

修士論文

大面積・高時間分解能  
Resistive Plate Chamber の開発

京都大学大学院理学研究科  
原子核ハドロン研究室

富田 夏希

2012年1月26日

## 概要

荷電粒子の飛行時間 (TOF) 測定器は、加速器を用いた素粒子・原子核実験において、生成粒子の識別に欠かせない存在である。その役目は長年シンチレーション検出器によって担われてきたが、近年シンチレーション検出器を上回る性能を持った Resistive Plate Chamber (RPC) の開発が進んでいる。RPC は高抵抗のプレートを複数枚並べた構造をしたガス検出器で、TOF として 50 ps 程度の高い時間分解能を持ち、生産コストが安く、磁場中でも使え、大型化が簡単、といったシンチレーション検出器にはない特徴を持つ。

我々は現在 SPring-8 において建設が進められている新たなハドロン光生成実験用ビームライン LEPS2 の TOF 検出器として RPC の開発を行っている。LEPS2 は既存の LEPS の約 10 倍の  $10^7/s$  という光子強度と、ほぼ全立体角を覆う大立体角検出器により、LEPS でカバーできなかった領域において、ハドロン内部構造の研究や、原子核中での中間子の質量変化をプローブとしたカイラル対称性の部分的回復の研究などを行う。

LEPS2 の TOF 検出器はソレノイドマグネット中でターゲットから約 1 m の距離に設置される。そのわずかな飛行距離で 1.1 GeV/c の運動量の K 中間子と  $\pi$  中間子を識別するためには 50 ps 程度の高い時間分解能が必要である。また、TOF 検出器の覆う面積は約 5 m<sup>2</sup> であり、読み出しチャンネル数を 1000 以下に抑えるために、1 チャンネル当たり 50 cm<sup>2</sup> 以上の面積の読み出しパッドの RPC を開発する必要がある。

現在大規模実験で使用されている RPC は 10 cm<sup>2</sup> 程度の小さい読み出しパッドのものが多く、大面積の読み出しパッドの RPC の開発研究は RPC の大きな課題の 1 つとなっている。我々はプロトタイプ RPC の開発を行い、1 チャンネル当たり 8 cm<sup>2</sup> の読み出しパッドで TOF としての時間分解能約 40 ps、50 cm<sup>2</sup> の読み出しパッドで TOF としての時間分解能約 60 ps と、LEPS2 での要求性能をほぼ満たす時間分解能を達成した。これらの値は TDC 等読み出し回路の影響も含めた TOF の時間分解能であり、読み出し回路の改善により更なる時間分解能の向上が期待できると考えられる。

この開発した RPC において、時間分解能のパッドサイズ依存性やレート依存性などの基本性能を詳細に報告する。

# 目次

第1章	序論	4
1.1	TOF 測定検出器	4
1.1.1	TOF 測定法	4
1.1.2	主な TOF 検出器	5
1.2	LEPS2	6
1.2.1	SPring-8	6
1.2.2	逆コンプトン散乱による $\gamma$ 線生成	6
1.2.3	LEPS2 ビームライン	8
1.2.4	LEPS2 検出器	8
1.2.5	RPC の開発目標	10
1.3	J-PARC E29 実験	13
第2章	Resistive Plate Chamber の動作原理	14
2.1	RPC の基本原理	14
2.2	オペレーションモード	14
2.2.1	ストリーマーモード	14
2.2.2	アバランシェモード	15
2.3	ギャップ構成	15
2.3.1	シングルギャップ型 RPC	15
2.3.2	マルチギャップ型 RPC	15
2.3.3	ダブルスタック型 RPC	16
2.4	時間分解能	17
2.5	検出効率	18
2.6	位置分解能	18
2.7	ギャップにかかる電圧	19
2.8	スペースチャージ	19
2.9	レート耐性	20
2.10	ガス	20
2.11	信号読み出し	21
2.12	大面積読み出しパッドの RPC	21
2.13	主な RPC	21
第3章	Resistive Plate Chamber の製作	23
3.1	ガラス	24
3.2	電極	24
3.3	読み出しパッド	25

3.4	絶縁	25
3.5	スペーサー	26
3.6	スペーサーの配置	28
3.7	読み出しケーブル	31
<b>第4章</b>	<b>Resistive Plate Chamber の基本動作</b>	<b>33</b>
4.1	信号	33
4.1.1	アバランシェ信号	33
4.1.2	プローブによる信号	33
4.1.3	ストリーマー信号	34
4.1.4	ダブルスタック型RPCの信号	35
4.1.5	ストリップ型読み出しパッドの信号	36
4.2	暗電流	36
4.3	ノイズ	36
4.4	反射	36
<b>第5章</b>	<b>ビーム照射試験のセットアップ</b>	<b>37</b>
5.1	レーザー	37
5.2	電子ビーム分布	38
5.3	トリガー	38
5.4	RF 信号	41
5.5	読み出し回路	41
5.6	高電圧電源	42
<b>第6章</b>	<b>Resistive Plate Chamber の性能評価</b>	<b>43</b>
6.1	測定条件	43
6.2	時間分解能	43
6.3	解析方法	44
6.3.1	検出効率	44
6.3.2	時間分解能	44
6.4	印加電圧依存性	47
6.4.1	時間分解能と検出効率	47
6.4.2	電荷分布	47
6.5	ギャップ幅依存性	49
6.6	ギャップ数依存性	49
6.6.1	時間分解能と検出効率	49
6.6.2	電荷分布	51
6.7	スタック数依存性	52
6.8	大面積パッド	53
6.8.1	サイズ依存性	53
6.8.2	読み出し形状依存性	54
6.8.3	トリガー位置依存性	56
6.8.4	読み出しパッド中の信号の伝搬による影響	57



6.9	ストリップ型大面積パッド	58
6.9.1	サイズ依存性	58
6.9.2	トリガー位置依存性	59
6.10	レート依存性	60
6.11	ガス依存性	61
6.12	クロストーク	61
6.13	ガスの置換時間	63
6.14	テスト結果のまとめ	64
<b>第7章</b>	<b>TOFの時間分解能の評価</b>	<b>65</b>
7.1	RPCの固有時間分解能	65
7.1.1	アバランシェ信号のばらつきによる影響	65
7.1.2	読み出しパッド内の伝搬による影響	66
7.2	RPC以外の時間分解能	66
7.3	TOFの時間分解能の評価のまとめ	67
<b>第8章</b>	<b>結論と今後の方針</b>	<b>69</b>
8.1	結論	69
8.2	今後の方針	70
8.3	今後の計画	72
<b>付録A</b>	<b>RPCのその他の性能評価</b>	<b>73</b>
A.1	ガラスサイズ依存性	73
A.2	トリガー面積依存性	73
A.3	角度依存性	74
A.4	読み出しパッドの不均一性	74
A.5	読み出しケーブルの足し合わせによる影響	75
A.6	カソードの接続	76
<b>付録B</b>	<b>RPC以外のTOFの時間分解能への寄与の評価</b>	<b>77</b>
B.1	RF信号	77
B.2	フィリングパターン	78
B.3	バンチ長	80
B.4	TDC	81
B.4.1	1chあたりの時間スケール	81
B.4.2	非線形度	83
B.4.3	時間分解能	84
B.5	ケーブル	85
B.6	アンプのノイズによる影響	85
	謝辞	87
	参考文献	88

# 第1章 序論

加速器実験において、生成した荷電粒子の粒子識別には、粒子の飛行時間 (Time of Flight(TOF)) 測定用の検出器が広く使われている。その役目は長年シンチレーション検出器によって担われてきたが、LHC 実験用の検出器開発とともに、シンチレーション検出器を上回る性能を持った Resistive Plate Chamber (RPC) の開発が進み、2000 年代以降多くの実験で利用されるようになった。我々は SPring-8 にて 2013 年開始予定のハドロン光生成実験 LEPS2 および J-PARC でステージ 1 の実験として採択されている  $\phi$  中間子原子核生成実験 E29 実験で使用するための RPC の開発を行った。特に LEPS2 への RPC のインストールは約 1 年後に迫っており、その目標は、1 チャンネル当たり  $50 \text{ cm}^2$  以上の大きさの読み出しパッドと、 $50 \text{ ps}$  ( $\sigma$ ) 以下の時間分解能を併せ持つ大面積・高時間分解能の RPC の開発である。

## 1.1 TOF 測定検出器

### 1.1.1 TOF 測定法

加速器によって生成された粒子は、主として電荷と質量の違いから粒子識別が行われる。電荷の正負は磁場中を運動する際に受けるローレンツ力の向きによって識別することができる。質量を求めるために使われる方法の 1 つが TOF 測定法である。

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

$$p = m\beta\gamma \quad (1.1)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (1.2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1.3)$$

とかける。

従って、粒子の飛行距離を  $L$ 、飛行にかかった時間を  $t$  とすると、粒子の質量  $m$  は

$$m^2 = p^2 \left( \frac{t^2 c^2}{L^2} - 1 \right) \quad (1.4)$$

と、 $p$  と  $t$  と  $L$  の関数でかける。

TOF 検出器は粒子がある距離の離れた 2 点間を飛行する時間  $t$  を測定するための検出器で、スタートのタイミングを測る検出器とともに用いられる。そして別途  $p$  と  $L$  を測る運動量測定・飛跡測定用の検出器と組み合わせて粒子の質量  $m$  を求めるために使用される。

TOF 検出器は、質量の異なる粒子の飛行時間の差を測定することにより粒子の識別を行うので、高い時間分解能を持つことが重要である。また、粒子が飛行した距離が長いほど質量の異なる粒子の到達時間差は大きくなるので、TOF 検出器は反応点からなるべく遠くに設置されることが望ま

しい。一方、遠くに設置すると一定の立体角を覆うためには大面積にする必要があるため、TOF 検出器には高い時間分解の他、安価で大量生産できることが求められる。

### 1.1.2 主な TOF 検出器

以下 TOF 検出器として使用されている主な検出器であるシンチレーション検出器、エアロジェルチェレンコフ検出器、Resistive Plate Chamber について述べる。

#### シンチレーション検出器

荷電粒子が物質を通過すると、物質中の電子が励起される。この励起された電子が基底状態に戻る際にシンチレーション光と呼ばれる光を出す。シンチレーション検出器は、このシンチレーション光を用いた検出器である。シンチレーション光は光電子増倍管により電気信号に変換され、信号として読まれる。TOF 用のシンチレーション検出器にはシンチレーション光の減衰時間の短いプラスチックシンチレーターが用いられる。シンチレーション検出器の時間分解能はシンチレーション光の減衰定数と、光電子増倍管の時間特性で決まり、シンチレーション検出器で達成できる時間分解能は 40 ~ 50 ps 程度である。また、シンチレーション検出器を大型化すると、シンチレーション光がシンチレーター内を伝搬する際の経路差から時間のばらつきが多くなり、時間分解能が悪化する。そのため 1 m 以上の幅を 100 ps を切る時間分解能のシンチレーション検出器で覆うことは非常に難しい。また、通常の光電子増倍管は磁場により増幅率が下がる為、磁場中でオペレーションするにはファインメッシュ型と呼ばれる光電子増倍管が必要であり、費用が高くなることという欠点がある。

#### チェレンコフ検出器

チェレンコフ検出器は高エネルギーの荷電粒子が物質中での光速を超える速度で物質へ入射される際に放出されるチェレンコフ光を利用した検出器である。チェレンコフ検出器はシンチレーション検出器と同様に光電子増倍管を用いて光を電気信号へ変換し、信号が読まれる。チェレンコフ光はシンチレーション光とは異なり、粒子が通過したタイミングで放出される。また、シンチレーション光はあらゆる角度に放出されるのに対し、チェレンコフ光は指向性が高く、光路差が小さい。この 2 点によりチェレンコフ検出器はシンチレーション検出器に比べ時間応答性が非常に良い。最も時間分解能のよいチェレンコフ検出器は高性能の光電子増倍管との組み合わせで 10 ~ 20 ps 程度の時間分解能を達成している [1]。このように、チェレンコフ検出器はシンチレーション検出器よりも高い時間分解能が出せるが、輻射体に用いられる物質の費用がシンチレーション検出器よりも高くなる。また、シンチレーション検出器と同様、光電子増倍管を用いて信号を読み出すので磁場中で使用する際の費用が高くなるという欠点もある。

#### Resistive Plate Chamber

Resistive Plate Chamber (RPC) は高抵抗のガラスを数 100  $\mu\text{m}$  のギャップ間隔で積み重ねた構造のガス検出器である。ギャップには数 ~ 10 kV/mm 程度の電場がかけられ、荷電粒子が通過するとガスがイオン化され電子が増幅される。その電子の動きによりガラスの外側の読み出しパツ

ドに誘起される信号を検出する。RPC は 1 つ 1 つのガスギャップが狭いため、非常に高い時間分解能を出すことができ、現在最も時間分解能の良い RPC は 20 ps 以下の時間分解能が報告されている [2]。実際に実験で使われている RPC の中で最も高い時間分解能を達成しているのは ALICE 実験の TOF 用の RPC で、読み出し回路の影響を含めて TOF として 50 ps 以下の時間分解能を達成している [3]。

RPC の時間分解能は主にギャップの幅・数と読み出しパッドの形状で決まり、基本的には読み出しパッドが小さいほど時間分解能は良い。しかし RPC の読み出しパッドはセグメント化が容易なため、小さい読み出しパッドの高い時間分解能を維持したまま大面積を覆うことができる。また、RPC は磁場中でも使用できるという利点がある。さらに、RPC は製作が簡単なため、生産コストを抑えられるという利点もある。

TOF 用の RPC は日本国内の実験で使用した例はまだなく、LEPS2 で初めて採用される。RPC については第 2 章で詳しく述べる。

## 1.2 LEPS2

現在 SPring-8 において新たなハドロン光生成実験 LEPS2 の建設が進められている。LEPS2 の実験開始は 2013 年を予定しており、2013 年までに LEPS2 の要求に適した RPC の開発が必要である。そこで我々は LEPS2 で要求される大面積、高時間分解能の RPC の開発を行った。

2001 年より始まった LEPS (Laser Electron Photon experiment at SPring-8) 実験は、レーザー光と SPring-8 の電子の逆コンプトン散乱による  $\gamma$  線ビームを利用したハドロン実験である。LEPS 検出器はターゲットの前方に設置され、水平方向  $\pm 25^\circ$ 、垂直方向  $\pm 10^\circ$  の領域を覆っている。

LEPS2 では新たにビームラインを設置し、既存の LEPS の約 10 倍の光子強度とほぼ 4 を覆う大立体角検出器により、LEPS でカバーできなかった領域において、ハドロン内部構造の研究や、原子核中での中間子の質量変化をプローブとしたカイラル対称性の部分的回復の研究などを行う。

### 1.2.1 SPring-8

SPring-8 (Super Photon Ring-8 GeV) は兵庫県の播磨科学公園都市に位置する世界最高性能の大型放射光施設の 1 つである (図 1.1)。全長 1436 m の蓄積リングに 8 GeV/c の運動量の電子が約 100 mA 蓄積され、その電子が磁場中を通過する際に放出される放射光が、物質科学、生命科学、医学など幅広い分野の研究に使用されている。全部で 62 のビームラインがあり、LEPS と LEPS2 はそれぞれ 1 本ずつの専用ビームラインが割り当てられている。

### 1.2.2 逆コンプトン散乱による $\gamma$ 線生成

LEPS, LEPS2 では蓄積リング上の電子にレーザー光を入射し、逆コンプトン散乱により高エネルギーの  $\gamma$  線を生成する (図 1.2)。レーザーの波長は 351 nm または 266 nm のものを使用し、351 nm の場合は 2.4 GeV までの、266 nm の場合は約 3.0 GeV までのエネルギーの  $\gamma$  線が生成される。逆コンプトン  $\gamma$  線のエネルギー分布を図 1.3 に示す。LEPS では現在 2 台のレーザーを用いており、ビーム強度は 351 nm レーザーを用いた 1.5 ~ 2.4 GeV の逆コンプトン  $\gamma$  線が  $2 \times 10^6$  /sec 程度、266 nm レーザーを用いた 1.5 ~ 3.0 GeV の逆コンプトン  $\gamma$  線が  $2 \times 10^5$  /sec 程度である。



図 1.1: SPring-8  
LEPS および LEPS2 の位置を 印で示す

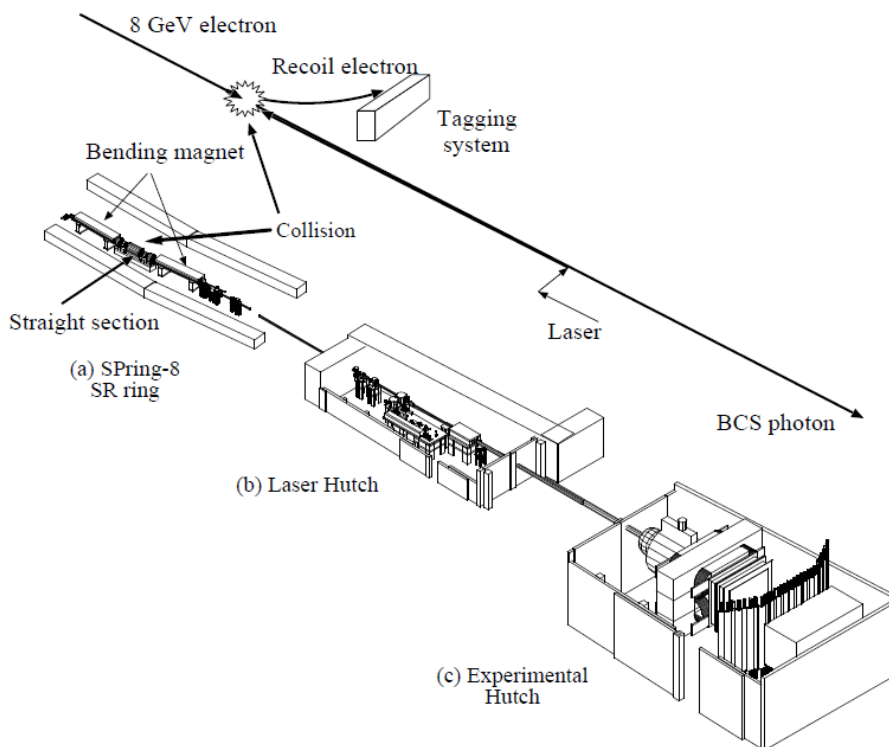


図 1.2: 逆コンプトン散乱の様子

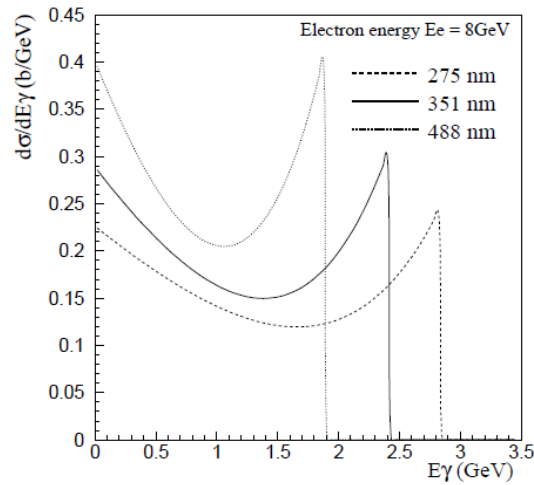


図 1.3: 逆コンプトン散乱で生成される  $\gamma$  線のエネルギー分布

### 1.2.3 LEPS2 ビームライン

LEPS2 ビームラインは SPring-8 の蓄積リングに 4 本しかない 30 m の長尺ビームラインを使用する。LEPS2 のビーム強度は以下の 3 点により LEPS より 1 桁向上する。

- 1 . レーザー設置用のハッチの大型化により、LEPS の倍の 4 台のレーザーを設置する。
- 2 . 長尺ビームラインでは 4 台のレーザーの焦点をずらし、干渉を避けて入射することができる。
- 3 . シリンドリカルレンズの導入により、ビームの形状を蓄積リング上の電子と同じ扁平な形状にする。

この 3 点により、LEPS2 でのビーム強度は 351 nm レーザーに対して  $10^7/\text{sec}$  程度、266 nm レーザーに対して  $10^6/\text{sec}$  程度となる予定である。また LEPS の検出器は蓄積リング棟内に位置するのに対し、LEPS2 の検出器は蓄積リング屋外に大型の建物を建設し、設置される。これは長尺ビームラインの角度発散が非常に小さく、逆コンプトン散乱で得られる  $\gamma$  線の角度発散が非常に狭くなるため、蓄積リングから 150 m と遠く離れた屋外に検出器を設置しても、 $\pm 6$  mm と実験可能なビームサイズを維持できることから可能となっている。

### 1.2.4 LEPS2 検出器

図 1.4 は LEPS2 検出器の模式図である。LEPS2 は中心磁場 1 T の長さ 2.22 m、内径 2.96 m のソレノイド電磁石と、その内側に設置されるターゲットの周り  $4\pi$  を覆ったシリコン検出器 (Double-sided Silicon Strip Detector (DSSD))、ドリフトチェンバー (Drift Chamber (DC))、タイムプロジェクションチェンバー (Time Projection Chamber (TPC))、レジスティブプレートチェンバー (Resistive Plate Chamber (RPC))、タイムオブプロパゲーションカウンター (Time of Propagation Counter (TOP))、エアロジェルチェレンコフ検出器 (Aerogel Cerenkov Counter (AC))、バレルカロリメーター (Barrel Electromagnetic Calorimeter (EMCAL)) の検出器からなる。

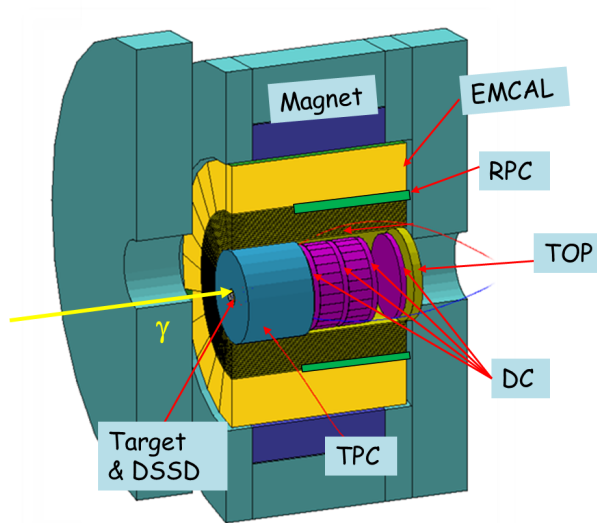


図 1.4: LEPS2 検出器

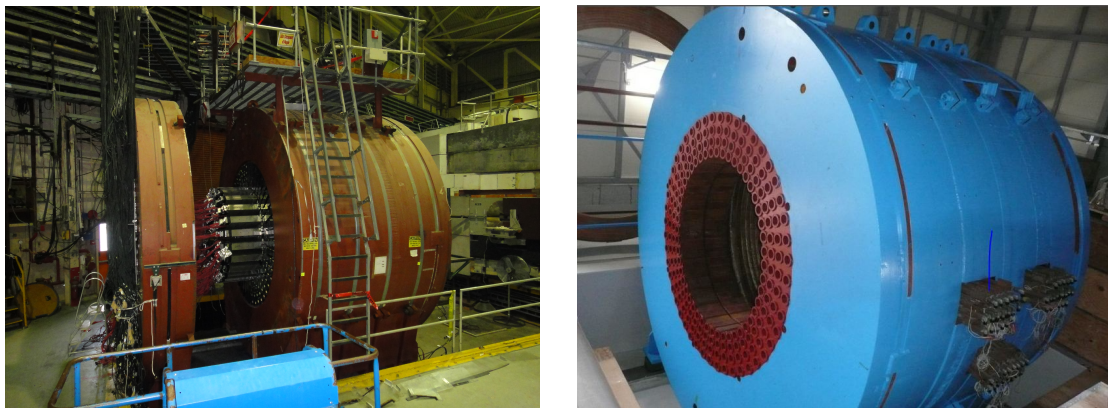


図 1.5: LEPS2 で使用されるソレノイドマグネット  
 (左) ブルックヘブン国立研究所で解体中の様子  
 (右) LEPS2 ビームラインへインストールされた様子

ソレノイド電磁石は 1990 年代から 2000 年代にかけてアメリカ ブルックヘブン国立研究所 AGS の K 中間子希崩壊実験 E787/E949 実験で使用されていたものを使用する。既に解体・輸送が完了し、LEPS2 ビームラインへインストールされている (図 1.5)。

粒子の飛跡はターゲット周りは DSSD によって、散乱角  $\theta < 30^\circ$  の前方領域は 4 つの DC、 $\theta > 30^\circ$  の後方領域は TPC によって測定し、荷電粒子の運動量が求められる。

粒子識別は  $\theta > 30^\circ$  の側方は RPC と AC、散乱角  $\theta < 30^\circ$  の前方のエンドキャップ部分は TOP を用いる。TOP は AC と同様にチェレンコフ光を用いる検出器であり、粒子が通過した際のチェレンコフ光の放出角度を再構成し、放出角度の違いから粒子の速度を求める検出器である。

EMCAL は鉛とプラスチックシンチレーターのサンドイッチ構造をしており、光子の検出とエ



エネルギーの測定に用いられる。EMCAL は E787/E949 実験でも使用されており、ブルックヘブン研究所より輸送してきたものをそのまま使用する。

### 1.2.5 RPC の開発目標

RPC は LEPS2 において実験室系での散乱角度  $30^\circ$  から  $60^\circ$  に散乱される陽子、K 中間子、中間子の粒子識別に用いる。RPC が設置されるのは図 1.6 の赤色で示した半径 0.85 m、奥行き 1 m のバレル部分で、約  $5 \text{ m}^2$  の面積を覆う。RPC の外側に位置する EMCAL およびソレノイドマグネットは E787/E949 実験で使用されていたものをそのまま使用する。RPC はその内側に設置する必要があるため、図 1.6 の位置より外側に置くことはできない。粒子の飛行距離は散乱角  $60^\circ$  で約 1 m、 $30^\circ$  で約 1.7 m である。

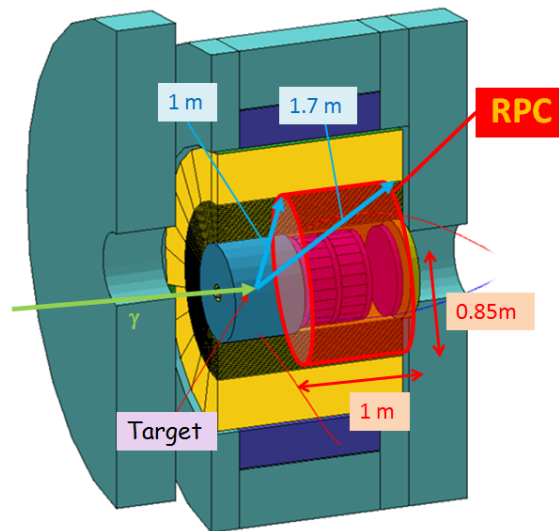


図 1.6: LEPS2 における RPC

式 (1.4) で示したように、粒子の質量  $m$  の決定精度は粒子の運動量  $p$ 、粒子の飛行距離  $L$ 、飛行にかかった時間  $t$  の測定精度で決まる。LEPS2 においては、TOF 測定のスタートのタイミングは蓄積リング内の電子のバンチ構造に対応した RF 信号によって非常に精度よく決められるため、飛行時間  $t$  の精度は RPC とその読み出し回路の時間分解能で決まる。約 1 m の飛行距離は TOF 測定のための飛行距離としては非常に短く、RPC には非常に高い時間分解能が要求される。

表 1.1 に例として、TOF の時間分解能  $t$  が、現在実験で使用されている中で最も良い ALICE 実験の TOF と同じ 50 ps の時間分解能を達成したとして、1.1 GeV/c の運動量で散乱角  $60^\circ$  に散乱される中間子の質量決定精度に対する  $p$ 、 $L$ 、 $t$  それぞれの測定精度の寄与を示す。散乱角度  $30^\circ$  から  $60^\circ$  の領域では  $p$  と  $L$  は TPC によって測定される。それぞれの測定精度はおおよそ 1 % と 0.05 % であり、粒子の質量  $m$  に対する寄与は 3 ~ 5 MeV と非常に小さい。一方  $t$  は ALICE 実験の RPC と同じ 50 ps の時間分解能を達成したとしても、その寄与がおおよそ 260 MeV と、RPC の時間測定の精度が質量の決定精度に最も大きな寄与を与えることが分かる。



Parameter	Value	resolution	$m$ resolution
$p$	1.1 GeV/c	0.01 GeV/c	3 MeV
$L$	1 m	0.5 mm	5 MeV
$t$	3400 ps	50 ps	260 MeV

表 1.1:  $p, L, t$  それぞれの測定精度が粒子の質量  $m$  の決定精度に与える影響

従って、RPC にはできる限り高い時間分解能が要求される。一方、読み出し回路にかかる費用を抑えるため、LEPS2 では RPC の信号の読み出しチャンネル数を 1000 以下にする必要がある。そのためには 1 チャンネル当たり  $50 \text{ cm}^2$  以上の大面積の読み出しパッドを使用する必要がある。50 ps の時間分解能を達成している ALICE 実験の RPC の読み出しパッドは約  $10 \text{ cm}^2$  の大きさである。そこで LEPS2 では ALICE 実験で達成している 50 ps の時間分解能を 1 チャンネル当たり  $50 \text{ cm}^2$  以上の大面積のパッドで達成することを目標とする。

図 1.7 に飛行時間  $t$  の測定精度が 50 ps を達成した場合、3 以上の精度の飛行時間差で陽子と K 中間子を粒子識別できる運動量を紫色で示す。3 GeV の  $\gamma$  線を用いた場合、散乱陽子と荷電 K 中間子それぞれの運動量が最も大きくなる反応は

$$\gamma p \rightarrow p \pi^0 \quad (1.5)$$

$$\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda \quad (1.6)$$

であり、それぞれ図 1.7 の黒色と赤色で示されたような運動量を持つ。従って 50 ps の時間分解能が達成できれば、散乱角  $30^\circ$  から  $60^\circ$  の領域に散乱される全ての陽子と K 中間子を識別できることが分かる。

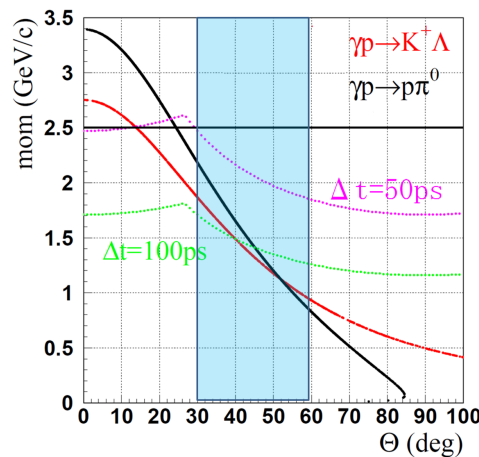


図 1.7: TOF 測定で識別できる陽子と K 中間子の運動量分布

図 1.8 には飛行時間  $t$  の測定精度が 50 ps の時間分解能を達成した場合に 1 m の飛行距離で 0.5 ~ 3.0 GeV/c の運動量の 中間子と K 中間子をどれだけの精度で識別できるかを示す。運動量 1.1 GeV/c までの 中間子と K 中間子は 3 以上の精度で識別できるが、1.1 GeV/c 以上の運動量では TOF による精度の良い識別が難しくなることが分かる。

RPC で識別することの難しい、高い運動量の  $\pi$  中間子と K 中間子の識別には閾値型のアロジェルチェレンコフ検出器を使用することを検討している。チェレンコフ光が放出されるのは荷電粒子の速度が物質中の光速を超えたときである。物質中での光速は物質の屈折率を  $n$  として  $c/n$  であるので、チェレンコフ光が放出されるのは粒子の速度  $v$  が  $v > c/n$  つまり  $n\beta > 1$  ( $\beta = v/c$ ) のときである。LEPS2 では  $n = 1.03$  のアロジェルを用いたアロジェルチェレンコフ検出器により  $30 \sim 60^\circ$  に散乱される  $1.1 \sim 2.0 \text{ GeV}/c$  の運動量の  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の識別を行う。 $1.1 \sim 2.0 \text{ GeV}/c$  の  $\pi$  中間子の  $n\beta$  は  $9.92 \sim 9.98$  であるため  $n\beta > 1$  を満たしチェレンコフ光が放出される。一方  $1.1 \sim 3.0 \text{ GeV}/c$  の  $K$  中間子の  $n\beta$  は  $9.12 \sim 9.71$  であるため  $n\beta > 1$  を満たさずチェレンコフ光は放出されない。

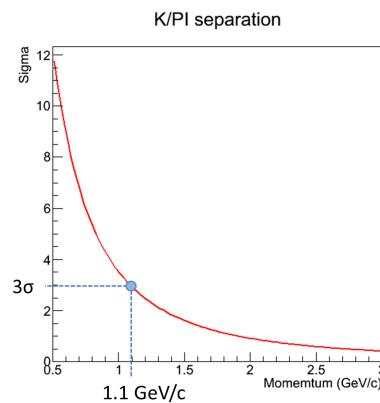


図 1.8: 1 m の飛行距離で  $\pi$  中間子と  $K$  中間子を識別するために必要な時間分解能

以上のように、LEPS2 において RPC は可能な限り高い時間分解能が求められる。一方、チャンネル数の制限により読み出しパッドは 1 チャンネル当たり  $50 \text{ cm}^2$  以上の面積を持つことが求められる。そこで実現可能な目標として、LEPS2 では  $50 \text{ cm}^2$  以上の面積の読み出しパッドで  $50 \text{ ps}$  以下の時間分解能を持つことを目標とする。これは RPC 単体ではなくアンプ、TDC 等の読み出し回路等も含めた TOF の時間分解能の目標である。また、検出効率は  $99\%$  以上を目標とする。RPC の設置位置における荷電粒子のレートは  $1 \text{ Hz}/\text{cm}^2$  以下であるのでレート耐性の要求は厳しくない。表 1.2 に LEPS2 における RPC の開発目標をまとめる。

Characteristics	Goal
Resolution	$< 50 \text{ ps}$
Pad size per channel	$> 50 \text{ cm}^2$
Efficiency	$> 99\%$

表 1.2: LEPS2 における RPC の開発目標

### 1.3 J-PARC E29 実験

J-PARC E29 実験は J-PARC ハドロンホールでステージ 1 の実験として採択されている  $\phi$  中間子原子核束縛状態探索実験である [4]。ハドロンがヒッグス機構で説明される質量よりはるかに大きい質量を持っているのはカイラル対称性の破れによるものと考えられている。ベクトル中間子はそのカイラル対称性の部分的回復により、原子核中で質量が軽くなると予想されている。E29 実験では  $\phi$  中間子原子核束縛状態を探索し、その束縛エネルギーを測定することで、カイラル対称性の回復による質量生成機構の実験的裏付けをすることを目的としている。

E29 実験では  $\bar{p}p \rightarrow \phi\phi$  反応で  $\phi$  中間子対を生成する。 $\bar{p}$  の運動量を 1.1 GeV/c に決めることによって、 $\phi$  中間子の一方は原子核に束縛され、一方は前方にはじき出される。 $\phi$  中間子原子核束縛状態の束縛エネルギーは前方にはじきだされる  $\phi$  中間子 (崩壊により生じる  $K^+K^-$  中間子) の運動量を測定することによって求める。また、バックグラウンド抑制のため、原子核に束縛された  $\phi$  中間子の崩壊で生じる K 中間子と  $\Lambda$  粒子のタギングを行う。

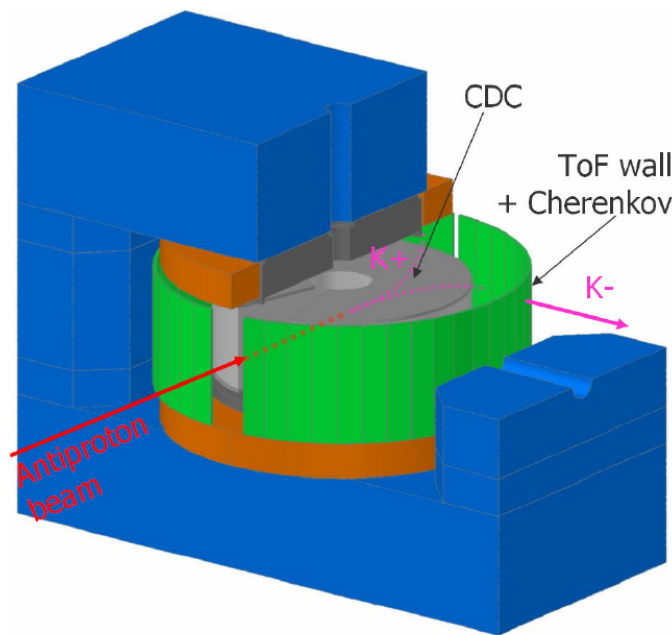


図 1.9: E29 検出器

図 1.9 に E29 実験の検出器を示す。0.5 T の磁場のもと、CDC(Cylindrical Drift Chamber) により粒子のトラッキングが行われる。粒子識別は CDC の周りに設置した RPC の TOF ウォールとチェレンコフ検出器によって行う。RPC は 700 MeV/c までの運動量の  $\phi$  中間子と K 中間子を識別するため、TOF として 100 ps の時間分解能が必要である。また、E29 実験の反応レートは LEPS2 よりはるかに高く、RPC は数 kHz/cm<sup>2</sup> 程度のレート耐性が必要である。

E29 実験への RPC のインストールは数年先を予定しているため、インストールが 2013 年に迫った LEPS2 で使用する RPC の開発が優先される。そのため今回の RPC の開発ではレート耐性についての評価を行いつつも、LEPS2 で必要な大面積読み出しパッド・高時間分解能に主眼を置いた。

## 第2章 Resistive Plate Chamber の動作原理

本章ではRPCの基本動作原理について述べる。

### 2.1 RPCの基本原理

RPCは高抵抗のプレートを用いた荷電粒子検出用のガスチェンバーである。基本原理は金属のプレートを平行に並べたParallel Plate Chamberと同等であるが、高抵抗のプレートを用いることで、放電を起こさずオペレーションすることが可能となっている。

図2.1は基本的なRPCであるシングルギャップ型RPCの模式図である。RPCはガラス、ベークライトなどの高抵抗のプレートを数100 $\mu\text{m}$ ～数mmの間隔で並べた構造を持つ。電圧はプレートの表面に印刷または貼付された高抵抗のカーボン等の電極によって印加され、ギャップには数～10 kV/mm程度の電場がかけられる。荷電粒子がプレートの間を通過すると、ガスがイオン化され、アノードに向かってアバランシェが起きる。読み出しパッドは電極のさらに外側に絶縁体をはさんで位置し、アバランシェによる信号はプレート、絶縁体を挟んで読み出しパッドへ誘起される。

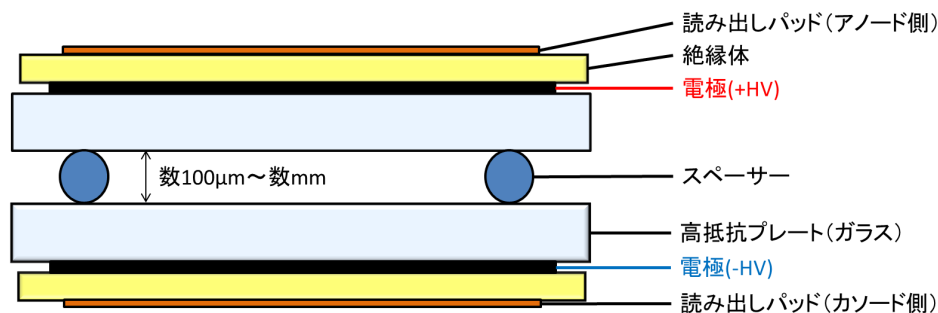


図 2.1: シングルギャップ型RPCの模式図

### 2.2 オペレーションモード

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

#### 2.2.1 ストリーマーモード

1980年代始めのR.SantonicoによるRPCの考案[5]以来、アバランシェモードが発見される1990年代まで主として使用されてきたのがストリーマーモードである。ストリーマーモードの

RPC はアルゴンを主成分としたガスでオペレートされる。アルゴンベースのガスでは、電子は  $10^8$  個以上に増幅され、紫外線がアバランシェ領域の外側の分子をイオン化し、電子がアノード・カソード間一体に広がるストリーマーモードとなる。ストリーマーモードでは、読み出しストリップへ誘起される電荷が  $10 \sim 1000$  pC と大きく、プリアンプ等を介さずに読み出しを行えるという利点がある。一方、一度にできる電荷が大きいため、電荷が流れて定常状態に戻るまでに時間がかかり、通常のガラス RPC では  $1 \text{ Hz/cm}^2$  程度のレート耐性しかないという欠点がある。また、ストリーマーが生じる時間にばらつきがあるため、ストリーマーモードの時間分解能は  $1 \text{ ns}$  程度である。ストリーマーモードの RPC は主にミュオン用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、Belle 実験、BaBar 実験、ARGO-YBJ 実験、OPERA 実験などで使用されている [6][7][9][8]。

### 2.2.2 アバランシェモード

アバランシェモードの RPC は  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  ガス（代替フロン、R134a）をベースにオペレートされる。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  は電気陰性度が高く、電子を吸着しやすいのでストリーマーの発生を抑え、アバランシェのみでオペレーションすることが可能である。アバランシェモードではストリーマーが起き始める  $10^8$  以下までしか電子が増幅されない。そのため読み出しストリップへ誘起される電荷は  $1 \sim 10$  pC 程度と小さく、高い増幅率のプリアンプが必要になる。一方、アバランシェの電子はストリーマーに比べて少ないことにより、定常状態に戻るまでの時間が短くなり、通常のガラス RPC で  $1 \text{ kHz/cm}^2$  程度のレートまでオペレーションすることができる。アバランシェモードの RPC は元々は高レートに耐える RPC の開発過程で開発されたが、アバランシェの信号は時間のばらつきが少なく、非常によい時間分解能を得られることが分かった。近年開発されている RPC はこのアバランシェモードで使用されるものが多い。

## 2.3 ギャップ構成

RPC は基本的にギャップ数が増えるほど時間分解能・検出効率ともに向上する。そのためシングルギャップの RPC の他、以下に述べるようなマルチギャップ型の RPC やダブルスタック型の RPC が用いられる

### 2.3.1 シングルギャップ型 RPC

シングルギャップ型 RPC は最も基本的な RPC である (図 2.1)。シングルギャップ型 RPC は構造が簡単で制作が容易であり、主に大面積のミュオンのトリガー用 RPC として用いられ、ATLAS 実験、ALICE 実験などで用いられている [13][14]。現在実験に用いられている多くのシングルギャップ型 RPC は  $2 \text{ mm}$  のギャップ厚であり、検出効率は  $95 \%$  程度、時間分解能は  $1 \text{ ns}$  程度である。

### 2.3.2 マルチギャップ型 RPC

マルチギャップ型 RPC は、ガラスとスペーサーを交互に積み重ねることによって、複数のギャップを持つ構造をした RPC である。図 2.2 は 5 ギャップのマルチギャップ型 RPC の模式図である。電圧は一番外側のプレートに付けられた電極に印加し、それぞれのギャップに均等に電圧がかか

る。アバランシェは各々のギャップ内で起き、外側の読み出しパッドにはそれぞれのギャップの信号の和が誘起される。多くのマルチギャップ RPC は  $250 \sim 300 \mu\text{m}$  厚のギャップ 4~6 層からなり、狭いギャップ幅ではあるが 100 % 近い検出効率を得ることができる。マルチギャップ型 RPC は主に 100 ps 以下の時間分解能の必要な TOF 用検出器に用いられる。

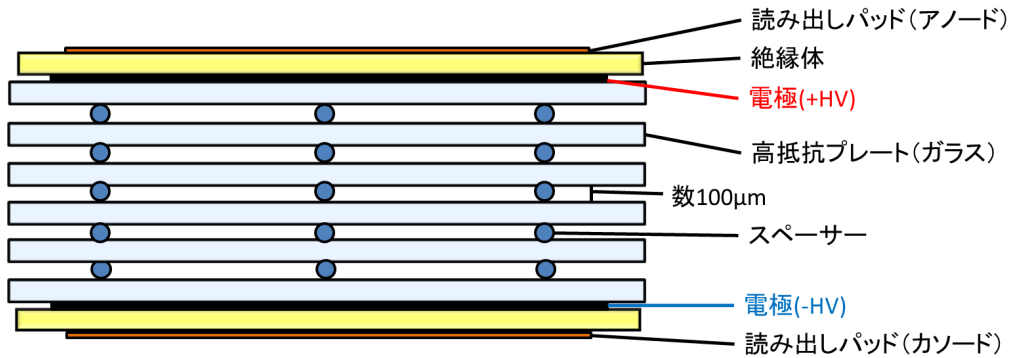


図 2.2: マルチギャップ型 RPC の模式図

### 2.3.3 ダブルスタック型 RPC

正電極と負電極の 2 つの電極で挟まれた部分を 1 つのスタックとして、2 つのスタックを重ねて作られる RPC がダブルスタック型 RPC である。図 2.3 にダブルスタック型 RPC の模式図を示す。一般に RPC はギャップ数が多いほど、高い時間分解能、高い検出効率を得られるが、1 ギャップあたり  $2.5 \sim 3 \text{ kV}$  程度と高い電圧をかける必要があるため、シングルスタックでギャップを増やすと相当の電圧をかけなければならなくなる。しかしダブルスタック型を用いれば、シングルスタックと同じ電圧でギャップの数を倍に増やすことができる。

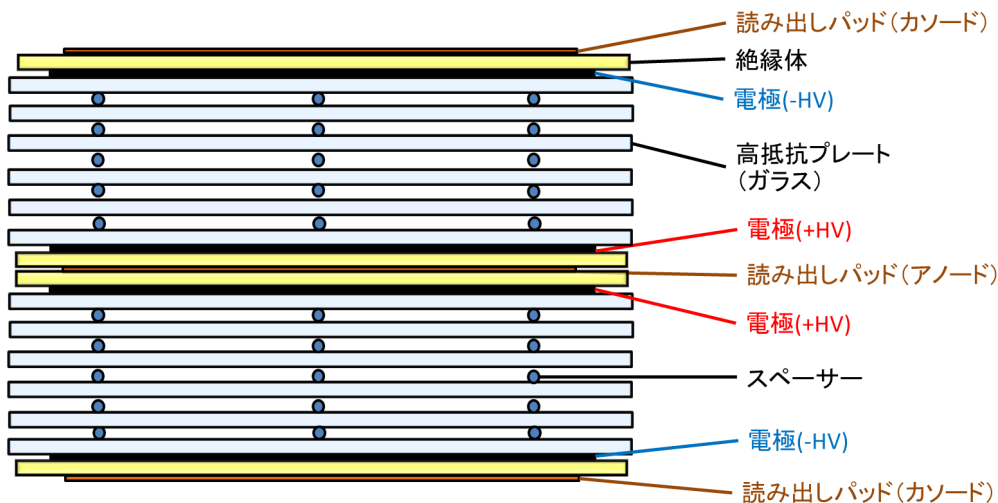


図 2.3: ダブルスタック型 RPC の模式図

読み出しパッドは一番外側のガラスのほか、スタック間にも位置する。外側の読み出しパッド (図 2.3 のカソード) はそれぞれのスタックの信号が誘起され、内側の読み出しパッド (図 2.3 のアノード) は上下両方のスタックの信号の和が誘起される。

ダブルスタック型ではシングルスタックに比べ信号の数が倍になるため、検出効率・時間分解能の向上が期待される。ALICE 実験の RPC ではシングルスタック型からダブルスタック型にすることで、時間分解能が 70 ps から 50 ps へ、検出効率が 99 % 以下からほぼ 100 % へ向上が見られた [11][16]。

また、ダブルスタック型の応用として、スタック数が 3 以上のマルチスタック型の RPC (図 2.4) も開発が報告されている [2]。

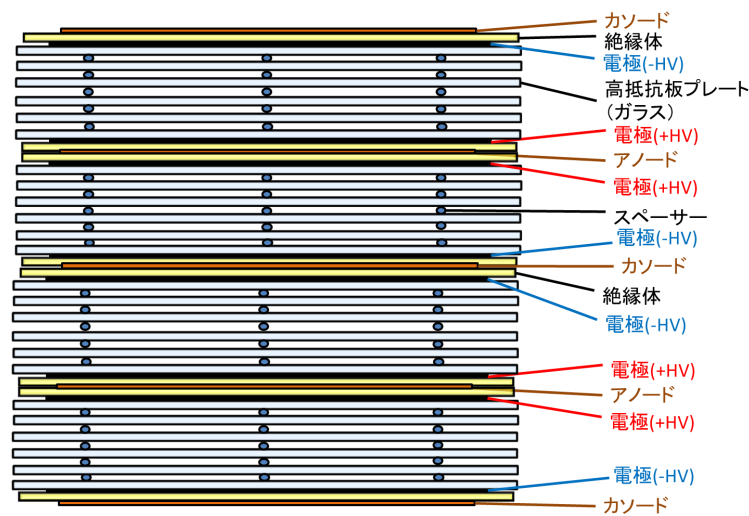


図 2.4: マルチスタック型 RPC の模式図

## 2.4 時間分解能

RPC の時間分解能は主にギャップの幅とギャップの数および読み出しパッドの形状で決まる。基本的にはギャップの幅が狭いほど、またギャップの数が多いほど時間分解能が良くなる。読み出しパッドは基本的に面積が小さいほど時間分解能が良く、大きくするほど読み出しパッド内の信号の伝搬により時間分解能が悪くなる。

RPC の 1 ギャップあたりの時間分解能は、増幅される電子の初期位置とその増幅のばらつきで決まる。観測可能な  $10^6$  個程度まで電子が増幅されるのは、荷電粒子が通過した際にギャップ間で電離生成された電子のうちカソード寄りの数 10 % の範囲でできた電子のみである。

例えば  $250 \mu\text{m}$  のギャップのうち、カソード寄りの 10 % で電離された電子のみが信号として観測されるとすると、電子の初期位置のばらつきは  $25 \mu\text{m}$  の幅の一様分布とみなせる。ギャップ幅が  $250 \mu\text{m}$  程度の RPC は電子のドリフト速度が  $200 \mu\text{m}/\text{ns}$  程度の電圧でオペレートされるので、 $25 \mu\text{m}$  をドリフトするのにかかる時間は  $130 \text{ ps}$  程度であり、標準偏差で表すと  $130 \text{ ps}/\sqrt{12} \sim 40 \text{ ps}$  より、 $40 \text{ ps}$  程度の時間分解能が期待できることが分かる。ギャップが  $150 \mu\text{m}$  として同様に計



算すると、約 20 ps の時間分解能となる。従って電子の初期位置分布を小さくすればするほど、すなわちギャップを狭くするほど時間分解能はよくなる [17]。

また、ギャップ数を増やすと生じる信号の数が増えるので時間分解能が良くなる。時間分解能は最も大きな信号の生じたギャップのタイミングで決まるため、単にギャップ数  $n$  の  $1/\sqrt{n}$  にはならないが、ギャップ数が増えるほど時間分解能が良くなることが示されている [18]。

現在主な実験で使われている時間測定用 RPC のギャップ幅は 250 ~ 300  $\mu\text{m}$  程度、ギャップ数は 6 ~ 10 のものが多く、STAR 実験や FOPI 実験などで 60 ~ 100 ps 程度の時間分解能が得られている [10]。実際に実験に使用されている RPC の中で最も時間分解能が良いのは ALICE 実験の 250  $\mu\text{m}$  ギャップの TOF 測定用 RPC であり、回路等のノイズや TDC の分解能を含めた TOF で 50 ps 以下の分解能を達成している [11]。(ただし実際の実験では粒子の通過位置の補正を行わずオペレーションしているため、時間分解能は 85 ps 程度である [12]。)

また最近では ALICE 実験のグループが 160  $\mu\text{m}$  のギャップ幅の RPC で時間分解能 20 ps を達成したとの報告もある [2]。この RPC は 160  $\mu\text{m}$  という狭いギャップで 6 gaps \* 4 stacks の計 24 ギャップの構成をしている。20 ps という値は読み出し回路の分解能を含んだ値であり、RPC 自体の分解能はさらによいと考えられる。

時間分解能の読み出しパッド依存性については 2.12 で詳しく述べる。

### 2.5 検出効率

RPC の検出効率はギャップの幅とギャップの数で決まり、ギャップの幅が大きいほど、また数が多いほど検出効率は高くなる。高い時間分解能の必要ないトリガー用の RPC には主に 2 mm ギャップのアバランシェモードの RPC が用いられ、シングルギャップで 95 % 以上の検出効率を得ている [6][13]。TOF 用の RPC は 200 ~ 300  $\mu\text{m}$  程度のギャップ幅で用いられ、10 ギャップ程度までギャップ数を増やすと 99 % 以上の検出効率を得られることが分かっている。

### 2.6 位置分解能

RPC の位置分解能は、基本的には読み出しパッドのサイズで決まる。例えば医療用の X 線検出器として開発された 30  $\mu\text{m}$  ピッチでストリップを並べた RPC は実際に 30  $\mu\text{m}$  (FWHM) の位置分解能を持つことが示されている [19]。また、大面積を覆うための長いストリップ状の読み出しパッドの RPC も開発されており、この場合はストリップ両端の信号到達の時間差からストリップ方向の位置の情報を得ることができる。読み出しパッド内での信号の伝搬速度はおよそ 50 ~ 100 ps/cm であり、例えばストリップサイズ 3 cm  $\times$  85 cm の RPC でストリップ方向の RPC の位置分解能 6.4 mm が報告されている [15]。



## 2.7 ギャップにかかる電圧

高抵抗プレートに電圧をかけると、図 2.5(左) のように、プレートとギャップにはそれぞれ誘電率に応じた電圧がかかる。しかし、高抵抗プレートは少量であるが電流が流れるので、時間が経過するとプレートの表面に電荷がたまり、図 2.5(右) のようにプレートにかかる電圧は 0 になり、ギャップのみに電圧がかかることになる [20]。マルチギャップ型 RPC についても同様で、例えば 5 ギャップの RPC に 15 kV の電圧がかかると、それぞれのギャップに 3 kV ずつの電圧がかかる。

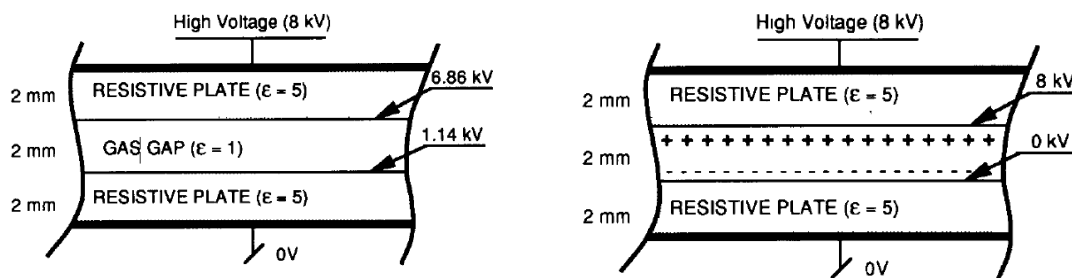


図 2.5: ギャップにかかる電圧の様子 [20]  
(左) 電圧をかけた直後 (右) しばらくした後

## 2.8 スペースチャージ

ギャップの狭いマルチギャップ型 RPC はギャップの広いシングルギャップの RPC に比べ安定した動作性、高い時間分解能、高いレート耐性を持つが、これには正イオンによるスペースチャージが重要な役割を果たしていることが示されている [22][23]。アバランシェによる電子はアノードへ向かってドリフトするが、正イオンは電子に比べて重く、ドリフト速度が遅いので、電子の時間スケールで見るとギャップ内に停滞する。すると正イオンが作り出す電場により、図 2.6 のようにアバランシェの先端では電場が低くなり、電子の増幅が起こらなくなる。

この正イオンのスペースチャージにより、電子はストリーマーモードに突入する直前の  $10^7 \sim 10^8$  個程度で増幅が止まるため、広い電圧の領域に渡ってストリーマーを抑えたオペレーションが可能になる。また、高抵抗プレートに隆起等があり、局所的に電場が高くなっている場合でも増幅を抑えることができるので、高抵抗プレートの平行性の要求を低くすることも可能にしている。また、増幅の抑えられた電子は分子に捕えられ、負イオンとなる。ほぼすべて正イオンがこの負イオンと再結合するため、正イオンがカソードにドリフトしきるのを待たずにギャップ内の電場が回復する。このことが高いレートでのオペレーションも可能にしている [23]。

狭いギャップほどアバランシェの密度が高いため、スペースチャージの効果が大きくなる。2 mm 程度のギャップの RPC よりも、数 100  $\mu\text{m}$  ギャップの RPC の方がストリーマーフリーのプラトーが長く、ガラス間隔の平行精度の要求が低いことも示されている。

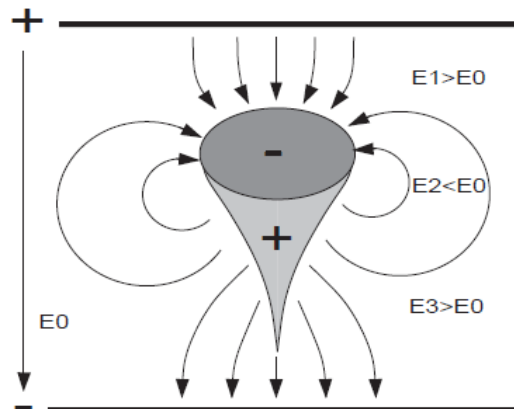


図 2.6: アバランシェの周りの電場の模式図 [23]

## 2.9 レート耐性

2.8 で述べたように、アバランシェモードの RPC は高いレートでもオペレーションすることができる。スペースチャージの効果の他、レート耐性には RPC のギャップ内で生じた電子がいかにか早く流れて、元の電場の状態に戻るかが重要である。アバランシェ等で生じた電子は主にプレートの中を流れるので、プレートの抵抗値が重要になる。通常のプレートに用いられるガラスの体積抵抗率は  $10^{13} \Omega \text{ cm}$  程度であり、この体積抵抗率では  $1 \text{ kHz/cm}^2$  程度までのレート耐性しか持たない。現在  $10^8 \sim 10^9 \Omega \text{ cm}$  程度の低抵抗率のガラスの開発により、約  $20 \text{ kHz/cm}^2$  までのレート耐性のある RPC の開発がされている [21]。また、抵抗率が  $10^7 \Omega \text{ cm}$  以下になると、定常的な放電が起きてしまうことも示されている。高いレート耐性の必要な RPC にはガラスよりも抵抗率の低いベークライトが用いられることもある [14]。

## 2.10 ガス

近年開発されているほとんどのアバランシェモードの RPC は  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  (代替フロン、R134a) をベースに、数%程度の  $\text{SF}_6$ 、 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  を混合したガスを使用している。

$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  はオゾン層を破壊しないフロンの 1 種で、不燃性のガスである。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  は電気陰性度が高いため、アルゴンに比べて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になった。また、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  はアルゴンの約 2.5 倍の密度があるため、荷電粒子が通過する際に電離される電子が多く、2 mm ギャップの RPC でアルゴンベースの場合の検出効率が約 78 % なのに対して  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  ベースの RPC は 98 % と、検出効率の向上につながっている。また、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  はアルゴンに比べ電子のドリフト速度が速いため、高い時間分解能を得ることができる。

アバランシェモードの RPC には  $\text{SF}_6$  も重要な役割を果たす。 $\text{SF}_6$  は電子親和力がとても大きく、電子を吸収するので、付加するとストリーマーを抑えることができる。その結果広い電圧の範囲でストリーマーを含まないオペレーションをすることが可能になった。

$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  は、ストリーマーを誘発する紫外線を抑制するためのクエンチャーとして多くの RPC

で用いられてきた。しかし後に SF<sub>6</sub> の有用性が確認され、現在では iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> を用いず C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub> と SF<sub>6</sub> のみでオペレーションしている実験グループもある [24]。

### 2.11 信号読み出し

RPC はアノード、カソードそれぞれの読み出しパッドに同じ大きさ・同じタイミングで符号が逆の信号が誘起される。ALICE 実験の TOF 用 RPC は作動アンプを用いてアノード、カソード両方の信号を読んでいる。しかし他のほとんどの RPC は読み出し回路を簡単にするため、片側のパッドの信号のみを用いている。

### 2.12 大面積読み出しパッドの RPC

2000 年代までの RPC の進歩は LHC 実験のための RPC の開発によって支えられてきた。LHC 実験では粒子の多重度が高く、使用されている TOF 用 RPC の読み出しパッドは 10 cm<sup>2</sup> 程度と小さい。従って大面積読み出しパッドの RPC の開発はあまり進んでおらず、実際に大型実験で高時間分解能の大面積読み出しパッドが使用されている例はまだない。2012 年現在、LEPS2 の他、RHIC の STAR 実験、GSI の CBM 実験、R3B 実験で大面積読み出しパッドの RPC の R & D が行われている。

プロトタイプ製作は何件か報告されており、両読みのストリップ型読み出しの RPC は高い時間分解能が出せることが報告されている。大きなものとしては、P.Fonte らのグループが開発した 5 cm × 160 cm のストリップ型読み出しパッドの RPC と ALICE 実験のグループが開発した 2.5 cm × 180 cm のストリップ型読み出しパッドの RPC があり、それぞれ 50 ~ 75 ps 程度の時間分解能と 65 ~ 80 ps 程度の時間分解能の報告がある [25][26]。時間分解能に幅があるのは時間分解能にストリップ中でのトリガー位置依存性があるためである。ストリップ中の信号の伝搬の理論的理解はまだ進んでおらず、RPC のこれからの課題のうちの 1 つとなっている [27]。その他 V.V.Ammosov らのグループによる RPC が 2.5 cm × 31 cm の読み出しパッドで約 45ps の時間分解能 [28]、STAR 実験のグループによる RPC が 2.5 cm × 90 cm の読み出しパッドで 60 ~ 70 ps の時間分解能 [29] などの報告がある。ただし、この 2 つは位置依存性など詳細な評価はされていない。

また、特殊な例として HADES 実験において、片側のプレートに高抵抗板ではなく金属を使用したハイブリッド型の RPC が使用されており、2 cm × 60 cm の読み出しパッド (電極と併用) で、時間分解能約 75 ps を達成している [30]。

### 2.13 主な RPC

表 2.1, 表 2.2 に、主な実験に使用されている TOF 用 RPC と、主なストリップ型大面積パッドの RPC の一覧を示す。

Group	Pad size	Gap width	Gaps	Stacks	Resolution	Efficiency
ALICE[11]	2.4 cm × 3.7 cm	250 μm	5	2	< 50 ps	> 99 %
STAR[10]	3.15 cm × 6.3 cm	220 μm	6	1	60 ps	> 97 %
FOPI[31]	0.194 cm × 90 cm	220 μm	4	2	60 ps	> 99 %
HARP[32]	2.9 cm × 10.4 cm	300 μm	2	2	130 ps	97 ~ 98 %

表 2.1: 主な実験で使用されている TOF 用 RPC

Group	Pad size	Gap width	Gaps	Stacks	Resolution	Efficiency
[25]	5 cm × 160 cm	300 μm	4	1	50 ~ 75 ps	95 %
[26]	2.5 cm × 180 cm	300 μm	5	1	65 ~ 85 ps	~ 95 %
[28]	2.5 cm × 31 cm	300 μm	3	2	45 ps	> 98 %
[29]	2.5 cm × 90 cm	250 μm	5	2	60 ~ 70 ps	> 95 %
[15]	3.0 cm × 85 cm	220 μm	6	2	80 ps	> 90 %

表 2.2: 主なストリップ型大面積パッドの RPC

### 第3章 Resistive Plate Chamberの製作

我々は1st プロトタイプとして2.5 cm × 7.5 cm のガラスを用いたRPCを製作した。1st プロトタイプのRPCはビーム照射試験を行い、十分な性能が確認できた。その後大型化の第1歩として実機の半分のサイズの10 cm × 50 cm のガラスを用いた2nd プロトタイプのRPCを製作した。RPCの製作はガラスを積むだけなら数時間程度、読み出しパッドを手作りしても1日程度しかかからないため、同じガラスを再利用して、様々なギャップ構成と様々な形状の読み出しパッドのRPCを製作し、ビーム照射試験を行った。10 cm × 50 cm のガラスを用いたRPCをまとめて2nd プロトタイプのRPCと呼ぶ。

1st プロトタイプのRPCを図3.1に、2nd プロトタイプのRPCを図3.2に示す。本章では図2.2で示したパーツごとにRPCの開発手順を示す。

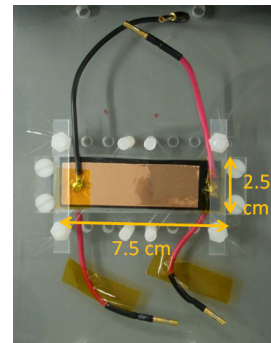
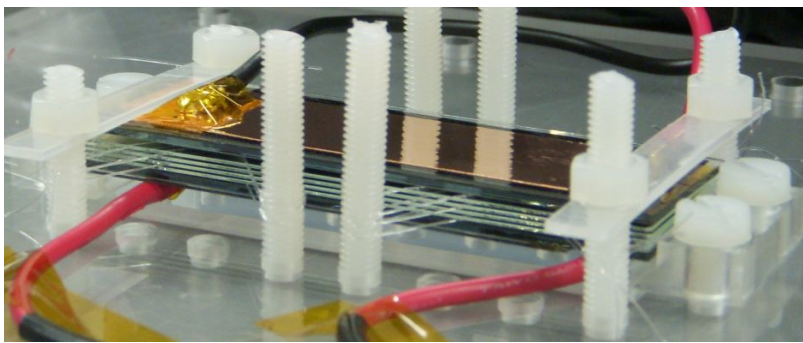


図 3.1: 1st プロトタイプのRPC  
(左) 横からの写真 (右) 上からの写真

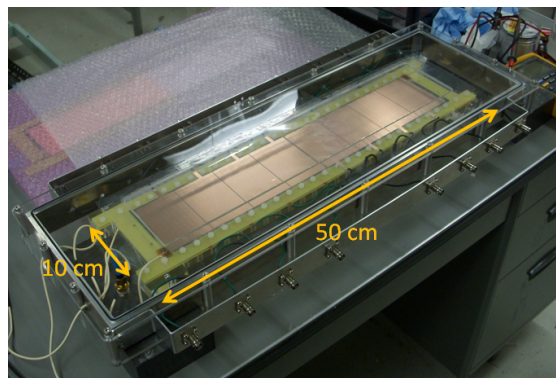


図 3.2: 2nd プロトタイプのRPC

### 3.1 ガラス

高抵抗のプレートには日本板硝子株式会社の ULTRA FINE FLAT GLASS の STANDARD クラス [33] のガラスを使用した。このガラスは板厚公差が  $\pm 50 \mu\text{m}$ 、表面凹凸が  $\pm 0.3 \mu\text{m}$  と非常に良い精度で表面の平面度が決まっている。1st プロトタイプでは、電極を貼付する一番外側のガラスには 2 mm 厚のものを、その他のガラスには 400  $\mu\text{m}$  厚のものを使用した。2nd プロトタイプでは外側のガラスには 500  $\mu\text{m}$  厚のものを、その他のガラスには 400  $\mu\text{m}$  厚のものを使用した。ギャップにかかる電圧はガラスの厚みには依存しないが、読み出しパッドに誘起される電荷はガラスの厚みに依存する [18]。2 mm 厚のガラスを使用した 1st プロトタイプの方が誘起される電荷は小さくなっていると考えられるが、1st プロトタイプと 2nd プロトタイプのビーム照射試験では使用した読み出し回路が異なるので系統的な評価は行っていない。現在一般的に RPC で使われているガラスの厚みは 400  $\mu\text{m}$  ~ 2 mm と様々である。

### 3.2 電極

RPC の電極の抵抗率が低いと、電極に信号が誘起されてしまい、読み出しパッドに誘起される信号が減ってしまう。そこで外側の読み出しパッドに信号が誘起されるよう、比較的高い抵抗率の電極を用いる [34]。ただし高抵抗プレートに均等に電圧がかかるように、プレートよりは低い抵抗率のものが用いられる。主な RPC で使用されている電極は数 10  $\text{k}\Omega/\text{sq}$  ~ 数  $\text{M}\Omega/\text{sq}$  程度の表面抵抗率のものが多く、我々の電極には唯一入手することができた ESD EMI エンジニアリング株式会社の T-9140 ライン半導電性両面粘着のカーボンテープ [35] を使用した (図 3.3)。このカーボンテープの表面抵抗率は約 500  $\Omega/\text{sq}$  である [36]。一般的に RPC に用いられているものよりは低いが、オペレーションに特に問題はなかった。ただし、カーボン電極の抵抗値が低いと信号がカーボン電極で広がるため、近接したパッドへクロストークを引き起こす可能性がある。また、カーボンテープの抵抗率が低いと位置分解能の位置依存性が出やすくなる可能性がある [37]、今回のテストではこのテープしか用いなかったため、抵抗率が時間分解能や検出効率といった RPC の特性にどこまで効いてくるのかといった評価は今後の課題である。

また、このテープは幅が 5 cm しかないため、10 cm  $\times$  50 cm の 2nd プロトタイプの RPC では 1 枚のテープではガラスを覆えず、ガラスの幅に合わせて切ったテープを僅かに重ねて使用している。そのため厚みが均等でなく、場所によって抵抗率も異なっている。大型の RPC ではカーボンのインクをプレートに塗り、電極とすることが多い。



図 3.3: ガラスに貼られた電極用のカーボンテープ



### 3.3 読み出しパッド

読み出しパッドには株式会社タカチ電気工業製の CUL-50T 型の  $35\ \mu\text{m}$  厚の銅テープを使用した。銅テープを用いるとどんな大きさのパッドも簡単に製作できるという利点があるが、貼る際にどうしてもしわが入ってしまう (図 3.4)。そこで 2nd プロトタイプでは図 3.5 のように PCB 基板に読み出しパッドを印刷したのも試した。印刷による読み出しパッドもテープと同じ  $35\ \mu\text{m}$  厚である。

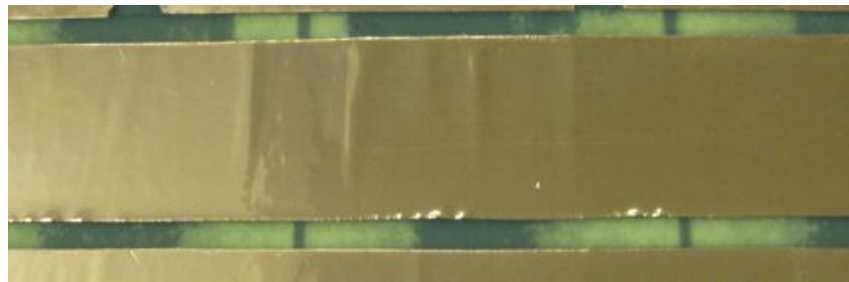


図 3.4: 銅テープによる読み出しパッド しわが出てしまう

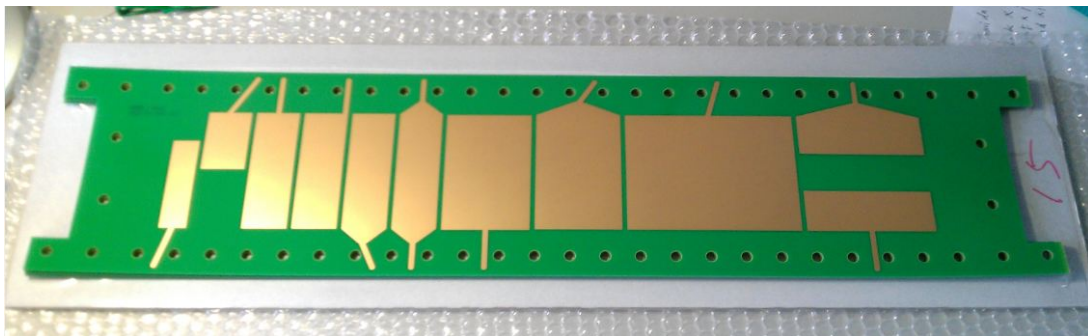


図 3.5: PCB 基板にプリントした読み出しパッド

### 3.4 絶縁

電極と読み出しパッドの間には  $10\ \text{kV}$  程度の電位差が生じるため、この電位差に耐えうる絶縁体を用いる必要がある。多くの RPC では、読み出しパッド用の電極を印刷した  $400\ \mu\text{m}$  程度の PCB を用いることが多い。

1st プロトタイプ開発初期は  $20\ \text{kV}$  程度の耐圧のある厚さ  $50\ \mu\text{m}$  のカプトンテープを使用していたが、オペレーションの最中カプトンテープの絶縁破壊が起き、電極から読み出しパッドにかけて放電が起きてしまった。以後は念のため、十分に厚みのある絶縁素材を使用することにした。1st プロトタイプの RPC では  $400\ \mu\text{m}$  厚のプラスチックのカードケースをガラスと同じ大きさにカットして使用した。2nd プロトタイプの RPC では  $400\ \mu\text{m}$  厚の PCB を使用した。

また、2nd プロトタイプ製作の際、最初は 10 cm × 50 cm のガラス全体を 1 枚で覆うことのできる PCB が手に入らず、2 枚を並べて使用したところ、図 3.6(左) のように PCB の隙間を通して、電極から読み出しパッドへ絶縁破壊が起きてしまった。それ以後は 1 枚ものの PCB を使用している。また、ガラスのふちから電極のふちまでの距離が短いと、図 3.6(右) のようにガラスの外側を回り込んでカソードとアノードの間で絶縁破壊が起きてしまう。現在のところガラスのふちと電極の間で 1 cm 以上の距離を取ると、絶縁破壊は起きていない。

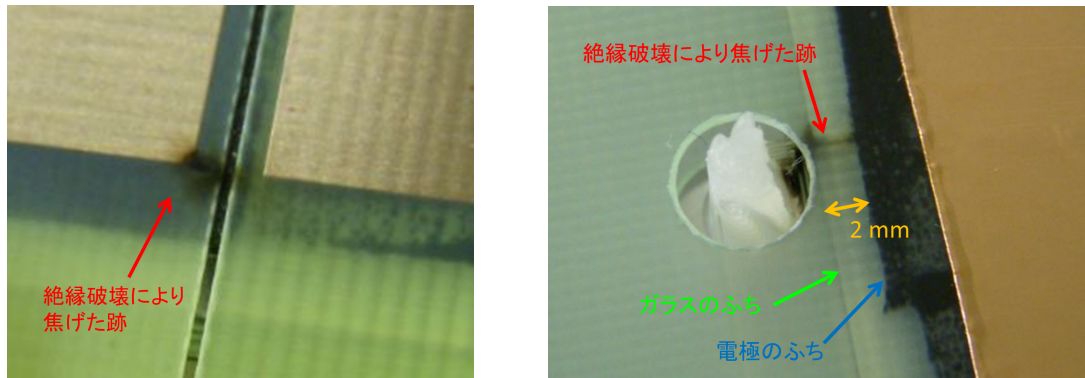


図 3.6: 絶縁破壊の様子

(左) 基板の隙間からの絶縁破壊

2 枚の PCB (黄色) の隙間を通して、カーボン電極から銅の読み出しパッドへ絶縁破壊が起こった

(右) カソード電極からアノード電極へかけて絶縁破壊

ガラスのふちと電極のふちの距離が近いため、ガラスの外を回り込んでカソード電極からアノード電極へかけて絶縁破壊が起きた

### 3.5 スペース

高抵抗プレートのギャップを作るスペーサーは均一の厚みで導電性が低いことが重要であり、通常ナイロン製の釣り糸が用いられる。日本で販売されている釣り糸には表 3.1 のような直径の種類があり、これらの値の間の直径の釣り糸を手に入れることはできない。また、釣り糸の号数は釣り糸が耐えられる荷重で決まるため、メーカーによって同じ号数でも太さが違う場合がある。しかしこの違いは 1~2  $\mu\text{m}$  程度である。数  $\mu\text{m}$  の精度で釣り糸の直径を測ることはできなかつたため、今回の論文ではメーカーが示している直径を表記する。RPC に用いるスペーサーは  $\pm 30 \mu\text{m}$  程度の厚みの違いがあっても、オペレーションに大きな影響がないことが ALICE 実験のグループによって示されている [16]。釣り糸の径が一定であるかの確認はできていないが、隣り合う径の直径の違いが狭いところで 10  $\mu\text{m}$  程度であるため (0.5 号と 0.6 号等) 径は 10  $\mu\text{m}$  以下の精度で決まっていると考えられ、RPC で要求される精度は十分満たしているものと考えられる。

今回のビーム照射試験では 104  $\mu\text{m}$ 、148  $\mu\text{m}$ 、260  $\mu\text{m}$  の釣り糸を使用した。使用した釣り糸は図 3.7(左)(中央) の東レ株式会社製の銀鱗シリーズ [38] と株式会社サンライン製のクインスターシリーズ [39] である。釣り糸は純ナイロン製であることが重要であるが、半端な号数の純ナイロン製の釣り糸はあまり生産されておらず、径が揃っているのは銀鱗シリーズしかない。クインスターシリーズの釣り糸は 235  $\mu\text{m}$  以上の径のものしか販売されていないが、銀鱗よりも長い単位で販



売されており、安く購入できる。図 3.7(右) のユニチカ株式会社製のグンターシリーズ [40] も試したが、通常は信号の見えない低い印加電圧でもストリーマーが観測され、うまくオペレーションできなかった。スパーサーに漏れ電流が流れると、周りのギャップにかかる電圧が高くなる [41]。電圧が高くなるとストリーマーモードに入りやすくなるので、低い電圧でストリーマーが観測されたのはこの漏れ電流のためだった可能性がある。メーカー表示ではナイロンとしか明記されていないが、ナイロン以外の導電性のある素材が混入しているのではないかと考えられる。

号数	標準直径
0.1号	0.053mm
0.2号	0.074mm
0.3号	0.090mm
0.4号	0.104mm
0.5号	0.117mm
0.6号	0.128mm
0.8号	0.148mm
1号	0.165mm
1.2号	0.185mm
1.5号	0.205mm
2号	0.235mm
2.5号	0.260mm
3号	0.285mm
3.5号	0.310mm
4号	0.330mm
5号	0.370mm
6号	0.405mm
7号	0.435mm
8号	0.470mm
10号	0.520mm

表 3.1: 日本で販売されている釣り糸の直径一覧



図 3.7: スパーサーに使用した釣り糸  
 (左) 銀鱗シリーズ (中央) クイーン・スターシリーズ (右) グンターシリーズ

### 3.6 スペースの配置

釣り糸は主にプレートの周りに設置したねじに図 3.8 のようにかけて張り使用する。その際あまり間隔をあけて張ると、電圧をかけた際に上下のプレートが引き合いプレートが歪んでしまう。1st プロトタイプでプレートの端にだけスペーサーを用いた際は、オペレートの途中でストリーマーの信号が多くなり、開けてみると図 3.9 のように中央でガラスがくっついてしまっていた。2nd プロトタイプでは釣り糸を張るためのねじは 2 cm 間隔で並ぶように設計した。初めは図 3.10(左) のようにギャップごとに互い違いのねじを用いて釣り糸をはって見たが、図 3.10(右) のように、釣り糸のないギャップが狭くなってしまいうまくいかなかった。ビームテスト用の RPC には図 3.8 の張り方を採用した。横から見た図が図 3.12 である。製作にかかる時間と釣り糸の節約のため、図 3.11 のような 4 cm 間隔も試してみたが、こちらも電圧をかけるとガラスが湾曲してしまった。ガラスの平行性を肉眼で確認することは難しいので、カメラで撮影し、拡大して確認している。スペーサーは非常に細く、垂直に入射する粒子はほとんどないので、スペーサーによる不感領域は検出効率に対しほとんど問題にならない。

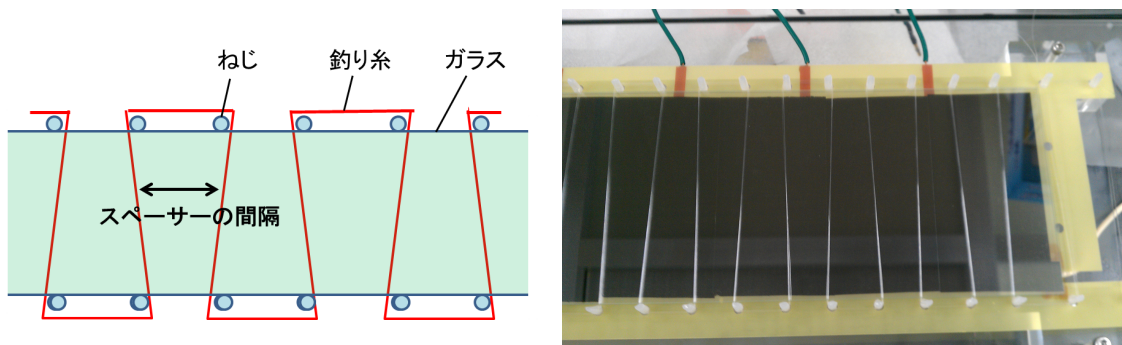


図 3.8: ビームテストで採用した釣り糸の張り方

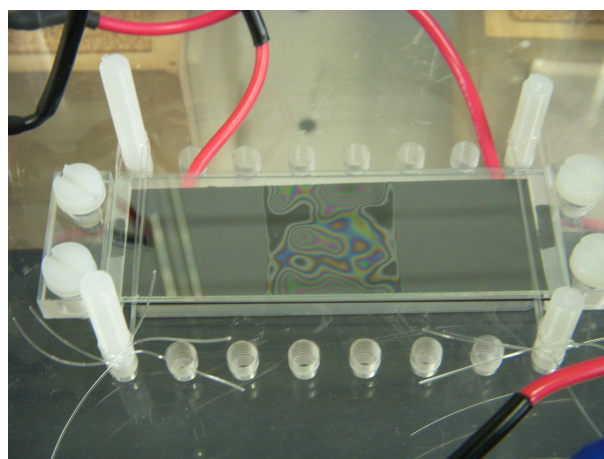


図 3.9: スペースの間隔が広く、歪んだガラス ニュートンリングが見える

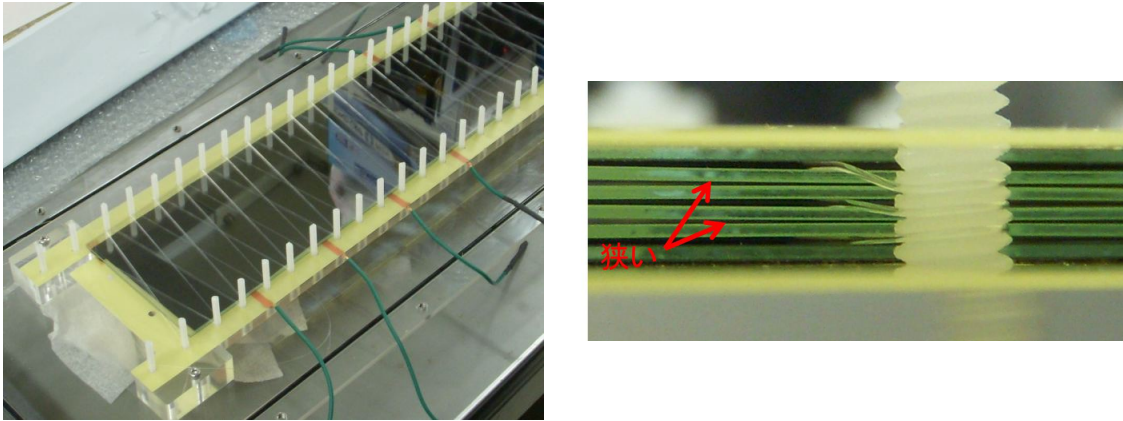


図 3.10: ギャップごとに互い違いに張った釣り糸  
(左) 上から見た図 (右) 横から見た図  
2 ギャップ目と 4 ギャップ目に釣り糸がないためギャップが狭くなってしまっていることが分かる

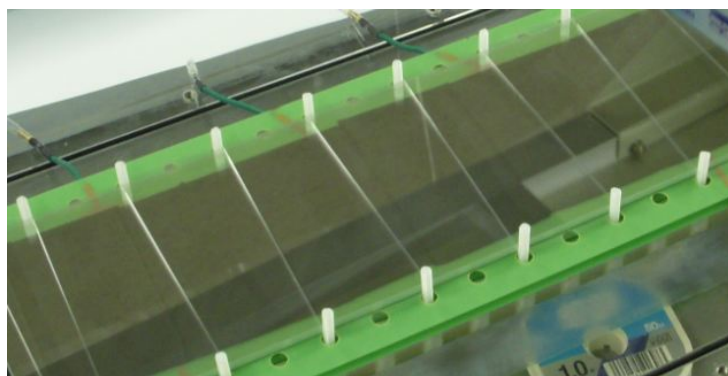


図 3.11: 4 cm の間隔で張った釣り糸

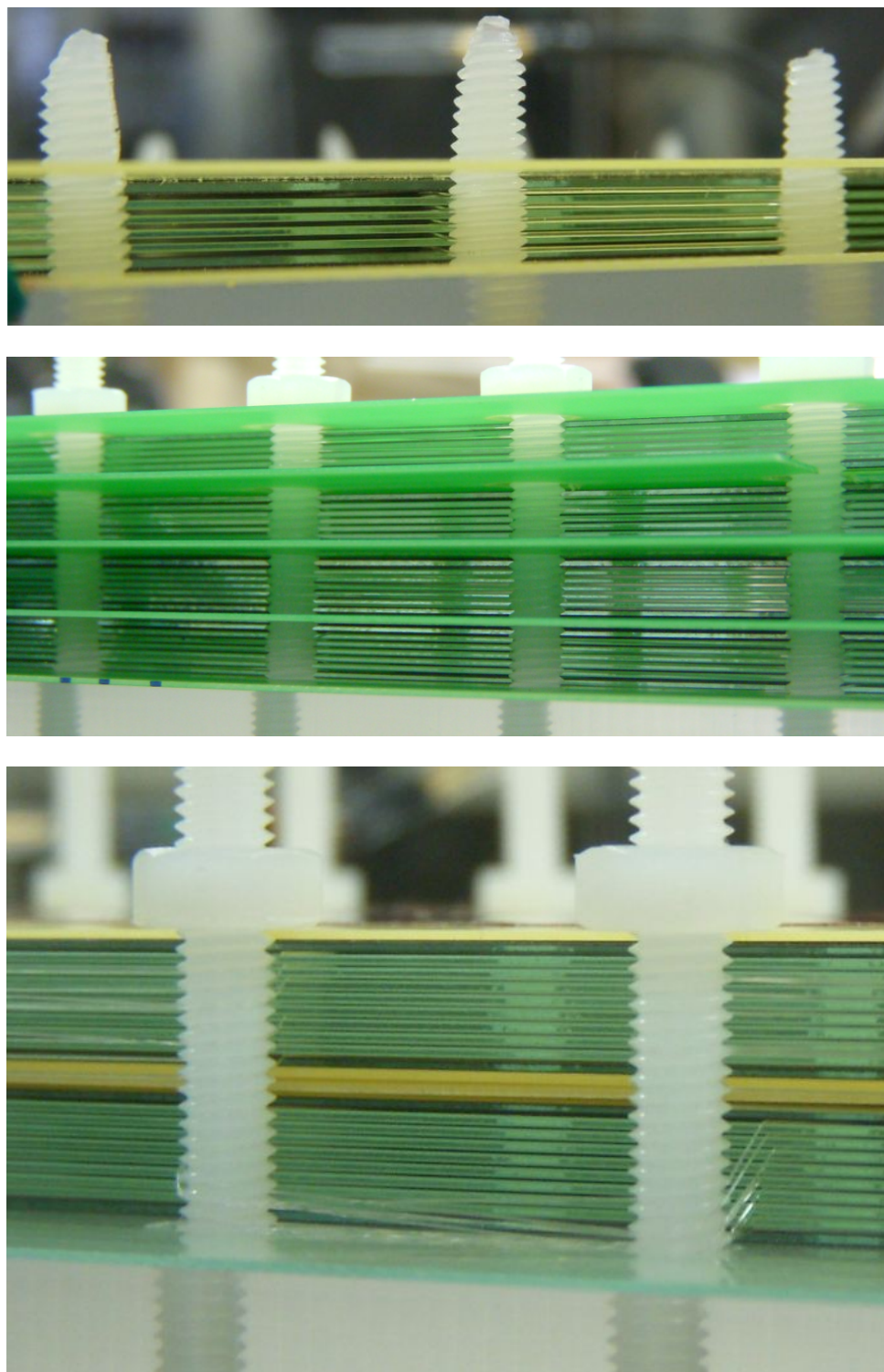


図 3.12: RPC を横から見た図

(上)  $260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps} \times 1 \text{ stack}$  の RPC

(中)  $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の RPC

(下)  $104 \mu\text{m} \times 7 \text{ gaps} \times 2 \text{ stacks}$  の RPC



### 3.7 読み出しケーブル

読み出しパッドからアンプまでの信号の伝搬には図 3.13 のようにケーブルを用いた。ケーブルはチェンバーの外で BNC コネクターに変換され、アンプに接続される。ケーブルの取り外しを簡単にするために、ケーブルの途中では図 3.14 のようなコネクターを用いた。読み出しパッドと読み出しケーブルは図 3.15 のようにはんだで接続した。またダブルスタック型 RPC は上下 2 つのパッドからの信号を合わせるため、図 3.16 のようなコネクターを製作した。2 つのケーブルを足し合わせる部分ははんだで接続した。

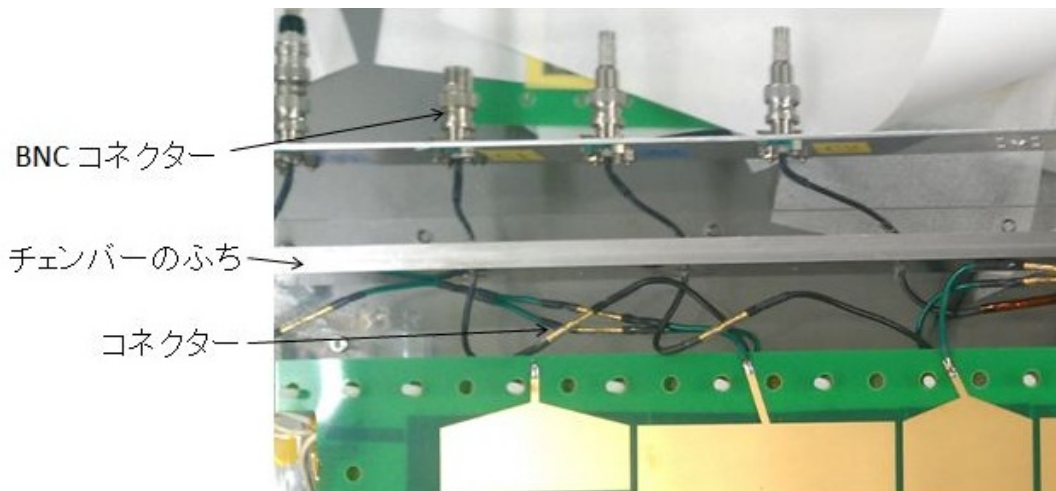


図 3.13: 読み出しケーブル

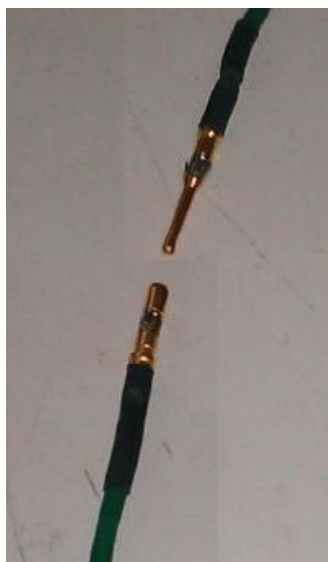


図 3.14: ケーブル間の接続に用いたコネクター

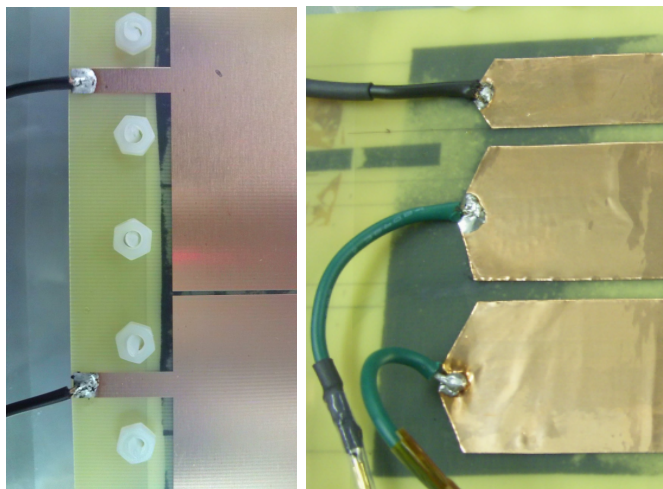


図 3.15: 読み出しケーブルと読み出しパッドの接着の様子  
はんだを用いている

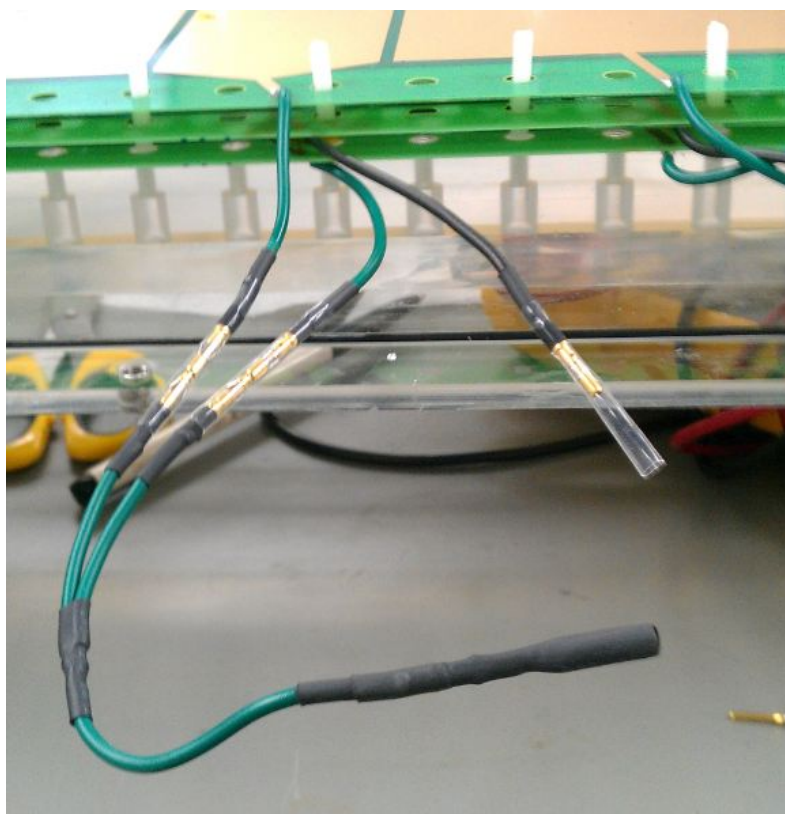


図 3.16: ダブルスタック型 RPC の信号の読み出しに用いたコネクタ  
上下 2 つのパッドからの信号を足し合わせる

## 第4章 Resistive Plate Chamberの基本動作

本章ではRPCの基本動作について述べる。

### 4.1 信号

#### 4.1.1 アバランシェ信号

図 4.1 は  $330 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps}$  のRPCの  $1.5 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$  のパッドをインピーダンス  $50 \Omega$  のオシロスコープで見た場合の典型的な信号である。この写真を撮った際はアノードとカソードで長さの違うケーブルを用いたためタイミングが異なっているが、基本的にはアノードとカソードで同じタイミングで極性が反対の信号が現れる。パルスの高さは数  $\text{mV}$  ~ 数  $10 \text{ mV}$  程度と小さいため、高い増幅率のアンプが必要になる。立ち上がりは  $2 \text{ ns}$  程度と非常に速いことが分かる。

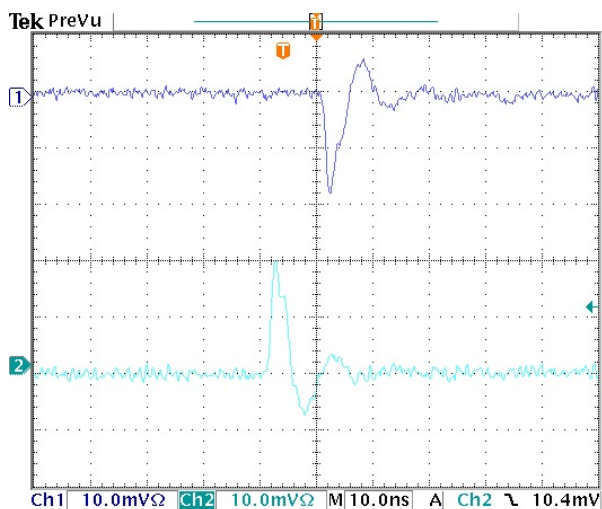


図 4.1: 典型的なRPCの信号 青色：アノード 水色：カソード

#### 4.1.2 プローブによる信号

図 4.2 はインピーダンスが  $10 \text{ M}\Omega$  のプローブを用いたRPCの信号である。最初の速い信号が電子によるもので、後ろのゆっくりとした信号は正イオンによるものである。  $50 \Omega$  のインピーダンスで信号を見る際には、時定数が短いため、電子による速い信号のみが見える。

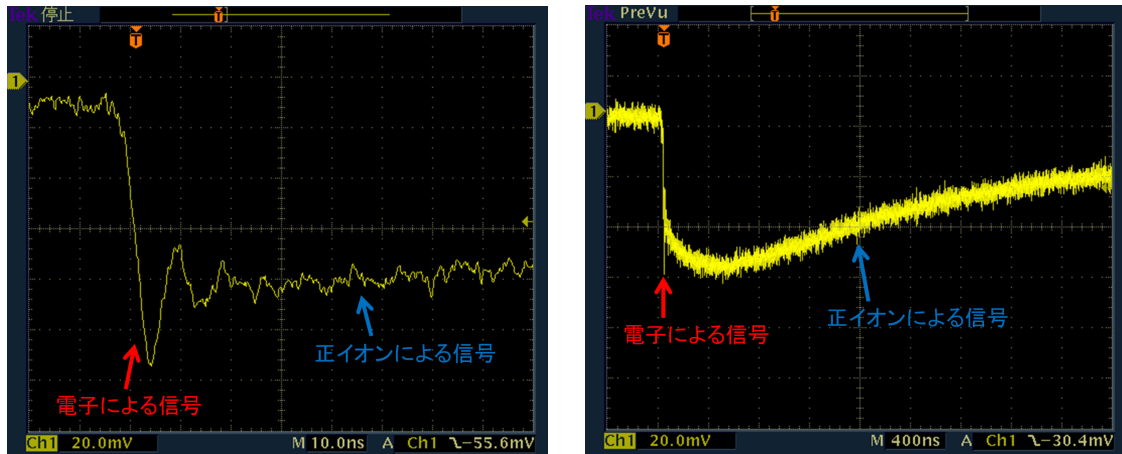


図 4.2: 10 MΩ のプローブを用いた RPC の信号  
 (左) 1 ビン 10 ns のスケール (右) 1 ビン 400 ns のスケール

#### 4.1.3 ストリーマー信号

図 4.3 は典型的なストリーマーの信号である (4 倍アンプ使用)。アバランシェの信号に遅れて大きなパルスハイトのストリーマーの信号が現れる。アバランシェの信号は荷電粒子が通過するとただちに現れるためタイミングが一定であるが、ストリーマーの信号は電子の個数がある一定の閾値を超えたときに現れるので、タイミングは信号の増幅過程に寄り、イベントごとに異なる。そのためストリーマーモードの RPC はあまり時間分解能が出ない。

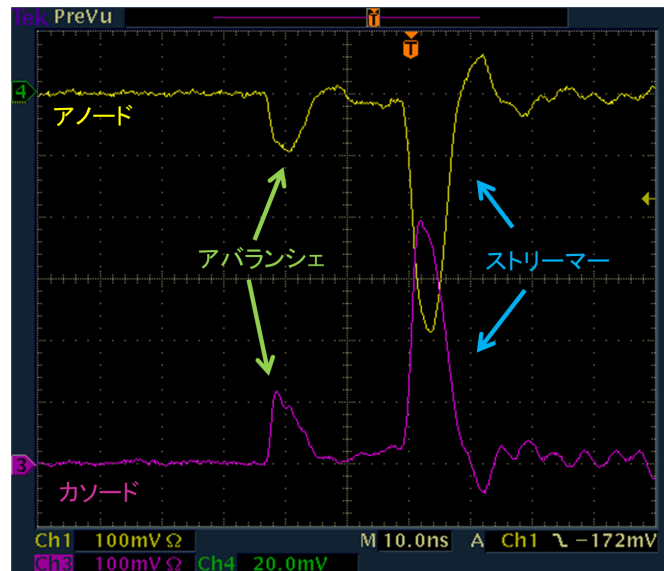


図 4.3: 典型的なストリーマーの信号 (4 倍アンプ使用)  
 1 つ目の信号がアバランシェによるもの、2 つ目の信号がストリーマーによるもの



#### 4.1.4 ダブルスタック型 RPC の信号

図 4.4 はダブルスタック型 RPC のそれぞれ A(アノード)、C1,C2(カソード)のパッドから読んだ信号である。アノードの信号はおよそ C1,C2 2つのカソードの信号の和と同じ程度のパルス高になっていることが分かる。実際のオペレーションは C1,C2 の信号は足し合わされて読まれる。図 3.16 のラインを用いて C1,C2 を足し合わせた場合のアノード・カソードの信号が図 4.5 である。アノードとカソードでほぼ同じパルス高になっていることが分かる。信号の後ろに見えているのは信号の反射であり、詳しくは 4.4 で述べる。

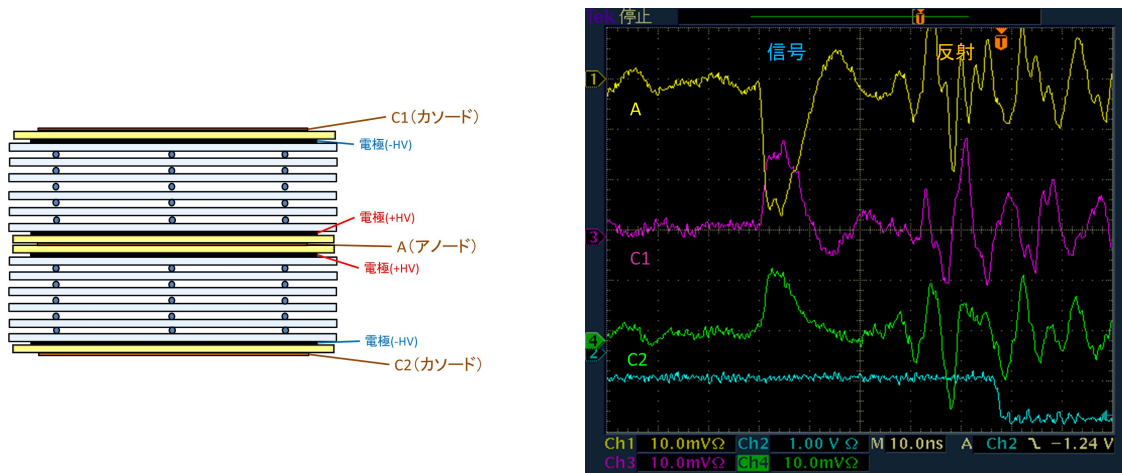


図 4.4: 2つのパッドの信号を足し合わせない場合のダブルスタック型 RPC の信号  
1つ目のピークが信号で、2つ目以降に見えているのは信号の反射である 4倍アンプ使用

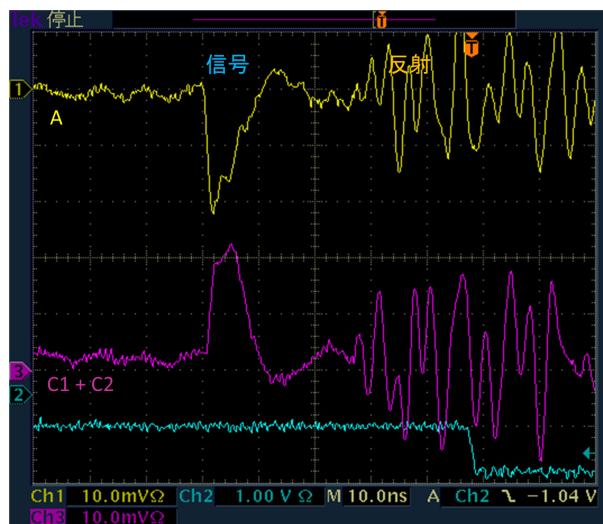


図 4.5: 2つのパッドの信号を足し合わせた場合のダブルスタック型 RPC の信号  
1つ目のピークが信号で、2つ目以降に見えているのは信号の反射である 4倍アンプ使用

### 4.1.5 ストリップ型読み出しパッドの信号

図 4.6 は 2.5 cm × 40 cm の両読みストリップ型読み出しパッドの信号である。入力インピーダンスが 50 Ω のアンプを使用した信号であり、パッドのインピーダンスと合っていないため、反射した波形になってしまっている。本実験では入力インピーダンス 50 Ω のアンプしか用意できなかったため、この波形のままの信号を使用した。

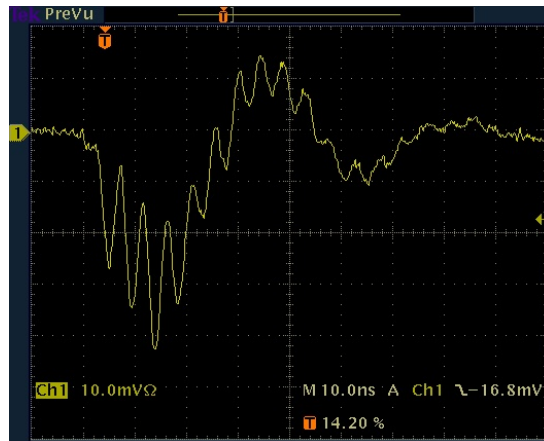


図 4.6: ストリップ型読み出しパッドの信号 4 倍アンプ使用

## 4.2 暗電流

RPC は定常状態で  $< 1 \text{ Hz/cm}^2$  程度の暗電流が見られる。暗電流と通常の信号は特に大きな違いは見られない。電圧を上げる際は一時的にこの暗電流が増えるため、暗電流の減少を待って、1 ~ 2 時間程度かけて電圧を上げるようにした。

## 4.3 ノイズ

RPC の信号は小さいため、ノイズによる影響を受けやすい。特に今回の実験では筐体にプラスチックを用いたため、静電遮蔽の効果がなく、ノイズがのりやすかった。ビーム照射試験の際はグラウンドの強化により、アンプ入力前で RMS 0.05 mV 程度までノイズレベルを落としてテストを行った。

## 4.4 反射

読み出しパッドとアンプのインピーダンスが合っていないと、図 4.4、図 4.5 の様に、信号の後ろに反射が起きる。この反射は信号が発生したパッドの他、近接したパッドにも現れる。この反射によるクロストークは、時により本来の信号によるクロストークよりも大きいパルス高となり、問題となることがある [27]。この反射は、読み出しパッドとアンプのインピーダンスを合わせることで抑えられることが示されている [42]。

## 第5章 ビーム照射試験のセットアップ

プロトタイプRPCのビーム照射試験はSPring-8のLEPSビームラインで行った。セットアップの模式図を図5.1に示す。逆コンプトン散乱によって散乱された $1.5 \sim 2.4 \text{ GeV}/c$ の $\gamma$ 線を $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ の鉛のターゲットに照射し、対生成によってできた電子を中心磁場 $0.6 \text{ T}$ の双極型電磁石によって曲げ、RPCに照射した。従って電子ビームはペンシル状ではなく、水平面に広がった分布になる。トリガー領域はフィンガーシンチレーターを用いて $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ とした。粒子の飛行時間は以下で述べるRF信号とRPCの信号の時間差で求め、時間分解能を評価した。

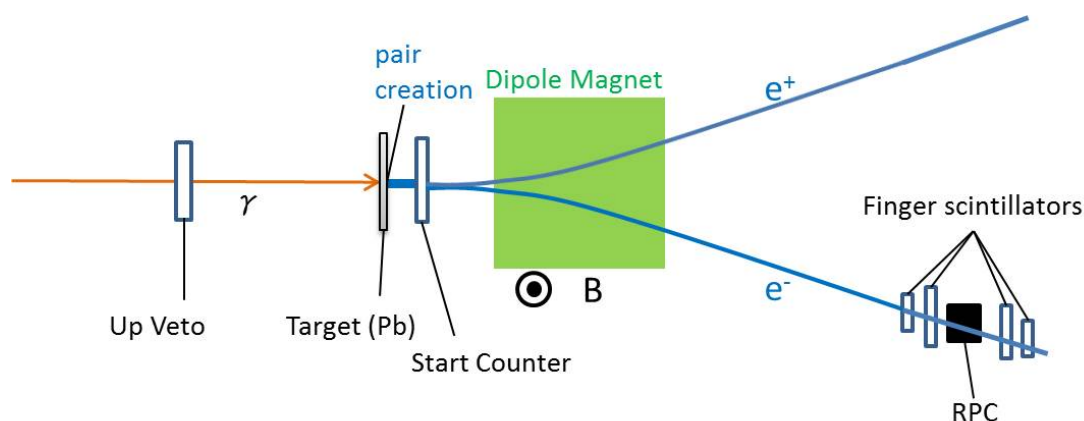


図 5.1: ビーム照射試験のセットアップ

### 5.1 レーザー

逆コンプトン散乱に用いるレーザーは波長 $351 \text{ nm}$ のものを使用した。 $351 \text{ nm}$ のレーザーを用いると $2.4 \text{ GeV}/c$ までの運動量の逆コンプトン $\gamma$ 線を生成できる。レーザーは $36 \text{ m}$ 離れた蓄積リングの軌道上で電子にあたるように、鏡で位置と方向を合わせる。この鏡の位置を調整することでレーザーの位置を動かす、ビームのレートも簡単に調整することができる。しかしこの鏡の局所的な向きと反射率が時間によってふらつくため、電子と散乱する確率もふらつき、電子ビームを一定の強度に保つことは難しい。

## 5.2 電子ビーム分布

図 5.2 は波長 351 nm のレーザーを用い、タガーカウンター (次節参照) のレートを 350 ~ 400 kHz に保った際の RPC の位置での電子強度の分布である。横軸はビーム軸からの距離を表し、0 mm がビーム中心である。図中の点は 2 秒ごとの平均のトリガーレートを 100 秒分示しており、例えばビーム中心から 180 mm の位置ではトリガーレートは 200 ~ 350 Hz/cm<sup>2</sup> と、鏡の反射率のふらつきに応じたトリガーレートのふらつきが分かる。

逆コンプトン散乱による  $\gamma$  線は図 1.3 のようなエネルギースペクトルをしており、対生成で生成される電子も  $\gamma$  線のエネルギーに対応して高い運動量のものが多く、低い運動量のものも少なくなる。双極型電磁石により大きい運動量のは小さく、小さい運動量のは大きく曲げられるため、図 5.2 のようにビーム軸に近い側でレートが高くなる。

$\gamma$  線ビームがチェンバーを横切らないようチェンバーの位置は固定して実験を行った。そのため位置によってトリガーレートに差が出ないよう、トリガーの場所ごとに鏡の角度を調整し、同じトリガーレートを保つようにして測定を行った。

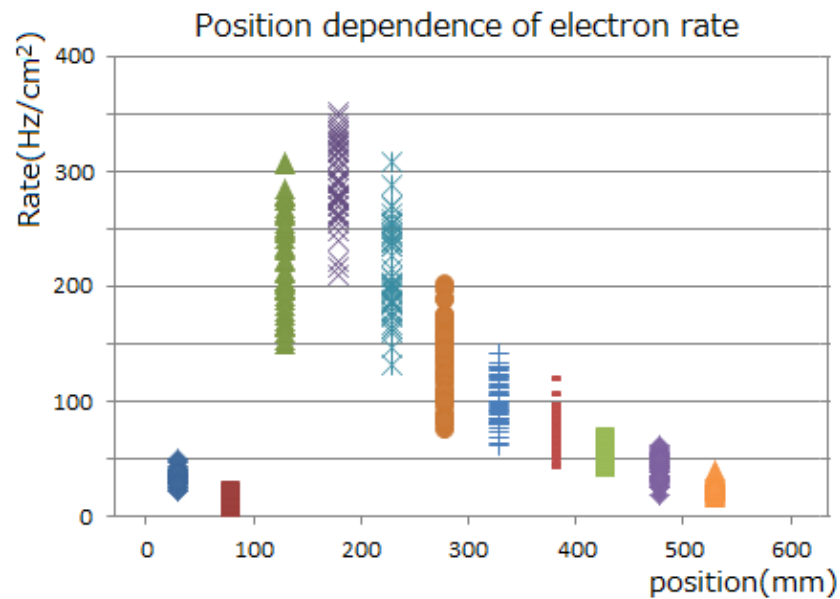


図 5.2: 電子ビーム分布

## 5.3 トリガー

トリガーは図 5.1 に示すタガーカウンター、スタートカウンター、フィンガーシンチレーターの 3 つのコインシデンスに、アップベトーカーンターによりベトを掛けて使用した。

### タガー

蓄積リング内の電子は  $8 \text{ GeV}/c$  の一定の運動量が保たれている。レーザー光により逆コンプトン散乱が起こると電子は運動量を失い、回転半径が小さくなり蓄積リングの軌道よりも内側へ曲げられる。リングの内側にはプラスチックシンチレーターが設置してあり、このシンチレーターのヒットにより、逆コンプトン散乱が起きたイベントを認識する。このシンチレーターの設置領域は  $\gamma$  線のエネルギーにして  $1.5 \sim 3.5 \text{ GeV}$  に対応している。

### アップベトー

アップベトーカウンターはターゲットの上流に置かれたシンチレーターであり、 $\gamma$  線がターゲットよりも上流でビームパイプの窓等と反応して電子・陽電子対になったイベントを認識する。アップベトーカウンターの信号はベトーとして用いた。

### スタートカウンター

スタートカウンターはターゲットの直後に置かれたシンチレーターであり、 $\gamma$  線がターゲットと反応して対生成し、電子陽電子対が通過したことを認識する。トリガーの段階ではスタートカウンターのヒット情報のみを用い、解析では電子陽電子対以外のイベントや、2組以上の電子陽電子対が通過したイベントを除くため電荷分布が 2MIP のイベント (1組の電子・陽電子対が通過したとみられるイベント) のみを用いるようにした。図 5.3 がスタートカウンターの電荷分布である。緑色で塗った部分のイベントを除き、ADC の値が  $200 \sim 300 \text{ ch}$  の間の値のイベントのみを用いた。

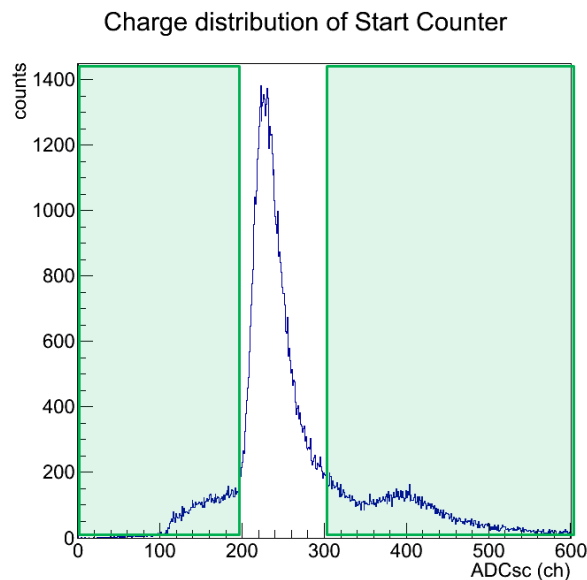


図 5.3: スタートカウンターの電荷分布  
緑色で塗った部分のイベントをカットした

フィンガーシンチレーター

フィンガーシンチレーターは電子がRPCをヒットする領域を決めるために使用した。図 5.4 のように幅 1 cm のフィンガーシンチレーターと幅 2 cm のフィンガーシンチレーターを組み合わせ、チェンバーの前後に設置し、1 cm × 2 cm のトリガー領域になるようにした。図 5.5 のように、パッドの長辺側がトリガーの 2 cm 辺の側になるように向きを決めた。

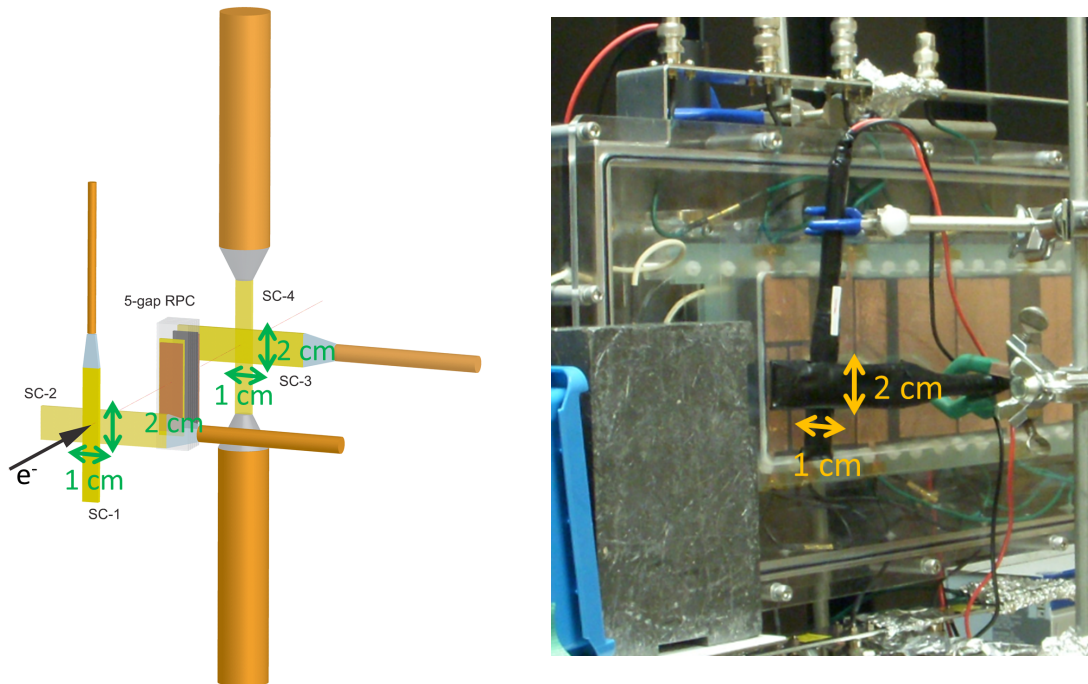


図 5.4: フィンガーシンチレーターのセットアップ

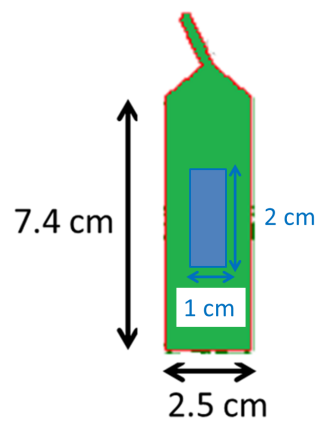


図 5.5: トリガー領域

## 5.4 RF 信号

蓄積リング上では電子ビームは細密のとき 1966 ps 間隔のバンチ構造をしている。ゆえに逆コンプトン散乱による  $\gamma$  線も 1966 ps 間隔となる。加速器側からはこの 1966 ps 間隔の RF 信号がユーザーに供給されている。レーザーと電子の衝突点からターゲットまで  $\gamma$  線は光速でやってくるため、この RF 信号でスタートのタイミングを決めることができる。対生成後の電子の速度はほぼ光速であり、運動量の違いによる RPC への到達時間差は無視できる。本実験および LEPS、LEPS2 ではこの RF 信号を TOF 測定のスタートのタイミングとして用いる。RF 信号の精度は非常によく、TDC の時間分解能 (約 20 ps) 以下である。LEPS および本実験では RF 信号を 87 回に 1 回に間引いて、RF 信号のタイミングを TDC により記録している。RF 信号については付録 B で詳しく述べる。

## 5.5 読み出し回路

図 5.6 にビーム照射試験で用いた RPC の読み出し回路を示す。

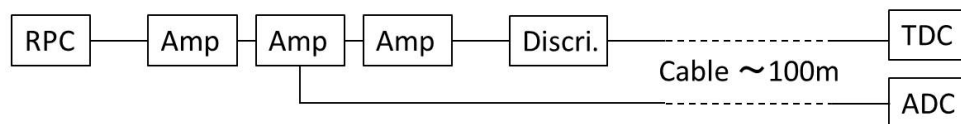


図 5.6: RPC の信号読み出し回路

### プリアンプ

プリアンプには海津製の PMT 用アンプ 2104 型を使用した [43]。この PMT アンプの最高繰り返し周波数は約 850 MHz で、周波数 500 MHz の信号の増幅率が約 5 倍である。RPC の信号を用いて測定した場合の増幅率の実測値は約 4 倍であった。RPC の信号はとても小さく、4 倍の増幅率では十分でないため、この PMT アンプを複数段使用した。電荷測定用には 2 段 (増幅率約 16 倍)、時間測定用には 3 段 (増幅率約 64 倍) で使用した。このアンプは負の信号のみに対応しているので、今回の測定ではアノードの信号しか使用していない。入力インピーダンスは 50  $\Omega$  である。

### ディスクリミネーター

ディスクリミネーターは Phillips 社製の 711 型を用いた [44]。閾値レベルはスキャンを行い、読み出しパッドごとに最も時間分解能のよい値を採用した。ほとんどのパッドでは -30 mV を採用し、パルスハイトの小さい両読みパッドの一部には -20 mV の閾値レベルで試験を行った。

### ケーブル

RPC の信号は実験ハッチから約 100 m のケーブルを通して計測器まで信号を伝達されている。テスト信号を用いて測定した結果、このケーブルを伝搬する間の時間分解能の悪化は約 10 ps であった。ケーブルによる時間分解能の悪化に関しては付録 B で詳しく述べる。



### TDC

時間測定には次の 2 種類の High Resolution TDC を用いた。TDC の性能評価については付録 B で詳しく述べる。TDC は Common Start モードで使用し、スタートのタイミングにはスタートカウンターの信号を利用した。

< LeCroy 1875A >

1 回目の 1st プロトタイプの RPC のビーム照射試験には FastBus の LeCroy1875A 型 High Resolution TDC を用いた [45]。フルレンジが 100 ns、1bin が約 25 ps であり、この TDC の時間分解能は 35 ~ 40 ps であった。

< GNC-040 >

2 回目以降のビーム照射試験には CAMAC のジー・エヌ・ディー製 GNC-040 型 High Resolution TDC を用いた [46]。この TDC もフルレンジが 100 ns、1bin が約 25 ps の設定で計測を行った。時間分解能は 17 ~ 19 ps であった。

### ADC

< LeCroy 4300B FERA >

1 回目の 1st プロトタイプの RPC のビーム照射試験には LeCroy4300B 型 Fast Encoding & Readout ADC を用いた [47]。

< RPC-022 >

2 回目以降のビーム照射試験には CAMAC の REPIC 製 RPC-022 型 ADC を用いた [48]。フルレンジが約 1000 pC で、1 bin が約 0.25 pC であった。

## 5.6 高電圧電源

アノードの電圧供給には松定プレジジョン製 入出力比例型高圧電源 HV-10P(A) を使用した。この電源は +10 kV までの電圧が供給可能な廉価な電源である。カソードには REPIC の RPH-042 型の高圧電源を使用した。この電源は -6 kV までの電圧が供給可能である。

この 2 つで計 16 kV までの電圧をかけることができ、この 2 つの電源を用いてテストを行った。

## 第6章 Resistive Plate Chamberの性能評価

本章ではプロトタイプRPCのビーム照射試験の測定結果を示す。

ビーム照射試験ではRPCの時間分解能と検出効率のギャップ幅依存性、ギャップ数依存性、スタック数依存性、レート依存性、ガス依存性など様々な依存性を調べた。また、様々な形状の面積のパッドを製作し、時間分解能と検出効率のサイズ依存性やトリガー位置依存性を調べた。本章では上記のようなRPCの性能評価に重要な結果を示し、読み出しケーブルやカソードの接続法など細かい依存性の測定結果については付録Aで述べる。

本テストで  $148\ \mu\text{m} \times 6\ \text{gaps} \times 4\ \text{stacks}$  のRPCは  $1.5\ \text{cm} \times 5.5\ \text{cm}$  の読み出しパッドで検出効率99%以上、TOFとしての時間分解能約40 psを達成した。また、LEPS2で1000 ch相当の大きさとなる  $2.5\ \text{cm} \times 40\ \text{cm}$  のストリップ型の両読みパッドでは、 $260\ \mu\text{m} \times 5\ \text{gaps} \times 2\ \text{stacks}$  の構造で検出効率99%以上、TOFとしての時間分解能約60 psを達成した。

### 6.1 測定条件

本章ではガラスサイズ  $10\ \text{cm} \times 50\ \text{cm}$  の2ndプロトタイプRPC(図3.2)の試験結果を示す。1stプロトタイプ(ガラスサイズ  $2.5\ \text{cm} \times 7.5\ \text{cm}$ )(図3.1)との試験結果の比較は付録Aで述べる。

ビーム照射試験には主に、 $260\ \mu\text{m} \times 5\ \text{gaps} \times 2\ \text{stacks}$  のRPCと  $148\ \mu\text{m} \times 6\ \text{gaps} \times 2\ \text{stacks}$  のRPCと  $104\ \mu\text{m} \times 7\ \text{gaps} \times 2\ \text{stacks}$  のRPCの3つのダブルスタック型RPCを使用した。本章では特に表記のない限り、 $260\ \mu\text{m}$  RPC、 $148\ \mu\text{m}$  RPC、 $104\ \mu\text{m}$  RPCは上記のギャップ・スタック構成を差すものとする。それぞれのギャップ数は検出効率のプラトーで1スタックにかける電場がおおよそ同じになるように決定した。基準となる読み出しパッドは  $1.5\ \text{cm} \times 5.5\ \text{cm}$  のサイズのものを使用した。本章ではこのパッドをSパッドと呼ぶ。ガスは特に表記のない限り、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2 : \text{SF}_6 : \text{iso-C}_4\text{H}_{10} = 90 : 5 : 5$  の割合を用いた。ビーム強度はレート依存性の測定以外では、 $5 \sim 20\ \text{Hz}/\text{cm}^2$  程度になるように調整した。トリガー領域は  $1\ \text{cm} \times 2\ \text{cm}$  である。

### 6.2 時間分解能

本章では加速器から提供されるRF信号とRPCの信号の時間差から得られる時間分解能を示す。時間分解能にはRPCの他に、アンプのジッター、ディスクリミネーターのジッター、TDCの時間分解能、蓄積リング内の電子のバンチ長、ケーブルの拾うノイズ、などが影響すると考えられる。このうちTDCの時間分解能、蓄積リング内の電子のバンチ長、ケーブルの拾うノイズによる影響は測定済みであり、それぞれ約18 ps、14~15 ps、約10 psであった(付録B参照)。この3つに依る時間分解能への影響は  $\sqrt{18^2 + 15^2 + 10^2} \sim 25\ \text{ps}$  程度であり、これは実機のオペレーションの際にもほぼ不可避な効果である。また、シミュレーションによりアンプのノイズによる時間分解能の悪化が15 ps程度あることが確認された(付録B参照)。その他のアンプやディスク

リミネーターのジッターによる影響は評価できなかったため、RPC 以外の回路による寄与はさらに大きい可能性もある。本章ではこういった RPC 以外の寄与も含んだ TOF の実測値の時間分解能を示す。

## 6.3 解析方法

### 6.3.1 検出効率

図 6.1 は  $148 \mu\text{m}$  RPC の電圧 10 kV での信号の時間分布である。信号のパルス高がディスクリミネーターの閾値レベルを下回った場合でも、反射によるパルスのパルス高は閾値レベルを上回ることがある (4.4 参照) ので、正しい信号 (2600 ch 付近) よりも後ろの位置にピークが見える。検出効率を求める際は正しい時間に信号が見えた場合のみ (1 つ目のピークのみ) をヒット有りとみなした。なおストリップ型読み出しの両読みパッドでは両方の読み出しで正しい時間にヒットがあったものをヒットとみなした。

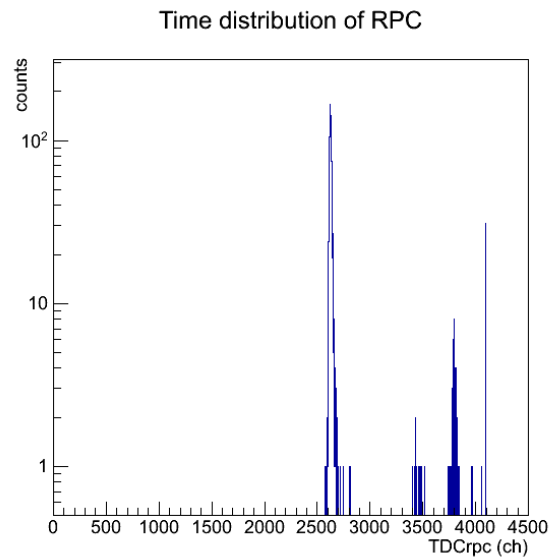


図 6.1: RPC 信号の時間分布

### 6.3.2 時間分解能

粒子の飛行時間を RF 信号と RPC の信号の時間差から求め、その分布をガウス関数でフィットした標準偏差から時間分解能を求めた。以下  $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の RPC を例として、解析方法の詳細を述べる。

### RF 信号の足し合わせ

スタートのタイミングは加速器側から RF 信号によって決める。5.4 で述べたように、加速器からの RF 信号は LEPS にて 87 回に 1 回に間引いて使用している。そのため 1 つの RF 信号に対して、1966 ps 間隔の 87 個のバンチ構造が現れる。その様子を図 6.2(左) に示す。縦軸が RF から RPC の時間差、横軸が RPC の電荷分布である。スケールはどちらもモジュールのチャンネルである。TDC は 1 ch=約 25 ps であり、約 2000 ps の間隔でバンチが現れていることが確認できる。解析ではこれらのうち、TDC の線形度のよい領域で測定された 30 バンチを足し合わせて使用した。足し合わせた後の時間-電荷分布が図 6.2(右) である。足し合わせ方法についての詳細は付録 B で述べる。

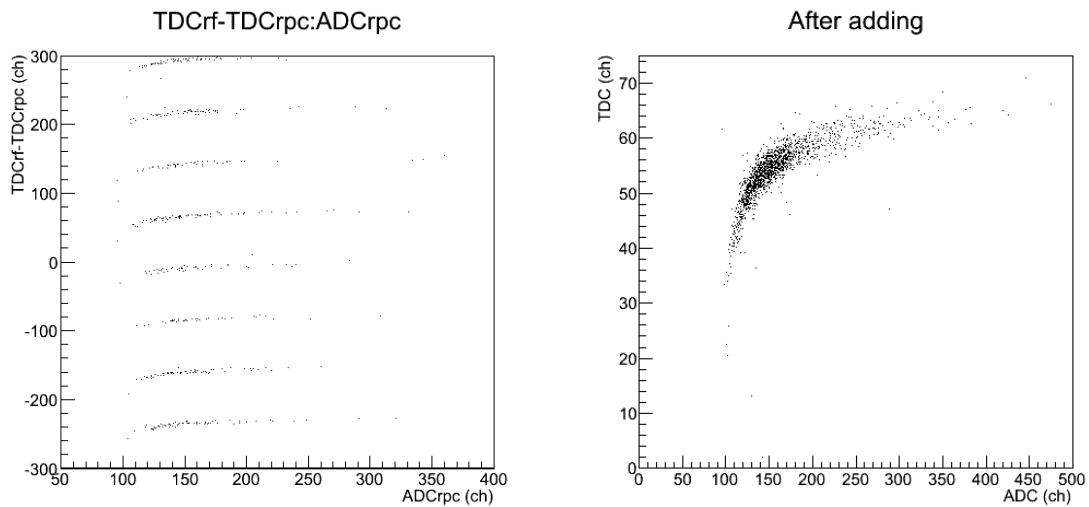


図 6.2: バンチ構造の足し合わせ  
(左) 足し合わせ前 (右) 足し合わせ後

### タイムウォーク補正

RPC の信号がシュレッシュールドを越えるタイミングはパルスの高さに依存する (タイムウォーク)。そこで電荷分布に対する時間を図 6.3(左) のように 6 次関数でフィットし、補正を行った。補正後の時間-電荷分布が図 6.3(右) である。補正後の時間分布をガウス関数でフィットし、その標準偏差をもって時間分解能とした。補正前と補正後の時間分布を図 6.4 に示す。本章では以後タイムウォーク補正後の時間分解能を示す。

### 両読み読み出しパッド

ストリップ型読み出しの両読みパッドでは、片側ずつタイムウォークの補正を行い、2 つの読み出しの時間の平均から、RPC のタイミングを求めた。

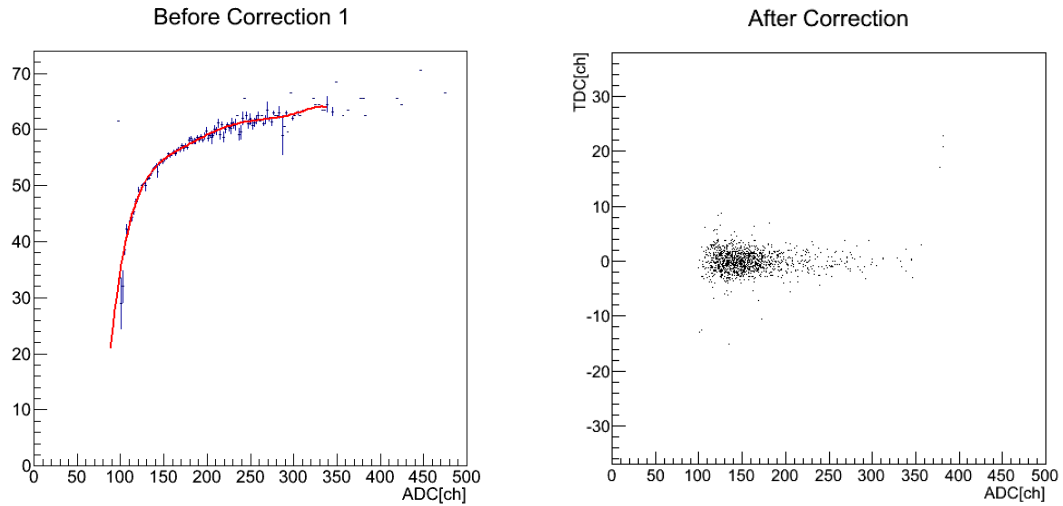


図 6.3: タイムウォーク補正  
(左) フィッティングの様子 (右) 補正後の時間-電荷分布

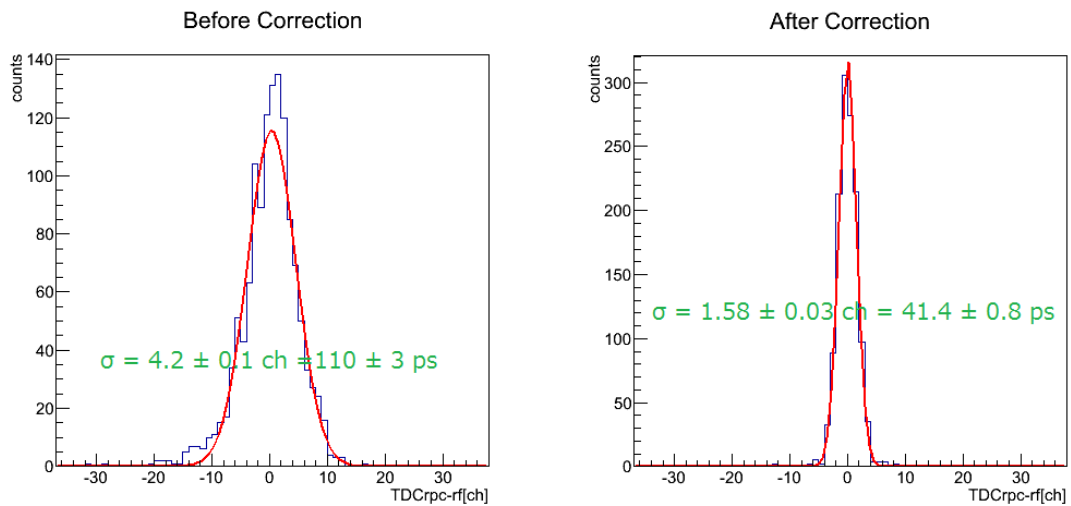


図 6.4: タイムウォーク補正前と補正後の時間分布  
(左) タイムウォーク補正前 (右) タイムウォーク補正後

## 6.4 印加電圧依存性

### 6.4.1 時間分解能と検出効率

図 6.5(左) に  $148 \mu\text{m}$  RPC の S パッドのタイムウォーク補正前と補正後の時間分解能の電圧依存性を、図 6.5(右) に検出効率とストリーマーの割合の電圧依存性を示す。ここでは ADC で 200 ch 以上の電荷を持つイベントをストリーマーとした。検出効率のプラトーに入る 10 kV よりも低い電圧の値では、パルス高が小さく時間分解能も悪い。検出効率のプラトーよりも高い電圧の値では、タイムウォーク補正前の信号は電圧を上げるに従って徐々に時間分解能は良くなっていく。しかし、ストリーマーの割合が増えると、ADC の値がアバランシェ、ストリーマー 2 つの信号の電荷の和になり、アバランシェ信号の正しいタイムウォークの補正ができなくなる。そのためタイムウォーク補正後の時間分解能は、ストリーマーの割合が増える 12.5 kV 以降次第に悪くなる。

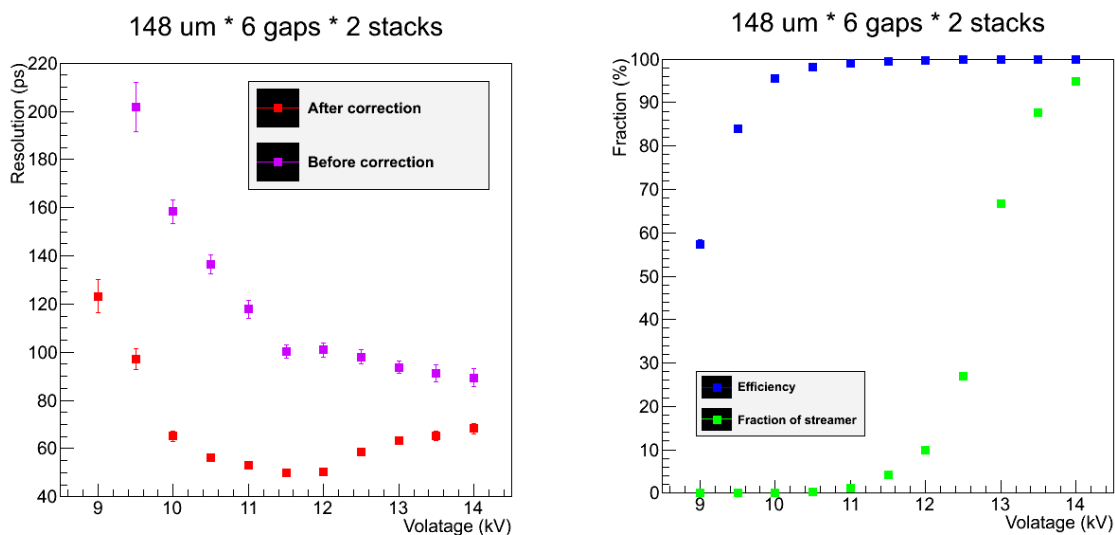


図 6.5:  $148 \mu\text{m}$  RPC の印加電圧依存性

(左) タイムウォーク補正前・補正後の時間分解能 (右) 検出効率、ストリーマーの割合

### 6.4.2 電荷分布

図 6.6 に  $148 \mu\text{m}$  RPC の 11 kV、12 kV、13 kV でのそれぞれの電荷分布を示す。12 kV 以下の電圧値では、電荷分布は電圧が高くなるほど大きくなる。13 kV 以上の電圧では半分以上の信号がストリーマーモードに入り、非常に大きな電荷量の二山目の信号が見える。



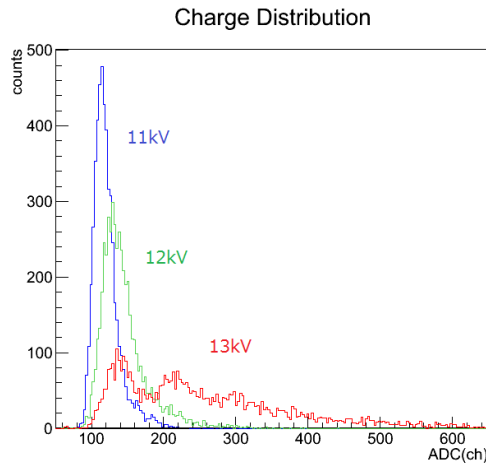


図 6.6: 148  $\mu\text{m}$  RPC の電荷分布

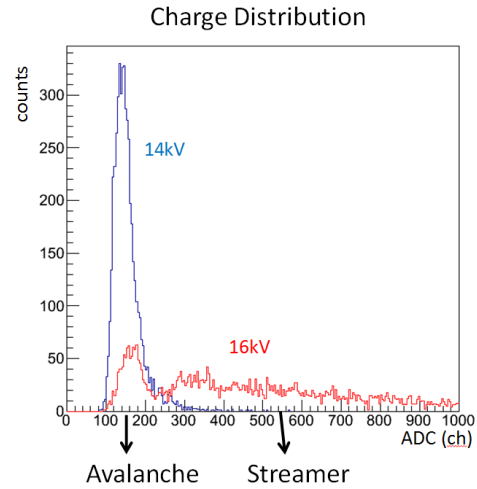


図 6.7: 260  $\mu\text{m}$  RPC の電荷分布

### スペースチャージの効果

図 6.7 に 260  $\mu\text{m}$  RPC の 14 kV と 16 kV の電圧値での電荷分布を示す。図 6.7 のように、電圧を高くしてもアバランシェの信号は一定の電荷量より増幅されない。これは 2.8 で述べた正イオンのスペースチャージの効果によるものである。

RPC の読み出しパッドに誘起される電流  $i(t)$  は、 $v$  を電子のドリフト速度、 $e_0$  を電子の電荷、 $N(t)$  を時間  $t$  での電子の個数、 $d$  をギャップの厚み、 $b$  を高抵抗プレートの厚み、 $\varepsilon$  を高抵抗プレートの誘電率、 $n$  をギャップ数として、

$$i(t) = \frac{ve_0\varepsilon}{nd\varepsilon + (n-1)b}N(t) \quad (6.1)$$

とかける [18]。[18] より  $v$  はおよそ 220 ~ 240  $\mu\text{m}/\text{ns}$ 、[33] より  $\varepsilon = 8.25$  である。 $d = 260 \mu\text{m}$ 、 $b = 400 \mu\text{m}$ 、 $n = 5$  とすると、260  $\mu\text{m} \times 5$  gaps RPC の 1 スタックあたりに誘起される電流はおよそ  $2.5 \times 10^{-11} N(t)$  である。今回は 2 スタックなので、誘起される電荷はこの倍の  $5 \times 10^{-11} N(t)$  となる。図 6.7 より読み出しパッドに誘起されたアバランシェ信号の最大電荷は 220 ch 付程度である。ペDESTAL は 80 ch であり、ADC の 1 ch = 0.25 pC、アンプの倍率 16 倍をとって計算すると、増幅前の信号の最大電荷はおよそ 1.7 pC となる。図 4.5 より、信号を幅 10 ns の三角形で近似すると、信号の電流は最大点でおよそ 0.43 mA となる。これらの値を (6.1) 式に入れると、 $N(t) \sim 2 \times 10^7$  となった。これはスペースチャージによって電子の増幅が  $10^7 \sim 10^8$  個程度に抑えられるという文献値 [22][23] とよく一致することが確認できた。

## 6.5 ギャップ幅依存性

図 6.8 に 104  $\mu\text{m}$ 、148  $\mu\text{m}$ 、260  $\mu\text{m}$  それぞれの RPC の S パッドの時間分解能と検出効率をギャップにかける電界強度の関数で示す。十分な検出効率を得るためには、ギャップの幅が狭くなるほど高い電圧をかけなければならないことが分かる。148  $\mu\text{m}$  と 260  $\mu\text{m}$  の RPC ではギャップ間隔の狭い 148  $\mu\text{m}$  RPC の方が 10 ps 程度時間分解能が良かったが、104  $\mu\text{m}$  の RPC は検出効率のプラトーに達する前にストリーマーモードに入り、時間分解能は 148  $\mu\text{m}$  RPC よりも良くならなかった。ギャップ幅は狭いほど時間分解能が良くなるが、104  $\mu\text{m}$  の幅はストリーマーフリーでオペレーションするためには狭すぎるということが確認できた。

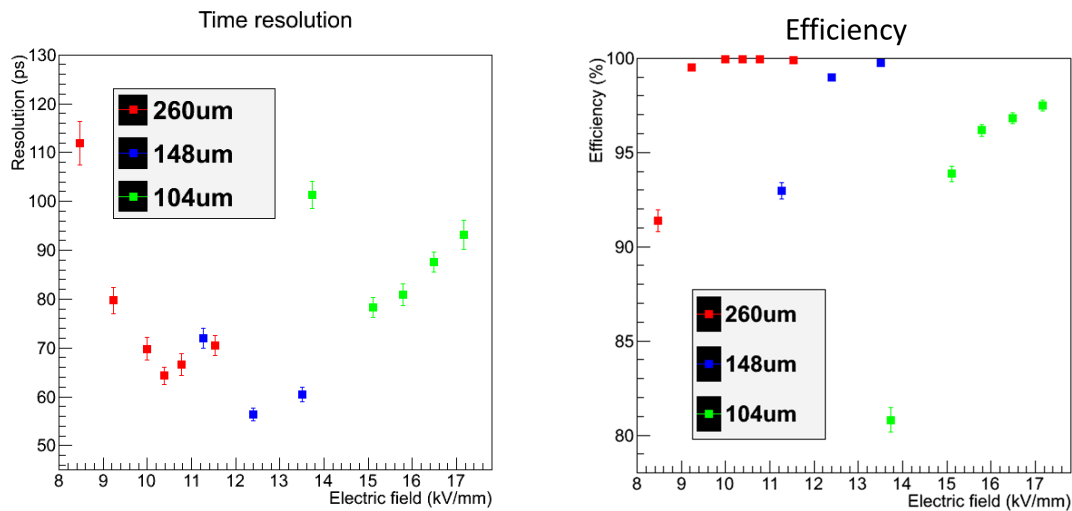


図 6.8: ギャップ幅依存性  
(左) 時間分解能 (右) 検出効率

## 6.6 ギャップ数依存性

### 6.6.1 時間分解能と検出効率

図 6.9 にギャップ幅が 260  $\mu\text{m}$  の RPC の 1 ギャップ、2 ギャップ、5 ギャップでの時間分解能と検出効率を示す。ギャップ数が増えるほど、時間分解能・検出効率ともよくなることが分かる。ただし、5 ギャップと 2 ギャップの RPC はおよそ 11 kV/mm でストリーマーモードに突入したのに対し、1 ギャップの RPC は約 11 kV/mm の電場で見え始め、約 14 kV/mm まで電場をあげてもストリーマーモードに入らなかった。1 ギャップのデータは時間分解能の分布も他のデータから大きく離れているため、1 ギャップのデータの測定に何かしらの問題があった可能性がある。

検出効率の計算値との比較

ギャップ数が  $n$  の RPC の検出効率  $\varepsilon_n$  は、1 ギャップあたりの検出効率を  $\varepsilon_1$  として

$$\varepsilon_n = 1 - (1 - \varepsilon_1)^n \quad (6.2)$$

とかける [18][34]。

それぞれのギャップのストリーマーに入る前のプラトー領域での検出効率 (1 ギャップは電場 13.8 kV/mm、2 ギャップと 5 ギャップは電場 10.8 kV/mm での値) と、式 (6.2) に 1 ギャップのデータの値を入れて計算した値を比較したものが図 6.10 である。プラトーでの検出効率は式 (6.2) とよく一致することが確認できた。プラトー領域より低い電圧での検出効率は式 (6.2) と一致しないが、TDC 用のディスクリミネーターのシュレッシュホールドレベルが高すぎたため、信号が出ているのに検出されないイベントがあったためではないかと考えられる。

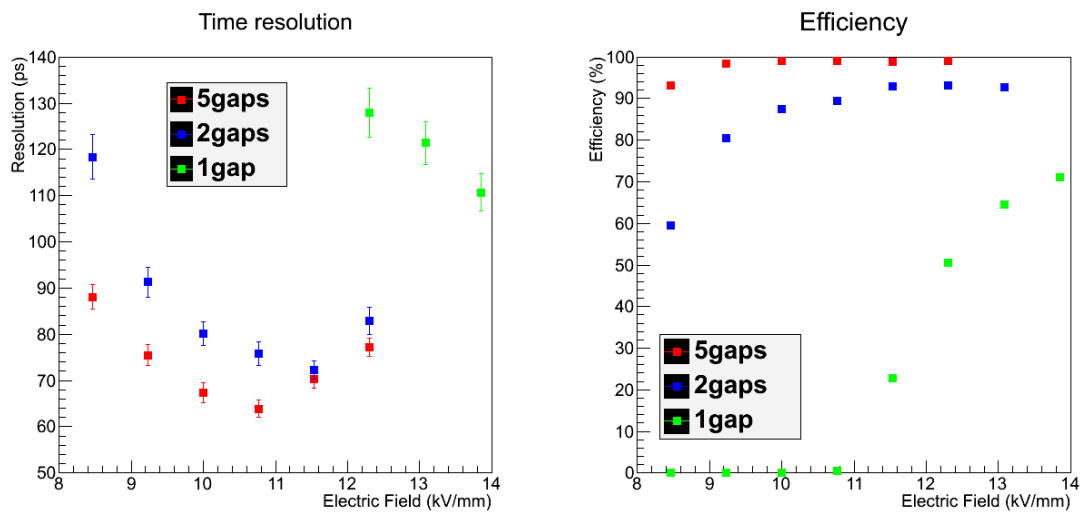


図 6.9: ギャップ数依存性  
(左) 時間分解能 (右) 検出効率

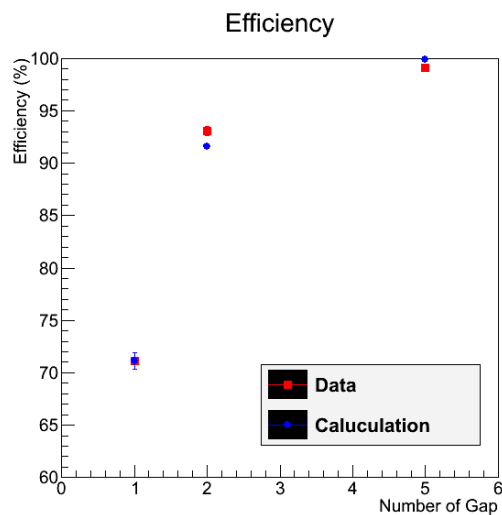


図 6.10: 検出効率のギャップ数依存性 データと計算との比較

### 6.6.2 電荷分布

図 6.11 は 1 ギャップ、2 ギャップ、5 ギャップそれぞれの検出効率のプラトーでの電荷分布である。(1 ギャップは電場 13.8 kV/mm、2 ギャップと 5 ギャップは電場 10.8 kV/mm での値)

RPC の 1 ギャップの電荷分布は、数個の電子のアバランシェの最初の増幅のふらつきで決まり、図 6.11 の 1 ギャップのようなエクスポネンシャルに近い分布になるとされる [18][17]。マルチギャップで見られるガウス型に近い分布はこの 1 ギャップの電荷分布の足し合わせによるものであると考えられる。

そこで、1 ギャップのイベントをランダムに 5 つとりだし足し合わせた場合と、2 ギャップのイベントをランダムに 2 つとりだし足し合わせた場合の電荷分布を図 6.12 に示す。この方法で 5 ギャップの場合に近い分布が得られることが確認できた。ただし電荷の値については単なる足し合わせでは再現することができなかった。

このように、電荷分布がガウス型に近づくことでペDESTAL と信号の分離が容易になることが、初期のマルチギャップ RPC の利点の 1 つであった [41]。

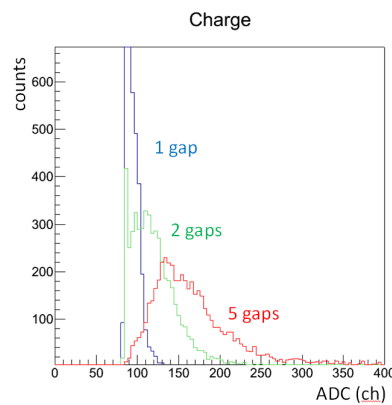


図 6.11: 1,2,5 ギャップの RPC の電荷分布

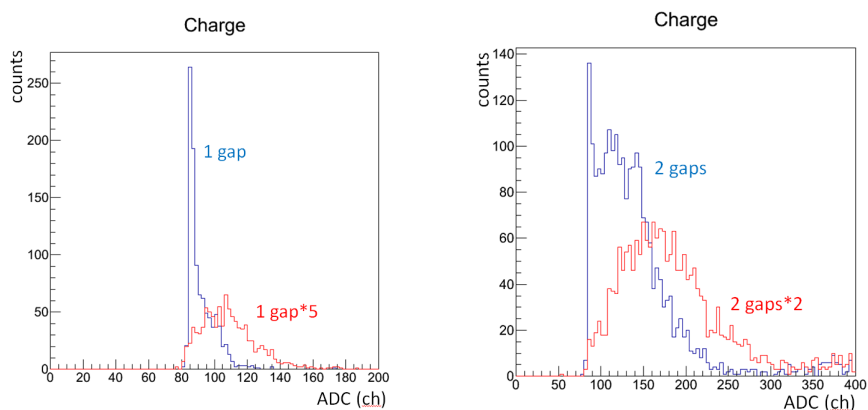


図 6.12: ギャップあたりの電荷を足し合わせた場合の時間分布  
 (左) 1 ギャップのイベントを 5 つ足し合わせた場合  
 (右) 2 ギャップのイベントを 2 つ足し合わせた場合

## 6.7 スタック数依存性

図 6.13 では  $260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps}$  の RPC の 1 スタックと 2 スタックの時間分解能と検出効率を示す。スタック数を 2 スタックに増やすことで、約  $10 \text{ ps}$  程度の時間分解能の向上と、 $100 \%$  に近い検出効率が達成できることが分かる。

図 6.14 には  $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps}$  の RPC の 2 スタックと 4 スタックの時間分解能と検出効率を示す。2 スタックで既に高い検出効率を達成しているため、2 スタックから 4 スタックへのスタック数の増加ではこれ以上の検出効率の向上は見られなかったが、時間分解能の向上が見られた。特に 4 スタックの RPC は最も良い電圧の値で時間分解能  $41 \text{ ps}$  を達成した。

この 2 つの測定から、検出効率の向上には 2 スタックまで、時間分解能の向上には 4 スタックまでスタック数を増やす有効性が確認できた。

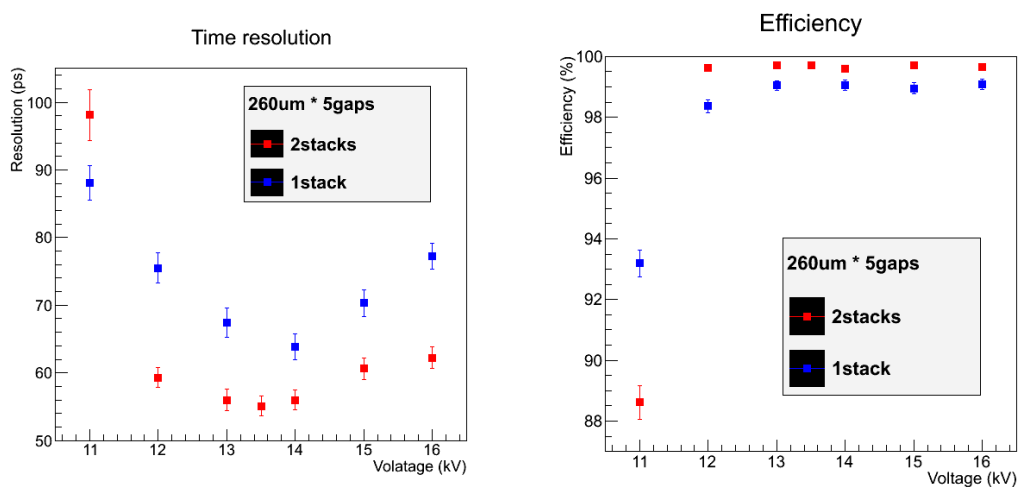


図 6.13:  $260 \mu\text{m}$  RPC のスタック数依存性  
(左) 時間分解能 (右) 検出効率

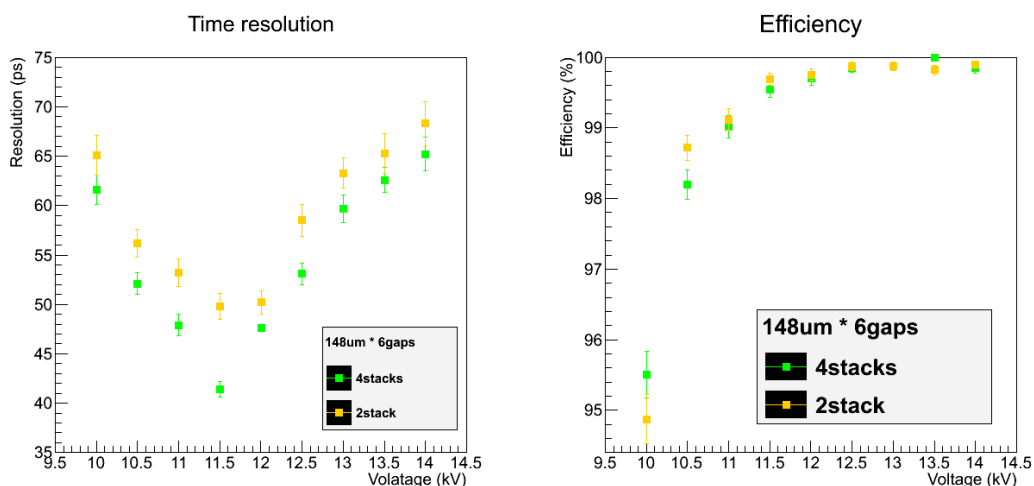


図 6.14:  $148 \mu\text{m}$  RPC のスタック数依存性  
(左) 時間分解能 (右) 検出効率

## 6.8 大面積パッド

最初の 2nd プロトタイプ RPC の試験の際は、図 6.15 のようにプリント基板で様々な形状・面積の読み出しパッドのテストを行った。時間分解能および検出効率のパッドサイズ依存性・トリガー位置依存性をそれぞれ述べる。また、読み出しケーブルにつながる読み出しラインの位置と形状の依存性についても述べる。この試験には 148  $\mu\text{m}$  RPC を使用した。

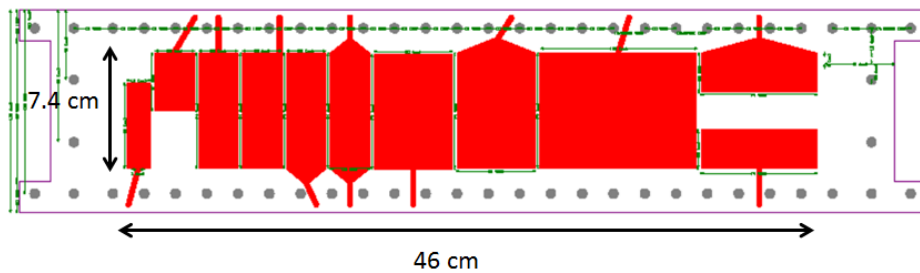


図 6.15: パッド型読み出しの試験に用いたパッド

### 6.8.1 サイズ依存性

サイズ依存性の評価には読み出し形状が同じ図 6.16 の S パッドおよび A ~ D パッドの 5 種類のパッドを使用した。それぞれのサイズと、LEPS2 で使用した場合のチャンネル数、時間分解能、検出効率を表 6.1 に示す。トリガー領域はパッドの中心である。

S パッドは時間分解能約 50 ps、検出効率 99 % 以上であるのに対し、D パッドでは時間分解能約 150 ps、検出効率約 90 % と、パッドの面積が大きくなるにつれて性能が悪化することが分かる。A パッドは ALICE 実験のものと同サイズであるが、ALICE 実験の時間分解能 (約 50 ps) は達成できなかった (7 参照)。S パッドと A パッドはほぼ同じ面積であるが、S パッドの方が時間分解能が 10 ps 程度良く、RPC の特性にはパッドの面積よりも形状が重要であることが分かる。

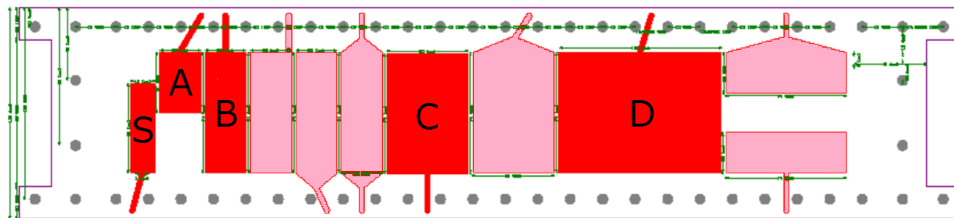


図 6.16: 読み出しパッドサイズ依存性の評価に用いたパッド S と A ~ D の 5 種類



Pad	Channel	Geometry	Resolution	Efficiency
S	7000 ch	1.5 cm × 5.5 cm	50 ± 1 ps	99.5 ± 0.1 %
A	6500 ch	2.5 cm × 3.7 cm	57 ± 2 ps	98.8 ± 0.2 %
B	3000 ch	2.5 cm × 7.4 cm	65 ± 3 ps	99.4 ± 0.2 %
C	1500 ch	5.0 cm × 7.4 cm	85 ± 3 ps	97.3 ± 0.3 %
D	800 ch	10.0 cm × 7.4 cm	151 ± 5 ps	90.0 ± 0.5 %

表 6.1: パッドサイズ依存性

### 6.8.2 読み出し形状依存性

図 6.17 のようにダブルスタック型 RPC の内側の読み出しパッドの信号を読む場合は、読み出しケーブルを接着するため読み出しラインをガラスより外側にのばし、図 3.15 左側の写真のように接着する必要がある。そこで読み出しラインの形状と位置が RPC の性能に影響を及ぼさないか評価を行った。

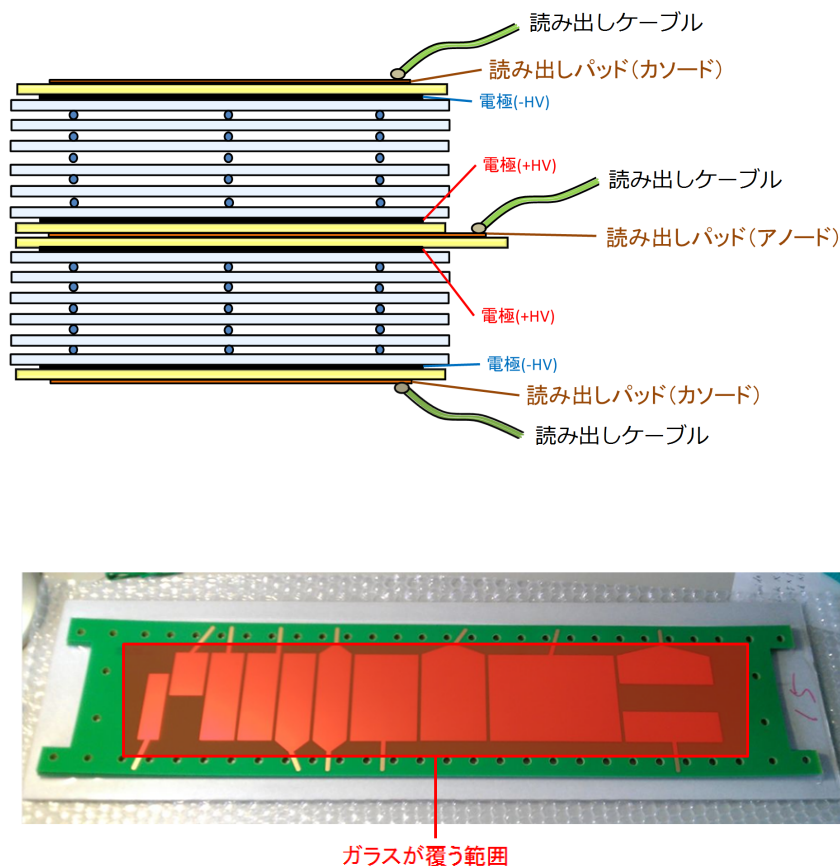


図 6.17: ダブルスタック型 RPC の内側のパッドの信号を読む場合の模式図  
(上)RPC を横から見た場合 (下) 上から見た場合

読み出しラインの形状と位置の評価には図 6.18 の B1 ~ B5 の 5 種類のパッドおよび C1, C2 の 2 種類のパッドを使用した。B3 および C2 のパッドの読み出しラインが曲がっているのは釣り糸をかけるねじとの干渉をさけるためである。それぞれの時間分解能を表 6.2 に示す。トリガー領域はパッドの中心である。

B1 と B3、C1 と C2 の違いは読み出しラインにつながる形状が三角形かどうかである。B パッドではほとんど違いが見られず、C パッドでは三角形の C2 の方が時間分解能がよかった。

B1 と B2 は読み出しラインの位置が異なり、読み出しが端にある B2 の方が時間分解能が悪かった。パッド中の信号の伝搬速度は 50 ~ 100 ps/cm と言われており [25]-[28]、アバランシェが生成された場所から読み出しラインまでの読み出しパッド中の信号の伝搬で経路差が出やすいほど時間分解能は悪くなるのではないかと考えられる。

B4 と B5 は読み出しがパッドの長辺にあるパッドであるが、いずれも短辺にある B1 ~ B3 よりも時間分解能・検出効率ともに悪かった。このことから RPC の読み出しパッドには読み出し位置に対して縦長のパッドの方が適していることが分かった。

これらの結果より、RPC のパッドの読み出しラインは、パッドの短辺の中央に経路差が出ないように製作するのがよいことが確認できた。また、ダブルスタック型 RPC の外側の読み出しパッドの信号を読む場合は読み出しラインをのばす必要がない(図 6.17)。そこで今回のテストでは図 3.15(右)のように読み出しラインをのばすことなく、読み出しパッドに直接読み出しケーブルを接着して使用した。ただし、内側外側両方の信号を作動アンプを用いて読む場合は、信号の到達時間を揃えるため内側と外側の読み出しラインを同一の形状にすることが必要である。

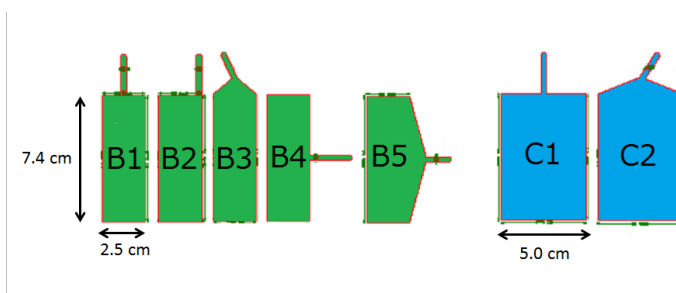


図 6.18: 読み出し形状依存性の評価に用いたパッド

Pad	Resolution	Efficiency
B1	65 ± 3 ps	99.4 ± 0.2 %
B2	74 ± 2 ps	99.0 ± 0.2 %
B3	65 ± 2 ps	99.6 ± 0.1 %
B4	78 ± 2 ps	96.5 ± 0.3 %
B5	84 ± 2 ps	98.0 ± 0.2 %
C1	85 ± 3 ps	97.3 ± 0.3 %
C2	77 ± 2 ps	97.3 ± 0.3 %

表 6.2: 読み出し形状依存性

### 6.8.3 トリガー位置依存性

B3、C2 それぞれのパッドにおいて、トリガーを図 6.19 の①～⑨で示す領域にし、時間分解能および検出効率のトリガー位置依存性を調べた。結果を表 6.3 に示す。B3 パッドの①の位置では時間分解能約 70 ps、③の位置では時間分解能約 50 ps と、C2 パッドでは④の位置では時間分解能約 90 ps、⑧の位置では時間分解能約 65 ps と、時間分解能は読み出しラインから遠くなるほど良いことが分かった。両読みの読み出しパッドではこのような依存性は確認されていないため (6.9.2 参照)、読み出しラインの近くで時間分解能が悪化するの読み出しラインの方向と反対向きに伝搬を始めた信号が、他端で反射され時間差を持って読み出しラインに伝搬されるためではないかと考えられる。検出効率に大きな位置依存性はなかった。

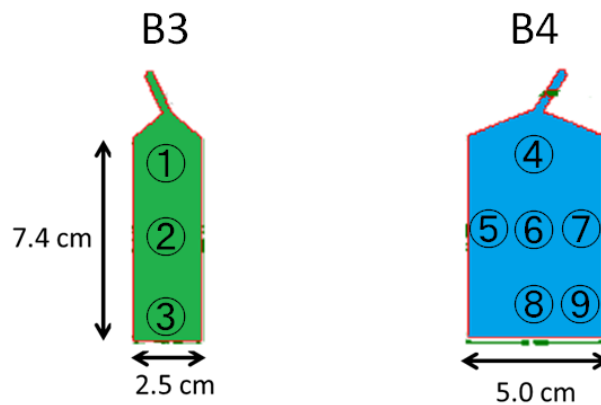


図 6.19: 位置依存性の評価に用いたパッド

Position	Resolution	Efficiency
①	$72 \pm 2$ ps	$99.4 \pm 0.1$ %
②	$63 \pm 1$ ps	$99.8 \pm 0.1$ %
③	$50 \pm 1$ ps	$99.6 \pm 0.1$ %
④	$90 \pm 3$ ps	$97.5 \pm 0.3$ %
⑤	$83 \pm 2$ ps	$99.7 \pm 0.3$ %
⑥	$78 \pm 2$ ps	$97.8 \pm 0.2$ %
⑦	$75 \pm 2$ ps	$96.7 \pm 0.3$ %
⑧	$67 \pm 2$ ps	$95.9 \pm 0.3$ %
⑨	$67 \pm 2$ ps	$96.6 \pm 0.3$ %

表 6.3: 位置依存性

## 6.8.4 読み出しパッド中の信号の伝搬による影響

図 6.20 に図 6.19 の B3 パッドの①と③の位置での信号の時間-電荷分布を示す。図 6.20 のように信号に約 250 ps(約 10 ch) 程度の時間差があることが分かる。①と③の中心値の間隔は約 5 cm であるので、読み出しパッド内の信号の伝搬速度はおよそ 50 ps/cm となる。これは読み出しパッド内の信号の伝搬速度がおよそ 50 ~ 100 ps/cm であるという文献値とよく一致する [25]-[28]。

このように、読み出しラインが 1 つだけの大面積読み出しパッドは読み出しラインまでの距離によって時間に差が出てしまうので、実験で使用する際には飛跡検出器を用いてヒット位置による時間の補正をしなければならないことが分かった。

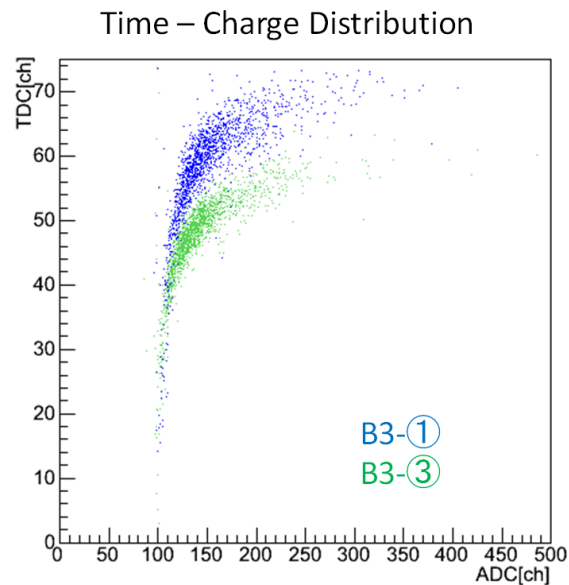


図 6.20: B3 パッドの①と③の位置での信号の時間-電荷分布

以上の結果より、読み出しが 1 つだけの大面積パッドでは時間分解能の大きな位置依存性があり、高時間分解能でオペレートするのが難しいことが分かった。また、大面積パッドでは信号の発生した位置から読み出しラインまでの距離のばらつきが大きく、信号の伝搬に時間差ができるため、粒子の通過した位置を確認できる飛跡検出器とともに組み合わせて位置情報を補正して使用する必要があることが分かった。また、読み出しラインは読み出しパッドの短辺に設置する方が時間分解能が良いことが確認できた。

以上のことより、この試験の次のビーム照射試験では細長いストリップ形状の両読みの読み出しパッドを製作し、テストを行った。両読みの読み出しパッドでは 2 つの読み出しで測定した信号の時間の平均は信号の発生した場所に依らず一定になるため、飛跡検出器をとともいいる必要がなくなる。

## 6.9 ストリップ型大面積パッド

### 6.9.1 サイズ依存性

ストリップ型読み出しパッドでは図 6.21 の L1 ~ L3 の 3 つの異なるサイズのパッドの評価を行った。それぞれのサイズと LEPS2 でのチャンネル数の対応とパッド中央での  $148 \mu\text{m}$ 、 $260 \mu\text{m}$  それぞれの RPC の時間分解能と検出効率を表 6.4 に示す。 $260 \mu\text{m}$  RPC の L3 パッドでは LEPS2 での要求性能に近い約 1000ch 相当の面積で、時間分解能約 65 ps、検出効率 99 % 以上を達成した。

ストリップ型読み出しパッドは両読みのため、信号のパルスの高さは片読みのパッドの場合の約半分になる。その結果 2 スタックの  $148 \mu\text{m}$  RPC では検出効率が十分得られないことが分かった。 $260 \mu\text{m}$  RPC は最も大きい L3 パッドにおいても検出効率 99 % 以上を達成した。

$260 \mu\text{m}$  RPC の L1 パッドは L2, L3 パッドに比べ時間分解能が良かったが、 $148 \mu\text{m}$  RPC では時間分解能のパッドサイズ依存性は見られなかった。時間分解能のサイズ依存性については今後さらに大面積の読み出しパッドを製作し、詳細な試験を行う予定である。

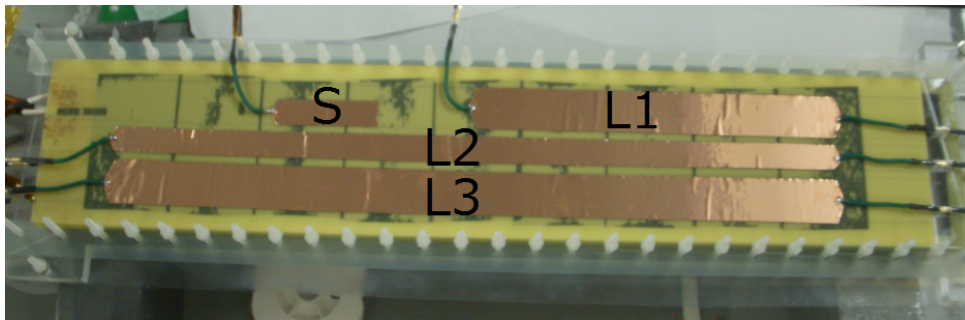


図 6.21: ストリップ型読み出しの RPC

Gap width	Pad	Size	channel	Resolution	Efficiency
$148 \mu\text{m}$	L1	$2.5 \times 20 \text{ cm}^2$	2000	$61 \pm 3 \text{ ps}$	$92.8 \pm 0.4 \%$
$148 \mu\text{m}$	L2	$1.5 \times 40 \text{ cm}^2$	1700	$62 \pm 2 \text{ ps}$	$96.4 \pm 0.3 \%$
$148 \mu\text{m}$	L3	$2.5 \times 40 \text{ cm}^2$	1000	$63 \pm 2 \text{ ps}$	$90.4 \pm 0.5 \%$
$260 \mu\text{m}$	L1	$2.5 \times 20 \text{ cm}^2$	2000	$56 \pm 2 \text{ ps}$	$99.2 \pm 0.2 \%$
$260 \mu\text{m}$	L2	$1.5 \times 40 \text{ cm}^2$	1700	$64 \pm 2 \text{ ps}$	$98.4 \pm 0.3 \%$
$260 \mu\text{m}$	L3	$2.5 \times 40 \text{ cm}^2$	1000	$65 \pm 2 \text{ ps}$	$99.5 \pm 0.2 \%$

表 6.4: ストリップ型パッドの性能評価

### 6.9.2 トリガー位置依存性

図 6.22 に  $148 \mu\text{m}$  RPC の L2 パッドの時間分解能のトリガー位置依存性を示す。読み出しパッドの中心を 0 とし、ビームの進行方向から見て、中心より右側を正の方向、左側を負の方向とした。右側の読み出し、左側の読み出し、その平均の 3 つを示した。平均の時間分解能は位置に依らずほぼ一定であるが、1 つずつの読み出しには大きなトリガー位置依存性があることが分かった。ただし、1 つずつの読み出しのトリガー位置依存性は、片読みの大面積パッドにおいては読み出しラインに近いほど時間分解能が悪くなる傾向が見られたが、両読みのストリップ型読み出しパッドにおいては位置による規則性は見られなかった。

P.Fonte らによる  $5 \text{ cm} \times 1.6 \text{ m}$  のストリップ型読み出しパッドや ALICE 実験のグループの  $2.5 \text{ cm} \times 1.8 \text{ m}$  のストリップ型読み出しパッドでは平均の時間分解能でも大きな位置依存性が報告されている [25][26]。この原因は読み出しストリップと読み出しケーブル、アンプ間のインピーダンスの不整合によって信号の反射が起きるためと考えられており、時間分解能の位置依存性をなくすためには読み出しパッドとインピーダンスの合った読み出し回路の製作が必要不可欠である。

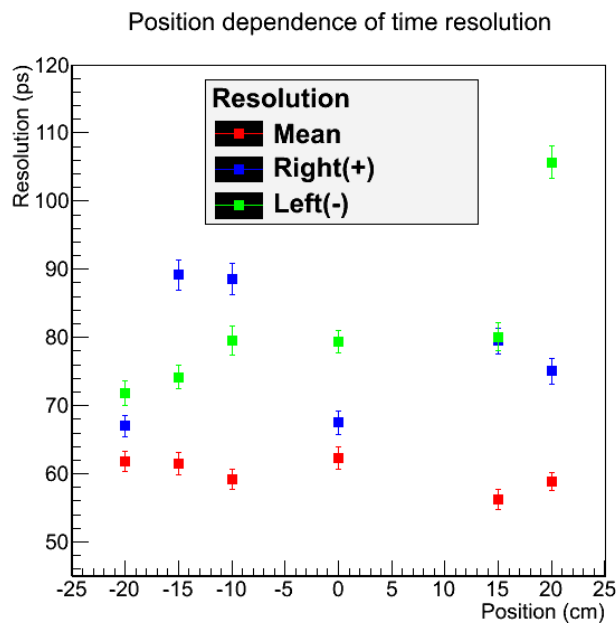


図 6.22: ストリップ型パッドの位置依存性

### 6.10 レート依存性

LEPS2 で用いる RPC はレート耐性の要求は厳しくないが、J-PARC E29 実験で用いる RPC は数 kHz/cm<sup>2</sup> 程度のレート耐性が必要である。そこで 1~5 Hz/cm<sup>2</sup> 程度の低いレートから、LEPS の電子ビームの最大レート約 200 Hz/cm<sup>2</sup> までのレート依存性を調べた。図 6.23 および図 6.24 に 148 μm RPC と 260 μm RPC の時間分解能と検出効率のレート依存性を示す。この試験には S パッドを用いた。5.1 で述べたように、レーザーの照射位置を調整する鏡の反射率のふらつきのため、電子ビームのレートにふらつきがあり、一定ではない。図では平均的なレートを示した。

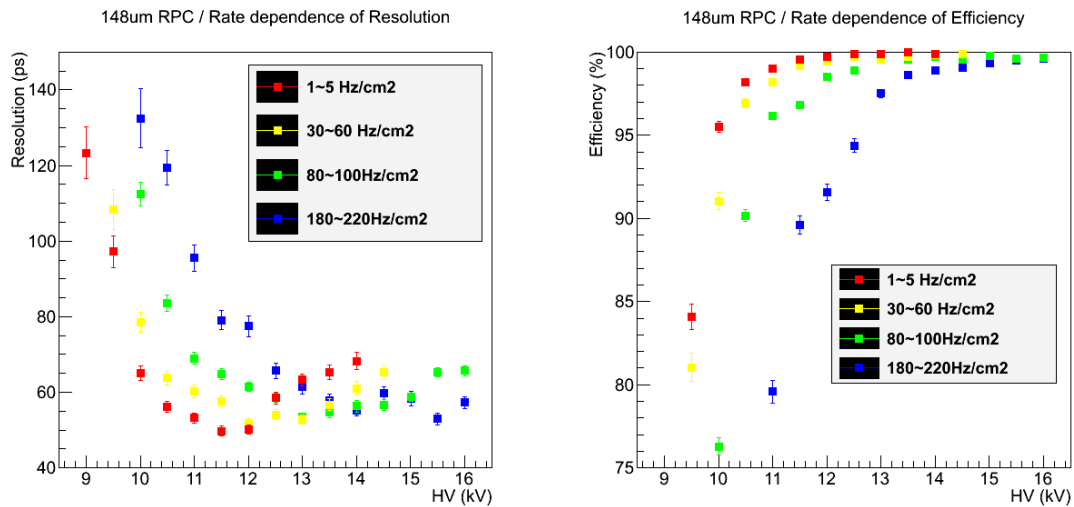


図 6.23: 148 μm RPC のレート依存性  
(左) 時間分解能 (右) 検出効率

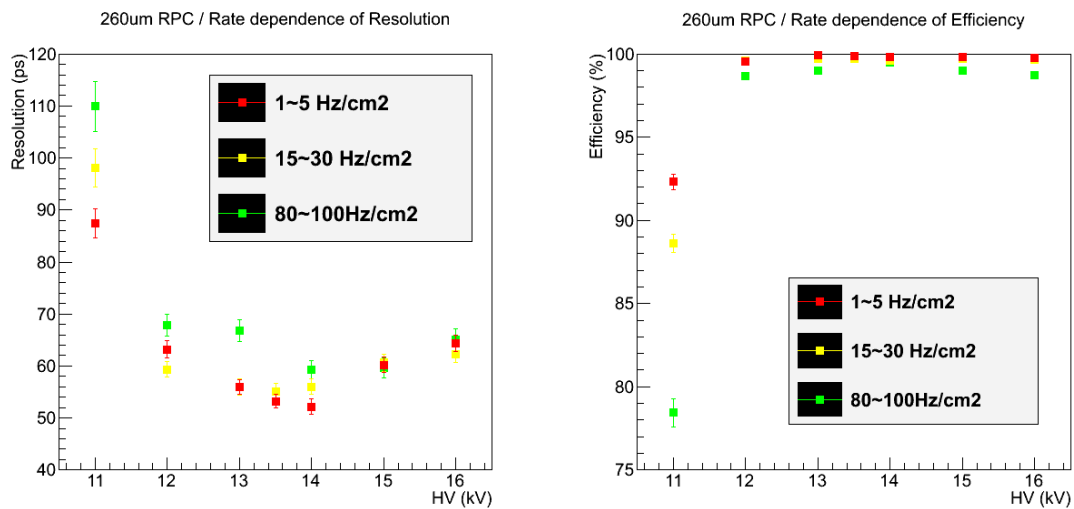


図 6.24: 260 μm RPC のレート依存性  
(左) 時間分解能 (右) 検出効率



レートを高くするとギャップ内にイオンがたまり、電子の増幅が抑えられる。148  $\mu\text{m}$  RPC では、検出効率のプラトー領域の始まりと時間分解能の最も良くなる電圧値は高電圧側へシフトが見られた。そして最も良い電圧の値では約 200  $\text{Hz}/\text{cm}^2$  のレートの元でも時間分解能の悪化は見られなかった。

260  $\mu\text{m}$  RPC は 148  $\mu\text{m}$  RPC ほど大きなプラトーの電圧値のシフトは見られず、約 100  $\text{Hz}/\text{cm}^2$  のレートの元で約 10 ps 程度の時間分解能の悪化が見られた。

以上より、レートに依存した検出効率プラトーの電圧値のシフトや、時間分解能の悪化の影響を避けるため、主なテストでは 5~20  $\text{Hz}/\text{cm}^2$  の一定のレートでデータ取得を行うようにした。

## 6.11 ガス依存性

ガス依存性については主成分の  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  は変更せず、クエンチャーの種類・割合を変えてテストを行った。標準で用いた  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2 : \text{SF}_6 : \text{iso-C}_4\text{H}_{10} = 90 : 5 : 5$  の割合の他、 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  の代わりに  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  を用いた  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2 : \text{SF}_6 : \text{C}_4\text{H}_{10} = 90 : 5 : 5$  の割合と  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  を用いない  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2 : \text{SF}_6 = 90 : 5$  の割合の 3 通りを試した。

表 6.5 に 148  $\mu\text{m}$  RPC の B3 パッドの③位置での 3 つのガスでの時間分解能の比較を示す。 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  と  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  では大きな違いは見られなかった。 $\text{SF}_6$  のみではわずかに時間分解能の悪化が見られた。図 6.25 には 260  $\mu\text{m}$  RPC の S パッドの時間分解能のガス・レート依存性を示す。 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  と  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  で大きな違いは見られなかった。

Gas	Resolution
Iso-Butane	50 $\pm$ 1 ps
Butane	52 $\pm$ 1 ps
SF6	57 $\pm$ 2 ps

表 6.5: 148  $\mu\text{m}$  RPC のガス依存性

$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  よりも  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  の方が安価であり、 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  の代わりに  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  で代用できることが確認できた。また、 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ 、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$  を用いない場合、 $\text{SF}_6$  の割合を高くすると  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  を用いた場合と同等の性能が得られるという報告があるので [24]、今後は  $\text{SF}_6$  の割合を変えたテストも行いたいと考えている。

## 6.12 クロストーク

図 6.26 に、トリガーを図 6.21 の L2 パッドの中心にした場合と、L3 パッドの中心にした場合の L2 パッドの時間分布を示す。L3 パッドの信号は読み出さずにターミネートしている。トリガーを L3 パッドにした場合、本来の信号が現れる 1800 ch 付近に約 20 %、そのよりも後の領域で約 65 % のクロストークが見られる。本来の信号のタイミングよりも後の領域で見られるクロストークは図 4.4、図 4.5 で見られるような反射によるものと考えられる。この反射によるクロストークが起きる原因は、読み出しパッドとアンプのインピーダンスの不整合であり、LEPS2 の実機では、インピーダンスの合ったアンプを開発し、このクロストークが起きる確率を今の 65 % 程度から数

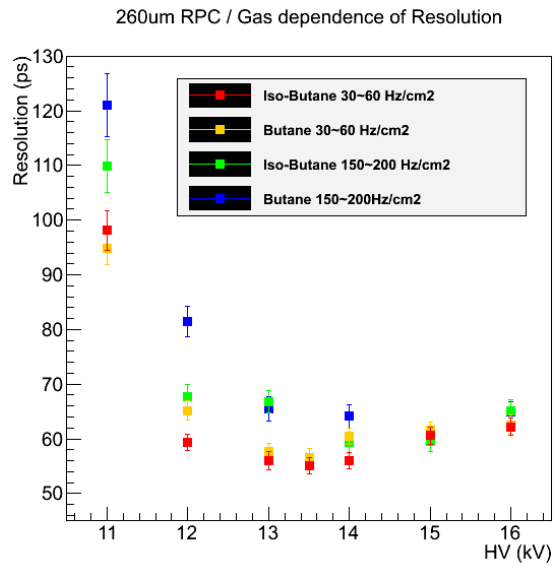


図 6.25: 260  $\mu\text{m}$  RPC のガス・レート依存性

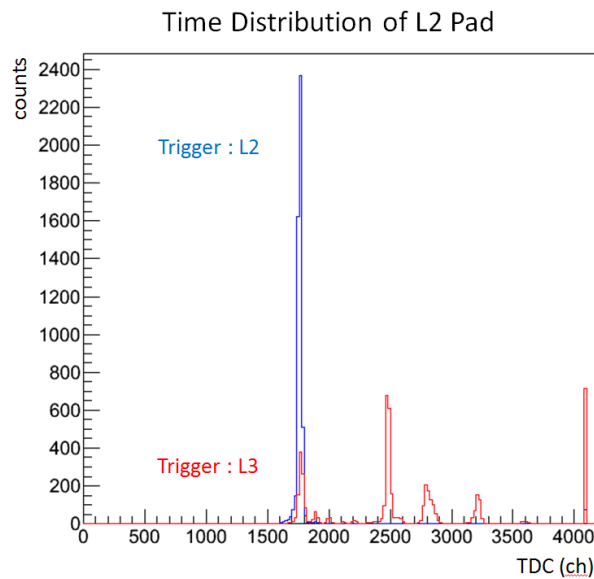


図 6.26: トリガーを L2 パッドと L3 パッドにした場合の L2 パッドの時間分布

%以下に抑える必要がある。また、本来の信号のタイミングでも 20 %程度のクロストークが見られるが、これは今回使用したカーボン電極の表面抵抗値が  $500 \Omega/\text{sq}$  と低いため、電極で信号が広がってしまっているためと考えられる。今後、今よりも高い抵抗値のカーボン電極を試す必要がある。

### 6.13 ガスの置換時間

データを解析してみると、2つの違う時期に取得したデータの中で、パッドサイズ、ギャップサイズ、ギャップ数の条件が全く同じであるにも関わらず、10 ps 程度異なる時間分解能を示すことがあった。

調べてみると悪い時間分解能を示したデータの共通点は、いずれもデータ取得開始直後のデータであるという点であった。ビーム試験の際、ガスがチェンバーを三回以上置換するのを待ってデータの取得を行ったが、狭いギャップのガスを置換するには、三置換では十分でなかったと考えられる。

図 6.27 に 260  $\mu\text{m}$  RPC の S パッドにおいて、三置換程度のガス流量時に取得したデータと、十置換程度のガス流量時に取得したデータを示す。同一のパッドであるが、十置換の後にとったデータでは 10 ps 程度の時間分解能の向上が見られた。

このガス置換時間による影響はデータの解析段階で気づいたため、今回取得したデータの中には置換回数が十分でなく時間分解能が本来達成できる値よりも悪いデータが入ってしまっている。

6.7 の 148  $\mu\text{m}$  RPC のスタック数依存性と 6.12 のガス依存性のデータは六置換以上置換した後のデータであるため問題ないと考えられる。6.5 のギャップ幅依存性、6.6 のギャップ数依存性、6.7 の 260  $\mu\text{m}$  RPC のスタック数依存性のデータはいずれもガスを三置換した直後にとったデータである。そのため時間分解能の絶対的な評価には用いることができないが、置換回数の条件が同じであるため、データの比較はできると考えられる。その他の依存性のデータは全て連続でとったデータであるので置換数の差はほとんどない。

ガスの置換時間による影響については次回以降のビーム照射試験で詳しく評価を行う。

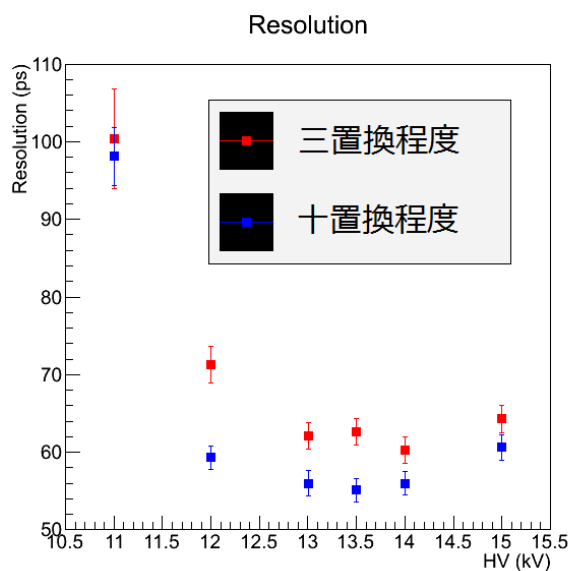


図 6.27: ガスの置換時間依存性

## 6.14 テスト結果のまとめ

表 6.6 にそれぞれのギャップ・スタック構成で最も時間分解能が良かったデータの結果をまとめる。十分にガスの置換をしたデータでは  $260 \mu\text{m}$  RPC も  $148 \mu\text{m}$  と同等に S パッドにおいて  $50 \text{ ps}$  程度の時間分解能を達成した。また  $260 \mu\text{m}$  RPC の両読みの L3 パッドについても  $5 \text{ ps}$  程度の向上が見られ、約  $60 \text{ ps}$  の時間分解能を達成した。また、 $148 \mu\text{m}$  RPC では 2 スタックから 4 スタックへのスタック数の増加で、S パッドにおいて  $10 \text{ ps}$  程度の時間分解能の向上が見られたが、ストリップ型読み出しパッドのデータは時間が足りず測定することができなかった。

Gap Width	Gap Number	Stack Number	S Pad Resolution	S Pad Efficiency	L3 Pad Resolution	L3 Pad Efficiency
$148 \mu\text{m}$	6	2	$50 \pm 1 \text{ ps}$	> 99 %	$63 \pm 2 \text{ ps}$	90 %
$148 \mu\text{m}$	6	4	$41 \pm 1 \text{ ps}$	> 99 %	No data	No data
$260 \mu\text{m}$	5	2	$52 \pm 1 \text{ ps}$	> 99 %	$61 \pm 2 \text{ ps}$	99 %

表 6.6: ビーム照射試験のまとめ

$260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps} \times 2 \text{ stacks}$  の RPC は、LEPS2 でのチャンネル数が 1000 程度になる  $2.5 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  のストリップ型読み出しパッドにおいて、時間分解能約  $60 \text{ ps}$ 、検出効率 99 % 以上と、LEPS2 での要求性能をほぼ満たす性能が確認できた。ストリップ型読み出しパッドでは時間分解能の位置依存性が見られないことも確認した。また、 $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の  $1.5 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$  のパッドは時間分解能  $40 \text{ ps}$  を達成した。これらの時間分解能は読み出し回路等の影響を含めた TOF の実測値である。

その他、 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  の代わりに  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  を用いても問題ないことが確認できたほか、 $148 \mu\text{m}$  RPC で約  $200 \text{ Hz}/\text{cm}^2$  までのレート耐性が確認できた。

## 第7章 TOF の時間分解能の評価

TOF の時間分解能には RPC の時間分解能の他、スタートタイミングを決める RF 信号の時間分解能とバンチ長、アンプとディスクリミネーターのジッター、TDC の時間分解能、信号にのっているノイズなどが影響する。本章ではそれぞれについての影響をまとめる。

### 7.1 RPC の固有時間分解能

RPC の時間分解能はアバランシェ信号のばらつきによる影響と、読み出しパッド内の伝搬による影響の 2 つが影響する。アバランシェ信号のばらつきによる影響は、シミュレーション及び他のグループで開発された RPC との比較の 2 つの方法で時間分解能の評価を行った。その結果、 $260 \mu\text{m}$  RPC の  $2.5 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  のストリップ型読み出しパッドではアバランシェ信号のばらつきによる影響がおよそ  $15 \sim 25 \text{ ps}$ 、読み出しパッドの伝搬による影響がおよそ  $30 \text{ ps}$  程度であるということが分かった。

#### 7.1.1 アバランシェ信号のばらつきによる影響

シミュレーションによる評価

W.Riegler らによるシミュレーション [18] によると、RPC の 1 ギャップあたりの時間分解能は  $\sigma_t$  は  $\alpha_{eff}$  を有効タウンゼント係数、 $v$  を電子のドリフト速度として

$$\sigma_t = \frac{1.28}{\alpha_{eff} v} \quad (7.1)$$

とかける。[18][22] より我々の用いたガスでは、 $260 \mu\text{m}$  RPC で最も良い時間分解能の得られるおおよそ  $10.5 \text{ kV/mm}$  の電場において  $\alpha_{eff} = 150/\text{mm}$ 、 $v = 220 \mu\text{m/ns}$  である。これを元に計算すると 1 ギャップあたりの時間分解能  $\sigma_t$  は  $38 \text{ ps}$  となる。複数ギャップの RPC の時間分解能は、最も大きい信号が起こったギャップの時間分解能で決まるため、単純な  $1/\sqrt{N}$  法則は成り立たないが、10 ギャップまで増やすと  $20 \text{ ps}$  程度の時間分解能が得られると考えられる。

他の RPC との比較

今回我々が製作した  $260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps} \times 2 \text{ stacks}$  の RPC と  $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の RPC は、それぞれ ALICE 実験の  $250 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps} \times 2 \text{ stacks}$  の RPC と [2] の  $20 \text{ ps}$  の時間分解能を達成した  $160 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の RPC と近いギャップ幅・ギャップ構成をしている。ALICE 実験と [2] の RPC はそれぞれ RPC 以外の寄与を精度良く測定しており、それぞれ RPC 以外の寄与を取り除いた RPC の時間分解能は  $15 \sim 25 \text{ ps}$  と  $8 \text{ ps}$  である [11][50]。

我々の  $260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps} \times 2 \text{ stacks}$  の RPC は S パッドで 52 ps、 $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の RPC は 41 ps の時間分解能を達成しており、RPC 以外の寄与が 40 ps 程度あるとすると、RPC 固有の時間分解能は  $260 \mu\text{m} \times 5 \text{ gaps} \times 2 \text{ stacks}$  の RPC で 33 ps、 $148 \mu\text{m} \times 6 \text{ gaps} \times 4 \text{ stacks}$  の RPC で 9 ps と、ALICE 実験及び [2] の RPC の時間分解能とおおよそ一致する。

### 7.1.2 読み出しパッド内の伝搬による影響

$260 \mu\text{m}$  RPC は  $1.5 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$  の S パッドで 50 ps、 $2.5 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  の L3 パッドで 60 ps の時間分解能であった。S パッド内での信号の伝搬による影響は無視できるとすると、L3 パッドを伝搬する際の影響は  $\sqrt{60^2 - 50^2} = 33$  よりおよそ 33 ps あることが分かる。

## 7.2 RPC 以外の時間分解能

RPC 以外の時間分解能の評価方法の詳細については付録 B に示した。本節では結果のみをまとめる。精度の良い測定およびシミュレーションから、スタートタイミングを決める RF 信号とバンチ長の影響が 14~18 ps、TDC の時間分解能が 17~19 ps、信号を伝達するケーブルによる影響が約 10 ps、信号にのっているノイズの影響がおよそ 15 ps あることが分かった。残るアンプとディスクリミネーターのジッターの影響は、既に分かっている他の影響をすべて差し引くとおよそ 35 ps 程度であることが分かった。

### スタートタイミング

ビーム照射試験を行った LEPS および実際に RPC を使用する LEPS2 では、加速器から提供される RF 信号を用いて TOF のスタートのタイミングを決めることができる。RF 信号は蓄積リング内の電子のバンチと同期したタイミングで提供される。TDC を用いて測定した結果、RF 信号の時間分解能は TDC の時間分解能に比べて非常に良く、時間分解能 17~19 ps の TDC では測定できないほどの良い精度であった。

一方、蓄積リング内の電子のバンチは進行方向に一定の広がりを持つ。RF 信号はバンチの中心のタイミングで提供されるため、バンチの端にある電子と逆コンプトン散乱が起きた場合は、RF 信号とのタイミングのずれが生じる。このずれはバンチ長に相当する。SPring-8 の蓄積リングの電子のバンチ長は電子のフィリングパターンに応じて 14~18 ps 程度である。よって LEPS, LEPS2 においては TOF のスタートのタイミングは 14~18 ps の精度で決めることができる。

通常は数 10~100 ps 程度の時間分解能を持ったスタートカウンターでスタートのタイミングを決めなければならないので、RF 信号によって 14~18 ps 程度の精度でスタートのタイミングを決めることができるのは、SPring-8 で行う実験の非常に大きなメリットである。

### TDC

1st プロトタイプ of ビーム照射試験には FASTBAS の LeCroy1875A、2nd プロトタイプ of ビーム照射試験には CAMAC の GNC-040 を使用した。それぞれテスト信号を用いて時間分解能の評価を行った。その結果、LeCroy1875A の時間分解能は 35~40 ps、GNC-040 の時間分解能は 17~19 ps であった。

### ケーブル

ビーム照射試験を行った LEPS では実験ハッチから計測器まで約 100 m のケーブルにより信号を伝達している。テスト信号を用いてケーブルを用いる場合と用いない場合の時間分解能の比較を行った。その結果、約 100 m のケーブルによる時間分解能の悪化はおおよそ 10 ps 程度であることが分かった。

### アンプのノイズ

RPC の信号のアンプ増幅後のノイズレベルは RMS 2.7 mV 程度であった。このノイズがディスクリミネーターのシュレシヨルドレベル -30 mV に対して、どの程度タイミングへ影響を及ぼすかシミュレーションを行った。その結果ノイズによる時間分解能への影響はおおよそ 15 ps 程度であることが分かった。

### アンプとディスクリミネーターのジッター

アンプとディスクリミネーターのジッターについては今回評価することができなかった。ただし、シミュレーションと他の RPC との比較から求めた RPC 固有の分解能が正しいとし、TOF の時間分解能から既に分かっている全ての寄与を差し引くと、アンプとディスクリミネーターによる影響は 32 ~ 37 ps 程度となる。

## 7.3 TOF の時間分解能の評価のまとめ

表 7.1 に今回の LEPS でのビーム照射試験において 260  $\mu\text{m}$  RPC の 2.5 cm  $\times$  40 cm の L3 パッドを用いた場合の TOF の時間分解能へ影響する要素をまとめる。アンプとディスクリミネーターのジッターに関しては、他の時間分解能の評価が正しいとして、全体の時間分解能から他の寄与を差し引くことで求めた。

Components	method	Effect
RPC アバランシェ	simulation	15 ~ 25 ps
RPC ストリップ	measurement	~ 33 ps
バンチ長	measurement	14 ~ 15 ps
TDC	measurement	17 ~ 19 ps
ケーブル	measurement	10 ps
アンプノイズ	simulation	~ 15 ps
アンプ・ディスクリミネータージッター	—	32 ~ 37 ps

表 7.1: 260  $\mu\text{m}$  RPC L3 パッドを用いた場合の TOF の時間分解能に対する寄与

ストリップ型読み出しパッドを用いた場合、時間分解能へ大きな影響を与えているのは読み出しパッド内の信号の伝搬と、アンプとディスクリミネーターのジッターであることが分かる。



ストリップ型の読み出しパッドはパッドのインピーダンスとアンプの入力インピーダンスが合っておらず、非常に汚い波形になっている (図 4.6)。インピーダンスの合ったアンプを開発することで、読み出しパッド伝搬による時間分解能の悪化は抑えられると考えている。

また、本実験で用いた PMT アンプは大量に用意することが不可能であり、CAMAC の TDC は読み出し速度が遅いため LEPS2 では使用できない。よって LEPS2 で用いる際には 1000 チャンネル分のアンプ及び TDC を新たに用意する必要がある。この際、低ジッター、低ノイズの時間分解能の良いアンプ及び TDC を開発することが重要である。

## 第8章 結論と今後の方針

### 8.1 結論

我々はLEPS2においてTOF検出器として使用するための大面積読み出しパッド・高時間分解能のRPCの開発を行った。

条件を換えて様々なプロトタイプを製作し、ギャップ幅  $260\ \mu\text{m}$ 、ギャップ数 5、スタック数 2 のRPCは、1チャンネル当たりの読み出し面積が  $50\ \text{cm}^2$  である、 $2.5\ \text{cm} \times 40\ \text{cm}$  のストリップ型読み出しパッドでTOFの時間分解能約  $60\ \text{ps}$ 、検出効率  $99\ \%$  と、LEPS2での開発目標をほぼ満たす性能を達成した(表 8.1)。

	Pad size	Resolution	Efficiency
Goal	$> 50\ \text{cm}^2/\text{channel}$	$< 50\ \text{ps}$	$> 99\ \%$
$260\ \mu\text{m}$ 2 stacks RPC	$50\ \text{cm}^2/\text{channel}$	$60\ \text{ps}$	$99\ \%$

表 8.1: 目標性能との比較

また、ギャップ幅  $148\ \mu\text{m}$ 、ギャップ数 6、スタック数 4 のRPCは  $2.5\ \text{cm} \times 40\ \text{cm}$  の読み出しパッドで、今回測定した中で最も良い時間分解能となるTOFで  $40\ \text{ps}$  の時間分解能を達成した。

これらの値は読み出し回路等RPC以外の寄与も含まれており、シミュレーション及び、他で開発されたRPCの時間分解能との比較から、アバランシェ信号のばらつきによるRPC固有の時間分解能は  $260\ \mu\text{m} \times 5\ \text{gaps} \times 2\ \text{stacks}$  のRPCで  $15\sim 25\ \text{ps}$  程度、 $148\ \mu\text{m} \times 6\ \text{gaps} \times 4\ \text{stacks}$  のRPCで  $8\ \text{ps}$  程度ではないかと考えられる。また、ストリップ型読み出しパッドのパッド内の信号の伝搬による影響はおおよそ  $30\ \text{ps}$  程度ではないかと考えられる。

読み出しパッドのサイズ・形状依存性の測定では、様々な形状の大面積の読み出しパッドを試した結果、両読みのストリップ型読み出しパッドが高い時間分解能と小さい位置依存性を持つことを確認した。

ギャップ幅依存性の測定では、 $260\ \mu\text{m}$  のギャップ幅の他、実験用のRPCでは使用されていない、狭い幅の  $104\ \mu\text{m}$ 、 $148\ \mu\text{m}$  のギャップを試した。 $148\ \mu\text{m}$  のギャップ幅は、片読みの読み出しパッドでは良い時間分解能と十分な検出効率を達成できるが、6ギャップ、2スタックの構成では、両読み読み出しパッドで十分な検出効率を得られないことが分かった。 $104\ \mu\text{m}$  のギャップ幅はアバランシェモードでオペレーションするためには狭すぎることを確認できた。

また、ギャップ数・スタック数の依存性の測定では、ギャップ数、スタック数ともに数が増えるほど時間分解能が良くなることも確認した。

その他、ガス依存性の測定により  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  の代わりに  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  を用いても問題ないことが確認できた。また、レート依存性の測定により、 $148\ \mu\text{m}$  ギャップのRPCで約  $200\ \text{Hz}/\text{cm}^2$  までのレート耐性が確認できた。

## 8.2 今後の方針

今後は LEPS2 で用いる実機の開発とアンプ及び TDC の開発を行う。ストリップ型読み出しパッドでのさらなる時間分解能の向上と、クロストークの抑制を大きな目標とする。

### 実機の開発

LEPS2 では図 8.1 のように、15 cm × 110 cm のガラスを用いた RPC を並べてバレル部分を覆う予定である。2012 年度の前半には実機と同サイズのプロトタイプを製作し、テストを行う予定である。

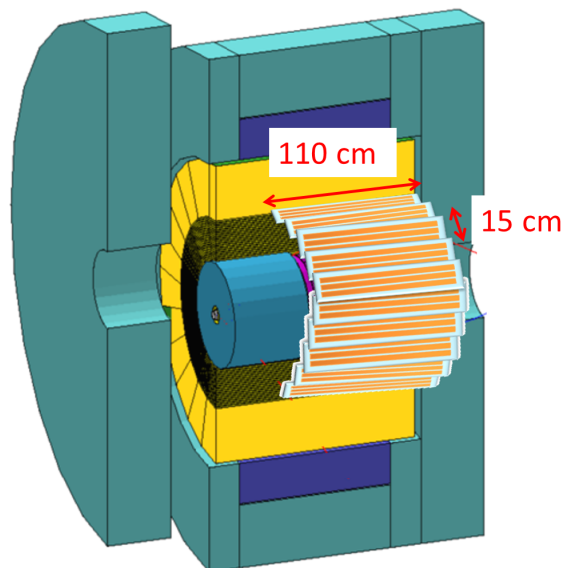


図 8.1: LEPS2 での RPC

### 時間分解能の向上

時間分解能の向上のために、アンプのインピーダンスマッチ、スタック数の増加、2 層の RPC の使用、時間分解能の良いアンプ・TDC の開発、の 4 点が考えられる。

#### <アンプのインピーダンスマッチ>

現在は入力インピーダンス 50 のアンプを使用しており、ストリップ型読み出しパッドではパッドとアンプのインピーダンスとの不整合のため、信号が図 4.6 のような反射した波形になっている。この波形を改善することでタイムウォーク補正の精度が向上し、時間分解能が向上すると考えられる。また、インピーダンスが合っていないため、他端で反射して遅れた信号が読み出し回路に入っていることも考えられる。これも波形を歪める原因となるため、入力インピーダンスの合ったアンプを開発することは非常に重要である。

### < スタック数の増加 >

1.5 cm × 5.5 cm の小型のパッドではスタック数を 2 から 4 へ増やすことによって時間分解能が 50 ps から 40 ps へ向上した。ストリップ型 RPC でも同程度の向上があるとすると、4 スタックでは 2.5 cm × 40 cm のパッドでも 50 ps 程度の時間分解能が期待できる。

### < 2 層の RPC の使用 >

RPC は 2 スタックでも 2 cm 以下と厚みが小さいため、狭い場所でも 2 層の RPC を使用することが可能である。RPC を 2 層使用し、1 つの粒子を 2 回 RPC で測定できれば時間分解能は  $1/\sqrt{2}$  となる。 $70/\sqrt{2} = 50$  であるから、70 ps の時間分解能の RPC を 2 層使用すれば 50 ps の時間分解能を得ることができる。

ただし、この方法を用いるとチャンネル数が 1 層の場合の 2 倍となってしまう。次節で述べるような方法で、1 チャンネルあたりの読み出しパッドの面積を今の  $50 \text{ cm}^2/\text{ch}$  から倍の  $100 \text{ cm}^2/\text{ch}$  程度に増やすことができれば、この方法は有用である。

### < アンブ・TDC の開発 >

7 で述べたように TOF の時間分解能には RPC 以外の寄与が大きい。従って、時間分解能の良いアンブと TDC を開発することは非常に重要である。アンブは ALICE 実験で使用されている NINO[51] をベースに、TDC は PSI 研究所の DRS4 チップ [52] をベースに 2011 年度の終わりから開発を開始する。

## 1 チャンネルあたりの読み出し面積の増加

実機と同サイズの 15 cm × 110 cm のプロトタイプ制作の際には、読み出しパッドの面積の増加、及び複数の読み出しパッドの結合、の 2 つの方法により、1 チャンネルあたりの読み出し面積を増加させることを検討している。1 チャンネルあたりの読み出し面積を増加できれば、読み出し回路にかかるコストを削減することができる。また、1 チャンネルあたりの読み出し面積を今の倍にすることができれば、前節で述べたように RPC を 2 層並べて時間分解能を向上させることができる。

### < 読み出しパッド面積の増加 >

2nd プロトタイプの RPC は 50 cm × 10 cm のガラスを用いたため、40 cm 以上の長さのストリップ型読み出しパッドは試すことができなかった。次の実機に向けた開発では 110 cm のガラスを使用するため、さらに長いストリップ型読み出しパッドを試すことができる。ストリップの長さ・幅と時間分解能の関係はまだ不明瞭であり、例えば今の 2.5 cm × 40 cm のストリップ型読み出しパッドを倍の幅、もしくは倍の長さの読み出しパッドでも今と比べて時間分解能の悪化が見られなければ、パッドの面積を倍にし、チャンネル数を今の半分の 500 チャンネルにすることが可能である。

### < 複数の読み出しパッドの結合 >

HARP 実験の RPC の製作などで、複数のパッドを 1 つのアンブに接続し、信号を読んでも時間分解能が悪化しないという報告がある [25][32]。そのため複数の読み出しパッドを 1 つのアンブに接続し、1 チャンネルあたりの読み出しパッドの面積を増やす、という方法も試す。

### クロストークの抑制

現在ストリップ型読み出しパッドのパッド間で 85 % 程度のクロストークが観測されている。そのうち 20 % 程度は本来信号の起きるタイミングで起きているクロストークであり、カーボン電極の抵抗率を上げることで数%以下に抑えることができると考えられる。また、残りの 65 % 程度のクロストークは信号の後ろに起きる反射によるものである。反射の起きる原因は、読み出しパッドとアンプの入力インピーダンスが合っていないためであり、反射によるクロストークの割合を数%程度に減らすためには、インピーダンスの合った読み出し回路の開発が必要である。

### 8.3 今後の計画

今後は 2012 年度の前半に実機と同サイズとなる 110 cm × 15 cm のガラスを用いたプロトタイプを製作する。そこで今よりも大きな読み出しパッドを製作しテストを行い、LEPS2 で使用するパッドサイズを決定する。また 2011 年度の後半よりアンプ及び TDC の開発を行う。

2012 年度の後半には実機の生産に入る。2013 年度にインストールを行い、LEPS2 でのオペレーションを開始する。

## 付録 A RPCのその他の性能評価

RPCのビーム照射試験においては、第6章で述べた以外にも様々な依存性を調べた。付録Aではそれらの詳細を述べる。

### A.1 ガラスサイズ依存性

1st プロトタイプ of RPC は  $2.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$  のガラスを、2nd プロトタイプ of RPC には  $10\text{ cm} \times 50\text{ cm}$  のガラスを用いた。1st プロトタイプ of RPC は、 $1.5 \times 5.5\text{ cm}$  の S パッドがガラスおよび電極とほぼ同サイズである (図 3.1)。このガラスのサイズによる影響を調べた。表に 1st プロトタイプと 2nd プロトタイプ of S パッドの時間分解能の比較を示す。1st プロトタイプと 2nd プロトタイプでは異なる TDC を用い、それぞれ時間分解能が異なる。そのため、TDC の影響を取り除いた値を示す。ギャップは  $260\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ gaps} \times 1\text{ stack}$  である。ガラスの大きさが違っても、パッドサイズが同じであれば性能に大きな差はないことが分かった。

RPC	Resolution (subtract TDC)	Resolution (include TDC)
1st	$65 \pm 2\text{ ps}$	$75 \pm 1\text{ ps}$
2nd	$65 \pm 2\text{ ps}$	$67 \pm 2\text{ ps}$

表 A.1: ガラスサイズ依存性

### A.2 トリガー面積依存性

本テストでは  $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  のトリガー領域を利用してきた。読み出しパッド中の信号の伝搬速度はおおよそ  $50 \sim 100\text{ ps/cm}$  と言われているため、トリガー領域が広いとアバランシェが起きた点から読み出しラインまでの時間差が生まれ、時間分解能が悪くなる恐れがある。そこでトリガー面積を狭くすることで時間分解能の向上が見られるかどうか、B3-3 パッドにおいて  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  のトリガー領域を用いて試してみたが、特に違いは見られなかった (表 A.2)。そのためこの測定以後も  $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  のトリガ領域を利用した。

trigger area	resolution
$1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$	$49.5 \pm 1.1\text{ ps}$
$1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$	$49.9 \pm 1.1\text{ ps}$

表 A.2: トリガー面積依存性

### A.3 角度依存性

ビーム入射の角度が時間分解能に影響を与えないか評価を行った。測定には  $260 \mu\text{m}$  RPC の L3 パッドを用いた。右側の読み出し、左側の読み出し、その平均の結果を表 A.3 に示す。特に大きな違いは見られなかった。 $55^\circ$  の平均の時間分解能は他の角度より悪いが、左側の読み出しの分解能のみが悪いので、位置依存性等、角度以外の原因によるものだと考えられる。

なお、本節以外の結果は全て、RPC に対しておよそ  $10 \sim 20^\circ$  のビーム入射角度で実験を行った。

Angle	Resolution	Resolution (Right)	Resolution (Left)
$10^\circ$	$65 \pm 2 \text{ ps}$	$71 \pm 3 \text{ ps}$	$88 \pm 3 \text{ ps}$
$55^\circ$	$74 \pm 4 \text{ ps}$	$69 \pm 3 \text{ ps}$	$95 \pm 5 \text{ ps}$
$-55^\circ$	$65 \pm 3 \text{ ps}$	$74 \pm 5 \text{ ps}$	$63 \pm 3 \text{ ps}$

表 A.3: 角度依存性

### A.4 読み出しパッドの不均一性

両読みのストリップ型読み出しパッドにおいては、時間分解能の大きな位置依存性が観測された。この理由として考えられる原因の1つが読み出しパッドの不均一性である。銅テープを用いて読み出しパッドを製作した場合はどうしてもしわが入ってしまう。そこで図 A.1 に示すように S-a, S-b, S-c の異なる3つの S サイズのパッドを製作し、評価を行った。S-a, S-b はなるべくしわの入らないように読み出しパッドを貼り、S-c はわざとしわを増やした。

S-a と S-b のパッドを比較したのが図 A.2(左) であり、S-b と S-c のパッドを比較したのが図 A.2(右) である。なお S-a と S-b のパッドの比較は三置換程度、S-b と S-c のパッドの比較は十置換程度 of ガス流量時と、異なる時間にデータ取得を行ったため、図 A.2 の (左) と (右) では S-b パッドの時間分解能が異なる。

S-a と S-b ではほとんど違いは見られなかったが、S-c パッドは S-b パッドに比べ  $10 \text{ ps}$  程度の時間分解能の悪化が見られた。

このことから、比較的きれいに銅テープを貼ることのできる S サイズの読み出しパッドでは時間分解能の違いは出にくい、しわの多い大面積のパッドではパッドの不均一性による影響が出る可能性があると考えられる。第6章の各節で示した依存性は、この影響をなくすため、同一の読み出しパッドを使用して比較を行った。

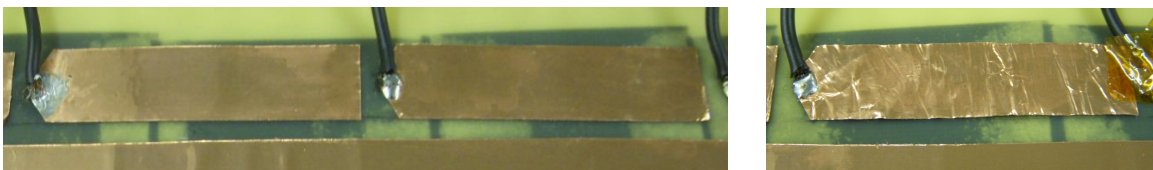


図 A.1: 3つの S パッド  
(左) 左側が S-a パッド、右側が S-b パッド (右) S-c パッド



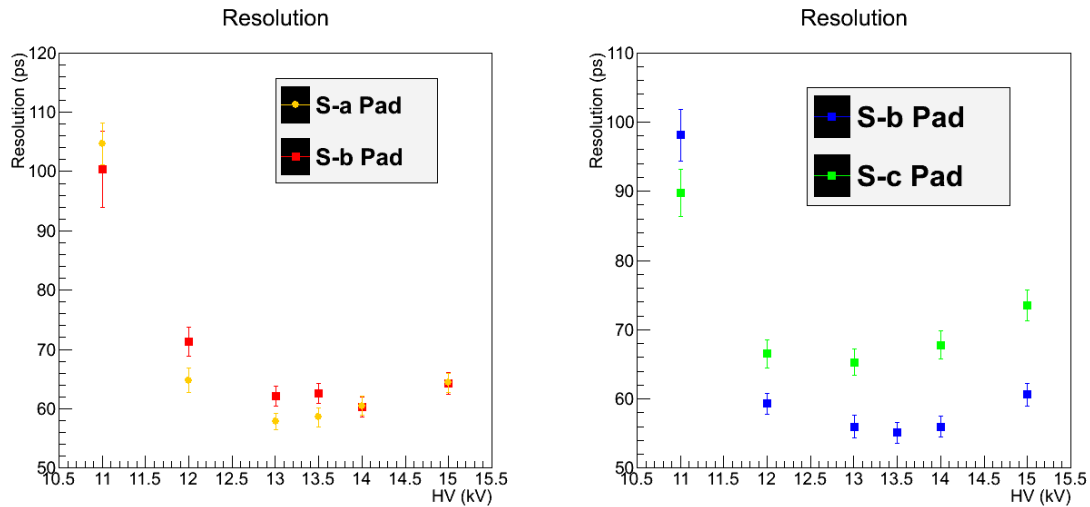


図 A.2: 読み出しパッドの比較  
 (左) S-a パッドと S-b パッドの比較 (右) S-b パッドと S-c パッドの比較

### A.5 読み出しケーブルの足し合わせによる影響

本実験では負の信号のみに対応したアンプを使用しているため、アノードの信号のみ使用している。ダブルスタック型 RPC の場合、電圧のかけ方には図 A.3 のように内側をアノードにする場合と外側をアノードにする場合の 2 通りがある。内側をアノードにする場合は、読み出しラインをガラスの外まで伸ばさなければならない一方、読み出しケーブルは 1 本のみでよい。外側をアノードにする場合は読み出しケーブルを直接パッドに接続できるため読み出しラインを作る必要はないが、図 3.16(右) のような 2 つの信号を合わせるケーブルを使用しなければならない。この足し合わせで時間分解能に影響が出るのではないかと考えたため、同じ RPC で内側がアノードになるように電圧をかける場合と外側がアノードになるように電圧をかける場合の両方のテストを行った。その比較の結果を示したのが表 A.4 である。この比較には 148  $\mu\text{m}$  のダブルスタック型 RPC の S パッドと B3 パッドの③の位置を用いた。条件を同じにするために、外側のパッドの読み出しラインも内側のパッドと同様、図 6.15 のようなガラスの外側まで読み出しラインをのばしたパッドを使用している。2 つの読み出しパッドの信号をを図 3.16(右) のようなラインで足し合わせても時間分解能や検出効率に大きな違いは見られないことが分かった。このことから、さらに信号の足し合わせの必要な 4 スタックの RPC に挑戦できることが確認でき、6.7 で述べた 4 スタック RPC の製作を行った。

Pad	S Resolution	B3-③ Resolution	S Efficiency	B3-③ Efficiency
アノード内側 (信号足し合わせなし)	50 $\pm$ 1 ps	50 $\pm$ 1 ps	99.7 $\pm$ 0.1 %	99.6 $\pm$ 0.1 %
アノード外側 (信号足し合わせあり)	46 $\pm$ 1 ps	50 $\pm$ 1 ps	99.5 $\pm$ 0.1 %	99.8 $\pm$ 0.1 %

表 A.4: 読み出しケーブル依存性

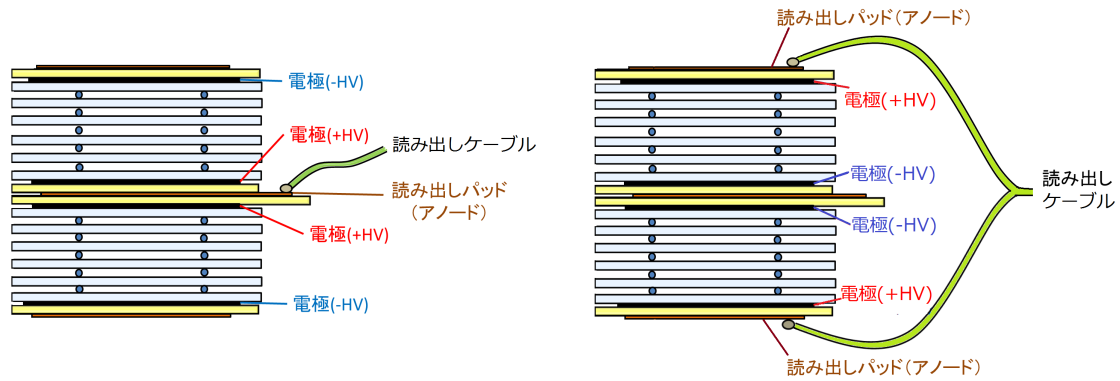


図 A.3: 電圧のかけ方  
 (左) 内側をアノードにする場合 (右) 外側をアノードにする場合

### A.6 カソードの接続

本実験ではアノードの信号のみを用いたが、その際カソードの読み出しパッドをグランドに接続しないと、時間分解能の悪化が見られた。260  $\mu\text{m}$  RPC の S パッドでカソードを 50  $\Omega$  の抵抗を介してグランドに接続した場合、直接グランドに接続した場合、どこにも接続しなかった場合、の結果を表 A.5 に示す。グランドへの接続方法による大きな依存性はなく、接続しなかった場合のみ時間分解能の悪化が見られた。検出効率の依存性は見られなかった。信号を読まないパッドもグランドへ接続することの必要性が確認できた。

Cathode	Resolution	Efficiency
50	$59 \pm 2$ ps	$99.7 \pm 0.1$ %
Directory	$56 \pm 1$ ps	$99.0 \pm 0.2$ %
No connection	$80 \pm 2$ ps	$99.1 \pm 0.2$ %

表 A.5: カソードの接続

## 付録B RPC以外のTOFの時間分解能への寄与の評価

TOFで50 ps程度の高い時間分解能を達成するには、時間分解能に対するRPC以外の寄与も非常に重要となる。

我々は今回ビーム照射試験を行ったセットアップの元でTOFの時間分解能に対してTDCによる寄与が約18 ps、蓄積リング内の電子のバンチ長による寄与が約14 ps、ケーブルによる寄与が約10 psあることを確認した。また、シミュレーションにより、アンプのノイズによる影響がおよそ15 ps程度であるという評価を行った。

本章ではその詳細を述べる。

### B.1 RF信号

5.4で述べたように、加速器側からは蓄積リングのバンチ間隔に対応して1966 ps間隔のRF信号が提供されている。LEPSではこのRF信号を1/87に間引いて使用している。従って、RF-RPCの時間分布を見ると、図6.2のように87個の1966 ps間隔のバンチ構造が現れる。

また、 $1966 \text{ ps} \times 87 \sim 170 \text{ ns}$ であるので、1回のRF信号で覆う領域は約170 nsとなり、Full range 100 nsのHigh Resolution TDCでは全ての範囲を覆うことができない。そこで1/87に間引かれた信号はさらに2つに分けられ、片側は86 nsのディレイをかけられる。それぞれをRF1、RF2とし、合わせて全ての範囲を覆う構造になっている(図B.1)。

間引いたあとのRF信号と、その170 ns後に来る次の間引かれたRF信号の時間分布を示したのが図B.2である。時間分解能はおよそ20 psであった。TDCの時間分解能はおよそ17~19 psであるので(B.4参照)、RF信号は間引いた後でもTDCの時間分解能に比べて非常に良い精度であることが分かる。

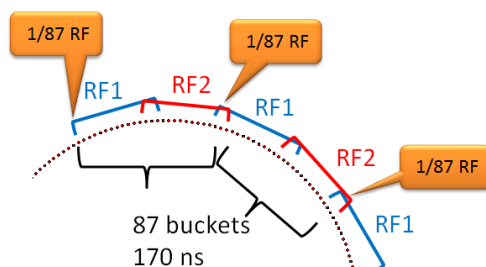


図 B.1: RF1 および RF2 が覆う範囲

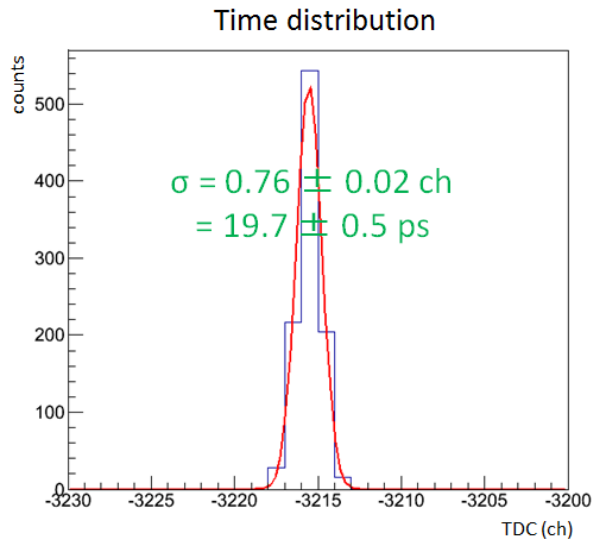


図 B.2: 間引かれた RF 信号間の時間分布

## B.2 フィリングパターン

蓄積リングにおいて、電子のバンチを詰められる場所はバケットと呼ばれる。SPring-8 の蓄積リングの周長は約 1436 m で全部で 2436 個のバケットがある。しかし、実際の運転では全てのバケットに電子を詰めるわけではなく、いくつかのフィリングパターンがある。3 週間程度の一定期間ごとにフィリングパターンが変更され、本実験の実験期間中のフィリングパターンは図 B.3 の C-mode(11 bunch train  $\times$  29) と D-mode(1/14 filling + 12 bunches) であった [53]。C-mode は 1966 ps 間隔で 11 個連続したバンチのかたまりが 29 個ある構造をしている。D-mode は 1/14 周に 1966 ps 間隔で 174 個のバンチが並んでおり、残りの 13/14 周に等間隔に 12 個のバンチがある。

C-mode では蓄積リングを 29 分割したバンチ構造になっており、これは  $2436/29=84$  より 1 分割あたり 84 個ずつのバケットに対応する。一方 RF の間引きは 87 個ずつのバケットに対応するので、バンチの train と間引かれた RF には 3 バケット分のずれがある。結果 TDC には図 B.4 のように 3 バケットずつずれて RF 信号が加算されていき、RF の TDC 分布にバンチ構造は反映されない(図 B.6(左))。

一方 C-mode は蓄積リングを 14 分割した構造になり、これは  $2436/14=174$  より 1 分割あたり 174 ずつのバケットに相当する。これは RF の間引き 87 バケットずつの丁度倍であり、RF 信号は TDC にバンチ構造をそのまま反映した位置に記録される(図 B.5 図 B.6(右))。そのため 1/14 filling と残りの 12 個のバンチを区別することができ、次節のバンチ長の評価に役立つ。

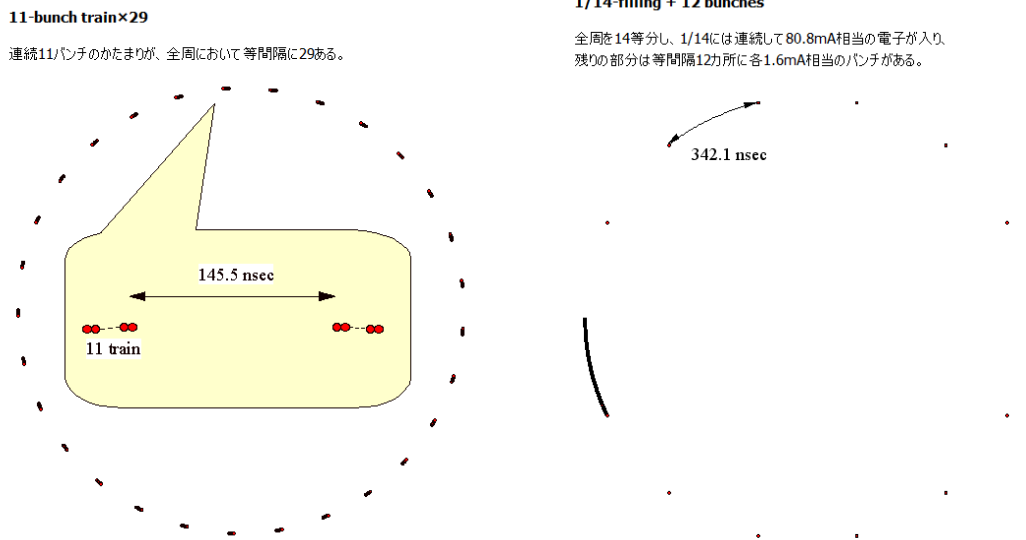


図 B.3: 蓄積リングのフィリングパターン  
(左)C-mode (11 bunch train × 29) (右)D-mode (1/14 filling + 12 bunches)

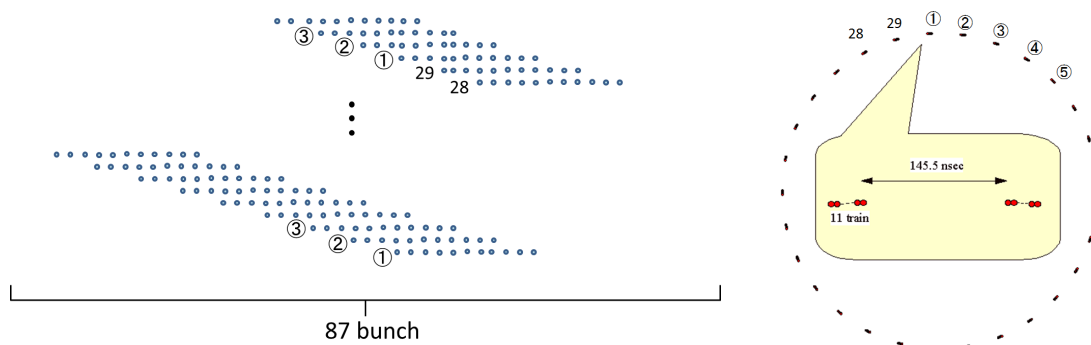


図 B.4: C-mode の RF の TDC での対応位置

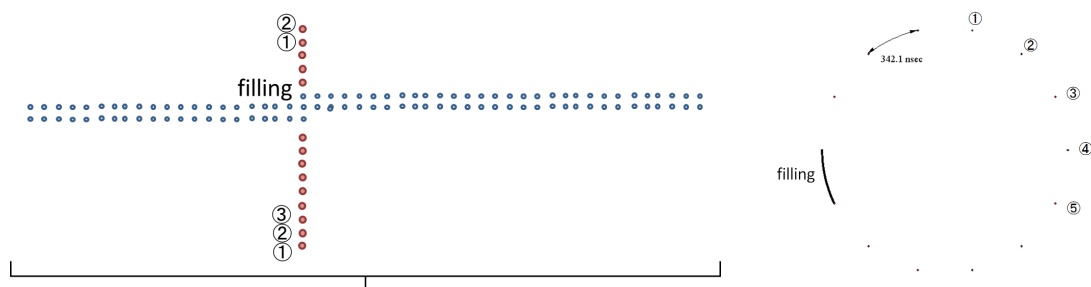


図 B.5: D-mode の RF の TDC での対応位置

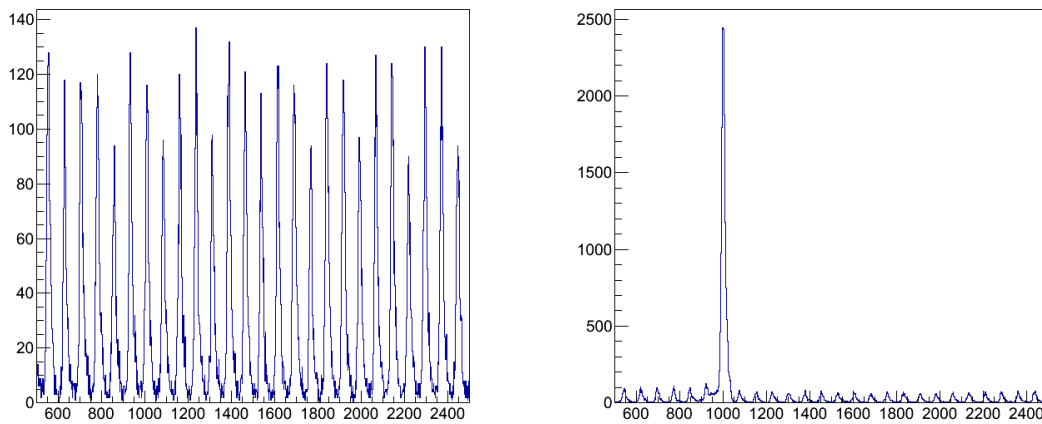


図 B.6: 実際の RF 分布

(左)C-mode (右)D-mode 12 bunches に対応した位置にのみ大きなピークが現れる

### B.3 バンチ長

飛行時間測定のためのスタートのタイミングは RF 信号によって決めるが、1つのバンチ内の電子は進行方向に一定の広がりを持つため、RF 信号のタイミングとは時間のずれが生じる (図 B.7)。1つのバンチ内での電流分布は cos 型をしているが、これをガウス型で近似し、電流分布の FWHM の  $1/2.35$  をバンチ長として評価する。フィリングパターンによって1バンチごとに詰められている電子の量が異なり、バンチ長も異なる。

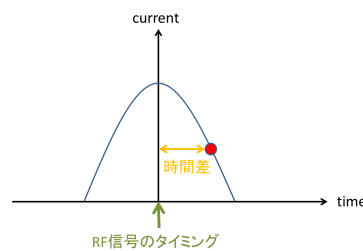


図 B.7: バンチ長

赤丸の位置にある電子と逆コンプトン散乱が起きた場合、RF 信号と矢印の分だけ時間差が生じる。これはバンチ長に対応する。

C-mode は全てのバンチの電流値は等しく、1バンチあたりの電流が約 0.3 mA でバンチ長は約 14 ps である。D-mode はバンチによって電流値が異なり、1/14 filling の 174 バンチは各バンチの電流が約 0.46 mA でバンチ長約 15 ps、13/14 周の 12 個のバンチは電流値が約 1.6 mA で、バンチ長が約 18 ps である。

D-mode の 1/14 filling と残りの 12 個のバンチは RF の TDC 分布から区別し、C-mode 運転のデータと D-mode 運転のデータで違いが出ないように、今回の解析ではバンチ長の近い 1/14 filling

のデータのみを用いた。LEPS2 で実際に運転される際はバンチ長の大きいバンチのイベントも使用するが、50 ps の TOF の時間分解能に対する寄与はバンチ長が 14 ps の場合が約 2 ps、18 ps の場合が約 3 ps と大きな違いにはならない。ここで示したバンチ長は SPring-8 の加速器グループがストリークカメラによる撮影で測定した値である。

## B.4 TDC

1st プロトタイプのビーム照射試験には Fastbus の LeCroy1875A を、2nd プロトタイプのビーム照射試験には CAMAC の GNC-040 を使用した。どちらも High Resolution TDC で、Full Range 100 ns で使用した。この場合 1 bin は約 25 ps である。

### B.4.1 1 ch あたりの時間スケール

High Resolution の TDC は 1 ch = 約 25 ps の時間スケールを持っているが、この時間スケールはチャンネルによってばらつきがあり、このばらつきも時間分解能の評価に重要となる。我々は以下に述べる 2 つの方法で TDC の 1 ch あたりの時間スケールを調べた。どちらも RF 信号が 1966 ps 間隔であることを利用しており、両者の結果は非常によく一致した。また複数の異なる実験日のデータを調べたが、結果に差はなかった。

本論文で示した TOF の時間分解能は RPC の信号を入力したチャンネルの 1 ch あたりの時間スケールと RF の信号を入力したチャンネルの 1 ch あたりの時間スケールの平均で評価している。例えば 2nd プロトタイプのビーム照射試験には GNC-040 の TDC を用い、RPC の信号に ch0 を、RF の信号に ch6 を用いた。ch 0 の 1 ch あたりの時間スケールは約 25.7 ps、ch 6 は約 26.5 ps であったため、時間分解能の評価にはこの 2 つの平均である 1 ch あたり 26.1 ps を用いて評価を行った。

以下 GNC-040 の ch 6 の評価を例として示す。

#### バンチ間の平均距離から求める方法

バンチ間隔は 1966 ps であるので、TDC のバンチ間隔が何 ch であるかを調べれば、1 ch あたりの時間スケールを評価することができる。TDC のスタートのタイミングはスタートカウンターによって決めている。よって RF のタイミングはスタートカウンターのパルスハイトに依存したタイムウォークが起きてしまう。(図 B.8(左)) しかしスタートカウンターの Charge でカットをかけ、電荷の大きいイベントと小さいイベントを除くと RF 信号の時間分布は図 B.8(右) のようにほぼガウス分布となる。このガウス分布の中心値間の距離を求めたものが図 B.9 である。バンチ間の平均距離は  $74.28 \pm 0.6$  ch であった。

#### 足し合わせのばらつきから求める方法

バンチを足し合わせる際は、各バンチを 1966 ps 間隔で足し合わせたときが最も時間分解能が良くなる。従って、足し合わせを行った際に最も時間分解能のよくなるチャンネルの間隔から、1 ch あたりの時間スケールを求めることができる。図 B.10 に 148  $\mu\text{m}$  RPC の時間分解能を足し合



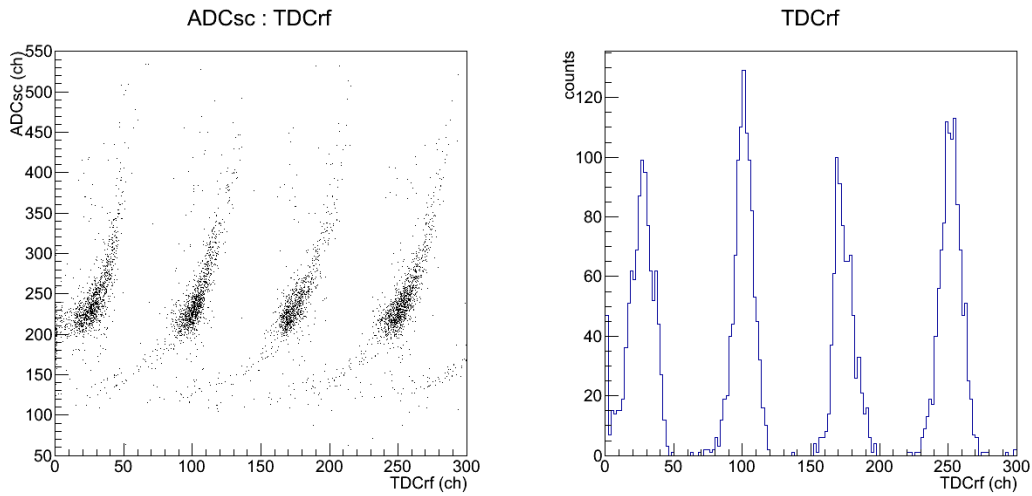


図 B.8: RF 信号

(左)RF の時間-スタートカウンターの電荷 分布  
 (右) スタートカウンターの電荷でカットをかけた後の RF 信号の時間分布

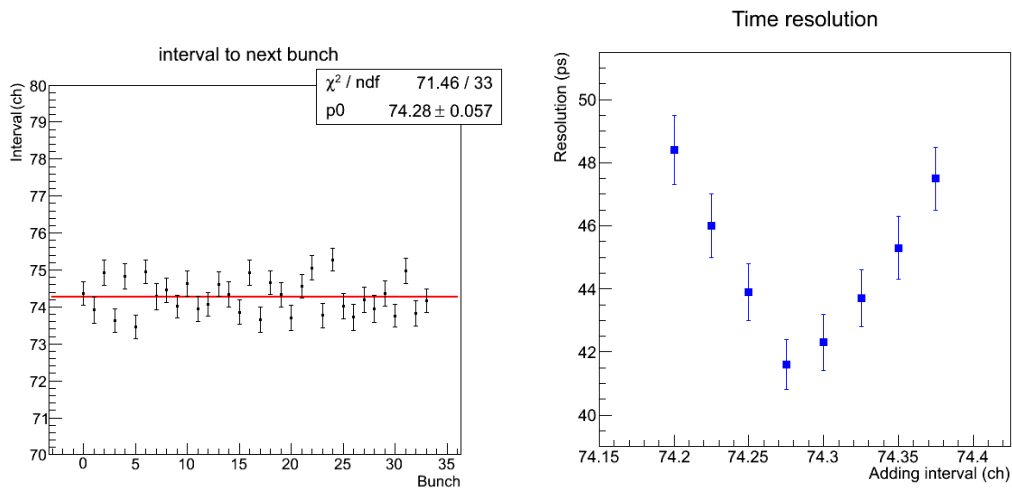


図 B.9: バンチの中心間の距離

図 B.10: 足し合わせの間隔を関数とした時間分解能

わせの間隔の関数で示す。最も時間分解能がよくなるのはおよそ 74.275 ch 間隔で足し合わせるときであった。これはバンチ間の平均距離から求めた値とも非常によく一致する。

1966 ps / 74.28 ch ~ 26.5 ps/ch より GNC-040 6ch の 1 チャンネルあたりの時間スケールはおよそ 26.5 ps と評価した。他のチャンネルについても同様の評価を行い、時間分解能の評価の際、ch から ps へのスケールの変換に用いた。

### B.4.2 非線形度

TDC の示す値は、実際の時間に対して非線形になることがある。このことも RF が 1966 ps 間隔であることを用いれば精度よく調べることができる。その結果線形からのずれは 2 種類のものがあることが分かった。

#### 小さいチャンネルでのずれ

1 つ目はチャンネル数が 1000 ch 以下程度の範囲では 1ch あたりの時間スケールが小さいことによるものである。図 B.11 は GNC-040 において各バンチの中心値が平均間隔よりもどの程度ずれているかを示したものである。1000 ch 以下にあるバンチは、1000 ch 以降の平均間隔よりも狭い間隔であることが分かる。これはどの TDC にも見られるもので、1チャンネル当たりの時間スケールの評価やバンチの足し合わせを容易にするため、今回の解析では 1000 ch 以下に入ったバンチは用いないようにした。

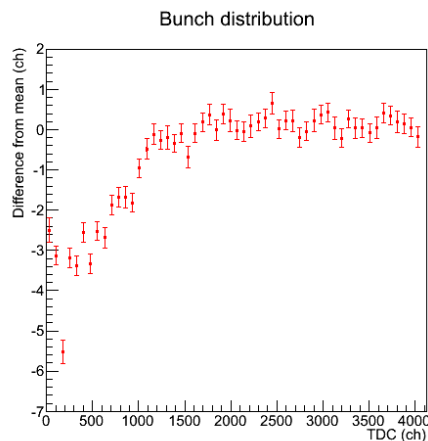


図 B.11: 各バンチの平均間隔からのずれ

#### TDC のジッターによるずれ

2 つ目はチャンネル数が 1000 ch 以上でも起こる TDC のジッターである。図 B.12 に LeCroy1875A と GNC-040 の 1000 ch 以上のバンチの中心値が、1000 ch 以上の領域において平均間隔よりもどの程度ずれているかを示す。LeCroy1875A は約 100 ps (4 ch) 程度の非常に大きなジッターがあることが分かる。一方、GNC-040 のジッターはピークの中心値を求める際の統計誤差以下であり、非常に良い線形性を持つことが分かった。

解析でバンチを足し合わせる際、LeCroy1875A はこのジッターを補正して足し合わせることで 5 ps 程度の時間分解能の向上が見られた。一方 GNC-040 は一定間隔で足し合わせた方が 1 ~ 2 ps 時間分解能が良かった。本論文では LeCroy1875A はジッターを補正した時間分解能を、GNC-040 は一定間隔で足し合わせた時間分解能を示している。

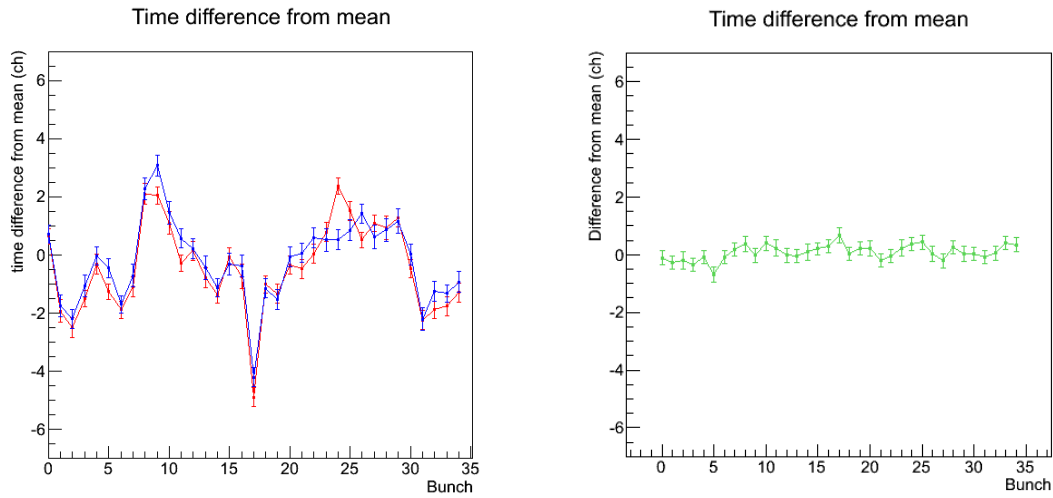


図 B.12: RF の中心値の平均からのずれ  
 (左)LeCroy1875A 2つの異なるランの結果を示している (右)GNC-040  
 1000 ch 付近にあるバンチを 0 とし、そこから 35 バンチ分を示している

### B.4.3 時間分解能

TDC の時間分解能の評価のためには、異なるチャンネルに全く同じ信号を入力し、チャンネル間の時間差を見ればよい。信号には Gate Generator によるループ信号と RF 信号の両方を試したが、両方で差はなかった。LeCroy1875A と GNC-040 それぞれ RF1 と RF2 の 2 つのチャンネル間の時間分布を図 B.13 に示す。

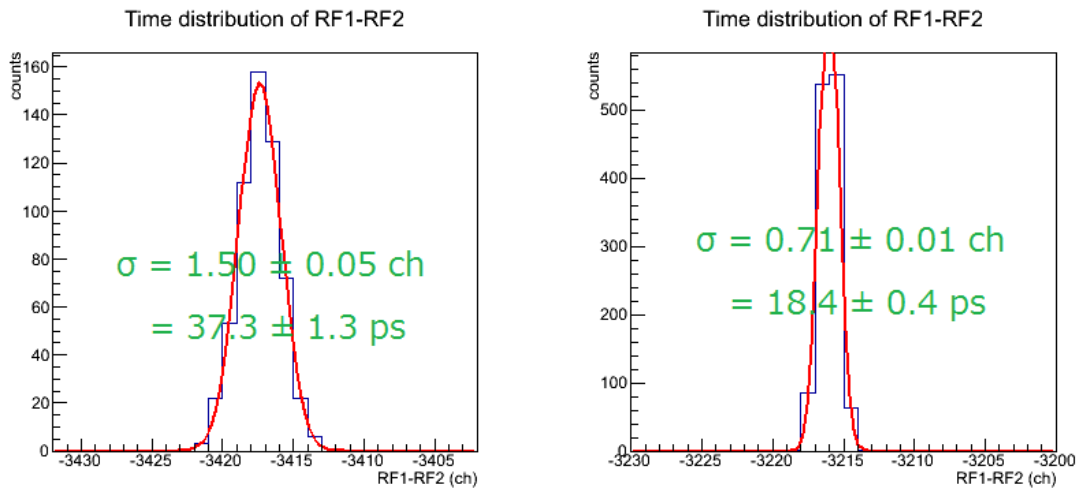


図 B.13: RF1 の信号と RF2 の信号の時間差  
 (左)LeCroy1875A (右)GNC-040

解析と同じ条件にするためにバンチの重ね合わせと同じ 75 ch 分の区間に入った信号のみを用いている。2つのチャンネル間の時間差にはチャンネルの非線形度も効いてくるので、区間を長くすればこの値は悪化し、短くするとよくなる。値は区間の位置によっても異なり LeCroy1875A の時間分解能はおよそ 35 ~ 40 ps、GNC-040 はおよそ 17 ~ 19 ps であった。LeCroy1875A の時間分解能は非常に悪く、LeCroy1875A を使用して 50 ps の時間分解能を達成するのは難しいことが分かった。

## B.5 ケーブル

LEPS では実験ハッチ内から計測器まで約 100 m のケーブルにより信号を伝達している。そこでテスト信号を入力し、100 m のケーブルを使う場合と使わない場合の時間分解能を比較し、ケーブルによる影響を調べた。100 m のケーブルを通さない場合のテスト信号の 1 ch あたりの時間分解能はおよそ 14 ~ 15 ps、通す場合は 17 ~ 18 ps であった。このことから 100 m のケーブルによる時間分解能の悪化はおよそ 10 ps であることが分かった。

またこの 100 m ケーブルを使用せず、ハッチのケーブルダクトから 10 m 程度の短いケーブルを引いてテストを行ったみたが、既にたくさんのケーブルがつまっているダクトであるためノイズを拾い、約 50 ps の時間分解能の悪化が見られた。

実際に実験で使用するにはクリーンな場所を通るケーブルを引くことが重要である。

## B.6 アンプのノイズによる影響

5.5 で示したように、TDC にはアンプ 3 段で約 64 倍に増幅した信号を使用した。増幅後のノイズレベルを示したのが図 B.14 である。RMS は約 2.7 mV であった。このノイズレベルはアンプの入力に RPC の信号を入力しなくても変わらなかったため、アンプを 3 段使用することによる不可避なノイズレベルだと考えられる。

また、増幅後の RPC の信号の立ち上がりをオシロスコープで拡大した図を図 B.15 に示す。今回使用した -30 mV の閾値レベルまでは約 400 ps の立ち上がりの速度で達していることが分かる。

そこで、図 B.14 で観測されているようなおよそ 3 ns 周期の約 5 mV までのランダムなパルス高のノイズにより、閾値レベルを超えるタイミングがどの程度ずれるかシミュレーションを行った。結果を図 B.16 に示す。タイミングのずれはおよそ 15 ps (RMS) であった。

この結果から、今回使用した PMT アンプの持つ不可避なノイズレベルによる影響はおよそ 15 ps 程度あると考えられる。

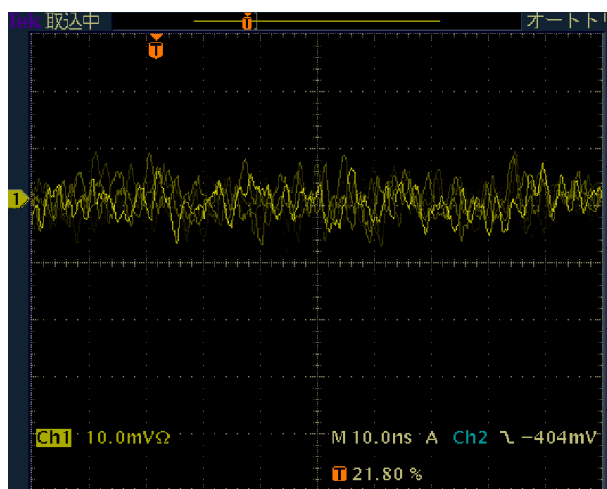


図 B.14: 増幅後のノイズレベル

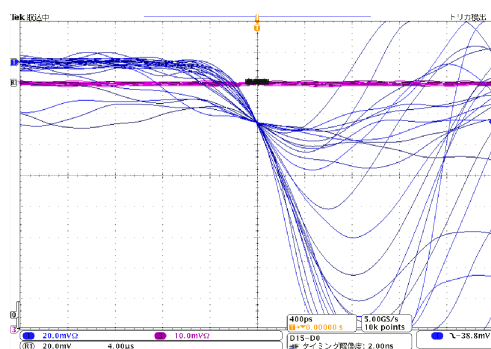


図 B.15: RPC の信号の立ち上がり

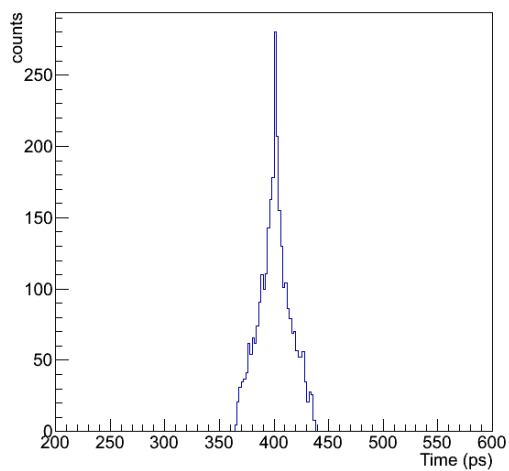


図 B.16: ノイズによる閾値レベルを超えるタイミングのずれのシミュレーション結果

## 謝辞

本研究と論文の執筆に当たっては大変多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお世話になった皆様にお礼申し上げます。

指導教員の新山雅之助教には、研究においても論文の執筆にあたって細部まで気を配っていただきました。土日も夜間も関係なくいつも親身になって助けていただき、感謝しております。理化学研究所の大西宏明研究員には特にRPCの製作で大変お世話になりました。大西さんの力なしにはRPCの製作は行えませんでした。それから共同実験者である台湾中央研究院の Chia-Yu Hsieh には特別に感謝しています。本研究に当たっては様々なタイプのRPCを何十回と製作をしてきました。何十回にも渡るRPCの製作とビーム試験ができたのもHsiehさんのおかげです。

永江知文教授にはこまめに研究の進捗状況を気にかけてくださり、論文執筆にあたって分かりやすいアドバイスをたくさんしていただきました。

同じ学年でともにLEPSで実験をしている野沢勇樹くんにも感謝しています。同じ目線でなんでも相談しあえる野沢くんがいることは、いつも非常に心強いです。それからビーム試験を手伝ってくれた同じ研究室の橋本敏和くん、水谷圭吾くん、阪大RCNPの濱野博友くん、岡本祐磨くんには感謝しても感謝しきれません。長い長いビーム試験を遂行できたのは4人のおかげです。

面白いテーマとたくさんのビームタイムを提供していただいた阪大RCNPのLEPSグループの方々には大変感謝しております。また同じ研究室でいつも暖かく見守ってくださる川畑貴裕准教授、村上哲也講師、藤岡宏之助教と先輩、同輩、後輩の方々にも深くお礼を申し上げます。

本論文が今後RPCを開発する方に少しでも役立てば幸いです。

## 参考文献

- [1] A.Ronzhin, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 931
- [2] S.An, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 594 (2008) 39
- [3] A.Crotty et al. Nucl. Instr. and Meth. A 602 (2009) 709
- [4] J-PARC E29 実験プロポーザル [http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/Proposal\\_e.html](http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/Proposal_e.html)
- [5] R.Santonico and R. Cardarelli, Nucl. Instr. and Meth. A 187 (1981) 337
- [6] J.G.Wang, Nucl. Instr. and Meth. A 508 (2003) 133
- [7] A.Zallo, Nucl. Instr. and Meth. A 456 (2000) 117
- [8] A.Bertolin, Nucl. Instr. and Meth. A 602 (2009) 631
- [9] G.Aielli, Nucl. Instr. and Meth. A 562 (2006) 92
- [10] B.Bonner, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 508 (2003) 181
- [11] A.N.Akindinov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 533 (2004) 74
- [12] CERN Courier (2011) 51(9)
- [13] G.Aielli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 533 (2004) 193
- [14] R.Arnaldi, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 451 (2000) 462
- [15] Wang X., et al., Chinese Phys. C 33 (2009) 114
- [16] M.C.S. Williams, Nucl. Instr. and Meth. A 478 (2002) 183
- [17] E. Cerron Zeballos, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 381 (1996) 569
- [18] W.Riegler, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 500 (2003) 144
- [19] C. Iacobaeus, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 513 (2003) 244
- [20] A.Crotty, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 337 (1994) 370
- [21] V. Ammosov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 576 (2007) 331
- [22] A.N.Akindinov, et al., Eur. Phys. J. s01 (2004) s325
- [23] C. Lippmann and W.Riegler, Nucl. Instr. and Meth. A 517 (2004) 54

- [24] A.N.Akindinov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 532 (2004) 562
- [25] A.Blanco, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 485 (2002) 328
- [26] M.Abbrescia, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 593 (2008) 263
- [27] D.Gonzalez-Diaz, Nucl. Instr. and Meth. A 661 (2012) 172
- [28] V.V.Ammosov, et al., Instr. and Exp. Tech. 53 (2010) 175
- [29] Y.J.Sun, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 593 (2008) 307
- [30] H. Alvarez, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 535 (2004) 277
- [31] A. Schuttauf, et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 158 (2006) 52
- [32] M.Bogomilov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 508 (2003) 152
- [33] 日本板硝子株式会社 HP <http://www.nsg.co.jp/products/display/utf.html>
- [34] P.Fonte, IEEE Trans. Nucl. Sci. 49 (2002) 881
- [35] ESD EMI エンジニアリング株式会社 HP <http://www.esd-emi.com/>
- [36] ESD EMI エンジニアリング株式会社 HP  
[http://www.eeec.co.jp/j/products/conductive\\_tape.html](http://www.eeec.co.jp/j/products/conductive_tape.html)
- [37] ALICE Technical Design Report of the TOF  
<http://aliweb.cern.ch/Documents/TDR/index.html>
- [38] TORAY 銀鱗 [http://www.torayfishing.net/products/mitiito/miti\\_a008.html](http://www.torayfishing.net/products/mitiito/miti_a008.html)
- [39] サンライン クインスター <http://www.sunline.co.jp/catalog/all/queenstar.html>
- [40] ユニチカ ゲンター <http://www.unitika.co.jp/fishing/products/harisu/harisu/gt.html>
- [41] M.C.S. Williams Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 61B (1998) 250
- [42] A.Schuttauf, et al., GSI sci. rep. (2003) 231
- [43] PMT アンブ KN2104 <http://www.kaizuworks.co.jp/2104-1a.htm>
- [44] ディスクリミネーター Phillips711 <http://www.phillipsscientific.com/pdf/711ds.pdf>
- [45] TDC Lecroy 1875A  
[http://teacher.pas.rochester.edu/Research/PHOBOS/  
TOFElectronics/PhobosFastbus/Manuals/1875/1875a.html](http://teacher.pas.rochester.edu/Research/PHOBOS/TOFElectronics/PhobosFastbus/Manuals/1875/1875a.html)
- [46] TDC GNC-040 <http://www.gn-d.com/guest/gnc040.pdf>
- [47] ADC Lecroy 4300B <http://cdn.lecroy.com/files/manuals/4300bman.pdf>



- [48] ADC Repic RPC-022  
[http://www.repic.co.jp/contents/products/repic/seihin/rpc\\_022.html](http://www.repic.co.jp/contents/products/repic/seihin/rpc_022.html)
- [49] A.Akindinov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 456 (2003) 16
- [50] C. Williams Talk on CERN Detector Seminar  
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=149006>
- [51] F.Anghinolfi, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 533 (2004) 183
- [52] DRS4 チップ PSI 研究所 HP <http://drs.web.psi.ch/>
- [53] SPring-8 HP セベラルバンチモード対応表  
[http://www.spring8.or.jp/ja/users/operation\\_status/bunch\\_mode/](http://www.spring8.or.jp/ja/users/operation_status/bunch_mode/)