

修士学位論文

LEPS2実験のための2m長高抵抗板検出
器の開発



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
原子核ハドロン物理学研究室

渡邊 憲

2018年2月27日

要約

本研究では LEPS2 実験に用いる 2 m 長 RPC を開発した。LEPS2 実験は SPring-8 において準備が進められている、ハドロン物理の研究を目的とした実験である。その実験では高輝度・高エネルギー・高偏極度の γ 線ビームを標的に当て、光生成された粒子を測定する。測定には極角 5° – 120° の大立体角を覆うソレノイド型スペクトロメータを用いる。スペクトロメータでは高抵抗板検出器 (RPC) とエアロジェルチェレンコフカウンター (AC) を用いて、極角 30° – 120° に飛来する π 中間子、 K 中間子、陽子 (p) を識別する予定である。RPC は高時間分解能・磁場中で動作可能・安価といった特徴を持つ飛行時間検出器である。SPring-8 蓄積リングの RF の信号と RPC の出力信号の時間差から飛行時間を測定し、飛跡検出器 (TPC、DC) から得られる運動量と合わせて、 K 、 p と $1 \text{ GeV}/c$ 以下の運動量の π 、 K を区別する。RF 信号の時間分解能は 20 ps 以下と非常に良く、飛行時間の分解能は RPC によって決まる。RPC は標的を覆うように円筒状に設置されるが、標的と RPC 間の距離は 85 cm と短いため、 K 、 p を 3σ の識別能力で区別するには 75 ps の高時間分解能が必要になる。先行研究では 1 m 長 RPC において約 60 ps の時間分解能を達成している。さらに、その後の開発では読み出しチャンネルを少なくするため、 2 m 長 RPC の開発を行い、時間分解能 70 ps の以下の性能を有することがわかった。しかし、この RPC はノイズや発振のため、安定した動作ができないという問題点を持っていた。本研究ではアース部分などの構造を再設計し、このノイズの問題点を改善した。また、さらなる時間分解能の向上のための研究を行い、実機の開発と性能評価を行なった。

時間分解能向上のため、本研究では RPC のストリップ上の信号伝搬における分散の効果に着目した。信号の分散は RPC の内部構造の静電容量とインダクタンスの結合が悪いことに由来するという指摘がある。そこで、本研究では先行研究の RPC 内部の材質を G10 からテフロンに変え、結合を調整することにより信号伝搬の周波数帯域の向上を計った。試作機においてネットワークアナライザを用いた測定により、実際にバンド幅が 2 倍程度向上したことを確認した。時間分解能の顕著な改善は見られなかったが、安価なテフロンでも十分な時間分解能を得られることが分かったため、テフロンでの実機製作を行うことを決定した。

実機製作にあたり、ノイズ対策としてグラウンドの強化を行い、結果プリアンプの出力後で $\text{RMS} 2 \text{ mV}$ 以下のノイズに抑制した。また本研究の RPC は 2 m と長いため、機械的構造を強化する必要がある。そこで RPC の多層構造をハニカムサンドイッチで挟む構造に変更した。

製作した実機 RPC の性能評価を SPring-8/LEPS2 ビームラインにおいて電子ビームを照射して行い、検出効率、時間分解能の印加電圧依存性や、ヒット位置依存性、入射角度依存性を調べた。また、磁場中での性能評価も行った。結果、検出効率 99% 以上、時間分解能 65 ps であり、LEPS2 実験の要求性能を満たすことが分かった。今後は LEPS2 実験に必要な台数を揃え、全ての RPC が要求性能を満たすかを試験する予定である。その後、ソレノイド型スペクトロメータにインストールし、飛跡検出器の TPC や DC とともに物理データの取得を始める。

目次

第 1 章 序論	3
1.1 LEPS2 実験	3
1.1.1 LEPS2 実験における物理目標	3
1.1.2 加速器施設：SPring-8	5
1.1.3 GeV γ ビームと LEPS2 ビームライン	5
1.1.4 LEPS2 スペクトロメータ	7
1.2 粒子識別と Barrel RPC の要求性能	11
第 2 章 2 m 長ストリップの高抵抗板検出器の開発の指針	14
2.1 高抵抗板検出器の動作原理の概要	14
2.1.1 RPC の構造と検出効率・時間分解能の関係	14
2.1.2 電子の増幅モード	16
2.1.3 信号のストリップ伝搬による分散とその抑制方法	17
2.2 先行研究	21
2.2.1 主要な実験における RPC	21
2.2.2 LEPS2 RPC 開発に関する先行研究	21
2.3 本論文の構成	23
第 3 章 信号のストリップ伝搬に関する周波数帯域の向上	25
3.1 先行研究との変更点	25
3.2 RPC ストリップの伝送係数の周波数特性の測定	25
3.2.1 ネットワークアナライザ	25
3.2.2 実験セットアップ	26
3.2.3 NWA 測定の結果	27
3.3 電子ビームを用いたテスト	27
3.3.1 実験概要とセットアップ	27
3.3.2 波形の伝搬距離依存性	30
3.3.3 解析方法	32
3.3.4 測定結果と結論	37
第 4 章 実機的设计と製作	42
4.1 RPC の内部構造の改良	42
4.2 増幅回路の磁場中での性能評価と変更点	46
4.3 ノイズ対策	47

第 5 章 実機 RPC の性能評価	49
5.1 印加電圧と Discriminator の閾値レベルの最適化	49
5.1.1 時間分解能・検出効率測定の実験セットアップ	49
5.1.2 解析方法	50
5.1.3 印加電圧の最適化と閾値レベルの最適化	50
5.2 性能評価	53
5.2.1 位置依存性	53
5.2.2 ストリップ依存性	55
5.2.3 磁場中の性能評価	55
5.2.4 ストリップ幅方向に関する入射位置不定性の影響	57
5.2.5 ストリップ長さ方向に関する入射位置不定性の影響	59
5.2.6 slewing 補正関数のビーム入射位置依存性	60
5.3 性能評価まとめ	61
第 6 章 まとめと今後の展望	64
Appendix	66
A 信号の伝搬速度と位置分解能の上限値	66

第1章 序論

本章では本研究の対象となる高抵抗板検出器 (Resistive Plate Chamber, RPC) を用いる LEPS2 実験の概要を説明する。そして LEPS2 実験に用いる RPC の要求性能について議論する。

1.1 LEPS2 実験

LEPS2 (Laser Electron Photon at SPring-8) 実験では光生成反応を測定し、様々なハドロン物理の研究を行う予定である。SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) の蓄積リングを周回する 8 GeV のエネルギーの電子にレーザーを照射し、逆コンプトン散乱で生じる高輝度、高エネルギー、高偏極度の γ 線をビームとして用いる。生成された γ 線ビームを内径 2.2m のソレノイド磁石中の標的に入射する。光生成した粒子を極角 5° – 120° を覆うソレノイド型スペクトロメータを用いて検出する (図 1.1)。以下ではこの LEPS2 実験について詳細に説明していく。

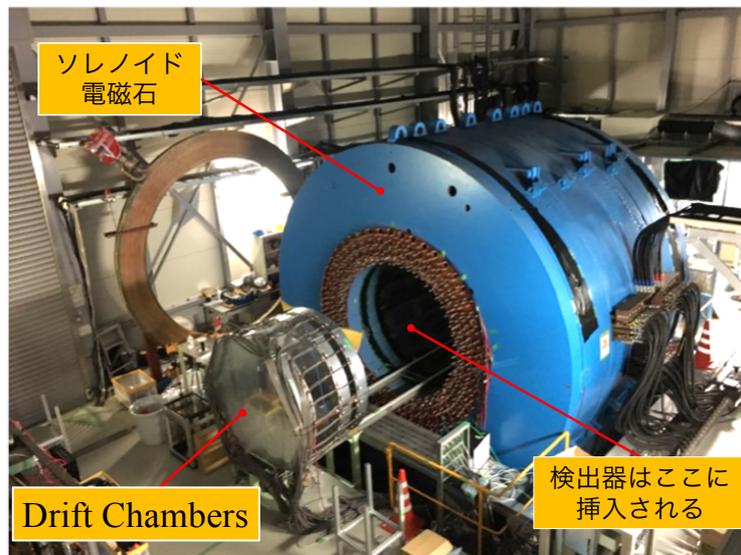


図 1.1. ビーム下流から見たソレノイド磁石。3つの DC がレールの上、ソレノイド磁石下流においてある。

1.1.1 LEPS2 実験における物理目標

LEPS2 実験ではハドロン光生成事象の測定により多くのハドロン反応を調べることが可能である。その中で主要な物理目標は Θ^+ 粒子の存否の調査である。

通常のハドロンは3つのクォーク (qqq で表す) で構成されるバリオンと、クォーク反クォーク ($q\bar{q}$) で構成されるメソンが一般的である。しかし、原理的には $q\bar{q}q\bar{q}$ のテトラクォークや $qqqq\bar{q}$ のペ

ンタクォークといったエキゾチック粒子が存在しても良い。実際に幾つかのエキゾチック粒子についてその存在が理論的に予想されてきた。さらに、これらのエキゾチック粒子は理論的な予想にとどまらず、実験でも存在が確認されている。

Θ^+ 粒子は其中で存否にまだ決着がついていないエキゾチック粒子である。初めにこの共鳴の信号を報告したのは LEPS2 実験の前実験である LEPS 実験である [1]。同グループはさらに統計量を上げた実験でも Θ^+ のピークを確認している [2]。理論的には Diakonov らのカイラルソリトン模型を用いた研究 [3] で予言されており、その質量値は $1530 \text{ MeV}/c^2$ で $15 \text{ MeV}/c^2$ 以下の狭い共鳴幅であると計算されていた。これは LEPS 実験で見つかったピーク構造と誤差内で一致する。また、LEPS は Θ^+ 粒子に対応する共鳴のストレンジネス量子数は +1 であり、その組成は $uudds$ であると報告しており、これも理論予想と合致する。

KEK や CLAS などの幾つかの実験施設によって Θ^+ 粒子が本当に存在するか、追実験が行われた。しかし、存在を支持する結果 [4][5] と否定する結果 [6][7] の両方が報告されている。特に CLAS の実験と LEPS の実験はいずれも同じ光生成反応を見ながら、異なる結果を報告している。この二つの実験の主な差異は、反応で生じる粒子を測定する検出器の覆う立体角である。LEPS 実験では前方範囲 (極角 20° 以下) を覆うのに対し、CLAS 実験では後方領域を覆っている (図 1.2)。

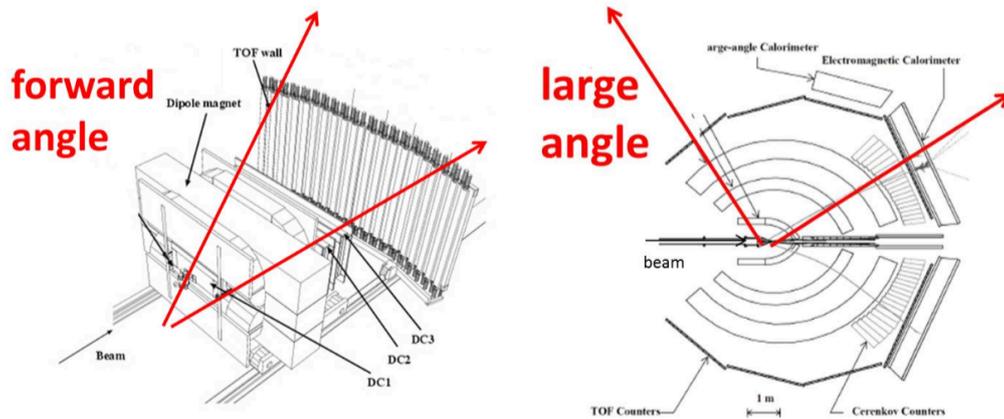


図 1.2. 検出器群が覆う立体角の違い。左図が LEPS、右図が CLAS の検出器群である。

LEPS2 実験では極角 5° – 120° の広範囲を覆うスペクトロメータを用いて Θ^+ 生成反応の測定を行う。この時に Θ^+ 粒子の生成断面積が大きな散乱角依存性が確認できれば、LEPS と CLAS の実験結果を統一的に理解することが可能である。LEPS2 実験では γ 線を液体重水素標的に入射し、 $\gamma p \rightarrow K^- \Theta^+$ 反応を測定する。この時、 Θ^+ は $\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ と崩壊するが、この崩壊後の粒子をすべて検出し、 Θ^+ 粒子の不変質量を再構築する。この反応測定には、LEPS や CLAS の測定における ϕ 中間子生成反応のバックグラウンドがなく¹、また、崩壊後の粒子をすべて観測できるため、標的のフェルミ運動による不変質量分布の不定性がないといった利点がある。この測定を実現するには Θ^+ 粒子の崩壊後の粒子を同定する必要がある。この役割を担うのが RPC である。

¹LEPS と CLAS で測定された反応 $\gamma d \rightarrow pK^+ K^- n$ には ϕ 中間子生成反応 $\gamma d \rightarrow pn\phi \rightarrow pK^+ K^- n$ のバックグラウンドが混入する。

1.1.2 加速器施設：SPring-8

SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) は兵庫県佐用郡佐用町に位置する大型加速器施設である [8]。ここではエネルギー 8 GeV の電子による放射光を利用した実験が数多く行われている。図 1.3 に SPring-8 の外観図を示す。線形加速器によって 1 GeV に加速された電子を、シンクロトロンを用いてさらに加速させる。8 GeV のエネルギーまで到達した電子は、蓄積リングへと供給される。蓄積リングには常に約 100 mA の電子が周回している。



図 1.3. SPring-8 の蓄積リングの概念図及び航空写真 [8]。

1.1.3 GeV γ ビームと LEPS2 ビームライン

LEPS2 実験では逆コンプトン散乱を利用して、高輝度、高エネルギー、高偏極度の γ 線ビームを生成する。図 1.4 のように、蓄積リングを周回する電子にレーザーを入射し、散乱した γ 線をビームとして用いる。LEPS2 実験では 4 台のレーザーを用いて、およそ 5 Mcps の計数率の γ 線ビームを生成する。

逆コンプトン散乱を用いる利点の一つは高エネルギーの γ 線を安定して生成できる点である。逆コンプトン散乱のエネルギーは次式で与えられる：

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma(1 - \beta \cos \theta_1)}{(1 - \beta \cos \theta_2) + \frac{E_\gamma}{E_e}(1 - \cos(\theta_1 - \theta_2))} \quad (1.1)$$

ここで β は電子の速度を表す。他のパラメタは図 1.4 に示してある。LEPS2 実験では波長 266 nm のレーザーを用いることで、最大エネルギー 2.9 GeV の γ 線ビームを照射可能である。実験では反跳した電子の位置を Tagger 検出器で測定し、 γ 線ビームのエネルギーを決定する。

二つ目の利点は γ 線ビームの偏極の向きを操作できる点である。例えば、t チャンネル反応の交換粒子のパリティを選択できる [13] といったより詳細な解析が可能になる。LEPS2 実験では 1.5 GeV を超えるエネルギーにおいて、偏極率 95% 以上のビームを生成する。

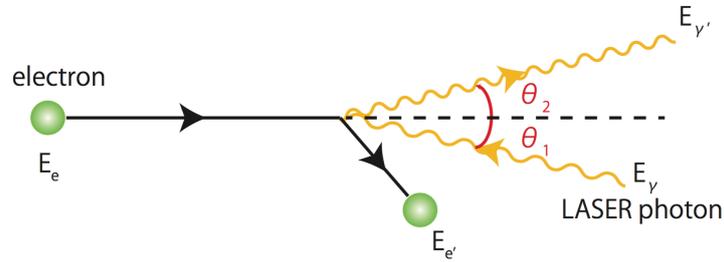


図 1.4. 逆コンプトン散乱の概念図。[9] より引用。

LEPS2 ビームラインの外観を図 1.5 に示す。蓄積リングにある 30 m の直長ラインにおいて逆コンプトン散乱を起こす。直長ラインには磁石がなく、中心部では電子の角度発散が $14 \mu\text{rad}$ と非常に小さく抑えられている。そのため、高エネルギー、高輝度を保ちながら、指向性の高いビームを生成できる。散乱点から 150 m 離れた場所に検出器を設置しても、ビームの拡がりは σ で $\pm 6 \text{ mm}$ である。結果、蓄積リング棟外でのビーム照射実験が実現できることになり、大立体角を覆う大型スペクトロメータの導入が可能になった。

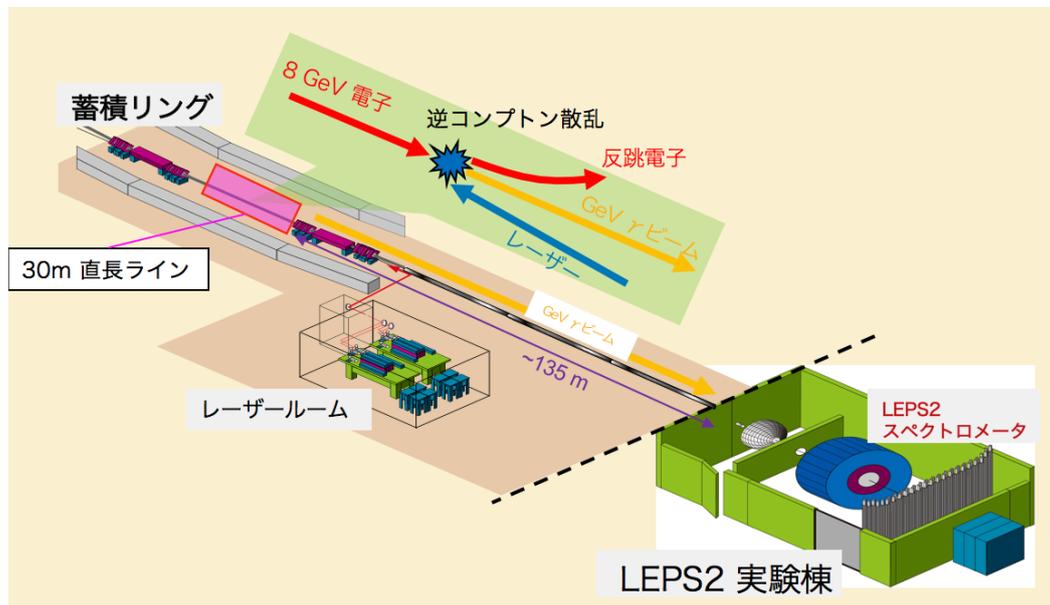


図 1.5. ビームラインの外観図。

1.1.4 LEPS2 スペクトロメータ

図 1.6 に LEPS2 スペクトロメータの外観を示す。中心磁場 0.9 T のソレノイド電磁石を使用する。このソレノイド磁石の内径は 2.2 m、長さは 2.7 m である。内部にはトリガーに用いる Start Counter (SC)、飛跡検出器である Time Projection Chamber (TPC) と Drift Chamber (DC)、粒子識別に用いる Aerogel Cherenkov Counter (AC)、飛行時間検出器 Barrel Resistive Plate Chamber (Barrel RPC)、また、電磁カロリメータの Barrel γ Detector を設置する。標的は SC 内部に、この SC は TPC 内部に設置する。ソレノイド磁石外部には Forward RPC を設置する。以下ではそれぞれの検出器について説明する。

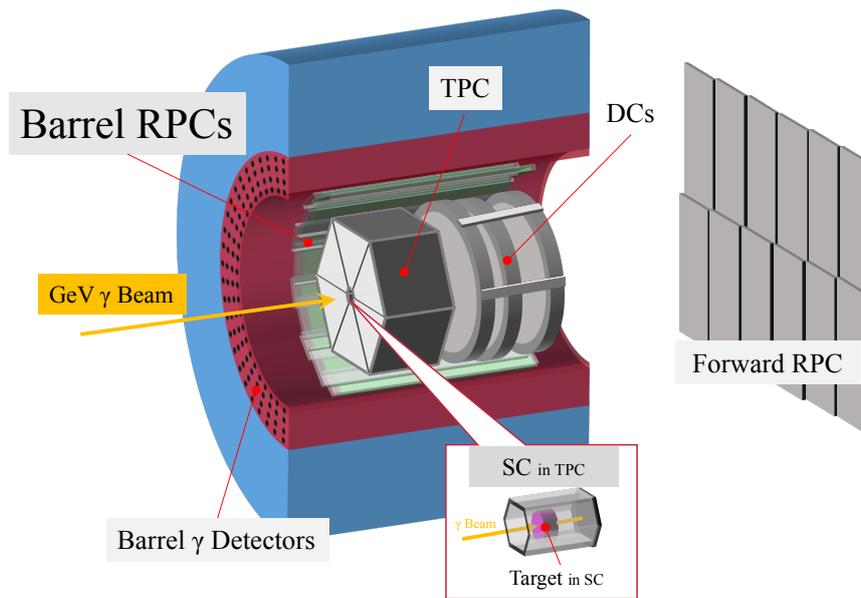


図 1.6. LEPS2 スペクトロメータの概観図。

Start Counter (SC)

図 1.7 は SC の概要図である。SC は正六角形の Forward SC と六角柱の形状の Side SC の 2 つで構成される。いずれも厚み 3 mm のプラスチックシンチレータである。シンチレータの光は、磁場中で可動な MPPC で検出する。標的とともに TPC 内部に挿入する。この時 SC が散乱角 0° – 120° を覆うように、標的を設置する。データ取得システムのトリガーとしての役割を持つ。

Time Projection Chamber (TPC)

TPC は実験室系で極角 50° – 115° に放出された荷電粒子の飛跡を測定するガス検出器である (図 1.8)。TPC はソレノイド磁石中に設置される。磁場中における荷電粒子の飛跡の曲率から運動量を決定する。

図 1.9 を用いて TPC の動作原理を示す。TPC を荷電粒子が通過すると、内部のガスが飛跡に沿ってイオン化される。TPC の内側には電場がかかっており、イオン化で生じた電子はこの電場に沿って移動する。センスワイヤ近くでは電場が強く、電子はアバランシェ増幅を起こしながらセンスワイヤに電荷を落とす。この時、同時にカソードパッドに信号が誘起される。電荷が落ちたセンスワイヤの位置と、カソードパッドにおける誘起電荷分布から xy 平面での位置を求めることができる。

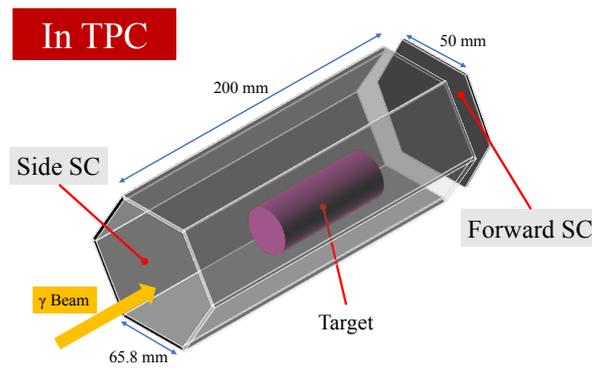


図 1.7. LEPS2 SC の概観図。SC は正六角形の形の Forward SC と六角柱の形の Side SC の 2 つで構成される。いずれも厚み 3 mm のプラスチックシンチレータである。TPC 内部に設置する。

また、電子の移動速度と移動時間から z 軸の位置情報を得る。こうして、散乱粒子の飛跡が決定できる。

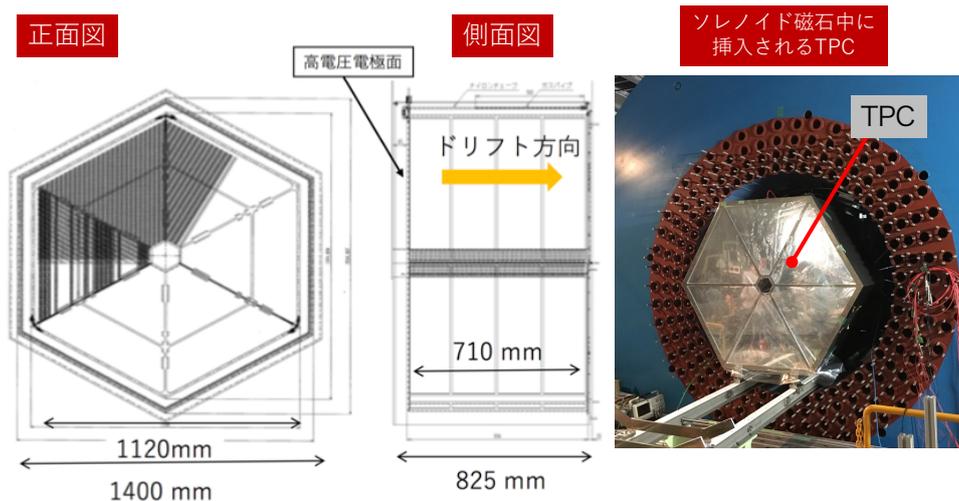


図 1.8. TPC の概略図と実際の写真。[10] より引用。

Drift Chamber (DC)

DC は荷電粒子の飛跡に関して二次元の位置情報を測定するガス検出器である。LEPS 2 実験では 3 つの DC を用いることで、粒子の三次元的な飛跡を求める。TPC のビーム下流に設置し、極角 30° 以下に前方散乱する粒子を測定する。DC 内部には内径 1280 mm の六角形のワイヤー面が 6 層あり、2 層ごとに 60° 傾いた方向にワイヤーが張られている (図 1.10 参照)。粒子が DC を通過するとイオン化で生じた電子が近くのワイヤーまで移動し、ワイヤーに電流を誘起する。そのワイヤーの位置と電子の移動時間から、飛跡のビーム垂直面での位置を決定する。

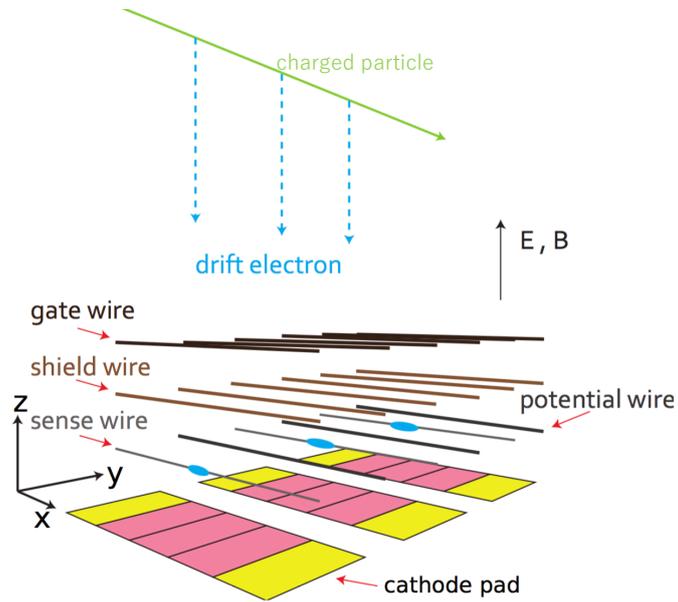


図 1.9. TPC の動作原理。[9] より引用。

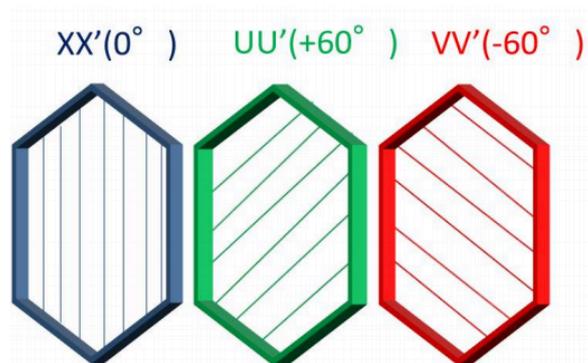


図 1.10. LEPS2 DC のワイヤー層の概念図。ワイヤー層がそれぞれ向きを変えて重なっている。[11] より引用。

Forward / Barrel Resistive Plate Chamber (Forward / Barrel RPC)

標的から前方（後方）に飛来する荷電粒子の飛行時間を測定するガス検出器が Forward (Barrel) RPC である。Forward RPC はソレノイド磁石下流に、Barrel RPC はソレノイド磁石内部に設置する。Barrel RPC と標的の位置関係を図 1.11 に示す。前方に飛来する粒子は Forward RPC で、極角 30° – 120° に飛来する粒子は Barrel RPC で測定する。標的からの最短距離はそれぞれ約 4 m と 84 cm である。RPC と加速器からの RF 信号で測定する飛行時間と、TPC、DC で測定した運動量を合わせて、散乱粒子が π 中間子、 K 中間子、陽子のいずれであるかを同定する。ただし、高運動量の π 中間子と K 中間子の識別は次で説明する AC で行う。この Barrel RPC が本修士論文の研究対象である。

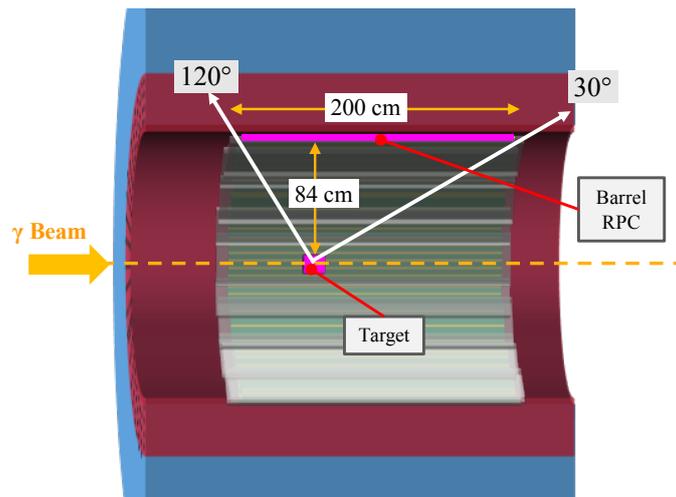


図 1.11. Barrel RPC と標的の位置関係。

Aerogel Cherenkov Counter (AC)

LEPS2 実験における AC は閾値型であり、運動量が $1 \text{ GeV}/c$ 以上の π 中間子と K 中間子を区別するために用いる。AC はシリカエアロジェルを輻射体として、チェレンコフ光を利用する検出器である。散乱粒子の典型的な運動量に対し、適切な屈折率のシリカエアロジェルを使用していて、チェレンコフ光発生の有無で粒子を区別する。散乱角度で 30° – 40° と 40° – 50° の位置に、それぞれ屈折率 1.03 と 1.05 の輻射体の AC を設置する予定である [14]。

Barrel γ Detector

Barrel γ Detector は反応で生じた γ 線のエネルギーと入射位置を測定する電磁カロリメータである。5 mm のシンチレータと 1 mm の鉛が 16–21 層重なった形状で、その両端にライトガイドと光電子増倍管がついている（図 1.12）。Barrel γ Detector は 1 層 48 個、全部で 4 層で構成される。入射される γ 線は鉛と反応し、対生成した電子陽電子がシンチレータを光らせる。この光を光電子増倍管で検出する。図 1.6 の赤い部分に見える穴がこの検出器の光電子増倍管が挿入される場所である。

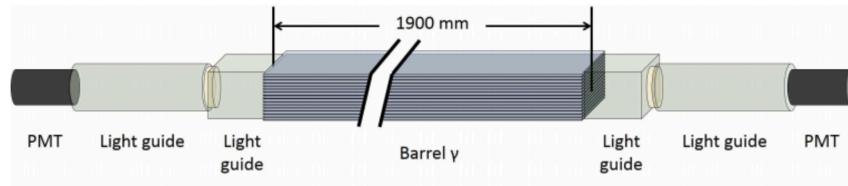


図 1.12. Barrel γ Detector の概念図。シンチレータと鉛が層になっている。
[15] より引用。

1.2 粒子識別と Barrel RPC の要求性能

強い相互作用を通して崩壊可能な粒子の寿命はおよそ 10^{-23} s と非常に短いため、その粒子を直接検出することはできない。LEPS2 スペクトロメータでは強い相互作用で崩壊できない長い寿命の荷電 π 中間子、荷電 K 中間子、陽子などを検出する。1 GeV/c 以上の運動量を持つ荷電 π 中間子と荷電 K 中間子は AC によって区別し、それ以外の荷電 π 中間子、荷電 K 中間子、陽子の識別は RPC を用いて行う。この節では LEPS2 実験における粒子識別の方法と RPC の要求性能について述べる。

本実験では、RPC を用いた散乱粒子の飛行時間の測定から、 K 中間子、陽子を区別する (図 1.13 参照)。同じ運動量の粒子の飛行時間は、質量によって異なる。これを利用して飛行時間の差異から粒子を判別することができる。しかし、測定した飛行時間に不定性がある場合、粒子の同定に誤りが生じる可能性がある。誤認率の少ない粒子同定のためには測定における時間分解能 σ が、異なる粒子の飛行時間差 ΔToF に比べて、十分に小さい必要がある。

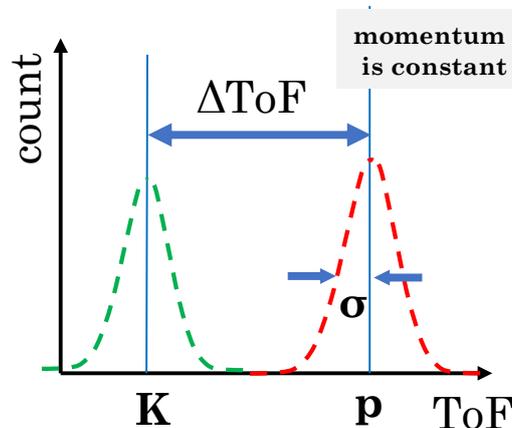


図 1.13. 飛行時間による粒子の識別の概念図。RPC の時間分解能が十分に小さければ、粒子同定の誤認率を減らせる。LEPS2 実験では $\Delta\text{ToF} > 6\sigma$ の時間分解能を RPC の性能目標にする

LEPS2 実験では飛行時間を加速器の RF 信号と RPC の出力信号の時間差から決める。飛行時間測定のスタートタイミングは RF 信号から非常に精度よく推定することができ、標準偏差で 14–18 ps である [19]。すなわち、飛行時間の分解能は RPC の時間分解能によって決まると考えて良い。LEPS2 実験では図 1.13 のように異なる粒子の飛行時間差を ΔToF として、 $6\sigma < \Delta\text{ToF}$ の精度で粒子識別

することを目標とする（以下ではこれを 3σ の識別能力を持つと表現する²）。この時の RPC の要求性能について考える。

一般に、飛行時間を用いた粒子識別は、その粒子の運動量が高いほど困難が生じる。なぜなら、高運動量の粒子では飛行時間が短く、結果 ΔToF が小さくなるからである。そこで、運動量が最大となる場合について考える。陽子標的の時、 π 中間子、 K 中間子、陽子の運動量が最も大きくなる反応はそれぞれ

$$\gamma p \rightarrow n\pi^+ \quad (1.2)$$

$$\gamma p \rightarrow K^+\Lambda \quad (1.3)$$

$$\gamma p \rightarrow p\pi^0 \quad (1.4)$$

である。入射 γ 線の最大エネルギー $E_\gamma = 2.9 \text{ GeV}$ での運動学から、散乱角と最大運動量の関係がわかる。標的静止系における散乱角と最大運動量の関係を図 1.14 に示す。紫線（左図）、赤線（両図）、マゼンタ色の線（右図）がそれぞれ π 中間子、 K 中間子、陽子に対応している。また、同図の緑（青）の実線は飛行時間測定的时间分解能が 75 ps の場合に、 3σ の識別能力で粒子を同定できる運動量の最大値を表す。すなわち、散乱粒子がこの線以下の運動量の時、粒子識別の誤認率は 0.2% 以下である。右図は陽子と K 中間子の区別に、左図は π 中間子と K 中間子の区別に関係する図である。

図 1.14 の右図では、 75 ps の時間分解能に対応する実線は K 中間子の最大運動量を表す赤線の上に位置している。この赤線を超える K 中間子が運動学的に存在しないことを考慮すれば、 75 ps の時間分解能で 3σ 以上の識別能力で K 中間子と陽子とが区別可能であることがわかる。左図を見ると、 75 ps の時間分解能を持つ時、極角 65° 以上に散乱する π 中間子と K 中間子については十分に区別可能であることがわかる。また、両図にあるオレンジの実線は反応 $\gamma n \rightarrow K^-\Theta^+$ で散乱する K 中間子の運動量を表しており、この反応の運動量領域では π 中間子と K 中間子についても十分に区別が可能であることを示している。高運動量の π と K 中間子を RPC で分けることは困難であるため、これは AC で識別する。

したがって、LEPS2 実験では回路系などの時間分解能を含めて、 75 ps 以下の時間分解能の達成を RPC の開発目標と定めることにする。

²これを 6σ の識別能力を持つと表現する場合もあるが、本論文ではこのように定義する

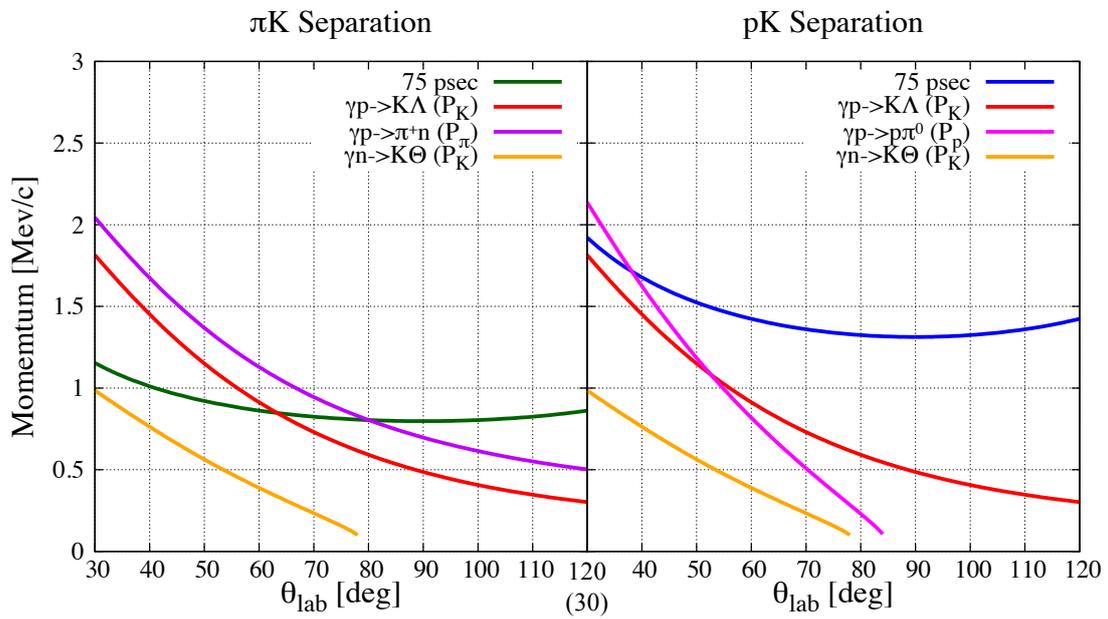


図 1.14. 左図は π/K 、右図は p/K の区別に関する図。紫線、赤線、マゼンタ色の線はそれぞれ π 、 K 、 p の標的静止系における最大運動量と散乱角のグラフである。緑（青）の実線は RPC の時間分解能が 75 ps の場合に、 3σ の精度で粒子識別できる運動量の最大値を表す。

第2章 2 m長ストリップの高抵抗板検出器の開発の指針

2.1 高抵抗板検出器の動作原理の概要

RPCの構造の一例を図2.1に示す¹。RPCは図にあるように、信号読み出しストリップ、絶縁体、HV電極、高抵抗板（例えばガラス）を重ねた構造を持つ。ガラスの間にはスペーサーを挿入し、数百 μm 程度の空間ができています。本論文ではこの空間を「ギャップ」と呼ぶ。

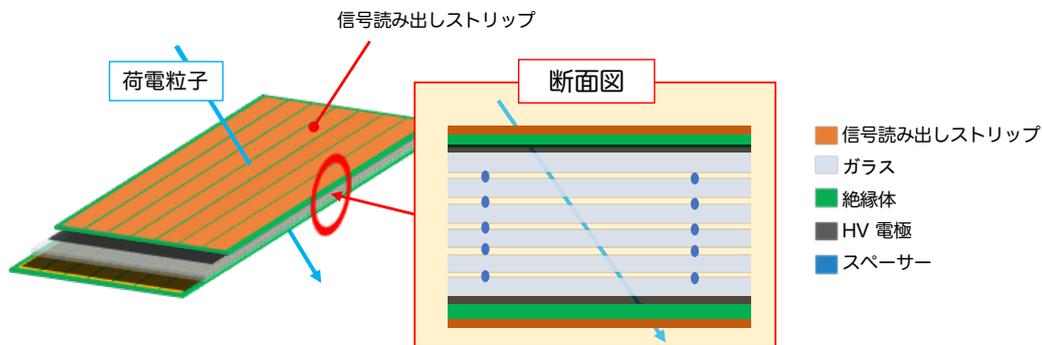


図 2.1. RPC の概念図。

図2.2を用いて、RPCの動作原理の概要を説明する。ギャップ間にはR134a（代替フロン、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ ）を主体としたガス²を充満させる。またRPCのHV電極にそれぞれ、正の電圧と負の電圧を印加する。このとき、電極間には電場が生じる。荷電粒子がRPCを通過すると、ギャップ間のガスがイオン化される。生じた電子は電場に沿って加速され、アバランシェ増幅を起こす。ギャップ間に電流が生じると、この電流は読み出しストリップ（導体）に電流を誘起する。誘起された信号は読み出しストリップに沿って伝搬していく。伝搬先には信号増幅回路を取り付けられていて、測定に十分な大きさに信号を増幅する。この信号から荷電粒子がRPCを通過した時間がわかる。

2.1.1 RPCの構造と検出効率・時間分解能の関係

現在使われている多くのRPCは多層構造を持つ。これはギャップ数 N_{gap} が多いと検出効率・時間分解能(σ_t)が良くなるからである。本研究の対象となるRPCも多層構造を有する。以下ではRPC

¹このように複数のギャップを持つ多層構造のRPCを特に multigap RPC (MRPC) と呼ぶ。本修士論文で研究するのもこのMRPCである。

²本修士論文のRPCはR134a:SF₆:C₄H₁₀が90:5:5の混合ガスを用いている。SF₆とC₄H₁₀は過剰な電子増幅を防ぐために使われる。例えば、ALICE[29]やSTAR[30]では同様の混合比のガスを用いている。またHADES[32]では98.5:1:0.5の混合比のガスを用いている。

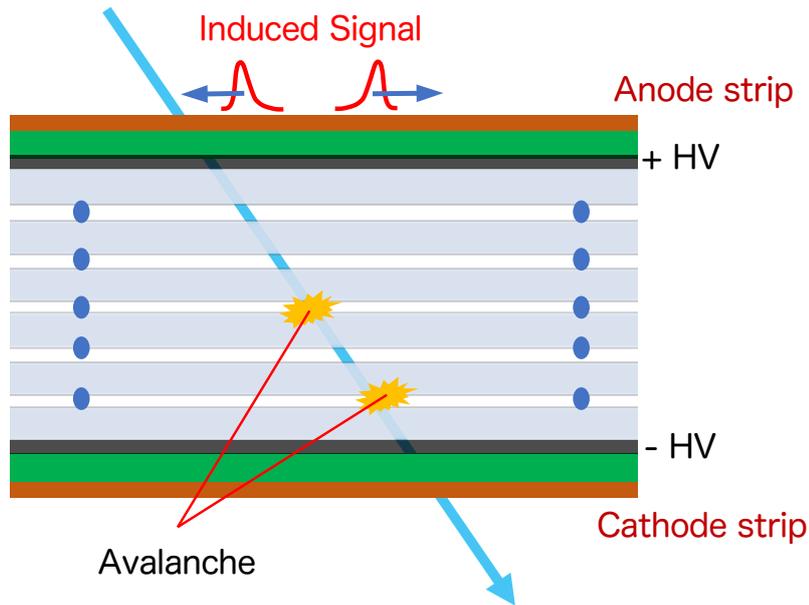


図 2.2. RPC の動作原理の概念図。

の構造と性能の関係とその応用例を紹介する。

[16][17]によれば、RPCの性能は近似的に

$$\text{RPC 全体の検出効率} > 1 - (1 - (1 \text{ ギャップの検出効率}))^{N_{\text{gap}}} \quad (2.1)$$

$$\sigma_t(E) = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{gap}}}} \sqrt{\frac{\lambda}{g} \frac{M}{(\alpha(E) - \eta(E))v_e(E)}} \quad (2.2)$$

で表現できる³。それぞれの変数は

σ_t : ストリップに信号が誘起するまでの時間の標準偏差

λ : 電場により移動する電子群が、ガス分子をイオン化するまでの平均自由行程

g : ギャップ幅, E : ギャップ中の電場, α : 第一タウンゼント係数, η : 電子吸収係数

である。また M は荷電粒子の通過によるガスの第一イオン化と、アバランシェ増幅の過程における統計的ばらつきに関係する量であり、たかだか1のオーダーである。式(2.1)の $>$ をつけた理由は、例えば二つのギャップでアバランシェ増幅が生じ、単体では測定できない小さな信号が足し合わさることで、測定可能な大きさになる状況を想定しているためである。

二つの表式から明らかなように、ギャップ数が多いと検出効率・時間分解能がともに良くなることがわかる。また式(2.2)はギャップ幅が狭いほうが時間分解能が良くなることを示す。実際にこれらの振る舞いは、先行研究[19]の実験結果と合致する。

一方で検出効率はギャップ幅を狭めると悪くなることがわかっている。例えば1ギャップのRPCの場合、初めにイオン化する原子・分子の総数がポアソン分布に従うと仮定すると、ギャップ幅が

³時間分解能に関するより正確な記述は [18] を参照。

狭まるにつれて最大検出効率は次式のように減少する [16] :

$$1 \text{ ギャップの最大検出効率} = 1 - e^{-g/\lambda_0} \quad (2.3)$$

ここで λ_0 は RPC を通過する粒子のイオン化衝突に対する平均自由行程である⁴。

したがって現在使われている RPC はギャップを狭く、数を多くしたものが多い。ギャップ数を 4 や 6 層に増やすことで 300 μm 以下のギャップ幅にもかかわらず 100% 近くの検出効率を得られる。例えば ALICE 実験 [20][21] ではギャップ数を増やすため、シングルスタック構造⁵ からダブルスタック構造に変更した (図 2.3)。この時、検出効率は 99% 以下からほぼ 100% へ、時間分解能は 60-80 ps から 50 ps へと変わりいずれの性能も改善している。今回用いる RPC もダブルスタック型であり、合計ギャップ数は 10、ギャップ幅 260 μm である。この形状は先行研究 [19] によって最適化されたものである。

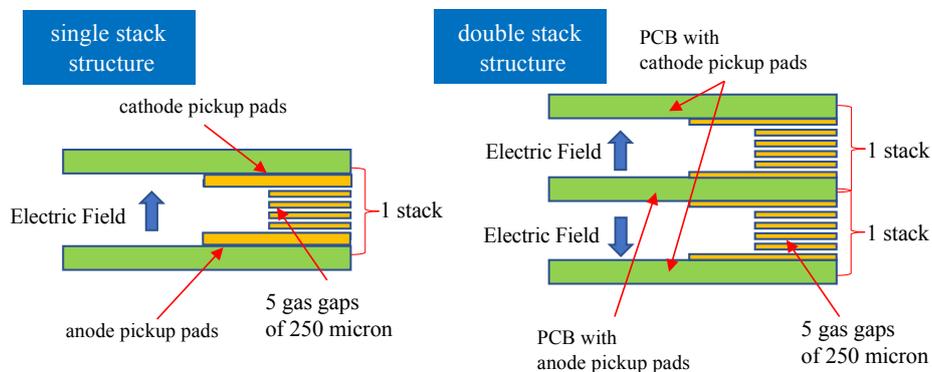


図 2.3. 左がシングルスタック構造 [20] で右がダブルスタック構造 [21]。

2.1.2 電子の増幅モード

RPC は二つの増幅モードのいずれかで使用する方法が一般的である；それがアバランシェモード (avalanche mode) とストリーマモード (streamer mode) である。ここではこの二つのモードの特徴について述べる。

アバランシェモード

アバランシェモードでは、単純なアバランシェ増幅を利用する。このモードでは後述するストリーマモードの欠点である係数率耐性が改善されている。ガスに電気陰性度が高い代替フロン $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ や SF_6 に iso- C_2H_2 といいた紫外線を吸収するクエンチャー (quencher) を混合したものをを用いることで、電子増幅の過剰な発達を防いでいる。これにより 100 -1000 Hz/cm^2 の係数率で使用が可能になった。アバランシェモードでは時間分解能が非常に良く、典型的には 100 ps 以下の性能が得られる。ただし、このモードの信号の大きさはストリーマモードと比べ 1/100 以下と小さく、増幅回

⁴検出可能なほど大きい電流をストリップに誘起するには、十分にアバランシェ増幅されてなければならないため、実際の検出効率は式 (2.3) よりも小さくなる。

⁵詳しくは [19] を参照。

路が必要になる。このためノイズ対策の必要性が出てくる。

現在よく使われるのはこのアバランシェモードである。本論分で扱う RPC もこのモードで使用する。

ストリーマモード

電子増幅が十分に大きくなると、光子が電子群の発達に影響を及ぼす。電場に沿って移動する電子群との衝突によって原子・分子が励起し、紫外線が放出される。その紫外線がアバランシェ増幅が生じている領域の外の原子・分子をイオン化し、そこでもアバランシェ増幅を発生させる。この過程は通常のアバランシェ増幅とは区別して考え、ストリーマモードと呼ぶ。RPC の歴史的にはアバランシェモードよりも先に登場しており、観測結果を適切に説明する幾つかのモデルが提案されている。

ストリーマモードには、増幅による電子数が多いため、読み出しストリップに誘起される電荷量が 10-1000 pC と大きく、増幅回路なしで信号を扱えるという利点がある。一方電子群の電荷が大きいため、定常状態に戻るまでに時間がかかり、係数率耐性に乏しいという欠点がある。例えば KEK の Belle 実験 [22] や SLAC の Babar 実験 [23] では 1 Hz/cm² 以下で使用されている。また十分な電荷量に達する時間にばらつきがあるため、時間分解能は 1 ns である。

2.1.3 信号のストリップ伝搬による分散とその抑制方法

式 (2.2) はストリップに誘起するまでの時間に対する分解能であった。しかし実際測定するのは、ストリップを伝搬した後の信号である。このため、RPC の出力信号について議論するときはストリップ伝搬の影響を考えなくてはならない。この影響は長いストリップを用いたときに顕著である。実際信号がストリップを伝搬した距離が長くなると、時間分解能が悪化することがわかっている (次節を参照)。以下では参考文献 [24] に基づいて、RPC に関する信号の伝搬の原理を説明する。この時、複数のストリップがある時、信号の損失がないにもかかわらず、信号が分散してしまうことを示す。またこの分散を抑制する方法について述べる。

モード分散

N 個のストリップ (導体) が y 軸方向に伸びている状況を考える (図 2.4)。 N 行 N 列の行列 \hat{C} ,

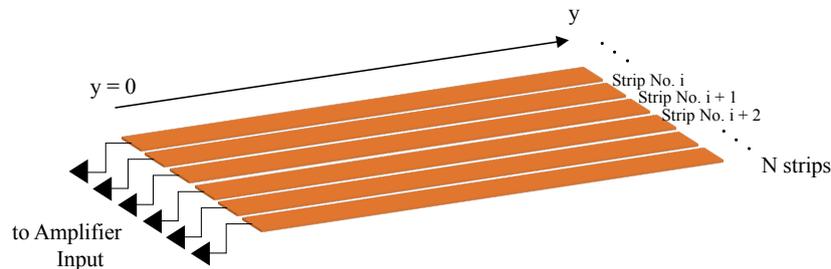


図 2.4. 信号が伝搬するストリップの系

$\hat{\mathbf{L}}$ をそれぞれ静電容量行列、インダクタンス行列とする。ストリップ伝搬に関して信号の損失を無視すると（抵抗が0）、次の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial z}\vec{V}(y,t) &= -\hat{\mathbf{L}}\frac{\partial}{\partial t}\vec{I}(y,t) \\ \frac{\partial}{\partial z}\vec{I}(y,t) &= -\hat{\mathbf{C}}\frac{\partial}{\partial t}\vec{V}(y,t)\end{aligned}\quad (2.4)$$

ここで $\vec{I}(y,t) = (I_1(y,t), \dots, I_i(y,t), \dots, I_N(y,t))^T$ 及び $\vec{V}(y,t) = (V_1(y,t), \dots, V_i(y,t), \dots, V_N(y,t))^T$ は i 番目のストリップにおける電流、電圧を表す。これより以下の2階微分方程式を得る：

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dy^2}\vec{I}(y,t) &= \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{L}}\frac{d^2}{dt^2}\vec{I}(y,t) \\ \frac{d^2}{dy^2}\vec{V}(y,t) &= \hat{\mathbf{L}}\hat{\mathbf{C}}\frac{d^2}{dt^2}\vec{V}(y,t)\end{aligned}\quad (2.5)$$

式(2.5)の一般解は任意の $2N$ 個の関数 I_m^+ , I_m^- を用いて次のようにかける。

$$\begin{aligned}\vec{I}(y,t) &= \hat{\mathbf{T}}\left(\begin{pmatrix} I_1^+(t-y/v_1) \\ I_2^+(t-y/v_2) \\ \vdots \\ I_N^+(t-y/v_N) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_1^-(t+y/v_1) \\ I_2^-(t+y/v_2) \\ \vdots \\ I_N^-(t+y/v_N) \end{pmatrix}\right) \\ \vec{V}(y,t) &= \hat{\mathbf{Z}}_c\hat{\mathbf{T}}\left(\begin{pmatrix} I_1^+(t-y/v_1) \\ I_2^+(t-y/v_2) \\ \vdots \\ I_N^+(t-y/v_N) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_1^-(t+y/v_1) \\ I_2^-(t+y/v_2) \\ \vdots \\ I_N^-(t+y/v_N) \end{pmatrix}\right)\end{aligned}\quad (2.6)$$

ここで $\hat{\mathbf{T}}$ は $\hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{L}}$ の正規化された固有ベクトルを含む行列を表している：

$$\hat{\mathbf{T}}^{-1}\hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{L}}\hat{\mathbf{T}} = \hat{\mathbf{v}}^{-2} \quad \text{ただし} \quad \hat{\mathbf{v}}^{-2} = \begin{pmatrix} 1/v_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1/v_N^2 \end{pmatrix}\quad (2.7)$$

$1/v_i^2$ は対応する固有値である。また $\hat{\mathbf{Z}}_c$ は特性インピーダンス行列と言われるもので

$$\hat{\mathbf{Z}}_c = \sqrt{\hat{\mathbf{L}}/\hat{\mathbf{C}}} = \hat{\mathbf{L}}\hat{\mathbf{T}}\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{T}}^{-1} \quad \text{ただし} \quad \hat{\mathbf{v}} = \begin{pmatrix} v_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & v_N \end{pmatrix}\quad (2.8)$$

である。さて n 番目のストリップの $y = y_0$ の位置において $I^0(t)$ の電流が誘起されているという境界条件を課す。この時の解は：

$$\begin{aligned} \vec{I}(y, t) &= \frac{1}{2} \hat{\mathbf{T}} \left(\begin{pmatrix} (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{1n} I^0(t - y/v_1) \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{2n} I^0(t - y/v_2) \\ \vdots \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{Nn} I^0(t - y/v_N) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{1n} I^0(t + y/v_1) \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{2n} I^0(t + y/v_2) \\ \vdots \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{Nn} I^0(t + y/v_N) \end{pmatrix} \right) \\ \vec{V}(y, t) &= \hat{\mathbf{Z}}_c \hat{\mathbf{T}} \left(\begin{pmatrix} (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{1n} I^0(t - y/v_1) \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{2n} I^0(t - y/v_2) \\ \vdots \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{Nn} I^0(t - y/v_N) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{1n} I^0(t + y/v_1) \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{2n} I^0(t + y/v_2) \\ \vdots \\ (\hat{\mathbf{T}}^{-1})_{Nn} I^0(t + y/v_N) \end{pmatrix} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

これを違う形に書き直す：

$$\vec{I}(y, t) = \vec{I}^+(y, t) - \vec{I}^-(y, t) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}(y, t) &= \hat{\mathbf{Z}}_c (\vec{I}^+(y, t) + \vec{I}^-(y, t)) \\ &= \vec{V}^+(y, t) + \vec{V}^-(y, t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

これらの式は境界条件 $\vec{I}^+(y_0, t) + \vec{I}^-(y_0, t) = (0, \dots, I^0(t), \dots, 0)^T$ を確かに満たす。

この式は信号が y_0 を中心として y 方向に対称に伝搬することを示している。さらに重要な結論はストリップを伝搬する信号は、 N 種類の速度の信号の重ね合わせであるということである。すなわち、ストリップを伝搬する信号は信号の損失と関係なく分散してしまう。これをモード分散 (modal dispersion) と呼ぶ。

モード分散の抑制方法

上で見たように、信号はストリップを伝搬の過程で分散してしまう。分散すると信号の立ち上がり時間が遅くなるため、時間分解能が悪化することが予想される。すなわちモード分散を抑制できれば、時間分解能が良くなる可能性がある。

文献 [25] ではモード分散の抑制方法について議論している。ここではこの抑制方法の原理を説明する。簡単の為、ストリップが2つの系を考える。図 2.5 は RPC の断面図である。二つのストリップが図の正面方向に伸びており、信号も正面方向に伝搬する。図 (a) は通常の RPC の系を想定しており、ガラスとギャップがある。この図ではギャップは一つだが、複数のギャップがあっても良い。一方図 (b) はストリップなどの位置は図 (a) の系と同じだが、ガラスがない場合の系である。ストリップ間と、ストリップとグラウンドの間にはそれぞれ C_m と C_g の容量性カップリングがあるとす。ガラスがない場合の系ではそれぞれを C'_m と C'_g と表現する。

この時、図 (a) の系の静電容量行列 $\hat{\mathbf{C}}$ は次の式で定義される：

$$\hat{\mathbf{C}} = \begin{pmatrix} C_0 & -C_m \\ -C_m & C_0 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

ここで $C_0 = C_m + C_g$ である。またすべての物質の比透磁率が1であるという近似の元では、イン

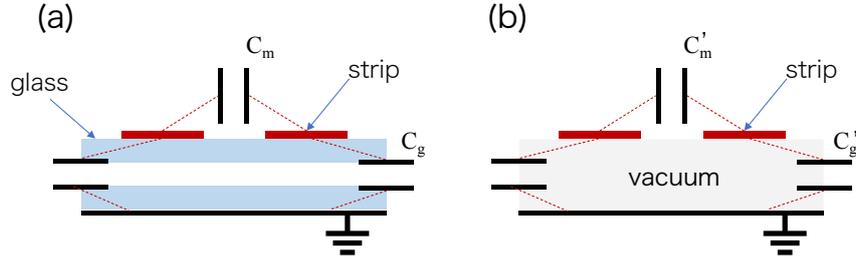


図 2.5. 2つのストリップの簡単な系。ストリップの間には C_m 、ストリップとグラウンドの間には C_g の容量性カップリングがあるとする。図 (a) のガラスがある通常の RPC を想定した系、図 (b) はガラスがないときの系を表す。

ダクタンس行列は次式のように表せる [36] :

$$\hat{\mathbf{L}} = \frac{1}{c^2} \hat{\mathbf{C}}'^{-1} \quad (2.13)$$

ここで c は光速である。また $\hat{\mathbf{C}}'$ は図 2.5 (b) の系の静電容量行列に対応する。この時に $C_m/C_0 \ll 1$ と仮定して、式 (2.7) を解くと

$$v_{\text{mean}} \approx \sqrt{\frac{C'_0}{C_0} c}, \quad \frac{\Delta v}{v_{\text{mean}}} \approx \frac{C_m}{C_0} - \frac{C'_m}{C'_0} \quad (2.14)$$

となる。 v_{mean} は異なるモードの信号の伝搬速度の平均、 Δv は伝搬速度の差である。また特性インピーダンス行列 $\hat{\mathbf{Z}}_C$ の対角要素を Z_C 、非対角要素を Z_m とすると

$$Z_C \approx \frac{1}{c\sqrt{C'_0 C_0}}, \quad \frac{Z_m}{Z_C} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{C_m}{C_0} + \frac{C'_m}{C'_0} \right) \quad (2.15)$$

である。もしモード分散がないときは、すなわち $\Delta v = 0$ のときは、(2.15) の右式の比 Z_m/Z_C が、伝搬する信号とクロストークした信号の電圧比を表す [24]。しかしモード分散がある場合は、クロストーク及び信号伝搬の振る舞いに関してモード分散の影響は大きく、(2.14) が重要な役割を果たす。式 (2.13) を見ると $\Delta v/v_{\text{mean}} = 0$ の RPC では、 $C_m/C_0 = L_m/L_0$ の対称性が成り立っていることがわかる。この対称性を回復させることをカップリングの補正 (Compensate) という [25]。今まで2つのストリップの系について考えてきたが3つ以上のストリップに関しても、 $C_m/C_0 = L_m/L_0$ の条件が成り立てば、モード分散はなくなる⁶。

カップリングの補正により、モード分散が抑制される。カップリングの補正を行う簡単な方法は、ストリップ間の容量カップリング C_m を変更することである⁷。これはストリップの上の物質の誘

⁶ここで C_m は隣り合うストリップ間の容量性カップリングである。隣り合わないストリップの間には、容量性カップリングがないという仮定のもとで、この結論は得られている。

⁷ストリップとグラウンドの間の部分 (例えばガラスやギャップ) を変更することもできるが、この場合アバランシェ増幅の過程も変わってしまう。

電率を変えることで実現可能である。

本研究では先行研究 [26] の RPC の構造をもとに、カップリング補正を行う。この RPC の C_m を変更し、対称性を回復させることを目指す。[25] の著者に協力していただき、MAXWELL-2D[27] と [25] の計算コードでのシミュレーションを依頼した。その結果については後述する。

2.2 先行研究

ここでは先行研究について述べる。まず主要な実験での RPC について紹介する。大面積ストリップを持つ RPC についても紹介する。また本研究の RPC 開発に関して、先行研究で得られた重要な結果について述べる。

2.2.1 主要な実験における RPC

表 2.1 に幾つかの実験の RPC の構造や性能を示す。比較的小さいストリップに関しては検出効率・時間分解能に関して、高い性能が得られており、数多く実用されている。

また LEPS2 実験で要求されるような大面積ストリップの RPC の研究もされている。これは表 2.2 にまとめる。表 2.1 に比較すると明らかなように、ストリップが大きくなれば RPC の時間分解能は悪化する。このように大面積ストリップの RPC 開発には困難が伴う。

表 2.1: 主な実験グループの RPC の構造と性能

Group	Strip Size	Gap Width	Stacks	Gaps/Stack	Resolution	Efficiency
BESIII [28]	$2.4 \times 14.1 \text{ cm}^2$	220 μm	2	6	62 ps	95%
ALICE[29]	$2.5 \times 3.7 \text{ cm}^2$	250 μm	2	5	<40 ps	>99%
FOPI[31]	$0.194 \times 90 \text{ cm}^2$	220 μm	2	4	60 ps	>99%
STAR[30]	$3.1 \times 6.0 \text{ cm}^2$	220 μm	1	6	60 ps	>97%
HADES[32]	$2.0 \times 60 \text{ cm}^2$	300 μm	1	4	70 ps	>95%
LEPS2 BGOegg[33]	$2.5 \times 100 \text{ cm}^2$	260 μm	2	5	50 ps	>99%

表 2.2: 大面積ストリップの RPC の構造と性能

Ref.	Strip Size	Gap Width	Stacks	Gaps/Stack	Resolution	Efficiency
S. Tanaka[26]	$2.6 \times 200 \text{ cm}^2$	260 μm	2	5	65-80 ps	>97%
M.Abbrescia, et al.[34]	$2.5 \times 180 \text{ cm}^2$	300 μm	1	5	65-85 ps	95%
A.Blanco, et al.[35]	$5.0 \times 160 \text{ cm}^2$	300 μm	1	4	65-75 ps	95%

2.2.2 LEPS2 RPC 開発に関する先行研究

本研究以前の LEPS2 RPC の開発状況について述べる。

LEPS2 RPC 試作機の結果

富田らによる先行研究 [12][33] の 1 m 長 RPC は LEPS2 BGOegg 実験で使用されている。またこれは LEPS2 実験でも Forward RPC として使われる予定である。1.2 節で述べた回路系などの時間分解能を考慮した飛行時間の測定に関する時間分解能について、先行研究 [12] では 60 ps の時間分解能が得られたと報告している。

この先行研究の結果を踏まえ、田中による先行研究 [26] ではストリップ長を 1 m から 2 m に延長した試作機 (図 2.6) でテストを行った。この先行研究ではビームの入射位置 (領域の大きさは $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$) を変えて検出効率・時間分解能を評価した。

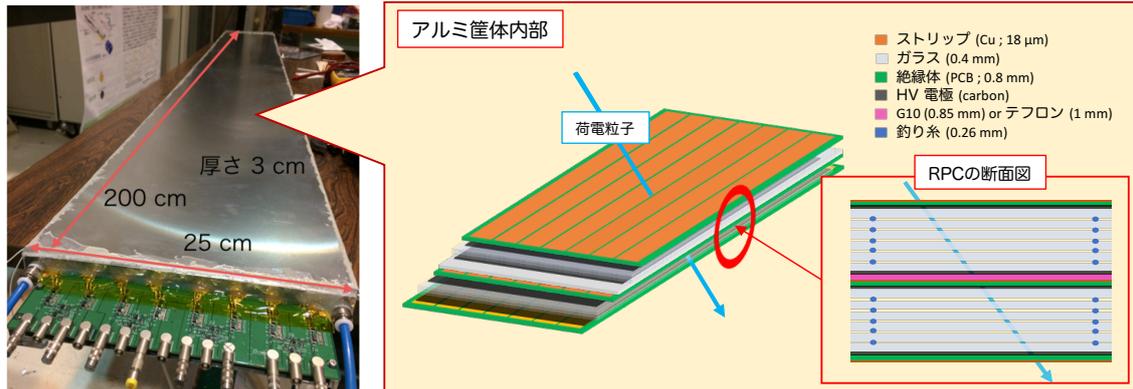


図 2.6. 先行研究 [26] でテストした 2 m 長ストリップの RPC。

図 2.7 に時間分解能のビーム入射位置依存性の測定結果を示す。横軸は 0 cm を中心としたビームの入射位置を表し、縦軸は時間分解能を表す。この RPC ではストリップの両端から信号が出力されるが、その左右それぞれの出力のタイミングの時間分解能 (赤と緑のプロット点) とその左右平均の時間分解能 (青のプロット点) が示されている。この結果は、中心付近とストリップの末端付近を除いた位置では両読み出しの平均で時間分解能 65-80 ps を達成していることを示す。さらに片方読み出しで、出力に近い方を選べば時間分解能 70 ps 以下となる。中心付近で時間分解能が悪化している原因は、RPC の製造の都合で 1 m のガラスを 2 つつなげており、その結合部分では電場が乱れているためだと予想される。また重要な結果として、片読み出しに関して、出力部分から離れるほど時間分解能が悪化していることがわかる。これは信号のストリップ伝搬の影響であると考えられる。

LEPS2 RPC におけるカップリング補正のシミュレーション結果

モード分散の影響で、時間分解能が悪化している可能性がある。LEPS2 グループは [26] の 2 m 長 RPC の時間分解能をさらに改善させるため、RPC の層構造の中心部の材質を変更する (図 2.6 の断面図のピンクの部分) ことで、カップリング補正をすることを考えた。

我々は [25] の著者に協力を依頼し、MAXWELL - 2D[27] と先行研究 [25] の計算コードでシミュレーションを行った。シミュレーションの結果によると、RPC の層構造の中心部の材質が G10 板の場合 (先行研究 [26] で用いた材質)、信号の伝搬速度は 58 ps/cm、 $\Delta v/v_{\text{mean}} = 0.064$ である。一方材質をテフロンに変えた場合、 $\Delta v/v_{\text{mean}}$ は同じのまま、信号の伝搬速度が 54.5 ps/cm となる。すなわち、G10 を用いた RPC では信号が 1 m 伝搬するごとに、遅いモードの信号は早いモードの信

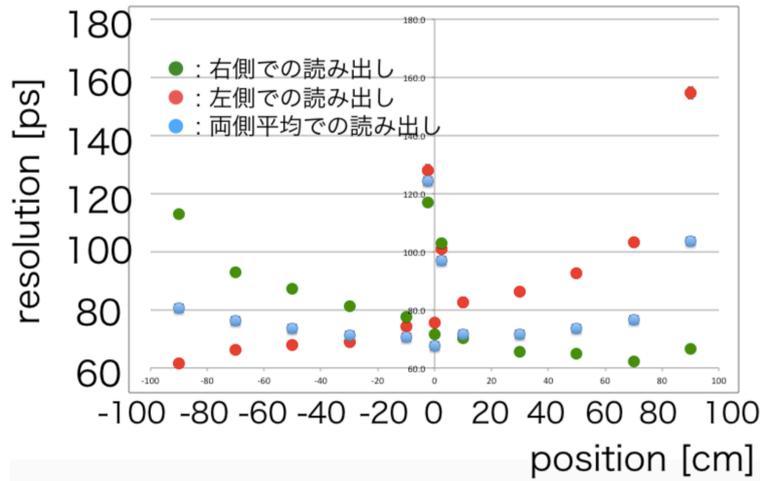


図 2.7. 時間分解能のビーム入射位置依存性 [26]。

号に対して 370 ps 遅れる。これに対し材質をテフロンに変えた場合、遅れは 200 ps に抑えられるということがわかった。

シミュレーションで得られた波形を伝搬距離 20 cm ごとに表示したものを図 2.8 に示す。図 2.8 (a) が G10 の RPC の波形であり、図 2.8 (b) がテフロンの RPC の図である。G10 の RPC では 1.6 m 以上伝搬すると波形が崩れる様子が見える。

また信号が 2 m 伝搬した際の伝送係数の周波数依存性を図 2.8 (c)(d) に示す。図 2.8 (c) が G10 の RPC、図 2.8 (d) がテフロンの RPC のものである。横軸は信号の周波数、縦軸はストリップを伝搬する際の伝送係数である。G10・テフロンのいずれの結果にも、モード分散が原因であるバンドストップ⁸が見られる。しかしバンドストップの位置は G10 の場合とテフロンの場合で異なり、テフロンの方が高周波側に位置している。その結果、テフロン RPC の方が広い周波数帯域⁹を持つことになることがわかる。

2.3 本論文の構成

先行研究の結果を踏まえ、行った研究とその結果を本修士論文において報告する。層構造の中心部の材質が G10 の RPC とテフロンの RPC の試作機を用意し、周波数帯域の測定、波形の測定、時間分解能の測定を行った。この方法と結果について、3 章で述べる。

また、テフロンを用いた実機製作を行った。その際に RPC の機械的構造の強化のため、ハニカムサンドイッチを多層構造に追加した。また先行研究 [26] の RPC の課題であった、発振ノイズ対策のため、グラウンドを強化した。これらの RPC 実機製作における構造の変更点については 4 章に詳しく示す。

製作した実機 RPC の検出効率・時間分解能の測定を行った。5 章にはこの結果を示す。まず印加電圧、Discriminator の閾値レベル依存性を調べ、その最適化を行った。また性能についてビームのヒット位置依存性、入射角度依存性、ストリップ依存性を調べ、さらに磁場の有無での比較などを行った。

⁸特に減衰している帯域のこと

⁹信号の強さが元の $1/\sqrt{2}$ になる周波数までの領域

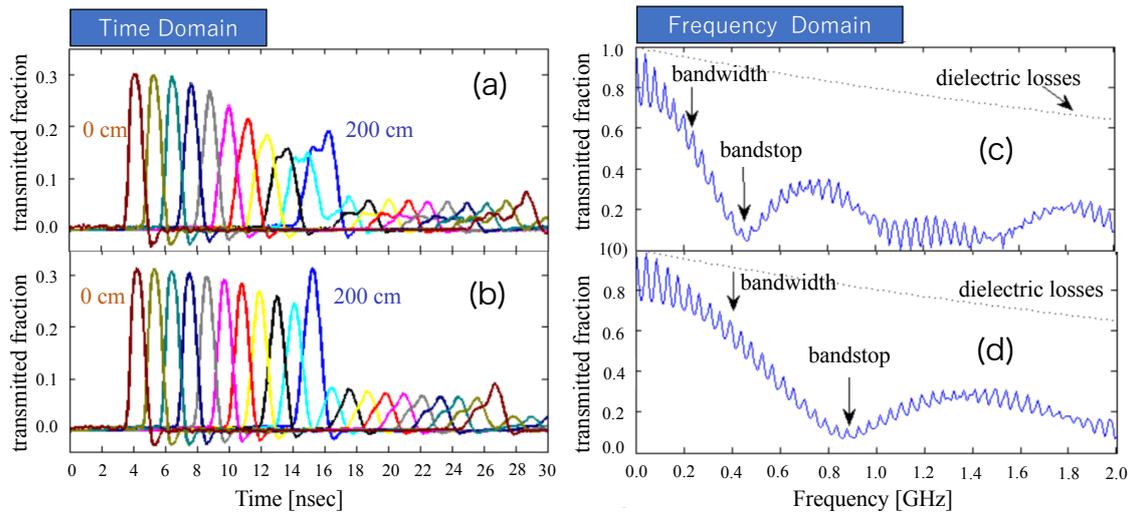


図 2.8. スタック中心の材質が G10 (上)、テフロン (下) である場合の、波形の伝搬距離依存性 (左) と信号が 2 m を伝播した時の伝送係数の周波数依存性を表している。テフロンの方が信号の波形を保ったまま伝搬している。またテフロンの方が周波数帯域が広い。

6 章には本研究のまとめと今後の展望について述べる。

第3章 信号のストリップ伝搬に関する周波数帯域の向上

先行研究 [26] の RPC 構造を変更して、カップリング補正を行った。多層構造の中心部 (図 2.6 のピンク色の部分) が G10 材質の RPC とテフロン材質の RPC の 2 種類 RPC を用意し、伝送係数の周波数特性や波形・時間分解能の測定を行った。その結果の比較から、LEPS2 RPC の実機製作に向けて、G10・テフロンどちらを使うか決定する。周波数帯域はネットワークアナライザを用いて測定を行い、波形・時間分解能は電子ビームを RPC に入射して測定した。この章では測定方法と結果・結論について述べる。

3.1 先行研究との変更点

今回作製した試作機は基本 [26] の構造とほぼ同じである。しかし、読み出しストリップの形状に変更を加えた。先行研究 [26] ではストリップの両端の形状は先細りになっているが、この章で用いる試作機ではこの先細り部分を除去した。これはシミュレーションとの差異を減らすためである (シミュレーションで先細りの形状を再現するのは難しい)。先行研究 [19] の測定結果では 25 mm 幅のストリップに関して、末端の形状が先細りの場合とそうでない場合で、時間分解能に有意な違いは見られなかった。

3.2 RPC ストリップの伝送係数の周波数特性の測定

RPC のストリップの伝送係数の周波数特性はネットワークアナライザを用いて直接測定が可能である。ここでは 2 m 長 RPC に関して、層構造の中心部の材質が G10 の場合とテフロンの場合で周波数帯域の違いを見る。また、測定の結果とシミュレーションの結果との違いについて述べる。

3.2.1 ネットワークアナライザ

ネットワークアナライザ (NetWork Analyzer, NWA) は周波数帯域を調べるための機器であり、加速器開発などでよく使われている。NWA は被測定物に、ある周波数の信号を入射する。そして、その時に得られる反射信号と伝送信号について波高や位相の変化を測定する (図 3.1 参照)。入射する信号の周波数を変えながら、反射信号と伝送信号の応答をしらべることで、被測定物の周波数特性がわかる。今回のテストでは特に入射信号と伝送信号の波高の比、つまり、RPC を信号の伝送係数に着目する。

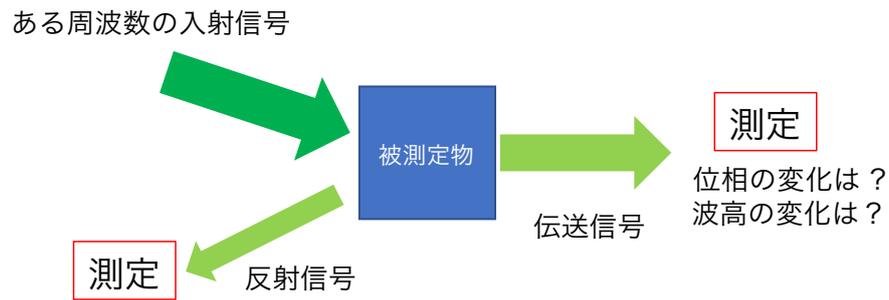


図 3.1. NWA の測定原理

3.2.2 実験セットアップ

測定には Agilent Technologies の型番 E5071C-480 の NWA [37] を用いた。この NWA は 9 kHz–8.5 GHz の周波数領域を測定できる。NWA とつなぐため、RPC のストリップにケーブルをはんだ付けした。(図 3.2 の左図参照)。この時ケーブルの結合部分が 1 cm 以下になるようにした。こうすることで 1.5–3.0 GHz 以下の周波数の信号に対し、結合部分における減衰や反射などの影響が小さくなる [38]。また、ケーブルとコネクタには、BNC 規格に比べて高周波成分の減衰が少ない SMA 規格のものを採用した。測定時にはストリップの両端と隣のストリップの両端の合計 4 つに NWA のポートを取り付けた。それぞれのポートは信号を出力し、それと同時に信号を計測できる。また、他のストリップには 50 Ω のターミネータを取り付けた。測定中は図 3.2 の中央部の写真のように RPC のスタックの厚みが一樣になるように、RPC 全体に圧力がかかるようにした。圧力をかけた場合とそうでない場合で、異なる測定結果が得られた時があったからである。

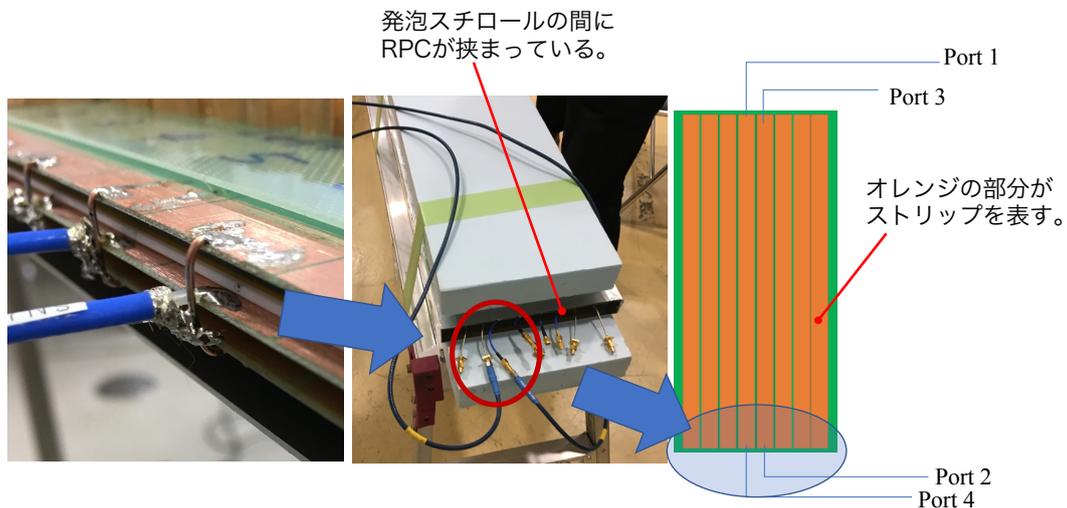


図 3.2. 測定のセットアップ

3.2.3 NWA 測定の結果

RPC の周波数帯域の測定結果の代表例を図 3.3 に示す。図の横軸は RPC に入射する信号の周波数、縦軸はストリップを伝搬する際の伝送係数（伝送信号の波高/入射信号の波高）を表す。青線が G10 の RPC[26] に、赤線がテフロン RPC に対応する。シミュレーションの予想（図 2.8）ほどの改善は見られないが、テフロン RPC のバンドストップの方が高周波数側に位置していることが確認できる。また、バンドストップの減衰が予想より大きくないことがわかる。これはシミュレーションで用いたテフロンの位置や厚さ、特性などが実際の値と異なるからだと考えられる。また、全周波数において、先行研究 [26] の RPC に比べ、テフロン RPC の方が信号の減衰が少ないということがわかった。

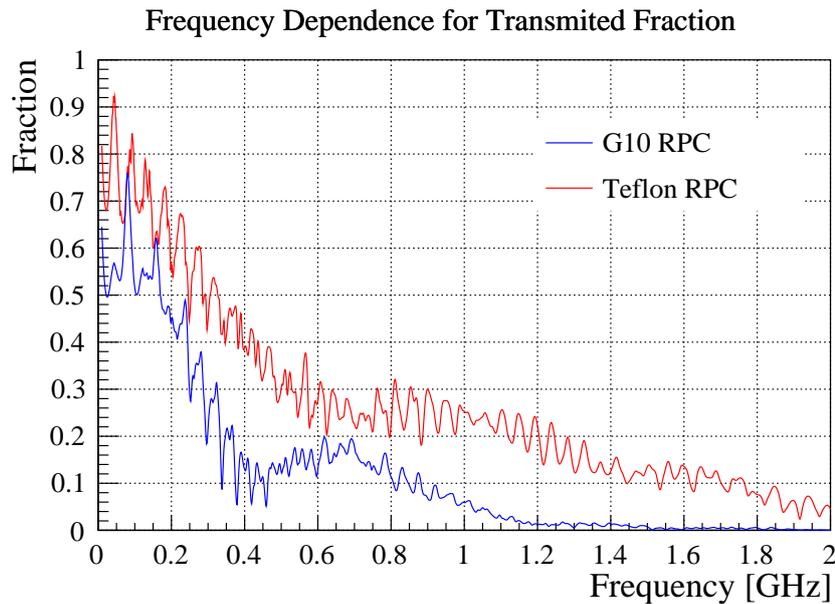


図 3.3. 信号伝搬に関する周波数帯域測定の結果。縦軸はストリップを伝播する信号の伝送係数、横軸は周波数を表す。G10 RPC が先行研究 [26] の RPC を、Teflon RPC が材質をテフロンに変えた RPC を表す。

3.3 電子ビームを用いたテスト

テフロン RPC の周波数帯域の向上を確認できたため、波形の位置依存性と時間分解能の位置依存性においても改善があると期待される。本節では電子ビームを用いたテストの方法とその結果について述べる。

3.3.1 実験概要とセットアップ

テストは SPring-8/LEPS2 ビームラインで行った。実験セットアップの外観を図 3.4 示す。

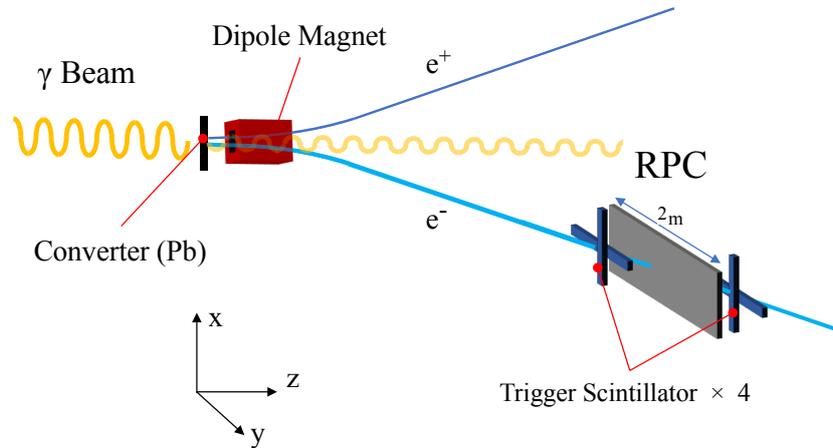


図 3.4. 実験セットアップ。 z 方向はビームの進む方向を表し、 y 方向は水平方向を表す。ダイポール常磁石で電子陽電子を上下に分離している。RPC は 2 m のストリップの長さ方向が y 軸に平行となるように設置した。

RPC に電子を入射し、時間分解能を測定した。このビームラインでは通常 γ 線ビームを用いるが、テストではコンバーター (0.5 mm の鉛) で対生成反応を起こし、電子ビームを作る。テストでは RPC の信号と RF の信号の時間差を求め、この分解能を評価する。これは先行研究 [26] の時のテストとほぼ同じセットアップである。

テストではビーム上流にダイポール常磁石を設置し、RPC を γ 線ビームの位置から x 方向負の向きにずらした。これは (1) γ 線ビームが直接 RPC に照射されることを避けるため、また (2) 電子陽電子の二つの粒子が RPC に照射されることを防ぐため、という理由による。荷電粒子が RPC に入射したことを同定するため、トリガーシンチレータを用意した。トリガーシンチレータは幅 2 cm 程度の細長いプラスチックシンチレータに光電子増倍管を取り付けたものである。二つのトリガーシンチレータが交差したものを RPC の上流下流に設置する。以降、4 つのトリガーシンチレータが重なる領域をトリガー領域と呼ぶ。電子ビームがトリガー領域を通った場合のみ、データを取得する。トリガーシンチレータが交差した領域は上流側が 2 cm \times 1 cm、下流側が 2 cm \times 2 cm である (y 方向 \times x 方向)。RPC のストリップ幅の中心にトリガー領域の中心点が重なるように設置した。図 3.5 にトリガー領域とストリップの位置関係を示す。

時間分解能のビームの入射位置依存性を見る際は、トリガーシンチレータの位置は動かさず、RPC のみを y 方向に移動させた。この時、ビームの入射位置はトリガー領域が RPC のストリップの中心点からの距離で定義する。また左 (右) 方向を y 方向の負 (正) の向きで定義する。

図 3.6 に回路図を示す。用いた TDC は 1 ch が 50 ps の CAMAC TDC [39] である。また ADC も CAMAC ADC [40] である。Discriminator の閾値レベルは -20 mV に設定した。

RPC には先行研究 [19][26] と同じく、大気圧下の R134a : SF₆ : C₂H₆ = 90 : 5 : 5 の混合比のガスを流した。また、この時 RPC に印加した電圧は 13.5 kV である。

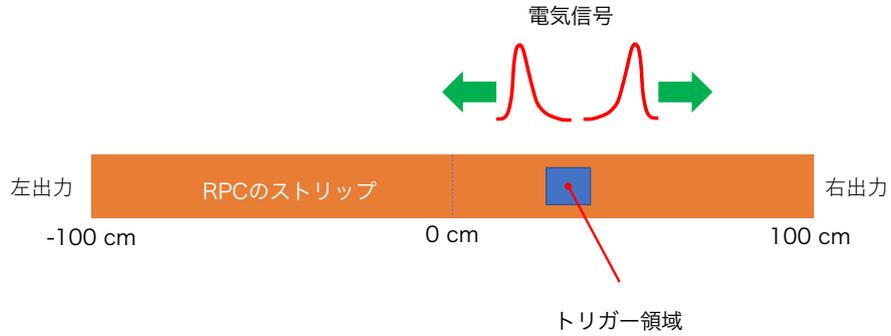


図 3.5. トリガー領域とストリップの位置関係。

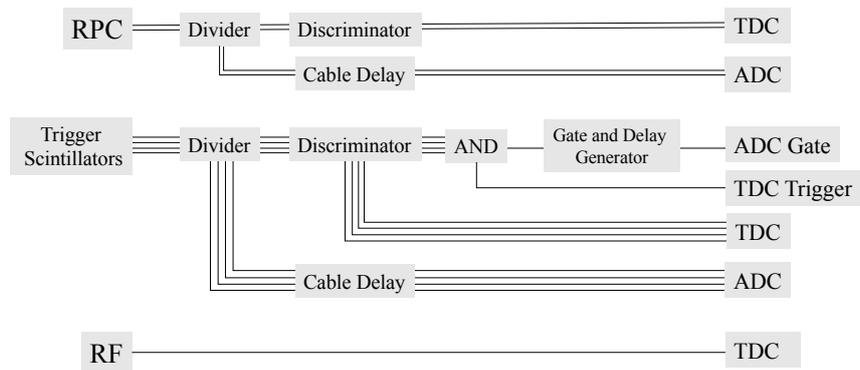


図 3.6. 回路図。実線の数にはチャンネル数を表す。RPC からは左右二つの信号が出力される。

3.3.2 波形の伝搬距離依存性

RPC の出力信号の波形を測定した。ビームの入射位置を変えることで波形のストリップの伝搬距離依存性を調べた。RPC の出力信号を Divider で分けたもの (図 3.6 参照) を DRS4 Evaluation Board[41] を用いて測定した。この DRS4 Evaluation Board は 500 mV までの波高の信号を測定できる。またこの周波数帯域は 700 MHz である。測定上の都合のため、テフロン RPC の波形測定では約 20 m の BNC ケーブルを伝搬した後に DRS4 Evaluation Board に入力した。また G10-RPC の波形測定の際には、周期的ノイズが乗っていたため、解析においてそのノイズを取り除いた。測定では信号を出力する片方の末端から 10, 120, 190 cm と離れた位置にビームを入射した。

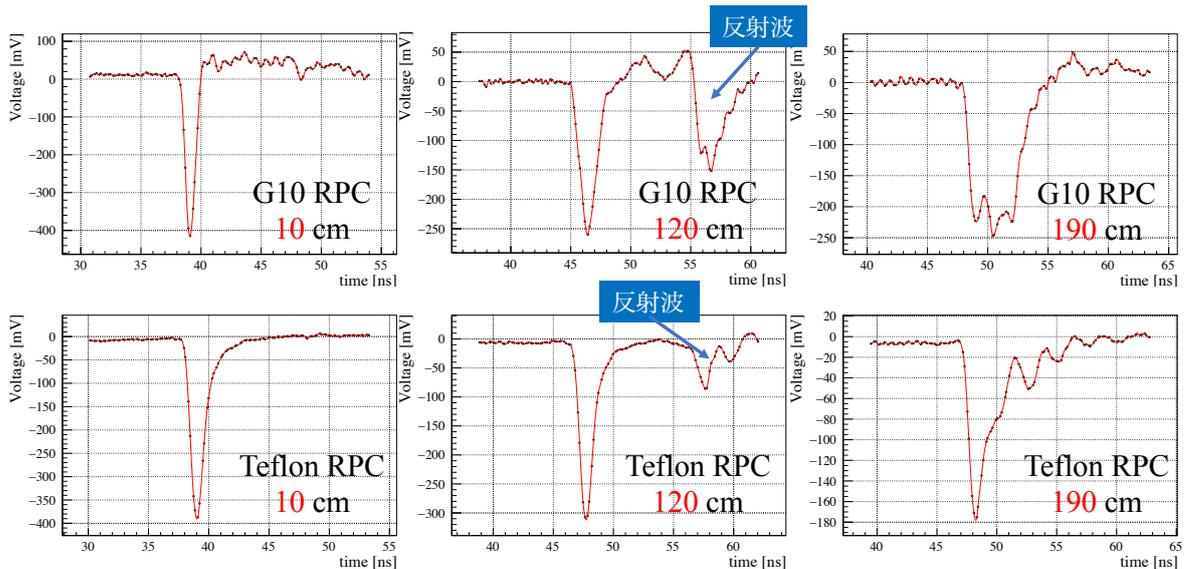


図 3.7. 波形の伝搬距離依存性。この長さは信号がストリップを伝搬した距離を表す。

図 3.7 に典型的な波形の伝搬距離依存性の図を示す。上の 3 つが G10 の RPC の波形で、下の図がテフロン RPC の波形である。それぞれ読み出しから 10, 120, 190 cm 離れた位置にビームを入射した時の波形である。120 cm の波形を見ると二つ目の波が見えるが、これはストリップの反対側の末端で反射した信号である。反射波は通常的直接出力部まで進行する波 (ここでは直接波と呼ぶ。) に対し、160 cm 長い距離を伝搬して出力される。すなわち、信号の伝搬速度が約 55 ps/cm であることを考慮すれば、約 9 ns 遅れるはずである。図で示した反射波も直接波に対して 9 ns 程度遅れている。また G10 とテフロンの反射波を比較すると、G10 の反射波の方がテフロンの反射波より大きいことがわかる。伝搬距離 190 cm の信号に注目すると、波形が崩れている様子が見える。これは反射波が直接波に追いつき、波形を歪めたのだと解釈できる。実際、直接波と反射波の時間差は約 1 ns であり、信号の広がりよりも小さい。シミュレーションの結果によると (図 2.8 参照)、波形の乱れが目立つのは 160 cm 以上伝搬した信号であった。しかし、今回の測定した 190 cm 伝搬した信号には反射波が混ざっており、テフロンと G10 の比較を行うには適さない。そこで 10 cm と 120 cm の波形について比較を行う。

測定した波形は離散的な点の集まりである。扱いやすくするため、測定点の間を図 3.7 のように 3

次のスプライン曲線で内挿した。得られた波形を用いて FWHM(半値全幅) と立ち上がり時間を求めた。半値全幅は波高の半分の電圧における信号の幅で定義している。また、立ち上がり時間は波高の 10%-90% で定義している (図 3.8)。30 から 40 個の波形に対し、半値全幅と立ち上がり時間を評価した。

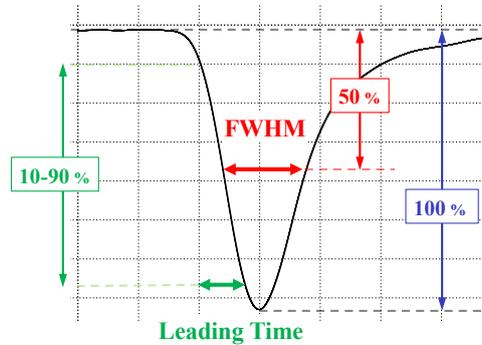


図 3.8. 半値全幅と立ち上がり時間

表 3.1 にその平均と誤差を示す。ただし、ここで誤差は、全イベント数を n 、評価対象を X として、以下の式で求めた：

$$X \text{ の誤差} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (3.1)$$

\bar{X} : X の平均値

表の括弧中の長さは、信号が伝搬した距離を表している。まず、信号の伝搬距離が 10 cm から 120 cm に変わった時の変化量を見る。半値全幅と立ち上がり時間の両方で、テフロンの方が変化量が小さい。モード分散がある場合、特に伝搬距離に関する変化が顕著なのが半値全幅であると考えられる。G10 では 0.6 ns 広がっているのに対し、テフロンでは 0.1 ns 程度である。また、120 cm 伝搬した信号について半値全幅を比較すると、G10 の方が有意に広がっていることがわかる (2.6σ)。これらの結果は、テフロン RPC は G10 の RPC に比べ、モード分散が抑えられていることを示している。一方 10 cm の短い距離を伝搬した信号に関して立ち上がり時間を比較すると、テフロンの方がだいぶ長くなっている。これは、テフロンの信号に関しては、20 m の BNC ケーブルを通して測定を行ったため、ケーブルによる減衰が生じたのだと解釈できる。

表 3.1: 波形の半値全幅と立ち上り時間。

RPC	FWHM (10 cm)	FWHM (120 cm)	Leading Time (10 cm)	Leading Time (120 cm)
G10 RPC	1.02±0.02 ns	1.64±0.04 ns	580±14 ps	818±27 ps
Teflon RPC	1.38±0.05 ns	1.49±0.04 ns	734±10 ps	859±17 ps

3.3.3 解析方法

RF と RPC の信号の時間差からの RPC の時間分解能を求める。RPC の信号は左右片読み出しだけの場合と左右両読み出しの平均の場合の 3 パターンで解析を行った。すなわち,

$$T_{\text{RPC-RF}} = \begin{cases} t_{\text{left(right)}} - t_{\text{RF}} \\ (t_{\text{left}} + t_{\text{right}})/2 - t_{\text{RF}} \end{cases} \quad (3.2)$$

の三つの場合で時間分解能を評価する。

トリガーのカット条件

図 3.9 に RPC とトリガーシンチレータの信号の電荷量分布を示す。上 2 つの図が RPC の左右の読み出した電荷量分布に、下 4 つがトリガーシンチレータの電荷量分布に対応している。入射されたビームのうち、1 粒子がヒットしたイベントを選ぶために、図 3.9 の薄緑の領域の部分を取り除いた。これをすべてのトリガーシンチレータの電荷量分布に適用した。青線はカット条件を課していない電荷量分布を表し、一方赤線の分布はカット条件を課したものに对应する。

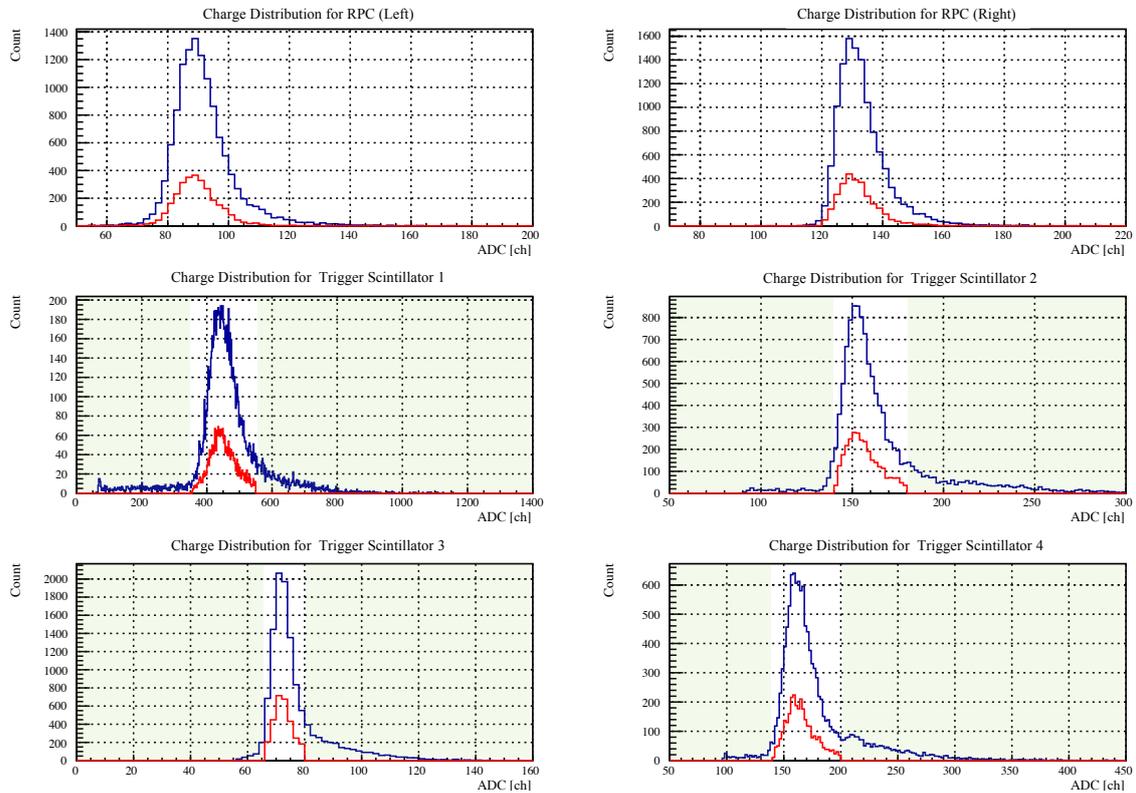


図 3.9. 信号の電荷量の分布。上 2 つは RPC の左右の読み出しに、下 4 つは各々のトリガーシンチレータに対応する。薄い緑の領域の部分を取り除いて解析を行う。青線はカット条件がない時の電荷量分布で、赤線はカット条件を課した時の電荷量分布を示す。

また、RF の TDC の値についても制限をかけた。RF 信号とトリガー信号の時間差のヒストグラムを図 3.10 に示す。0–105 ns の複数のピークは、加速器中の電子のバンチ構造を表す。この電子の

バンチ間の時間差は約 2 ns であるが、このヒストグラムのパークもその時間間隔で現れている。RF の信号が overflow したイベント (112 ns あたりに見られるパーク)、また、TDC の値が 0 であるものを解析では除外する。これが RF 信号のタイミングに関するカット条件である。これ以降の解析ではこのカット条件が常にかかっている。

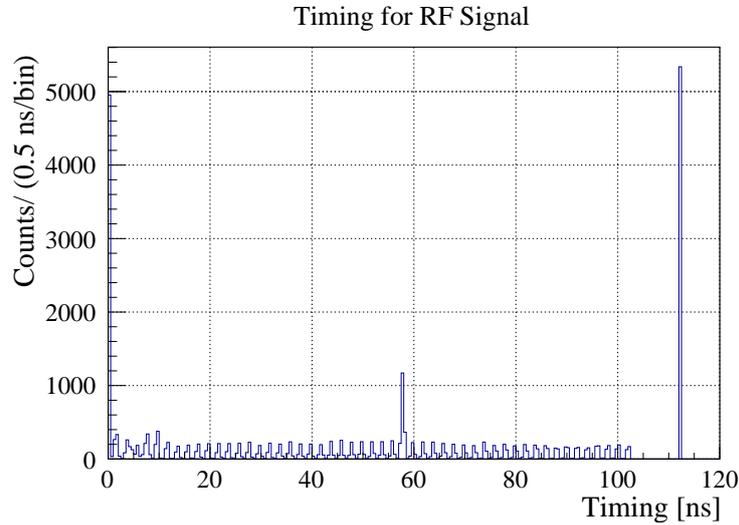


図 3.10. RF 信号のタイミングの分布。

RPC の信号に関するカット条件

RPC の信号に関しても、2 つカット条件を課した。一つ目はイベント番号に関するカット条件である。図 3.11 は RPC の電荷量分布と $T_{\text{mean}} = (t_{\text{left}} + t_{\text{right}})/2 - t_{\text{RF}}$ のイベント番号依存性を表している。薄緑の領域で異常な振る舞いをしていることがわかる。電荷量において非常に大きい値、もしくは非常に小さい値であることから、これは RPC についている増幅回路の発振であると考えられる。このような発振が見られるイベントは除外した。

二つ目は RPC の左右の出力信号の時間差に関するカット条件である。ビームの入射位置が決定している場合、RPC の左右両端に出力される信号の時間差も、ある時間分解能の範囲内で決定するはずである。しかし、一つの電子がトリガー領域を通ると同時に他の粒子が同ジストリップに当たった場合 (マルチヒットイベント)、左右の信号の時間差は通常値からずれる。図 3.12 は左読み出しの TDC の値と右読み出しの TDC の値の相関を表したものである。片方が正しい TDC の値にもかかわらず、もう一方が通常と異なるイベント (薄緑の領域のイベント) はマルチヒットイベントである。解析では左右の時間差をガウス関数でフィッティングし、その中心値から ± 300 ps 以上離れたものを取り除いた (図 3.13)。トリガー領域の幅は最大 2 cm あるが、この領域内のどこに当たるかによって時間差は異なる。しかし、この領域に一樣に電子が入射したとしても、信号の伝搬速度を 55 ps/cm と考えれば、この影響の広がりには 55 ps である。そのため、RPC で誘起される信号の時間分解能が 65 ps であったとしても ± 300 ps の値は十分広いと考えられる。

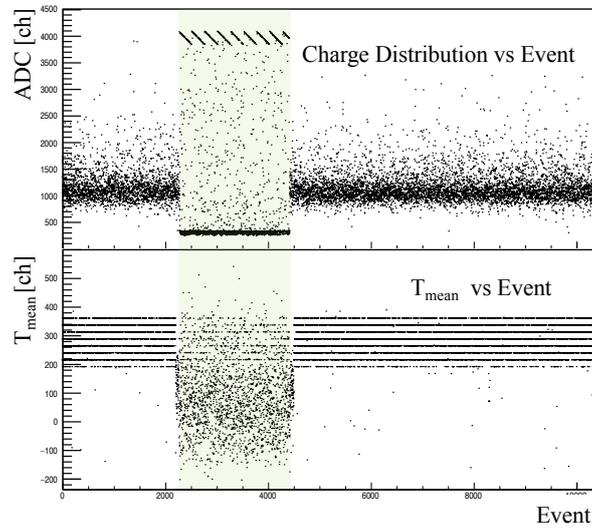


図 3.11. RPC の信号の電荷量と T_{mean} のイベント依存性。薄緑の部分は発振と考えられ、カットした。

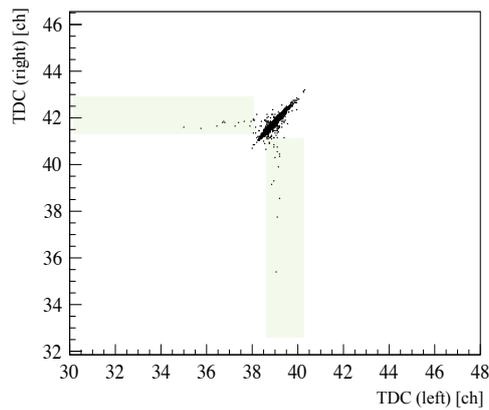


図 3.12. RPC の左右から出力される信号の時間差の相関図。横軸が左からの読み出し、縦軸が右からの読み出し信号のものである。薄緑の領域はマルチヒットイベントであると考えられる。

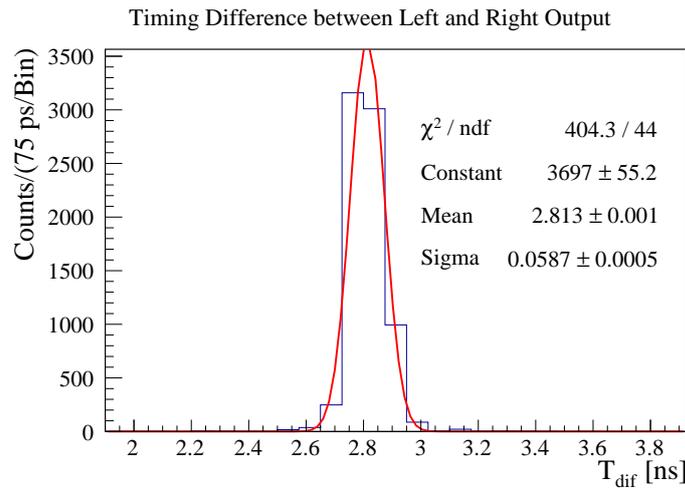


図 3.13. RPC の左右の出力信号の時間差。ガウス関数でフィッティングを行い、中心値から ± 300 ps 以上離れたイベントは除去する。

RF 信号の足し合わせ

図 3.10 と同様に、 $T_{\text{RPC-RF}}$ のヒストグラムにも約 2 ns 間隔の離散的なピーク構造が現れる (図 3.14)。解析では統計量を増やすため、このピークを足し合わせた。それぞれのピークに対して、ガウス関数でフィッティングを行い (図 3.17)、そのフィッティング関数の中心値が同じになるようにそれぞれのピークを重ね合わせている。

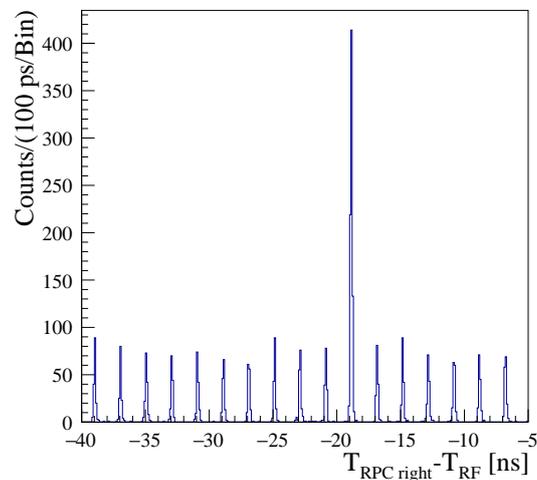


図 3.14. RF 信号と RPC の信号の時間差のヒストグラム。蓄積リングで加速している電子のバンチ構造 (間隔 2 ns) が見られる。統計数が多いピークはそのバンチに電子が多いことを表す。

Slewing 補正

RPC の信号が Discriminator の閾値レベルを超えるタイミングは、その波高に依存している。すなわち、波高が高いとタイミングは早く、逆に波高が低いとタイミングは遅く評価される。このようなズレをタイムウォークという。飛行時間を正確に評価するために、タイムウォークに対する補正を行う。(タイムウォーク補正、もしくは slewing 補正という。) 図 3.15(a) は $T_{\text{RPC-RF}}$ と RPC 信号の電荷量の相関図である。ただし、 $T_{\text{RPC-RF}}$ は上記の方法でバンチごとのピークを足しあわせたものである。図 3.15(b) に ADC のチャンネルごとに $T_{\text{RPC-RF}}$ を平均化したものを示す。補正の方法は (b) のプロット点を、ADC の値を a_{ch} 、またパラメタを p_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) として

$$f(a_{\text{ch}}) = p_0 + p_1 a_{\text{ch}} + \text{atan}\left(\frac{p_3}{p_4 a_{\text{ch}} + p_5}\right) \quad (3.3)$$

でフィッティングし、そのフィッティング関数をそれぞれのプロット点から差し引く；

$$\text{補正後の } T_{\text{RPC-RF}}(a_{\text{ch}}) = T_{\text{RPC-RF}}(a_{\text{ch}}) - f(a_{\text{ch}}) \quad (3.4)$$

図 3.15(c) にこの補正後の相関図を示す。

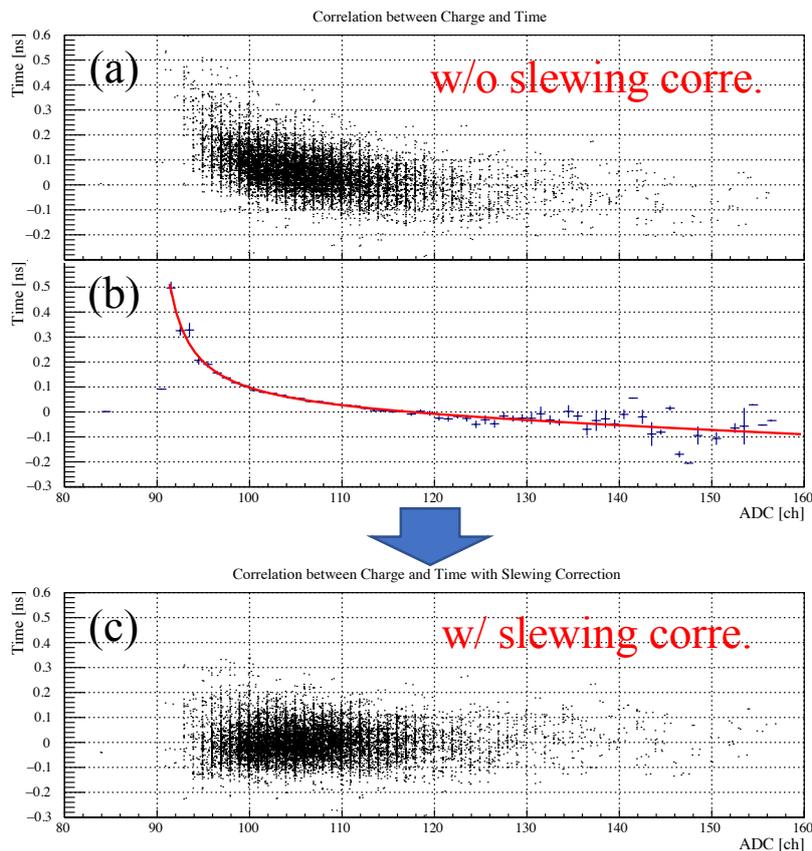


図 3.15. RPC-RF の時間差と RPC の信号の電荷量の相関図。図 (a)(c) は slewing 補正前後の相関図。縦軸は RPC-RF の時間差、横軸は RPC 電荷量を ADC である。図 (b) は図 (a) の時間差を ADC の値ごとに平均化したものである。図 (b) のフィッティング関数を使用して slewing 補正を行う。

ただし、ここでは ADC の値は片方の出力信号のものを用いた。左右の出力信号の電荷量は強い正の相関を持つため (図 3.16)、片方の電荷量を考慮すれば十分であるからである。

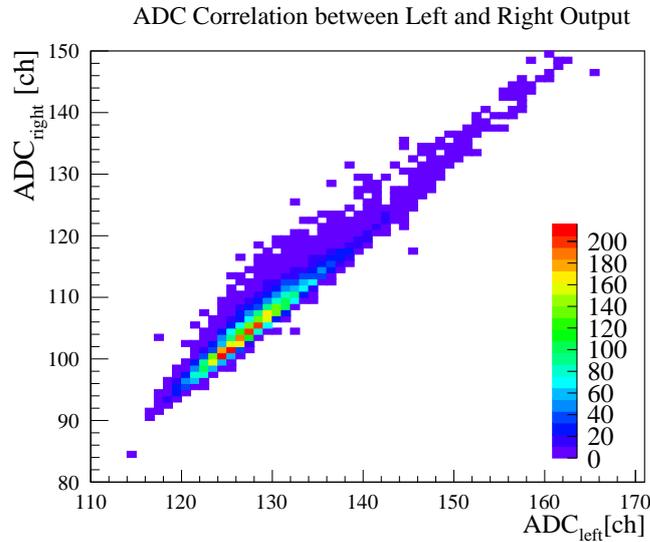


図 3.16. RPC の信号の電荷量の左右の相関図。強い正の相関を持つことがわかる。

実際の解析では

- (1) タイムウォークの影響が少ない、ADC の値が高いイベントの時間差のみをガウス関数でフィッティングし、その中心値を用いて全てのイベントに対してピークの足しあわせを行う。
- (2) (1) で足しあわせた RPC-RF 間の時間差と ADC の相関図を用いて、slewing 補正のパラメタを求める。
- (3) (2) で得たパラメタを用いて、(1) で足し合わせる前の RPC-RF 間の時間差を補正し、補正後のものを足し合わせる。

という三つの段階を経て最終的な $T_{\text{RPC-RF}}$ を得る。図 3.17 は図 3.14 の一つのピークに関して、slewing 補正前のピークと (緑) と補正後のピーク (青) の拡大図を表している。また、赤線は補正後の時間差をフィッティングしたガウス関数を表す。補正後の方がよりガウス関数に近いことがわかる。このため、ピークの足しあわせが精度よく行えると考えられる。

時間分解能の評価

上述の (1)-(3) の過程を経て得られる RPC-RF 間の時間差をガウス関数でフィッティングする。求められたフィッティング関数の標準偏差を時間分解能とした (図 3.18)。

3.3.4 測定結果と結論

ここでは G10・テフロン RPC の時間分解能を比較する。ただし、波形測定の時と異なり、テフロン RPC の出力部分に 20 m の BNC ケーブルを用いていない。図 3.19 時間分解能の位置依存性の測定結果を示す。左右の図はそれぞれ G10、テフロンを用いた RPC の結果である。横軸はビームの入射位置を表し、0 cm は RPC の中心である (図 3.5 参照)。また、縦軸は時間分解能で、誤差は

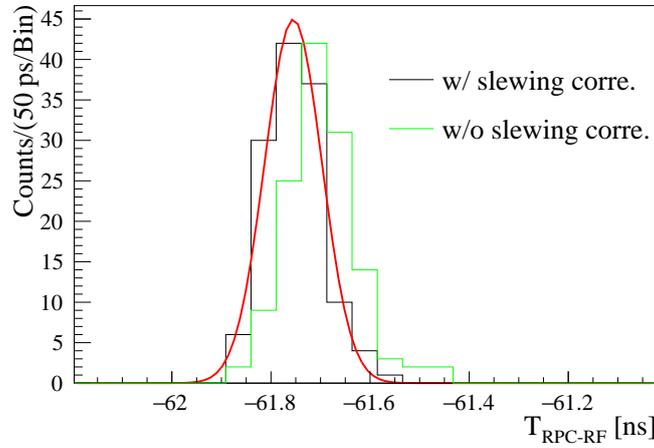


図 3.17. バンチ毎の RPC-RF 間の時間差の slewing 補正前 (緑) と補正後 (青) のヒストグラム。赤線は補正後の時間差をガウス関数でフィッティングしたものを表す。バンチの足しあわせの過程では、このフィッティング関数の中心値が重なるようにバンチを足し合わせる。

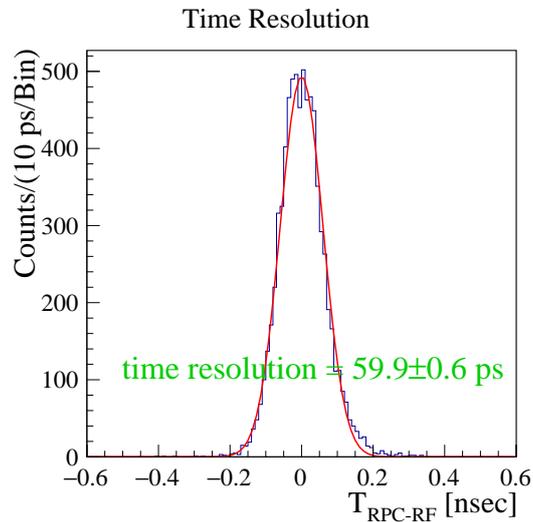


図 3.18. RPC-RF 信号の時間差の分布。slewing 補正を行い、RF のバンチ構造由来のピークの足しあわせを行って得られた値が横軸である。

フィッティングしたガウス関数の σ の誤差である。青 (緑) のプロット点は RPC の左 (右) から出力される信号の時間分解能を表し、赤のプロット点は左右読み出しの平均である (式 (3.2) 参照)。テフロン RPC の結果の -20, 10, 20, 24 cm の位置の結果は分解能が悪化している。RPC を分解してスタック構造を見たところ、HV を印加するカーボン電極において、この位置にシワが寄っていたことを発見した (図 3.20)。すなわち、シワが寄っていたため、電場の一様性が崩れ、この影響で分解能が悪くなっていたのだと考えられる。また、中心点 0 cm はストリップの結合部であり、ここでは時間分解能が悪化することがわかっている [26]。

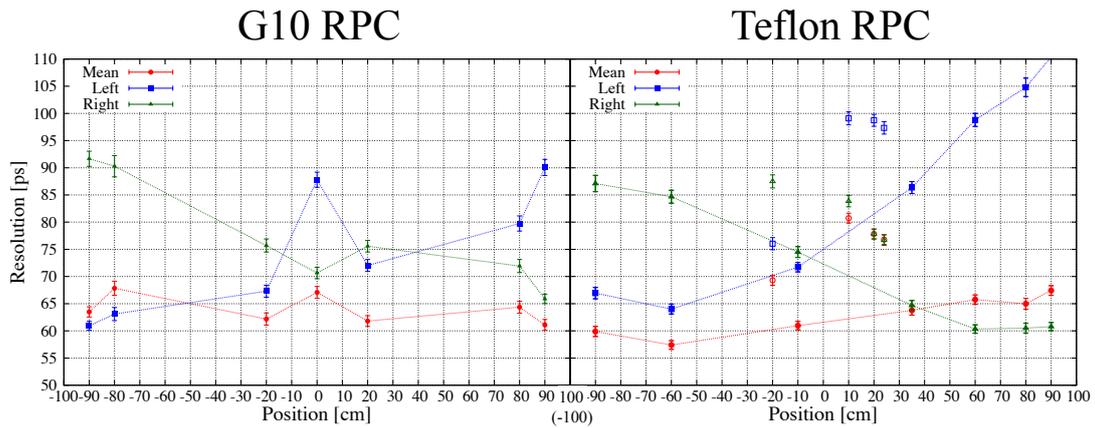


図 3.19. G10-RPC とテフロン RPC の時間分解能の位置依存性。

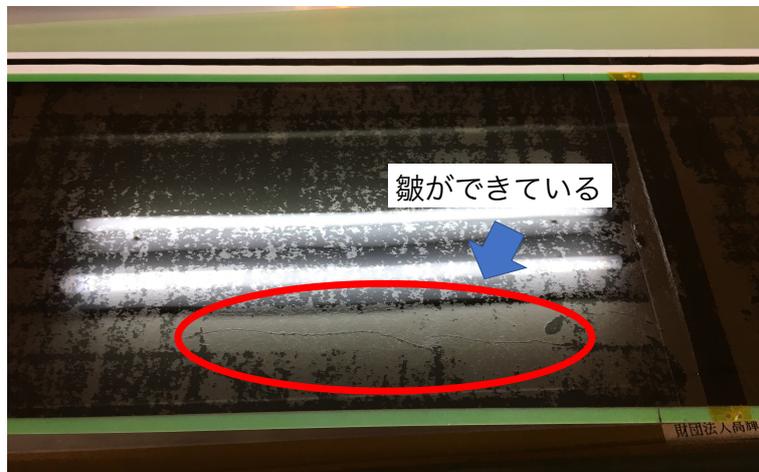


図 3.20. カーボン電極にできたシワ。ビーム入射位置が -20, 10, 20, 24 cm でテフロン RPC の時間分解能が悪化していた原因だと考えられる。

シワと中心の位置の結果を無視して考える。両読み出しの平均では G10、テフロンに大きな差はなく、いずれも 65 ps 程度の時間分解能が得られることがわかった。また、両読み出しの平均では位置依存性はあまりないこともわかった。一方、片側読み出しに関しては大きな位置依存性を持つ。左右の出力でも位置依存性に違いが存在し、特にテフロンの場合でこれは顕著である。左読み出しでの時間分解能は正の位置で悪くなっており、その結果、両読み出しの平均の時間分解能も正の方向に進むにつれ悪くなっている。もう片方の読み出しの時間分解能が良いことから、これは RPC の構

造的問題でなく、読み出し回路系に問題があったと考えられる。当初はテフロンの方がモード分散による波形の崩れが少ないため、読み出しからの距離の増加に伴う時間分解能の悪化は減少されるはずだと考えていた。しかし、この予想に反して、材質をテフロンに変更したことによる改善は見られなかった。これを説明する一つの要因はトリガーの計数率である。テフロンと G10 の測定でのトリガーの計数率はそれぞれ 240 cps と 130 cps で約 2 倍異なっている。先行研究 [19] ではトリガーの計数率が高くなると時間分解能が 10 ps ほど悪くなることであると示している。これは、ギャップ内に残ったイオンがギャップ間の電場が弱めてしまい、アバランシェ増幅が抑制されてしまうからである。計数率の高いテフロンの方では時間分解能が悪化した可能性がある。逆に考えれば、テフロンの方のトリガー計数率を下げれば、G10 より時間分解能が改善する可能性がある。

モード分散の影響は slewing 補正で打ち消されている可能性がある。これを調べるため、補正前の時間分解能を評価し、比較した。補正をする場合は、RPC と RF の時間差の分布 (図 3.14) に対し、式 (3.4) の補正を行い、得られたピークを重ね合わせていた。一方、今回は RPC と RF の時間差の分布 (図 3.14) に対し、補正をせずにピークを重ね合わせた。(図 3.17 の緑のピークを足し合わせることに対応している。)。得られた分布をガウス関数でフィットし、その標準偏差を時間分解能とした。図 3.21 に補正前と補正後の時間分解能の位置依存性の結果を示す。図の (a),(b),(c) はそれぞれ左右両読み出しの平均、左の片読み出し、右の片読み出しに対応している。赤色、青色のプロット点はそれぞれテフロン、G10 の信号を表す。また、塗りつぶされたプロット点は補正前の時間分解能であり、塗りつぶされていないプロット点は補正後の時間分解能を示している。図 (a) を見ると、補正前の時間分解能に関して、G10 に比べ 15-20 ps 程度、テフロンの方が良くなっていることがわかる。また、(b),(c) の片読み出しの結果も、補正前ではテフロンの方が良い。すなわち、テフロン RPC では slewing 補正前の時間分解能について改善されている。波形測定の結果を思い出せば、補正前の結果は、G10 の方が波形が鈍っているためと理解が可能である。しかし、補正後の時間分解能は両読み出しの平均に関して、G10 とテフロンの方に補正前ほどの違いはない。すなわち、波形の鈍りによる時間分解能悪化の影響は、slewing 補正によって打ち消すことができるものである、と説明可能である。

以上の結果を踏まえ、LEPS2 では実機製作に向けて、

- (1) テフロン・G10 いずれの材質の RPC も両読み出しで時間分解能 65 ps 程度を達成
- (2) トリガー計数率を考慮すれば、テフロンの時間分解能は改善の余地がある。
- (3) テフロンの方がモード分散が抑制されており、反射が小さい。
- (4) テフロンの方が安価

の 4 つの理由から RPC の内部の構造をテフロンにすることに決めた。

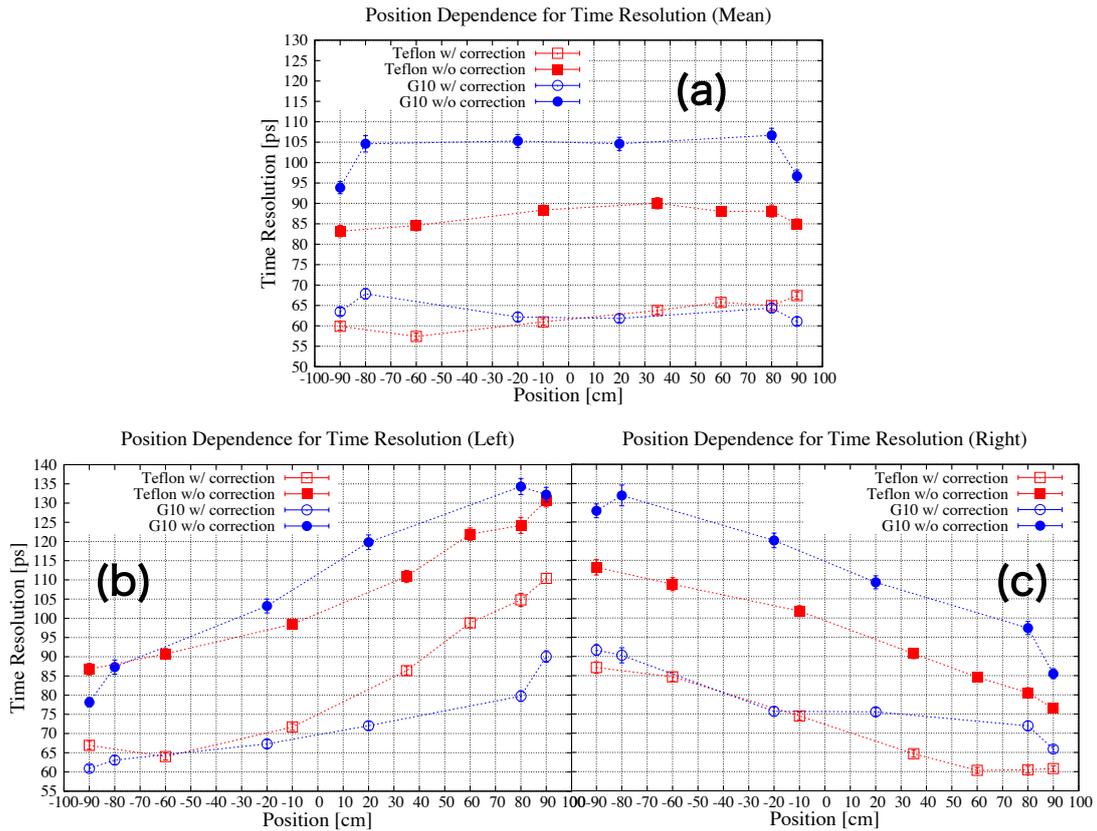


図 3.21. 補正前と補正後の時間分解能の位置依存性の結果を示す。図の (a),(b),(c) はそれぞれ左右両読み出しの平均、左の片読み出し、右の片読み出しに対応している。プロット点の色は赤色がテフロン、青色が G10 を表している。また塗りつぶしたプロット点は slewing 補正前の、塗りつぶしていないプロット点は補正後の時間分解能を表す。

第4章 実機的设计と製作

3章でのテストの結果を踏まえて、実機的设计・製作を行った。LEPS2 スペクトロメータにインストールする RPC は2種類ある。Large-RPC と Small-RPC である。図 4.1 にソレノイド電磁石中におけるそれぞれの位置関係を示す。

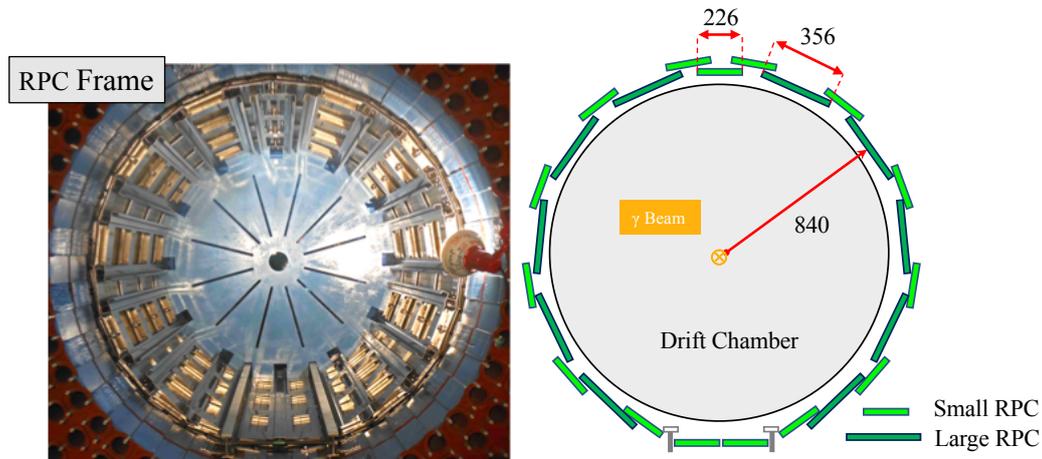


図 4.1. Large-RPC と Small-RPC のソレノイド電磁石中インストール位置。左の図はソレノイド磁石内部をビーム下流側から撮影したもの。円筒状に囲っているアルミフレームに RPC を設置する。右図は RPC の設置値位置の概念図を表す。ここでの寸法の単位は mm である。RPC は外径 800 mm の DC からわずかに外側に位置している。

Large-RPC は有感領域 $2000\text{ mm} \times 312.5\text{ mm}$ で¹、幅 25.5 mm のストリップが 12 本ある (図 4.2 参照)。それぞれのストリップは 0.5 mm 間隔で配置される。この隙間の影響は性能評価の章で述べる。このストリップ幅は 3 章の試作機のものと同じである。左右末端には増幅回路がついており、合計 24 ch の信号の出力を行う。一方 Small-RPC は有感領域 $2000\text{ mm} \times 184.5\text{ mm}$ である。8 本のストリップを持ち、合計 16 ch で読み出す。ストリップ幅は Large-RPC より少し狭い 22.5 mm である。通常ストリップが大きいと時間分解能が悪化する [19]。本研究ではこの Large-RPC を製作し、その性能評価を行う。Large-RPC で十分な性能が出れば、Small-RPC でも十分な性能が期待できる。ここでは Large-RPC の構造について説明する。

4.1 RPC の内部構造の改良

RPC のスタック構造は先行研究 [12] と [26]、また、3 章の試作機の構造とほぼ同じである (図 2.6 参照)。ただし、層構造の中心部の材質をテフロンに変えた。ストリップの形状と、用いたガラスも

¹ここで有感領域は銅プリントのストリップが覆う領域である。

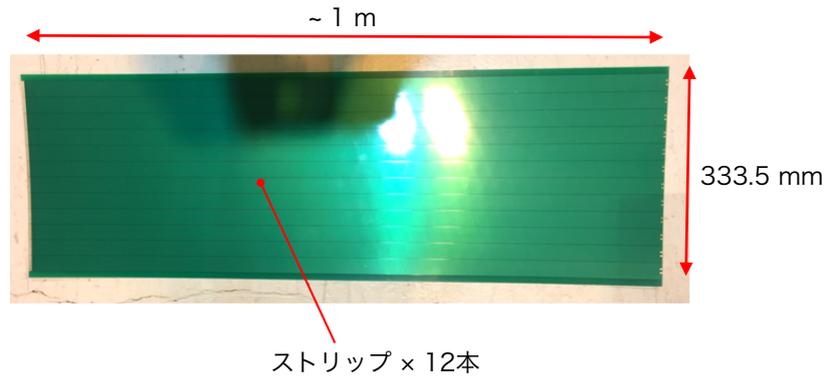


図 4.2. Large-RPC のカソードストリップ基盤の写真。0.8mm 厚の PCB に 18 μm 厚の銅プリントが施されている。25.5mm のストリップが全部で 12ch あり、これは 0.5mm 間隔で並ぶ。幅方向の端に 1cm ほどの余白部分があるため、全体としては 333.5mm の幅を持つ。一つのストリップ基盤は 1m であり、2つをつなげて 2m にする。詳しくは [26] を参照。

変わっている。さらに、ハニカムサンドイッチが層構造に新たに追加された。層構造中心部の材質を G10 からテフロンに変更するという議論に関しては前章で詳しく述べた。ここでは他の変更点について述べる。

ストリップ基盤の変更 3章で述べたように今回の RPC では、ストリップの末端部分のテーパー部分を削除した。これは増幅回路の入力部分と RPC の出力部分の計算できない結合部を短くし、シミュレーションの結果と近づけるために行った。ストリップの末端部分の写真を図 4.3 に示す。増幅回路はアノードストリップに接するように取り付けられる。

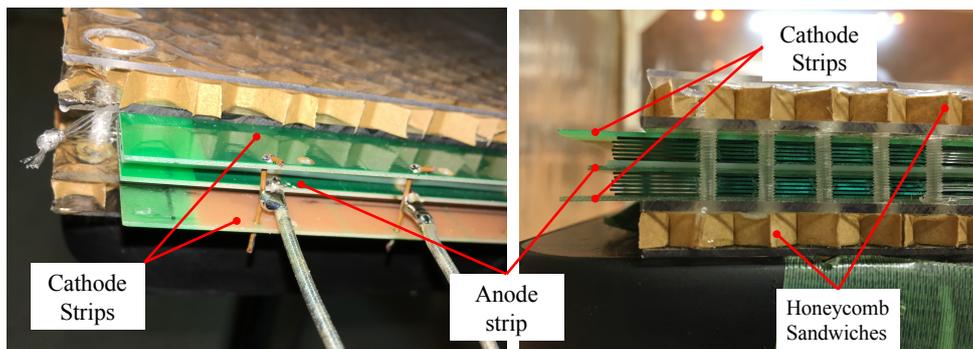


図 4.3. RPC の末端部分の構造、操作時はアノード部分の出力部分と増幅回路の入力部分を導線をつなぐ。その際に増幅回路はアノードストリップに接するように取り付ける。

ガラスの変更 高抵抗板であるガラスを変更した。これは [12],[19],[26] で用いていたガラスが、製造会社の都合で使用できなくなったという製作上の理由による。RPC に関するガラスの性能の変

更点を表 4.1 に示す。ガラスの誘電率が減っている。文献 [42] によると、ストリップに誘起される

表 4.1: RPC の性能に関するガラスの性質の変更点。

	厚さ ± 公差	誘電率	誘電正接
変更前	400 ± 50 μm	8.25	0.0086
変更後	400 ± 100 μm	7.2–7.6	0.012–0.013

電流 $i(t)$ は誘電率 ε と次式のような関係を持つ：

$$i(t) = \frac{v_e \varepsilon e}{N_{\text{gap}} g \varepsilon + (N_{\text{gap}} - 1) b} N_e(t) \quad (4.1)$$

ここで他の変数は

v_e : 電子の移動速度, e : 電子の電荷, $N_e(t)$: 電子の数

g : ギャップ幅, N_{gap} : ギャップ数, b : ガラスの厚み

である。この式に典型的な速度 $v_e = 230 \mu\text{m}/\text{ns}$ として、今回の層構造のパラメタや誘電率を代入した。この式によると、ガラスの変更によって誘起される電流量は減少するが、それは 2%程度だということがわかる。

また、今回のガラスでは誘電損失²が増えている。誘電損失の増加はストリップの伝搬に関する信号の損失が増えることを示す [25]。この影響を調べるため、このガラスで製作した RPC の周波数特性を、NWA を用いて測定した。測定結果を図 4.4 に示す。縦軸が伝送信号と入射信号の波高の比率、横軸が入射信号の周波数を表す。赤線がガラスを変えた今回の RPC に対応する。青線と緑線は 3 章で測定した、ガラスを変える前の RPC の周波数特性であり、それぞれ層構造の中心部分にテフロンと G10 を用いた RPC に対応する。テフロンを用いた RPC に関して、ガラスを変える前と変えた後の結果を比較すると、400 MHz から違いが見られる。ガラスを変えた後の方が減衰率が大きくなっており、10%ほどの増加が見られる。これは誘電正接増加の影響と考えられる。しかし、バンドストップの位置に大きな変化は見られない。このため、今回の RPC はガラスを変える前の G10 の RPC よりも周波数帯域が大きい。G10 の RPC でも時間分解能 65 ps を達成できているため、ガラスの誘電正接増加による、信号伝搬に関する損失の影響は問題にはならないと考えられる。

ハニカムサンドイッチの導入 Large-RPC ではスタック構造にハニカムサンドイッチを追加した。試作機は 2000 mm×230 mm の大きさで、重さが約 15 kg であった。実機の Large-RPC はスタックの大きさで約 2000 mm×350 mm であるため 25 kg 相当の重さになる。LEPS2 のソレノイドスペクトロメータに組み込むとき、RPC は標的周りに円筒状に設置される。これを考慮すると、ソレノイド磁石中において RPC が大きく撓む可能性がある。この撓みを極力少なくするように、ハニカムサンドイッチを用いて構造の強化を計った。

ハニカムサンドイッチは物質量が少ないにもかかわらず、剛性が高いという特徴を持つ。例えば、これは航空機や建築などの材料に使用されている。ハニカムサンドイッチはハニカム構造の中心材とそれを挟む二つの表面板で構成される (図 4.5)。ここでは表面板に PET 樹脂を採用した。PET はアウトガスがほぼなく、RPC のガスの汚染の影響が少ない。また、安価で、加工しやすいという利点がある。中心材は鈴英株式会社のペーパーハニカム 9-G-30[44] を使用した。

²誘電体に交流電場が加わる際に、誘電体の中で熱などに変わることで損失する程度を表す量。

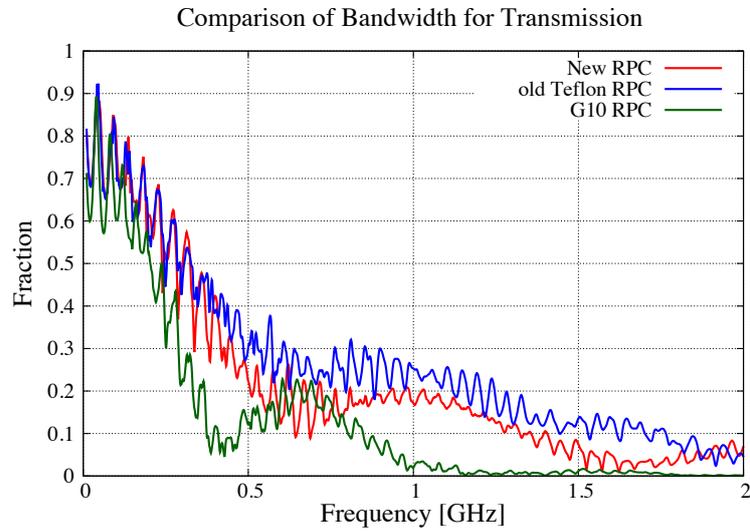


図 4.4. 信号伝搬の周波数帯域の測定結果。縦軸は伝送信号と入射信号の波高の比率、横軸は入射信号の周波数を示す。赤色が今回のガラスを変更した RPC のものである。青色と緑色の結果は 3 章で述べた試作機 RPC の結果である。それぞれテフロンと G10 を使ったものを表す。

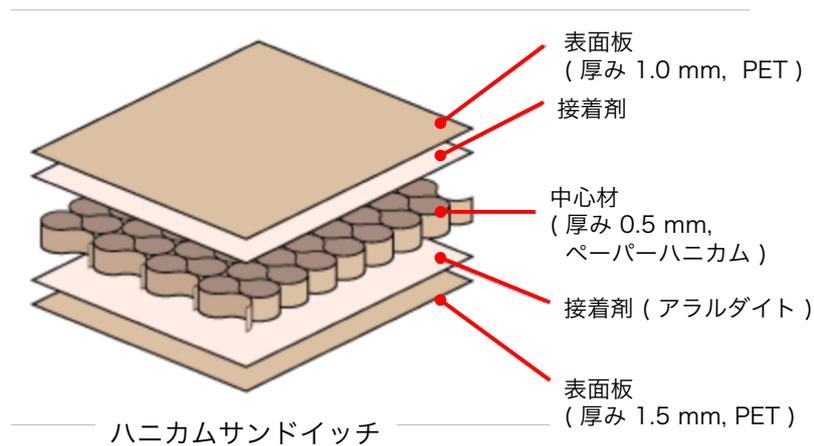


図 4.5. ハニカムサンドイッチの図 [43]。ここでは表面紙は PET 材質で、中心材はペーパーハニカムを用いた。

図 4.5 の層構造で、RPC と同様の 35 cm 幅のハニカムサンドイッチに単位重み 3.2 g/cm^2 が一様にかけられた場合³、中心部での撓みは $900 \mu\text{m}$ に抑えられる見込みである。⁴ このハニカムサンドイッチを 2 つ用いて、RPC のスタックを挟み込み、両端でねじ止めした (図 4.3 参照)。

4.2 増幅回路の磁場中での性能評価と変更点

Large-RPC のストリップ数に対応した読み出しチャンネル数 12 ch の増幅回路を我々は作製した。この時にいくつか変更を加えたのでこれについて説明する。

先行研究 [12][26] での増幅回路 (以下旧増幅回路と呼ぶ) では ADC に入力する信号と TDC に入力する信号を分けていた。しかし、LEPS2 実験では、3 章のように一つの出力信号を Divider を用いて二つに分けて使用する予定である。そこで ADC 入力用の出力チャンネルを取り除いた。

また、旧増幅回路ではインダクタを用いており、このコアにフェライトコアを使用していた。フェライトは磁場中では飽和してしまい、空芯の場合と同じ振る舞いになる。磁場の影響を調べるため、磁場ありと磁場なしの二つの場合において、増幅回路に信号を入射し、その出力信号の波高を測定した。また、周波数依存性を見るため、測定では周波数の異なる sin 波を複数入力し、その違いも確認した。磁場ありの場合の測定では、増幅回路をソレノイド磁石中に設置した。弱い磁場中の場合、フェライトコアを用いたインダクタは、磁場の向きによってその特性を変えるが、磁場が強くなるとその向き依存性はなくなる。これはフェライトコアが飽和していることを示す。ソレノイド磁石のビーム下流部において増幅回路の向きや位置を変えた時、出力信号に変化が見られた。しかし、ソレノイド磁石内部において同じことを行っても出力信号に変化は見られなかった。また、RPC の設置位置でも出力信号の波高に向き依存性は見られない。したがって、RPC の設置位置ではインダクタのフェライトコアは十分に飽和していると考えられる。この測定では RPC の設置位置に増幅回路を置いて行った。図 4.6 に測定の結果を示す。磁場ありの場合の方が、出力信号の波高が低いことがわかる。これは増幅回路の増幅率が減っていることを示している。また、周波数が低い信号では磁場の有無で大きな違いが見られるが、高い周波数では増幅率の差異はほぼないことがわかる。

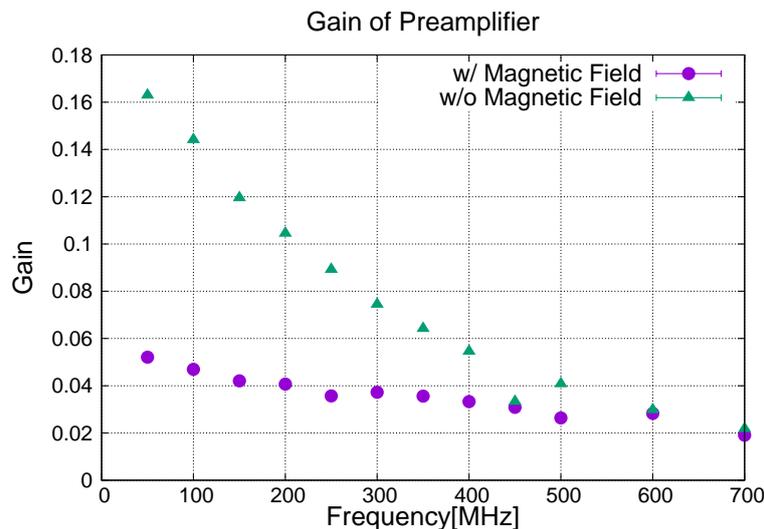


図 4.6. 増幅回路のゲインの周波数依存性を磁場の有無で比較した図。

³RPC がハニカムサンドイッチの上ののっているような状態に相当する。 $15 \text{ kg}/(200 \times 23 \text{ cm}^2)$ から得られる。

⁴ここではハニカムサンドイッチの両端に対し、2 辺支持を仮定して計算している。

増幅率の低下による影響を調べるため、先行研究 [12] の 1 m 長 RPC を用いて時間分解能の測定を行った。ここで RPC はソレノイド磁石中に設置し、磁場をかけた場合とかけなかった場合で比較を行った。結果を表 4.2 に示す。明確な違い (σ で 4.2) はあるが、フェライトが飽和状態だった

表 4.2: [12] を用いた時間分解能の磁場の有無の比較。

	時間分解能	統計誤差
磁場なし	56.6 ps	0.4 ps
磁場あり	59.7 ps	0.6 ps

としても、十分な時間分解能が得られることがわかった。新しい増幅回路では空芯のインダクタに変更した。

4.3 ノイズ対策

一般に RPC のアバランシェモードでの使用には増幅回路が必要である。その時に課題となるのがノイズである。先行研究 [26] の RPC においてもノイズの問題が残っていた。本研究の RPC はソレノイドスペクトロメータ内部に設置するため、増幅回路や RPC にアクセスしづらい。したがって、安定した低ノイズ環境が必要となる。ここではその対策について述べる。

よく出現したノイズの例を図 4.7 に示す。周期が約 370 ns の sin 型の高周波ノイズである。この周波数領域は RPC の信号を形成する主要な周波数成分に対応するため、ローパスフィルターなどで消すことはできず、根本的な解決が必要になる。このような周期的ノイズは非周期的なホワイトノイズと異なり、外部由来とは考えにくい。そこで増幅回路の発振が原因だと考えた。発振は増幅回路の出力が入力部分に何らかの経路で入り、その出力がまた入力に戻るという現象である。このため、周期的なノイズになる。

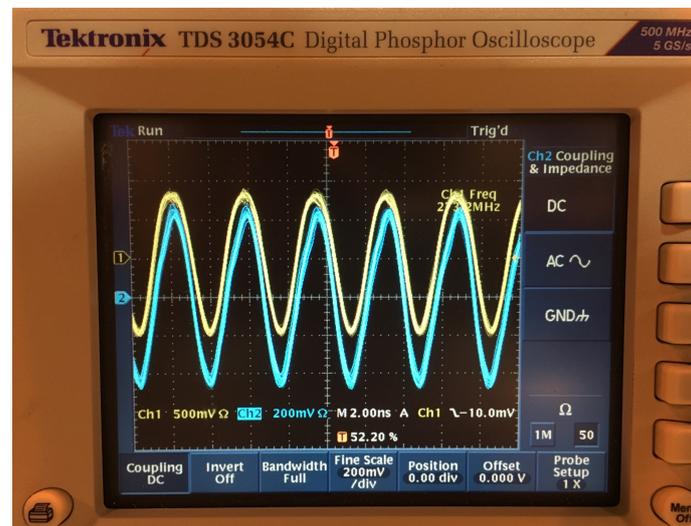


図 4.7. よく現れるノイズ。

対策としてグラウンドの強化を行った。グラウンドが弱い場合、出力信号がグラウンドを揺らし、それが入力部分に影響を及ぼす可能性がある。試作機において増幅回路のグラウンドは RPC のガ

スを封じ込めるアルミ筐体とつないでいた。この時、増幅回路と筐体はアルミブロックを介して接合した（図 4.8 の左図）。それぞれネジで接合している。しかし、アルミは酸化皮膜ができてしまうため、ただ接触させるだけではグラウンドの弱化の原因になる。この酸化皮膜を取り除くため、ネジをつける時には歯付きワッシャーを使用した。試作機では図 4.8 の左図のように、増幅回路の中心部のグラウンドは出力信号を外部に繋ぐ LEMO ケーブルのグラウンドで繋がっているのみであった。しかし、今回はよりグラウンドを強化するため、帯状のケーブルでコネクタと増幅回路の間をつないだ。

増幅回路上部に金属を置いた時、図 4.7 のノイズがよく現れることがわかった。これは出力部分の信号が電磁波として空气中を伝搬し、上部の金属と反射して入力部分に入るのだと考えられる。そこで先行研究 [26] で使用していた上部のアルミ板を取り除き、PET 板によってガスを閉じ込めることを考えた。アルミ板を取り除いた場合、外部ノイズが増えることが予想されたが、今の所問題は無い。これにより発振の発生率が大幅に減った。

また、図 4.8 の左図に見える LEMO ケーブルに注目した。信号がケーブルを伝搬する際、そのケーブルが曲がっていると、その曲がり角において電磁波が発生する可能性がある。もし、空气中を伝搬する電磁波が問題になるならば、この影響により発振ノイズが発生しうる。そこでこの LEMO ケーブルができるだけまっすぐになるようにした。また、コネクタと LEMO ケーブルの接合部で反射をする可能性があるため、接合部分が大きくなりすぎないように注意した。さらに、ケーブルの周りを遮蔽し、電磁波が飛ばないようにした（図 4.8 の右図）。特にこの遮蔽は重要で、遮蔽をしない場合とする場合では発信ノイズの発生率に大きな違いがある。出力部分の信号は増幅前に比べ大きく、ノイズに影響しやすいと考えられる。実際、他の部分を遮蔽しても改善はあまり見られなかった。

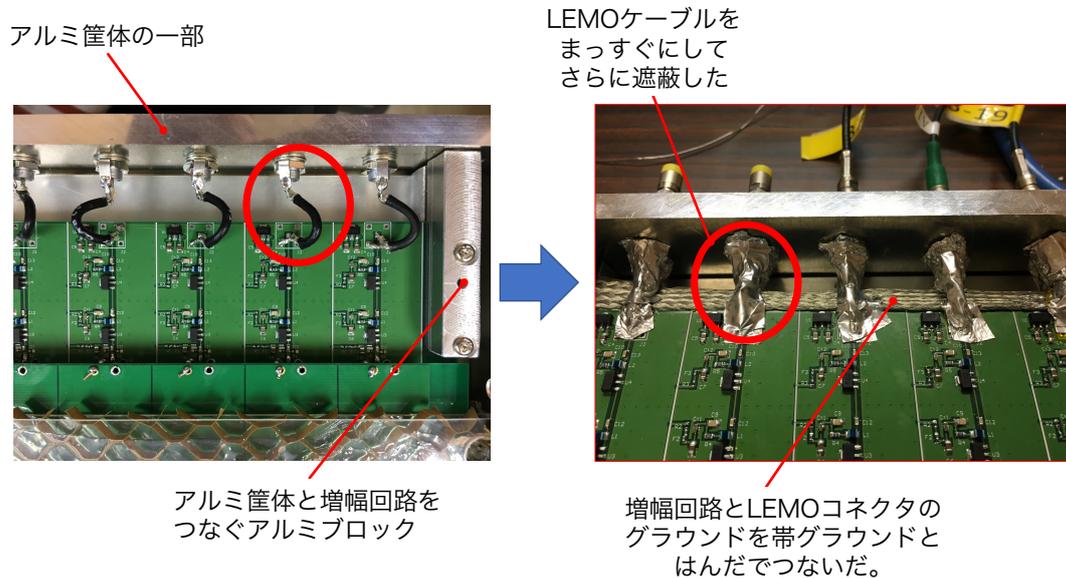


図 4.8. 増幅回路周りの写真。増幅回路の出力部分を遮蔽する前後の写真。

以上のノイズ対策を行うことで、増幅回路の出力信号を Divider で分けた信号に関して、ノイズを RMS で 3mV 以下に抑制することができた。特に安定性に関して大幅に改善された。

第5章 実機RPCの性能評価

4章で作製した Large-RPC の検出効率及び時間分解能について性能評価を行った。まず、印加電圧・閾値レベルの最適化を行った。また、ストリップの長さ方向 (2m に伸びている方向) と、それと垂直なストリップ幅方向に関して、位置依存性を調べた。また、異なるストリップに電子を入射し、ストリップの依存性がないか調べた。さらに、ソレノイド電磁石内部にRPCを設置し、磁場をかけた場合とかけなかった場合で測定を行い、比較を行った。さらに、トリガー領域を拡張した場合の影響も調べた。本章では測定の方法とその結果を示す。

5.1 印加電圧と Discriminator の閾値レベルの最適化

RPC への印加電圧と回路 (図 3.6 参照) における Discriminator の閾値レベルに関して最適化を行うため、それらの依存性を調べた。印加電圧依存性を調べるときは閾値レベルは -20 mV に設定した。また、閾値レベル依存性を調べるときは印加電圧は 13.0 kV に設定した。トリガーシンチレータは、トリガー領域の中心がRPCの中心から 20 cm 横にずれた位置に設置した。

5.1.1 時間分解能・検出効率測定の実験セットアップ

セットアップは3章で行ったものとほぼ同じである。ただし、トリガー領域を変更し、上流で $2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ で下流で $1.5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ とした (水平方向 \times 鉛直方向)。テスト時の写真を図 5.1 に示す。

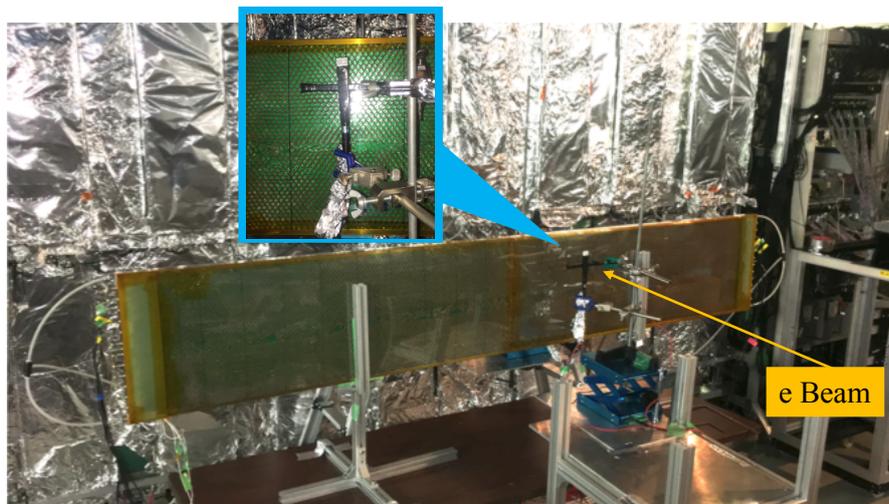


図 5.1. 実験セットアップの図。

5.1.2 解析方法

時間分解能の評価方法に関しては小節 3.1.1 と同じである。ここでは特に検出効率の評価方法について述べる。検出効率は、小節 3.1.1 で示したトリガーのカット条件のもと評価した。検出効率の分子は RPC の左右からの出力信号がいずれも正しいタイミングであるイベント数で定義する。図 5.2 の左の 2 つの上図 (下図) は RPC の右 (左) 出力信号とトリガーとのタイミング差の分布である。これに対しガウス関数でフィッティングを行い、 $\pm 5\sigma$ 内側の領域 (左図の赤色の領域) を正しいタイミングとする。検出効率の分母に関しては、RPC に複数の粒子が入射したマルチヒットイベント影響を考慮した。これは図 5.2 の右図で赤色で表した、マルチヒット領域に入るイベントである。マルチヒット領域は左右片方が正しいタイミングで、なおかつもう片方が正しいタイミングより早く TDC に入力される場合で定義される。このマルチヒットイベントを除外したイベントを検出効率の分母とする。以下の結果ではマルチヒットイベントを分母から取り除いた検出効率と、そうでない検出効率の両方を示す¹。

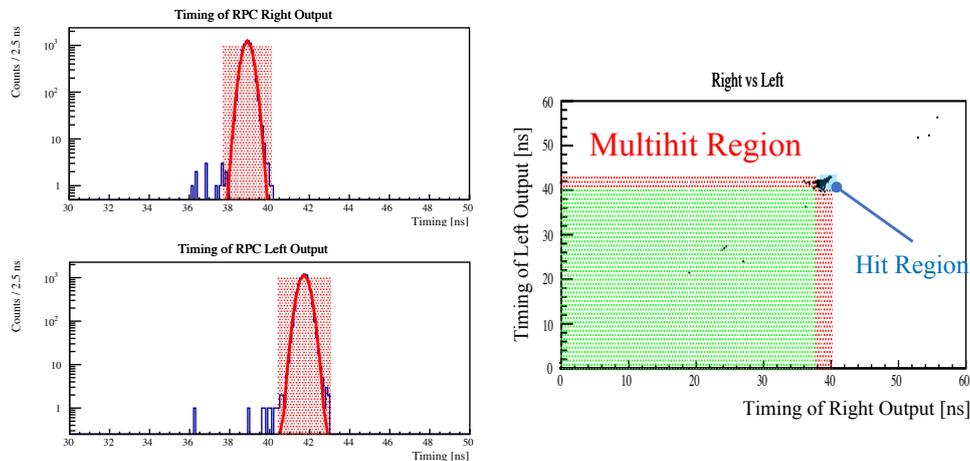


図 5.2. 左図：上が RPC の右読み出しタイミングで下が左読み出しのタイミングのヒストグラム。右図が右と左の相関図。青、赤、緑の領域はそれぞれ、ヒット領域、マルチヒット領域、アクシデンタル領域である。検出効率は分母からマルチヒット領域に存在するイベントを取り除いて評価する。

5.1.3 印加電圧の最適化と閾値レベルの最適化

電荷量分布の印加電圧依存性

RPC の信号の電荷量分布の印加電圧依存性を図 5.3 に示す。印加電圧が 13.5 kV の分布では、ADC の高い場所で非常に小さい二つ目の山が見える。これは RPC がストリーマモードに入り始めていることを示す [19]。

¹ また、ビームと関係なく RPC になるイベントが、偶然ビームと同期する場合がある。これをアクシデンタルイベントと呼び、図の緑の領域内のイベントで定義する。今回は実際の状況を想定して、分母にこのイベントを入れて検出効率を評価した。アクシデンタルイベントが多いと検出効率が悪くなる。

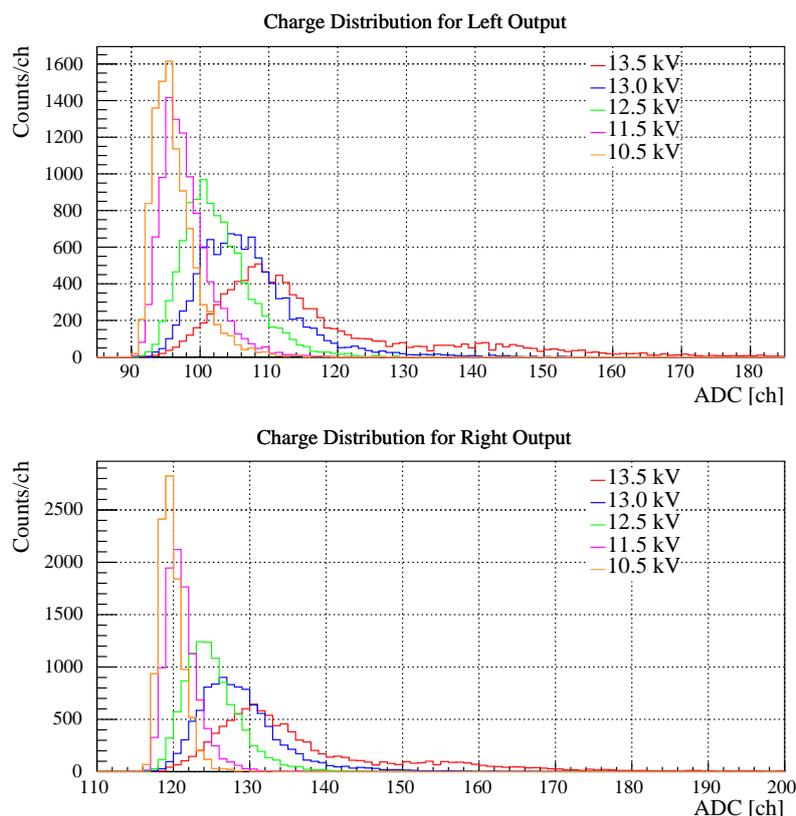


図 5.3. 電荷量分布の印加電圧依存性。上図が RPC の左からの出力信号、下図が右からの出力信号を表す。13.5 kV ではテール成分に非常に小さな山が見える。これはストリーマモードに入り始めていることを示す。

時間分解能と検出効率に関する印加電圧依存性と閾値レベル依存性

図 5.4 に時間分解能の結果を示す。左図が印加電圧依存性、右図が閾値レベル依存性を表し、これらは slewing 補正後の値である。印加電圧依存性の図を見ると、13.0 kV が一番時間分解能が良い。これは 13.0 kV まではアバランシェモードであり、電圧が高くなるに従い信号が大きくなるため、時間分解能が向上したのだと理解できる。13.5 kV で少し悪くなった原因は、この電圧ではストリーマモードのイベントが混入したためだと考えられる。しかし図 5.3 の二つ目の山は小さく、ストリーマモードの増幅のイベントは多くない。このため、13.0 kV との違いはほぼないのだと理解出来る。閾値レベル依存性の測定結果では、有意な違いは見られなかった。

図 5.5 に検出効率の結果を示す。先程と同様に左図が印加電圧依存性、右図が閾値レベル依存性を表す。印加電圧依存性の結果は 12.5 kV より下からは検出効率下がっていくことを示す。また閾値レベルの違いによる検出効率の有意な違いは見られなかった。

印加電圧 13.0, 13.5 kV を比較すると時間分解能と検出効率に関して有意な違いは見られない。しかし、13.5 kV ではストリーマモードのイベントが見られるため、経年劣化の恐れがある。そこで以下では印加電圧 13.0 kV で測定を行う。また、今回は有意な差はないが閾値レベル -20 mV が最も良い時間分解能が得られているため、今回はこの値で測定を行うことにする。

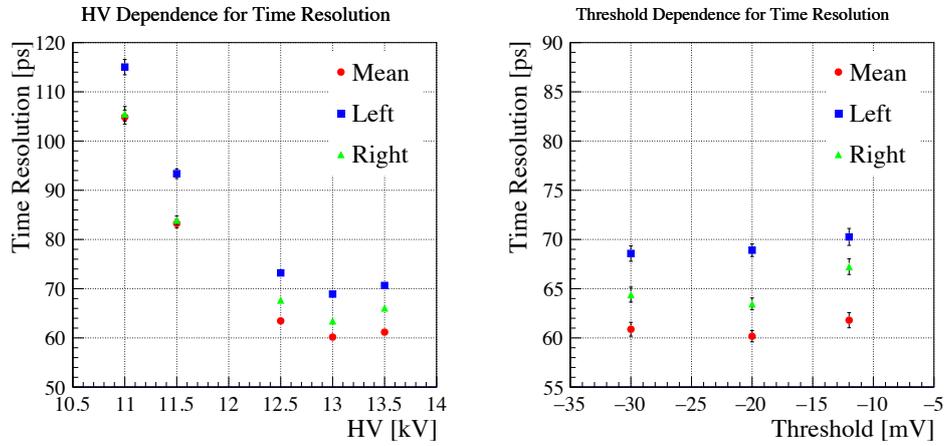


図 5.4. 左図が時間分解能の印加電圧依存性、右図が時間分解能の閾値レベル依存性を表す。

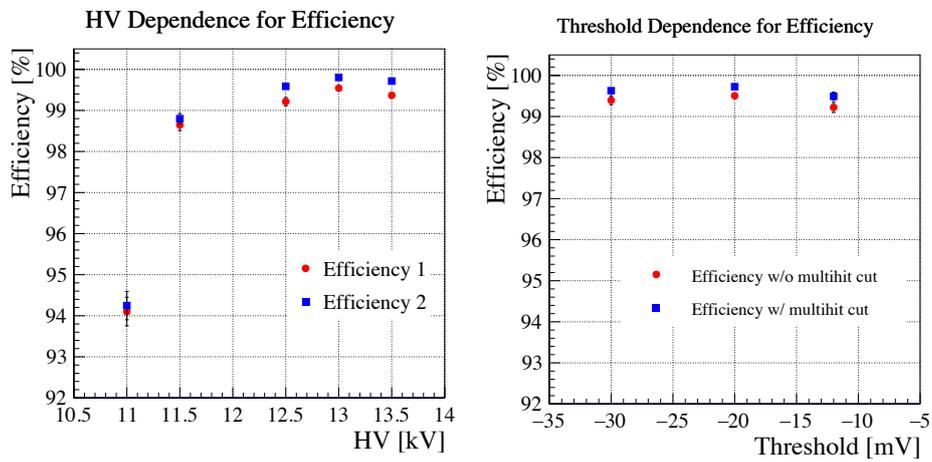


図 5.5. 左図が検出効率の印加電圧依存性、右図が検出効率の閾値レベル依存性を表す。赤色のプロットは検出効率 1 を、青色のプロットは検出効率 2 を示す。検出効率の定義は前節の解析の部分参照。

5.2 性能評価

RPC の性能評価を行った。ここではその結果を示す。ここではいずれもトリガーの係数率は 100 cps 以下である。また、ビーム入射の前後でノイズを確認した。その時のノイズは、増幅回路の出力信号を Divider を通した後の信号において RMS で 2.5 mV 以下であった。

5.2.1 位置依存性

RPC に対する電子ビーム入射位置を変えて、その時の性能を調べた。RPC の中心部はストリップやガラスの結合部分であるため、性能が悪化することがわかっている [26]。LEPS2 実験では RPC の中心部に当たるものは除外して、解析を行う予定である。すなわち中心部を除くすべての位置で、LEPS2 実験の要求性能が満たされるか確認する必要がある。この時ストリップの長さ方向だけでなく、ストリップの幅方向の依存性も調べた。特にストリップの間に粒子が当たった場合でも、要求性能が満たされるか確認する必要があるからである。

ストリップの長さ方向の位置依存性

トリガーシンチレータの位置を固定したまま RPC の位置を動かし、ストリップの 2 m の長さ方向に関してビーム入射位置依存性を調べた。このときトリガー領域の中心がストリップの中心に重なるようにした。詳細は 3.3.1 の小節で述べたとおりである。図 5.6 にその結果を示す。ここで位置や左右の定義は図 3.5 のときと同じである。赤、青、緑のプロット点はそれぞれ、両読み出しの平均、左読み出し、右読み出しの信号を用いて評価した時間分解能である。 ± 2.5 cm の位置の分解能は、どちらも時間分解能 75 ps 以下である。またそれ以上離れた位置ではほとんどが 65 ps 以下の時間分解能である。 ± 95 cm の位置で時間分解能が悪い原因は、端であるため電場が一様でないという理由と、反射波の影響で slewing 補正がうまくいっていないという理由の二つの理由が考えられる。 -40 cm の位置で右出力の時間分解能が 100 ps と悪くなっているが、この原因は未だわかっていない。今後 RPC を分解し、内部を調べる予定である。また検出効率に注目すると、マルチヒットイベントを考慮した検出効率で 99% 以上であることがわかる。

また別のストリップを用いた測定も行った。その結果を図 5.7 に示す。異なるストリップでも矛盾のない結果得られた。すなわち 0 cm 以外の位置で LEPS2 実験の要求性能 75 ps 以下の時間分解能が満たされていることがわかった。

ストリップの幅方向の位置依存性

RPC の位置を固定したままトリガーシンチレータの位置を上下に動かし、ストリップの幅方向のビーム入射位置依存性を調べた。図 5.8 のように信号を読み出すストリップの中心値を 0 mm として、負の方向にトリガーシンチレータを動かした。 -12.5 mm はちょうど隣り合う 2 つのストリップの間に設置した場合を表している。結果を図 5.9 に示す。ストリップの中心から離れていくと、時間分解能と検出効率ともに悪化するという傾向が見られる。しかし、いずれの位置でも時間分解能 70 ps 以下、検出効率 99% 以上であり、要求性能は満足している。

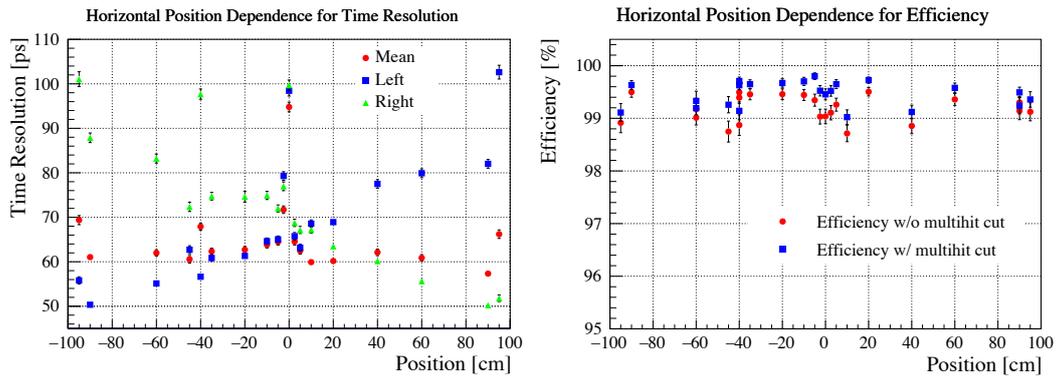


図 5.6. ストリップ長さ方向のビーム入射位置依存性。左図が時間分解能、右図が検出効率を表す。

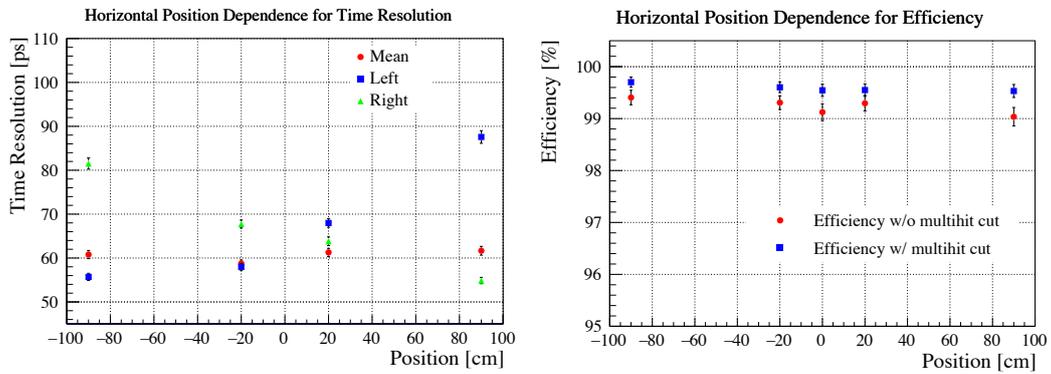


図 5.7. ストリップ長さ方向のビーム入射位置依存性。図 5.6 と異なるストリップにビームを入射した。左図が時間分解能、右図が検出効率を表す。

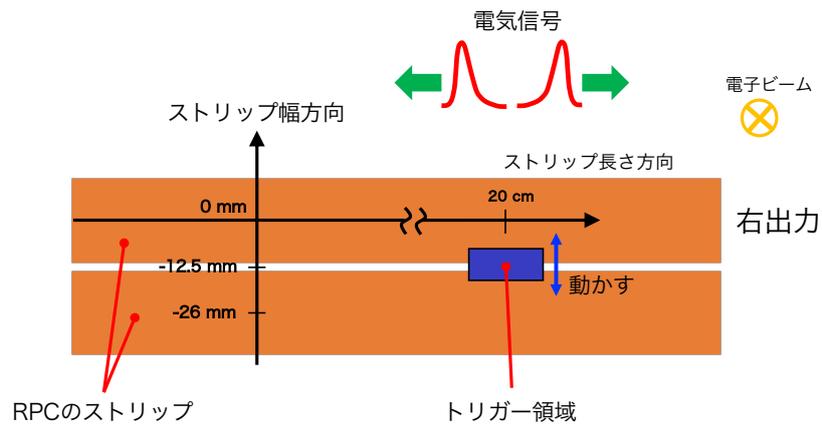


図 5.8. ストリップ幅方向のビーム入射位置依存性の測定の概念図。

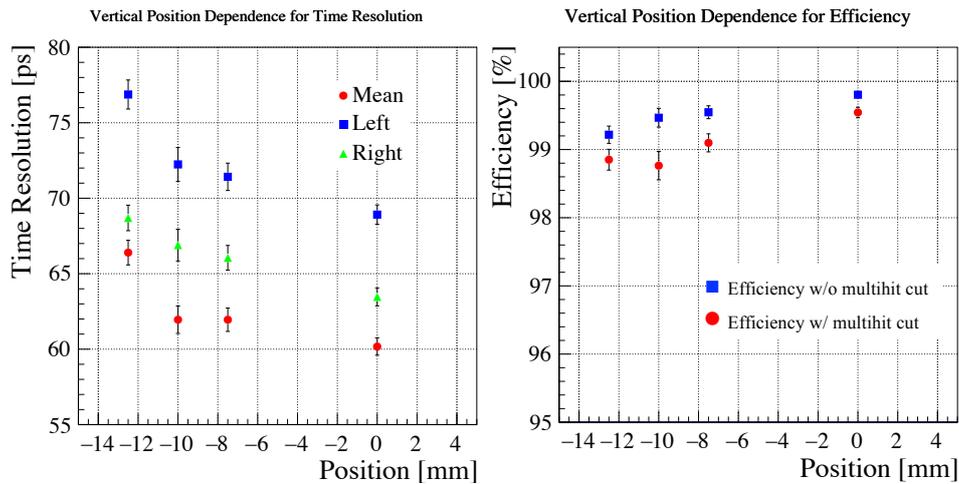


図 5.9. ストリップ幅方向のビーム入射位置依存性。左図が時間分解能、右図が検出効率を表す。

5.2.2 ストリップ依存性

ストリップ長さ方向の位置 20 cm において、時間分解能・検出効率のストリップ依存性を測定した。結果を図 5.10 に示す。いずれも左右の読み出しの平均で LEPS2 実験の要求性能の時間分解能 75 ps 以下を満足していることが確認できた。また両読み出しの平均の時間分解能に、有意な違いは見られなかった。

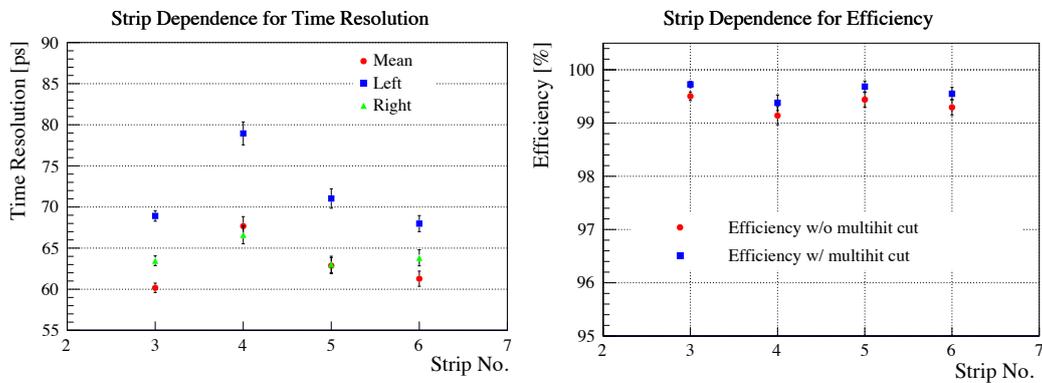


図 5.10. 時間分解能・検出効率のストリップ依存性。

5.2.3 磁場中の性能評価

LEPS2 実験では、RPC をソレノイド磁石内部に挿入して測定を行う。したがって、RPC の磁場中での性能を調べる必要がある。4.2 節で述べたように、今回の増幅回路のインダクタのコアは空芯である。このため、増幅率に関して、磁場の有無による差異はないはずである。また、RPC は磁場中でも振る舞い変わらない検出器である。したがって、信号の電荷量もほぼ変わらないことが予

想される。測定では LEPS2 ビームラインのソレノイド磁石内部に RPC を設置した。ソレノイド磁石の内径は RPC を入れるには小さいため、RPC をビームに対して傾ける必要があった。そこで、この測定では RPC をビームに対して約 40° 傾けている (図 5.11 参照)。この時磁場の向きはビームとおよそ平行である。また、トリガーに用いていた光電子増倍管を、磁場に強い Finemesh 型のものに変更した。この時トリガー領域は上流で $2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 、下流で $2.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ である (水平方向 \times 鉛直方向)。

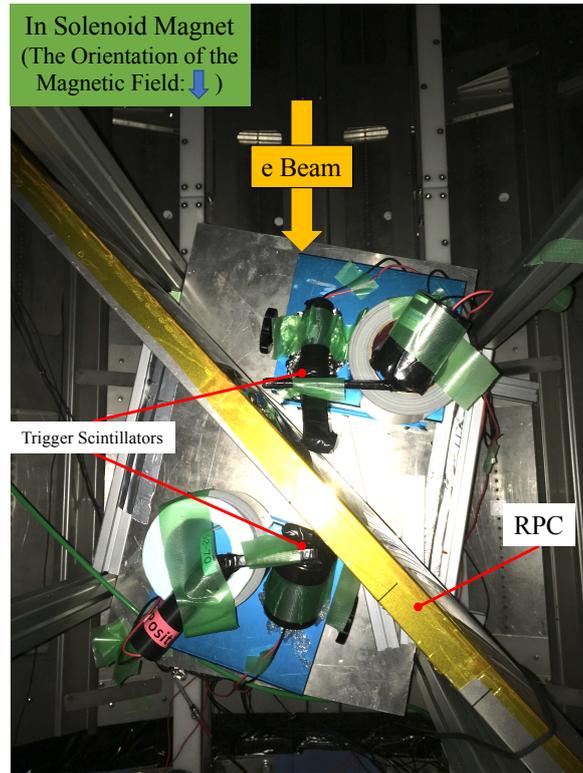


図 5.11. 磁場中の測定のセットアップ。

RPC の出力信号の電荷量分布について、磁場が有る場合と無い場合での比較を図 5.12 に示す。ここでは全イベント数が 10000 になるようにスケールしてある。青の分布が磁場が有る場合、赤の分布が磁場の無い場合を表す。電荷量分布の平均値を表 5.1 に示す。磁場ありの方が少しだけ信号が小さくなっているが、その違いは大きくないことがわかる。予想と矛盾ない結果であった。ちなみに ADC のペDESTAL の値が磁場の有無で変わらないことは確認している。

表 5.1: RPC の信号の電荷量分布に関する磁場の有無の比較。

	左読み出しの平均値	右読み出しの平均値
磁場なし	104.61 ± 0.11	127.19 ± 0.07
磁場あり	103.60 ± 0.11	126.38 ± 0.08

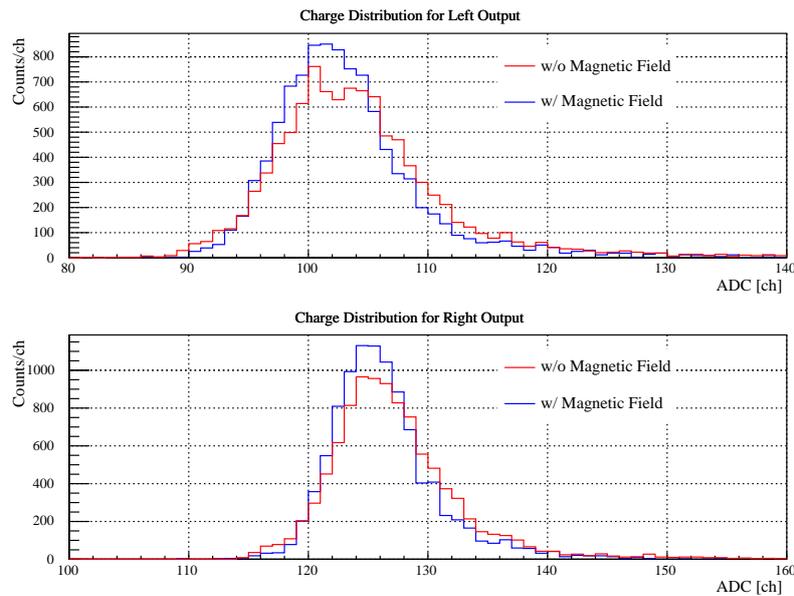


図 5.12. 電荷量分布の磁場の有無の比較。

次に時間分解能と検出効率の結果を見る。結果は表 5.2 に示す。ここで磁場なしの結果は、ビームの入射角度を 40° 傾けたときの測定結果である。前節での結果と比較すると、ビームの入射角度の変化による影響はほぼないことがわかる。これは先行研究 [19] の入射角度依存性は見られなかったという結果と無矛盾である。時間分解能は磁場の有無でほとんど変わっていない。いずれも左右の平均で約 65 ps の時間分解能である。また検出効率に関してだが、どちらの結果も 99.5% 以上であることがわかる。すなわち、磁場中でも RPC は正常に動作可能であり、LEPS2 実験の要求性能を満たすことがわかった。

表 5.2: RPC の時間分解能・検出効率に関する磁場の有無の比較。

	時間分解能 (平均)	時間分解能 (左)	時間分解能 (右)	検出効率 1	検出効率 2
磁場なし	65.93 ± 0.71	69.30 ± 0.85	87.28 ± 0.94	99.59 ± 0.08	99.75 ± 0.06
磁場あり	62.76 ± 0.83	66.58 ± 0.94	84.21 ± 1.13	99.29 ± 0.12	99.73 ± 0.07

5.2.4 ストリップ幅方向に関する入射位置不定性の影響

LEPS2 実験ではどのストリップに粒子が当たるか決まっていない。このような状況下でも飛行時間を精度よく評価できるかはわかっていない。そこで、入射位置の不定性の影響を調べるため、図 5.13 のように、鉛直方向のシンチレータのみをトリガーに用いて測定を行った。トリガー領域は 3 つのストリップを完全に覆っている。図の Strip No.4-6 のストリップが完全に覆われたストリップである。完全ではないが、Strip No.3 と No.7 のストリップもトリガー領域と重なっている。トリガーシンチレータの幅は上流で 2 cm、下流で 2.5 cm である。この時 RPC は前小節のようにビームに対して、約 40° 傾いている²。ここでは磁場なしの状態での測定を行った。3 つのストリップの左右

²前述したように、ビームの入射角度によって性能は大きく変わらなかったことに注意。

両端の出力信号に関して解析を行い、時間分解能を評価した。

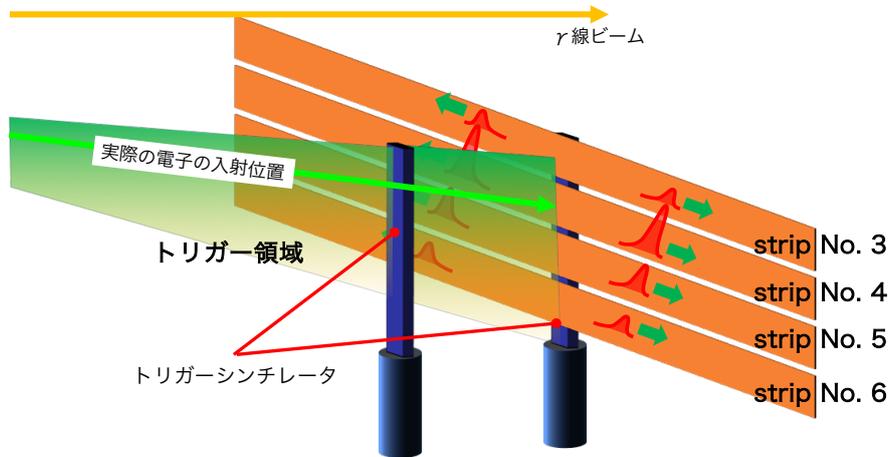


図 5.13. 測定の概念図。トリガー領域は複数ストリップにまたがっている。解析では最も電荷量が大い信号を用いて、飛行時間を評価する。

解析の方法を説明する。粒子があるストリップを通過する時、クロストークの影響でその隣り合うストリップからも信号は出力される。このうちで飛行時間が最も精度よく決められるのは、粒子が通過したストリップからの信号であると考えられる。また、この信号はクロストークの信号に比べ大きい電荷量を持つと予想される。そこで、3つのストリップのうち電荷量もっとも大きい信号を、イベントごとに選んだ。選んだ信号に対し、小節 3.3.3 で示した方法と同様に、RF 信号の重ね合わせと slewing 補正を施し、時間分解能を求めた。この時、小節 3.3.3 と同様にトリガーシンチレータや RF 信号のカット条件を課した。しかし、RPC の左右の出力信号の時間差に関する制限を 300 ps から 500 ps に変更した。

3つのストリップ由来の信号の電荷量分布を図 5.14 に示す。左から順に図 5.13 の Strip No.4,5,6 のストリップ由来の信号に対応する。青線はトリガーシンチレータや RF 信号に関するカット条件を課した分布 (小節 3.3.3 を参照)、赤線は青の条件に電荷量もっとも大きいという制限を課した分布、緑線はさらに左右の出力の時間差をガウス関数でフィッティングし (図 3.13)、その平均値から ± 500 ps 以内にあるという制限を課した分布である。Strip No.5, 6 に関してはペDESTALと信号が区別できている。Strip No.4 でペDESTALを区別できていない理由は、Strip No.3 からのクロストークが多いためである。Strip No.4 に隣あう No.3 のストリップは γ 線ビームに近いので電子ビーム入射の計数率が高い。したがって、Strip No.3 から No.4 へのクロストークも多いと考えられる。Strip No.6 にも No.7 からのクロストークの影響があると予想される。しかし、No.7 のストリップは γ 線ビームから遠く、電子ビーム入射の係数率が低い。そのため、クロストークの影響は小さく、No.6 の電荷量分布はペDESTALと区別できているのだと理解できる。

時間分解能の結果を表 5.3 に示す。Strip No.4 はクロストークの影響が大きいため無視する。Strip No.5 と No.6 では時間分解能は 60 ps 以下である。結論として、この解析方法を用いれば、粒子がどのストリップに当たったかわからないような状態でも、要求性能を満たす時間分解能を得られるということがわかった。一方で詳細な解析を行うことでより良い時間分解能が得られる可能性がある。例えば、2つのストリップで飛行時間を求め、それらの電荷量の重みつき平均で求めた飛行時間を新たに設定した場合、これはより良い時間分解能を持つ可能性がある。このような詳細な解析

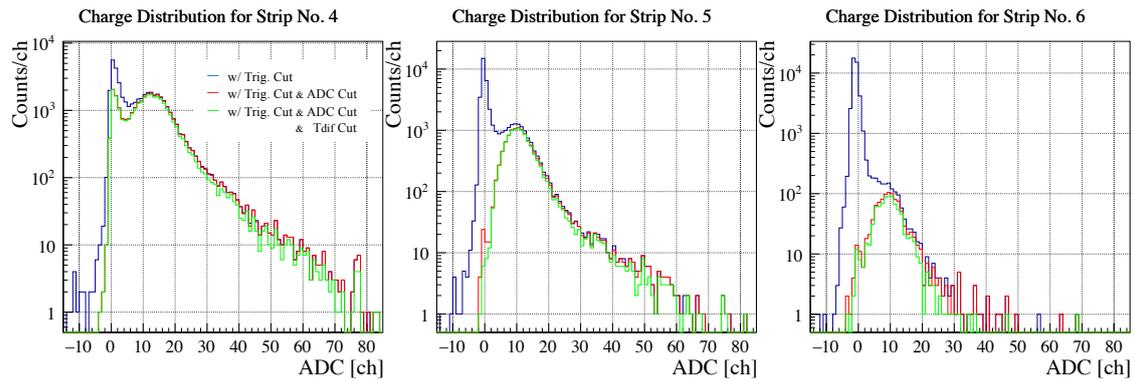


図 5.14. 電荷量分布

はまだできていないため、今後行う予定である。

表 5.3: 複数チャンネル読み出しの場合の RPC の時間分解能

時間分解能 (平均)	
Strip No.4	69.0 ± 0.4
Strip No.5	55.5 ± 0.5
Strip No.6	53.0 ± 1.7

5.2.5 ストリップ長さ方向に関する入射位置不定性の影響

LEPS2 実験では位置ごとに slewing 補正のパラメタを決める予定である。この時、補正のパラメタをどのくらいの位置の間隔で決めるか、という問題がある。この間隔が狭ければ補正がうまくいくため、結果良い時間分解能が得られると予想される。しかし統計量を多くするため、広い間隔で補正できる方が望ましい。そこでトリガー領域をストリップ長さ方向に伸ばした場合の測定を行った。すなわち図 5.11 のトリガーシンチレータのうち、水平方向のシンチレータのみをトリガーに用いて測定を行った。このときトリガー領域は上流で $9\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 、下流で $11\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ である（水平方向 \times 鉛直方向）。またこの測定でも図 5.11 のように RPC は 40° 傾いている。

図 5.15 を用いて今回行う解析の概要を示す。右のヒストグラムは今回の測定で得られた左右出力信号の時間差を表す。これを見るとおおよそ $\pm 500\text{ ps}$ 程度広がっていることがわかる。幅 2.0 cm のシンチレータを用いた場合の図 3.13 と比べ、この広がりは大いことがわかる。信号の伝搬速度を 55 ps/cm^3 と考えると、 $\pm 500\text{ ps}$ の広がり電子の入射位置が $\pm 9\text{ cm}$ 程度の広がりを持つことに対応している。

さて、今回注目するのは、

- (1) このように粒子の入射領域が広い場合で slewing 補正のパラメタを決定する。
- (2) 得られたパラメタを、時間差で狭い領域⁴に適用する。

この (1)(2) の過程で得られた飛行時間の標準偏差を調べることである。ここでは (1) の領域を時間差の中心から $\pm 600\text{ ps}$ と定義し、この領域中のイベントを使って補正パラメタを求める。求めたパ

³測定で評価できる。Appendix に示す。

⁴これは粒子の入射位置を固定していることに対応している

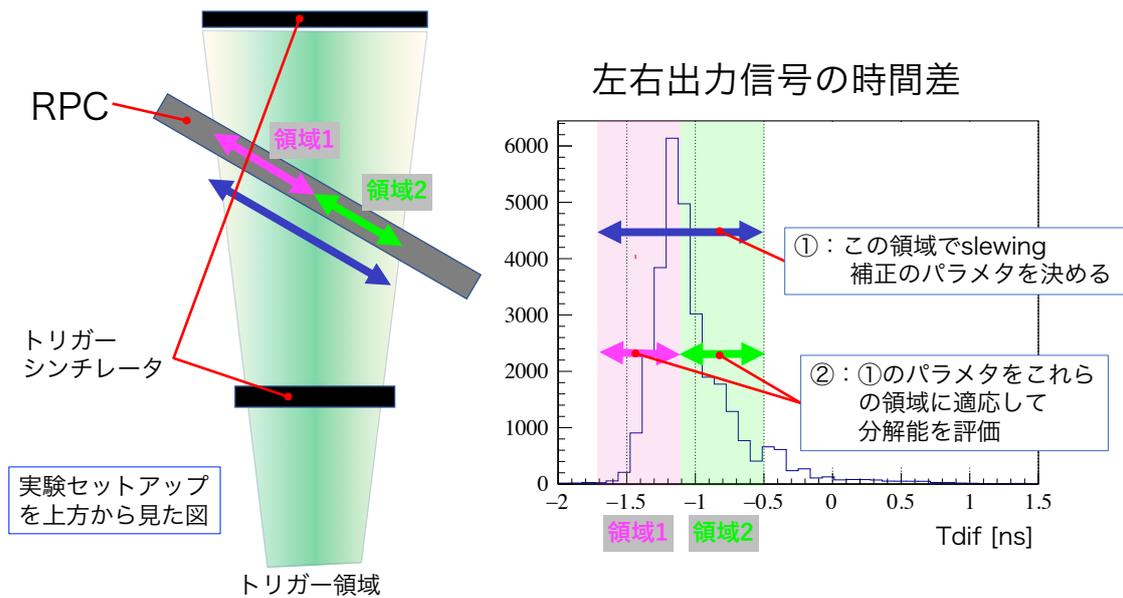


図 5.15. 左右の出力信号の時間差の位置依存性。

ラメタを用いて、その中心から離れた狭い領域 (± 300 ps の広がり) の制限の元、小節 3.1.1 と同様な方法で時間分解能を評価する。ここで狭い領域に限る理由は電子の入射位置が異なると、飛行時間が異なるためである。RPC は傾いているため、RPC に届くまでの飛行距離が異なりうる。ビームがトリガーシンチレータに垂直に入ってきたと仮定すると、飛行時間は中心値から最大で ± 180 ps 程度ずれる。また狭い領域の範囲の大きさは、分解能の位置依存性を評価した時の範囲と同じである。ここで狭い領域として、図 5.15 の緑とピンクの領域の、二つを用いる。これらは slewing 補正のパラメタを決めた領域を半分に分けたものである。それぞれ領域 1、領域 2 とし、その比較を行う。

飛行時間のヒストグラムと時間分解能の結果を図 5.16 に示す。左が領域 1 の時間差の制限をかけたもの、右が領域 2 の時間差の制限をかけたものを表す。いずれも 65 ps を下回る時間分解能であり、これは LEPS2 の要求性能を満たす。領域 2 の結果にテールが引いているのはマルチヒットイベントの影響である。片方にのみテール成分が見える理由は、RPC が傾いているため電子ビームの生成点からの立体角が広く、マルチヒットイベントの粒子が入りやすいため、と理解できる。実際図 5.15 の時間差のヒストグラムには片側だけテール成分が見えており、これはマルチヒットの粒子が片側にのみ入射しやすいことを示している。

小節 5.3.1 と比べると左右の時間差の標準偏差は 60 ps から 200 ps に広がっていた。このようにヒット範囲が広がっている場合に補正パラメタを決めたとしても、十分な時間分解能が得られることがわかった。

5.2.6 slewing 補正関数のビーム入射位置依存性

異なる入射位置の補正パラメタを用いて slewing 補正をした時に、時間分解能がどう変わるかを評価した。ここでは特に両読み出しの平均の時間分解能を見る。また、ここでは図 5.6 のデータを用いた。図 5.17 に補正パラメタを変えた時の時間分解能の位置依存性を示す。ここで横軸はビームの入射位置、縦軸は時間分解能を表す。同じ色のプロット点は、凡例に示した入射位置における補

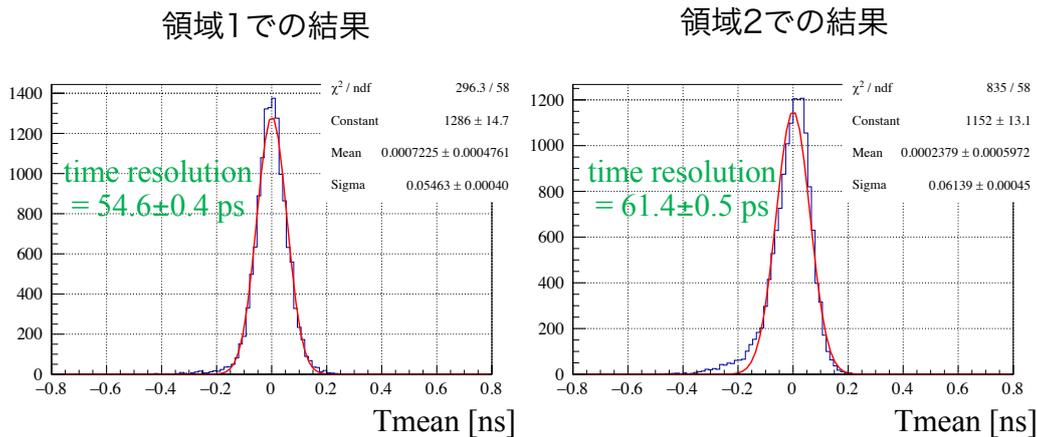


図 5.16. それぞれ領域 1 と領域 2 の範囲で得られた飛行時間の分布と、飛行時間の分解能。

正関数を用いて slewing 補正していることを表す。例えば、緑色のプロットは、図 5.6 のデータに対し、入射位置 -20 cm の解析で用いた補正関数で slewing 補正を行ったものである。ここでは入射位置が $-20, 2.5, 20, 90, 95$ cm の時の補正関数を用いた。ただし、紫のプロットは例外で、それぞれの入射位置で正しい補正関数を用いたものであり、図 5.6 の値に等しい。この図からわかることは中心付近以外の位置での補正関数の位置依存性は少ないということである。2.5, 5.0 cm のプロット点以外は誤差内で一致している。中心付近でずれているのは、この領域はガラスの接合部付近であり、電場が一様でないためだと理解できる。したがって、中心付近以外においては、補正パラメータをどこかで一旦決めれば、他の領域に適用させることができる。LEPS2 実験のことを考えると、比較的統計量の多い前方角度で補正パラメータを決定すれば、それで十分であることがわかった。

5.3 性能評価まとめ

性能評価の結果をまとめる。

印加電圧・閾値レベルの最適化

RPC の性能に関して印加電圧依存性を調べた結果、13.0 kV が最適値であることがわかった。また、閾値レベルを変化させ、性能を調べた。有意な差は見られなかったが、ここでは最も良い値であった -20 mV を採用した。

ビーム入射位置依存性の評価

ビームの入射位置を変えて、その時の性能を調べた。ストリップの 2 m の長さ方向に動かした場合、中心付近と末端付近以外の場所では、両読み出しの平均に関して 65 ps 以下の時間分解能が得られた。末端と中心付近では少し時間分解能が悪化していたが、中心以外では 75 ps の時間分解能であることがわかった。検出効率はずべての位置で 99% 以上であった。異なるストリップでも測定を行ったが矛盾のない結果が得られた。

また、ストリップの幅方向に関して測定を行った。ストリップの中心から入射位置が離れると、時間分解能・検出効率ともに悪化する傾向が見られた。しかし、ストリップ間の隙間に当たると

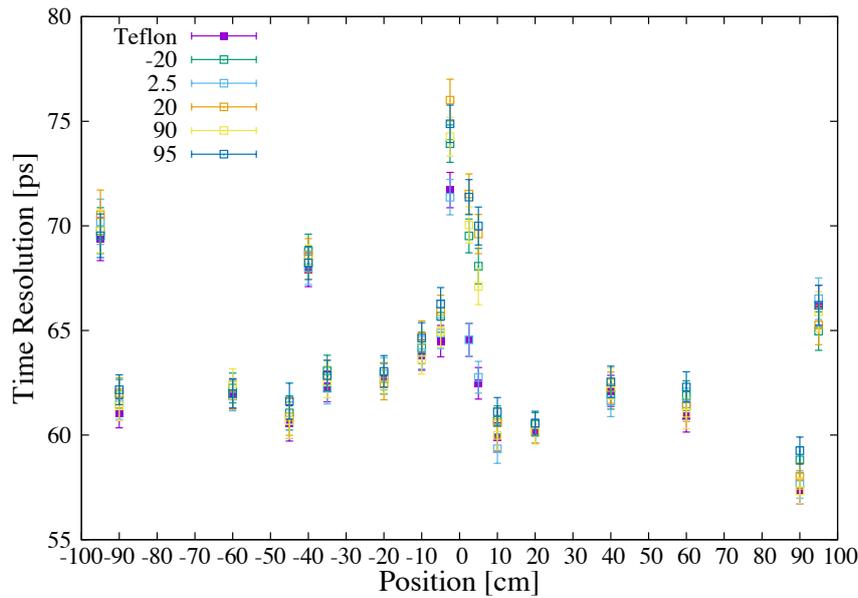


図 5.17. 補正関数を変えた場合の時間分解能の変化。紫のプロット点は正しい補正関数で slewing 補正を行ったもの。同じ色のプロット点は、凡例に示したの入射位置における補正関数を使って、slewing 補正を行ったもの。

しても 70 ps 以下の時間分解能が得られることがわかった。

ストリップ依存性

4 本のストリップに関して性能を比べたがいずれも十分な性能を持つことがわかった。

磁場中での性能評価

RPC に対してビームを約 40° 傾けて入射した場合でも性能に違いが見られなかった。この状態で磁場をかけた。磁場ありの場合と磁場なしの場合を比較したところ、信号の電荷量分布が少し下がっていたが、大きな変化は見られなかった。磁場中での性能は検出効率は 99.5% 以上、時間分解能は 62.8 ± 0.8 ps と LEPS2 実験の要求性能を十分満足することが確認できた。

入射位置不定性の時間分解能の影響

トリガー領域をストリップ幅方向に伸ばした時の時間分解能への影響を見た。複数ストリップからの信号のうち、最も電荷量が高い信号に関して時間分解能を評価したところ、55 ps 以下の精度で飛行時間を得られることがわかった。また、トリガー領域をストリップ長さ方向に拡張した場合でも十分な性能を得られることがわかった。

Slewing 補正関数の位置依存性

異なる位置でえられた補正関数を用いて slewing 補正をしたところ、得られる時間分解能は、誤差内で一致しているということがわかった。すなわち、補正関数に位置依存性はほとんどないことがわかった。しかし、中心付近においては補正関数に違いが現れることもわかった。

以上の結果は、今回製作した RPC が LEPS2 実験の要求性能を満たすことを示している。また、RPC の性能はストリップ長さ方向の位置依存性の結果よりおおよそ 65 ps である（ただし中心以外の場所）。またその検出効率は 99% 以上である。この RPC の分解能測定においては、解析方法や回路系にまだ改善の余地がある。飛行時間を現在、左右の出力信号の平均で評価しているが、片読み出し場合の分解能の重みで、重みつき平均をとる方法もある。この解析方法では、より良い精度の飛行時間測定ができる可能性がある [45]。この調査に関しては今後の課題にする。

第6章 まとめと今後の展望

LEPS2 実験では RPC を用いた飛行時間の測定により粒子識別を行う。ソレノイド磁石内部の極角 30° – 120° の大立体角を覆うため、従来にない 2 m 長の RPC を開発する必要がある。RPC と標的間の距離は 84 cm と短いため、 3σ 以上の識別能力で K 中間子と陽子を区別するには、75 ps 以下の高い時間分解能が要求される。さらに、チャンネル数を減らすため、LEPS2 実験は 2 m 長のストリップを持つ RPC の開発を行ってきた。このストリップ長で時間分解能 75 ps 以下の性能を持つ RPC は、先行研究 [26] でのみ報告されている。しかし、この先行研究の RPC はノイズや増幅回路の発振が多く、安定した動作ができないという問題点を抱えていた。

本研究では [26] の結果を踏まえ、構造に幾つか変更を加え、実機の開発を行った。特にカップリング補正によって信号伝搬の周波数帯域を向上させた。内部の材質を G10 とテフロンにした RPC を作製し、NWA を用いた周波数特性の測定を行った。シミュレーションほどではないが、G10 RPC よりもテフロン RPC の方が周波数帯域が広いことを確認できた。また SPring-8/LEPS2 ビームラインにおいて、電子ビームを用いた、RPC の波形の測定を行った。波形のストリップ伝搬距離依存性を確認すると G10 の方がテフロン RPC よりも立ち上がり時間・半値全幅において変化率が大きいことがわかった。また、時間分解能のビーム入射位置依存性を測定したが優位な変化は見られなかった。両読み出しの平均に関する時間分解能はほぼ同じであった。この結果は、モード分散の影響は slewing 補正で打ち消すことが可能である程度の影響である、と考えれば理解が可能である。これらの結果と、テフロンの方が安価であることから実機をテフロン材質で作製することに決めた。

実機開発に向けて層構造内部の材質以外にも変更を加えた。[26] の RPC の一番の問題であったノイズ対策のため増幅回路周りのグラウンド環境を改良した。その結果、実用可能なレベルの安定性・ノイズレベルにすることができた。また、層構造にハニカムサンドイッチを加え、RPC の構造的強化を図った。これにより撓みは 1 mm 以下に抑制される見込みである。増幅回路に関しても変更を加えた。今回の RPC は磁場中で使用する予定であるため、[33] で使用した増幅回路中のインダクタの性質が変わる。そこで [33] の RPC を用いて磁場中でも十分な時間分解能が得られるか試験を行った。結果インダクタ内部のフェライトコアが飽和し、空芯のような振る舞いになったとしても十分な時間分解能が得られることがわかった。そこで新しい増幅回路では空芯のインダクタを採用した。また、製作上の都合によりガラスを変更した。

製作した実機の RPC を用いて性能評価を行った。RPC に入射するビームの位置をストリップ長さ方向とストリップ幅方向に変えて時間分解能・検出効率を測定した。その結果 RPC の中心を除き、両読み出しの平均で 75 ps の時間分解能、99% を超える検出効率が得られた。異なるストリップについてもストリップ長さ方向の位置依存性を確認したが、矛盾のない結果が得られた。RPC に入射する電子ビームが約 40° 傾けた状態でも測定を行い、影響がないことがわかった。さらに、磁場中でも試験を行い、性能に影響がないことを確認した。また、トリガー領域を広げ、3つのストリップにビームが当たるようにして測定を行った。3つのストリップのうち、最も信号の電荷量が大きいものを選べば十分な性能が得られることがわかった。また、補正パラメタの位置依存性がないことを確認した。

以上の測定の結果はいずれも、今回作製した RPC は LEPS2 実験の要求性能を十分満足している

ことを示す。平均 65 ps 以下の時間分解能、99%を越す検出効率が得られている。ストリップが 2 m 長でこの性能を持つ RPC の実機開発は、今回が世界で初めてとなる。RPC の性能が非常に良いことが分かったため、回路系の分解能の影響も無視できなくなってくる。今回の測定では 50 ps/ch の TDC を用いていたが、LEPS2 実験では高分解能の 25 ps/ch の TDC を用いる予定である。これを使えばさらなる時間分解能の向上が期待できる。

今回作製した RPC の構造は LEPS2 の要求性能を満たすことが確認できたためこの構造で RPC を大量生産していく予定である。二種類の大きさの RPC を作製し、順次性能評価を行っていく。性能評価を終えた RPC を実際に LEPS2 のソレノイド型スペクトロメータに挿入する。飛跡検出器とともにデータを取得し、粒子識別の試験を行う。そしてハドロン光生成の物理データを収集していく。

Appendix

A 信号の伝搬速度と位置分解能の上限値

粒子の通過位置を RPC の信号から高精度でわかると都合が良い。粒子の通過位置は左右の出力信号の時間差 T_{dif} から決めることができる。この位置分解能 σ_{position} は RPC のストリップを伝搬する信号の速度 v_{signal} 、左右の時間差に関する時間分解能 $\sigma_{T_{\text{dif}}}$ を用いて

$$\sigma_{\text{position}} = \sigma_{T_{\text{dif}}} / 2v_{\text{signal}} \quad (\text{A.1})$$

と表現できる。今回行った測定は 1 cm 以上の幅のトリガーシンチレータを用いたため、これ以上の精度で位置分解能を決めることはできないと考えられる。しかし信号の伝搬速度を求めることは可能である。本節ではこれを評価する。

時間分解能の位置依存性を求めたデータ (図 5.6) を用いて T_{dif} の位置依存性を調べる。時間差 T_{dif} をガウス関数でフィッティングした (図 3.13)。そのフィッティング関数の中心値をビームの入射位置ごとにプロットしたものを図 A.1 に示す。 T_{dif} の値がビームの入射位置と比例している様子がわかる。赤線はプロット点を 1 次関数でフィッティングした結果である。この時プロット点の誤差はトリガーシンチレータ設置の不定性として 0.5 cm と定めた。時間差のフィッティングに関する誤差も入っているが、これは小さくほとんど影響しない。信号の伝搬速度は図 A.1 のフィッティング関数の傾きを 2 で割ったものである。したがって、信号の伝搬速度は $v_{\text{signal}} = 54.8 \pm 0.1 \text{ ps/cm}$ と見積もられる。これは 2 章で示した伝搬速度の予想値とほぼ同じである。

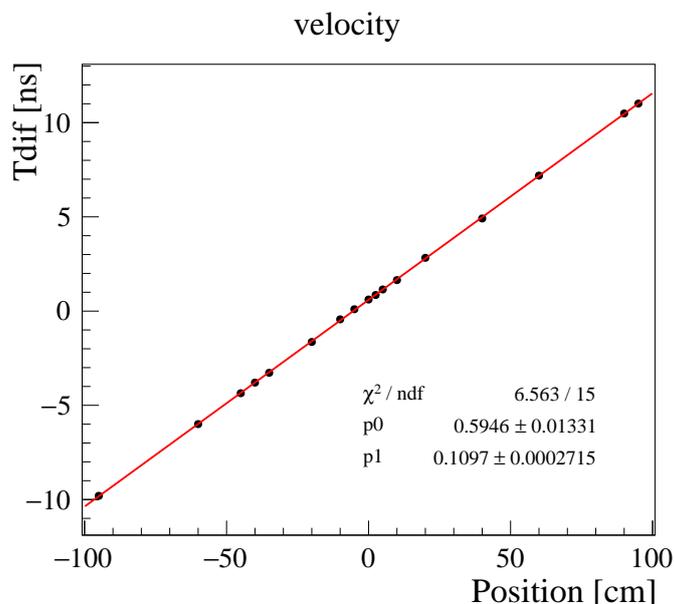


図 A.1. 左右の出力信号の時間差の位置依存性。

精度よく評価することはできないが、位置分解能の上限値を決めることは可能である。ここでは上限値を評価してみる。 T_{dif} をフィッティングして得られた σ の位置依存性を図 A.2 に示す。ここではこの σ を時間分解能として扱う¹。結果を見ると、もっとも悪い時でビームの入射位置が ± 95 cm の時で、その値は 115 ps であることがわかる。この値を用いると位置分解能の上限値は $115 \text{ cm} / (2 \times 54.8 \text{ ps/cm}) = 1.05 \text{ cm}$ であると考えられる。これは位置分解能の上限値がほぼトリガーシンチレータの大きさによって決まっていることを示す。すなわち今回の方法で位置分解能を正確に測定するためには、用いるトリガーシンチレータをより細くする必要がある。

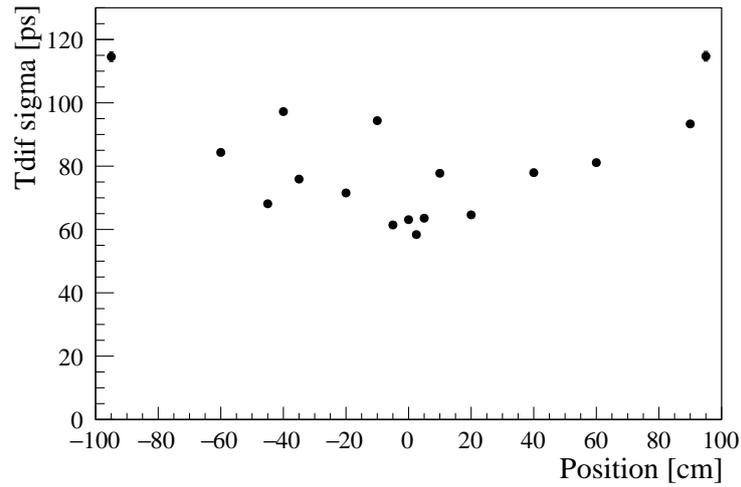


図 A.2. 左右の出力信号の時間差に関する時間分解能の位置依存性。

¹これは正確でない。トリガー領域は 1 cm 幅であるため、これの影響だけで $1 \text{ cm} \times 2v_{\text{signal}} \approx 100 \text{ ps}$ ほど広がりを持つ。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大変多くの方々にお世話になりました。この場を借りて皆様にお礼を申し上げます。

同研究室の新山雅之助教には、本研究を行う上で直接的な指導をいただきました。本修士論文の執筆の際に、新山さんに何度も添削をしていただきました。新山さんの手助けなしには、本修士論文を完成させることはできませんでした。また、研究だけでなく、ゼミなどを通して物理の基礎から教えていただきました。本当にありがとうございます。同研究室の永江知文教授には、研究について何度もアドバイスをいただきました。特に、ノイズ落としやハニカムサンドイッチの構造に関して、非常に助かりました。また、大阪大学 RCNP の與曾井優教授にも、テストや解析の指針に関して、何度も相談に乗っていただきました。SPring-8 での作業に関しても、多くのことを指導してもらいました。東北大学電子光研究室の大西宏明教授には、RPC 製作やテストに関する助言だけでなく、私の拙い会議資料に関しても指導をいただきました。Spring-8 の大橋裕二さんは普段から本研究のことに関して気をかけてくださり、多くのことを教えていただきました。特に NWA 測定の際は何も知らない僕に対して、親身になって指導していただきました。RPC 開発の先輩である RCNP の富田夏希さん、田中慎太郎さんにもたくさんの助けをいただきました。特に田中さんには幾度となく、ビームテスト、RPC 製作を手伝っていただきました。RCNP の特任研究員である佐田優太さんや、同研究室の先輩である小早川亮さんにもテストの際に幾度となく、手伝っていただきました。また、お二方には普段から優しくしていただき、とても感謝しています。RCNP の桂川仁さん、山本林那さん、また、同研究室の後輩である梅崎英一くんにも作業を手伝っていただきました。

上記の方々に加え、ここでは書かなかった同研究室の方々、LEPS2 グループの方々に深くお礼を申し上げます

参考文献

- [1] T.Nakano, et al., Phys.Rev.Lett, 91 (2003) 1
- [2] T.Nakano, et al. Phys.Rev. C 79 (2009) 025210
- [3] D.Diakonov, V.Petrov, M.Polyakov, Z. Phys. A 359 (1997) 305
- [4] A. Airapetian, et al., Phys. Lett. B 585 (2004) 213
- [5] V. Kubarovsky et al., Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 032001
- [6] R. De Vita et al., Phys. Rev. D 74 (2006)032001
- [7] K. Miwa, et al., Phys. Rev. C 77 (2008) 045203
- [8] Spring-8 HP. <http://www.spring8.or.jp/ja/>
- [9] Y. Nozawa, Kyoto-Univ., Master thesis (2012)
- [10] R. Kobayakawa, Kyoto-Univ., Master thesis (2017)
- [11] T. Hashimoto, Kyoto-Univ., Master thesis (2013)
- [12] N. Tomida et al., JINST 11 (2016) C11037
- [13] T. Hyodo et al, Phys. Lett., B593 (2004) 75
- [14] H. Katsuragawa, Gifu-Univ., Master thesis (2016)
- [15] H. Goto, Osaka-Univ., Master thesis (2016)
- [16] D. Gonzalez-Diaz, JINST 003, Univ. Santiago de Compostela, Ph.D. Thesis(2006), http://jinst.sissa.it/jinst/theses/2006_JINST_TH_003.jsp,
- [17] D. Gonzalez-Diaz et al., arXiv:1606.08172v2, DOI: 10.1088/1748-0221/12/03/C03029
- [18] A. Blanco et al., Nucl. Instr. and Meth. A 513 (2003) 8
- [19] N. Tomida, Kyoto-Univ., Master thesis (2012)
- [20] M.C.S. Williams, Nucl. Instr. and Meth. A 478 (2002) 183
- [21] A.N.Akindinov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 533 (2004) 74
- [22] Jian Gui Wang, Nucl. Instr. and Meth. A, 508(2003)133.
- [23] D. Piccolo et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 577(2002)435.
- [24] W. Riegler, D. Burgarth, Nucl. Instr. and Meth. A,481(2002)130.

- [25] D. Gonzalez-Diaz et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 648(2011)52.
- [26] S. Tanaka, Osaka-Univ., Master thesis (2016)
- [27] maxwell 2d
- [28] Z. Liu, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 874 (2017) 12
- [29] A.N.Akindinov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 602 (2009) 709
- [30] B. Bonner, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 508 (2003) 181
- [31] A. Schuttauf, et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 158 (2006) 52
- [32] P. Fonte, et al., PoS (HEP2005) 376
- [33] N. Tomida et al., Nucl. Instr. and Meth. A 766 (2014) 283
- [34] M. Abbrescia, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 593 (2008) 263
- [35] A. Blanco, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 485 (2002) 328
- [36] C. Wei, et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 32 (1984) 439.
- [37] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5479EN.pdf>
- [38] C.R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, John Wiley and Sons, 2008.
- [39] LeCroy 2228A TDC <http://www.fnal.gov/projects/ckm/jlab/2228a-spec.htm>
- [40] LeCroy 2249A ADC <http://www.fnal.gov/projects/ckm/jlab/2249a-spec.htm>
- [41] <https://www.psi.ch/drs/evaluation-board>
- [42] W. Riegler, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 500 (2003) 144
- [43] <https://www.snfc core.co.jp/merit/>
- [44] http://www.suzuei.co.jp/business/industrial/pdf/suzuei_i_cata06.pdf
- [45] T. Tanimori, Tokyo-Univ., Master thesis (1982)