

修士論文

J-PARC における
チャームバリオン分光実験で用いる
飛行時間測定用大型
Multigap Resistive Plate Chamber の開発

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻

原子核実験研究室

林 双葉

2024 年 2 月 29 日

概要

一般的にハドロンの基底状態や低励起状態は、構成子クォーク模型でよく記述できる。しかし、構成子クォーク模型では説明できないようなハドロンの高励起状態やエキゾチックハドロンが見つかっている。このような状態を説明するために、2つのクォークの相関(ダイクォーク相関)をハドロンの有効自由度として導入する試みがなされているが、ダイクォーク相関の存在は実験的に明らかになっていない。ダイクォーク相関を解明するため、バリオン内の3つの軽いクォークのうち1つを重いチャームクォークに入れ替えたチャームバリオンの励起状態を観測することで、2つの軽いクォーク間のダイクォーク相関を抽出できる可能性がある。チャームバリオンの励起エネルギー、生成率や崩壊過程はダイクォーク相関を強く反映すると考えられている。したがって、チャームバリオンの包括的な研究により、ダイクォーク相関の性質の解明が期待される。

J-PARC ハドロン実験施設内の二次粒子ビームライン($\pi 20$ ビームライン)において、チャームバリオン分光実験を計画している。この実験では $20 \text{ GeV}/c$ の大強度 π^- ビームを LH_2 標的に照射し、 $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$ の反応でチャームバリオン (Y_c^{*+}) を生成する。 D^{*-} の崩壊により生じる K^+ 、 π^- 、 π^- とビーム π^- の運動量を測定し、欠損質量法を用いて Y_c^{*+} の質量スペクトルを得る。崩壊粒子のうち、 $1.7 \text{ GeV}/c$ 以下の π^- 、 K^+ の粒子識別に Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) を使用する。MRPC とは高抵抗のガラスを積み重ねた構造のガス検出器であり、この検出器を用いて粒子の飛行時間を測定し、飛跡検出器により得られる運動量情報と合わせて粒子識別を行う。MRPC は読み出しストリップの長さ方向が 1.8 m で、複数台を組み合わせて 11 m^2 の大面積を覆う必要がある。飛行時間のスタートタイミングをビームタイミング検出器、ストップタイミングを MRPC で測定する際の、飛行時間の時間分解能は 75 ps 以下であることが求められている。ビームタイミング検出器の時間分解能は 40 ps 以下を達成しているため、MRPC に要求される時間分解能は約 60 ps となる。また、チャームバリオン分光実験ではトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを新たに導入し、時間情報のみを取得する。そのため電荷の情報を必要とせず、時間情報のみを用いた解析手法を確立しなければならない。

このような要求性能を達成する MRPC の開発を目的とし、本研究では試作機となる 1.8 m の MRPC を製作した。検出効率や時間分解能といった基本性能を評価するため、SPring-8 LEPS2 ビームラインにおいて電子ビームを用いたテスト実験を行った。時間分解能を評価する際、電荷の情報は用いず Time-over-Threshold (TOT) を用いた slewing 補正を行った。テスト実験の結果、最適な条件下では 99% 以上の時間分解能と約 80 ps の時間分解能が得られたが、電圧供給部分からの距離による性能の位置依存性が見られた。また、J-PARC ハドロン実験施設内の K1.8BR ビームラインにおいてハドロンビームを用いたテスト実験を行った。J-PARC でのテスト実験では初めてトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いてデータを取得した。その結果、検出効率ではレート依存性と位置依存性が見られた。得られた時間分解能は $60\text{--}80 \text{ ps}$ である。また、測定した飛行時間により π^+ 、 K^+ の粒子識別を行った。

目次

第 1 章	序論	7
1.1	ハドロンの構造	7
1.2	チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)	8
1.3	π 20 ビームライン	10
1.4	チャームバリオンスペクトロメータ	11
1.5	トリガーレス・ストリーミング DAQ システム	12
1.6	TOF 測定法	13
1.7	本研究の目的	14
第 2 章	Multigap Resistive Plate Chamber	16
2.1	RPC の原理と構造	16
2.2	ギャップにかかる電圧とその変化	18
2.3	スペースチャージ	19
2.4	オペレーションモード	20
2.5	主な飛行時間測定用 MRPC	21
第 3 章	Multigap Resistive Plate Chamber の製作	22
3.1	材料	22
3.2	製作	22
3.3	アンプ	25
3.4	MRPC の信号	26
第 4 章	SPring-8 LEPS2 ビームラインにおける性能評価試験	28
4.1	目的	28
4.2	SPring-8 LEPS2 ビームライン	29
4.3	実験セットアップ	30
4.4	ディスクリミネーター	31
4.5	HR-TDC	32
4.6	RF 信号	32
4.7	測定条件	33

4.8	解析方法	34
4.9	結果	40
4.10	テスト実験のまとめ	50
第 5 章	J-PARC K1.8BR ビームラインにおける性能評価試験	52
5.1	目的	52
5.2	J-PARC K1.8BR ビームライン	52
5.3	実験セットアップ	54
5.4	データの取得	57
5.5	測定条件	58
5.6	解析方法	58
5.7	結果	65
5.8	テスト実験のまとめ	74
第 6 章	結論	76
付録 A	SPring-8 LEPS2 ビームラインにおける性能評価試験の解析	78
A.1	RF 信号	78
付録 B	J-PARC K1.8BR ビームラインにおける性能評価試験の解析	81
B.1	イベント選択	81
B.2	Y 方向のヒット分布	82
参考文献		85

目次

1.1	チャームバリオンの励起準位スペクトル	8
1.2	チャームバリオン Y_c^{*+} 生成反応の模式図。	9
1.3	予想されるチャームバリオンの質量スペクトル。	10
1.4	J-PARC $\pi 20$ ビームライン [3]。	11
1.5	チャームバリオンスペクトロメータの概略図。	12
1.6	チャームバリオン分光実験での MRPC の配置。	15
2.1	RPC の断面図。	16
2.2	ダブルスタック型 MRPC の断面図。	18
2.3	ギャップにかかる電圧の様子 [6]。	19
2.4	アバランシェの周りの電場の様子 [7]。	20
3.1	電圧供給部分	23
3.2	スパーサー (釣り糸) の張り方と実際の写真。	23
3.3	ガラスの重ね方。	23
3.4	ガラスを重ねた様子。	24
3.5	ポリイミドテープで閉じた様子。	24
3.6	ガスチューブ周辺。	24
3.7	アクリルケースと読み出しストリップを重ねた様子。	25
3.8	読み出しストリップ。	25
3.9	U.FL ケーブル。	25
3.10	使用したアンプ。	26
3.11	RPC の信号	27
4.1	SACLA と SPring-8。	29
4.2	LEPS2 ビームライン [26]。	30
4.3	実験セットアップ。	30
4.4	トリガー及びデータ収集系の回路図。	31
4.5	ディスクリミネーター。	31
4.6	バンチ構造の足し合わせ前 (左) と後 (右) の RF 信号と MRPC の信号の時間差。	33

4.7	MRPC のストリップにおけるトリガー領域の位置。	34
4.8	トリガーシンチレータ T1、 T2、 T3、 T4 のタイミング分布。	35
4.9	leading と trailing。	36
4.10	MRPC と T3 の時間差。	36
4.11	Time-over-Threshold(TOT) とタイムウォークの概略図。	37
4.12	反射波を含んだ場合の TOT。	38
4.13	(左)2 ピークに分かれた TOT 分布、 (右)TOT と TOT integral の相関。	38
4.14	(左)TOT と $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ の相関、 (右)TOT integral と $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ の相関。	39
4.15	TOT から TOT integral への変換。	39
4.16	補正前 (左) と補正後 (右) の TOT integral と $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ の相関。	40
4.17	補正前 (左) と補正後 (右) の $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ 分布。	40
4.18	検出効率の MRPC 印加電圧依存性。	41
4.19	時間分解能の MRPC 印加電圧依存性。	42
4.20	(左)13.5 kV 印加時、 (右)15.5 kV 印加時の TOT 分布。	42
4.21	検出効率の X 位置依存性。	43
4.22	X = -700 mm における検出効率の印加電圧依存性。	44
4.23	時間分解能の X 位置依存性。	45
4.24	カーボンテープへの電圧供給。	45
4.25	電極に銀のインクを塗布した様子 [29]。	46
4.26	カーボンテープへの電圧供給。	46
4.27	ストリップ・ガラスの継ぎ目における検出効率。	47
4.28	ストリップ・ガラスの継ぎ目における時間分解能。	47
4.29	ガラスの継ぎ目における TOT 分布。	48
4.30	ガラスの継ぎ目における $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ 分布。(左)X = -35 mm、 (右)X = 35 mm。	49
4.31	読み出しストリップ側とアンプ側を遮蔽した様子。	50
5.1	J-PARC ハドロン実験施設 [30]。	53
5.2	K1.8BR ビームライン [31]。	54
5.3	セットアップの全体図。	55
5.4	TOF 検出器のセットアップ。	55
5.5	MRPC のセットアップ。	55
5.6	UTOF・DToF のセットアップ。	56
5.7	回路図。	57
5.8	近いタイミングで DToF L2 が 2 回ヒットした場合のヒット分布の模式図。	59
5.9	(左) $\text{TOF}_{\text{DToF-UTOF}}$ 、 (右) $\text{TOF}_{\text{DToF-MRPC}}$ のタイミング分布。	60
5.10	(左)DToF 左右の TOT の和、 (右)TOT と TOT integral の相関。	61

5.11	補正前 (左) と補正後 (右) の TOT integral と $TOF_{D\text{TOF-MRPC}}$ の相関。	62
5.12	補正前 (左) と補正後 (右) の $TOF_{D\text{TOF-MRPC}}$ の分布。	62
5.13	(左)MRPC 左右の TOT の和、(右)TOT と TOT integral の相関。	63
5.14	補正前 (左) と補正後 (右) の TOT integral と $TOF_{D\text{TOF-MRPC}}$ の相関。	63
5.15	補正前 (左) と補正後 (右) の $TOF_{D\text{TOF-MRPC}}$ の分布。	64
5.16	(左)D _{TOF} seg2 の左右の時間差、(右)U _{TOF} seg1 の左右の時間差。	65
5.17	MRPC の左右の時間差。	66
5.18	D _{TOF} と U _{TOF} の左右の時間差の相関。	67
5.19	MRPC と D _{TOF} の左右の時間差の相関。	67
5.20	検出効率 (左右両側) のレート依存性。	68
5.21	検出効率 (左) のレート依存性。	69
5.22	検出効率 (右) のレート依存性。	69
5.23	検出効率の位置依存性 (25 kHz)。	70
5.24	検出効率の位置依存性 (100 kHz)。	70
5.25	検出効率の位置依存性 (200 kHz)。	71
5.26	飛行時間の時間分解能の位置依存性。	72
5.27	検出器固有の時間分解能の位置依存性。	73
5.28	Slewing 補正後の $TOF_{MRPC-U\text{TOF}}$ の分布。	74
A.1	C mode のフィリングパターン。	79
A.2	電子のフィリングパターンと RF の間引き。	79
A.3	RF 信号と MRPC の時間差。	80
B.1	1 イベント内のヒット分布の模式図。	82
B.2	1 イベント内のヒット分布の模式図。	82
B.3	U _{TOF} のヒットセグメント分布。	83
B.4	D _{TOF} のヒットセグメント分布。	83
B.5	MRPC のヒットストリップ分布。	83

表目次

5.1	ビームの条件。	56
5.2	UTOF・DToF の印加電圧。	58

第 1 章

序論

1.1 ハドロンの構造

ハドロンとはクォークがグルーオン交換による強い相互作用で結合した粒子であり、3つのクォークからなるバリオンと、クォーク1つと反クォーク1つからなるメソンに大別される。基底状態や低励起状態のハドロンは、独立なクォークの組み合わせで考えるクォーク模型でよく記述できる。これはハドロンを構成子クォークと呼ばれる準粒子の複合体とするモデルである。例えば陽子は u クォーク2つと d クォーク1つからなるが、陽子質量の $1/3$ である約 $300 \text{ MeV}/c^2$ の構成子クォーク3つで構成されると考えられる。

しかし、一部のハドロンの高励起状態や、バリオンやメソン以外の構造を持つとされるエキゾチック・ハドロンは従来の構成子クォーク模型では説明できない性質を持つ。そこで、2つのクォークの相関 (ダイクォーク相関) をハドロンの有効自由度として導入する試みがなされている [1]。ダイクォーク相関を考えることによって、励起状態やエキゾチック・ハドロンを含めたハドロンの全体像の理解へ繋がる可能性があるが、ダイクォーク相関の存在は実験的に確立されていない。

1.1.1 チャームバリオンにおけるダイクォーク相関

ダイクォーク相関は2つのクォークの相関であり、クォーク間のカラーสปิน (磁気) 相互作用における強い引力によって生じる。3つのクォークで構成されるバリオンには3対のダイクォーク相関が存在する。 u クォークや d クォークのみからなる軽いバリオンの場合、3対のダイクォーク相関が縮退して分離できず、単独のダイクォーク相関を抽出することは困難である。一方、バリオン内の軽いクォーク1つを重いクォーク1つに入れ替えることでダイクォーク相関を顕在化できると考えられている。軽いクォーク2つ (u, d) とそれらに比べて重いクォーク (c) を1つ持つチャームバリオンでは、運動学的に ud と c の相対運動 (λ モード) と ud の内部運動 (ρ モード) に分離する。その結果、アイソトープ・シフトと呼ばれる2つの励起モードが準位構造に現れ、励起状態のエネルギー比は

$$\frac{\hbar\omega_\rho}{\hbar\omega_\lambda} = \sqrt{\frac{3m_Q}{2m_q + m_Q}} \quad (1.1)$$

となる。ここで、 m_Q, m_q はそれぞれ重いクォークと軽いクォークの構成子クォーク質量である。3つの軽いクォークからなるバリオンでは $m_Q = m_q$ となり、式 (1.1) の値は 1 となることから λ モードと ρ モードは縮退することがわかる。また、重いクォークの質量が他のクォークの質量より十分大きい場合 ($m_Q \gg m_q$)、2つの励起状態のエネルギー比は

$$\frac{\hbar\omega_\rho}{\hbar\omega_\lambda} \rightarrow \sqrt{3} \quad (1.2)$$

となる。

また、クォーク間のカラー磁気相互作用の大きさはクォークの質量に反比例する。そのため重いクォークを1つ含む場合、軽いクォークと重いクォークの相関より2つの軽いクォーク間の相関の方が強くなる。図 1.1 のように2つの励起モードに分離され、各モードに応じた励起状態が観測される。これらの励起状態の性質、中でもチャームバリオンの励起エネルギー、生成率や崩壊過程はダイクォーク相関を強く反映すると考えられている。したがって、チャームバリオンの包括的な研究により、ダイクォーク相関の性質の解明が期待される。

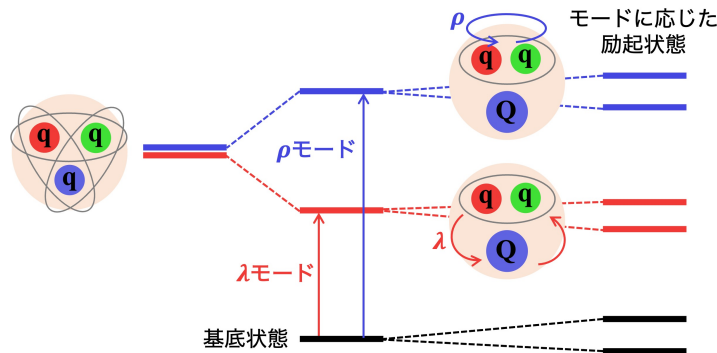


図 1.1: チャームバリオンの励起準位スペクトルの模式図。ダイクォーク相関の ρ, λ モードを反映した準位構造が見られる。

1.2 チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)

我々は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ハドロン実験施設内の二次粒子ビームライン ($\pi 20$ ビームライン) において、ダイクォーク相関の解明を目的とするチャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している [2]。実験では運動量 $20 \text{ GeV}/c$ の大強度 π^- ビームを液体水素標的に照射し、式 (1.3) のようにチャームバリオン (Y_c^{*+}) を生成する。同時に生成された D^{*-} は式 (1.4) のように崩壊するモードを持つ。図 1.2 にチャームバリオン生成反応の模式図を示す。

$$\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-} \quad (1.3)$$

$$D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \quad (1.4)$$

$D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-$ (分岐比 67.7 %) による π^- と、 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ (分岐比 3.89 %) による K^+ , π^- の運動量から D^{*-} を再構成し、欠損質量法で Y_c^{*+} の質量スペクトルを得る。欠損質量法を用いることで、生成した Y_c^{*+} の終状態によらず基底状態から励起エネルギーが 1 GeV 以上の高励起状態まで、広い質量範囲のチャームバリオンを測定できるという利点がある。また、励起状態の生成率の測定と同時に崩壊分岐比を求められるという点もこの実験の特徴である。

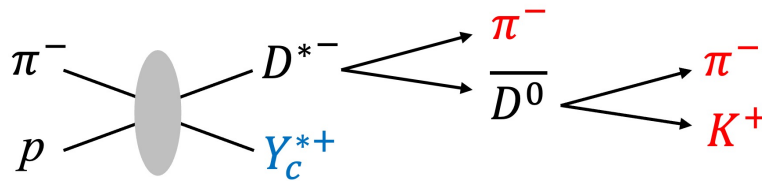


図 1.2: チャームバリオン Y_c^{*+} 生成反応の模式図。

式 (1.3) のチャームバリオン生成反応は陽子の u クォークを c クォークに置き換える反応で、反応に寄与しなかった陽子中のクォーク対と導入された c クォークの間に角運動量が持ち込まれやすい。その結果、 ud と c の相対運動である λ モードの励起状態の生成率が高くなる [5]。図 1.3 は既知のチャームバリオン状態を用いたシミュレーションで得た、予想質量スペクトルである。 λ モードの励起状態 (軌道角運動量 L) でダイクォークのスピンが 0 の場合、 $J = L - 1/2, L + 1/2$ のスピン二重項 (重クォーク二重項) を形成する。このとき生成率の比はスピン多重度 $2J + 1$ の比、すなわち $L : L + 1$ になると予想されている。 Λ_c (2595) と Λ_c (2625) は $L = 1$ の重クォーク二重項であると考えられており、その生成比は 1:2 になることが期待される。 λ や ρ の励起モードの性質が生成率に反映されるため、実験により測定した生成率からダイクォーク相関の情報を知ることができる。また、崩壊粒子の角度分布を測定することで、状態のスピンパリティを決定することも可能である。

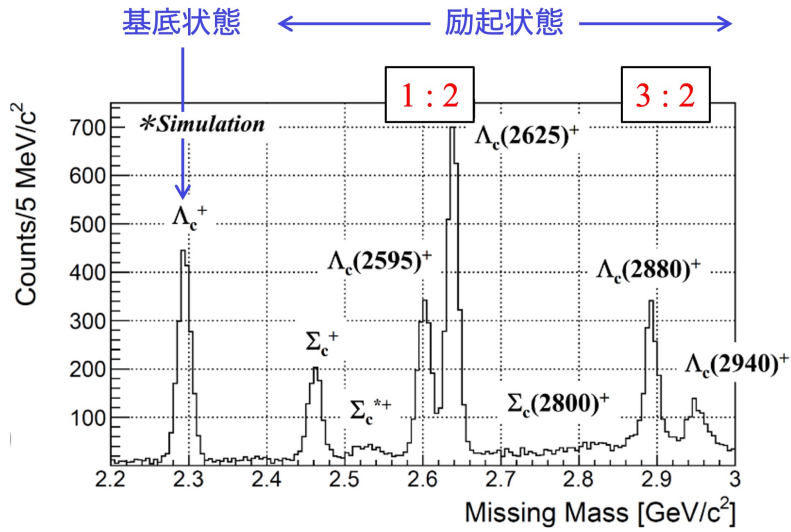


図 1.3: 予想されるチャームバリオンの質量スペクトル。

1.3 π 20 ビームライン

現在、J-PARC の高運動量ビームラインは、既存の一次陽子ビームラインのハドロン実験施設への入射部から分岐している。J-PARC の一次ビームラインでは 30 GeV の陽子が輸送されているが、その一部を電磁石を用いて高運動量ビームラインに分岐させる。分岐点には二次粒子生成標的が設置され、20 GeV/c までの二次粒子ビームの供給が可能である。二次粒子の輸送に用いられるのが π 20 ビームラインであり、新設が予定されている。チャームバリオン分光実験では、20 GeV/c の高運動量かつ 60 M/spill (5.2 秒周期、そのうちビーム取り出し時間は 2 秒間) の大強度二次 π^- ビームを使用予定である。

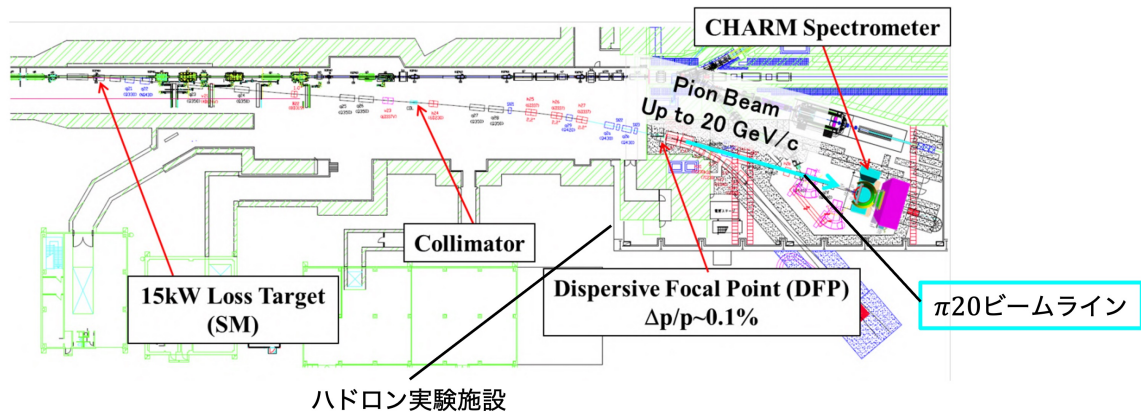


図 1.4: J-PARC $\pi 20$ ビームライン [3]。

1.4 チャームバリオンスペクトロメータ

図 1.5 に、チャームバリオン分光実験で用いるスペクトロメータを示す。欠損質量法を用いる場合、ビーム粒子と散乱粒子の両方を測定する必要がある。そのためチャームバリオンスペクトロメータは、ビーム粒子測定用検出器群と標的での反応により生成された散乱粒子を測定するための磁気スペクトロメータに分けられる。また、生成標的には 4 g/cm^2 、長さ 570 mm の液体水素を使用し、検出器のアクセプタンスが最大になるよう、磁気スペクトロメータの双極電磁石の入り口付近に設置する。

1.4.1 ビーム粒子測定用検出器

最上流には、ビーム粒子識別検出器としてシリカエアロゲルとガスを用いたリングイメージングチェレンコフ検出器を設置し、 $20 \text{ GeV}/c$ の π^- 、 K^- 、 \bar{p} を識別する。また、ビームタイミング検出器によりビーム粒子のスタートタイミングを決定する。焦点面に置かれたシンチレーションファイバー検出器では粒子の位置を決定することで、 0.1% の精度で運動量の情報を得ることができる。

1.4.2 磁気スペクトロメータ

標的での反応により生じた散乱粒子の軌道を曲げるため、最大磁場 1 T の FM 双極電磁石を使用する。ビーム粒子 (π^-) のエネルギーが $20 \text{ GeV}/c$ の場合、 \bar{D}^0 が崩壊して生じた K^+ 、 π^- の運動量は $2\text{--}16 \text{ GeV}/c$ に分布する。また、 D^{*-} の崩壊粒子である π^- の運動量は $2 \text{ GeV}/c$ 以下である。これらの粒子の飛跡を検出するためにシンチレーションファイバー検出器、ドリフトチェンバーを用いる。また磁石内の MRPC、磁石外の TOF 検出器、閾値型チェレンコフ検出器、リングイメージチェレンコフ検出器 (RICH) を用いて粒子の種類を識別する。

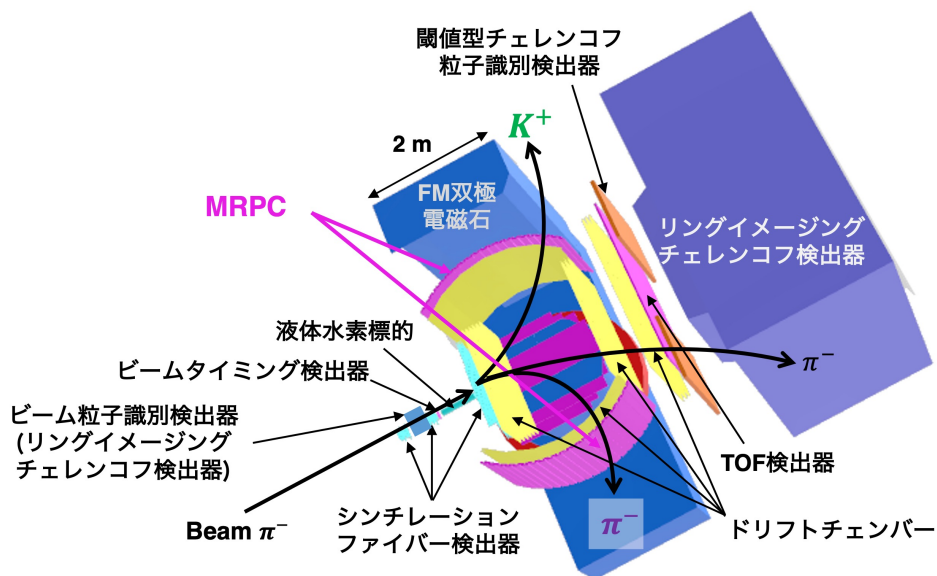


図 1.5: チャームバリオンスペクトロメータの概略図。

1.5 トリガーレス・ストリーミング DAQ システム

チャームバリオン分光実験では、イベントの測定にトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを導入する [4]。このシステムではハードウェアによるトリガーの生成を行わず、検出器からの信号は読み出し回路でデジタル化した後、全てを一旦コンピュータに取り込み、オンラインでソフトウェアによってイベントを選別する。

一方、従来のハドロン実験ではトリガー DAQ システムが使用されてきた。ハードウェアを用いて検出器の信号からトリガーを作成し、そのトリガーを基準にデータを取得、処理、保存する手法で、トリガーレートの上限は約 10 kHz である。そこで、今回のチャームバリオン分光実験におけるトリガー DAQ システムの使用の可能性について検討してみる。この実験では多種多様な反応によるイベントが高レートで観測され、ビームレートは 60 M/spill、反応レートは 3.6 M/spill (1 spill=2 秒) である。ビームタイミング検出器と、磁気スペクトロメータ内の TOF 検出器により測定した時間情報を用いてトリガーを生成する場合、トリガーレートは 1-2 M/spill となる。これはトリガー DAQ システムのレートの許容値を大きく上回る。そこで飛跡検出器の情報をトリガーに加え、オンライントラッキングによる飛跡の再構成を行うことでトリガーレートを 15-23 k/spill まで抑えることができる。しかし、この方法にはいくつかの問題点がある。まず、トリガーの生成に必要な検出器のチャンネル数が約 20000 チャンネルとなり、トリガー回路が非常

に複雑になる。さらに FPGA 等を用いたオンライントラッキングを行う必要があるが、そのような回路は開発コストが大きい。また、高運動量のビームを使用した実験では様々な反応が同時に起こると想定される。そのため特定の反応事象に絞ってトリガーを生成すると、他の多くの反応事象を測定することができない。このような理由から、チャームバリオン分光実験では従来のトリガー DAQ システムから移行し、新たにトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを導入する。

トリガーレス・ストリーミング DAQ システムでデータを収集する方法について述べる。検出器から得られた信号は TDC ベースの Front-end Electronics (FEE) によってアナログ信号からタイミング信号へ変換される。その後、タイミング信号は連続読み出し TDC によって時間情報を持つデジタル信号へと変換される。今回の実験では全ての信号を取得するため、高速なデータリンクと十分な容量のバッファを持つ FEE が必要である。そこで本実験のために開発された AMANEQ[17] を用いる。また、この DAQ システムでは信号の波形の情報を取得せず、時間情報のみを取得する。時間情報を付与されたデータは全てコンピュータに送られる。コンピュータ上では時間情報の相関の検出や、オンライントラッキングによる飛跡の再構成を行う。その結果を用いて不要なデータに対してフィルターをかけ、必要なデータのみを保存する。

このようなトリガーレス・ストリーミング DAQ の導入により、煩雑なトリガー回路の開発コスト削減のほか、同時に起こる多種多様な反応事象を全て取得し、後から解析上で必要な事象を選ぶことができるという利点を活かしたデータ収集を行うことが可能となる。

1.6 TOF 測定法

反応により生成された粒子は、電荷と質量の違いから粒子識別できる。電荷の正負は、磁場中を運動する際に受けるローレンツ力の向きによって識別される。荷電粒子の質量を求める方法の 1 つに TOF 測定法がある。ビームタイミング検出器によって測定したスタートタイミングと Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) のような TOF 検出器で測定したストップタイミングの情報から、粒子が 2 点間を飛行する時間を求める。さらに飛跡検出器を用いて運動量と飛行距離を再構成し、飛行時間の情報と組み合わせて荷電粒子の質量を求める。

粒子の運動量 p は、粒子の質量を m 、速度を v 、光速度を c として

$$p = \beta\gamma mc \quad (1.5)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (1.6)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1.7)$$

とかける。したがって、粒子の飛行距離を L 、飛行時間を t とすると、粒子の質量 m は

$$m^2 = \frac{p^2}{c^2} \left(\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1 \right) \quad (1.8)$$

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1} \quad (1.9)$$

と表すことができる。このように運動量、飛行距離、飛行時間の情報から質量を求め、粒子識別を行う。

1.7 本研究の目的

本研究の目的は、高時間分解能を持つ大型 Multigap Resistive Plate Chamber (MRPC) の開発である。チャームバリオン分光実験では、 D^{*-} の崩壊およびその他の反応で生じる $1.7 \text{ GeV}/c$ 以下の K^- と π^- 、 p と K^+ と π^+ を識別する必要がある。MRPC を用いて散乱粒子の飛行時間を測定し、飛跡検出器により得られる運動量情報と合わせて粒子識別を行う。

要求性能は以下の通りである。

- 60 ps 以下の時間分解能

TOF 測定法を用いて $1.7 \text{ GeV}/c$ 以下の K^- と π^- を識別するために必要な時間分解能を計算する。式 (1.9) より、質量 m の誤差伝播の式を求めると以下ようになる。

$$(dm)^2 = \left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)^2 dp^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial L}\right)^2 dL^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 dt^2 \quad (1.10)$$

$$= \left(\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1\right) \frac{dp^2}{c^2} + \frac{p^2 t^2}{L^2} \frac{1}{1 - \frac{L^2}{c^2 t^2}} \frac{dL^2}{L^2} + \frac{p^2 t^2}{L^2} \frac{1}{1 - \frac{L^2}{c^2 t^2}} \frac{dt^2}{t^2} \quad (1.11)$$

$$= m^2 \left(\frac{dp}{p}\right)^2 + m^2 \gamma^4 \left(\frac{dL}{L}\right)^2 + m^2 \gamma^4 \left(\frac{dt}{t}\right)^2 \quad (1.12)$$

dp 、 dL 、 dt はそれぞれ p 、 L 、 t の測定精度を表す。具体的には $p = 1.7 \text{ GeV}/c$ 、 $dp/p = 0.001$ (0.1%)、 $L = 3000 \text{ mm}$ 、 $dL = 5 \text{ mm}$ とする。 K 中間子の質量は $m_K = 494 \text{ MeV}/c^2$ 、飛行時間は $t_K = 10.4 \text{ ns}$ 、 π 中間子の質量は $m_\pi = 140 \text{ MeV}/c^2$ 、飛行時間は $t_\pi = 10.0 \text{ ns}$ である。質量 m の誤差伝播を考える上で、式 (1.12) の第 1 項と第 2 項は、第 3 項に比べ 3 桁以上小さくなる。したがって質量 m の誤差伝播 dm は第 3 項の dt/t によって決まると言える。飛行時間の時間分解能 dt を 75 ps とすると、 $dm_\pi = 155 \text{ MeV}/c^2$ 、 $dm_K = 45.7 \text{ MeV}/c^2$ となる。このとき π 中間子と K 中間子は片側 1.76σ で分離できる。チャームバリオン分光実験で識別する K^- 、 π^- の運動量は $1.7 \text{ GeV}/c$ 以下である。運動量が $1.7 \text{ GeV}/c$ のときの識別精度は片側 1.76σ であるが、実際に検出する粒子のほとんどはこれより低い運動量である。そのため多くの粒子は片側 1.76σ 以上の精度で識別でき、チャームバリオン分光実験においてこの識別精度は十分な値だと言える。

またチャームバリオン分光実験では、飛行時間のスタートタイミングをビームタイミング検出器、ストップタイミングを MRPC で測定する。飛行時間の時間分解能が 75 ps の場合、ビームタイミング検出器の時間分解能は 40 ps 以下を達成していることから [19]、MRPC の要求時間分解能は約 60 ps となる。

- 1800 mm 長、11 m² の大面積を覆う

図 1.6 に示したように複数台の MRPC を円弧状に並べ、大面積を覆う壁のように設置する。高さ方向には 1600 mm のアクセプタンスが必要である。しかし長いストリップを持つ MRPC では、ストリップの端で信号の反射や伝播距離の影響により時間分解能が悪化することが報告されている [14]。オフライン解析で時間分解能の悪いストリップの両端 (それぞれ 100 mm) に当たった粒子を切り捨てられるよう、1800 mm 長の MRPC を開発する。

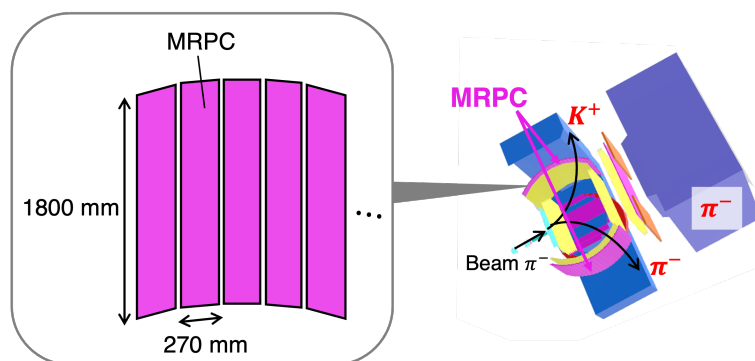


図 1.6: チャームバリオン分光実験での MRPC の配置。

- 時間情報のみを用いた解析が可能

チャームバリオン分光実験では、各検出器をトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いて読み出す。このシステムでは時間情報のみを取得する。時間分解能を求める際に必要となる slewing 補正について、電荷の情報を使用しない補正方法を確立しなければならない。

本論文では大型化した MRPC のデザインの検討、製作、性能評価のためのテスト実験とその結果について述べる。テスト実験を 2 回実施した。SPring-8 でのテスト実験では電子ビームを用いて基本的な性能の評価を行った。J-PARC でのテスト実験ではハドロンビームを使用し、トリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いたデータ取得と飛行時間による粒子識別を行った。

第 2 章

Multigap Resistive Plate Chamber

2.1 RPC の原理と構造

2.1.1 基本原理

Resistive Plate Chamber (RPC) はガラスなどの高抵抗板を用いたガス検出器であり、主に荷電粒子の検出を目的として使用される。図 2.1 は RPC の模式図である。ガラスなどの高抵抗板を数 $100\ \mu\text{m}$ –数 mm の間隔で重ねた構造を持つ。スペーサーによってできた高抵抗板の隙間をギャップと呼び、ギャップ内はガスで満たされている。高抵抗板の外側の電極によって電圧を印加し、ギャップに電場をかける。荷電粒子が RPC を通過するとギャップ内のガスがイオン化される。生じた電子が電場に沿って加速され、ガスとの相互作用でアバランシェが起こり、電気信号が増幅される。この電子増幅による信号が読み出しストリップに誘起される。RPC は信号の立ち上がり時間が速く、時間分解能が良いという特徴がある。

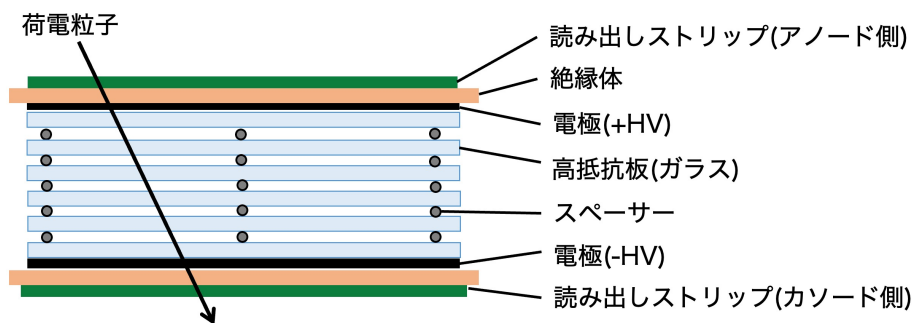


図 2.1: RPC の断面図。

2.1.2 RPC の構造と性能

RPC はギャップの数が多ほど検出効率・時間分解能が良くなる。このため 1 つのギャップを持つシングルギャップ型 RPC に比べ、複数のギャップを持つマルチギャップ型 RPC (MRPC) がよく用いられる。今回開発した RPC もマルチギャップ型の構造である。

以下ではギャップ数と性能の具体的な関係について述べる。ギャップ数 N の MRPC の検出効率 ε_N は、ギャップ数 1 の RPC の検出効率を ε_1 とすると

$$\varepsilon_N = 1 - (1 - \varepsilon_1)^N \quad (2.1)$$

と書ける [20]。

次にギャップ数 1 の RPC の時間分解能 σ_1 について述べる。RPC の信号が閾値を超えるタイミングの分布は式 (2.2) のように表すことができる [21]。ただし E は電場の大きさ、 v_d はドリフト速度である。 α は第一電離係数、 η は付着係数であり、それぞれ電子が単位距離を進む間にガス原子と衝突して電離する回数、ガス電子に付着する回数をを表す。

$$P(t) = (\alpha(E) - \eta(E))v_d(E) \times F((\alpha(E) - \eta(E))v_d(E)t) \quad (2.2)$$

ここで、関数 $F(x)$ は

$$F(x) = \exp(-x - \exp(-x)) \quad (2.3)$$

である。式 (2.2) に含まれる F は電子が時間 t 進む間に電離する回数に依存する無次元量であり、その分散は $\sigma(F) = 1.28$ である。したがってギャップ数 1 の RPC の時間分解能 σ_1 は

$$\sigma_1(E) = \frac{1.28}{(\alpha(E) - \eta(E))v_d(E)} \quad (2.4)$$

と書ける [21]。また、ギャップ数 N の MRPC の時間分解能 σ_N は

$$\sigma_N(E) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\lambda}{g} \frac{M}{(\alpha(E) - \eta(E))v_d(E)}} \quad (2.5)$$

と書ける [22]。

ここで g はギャップ幅、 λ は通過する荷電粒子がガス原子を電離するまでの平均自由工程、 M はアバランシェ増幅の統計及びガス原子の電離の寄与のばらつきによる量で、オーダーは 1 である。式 (2.4) と (2.5) より σ_N を σ_1 を用いて表すと、

$$\sigma_N(E) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\lambda}{g} \frac{M\sigma_1}{1.28}} \quad (2.6)$$

となる。式 (2.1)、(2.6) からわかるように、ギャップ数が多いほど検出効率、時間分解能は向上する。

ギャップ数を増やす場合、ダブルスタック型と呼ばれる構造が用いられることが多い。ダブルスタック型 MRPC の断面図を図 2.2 に示す。アノードとカソードで挟まれた部分をスタックとし、これを 2 つ重ねたものがダブルスタック型である。1 ギャップあたりにかける電圧は決まっているため、シングルスタックでギャップ数を増やすと電極間に印加する電圧が大きくなる。一方で、ダブルスタック型にすると、シングルスタックの場合と同じ電圧でギャップ数を 2 倍に増やせるというメリットがある。またダブルスタック型では上下 2 つのスタックからの信号を足し合わせて読み出すことができる。これにより信号の波高が大きくなり、検出効率と時間分解能が向上する。

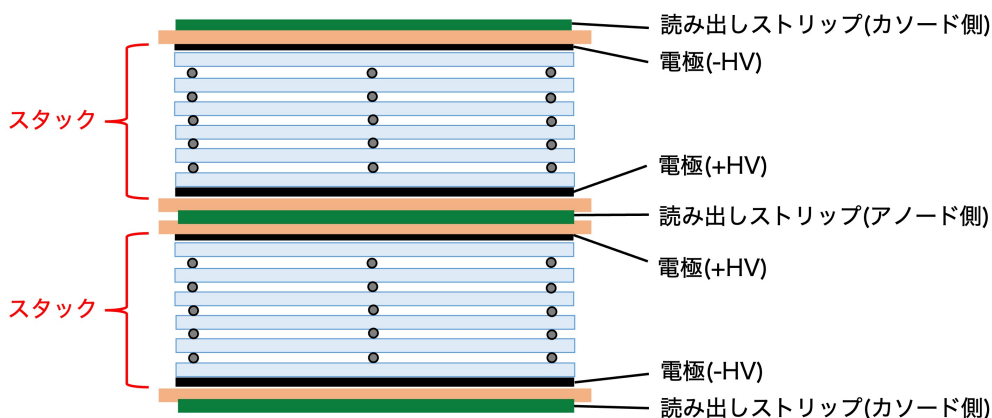


図 2.2: ダブルスタック型 MRPC の断面図。

2.2 ギャップにかかる電圧とその変化

図 2.3 (上) は RPC に電圧を印加した直後に内部にかかる電圧の様子である。高抵抗板とギャップにはそれぞれの誘電率 ϵ に応じた電圧がかかる。しかし、時間が経つと高抵抗板内を電荷が移動し、高抵抗板表面に電荷がたまる (図 2.3 (下))。その結果、高抵抗板そのものには電圧がかからず、間のガスギャップのみに電圧がかかる [6]。

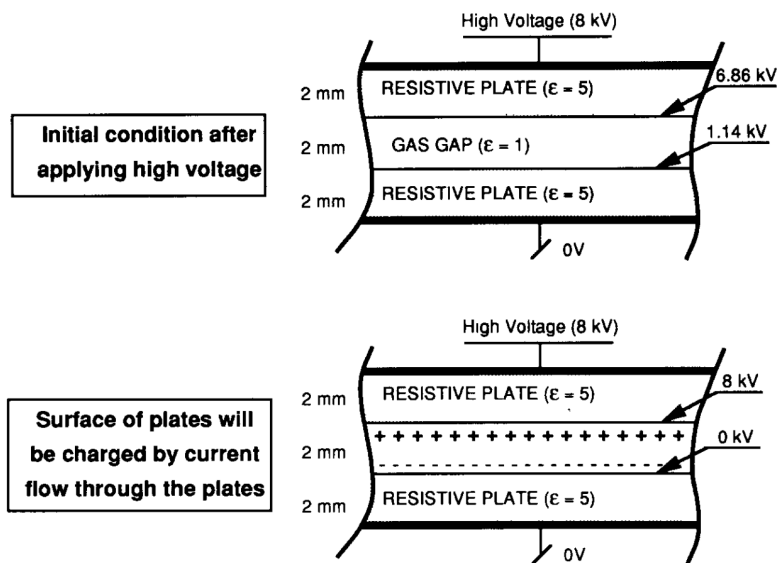


図 2.3: ギャップにかかる電圧の様子 [6]。

2.3 スペースチャージ

ギャップの狭い MRPC は、ギャップの広いものに比べて動作の安定性、検出効率、時間分解能、レート耐性が優れている。この要因の 1 つとして、スペースチャージ効果が挙げられる [7, 8]。荷電粒子が RPC を通過するとガスはイオン化され、発生、増幅した電子はアノードヘドリフトする。正イオンはカソードヘドリフトするが、電子に比べて質量が大きいためドリフト速度が小さい。そのため、電子の時間スケールにおいて正イオンはギャップ内に停滞する。停滞した正イオンが作り出す電場がアバランシェ周辺の電場を変化させ、電子増幅にも影響を与える。

図 2.4 はアバランシェ周辺の電場の様子を示している。アバランシェの先端と末端では電場が E_1 、 E_3 となり、これは印加された電場 E_0 より大きい。一方、アバランシェの中心部の電場 E_2 は E_0 より小さくなっている。その結果アバランシェ内で電位差が生じる。

このようにして電位が低くなったアバランシェの先端では、電子の増幅が抑えられる。この効果により電子の増幅はストリーマーモードに入る前の 10^7 – 10^8 個で止まり、高電圧領域においてもアバランシェモードでのオペレーションが可能になる。増幅が抑えられた電子は周辺的气体分子に捕らえられ負イオンになる。これらの負イオンのほとんどは、ギャップ中に停滞した正イオンと結合するため、正イオンがカソードヘドリフトし終える前にギャップ内の電場が回復する。電場の回復時間が短いことで、レート耐性が向上する。

また、何らかの原因でギャップの間隔が局所的に狭くなった場合、その部分のみ電場が高くなってしまう。この場合でも電子の増幅を抑えることができるので、高抵抗板の平行精度の要求を低くすることにも繋がる。

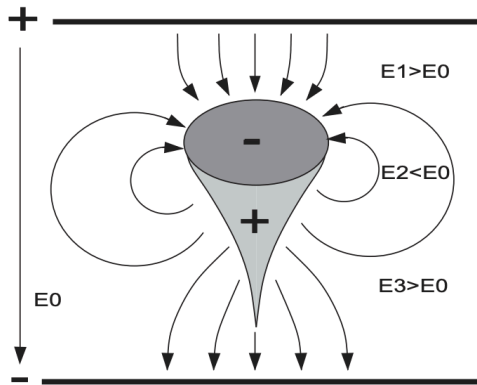


図 2.4: アバランシェの周りの電場の様子 [7].

2.4 オペレーションモード

RPC のオペレーションモードにはストリーマーモード、アバランシェモードの 2 種類がある。

2.4.1 ストリーマーモード

電子が増幅するとき、イオン化した不活性ガス原子が電子と再結合し、紫外線を放出する。電子増幅が大きい場合 (電子が 10^8 個以上)、この紫外線がアバランシェ領域の外側の原子や分子をイオン化し、そこでもアバランシェ増幅が起きてしまう。その結果、アノード・カソード間に電子が広がって存在する状態をストリーマーと呼ぶ。

ストリーマーモードの RPC はアルゴンを主成分とするガスでオペレートされる。このモードでは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、アンプ等の信号増幅回路を用いずに信号を扱うことができる。一方、電荷量が大きいため定常状態に戻るまでに時間を要し、レート耐性に乏しい (約 1 Hz/cm^2)。また、信号の発生時間にばらつきがあるため、時間分解能は約 1 ns と悪い。以上の特性から、ストリーマーモードの RPC は主にミューオンや宇宙線の測定器として使用されている。

2.4.2 アバランシェモード

アバランシェモードの RPC に用いるガスは、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ (代替フロン、R134a) に SF_6 、 C_4H_{10} (ブタン) といったクエンチャーを加えたものである。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ や SF_6 は電気陰性度が高く電子を吸着しやすいことと、クエンチャーが紫外線を吸着することで、ストリーマーの発生を抑えることができる。アバランシェモードでは読み出しストリップに誘起される電荷量が 1–10 pC と小さいため、信号増幅回路が必要である。一方、電荷量が小さいことで定常状態に戻る時間が短くなり、ストリーマーモードの RPC よりも優れたレート耐性を持つ。レート耐性はガラスの厚みや抵抗率に

も依存するが、一般的なガラス RPC の場合は約 1 kHz/cm^2 である。また、信号の発生時間のばらつきが小さく、およそ 100 ps 以下という高い時間分解能を持つ。近年よく使われるのはアバランシェモードであり、本研究で開発した MRPC もこのモードでオペレーションする。

2.5 主な飛行時間測定用 MRPC

主要な実験において、飛行時間の測定に用いられている MRPC をいくつか挙げる。これらは全てアバランシェモードでオペレーションされる。

LHC の ALICE 実験では $25 \times 35 \text{ mm}^2$ の読み出しパッドが 96 個取り付けられた構造の MRPC が用いられている。ガスギャップの間隔は $250 \mu\text{m}$ 、5 ギャップのスタック 2 つで構成されている。検出効率は 98–99%、時間分解能は 56 ps で、 3.7 m の飛行距離に対して $3 \text{ GeV}/c$ 以下の K/π 、 $5 \text{ GeV}/c$ 以下の p/K を飛行時間測定により識別することができる。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 : \text{SF}_6 = 93 : 7$ の混合ガスを使用している [9, 10]。

STAR 実験では読み出しパッドの大きさが $35 \times 61 \text{ mm}^2$ の MRPC が使われている。ガスギャップの間隔は $220 \mu\text{m}$ 、5 ギャップのスタック 1 つで構成され、時間分解能は 85 ps である。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 : \text{iso-C}_4\text{H}_{10} = 95 : 5$ の混合ガスを使用している [11]。

CERN の SHiP 実験では読み出しストリップの大きさが $29 \times 1600 \text{ mm}^2$ の MRPC が使われている。ストリップピッチは 30 mm である。2 台の MRPC をまとめて読み出し (41 ストリップ)、合計 70 台 (35 セット) を並べて 50 m^2 の領域を覆っている。ガスギャップの間隔は $300 \mu\text{m}$ 、6 ギャップのスタック 2 つで構成され、検出効率は 98%、時間分解能は 54 ps である。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 : \text{SF}_6 = 97.5 : 2.5$ の混合ガスを使用している [12, 13]。

SPring-8 の LEPS2 実験では読み出しストリップの大きさが $25 \times 2000 \text{ mm}^2$ の MRPC が使われている。ガスギャップの間隔は $260 \mu\text{m}$ 、5 ギャップのスタック 2 つで構成され、検出効率は 99% 以上、時間分解能は 80 ps である。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 : \text{SF}_6 : \text{C}_4\text{H}_{10} = 90 : 5 : 5$ の混合ガスを使用している [14]。

SPring-8 の BGOegg 実験では、読み出しストリップの大きさが $25 \times 1000 \text{ mm}^2$ の MRPC が使われている。基本的な構造は LEPS2 実験で用いられる MRPC と同じであり、ガスギャップの間隔は $260 \mu\text{m}$ 、5 ギャップのスタック 2 つで構成される。32 台の MRPC を壁状に並べて $3.2 \times 2 \text{ m}^2$ の面積を覆い、約 60 ps の時間分解能を達成している。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 : \text{SF}_6 : \text{C}_4\text{H}_{10} = 90 : 5 : 5$ の混合ガスを使用している [15, 16]。

第3章

Multigap Resistive Plate Chamber の製作

3.1 材料

電極用カーボンテープ

ESD EMI エンジニアリング株式会社の半導電性両面粘着カーボンテープ (T-9188) を電極として使用した。このカーボンテープの抵抗値は $14 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$ である。

ガラス

高抵抗板として、株式会社ミツル光学研究所製の厚さ $400 \mu\text{m}$ のガラスを使用した。ただし1枚のガラスで 1800 mm の長さを覆うことができないため、 $230 \text{ mm} \times 940 \text{ mm}$ のガラスと $230 \text{ mm} \times 870 \text{ mm}$ のガラスを組み合わせて使用した。

スペーサー

株式会社サンライン製のクインスターシリーズの釣り糸を使用した。直径は $260 \mu\text{m}$ (2.5号) である。

アクリルケース

今回製作した MRPC では、電極用カーボンとガラス層をまとめてアクリルケースに入れ、ケース内部をガス領域とした。このような工夫により、封じたガス領域を開けることなく読み出しストリップやアンプの調整を行うことが可能になった。アクリルケースの厚さは 6 mm (本体 5 mm 、蓋 1 mm) である。

読み出しストリップ

8本の読み出しストリップを PCB 基板に印刷したものを使用した。ストリップの幅は 25 mm 、ピッチは 26 mm で、PCB 基板の厚さは 0.8 mm である。製作最大サイズの限界により、 920 mm 長の PCB 基板2枚を銅テープで繋いで使用する。

3.2 製作

1. 図 3.1 のように電極用カーボンテープをアクリルケースに貼り付け、銅テープを用いてテープに電圧を供給する。

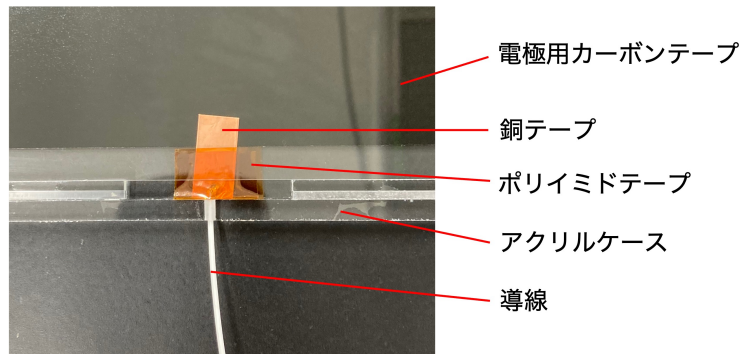


図 3.1: 電圧供給部分。銅テープを通して電極用カーボンテープに電圧を印加する。

2. ガラスと釣り糸を交互に重ね、ガラス間に隙間 (ギャップ) を作る。釣り糸の張り方を図 3.2 に示す。釣り糸の位置がずれないように、アクリルケース内壁の釣り糸通し穴に通しながら、アクリルケースを横断するように糸を張っていく。また、2 種類の大きさのガラスを図 3.3 のように組み合わせて使用する。ガラスは 6 段 (5 ギャップ) 重ねるが、各段でガラスの継ぎ目が互い違いになるようにしている。実際にガラスを重ねた後の様子を図 3.4 に示す。

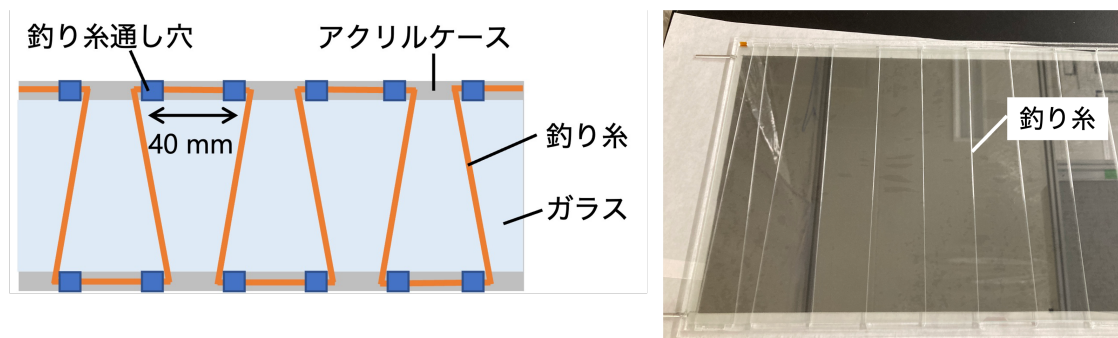


図 3.2: スペース (釣り糸) の張り方と実際の写真。

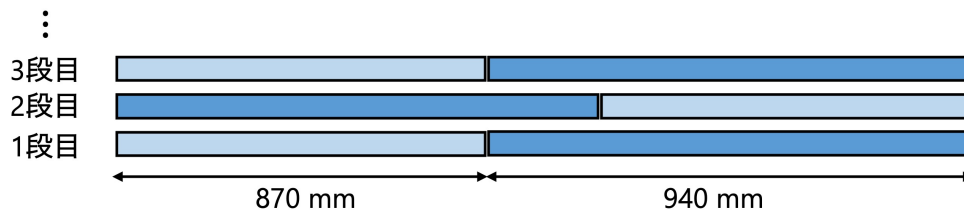


図 3.3: ガラスの重ね方。

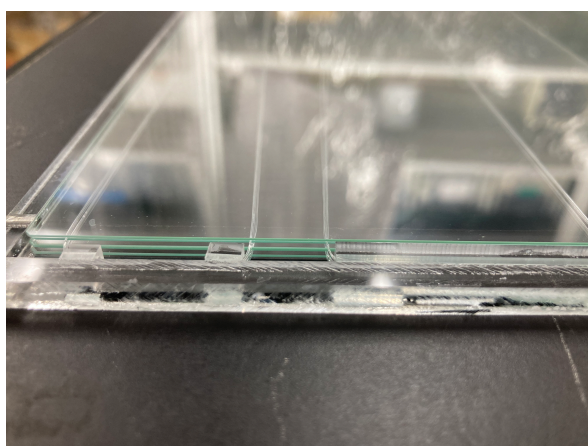


図 3.4: ガラスを重ねた様子。

3. ガス領域であるアクリルケースを密閉する。まず始めにケースの 4 辺を幅 50 mm のポリイミドテープで閉じる (図 3.5)。ただしケースの角ではテープが重なり、その部分からガスが漏れてしまう。そのため角にはポリイミドテープに加えてアクリル接着剤を塗布し、ケースを密閉した。また、アクリルケースの壁に開けた穴からガスチューブが出る構造になっており、ガスチューブとアクリルケースの隙間はエポキシ系樹脂接着剤 (アラルダイト) を用いて塞いだ (図 3.6)。

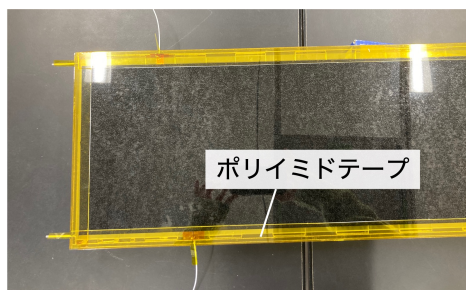


図 3.5: ポリイミドテープで閉じた様子。

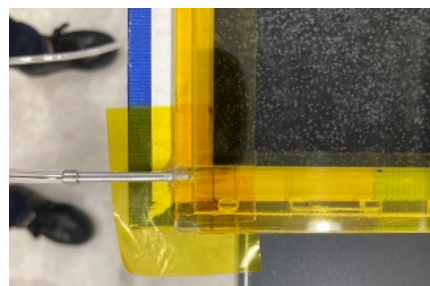


図 3.6: ガスチューブ周辺。

4. 図 3.7 のようにアクリルケールと読み出しストリップを重ね、信号を読み出すための配線を行う。読み出しストリップの全体像を図 3.8 に示す。読み出しストリップとアンプを U.FL ケーブル (図 3.9) という同軸ケーブルで繋ぐ。

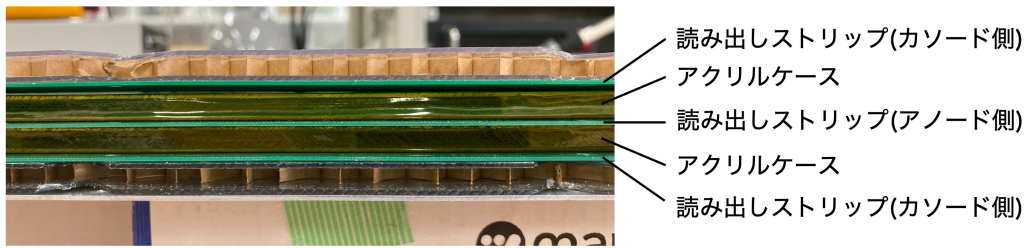


図 3.7: アクリルケースと読み出しストリップを重ねた様子。

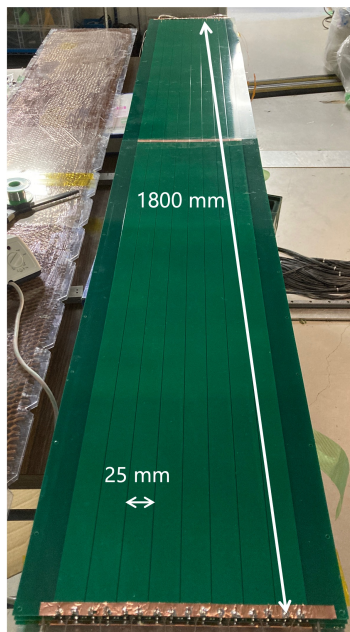


図 3.8: 読み出しストリップ。

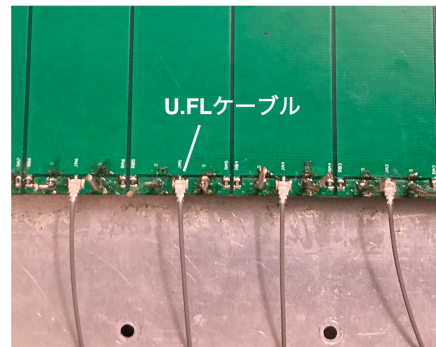


図 3.9: U.FL ケーブル。

3.3 アンブ

アバランシェモードでオペレーションする MRPC は信号の波高が小さく、アンブを用いて増幅させる必要がある。使用したアンブを図 3.10 に示す。1 つの基板に 2 段の集積回路チップ (BGA2866・BGA2869) とアッテネーターを 1 つ含むもので、台湾中央研究院にて開発された。アンブの増幅率は 1 段目が 14–16 倍、2 段目が 35–40 倍であり、間に -6 dB (0.5 倍) のアッテネーターを挟むことで全体の増幅率は 250–300 倍となる。

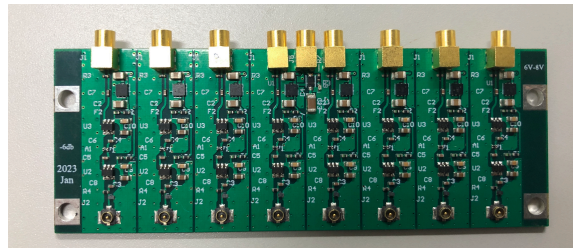


図 3.10: 使用したアンプ。

先行研究である EMPHATIC 実験用 1000 mm 長 MRPC [24] では、アッテネーターを用いず増幅率が 500–600 倍のアンプが用いられた。検出効率は 99% 以上、時間分解能は 60–70 ps と要求を満たす性能を達成した一方、不安定なノイズのため長時間の安定した動作が難しいという課題があった。

ノイズは周期的であり増幅回路の発振が原因だと考えられる。具体的にはアンプの出力が再び MRPC のストリップに入り、出力された信号がアンプで増幅される、という現象が繰り返し生じることにより、周期的な発振ノイズとなる。ベースラインのノイズが大きくなると MRPC の信号がノイズの上に乗ってしまう。そのため時間情報を正しく測定できず、MRPC の時間分解能が得られない可能性がある。そこで従来より増幅率を抑えたアンプを用い、ノイズの低減を目指した。

3.4 MRPC の信号

図 3.11 に、製作した MRPC に電子ビームを照射したときのアノード側で見られる信号の波形を示す。これは 3.3 節で述べたアンプを用いて増幅させた後の信号である。第 1 波の後に見える複数の小さなピークは反射によるものである。読み出しストリップとアンプのインピーダンスが異なると、接続部分で信号の反射が生じると考えられている。反射を抑えるため、アンプと並列になるように読み出しストリップとグラウンドの間に 100 Ω の抵抗を 2 つ繋いでインピーダンスマッチングを行った。

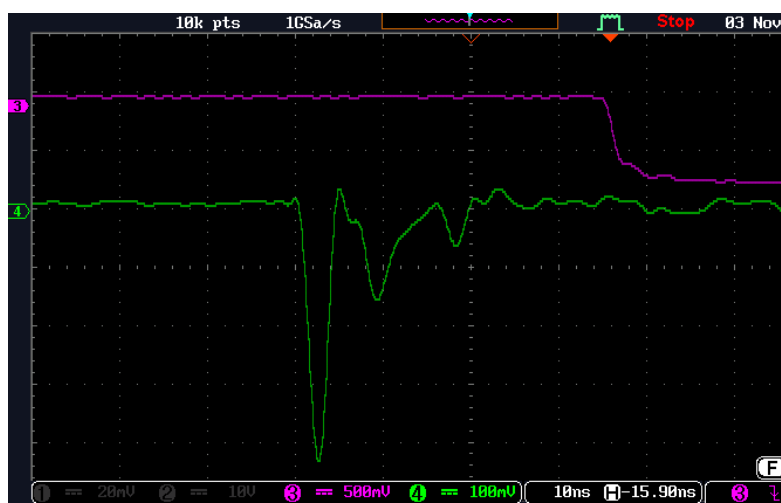


図 3.11: RPC の信号。(緑：アノード、紫：外部トリガー)

第 4 章

SPring-8 LEPS2 ビームラインにおける 性能評価試験

製作した 1800 mm 長の MRPC を SPring-8 LEPS2 ビームラインに持ち込み、電子ビームを用いた試験を行った。

4.1 目的

試験の目的を以下に述べる。

- HR-TDC を用いた時間情報の測定
RPC の信号は信号幅が約 2 ns、立ち上がり時間が約 1 ns と高速である。このような信号の立ち上がり、立ち下がり時間を高時間分解能 TDC (HR-TDC) (4.5 節) を用いて正しく測定できるかを調べた。今回のテスト実験では、チャームバリオン分光実験で使用されるものと同じ HR-TDC を用いた。
- 時間情報のみを用いた slewing 補正
時間分解能を求める上で必要となる slewing 補正に関して、これまでは電荷の情報を用いた補正方法が用いられてきた。本研究では電荷の測定は行わないため、時間情報のみを用いた補正方法を試し、適用可能かを調査した。
- 検出効率・時間分解能の評価
それぞれについて MRPC 印加電圧依存性・位置依存性を調べた。
- 読み出しストリップの継ぎ目・ガラスの継ぎ目における性能の評価
本研究で製作した MRPC は 2 種類の大きさのガラスを使用しており、ガラスの継ぎ目が存在する。また、読み出しストリップについても 2 枚を繋いで使用している。先行研究 [14] では読み出しストリップの継ぎ目とガラスの継ぎ目における性能の悪化が報告されているため、その再現性を調査した。
- 低増幅率アンプの導入

3.3 節で述べたように、従来より増幅率の低いアンプを導入することでノイズレベルが低下し、安定した動作が可能になると期待される。一方、増幅された MRPC の信号の波高も小さくなるため、性能に影響が生じるかどうかを調べた。

4.2 SPring-8 LEPS2 ビームライン

SPring-8(Super Photon ring-8 GeV) は兵庫県佐用郡佐用町に位置する大型放射光施設である。SPring-8 で使用する電子ビームは、隣接する X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA より供給される (図 4.1)。SACLA では電子銃から打ち出された電子ビームを線型加速器で加速しており、XFEL のユーザー運転と並行して一部のビームを SPring-8 に入射させている。8 GeV に加速された電子ビームが SPring-8 の蓄積リングに供給され、リング内には常に 100 mA の電子が周回している。この電子が磁場により曲げられた際に生じる放射光が様々な研究に利用されている。

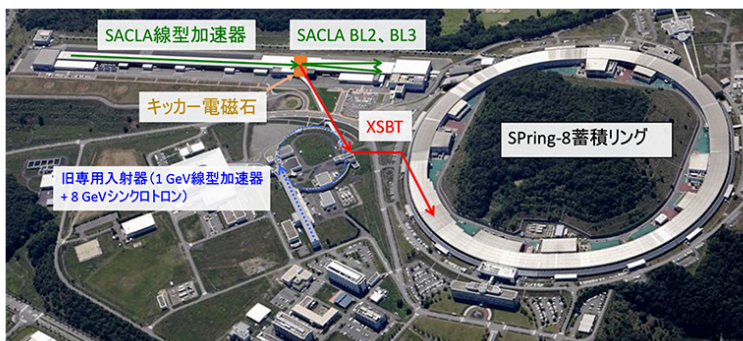


図 4.1: SACLA と SPring-8。

図 4.2 に示すように、LEPS2 ビームラインでは蓄積リング内の電子にレーザーを入射し、逆コンプトン散乱により高エネルギーの γ 線を生成する。

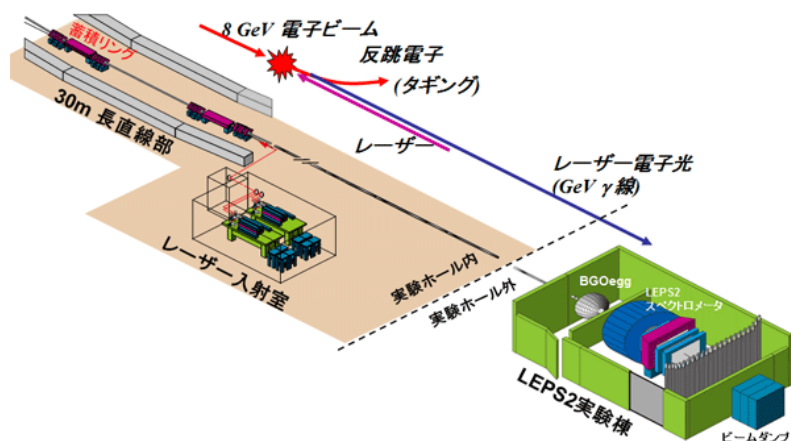


図 4.2: LEPS2 ビームライン [26]。

4.3 実験セットアップ

実験セットアップの概要図を図 4.3 に示す。

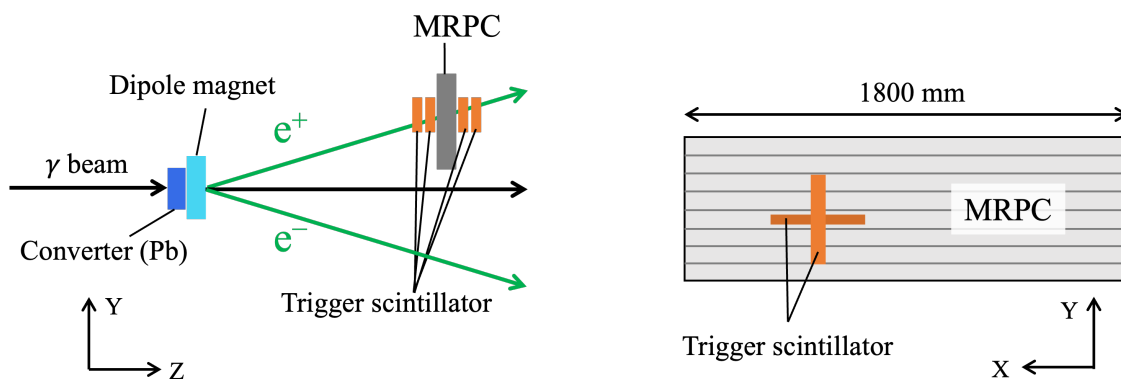


図 4.3: 実験セットアップ。

逆コンプトン散乱によって得られる 1–2 GeV/c の γ 線をコンバーター (厚さ 0.5 mm の鉛) に照射し、電子対生成反応を起こす。生じた電子、陽電子を双極型常磁石で曲げ、そのうちの陽電子のみを MRPC に照射した。加速器から得られる RF 信号をスタートタイミング、MRPC の信号をストップタイミングとして粒子の飛行時間を測定し、時間分解能を評価した。

トリガー信号の作成のため、4つのプラスチックシンチレータを用いた。シンチレータ 2 本を交差させたものを MRPC の上流と下流にそれぞれ設置した。シンチレータの幅は上流から順に 5 mm (垂直)、3 mm (水平)、10 mm (水平)、10 mm (垂直) である。上流から順に T1、T2、T3、T4 とする。4つのうち 3つ以上のシンチレータを通過した場合 (3つ以上のシンチレータのコイン

シデンスイベント)のみ、データを取得する。後の解析において検出効率や時間分解能を求めるときは、4つのシンチレータ全てを通過したイベントを採用した。この場合、トリガー領域は5 mm×3 mm(x方向×y方向)である。

読み出し回路を図4.4に示す。実線の数にはチャンネル数を示し、MRPCは1ストリップにつき左右それぞれから信号を読み出す。シンチレータの信号はNIMディスクリミネーターを通してデジタル信号に変換し、TDCのトリガー信号を生成した。その後、各シンチレータの時間情報をTDCで取得するため、MRPCに用いたものと同じPECL出力のディスクリミネーターを使用した。

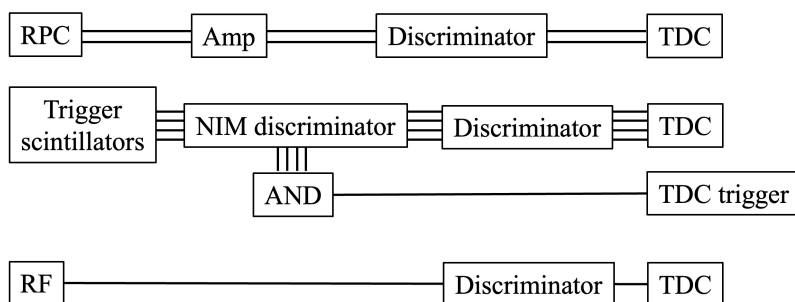


図 4.4: トリガー及びデータ収集系の回路図。

4.4 ディスクリミネーター

MRPCの信号は立ち上がり時間が約1 nsと速い。このような高速信号に対応したディスクリミネーターが台湾中央研究院で開発された(図4.5)。ADCMP573BCPZコンパレータが使用されており、出力信号はPECL、閾値は可変である。

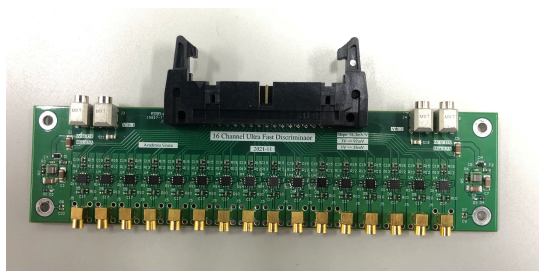


図 4.5: ディスクリミネーター。

4.5 HR-TDC

時間測定には High Resolution TDC (HR-TDC) を用いた [27]。ハドロン実験のために開発された Hadron Universal Logic (HUL) モジュールに、HR-TDC のメザニンボードを乗せたものである。本テスト実験では、チャームバリオン分光実験で使用されるものと同じ HR-TDC のメザニンボードを用いた。時間分解能は common stop に対して 25 ps、チャンネル間の差分では 20 ps である。HUL1 台で 64 ch 読み出すことができる。HR-TDC の入力信号の規格は LVDS だが、同様な差動信号である PECL でも回路のドライブ電圧が適合すれば読み出すことができる。4.4 節のディスクリミネータはこの条件を満たしていたため、HR-TDC で PECL 信号を読み出すことができた。

4.6 RF 信号

SPring-8 では、加速器側からユーザーへ 1966 ps 間隔の RF 信号が供給されている。これは蓄積リング内を周回する電子のバンチ間隔 (最も細密の場合) と同じである。逆コンプトン散乱により得られる γ 線の間隔も 1966 ps となり、電子対生成を起こすコンバーターまで光速で進む。したがって、RF 信号により飛行時間測定のスタートタイミングを決定することができる。RF 信号の時間分解能は約 4 ps、電子バンチの広がり約 14 ps であり、これらの寄与を合わせた約 14–15 ps がスタートタイミングの時間分解能となる。これは TDC の時間分解能 (25 ps) より優れている。

図 4.6 は RF 信号と MRPC の信号の時間差である。電子のバンチ間隔と等しい、1966 ps 間隔のピークが見られる。ただし、供給された RF 信号を全て TDC で測定するのではなく間引いて使用していることと、蓄積リング内の電子のフィリングパターンによってピークの本数は変わる。これらの詳細は付録で述べる。本テスト実験の解析ではこれら 11 本のピークを足し合わせて使用した。

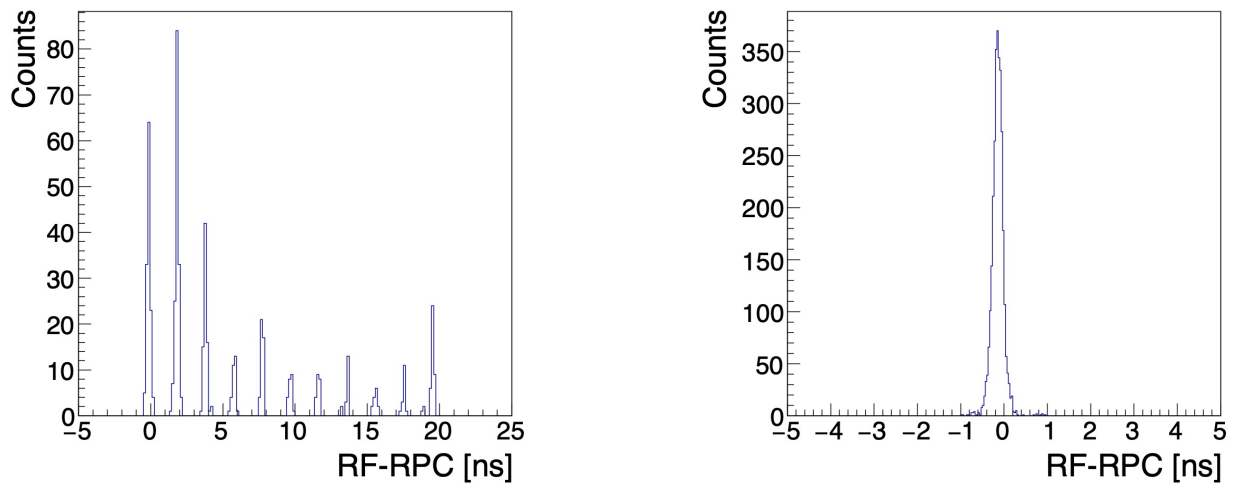


図 4.6: バunch構造の足し合わせ前 (左) と後 (右) の RF 信号と MRPC の信号の時間差。

4.7 測定条件

検出効率、時間分解能の電圧依存性を調べる場合を除いて、MRPC に印加する電圧は 13.5 kV に固定した。ディスクリミネーターの閾値は MRPC の信号に対しては -52.5 mV、RF 信号に対しては -105 mV に設定した。トリガー用シンチレータに用いる NIM ディスクリミネーターの閾値は T1、T2 に対しては -15 mV、T3、T4 に対しては -30 mV とした。

ガスは $C_2H_2F_4 : SF_6 : C_4H_{10} = 90 : 5 : 5$ の割合で 3 種類を混合したものをを用いた。2.5 節で述べたように、今回開発した MRPC は先行研究である LEPS2 実験の MRPC と近い構造であるため、同様の混合ガスを使用した。

検出効率、時間分解能の位置依存性を調べる場合を除いて、トリガー領域は図 4.7 の位置に固定した。MRPC の信号は左右から読み出し、左への伝播距離は 1400 mm、右への伝播距離は 400 mm である。位置依存性を調べる時はトリガー領域を X 方向に移動させ、 $X = -700, -500, -300, 0, 300, 500, 700$ mm の各点で測定した。その後、ガラスの継ぎ目である $X = -35, 35$ mm の 2 点で測定を行った。MRPC の電圧は、電極用カーボンテープの右端から印加している。

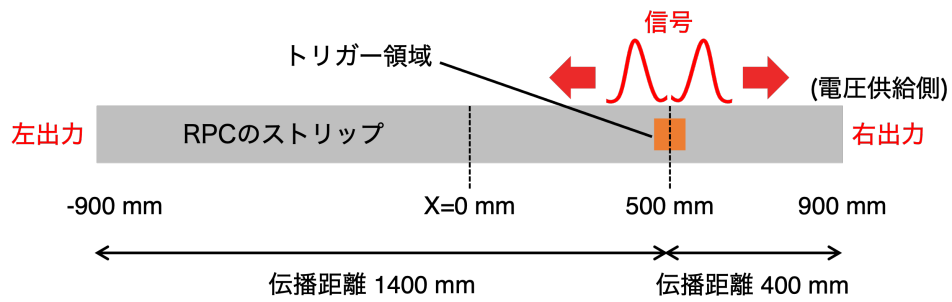


図 4.7: MRPC のストリップにおけるトリガー領域の位置。ビームは紙面奥から手前方向である。

4.8 解析方法

4.8.1 カット条件

トリガーのカット条件

図 4.8 に 4 つのトリガーシンチレータのタイミングの分布を示す。トリガー用シンチレータ T1、T2、T3、T4 全てがディスクリミネータの閾値を超えたイベントを用いるが、複数のビーム電子によるマルチヒットイベントを取り除き、1 粒子が正しいタイミングでヒットしたイベントを選ぶ必要がある。そのため図 4.8 の水色の領域は取り除き、ピーク部分のみをトリガーイベントとした。

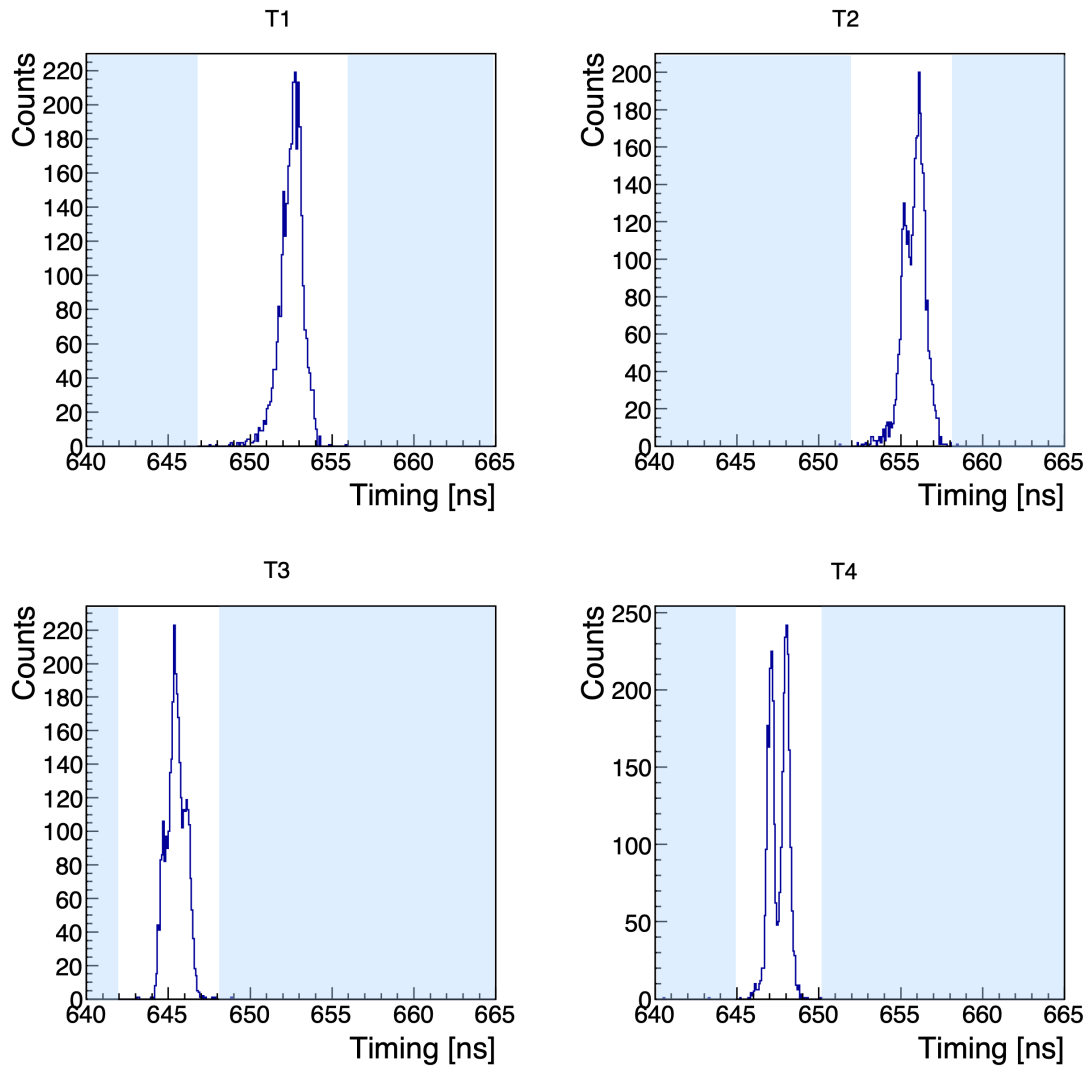


図 4.8: トリガーシンチレータ T1、T2、T3、T4 のタイミング分布。これ以降の解析では水色の領域は使用しない。

MRPC のカット条件

MRPC の信号の leading と trailing の両方を測定できた場合、MRPC にヒットがあったとみなした。図 4.9 に示すように、leading は信号の立ち上がり時にディスクリミネーターの閾値を超えたタイミング、trailing は信号の立ち下がり時にディスクリミネーターの閾値を超えたタイミングを指す。今回のテスト実験の目的として、立ち上がり時間が約 1 ns と高速な MRPC の信号に対する時間情報の測定がある。このように高速な信号の時間情報を測定する場合、trailing を取り逃がしてしまう可能性がある。今回は leading と trailing の両方を測定できたイベントのみ、解析に使用した。

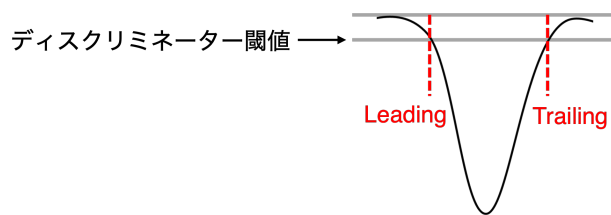


図 4.9: leading と trailing。

MRPC の信号に対してもタイミングカットを行う。4つのトリガーシンチのうち最も時間分解能の良い T3 と MRPC の時間差を用い、MRPC がトリガーと同じタイミングでヒットしたイベントを選んだ。但し、MRPC のタイミングは左右の信号のタイミングの平均値を用いた。図 4.10 は MRPC と T3 の時間差分布を示し、 -34 ns 付近のピークは MRPC がトリガーと同じタイミングでヒットしたイベントである。水色の部分は MRPC が通常より早くヒットしたイベントを示す。このようなイベントは複数のビーム粒子がほぼ同時に入射することで、2ヶ所以上で電子増幅が生じ信号が誘起されるマルチヒットイベントである。この場合、タイミングの平均値の計算に用いる左右の信号は別の粒子起因となるため、MRPC のタイミングは通常より早くなってしまう。このようなマルチヒットイベントは、検出効率を求める際にはトリガーイベントから取り除いた。一方、緑色の部分は MRPC が通常より遅くヒットしたイベントを示す。これは反射波の影響で生じると考えられる。

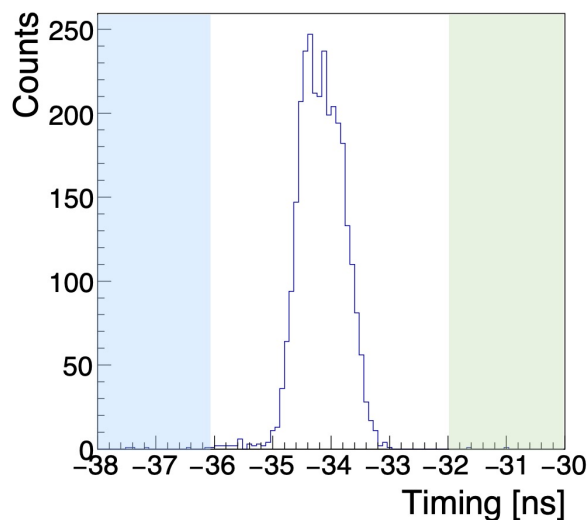


図 4.10: MRPC と T3 の時間差。色がついた領域は MRPC がトリガーと同じタイミングでヒットしていないためカットした。水色の領域はトリガーイベントからも除いた。

4.8.2 検出効率

トリガーイベントのうち、MRPC が正しいタイミングでヒットしたイベントの割合を求めた。MRPC の左右両方にヒットした場合、左にヒットした場合、右にヒットした場合のそれぞれについて検出効率を計算した。

4.8.3 時間分解能

MRPC と RF の信号の時間差 ($\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$) を用いて MRPC の時間分解能を求めた。MRPC の時間 t_{RPC} は、左 (または右) 片読み出しの場合はそれぞれの信号のタイミング、左右両読み出しの場合は左右の信号のタイミングの平均とした。

$$\text{TOF}_{\text{RPC-RF}} = t_{\text{RPC}} - t_{\text{RF}} = \begin{cases} t_{\text{left(right)}} - t_{\text{RF}} & (\text{片読み出し}) \\ (t_{\text{left}} + t_{\text{right}})/2 - t_{\text{RF}} & (\text{両読み出し}) \end{cases} \quad (4.1)$$

Slewing 補正

アナログ信号に対してディスクリミネータを用いる際、波高によって閾値を超えるタイミングにずれ (タイムウォーク) が生じる (図 4.11)。粒子の飛行時間を正確に評価するためにはこのずれを補正する必要がある (slewing 補正・タイムウォーク補正と呼ぶ)。

タイムウォークはアナログ信号の波高に依存し、一般的に波高の評価には電荷の情報を用いる。しかし、1.7 節で述べたように本研究では電荷の測定は行わず、時間情報のみを解析に使用した。測定した時間情報から Time-over-Threshold (TOT) を求めることができ、TOT と波高には相関がある。そこで電荷情報の代わりに TOT を用いた slewing 補正を行った。ここで、TOT とはアナログ信号がディスクリミネーターの閾値を超えている時間を表す (図 4.11)。

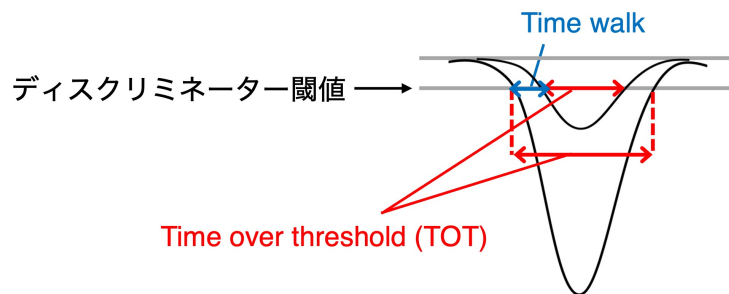


図 4.11: Time-over-Threshold(TOT) とタイムウォークの概略図。

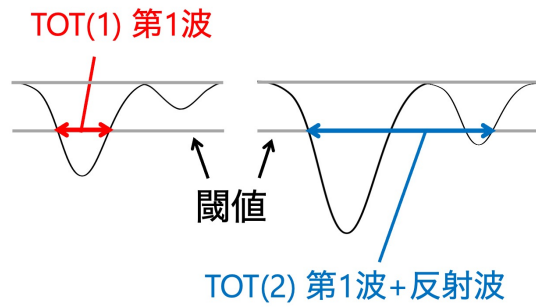


図 4.12: 反射波を含んだ場合の TOT。

3.4 節で述べたように、MRPC の信号では第 1 波に加えて反射波の影響を考慮する必要がある。反射波がディスクリミネーターの閾値を超えた場合、そうでない場合に比べて TOT が大きくなる (図 4.12)。TOT 分布が複数ピークに分かれることで TOT と TOF の相関が不連続になり、補正のためのフィッティングが困難になる (図 4.13 (左)、図 4.14 (左))。そこで TOT を TOT integral [25] に変換し、TOT integral を用いた slewing 補正を行った。

TOT integral とは、TOT を小さいものから順に並べたとき、ある TOT が全体のうち何番目に位置するかを割合 (%) で表したものである。図 4.15 で赤い丸で示したイベントは、小さい方から数えて 5 番目の TOT を持つ。このイベントの TOT integral は、 $5/20$ (イベント数) $=0.25$ より、25% である。TOT を TOT integral に変換することで、TOT integral と TOF の相関が連続的になる (図 4.14 (右))。

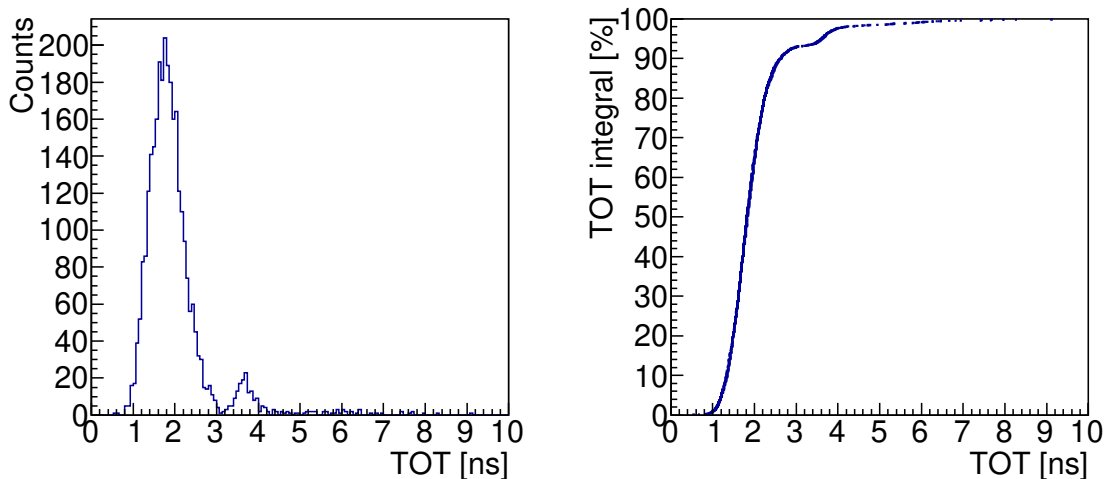


図 4.13: (左)2 ピークに分かれた TOT 分布、(右)TOT と TOT integral の相関。

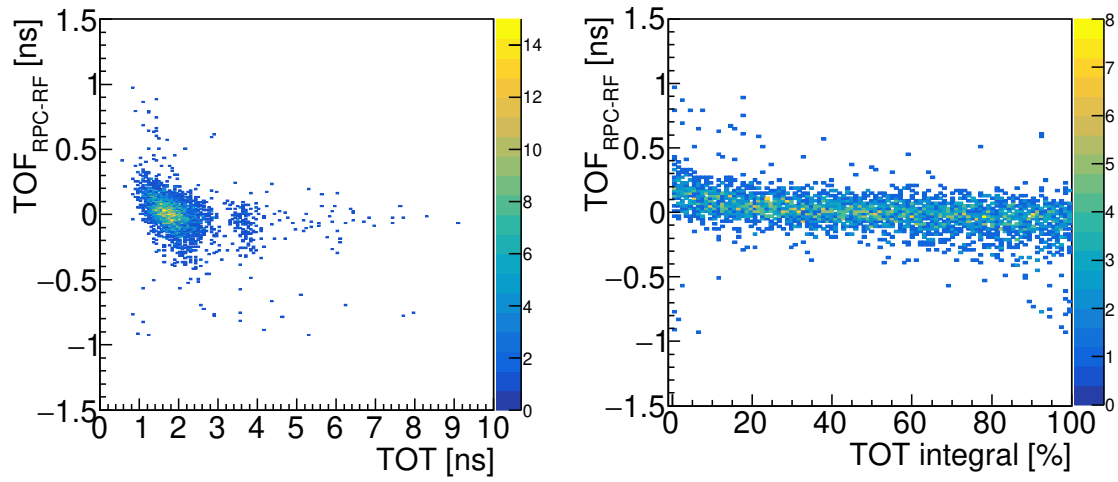


図 4.14: (左)TOT と $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ の相関、(右)TOT integral と $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ の相関。

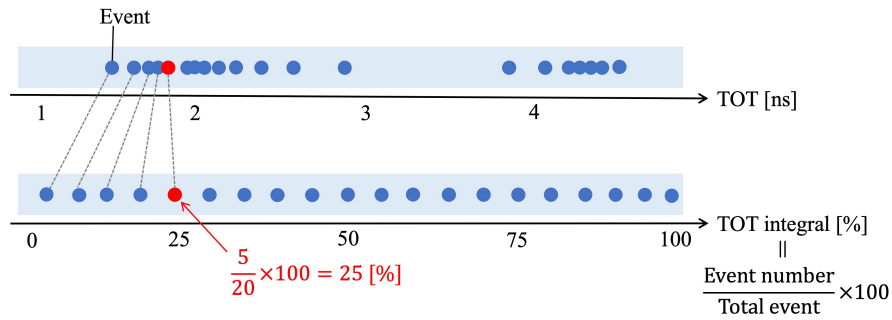


図 4.15: TOT から TOT integral への変換。

TOT integral と TOF の相関に対して、 p_0 、 p_1 、 p_2 をパラメータとして以下の二次の関数でフィッティングを行った。

$$f(\text{TOT integral}) = p_0(\text{TOT integral})^2 + p_1(\text{TOT integral}) + p_2 \quad (4.2)$$

フィッティング後、フィッティング関数 f を $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ から差し引いたものが図 4.16 (右) である。

図 4.17 に、補正前と補正後の $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ 分布を示す。それぞれ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。この図の場合、補正前の時間分解能は 97.30 ± 2.01 ps、補正後の時間分解能は 86.44 ± 1.82 ps である。以降、時間分解能は slewing 補正後の値を用いる。

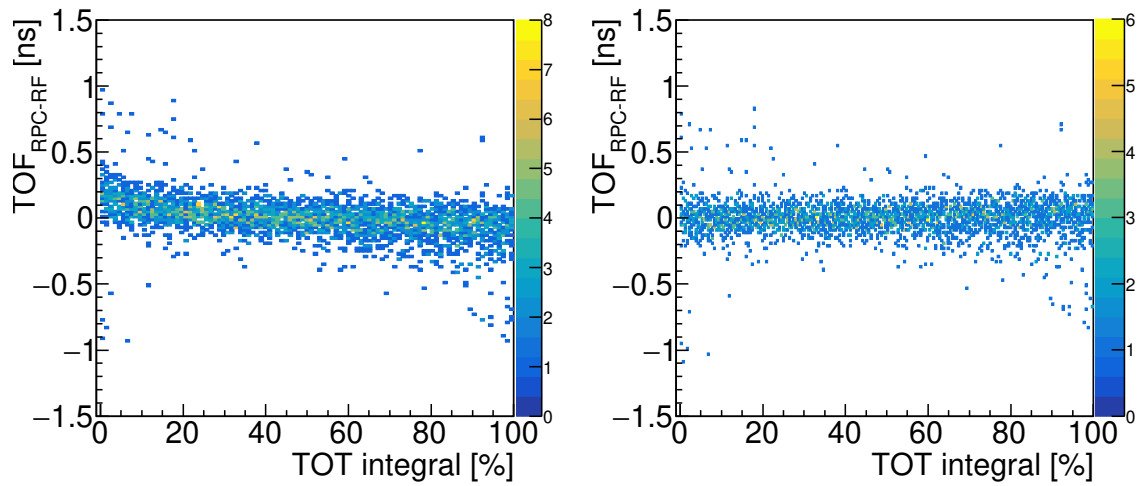


図 4.16: 補正前 (左) と補正後 (右) の TOT integral と $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ の相関。

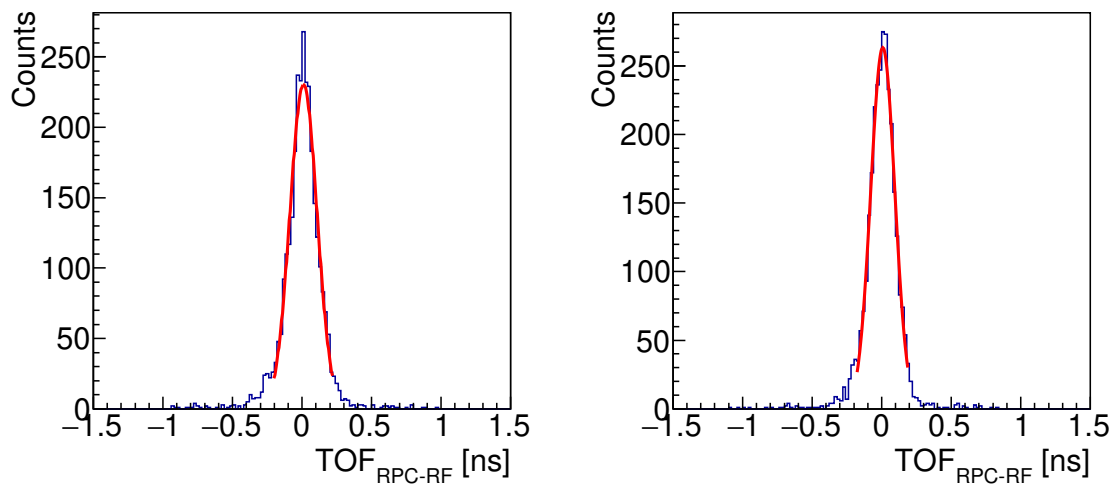


図 4.17: 補正前 (左) と補正後 (右) の $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ 分布。

4.9 結果

4.9.1 検出効率と時間分解能の MRPC 印加電圧依存性

図 4.18 に検出効率の印加電圧依存性を示す。測定時、トリガー領域は $X = 500 \text{ mm}$ に固定した。左への伝播距離は 1400 mm 、右への伝播距離は 400 mm である。印加電圧が 11 kV から 13.5

kV の範囲では、電圧が大きくなるにしたがって検出効率も高くなった。これはギャップ内の電場が大きくなるにつれて MRPC の信号の波高も大きくなるからだと考えられる。印加電圧が 13.5 kV 以上になると検出効率は 99% を超え、プラトーに達する。また信号の leading、trailing の両方を測定できたイベントが 99% 以上あることから、立ち上がり、立ち下がり時間の早い MRPC の信号に対しても、問題なく時間情報を取得できていることがわかった。

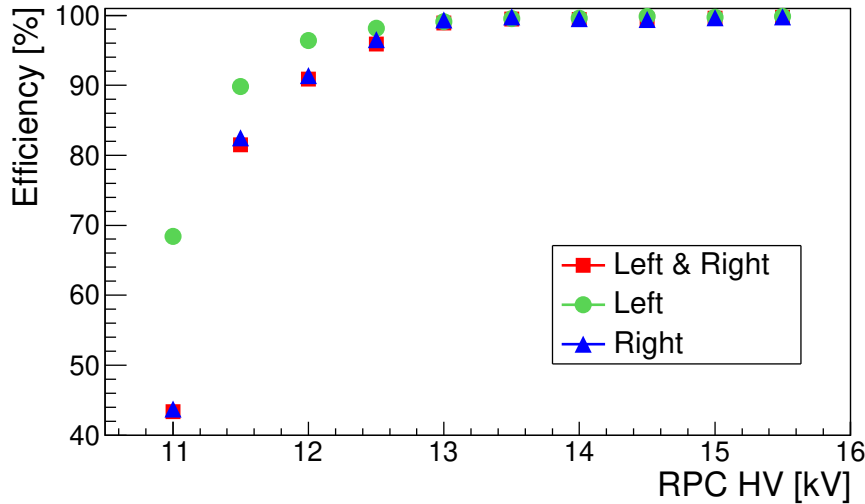


図 4.18: 検出効率の MRPC 印加電圧依存性。

図 4.19 に slewing 補正前後の時間分解能の印加電圧依存性を示す。補正後の時間分解能については、印加電圧依存性はほぼ見られなかった。一方、補正前の時間分解能は、MRPC への印加電圧が 11 kV から 13.5 kV の範囲では電圧を上げるにつれて向上した。これは検出効率の向上と同様に、MRPC の信号の波高が大きくなるためだと考えられる。しかし、印加電圧が 13.5 kV を超えると、電圧を上げて時間分解能は良くならない。これはストリーマーによる影響だと考えられる。図 4.20 に TOT 分布を示す。印加電圧が 13.5 kV のときはアバランシェによる信号のみが現れている。一方、15.5 kV のときはアバランシェによる信号に加え、ストリーマーによる波高、すなわち TOT の大きい信号が混ざっていることがわかる。これは印加電圧が大きくなるとストリーマーモードに入り始めていることを示している。ストリーマーによる信号は発生時間にばらつきがあるため、時間分解能を悪化させる原因となる。今回は印加電圧が 14.5 kV 以上になるとストリーマーによる信号が見られた。

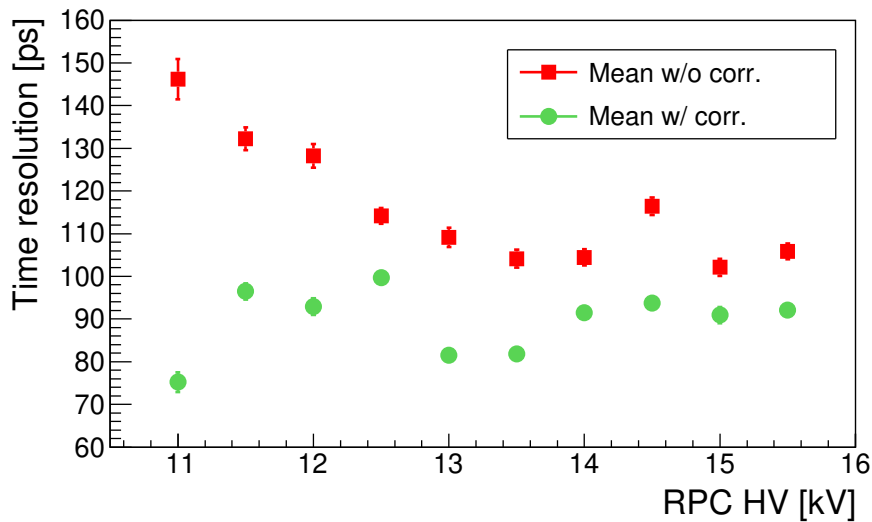


図 4.19: 時間分解能の MRPC 印加電圧依存性。

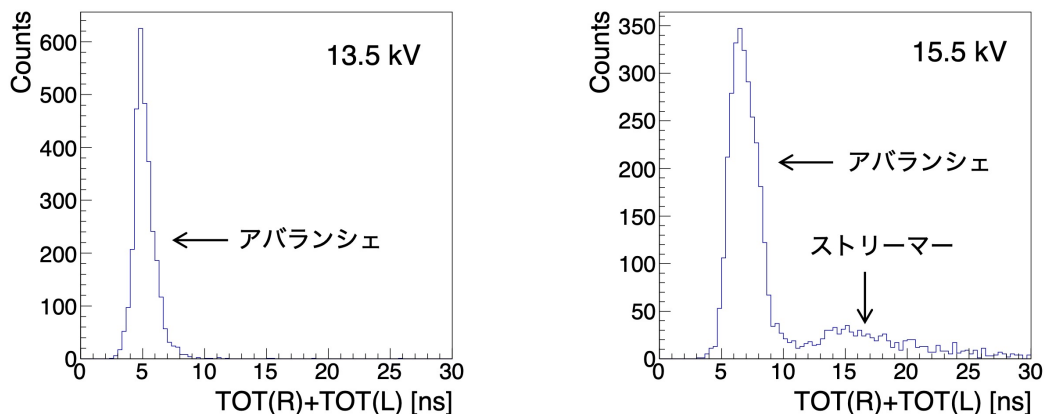


図 4.20: (左)13.5 kV 印加時、(右)15.5 kV 印加時の TOT 分布。印加電圧が 15.5 kV ではストリーマーによる波高が大きな信号が発生している。

位置依存性の測定は、検出効率と時間分解能どちらについても十分な値が得られたという理由から、印加電圧を 13.5 kV に固定して実施した。

4.9.2 検出効率と時間分解能の位置依存性

MRPC のストリップの長さ方向 (X 方向) にビームの入射位置を移動させ、検出効率と時間分解能の位置依存性を調べた。図 4.7 に示すように、ストリップの左端が $X = -900$ mm、右端が

X = 900 mm に対応する。図 4.21 に、検出効率の位置依存性を示す。ストリップの中心より右側では 98% 以上と十分な検出効率を得られた一方、ストリップの左端に向かうにつれ検出効率が低下していることが分かった。ストリップの端に近い部分にビームを入射させた場合、伝播距離の長い方の読み出しについては信号の減衰により検出効率が低下することがある。しかし、今回はビームの入射位置が左側であるのに対し、伝播距離の短い左側の検出効率が特に低下しており、予想と反する結果となった。

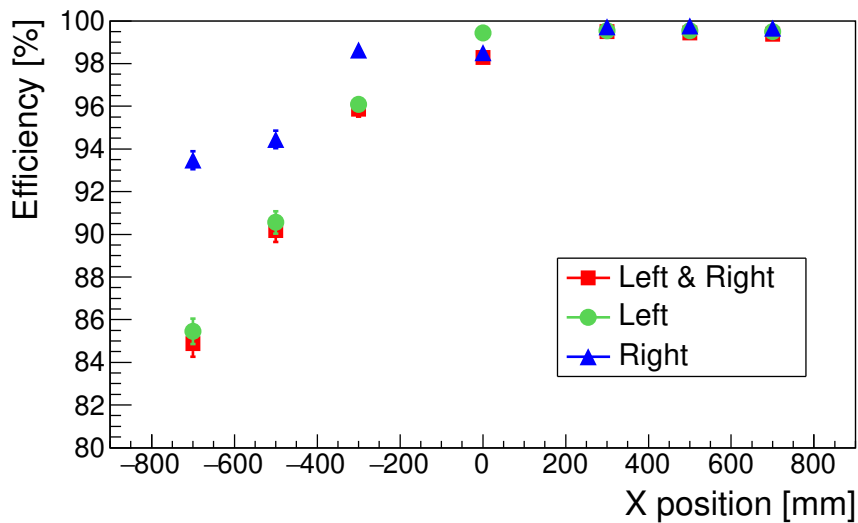


図 4.21: 検出効率の X 位置依存性。

原因として、MRPC の左側のガスギャップに十分な電場がかかっていなかったことが考えられる。電極にかかる電圧の大きさや、ガスギャップにかかっている電場の大きさを直接測定することはできない。そのため、ビームの入射位置を X = -700 mm に固定し、MRPC への印加電圧を上げた場合の検出効率を調べた。結果を図 4.22 に示す。印加電圧が大きくなるにつれ検出効率が向上していることがわかる。耐電圧の都合上 16 kV 以上の電圧は印加できなかったが、検出効率はプラトーには入っておらず、さらに高電圧を印加すると検出効率も向上すると予想される。また、ビームの入射位置が X = -700 mm、印加電圧が 15 kV の場合、図 4.20(右) に示したようなストリーマーによる信号は見られなかった。同じ 15 kV を印加しても位置によってストリーマーの有無が異なることから、位置によってガスギャップにかかる電場の大きさに違いがあったと考えられる。このような現象が起こった原因は、電極用カーボンの抵抗率の高さや電圧供給部分からの距離の長さであると考えられ、詳細は 4.9.3 節で述べる。

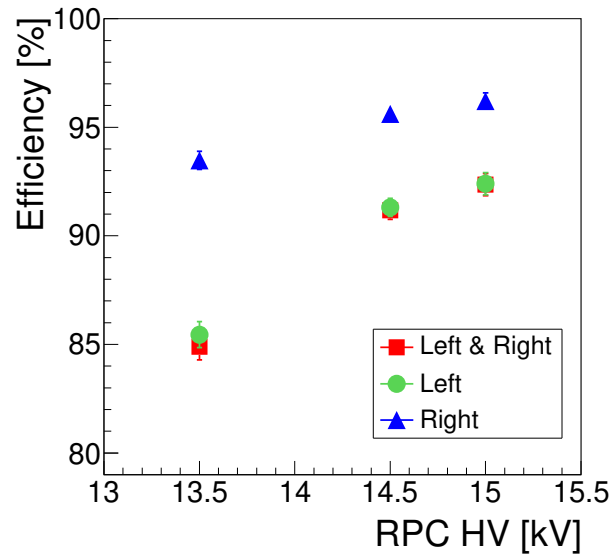


図 4.22: $X = -700$ mm における検出効率の印加電圧依存性。

時間分解能の位置依存性を図 4.23 に示す。プロットしている結果は全て slewing 補正後の値である。今回の結果は信号の伝播距離、反射、電圧の低下という 3 つの要因で説明できる。全体的な傾向として、ビーム入射位置が左側の場合は右の、ビーム入射位置が右側の場合は左の時間分解能が悪化する傾向が見られる。これは伝播距離が長いと信号が鈍り、時間分解能が悪化するためである。

十分な検出効率を得られた $X = 0$ mm から 500 mm では、80–90 ps の時間分解能となった。両読み出しで左右からの信号のタイミングの平均を用いた場合、時間分解能は $X = 500$ mm で最も良く、 81.80 ± 1.52 ps であった。右端の $X = 700$ mm では slewing 補正が適切に適用できなかったため、他と比べて時間分解能が悪くなっている。次に検出効率が不十分な左側の領域について述べる。左端である $X = -700$ mm を除いて、90–95 ps の時間分解能が得られた。 $X = -700$ mm では右側の信号を用いた時間分解能が悪いが、これは反射の影響であると考えられる。右側では、信号の発生位置から直接伝播した信号に加え、左側のストリップ端で反射した信号も読み出す。 $X = -700$ mm で信号が誘起された場合、反射した信号の伝播距離は右側まで直接伝播した信号に比べて約 400 mm 長い。このとき、反射した信号は直接伝播した信号より約 2 ns 遅れて読み出される。その結果、直接伝播した信号と反射した信号が混ざり、読み出した信号のタイミングが広がりを持つことで時間分解能が悪化する。

また、 $X = -700$ mm から -300 mm での検出効率を図 4.18 と単純に比較すると、この領域で実際にかかっていた電圧は 11.5–12.5 kV 程度と推測される。この場合、図 4.19 より補正後の分解能は、最も良い 13.5 kV の場合と比べて約 20 ps 悪化する。したがって左側のガスギャップにも十分な大きさの電場をかけることができれば、右側と変わらない程度まで時間分解能が改善すると考

えられる。

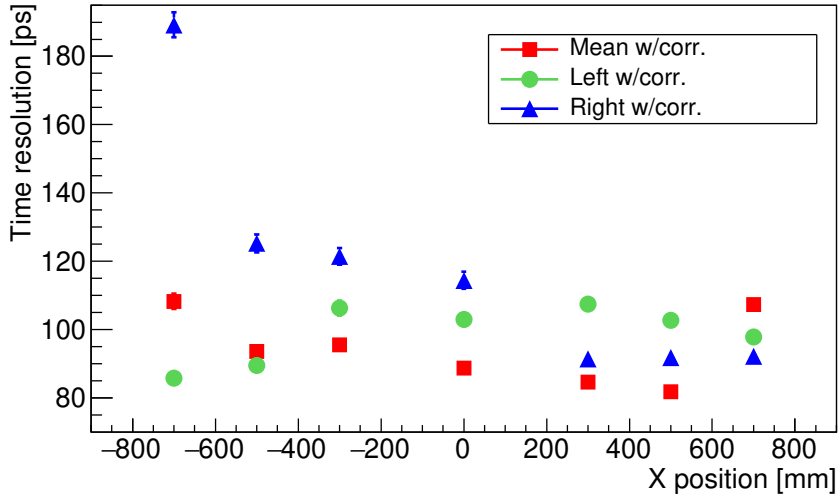
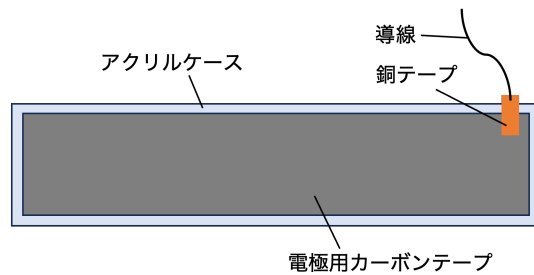


図 4.23: 時間分解能の X 位置依存性。

4.9.3 電圧低下の原因

先に述べたように、MRPC の左側のガスギャップに十分な電圧がかかっていなかった可能性が高い。ここではその原因について考察する。



電極用カーボンテープへの電圧供給の様子を図 4.24 に示す。カーボンテープはアクリルケースに貼付し、右端から銅テープを介して電圧を印加した。今回の結果より、電圧供給部分から遠く離れるにつれて何らかのリーク電流が生じてしまい、十分な電圧がかからなくなると予想される。また、今回用いたカーボンテープの抵抗値は 14 M Ω であり、一般的な MRPC に比べて 1 桁高かったことも、リーク電流を増加させる要因となるため電圧が低下する一因であったと考えられる。

先行研究 [28][13] のように電極の抵抗値が高い MRPC では、電極全体に均一に電圧がかかるような工夫を行っている。これらの MRPC はカーボンを含むインクを塗布した電極を使用し、その抵抗値は $100\text{ M}\Omega$ である。図 4.25 のようにインクを塗布した電極の上に導電性の高い銀のインクをループ状に塗布することで、広い面積に均一に電圧をかけることができる [29]。

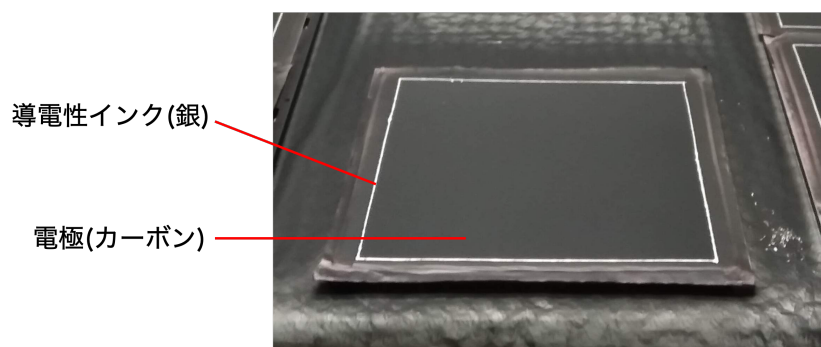


図 4.25: 電極に銀のインクを塗布した様子 [29]。

他の対策として、図 4.26 のように電圧供給部分の銅テープをカーボンテープの端まで伸ばすと電極全体に一様な電圧を印加できると考えられる。このような対策を施した MRPC の開発は、今後の課題である。

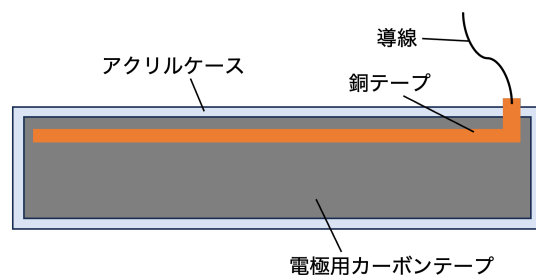


図 4.26: カーボンテープへの電圧供給。銅テープ等で端まで均一に電圧を供給する。

4.9.4 ストリップ・ガラスの継ぎ目における性能

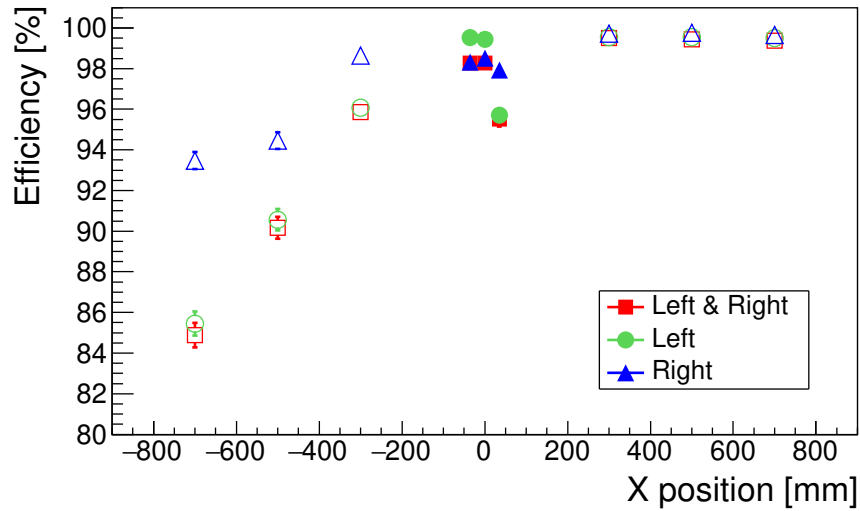


図 4.27: ストリップ・ガラスの継ぎ目における検出効率。塗りつぶされたプロットは継ぎ目、中抜きのプロットはその他の位置を表す。

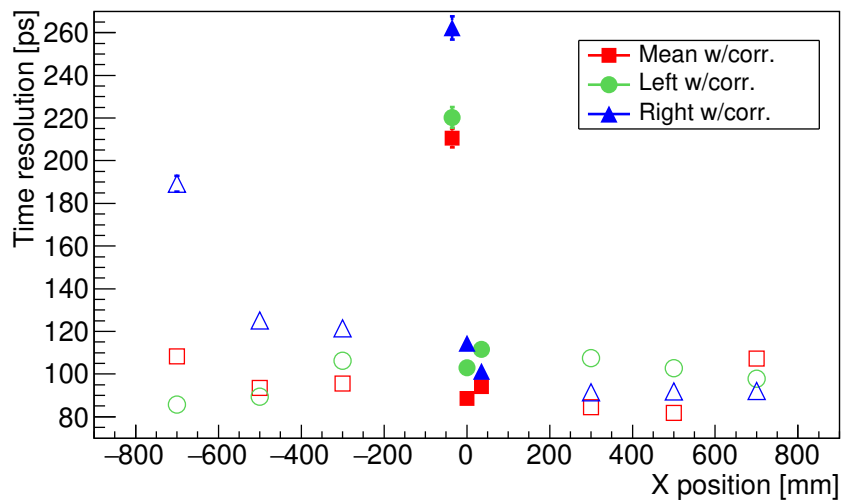


図 4.28: ストリップ・ガラスの継ぎ目における時間分解能。塗りつぶされたプロットは継ぎ目、中抜きのプロットはその他の位置を表す。

ストリップの継ぎ目 ($X = 0$ mm) とガラスの継ぎ目 ($X = -35, 35$ mm) における検出効率を図 4.27 に、時間分解能を図 4.28 に示す。ストリップの継ぎ目においては検出効率、時間分解能ともに悪化する傾向は見られなかった。検出効率については、ガラスの継ぎ目のうち $X = 35$ mm で周辺に比べ数 % 悪化した。ストリップの継ぎ目、もう一方のガラスの継ぎ目 ($X = -35$ mm) においては検出効率が悪化する傾向は見られなかった。

時間分解能については、ガラスの継ぎ目のうち $X = 35$ mm では 94.1 ± 2.0 ps であったのに対し、 $X = -35$ mm では 210.6 ± 4.5 ps と著しく悪化した。 $X = -35, 35$ mm それぞれの位置における TOT を図 4.29 に、MRPC と RF 信号の時間差分布を図 4.30 に示す。時間分解能が悪い $X = -35$ mm では MRPC の信号のタイミングが遅いイベントが多く、TOT も大きいことから何らかの原因で信号が鈍ってしまったと考えられる。考えられる原因として、 $X = -35$ mm の継ぎ目部分で、ガラスに隙間があった可能性がある。MRPC の構造上、ガラスは完全には固定されておらず、数 mm 程度ずれてしまう可能性がある。仮に継ぎ目の部分で 2 枚のガラスに隙間があった場合、その部分はガスギャップが他に比べて広くなる。その結果局所的に電場が乱れ、信号の伝播に影響を及ぼした可能性がある。正確な原因を知るためには MRPC を解体し、中のガラスの状態を確認する必要がある。しかし、本研究で開発した MRPC は、一度解体すると再使用が難しい構造になっている。そのため他の実験等での使用が終了してから解体し、詳しい原因を調べたいと考えている。なお、ストリップの継ぎ目では時間分解能の悪化は見られなかった。

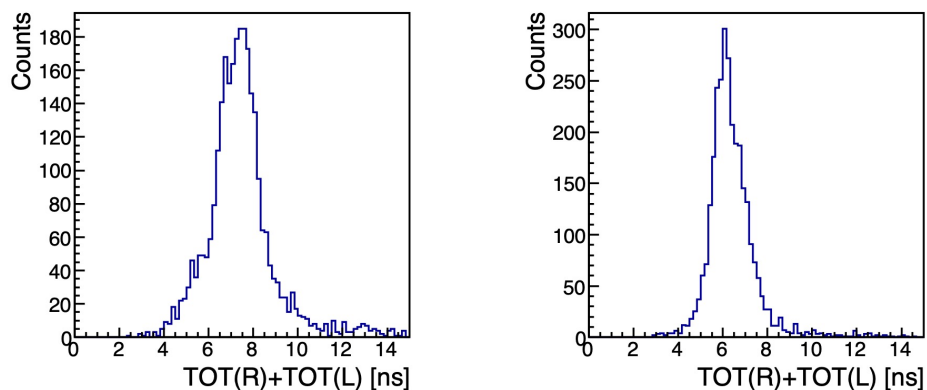


図 4.29: ガラスの継ぎ目における TOT 分布。(左) $X = -35$ mm、(右) $X = 35$ mm。

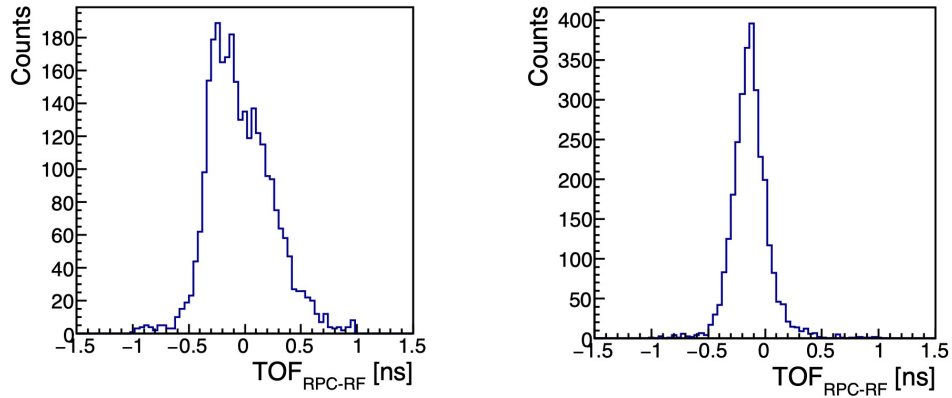


図 4.30: ガラスの継ぎ目における $\text{TOF}_{\text{RPC-RF}}$ 分布。(左) $X = -35$ mm、(右) $X = 35$ mm。

4.9.5 低増幅率アンプの導入

本研究では 3.3 節で述べたように増幅率の小さいアンプを導入したため、MRPC の信号の波高が小さくなり検出効率が悪化することが懸念された。しかし、13.5 kV 以上の電圧を印加した場合、99% を超える検出効率が得られたことから、今回使用したアンプは十分な増幅率だったと考えられる。

また、課題であった不安定で大きな周期的ノイズについてはいくつかの対策を行うことで改善することができた。まず行った対策はグラウンドの強化である。読み出しストリップ、MRPC のアルミ筐体、アンプのグラウンドを銅線や銅テープを用いて接続した。次に読み出しストリップとアンプの間を銅テープやアルミの構造体によって遮蔽した (図 4.31)。このような対策によりノイズレベルは両端のストリップでは約 20 mV (peak-to-peak)、その他のストリップで約 10 mV (peak-to-peak) に抑制することができた。また、ノイズの安定性についても大幅に改善し、長時間の安定した動作が可能となった。

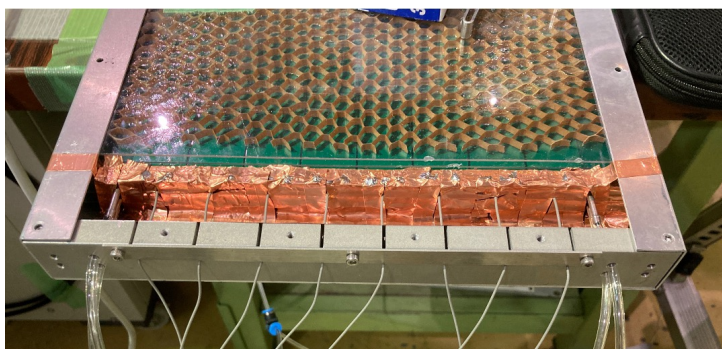


図 4.31: 読み出しストリップ側とアンプ側を遮蔽した様子。写真奥が読み出しストリップ、手前がアンプ側。

4.10 テスト実験のまとめ

SPring-8 LEPS2 ビームラインにおいて、電子ビームを用いたテスト実験を行った。結果を以下にまとめる。

- HR-TDC を用いた時間情報の測定

チャームバリオン分光実験で使用されるものと同じ HR-TDC を用いて測定を行った。立ち上がりの早い MRPC の信号に対しても問題なく leading、trailing を測定できた。

- 時間情報のみを用いた slewing 補正

今回のテスト実験では、チャームバリオン分光実験と同様に電荷の情報を測定せず、時間情報のみを測定した。時間分解能を求めるにあたり、測定した TOT 及び TOT integral を用いた slewing 補正を行った。

- 検出効率・時間分解能の評価

$X = 500$ mm という条件のもと、検出効率と時間分解能の MRPC 印加電圧依存性を調べた。その結果、印加電圧が 13.5 kV の場合、 $99.44 \pm 0.13\%$ の検出効率と 81.80 ± 1.52 ps の時間分解能が得られた。検出効率については十分な値が得られた一方、時間分解能については目標性能である 60 ps を達成することはできなかった。

印加電圧が 13.5 kV という条件のもと、検出効率と時間分解能の位置依存性を調べると、電圧供給部分から離れるにつれて性能が悪化することがわかった。原因として、電圧供給部分からの距離とともに電極にかかる電圧が低下し、ガスギャップ内の電場が低下していることが挙げられる。

- 読み出しストリップの継ぎ目・ガラスの継ぎ目における性能の評価

ストリップの継ぎ目では性能の悪化は見られなかった。一方、2つあるガラスの継ぎ目のうち1箇所では時間分解能が大幅に悪化した。正確な原因は調査中だが、ガラスの継ぎ目ではギャップ幅の変化やそれに伴う電場の乱れが生じている可能性がある。そのため、ガラスの継ぎ目に当たった粒子は物理解析には使用しないことが望ましい。

- 低増幅率アンプの導入

従来より増幅率の低いアンプを導入することでノイズレベルが低下し、長時間の安定したオペレーションが可能になった。また、検出効率についても $X > 0$ mm という条件では 99% 以上と十分な値が得られた。そのためアンプの増幅率の低下により信号の波高は小さくなったが、検出効率への影響はなかった。

第 5 章

J-PARC K1.8BR ビームラインにおける 性能評価試験

製作した 1800 mm 長の MRPC を J-PARC K1.8BR ビームラインに建設した実験セットアップに設置し、ハドロンビームを用いた試験を行った。

5.1 目的

試験の目的を以下に述べる。

- トリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いたデータ取得
1.5 節で述べたように、チャームバリオン分光実験に向け、トリガーを使用しない新たな DAQ システムの開発が進められてきた。この試験では初めてトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いたデータの取得と解析を行った。
- 検出効率のレート依存性評価
今回、様々なレートのビームを用いて測定を行った。検出効率のレート依存性を調べた。
- 検出効率と時間分解能の位置依存性評価
それぞれの位置依存性を調べ、SPring-8 LEPS2 ビームラインでの試験で得られた性能の再現性を確認した。
- 飛行時間の測定と粒子識別
MRPC と他検出器の時間情報から粒子の飛行時間を求め、K 中間子と π 中間子の識別精度を調べた。

5.2 J-PARC K1.8BR ビームライン

K1.8BR ビームラインは、J-PARC ハドロン実験施設における二次粒子ビームラインの 1 つである (図 5.1、図 5.2)。偏向電磁石 (D3) で K1.8 ビームラインから分岐しており、1.2 GeV/c 以下

のビームを輸送することができる。

ハドロン実験施設では 30 GeV の一次陽子ビームを生成標的 (T1) に入射させ、 π 中間子、K 中間子、反陽子などの二次粒子を生成する。生成された二次粒子は静電セパレータ (ES1) を用いて種類を選別でき、IF スリットやマススリット (MS1) を使用することで、ビームにおける特定の二次粒子の純度を向上させることができる。

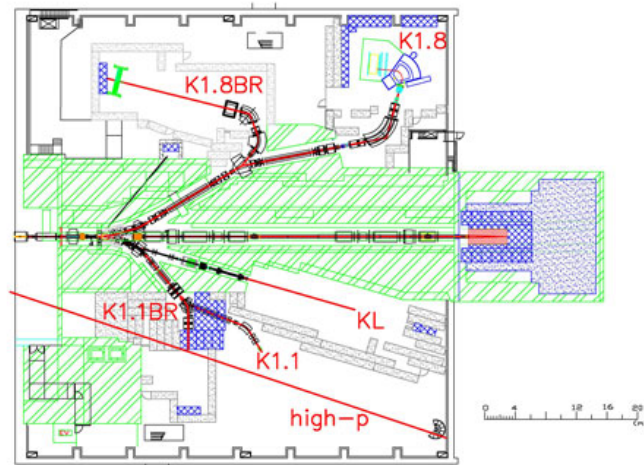


図 5.1: J-PARC ハドロン実験施設 [30]。

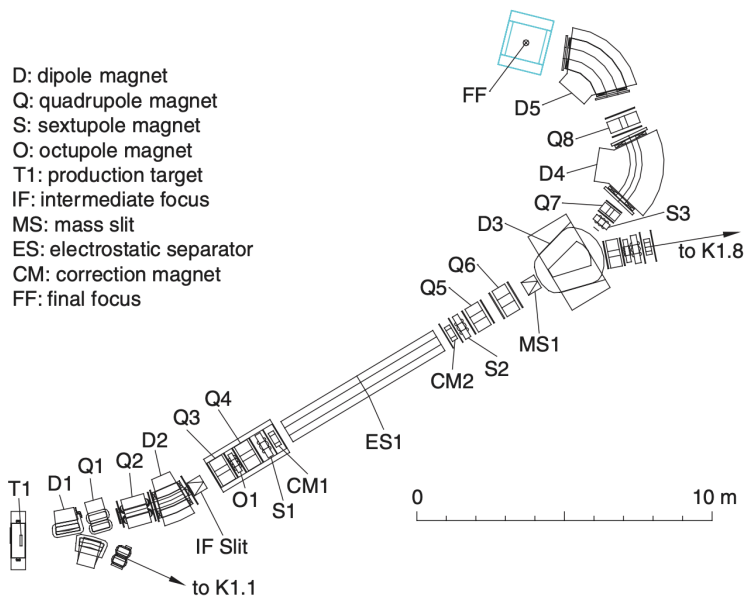


図 5.2: K1.8BR ビームライン [31]。

5.3 実験セットアップ

5.3.1 実験セットアップとビームの条件

実験セットアップの概要を以下に示す。図 5.3 には全体像を、図 5.4 には今回の解析で使用した TOF 検出器のセットアップを抜粋して示す。シンチレーションファイバー検出器 (SFT)、ドリフトチェンバー (KLDC・BDC)、プラスチックシンチレータ (UTOF・STOF・LTOF・DTOF)、MRPC、T0 検出器がインストールされており、全てチャームバリオン分光実験用に開発された検出器である。今回のテスト実験では、実験セットアップに設置した各検出器の性能評価を行った。MRPC の性能評価のための解析では UTOF、DTOF、MRPC の TOF 検出器を使用した。解析に使用した TOF 検出器のセットアップの詳細を図 5.5、図 5.6 に示す。

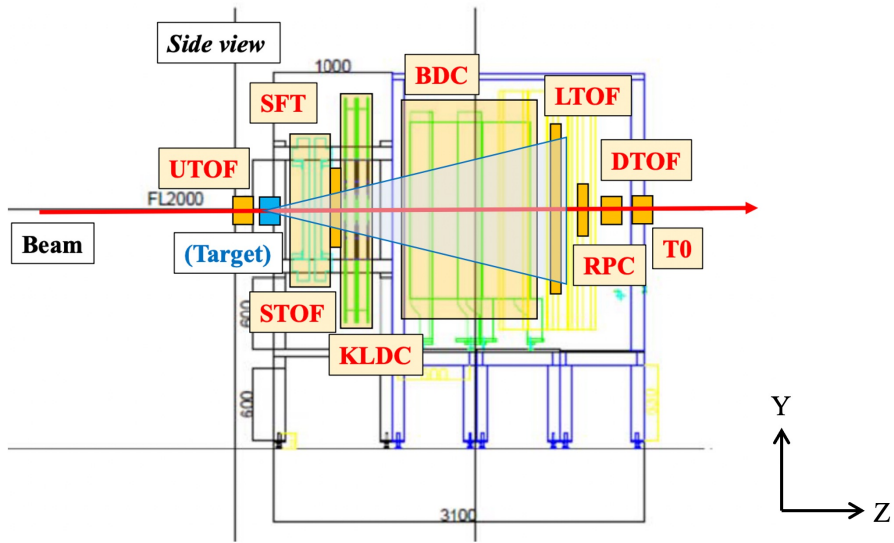


図 5.3: セットアップの全体図。

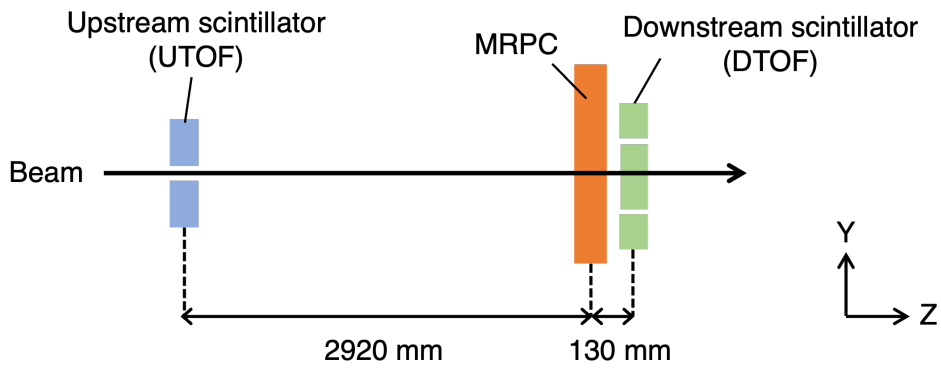


図 5.4: TOF 検出器のセットアップ。

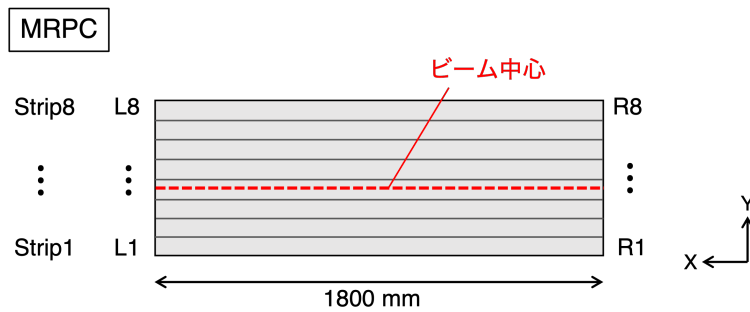


図 5.5: MRPC のセットアップ。

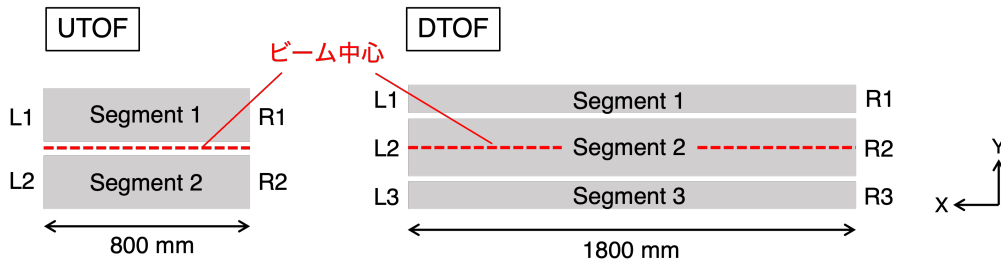


図 5.6: UTOF・DTOF のセットアップ。

静電セパレータで選別された、1 GeV/c の二次粒子ハドロンビームを用いた。但し、我々の検出器群の上流では別の実験 (J-PARC T98 実験 [32]) が同時に実施されていたため、T98 実験の検出器群を通過した後の粒子を測定することになり、ビームの運動量は広がっていた。解析に使用したデータのビーム条件を表 5.1 に示す。1 spill=2 秒である。T98 実験で設定したビーム粒子を照射したため重陽子 (d) や反重陽子 (\bar{d})、反陽子 (\bar{p}) ビームが照射される条件でテスト実験を行った。但し、これらは静電セパレータで設定した粒子であり、実際には π 中間子が大きく混ざったビームとなっている。 d 、 \bar{d} 、 \bar{p} は生成されにくいことに加え、生成されてもほとんどが上流の検出器群で止まるため、下流側の我々の検出器群では主に π^+ 、 π^- を測定した。また、MRPC に入射した粒子のレートとして、UTOF のシングルレートを目安として使用した。

表 5.1: ビームの条件。

静電セパレータの設定	主な測定粒子	ビームレート [k/spill]	UTOF シングルレート [kHz]
K^+	K^+, π^+	2000	150
\bar{d}	π^-	1500	200
d	π^+	800	25
\bar{p}	π^-	500	100

プラスチックシンチレータ (上流側が UTOF・下流側が DTOF)、MRPC を用いて粒子の飛行時間を測定する。ビームを Z 軸方向としたとき、MRPC はストリップ方向を X 軸方向に合わせ、Y 軸正に向かって strip1-8 となるように設置した。また、MRPC の strip4 をビーム高さに合わせて (図 5.5)。

5.3.2 プラスチックシンチレータ

図 5.6 にプラスチックシンチレータのセットアップを示す。UTOF として、長さ 800 mm のプラスチックシンチレータを Y 軸方向に 2 台並べて使用する。上から順に Segment1、Segment2 とし、シンチレータの型番はどちらも BC-408 である。2 台の間がビーム高さ合うよう設置し、光

電子増倍管は浜松ホトニクス製のファインメッシュ PMT (R7761) を用いた。

DTOF としては長さ 1800 mm のシンチレータを Y 軸方向に 3 台並べて使用する。上から順に Segment1、Segment2、Segment3 とし、シンチレータの型番は上から BC-400、BC-420、BC-420 である。Segment2 の中心がビーム高さとなるよう設置し、光電子増倍管は浜松ホトニクス製のメタルパッケージ PMT (H11934-200-020) を用いた。DTOF に用いたシンチレータ (BC-400・BC-420) の時間分解能は、slewing 補正に電荷の情報を用いた場合は 60 ps [33]、時間情報 (TOT) を用いた場合は約 100 ps である。

5.3.3 読み出し回路

読み出し回路を図 5.7 に示す。UTOF、DTOF、MRPC の信号はディスクリミネーターを用いてデジタル信号へ変換し、時間情報を HR-TDC で取得する。HR-TDC は、チャームバリオン分光実験用に開発された FEE である AMANEQ (1.5 節) に搭載されている。ディスクリミネーターと HR-TDC は SPring-8 LEPS2 ビームラインでのテスト実験で用いたものと同じであり、それぞれの詳細は 4.4 節、4.5 節で述べている。

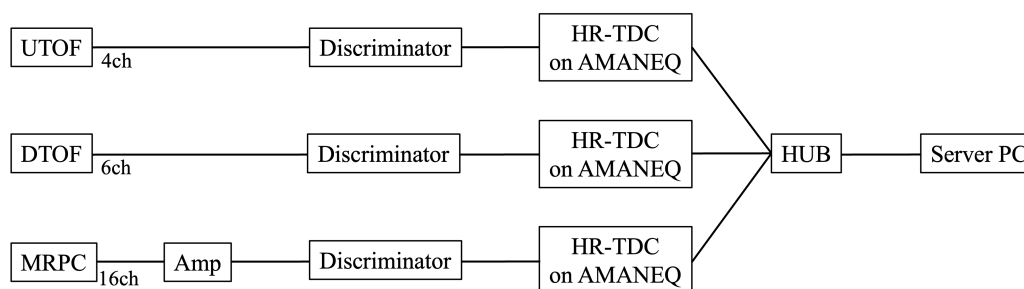


図 5.7: 回路図。

5.4 データの取得

読み出しにはチャームバリオン分光実験で使用予定である、トリガーレス・DAQ システム (1.5 節) を用いた。全ての検出器に対して電荷の測定は行わず、時間情報のみを取得する。1.5 節で述べたように、トリガーレス・ストリーミング DAQ システムではハードウェアによるトリガーの生成が不要である。検出器からの信号は、読み出し回路でデジタル化された後に全てコンピュータに取り込まれ、ソフトウェアによる解析によってフィルタリングを行い、必要なイベントを取り出す。

今回はアクシデンタルなイベントを除き、同一粒子が上流から下流まで通過したイベントを選ぶために UTOF と DTOF によるフィルターをかけた。20 ns の間に UTOF と DTOF 両方にヒットした場合のみデータを取得する。ただし 1 つ以上の segment で左右両方にヒットがあることを要求した。

5.5 測定条件

MRPC

MRPC への印加電圧は 13.5 kV、ディスクリミネータの閾値は -52.5 mV とした。ガスは SPring-8 LEPS2 ビームラインでのテスト実験と同じく、 $C_2H_2F_4 : SF_6 : C_4H_{10} = 90 : 5 : 5$ の割合で 3 種類を混合したものをを用いた。

UTOF・DToF

ディスクリミネータの閾値は -97.0 mV に設定した。光電子増倍管への印加電圧は表 5.2 の通りである。

表 5.2: UTOF・DToF の印加電圧。

Detector	Channel	HV[V]
UTOF	1L	-975
UTOF	1R	-975
DToF	1L	-950
DToF	1R	-910
DToF	2L	-975
DToF	2R	-975
DToF	3L	-925
DToF	3R	-925

5.6 解析方法

5.6.1 イベントビルド

取得したデータのうち、今回の解析では UTOF、DToF、MRPC のデータを使用する。DToF segment2 の左 (L2) にヒットがあったことを要求した上で、L2 の信号を基準に前後 $1 \mu s$ を 1 イベントとして、イベントビルドを行った。

5.6.2 検出効率

UTOF、DToF 両方にヒットしたイベントのうち、MRPC にヒットがあった割合を調べる。MRPC の左右両方にヒットした場合、左にヒットした場合、右にヒットした場合のそれぞれにつ

いて検出効率を求めた。但し、MRPC の左右両方からのヒットを要求する場合、それらは同一のストリップからの出力であるとした。

検出効率を求めるにあたり、各検出器を同一粒子が通過したイベントを選ぶためにいくつかの条件をかけた。まず、1 イベント内の DTOF L2 のヒットが 1 回のみイベントを採用した。図 5.8 のように近いタイミングで DTOF L2 が 2 回ヒットすると、それぞれのヒットを基準として 2 回のイベントビルドが行われる。この場合、MRPC L4 へのヒットはどちらのイベントにも含まれてしまい、DTOF に対する MRPC の検出効率を正しく評価できない可能性がある。そのため 1 イベント内の DTOF L2 へのヒットが 2 回以上のイベントは排除した。このカットはこれ以降の解析全てに適用した。

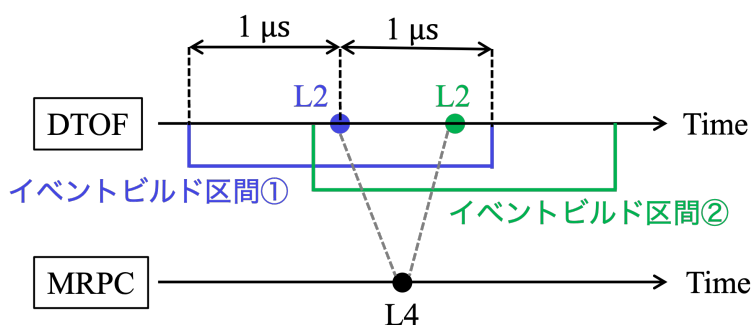


図 5.8: 近いタイミングで DTOF L2 が 2 回ヒットした場合のヒット分布の模式図。

次に、検出器間の時間差を用いたタイミングカットを行う。UTOF、MRPC、DTOF を同一粒子が通過したイベントを選ぶため、UTOF と DTOF、MRPC と DTOF の時間差でカットをかけた。カットに用いる時間差を式 (5.1) と式 (5.2) に示す。 t は検出器の信号のタイミングを表す。UTOF と DTOF は、常に左右の信号のタイミングの平均を用いた。MRPC については、左 (または右) 片読み出しの場合はそれぞれの信号のタイミング、左右両読み出しの場合は左右の信号のタイミングの平均を、検出器間の時間差の計算に用いた。

$$\text{TOF}_{\text{DTOF-UTOF}} = (t_{\text{DTOF(L)}} + t_{\text{DTOF(R)}})/2 - (t_{\text{UTOF(L)}} + t_{\text{UTOF(R)}})/2 \quad (5.1)$$

$$\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}} = \begin{cases} (t_{\text{DTOF(L)}} + t_{\text{DTOF(R)}})/2 - t_{\text{MRPC(L(R))}} & \text{(片読み出し)} \\ (t_{\text{DTOF(L)}} + t_{\text{DTOF(R)}})/2 - (t_{\text{MRPC(L)}} + t_{\text{MRPC(R)}})/2 & \text{(両読み出し)} \end{cases} \quad (5.2)$$

ビーム粒子の種類によってカット条件の最小値、最大値は異なる。例として π^+ が入射した場合のカット条件を図 5.9 に示す。この場合は $56 < \text{TOF}_{\text{DTOF-UTOF}} < 62 \text{ ns}$ 、 $31 < \text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}} < 38 \text{ ns}$ のイベントのみ使用した。

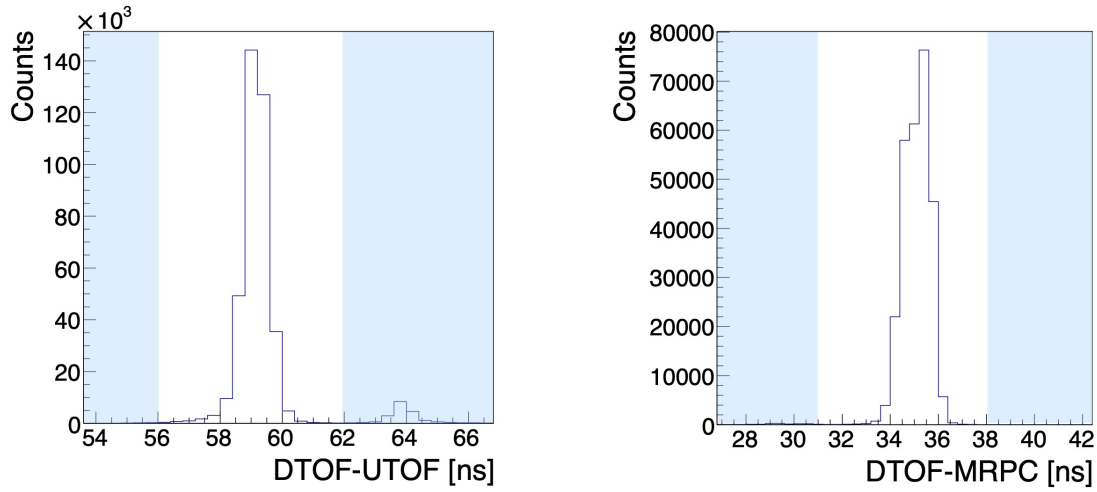


図 5.9: (左)TOF_{DTOF-UTOF}、(右)TOF_{DTOF-MRPC} のタイミング分布。水色の領域は使用しない。

また検出効率の位置依存性を調べるため、DTOF の左右の時間差 ($t_{\text{DTOF(L)}} - t_{\text{DTOF(R)}}$)、UTOF の左右の時間差 ($t_{\text{UTOF(L)}} - t_{\text{UTOF(R)}}$) を用いて X 方向のビーム入射位置を限定した。

5.6.3 時間分解能

時間分解能を求める際、UTOF は segment1、DTOF は segment2、MRPC は strip4 のそれぞれ左右両方にヒットがあることを要求した。その上で UTOF と DTOF の時間差 (式 (5.1))、MRPC と DTOF の時間差 (式 (5.2)) を用いて、3 つの検出器を同一粒子が通過したイベントのみを選んだ。

これらの要求を満たすイベントを用いて、式 (5.3)、(5.4)、(5.5) に示す各検出器間の飛行時間 (TOF) に対して時間分解能を求めた。

$$\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}} = (t_{\text{DTOF(L)}} + t_{\text{DTOF(R)}})/2 - (t_{\text{MRPC(L)}} + t_{\text{MRPC(R)}})/2 \quad (5.3)$$

$$\text{TOF}_{\text{DTOF-UTOF}} = (t_{\text{DTOF(L)}} + t_{\text{DTOF(R)}})/2 - (t_{\text{UTOF(L)}} + t_{\text{UTOF(R)}})/2 \quad (5.4)$$

$$\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}} = (t_{\text{MRPC(L)}} + t_{\text{MRPC(R)}})/2 - (t_{\text{UTOF(L)}} + t_{\text{UTOF(R)}})/2 \quad (5.5)$$

例として、MRPC から DTOF までの飛行時間 ($\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$) に対する時間分解能を求める場合の手順を述べる。SPring8 LEPS2 ビームラインでのテスト実験と同様に、TOT を用いた slewing 補正を行う (4.8.3 節参照)。今回は飛行時間 ($\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$) に対してまず DTOF の TOT integral で slewing 補正した後、補正後の飛行時間をさらに MRPC の TOT integral で slewing 補正した。

まず、DFOB の左右の TOT の和を TOT integral に変換する (図 5.10)。

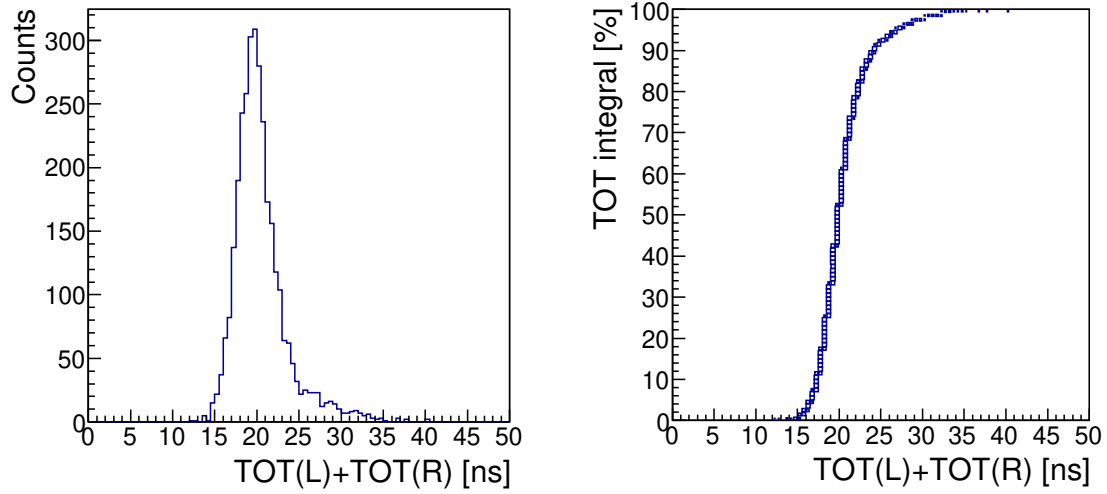


図 5.10: (左)DFOB 左右の TOT の和、(右)TOT と TOT integral の相関。

次に TOT integral と $\text{TOF}_{\text{DFOB-MRPC}}$ の相関 (図左) に対して、 p_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 をパラメータとして以下の三次の関数でフィッティングを行った。

$$f(\text{TOT integral}) = p_0(\text{TOT integral})^3 + p_1(\text{TOT integral})^2 + p_2(\text{TOT integral}) + p_3 \quad (5.6)$$

フィッティング後、フィッティング関数 f をそれぞれのプロット点から差し引いたものが図 5.11 である。

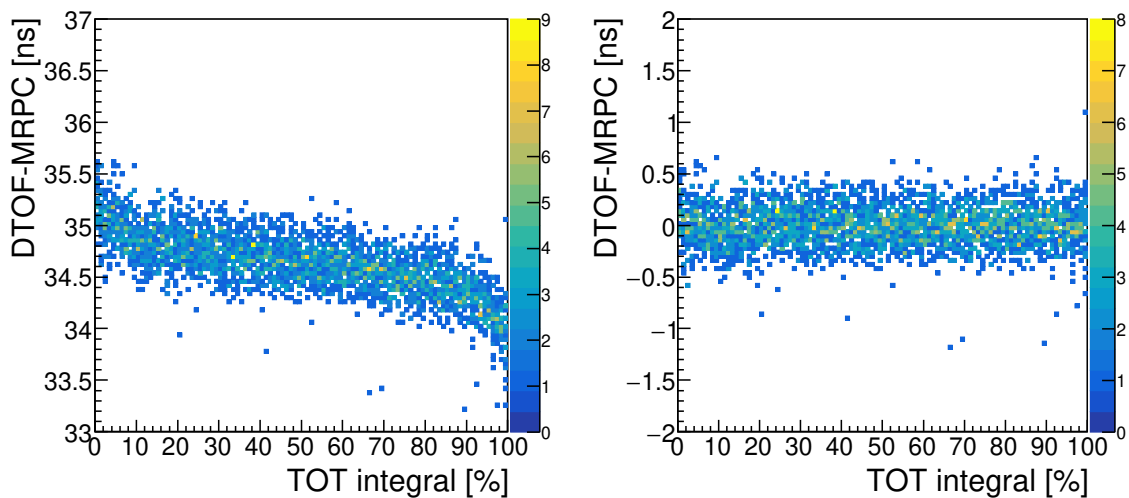


図 5.11: 補正前 (左) と補正後 (右) の TOT integral と $\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$ の相関。

図 5.12 に、補正前後の $\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$ 分布を示す。補正後の時間差を $\text{TOF}'_{\text{DTOF-MRPC}}$ とする。それぞれ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。この図の場合、補正前は 283.1 ± 4.2 ps、補正後は 184.4 ± 2.5 ps の時間分解能が得られた。

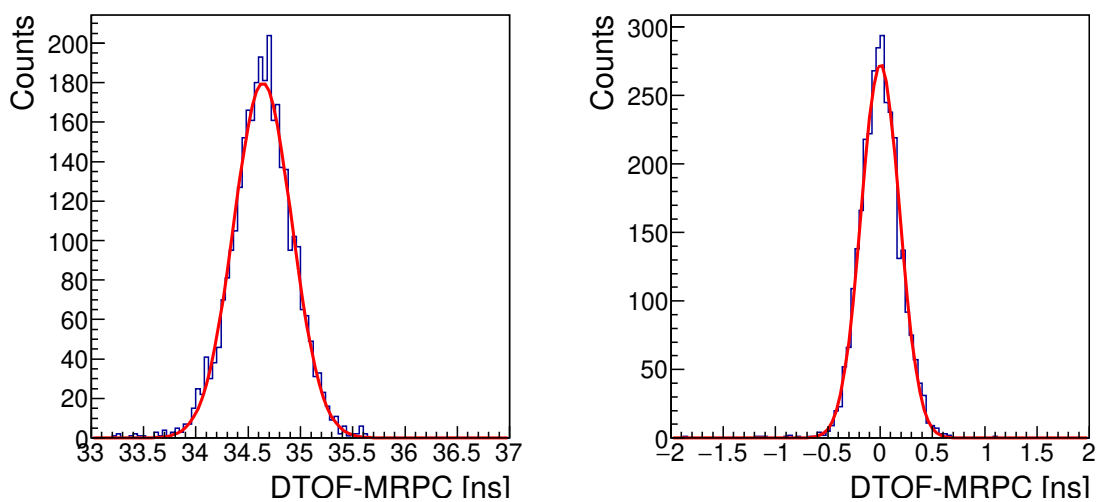


図 5.12: 補正前 (左) と補正後 (右) の $\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$ の分布。

$\text{TOF}'_{\text{DTOF-MRPC}}$ に対し、MRPC でさらに補正する。MRPC の左右の TOT の和を TOT integral に変換したものが、図 5.13 である。

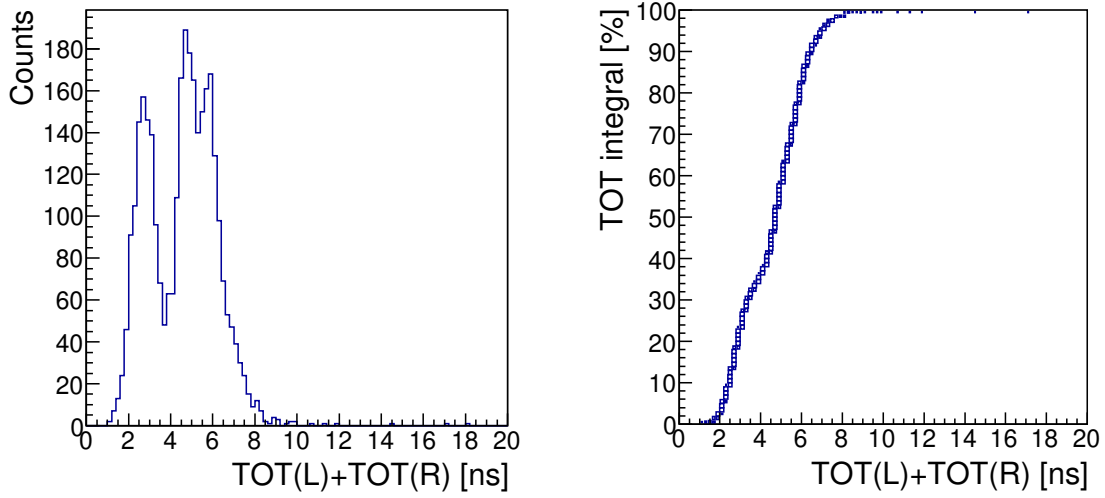


図 5.13: (左)MRPC 左右の TOT の和、(右)TOT と TOT integral の相関。

次に TOT integral と $\text{TOF}'_{\text{D}^{\text{TOF}}\text{-MRPC}}$ の相関 (図 5.14(左)) に対して、式 (5.6) の 3 次関数でフィッティングする。フィッティング後、フィッティング関数 f をそれぞれのプロット点から差し引いたものが図 5.14(右) である。

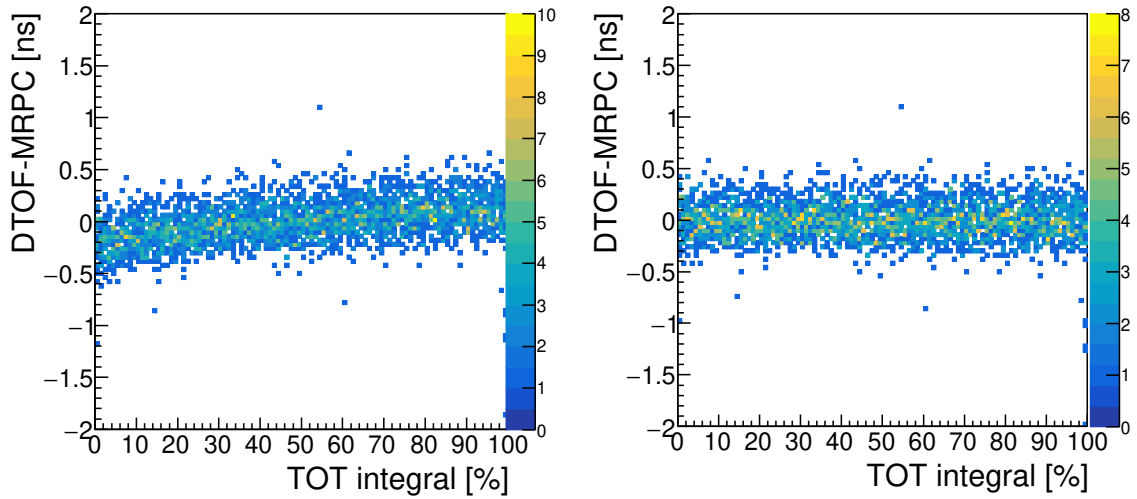


図 5.14: 補正前(左)と補正後(右)の TOT integral と $\text{TOF}'_{\text{D}^{\text{TOF}}\text{-MRPC}}$ の相関。

図 5.15 に補正前後の $\text{TOF}'_{\text{D}^{\text{TOF}}\text{-MRPC}}$ 分布を示す。補正前は 184.4 ± 2.5 ps、補正後は 158.6 ± 2.2 ps の時間分解能が得られた。以降、時間分解能は slewing 補正後の値を用いる。 $\text{TOF}'_{\text{D}^{\text{TOF}}\text{-UTOF}}$ 、 $\text{TOF}'_{\text{MRPC}\text{-UTOF}}$ についても同様の方法で時間分解能を求めた。

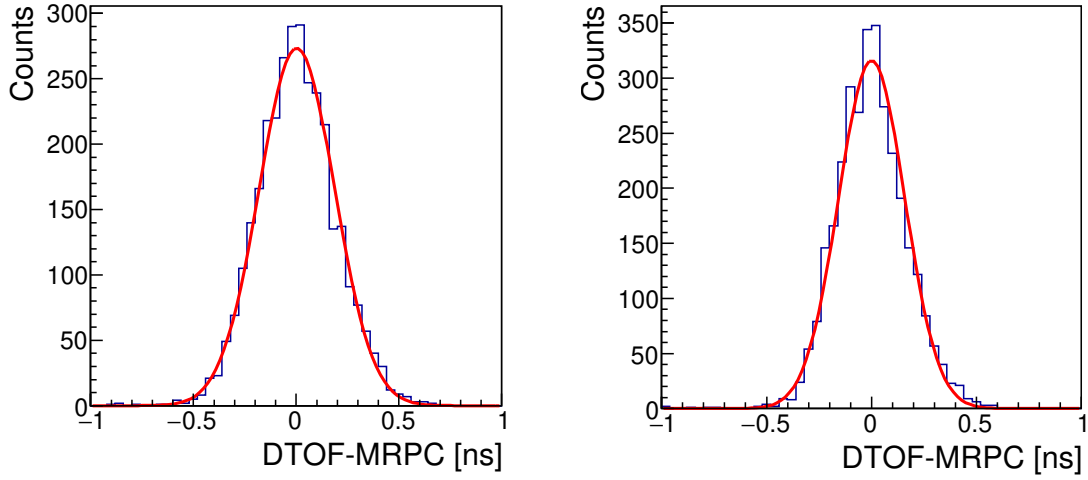


図 5.15: 補正前 (左) と補正後 (右) の $\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$ の分布。

それぞれの飛行時間について求めた時間分解能から UTOF、DTOF、MRPC それぞれの時間分解能を求めた。 $\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$ 、 $\text{TOF}_{\text{DTOF-UTOF}}$ 、 $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ に対する時間分解能をそれぞれ、 $\sigma_{\text{DTOF-MRPC}}$ 、 $\sigma_{\text{DTOF-UTOF}}$ 、 $\sigma_{\text{MRPC-UTOF}}$ 、各検出器の時間分解能を σ_{DTOF} 、 σ_{UTOF} 、 σ_{MRPC} とすると、以下の関係式が成り立つ。この 3 式を解くことにより各検出器の時間分解能を得た。

$$\sigma_{\text{DTOF}}^2 + \sigma_{\text{MRPC}}^2 = \sigma_{\text{DTOF-MRPC}}^2 \quad (5.7)$$

$$\sigma_{\text{DTOF}}^2 + \sigma_{\text{UTOF}}^2 = \sigma_{\text{DTOF-UTOF}}^2 \quad (5.8)$$

$$\sigma_{\text{MRPC}}^2 + \sigma_{\text{UTOF}}^2 = \sigma_{\text{MRPC-UTOF}}^2 \quad (5.9)$$

また、検出効率の場合と同様に DTOF の左右の時間差 ($t_{\text{DTOF(L)}} - t_{\text{DTOF(R)}}$)、UTOF の左右の時間差 ($t_{\text{UTOF(L)}} - t_{\text{UTOF(R)}}$) を用いて X 方向のビーム入射位置を限定し、時間分解能の位置依存性を調べた。

5.6.4 粒子識別

K^+ と π^+ に対して、UTOF から MRPC までの飛行時間を用いた粒子識別を行った。測定した K^+ と π^+ の時間差に対し、 $\sigma_{\text{MRPC-UTOF}}$ を用いて識別精度を調べた。

5.7 結果

5.7.1 ヒット分布

各検出器の左右の時間差の分布より、X方向に対する粒子のヒット分布を調べた。図 5.16 は π^- が入射した場合の DTOF segment2 の左右の時間差と UTOF segment1 の左右の時間差、図 5.17 は MRPC の左右の時間差である。但し、MRPC のストリップは限定していない。いずれの検出器についてもヒット分布は均等ではなく、 $L - R > 0$ 、すなわち検出器の右側に入射粒子が偏っていることがわかる。入射粒子が K^+ や π^+ である他のビーム条件の場合も、同じ傾向のヒット分布が得られた。

また、図 5.16 の DTOF および UTOF の左右の時間差分布では 3 つのピーク構造が現れ、 ± 1 ns 付近のイベントが少なく、0 ns 前後のイベントが極端に多くなっている。これは使用したディスクリミネーター (4.4 節) の特性が原因であり、ディスクリミネーターの隣り合うチャンネルに入力された信号の時間差が非常に小さい (\pm 約 1 ns) 場合、誤って時間差を 0 ns 近くに返してしまうことが判明した。そのため本来の DTOF、UTOF のヒット分布は MRPC と同様の 1 つのピーク構造になると考えられる。DTOF と UTOF に対してテスト実験中にこの現象が起きていたことを確認しており、現在この問題を改善したディスクリミネータの開発を進めている。

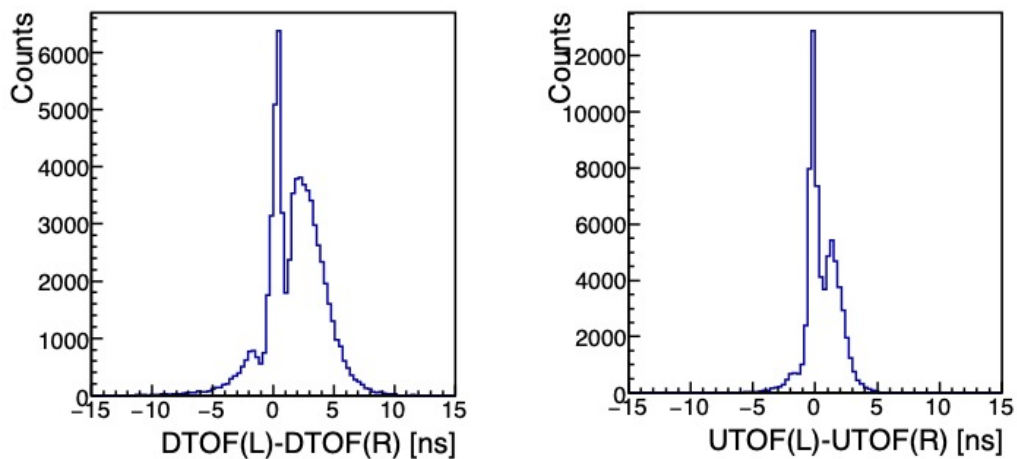


図 5.16: (左)DTOF seg2 の左右の時間差、(右)UTOF seg1 の左右の時間差。

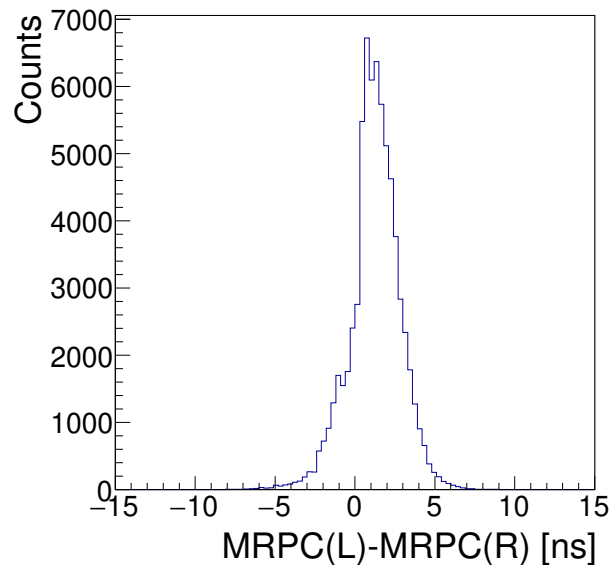


図 5.17: MRPC の左右の時間差。

5.7.2 粒子の入射位置の決定

検出効率及び時間分解能の位置依存性を評価するために、粒子の入射位置を決定する方法を述べる。5.6.2 節でも述べたように、DTOF の左右の時間差と UTOF の左右の時間差を用いる。図 5.18 は、 π^- が入射した場合の DTOF segment2 の左右の時間差と UTOF segment1 の左右の時間差の 2 次元相関、図 5.19 は MRPC の左右の時間差と DTOF segment2 の左右の時間差の 2 次元相関である。MRPC のストリップは限定しない。DTOF segment2 の左右の時間差をを 1 ns ずつの区間に分けることで、粒子の入射位置を限定した。但し、入射した粒子の数が少ない端の部分は避け、 -6 ns から 6 ns までの範囲を 1 ns ずつに区切った。図 5.18 から分かるように UTOF の左右の時間差にも広がりが見られたため、1 ns ずつに区切った DTOF の左右の時間差に対応するように、UTOF の左右の時間差についてもカットをかけた。

また、図 5.19 からわかるように、中心付近では DTOF 上の位置と MRPC 上の位置の対応が正確ではない。これは 5.7.1 節で述べたディスクリミネーターの特性が原因である。そのため、これ以降の位置依存性の解析では DTOF の左右の時間差が -2 ns から 2 ns の範囲は 1 ns ずつ区切ることはせず、まとめて 1 つの区間として評価した。

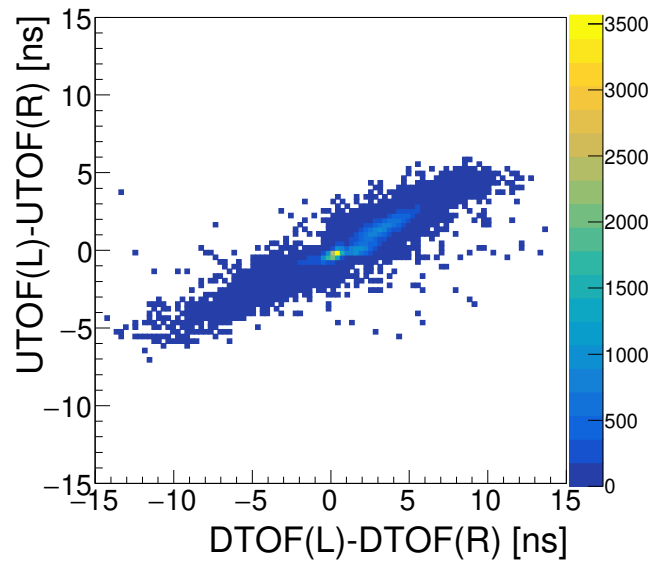


図 5.18: DTOF と UTOF の左右の時間差の相関。

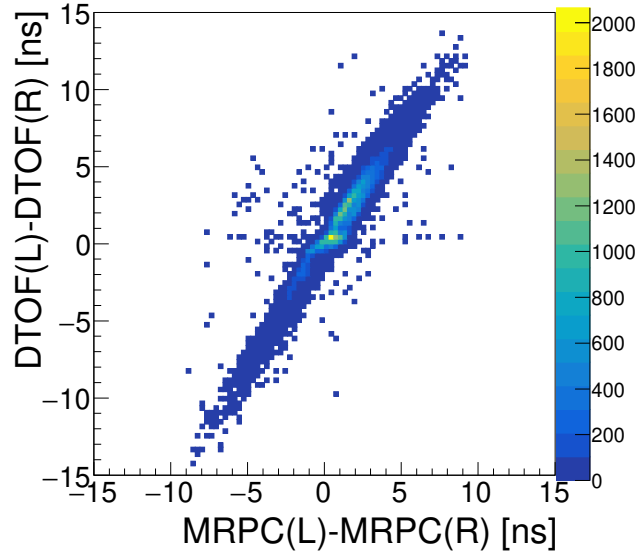


図 5.19: MRPC と DTOF の左右の時間差の相関。

5.7.3 検出効率

レート依存性

検出効率のレート依存性を調べた。アバランシェモードでオペレーションする MRPC のレート耐性は約 1 kHz/cm^2 であると言われているが、ガラスや読み出しストリップの厚さに依存するため、必ずしもこの限りではない。入射粒子のレートと検出効率の関係を調べるため、3種類のレートに対して検出効率を評価した。但し、MRPC に入射した粒子のレートとして、UToF のシングルレートを目安として用いた。また位置によって検出効率が大きく異なるため、DToF(L) – DToF(R) を用いて粒子の入射位置を4箇所選び、それぞれの位置でレート依存性を調べた。約 25 kHz、約 100 kHz、約 200 kHz という3種類の UToF のシングルレートに対する検出効率のレート依存性を図 5.20、5.21、図 5.22 に示す。それぞれ左右両側、左側、右側の検出効率のレート依存性である。入射粒子は π^+ または π^- である。

図 5.20–5.22 より、粒子の入射位置に依らず、UToF のシングルレートが低くなるにつれて検出効率は向上することが分かった。今回は 25 kHz までしか測定していないが、さらにレートを下げると検出効率も良くなることが期待できる。また、一般的に MRPC への印加電圧を大きくするとレート耐性を高めることができる。そのため今回印加した 13.5 kV よりも高い電圧で測定すると、結果が向上すると考えられる。

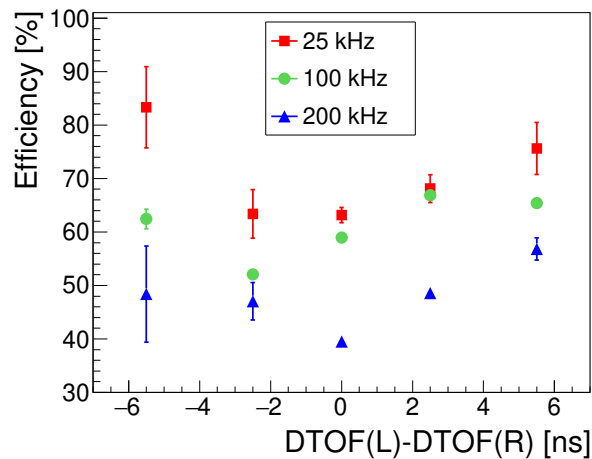


図 5.20: 検出効率 (左右両側) のレート依存性。

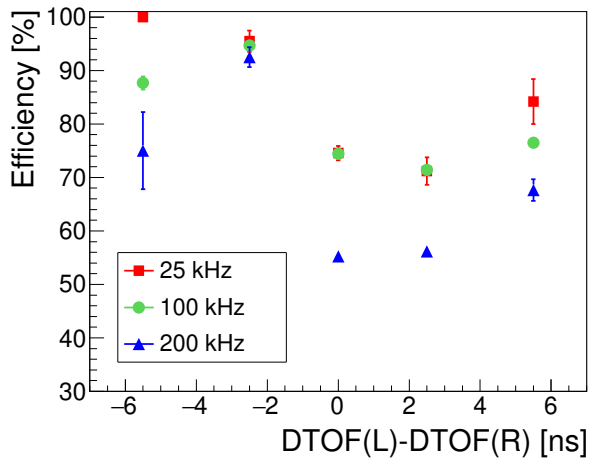


図 5.21: 検出効率 (左) のレート依存性。

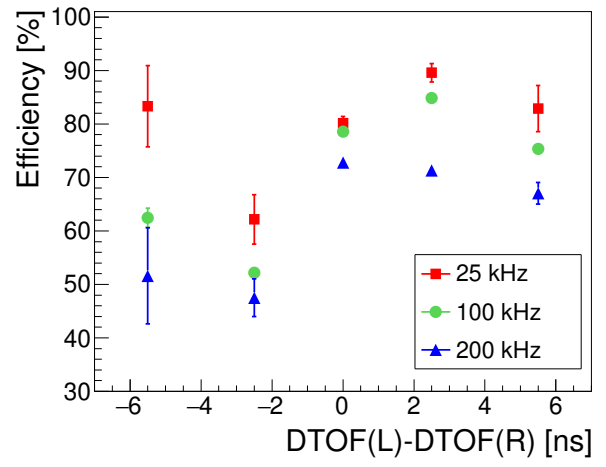


図 5.22: 検出効率 (右) のレート依存性。

位置依存性

検出効率の位置依存性を調べる。UTOF のシングルレートが約 25 kHz、約 100 kHz、約 200 kHz の場合の検出効率の位置依存性を、図 5.23、5.24、5.25 に示す。

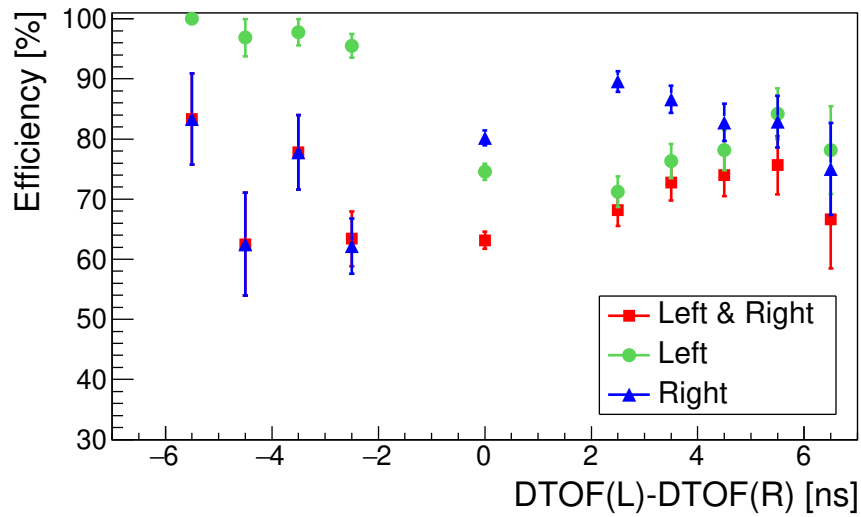


図 5.23: 検出効率の位置依存性 (UTOF シングルレートは約 25 kHz、入射粒子は π^+)。

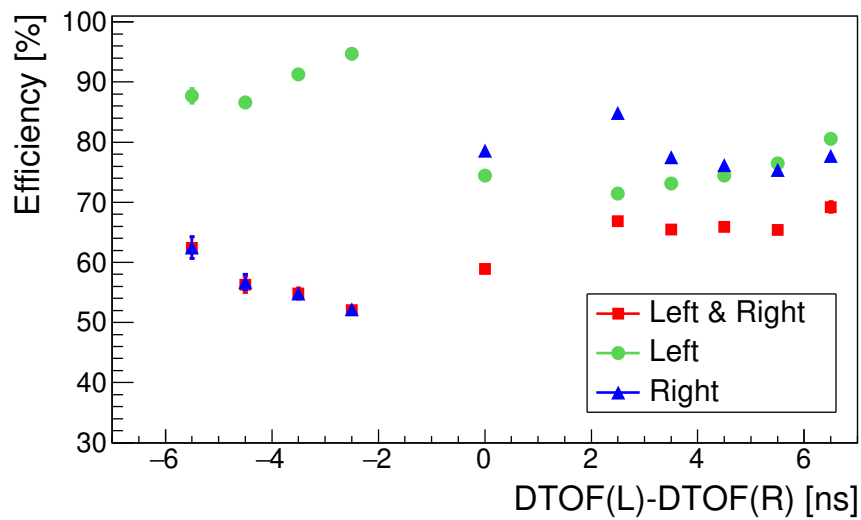


図 5.24: 検出効率の位置依存性 (UTOF シングルレートは約 100 kHz、入射粒子は π^-)。

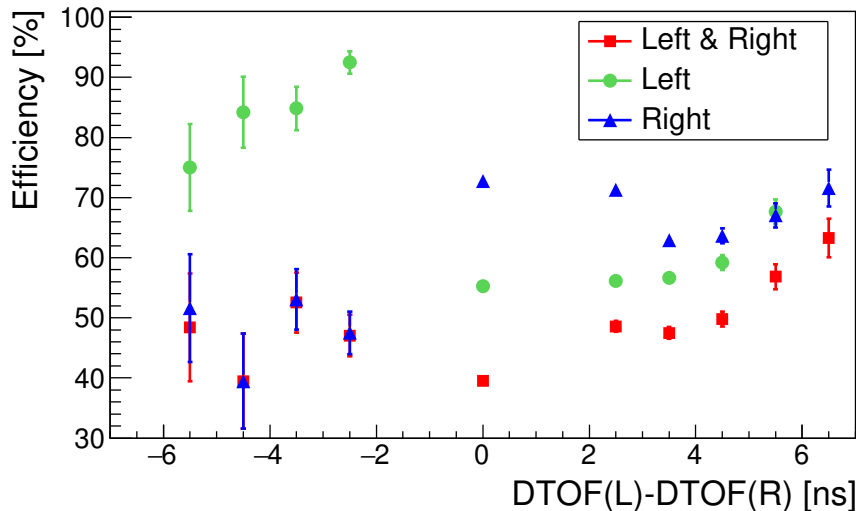


図 5.25: 検出効率の位置依存性 (UTOF シングルレートは約 200 kHz、入射粒子は π^-)。

検出効率の位置依存性について、入射粒子のレートが高い領域、信号の伝播距離が長い領域、電圧供給部分からの距離が長い領域では検出効率が低くなるという傾向が見られた。

まず $\text{DTOF(L)} - \text{DTOF(R)} < 0 \text{ ns}$ の領域、すなわち検出器の左側に粒子が入射した場合について述べる。今回のセットアップでは、MRPC の左側から電圧を供給しており、この領域では電場の大きさは十分であると考えられる。そのため、信号の伝播距離が短い左側の検出効率が、右側に比べて約 20% 以上良いという結果になった。一方 SPring-8 でのテスト実験では、電場の大きさが十分である領域においては左右の検出効率の差は 1% 未満で、誘起された信号はほぼ全て左右両側から読み出されている。このような違いより、今回の J-PARC のテスト実験では誘起された信号の波高が小さく、距離が長い右端まで伝播する間にディスクリミネーターの閾値以下まで信号が減衰したと考えられる。ビームのレートが高すぎる場合、一度電子が増幅して信号が誘起された後、ガスギャップ内の電場が完全に元に戻る前に次の粒子が入射してしまう。そのため、電子の増幅が不十分となり、信号の波高が小さくなる。また $\text{DTOF(L)} - \text{DTOF(R)}$ が 0 ns に近づく、すなわち、粒子の入射位置が中心に近づくにつれて特に右側の検出効率が悪化していることがわかる。これは中心付近の方が端に比べてレートが高く、上に述べた信号の波高が小さくなる効果が顕著に現れているためだと考えられる。

次に、 $\text{DTOF(L)} - \text{DTOF(R)} > 0 \text{ ns}$ の領域、すなわち検出器の右側に粒子が入射した場合について述べる。全体的な傾向としては、検出器の左側に粒子が入射したときと同じである。しかし、先程とは異なり、中心から $\text{DTOF(L)} - \text{DTOF(R)} = 3 \text{ ns}$ 付近に向かうにつれ、検出効率が低下している。これは図 5.16 で示したように、この領域で入射粒子のレートが高いことが影響していると考えられる。但し、レートが下がった $\text{DTOF(L)} - \text{DTOF(R)} > 5 \text{ ns}$ の領域でも検出効率が十分に回復していない。これは SPring-8 でのテスト実験で明らかになった、電圧供

給部分から離れた領域で十分な電圧がかかっていないという問題が関係していると考えている。 $\text{DToF(L)} - \text{DToF(R)} = 6 \text{ ns}$ に対応する MRPC のヒット位置は $\text{MRPC(L)} - \text{MRPC(R)} \approx 3.6 \text{ ns}$ であり、これは MRPC の中心から右に 400 mm 前後の領域に対応する。この領域は、SPring-8 でのテスト実験で得られた結果の図 4.21 では $X = -400 \text{ mm}$ 付近にあたり、検出効率が低下し始めた領域と概ね一致する。以上のように、得られた検出効率の位置依存性はレート耐性、左右の読み出しまでの信号の伝播距離、電圧が十分にかかっていない領域があったという 3 つの要因が重なり合った結果であると考えられる。

5.7.4 時間分解能の位置依存性

検出効率の場合と同じ方法で粒子の入射位置を決定し、時間分解能の位置依存性を調べた。但し、位置については DToF の左右の時間差が 0 ns 付近は避け、ヒット数が十分多い領域のみを用いた。入射粒子が π^- 、UToF のシングルレートが約 100 kHz の場合の結果を示す。図 5.26 は各飛行時間に対する時間分解能の位置依存性、図 5.27 は各検出器固有の時間分解能の位置依存性である。

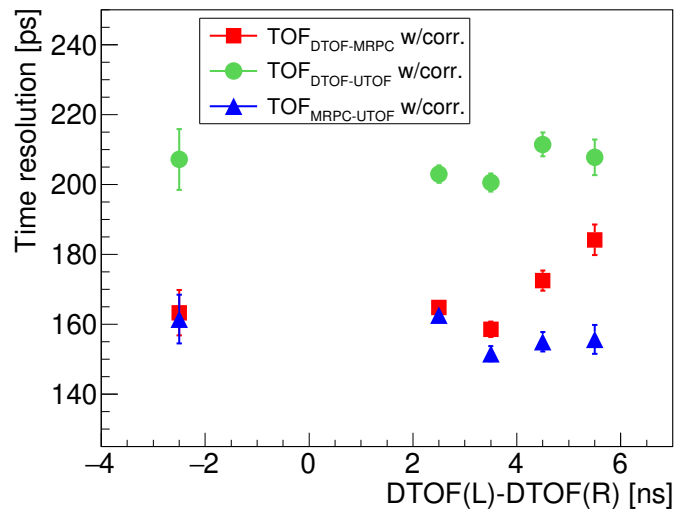


図 5.26: 飛行時間の時間分解能の位置依存性。

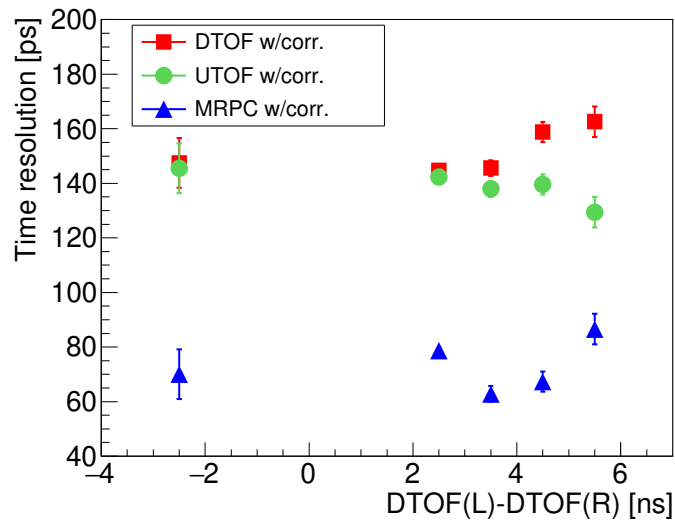


図 5.27: 検出器固有の時間分解能の位置依存性。

飛行時間に対する時間分解能は、いずれの位置でも $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ 、 $\text{TOF}_{\text{DTOF-MRPC}}$ 、 $\text{TOF}_{\text{DTOF-UTOF}}$ の順に良い値となった。各検出器固有の時間分解能は DTOF と UTOF がほぼ等しく、MRPC はそれらに比べて大幅に良い結果となった。但し、DTOF と UTOF の固有時間分解能は先行研究で得られていた 100 ps に比べて悪い。粒子が右に入射したとき、DTOF 固有の時間分解能が悪く、UTOF 固有の時間分解能が良くなるという位置依存性が見られた。MRPC 固有の時間分解能はこれらの影響を受ける可能性があるが、最も良い位置で 62.83 ± 2.87 ps となった。

5.7.5 粒子識別

検出器間の飛行時間を用いて π^+ と K^+ を識別する。入射粒子は π^+ と K^+ 、UTOF のシングルレートは 150 kHz という条件のデータを用いた。3 種類の飛行時間のうち、 $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ と $\text{TOF}_{\text{DTOF-UTOF}}$ の 2 つで π^+ と K^+ を分離できた。今回は 2 つのうち時間分解能の優れている $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ を用いて π^+ と K^+ を識別する。 $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ に対して粒子の入射位置ごとの時間分解能を求め、最も良い結果が得られた $4 \text{ ns} < \text{DTOF(L)} - \text{DTOF(R)} < 5 \text{ ns}$ の条件で粒子識別を行った。

π^+ 、 K^+ それぞれの $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ に対して slewing 補正を行った。結果を図 5.28 に示す。

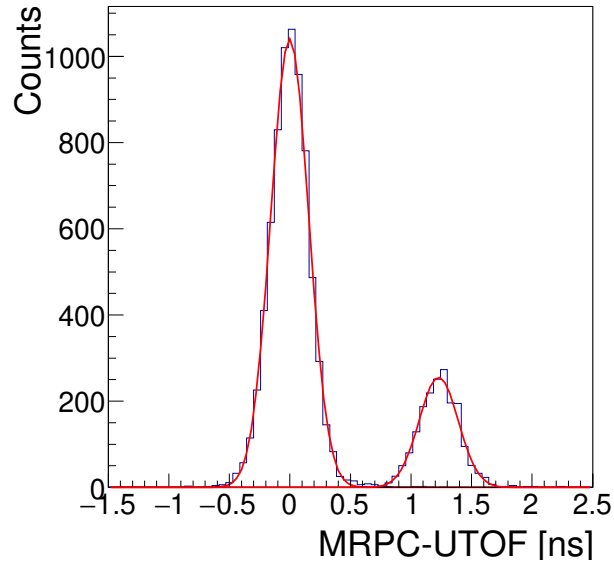


図 5.28: Slewing 補正後の $\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ の分布。0 ns 付近のピークは π^+ 、1.23 ns 付近のピークは K^+ によるものである。

$\text{TOF}_{\text{MRPC-UTOF}}$ の時間分解能は π^+ に対して 175.5 ± 3.2 ps、 K^+ に対して 161.7 ± 2.8 ps となった。また、測定した π^+ と K^+ の時間差は $\Delta t = 1230 \pm 4$ ps であったことから、 π^+ と K^+ は

$$\frac{1230 \pm 4}{175.5 + 161.7 \pm \sqrt{3.2^2 + 2.8^2}} \approx 3.65 \pm 0.06 \quad (5.10)$$

より、片側 $3.65 \pm 0.06\sigma$ で分離できている。

また、測定した π^+ と K^+ の時間差 Δt から入射粒子の運動量 p を計算することができる。UTOF から MRPC までの距離は $L = 2920$ mm、 K^+ と π^+ の質量はそれぞれ $m_K = 494$ MeV/ c^2 、 $m_\pi = 140$ MeV/ c^2 とする。 Δt と p の関係は以下の式で表される。

$$\Delta t = \frac{L}{pc} (\sqrt{m_K^2 c^2 + p^2} - \sqrt{m_\pi^2 c^2 + p^2}) \quad (5.11)$$

$\Delta t = 1230 \pm 4$ ps より、入射粒子の運動量は $p = 909 \pm 2$ MeV/ c と得られた。

5.8 テスト実験のまとめ

1800 mm 長の MRPC を J-PARC ハドロン実験施設内の K1.8BR ビームラインに持ち込み、ハドロンビームを用いたテスト実験を行った。結果を以下にまとめる。

- トリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いたデータ取得
チャームバリオン分光実験で使用予定であるトリガーレス・ストリーミング DAQ システム

を用いてデータを取得した。またデータを取得した後、解析上でトリガーをかけ、必要なデータのみを取り出して解析する方法を確立した。

- 検出効率のレート依存性評価

ビームレートが高くなるにつれ、MRPC の検出効率が低下する傾向が見られた。

- 検出効率と時間分解能の位置依存性評価

位置によるビームレートの違い、左右の読み出しまでの信号の伝播距離、電圧供給部分から離れた領域における電場の低下という 3 つの要因による、検出効率の位置依存性が見られた。最もレートが低く、MRPC の端に粒子が入射したという条件のもとで、左右両読みの検出効率は $80.85 \pm 5.74\%$ であった。MRPC 固有の時間分解能の位置依存性は小さく、最も良い条件下では 62.83 ± 2.87 ps となった。

- 飛行時間の測定と粒子識別

UToF から MRPC までの飛行時間を用いて π^+ と K^+ の識別を行った。測定した飛行時間の差に対し、片側約 3.65σ という十分な精度で π^+ と K^+ を分離することができた。

第6章

結論

本研究では、J-PARC ハドロン実験施設内の二次粒子ビームライン ($\pi 20$ ビームライン) におけるチャームバリオン分光実験で用いるための、飛行時間測定用 MRPC の開発を行った。MRPC の要求性能は 60 ps 以下の時間分解能を持つこと、読み出しストリップの長さ方向が 1800 mm であること、時間情報のみを用いた解析が可能であること、の 3 点である。

今回はプロトタイプとなる 1800 mm 長 MRPC のデザインを検討、製作し、性能評価のためのテスト実験を 2 度実施した。SPring-8 LEPS2 ビームラインでは電子ビームを用いた試験を行い、基本的な性能を評価した。このテスト実験では低増幅率のアンプを導入することでノイズを抑え、安定したオペレーションを可能にした。また、電荷の情報は用いず、時間情報のみを用いた解析方法を確立させることができた。テスト実験の結果、MRPC への印加電圧が 13.5 kV のとき、検出効率は $99.44 \pm 0.13\%$ 、時間分解能は 81.80 ± 1.52 ps となった。一方、検出効率と時間分解能の位置依存性を調べると、電圧供給部分から離れるにつれて性能が悪化することがわかった。原因としては、距離とともに電極にかかる電圧が低下し、それに伴ってガスギャップ内の電場が低下していることが考えられる。

J-PARC K1.8BR ビームラインではハドロンビームを用いたテスト実験を行った。この実験では、チャームバリオン分光実験で使用予定であるトリガーレス・ストリーミング DAQ システムを用いてデータを取得し、解析を行った。その結果、検出効率についてはレート依存性が見られた。入射粒子のレートが低いほど検出効率は向上し、レートが 25k/spill かつ最も良い位置においては $83.33 \pm 7.61\%$ の検出効率が得られた。検出効率の位置依存性を調べたところ、位置によるビームレートの違い、左右の読み出しまでの信号の伝播距離、電圧供給部分から離れた領域における電場の低下という 3 つの要因による位置依存性が見られた。また、プラスチックシンチレータと MRPC の時間差の分解能を用いて MRPC 固有の時間分解能を求めた。入射粒子のレートが 25k/spill かつ最も良い位置においては 62.83 ± 2.87 ps の時間分解能が得られた。また、測定した飛行時間による K^+ 、 π^+ の粒子識別を行い、約 1 GeV/c の低運動量においては十分な精度で K^+ と π^+ を分離できることを確認した。

以上のように、本研究ではチャームバリオン分光実験で用いる MRPC のプロトタイプを製作し、ビームを用いたテスト実験により性能を評価した。トリガーレス・ストリーミング DAQ シス

テムを用いたデータ取得と解析の方法、時間情報 (TOT) のみを用いた slewing 補正の方法を確立した。テスト実験の結果、最適な条件下では要求性能を達成したものの、性能の位置依存性という課題が残った。

今後の課題

今後の課題として、ストリップの長さ方向の位置によらず要求性能を達成することが挙げられる。今回製作した MRPC では、電圧供給部分から約 1000 mm 以上離れると、距離とともに電極にかかる電圧が低下するという問題点があった。電極全体に一律な電圧を加えるため、導電性インクや導電性テープを用いた対策を施すことで、この問題を解決できると考えている。

しかし、チャームバリオン分光実験に向けて MRPC を大量に生産する必要がある。大量生産にあたり、いくつかの課題がある。まず 1 つ目に、電極用材料の調達である。本研究で使用した ESD EMI エンジニアリング株式会社製の半導電性両面粘着カーボンテープは生産中止になることが決まっており、代わりとなる材料を探さなければならない。これまで他社製のカーボンテープやカーボンインクを用いた MRPC の開発を行ってきたが、安定した動作の実現には至っていない。また、カーボンを使用しないカーボンレス MRPC の開発も進めており、現在小型の試作機で性能評価を行っている。2 つ目の課題として、大量生産しやすいデザインの検討が挙げられる。本研究で開発した MRPC のデザインでは、特にガス領域の密閉に手間がかかってしまう。現在はテープや接着剤を使用してアクリルケースを密閉しているが、O リングを用いるなど、ガス領域を簡単に密閉できる方法を検討する必要がある。今後はこれらの課題を解決した上で、要求性能を達成する MRPC の生産が求められる。

付録 A

SPring-8 LEPS2 ビームラインにおける 性能評価試験の解析

A.1 RF 信号

飛行時間測定のスタートタイミングとして、加速器側から供給される RF 信号を使用した。ここではその詳細について述べる。

A.1.1 電子のフィリングパターン

SPring-8 では、蓄積リング内を周回する電子をビームとして取り出して使用する。蓄積リング内の電子を詰める場所をバケットと呼び、1 周 (1436 m) に 2436 個のバケットがある。全てのバケットに常に電子が詰められているのではなく、用途に応じていくつかのパターンで電子が詰められる。電子の詰め方をフィリングパターンと呼び、今回のテスト実験では C mode のフィリングパターンのビームを使用した。図 A.1 に示すように、C mode では 11 個のバンチに連続で電子を詰めた塊が等間隔で 29 個並ぶ構造をしている。

11-bunch trainx29

連続11バンチのかたまりが、全周において等間隔に29ある。

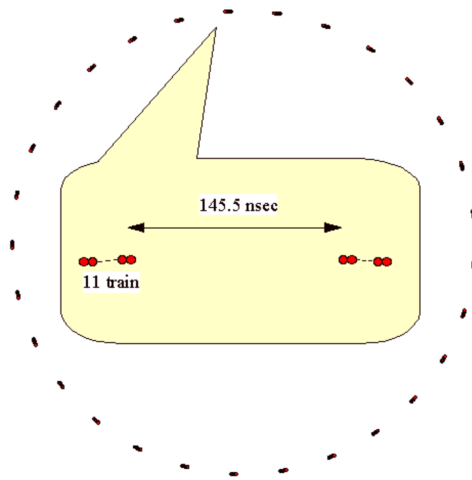


図 A.1: C mode のフィリングパターン。

A.1.2 RF 信号の間引き

4.6 節で述べたように、加速器側からユーザーへ 1966 ps 間隔の RF 信号が供給されている。これは蓄積リング内を周回する電子のバンチ間隔 (最も細密の場合) と同じ時間間隔で、全てのバケットに対応して RF 信号が存在する。今回のテスト実験では RF 信号を全て用いるのではなく、420 回に 1 回に間引いて HR-TDC で読み出す。図 A.2 に C mode での電子の構造と間引いた RF 信号のタイミングを示す。C mode では、 $2436/29=84$ より 1 分割あたり 84 個のバケットを 29 回繰り返す。RF 信号は $420/84=5$ より 5 分割に 1 回に間引いている。

間引いた後の RF 信号と MRPC の時間差を図 A.3 に示す。読み出した RF 信号のタイミングが 0 ns のピークに対応しており、1966 ps 間隔で連続して入射する 11 個の電子と対応して 11 本のピークが見られた。

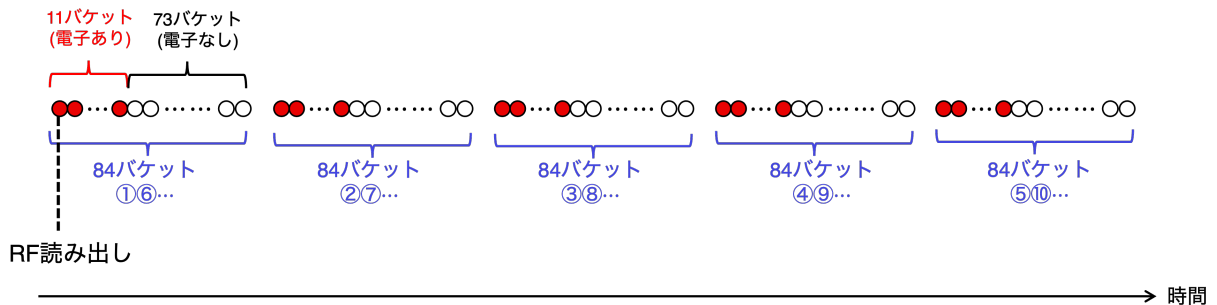


図 A.2: 電子のフィリングパターンと RF の間引き。

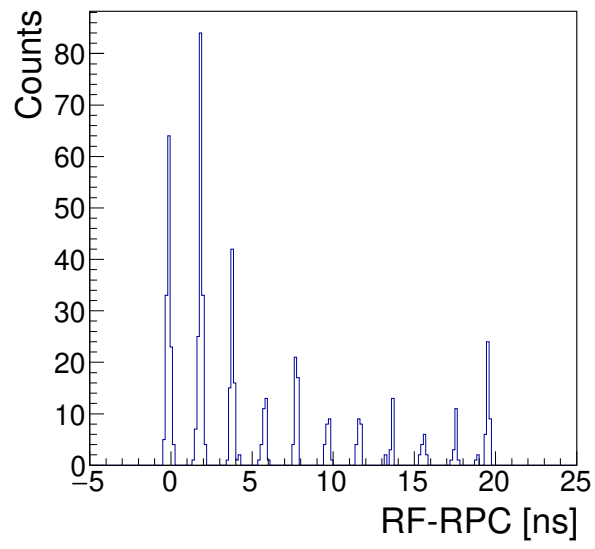


図 A.3: RF 信号と MRPC の時間差。

付録 B

J-PARC K1.8BR ビームラインにおける 性能評価試験の解析

B.1 イベント選択

テスト実験で取得したデータは root ファイルの形式で保存し、解析に使用した。その際、検出器の左右ごとにツリーにデータを格納している。すなわち UTOF L1-L3、UTOF R1-R3、DFOB L1-L3、DFOB R1-R3、MRPC L1-L8、MRPC R1-R8 のデータをそれぞれツリーに格納するため、1 つのツリーの中に複数セグメント (ストリップ) のデータが含まれる。そのため 5.6 節で述べたイベントカットをする前に、いくつかの処理を行った。ここではその処理方法について述べる。

MRPC の左右両方へのヒットを要求する場合

5.6.2 節で述べたように、UTOF、MRPC、DFOB を同一粒子が通過したイベントを選ぶため、UTOF と DFOB、MRPC と DFOB の時間差が正しいイベントを選ぶ。時間差の計算に用いる各検出器のタイミングは左右の平均値を使う。図 B.1 に 1 イベント内の各検出器のヒット分布の模式図を示す。各検出器の同一セグメント (ストリップ) の左右それぞれのヒットをペアとして (青色の破線)、2 つのタイミングの平均を求めた。

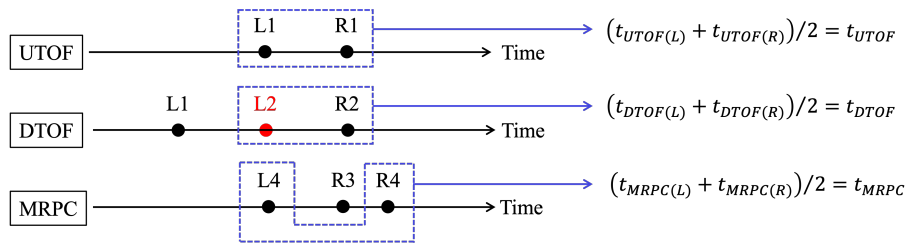


図 B.1: 1 イベント内のヒット分布の模式図。

MRPC の左右どちらかへのヒットを要求する場合

MRPC の左右両方にヒットした検出効率を求めるときと同様に、UTOF と DTOF、MRPC と DTOF の時間差が正しいイベントを選ぶ。UTOF と DTOF のタイミングについては先程と同様に左右の平均値を用いる。MRPC のタイミングとしては、イベント内で 1 ヒット目の L(または R) のタイミングを使用する (図 B.2)。

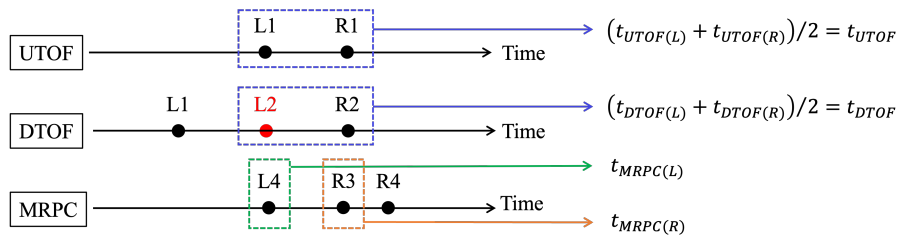


図 B.2: 1 イベント内のヒット分布の模式図。

B.2 Y 方向のヒット分布

各検出器の X 方向のヒット分布は 5.7.1 節の通りである。ここでは Y 方向に対する粒子のヒット分布について述べる。図 B.3、B.4、B.5 に UTOF、DTOF、MRPC の Y 方向のヒット分布を示す。これらは入射粒子が π^- 、UTOF のシングルレートが約 100 kHz の場合の分布であるが、他のビーム条件の場合も同様の結果であった。但し、いずれの検出器も同一セグメント (ストリップ) の左右両方にヒットがあったことを要求した。

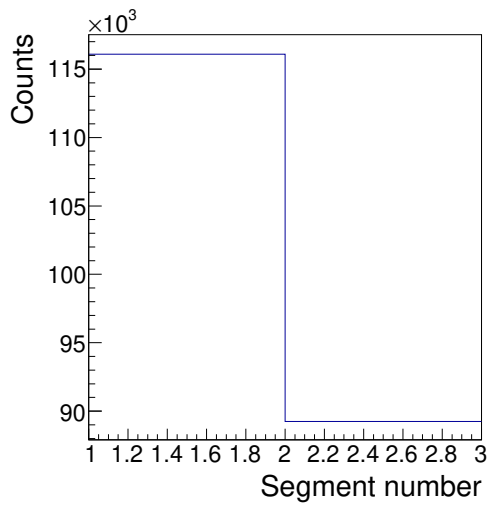


図 B.3: UTOF のヒットセグメント分布。

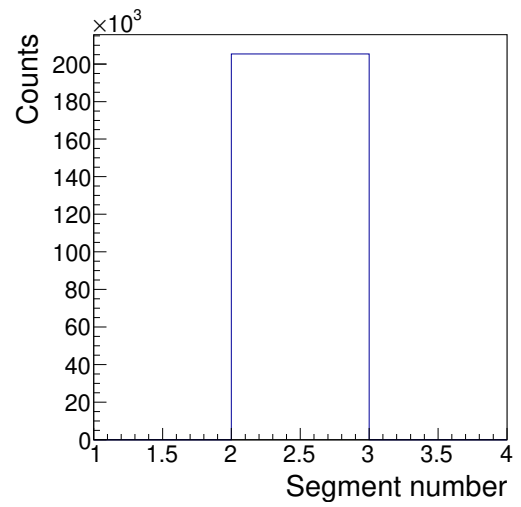


図 B.4: DTOF のヒットセグメント分布。

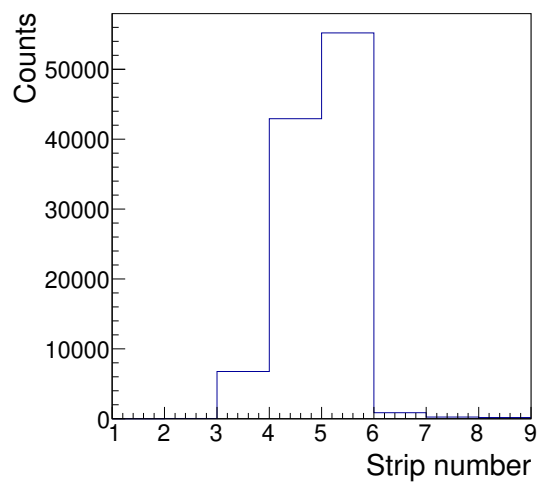


図 B.5: MRPC のヒットストリップ分布。

謝辞

本研究、本論文の執筆にあたり、多くの方にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。指導教員である阪口篤志教授には、毎週の打ち合わせで多くの助言をいただき、発表練習や資料の校正もしていただきました。ありがとうございました。京都大学の富田夏希助教には約2年半、お世話になりました。MRPCの製作、テスト実験、解析、資料作成など、研究の全ての面で手厚く指導していただき、心より感謝しております。大阪大学核物理研究センターの野海博之教授、白鳥昂太郎助教には、特にテスト実験でお世話になりました。また、打ち合わせの際にも貴重な助言をいただき、ありがとうございました。SPring-8でのテスト実験では大阪大学核物理研究センターの石川貴嗣教授、LEPS2実験グループの方々に、J-PARCでのテスト実験の際にはK1.8BRグループの方々にご協力いただきました。また、大阪大学核物理研究センターの大田晋輔准教授には、J-PARCでのテスト実験の解析方法を1から教えていただきました。お忙しい中何度も打ち合わせをしていただき、本当にありがとうございました。川畑貴裕教授をはじめとする川畑研究室のスタッフの方々には、発表練習の際に多くの助言をいただき感謝しております。

川畑研究室ハイパーグループの先輩方にもお世話になりました。徳田さん、戸田さんにはテスト実験を手伝っていただいたほか、打ち合わせで解析の助言を頂きました。ありがとうございました。同期の宇田君とはMRPCの製作、テスト実験など、様々な面で協力して研究を進めてきました。研究室の同期である白井君、杉崎君、田口君、本多君にも親しくしていただき、良い大学院生活を送ることができました。大変感謝しています。

最後に、大学院進学まで支えていただいた両親に深く感謝します。

参考文献

- [1] M. Anselmino *et al.*, Rev. Mod. Phys. 65, 1100(1993).
- [2] H. Noumi *et al.*, J-PARC E50 proposal.
http://www.j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1301/pdf/P50_2012_19.pdf
- [3] K. Shirotori *et al.*, "Proposal of test experiment to evaluate performances of secondary beam mode at the high-momentum beam line"(2021).
- [4] R. Honda *et al.*, "Continuous timing measurement using a data-streaming DAQ system", PTEP 123H01(2021).
- [5] S.H. Kim, A. Hosaka, H.C. Kim, H. Noumi, K. Shirotori, Prog. Theor. Exp. Phys. 103D01(2014).
- [6] A.Crotty *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 337(1994).
- [7] C.Lippmann and W. Riegler, "Space charge effects in Resistive Plate Chambers", Nucl. Instr. and Meth. A 517(2004).
- [8] A.N. Akindinov *et al.*, "Space charge limited avalanche growth in multigap resistive plate chambers", Eur. Phys. J. s01(2004).
- [9] F. Carnesecchi, "Performance of the ALICE Time-Of-Flight detectors at the LHC", JINST 14 C06023(2019).
- [10] The ALICE Collaboration, "Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC", Int. J. Mod. Phys. A 29(2014).
- [11] W.J. Llope *et al.*, "Multigap RPCs in the STAR experiment at RHIC", Nucl. Instr. and Meth. A 661(2012).
- [12] The SHiP Collaboration, "The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility", Eur. Phys. J. C 82(2022).
- [13] A. Blanco *et al.*, "The SHiP timing detector based on MRPC", JINST 15 C10017(2020).
- [14] K. Watanabe *et al.*, "A compensated multi-gap RPC with 2 m strips for the LEPS2 experiment", Nucl. Instr. and Meth. A 925(2019).
- [15] N. Tomida *et al.*, "Performance of TOF-RPC for the BGOegg experiment", JINST 11 C11037(2016).
- [16] N. Tomida *et al.*, "The TOF-RPC for the BGO-EGG experiment at LEPS2", JINST 9

- C10008(2014).
- [17] AMANEQ(連続読み出し DAQ 用フロントエンド回路).
<https://openit.kek.jp/project/StrHRTDC>
 - [18] 富田夏希, "大面積・高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発", 2011 年度京都大学大学院理学研究科修士論文.
 - [19] 赤石貴也, "チャームバリオン分光実験用ビームタイミング検出器の開発", 2018 年度大阪大学大学院理学研究科修士論文.
 - [20] D. Gonzalez-Diaz, "Research and developments on timing RPCs. Application to the ESTRELA detector of the HADES experiment at GSI", JINST 003(2006).
 - [21] W. Riegler, Christian Lippmann, Rob Veenhof, "Detector physics and simulation of resistive plate chambers", Nucl. Instr. and Meth. A 500(2003).
 - [22] D. Gonzalez-Diaz *et al.*, "Detectors and Concepts for sub-100 ps timing with gaseous detectors", JINST 12(2017).
 - [23] 渡邊憲, "LEPS2 実験のための 2m 長高抵抗板検出器の開発", 2017 年度京都大学大学院理学研究科修士論文.
 - [24] N. Tomida *et al.*, "Development of an 1-m long prototype TOF-RPC for the J-PARC π 20 beam line", Nucl. Instr. and Meth. A 1056(2023).
 - [25] R.X. Yang *et al.*, "Multi-peak pattern in Multi-gap RPC time-over-threshold distributions and an offline calibration method", JINST 12 C01012(2017).
 - [26] SPring-8 LEPS2 ビームライン.
http://www.spring8.or.jp/wkg/BL31LEP/instrument/lang/INS-0000001563//instrument_summary_view
 - [27] Hadron Universal Logic Module. <https://openit.kek.jp/project/HUL>
 - [28] A. Blanco *et al.*, "Sealed (zero gas flow) resistive plate chambers", Eur. phys. J. Plus 138(2023).
 - [29] Luis Lopes (LIP) in private communication.
 - [30] J-PARC K1.8BR ビームライン.
<https://www.kek.jp/ja/Facility/IPNS/K18BRBeamLine/>
 - [31] K. Agari *et al.*, "The K1.8BR spectrometer system at J-PARC", Prog. Theor. Exp. Phys. 02B011(2012).
 - [32] K. Aoyama *et al.*, J-PARC T98 proposal.
<https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac.2301/pdf/P98.2023-5.pdf>
 - [33] T. Ishikawa *et al.*, "Time resolution of a 1.8-m long BC-420 plastic scintillator bar with metal-packaged H11934 photomultiplier tubes", Nucl. Instr. and Meth. A 1039(2022).