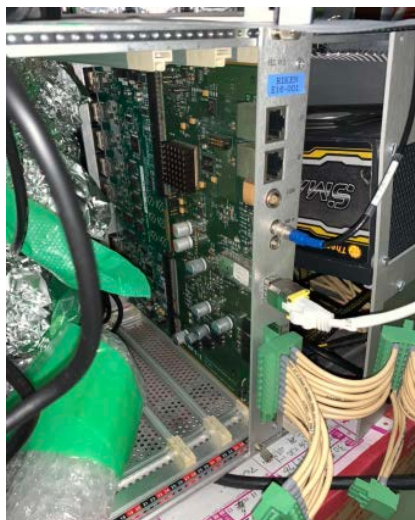


図 2.13 SRS の写真.

あり、プリアンプ、シェイパー、コンパレータで構成される。プリアンプで増幅し、シェイパーおよびコンパレータによってトリガー用のデジタル信号が出力される。コンパレータの閾値は ASD 上の可変抵抗および DAC を用いて調整する。シェイパーの時定数は 25 ns である。また、図 2.14 に示されるように、ASD はアナログ信号とデジタル信号の両方を取り出すことができる。アナログ信号は、スロウコントロールにより選択したチャンネルのみから出力される。また、ASD はテストパルスを用いて LEMO で入力することができ、テストパルス用の初段のコンデンサ容量は 100 fF である。4 枚の ASD chip により 24 チャンネルのトリガー情報が読み出される。ASD のスロウコントロールおよび PC データの送受信は Mezzanine Board と Raspberry Pi によって行うことができ、Mezzanine Board に LEMO ケーブルをつなぎ直接アナログ信号を受信することができる。また、ASD と GEM4 (T タイプ) の間には ASD-sub 基板が接続されており、放電保護の役割を果たしている。

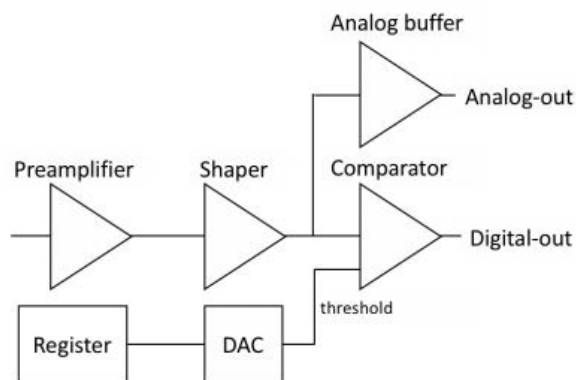


図 2.14 ASD の回路図.

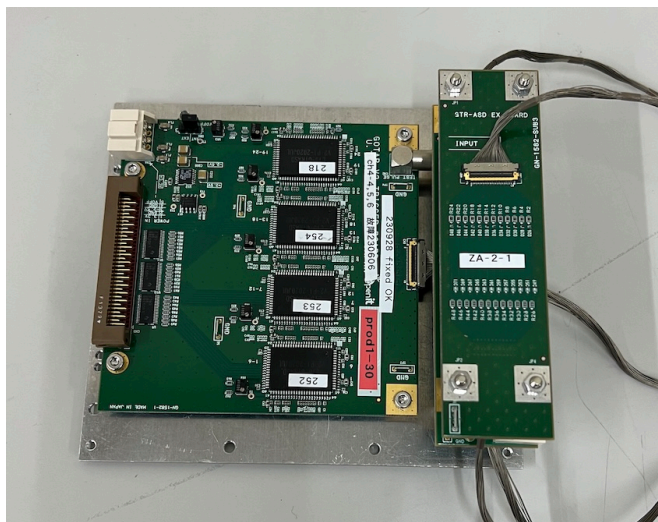


図 2.15 ASD と ASD-sub の写真.

2.3 4 枚化計画

これまで GTR では、3 枚の GEM を用いた GTR (3 枚 GTR) を主に使用したが、GEM 枚数を 4 枚に変更した GTR (4 枚 GTR) を新たに開発した。この 4 枚 GTR 開発に至った動機およびその具体的な構造を詳述する。

2.3.1 動機

これまで行われてきたコミッションングランの中で、GTR 運用における課題のひとつに「GEM が導通してしまうこと」があった。GEM の導通は、GEM の放電によって発生する。この様子を図 2.16 に示す。通常 GTR はチェンバーが密閉されているため、GEM の孔にゴミが付着することはほぼない。しかし、放電によって焼けたポリイミドや溶けた銅、焼けた埃などが発生・付着し、GEM の表裏が導通してしまう。この導通によって、GEM が表裏で同電位になってしまい、電子の増幅を行えなくなる。その結果、導通した GEM のストリップは十分なゲインを出せなくなってしまい、飛跡検出ができなくなる。つまり、導通によってスペクトロメータ全体のアクセプタンスが減少することになってしまう。この「GEM の導通」はそのほとんどが 300GTR に対して発生しており、300GTR の改良が必要とされた。これまでも、放電対策には MESH のゆがみや GEM のたるみの改善など、試行錯誤してきたが大きな解決に至っていなかった。

この課題を解決するために考案したのが GTR4 枚化計画である。導通が起りやすい 300GTR の GEM を 3 枚から 4 枚に変更するというものだ。これにより、従来の 3 枚 GTR と同ゲインを出しつつ、GEM1 枚あたりの電圧を抑えることができる。そして、GEM の放電確率を減少させ、導通を防ぐと考えている。



図 2.16 放電し GEM の表裏が導通する様子. 放電が発生することによって導体に準じるものが付着し, GEM の表裏が導通してしまう.

2.3.2 実験概要

4 枚 GTR を実験で用いることは可能かを評価する上で重要なことは, 3 枚 GTR 運用時よりも低い GEM の電圧によって, 同等以上の性能を発揮できるかどうかである. 評価項目は, ゲインと検出効率, 位置分解能の 3 つが必要である. GEM 一枚あたりの電圧を変動させながら, これらの性能評価を行った. また, より高い性能を発揮させることを目標に, 従来の電圧印加方法を改善し, 各 GEM, ドリフトギャップやトランスファーギャップでの電圧を変動させながら最も性能の高い組み合わせを探った.

そこで 4 枚 GTR に対し, 以下の性能を評価する.

1. ゲイン

実験室でゲイン測定を行い, 3 枚 GTR より低い電圧で同等のゲインが出ることを検証する. また, その時印加する電圧の組み合わせを記録し, ビームを用いた性能評価と比較する.

2. 検出効率・位置分解能

テストビームラインで検出効率・位置分解能が要求性能を満たすか確認する. その際, チェンバー内の各電圧を変動させ, 最も性能が発揮される組み合わせを調べる.

これらの実験により, 4 枚 GTR の必要性および, 実際のデータ収集で運用する際の最適な電圧配分を決定する.

2.3.3 検出器

実験で使用する 4 枚 GTR の構造について記述する. 3 枚 GTR から 4 枚 GTR にしたことによる, 構造の具体的な変更点は以下のとおりである.

- GEM の枚数: 3 枚 \Rightarrow 4 枚
- HV 供給基板: 4 枚 GTR 用に変更
- HV チャンネル数: 2ch \Rightarrow 4ch

HV 供給基板の回路図の変更を表す図を図 2.17 に示す. 3 枚 GTR は GEM1 から順に B,A,T タイプの GEM が積層されているが, 4 枚 GTR は B,A,B,T タイプの順で積層している. 今回の 4 枚 GTR では, GEM1 の表裏 HV をその他の GEM の HV と別系統に分離して供給することにした. これにより, GEM1 の電圧および GEM1-GEM2 のトランスファーギャップの電圧を独立して印加することが可能になる. これにより, 電圧の印加条件を様々に変更し, テストを実施できる.

また, この変更に伴い, HV 供給基板の枚数を 1 枚から 2 枚に変更した. HV 供給基板の写真は図 2.18 のとおりである. 4 枚 GTR の組み立て方を示した図を図 2.19 に, 最終的に完成した 4 枚 GTR の写真を図 2.20 に示す. 図 2.20 において HV 供給基板は検出器面の正方形に対し下辺についている. アクセプタンスに干渉することを防ぎ, かつ基板同士で放電が起こらないように, 基板同士を逆向きに 2 段で配置した.

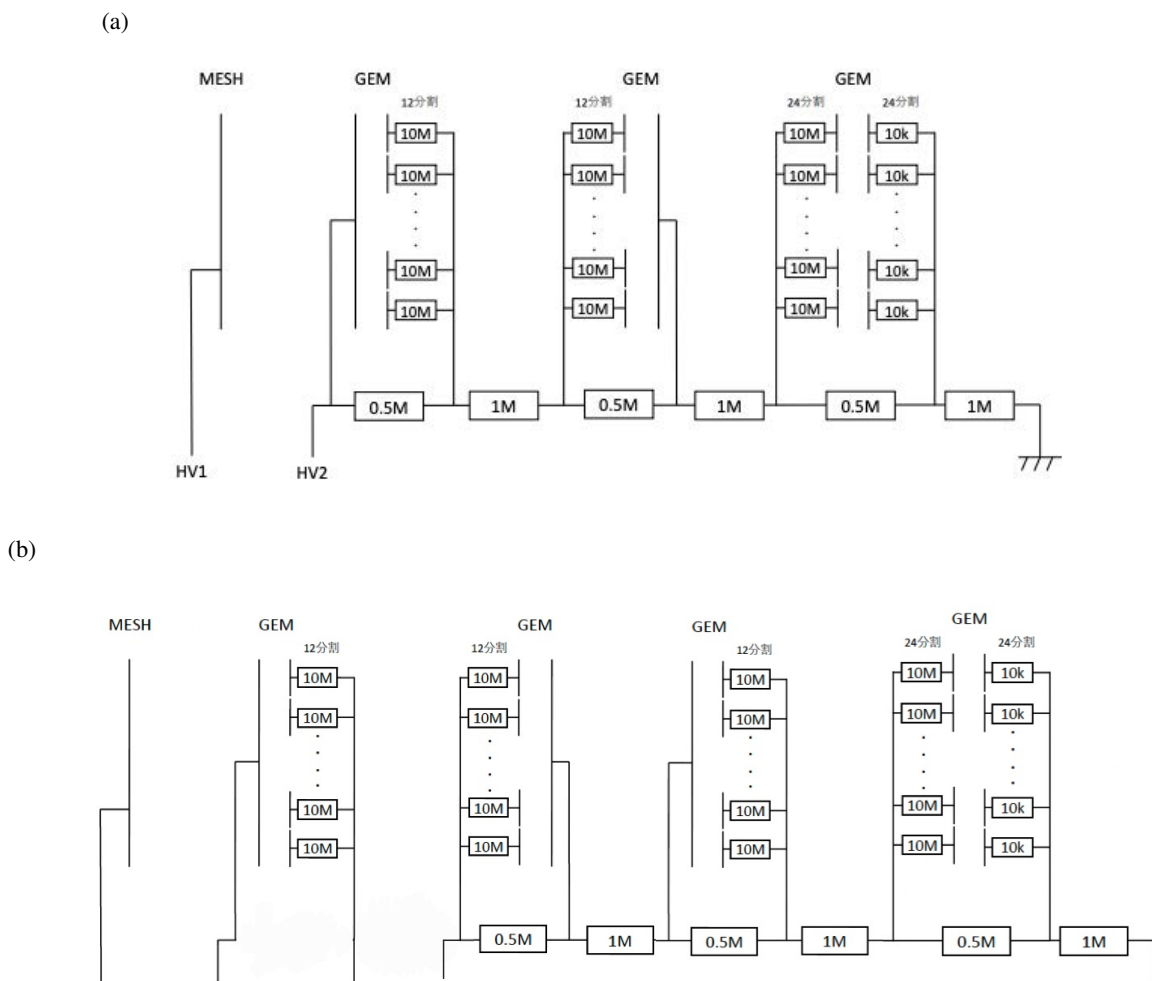


図 2.17 300GTR の HV 供給基板の回路図. (a)3 枚 GTR. (b)4 枚 GTR.



図 2.18 HV 供給基板の写真. 右側の基盤が旧基板. 左側の 2 枚が本研究で開発した新基板である.

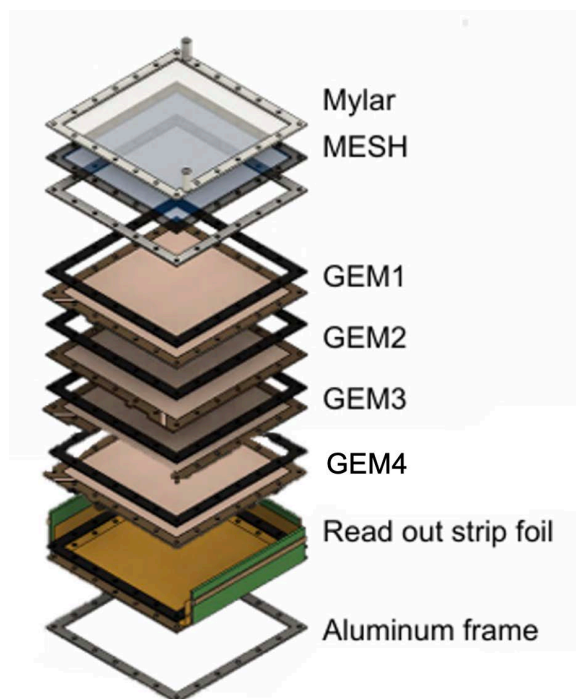


図 2.19 4 枚 GTR の組み立て.

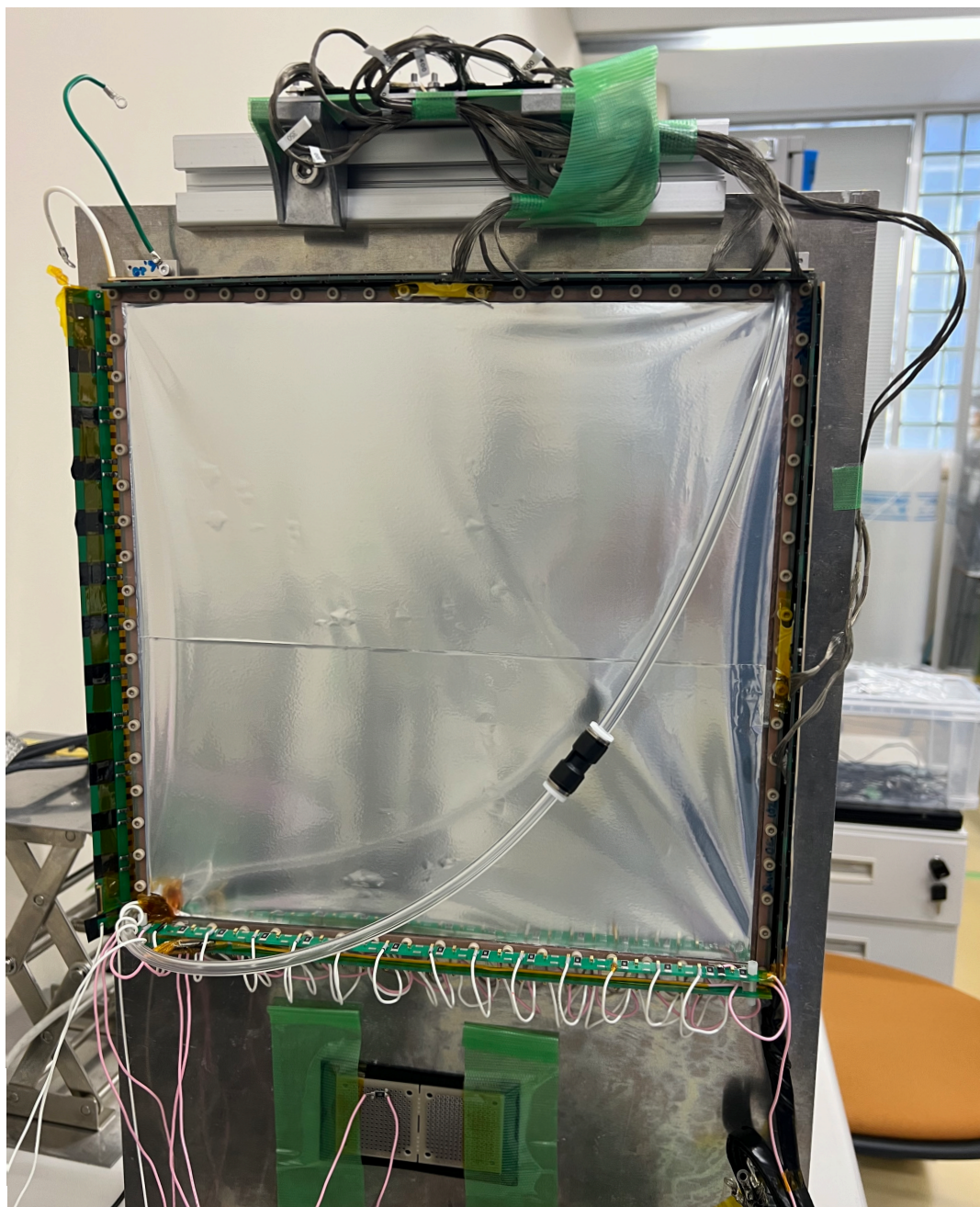


図 2.20 完成した 4 枚 GTR の写真.

第 3 章

ゲイン測定

4 枚 GTR を実験で使用するためには、現状の 3 枚 GTR と同等以上の性能を持つことを示す必要がある。性能評価項目の 1 つにゲインの測定がある。ゲインとは電子増幅率のことを指し、十分な位置分解能を示すための重要な指標である。このゲインが $\sim 6 \times 10^3$ 倍以上あれば十分な電子検出効率および位置分解能を示すことがわかっている [12]。ゲインは主に GEM 一枚の表裏電圧 V_{GEM} に依存しており、3 枚 GTR では要求されるゲインを得るために、典型的には 390 V 程度の V_{GEM} を印加する必要がある [27]。4 枚 GTR とすることで要求ゲインを達成する V_{GEM} を下げ、GEM の放電の確率および放電時に放出される電荷を抑制する。これにより GEM が導通してしまう確率を下げられることを期待している。本章では、後述するテストビームラインを用いた実験に先立って実験室で行ったゲインの測定について記述する。また、ここで得た結果からテスト実験での運用電圧の目安を決めた。

3.1 測定方法

ゲインの測定は線源を用いて行なった。検出器のゲイン測定では、全吸収の場合に一定のエネルギー損失を持つため X 線源を使用することが一般的であり、今回は 5.9 keV を放出する ^{55}Fe を用いた。セットアップの概念図を図 3.1 に示す。GTR 内はガス $\text{Ar}+\text{CO}_2$ で満たされており、その比は、 $\text{Ar}/\text{CO}_2 = 70/30$ である。ガスは、内圧を保つために常に流し、50 mL/min を維持している。

また、X 線入射時の 4 枚 GTR の構造を表した図を図 3.3 に示す。 ^{55}Fe から放出された X 線が、電離作用により $\text{Ar}+\text{CO}_2$ を電離させる。ドリフトギャップで飛び出した電子は、GEM1 から MESH 方向に印加された電場（ドリフト電場）によって GEM1 へ誘導され、増幅される。各トランスファーギャップやインダクションギャップに印加された電場によって、GEM2-4 においても繰り返し増幅された電子がリードアウトに到着し、フォイル上の電極に正電荷を誘起させる。こうしてデータ信号として読み出され ASD にて信号が増幅される。図 3.1 にあるとおり、ASD で増幅したパルス信号をオシロスコープを用いて計測した。ゲインは、オシロスコープによってパルス信号からヒストグラムを作成しそのピークから評価した。

ゲイン $\sim 6 \times 10^3$ 倍以上を達成するとき、4 枚 GTR における 1 枚目 GEM の V_{GEM} ($V_{\text{GEM}1}$)、2,3,4 枚目 GEM の V_{GEM} ($V_{\text{GEM}234}$)、ドリフトギャップの電位差 V_{drift} 、GEM1-2 枚目間の電位

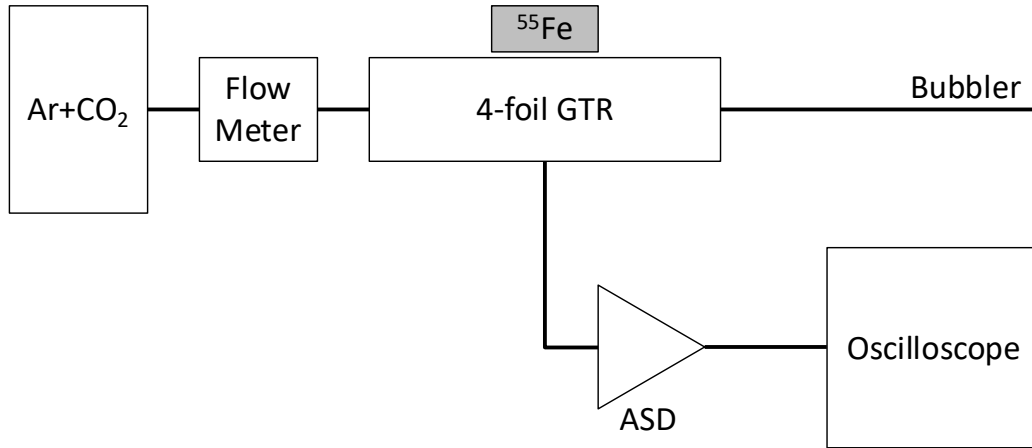


図 3.1 ゲイン測定のセットアップ概念図.

差 V_{transfer} の各値を記録した. 各名称は表 3.1 にまとめた.

3.2 評価手法

一般に実験では, ゲインは入射粒子によって生成された一次電子の数と, 最終的に検出器で観測される二次電子の数の比として定義される. ドリフトギャップでイオン化された電子の数を N_{seed} , リードアウトでの電子の数を $N_{\text{amplified}}$ とすると, ゲインは,

$$G = \frac{N_{\text{amplified}}}{N_{\text{seed}}} \tag{3.1}$$

で表される. 分子と分母に, ASD を含む回路全体のゲイン $G_{\text{conversion}}$ と電荷素量 e を乗じると,

$$G = \frac{h [\text{V}]}{G_{\text{conversion}} [\text{V/C}] \times N_{\text{seed}} \times e [\text{C}]} \tag{3.2}$$

ここで, $h \text{ V}$ はオシロスコープで記録した増幅信号パルスの波高の平均を表している. ASD が増幅信号を整形しピークを持つ波形にしているため, パルスの波高が計測できる. N_{seed} は, $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ($\text{Ar}/\text{CO}_2 = 70/30$) の電離に必要な最低エネルギーが 28.1 eV , ^{55}Fe の X 線が 5.9 keV であるこ

表 3.1 GEM 間電位差の名称

名称 [V]	説明
V_{GEM1}	GEM1 の表裏の電位差
V_{GEM234}	GEM2,3,4 の表裏の電位差
V_{drift}	ドリフトギャップの電位差
V_{transfer}	GEM1-2 のトランスファーギャップの電位差

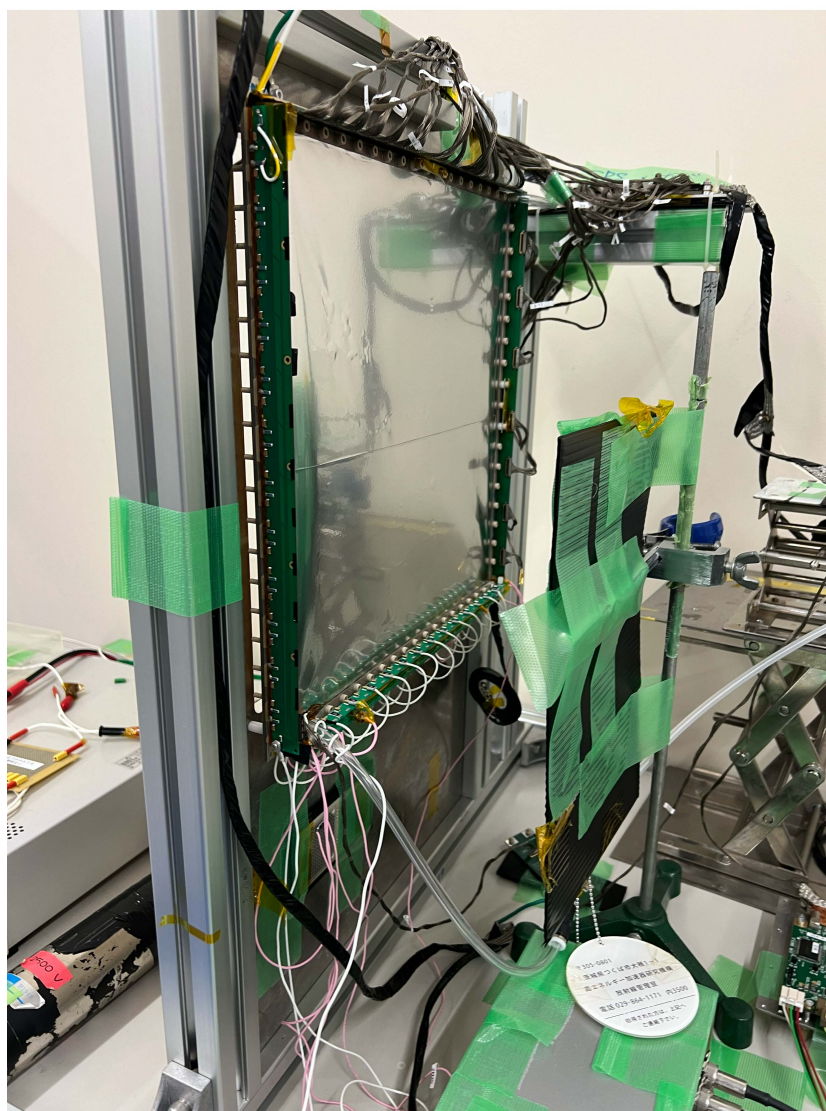


図 3.2 ゲイン測定のセットアップ.

とから,

$$N_{\text{seed}} = \frac{5.9 \times 10^3 \text{ eV}}{28.1 \text{ eV}} = 210 \quad (3.3)$$

とわかる. $G_{\text{conversion}}$ は, $\frac{V_{\text{out}}}{CV_{\text{in}}}$ で表され, テストパルスを送り, 出力されたパルス信号から計算できる. 図 3.4 のように, 105 mV の矩形信号を ASD に入力すると 23 mV のパルスが出力された. ASD のコンデンサ容量が 100 fF であるから,

$$G_{\text{conversion}} = \frac{23 \text{ mV}}{100 \text{ fF} \times 105 \text{ mV}} = 2.19 \text{ [V/pC]} \quad (3.4)$$

以上より, 本ゲイン測定における式は,

$$G = \frac{h \text{ [V]}}{2.19 \text{ [V/pC]} \times 210 \times 1.6 \times 10^{-7} \text{ [pC]}} \quad (3.5)$$

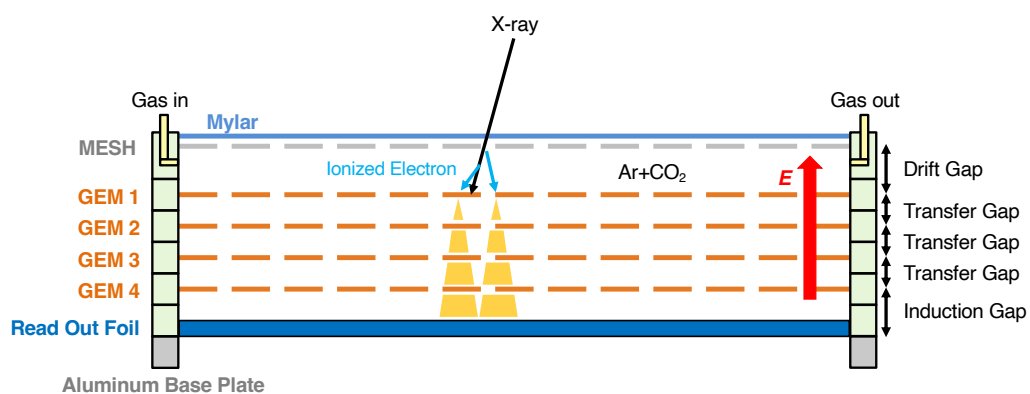


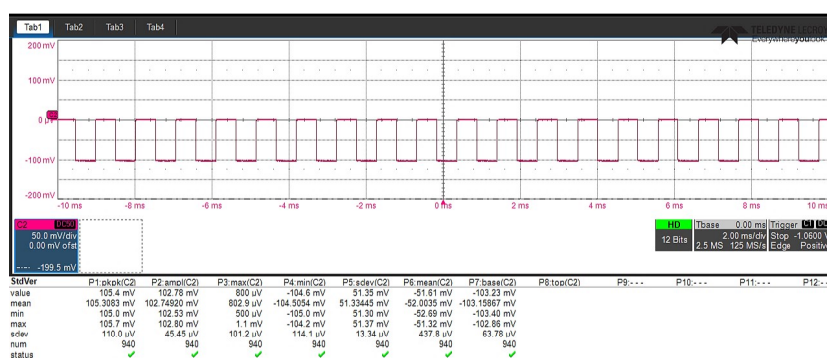
図 3.3 X 線入射時の 4 枚 GTR の様子.

と求められる.

3.3 結果

結果を図 3.5 に示す. ヒストグラムの X 線全吸収ピークは 792 mV にあるため, 式 3.5 より, ゲイン $\sim 10,800$ 倍と計算できる. この時の V_{GEM} は, $V_{\text{GEM1}} = 360$ V, $V_{\text{GEM234}} = 350$ V. これに対し, 3 枚 GTR では $V_{\text{GEM}} = 390$ V の時にゲイン $\sim 6,000$ 倍であった [27]. これより, 4 枚 GTR では 3 枚 GTR より低い V_{GEM} でゲイン $\sim 6 \times 10^3$ 倍以上を達成することが確認できた.

(a)



(b)

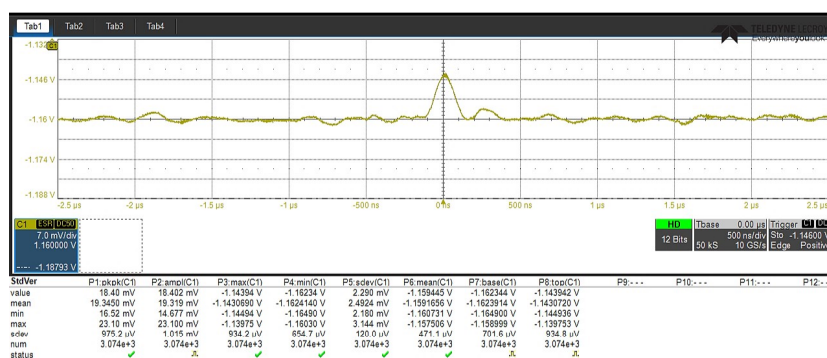


図 3.4 $G_{conversion}$ 計算のためのテストパルス信号. (a)105 mV の入力矩形信号. (b)ASD によって増幅されたパルス信号 23 mV.

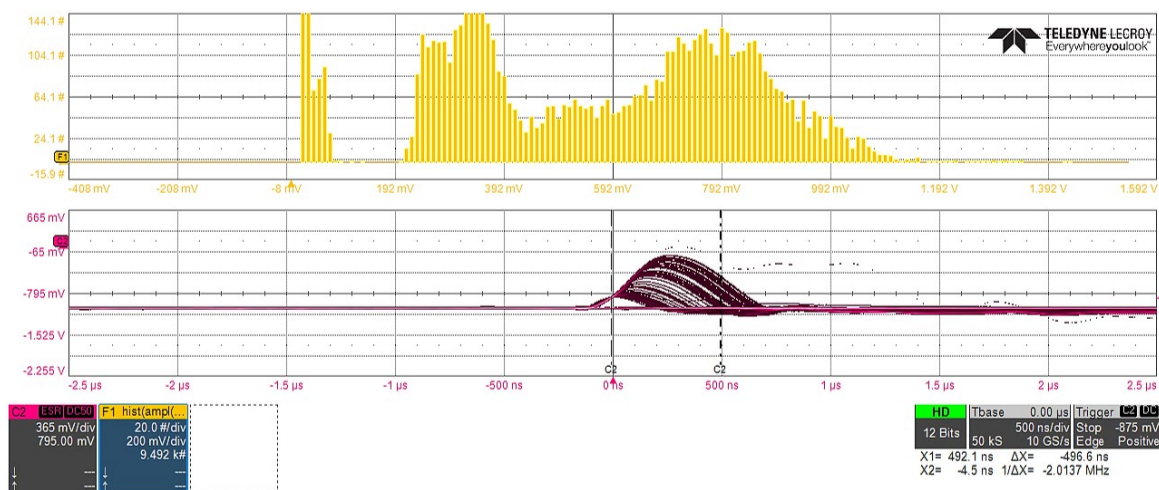


図 3.5 $V_{GEM1} = 360 \text{ V}$, $V_{GEM234} = 350 \text{ V}$, $V_{drift} = 180 \text{ V}$, $V_{transfer} = 700 \text{ V}$ 時のゲイン測定の結果. 下のグラフは, オシロスコープが表示するパルス波形. 横軸は時間 [ns], 縦軸はパルスハイト [mV]. ベースライン -1150 mV に対して閾値 -875 mV をかけた. 上のグラフは, 下のグラフのパルス波高をインプットとしたヒストグラム. 横軸はパルスハイト [mV], 縦軸はエントリー数. 一般に, X 線検出のスペクトルには全吸収ピークとエスケープピークが見られ, 本ゲイン測定では 792 mV に全吸収ピーク, $\sim 500 \text{ mV}$ にエスケープピークが見られる.

第 4 章

ビーム テスト

ゲイン以外の性能評価項目には、本章で述べる荷電粒子検出効率と位置分解能がある。4 枚 GTR の電子検出効率と位置分解能を知るために、4 枚 GTR のほかに 2 つの 100GTR を用い、ビームを利用したテスト実験により性能評価を行った。本章ではこのテスト実験について述べる。

4.1 PF-AR テストビームライン

KEK（高エネルギー加速研究機構）のつくばキャンパスにある PF-AR（Photon Factory - Advanced Ring）には、測定器開発のためのテストビームラインが設置されている [28]。このビームラインでは、 ~ 0.5 GeV から 6.5 GeV までの電子ビームを利用可能であり、2023 年度から大学共同利用が正式に開始された。PF-AR は、シングルバンチ電子ビームを蓄積するリングであり、周回周期は $1.257 \mu\text{s}$ である。この蓄積リングにワイヤ標的を挿入し、ビームハローから光子を生成する。生成された光子は銅製のコンバータに入射され、電子・陽電子対を生成する。その後、双極電磁石と四重極電磁石からなるビーム取り出し電磁石群により、目的のエネルギーを持つ電子ビームを測定器試験エリアに取り出す。本テスト実験では、3.0 GeV の電子ビームを用いた。



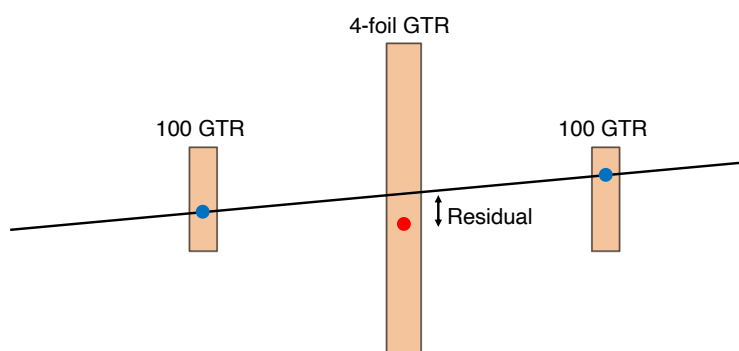
図 4.1 PF-AR テストビームライン実験エリア [28].

4.2 目的

本実験の目的は、4枚 GTR の検出効率と位置分解能を調べることによって、要求性能を十分満たすことおよび、最も性能が発揮される電圧の組み合わせを探ることである。そのために、各ギャップにおいて電圧を固定し依存性を調べた。 V_{GEM1} および V_{GEM234} の変動には、 V_{GEM1} と V_{GEM234} のどちらがより検出効率と位置分解能の増加に効果的かを調べる目的がある。 V_{drift} および V_{transfer} の変動は、4枚 GTR を運用するにあたり最も効果的な値を探ることを目的としている。各データセットについては別の項で後述する。

本実験では、4枚 GTR 以外にも2つの GTR を用いビーム電子の飛跡を決めた。位置分解能の評価には、4枚 GTR を飛跡のフィッティング直線に含む場合と含まない直線で評価した。これら直線の4枚 GTR との交点と実際に4枚 GTR で電子検出した位置との差の分布を残差分布とした(図4.2)。4枚 GTR を含む残差分布の幅は、含まないものに比べて細くなるはずである。検出効率は、4枚 GTR をフィットに含まない場合の直線の数に対する、4枚 GTR のヒットの割合として定義した。

(a)



(b)

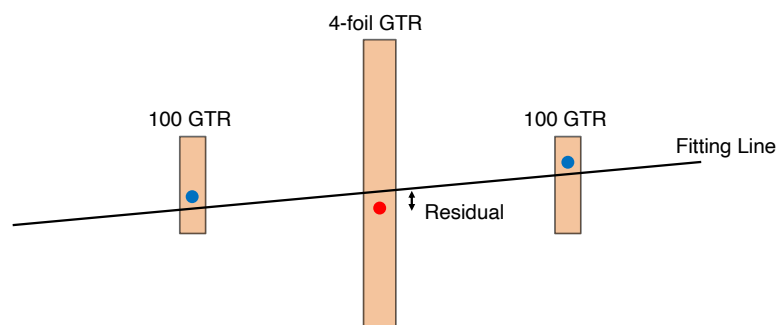


図4.2 残差分布の求め方。(a)4枚 GTR を含まない場合。(b)4枚 GTR を含む場合。

4.2.1 検出効率

検出効率は、4枚 GTR を含まない直線 (図 4.2(a)) の本数と 4枚 GTR 上で電子検出をしたヒット数の割合として定義される。今回の解析では、残差が ± 1 mm より小さい領域のヒット数で定義している [12]。要求性能は 96% 以上である。

4.2.2 位置分解能

位置分解能は、粒子の通過位置をどれだけ正確に特定できるかを表す指標である。4枚 GTR を含む場合と含まない場合それぞれの残差分布の幅の積の平方根によって簡易的に評価できる [29]。本論文では、これを GTR の位置分解能と定義した。位置分解能を σ mm, 4枚 GTR を含む残差分布の幅を $\sigma_{\text{res_in}}$ mm, 4枚 GTR を含まない残差分布の幅を $\sigma_{\text{res_out}}$ mm とすると、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{res_in}} \cdot \sigma_{\text{res_out}}} \quad (4.1)$$

となる (付録 A)。E16 実験での要求性能は $100\mu\text{m}$ 以下である。

4.3 実験方法

4.3.1 検出器

実験セットアップの概念図を図 4.3 に、実際のセットアップ写真を図 4.4 示す。シンチレーション検出器を3つと 100GTR を2つが4枚 GTR を挟みこむ形に並行に並べた。各検出器の詳細を説明する。

シンチレーション検出器

シンチレータを用いた放射線検出器であり、本実験では、光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) によって電子を増幅し検出している。ビーム上流から順に S1,S2,S3 とした。各シンチレーション検出器に用いられている PMT およびシンチレータを表 4.4 にまとめた。シンチレーション検出器はトリガーのために用い、PMT の信号をディスクリミネータに通しコインシデンスをとった。S3 は、S1,S2 に比べて時間分解能が高く、トリガータイミングの決定に使用するために 100 ns のディレイと ~ 10 ns のケーブルディレイを入れて調整した。

表 4.1 各シンチレーション検出器における PMT の性能およびシンチレータのサイズ

	PMT				シンチレータ
	型番	定格電圧 [V]	走行時間 [ns]	走行時間拡がり [ns]	サイズ
S1,S2	H6520	-1000	27	2.8	10 mm \times 10 mm
S3	H1949	-2500	28	0.55	30 mm \times 30 mm

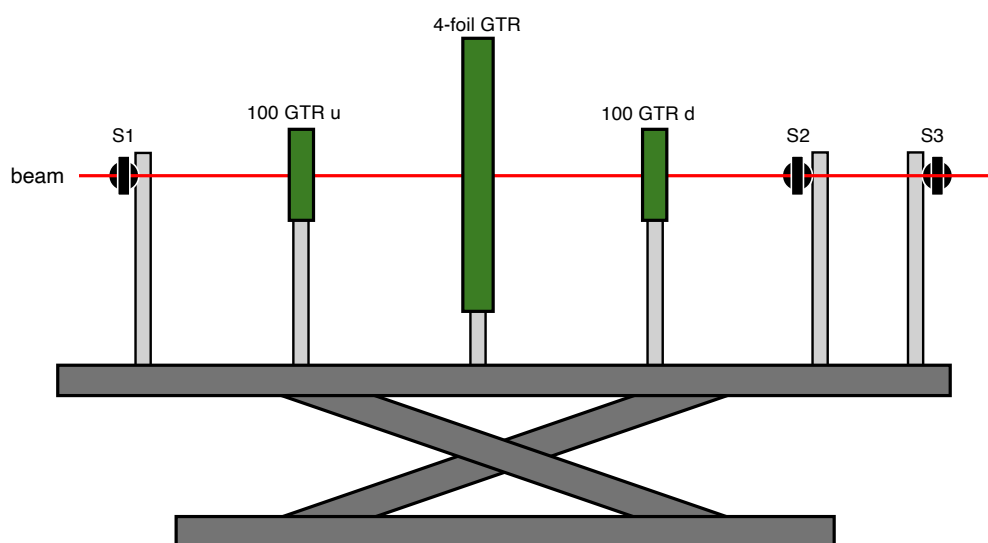


図 4.3 検出器のセットアップを水平方向から見た概念図. シンチレーション検出器 × 3, 100 GTR × 2, および 4 枚 GTR で構成される. 図の左方がビーム上流. 上流から順に, シンチレーション検出器が S1, S2, S3, 100GTR が 100GTRu, 100GTRd. 各検出器はアルミフレームによって土台と繋がれており, 土台とリフターは絶縁されている. 各検出器の距離は 4 枚 GTR を中心に (S1, 100GTRu, 4 枚 GTR, 100GTRd, S2, S3)=(334.5, 167.4, 0, -157.6, -290, -406)mm である.

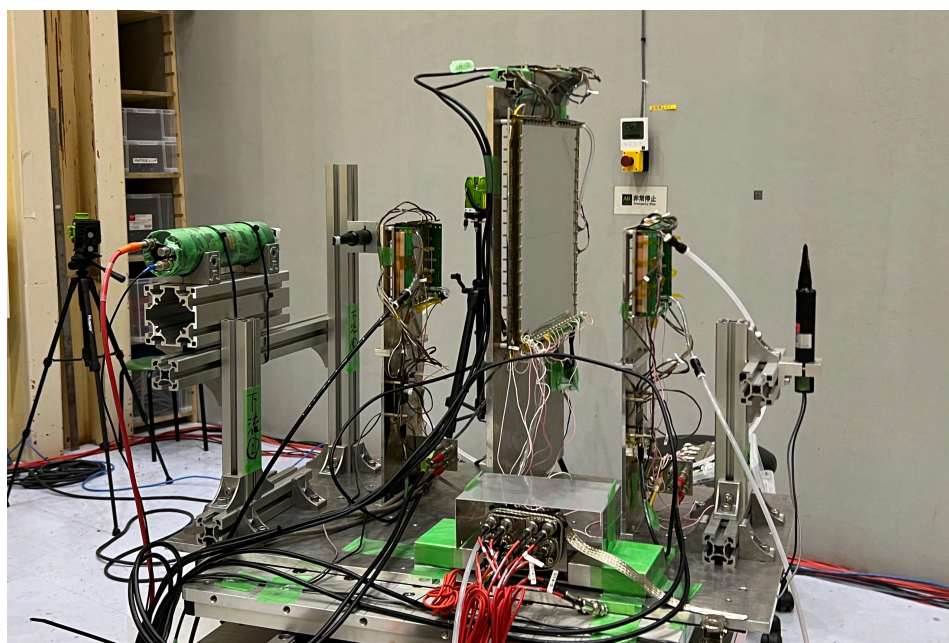


図 4.4 検出器のセットアップ写真. 概念図とは左右が逆向き.

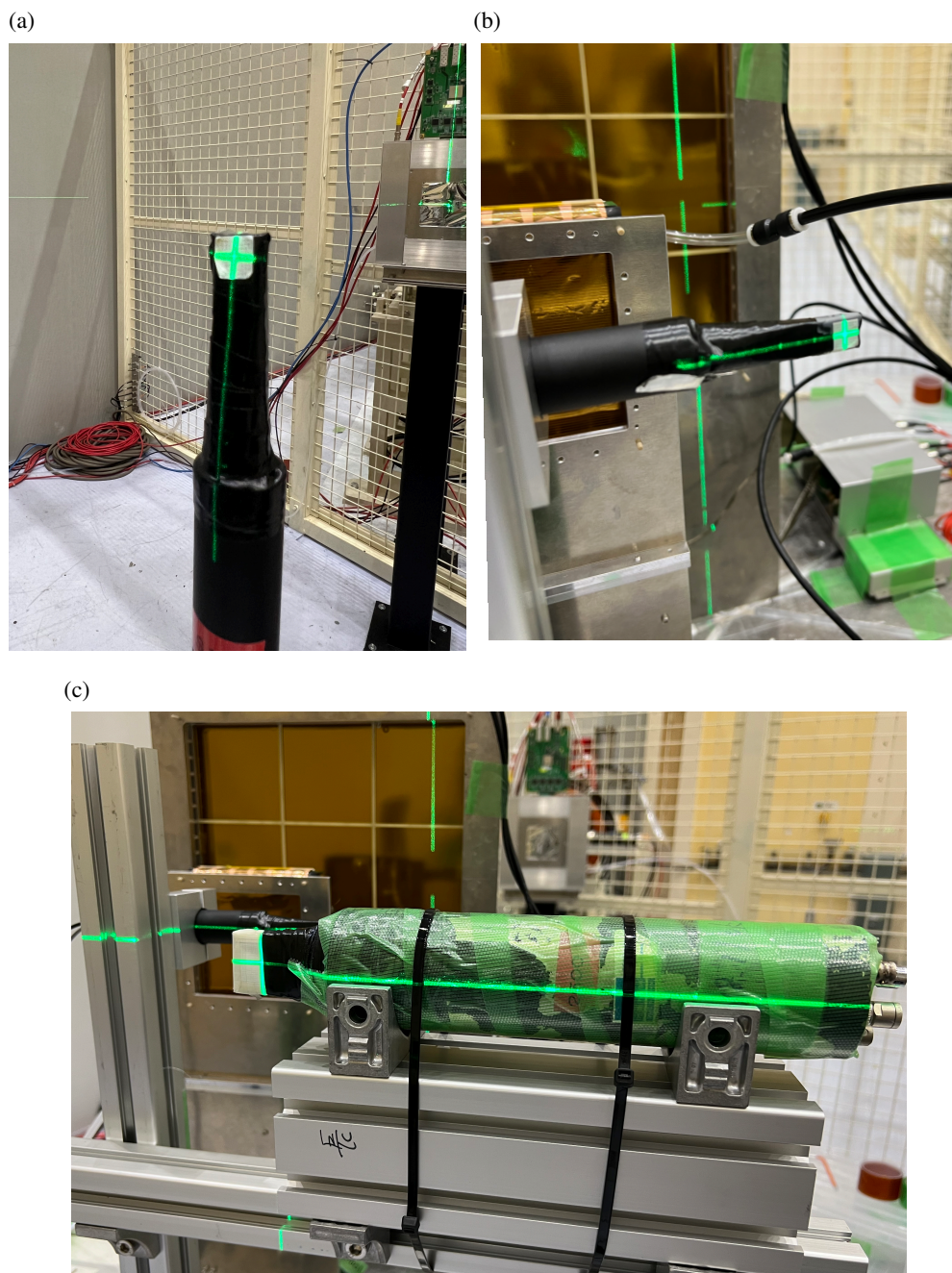


図 4.5 各シンチレーション検出器の写真. 測量中に撮影したため十字のレーザーが走っている. (a)S1. (b)S2. (c)S3.

100GTR

100GTR は, サイズ $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ の 3 枚 GTR のことである. 100GTR に用いられる GEM は分割が無く, トリガー用 GEM がない. 本実験では, 残差分布により 4 枚 GTR の性能評価を行うために 2 つ用いた. ビーム上流から順に 100GTRu, 100GTRd. ガスは, 両 100GTR に対して

直列に接続し、50 mL/min を維持した。ゲイン $\sim 6 \times 10^3$ 倍を達成するために、100GTRu には $V_{\text{GEM}} = 390 \text{ V}$ 、100GTRd には $V_{\text{GEM}} = 380 \text{ V}$ を印加して運用した。

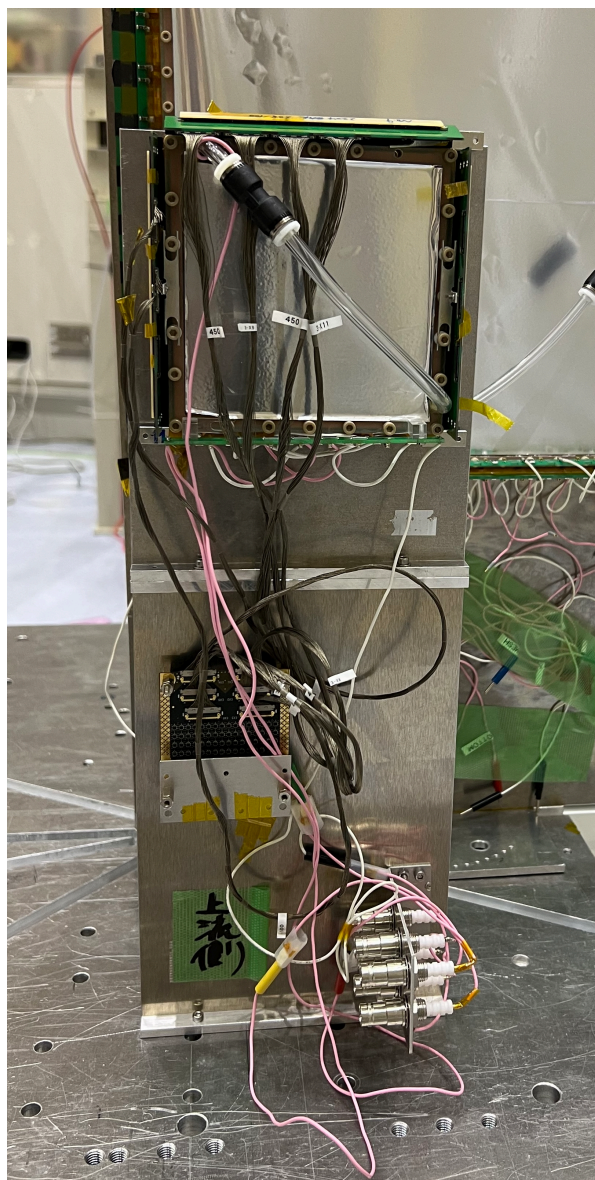


図 4.6 100GTRu の写真。アルミフレームに取り付けられている。下部には APV と HV 供給の中継コネクタがついている。

4 枚 GTR (300GTR)

4 枚 GTR には、2.3.3 で述べたチェンバーを用いた。ビームの入射角は検出器面に対して垂直を 0 度と定義しており、入射角 0 度で 4 枚 GTR にビームを照射した。各検出器は並行に設置されており、それぞれの検出器にも 0 度でビームが入射する。ガスは、50 mL/min で一定に流した。

4.3.2 DAQ システム

VME モジュールを用いてデータ取得 (Data Acquisition: DAQ) を行った。VME (Versa Module Europa) は、モジュール式データ収集・制御システムであり、高エネルギー物理実験等の分野によく使用される。使用した VME モジュールを表 4.2 にまとめる。ADC (Analog-to-Digital Converter) とは、一般にアナログ信号をデジタル信号に変換する装置や回路を指す。また、本実験で用いた DAQ システムの概念図を図 4.7 に示す。

表 4.2 使用した VME モジュール

モジュール	型番	ch	検出器	役割
Interrupt Register	RPV-130	-	-	トリガー信号を管理
Visual Scaler	RPV-100	-	GTR	信号をカウントし記録
Peak sense ADC	V785	32	4 枚 GTR	信号波形のピーク値をデジタル化
TDC	V775	32	GTR, 各 PMT	時間情報をデジタル化
Charge sense ADC	V792N	32	各 PMT	信号の電荷量をデジタル化

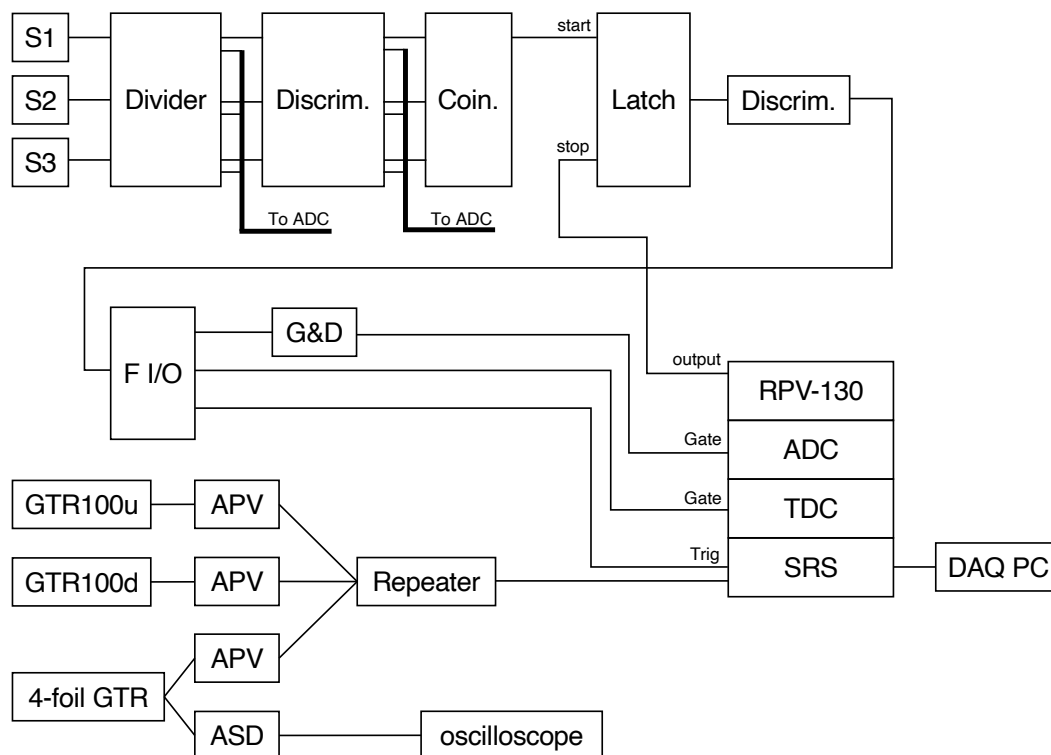


図 4.7 DAQ システムの概念図.

4.3.3 データセット

4枚GTRの性能評価のために、 V_{GEM1} 、 V_{GEM234} 、 V_{drift} 、 V_{transfer} の値を変えながらデータを取得した。各データセットを表4.3にまとめた。これは、第3章のゲイン測定によって得た電圧の組み合わせを参考に作られている。なお、 V_{drift} の値は、600 V/cmがE16実験における標準的な値である[11]。ドリフトギャップが3mmであることから、180 Vを規定の電圧としている。また、現在実装されている3枚フォイルの300GTRは、 $V_{\text{transfer}} = V_{\text{GEM1}}$ が設定されている。各データセットの目的は、以下にまとめた。

表 4.3 変更する電圧名称と各データセット

変更する電圧 [V]	V_{GEM1} [V]	V_{GEM234} [V]	V_{drift} [V]	V_{transfer} [V]
V_{GEM}	330, 340, 350, 355		180	$2V_{\text{GEM234}}$
	270, 290, 300, 310, 330, 350	350		700
V_{GEM1}	300, 320, 340, 360	340	180	680
	330, 350, 360, 370	330		660
	360	330, 340, 350, 355		
V_{GEM234}	350	330, 350	180	$2V_{\text{GEM234}}$
	330	330, 350		
V_{drift}	360	350	-90, 0, 180, 270, 360	700
V_{transfer}	360	350	180	100, 250, 350, 533, 700

- V_{GEM} : ゲインと位置分解能および検出効率の相関を調べる。 V_{GEM} とゲインは相関関係にあるため、 V_{GEM} の変更がゲインの変更を意味する。
- V_{GEM1} 、 V_{GEM234} : ゲインと位置分解能、検出効率の関係性を評価する。また、電圧の比が拡散にどのように影響を与えるかを調べる。
- V_{drift} : 設定値 180 V の妥当性の評価する。
- V_{transfer} : 設定値の $V_{\text{GEM234}} \times 2$ との比較を行う。

これらのデータセットに対して以下のように予想を立てた。

- V_{GEM} が大きいほどゲインが増加するため、位置分解能および検出効率は向上する。
- V_{GEM234} に比べ、 V_{GEM1} の比が大きいほど増幅された電子の拡散が大きくなり、位置分解能が悪化する。
- V_{drift} および V_{transfer} が大きいほど、電子の拡散が抑制され、位置分解能および検出効率が向上する。

4.3.4 ビーム条件

本論文におけるビームテストおよび今後予定されている物理データ取得ラン Run-1 のビーム条件の違いを以下にまとめた。なお、PF-AR でのテスト実験のビーム強度は、ビーム強度 50 mA から導出した (付録 B)。

表 4.4 PF-AR テストビームラインおよび Run-1 のビーム条件

	種類	ビーム		標的	生成粒子
		エネルギー [GeV]	強度 [proton/spill]		
PF-AR	電子	3.0	1×10^{18}	-	-
Run-1	陽子	30	1×10^{10}	C,Cu	ϕ 中間子

4.4 解析方法

4枚 GTR でのヒットの位置は、ヒットストリップの電荷による重み付き平均（電荷重心）をヒット位置とする方法により求めた。APV のチャンネルによってベースラインが異なるため、まずはペDESTAL補正を行う。ペDESTAL補正とは、電子データの処理において、信号がない場合でも検出器や読み出し回路から生じるオフセットを取り除くための補正方法を指し、このオフセット値がペDESTALである。

4.4.1 ペDESTAL補正

APV から得られる波形信号は、図 2.11 のようになっている。この波形信号から、各ストリップのペDESTALを差し引く。ペDESTALランを 1 kHz のクロック信号をトリガーとして取得した。ペDESTAL補正は、ペDESTALランのデータを用いて行った。

APV チップ内の全チャンネルの ADC 値の平均を ADC 値からそれぞれ引く。これが、APV チップごとに同相モードのノイズを引くことに相当すると考える。 n 番目のイベント、 i 番目のチャンネル、 j 番目のサンプルでの ADC 値を $ADC_{(i,j)}^{(n)}$ 、全チャンネルを N_{ch} とし、ADC 値から同相モードのノイズの平均値を差し引くと、

$$a_{(i,j)}^{(n)} = ADC_{(i,j)}^{(n)} - \sum_i \frac{ADC_{(i,j)}^{(n)}}{N_{ch}} \quad (4.2)$$

となる。各ストリップのペDESTALを $\mu_{(i)}$ とすると、

$$\mu_{(i)} = \sum_{n,j} \frac{a_{(i,j)}^{(n)}}{N_{sample} N_{event}} \quad (4.3)$$

で与えられる。ここで、 N_{sample} はサンプル数であり本実験では 24 である。 N_{event} はイベント数である。ペDESTAL補正した ADC 値を $b_{(i,j)}^{(n)}$ とすると、

$$b_{(i,j)}^{(n)} = a_{(i,j)}^{(n)} - \mu_{(i)} \quad (4.4)$$

で求められる。

4.4.2 電荷重心による位置の測定

ヒットストリップの電荷による重み付き平均（電荷重心）をヒット位置とする方法を、COG 法（Center of Gravity method）と呼ぶ。電荷 $q_{(i)}^{(n)}$ はペDESTAL補正をした後、各ストリップの波形の最大値から決定した。その後 $q_{(i)}^{(n)}$ は、あるスレシヨルドを超えたストリップのみで使用した。これを表した図を図 4.8 に示す。 $q_{(i)}^{(n)}$ の最大値を示すストリップを含み、隣接するストリップが連続している範囲を COG 法に用いる「クラスター」と定義する。 $x_{(i)}$ を i 番目の x ストリップの GTR のローカル座標系における x 座標とすると、電荷重心 COG は、

$$\text{COG}^{(n)} = \frac{\sum_{i \in \text{cluster}} x_{(i)} q_{(i)}^{(n)}}{\sum_{i \in \text{cluster}} q_{(i)}^{(n)}} \quad (4.5)$$

で表される [12]。なお、ローカル座標系とは GTR ごとに定義される検出器固有の座標系であり、ビーム入射位置を原点としている。こうして定義されるクラスターにより、1 イベントがカウントされる。一方、同一イベントの中に複数のクラスターが存在し、クラスターの重なりが生じる場合がある。このとき複数の電子飛跡を見ていることになり、正常な解析が困難になる。そこで、イベントをカウントする際には、1 イベントのクラスターの個数が 1 つの時のみに限定するカットをかけている。

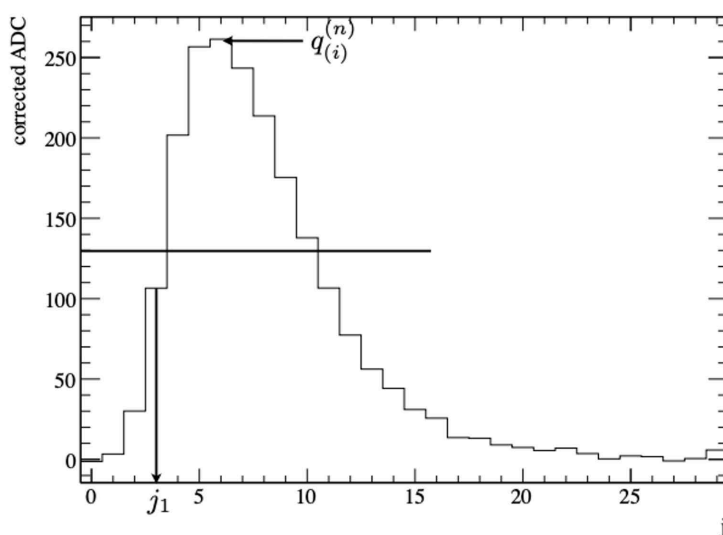
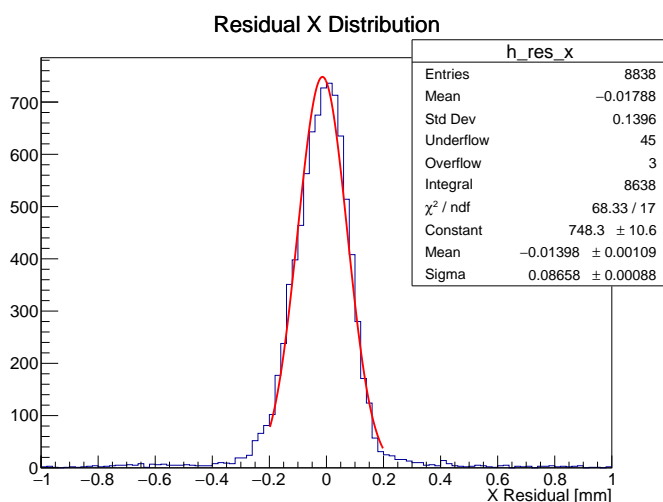


図 4.8 ペDESTAL補正された波形。スレシヨルドを超えるストリップのみを選択する。スレシヨルドは可変であり、ランごとに変更可能である。本グラフのスレシヨルドは、 $1/2 \times q_{(i)}^{(n)}$ となっている。

4.5 結果

典型的な残差分布の結果を図 4.9 に示す. (a) は図 4.2(a) のように 100GTR のみのヒットから直線を引いた残差分布で, (b) は図 4.2(b) のように 3 つの GTR のヒットからフィッティング直線を引いた残差分布である. x 軸原点は, 4 枚 GTR のローカル座標の原点である. グラフの描画領域を -1 mm から 1 mm に設定し, 描画領域外も含む全領域のイベント総数に対する, 描画領域内のイベント総数の割合から検出効率を計算している. また, 位置分解能は, 残差分布をガウスフィッティングし, その標準偏差 σ から求めた.

(a)



(b)

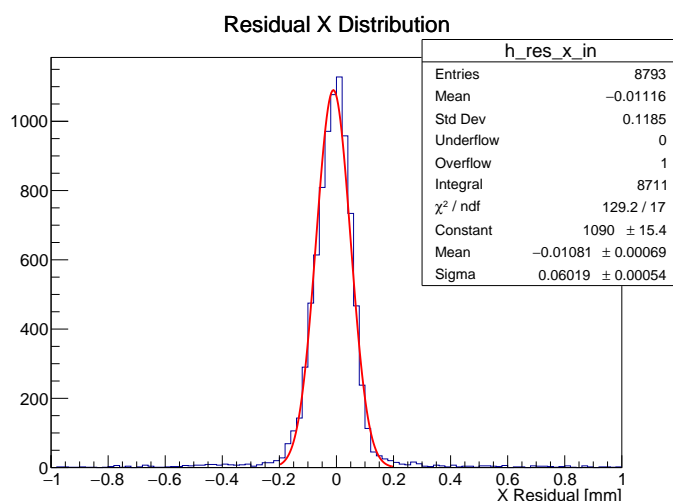


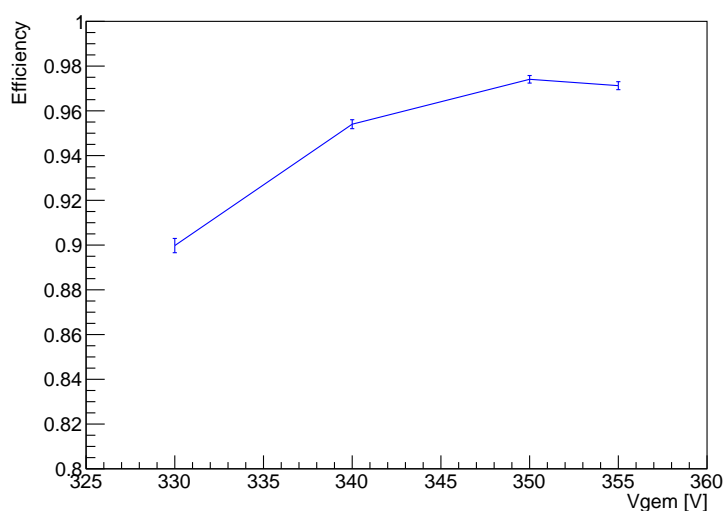
図 4.9 0 度, X 軸方向の残差分布. $V_{\text{GEM1}} = 360\text{ V}$, $V_{\text{GEM234}} = 350\text{ V}$, $V_{\text{drift}} = 180\text{ V}$, $V_{\text{transfer}} = 700\text{ V}$. 赤色の曲線はガウスフィッティング結果. (a)4 枚 GTR を含まない残差分布. (b)4 枚 GTR を含む残差分布.

4.5.1 $V_{\text{GEM}} (V_{\text{GEM}1} = V_{\text{GEM}234})$ 依存性

$V_{\text{GEM}1} = V_{\text{GEM}234}$ の時の結果を、図 4.10 に示す。図 4.10 から、 V_{GEM} の増加に伴い検出効率は増加し、350 V 付近で飽和しているように見える。前章より、 $V_{\text{GEM}} = 350$ 付近はゲイン $\sim 10,000$ 倍を示すことがわかっており、ゲイン 10,000 倍付近で検出効率が飽和することが分かる。また位置分解能については、 V_{GEM} の増加に伴い減少し、350 V 付近で飽和しているように見える。両項目とも、ゲイン $\sim 10,000$ 倍が出ていれば十分に要求性能である 0.96 および $100\mu\text{m}$ を満たした。

(a)

Efficiency vs Vgem



(b)

Resolution vs Vgem

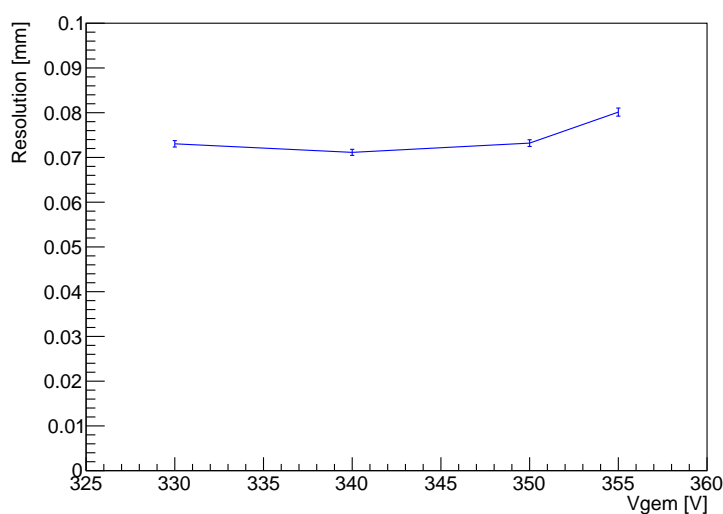


図 4.10 0 度、 $V_{\text{GEM}1} = V_{\text{GEM}234}$ の結果。 $V_{\text{drift}} = 180$ V. (a) 検出効率. (b) 位置分解能.

4.5.2 V_{GEM} ($V_{\text{GEM}1} \neq V_{\text{GEM}234}$) 依存性

$V_{\text{GEM}234}$ 一定のときの $V_{\text{GEM}1}$ 依存性を表したグラフおよび, $V_{\text{GEM}1}$ 一定のときの $V_{\text{GEM}234}$ 依存性を表したグラフを図 4.11, 4.12 に示す. 図 4.11 を見ると, $V_{\text{GEM}2}$ の増加とともに検出効率が增加する方向にシフトした. 位置分解能は図 4.10 と同様の傾向を確認できたが, V_{GEM} の増加に対する変化は $10\mu\text{m}$ 程度であった. $V_{\text{GEM}1}$ 一定の場合も図 4.12 より, $V_{\text{GEM}2}$ 一定の場合と全く同様の結果が得られた. どちらの場合についても固定 V_{GEM} の値が 350 V 以上の時に検出効率の増加が緩やかになっている. このことから, いずれか 1 つ以上の GEM が $V_{\text{GEM}}=350\text{ V}$ 以上のとき, 安定した検出効率を示すと考えられる (ただし全ての V_{GEM} は 300 V 程度以上印加する必要がある).

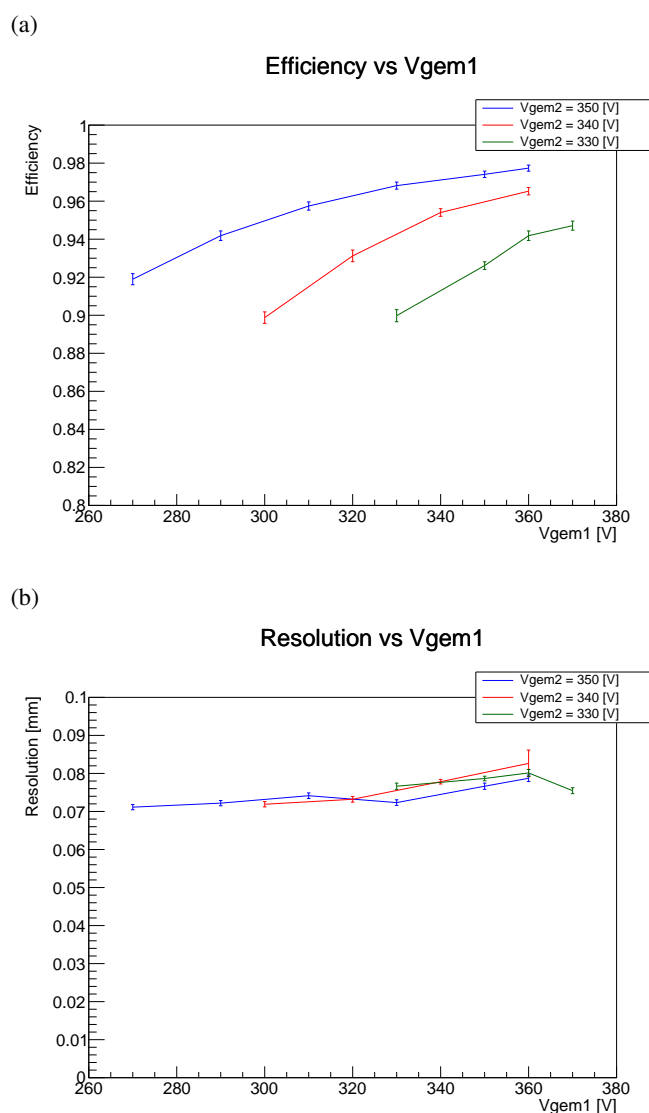


図 4.11 0 度, $V_{\text{GEM}234}$ 一定のときの $V_{\text{GEM}1}$ 依存性. $V_{\text{drift}} = 180\text{ V}$. (a) 検出効率. (b) 位置分解能.

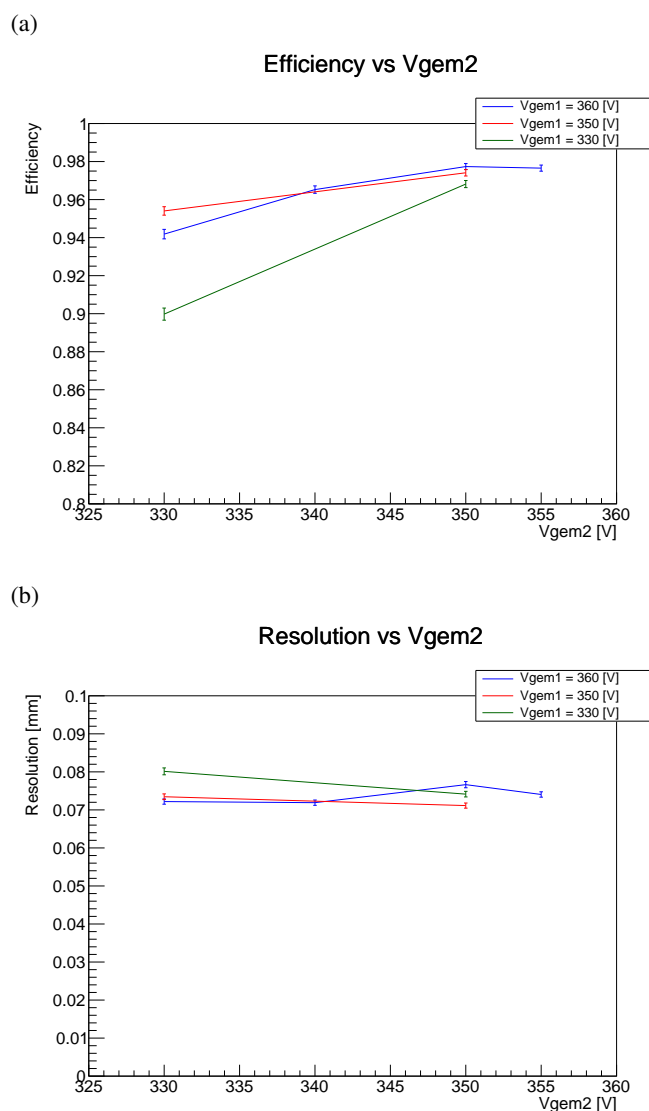


図 4.12 0 度, V_{GEM1} 一定のときの V_{GEM234} 依存性. $V_{drift} = 180$ V. (a) 検出効率. (b) 位置分解能.

4.5.3 V_{drift} 依存性

V_{drift} 依存性を表したグラフ図 4.13 に示す. 図 4.13 より, 設定 V_{drift} である 180 V に目掛けて検出効率が増加し, 要求性能を達成する 0.96 以上となった. その後は頭打ちになり大きな変化はないことが分かる. 位置分解能についても一見 $V_{drift} = 180$ V 以上で低い値を示しているように見える. $V_{GEM1} = 360$ V のグラフ (青色) を見ると $V_{drift} = -100$ V から上昇したのちに, $V_{drift} = 180$ V 付近から減少をはじめ, その後一定になった.

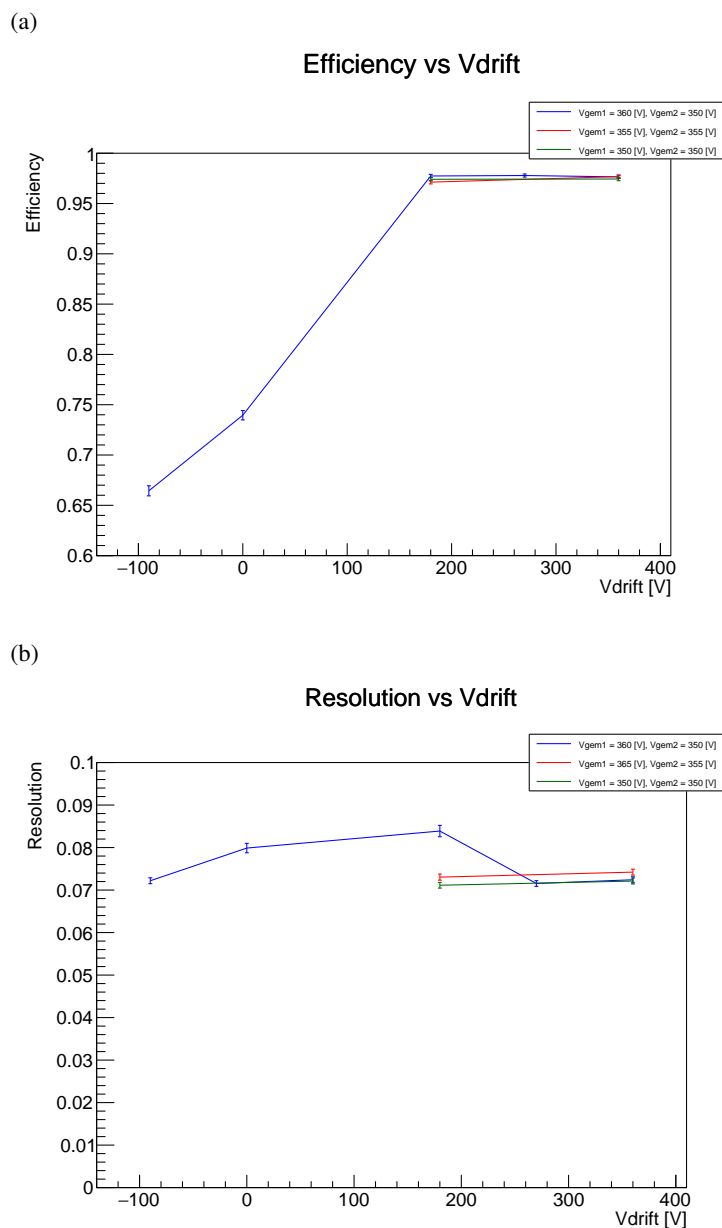


図 4.13 0 度, V_{GEM1} , V_{GEM234} 一定のときの V_{drift} 依存性. (a) 検出効率. (b) 位置分解能.

4.5.4 $V_{transfer}$ 依存性

$V_{transfer}$ 依存性を表したグラフ図 4.14 に示す. $V_{transfer}$ を変動させた場合, $V_{transfer} = 100$ V から 250 V にかけて飛躍的に検出効率が増加した. その後 $V_{transfer} = 250 - 350$ V 以上からは一定を示した. 位置分解能は常に一定の値を示し, 少なくとも $V_{transfer} = 100$ V 以上に関しては位置分解能に大きな寄与をしないことが分かる. これらより, $V_{transfer} = V_{GEM234}$ 以上 (今回の場合 350 V) 出ていれば要求性能を満たすといえる.

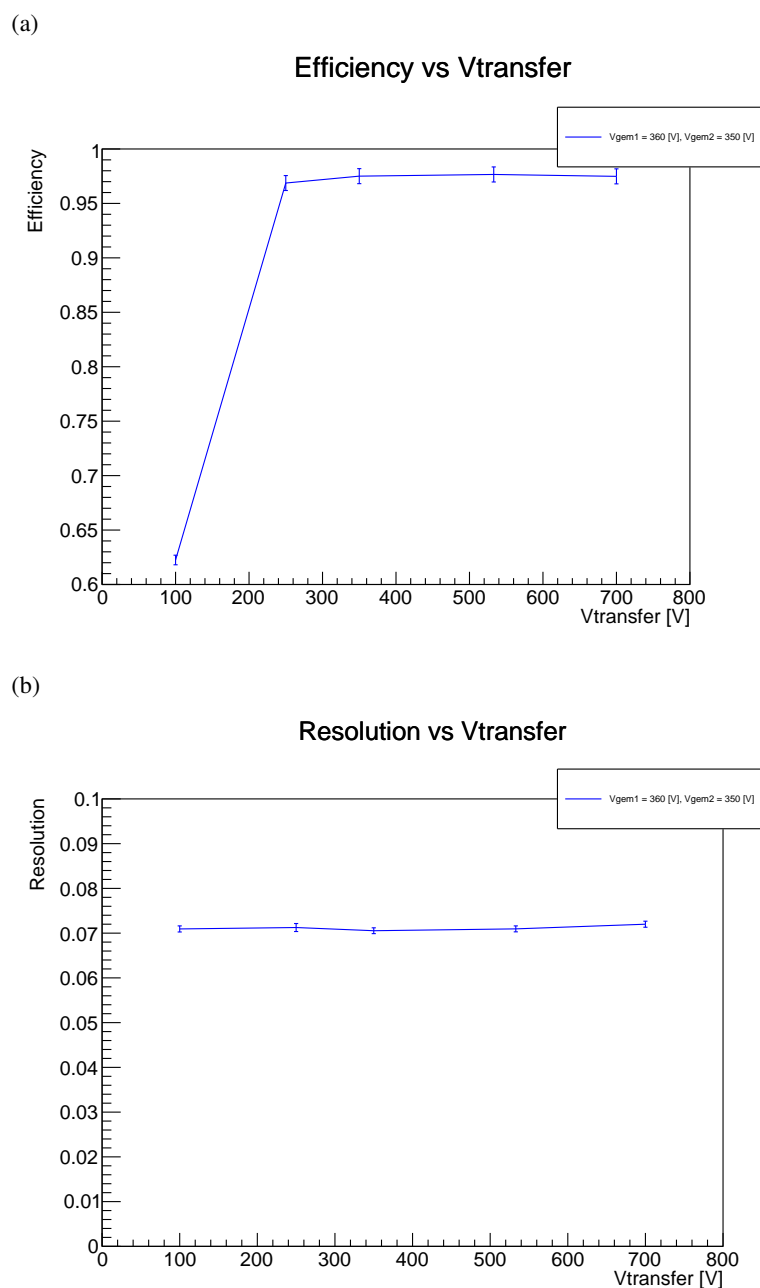


図 4.14 0 度, V_{GEM1} , V_{GEM234} 一定のときの $V_{transfer}$ 依存性. (a) 検出効率. (b) 位置分解能.

4.6 議論・考察

表 4.3 のデータセットに基づき, 検出効率と位置分解能をまとめた結果に対する考察を以下で述べる. 議論する際に, クーロン多重散乱の計算を行い, 散乱角が十分に無視できるかの確認を行った.

4.6.1 クーロン多重散乱

一般に、位置分解能を求めるためには、クーロン多重散乱の影響を考慮する必要がある。荷電粒子の rms 散乱角は、

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0 \beta^2} \right) \right] \quad (4.6)$$

で表される [30]。このとき、 p は入射粒子の運動量、 βc は粒子の速度、 z は粒子の電荷数、 x は通過物質の厚さ、 X_0 は放射長である。入射粒子が電子ビーム 3.0 GeV であることから、 $\beta \approx 1$ と仮定できるため、

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \frac{13.6 \text{ MeV}}{c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \\ &= \frac{13.6}{3.0 \times 10^3} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \\ &= 4.53 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

と計算できる。通過物質ごとに x/X_0 を計算する。主に GEM のポリイミド膜と銅膜、検出器中のガス Ar + CO₂ が通過物質である。各物質の厚さと枚数、密度、およびそれらより計算した x/X_0 を表 4.5 にまとめる。

表 4.5 GTR を構成する各物質の特性とその x/X_0

名称	厚さ [μm]	枚数	密度 [g/cm^3]	放射長 X [g/cm^2]	x/X_0
ポリイミド膜	50	4	1.42	28.6	9.92×10^{-3}
銅膜	4	4	8.96	12.86	1.39×10^{-3}
Ar + CO ₂	11,800	-	0.0018	19.4	1.09×10^{-4}

これより、全体の x/X_0 は、全物質の和であるから 1.14×10^{-2} となる。これを式 (4.7) に代入すると、

$$\begin{aligned} \theta_0 &= 4.53 \times 10^{-3} \sqrt{1.14 \times 10^{-2}} \left[1 + 0.038 \ln (1.14 \times 10^{-2}) \right] \\ &\approx 4.48 \times 10^{-4} \text{ rad} \end{aligned} \quad (4.8)$$

と求まる。

クーロン多重散乱による 100GTRu の横方向のずれを y_{100u}^{rms} とすると、

$$y_{100u}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{3}} x \theta_0 \quad (4.9)$$

と表される [30]。式 (4.8) および、表 4.5 より、

$$\begin{aligned} y_{100u}^{\text{rms}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.396 \times 4.48 \times 10^{-4} \\ &= 3.61 \times 10^{-4} \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.10)$$

と導出できる。同様に、4枚 GTR における横方向のずれ $y_{4\text{foil}}^{\text{rms}}$ は、

$$\begin{aligned} y_{4\text{foil}}^{\text{rms}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.396 \times 4.48 \times 10^{-4} \times 2 \\ &= 7.22 \times 10^{-4} \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.11)$$

である。よって、セットアップ全体の複合的な横方向のずれ y^{rms} は、図 4.3 の数値を用いて、

$$\begin{aligned} y^{\text{rms}} &= y_{100\text{u}}^{\text{rms}} \times \frac{167.4 + 12.016}{12.016} + y_{4\text{foil}}^{\text{rms}} \times \frac{157.6 + 12.016}{12.016} \\ &= 3.61 \times 10^{-4} \times \frac{167.4 + 12.016}{12.016} + 7.22 \times 10^{-4} \times \frac{157.6 + 12.016}{12.016} \\ &= 0.0156 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.12)$$

と求められる。したがって、クーロン多重散乱による位置分解能のずれは最大で $15 \mu\text{m}$ 程度と分かる。テスト結果で得られた位置分解能は最大で $\sim 80 \mu\text{m}$ 程度であったため、性能評価に関してクーロン散乱の影響は大きくない。また、位置分解能を過大に見積もる方向なので、要求性能は満たしているといえる。

4.6.2 各ギャップでの考察

本テストは、各ギャップの電圧条件を変更して結果を取得した。そこで各ギャップに分け、得られた結果を考察する。

GEM

まず、 V_{GEM} の変更による増幅の変化について考える。ここでは、簡単のためゲインが V_{GEM} のみに依存すると考える。 V_{GEM} を増加させると、GEM の表裏の銅の間で電場が生じる。例として $V_{\text{GEM}} = 350 \text{ V}$ の場合の GEM1 の孔 1 つ当たりの電場を考える。図 2.9 より、簡単には、孔全体の平均電場 E_{avg} は、

$$\begin{aligned} E_{\text{avg}} &= \frac{V_{\text{GEM}}}{t_1 + t_2} \\ &= \frac{350}{(5 + 55) \times 10^{-4}} \\ &\approx 63,600 \text{ V/cm} \end{aligned} \quad (4.13)$$

と近似できる。また、孔の中央付近の電場 E_{center} は、

$$\begin{aligned} E_{\text{center}} &= E_{\text{avg}} \frac{D}{d} \\ &= 63,600 \times \frac{65}{25} \\ &\approx 165,000 \text{ V/cm} \end{aligned} \quad (4.14)$$

と考えられる。GEM2,3 についてもパラメータが同じであるため全く同じ電場だといえる。GEM4 は T タイプであり、孔の径が異なっている。 E_{avg} が GEM1 と同じであるから、GEM4 の孔の中央

付近の電場は,

$$\begin{aligned} E_{\text{center}} &= E_{\text{avg}} \frac{D}{d} \\ &= 63,600 \times \frac{55}{25} \\ &\approx 140,000 \text{ V/cm} \end{aligned} \quad (4.15)$$

である. 一般に, ゲインと電場には, $G \propto \exp(\alpha E)$ の関係がある. ここで α は検出器特有の係数である. これより, 全体のゲインは,

$$\begin{aligned} G_{\text{all}} &= G_{\text{GEM1}} \cdot G_{\text{GEM2}} \cdot G_{\text{GEM3}} \cdot G_{\text{GEM4}} \\ &\approx a \{ \exp(\alpha E_{\text{GEM1}}) \cdot \exp(2\alpha E_{\text{GEM2}}) \cdot \exp(\alpha E_{\text{GEM4}}) \} \\ &= a \exp\{ \alpha (E_{\text{GEM1}} + 2E_{\text{GEM2}} + E_{\text{GEM4}}) \} \end{aligned} \quad (4.16)$$

ここで, a は比例係数である. $V_{\text{GEM}} = 350 \text{ V}$ から 360 V に上昇させた時のゲインの比は,

$$\begin{aligned} \frac{G_{V_{\text{GEM}}=360}}{G_{V_{\text{GEM}}=350}} &= \frac{\exp(\alpha E_{V_{\text{GEM}}=360})}{\exp(\alpha E_{V_{\text{GEM}}=350})} \\ &= \exp(\alpha E_{V_{\text{GEM}}=350} \cdot \frac{1}{35}) \end{aligned} \quad (4.17)$$

であるから, 全体のゲインの上昇率は,

$$\frac{G_{\text{all}_{V_{\text{GEM}}=360}}}{G_{\text{all}_{V_{\text{GEM}}=350}}} = \exp(\alpha E_{V_{\text{GEM}}=350} \cdot \frac{1}{35}) \quad (4.18)$$

と表せる. 同様にして, $V_{\text{GEM}} = 300 \text{ V}$ から 310 V に増加させた時は,

$$\begin{aligned} \frac{G_{\text{all}_{V_{\text{GEM}}=310}}}{G_{\text{all}_{V_{\text{GEM}}=300}}} &= \exp(\alpha E_{V_{\text{GEM}}=350} \cdot \frac{300}{350} \cdot \frac{1}{30}) \\ &= \exp(\alpha E_{V_{\text{GEM}}=350} \cdot \frac{1}{35}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

となり, ゲインの上昇率は一定であると分かる. したがって, 電圧の増加によってゲインは指数的に上昇し, 性能も変化すると予想した. 結果では 350 V 付近を境目に検出効率が飽和し, 位置分解能に関しては, V_{GEM} の上昇に対して大きな変化を見せなかった.

これらの要因について考察する. 検出効率に関しては, これまでの実験において 99% 以上を達成することができていなかったため, 本テストに対しても同様の事象が起こったと考えられる. 本テストでは, クラスターのヒットとして全 GTR に対して同タイミングのものみにカットをかけている. そのため, ビーム由来であるが, 本来あるべき位置から離れた位置にヒットがあったことにより, 検出効率 100% を達成できない可能性がある. しかし, 検出効率の定義で $\pm 1 \text{ mm}$ と広い範囲を選択しているため, その確率は低いと考える. 今回のテストでは, 確実な解析は出来ないが, 本検出器はレート耐性を高くするために一次電子を生成するドリフトギャップを短く設定しているため, 一次電子の数が足りない可能性は議論されている.

次に, 位置分解能に関して考える. ゲインの増加に伴い, 位置分解能は小さくなるはずであるが, V_{GEM} および V_{GEM1} の依存性に関しては $V_{\text{GEM}} = 250 \text{ V}$ 以上の範囲において僅かに増加傾向が見られた. これは, すでに位置分解能が十分出ており, 電圧上昇に伴い何らかの要因によって悪化したのだと考えられる. 以下に要因を挙げる.

1. 過剰な増幅が起こり、電子密度が大きくなることで電子間の反発が発生し、クラスターが広がった。
2. 縦方向の拡散が起こり、電子雲が長く広がった。
3. クラスターの範囲がリードアウトのストリップ範囲内に収まっているために、十分なゲインかつ十分小さな拡散にも関わらず、これ以上位置分解能が向上する見込みがなかった。

1. は、すでにゲインがある閾値を超え、本来クラスターを狭めるのに効果的なゲインの増加が、電子間の反発によってむしろ広がってしまうということだ。2. は、過剰な電場により、横方向の拡散が十分に抑制できたものの、縦方向に電子雲が広がってしまうというものだ。これら 1,2. の考察の理由としては、 V_{GEM234} の関与が位置分解能の僅かな増加に大きく影響を与えているためだ。これは、より下層の GEM2~GEM4 では電子が過剰に増幅されてしまっていることで、1,2. の影響が反映されやすいためだ。3. の要因については、位置分解能の要求性能がリードアウトの設計から算出されていることから、十分に有り得るものと考えられる。

ドリフトギャップ

ドリフト電場の増加に対しては、検出効率は飛躍的に増加した後横ばいに、位置分解能については増加から減少に移行し、その後一定になっている。まず、検出効率については、GEM1 に誘導される電子数が増加するために飛躍的に増加している。その後 $V_{\text{drift}} = 180 \text{ V}$ (電場: 600 V/cm) 付近を境にあるスレシヨルドを超え、十分な一次電子が GEM1 に到達することで検出効率が出たのだと考える。

位置分解能については、 $V_{\text{drift}} = 180 \text{ V}$ より低い両域での上昇傾向は、ドリフトギャップでの一次電子がカットされ、トランスファーギャップで生成された一次電子の影響が見られたことが要因として考えられる。これは、 V_{drift} がマイナス領域でも十分な検出効率が得られてることからだ。トランスファーギャップからリードアウトまでの距離は相対的に短いため、ドリフトギャップに比べ電子の拡散も小さくなることが予想される。一方で、 V_{drift} の増加に伴い位置分解能が悪化したのは、ドリフトギャップで生成された一次電子が十分な速度を持たないためにガス等の影響により拡散が大きくなるためだと考えられる。それより大きな電場では、十分な速度に到達することで、再び位置分解能が向上し一定になるのだと考える。

トランスファーギャップ

トランスファーギャップでの結果は、検出効率のみ他のデータセットとは異なる挙動が見えていた。トランスファーギャップの電場は GEM 間の電子の輸送に大きく関わっており、十分な大きな電場が形成されていないと、十分な速度が出ていないために電子の横方向の拡散が発生する。しかし、十分な高電場では、拡散は飽和すると考えられる。その飽和点が $V_{\text{transfer}} = 250 \sim 350 \text{ V}$ 付近にあるために、検出効率が向上したのちに一定になると考察する。

4.6.3 まとめ

以上の結果をまとめると、ゲイン $\sim 10,000$ 倍以上を示す $V_{\text{GEM}} = 350 \text{ V}$ 以上であれば十分に要求性能を満たす検出効率および位置分解能を示すといえる。また、 V_{drift} および V_{transfer} は現在の設定値で十分要求性能を満たしているが、 V_{transfer} に関しては設定値の半分の $V_{\text{transfer}} = V_{\text{GEM234}}$ でも十分な性能であった。

第 5 章

結論

J-PARC E16 実験では、2020~2024 年にかけてスペクトロメータの性能評価および調整を目的としたコミッショニングランが複数回行われた。コミッショニングラン中に GTR の安定性が課題となり、考案されたのが GEM 飛跡検出器の GEM フォイル枚数を 3 枚から 4 枚に変更させた 4 枚 GEM 検出器 (4 枚 GTR) の開発であった。本論文では、この 4 枚 GTR を製作し、性能評価を行うことでその有効性を検証してきた。

行った性能評価項目はゲイン、検出効率、位置分解能の 3 つである。GEM 一枚あたりの電圧を変動させながら、これらの性能評価を行い、4 枚 GTR の必要性および、実際のデータ収集で運用する際の最適な電圧配分を決定した。ゲイン測定およびビームテストで分けて、これらの結果を以下にまとめる。

実験室でのゲイン測定により、4 枚 GTR の電圧の組み合わせが V_{GEM} は、 $V_{\text{GEM}1} = 360 \text{ V}$, $V_{\text{GEM}234} = 350 \text{ V}$ の時、ゲイン 10,800 倍を達成した。これに対し、3 枚 GTR では $V_{\text{GEM}} = 390 \text{ V}$ の時にゲイン ~6,000 倍であった。これより、4 枚 GTR では 3 枚 GTR より低い V_{GEM} でゲイン ~ 6×10^3 倍以上を達成することが確認できた。

ビームテスト実験によって、検出効率と位置分解能に対する各電圧の依存性を確認した。 V_{GEM} の増加に伴い検出効率、位置分解能ともに性能が向上する方向へ進み、350 V 付近で飽和した。両項目とも、ゲイン ~10,000 倍が出ていれば十分に要求性能である 0.96 および $100 \mu\text{m}$ を満たした。また、いずれか 1 つ以上の GEM が $V_{\text{GEM}}=350 \text{ V}$ 以上のとき、安定した検出効率を示した (ただし全ての V_{GEM} は 300 V 程度以上印加する必要がある)。 V_{drift} 依存性に関しては、設定 V_{drift} である 180 V に目掛けて検出効率が増加し、要求性能を達成する 0.96 以上となった。 V_{transfer} 依存性に関しては、 $V_{\text{transfer}} = V_{\text{GEM}234}$ 以上 (今回の場合 350 V) 出ていれば要求性能を満たし、その後は一定の値を示した。以上のビームテストの結果をまとめると、ゲイン ~10,000 倍以上を示す $V_{\text{GEM}} = 350 \text{ V}$ 以上であれば十分に要求性能を満たす検出効率および位置分解能を示すといえる。また、 V_{drift} および V_{transfer} は現在の設定値で十分要求性能を満たしているが、 V_{transfer} に関しては設定値の半分の $V_{\text{transfer}} = V_{\text{GEM}234}$ でも十分な性能であった。

以上の 2 つのテスト結果をまとめると、4 枚 GTR は、従来の 3 枚 GTR より 40 V 以上低い V_{GEM} によってゲイン ~ 6×10^3 倍以上を達成し、その時の検出効率と位置分解能が要求性能を十分に示すことが検証できた。このことから、4 枚 GTR の必要性証明するために必要であった、「従

来よりも V_{GEM} が低い条件で同等以上の性能を示す」という内容が十分に示された。また、今後の 4 枚 GTR の運用電圧として、 $V_{\text{GEM}}=350 \text{ V}$, $V_{\text{drift}} = 180 \text{ V}$, $V_{\text{transfer}} = V_{\text{GEM}234} \text{ V}$ 以上の値に、それぞれ設定する必要があることがわかった。

E16 実験は、2025 年春から物理ランのデータ収集が開始する。本論文のテスト結果により、現在 8 モジュールの設置が完了している GTR について、300GTR の 4 枚化を進めることが決定された。そして、運用電圧はこれまでの V_{GEM} から飛躍的に抑えることができ、安定した GTR の運用が期待される。

付録

A 幾何平均による位置分解能の補正

点 i の位置分解能 σ_i は、以下の幾何平均によって簡易的に求めることができる [31]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{i,\text{in}} \cdot \sigma_{i,\text{ex}}}$$

ここで、 $\sigma_{i,\text{in}}$ は点 i を含む直線フィットによる残差の標準偏差、 $\sigma_{i,\text{ex}}$ は点 i を除く直線フィットによる残差の標準偏差である。以下にその証明を示す。

トラックは N 個の測定値 $\{(y_j, x_j) \mid j = 1, \dots, N\}$ で構成され、各測定値 x_j は期待値 $\langle x_j \rangle = a + by_j$ を中心に分布し、標準偏差 σ_j を持つ。また、各測定値には重み $w_j = 1/\sigma_j^2$ が付与される。このとき、点 i に対応する残差は以下のように定義される:

$$d_i = a - x_i$$

a は直線フィットによって求められる切片である。最小二乗法を用いて、切片 a は以下の式で与えられる。

■点を含めた場合

$$a_{\text{in}} = \frac{\sum_j w_j x_j \sum_k w_k y_k^2 - \sum_k w_k y_k \sum_j w_j x_j y_j}{D_{\text{in}}},$$

ここで、分母 D_{in} は次のように定義される:

$$D_{\text{in}} = \sum_j w_j \sum_j w_j y_j^2 - \left(\sum_j w_j y_j \right)^2$$

■点を除外した場合

$$a_{\text{ex}} = \frac{\sum_{j \neq i} w_j x_j \sum_{k \neq i} w_k y_k^2 - \sum_{k \neq i} w_k y_k \sum_{j \neq i} w_j x_j y_j}{D_{\text{ex}}},$$

ここで、分母 D_{ex} は次のように定義される:

$$D_{\text{ex}} = D_{\text{in}} - w_i \sum_j w_j y_j^2$$

残差 d_i は、点 i を含む場合 $d_{i,\text{in}} = a_{\text{in}} - x_i$ と表され、点 i を除外した場合 $d_{i,\text{ex}} = a_{\text{ex}} - x_i$ となる。一方、点 i を含む場合の残差分散 $\sigma_{i,\text{in}}^2$ は、

$$\sigma_{i,\text{in}}^2 = \sigma_i^2 \cdot \frac{D_{\text{ex}}}{D_{\text{in}}}$$

点 i を除外した場合の残差分散 $\sigma_{i,\text{ex}}^2$ は,

$$\sigma_{i,\text{ex}}^2 = \sigma_i^2 \cdot \frac{D_{\text{in}}}{D_{\text{ex}}}$$

となる。上記の分散式より、 $\sigma_{i,\text{in}}$ と $\sigma_{i,\text{ex}}$ の幾何平均は,

$$\sqrt{\sigma_{i,\text{in}}^2 \cdot \sigma_{i,\text{ex}}^2} = \sqrt{\left(\sigma_i^2 \cdot \frac{D_{\text{ex}}}{D_{\text{in}}}\right) \cdot \left(\sigma_i^2 \cdot \frac{D_{\text{in}}}{D_{\text{ex}}}\right)} = \sqrt{\sigma_i^4} = \sigma_i^2$$

したがって、分解能 σ_i は

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{i,\text{in}} \cdot \sigma_{i,\text{ex}}}$$

と導出できる。

B PF-AR テストビームラインのビーム強度の換算

電流 $I = 50 \text{ mA}$ を 1 スピルあたりの電子数に換算する。電流 I は、単位時間あたりの電荷量 Q で表される:

$$I = \frac{Q}{t}$$

ここで、 $Q [\text{C}]$ は電荷量、 $t [\text{s}]$ は時間を表す。1 spill は 4 秒続いたため、1 スピルあたりの総電荷量 Q は,

$$Q = I \cdot t = (50 \times 10^{-3}) \text{ C/s} \cdot 4 \text{ s} = 0.2 \text{ C}$$

電子 1 個の電荷 e は,

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

であることから、1 スピルあたりの陽子数 N は次の式で求められる:

$$N = \frac{Q}{e} = \frac{0.2}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 1 \times 10^{18}$$

したがって、ビーム強度 50 mA から $1 \times 10^{18} \text{ electron/spill}$ が分かる。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、大勢の方々にお世話になりました。そのすべての方々はこの場を借りてお礼申し上げます。

まず初めに、私の指導教員である小沢恭一郎准教授に深く感謝申し上げます。この2年間の研究室生活全般にわたって大変お世話になりました。ハドロン物理学の基礎から検出器実験の全般にわたり、本研究に関わるほとんどすべての部分を指導いただきました。また、日頃から研究の進み具合を気にかけていただき、優しい言葉で私を励ましてくださいました。

E16 実験グループのみなさまにも大変お世話になりました。理化学研究所仁科加速器科学研究センターの四日市悟専任研究員には、日々の打ち合わせや解析で様々なアドバイスをいただきました。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 素粒子原子核研究の青木和也研究機関講師と森野雄平研究機関講師には、輪講や本研究の議論などに親身に付き合ってくださいました。その他に、京都大学の成木恵准教授や台湾物理学研究所中央研究院 Wen-Chen Chang 講師、大阪大学核物理研究センターの高橋智則特任研究員にも E16 collaborator としてお世話になりました。

GTR のメンバーとして、理化学研究所の中井恒さん、村上智紀さん、広島大学の江島廉さんにも非常にお世話になりました。中井さんと村上さんには、研究室 OB としても、日々 GTR に関わるすべてのことを大変丁寧に指導いただきました。特に、本実験のビームテストで検出器の準備や DAQ システムの構築、解析のほとんどすべてにおいて手伝っていただきました。江島さんは、GTR の組み立てや実験の相談に乗っていただきました。

E16 実験グループに所属する先輩方である、KEK の市川真也さん、京都大学の中須賀さとみさん、長房俊之介さんにもお世話になりました。普段からご飯に連れて行ってくださったり、何気ない雑談に付き合ってくださいたり、日常生活から気にかけていただきました。また、広島大学の山田蓮斗さんにはグループの同期として、普段から実験の手伝いやアドバイスをもらい大きな心の支えとなりました。京都大学の柳井祥吾さんと橋本竣史さんにも短い間ながら実験のサポートをしていただきました。

他にもここに書ききれなかった E16 実験に関わるすべての方々に感謝の意を示したいと思います。

最後に、これまで私を支え熱心に応援してくれた両親、両祖父母をはじめ、家族全員に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] M. E. Peskin, and D. V. Schroeder, "An Introduction to Quantum Field Theory", 1995.
- [2] 土岐博, 保坂淳, 「相対論的多体系としての原子核 – 相対論的平均場理論とカイラル対称性 –」, 大阪大学出版会, 2011.
- [3] <https://staff.aist.go.jp/t-yanagisawa/activity/ng-boson.html>.
- [4] J. I. Kapusta, and C. Gale, "Finite-Temperature Field Theory: Principles and Applications", Cambridge University Press, 2006.
- [5] W. Weise, Nucl. Phys. A553, 59c-79c, 1993.
- [6] M.A. Shifman, A.I. Vainshtein, and V.I. Zakharov, Nucl. Phys. B 147, 385, 1979.
- [7] P. Gubler, and K. Ohtani, Phys. Rev. D 90, 094002, 2014.
- [8] K. Ozawa, *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol.86, p.5019, 2001.
- [9] M. Naruki, *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol.96, p.092301, 2006.
- [10] R. Muto, *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol.98, p.042501, 2007.
- [11] 村上智紀, 修士論文, 2020.
- [12] 中井恒, 修士論文, 2013.
- [13] R. Arnaldi, *et al.*, PRL 96, p.162302, 2006
- [14] G. Agakishiev, *et al.*, Physics Letters B, Vol.715, No.4, pp.304–309, 2012.
- [15] C. Djalali, *et al.*, Journal of Physics G, Nuclear and Particle Physics, Vol.34, No.8, pp.S495–S501, 2007.
- [16] D. Rnka, *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol.94, p.192303, 2005.
- [17] <https://j-parc.jp/c/facilities/accelerators/index.html>
- [18] <https://j-parc-th.kek.jp/workshops/2013/03-18/Sawada-2013-03-18.pdf>.
- [19] <https://j-parc.jp/Hadron/ja/index.html>
- [20] <https://www.j-parc.jp/c//press-release/2020/08/11000577.html>
- [21] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth., A386, p.531, 1997.
- [22] <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- [23] P.A. Zyla, *et al.*, Review of Particle Physics, PTEP, Vol.2020, No.8, p.083C01, 2020.
- [24] M.J. French, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A., Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol.466, No.2, pp.359–365, Int. Symp. on Development and Application of Semiconductor, 2001.

-
- [25] 浅野秀光, 修士論文, 2010.
- [26] S. Martoiu, H. Muller, and J. Toledo, 2012.
- [27] T. N. Murakami *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A1058, p.168817, 2024.
- [28] <https://itdc.kek.jp/testBeamLine/index.html>.
- [29] 橋本敏和, 修士論文, 2013.
- [30] R. L. Workman *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 083C01, 2022.
- [31] R. K. Carnegie, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A538, pp.372-383, 2005.