

修士論文

---

---

# MPPCを用いた大面積・高時間分解能 飛行時間測定器の開発

Development of a new time-of-flight counter  
with large area and high timing resolution using MPPC

---

---



TOHOKU  
UNIVERSITY

東北大学 大学院 理学研究科

物理学専攻

原子核物理研究室

藤原 友正

令和3年



# MPPC を用いた大面積・高時間分解能飛行時間測定器の開発

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核物理研究室

藤原 友正

## 1 研究背景と目的

クォーク 3 個によって構成されるバリオンのうち、 $s$  クォークを少なくとも 1 つ含んだものをハイペロン、ハイペロンを含む原子核をハイパー核という。我々は特に  $s$  クォークを 1 つ含んだ最も軽いハイペロンである  $\Lambda$  粒子を含む  $\Lambda$  ハイパー核を研究対象としている。 $\Lambda$  ハイパー核はこれまでに質量数  $A = 209$  までの幅広い質量領域でその性質が研究されてきたが、 $A = 3$  の最も軽い  $\Lambda$  ハイパー核である  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  に対する精密測定が求められている。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  はハイパー核実験の黎明期より泡箱や原子核乾板により観測されており、重水素原子核に  $\Lambda$  粒子が非常に浅く ( $B_{\Lambda} = 130 \text{ keV}$ ) 束縛したハイパー核である [1]。そのため、 $\Lambda$  粒子とコア核間に働く相互作用が小さいため、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命は自由空間での  $\Lambda$  粒子の寿命 ( $\tau = 263.2 \text{ ps}$ ) と同程度であると理論予想されており [2]、測定結果もこれを支持するものであった [3]。しかし、近年、重イオン衝突を用いたハイパー核実験により、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の  $B_{\Lambda}$  はより深く寿命も短いとする結果が相次いで報告された [4-6]。一方で、同様の手法を用いながらも相反する結果も報告されており [7]、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を取り巻く状況は混迷を極めてしている。このような状況を打破すべく、我々はこれまでとは異なる手法 (“ $\gamma, K^+$ ” 反応による  $\Lambda$  ハイパー核直接寿命測定” を東北大学電子光理学研究センター (ELPH) で計画している。

この実験セットアップを図 1 に示した。ELPH の BST-ring 中の  $1.3 \text{ GeV}$  周回電子からの制動放射光子を液体  ${}^3\text{He}$  標的に照射し、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  ハイパー核を生成する。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  生成時に対となって生成される  $K^+$  中間子と  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  崩壊時に放出される  $\pi^-$  中間子を同時計測し、その時間差を測定することで  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命を “直接” 求めることができる。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の同定は、式 (1) を用いてその質量  $M_{\Lambda\text{H}}$  を求めることで行う (Missing mass 法)。

$$M_{\Lambda\text{H}} = \sqrt{(M_{\text{He}} + E_{\gamma} - E_{K^+})^2 - (\mathbf{p}_{\gamma} - \mathbf{p}_{K^+})^2} \quad (1)$$

ここで  $M_{\text{He}}$  は標的核の質量、 $E_{\gamma} = |\mathbf{p}_{\gamma}|$  は光子標識化装置で測定した光子のエネルギー、 $E_{K^+}$  及び  $\mathbf{p}_{K^+}$  は既設の磁

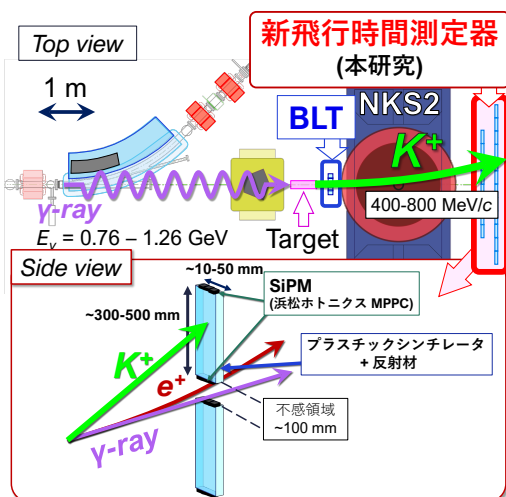


図 1: 実験セットアップ概略及び新飛行時間測定器基礎デザイン概念図。NKS2 上流側の検出器 (BLT) との飛行時間により  $K^+$  を同定する。

気スペクトロメータ NKS2 で測定した  $K^+$  中間子のエネルギー及び運動量である。この実験において最も重要な点の一つは、大量に存在する  $\pi, p$  から如何に  $K^+$  を弁別できるかにある。そのため、NKS2 の上流と下流にそれぞれ高時間分解能検出器を設置し、その飛行時間 (TOF) を測定することで  $\pi - K - p$  弁別を行う。既存の検出器は時間分解能が十分ではないため、新規に飛行時間測定器を開発する必要があった。NKS2 電磁石の複雑な漏れ磁場中でも十分な時間分解能を持つ大面積な飛行時間測定器を光電子増倍管 (PMT) を用いて実現することは非常に難しい。そこで本研究では SiPM (浜松ホトニクス MPPC) を光検出器として採用し、シンチレーション検出器の形状・反射材等が時間分解能に与える影響を調査した。その上で新飛行時間測定器として最適なプロトタイプの開発を行った。

## 2 新飛行時間測定器に対する要求性能と基礎設計

新飛行時間測定器の要求性能は以下の通りである。1.  $400 - 800 \text{ MeV}/c$  の  $K^+/\pi^+$  を  $5\sigma$  で弁別可能な時間分解能 ( $\sigma < 150 \text{ ps}$ )。2. NKS2 間口と同程度の面積 (高さ  $0.8 \text{ m} \times$  幅  $1.6 \text{ m}$ )。3. 光子ビームからの  $e^+/e^-$  対生成事象が大部分を占める領域に物質を配さない。4. NKS2 の漏れ磁場下 ( $\sim 0.1 \text{ T}$ ) での安定した動作。以上の要求を満たすものとして光子ビーム平面の上下に  $\sim$  数 cm 幅のシンチレータを並べ各々の両端に MPPC を光検出器として接続する基礎デザインを採用した (図 1 下部を参照)。具体的な構成を決めるため、プラスチックシンチレータのサイズや種類、反射材、MPPC の構成 (個数・接続方法・種類) など時間分解能の関係について定量的な調査を行った。

## 3 試作機による基礎データ収集

前述のように、新飛行時間測定器の構成の最適化を目的とし、様々な条件のもと、時間分解能の調査を  ${}^{90}\text{Sr}/{}^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源

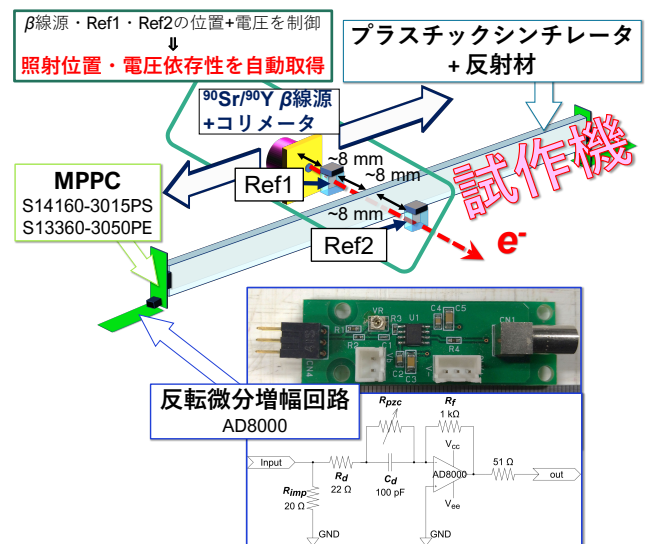


図 2:  ${}^{90}\text{Sr}/{}^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源を用いた基礎データ収集でのセットアップ。

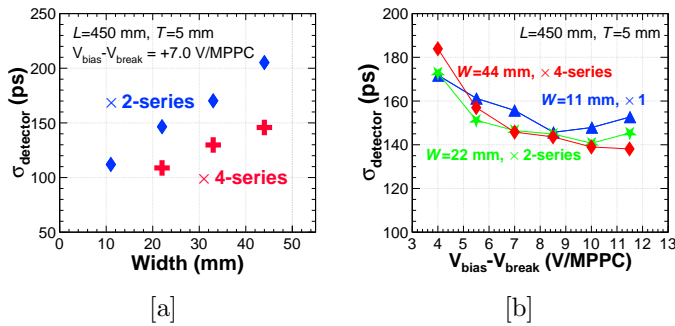


図 3: プラスチックシンチレータの幅依存性測定結果。[a]: 同じ印加電圧下での時間分解能の幅依存性。幅の増加に伴う時間分解能の悪化が確認された。[b]: シンチレータ断面積と MPPC の面積の比を等しくした場合の印加電圧依存性。いずれの組合せも同程度の時間分解能を示した。

を用いて行った。このデータ収集でのセットアップを図 2 に示した。製作した試作機はシンチレータ・MPPC・増幅回路より構成される。特に増幅回路は MPPC を用いた高時間分解能検出器での使用実績のあるもの [8] を採用した。試作機の前後に 2 つのリファレンス検出器 (Ref1・Ref2、サイズは共に  $1.5^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$ 、Eljen EJ-230) を配置しデータ収集のトリガーに組み込むことで  $\beta$  線が試作機を貫通したことを保証した。更に、MPPC の印加電圧及び  $\beta$  線源の位置を自動制御可能なシステムを製作し、系統的なデータ収集とその自動化を可能とした。試作機の固有時間分解能  $\sigma_{\text{detector}}$  はタイムウォークの補正を行った後、各検出器間の飛行時間 (TOF) 分布をガウス関数でフィットし得られた  $\sigma$  から式 (2) を用いて行った。ここで  $\sigma_{\text{Ref1ToF}}$ ,  $\sigma_{\text{ToFRef2}}$ ,  $\sigma_{\text{Ref1Ref2}}$  は各検出器間の TOF の時間分解能である。

$$\sigma_{\text{detector}} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\text{Ref1ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToFRef2}}^2 - \sigma_{\text{Ref1Ref2}}^2} \quad (2)$$

本論文では、形状や MPPC 印加電圧等様々な要素と時間分解能の依存性を記述したが、ここでは印加電圧  $V_{\text{bias}}$  及びシンチレータ幅についての結果を示す。

#### MPPC の個数依存性

MPPC の個数や接続方法 (直列/並列接続) に関して比較を行った。その結果、MPPC の個数を増やすことで時間分解能が向上すると共に、直列接続を用いると並列接続よりも良い時間分解能が得ることができ、特に  $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$  (EJ-230) と MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続の構成で  $\sigma < 100 \text{ ps}$  が達成できることがわかった。

#### シンチレータの幅依存性

シンチレータの幅を 11 mm – 44 mm の範囲で検討した結果、幅の大きなシンチレータでは時間分解能が悪化した (図 3[a])、シンチレータの断面積に対して MPPC が覆う面積の比率によって時間分解能が決まることがわかった。 (図 3[b])。これによって幅 ~ 40 mm のシンチレータでも要求性能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を達成可能であるとわかった。

#### その他

様々な種類のシンチレータの比較からシンチレータの特性の寄与を調査した結果、発光量と立上り時間のバランスが重要であるとわかった。このほか、反射材や MPPC の種類による違いも検討を行い、特にアルミナイズドマイラーと S13360-3050PE 4 個直列接続の組合せで  $\sigma_{\text{detector}} \sim 100 \text{ ps}$  となるという結果を得た。

また、アンプ回路の構成も検討した。LVDS コンパレータを導入し Time-Over-Threshold (TOT) の取得を検討した。また、アンプ後段にショットキーバリアダイオード (Infineon

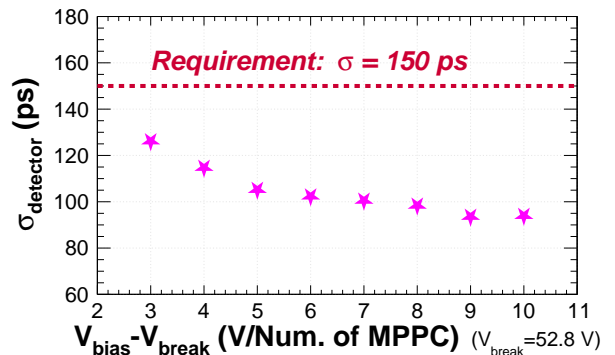


図 4: 本研究で決定したプラスチックシンチレータの時間分解能評価。  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を達成した。

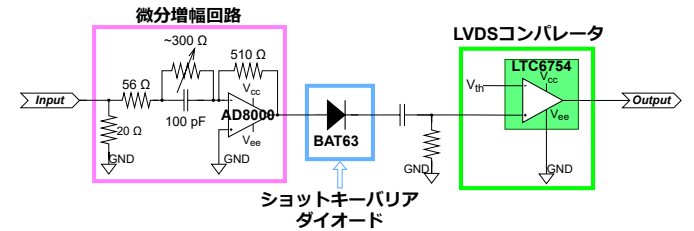


図 5: 採用した回路部分の構成。微分回路と LVDS コンパレータを組み合わせたものを採用した。

BAT63) を実装することでアナログ信号に見られたテール部分を約 ~ 25% まで抑制できるとわかった。

## 4 新飛行時間測定器の構成

前節までの結果を踏まえて、新飛行時間測定器の構成を決定した。プラスチックシンチレータとして  $5^T \times 50^W \times 400^L \text{ mm}^3$  (EJ-230) を採用し、用いる反射材はアルミナイズドマイラーとした。これらと MPPC (S13360-3050PE、4 個直列接続) を組み合わせて  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源を用いて時間分解能の評価を行った結果、 $\sigma < 150 \text{ ps}$  の時間分解能が達成可能であることを確認できた (図 4)。MPPC は S13360-3050PE を採用した。回路部分は反転微分増幅回路と BAT63、LVDS コンパレータを組み合わせた構成とした (図 5)。

## 5 まとめと今後の展望

ELPH における  $\Lambda$  ハイパー核寿命測定実験のための、新飛行時間測定器の開発を行った。プラスチックシンチレータと MPPC を用いて試作機を製作し、要求性能を満たす構成の検討を行った。この結果を受けて回路構成及びシンチレータサイズを決定した。特にシンチレータ部分は要求性能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を達成可能であることを確認した。今後、回路部分を含めた実機の建造を行い 2022 年 3 月に ELPH 第 2 実験室にて性能評価を実施する予定である。

## 参考文献

- [1] M. Juric *et al.*, Nuclear Physics **B52** (1973) 1-30.
- [2] H. Kamada *et al.*, Phys. Rev. C **57** (1998), 1595
- [3] R. J. Prem and P. H. Steinberg, Phys. Rev. **136**, B1803., G. Keyes *et al.*, Phys. Rev. Lett. **20** (1968) 819., R. E. Philips and J. Schneps, Phys. Rev. **180** (1969) 1307., G. Bohm *et al.*, Nucl. Phys. B16 (1970) 46-52., G. Keyes *et al.*, Phys. Rev. **D 1** (1970) 66., G. Keyes *et al.*, Nucl. Phys. **B 67** (1973) 269.
- [4] The STAR collaboration, Science **328** (2010) 58-62.
- [5] C. Rappold *et al.*, Nucl. Phys. **A 913** (2013) 170.
- [6] ALICE Collaboration, Phys. Rev. **B 754** (2016) 360-372.
- [7] L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration), Phys. Rev. **C 97**, 054909., ALICE Collaboration, Phys. Lett. **B 797** (2019) 134905.
- [8] 佐々木 貴之 修士論文 東北大学 (2015), 外山 裕一 修士論文 東北大学 (2017), 上原 圭太 修士論文 東北大学 (2020)

# 概要

クォーク 3 個によって構成されるバリオンのうち、 $s$  クォークを少なくとも 1 つ含んだものをハイペロン、ハイペロンを含む原子核をハイパー核という。我々の研究グループでは、特に  $s$  クォークを 1 つ含んだ最も軽いハイペロンである  $\Lambda$  粒子を含む  $\Lambda$  ハイパー核を研究対象としている。 $\Lambda$  ハイパー核はこれまでに質量数  $A = 209$  までの幅広い質量領域で、質量分光実験が展開されその性質が研究されてきた。しかしその一方で、 $A = 3$  の最も軽い  $\Lambda$  ハイパー核である  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  についてはいまだ不明瞭な点が多く、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  に対する精密測定が求められている。

${}^3_{\Lambda}\text{H}$  はハイパー核実験の黎明期より泡箱や原子核乾板により観測され、その性質が研究されてきた。これらの研究による  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の束縛エネルギー  $B_{\Lambda}$  の測定から、 $B_{\Lambda} = 130 \text{ keV}$  であるという結果が得られ、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  は重水素原子核に  $\Lambda$  粒子が非常に浅く束縛したハイパー核であると考えられた。そのため、 $\Lambda$  粒子とコア核間に働く相互作用が小さいために、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命は自由空間での  $\Lambda$  粒子の寿命 ( $\tau = 263.2 \text{ ps}$ ) と同程度であると理論予想され、測定結果もこれを支持するものであった。しかし、2010 年代以降、重イオン衝突を用いたハイパー核実験により、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の  $B_{\Lambda}$  はより深く寿命も短いとする結果が相次いで報告された。その一方で、同様の手法を用いながらも異なる実験グループが相反する結果を報告しており、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を取り巻く状況は混迷を極めてしている。このような状況を打破すべく、我々はこれまでとは異なる手法“( $\gamma, K^+$ ) 反応による  $\Lambda$  ハイパー核直接寿命測定”を東北大学電子光理学研究センター (ELPH) で計画している。

この実験では、ELPH の 1.3 GeV BST-ring の周回電子より制動放射により取り出した光子ビームを液体  ${}^3\text{He}$  標的に照射し、 ${}^A\text{Z}(\gamma, K^+){}^A_{\Lambda}(Z-1)$  反応によって  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を生成する。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  生成時に対となって生成される  $K^+$  中間子と  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の弱崩壊時に放出される  $\pi^-$  中間子を同時計測し、その時間差を測定することで  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命を“直接”求めることができる。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の同定は、欠損質量 (Missing mass) 法を用いて行う。これは、標的核である  ${}^3\text{He}$  原子核の質量、BST-ring の偏向磁石中に設置される光子標識化装置で測定される光子のエネルギー、ELPH 既設の磁気スペクトロメータ NKS2 で測定される  $K^+$  中間子の運動量を用いて運動学からハイパー核の質量を再構成する手法である。この手法を用いる上で重要な点の 1 つは如何に精度よく  $K^+$  を同定できるかにある。これに対して、NKS2 の上流と下流にそれぞれ高時間分解能検出器を設置し、その飛行時間 (TOF) を用いて大量に存在する  $\pi, p$  から  $\pi - K - p$  弁別を行う。しかし、既存の飛行時間測定器は時間分解能が十分ではなく、新規に飛行時間測定器を開発する必要があった。

そこで、本研究では NKS2 下流に新規に設置する新飛行時間測定器の開発を行った。新飛行時間測定器に対しては、 $\pi - K - p$  弁別、特に  $K^+/\pi^+$  の弁別が可能な時間分解能、NKS2 間口と同程度の大面積、NKS2 の漏れ磁場下における安定した動作のそれぞれを満たすことが求められる。これらの要求を満足する飛行時間測定器を実現するために、SiPM(浜松ホトニクス MPPC) を光検出器として採用し、シンチレーション検出器の形状・反射材等が時間分解能に与える影響を調査した。その上で新飛行時間測定器として最適なプロトタイプ検出器の開発を行った。最終的に決定したシンチレーション検出器の構成は  ${}^{90}\text{Sr}/{}^{90}\text{Y}\beta$  線源を用いた性能評価の結果、要求される時間分解能を達成可能であることが確認された。

# 目次

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 概要           |   | i         |
| <b>第 1 章</b> | <b>ハイパー核物理</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1          | ハイパー核とは . . . . .   | 1         |
| 1.2          | これまでのハイパー核研究の歴史 . . . . .   | 3         |
| 1.3          | ハイパー核反応分光実験 . . . . .   | 5         |
| 1.3.1        | $(K^-, \pi^-)$ 反応 . . . . .   | 5         |
| 1.3.2        | $(\pi^+, K^+)$ 反応 . . . . .   | 5         |
| 1.3.3        | $(e, e'K^+)$ 反応 . . . . .   | 6         |
| 1.3.4        | $(\gamma, K^+)$ 反応 . . . . .  | 8         |
| 1.4          | ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ puzzle . . . . .   | 9         |
| 1.4.1        | ハイパー核の崩壊 . . . . .  | 9         |
| 1.4.2        | ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ . . . . .  | 9         |
| 1.4.2.1      | 重イオン衝突実験における ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命測定方法 . . . . .                                      | 11        |
| 1.5          | ELPH における ${}^A_Z(\gamma, K^+){}^A_{\Lambda}(Z-1)$ 反応を用いた $\Lambda$ ハイパー核直接寿命測定実験 . . . . . | 13        |
| 1.5.1        | 実験原理 . . . . .  | 13        |
| 1.5.2        | 東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) . . . . .   | 13        |
| 1.5.3        | 光子標識化装置: Tagger . . . . .   | 14        |
| 1.5.4        | Neutral Kaon Spectrometer 2(NKS2) . . . . .   | 17        |
| 1.5.4.1      | 680 電磁石 . . . . .   | 17        |
| 1.5.4.2      | Vertex Drift Chamber (VDC) . . . . .  | 18        |
| 1.5.4.3      | Cylindrical Drift Chamber (CDC) . . . . .   | 19        |
| 1.5.4.4      | Inner Hodoscope (IH) . . . . .  | 19        |
| 1.5.4.5      | Outer Hodoscope (OH) . . . . .  | 19        |
| 1.5.5        | 実験手法 . . . . .  | 20        |
| 1.5.5.1      | ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の同定方法 . . . . .  | 21        |
| 1.5.5.2      | 崩壊粒子の識別 . . . . .   | 21        |
| 1.5.5.3      | 寿命の決定 . . . . .   | 24        |
| 1.5.6        | 新粒子飛行時間測定器に対する要求性能 . . . . .  | 26        |
| 1.6          | 本研究の目的 . . . . .  | 26        |
| <b>第 2 章</b> | <b>新飛行時間検出器の基礎設計</b>  | <b>27</b> |
| 2.1          | 検出器への要求性能とデザイン . . . . .  | 27        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 2.1.1        | $K^+/\pi^+$ 弁別が十分可能な時間分解能 . . . . .  | 27        |
| 2.1.2        | NKS2 スペクトロメータの間口を覆う大面積 . . . . .   | 34        |
| 2.1.3        | 電子・陽電子対生成のバックグラウンドの回避 . . . . .  | 35        |
| 2.1.4        | 磁場中における安定した動作 . . . . .  | 38        |
| 2.1.5        | 検出器の基礎デザイン概要 . . . . .   | 38        |
| 2.2          | 光検出器 MPPC . . . . .  | 41        |
| 2.2.1        | 動作原理 . . . . .   | 41        |
| 2.2.2        | 特性 . . . . .   | 43        |
| <b>第 3 章</b> | <b><math>\beta</math> 線源を用いた MPPC 読み出し方法・シンチレータサイズの最適化</b>                         | <b>48</b> |
| 3.1          | 目的 . . . . .   | 48        |
| 3.2          | 評価項目 . . . . .   | 48        |
| 3.3          | $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . . . . .                                | 49        |
| 3.4          | 試作機概要 . . . . .  | 51        |
| 3.4.1        | プラスチックシンチレータの端面の処理 . . . . .   | 51        |
| 3.4.2        | 増幅回路 . . . . .   | 51        |
| 3.5          | 実験セットアップ . . . . .   | 53        |
| 3.5.1        | リファレンス用検出器 . . . . .   | 55        |
| 3.5.2        | データ収集回路系 . . . . .   | 56        |
| 3.5.2.1      | トリガー . . . . .   | 58        |
| 3.5.2.2      | アナログ信号の処理 . . . . .  | 59        |
| 3.5.3        | 検出器の調整 . . . . .   | 60        |
| 3.6          | 解析方法 . . . . .   | 61        |
| 3.6.1        | ペDESTAL情報による QDC の較正 . . . . .   | 61        |
| 3.6.2        | TDC 情報によるイベント選択 . . . . .  | 62        |
| 3.6.3        | タイムウォークコレクション . . . . .  | 63        |
| 3.6.4        | 時間分解能の導出 . . . . .   | 65        |
| 3.6.4.1      | IDEJ230-I300-1、EJ230-I300-2、EJ230-I300-3 のプラスチックシンチレータを用いた場合の固有時間分解能導出方法 . . . . . | 66        |
| 3.6.4.2      | そのほかのプラスチックシンチレータを用いた場合の固有時間分解能導出方法 . . . . .                                      | 66        |
| 3.7          | 結果 . . . . .   | 66        |
| 3.7.1        | 電荷分布に対する MPPC 印加電圧依存性 . . . . .  | 67        |
| 3.7.2        | 時間分解能に対する MPPC 印加電圧依存性 . . . . .   | 70        |
| 3.7.3        | MPPC 読み出し方法依存性 . . . . .   | 71        |
| 3.7.3.1      | 出力信号の比較 . . . . .  | 72        |
| 3.7.3.2      | 時間分解能 . . . . .  | 72        |
| 3.7.4        | 時間分解能に対するプラスチックシンチレータの形状依存性 . . . . .  | 76        |
| 3.7.4.1      | 長さ依存性 . . . . .  | 77        |
| 3.7.4.2      | 厚さ依存性 . . . . .  | 77        |
| 3.7.4.3      | 幅依存性 . . . . .   | 78        |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| 3.7.5        | シンチレータの形状と MPPC 個数との関係 . . . . .                                | 80         |
| 3.7.6        | ディスクリミネータ閾値電圧依存性 . . . . .                                      | 82         |
| 3.7.7        | $\beta$ 線通過位置依存性 . . . . .                                      | 85         |
| 3.7.8        | 読み出し基板の設計による影響の見積もり . . . . .                                   | 90         |
| 3.7.9        | プラスチックシンチレータの種類依存性 . . . . .                                    | 92         |
| 3.7.10       | 反射材依存性 . . . . .  | 96         |
| 3.7.11       | MPPC の種類依存性 . . . . .   | 98         |
| 3.8          | 増幅回路の最適化 . . . . .  | 107        |
| 3.8.1        | 用いたアンプ回路 . . . . .  | 107        |
| 3.8.2        | TOT (Time-Over-Threshold) . . . . .                             | 107        |
| 3.8.3        | 測定セットアップ . . . . .  | 108        |
| 3.8.4        | 解析方法 . . . . .  | 110        |
| 3.8.5        | 結果 . . . . .  | 115        |
| 3.8.5.1      | 回路パラメータの依存性 . . . . .   | 115        |
| 3.8.5.2      | Time-over-threshold(TOT) を用いた場合の時間分解能 . . . . .                 | 118        |
| 3.8.5.3      | 積分回路の検討 . . . . .   | 120        |
| 3.8.5.4      | ショットキーバリアダイオードの検討 . . . . .                                     | 121        |
| 3.9          | $\beta$ 線源を用いた MPPC 読み出し方法・シンチレータサイズ最適化のまとめ . . . . .           | 126        |
| <b>第 4 章</b> | <b>陽電子ビームを用いた性能評価試験</b>   | <b>128</b> |
| 4.1          | 目的 . . . . .  | 128        |
| 4.2          | 本実験で使用した陽電子ビーム . . . . .  | 128        |
| 4.3          | 本実験における試作機概要 . . . . .  | 129        |
| 4.4          | 本実験におけるリファレンス検出器 . . . . .                                      | 129        |
| 4.5          | 実験セットアップ . . . . .  | 131        |
| 4.5.1        | 検出器群の配置 . . . . .   | 131        |
| 4.5.2        | データ収集回路 . . . . .   | 133        |
| 4.6          | 解析方法 . . . . .  | 133        |
| 4.6.1        | イベント選択 . . . . .  | 133        |
| 4.6.2        | 時間分解能解析 . . . . .   | 135        |
| 4.7          | 結果と考察 . . . . .   | 136        |
| 4.7.1        | MPPC 印加電圧 ( $V_{bias}$ )・ディスクリミネータ閾値 ( $V_{th}$ ) 依存性 . . . . . | 136        |
| 4.7.2        | ビーム照射位置依存性 . . . . .  | 139        |
| 4.7.3        | イベント選択の条件による時間分解能への影響 . . . . .                                 | 141        |
| 4.7.4        | $\beta$ 線源を用いた測定との比較 . . . . .                                  | 143        |
| 4.7.5        | モンテカルロシミュレーションを用いたエネルギー損失の見積もり . . . . .                        | 145        |
| 4.7.5.1      | シミュレーションのセットアップ . . . . .                                       | 146        |
| 4.7.5.2      | シミュレーション結果 . . . . .  | 148        |
| 4.8          | 陽電子ビームを用いた性能評価試験のまとめ . . . . .                                  | 150        |
| <b>第 5 章</b> | <b>新飛行時間検出器の設計及び性能評価</b>  | <b>151</b> |



---

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| 5.1          | 新飛行時間検出器の設計 . . . . .   | 151        |
| 5.1.1        | シンチレータの構成 . . . . .   | 151        |
| 5.1.2        | 回路部分の設計 . . . . .   | 151        |
| 5.1.2.1      | アンプ回路の設計 . . . . .  | 151        |
| 5.1.2.2      | MPPC の読み出し方法 . . . . .  | 153        |
| 5.2          | シンチレータ部分の性能評価 . . . . .                                       | 157        |
| <b>第 6 章</b> | <b>まとめと今後の課題</b>  | <b>160</b> |
| 6.1          | $^{90}\text{Sr}^{90}\text{Y}\beta$ 線源による試作機の基礎データ収集 . . . . . | 160        |
| 6.2          | 陽電子ビームによる性能評価 . . . . .                                       | 161        |
| 6.3          | 新飛行時間測定器の構成 . . . . .   | 161        |
| 6.4          | 今後の課題 . . . . .   | 161        |
| <b>謝辞</b>    |   | <b>163</b> |
| <b>付録 A</b>  | <b><math>\beta</math> 線源による測定において用いた各種シンチレータに関する情報</b>        | <b>166</b> |
| A.1          | 納期及び価格について . . . . .  | 166        |
| A.2          | 各種シンチレータの特性について . . . . .                                     | 166        |
| <b>参考文献</b>  |   | <b>168</b> |

# 目次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | バリオン 8 重項とバリオン 10 重項 . . . . .  | 2  |
| 1.2  | これまでに測定が遂行された $\Lambda$ ハイパー核 . . . . .   | 6  |
| 1.3  | 代表的な $\Lambda$ 粒子生成反応の素過程の概念図 . . . . .   | 7  |
| 1.4  | 代表的な $\Lambda$ 粒子生成反応における入射粒子の運動量と $\Lambda$ 粒子の反跳運動量の相関 . . . . .                                      | 8  |
| 1.5  | これまでに実施された主な ${}^3_\Lambda\text{H}$ の寿命測定実験の結果 . . . . .  | 10 |
| 1.6  | HypHI コラボレーションによる重イオン衝突実験でのセットアップ概念図 . . . . .  | 11 |
| 1.7  | ${}^3_\Lambda\text{H}$ 事象の不変質量分布 . . . . .  | 12 |
| 1.8  | ${}^3_\Lambda\text{H}$ 事象の (崩壊距離) / $\beta\gamma$ 分布 . . . . .  | 12 |
| 1.9  | 実験手法の概念図 . . . . .  | 14 |
| 1.10 | ELPH 1.3 GeV BST-ring の概観 . . . . .   | 15 |
| 1.11 | 実験中のビーム電流の概念図 . . . . .   | 15 |
| 1.12 | 旧 Tagger の概念図 . . . . .   | 16 |
| 1.13 | 新 Tagger の検出器の配置 . . . . .  | 18 |
| 1.14 | NKS2 磁気スペクトロメータの概観 . . . . .  | 19 |
| 1.15 | IH の概略図 . . . . .   | 20 |
| 1.16 | OH の配置 . . . . .  | 21 |
| 1.17 | 予定している実験セットアップ . . . . .  | 22 |
| 1.18 | 運動エネルギー $E_{kin}$ とプラスチックシンチレータ中での単位長さ当たりのエネルギー損失の相関 . . . . .  | 24 |
| 2.1  | 粒子の飛跡長の見積もりにおいて仮定したセットアップ . . . . .   | 28 |
| 2.2  | 過去に NKS2 を用いて行われた実験で得られた反応点分布の一例 . . . . .  | 30 |
| 2.3  | セットアップの概念図 . . . . .  | 31 |
| 2.4  | シミュレーション内で生成した粒子の運動量分布とビーム軸に対する角度分布 . . . . .   | 31 |
| 2.5  | VD0 でのイベント選択の例 . . . . .  | 32 |
| 2.6  | NKS2 の検出器システムでの運動量分解能の評価 . . . . .  | 33 |
| 2.7  | 異なる飛行時間分解能 $\sigma_{TOF}$ での質量二乗分布の比較 . . . . .   | 34 |
| 2.8  | 質量二乗分布上で選択した領域の事象のうち $K^+$ の事象が占める比の $\sigma_{TOF}$ 依存性 . . . . .                                       | 35 |
| 2.9  | 質量二乗分布上で選択した領域の事象のうち $K^+$ の事象と $\pi^+$ の事象の比 $N_{\pi^+}/N_{K^+}$ の飛行時間分解能 $\sigma_{TOF}$ 依存性 . . . . . | 35 |
| 2.10 | 680 電磁石をビーム上流方向から見込んだ断面図 . . . . .  | 36 |
| 2.11 | OHVL2 の配置 . . . . .   | 37 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.12 | 2010年10月の実験時のデータより得られた OHVL2 での鉛直位置のヒット数分布 . . .                                   | 38 |
| 2.13 | 有限要素法を用いた 3次元磁場計算で得られた NKS2 電磁石の磁場分布 . . . . .                                     | 39 |
| 2.14 | 新飛行時間測定器の基礎デザイン . . . . .  | 40 |
| 2.15 | MPPC の基本構造の概念図 . . . . .   | 41 |
| 2.16 | アバランシェ増倍の概念図 . . . . .   | 42 |
| 2.17 | 本研究で使用した MPPC の写真 . . . . .  | 44 |
| 2.18 | 本研究で用いた MPPC の光子検出効率 (PDE) . . . . .   | 45 |
| 2.19 | 本研究で用いた MPPC の増倍率の印加電圧依存性 . . . . .  | 46 |
| 2.20 | 本研究で用いた MPPC の増倍率の印加電圧依存性 . . . . .  | 46 |
| 3.1  | $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . . . . .                                | 50 |
| 3.2  | 本測定において使用した試作機の概念図 . . . . .   | 52 |
| 3.3  | $\beta$ 線源を用いた測定において使用した MPPC 基板の一例 . . . . .                                      | 52 |
| 3.4  | プラスチックシンチレータの端面の処理の一例 . . . . .  | 53 |
| 3.5  | 本測定で使用した増幅回路 . . . . .   | 54 |
| 3.6  | $\beta$ 線源を用いた測定におけるセットアップ概念図 . . . . .  | 55 |
| 3.7  | 本測定での実際のセットアップの実際の写真 . . . . .   | 55 |
| 3.8  | 本測定において使用したコリメータ . . . . .   | 56 |
| 3.9  | リファレンス検出器に用いたプラスチックシンチレータ . . . . .  | 57 |
| 3.10 | データ収集のための回路セットアップ . . . . .  | 57 |
| 3.11 | PM amp. を併用しない場合とした場合の比較 . . . . .   | 59 |
| 3.12 | ポールゼロ抵抗 ( $R_{pzc}$ ) によるオーバーシュート調整の一例 . . . . .                                   | 61 |
| 3.13 | 時間分解能の導出に係る解析の流れ . . . . .   | 61 |
| 3.14 | ペDESTAL分布の一例 . . . . .   | 62 |
| 3.15 | 各検出器での TDC 分布 . . . . .  | 63 |
| 3.16 | タイムウォークの概念図 . . . . .  | 64 |
| 3.17 | タイムウォークコレクションの一例 . . . . .   | 65 |
| 3.18 | MPPC での電荷分布 . . . . .  | 67 |
| 3.19 | QDC 分布評価の際のフィッティングの一例 . . . . .  | 68 |
| 3.20 | QDC 分布の MPV の印加電圧依存性 . . . . .   | 69 |
| 3.21 | 各電圧でのペDESTAL分布 . . . . .   | 70 |
| 3.22 | MPPC を S14160-3015PS を 2 個直列に接続した場合の印加電圧依存性 . . . . .                              | 71 |
| 3.23 | MPPC の個数・接続方法の検討のために用いた基板の回路図と実際の基板の写真 . . . . .                                   | 73 |
| 3.24 | 直列接続と並列接続での信号の比較 . . . . .   | 74 |
| 3.25 | $R_{pzc}$ を変化させた場合の出力波形 (MPPC S14160-3015PS を 4 個並列接続した場合) . . . . .               | 74 |
| 3.26 | ID EJ230-l300-2 のシンチレータに S14160-3015PS を複数個取り付けた場合の個数毎の印加電圧依存性 (直列接続の場合) . . . . . | 75 |
| 3.27 | ID EJ230-l300-2 のシンチレータに S14160-3015PS を複数個取り付けた場合の個数毎の印加電圧依存性 (並列接続の場合) . . . . . | 75 |
| 3.28 | MPPC の個数依存性 (直列接続・並列接続の比較) . . . . .   | 76 |
| 3.29 | プラスチックシンチレータの長さ依存性 . . . . .   | 77 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.30 | プラスチックシンチレータの厚さ依存性 (印加電圧依存性を含めた比較) . . . . .  | 78  |
| 3.31 | プラスチックシンチレータの厚さ依存性 (MPPC への印加電圧を固定した場合) . . . . .   | 79  |
| 3.32 | 様々な厚さのシンチレータを使用した場合の電荷量分布 ( $T = 3, 4, 5$ mm の場合) . . . . .   | 79  |
| 3.33 | 左右の MPPC での電荷量の MPV に対する厚さ依存性 . . . . .   | 80  |
| 3.34 | シンチレータの幅依存性 . . . . .   | 81  |
| 3.35 | シンチレータの幅依存性 (MPPC への印加電圧を固定した場合) . . . . .  | 82  |
| 3.36 | シンチレータ端面の面積と MPPC が覆う面積の比を等しくするような幅と個数の組合せ間での時間分解能の印加電圧依存性の比較 . . . . .                                   | 83  |
| 3.37 | シンチレータ断面積と MPPC の受光面の面積の比 $\epsilon_{MPPC}$ が等しくなる組合せでのシンチレータ幅依存性 (長さ 300 mm の場合) . . . . .               | 84  |
| 3.38 | シンチレータ断面積と MPPC の受光面の面積の比 $\epsilon_{MPPC}$ が等しくなる組合せでのシンチレータ幅依存性 (長さ 450 mm の場合) . . . . .               | 84  |
| 3.39 | 試作 ToF での波高測定ラインの信号と QDC ゲート信号 . . . . .  | 85  |
| 3.40 | $5^T \times 11^W \times 450^L$ mm <sup>3</sup> のシンチレータに S14160-3015PS を 2 個直列接続を組み合わせた時の閾値電圧依存性 . . . . . | 85  |
| 3.41 | $\beta$ 線照射位置依存性の測定における座標の定義 . . . . .  | 87  |
| 3.42 | $\beta$ 線照射位置依存性 (シンチレータ幅毎の比較) . . . . .  | 87  |
| 3.43 | $\beta$ 線照射位置依存性 (MPPC の個数毎の比較) . . . . .   | 88  |
| 3.44 | 鉛直方向の位置を変更した場合の $\beta$ 線照射位置依存性 . . . . .  | 89  |
| 3.45 | 新たに設計した MPPC 基板 . . . . .   | 90  |
| 3.46 | 基板による時間分解能の違いの比較 . . . . .  | 91  |
| 3.47 | New と Prev の各基板で MPPC を 1 又は 2 個実装する場合の配線方法の違い . . . . .  | 91  |
| 3.48 | 種類依存性の測定で使用したプラスチックシンチレータの発光の波長依存性 . . . . .  | 93  |
| 3.49 | 推定される検出光子数の波長分布 . . . . .   | 93  |
| 3.50 | 推定される検出光子数 (全体の積分) . . . . .  | 94  |
| 3.51 | 各シンチレータでの時間分解能に対する印加電圧依存性 . . . . .   | 95  |
| 3.52 | 各シンチレータでの時間分解能 . . . . .  | 95  |
| 3.53 | 各種シンチレータにおける両側の MPPC での QDC 分布の比較 . . . . .   | 95  |
| 3.54 | 各種種類のシンチレータでの QDC 分布の MPV 値の比較 . . . . .  | 96  |
| 3.55 | 反射材による依存性の検討で用いた各種反射材 . . . . .   | 97  |
| 3.56 | 時間分解能の反射材依存性 . . . . .  | 98  |
| 3.57 | 各反射材を用いた場合の QDC 分布 . . . . .  | 99  |
| 3.58 | S13360-3050PE を用いた測定において使用した MPPC 基板 . . . . .  | 100 |
| 3.59 | S13360-3050PE を用いた測定において使用したアンプ回路 . . . . .   | 102 |
| 3.60 | S13360-3050PE を用いた場合の信号の一例 . . . . .  | 103 |
| 3.61 | S13360-3050PE を用いた場合の時間分解能に対する MPPC 印加電圧依存性 . . . . .   | 104 |
| 3.62 | S13360-3050PE を用いた場合のディスクリミネータ閾値電圧依存性 . . . . .   | 105 |
| 3.63 | S13360-3050PE を用いた場合の時間分解能に対する印加電圧依存性 ( $V_{th}$ の値毎の比較) . . . . .  | 105 |
| 3.64 | S13360-3050PE を用いた場合の時間分解能に対するディスクリミネータ閾値電圧と MPPC 印加電圧との相関 . . . . .                                      | 106 |
| 3.65 | S13360-3050PE を用いた場合の $\beta$ 線照射位置依存性 . . . . .  | 106 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.66 | Time-over-threshold を利用した波高情報取得の概念図   | 107 |
| 3.67 | 回路最適化の測定でのセットアップ  | 108 |
| 3.68 | 回路最適化の測定でのデータ収集回路   | 109 |
| 3.69 | TOT 測定において用いた反転回路   | 110 |
| 3.70 | LVDS コンパレータ回路   | 111 |
| 3.71 | LVDS FAN I/O 回路   | 112 |
| 3.72 | 回路最適化の測定での解析の一例   | 113 |
| 3.74 | 時間分解能に対するダンピング抵抗 $R_d$ の依存性   | 115 |
| 3.75 | 異なる $R_d$ の値毎の信号の比較   | 116 |
| 3.76 | 時間分解能に対する $R_{pzc}$ の依存性  | 116 |
| 3.77 | $R_{pzc}$ 依存性測定のうち pzc setting1 での $R_{pzc}$ 毎の波形の比較。                                   | 117 |
| 3.78 | $R_{pzc}$ 依存性測定 pzc setting2 のうち $R_{pzc} = 491.8\Omega$ での波形                           | 118 |
| 3.79 | 時間分解能に対するフィードバック抵抗 $R_f$ 依存性  | 118 |
| 3.80 | フィードバック抵抗 $R_f$ の値に対する波形  | 119 |
| 3.81 | TOF2 に対する TOT 及び QDC との相関   | 119 |
| 3.82 | QDC と TOT との相関  | 120 |
| 3.83 | 積分回路を導入した際の回路図  | 121 |
| 3.84 | 積分回路を導入した際の実際の波形  | 121 |
| 3.85 | 積分回路を導入した際の QDC-TOT 相関  | 122 |
| 3.86 | BAT63 及び BAT54 の順方向電圧 ( $V_F$ )-順方向電流 ( $I_F$ ) 特性                                      | 123 |
| 3.87 | ショットキーバリアードダイオードを実装した場合の波形の比較   | 124 |
| 3.88 | BAT63 の有無での <i>Signal</i> 対 <i>Tail</i> の比較   | 125 |
| 4.1  | 本実験で用いた試作機の一例の写真  | 130 |
| 4.2  | 陽電子ビームを用いた実験で用いたりファレンス検出器の写真  | 131 |
| 4.3  | 陽電子ビームを用いた実験でのセットアップの概略   | 132 |
| 4.4  | 検出器配置の俯瞰図   | 132 |
| 4.5  | 陽電子ビームを用いた実験でのデータ収集回路系  | 134 |
| 4.6  | Ref1-2 及び Ref2-2 における電荷量分布  | 135 |
| 4.7  | タイムウォークコレクション前後での飛行時間 (TOF)-電荷量 (charge) 相関   | 137 |
| 4.8  | $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$ のシンチレータと S14160-3015PS 4 個直列接続での印加電圧依存性     | 138 |
| 4.9  | $5^T \times 11^W \times 300^L \text{ mm}^3$ のシンチレータと S14160-3015PS 2 個直列接続での印加電圧依存性     | 138 |
| 4.10 | $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$ のシンチレータでの印加電圧依存性及び閾値電圧依存性                   | 140 |
| 4.11 | $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$ のシンチレータでの時間分解能に対する MPPC 印加電圧とディスクリミネータ閾値の相関 | 141 |
| 4.12 | $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ のシンチレータでの印加電圧依存性及び閾値電圧依存性                   | 142 |
| 4.13 | $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ のシンチレータでの時間分解能に対する MPPC 印加電圧とディスクリミネータ閾値の相関 | 143 |
| 4.14 | ビーム照射位置依存性における座標系の定義  | 143 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.15 | $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$ , MPPC S13360-3050PE 4 個直列接続の場合での時間分解能位置依存性 . . . . . | 144 |
| 4.16 | $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ , MPPC S13360-3050PE 2 個直列接続の場合での時間分解能位置依存性 . . . . . | 144 |
| 4.17 | 飛行時間構成時のイベント選択条件による違いの比較 . . . . .  | 145 |
| 4.18 | 陽電子ビームを用いた場合と $\beta$ 線源を用いた場合での電荷量分布の比較 (ヒストグラムの比較) . . . . .                                    | 146 |
| 4.19 | シミュレーションのセットアップ . . . . .   | 147 |
| 4.20 | 異なるエネルギーの荷電粒子を入射した場合のエネルギー損失の比較 . . . . .   | 149 |
| 5.1  | 新飛行時間測定器に用いるプラスチックシンチレータ . . . . .  | 152 |
| 5.2  | 本研究で決定したアンプ回路の構成 . . . . .  | 152 |
| 5.3  | LTC6754 におけるヒステリシス制御用抵抗値と付与されるヒステリシスとの相関 . . . . .  | 153 |
| 5.4  | 新たに検討する MPPC 読み出し手法の構成 . . . . .  | 154 |
| 5.5  | MPPC 読み出し手法の検討のために使用したプリント基板 . . . . .  | 155 |
| 5.6  | S13360-3050PE に対しカソードから信号を読み出した際の波形 . . . . .   | 155 |
| 5.7  | MPPC のカソードからの信号読み出しの検討のために使用したアンプ回路 . . . . .   | 155 |
| 5.8  | カソードから読み出した信号をアンプ回路に入力した後の波形 . . . . .  | 156 |
| 5.9  | 新たに導入したプラスチックシンチレータの $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$ 線源による性能評価時のセットアップ . . . . .              | 157 |
| 5.10 | MPPC 印加電圧依存性 . . . . .  | 158 |
| 5.11 | $\beta$ 線照射位置依存性 . . . . .  | 159 |
| A.1  | 種類依存性の測定で使用したプラスチックシンチレータの発光の波長依存性 (再掲) . . . . .   | 167 |
| A.2  | EJ-230 を用いた場合での信号の例 . . . . .   | 168 |
| A.3  | EJ-200 を用いた場合での信号の例 . . . . .   | 168 |
| A.4  | EJ-204 を用いた場合での信号の例 . . . . .   | 169 |
| A.5  | EJ-212 を用いた場合での信号の例 . . . . .   | 169 |
| A.6  | EJ-228 を用いた場合での信号の例 . . . . .   | 170 |
| A.7  | EJ-232 を用いた場合での信号の例 (縦軸 200 mV/div. の場合) . . . . .  | 170 |
| A.8  | EJ-232 を用いた場合での信号の例 (縦軸 100 mV/div. の場合) . . . . .  | 171 |

# 表目次

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1.1  | クォークとレプトン . . . . .   | 1   |
| 1.2  | 主なハイペロンの性質 . . . . .  | 3   |
| 1.3  | 原子核乾板を用いた実験で得られた ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の束縛エネルギー . . . . .      | 10  |
| 1.4  | BST-ring の典型的性能 . . . . .   | 14  |
| 2.1  | $K^+$ 中間子と $\pi^+$ 中間子の主な性質 . . . . .                             | 28  |
| 2.3  | 本研究で用いる MPPC の主な性能 (2 種類間での比較) . . . . .                          | 44  |
| 3.1  | 本章の測定で使用したプラスチックシンチレータ . . . . .                                  | 50  |
| 3.2  | オペアンプ AD8000 の基本性能 . . . . .                                      | 53  |
| 3.3  | 本測定でリファレンス検出器として使用したプラスチックシンチレータの諸元 . . . . .                     | 56  |
| 3.4  | リファレンス検出器で使用した MPPC の推奨印加電圧 $V_{op}$ . . . . .                    | 57  |
| 3.5  | 異なる設計の基板を用いた場合の時間分解能の比較 . . . . .                                 | 91  |
| 3.6  | 種類依存性の測定において使用した各種プラスチックシンチレータの性能値 . . . . .                      | 92  |
| 3.7  | S13360-3050PE を用いた測定において使用した MPPC 基板の $V_{op}$ . . . . .          | 100 |
| 3.8  | S13360-3050PE を用いた測定において使用した回路の各素子の値 . . . . .                    | 101 |
| 3.9  | LVDS コンパレータ LTC6754 の基本性能 . . . . .                               | 110 |
| 3.10 | ポールゼロ抵抗 $R_{pzc}$ の依存性の調査を行った際の $R_d$ 及び $R_f$ の組合せ . . . . .     | 116 |
| 3.11 | TOF2 と TOT によって得られた時間分解能の一例 . . . . .                             | 119 |
| 3.12 | BAT63 及び BAT54 の性能 . . . . .                                      | 123 |
| 3.13 | ショットキーバリアードダイオードの検討を行った際に用いた回路の構成 . . . . .                       | 123 |
| 3.14 | BAT63 の有無での <i>Signal</i> 及び <i>Tail</i> 領域での積分結果の比較 . . . . .    | 125 |
| 3.15 | BAT63 を実装した場合と微分回路のみの場合での時間分解能の比較 . . . . .                       | 125 |
| 4.1  | 本実験で使用した陽電子ビームの特性 . . . . .                                       | 129 |
| 4.2  | 陽電子ビームを用いた性能評価試験において測定した試作機の構成 . . . . .                          | 129 |
| 4.3  | 本実験でリファレンス検出器として用いたプラスチックシンチレータ . . . . .                         | 130 |
| 4.4  | 陽電子ビームを用いた実験での各検出器での Attenuator の設定 . . . . .                     | 135 |
| 4.5  | 陽電子ビームを用いた場合と $\beta$ 線源を用いた場合での電荷量分布の比較 (分布の MPV 値の比較) . . . . . | 146 |
| 4.6  | 仮想空間上で設置した物体の一覧 . . . . .   | 148 |
| 4.7  | シミュレーションで使用したビームの設定 . . . . .                                     | 148 |

---

|     |                                      |     |
|-----|--------------------------------------|-----|
| 5.1 | 決定したプラスチックシンチレータの構成 . . . . .        | 152 |
| A.1 | 種類依存性測定で用いた各種シンチレータの見積もり結果 . . . . . | 167 |
| A.2 | 各種プラスチックシンチレータの性能値 (再掲) . . . . .    | 167 |



# 第1章

## ハイパー核物理

本論文は、我々が東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) において実施を計画する  $\Lambda$  ハイパー核実験のための新型粒子飛行時間測定器の開発のために行った基礎データ収集に関して述べるものである。本章では、本研究において研究対象とするハイパー核に関して述べる。まず、ハイパー核の概要について説明し、今日に至るまでのハイパー核に関する実験的研究の歩みについて概観する。その上で本研究と特に関連するハイパー核である  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を取り巻く問題を説明する。次いで、この問題に対する実験的なアプローチとして我々が提案する東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) における  $\Lambda$  ハイパー核実験の概要を説明する。これを踏まえて、本研究において開発を行った新粒子飛行時間測定器の果たす役割と、そのために達成すべき要求性能について説明する。

### 1.1 ハイパー核とは

我々の世界を形作るものは何であろうか。これは我々人類が長きにわたって抱き続けてきた問いである。現代物理学における到達点ともいえる標準理論では素粒子であるクォークとレプトンが最小の物質粒子であると考えられている。このうち、クォークとは強い相互作用をする粒子である。一方、レプトンは強い相互作用をしない。また、クォークとレプトンは共に第1世代から第3世代までの世代が存在する。このうちクォークでは  $+\frac{2}{3}e$  の電荷を持つものと  $-\frac{1}{3}e$  の負の電荷を持つものが各世代に1つずつ対となるように存在している。クォークとレプトンを表 1.1 に示した。強い相互作用ではカラー (色荷) と呼ばれる量が重要な役割を担い、これには  $R, G, B$  の3種が存在する。クォークはこのカラーを白色にするようにして束縛系をなす。このようにクォークが強い相互作用によって束縛した複合粒子をハドロンとい

表 1.1: クォークとレプトン。

|      | 電荷              | スピン           | 世代      |           |            |
|------|-----------------|---------------|---------|-----------|------------|
|      |                 |               | 1       | 2         | 3          |
| クォーク | $+\frac{2}{3}e$ | $\frac{1}{2}$ | $u$     | $c$       | $t$        |
|      | $-\frac{1}{3}e$ | $\frac{1}{2}$ | $d$     | $s$       | $b$        |
| レプトン | $-e$            | $\frac{1}{2}$ | $e$     | $\mu$     | $\tau$     |
|      | 0               | $\frac{1}{2}$ | $\nu_e$ | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ |

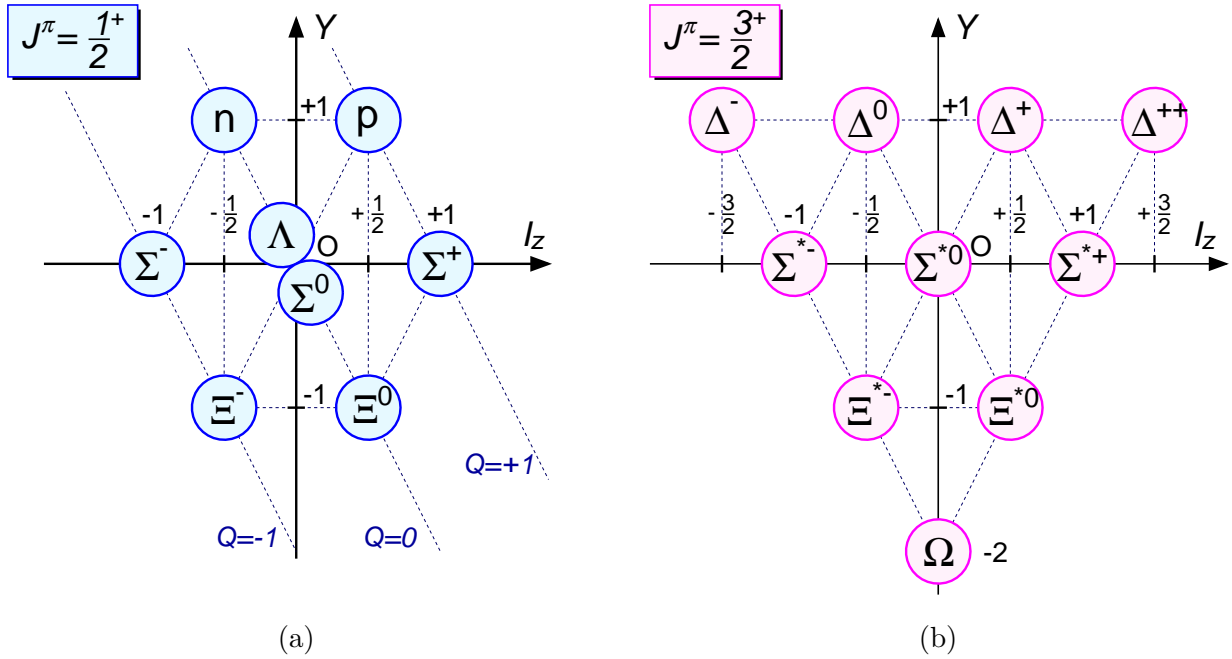


図 1.1: バリオン 8 重項とバリオン 10 重項。(a): バリオン 8 重項。(b): バリオン 10 重項。いずれの図においても縦軸  $Y$  はバリオンの超電荷、横軸  $I_z$  はアイソスピンの第 3 成分である。また、 $Q$  はバリオンの電荷である。

う。このうち、 $R$  に対する  $\bar{R}$  といった逆の色荷を持つクォークと反クォーク 2 個が束縛したハドロンをメソン (中間子)、クォーク 3 個が束縛したハドロンをバリオンという。

私たちの身の回りの物質を構成する原子は原子核とそれを取り巻く電子によって構成される。原子核は陽子と中性子から構成されるが、これらはそれぞれクォークの組成で  $uud$ 、 $udd$  と書くことができ、両者ともに第 1 世代のクォークによって構成されるバリオンの一種である。陽子・中性子間の相互作用は核力と呼ばれる。原子核はこの核力によって陽子・中性子が束縛した量子多体系である。この核力は  $u$ 、 $d$  クォークの入れ替えに対する対称性、即ち  $SU(2)$  対称性によって非常に良い精度で理解されることが知られている。その対称性から陽子・中性子はある粒子の異なる量子数 (アイソスピン) を持った状態であるとみなされ、これら 2 種は核子 (Nucleon) と称される。

$u$ 、 $d$  に次いで軽い質量を持つ第 2 世代のクォークである  $s$  クォークを構成要素として含むバリオンをハイペロンという。この拡張により、その対称性は 3 種類のクォークの質量が近いことから近似的に成立するフレーバー  $SU(3)$  対称性へと拡張される。ここで新たに  $s$  クォークを導入したことにあわせて、ストレンジネス  $S$  という量子数を導入する。これは、バリオンに含まれる  $s$  クォークの個数に  $-1$  を乗じた値である。更に、ストレンジネス  $S$  とバリオン数  $B$  の和として超電荷  $Y$  を定義する。 $s$  クォークを含んだバリオンのうち、スピン ( $J$ ) 及びパリティ ( $\pi$ ) が  $J^\pi = \frac{1}{2}^+$  のものは図 1.1[a] に示すバリオン 8 重項をなす。一方  $J^\pi = \frac{3}{2}^+$  のバリオンは図 1.1[b] に示すバリオン 10 重項をなす。図 1.1 において横軸はアイソスピンの第 3 成分、縦軸は超電荷  $Y$  である。また、図 1.1[a] 中の  $Q$  はバリオンの電荷を表す。更に図 1.1 に示したハイペロンのうち、代表的なものの性質 (クォーク組成、質量、寿命、主な崩壊モード及び分岐比) を表 1.2 に示した。これらのハイペロンは弱い相互作用によって崩壊するモードが主であり、典型的に  $\sim 10^{-10}$  s の寿命を持つ。一見すると極めて短い時間スケールにも思われる。一方で、原子核内においては強い相互作用が支配的であり、その典型的な時間スケールは  $\sim 10^{-24}$  s である。したがって、ハ

表 1.2: 主なハイペロンの性質 [1]。クォーク組成、質量、寿命、主な崩壊モードとその分岐比を記載した。数値末尾の括弧内に示した数値はその値の統計誤差を示す。

| 名前         | クォーク組成 | 質量<br>(MeV/ $c^2$ ) | 寿命<br>(s)                    | 主な崩壊モード         | 分岐比<br>(%)  |
|------------|--------|---------------------|------------------------------|-----------------|-------------|
| $\Lambda$  | $uds$  | 1115.683 (6)        | $2.632 (20) \times 10^{-10}$ | $p\pi^-$        | 63.9 (5)    |
|            |        |                     |                              | $n\pi^0$        | 35.8 (5)    |
| $\Sigma^0$ | $uds$  | 1192.642 (24)       | $7.4 (7) \times 10^{-20}$    | $\Lambda\gamma$ | 100         |
| $\Sigma^+$ | $uus$  | 1189.37 (6)         | $8.018 (26) \times 10^{-9}$  | $p\pi^0$        | 51.57 (30)  |
|            |        |                     |                              | $n\pi^+$        | 48.31 (30)  |
| $\Sigma^-$ | $dds$  | 1197.45 (4)         | $1.479 (11) \times 10^{-10}$ | $n\pi^-$        | 99.848 (5)  |
| $\Xi^0$    | $uss$  | 1314.86 (20)        | $2.90 (9) \times 10^{-10}$   | $\Lambda\pi^0$  | 99.524 (12) |
| $\Xi^-$    | $dss$  | 1321.71 (7)         | $1.639 (15) \times 10^{-10}$ | $\Lambda\pi^-$  | 99.887 (35) |

ハイペロンの典型的な時間スケールであっても原子核内に束縛され構成要素の一員として相互作用をすることが可能である。ハイパー核とは、これらのハイペロンを構成要素として含む原子核のことを指す。ハイパー核の研究を通じて、ハイペロン ( $Y$ )–核子 ( $N$ ) 相互作用 ( $YN$  相互作用) の情報を引き出すことができる。これは従来の核子間相互作用 ( $NN$  相互作用) では得ることのできなかった情報であり、これらの情報を用いることで、より一般化されたバリオン–バリオン間相互作用 ( $BB$  相互作用) へと拡張する足掛かりとなることが期待される。また、核内におけるハイペロンは陽子や中性子による Pauli の排他律の影響を受けない。そのため、原子核内の深い準位に束縛されることもでき、原子核深部を探るための探針となりうる。

次節では、今日に至るまでのハイパー核に関する実験的研究の歴史を概観する。

## 1.2 これまでのハイパー核研究の歴史

1952年、M. Danysz と J. Pniewski が宇宙線にさらした原子核乾板 (エマルジョン) の解析からハイパー核を発見した [2] ことに端を発しハイパー核の実験的な研究が始まった。1950年代から1960年代にかけてのハイパー核実験の黎明期は、原子核乾板や泡箱を用いて宇宙線からハイパー核を生成し、その飛跡を解析するという実験が盛んにおこなわれた。こうした研究を通じて主に質量数  $A$  が  $A < 16$  の比較的軽い領域のハイパー核の束縛エネルギーなどが調べられ、その理解が進んだ。ここで原子核乾板に関して述べる。これは写真乾板とも称される。乳化剤として臭化銀 ( $\text{AgBr}$ ) が含有されており、原子核乾板中に荷電粒子が入射しエネルギー損失を起こすと、この臭化銀結晶が反応することにより粒子の飛跡が乾板中に記録される。その際の飛跡の濃淡からは荷電粒子のエネルギー損失の情報を、飛跡の長さからは乾板中での飛程、全エネルギーに関する情報を引き出すことができる。臭素 ( $A \sim 80$ ) や銀 ( $A \sim 100$ ) といった原子核を含んでいながらも軽い質量領域でのハイパー核の探索が主であったのは、原子核乾板の性質によるものであった。質量数が大きな原子核で反応が生じた場合では、核破碎反応などが起こり、反応点周辺での飛跡が複雑化してしまうために解析が困難になってしまう。ハイパー核の事象を測定するためには、その飛跡を解析する必要がある。しかし、質量数の大きいハイパー核ほど単位長さ当たりのエネルギー

ギー損失が大きくなってしまいうために飛程が短くなってしまいうことも解析を困難にしていた。また、エマルジョンには前述の臭化銀に加え、ゼラチンなどが多分に含有されていた。主な構成元素はC、H、Oなどであり、比較的質量数の軽いものが主であった。こうした事情から、質量数の軽いハイパー核の観測が主であった。また、こうした観測はハイパー核の基底状態に限定されてしまいう、励起状態やエネルギー準位構造についての探索はできなかつた。

1970年代に入ると加速器技術の向上によって、加速器からの高エネルギーのビームを利用した人工的なハイパー核生成実験が展開されるようになった。欧州原子核研究機構(CERN)[3]において( $K_{stop}^-$ ,  $\pi^-$ )反応を用いて ${}^{12}_{\Lambda}\text{C}$ ハイパー核の質量分光に成功した[4]ことを皮切りに、アメリカ合衆国のブルックヘブン国立研究所(BNL)等で $K^-$ 中間子ビームを利用したカウンター実験が展開されるようになった。これらの実験を通じて、それまでの原子核乾板を用いた実験では観測できなかつたハイパー核の励起状態やエネルギー準位構造の研究が可能となった。

1980年代以降、更なる加速器技術の向上によって、BNLや日本の高エネルギー加速器研究機構(KEK)において大強度( $\sim$  MHz)の $\pi^+$ 中間子ビームを利用した( $\pi^+$ ,  $K^+$ )反応を用いた $\Lambda$ ハイパー核質量分光実験が展開された。特にKEKで遂行されたE140a実験などでは大立体角かつ高分解能の磁気スペクトロメータSKSを導入し、 $A = 10 - 208$ に至るまでの幅広い質量領域で実験が展開された[5]。

その後、半導体検出器であるGe検出器(Germanium detector)を用いて励起状態にあるハイパー核が脱励起時に放出する $\gamma$ 線を測定する $\gamma$ 線分光実験が創始された。当時理論計算から予測されていた ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ ハイパー核における収縮効果の実証[6]や ${}^{16}_{\Lambda}\text{O}$ 、 ${}^{15}_{\Lambda}\text{N}$ での $\gamma$ 線分光による $\Lambda N$ 相互作用でのテンソル力の測定[7]等ハイパー核の理解において大きな成果を挙げた。

2000年以降、アメリカ合衆国のThomas Jefferson National Accelerator Facility(JLab)において大強度の一次電子線を用いた( $e$ ,  $e'K^+$ )反応による $\Lambda$ ハイパー核反応分光実験が創始された。これまでに展開されてきた $\Lambda$ ハイパー核実験と比較して飛躍的に分解能を向上させることに成功し、この時点では史上初となる $< 1$  MeV(FWHM)の分解能を達成した[8]。

2011年からは、新たに電子線を利用した崩壊 $\pi^-$ 中間子分光(decay  $\pi^-$  spectroscopy)がドイツMaintz大学の電子線加速器施設MAMI-Cにおいて展開された。この実験では、標的に電子線を照射することで( $e$ ,  $e'K^+$ )反応により $\Lambda$ ハイパー核を生成する。これが標的内でエネルギー損失により静止し2体に弱崩壊する際に放出される $\pi^-$ 中間子の運動量を精密に測定することによってハイパー核の質量分光を行う。 $\Lambda$ 粒子生成事象の同定は( $e$ ,  $e'K^+$ )反応で同時生成される $K^+$ を同時測定することで行う。この実験手法の特色として、生成されるハイパー核として標的核を $\Lambda$ ハイパー核に変換するものに加え、標的核が破碎したものに $\Lambda$ 粒子が束縛されて生成されるハイパーフラグメントも含まれるという点がある。2012年に実施された実験では、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ハイパー核の弱崩壊時に放出される $\pi^-$ 中間子の運動量を精密測定することによって $\Lambda$ 粒子の束縛エネルギーを

$$B_{\Lambda} = 2.12 \pm 0.01 (\text{stat.}) \pm 0.09 (\text{syst.}) \text{ MeV} \quad (1.1)$$

という極めて高精度で測定した[9, 10]。

次節では、ここまで述べてきた中で、特に重要な実験手法である反応分光について説明する。

## 1.3 ハイパー核反応分光実験

本節では、ハイパー核を実験的に研究する上で極めて重要な手法である反応分光について述べる。ここでは特に  $\Lambda$  ハイパー核に着目して説明する。反応分光実験では入射粒子の運動量と反応時に散乱・生成される粒子の運動量を測定し、標的核の質量などの情報を組み合わせてミッシングマスを求め、ハイパー核の質量分光を行う。前節にて述べたように、反応分光に用いられるハイペロン生成反応にはいくつかの種類があり、それぞれが異なる特色を持つ。代表的なものとしては  $(K^-, \pi^-)$  反応、 $(\pi^+, K^+)$  反応、 $(e, e'K^+) \cdot (\gamma, K^+)$  反応がある。図 1.2 にこれまでに実験的に測定が行われてきたハイパー核を核図表の形式で示した。但し、スペースの都合上、質量数は  $A \leq 20$  の範囲に限定した。ハイパー核の核種と共に、測定が行われた際に用いられた反応を示した。緑の印が  $(K^-, \pi^-)$  反応、赤の印が  $(\pi^+, K^+)$  反応、青の印が  $(e, e'K^+)$  反応を用いて測定が行われたことを示す。核種によって用いられた反応の種類が異なることがわかる。これはそれぞれの反応で生成できるハイパー核の核種が異なることを示しており、これもまたそれぞれの反応系統の特色である。このことについては、以下で詳述する。また、それぞれの  $\Lambda$  粒子生成反応の素過程の概念図を図 1.3 に示した。それぞれ [a] が  $(K^-, \pi^-)$  反応、[b] が  $(\pi^+, K^+)$  反応、[c] が  $(e, e'K^+)$  反応、[d] が  $(\gamma, K^+)$  反応である。ここで  $(e, e'K^+)$  反応と  $(\gamma, K^+)$  反応の違いは光子が仮想光子であるか実光子であるかという点であり、基本的には同一の反応過程である。更に、図 1.4 に代表的な  $\Lambda$  粒子生成反応における入射粒子の運動量と  $\Lambda$  粒子の反跳運動量の相関を示した。

### 1.3.1 $(K^-, \pi^-)$ 反応

$(K^-, \pi^-)$  反応は図 1.3[a] に示したように、入射するビームである  $K^-$  中間子に予め  $s$  クォークが含まれている。この  $s$  クォークを交換することによって標的核に含まれる中性子を  $\Lambda$  粒子へ変換する。この反応は吸熱反応であることから、ビーム粒子である  $K^-$  の運動量が 0 の場合にも反応を起こすことができ、標的中で  $K^-$  を静止させることによって原子核表面の核子と反応を起こす ( $K^-_{stop}, \pi^-$ ) と呼ばれる反応が可能となる。また、 $K^-$  中間子が運動量をもって飛行した状態で反応を起こす in-flight( $K^-, \pi^-$ ) 反応においては、反応時に誘起される  $\pi^-$  中間子の放出角度が  $0^\circ$  である場合には生成される  $\Lambda$  粒子の運動量移行が 0 になる特別な運動量が存在する。これを“Magic Momentum”(～500 MeV/c) という。この運動量を図 1.4 中に藍色の矢印によって示した。Magic Momentum 近傍では  $\Lambda$  粒子への運動量移行が小さくなることから、反応前の中性子と同じ軌道に入ることがある。このような状態のことを subsutititional state という。また、典型的な反応断面積として  $\sim \mu b - mb$  であり、後述する反応と比較して大きいという特徴がある。

### 1.3.2 $(\pi^+, K^+)$ 反応

この反応の概念図を図 1.3[b] に示した。 $s\bar{s}$  の対生成によって、標的核に含まれる中性子を  $\Lambda$  粒子へ変換する。この反応は発熱反応であることから、入射する  $\pi$  中間子の運動量として  $\sim 900$  MeV/c の反応閾値が存在する。図 1.4 に示したように、 $\Lambda$  粒子への運動量移行が大きいことから、反応前の中性子とは異なる軌道角運動量状態を取る確率が大きくなる。このことから、角運動量状態を大きく変化させて、コア核に深く束縛されるような状態を取ることも可能となる。特に、反応の前後での角運動量状態の変化が最大となるような状態を stretched state という。こうした性質を利用することによって、過去に行われた

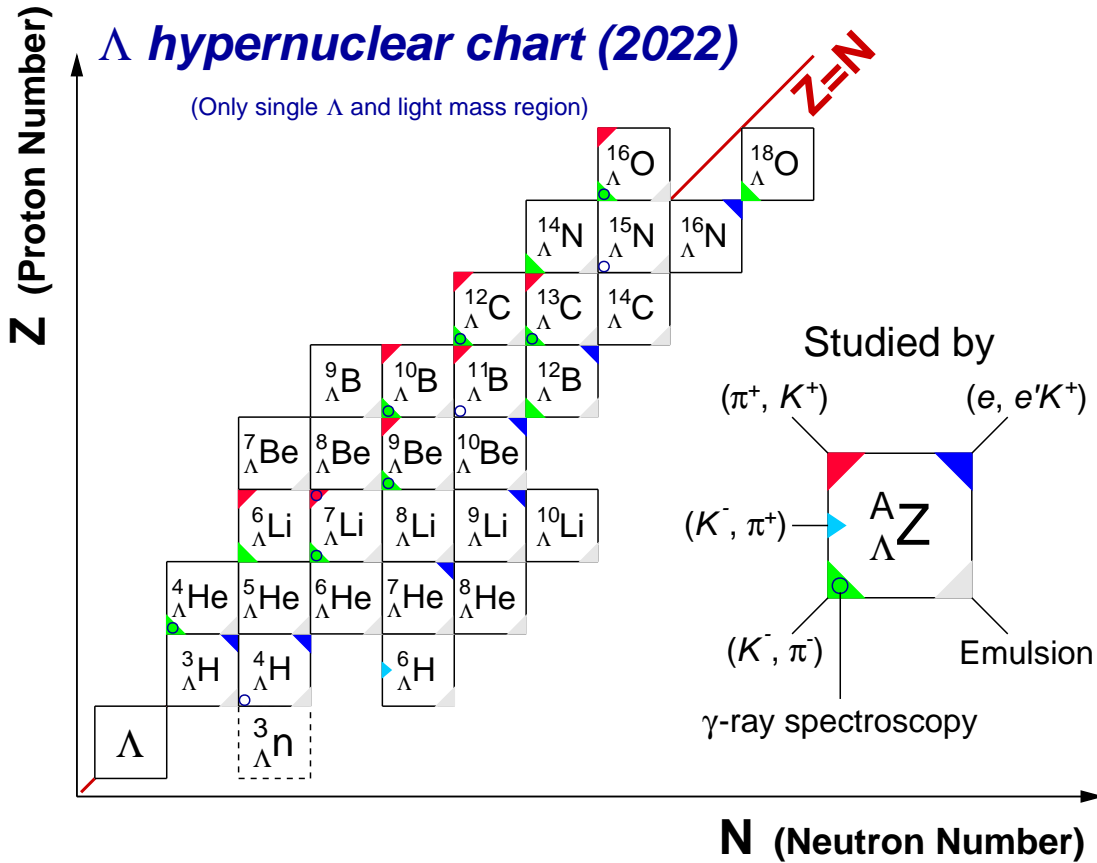


図 1.2: これまでに測定が遂行された  $\Lambda$  ハイパー核の核図表 [11, 12]。横軸はハイパー核の中性子数  $N$ 、縦軸は陽子数  $Z$  である。また赤線は  $Z = N$  の安定線を示す。それぞれの核種とともに実験で測定された際の手法を示した。ただし質量数  $A$  が 20 以下の領域のみを図示している。尚、その存否について確定していない  ${}^3_{\Lambda}n$  は点線で示した。

実験では、 ${}^{89}_{\Lambda}Y$  ハイパー核において  $\Lambda$  粒子が  $s$  軌道から  $f$  軌道に束縛された状態の観測に成功した [5]。

### 1.3.3 $(e, e'K^+)$ 反応

この反応の概念図を図 1.3[c] に示した。この反応の特色の一つは電磁相互作用を用いて  $s\bar{s}$  の対生成を行い、ハイペロンを生成するという点にある。実験の際には電子線を標的に照射し、標的核中の陽子との電子散乱の際に媒介される仮想光子より  $s\bar{s}$  の対生成を行う。以下、この反応の特徴を示す。また、 $(e, e'K^+)$  反応を用いた反応分光の特徴として、標的から放出される  $K^+$  中間子に加えて散乱電子  $e'$  も同時に測定する必要があるという点が挙げられる。

#### 陽子を $\Lambda$ へと変換

図 1.3[c] に示したように、この反応の大きな特徴の一つは陽子を  $\Lambda$  粒子へ変換するという点にある。この特徴より、水素標的を用いることで  $p(e, e'K^+)\Lambda$  や  $p(e, e'K^+)\Sigma^0$  のような反応素過程のデータを取得することができる。 $\Lambda/\Sigma^0$  の質量は精度よく決定されていることから、これらを測定することによって質量の絶対値較正が可能となり、ハイパー核の質量の絶対値を測定可能となる。この素過程のデータ取得は陽子を  $\Lambda$  粒子へ変換する反応であることで可能となるものである。自由空間における中性子は

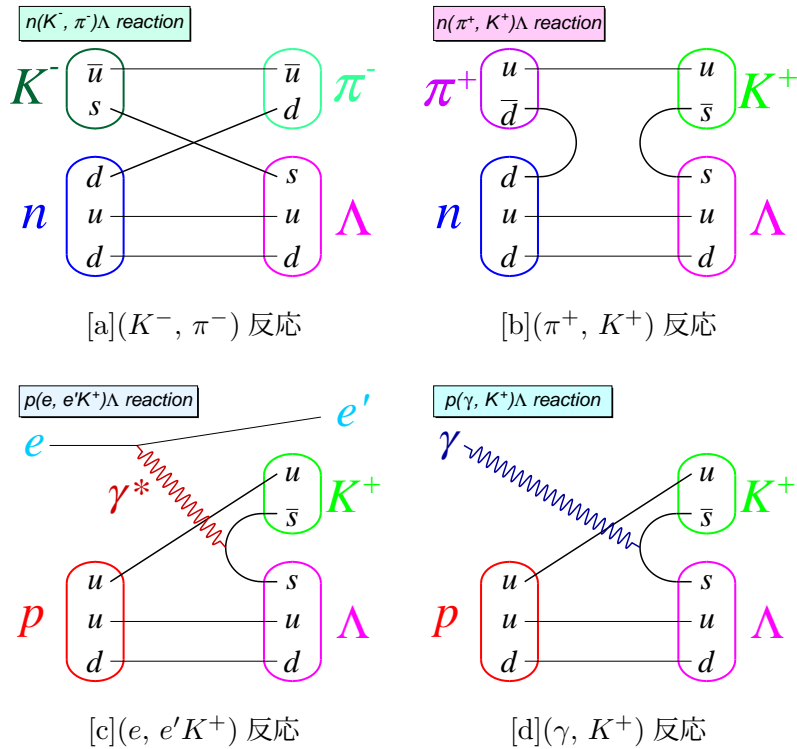


図 1.3: 代表的な  $\Lambda$  粒子生成反応の素過程の概念図。[a]:  $(K^-, \pi^-)$  反応。[b]:  $(\pi^+, K^+)$  反応。[c]:  $(e, e'K^+)$  反応。[d]:  $(\gamma, K^+)$  反応。 $(K^-, \pi^-)$  反応が  $s$  クォークを他のクォークとの交換によりハイペロンを生成するのに対し、 $(\pi^+, K^+) \cdot (e, e'K^+) \cdot (\gamma, K^+)$  反応は  $s\bar{s}$  の対生成によってハイペロンを生成する。 $(e, e'K^+)$  反応と  $(\gamma, K^+)$  反応の違いは光子 ( $\gamma$ ) が電子散乱によって媒介される仮想光子であるか実光子であるかの点である。

$\tau = 979.4(6)$  s の寿命で  $\beta$  崩壊を起こすため、安定した中性子標的は存在せず、 $(K^-, \pi^-) \cdot (\pi^+, K^+)$  では測定することはできない。

また、この特徴によって、 $(K^-, \pi^-)$  反応  $\cdot$   $(\pi^+, K^+)$  反応によって生成されるハイパー核の鏡像核を生成することができる。この性質から  $(K^-, \pi^-)$  反応  $\cdot$   $(\pi^+, K^+)$  反応との相補的な研究が可能となる。加えて、質量数の少ない領域では  ${}^7_{\Lambda}\text{He}$  といった中性子過剰なハイパー核の分光も行うことが可能となる [13]。

### spin-flip 状態の生成

光子は spin1 を持っている。このことから、 $(e, e'K^+)$  反応では、生成されたハイペロンのスピン状態が生成前の核子のスピンから反転した状態 (spin-flip 状態) を生成することができる。また、spin-flip 状態と non-spin flip 状態の断面積が同程度であることから、これらを同時に研究することができ、 $\Lambda$  粒子の束縛エネルギー  $B_{\Lambda}$  のスピン依存性を詳細に研究することが可能となる。

### 一次ビームの使用が可能

前述の  $(K^-, \pi^-)$  反応、 $(\pi^+, K^+)$  反応では中間子ビームを用いることから、利用できるビームは 1 次ビームを金 (Au) などの生成標的に照射することで得られる 2 次ビームであった。これらをビームとして用いるためには粒子 1 つ 1 つの運動量を測定する必要があった。また、2 次ビームであるという特徴から、ビーム強度も  $\sim 10^6$  /s 程度に制限されてしまう。このためハイパー核の収量を増やすためには標的

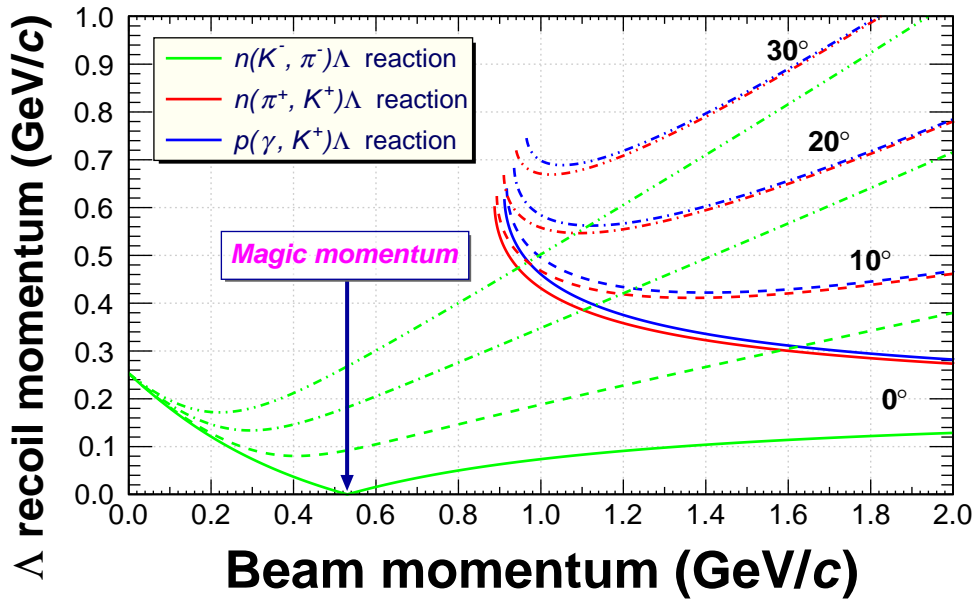


図 1.4: 代表的な  $\Lambda$  粒子生成反応における入射粒子の運動量と  $\Lambda$  粒子の反跳運動量の相関。緑線が  $(K^-, \pi^-)$  反応、赤線が  $(\pi^+, K^+)$  反応、青線が  $(\gamma, K^+)$  反応の場合を示す。また、線種の違いは反応により誘起される中間子がビームに対してなす散乱角度を示しており、実線が  $0^\circ$  の場合、破線は  $10^\circ$  の場合、一点鎖線は  $20^\circ$  の場合、二点鎖線は  $30^\circ$  の場合を示す。 $(K^-, \pi^-)$  反応で  $\pi^-$  の散乱角が  $0^\circ$  の場合には  $\sim 500$  MeV/c 付近に Magic momentum があることが見てとれる。

厚を厚くする必要があった。そのために標的でのエネルギー損失による分解能の悪化が避けられず、分解能も  $\sim 1.5$  MeV に制限されてしまっていた。

対して、 $(e, e'K^+)$  反応を用いる場合には加速器の性能にもよるが、大強度の 1 次ビームを利用することが可能となる。我々の実験グループが電子線を用いて  $(e, e'K^+)$  反応による  $\Lambda$  ハイパー核実験を展開する JLab では  $\sim 100 \mu\text{A}$  の大強度の電子線を利用することができる。また、加速器より直接供給される 1 次ビームであるという特徴から、入射電子のエネルギーは  $\Delta E/E \sim 10^{-4}$  という極めて良い精度でわかっており、標的におけるビームスポットの大きさも  $\sigma \sim 100 \mu\text{m}$  と非常に小さい。これら恩恵によって、薄い標的を用いた場合でも十分な収量を得ることが可能となった。これにより、標的でのエネルギーストラグリングを低減することができ、過去に行われた実験では  $\sim 0.5$  MeV (FWHM) のエネルギー分解能を達成した。

### 1.3.4 $(\gamma, K^+)$ 反応

この反応の概念図を図 1.3[d] に示した。この反応もまた  $(e, e'K^+)$  反応と同様に、標的核内の陽子を  $\Lambda$  粒子へ変換する。 $(e, e'K^+)$  反応との相違点はビームとして入射するのが電子散乱時に媒介される仮想光子か実光子かという点にある。実際の実験を想定した場合、何らかの反応を経由する必要がある。例として、本論文で取り上げる東北大学電子光理学研究センター (ELPH) での場合は、電子シンクロトロン の周回軌道上に炭素標的を挿入し、制動放射によって生成した実光子ビームを用いる。



## 1.4 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ puzzle

1.2 節にて述べたように、これまでに我々は宇宙線を用いた原子核乾板による実験から始まり、加速器による実験を展開し幅広い質量領域でハイパー核の性質を研究してきた。しかし、近年、質量数  $A = 3$  という最も基本的なハイパー核である  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  に対して、その寿命と束縛エネルギーについて精密測定が求められ、実験・理論の双方で議論が活発に行われている。本節では、この  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を取り巻く問題 “ ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  puzzle” について述べる。

### 1.4.1 ハイパー核の崩壊

表 1.2 にて示したように、自由空間における  $\Lambda$  粒子の主な崩壊モードは

$$\Lambda \rightarrow p\pi^- \quad (1.2)$$

$$\Lambda \rightarrow n\pi^0 \quad (1.3)$$

のいずれかに弱崩壊するものである。この時の分岐比はおよそ  $p\pi^- : n\pi^0 = 2 : 1$  である。この分岐比はスピンとアイソスピンの代数から理解される。

一方、原子核内では核子との間で仮想的に  $\pi$  中間子を媒介することで露わに  $\pi$  中間子の放出を伴わずに崩壊する非中間子弱崩壊 (Non mesonic weak decay; NMWD) を起こすことが知られている。 $\pi$  中間子の放出を伴うような弱崩壊は、静止状態から核子と  $\pi$  中間子への 2 体崩壊を仮定すると、運動量移行が  $\sim 100 \text{ MeV}/c$  となる。これは原子核内でのフェルミ運動量 ( $\sim 270 \text{ MeV}/c$ ) よりも小さい値であるために、中重核では Pauli の排他律によって抑制され、NMWD が支配的となる。過去に KEK で行われた  $\Lambda$  ハイパー核の寿命測定実験 (KEK E307 実験) の結果から、中重ハイパー核では寿命が  $\sim 200 \text{ ps}$  でほぼ一定となるという結果が得られている [14]。

### 1.4.2 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$

${}^3_{\Lambda}\text{H}$  は質量数  $A = 3$  で陽子・中性子・ $\Lambda$  粒子がそれぞれ 1 個で形成されるもっとも基本的なハイパー核である。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  はハイパー核研究の黎明期より、原子核乾板や泡箱を用いた実験によって観測が行われてきた。過去に原子核乾板を用いて測定された  $\Lambda$  ハイパー核の束縛エネルギーの結果は Juric によってまとめられている。特に  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  に関しては崩壊モード毎に束縛エネルギーを求め、最終的に得られる全体としての値を示した。加えて、[15] において測定された 122 事象を独自に再解析した結果も含めた結果も示しており、その値は

$$B_{\Lambda}({}^3_{\Lambda}\text{H}) = 0.13 \pm 0.05 \text{ MeV} \quad (1.4)$$

であるとされた [16]。表 1.3 に各崩壊モード毎の  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の束縛エネルギー及び全体の結果を示した。この結果より、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  は  $\Lambda$  粒子が非常にゆるく束縛していることから、コア核である重陽子の周りに  $\Lambda$  がハローとして存在する  $\Lambda$  ハロー核であると考えられてきた。そのため、寿命は自由空間にある時の  $\Lambda$  粒子と大きく違わないと理論予想がなされてきた [17, 18]。図 1.5 にこれまでに行われてきた  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命測定実験と関連する理論計算の結果を示した。ここで青の三角は原子核乾板、緑の丸は泡箱を用いた測定結果である。実際に、過去に行われた原子核乾板や泡箱の実験の結果は統計誤差が大きいものの、およそ、これを支持する結果が得られていた [19, 20, 21, 22, 23]。

表 1.3: 原子核乾板を用いた実験で得られた  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の束縛エネルギー [16]。

| 崩壊モード  | イベント数 | 束縛エネルギー $B_{\Lambda}$ (MeV) |
|--|-------|-----------------------------|
| ${}^3_{\Lambda}\text{H} \rightarrow \pi^{-} + p + d$         | 24    | $0.23 \pm 0.11$             |
| ${}^3_{\Lambda}\text{H} \rightarrow \pi^{-} + {}^3\text{He}$ | 58    | $0.06 \pm 0.11$             |
| 全体   | 82    | $0.15 \pm 0.08$             |
| 全体 ([15] で得られた 122 事象のデータ含)                                  | 204   | $0.13 \pm 0.05$             |

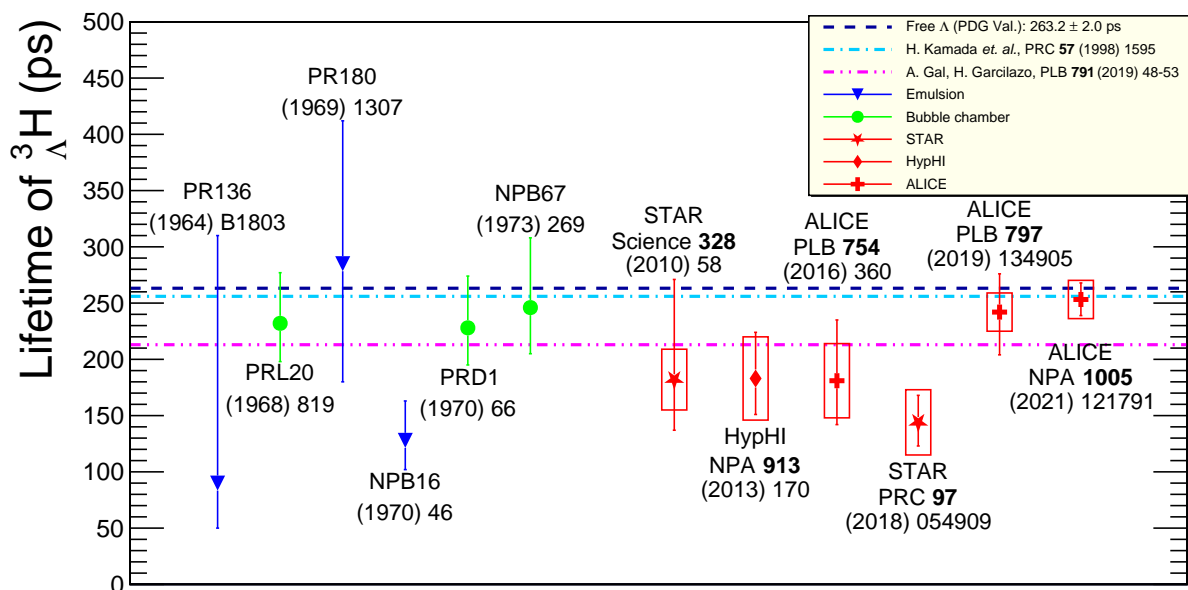


図 1.5: これまでに実施された主な  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命測定実験の結果 [1, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]。各マーカーはそれぞれの実験結果を表す。青の三角は原子核乾板、緑の丸は泡箱を用いた測定結果である。赤のマーカー群は重イオン衝突実験による結果であり、マーカーの種類は各実験を遂行したグループを示す。各結果において統計誤差を誤差棒で、系統誤差を長方形で示した。また、直線は自由空間における  $\Lambda$  の寿命及び  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命に関する理論計算の結果を表す。特に紺色の破線は自由空間における  $\Lambda$  の寿命を示す。

しかし、近年重イオン衝突によるハイパー核実験が行われるようになり、状況は大きく動き出した。2010年の STAR Collaboration の報告を筆頭として、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命は自由空間での  $\Lambda$  と比較して有意に短いとする結果が相次いで報告された [24, 25, 26]。更に 2018 年に STAR、2019 年には ALICE という重イオン衝突を行う 2 つの実験グループが相次いで新たな結果を報告した。しかし、STAR ではより短い寿命であるという結果であったのに対し、ALICE では自由空間での  $\Lambda$  粒子の寿命により近いとする結果を報告した [27, 28, 29]。これら重イオン衝突実験による測定結果を図 1.5 中に赤色のマーカーで示した。但し、統計誤差を誤差棒、系統誤差を白抜きの長方形で示した。両者の結果は、同一の実験手法を用いているながらも一貫した理解が得られないということを示していた。こうした、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命と束縛エネルギーの統一的な理解が困難であるという問題は“ ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  puzzle”と呼ばれ、近年、実験と理論の両面から注目がなされている。

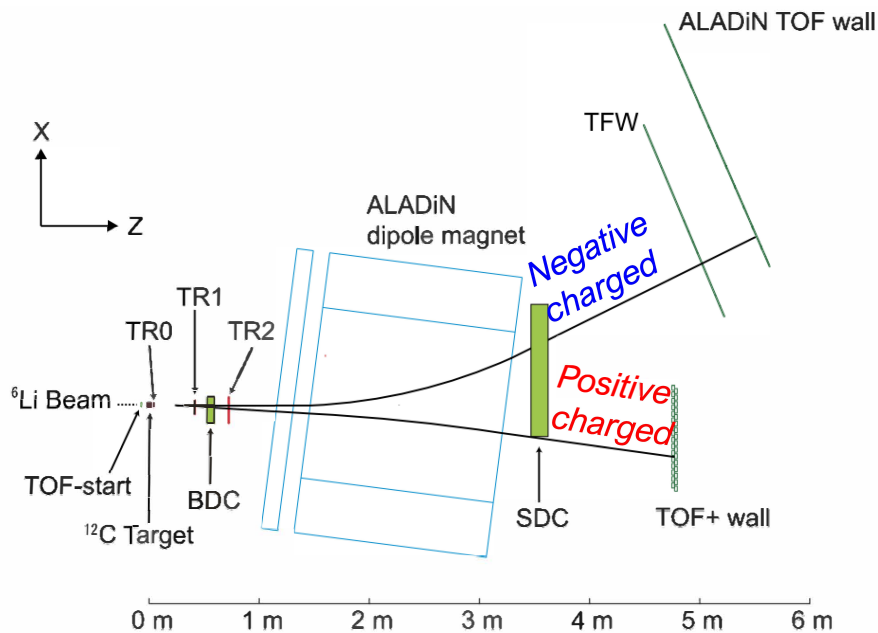


図 1.6: HypHI コラボレーションによる重イオン衝突実験でのセットアップ概念図 (元の図は参考文献 [25] より引用)。標的からの荷電粒子は後段の双極電磁石によって運動量と電荷の符号が分離され、その後段の検出器群で飛行時間並びに通過位置を測定した。

#### 1.4.2.1 重イオン衝突実験における ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命測定方法

ここで、先の重イオン衝突実験においてどのようにして  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命を求めているのか、その方法について述べる。ここでは HypHI コラボレーションによって遂行された実験を例として説明する。

この実験は HypHI コラボレーションの phase0 実験としてドイツのダルムシュタットにある重イオン研究所 GSI において遂行された。実験セットアップの概念図を図??に示した [25]。この実験では 1 核子あたり 2 GeV まで加速した  ${}^6\text{Li}$  原子核を厚さ  $8.84\text{ g/cm}^2$  のグラファイト ( ${}^{12}\text{C}$ ) 標的に照射した。標的から放出される荷電粒子に対し、後段に設置した  $\sim 0.75\text{ T}$  の磁場を持つ双極電磁石 (ALADiN magnet) を用いて運動量分析並びに電荷の分離を行った。この実験ではプロジェクティルとして生成される  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の弱崩壊時に娘粒子として生成される  ${}^3\text{He}$  原子核と  $\pi^-$  中間子を測定した。電磁石後段の検出器群で運動量の測定を行い、2 粒子の生成位置、即ち  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の崩壊位置を決定した。2 粒子での invariant mass (不変質量) を構成し、その分布から  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象の同定を行った。この実験で得られた  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の不変質量分布を図 1.7 に示した。バックグラウンドの分布の形は mixed-event analysis によって見積もった。不変質量分布に対し、ガウス関数を仮定したシグナルと第 1 種チェビシェフ多項式を仮定したバックグラウンド関数の和の形でフィッティングを行い  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象を決定した。フィットの結果  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の収量は  $154 \pm 49$  と見積もられた。不変質量を求める際には、娘粒子の運動量を測定していることから、運動学を用いて崩壊時のハイパー核の運動量を決定することが出来る。これによって、各事象ごとに  $\beta\gamma$  の値が決定される。更に、標的直前でのビーム通過位置を測定しておくことによって、崩壊点の位置の情報と組合せて、ハイパー核が標的で生成されてから崩壊までに飛行した距離 (崩壊距離) を決定することができる。これから各事象に対して (崩壊距離) /  $\beta\gamma$  が決定され、このヒストグラムを得ることができる。このヒストグラムに対して最尤法を用いて  $\exp(-\text{decay length}/\beta\gamma ct)$  のフィッティングを行い、最終的な寿命を決定した。フィットの結果、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命を

$$\tau({}^3_{\Lambda}\text{H}) = 183^{+43}_{-32} (\text{stat.}) \pm 37 (\text{syst.}) \text{ ps} \quad (1.5)$$

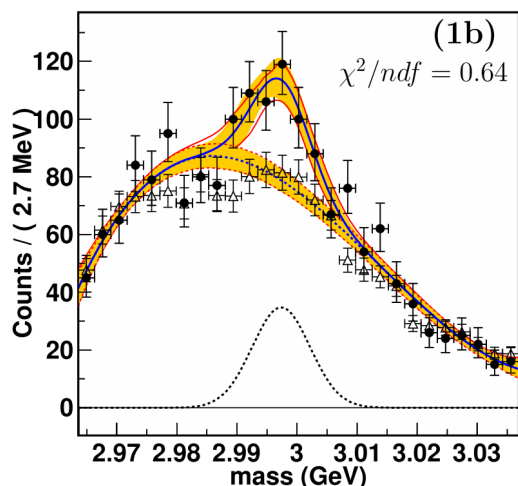


図 1.7:  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象の不変質量分布 (元の図は参考文献 [25] より引用。)。ガウス関数と第 1 種チェビシェフ多項式の和の形でフィッティングを行い、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の収量を  $154 \pm 49$  と決定した。

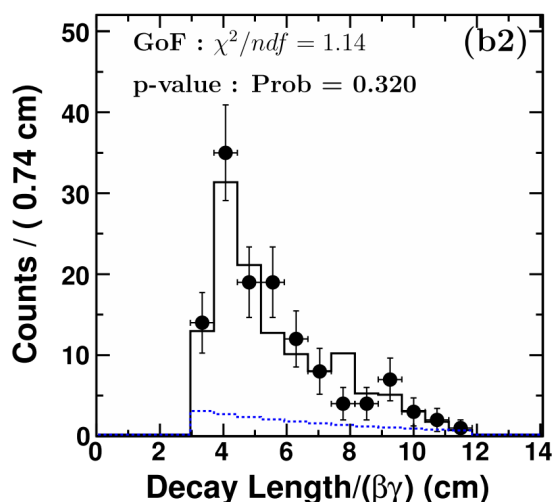


図 1.8:  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象の (崩壊距離) /  $\beta\gamma$  分布 (元の図は参考文献 [25] より引用。)

と決定した。ここで、系統誤差の  $\pm 37$  ps は崩壊点の位置の不定性に起因する崩壊距離の不定性にあるとされた。

こうした動向を受けて  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を取り巻く状況は混迷を極めている。しかし、近年問題として取り沙汰されている寿命測定実験の結果は、いずれも重イオン衝突実験で生成したハイパー核崩壊時の娘粒子の飛跡測定という同一の手法によって得られた結果である。この状況を打破すべく、我々はこれまでとは異なる手法による  $\Lambda$  ハイパー核直接寿命測定実験を東北大学電子光理学研究センター (ELPH) にて行うことを計画している。重イオン衝突実験とは異なる系統誤差を有する方法でこの問題に迫ることを目指す。この実験について、次節で述べる。

## 1.5 ELPH における ${}^A_Z(\gamma, K^+) {}^A_{\Lambda}(Z-1)$ 反応を用いた $\Lambda$ ハイパー核直接寿命測定実験

本節では、1.4 節において述べた  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  puzzle に対する実験的なアプローチとして我々が実施を計画する ELPH における  ${}^A_Z(\gamma, K^+) {}^A_{\Lambda}(Z-1)$  反応を用いた  $\Lambda$  ハイパー核実験について述べる。まず、提案する実験の原理について説明する。次いで、実験の実施予定場所である東北大学電子光物理学研究センターの加速器設備及び既設の検出器等を説明する。その上で、実験手法を予定される実験セットアップと併せて説明し、新粒子飛行時間測定器の役割を述べる。最後に、これを受けて新粒子飛行時間測定器の要求性能に関して説明する。

### 1.5.1 実験原理

ここでは、我々が提案する実験の原理について説明する。図 1.9 にこの実験手法の概念図を示した。この実験では  ${}^A_Z(\gamma, K^+) {}^A_{\Lambda}(Z-1)$  反応によって  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を生成する。エネルギー・生成時刻が測定された標識化光子を液体  ${}^2\text{He}$  標的に照射し  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を生成する。この時に生成される  $K^+$  中間子を磁気スペクトロメータで測定し運動量を決定する。この時に高時間分解能トリガー検出器を組み合わせて  $K^+$  中間子の生成時刻、すなわち  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の生成時刻を決定する。生成された  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  が弱崩壊する際に放出される  $\pi^-$  中間子を標的の近傍に設置した検出器群で測定することで  $\pi^-$  中間子の生成時刻、即ち  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の崩壊時刻を決定する。以上の測定によって  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の崩壊時間を生成時刻と崩壊時刻を用いて各イベント毎に決定することができる。この分布から  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命を決定する。即ち、この実験手法では  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の生成時刻と崩壊時刻を用いて、その寿命を“直接”測定する。

ここで、ハイパー核を生成する手法として  $(\gamma, K^+)$  反応を用いた理由としては、標的側の制約によるものと実験デザインによるものの 2 点がある。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を生成する反応として  $(K^-, \pi^-)$  反応若しくは  $(\pi^+, K^+)$  反応を用いる場合、中性子を  $\Lambda$  に変換することになるが、この場合は標的として  ${}^3\text{H}$  を用いる必要がある。しかし、 ${}^3\text{H}$  は放射性物質且つ可燃性ガスであるため、安全上の取り扱いが非常に難しい。一方、陽子を  $\Lambda$  粒子へ変換する  $(\gamma, K^+)$  反応であれば、安定原子核の  ${}^3\text{He}$  を用いることが可能となる。2 点目は、ビーム強度によるものである。陽子を  $\Lambda$  粒子へ変換する反応としては 1.3 節にて述べたように  $(e, e'K^+)$  反応もある。しかし、 $(e, e'K^+)$  反応では 1 次ビーム故のビーム強度のために、標的周辺での背景事象の計数率が増大してしまい検出器が正しく動作しなくなってしまうことが懸念される。対して、2 次ビームとして取り出される  $\gamma$  線を用いる  $(\gamma, K^+)$  反応を用いることを考える。この場合、我々が実施を計画する東北大学電子光物理学研究センター 1.3 GeV BST-ring の実光子ビームでは、 $\sim 10^6$  photons/s のビーム強度で実験を遂行できる。以上の理由から  $(\gamma, K^+)$  反応を用いることに有意性があるといえる。

### 1.5.2 東北大学電子光物理学研究センター (ELPH)

次に我々が実験の実施を計画する東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) の加速器設備について説明する。ここでは特に我々が利用を考えている電子シンクロトロンである 1.3 GeV BST-ring について述べる。図 1.10 に当該加速器が設置される ELPH の第 2 実験室及び BST-ring の概観を示した。まず、図 1.10 中右下の入射用線形加速器において 90 MeV まで電子を加速し、第 2 実験室の BST-ring へ入射する。BST-ring の典型的な性能を表 1.4 に示した。電子は BST-ring 内で 1.3 GeV まで加速され、一定

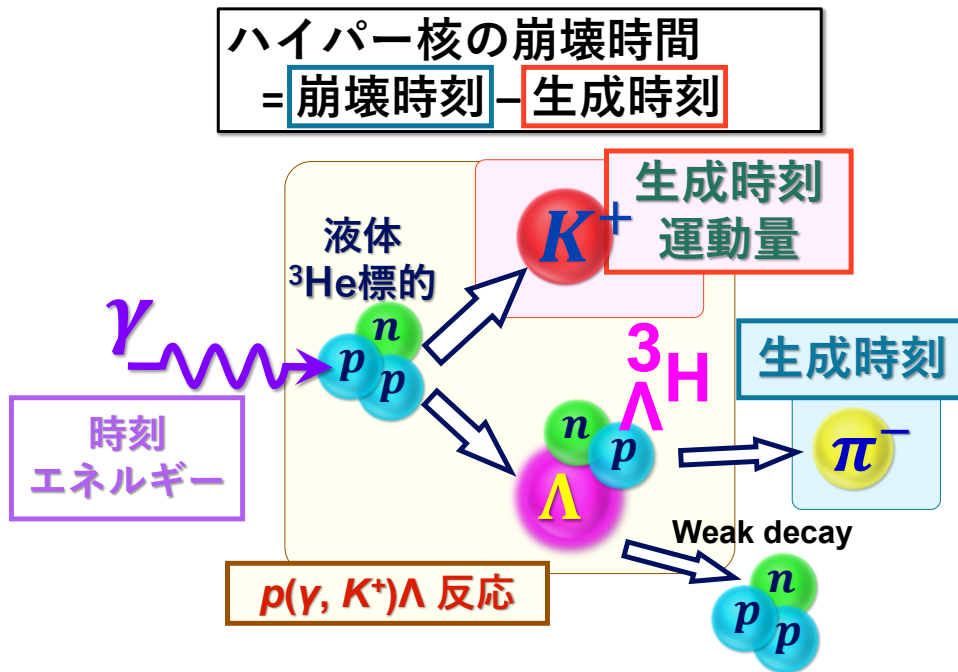


図 1.9: 実験手法の概念図。 $\Lambda^3\text{H}$  生成時の  $K^+$  を検出することで生成時刻を決定する。弱崩壊時の  $\pi^-$  を測定することにより崩壊時刻を決定する。これら 2 つの時刻の情報から崩壊時間を直接決定する。

表 1.4: BST-ring の典型的性能 [30]。

| Injection Beam Energy (MeV) | Injection Repetition (typ.) (Hz) | Ring Top Energy (GeV) | Storage Beam Current (mA) |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 90                          | ~ 0.05                           | 0.8 – 1.3             | ~ 30                      |

時間の間リング内に貯蔵される。このリングの周回軌道上に  $\phi = 11 \mu\text{m}$  の炭素ファイバーを輻射体 (ラジエータ) として挿入することによって周回電子が炭素原子核と反応して制動放射が起こる。この光子をビームとして取りだし利用する。リングへの電子ビームの入射・貯蔵から光子ビームの取り出しという一連の流れは一定周期で繰り返される。ビーム電流と時間の相関の概念図を図??に示した。電子が入射されリング内に貯蔵される時間をフラットトップ (flat top) といい、サイクル全体の時間に対するフラットトップの時間の比を duty factor という。また、この一連のサイクルを spill という。spill 開始時の加速器からの信号を受け取ることでラジエータが動作し、ビームの削りだしが行われる。例として、2021 年 7 月に NKS2 スペクトロメータを用いて実施した実験時には、1 spill 約 20 秒、フラットトップ約 10 秒の設定で運用していた。

次節では、こうして取り出した光子ビームのエネルギーと生成時刻を決定する方法について述べる。

### 1.5.3 光子標識化装置: Tagger

BST-ring から制動放射によって取り出した光子をビームとして利用するためには、各イベント単位で光子のエネルギーや生成時刻を知る必要がある。しかし、光子そのものを測定しようとすると、反応を起こした際に消えてしまうためビームとして利用することはできない。ここでは、光子の情報を非破壊で取り出すために、制動放射の際の散乱電子の情報を用いる。生成された制動放射光子のエネルギーを  $E_\gamma$ 、

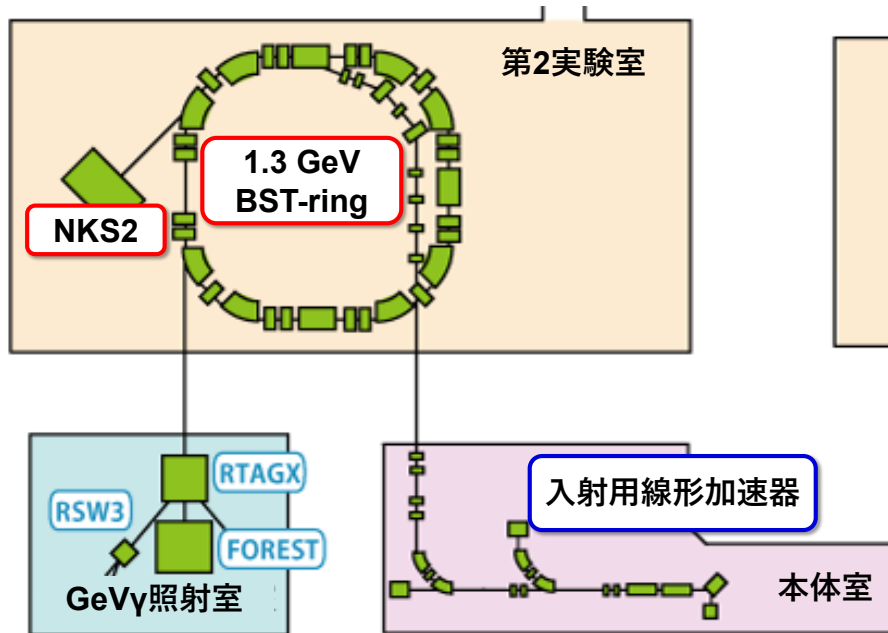


図 1.10: ELPH 1.3 GeV BST-ring の概観 [30]。図中右下の入射用線形加速器で加速された電子は第二実験室の BST-ring へと送られ、1.3 GeV まで加速される。

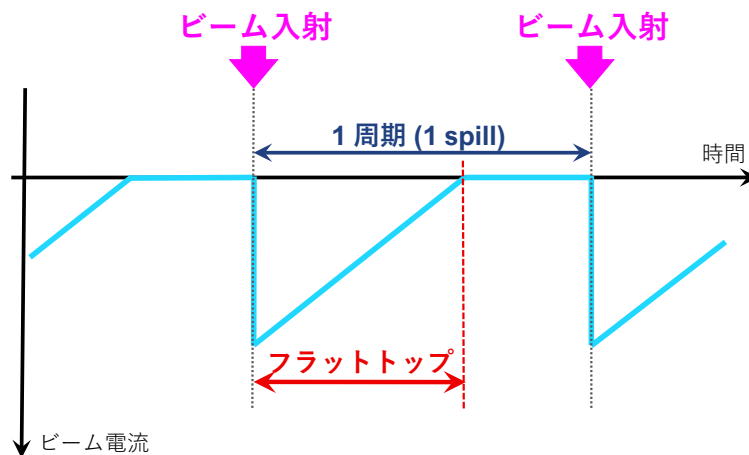
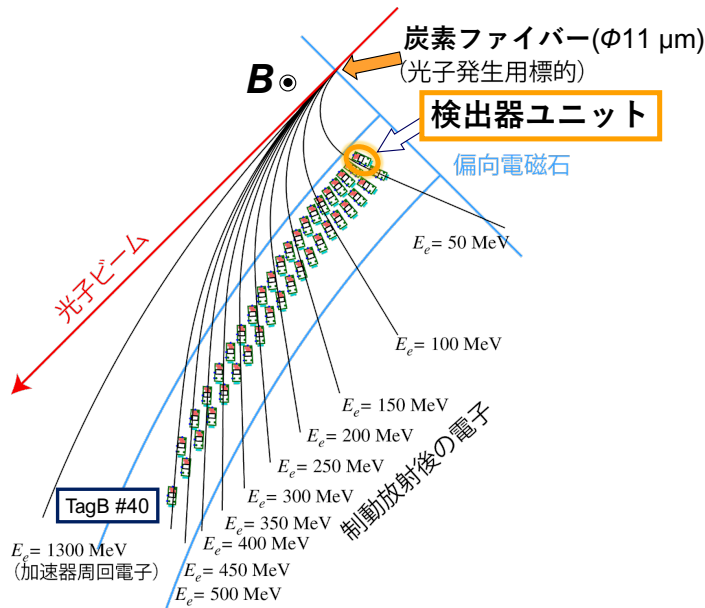


図 1.11: 実験中のビーム電流の概念図。

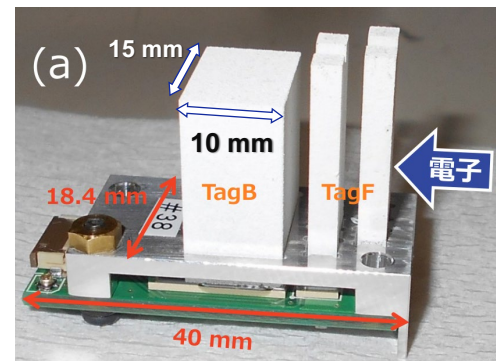
周回電子のエネルギーを  $E_e$ 、制動放射後の電子のエネルギーを  $E_{e'}$  とすると、

$$E_\gamma = E_e - E_{e'} \quad (1.6)$$

の関係が成り立つ。ただし、ここでは電子の質量や標的である炭素原子核への運動量移行は十分に小さいものとして無視している。即ち、制動放射を起こし、その分のエネルギーを失った電子のエネルギーを知ることによって制動放射光子のエネルギー情報を取得する。ここでは散乱電子のエネルギーをその通過位置から決定する。制動放射によってエネルギーを失った電子は直後の偏向磁石内で本来の設計軌道とは異なり偏向電磁石の内側方向に曲げられ、そのエネルギーによって異なる軌道を描く。磁場の分布が既知であるとする、通過位置と電子のエネルギーを対応付けることが可能になる。これによって散乱電子のエネルギーを知ることができる。以下では、各イベント毎に光子のエネルギーや生成時刻を決定することを



(a) 全体の概念図 (元の図は [33] より引用。)



(b) ユニットの拡大図 (元の図は [34] より引用。)

図 1.12: 旧 Tagger の概念図。(a): 全体の概念図 (元の図は [33] より引用。)。偏向電磁石内側に設置されており、散乱電子がどのユニットを通過したかによってエネルギーを同定する。(b): ユニットの拡大図 (元の図は [34] より引用。)。TagB1 本に対して TagF4 本の組合せを基本単位として、これを計 40 ユニット配置した。全体では TagB40 チャンネル、TagF160 チャンネルであった。

標識化 (tagging) といい、この測定が行われた光子を標識化光子 (Tagged photon) という。これを行う検出器である光子標識化装置 Tagger について述べる。光子標識化装置は 2021 年に新規製作・置き換えが行われた。ここでは置き換え以前に運用されていた光子標識化装置 (以下、旧 Tagger) と置き換え後の光子標識化装置 (新 Tagger) について述べる。尚、旧 Tagger は 2016 年から 2019 年にかけて運用されていたものであり、これ以前にはまた別のデザインの Tagger が用いられていたが、本節ではこれについては詳述しないものとする。

新旧いずれにも共通の構造を述べる。Tagger はラジエータが設置された位置の直後にある偏向電磁石 (BM4) 内部に設置される。Tagger は 2 種類の検出器の組み合わせによって構成される。時間測定用検出器と散乱電子位置測定用検出器があり、時間測定用検出器は TagB、位置測定用検出器は TagF と呼ばれる。それぞれプラスチックシンチレータと光検出器 SiPM(浜松ホトニクス MPPC) によって構成される。MPPC については 2.2 節にて詳述する。

まず、旧 Tagger について述べる。図 1.12 に旧 Tagger の概観を示した。旧 Tagger は TagB1 個に対して TagF4 個の組み合わせで 1 ユニートを構成し、これを計 40 ユニット配置した構成となっていた。各ユニットでは TagF の隙間を電子が通過しないようユニット正面に対して 0.1 mm ずつ重なり合った構成となっていた。検出器全体では、周回電子のエネルギー 1.3 GeV 時で標識化可能なエネルギー範囲は 0.76 – 1.26 GeV であった。TagF は 1 – 6 MeV のエネルギー幅で散乱電子のエネルギーを決定することができるものとなっていた [31]。また、時間測定用の TagB の時間分解能は  $\sigma = 35$  ps であった [32]。

旧 Tagger は実際の実験などでも運用されたものの、実験で運用する中で 2019 年頃に一部ユニットで半導体光検出器である MPPC が放射線損傷に起因すると思われる動作不良をきたしていることが判明した。これを受けて、Tagger の新規製作を行った。放射線損傷を最低限に抑えるために、実験実施時



のみ電磁石に設置することを想定して、電磁石内からの引き出しが容易、且つ検出器ユニットの交換が容易な設計に変更するなどメンテナンス性を向上させた構造に変更することとした。更に、散乱電子軌道に対しての各検出器 (TagB/F) の形状や配置の最適化によるアクシデンタルバックグラウンドの低減も併せて実施した。新 Tagger の BM4 内部での配置の概念図を図 1.13 に示した。(a) が全体の配置である。散乱電子のエネルギー毎の軌道を合わせて示した。(b) が一部ユニットを拡大して示したものである。黒及び桃色の円形の部分が各 TagB/F の MPPC を実装したプリント基板の外形を示している。新 Tagger は TagB(Eljen EJ-204, (厚さ)  $20 \times$  (幅)  $20 \times$  (高さ)  $40 \text{ mm}^3$ ) 計 30 本、TagF(Eljen EJ-204, (厚さ)  $5 \times$  (幅)  $6 - 29 \times$  (高さ)  $40 \text{ mm}^3$ ) 計 105 本から構成される。TagF の幅は標識化される光子のエネルギー幅を 5 MeV に固定し、これに合わせるようにしてチャンネル毎に異なる値に設定された。新 Tagger では TagF と TagB をユニット化せず、それぞれ独立に配置するような構造を採用した。それぞれの検出器の構成は BM4 の磁場分布や周回電子の空間的な広がりや物理モンテカルロシミュレーションによって決定した。新 Tagger に関しては、2021 年 6 月と同年 7 月に性能評価を ELPH 第二実験室において実施した。また、これに先立って TagB の時間分解能評価を 2021 年 3 月に ELPH GeV $\gamma$  照射室の陽電子ビームラインにおいて実施した。尚、これらの設計及び性能評価やその詳細については参考文献 [35] としてまとめられる予定である。

#### 1.5.4 Neutral Kaon Spectrometer 2(NKS2)

本節では、 $K^+$  中間子の運動量の測定に用いられる磁気スペクトロメータである NKS2(Neutral Kaon Spectrometer 2) スペクトロメータについて述べる。NKS2 の概観を図 1.14 に示した。スペクトロメータの断面を上側から見下ろしたものである。NKS2 は、 $n\gamma \rightarrow K^0\Lambda$  というストレンジネス光生成チャンネルの研究を目的として開発された検出器システムである。NKS2 では  $\Lambda$  粒子と同時生成される  $K^0$  崩壊時の  $2\pi$  の検出によってストレンジネス生成の同定を行う方式を採っていた。この測定に特化するために従来の検出器システムでは双極電磁石 (680 電磁石) の中心部分に標的を配置し、これを円筒形に囲むようにして検出器群が配置される構造となっていた。検出器としては飛跡検出用ドリフトチェンバー 2 台 (Vertex Drift Chamber; VDC, Cylindrical Drift Chamber; CDC)、飛行時間測定用プラスチックシンチレーション 2 層 (Inner Hodoscope; IH, Outer Hodoscope; OH) から構成される。中心部分の標的から順に外側に向かって VDC, IH, CDC, OH の順で検出器が配置される構成である。更に、OH の外側には光子の  $e^+/e^-$  対生成によるバックグラウンドを除去するためのプラスチックシンチレーション検出器 (Electron Veto; EV) が設置される。EV は上流と下流のそれぞれでビーム平面に沿うようにして配置される。

##### 1.5.4.1 680 電磁石

680 電磁石は NKS2 スペクトロメータにおいて運動量分析を行うための重要な役割を担う。680 という名称は磁極間のギャップが 680 mm であることにちなんで名づけられた。この電磁石は東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (Cyclotron and Radioisotope Center; CYRIC)[37] で用いられていたものを移設したものである。最大電流 1000 A 時の電磁石中心部分における最大平均磁束密度は 0.42 T である [36]。また、磁極中央部分には上下ともに  $\phi 162 \text{ mm}$  の穴が設けられており、従来の NKS2 実験では標的の挿入に用いられた。

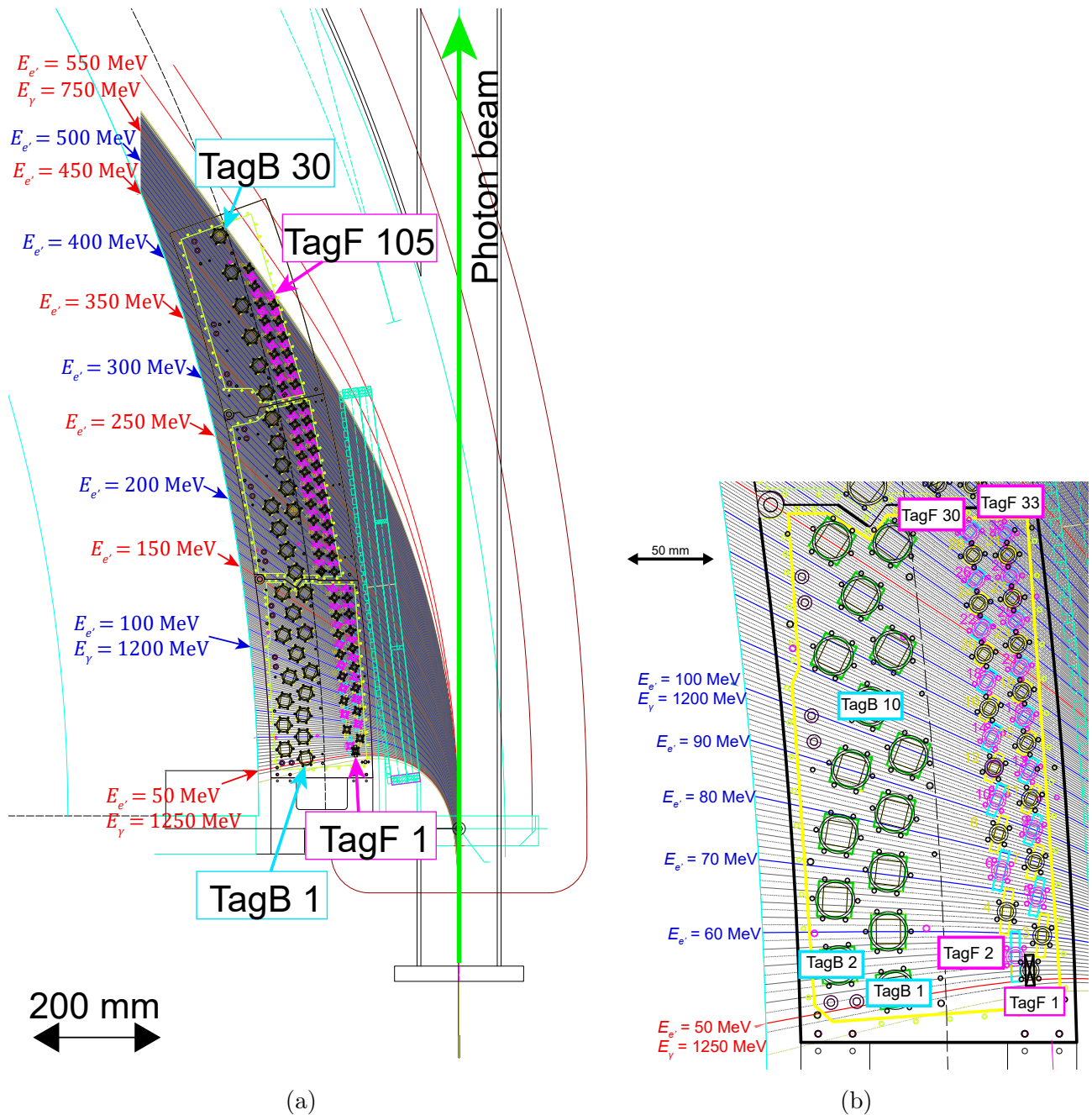


図 1.13: 新 Tagger の検出器の配置。(a) が全体の配置。散乱電子のエネルギー毎の軌道を合わせて示した。(b) が一部ユニットを拡大して示したもの。

#### 1.5.4.2 Vertex Drift Chamber (VDC)

VDC は NKS2 の内側に配置されるドリフトチェンバーであり、その名称の通り標的での反応点を求める役割を担う。検出器全体の寸法は内径  $\phi 110$  mm、外径  $\phi 330$  mm、高さ 506 mm である。筐体中心の空洞には実験時に標的が配置される。計 8 層から構成され、すべての層のワイヤーがステレオワイヤーとなっている。これによって、3 次元的に反応点の位置を求めることが可能となっている。ガスは Ar とエタン  $C_2H_6$  を 1 : 1 で混合した気体を用いて、これを 1 気圧で充填して使用する。過去の実験結果及びモンテカルロシミュレーションとの比較から、位置分解能は  $\sigma = 450 \mu\text{m}$  であると見積もられている [36]。

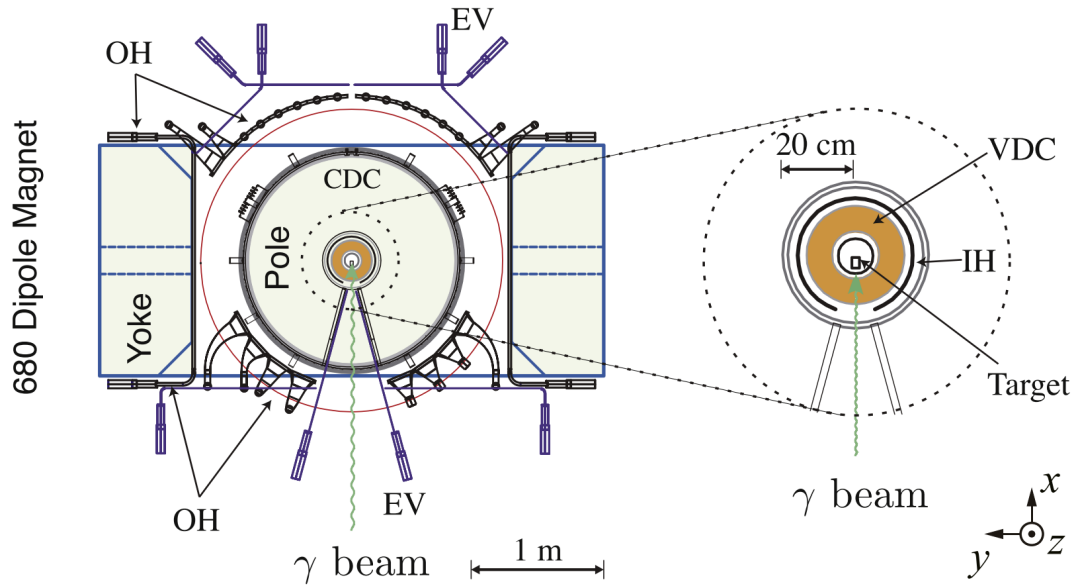


図 1.14: NKS2 磁気スペクトロメータの概観 [36]。680 電磁石中心部分に設置された標的から順に外側に向かって VDC, IH, CDC, OH の順で検出器が配置される。

#### 1.5.4.3 Cylindrical Drift Chamber (CDC)

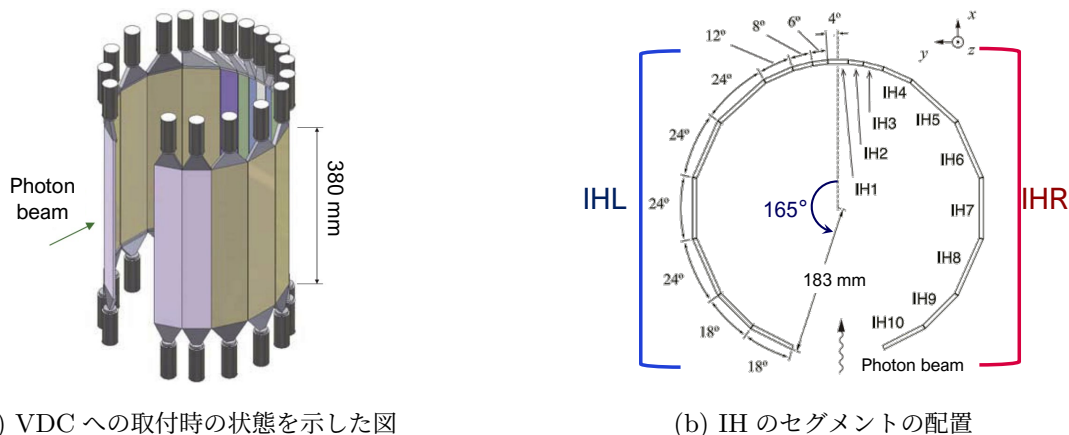
CDC は IH の外周を覆うような形で配置される円筒形のドリフトチェンバーである。IH を通過してきた荷電粒子の飛跡を測定することで運動量測定を行う役割を担う。検出器全体の寸法は内径  $\phi 400$  mm、外径  $\phi 1600$  mm、高さ 630 mm である。計 10 層から構成され、内 6 層がアキシアルワイヤー、4 層がステレオワイヤーとなっている。使用するガスは VDC と同様のものである。過去の実験結果及びモンテカルロシミュレーションとの比較から、位置分解能は  $\sigma = 350 \mu\text{m}$  であると見積もられている [36]。

#### 1.5.4.4 Inner Hodoscope (IH)

IH は VDC の外周を覆うように設置されるプラスチックシンチレーション検出器であり、飛行時間測定のスタートタイミングを形成する。IH の概略図を図 1.15 に示した。IH は計 20 のセグメントに分割された構成となっている。各セグメントはビーム軸方向に設置されるセグメントを IH1 とし、ビーム上流側から見て右側を IHR、左側を IHL とラベルされる。また左右共に下流側から順に IHR(L)2, IHR(L)3, … と番号が割り当てられる。図 1.15(b) に示したように、これらのセグメントで各シンチレータの鉛直方向の長さは 380 mm、動径方向の厚さは 5 mm である。シンチレータの種類は Eljen technology 社の EJ-230[38]、反射材はアルミナイズドマイラーで全セグメント共通である。読み出しはシンチレータ上下での両読みである。光検出器はファインメッシュ型の光電子増倍管 (浜松ホトニクス H6152-01B) を用いている。これは IH が 680 電磁石中心付近の磁場領域に設置されるためである。但し、IH1 は構成が異なり、ビーム通過用の窓が設けられ上下に分割されている。そのため読み出しは片読みで行う。上下ともにシンチレータの鉛直方向の長さは 165 mm である。

#### 1.5.4.5 Outer Hodoscope (OH)

OH は NKS2 の外周を覆うようにして設置されるプラスチックシンチレーション検出器である。飛行時間測定のストップタイミングを形成する。OH の配置を図 1.16 に示した。OH は OHV と OHH の 2 つの部分からなる。V は “Vertical”、H は “Horizontal” の意である。OHV は鉛直方向に長いプラス



(a) VDC への取付時の状態を示した図

(b) IH のセグメントの配置

図 1.15: IH の概略図。(a): VDC への取付時の状態を示した図。但し、ここでは VDC 及び取付時の治具は省略して示した。(b): IH のセグメントの配置。番号の割り当てと共に示した。(元の図はいずれも参考文献 [36] より引用。)

チックシンチレータを 680 電磁石の間口を囲うようにして縦置きで設置される。一方、OHH は 680 電磁石の間隙内の側面に沿うようにして水平に設置される。更に、OHV、OHH はビーム上流方向から見て右側に配置されるものを OHV(H)R、向かって左側に配置するものを OHV(H)L と称する。このうち OHVL、OHVR は全 10 セグメントから構成され、それぞれ OHVL(R)1-10 と番号が割り当てられている。番号はビーム進行方向に近いものから順に割り当てられる。したがって、OHVL(R)1 が前方方向となる。このうち OHVL(R)1-8 は標的の下流側、OHVL(R)9-12 は標的上流側に設置される。OHH では LR 共に、9 本のプラスチックシンチレータからなり、鉛直下側から順に番号が割り当てられる。このうち、左右共に OHHL(R)5 がビーム平面の高さに位置する。それぞれのシンチレータの寸法は OHVL(R)1-8 では鉛直方向長さ 748 mm、幅 150 mm、厚さ 20 mm であり、OHVL(R)9-12 鉛直方向長さ 500 mm、幅 200 mm、厚さ 20 mm である。OHHL(R)2-4 及び OHHL(R)6-8 では水平方向長さ 1600 mm、幅 80 mm、厚さ 20 mm、OHHL(R)1 及び OHHL(R)9 では水平方向長さ 1600 mm、幅 82.5 mm、厚さ 20 mm である。OHHL(R)5 では水平方向長さ 1600 mm、幅 45 mm、厚さ 20 mm である。過去の実験結果より、OH の各セグメントでの典型的な時間分解能は  $\sigma = 300 - 400$  ps である [39]。

本実験に利用するにあたっては、NKS2 の検出器システムを大幅に変更を加えることとなる。この詳細は次節にて述べる。

### 1.5.5 実験手法

予定している実験セットアップを図 1.17 に示した。標識化光子を液体  ${}^3\text{He}$  標的に照射し、 ${}^A_Z(\gamma, K^+){}^A_{\Lambda}(Z-1)$  反応によって  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  ハイパー核を生成する。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  生成時に対となって生成される  $K^+$  中間子と  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  崩壊時に放出される  $\pi^-$  中間子を同時計測し、その時間差を測定することで  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命を直接求める。この時、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  崩壊由来の  $\pi^-$  中間子をより効率的に検出できるように標的の近傍の検出器群は標的を円筒形に囲むようにして設置する。これは内側から順に飛行時間測定器 TDL、飛跡検出器 VDC、飛程検出器の構成となっている。この標的の近傍検出器群に関しては後で詳述する。標的直後に配置したスタートタイミング決定用トリガー検出器 (Beam Line Trigger; BLT) で標的から放出された  $K^+$  中間子

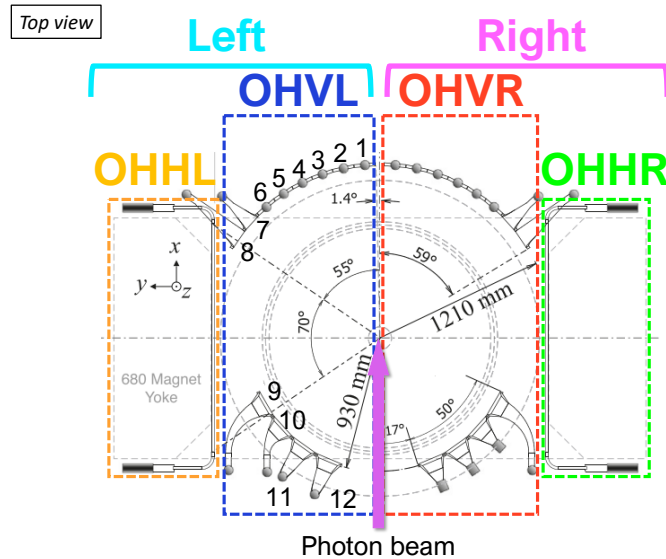


図 1.16: OH の配置 (元の図は参考文献 [36] より引用。)

を測定し、その時間情報によって  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  ハイパー核の生成タイミングを決定する。その後段の NKS2 スペクトロメータを用いて運動量分析と飛跡測定を行う。ここでは従来の NKS2 検出器群のうち運動量分析のための 680 電磁石と CDC のみを用いる。その後 NKS2 の磁極間のギャップを通過してきた粒子を後段に設置予定である飛行時間測定器で検出する。

### 1.5.5.1 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の同定方法

${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の同定方法としてミッシングマス (欠損質量) 法を用いることを予定している。ここでミッシングマスの計算式は以下に示す式 (1.8) で書ける。

$$M_{\Lambda\text{H}} = \sqrt{(E_{\gamma} - E_{K^+} + M_{tar})^2 - (\vec{p}_{\gamma} - \vec{p}_{K^+})^2} \quad (1.7)$$

$$= \sqrt{(E_{\gamma} - E_{K^+} + M_{tar})^2 - (p_{\gamma}^2 - 2p_{\gamma}p_{K^+}\cos\theta + p_{K^+}^2)} \quad (1.8)$$

$M_{tar}$  : 標的核の質量

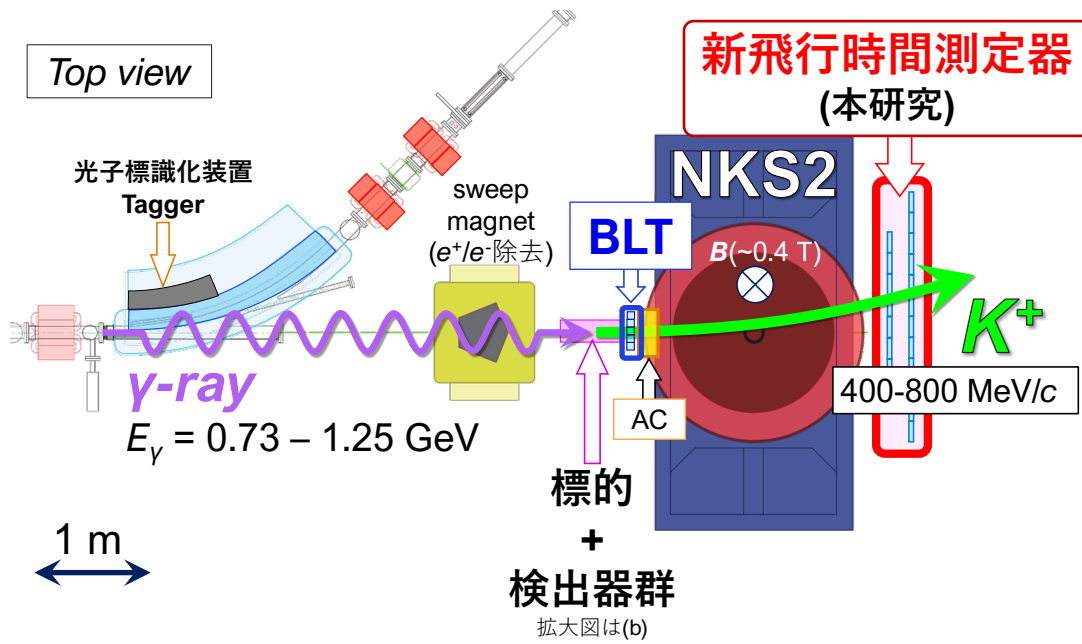
$E_{\gamma} = |\vec{p}_{\gamma}|$  : 実光子のエネルギー

$p_{K^+}$  :  $K^+$  の運動量

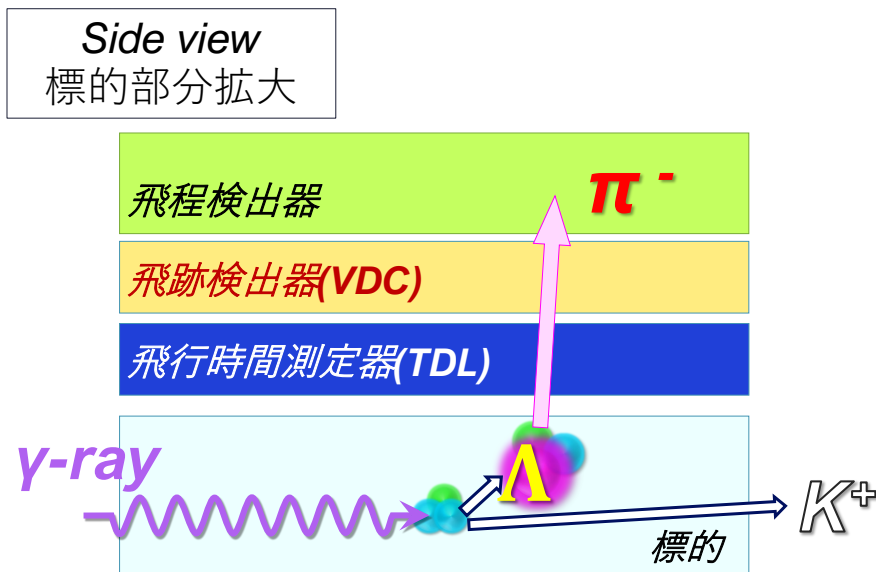
$M_{tar}$  は標的核の質量であり既知の量である。また、 $p_{K^+}$  は  $K^+$  中間子の運動量であり、ビーム軸に対して  $K^+$  中間子の運動量がなす角  $\theta$  は飛跡の測定によって求められる。

### 1.5.5.2 崩壊粒子の識別

標的近傍の検出器群には飛行時間測定器 TDL、飛跡測定器 VDC に加え飛程検出器を導入する。TDL と飛程検出器はいずれもプラスチックシンチレーション検出器とする予定であるが、飛程検出器では粒子の全エネルギーを測定し、TDL におけるエネルギー損失の情報と組み合わせることによってバックグラウンド粒子の除去を行い、標的からの  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  由来の崩壊  $\pi^-$  中間子事象の選別を行う。このような全エネルギー ( $E$ ) とエネルギー損失 ( $\Delta E$ ) とを組み合わせる粒子の識別を行う手法を  $\Delta E - E$  法という。ここで



(a) セットアップ全体の概観



(b) 標的傍部分の概念図

図 1.17: 予定している実験セットアップ。(a): セットアップ全体の概観。ELPH BST-ring から取り出した標識化光子を標的に照射する。ハイパー核と同時生成される  $K^+$  を下流の NKS2 スペクトロメータとその前後に設置した 2 つの飛行時間測定器で測定する。(b): 標的傍部分の概念図。標的を円筒状に囲むように設置した検出器群によってハイパー核弱崩壊時の  $\pi^-$  を検出する。

物質中の単位長さ当たりのエネルギー損失は次の式 (1.9) に示す Bethe-Bloch の式 [40] で記述される。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta} \left[ \frac{1}{2} \ln(2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}) - \ln I - \beta^2 - \frac{1}{2} \delta - \frac{C}{Z} \right] \quad (1.9)$$

$N_a = 6.0 \times 10^{23}$  : アボガドロ定数

$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.8179403262$  (13) fm : 古典電子半径

$m_e = 0.51099895000$  (15) MeV/ $c^2$  : 電子質量

$\rho$  : 物質の密度 [g/cm<sup>3</sup>]

$Z$  : 物質の原子番号

$A$  : 物質の質量数

$z$  : 入射する荷電粒子の電荷

$W_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \beta^2 \gamma^2} + s^2}$  : 一度の電子との弾性散乱における最大の運動エネルギー移行。

$s = \frac{m_e}{M}$

$M$  : 入射粒子の質量

$I$  : 平均イオン化エネルギー

$\delta$  : 密度補正項

$C$  : シェル補正項

ここで、密度補正項  $\delta$  は超相対論的領域での補正項であり、以下の式 (1.10) のように書ける。但し、 $X_0$ ,  $X_1$ ,  $a$ ,  $m$  は物質に固有なパラメータである。

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{for } (X < X_0) \\ 4.6052X + C_0 + a(X_1 - X)^m & \text{for } (X_0 < X < X_1) \\ 4.6052X + C_0 & \text{for } (X > X_1) \end{cases} \quad (1.10)$$

$$X \equiv \log_{10}(\beta\gamma)$$

$$C_0 \equiv -\left(2 \ln \frac{I}{h\nu_p} + 1\right)$$

$$\nu_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\pi m_e}} = \sqrt{\frac{\rho Z N_a e^2}{\pi m_e A}}; \text{ プラズマ振動数}$$

一方、シェル補正項  $C$  は低エネルギー領域での補正項であり、以下の式 (1.12) のように書ける。但し、 $I$  は平均イオン化エネルギーであり eV の単位で扱う。

$$C = (0.4223777\eta^{-2} + 0.0304043\eta^{-4} - 0.000381067\eta^{-6}) \times 10^{-6} I^2 \\ + (3.850190\eta^{-2} - 0.16679897\eta^{-4} + 0.00157955\eta^{-6}) \times 10^{-9} I^3 \\ \eta \equiv \beta\gamma \quad (1.11)$$

プラスチックシンチレータでの単位長さあたりのエネルギー損失  $-\frac{dE}{dx}$  と運動エネルギー  $E_{kin}$  との相関を図 1.18 に示した。ここでは実際の実験での粒子識別を想定して、 $\pi$  中間子と陽子の違いを示した。粒子の質量によって単位長さあたりのエネルギー損失と運動エネルギーの対応が異なることがわかる。この差を利用して粒子の識別を行う。

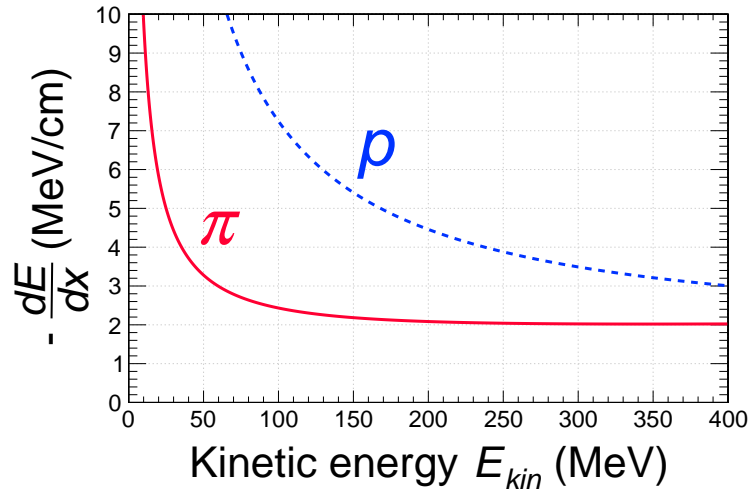


図 1.18: 運動エネルギー  $E_{kin}$  とプラスチックシンチレータ中での単位長さ当たりのエネルギー損失の相関。赤の実線が  $\pi$  中間子、青の破線が陽子の場合を示す。粒子の質量の違いから  $-dE/dx$  と運動エネルギーとの対応が異なる。

### 1.5.5.3 寿命の決定

${}^3_{\Lambda}\text{H}$  生成時に同時に生成される  $K^+$  が BLT を通過する時刻を  $t_{K^+}$ 、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  崩壊時に放出される  $\pi^-$  が TDL を通過する時刻を  $t_{\pi^-}$  とする。更に  $K^+$  の標的での生成位置から BLT までの飛行時間を  $TOF_{K^+}$ 、崩壊  $\pi^-$  の TDL までの飛行時間を  $TOF_{\pi^-}$  とすると、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の崩壊時間  $t_d$  は次のように書ける。

$$t_d = (t_{\pi^-} - TOF_{\pi^-}) - (t_{K^+} - TOF_{K^+}) \quad (1.12)$$

この量をイベント毎に算出して、得られた  $t_d$  の分布にガウス関数に指数関数を畳み込んだ関数でフィッティングを行うことによって  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命  $\tau$  を決定する。

この実験において導入される検出器群は既設の NKS2 検出器システムからの流用も含めて、既にいくつもの先行研究によって開発が進められている。筆者はこれらの開発に貢献したわけではないが、いずれの検出器も本実験を遂行する上で不可欠な役割を担うため、以下で各検出器の概要を述べる。

### TDL

TDL は Timig counter for Direct Lifetime measurement の略称である。TDL はハイパー核崩壊時に放出される  $\pi$  中間子を検出することで崩壊時刻を決定する、 $\Lambda$  ハイパー核寿命測定実験の要ともいえるべき検出器である。先行研究 [33] において実験全体のデザインと併せて基礎開発が遂行され、その後、実機開発とより詳細な検討が進められている [41, 42, 43]。低物質質量・小型・高時間分解能かつ大立体角であることを基本思想として設計・開発されており、プラスチックシンチレータ (Eljen EJ-212) と SiPM (浜松ホトニクス MPPC S13360-3050PE) から構成される。光検出器として SiPM を用いることから磁場中での安定した動作も期待できる。

構造としては、長さ 200 mm、厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータ計 48 本を十二角形になるように配置し、各シンチレータの両端に MPPC を接続したものとなっている。この構造は、標的の周囲を覆うことと、後述する飛跡検出器・VDC の内部に収まるようにするという 2 つの条件を満たすように考案されたものである。多角形構造となるようにシンチレータを配置するために、頂点部分に配置される一部



のシンチレータは断面が台形に設計されている。この他のシンチレータに関しては幅 5 mm であり、正方形の断面を持つ。また、MPPC は各シンチレータの端面に対して 1 個ずつ接続されるが、読み出しチャンネル数を少なく抑えるため、MPPC 隣接する 2 チャンネルを 1 組として直列接続で読み出す方式が採用されている。

### VDC

VDC はハイパー核崩壊時に放出される  $\pi$  中間子の飛跡測定を行うための検出器である。これには従来の NKS2 において 680 電磁石内部に設置していた VDC をそのまま使用する。ただし、ビーム軸方向に横倒しにして使用するという点で従来のセットアップとは異なる。

### BLT

BLT は Beam Line Trigger の略称であり、標的システムの直後に設置されるプラスチックシンチレーション検出器である。標的から放出された  $K^+$  中間子を検出することで、標的におけるハイパー核の生成時刻の決定及び飛行時間測定のスタートタイミングを決定する。BLT は先行研究 [44] において開発が行われ、検出器全体の設計及びプラスチックシンチレータの構成の検討が行われた。 $3^T \times 5^W \times 15^L \text{ mm}^3$  のプラスチックシンチレータ (Eljen EJ-232) の長さ方向両端に光検出器として MPPC S13360-3050PE を接続したものを基本単位として、これを計 30 本並べた構成となっている。BLT の設置場所は標的直後かつビームライン上であることから、実光子ビーム起因に起因する  $e^+/e^-$  の大量のバックグラウンドが存在することが予想される。これを回避するため、ビーム中心に対して幅 25 mm  $\times$  高さ 12 mm の部分をアクリルに置き換えることで不感領域としている。

### AC

BLT の下流側にはエアロジェルチェレンコフ検出器 (AC) を設置する。AC は輻射体として屈折率  $n = 1.06$  のエアロジェルを用いた閾値型チェレンコフ検出器である。

真空中での光速を  $c$  とするとき、屈折率  $n$  の媒質中における光速  $c'$  は  $c' = \frac{c}{n}$  となる。荷電粒子が  $\beta > \frac{1}{n}$  の速さでこの入射するとき、粒子の運動方向に対して

$$\theta_c = \cos^{-1} \left[ \frac{1}{\beta n} \right] \quad (1.13)$$

なる角度で光を放出する。この現象をチェレンコフ放射といい、放出される光をチェレンコフ光という。チェレンコフ検出器は輻射体中で放出されたチェレンコフ光を検出することで粒子の  $\beta$  を弁別する検出器である。

標的から放出される粒子は測定対象である  $K^+$  に加え、大量のバックグラウンドを含んでいることが予想される。具体的には  $\pi$  中間子や  $\mu$  粒子、 $e^\pm$  などが考えられる。これらのバックグラウンド粒子が混入することによるデータ収集効率の悪化が懸念される。AC の役割はこれらのバックグラウンド粒子をトリガー段階で除去することにある。図 1.19 に粒子の運動量と  $\beta$  の相関を示した。ここでは  $K$ ,  $\pi$ , 陽子の 3 種類の荷電粒子の場合を示した。併せて AC で用いるエアロジェルの屈折率  $n = 1.05$  の逆数 ( $1/n \sim 0.952$ ) に対応する値を藍色の二点鎖線で示した。 $\pi$  の場合には  $p > 436 \text{ MeV}/c$  の範囲で  $\beta > 1/n$  となるのに対して、 $K$  及び陽子は図 1.19 に示した範囲では閾値を超えることはない。したがって、 $\beta$  による粒子の弁別が可能となる。

AC は先行研究 [45] において開発が行われている他、プロトタイプの製作及び性能評価が行われて

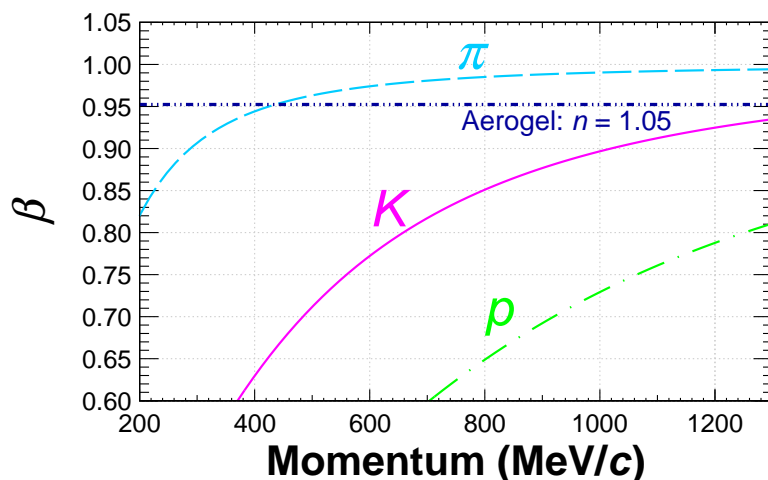


図 1.19: 運動量と  $\beta$  の相関。K,  $\pi$ , 陽子の 3 通りの場合と AC で用いるエアロジェルの屈折率  $n = 1.05$  の逆数 ( $1/n \sim 0.952$ ) に対応する値を示した。

いる。

### 1.5.6 新粒子飛行時間測定器に対する要求性能

この実験を成功に導くうえで極めて重要なことは、より多くの  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象を同定することにある。1.5.5 節において、本実験では  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象の同定はミッシングマスを用いて行うことを述べた。この手法を用いるうえで、重要な点の 1 つは如何に大量に存在すると予想されるバックグラウンド粒子 ( $\pi$ ,  $p$ ) の中から識別対象たる  $K^+$  中間子を識別し、標的でのストレンジネス生成事象を同定できるかという点にある。そのためには NKS2 スペクトロメータを用いて遂行する運動量測定と併せて、NKS2 上流と下流それぞれに配置した検出器間での飛行時間 (Time Of Flight; TOF) の測定を行い TOF の情報から粒子の弁別をおこなうことが重要である。 $K^+$  に対しての主たる弁別対象としては  $\pi^+$  が挙げられる。新たに NKS2 下流へ導入する新飛行時間測定器には、TOF 分布の上で  $5\sigma$  の精度で  $K/\pi$  の弁別を遂行できることを要求性能に上げ、その目標性能を  $\sigma < 150$  ps とする。加えて、実光子ビーム起因の電子・陽電子対生成事象が支配的な領域の回避、NKS2 の漏れ磁場領域での安定した動作が求められる。

## 1.6 本研究の目的

我々が東北大学電子光理学研究センター (ELPH) で実施を計画する  ${}^A_Z(\gamma, K^+){}^A_{\Lambda}(Z-1)$  反応を用いた  $\Lambda$  ハイパー核直接寿命測定実験のためには新たに  $\sigma < 150$  ps を満足する飛行時間測定器の開発が求められる。しかし、NKS2 スペクトロメータ既設の飛行時間測定器では時間分解能は典型的に  $\sigma \sim 300$  ps である [39]。そのため、十分な時間分解能を持つ検出器を新規に開発を行う必要がある。更に、前述の通り、時間分解能のみならず様々な要求を同時に満足していることが求められる。本研究の目的は、この時間分解能と各種要求性能とを両立する新飛行時間測定器の開発を行うことにある。

## 第 2 章

# 新飛行時間検出器の基礎設計

この章では、新飛行時間測定器に求められる要求性能について整理し、それを踏まえて開発する検出器の基本的な構成について述べる。続けて、本研究で光検出器として採用することを考えている MPPC (Multi Pixel Photon Counter) について説明する。

### 2.1 検出器への要求性能とデザイン

本節では、新飛行時間測定器に対する要求性能と基礎デザインを述べる。まず、考慮すべき点とともにそれに対して求められる具体的な性能について、モンテカルロシミュレーションや過去実験のデータを参照しながら述べる。続いて、それらを踏まえて決定した検出器全体の基本的な設計方針を述べる。

#### 2.1.1 $K^+/\pi^+$ 弁別が十分可能な時間分解能

##### 要求される時間分解能の見積もり

我々の実験セットアップにおいて、NKS2 の後段で検出される粒子の運動量は  $400 - 800 \text{ MeV}/c$  の範囲であると予想される。この時、運動量が  $800 \text{ MeV}/c$  である  $K^+$  中間子と主な弁別対象となる  $\pi^+$  を飛行時間の情報を用いて弁別することを考える。2 粒子を弁別するために十分な時間分解能として、これらの飛行時間を  $5\sigma$  で分離可能であることを要請する。以下では、どの程度の時間分解能であればこの要求を達成できるかを見積もる。それぞれの粒子の飛行時間  $TOF_{K^+, \pi^+}$  は粒子の飛跡長  $L_{path}$  と粒子の飛行速度を光速  $c$  で規格化した量  $\beta$  によって

$$TOF = \frac{L_{path}}{\beta c} \quad (2.1)$$

と書くことができる。まず、 $\beta$  を考える。質量  $m$  の粒子が  $p$  の運動量をもって飛行するときの  $\beta$  は式 (2.2) で書ける。

$$\beta = \frac{pc}{\sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}} \quad (2.2)$$

この式 (2.2) を用いて運動量  $800 \text{ MeV}/c$  の  $K^+$  と  $\pi^+$  のそれぞれについて  $\beta$  を計算する。表 2.1 に  $K^+$  と  $\pi^+$  の主な性質を示した。それぞれの質量は表 2.1 の値を用いると次のように計算される。

表 2.1:  $K^+$  中間子と  $\pi^+$  中間子の主な性質。両者の質量と寿命、主な崩壊モードとその分岐比を示した。  
[1]

| 粒子      | 質量<br>(MeV/ $c^2$ ) | 寿命<br>(ns)  | 主な崩壊モード                               | 分岐比<br>(%)   |
|---------|---------------------|-------------|---------------------------------------|--------------|
| $K^+$   | 493.677 (13)        | 12.379 (21) | $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$       | 63.56 (11)   |
|         |                     |             | $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$         | 20.67 (8)    |
|         |                     |             | $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$     | 5.07 (4)     |
|         |                     |             | $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ | 3.352 (33)   |
| $\pi^+$ | 139.57039 (17)      | 26.033 (5)  | $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$     | 99.98770 (4) |

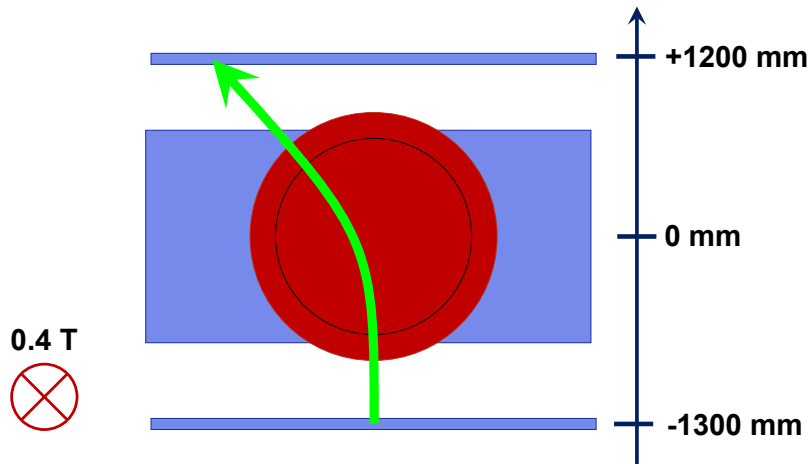


図 2.1: 粒子の飛跡長の見積もりにおいて仮定したセットアップ。粒子はビーム軸上に放出されると仮定した。NKS2 電磁石による磁場はここでは全領域一様に 0.4 T と仮定した。

$$\beta(K^+) = \frac{800}{\sqrt{(493.7)^2 + (800)^2}} = 0.851 \quad (2.3)$$

$$\beta(\pi^+) = \frac{800}{\sqrt{(139.6)^2 + (800)^2}} = 0.985 \quad (2.4)$$

次に飛行時間を測定する検出器間の粒子の飛跡長  $L_{path}$  を考える。ここでは、次のように見積もった。仮定した条件を図 2.1 に示した。NKS2 電磁石の中心をビーム軸方向の原点に取り、ビームの進行方向を正にとる。ここで、上流側に設置する BLT は原点から  $-1300$  mm だけ前方に位置すると仮定する。下流に設置する新飛行時間測定器は  $+1200$  mm 下流にあるとした。この時、スペクトロメータによる磁場は鉛直下向きで一様に  $0.4$  T であると仮定する。実際には磁極の大きさが  $\phi = 800$  mm であり、有限要素法による 3 次元磁場計算ソフト (TOSCA) による磁場計算より、磁場は一様ではなく磁極周辺で減衰する形状であり、水平方向の成分も存在するとわかっているが、簡単のためここでは考慮しない。ここで  $B$  [T] の磁場中で運動量  $p$  [GeV/ $c$ ] で飛行する粒子が描く軌道半径  $\rho$  [m] は次の式 (2.5) で書ける。

$$p \text{ [GeV}/c] = 0.3B \text{ [T]} \rho \text{ [m]} \quad (2.5)$$

これを用いると、 $p = 800$  MeV/ $c$ 、 $B = 0.4$  T の場合の磁場半径は  $\rho = 6.67$  m となる。今、考えている粒子が、上流側の検出器からビーム軸に沿って通過したとする。この粒子が距離  $d = 2.5$  m だけ離れた下

流の検出器面に達する時の軌道長を考える。これは検出器間の距離と軌道半径によって求められる弧の長さを考えればよい。したがって、 $L_{path}$  は

$$L_{path} = \rho \sin^{-1} \left( \frac{d}{\rho} \right) = 6.67 \sin^{-1} \left( \frac{2.5}{6.67} \right) = 2.56 \text{ m} \quad (2.6)$$

と見積もられる。これを用いると、 $K^+$  と  $\pi^+$  のそれぞれの飛行時間及びその差  $\Delta TOF$  は次のように計算される。

$$TOF_{K^+} = \frac{2.56 \text{ m}}{(3.0 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot (0.851)} = 1.00377 \dots \times 10^{-8} \simeq 1.00 \times 10^{-8} \text{ s} \quad (2.7)$$

$$TOF_{\pi^+} = \frac{2.56 \text{ m}}{(3.0 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot (0.985)} = 8.67118 \dots \times 10^{-9} \simeq 8.67 \times 10^{-9} \text{ s} \quad (2.8)$$

$$\Delta TOF = 1.37 \times 10^{-9} \text{ s} \quad (2.9)$$

となる。これを  $5\sigma$  の精度で弁別するためには検出器間の飛行時間の分解能  $\sigma_{TOF}$  が  $\sigma_{TOF} \sim 260 \text{ ps}$  であれば良いということになる。但し、これは他のバックグラウンド等を一切考慮しない理想的な実験環境を想定した場合の最低要件と考えられる。本研究ではこれを最低条件であるとみなし、更に安全性を考慮して検出器間の飛行時間の分解能に対し、 $\sigma_{TOF} < 200 \text{ ps}$  を要求性能として設定した。上流側に設置する検出器である BLT は先行研究 [44] において  $\sigma < 100 \text{ ps}$  の時間分解能を目標性能として開発が行われており、プロトタイプ検出器は要求性能を十分に達成可能であるという結果が得られている。これを踏まえて、本研究で開発する飛行時間測定器に対しては  $\sigma < 150 \text{ ps}$  の時間分解能を要求性能として設定した。

ここまでは、検出器間での時間の測定精度のみで検討を行ってきた。実際の実験では飛行時間に加え、粒子の飛行距離も測定量であるため、飛行距離の不定性についても考慮する必要がある。飛行距離は NKS2 スペクトロメータによる飛跡測定から決定する予定である。飛跡の決定精度に関わる量として、飛跡解析から得られた反応点 (バーテックス) の位置分解能を用いる。図 2.2 に過去に NKS2 を用いて行われた実験で得られた反応点分布を示した [46]。飛跡に関して粒子の識別を行い  $\Lambda$  粒子の弱崩壊に伴い放出された  $p\pi^-$  の組のみを選別し、その崩壊点の位置を求めたものである。但し、反応点での 2 粒子の飛跡の開き角  $\theta$  を用いて  $-0.9 \leq \cos \theta \leq 0.9$  となるものを選択したものである。図 2.2 中の左のヒストグラムがビーム軸方向の反応点分布、右のヒストグラムが鉛直方向での反応点分布を示す。ガウス関数のフィット結果から  $\sigma = 5.20 \pm 0.015 \text{ mm}$  (ビーム方向)、 $\sigma = 3.29 \pm 0.013 \text{ mm}$  (鉛直方向) という値が得られている。我々が計画する実験においても、既設のドリフトチェンバーを利用することから、この値は有効であると考えられる。これに加え、飛行距離に不定性を与える要素として、NKS2 上流と下流での飛行時間測定器配置時の位置の不定性が挙げられるが、これは  $\sim \text{mm}$  程度であると予想される。したがって、飛跡解析による不定性の方が大きいと考えられる。これらの影響を考慮すると、飛行距離の分解能  $\sigma_{path}$  は

$$\sigma_{path} \sim \sqrt{5.2^2 + 3.3^2 + 1^2 + 1^2} \sim 6.3 \text{ mm} \quad (2.10)$$

と見積もられる。ここで、上流に設置する BLT と下流に設置する新飛行時間測定器の設置時の不定性としてそれぞれ  $1 \text{ mm}$  を仮定した。これに対して更に安全性を考慮し  $\sigma_{path} = 10 \text{ mm}$  を仮定する。この場合の飛行時間差  $\Delta TOF$  への影響を見積もる。元の飛行距離の差が運動量  $800 \text{ MeV}/c$  の  $K^+$  及び  $\pi^+$  を仮定した場合に  $2.56 \text{ m}$  であったのに対して、 $\sigma_{path}$  に起因する不定性によって距離を誤って  $2.55 \text{ m}$  とした場合と  $2.57 \text{ m}$  とした場合を考える。  $2.55 \text{ m}$  とした場合は  $\Delta TOF = 1.37 \text{ ns}$ 、  $2.57 \text{ m}$  とした場合は  $\Delta TOF = 1.36 \text{ ns}$  であり、 $\sim 10 \text{ ps}$  程度となる。このことから  $\sim 10^2 \text{ ps}$  である飛行時間の誤差による影

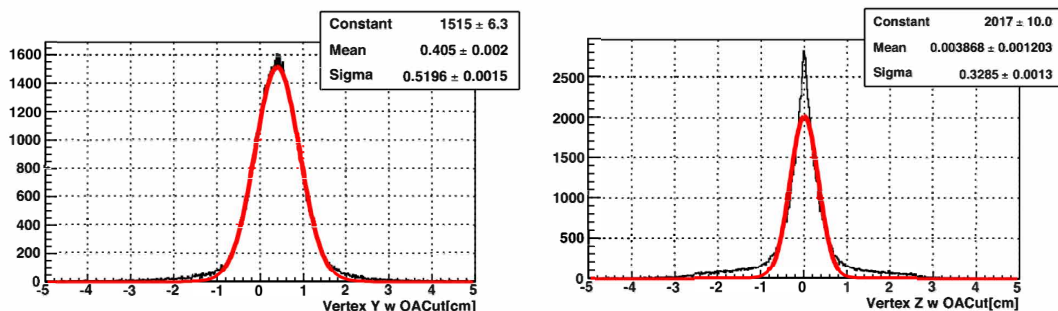


図 2.2: 過去に NKS2 を用いて行われた実験で得られた反応点分布の一例 (参考文献 [46] より引用)。左がビーム軸方向、右が鉛直方向での反応点分布である。ガウス関数のフィット結果から  $\sigma = 5.20 \pm 0.015$  mm (ビーム方向)、 $\sigma = 3,29 \pm 0.013$  mm (鉛直方向) という値を得た。

響の方が大きくなり、これを小さく抑えこむための高い時間分解能が重要であると考えられる。総じて、飛行時間による弁別においては、各検出器での時間分解能の寄与が大きいものと予想される。

#### モンテカルロシミュレーションを用いたパフォーマンスの見積もり

次に、前述のように飛行時間分解能が  $\sigma_{TOF} < 200$  ps 達成できると仮定した場合に、実験のセットアップ下でどのようなパフォーマンスが期待されるかを Geant4 を用いたモンテカルロシミュレーションを通じて見積もる。

#### ★Geant4

Geant4[47] とは CERN によって開発されている物理モンテカルロシミュレーションツールである。様々な物理過程を組み込むことができ、電磁場下での荷電粒子の輸送はもとより、粒子と物質間での相互作用による散乱・エネルギー損失・崩壊・二次粒子の生成といった物理過程を含んだシミュレーションを行うことができる。素粒子・原子核分野や加速器物理、宇宙線物理といった分野にとどまらず、医療・生命科学分野にも利用されている。計算機上に再現した空間内では、ユーザーが任意に検出器のジオメトリを設定することができる他、仮想検出器 (ヴァーチャル・ディテクタ) を配置して粒子の位置や運動量、エネルギー損失などの情報を取得することも可能である。本節では Geant4 を用いて実験セットアップを計算機上に簡易的に再現することで、見積もりを行った。

#### ★シミュレーションのセットアップと手順

図 2.3 に仮定したセットアップの概念図を示した。シミュレーション上での座標系はビーム軸方向に  $z$  軸をとり、鉛直上方向に  $y$  軸を取った。 $y$  と  $z$  両軸に直交するように水平方向に  $x$  軸を取り、ビーム上流側から見て左手側を正の方向と定義した。座標原点は NKS2 スペクトロメータの磁極のギャップの中心に合わせるようにとった。原点から  $z$  軸方向に  $-1500$  mm の位置を標的位置とした。また、 $z = -1300$  mm,  $0$  mm,  $+1200$  mm の位置にそれぞれ仮想検出器 (以下、VD) を配置した。ビーム上流側から順に VD0、VD1、VD2 とした。このシミュレーションにおいては VD0 と VD2 の情報を用いた。

次に、シミュレーション手順を述べる。 $z = -1500$  mm の位置で  $K^+$ ,  $\pi^+$ ,  $p$  を生成した。この時、運動量は  $250 - 750$  MeV の範囲で一様、角度分布はビーム軸 ( $z$  軸) に対してなす角度  $\theta = 0^\circ - 15^\circ$  の範囲で球面一様とした。生成するイベント数はいずれも  $500000$  とした。この時の運動量分布・角度分布の一

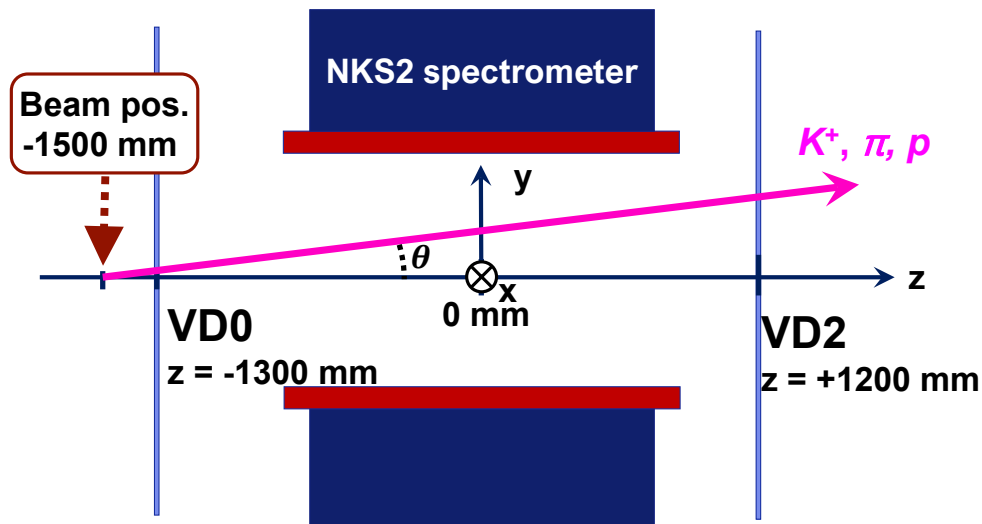
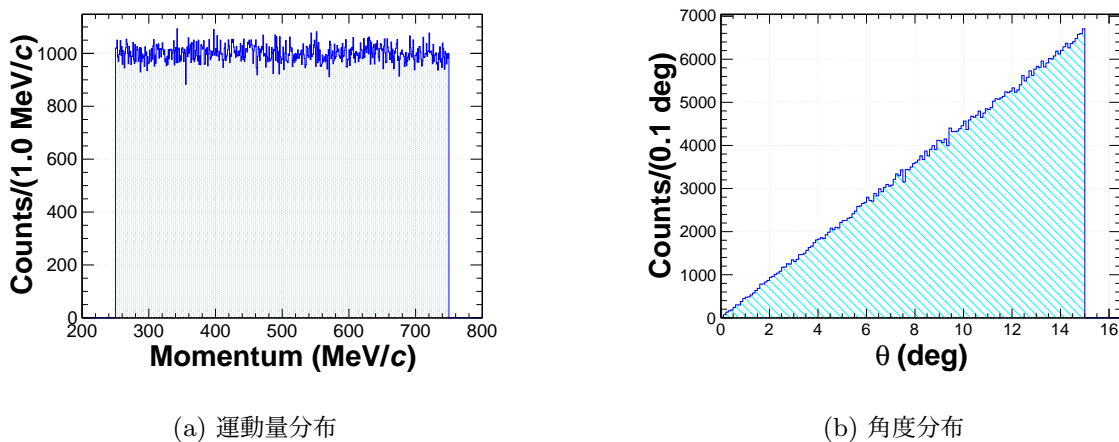


図 2.3: セットアップの概念図。シミュレーション上での座標系はビーム軸方向に  $z$  軸をとり、鉛直上方向に  $y$  軸、これらに直交するように水平方向に  $x$  軸を取った。座標原点は NKS2 スペクトロメータの中心に取った。



(a) 運動量分布

(b) 角度分布

図 2.4: シミュレーション内で生成した粒子の運動量分布とビーム軸に対する角度分布。ここで示したのは生成した粒子が  $K^+$  の場合であるが、他 2 種の粒子の場合も同様に同様生成した。

例を図 2.4 に示した。図中に示したのは生成した粒子が  $K^+$  の場合であるが、他 2 種の粒子の場合も同様に同様生成を行った。これら粒子を前述の位置に配置した仮想検出器群で検出した。生成した粒子のうち  $K^+$  は表 2.1 に示したように  $\sim 12.4$  ns の寿命を持つ。同様に  $\pi^+$  も 26.0 ns の寿命で  $\mu^+\nu_\nu$  の 2 粒子に  $\sim 100\%$  の確率で崩壊する。ここではこれら粒子の有限の寿命による崩壊も取り入れた形式でシミュレーションを遂行した。

次に、評価の方法を述べる。検出された粒子の情報を後述する方法で選別したのち、各物理量に分解能を与えて鈍らせる。その量を用いて次の式 (2.11) で表される質量二乗 (Mass squared) を計算した。ここで、 $m$  は粒子の質量、 $p$  は運動量、 $\beta$  は光速で規格化した粒子の速さ、 $TOF$  は検出器間の飛行時間、 $L_{path}$  は飛行距離である。 $TOF$ 、 $L_{path}$  は VD0 と VD2 での情報を用いて計算した。運動量は生成した

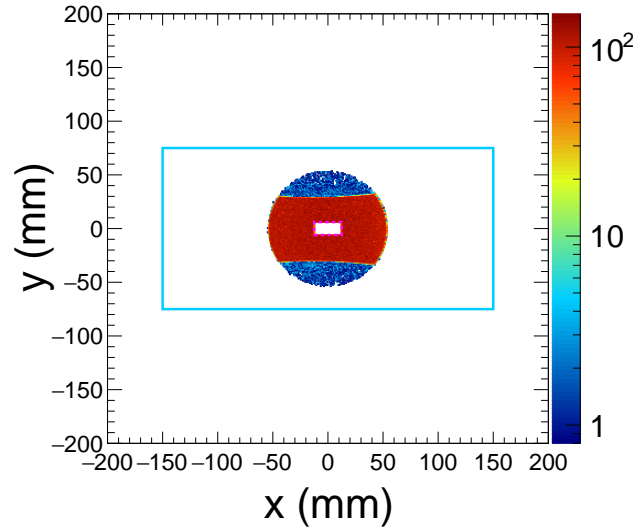


図 2.5: VD0 でのイベント選択の例。水色実線で囲まれた領域を選択し、更に桃色点線の内側の領域を除外した。

際の値を用いた。

$$m^2 = \frac{p^2}{c^2} \left( \frac{1}{\beta^2} - 1 \right) = p^2 \left( \frac{c^2 TOF^2}{L_{path}^2} - 1 \right) \quad (2.11)$$

この式で構成される質量二乗分布を用いて弁別能力の評価を行った。

#### \*事象選択方法

事象の選択では、VD0、VD2 の両方で粒子を検出したことを要請した。更に VD0 に対しては、BLT のサイズと不感領域の大きさを考慮したイベント選択を行った。図 2.5 に VD0 での事象選択の例を示す。水色の実線の枠が検出器全体を仮定したサイズ、内側の点線の枠は超前方領域に設ける予定の不感領域である。それぞれのサイズは先行研究 [44] を参考にして、 $(x, y) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  を中心として検出部分が  $300^x \times 150^y \text{ mm}^2$ 、不感領域が  $25.0^x \times 12.0^y \text{ mm}^2$  とした。粒子の  $x$  位置及び  $y$  位置が検出部分の領域内かつ、不感領域外にあることを要請した。但し、VD2 に対しては検出位置による選別は行わなかった。更に、それぞれの粒子が実際に生成される数量の比を  $K^+ : \pi^+ : p = 1 : 50 : 50$  と仮定し、解析時に扱う個数もこの比に従うように、各粒子の VD2 における検出個数を間引いた。ここでは間引く対象は  $K^+$  のみとした。この際、偏りの無いように、数え上げた個数を 50 で割りその剰余が 0 となった時の事象を採用した。

#### \*分解能

次に適用した分解能について説明する。運動量分解能  $\sigma_p$  は参考文献 [36] に示されている運動量分解能を参考に  $\sigma_p/p = 0.04$  とした。参考文献 [36] 中では、モンテカルロシミュレーションを用いてある運動量  $p_{gene}$  の陽子と  $\pi$  中間子を生成し、実際の実験のデータ解析と同様の手法で飛跡解析を行い再構成した運動量  $p_{rec}$  との差分の分布を作成し評価するという方法で運動量分解能  $\sigma_{p_{rec}}$  を評価している。生成運動量と分解能との関係を図 2.6 に示した。粒子の生成運動量毎に評価を行っているが、ここではそれは考慮せず運動量に依らない一定値として適用した。飛行距離の分解能  $\sigma_l$  は、先に述べた飛跡解析による反応



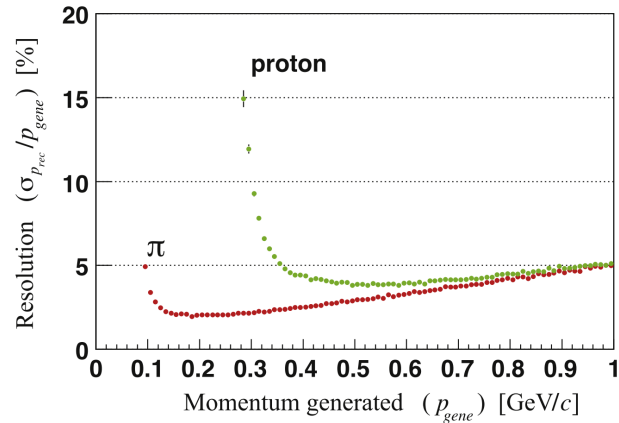


図 2.6: NKS2 の検出器システムでの運動量分解能の評価 [36]。モンテカルロシミュレーションを用いてある運動量  $p_{gene}$  の陽子と  $\pi$  中間子を生成し、実データの解析と同様に飛跡解析を行い再構成した運動量  $p_{rec}$  との差分を評価したものである。赤のマーカが  $\pi$ 、緑のマーカが陽子である。

点の分解能や検出器の配置の不定性を考慮した値として  $\sigma_l = 10 \text{ mm}$  とした。飛行時間の時間分解能は  $\sigma_{TOF} = 100 \text{ ps} - 500 \text{ ps}$  の範囲を検討した。

#### ★質量二乗分布の評価

これらの量から得られる質量二乗分布に対して、 $K^+$  中間子であるとみなす領域を設定し、この領域に漏れこんでくる  $K^+$  以外の粒子の個数を評価した。ここでは、 $K^+$  事象であるとみなす条件として、得られた質量二乗  $m_X^2$  が

$$0.5m_{K^+}^2 < m_X^2 < 1.5m_{K^+}^2 \quad (2.12)$$

の範囲にあることを条件として要請した。ここで  $m_{K^+}$  は  $K^+$  中間子の質量 ( $493.6 \text{ MeV}/c^2$ ) である。以上の手順によって得られた質量二乗分布の例を図 2.7 に示した。ここでは飛行時間の分解能が  $\sigma = 200 \text{ ps}$  の場合と  $\sigma = 400 \text{ ps}$  の 2 通りを示した。水色のヒストグラムが  $\pi^+$  の事象、桃色のヒストグラムが  $K^+$ 、緑色のヒストグラムが陽子に相当する事象である。紺色のヒストグラムは  $\pi^+$  及び  $K^+$  の崩壊事象によって生じた粒子を示す。黒色のヒストグラムが全イベントの総和である。また、 $K^+$  事象とみなす範囲を藍色の破線によって示した。 $\sigma = 200 \text{ ps}$  には  $K^+$  である桃色のヒストグラムがはっきりと見えているのに対して、 $\sigma = 400 \text{ ps}$  では  $K^+$  の分布が鈍っていることに加えて全体の黒色のヒストグラムが広がり、埋もれてしまっていることがわかる。

更に、 $\sigma_{TOF} = 100 \text{ ps} - 500 \text{ ps}$  のそれぞれの場合において、 $K^+$  の質量二乗の領域に該当した事象の総数 ( $N_{All}$ ) のうち、イベント生成時に  $K^+$  として生成された事象の数 ( $N_{K^+}$ ) が占める比 ( $N_{K^+}/N_{All}$ ) を求めた結果を図 2.8 に示した。 $\sigma_{TOF} < 250 \text{ ps}$  の範囲で事象の数の比に依存性が見られなくなることがわかる。加えて、それぞれの時間分解能の下で  $K^+$  の領域への  $\pi^+$  の漏れ込みを考える。式 (2.12) の条件に該当する事象のうち、VD2 で検出された  $K^+$  の数  $N_{K^+}$  と  $\pi^+$  の数  $N_{\pi^+}$  との比は図 2.9 のようになった。この時、 $\sigma_{TOF} = 300 \text{ ps}$  時で  $N_{\pi^+}/N_{K^+} = 8.426 \times 10^{-2}$ 、 $\sigma_{TOF} = 250 \text{ ps}$  時で  $N_{\pi^+}/N_{K^+} = 1.553 \times 10^{-2}$ 、 $\sigma_{TOF} = 200 \text{ ps}$  時で  $N_{\pi^+}/N_{K^+} = 1.687 \times 10^{-4}$  であった。このことより飛行時間分解能が  $\sigma_{TOF} < 200 \text{ ps}$  であれば  $K^+$  の検出数に対する  $\pi^+$  検出数の相対量を  $\sim 10^{-4}$  に抑えることが可能と考えられる。このことから  $\sigma_{TOF} < 200 \text{ ps}$  の時に、粒子の弁別を行うための時間分解能としては十分なパフォーマンスを期待できると考えられる。この飛行時間分解能を達成するためには、上

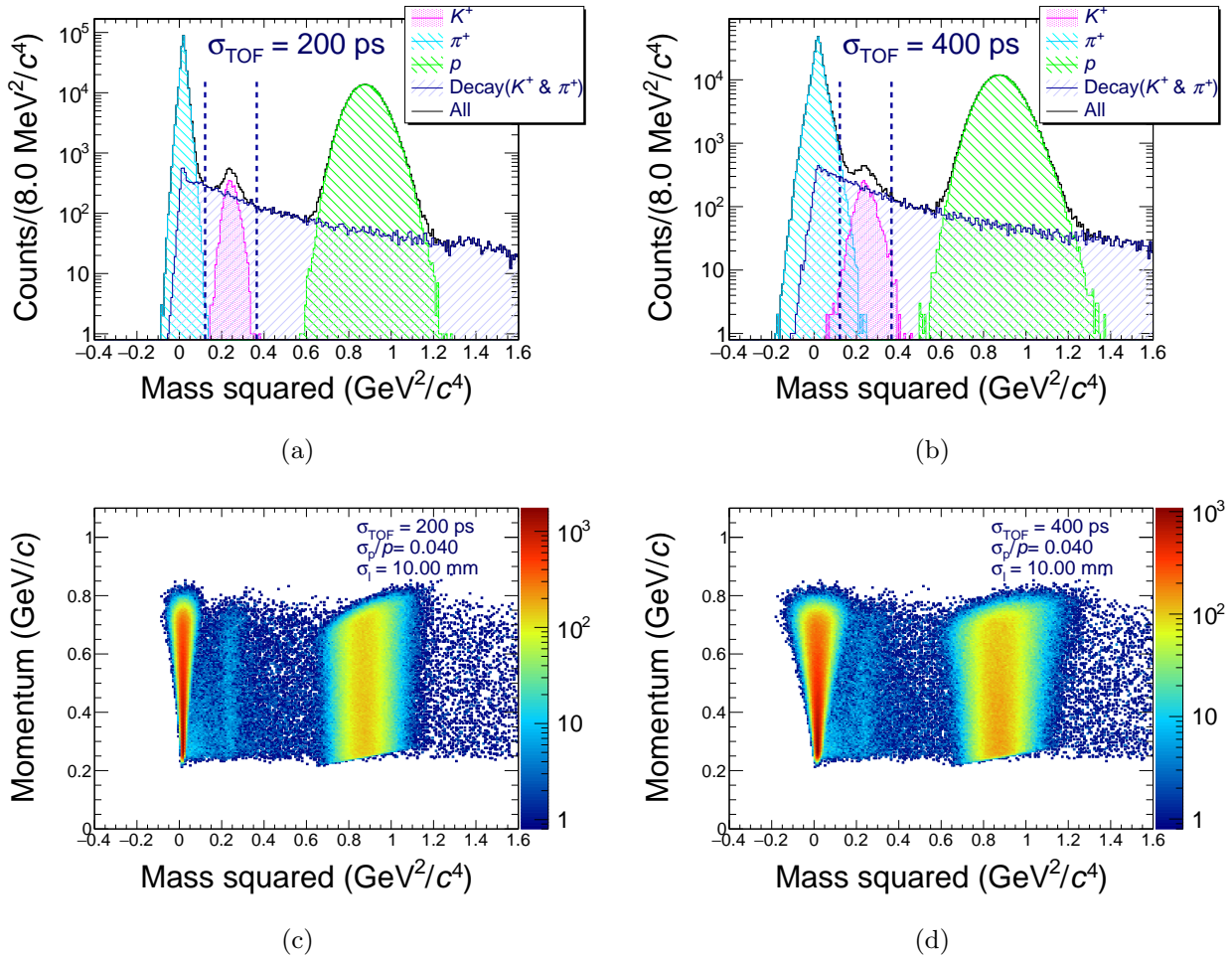


図 2.7: 異なる飛行時間分解能  $\sigma_{TOF}$  での質量二乗分布の比較。ここでは典型的な例として飛行時間分解能  $\sigma_{TOF} = 200$  ps, 400 ps の 2 通りの場合を示した。(a):  $\sigma_{TOF} = 200$  ps の場合の質量二乗分布。(b):  $\sigma_{TOF} = 400$  ps の場合の質量二乗分布。(c):  $\sigma_{TOF} = 200$  ps の場合の質量二乗と生成時の運動量の相関。(d):  $\sigma_{TOF} = 400$  ps の場合の質量二乗と生成時の運動量の相関。

流側の飛行時間測定器の時間分解能として  $\sigma = 100$  ps を想定すると、下流側の検出器に対する飛行時間分解能として  $\sigma = 200$  ps であることが必要と見積もられる。

### 2.1.2 NKS2 スペクトロメータの間口を覆う大面積

前節では、飛行時間による弁別のために時間分解能が要求されることを述べた。 $K^+$  より効率よく弁別するためには、検出可能な事象の数より多くすることが重要である。そのために時間分解能のみならず、検出器全体が NKS2 の間口を覆うような大面積を有している必要がある。図 2.10 に NKS2 の 680 電磁石をビーム上流方向から見込んだ図を示した。濃い青色の部分は電磁石のヨークである。粒子が通過してくる電磁石間の間隙の大きさを水色の矢印によって示した。鉛直方向 680 mm、水平方向 1645 mm がその大きさである。この電磁石の磁極間の間口の大きさを考慮して検出器全体が高さ 0.8 m  $\times$  幅 1.6 m の範囲を覆う構成を考えた。

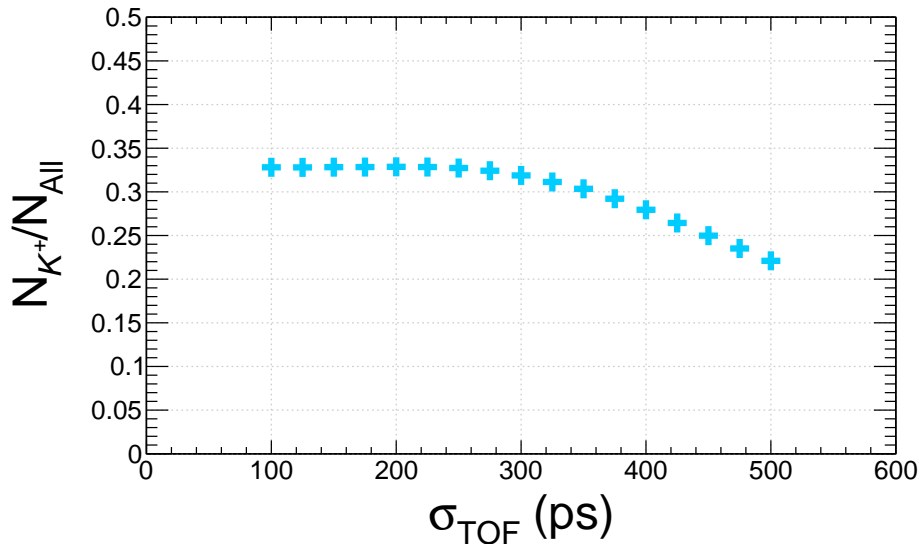


図 2.8: 質量二乗分布上で選択した領域の事象のうち  $K^+$  の事象が占める比の  $\sigma_{TOF}$  依存性。

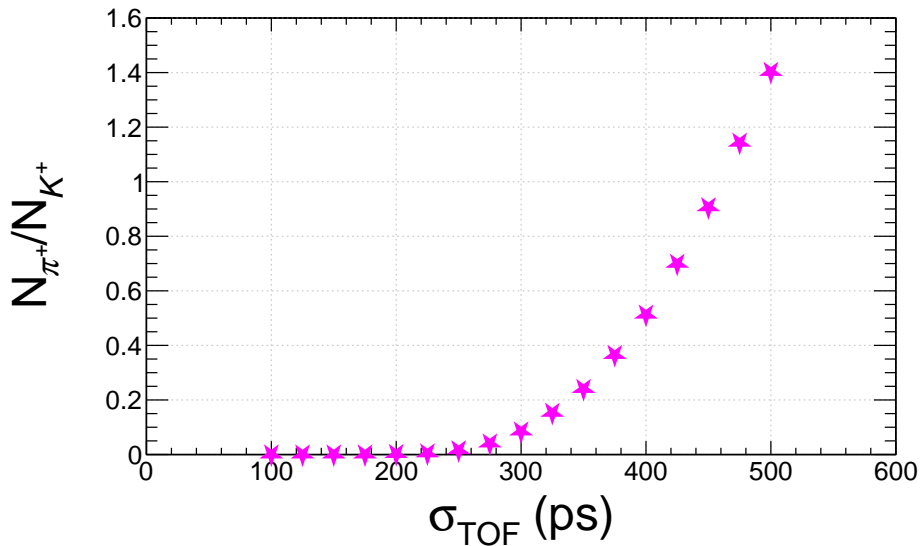


図 2.9: 質量二乗分布上で選択した領域の事象のうち  $K^+$  の事象と  $\pi^+$  の事象の比  $N_{\pi^+}/N_{K^+}$  の飛行時間分解能  $\sigma_{TOF}$  依存性。飛行時間分解能が  $\sigma_{TOF}$  を小さい値に設定した場合に  $N_{\pi^+}/N_{K^+}$  が小さい値を示す傾向が見て取れる。特に  $\sigma_{TOF} = 200$  ps 時で  $N_{\pi^+}/N_{K^+} = 1.687 \times 10^{-4}$  であった。

### 2.1.3 電子・陽電子対生成のバックグラウンドの回避

1.5 節にて述べたように、我々の計画する実験では実光子ビームを用いてハイパー核生成を行う。そのため、光子からの電子・陽電子対生成による大量のバックグラウンドが予想され、これの対策が求められる。従来の NKS2 実験ではビーム平面上に取えてシンチレーション検出器 (Electron Veto; EV) を配置した。これによって電子・陽電子対生成事象を積極的に検出し、トリガーに VETO として組み込むことによってこれらの事象の除去を行っていた。

新飛行時間測定器には、こうした光子ビーム起因の電子・陽電子対生成が支配的となる領域を回避することが求められる。これらの事象を検出しないようにすることによって、過剰な背景事象によって計数率

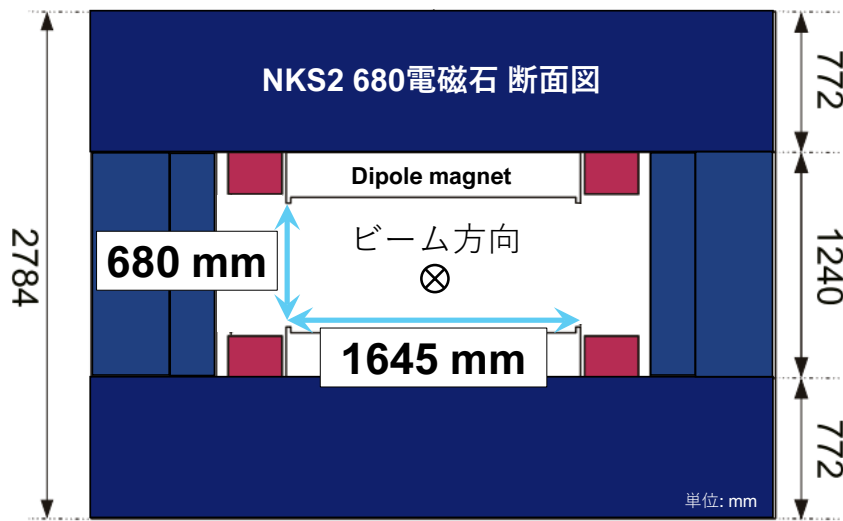


図 2.10: 680 電磁石をビーム上流方向から見込んだ断面図。

が増大してしまいデータ収集効率を悪化させることを回避する。そのために、ビーム平面の周辺には検出器を配置せずに、上下に分割して検出器を配置するという構成を取ることにした。

ここで、検出器を配置しない不感領域として、どの程度の大きさを考慮すればよいのかを、過去の NKS2 実験で得られたデータから考える。以下では 2010 年 10 月に液体重水素標的を用いて遂行された実験でのデータを取り上げる。

この実験では、NKS2 スペクトロメータの中心部分に配置した液体重水素標的に光子ビームを照射し、そこから放出された荷電粒子を周囲の検出器群で測定した。この時のデータ収集のトリガー条件は次のようなものであった [46]。

$$\text{Trigger} = (n_{\text{TagSum}} \geq 1 \otimes n_{\text{IH}} \geq 2) \otimes n_{\text{OH}} \geq 2 \otimes \bar{E}\bar{V} \quad (2.13)$$

TagSum とは Tagger を構成する検出器ユニットのうち、時間測定用検出器 TagB とこれに対応する位置測定用検出器 TagF の組み合わせで形成される論理信号の全組合せでの論理和である。これは、Tagger で散乱電子事象を検出し、少なくとも 1 光子以上の生成が行われたことを担保する信号である。 $n_{\text{IH}}$  は時間測定用ホドスコープのうち、IH の各セグメントのうち、荷電粒子を検出したセグメントの数を表す。即ち  $n_{\text{IH}} \geq 2$  は IH で 2 個以上の荷電粒子が通過した事象を観測したことを示す。 $n_{\text{OH}}$  も  $n_{\text{IH}}$  と同様である。 $\bar{E}\bar{V}$  は電子・陽電子対生成事象除去のために設置されたシンチレーション検出器群で形成される論理信号である。計 4 個の VETO 用検出器の信号の論理積で形成される。 $\bar{\quad}$  が付されていることからわかるように、これは VETO として機能するものである。これらの信号の論理積により、実光子ビームが生成され ( $n_{\text{TagSum}} \geq 1$ )、標的で 2 荷電粒子以上の生成を伴う反応が起こりそれらが IH 及び OH を通過したとみなされる ( $n_{\text{IH}} \geq 2, n_{\text{OH}} \geq 2$ ) 事象のうち、ビーム起因の背景事象ではない ( $\bar{E}\bar{V}$ ) 事象を選択したこととなる。

この実験で取得されたデータのうち、本節で取り上げるランにおける設定を述べる。加速器の運転サイクルのうち、実際にビームが出ている時間を示す Flat top が 41 s であった。また、このランではスピル数を 80 spill として取得を行った。これらの値と、データ収集時に記録された TagSum のスケアラでの値を用いて計算される標識化光子の計数率を表 2.2 に示した。但し、筆者がこれらの値を基に計算を行った

表 2.2: 2010 年 10 月の NKS2 実験における標識化光子の計数率の見積もり。但し、データ収集時の記録を基に筆者が計算したものである。また、1 ラン分のみのデータである。

|              |                    |
|--------------|--------------------|
| Flat top (s) | 41                 |
| スピル数         | 80                 |
| TagSum カウント数 | $5.67 \times 10^9$ |
| 計数率 (/s)     | $1.73 \times 10^6$ |

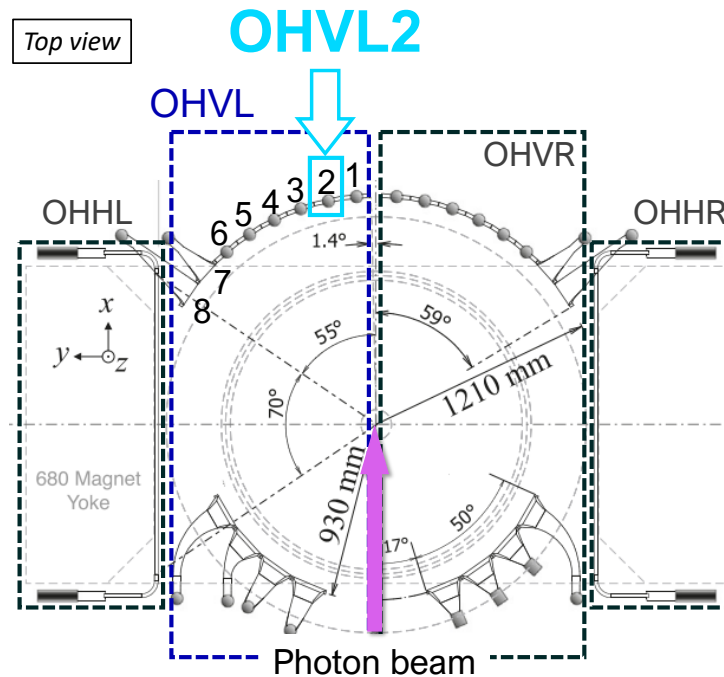


図 2.11: OHVL2 の配置 (元の図は参考文献 [36] より引用。)

ものである。したがって、標識化光子の計数率は  $\sim 1 - 2 \times 10^6$  counts/s であったと見積もられる。本節では、NKS2 スペクトロメータの外周に設置した飛行時間測定用のホドスコープ OH のヒット数から考えることとした。OH の構成は 1.5.4.5 節にて述べた通りであるが、ここでは各セグメントのうち、OHVL2 に着目した。このセグメントの位置を図 2.11 に示した。ビーム前方方向且つビームからみて左側に相当する配置である。このランでの OHVL2 における鉛直位置でのヒット分布を図 2.12 に示した。これは飛跡検出器 (CDC・VDC) の情報を用いた飛跡解析によって得られたものである。横軸の Vertical position 0 cm はビーム平面に相当する。ヒット数分布はビーム平面付近で鋭いピークをなすことがわかる。図中にこのヒストグラムより計算した FWHM の値を示した。ここでは  $\text{FWHM} = 8.0$  cm と求めた。このことから、不感領域の範囲は全体で  $\sim 10$  cm、ビーム平面を基準として鉛直方向に  $\pm 5$  cm 程度とすることを基礎デザインに含めることとした。但し、従来の NKS2 実験と新たに我々が計画する直接寿命測定実験とでは標的システムが大きく異なることに留意しなければならない。直接寿命測定実験に導入予定の標的システムはビーム軸方向の厚さが  $\sim 20$  cm であることから、標的厚さに起因する背景事象の増加が予想される。また、これまでの NKS2 実験では周回電子の電流値を典型的な値として  $\sim 1 - 2$  mA に設定して行ってきた。本節で取り上げた実験もこのようなセットアップで取得されたものであり、Tagger の典型的な計数率は表 2.2 に示したように  $\sim 2 \times 10^6$  counts/s である。直接寿命測定実験においてはさ

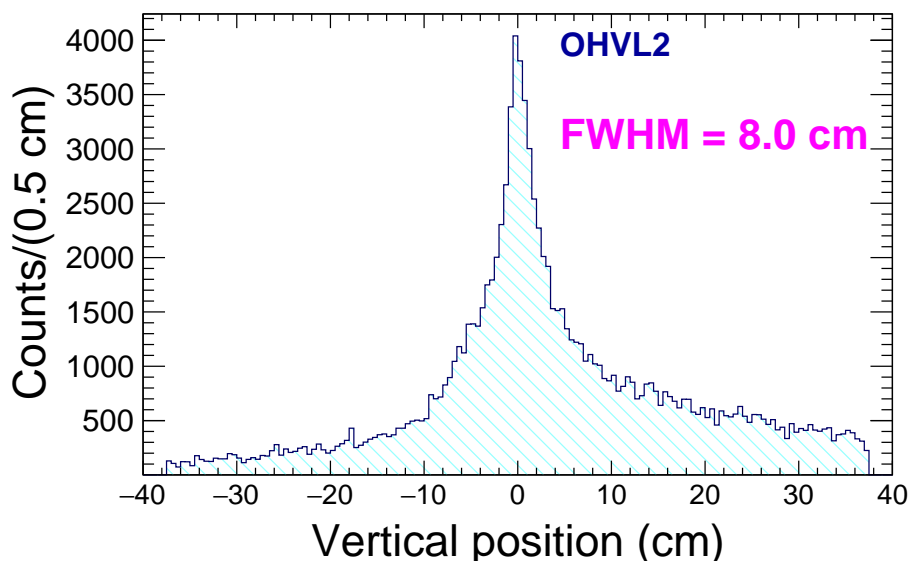


図 2.12: 2010 年 10 月の実験時のデータより得られた OHVL2 での鉛直位置のヒット数分布。鉛直位置の値は飛跡検出器群を用いた飛跡解析によって得られたものである。ヒストグラムより計算した FWHM の値を併せて示した。

らに周回電子の電流値を引き上げ標識化光子のビーム強度を引き上げることを計画している。そのため、ビーム強度の面からも背景事象の増加が予想される。そのため、過去実験のデータに基づく見積もりに加えて、実際の検出器の配置の元で計数率の測定を遂行するといったことも必要であると考えられる。

#### 2.1.4 磁場中における安定した動作

新飛行時間測定器を設置予定である NKS2 下流では、電磁石からの漏れ磁場が存在することが磁場計算の結果わかっている。図 2.13 に有限要素法を用いた 3 次元磁場計算プログラムである TOSCA を用いて計算された NKS2 の磁場分布を示した。(a) がビーム平面上での 2 次元分布である。色の濃淡が鉛直成分の磁場の強度を示す。(b) がビーム軸上での磁場の鉛直成分の分布である。但し、ここでプロットしたのは値の絶対値であり、磁場の向きは実際には鉛直下向きに作用する。 $z = 0$  cm が NKS2 電磁石の中心位置を示す。磁極中心よりビーム軸方向に 1.5 m 程離れた点であっても、 $\sim 0.04$  T の磁場があることがわかる。加えて、運動量分析のための鉛直成分のみならず、水平方向の成分も加わり複雑な様相となっている。このような状況下では光電子増倍管を用いて十分な性能を発揮することはむずかしいと考えられる。そこで、本研究では光検出器として、半導体光検出器である SiPM (Silicon Photo Multiplier) を採用することを考えた。更に、これをシンチレータの長さ方向両端に取り付ける構成を考えた。本研究では SiPM として浜松ホトニクス社の MPPC を採用する。MPPC の詳細に関しては 2.2 節にて述べる。

#### 2.1.5 検出器の基礎デザイン概要

前節までの内容を踏まえて、新飛行時間測定器の基本的なデザインとして採用したものを図 2.14 に示した。検出器全体としては NKS2 の間口全体を覆うように高さ 0.8 m  $\times$  幅 1.6 m とする。全体をプラスチックシンチレータの両端に MPPC を取り付けものを基本単位としてセグメント化する。個々のシンチレータは長さ 300 – 450 mm、幅 10 – 50 mm、厚さ 3 – 5 mm の薄く幅の細いものを採用する。各セグメ

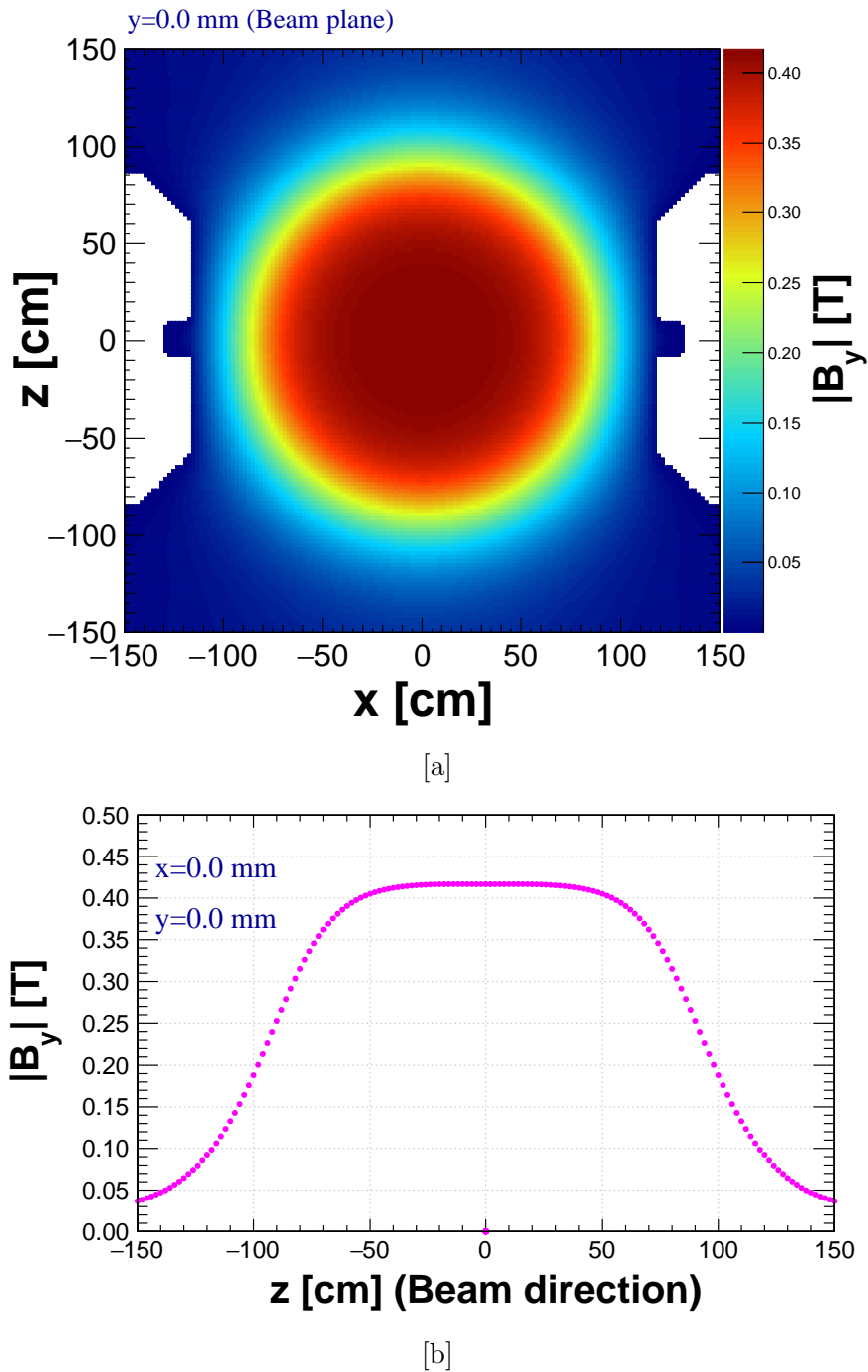
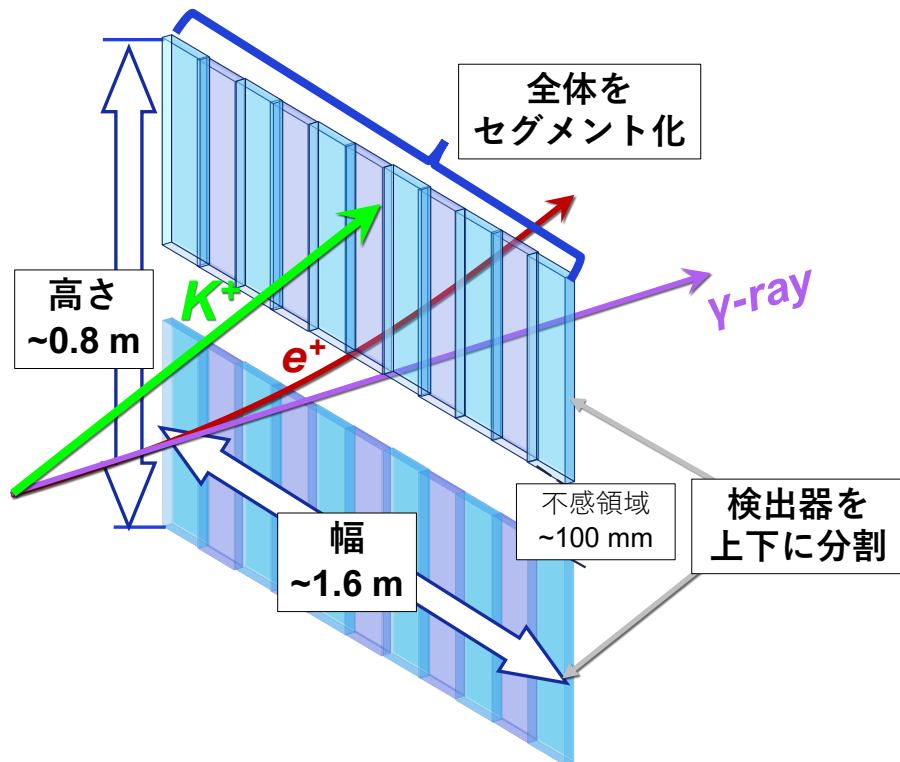
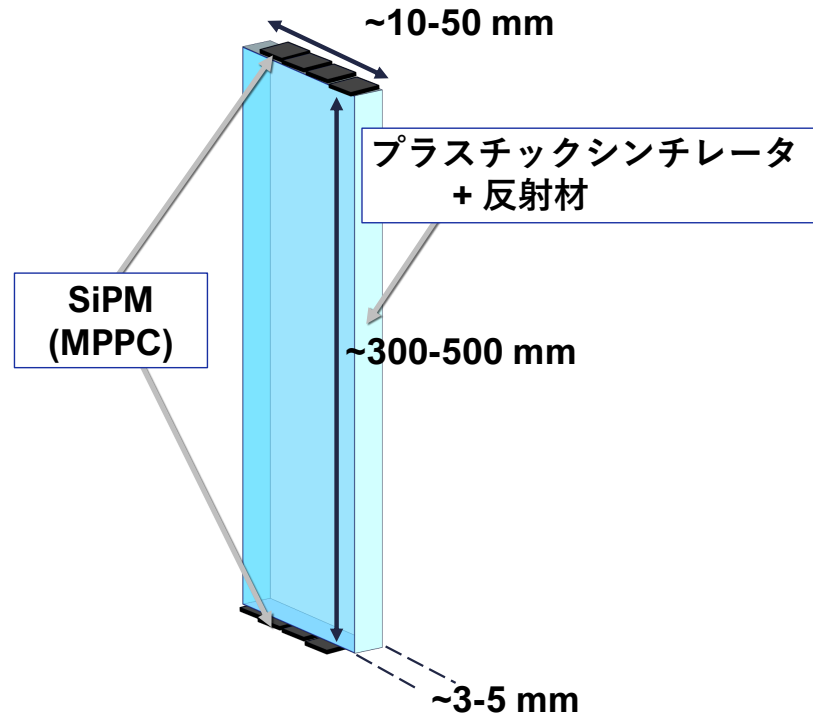


図 2.13: 有限要素法を用いた 3 次元磁場計算で得られた NKS2 電磁石の磁場分布。[a]: ビーム平面上での 2 次元分布。[b]: ビーム軸に沿った位置での分布。但し、鉛直方向の成分の寄与のみを示した。

ントのサイズは小さくすることによって個々のセグメントが十分な時間分解能を発揮できるようにすることを目指す。また、ビーム平面付近は検出器を配置せずに、上下に分割した構成をとる。多数個のプラスチックシンチレータを並べる構成とした場合、反射材の厚さやシンチレータ間の境界部分などに起因する不感領域が生じ、検出効率を下げってしまう恐れがある。このため、最終的には検出器全体を 2 層構造にすることを予定している。粒子を前後の 2 段階で検出できるようにすることで不感領域による粒子の損失を解消することを目指す。



(a) 検出器全体の概念図



(b) セグメント単体の概念図

図 2.14: 新飛行時間測定器の基礎デザイン。(a): 検出器全体の概念図。(b): セグメント単体の概念図。



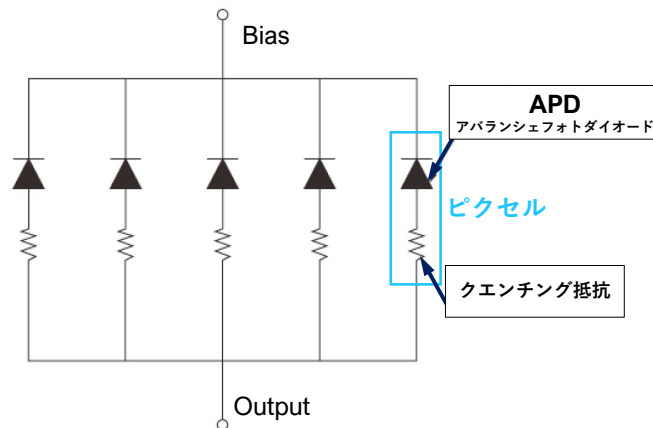


図 2.15: MPPC の基本構造の概念図 (元の図は文献 [49] より引用)。Si APD とクエンチング抵抗を直列接続したものを並列接続したものとなっている。

## 2.2 光検出器 MPPC

本節では本研究で光検出器として使用する MPPC (Multi Pixel Photon Counter) について説明する。MPPC は半導体光検出器である SiPM (Silicon Photo Multiplier) の一種である。本来は、製造元である浜松ホトニクス株式会社 [48] の商品名であるが、素粒子・原子核実験の分野では光検出器として広く用いられているため、以下ではこの名称を用いる。まず次節で動作原理について説明する。続けて本研究で使用した MPPC の特性を述べる。本研究では 2 種類の MPPC を用いた。ここではそれらの相違点についても述べる。

### 2.2.1 動作原理

ここでは MPPC の動作原理について説明する。図 2.15 に MPPC の基本構成の概念図を示した。MPPC はガイガーモードで動作する Si APD (Silicon Avalanche Photo Diode) と電圧降下用のクエンチング抵抗を直列接続したものを基本単位として、これらを平面上に電気的に並列に接続したものとなっている。以下では、この基本単位のことをピクセルと呼ぶことがある。

MPPC の基本単位をなす Si APD について説明する。APD は PN 接合に所定の値以上の逆電圧を印加することで運用される。先に PN 接合について簡単に述べる。一般的な半導体には p 型半導体と n 型半導体の 2 種類がある。これらの違いは付加 (ドーピング) する不純物 (ドーパント) の種類と電荷の担い手 (キャリア) にある。p 型半導体はホウ素 (B) やアルミニウム (Al) といった価電子数 3 の元素をドーピングしたものである。これらが結晶中にある時、実効的に結晶構造内で電子が 1 つ欠けたような状態ができる。ここへ電子が移動してくることによって電子が欠けた位置が移動するため、見かけ上正の電荷が結晶内を移動しているとみなせる。これをホール (正孔) という。p 型半導体ではこのホールがキャリアとなる。一方、n 型半導体はヒ素 (As) 等価電子数 5 の元素をドーピングしたものであり、電子がキャリアとなる。これら 2 種の半導体を接続したものを PN 接合という。両者の接合面近傍ではホールと電子の再結合が生じ、キャリアのない空乏層が形成される。空乏層に逆電圧を印加すると、電子は正の電極へと移動し空乏層は拡大する。APD ではこの PN 接合に形成された空乏層に外部からバンドギャップ以上のエネルギー

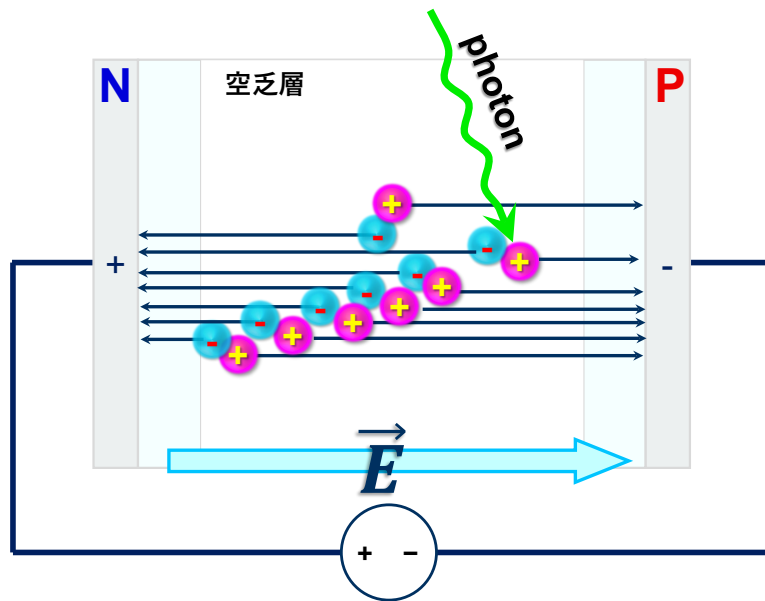


図 2.16: アバランシェ増幅の概念図。空乏層へ入射した光子によって生成された電子・正孔の対は外部電場にしたがって移動する。その過程で連鎖的に電子・正孔対が生成され電荷の増幅がおこる。

を持つ光子が入射すると、電子-正孔の対が生成される。APD に逆電圧が印加されているとき、それぞれのキャリアについて、電子は N 側、正孔は P 側へ逆電圧による電場にしたがって移動する。電子が電場にしたがってドリフトする際に他の結晶格子に衝突し新たに電子正孔対が生成され、雪崩的に電荷の増幅が起こる。これをアバランシェ増幅という。通常の逆電圧を印加した状態では増幅は  $\sim 30$  ps で直ちに収束してしまう。しかし、逆電圧をある電圧よりも高くするときには、電子のみならず正孔もアバランシェ増幅を引き起こす。この現象を説明した概念図を図 2.16 に示した。電子・正孔がともに増幅を起こすことで、はじめに発生した電子正孔対から新たな電子正孔対の生成が繰り返される。この時、APD からは一定の飽和した出力が得られる。このような状態をガイガーモード、この状態で電荷が出力されることをガイガー放電という。また、ガイガーモードに達する時の逆電圧を降伏電圧 (以下、本稿では  $V_{break}$  と表記) という。ガイガーモード下では入射した光子の数によらず一定の出力を得ることができる。

多数個の APD によって構成される MPPC では、この特性を利用することにより、光子を検出してガイガー放電を起こした APD の数、即ち光子を検出したピクセルの数に対応した出力が得られる。印加電圧を  $V_{bias}$  とするとき、MPPC によって得られる電荷量  $Q_{MPPC}$  は次の式 (2.14) のように記述される [49]。

$$Q_{MPPC} = C_{MPPC} (V_{bias} - V_{break}) = \frac{M}{e} (V_{bias} - V_{break}) \quad (2.14)$$

ここで、 $C_{MPPC}$  は検出器容量と呼ばれる量である。またこれを素電化  $e$  で割った値  $M$  をゲイン (増倍率) という。この増倍率は MPPC の性能を特徴づける重要な量の一つである。

MPPC に逆電圧を印加し続ける状態下では APD が一度ガイガーモードに達するとその状態が持続されるため、後から入射する光子を検出することができない。これを解決するためにはガイガーモードを停止する必要がある。この役割を担うのが、各 APD に対し直列に接続されたクエンチング抵抗である。ガイガー放電が生じる際に流れる電流によってクエンチング抵抗で電圧降下が生じ、自ずとガイガーモードが停止する。これによって次にやってくる入射光子を検出可能となる。

### 2.2.2 特性

MPPC の一般的な特徴を述べる。まず、MPPC の利点として以下のような点が挙げられる。

#### 1. 安価

種類や個数にもよるが、1 個当たり ~ 1,000 円 程度で購入することができる。一般的に光検出器として広く利用される光電子増倍管 (PMT, ~ 10 万円) と比較すると、非常に安価である。

#### 2. コンパクト

検出器の読み出し面のサイズや設置場所のスペースに制約がある場合でも導入が容易である。詳細は後述するが、本研究で用いる MPPC の場合、デバイス全体のサイズとしては  $\sim 3.85 \times 4.50 \times 1.50 \text{ mm}^3$ 、入射光に対して実際に感度を持つ受光面の面積は  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  である。

#### 3. 磁場中での安定した動作

光電子増倍管の場合は電子がアノードに達するまでの間に磁場の影響を受けて本来とは異なる方向へドリフトされてしまうことで、ダイノード間の飛行が妨げられてしまい、正しく増幅がなされない。MPPC の場合、電子が電極に達するまでに移動する距離はピクセルのサイズと同程度  $\sim \mu\text{m}$  になるため磁場による増幅への悪影響はない。

但し、このような利点がある一方で、次に述べる点に注意を払わなければならない。

#### 1. 暗電流に伴うノイズ

#### 2. 印加電圧に対して敏感な増幅率

印加電圧の値によっては電圧が 1 V 変化した場合に増幅率 ~ 数十 % 変化することもある。そのため、電圧供給の安定性にも注意を払う必要がある。

#### 3. 増幅率の温度依存性

MPPC がガイガーモードに達する降伏電圧  $V_{break}$  が温度によって変化し、それによって増幅率も変化してしまう。特に高計数率な環境下で運用する場合には電流の増加に伴う自身による発熱に注意を要する。

#### 4. 入射光子数による出力の線形性の消失

入射光子数が非常に多く、1 つのピクセルに複数個の光子が同時に入射するような環境下では出力信号の光子数に対する線形性が失われてしまう。

#### 5. 放射性への耐性

MPPC は半導体検出器であるため、長期間放射線に曝露されることにより、内部の結晶構造に乱れが生じてしまい、検出器としての性質が劣化してしまう恐れがある。実際に我々の実験グループにおいても、長期間加速器内部に検出器を設置した際に、使用していた MPPC のうち一部が動作不良に陥った事例がある。

本研究では MPPC として S14160-3015PS [50] と S13360-3050PE [51] の 2 種類を候補に据えた。S14160-3015PS は近年登場した MPPC であり、本グループ内で検出器として採用された実例は少ない。一方で、S13360-3050PE は第 1 章にて紹介した高時間分解能プラスチックシンチレーション検出器群 (TDL・BLT) にも採用された実績を持つ。図 2.17 にこれら 2 種の MPPC の写真を示した。また、これらの特性を表 2.3 に示した。表 2.3 中に記載した諸元のうち、開口率  $\epsilon_{geo}$  とは各ピクセルの面積と実際に入射光子に対して有感である領域の面積の比である。推奨印加電圧  $V_{op}$  とは浜松ホトニクスが MPPC の動作電圧として提示している値である。物理過程としてガイガーモードに至る電圧である降伏電圧よりも

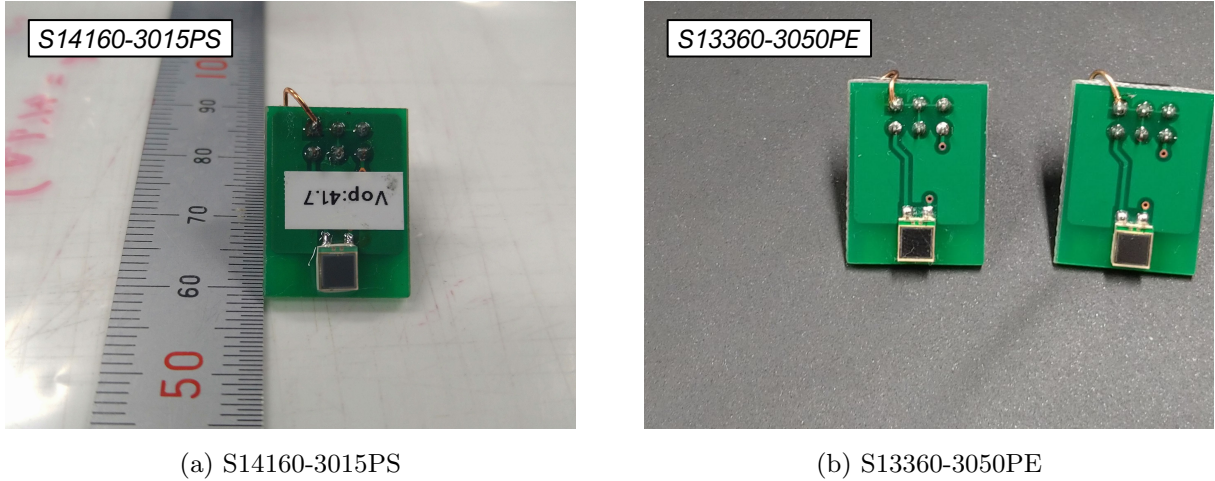


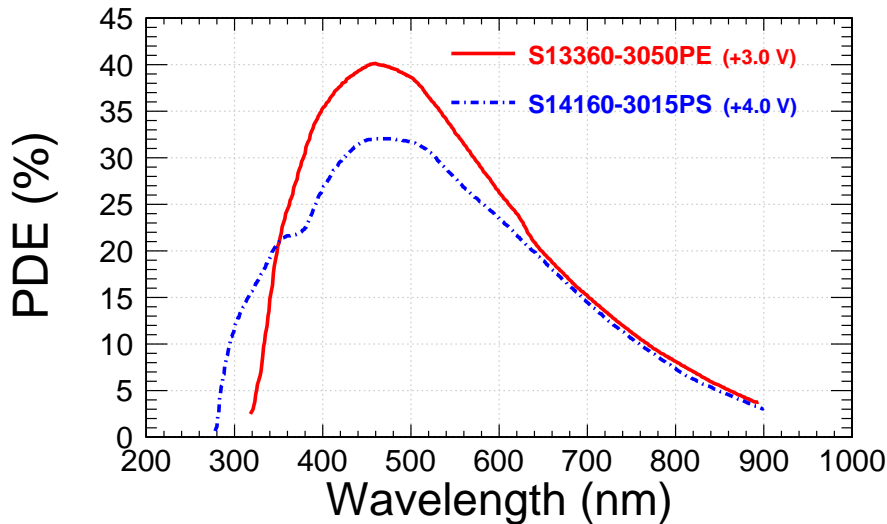
図 2.17: 本研究で使した MPPC の写真。(a): S14160-3015PS。(b): S13360-3050PE

表 2.3: 本研究で用いる MPPC の主な性能 (2 種類間での比較)[50, 51]。いずれの MPPC の値も製造元である浜松ホトニクスに性能表に記載された値を示した。特に表記をしない場合、 $V_{bias} = V_{op}$  での値である。

| 項目                                  | (単位)                      | S14160-3015PS     | S13360-3050PE     |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| ピクセルピッチ                             | ( $\mu\text{m}$ )         | 15                | 50                |
| ピクセル数                               |                           | 39984             | 3600              |
| 開口率 $\epsilon_{geo}$                | (%)                       | 49                | 74                |
| 受光面面積                               | ( $\text{mm}^2$ )         | $3 \times 3$      | $3 \times 3$      |
| 降伏電圧 $V_{break}$ (typ.)             | (V)                       | $38 \pm 3$        | $53 \pm 5$        |
| 推奨印加電圧 $V_{op}$                     | (V)                       | $V_{break} + 4$   | $V_{break} + 3$   |
| 増倍率                                 |                           | $3.6 \times 10^5$ | $1.7 \times 10^6$ |
| 最大感度波長 $\lambda_p$                  | (nm)                      | 460               | 450               |
| 光子検出効率 PDE( $\lambda = \lambda_p$ ) | (%)                       | 32                | 40                |
| クロストーク確率                            | (%)                       | $< 1$             | 3                 |
| ダークカレントレート (typ.)                   | ( $\times 10^3$ counts/s) | 700               | 500               |
| 窓材                                  |                           | シリコン              | エポキシ樹脂            |
| 窓材の屈折率 $n$                          |                           | 1.57              | 1.55              |

数 V 高い値として設定されている。S14160-3015PS の場合は  $V_{op} \equiv V_{break} + 4.0\text{V}$ 、S13360-3050PE の場合は  $V_{op} \equiv V_{break} + 3.0\text{V}$  である。クロストーク確率とは、あるピクセルに光子が入射した際に 2 photon 以上の光子が検出されてしまう現象 (クロストーク) が生じる確率を指す。クロストークはピクセル内部でのアバランシェ増幅の過程で 2 次的に生じた光子を他のピクセルで検出してしまうことによって生じるものである。光子検出効率 (Photon Detection Efficiency; PDE) は入射した光子のうちどれだけの光子を検出できるかを示した値であり、各ピクセルの開口率  $\epsilon_{geo}$ 、各ピクセルでの量子効率 QE、アバランシェ確率  $P_a$  の積として式 (2.15) のように表現される [49]。

$$PDE = \epsilon_{geo} \times QE \times P_a \quad (2.15)$$



(a) 波長依存性

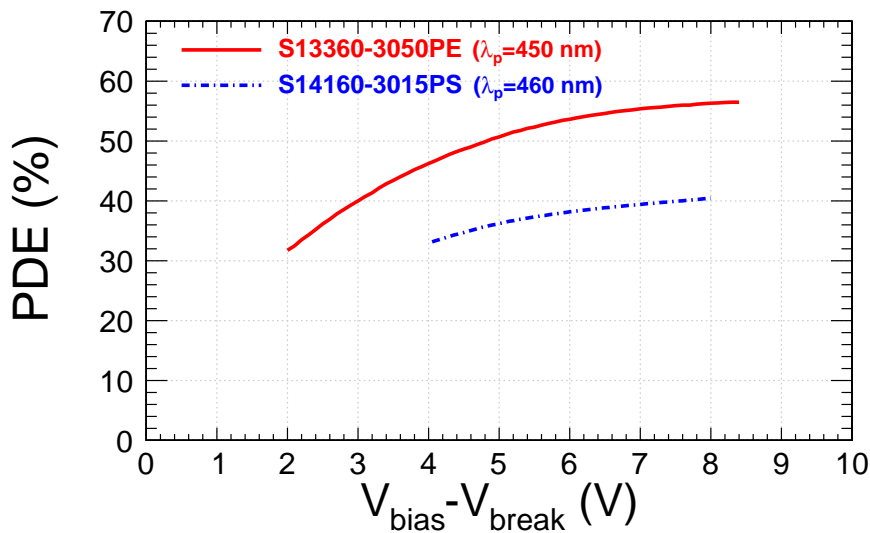
(b) 検出効率が最大となる波長  $\lambda_p$  での印加電圧依存性

図 2.18: 本研究で用いた MPPC の光子検出効率 (PDE)。参考文献 [50, 51] に示されているデータを読み取り、筆者がプロットし直したものである。本研究で使用する 2 種類の MPPC について示した。赤の実線が S13360-3050PE、青の一点鎖線が S14160-3015PS である。(a): 波長依存性。(b): 検出効率が最大となる波長  $\lambda_p$  での印加電圧依存性。

ここで量子効率とは、ピクセルへ入射した光子がキャリアを生成する確率を表す量であり波長依存性を持つ。アバランシェ確率  $P_a$  は形成されたキャリアがアバランシェ増幅を起こす確率であり、印加電圧に依存している。したがって、PDE は入射光の波長、印加電圧に依存した量である。

両者の諸量のうち、PDE の波長依存性及び印加電圧依存性を図 2.18 に示した。また、増倍率およびクロストーク確率の印加電圧依存性を図 2.19、図 2.20 にそれぞれ示した。いずれの図においても S14160-3015PS の数値を青色の一点鎖線で、S13360-3050PE の数値を赤色の実線によって示した。

2 つの MPPC の相違点のうち、特に着目すべき点を以下に述べる。両者を比較する上で重要な点は大きく 3 つある。

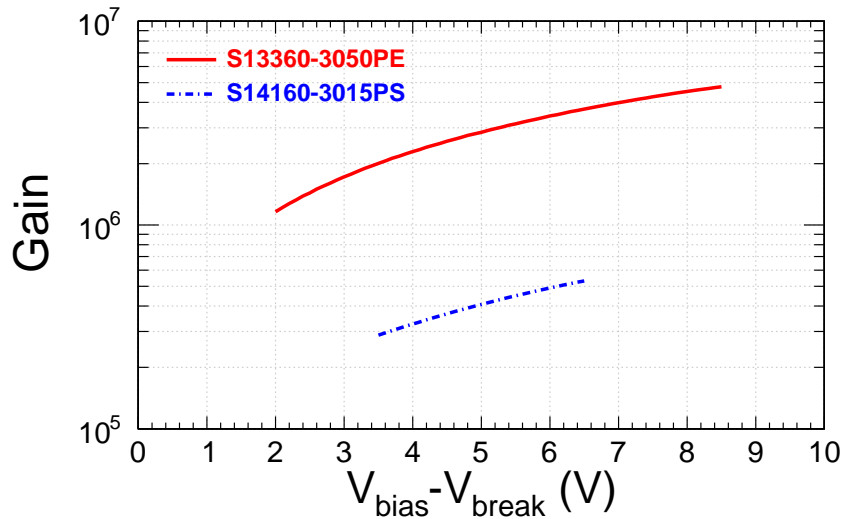


図 2.19: 本研究で用いた MPPC の増倍率の印加電圧依存性 [50, 51]。横軸は降伏電圧  $V_{break}$  を基準に取った印加電圧、縦軸はその電圧での増倍率である。赤の実線が S13360-3050PE、青の一点鎖線が S14160-3015PS である。

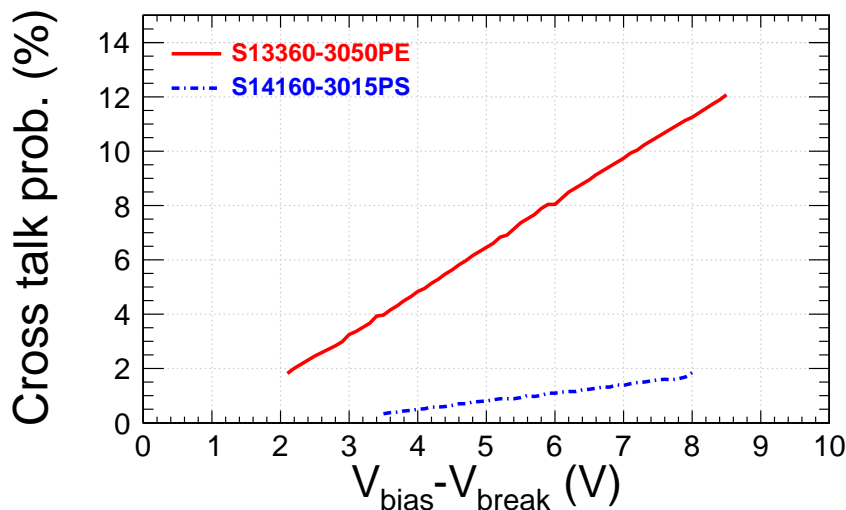


図 2.20: 本研究で用いた MPPC のクロストーク確率の印加電圧依存性 [50, 51]。横軸は降伏電圧  $V_{break}$  を基準に取った印加電圧、縦軸はその電圧でのクロストーク確率である。赤の実線が S13360-3050PE、青の一点鎖線が S14160-3015PS である。

### 1. 光子数に対するダイナミックレンジ

S14160-3015PS ではピクセルピッチが  $15 \mu\text{m}$  と S13360-3050PE と比較して 30% の大きさになっている。そのため、全体のピクセル数が増加し、光子数に対するダイナミックレンジも広がっている。入射光子数の多い環境下でも出力との線形性が期待される。また、S14160-3015PS ではピクセル数が増加したために、図 2.20 に示したようにクロストーク確率も低減されている。しかし、その一方で、各ピクセルの開口率は S13360-3050PE と比較して減少しており、ダークカレントの計数率も S13360-3050PE では  $5.00 \times 10^5 \text{ counts/s}$  であるのに対して S14160-3015PS では  $7.00 \times 10^5 \text{ counts/s}$  と、 $\sim 1.5$  倍ほど高くなっている。

### 2. 駆動電圧

表 2.3 中に示したように、S14160-3015PS では降伏電圧  $V_{break}$  の値の製造誤差がより小さくなっている。また、表中には記載していないが、S14160-3015PS は、ロット単位で一様にそろった降伏電圧を持ったものを製造可能となった。同ロット内での  $V_{break}$  のばらつきは  $\pm 0.1$  V であるとされる。従来の S13360-3050PE では個々に異なる降伏電圧を持っているため、多数個を同時使用する場合には、降伏電圧の値が近い MPPC を集める必要があった。本研究で開発する検出器のように、多チャンネル化した検出器では、各チャンネルが同じ動作環境で一様な性能を示すことが望ましい。チャンネル単位でのばらつきを小さくすることが期待できるという観点では特筆すべき点である。

### 3. 増倍率・PDE

前述のように、S14160-3015PS は S13360-3050PE と比較して一様な電圧特性が期待できるものの、電荷の増倍率は  $\sim 1/5$  程度 ( $V_{bias} = V_{op}$  印加時) と小さくなってしまっている。また、光子検出効率 (PDE) についても、S14160-3015PS は S13360-3050PE と比較して  $\sim$  数 % 低い値を示している。先に図 2.18 に示した PDE の印加電圧及び波長依存性に着目する。[a] が印加電圧が  $V_{bias} = V_{op}$  時の波長依存性、[b] が最大発光波長  $\lambda_p$  に着目した時の印加電圧依存性である。[a] と [b] の双方より、S14160-3015PS の方が低い値を示していることがわかる。次に、増倍率の電圧依存性を図 2.19 に示した。横軸は降伏電圧を基準とした印加電圧である。比較のため、文献 [50] 及び [51] に記載されている値を読み取り縦軸を対数スケールで示した。 $V_{break} = V_{op}$  での値は表 2.3 に示したが、電圧依存性の図からも S14160-3015PS の方が増倍率が低い値を持つことがわかる。

尚、受光面に用いられている窓材も異なっているが、両者とも屈折率は S14160-3015PS :  $n = 1.57$ 、S13360-3050PE :  $n = 1.55$ 、と非常に近い値であり、一般的なプラスチックシンチレータの屈折率  $n \sim 1.5 - 1.6$  とは大きく乖離していないため、問題はないものとする。以上の点から、どちらの MPPC を採用するのかは測定を通して性能を検討する必要がある。続く第 3 章以降の基礎データ収集では、これら 2 種の MPPC を用いて、比較・検討を行った。

## 第3章

# $\beta$ 線源を用いた MPPC 読み出し方法・シンチレータサイズの最適化

この章では、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線源を用いて行った試作機の性能評価テストについて述べる。まず 3.1 節で目的を述べる。続く 3.2 節では評価項目について説明する。実験セットアップに関して説明し、3.7 節で測定結果を述べる。続けて、3.8 節では、この測定と並行して実施した信号の整形・増幅を行うためのアンプ回路の最適化に関して述べる。この測定は 3.7 節までの MPPC 読み出し方法・シンチレータサイズの最適化のために実施した測定とは一部評価手法に異なる点があるため、個別に説明を行う。最後に 3.9 節で、これらの測定によって得られた結果についてまとめる。

### 3.1 目的

---

この実験の目的は新型飛行時間測定器の製作に際しての基礎データの収集である。新飛行時間測定器の開発のためにはその構成を最適化する必要がある。そのために検出器を構成するプラスチックシンチレータの形状や種類、MPPC の種類や接続回数・接続方法といった構成が時間分解能に対してどのように影響するのかを知ることは重要である。測定の結果を通じてそれらに対する知見を得ることを目指す。具体的な評価内容に関しては次節で述べる。

### 3.2 評価項目

---

ここでは以下に挙げる点について時間分解能に対する依存性を調査した。

- MPPC の印加電圧依存性

第 2 章で述べたように、MPPC の電荷増倍率や光子検出効率 (PDE) は印加電圧に依存し、これらの量は電圧の上昇に伴って向上する傾向を持つ。しかし、その一方で印加電圧を高くした場合には暗電流の増加に伴うノイズの増加などが懸念される。MPPC への印加電圧が及ぼす影響に関して検討を行った。この結果は 3.7.1 節及び 3.7.2 節において説明する。



- **MPPCの読み出し手法依存性**

MPPCを複数使用することにより、実効的に検出できる光子数を多くすることができ、時間分解能が向上する。複数個のMPPCを使用する場合の個数と接続方法に関して、時間分解能への寄与を調査した。また、異なる種類のMPPCを使用し、種類ごとの性能への影響についても調査した。本測定ではS14160-3015PSとS13360-3050PEの2種類を検討した。MPPCの個数と接続方法に関しては3.7.3節で、種類による違いに関しては3.7.11節でそれぞれ述べる。

- **シンチレータの形状依存性**

プラスチックシンチレータの形状が変わることにより、シンチレーション光の量や伝播の状態が変化すると予想される。そのため、厚さ、幅、長さの異なるシンチレータを用いた場合の時間分解能への寄与を調べた。結果は3.7.4節にて述べる。

- **シンチレータの種類依存性**

プラスチックシンチレータはその種類ごとに単位エネルギー損失あたりに生じる光量や、シンチレーション光の立ち上がり時間・立下り時間といった時間応答、光の減衰長など異なる特性を有する。異なる種類のプラスチックシンチレータを使用した場合の時間分解能への寄与に関して調べた。この結果は3.7.9節で述べる。

- **反射材依存性**

プラスチックシンチレータ表面を反射材で覆うことによって、シンチレーション光をより効率的に検出面まで導くことが可能であると期待される。この時に用いる材質によって光学的な応答が異なると予想される。こうした素材の違いによる性能への寄与を検討した。この結果は3.7.10節で述べる。

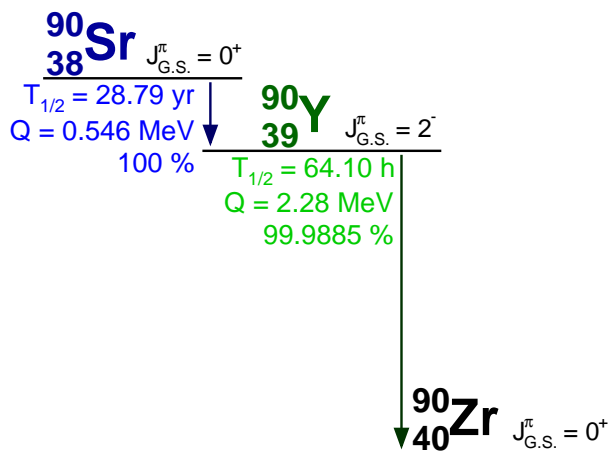
表3.1に、この章における調査で用いたプラスチックシンチレータの一覧を示した。ただし、1450-2b及び1450-2cの2種類は1450-2aをレーザー加工機(Podea株式会社 Podea-02[52])を用いて加工したものである。

### 3.3 $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

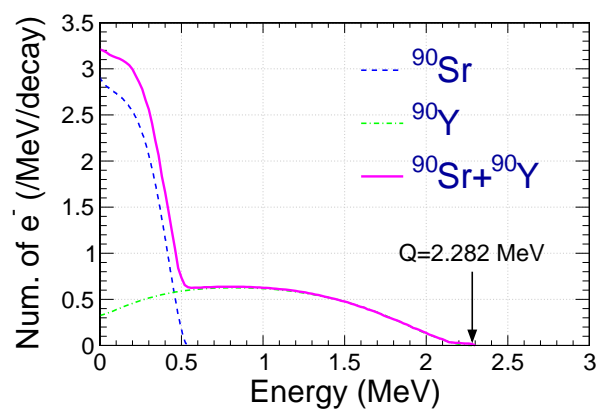
本試験において使用した $\beta$ 線源について述べる。図3.1[a]に $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の崩壊図を、図3.1[b]に放出される電子のエネルギー分布をそれぞれ示した[53]。図3.1[a]において、 $T_{1/2}$ は核種の半減期、 $J_{G.S.}^{\pi}$ は基底状態におけるスピン・パリティを表す。 $^{90}\text{Sr}$ は約28.8年の半減期で $^{90}\text{Y}$ の基底状態へ $\beta$ 崩壊する。その際に放出される電子の最大エネルギー( $Q$ 値)は0.546 MeVである。崩壊先である $^{90}\text{Y}$ もまた、64.10時間の半減期をもって $^{90}\text{Zr}$ の基底状態へ $\beta$ 崩壊する。この時の $Q$ 値は2.28 MeVである。通常、 $^{90}\text{Sr}$ と $^{90}\text{Y}$ は放射平衡の状態にあるため、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ を線源として用いる場合には $^{90}\text{Y}$ からの最大2.28 MeVの電子をみることになる。一般的なプラスチックシンチレータの最小エネルギー損失(Minimum Ionization Particle; MIP)に対応する単位長さ当たりの平均エネルギー損失は $\sim 2$  MeV/cmである。この $\beta$ 線源を用いることにより、最小エネルギー損失に対応する電子がプラスチックシンチレータを通過するときの応答について測定することが可能となる。

表 3.1: 本章の測定で使用したプラスチックシンチレータの一覧。ただし、1450-2b 及び 1450-2c の 2 種類は本文中の記述の通り、1450-2a をレーザー加工機で加工したものである。

| ID            | シンチレータの種類 | 厚さ ( $t$ ) [mm] | 幅 ( $w$ ) [mm] | 長さ ( $l$ ) [mm] |
|---------------|-----------|-----------------|----------------|-----------------|
| EJ230-1300-1  | EJ-230    | 5               | 11             | 300             |
| EJ230-1300-2  | EJ-230    | 5               | 22             | 300             |
| EJ230-1300-3  | EJ-230    | 5               | 44             | 300             |
| EJ230-1450-1a | EJ-230    | 5               | 11             | 450             |
| EJ230-1450-1b | EJ-230    | 5               | 11             | 450             |
| EJ230-1450-2a | EJ-230    | 5               | 22             | 450             |
| EJ230-1450-2d | EJ-230    | 5               | 22             | 450             |
| EJ230-1450-2b | EJ-230    | 5               | 22             | 400             |
| EJ230-1450-2c | EJ-230    | 5               | 22             | 349             |
| EJ230-1450-3  | EJ-230    | 4               | 22             | 450             |
| EJ230-1450-4  | EJ-230    | 3               | 22             | 450             |
| EJ230-1450-5  | EJ-230    | 5               | 33             | 450             |
| EJ230-1450-6  | EJ-230    | 5               | 44             | 450             |
| EJ200-1450-1  | EJ-200    | 5               | 22             | 450             |
| EJ204-1450-1  | EJ-204    | 5               | 22             | 450             |
| EJ212-1450-1  | EJ-212    | 3               | 22             | 450             |
| EJ228-1450-1  | EJ-228    | 5               | 22             | 450             |
| EJ232-1450-1  | EJ-232    | 5               | 22             | 450             |



[a]



[b]

図 3.1:  $\beta$ 線源  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  [53, 54]。[a]:  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  の崩壊図。それぞれの核種に対して半減期  $T_{1/2}$  と崩壊時に放出される  $e^-$  の最大エネルギー  $Q$  値、 $\beta$ 崩壊の分岐比、基底状態におけるスピン・パリティ  $J_{G.S.}^{\pi}$  を示した。[b]:  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  から放射される  $\beta$ 線のエネルギー分布。青の破線は  $^{90}\text{Sr}$ 、緑の一点鎖線は  $^{90}\text{Y}$ 、桃色の実線はこれら 2 種の合計を示す。 $^{90}\text{Y}$  由来の  $\beta$ 線による最大エネルギーは 2.28 MeV である。

### 3.4 試作機概要

図 3.2 に本測定において使用した試作機の概念図を示した。この試作機は、以下の要素によって構成される。以降、この試作機のことを本稿では試作 ToF と呼称する。

- ★ プラスチックシンチレータ
- ★ 反射材
- ★ MPPC 基板
- ★ 増幅回路

図 3.2 に示したように、プラスチックシンチレータの表面を反射材で覆い、その両端に MPPC を取り付けた。MPPC はプリント基板に実装した状態で使用した。使用した MPPC 基板の一例を図 3.3 に示した。ここで示した基板は MPPC S14160-3015PS を直列に接続した場合のものである。MPPC の接続手法や回路図などについては 3.7.3 節で詳述する。本章の冒頭で述べた通り、本測定では様々な種類の MPPC や反射材を用いて測定を行った。3.7 節以降で結果を述べる際には、特に断りのない場合、反射材はテフロンシート (チューコーフロー シールテープ、0.1 mm 厚)、使用した MPPC は S14160-3015PS を用いたものである。

プラスチックシンチレータ表面と MPPC の受光面の接続に、オプティカルグリス (Adhesive Materials group V-788[55]) を使用した。このオプティカルグリスの屈折率は  $n = 1.46$  である [55]。プラスチックシンチレータは一般的に  $n \sim 1.5 - 1.6$  の屈折率を持つ。MPPC 受光面との間を空気で接続する場合と比較してブリュースター角  $\theta_B$  が大きくなることから、境界面での全反射による光量の損失を軽減できる。

#### 3.4.1 プラスチックシンチレータの端面の処理

MPPC を取り付ける際のプラスチックシンチレータの端面の処理について述べる。先行研究 [56] より、MPPC を取り付ける部分以外を反射材で覆うことによって時間分解能が向上するという結果が得られている。本研究でもこれに倣い、MPPC が実際に接する領域のみが露出するようにし、その他の部分は反射材で覆う処理を行った。実際に行った処理を図 3.4 に示した。ここでは端面の寸法が  $5^t \times 11^w \text{ mm}^2$  であるプラスチックシンチレータに、MPPC を 1 個取り付けるために中心付近  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  の範囲を露出させて、その他の部分はテフロンシートで覆った。尚、MPPC のデバイス全体としてのサイズは  $3.85^x \times 4.50^y \text{ mm}^2$  であるが、取付時のずれを考慮してやや余裕を持たせた範囲とした。

#### 3.4.2 増幅回路

先行研究より、MPPC からの信号を増幅・整形することによって時間分解能が向上するということが明らかになっている。これを受けて、MPPC の生の信号を反転微分増幅回路に入力することによって増幅・整形を行った。本測定においては高速オペアンプである ANALOG DEVICES AD8000[57] を用いた。AD8000 の性能を表 3.2 に示した。使用した回路の回路図を図 3.5[a] に、実際の回路基板を図 3.5[b] にそれぞれ示した。この増幅回路は先行研究 [33] において、プラスチックシンチレータと MPPC による読み出しという構成のもとで、 $\sigma < 100 \text{ ps}$  の時間分解能を有する検出器のために開発されたもの [31] を基本としている。特に先行研究 [44] ではプラスチックシンチレータ (EJ-232) と MPPC(S13360-3050PE)

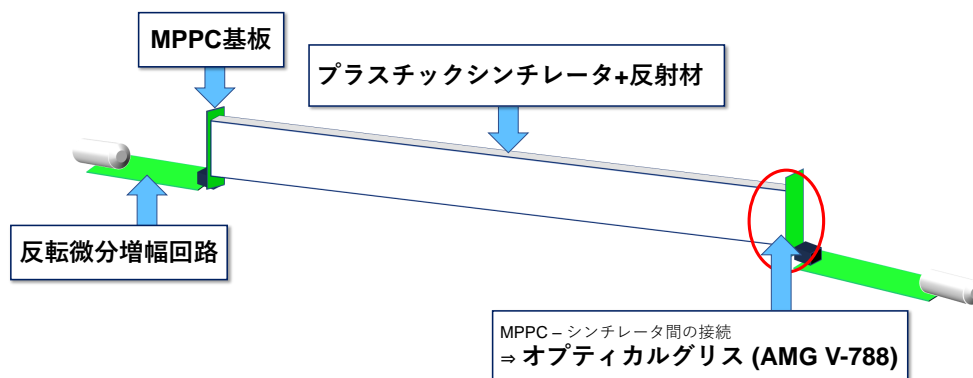


図 3.2: 本測定において使用した試作機概念図。試作機はプラスチックシンチレータとそれを覆う反射材、MPPC、アンプ回路により構成される。

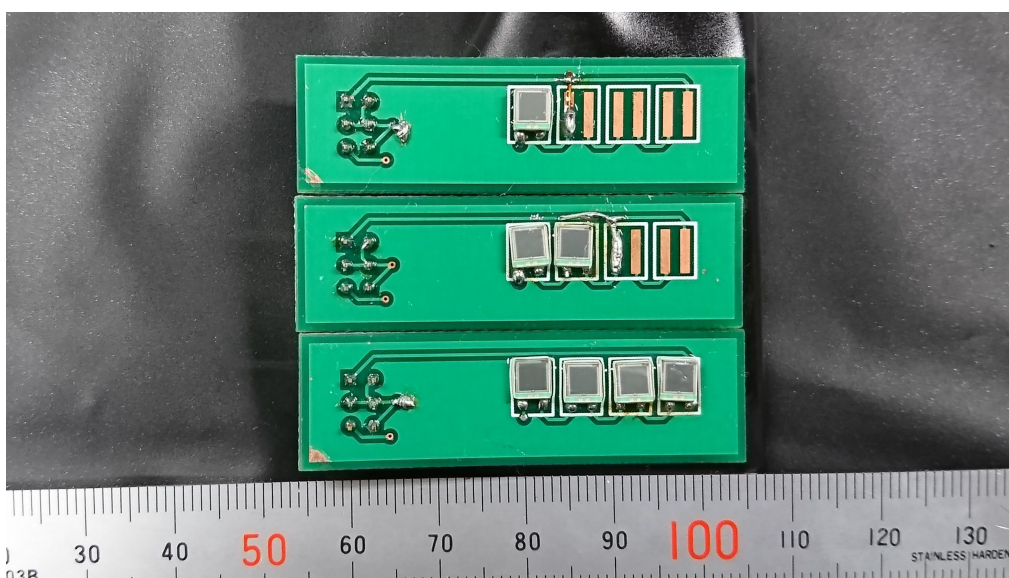


図 3.3:  $\beta$ 線源を用いた測定において使用した MPPC 基板の一例。図中で示した基板は MPPC を直列に接続する場合の配線パターンとなっている。

を組み合わせたプラスチックシンチレーション検出器に用いた場合に  $\sigma = 36.7 \pm 1.4 \text{ ps}$  を達成した。こうした結果より、十分な時間分解能を達成可能であることは確認されており、 $\sigma < 150 \text{ ps}$  の時間分解能を達成目標とする本研究に用いることは妥当であると判断した。ここで回路図中のコンデンサ  $C_d$  (100 pF) に対して並列になっている抵抗  $R_{PZC}$  は出力信号のオーバーシュートを抑制するためのポールゼロ抵抗である。測定に当たっては、使用する MPPC の種類や接続方法に応じて適宜調整を行った。この調整に関しては 3.5.3 節で詳しく述べる。

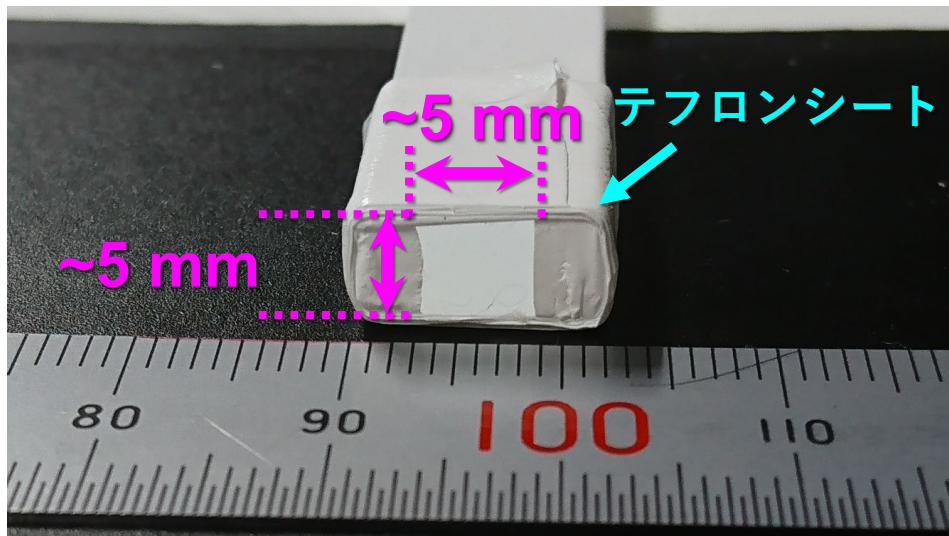


図 3.4: プラスチックシンチレータの端面の処理の一例。MPPC を取り付ける部分以外を反射材のテフロンシートで覆った。

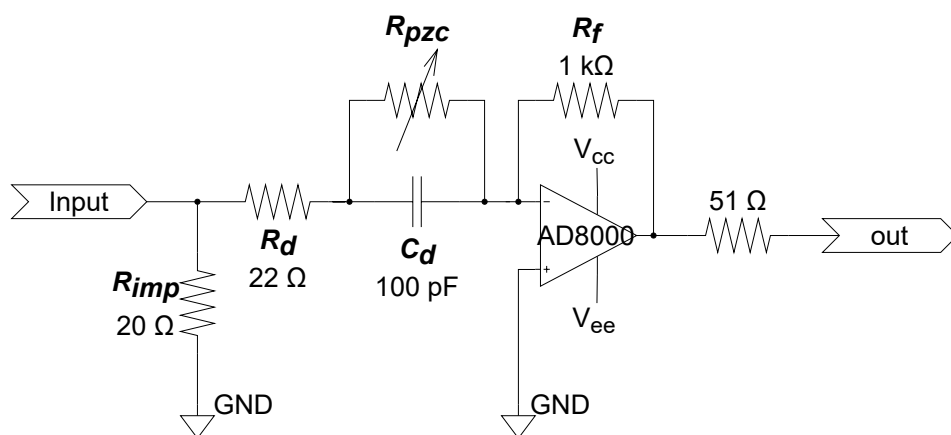
表 3.2: オペアンプ AD8000 の基本性能 [57]。性能表の値を記載した。

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| -3 dB bandwidth      | 1.5 GHz         |
| Slew rate            | 4100 V/ $\mu$ s |
| 0.1 % setting time   | 12 ns           |
| Supply voltage range | 4.5 – 12 V      |

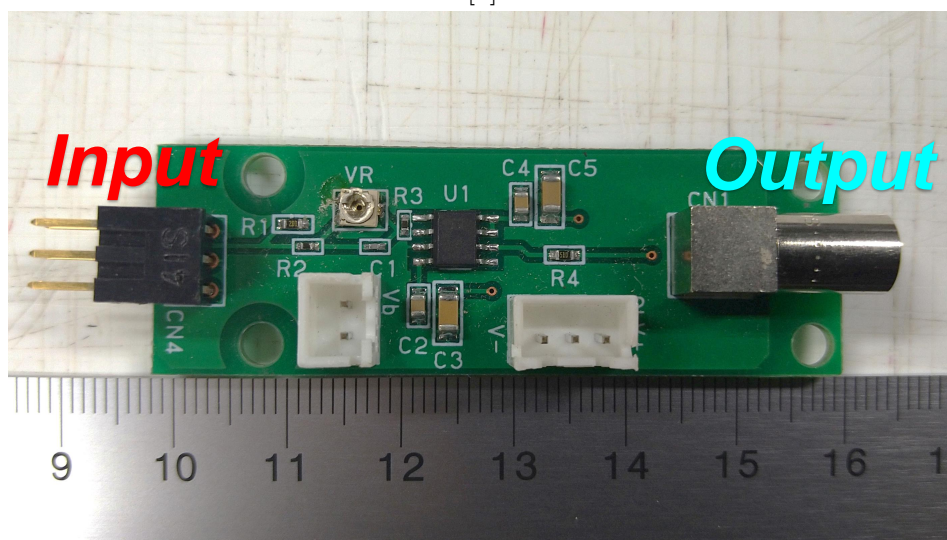
### 3.5 実験セットアップ

ここでは、本測定の設定アップに関して説明する。はじめにセットアップ全体の概要を示したのち、リファレンス用検出器とデータ収集回路に関して説明する。加えて、データ収集時に行った検出器等の調整についても述べる。

まず、セットアップの全体について説明する。図 3.6 にセットアップの概念図を、図 3.7 に実際のセットアップの写真をそれぞれ示した。試作機を挟み込むようにして 2 つのリファレンス用検出器を配置し、これら 3 つの検出器を貫くように  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源を配置した。以下、本稿では 2 つのリファレンス用検出器について、線源から見て試作機の手前側に配置したものを Ref1、試作機の後方に配置した物を Ref2 と呼称することとする。また、ここで設置した試作 ToF は両読みの構成となっている。以降では、線源から見て左側に位置する MPPC からの読み出しチャンネルを ToF1、右側にある読み出しチャンネルを ToF2 と呼称する。線源からの  $\beta$  線は、真鍮製のコリメータを導入することにより検出器に入射するものを選択的に照射した。図 3.8 に使用したコリメータを示した。このコリメータは中央部分に  $\phi = 25.5$  mm、深さ 5.0 mm の円形のくぼみを設けており、ここに  $\beta$  線源を取り付ける。くぼみ中心部分には  $\phi = 5.0$  mm の穴が空いており、この部分から  $\beta$  線を照射する。コリメータ全体の厚さは 8.0 mm、線源取り付け部分の厚さは 3.0 mm である。本セットアップにおいては、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源とコリメータ、Ref1, Ref2 はともにステッピングモータ (シグマ光機 OSOM26-300(X)[58]) のステージ上に固定する形



[a]



[b]

図 3.5: 本測定で使用した増幅回路。[a] 回路図。[b] 実際の回路基板の写真。写真左側の 6 ピン部分から MPPC の信号を入力する。特性インピーダンス 50  $\Omega$  の同軸ケーブルで出力する。

で設置した。このステップモータはデータ収集用の PC とシリアルバス通信によって接続されており、ステージの移動及び位置情報の取得を遠隔で行うことが可能となっている。これを利用し、線源及びリファレンス検出器群を移動することによって、ステップモータの稼働域内の任意の位置で  $\beta$  線を照射することを可能とした。更に、試作機の MPPC へ電圧を供給する直流安定化電源についても LAN 接続と用いることで遠隔での監視及び電圧の操作をすることを可能とした。これらを用いることによって、データ収集系の制御及び測定セットアップの変更を一括して行うことができ、系統的なデータ収集を可能とした。加えて、これらの仕組みを利用することによって、大学内及び実験室への立ち入りが制限される状況下にあっても、セットアップ変更等に伴う立ち入り時間を最低限に抑えながらもデータ収集を継続的に行うことが可能となる。

測定時にはこれらのセットアップ全体をブラックシートで覆い遮光した上で、可能な限り実験室は消灯した状態で実施した。

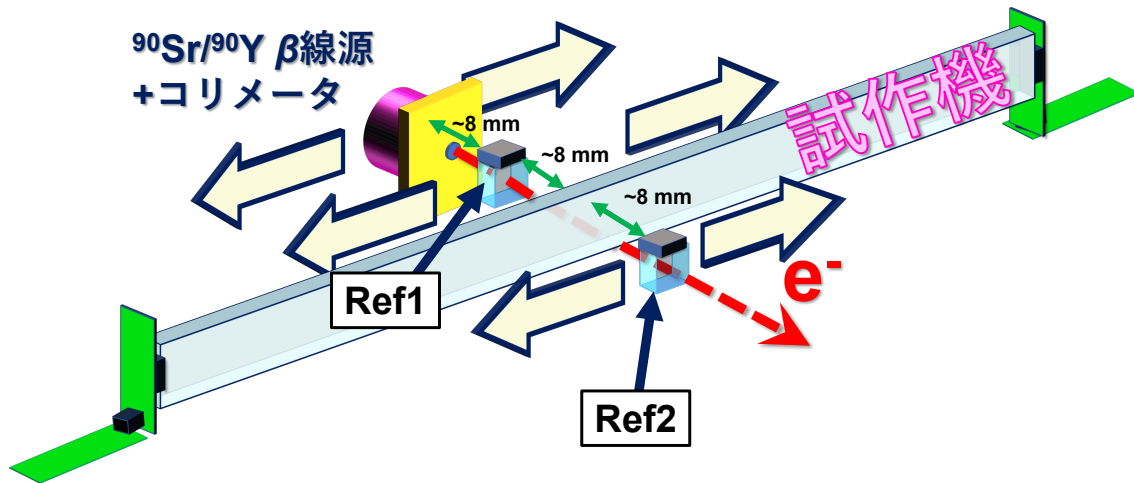


図 3.6:  $\beta$  線源を用いた測定におけるセットアップ概念図。

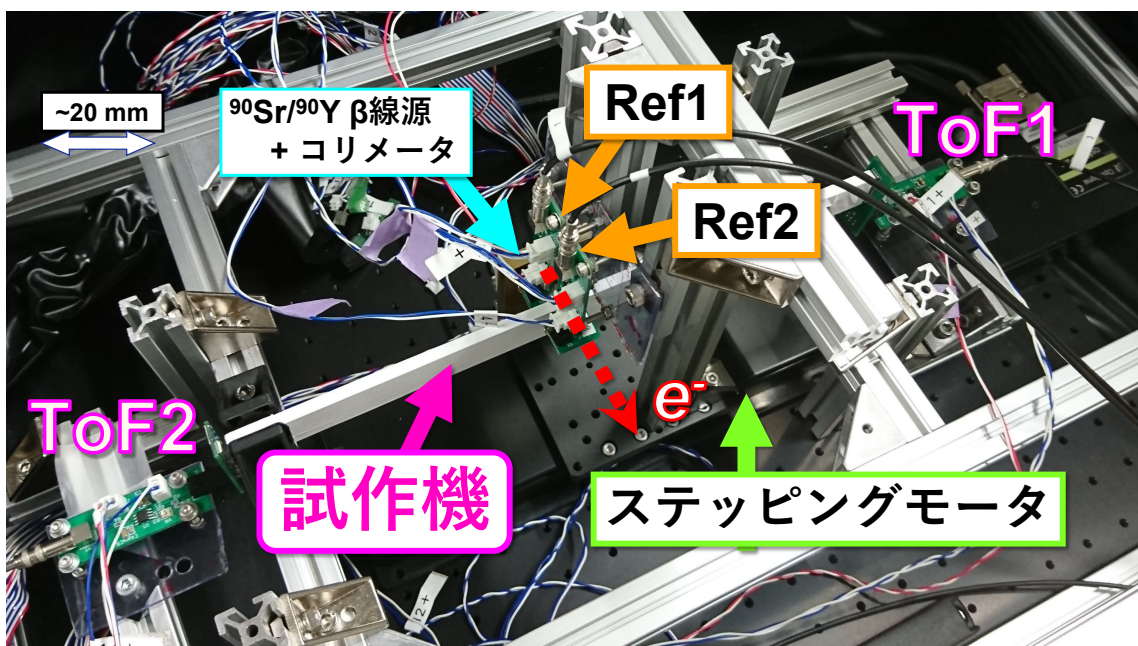


図 3.7: 本測定での実際のセットアップの実際の写真。ID 1300-2( $5^t \times 22^w \times 300^l \text{ mm}^3$ )のシンチレータを配置した場合を示した。

### 3.5.1 リファレンス用検出器

ここでは本実験において使用したリファレンス用検出器 (Ref1、Ref2) に関して述べる。検出器全体の構成は Ref1、Ref2 共に共通しており、プラスチックシンチレータと SiPM(浜松ホトニクス MPPC S13360-3050PE)、反転微分増幅回路により構成される。

表 3.3 に使用したプラスチックシンチレータの諸元を示した。また図 3.9 に使用したプラスチックシンチレータを示す。寸法は  $1.5^t \times 3.0^w \times 3.0^l \text{ mm}^3$  であり、型番は EJ-230 である。これは試作機に用いた

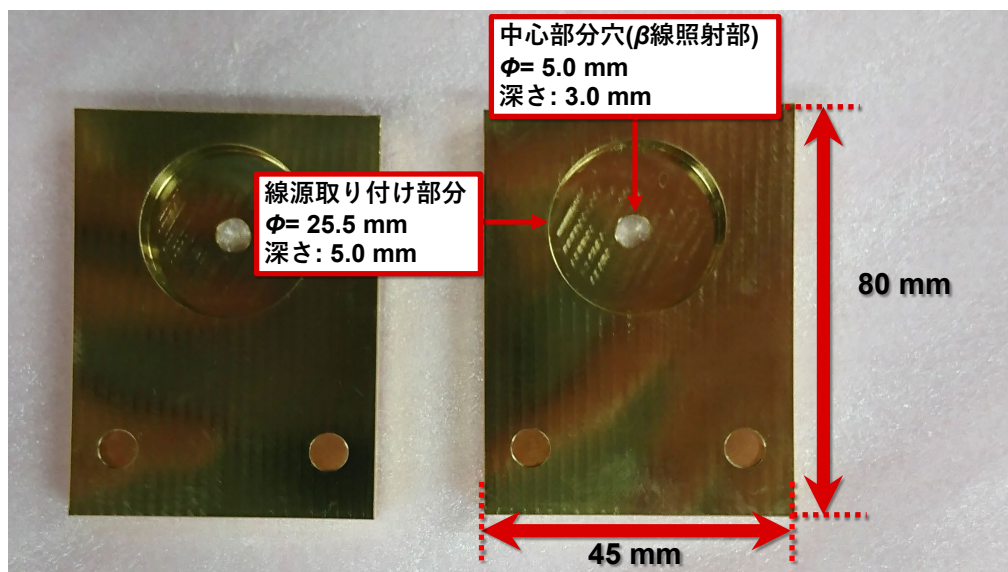


図 3.8: 本測定において使用したコリメータ。材質は真鍮である。中央部分の  $\phi = 25.5$  mm の円形のくぼみに線源を取り付ける。くぼみ中央部にある  $\phi = 5.0$  mm の穴から  $\beta$  線を照射する。全体の横幅は 45 mm、高さは 80 mm、厚さは 8 mm、線源取り付け部分の厚さは 3 mm である。

表 3.3: 本測定でリファレンス検出器として使用したプラスチックシンチレータの諸元。2 個のプラスチックシンチレータは共に同じ型番、寸法である。

| ID   | 厚さ ( $t$ ) [mm] | 幅 ( $w$ ) [mm] | 長さ ( $l$ ) [mm] | 型番    |
|------|-----------------|----------------|-----------------|-------|
| Ref1 | 1.5             | 3.0            | 3.0             | EJ230 |
| Ref2 | 1.5             | 3.0            | 3.0             | EJ230 |

ものと同じ種類のプラスチックシンチレータである。

各シンチレータの側面をオプティカルセメントを用いて MPPC の受光面に接着することで光学的に接続した。またシンチレータの表面には反射材のペースト (BC-620[59]) を塗布した。BC-620 は二酸化チタンをベースとする水溶性のペーストである。MPPC は予めマウント用のプリント基板上に実装された状態となっており、同じく基板上に実装された 2.54 mm ピッチのピンソケットを用いて読み出し用の反転微分増幅回路に接続することで検出器全体を構成する。ここで用いている回路は試作機で使用したものからポールゼロ抵抗 ( $R_{pzc}$ ) を除いたものとなっており、その他は同一の構成である。MPPC S13360-3050PE はその個体毎に推奨印加電圧  $V_{op}$  が異なる。今回 2 つのリファレンス検出器で使用するにあたっては、 $V_{op}$  の値が近いものを 2 個用意した。それぞれの  $V_{op}$  を表 3.4 に示した。ID は MPPC のパッケージに記載された識別番号である。2 つの MPPC での  $V_{op}$  の差は 0.01 V であるため、1 つの電源から同じ電圧を印加し駆動しても問題はないとみなされる。測定にあたっては印加電圧  $V_{bias} = V_{op} + 3.0$  V = 58.8 V として運用した。

### 3.5.2 データ収集回路系

本測定におけるデータ収集回路系について説明する。本測定におけるトリガー回路図を図 3.10 に示した。但し、Div. はディバイダ、Att. は Attenuator、G. G. はゲートジェネレータの意である。各検出器



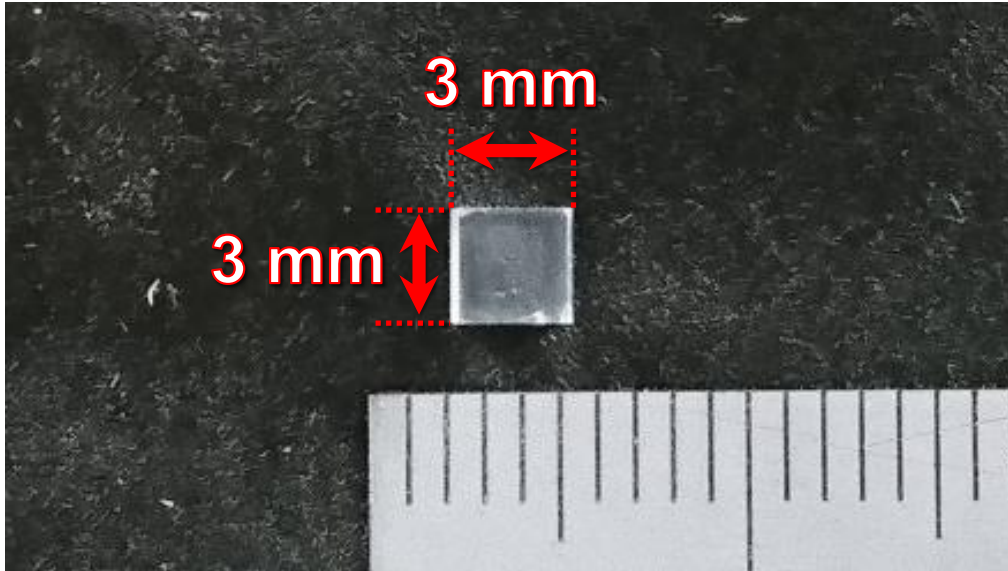


図 3.9: リファレンス検出器に用いたプラスチックシンチレータ。長さ、幅は共に 3.0 mm、 $\beta$  線通過方向の厚さは 1.5 mm である。

表 3.4: リファレンス検出器で使した MPPC の推奨印加電圧  $V_{op}$ 。

| 検出器  | ID    | 推奨印加電圧 $V_{op}$ (V) |
|------|-------|---------------------|
| Ref1 | 64597 | 55.85               |
| Ref2 | 64623 | 55.84               |

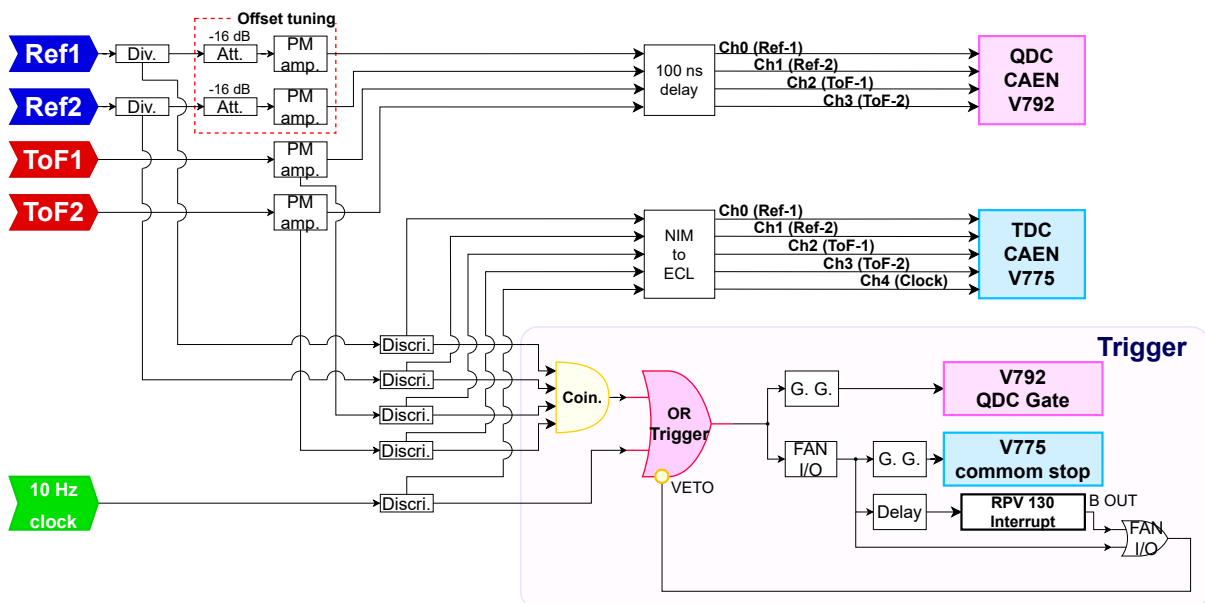


図 3.10: データ収集のための回路セットアップ。Div. はディバイダ、Att. は Attenuator、G. G. はゲートジェネレータの略である。

の信号は波高測定用と時間測定・トリガー生成用の2ラインに分割し処理を行った。波高測定と時間測定は異なるモジュールを用いて処理を行う。波高測定には QDC (Charge to Digital Converter) モジュールとして CAEN V792 を用いた。ここで略称の Q は電荷 (charge) の意である。これは電荷積分型のモジュールである。ゲート信号として与えられた論理信号の時間幅で各チャンネルに入力されたアナログ信号を積分し電荷に変換した上で 1 ch. = 0.1 pC として離散化されたチャンネル値として記録する。時間測定には TDC (Time to Digital Converter) モジュールとして CAEN V775 を用いた。合計で 32 チャンネル分の信号を記録することが可能である。1 ch. = 35 ps の LSB (Least Significant Bit) であり、140 ns のダイナミックレンジを有する。本測定では common stop モードで用いた。common stop モードでは、外部からタイミングを知らせる論理信号を受け取った時刻をストップのタイミングとして、決められたダイナミックレンジの時間 (本測定の設定では 140 ns) だけ遡り各入力チャンネルでのヒット情報の記録を行う。この時に記録されるのはストップの信号を受け取った時刻からの相対的な時間差である。したがって、TDC のデータ上では値の大きいイベントほど、実際のタイミングとしては早いイベントということになる。DAQ (Data Acquisition) システムは KiNOKO (Kinoko Is Network distributed Object oriented Kamland Online-system)[60] を用いた。KiNOKO は東北大学ニュートリノ科学研究センターにおいて開発された高エネルギー実験や原子核実験のための汎用データ収集ソフトウェアである。

### 3.5.2.1 トリガー

データ収集のトリガーは検出器からの信号のコインシデンスとクロックジェネレータによって生成した 10 Hz のクロック信号との論理和を取ったものを用いた。このとき、クロック信号を組み込むことによって、 $\beta$ 線とは独立なタイミングでのデータが同時に取得される。これによって、データ収集中の検出器のベースラインの状態についての情報を取得することを可能とした。但し、コインシデンスの組み方のうち検出器の信号による論理積の部分は、EJ230-I300-1、EJ230-I300-2 及び EJ230-I300-3 のプラスチックシンチレータを用いた場合とそのほかのプラスチックシンチレータの用いた場合とでは異なる構成を用いてデータ収集を行った。このことについて述べる。

EJ230-I300-1、EJ230-I300-2 及び EJ230-I300-3 を用いた場合には、まずトリガーを Ref1、Ref2、ToF1、ToF2 の全読み出しチャンネルのコインシデンスとクロック信号の論理和とした状態で 1 ラン分のデータの取得を行った。この時の MPPC への印加電圧は浜松ホトニクスが提示する推奨印加電圧 (本稿では以下  $V_{op}$  と記載する。) を基準として +3.0 V、 $\beta$ 線の照射位置は試作 ToF の長さ方向中心で固定とした。その後、トリガーのうちコインシデンスの部分を Ref2、ToF1、ToF2 の計 3 チャンネルでのコインシデンスに変更し MPPC の印加電圧や  $\beta$ 線の照射位置を変更した場合などのデータ収集を行った。ここで上流側に設置したリファレンス検出器である Ref1 を含めなかったのは、検出器のコインシデンスの計数率を下げすぎないようにするためである。Ref1 を含めた場合の全検出器のコインシデンスの計数率は典型的な値として  $\sim 1 - 2$  counts/s 程度であった。一方、Ref1 を含まない Ref2、ToF1、ToF2 によるコインシデンスの計数率は  $\sim 50 - 60$  counts/s 程度であった。データ収集をより効率的に進めることを優先しこのような方策を取った。

そのほかのプラスチックシンチレータを用いた場合には、一貫してトリガーを Ref1、Ref2、ToF1、ToF2 の全チャンネルによるコインシデンスとクロック信号の論理和として測定を行った。ただし、いずれの場合においても、常に試作機下流側に設置した Ref2 の信号を含めてデータ収集を行った。これは  $\beta$ 線が確実に試作機を通過したことを保証するための措置である。

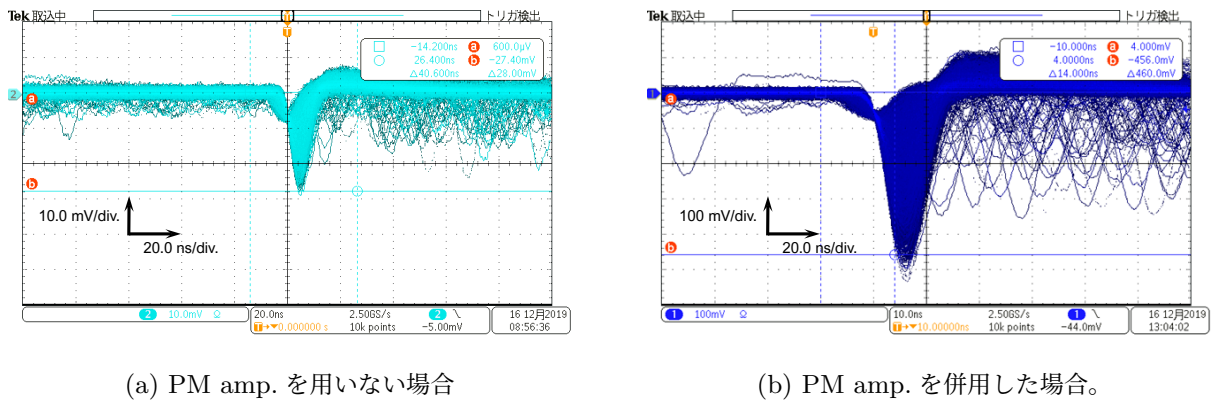


図 3.11: PM amp. を併用しない場合とした場合の比較。(a) の PM amp. を用いない場合に比して (b) では 2 MeV の  $e^-$  に対応する信号が  $\sim 400$  mV 程度であり、ベースラインのノイズも相対的に小さくなっている。

### 3.5.2.2 アナログ信号の処理

検出器からのアナログ信号の処理について述べる。先に時間測定・トリガー生成用の 2 ラインに分割したと述べたが、試作機の信号に関しては用いた MPPC の構成によって扱いが異なる。S14160-3015PS を用いて測定を行った場合には前述のアンプ回路からの出力信号を増幅率 10 倍の PM amplifier (富士ダイヤモンドインターナショナル株式会社 TKY-0351) による増幅及びオフセット調整を併用した。これは以下に述べる 2 つの理由のためである。一点目は、S14160-3015PS を用いた場合、初段のアンプからの出力信号の波高が  $\sim$  数十 mV であり、その状態から更に信号を分割して利用するには十分ではないと判断したためである。S14160-3015PS を使用した場合の典型的な信号を図 3.11[a] に示した。S14160-3015PS と  $10^T \times 10^W \times 300^L$  mm<sup>3</sup> のプラスチックシンチレータ EJ-200 を組み合わせたプラスチックシンチレーション検出器に  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源からの  $\beta$  線を照射した際のものである。ただし、本測定において用いている増幅回路を用いて信号の増幅及び整形を行った後にディバイダで 2 ラインに分割を行った際のものである。初段のアンプ回路の出力を PM amp. に入力することで追加的に増幅を行った後の信号が [b] である。増幅後の 2 MeV の  $e^-$  に対応する信号は  $\sim 400$  mV 程度であり、ベースライン近傍のノイズも相対的に小さくなっていることがわかる。本測定で用いるプラスチックシンチレータ群は長さが 300 mm 以上であり、図 3.11 に示したシンチレータと同等もしくはそれ以上の長さである。このため、長さの影響によるシンチレーション光の減衰が予想される。また、厚さに関しては図 3.11 の場合の半分以下の 3–5 mm であり、厚さの違いに起因する光量の低下が予想される。したがって、本測定の場合においても PM amp. を併用することが妥当であると判断した。

2 点目は出力信号のオフセット調整のためである。アンプ回路からの信号はベースラインが  $\sim 10$  mV 程度 + 方向にずれていることが確認された。電荷積分型の QDC モジュールを用いる場合には、記録される電荷量に損失が生じてしまう。このため、前述の PM amplifier のオフセット調整機能を利用して、オフセットの調整を行った。信号ラインの分割は TKY-0351 の出力が各チャンネルに対して 2 つあることから、ディバイダを用いずにこれらをそのまま使用した。S13360-3050PE を用いた場合には、PM amplifier は用いずにディバイダによって信号の分割を行った。

### 3.5.3 検出器の調整

測定に際して行った調整について述べる。行った事項は以下の2つである。

- ★ 増幅回路のポールゼロ抵抗 ( $R_{pzc}$ ) 調整
- ★ ディスクリミネータでの閾値 ( $V_{th}$ ) 調整

#### 増幅回路のポールゼロ抵抗 ( $R_{pzc}$ ) 調整

この目的は、ポールゼロ抵抗 ( $R_{pzc}$ ) の値の調整による信号のオーバーシュートの抑制である。本測定では電荷積分型のモジュールを用いて波高情報の取得を行っている。信号に正方向のオーバーシュートがある場合には電荷を積分して記録する際に本来の信号の寄与を打ち消してしまい、波高情報が損なわれる。また、オーバーシュート部分がベースラインに戻る前に別のイベント起因の信号がやってきた場合、波高を正しく評価出来なくなる。これを回避するために、以下に述べる手順で  $R_{pzc}$  の調整を行った。

試作 ToF をブラックシートで遮光した上で MPPC に電圧を印加する。この時の印加電圧は  $V_{op} + 3.0\text{V}$  の値とした。この値としたのは、これまで S14160-3015PS を用いてきたなかで使用実績のある値であるためである。オシロスコープで波形を確認し、信号のオーバーシュートしている部分がなくなるように可変抵抗の値を決定した。その際の波高の一例を図 3.12 に示した。これは EJ230-1300-1 のシンチレータに S14160-3015PS を 1 個接続した場合のものである。 $R_{pzc} \simeq 100, 180, 200, 410\ \Omega$  の 4 つの場合を示した。これらの図より、 $R_{pzc} \sim 180\ \Omega$  付近でオーバーシュートがよくベースライン付近に調整されているということがわかる。以下では、ポールゼロ抵抗の値を  $R_{pzc} \sim 180\ \Omega$  になるように設定して測定を実施した。ここで、抵抗の値をおよその値として表記しているのは可変抵抗のポテンショメータを手動で調整していること及びその値をテスターで読み取る際に  $\sim 10 - 15\ \Omega$  程度の値の揺らぎがあるためである。

#### ディスクリミネータでの閾値 ( $V_{th}$ ) 調整

次に、ディスクリミネータでの閾値調整について述べる。MPPC への電圧の設定は前述の  $R_{pzc}$  調整時と同じく  $V_{op} + 3.0\text{V}$  とした。QDC ラインの信号をオシロスコープで確認し、2 MeV に相当するおおよその波高を目測で確認した。確認を行う際には、波形の表示時間を 10 秒間に設定した。これは短時間での波高のばらつきを避けるためである。この時に確認する信号は S14160-3015PS を用いた場合には PM amp. の出力、S13360-3050PE を用いた場合にはディバイダの QDC ラインとして用いる側の出力である。ここで確認した値を基に以下の 2 つの基準で閾値  $V_{th}$  の設定を行った。

**基準 A** 確認した 2 MeV の  $\beta$  線に対応した波高の  $\sim 1/20$  程度にディスクリミネータの閾値  $V_{th}$  を合わせる

**基準 B** 基準 A で設定した状態で電圧を  $V_{op} + 6.0\text{V}$  まで引き上げた際に、ベースラインのノイズレベルを拾わない状態であること

まず、基準 A に沿って設定を行い、基準 B が問題ないと確認出来た場合にはその値を採用した。この時、基準 B を満たさないと確認された場合にはノイズのレベルを超過する値まで閾値を引き下げ、その値を採用した。この調整はシンチレータや MPPC 付け替えを行うタイミングでその都度実施した。

また、ここで設定した値が時間分解能に対して与える影響に関しては 3.7.6 節において述べる。

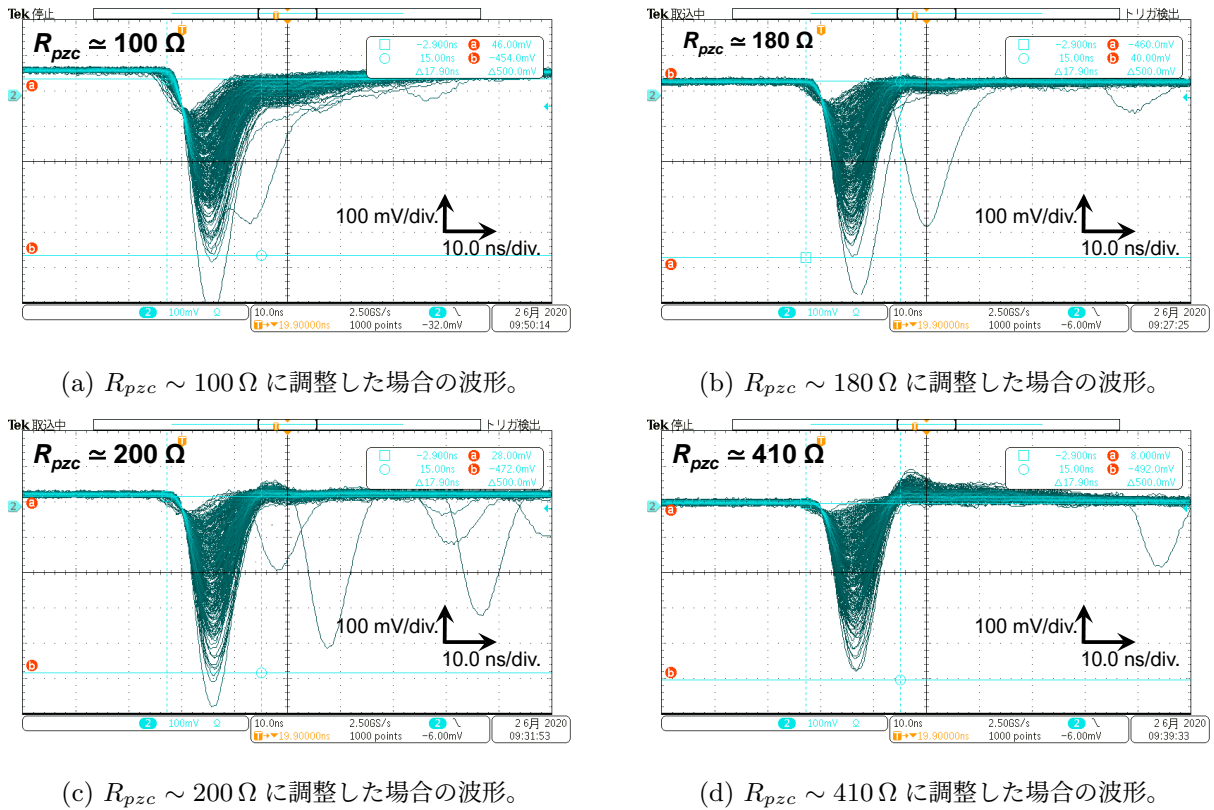


図 3.12: ポールゼロ抵抗 ( $R_{pzc}$ ) によるオーバーシュート調整の一例。

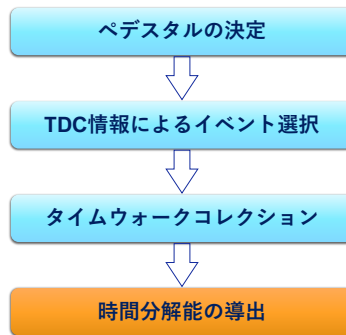


図 3.13: 時間分解能の導出に係る解析の流れ。各処理の具体的な内容は 3.6.1 以降で説明する。

### 3.6 解析方法

ここでは、時間分解能の評価を行うための解析の流れとその具体的な内容に関して説明する。図 3.13 に解析の流れを示した。次節以降で各手順の説明を行う。

#### 3.6.1 ペDESTAL情報による QDC の較正

3.5.2 節で記載した通り、検出器からの信号の波高情報は QDC として  $1 \text{ ch.} = 0.1 \text{ pC}$  として離散化された量として記録される。しかしながら、記録されたチャンネル値がそのまま本来の電荷量に対応するの

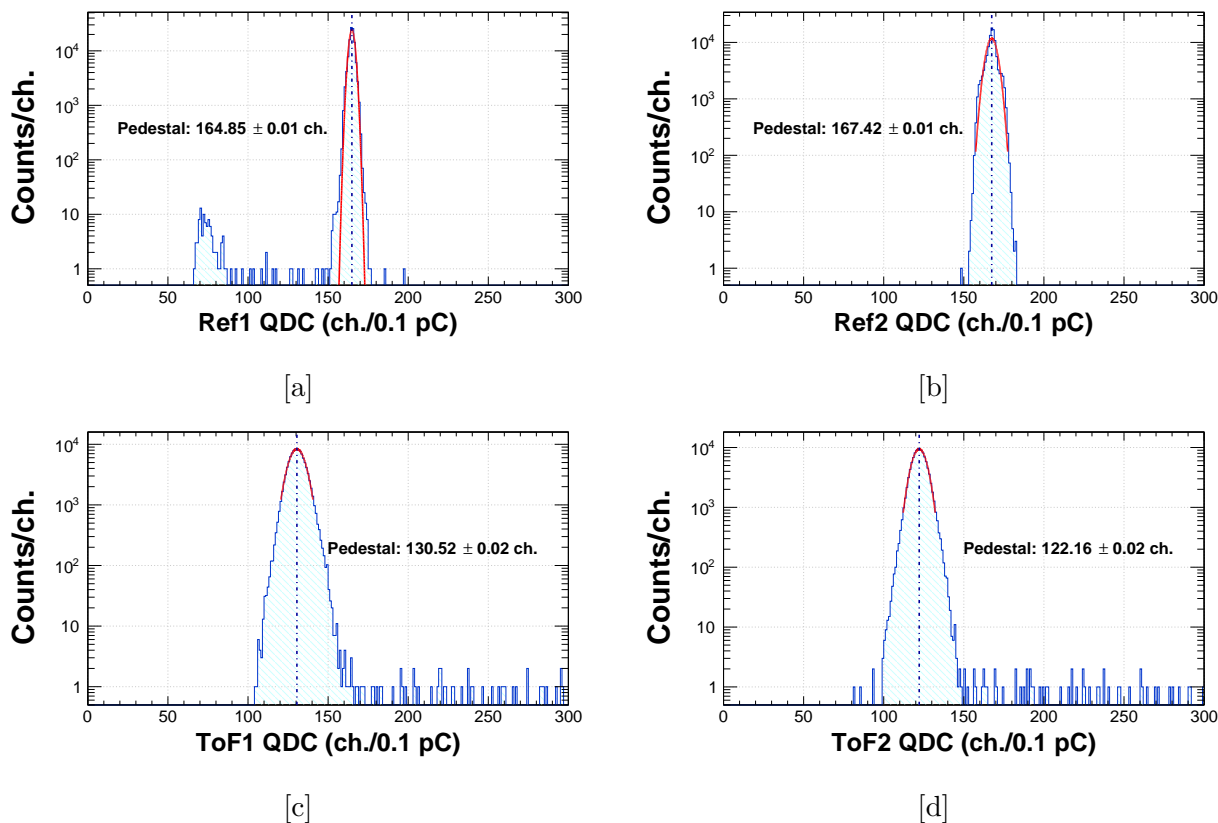


図 3.14: ペDESTAL分布の一例。各分布をガウス関数でフィットした。フィットの結果得られた中心値をペDESTALとして採用した。またこの値を黒の一点鎖線で示した。

ではなく、各入力チャンネルに固有のオフセットを持った値となっている。このオフセット値をペDESTALという。各検出器毎にペDESTALを元の QDC の値から差し引くことにより、QDC 値をイベント毎の電荷量として評価することができる。

本測定では、クロック信号をデータ収集のトリガーに OR として含めている。これは  $\beta$  線によるイベントとは独立なタイミングで取得されることから、クロック信号によるイベントを選択することによって、検出器で信号がない時の QDC の分布としてペDESTALの分布を得ることができる。ここでは、クロック信号の TDC 値が  $TDC_{\text{Clock}} > 0$  となる事象を選択した。図 3.14 にペDESTAL分布の一例を示した。これらの分布をガウス関数でフィットし、フィッティングパラメータとして得られる中心値  $\mu$  を当該 QDC チャンネルでのペDESTAL値として採用した。図 3.14 にフィット結果を赤線としてプロットし、各ヒストグラムと共にフィット結果を示した。併せて、その値を一点鎖線として示した。Ref1 の分布において 60 – 80 ch. 付近にみられる構造は、ここで示したランに限定されずその他のランにおいても確認されている。これは信号のオーバーシュートに起因するものと考えられる。

### 3.6.2 TDC 情報によるイベント選択

TDC の情報を選択することによって、検出器に対して正しく  $\beta$  線のヒットがあった事象を選択する。図 3.15 に各検出器での TDC 分布の一例を示した。それぞれのチャンネルにおいて  $\sim 2000$  ch. 付近にピーク構造があることが見て取れる。本測定の解析では、これらに対応する事象が  $\beta$  線が通過したことに

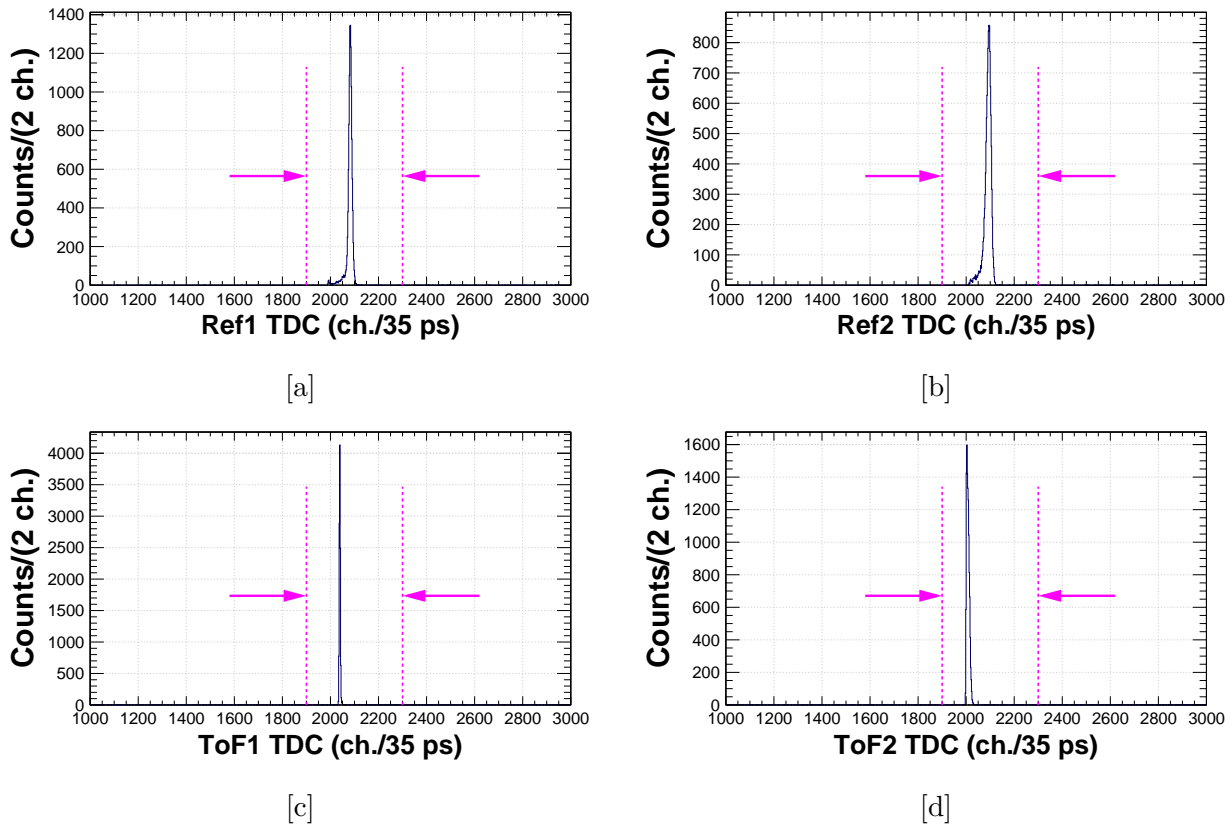


図 3.15: 各検出器での TDC 分布。～ 2000 ch. 付近に正しいヒットに対応するピークがあることがわかる。この部分を選ぶように、桃色の線で挟んだ範囲のイベントを選択した。

起因する正しいヒットであるとして、全検出器チャンネルに対して

$$1900 \text{ ch.} < \text{TDC} < 2300 \text{ ch.} \quad (3.1)$$

とするカット条件を要請し、イベントの選択を行った。但し、一部のランを解析する際には異なる範囲の事象を選択した。これは、NIM-ECL モジュールと TDC モジュールを接続するフラットケーブルに異なるものを使用したことにより、そのケーブル長の違いから common stop 信号との相対的なタイミングにずれが生じ、前述の正しいヒットに対応するピーク的位置が変化したためである。この場合には全検出器チャンネルに対して

$$2000 \text{ ch.} < \text{TDC} < 2500 \text{ ch.} \quad (3.2)$$

の範囲を選択した。次節で述べる結果のうちこれに該当するものは、3.7.9 節のうち EJ-230 を除いたシンチレータの場合、3.7.10 節のうち ESR を使用した場合、3.7.11 節のものである。

### 3.6.3 タイムウォークコレクション

本測定において使用したような leading edge 型ディスクリミネータでは、入力された信号がある閾値を超過したタイミングで論理信号を出力する。そのため、同時刻に入力された信号であっても、その波高が異なっていた場合にはディスクリミネータからの出力のタイミングにずれが生じる。図 3.16 にこの現象の概念図を示した。例えば、波高の異なる赤色と水色の 2 つのアナログ信号では、波高の大きい赤色の信号による出力はより早く、水色の信号による出力はより遅く出力されてしまう。このようなずれのこと

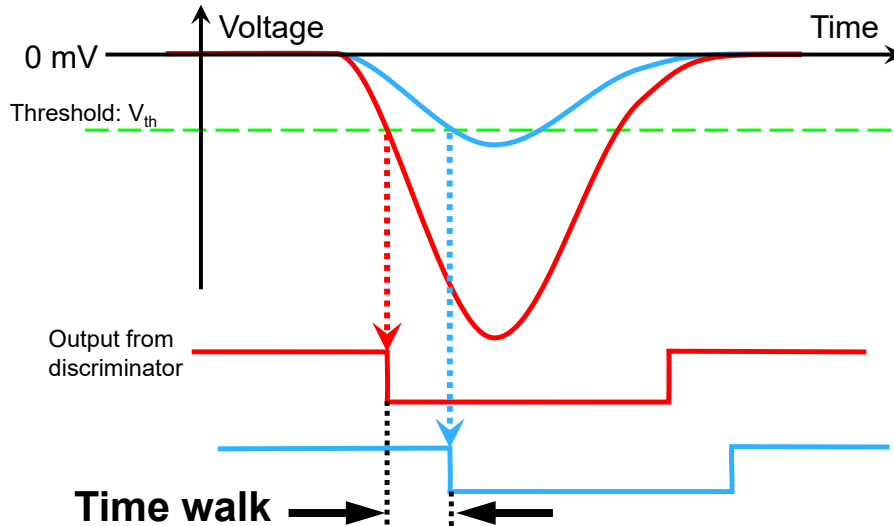


図 3.16: タイムウォークの概念図。同時刻に立ち上がった信号であっても、波高の大小によって論理信号が出力されるタイミングにずれが生じる。

をタイムウォークという。タイムウォークの影響によって、各検出器での QDC と検出器間での飛行時間 (Time-of-flight; TOF) との間に相関が生じる。この寄与を補正することによって飛行時間の分解能を正しく評価することが可能となり、タイムウォークコレクションと呼ばれる。タイムウォークコレクションは、その名称に揺れがあり、このほかにパルスハイトコレクションやスルーイングコレクションと称されることもある。

前述のように、タイムウォークの影響は各検出器での QDC と検出器間の TOF との相関として現れる。このことを利用して、この2つの量の2次元相関に対し関数形を仮定してフィッティングを行い、得られる補正関数を差し引くことによって相関を打ち消すことができる。補正関数の形は実際に得られる2次元相関の形を基に決定するほか、アナログ信号の立上りが時間に対して2次関数的であるものと仮定して  $1/\sqrt{QDC}$  の関数形を用いることが多い。本測定の解析においては以下のような関数形を用いた。

$$(\text{Ref1, Ref2}) : f(x) = \frac{p_0}{\sqrt{x - p_1}} + p_2 \quad (3.3)$$

$$(\text{試作 ToF}) : \begin{cases} f(x) = \frac{p_0}{\sqrt{x}} + p_1 \\ f(x) = p_0 \exp(p_1 x) + p_2 \\ f(x) = p_0 x + p_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで、試作 ToF に対しては、3通りの関数形を列挙した。解析時には、 $f(QDC) = p_0/\sqrt{QDC} + p_1$  の関数形を基本として解析を行い、フィッティングを行った結果を基にいずれの関数形を採用するかを決定した。ここで選択した関数形は、シンチレータとMPPCの構成を変更せずに行った印加電圧依存性や $\beta$ 線照射位置依存性などの一連のランに対しては共通のものとして行った。また、試作 ToF は3.4節において述べた通り、シンチレータの両端にMPPCを取り付けた両読みとなっている。同じシンチレータの両端に同一の型のMPPCを取り付けていることからその応答は同じ関数形で記述できると仮定して、両端でのQDCに対する関数形は同一のものを用いた。Ref1とRefに関しては、構成が同一であることから用いる関数形も同一とし、ランやセッティング毎で関数形の変更は行わず固定として解析を行った。図3.17にタイムウォークコレクションの一例を示した。[a]が補正前のTOFとQDCとの相関、[b]が補正後の相関である。



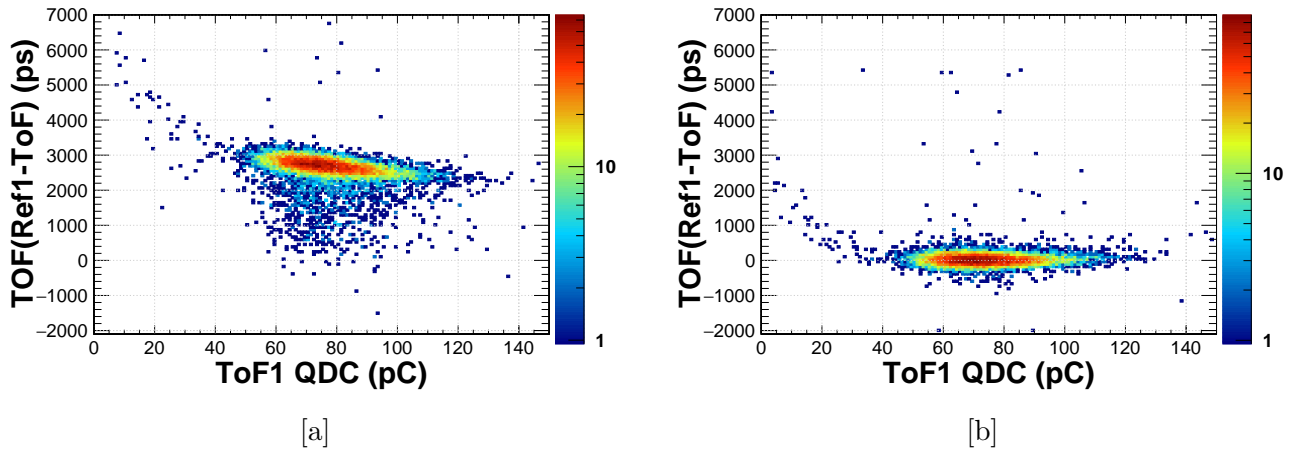


図 3.17: タイムウォークコレクションの一例。[a]: 補正前の TOF-QDC 相関。[b]: 補正後の TOF-QDC 相関。

### 3.6.4 時間分解能の導出

時間分解能の導出方法について説明する。本測定では 3 個の検出器を設置したことから、検出器 2 個の組合せを選ぶことで各検出器間での飛行時間 (Time-Of-Flight; TOF) を 3 つ構成することができる。ここで、試作 ToF 検出器は両読みの構成となっている。そのため、両端に取り付けた MPPC での TDC 値の算術平均を取ったものを試作 ToF 検出器の時間情報として採用した。一方、Ref1 と Ref2 は共に 1 個の MPPC を用いた片読みとなっていることから、それぞれでの TDC の値をそのまま用いた。これらの情報から飛行時間分布を作成し、これらをガウス関数でフィッティングする。その結果として得られるフィッティングパラメータの  $\sigma$  を飛行時間の分解能として採用する。各検出器の固有時間分解能  $\sigma_{\text{ToF}}$ 、 $\sigma_{\text{Ref1}}$  及び  $\sigma_{\text{Ref2}}$  が独立なものであると仮定すると、それぞれの飛行時間の分解能  $\sigma_{\text{Ref1-ToF}}$ 、 $\sigma_{\text{ToF-Ref2}}$  及び  $\sigma_{\text{Ref1-Ref2}}$  は誤差伝搬則によって次に示す式 (3.5) のように書き表される。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 &= \sigma_{\text{Ref1}}^2 + \sigma_{\text{ToF}}^2 \\
 \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 &= \sigma_{\text{ToF}}^2 + \sigma_{\text{Ref2}}^2 \\
 \sigma_{\text{Ref1-Ref2}}^2 &= \sigma_{\text{Ref1}}^2 + \sigma_{\text{Ref2}}^2
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

この式を用いることによって検出器の固有時間分解能の導出を行った。ただし、EJ230-1300-1、EJ230-1300-2 及び EJ230-1300-3 のプラスチックシンチレータを用いた場合とそのほかのプラスチックシンチレータの用いた場合とは異なる方法によって導出を行った。以下、それぞれの方法について説明する。

### 3.6.4.1 IDEJ230-I300-1、EJ230-I300-2、EJ230-I300-3のプラスチックシンチレータを用いた場合の固有時間分解能導出方法

先に式(3.5)に示した3本の式を連立方程式とみなして解くことにより、各検出器の固有時間分解能  $\sigma_{\text{ToF}}$ 、 $\sigma_{\text{Ref1}}$  及び  $\sigma_{\text{Ref2}}$  を次の式(3.6)のように書き表すことができる。

$$\begin{cases} \sigma_{\text{ToF}} &= \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 - \sigma_{\text{Ref1-Ref2}}^2)} \\ \sigma_{\text{Ref1}} &= \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 - \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 + \sigma_{\text{Ref1-Ref2}}^2)} \\ \sigma_{\text{Ref2}} &= \sqrt{\frac{1}{2} (-\sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 - \sigma_{\text{Ref1+Ref2}}^2)} \end{cases} \quad (3.6)$$

また、固有時間分解能に対する統計誤差  $\epsilon_i$  ( $i = \text{Ref1}, \text{Ref2}, \text{ToF}$ ) は以下に示す式(3.7)のようになる。

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{ToF}} &= \frac{\sqrt{\sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 \epsilon_{\text{Ref1-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 \epsilon_{\text{ToF-Ref2}}^2 + \sigma_{\text{Ref1-Ref2}}^2 \epsilon_{\text{Ref1-Ref2}}^2}}{2\sigma_{\text{ToF}}} \\ \epsilon_{\text{Ref1}} &= \frac{\sqrt{\sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 \epsilon_{\text{Ref1-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 \epsilon_{\text{ToF-Ref2}}^2 + \sigma_{\text{Ref1-Ref2}}^2 \epsilon_{\text{Ref1-Ref2}}^2}}{2\sigma_{\text{Ref1}}} \\ \epsilon_{\text{Ref2}} &= \frac{\sqrt{\sigma_{\text{Ref1-ToF}}^2 \epsilon_{\text{Ref1-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 \epsilon_{\text{ToF-Ref2}}^2 + \sigma_{\text{Ref1+Ref2}}^2 \epsilon_{\text{Ref1+Ref2}}^2}}{2\sigma_{\text{Ref2}}} \end{cases} \quad (3.7)$$

このケースでは、3.5.2.1節にて述べた通り、まずすべての検出器での信号を用いたコインシデンスをトリガーに含めたデータを取得した。このランのデータから前述の式(3.6)及び(3.7)を用いて全検出器の固有時間分解能の導出を行う。Ref2、ToF1、ToF2のコインシデンスをトリガーに組み込んで取得したその他のランに関しては、次の式(3.8)及び(3.9)を用いて固有時間分解能の導出を行った。ここで、Ref2の固有時間分解能  $\sigma_{\text{Ref2}}$  及びその統計誤差  $\epsilon_{\text{Ref2}}$  は前述の全コインシデンスでのランによって得られた値を用いた。

$$\sigma_{\text{ToF}} = \sqrt{\sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 - \sigma_{\text{Ref2}}^2} \quad (3.8)$$

$$\epsilon_{\text{ToF}} = \frac{1}{\sigma_{\text{ToF}}} \sqrt{\sigma_{\text{ToF-Ref2}}^2 \epsilon_{\text{ToF-Ref2}}^2 + \sigma_{\text{Ref2}}^2 \epsilon_{\text{Ref2}}^2} \quad (3.9)$$

### 3.6.4.2 そのほかのプラスチックシンチレータを用いた場合の固有時間分解能導出方法

この場合には、すべてのランにおいて前節にて示した式(3.6)及び式(3.7)を用いて固有時間分解能の導出を行った。

## 3.7 結果

測定結果について述べる。以下に示す結果は、特に断りのない場合  $\beta$ 線の照射位置をシンチレータの長さ方向中心とした場合のものである。

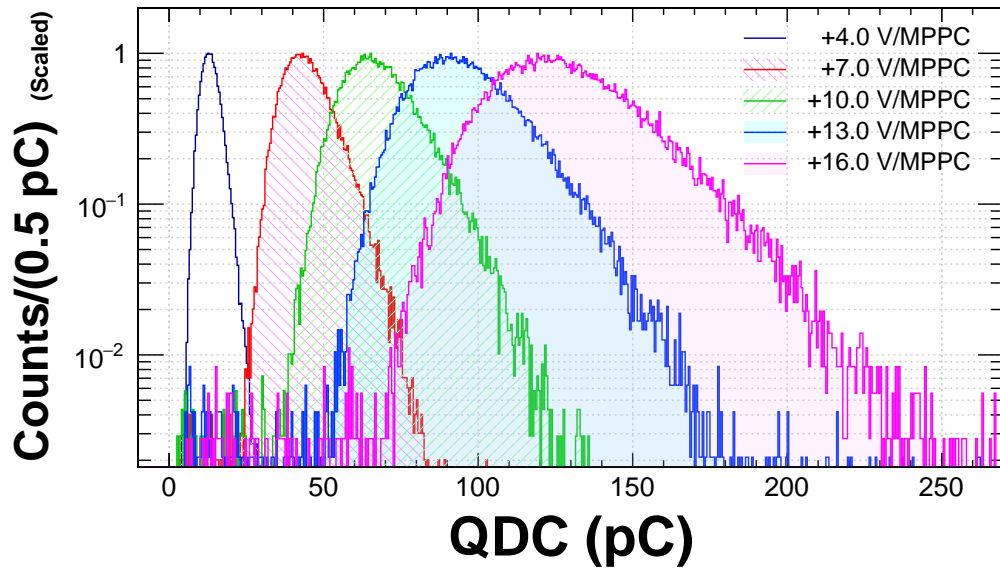


図 3.18: MPPC での電荷分布。QDC の値からペDESTAL 値を差し引いた上で、1 ch. = 0.1 pC として電荷量に換算したものである。

### 3.7.1 電荷分布に対する MPPC 印加電圧依存性

本節では、本題である時間分解能に先立ち、試作機での電荷情報の印加電圧依存性について述べる。以下では MPPC の印加電圧依存性について述べる際、MPPC の降伏電圧  $V_{break}$  を基準とした電圧値として  $V_{bias} - V_{break}$  という形で記述する。ここで降伏電圧  $V_{break}$  は MPPC でアバランシェ増幅が起り始める電圧である。本節で述べる S14160-3015PS の場合には  $V_{op} \equiv V_{break} + 4.0\text{ V}$  である。また、単位としては接続する MPPC の個数で平均化した値として V/Num. of MPPC という表記を用いる。これは複数個の MPPC を直列接続で運用する場合、実際に印加する電圧が個数によって変わるためである。

図 3.18 に MPPC S14160-3015PS を 2 個直列に接続したものをシンチレータ ID EJ230-1300-1 に取り付けた場合の一方の MPPC の電荷分布を示した。ここでは  $V_{bias} - V_{break} = 4.0, 7.0, 10.0, 13.0, 16.0\text{ V/Num. of MPPC}$  の場合について示した。但し、比較のためにそれぞれのヒストグラムについてエントリー数が最大となるピンの高さを 1 とするように規格化している。電圧を大きくすることにしたがって電荷量がより大きくなっている様子がわかる。

ここでは、こうした分布に対してより定量的に評価するために Landau 関数にガウス関数を畳み込んだ次に示す式 (3.10) の関数でフィットを行い、その MPV (Most Probable Value) を評価する。ここで、MPV は Landau 分布を特徴づける量の 1 つであり、分布の最頻値に関係した量である。

$$f_{QDC}(x) = (g * h)(x) \quad (3.10)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{Landau}}} L(x, MPV, \sigma_{\text{Landau}}) \quad (3.11)$$

$$h(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{Gaus}}^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{\text{Gaus}}^2}(x - \mu)^2\right] \quad (3.12)$$

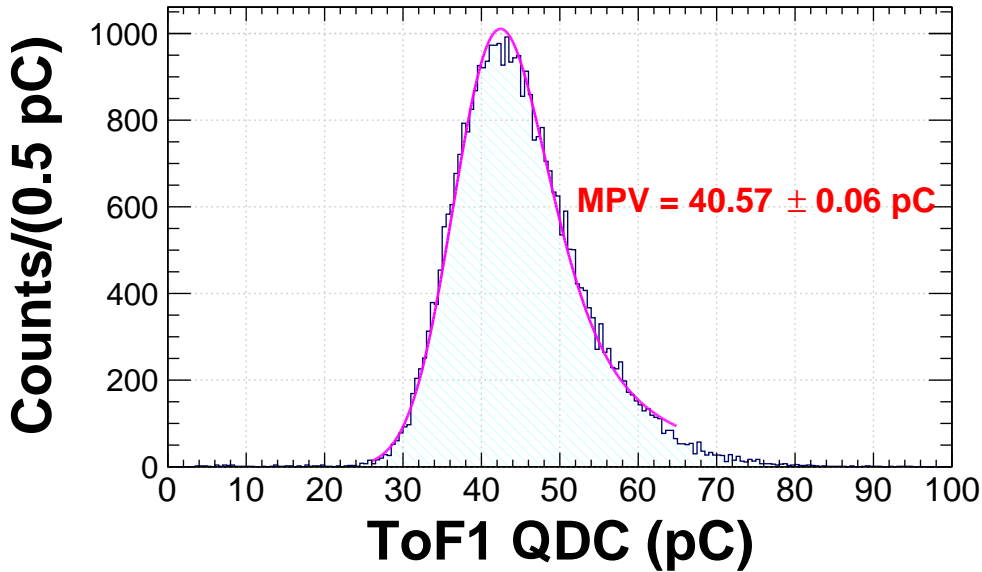


図 3.19: QDC 分布評価の際のフィッティングの一例。一方の MPPC の QDC 分布を式 (3.10) に示した Landau 関数とガウス関数の畳み込み関数でフィットした。この図に示す場合では  $MPV = 40.57 \pm 0.06$  pC という結果を得た。

ここで Landau 関数  $L(x, MPV, \sigma_{\text{Landau}})$  は以下のように表される関数である [61, 62]。

$$L(x, MPV, \sigma_{\text{Landau}}) = \phi\left(\frac{x - MPV}{\sigma_{\text{Landau}}}\right) \quad (3.13)$$

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \exp[\lambda s + s \ln s] ds \quad (3.14)$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \exp[-\lambda u - u \ln u] \sin(\pi u) du \quad (3.15)$$

ただし、式 (3.14) 中で  $i$  は虚数単位である。また、式 (3.14) と式 (3.15) は変数変換を行ったものである。フィッティングによる電荷量分布の評価の一例を図 3.19 に示した。

本測定においてはプラスチックシンチレータの長さ方向両端にそれぞれ MPPC を取り付けている。ここで、両端それぞれでの分布に対してフィットを行い、得られた値の相乗平均を取ることで評価を行う。ここで、代表値として相乗平均を用いたのは、荷電粒子の通過位置の中心からの偏りに起因する光量の増減の効果を打ち消した上で評価を行うためである。減衰長が  $L_{att}$  であるシンチレータ内部である長さ  $l$  だけシンチレーション光が伝播するときの光量の減少は  $\exp\left(-\frac{l}{L_{att}}\right)$  に従うと解釈できる。シンチレータの長さ方向の左右両端で読み出す場合を考える。左右で伝播する距離の長さが  $\delta$  だけ異なっていた時、両端で検出される光量は、一方では  $\exp\left(-\frac{\delta}{L_{att}}\right)$  倍、もう一方では  $\exp\left(+\frac{\delta}{L_{att}}\right)$  倍だけ光量が偏って見えてしまうことになる。これらに対して相乗平均を求めることで、指数関数的な偏りを相殺することができ、光量のずれによる偏りのない形で評価が行えると期待される。図 3.20 に得られた相乗平均値の印加電圧依存性を示した。横軸の値は本節の冒頭にて述べた印加した ( $V_{bias}$ ) と降伏電圧 ( $V_{break}$ ) との差分を接続する MPPC 個数で平均化した値である。ここで、 $V_{bias} - V_{break} = +7.0, 10.0, 11.5$  V の点に関しては、再現性の確認のために複数回の複数回の測定を行っている。これらのランの結果に関しては、各ラン毎に個別に解析を行い、それらの加重平均を求めることで当該電圧での値とした。この分布に対し、得

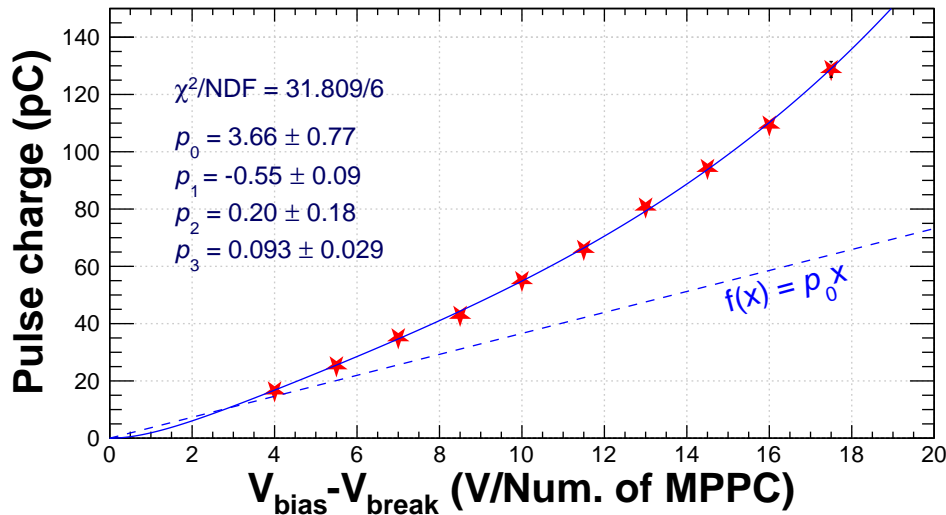


図 3.20: QDC 分布の MPV の印加電圧依存性。プロットしているのは両端での MPPC による値の相乗平均である。図中の青の実線は式 (3.17) に示した関数でのフィット結果である。

られる電荷量の印加電圧依存性が以下に示す関数形によって理解されると仮定しフィッティングを行った。

$$f_{Charge}(x) = Gain(x)PDE(x)Cross(x) \quad (3.16)$$

$$= p_0 x [1 - \exp(p_1 x)] [1 + p_2 \exp(p_3 x)] \quad (3.17)$$

$$\begin{cases} Gain(x) = p_0 x \\ PDE(x) = 1 - \exp(p_1 x) \\ Cross(x) = 1 + p_2 \exp(p_3 x) \end{cases} \quad (3.18)$$

ここでは、電荷量の印加電圧依存性は MPPC 内部での増倍率 Gain、光子検出効率 PDE、クロストーク確率 Cross の積として記述できるものと仮定した。Gain の因子は、出力される電荷とオーバー電圧の関係から 1 次関数的であると仮定した。PDE および Cross に関しては、性能表に示される電圧依存性を基にそれぞれ関数形を仮定した。本来ならば、PDE と Cross には各要素の寄与を決定するような定数因子が付されるべきであるが、仮定した関数形が積の形をとるものであること及びフィッティングパラメータの自由度を下げるため、これらの寄与は関数全体としての係数に含まれるとして、 $p_0$  に含まれているものと仮定した。なお、本測定の設定では MPPC からの生の信号をアンプ回路により増幅を行っている。このことの寄与は MPPC への印加電圧に対しては独立であり、定数的な因子とみなせるものと仮定し、同様に Gain の定数項  $p_0$  に含まれているものとみなした。

図 3.20 中の実線が仮定した関数によるフィット結果を示す。また、フィットした関数のうち、線形の因子 (Gain) のみ抽出したものを点線で示した。式 (3.17) において仮定した関数形とおよそ一致していることがわかる。このことから、得られる電荷量は単純な増倍率のみではなく、指数関数的な因子の寄与を含めることによってよく理解できることがわかる。

このように、自然なことではあるが、印加電圧をひきあげることに伴い、得られる電荷が増加するということがわかった。他方で、このような場合にベースラインに相当するペDESTALの分布がどのように変化するかという点を見ていく。片側の MPPC でのペDESTAL分布を図 3.21 に示した。ここでは  $V_{bias} - V_{break} = 7.0, 10.0, 13.0, 16.0$  V/Num. of MPPC の場合を示した。但し、この図では横軸の値は電荷量に換算していない生のチャンネル値である。また、定性的な傾向を比較するため、各ヒストグラ

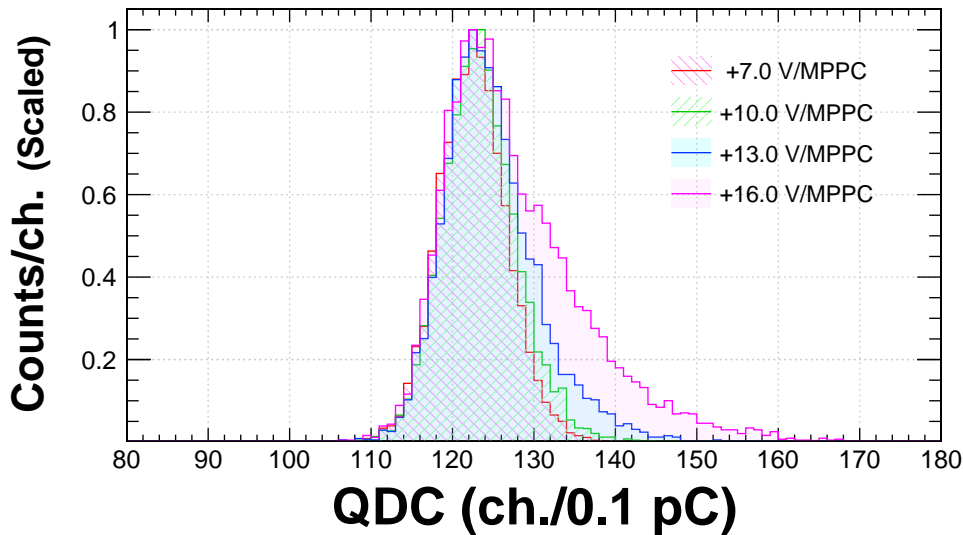


図 3.21: 各電圧でのペDESTAL分布。は  $V_{bias} - V_{break} = 7.0, 10.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  では変化が見られないのに対しては  $V_{bias} - V_{break} < 13.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  では分布が太く、QDC 値が高い側へと尾を引く非対称な形になっていくことがわかる。

ムの高さが 1 となるようにスケールしている。印加電圧  $V_{bias} - V_{break} > 10.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の領域で、ペDESTAL分布が太く、また電荷量のより大きい側へと形が非対称になっていく傾向があることがわかる。これは印加電圧を引き上げることに伴うノイズの増加や次節以降ではこうした MPPC への印加電圧を変えることによる影響が時間分解能に対してどのように寄与するのかを見ていく。

### 3.7.2 時間分解能に対する MPPC 印加電圧依存性

ここでは、時間分解能の印加電圧依存性について述べる。ここでは、MPPC の構成を同一とした場合の結果から検討を行う。

図 3.22 に MPPC S14160-3015PS を 2 個直列に接続した場合の時間分解能  $\sigma_{\text{detector}}$  と印加電圧  $V_{bias} - V_{break}$  との相関を示した。ここで使用したシンチレータは ID EJ230-1300-1、EJ230-1300-2、EJ230-1300-3 である。横軸の値は 3.7.1 と同様に印加電圧 ( $V_{bias}$ ) と降伏電圧 ( $V_{break}$ ) との差分を MPPC 個数で平均化した値である。赤の星印が EJ230-1300-1、緑の菱形が EJ230-1300-2、青の十字が EJ230-1300-3 のシンチレータを用いた場合の結果である。いずれの形状のシンチレータを用いた場合であっても、 $V_{bias} - V_{break} = 4.0 - 8.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  の範囲においては印加電圧を上げていくのに伴って時間分解能が向上するという傾向があるということがわかる。また、 $V_{bias} - V_{break} = 8.5 - 11.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  の範囲では時間分解能に大きな変化は見られず、印加電圧に対する強い依存性は見られないということがわかる。特に EJ230-1300-1 のプラスチックシンチレータを用いた場合には、 $V_{bias} - V_{break} = +8.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  時に  $\sigma_{\text{detector}} = 77.6 \pm 0.6 \text{ ps}$  という結果を得た。同じ電圧の点で比較すると、EJ230-1300-2 では  $\sigma_{\text{detector}} = 116.7 \pm 0.9 \text{ ps}$ 、EJ230-1300-3 では  $\sigma_{\text{detector}} = 189.2 \pm 0.8 \text{ ps}$  であった。しかし、更に電圧を引き上げていった場合には時間分解能が逆に悪化するという傾向がみられた。特に、印加電圧  $V_{bias} - V_{break} = 17.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  時  $\sigma_{\text{detector}} = 99.9 \pm 0.6 \text{ ps}$  であった。これは  $V_{bias} - V_{break} = 8.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  時の結果と比較すると  $\sim 20 \text{ ps}$ 、相対比として  $\sim 30\%$  程度悪化するということになる。こうした傾向は 3.7.1 において

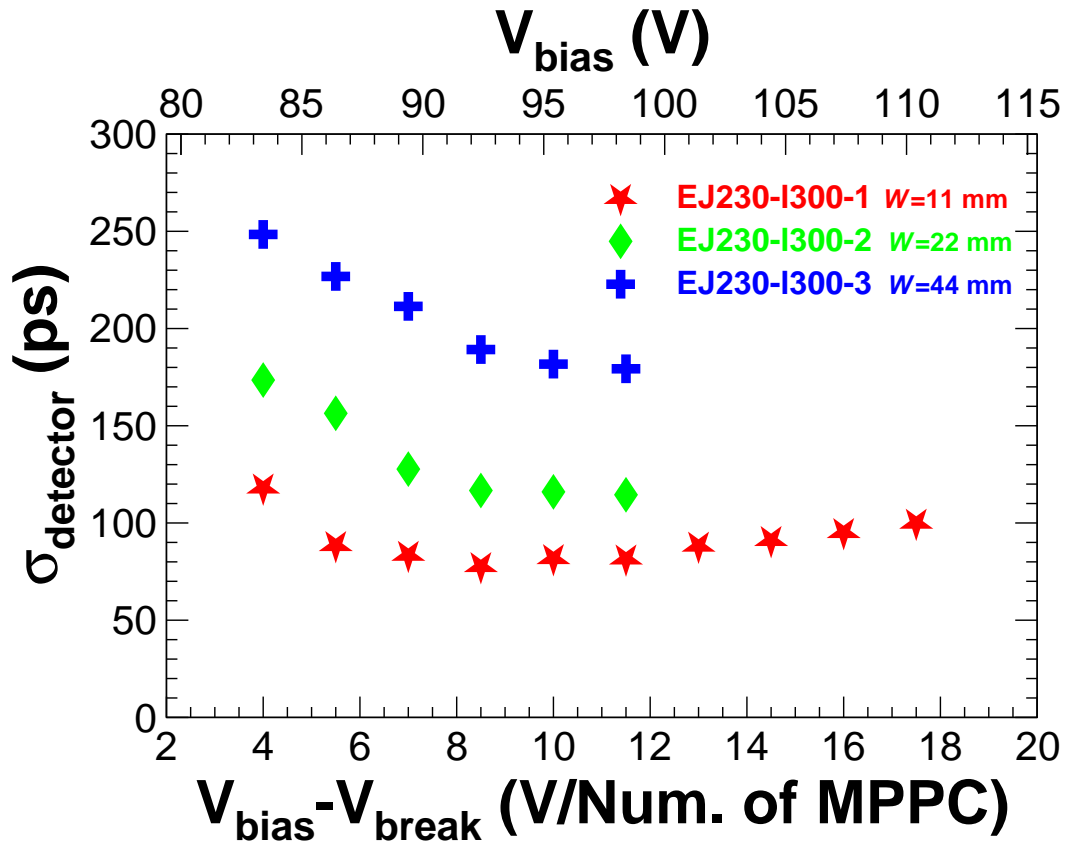


図 3.22: MPPC を S14160-3015PS を 2 個直列に接続した場合の印加電圧依存性。幅 11, 22, 44 mm の 3 通りの場合を示した。印加電圧を引き上げるに従って時間分解能が向上する一方で、 $V_{bias} - V_{break} = 8.5 - 11.5$  V/Num. of MPPC の範囲では電圧に対して強い依存性が見られないことがわかる。

見たように、印加電圧の高い領域においては pedestals の分布が太くなっていくという傾向を反映しているものと考えられる。しかしながら、EJ230-I300-1 のシンチレータと組み合わせた場合には  $V_{bias} - V_{break} = 8.5 - 17.5$  V/Num. of MPPC の範囲で  $\sigma_{detector} \leq 100$  ps を達成可能であるということがわかった。

### 3.7.3 時間分解能に対する MPPC 読み出し方法依存性

取り付ける MPPC の個数を増やすことで、シンチレーション光に対する有効面積を拡大させることができる。これにより検出光子数が増加し、時間分解能が向上する。多数個の MPPC を取り付ける際の個数と接続方法に関して検討を行った。ここでは、接続方法として直列接続と並列接続の 2 つをを検討した。以下でそれぞれの方法の特徴について述べる。

#### ★ 直列接続

この方法では MPPC を直列に接続して信号の読み出しを行う。MPPC を降伏電圧  $V_{break}$  以上の電圧  $V_{bias}$  で動作させるとき、出力として得られる電荷  $Q$  は次の式 (3.19) により記述される [49]。ここで  $C$  は検出器容量である。

$$Q = C (V_{bias} - V_{break}) \quad (3.19)$$

したがって、検出器としての MPPC は電荷の蓄積と放出を行うキャパシタとみなすことができる。したがって、MPPC の直列接続はキャパシタの直列接続と等価であると考えることができる。 $n$  個のキャパシタの直列接続を考える時、各素子での容量を  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 全体の容量  $C_{total}$  の関係は式 (3.20) で書き表され、全体の容量は各キャパシタでの容量よりも小さくなる。

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (3.20)$$

この効果により、直列接続を用いる場合には得られる信号の時間応答がより速くなるということが予想され、時間分解能の向上が期待される。しかし、一方で差動に必要な電圧は用いる MPPC の個数に応じて増加するため、単体で使用する場合と比較してより大電圧が必要となるという欠点も存在する。

#### ★ 並列接続

この場合も直列接続の場合と同様にキャパシタの並列接続とみなすことができる。こちらでは直列接続と対称的に、作動に必要な電圧は単体で使用する場合と同じである。一方で全体の容量は増加するため、直列接続の場合と比較して時間応答がなまってしまうことが予想される。

図 3.23 に本節での比較のために用いた MPPC 読み出し用のプリント基板とその回路図をそれぞれ示した。並列接続のための基板では、実装した MPPC それぞれに電圧保護用のコンデンサ (容量  $0.1 \mu\text{F}$ 、耐圧  $100 \text{V}$ ) を並列に接続している。尚、各接続方法に関して MPPC 個数の検討を行う際には、MPPC を 1 個実装した場合の結果として直列接続用に設計した基板を用いた場合の結果を共通で用いることとした。これは、基板の形状や電圧供給ラインから MPPC までの配線パターンなどが、MPPC 部分が直列接続であるか並列接続であるかを除いてほぼ同じ設計を行ったためである。

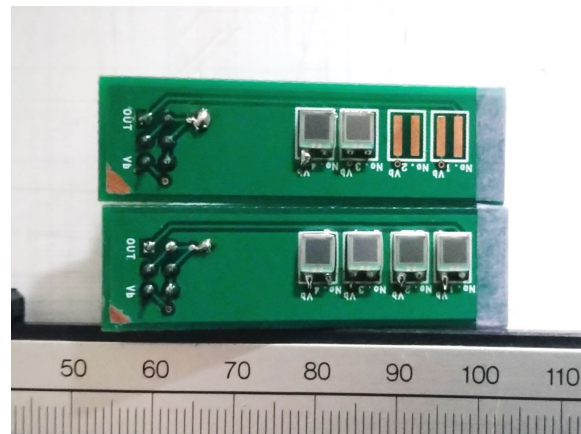
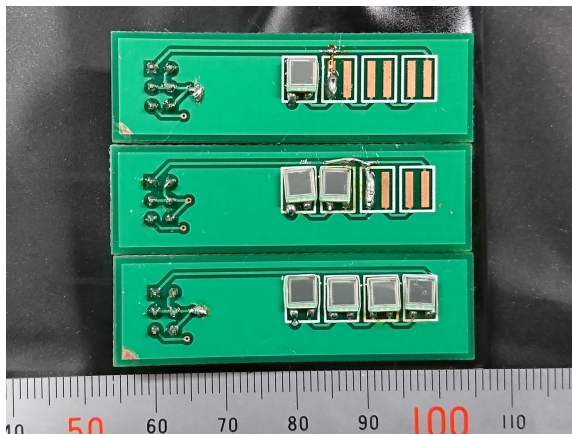
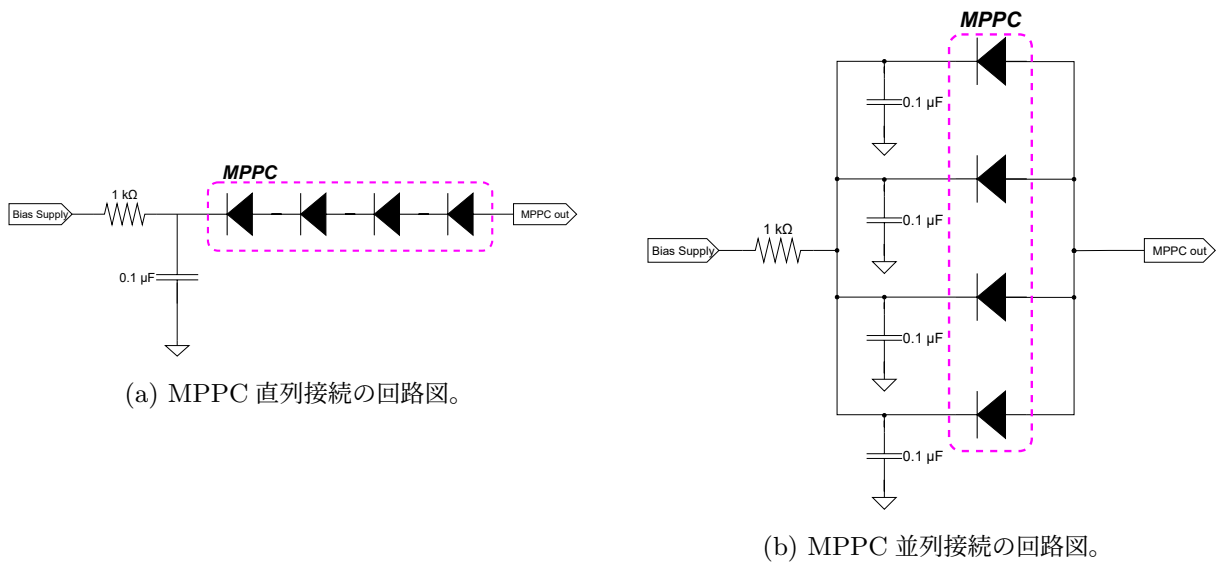
#### 3.7.3.1 出力信号の比較

時間分解能に言及するに先立ち、2 つの接続方法を用いた場合に得られる出力波形について述べる。図 3.24 に MPPC を直列接続または並列接続で 4 個実装した基板を用いた場合の信号を示した。いずれのケースでもシンチレータは ID EJ230-I300-2 を用いており、印加電圧は  $V_{bias} - V_{break} = 3.0 \text{V/Num. of MPPC}$ 、 $R_{pzc} \sim 190 \Omega$  に設定している。同じ構成のアンプ回路を用いる場合でも、並列接続では直列接続と比較して信号がより太く後ろ側へ長く尾を引く形となっている。実際にはアンプ回路による増幅・整形の効果を含んでいるため、直接的に比較することは難しいが接続方法の違いに起因する検出器容量の変化やそれによる時間応答の変化が、波形の差として現れているものと考えられる。実際にデータ取得を行う際には、このテール部分を調整するために増幅回路のポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  の再調整を行った。その際のいくつかの抵抗値での波形をプロットしたものを図 3.25 に示す。但し、オシロスコープで取得した際にそれぞれの信号の波高にばらつきがあったため、各波形データに対して最大となる点が 1 となるように波形の規格化を行ったものである。そのため、縦軸の単位を a. u. としている。 $R_{pzc} \sim 400 \Omega$  とした時に  $\sim 10 \text{ns}$  以降に見られたテール成分を抑えることが出来ており、更に抵抗値を大きくし  $R_{pzc} \sim 600 \Omega$  とした場合には逆にオーバーシュートが生じていることがわかる。これを受けて、 $R_{pzc} \sim 400 \Omega$  を採用した。

#### 3.7.3.2 時間分解能

続いて、時間分解能について見ていく。図 3.26 及び図 3.27 に ID EJ230-I300-2 のシンチレータに MPPC S14160-3015PS を接続した場合の時間分解能と印加電圧との相関を示した。但し、取得した印加





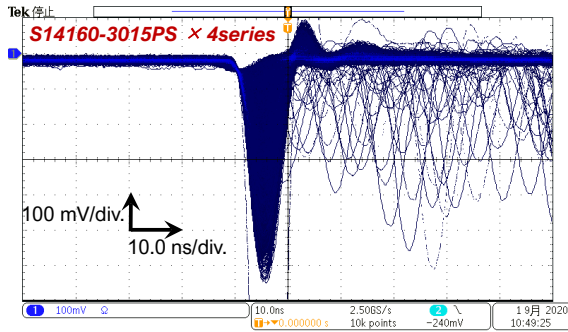
(c) MPPC 直列接続において使用した回路。上から順に 1 個、2 個、4 個を実装している。

(d) MPPC 並列接続において使用した回路。上から順に 2 個、4 個を実装している。

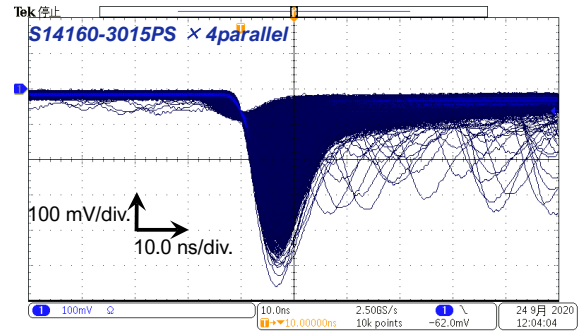
図 3.23: MPPC の個数・接続方法の検討のために用いた基板の回路図と実際の基板の写真。実装している MPPC はいずれも S14160-3015PS である。(a) 及び (c) が直列接続のものである。(b) 及び (d) が並列接続のものである。基板はどちらも MPPC 部分の配線パターンを除き、パッドの配置や全体の形状は同一に設計した。

電圧の範囲のために図 3.26 と図 3.27 では横軸の範囲が異なっている。ここでの結果においても 3.7.2 節で見た場合と同様に、いずれの接続方法・個数においても印加電圧を引き上げることに伴って時間分解能が向上する傾向がみられる。一方で  $V_{bias} - V_{break} = 8.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  付近では強い依存性は見られない。これもまた 3.7.1 節にて見た傾向と同じである。こうした電圧に対する応答は個数や接続方法に依存しない性質であるとみることができる。同じ印加電圧での結果に着目すると、直列・並列いずれの場合においても接続する MPPC の個数を多くした場合に時間分解能が向上する傾向があることが見て取れる。

次に印加電圧をある値に固定した場合の個数ごとの時間分解能について着目する。ここでは図 3.26 及び図 3.27 中に一点鎖線で示した  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  での値に着目する。このときの MPPC の個数と時間分解能の関係を図 3.28 に示した。桃色の星印が直列接続の場合を、水色の菱形が並列接続の場合の結果をそれぞれ示す。ここで、MPPC の個数  $N_{MPPC}$  と検出される光子数  $N_{det}$  と時間



(a) S14160-3015PS 4個直列接続の場合



(b) S14160-3015PS 4個並列接続の場合

図 3.24: 直列接続と並列接続での信号の比較。本文中にて記載した通り、使用したシンチレータやMPPCへの印加電圧は同じ場合のものを示した。直列接続の場合は信号幅が $\sim 10$  ns であるのに対して並列接続では信号が長くテールを引く形状であり、波形が大きく異なることがわかる。

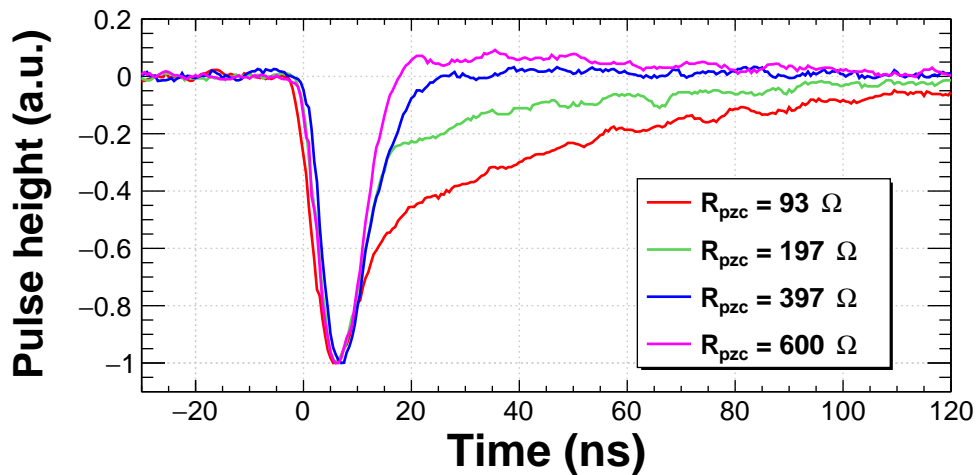


図 3.25:  $R_{pzc}$  を変化させた場合の出力波形の比較 (MPPC S14160-3015PS を 4 個並列接続した場合)。 $R_{pzc} = 93, 197, 397, 600 \Omega$  の 4 つの場合を示した。但し、本文中に記載の通りそれぞれの波形は最大の波高が 1 となるように高さをそろえている。 $R_{pzc} = 397 \Omega$  の場合にオーバーシュートの成分をよく調整できているとみなし、この値を採用した。

分解能  $\sigma_{\text{detector}}$  との関係について考える。但し、今はMPPCの検出効率やその波長依存性などは考えないものとして、単純に到達した光子数を考えるものとする。 $N_{\text{det}}$  は幾何学的には、シンチレータ端面上の有感領域の面積によって決定される。より厳密にはシンチレータと表面の反射材の境界での反射や屈折といった光学的な過程を考慮する必要があるが、単純には検出される光子数はMPPCが覆う実効的な面積つまりMPPC個数に比例すると考えることができる。一方、光子数  $N_{\text{det}}$  の時間分解能  $\sigma_{\text{detector}}$  に対する寄与は、光子数の分散 ( $\frac{1}{\sqrt{N_{\text{det}}}}$ ) という形で現れると期待される。これから、MPPCの個数  $N_{\text{MPPC}}$  は時間分解能に対し  $\propto \frac{1}{\sqrt{N_{\text{MPPC}}}}$  という形で関係づけられることが考えられる。よって、直列接続・並列接続それぞれの結果に対して次の式 (3.21) の関数形でフィットを行った。

$$f(x) = \frac{p_0}{\sqrt{x}} + p_1 \quad (3.21)$$

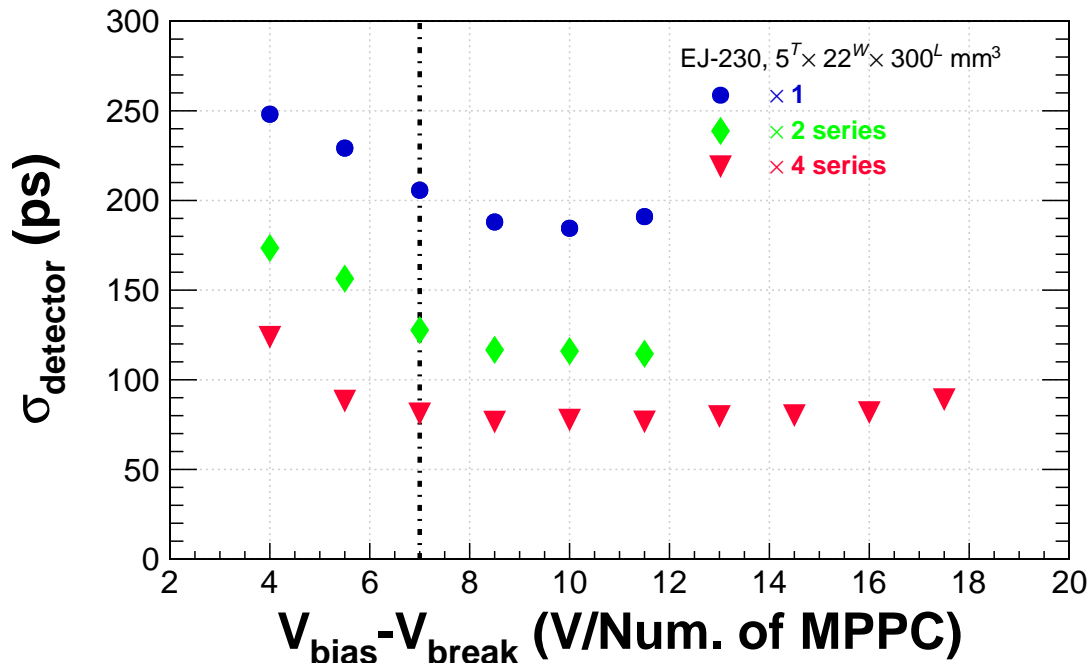


図 3.26: ID EJ230-I300-2 のシンチレータに S14160-3015PS を複数個取り付けた場合の個数毎の印加電圧依存性 (直列接続の場合)。いずれの接続方法・個数においても印加電圧を引き上げることに伴って時間分解能が向上する傾向がみられる。

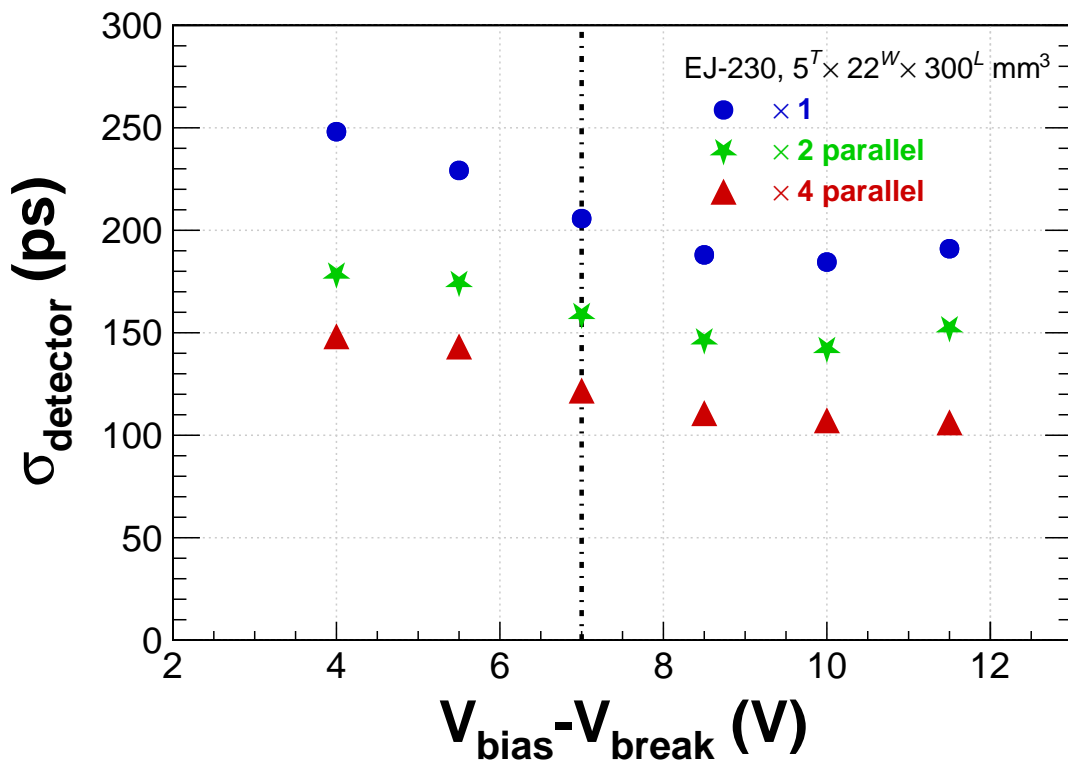


図 3.27: ID EJ230-I300-2 のシンチレータに S14160-3015PS を複数個取り付けた場合の個数毎の印加電圧依存性 (並列接続の場合)。接続方法を並列とした場合でも  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 8.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  付近では強い相関は見られなくなることがわかる。

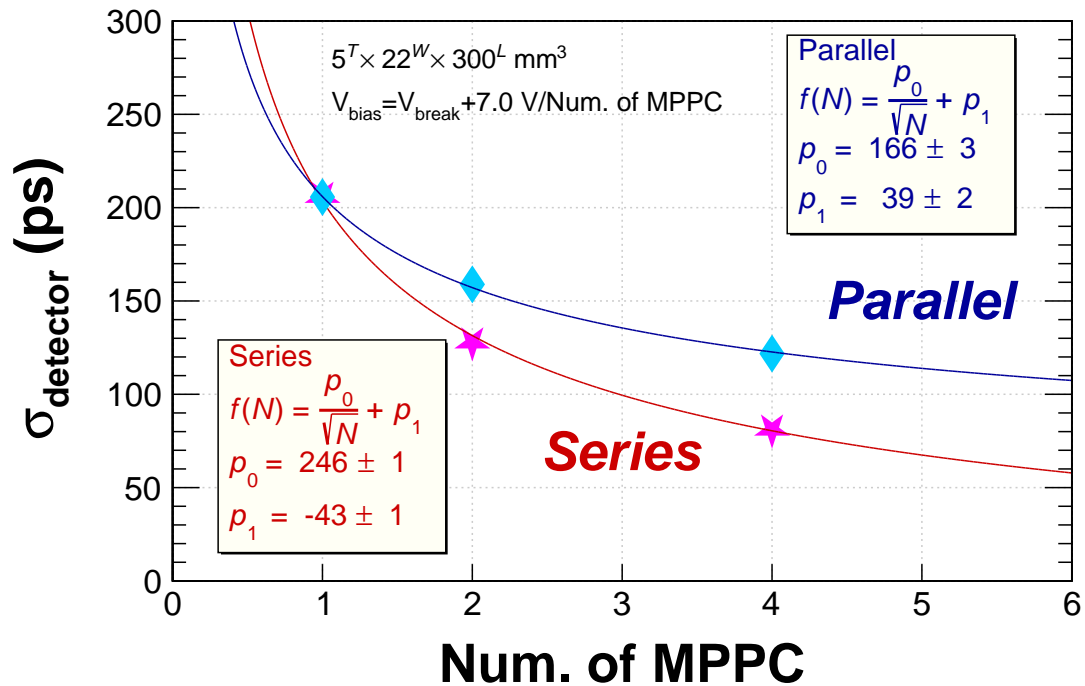


図 3.28: MPPC の個数依存性 (直列接続・並列接続の比較)。桃色の星印が直列接続の場合、水色の菱形が並列接続の場合の結果である。式 (3.21) の関数形でフィットを行った。

その結果が図 3.28 中のグラフである。直列接続・並列接続いずれの結果も式 (3.21) の関数形に従っているとわかる。

一方、同じ MPPC の個数で直列接続と並列接続の結果を比較した場合を考える。図 3.28 にみられるように 2 個、4 個いずれの個数の場合においても直列接続のほうが良い時間分解能を示しているということがわかる。特に MPPC を 4 個実装した場合には、直列接続で  $\sigma_{\text{detector}} = 81.0 \pm 0.3 \text{ ps}$ 、並列接続では  $\sigma_{\text{detector}} = 121.8 \pm 1.2 \text{ ps}$  という結果を得た。以上のことより、複数個の MPPC を用いる場合には、直列接続を用いる場合のほうがより良い時間分解能を得ることができるということが分かった。これを踏まえて、次節以降における測定では MPPC の接続方法として直列接続を採用することとした。

### 3.7.4 時間分解能に対するプラスチックシンチレータの形状依存性

前節までは一部幅の異なるシンチレータを含んではいたものの、すべて同じ長さ、厚さのものを用いて測定を行った結果について述べてきた。本節では、プラスチックシンチレータの形状を変えた場合の依存性について述べる。

シンチレーション光のシンチレータ内部における応答はその形状に大きく依存していると考えられる。例えば、シンチレータの厚さによって、通過する荷電粒子によるエネルギー損失の総量が増減することが予想される。エネルギー損失の量はシンチレータ内部で生じる光量に直結する。また、シンチレータの幅や長さは発生した光が伝播する時の経路に寄与すると考えられる。特に長さは光の減衰にかかわってくると予想できる。様々な形状のシンチレータを比較することでこれらの要素の検討を行った。新飛行時間検出器の開発において、このシンチレータの形状はとりわけ重要な要素である。目標とする時間分解能の達成と大面積を実現するという 2 つの観点から検討を行う必要がある。特に長さは検出器が覆うことのできる面積に直結する。また幅はセグメント単位の時間分解能のみならず検出器全体としての読み出しチャ

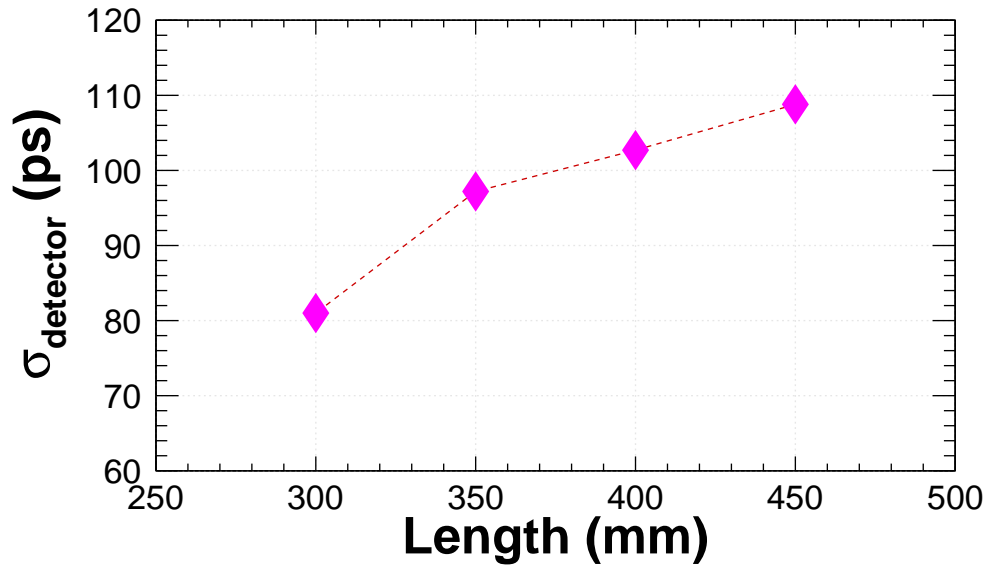


図 3.29: プラスチックシンチレータの長さ依存性。幅 22 mm、厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータに S14160-3015PS を 4 個直列に接続したものを取り付けただけの場合のものである。

ンネル数にも関わるパラメータである。そのため、形状依存性の測定では長さ・厚さ・幅の 3 要素すべてを検討した。本節では表 3.1 に示したシンチレータ群のうち ID EJ230-I300-1 - EJ230-I450-6 までの EJ-230 のものを用いた。

#### 3.7.4.1 長さ依存性

長さ依存性の検討においては、シンチレータの幅を 22 mm、厚さは 5 mm で固定として、ID EJ230-I300-2、EJ230-I450-2a、EJ230-I450-2b 及び EJ230-I450-2c のシンチレータを用いて測定を行った。但し 3.2 節にて述べた通り、EJ230-I450-2b と EJ230-I450-2c に関しては EJ230-I450-2a をレーザー加工機を用いて切断したものである。EJ230-I450-2c の長さがややキリの悪い値となっているのはそのためである。

図 3.29 に MPPC S14160-3015PS を 4 個直列に接続した場合の時間分解能と長さの相関を示した。但し、ここでは印加電圧はすべて  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の場合のものである。長さの増加に伴って時間分解能が悪化する傾向が見られる。特に長さ 450 mm において  $\sigma_{\text{detector}} = 108.8 \pm 0.4 \text{ ps}$  であった。これは、シンチレータの長さが増加することによってシンチレーション光が発生した位置から MPPC までの距離が長くなり、光子の経路長が増加するとともにそれぞれのばらつきが大きくなってしまいうためであると予想される。しかし、MPPC を 4 個直列接続で使用した場合には、いずれの長さのシンチレータを用いた場合においても要求性能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を達成しうると考えられる。

#### 3.7.4.2 厚さ依存性

続いて、厚さの検討に関して述べる。シンチレータを薄くすることによる光量の減少も予想される。その一方で、本研究で使用する MPPC は  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  の面積の受光面を有する。この大きさにより近い厚さを持つシンチレータを用いることによって、取り付ける端面に対して実効的に覆う面積の比を上げることができると期待される。実際の性能に対しては厚さがどのように寄与するのかを調査した。

厚さ依存性の測定ではシンチレータの長さは 450 mm で固定して行った。シンチレータの幅に関

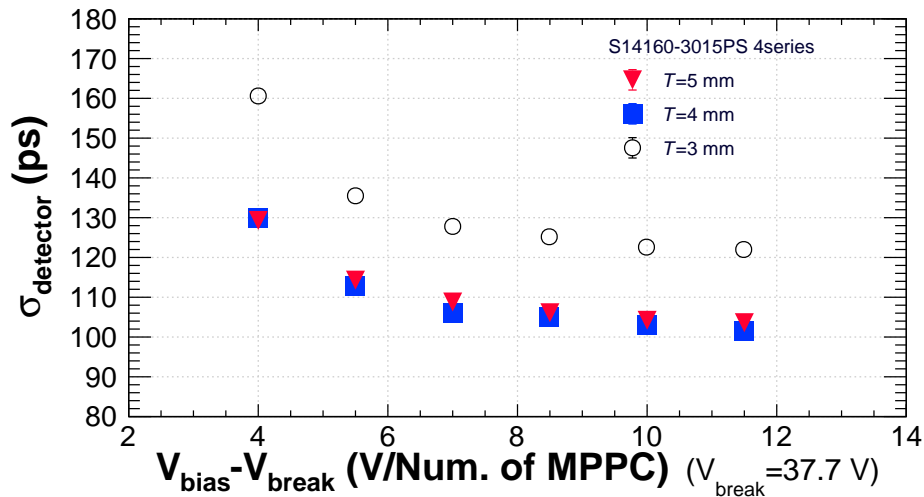


図 3.30: プラスチックシンチレータの厚さ依存性 (印加電圧依存性を含めた比較)。赤のマークが 5 mm、青のマークが 4 mm、黒のマークが 3 mm の結果を示す。厚さ 4 mm と 5 mm の間では明確な差はないが 3 mm では悪化する傾向がわかる。

しては前述の長さ依存性の測定と同様に 22 mm のものを用いた。MPPC は S14160-3015PS を 4 個直列に接続したのものを用いた。この時、厚さ 5 mm、4 mm、3 mm それぞれの場合の印加電圧依存性は図 3.30 のようになった。ここでは、傾向を見やすくするために縦軸の範囲を 80 ps から 180 ps とした。赤のマークが 5 mm、青のマークが 4 mm、黒のマークが 3 mm の場合をそれぞれ示す。厚さ 4 mm と 5 mm の間では明確な差はないが、3 mm ではそれぞれの印加電圧の点でこれら 2 系統よりも悪化している傾向がわかる。特に、ある印加電圧に着目し厚さ毎の差異を比較した場合として、 $V_{bias} - V_{break} = 7.0$  V/Num. of MPPC 印加時の時間分解能  $\sigma_{detector}$  と厚さの相関を図 3.31 に示した。この時、厚さ 5 mm の場合の結果は前節にて示した結果の通り  $\sigma_{detector} = 108.8 \pm 0.4$  ps であった一方、厚さ 3 mm では  $\sigma_{detector} = 127.2 \pm 0.2$  ps であった。厚さ 4 mm と 5 mm の間では ~ 数 ps の差であり、明確に大きな違いは見られていない。これに対して、3 mm では ~ 20 ps 程悪化する傾向があることがわかった。

ここで、QDC の分布に着目する。図 3.32 に片側の MPPC の QDC 分布を示した。但し、ペDESTAL を 0 ch. に合わせた上で 1 ch. = 0.1 pC として電荷量に換算したものである。赤のヒストグラムが 5 mm、青のヒストグラムが 4 mm、黒のヒストグラムが 3 mm の場合である。但し、比較のためにいずれのヒストグラムもエントリー数が最大となるビンの高さを 1 とするよう全体を規格化した。3 mm の場合では他の厚さと比較して電荷量が小さくなっていることがわかる。更に、3.7.1 節と同様の方法によって、左右の MPPC での MPV を求め、その相乗平均を取ったものを図 3.33 に示した。この図からも薄いシンチレータ程 MPV の値が減少していることがわかる。薄いプラスチックシンチレータでは荷電粒子によるエネルギー損失も減少するため、結果として生じる光量も減少する。この影響が 3 つの分布の違いとして現れているものであると考えられる。

### 3.7.4.3 幅依存性

幅依存性では長さ 450 mm のシンチレータに対して 11, 22, 33, 44 mm の 4 通りの検討を行った。MPPC S14160-3015PS を 2 個直列接続の場合と 4 個直列接続の場合の印加電圧依存性を図 3.34[a] 及び [b] に示す。[a] が 2 個直列接続の場合、[b] が 4 個直列接続の場合である。定性的な傾向としては、

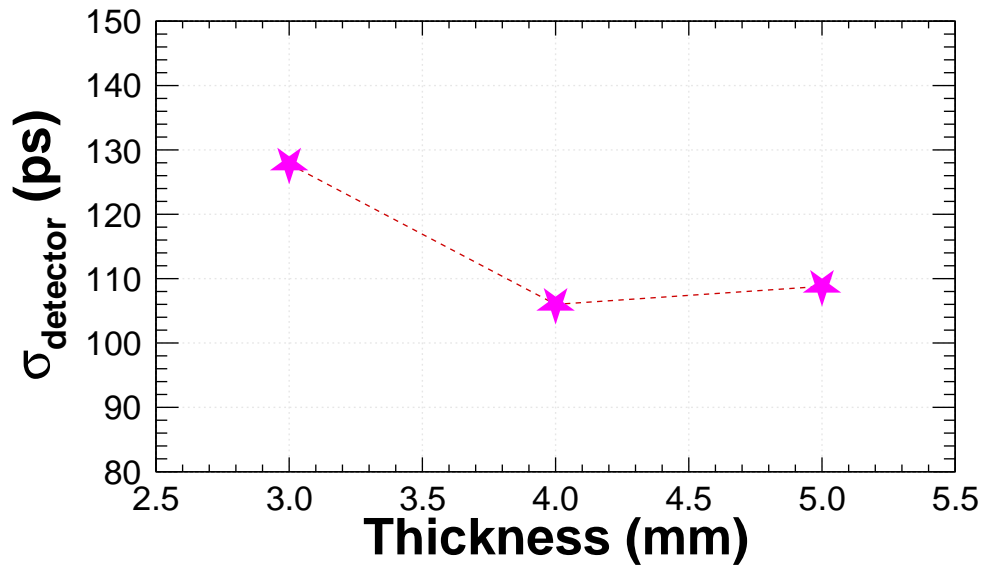


図 3.31: プラスチックシンチレータの厚さ依存性 (MPPC への印加電圧を固定した場合)。幅 22 mm、長さ 450 mm のプラスチックシンチレータに S14160-3015PS を 4 個直列に接続したものを取り付けた場合のものである。厚さ 5 mm と 4 mm では明確な差異がみられないのに対して、厚さ 3 mm では悪化していることがわかる。

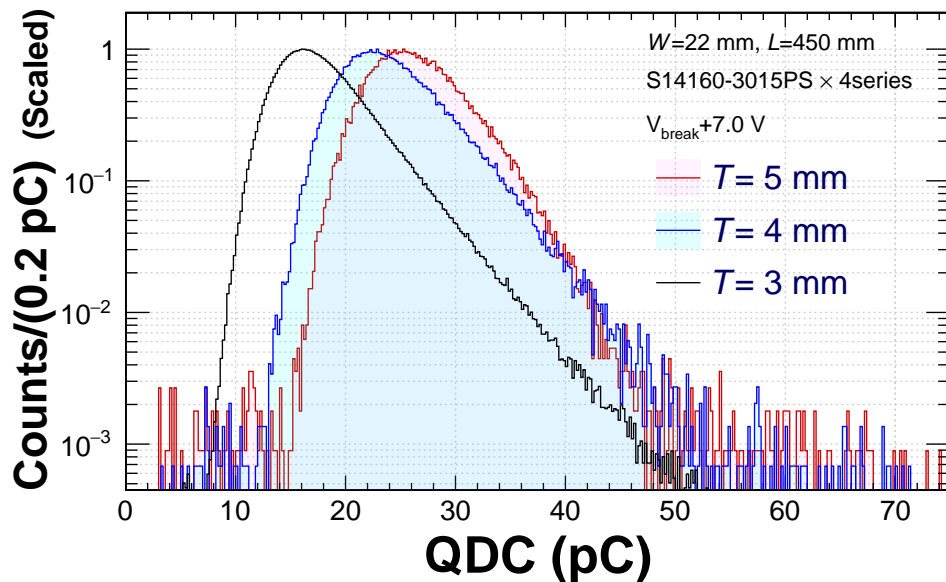


図 3.32: 様々な厚さのシンチレータを使用した場合の電荷量分布 ( $T = 3, 4, 5$  mm の場合)。試作機の MPPC のうち、一方の MPPC の電荷分布を示した。赤線が 5 mm、青線が 4 mm、黒線が 3 mm に対応する。シンチレータ厚を薄くすることに従い電荷量の分布が値の小さい側へとシフトしていくことがわかる。

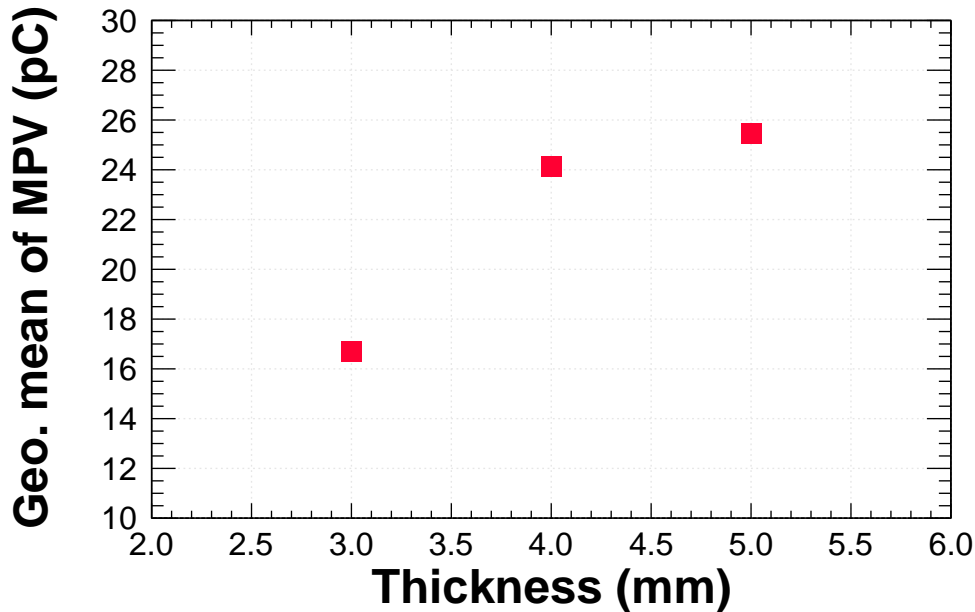


図 3.33: 左右の MPPC の電荷量の MPV に対する厚さ依存性。左右それぞれで算出した MPV 値の相乗平均値を示した。シンチレータ厚を薄くすることに従い MPV 値が減少することがわかる。

いずれの厚さの場合においても類似した電圧依存性の傾向を示していることがわかる。特に、それぞれの MPPC 個数に対して  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の場合での時間分解能の幅依存性は図 3.35 のようになる。これらの図より、同じ電圧・同じ MPPC の個数では、幅の大きいシンチレータを用いた場合に時間分解能が悪化する傾向があることがわかる。

### 3.7.5 シンチレータの形状と MPPC 個数との関係

前節までは、形状と MPPC の個数に関して一方を固定した状態の結果について述べてきた。ここでは、それらの個々の組み合わせでの結果の対応をみることで、シンチレータの形状と MPPC 個数の寄与について述べる。

図 3.36 に長さ 300 mm のシンチレータ群のうち幅と MPPC の個数をいくつか抜粋したものを示した。ここでは幅 11 mm に MPPC を 1 個取り付け、幅 22 mm に MPPC を 2 個直列接続で取り付け、幅 11 mm に MPPC を 4 個直列接続で取り付け、幅 11 mm に MPPC を 4 個直列接続で取り付け、幅 11 mm に MPPC を 4 個直列接続で取り付け、幅 11 mm に MPPC を 4 個直列接続で取り付けたものの 3 種類のセットアップを示している。これらの組み合わせはシンチレータ端面の面積に対して MPPC が占める面積の比が同じになるように選んだ組み合わせである。セッティング間で  $\sim 5 - 10 \text{ ps}$  程のばらつきがみられるものの、その範囲内ではおよそ一致した傾向にあり、同程度の時間分解能を示すことがわかる。 $V_{bias} - V_{break} > 8.5 \text{ V/Num. of MPPC}$  の領域においては、いずれの組み合わせでも  $\sigma_{\text{detector}} \sim 120 \text{ ps}$  となっている。同様の幅と個数の組み合わせについて長さ 450 mm の場合で比較したものが図 3.36[b] である。同一電圧におけるセッティング間のばらつきが 300 mm の場合よりも大きくなっているものの、こちらでも近い傾向を示していると考えられる。この傾向から、同一のシンチレータ長さの下ではシンチレータ端面の面積に対して MPPC が占める面積の比が等しくなる場合には同程度の時間分解能を得ることができると予想される。ここで、シンチレータ断面積に対する MPPC 受光面の面積の比率  $\epsilon_{MPPC}$  が等しくなる組み合わせを同一系統とみなして整理した場合の幅依存性の結果を図 3.38 に示した。いずれも、シンチレータの厚さ 5 mm、長さ 300 mm、MPPC は直列接続であり、印加電圧  $V_{bias} - V_{break} = +7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  のものである。ここで、 $\epsilon_{MPPC}$  は



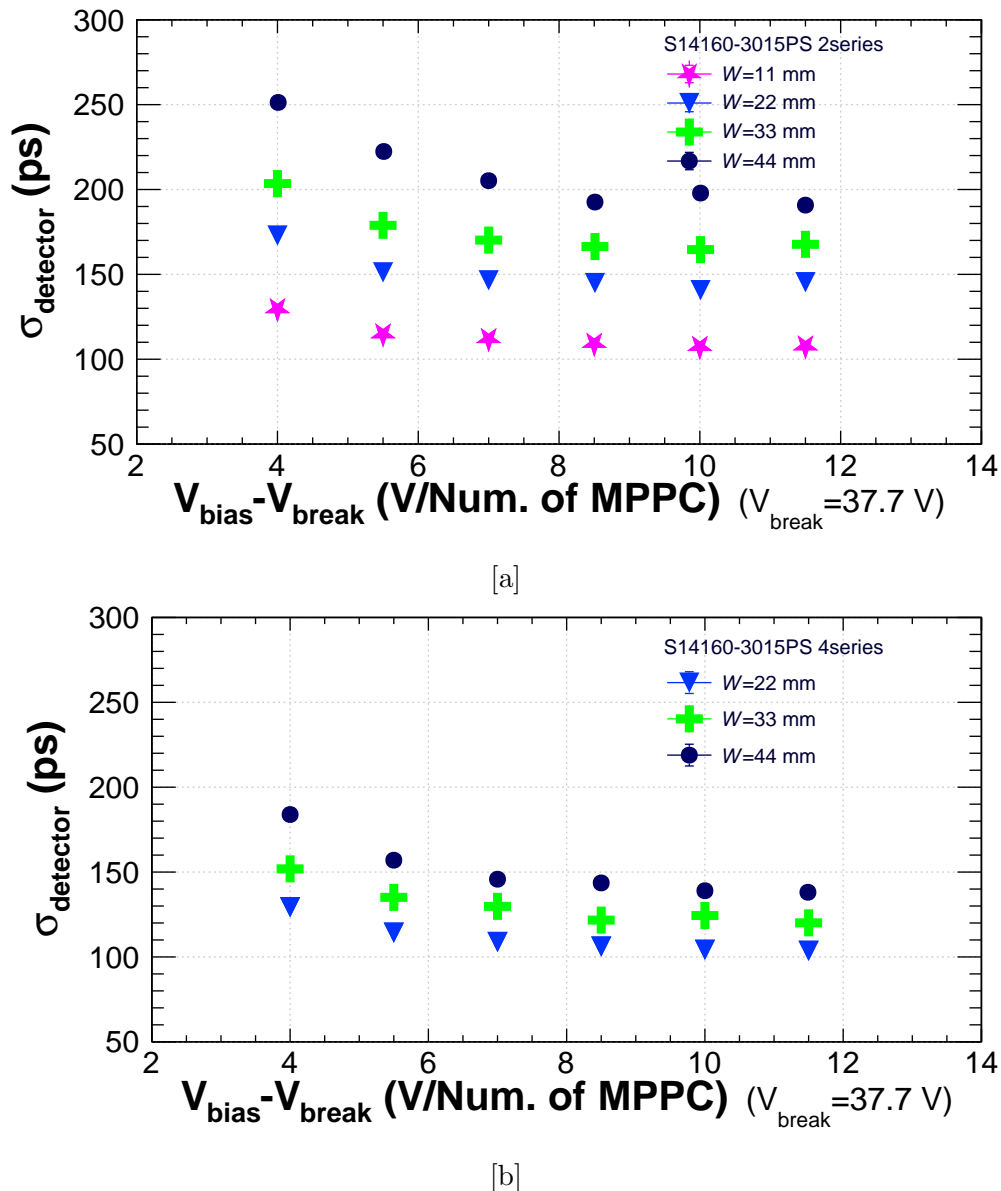


図 3.34: シンチレータの幅依存性。[a]: MPPC S14160-3015PS 2 個直列接続の場合。[b]: MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続の場合。

MPPC の受光面の面積を  $3 \times 3 = 9 \text{ mm}^2$  とし、 $(\text{MPPC 個数} \times \text{受光面の面積}) / (\text{シンチレータ断面積})$  として算出した。図 3.37 では面積比について 3 通りの場合を示したが、いずれの場合でも幅に対する依存性見られず、同程度の時間分解能を示していることがわかる。同様の考察を長さ 450 mm の場合に行った結果は図 3.38 のようになった。このことから、時間分解能にはシンチレータ断面に対して光検出器が覆う面積の比率が強く寄与しているといえる。

3.7.4.3 では幅の大きいシンチレータでは時間分解能が悪化する傾向があることを見たが、この影響に対しては接続する MPPC の個数を増やし、有効面積を拡大することによって改善することができるものと考えられる。これらのことから、幅  $\sim 40 \text{ mm}$  の広いシンチレータでも MPPC 個数を考慮することで、新飛行時間測定器のためのシンチレータとして採用できると期待される。加えて、シンチレータの形状に加えて、得られる光量をより多くすることが時間分解能を向上させるためには重要であると考えられる。

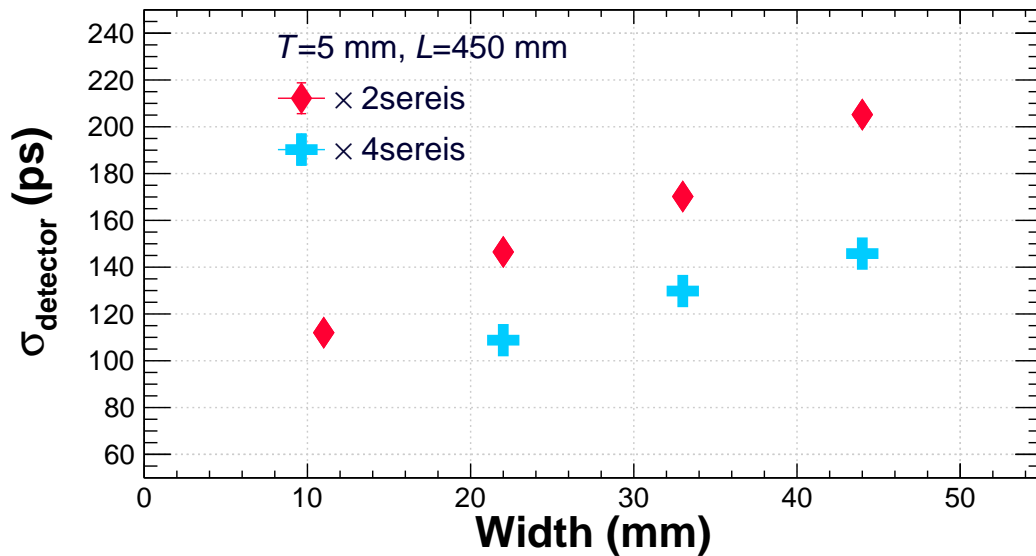


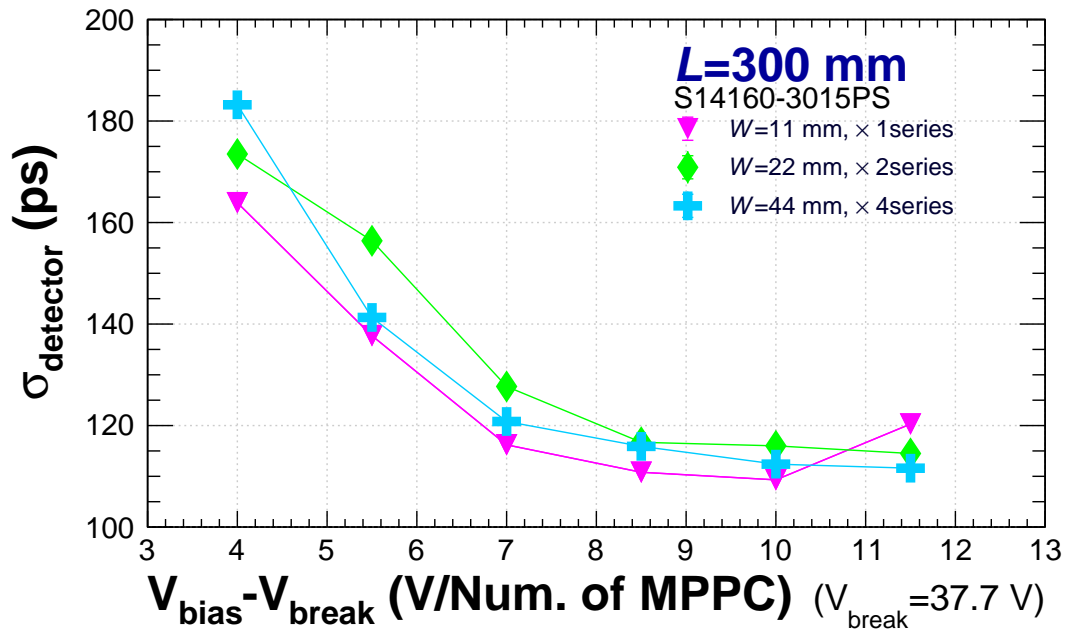
図 3.35: シンチレータの幅依存性 (MPPC への印加電圧を固定した場合)。

### 3.7.6 ディスクリミネータ閾値電圧依存性

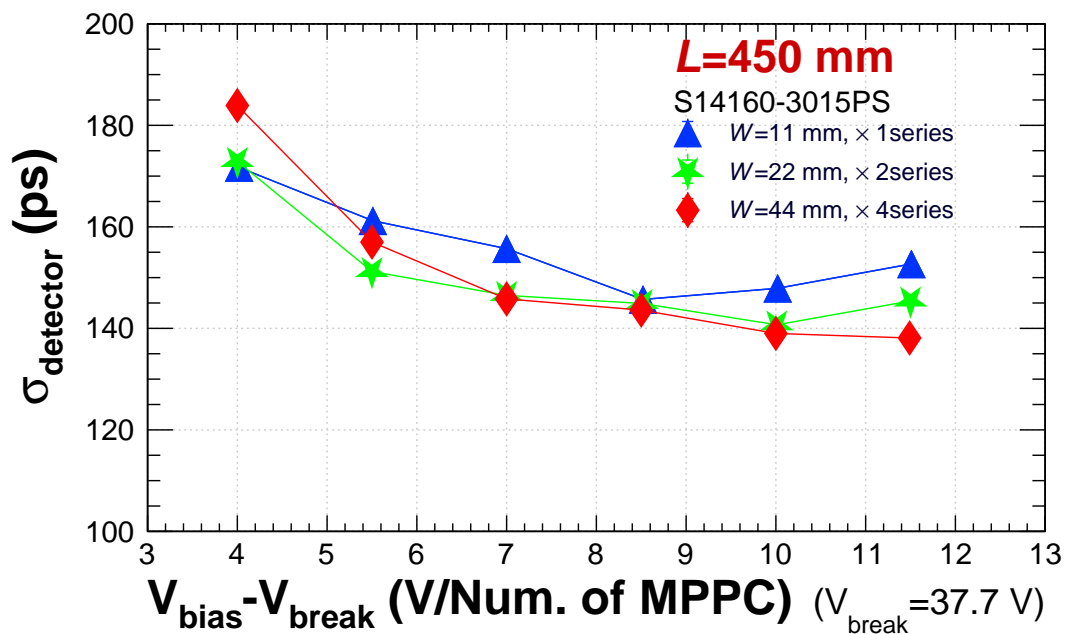
ディスクリミネータの閾値を変化させた場合、検出器からの信号に対しての相対的な位置が変化する。これによって 3.6 節にて述べたタイムウォークの影響が変化し、時間分解能に影響を与えることが予想される。この要素の影響に関して調査を行った。

ここでの測定は EJ230-1450-1a と S14160-3015PS の 2 個直列接続の構成で行った。 $V_{th}$  の範囲は、ベースライン電圧を基準として  $V_{th} = -20 \text{ mV}$  から  $V_{th} = -185 \text{ mV}$  の範囲で測定を行った。この測定範囲は最小電離損失 (Minimum Ionization Particle; MIP) に対応する信号をオシロスコープで確認して決定した。図 3.39 に印加電圧を  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  としたときの波高測定用ラインの信号と QDC ゲート信号とのタイミングを見た時のオシロスコープの画像を示した。但し、波高測定ラインの信号は 100 ns 分の遅延を行った後のものである。QDC ゲート信号はトリガー信号がゲートジェネレータに入力された場合に出力される。したがってこの図ではすべての検出器を  $\beta$  線が通過し、各検出器でのコインシデンスの事象に対応した信号を見ていることになる。この信号の波高から MIP に対応する波高を  $\sim -400 \text{ mV}$  であると見積り、その  $\sim 50\%$  となる値として測定範囲の下限値  $-185 \text{ mV}$  を決定した。

結果を図 3.40 に示した。横軸はベースラインのオフセット電圧を  $0 \text{ mV}$  として基準を取り直した時の閾値電圧  $V_{th}$  である。 $V_{th}$  を負方向へ動かした場合、時間分解能が悪化していく傾向がみられる。特に、セットアップの節で述べた基準の  $V_{th} = -40 \text{ mV}$  の場合には  $\sigma_{\text{detector}} = 112 \pm 0.4 \text{ ps}$  であったのに対して、 $-185 \text{ mV}$  とした場合には  $\sigma_{\text{detector}} = 134.5 \pm 1.8 \text{ ps}$  であった。測定開始時の基準点として設定した  $V_{th} = -40 \text{ mV}$  という値は  $2 \text{ MeV}$  の  $\beta$  線の信号の  $1/20$  程度という基準から決定していた。先ほど見たように、今使用しているシンチレータでは MIP に対応する信号は  $\sim -400 \text{ mV}$  であり、その  $\sim 1/10$  に相当する値ということになる。これらの値の比較より、MIP の  $\sim 50\%$  に設定した場合には、 $\sim 10\%$  とした場合と比較して  $\sim 20\%$  程の時間分解能の悪化がおこると見積もることができる。一方で、よりベースラインに  $V_{th}$  に近い値に設定した場合には  $\sim 5 \text{ ps}$  程度時間分解能が悪化するという傾向もみられる。ベースラインに寄せすぎた場合には暗電流やノイズの影響が大きくなることが予想されるため、これらの影響が現れたと考えられる。但し、これに関しては各測定点での統計誤差が  $\sim 2 \text{ ps}$  であることに留意しなけ



[a]



[b]

図 3.36: シンチレータ端面の面積と MPPC が覆う面積の比を等しくするような幅と個数の組合せ間での時間分解能の印加電圧依存性の比較。[a]: 長さ 300 mm の場合。[a]: 長さ 450 mm の場合。ここでは [a]・[b] 共に傾向を見やすくするために縦軸範囲を 100 – 200 ps とした。いずれの長さの場合でも、各印加電圧の点で同程度の時間を示すことがわかる。但し、ここでは各データ系列の間でシンチレータ幅と MPPC 個数の組合せが異なることを明確に示すために、敢えてシンチレータ毎の ID ではなく幅の値と MPPC 個数でラベルを付した。

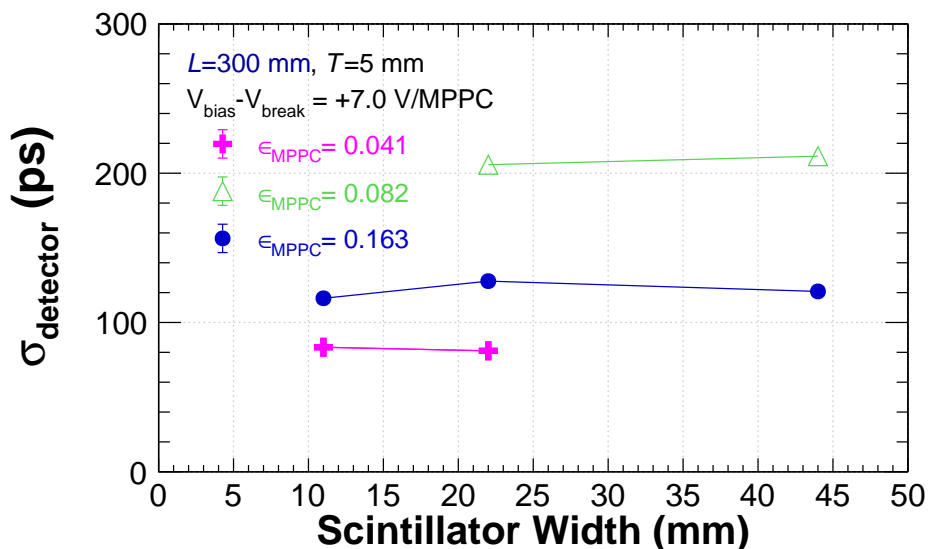


図 3.37: シンチレータ断面積と MPPC の受光面の面積の比  $\epsilon_{\text{MPPC}}$  が等しくなる組合せでのシンチレータ幅依存性 (長さ 300 mm の場合)。シンチレータの厚さ 5 mm、MPPC 印加電圧  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = +7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  のものである。

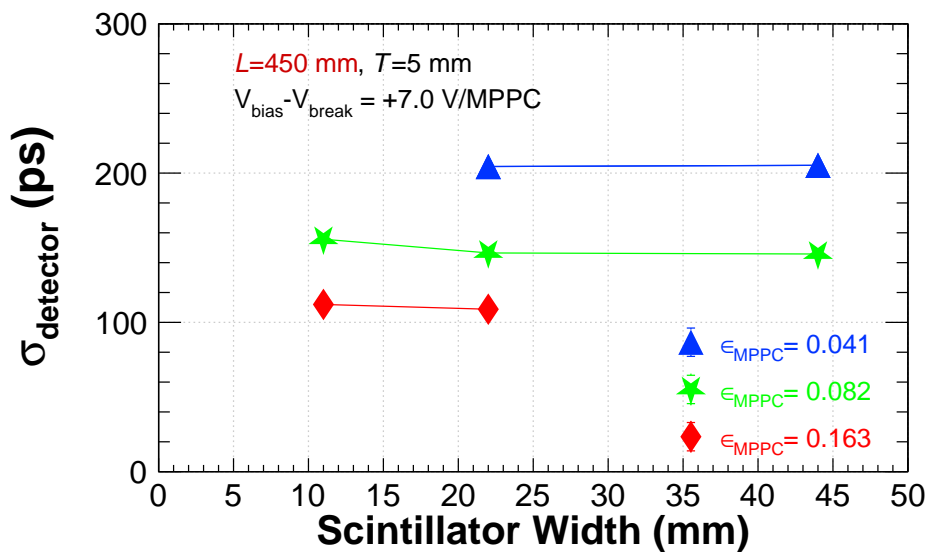


図 3.38: シンチレータ断面積と MPPC の受光面の面積の比  $\epsilon_{\text{MPPC}}$  が等しくなる組合せでのシンチレータ幅依存性 (長さ 450 mm の場合)。シンチレータの厚さ 5 mm、MPPC 印加電圧  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = +7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  のものである。

ればならない。これらの結果より、 $V_{th}$  は 2 MeV の  $e^-$  による信号の  $\sim 1/20$ 、MIP の  $\sim 1/10$  程度に設定する時に良い動作を示すものと考えられる。この印加電圧の領域で閾値電圧がベースラインに相対的に近くなることによってタイムウォークの影響が抑制される効果を最も得られるためであると予想される。

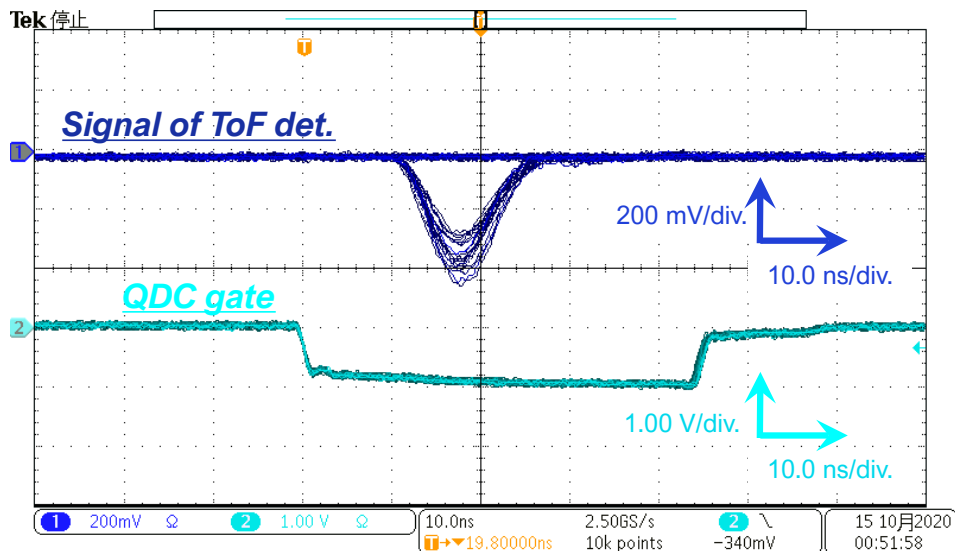


図 3.39: 試作 ToF での波高測定ラインの信号と QDC ゲート信号。この図で示す信号は各検出器でのコインシデンスの事象由来のものであり、波高は MIP に対応する。

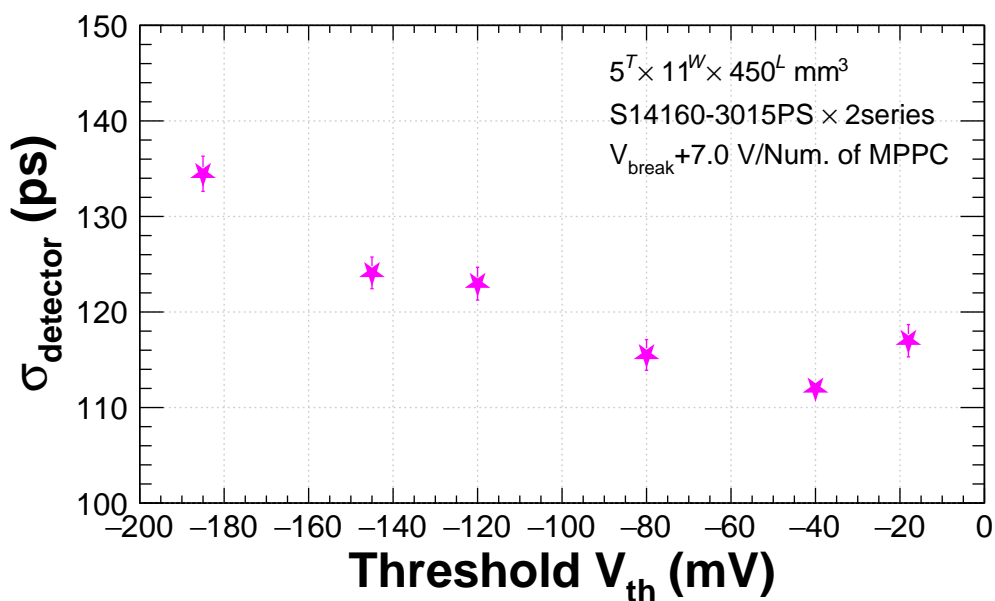


図 3.40:  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  のシンチレータに S14160-3015PS を 2 個直列接続を組み合わせた時の閾値電圧依存性。

### 3.7.7 $\beta$ 線通過位置依存性

3.7.5 節にて述べたように、光量を多くすることが時間分解能を向上させる可能性がある。更に 3.7.4 節での形状に関する測定結果から、同一の MPPC 個数では幅や長さの大きいシンチレータに対しては時間分解能が悪化するという定性的な傾向があることがわかった。このことから、光子が MPPC に達するまでの伝播の過程が時間分解能に寄与していることが考えられる。ここまでの測定においては  $\beta$  線をシンチレータの長さ方向中心部分に照射した場合の結果であった。照射位置を変えることによって、シンチレータ内部での光子の伝播の状態が変化すると予想される。この影響について調査を行った。 $\beta$  線通過位置依存性の測定に当たって、図 3.41 のように座標系を定義した。シンチレータの長さ方向中心を原点

として、 $\beta$ 線の通過する方向に対して右側を正、左手側を負にとる。この時の $\beta$ 線の照射位置はステップモータの位置を基に決定した。

測定結果を示していく。S14160-3015PS を 2 個直列として EJ230-1450-1a、EJ230-1450-2a、EJ230-1450-5、EJ230-1450-6 のシンチレータに取り付けて測定を行った結果を図 3.42 に示した。この時の MPPC への印加電圧はすべての点において  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  である。但し、EJ230-1450-6 のシンチレータのみ、鉛直上向き方向に 5 mm だけずらした位置で照射を行った。これは EJ230-1450-6 の幅では、リファレンス検出器を固定するための部品との間に干渉が生じてしまい、配置が出来なかったためである。先に座標系の定義において述べたように、0 mm がシンチレータの長さ方向の中心を表す。中心から  $\pm 25 \text{ mm}$  の点ではおおよそ平坦であるのに対し、 $\pm 50 \text{ mm}$  よりも偏った位置に照射するときには、より端に近い位置程時間分解能として小さい値を示す傾向があることがわかる。また、図中に示したそれぞれのシンチレータ幅で比較すると、照射位置毎のばらつきが大きくなる傾向があるということもわかる。MPPC での検出光子数がシンチレータの断面積と MPPC によって覆われている部分の面積によって決まると考えると、同じ断面積を持つシンチレータに異なる個数の MPPC を接続した場合、通過位置による応答も変化すると予想される。これについて検討するために、同一のシンチレータに異なる個数の MPPC を接続した場合についても測定を行った。ここでは、EJ230-1450-6 の幅 44 mm のシンチレータに対して S14160-3015PS を 2 個直列につけた場合と 4 個直列で取り付けた場合とで比較を行った。結果を図 3.43 に示した。紺色のマーカーが MPPC 個数が 2 個の場合、白抜きのマーカーが同じく 4 個の場合である。各測定位置につき、MPPC 個数が 2 個の方が  $\sim 50 \text{ ps}$  程度時間分解能が悪くなる傾向がみられる。しかし、中心位置での時間分解能に対する各通過位置での定性的な変化の傾向には一致がみられることがわかる。したがって、この傾向は MPPC 個数によらず、シンチレータの形状に起因するものであると考えられる。これらの依存性について考える。シンチレーション光は荷電粒子(本測定の場合は  $e^-$ ) が通過した飛跡に沿ってそれぞれの位置から一様な角度方向に放たれる。この時、直接 MPPC に達する光子と内部で反射をしながら達するものとの 2 通りがあることが予想される。特に後者を考えると、幅が大きい程その経路長は長くなると考えられる。荷電粒子が通過する位置が一方の MPPC の側に偏る場合、一方の MPPC から見ると位置は遠ざかって見えるが、もう一方の MPPC に対してはより照射位置との距離が近くなって見える。この時、幅の大きなシンチレータの方が、接近に伴う一方の MPPC との距離の減少の効果を強く受け、より近くなった側の MPPC で検出できる光子が増加する。これによって、時間分解能が小さくなるという結果になったと予想される。

先の結果より、長さ方向に関して位置依存性を持つことがわかった。次に幅方向に対する依存性について調査を行った。これは S14160-3015PS を 4 個直列として行った。シンチレータの幅方向の中心を基準として、鉛直上向きに 5, 10, 15, 20 mm の位置で測定を行った。加えて、各鉛直位置における長さ方向の位置依存性の測定も行った。結果を図 3.44[a] 及び [b] に示した。[a] が、各鉛直位置での長さ方向依存性、[b] が長さ方向の位置を中心とした場合の鉛直方向に対する位置依存性である。照射位置を鉛直方向にずらした場合でも長さ方向に対する定性的な傾向には大きな違いは見られないことがわかる。しかし、水平方向位置を固定した状態で鉛直方向即ち幅方向へ照射位置を変更した場合、よりシンチレータの端に近い位置では時間分解能が  $\sim 15 \text{ ps}$  程度悪化する傾向がみられる。

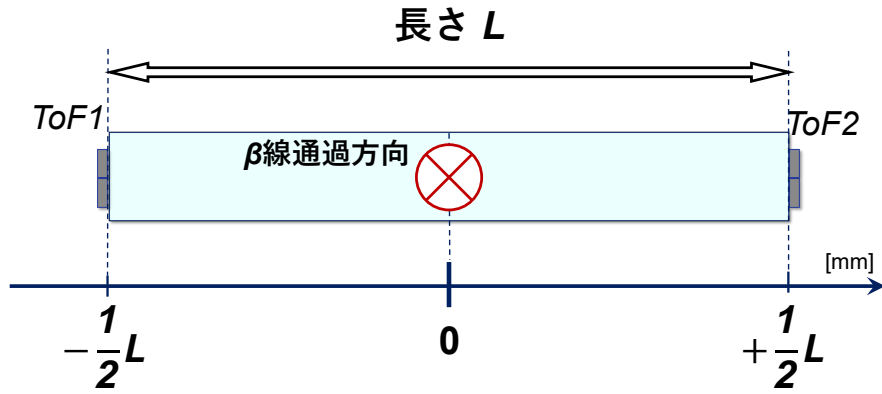


図 3.41:  $\beta$  線照射位置依存性の測定における座標の定義。シンチレータの長さ方向の中心を原点とする。 $\beta$  線は紙面表から裏へ貫く方向に照射される。

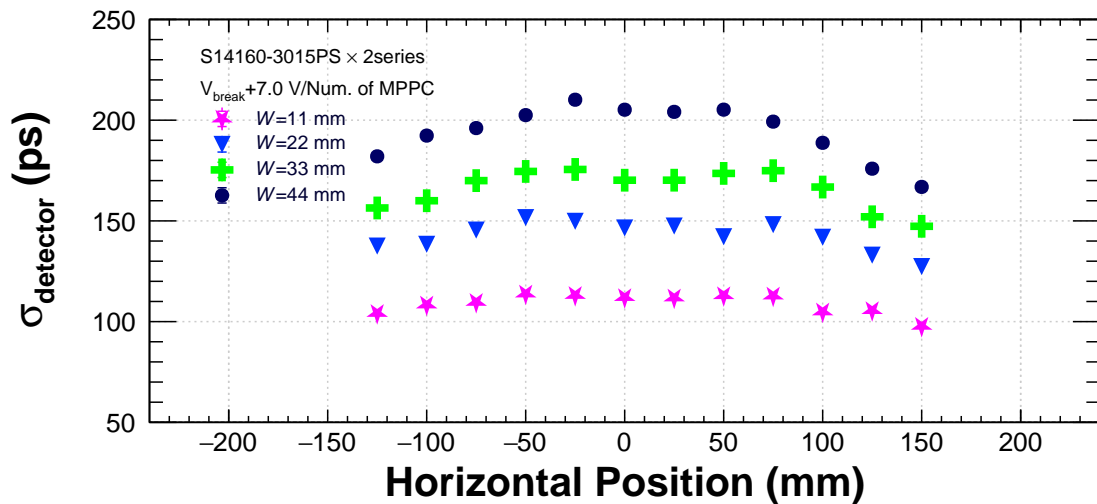


図 3.42:  $\beta$  線照射位置依存性 (シンチレータ幅毎の比較)。長さ 450 mm、厚さ 5 mm のシンチレータと MPPC2 個直列接続の組合せを使用した。

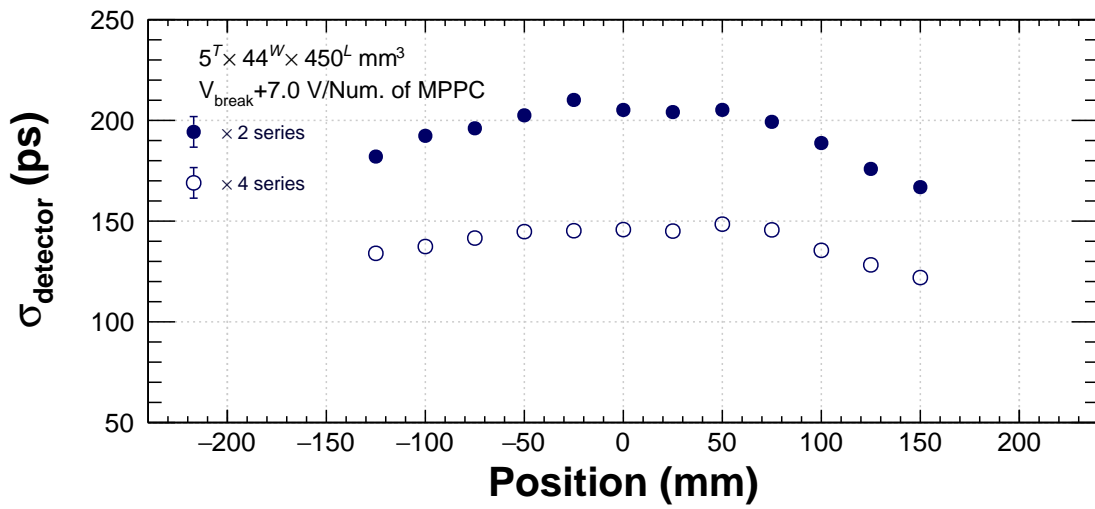
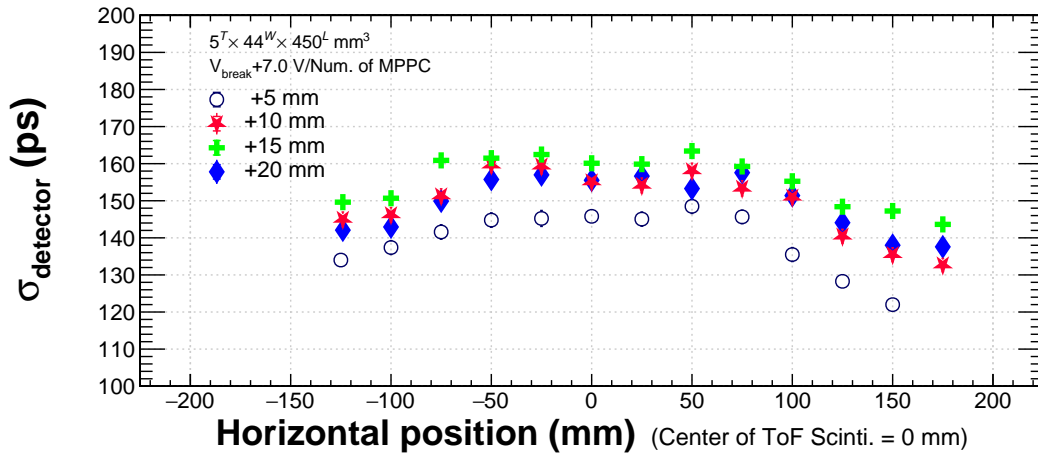
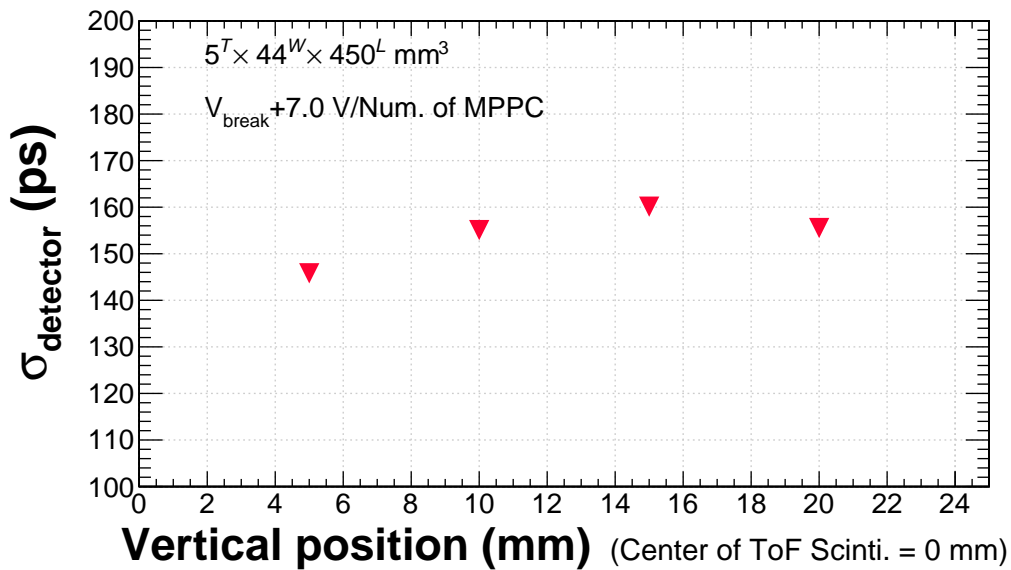


図 3.43:  $\beta$ 線照射位置依存性 (MPPC の個数毎の比較)。幅 44 mm 長さ 450 mm、厚さ 5 mm のシンチレータを用いた結果である。



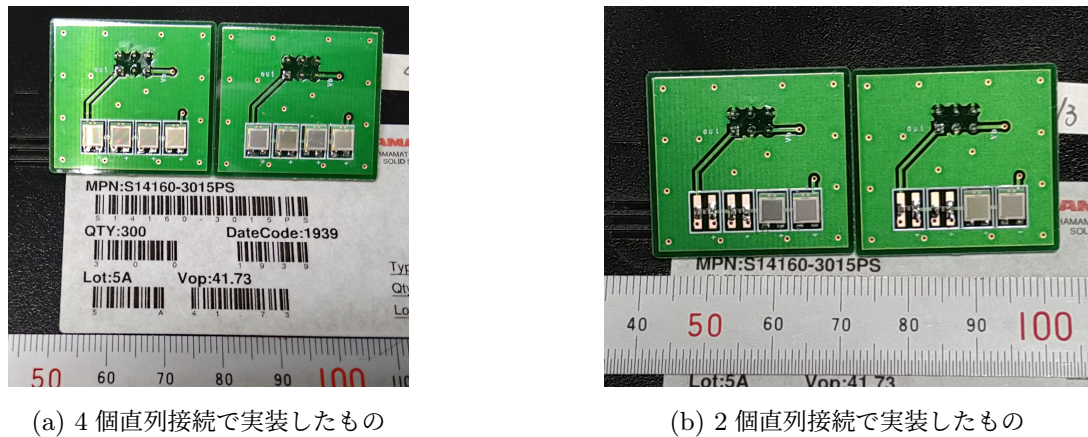


[a]



[b]

図 3.44: 鉛直方向の位置を変更した場合の  $\beta$  線照射位置依存性。[a]: 各鉛直位置毎での長さ方向の位置依存性。[b]: 長さ方向の照射位置を中心においた場合の鉛直位置方向の位置依存性。幅方向においても端に向かうにしたがって中心位置に照射する場合と比較して時間分解能が悪化する傾向がみられる。



(a) 4個直列接続で実装したもの

(b) 2個直列接続で実装したもの

図 3.45: 新たに設計した MPPC 基板。MPPC を 4 個実装したものと 2 個実装したもののそれぞれを示した。

### 3.7.8 読み出し基板の設計による影響の見積もり

読み出しの手法に関連して異なる設計の読み出し基板を用いた場合の時間分解能への寄与を検討する。回路図上での設計が同じであっても、実際の基板の形状や配線のパターンなどによっては挙動が異なる可能性がある。ここでは、前節までの測定において用いていた MPPC 用の基板に加えて図 3.45 に示す MPPC 基板を用いた。MPPC の接続方法は直列接続としており、図 3.45 では S14160-3015PS を 4 個実装したもの (a) と 2 個実装したもの (b) をそれぞれ示している。実装している部品も同じ値のものを使用しており、回路図上では同じものとみなすことができると考える。大きな違いは、グランドピンのベタへの接続や表面上のビアの有無である。以下ではこの設計の基板を New、対して前節まで用いていた基板を Prev と称する。これらに対して ID EJ230-1450-1b、EJ230-1450-2d のシンチレータをもちいて測定を行った。使用したシンチレータがこれまでと異なっているのは、EJ230-1450-1a 及び EJ230-1450-2a のシンチレータに関してはレーザー加工機によってサイズを加工したため、当該サイズのものがないためである。

結果を図 3.46 に示した。[a] が 4 個直列接続同士の比較、[b] が 2 個直列接続同士の比較である。まず、4 個直列接続での結果に着目する。各電圧の点において New のほうが良い時間分解能を示していることがわかる。その一方で、2 個直列接続の場合には New のほうが時間分解能としては悪化しているという傾向がみられる。特に印加電圧を  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  とした場合を見ていく。具体的な値を表 3.5 に示した。New で 4 個直列接続の場合には  $\sigma_{\text{detector}} = 96.3 \pm 0.5 \text{ ps}$  であった。Prev の基板を用いて行った場合の結果  $\sigma_{\text{detector}} = 106.1 \pm 0.7 \text{ ps}$  と比較すると  $\sim 10 \text{ ps}$  程良い値を示していることがわかる。その一方で、2 個直列接続では New の場合には  $14 \text{ ps}$  程度悪い結果となっている。

こうした違いを生じさせる原因を考える。2 個直列の場合の基板としての違いは、形状や配線パターンの他に、MPPC を実装しないパッドの部分の取り扱いが考えられる。この部分の扱いについてを図 3.47 に示した。Prev で 2 個直列接続を行う場合には、信号を出力するパターン部分の表面を削り、MPPC を実装しないパッドとの間にユニバーサル基板などに使用する回路素子の足を切り落としたものを銅線としてハンダ付けすることによって接続していた。一方、New の場合にはパターンを削ることによる経路のショートカットなどはせず、接続されないパッド間に抵抗値  $0 \Omega$  のチップ抵抗を配することによって接続していた。こうした方法の違いが性能の違いとなって現れた可能性もある。このように、

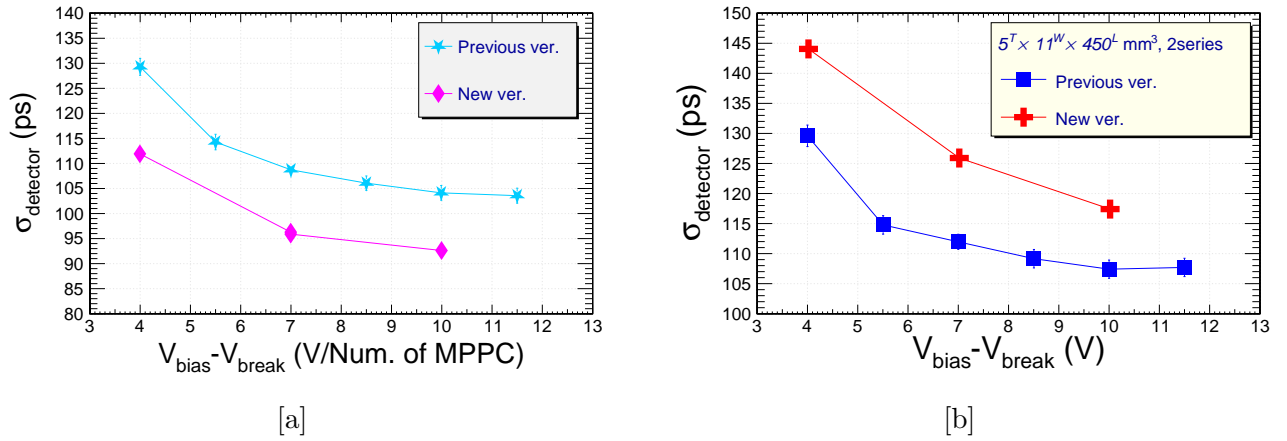


図 3.46: 基板による時間分解能の違いの比較。[a]: MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続の場合。[b]: MPPC S14160-3015PS 2 個直列接続の場合。

表 3.5: 異なる設計の基板を用いた場合の時間分解能の比較。  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  での値を示している。

| Scintillator Size                           | Board type | Resolution $\sigma_{\text{detector}}$ (ps)            |
|---|------------|---|
| $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ | Prev       | $\sigma_{\text{detector}} = 112.0 \pm 0.4 \text{ ps}$ |
|   | New        | $\sigma_{\text{detector}} = 125.9 \pm 0.9 \text{ ps}$ |
| $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$ | Prev       | $\sigma_{\text{detector}} = 108.8 \pm 0.4 \text{ ps}$ |
|   | New        | $\sigma_{\text{detector}} = 96.3 \pm 0.5 \text{ ps}$  |

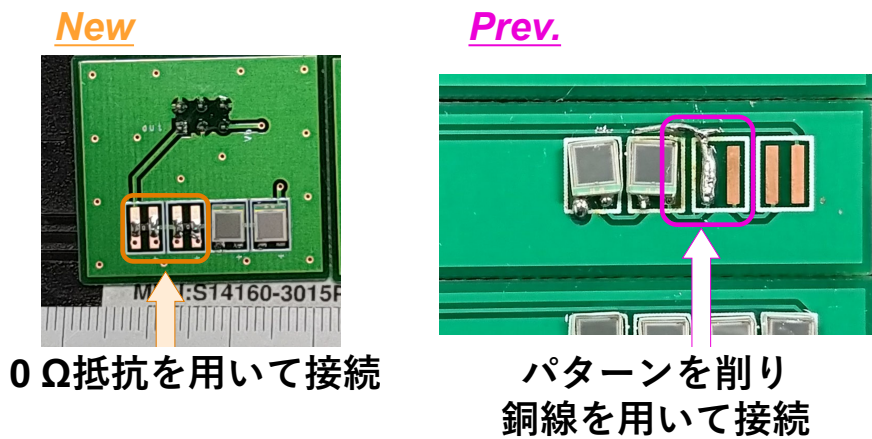


図 3.47: New と Prev の各基板で MPPC を 1 又は 2 個実装する場合の配線方法の違い。

MPPC の接続方法や個数、シンチレータの形状といった要素に加え、回路部分の要素もまた、時間分解能に影響することに注意が必要であると考えられる。

表 3.6: 種類依存性の測定において使用した各種プラスチックシンチレータの性能値 [38, 63, 64]。製造元である Eljen Technology 社が公表する性能表の値を記載した。EJ-228 及び EJ-232 の 2 種に関しては減衰長の値が公表されていないため空欄とした。

|                                      | EJ-230 | EJ-200 | EJ-204 | EJ212 | EJ228 | EJ232 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 屈折率                                  | 1.58   | 1.58   | 1.58   | 1.58  | 1.58  | 1.58  |
| 発光強度<br>(%Anthracene)                | 64     | 64     | 68     | 65    | 67    | 55    |
| 光量<br>(Num. of photons/1 MeV $e^-$ ) | 9700   | 10000  | 10400  | 10000 | 10200 | 8400  |
| 最大発光波長<br>[nm]                       | 391    | 425    | 408    | 423   | 391   | 370   |
| 立上り時間<br>[ns]                        | 0.5    | 0.9    | 0.7    | 0.9   | 0.5   | 0.35  |
| 立下り時間<br>[ns]                        | 1.5    | 2.1    | 1.8    | 2.4   | 1.2   | 1.6   |
| パルス幅 (FWHM)<br>[ns]                  | 1.3    | 2.5    | 2.2    | 2.7   | 1.2   | 1.3   |
| 減衰長<br>[cm]                          | 120    | 380    | 160    | 250   | -     | -     |

### 3.7.9 プラスチックシンチレータの種類依存性

既に 3.2 節において述べたように、プラスチックシンチレータはベースとなる基材に対してシンチレータとして混合する溶質の種類や組合せ、その際の比率によって異なる性能を示す。そうした種類毎の特性の違いによって時間分解能にも差異が生じると予想される。ここでは、プラスチックシンチレータの種類による時間分解能への寄与に関して検討を行った。ここでは、プラスチックシンチレータの寸法は基本的に  $5^T \times 22^W \times 450^L$  mm<sup>3</sup> とした。但し、EJ-212 に関してはシンチレータの加工依頼先である株式会社ジーテックでは幅 22 mm、長さ 450 mm の場合には厚さ 5 mm のものを取り扱っていなかったため、調達が可能な厚さとして 3 mm を使用している。測定の際は、MPPC の接続方法は S14160-3015PS 4 個直列接続を一貫して使用した。

使用した各種プラスチックシンチレータの性能値に関して表 3.6 に示した。また、各シンチレータの発光の波長分布を図 3.48 に示した。但し、それぞれの分布は最大発光波長での値を 1 とするように高さを規格化した相対値である。

では、ここでそれぞれのシンチレータで期待される光子数がどの程度であるかを見積もる。この光子数は表 3.6 中に示したシンチレータ中での単位エネルギー損失あたりに生じる光子数、図 3.48 に示した放出されるシンチレーション光の波長分布、第 2 章の図 2.18 に示した MPPC での光子検出効率 (PDE) の波長依存性の情報を用いることで概算できる。厳密にはシンチレーションが生じた点から光子が伝播する際の経路やその長さに応じた減衰の効果を検討する必要があるが、ここではそれらは光量せずに、各シンチレータの間で予測される相対的な光量の違いを概算する。光子数  $NP_{tot}$  を以下の式 (3.22) によって見積もった。

$$NP_{tot} = \int NP(\lambda)d\lambda = \int Amp(\lambda)PDE(\lambda)d\lambda \quad (3.22)$$

ある波長  $\lambda$  における発光強度  $Amp(\lambda)$  と MPPC の  $PDE(\lambda)$  の積を計算しその波長  $\lambda$  における光子数  $NP(\lambda)$  を求める。これを積分することによって  $NP_{tot}$  を得る。但し、ここで述べた発光強度  $Amp(\lambda)$  は全体をシンチレータの単位エネルギー損失あたりに生じる光子数で規格化したものである。ここでは、MPPC としてここまでの測定で用いてきた S14160-3015PS のデータを用いて計算する。波長当たりの光子数  $NP(\lambda)$  の分布は図 3.49 のようになった。この分布を波長で積分し得られる値  $NP_{tot}$  を各シンチ

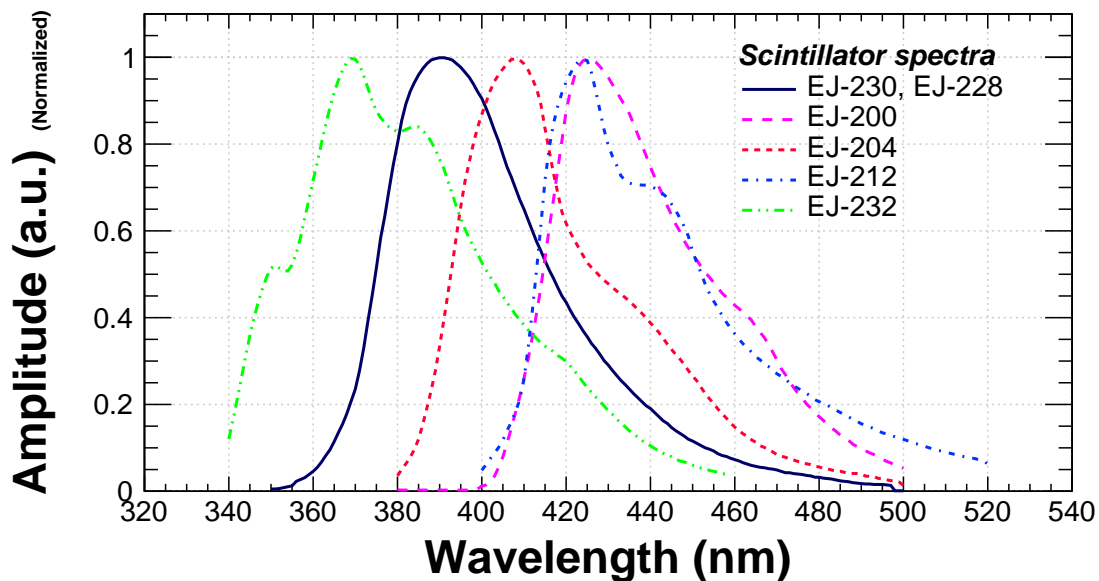


図 3.48: 種類依存性の測定で使用したプラスチックシンチレータの発光の波長依存性 [38, 63, 64]。各グラフは最大値を 1 とするよう規格化した相対値である。各シンチレータの種類毎にスペクトルの形状や発光強度が最大値を取る波長が異なることがわかる。

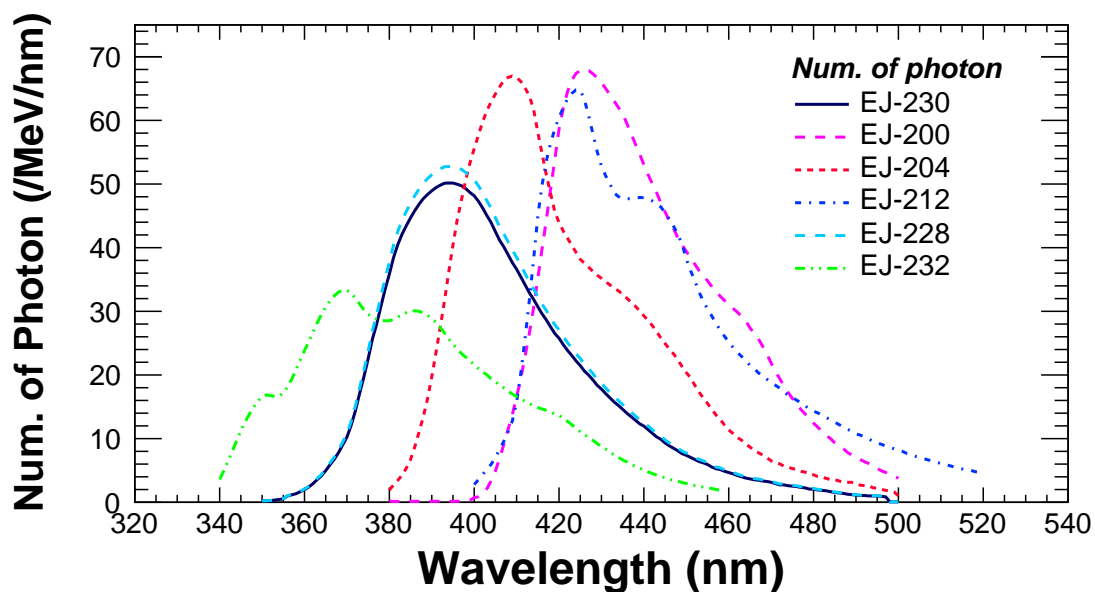


図 3.49: 推定される検出光子数の波長分布。

レータ毎にプロットしたものが図 3.50 である。

測定を行った結果は、次に示す図 3.51 のようになった。但し、本節での測定においては MPPC を実装した基板として 3.7.5 節にて述べた New の基板を用いて行った。そのため、比較として示した EJ-230 の値が形状依存性や MPPC の個数依存性に関して述べた際に示した値とは異なっているということに注意が必要である。各電圧の点において、EJ-204 と EJ-228 が同程度、次いで EJ-230 が良い分解能を示していることがわかる。特に  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  での値に着目し同じ電圧を印加した場合を見ると、図 3.52 のようになった。特に EJ-230 では  $\sigma_{\text{detector}} = 96.0 \pm 0.3 \text{ ps}$ 、EJ-228 では

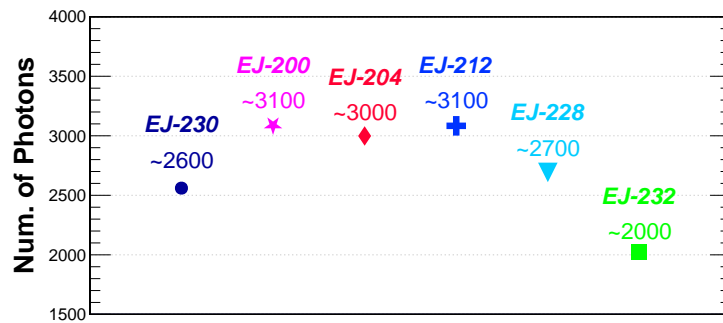


図 3.50: 推定される検出光子数 (全体の積分)。それぞれのシンチレータの種類とともに式 (3.22) の積分の結果得られるおよその光子数を示した。

$\sigma_{\text{detector}} = 82.0 \pm 0.3 \text{ ps}$  であった。

次に、それぞれのシンチレータでの QDC 分布に着目する。先ほどと同様に  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の場合に注目するとき、EJ-230、EJ-204、EJ-228、EJ-232 の 4 種類の QDC 分布は図 3.53 のようになった。それぞれの MPPC において、EJ-204 が最も得られる電荷量が大きく、次いで EJ-230、EJ-228 が続く形になっており、EJ-232 での電荷量分布が最も小さいことがわかる。更に、他の種類のシンチレータも含めて両側の QDC 分布の MPV の相乗平均を求めた結果を図 3.54 に示した。表に示したように発光量の多い EJ-200 と EJ-204 では電荷分布も大きくなる傾向がみられている。また、事前の計算でも少なかった EJ-232 は実際のデータでも電荷量が少なくなっている。EJ-212 で他のシンチレータと比較してやや少なくなっているのは、当該シンチレータのみ厚さが 3 mm であり、エネルギー損失が小さくなったためであると解釈できる。EJ-228 に関しては、減衰長や散乱による光子の損失の影響が現れたものと解釈される。製造元である Eljen Technology の解説によれば、EJ-228 は検出器の最大の辺の長さが 10 cm 以下にとるような場合に光子の散乱の効果が抑制され最も良い性能を発揮できる [38]。今回使用したシンチレータでは長さが 450 mm = 45 cm であるから、こうした影響を受けたのであると予想できる。このことから先に述べた計算の結果とは、一部で一致しない点が見られるものの、総じておよそ先の見積りに類似した傾向がみられていると考えられる。

時間分解能に再び話題を戻す。本節の結果より、シンチレータの特性がどのように時間分解能に寄与するかを考える。本節の結果では、光量が多く得られると予想される EJ-204 が最も良い分解能を示した。しかし、電荷量分布の結果から同程度の光量であったと予想される EJ-200 は  $\sim 20 \text{ ps}$  悪い結果を示している。また、予想される光量の少ない EJ-228 も EJ-204 と同程度の時間分解能を示した。このことから、単純に光量の大小だけが時間分解能に影響するわけではないと考えられる。EJ-230、EJ-228、EJ-204 の 3 種に共通する特性としては立上り時間が速いことが上げられる。では、時間応答が突出して速い場合には良い時間分解能に至るのであろうか。性能表上で 350 ps と極めて良い立上り時間を持つ EJ-232 は他のシンチレータと比較すると最も悪い分解能となった。このことから、やはり時間応答が速いというだけでは時間分解能には直結しないとも考えることができる。総じて、時間応答の高速さや光量といった種々のパラメータの釣り合いが重要であろうと考えられる。但し、いずれの種類のプラスチックシンチレータを用いた場合であっても、印加電圧として  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} \geq 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の領域を選ぶことによって、 $\sigma_{\text{detector}} < 120 \text{ ps}$  となる結果を得ている。したがって、いずれのシンチレータでも本研究で要求する  $\sigma < 150 \text{ ps}$  に対しては十分な性能を示している。

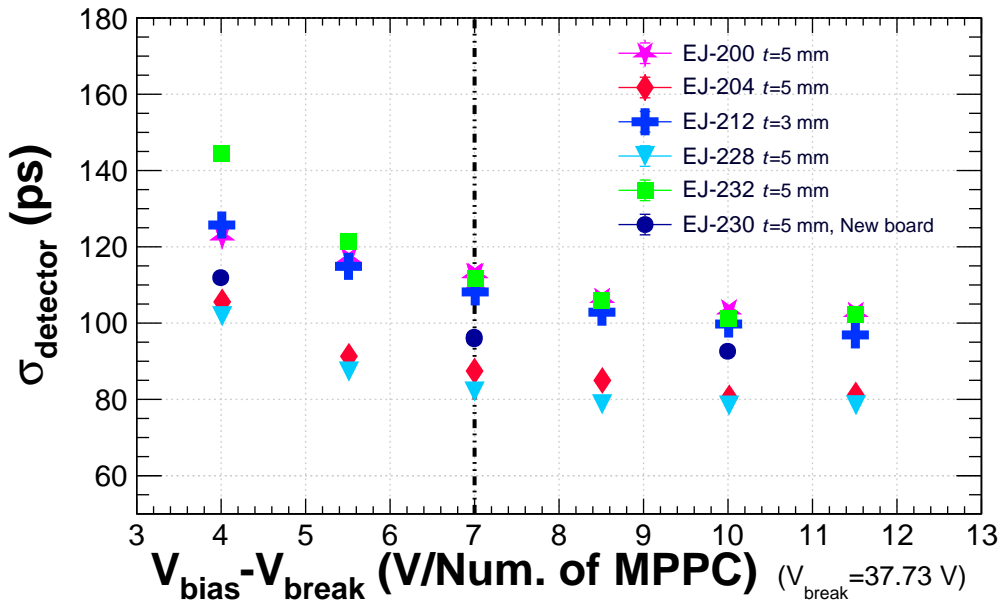


図 3.51: 各シンチレータでの時間分解能に対する印加電圧依存性。

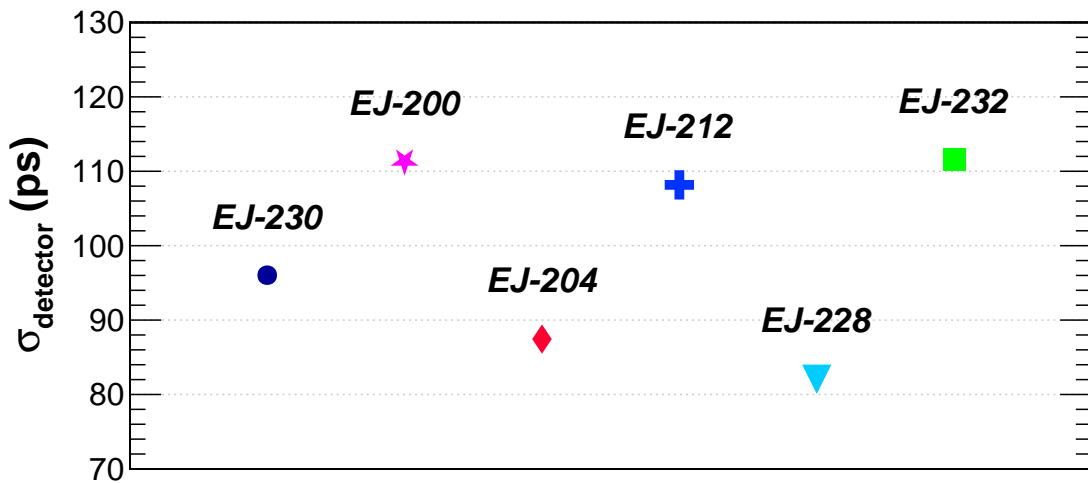


図 3.52: 各シンチレータでの時間分解能。

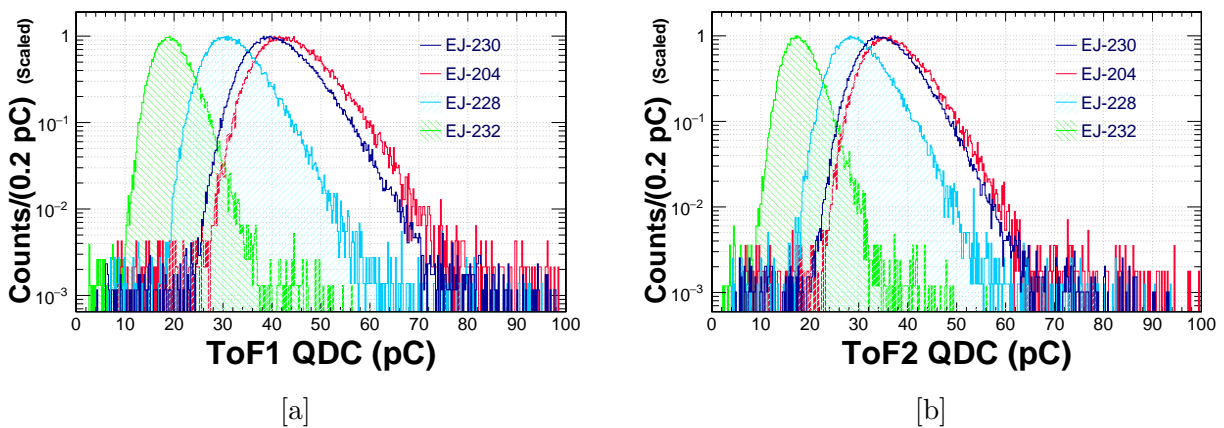


図 3.53: 各種シンチレータにおける両側の MPPC での QDC 分布の比較

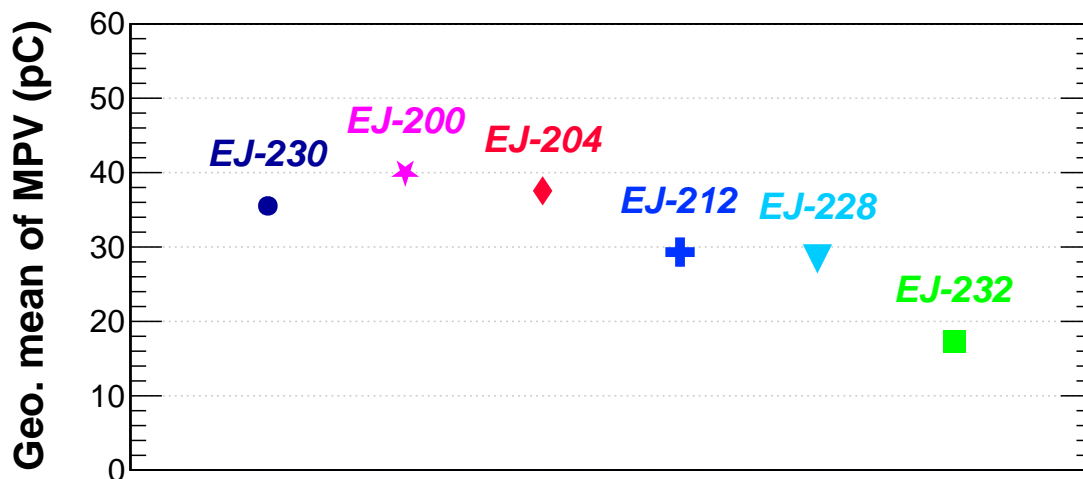


図 3.54: 各種類のシンチレータでの QDC 分布の MPV 値の比較。

### 3.7.10 反射材依存性

反射材として用いる材質によって、境界面での光学的な応答が変化することが予想される。反射材の違いが性能に対して及ぼす影響に関して検討を行った。ここでは以下の材質について測定を行った。また、それぞれの反射材を図 3.55 に示した。

★ テフロンシート

テフロン™(Teflon) は Chemours 社 [65] が製造するフッ素樹脂の商品名である。物質としては PTFE (ポリテトラフルオロエチレン、化学式  $C_2F_4$ ) であり、反射材としては乱反射の性質を持つ。本測定では中興化成工業株式会社 [66] 製のチューコフロー シールテープ (厚さ 0.1 mm) を用いた。

★ アルミナイズドマイラー

ポリエステルフィルムの表面にアルミニウムを蒸着させたものである。蒸着させた面での鏡面反射が期待される。

★ ESR

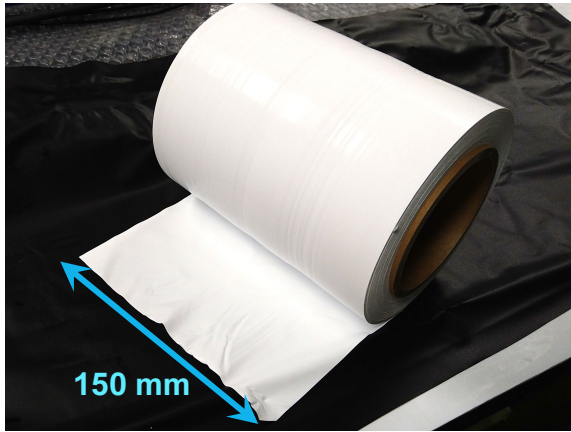
ESR は鏡面反射タイプの多層膜フィルム的一种である。一般には液晶ディスプレイやスマートフォン、タブレット端末の画面に貼付するフィルムなどとして流通している。本研究では市販のものを用いた。

尚、今回使用した反射材 3 種のうち、アルミナイズドマイラーと ESR には表裏があるため、使用の際には注意が必要である。アルミナイズドマイラーは一方の面にのみアルミニウムが蒸着されている。しかし、目視では面による差異は見られないため (少なくとも筆者には目視での差異は確認できなかった。)、目視による面の判別は容易ではない。テスターなどを用いて導通の確認を行うことで面の判別ができる。一方、ESR の場合は表裏で反射の様相に明確な違いがあるため、面の判別は比較的容易である。

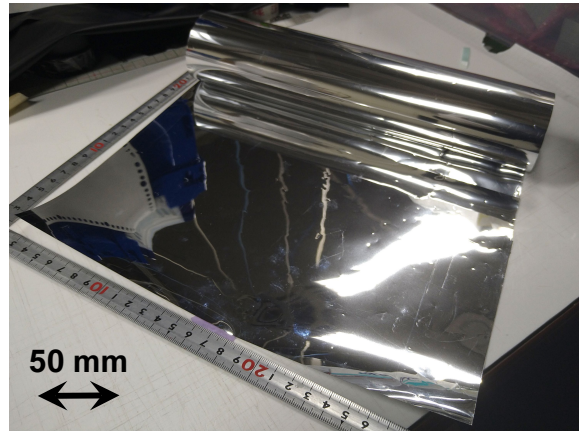
このほか、比較対象として、反射材を一切用いなかった場合についても同様に測定を行った。ここでの測定ではシンチレータとして ID EJ230-I450-1b、MPPC は S14160-3015PS を Prev の基板に 2 個実装したのものを用いた。

印加電圧を  $V_{bias} - V_{break} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  とした場合の各反射材での結果を図 3.56 に示した。青色のマーカーがテフロンシートの場合、桃色のマーカーがアルミナイズドマイラーを用いた場合、

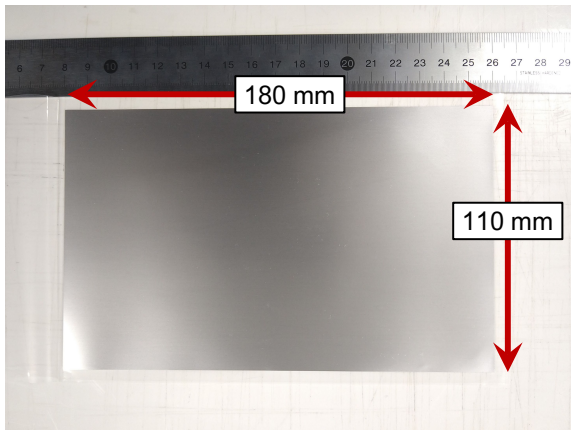




(a) テフロンシート。



(b) アルミナイズドマイラー



(c) ESR

図 3.55: 反射材による依存性の検討で用いた各種反射材。(a): テフロンシート。本文中に記載した通り、厚さは 0.1 mm である。(b): アルミナイズドマイラー。(c): ESR。本研究では  $180 \times 110 \text{ mm}^2$  のものを使用した。但し、表面に保護用のフィルムを貼付した状態である。

緑色のマーカーが ESR を用いた場合、黒色のマーカーが反射材を何も使用しなかった場合である。ここで、テフロンシートに関しては、同様の形状・型番のシンチレータ (EJ230-1450-1a) で測定を行った際の結果を 3.7.4.3 節 (幅依存性) などで既に示したが、反射材の依存性を調査するに当たって、再度同じ型番且つ同一の形状のシンチレータとして EJ230-1450-1b を用いて測定を行った。ここではテフロンシートの結果として、その際の結果を示す。テフロンシートと ESR では時間分解能はおよそ同程度であった。一方でアルミナイズドマイラーを用いた場合には  $\sigma_{\text{detector}} = 99.2 \pm 0.6 \text{ ps}$  でありこれら 2 種を用いた場合よりもややよい時間分解能を示している。何も反射材をつけなかった場合では  $\sigma_{\text{detector}} = 109.5 \pm 0.6 \text{ ps}$  であった。反射材を用いた場合と比較すると分解能が出ていない傾向はあるものの、その差は ~ 数 ps 程度であり、節で見てきたような形状依存性による性能の変化と比較するとその幅は小さいとも考えられる。この結果より、乱反射の特性を有するテフロンシートよりも、鏡面反射を示すアルミナイズドマイラーのほうが良い時間分解能を得ることができると考えられる。

次に、QDC 分布に着目する。 $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  での QDC 分布は次に示す図 3.57 のようになった。ヒストグラム及びグラフのマーカーの色の対応は先に示した図 3.56 と同じである。電荷量分布ではテフロンシートとアルミナイズドマイラーが同程度の電荷量であるのに対して、ESR で

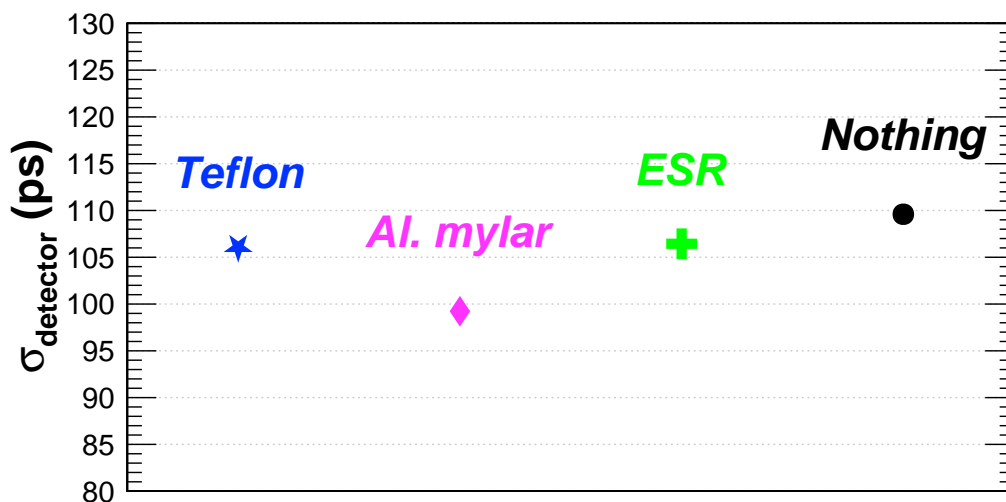


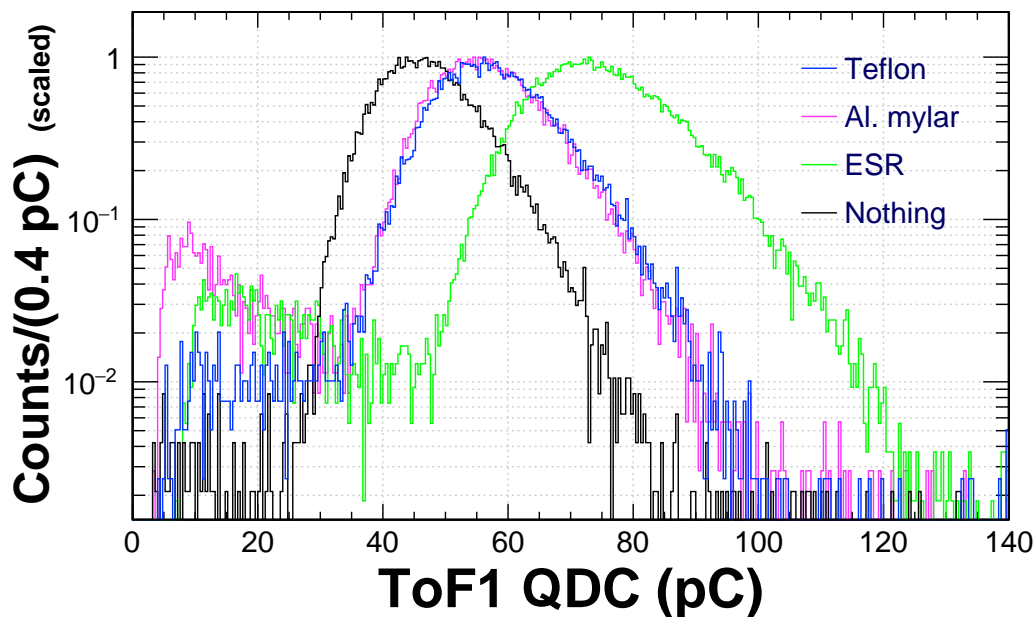
図 3.56: 時間分解能の反射材依存性。MPPC は S14160-3015PS を 2 個直列に接続したものをを用いた。印加電圧はいずれの点においても  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  である。青色のマーカーがテフロンシートの場合、桃色のマーカーがアルミナイズドマイラーを用いた場合、緑色のマーカーが ESR を用いた場合、黒色のマーカーが反射材を何も使用しなかった場合を示す。

はこれら 2 種よりもやや大きな値を示していることがわかる。また、何もつけなかった場合はいずれの反射材を使用した場合よりも小さい値を示している。このように、電荷量の大小つまり光量の大小関係と時間分解能は直接は対応していないということがわかる。

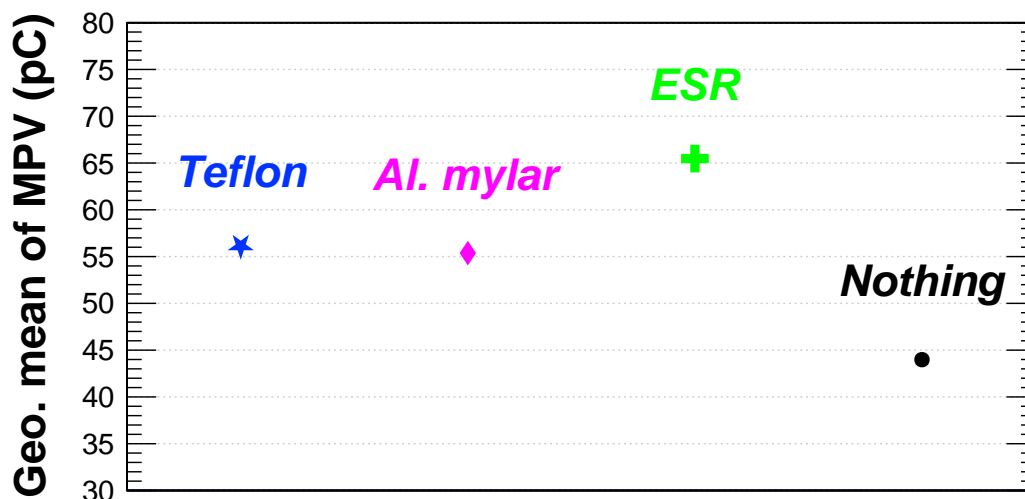
MPPC を用いたプラスチックシンチレーション検出器での反射材の検討については先行研究 [33] においても行われている。テフロンシート、アルミナイズドマイラーで比較を行い、テフロンシートがより良い時間分解能を達成できるという結果が得られている。本測定との大きな違いとして、用いているシンチレータの形状が上げられる。先行研究 [33] では長さ 40 mm、幅は 18 mm、厚さ 3 mm のものと長さ 40 mm、幅は 3 mm、厚さ 3 mm の 2 通りの形状で検討を行い、そのいずれでもテフロンシートで良い時間分解能が得られるという結果を得ている。また、MPPC での電荷分布に関してもテフロンの方がより大きくなるという結果を得ている。いずれも本測定で用いたシンチレータと比較して長さが大きく異なっている。このことから、シンチレータの大きさによってどのような反射特性を持つ反射材が有利に作用するかが異なってくる可能性があると考えられる。本節における測定結果より、全体の形状として短冊状の長い ( $\sim 300 - 450 \text{ mm}$ ) のシンチレータでは鏡面反射の特性を持つ反射材のほうがより適している可能性が考えられる。更に今回の結果から、同じ鏡面反射であっても、ESR とアルミナイズドマイラーとでは後者の方が良い時間分解能が得られた。両者の違いはその物質にある。ESR は誘電体の多層膜によって鏡面反射をなしている。対して、アルミナイズドマイラーでは金属であるアルミニウムを蒸着させることで鏡面反射をなしている。鏡面反射であるか乱反射であるかといったような反射特性のみではなく、それぞれの物質の違いもまた反射材としての応答に寄与している可能性がある。

### 3.7.11 MPPC の種類依存性

ここまでの測定においては、MPPC として一貫して S14160-3015PS を用いていた。しかしながら、S14160-3015PS の場合には得られる信号が十分ではないことから、後段で PM amp. による増幅を併用して測定を行っていた。しかしながら、最終的な検出器を想定した場合に、全チャンネルに対して PM



[a]



[b]

図 3.57: 各反射材を用いた場合の QDC 分布。[a]: 一方の MPPC における QDC 分布。[b]: 両側での QDC 分布の MPV の相乗平均値。ヒストグラム及びグラフのマーカーの色の対応は先に示した図 3.56 と同じである。電荷量分布の比較では ESR が最も高い値を示し、次いでテフロンシートとアルミナイズドマイラーが同程度であった。何も用いなかった場合はいずれの場合よりも小さな値となった。

amp. を使用することは、全チャンネル数が～数百 となることから必要となるモジュール数も莫大なものとなることが予想される。こうしたことは、検出器の取り回しという点やコストの面から考えると現実的ではない。そこで、S14160-3015PS と比較して～5 倍の増倍率を持つ S13360-3050PE を用いることを検討した。シンチレータは EJ230-1450-6 ( $5^T \times 44^W \times 450^L$  mm<sup>3</sup>) を用いた。反射材はテフロンとアルミナイズドマイラーの 2 種を検討した。

測定に当たっていくつかの変更を行った。このことについて述べる。

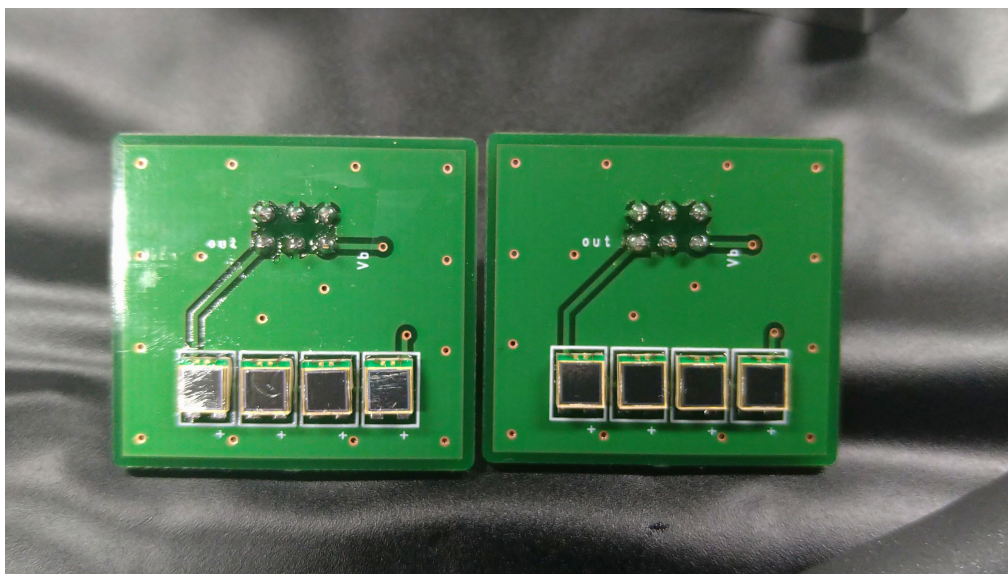


図 3.58: S13360-3050PE を用いた測定において使用した MPPC 基板。それぞれ 4 個直列接続で実装している。MPPC の種類以外の構成はこれまでと同一である。

表 3.7: S13360-3050PE を用いた測定において使用した MPPC 基板の  $V_{op}$ 。

| Group | ID    | $V_{op}$ (V) |
|-------|-------|--------------|
| 1     | 64365 | 55.8         |
|       | 64580 | 55.8         |
|       | 64674 | 55.8         |
|       | 64739 | 55.79        |
| 2     | 64585 | 55.81        |
|       | 64650 | 55.81        |
|       | 64712 | 55.81        |
|       | 64763 | 55.81        |

### MPPC について

ここでは MPPC 基板として 3.7.8 節で示した New のタイプのものを使用した。実際に使用した MPPC 基板を図 3.58 に示した。MPPC として S13360-3050PE を 4 個直列接続で実装した。S14160-3015PS はロット単位で共通した降伏電圧を有しており、複数個の MPPC を組み合わせた場合でも均一な動作が期待される。一方で、ここで使用した MPPC である S13360-3050PE は個体毎に異なる降伏電圧を持ち、電圧応答に個体差が生じ得るという点が異なっている。ここでは各 MPPC について、 $V_{op} \sim 55.8$  V 程度のものを 8 個用意し使用した。表 3.7 に使用したそれぞれの MPPC の  $V_{op}$  を示した。尚、S14160-3015PS と S13360-3050PE では  $V_{op}$  の定義が異なっていることに注意しなければならない。S14160-3015PS の場合は降伏電圧  $V_{break}$  に対して  $V_{op} \equiv V_{break} + 4.0$  V であるのに対して、S13360-3050PE の場合には  $V_{op} \equiv V_{break} + 3.0$  V である。

表 3.8: S13360-3050PE を用いた測定において使用した回路の各素子の値。各素子のラベル名は図 3.59 中に示したものに従う。 $R_{imp}$  及び  $C_d$  は可変ではなく固定値である。

| 素子のラベル (単位)            | ToF1 | ToF2 |
|------------------------|------|------|
| $R_{imp}$ ( $\Omega$ ) | 20   | 20   |
| $R_d$ ( $\Omega$ )     | 21   | 22   |
| $C_d$ (pF)             | 100  | 100  |
| $R_{pzc}$ ( $\Omega$ ) | 308  | 300  |
| $R_f$ ( $\Omega$ )     | 1080 | 1071 |

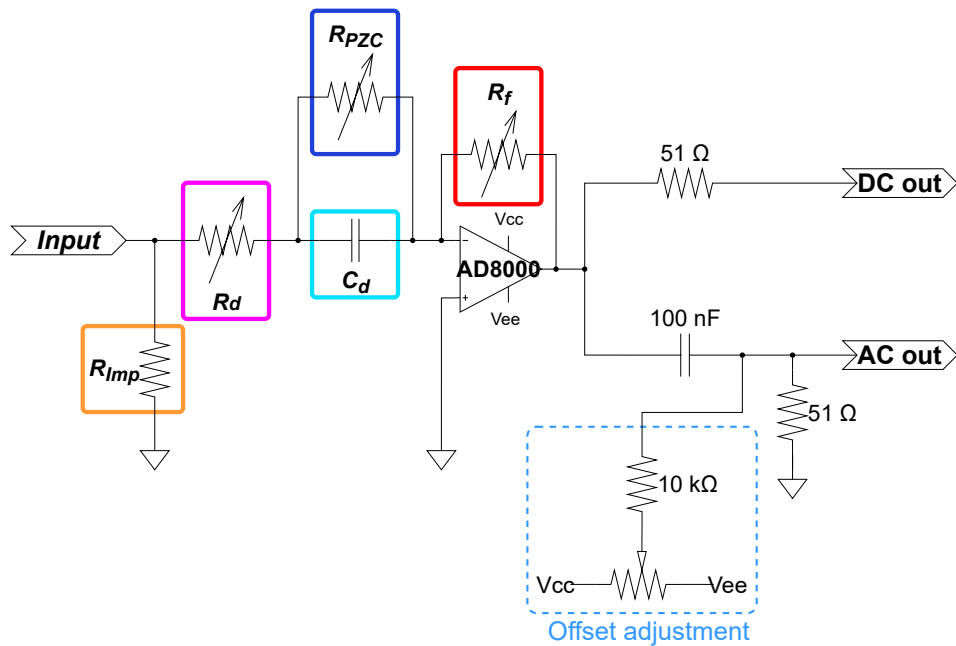
### アンプ基板

本節の測定においては、アンプ回路を変更して行った。その回路図を図 3.59[a] に、実際に使用した基板を図 3.59[b] にそれぞれ示した。オペアンプ AD8000 を使用した反転微分増幅回路である点は前節まで使用していたアンプ回路と同じであるが、ポールゼロ抵抗に加えフィードバック抵抗やダンピング抵抗も可変抵抗としている。尚、インピーダンス用の抵抗及び微分用のコンデンサは従来と同様の値としてそれぞれ  $R_{imp} = 20 \Omega$ 、 $C_d = 100 \text{ pF}$  を実装している。可変抵抗に関しても、実際に測定に用いる際にはこれまで用いていた回路と同じ値になるように調整を行った。その際、ToF1 及び 2 のそれぞれで使用するアンプについて各抵抗値をテスターで測定した値を表 3.8 に示した。尚、 $R_{imp}$  及び  $C_d$  に関しては固定値の素子を使用しているが、便宜上併せて示している。

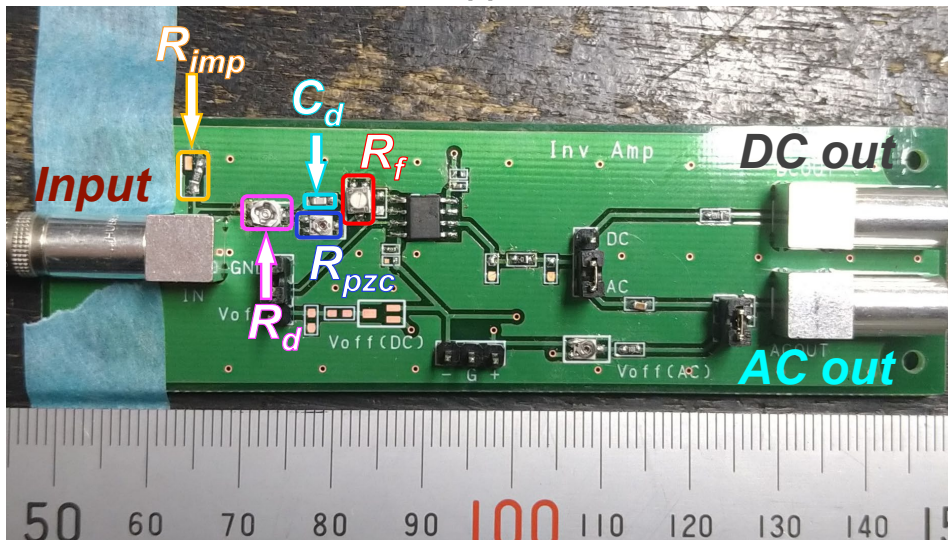
加えて、オペアンプ後段にもパッドを用意しており必要に応じて部品を実装可能にしている。但し、本節に述べる測定ではこの部分は特に使用せず、接続のために  $0 \Omega$  の抵抗を配している。これらの可変部分を用いた回路構成の検討に関しては、3.8 節にて述べる。

また、出力部分は AC カップリングと DC カップリングの 2 ラインを用意し、ジャンパーピンの接続によっていずれを使用するかを選択できるようにした。さらに、AC カップリングの出力側には、オフセット電圧調整用のラインを追加している。これはオペアンプ駆動用の  $V_{cc}$ 、 $V_{ee}$  ラインからの抵抗分割を用いている。これにより、外部モジュールを併用することなくこの回路単体でオフセットの調整が可能とした。尚、実際にデータを収集する際には AC ラインのみを使用した。その際のオフセット電圧は QDC ラインをオシロスコープで確認した際のベースラインが  $\sim -15 \text{ mV}$  となるように設定を行った。これらをアルミナイズドマイラーを巻いた EJ230-1450-6 に接続し、 $\beta$  線源を照射した際の信号の一例を図 3.60 に示した。但し、MPPC への印加電圧は  $V_{bias} - V_{break} = 6.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  とし、ディバイダによって分割した後のものである。この時、 $2 \text{ MeV}$  の  $\beta$  に対しての波高は  $\sim 200 \text{ mV}$  とみることができる。このほか、3.5.2.2 節 (アナログ信号の処理) ですでに述べたように、本節の測定ではアンプ回路の出力を PM アンプは使用せずに、ディバイダによって分割した。

以下に述べる測定項目は印加電圧依存性、ディスクリミネータにおける閾値電圧依存性、 $\beta$  線通過位置依存性である。これらに関しては既に前節までの S14160-3015PS を用いた測定結果において検討を行っているものであるが、使用する MPPC を S13360-3050PE に変更した場合に関して、改めて検討を行った。



[a]



[b]

図 3.59: S13360-3050PE を用いた測定において使用したアンプ回路。[a]: 回路図。[b]: 実際の回路基板の写真。この回路では DC 結合と AC 結合の 2 つの出力ラインを持ち、任意に切り替えが可能となっている。

#### 印加電圧・ディスクリミネータ閾値電圧依存性

3.7.2 にて見たように、S14160-3015PS を用いた場合には、印加電圧を高くした時に時間分解能が向上するが、ある値よりも大きくなると電圧に対して一定となるような傾向を示していた。S13360-3050PE を用いた場合にも類似した傾向がみられるのかという点について調査を行った。図 3.61 に結果を示した。反射材としてテフロンシートを用いた場合とアルミナイズドマイラーを用いた場合の双方を示した。また、比較として同じ EJ230-1450-6 のシンチレータにテフロンシートを巻き S14160-3015PS を 4 個直列に取り付けた場合の結果について示している。検出器としての電圧応答の違いから、S14160-3015PS を用いた場合との単純な比較は容易ではない。しかしながら、降伏電圧  $V_{break}$  を基準として見たとき、

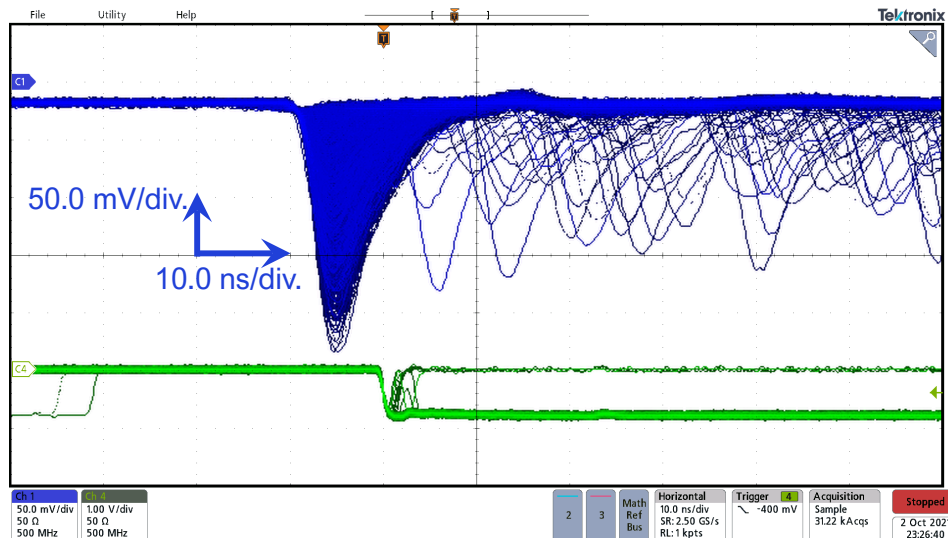


図 3.60: S13360-3050PE を用いた場合の信号の一例。

各点においてテフロンシートを用いた場合とアルミナイズドマイラーを用いた場合のどちらにおいても S14160-3015PS よりも良い時間分解能が得られているということがわかる。特に、アルミナイズドマイラーを用いた測定では MPPC への印加電圧を  $V_{bias} - V_{break} = 9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  とした時に  $\sigma_{\text{detector}} = 93.7 \pm 0.6 \text{ ps}$  であり、最も良い時間分解能を得るという結果を得た。この電圧は MPPC の推奨印加電圧  $V_{op}$  を基準にとると  $V_{op} + 6.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  という値に相当する。先行研究 [33] では、S13360-3050PE に対して印加電圧を  $V_{op} + 6.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  とした場合に、先行研究 [44] では、 $V_{op} + 5.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の場合に最も良い時間分解能が得られるという結果が得られている。このことから本測定の結果においても先行研究をおおむね支持する結果が得られているものといえる。

次に S13360-3050PE を使用した 2 つの系列に着目する。本節の測定では 3.7.10 節にて反射材の比較を行った際のシンチレータとは幅が異なっているが、こちらにおいてもアルミナイズドマイラーを用いた場合の方が良い時間分解能が得られていることがわかる。これを受けて、本節での測定はアルミナイズドマイラーを反射材として使用した。

次に、閾値電圧 ( $V_{th}$ ) を変化させた場合の依存性について述べる。ここでは、 $V_{th}$  の時間分解能に対する寄与について、MPPC への印加電圧も変化させながら取得を行うことによって 2 次的に調査を行った。 $V_{th}$  のもたらす影響はタイムウォークの効果の大小として現れるものと考えられる。印加電圧を変えた場合、そこでの典型的な波高に応じて閾値の相対的な位置は変化するため、信号が閾値を超過するタイミングの揺らぎの度合もまた変化すると予想される。このことについての調査を行った。 $V_{th}$  の測定範囲はベースライン電圧 ( $\sim -15 \text{ mV}$ ) を基準として、 $V_{th} = -5, -8, -10, -13, -20, -25 \text{ mV}$  の範囲とした。ここで上限値の  $V_{th} = -25 \text{ mV}$  は印加電圧をちょうど  $V_{op} = V_{break} + 3.0 \text{ V}$  に設定した場合に最小電離損失に対応した事象の波高を超過しないギリギリの境界として見積もった値である。また、ベースラインに最も近い値である  $V_{th} = -5 \text{ mV}$  は、 $V_{bias} - V_{break} = 3.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時にベースライン近傍のノイズのレベルを拾わずに測定が可能な値として見積もったものである。結果は図 3.62 のようになった。 $V_{bias} - V_{break} = 3.0, 6.0, 9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の 3 通りについて示した。 $V_{bias} - V_{break} = 6.0, 9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  では全領域においておよそ安定した分解能を示していることがわかる。これに対して、 $V_{bias} - V_{break} = 3.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  では急激に悪化する様子がみられる。こうした傾向を MPPC への印加電圧依存性という立場から見てみる。 $V_{th} = -5, -15, -25 \text{ mV}$  での印

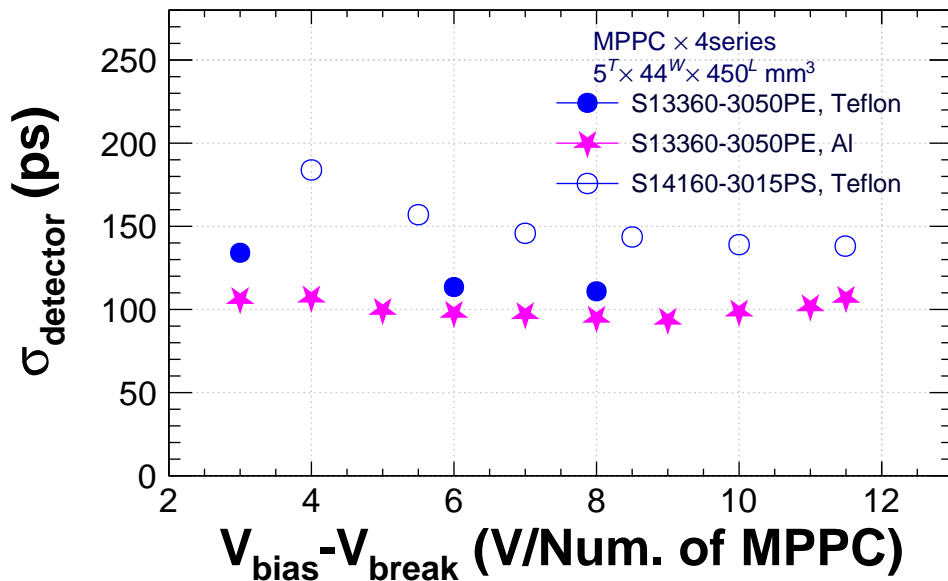


図 3.61: S13360-3050PE を用いた場合の時間分解能に対する MPPC 印加電圧依存性。反射材としてテフロンシートを用いた場合とアルミナイズドマイラーを用いた場合を示した。また、比較として同じシンチレータに S14160-3015PS 4 個直列接続を組み合わせた場合の結果を示した。

加電圧依存性は図 3.63 のようになった。 $V_{bias} - V_{break} = 7.0 - 10.0$  V/Num. of MPPC の電圧においては  $V_{th}$  の値によらず安定した分解能を示している。このことから、MPPC を動作させる電圧領域によって、安定した性能を期待できる閾値電圧の範囲は異なっていることがわかる。特に本節の設定として用いた構成の場合、印加電圧領域を  $V_{bias} - V_{break} > 7.0$  V/Num. of MPPC とするときには  $V_{th} = -5$  mV から  $V_{th} = -25$  mV の範囲で安定した時間分解能を見込めると考えられる。3.7.6 節にて示した S14160-3015PS を使用した場合と比較すると、印加電圧の低い  $V_{bias} - V_{break} = 3.0$  V/Num. of MPPC での時間分解能の悪化が顕著に見られていることがわかる。最後に、すべての印加電圧、閾値電圧の測定点を含めた結果を図 3.64 に示した。この図からも、印加電圧が低い場合には同じ  $V_{th}$  に対しても時間分解能の変化が急激であるということがわかる。

### $\beta$ 線通過位置依存性

次に、 $\beta$ 線を照射する位置を動かした場合の通過位置依存性について述べる。ここでは長さ方向に沿って照射位置を変更した場合の測定を行った。座標系の定義は 3.7.7 節にて述べたものに従う。ここではテストベンチの構成に変更を加え、幅 44 mm のシンチレータを配置した場合でもリファレンス検出器等の部品の干渉を受けずに幅方向中心に  $\beta$ 線を照射できるようにした。反射材はアルミナイズドマイラーとし、MPPC の印加電圧は  $V_{bias} - V_{break} = 6.0$  V/Num. of MPPC で固定とした。各点における時間分解能は次の図 3.65 のようになった。中心位置において  $\sigma_{detector} = 97.8 \pm 0.3$  ps であるのに対して、+100 mm の位置では  $\sigma_{detector} = 100.1 \pm 0.7$  ps、-100 mm の位置では  $\sigma_{detector} = 84.8 \pm 0.7$  ps であり、左右での非対称性がみられる。しかしながら、いずれの点においても  $\sim 100$  ps の時間分解能を見込めることがわかる。このことから、S13360-3050PE を用いた場合には、 $\sigma_{detector} < 150$  ps を達成しうる可能性があると期待される。これらの結果を受けて、MPPC の種類としてはこれまでの測定において使用し S14160-3015PS に加え、S13360-3050PE もまた有力であるということがわかった。



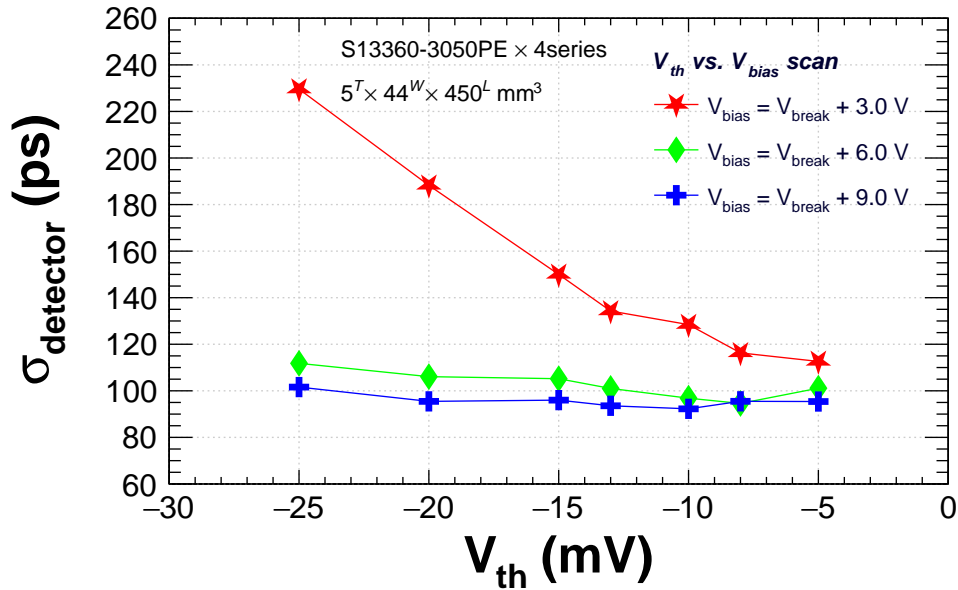


図 3.62: S13360-3050PE を用いた場合のディスクリミネータ閾値電圧依存性。ここでは代表例として  $V_{bias} - V_{break} = 3.0, 6.0, 9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の 3 通りを示している。

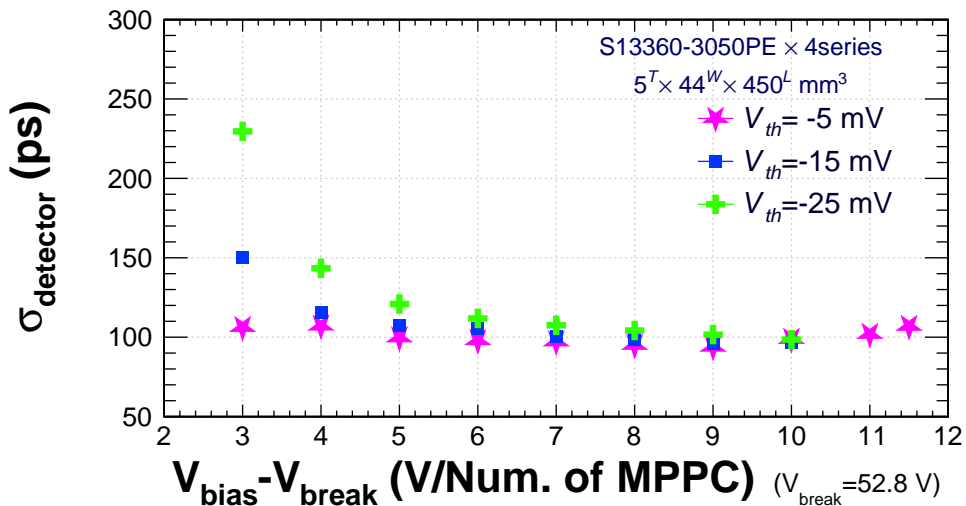


図 3.63: S13360-3050PE を用いた場合の時間分解能に対する印加電圧依存性 ( $V_{th}$  の値毎の比較)。ここでは代表例として  $V_{th} = -5, -15, -25 \text{ mV}$  の 3 通りを示した。  $V_{th} = -25 \text{ mV}$  の場合には印加電圧が  $V_{bias} - V_{break} = 3 - 4 \text{ V/Num. of MPPC}$  となる領域では急激な悪化がみられる。

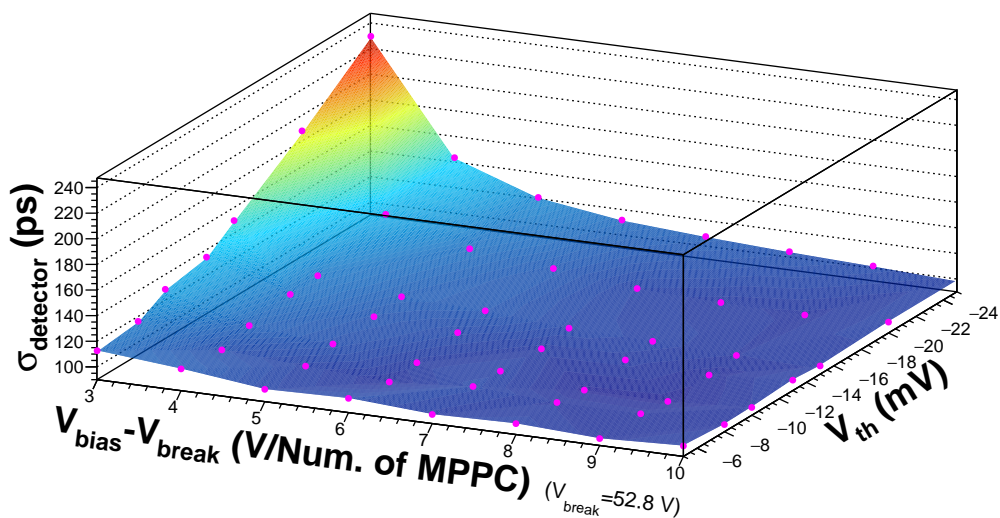


図 3.64: S13360-3050PE を用いた場合の時間分解能に対するディスクリミネータ閾値電圧と MPPC 印加電圧との相関。MPPC への印加電圧を横軸、閾値電圧を縦軸に取り、各測定点での時間分解能を高さ方向の値で示した。

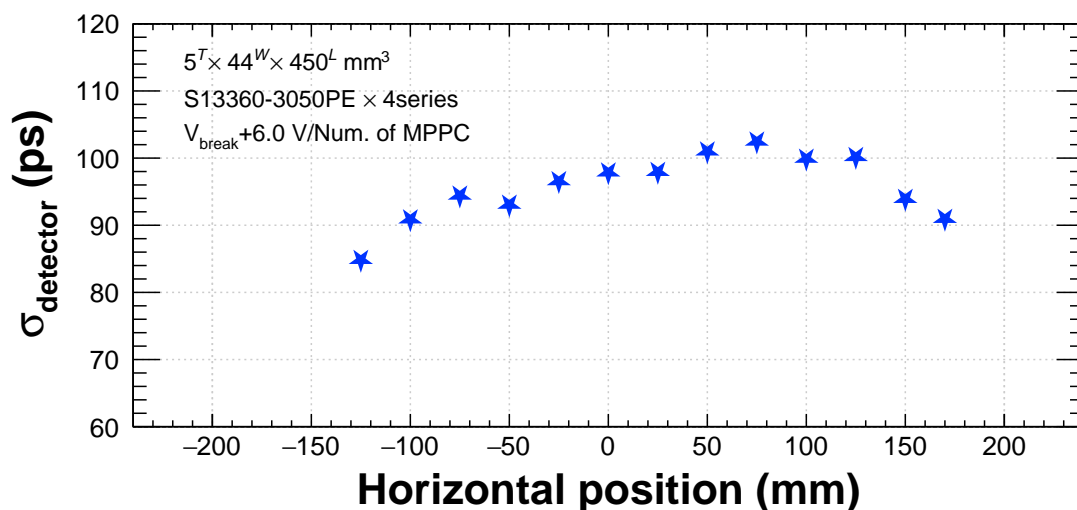


図 3.65: S13360-3050PE を用いた場合の  $\beta$ 線照射位置依存性。

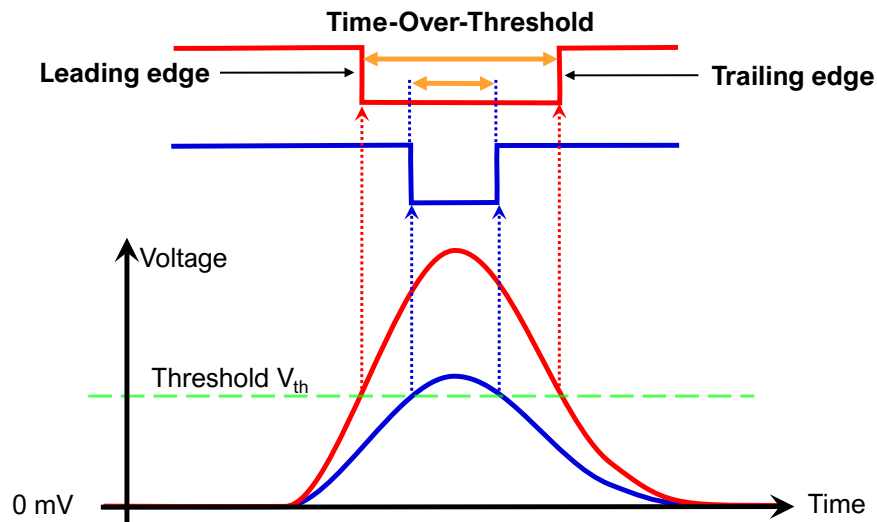


図 3.66: Time-over-threshold を利用した波高情報取得の概念図。波高の大小によって得られる論理信号の幅が異なる。

### 3.8 増幅回路の最適化

この節では、信号の整形増幅を行うアンプ回路の最適化について説明する。3.7 節までに述べた測定で使用していたアンプ回路をベースとして、回路を構成する素子の値を変更した場合の時間分解能への影響を調査した。用いたアンプ回路については次節で説明する。加えて、QDC に変わる波高情報取得の方法として TOT を用いることを検討した。これを受けて TOT 測定のための回路構成についても検討を行った。TOT については 3.8.2 節で説明する。

#### 3.8.1 用いたアンプ回路

本節の測定で用いたアンプ回路について述べる。基本的な構成及び用いているプリント基板は 3.7.11 節の図 3.59 に示したものと同型のオペアンプ AD8000 を用いた回路である。但し本測定を行うに際して別途各部品を実装したものであり、先に示したものとは別の個体を使用した。

#### 3.8.2 TOT (Time-Over-Threshold)

ここまでの測定においては、波高情報の取得に電荷積分型のモジュールである QDC を用いていた。これに代わる波高情報を取得する手法として Time-over-threshold (TOT) を用いることを検討した。

TOT とは入力された信号がある設定された閾値 (threshold) を上回った時間のことである。これを用いた波高情報取得の概念図を図 3.66 に示した。波高が閾値を超過している時間に対応した論理信号を得る。論理信号の立上り (leading) と立下り (trailing) の時刻を取得し、その差を求めることによって TOT を得る。図中に示したように、波高の大きい場合には得られる信号幅も同様に大きくなるということがわかる。

TOT を用いる場合、論理信号の leading と trailing の 2 つのタイミングを取得することで波高に対応

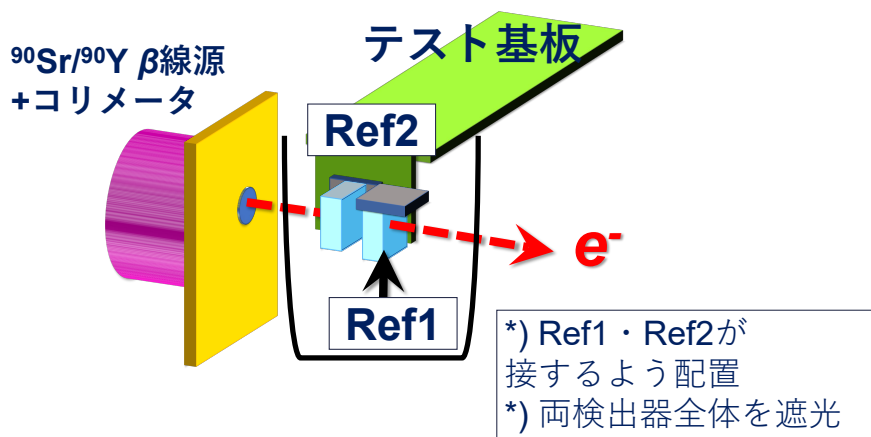


図 3.67: 回路最適化の測定でのセットアップ。Ref1 及び Ref2 の 2 つを並べ、これらをまとめて遮光した。これに対して  $\beta$  線を照射した。2 つの検出器のうち、 $\beta$  線源に近い側の検出器が Ref2 である。

した情報を得ることが可能であるため、時間情報の取得を行うモジュールのみで波高情報の処理も併せて行うことが出来る。これによって、従来の電荷積分型のモジュールを併用する構成と比較して、データ収集の高速化が期待される。

### 3.8.3 測定セットアップ

図 3.67 に測定セットアップの概念図を示した。本節における測定では、前節までのデータ収集で使用していたリファレンス用検出器 (Ref1、Ref2) を流用している。Ref1、Ref2 のシンチレータを接するようにして配置し、2 つの MPPC 基板をまとめてブラックテープで覆い遮光した。これら 2 つを貫通するように  $\beta$  線を照射した。但し、本節では線源から見て上流側に Ref2 を、下流側に Ref1 を配置しており、前節までとは 2 つの位置関係が逆になっている。上流側に配した Ref2 では図に示したアンプ回路を用いた。この時、アンプの出力はこれまでと同様に AC ラインを用いた。一方、下流側に配置した Ref1 に関してはこれまでと同様のアンプ回路を用いた。線源からの  $\beta$  線は 3.5 節の図 3.8 に示したコリメータを用いてその方向を限定した。また、MPPC の印加電圧は両検出器に共通で、58.8 V とした。データ収集回路図を図 3.68 に示した。但し、Div. はディバイダ、Att. は Attenuator、PM は PM amp.、G. G. はゲートジェネレータの意である。全体の構成は前節までで用いたデータ収集回路から試作 ToF に関する部分を排したものに準じた構成である。各検出器の信号は波高測定用のラインと時間測定・トリガー生成用ラインの 2 つに分割し処理を行う。波高測定には QDC モジュールとして CAEN V792 を、時間測定には TDC モジュールとして CAEN V775 を用いた。DAQ は KiNOKO を用いた。本節ではトリガーとして、Ref1 と Ref2 のコインシデンスと 10 Hz のクロック信号の論理和を用いた。ここでの変更点としては、TOT 測定用のラインを新たに用意した点である。

次に TOT 測定用のラインについて述べる。Ref2 においては、アンプ回路からのアナログ信号をディバイダで分割したのち、波高測定用・時間測定用のラインそれぞれで個別に Attenuator と PM amp. を経由し出力の調整を行った。ここで用いる PM amp. は 3.5.2.2 節にて述べたアナログ信号の調整に用いたものと同じのものを用いた。このうち時間測定用ラインの PM amp. 出力の一方をコンパレータへ入力

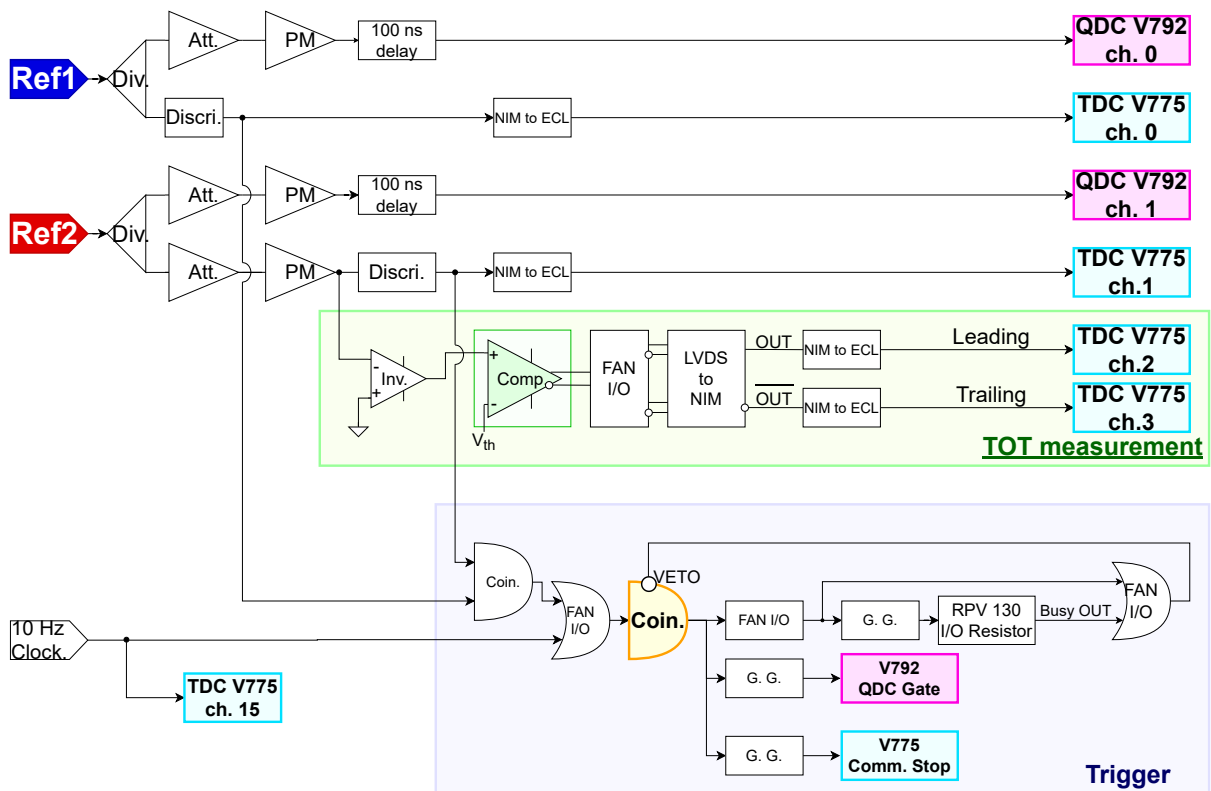


図 3.68: 回路最適化の測定でのデータ収集回路。但し、図中で Div. はディバイダ、Att. は Attenuator、PM は PM amp.、G. G. はゲートジェネレータを示す。

し論理信号へ変換を行い、その信号幅を TOT として処理する。最終的な時間情報の取得はこれまでと同様に V775 を用いて行う。本測定では LVDS コンパレータを用いて LVDS 規格の論理信号を取得した。LVDS とは Low voltage differential signal の略称である。2 本の差動信号によって信号の伝送を行う。この信号を今までの測定に用いていた TDC モジュールである V775 で処理するためには、LVDS 信号から ECL 信号へ信号規格を変換する必要がある。そこで、本測定においては LVDS-NIM コンバータを用いて、コンパレータからの出力を一旦 NIM 信号へ変換した後に NIM-ECL コンバータへ入力することによって信号規格の変換を行った。以下、この変更のために新規に導入した回路について述べる。

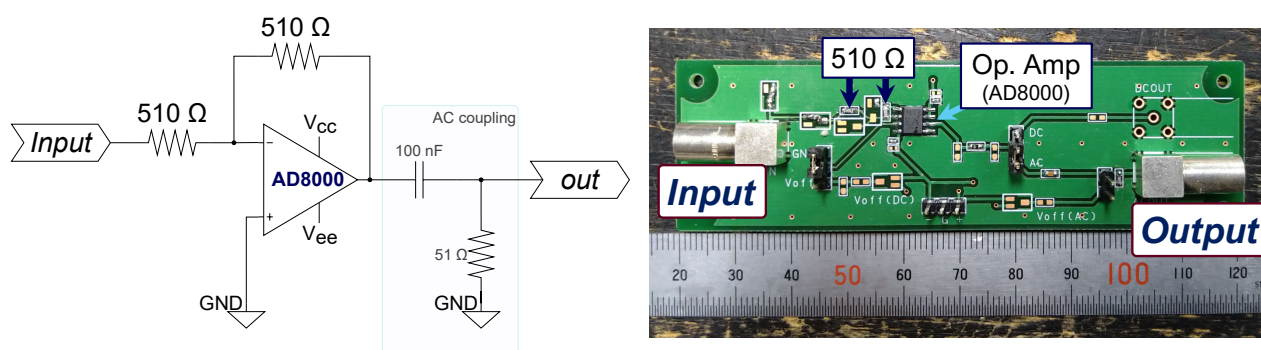
#### ◇反転増幅回路

以下に述べる LVDS コンパレータ回路では正の波高を持つ信号の弁別を行う。しかし、節図などのオシロスコープの画像で見たように、初段のアンプ回路から得られる信号は負の波高を持つ。そのため、ここでは図 3.69 に示した反転増幅回路を用いて信号の極性反転を行った。(a) が回路図、(b) が実際の回路基板の写真である。入力ラインの抵抗と負帰還抵抗として共に  $510\ \Omega$  の抵抗を配することでゲインを  $-1$  とし、入力した信号の極性の反転を行う。

#### ◇LVDS コンパレータ回路

本測定では、リニアテクノロジー社製の LVDS コンパレータである LTC6754[67] を用いた回路によって TOT の取得を行った。LTC6754 の基本性能を表 3.9 に示した。また、このコンパレータ回路を図 3.70 に示した。[a] が回路図、[b] が実際の回路基板の写真である。実際の回路は 2 チャンネル分のインプットとアウトプットを備えるが、これらは同一の構成であるため、回路図上では 1 チャンネル分のみを示した。

#### ◇LVDS FAN I/O 回路



(a) 回路図。

(b) 実際の回路。

図 3.69: TOT 測定において用いた反転回路。(a): 回路図。(b): 実際に用いた回路基板の写真。

表 3.9: LVDS コンパレータ LTC6754 の基本性能 [67]。当該 IC の性能表に記載されている値を記した。

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| Propagation delay    | 1.8 ns       |
| Toggle rate          | 890 Mbps     |
| Jitter (RMS)         | 1.5 ps       |
| Supply voltage range | 2.4 – 5.25 V |

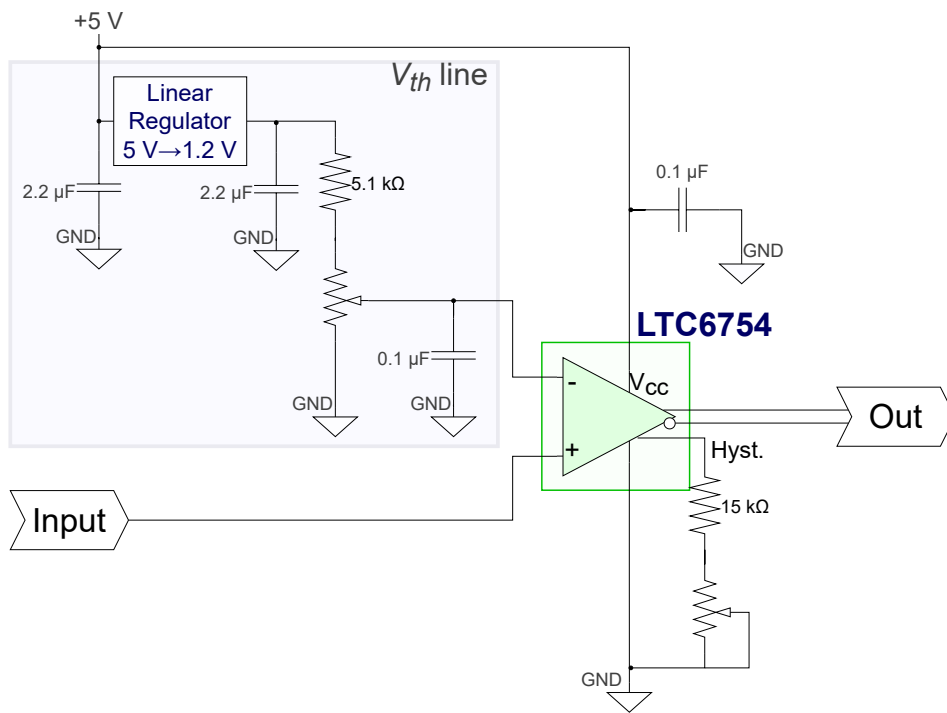
V775 は Leading edge のタイミングを記録することはできるが、trailing edge に対しては感度を持たない。したがって、実際に TOT を取得するためには、元の信号から極性を反転させた論理信号を用意する必要がある。そのために、図 3.71 に示した LVDS FAN I/O 回路を用いて、信号の分割を行った。この回路では、LVDS FAN I/O 用の IC として NB3L8504S [68] を実装している。この IC は 1 チャンネルの入力を 4 チャンネルに分割して出力する。この 4 つの出力のうち 2 つを用いて一方はそのまま NIM レベルへ変換を行い、もう一方は  $+/-$  の極性を反転して NIM レベルへ変換を行うことで trailing edge を測定できるようにした。

### 3.8.4 解析方法

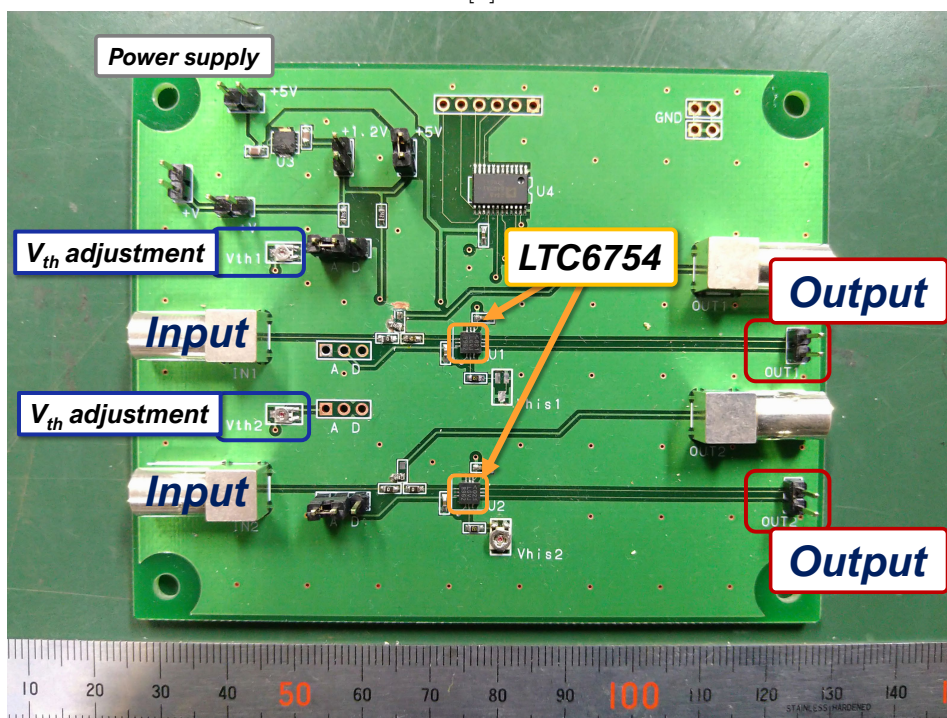
波高情報として QDC を用いた場合と TOT を用いた場合とで方法に差異があるため、個別に説明する。

#### TOF の定義

3.8.3 節にて述べたように、このセットアップでは Ref2 による信号の時間情報 (TDC) は 2 通りの形で記録される。1 つはディスクリミネータ出力の leading edge によって得られるものである。もう 1 つは LVDS コンパレータの出力の leading edge として得られるものである。ここでは、前者の TDC と Ref1 の TDC とで差分を求めたものを *TOF1*、後者の TDC と Ref1 の TDC とで差分をとり構成したものを *TOF2* と称する。



[a]



[b]

図 3.70: LVDS コンパレータ回路。[a]: 回路図。[b]: 実際の回路基板の写真。

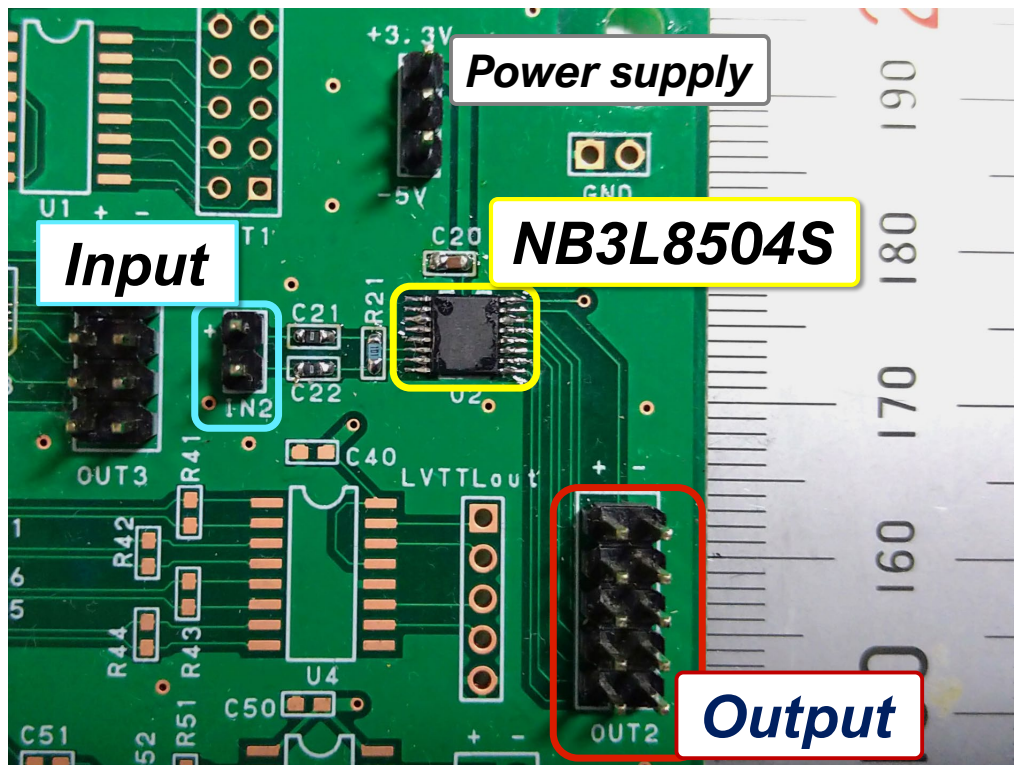


図 3.71: LVDS FAN I/O 回路。

### QDC を用いる場合

QDC を用いて評価を行う場合にはディスクリミネータを介して得られた TDC を Ref2 の時間情報と Ref1 の TDC で構成した  $TOF_1$  を 2 検出器間の飛行時間として用いた。 $TOF_1$  の分布に対して、両検出器を十分なエネルギー損失を伴って正しく通過した粒子によるイベントのみ選択的に解析を行う。ここでは、それぞれでの電荷情報 (QDC) の情報を用いてイベントの選択を行った。図 3.72 にその操作の一例を示した。縦軸を Ref1 と Ref2 間での飛行時間、横軸を各検出器の QDC の値とする 2 次元相関を作成する。それぞれの相関において分布を横軸に射影した分布を作成し、エントリー数が最大となるビンの中央値  $Peak_i$  ( $i = 0, 1; \text{Ref1, Ref2}$ ) を取得する。但し、ここでの QDC はペダスタルの分の較正は行っておらず、電荷量へ換算していない生のデータの値である。ここではペダスタル値  $Ped$  を両検出器共通で  $200 \text{ ch.}/(0.1 \text{ pC})$  として扱う。これを用いて

$$|QDC_i - (Peak_i - Ped)| < 0.05 \times (Peak_i - Ped) \quad (3.23)$$

$$i = 0, 1; \text{Ref1, Ref2}$$

の条件を双方の検出器で満たす事象を選択した。この時に選択される範囲を図 3.72(a) 及び (b) 中に青の破線で示した。2 本の線で挟まれた領域内にある事象が選択対象となる。そのうえで再度飛行時間分布を作成し、これにガウス関数をフィットする。この時のフィットパラメータとして得られる  $\sigma$  を飛行時間の分解能  $\sigma_{\text{Ref1-Ref2}}$  として定義する。ここでは、この  $\sigma_{\text{Ref1-Ref2}}$  より Ref1 の寄与を差し引くことによって、Ref2 の固有時間分解能を評価することを試みる。固有時間分解能をそれぞれ  $\sigma_{\text{Ref1}}\sigma_{\text{Ref2}}$  とするとき、誤差伝搬則より  $\sigma_{\text{Ref2}}$  は次の式 (3.24) のように記述される。ここでは  $\sigma_{\text{Ref1}}$  はこれまでの測定結果を基に  $40.2 \pm 0.5 \text{ ps}$  とした。これは Ref2 の回路も変更していない状態として測定を行い、それを解析した結果の飛行時間分解能より求めた値である。

$$\sigma_{\text{Ref2}} = \sqrt{\sigma_{\text{Ref1-Ref2}}^2 - \sigma_{\text{Ref1}}^2} \quad (3.24)$$



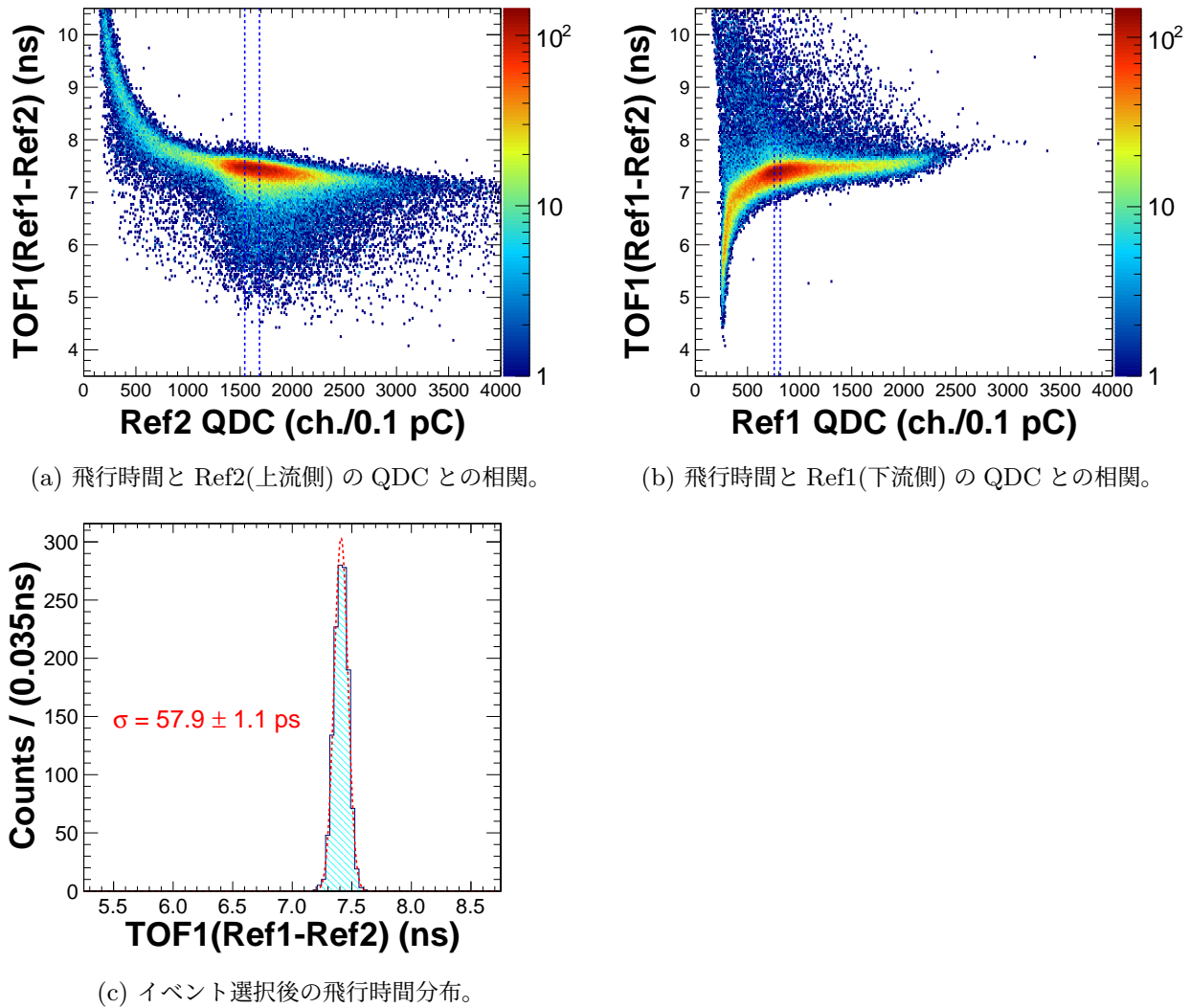


図 3.72: 回路最適化の測定での解析の一例。(a): 飛行時間と Ref2(上流側) の QDC との相関である。(b): 飛行時間と Ref1(下流側) の QDC との相関である。(a), (b) それぞれで QDC の値をもとに青色の破線で挟んだ範囲の事象を選択した。(c): 事象選択後の飛行時間分布である。この場合では、ガウス関数によるフィットにより  $\sigma = 57.9 \pm 1.1$  ps を得た。

### Ref1 の時間分解能の導出

前節までの測定と同様に Ref1、Ref2 共に同じ回路を用いて、試作 ToF を配せず Ref1 と Ref2 のみを並べた状態で測定を行った。この時、用いているデータ収集回路はこれまでの測定と同一のものを用いて実施した。Ref1 と Ref2 の TDC の差分により構成した TOF とそれぞれの QDC との相関を作成し、これに対して式 (3.3) の関数をフィットしてタイムウォークの補正を行った。ここでは十分なエネルギー損失を伴った事象を選択するため、Ref1・Ref2 での電荷量に対して  $QDC < 20$  pC の条件を要請し事象の選択を行った。補正後の TOF 分布にガウス関数をフィットして得られた  $\sigma$  より、2つの検出器の構成が同一であることから、その性能は等価であると仮定して  $\sigma_{\text{Ref1}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma$  として Ref1 の時間分解能を得た。この時の解析の流れを図 3.73 に示した。

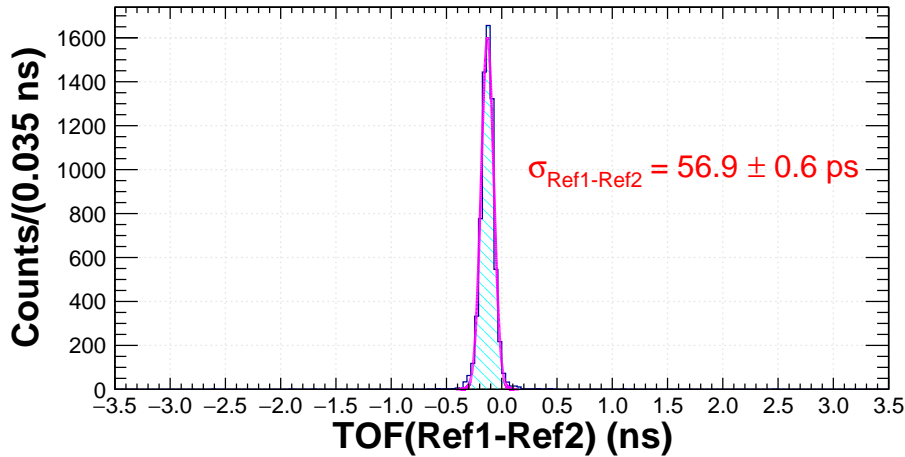
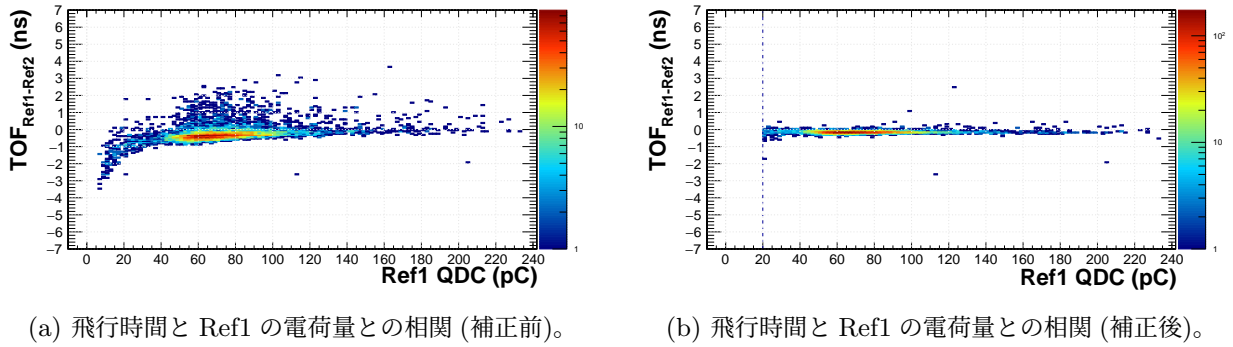


図 3.73: Ref1 時間分解能導出の際の解析。Ref1-Ref2 間の飛行時間と Ref1、Ref2 の QDC との相関を作成し、これにタイムウォークコレクションを行った。(a): 補正前の TOF-Ref1 の QDC 相関。(b): 補正後の TOF-Ref1 の QDC 相関。(c): 補正後の飛行時間分布。

### TOT を用いる場合

Ref2 の波高情報として TOT を用いた場合には飛行時間と Ref1 の QDC、Ref2 の TOT とで先程と同様に 2 次元相関を構成し、波高情報を基にイベント選択を行った。ここで TOT はコンパレータの出力から得られる leading の TDC 情報と trailing の TDC 情報の差分として構成した。2 次元分布を射影することで QDC 及び TOT の 1 次元分布を作成し、ピークに対応する値を取得した。TOT を解析で用いる場合にはオフセット値を  $Ofs = 400 \text{ ch.} / (35 \text{ ps}) = 14 \text{ ns}$  として、ピーク周囲の事象に対し、

$$|TOT_{\text{Ref2}} - (Peak_{\text{Ref2}} - Ofs)| < 0.05 \times (Peak_{\text{Ref2}} - Ofs) \quad (3.25)$$

の条件を満たす事象を選択した。ここでは飛行時間は  $TOF1$  と  $TOF2$  の 2 つを用いて解析を行った。

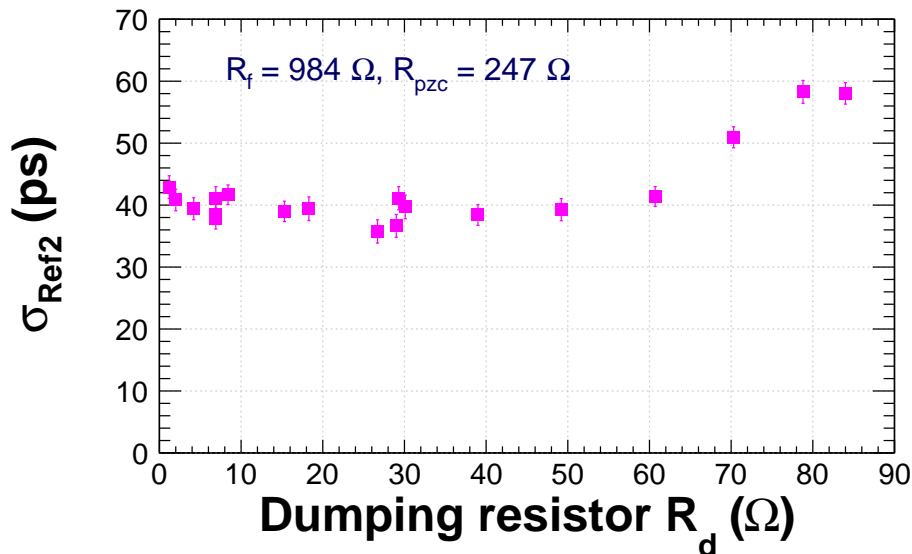


図 3.74: 時間分解能に対するダンピング抵抗  $R_d$  の依存性。MPPC の印加電圧は  $V_{bias} = 58.8 \text{ V}$ 、ポールゼロ抵抗は  $R_{pzc} = 246 \Omega$ 、フィードバック抵抗は  $R_f = 984 \Omega$  で固定とした。 $R_d \sim 50 \Omega$  付近までは依存性が見られないのに対して、 $R_d > 60 \Omega$  の範囲で急激な悪化がみられることがわかる。

### 3.8.5 結果

#### 3.8.5.1 回路パラメータの依存性

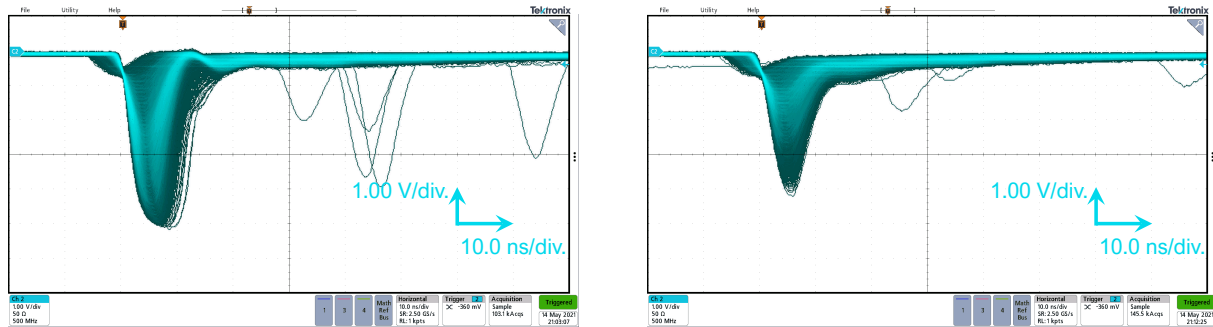
ここでは、アンプ回路に配された各種部品のうちダンピング抵抗  $R_d$ 、ポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  及びフィードバック抵抗  $R_f$  のそれぞれが実際の出力に対してどのように寄与するのかという点に関して調査を行った。この時、ある回路の可変抵抗の値のみを変更し、そのほかの部分については変更は行わず、固定した値で測定を行った。

##### ◇ ダンピング抵抗 $R_d$

まず、ダンピング抵抗  $R_d$  について述べる。ここでは  $R_{pzc} = 247 \Omega$ 、 $R_f = 984 \Omega$  の設定で測定を行った。この時の時間分解能の結果を図 3.74 に示した。この時、 $R_d \leq 50 \Omega$  の範囲では測定点毎のバラツキはみられるものの、安定した時間分解能を示している。その一方で、 $R_d > 60 \Omega$  では時間分解能が悪化する傾向がみられた。では、この測定における信号の応答を比較してみる。図 3.75 に  $R_d = 26.7, 84.0 \Omega$  の 2 通りの場合の結果を示した。 $R_d = 26.7 \Omega$  の場合と比較して  $R_d = 84.0 \Omega$  の場合では、信号の波高が  $\sim 20\%$  程低くなっていることに加え、信号の立ち上がり部分の形がやや緩やかになって見えていることがわかる。この波形の立上りの形状の変化が時間分解能の変化に関与したと考えられる。一般に理想オペアンプを考える時、そのゲイン  $G$  は、負帰還部分のインピーダンス  $Z_1$  とオペアンプの前段部分のインピーダンス  $Z_0$  の比  $\frac{Z_1}{Z_0}$  として考えることができる。この時、 $R_d$  は前段部分のインピーダンス  $Z_0$  に含まれる。また  $Z_0$  は、 $C_d$  や  $R_{pzc}$  といった微分の要素の寄与との合成インピーダンスである。このことから、 $R_d$  が増大することはゲイン  $G$  に対して微分の寄与を相対的に弱めゲインの絶対値を減少させるような効果があると予想できる。定性的ではあるが、 $R_d$  に対する応答の変化はこのような形で理解ができる。また、このことから、 $R_d < 50 \Omega$  の範囲を選択するのが好ましいと考えられる。

##### ◇ ポールゼロ抵抗 $R_{pzc}$

次に、ポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  について述べる。ここでは  $R_d$  及び  $R_f$  に関して 2 通りの設定で測定を行った。表 3.10 にその値の組み合わせを示した。この時の時間分解能は図 3.76 のようになった。Setting1 に



(a)  $R_d = 26.7 \Omega$  の場合。

(b)  $R_d = 84.0 \Omega$  の場合。

図 3.75: 異なる  $R_d$  の値毎の信号の比較。(a):  $R_d = 26.7 \Omega$  の場合。(b):  $R_d = 84.0 \Omega$  の場合。いずれもポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  及びフィードバック抵抗  $R_f$  は固定としている。

表 3.10: ポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  の依存性の調査を行った際の  $R_d$  及び  $R_f$  の組合せ。双方の設定で  $R_d$  は同程度の値に設定し、 $R_f$  を変更した。

| 抵抗 ( $\Omega$ ) | pzc setting1 | pzc setting2 |
|-----------------|--------------|--------------|
| $R_d$           | 30.1         | 30.4         |
| $R_f$           | 984          | 501          |

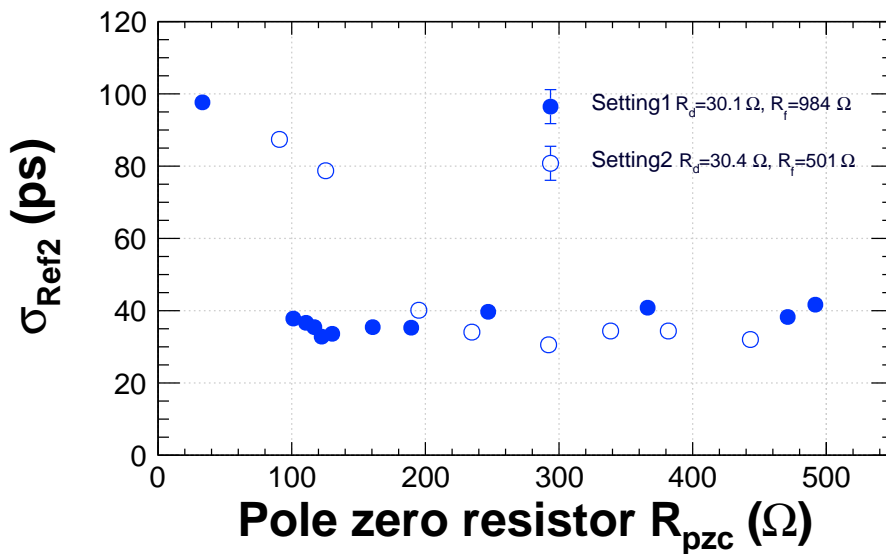


図 3.76: 時間分解能に対する  $R_{pzc}$  の依存性。横軸は  $R_{pzc}$ 、縦軸は Ref1 の寄与を差し引いた Ref2 の固有時間分解能  $\sigma_{Ref2}$  である。表 3.10 中の setting1 に対応する値をマークで、setting2 に対応するデータを白抜きマークでそれぞれ示した。

においては  $R_{pzc} < 100 \Omega$  の領域で急激な分解能の悪化がみられた。一方で、 $100 \Omega$  よりも大きな領域では安定した分解能を示し、大きな相関は見られない。一方、Setting2 では  $R_{pzc} < 200 \Omega$  以下の領域で急激な分解能の悪化がみられ、やはり、 $R_{pzc}$  の小さい領域において分解能の悪化する傾向を示す。200  $\Omega$  では強い相関はなくなることがわかる。この時の Setting1 での設定から  $R_{pzc} = 33.2, 160.6, 366.3, 491.8 \Omega$  の 4 通りの波形を抜粋して図 3.77 に示した。 $R_{pzc}$  の値を大きくしていく場合、 $R_d$  の場合とは異なり、

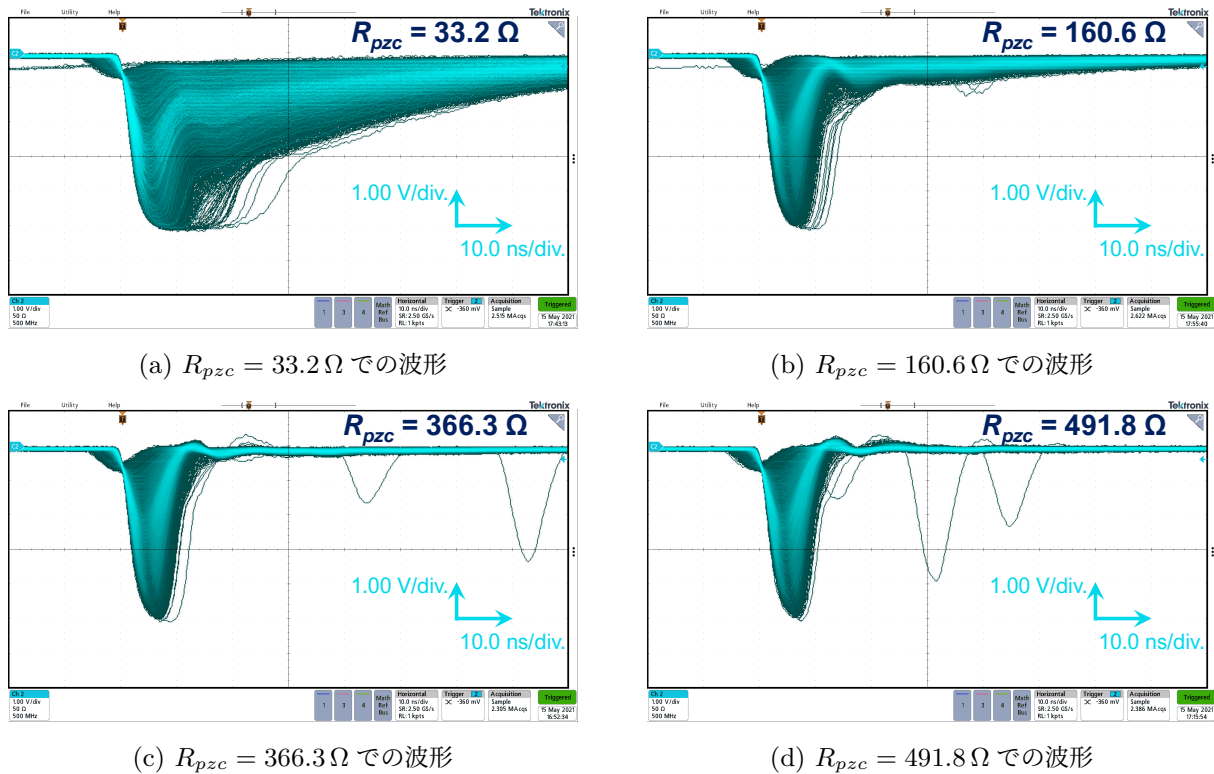


図 3.77:  $R_{pzc}$  依存性測定のうち pzc setting1 での  $R_{pzc}$  毎の波形の比較。

立上りの形状は大きくは変わらないことがわかる。その一方で、信号の幅が小さくなり、信号の立上りから  $\sim 15$  ns 付近でのテール的な成分が減少していくことがわかる。特に  $R_{pzc} = 366.3 \Omega$  では、ややリングング的な成分と共にテール成分が見えるものの、他の3つの設定と比較するとテール成分がおおよそ消えていることがわかる。更に抵抗値を上げて  $491.8 \Omega$  とした場合では、信号の立上りから  $\sim 10 - 30$  ns 付近にオーバーシュートが現れる傾向があるということがわかる。したがって、pzc setting1 の構成では  $R_{pzc} \sim 350 - 400 \Omega$  の抵抗値に取ることによって、テール成分やオーバーシュートをよく制御できることがわかった。

では、 $R_{pzc}$  に対する応答に違いのあった pzc setting2 に着目するとき、波形という観点でどのような影響があるのかを見る。先ほどの  $R_{pzc} = 366.3 \Omega$  に近い抵抗値の値として setting2 の測定点から  $R_{pzc} = 381.8 \Omega$  の場合を見る。この時の波形を図 3.78 に示した。setting1 と比較して信号がより太くなっていることがわかる。立上りより  $\sim 10 - 30$  ns の領域に見られたリングング的な挙動も見られないことがわかる。このことから、信号全体や立下り領域での挙動にはフィードバック抵抗の寄与も大きい可能性が考えられる。

#### ◇ フィードバック抵抗 $R_f$

次にフィードバック抵抗  $R_f$  について調査した。ここでは  $R_d = 30.1 \Omega$ 、 $R_{pzc} = 201.5 \Omega$  の設定で測定を行った。その結果を図 3.79 に示した。この測定は  $214.3 \Omega$  から  $1421 \Omega$  の範囲で行ったが、この範囲では時間分解能に対しては強い相関は見られないということがわかった。一方、いくつかの抵抗値の場合の波形を図 3.80 に示した。最も抵抗値を低く設定した  $R_f = 214.3 \Omega$  の場合には信号幅が  $\sim 20$  ns であるが、抵抗値を高く取ることによってその幅が細くなる傾向があることがわかる。

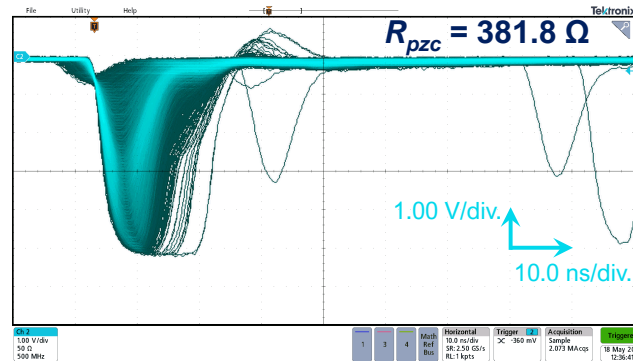


図 3.78:  $R_{pzc}$  依存性測定 pzc setting2 のうち  $R_{pzc} = 381.8 \Omega$  での波形。

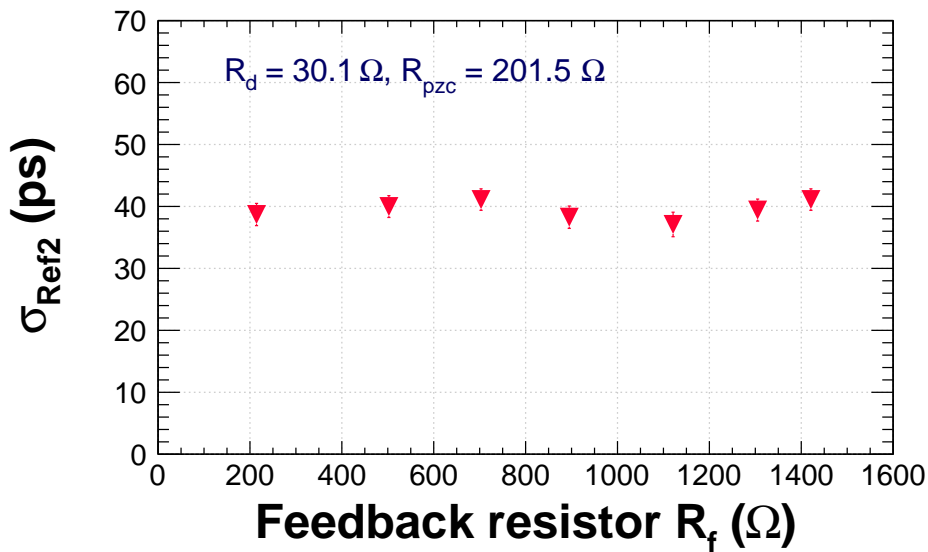


図 3.79: 時間分解能に対するフィードバック抵抗  $R_f$  依存性。測定を行ったいずれの抵抗値においても  $\sigma \sim 40$  ps を示しており、強い依存性は見られない。

### 3.8.5.2 Time-over-threshold(TOT) を用いた場合の時間分解能

ここまでは、波高情報として TOT を用いていた場合の結果であった。ここでは Ref2 の情報として TOT を利用した場合を見る。  $R_d = 30.1 \Omega$ 、  $R_{pzc} = 116.9 \Omega$ 、  $R_f = 984 \Omega$  とした場合の結果を述べる。TOT の情報を用いてイベント選択を行ったのちの  $TOF2$  における時間分解能及びそこから算出された Ref2 の時間分解能は表 3.11 のようになった。比較として同じランのデータに対して Ref2 の QDC を用いてイベント選択を施したのちの  $TOF1$  の分解能を示した。  $TOF2$  と TOT のコンパレータ経由の時間情報によって得られる結果では、大幅に時間分解能が悪化していることがわかる。この時の  $TOF2$  と TOT との相関及び  $TOF2$  と Ref2 の QDC との相関は図 3.81 のようになった。QDC、TOT 共にタイムウォークに起因する分布の傾斜が強く現れていることがわかる。加えて、Ref2 QDC  $\sim 2000$  ch. 以降のような波高の大きな事象に対応するとみなせる領域での応答に QDC と TOT とで違いがあるということもわかる。これについて、TOT と QDC との相関は図 3.82 のようになった。TOT-QDC 相関の傾斜が次第に緩やかになっていく傾向がみられる。このことから、波高が大きくなることに伴って TOT がその変化に対する感度を失っていく傾向があると解釈できる。こうした応答の違いが  $TOF2$  との相関や時間分解能の悪化に影響したと予想される。これを受けて、より TOT の測定に適した回路構成の検討を

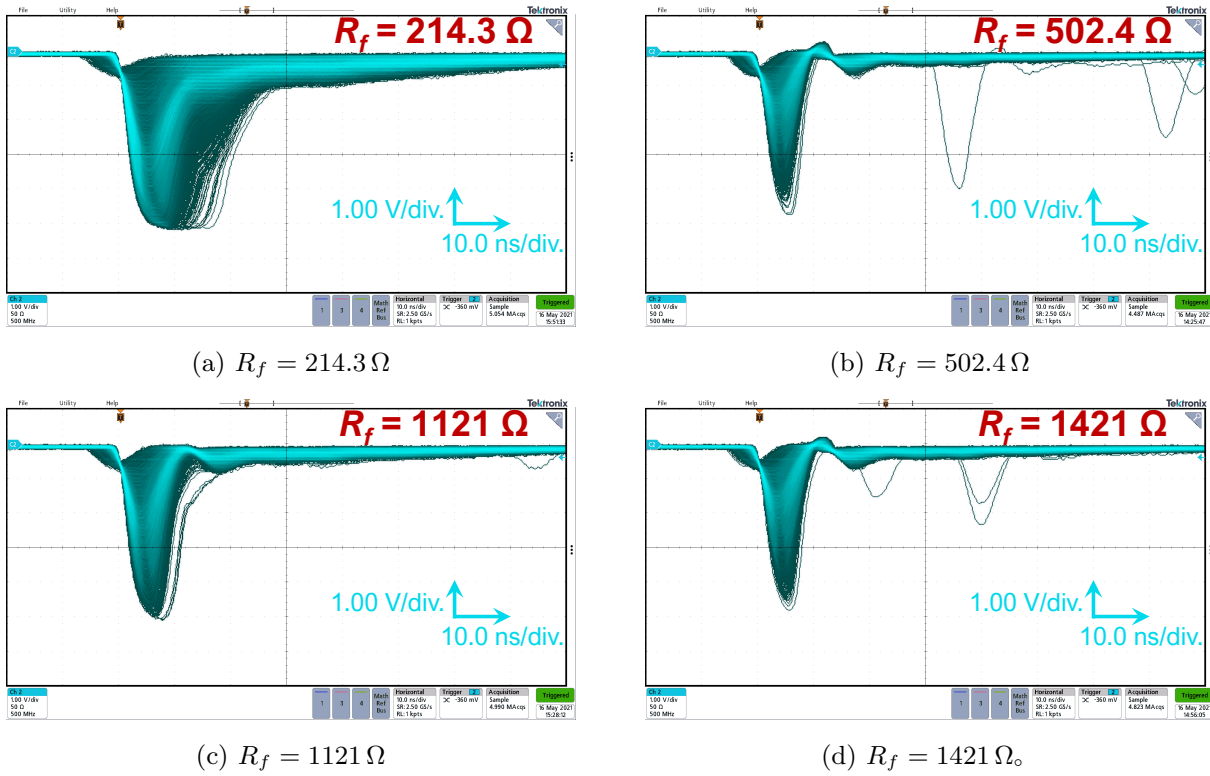


図 3.80: フィードバック抵抗  $R_f$  の値に対する波形。

表 3.11:  $TOF2$  と  $TOT$  によって得られた時間分解能の一例。各可変抵抗の設定は本文中に示した。

| $TOF2$ 分解能: $\sigma_{TOF2}$ (ps) | Ref2 固有時間分解能 $\sigma_{Ref2}$ (ps) | $TOF1$ 時間分解能 $\sigma_{TOF1}$ (ps) |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $104.0 \pm 8.7$                  | $95.9 \pm 9.4$                    | $35.4 \pm 1.9$                    |

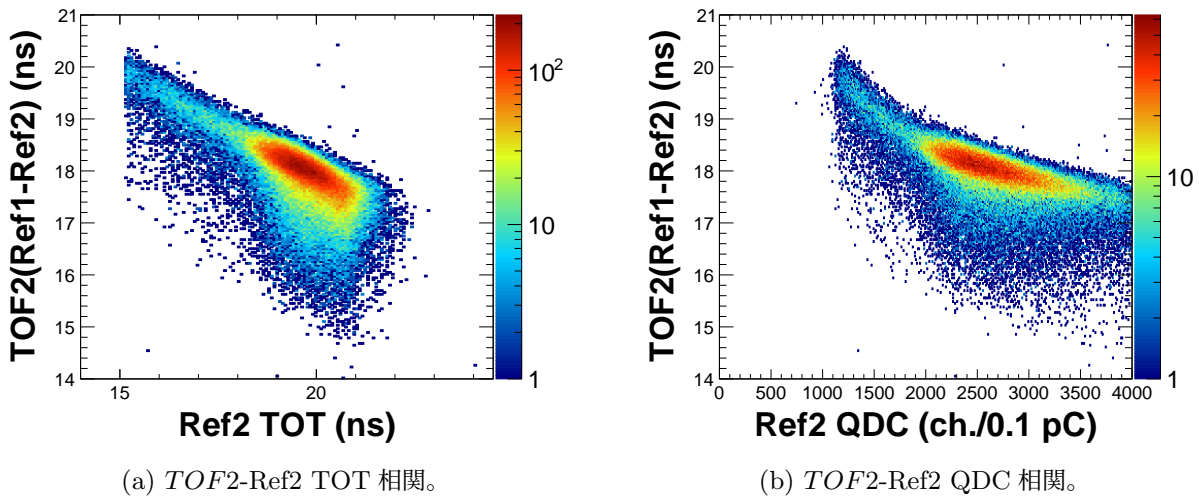


図 3.81:  $TOF2$  に対する  $TOT$  及び  $QDC$  との相関。各可変抵抗の設定は本文中に示した。 $QDC$  と  $TOT$  の対応が線形ではないことが見て取れる。

行った。次節ではこれに関して述べる。

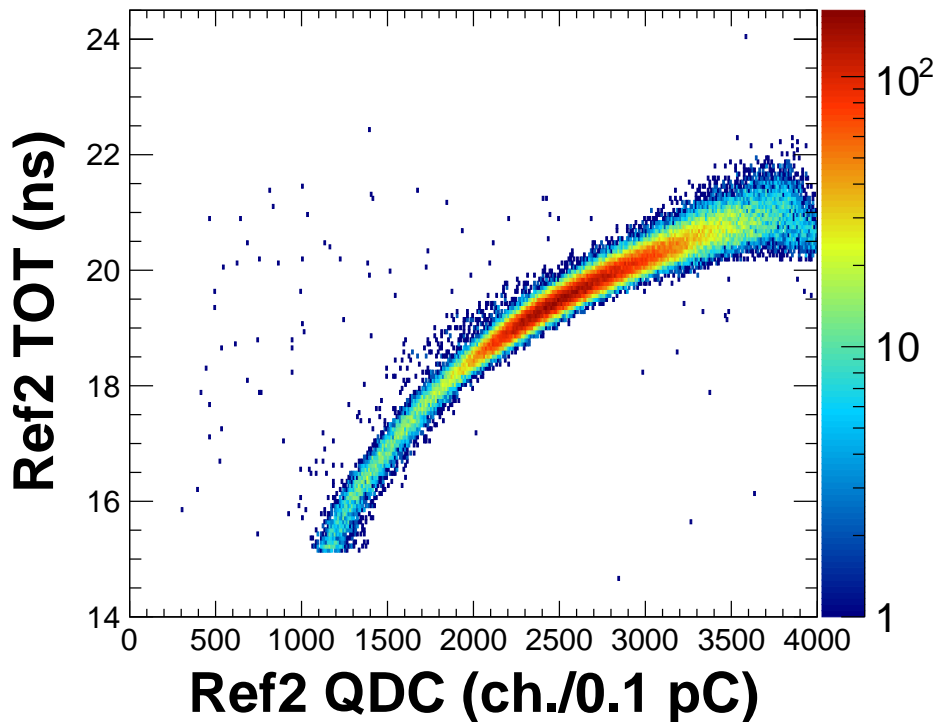


図 3.82: QDC と TOT との相関。各可変抵抗の設定は本文中に示した。

### 3.8.5.3 積分回路の検討

前節で、電荷量の大きな領域に対しては TOT がその変化に対して感度が弱まるということを見た。このことは定性的には、微分回路としての作用が強く、整形後の波形を細く鋭くしすぎていることに波高に対しての信号幅の変化が、小さくなっているためであると予想される。これに対して、オペアンプ後段に積分回路を導入することを試みた。これによって、波形の立上り部分の応答が緩やかにし、TOT-QDC の相関や TOF に対する応答を改善できるかを検討した。一方、これにより立上りが鈍くなることから、時間分解能への影響が予想される。これらの影響に関して調査を行った。

これに伴って、Ref2 で用いるアンプ回路を図 3.83 のように変更した。一般に積分回路を特徴づける量として、時定数  $\tau$  がある。これは積分回路を構成するキャパシタ  $C_{int}$  と抵抗  $R_{int}$  をもちいて  $\tau = C_{int}R_{int}$  と記述される。ここでは、前段の各可変抵抗の値を  $R_d = 7.1\Omega$ ,  $R_{pzc} = 241.3\Omega$ ,  $R_f = 532.3\Omega$  に設定し、 $C_{int} = 470\text{pF}$ ,  $R_{int} = 10\Omega$  とした積分回路を実装した場合を示す。即ち個々での設定では  $\tau = 4.7\text{ns}$  である。前述の設定とは  $R_f$  などの値が異なっているが、3.8.5.1 節にて述べた、各抵抗による波形の変化や時間分解能に対する依存性より、積分回路のない場合には同等の動作が予想される。この設定でのアナログ信号の波形は図 3.84 のようになった。波形の立上り部分の形状がなだらかになっており、これまでと大きく変化していることがわかる。加えて、信号幅もおおよそ  $\sim 25\text{ps}$  と長くなっていることがわかる。この時、 $TOF2$  の時間分解能は  $\sigma_{TOF2} = 96.2 \pm 3.4\text{ps}$  であった。また  $TOF1$  の分解能は  $\sigma_{TOF1} = 94.9 \pm 1.4\text{ps}$  であった。 $TOF2$  に対する分解能は前述の値と比較した時、互いに統計誤差の範囲内であり大きな改善があるとは言えない。また、信号の立上りを鈍らせることになるため予想通りではあるものの、 $TOF1$  分解能も大幅に悪化している。この場合での Ref2 の QDC-TOT 相関は図 3.85 のようであった。信号幅が拡大したことから、TOT の値が分布する幅は拡大したものの、QDC の値の範囲によって対応が一樣ではないという点では変化は見られない。このような結果を受けて、積分回路の組み込みは行わないこととした。



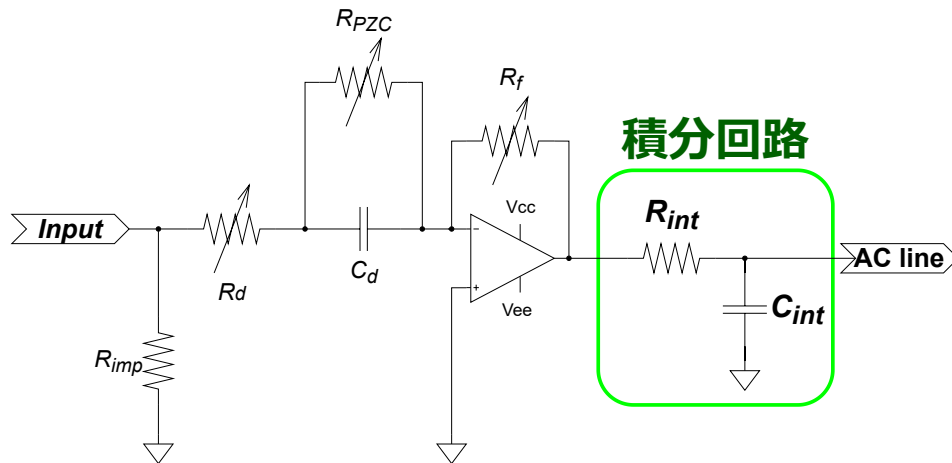


図 3.83: 積分回路を導入した際の回路図。オペアンプ出力ラインと AC ラインとの間に積分回路を実装した。

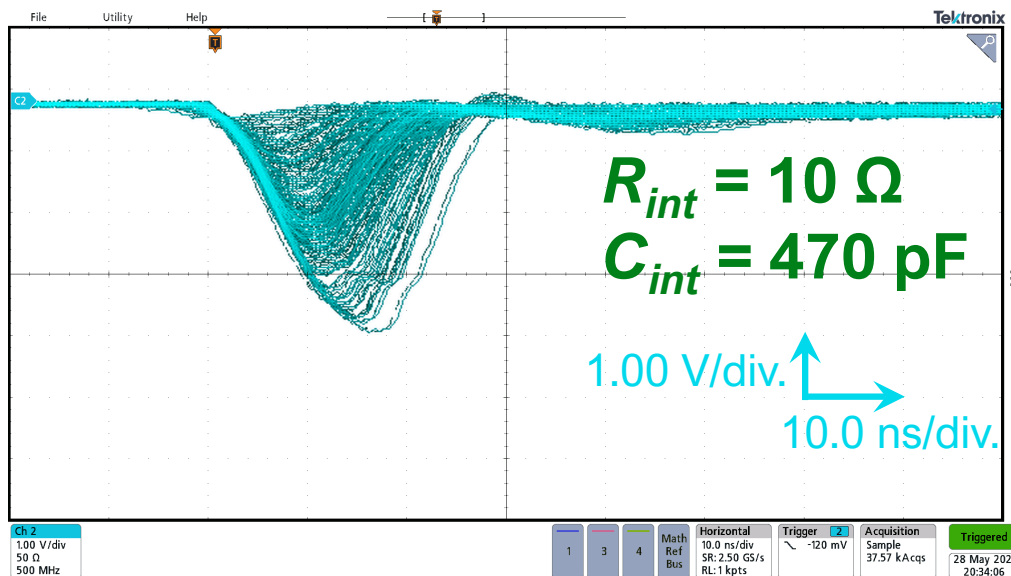


図 3.84: 積分回路を導入した際の実際の波形。信号の幅が  $\sim 20$  ns と広くなり、立上りも緩やかになっていることがわかる。この時の回路の設定は本文中に示した。

### 3.8.5.4 ショットキーバリアードダイオードを用いた場合の時間分解能

これまで見たように、波形の立下り部分にリングングと共に  $\sim$  数十 ns のテール成分があった。ショットキーバリアードダイオードをオペアンプの出力に対して直列に導入することによって、信号のテール部分を抑制する効果が期待される。その寄与に関して調査を行った。

本測定ではショットキーバリアードダイオードとして ST マイクロエレクトロニクス製の BAT54[69]、Infineon 社製の BAT63[70] の 2 種を検討した。両者の性能を表 3.12 に示した。BAT63 は BAT54 に対して順方向電力損失が小さいという特徴がある。一方、BAT54 は最大逆方向電圧が 40 V と大きい。これら 2 種の順方向電圧-順方向電流特性を 3.86 に示した。但し、双方の性能表に記載された特性曲線を筆者が読み取りプロットし直したものである。BAT54 に関しては性能表情で順方向電流 0 – 1000 mA の範囲での特性曲線が示されているが、比較対象となる BAT63 のデータは 0 – 100 mA の範囲のみであるため、順方向電流の範囲を 0 – 100 mA の範囲で限定し示した。BAT63 の曲線上で順方向電圧 300 – 500 mV

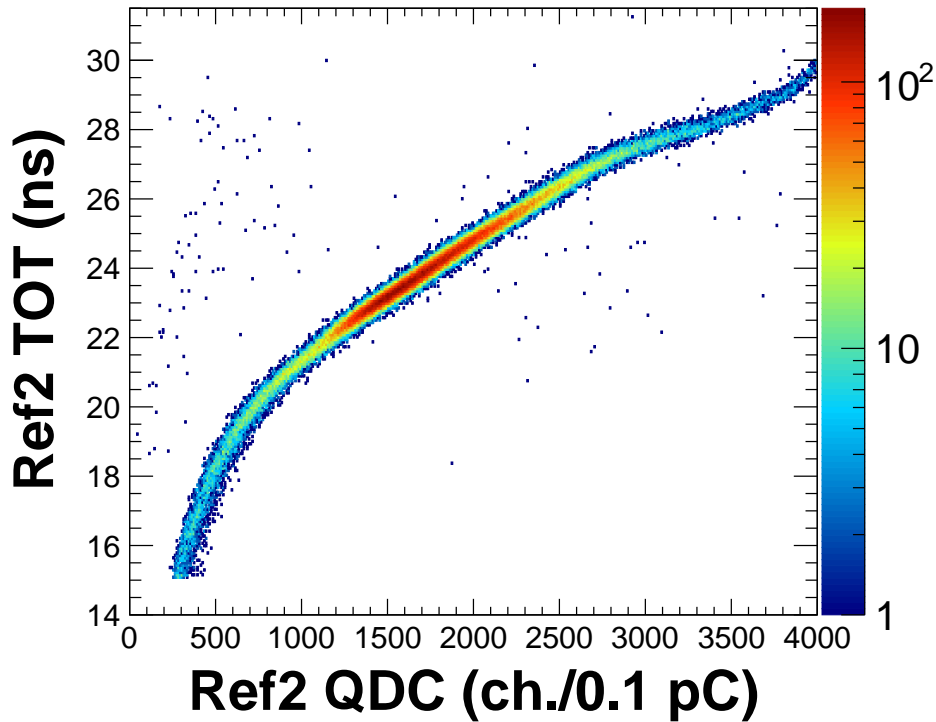


図 3.85: 積分回路を導入した際の QDC-TOT 相関。QDC > 3000 ch. の高い領域での変化に対しても TOT が応答しているものの、依然として、QDC の値の大きい領域で相関の傾きが緩やかになっていく傾向がみられる。この時の回路の設定は本文中に示した。

付近での挙動と、BAT54 の曲線上で順方向電圧 400 – 700 mV 付近での挙動とを比較すると、BAT63 の方がより大きい傾きを持つことがわかる。これを定量的に評価するため、両者の特性曲線が直線的な挙動を示すとみなせる順方向電圧 30 – 90 mA 範囲の値に対し一次関数をフィットし、およその傾きを概算した。なお、フィットに当たっては各点で読み取った値に対して 5% の誤差を付した。それぞれの種類について

$$\text{BAT63} : I_F \text{ (mA)} = (0.437 \pm 0.002) V_F - (116.1 \pm 0.7) \text{ mA} \quad (3.26)$$

$$\text{BAT54} : I_F \text{ (mA)} = (0.285 \pm 0.003) V_F - (103.5 \pm 1.5) \text{ mA} \quad (3.27)$$

であった。フィット結果は図 3.86 中に破線として示した。得られた直線の式の係数から、横軸との交点即ち I-V 特性において立上りを与える電圧の値  $V_0$  を見積もった値は以下ようになった。

$$\text{BAT63} : V_0 = 266 \pm 2 \simeq 2.7 \times 10^2 \text{ mV} \quad (3.28)$$

$$\text{BAT54} : V_0 = 363 \pm 11 \simeq 3.6 \times 10^2 \text{ mV} \quad (3.29)$$

BAT63 の方がより低い順電圧での動作が可能であると期待される。

ダイオードの検討を実施した際の回路構成を表 3.13 に示した。ここで抵抗値をおおよその値で記載したのは、測定に際して比較のためにダイオードの有無以外が同一の構成となるアンプ基板を用意し、それぞれで可変抵抗の調整を行ったためである。オペアンプ後段にそれぞれ実装した場合の信号を図 3.87 に示した。比較として、ダイオードを実装せずにパッド部分に  $0 \Omega$  のチップ抵抗を配した場合のものを示した。図 3.87(a) の BAT63 を実装した場合に着目する。ダイオードを実装しない (c) の場合と比較して ~ 20% の波高の低下がみられるものの、その一方で立下り部分のテール成分が減少していることが見て

表 3.12: BAT63 及び BAT54 の性能 [69, 70]。それぞれの性能表に記載された値を示した。但し、順方向電圧  $V_F$  については順方向電流  $I_F = 1 \text{ mA}$ 、動作温度  $T = 25^\circ\text{C}$  時の最大値である。

|                    |      | BAT63 | BAT54 |
|--------------------|------|-------|-------|
| 最大順方向電流 $I_{Fmax}$ | (mA) | 100   | 300   |
| 順方向電圧 $V_F$        | (mV) | 300   | 320   |
| 最大逆方向電圧 $V_{RRM}$  | (V)  | 3     | 40    |
| 端子間容量 $C_T$        | (pF) | 0.65  | 7     |

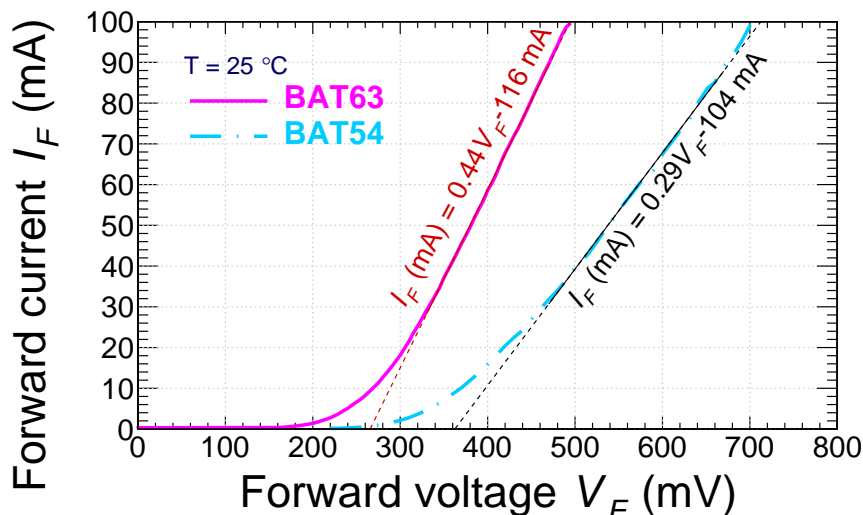


図 3.86: BAT63 及び BAT54 の順方向電圧 ( $V_F$ )-順方向電流 ( $I_F$ ) 特性 [69, 70]。桃色の実線が BAT63、水色の一点鎖線が BAT54 の曲線である。動作電圧  $25^\circ\text{C}$  の場合を示した。両者の性能表に記載された特性曲線を筆者が読み取りプロットしたものである。

表 3.13: ショットキーバリアーダイオードの検討を行った際に用いた回路の構成。各要素のラベルは図 3.59 中に示したものに従う。

| 部品ラベル     | (単位)         |             |
|-----------|--------------|-------------|
| $R_{imp}$ | ( $\Omega$ ) | 20          |
| $R_d$     | ( $\Omega$ ) | 30 – 33     |
| $C_d$     | (pF)         | 100         |
| $R_{pzc}$ | ( $\Omega$ ) | 200 – 203   |
| $R_f$     | ( $\Omega$ ) | 1000 – 1050 |

取れる。一方、図 3.87(b) の BAT54 を配した場合を見ると、こちらではテール成分がほぼなくなっているように見える。しかしながら、正方向に主たる波高の  $\sim 1/3$  程度の波高でオーバーシュートを起こしてしまっている。また、得られる波高は (a) の BAT63 の場合よりも更に減少し、(c) のダイオード無しの場合と比較して半分以下になってしまっている。

次に、先に述べたショットキーバリアーダイオード 2 種のうち BAT63 に着目して、テール成分をどの程度抑制出来ているのかを定量的に評価する。図 3.88 に BAT63 を実装した場合の波形とダイオードを

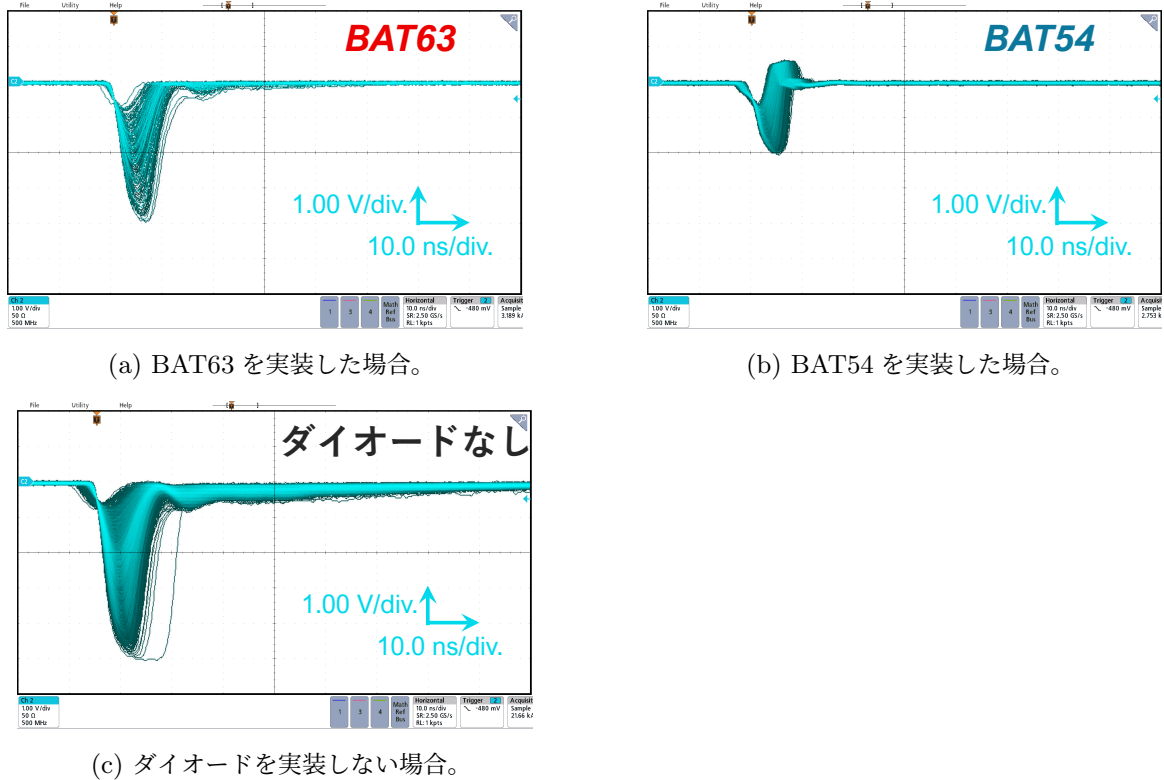


図 3.87: ショットキーバリアーダイオードを実装した場合の波形の比較。(a): BAT63 を実装した場合。(b): BAT54 を実装した場合。(c): ダイオードを実装しない場合。回路構成は表 3.13 にて示した。(b)の BAT63 を実装した場合には波高の低下はみられるものの、(c) のダイオードを実装しない場合と比較しテール成分が減少していることがわかる。

実装しない微分回路の場合の波形を示した。これはオシロスコープで取得した波形データをプロットしたものである。赤の実線が BAT63 を載せた場合、青色の破線がダイオードを実装しない場合である。ここでは、この波形を2つの領域に分けて考える。 $-1.5\text{ ns}$  から  $13.0\text{ ns}$  までの範囲を *Signal*、 $+13.0\text{ ns}$  から  $+100.0\text{ ns}$  の領域を *Tail* とする。それぞれの領域での波形を時間で積分し、その相対比を比較する。この時の波形は特性インピーダンスが  $50\ \Omega$  であるから、各時刻での電圧値を電流に読み替え、積分結果を電荷量として比較する。その計算結果を表 3.14 に示した。また、図 3.88 に示した数値はそれぞれの波形での *Tail/Signal* の面積比である。微分回路のみの場合、 $0.754$  であったのに対して、BAT63 実装時では  $0.180$  であった。このことから、積分した電荷量の比として  $\sim 1/4$  にテール成分を抑制することが可能であると考えられる。

この場合の時間分解能について述べる。BAT63 を実装した場合と微分回路のみの場合で比較する。 $TOF1$ 、 $TOF2$  それぞれの時間分解能  $\sigma_{TOF1}$ 、 $\sigma_{TOF2}$  及び  $\sigma_{TOF2}$  から算出した Ref2 の固有時間分解能  $\sigma_{\text{Ref2}}(TOF2)$  は表 3.15 のようになった。統計誤差が大きいので、一概に断言は出来ないが、BAT63 を実装した場合に微分回路のみの構成の場合と比較して TOF2(TOT 測定でのリーディングを用いて構成)の時間分解能が改善する可能性があると考えられる。

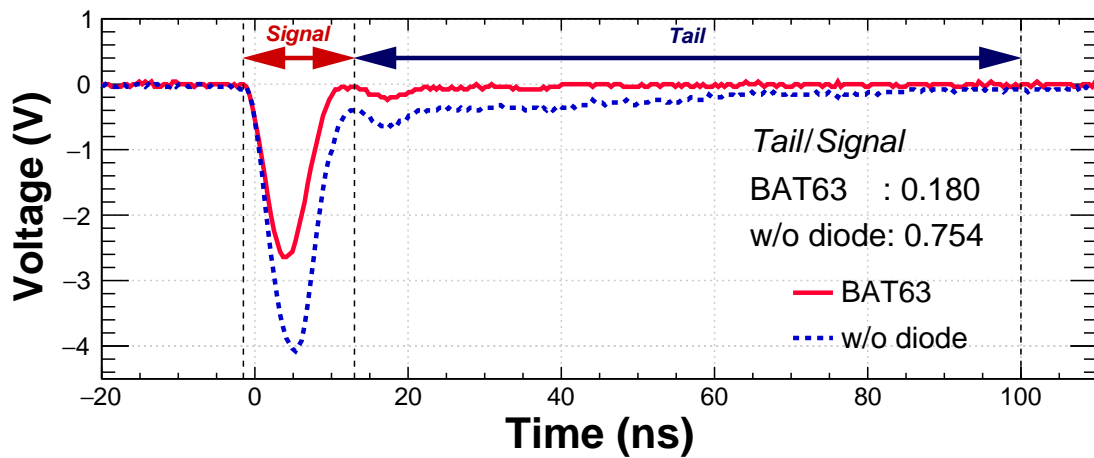


図 3.88: BAT63 の有無での *Signal* 対 *Tail* の比較。赤の実線が BAT63 を実装した場合の波形、青の破線がダイオードを実装しない場合の波形である。-1.5 ns から 13.0 ns までの範囲を *Signal*、+13.0 ns から +100.0 ns の領域を *Tail* と定義した。

表 3.14: BAT63 の有無での *Signal* 及び *Tail* 領域での積分結果の比較。但し、積分量は電荷に換算している。

| 回路構成             | <i>Signal</i><br>(pC) | <i>Tail</i><br>(pC) | <i>Tail/Signal</i><br>(a.u.) |
|------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|
| BAT63            | 331                   | 55.0                | 0.180                        |
| ダイオード無し (微分回路のみ) | 583                   | 440                 | 0.754                        |

表 3.15: BAT63 を実装した場合と微分回路のみの場合での時間分解能の比較。

| 回路構成             | $\sigma_{TOF1}$<br>(ps) | $\sigma_{TOF2}$<br>(ps) | $\sigma_{Ref2} (TOF2)$<br>(ps) |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| BAT63 実装         | 91.2 ± 2.4              | 128.4 ± 17.8            | 121.9 ± 18.7                   |
| ダイオード無し (微分回路のみ) | 59.3 ± 1.3              | 132.0 ± 9.6             | 125.7 ± 10.1                   |

### 3.9 $\beta$ 線源を用いた MPPC 読み出し方法・シンチレータサイズ最適化のまとめ

ここでは、本章の測定によって得られた結果をまとめる。新飛行時間測定器の開発に向けては検出器を構成する基本要素たるプラスチックシンチレータ、MPPC、読み出し回路などがどのように時間分解能に影響するかを知る必要がある。これに対する調査のため、MPPC とプラスチックシンチレータを組み合わせた試作機を製作し、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$ 線源を用いたデータ収集を行った。それによって、以下に挙げる結果を得た。

#### MPPC 読み出し手法

本章では、複数個の MPPC をシンチレータに取り付ける構成を検討した。その際、取り付ける個数及びそれらを読み出す際の接続方法について検討した。MPPC の個数に関して、1、2、4 個の構成で測定・比較を行い、同じサイズのシンチレータに対しては個数を多くした場合の方がより良い時間分解能が得られるという結果を得た。また、接続方法に関しては直列接続と並列接続の 2 つを候補として比較を行い、直列接続を用いる場合の方が良い時間分解能を達成するという結果を得た。特に、 $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$  のサイズのプラスチックシンチレータ EJ-230 に反射材としてテフロンシートを巻いたものに MPPC S14160-3015PS を 4 個直列接続の構成で取り付けた場合、 $\sigma_{\text{detector}} = 81.0 \pm 0.3 \text{ ps}$  の時間分解能が得られることがわかった。

#### シンチレータ部分

シンチレータに関する部分では、大きく分けて形状、シンチレータの種類、表面に巻く反射材の 3 要素を検討した。とりわけ形状に関しては長さ・厚さ・幅の 3 辺それぞれについての依存性を検討した。

##### シンチレータ形状 (長さ・厚さ・幅) の検討

長さの依存性に関しての測定では、300 mm から 450 mm の範囲で検討を行い、幅 22 mm・厚さ 5 mm のシンチレータ EJ-230 と MPPCS14160-3015PS 4 個直列接続の構成で検討を行った結果、 $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時で  $\sigma_{\text{detector}} = 108.8 \pm 0.4 \text{ ps}$  という結果を得た。300 mm と比較すると悪化する傾向が見られたものの、この長さでも要求性能を満たすことがわかり、この範囲の長さのシンチレータも採用できる可能性を確認した。

同様にシンチレータの厚さに関して幅 22 mm・長さ 450 mm の条件で 3, 4, 5 mm の 3 通りに関して検討を行った。3 mm 厚のシンチレータでは 4, 5 mm の場合と比較して時間分解能が悪化する傾向があることがわかった。これは物質厚が薄くなることによるエネルギー損失量の減少もとい発生する光量の変化に起因するものであると予想される。これを受けてシンチレータの厚さとして 4 – 5 mm を候補とすることとした。

シンチレータの幅に関しては 11, 22, 33, 44 mm の場合を検討した。その結果、MPPC 個数や接続方法、動作電圧が同一の場合には幅の大きなシンチレータで時間分解能が悪化する傾向を確認した。しかしながら、取り付ける MPPC 個数を増やした場合には幅の細いシンチレータを用いる場合とおよそ同程度の性能が期待されることもわかった。特に  $5^T \times 44^W \times 450^L \text{ mm}^3$  のシンチレータ EJ-230 と MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時という条件で

$\sigma_{\text{detector}} = 145.8 \pm 0.5 \text{ ps}$  という測定結果を得た。この結果から  $W \geq 40 \text{ mm}$  のような幅の大きなシンチレータも採用しうることを確認した。

### シンチレータの種類

EJ-230、EJ-200、EJ-204、EJ-212、EJ-228 と EJ-232 の計 6 種のシンチレータについて  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  (EJ-212 のみ 3 mm 厚) の同一形状の条件の元で調査し、プラスチックシンチレータを特徴づけるパラメータの寄与について検討した。その結果、EJ-204、EJ-228 の 2 種が特に良い時間分解能を示すことがわかった。さらに、各種シンチレータの性能値と電荷量分布の情報から、シンチレータとしての発光量と時間応答の高速さが関与していると予想された。特に、いずれかのみが突出するのではなく互いのバランスが大きく影響する可能性があるかと予想された。尚、いずれのシンチレータを用いた場合であっても十分な性能が得られていることを確認した。

### 反射材

0.1 mm 厚テフロンシート、アルミナイズドマイラー、ESR に加え反射材を用いない場合の 4 通りで検討を行った。EJ-230  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ 、MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続、 $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時の条件下でアルミナイズドマイラーが最も良い時間分解能を示すという結果を得た。このことから、反射材としてはアルミナイズドマイラーを用いることが良いと考えられた。

### 読み出し回路の最適化

MPPC の読み出し手法・シンチレータサイズの最適化と並行して、読み出しに用いる反転微分増幅回路の構成の検討を行った。

まず、回路に実装する抵抗の値を変更した場合の時間分解能への影響を調査した。ダンピング抵抗  $R_d$  に関して、 $R_d < 90 \Omega$  の範囲で調査を行った。 $R_d < 50 \Omega$  の範囲で安定した時間分解能を示すが、 $R_d > 60 \Omega$  の範囲では時間分解能が悪化するという結果を得た。ポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  については  $R_d$  及びフィードバック抵抗  $R_f$  の値について 2 通りの場合を調査した。いずれの場合でも  $R_{pzc} > 200 \Omega$  では安定した時間分解能を示すということがわかった。また、様々な  $R_{pzc}$  での波形の比較から  $R_{pzc} \sim 350 - 400 \Omega$  に設定した場合に、信号に見られたオーバーシュートをよく制御できるというもわかった。一方で  $R_f$  を変更した場合には波形は大きく変化するものの時間分解能の面では強い依存性は見られなかった。

続いて、波高情報取得の方法として TOT を用いることの検討を行った。TOT の情報を用いて時間分解能の評価を行ったところ、同じデータをこれまで用いていた QDC の情報を利用して解析した場合と比較して大幅に時間分解能が悪化することがわかった。また、TOT と QDC との相関から波高の大きい事象に対しては TOT は感度が弱くなる傾向があることがわかった。この対策としてオペアンプ出力ラインに積分回路を実装することを検討したが、TOT-QDC 相関には大きな変化はなかった。

オペアンプ出力ラインにショットキーバリアダイオードを実装することによる信号のテール成分の低減を検討した。BAT54、BAT63 の 2 種類とともにダイオードを実装しない従来と同様の構成の場合の 3 通りで比較を行った。観測された信号の比較から、BAT63 を用いた場合にダイオードを実装しない場合と比較して、 $\sim 25\%$  にテール成分を抑制できることがわかった。

次章では、より実際の実験環境に近い状態で陽電子ビームを用いて行った性能評価実験について述べる。

## 第4章

# 陽電子ビームを用いた性能評価試験

第3章では $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$ 線源を用いたテストベンチで新飛行時間測定器の試作機の性能評価を行ってきた。より実機に近い状態での性能評価を行うべく、2021年3月に東北大学電子光理学研究センターのGeV- $\gamma$ 実験室において陽電子ビームを用いた性能評価を行った。

次章で本実験の目的と具体的な測定項目を述べる。続く4.2節にて本実験で利用したビームについて述べる。本実験で設置した試作機の構成と実験セットアップについて述べた後、解析方法について説明する。そして、4.7節で結果を述べ、最後に4.8節にて本実験についてまとめる。

### 4.1 目的

---

本節において述べる性能評価試験の目的は、第3章での性能評価と比較して高エネルギーの荷電粒子を用いてデータ収集を行うことで、より実地に近い環境下での性能評価を行うことにある。具体的には以下に挙げる項目について測定を行った。

1. MPPC 印加電圧 ( $V_{bias}$ ) 依存性
2. ディスクリミネータ閾値 ( $V_{th}$ ) 依存性
3. 粒子通過位置依存性

### 4.2 本実験で使用した陽電子ビーム

---

本章の冒頭に述べたように本実験はELPH GeV- $\gamma$ 照射室内の陽電子ビームラインにて実施した。GeV- $\gamma$ 照射室では、BST-ring中の周回電子から制動放射によって取り出した光子ビームを用いた実験が行われている。この光子ビームライン上に設置した金属箔を用いて $e^+/e^-$ の対生成を起こす。これを後段に設置したRTAGX双極電磁石を用いてビーム軸に対して $30^\circ$ に運動量分析したものをビームとして用いた。陽電子ビームの運動量はRTAGX電磁石の電流値によって変化するが、実験時の設定では $493\text{ MeV}/c$ となるように調整がなされた。このビームラインの典型的な特性を表4.1に示した。



表 4.1: 本実験で使用した陽電子ビームの特性 [30]。

| 粒子    | 運動量 (MeV/c) | ビーム強度 (kHz, typ.) |
|-------|-------------|-------------------|
| $e^+$ | ~ 500       | ~ 1               |

表 4.2: 陽電子ビームを用いた性能評価試験において測定した試作機の構成

| ID | シンチレータサイズ<br>(厚さ × 幅 × 長さ mm <sup>3</sup> )    | MPPC 型番       | MPPC 接続個数 | 備考                          |
|----|--|---------------|-----------|-----------------------------|
| 1  | $5^T \times 22^W \times 300^L$ mm <sup>3</sup> | S14160-3015PS | 4 個直列     | 表 3.1 中の EJ230-I300-2 に同一。  |
| 2  | $5^T \times 11^W \times 300^L$ mm <sup>3</sup> | S14160-3015PS | 2 個直列     | 表 3.1 中の EJ230-I300-1 に同一。  |
| 3  | $5^T \times 22^W \times 450^L$ mm <sup>3</sup> | S13360-3050PE | 4 個直列     | 表 3.1 中の EJ230-I450-2d に同一。 |
| 4  | $5^T \times 11^W \times 450^L$ mm <sup>3</sup> | S13360-3050PE | 2 個直列     | 表 3.1 中の EJ230-I450-1b に同一。 |

### 4.3 本実験における試作機概要

この実験では試作 ToF の構成として表 4.2 に示す 4 種類を試験した。4 種それぞれシンチレータサイズが異なるものを用いた。それぞれのシンチレータサイズに対しては使用する MPPC の構成は固定とした。長さ 300 mm のシンチレータに対しては S14160-3015PS を、長さ 450 mm のシンチレータに対しては S13360-3050PE を使用した。幅 11 mm のシンチレータに対しては 2 個直列接続、22 mm に対しては 4 個直列接続を使用した。尚、いずれのサイズのものもシンチレータの種類は EJ-230 であり、反射材は 0.1 mm 厚のテフロンシートを用いた。シンチレータと MPPC との接続にはオプティカルグリッド (V788) を用いた。MPPC 基板は S14160-3015PS、S13360-3050PE 共に第 3 章 3.7.8 節にて示した “New.” の基板を使用した。アンプ回路に関しては第 3 章 3.4 節にて記載したアンプ基板を用いた。本実験において実際に使用した試作 ToF の写真を図 4.1 に示す。この写真はシンチレータのサイズが EJ230-I300-2 の場合のものである。設置時の位置合わせのためにシンチレータ表面に方眼紙を重ねているために視認できないが、表面には反射材のテフロンシートを巻いている。長さ方向両端をアルミフレームで挟み込むようにして固定した。また、図中に示したブラケットを用いて後述するステッピングモータに取り付けた。

尚、表 4.2 に記載した 4 種に加えて、3 章において用いたその他のプラスチックシンチレータでの測定も実施する準備を行ってはいたものの、シンチレータの交換に要する時間などとの関係から、上記 4 種類の構成でのデータ収集にとどまった。

### 4.4 本実験におけるリファレンス検出器

本実験で用いたリファレンス検出器 Ref1、Ref2 について述べる。Ref1、Ref2 は共に 3 つのセグメントで構成されたプラスチックシンチレーション検出器である。各セグメントはプラスチックシンチレータと MPPC S13360-3050PE からなる。プラスチックシンチレータ側面をオプティカルセメントによってプリント基板上に実装された MPPC に光学的に接続、固定している。シンチレータ表面には、反射材のペースト (Bicron BC620) を塗布した。MPPC からの信号は 3.4 節に示したアンプ回路を用いて増幅

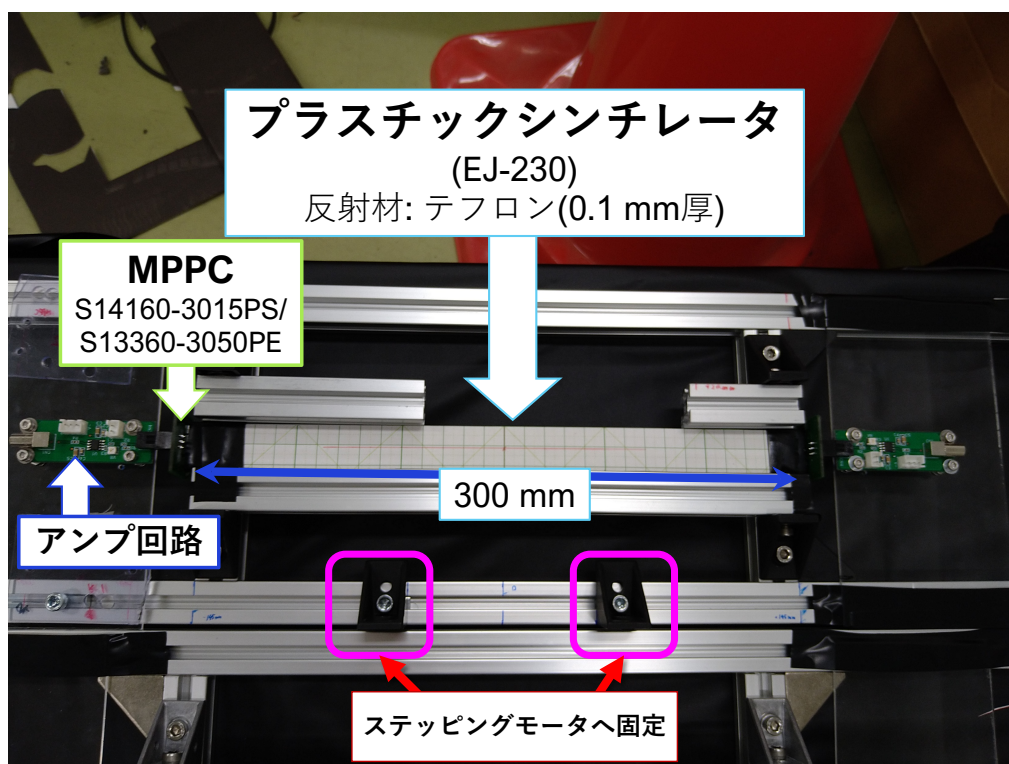


図 4.1: 本実験で用いた試作機の一例の写真。この写真で使用しているシンチレータのサイズは  $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$  である。

表 4.3: 本実験でリファレンス検出器として用いたプラスチックシンチレータ

| 検出器名   | シンチレータサイズ<br>(厚さ × 幅 × 長さ $\text{mm}^3$ )  | シンチレータ型番 |
|--------|--|----------|
| Ref1-1 | $1^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$   | EJ-232Q  |
| Ref1-2 | $1.5^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$ | EJ-230   |
| Ref1-3 | $1^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$   | EJ-232   |
| Ref2-1 | $1^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$   | EJ-232Q  |
| Ref2-2 | $1.5^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$ | EJ-230   |
| Ref2-3 | $1^T \times 3^W \times 3^L \text{ mm}^3$   | EJ-232   |

した。これは第3章の  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$  線源を用いたテストにて使用したリファレンス検出器に倣った構成である。Ref1、Ref2のそれぞれで各セグメントに対して重力方向で上から順に Ref1(2)-1, 2, 3 とラベルする。それぞれのセグメントに使用したシンチレータを表4.3に示した。表中に示したようにシンチレータの種類は EJ-230、EJ-232、EJ232Q の3種類を用いており、セグメントによって使用しているプラスチックシンチレータの型番が異なっている。但し、Ref1とRef2いずれにおいても上側セグメントのセグメントから順に EJ-232Q、EJ-230、EJ-232 の順となるように配置した。このうち、Ref1-2は第3章で使用した Ref1 検出器と同一のものであり、同じく Ref2-2は Ref1 検出器と同一のものである。使用したリファレンス検出器の写真を図4.2に示す。この写真では上流側に設置した Ref1 をビーム進行方向に見込むようにして撮影した。ここに示したのは Ref1 のみであるが、Ref2 も同様な構成となっている。

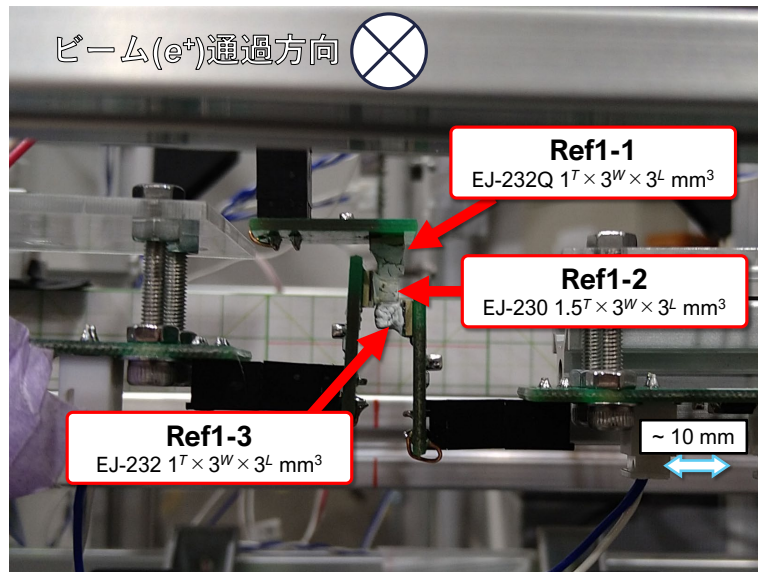


図 4.2: 陽電子ビームを用いた実験で用いたリファレンス検出器の写真。上流側に設置した Ref1 をビーム進行方向に見込むようにして撮影している。

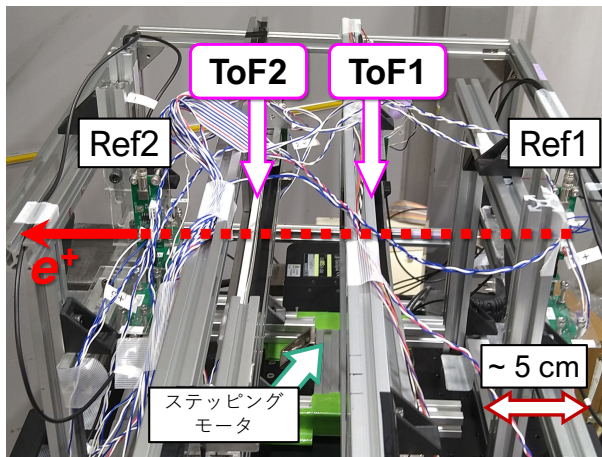
## 4.5 実験セットアップ

### 4.5.1 検出器群の配置

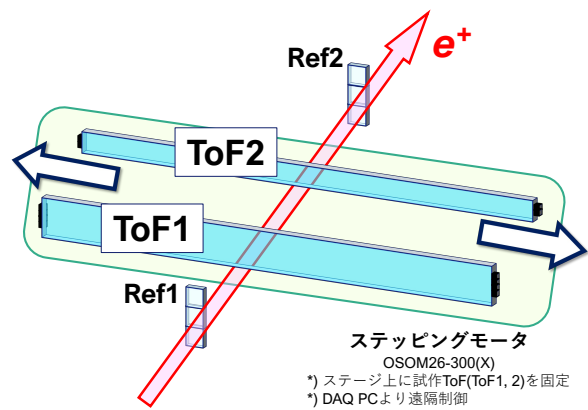
本実験でのセットアップの概略を図 4.3 に示す。ビームライン上流側より、上流側リファレンス検出器 Ref1、試作機、下流側リファレンス検出器 Ref2 の順で配置した。本実験では試作機は 2 機同時に配置した。また、検出器群のうち、試作機 2 機は架台上に設置したステッピングモータ (OSOM26-300(X)) のステージ上に固定する形で設置した。このステッピングモータはビーム軸に対して直交、且つ水平方向に移動できるように設置した。これを DAQ 用の PC に接続し、データ収集と同時にステージを移動することによってビーム照射位置の依存性を取得できるようにした。

試作 ToF に関して本節では上流側に設置したものを ToF1、下流側を ToF2 と称する。また、ビーム進行方向に対して右側の MPPC から読み出すチャンネルを ToF1(2)R、向かって左側を ToF1(2)L と称する。配置の際には幅 22 mm のシンチレータを上流側、幅 11 mm のシンチレータを下流側へ配置した。

検出器の配置の俯瞰図を図 4.4 に示した。検出器の配置時は水平方向に対しての中心をビームライン上に配置した。また、鉛直方向に関しても、各検出器の中心をビーム平面とするようにレーザー墨出し器を用いて設置を行った。この時、Ref1 及び Ref2 は各 3 セグメントから構成されるが、上流側は Ref1-2、下流側では Ref2-2 をビーム平面に合わせるように設置した。図 4.4 に示すように、セットアップ全体をビームパイプより数 m 離れた位置に設置した。本実験は新光子標識化装置 (Tagger) に用いる時間測定器 “TagB” 及び我々の研究グループが開発を進めるエアロジェルチェレンコフ検出器に使用する光検出器 MCP-PMT (Multi Channel Plate Photo Multiplier Tube) の性能評価として実施された実験のパラサイト実験として行われた。このエアロジェルチェレンコフ検出器は、我々の研究グループが準備を進めている ELPH における  $(\gamma, K^+)$  反応を用いた  $\Lambda n$  終状態相互作用測定実験 [71] において、 $e^+/e^-$  の背景事象除去のために用いられる予定の検出器である。これら TagB 及び MCP-PMT の性能評価のための



(a) セットアップの実際の写真。



(b) セットアップの概念図。

図 4.3: 陽電子ビームを用いた実験でのセットアップの概略。[a]: 実際の写真。陽電子ビームは写真上で右から左の向きへと照射される。[b]: セットアップの概念図。設置した検出器群のうち、試作機 (ToF1、ToF2) はステッピングモータに取り付けた。

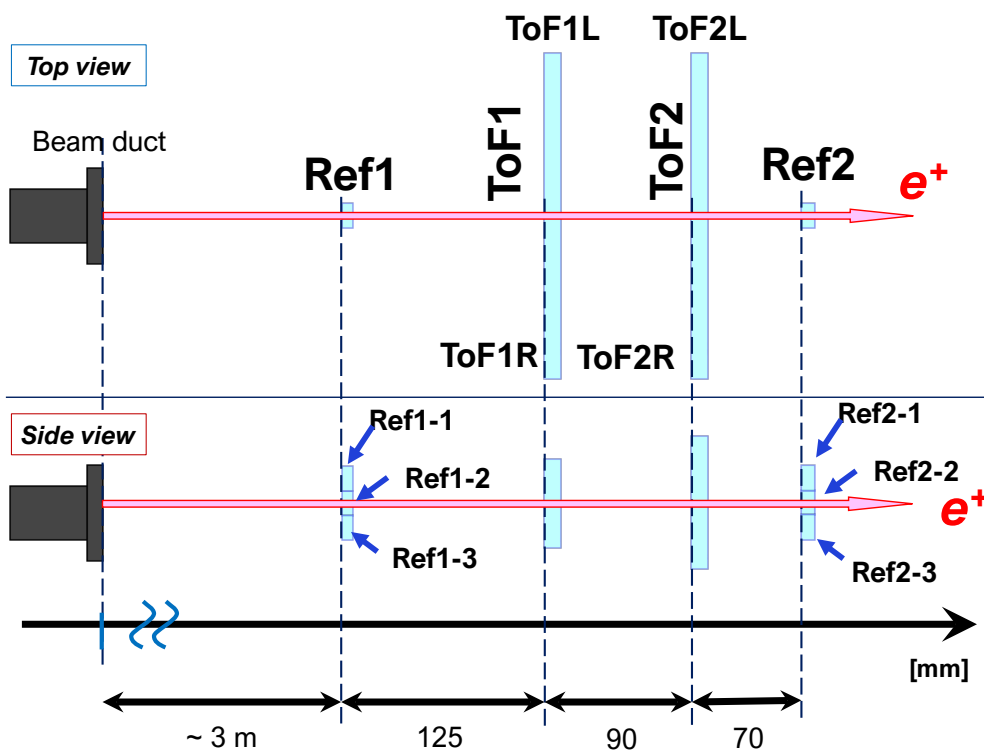


図 4.4: 検出器配置の俯瞰図。各検出器の水平方向中心をビームライン上に合わせ、鉛直方向に関してビーム平面に相当する高さに合わせた。

セットアップに続く形で設置を行ったため、ビームパイプとの間にこのような距離を取ることとなった。

### 4.5.2 データ収集回路

この実験でのデータ収集回路を図 4.5 に示した。但し、Div. はディバイダ、Att. は Attenuator、PS はプリスケアラ、G. G. はゲートジェネレータを示す。各検出器の信号は波高測定用のラインと時間測定・トリガ生成用のラインの 2 つに分割して処理を行った。試作 ToF の信号に関しては、第 3 章での測定時と同様に、アンプ回路からの信号を PM amp. で増幅し、オフセット調整を行った後のものを用いた。但し MPPC として S13360-3050PE を使用した場合には、波高の飽和を避けるために、Attenuator により 12 dB 減衰させたのちに PM amp. へと入力した。リファレンス検出器の信号はまずディバイダにより 2 ラインに分割を行い、波高測定用ラインのみ Attenuator で減衰させたのちに PM amp. へ入力した。時間測定・トリガ用のラインはそのままディスクリミネータへと入力した。この時の各検出器での Attenuator の設定を表 4.4 に示した。

本実験ではトリガーとして以下の信号の論理和を用いた。

1. Ref1 の 2 セグメント (Ref1-1、Ref1-2、Ref1-3) での論理和
2. Ref2 の 2 セグメント (Ref2-1、Ref2-2、Ref2-3) での論理和
3. ToF1L、ToF1R でのコインシデンスを 1/5 にプリスケールしたもの
4. ToF2L、ToF2R でのコインシデンスを 1/5 にプリスケールしたもの

更に、上記の信号からなる論理和と 10 Hz のクロック信号とで論理和を取り、これを最終的なトリガー信号として用いた。第 3 章での測定とは異なり、検出器間のコインシデンスを組み込まない形を取った。このようにした理由としては、検出器での計数率が低かったことがあげられる。当初の予定では Ref1 の 3 セグメントでの論理和及び Ref2 の 3 セグメントでの論理和の 2 つのコインシデンスを用いることを予定していた。しかし、実験開始直後の時点ではコインシデンスの計数率が  $\sim 100$  /spill 程になってしまっていた。ここで spill は加速器の運転周期を指すものであるが、この実験時では 1 spill のうち実際にビームが照射される時間は  $\sim 10$  s であった。これをうけて上記のようにトリガの変更を行い、データ収集時ではなく、オフライン解析時に各検出器での時間情報を用いて追加的に条件を加えることによって、それぞれの検出器間をビームが通過した事象を選別するという方針を取った。

波高情報と時間情報はそれぞれ別モジュールでの取得を行った。波高情報は電荷積分型の QDC モジュール CAEN V792 (1 ch. = 0.1 pC) を用いた。時間情報はマルチイベント型 TDC モジュール CAEN V775 (1 ch. = 35 ps) を用いて取得した。このうち、クロック信号は時間情報のみ記録した。DAQ システムは KiNOKO[60] を用いた。

## 4.6 解析方法

### 4.6.1 イベント選択

4.5 節において、リファレンス用検出器を上流側、下流側にそれぞれ 3 個ずつ配置したことを述べた。しかし、実験期間中のオンライン解析により、ビーム平面から外れた位置に配置した 4 つ (Ref1-1、Ref1-3、Ref2-1、Ref2-3) に関してはイベント数が少ないということが確認された。このことから、本実験の解析は、リファレンス検出器として Ref1-1、Ref1-3、Ref2-1 及び Ref2-3 の 4 つは使用せずにビーム平面にあたる位置に設置した Ref1-2 及び Ref2-2 の情報を用いるという方針の元で進めることとした。

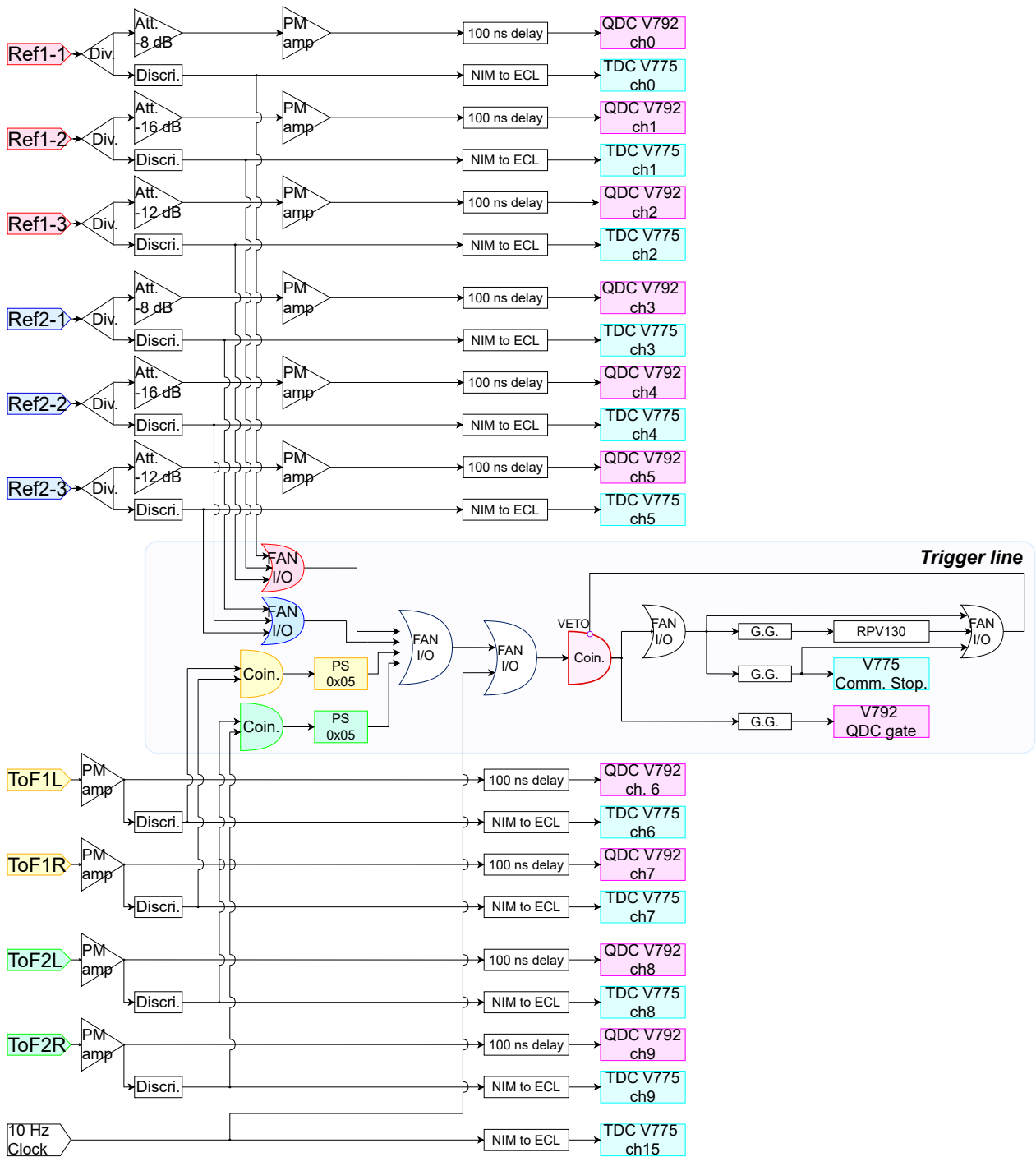
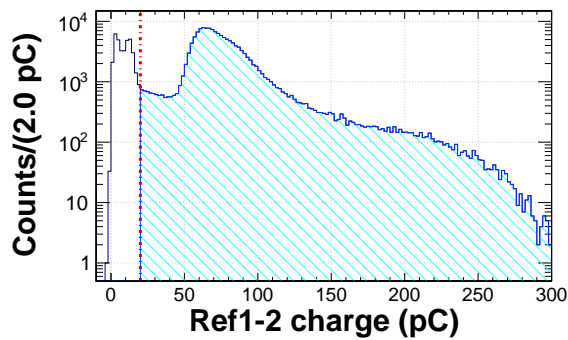


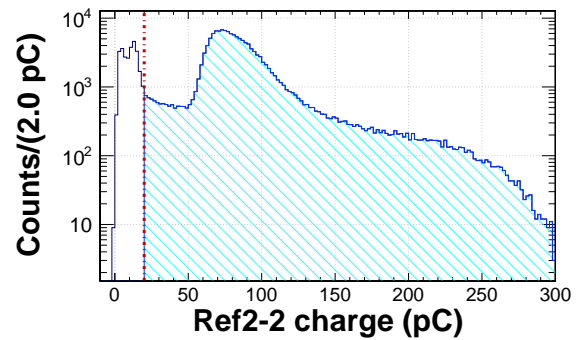
図 4.5: 陽電子ビームを用いた実験でのデータ収集回路系。Div. はディバイダ、Att. は Attenuator、PS はプリスケラ、G. G. はゲートジェネレータを示す。

表 4.4: 陽電子ビームを用いた実験での各検出器での Attenuator の設定。

| 検出器名                       | Attenuator 設定値 |
|----------------------------|----------------|
| Ref1-1                     | 8 dB           |
| Ref1-2                     | 16 dB          |
| Ref1-3                     | 12 dB          |
| Ref2-1                     | 8 dB           |
| Ref2-2                     | 16 dB          |
| Ref2-3                     | 12 dB          |
| ToF1L(S13360-3050PE 使用時のみ) | 12 dB          |
| ToF1R(S13360-3050PE 使用時のみ) | 12 dB          |
| ToF2L(S13360-3050PE 使用時のみ) | 12 dB          |
| ToF2R(S13360-3050PE 使用時のみ) | 12 dB          |



(a) 上流側 Ref1-2 での電荷量分布



(b) 下流側 Ref2-2 での電荷量分布

図 4.6: Ref1-2 及び Ref2-2 における電荷量分布。時間分解能評価においては斜線の領域に該当する事象であることを選択条件として含めた。

また、後述する時間分解能評価では、Ref1-2 と Ref2-2 の電荷量の情報を用いて、十分なエネルギー損失を伴って検出器を通過したとみなせる事象の選択を行った。図 4.6 に Ref1-2 と Ref2-2 の電荷量分布を示す。本実験は 2021 年 3 月 17 日から 18 日の 2 日間にわたって実施されたが、そのうち 3 月 18 日に取得したデータを統合したものに対して、各々の TDC が正の値でありヒットがあったとみなせる事象を示したものである。Ref1-2、Ref2-2 それぞれの電荷量に対して  $QDC > 20 \text{ pC}$  となる事象を選択し評価を行った。この境界を図 4.6 中で赤の一点鎖線で示した。水色の斜線で覆った領域に該当する事象であることをイベント選択条件に含めた。

#### 4.6.2 時間分解能解析

時間分解能解析の際には Ref1-2 と試作 ToF、試作 ToF と Ref2-2、Ref1-2 と Ref2-2 の間で飛行時間を構成する。この時、それぞれの飛行時間に係る検出器に対して TDC にヒットがあったという条件を要請することによって事象の選別を行った。例えば、Ref1-2 と ToF1 との飛行時間を構成する際には

$$(\text{Ref1} - 2 \text{ TDC} > 0) \ \&\& \ (\text{ToF1L} \text{ TDC} > 0) \ \&\& \ (\text{ToF1R} \text{ TDC} > 0) \quad (4.1)$$

という条件を要請した。このように、すべての検出器での時間情報があることを要求するのではなく、飛行時間を構成するために必要な検出器の情報のみを要求した。このような事象の選択の方法を採用したことによる結果への影響に関しては、4.7.3節(イベント選択の条件による時間分解能への影響)で述べる。この事象選択によって構成した飛行時間とそれぞれに係る検出器でのQDCとの2次元相関を作成し、タイムウォークコレクションを行う。この時、それぞれの検出器に対して式(4.2)の関数形でフィットを行った。ここで  $p_0$ ,  $p_1$  はフィットパラメータである。

$$f(QDC) = \frac{p_0}{\sqrt{QDC}} + p_1 \quad (4.2)$$

補正を行う前後での飛行時間-QDC相関の一例を図4.7に示した。補正を行った後の飛行時間分布に対してガウス関数をフィットし  $\sigma$  を求めることでそれぞれの飛行時間分布の時間分解能を決定した。尚、図4.7に示したヒストグラムは見やすさのために分布の中心と図の中心とを合わせるように横軸の範囲を定数分だけずらしているが、示している値の範囲は変更していない。いま、Ref1-2と試作ToF(ToF1、ToF2)間の飛行時間分解能を  $\sigma_{\text{Ref12-ToF}}$ 、試作ToFとRef2-2間の飛行時間分解能を  $\sigma_{\text{ToF-Ref22}}$ 、Ref1-2とRef2-2間の飛行時間分解能を  $\sigma_{\text{Ref12-Ref22}}$  とおき、それぞれの統計誤差を  $\epsilon_{\text{Ref12-ToF}}$ ,  $\epsilon_{\text{ToF-Ref22}}$ ,  $\epsilon_{\text{Ref12-Ref22}}$  とおく。このとき、それぞれの固有時間分解能  $\sigma_{\text{ToF}}$ ,  $\sigma_{\text{Ref12}}$ ,  $\sigma_{\text{Ref22}}$  は独立と仮定すると誤差伝搬の法則より次に示す式(4.3)のように記述される。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Ref12-ToF}}^2 &= \sigma_{\text{Ref12}}^2 + \sigma_{\text{ToF}}^2 \\ \sigma_{\text{ToF-Ref22}}^2 &= \sigma_{\text{ToF}}^2 + \sigma_{\text{Ref22}}^2 \\ \sigma_{\text{Ref12-Ref22}}^2 &= \sigma_{\text{Ref12}}^2 + \sigma_{\text{Ref22}}^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

これにより、固有時間分解能は次の式(4.4)で書ける。

$$\sigma_{\text{ToF}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_{\text{Ref12-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref22}}^2 - \sigma_{\text{Ref12-Ref22}}^2)} \quad (4.4)$$

また、 $\sigma_{\text{ToF}}$  に対する統計誤差  $\epsilon_{\text{ToF}}$  は次の式(4.5)のように書ける。

$$\epsilon_{\text{ToF}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{Ref12-ToF}}^2 \epsilon_{\text{Ref12-ToF}}^2 + \sigma_{\text{ToF-Ref22}}^2 \epsilon_{\text{ToF-Ref22}}^2 + \sigma_{\text{Ref12-Ref22}}^2 \epsilon_{\text{Ref12-Ref22}}^2}}{2\sigma_{\text{ToF}}} \quad (4.5)$$

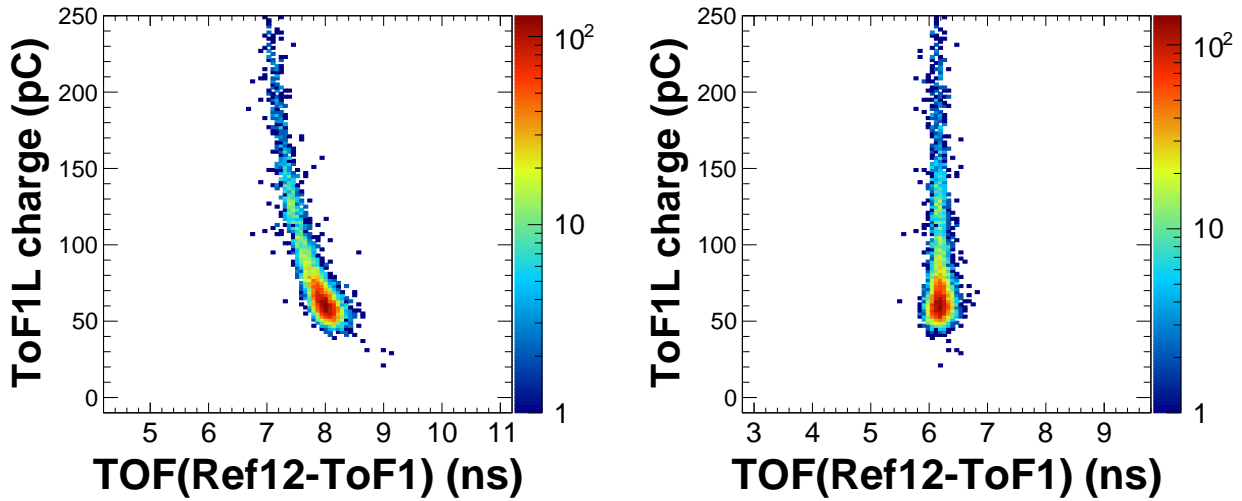
## 4.7 結果と考察

結果について述べる。ここでは、試作ToFの構成別にS14160-3015PSの場合(シンチレータ長さ300mm)とS13360-3050PEの場合(シンチレータ長さ450mm)とで分けて述べる。

### 4.7.1 MPPC 印加電圧 ( $V_{bias}$ )・ディスクリミネータ閾値 ( $V_{th}$ ) 依存性

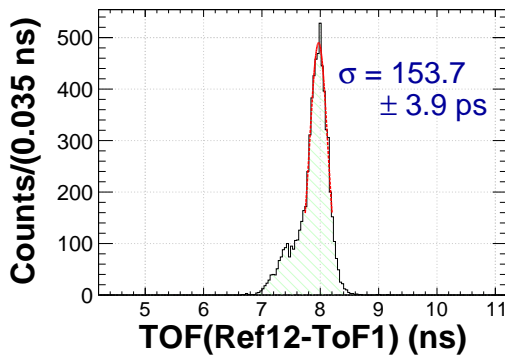
本実験においてはS14160-3015PSとS13360-3050PEの2種類のMPPCを使用した。第3章にて触れたように、推奨印加電圧  $V_{op}$  が異なっているなど印加する電圧に対しての応答が異なる。そのため以下ではそれぞれのMPPCの種類に分けて結果を述べることにする。また、閾値電圧依存性に対してはS13360-3050PEを用いた場合でのみ測定を行った。



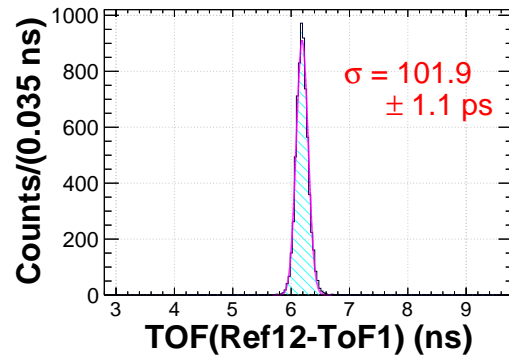


(a) 補正前の飛行時間 (TOF)-電荷量 (charge) 相関

(b) 補正後の飛行時間 (TOF)-電荷量 (charge) 相関。



(c) 補正前の 1 次元飛行時間分布。



(d) 補正後の 1 次元飛行時間分布。

図 4.7: タイムウォークコレクション前後での飛行時間 (TOF)-電荷量 (charge)。(a) 及び (c) に示した TOF と charge の 2 次元相関に加え、補正前後での 1 次元 TOF 分布も (b) 及び (d) に示した。ここでは QDC を 1 ch. = 0, 1 pC として電荷量 (charge) に換算した。

#### S14160-3015PS を用いた場合

はじめに S14160-3015PS を用いて測定を行った結果を示す。幅 22mm、S14160-3015PS 4 個直列接続時の結果を図 4.8 に示した。青の三角のマーカが本実験での結果である。白抜き色のマーカは比較として示した  $\beta$  線源を用いた測定での結果である。本実験では、特に  $V_{bias} - V_{break} = +7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時で  $\sigma_{\text{detector}} = 98.6 \pm 1.2 \text{ ps}$  であった。続いて、幅 11mm、S14160-3015PS 2 個直列接続時の結果に着目する。この時の結果を図 4.9 に示した。赤色のマーカが本実験での結果、白抜き色のマーカが  $\beta$  線源を用いた測定結果である。 $V_{bias} - V_{break} = +7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時では  $\sigma_{\text{detector}} = 94.1 \pm 1.3 \text{ ps}$  であった。これらの結果は、 $\beta$  線源を用いた測定と比較した場合、印加電圧に対しての定性的な傾向には一致がみられるものの、定量的な値として見た場合には  $\sim 10 - 20 \text{ ps}$  程度時間分解能が悪化している。しかし、測定を行った  $V_{bias} - V_{break} = 4.0 - 10.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の範囲内ではいずれも目標時間分解能を満たすことは確認できた。特に  $V_{bias} - V_{break} > 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  ではいずれの構成も  $\sigma < 100 \text{ ps}$  の時間分解能を得ることができるとわかった。

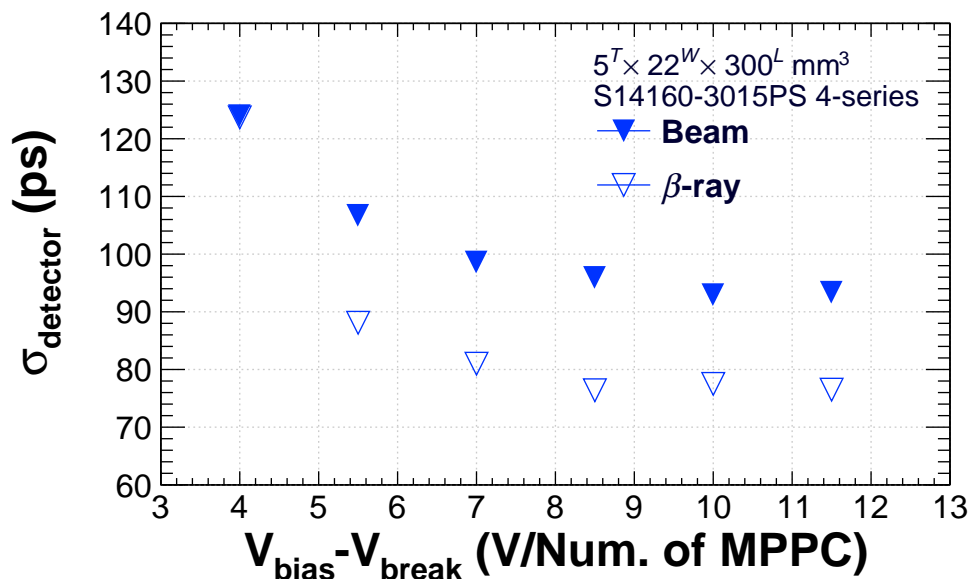


図 4.8:  $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$  のシンチレータと S14160-3015PS 4 個直列接続での印加電圧依存性。横軸は降伏電圧を基準に取った場合の印加電圧を MPPC 個数で平均化した値である。青のマーカが本実験での結果、白抜ききのマーカが  $\beta$  線源を用いて行った測定結果である。

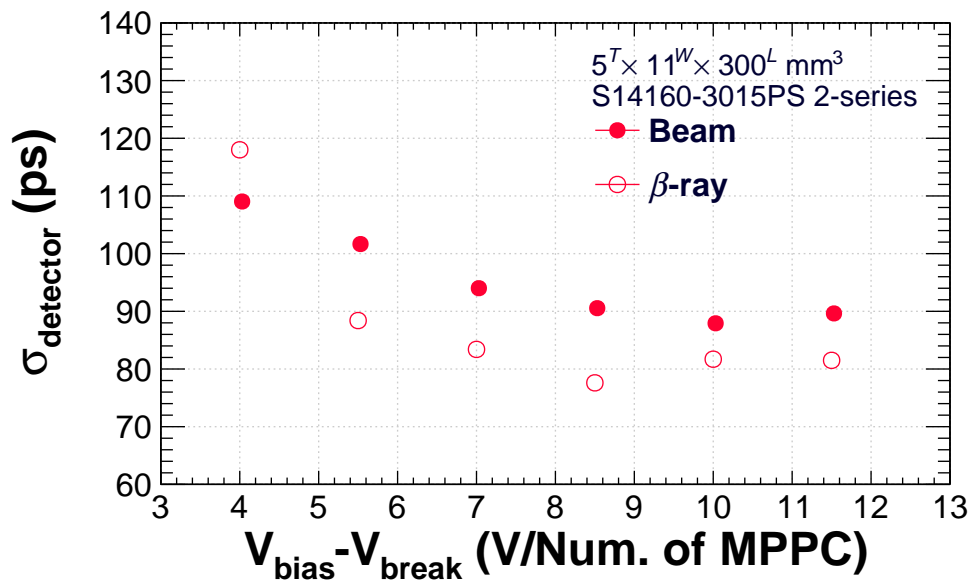


図 4.9:  $5^T \times 11^W \times 300^L \text{ mm}^3$  のシンチレータと S14160-3015PS 2 個直列接続での印加電圧依存性。横軸は降伏電圧を基準に取った場合の印加電圧を MPPC 個数で平均化した値である。赤のマーカが本実験での結果、白抜ききのマーカが  $\beta$  線源を用いて行った測定結果である。

### S13360-3050PE を用いた場合

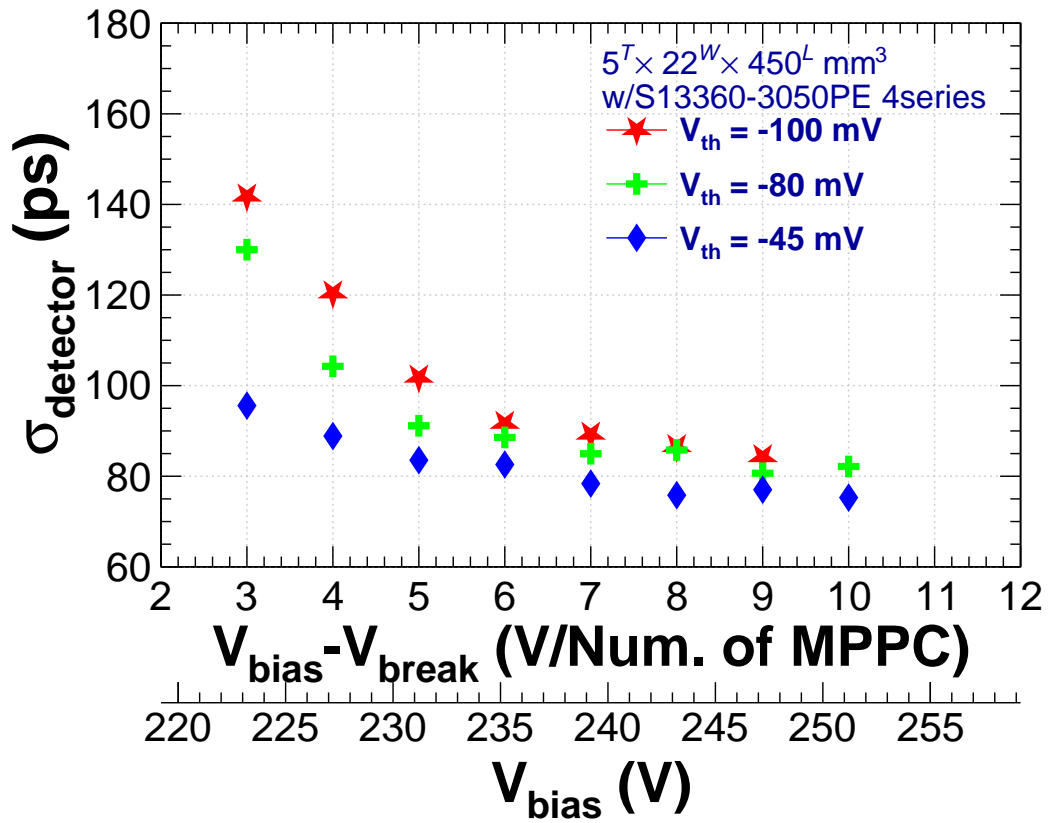
まず、S13360-3050PE を用いた場合の結果を述べる。ここでは閾値電圧の設定を変更しながら MPPC 印加電圧を複数回測定した。まず、 $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と 4 個直列接続の場合を示す。各閾値毎での印加電圧依存性を図 4.10(a) に示した。横軸の値は MPPC の降伏電圧  $V_{break}$  を基準とした値であるが、ここでは参考として実際に印加した電圧の値についても副軸として示した。この図より  $V_{bias} - V_{break} = 8.0 - 10.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  において安定した時間分解能を示していることがわかる。特に、 $V_{bias} - V_{break} = 10.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時で  $\sigma_{detector} = 75.3 \pm 1.9 \text{ ps}$  ( $V_{th} = -45 \text{ mV}$  設定時) であった。また、同様に印加電圧毎の閾値電圧依存性を図 4.10(b) に示した。この図では  $V_{bias} - V_{break} = 3.0, 6.0, 9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の場合を示した。閾値の絶対値を大きく取ることによって分解能の悪化する傾向が今回の実験結果でも同様にみられた。しかし、 $V_{bias} - V_{break} = 6.0, 9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の場合には図 4.10 に示したいずれの閾値設定の場合でも  $\sigma_{detector} < 100 \text{ ps}$  が得られていることがわかる。図 4.11 はここで述べた印加電圧及び閾値電圧を変更した場合の時間分解能の変化をより視覚的に示すために印加電圧  $V_{bias} - V_{break}$  及び閾値電圧  $V_{th}$  を横軸に取り、時間分解能  $\sigma_{detector}$  を高さ方向の値として示したものである。 $V_{bias} - V_{break}$  の小さい領域程  $V_{th}$  を大きくした場合の影響がより強く現れていることがわかる。しかし、その一方で、 $V_{bias} - V_{break} = +9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  のように印加電圧を高くとった領域では、その影響は相対的に小さいこともわかる。

続いて、 $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と 2 個直列接続の場合に関して見る。この場合の結果を図 4.12 に示した。この試作 ToF の構成では  $V_{th}$  を  $-60 \text{ mV}, -80 \text{ mV}, -100 \text{ mV}$  の 3 点で取得を行った。それぞれの  $V_{th}$  の設定の下での印加電圧依存性を図 4.12(a) に示した。また、 $V_{th}$  依存性の結果を図 4.12(b) に示した。更に  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と 4 個直列接続の場合と同様にこれら各測定点での結果を 3 次元図として図 4.13 に示した。この時、 $V_{bias} - V_{break} > 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の領域においていずれの閾値設定において  $\sigma_{detector} \sim 100 \text{ ps}$  を示すことがわかる。特に  $V_{bias} - V_{break} = +9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  ( $V_{th} = -60 \text{ mV}$ ) 設定時で  $\sigma_{detector} = 94.6 \pm 1.3 \text{ ps}$  であり、本章の実験での  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と S13360-3050PE 2 個直列接続の構成下で最も良い時間分解能であった。上流側に設置を行った  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と S13360-3050PE 4 個直列接続の構成と比較した場合には  $\sim 20 \text{ ps}$  程度時間分解能が悪いという結果であった。

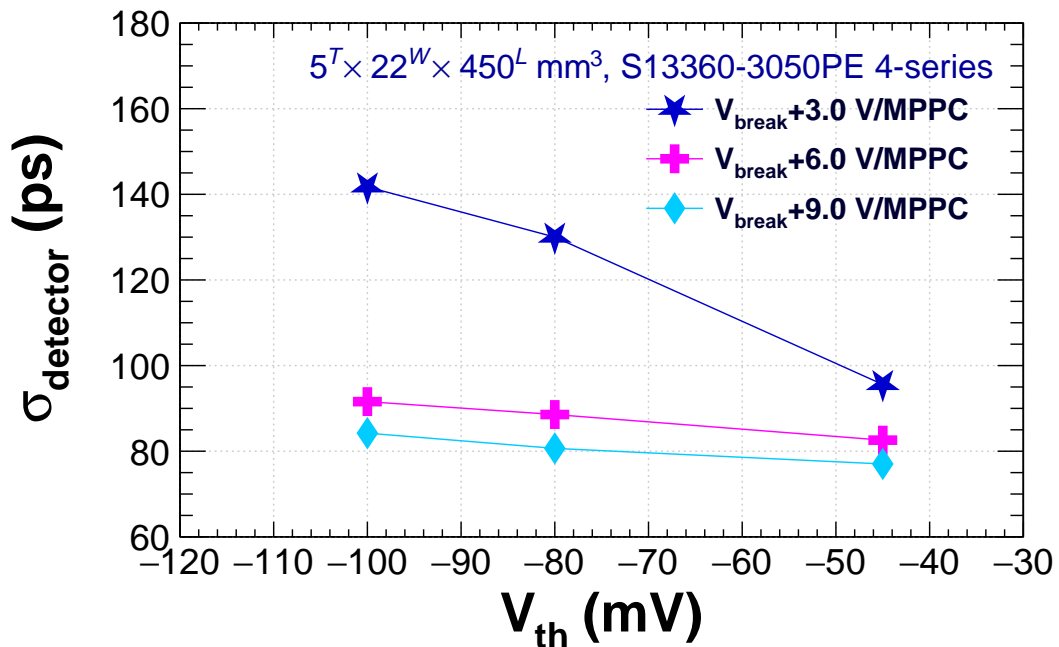
### 4.7.2 ビーム照射位置依存性

ここではビームの通過位置の座標系を次の図 4.14 に示すように定義した。ここここでは陽電子ビームの進行方向に対して右側を正、左側を負の方向と定義し、長さ方向の中心を位置の原点に取った。これは第 3 章にて行った  $\beta$  線照射位置依存性の測定と同様の定義であるが、再度確認のために改めて示した。今回の測定では設置の都合上、中心位置から左側、即ち負の方向に位置を動かした場合のみでの測定となった。これは使用したステッピングモータの可動範囲が  $30 \text{ cm}$  であったことと、設置の際に試作機の安定性を保持するためにステッピングモータ本体及びステージをを架台中心に設置したために、ステージを動かしてビーム照射位置を変更できる範囲が制限されてしまったためである。

まず、試作機の構成が  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$ 、MPPC S13360-3050PE 4 個直列接続の時を示す。この時の通過位置依存性は図 4.15 のようになった。但し、ここでは印加電圧は  $V_{bias} - V_{break} = +9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$ 、閾値電圧は  $V_{th} = -80 \text{ mV}$  とした。但し、中心位置での結果は複数回に分けて測定を行い、それらの加重平均を求めた値となっている。中心位置での時間分解能が  $\sigma_{detector} = 80.6 \pm 0.3 \text{ ps}$  であったのに対し、中心位置から最も離れた  $200 \text{ mm}$  だけ離れた点では  $\sigma_{detector} = 75.6 \pm 1.4 \text{ ps}$



(a)



(b)

図 4.10:  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  のシンチレータでの印加電圧依存性及び閾値電圧依存性。(a): 様々な  $V_{\text{th}}$  での印加電圧依存性。

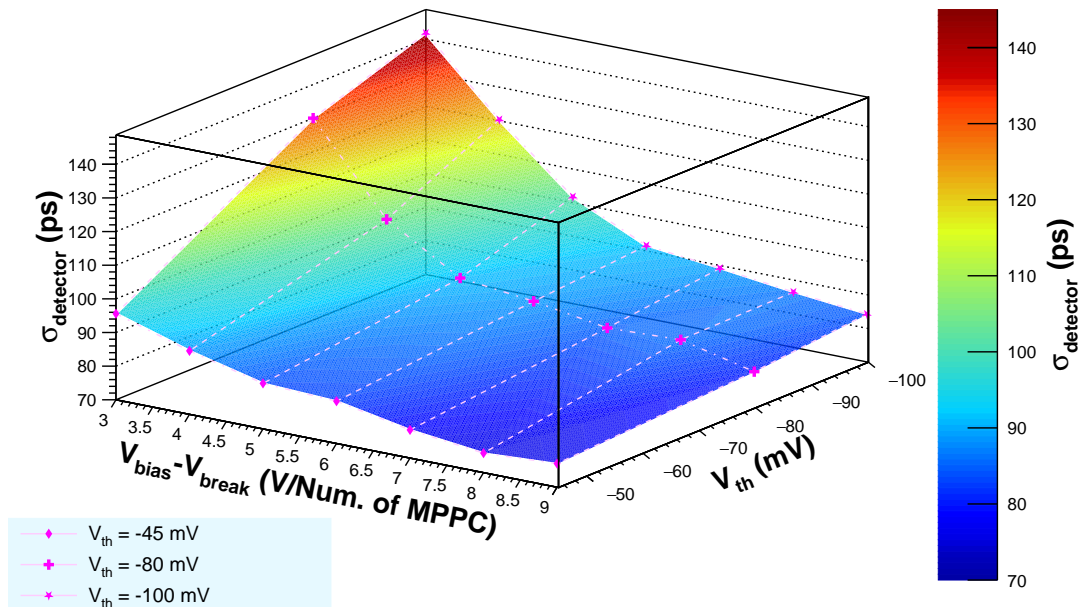


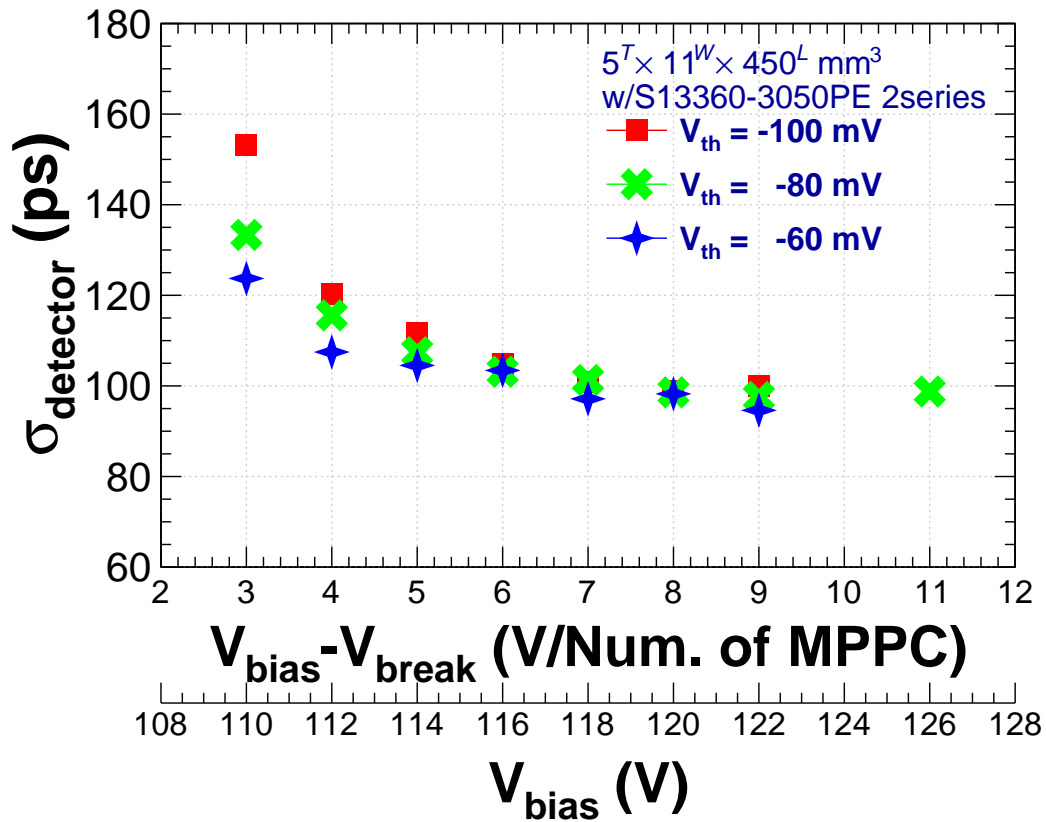
図 4.11:  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  のシンチレータでの時間分解能に対する MPPC 印加電圧とディスクリミネータ閾値の相関。各印加電圧及び閾値電圧の元で得られた時間分解能を高さ方向の値として 3 次元的に示した。

であった。また、175 mm だけ離れた点では  $\sigma_{\text{detector}} = 68.9 \pm 4.5 \text{ ps}$  であった。位置によって時間分解能に  $\sim 10 \text{ ps}$  のばらつきがあることが確認された。

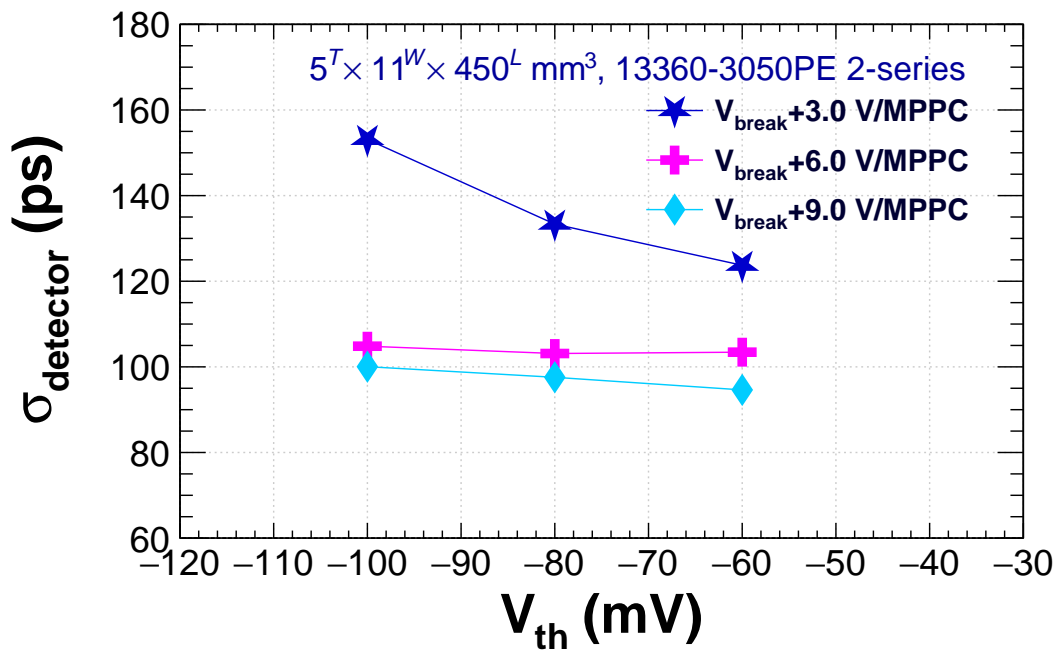
次に、試作機の構成が  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ 、MPPC S13360-3050PE 2 個直列接続の時を示す。この時の通過位置依存性は図 4.16 のようになった。こちらでは、試作機の端により近い位置へ照射位置を動かした際に時間分解能が  $\sim 10 \text{ ps}$  悪化し、特に 175 mm だけ離れた点では  $\sigma_{\text{detector}} = 108.5 \pm 3.1 \text{ ps}$  という結果になった。位置による時間分解能の差異は確認されるものの、いずれの位置を選んだ場合でも、要求される時間分解能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を満たしており、目標性能の達成は可能であると考えられる。

### 4.7.3 イベント選択の条件による時間分解能への影響

4.5.2 節で述べたように、本実験では検出器群の計数率の制約からそれぞれの検出器での信号の論理和をとったものをデータ取得のトリガーとしていた。解析時にはそこから対象となる検出器の TDC の値が正であるという条件を要請して各検出器を荷電粒子が通過したとみなせる事象の選択を行った。この時、統計量を確保するためにある 2 つの検出器間で飛行時間を構成する際にはそれに関与する検出器にのみ TDC の値を要求した。このことから、得られる飛行時間分布にはすべての検出器を通過しなかった事象も含まれている。これに対して、選別条件を改め、Ref1-2・ToF1(ToF2)・Ref2-2 の全検出器での TDC を要求することで、すべての検出器を正しく通過した事象のみを選択した場合に時間分解能にどの程度影響があるのか検討した。ここでは表 4.2 中に示した構成のうち、ID3、 $V_{th} = -100 \text{ mV}$  とした時の結果からこれを検討する。各 MPPC 印加電圧での固有時間分解能の結果を図 4.17 に示した。横軸は降伏電圧  $V_{break}$  を基準とした時の MPPC の印加電圧を個数で平均化した値 ( $V_{bias} - V_{break}$ ) である。また、その下に副軸として平均化していない実際に印加した電圧の値 ( $V_{break}$ ) も示した。飛行時間の組合せごとに TDC のヒットを要求した場合を赤色のマーカー (Original) で、いずれの飛行時間に対しても全検出器でのヒットを要求した場合を白抜きのマーカー (Strict) によって示した。ここでは傾向を示すために縦軸



(a)



(b)

図 4.12:  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  のシンチレータでの印加電圧依存性及び閾値電圧依存性。

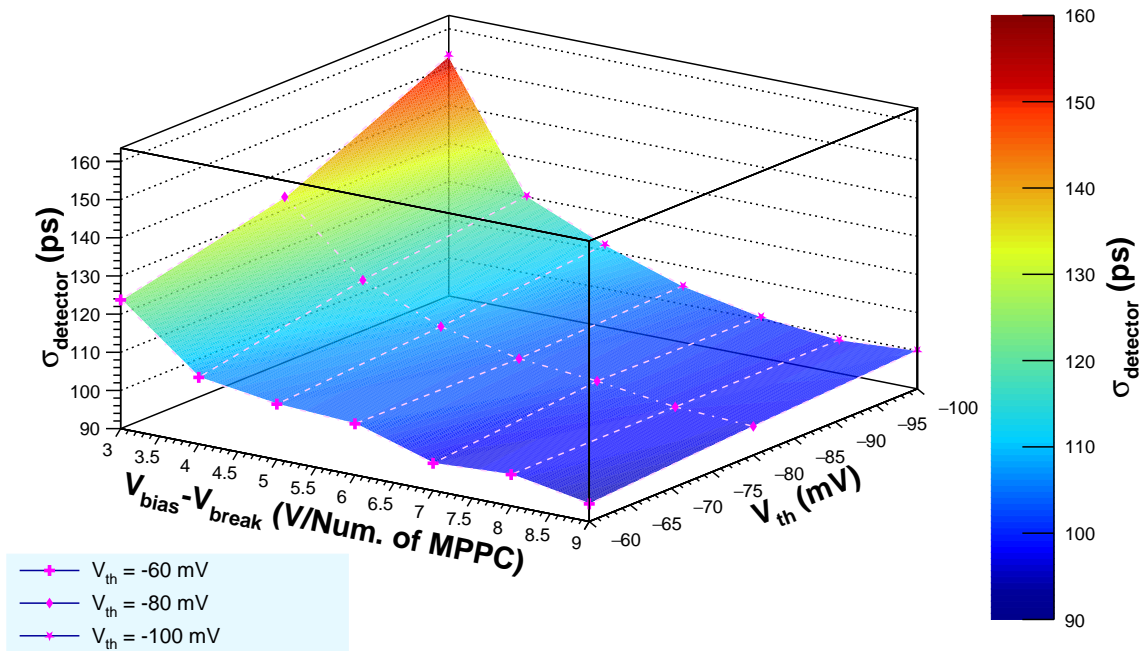


図 4.13:  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  のシンチレータでの時間分解能に対する MPPC 印加電圧とディスクリミネータ閾値の相関。

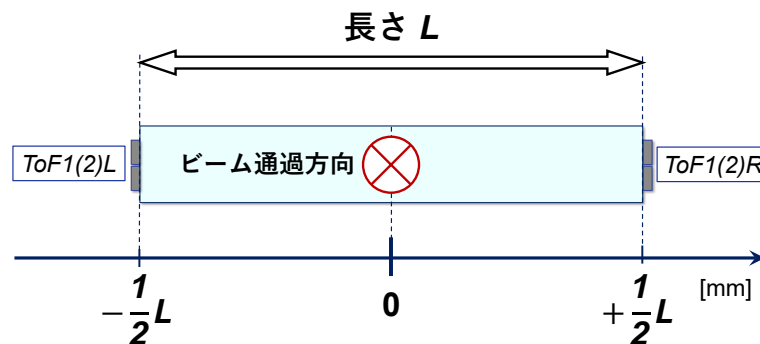


図 4.14: ビーム照射位置依存性における座標系の定義。試作機のシンチレータ長さ方向の中心を原点に取り、ビームの進行方向に対して右側を正に取る。

範囲を  $\sigma_{\text{detector}} = 60 \text{ ps} - 160 \text{ ps}$  とした。全検出器でのヒットを要求した場合には各電圧の点において数 ps 程度時間分解能が低い値を示すことがわかる。特に最も変化の大きかった  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 8.0 \text{ V}$  印加時では、飛行時間の組合せごとに TDC を要求した場合で  $\sigma_{\text{detector}} = 86.4 \pm 1.2 \text{ ps}$ 、すべての飛行時間の組合せに対して全検出器での TDC を要求した場合には  $\sigma_{\text{detector}} = 74.5 \pm 2.2 \text{ ps}$  であった。こうした差異は、飛行時間の組合せごとに事象の選別を行った場合には、粒子が検出器に対して入射する際の角度方向のばらつきが大きくなることに起因するものと考えられる。

#### 4.7.4 $\beta$ 線源を用いた測定との比較

本実験で得られたデータと第 3 章での測定結果を比較する。まず、実データでの比較を行った。その後、geant4 を用いたモンテカルロシミュレーションで、測定セットアップを簡易的に再現し、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$

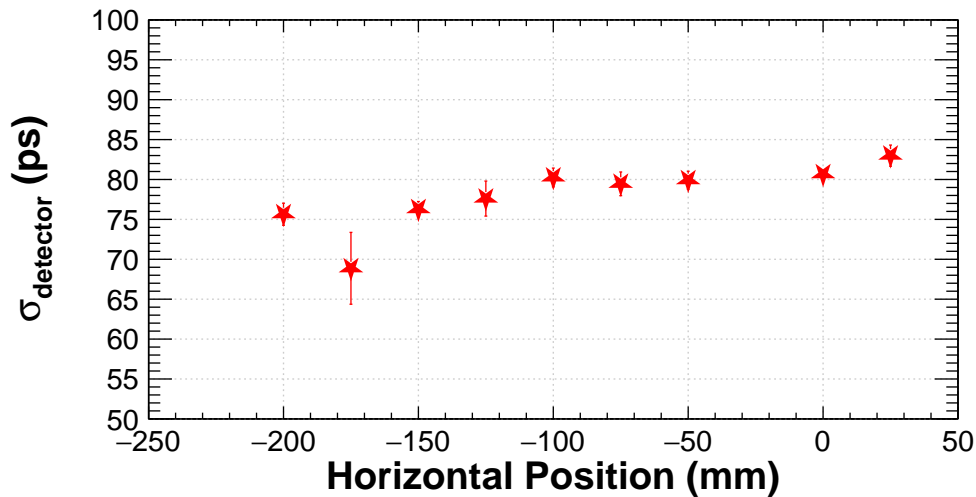


図 4.15:  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$ , MPPC S13360-3050PE 4 個直列接続の場合での時間分解能位置依存性。中心位置での時間分解能に対して  $\sim 10 \text{ ps}$  程度時間分解能に差が見られた。

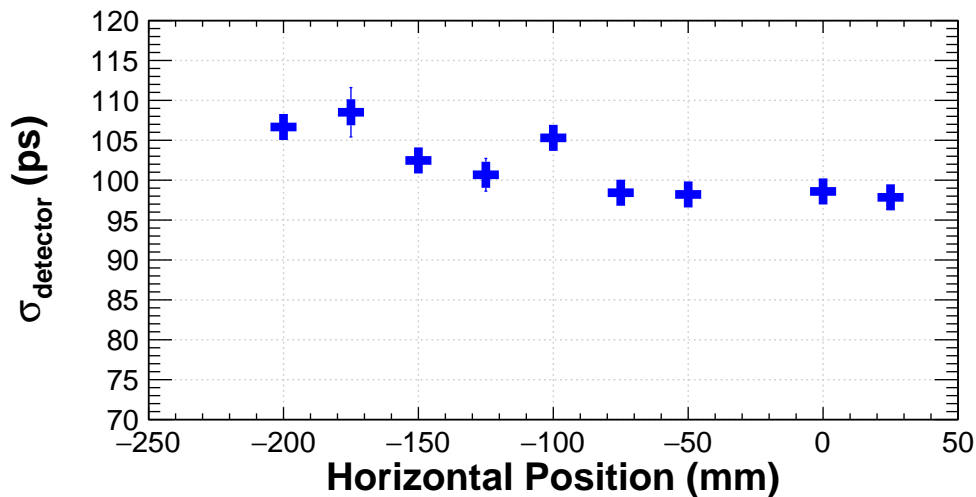


図 4.16:  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$ , MPPC S13360-3050PE 2 個直列接続の場合での時間分解能位置依存性。

線源からの電子を想定した場合と本実験でのビームを想定した陽電子を想定した場合でのエネルギー損失の応答を比較した。

ここでは、本実験で測定を実施した試作 ToF の構成のうち、ID 1( $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$ , MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続) を取り上げる。荷電粒子の照射方向に対し左右それぞれに取り付けた MPPC の電荷量分布を図 4.18 に示した。いずれの図もペDESTAL を基準に取り  $1 \text{ ch.} = 0.1 \text{ pC}$  として電荷量に換算した値 (Charge) を横軸に取って示した。縦軸の値は、比較のために高さを 1 とするように各々のヒストグラムを規格化した。桃色のヒストグラムが、本章の陽電子ビームを用いた結果、青色のヒストグラムが  $\beta$  線源を用いた際の結果である。いずれも印加電圧  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  での比較である。但し、いずれのヒストグラムについても荷電粒子が確実に試作 ToF を通過した事象を選択するために試作機両端の MPPC に加えて下流側に設置したリファレンス検出器 (本章の測定では Ref2-2、 $\beta$  線源による測定のデータでは Ref2) の TDC の情報を要求して作成した。左右いずれの MPPC



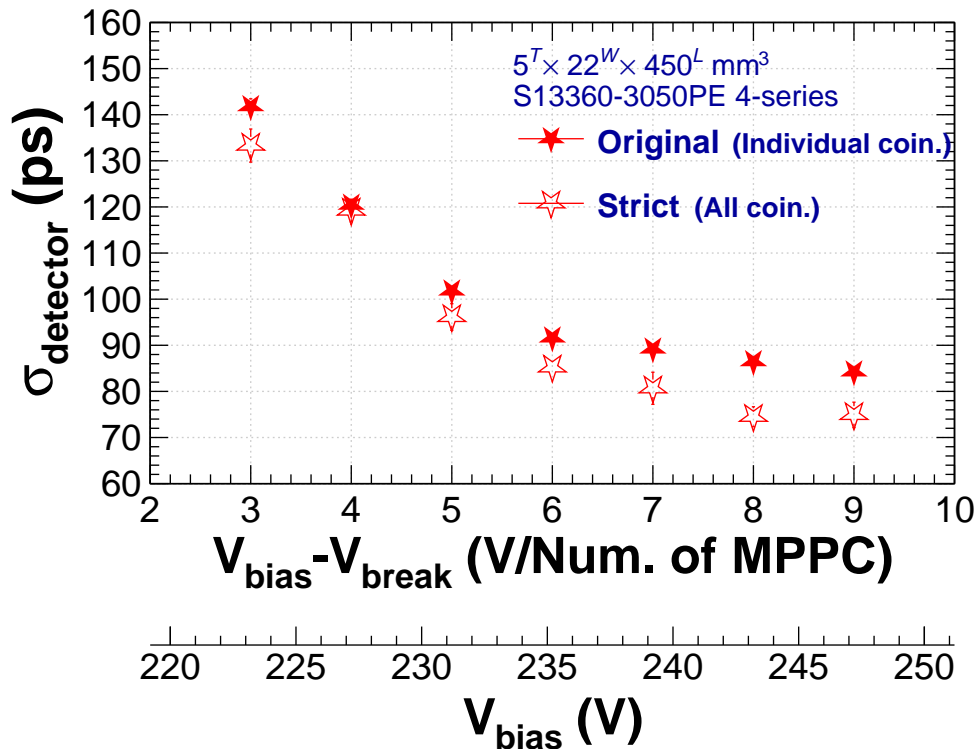
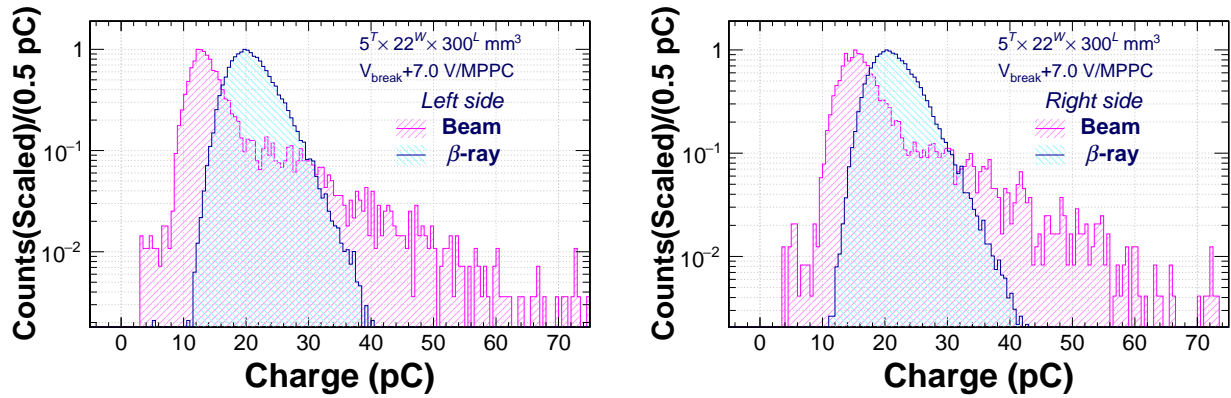


図 4.17: 飛行時間構成時のイベント選択条件による違いの比較。各電圧値の設定において、選択条件を厳しくした場合 (白抜きのマーカー) に時間分解能が小さくなる傾向があることがわかる。

においても、分布の形状が大きく異なっていることがわかる。陽電子ビームによって得られた分布では、電荷量の高い範囲へ長くテールを持った典型的な Landau 分布的形状を取っていることがわかる。このような形状の違いが現れること自体は使用している荷電粒子の性質に起因すると理解できる。 $\beta$ 線源による測定では得られる荷電粒子の最大エネルギーが $^{90}\text{Y}$ 原子核由来の最大 2.28 MeV で制限されてしまうが、本章の実験では、それよりもはるかに値の大きい $\sim 10^2$  MeV/c の運動量の荷電粒子を受けることができる。この違いがテール成分に現れていると解釈できる。その一方で、その分布の高さが最大となる横軸の値は $\beta$ 線源による結果と比較すると $\sim 5$  pC 程度低くなっていることが直感的に見て取れる。このことから、 $\beta$ 線源による測定と比較して光量が少なくなっていると解釈される。このことを定量的に評価する。第 3 章にて電荷量分布の評価を行った際と同様に、左右の MPPC の電荷量分布に式 (3.10) の関数をフィットすることで分布の MPV を求め、その相乗平均を比較する。その結果を表 4.5 に示した。MPV の相乗平均値の値は $\beta$ 線による測定時と比較して、 $\sim 30\%$  低い値となった。同じ構成の MPPC、回路構成で測定を行ったことから、電荷量の減少は光量の減少と解釈される。この光量の減少が $\beta$ 線源を用いた測定と比較した場合の時間分解能の悪化につながったものと考えられる。

#### 4.7.5 モンテカルロシミュレーションを用いたエネルギー損失の見積もり

4.7.4 節にて第 3 章の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  $\beta$ 線源による測定で得られたデータと比較したところ、電荷量分布の MPV が $\sim 30\%$  小さい値を取ることがわかった。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  $\beta$ 線源と本実験で使用した陽電子ビームとではエネルギーが大きく異なる。最小電離損失を取る運動エネルギーよりも十分にエネルギーの高い陽電子の方が、エネルギー損失は小さくなると予想されるため、直感的にはこれが電荷量の違いに影響したと考



(a) 荷電粒子照射方向に対し左側の MPPC の電荷量。 (b) 荷電粒子照射方向に対し右側の MPPC の電荷量。

図 4.18: 陽電子ビームを用いた場合と  $\beta$  線源を用いた場合での電荷量分布の比較 (ヒストグラムの比較)。(a): 荷電粒子照射方向に対し左側の MPPC の電荷量。(b): 荷電粒子照射方向に対し右側の MPPC の電荷量。

表 4.5: 陽電子ビームを用いた場合と  $\beta$  線源を用いた場合での電荷量分布の比較 (分布の MPV 値の比較)。式 (3.10) によるフィットの結果を示した。陽電子ビームを用いた場合 (表下段) では、電荷量の MPV が減少しており、特に相乗平均では  $\sim 30\%$  少ないことがわかった。

| 荷電粒子の種類                                | 進行方向左側での MPV 値<br>(pC) | 進行方向右側での MPV 値<br>(pC) | 左右の相乗平均<br>(pC) |
|--|------------------------|------------------------|-----------------|
| $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$ 線源 | $18.9 \pm 0.4$         | $19.6 \pm 0.4$         | $19.3 \pm 0.3$  |
| 陽電子ビーム                                 | $11.98 \pm 0.05$       | $14.38 \pm 0.06$       | $13.1 \pm 0.04$ |

えられる。このことを定量的に検討するため、モンテカルロシミュレーションを用いてエネルギーの異なる荷電粒子を入射した場合の応答について調査した。

#### 4.7.5.1 シミュレーションのセットアップ

##### 検出器の配置

シミュレーションのセットアップを図 4.19 に示した。また、この仮想空間上で配置した物体を表 4.6 にまとめた。厚さ 5 mm、幅 22 mm、長さ 300 mm のプラスチックシンチレータを配置し、この重心を座標原点として定義した。シンチレータの厚さ方向と一致するように  $z$  軸、長さ方向を  $x$  軸として定義した。また、 $z$  軸の負から正の方向に見たときの左手方向  $x$  軸の正とした。このシンチレータをここでは試作 ToF として扱う。更に試作 ToF を挟み込むようにして 2 つのプラスチックシンチレータを配置した。これら 2 つのシンチレータは実際の測定において使用したリファレンス検出器を仮定し、実際の検出器の大きさにあわせて  $3^x \times 3^y \times 1.5^z \text{ mm}^3$  とした。それぞれの重心が  $z$  軸上に位置するようにそれぞれ  $z = -8 \text{ mm}$ ,  $+8 \text{ mm}$  に設置した。上流側に設置したものを Ref1、下流側を Ref2 と称する。また、 $z = -10 \text{ mm}$ ,  $-6 \text{ mm}$ ,  $-3 \text{ mm}$ ,  $+3 \text{ mm}$ ,  $+10 \text{ mm}$  の計 5 か所に仮想検出器を配置した。大きさはいずれも  $1000^x \times 1000^y \times 0.2^z \text{ mm}^3$  であり、物質は “G4\_Galactic” (geant4 内で定義される真空に相当する物質) である。これら検出器を配置した仮想空間 (world) 全体の大きさは  $10^x \times 10^y \times 10^z \text{ m}^3$  であり、空間全体は空気で満たされている状態とした。但し、シミュレーション結果の解析では試作 ToF と Ref1、

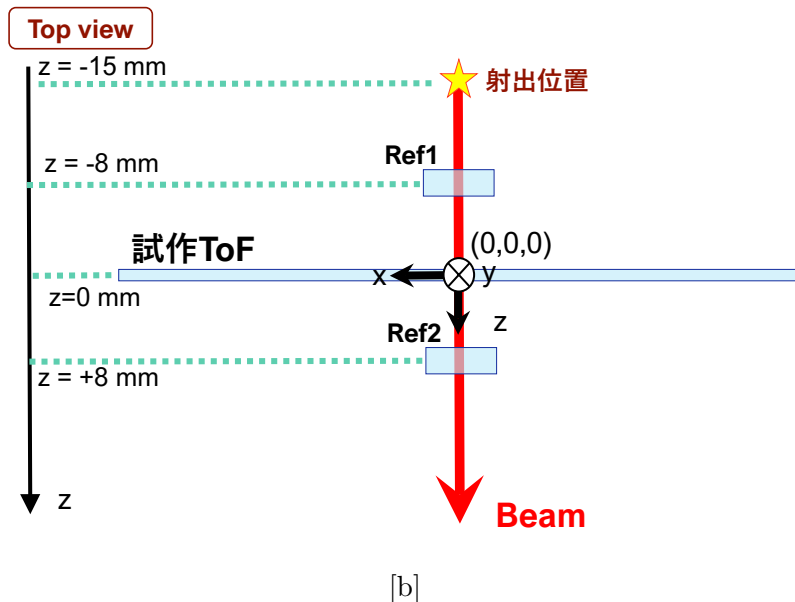
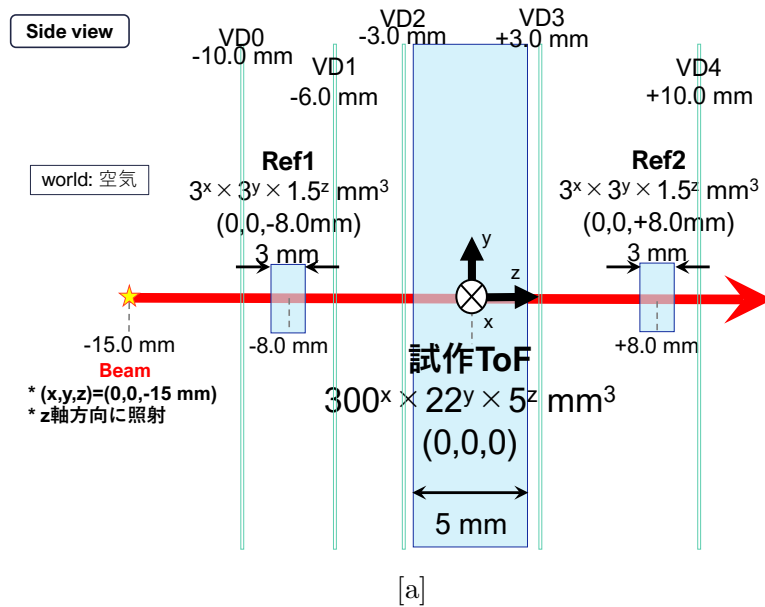


図 4.19: シミュレーションのセットアップ。[a]: セットアップを側面から見た概念図。[b]: セットアップを上面から見た概念図。但し [b] では簡略化して試作 ToF と Ref1、Ref2 のみ示した。

Ref2 のヒット情報のみを用いた。

#### 照射するビーム

ここでは、上記のように設定したジオメトリ内で 2 種類の異なる設定で荷電粒子を打ち込むことで比較を行った。ここでは  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$  線源からの電子を照射すること仮定した場合と陽電子ビームを照射することを仮定した場合の 2 つの設定を用いた。それぞれの設定を表 4.7 に示した。以下では記述を簡略化するため、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$  線源相当の設定を case1、陽電子ビーム相当の設定を case2 と称する。case1 では粒子の種類は  $e^-$ 、運動エネルギーは 1.0 – 2.28 MeV の範囲で一様生成とした。この範囲の上限値は  $^{90}\text{Y}$  原子核による  $\beta$  崩壊の  $Q$  値から決定した。case2 では粒子は  $e^+$ 、運動エネルギーは 500 MeV で固定とした。いずれのセッティングにおいても、ビームの照射位置は  $(x, y, z) = (0, 0, -15 \text{ mm})$  であり、方向は  $z$  軸の正方向で一様な方向で、角度は固定とした。シミュレーションを実行する際は、いずれの設定

表 4.6: 仮想空間上で設置した物体。それぞれの物体の大きさ及び物質を本文中で記述する際の名称と共に示した。

|     |             | 試作 ToF                         | Ref1 | Ref2 |
|-----|-------------|--------------------------------|------|------|
| 大きさ | $x$ 方向 (mm) | 300                            | 3    | 3    |
|     | $y$ 方向 (mm) | 22                             | 3    | 3    |
|     | $z$ 方向 (mm) | 5                              | 1.5  | 1.5  |
| 位置  | $x$ (mm)    | 0                              | 0    | 0    |
|     | $y$ (mm)    | 0                              | 0    | 0    |
|     | $z$ (mm)    | 0                              | -8   | +8   |
| 物質  |             | プラスチックシンチレータ (polyvinyltolene) |      |      |

表 4.7: シミュレーションで使用したビームの設定。いずれも照射位置及び粒子の射出方向は固定とした。

|                         |  | $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$ 線源 | 陽電子ビーム      |
|-------------------------|--|--|-------------|
|                         |  | case1                                  | case2       |
| 粒子                      |  | $e^-$                                  | $e^+$       |
| 運動エネルギー (MeV)           |  | 1.0 - 2.28(一様)                         | 500(固定)     |
| 照射位置 ( $x, y, z$ ) (mm) |  | (0, 0, -15)                            | (0, 0, -15) |
| $z$ 軸に対する角度 (deg)       |  | 0                                      | 0           |

でも生成するイベント数は 250000 とした。

#### 4.7.5.2 シミュレーション結果

結果を示す。解析に当たっては、より実際の条件に近づけるために、生成した全事象のうち試作機の上流と下流に設置した2つのシンチレータにヒットがあった事象を選択して解析した。これは実際のデータ取得時に前後に設置したリファレンス検出器2つと試作機でのコインシデンスを要求したことと同等であるとみなせる。この事象選択を行った後の試作 ToF でのエネルギー損失の分布を図 4.20 に示した。水色のヒストグラムが case1( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$  線源からの電子を想定した場合)、桃色のヒストグラムが case2(陽電子ビームを想定した場合) のエネルギー損失の分布である。比較のため、それぞれのヒストグラムはそれぞれのエントリー数で規格化して示した。case1 の分布に対して case2 ではエネルギー損失の低い領域にイベントが集中していることがわかる。これを定量的に評価するために、それぞれの分布に対して Landau 関数をフィットし MPV を求めた。フィット結果を図 4.20 中に示した。それぞれ青の破線が case1、赤の破線が case2 に対するフィット結果である。得られた結果は

$$\text{case1} : 0.9560 \pm 0.0026 \text{ MeV} \quad (4.6)$$

$$\text{case2} : 0.8069 \pm 0.0002 \text{ MeV} \quad (4.7)$$

であった。このフィット結果から case1 での MPV に対して case2 での MPV の相対的な変化量  $\Delta MPV$  を考える。

$$\Delta MPV = \frac{0.9560 - 0.8069}{0.9560} = 0.1561 \sim 0.2 \quad (4.8)$$

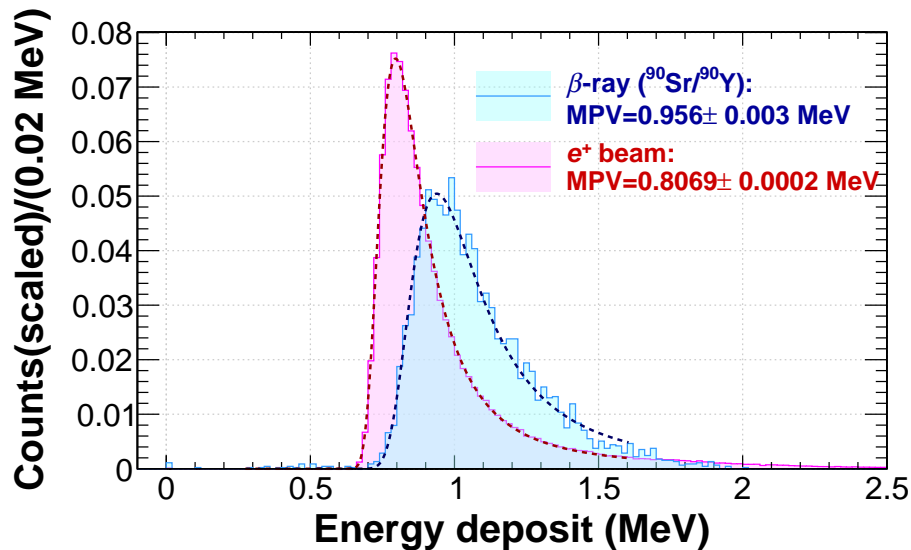


図 4.20: 異なるエネルギーの荷電粒子を入射した場合のエネルギー損失の比較。水色のヒストグラムが $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源からの電子を想定した場合、桃色のヒストグラムが陽電子ビームを想定した場合のエネルギー損失の分布である。試作 ToF の上流・下流それぞれに設置したシンチレータにヒットがあったことを要請しイベント選択を行ったものである。但し、それぞれ統計量でスケールして示した。また、Landau関数によるフィットの結果を併せて示した。

より、case1 及び case2 での荷電粒子の違いによってエネルギー損失は $\sim 20\%$ 程度の減少が生じると見積もることができる。このことから、運動量  $500 \text{ MeV}/c$  陽電子ビームを用いた場合にエネルギー損失が減少することがわかる。この減少が光量の減少に影響したと予想される。しかし、この変化のみでは 4.7.4 節で電荷量分布より見積もった光量の減少を完全に説明することはできない。こうした光量の減少を引き起こす要因として、MPPC をプラスチックシンチレータに取り付ける際に、接合が十分ではなく、プラスチックシンチレータから MPPC の受光面へシンチレーション光が正しく届かなくなってしまうということが考えられる。

## 4.8 陽電子ビームを用いた性能評価試験のまとめ

$\beta$ 線源による性能評価よりも実際の実験環境における動作の評価を行うべく、東北大学電子光物理学研究センターの GeV $\gamma$  照射室の陽電子ビームラインを利用して性能評価試験を実施した。

この実験では、 $5^T \times 11^W \times 300^L \text{ mm}^3$  と MPPC S14160-3015PS 2 個直列接続、 $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$  と MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続の 2 つに加え、MPPC S13360-3050PE を用いた構成として  $5^T \times 11^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と MPPC S13360-3050PE 2 個直列接続、 $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  と MPPC S13360-3050PE 4 個直列接続の 4 通りの構成について調査を行った。MPPC 印加電圧依存性の測定結果より、MPPC S14160-3015PS を用いた 2 つの構成はいずれも、 $\beta$ 線源による測定の結果と比較して  $\sim 10\text{--}20 \text{ ps}$  程度時間分解能が悪化するという結果となった。しかし、 $V_{bias} - V_{break} > 7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の領域において  $\sigma < 100 \text{ ps}$  を達成できることもわかった。

S13360-3050PE を用いた構成のうち、 $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  を用いた場合には印加電圧を  $V_{bias} - V_{break} > 6.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  としたとき、 $\sigma < 100 \text{ ps}$  となることがわかった。加えて、印加電圧依存性と併せて調査した閾値電圧 ( $V_{th}$ ) 依存性の結果より、本実験で測定したいずれの閾値電圧の設定下でも  $\sigma < 100 \text{ ps}$  を満たすことも分かった。S13360-3050PE を用いた構成では、印加電圧  $V_{bias} - V_{break} = +9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$ 、閾値電圧  $V_{th} = -80 \text{ mV}$  の設定下でビーム照射位置依存性を調査した。その結果、照射位置によって時間分解能が変動することがわかり、その程度はシンチレータ中心部分に照射した場合と比較して  $\sim 10 \text{ ps}$  であった。このことより、本実験で調査したいずれの照射位置でも要求性能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を満足するとわかった。

これらの結果から、実際の実験環境により近い状況においては  $\beta$ 線源を使用して行った性能評価と比較して時間分解能が悪化するという傾向が確認されたものの、要求時間分解能を達成しうる性能を示すということがわかった。

次章では、本章並びに前章での結果を踏まえて決定した新飛行時間測定器の構成を述べる。

## 第 5 章

# 新飛行時間検出器の設計及び性能評価

前章までで、新飛行時間測定器開発のための基礎データ収集及び性能評価について述べてきた。本章ではこれらの結果を受けて決定した新飛行時間測定器の構成について述べる。まず次節でシンチレータ及び回路部分の構成を述べる。ここでは回路部分の構成に合わせて検討を行った MPPC の読み出し方法についても述べる。続いて、5.2 節で決定した構成のうちシンチレータ部分の性能評価の結果を述べる。

### 5.1 新飛行時間検出器の設計

---

本節では、新飛行時間検出器の設計を述べる。ここではプラスチックシンチレータに関わる部分と読み出しに関わる回路系統の部分とで分けて説明を行う。まず、次節でシンチレータ部分の構成について説明する。続く 5.1.2 節で回路部分の構成を述べる。

#### 5.1.1 シンチレータの構成

第 3 章及び第 4 章で行ったシンチレータ形状や反射材の結果より、シンチレータの厚さは 4 – 5 mm の場合に良い時間分解能が得られるとわかった。また、長さは MPPC 個数の組合せにもよるが ~ 400 mm でも目標時間分解能が得られるとわかった。幅についても同様に ~ 40 mm のシンチレータの場合でも問題はないとわかった。更に、反射材の検討の結果、アルミナイズドマイラーが良い時間分解能を示すとわかった。これを基に、使用するプラスチックシンチレータの構成を表 5.1 のように決定した。またこのシンチレータの写真を図 5.1 に示した。但し、反射材としてのアルミナイズドマイラーに加え、さらにその上に遮光用のブラックシートを巻いている。

#### 5.1.2 回路部分の設計

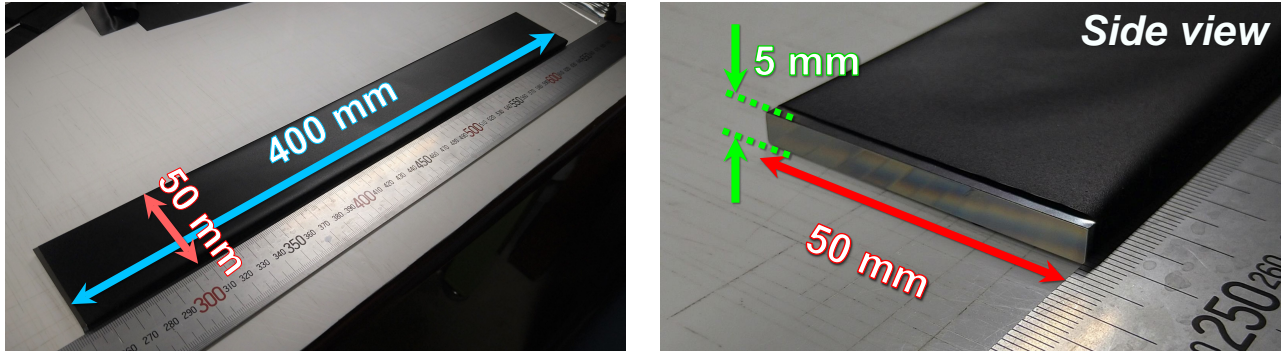
##### 5.1.2.1 アンプ回路の設計

この節では、これまでの調査をもとに決定したアンプ回路について述べる。決定した回路の構成を図 5.2 に示した。この回路は反転微分増幅回路とコンパレータの 2 段階で構成される。

前段の反転微分増幅回路に組み込む各抵抗の値は 3.8 節 (増幅回路の最適化) にて行った結果に基づいて決定した。微分回路を構成するダンピング抵抗は時間分解能に対して強い依存性が確認されず、分解能の悪化へ影響しないとみなした領域から 56  $\Omega$  を選択した。ポールゼロ抵抗  $R_{pzc}$  については、

表 5.1: 決定したプラスチックシンチレータの構成。

| 種類     | 厚さ<br>(mm) | 幅<br>(mm) | 長さ<br>(mm) | 反射材         |
|--------|------------|-----------|------------|-------------|
| EJ-230 | 5          | 50        | 400        | アルミナイズドマイラー |



[a]

[b]

図 5.1: 新飛行時間測定器に用いるプラスチックシンチレータ。表面に反射材としてアルミナイズドマイラーとブラックシートを包装している。[a] シンチレータの前面からみた図。[b] シンチレータの断面をみた図。この面に対して MPPC を取り付ける。

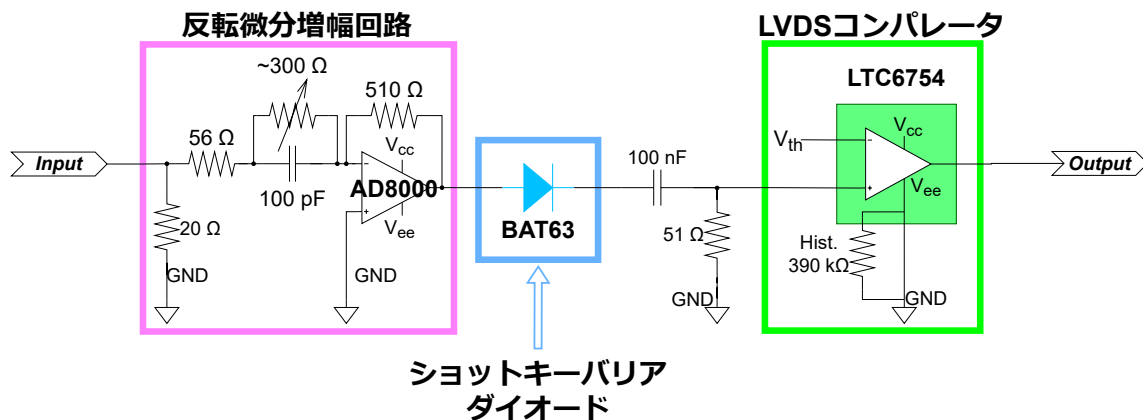


図 5.2: 本研究で決定したアンプ回路の構成。

S13360-3050PE を用いて実施した測定結果より、 $\sim 300 \Omega$  を基本とし、使用する MPPC の構成等によって波形の調整を任意に行うことができるように、可変抵抗とすることを予定している。帰還抵抗  $R_f$  は時間分解能には強い依存性を見せなかったものの、信号の形状には大きく影響することがわかった。ここでは  $510 \Omega$  を用いることとした。また、反転微分増幅回路の後段にはショットキーバリアダイオードとして BAT63 を実装する。

後段のコンパレータには LVDS コンパレータとしてリニアテクノロジー社製 LTC6754 を採用した。このコンパレータにはヒステリシスを制御するため入力ピンが設けられており、直列に抵抗を接続することによってヒステリシスを制御することが可能となる。尚、素子を接続せずに端子を解放した場合には公称のデフォルト値として  $4.5 \text{ mV}$  が適用されることになっている。本研究では、明示的にヒステリシスの値を設定するために、特定の値の抵抗を接続することとした。その値は接続する抵抗値とそれによって



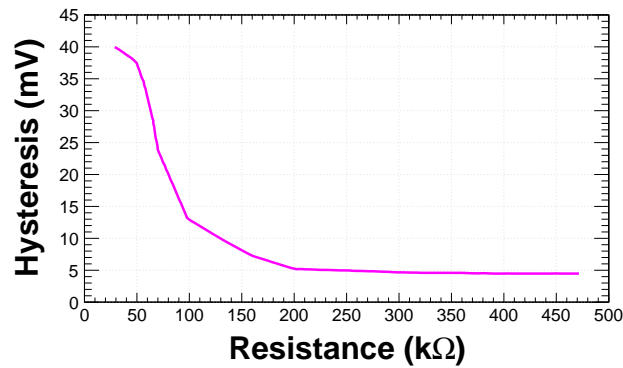


図 5.3: LTC6754 におけるヒステリシス制御用抵抗値と付与されるヒステリシスとの相関 [67]。性能表に記載の図をもとに筆者が読み取りを行いプロットしなおしたものである。

付与されるヒステリシスの値の相関を基に決定した。抵抗値とヒステリシスの値の相関を LTC6754 のスペックシートを基にプロットしたものを図 5.3 に示した。この図より、抵抗値が 360 kΩ 付近を境目として、それよりも大きな抵抗値に対してはヒステリシスの値が ~ 4.5 mV で一定になるような挙動であることがわかる。この相関を基に、導入する抵抗の値を 390 kΩ と決定した。波高弁別のための閾値電圧は外部電源からの供給によって行うが、可変抵抗によるチャンネル単位での微調整を行うことができるようにした。

#### 5.1.2.2 MPPC の読み出し方法

本節では、前節で述べた新たな構成のシンチレータと回路を導入するにあたって検討した MPPC 部分の構成を説明する。第 3 章及び第 4 章を通して S14160-3015PS と S13360-3050PE の 2 種類の MPPC の比較を行ってきた。その結果、S13360-3050PE の方が同じ個数・接続方法を採用した場合に良い時間分解能を示すことがわかった。これを受けて MPPC として S13360-3050PE を採用する。但し、使用個数や接続方法の構成に関しては更なる検討を行う必要がある。以下でこのことについて述べる。

今回新たに導入したシンチレータは幅 50 mm とこれまで用いてきたシンチレータよりもさらに幅の大きいものを選択した。3.7.5 節 (シンチレータの形状と MPPC 個数との関係) にて述べたように、幅の大きなシンチレータであっても MPPC 個数即ち光検出器が覆う面積とシンチレータ断面積の比率を拡大することで時間分解能が向上すると期待される。このことから、取り付ける MPPC の個数や接続方法を検討することによってより良い時間分解能の達成を目指す。新たな構成として、MPPC を 4 個直列接続したものを 2 セット並列に接続するものを想定している。更に、3.8 節 (増幅回路の最適化) にて紹介したように、今回採用した LVDS コンパレータ回路は正方向の波高を弁別する構成である。そのため、コンパレータへ入力されるアンプの出力は正の波高を持つ信号である必要がある。しかし、ここまでの測定で一貫して採用していた MPPC からの読み出し手法は、正の信号として出力を得る方法であったため、アンプの出力は負の信号であった。そのため、MPPC からの信号の極性に関しても新規に検討を行う必要がある。新規案として図 5.4 のような構成を用いることを検討している。これまでは MPPC のカソード側に電圧を印加し、アノード側で信号を読み出す方式を採用してきた。新たに検討した方法では、MPPC のカソードに電圧を印加することは従来と同じであるが、信号の読み出しもまたカソードで行い、アノード側の電極はグランドへ接地する。このことによって、正負の反転した信号を得る。この読み出し手法は、スイスのポールシェラー研究所 (PSI) [72] で展開される MEG-II 実験 [73] において、MPPC を用いた検出器に採用されている方法 [74] を基にしたものである。既に他の実験グループによって採用された

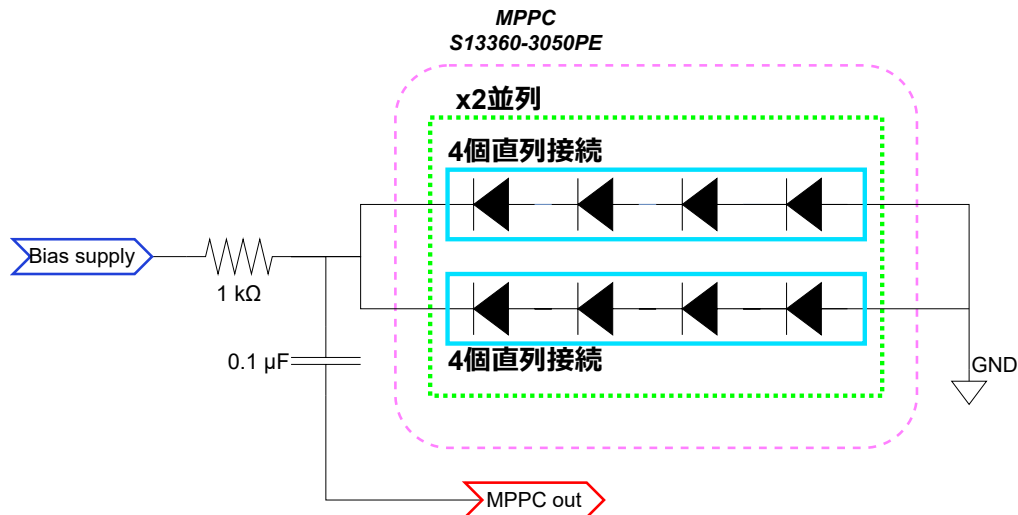
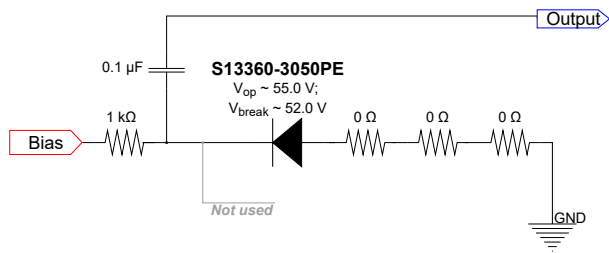


図 5.4: 新たに検討する MPPC 読み出し手法の構成。

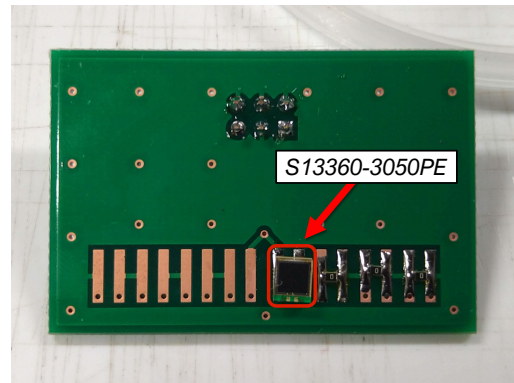
手法であることから、その実用性は保証されているとみなせるが、我々が用いる MPPC が実際にこの方法で動作するかは確認を行う必要がある。

ここでは非常に簡易的ではあるが、直列接続や並列接続は併用せず MPPC1 個のみでカソードから信号を読み出すことができるかの確認を行った。複数個を同時に実装した状態で行う場合、ハンダ付けなど基板実装時の不備に起因する不調等の可能性も高くなってしまい、読み出し手法に由来する問題との切り分けが困難になってしまうと判断したためである。確認に当たって使用したプリント基板を図 5.5 に示す。図 5.5[a] が回路図である。但し、部品未実装の部分に当たる箇所は灰色とし、実際に実装して使用した部分のみ色をつけて示した。図 5.5[b] が実際の基板の写真である。ここでは MPPC として S13360-3050PE を使用した。ここで使用したものの降伏電圧  $V_{break}$  は  $V_{break} \sim 52.0 \text{ V}$  ( $V_{op} = 55.0 \text{ V}$ ) である。但し MPPC を実装する側のみを示した。保護用の抵抗及びコンデンサは基板裏側に実装した。本来 4 個直列接続したものを 2 セット分並列接続で実装できるように計 8 個分のパッドが設けられているが、ここでは一方の系列のみ且つ MPPC1 個分のパッドを使用し、実装しない部分は  $0 \Omega$  のチップ抵抗で接続した。まずは、この MPPC 基板より直接信号を見ることができると確認した。MPPC に  $V_{bias} = 57.0 \text{ V} \sim V_{break} + 5.0 \text{ V}$  を印加し、その出力を特性インピーダンス  $50 \Omega$  の同軸ケーブルで引き出しオシロスコープで確認した。この時の信号を図 5.6 に示した。この時、プリント基板全体はブラックシートで覆い遮光した上で、更にこれをアルミフレームとブラックシートで作った暗箱内に置いて二重に遮光を行った状態で電圧の印加を行った。トリガーレベルの付近にノイズ的な成分が見えるものの、MPPC からの出力が確かに、負方向の信号として得られていることが確認できる。

次に、読み出した MPPC からの信号をこれまで使用していたような構成のアンプ回路へ入力した時の動作を確認した。使用したアンプ回路の回路図を図に示した。アンプ回路を経たのちの信号をオシロスコープで見たものを図 5.8 に示した。この結果、本節に述べたカソードから負方向の信号を得るという読み出し手法が確かに機能することが確認できた。しかしながら、これは MPPC を 1 個に限定した場合の結果である。最終的に直列・並列接続を併用した場合にも同様に信号を得ることができるとは別途確認しなければならない。更に、この構成の下で十分な時間分解能を発揮できるのかという点に関しては、回路部分と組み合わせた上で慎重に検討がなされなければならない。



(a) 回路図



(b) 実際の写真

図 5.5: MPPC 読み出し手法の検討のために使用したプリント基板。(a): 回路図。(b): 実際の写真。MPPC を配置しない部分には  $0\ \Omega$  のチップ抵抗を実装した。写真には写っていないが抵抗及びコンデンサは裏面に実装した。

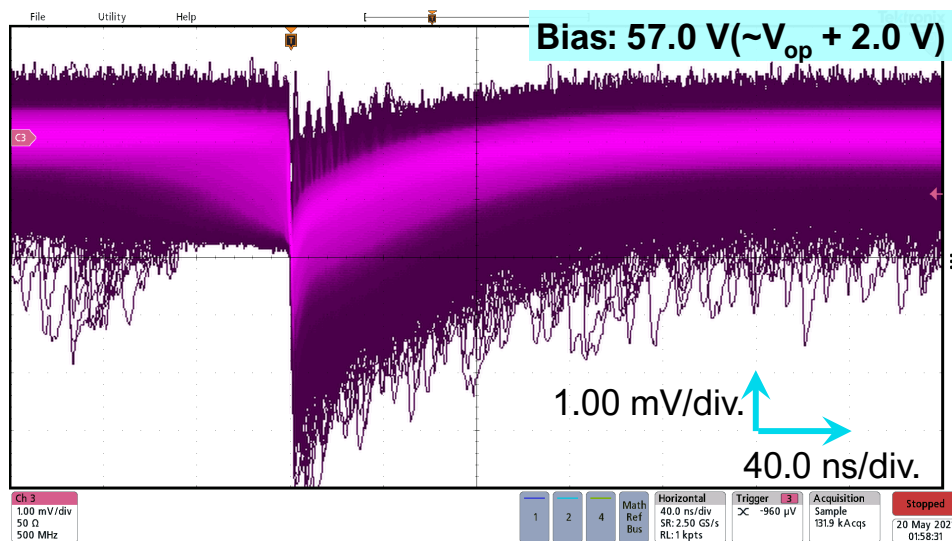


図 5.6: S13360-3050PE に対しカソードから信号を読み出した際の波形。この時の印加電圧は  $\sim V_{break} + 5.0\ \text{V}$  である。基板からの出力は  $50\ \Omega$  の同軸ケーブルで引き出した。

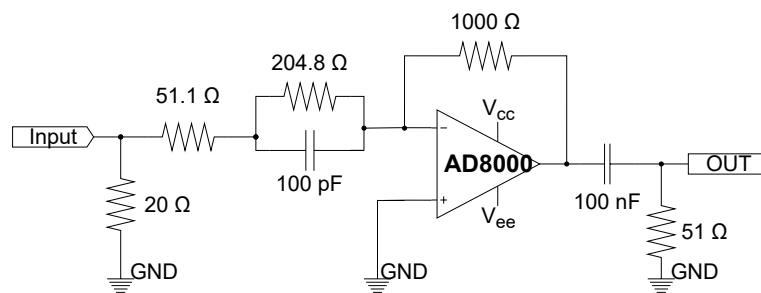


図 5.7: MPPC のカソードからの信号読み出しの検討のために使用したアンプ回路。

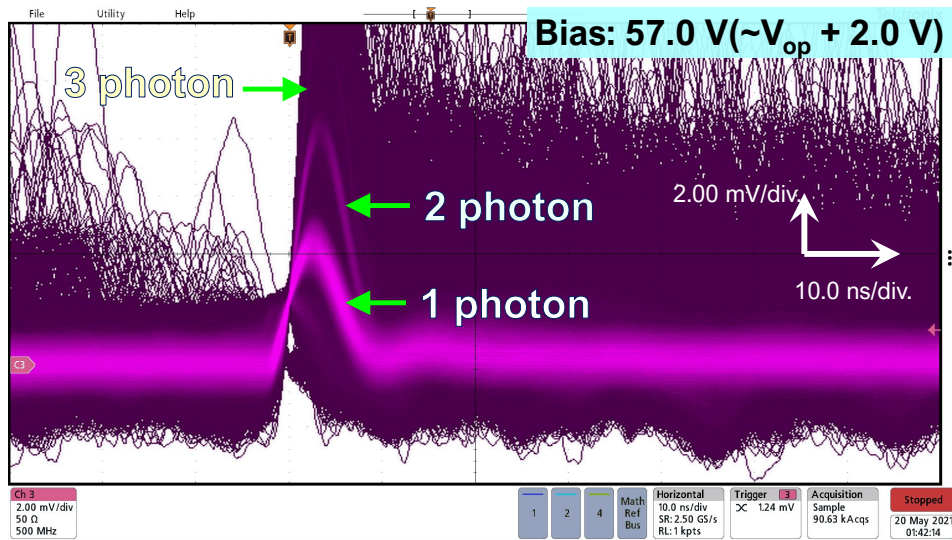
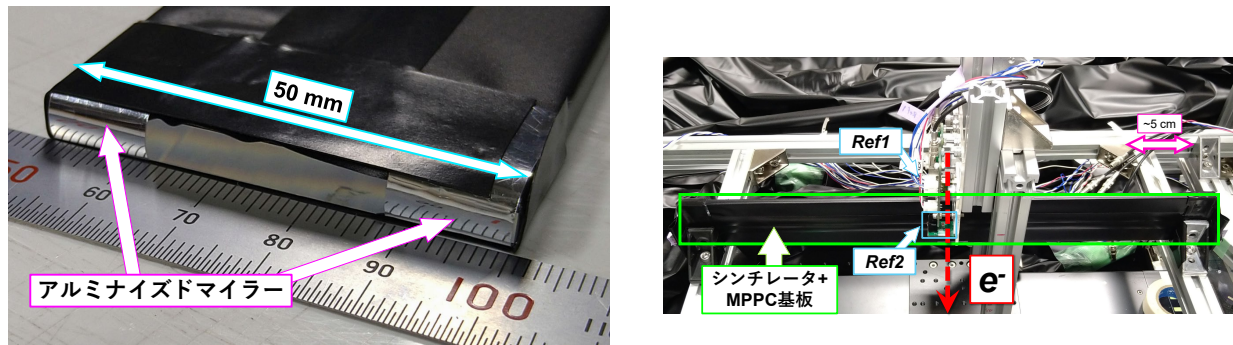


図 5.8: カソードから読み出した信号をアンプ回路に入力した後の波形。1 – 3 photon 相当の離散化した信号を確認できる。この時の印加電圧は  $\sim V_{break} + 5.0\text{ V}$  である。基板からの出力は  $50\ \Omega$  の同軸ケーブルで引き出した。



(a) プラスチックシンチレータの端面 (MPPC 接続面) 処理。

(b) テストベンチ設置時の様子

図 5.9: 新たに導入したプラスチックシンチレータの  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$  線源による性能評価時のセットアップ。(a): プラスチックシンチレータの端面 (MPPC 接続面) の処理。MPPC を接続する部分のみが露出するようにアルミナイズドマイラーで端面を覆った。(b): テストベンチ設置時の様子。第 3 章でのデータ収集時と同様に配置を行った。 $\beta$  線は図中に示した赤色の破線の矢印で示した方向に照射される。

## 5.2 シンチレータ部分の性能評価

5.1.1 節に示した新たな構成のシンチレータに対し、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$  線源を用いて性能評価を行った。ここでは、シンチレータ部分に限定して評価を行うために、MPPC の構成及びアンプ回路は 3.7.11 節で使用したものと同一のものを用いた。MPPC を接続する際には、3.4.1 節 (プラスチックシンチレータの端面の処理) にて述べた処理と同様に、MPPC が接する箇所以外をアルミナイズドマイラーで覆った。MPPC 基板を取り付けた後、テストベンチに配置した。この様子を図 5.9 に示した。(a) が端面処理を行った時の様子である。(b) はデータ取得時にテストベンチに設置した際の写真である。図中奥側から手前に向かって  $\beta$  線を照射した。この状態で、アンプ回路を取り付けた後、全体を遮光してデータ取得を行った。

測定結果を述べる。 $\beta$  線照射位置をシンチレータの長さ方向の中心とした場合の MPPC 印加電圧依存性を図 5.10 に示した。測定は  $V_{bias} - V_{break} = +3.0 - 10.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の範囲で実施した。このうち、 $V_{bias} - V_{break} = +6.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  の点については、再現性確認のために印加電圧依存性の測定開始時と終了時、後述する  $\beta$  線照射位置依存性の測定開始時及び終了時の計 4 回測定を行った。図 5.10 にはそれら各回で得られた結果の加重平均を当該電圧での結果として示した。尚、計 4 回の測定を行ったうち、最も時間分解能が悪かった場合で  $\sigma_{\text{detector}} = 104.8 \pm 0.6 \text{ ps}$ 、最も良かった場合には  $\sigma_{\text{detector}} = 99.8 \pm 0.6 \text{ ps}$  であった。測定したいずれの印加電圧の点においても要求性能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を満たすという結果になった。特に  $V_{bias} - V_{break} = +7.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時には  $\sigma_{\text{detector}} = 98.3 \pm 0.9 \text{ ps}$ 、 $V_{bias} - V_{break} = +9.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  印加時には  $\sigma_{\text{detector}} = 93.5 \pm 0.9 \text{ ps}$  であった。

併せて  $\beta$  線照射位置依存性の測定も行った。座標系の定義は 3.7.7 節にて示した定義に従い、ここでも  $\beta$  線の進行方向から見て右手側を正の方向に取った。MPPC 印加電圧を  $V_{bias} - V_{break} = +6.0 \text{ V/Num. of MPPC}$  で固定し、 $-100 \text{ mm}$  から  $+150 \text{ mm}$  の範囲で測定を行った結果を図 5.11 に示した。中心よりもずれた位置に照射した場合に時間分解能が小さい値を示す傾向がみられるものの、測定

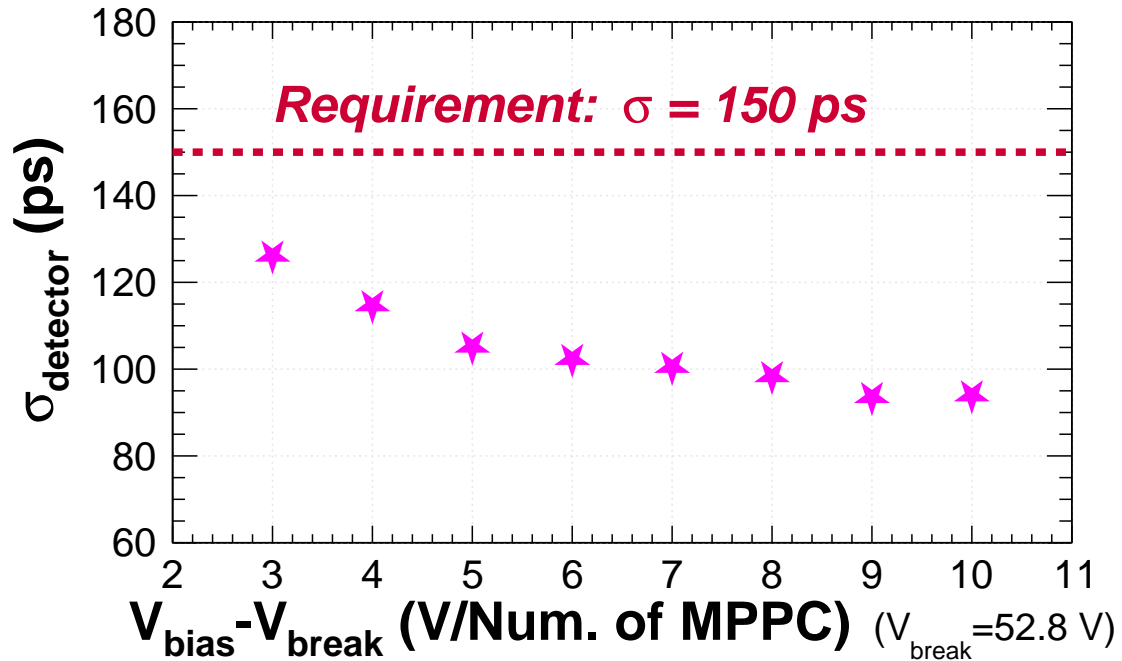


図 5.10: MPPC 印加電圧依存性。横軸の値はこれまでに従い、降伏電圧  $V_{\text{break}}$  を基準とした印加電圧を個数で平均化したものである。使用した MPPC の構成は本文中に示した通り、S13360-3050PE 4 個直列接続である。いずれの測定点においても目標性能である  $\sigma < 150 \text{ ps}$  を満たした。

を行ったすべての位置で  $\sigma_{\text{detector}} < 150 \text{ ps}$  であることが確認された。-100 mm から +100 mm の範囲で測定したデータをすべて統合し 1 つのランとみなして解析を行った場合の結果を、当該範囲に赤色の一点鎖線として示した。これは -100 mm から +100 mm の範囲で一様に  $\beta$  線が照射された状況に近いものをデータ上で再現したとみなせる。縦軸方向の値が結果として得られた時間分解能を示す。結果は  $\sigma_{\text{detector}} = 105.0 \pm 0.3 \text{ ps}$  であった。中心位置にのみ照射した場合の結果は  $\sigma_{\text{detector}} = 102.1 \pm 0.4 \text{ ps}$  (前述の通り、計 4 回の結果の加重平均) であった。このことから、照射位置が固定ではなく一様である場合であっても、要求性能を満たす動作が期待できると考えられる。

以上の印加電圧依存性及び照射位置依存性の測定結果より、本節で採用したシンチレータの構成は要求時間分解能を達成可能であると考えられる。

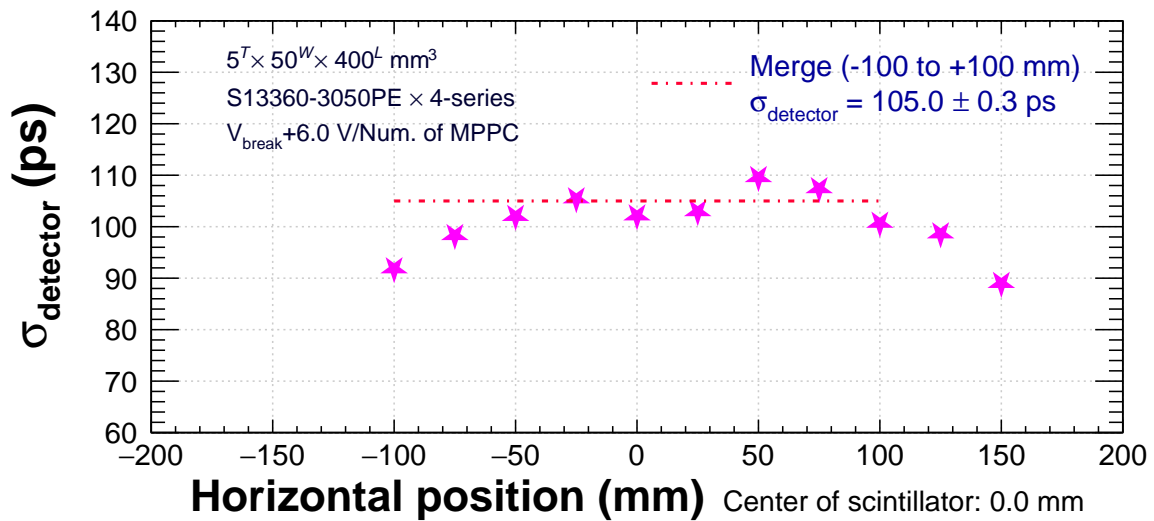


図 5.11:  $\beta$  線照射位置依存性。横軸の値はシンチレータ長さ方向中心を原点に取った時の位置である。赤色の一点鎖線は  $-100$  mm から  $+100$  mm の範囲で測定したデータを統合し解析を行った場合の結果である。印加電圧はいずれの測定点でも  $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}} = +6.0$  V/Num. of MPPC、MPPC の構成は本文中に示した通り S13360-3050PE 4 個直列接続である。

## 第6章

# まとめと今後の課題

本章では、本研究のまとめと今後の課題を述べる。

近年、質量数  $A = 3$  という極めて基本的な系であるハイパー核の  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の寿命と束縛エネルギーについて注目が高まっている。 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  はハイパー核実験の黎明期より泡箱や原子核乾板により観測されており、重水素原子核に  $\Lambda$  粒子が非常に浅く ( $B_{\Lambda} = 130 \text{ keV}$ ) 束縛したハイパー核であると考えられてきた。過去の泡箱や原子核乾板の測定結果もこれを支持するものであった。しかし、近年、重イオン衝突を用いたハイパー核実験により、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  の  $B_{\Lambda}$  はより深く寿命も短いとする結果が相次いで報告された。一方で、同様の手法を用いながらも相反する結果も報告されており、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  を取り巻く状況は混迷を極めている。このような状況を打破すべく、我々はこれまでとは異なる手法による  $\Lambda$  ハイパー核直接寿命測定を東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) で計画している。この実験では  $(\gamma, K^+)$  反応における欠損質量法を用いて  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  事象の同定を行う。これに必要な  $K^+$  中間子の運動量は既設の磁気スペクトロメータ NKS2 を用いて行う。しかし、NKS2 既設の飛行時間測定器は時間分解能に乏しく、 $K^+$  事象の同定は困難であった。本研究では、この実験遂行のために必要な新飛行時間測定器の開発を行った。

### 6.1 ${}^{90}\text{Sr}{}^{90}\text{Y}\beta$ 線源による試作機の基礎データ収集

本研究ではこの新飛行時間測定器の開発に向けた基礎データ収集として、MPPC(浜松ホトニクス S14160-3015PS S13360-3050PE) とプラスチックシンチレータを組み合わせた試作機の製作を行い、これを用いて  ${}^{90}\text{Sr}{}^{90}\text{Y}\beta$  線源によるデータ収集を行った。これを通じて MPPC の構成や、シンチレーション検出器の形状・反射材などが時間分解能に与える影響について調査を行った。以下に述べるような結果を得た。

#### MPPC の個数依存性

MPPC の個数や接続方法 (直列/並列接続) に関して比較を行った。その結果、MPPC の個数を増やすことで時間分解能が向上すると共に、直列接続を用いると並列接続よりも良い時間分解能が得ることができ、特に  $5^T \times 22^W \times 300^L \text{ mm}^3$  (EJ-230) と MPPC S14160-3015PS 4 個直列接続の構成で  $\sigma < 100 \text{ ps}$  が達成できることがわかった。



## シンチレータの幅依存性

シンチレータの幅を 11 mm – 44 mm の範囲で検討した結果、幅の大きなシンチレータでは時間分解能が悪化したが、シンチレータの断面積に対して MPPC が覆う面積の比率によって時間分解能が決まることがわかった。これによって幅 ~ 40 mm のシンチレータでも要求性能である  $\sigma < 150$  ps を達成可能であるとわかった。

## その他

様々な種類のシンチレータの比較からシンチレータの特性の寄与を調査した結果、発光量と立上り時間のバランスが重要であるとわかった。このほか、反射材や MPPC の種類による違いも検討を行い、特にアルミナイズドマイラーと S13360-3050PE 4 個直列接続の組合せで  $\sigma_{\text{detector}} \sim 100$  ps となるという結果を得た。

また、アンプ回路の構成も検討した。LVDS コンパレータを導入し Time-Over-Threshold (TOT) の取得を検討した。また、アンプ後段にショットキーバリアダイオード (Infineon BAT63) を実装することでアナログ信号に見られたテール部分を約 ~ 25% まで抑制できるとわかった。

---

## 6.2 陽電子ビームによる性能評価

$\beta$  線源によるテストベンチのみならず、より実際の実験環境に近い設定でのデータ収集として、ELPH の陽電子ビームラインを用いてデータ収集を行った。その結果、テストベンチでのデータとの比較から、シンチレーション光の減少に起因するとみられる時間分解能の悪化 (~ 20 ps) が確認された。しかしながら、時間分解能としての要求性能  $\sigma < 150$  ps は達成可能であるという結果を得た。

---

## 6.3 新飛行時間測定器の構成

前節までの結果を踏まえて、新飛行時間測定器の構成を決定した。プラスチックシンチレータとして  $5^T \times 50^W \times 400^L$  mm<sup>3</sup>(EJ-230) を採用し、用いる反射材はアルミナイズドマイラーとした。これらと MPPC(S13360-3050PE、4 個直列接続) を組み合わせて <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y  $\beta$  線源を用いて時間分解能の評価を行った結果、 $\sigma < 150$  ps の時間分解能が達成可能であることを確認できた。MPPC は S13360-3050PE を採用した。回路部分は反転微分増幅回路と BAT63、LVDS コンパレータを組み合わせた構成とした。

---

## 6.4 今後の課題

本研究によって、シンチレータのサイズ及び使用する反射材といった、検出器を構成するセグメント単位の構成を決定した。今後は、検出器全体の構成を決定していくことが必要となる。新飛行時間測定器の

開発のためには、今後決定した回路構成も含めた時間分解能評価が必要である。また、実際に ELPH 第 2 実験室に導入した場合の配置の最適化等を行っていかねばならない。これにより、設置位置や不感領域の大きさを決定する。その次なる第一歩として、2022 年 3 月に ELPH の第 2 実験室において、性能評価を実施することを予定している。これらの実験を随時フィードバックすることで新飛行時間測定器の開発をより詳細に行っていく必要がある。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導とご協力を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

指導教員である中村哲教授には、学部生として配属された頃より今に至るまで大変お世話になりました。日々のミーティングで時折いただいた鋭いご指摘は私自身の理解の未熟さや研究に対する姿勢の甘さを気づかせるものであったとともに、私の気を引き締めさせるものでありました。それだけではなく、今後の方向性等についての丁寧なご助言によってより研究を膨らませることができました。研究活動のみならず、学部の講義の TA としても大変お世話になりました。教科書的な内容に縛られず、それでいて内にある物理を気づかせるような引き出しの豊富さや受講生の疑問に丁寧に向き合うその姿から、多くのことを学ぶことができ貴重な経験となりました。修士論文の作成が遅々として進まなかった私に対してもぎりぎりまで丁寧に校正をしていただき、本当にありがとうございました。また、修士論文発表会の発表準備の場面のみならず、発表の最中にも助けていただきました。研究室内外の様々な業務でご多忙であるはずにもかかわらず、学生一人ひとりにしっかりと向き合うそのお姿は、研究者や教育者のみならず、人としてのあるべき姿を示すものであったと感じます。思い返すと、学部入学式の日に研究室見学で偶然この研究室に立ち寄り、中村教授のお話を聞いたことが、私が原子核物理に興味を抱ききっかけでした。この研究室を選び、中村教授のもとで研究をすることができて本当に良かったと心から思います。本当にありがとうございました。

田村裕和教授には、ハイパー核ゼミ等を通じて原子核物理の面白さや個々の実験に関する事柄等を大変熱心に教えていただきました。修士1年次に私の不手際によってオープンキャンパス用の検出器を損傷させる事態を引き起こしてしまった際には、田村教授に冷静に対処していただいたことで大事に至らずに済みました。大変なご迷惑をおかけしてしまいました。深く反省しております。また、研究室内でのミーティングや研究会でのご指摘を通じて自分自身の研究に対する理解を深めることができました。ありがとうございました。

永尾翔助教には、研究室で過ごしてきた中でありとあらゆる面で多大なご助力をいただきました。研究を始めたばかりで右も左もわからなかった私に、プログラムや検出器の扱い方といった技術的な事項のみならず研究に関するあらゆることを教えてくださいました。本修士論文に記載した結果の大半は永尾助教の絶大なご支援があってこそのものであります。理解力の乏しい私にとって、どんな些細なことでも何度も丁寧に教えてくださる永尾助教の存在はとても大きく心強いものでした。永尾助教のご協力をなくして、 $\beta$ 線テストベンチの構築やデータ収集は不可能でしたし、ELPHでテスト実験を行うこともできませんでした。怠惰で日々の進捗に乏しい私に根気強くそして篤くご指導を続けてくださいました。ここに至るまで私が研究を続けられたのは永尾助教のおかげといっても過言ではありません。本当にありがとうございました。ToFの完成という結果という形をもって永尾助教に報いることが出来なかったことは慙愧に堪えません。本修士論文での結果はあまり大きなものとは言えないかもしれませんが今後の開発に少しでも貢献できたのであれば幸いです。また、研究以外でも学生実験の TA 業務でもお世話になりました。永尾助

教のお誘いもあって担当した業務でしたが、人に何かを教えるということの難しさを実感することができた貴重な機会でした。繰り返しになりますが、ここに感謝の意を申し上げます。本当にありがとうございます。

金田雅司助教には、学部生の頃からオープンキャンパス等でお世話になりました。また、普段のミーティングや実験準備等ではご自身の豊富な経験に基づいた様々な助言をいただき、大変勉強になりました。特にプラスチックシンチレータの形状や反射材についての見解や VDC のワイヤ修理に関することなど非常に参考になりました。本当にありがとうございました。

三輪浩司准教授、本多良太郎助教(現 KEK 准教授)、早川修平助教にはセミナーやミーティングを通じて多くのご助言をいただきました。特に MPPC に関するご意見は大変参考になりました。ゼミの内容について居室に押しかけて質問をした際にも快く応じ、丁寧に説明をしていただきました。本当にありがとうございました。

東京工業大学の藤岡宏之准教授には、コラボレータとして、ミーティングで多くの的確な、そして鋭いご助言をいただきました。本当にありがとうございました。

技術職員である梅津裕生氏には、実験室での様々な作業や放射線手続等でお世話になりました。また、積極的に学生のゼミに参加されるなど、その姿勢は大変尊敬しております。

原子核物理研究室秘書の高橋あゆみ氏、佐々木幸恵氏には様々な事務手続きに際して大変お世話になりました。私の不備により多大なご迷惑をおかけすることもありました。誠に申し訳ございませんでした。

同グループの先輩である外山裕一氏、板橋浩介氏、上原圭太氏、秋山タケル氏、奥山和樹氏、梶川俊介氏、坂尾珠和氏からは日々の研究に取り組まれるその姿勢から多くのことを学ばせていただきました。ありがとうございました。特に外山氏からは、研究についてのコメントをいただく機会が多々あり、非常に大きな助けとなりました。本当にありがとうございました。本研究で用いた回路等は外山氏が修士の頃より続けてこられた検出器開発の結果に基づいたものでありました。それにとどまらず、ご自身の博士論文執筆で忙しいにも関わらず、解析用プログラムの提供や発表資料へのコメント等あらゆる面で助けていただきました。外山氏の研究なくしては本研究の結果は成しえないものでした。また、ELPH での実験等様々な場面でリーダーシップを発揮してグループを主導されるそのお姿はとても頼もしいものでした。本当にありがとうございました。新天地での今後の更なるご活躍をお祈りしております。板橋氏の日夜研究に取り組まれるそのお姿には非常に強い感銘を受けました。ありがとうございました。秋山氏には 2021 年 3 月の GeV $\gamma$  でのビームタイムの際に絶大なご助力をいただきました。秋山氏がご自身の研究の中で築き上げた解析技術によって安定したオンライン解析やデータ収集を行うことが出来ました。また、日々のミーティングなどでの進捗には毎回のように強く感銘を受けております。ありがとうございました。奥山氏の物理に対して真摯に向かうその姿勢は大変尊敬しております。また、本修士論文の内容と直接関係するところではありませんが、2021 年 7 月の ELPH での実験に際しては準備・データ取集中共に、冷静且つ的確な判断でその場を率いてくださいました。常に動じることなく穏やかなその姿は非常に頼もしいものでした。本当にありがとうございました。

原子核物理研究室の同輩である市村康祐氏、鎌田健人氏、北岡智真氏、北山翔氏、齋藤由子氏、中村雄紀氏、水野征哉氏、和田俊輔氏には共に研究室で過ごす中で大変お世話になりました。皆さんと研究の話だけでなく、他愛のない話ができただけの時間もとても貴重なものでした。皆さんのおかげで修士論文執筆期間を乗り越えることが出来ました。ありがとうございました。

中村氏とは、学部生でグループに配属された時からミーティングや実験など活動を共にしてきました。着実に研究を進め、毎週のミーティングの場で報告するその姿にいつも感銘を受けておりました。水野氏とは開発している検出器の基本的な構成がプラスチックシンチレータと MPPC で似ているということも

あって、Tagger の調整等の手伝いをする機会をいただいたこともありました。いつも丁寧に、そして着実に研究を進める姿、それを丁寧に話される誠実な姿は大変尊敬しております。お二人と同じグループの一員として研究ができたことに大変感謝しております。本当にありがとうございます。

東京工業大学藤岡研究室の深田憲史氏とは、コラボレーターとして日々のミーティングにとどまらず、NKS2 の実験で共に準備やデータ収集に当たる機会に恵まれました。常に冷静でそれでいて研究に邁進される姿は大変尊敬しております。共に活動できたことを嬉しく思います。ありがとうございました。

後輩である木野量子氏、橘昂我氏、永野慎太郎氏、大浦文也氏、森野泰斗氏、石毛達大氏の研究に対して真摯に向かう姿には強い感銘を受けております。本当にありがとうございました。

木野氏には、アンプ回路の性能評価において、データ収集から解析に至るまで全面的にご協力を賜りました。本修士論文中に示した結果のうち、アンプ回路に関する部分は木野氏のご協力なくしては決して成し得ないものでした。氏の迅速かつ丁寧な仕事にはいつも驚かされるばかりでした。ここに改めて感謝の意を表します。本当にありがとうございます。

橘氏には、本修士論文の内容とは直接的な関係はないものの、NKS2 の検出器修理等の種々の作業の場面でご協力をいただきました。手際よく仕事をされるその姿はとても頼もしく映りました。

永野氏には、2021 年 3 月の GeV $\gamma$  でのビームタイムの際に多大なご協力をいただきました。永野氏の正確かつ迅速な仕事によって実験を安定して行うことができました。ありがとうございました。

学部生の頃からの友人の皆様に感謝を申し上げます。ふとした時に学内で顔を合わせて他愛のない話を出来たことが息抜きにもなり、心が安らぐときでもありました。ありがとうございました。

最後に、決して余裕があるとは言えない経済状況でも私の大学・大学院への進学に理解を示していただき、見守ってくれていた母、兄、祖父、祖母にも感謝しております。本当にありがとうございました。

大変残念ながら、紙面も限られておりますので、ここに書ききることのできなかつた方も含めまして、私の大学院での 2 年間に関わったすべての方々に、改めて厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

令和 4 年 2 月吉日  
藤原友正

## 付録 A

# $\beta$ 線源による測定において用いた各種シンチレータに関する情報

本論文の第 3 章ではシンチレータの種類依存性に関しての測定を行った。本章では、参考として、その際に使用した各種シンチレータについて記載する。今後のプラスチックシンチレーション検出器開発の参考となれば幸いである。

### A.1 納期及び価格について

---

原子核物理研究室の永尾翔助教に、各種シンチレータの加工依頼先である株式会社ジーテック [75] に見積もりを取っていただいた際の情報を表 A.1 に示した。3.7.9 節にて記載したことで重複してしまうが、これらのうち、EJ-212 のみ厚さ 3 mm のものとなっている。これは、我々が測定を予定していた長さ 450 mm・幅 22, 44 mm の構成では厚さ 5 mm での取り扱いを行っていなかったためである。なお、これらはいずれも 2021 年 10 月当時での情報である。

ここで EJ-232Q の表記について補足すると、型番に付された (0.5%) という数値は、EJ-232Q に混合されたベンゾフェノン (benzophenone, 化学式  $C_{13}H_{10}O$ ) の比率を指す。ベンゾフェノンには光を吸収する効果があり、これによってより速い時間応答が期待できる他、高計数率下での運用にも利用できるとされる [64]。

### A.2 各種シンチレータの特性について

---

ここでは、前述の表 A.1 に示したシンチレータのうち、実際に測定に用いた EJ-200, EJ-204, EJ-212, EJ228, EJ232 及び EJ-230 の性能及び、MPPC を取り付けて  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$  線源を照射した場合の信号の例を示す。シンチレータのカタログスペック並びに発光強度の波長依存性は既に 3.7.9 節の表 3.6 及び図 3.48 にて示したが、ここで改めて示す。

次に、MPPC を取り付けて  $\beta$  線を照射した際のオシロスコープでの画像を示す。シンチレータの寸法は  $5^T \times 22^W \times 450^L \text{ mm}^3$  (但し、EJ-212 のみ  $T = 3 \text{ mm}$ )、反射材はテフロンである。MPPC の構成は

表 A.1: 種類依存性測定で用いた各種シンチレータの見積もり結果。シンチレータの種類毎に寸法、価格、納期の見積もり結果を記載した。但し、いずれも 2021 年 10 月時点での情報である。また、価格はすべて税抜である。

| type          | size<br>(長さ × 幅 × 厚さ mm <sup>3</sup> ) | 価格<br>(JPY.) | 納期       |
|---------------|--|--------------|----------|
| EJ-200        | 450 × 22 × 5                           | 18,000       | 約 3 週間   |
| EJ-204        | 450 × 22 × 5                           | 23,000       | 約 3 週間   |
| EJ-212        | 450 × 22 × 3                           | 15,000       | 約 3 週間   |
| EJ-228        | 450 × 22 × 5                           | 50,000       | 約 1.5 か月 |
| EJ-232        | 450 × 22 × 5                           | 58,000       | 約 1.5 か月 |
| EJ-232Q(0.5%) | 450 × 22 × 5                           | 62,000       | 約 1.5 か月 |
| EJ-200        | 450 × 44 × 5                           | 24,000       | 約 3 週間   |
| EJ-204        | 450 × 44 × 5                           | 28,000       | 約 3 週間   |
| EJ-212        | 450 × 44 × 3                           | 21,500       | 約 3 週間   |
| EJ-228        | 450 × 44 × 5                           | 72,000       | 約 1.5 か月 |
| EJ-232        | 450 × 44 × 5                           | 79,000       | 約 1.5 か月 |
| EJ-232Q(0.5%) | 450 × 44 × 5                           | 83,000       | 約 1.5 か月 |

表 A.2: 各種プラスチックシンチレータの性能値 (再掲)[38, 63, 64]。

|   | EJ-230 | EJ-200 | EJ-204 | EJ212 | EJ228 | EJ232 |
|---|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 屈折率   | 1.58   | 1.58   | 1.58   | 1.58  | 1.58  | 1.58  |
| 発光強度<br>(%Anthracene)                         | 64     | 64     | 68     | 65    | 67    | 55    |
| 光量<br>(Num. of photons/1 MeV e <sup>-</sup> ) | 9700   | 10000  | 10400  | 10000 | 10200 | 8400  |
| 最大発光波長<br>[nm]                                | 391    | 425    | 408    | 423   | 391   | 370   |
| 立上り時間<br>[ns]                                 | 0.5    | 0.9    | 0.7    | 0.9   | 0.5   | 0.35  |
| 立下り時間<br>[ns]                                 | 1.5    | 2.1    | 1.8    | 2.4   | 1.2   | 1.6   |
| パルス幅 (FWHM)<br>[ns]                           | 1.3    | 2.5    | 2.2    | 2.7   | 1.2   | 1.3   |
| 減衰長<br>[cm]                                   | 120    | 380    | 160    | 250   | -     | -     |

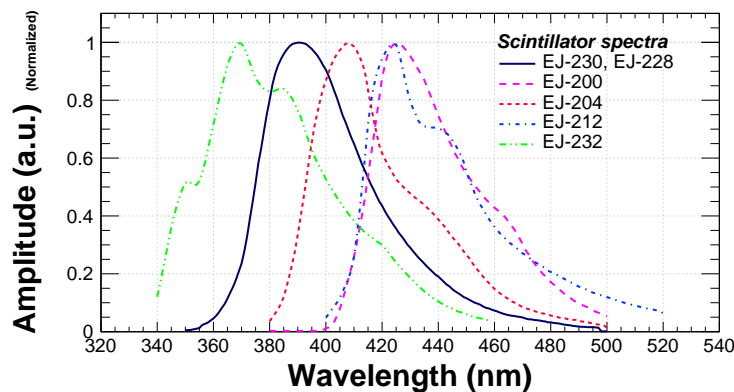


図 A.1: 種類依存性の測定で使用したプラスチックシンチレータの発光の波長依存性 (再掲)[38, 63, 64]。

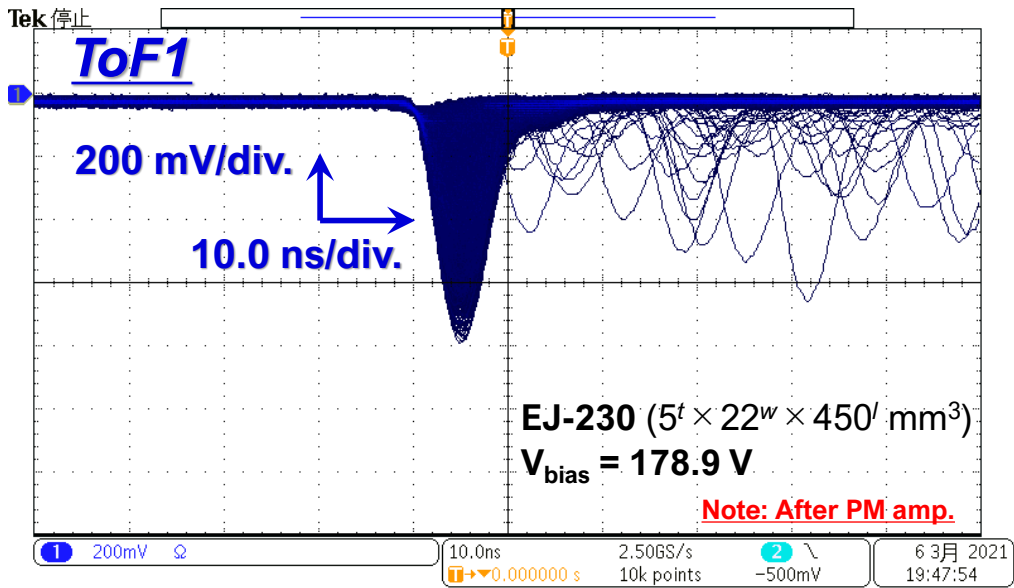


図 A.2: EJ-230 を用いた場合での信号の例。

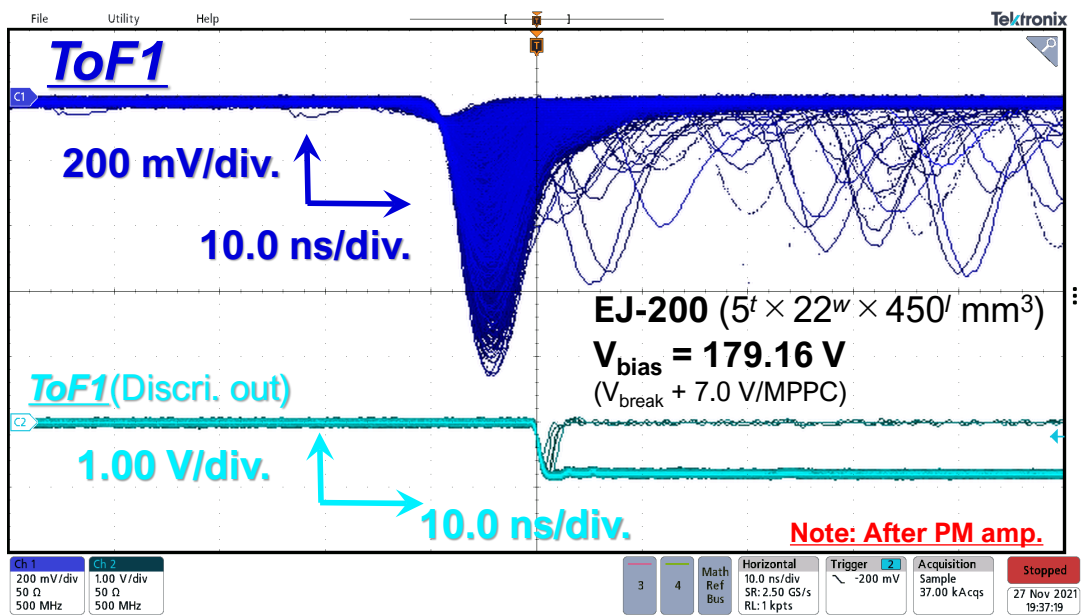


図 A.3: EJ-200 を用いた場合での信号の例。

S14160-3015PS、4個直列接続、印加電圧は  $V_{bias} - V_{break} = +7V/\text{Num. of MPPC}$  とした。 $\beta$  線の照射位置は長さ方向中心付近の場合である。いずれの場合も線源からみて左側に位置する MPPC の側の信号を示した。但し、EJ232 のみ、波高が他のシンチレータと比較して小さかったため、縦軸のスケールを変更した場合についても示した。



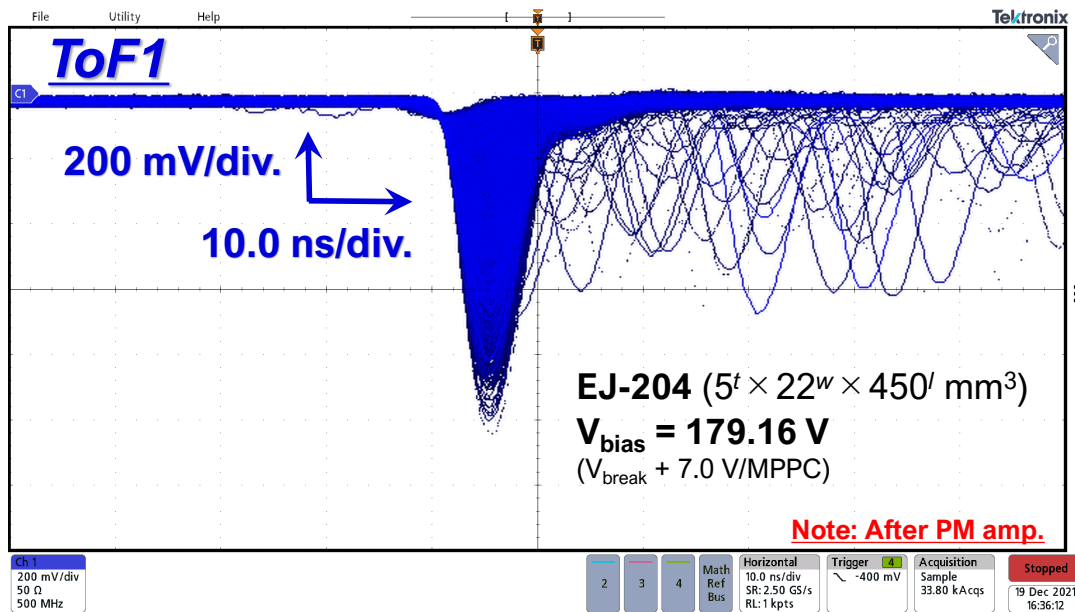


図 A.4: EJ-204 を用いた場合での信号の例。

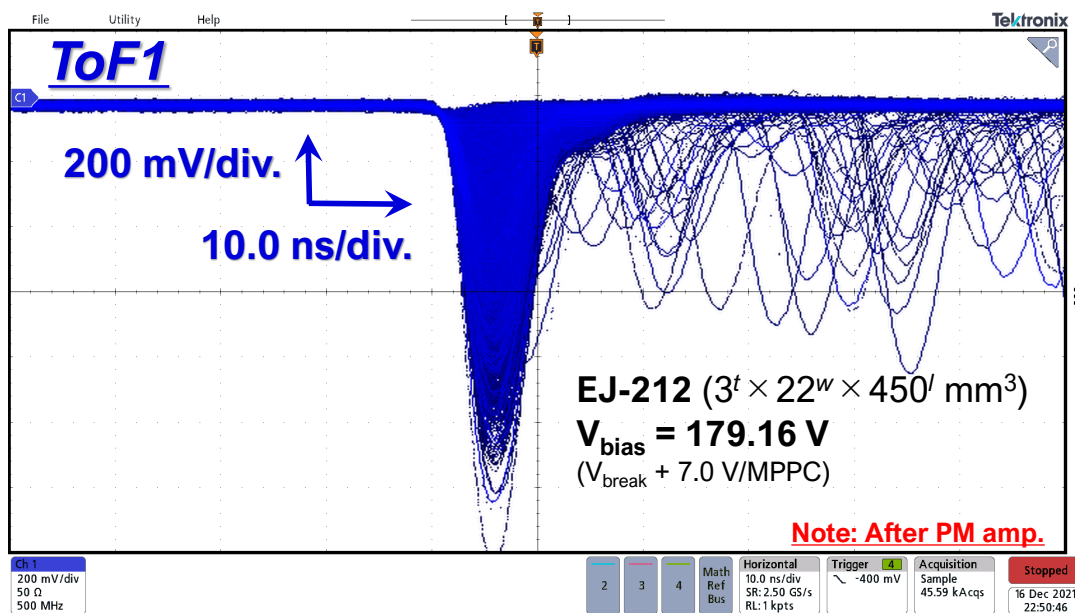


図 A.5: EJ-212 を用いた場合での信号の例。

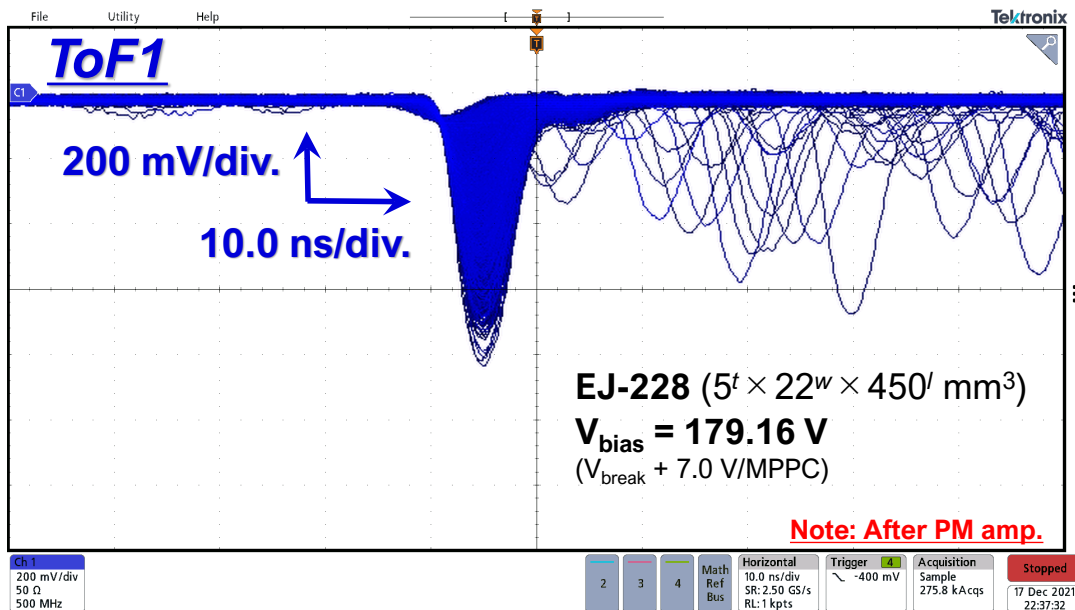


図 A.6: EJ-228 を用いた場合での信号の例。

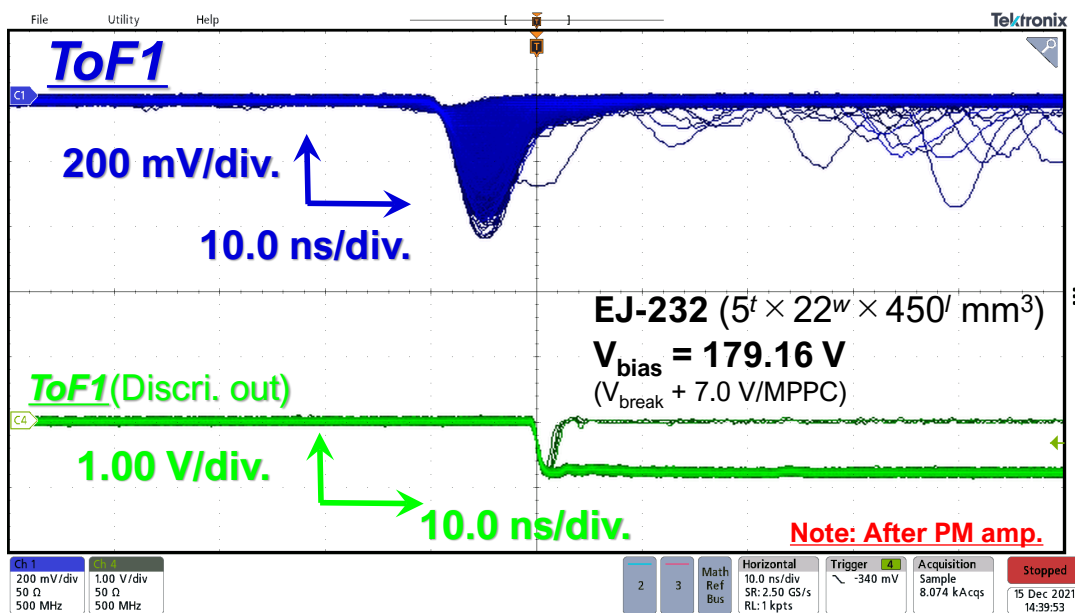


図 A.7: EJ-232 を用いた場合での信号の例 (縦軸 200 mV/div. の場合)。

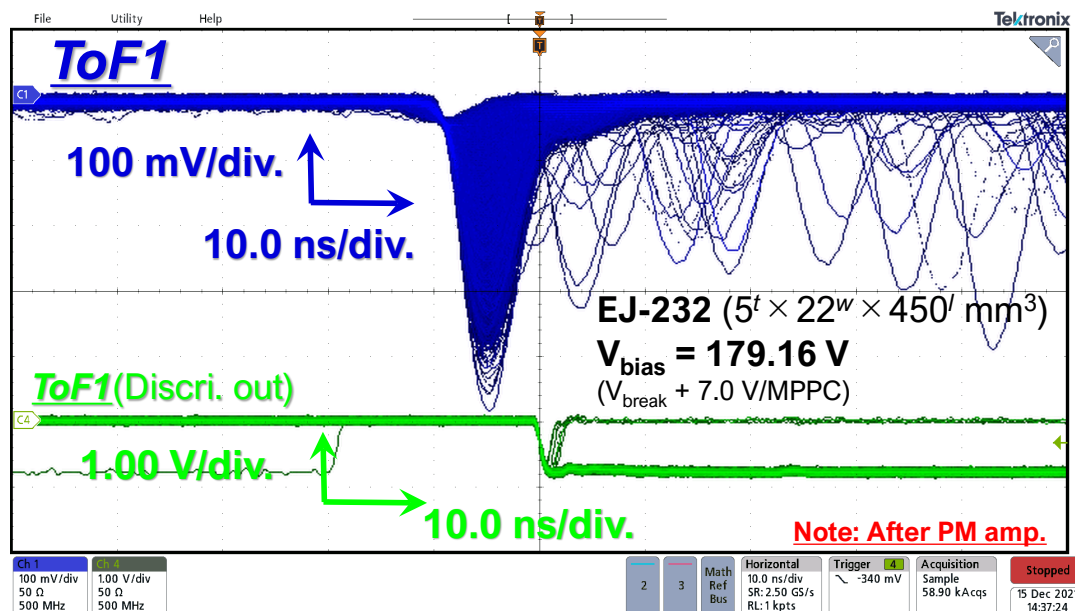


図 A.8: EJ-232 を用いた場合での信号の例 (縦軸 100 mV/div. の場合)。

## 参考文献

- [1] P. A. Zyla *et al.* (Particle Data Group). *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020** (2020) 083C01.
- [2] M. Danysz, J. Pniewski. *Phil. Mag.* **44** (1953) 348–350.
- [3] 欧州原子核研究機構 CERN. <https://home.cern/>.
- [4] M. Faessler *et al.* *Phys. Lett. B* **46** (1973) 468–470.
- [5] T. Hasegawa *et al.* *Phys. Rev. C* **53** (1996) 1210–1220.
- [6] K. Tanida *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 1982–1985.
- [7] M. Ukai *et al.* (E930('01) Collaboration). *Phys. Rev. C* **77** (2008) 054315.
- [8] T. Miyoshi *et al.* (HNSS Collaboration). *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 232502.
- [9] A. Esser and S. Nagao *et al.* (A1 Collaboration). *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 232501.
- [10] 永尾 翔. Decay pion spectroscopy of electro-produced hypernuclei (電磁生成したハイパー核の崩壊  $\pi$  中間子分光). PhD thesis, 東北大学, 2015 年.
- [11] O. Hashimoto, H. Tamura. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **57** (2006) 564–653.
- [12] Chart of Hypernuclides - Hypernuclear Structure and Decay Data. <https://hypernuclei.kph.uni-mainz.de/>.
- [13] S.N. Nakamura *et al.* (HKS (JLab E01-011) Collaboration). *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 012502.
- [14] H. Bhang *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 4321–4324.
- [15] G. Bohm *et al.* *Nucl. Phys. B* **4** (1968) 511–526.
- [16] M. Juric *et al.* *Nucl. Phys. B* **52** (1973) 1–30.
- [17] H. Kamada *et al.* *Phys. Rev. C* **57** (1998) 1595–1603.
- [18] A. Gal, H. Garcilazo. *Phys. Lett. B* **791** (2019) 48–53.
- [19] R.J. Prem, P. H. Steinberg. *Phys. Rev.* **136** (1964) B1803–B1806.
- [20] G. Keyes *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **20** (1968) 819–821.
- [21] R.E. Phillips, J. Schneps. *Phys. Rev.* **180** (1969) 1307–1318.
- [22] G. Keyes *et al.* *Phys. Rev. D* **1** (1970) 66–77.
- [23] G. Keyes *et al.* *Nucl. Phys. B* **67** (1973) 269–283.
- [24] B.I. Abelev *et al.* *Science* **328** (2010) 58–62.
- [25] C. Rappold *et al.* *Nucl. Phys. A* **913** (2013) 170–184.
- [26] J. Adam *et al.* *Phys. Lett. B* **754** (2016) 360–372.
- [27] L. Adamczyk *et al.* (STAR Collaboration). *Phys. Rev. C* **97** (2018) 054909.
- [28] S. Acharya *et al.* *Phys. Lett. B* **797** (2019) 134905.
- [29] E. Bartsch. *Nucl. Phys. A* **1005** (2021) 121791.
- [30] 東北大学電子光学研究センター. <https://hayabusa1.lns.tohoku.ac.jp/>.

- [31] 葛西裕磨. 修士論文. MPPC を用いた内部標的型光子標識化装置の開発. 2013 年, 東北大学.
- [32] 佐々木貴之. 修士論文. 2016 年, 東北大学.
- [33] 外山裕一. 修士論文.  ${}^3\Lambda$  H の寿命測定実験のデザイン. 2016 年, 東北大学.
- [34] 二宮亜紀. 修士論文.  $\eta$  中間子および  $\Lambda$  粒子光生成反応を用いた新光子標識化装置の性能評価. 2016 年, 東北大学.
- [35] 水野征哉. 修士論文. NKS2 実験で用いる新光子標識化装置の開発. 2022 年, 東北大学.
- [36] M. Kaneta *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **886** (2018) 88–103.
- [37] 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC). <https://www.cyric.tohoku.ac.jp/>.
- [38] Eljen Technology EJ230 (最終閲覧: 2021 年 11 月 29 日). <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-228-ej-230>.
- [39] 木村千草. 修士論文. 2009 年, 東北大学.
- [40] W.R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer, (1994).
- [41] 外山裕一. 「光生成したハイパー核の寿命測定実験の原理検証」。日本物理学会 2017 年秋季大会 (素核宇) 講演番号: 13pT11-6。
- [42] 外山裕一. 「MPPC を用いたハイパー核寿命測定用高時間分解能検出器・TDL の開発」。日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年) (素核宇) 講演番号: 25aK302-3。
- [43] 外山裕一. 「MPPC を用いたハイパー核寿命測定用高時間分解能検出器・TDL の開発 (2)」。日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年) (素核宇) 講演番号: 14aK202-8。
- [44] 上原圭太. 修士論文. 光子ビームを用いた軽いハイパー核寿命測定実験のためのトリガー検出器の開発. 2020 年, 東北大学.
- [45] 上原圭太. 学士論文「ハイパー核寿命測定のためのエアロジェルチェレンコフ検出器の開発」2018 年。東北大学。
- [46] B.O. Beckford. *Study of the Strangeness Photoproduction Process in the  $\gamma d \rightarrow \Lambda X$  Reaction at Photon Energies up to 1.08 GeV*. PhD thesis, 東北大学, (2012).
- [47] Cern Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/>.
- [48] 浜松ホトニクス株式会社. <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html>.
- [49] 浜松ホトニクス 技術資料/MPPC (最終閲覧: 2021 年 12 月 24 日). [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc\\_kapd9008j.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9008j.pdf),.
- [50] 浜松ホトニクス MPPC S14160-3015PS (最終閲覧: 2021 年 12 月 24 日). <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/S14160-3015PS/index.html>,.
- [51] 浜松ホトニクス MPPC S13360-3050PE (最終閲覧: 2021 年 12 月 24 日). <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/S13360-3050PE/index.html>,.
- [52] PedeA 株式会社 pedea-02. <https://www.podea.net/podea-02>.
- [53] W.G. Cross, H. Ing, N. Freedman. Phys. Med. Biol. **28** (1983) 1251–1260.
- [54] NuDat3 National Nuclear Data Center, Brookhaven National laboratory. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>.
- [55] Adhesive Materials Group V-788 最終閲覧: 2021 年 11 月 29 日. [https://www.adhesivematerialsgroup.com/sites/default/files/pdf/AMG\\_Flyer\\_Medical\\_proof.pdf](https://www.adhesivematerialsgroup.com/sites/default/files/pdf/AMG_Flyer_Medical_proof.pdf).
- [56] 小西由浩. 修士論文. ハイパー核寿命測定実験用の新型粒子飛行時間測定器の開発. 2019 年, 東北大学.

- [57] ANALOG DEVICES AD8000. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8000.pdf>.
- [58] シグマ光機 osom26-300(x) (最終閲覧: 2021 年 11 月 29 日). [https://jp.optosigma.com/ja-jp/catalog/product/view/id/13350/s/osms26-300\\_x\\_/category/455/](https://jp.optosigma.com/ja-jp/catalog/product/view/id/13350/s/osms26-300_x_/category/455/).
- [59] Saint-Gobain BC-620. [https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/detector-assembly-materials\\_69673.pdf](https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/detector-assembly-materials_69673.pdf).
- [60] KiNOKO - 高エネルギー実験用データ収集システム -. <https://www.awa.tohoku.ac.jp/~sanshiro/kinoko/index.html>.
- [61] L.D. Landau. *J. Phys.* **8** (1944) 201–205.
- [62] K.Kölbig, B. Schorr. *Comput Phys Commun* **31** (1984) 97–111.
- [63] Eljen Technology EJ-200 (最終閲覧: 2021 年 11 月 29 日). <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
- [64] Eljen Technology EJ-232, EJ-232Q (最終閲覧: 2021 年 11 月 29 日). <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-232-ej-232q>.
- [65] Chemours 社 (最終閲覧: 2021 年 12 月 17 日). <https://www.chemours.com/>.
- [66] 中興化成工業株式会社 (最終閲覧: 2021 年 12 月 17 日). <https://www.chukoh.co.jp/>.
- [67] LINEAR TECHNOLOGY LTC6754. <https://www.analog.com/en/products/ltc6754.html>.
- [68] ONSEMI NB3L8504S. <https://www.onsemi.jp/products/timing-logic-memory/clock-data-distribution/drivers-fanout-buffers/nb3l8504s>.
- [69] ST マイクロエレクトロニクス BAT54. <https://www.st.com/ja/diodes-and-rectifiers/bat54.html>.
- [70] Infineon BAT63 データシート。 [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAT63SERIES-DS-v01\\_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca38901151817843c0df4](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAT63SERIES-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca38901151817843c0df4).
- [71] M. Kaneta *et al.* (NKS2 Collaboration), *JPS Conf. Proc.* **26** (2019) 023017.
- [72] Paul Scherrer Institute (PSI) (最終閲覧: 2022 年 1 月 14 日). <https://www.psi.ch/en>.
- [73] Muegamma Home Page (最終閲覧: 2022 年 1 月 14 日). <https://meg.web.psi.ch/>.
- [74] 西村 美紀. 修士論文. MEG 実験アップグレードに向けた分解能 30 ピコ秒の陽電子タイミングカウンターの研究開発. 2014 年, 東京大学.
- [75] 株式会社ジーテック (最終閲覧: 2022 年 3 月 1 日). <http://www.ggg-tech.co.jp/>.