

MARQ 実験用 Multi-gap Resistive Plate Chamber のための 新素材高圧印加電極の開発

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

小池諒太郎

2025 年 9 月 26 日



目次

第 1 章 序章	1
1.1 ハドロンの構造	1
1.1.1 構成子クォーク模型の限界	1
1.1.2 チャームバリオンにおけるダイクォーク	1
1.2 チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)	2
1.2.1 J-PARC ハドロン実験施設	2
1.2.2 ハドロン実験施設拡張計画と $\pi 20$ ビームライン	3
1.2.3 MARQ スペクトロメーター	4
1.2.4 チャームバリオン分光実験の概略	5
1.3 MRPC の時間分解能が実験に与える影響	6
1.3.1 TOF 測定による粒子識別	7
1.3.2 MRPC の時間分解能が TOF 測定の時間分解能に与える影響	7
1.3.3 TOF 測定の時間分解能が粒子識別に与える影響	7
1.4 本研究の目的	8
第 2 章 Multi-gap Resistive Plate Chambers の基礎	10
2.1 RPC の原理	10
2.1.1 ワイドギャップ型 RPC	10
2.1.2 オペレーションモード	10
2.1.3 ギャップに掛かる電圧	11
2.2 MRPC	11
2.2.1 シングルスタック型 MRPC	12
2.2.2 ダブルスタック型 MRPC	12
2.2.3 ガス	12
2.2.4 スペースチャージ効果	12
2.2.5 MRPC の採用事例	13
第 3 章 MRPC の高圧印加電極候補の探索	15
3.1 高圧印加電極の役割・要求される性能	15
3.1.1 役割	15
3.1.2 高圧印加電極の抵抗率が (M)RPC のパフォーマンスに与える影響	15
3.1.3 高圧印加電極への要求	17
3.2 従来日本グループが使用してきた電極：T-9188	17
3.3 他の実験コラボレーションでの事例	17
3.4 先行研究と国内新候補	18
3.4.1 先行研究：タニムラ (株) による高抵抗粘着テープの検討	18
3.4.2 海外製候補を含めた探索	18
3.4.3 本研究で注目した新候補	20
3.4.4 塗工方法によるメリット・デメリット	21
3.5 作成した高圧印加電極 (第一弾)	21

3.5.1	設計方針と主な改良点	21
3.5.2	電極の作成方法	22
3.5.3	第一弾小型試作の概要整理	23
3.6	作成した高圧印加電極 (第二弾)	25
3.6.1	製作の狙いと概要	25
3.6.2	電極の作成方法	26
3.6.3	大型試作の概要整理	27
第 4 章	電極比較用プロトタイプ製作	29
4.1	材料	30
4.1.1	高抵抗プレート	30
4.1.2	スペーサー	30
4.1.3	接着剤	32
4.1.4	絶縁体と読み出しストリップ	32
4.2	組み立ての手順	34
4.2.1	1 スタック MRPC の場合	34
4.2.2	2 スタック MRPC の場合	36
4.3	第一弾: 動作確認のための小型プロトタイプ	36
4.4	第二弾: より詳細な比較のための大型プロトタイプ	37
第 5 章	第一段プロトタイプの試験	38
5.1	試験に使用した機器	38
5.1.1	アンプ	38
5.1.2	ディスクリミネータ	39
5.1.3	HR-TDC	39
5.1.4	HV モジュール	40
5.1.5	ガス	42
5.2	実験室での高圧印加試験	42
5.2.1	セットアップ	42
5.2.2	結果	42
5.3	ビーム試験	43
5.3.1	SPring-8	43
5.3.2	LEPS2 ビームライン	43
5.3.3	RF 信号	44
5.4	ビーム試験のセットアップ	44
5.5	測定項目・方法	46
5.5.1	検出効率の評価方法	46
5.5.2	時間分解能の評価方法	47
5.6	結果	48
5.6.1	Graphit 33	48
5.6.2	KP-8348-1	50
5.6.3	CS-6301 (ガラス塗布)	51
5.6.4	CS-6301 (フィルム塗布)	53
5.7	まとめ	54

第 6 章	第二段プロトタイプの実験	56
6.1	実験室での高圧印加試験	56
6.2	ビーム試験	56
6.3	測定項目・方法	56
6.4	結果	58
6.4.1	CS-6301	58
6.4.2	CS-5302	59
6.4.3	KP-8348-1	61
6.4.4	KP-K2919-1	63
6.5	まとめ	64
第 7 章	結論と今後の展望	68

目 次

1.1	チャームバリオンの励起準位スペクトルの模式図	2
1.2	現在のハドロン実験施設	3
1.3	ハドロン実験施設拡張後のイメージ。	3
1.4	$\pi 20$ ビームラインの全体図。	4
1.5	$\pi 20$ ビームラインにおいて供給できる各運動量におけるビーム強度	4
1.6	MARQ スペクトロメーターの概略図	5
1.7	チャームバリオン Y_c^{*+} 生成反応の模式図。	6
1.8	予想されるチャームバリオンの質量スペクトル。	6
1.9	様々な TOF 分解能の場合の粒子識別	8
2.1	ワイドギャップ型 RPC の構造 (断面図)	10
2.2	電圧印加直後と時間が経った後の、ガスギャップに掛かっている電圧の様子	11
2.3	シングルスタック型 MRPC とダブルスタック型 MRPC の断面図の比較	12
2.4	アバランシェの周りの電場の様子	13
3.1	高圧印加電極で誘起電荷が拡散される様子を表した概念図	15
3.2	読み出しパッド間での MRPC の性能	16
3.3	バーコーターの仕組み	22
3.4	マイクログラビア塗工の仕組み	23
3.5	第一弾で使用した電極の外見	24
3.6	CS-6301 が塗布されたフィルムロール	26
3.7	KP-8348-1 が塗布された大型ガラス	27
3.8	KP-K2919-1 が塗布されたフィルム	27
4.1	従来のガスボリュームの構造	29
4.2	今回作成したプロトタイプのガスボリュームの構造	29
4.3	釣り糸スペーサーとマイラースペーサーの比較	30
4.4	釣り糸をスペーサーとして使った場合	30
4.5	マイラースペーサーを使った場合	30
4.6	ポリエステルフィルムスペーサーの構造	31
4.7	ポリエステルフィルムスペーサーの外観	31
4.8	小型 PCB の設計図	32
4.9	読み出しストリップの回路図。low-pass filter がついている。	32
4.10	大型 PCB のカソードのデザイン。端の部分の拡大図。幅 25.5 mm のストリップが 0.5 mm の間隔をあけて 8 本並んでいる。	33
4.11	HV 電極に HV 供給線を張り付けた様子	34
4.12	スペーサを貼り付けている様子。	35
4.13	一枚のガラスにスペーサーを設置完了した図。	35
4.14	ガラスを積み上げる様子	35
4.15	5 gap 分積み上げたガラス	35
4.16	ガスタイトの様子	35

4.17 PCB 間でのグラウンド共有の様子	36
4.18 ストリップのグラウンドをアルミケースに落とす様子	37
5.1 使用したアンプ	39
5.2 使用したディスクリミネータ	40
5.3 HUL HR-TDC の写真 [1]、(左)HR-TDC のフロントパネル、HR-TDC として使用する際にはメザニンカードの入力コネクタに信号を入れる。(右)HR-TDC を横から見た図、図中のオレンジの四角に囲まれているのがメザニン HR-TDC カードである。	41
5.4 入力信号の正負によって異なる、記録される TOT の大きさ	41
5.5 第一弾プロトタイプ宇宙線試験のセットアップ	42
5.6 宇宙線試験で観察できた信号。CS-6301(ガラス塗布) に 12 kV を印加した。ch 1(黄) は anode、ch 2(紫) は cathode の信号で、同一位置にあるストリップのため、逆向きで同じタイミングの信号が出ている。	43
5.7 SPring-8 を上空から見た写真	43
5.8 逆コンプトン散乱によって生成された γ のエネルギー分布	44
5.9 ビーム試験のセットアップ	45
5.10 第一弾プロトタイプ試験の様子。	45
5.11 データ取得用の回路。	46
5.12 Y 方向へのスキンのイメージ。写真は PCB を写しており、茶色の読み出しストリップが横方向に 7 本ある。Y = 0 mm があるストリップの中心にあたり、Y = 26 mm がその隣のストリップの中心にあたる。	47
5.13 TOT Percentile を用いたスルーイング補正	48
5.14 スルーイング補正前後の時間分解能	49
5.15 Graphit33 の検出効率の HV 依存性。	49
5.16 Graphit33 の時間分解能の HV 依存性。	49
5.17 Graphit33 のストリップ間での検出効率。	50
5.18 Graphit33 のストリップ間での時間分解能。	50
5.19 KP-8348-1 の検出効率の HV 依存性。	50
5.20 KP-8348-1 の時間分解能の HV 依存性。	50
5.21 KP-8348-1 のストリップ間での検出効率	51
5.22 KP-8348-1 のストリップ間での時間分解能	51
5.23 CS-6301 (ガラス塗布) の検出効率の HV 依存性。	52
5.24 CS-6301 (ガラス塗布) の時間分解能の HV 依存性。	52
5.25 CS-6301 (ガラス塗布) のストリップ間での検出効率	53
5.26 CS-6301 (ガラス塗布) のストリップ間での時間分解能	53
5.27 CS-6301 (フィルム塗布) の検出効率の HV 依存性。	53
5.28 CS-6301 (フィルム塗布) の時間分解能の HV 依存性。	53
5.29 CS-6301 (フィルム塗布) のストリップ間での検出効率	54
5.30 CS-6301 (フィルム塗布) のストリップ間での時間分解能	54
6.1 第二弾プロトタイプ試験の様子	57
6.2 データを取得した場所 (CS-5302)。	58
6.3 第二弾 CS-6301 の検出効率の HV 依存性。	58
6.4 第二弾 CS-6301 の時間分解能の HV 依存性。	58
6.5 第二弾 CS-6301 のストリップ間での検出効率。	59
6.6 第二弾 CS-6301 のストリップ間での時間分解能。	59
6.7 データを取得した場所 (CS-5302)。	59

6.8	第二弾 CS-5302 の検出効率の HV 依存性 (center)。	60
6.9	第二弾 CS-5302 の時間分解能の HV 依存性 (center)。	60
6.10	第二弾 CS-5302 の検出効率の HV 依存性 (most right)。	60
6.11	第二弾 CS-5302 の時間分解能の HV 依存性 (most right)。	60
6.12	それぞれの場所 (X position) での第二弾 CS-5302 の検出効率。	61
6.13	それぞれの場所 (X position) での第二弾 CS-5302 の時間分解能。	61
6.14	第二弾 CS-5302 のストリップ間での検出効率。(Center)	61
6.15	第二弾 CS-5302 のストリップ間での時間分解能。(Center)	61
6.16	データを取得した場所 (KP-8348-1)。	62
6.17	第二弾 KP-8348-1 の検出効率の HV 依存性 (center)。	62
6.18	第二弾 KP-8348-1 の時間分解能の HV 依存性 (center)。	62
6.19	それぞれの場所 (X position) での第二弾 KP-8348-1 の検出効率。	62
6.20	それぞれの場所 (X position) での第二弾 KP-8348-1 の時間分解能。	62
6.21	KP-8348-1 のストリップ間での検出効率。(Center)	63
6.22	KP-8348-1 のストリップ間での時間分解能。(Center)	63
6.23	データを取得した場所 (KP-K2919-1)。	63
6.24	第二弾 KP-K2919-1 の検出効率の HV 依存性。	64
6.25	第二弾 KP-K2919-1 の時間分解能の HV 依存性。	64
6.26	KP-K2919-1 のストリップ間での検出効率。	64
6.27	KP-K2919-1 のストリップ間での時間分解能。	64

表 目 次

1.1	MRPC の時間分解能と TOF 測定精度の対応	7
2.1	主要な実験で使用されている MRPC	13
3.1	第一弾で作成した高圧印加電極の仕様一覧。	25
3.2	第二弾で作成した高圧印加電極の仕様一覧	28
4.1	第一弾で作成したプロトタイプの仕様一覧。	37
4.2	第二弾で作成したプロトタイプの仕様一覧	37
5.1	第一弾で作成したプロトタイプの仕様一覧 (再掲)	38
5.2	第一弾電極の試験結果	55
6.1	第二弾で作成したプロトタイプの仕様一覧 (再掲)	56
6.2	第二弾電極の試験結果	65
6.3	temp	66
6.4	temp	67

概要

バリオンの基底状態の性質はクォーク模型によって非常に良く記述されるが、クォーク模型で予測されるバリオンの励起状態の中で実験的に発見されていない状態が多く存在する。この問題を解決する模型として2つのクォーク間で相関を持つとするダイクォーク模型が提唱されている [2]。バリオン内部でのクォークの自由度を解明するにあたり、励起状態についての詳細な実験が期待されている。特に u , d クォークより質量の大きい c クォークを1つ含むチャームバリオンの励起状態の生成比から、ダイクォークの効果を検証できる。チャームバリオンの励起状態について精密分光を行うことで、バリオン内部の構造を明らかにすることができると期待される。

様々なハドロン分光・探索実験と、そのための汎用的な MARQ スペクトロメーターの建設が、J-PARC の π 20 ビームラインにて計画されている。チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) もその1つであり、 π^- ビームを液体水素標的に照射し、チャームバリオンの励起状態の質量スペクトルを測定する [3]。欠損質量法により励起エネルギー $1\text{ GeV}/c^2$ までの各励起状態を生成・測定することが目的である。MARQ スペクトロメーターにおいて、散乱粒子の π, K, p のうち運動量が $1.7\text{ GeV}/c$ までのものは飛行時間法により識別する。そのためには高時間分解能を持ち、磁場中で動作し、大面積を覆うことができる検出器が必要であり、これらの特徴を兼ね備えた Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) が飛行時間法による粒子識別を担当する。

MRPC は荷電粒子検出用のガスチェンバーである。ガラスなどの高抵抗板を積み上げて狭いガスギャップを作る。最も外側のガラスに貼られた電極に高電圧を印加することで荷電粒子が通過した際に電子雪崩を作り出す。高圧印加電極の抵抗率が高すぎると電圧降下が大きくなり一様な電場が得られなくなる。一方、抵抗率が低すぎると誘起される電荷が分散しパフォーマンスの低下を引き起こしてしまう。そのため典型的には、グラファイトを含み $10^5 - 10^7\ \Omega/\text{cm}^2$ の抵抗率を持つ素材が用いられる。日本での MRPC 開発には半導電性のテープが使用されてきたが、製造中止のため入手困難となった。他の半導電性テープの使用も試みられてきたが代用になるものは見つからず、日本における MRPC の制作が困難となっていた。本研究ではガラスやフィルムに塗布する形態の素材を探索した。

新素材として、海外で実績のある、カーボンを含有する塗料2種類、および本試験で初めて試験する国内製塗料5種類を候補とした。高圧印加電極を作成するにあたり、複数の基材や塗布方法での作成を試みた。通常 MRPC の高圧印加電極は、ガラスに直接コーティングすることで作成するが、本研究では PET フィルムに塗布し、MRPC を組み立てる際にガラスに押し当てるという方法を導入した。こうすることで高圧印加電極の作成を MRPC の組み立てと独立して行うことができ、 $400\ \mu\text{m}$ と薄いガラス板の破損を最小限に抑えることが可能となるほか、機械塗工によりロール to ロールで成膜することで大量生産が可能になる。各塗料が適用可能な基材や塗工方法を調べ、膜厚の調整による抵抗率の調整なども試みながら高圧印加電極を作成した。

作成した新素材高圧印加電極を用いて、MRPC のプロトタイプを組み立てた。実験室で高圧を印加して暗電流や宇宙線が見えるかをチェックした後、MRPC の検出効率や時間分解能を SPring-8 にて電子ビームを用いて評価した。複数の候補で MRPC として正常に動作することが確かめられ、得られた検出効率、時間分解能からどの候補が高圧印加電極に適しているか議論した。コルコート株式会社製の CS-6301, CS-5302、および関西ポリマー株式会社製の KP-8348-1, KP-K2919-1 が最終候補として残った。CS-6301 と CS-5302 を使用したプロトタイプでは 99 % 以上の検出効率、最良で $\sim 70\text{ ps}$ の時間分解能を達成した。CS-6301、CS-5302 はフィルムにロール to ロールでの機械塗工が可能であり、量産性や抵抗率の均一性・再現性が高い。KP-8348-1, KP-K2919-1 を使用したプロトタイプでは、99 % 以上の検出効率、 $\sim 100\text{ ps}$ の時間分解能が確認された。KP-8348-1, KP-K2919-1 はハンドスプレーガンによる手作業での塗工となるため、量産性や均一性・再現性は低いが、これらを高圧印加電極に使用したプロトタイプは安定した動作を見せた。4つの最終候補が残ったことで、MARQ 実験のための MRPC 検出器の量産が現実的となった。

第1章 序章

1.1 ハドロンの構造

物理学の大きな目標の一つとして、物質の起源を理解することが挙げられる。物質を構成する最も基本的な粒子(素粒子)としてクォークが存在する。クォークには6つの種類(フレーバー)があり、それぞれダウルクォーク(d)、アップクォーク(u)、ストレンジクォーク(s)、チャームクォーク(c)、ボトムクォーク(b)、トップクォーク(t)と呼ばれる。ハドロンは複数の素粒子(クォークやグルーオン)から成る最も原始的な複合粒子であり、これまでに数百種類が確認されている。原子核を構成する陽子や中性子がハドロンの例である。ハドロンを理解することは、物質の成り立ちをその構成要素から理解するための第一歩である。

1.1.1 構成子クォーク模型の限界

ハドロンの理解として確立したものの一つが、ハドロンを独立なクォークの組み合わせで考える構成子クォーク模型である。構成子クォーク模型は、構成子クォークと呼ばれる準粒子がグルーオン交換による強い相互作用で結合した粒子としてハドロンを記述する。例えば、陽子は質量が約 $938\text{MeV}/c^2$ 、スピン $1/2$ であるが、u クォーク 2 つと d クォーク 1 つからなり、それぞれの構成子クォークの質量が約 $300\text{MeV}/c^2$ 、スピンがアップ・アップ・ダウンで組んだ状態ということになる。陽子のみならず基底状態や励起状態のハドロンは、構成子クォーク模型でよく記述できる。

しかし、高励起状態に目を向けると、構成子クォーク模型で存在が予言されているにもかかわらず観測されていない状態、観測されたがクォーク模型では禁止される量子数を持つエキゾチックハドロン、量子数は許容されるが質量が上手く説明できない状態などが存在する。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ある[2]。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。

1.1.2 チャームバリオンにおけるダイクォーク

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

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

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。この効果により、チャームバリオンの励起準位スペクトルは図 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と考えられる。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。

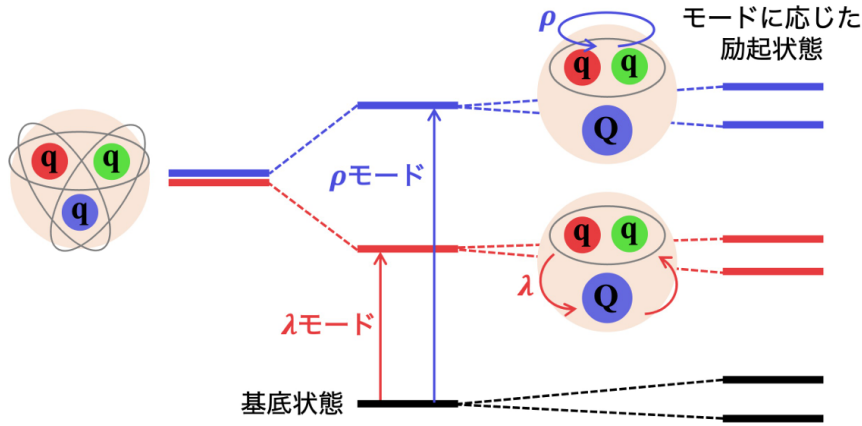


図 1.1: チャームバリオンの励起準位スペクトルの模式図。ダイクォーク相関の ρ, λ モードを反映した準位構造が見られる。

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 (Japan Proton Accelerator Research Complex; J-PARC) ハドロン実験施設内の高運動量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 [3]。

1.2.1 J-PARC ハドロン実験施設

J-PARC のハドロン実験施設では 30 GeV/c まで加速された陽子ビームを用いて素粒子・ハドロン物理学分野の実験が行われている。図 1.2 に示すように、ハドロン実験施設には複数のビームラインが存在する。K1.8、K1.8BR、KL ビームラインでは T1 ターゲットで生成された π, K などの二次粒子を用いて、ストレンジネス核物理、標準模型を超える物理の探索など様々な研究が行われている。高運動量 (high-p) ビームラインは 2019 年度に新設されたビームラインであり、30 GeV/c の一次陽子ビームの一部を取り出して利用する。物質内でのカイラル対称性の破れによる中間子の質量変化の観測実験 (E16 実験) が行われている。COMET ビームラインは 2022 年度に完成したビームラインであり、 ~ 8 GeV/c の一次陽子ビームを用いるビームラインである。新物理探索実験である COMET 実験が行われている。

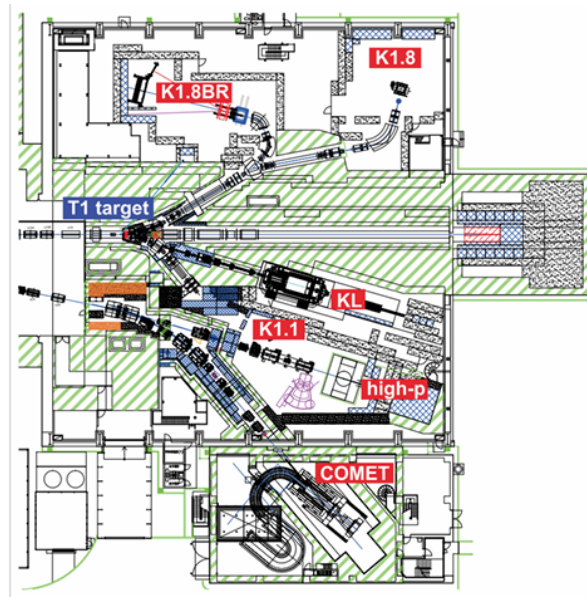


図 1.2: 現在のハドロン実験施設

1.2.2 ハドロン実験施設拡張計画と $\pi 20$ ビームライン

ハドロン実験施設を拡張する計画がある。現在、二次粒子生成ターゲットである T1 ターゲットの下流はビームダンプとなっているが、その位置に新たな二次粒子生成ターゲットとなる T2 ターゲットを設置、実験ホールを拡張して既存のビームラインとは特徴の異なるビームラインを新設する (図 1.3)。

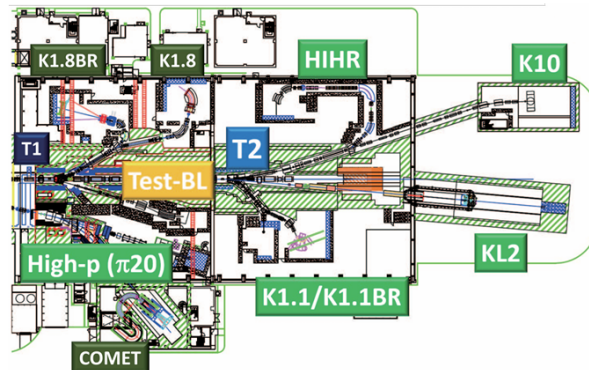


図 1.3: ハドロン実験施設拡張後のイメージ [4]。T2 標的を設置し、新しいビームライン (HIHR, K10, KL2, K1.1/K1.1BR) を新設する。

また、ハドロン実験施設拡張計画と並行して、high-p ビームラインで二次粒子ビームを使用できるように改良する計画が進んでいる。二次粒子化後の high-p ビームラインは $\pi 20$ ビームラインと呼ばれ、20 GeV までの π 、 K 、 p が利用可能となる。 $\pi 20$ ビームラインのための二次粒子生成標的は、現在 30 GeV の一次陽子ビームを取り出している分岐点に置かれる。図 1.4 で示されている Dispersive Focal Plane (ビーム位置とビーム運動量が強い相関をもつ場所) において 1 mm の位置分解能でビーム粒子の位置を測定することでビームの運動量を $\Delta p/p \sim 0.1\%$ の精度で決定できる。なお T2 ターゲットで生成された二次粒子は、静電セパレータなどで分離されることなくそのまま輸送される。ビームの構成としては π^- が他の粒子に比べ 2 桁ほど多く、 π^- 以外の粒子を用いる際にはビーム粒子識別用リングイメージチェレンコフ検出器 [5] で π^- を識別・除去する。

$\pi 20$ ビームラインによって重いグザイバリオンやチャームバリオンの生成が可能になる。これまで国内

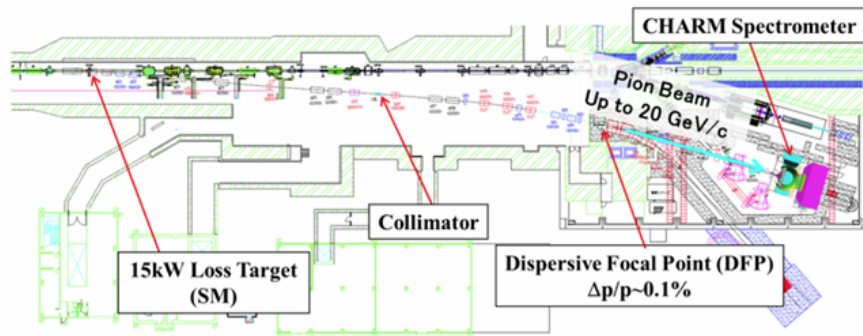


図 1.4: $\pi 20$ ビームラインの全体図。

で利用可能な二次粒子ビームの運動量は最高でも $2 \text{ GeV}/c$ であった。 $\pi 20$ ビームラインでは負電荷ビームとして $20 \text{ GeV}/c$ までの π^- , K^- , $\bar{p}$ を用いることができるようになる。想定されるビーム強度は図 1.5 のようになっている。このように、 $\pi 20$ ビームラインはこれまで不可能であった、 $2 \text{ GeV}/c^2$ より重い領域にあるグザイバリオン ($\sim 1.3 \text{ GeV}/c^2$) の高励起状態やチャームバリオン ($\sim 2.3 \text{ GeV}/c^2$) の生成を可能にする。これらの重いバリオンを生成し、高励起状態まで系統的に調べることで、ハドロン構造の理解に重要な知見を得ることが期待されている。

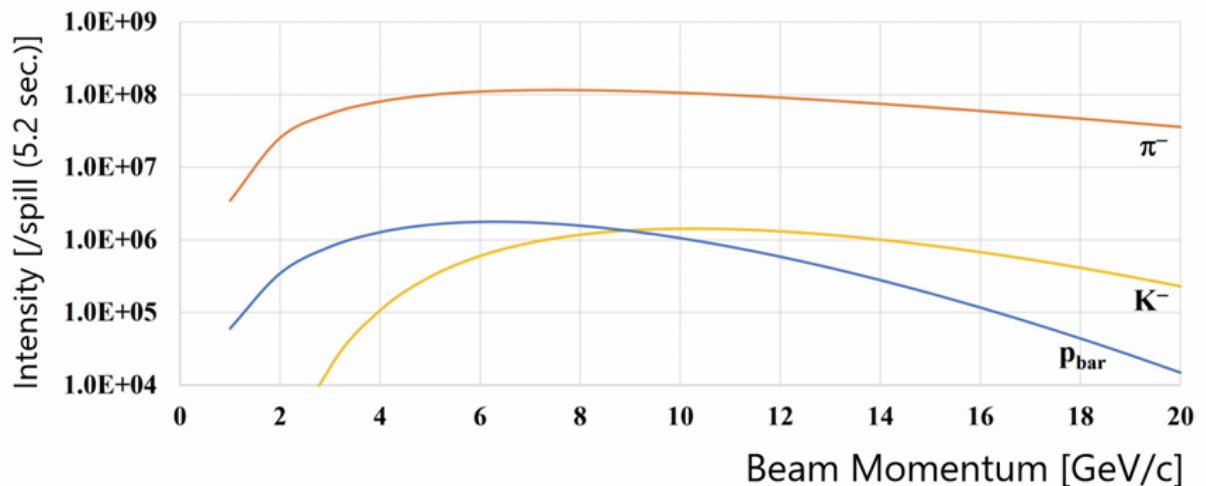


図 1.5: $\pi 20$ ビームラインにおいて供給できる各運動量におけるビーム強度 [4]

1.2.3 MARQ スペクトロメーター

Multi-purpose Analyzer for Resonance and Quark dynamics (MARQ スペクトロメーター) は、 $\pi 20$ ビームラインで用いる汎用スペクトロメーターである。チャームバリオン分光実験 (E50) に限らず、グザイバリオン分光実験 (E97)、 $I = 3$ ダイバリオン探索実験など、 $\pi 20$ ビームラインで行われる様々な実験で汎用的に使用される。

欠損質量を測定するために、ビーム粒子と散乱粒子の種類と運動量を決定する検出器群が用意される。図 1.6 に MARQ スペクトロメータの概略図を示す。ターゲット上流にビーム粒子測定用の検出器群、ターゲット下流に散乱粒子測定用の検出器群が配置されている。ビーム粒子測定用の検出器群はビームのタイミングを測定するタイミング検出器 (T0)、ビームのトラッキングを行うシンチレーションファイバー検出器 (Beam Fiber Tracker)、そしてビーム粒子を識別するためのリングイメージングチェレンコフ検出器 (beam RICH) で構成される。散乱粒子測定用の検出器群はターゲット下流を覆うように設置される。散乱粒子の

トラッキングを行うシンチレーションファイバー検出器 (Scatter Fiber Tracker)、Barrel ドリフトチェンバー (Barrel DC) がある。Barrel DC の後方には Time-Of-Flight を測定するための Multi-gap Resistive Plate Chamber (TOF-MRPC) が設置され、双極電磁石と組み合わせることで運動量の小さい ($1.7 \text{ GeV}/c$ 以下) 散乱粒子を測定する。高運動量の散乱粒子は前方に設置された検出器群で測定する。4 台の Drift Chamber で粒子のトラッキング、リングイメージングチェレンコフ検出器 (RICH)、閾値型チェレンコフ検出器 (AC)、ミューオン検出器 (TOF-tracker MRPC) を用いて粒子識別を行う。

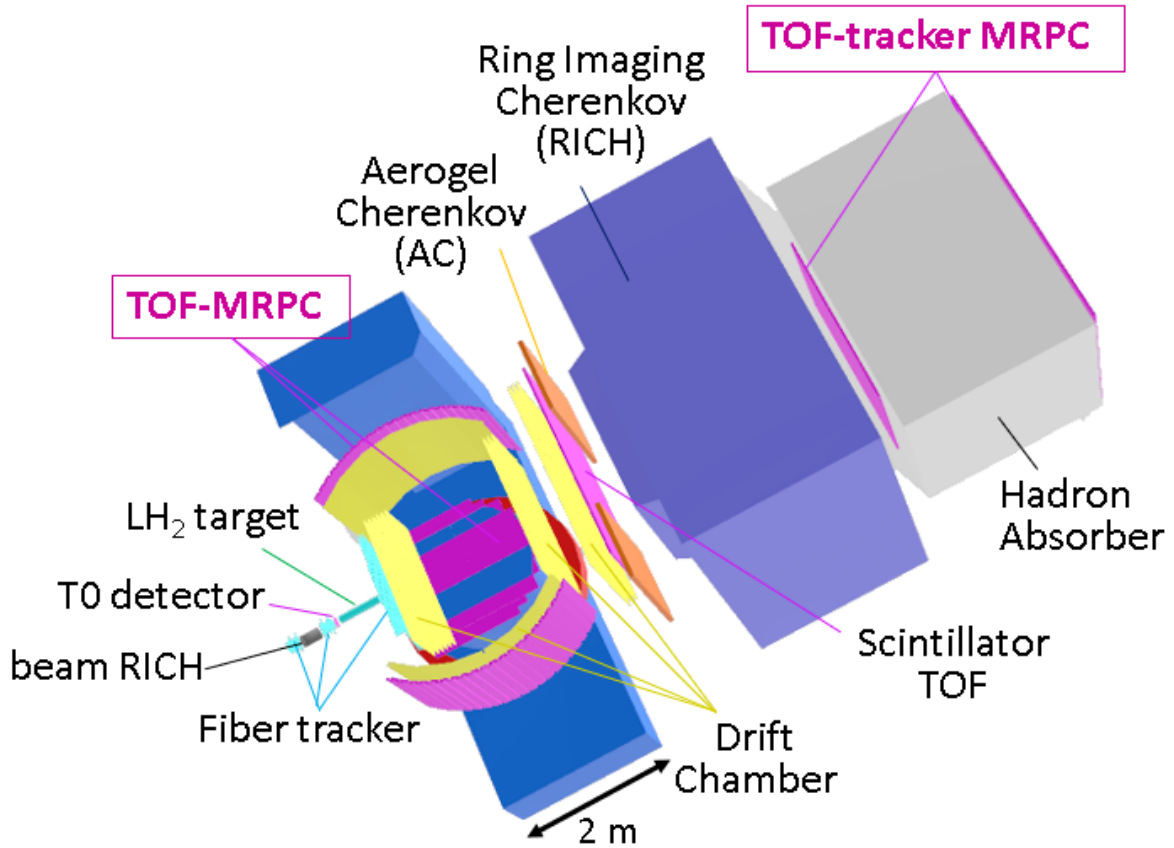


図 1.6: MARQ スペクトロメーターの概略図

1.2.4 チャームバリオン分光実験の概略

J-PARC E50 実験では欠損質量法によってチャームバリオン (Y_c^{*+}) の質量スペクトルを得る。図 1.7 に、実験で着目するチャームバリオン生成反応を示す。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を生成する。チャームバリオンと同時に生成される D^{*-} は式 1.4 のように崩壊するモードを持つ。

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

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

$D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-$ (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、欠損質量法によって 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、 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

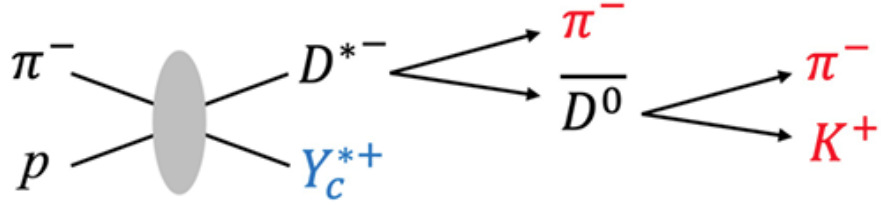


図 1.7: チャームバリオン Y_c^{*+} 生成反応の模式図。

バリオンを測定できる。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。

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 [6]。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を図 1.8 に示す。 λ モードの励起状態 (軌道角運動量 L) において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。 $\Lambda_c(2595)$ と $\Lambda_c(2625)$ 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。

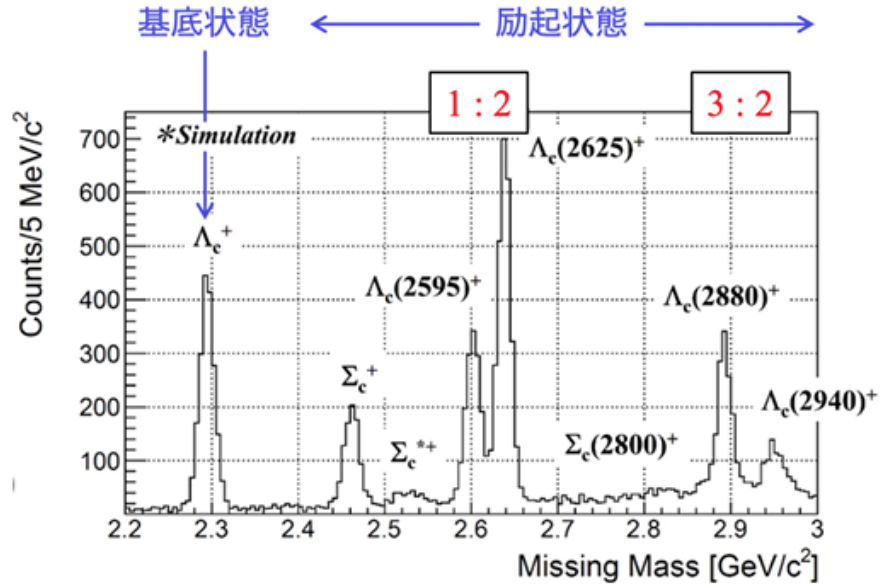


図 1.8: 予想されるチャームバリオンの質量スペクトル。

1.3 MRPC の時間分解能が実験に与える影響

本研究は MRPC に関する開発である。そこで、本節では MARQ スペクトロメーターにおける MRPC の役割と MRPC の時間分解能が実験に与える影響をまとめる。

1.3.1 TOF 測定による粒子識別

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、磁場中でのトラッキング軌跡からその粒子に働いているローレンツ力の向きを決定することで識別される。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 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 、光速を c として、

$$p = \beta\gamma mc$$

$$\left(\text{ここで } \beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{1 - \beta^2} \right)$$

と書ける。したがって、粒子の飛行距離が L 、飛行時間が t であった場合、粒子の質量 m は

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1} \quad (1.5)$$

となる。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。

1.3.2 MRPC の時間分解能が TOF 測定の時間分解能に与える影響

TOF-MRPC は MARQ スペクトロメーターにおいて、低運動量 ($p < 1.7 \text{ GeV}/c$) の粒子の粒子識別を担当する。種々の反応で生じる $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ のうち、 $1.7 \text{ GeV}/c$ までのものを TOF-MRPC で識別し、より運動量が高い粒子はエアロゲルを用いた閾値型チェレンコフ検出器 (AC) などを用いて識別する。チャームバリオン分光実験では、同定された粒子種と測定された運動量から D^{*-} を再構成する。

TOF 測定のスタートカウンタはチェレンコフ光を用いたアクリル輻射体と MPPC からなるビームタイミング検出器 T0 [7]、ストップカウンタが TOF-MRPC である。T0 は実機が完成しており時間分解能 40 ps を達成している。そのため、MRPC の時間分解能で TOF 測定の精度が決定する。T0 の時間分解能が dT_{T0} 、TOF-MRPC の時間分解能が dT_{MRPC} のときの TOF 測定の精度 dT_{TOF} は $dT_{TOF} = \sqrt{(dT_{T0})^2 + (dT_{MRPC})^2}$ となる。 $dT_{T0} = 40 \text{ [ps]}$ とし、 dT_{MRPC} を変えたときの TOF 測定の精度を表 1.1 に示す。

表 1.1: MRPC の時間分解能と TOF 測定精度の対応

dT_{MRPC}	dT_{TOF}
50 ps	64 ps
60 ps	70 ps
70 ps	81 ps
80 ps	89 ps
90 ps	100 ps
100 ps	108 ps

1.3.3 TOF 測定の時間分解能が粒子識別に与える影響

図 1.9 に、TOF 測定の時間分解能が粒子識別に与える影響を調べるために行ったモンテカルロシミュレーションの結果を示す。TOF 測定の精度が 50, 70, 100 ps の場合それぞれについて、粒子の運動量と mass squared $M^2 = (p/\beta)^2(1 - \beta^2)$ の相関を表したものが右側のプロットである。左側のヒストグラム

は、運動量領域 $1.5 \text{ GeV}/c < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ の範囲のイベントのみを選んだ際の M^2 の分布である。運動量が高い粒子ほど、時間分解能によるバラツキのために M^2 がよりバラついてしまう様子が確認できる。 dT_{TOF} が 50 ps であれば $1.5 \text{ GeV}/c < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ の運動量のものでも分離できている。 dT_{TOF} が 70 ps (MRPC の分解能が $dT_{\text{MRPC}} = 60 \text{ ps}$) の場合、 π と K の分布の裾が重なる。 dT_{TOF} が 100 ps (MRPC の分解能が $dT_{\text{MRPC}} = 90 \text{ ps}$) の場合、 π と K の分布が大きく重なり、粒子識別できずに捨てるイベントが多くなってしまう。

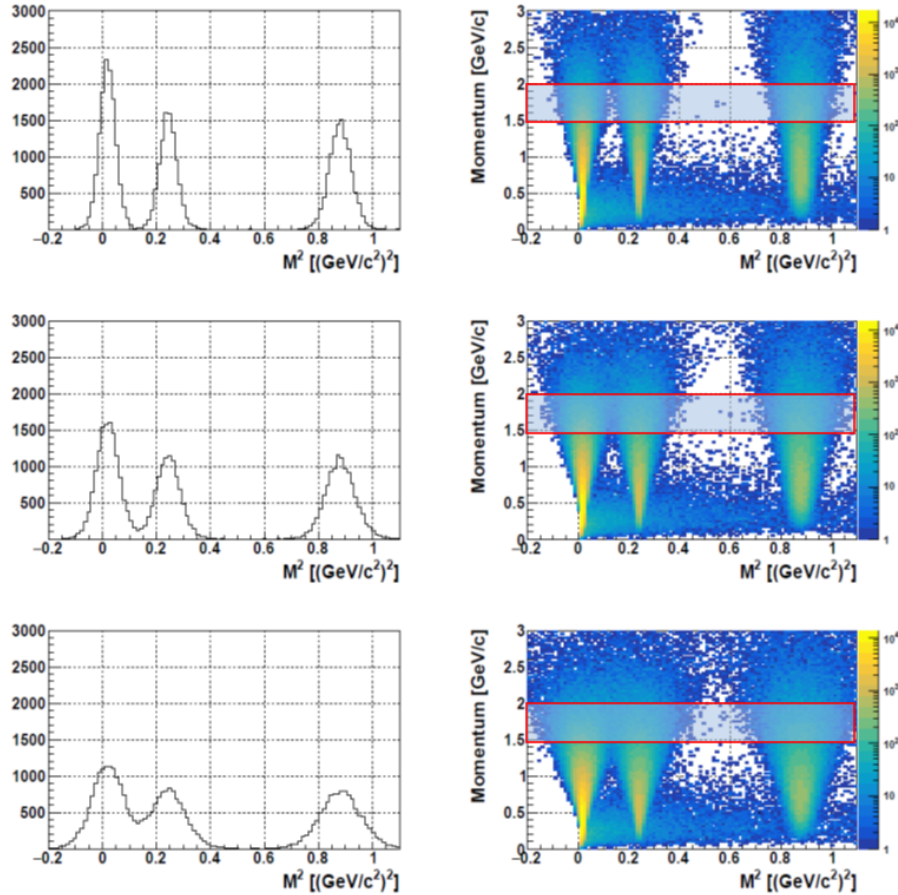


図 1.9: 様々な TOF 分解能の場合の粒子識別のシミュレーション。上から TOF 分解能が $dT_{\text{TOF}} = 50, 70, 100 \text{ ps}$ (MRPC の分解能に直すと $dT_{\text{MRPC}} = 30, 60, 90 \text{ ps}$) の場合。右図が質量 M^2 と運動量 p と相関を表している。左図は、TOF で粒子識別をするもののうち最も厳しい運動量領域、 $1.5 \text{ GeV} < p < 2.0 \text{ GeV}$ の範囲のイベントを質量軸に射影したものである。

1.4 本研究の目的

MRPC は荷電粒子検出用のガスチェンバーである。ガラスなどの高抵抗板を積み上げて狭いガスギャップを作る。最も外側のガラスに貼られた電極に高電圧を印加することで荷電粒子が通過した際に電子雪崩を作り出す。高圧印加電極の抵抗率が高すぎると電圧降下が大きくなり一様な電場が得られなくなる。一方、抵抗率が低すぎると誘起される電荷が分散しパフォーマンスの低下を引き起こしてしまう。そのため典型的には、グラファイトを含み $10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ の抵抗率を持つ素材が用いられる。日本での MRPC 開発には半導電性のテープが使用されてきたが、製造中止のため入手困難となった。他の半導電性テープの使用も試みられてきたが代用になるものは見つからず、日本における MRPC の制作が困難となっていた。

本研究の目的は、生産停止に伴い入手困難となった従来の高圧印加電極に代わる MRPC の高圧印加電極を開発することである。MARQ スペクトロメーターには、反応点直後 TOF 測定による粒子識別を担当

する TOF-MRPC と最下流でミュオンのトラッキングと識別を行う TOF-tracker MRPC が組み込まれる。TOF-MRPC の開発 [8] と TOF-tracker MRPC の開発 [1] は従来の高圧印加電極を用いて行われている。TOF-MRPC のプロトタイプは、99 % 以上の検出効率と約 80 ps (最良の場所では 約 60 ps) の時間分解能を達成している。TOF-tracker MRPC のプロトタイプは、最適な条件において、95 % 以上の検出効率、70 ps 以下の時間分解能、約 0.8 mm の位置分解能を達成している。このように、MARQ スペクトロメーター用の MRPC の設計は有効性が確認されており、高圧印加電極の目途が立てば量産が視野に入るという状況である。そこで本研究では、量産の際の利便性なども考慮に入れながら、新しい高圧印加電極の開発を行った。

本論文では新しい高圧印加電極素材の探索、新素材電極の作成、新電極を用いた MRPC の製作、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。新電極の試験は二段階に分けて行った。第一段階では、新しい素材を用いて初めて高圧印加電極を作成、それを利用した小型プロトタイプが MRPC として動作するかを試験した。第二段階では、第一段階で有望と判断された電極素材について、大型プロトタイプ MRPC を作成して詳細な比較を行った。両段階ともテスト実験は SPring-8 で行い、電子ビームを用いて検出器の検出効率・時間分解能を評価した。

第2章 Multi-gap Resistive Plate Chambers の基礎

Resistive Plate Chamber (RPC) は高エネルギー物理学分野で広く利用されている荷電粒子検出器である。その構造や性能は、応用分野の要件に合わせて最適化されており、大きく分けてワイドギャップ型とマルチギャップ型の2種類に分類される。本章では、ワイドギャップ型 RPC (単に RPC と呼ばれることが多い) について概略を述べた後、マルチギャップ型 RPC (Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC) の動作原理、構造、特徴について詳しく説明する。

2.1 RPC の原理

RPC はガラスやベークライトなどの高抵抗板を利用した荷電粒子検出用ガスチェンバーである。その構造は、高抵抗材料で構成される平行平板電極を用い、内部には特定のガス混合物を充填している。高電圧が印加された電極間で発生する電場により、電離された荷電粒子が増幅され、信号として読み出される。

2.1.1 ワイドギャップ型 RPC

図 2.1 に示すようにワイドギャップ型 RPC は2枚の平行な高抵抗板とその間に形成された、典型的には数 mm の大きさのギャップで構成されている。ギャップの維持には釣り糸などが使われ、ギャップ数はほとんどの場合 1 または 2 である。高抵抗板の外側側面に置かれた高圧印加電極に 10 kV 程度の電圧をかけることで動作する。典型的な性能としては検出効率が 99%、時間分解能が 1 ns 程度である。単純な構造ながら、検出効率や大面積を覆う際のコストの面で優れており、高エネルギー物理実験では検出器群の最外層に置いてミューオン検出器としてよく用いられる。

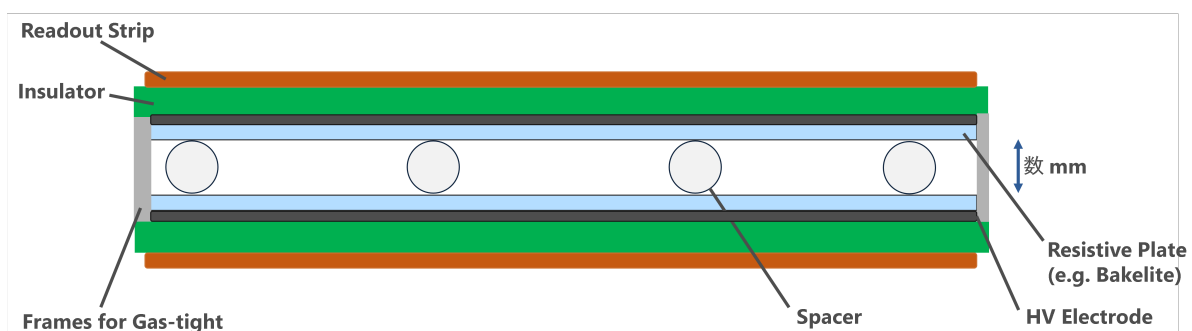


図 2.1: ワイドギャップ型 RPC の構造 (断面図)

2.1.2 オペレーションモード

ストリーマーモード

1980 年代始めに RPC が開発されて以来、アバランシェモードが発見されるまでストリーマーモードと呼ばれるオペレーションモードが主に使用されていた。ストリーマーモードではアルゴンベースの混合ガ

スを使用される。このアルゴンベースのガスでは、アバランシェによって電子が 10^8 個以上に増幅される。この増幅がアバランシェ領域外まで広がり、電子がアノード・カソード間全体に広がる状態をストリーマーと呼ぶ。アバランシェがストリーマーに遷移する過程は2通りある。1つ目はアバランシェが直接ストリーマーに遷移する過程で、この過程は比較的早い。2つ目は電子の増幅によって発生した紫外線がアバランシェ領域外のガスをイオン化し、電子の増幅を起こす過程である。この過程は先述した過程よりも遅い過程である。ストリーマーモードでは出力信号の電荷量が $10 \sim 1000$ pC と大きいと、プリアンプを介さず直接信号の読み出しが可能という利点がある。一方、信号の電荷量が大きく、ガスやガラスが定常状態まで戻るのに時間がかかるためレート耐性が 1 Hz/cm^2 程度しかないという欠点を持つ。また信号の発生時間にもばらつきがあるため、時間分解能も約 1 ns と悪い。以上の理由からミュオンのトリガーカウンターや宇宙線、ニュートリノ実験に用いられる RPC はストリーマーモードで使用される。実際には Belle 実験、BaBar 実験などで使用されている。

アバランシェモード

アバランシェモードとは電気陰性度の高いフロン系のガスをベースとした混合ガスを使用することでストリーマーの発生を抑制し、アバランシェのみでオペレーションできるモードで 1990 年代に発見された。アバランシェモードでは電子の増幅がストリーマーが発生する前の 10^8 個以内に抑えられるため、読み出し電極に誘起される信号の電荷は $1 \sim 10$ pC と小さく、信号を読み出す際に高い増幅率のアンプが必要となる。しかし、アバランシェで増幅される電子はストリーマーに比べ、数が少なく、定常状態に戻るまでの時間が短縮されるため、 1 kHz/cm^2 程度のレートでオペレーションすることが可能となる。また、アバランシェモードでは信号が誘起されるタイミングにばらつきが小さく、ストリーマーモードに比べて良い時間分解能が得られる利点を持つ。これらの理由からアバランシェモードでオペレーションされる RPC は TOF 測定用検出器としてよく用いられる。

2.1.3 ギャップに掛かる電圧

RPC の高圧印加電極に電圧を印加すると、電圧印加直後は図 2.2a のように高抵抗プレートとガスギャップそれぞれの誘電率に応じた電圧がかかる。そのため印加直後は、ガスギャップにかかる電圧は高圧印加電極に印加した電圧よりも低くなる。しかしプレートは完全な絶縁体ではないため、電荷が移動し、図 2.2b のようにプレートにかかる電圧は 0 となり、ギャップのみに電圧がかかるようになる。これはギャップ数を増やした場合も同様で、各ギャップに印加電圧が等しく分配される [9]。

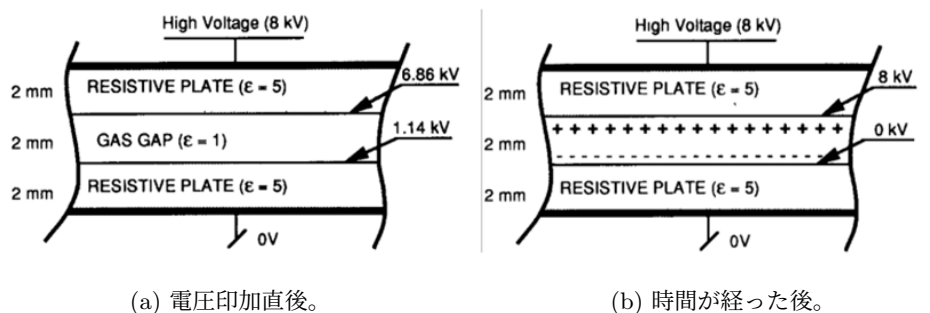


図 2.2: 電圧印加直後と時間が経った後の、ガスギャップに掛かっている電圧の様子 [9]。

2.2 MRPC

MRPC (Multi-gap Resistive Plate Chamber) は、ワイドギャップ型 RPC を発展させた検出器であり、時間分解能の向上や検出効率の向上を目的として設計された。MRPC の特徴は、ギャップ幅を狭くするこ

とでより高い時間分解能を実現しつつ、同時にギャップ数を増やすことで、ギャップ幅を狭くすることで失われる検出効率を補う点にある。このセクションでは、基本的な構造であるシングルスタック型 MRPC から、さらに発展したダブルスタック型 MRPC までを解説する。

2.2.1 シングルスタック型 MRPC

シングルスタック型 MRPC は MRPC の基礎形態であり、細かなギャップを複数層用意することで精密な時間分解能と高い検出効率を両立する。ワイドギャップ型 RPC に比べ、1 ギャップが数百 μm と小さく、ギャップ数が多い。シングルスタック型 MRPC の構造を図 2.3a に示す。ガラスを数 100 μm の間隔で複数枚積層している。ガラスとガラスの間の空間をガスギャップといい、荷電粒子が通過した際にはここでアバランシェが作られる。最外層のガラスに貼られた高圧印加電極により電場を張る。

2.2.2 ダブルスタック型 MRPC

ダブルスタック型 MRPC とは、シングルスタック型 MRPC を 2 つ積み重ねることで必要な高電圧はそのままに有感ギャップ数を 2 倍にした MRPC である。MRPC ではギャップ数を多くするほど検出効率・時間分解能が基本的に向上するが、同時に、必要な高電圧はギャップ数に比例して大きくなる。例えば、各ギャップ 260 μm でギャップ数が 5 のシングルスタック型 MRPC の場合およそ 12-14 kV が必要であるが、これを 10 gap MRPC にしようとする 20 kV 以上の高電圧が必要となってしまう。図 2.3b にダブルスタック型 MRPC の構造を示す。図中に 4 つの高圧印加電極があるが、上から順に +HV、-HV、-HV、+HV という順番になっている。シングルスタック型に比べてギャップ数は 2 倍になっているが、2 つのスタックに分割されている分、各スタックに必要な電圧はシングルスタックの時と同じである。また、アノード側に 2 スタック分のアバランシェが引き寄せられ、誘起される信号がシングルスタックと比べて 2 倍になる。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。

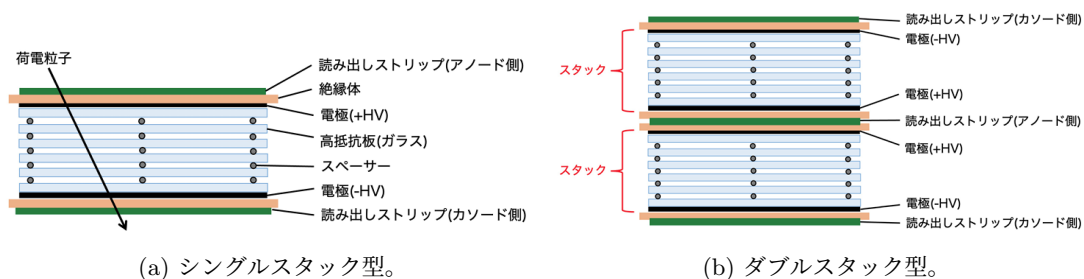


図 2.3: シングルスタック型 MRPC とダブルスタック型 MRPC の断面図の比較

2.2.3 ガス

MRPC は時間分解能を追求するため通常はアバランシェモードで運転する。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。

2.2.4 スペースチャージ効果

スペースチャージ効果とは、電子雪崩の発展において、電離電子や正イオンが作る追加的な電場の影響で信号の増幅が抑えられる効果のことである。MRPC において、スペースチャージ効果は高時間分解能を実

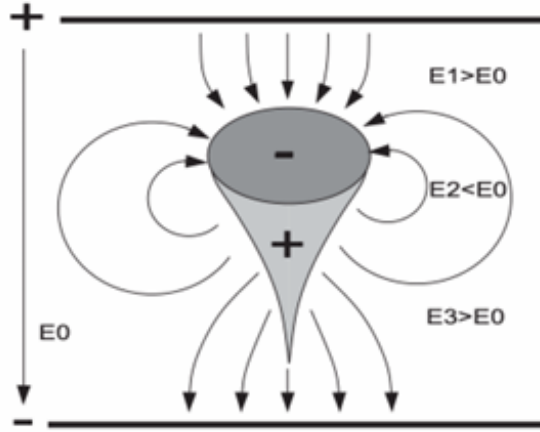


図 2.4: アバランシェの周りの電場の様子 [10]

現するために重要な働きを果たす [10, 11]。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の電場の大きさを $E1$ 、 $E3$ とすると、これは印加された電場 $E0$ より大きい。一方、アバランシェの中心部の電場 $E2$ は $E0$ より小さい。 $E1$ 、 $E3$ の領域では電位が高くなるためアバランシェがより強く増幅され、 $E2$ の領域では電位が低くなるため増幅は抑制される。アバランシェ中の大半の電子は $E2$ の領域にあるため、全体としては増幅の抑制が起こる。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り、高い時間分解能を実現できる。

スペースチャージ効果は MRPC のレート耐性にも寄与する。増幅が抑えられた電子は周辺のガス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、何らかの原因でガスギャップの幅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ふ。この場合でもスペースチャージ効果が電子の増幅を抑えるため、高抵抗板の平行精度の要求を低くすることにも繋がる。

2.2.5 MRPC の採用事例

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 (表 2.1)。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。

表 2.1: 主要な実験で使用されている MRPC

Experiments	Total active area (m^2)	Gap $\times$ thickness (mm)	Efficiency (%)	Time resolution (ps)
STAR [12, 13]	50	6×0.22	95–97	60
ALICE [14, 15, 16]	141	10×0.25	99.9	40
SHiP [17, 18]	50	12×0.300	98	54
LEPS2 [19]	10	10×0.260	99	80
BGOegg [20, 21]	6.4	10×0.260	99	60

• STAR

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 $220\text{ }\mu\text{m}$ 、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。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$: iso- C_4H_{10} = 95 : 5 の混合ガスを使用している [13]。

- **ALICE**

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 $250\text{ }\mu\text{m}$ 、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。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$: SF_6 = 93 : 7 の混合ガスを使用している [15, 16]。

- **SHiP**

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 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、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。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$: SF_6 = 97.5 : 2.5 の混合ガスを使用している [17, 18]。

- **BGOegg**

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。ガスギャップの間隔は $260\text{ }\mu\text{m}$ 、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。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$: SF_6 : C_4H_{10} = 90 : 5 : 5 の混合ガスを使用している [20, 21]。

- **LEPS2**

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。基本的な構造は BGOegg 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 $260\text{ }\mu\text{m}$ 、5 ギャップのスタック 2 つで構成される。検出効率は 99 % 以上、時間分解能は 80 ps である。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$: SF_6 : C_4H_{10} = 90 : 5 : 5 の混合ガスを使用している [19]。

第3章 MRPC の高圧印加電極候補の探索

3.1 高圧印加電極の役割・要求される性能

3.1.1 役割

MRPC の高圧印加電極の役割は、高抵抗板 (ガラス) の一面全体に均一に高圧を供給することである。高圧印加電極の抵抗率は、単位面積当たりの抵抗値である表面抵抗率 (単位は Ω/cm^2) で表されることが多い。表面抵抗率は塗装膜・薄膜等の分野で用いられる量で、厚みに依存するため物質固有の物理量ではないが、塗工面積には依らないので塗工膜の簡便な比較に便利である。(M)RPC では高圧電極を通して高抵抗板に電圧を印加するため、抵抗率が高すぎると電圧降下が大きくなり一様な電場が得られなくなる。また、ガスギャップ中で発展する電子雪崩が誘起する信号は、高圧印加電極を透過して外側の読み出しストリップに電荷を誘起する必要がある。このような仕組みのため、抵抗率が高い場合は誘起される信号が小さくなってしまい、パフォーマンスの低下に繋がる。一方、抵抗率が低すぎると、誘起される電荷が分散してしまう。その結果複数のストリップが鳴り位置分解能が低下したり、1ストリップ当たりの電荷が小さくなることで検出効率や時間分解能が低下してしまう。一般的に、 $10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ 程度の導電性素材が好ましいとされる。

3.1.2 高圧印加電極の抵抗率が (M)RPC のパフォーマンスに与える影響

高圧印加電極の表面抵抗率を変化させた際の MRPC のパフォーマンスについては、ALICE グループの Technical Design Report [22, 23] や ICAL コラボレーションの詳細な報告 [24] がある。まず、高圧印加電極の表面抵抗率によって、誘起される電荷の拡散が異なる。図 3.1 に示すように、誘起される電荷の広がり、信号源となる電子雪崩と読み出しストリップの距離に依存するが、高圧印加電極によってさらに広がる可能性がある。ICAL コラボレーションの報告では、粒子が通過した領域の直上に位置するストリップ、およびそれに隣接するストリップに誘起される電荷量を計測している。その結果、表面抵抗率が低いほど、電荷がより多くのストリップにシェアされることが確かめられている。つまり、粒子が通過した領域の直上にあるストリップの検出効率は多少変化する程度だが、隣接するストリップの検出効率はより大きく上がることが報告されている。また、抵抗率が低いほど、ノイズレートは下がり、オペレーティング電圧は高くなることが報告されている。

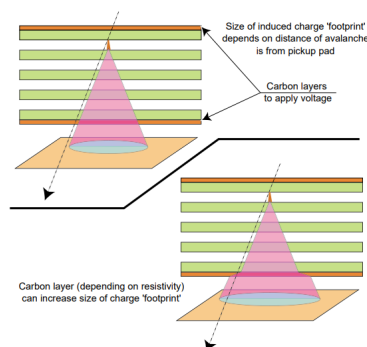
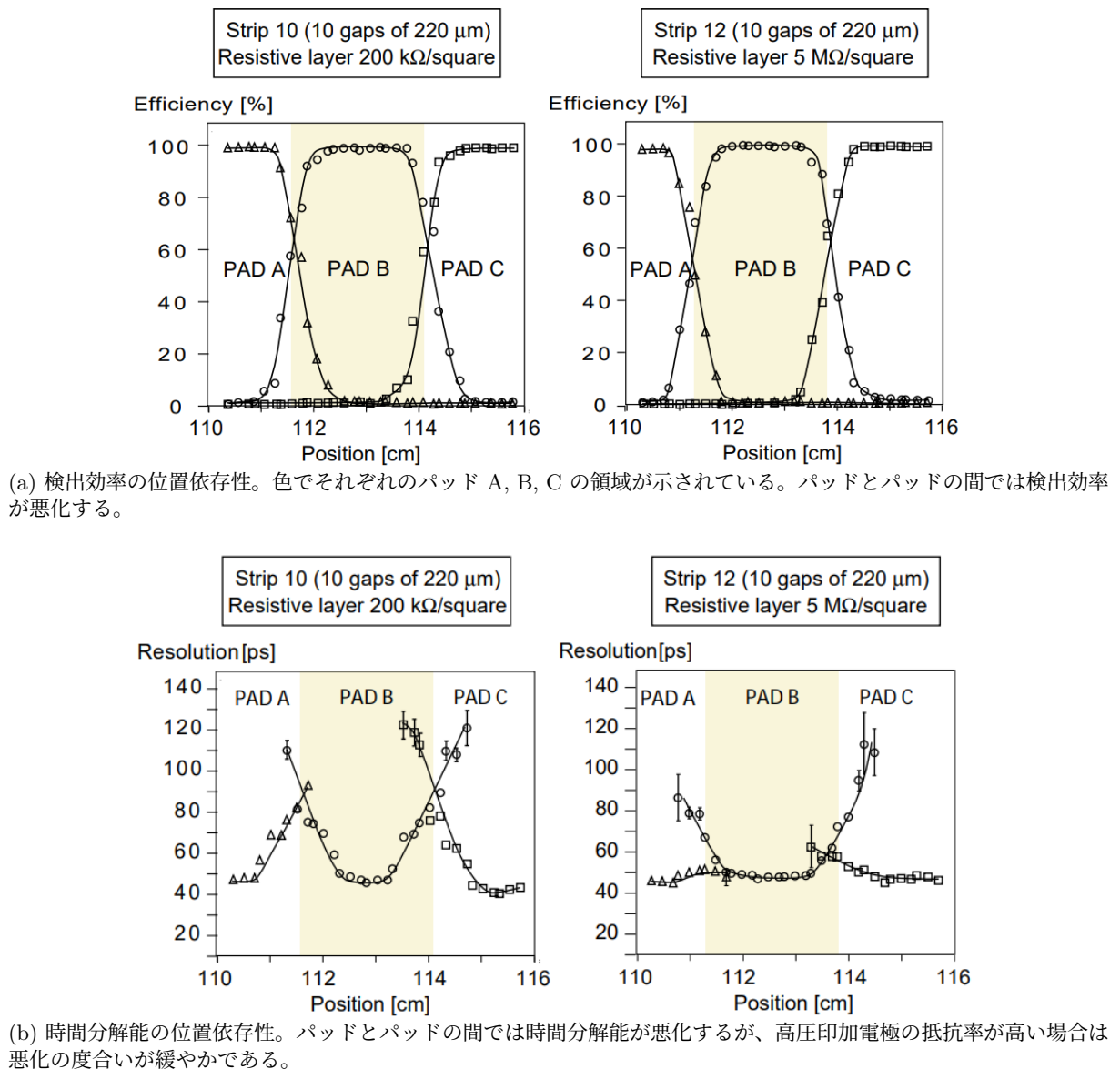


図 3.1: 高圧印加電極で誘起電荷が拡散される様子を表した概念図 [23]。

また、ALICE グループの Technical Design Report では、高圧印加電極の抵抗率によって読み出しパッド間の時間分解能の悪化の度合いが変化することが報告されている。一般に、読み出しパッドと読み出しパッドの間の絶縁体しか存在しない領域付近を粒子が通過した際、誘起される電荷は一部が片方のパッドに、一部がもう一方のパッドに分散されるため、パフォーマンスの低下が起こりうる。図 3.2a は、高圧印加電極の抵抗率が $200 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ と $5 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$ の 2 パターンについて、パッド間 (色分けされた領域の境目) で検出効率が下がる様子を比較している。検出効率の振る舞いは抵抗率の違いで大きくは変わらず、いずれの場合も、隣接するパッドの片方にのみ着目した場合の検出効率は 60 % ほどに悪化している。図 3.2b は、同じく 2 パターンの抵抗率の電極について、時間分解能を比較している。時間分解能では抵抗率の違いで大きな差異が見られた。 $200 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ の電極 (左図) では、パッド中央では 50 ps 程度あった時間分解能が、パッド間の領域では 80 ps 程度にまで悪化している。一方、 $5 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$ の電極 (右図) の場合、パッド間の領域であっても 60 ps 程度に悪化するにとどまっている。したがって、低い抵抗率の電極では電荷広がりが大きくなり、隣接する読み出しパッド間で電荷を共有することで時間分解能が大きく悪化してしまうが、高い抵抗率の電極ではその悪化を抑えることができることが示されている。

図 3.2: 読み出しパッド間での MRPC の性能 [23]



3.1.3 高圧印加電極への要求

高圧印加電極を作成するにあたり、導電性素材の種類、塗布の形態、粘着性の有無、厚みなど、いくつかの選択肢が存在する。導電性素材の種類では、コロイド状のカーボンをアクリル性の媒質に分散させたコーティングなどが世界的に使われている。塗布形態としては、世界で広く採用されている高抵抗板 (ガラス) に直接塗布する形態の他、日本のグループがこれまで採用してきた高抵抗粘着テープの形態などがある。また、本研究では新しくフィルム塗布の形態を試した。これはポリエステル (PET/マイラー) フィルムやポリイミドフィルムに導電性塗料を塗布する形態である。粘着性はない。塗工膜の膜厚は表面抵抗率に影響する。基本的に導電性塗料が厚く塗られてるほど抵抗率は下がる。また、厚みは誘起される電荷の大きさにも影響する。

以上を踏まえ、我々は高圧印加電極に対して以下の要件を求めることとした。

- 適度な抵抗率

一般的に好ましいとされる $10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ を目安とし、MRPC の動作に問題を生じない表面抵抗率を持つ。

- 大型化や実装を考慮した一様性・安定性

大面積の MRPC を製作する場合でも、塗布や貼り付けによるばらつきが少なく、安定して所望の抵抗値を得られる。

- 入手性と量産性

検出器を多数製作・運用するため、大量生産が可能で、継続的かつ安定的に供給される素材である。

3.2 従来日本グループが使用してきた電極：T-9188

MARQ 実験用に限らず日本における MRPC 開発では、EEEC 社製の高抵抗粘着テープ T-9188 が使用されてきた。T-9188 は $10^6 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ 程度 (ロットによってばらつきあり) の表面抵抗率を持ち、カーボンを含有した両面粘着テープである。LEPS2 実験、BGOegg 実験などで使われている実機 MRPC において安定した動作実績が得られていたものの、現在は生産が停止しており、在庫も限られている。MARQ 実験用 MRPC の将来的な大規模増産や長期運用を考慮すると、継続的かつ安定的に供給できる新素材の開発・探索が不可欠となっている。

3.3 他の実験コラボレーションでの事例

MRPC は、STAR 実験 (RHIC)、ALICE 実験 (LHC)、BESIII 実験 (IHEP)、CBM 実験 (FAIR) など多くの実験コラボレーションでも用いられている。他のコラボレーションと共同で開発しているコラボレーションも存在するが、基本的にはそれぞれのグループがそれぞれの電極素材を開発・使用している。また、海外で開発・使用されている導電性塗料やテープであっても、日本国内での法的規制や輸入手続きの問題から、量産・実装が難しい例がある。たとえば海外メーカー kontaktchemie 社製の Graphit 33 は、Lyon 大学グループによって RPC 電極として実績があるものの、日本への本格的な輸入は法制度上困難であった。本研究では少量のみ譲り受けて小型プロトタイプテストに利用したが、大規模導入は現実的ではない。そのため、国内で安定供給が見込める代替素材の探索が引き続き重要となる。

RPC・MRPC を使用する実験で使われている電極は以下のようにになっている。

- SHiP

SHiP コラボレーションでは MRPC の高圧印加電極として、3.4.2 節で詳述する、コロイド状のカーボンを含んだ水性インク Air-Opaque を使用している。導電性のインクと絶縁性のインクを混ぜ合わせ、エアブラシで成膜することで、約 $10^8 \Omega/\text{cm}^2$ の抵抗率を実現する [25]。

- **CALICE**

高抵抗率のペイントと低抵抗率のペイントを混ぜ、エアブラシで成膜している。抵抗率は $1-5 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ である。[26]

- **MEG II**

MEG II 実験に用いられる RPC では、Diamond Like Carbon (DLC) と呼ばれるアモルファス硬質薄膜を活用している [27]。MEG II 実験では物質量が少なく、高レートにも耐えられる RPC が求められている。そのため、 $50 \mu\text{m}$ の厚みのカプトンフィルムに DLC を塗工して、高圧印加電極かつ高抵抗板として使用するという特殊な構造になっている。DLC による電極の形成には、真空チャンバー内で不活性ガスを導入し、高電圧をかけて放電することで薄膜を形成するスパッタリングの技術が用いられる。表面抵抗率は $10 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$ のオーダーである。

- **CMS**

CMS コラボレーションの RPC では Electrodag 社が提供する導電性のインク (6017SS) と絶縁性インク (PM-404) を混ぜて使うことで高圧印加電極を作成している [28]。

- **CBM/STAR** CBM、STAR 両コラボレーションでは、3.4.2 に詳述する、コロイド状のカーボンを含む中国製のインクを使用している [29]。表面抵抗率は $5 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ である。

- **SoLID**

コロイド状のカーボンを含む液体をガラスにスプレーしている [30]。表面抵抗率は $5 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ である。

3.4 先行研究と国内新候補

3.4.1 先行研究：タニムラ (株) による高抵抗粘着テープの検討

日本国内での代替電極探索の一例として、高抵抗粘着テープを探索した試み [31] がある。この先行研究ではタニムラ株式会社が提供する複数種類のテープ (MK-APT[32]、TW-CPT[33]) に加えて、中興化成工業株式会社製のテープ (ASB-110 [34]、ASB-121[35]) やトラスコ中山株式会社製のテープ (SDT1005 [36]) を比較している。抵抗率や MRPC としての動作可否を宇宙線を用いて評価した結果、MK-APT (約 $10^8 \Omega$ 程度) が唯一有望な候補として残ったとされている (図表や性能比較は文献 [31] 参照)。

しかしその後の更なる試験で、

- 粘着面に触った部分の導電性が容易に失われ、一面に様に電圧を印加することが難しい。
- 大型・アクリルケースのプロトタイプで数時間 HV を印加した際に、暗電流が見られなくなる。(電圧がかからなくなる)

などの課題が見つかった。

3.4.2 海外製候補を含めた探索

我々のグループは 3 年ほど前から代替素材の探索を開始し、当初は海外の実験コラボレーションが使用している素材を導入しようとした。具体的には Badger Air-Brush 社製 Air-Opaque や、中国または韓国で生産されているカーボンインク、Diamond Like Carbon が候補として挙がった。以下に本研究の以前に導入を試みた塗料をまとめる。

SHiP コラボレーションで使用中の Badger Air-Brush 社製 Air-Opaque

Air-Opaque は、もともとイラストレーターや画家向けのアクリルを主体とする水性塗料である。7-01-Air-Opaque:Black と 7-40-Air-Opaque:Chrome Oxide Green を black : green = 7 : 3 の割合で混合することで目的の導電性を得る。Laboratory of Instrumentation and Experimental Particle Physics (LIP) のグループが SHiP コラボレーションの MRPC に実際に使用した実績があるが、日本国内で使用するためには塗料を輸入する必要がある。塗布は主にエアブラシやスプレーガンで行い、乾燥には特別な熱処理は不要である。

過去、実際にアメリカの通販サイトを經由して日本へ輸入し、ガラス基板に試験塗布を行ったところ、高圧印加時に暗電流が観測されなかった。高電圧を印加できなかったとみられる。また、この塗料には品質ばらつきがあり熟練技を必要とするという問題があることが分かった。同社製の副剤には、そもそも含有されるカーボン濃度にバラつきがあり、7 : 3 の混合比でも毎回同じ抵抗率が得られる保証はない。LIP のグループからも、「塗布のたびに抵抗率を測定し、望ましい値になるよう調整が必要」とのアドバイスを得た。

以上のように、1) 外国からの原液輸入が必要、2) 品質のばらつきが大きい、3) 塗工に高度な技能が必要——などの理由から、日本のグループでの本格採用は見送りとなった。海外グループ (LIP) では一定の成功例が報告されているが、その成功には熟練した技術と多くの試行が必要と推測される。

CBM/STAR コラボレーションで使用中の中国製カーボンインク

CBM、STAR 両コラボレーションでは、中国製のカーボンを含有したインクが使用されている。日本への輸入を試みたが、法的制限から液体での輸入が不可であり、日本での使用は困難と判明した。

CMS コラボレーションで使用中の韓国製カーボンインク

CMS コラボレーションでは、韓国で製作のカーボン含有インクが使用されている。このインクは価格は安い、韓国語でのみ注文を受け付けておりコミュニケーションコストが高い。これまでは韓国の大学の教授が仲介を受け持っていたが、その教授も定年で退職が近く、また高齢の職人が単独で生産しているため将来的な供給への不安もある。

Diamond Like Carbon

MEG II 実験の RPC では Diamond Like Carbon (DLC) が使用されている [27]。DLC は価格が高価であるうえ、塗布部にカプトンテープを貼って剥がすだけで塗膜が剥離してしまうなど、十分な強度を有しないという問題点がある。また、日本で加工可能なサイズは最大 1 m であり、MARQ スペクトロメーターに必要な ~ 1.8 m の長さに届かないこともあり、採用は見送った。

これまでの電極探索のまとめ

本研究の以前に検討した導電塗料としては、SHiP コラボレーションが使用している Air-Opaque、CBM/STAR コラボレーションが使用している中国製カーボンインク、CMS コラボレーションが使用している韓国製カーボンインク、Diamond Like Carbon といった候補がある。しかし、いずれも大量・継続的な供給や品質の安定確保が難しく、大面積化を視野に入れた MRPC 電極として利用するには大きな課題が残る。

3.4.3 本研究で注目した新候補

本研究では、海外グループで実績のある塗料の使用を引き続き考慮しつつ、国内企業が提供する導電性塗料にまで探索の幅を広げることとした。テープではなくガラスやフィルムに塗布する塗料に着目した点が本研究の特色である。以下に挙げる塗料をそれぞれガラスやフィルムに塗布して高圧印加電極を作成し、小型および大型 MRPC プロトタイプでの評価を実施した。

Badger Air-Brush 社製 Air-Opaque

3.4.2 節でも述べたように、Air-Opaque はイラストレーターや画家向けのアクリルを主体とする水性塗料である。過去にアメリカの小売店から原液を輸入してハンドスプレーガンによる電極の作成を試みたが、高圧を印加することができなかった。本研究では、その際に余った未使用のストックを用いて、塗工の方法を変えて再度電極製作に挑戦した。その際には抵抗率が $10^{10} \Omega/\text{cm}^2$ と非常に高く、MRPC の高圧印加電極としては機能しなかった。

Kontakt Chemie 社製 Graphit 33

Graphit 33 [37] は、欧州を中心に電子工作や実験用途で用いられている電気伝導性塗料で、微細なコロイド状グラファイト粒子を有機バインダーと特殊な溶剤で分散したものである。塗布後に乾燥すると、プラスチック、木材、ガラス、セラミックスなどの非導電性素材の表面に、比較的安定した導電膜を形成できる。スプレーで手軽に導電膜を形成できるという特徴がある。塗布後は自然乾燥のほか、 90°C 程度で加熱などの処理を施す必要がある。

Lyon 大学のグループが、従来使用していた韓国製の塗料の代替として、Graphit 33 を用いることを検討中である。MRPC の高圧印加電極として用いる際には、同社製のアクリル系絶縁塗料 Plastic 70 [38] と、おおよそ Graphit 33 : Plastic 70 = 6 : 4 の割合で混合することで目的の抵抗率を得る。さらに、シルクスクリーン技術を用いて基材に塗布しており、これにより塗膜の均一性を高め、ある程度の量産性を確保している。海外グループで実績のある塗料として、本研究では日本への輸入を試みる段階から検討を開始した。

コルコート (株) CS シリーズ

CS シリーズはコルコート株式会社が開発・販売する導電性塗料である。一般には剥離帯電防止などの用途に用いられる。導電性を担うナノカーボンが分散された、ポリシロキサンを主成分とする非粘着性の塗料である。CS-6301、CS-5302 など、カーボンの種類や濃度、溶媒の種類が異なるラインナップが存在する。各種フィルムやプラスチック、ガラスに塗布が可能で、単一の液として提供されるので 2 液を混ぜ合わせるなどの工程は必要ない。ハンドスプレーガンによる手での塗布、マイクログラビアによるロール to ロールでの機械塗布などに対応している。塗布後には 125°C 程度で約 1 分の乾燥が必要である。メーカー公称の表面抵抗率は CS-6301 が $10^7 - 10^8 \Omega/\text{cm}^2$ 、CS-6301 が $10^5 - 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ である。

関西ポリマー (株) KP シリーズ

KP-8348-1、KP-K2929-1 は関西ポリマー株式会社が販売する導電性フッ素樹脂コーティング [39] である。帯電防止用途に半導体関連やプラントなどで幅広く使われる。通常は絶縁性のフッ素樹脂にカーボンを混ぜることで導電性を持たせている。KP-8348-1 は黒色不透明の塗料でガラスへの塗布が可能である。主成分である PTFE 樹脂とエポキシ樹脂にカーボンが含まれており、体積抵抗値で $10^6 \Omega\text{cm}$ 以下の導電性を有する。耐熱温度は 160°C 、主に滑り用途で使用されている。ハンドスプレーガンで塗布後、 200°C で焼成する。KP-K2919-1 は無色透明の塗料でフィルムへの塗布が可能である。ロールを巻き取りながらの

コーティング・焼成は難しく、フィルム一枚一枚にハンドスプレーガンで塗布する形となる。参考表面抵抗値は $10^8 \sim 10^9 \Omega$ である。

なお、関西ポリマー社保有の焼成炉のうち、最大のものが扉式で $3000 \times 36000 \times h2000 \text{ mm}$ であり、塗布可能なサイズもこれに制限される。MARQ スペクトロメーター用 MRPC のサイズは 2000 mm を超えないため、十分である。

信越ポリマー (株) セプルジーダ

セプルジーダは信越ポリマー株式会社が開発するポリチオフェン系導電性ポリマーである [40]。Intrinsically conductive polymer の一種である PEDOT-PSS が主成分で、ポリマー自身が導電性を持つ点が今回検討した他の塗料との大きな違いである。無色透明の塗料であり、各種プラスチックやガラスへの塗工が可能である。低い抵抗率 ($70 \Omega/\text{cm}^2$) から高い抵抗率 ($\sim 10^{11} \Omega/\text{cm}^2$) まで表面抵抗率の幅広い調整が可能である。手作業のバーコート塗工や、ロール to ロールの機械塗布などに対応している。

3.4.4 塗工方法によるメリット・デメリット

新たな電極素材を導入する際には、どの基材に塗布するかも重要である。本研究では、「フィルム塗布」「ガラス塗布」の2つを主な選択肢とし、それぞれの長所・短所を考慮した。

ガラス塗布

ガラス塗布は、塗料をガラスに塗布する形態のことである。高圧印加電極である塗工膜とガラスがよく密着・一体化しているため、電極とガラスの接触を強固にする追加的な手順は必要なく、検出器の組み立てが簡潔になる。一方、ガラス一枚一枚に塗工が必要であり、塗工業者との間の輸送や塗工作业時の持ち運びでガラスを破損する可能性が上がる。手作業で塗布することになるので、ガラスピースごとに抵抗率が大きく異なるなど、大量生産時の品質のばらつきも大きくなる。

フィルム塗布

フィルム塗布は、塗料をマイラーなどのフィルムに塗布する形態のことである。高抵抗板としてのガラスと高圧印加電極としてのフィルムを独立させる方式で、ガラスの破損のリスクが減る。また、塗料によっては機械塗工が可能であり、 100 m 長のフィルムに短時間で塗工することもできる。塗工時の膜厚設定などを指定でき、品質の均一性・再現性が手塗に比べると高い。

3.5 作成した高圧印加電極 (第一弾)

3.5.1 設計方針と主な改良点

第一弾の試作では、海外で (M)RPC の高圧印加電極として使用実績のある塗料 (Air-Opaque、Graphit 33) および実績はなく今回初試験の日本製塗料 (CS-6301、KP-8348-1、セプルジーダ) を、ガラスまたはフィルムに塗布して高圧印加電極を製作した。MRPC に適した抵抗率 ($10^5 \sim 10^7 \Omega/\text{cm}^2$) を実現できるか確認することが主要な目的である。

また、本試作ではフィルム塗布の電極を初めて導入した点が大きな特徴である。第 3.4.4 節でも触れたとおり、フィルム塗布は量産への道筋が比較的立てやすい。そのため、本研究ではガラス塗布とフィルム塗布を並行して評価することで、将来的なマスプロダクションの際の利便性も考慮しつつ新電極の探索を行った。

3.5.2 電極の作成方法

第一弾では、次の 6 種類の電極素材を試作した。いずれもおおよそ 200 mm × 200 mm 程度の大きさである。電極の作成 (ガラスやフィルムへの導電性塗料の塗布) は外部に依頼し、大学で表面抵抗率を測定した。表面抵抗率の測定には VESSEL 社の表面抵抗測定器 [41] を用いた。

● Air-Opaque

SHiP コラボレーションで使用中の Air-Opaque はイラストレーター向け水性塗料である。海外製ではあるが、アメリカの小売店を介してオンラインでの購入が可能である。本研究では、以前購入して試験した際に余ったストックを使用した。本研究以前の試験では大学内でハンドスプレーガンによる塗布を行ったが、本研究では、様々な塗布技術・設備を持つ中本パックス (株) に塗工を依頼した。ロール to ロールでの機械塗工も可能だが、小サイズのサンプルのためバーコート塗工でフィルムに塗布した (図 3.5f)。7-01-Air-Opaque:Black と 7-40-Air-Opaque:Chrome Oxide Green の混合割合は black : green = 7 : 3 とし、塗布の前に抵抗率が目的の値になっているかは確認しなかった。190 mm × 190 mm に切り出し使用した。表面抵抗率は $5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$ で、マイラーフィルム自体の抵抗率と変わらない結果となった。

なお、バーコート塗工とは、図 3.3 に示すように、バーコーターと呼ばれるロッドを用いて手作業で薄膜を形成する手法である。バーコーターはワイヤーが巻き付けられたロッドである。塗工面に液を垂らし、バーコーターで引き延ばす。巻きつけられたワイヤーの隙間それぞれに同じ量の液が保持されることで、均一な厚みの膜を成形できる。ワイヤーの径を変化させることで液を基材に置いていく量が変化し、膜厚をコントロールできる。バーコーターによる塗布は手作業ではあるが、メカニカルな原理で塗料の量が決められるため膜厚の均一性は良い。

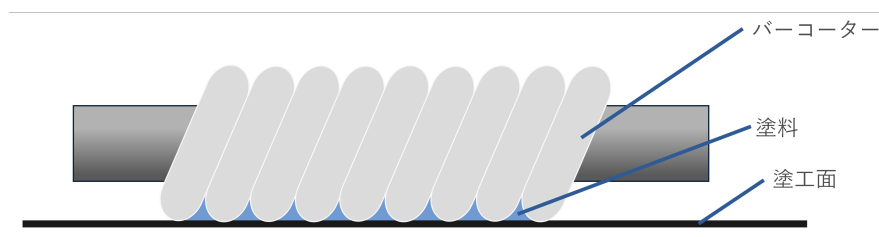


図 3.3: バーコーターの仕組み。紙面に垂直な方向にロッドを引いて塗料を引き延ばす。

● Graphit 33

Graphit 33 は海外製の塗料で、Lyon 大学で使用実績がある。液体である Graphit 33 をそのまま輸入することはできなかった。Lyon 大学のグループがあらかじめマイラーフィルム上に塗布したもの (図 3.5a) を少量譲り受けることができた。塗工にはインクローラーを用いており、フィルムの向こう側が透過して見える領域と黒く不透明になっている部分があるなど、塗りムラが目視で確認できた。実測抵抗率は $2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ を確認している。輸入の問題があることが分かったため、日本での MRPC 製作に用いることは難しいが、本研究で試験する他の電極は今回が初試験もしくは過去に動作しなかったものであるため、あくまで参考として用意した。

● KP-8348-1

KP-8348-1 は関西ポリマー株式会社が販売する日本製の導電性フッ素樹脂コーティングである。販売元である関西ポリマー (株) が、スプレーガンを用いた手作業でガラスに塗布した。200 mm × 200 mm のガラスを大学から関西ポリマーに輸送し、完成したものを再度輸送で受け取った。塗布領域は $200 \times 200 \text{ mm}^2$ のガラスの中央 $180 \times 180 \text{ mm}^2$ である。図 3.5b に KP-8348-1 が塗布されたガラスの外観を示す。表面抵抗率は $\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$ であった。

- **CS-6301 (ガラス塗布)**

CS-6301 はコルコート社製の導電性無機塗料である。ガラス・フィルムの両方に塗布できるため、両サンプルを用意した。コルコートは塗料の開発・販売を行うが塗布の技術・設備は有していない。そこでガラス塗布のサンプルは、フロロコート株式会社に依頼し、スプレーガンを用いた手作業によってガラスの上に塗布した。抵抗率を測りながら $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ オーダーになるまで数回、スプレーによる吹き付けと 200°C での焼成を繰り返して作成した。図 3.5c 塗布後のガラスピースを示す。得られた表面抵抗率は $\sim 4 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ であった。

- **CS-6301 (フィルム塗布)**

ガラスとフィルムの両方に塗布できる CS-6301 をフィルムに塗布したサンプルが図 3.5e である。株式会社ラボが過去にマイクログラビア塗工機でフィルムに塗布したサンプルを譲り受けた。190 mm × 190 mm に切り出して使用した。

なお、マイクログラビア塗工とは、図 3.4 に示すような機械を使った塗工方法である。液溜めに塗料が溜められており、基材のロールを巻き取りながらグラビアロールが塗料を塗っていく。余分な塗料はドクターブレードがそぎ落とすことで一定の膜厚で塗料が塗られる。グラビアロールには溝が掘っており、その線数を変えることやロールの回転数を変えることで膜厚の調整が可能である。

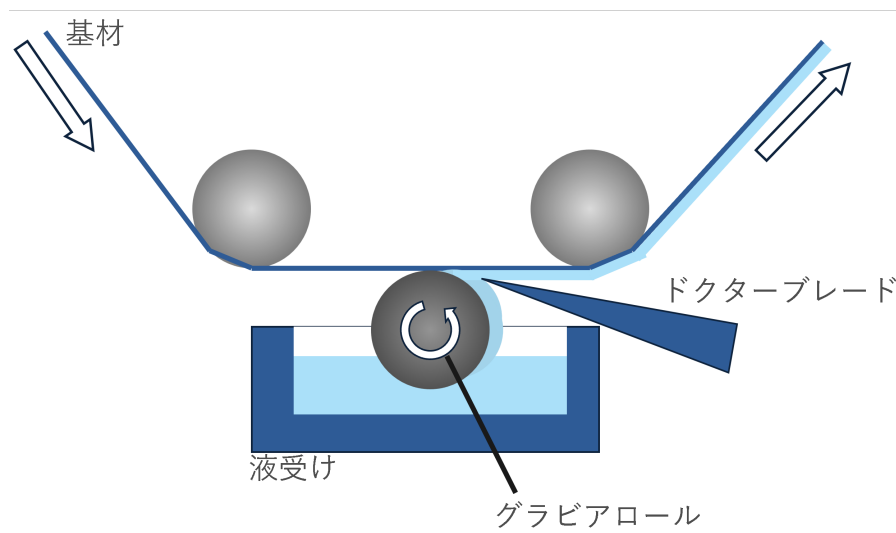


図 3.4: マイクログラビア塗工の仕組み。液溜めに塗料が溜められており、基材のロールを巻き取りながらグラビアロールが塗料を塗っていく。余分な塗料はドクターブレードがそぎ落とす。

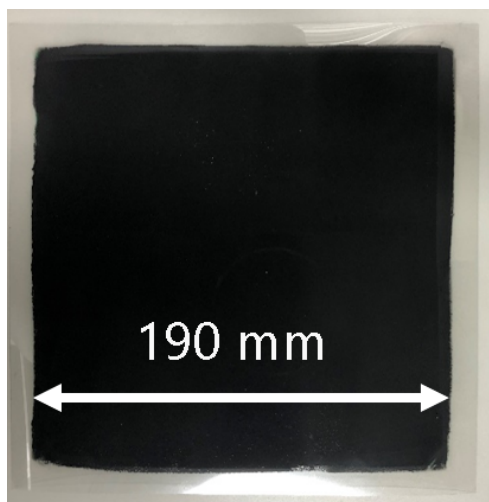
- **セブルジーダ**

信越ポリマー (株) が提供する導電性ポリマーである。中本パックス (株) に原液の調達と塗工を依頼した。バーコート塗工によりフィルムに塗布した (図 3.5d)。フィルムは 190 mm × 190 mm に切り出し使用した。表面抵抗率としてはおよそ $6 \times 10^5 \Omega/\text{cm}^2$ が得られた。

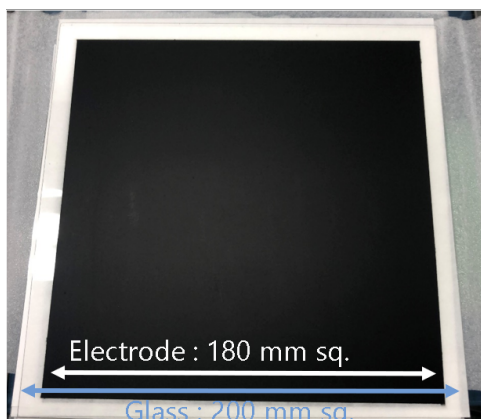
3.5.3 第一弾小型試作の概要整理

第一弾の高圧印加電極作成では、MRPC に適した抵抗率 ($10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$) を実現できるか確認することを目的に、実績のある海外製の塗料と初試験の日本製の塗料を使用した。実際の塗布作業は外部の組織に依頼して行った。表 3.1 に第一弾で作成した高圧印加電極を示す。

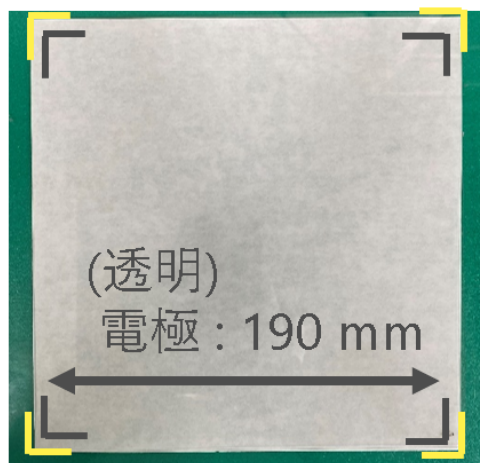
Air-Opaque は SHiP コラボレーションで使用されている、カーボンを含んだ海外製塗料である。液体の状態で輸入できるが、国内で生産されている塗料に比べると入手性は悪い。今回は以前入手した際のストッ



(a) Graphite 33 が塗布されたフィルム。



(b) KP-8348-1 が塗布されたガラス。

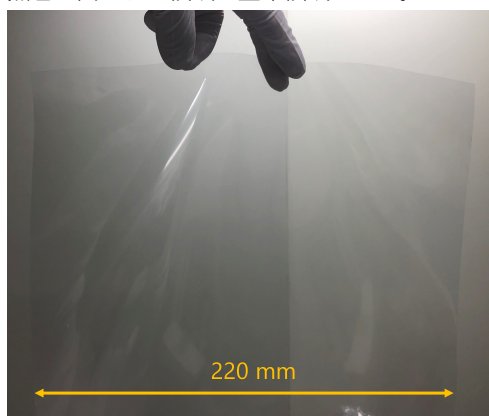


ガラス: 200 mm

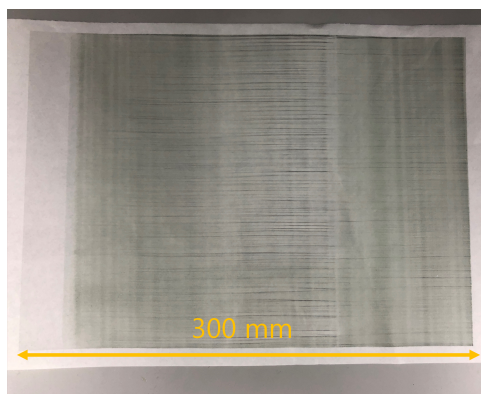
(c) CS-6301 が塗布されたガラス。
黒色で囲われた領域が塗布領域である。



(d) セプルジーダが塗布されたフィルム。
ガスタイト用の大きなフィルムの中央にセプルジーダが塗布された小さいフィルムを固定している。



(e) CS-6301 が塗布されたフィルム。
200 mm 四方に切り出して使用した。



(f) Air-Opaque が塗布されたフィルム。
200 mm 四方に切り出して使用した。

図 3.5: 第一弾で使用した電極の外見

クを利用し、比較的膜厚の均一性が良いと期待されるバーコート塗工でフィルムの上に塗布した。抵抗率は $5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$ となり、導電性を与えることはできなかった。

同じく海外製の Graphit 33 は Lyon 大学のグループが今後使用を検討している、カーボンを含んだ塗料である。こちらは液体で入手できないことが判明した。本研究で試験する他の電極は今回が初試験もしくは過去に動作しなかったものであるため、あくまで参考として用意した。Lyon 大学から入手した塗布済みサンプルの抵抗率は $2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ と、MRPC の高圧印加電極として望ましい値であった。

KP-8348-1 はカーボンを含んだ塗料であり、日本製のため入手性はよい。スプレーガンによる手作業でガラスに塗布した。抵抗率は $2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$ と、目安である $10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ よりも低い結果となった。

CS-6301 もカーボンが含まれた日本製の塗料であり、入手性は良い。ガラスとフィルムの両方に塗布可能であるため、両方の基材に塗布した。ガラス塗布はスプレーガンを用いた手作業で作成した。フィルム塗布の方は過去にマイクログラビア塗工で作成されたサンプルを譲り受けた。抵抗率はいずれも $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ で、MRPC の高圧印加電極として望ましい値であった。

セプルジータは日本製の導電性ポリマーである。入手性は良い。今試作で成功すれば機械塗工に移行することを念頭に、小さい試作のためバーコート塗工でフィルムに塗布した。抵抗率は $6 \times 10^5 \Omega/\text{cm}^2$ で、MRPC の高圧印加電極として望ましい値であった。

Air-Opaque を除く 4 種類の塗料・5 種類の電極で概ね望ましい抵抗率を得ることができた。製作後は、各高圧印加電極を用いて MRPC を組み立て、動作試験を行った。

表 3.1: 第一弾で作成した高圧印加電極の仕様一覧。

塗料	入手性	塗布形態	塗布方法	抵抗率
Air-Opaque	△	フィルム塗布	バーコーターによる手作業	$5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$
Graphit 33	×	フィルム塗布	インクローラーによる手作業	$2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$
KP-8348-1	○	ガラス塗布	スプレーガンによる手作業	$2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
CS-6301 (1)	○	ガラス塗布	スプレーガンによる手作業	$4 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$
CS-6301 (2)	○	フィルム塗布	マイクログラビア機による機械塗工	$3 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$
セプルジータ	○	フィルム塗布	バーコーターによる手作業	$6 \times 10^5 \Omega/\text{cm}^2$

3.6 作成した高圧印加電極 (第二弾)

3.6.1 製作の狙いと概要

第一弾 (小型プロトタイプ) で基礎的な動作を確認した電極素材を中心に、より大面積に塗料を塗った高圧印加電極を作成した。これは、大型化しても高圧を印加可能であるかを確かめることに加え、量産方法の確立や抵抗率の均一性・再現性を確かめることを目的としている。

第二弾で製作した電極は関西ポリマー (株) から 2 種類 (KP-8348-1, KP-K2919-1)、コルコート (株) から 2 種類 (CS-6301, CS-5302) である。KP-8348-1、CS-6301 が第一弾でも試験した電極、KP-K2919-1、CS-5302 は第二弾で初めて試験する電極である。なお、関西ポリマー (株) 製 KP-K2919-1 については、当初のメーカー情報から想定される表面抵抗値がやや高すぎる可能性があり、大面積化しても十分な動作が得られない懸念があった。そこで、本研究では KP-K2919-1 のみ小型スケールで試作し、抵抗率や動作を調べる一方、他の電極 (CS シリーズの 2 つ、KP-8348-1) については大型化して性能比較を進めている。

3.6.2 電極の作成方法

CS-6301, CS-5302

第一弾で CS-6301 が MRPC の高圧印加電極として問題なく動作したことから、第二弾では CS-6301 と CS-5302 の大面積化を試みた。CS-6301 と CS-5302 は含まれるカーボンの種類や濃度が異なる。両塗料ともガラスとフィルムの両方に塗布が可能であり、第一弾の試験ではガラス塗布の電極もフィルム塗布の電極も問題ない動作を示した。フィルム塗布には量産性や品質の均一性、再現性が高いというメリットがある。そこで、今回は株式会社ラボに依頼し、マイクログラビア塗工機で厚み $50\text{ }\mu\text{m}$ の PET フィルムに塗布した。塗布したフィルムロールの長さは 10 m である。図 3.6 に CS-6301 が塗布されたフィルムロールを示す。

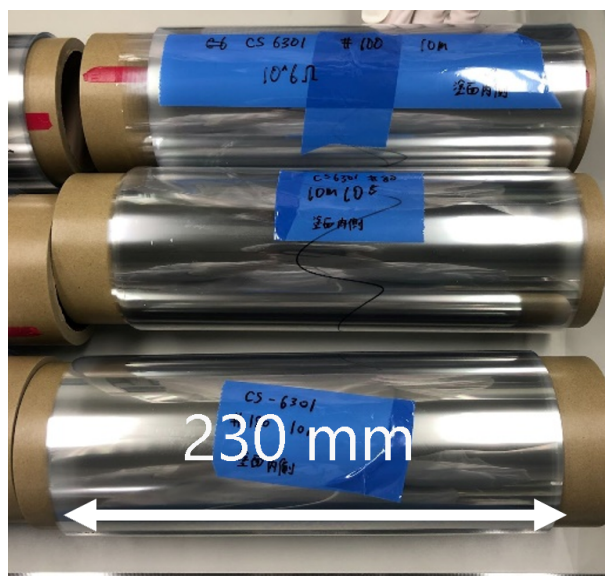


図 3.6: CS-6301 が塗布されたフィルムロール

CS シリーズでは膜厚を調整することで異なる抵抗率を得ることが可能である。マイクログラビア塗工では塗料の膜厚を制御することが可能である。第二弾の製作の際には、両塗料について複数の膜厚で塗工を行い、実際に塗工したサンプルを評価した。表面抵抗率を測定した結果、以下に示す表面抵抗率が得られた。

- CS-6301: $10^5, 10^6, 10^7\text{ }\Omega/\text{cm}^2$ の 3 水準
- CS-5302: $10^4, 10^5, 10^8\text{ }\Omega/\text{cm}^2$ の 3 水準

今後同じ条件で塗工することでこれらの抵抗率を再現できる。このように目標の抵抗率を実現するために必要な膜厚のデータは、本研究以前には十分に整理されていなかった。そのため CS シリーズの抵抗率の再現性は保証されていなかったが、今回の試作で再現性を確認でき、今後大量生産することが現実的となった。

KP-8348-1

第一弾の小型試作で想定よりも低い抵抗率を示しつつも、作成したプロトタイプ MRPC が十分に動作することを確認したため、大面積化を行った。ガラスを送付して関西ポリマー (株) の設備でハンドスプレーガンによる塗工と熱乾燥を行った。塗布領域は $230 \times 940\text{ mm}^2$ のガラスの中央 $220 \times 930\text{ mm}^2$ である。図 3.7 に KP-8348-1 が塗布されたガラスの外観を示す。

ガラスへの直接塗布のため、検出器組み立ての際にフィルムを切り出してガラスと接触させるなどの作業は必要ないが、郵送や塗工の際の破損するリスクや完成品の品質がバラつくリスクがある。実際、今回の塗

工作業時には 8 枚中 2 枚が破損した。作成したピースの抵抗率は 6 枚中 5 枚が $10^4 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダー、1 枚が $10^3 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダーであった。手作業でのガラスへの塗布のため、ガラスの破損リスクが大きく品質のバラつきも大きいことが確認された。

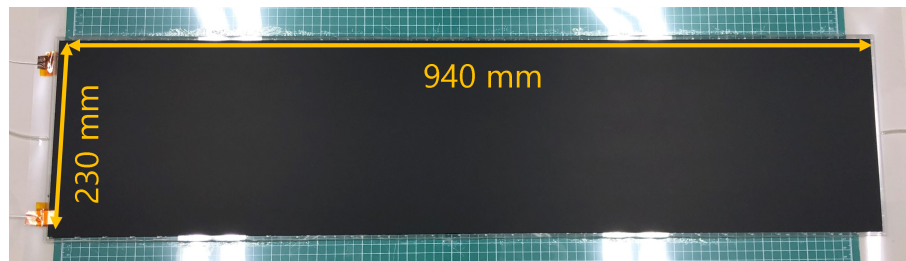


図 3.7: KP-8348-1 が塗布された大型ガラス

KP-K2919-1

フィルム塗布タイプの塗料であり、関西ポリマー (株) 公称の表面抵抗値は $10^8 - 10^9 \Omega$ 程度である。第一弾時点では作成を見送っていたが、KP-8348-1 の表面抵抗率が事前の想定より低かったものの試験に成功したことを受け、新たに小型スケールでの試作を実施し、抵抗率が高い場合でも MRPC として動作できるかを検証した。厚み $75 \mu\text{m}$ の PET フィルムを提供し、関西ポリマー (株) の設備でハンドスプレーガンによる塗工と熱乾燥を行った。実測表面抵抗率は $1 \times 10^8 \Omega/\text{cm}^2$ であった。図 3.8 に KP-K2919-1 が塗布されたフィルムの外観を示す。

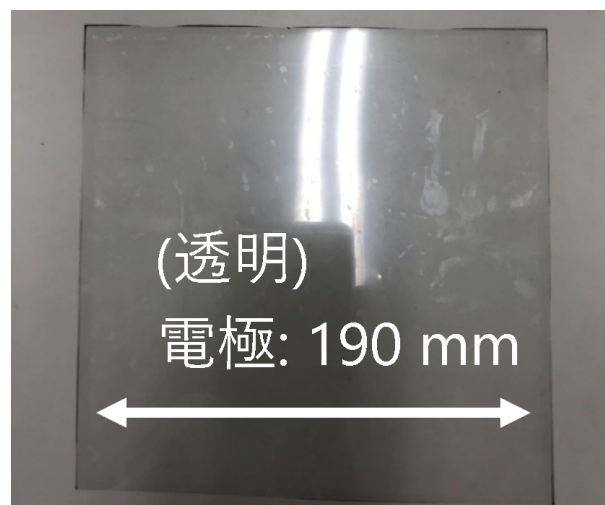


図 3.8: KP-K2919-1 が塗布されたフィルム

3.6.3 大型試作の概要整理

第二弾の大型電極作成では、第一弾の結果を踏まえて大面積化が可能であるかの検証と量産性や抵抗率の均一性・再現性を確認することを主眼に製作を進めた。第二弾で製作した電極の情報を、表 3.2 にまとめた。

CS シリーズはガラス塗布だけでなくフィルム塗布にも対応可能であり、膜厚条件を調整することで $10^4 - 10^8 \Omega/\text{cm}^2$ という広い範囲で抵抗率を調整できることが確認できた。また、マイクログラビア塗工でロール to ロールで塗布することができるため、量産性・均一性・再現性が高いことが分かった。100 mL

程度の少量の液で数十 m の長いロールに塗布が可能である。塗工を依頼する際にはマシンを占有する時間で請求が発生するが、1000 m などの長さでも、準備を含めて数時間で塗工が完了するため費用対効果が大
きいことも判明した。

一方、KP-8348-1 は 940 mm × 230 mm のガラスに塗布した。抵抗率においてはおおむね $10^4 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダーであったが、6 枚中 1 枚 $10^3 \Omega/\text{cm}^2$ のものが確認された。また、ガラスにスプレー塗布する際や郵送中、塗工作業中の破損リスクが高く、実際に 8 枚中 2 枚を破損してしまった。こちらは塗布するガラスの枚数やサイズで大きく金額が変動する。こうした要素は、最終的に量産化や運用の安定性を検討するうえで重要な比較項目となる。

KP-K2919-1 は 200 mm × 200 mm の小型サイズで製作した。フィルムへの塗布が可能な塗料ではあるが、ロール to ロールでの塗布はできないことが担当者とのやり取りで判明した。ハンスプレーガンによるフィルムへの塗布で製作し、抵抗率は $\sim 2 \times 10^8 \Omega/\text{cm}^2$ であった。

表 3.2: 第二弾で作成した高圧印加電極の仕様一覧

電極	塗布形態	塗布方法	抵抗率
CS-6301	フィルム塗布	マイクログラビアによる機械塗工	$\sim 1 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$
CS-5302	フィルム塗布	マイクログラビアによる機械塗工	$\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
KP-8348-1	ガラス塗布	スプレーガンによる手作業	$\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
KP-K2919-1	フィルム塗布	スプレーガンによる手作業	$\sim 2 \times 10^8 \Omega/\text{cm}^2$

第4章 電極比較用プロトタイプの製作

作成した新電極候補の比較を行うため、それぞれの候補を高圧印加電極として用いたプロトタイプ MRPC を作成した。第 3 章で説明したとおり、導電性素材をガラスやフィルムに塗布する作業は企業に依頼して行った。MRPC の組み立て・製作は大学にて手作業で行った。

今回、ガスボリュームの構造を改良した。アクリルケースを使わないガスタイト方式、釣り糸に替わるマイラースペーサー、フィルムに塗布された高圧印加電極など、いくつかの点で従来の MRPC 検出器と組み立て方式が異なる。図 4.1 に従来のガスボリュームの構造を、図 4.2 に今回作成したプロトタイプのガスボリュームの構造を示す。従来の構造では、アクリルケースにガラスやスペーサー、高圧印加電極を閉じ込める形になっていた。ガラス部分とアクリルケースは独立しており、固定はされていなかった。また、スペーサーとして釣り糸を使用しており、4.1.2 節で述べるエイジングの懸念もあった。高圧印加電極は高抵抗の粘着テープを使用しており、アクリルケースまたはガラスに貼りつけられていた。新しい構造では、天面と底面をフィルムで覆い、側面はガラスごと接着剤で塗り固めることでガスタイトしている。ガラスとガスタイトが一体化し、機械的な強度が上がっている。スペーサーには両面粘着のフィルムを用いている (4.1.2 節)。高圧印加電極はガラスに塗布されているか、フィルムに塗布されたものをガラスに押し付ける形で設置している。高圧印加電極に粘着性はなく、組み立て後に外から圧迫することで電極とガラスの電気的な接触を担保した。

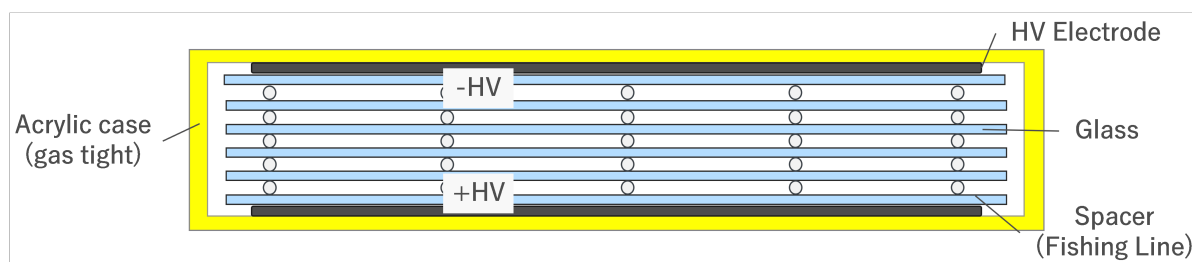


図 4.1: 従来のガスボリュームの構造。アクリルケースの中にガラスなどを入れる形である。また、釣り糸をスペーサーに使っており、スペーサーの断面は丸い。

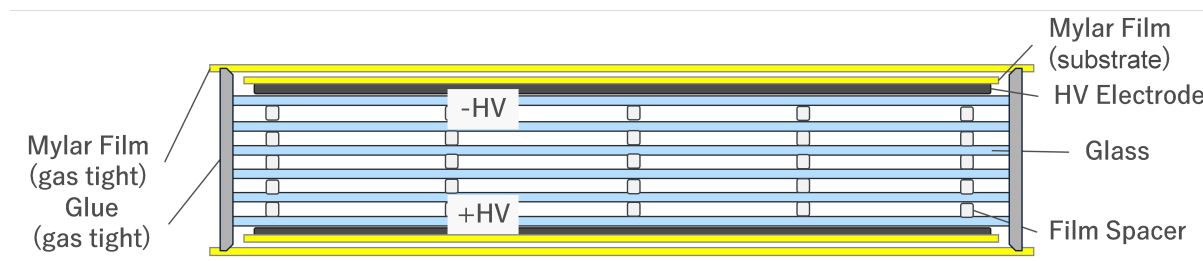


図 4.2: 今回作成したプロトタイプのガスボリュームの構造。天面と底面はフィルムで覆い、側面はガラスごと接着剤でガスタイトしている。また、フィルムスペーサーを使用することでスペーサーの断面が四角い形状になっている。フィルム塗布の場合は、フィルムの塗布面をガラスに接触させる形で配置する。

4.1 材料

この節では MRPC の製作に用いた材料について述べる。

4.1.1 高抵抗プレート

高抵抗プレートには平岡硝子工業のソーダライムガラス、もしくは株式会社ミツル光学研究所のソーダガラスを使用した。ガラスの厚みはいずれも $400\text{ }\mu\text{m}$ で、体積抵抗率は $10^{13}\Omega\text{ m}$ 程度である。本研究の範囲ではガラスによる違いは現れないと考えられる。

4.1.2 スペーサー

スペーサーは導電性が低く、厚みが均一であることが要求される。従来はナイロン製の釣り糸が使用されてきた。我々のグループでは、日本で購入可能な釣り糸を探索し [42]、株式会社サンライン社製のクインスター [43] の 2.5 号 (直径 $260\text{ }\mu\text{m}$) が使用されてきた。しかし CBM コラボレーションの最近の報告で、長時間のオペレーションで釣り糸の周辺にダメージが蓄積することが報告された。これは、図 4.4 に示すように、釣り糸の丸みを帯びた形のためにガラスと釣り糸の間に電場が付近より強くなっており、暗電流が増加しているためだと考えられる。必然的にノイズレートが上昇するため、パフォーマンスにも影響を与える。これを受けて、図 4.5 のような平面的な構造でガラスに密着するスペーサーを導入する動きがある [44]。

図 4.3: 釣り糸スペーサーとマイラースペーサーの比較

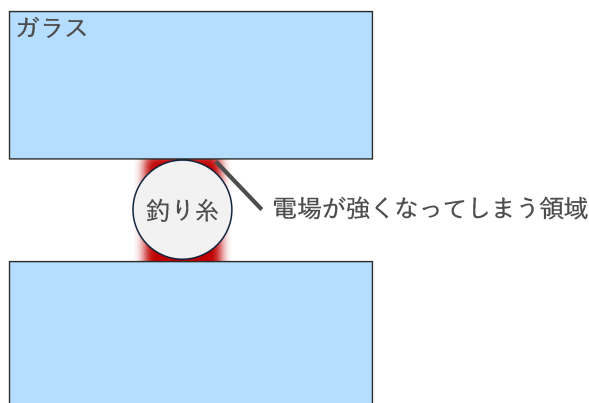


図 4.4: 釣り糸をスペーサーとして使った場合。赤色で示した領域で電場が強くなってしまい、過度な電子雪崩の増幅により経年劣化を生じる。

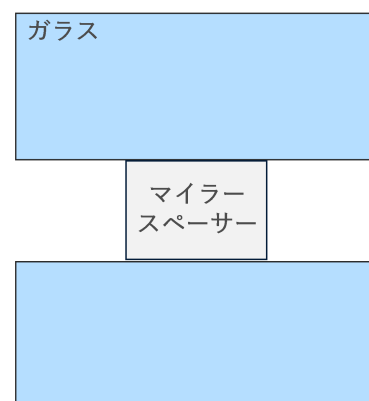


図 4.5: マイラースペーサーを使った場合。均等に電場が張られる。

MARQ 実験用 MRPC はスペクトロメーターの一部として数年以上の期間運転を行う。長期運転によるパフォーマンスの低下は問題になる。そこで我々のグループでも、今回からポリエステルフィルムベースの両面接着型スペーサーを導入した。私たちが使用したポリエステルフィルムスペーサーは、台湾の企業が製作したもので、図 4.6 に示す層構造をしている。厚さは $255\text{ }\mu\text{m}$ に指定した。直径 2 mm の円形に切り出し、図 4.7 のように指定した間隔で並べて台紙に張り付けられた状態で受け取った。使用する際には、通常の両面テープと同様に、片側の台紙を剥がしてガラスに接着した後、もう片側の台紙を剥がして別のガラスを上から置き、ガラスとガラスの間に挟まる形にする。このスペーサーの試験も本研究の付随的な目的である。



図 4.6: ポリエステルフィルムスペーサーの構造。市販のフィルムやテープを組み合わせている。



図 4.7: ポリエステルフィルムスペーサーの外観。青い台紙に直径 2 mm の円形スペーサーが張り付いている。まず白い保護フィルムを剥がして、ガラスにスペーサーを押し付けた後青い台紙も剥がすと、ガラスにスペーサーがくっついて残る。

4.1.3 接着剤

今回製作したプロトタイプではガラスの端面を直接接着剤で塞ぐことでガスタイトをしている。この用途の接着剤として、エポキシ系接着剤アラルダイトラピッドを使用した。アラルダイトラピッドを含むアラルダイトの一部製品は、含有される成分が毒物及び劇物指定令の劇物に新たに指定されたため、販売が終了している。今回は販売終了以前に購入していた分を使用した。ガスタイト用途で使用する接着剤はアラルダイトラピッドである必要はなく、その他のエポキシ系接着剤でも代用は可能だと考えられる。

4.1.4 絶縁体と読み出しストリップ

小型 PCB

第一弾で作成した全てのプロトタイプ、および第二弾の KP-K2919-1 では、ここで説明する小型 PCB を使用した。図 4.8 にサイズと構成を示す。PCB の外寸は 260 mm 四方であり、25 mm 幅のストリップが 7 本備わっている。ストリップとストリップの間のギャップ幅は 1 mm である。図中点線で示す 200 mm 四方の領域にガスボリュームを配置する。また、図 4.9 に読み出しストリップの回路図を示す。7 本中 3 本のストリップの両端にはノイズ軽減を狙ったローパスフィルターが設置されている。残りの 4 本には、両端にインピーダンスマッチング用の $50\ \Omega$ 抵抗がついている。

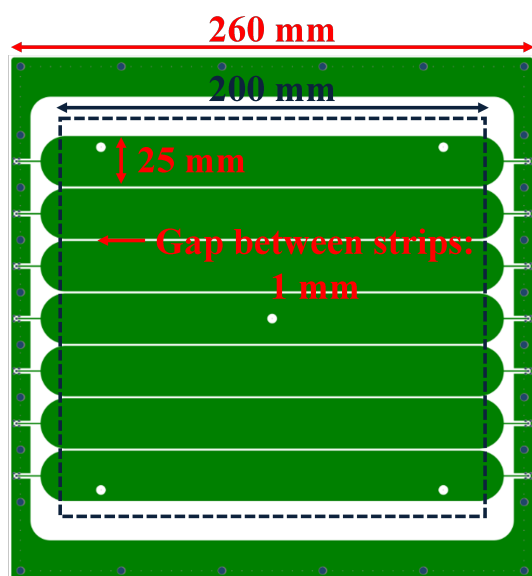


図 4.8: 小型 PCB の設計図

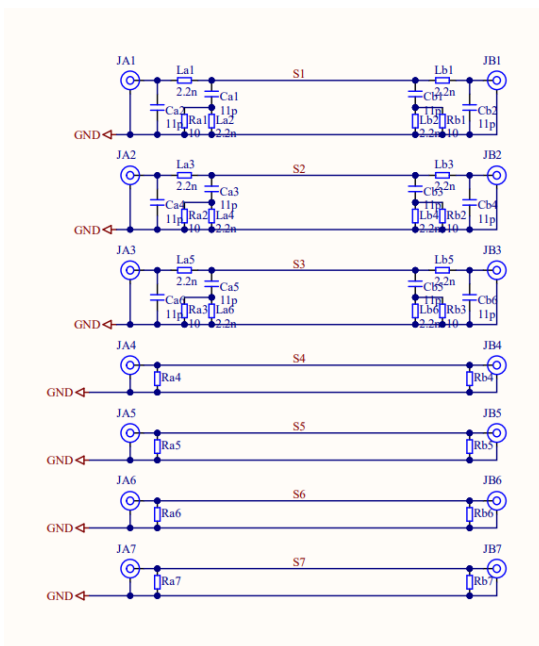


図 4.9: 読み出しストリップの回路図。low-pass filter がついている。

大型 PCB

第二弾で作成した大型プロトタイプでは、フェルミ研究所（アメリカ）の EMPHATIC 実験で使われる MRPC 用にデザインされた読み出し PCB を使用した。EMPHATIC PCB のデザインを図 4.10 に示す。読み出しストリップは 8 本あり、幅が 25.5 mm、隣のストリップと 0.5 mm の間隔をあけて並んでいる。両端のストリップのさらに外側には、端のストリップでノイズが大きいことを軽減する目的で、読み出しには使用されないグラウンド用ストリップが存在する。

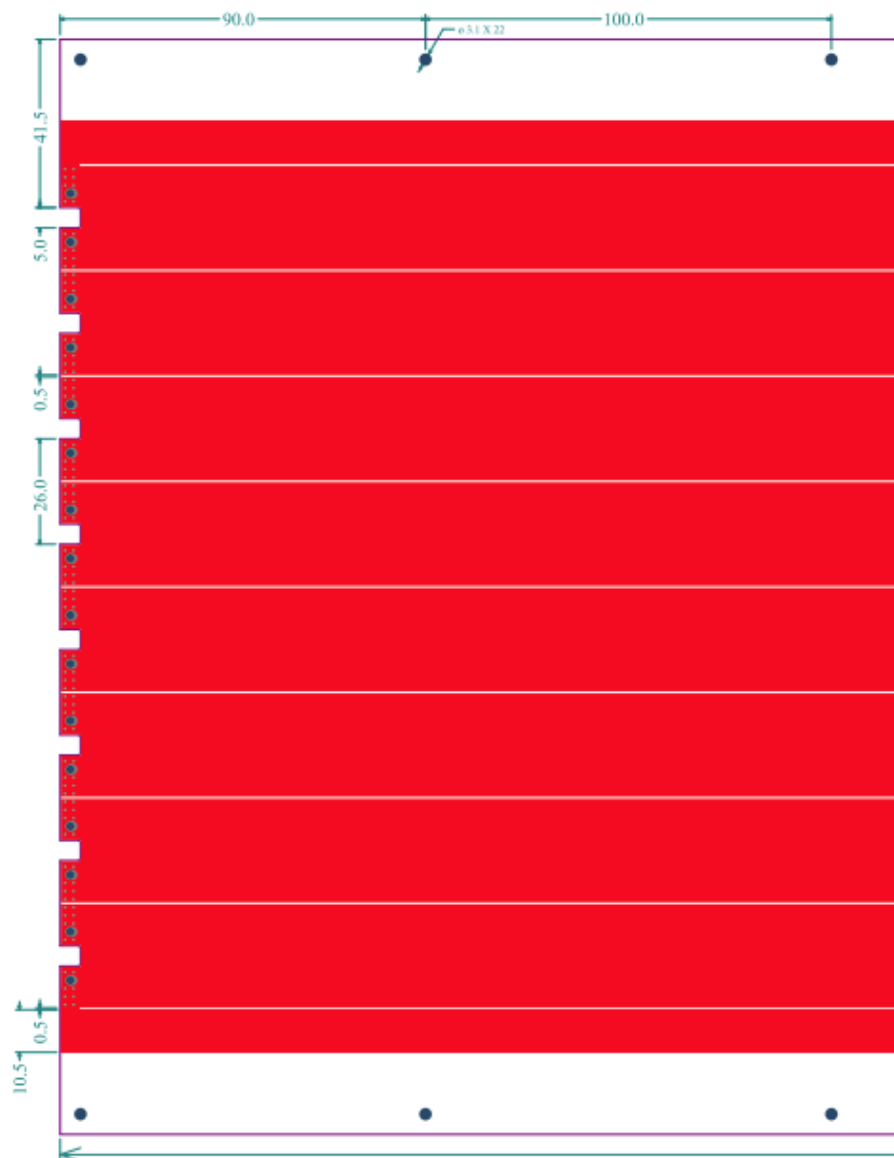


図 4.10: 大型 PCB のカソードのデザイン。端の部分の拡大図。幅 25.5 mm のストリップが 0.5 mm の間隔をあけて 8 本並んでいる。

4.2 組み立ての手順

第一弾と第二弾のプロトタイプของいずれでも、共通して以下の手順で組み立てを行った。

MRPC の組み立ては、ガスギャップ内への塵やホコリの混入を防ぐため、クリーンルームで行った。作業者はクリーンスーツ・手袋・ヘアキャップなどを着用し、ガラスや電極（フィルム）に触れる際はエタノール清掃やエアダスターでの除塵を適宜行う。

なお、本研究で用いる電極には、大きく分けてガラス塗布とフィルム塗布の2種類がある。ガラス塗布の場合、メーカーの塗工設備であらかじめガラス表面へ導電塗料を塗布・乾燥させた状態で受け取る。MRPC に組み込む際は、この塗布ガラスが外側（最表面）に来るよう配置するため、特別な貼り付け作業は不要である。フィルム塗布の場合、コーティングが施されたフィルムを受け取る。コーティング自体に接着成分は含まれず、組み立ての際にはカプトンテープによってガラスに固定し、実験時はフィルムとガラスを押し付ける形で物理的に圧迫し導電面とガラスの接触を確保する。

4.2.1 1 スタック MRPC の場合

1. HV 供給線の取り付け

ガラス塗布・フィルム塗布にかかわらず、高電圧を供給するための共有ラインを各電極に装着する。電極に電圧を供給するための導線の片端を銅テープにはんだ付けし、銅テープを電極テープに貼付する。図 4.11 に実際に銅テープを貼付した状態を示す。

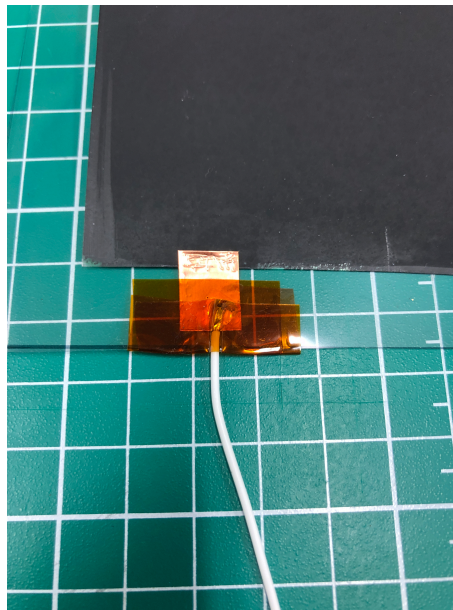


図 4.11: HV 電極に HV 供給線を張り付けた様子

2. ガラスの積み重ね

ガラス 1 枚ごとにエタノールを使って油分や埃を除去する。また、エアダスターで微細なホコリを飛ばし、キズや割れがないかを点検する。

ガスギャップを保持のためにマイラースペーサーを張り付ける (図 4.12)。スペーサーを配置後、保護台紙を外し、2 枚目のガラスを重ねる。2 枚目のガラスにもスペーサーを貼り付け→3 枚目を積み重ね…の作業を 6 枚分繰り返し、1 スタック（5 ギャップ）を形成する。図 4.15 に 5 ギャップ分積み上げたガラスを示す。

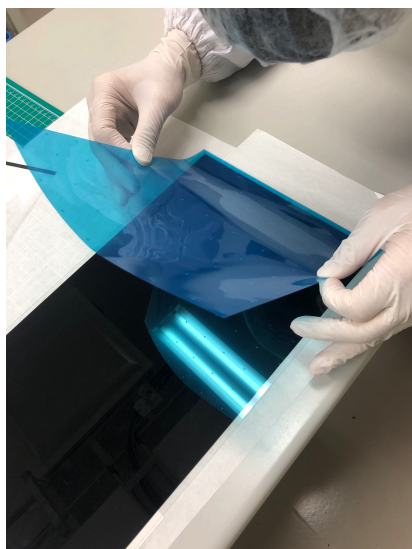


図 4.12: スペースを貼り付けている様子。

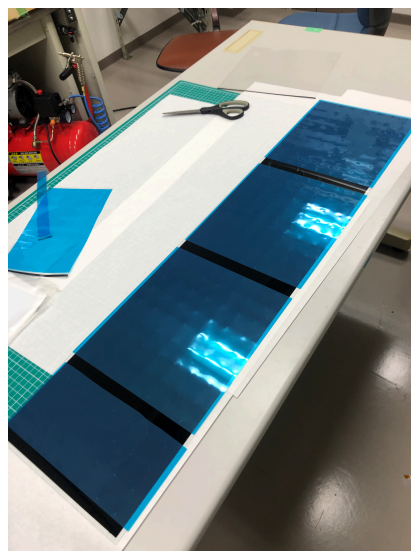


図 4.13: 一枚のガラスにスペーサーを設置完了した図。

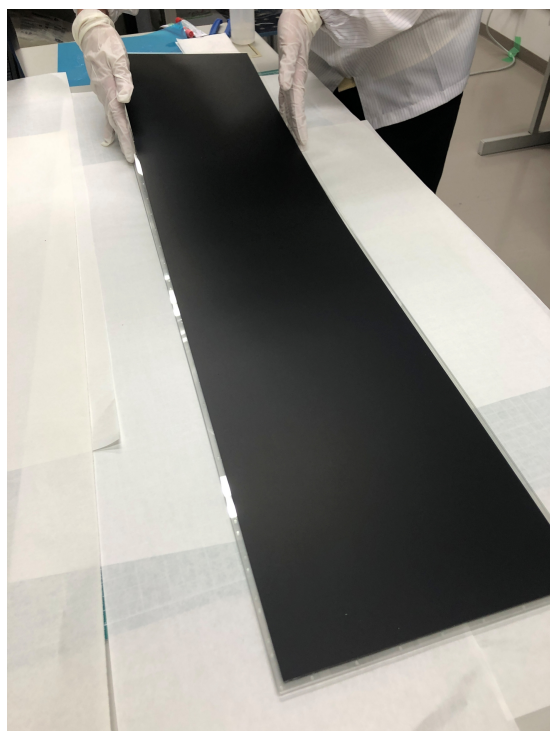


図 4.14: ガラスを積み上げる様子。6 枚目の、電極が塗布されたガラスを積み上げている。



図 4.15: 5 gap 分積み上げたガラス。ガスギャップ内にスペーサーが見える。

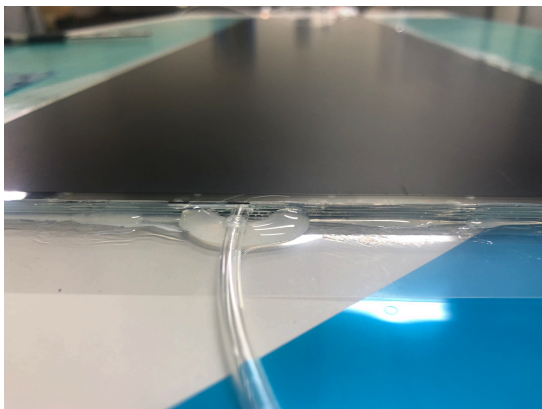


図 4.16: ガスタイトの様子。ガスチューブの部分以外はガラス端の各ギャップに接着剤を流し込んでガスタイトする。

3. 電極配置（フィルム塗布の場合）

ガラス塗布であれば外側ガラスが既に導電面をもつため、この工程は省略する。フィルム塗布の場合、伝導面をガラス側に向けて重ね合わせ、カプトンテープ等で軽くずれないように固定する。

4. ガスタイト処理

積み重ねたガラススタックの上面・下面をガスタイト用フィルムで覆い、側面をアラルダイト（エポキシ系接着剤）で塗り固める。ガラスの層間やフィルムとガラスの合わせ目をアラルダイトで塞ぎ、気密性を確保する。図 4.16 のように、ガラス間の隙間をアラルダイトで埋める。短辺部にはガスの注入口を設け、外径 4 mm・内径 2 mm のチューブを挿し込む。ガスの注入口は接着剤で完全に塞ぐことがないように注意し、全ギャップにガスが行き渡る経路を確保する。

4.2.2 2 スタック MRPC の場合

2 スタック MRPC は、上の要領でガスボリュームを 2 つ作り、それを重ねることで完成する。

1. ガスボリュームの作成

2. ガスボリュームの積み重ね

ガスボリュームと読み出し PCB を重ねる。

3. 読み出し PCB 間のグラウンドの共通化

ノイズの軽減やインピーダンスマッチングによる反射の軽減のため、アノード 1 枚とカソード 2 枚の間のグラウンドを共通化する。図 4.17 に示すように、PCB に用意された穴に銅線を通し、はんだ付けを行う。さらに、図 4.18 のように、各ストリップのグラウンド間にも銅テープを渡し、グラウンドを共通させる。最後に、ノイズ遮蔽用のアルミケースを被せるが、銅テープでアルミケースにグラウンドを落とす。

4.

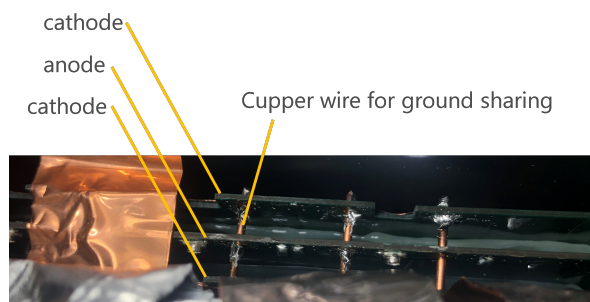


図 4.17: PCB 間でのグラウンド共有の様子

4.3 第一弾: 動作確認のための小型プロトタイプ

第一弾の試作の目的は、小型サイズで製作した 5 塗料 6 種類の新電極候補（Air-Opaque、Graphit 33、KP-8348-1、CS-6301(ガラス塗布またはフィルム塗布)、セプルジーダ）が、それぞれ MRPC の高圧印加電極として動作するかを確かめることである。表 4.1 に第一弾で作成したプロトタイプ MRPC の構成を示す。各電極の作成方法は 3.5.2 節で述べた。Air-Opaque ($5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$) や KP-8348-1 ($2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$) は目安である $10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ に収まっていないが、動作可否や性能に違いが出るのかを確かめるために MRPC を作成した。そのため、用意した高圧印加電極すべてで MRPC を作成したことになる。全電極共通で、200 mm × 200 mm のガラスを用いた 1 スタック・5 ギャップの MRPC を製作した。ガスギャップは 255 μm のフィルムスペーサーを用いて保持した。

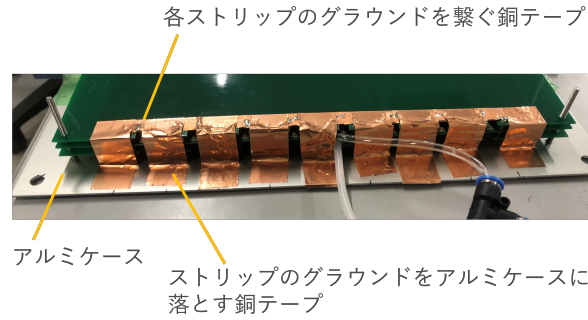


図 4.18: ストリップのグラウンドをアルミケースに落とす様子

表 4.1: 第一弾で作成したプロトタイプの仕様一覧。

塗料	塗布形態	抵抗率	ギャップ構成
Air-Opaque	フィルム塗布	$5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
Graphit 33	フィルム塗布	$2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
KP-8348-1	ガラス塗布	$2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
CS-6301 (1)	ガラス塗布	$4 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
CS-6301 (2)	フィルム塗布	$3 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
セプルジーダ	フィルム塗布	$6 \times 10^5 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$

4.4 第二弾: より詳細な比較のための大型プロトタイプ

第二弾の試作の目的は、第一弾で問題がなかった新電極候補について、大型化しても高圧を印加可能であるか確かめること、場所ごとの性能の違いが現れるか確かめることである。第一弾で試験した CS-6301(フィルム塗布)、KP-8348-1 に加え、CS-5302(フィルム塗布)、KP-K2919-1 を高圧印加電極に用いてプロトタイプ MRPC を作成した。表 4.2 に第二弾で作成したプロトタイプの仕様一覧を示す。CS-6301、CS-5302、KP-8348-1 は約 1 m 長、2 スタック (10 gap) と実機 (1.8 m 長、2 スタック) により近い構成とした。KP-K2919-1 は抵抗率が高いことが電極作成前から予見されたため、第一弾と同じく 200 mm × 200 mm のサイズ、1 スタック (5 gap) とした。

3.6.2 節で述べたように、CS-6301 と CS-5302 は膜厚調整により抵抗率の調整が可能である。それぞれ 3 水準を用意したものの、材料と時間の制約上、実際に MRPC 検出器を製作した 1 水準ずつのみとなった。すなわち、CS-6301 は $10^5, 10^6, 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ の 3 水準のうち $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ のものだけを、CS-5302 は $10^4, 10^5, 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ の 3 水準のうち $10^4 \Omega/\text{cm}^2$ のものだけを使用した。残る水準については、時間的制約などから大型 MRPC への適用とビーム試験は実施していない。今後、この残りの水準を使用した場合 MRPC としての動作特性がどう変化するかを調べるのが課題となる。

表 4.2: 第二弾で作成したプロトタイプの仕様一覧

電極	塗布形態	塗布方法	ガラスサイズ	スタック数	抵抗率
CS-6301	フィルム塗布	マイクログラビア	940 mm × 230 mm	2 stack	$\sim 1 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$
CS-5302	フィルム塗布	マイクログラビア	870 mm × 230 mm	2 stack	$\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
KP-8348-1	ガラス塗布	スプレーガン	940 mm × 230 mm	2 stack	$\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
KP-K2919-1	フィルム塗布	スプレーガン	200 mm × 200 mm	1 stack	$\sim 2 \times 10^8 \Omega/\text{cm}^2$

(すべてのプロトタイプで、1 stack のガスギャップ構成は $255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps}$ である。)

第5章 第一段プロトタイプの試験

本章では、第一弾で製作した小型プロトタイプ MRPC を用いた試験の結果について述べる。試験は、実験室での高圧印加試験とビーム試験の2段階で行った。高圧印加試験では新電極を用いた MRPC が基本的な動作をしているかを確認し、正常動作が確認されたチェンバーのみをビーム試験に進めた。ビーム試験では検出効率と時間分解能を評価し、MRPC として妥当な性能が出ているかを試験した。表 5.1 に第一弾で作成したプロトタイプの仕様一覧を再掲する。

表 5.1: 第一弾で作成したプロトタイプの仕様一覧 (再掲)

塗料	塗布形態	抵抗率	ギャップ構成
Air-Opaque	フィルム塗布	$5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
Graphit 33	フィルム塗布	$2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
KP-8348-1	ガラス塗布	$2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
CS-6301 (1)	ガラス塗布	$4 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
CS-6301 (2)	フィルム塗布	$3 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$
セプルジーダ	フィルム塗布	$6 \times 10^5 \Omega/\text{cm}^2$	$255 \mu\text{m} \times 5 \text{ gap} \times 1 \text{ stack}$

5.1 試験に使用した機器

この節では第 5 章、第 6 章での宇宙線試験やビーム試験で用いた機器について述べる。

5.1.1 アンプ

MRPC の信号処理にはその時間分解能を損なわないように速い回路が求められる。台湾の Academia Sinica が開発した fast amplifier を使用している。

図 5.1 に今回使用したアンプを示す。図下側の 8 つの mmcx コネクタが入力端子であり、上側 9 つの mmcx コネクタのうち中央以外の 8 つが出力端子である。中央の MMCX コネクタはアンプの電源供給用のコネクタである。ここから 6–7 V の電圧を供給することでアンプが動作する。このアンプは時間応答の速い信号を鈍らせることなく信号を増幅することが可能なアンプである。そのため MRPC のような時間分解能が良い検出器の信号を増幅するのに適している

増幅回路はマイクロ波集積回路 (Monolithic Microwave Integrated Circuit ; MMIC) である BGA2866 と BGA2869 を組み合わせた 2 段から成る。両 IC の帯域幅は 2 GHz であり、ゲインはそれぞれ 24 dB と 31 dB である。第一段で約 15 倍の増幅率で増幅され、その後、約 35 倍の増幅率で増幅される。合計の増幅率は 55 dB (約 560 倍) である。

これまで、EMPHATIC 用 MPRC の運用や MARQ 用 MRPC のプロトタイプ試験 (大阪大学 宇田・林修論 [1, 8]) では入力側のコネクタが U.FL のものを使用していた。U.FL コネクタは少しの衝撃で外れやすく、また何度も着脱を繰り返すと接触が不良になりノイズが乗りやすくなるという問題があった。この問題に対処するため、読み出し PCB とアンプに U.FL コネクタを使用することをやめ、代わりに mmcx コネクタを採用することとなった。

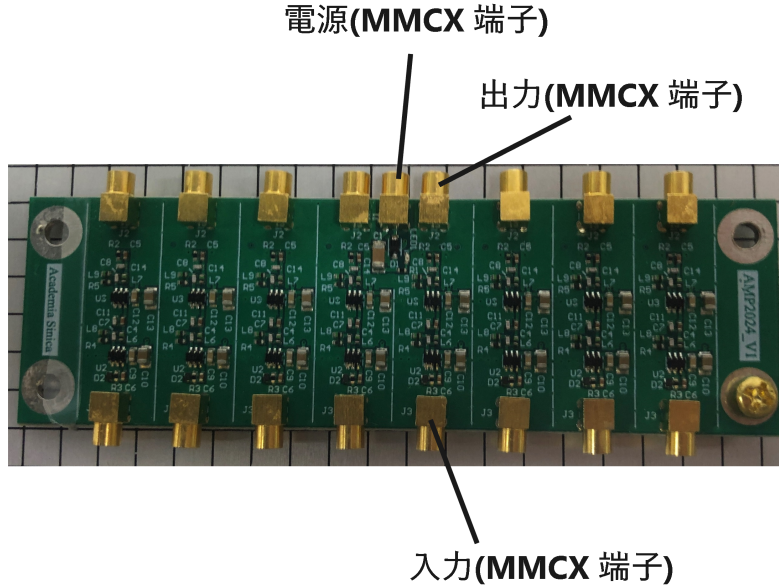


図 5.1: 使用したアンプ

5.1.2 ディスクリミネータ

MRPC の時間応答の速い信号や、MARQ スペクトロメータの時間情報だけを取得するという特徴に対応するため、我々は特別にデザインされたディスクリミネータを用いる。このディスクリミネータも Academia Sinica で開発され、外観は図 5.2 のようになっている。

図下側の MMCX コネクタが入力側であり、ディスクリミネーターチップ (ADCMP573BCPZ [45]) によってデジタル変換された PECL 信号が図上側のフラットケーブルコネクタから出力される。このディスクリミネーターは 1 台につき 16 ch 入力できるが、左右の 8 ch ずつで独立して使用することも可能である。

スレッシュホールド電圧は調整が可能で、以下の式に従って印加電圧に比例したスレッシュホールドが掛かる。掛かるスレッシュホールド電圧を V_{th} は、入力する電圧を V_{set} として

$$V_{th} [\text{mV}] = 31.3 [\text{mV/V}] \times V_{set} [\text{V}] + 3.7 [\text{mV}]$$

である。また、かける電圧を負にすることでスレッシュホールドは正の値を取ることができ、ポジティブな信号も PECL 信号に変換できるという特徴を持つ。図中の左右のスレッシュホールド設定コネクタから別々に電圧を供給することで 8 ch ごとに異なるスレッシュホールドを設定することが可能である。

このディスクリミネータは高い周波数領域に帯域を持ち、MRPC の時間応答の速い信号に対応して時間分解能を悪化させることなく信号を変換できる。また、このディスクリミネーターはアナログ信号の Time-over-Threshold (TOT) を保ったまま PECL 信号に変換する。TOT は信号がスレッシュホールドを超えていた時間であり、信号の波高や電荷量と正の相関を持つ。TOT を信号の電荷情報の代わりに使う事で、スルーイング補正などが可能になる。以上の 2 つの特徴から、このディスクリミネーターを使用することで、TDC 情報のみを取得するセットアップでも MRPC の時間分解能を損なうことなく正確な TOF 測定が可能となる。

5.1.3 HR-TDC

1.2.3 節で述べたように、MARQ 実験では TDC で取得したタイミング情報のみを用いて解析を行う。本実験でも同様に、データ取得は TDC のみを用いて行った。

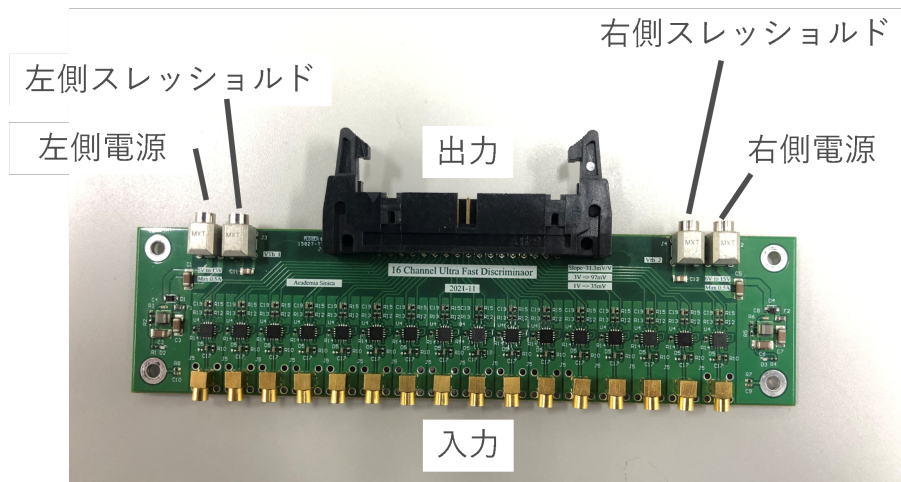


図 5.2: 使用したディスクリミネータ

HUL モジュール [46] は J-PARC におけるハドロンビーム実験用に開発された汎用のデータ収集基盤である。用途に合わせてメザニンカードを付け替えることで様々な使い方が可能である。メザニンカードは 2 枚まで取り付けが可能である。VME クレートに挿して電源供給を受けることで動作する。

図 5.3 に示すように、本試験では HUL モジュールにメザニン HR-TDC カードを 2 枚取り付けて使用した。このメザニン HR-TDC カードは実際に MARQ スペクトロメーターで使用する AMANEQ モジュールにも載せて使用する予定である。HR-TDC の測定精度は 20 ps であり、典型的な MRPC の時間分解能 ~ 60 ps より十分良い。HR-TDC のフロントパネルを図 5.3 に示す。入力は ハーフピッチコネクタを介して行い、メザニンカード 1 つで 32 ch、合計 64 ch 読み出すことが可能である。common stop、multi hit 方式であり、トリガー信号を common stop に、各チャンネルの入力信号をそれぞれのスタートタイミングとして用いる。取得されるデータとしてスタートタイミングと common stop との時間差が記録される。図中 Busy と書かれた LEMO コネクタからは HR-TDC の busy 信号が出力され、他のモジュールの busy と組み合わせてトリガー入力に veto をかける。データの転送は、HUL モジュールの LAN ポートと PC を LAN ケーブルで繋いで行う。

この HR-TDC は、信号が正から負の方向に行くタイミングを trailing edge、信号が負から正の方向に行くタイミングを leading edge として記録する。実際に記録されるタイミング情報は、入力信号の trailing edge と leading edge それぞれに対してあるオフセットが付加された値である。仕様として、trailing edge のオフセットは leading edge のオフセットよりも小さい値となっている。そのため図 5.4 のように、入力信号の幅が同じであってもポジティブな信号とネガティブな信号で振る舞いが異なる。TDC 上ではポジティブな信号の TOT データの方がネガティブな信号の TOT データよりも小さな値として記録されてしまう。

また、この HR-TDC は最小約 1 ns の幅の信号を受け付けることができる。しかし、先ほど述べたようにポジティブな信号の立ち下がりタイミングを過小評価してしまうので、MRPC の信号の TOT が小さい場合には、ポジティブな信号の TOT の検出ができずに、検出効率が低下する可能性がある。また、TOT が狭い場合、時間測定の精度が悪化する事も分かっており、時間分解能が悪化する可能性がある。

5.1.4 HV モジュール

今回製作した MRPC は 1 スタック当たりのギャップ数が 5 であるため、合計で十数 kV の電圧を印加する必要がある。そのため電源モジュールとして、松定プレジジョン株式会社の HV-10P と HV-10N を使用した [47]。HV-10P、HV-10N は低電圧を入力するとそれに比例した正と負の高電圧を出力する電源モジュールで、それぞれ最大 +10 kV、-10 kV を印加することができる。

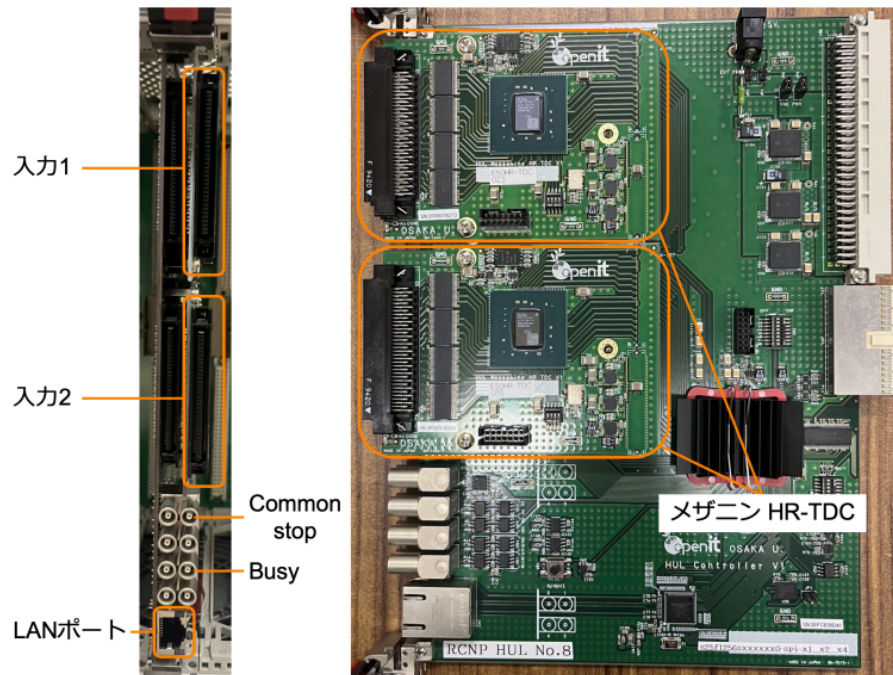


図 5.3: HUL HR-TDC の写真 [1]、(左)HR-TDC のフロントパネル、HR-TDC として使用する際にはメザニンカードの入力コネクタに信号を入れる。(右)HR-TDC を横から見た図、図中のオレンジの四角に囲まれているのがメザニン HR-TDC カードである。

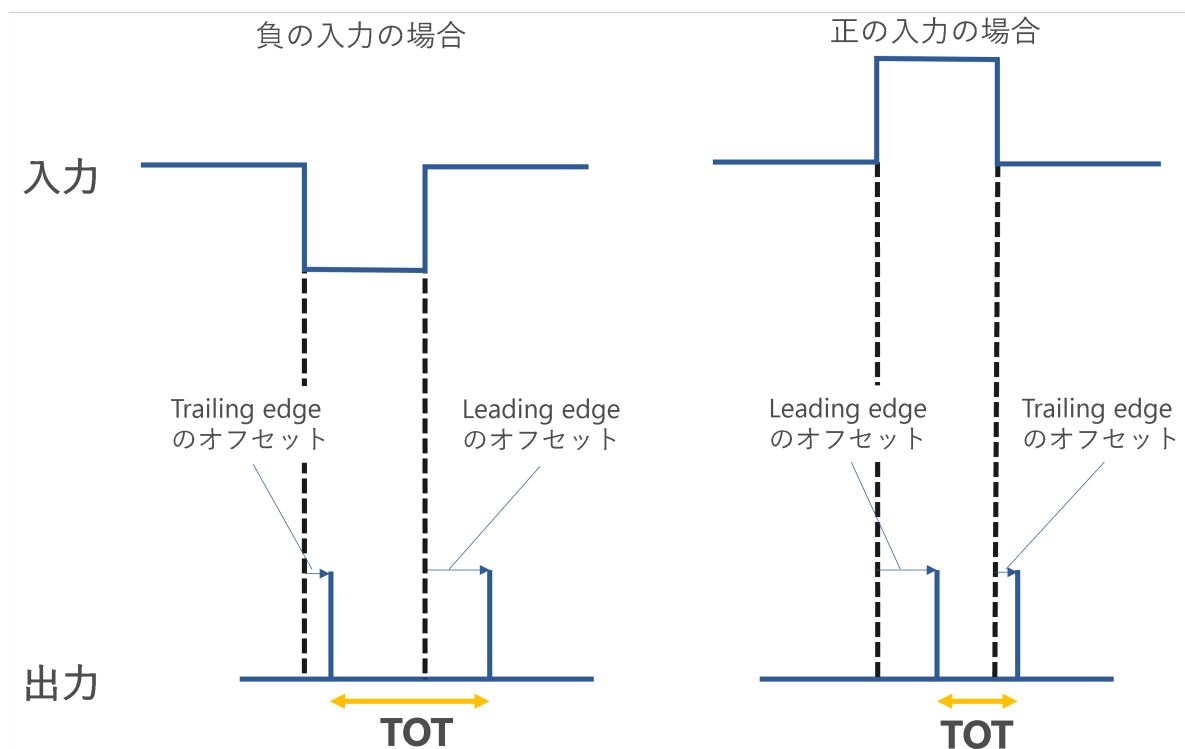


図 5.4: 入力信号の正負によって異なる、記録される TOT の大きさ。TDC にはディスクリミネータの出力である矩形波が入力される。trainling edge と leading edge のオフセットの違いにより、正の入力に対する TOT は負の入力の TOT よりも小さく評価される。

5.1.5 ガス

使用したガスは、アバランシェモードでの運用で典型的な、1,1,1,2-テトラフルオロエタン（代替フロン、R134a、 $C_2H_2F_4$ ）をベースとした混合ガスである。R134a 以外には SF_6 と C_4H_{10} （ブタン）を使用した。R134a は電気陰性度が高く、ガス分子が電子と吸着しやすい。そのため電子の増幅を抑えることができ、アバランシェモードでのオペレーションが可能となる。 SF_6 は電子親和力が高いため、広い電圧の範囲でストリーマーの発生を抑制することが可能となる。 C_4H_{10} はストリーマー発生の原因となる紫外線を吸収するクエンチャーの役割を果たす。ガスは $R134a : SF_6 : C_4H_{10} = 90 : 5 : 5$ の比で混ぜて使用した。

5.2 実験室での高圧印加試験

作成したプロトタイプ MRPC が MRPC として最低限動作しているかを確認するため、まず実験室で高電圧の印加試験を行った。高圧印加電極に実際に掛かっている電圧を MRPC 組み立て後に測定することは難しいため、暗電流や宇宙線の信号が見えるかどうかで高圧が印加できているか確かめた。

5.2.1 セットアップ

二つのプラスチックシンチレータをトリガーとして用い、MRPC チェンバーから宇宙線信号が取得できるかを評価（図 5.5）。チェンバーの上下に配置した二つのプラスチックシンチレータからのトリガー信号を基に、MRPC の出力信号をオシロスコープで観測した。MRPC の信号は MMCX-input のアンプカードを通すことで増幅し、増幅後の信号をオシロスコープで観察した。シンチレータの信号は NIM モジュールのディスクリミネータでロジック信号に変換したのち、ロジックユニットで上下 2 つのシンチレータの AND を取ってトリガー信号とした。

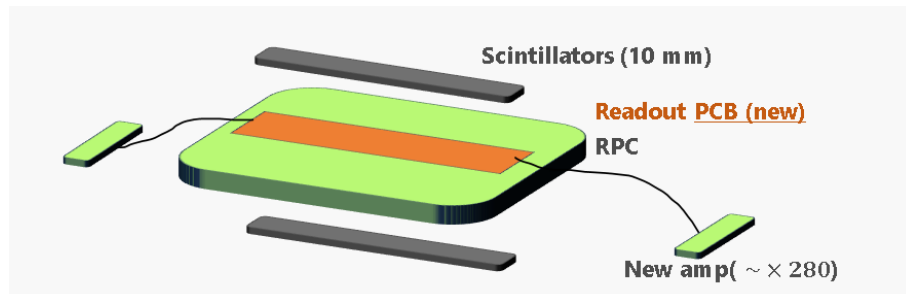


図 5.5: 第一弾プロトタイプの宇宙線試験のセットアップ

5.2.2 結果

Graphit 33, KP-8348-1, CS-6301（ガラス塗布）、CS-6301（フィルム塗布）の 4 つのチェンバーについては、宇宙線信号が観測され MRPC として正常動作していることが確認された（図 5.6）。

一方、Air-Opaque ($10^{10} \Omega/cm^2$)、およびセプルジーダ ($10^5 \Omega/cm^2$) を用いたチェンバーについては暗電流、宇宙線信号のいずれも観測することができなかった。電圧が掛かっていないと思われる挙動であり、以降の試験対象から除外した。Air-Opaque に関しては抵抗率が高すぎたことが原因だと考えられる。セプルジーダに関しては、抵抗率は目安である $10^5 - 10^7 \Omega/cm^2$ に収まっているにも関わらず、電圧を供給できなかった。セプルジーダは導電性ポリマーからなり、カーボンを含むその他の塗料と導電性を実現する機構が異なることが原因の一つとして考えられる。



図 5.6: 宇宙線試験で観察できた信号。CS-6301(ガラス塗布) に 12 kV を印加した。ch 1(黄) は anode、ch 2(紫) は cathode の信号で、同一位置にあるストリップのため、逆向きで同じタイミングの信号が出ている。

5.3 ビーム試験

製作したプロトタイプ MRPC のうち実験室での簡易試験を通過したものについて、検出効率・時間分解能を評価するために SPring-8 の LEPS2 ビームラインでビーム試験を行った。本節ではビームラインの詳細を述べる。

5.3.1 SPring-8

SPring-8 (Super Photon ring-8GeV) は兵庫県の播磨科学公園都市に位置する大型放射光施設である [48]。図 5.7 に SPring-8 の全体図を示す。SPring-8 では 8 GeV/c まで加速された電子が周長 1436 m の蓄積リングを周回する。蓄積リングを周回する電子によって生み出された放射光を利用して、ナノサイズの世界での物質の構造を調べる研究などに利用されている。



図 5.7: SPring-8 を上空から見た写真 [48]。

5.3.2 LEPS2 ビームライン

今回ビーム試験を行った LEPS2 (Laser Electron Photon at SPring-8) ビームラインは SPring-8 から割り当てられた専用ビームラインの 1 つである。LEPS2 ビームラインでは、ペンタクォーク Θ^+ の探索

をはじめとした実験を行っている LEPS2 実験および中性中間子の光生成を研究している BGOegg 実験が行われている。LEPS2 ビームラインでは、レーザー光を蓄積リングを周回している電子に入射し、逆コンプトン散乱により生成される GeV 領域の高エネルギー γ 線を実験に用いる。レーザー光の波長ごとの逆コンプトン散乱によって生成された γ 線のエネルギー分布を図 5.8 に示す。今回のビーム試験では、レーザーの波長は 351 nm のものを使用した。したがって、LEPS2 実験棟に入射してくる γ 線の最大運動量は $2.4 \text{ GeV}/c$ である。

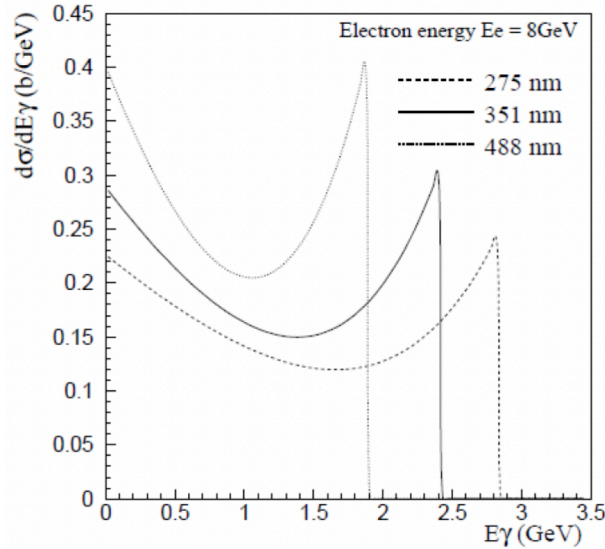


図 5.8: 逆コンプトン散乱によって生成された γ のエネルギー分布 [1]。使用するレーザーの波長に応じて違う分布を持つ。

5.3.3 RF 信号

SPring-8 の蓄積リングを周回している電子のバケット数は 2436 であり、バケットの時間間隔は 1.966 ns である [49]。したがって連続して電子が来る場合、逆コンプトン散乱によって生成される γ 線の時間間隔は同様に 1.966 ns となる。また、この電子バケットと同期した RF 信号が 1.966 ns 間隔で加速器側から供給される。 γ 線の速さはエネルギーによらず光速であるため、 γ 線がレーザーの衝突点から標的までを伝播する時間はエネルギーによらず一定である。また、電子のバケット幅が 14 ps 程度であり、RF 信号の時間分解能は LEPS2 実験棟で約 4 ps である。つまり、RF 信号は加速器側から供給される同期信号であり、電子バンチの到来タイミングを決定づける。実際には電子バンチ幅やレーザー衝突点のばらつきなどに起因して、RF 信号の周辺で若干のタイミングゆらぎ（ジッタ）が生じるが、検出器の時間分解能評価のためのリファレンスとして利用可能である。

RF 信号の間隔は約 2 ns ごとであり、そのまま TDC で取ろうとするとチャンネルあたりのデータ取得数を超えてしまっており取りきれないので、間引いて取得する必要がある。今回は 420 回に 1 回ごとに RF 信号のタイミングを TDC によって記録した。

5.4 ビーム試験のセットアップ

図 5.9 にビーム試験でのセットアップを示す。逆コンプトン散乱後 LEPS2 実験棟に入射してきた γ 線のビーム軸上に鉛標的を設置し、電子陽電子対を生成する。生成された電子・陽電子対は標的のすぐ下流に設置された永久磁石によってそれぞれ下方向と上方向に曲げられる。永久磁石の磁場の強さは 0.5 T である。標的の下流 $3\text{--}4 \text{ m}$ の位置に MRPC を設置し、電子または陽電子のみが照射されるようにする。MRPC

の上流と下流にはそれぞれ 2 本ずつプラスチックシンチレータを設置し、これらプラスチックシンチレータ 4 本全部が同時になったイベントをトリガーとした。水平に置かれたシンチレータの幅は 3 mm であり、MRPC のストリップ幅 25 mm よりは十分小さく、ストリップ間の距離 1 mm よりは大い。

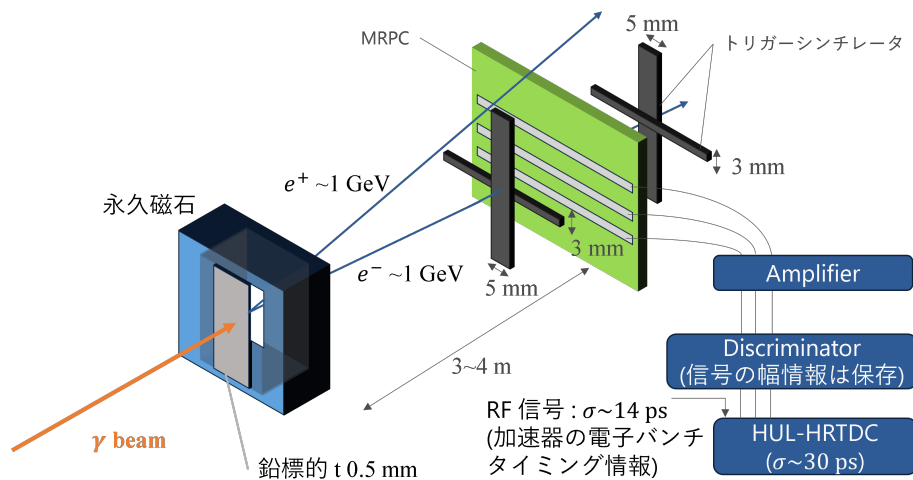


図 5.9: ビーム試験のセットアップ

図 5.10 は第一弾試験の様子である。中央の遮蔽用アルミボックスの中に MRPC が入っている。手前側がビーム上流で、2 本のプラスチックシンチレータが見えている。フィルム塗布の電極をガラスに強く接触させるために、この試験では万力で圧迫した。両脇にはアンプを固定するためのアルミ板が張り付けられている。

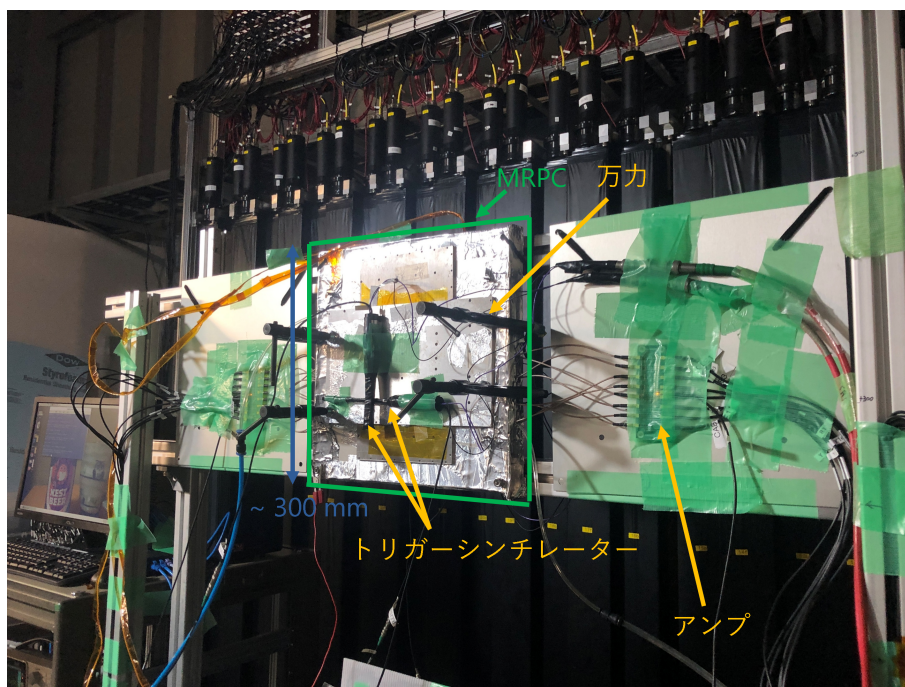


図 5.10: 第一弾プロトタイプ試験の様子。

データ取得用の回路図を図 5.11 に示す。トリガー用のフィンガーシンチレータの信号はディスクリミネータを通過した後、NIM ロジックユニットで 4 つのコインシデンスを取った。VETO として各モジュールのビジー信号や、アクセプトされた最後のトリガーから 1 μ s 続くロジック信号を入れた。VETO が掛からなかったトリガー信号は 200 ns のディレイが掛かったのち、コモンストップとして HR-TDC 前面の

LEMO コネクタに入力される。RF 信号やアンプ後の MRPC 信号などのスタート信号は特製のディスクリミネータ (5.1.2 節) を通過し、HR-TDC のハーフピッチコネクタに入力される。

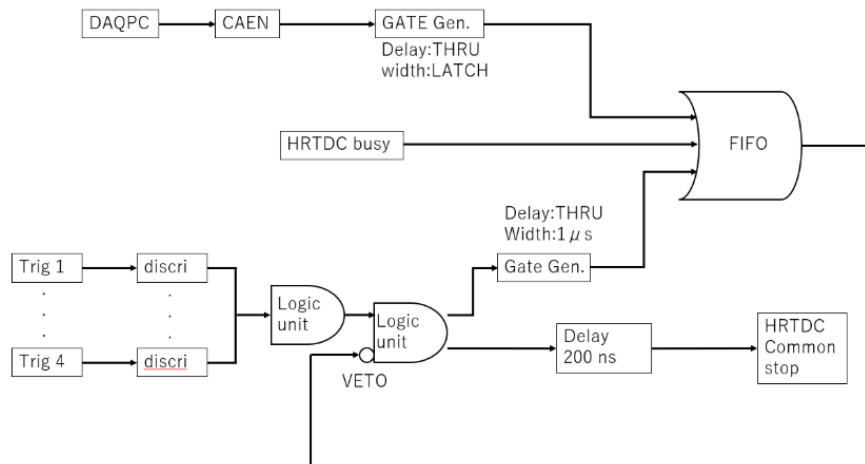


図 5.11: データ取得用の回路。

5.5 測定項目・方法

新電極を用いた MRPC が正常に動作しているか、また電極の違いがパフォーマンスに影響を与えているかを確かめることを目的に、主に以下の 2 つの観点で試験をおこなった。

- ストリップ中心での検出効率・時間分解能の HV 依存性
- 抵抗値が低いと悪化すぎると思われるストリップ間でのパフォーマンス

ストリップ中心 (図 5.12 中、Y=0 mm の点) での検出効率・時間分解能の HV 依存性は、MRPC プロトタイプの典型的なパフォーマンス評価である。トリガーシンチレータをストリップ中心に設置し、検出効率・時間分解能の HV 依存性を測定した。

また、3.1.2 で述べたように、電極の違いによるパフォーマンスへの影響は、ストリップ間で最も顕著に表れると予想されるため、検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャンも行った。HV は固定のまま、図 5.12 に示すように、トリガー位置をストリップと垂直 (Y 方向) に移動させるスキャンを行い、ストリップ間でのパフォーマンスの評価を行った。トリガーシンチレータの設置は、遮蔽用アルミボックスにシンチレータを養生テープで張り付ける形で行った。位置合わせは、目視で最初のストリップの中心に設置し、以降は物差しを用いて最初の位置からの相対距離が所望の値となるように調整した。

5.5.1 検出効率の評価方法

MRPC の検出効率は、総イベント数のうち MRPC が鳴ったイベント数の割合で評価する。分母となるイベントには、4 本のトリガーシンチレータおよび RF 信号の全てで leading edge と trailing edge が少なくとも 1 つ記録されていることを要求した。分子となるイベントで MRPC のあるストリップが鳴ったという判定は以下のように行った。ストリップの両端のそれぞれで、leading edge と trailing edge が少なくとも 1 つ記録されている場合にそのストリップ端が鳴ったと判定する。あるストリップの両端が鳴った場合、そのストリップは鳴ったと判定される。

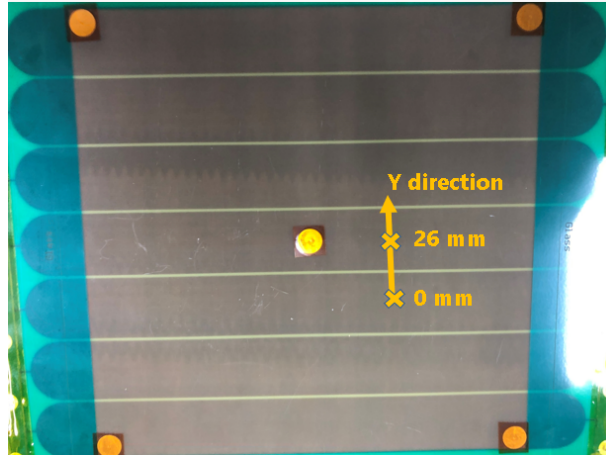


図 5.12: Y 方向へのスキャンのイメージ。写真は PCB を写しており、茶色の読み出しストリップが横方向に 7 本ある。Y = 0 mm があるストリップの中心にあたり、Y = 26 mm がその隣のストリップの中心にあたる。

5.5.2 時間分解能の評価方法

MRPC の時間分解能は、MRPC が鳴ったタイミングと加速器から供給される RF 信号 (5.3.3 節に詳述) が記録されたタイミングとの時間差 ($T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$) から評価する。 $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の分布をガウスフィットし、その分散を MRPC の時間分解能とする。なお、MRPC に入射する陽電子の運動量は質量に比べて十分大きく ($\sim 1 \text{ GeV}$)、全てがほぼ光速で飛来してくるので、RF 信号と MRPC との時間差は一定であると考えてよい。また、RF 信号のタイミング精度や HR-TDC の時間分解能は MRPC の時間分解能に対して十分に良いので、TOF の時間分解能に及ぼす影響は無視できる。

TOT percentile を用いたスルーイング補正

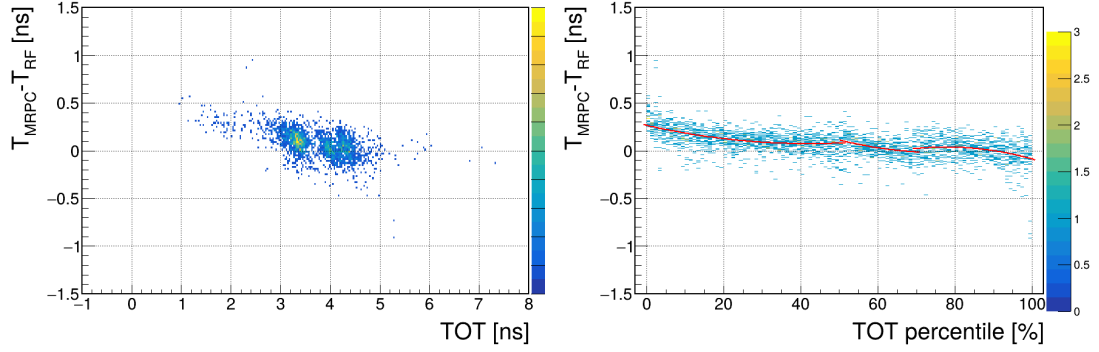
本解析では、MRPC のスルーイング補正に用いる変数として TOT percentile を導入する。通常、検出器信号の電荷情報を取得できない場合、TOT (Time Over Threshold) を電荷の代替指標として用いることが多い。MARQ スペクトロメーターでは TDC 情報のみのデータを取得するので、我々も電荷の代替指標として TOT を扱う。しかし、TOT の分布がある領域 (特に小さい TOT) に偏在する場合、補正関数とその狭い領域の影響を大きく受け、小さい TOT に対するスルーイング補正が不十分になる問題が生じる。そこで本研究では、TOT を一旦「データセット中のパーセンタイル」に変換したうえで補正を行う手法を採用する。このパーセンタイル変換を TOT percentile と呼ぶ。

あるデータセット中の TOT をすべて集め、各イベントの TOT を昇順に並べたとき、その値がデータセット全体の中で何%の位置にあるかを表したものが TOT percentile である。たとえば、あるランで 3000 イベントを取得し、そのうち 2100 イベントが TOT 値「x」以下であった場合、x に対応する TOT percentile は $2100/3000 = 0.70$ (70 %) となる。TOT percentile の特徴として以下の 3 つが挙げられる。

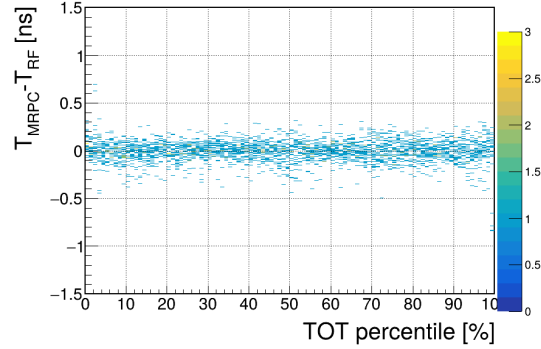
- TOT percentile はナীবにはデータセットに依存する量であり、同じ TOT 値であってもデータセットが変われば TOT percentile の値は変わる。
- TOT の分布が偏在していても、TOT percentile を用いることで (0, 100] 上の一様な分布へと写像できるため、スルーイング補正の際に広い範囲での情報をバランスよく反映させることができる。
- 小さい TOT 領域に多数のイベントが集中する場合でも、その密集度合いが TOT percentile 上では均等に扱われるため、補正関数の導出において極端な重みづけを受けにくい。

実際、TOT percentile を用いることによって効果的にスルーイング補正を行うことが可能であることは R. X. Yang らによって示されている [50]。以降の節では断りのない限り、スルーイング補正後の時間分解能を示す。

図 5.13 に TOT Percentile によるスルーイング補正の流れを示す。まず、TOT と $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の二次元相関 (図 5.13a) からスタートする。複数の島が見えるのは、MRPC 特有の現象であり、メインの信号とストリップの反対の端で反射して返ってきた信号が重なり、スレッシュホールドを超える時間が長くなることで起きる。横軸を TOT から TOT Percentile に変換したものが図 5.13b である。スルーイング補正では横軸を複数の区間に区切り、各区間で二次関数をフィットした。区間の区切り方は run 毎に調整した。図 5.13b にはフィット結果の関数も描画されている。各区間でフィットした補正関数を差し引いた結果が図 5.13c である。



(a) TOT と $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の二次元相関。複数の島が見えるのは、MRPC 特有の現象である。 (b) TOT Percentile と $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の二次元相関 (スルーイング補正前)。フィット関数も描画している。



(c) TOT Percentile と $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の二次元相関 (スルーイング補正後)

図 5.13: TOT Percentile を用いたスルーイング補正

時間分解能の値は、図 5.14 に示すように $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の分布から求める。 $T_{\text{MRPC}} - T_{\text{RF}}$ の分布をガウスフィットし、フィット結果のガウシアン標準偏差 σ を時間分解能とする。図 5.14a がスルーイング補正前、図 5.14b が補正後の分布である。この例の場合、スルーイング補正前は $\sigma = 116.9$ ps であったが、補正後は $\sigma = 88.4$ ps となっており、MRPC の固有時間分解能は 88.4 ps であると評価される。

5.6 結果

5.6.1 Graphit 33

Kontakt Chemie 社製 Graphit 33 は、フランス Lyon 大学のグループが従来使用していた韓国製の塗料の代替として検討中の、カーボンを含んだ導電性塗料である。本研究で初めて輸入を試みた結果、液体のまま輸入することは困難であることが分かったが、Lyon 大学からフィルムに塗布したものを譲り受けること

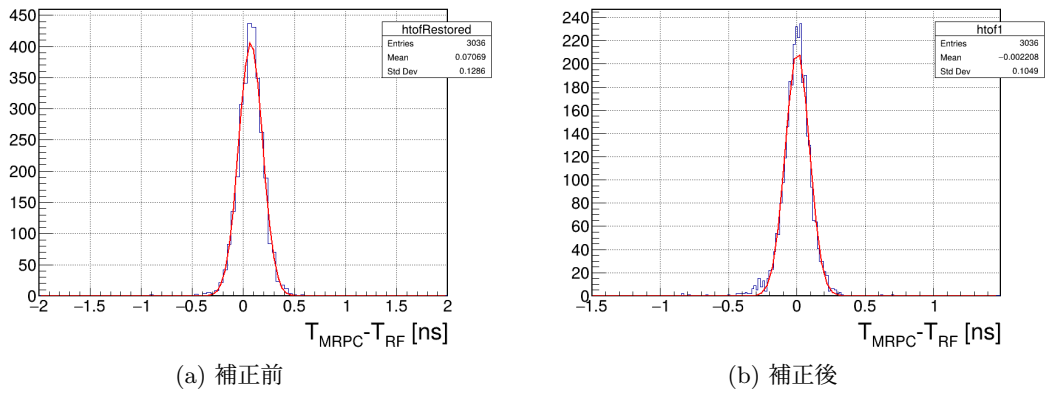


図 5.14: スルーイング補正前後の時間分解能

ができた。その他の新電極候補が今回が初試験もしくは過去に動作しなかったものであるため、あくまで参考として試験した。抵抗率は $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダーであった。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

トリガーシンチレータをストリップ中心に設置し、印加電圧を 10.5 kV ～ 16.0 kV の範囲で変えて約 3000 イベントのデータを取得した。Threshold は 22.48 mV ($V_{\text{set}} = 0.6 \text{ V}$) に設定した。

図 5.15 に検出効率、図 5.16 に時間分解能の HV 依存性を示す。検出効率は HV を上げるにつれ上昇し、13 kV 以上の HV では 95 % 以上であった。ギャップ数が 5 の MPRC としては妥当な検出効率である。時間分解能は、最初 HV を上げるにつれ向上し、HV=13.0 kV で最も良い値 73.3 ps を記録したのち、さらに HV を上げると悪化する振る舞いを見せた。これは MPRC の典型的な振る舞いである。HV を上げると複数ギャップでのアバランシェからくる信号が足し合わされ、時間分解能が向上する。HV を上げすぎるとストリーマー (2.1.2 節参照) が発生する割合が増え、時間分解能は悪化する。

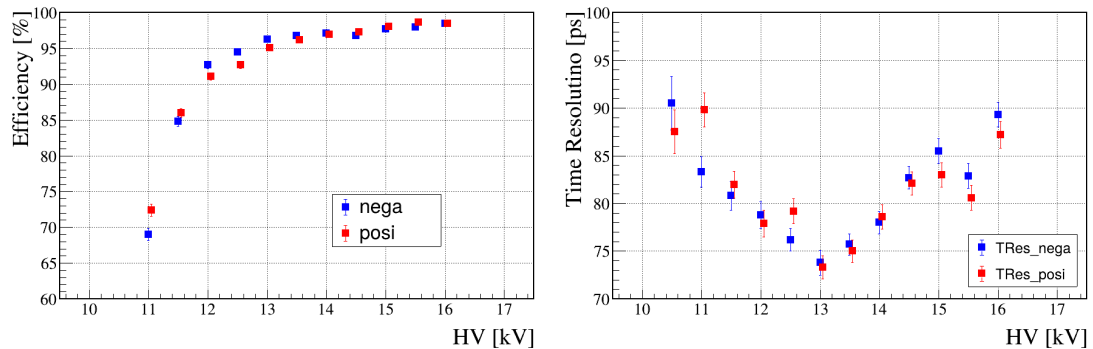


図 5.15: Graphit33 の検出効率の HV 依存性。図 5.16: Graphit33 の時間分解能の HV 依存性。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

HV スキャンの結果で時間分解能が最もよかった設定 HV=13.0 kV, threshold = 22.5 mV ($V_{\text{set}} = 0.6 \text{ V}$) で、Y 方向の位置スキャンを行った。Y=0 mm は strip 6 の中心、Y=26 mm は strip 5 の中心におおよそ相当する。データを取得した地点は Y= 0, 10, 12, 13, 14, 16 mm の 6 点である。

図 5.17 に検出効率の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて（つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって）、strip 6 だけの検出効率は下がり、逆に strip 5 だけの検出効率は上がっている様子が確認できる。また、MRPC が鳴ったという

判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y position に依存せず 95 % 以上の検出効率が達成されていることも確認できる。

図 5.18 に時間分解能の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて (つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって)、strip 6 だけの時間分解能は悪化し、逆に strip 5 だけの時間分解能は上がっている様子が確認できる。

また、両図からストリップ間の Y position は 13-14 mm の付近であることが分かる。Y = 14 mm での OR 条件での検出効率は $96.4 \pm 0.34\%$ 、両ストリップの時間分解能の平均は 81.5 ± 1.45 ps であった。

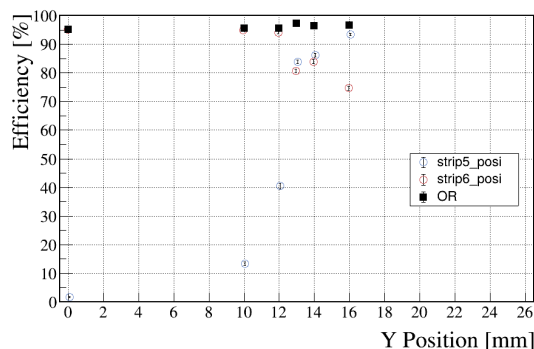


図 5.17: Graphit33 のストリップ間での検出効率。

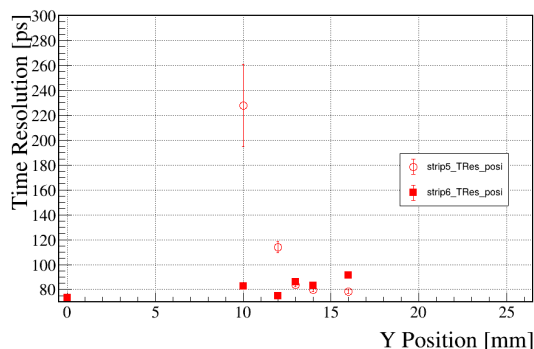


図 5.18: Graphit33 のストリップ間での時間分解能。

5.6.2 KP-8348-1

関西ポリマー (株) 社製 KP-8348-1 は、本研究で初めて着目した、日本製の導電性フッ素樹脂コーティングである。ガラスに塗布が可能で、ハンドスプレーガンを用いて塗布したものを使用した。抵抗率は $10^4 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダーであり、目安の $10^5 - 10^7 \Omega/\text{cm}^2$ を外れていたが、暗電流や宇宙線の信号は見えたためビーム試験に持ち込んだ。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

トリガーシンチレータをストリップ中心に設置し、HV を 11.0 kV ~ 14.0 kV の範囲で変えて約 3000 イベントのデータを取得した。Threshold は 28.7 mV ($V_{\text{set}} = 0.8$ V) に設定した。

検出効率は HV を上げるにつれ上昇し、12.5 kV 以上の HV では 90 % 以上、13.0 kV 以上で 95 % 以上であった。時間分解能は HV=12.5 kV で底を打つ形となり、その最良の値は 81.4 ps であった。KP-8348-1 でも、検出効率や時間分解能の HV 依存性は典型的な MRPC の振る舞いを見せたといえる。

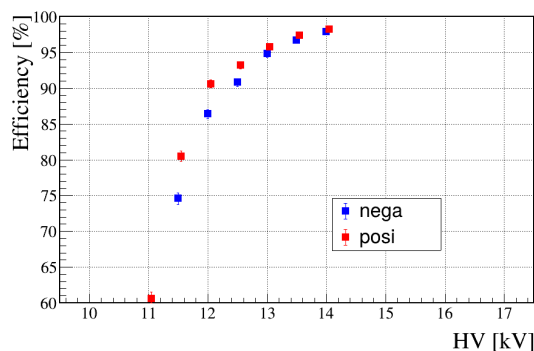


図 5.19: KP-8348-1 の検出効率の HV 依存性。

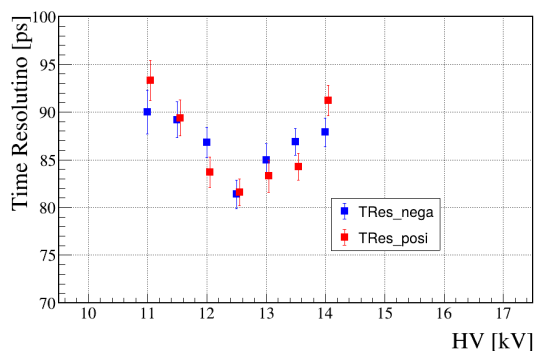


図 5.20: KP-8348-1 の時間分解能の HV 依存性。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

KP-8348-1 の Y 方向位置スキャンは、w/ low-pass filter、HV=13.0 kV、th= 22.5 mV ($V_{\text{set}} = 0.6\text{V}$)、15 m cable の条件で行った。Y=0 mm は strip 6 の中心、Y=26 mm は strip 5 の中心におおよそ相当する。データを取得した地点は Y = 0, 9.0, 10.5, 12.0mm の 4 点である。

図 5.21 に検出効率の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて（つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって）、strip 6 だけの検出効率は下がり、逆に strip 5 だけの検出効率は上がっている様子が確認できる。また、MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y position に依存せず 96 % 以上の検出効率が達成していた。

図 5.22 に時間分解能の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて（つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって）、strip 6 だけの時間分解能は悪化し、逆に strip 5 だけの時間分解能は上がっている様子が確認できる。なお、Y = 12.0mm における strip6.TRes_posi は約 350 ps で、図の範囲外となっている。

また、両図からストリップ間に最も近いデータ点は Y = 10.5mm の点であることが分かる。Y = 10.5 mm での OR 条件での検出効率は $98.1 \pm 0.25\%$ 、両ストリップの時間分解能の平均は $121.5 \pm 2.45\text{ps}$ であった。

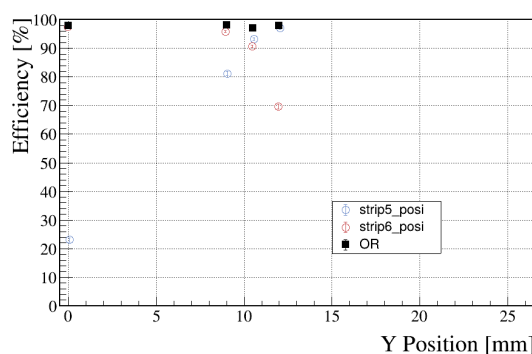


図 5.21: KP-8348-1 のストリップ間での検出効率

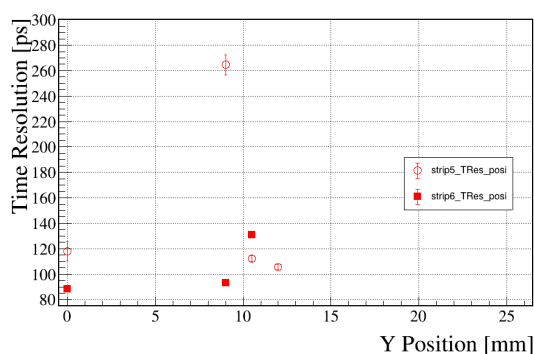


図 5.22: KP-8348-1 のストリップ間での時間分解能

5.6.3 CS-6301 (ガラス塗布)

コルコート (株) 社製 CS-6301 は、本研究で初めて試験する、日本製の導電性無機塗料である。カーボンを含む塗料で、ガラスとフィルムの両方に塗布が可能である。第一弾ではガラス塗布とフィルム塗布の両方を用意した。この節ではハンドスプレーガンを用いてガラスに塗布した試作機について述べる。抵抗率は $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダーであった。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

トリガーシンチレータをストリップ 6 (w/ low-pass filter) 中心に設置し、HV を 11.0 kV ~ 15.5 kV の範囲で変えて約 3000 イベントのデータを取得した。Threshold は 35 mV ($V_{\text{set}} = 1.0 \text{ V}$) に設定した。

図 5.23 に検出効率、図 5.24 に時間分解能の HV 依存性を示す。検出効率は HV を上げるにつれ上昇し、13.5 kV でプラトーに達して 95 % 以上の検出効率となった。時間分解能については、他のチェンバーと異なり HV を上げるにつれ悪化する結果となった。HV = 14.0 kV 以上で時間分解能が悪くなっていることはストリーマーの増加で理解できる。HV = 12.0 kV 以上で時間分解能が良くなっていることは、検出効率が低い領域であることを考慮すると、全イベントのうち波高の高いイベントが記録されたなど何らかのバイアスがかかった結果だと考えられる。

代表として HV=13.0 kV でパフォーマンスを挙げると、検出効率は 92.0 %、時間分解能は 83.2 ps であった。

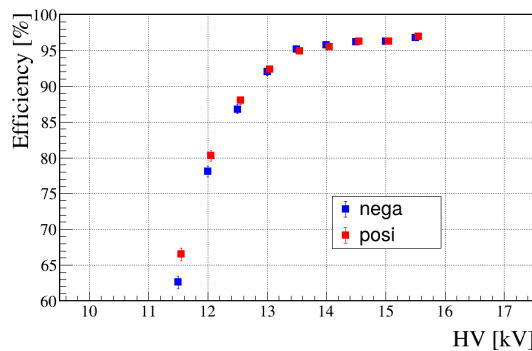


図 5.23: CS-6301 (ガラス塗布) の検出効率の HV 依存性。

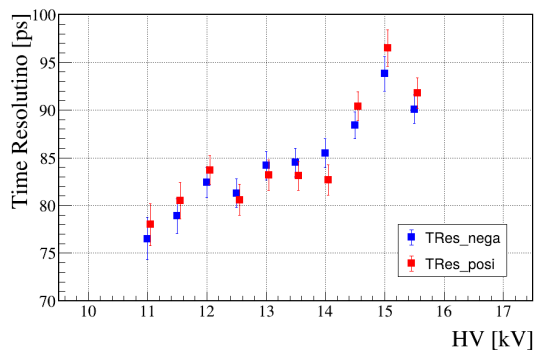


図 5.24: CS-6301 (ガラス塗布) の時間分解能の HV 依存性。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

CS-6301 (ガラス塗布) の Y 方向位置スキャンは、HV = 15.5 kV、th= 35 mV ($V_{\text{set}} = 1.0$ V) の条件で行った。図 5.24 に見て取れるように、これは時間分解能最良の設定ではない。(HV が高すぎてストリーマーで時間分解能が悪化している。) オンラインでの解析では検出効率を優先してこの設定で取ってしまった。Y=0 mm は strip 6 の中心、Y=26 mm は strip 5 の中心におおよそ相当する。データを取得した地点は Y= 0, 11.5, 14.5, 26 mm の 4 点である。

図 5.25 に検出効率の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて (つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって)、strip 6 だけの検出効率は下がり、逆に strip 5 だけの検出効率は上がっている様子が確認できる。また、MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y position に依存せず 96 % 以上の検出効率が達成していた。

図 5.26 に時間分解能の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて (つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって)、strip 6 だけの時間分解能は悪化し、逆に strip 5 だけの時間分解能は上がっている様子が確認できる。

また、両図からストリップ間は Y = 11.5mm の点と Y = 14.5mm の間にあると考えられる。スキャンが荒くストリップ間の十分近傍でのデータは取れていないが、その他の点での振る舞いから、ストリップ間でのパフォーマンスは検出効率が 90 % 以上、時間分解能が 120-160 ps 程度であると考えられる。 $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ という抵抗率を考えると、ストリップ間でもストリップ中央と変わらない時間分解能が達成されるかと予想したが、予想よりも時間分解能は悪化している。この原因は現時点で不明で、さらなる調査が求められる。

プラトーのシフト

テスト実験の途中で、CS-6301 (ガラス塗布) の検出効率が突然低下する出来事があった。HV = 15.5 kV で ~95 % の検出効率を記録した次のデータ取得で、同じく HV = 15.5 kV であるのに検出効率が ~75 % まで低下した。その後も検出効率は戻らなかったが、17 kV などより高い電圧を印加すれば ~95 % の検出効率が出た。この原因として、実験中にスペーサーの接着力が低下してガスギャップが広がったことが考えられる。ガラスの電位は一定であり、ガスギャップが広がると印加される電場が弱くなるため、検出効率を多少低下させることがあり得る。

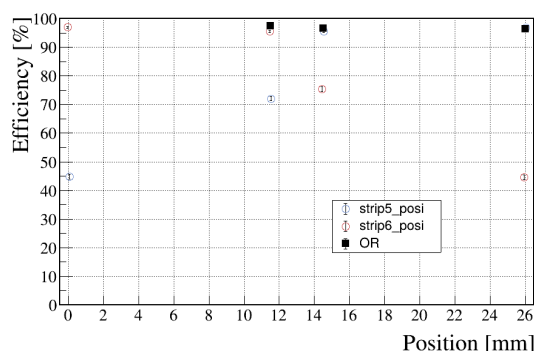


図 5.25: CS-6301 (ガラス塗布) のストリップ間での検出効率

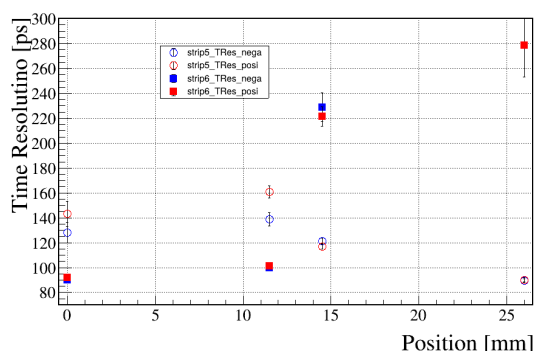


図 5.26: CS-6301 (ガラス塗布) のストリップ間での時間分解能

5.6.4 CS-6301 (フィルム塗布)

コルコート (株) 社製 CS-6301 は、本研究で初めて試験する、日本製の導電性無機塗料である。カーボンを含む塗料で、ガラスとフィルムの両方に塗布が可能である。第一弾ではガラス塗布とフィルム塗布の両方を用意した。この節ではマイクログラビア塗工でフィルムに塗布された試作機について述べる。抵抗率はガラス塗布と同じく $10^6 \Omega/\text{cm}^2$ のオーダーであった。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

トリガーシンチレータをストリップ 6 (w/ low-pass filter) 中心に設置し、HV を 10.0 kV ~ 13.5 kV の範囲で変えて約 3000 イベントのデータを取得した。Threshold は 28.7 mV ($V_{\text{set}} = 0.8 \text{ V}$) に設定した。

図 5.15 に検出効率、図 5.16 に時間分解能の HV 依存性を示す。検出効率は HV を上げるにつれ上昇し、13 kV 以上の HV では 95 % 以上であった。時間分解能は HV によらずおよそ一定で、85 ~ 90 ps 程度であった。

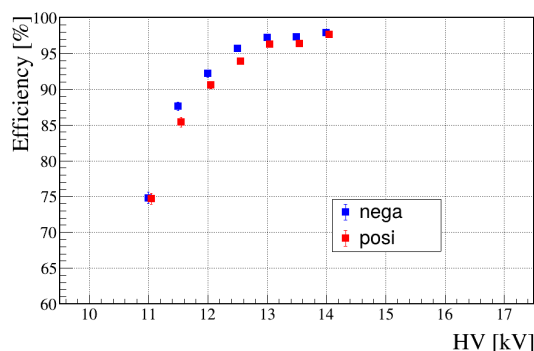


図 5.27: CS-6301 (フィルム塗布) の検出効率の HV 依存性。

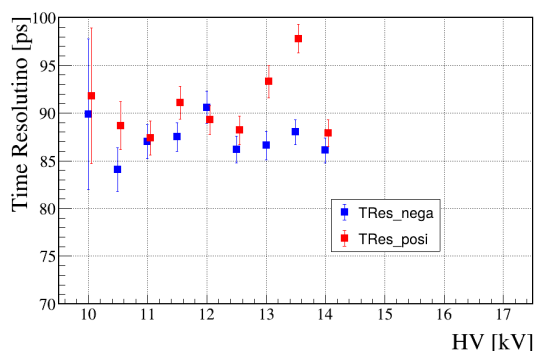


図 5.28: CS-6301 (フィルム塗布) の時間分解能の HV 依存性。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

CS-6301 (フィルム塗布) の Y 方向位置スキャンは、w/ low-pass filter、HV=14.0 kV、 $t_h = 35.0 \text{ mV}$ ($V_{\text{set}} = 1.0 \text{ V}$)、3 m cable の条件で行った。Y=0 mm は strip 6 の中心、Y=26 mm は strip 5 の中心におおよそ相当する。データを取得した地点は Y = 0, 6.0, 10.5, 12.5, 13.0, 13.5, 15.0 mm の 7 点である。

図 5.29 に検出効率の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて (つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって)、strip 6 だけの検出効率

は下がり、逆に strip 5 だけの検出効率は上がっている様子が確認できる。また、MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y position に依存せず 97 % 以上の検出効率が達成していた。

図 5.30 に時間分解能の Y position 依存性を示す。トリガーポジションが strip 6 の中央から strip 5 の中央に動くにつれて (つまり Y が 0.0 mm から 26.0 mm に増えるにしたがって)、strip 6 だけの時間分解能は悪化し、逆に strip 5 だけの時間分解能は上がっている様子が確認できる。

また、両図からストリップ間に最も近いデータ点は Y = 13.0mm の点であることが分かる。Y = 13.0 mm での OR 条件での検出効率は $98.0 \pm 0.3\%$ 、両ストリップの時間分解能の平均は $106.1 \pm 2.2\text{ps}$ であった。

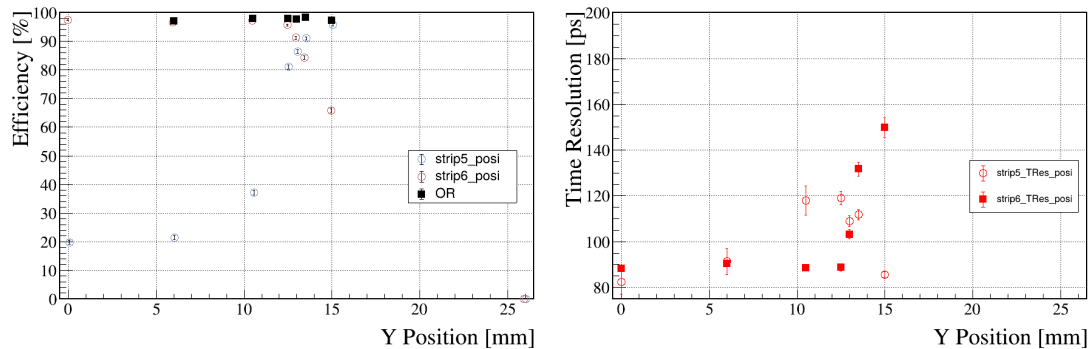


図 5.29: CS-6301 (フィルム塗布) のストリップ間での検出効率

図 5.30: CS-6301 (フィルム塗布) のストリップ間での時間分解能

5.7 まとめ

Air-Opaque、Graphit 33、KP-8348-1、CS-6301 (ガラス塗布)、CS-6301 (フィルム塗布)、セプルジーダの 6 種類の電極を使用して小型プロトタイプ MRPC を作成・試験した。第一弾の電極候補のうち複数 MRPC の高圧印加電極として使用可能であることが分かった。表 5.2 に第一弾の試験の結果を示す。

Graphit 33 は液体のまま日本に輸入することができなかったため、入手性には難があることが分かった。Graphit 33 を使用して作成した MRPC は安定して動作しており、ストリップ間での時間分解能も $81.5 \pm 1.45\text{ ps}$ と高かった。

KP-8348-1 は日本の企業から購入できる塗料であり、入手性は良い。MRPC として安定的に動作し、ストリップ間での時間分解能は $121.5 \pm 2.45\text{ ps}$ であった。

CS-6301 も日本の企業から購入できる塗料であり、入手性は良い。ガラス塗布の電極もフィルム塗布の電極も、MRPC として動作した。ストリップ間での時間分解能は、ガラス塗布が 120-160 ps、フィルム塗布が 106.1 ps であった。安定性についても問題なかった。

また、多くのプロトタイプで MRPC の動作は正常だったことから、新しいスペーサー、ガスタイト方式に問題がないことが確認できた。ただし、CS-6301 (ガラス塗布) でプラトーカーブのシフトが起きた原因として、実験中にスペーサーの接着力が低下してガスギャップが広がったことが考えられる。さらなる評価が必要である。

入手性も考慮すると KP-8348-1、CS-6301 の 2 つの塗料が日本での MRPC に使用する高圧印加電極として使用可能であるということが分かった。第一弾試験では確かめられていない、量産が容易か、品質が均一かなどといった点を確かめるため、第二弾で大型プロトタイプを作成する。

表 5.2: 第一弾電極の試験結果

電極	動作可否	ストリップ間での時間分解能	安定性	抵抗率	入手性
Air-Opaque	×	-	-	$5 \times 10^{10} \Omega/\text{cm}^2$	△
Graphit 33	○	$81.5 \pm 1.45\text{ps}$	○	$2 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	×
KP-8348-1	○	$121.5 \pm 2.45\text{ps}$	○	$2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$	○
CS-6301 (ガラス塗布)	○	120-160 ps	○	$4 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	○
CS-6301 (フィルム塗布)	○	$106.1 \pm 2.15\text{ps}$	○	$3 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$	○
セプルジーダ	×	-	-	$6 \times 10^5 \Omega/\text{cm}^2$	○

第6章 第二段プロトタイプの試験

第一弾（小型プロトタイプ）で基礎的な動作を確認した電極素材を中心に、より大面積・多スタック構成の MRPC を作製することで、電極の一様性を確かめるための性能検証を行った。第二弾プロトタイプの詳細については 4.4 節参照のこと。基本的な仕様をまとめた表 3.2 を、表 6.1 に再掲する。

表 6.1: 第二弾で作成したプロトタイプの仕様一覧 (再掲)

電極	塗布形態	塗布方法	ガラスサイズ	スタック数	抵抗率
CS-6301	フィルム塗布	マイクログラビア	940 mm × 230 mm	2 stack	$\sim 1 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$
CS-5302	フィルム塗布	マイクログラビア	870 mm × 230 mm	2 stack	$\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
KP-8348-1	ガラス塗布	スプレーガン	940 mm × 230 mm	2 stack	$\sim 2 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$
KP-K2919-1	フィルム塗布	スプレーガン	200 mm × 200 mm	1 stack	$\sim 2 \times 10^8 \Omega/\text{cm}^2$

(すべてのプロトタイプで、1 stack のガスギャップ構成は $260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps}$ である。)

6.1 実験室での高圧印加試験

5.2 節と同様に、第二弾のプロトタイプでも最低限の動作確認を実験室にて行った。試験方法、セットアップは基本的に同じである。約 1 m 長の 3 台については、読み出し PCB に用意されている読み出し用コネクタが U.FL コネクタであるため、U.FL から mmcx への変換ケーブルで mmcx-input のアンプに入力した。

全てのチェンバーで問題なく宇宙線の信号を観測することができた。

6.2 ビーム試験

第二弾でも第一弾と同様に、LEPS2 ビームラインでビーム試験を行った。試験に使用した機器、ビームラインの仕様や試験のセットアップは第一弾と同様である。第 5 章を参照のこと。

6.3 測定項目・方法

本試験では、電極や張られる電場の一様性の確認を目的に、大型プロトタイプの様々な点でのパフォーマンス評価を行った。つまり、第一弾でも行った評価に加えて、ストリップに平行な方向 (X 方向) のスキャンも行った。

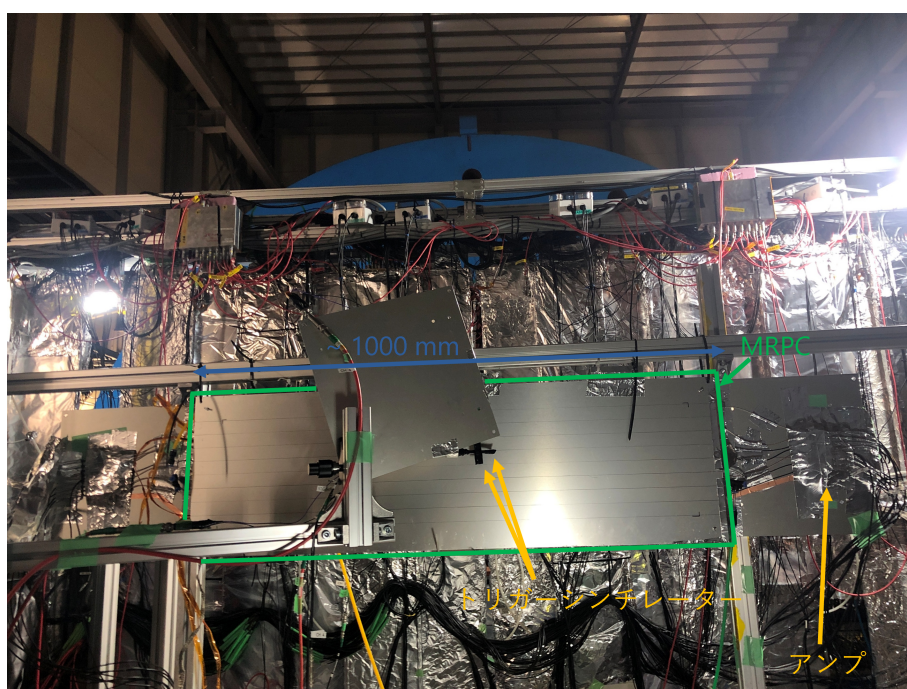


図 6.1: 第二弾プロトタイプ試験の様子

第二弾プロトタイプ試験の様子。中央の遮蔽用アルミボックスの中に MRPC が入っている。ビーム下流からの写真で、チェンバーの中央に設置した 2 本のプラスチックシンチレータが見えている。

6.4 結果

6.4.1 CS-6301

CS-6301 では、図 6.2 に示す点でデータの取得ができた。ただし、図中黄色のバツで印した 2 点でデータを取った後、15 kV 以上の高い電圧をかけた際に HV 供給線の周りで放電が起きるようになった。テスト実験中にカプトンテープで追加の絶縁保護を行って高い電圧をかけられるようにはなったが、大きなノイズが乗って落ちなくなった。また、4 枚ある高圧印加電極のうち 1 枚が故障し、電圧を適切に印加できなくなるアクシデントもあった。これは電極 1 枚ずつに電圧を掛け、暗電流が見えるかチェックする方法で確かめた。電圧を印加できない原因としては塗料と HV 供給線の接触不良などが考えられる。時間の制限もあり、様々な X position でデータを取得することは断念した。そのため非常に限られた数の点でしかデータを取得できていない。

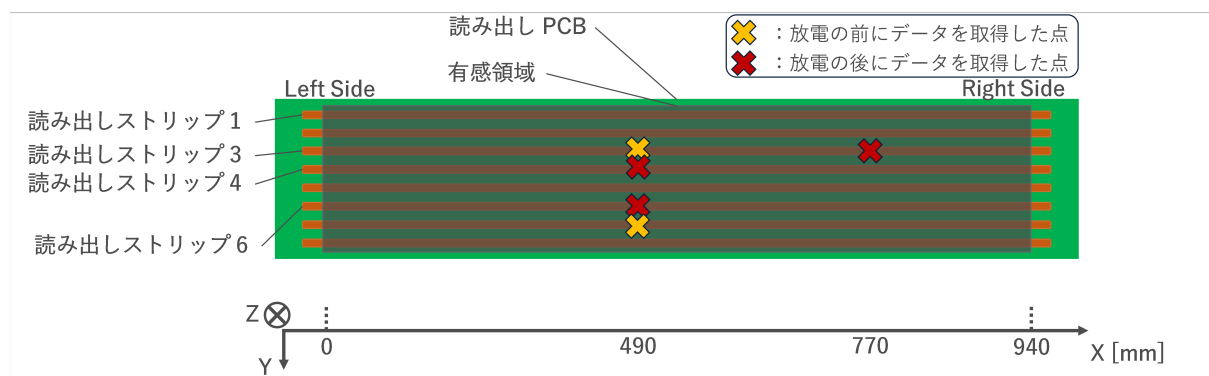


図 6.2: データを取得した場所 (CS-5302)。

最良のパフォーマンス (ストリップ中心)

放電が起こる前にストリップ 3 の中央 (X=490) で HV スキャンを行って得られた、検出効率の HV 依存性を図 6.3 に、時間分解能の HV 依存性を図 6.4 に示す。検出効率は 12 kV でプラトーに達し、99.6 % であった。時間分解能は 13 kV で最良となり、77.8 ps であった。

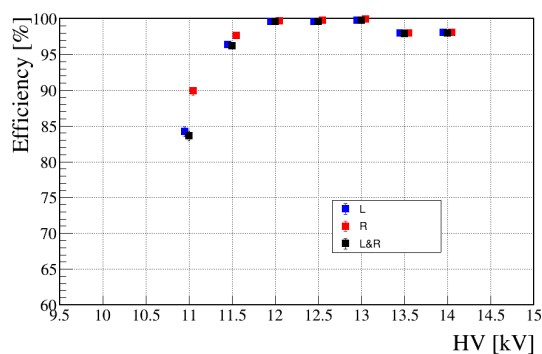


図 6.3: 第二弾 CS-6301 の検出効率の HV 依存性。

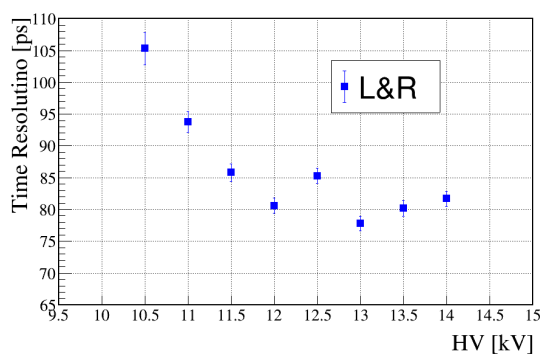


図 6.4: 第二弾 CS-6301 の時間分解能の HV 依存性。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

放電が起こった後、strip 4 と 3 の間で Y 方向位置スキャンを、HV=14.5 kV、th= 35.0 mV ($V_{\text{set}}=1.0$ V)、X = 490 mm の条件で行った。

Y=0 mm は strip 4 の中心、Y=26 mm は strip 3 の中心におおよそ相当する。データを取得した地点は Y = 0, 6.5, 13.0, 19.5, 26 mm の 5 点である。図 6.5 に検出効率の Y position 依存性を示す。MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y position に依存せず 98 % 以上の検出効率が達成していた。図 6.6 に時間分解能の Y position 依存性を示す。ストリップ中心では 100 ps ほどの時間分解能を持っており、トリガー位置がストリップ中心から離れていくほど分解能が悪化している。

両図からストリップ間は Y = 11.5mm の点と Y = 14.5mm の間にあると考えられる。スキャン間隔が荒くストリップ間の十分近傍でのデータは取れていないが、その他の点での振る舞いから、ストリップ間でのパフォーマンスは検出効率が 95 % 以上、時間分解能が 100-140 ps 程度であると考えられる。

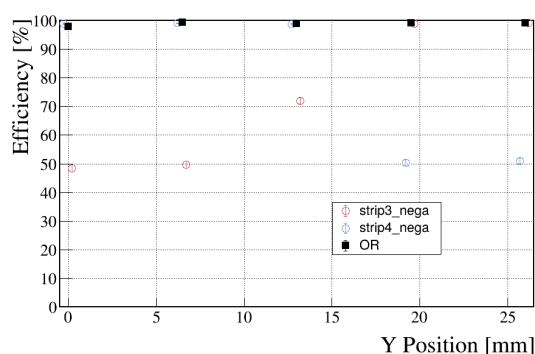


図 6.5: 第二弾 CS-6301 のストリップ間での検出効率。

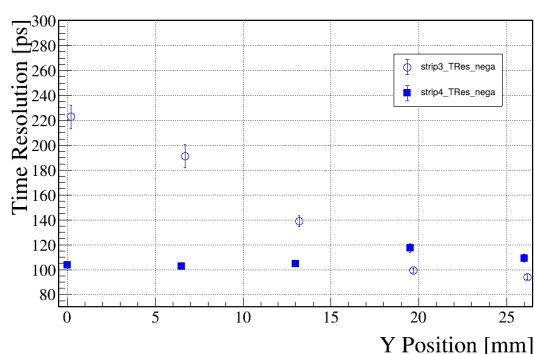


図 6.6: 第二弾 CS-6301 のストリップ間での時間分解能。

6.4.2 CS-5302

CS-5302 では、図 6.7 に示すようにチェンバーの片方の端からもう片方の端まで 5 点にわたってデータを取得することができた。データを取得した点の X position は X = 50, 250, 520, 680, 830 mm である。各点で HV スキャンと Y position スキャンを行った。Y position スキャンを行った HV の値は X position の小さい順に 14.5 kV、14.0 kV、14.5 kV、14.5 kV、14.5 kV である (図 6.7)。スレッシュホールドの値は全ての点で 35.0 mV ($V_{\text{set}} = 1.0$ V) である。

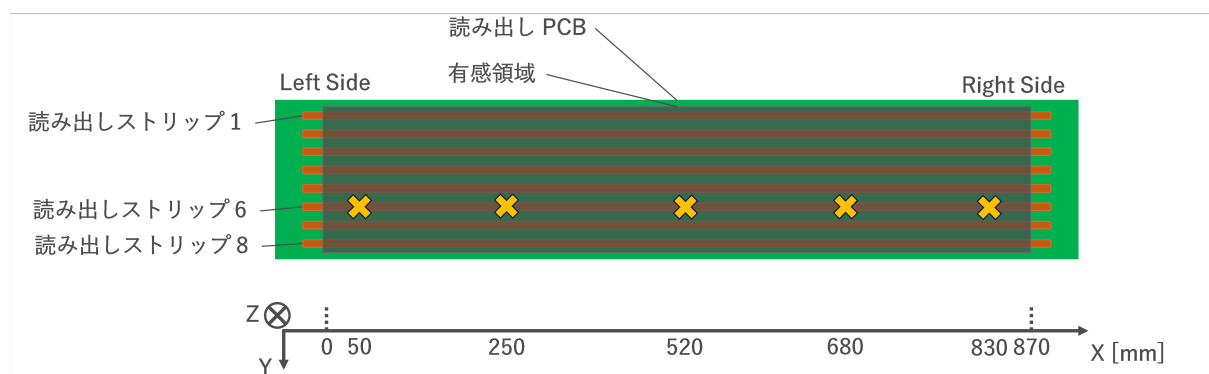


図 6.7: データを取得した場所 (CS-5302)。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

図 6.8 にストリップ中央 $X = 520\text{mm}$ での検出効率の HV 依存性を示す。図 6.9 は時間分解能の HV 依存性である。印加電圧が 11.5 kV でプラトーに達しており、 99.4% の検出効率を達成している。時間分解能は印加電圧には依存せず、安定して $75\text{ ps} \sim 80\text{ ps}$ であった。

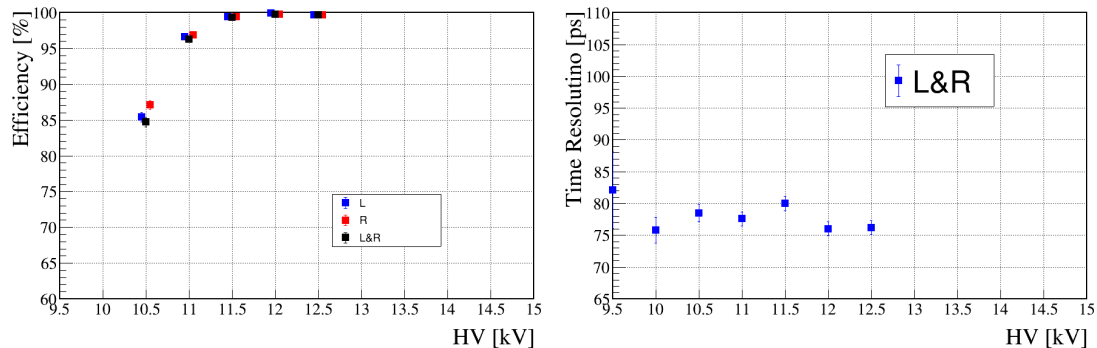


図 6.8: 第二弾 CS-5302 の検出効率の HV 依存性 (center)。 図 6.9: 第二弾 CS-5302 の時間分解能の HV 依存性 (center)。

一方、中央以外での測定は中央での測定から 12 時間ほど経過したのちにデータを取得したが、それらの点では中央と違った振る舞いが見られた。中央以外の点の代表として $X = 830\text{ mm}$ での HV スキャンの結果を、図 6.10 と図 6.11 に示す。中央で取得したデータ (図 6.8) と比較すると、プラトーカーブが高電圧側にシフトしている。この原因としてガスギャップが広がったこと他、今回はダブルスタック型なので、4 枚ある電極のうち 1 枚が故障して電圧が正常に印加できていない可能性などが考えられる。

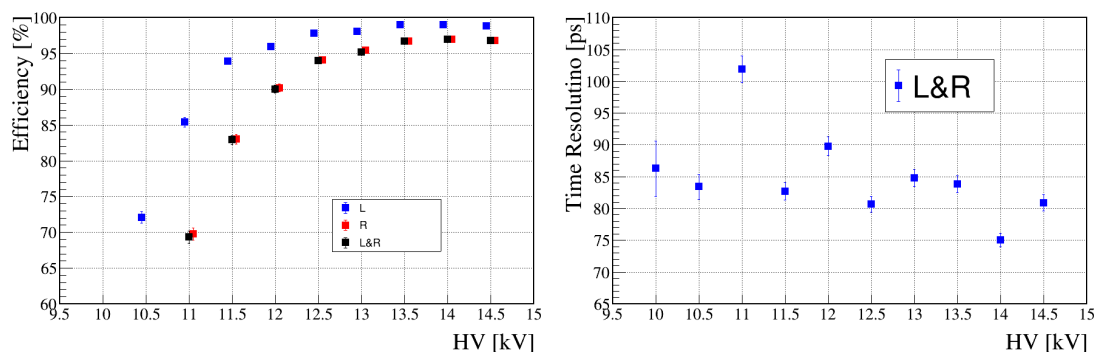


図 6.10: 第二弾 CS-5302 の検出効率の HV 依存性 (most right)。 図 6.11: 第二弾 CS-5302 の時間分解能の HV 依存性 (most right)。

図 6.12 に検出効率、図 6.13 に時間分解能が、 X position ごとにどう変わるかを示している。全体的に安定した動作を示しており、 $X = 820\text{ mm}$ の点で Efficiency が 96% と落ちていることを除くと、どの場所でも 99% 以上の検出効率、 $70\text{ ps} \sim 80\text{ ps}$ の時間分解能が出ていた。 $X = 820\text{ mm}$ の点は HV 供給点に最も近い点であり、十分な電圧は掛かっていたと考えられる。考えられる原因としては、読み出し PCB が反っており、この点でガスボリュームから遠ざかってしまったために誘起される信号が小さくなってしまったなどという可能性がある。いずれにせよ、電極の問題よりは組み立て時の不良などが原因と考えたほうが自然である。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

図 6.14 と図 6.15 に、チェンバーの中央 ($X=520\text{ mm}$) で行った Y position スキャンで得られた、検出効率と時間分解能の Y position 依存性を示す。スキャンは strip 4 と strip 3 の間で行い、条件は $HV=14.5\text{ kV}$ 、

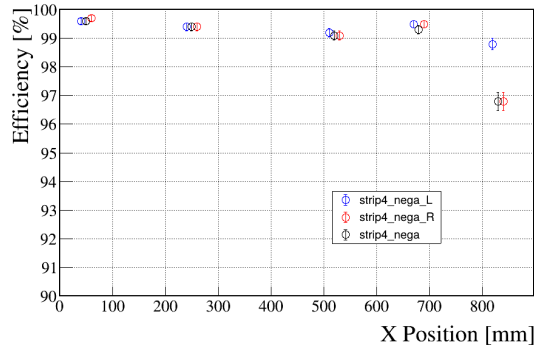


図 6.12: それぞれの場所 (X position) での第二弾 CS-5302 の検出効率。

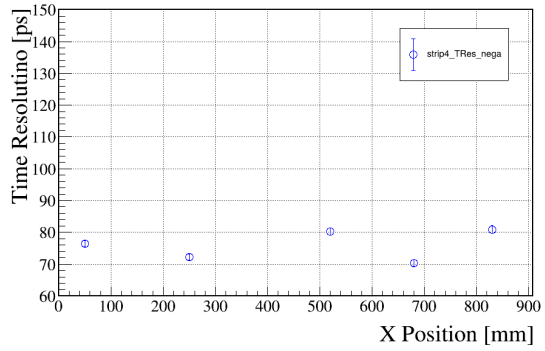


図 6.13: それぞれの場所 (X position) での第二弾 CS-5302 の時間分解能。

threshold = 35.0 mV である。

MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y position に依存せず 99 % 以上の検出効率を達成していた。両図からストリップ間に最も近いデータ点は Y=13.0 mm の点であることが分かる。そこでの OR 条件での検出効率は $99.1 \pm 0.17\%$ 、両ストリップの時間分解能の平均は $85.8 \pm 1.37\text{ps}$ であった。

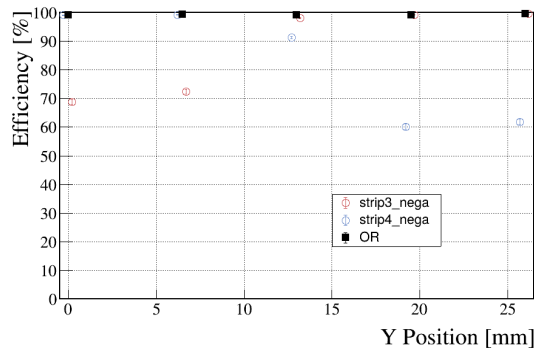


図 6.14: 第二弾 CS-5302 のストリップ間での検出効率。(Center)

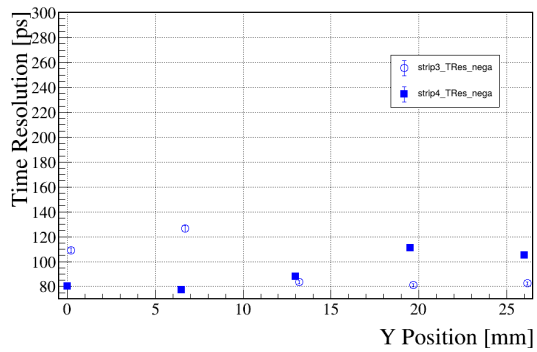


図 6.15: 第二弾 CS-5302 のストリップ間での時間分解能。(Center)

6.4.3 KP-8348-1

KP-8348-1 では、図 6.16 に示すようにストリップ 6 の両端と中央の 3 点でデータを取得した。データを取得した点の X position は $X = 170, 460, 750 \text{ mm}$ である。各点で HV スキャンと Y position スキャンを行った。Y position スキャンを行った条件は全ての点で HV=13.5 kV、スレッシュホールドは 35.0 mV ($V_{\text{set}} = 1.0 \text{ V}$) である (図 6.16)。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

(strip 6 w/ resistors, $\text{th}=1.0 \text{ V}$) ストリップ 3 の中央 ($X=460$) で HV スキャンを行って得られた、検出効率の HV 依存性を図 6.17 に、時間分解能の HV 依存性を図 6.18 に示す。検出効率は 11.5 kV でプラトーに達し、99 % 以上となった。時間分解能は 11.5 kV で最悪の 110 ps であったが、13.0 kV 付近では約 95 ps であった。

HV = 13.5 kV, $V_{\text{thresh}} = 35.0 \text{ mV}$ で行った X positoin スキャンの結果得られた、検出効率・時間分解能の X position 依存性をそれぞれ図 6.19、図 6.20 に示す。検出効率は 3 つの点すべてで 99 % を超えて

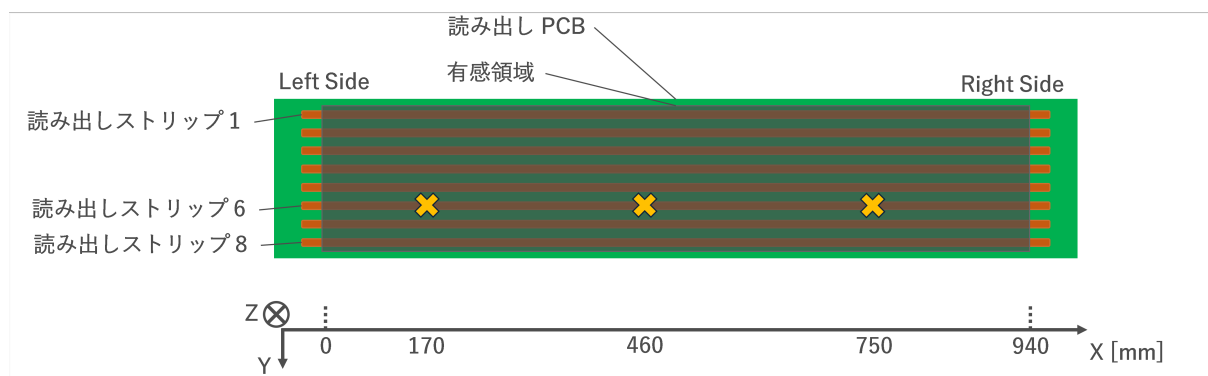


図 6.16: データを取得した場所 (KP-8348-1)。

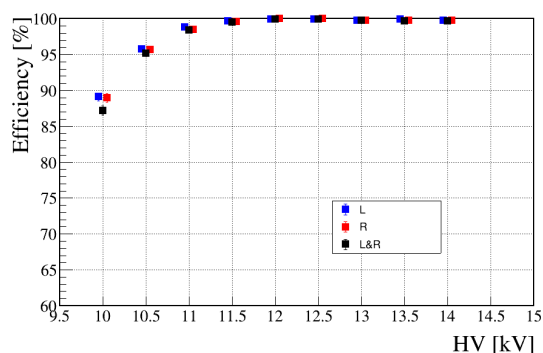


図 6.17: 第二弾 KP-8348-1 の検出効率の HV 依存性 (center)。

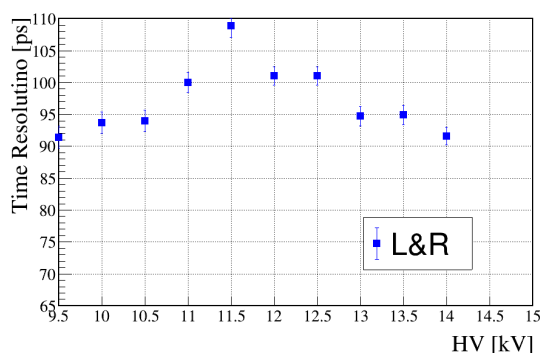


図 6.18: 第二弾 KP-8348-1 の時間分解能の HV 依存性 (center)。

いた。時間分解能はチェンバーの右側 (X が増える方向) に近づくほど悪化する振る舞いを見せ、90-110 ps に収まった。

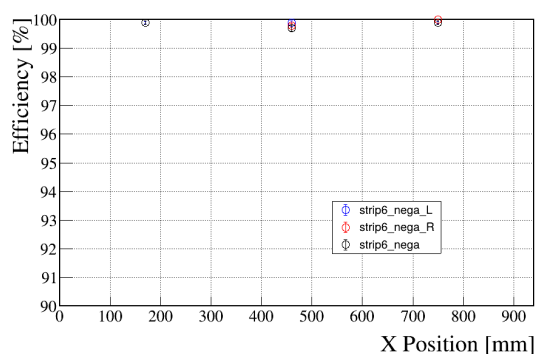


図 6.19: それぞれの場所 (X position) での第二弾 KP-8348-1 の検出効率。

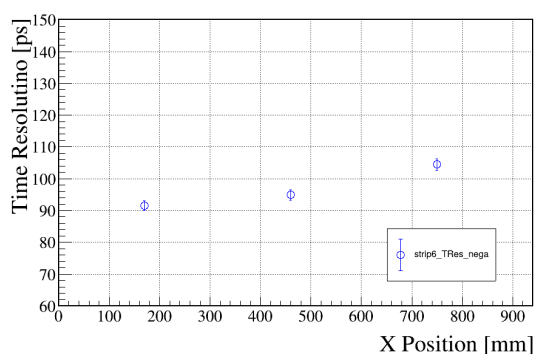


図 6.20: それぞれの場所 (X position) での第二弾 KP-8348-1 の時間分解能。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

図 6.21 と図 6.22 に、チェンバーの中央 (X=460 mm) で行った Y position スキャンで得られた、検出効率と時間分解能の Y position 依存性を示す。スキャンは strip 6 と strip 5 の間で行い、条件は HV=13.5 kV、threshold = 35.0 mV である。Y = 0.0, 6.5, 9.0, 10.0, 13.0, 19.5, 26.0 mm の 7 点でデータを取得した。

MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行えば Y

position に依存せず 99 % 以上の検出効率を達成していた。両図からストリップ間に最も近いデータ点は Y=9.0 mm の点であることが分かる。そこでの OR 条件での検出効率は $99.9 \pm 0.001 \%$ 、両ストリップの時間分解能の平均は $101.0 \pm 1.42 \text{ ps}$ であった。

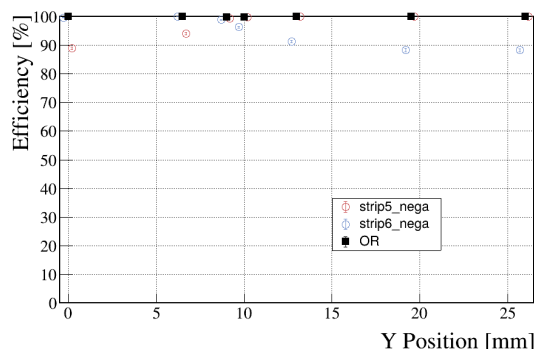


図 6.21: KP-8348-1 のストリップ間での検出効率。(Center)

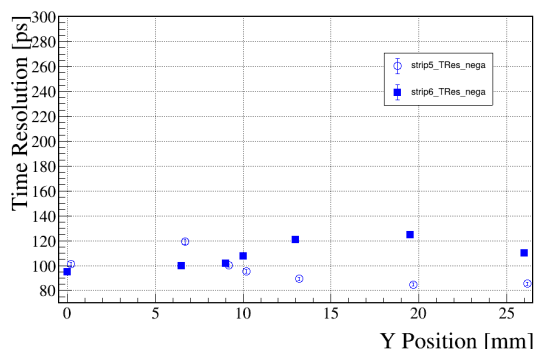


図 6.22: KP-8348-1 のストリップ間での時間分解能。(Center)

6.4.4 KP-K2919-1

KP-K2919-1 では、ストリップ 3 の中心 (X=100 mm) でデータを取得した。この点で HV スキャンと Y position スキャンを行った。

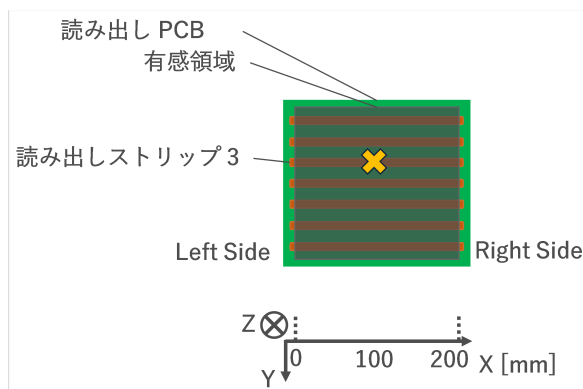


図 6.23: データを取得した場所 (KP-K2919-1)。

ストリップ中心での検出効率・時間分解能

図 6.24 に検出効率の HV 依存性、図 6.25 に時間分解能の HV 依存性を示す。検出効率は HV を上げるにつれ上昇したが、プラトーに達した時点でも 80 % 程度の検出効率に留まった。ストリップ右端の検出効率は 90 % を超えたが左端のが 80 % 程度であったためである。時間分解能は HV に依存せず 100 ps 程度であった。

このチェンバーは 1 スタック構成であるため、右端の 90 % 程度という検出効率は説明可能である。

検出効率・時間分解能の Y 方向位置スキャン

図 6.26 と 図 6.27 チェンバーの中央 (X=100 mm) での Y position スキャンで得られた、検出効率と時間分解能の Y position 依存性を示す。スキャンは strip 3 と strip 2 の間で行い、条件は HV=12.5 kV、

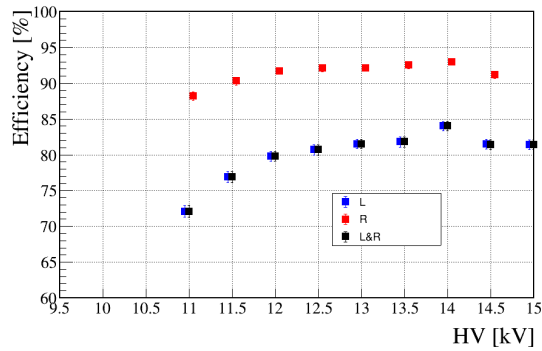


図 6.24: 第二弾 KP-K2919-1 の検出効率の HV 依存性。

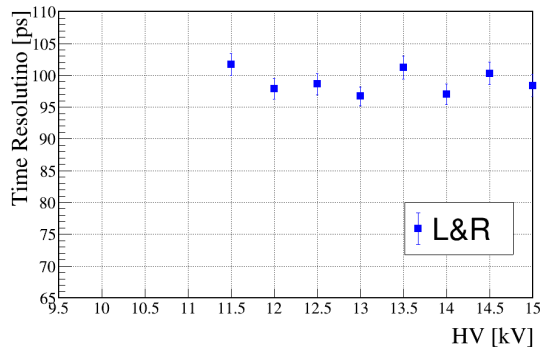


図 6.25: 第二弾 KP-K2919-1 の時間分解能の HV 依存性。

threshold = 19.35 mV である。Y = 0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 14.0, 16.0, 20.0, 24.0 mm の 8 点でデータを取得した。

MRPC が鳴ったという判定を、少なくとも片方のストリップが鳴ったという条件 (OR) で行った場合、検出効率は Y position が大きくなるにつれて (HV 供給点に近づくほど) 緩やかに上がった。これは KP-K2919-1 の抵抗率が高く、電圧降下が起こっていることが原因である可能性がある。両図からストリップ間に最も近いデータ点は Y = 14.0 mm の点であることが分かる。そこでの OR 条件での検出効率は $83.0 \pm 0.67\%$ 、両ストリップの時間分解能の平均は 164.2 ± 5.27 ps であった。

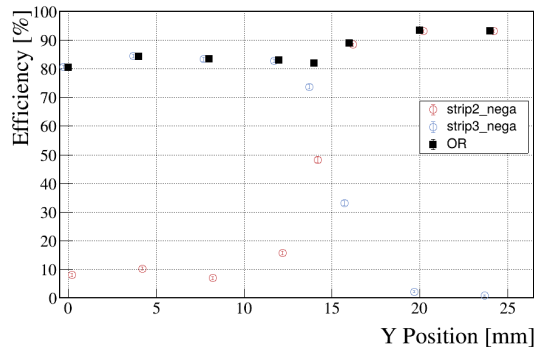


図 6.26: KP-K2919-1 のストリップ間での検出効率。

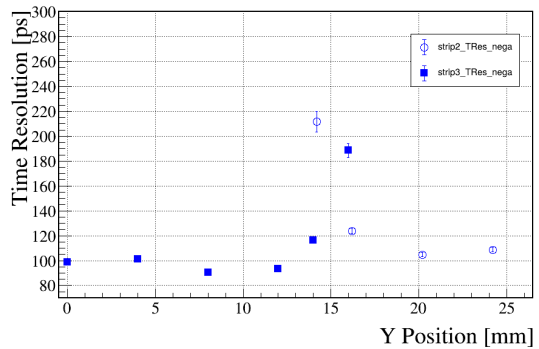


図 6.27: KP-K2919-1 のストリップ間での時間分解能。

6.5 まとめ

CS-6301 (フィルム塗布)、CS-5302 (フィルム塗布)、KP-8348-1、KP-K2919-1 の 4 種類の電極を使用して、1 m 長の大型プロトタイプ MRPC を作成・試験した。表 6.2 に第二弾試験の結果を示す。

CS-6301 は 10 gap の MRPC として合理的な 99% の検出効率、(最良で) ~ 80 ps の時間分解能を示した。放電のトラブルとそれに伴う性能低下はあったものの、ストリップ間でも時間分解能は落ちていなかった。量産性や抵抗率の再現性も高いことが確かめられた。一方、テスト実験中、使用した CS-6301 の 4 枚のうち 1 枚に高圧を印加できなくなった。塗料に問題があるのか、単に組み立ての精度が悪く接触不良などを起こしたのかは定かではないが、原因の究明が必要である。

CS-5302 は第二弾で新しく試験した電極であるが、MRPC として正常に動作した。時間分解能が安定して高く、チェンバーの広い範囲、またストリップ間でも約 80 ps を記録した。CS-6301 と同じく量産性や抵抗率の再現性も高い。一方、最初にとったチェンバー中央でのデータとそれ以外のデータで、プラトーカーブが高電圧側にシフトする振る舞いが見られた。この原因がガスギャップが広がるなど電極以外の部

分にあるのか、4枚ある電極のうち1枚が故障して電圧が正常に印加できていないなど電極にあるのかは分からない。更なる調査と評価が必要である。

KP-8348-1は99%以上の検出効率、100 ps程度の時間分解能を示した。これも10 gap MRPCとして合理的なパフォーマンスの範囲である。作成した電極6枚のうち5枚が $10^4 \Omega/\text{cm}^2$ オーダーの抵抗率、1枚が $10^3 \Omega/\text{cm}^2$ オーダーの抵抗率を持っており、品質のばらつきは大きい。時間分解能はCSシリーズ程は高くなかったが、非常に安定して動作し、故障や奇妙な振る舞いなどはなかった。

KP-K2919-1は第二弾で新しく作成した電極で、シングルスタック型MRPCを作成した。検出効率が～80%と低かった。時間分解能は100 ps程度であった。KP-K2919-1の抵抗率が $10^8 \Omega/\text{cm}^2$ と高いため、HV供給地点から離れると電圧降下を起こしているという可能性がある。

表 6.2: 第二弾電極の試験結果

電極	動作可否	ストリップ間での時間分解能	安定性	量産性	抵抗率の再現性
CS-6301 (フィルム塗布)	○	100 – 140 ps	△	高い	○
CS-5302 (フィルム塗布)	○	85.8 ± 1.37 ps	△	高い	○
KP-8348-1	○	101.0 ± 1.42 ps	○	低い	△
KP-K2919-1	○	120 – 180 ps	○	低い	?

表 6.3: temp

電極	動作可否	ストリップ中央での性能	ストリップ間での性能	安定性	量産性	抵抗率の再現性
③ CS-6301 (フィルム塗布)	○	99.6 %, 77.8 ps	(95 + %), (~100 ps)	△	高い	○
④ CS-5302 (フィルム塗布)	○	99.4 %, 70 – 80 ps	99.1 %, ~80 ps	△	高い	○
⑤ KP-8348-1	○	99.9 %, ~100 ps	99.9 %, 101.0 ps	○	低い	△
⑥ KP-K2919-1	○	~80 %, ~100 ps	~80 %, 110 – 150 ps	○	低い	?

表 6.4: temp

Chamber	on a strip	between strips	stability	producibility	reproducibility
③ CS-6301 (on Film)	99.6 %, 77.8 ps	(95 + %), (100 ps)	△	○	○
④ CS-5302 (on Film)	99.4 %, 70 – 80 ps	99.1 %, ~ 80 ps	△	○	○
⑤ KP-8348-1	99.9 %, ~100 ps	99.9 %, 101.0 ps	○	△	△
⑥ KP-K2919-1	~ 80 %, ~ 100 ps	~ 80 %, 120 – 180 ps	○	△	?

第7章 結論と今後の展望

本研究では、J-PARC π 20 ビームラインにおける様々なハドロン分光・探索実験に向けて、MARQ スペクトロメーター内に組み込む予定の MRPC 検出器の開発を行った。特に、生産停止となった従来の高圧印加電極に代わる電極を開発することが主眼である。電極への要求性能は、MRPC 検出器の有感領域全体に均一な電場を張れること、日本で容易に入手可能であること、将来のマスプロダクションに適した量産性を持っていることである。

今回は日本で入手可能な塗料を中心に探索し、コルコート (株) 製 CS シリーズ (CS-6301, CS-5302)、関西ポリマー (株) 製 KP シリーズ (KP-8348-1, KP-K2919-1)、信越ポリマー (株) 製セプルジダ、Badger Air-Brush 社製 Air-Opaque、Kontakt Chemie 社製 Graphit 33 の使用を試した。電極の開発は以下の 2 段階で行った。まず第一段階として、電極の製作・入手の難易度を評価するとともに、各電極が MRPC 検出器の高圧印加電極として使用可能であるかを試験した。各塗料を塗布したガラスやフィルムなどを試作し、これを使用して小型の MRPC 検出器を作成した。SPRING-8 LEPS2 ビームラインで電子ビームを用いて行ったテスト実験で、作成した小型 MRPC 検出器の基本的な性能を評価した。次に第二段階として、第一段階で有望と評価された CS シリーズと KP シリーズについて、詳細な調査を行った。約 1 m の長さを持つ大型プロトタイプを作成し、電極の一様性が MRPC 検出器のパフォーマンスに与える影響を調査した。SPRING-8 LEPS2 ビームラインにて電子ビームを用いてテスト実験を行い、チェンバー上の複数の点でパフォーマンスを評価した。CS シリーズについては、塗工の膜厚を変えることで表面抵抗率の値を調整することが可能であることを確かめ、目的の抵抗率を得るための手法や再現性を確立した。

第一弾の試験の結果、Graphit 33、KP-8348-1、CS-6301 (ガラス塗布)、CS-6301 (フィルム塗布) が MRPC の高圧印加電極として使用可能であることが分かった。どの電極でも、ストリップ中心・ストリップ間の両方で 95 % 以上の検出効率を達成した。時間分解能もストリップ中心で 70-90 ps、ストリップ間で 80-120 ps 程度と、5 ギャップ MRPC として典型的な値であった。それ以外のセプルジダ、Air-Opaque は高電圧を印加することができないのか、宇宙線の信号を見ることが出来なかった。

第二弾の試作では、第一弾で動作した電極を中心に、大型化した際に関西ポリマー社製 KP-8348-1、コルコート社製 CS-6301 に加えて、同じく KP シリーズの KP-K2919-1、CS シリーズの CS-5302 も試験した。CS-6301 は 10 gap の MRPC として合理的な 99% の検出効率、(最良で) ~ 80 ps の時間分解能を示した。放電のトラブルとそれに伴う性能低下はあったものの、ストリップ間でも時間分解能は落ちていなかった。量産性や抵抗率の再現性も高いことが確かめられた。一方、テスト実験中、使用した CS-6301 の 4 枚のうち 1 枚に高圧を印加できなくなった。塗料に問題があるのか、単に組み立ての精度が悪く接触不良などを起こしたのかは定かではないが、原因の究明が必要である。CS-5302 は第二弾で新しく試験した電極であるが、MRPC として正常に動作した。時間分解能が安定して高く、チェンバーの広い範囲、またストリップ間でも約 80 ps を記録した。CS-6301 と同じく量産性や抵抗率の再現性も高い。一方、最初に取ったチェンバー中央でのデータとそれ以外のデータで、プラトーカーブが高電圧側にシフトする振る舞いが見られた。この原因がガスギャップが広がるなど電極以外の部分にあるのか、4 枚ある電極のうち 1 枚が故障して電圧が正常に印加できていないなど電極にあるのかは分からない。更なる調査と評価が必要である。KP-8348-1 は 99 % 以上の検出効率、100 ps 程度の時間分解能を示した。これも 10 gap MRPC として合理的なパフォーマンスの範囲である。作成した電極 6 枚のうち 5 枚が $10^4 \Omega/\text{cm}^2$ オーダーの抵抗率、1 枚が $10^3 \Omega/\text{cm}^2$ オーダーの抵抗率を持っており、品質のばらつきは大きい。時間分解能は CS シリーズ程は高くなかったが、非常に安定して動作し、故障や奇妙な振る舞いなどはなかった。KP-K2919-1 は第二弾で新しく作成した電極で、シングルスタック型 MRPC を作成した。検出効率が ~ 80 % と低かった。時間分解能は 100 ps 程度であった。KP-K2919-1 の抵抗率が $10^8 \Omega/\text{cm}^2$ と高いため、HV 供給地点から離

れると電圧降下を起こしているという可能性がある。

今後、MARQ スペクトロメーターの建設に向けて、安定した性能の MRPC を大量に生産する必要がある。今回、プラトーカーブが高電圧側にシフトする振る舞いが CS シリーズに見られた。CS シリーズを使った MRPC は時間分解能は高かったが、この不安定な挙動は懸念点である。原因が電極の素材や作成方法にあるのか、その他組み立ての精度の悪さなどから来るものなのかは調査が必要である。また、機械塗工のフィルム塗布という、大量生産に適しており抵抗率の再現性も高い電極の作成方法が可能性として浮上した。しかしフィルム塗布の場合、ガラスと高圧印加電極の接触を担保するものがない。今回は物理的に押し付けて接触を確保したが、実機を作成する際には安定的に接触が担保される構造や貼り付け手法が必要となる。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。

謝辞

本研究、本修士論文を執筆するにあたり大変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。

指導教員である富田夏希助教には、日々多くの助言や励ましをいただき、研究を前に進め成果を発表する手助けをしていただきました。ありがとうございます。

台湾からのコラボレータである Wen-Chen Chan、Ming-Lee Chu、Chia-Yu Hsieh にはフロントエンドエレクトロニクスや読み出しストリップの開発に協力をいただきました。特に、Chia-Yu Hsieh には、テスト実験でのデータ取得に多大な貢献をしていただきました。ありがとうございました。

大阪大学核物理研究センターの野海博之教授、石川貴嗣教授、鈴木謙助教、白鳥昂太郎助教、他 MARQ コラボレーションの皆さまには、毎回のミーティングで本研究の意義や重要性、確認すべきことなどについて助言をいただきました。MARQ コラボレーションに限らず、大阪大学核物理研究センターの皆さまには大変お世話になりました。特に LEPS2 実験グループの皆さまには、ビームラインをお借りするのみならず、テスト実験の遂行に多大な協力をいただきました。本当にありがとうございました。

京都産業大学の新山雅之教授、学生たち、および原子核・ハドロン物理学研究室の岡崎凜大郎くん、堀祐輔くんには MRPC プロトタイプ製作や施設までの搬入、データ取得を大いに助けていただきました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 宇田隆佑. 2023 年度大阪大学大学院理学研究科修士論文. <https://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/public>.
- [2] Mauro Anselmino, Enrico Predazzi, Svante Ekelin, Sverker Fredriksson, and D. B. Lichtenberg. Diquarks. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 65, pp. 1199–1233, Oct 1993.
- [3] J-PARC E50 proposal H. Noumi et al. <http://www.j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac1301/pdf/P50201219.pdf>.
- [4] Extension of the J-PARC Hadron Experimental Facility: Third White Paper, 2021. arXiv: 2110.04462 [nucl-ex].
- [5] 鈴木翔太. 2023 年度京都大学大学院理学研究科修士論文. <https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/articles-wp/>.
- [6] H. C. Kim H. Noumi K. Shirotori Prog. Theor. Exp. Phys. 103D01 (2014). S. H. Kim, A. Hosaka.
- [7] 赤石貴也. 2018 年度大阪大学大学院理学研究科修士論文. <https://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/public>.
- [8] 林双葉. 2023 年度大阪大学大学院理学研究科修士論文. <https://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/public>.
- [9] I. Crotty, J. Lamas Valverde, G. Laurenti, M.C.S. Williams, and A. Zichichi. The non-spark mode and high rate operation of resistive parallel plate chambers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 337, No. 2, pp. 370–381, 1994.
- [10] Christian Lippmann and Werner Riegler. Space charge effects in resistive plate chambers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 517, No. 1, pp. 54–76, 2004.
- [11] Akindinov, A.N., Alici, A., Anselmo, F., Antonioli, P., Baek, Y., Basile, M., Romeo, G. Cara, Cifarelli, L., Cindolo, F., Cosenza, F., Caro, A. De, Pasquale, S. De, Bartolomeo, A. Di, Girard, M. Fusco, Guida, M., Hatzifotiadou, D., Kaidalov, A.B., Kim, D.W., Kim, D.H., Kisselev, S.M., Laurenti, G., Lee, K., Lee, S.C., Lioulev, E., Luvisetto, M.L., Margotti, A., Martemyanov, A.N., Nania, R., Noferini, F., Otiougova, P., Pierella, F., Polozov, P.A., Scapparone, E., Scioli, G., Sellitto, S.B., Smirnitski, A.V., Tchoumakov, M.M., Valenti, G., Vicinanza, D., Voloshin, K.G., Williams, M.C.S., Zagreev, B.V., Zampolli, C., and Zichichi, A. Space charge limited avalanche growth in multigap resistive plate chambers. *Eur Phys J C*, Vol. 34, pp. s325–s331, 2004.
- [12] Yi Wang, Jing-Bo Wang, Jianping Cheng, Yuanjing Li, Qian Yue, Huangshan Chen, and Jin Li. Production and quality control of STAR-TOF MRPC. *Nucl. Instrum. Meth. A*, Vol. 613, pp. 200–206, 2010.

- [13] W.J. Llope. Multigap rpcs in the star experiment at rhic. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 661, pp. S110–S113, 2012. X. Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 2010).
- [14] A. Akindinov, S. Alessandrini, A. Alici, P. Antonioli, S. Arcelli, M. Basile, G. Cara Romeo, D. Cavazza, L. Cifarelli, F. Cindolo, I. D’Antone, A. De Caro, S. De Pasquale, A. Di Bartolomeo, M. Furini, M. Fusco Girard, V. Golovin, Yu. Grishuk, M. Guerzoni, M. Guida, D. Hatzifotiadou, W.W. Jung, H.N. Kim, D.H. Kim, D.W. Kim, S. Kiselev, G. Laurenti, M.L. Luvisetto, D. Mal’kevich, A. Margotti, F. Massera, S. Meneghini, R. Michinelli, R. Nania, F. Noferini, G. Pancaldi, A. Pesci, R. Pilastrini, O. Pinazza, R. Preghenella, M. Rizzi, M. Ryabinin, E. Scapparone, G. Scioli, S. Sellitto, F. Semeria, S. Serra, R. Silvestri, A. Smirnitski, E. Ugolini, E. Usenko, K. Voloshin, M.C.S. Williams, B. Zagreev, C. Zampolli, A. Zichichi, A. Zinine, A. Zucchini, and M. Zuffa. The mrpc detector for the alice time of flight system: Final design and performances. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 158, pp. 60–65, 2006. Proceedings of the 8th International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.
- [15] F. Carnesecchi. Performance of the alice time-of-flight detector at the lhc. *Journal of Instrumentation*, Vol. 14, No. 06, p. C06023, jun 2019.
- [16] ALICE collaboration. Performance of the alice experiment at the cern lhc. *International Journal of Modern Physics A*, Vol. 29, No. 24, p. 1430044, 2014.
- [17] Akmete A. Albanese R. et al. Ahdida, C. The ship experiment at the proposed cern sps beam dump facility. *Eur. Phys. J. C* 82, 486 (2022), <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10346-5>.
- [18] A. Blanco, F. Clemencio, P. Fonte, C. Franco, N. Leonardo, L. Lopes, C. Loureiro, J. Saraiva, and G. Soares. The ship timing detector based on mrpc. *Journal of Instrumentation*, Vol. 15, No. 10, p. C10017, oct 2020.
- [19] K. Watanabe, S. Tanaka, W.C. Chang, H. Chen, M.L. Chu, J.J. Cuenca-García, T. Gogami, D. González-Díaz, M. Niiyama, Y. Ohashi, H. Ohnishi, N. Tomida, and M. Yosoi. A compensated multi-gap rpc with 2 m strips for the leps2 experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 925, pp. 188–192, 2019.
- [20] N. Tomida, N. Tran, M. Niiyama, H. Ohnishi, and N. Muramatsu. Performance of tof-rpc for the bgoegg experiment. *Journal of Instrumentation*, Vol. 11, No. 11, p. C11037, nov 2016.
- [21] N Tomida, N Tran, M Niiyama, H Ohnishi, C Y Hsieh, M L Chu, W C Chang, J Y Chen, Y Matsumura, K Shiraishi, and T Hashimoto. The tof-rpc for the bgo-egg experiment at leps2. *Journal of Instrumentation*, Vol. 9, No. 10, p. C10008, oct 2014.
- [22] G. Dellacasa, et al. ALICE technical design report of the time-of-flight system (TOF). 2 2000.
- [23] P. Cortese, et al. ALICE: Addendum to the technical design report of the time of flight system (TOF). 4 2002.
- [24] S.H. Thoker, B. Satyanarayana, W. Bari, R.R. Shinde, and G. Majumder. Effect of electrode coat’s surface resistivity of resistive plate chamber on the space dispersion of induced charge. *Journal of Instrumentation*, Vol. 15, No. 09, p. T09010, sep 2020.

- [25] Akmete A. Albanese R. et al. Ahdida, C. The ship experiment at the proposed cern sps beam dump facility. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10346-5>.
- [26] M. Tosun, B. Bilki, and K.K. Sahbaz. Development of hybrid resistive plate chambers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1054, p. 168448, 2023.
- [27] Kensuke Yamamoto, Sei Ban, Kei Ieki, Atsuhiko Ochi, Rina Onda, Wataru Ootani, Atsushi Oya, and Masato Takahashi. Development of ultra-low mass and high-rate capable rpc based on diamond-like carbon electrodes for MEG II experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1054, p. 168450, 2023.
- [28] D. Loterman and M. Tytgat. Development of a Glass Resistive PlateChamber for the Phase-2 Upgrade of the CMS Detector at the Large Hadron Collider. MSc thesis in Physics and Astronomy, Ghent University (2014), <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002163596>. Accessed on 13 February 2025.
- [29] Zhu Weiping, Wang Yi, Feng Shengqin, Wang Jingbo, Huang Xinjie, Shi Li, V. Babkin, V. Golovatyuk, M. Rumiant c ev, G. Eppley, and T. Nussbaum. A thin float glass mrpc for the outer region of cbm-tof wall. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 735, pp. 277–282, 2014.
- [30] The SoLID Collaboration. Solid (solenoidal large intensity device) updated preliminary conceptual design report. http://lichen.phys.uregina.ca/~huberg/solid/Solid_preCDR_2017.pdf. Accessed on 24 January 2024.
- [31] 高橋準平. 2020 年度東北大学大学院理学研究科修士論文. <https://www1.lns.tohoku.ac.jp/~hadron/thesis.html>.
- [32] タニムラ株式会社 MK-APT 商品ページ. https://www.tanimura.biz/catalog/antistatic_cl_pettape.html. Accessed on 24 January 2024.
- [33] タニムラ株式会社 TW-CPT 商品ページ. https://www.tanimura.biz/catalog/conductive_pettape.html. Accessed on 24 January 2024.
- [34] 中興化成工業株式会社 ASB-110 商品ページ. <https://www.chukoh.co.jp/products/tape/asb-110/>. Accessed on 24 January 2024.
- [35] 中興化成工業株式会社 ASB-121 商品ページ. <https://www.chukoh.co.jp/products/tape/asb-121/>. Accessed on 24 January 2024.
- [36] トラスコ中山株式会社 SDT-1005 商品ページ. <https://www.orange-book.com/ja/c/products/index.html?itemCd=SDT1005+++++++3100>. Accessed on 24 January 2024.
- [37] Graphit33 商品ページ. <https://www.kontaktchemie.com/koc/KOCproductdetail.csp?division=&product=GRAPHIT%2033&ilang=en&plang=en>. Accessed on 24 January 2024.
- [38] Plastic70 商品ページ. <https://www.kontaktchemie.com/koc/KOCproductdetail.csp?division=&product=PLASTIK%2070&ilang=en&plang=en>. Accessed on 24 January 2024.
- [39] 関西ポリマー株式会社導電性フッ素樹脂コーティング. <https://kansaipolymer.co.jp/products/conductive>. Accessed on 14 February 2025.

- [40] 信越ポリマー株式会社セプロジーダ商品ページ. <https://www.shinpoly.co.jp/ja/product/product/material/seplegyda.html>. Accessed on 14 February 2025.
- [41] Vessel Surface Resistivity Checker 商品ページ. <https://www.vessel.co.jp/english/product/epa/621604>. Accessed on 17 February 2025.
- [42] 富田夏希. 2011 年度京都大学大学院理学研究科修士論文. <https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/articles-wp/>.
- [43] 株式会社サンラインクインスター. <https://fishing.sunline.co.jp/line/197/>. Accessed on 24 January 2024.
- [44] Botan Wang, Kai Sun, Yi Wang, Dong Han, Ingo Deppner, Norbert Herrmann, Baohong Guo, Xiaolong Chen, Daming Liu, and Qiunan Zhang. Development of a sealed mrpc with mylar spacers for high luminosity tof systems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1054, p. 168454, 2023.
- [45] ディスクリミネータチップ ADCMP573. <https://www.analog.com/jp/products/adcmp573.html>. Accessed on 12 February 2024.
- [46] Hadron Universal Logic Module. <https://openit.kek.jp/project/HUL>.
- [47] 松定プレシジョン株式会社 HV シリーズ. <https://www.matsusada.co.jp/product/power-supplies/high-voltage-modules/hv/>. Accessed on 24 January 2024.
- [48] SPring-8 ホームページ. <https://new.spring8.or.jp/index.php>. Accessed on 24 January 2024.
- [49] SPring-8 セベラルバンチ運転モード対応表. http://www.spring8.or.jp/ja/users/operation_status/schedule/bunch_mode. Accessed on 24 January 2024.
- [50] R.X. Yang, C. Li, Y.J. Sun, Y.K. Heng, S.S. Sun, H.L. Dai, Z. Wu, Z. Liu, X.Z. Wang, and F.F. An. Multi-peak pattern in multi-gap rpc time-over-threshold distributions and an offline calibration method. *Journal of Instrumentation*, Vol. 12, No. 01, p. C01012, jan 2017.