修士学位論文

ATLAS 実験アップグレードにおける MicroMEGAS 検出器の 放射線耐性の研究

2017年3月6日

| 専 攻 名 | 物理学専攻 |
|-------|----------|
| 学籍番号 | 159s118s |
| 氏 名 | 長坂 憲子 |

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程



スイスのジュネーブ郊外に位置する欧州原子核研究機構(CERN)では、世界最大の衝突エネルギーを もつ Large Hadron Collider (LHC)を用いた素粒子実験が行われている。ATLAS 実験は LHC で行われ ている実験の一つであり、2012 年、ATLAS 実験とその競合相手である CMS 実験により、標準模型で 唯一未発見であったヒッグス粒子が発見された。今後、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を超える物 理の発見を目指しており、このためには従来以上に高い衝突エネルギーと統計量が必要とされる。LHC では重心系エネルギーと瞬間ルミノシティを段階的に上げていくアップグレードが計画されており、 ATLAS 実験でも段階的に検出器やトリガーのアップグレードが行われる。2019 年から 2020 年のロン グシャットダウンでは、ATLAS 検出器の現在のミューオン検出器の一部分である Small Wheel (SW) を New Small Wheel (NSW) へと置き換える。NSW に使用される検出器は sTGC と MicroMEGAS で あり、神戸大学と東京大学で構成される日本マイクロメガスグループは、NSW における MicroMEGAS に用いられる高抵抗ストリップの研究開発および生産を担当している。2019 年の導入に向けて、現在 は高抵抗ストリップの生産段階に入っている。

i

MicroMEGAS は主にミューオンの精密位置測定に用いられる予定で、高い位置分解能や時間分解能、 検出効率だけでなく、高レート環境での安定動作と長期間の使用で放射線耐性が要求される。本論文で は、予想されるバックグラウンドのうち γ 線に注目し、γ 線を用いた MicroMEGAS の耐久試験を行っ た。γ 線照射前後での MicroMEGAS の性能の変化や、高抵抗ストリップの表面について研究したもの を報告する。

目次

| 第1章 | 序論 | 1 |
|-------------|--|----|
| 第2章 | LHC-ATLAS 実験 | 3 |
| 2.1 | LHC | 3 |
| 2.2 | ATLAS 実験 | 3 |
| 2.3 | ATLAS 検出器 | 4 |
| 2.4 | トリガーシステム | 9 |
| 第 3章 | New Small Wheel(NSW) 計画 | 10 |
| 3.1 | LHC アップグレード計画 | 10 |
| 3.2 | NSW 計画の概要 | 11 |
| 3.3 | NSW の要求性能 | 14 |
| 3.4 | NSW の構造 | 15 |
| 3.5 | NSW で使用される検出器 | 15 |
| 3.6 | 予想されるバックグラウンド.................................... | 15 |
| 第4章 | ガス検出器 | 19 |
| 4.1 | 放射線と物質との相互作用 | 19 |
| 4.2 | ガス増幅.................................... | 20 |
| 4.3 | MPGD | 22 |
| 4.4 | ATLAS-NSW 用に開発した MicroMEGAS | 25 |
| 4.5 | 放射線による検出器の劣化 | 26 |
| 第5章 | MicroMEGAS 試作器 | 27 |
| 5.1 | 小型試作器 | 27 |
| 5.2 | 增幅率測定 | 28 |
| 第6章 | CERN SPS H6 ビームラインにおける 120 GeV π を用いたトラッキング試験 | 33 |
| 6.1 | CERN SPS H6 ビームライン | 33 |
| 6.2 | 試験の目的と内容 | 34 |
| 6.3 | セットアップ | 34 |
| 6.4 | 読み出しシステム | 35 |
| 6.5 | トラッキングの例 | 36 |
| 6.6 | 基本性能の評価 | 37 |
| 6.7 | まとめ | 39 |

| 第7章 | γ 線を用いた耐久試験 | 40 |
|------|---------------------|----|
| 7.1 | γ線照射施設 GIF++ | 40 |
| 7.2 | γ 線照射試験の内容 | 40 |
| 7.3 | γ線照射試験の結果 | 43 |
| 7.4 | γ 線照射施設 GIF++ でのまとめ | 45 |
| 7.5 | 照射前後での増幅率測定 | 47 |
| 7.6 | 照射前後でのトラッキング試験 | 47 |
| 7.7 | 照射前後での中性子を用いた試験 | 48 |
| 7.8 | 照射前後での表面抵抗値の測定 | 51 |
| 7.9 | 照射前後での表面調査 | 54 |
| 7.10 | γ線耐久試験のまとめ | 56 |
| 第8章 | 結論 | 60 |

| ᆇ | ᆂ | ┯┯ | 土上 |
|---|---|--------|--------|
| 豕 | Æ | v | ¥Τ |
| ~ | 7 | \sim | ITTN V |

63

第1章

序論

スイスのジュネーブ郊外に位置する欧州原子核機構 (CERN) では、Large Hadoron Collider (LHC) を 用いた素粒子実験が行われている。LHC は現在、重心系エネルギー 13 TeV 、最大瞬間ルミノシティ 5×10³³cm⁻²s⁻¹ で稼働している。LHC の4箇所の衝突点のうち、A Todoidal LHC ApparaturS (ATLAS) 実験は、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を超える新物理の発見を目指している。

LHC では、衝突エネルギーと統計量を貯めるために、重心系エネルギーを 13 TeV から 14 TeV へ、瞬間ルミノシティを 5×10^{33} cm⁻²s⁻¹ から 5×10^{34} cm⁻²s⁻¹ まで上げ 2026 年の物理からは、High Luminosity LHC (HL-LHC) として、約 10 年間で 3000 fb⁻¹ の統計量を目指す。

現在の ATTLAS 検出器はルミノシティが 1×10^{34} cm⁻²s⁻¹ を想定して設計されており、HL-LHC で は対応できない。このため、ATLAS 実験では各検出器や DAQ システムの改良が計画されており、2019 年から 2020 年のアップグレードでは、ミューオン検出器の衝突点に一番近い Small Wheel (SW) を New Small Wheel (NSW) へと取り替える。SW は、ルミノシティ増加により、トラッキング性能が低下し、 ミューオンと誤って発行されるトリガーの増大によりミューオントリガーレートの圧迫が懸念されてい る。このため、高レートでも高性能を保ち、トリガーをできる検出器として NSW が導入され、10 年の 運用期間が予定されている。

NSW は、トリガー用に Small strip TGC (sTGC)、精密位置測定用に Micro-MEsh GAseous Structure (MicroMEGAS) が採用されている。MicroMEGAS は、Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) と呼ば れる、微細化加工技術を用いた近年開発されている、高性能ガス放射線測定器である。数百 μm の非常 に狭い増幅領域から空間分解能が高く、高レートでも安定して高い位置分解能を発揮することができる。

MPGD は、数百 µm と非常に狭い領域に高電場を形成することから、電極間に放電が起こりやす く、放電は検出器の電極破壊や読み出し系の損傷を招く。NSW に導入される MicroMEGAS はこの放 電を抑制するために、読み出しストリップの上に絶縁層を介して高抵抗ストリップを加えている。この NSW の MicroMEGAS における高抵抗ストリップの研究開発及び生産は、神戸大学と東京大学で構成 される日本マイクロメガスグループが担当している。

NSW は、衝突点から 7 m 付近という、非常に衝突点から近い距離に位置し、ビームパイプにも近い。 よって、ミューオンだけでなく、γ線や中性子等のフラックスが大きく、それぞれ 375 kHz/cm²、1200 kHz/cm² となっている。MicroMEGAS は、高い位置分解能や時間分解能、検出効率だけでなく、この ような高レート環境での安定動作と長時間の使用で放射線耐性が要求される。

本研究では、予想されるバックグラウンドのうち γ 線に注目し、CERN にある Gamma Iradiation Facility ++ (GIF++) にて、MicroMEGAS の γ 線に対する耐久試験を行った。MicroMEGAS 2 台につい て異なる合計量の γ 線を照射をし、照射前後で特性がどのように変化したかを調べた。まず、CERN の 120 GeV π ビームを用いてトラッキング試験を行い、照射前後での位置分解能と検出効率の変化を 調べた。また、神戸大学のタンデム加速器を用いて、中性子環境下での動作試験を行った。最後に、 MicroMEGAS の高抵抗ストリップの表面調査を行い、表面抵抗値を測定し、デジタルマイクロスコー プでの簡単な調査、レーザー顕微鏡による3次元形状の測定、走査型X線光電子分析装置を用いた表面 の元素組成を分析した。

本論文は以下の構成になる。

- 第2章: LHC-ATLAS 実験について
- 第3章:NSW 計画について
- ・第4章:ガス検出器について
- 第5章: 試作した小型 MicroMEGAS 検出器について
- 第6章: CERN SPS H6ビームラインで試験をしたトラッキング試験について
- 第7章: CERN GIF++ で試験をした γ 線を用いた耐久試験について
- 第8章:全体のまとめ

第2章

LHC-ATLAS 実験

Large Hadron Collider (LHC) は、スイスのジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構 (CERN) にあ る加速器である [2]。LHC には複数の実験があり、この中の1つである、A Toroidal LHC AppparatuS (ATLAS)実験は、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を超える物理の発見を目指している。本章では、 LHC 及び ATLAS 実験について述べる。

2.1 LHC

LHC は、スイスとフランスの国境付近の地下 100 m に位置する、周長約 27 km の世界最大の陽子・ 陽子衝突型の円形加速器である。加速粒子の陽子は、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が少な く、高いエネルギーを実現しやすい。2015 年に重心系エネルギー 13 TeV を実現し、素粒子物理実験に おいて世界最大のエネルギースケールでの実験を可能とする。陽子・陽子衝突での LHC の現在の主要 パラメータを表 2.1 に示す。図 2.1 に示すように、LHC の陽子ビームは複数の前段加速器を用いて高エ

| 表 2.1 LHC の現在の主要パフメータ | | |
|-----------------------|--|--|
| 重心系エネルギー | 13 TeV | |
| 最大瞬間ルミノシティ | $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ | |
| バンチ間隔 | 25 ns | |

ネルギーへと加速される。陽子イオン源から発生する陽子は Linac 2 で 50 MeV、PSB で 1.4 GeV、PS で 25 GeV、SPS で 450 GeV まで加速した後、LHC に入射され、最終的に 7 TeV まで加速される。LHC には 4 箇所のビーム衝突点が存在し、各実験(ATLAS, CMS, ALICE, LHCb)の目的に応じた検出器 が設置されている。ATLAS 実験、CMS 実験は陽子・陽子衝突による幅広い物理の探索、ALICE 実験 は重イオン衝突によるクオーク・グルーオン・プラズマの研究、LHCb 実験は B 中間子の CP 対称性の 破れに焦点を当てた実験を行っている。次章では私が所属する ATLAS 実験について述べる。

2.2 ATLAS 実験

ATLAS 実験はヒッグス粒子の精密測定や、超対称性粒子等の標準模型を超える物理の発見を目的と している。標準模型において弱い相互作用の媒体となるゲージ粒子は、ヒッグス機構により質量を与え られると考えられている。このヒッグス機構はスピンが0のスカラー粒子であるヒッグス粒子の存在を 予言しており、長年探索が行われてきた。2012 年、ATLAS 実験と CMS 実験は、ヒッグス粒子と思わ れる粒子をついに発見し、2013 年のノーベル賞に至った。今後は、スピンや湯川結合定数等の精密測定



図 2.1 CERN の加速器 [1]: LHC は CERN の中で最終の加速器であり、陽子ビームは前段加速器 にて高エネルギーへと加速される。

によりヒッグス粒子の検証をしていく。

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、陽子・陽子衝突で生じた粒子を検出する。図 2.2 に示すように、直径 25 m、長さ 44 m、総重量 7000 t の円筒型の大型検出器であり、衝突点を囲むように様々な検出器で構成されてい る。内側から、内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオン検出器の順に配置され、内部飛跡検出器と カロリメータの間にソレノイドマグネット、またカロリメータとミューオン検出器の間にはトロイダル マグネットが設置されている。それぞれの特徴を活かして、粒子の運動量やエネルギーなどを測定し、物理事象を再構成する。

2.3.1 ATLAS の座標系

ATLAS 実験での座標系は、図 2.3 に示す座標をとる。また、衝突点からの天頂角 θ を用いて、擬ラ ピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ を定義し、領域を示すときなどに用いることがある。

2.3.2 内部飛跡検出器

ATLAS 検出器の内部飛跡検出器の全体像を図 2.4 に示す。内側からピクセル検出器 (Pixel)、シリ コンストリップ検出器 (Semi Conductor Tracker (SCT))、遷移輻射飛跡検出器 (Transition Radiation Tracker (TRT))の順に構成されている。外側のソレノイドマグネットが作る約2Tの磁場により曲げ られた荷電粒子の運動量の測定や、衝突点を再構成する。



図 2.2 ATLAS 検出器 [2] : 事象をもれなく再現するように全方向を覆う形で、様々な検出器で構成されている。



図 2.3 ATLAS の座標系: 衝突点を原点とし、ビーム軸方向をz軸、リング中心方向をx軸、これ らと垂直な天頂方向をy軸とする。また、衝突点からの天頂角をθを用いて擬ラピディティを定義 している。

2.3.3 **カロリメータ**

カロリメータは図 2.5 に示すように、電磁カロリメータとハドロンカロリメータから構成され、電子 や光子、ジェット等のエネルギーや角度を測定する。



図 2.4 内部飛跡検出器 [2] : 内部飛跡検出器は、ピクセル検出器 (Pixel detectors)、シリコンスト リップ検出器 (semiconductor tracker)、遷移輻射飛跡検出器 (transition radiation tracker) で構成され る。高い位置分解能と多層構造により、高精度で荷電粒子の曲率を計算している。



図 2.5 カロリメータ [2] : カロリメータは、電磁カロリメータ (electromagnetic calorimeter) とハド ロンカロリメータ (hadronic calorimeter) から構成される。

2.3.4 ミューオン検出器

ミューオン検出器の全体像を図 2.6 に示す。ミューオンの精密位置測定を行う Monitored Drift Tube (MDT) と Cathode Strip Chamber (CSC)、主にトリガーを発行する Resistive Plate Chamber (RPC) と Thin Gap Chamber (TGC) の計 4 種類の検出器で構成されている。図 2.7 に示すように、バレル部では、 MDT が精密位置測定を、読み出しストリップを直交することにより二次元読み出しが可能な RPC がト リガー発行を担っている。またエンドキャップ部では、MDT と高レート耐性の CSC を用いて精密位置 測定を、アノードワイヤーとカソードストリップにより二次元の位置情報が可能な TGC がトリガー発 行を担っている。各検出器の用途や性能を表 2.2 に、各検出器の構造を図 2.8 から図 2.11 にまとめる。



図 2.6 ミューオン検出器 [2] : MDT と CSC が精密位置測定を、RPC と TGC がトリガーを担当している。



図 2.7 ミューオン検出器の yz 平面断面図 [2] : 緑色が MDT、白色が RPC、黄色が CSC、水色が MDT、紫色が TGC で表している。赤色や灰色はカロリメータである。バレル部は、衝突点から近い 方から、Barrel Inner Large (BIL)、Barrel Middle Large (BML)、Barrel Outer Large(BOL) と大きく区 分される。エンドキャップ部は、End-cap Inner Large (EIL)、End-cap Middle Large (EML)、End-cap Outer Large (EOL) と大きく区分される。

表 2.2 ミューオン検出器を構成する検出器の用途や性能 [2] : 各検出器の固有の時間分解能は、信号伝搬とエレクトロニクスの寄与を加える必要がある。

| | •••= | | | |
|-------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------------|
| | MDT | CSC | RPC | TGC |
| 用途 | 精密位置測定 | 精密位置測定 | トリガー | トリガー |
| 位置分解能 | 60 µm | $40 \ \mu m$ | 10 mm | 2 – 6 mm |
| 角度分解能 | | 5 mm | 10 mm | 3 – 7 mm |
| 時間分解能 | | 7 ns | 1.5 ns | 4 ns |
| 担当領域 | $ \eta < 2.7$ | $2.0 < \eta < 2.7$ | $ \eta < 1.05$ | $1.05 < \eta < 2.7$ |



図 2.8 MDT [2]: MDT は直径 30 mm のアルミ ニウムのカソードチューブと直径 50 µm のタング ステンのアノードワイヤーで構成されている。ド リフトチューブを積層して1つの検出器を形成し ており、ドリフト時間と信号の大さから位置情報 を測定している。



図 2.9 CSC [2]: CSC は Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC) であり、カソードストリップが アノードワイヤと直行する向きに配置して 2 次元 の位置情報を測定している。



図 2.10 RPC [2] : RPC は平行に並んだ 2 枚の 抵抗板が 2 mm のガス層を挟んで固定されており、 1 枚の RPC は 2 層で構成されている。各抵抗板 と絶縁層を挟んで、読み出しストリップが直行に なるように配置し、2 次元の位置情報を測定して いる。



図 2.11 TGC [2]: TGC は MWPC であり、直径 50 μ m のアノードワイヤーが 1.8 mm 間隔で並ん でおり、ワイヤーと直行するカソードストリップ より 2 次元の位置情報を測定している。また、2.8 mm の非常に狭いガス層で、電子のドリフト距離 を短くすることにより、高時間分解能を実現して いる。



図 2.12 ATLAS 実験のトリガーシステムの全体の流れ [3] : 40 MHz のイベントレートを段階的に 削減し、約 100 Hz まで削減している。

2.4 トリガーシステム

ATLAS 実験では、40 MHz の頻度で陽子のバンチが衝突する。これらの衝突で生じた反応の全てを 記録することは、データ量が莫大になり記憶容量の制限から不可能である。よって記録すべき事象をオ ンラインで選別することでデータ量を削減しており、このシステムをトリガーシステムと呼ぶ。図 2.12 に現在のトリガーシステムの全体の流れを示す。ATLAS 実験のトリガーシステムは、Level-1 (L1)、 Level 2 (L2)、Event Filter (EF) の 3 段階で構成されている。1 段目の L1 はハードウェアベースのトリ ガーであり、カロリメータやミューオン検出器から得られるエネルギーや運動量、位置情報を算出し、 トリガーを発行する。L1 は処理時間が非常に短く、40 MHz のイベントレートを 100 kHz まで削減す る。2 段目の L2 はソフトウェアベースのトリガーであり、L1 から受け取ったデータに対してより正確 に事象を再構成し、トリガーを発行する。L2 では、100 kHz のイベントレートを約 1 kHz まで削減す る。3 段目の EF はオフライン事象解析とほぼ同等の制度で事象を再構成し、約 100 Hz 程度まで削減す る。このように、ATLAS 実験のトリガーシステムは、40 MHz あるイベントレートを約 100 Hz 程度に 段階的に削減する。

第3章

New Small Wheel (NSW) 計画

本章では、LHC-ATLAS 実験アップグレード計画と、それに伴う New Small Wheel (NSW)計画 [4] について述べる。

3.1 LHC アップグレード計画

LHC-ATLAS 実験では今後、TeV スケールの新物理事象やヒッグス粒子の精密測定などを目標として いる。そのためには従来以上に衝突エネルギーと統計量を上げる必要があり、LHC では重心系エネル ギーと瞬間ルミノシティを段階的に上げていくアップグレードが計画されている。図 3.1 に LHC アッ プグレード計画の概要を示す。

Run と呼ばれる物理ランと、Long Shutdown(LS)と呼ばれる改修・補修用期間があり、2016 年現在 は Run 2 が順調に進んでいる。LS で段階的にアップグレードを行ない、2026 年からは High Luminosity LHC (HL-LHC)として、現在の Run のルミノシティ 5×10³³ cm⁻²s⁻¹ より高いルミノシティ 5×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ を実現し、約 10 年間で 3000 fb⁻¹ のデータを貯めることを目標にしている。LHC アップグ レードに対応するため、ATLAS 検出器のアップグレードも計画されており、2019 年から 2020 年の LS2 では、主に Level-1 トリガーに焦点を当てたアップグレードが行なわれ、NSW 計画もその一つであ る。また、2024 年から予定されている LS3 では、総線量の限界を迎える内部飛跡検出器の交換や DAQ システムの改良などが計画されている。



図 3.1 LHC アップグレード計画 [5]: Long Shutdown (LS) ごとに、重心系エネエルギー (紫色)、瞬 間ルミノシティ (緑色) を上げていく。



図 3.2 ATLAS 検出器の zy 断面図 [4] : この図は各検出器と色の対応は、図 2.7 と同じである。 TGC、CSC と MDT で構成される衝突点に近い部分を Small Wheel (SW)、TGC 3 層と MDT を Big Wheel (BW) と呼ぶ。

3.2 NSW 計画の概要

エンドキャップ部のミューオン検出器は図 3.2 に示すように三段階に分けられており、TGC と CSC、 MDT で構成される、衝突点に一番近い部分を Small Wheel (SW)と呼ぶ。現在の SW では LHC のル ミノシティ増加により物理事象のデータをより多く得ることができる一方で、後述するトラッキング性 能の低下とミューオントリガーにおけるフェイクトリガーの増大が懸念される。これらの問題を解決す るために、2019 年から 2020 年の LS2 にて、SW を NSW へとアップグレードする。

・トラッキング性能の低下

現在の SW 自体が高いルミノシティに対応しておらず、MDT や CSC は高ヒットレート環境 下でのマルチヒットにより検出効率が低下する。図 3.3 は、MDT のチューブ1本あたりの検出 効率と MDT 自身の検出効率を示し、ヒットレート増加に伴う MDT の検出効率の減少を示して いる。ルミノシティ 1×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ に相当するヒットレート 300 kHz/Tube で、約 35% の検 出効率の低下がわかる。検出効率の低下と同時に、空間電荷の効果により位置分解能も悪化し、 ミューオンの運動量測定に影響する。運動量測定は、EI、EM、EO の 3 つ全てのステーションに よって実現するため、SW が属する EI の情報が劣化すると運動量の測定精度も悪化する。これら の理由から、SW をアップグレードする必要がある。

・フェイクトリガーの増大

Run 1 の L1 ミューオントリガーでは、Big Wheel (BW) にある 3 層の TGC (衝突点に近い方 から M1,M2,M3) を用いて、飛跡の曲率からミューオンの横運動量 *p*_T を算出しており、*p*_T 閾値



図 3.3 MDT の検出効率とヒットレート依存性 [4]:ビームテストのデータに基づいた、MDT の チューブ1本あたりの検出効率 (実線) と、チェンバーにおけるトラック再構成効率 (破線) を示す。

によって使用する TGC の枚数が異なる。具体的には、低い p_T 閾値の場合は M2 と M3 の 2 枚、 高い p_T 閾値の場合は M1、M2、M3 の 3 枚を使用し、再構成された飛跡の情報を用いて、衝突 点由来のミューオンを選別していた。したがって、図 3.4 に示す A の飛跡は衝突点由来であり 正しいトリガーであるが、B や C の飛跡を辿るような粒子が TGC に入射した場合にも、誤って トリガーを発行してしまう。これはフェイクトリガーと呼ばれ、トリガーレート増大の原因とな る。フェイクトリガーの原因に二次生成粒子が考えられる。陽子・陽子衝突後に ATLAS 検出器 内を漂う陽子や中性子がビームパイプや磁石に衝突することで荷電粒子が生成され、この荷電粒 子が磁場によって曲げられ、衝突点から来たように見えてしまう。図 3.5 に、Run 1 で取得した データによる、 p_T が 10 GeV 以上と判定された L1 ミューオントリガー (L1_MU11) と、オフラ インで再構成されたミューオンの η 分布を示す。L1_MU11 とオフラインで再構成されたミュー オンのヒストグラムの差は、衝突点由来のミューオン以外によって発行されたトリガーであり、 取得すべきではないフェイクトリガーである。また、ミューオントリガーレートの 80 % 以上が、 η が 1 より大きいエンドキャップ部のトリガーが占めており、それらの大半はフェイクトリガー である。

Run 2 からは、SW にある 2 層の TGC からの情報を L1 ミューオントリガーに組み込んでお り、このフェイクトリガーを削減している。図 3.6 に、 p_T が 20 GeV 以上と判定された L1 ミュー オントリガー (L1_MU20) における、SW にある TGC の情報を用いた場合と用いなかった場合の ミューオンの η 分布を示す。図 3.5 に示した Run 1 におけるミューオンの分布と比べると、SW にある TGC の情報を用いるとフェイクトリガーは削減できている。

2.12 節で前述したように、L1 では 40 MHz のイベントレートを 100 kHz まで削減している。L1 の 100 kHz のうち、ミューオントリガーに割り与えられているイベントレートは約 20 kHz である。表 3.1 に、2011 年の 7 TeV のデータから外挿した、ルミノシティ 5×3^{34} cm⁻²s⁻¹、重心系エネルギー 14 TeV、 バンチ間隔 25 ナノ秒において予想されている L1 ミューオントリガーレートと L1 ミューオン p_T 閾値 の関係を示す。現在の L1 ミューオン p_T 閾値である 20 GeV を維持すると、現在のトリガーシステムで は、L1 ミューオントリガーの許容量である 20 kHz より大幅に大きくなってしまう。閾値を 40 GeV に あげるとトリガーレートは低くなるが、これは p_T の小さいレプトンを使ってトリガーするような物理



図 3.4 エンドキャップ部ミューオンのトリガーの概略図 [4] : A は衝突点由来の飛跡であるが、衝 突点由来の飛跡ではない B や C もトリガーを発行してしまう。BW と NSW の情報を用いることで、 フェイクトリガーを区別することができる。



図 3.5 Run 1 におけるミューオンの η 分布 [4] : 青色の斜線部がL1 ミューオントリガーでミュー オンと判断されたもの、水色の斜線部がオフラインの解析でミューオンと判断されたもの、青色部分 は水色の斜線部の内、 $p_{\rm T}$ が 10GeV 以上で判定されたものを示す。

事象にとって極めて大きな問題となる。図 3.7 に $H \to WW \to \ell \nu \ell \nu$ 過程におけるレプトン p_T の分布 を示す。ヒッグス信号からのレプトンは p_T が 20 GeV から 40 GeV に多く、表 3.1 の 2 段目のように、 p_T 閾値を 40 GeV にあげてミューオントリガーレートを削減することは、トリガーレート削減の良い解 決策ではないことがわかる。

ルミノシティの増加に伴い、現在のSWの検出効率が低下し、ミューオントリガーにおけるフェイクトリガーの増大が懸念されることから、SWをNSWへとアップグレードする。



図 3.6 SW の TGC の情報を組み込んだ Run 2 におけるミューオンのη分布 [6] : 黄色部分が TGC の情報を組み込んだ L1_MU20、灰色部分が組み込んでいない従来のトリガー条件で得た L1_MU20 である。図 3.5 よりもフェイクトリガーは削減できていることがわかる。

表 3.1 L1 ミューオン p_T 閾値と L1 でのミューオントリガーレート [4] : 2011 年の 7 TeV のデータ から外挿した、ルミノシティ 5×3³⁴ cm⁻²s⁻¹、重心系エネルギー 14 TeV、バンチ間隔 25 ナノ秒に おいて予想されているトリガーレートである。 p_T 閾値をあげるトリガーレートは低くなるが、NSW の情報を使うと p_T を維持したままトリガーレートを低くすることができる。

| L1 ミューオン <i>p</i> T 閾値 [GeV] | Level-1 ミューオントリガーレート [kHz] |
|------------------------------|----------------------------|
| $p_{\rm T} > 20$ | 60 ± 11 |
| $p_{\rm T} > 40$ | 29 ± 5 |
| $p_{\rm T} > 20$ with NSW | 22 ± 3 |

3.3 NSW の要求性能

NSW は Run 3 以降の約 10 年に渡って運用される。高ヒットレート環境下において、現在の SW と 同程度のトラッキング性能が要求され、以下のことが精密飛跡再構成から要求される。

- SW の MDT システムに匹敵する 50 μm より良い位置分解能であること。NSW は 4 層の検出器 で構成されるため、1 層に要求される位置分解能は 100 μm 以下である。
- pT が 10 GeV 以上のミューオンに対して、飛跡の再構成効率が 97 % 以上であること。
- 検出効率と位置分解能が、高い運動量をもつる線やシャワーなどによって低下しないこと。

また、フェイクトリガーを削減するために、NSW の情報を用いてトリガーを削減することから、以下 のことがトリガーから要求される。

- 現在の BW TGC の遅延時間は 1.088 µ 秒であるため、陽子衝突から 1.088 µ 秒以内に、トラック 情報を L1 ミューオントリガーシステムに送ること。
- トリガーのためのトラック再構成が1mradの角度分解能を持つこと。
- 現在のミューオントリガーシステムのトラック再構成と合わせるために、η-φ 平面で、0.04 ×



図 3.7 $H \rightarrow WW \rightarrow \ell \nu \ell \nu$ 過程におけるレプトン p_{T} の分布 : ヒッグス信号は赤色のヒストグラム であり、明らかにヒッグス信号からのレプトンは低い p_{T} を持つ。

0.04の制度でトラックを再構成すること。

• 全ての 1.3 < |η| < 2.5 の全領域で、トラックが 95 % 以上で再構成できること

3.4 NSW の構造

NSW は、図 3.8 に示すように、衝突点側の青色の Small Sector と、衝突点と逆側の水色の Large Sector から構成され、不感領域をなくすために少しずつ重なるように配置される。16 つのセクター は全て同じ構造をしており、セクター 1 つの断面図を図 3.9 に示す。トリガー用に Small strip TGC (sTGC)、精密位置測定用に MicroMEGAS の 2 種類の検出器を用いており、sTGC×4、MicroMEGAS×4、 MicroMEGAS×4、sTGC×4 という順に並べた 16 層構造となる。さらに MicroMEGAS の 4 層のうち、図 3.10 に示すように最初の 2 層は r 方向の読み出しのために配置され、残りの 2 層は ϕ 方向の読み出 しのために各々 ±1.5° 傾けて配置される。このような多層構造は故障等への対応や正確な飛跡再構成を可能にする。

3.5 NSW で使用される検出器

SW では、トリガー用に TGC、精密位置測定用に MDT と CSC が用いられているが、NSW では、ト リガー用に sTGC、精密位置測定用に MicroMEGAS が用いられる。MicroMEGAS については 4.4 で後 述するため、sTGC の構造を図 3.11 に示す。sTGC は、エンドキャップ部に現在使われている TGC と 比較して、ストリップ間隔が 3.2 mm と小さいことから Small strip TGC と呼ばれる。

3.6 予想されるバックグラウンド

ミューオン検出器にとって、中性子や γ 線などの大量のバックグランドは、ミューオンでないにもか かわらず、フェイクトリガーとして判定されるため、ミューオントリガーの検出効率を下げてしまう。



図 3.8 NSW の概略図 [4]:青色が衝突点側である。不感領域をなくすために、少しずつ重なるよう に配置されている。



図 3.9 NSW の 1 つのセクター [4] :ピンク色部分はトリガー用の sTGC、緑色部分は精密位置測定 用の MicroMEGAS である。右図は 1 層の MicroMEGAS の構造であり、2 枚の MicroMEGAS が背 中合わせになっており、これが 2 つあることで 1 層に 4 枚の MicroMEGAS がある。



図 3.10 MM の 4 層構造 : 赤の 2 層は r 方向の読み出しを、緑の 2 層は ϕ 方向の読み出しのために 各々 $\pm 1.5^{\circ}$ 傾けて配置されている。



図 3.11 sTGC [4] : 図 2.11 に示した現在の TGC と同じように、直径 50 µm のアノードワイヤー が 1.8 mm 間隔で並んでいる。読み出しストリップが 3.2 mm の非常に小さい間隔であることから Small strip TGC と言われる。



図 3.12 ルミノシティ 1×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ における、ミューオン検出器でのバックグラウンドのシ ミュレーションでのフラックス [2]:中性子と γ 線の単位は kHz /cm²、ミューオンと陽子の単位は Hz /cm² となっている。

また、CSC のような衝突点に近い検出器は、他の検出器に比べて放射線の影響を受けやすく、最悪の場 合、故障する場合も考えられる。図 3.12 は、ルミノシティ 1×10³⁴ cm⁻²s⁻¹×10³⁴ における、ミューオ ン検出器での粒子別のフラックスのシミュレーションである [2]。NSW の場合、一番フラックスの高い 場所は、CSC が設置されているビームパイプに近いところであり、予想されるバックグラウンドは、中 性子で 79 kHz /cm²、γ線で 25 kHz/cm² である。NSW の MicroMEGAS に対するバックグラウンドの 見積もりは [7] で先行研究されており、表 3.2 にまとめる。ヒットレートは、フラックスと検出器固有 の感度の積で求めることができる。総ヒット数は、NSW の運用期間の 10 年間分のヒットに相当する。

表 3.2 NSW の MicroMEGAS に対するバックグラウンドの見積もり [7]:フラックスは、データを 元にルミノシティ 5×10^{34} cm⁻²s⁻¹ × 10^{34} を考えた値であり、感度は、Geant4 によるシミュレー ションにより得た値である。

| ションに | より特に値でのる。 | | | |
|------|------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| 粒子 | フラックス [kHz/cm ²] | 感度 | ヒットレート [Hz/cm ²] | 総ヒット数 [/cm ²] |
| γ 線 | 375 | 4×10^{-3} | 1500 | 9×10^{10} |
| 中性子 | 1200 | 1×10^{-4} | 120 | 7.2×10^{9} |

第4章

ガス検出器

ガス検出器は、放射線と物質 (ガス) との相互作用により生成された電離電子を収集、増幅して電気信 号として検出する。放射線と物質との相互作用について述べ、近年開発されているガス検出器について 述べる。

4.1 放射線と物質との相互作用

4.1.1 荷電粒子と物質との相互作用

荷電粒子が物質に入射すると、物質中の原子と荷電粒子間のクーロン力により原子が電離され、電子 イオン対が生成される。この時入射荷電粒子が物質中で損失するエネルギーは、以下の Bethe-Bloch の 式 4.2 で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z_e^2}{m_e v^2} NZ \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \frac{v^2}{c^2}) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$
(4.1)

ここで、*c*,*m*_e,*e* は光速度, 電子の静止質量, 電気素量、*E*,*z*_e,*v*,*x* は入射粒子のエネルギー, 電荷, 速度, 移動距離、*Z*,*N*,*I* は物質の原子番号, 単位体積あたりの原子個数, イオン化エネルギーを表す。

入射粒子を μ^+ 、吸収物質を銅としたときのエネルギー損失を図 4.1 に示す。図 4.1 中の β, γ はそれ ぞれ、 $\beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ である。エネルギー損失は、速度が小さいと β^2 に反比例して減少し、 $\beta\gamma \approx 3$ 付近で最小値をとり、速度が大きくなると式 4.2 中の $1-v^2/c^2$ の寄与が支配的になり増加する。 従って、 $\beta\gamma$ が 1000 より低い、制動放射の無視できる範囲で入射した荷電粒子はエネルギー損失が一定 になると考えることができ、最小電離損失粒子 Minimum Ionizing Particle (MIP) と呼ぶ。宇宙線ミュー オン等がこれに含まれ、ATLAS でのミューオン検出器で検出するミューオンの運動量は GeV オーダー であることから MIP として扱うことができる。

4.1.2 光子と物質との相互作用

光子と物質との相互作用は、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成が主にある。これらの相互作用 の断面積は、光子の入射エネルギーと物質の原子番号に依存する。光子と物質を炭素と鉛にした相互作 用の断面積を図 4.2 に示す。光子の入射エネルギーが約 100 keV 以下では光電効果、数 100 keV から 10 MeV 程度ではコンプトン散乱、10 MeV 以上では電子対生成が主な相互作用である。

・光電効果

光電効果は、光子が物質中の軌道電子を光電子として叩き出す反応である。光子の入射エネル ギーが電子の束縛エネルギーよりも大きいときに起き、原子核に最も近い K 殻の電子が反応しや



図 4.1 銅における µ⁺ のエネルギー損失 [8]: GeV オーダーの運動量を持つ粒子は、ほぼ一定のエ ネルギーを損失し、MIP という。

すい。反応断面積は原子番号の5乗に比例する。電子が放出した後の原子は励起状態となり、基 底状態に戻る際に電子が移動した準位間のエネルギーを持った特性 X 線が放出される。

・コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子と軌道電子が弾性散乱であり、光子が電子を反跳し、光子は電子に与 えた分だけエネルギーの低い光子となる反応である。反応断面積は原子番号に比例する。散乱後 の光子のエネルギー E'_{γ} は、光子の入射エネルギーを E_{γ} 、光子の散乱角を θ を用いて以下の式で 表せる。

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (E_{\gamma}/m_e c^2)(1 - \cos\theta)}$$
(4.2)

・電子対生成

電子対生成は、光子の入射エネルギーが電子の静止質量 511 keV の 2 倍を超えるときに起こる 反応で、光子と物質中の電磁場との相互作用により電子と陽電子の対が生成される反応である。 反応断面積は原子番号の 2 乗に比例する。

4.2 ガス増幅

ガス増幅とは、ガスと電場を用いて電子数を増やすことである。ガス検出器は一般に、主成分に希ガ ス、クエンチングガスに他原子分子のガスを用いる。検出器に入射した放射線は、ガス中の原子から電 子を電離し、電子イオン対を生成する。電子イオン対の数は荷電粒子のエネルギー損失に比例し、ガス の種類に依存する。

生成された電子イオン対はクーロン力により中性原子に再結合しようとするが、ガス中に電場をかけ



図 4.2 光子と炭素、鉛との相互作用 [8] : $\sigma_{p.e.}$ は光電効果、 $\sigma_{Rayleigh}$ は原子のイオン化や励起を 伴わないレイリー散乱、 $\sigma_{Compton}$ はコンプトン散乱、 κ は電子対生成を表す。それぞれの相互作用 の断面積は、光子の入射エネルギーと物質の原子番号に依存する。

て抑制する。ガス中の電場により、イオンは陰極に、電子が陽極に移動する。電子の平均自由行程はイ オンに比べて非常に大きいことから、電子はイオンよりもはるかに加速される。

加速された電子がガス原子のイオン化エネルギーを超える運動エネルギーでガス原子と衝突すると、 ガス原子が電離され電子が生成される。この電子もまた電場により加速され、他のガス原子を電離す る。この連鎖的な電離により電子の数が増える現象を電子雪崩と呼ぶ。電子雪崩で生成された大量の電 荷の移動によって陽極に誘起された信号を測定する。



図 4.3 MSGC の構造 [11]: Anode stip と Cathode strip が数百 µm 以下の間隔で交互に並んでいる。

4.3 MPGD

Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) は、フォトリソグラフィ等の微細加工技術の発展に伴い近年 開発されている、高性能ガス放射線測定器である。従来のガス検出器はワイヤーを用いるものが基本で あり、比例計数管や Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) などがこれに当てはまる。ワイヤーを 用いたガス検出器は、ワイヤー同士の静電反発のためにワイヤー間隔を数 mm より小さくできないた め、空間分解能が低下する。また、電子雪崩で生成されるイオンの収集に時間を要するため、放射線が 高頻度で入射する環境に適さない。

MPGD はこれらの問題を解決するために開発された検出器であり、次世代のガス検出器として各国で 盛んに研究されており、実験にも使われ始めている。以下に代表的な MPGD を簡単に紹介する。

• MSGC

Micro Strip Gas Chamber (MSGC) は、1998 年に A. Oed により開発された [9]。図 4.3 に示す ように、絶縁基板の上に陽極ストリップと陰極ストリップを数百 µm 以下の間隔で交互に配置し た構造になっている。陰極が陽極のすぐ隣にあるため、電子雪崩で生成されるイオンが速やかに 収集できることから、高頻度環境下でも動作可能である。しかしながら、電極の終端などで放電 が発生し、電極が破壊される問題は簡単に解決できなかった [10]。MSGC 以上の性能を得るた めに、放電破壊の発生しない微細構造を求めて MPGD の研究が進められた。

• GEM

Gas Electron Multiplier (GEM) は、1997 年に F. Sauli らにより開発された [12]。標準的な GEM の電子顕微鏡による拡大写真を図 4.4 に示す。両面が銅で被膜されたポリイミドフォイル に、直径 70 µm の穴を 140µm の間隔で高密度に開けた構造になっている。銅に電位差を与える ことで穴中に高電場が形成され、穴中に入射した電子は電子雪崩を生成する。図 4.6 に示すよう に、GEM を多段に用いることにより合計一万倍以上の増幅が実現できる。これは、1 枚当たり



図 4.4 GEM の拡大写真 [13] : 穴の直径は 70 µm であり、140 µm の間隔で穴が並んでいる。この 穴を通り抜ける際に電子が増幅される。



図 4.6 GEM の増幅率 [13]:緑色が 1 枚の GEM、
 赤色が 2 枚の GEM、青色が 3 枚の GEM を用いた
 ときの増幅率を表してる。1 枚の GEM では数百
 という低い増幅率であるが、複数枚の GEM を用
 いることで高い増幅率を達成できる。

の GEM を低い増幅率で動作させることにより放電の危険を抑えることができる [13]。GEM は ガス増幅のみをするため、他の検出器と組み合わせて使用することが一般的であり、現在様々な 実験に使用されている。

MicroMEGAS

Micro-MEsh GAseous Structure (MicroMEGAS) は、1996 年に Y. Giomataris により開発された [14]。図 4.7 に標準的な MicroMEGAS の構造と動作原理を示す。鋼鉄製のマイクウロファインメッシュにより数 mm のドリフト領域と数百 µm の増幅領域を分けているため、空間分解能が高く、高頻度環境下でも動作可能である。メッシュは基板上に形成された絶縁体のピラーにより支えられている。増幅領域にドリフト領域の数百倍の電場を形成することで、ガス原子から電離



図 4.7 MicroMEGAS [4] : Mesh は絶縁体のピラーで支えられており、Drift Cathode は絶縁体のスペーサー等で固定する。



図 4.8 µ-PIC: ピクセル単位で増幅し、陽極と陰極ストリップによる二次元読み出しが可能である。

された電子のほとんどがメッシュを通り抜けることができる。MicroMEGAS は ATLAS NSW で 採用されている検出器であり、4.4 節に ATLAS NSW 用に開発した MicroMEGAS について後述 する。

• *μ*-PIC

Micro Pixel Chsmber (µ-PIC) は、2001 年に越智敦彦、谷森達により開発された [16]。図 4.8 に示すように、ポリイミドの絶縁基板に直径 50 µm の陽極ピクセルが 400 µm の間隔でピクセル 上に配置され、直径 200 µm の陰極が各陽極ピクセルを取り囲む構造となっている。陽極ピクセ ルと陰極は一列ずつ読み出しストリップにつながっており直交していることから、二次元読み出 しが可能である。また、陰極が円形という構造から、陰極近傍での電場が抑えられるため、放電 を起こしにくい。



図 4.9 NSW で用いられる Resistive MicroMEGAS の構造 [15] : 図 4.7 で示した一般的な MicroMEGAS の読み出しストリップの上に絶縁層を介して高抵抗ストリップを加えている。

| Item/Parameter | Characteristics | Value |
|------------------------|--|-------------------------------------|
| Mesh | Stainless steel separate from readout board | 325 lines/inch |
| Amplification gap | - | $128\mu\mathrm{m}$ |
| Drift/conversion gap | | 5 mm |
| Resistive strips | Interconnected | $ m R = 10	ext{}20 m M\Omega hm/cm$ |
| Readout strip pitch | | $0.425 - 0.445\mathrm{mm}$ |
| Stereo angle | 4/8 layers | $\pm 1.5^{\circ}$ |
| Total number of strips | , . | 2.1 M |
| Gas | Ar:CO ₂ | 93:7 |
| HV on resistive strips | positive polarity | $550\mathrm{V}$ |
| Amplification field | • | $40 \mathrm{kV/cm}$ |
| Drift field | | $600 \mathrm{V/cm}$ |

図 4.10 NSW で動作する MicroMEGAS の各パラメータ [4] :これらのパラーメータのうち、日本 の担当は高抵抗ストリップの研究開発および生産である。

4.4 ATLAS-NSW 用に開発した MicroMEGAS

MPGD は数百 μm と非常に狭い領域に高電場を形成することから電極間に放電が起こりやすい。放 電は増幅された電子数が Reather limit と呼ばれる 10⁷ 個を超えると発生する。LHC のようなハドロン 衝突実験において、荷電粒子だけでなく高速中性子や α 粒子などもガス原子核と相互作用し、原子核を 反跳する。反跳原子核が検出器内で大きなエネルギーを落とすと放電が生じ、検出器の破壊につながる。

放電を抑制するために、読み出しストリップの上に絶縁層を介して高抵抗ストリップを加えた。この 高抵抗を用いた MicroMEGAS は、Resistive MicroMEGAS と呼ばれ、図 4.9 に構造、図 4.10 に特徴を 示す。抵抗値を高くすると放電を抑制することができるが、高頻度環境下では電圧降下により検出器の 増幅率が下がってしまう。低くしすぎると放電を抑制できない。よって NSW の MicroMEGAS では、 最適な抵抗値として 20 MΩ/cm が採用された。神戸大学では、以前から高抵抗を用いた MPGD の製作 や動作に経験豊富であることも踏まえ、NSW の MicroMEGAS において、高抵抗ストリップの研究開 発および生産は日本の担当となっている。高抵抗ストリップの素材や量産に向けて、これまでに [17] や



図 4.11 表面が汚染されたワイヤー [19] : 動作ガ スの成分が重合し、ワイヤーに付着物が確認され ている。



図 4.12 シリコン化合物が付着したワイヤー [19] :シリコンの由来は、ガスのチューブなどから蒸発 したものであると考えられている。

[18] などで研究されており、現在は量産段階に入っている。本論文では Resistive MicroMEGAS の放射 線耐性について述べる。

4.5 放射線による検出器の劣化

ATLAS 実験等では、検出器を導入するとすぐに取り出せないことから、長期間にわたり性能を維持 することが重要である。MWPC などのワイヤーを用いたガス検出器では、放射線損傷によるワイヤー の付着物は増幅率の低下につながる。図 4.11 に示す付着物は、ワイヤーにガスの成分である炭化水素 が重合したと考えられている。また、図 4.12 のようにシリコンの付着物も確認されており、これは接着 剤やオーリング、ガスのチューブなどから発生したシリコンが蒸発してガス中に含まれ、ワイヤーにシ リコン化合物として付着していると考えられている [19] [20]。

第5章

MicroMEGAS 試作器

NSW に導入される MicroMEGAS は Resistive MicroMEGAS であり、以後の MicroMEGAS は Resistive MicroMEGAS とする。日本の担当は高抵抗ストリップの研究開発および生産であることから、現在に至るまで様々な小型試作器を製作してきた。本章では、小型 MicroMEGAS 試作器について述べる。

5.1 小型試作器

NSW に導入される MicroMEGAS の大きさは、図 3.8 の 1 つのセクターが 1.8 m×3.7 m である。小型試作器は、有感領域が 10 cm×10 cm であり、400 μ m 間隔の 256 本の読み出しストリップで読み出 す。小型試作器は、NSW に導入される大きさの 1.5×10⁻³ 倍であり、検出器の様々なパラメータを変 更して製作することができ、製作費用も抑えることができる。現在までに製作してきた試作器を表 5.1 にまとめる。製作した試作器は Japan の頭文字をとって J チェンバーと名付けており、J1 が一番古い検 出器である。これまで試作した検出器のうち、J <番号> とあるのは NSW に導入される MicroMEGAS と同じ一次元読み出しのもの、Jmm <番号> とあるのは二次元読み出しが可能な MicroMEGAS であり、 現在神戸大学等で研究が進められている。

高抵抗ストリップの製造方法として、これまで日本グループでは、炭素スパッタとリフトオフを用いたものと、電極をスクリーンプリントで印刷するものの、二つの手法を開発してきた。スパッタリングは、真空中に負の電圧が印加された標的を置き、イオン化されたガス原子を標的に高速で衝突させ、標的の構成粒子を叩き出し、基板に付着させることで薄膜を形成する技術である。スパッタリングによる炭素薄膜を用いて高抵抗ストリップを製作する方法は、神戸大学が独自に開発した技術であり、Resistive MicroMEGAS の他に、GEM や μ-PIC、RPC などの製作、動作実績もある。炭素薄膜の厚さにより抵抗値の制御が可能であり、粒子のポリイミドに対する付着力が強いため、物理的や化学的安定性にも優れる。しかしながら、製作の工程数が多いために製作に要する時間が長く、費用が高い。一方スクリーンプリントは、炭素を混ぜたインクをパターン形成をしたスクリーンに押し出す方法である。基礎技術が確立されており、様々なインクに対応でき、作成時間が短く、費用も安い。しかしながら、抵抗値の均一性の制御が難しく、百 μm 以下の細かいパターン形成ができないが、NSW での MicroMEGAS で要求されている性能を満たすには十分である。そのため、最終的に NSW に導入される MicroMEGAS は費用が重視され、高抵抗ストリップの量産にはスクリーンプリントを採用している。

MicroMEGAS のメッシュの構造は主に2つあり、取り外しが可能なフローティングと、メッシュが ピラーに挟まれて固定されている Bulk 型がある。Bulk 型はメッシュが固定されているため、安定した 増幅領域を確保できるが、製造過程や動作中に、ゴミが増幅領域に混入してしまうと取り出すことが困

| 表 5.1 日本で製作した小型試作器のリスト | | | | | |
|------------------------|----------------------|---------|----------|-----------|--|
| | 高抵抗ストリップ | | | | |
| 名前 | 製造方法 | 間隔 [μm] | メッシュの構造 | 増幅領域 [μm] | |
| J1,J2 | スクリーンプリント | 400 | Bulk | 100 | |
| J3,J4 | Sputtered Carbon + W | 200 | Bulk | 128 | |
| J5,J6 | Sputtered Carbon | 200 | Floating | 128 | |
| J7,J8 | Sputtered Carbon + N | 400 | Floating | 128 | |
| J9–J18,J29,J30 | スクリーンプリント | 400 | Floating | 128 | |
| J19,J20 | スクリーンプリント | 400 | Floating | 100 | |
| Jmm1,Jmm2 | Sputtered Carbon | 250 | Floating | 128 | |
| JmmA–JmmC | Sputtered Carbon | 平面 | Floating | 128 | |
| J26–J28 | Sphttered Carbon | 平面 | Floating | 128 | |

難である。一方フローティングは、静電気力によりメッシュを安定させる。取り外しが可能なため、ゴ ミの除去が容易であり、NSW に導入される MicroMEGAS にはフローティングを採用している。

6 章のトラッキング試験では J12–J15 を、7 章の γ 線照射試験、7.7 節の中性子を用いた試験では J13,J14 を用いている。

小型試作器の中の写真や外観を、図 5.1 から図 5.5 に示す。ガスパッケージと PCB、上蓋の間にはそ れぞれシリコン製の O-ring を挟み、ガス漏れを防いでいる。

5.2 増幅率測定

試作器の特性を調べるために、まず最初に放射線源 ⁵⁵Fe を用いて増幅率を測定した。増幅率は、神戸 大学と CERN のいずれにおいても測定したが、原理やセットアップに大きな変更はないため、以下では 神戸大学での測定について述べる。ガスは、NSW のデザインと同じ、Ar:CO₂=93:7 の混合ガスを用い ている。

5.2.1 測定の原理

 55 Fe は、鉄原子の安定同位体 56 Fe よりも中性子の数が一つ少ない放射性同位体である。電子捕獲により 55 Mn になる際、主に K 殻から電子が奪われ、外殻から電子が遷移するときに 5.9 keV の X 線を放出する。

X線がアルゴン原子に光電吸収されると、主に K 殻の電子が放出される。K 殻の束縛エネルギーは 3.2 keV であるため、入射エネルギー 5.9 keV から 3.2 keV を差し引いた 2.7 keV のエネルギーを持つ 光電子が放出される。電子が放出した後のアルゴン原子は励起状態となり、エネルギーを放出して基底 状態に戻ろうとする。この際、外殻の電子が遷移した準位間のエネルギーを持つ特性 X 線が放出され るか、同等のエネルギーを持つ外殻の電子が放出される。これらが発生する確率は、15%、85% とな り、後者の確率が圧倒的に高い。前者の場合、特性 X 線はアルゴン原子を励起させるだけのエネルギー を持っていないため、ガス中をそのまま通過して検出器の外へ逃げる。よって、2.7 keV のエネルギー を持つ光電子のみが増幅され、2.7 keV のピークを持ち、エスケープピークと呼ぶ。後者の現象はオー ジェ効果、放出される電子をオージェ電子と呼ばれる。よって、2.7 keV の光電子と 3.2 keV のオージェ 電子が増幅され、5.9 keV のピークを持ち、メインピークと呼ぶ。



図 5.1 PCB: 左側は電圧供給部分であり、右側 に読み出しコネクターがついている。黒い部分が 有感領域であり、大きさは 10 cm × 10 cm である。



図 5.3 メッシュを取り付けた検出器: 井桁型の 枠にメッシュを固定してある。メッシュは写真上 側の銅テープと接触しており、メッシュを接地し ている。



図 5.2 高抵抗ストリップとピラー : 図 5.1 を拡 大した写真。横方向の黒い線が高抵抗ストリップ、 黒い点がピラーであり、ピラーは 2.5 mm 間隔に 並んでいる。



図 5.4 ドリフトメッシュを取り付けた検出器: ドリフト領域は 5 mm である。



図 5.5 小型試作器の外観 : 上下のチューブより 検出器内にガスを満たす。

放射線源 ⁵⁵Fe を用いた測定では、前述したようにエネルギースペクトルは2つのピークを持つが、増幅率測定では 5.9 keV のメインピークのイベントのみを用いる。増幅率は式 5.1 のように定義する。

増幅率 =
$$\frac{検出器の信号から得られた電荷量}{5.9 \text{ keV o X 線がガス中で作る一次電子の電荷量}}$$
 (5.1)

ー次電子の電荷量は、ガス中で生成される一次電子数に比例する。一対の電子イオン対を生成するため に必要なエネルギーは W 値と呼ばれ、W 値はガスの種類で違う。今回使用したガスは、Ar:CO₂=93:7 であり、Ar と CO₂ の W 値はそれぞれ 26 eV、34 eV である。5.9 keV の X 線がガス中で生成する一次 電子数は、式 5.2 となる。

$$\frac{5.9 \,[\text{keV}]}{26 \,[\text{eV}]} \times 0.93 + \frac{5.9 \,[\text{keV}]}{34 \,[\text{eV}]} \times 0.07 \approx 222 \,\text{id}$$
(5.2)



よって 5.9 keV の X 線がガス中で作る一次電子の電荷量は、電気素量を用いて式 5.3 となる。

$$222 \times 1.6 \times 10^{-19} \,[\text{C}] \approx 3.6 \times 10^{-5} \,[\text{pC}] \tag{5.3}$$

このようにして、検出器の信号の大きさから増幅率を計算することができる。

5.2.2 **セットアップ**

MicroMEGAS 試作器の増幅率測定のセットアップを図 5.6 に示す。MicroMEGAS の信号読み出しに は、ATLAS 実験の TGC 用に開発された Amp Shaper Discriminator (ASD) を用いた。ASD は 4 チャ ンネル分の信号処理ができるチップが 4 個搭載されており、ASD 1 つで 16 チャンネルを処理できる。 MicroMEGAS は 256 本の読み出しストリップがあり 2 つの読み出しに分かれているため、8 本の読み出 しストリップを 1 つのチャンネルとして信号を読み出すことができる。Multi Channel Analyzer (MCA) は、信号の最大波高を測定し波高インターバル毎にカウントされたイベント数が記録される機器であ る。今回増幅率測定で用いた AMPTEK 社製の Pocket MCA 8000D は、収集したデータはメモリーに蓄 えられ、PC から読み出しが可能である。MCA で得られたヒストグラムのメインピークの中心値から電 荷量を算出し、増幅率を求める。MCA のヒストグラムを得る前に、デジタルオシロスコープで ⁵⁵Fe の 信号を確認した。⁵⁵Fe の信号の例として、J14 のドリフト電場を 600 V/cm に固定し、アノード電圧を 560 V と 590 V に変化させた時にデジタルオシロスコープで確認した信号を図 5.7 と図 5.8 に示す。ま た、この時に MCA で得た鉄のヒストグラムのピークも約 30 から約 100 に大きくなっている。

5.2.3 キャリブレーション

MCA で得られたヒストグラムの値と電荷量の関係を調べるために、パルスジェネレータを用いて キャリブレーションを行った。キャリブレーションのセットアップを図 5.11 に示す。既知の電荷量を 得るために、 $\Delta Q = C \times \Delta V$ の関係式を用いた。 ΔV の短波形を容量 C のコンデンサに通すことで、既 知の電荷 ΔQ を得た。パルスジェネレータの信号をコンデンサに通すと、出力電圧に応じた電荷のヒス トグラムを MCA で得ることができる。パルスジェネレータから 100 mV – 800 mV の短波形を出力し、 出力電圧に応じた電荷量のヒストグラムを取得し、MCA のヒストグラムの値と電荷量の校正曲線を算 出した。図 5.12 に校正曲線の結果を示す。 キャリブレーションにより、MCA のヒストグラムの値 y と電荷量 x の関係は式 5.4 となる。

$$y = 277.3x + 11.9 \tag{5.4}$$

これにより、式 5.1 から増幅率の絶対値を求めることができる。

5.2.4 増幅率の結果

表 5.1 のうち、本論文で用いている検出器の増幅率を図 5.13 にまとめる。増幅率は、MicroMEGAS のドリフト電場を 600 V/cm に固定し、アノードである高抵抗ストリップに印加する電圧を変化させて 測定した。ガスは Ar:CO₂=93:7 の混合ガスを 1 気圧で常流している。小型試作器において、10⁴ 以上

30



図 5.7 アノード電圧 560 V の時の ⁵⁵Fe の信号の 例 : 信号の大きさは約 50 mV である。



図 5.9 アノード電圧 560 V の時の ⁵⁵Fe の MCA で得たヒストグラム : ⁵⁵Fe の 5.9 keV のメイン ピークは MCA channel で 30 付近にある。



図 5.8 アノード電圧 590 V の時の ⁵⁵Fe の信号の 例: 560 V の時の信号より大きくなっていること がわかる。



図 5.10 アノード電圧 590 V の時の ⁵⁵Fe の MCA で得たヒストグラム : ⁵⁵Fe の 5.9 keV のメイン ピークは MCA channel で 100 付近にあり、560V の時よりもピークが移動している。



図 5.11 キャリブレーションのセットアップ: パルスジェネレータの出力電圧に応じた電荷は、増 幅率測定のセットアップと同じ経路をたどる。50 Ω は、信号の反射を抑制している。

の十分な増幅率が得られたことがわかる。J1 と J3 は他の試作器と比べて、同じ電圧でも増幅率が高く なっている。J1 と J3 は Bulk 型の MicroMEGAS であり、メッシュがピラーに挟まれていることから、 本来の増幅領域からメッシュの厚さの半分だけ狭くなっている。よって図 5.13 に示した小型検出器の リストの増幅領域は、J1、J3、その他の検出器の順に大きくなっている。増幅領域が狭いと、同じ電圧 を印加した時、より高い電場を得ることができ、そのため増幅率が高くなる。



図 5.12 校正曲線 : 横軸が 100 mV-800 mV の短波形に相当する電荷量、縦軸が MCA で測定され たヒストグラムの中心値



図 5.13 増幅率 : J1 と J3 は Bulk 型の MicroMEGAS であり、その他の検出器は Floating MicroMEGAS である。増幅領域の違いが、増幅率が違う原因である。

第6章

CERN SPS H6 ビームラインにおける 120 GeV π を用いたトラッキング試験

3 章で述べたように、NSW に導入する MicroMEGAS は高い検出効率と空間分解能が要求される。小型試作器の性能を評価するために、2015 年 9 月に 120 GeV のπビームを用いた試験を行った。小型試 作器は、NSW に導入される MicroMEGAS と同じ特徴を持つ、J12 – J15 を用いた。これらは、高抵抗 ストリップがスクリーンプリントで製造され、メッシュがフローティングである。本章では、ビームラ イン、試験に用いる読み出しシステム、測定結果について述べる。

6.1 CERN SPS H6 ビームライン

図 2.1 に示した CERN の加速器において、LHC の陽子ビームは SPS にて 450 GeV まで加速される。 SPS で加速された陽子ビームは一部取り出され、図 6.1 の T4 というターゲットに照射し、二次ビーム を生成する。本実験では二次ビームに、120 GeV の π ビームを用いる。120 GeV の π ビームはエネル ギーが高いビームであり、多重散乱の影響は小さい。



図 6.1 North Area の各ビームライン [21]: H6 ビームラインは T4 ターゲットの先にある。



34

図 6.2 検出器のセットアップ: 各検出器はアルミニウムのフレームにネジで固定されている。二 次型 MicroMEGAS Tmm で J12 – J15 を挟んでおり、飛跡をより高い精度で要求することができる。



図 6.3 ビームラインと検出器のセットアップの拡大写真: ビームは手前から奥へと通る。アルミニ ウムのフレームに固定した検出器と両側にシンチレータが見える。

6.2 試験の目的と内容

NSW における MicroMEGAS 一層への要求性能は、検出効率 99% 以上、位置分解能 100µm である。 小型試作器 J12–J15 がこれらの要求性能を満たすかどうかの確認をすることが、今回のビームテストの 目的である。

6.3 セットアップ

検出器のセットアップを図 6.2、図 6.3 に示す。各検出器は角度を変えることができるアルミニウムの フレームに取り付けている。日本で製作した検出器に加え、CERN で製作された二次元型 MicroMEGAS である Tmm を 3 台用いる。Tmm は検出効率を測定する際に、飛跡を要求するための検出器として設 置した。10 cm×10 cm のシンチレータを、計 7 台の MicroMEGAS の前後に固定し、このコインシデ ンスの信号をトリガーにした。ビームは図 6.2 では右から左へ、図 6.3 では手前から奥へと通る。検出 器からのデータの流れ図を、図 6.4 に示す。J12 – J15 は APV で、Tmm 3 台は VMM で読み出され、 HDMI ケーブルを通して、SRS へとデータが送信される。SRS から Gigabit Ethernet ケーブルを通して 転送されたデータは、MicroMEGAS 用に開発された mmDAQ というソフトウエアを用いてデータが処 理、記録される。それぞれの電子機器については 6.4 節で後述する。



図 6.4 MicroMEGAS から mmDAQ にデータが送信されるまでの流れ図 :J12–J15 は APV25 に、 Tmm は VMM2 に接続されており、データは、HDMI ケーブルを通して SRS、Gigabit Ethernet を通 して mmDAQ へと送信される。



図 6.5 APV25 : 1 枚の APV25



図 6.6 APV25 Hybrid : APV25 を 2 枚つなげたもの。

6.4 読み出しシステム

MicroMEGASの読み出しシステムには、APV25をフロントエンドチップに、Scalable Readout System (SRS)をバックエンドエレクトロニクスに用いる。

APV25 は CMS のシリコンストリップ検出器の読み出し用に開発されたチップである [22]。図 6.5 に 1 枚の APV25 を示す。1 枚のチップは 128 チャンネル分の信号を増幅、整形することができ、図 6.6 の ように 2 枚の APV を合わせて使うと、MicroMEGAS の 256 本の読み出し全てが可能である。256 本 の信号は 1 本の HDMI ケーブルを通して SRS へと送られる。なお、NSW の MicroMEGAS の読み出 しチップには、VMM と呼ばれる別のフロントエンドチップが使われる。VMM は現在開発中であるた め、本論文では APV25 を使用している。

SRS は、MPGD 開発の国際コラボレーションである RD51 によって開発された汎用読み出しシステムである。Analog Digital Conveter (ADC) ボードと Front-End Concentrator card (FEC) ボードから構



図 6.7 MicroMEGAS の信号の例 : ストリップと時間の 2 次元で表した電荷ヒストグラム。1 イベントの時間は 27 time bin × 25 nsec = 675 nsec となる。

成される。ADC ボードは APV25 から HDMI ケーブルを通して、アナログ信号をデジタル信号に変換 する。FEC ボードはトリガーからの信号に基づいて ADC からの信号を受け取り、処理をし、Gigabit Ethernet ケーブルを通して PC へと転送する。トリガーは外部信号を使う外部トリガーと内部クロック を使う内部トリガーの 2 種類が選択可能である。

SRS から転送されたデータは、MicroMEGAS 用に開発された mmDAQ というソフトウエア を用い てデータを処理、記録される。物理ランを始める前に、MicroMEGAS の各ストリップのベースライン の情報を取得し、ADC 値と標準偏差を記録する。これをペデスタルランと呼び、ペデスタルの情報を 元にオンライン閾値を決定する。物理ランでは、オンライン閾値を超えた信号がストリップにある時の みのデータをファイルに記録する。

6.5 トラッキングの例

本章のトラッキング試験では、小型試作器のアノード電圧に対する検出効率と位置分解能を測定した。検出効率、位置分解能に話を移す前に、mmDAQ から得られた信号の例について説明する。図 6.7 に J12 に π ビームを 0 度入射した時の信号の例を表す。時間情報は、1 time bin=25 ナノ秒として保存 され、1 イベントにつき 27 time bin である。



図 6.8 検出効率: 4 台の小型検出器は検出効率 99%以上を満たしている。

6.6 基本性能の評価

6.6.1 検出効率

検出器の有感領域内にビームが通過したイベントを選別することで、検出効率を求める。検出効率 は、式 6.1 のように定義した。

検出効率 =
$$\frac{検出効率を測定する検出器にヒットがあるイベント数}{他の検出器全てにヒットがあるイベント数}$$
 (6.1)

またヒットの定義を以下のようにした。

- 各検出器において隣り合う6本のストリップの束(クラスター)が1個であること
- Tmm2、Tmm5、Tmm6のクラスターの位置が、ビームの位置を考慮した、2 mm × 2 mm に収 まっていること

図 6.8 に、ビーム角度が検出器に対して 0 度の時の、アノード電圧に対する検出効率を示す。全ての検 出器において、増幅率 5000 に対するアノード電圧において、要求性能である 99 % 以上を満たしている ことがわかる。1 % の不検出効率は、検出器の有感領域に対して絶縁体のピラーが占める領域が 1 % で あるために生じる値である。

6.6.2 位置分解能

位置分解能は、2 台の検出器のヒット位置を用いて求める。ヒット位置の差のヒストグラムをガウシ アンでフィットをした標準偏差 σ を求める。2 台の検出器の性能が同じだと仮定すると、誤差伝搬によ り、一台あたりの位置分解能は $\sigma/\sqrt{2}$ となる。図 6.9 から図 6.11 にヒット位置の差のヒストグラムを 示す。これらの標準偏差により求めた位置分解能を表 6.12 に示す。

38



| 図 6.12 | 位置分解能のまとめ |
|---------|------------|
| 検出器 | 位置分解能 [µm] |
| J12–J13 | 76 |
| J13–J14 | 78 |
| J14–J15 | 78 |

6.7 **まとめ**

NSW に導入される MicroMEGAS と同じ特徴を持つ、高抵抗ストリップがスクリーンプリントで製造され、メッシュがフローティングである J12 – J15 を製作した。これらの小型試作器が、要求性能である検出効率 99% 以上、位置分解能 100 μ m を満たすことを確認するために、CERN SPS H6 ビームラインにおける 120 GeV π ビームを用いて実験を行った。全ての小型試作器において、NSW の精密位置測定を担う MicroMEGAS への要求性能である、位置分解能 100 μ m を満たしていることを確認し、検出効率は 99% 以上を実現していることがわかった。

第7章

γ 線を用いた耐久試験

NSW の設置場所は、多くの中性子や γ 線のバックグラウンドが存在する。MicroMEGAS のヒット レートは、具体的に、中性子は 120 Hz/cm²、 γ 線は 1.5 kHz/cm² となっており、このような環境下にお いて、検出器の動作安定性や劣化が問題となる。CERN にある γ 線照射施設を使い、MicroMEGAS 検 出器の耐久試験を行った。 γ 線照射後の検出器の評価について、照射前後で、2 種類の検出器 J13、J14 の特性がどのように変化したのかを述べる。J13 は、増幅率の測定、トラッキング試験、抵抗値測定、 表面調査を行った。J14 は、増幅率の測定、トラッキング試験、中性子を用いた試験、抵抗値測定、表 面調査を行った。

7.1 γ **線照射施設** GIF++

 γ 線照射試験は、CERN にある Gamma Iradiation Facility ++ (GIF++) と呼ばれる施設で行った [23]。 HL-LHC におけるルミノシティの増加は、現状に対してより高い粒子のバックグラウンドが懸念され る。GIF++ は、LHC や将来のアップグレード実験に使われる検出器の性能や安定性を研究対象とした 施設である。この施設は、 γ 線源として強度が 140 TBq の ¹³⁷Cs が使用されており、例えば数年分の HL-LHC の実験条件に相当する線量を数日から数ヶ月という妥当な時間で累積することを可能にして いる。また、図 6.1 に示したように、GIF++ は H4 ビームライン上にあるため、 γ 線を照射しつつ、高 エネルギー荷電粒子ビームを使いトラッキングを行うことも可能である。図 7.1 に GIF++ の全体写真、 図 7.2 に GIF++ を上から見た図を示す。

7.2 *γ*線照射試験の内容

今回の照射試験では、図 7.3 のように小型試作器の J13、J14 を線源から 1 m 離しておいた。 γ 線の フラックスは、図 7.4 に示すように、測定値を線源からの距離の 2 乗の関数としてフィットして考えた [24]。線源から検出器の距離は 1 m としたので、 γ 線のフラックスは 130 MHz/cm² に相当する。Geant 4 シミュレーションにおける MicroMEGAS の γ 線に対する感度は、 1.0×10^{-4} であるから [7]、今回の 試験で予想される γ 線のヒットレートは 130 kHz/cm² となる。

γ線照射試験は、表 7.1 のスケジュールの通り、J13、J14 は 1 回目の γ線照射試験後、一旦 γ線照射 施設から取り出し、6 章に示したトラッキング試験と同じ要領で性能試験、増幅率の測定や抵抗値測定 などをした。これらの照射後の試験については 7.5 節以降で後述する。J13 はこれらの試験後、日本に 持ち帰り破壊を伴う検査を行ったが、J14 についてはその後も γ線照射試験を続けた。

1、2回目の y 線照射試験とも、ドリフト電場を 600 V/cm に固定し、アノード電圧を 580V、ガスの



図 7.1 GIF++ の全体写真 [24] : 照射施設は γ 線の漏れを防ぐために、分厚いコンクリートで覆われている。検出器を動作させるために必要な電圧やガスは、Irradiation bunker の外に確保されている。



図 7.2 GIF++ を上から見た図 [24] : 照射場所は 2 つ確保されており、全体で 100 m² ある。幅広 い大きさの検出器の同時試験が可能である。



図 7.3 小型試作器のセットアップの写真:緑の塔の中に線源が格納されている。検出器は線源から 1 m 離しておいている。



図 7.4 γ 線のフラックス : [24] の測定値を距離の 2 乗の逆数でフィットした。線源から検出器の 距離は 1 m なので、今回の試験での γ 線のフラックスは 130 MHz/cm² となる。

表 7.1 γ 線照射試験のスケジュール: J13 は 1 回目の γ 線照射試験のみだが、J14 は調査後、2 回 目の γ 線照射試験を行った。

| 日付 | 検出器 | 内容 | |
|------------|---------|------------------|--|
| 2015年9月上旬 | J13、J14 | トラッキング試験 | |
| 2015年9月中旬 | J13、J14 | γ 線照射試験 | |
| 2015年9月中旬 | J13、J14 | トラッキング試験 | |
| 2015年9月下旬 | J13、J14 | 表面調査 | |
| 2015年11月中旬 | J14 | γ 線照射試験 | |
| 2016年4月中旬 | J14 | γ 線照射試験終了 | |

流量は 5 L/hour で常流した。アノードである高抵抗ストリップに流れる電流や電圧などをモニターした。また、SRS を内部トリガーで動作させ、J13 と J14 における y 線由来の信号を記録した。

7.3 γ 線照射試験の結果

7.3.1 1回目の照射試験

2015 年9月中旬に1回目の照射試験を行った結果について述べる。図 7.5 から図 7.8 に、J13 とJ14 のアノードである高抵抗ストリップに印加した電圧と電流の時間経過を示す。これらの図は全て同じ 日、同じ時間に取得したデータであり、始点は 2015 年9月9日午前であり、終点は9月 20日午後であ る。我々が試験をした同じ時期に他のグループも違う試験をしており、彼らの要求に合わせて線源の強 度を変化させたりしており、その影響がデータ取得から約 20 時間から 30 時間の間に見られる。また、 データ取得から約 145 時間後にはガスボンベの交換を行っており、その際に混入した不純物の影響で電 流値が不安定になっていると考えられる。 γ 線照射がオンの時、両検出器とも γ 線由来の信号による約 3.7 μ A の電流が常に流れた。今回の照射時間は、電圧がオフの時や線源の強度などを考慮すると、約 210 時間であり、合計照射量は 28 mC/cm² となった。

また SRS で取得したデータから、ヒットレートは 100 kHz/cm² と見積もり、210 時間の総ヒット数は 7.6×10¹⁰ / cm² となった。このヒットレートは前述したシミュレーションから予想される γ 線のヒット レート 130 kHz/cm² とほぼ一致している。

NSW は Run 3 以降での約 10 年間に渡って運用される。Run 4 以降の HL-LHC での運用も考慮して、 γ線の照射量を以下のように見積もった。

・電流からの見積もり

HL-LHC は 10 年間で積分ルミノシティ 3000 fb⁻¹ を目指しており、瞬間ルミノシティは 5 – 7×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ である。よって、HL-LHC の実際の衝突時間は、以下の計算より 6×10⁷ 秒となる。

$$\frac{3000 \,[\text{fb}^{-1}]}{5 \times 10^{34} \,[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]} = \frac{3000 \times 10^{15} \times 10^{28} \,[\text{m}^{-2}]}{5 \times 10^{34} \,[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]} = 6 \times 10^7 \,[\text{s}]$$
(7.1)

NSW の位置での MicroMEGAS に対する γ 線の最大ヒットレートは 1.5 kHz/cm² であり、Geant 4 シミュレーションにおける MicroMEGAS のガス領域に落とす γ 線の平均エネルギーデポジッ トは 10 keV [7] であることから、HL-LHC における照射量は、以下の計算より 28 mC /cm² と なる。

照射量 = (ヒットレート)×(衝突時間)×(種電子数)×(動作増幅率)×(素電荷) (7.2)
=
$$1.5 \times 10^3 [\text{Hz/cm}^2] \times 6 \times 10^7 [s] \times \frac{10 [\text{keV}]}{26 [\text{eV}]} \times 5000 \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]$$
 (7.3)

$$= 28 \,[\mathrm{mC/cm}^2]$$
 (7.4)

・ヒット数からの見積もり

MicroMEGAS に対する γ 線の最大ヒットレートは 1.5 kHz/cm² であり、HL-LHC の実際の衝 突時間は 6×10^7 秒から、総ヒット数は以下の計算より 9×10^{10} /cm² となる。

総ヒット数 = $(ヒットレート) \times (衝突時間)$ (7.5)

$$= 1.5 \times 10^{3} \,[\text{Hz/cm}^{2}] \times 6 \times 10^{7} [\text{s}]$$
(7.6)

$$=9.0 \times 10^{10} \,[/\text{cm}^2] \tag{7.7}$$



図 7.6 J13 のアノード電流の時間経過:線源をオンの時、電流が約 3.7 µA 流れており、線源をオフにすると、電流が 0 A に落ちている。また 10 µA 以上の放電が起きても、瞬時に検出器は回復して動作を続けていることがわかる。



図 7.8 J14 のアノード電流の時間経過:線源をオンの時、電流が約 3.7 µA 流れており、線源をオ フにすると、電流が 0 A に落ちている。

いずれの見積もりからも、1回目の γ 線照射試験では HL-LHC における、NSW の想定運用期間である、約 10 年分の γ 線の照射量に相当する。

7.3.2 2回目の照射試験

2015 年 11 月中旬から 2016 年 4 月中旬まで行った 2 回目の照射試験の結果について述べる。この照 射試験は、J14 に γ 線をさらに照射を続けた試験である。図 7.9 から図 7.10 に、照射開始時刻の 2015 年 11 月 20 日 23 時から 48 時間のアノード電圧と電流の時間経過を示す。図 7.11 から図 7.12 に、照 射終了時刻の 2016 年 4 月 17 日 22 時までの 96 時間のアノード電圧と電流の時間経過を示す。電圧は 検出器の様子を見ながら徐々にあげていったため、試験開始当初は 500V となっているが、試験終了時 には 580V 一定になっている。試験開始時に電流が安定していない理由として、検出器内に不純物が含 まれており、その焼きだしのために電流が流れていると考えられる。また試験終了時付近に見られる 0 μ A の現象については、J14 と同様の実験を行っていた CERN 検出器についても電圧をかけているにも 関わらず電流値が 0 μ A となっていることから、通信等の原因で電流値のデータが取得できていないと 考えられるが、詳細についてはわかっていない。

図 7.13 と図 7.14 に、2 回目の照射試験での全データの電圧と電流のヒストグラムを示す。印加電圧 は 540V、580V の主に 2 種類になっており、電流値は 2 µA にピークを持っている。

図 7.8 に示した 1 回目の照射試験における電流の時間経過と、図 7.12 に示した 2 回目の照射試験にお ける電流の時間経過を比較すると、1 回目の照射試験では 580V で 3.7 μA 流れていたが、2 回目の照射 試験では 580V で 2 μA に減少していることがわかる。これは、γ線の 130 MHz/cm² という高いフラッ クス環境下において、電圧降下が生じ、検出器の増幅率が低下していることが考えられる。これは、J14 のアノードである高抵抗ストリップの抵抗値が増加していることを示唆する。増幅率や抵抗値について は 7.5 節と 7.8 節にて後述する。

HL-LHC 1 年間における γ 線の照射量は、前述したように電流からの見積もりだと 2.8 mC/cm² であ り、ヒット数からの見積もりだと 9.0×10^9 cm² となる。今回の照射時間は、電圧がオフの時を考慮する と約 90 日間であり、電流値のふらつきが多いため、 γ 線の照射量は、ヒット数からの見積もりをした。 SRS で取得したデータから、ヒットレートは 170kHz/cm² となり、約 90 日間の総ヒット数は 7.6 ×10¹⁰ / cm² となった。以上より、2 回目の照射試験にて J14 は、HL-LHC 約 80 年分の γ 線の照射量に相当 する γ 線照射に成功した。

7.4 γ 線照射施設 GIF++ でのまとめ

γ線照射試験は2回に分けて行い、1回目の試験では HL-LHC 10年分のγ線のヒットに相当する照 射を、2回目の試験では HL-LHC 80年分のγ線の照射量に相当するγ線照射に成功した。照射中のア ノード電流は特にふらつくこともなく安定してγ線由来の電流であり、検出器はγ線照射中も安定動作 していることがわかった。しかしながら、1回目の試験では 3.7 μ A であったアノード電流が、2回目の 試験では約2 μ A となっていることから、γ線の高いフラックス環境下において、電圧降下が生じ、検 出器の増幅率が低下していることが考えられる。これは、アノードに用いている高抵抗ストリップの抵 抗値が増加していることが考えられ、この議論については 7.8 節で後述する。



図 7.9 試験開始時のアノード電圧の時間経過 :電圧は 500V から開始し徐々にあげていった。36 時間後に電圧を 540V にあげている。



図 7.10 試験開始時のアノード電流の時間経過:試験開始時は電流が少し安定していないが、徐々 に 1µA に安定している。また 36 時間後における電圧増加とともに電流も増加している。



図 7.12 試験終了時のアノード電流の時間経過 : 電圧が一定であることに対し、電流は 2 μ A 一定 の時と 0 μ A の時がある。

46



図 7.13 試験全体における電圧のヒストグラム: アノード電圧は大半が 540V、580V の 2 通りで ある。



図 7.14 試験全体における電流のヒストグラム : アノード電流は主に 1 µA から 2 µA で流れて いる。



図 7.15 J13 の増幅率: 黒が照射前、オレンジが 照射後の増幅率である。照射前後で増幅率の変化 がないことがわかる。



図 7.16 J14 の増幅率: 黒が照射前、オレンジが 1 回目の照射後、赤が2回目の照射後の増幅率で ある。

7.5 照射前後での増幅率測定

5.2 節と同じ要領で、増幅率の測定を行った。図 7.15 と図 7.16 に、J13 と J14 の照射前後での増幅率 を示す。J13 と J14 では γ 線の照射量が異なる。まず、両検出器とも HL-LHC 10 年分の γ 線のヒット に相当する照射後、一度照射施設から検出器を取り出し、CERN にて増幅率の測定を行った。増幅率の 測定後、J13 は 7.9 節で後述する表面調査のために日本へ送られたが、J14 は増幅率の測定後も γ 線照射 施設にて照射を続け、HL-LHC 80 年分の γ 線のヒットに相当する照射をした。J14 はさらなる照射後、 日本へ送られ増幅率の測定を行った。図 7.15、図 7.16 中の before は照射前、after1 は 1 回目の照射の ことであり、HL-LHC 10 年分の γ 線のヒットに相当する照射を意味する。after2 は 2 回目の照射のこ とであり、HL-LHC 80 年分の γ 線のヒットに相当する照射を意味する。after2 は 2 回目の照射のこ

7.6 照射前後でのトラッキング試験

HL-LHC 10 年分の γ線のヒットに相当する照射前後の J13 と J14 の位置分解能と検出効率は、[7] で 先行研究が行われている。J13 と J14 は、照射前後で、位置分解能、検出効率は変化しないことを確認 している。

7.7 照射前後での中性子を用いた試験

NSW は、 y線だけでなく、中性子のバックグランド環境下でもある。中性子により、検出器内で放電 が発生し、MicroMEGAS の性能低下や損傷が危惧される。神戸大学海事科学部のタンデム加速器を用 いて、高速中性子環境下での y線照射前後のJ14 の動作試験を 2015 年 8 月と 2016 年 12 月に行った。

7.7.1 中性子の発生原理

神戸大学海事科学部のビームラインの写真を図 7.17 に、タンデム加速器の概略図を図 7.18 に示す。 セシウムをチタンに重水素を吸着させた陰極にスパッタし、表面に数原子層の薄膜を作る。陰極を熱し て出てきた d は、セシウム層を通過する時に電子をもらい、d⁻¹ となり、タンデム加速器に入射し加速 される。加速器内の中央部は窒素分子が満たされており、d⁻¹ は窒素分子との電荷ストリッピング反応に より、正イオン d⁺ に変換され再加速される。3 MeV まで加速された d⁺ は磁石によって振り分けられ、 各ビームラインに送られる。本実験で使用したビームラインの先には、ターゲットとして Be を使用し ており、以下の反応により中性子が発生する。

$${}^{9}\text{Be} + d \longrightarrow {}^{10}\text{Be} + n + 4.35 \text{ MeV}$$
(7.8)

この核反応の反応エネルギーは 4.3 MeV であり、d⁺ ビームのエネルギーが 3 MeV であることから、最 大 7 MeV の中性子が発生する。

7.7.2 中性子のフラックス

図 7.19 に、式 7.8 の反応におけるビーム軸に対して 0 度方向の中性子の生成数を表す。本実験の d⁺ のエネルギーは 3 MeV で固定であるため、図 7.19 の赤の曲線を参考にして、ビーム軸に対して 0 度方向に発生する中性子数を 3.81×10^8 neutrons / sr / μ C とした。図 7.20 に示すように、Be ターゲットと検出器の距離を 7 cm に固定した。また、発生する中性子の強度を測定するために、Be ターゲットとビームパイプを絶縁し、その間の電流を測定している。図 7.21 に示すように、ターゲットとビームパイプの間に 100 V の電圧を印加することで、ビーム照射によりターゲットからの二次電子の放出を防ぐことで、正確に電流を測定できる。

このようにして、MicroMEGASの有感領域に入射される中性子のフラックスを以下の式より求めた。

中性子のフラックス =
$$\frac{3.81 \times 10^8}{d^2} \times I \times S$$
 (7.9)

ここで、d は Be ターゲットと検出器の距離 [cm]、I は図 7.21 で測定するターゲット電流 [μ A]、S は検 出器の有感領域 [cm²] である。本実験では、d を 7 cm、S は 10 cm × 10 cm であり、例えばターゲッ ト電流が 1 μ A のとき、中性子のフラックスは約 7 MHz/cm² となり、3.6 節で先述した HL-LHC での NSW で予想される中性子フラックス約 1.2MHz と比較して十分大きなフラックスとなってる。

7.7.3 中性子環境下における照射前後の MicroMEGAS の動作

γ線照射前後でのJ14の動作試験を中性子のフラックスを2段階に変えて行った。中性子のフラック スを決定するターゲット電流を固定することは難しいため、γ線照射前後の実験で中性子のフラックス



図 7.17 神戸大学海事科学部の中性子ビームラインの全体写真:写真左がイオン源、右下の Be ター ゲットの先に検出器がセットアップされている。



図 7.18 タンデム加速器の概略図:イオン源から重水素イオン d⁻ を引き出し、タンデム加速器にて 3 MeV まで加速する。加速された重水素イオンは磁石で振り分けられ、ターゲットの Be に衝突し、 高速中性子が発生する。



図 7.19 入射ビーム d⁺ を Be ターゲットにした時のビーム軸に対して 0 度方向の中性子の生成数 [25]: 横軸は入射ビームのエネルギー、縦軸は中性子数を表す。



図 7.20 中性子試験での検出器のセットアップ: Be ターゲットと検出器の距離を 7 cm に固定して 実験を行った。



図 7.21 ターゲット電流測定のセットアップ: Be ターゲットとビームパイプは絶縁されており、その間の電流を測定する。

は少し異なるが、両実験において、高いフラックスが低いフラックスより数倍大きくなるようなター ゲット電流を設定した。γ線照射前の実験では、110 nA で 0.86 MHz/cm²、710 nA で 5.52 MHz/cm² の 2 段階で、γ線照射後の実験では、150 nA で 1.17 MHz/cm²、850 nA で 6.61 MHz/cm² の 2 段階で 実験を行った。この 2 段階の中性子フラックス環境下でのでの高抵抗ストリップに流れる電流を USB オシロスコープを介して記録した。高抵抗ストリップに流れる電流は、高抵抗ストリップに印加してい る電圧モジュールからモニターできる。γ線照射前の実験では、測定時間は 10 分、照射後の実験では、 測定時間は 20 分とし、データの取得をしてから数秒後に中性子ビームを出し始め、各測定時間後、中 性子ビームを止め、その数秒後にデータの取得を止めている。J14 の動作電圧は、ドリフト電場を 600 V/cm、アノード電圧を 580 V にした。

高速中性子がガス原子核を反跳し、反跳原子核が検出器内で大きなエネルギーを落とすと、アノード に大きな電流が流れ、放電が生じる。中性子ビームをオンにすると、検出器は中性子由来の電流値が流 れ、ビームをオフにすると中性子由来の電流は流れなくなる。図 7.22 から図 7.27 に、各フラックスで の高抵抗ストリップに流れた電流モニター値を示す。図 7.22 と図 7.25 から、中性子を照射していない ときでも 500 nA の電流の揺らぎが見られる。この揺らぎは電源モジュールのノイズ由来のものであり、 図 7.25 に示す γ 線照射後の実験時の方が揺らぎが大きい。ノイズは、実験をした日の実験環境に依存 するものが大きいと考えられる。例えば用いた HV モジュールのノイズや電源からのノイズなどが考え られるが、確実な理由はわからない。

図 7.23、図 7.24 に示した γ 線照射前の電流モニターでは、中性子の低いフラックス、高いフラック スの両方において、電源ノイズを超える放電は観測できず、中性子環境下において MicroMEGAS が安 定に動作していることがわかる。しかしながら、図 7.26、図 7.27 に示した γ 線照射後の電流モニター では、両フラックスにおいて電源ノイズを超える放電を観測した。放電が増加した理由として、γ 線照 射前に比べて、例えば高抵抗ストリップに何かが付着し、検出器内が綺麗な状態ではないことが考えら れる。この付着物に関しては、7.9 節の表面調査にて後述する。また、γ 線照射後では、中性子の低いフ ラックの方が高いフラックスと比較して放電が多いことがわかる。これは、中性子の高いフラックスの 環境下において電圧降下が生じ、検出器の増幅率が低下していると考えることができる。電圧降下は、 高抵抗ストリップの抵抗値が上昇することにより生じることであり、後述する表面抵抗値の上昇を裏付 けることができる。放電の大きさは最大で 2 μA であり、放電後も MicroMEGAS は破壊されずに正常 に動作していることがわかる。

7.7.4 中性子を用いた試験のまとめ

最大約 6 MHz/cm² の中性子環境下において、 γ 線照射前後の J14 の動作試験をし、 γ 線照射後の試験 では照射前に比べて、放電が増加したが、J14 は破壊されることなく動作を続けることができた。放電 が増加した理由として、検出器内に不純物が混ざり込み、検出器内が綺麗な状態ではないことが考えら れる。ガス系統は照射前後で同様のものを使用していることから、J14 の表面上に何かしらの付着物が つき、その付着物が放電の原因となっていることが考えられる。また、 γ 線照射後の試験において、中 性子のフラックスの高い方と比較して低い方が放電が多くなっており、中性子のフラックスが高い環境 下では検出器の増幅率が低下していることが考えられる。これは、後述する高抵抗ストリップの抵抗値 の上昇により、電圧降下が生じていることがわかる。J14 は、HL-LHC 80 年分に相当する γ 線を照射 した MicroMEGAS であり、NSW の運用期間は 10 年間である。今回、HL-LHC 10 年分に相当する γ 線を照射した J13 は、照射前後で中性子試験を行っていないが、今回の試験より、HL-LHC 10 年では MicroMEGAS は問題なく動作することができると考えられる。

7.8 照射前後での表面抵抗値の測定

4.4 節で述べたように、ATLAS-NSW に導入する MicroMEGAS は、放電を抑制するために高抵抗ス トリップを採用している。抵抗値は低くしすぎると放電を抑制できず、高くしすぎると高頻度環境下で は電圧降下により検出器の増幅率が低下してしまう。このように ATLAS 実験のような高頻度環境下で は、抵抗値は重要であり、7.5 節の増幅率測定と同じ時期に表面抵抗値を測定した。図 7.28 に示すよう に、1 cm 角の電極に金属メッシュで覆ったゴムを 1 cm 離して測定した。測定箇所は、図 7.29 のよう に 4 分割または 9 分割にして測定した。

表面抵抗値の測定結果を図 7.30 と図 7.31 に示す。HL-LHC の γ 線照射量の何年分に相当するかを 横軸に、抵抗値とその分散を縦軸にしている。照射量が増えるにつれて抵抗値の増加していることがわ かり、J14 の抵抗値増加の結果から、照射量と抵抗値は比例の関係にあり、高抵抗ストリップが照射量 とともに何かしらの変化をしていることが推測できる。この高抵抗ストリップの変化は、7.9 節で後述 する表面調査により、高抵抗ストリップ上に SiO₂ ベースの付着物があることがわかった。抵抗値の増 加は、放射線の高頻度環境下において、高抵抗ストリップに電圧供給が追いつかなくなり電圧降下の原



図 7.22 γ線照射前の、中性子ビームがオフの時のアノードに流れた電流: アノード電圧に 580 V 印加した時にアノードに流れた電流



図 7.23 γ線照射前の、中性子フラックスが低い時にアノードに流れた電流:中性子ビームがオン になると、アノードに流れる電流が中性子の寄与により約 200 μA 増加している。



図 7.24 γ線照射前の、中性子フラックスが高い時にアノードに流れた電流: 上図の低いフラック スに比べ、電流の上昇具合は大きく、約 500 μA 増加している。



図 7.25 γ線照射後の、中性子ビームがオフの時にアノードに流れた電流: 電流の揺らぎは、電源 モジュール由来のノイズと考えられる。



図 7.26 γ線照射後の、中性子が低いフラックスの時にアノードに流れた電流:中性子ビームがオンなるとアノード電流は増加しているが、照射前の 200 µA は流れておらず、放電が目立つ。



図 7.27 γ線照射後の、中性子が低いフラックスの時にアノードに流れた電流:低いフラックス時よりも、高いフラックス時のほうが放電が少ない。



図 7.28 表面抵抗値の測定方法:1 cm 角のプロー ブを 1 cm 離して抵抗値の測定した。



図 7.29 表面抵抗値の測定範囲: 10 cm × 10 cm の 有感領域を 4 分割または 9 分割にして測定した。



図 7.30 J13 の表面抵抗値の変化 : J13 は HL-LHC のγ線照射量の 10 年分を照射した検出器で ある。数倍の抵抗値が増加した。



図 7.31 J14 の表面抵抗値の変化 : J14 は HL-LHC の γ 線照射量の 10 年分と 80 年分を照射し た検出器である。10 年分では、J13 と同様に数倍 に、80 年分では約十倍の抵抗値が増加した。

因となる。7.7 節で前述した、中性子のフラックスが高い環境下において増幅率が低下した結果は、この抵抗値増加による電圧降下が原因であると考えられる。NSW における MicroMEGAS の高抵抗ストリップの抵抗値の許容量は $0.35 - 3.5 \text{ M}\Omega/\text{sq}$ と定められている。 γ 線の照射による MicroMEGAS の高抵抗ストリップの抵抗値の増加が見られたが、HL-LHC γ 線照射量の 10 年分での表面抵抗値は、約 5 M Ω/sq であり、増幅率が低下していないこと、トラッキング試験により位置分解能と検出効率が変化しないこと、中性子を用いた試験より、HL-LHC 10 年の運用は問題なくできると考えられる。

7.9 照射前後での表面調査

7.8 節の抵抗値増加の原因を究明するために、高抵抗ストリップの表面を調査した。デジタルマイク ロスコープを用いて簡単な調査を行い、その後、レーザー顕微鏡を使い 3 次元形状の測定を行い、最後 に、走査型 X 線光電子分析装置 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) で表面の元素組成を分析した。 デジタルマイクロスコープは、キーエンス社製の VHX-2000 を使用し、レーザー顕微鏡は、東京大学に あるキーエンス社製の VK-X200 を使わせていただき、XPS は、アルバック・ファイ社製の PHI X-tool を使用した。



図 7.34

図 7.35

7.9.1 デジタルマイクロスコープを用いた観察

デジタルマイクロスコープでは、高抵抗ストリップとピラーを観察した。図 7.32 から図 7.34 に、高 抵抗ストリップとピラーを倍率 100 倍で観察した画像を示す。これらの図は、横の長さが 400 μ m、縦 の長さが 250 μ m に相当する。図 7.32 は、 γ 線非照射の検出器、図 7.33 は HL-LHC 10 年分に相当する γ 線を照射した J13、図 7.34 は HL-LHC 100 年分に相当する γ 線を照射した J14 の画像である。 γ 線 の照射量が多いほど、高抵抗ストリップやピラーの変色している。高抵抗ストリップの変色は J13、J14 ともに、有感領域の全領域で見られたが、ピラーの変色に関して、全てのピラーが変色しているわけで はなかった。また、変色したピラーについて抵抗値を確認したが、テスターで測定可能な抵抗値を測定 できなかったことから、変色したピラーについても、変色していないピラー同様に絶縁体であることを 確認し、検出器を動作中、ピラーに接触しているメッシュと高抵抗ストリップは絶縁であることがわか る。図 7.35 は、J14 の有感領域と不感領域の境界であり、図 7.34 と比較して、放電の影響が激しく見 られた。

7.9.2 レーザー顕微鏡を用いた観察

レーザー顕微鏡では、高抵抗ストリップの高さを測定した。今回用いたレーザー顕微鏡 VK-X200 は、 レーザー光源と白色光源を用いた 2 つの光源をもとに、色、光量、高さの情報を知ることができる。こ れにより、安定した高解像度、高コントラストの三次元画像を得ることができる。顕微鏡で観察した検 出器は、γ線を照射していない J12 と、照射した J13、J14、計 3 台であり、図 7.36 から図 7.41 に、高 抵抗ストリップをレーザー顕微鏡を用いて倍率 20 倍で観察した画像と、図中の青線の部分での高さの

| 測定箇所 | C1s [%] | O1s [%] | Si2p [%] |
|---------------|---------|---------|----------|
| 非照射の高抵抗ストリップ | 75.1 | 20.3 | 3.6 |
| J13 の高抵抗ストリップ | 8.1 | 62.2 | 29.6 |
| J14 の高抵抗ストリップ | 13.6 | 60.2 | 26.2 |

表 7.2 走査型光電子分析装置による高抵抗ストリップの表面分析の元素組成の結果: γ線を照射した J13、J14 いずれにおいても、C が減少、O と Si が増加した。

測定結果を示す。これらの図は、横の長さが約 530 μ m に相当する。観察した画像では、茶色の部分が 絶縁層、灰色の部分が高抵抗ストリップであり、高さの測定結果では、平らな部分が絶縁層、丸みを帯 びた部分が高抵抗ストリップを表す。また高さの測定結果は、縦軸は全て 15 μ m の間隔に表示を合わせ ている。図 7.38 と図 7.40 では、高抵抗ストリップ上に斑点が規則正しく並んでいることがわかる。こ の点が約 90 μ m の間隔で並んでいること、用いているメッシュの間隔が 88 μ m であることから、メッ シュの穴を通り抜けた電子の後が見えていると考えられる。高さの測定から、規則正しく並ぶ斑点に応 じた高さの変化は観測できなかった。 γ 線の照射前は、高抵抗ストリップが綺麗に丸みを帯びているこ とに比べて、 γ 線の照射後は、数 μ m の高さ変動を伴いながら丸みを帯びていることが観察できる。7.8 で前述した抵抗値の増加と、レーザー顕微鏡で観察された数 μ m の高さ変動から、高抵抗ストリップ上 に何かしらの付着物があることが推察される。付着物の元素組成の測定は次節で述べる。

7.9.3 XPS

走査型光電子分析装置では、高抵抗ストリップの表面上の元素組成を分析した。走査型光電子分析 は、試料表面にX線を照射し、光電効果により表面から放出する光電子の運動エネルギーを観測するこ とにより、表面の元素組成を分析する手法である。光電子が物質中を非弾性散乱することなく進む距離 から、測定可能な深さは試料表面から数 nm となる。装置は図 7.42 に示す機種であり、図 7.43 のよう に試料をネジ等で固定し、装置内に入れた。図 7.44 から図 7.46 は、実際に得られたスペクトルであり、 横軸は照射した X線を基準とした時の光電子のエネルギー、縦軸は観測された光電子の個数である。ま た、表 7.2 に、各測定箇所での元素の比率をまとめる。元素組成を分析することにより、y線を照射し た J13、J14 のいずれの検出器においても、高抵抗ストリップを形成する際に用いている抵抗ペースト に含まれる C が減少し、照射前にはほぼ確認できなかった Si が数十倍増加した。また、O も増加して いることから、高抵抗ストリップの表面に SiO₂ が付着していることが推測できる。この Si の発生源と して、ガスのチューブ、ガスパッケージと PCB や上蓋の間にガス漏れを防ぐために用いている O-ring などの成分が蒸発したものと考えている。ガスとして用いている CO₂ の酸素と反応することで、SiO₂ が高抵抗ストリップ上に付着しているのではないかと考えている。

7.10 γ線耐久試験のまとめ

 γ 線照射前後での MicroMEGAS の小型試作器である J13、J14 の特性がどのように変化したかを、増 幅率、トラッキング試験、中性子を用いた試験、抵抗値測定、表面調査の観点から調べた。HL-LHC 10 年分の γ 線照射を行った J13、J14 に関しては、増幅率、トラッキング試験より位置分解能と検出効率 に、照射前後での変化は見られず、検出器の基本的な性能は低下していないことがわかった。HL-LHC 80 年分の γ 線照射をさらに行った J14 に関しては、中性子を用いた試験より、照射前後で放電が増加 した。J14 の表面抵抗値は数十倍に増加しており、表面調査をした結果、数 μ m の高さ変動をしており、



図 7.36 非照射の J12 の高抵抗ストリップ



図 7.37 非照射の J13 の高抵抗ストリップの高さ測定結果 : 左図中の青線の部分での高さを表す。縦軸が高さ、横軸は 青線の長さ、つまり左図の縦の長さを表す。



図 7.38 照射の J13 の高抵抗ストリッ プ:斑点が規則正しく並んでおり、メッ シュの構造が見えている。



図 7.39 照射の J13 の高抵抗ストリップの高さ測定結果: 左図のメッシュの焼け跡による斑点の構造は見られなかっ た。図 7.37 に比べて数 µm の高さ変動を伴っていることが わかる。



図 7.40 照射の J14 の高抵抗ストリップ



数 µm の高さ変動を伴っていることがわかる。

元素組成の分析から、表面に SiO₂ が高抵抗ストリップ上に付着していることがわかった。この付着物 により、検出器内が綺麗な状態ではなくなり、放電が増加したと考えられる。また、この付着物の影響 により、表面抵抗値が増加し、中性子のフラックスが高い環境下で、電圧降下が生じ、増幅率が低下す ることがわかった。

NSW の運用期間は 10 年間であり、J13 の結果より 10 年の運用は可能であるが、J14 の結果より、80 年の運用では、表面抵抗値が増加し、性能が低下することを確認した。しかしながら、表面抵抗値を増加させた原因である SiO₂ の付着物は、ガスのチューブやガス漏れを防ぐために用いた O-ring などの成



図 7.42 使用した走査型光電子分析装置の写真: 写真中央の扉を開けて試料をセットアップする。



図 7.43 観察した試料サンプル:小型検出器から 切り出した高抵抗ストリップフォイルをネジ等を 使って固定している。

分が蒸発した Si が原因になっていると考えており、検出器周りの物質に注意を払わないといけないこ とがわかった。NSW の MicroMEGAS では、読み出し平面とドリフトパネルの間は、O-ring を使った 密閉が考えられており [4]、十分に高抵抗ストリップの表面上に、SiO₂ が付着する可能性がある。この SiO₂ の付着問題については、更に研究を続けられる必要があり、Si 製ではない O-ring やガスチューブ を用いた小型試作器を製作し、今回と同様に γ 線を照射し、表面等の変化を調査することが考えられて いる。



図 7.44 γ線非照射の高抵抗ストリップ:高抵抗ストリップを形成する際に用いているインクに含まれる C と O のピークが顕著になっている。



図 7.45 γ 線を照射した J13 の高抵抗ストリップ:C が減少し、O と Si が増加しており、抵抗値の 増加と数 μ m の高さ変動をしていることから、高抵抗ストリップ表面に SiO₂ が降り積もっていると 考えられる。



図 7.46 γ 線を照射した J14 の高抵抗ストリップ:J13 と J14 は γ 線照射量が異なるが、元素組成 の割合に変化はなく、J13 と同様に SiO₂ が降り積もっていると考えられる。

第8章

結論

NSW に導入される MicroMEGAS は放電を抑制するために、読み出しストリップの上に絶縁層を介 して高抵抗ストリップを加えている。NSW の MicroMEGAS における高抵抗ストリップの研究開発及 び生産は、神戸大学と東京大学で構成される日本マイクロメガスグループが担当している。

NSW は、衝突点から 7 m 付近という、非常に衝突点から近い距離に位置し、ビームパイプにも近い。 よって、ミューオンだけでなく、バックグラウンドとなる γ 線や中性子等のフラックスが大きく、それ ぞれ 375 kHz/cm²、1200 kHz/cm² に達することが予想されている。MicroMEGAS は、高い位置分解能 や時間分解能、検出効率だけでなく、このような高レート環境での安定動作と長時間の使用で放射線耐 性が要求される。

本研究では、予想されるバックグラウンドのうち、 γ 線に注目し、CERN にある Gamma Iradiation Facility ++ (GIF++) にて、MicroMEGAS の γ 線に対する耐久試験を行った。NSW の運用期間は 10 年 であり、まずはこの 10 年分の γ 線照射に成功し、表面抵抗値が 2 MΩ/sq から約 5 MΩ/sq と上昇した こと確認した。また、レーザー顕微鏡による数 μ m の高さ変動や、XPS による表面の元素分析により、 SiO₂ が高抵抗ストリップ上に付着していることがわかった。しかしながら、照射前後での増幅率の低 下、位置分解能と検出効率の変化は見られなかったことから、10 年の運用において、検出器のパフォー マンスの低下には問題ないと考えられる。

さらなる γ 線照射をおこない、HL-LHC の 80 年の γ 線照射試験を行った。先ほどと同様に、表面抵抗値を確認したところ、数十倍に増加しており、 γ 線の照射量と表面抵抗値には相関が見られ、高抵抗ストリップの表面が何かしらの変化をしていると推測された。そして、表面の元素分析により、SiO₂ が高抵抗ストリップ上に付着していることがわかった。この付着物により、検出器内が綺麗な状態ではなくなり、中性子を用いた試験より γ 線照射前後で、明らかに放電が増加していることを確認した。また、中性子のフラックスが高い環境下では、抵抗値の増加に伴い、電圧降下が生じ、増幅率が低下することも確認し、10 年以上の NSW での運用は、検出器のパフォーマンスが低下する可能性を示すことができた。

表面抵抗値の増加の原因となった SiO₂ は、検出器の密閉のために用いた O-ring や、ガスのチューブ から Si ベースの成分が蒸発し、ガスとして用いている CO₂ の酸素と反応することで SiO₂ が高抵抗ス トリップ上に付着しているのではないかと考えている。NSW の MicroMEGAS では、読み出し平面と ドリフトパネルの間は O-ring を使った密閉が考えられているが、本研究より、検出器周りの物質に注 意を払わないといけないことがわかった。今後、日本マイクロメガスグループでは、高抵抗ストリップ の量産を行うとともに、Si 製ではない O-ring やガスチューブを用いた小型試作器を製作し、今回と同 様の γ 線照射をし、表面等の変化を調査をすることが考えられている。

謝辞

本研究を進め、この修士論文を書き終えるにあたり、本当に多くの方々に支えていただきました。私 の研究や日常生活に関わってくださった全ての方に御礼を申し上げます。まずなにより、指導教員の越 智先生、未熟な私を μ-PIC グループに快く受け入れてくださり、たくさん指導していただき、本当に ありがとうございます。常に忙しそうな越智先生ですが、研究を本当に楽しそうにしている姿は輝かし く、尊敬しています。ATLAS 実験の検出器の研究に携わらせていただき、神戸大に来て楽しい 2 年間 でした。本当にありがとうございました。本間先生には、2階で実験をする際やミーティングにて様々 な助言をいただき、ありがとうございました。さらに、これまで1台しか稼働していなかったガス混合 器を、本間先生のガス混合器も使えるようにしていただき、実験が複数できるようになり、とてもはか どりました。本間先生のおかげで私も、後輩たちも、より研究のしやすい環境が整ったと思います。身 内先生はとても話しやすい先生で、最初はそのノリに驚きましたが、本当に楽しい先生でした。気さく に話しかけてくださり、ありがとうございました。昼食後にコーヒースペースにおいてくださる日経新 聞は密かに楽しみにしていました。藏重先生には、神戸大に私が入学する前に会って研究生活について 話していただいたり、ATLAS 実験の手続きや、CERN での出張の際にとてもお世話になりました。素 粒子などの物理についてコロキウムなどを通じて教えていただき、本当にありがとうございました。竹 内先生は、M1の素粒子の授業で、またコロキウム等でたくさんご指導いただき、ありがとうございま す。また、TA では、TA 後にミーティングのある私に、やっとくから先に帰っても良いよ、という一言 に何度も助けられました。山崎先生は、CERN の出張の際、関空から CERN まで送り届けていただき、 先生の力なしでは CERN にたどり着くことはできなかったと思います。ATLAS 関連のことや、コロキ ウムでは本当にありがとうございました。鈴木先生は、いつも研究室におられ、土日に研究室に行った 時にすれ違ったりしてとても心強かったです。矢野先生は、コロキウムの際に的確な指導をしていただ き、本当にありがとうございました。前田先生は、最初は CERN 出張が多くレアポケモンでしたが、後 半からは日本にいることも多く、会った時は話してくださり、ありがとうございました。清水先生は、 育休前のバーベキューでたくさん話せてよかったです。また元気に神戸大に戻ってきてください。神戸 大に来る前から、自称イケメンで有名だった中野さん、コロキウムでの質問やコメント、勉強になりあ りがとうございました。秘書の横山さんには、出張手続きの際、本当にお世話になり、ありがとうござ いました。

同じ研究グループの先輩である山根さんは、一から MicroMEGAS のことを教えていただき、時には 真夜中まで一緒に実験してくださり、本当にお世話になりました。また、中性子のビームテストの時は いつも車の手配、本当にありがとうございました。岡さんは、大学に行くまでの坂道で、自転車に乗っ て果敢に坂道を登っている岡さんが印象的でした。矢ケ部さんは、わからないことがあって聞くと、い つも親身になって考えてくださり、本当に良い先輩だなと思いました。2 階での実験も、矢ケ部さんが いると懐かしい音楽が聞けて、実験に行き詰まっているときもめげずに実験することがきました。長谷 川さんは、土日に会った時、話していただきありがとうございました。陳さんは、CERN での出張の際 にお世話になりました。木戸さんは、家が近いこともあり、よく飲み会の帰りに一緒に帰っていただき ありがとうございました。橋本さんは、本当に話しやすい先輩で、M1 の頃から色々とお世話になりま した。会った時にするじゃんけん楽しかったです。同じ実験グループでいつも真面目で研究熱心な長谷 川君、隣の席のいつもオシャレなゲーマー谷岡くん、将棋と麻雀が大好きな斉藤君、とても研究熱心だ けれどどこか抜けている池田君、いつも忙しそうな漢字の難しいたいしゃくくん、2 年間という短い期 間でしたが、みなさんと過ごした時間は本当に楽しかったです。これからバラバラになりますが、それ ぞれの方面でお互い頑張りましょう。そしてたまに会いましょう。同じ実験グループでツッコミが達者 な RPC 小川君、今や立派に研究ができている 2dMM 又吉君、ON と OFF がきちんとしている竹田君、 梅田まで阪急仲間の阿部ちゃん、教師と研究が両立できる女の中澤さん、一緒に帰ったりつまらぬ話に

付き合ってくれる若宮君、これらかの研究、更に頑張ってください。いつも話にのってくれてありがと うございました。また東京大学の川本先生、増渕先生、片岡先生、ザキヤマさん、山谷さん、木村君、 前川君には、CERN でのビームテストや生活、東大への出張、神戸大でのフォイル測定で本当にお世話 になり、ありがとうございました。大学時代の友人や、高校時代の友人など、あげていったらキリのな いほど、本当にたくさんの方々に支えていただきました。最後に、大学院まで勉強をさせてくれた両親 に感謝の意を述べ、謝辞とさせていただきます。

長坂憲子



- [1] CERN's Accelerator Complex https://cds.cern.ch/record/2197559
- [2] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 2008, JINST 3 S08003, DOI:10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [3] 名古屋大学修士論文"LHC-ATLAS 実験ミュー粒子検出器の精密アライメントによるトリガー効率の改善",山内 克弥, 2013.
- [4] ATLAS Collaboration, Technical Design Report New Small Wheel.
- [5] The HL-LHC project. http://hilumilhc.web.cern.ch/about/hl-lhc-project
- [6] Rate reduction by 2016 EI/FI-coincidence of Level-1 Endcap Muon Trigger https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/MuonTriggerPublicResults
- [7] 東京大学修士論文"ATLAS 実験におけるミューオン検出器アップグレードに向けた Micromegas の放射線耐性の評価", 山崎 友寛,2016.
- [8] Particle Data Group, The Review of Particle Physics, 2016, Chin. Phys. C40 10001.
- [9] A. Oed, Position Sensitive Detectpr with Microstrip Anode for electron Multiplication with Gases, 1988, Nucl.Instrum.Meth. A263 (1988) 351-359, DOI:10.1016/0168-9002(88)90970-9.
- [10] V. Peskov, et al., Feedback and breakdowns in microstrip gas counters, 1997, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Soectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 397, Issues 2-3, 243-260, DOI:10.1016/S0168-9002(97)00743-2.
- [11] MPGD 研究会, "MSGC 開発史", 越智 敦彦,2004. http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/mu-PIC/workshop/2004.html
- [12] F. Sauli, GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, 1997, Nuclear Instruments ande Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 386, Issues 2-3, 531-534, DOI:10.1016/S0168-9002(96)01172-2.
- [13] EP-DT-DD Gas Detectors Development, GAS ELECTRON MULTIPLIER GENERAL. http://gdd.web.cern.ch/GDD/
- [14] Y. Giomataris, et al., MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments, 1996, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 376, Issue 1, 29-35, DOI:10.1016/0168-9002(96)00175-1.
- [15] Y. Kataoka, et al., Performance Studies of a Micromegas Chamber in the ATLAS Environment, 2014, arXiv:1310.8603v2.
- [16] A. Ochi, et al., A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, 2001, Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 471, Issues 1-2, 264-267, DOI:10.1016/S0168-9002(01)00996-2.

- [17] 神戸大学修士論文"ATLAS アップグレードに向けた MicroMEGAS の開発とその性能評価", 江戸 勇樹, 2013.
- [18] 神戸大学修士論文"ATLAS Phase-I Upgrade に向けた MicroMEGAS の性能評価",山根 史弥, 2015.
- [19] M. TITOV, RADIATION DAMAGE AND LONG-TERM AGING IN GAS DETECTORS, 2004. arXiv:0403055v2.
- [20] 東京農工大学大学院修士論文"ヘリウムガスを使ったドリフトチェンバーの開発", 江見 恵子, 1991.
- [21] Advanced European Infrastructures for Detectprs at Accelerators http://aida2020.web.cern.ch/content/cern
- [22] L. Jones, APV25-S1 User GuideVersion 2.2, 2011. https://cds.cern.ch/record/1069892/files/cer-002725643.pdf
- [23] EP-DT Detector Technologies GIF++
 https://ep-dep-dt.web.cern.ch/irradiation-facilities/gif
- [24] R. Guida, GIF++:The new CERN Irradiation Facility to Test Large-Area Detectors for the HL-LHC Program, 2015, CERN Detector Siminar https://indico.cern.ch/event/387753/attachments/774726/1062498/ DetectorSeminarGIFMay2015RobertoGuida_v3reduced.pdf
- [25] Y. Zuo, et al., Neutron yields of thick Be target bombarded with low energy deuterons, 2014, Physics Procedia 60 (2014) 220-227, doi:10.1016/j.phpro.2014.11.031.