修士学位論文

ATLAS アップグレードに向けた 高放射線環境における Micromegas の動作試験

2018年2月28日

専攻名物理学専攻学籍番号165s120s氏名又吉

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

ATLAS 実験は、欧州原子核研究機構 (CERN)の大型ハドロン衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) で行われている実験の一つであり、ヒッグス粒子などの標準模型の粒子の精密測定や、標準模型を超える物理 現象の発見を目指している。LHC では更なる統計量の取得を目的として、衝突エネルギーとルミノシティを 向上させるための段階的なアップグレードが計画されている。それに伴い 2019 年からの 2 年間の LHC ロン グシャットダウン期には ATLAS 実験の新たなエンドキャップミューオン検出器として現在の Small Wheel (SW) に代わり New Small Wheel (NSW)を設置する。NSW はビームのヒット点に近いため高いレート環 境下にあり、トラッキング用検出器としては優れた応答速度を持つ Micromegas 検出器と sTGC が用いられ る。NSW での動作中の Micromegas 検出器は強い放射線に曝されるため、放射線による性能の低下が引き起 こされないことが必要である。先行研究では長期のガンマ線照射によって Micromegas 検出器の検出面上にシ リコン由来と思われる不純物の蓄積が見られ、表面抵抗の増加に伴う増幅率の低下が確認されている。本論文 では、不純物が遊離する源となるシリコン系素材を極力排除した部品を用いた Micromegas 検出器の小型試作 器を使用して行ったガンマ線照射試験及びトラッキング試験の結果を報告する。

目次

第1章	序論	1
第2章	ATLAS 実験	2
2.1	LHC	2
2.2	ATLAS 実験	2
2.3	ATLAS 検出器	3
2.3.	1 内部飛跡検出器	3
2.3.	2 カロリメータ	4
2.3.	3 ミューオン検出器	5
2.3.	4 トリガーシステム	6
第3章	New Small Wheel (NSW)	7
3.1	LHC アップグレード	7
3.2	NSW 計画	7
3.2.	1 NSW の構造	9
3.2.	2 NSW の性能要求	11
3.2.	3 NSW におけるバックグラウンド	12
第4章	ガス検出器	14
4.1	粒子と物質の相互作用	14
4.1.	1 荷電粒子	14
4.1.	2 光子	14
4.2	ガス増幅	16
4.3	Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD)	16
第5章	Micromegas 検出器	19
5.1	ATLAS NSW のために開発した Micromegas 検出器	19
5.1.	1 検出器の動作	20
5.1.	2 放射線による検出器の劣化	20
5.1.	3 小型試作器	21
第6章	CERN Gamma Irradiation Facility++ におけるガンマ線照射試験	23
6.1	Gamma Irradiation Facility++ (GIF++)	23
6.2	高放射線環境における動作試験の先行研究	24
6.3	小型試作器の改良	29
6.4	ガンマ線照射試験のセットアップ	30
6.5	照射試験中のアノード電流	31
6.6	照射試験前後の増幅率の変化	32
6.6.	1 増幅率測定	32
6.7	照射試験前後の表面検査	36
6.7.	1 表面抵抗測定	36

6.7	.2	表面の観察	38
6.7.	.3	レーザー顕微鏡による観察	40
6.7.	.4	走査型電子顕微鏡(SEM)による観察	41
6.7.	.5	走査型光電子分析装置 (SPES) を用いた元素組成分析	42
6.8	ガン	マ線照射試験のまとめ	45
第7章	CEF	RN H4 ビームラインにおけるトラッキング試験	47
7.1	CE	RN H4 ビームライン	47
7.2	トラ	・ッキング試験の内容	47
7.3	検出	器のセットアップ	47
7.4	読み	出しシステム	48
7.4.	.1	APV25 4	49
7.4.	.2	Scalable Readout System (SRS)	49
7.4.	.3	mmDAQ	50
7.5	検出	·効率	50
7.6	位置	ē分解能	52
7.7	トラ	・ッキング試験のまとめ	55

第8章 結論

第1章 序論

スイスのジュネーブ郊外の欧州原子核研究機構 (CERN)では、フランスとの国境に跨る大型ハドロン衝突 型加速器 Large Hadron Collider (LHC)を用いた複数の実験が行われている。ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)実験はそれらの実験の内の一つであり、2012年にATLAS実験とCMS実験で発見されたヒッ グス粒子などの標準模型の粒子の精密測定や、標準模型を超える物理の発見を目指している。LHC は全周 27 km の円形加速器であり、現在は衝突の重心エネルギー 13 TeV、最大瞬間ルミノシティ 2×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ で稼動している [1]。LHC では衝突エネルギーと統計量の向上を目指した段階的なアップグレードが計画され ており、2026年には衝突の重心エネルギー 14 TeV、瞬間ルミノシティ 7×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ が達成される予定 である。アップグレード後のLHC は High Luminosity LHC (HL–LHC)として、10 年間の運用で最終的に 3000 fb⁻¹の統計量を目指す。一方で、これまでのATLAS検出器はルミノシティ 1×10³⁴ cm⁻²s⁻¹を想定 して設計されているため、HL–LHC の高ルミノシティ環境に対応するための検出器のアップグレードが必要 となっている。現在のATLASのミューオン検出器の一部である Small Wheel (SW) は、ミューオン検出器 のうちビーム衝突点に最も近い位置にあるので、入射粒子のレートの増大に向けて New Small Wheel (NSW) へと置換される。Micromegas検出器は増幅領域が狭く、高レートの入射粒子への対応能力が高いため NSW のミューオントラッキング用検出器として採用された。また、トリガー用検出器としては Small strip TGC (sTGC) が採用されている。

Micromegas 検出器は加速器アップグレード後の HL-LHC 環境での 10 年間の運用が計画されているが、 ビームライン及び衝突点に近い NSW ではミューオンのみならずガンマ線や中性子などのバックグラウンド放 射線のフラックスも大きい。NSW に対するバックグラウンドの最大フラックスは、ガンマ線が 25 kHz/cm²、 中性子が 79 Hz/cm² となっており、それぞれの粒子への感度を考慮した Micromegas へのヒットレートは それぞれ 1.5 kHz/cm²、0.1 kHz/cm² となっている [2]。このような高放射線環境で長期に渡って稼動させ ることによる検出器の性能が低下が懸念されているため、Micromegas の小型試作機を対象として CERN の Gamma Irradiation Facility++ (GIF++) において NSW 環境での長期の稼動に匹敵する量のガンマ線を照 射するエイジング試験を行った。

一度目のエイジング試験では、NSW 環境 80 年分相当のガンマ線の照射後 Micromegas の検出面上には検 出器内部の部品から遊離したと思われるシリコンが蓄積しており、増幅率の低下が確認された。二度目のエイ ジング試験では部品からシリコン素材を極力排除した Micromegas を作成し、Micromegas 三台について最大 42 年分のガンマ線を照射して NSW での要求に照らした性能評価と検出面の検査を行った。性能評価は、まず ⁵⁵Fe を用いた増幅率測定を行い、CERN の SPS H4 ビームラインでミューオンを用いたトラッキング試験を 行い位置分解能と検出効率を測定した。検出面上の不純物は、表面抵抗の測定の後、 CERN の走査型電子顕 微鏡 (SEM) と神戸大学の二次電子分光装置 (SPES) を用いて表面の元素組成を分析することで検査した。 本論文の各章ではそれぞれ以下について述べる。

- 第2章: ATLAS 実験
- 第3章: New Small Wheel (NSW)
- 第4章:ガス検出器
- 第5章: Micromegas 検出器
- 第6章: CERN GIF++ におけるガンマ線照射
- 第7章:ガンマ線照射後に行った CERN H4 ビームラインにおけるトラッキング試験
- 第8章:結論

第2章 ATLAS 実験

2.1 LHC

大型ハドロン衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) は欧州原子核機構 (CERN) の全周 27 km に及 ぶ世界最大の陽子–陽子衝突加速器であり、スイスとフランスの国境を跨ぐジュネーブ郊外の地下 100 m に位 置している (図 2.1)。加速器は 2008 年から稼動を始めており、2017 年には衝突の重心系エネルギー 13 TeV、 瞬間最大ルミノシティ 2 × 10³⁴ cm⁻²s⁻¹ を達成している [1]。



図 2.1 ジュネーブ郊外の地下 100 m の位置にある Large Hadron Collider (LHC)[3]: 全周 27 km で、 四箇所の衝突点ではそれぞれ ATLAS、CMS、ALICE、LHCb という実験が行われている。

LHC ではまずイオン源から発生した陽子を複数の前段加速器を用いて加速する。前段加速器は順番に LINAC2、PSB、PS、SPS といい、陽子ビームは SPS の時点で 450 GeV まで加速されて LHC に入射する。 LHC では 2 本のビームラインがあり、それぞれで 7 TeV まで加速させて最終的に重心エネルギー 13 TeV で 衝突させる。陽子ビームの衝突点は四箇所あり、それぞれの点では ATLAS、CMS、ALICE、LHCb といっ た実験が行われている。

2.2 ATLAS 実験

ATLAS 実験は LHC で行われている実験の一つで、ヒッグス粒子の精密測定のほか、超対称性粒子、余剰 次元などの標準理論を超えた物理の探索を目的としている。ヒッグス粒子は 2012 年に ATLAS 及び CMS に よって発見された、標準模型を説明する粒子のうち最後に発見された粒子である。ゲージ対称性を要求する標 準模型の下ではゲージボソンの Z、Wボソンは質量を持たないが、観測によりそれぞれ 91 GeV、80 GeV の 質量を持つことが確認されおり、この事実はヒッグス機構を導入することで説明される。標準理論を超えた物 理の一つである超対称性粒子は宇宙の質量の約 25 % を占めると言われている暗黒物質の候補の一つであり、 ATLAS 実験では数 TeV までの超対称性粒子の発見が期待されている。

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器では LHC での陽子--陽子衝突から生じた粒子を測定する。図 2.2 に示すように円筒型をして おり、その大きさは直径 25 m、長さ 44 m、総重量 7000 t に及ぶ。複合型の検出器であり、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ている。

ATLAS 検出器では座標系は円筒座標系で表され、ビーム軸方向を z 軸、ビーム軸に垂直な方向を r 方向、ビーム軸周りの周方向を ϕ とする。また、衝突点からの z 軸に対する天頂角 θ を用いて擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ が定義される。擬ラピディティはローレンツ変換に対して不変なので高エネルギーの粒子衝突実験で用いやすい。円筒側面は $|\eta| < 1.0$ でバレル領域と呼ばれ、円筒の両底面は $|\eta| > 1.0$ でエンドキャップ領域と呼ばれる。以下では、ATLAS 検出器を構成する各要素について詳述する。



図 2.2 ATLAS 検出器 [4]:両底面の直径が 25 m、長さ 44 m の円筒型をしている複合型検出器である。 擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ が定義されており、円筒側面が $|\eta| < 1.0$ のバレル領域、円筒両底面が $|\eta| > 1.0$ のエンドキャップ領域と呼ばれる。

2.3.1 内部飛跡検出器

図 2.3 に示す内部飛跡検出器は ATLAS 検出器の最も内側に位置しており、|η| < 2.5 の領域をカバーしてい る。超伝導ソレノイド磁石により 2 T の磁場がかけられており荷電粒子の飛跡測定に用いられ、内側のピクセ ル検出器とシリコンストリップ検出器が荷電粒子に対して高い分解能で位置を決定する。最内部から離れた遷 移輻射検出器はキセノンガスで満たされたチューブ郡であり、電子が通過すると遷移輻射によって X 線が生じ ることから電子の同定を行うことができる。



図 2.3 内部飛跡検出器 [4]: ATLAS 検出器で最も内側に位置する検出器であり、|η| < 2.5 の領域をカ バーして荷電粒子の飛跡測定と電子の同定を行う。

2.3.2 カロリメータ

図 2.4 にカロリメータを示す。カロリメータは |η| < 4.9 の領域をカバーしており、電磁カロリメータとハ ドロンカロリメータに分けられる。電磁カロリメータは液体アルゴンで満たされ、鉛を吸収体として電磁シャ ワーのエネルギー測定とハドロンシャワーの選別を行う。図 2.5 に示すようにアコーディオン型をしており、 あらゆる方向からの入射をカバーできる構造となっている。



図 2.4 カロリメータ [4]: |η| < 4.9 の領域をカバー し、電磁シャワーのエネルギーを測定する電磁カロリ メータとハドロンシャワーのエネルギーを測定するハ ドロンカロリメータに分けられる。



図 2.5 電磁カロリメータ [4]:あらゆる方向からの入 射をカバーするためにアコーディオン型をしている。

ハドロンカロリメータは三つの領域に分かれる。 $|\eta| < 1.0$ のバレル領域と $0.8 < |\eta| < 1.7$ の拡張バレル領域では鉄の吸収体とシンチレータタイルを、 $1.5 < |\eta| < 3.2$ のエンドキャップ領域と $3.1 < |\eta| < 4.9$ のフォワード領域では液体アルゴンを用いており、入射したハドロンシャワーのエネルギーを測定する。

2.3.3 ミューオン検出器

ミューオン検出器を図 2.6 に示す。 $|\eta| < 2.7$ の領域をカバーするミューオン検出器は、バレル領域とエンド キャップ領域に分けられている。バレル領域では Resistive Plate Chamber (RPC) によってトリガー発行を、 Monitored Drift Tube (MDT) により精密位置測定を行う。エンドキャップ領域では Thin Gap Chamber (TGC) でトリガーを発行し、位置の精密測定は MDT 及び Cathode Strip Chamber (CSC) を用いて行う。



図 2.6 ミューオン検出器 [4]: |η| < 2.7 の領域をカバーする。バレル領域では RPC によるトリガー発行 と MDT による精密位置測定を行い、エンドキャップ領域では TGC によるトリガー発行と MDT 及び CSC による精密位置測定を行う。

ATLAS のミューオン検出器のうち、TGC と CSC、MDT で構成されるエンドキャップ領域の衝突点に最 も近い部分は Small Wheel (SW) と呼ばれる。(図 2.7)



図 2.7 ミューオン検出器の断面図 [4]:青枠で囲まれたエンドキャップ領域の衝突点に最も近い部分を Small Wheel (SW) と呼ぶ

2.3.4 トリガーシステム

ATLAS 実験における陽子のバンチ衝突は 40 MHz という極めて高い頻度で起こり、一つのバンチには 1.6× 10¹¹ 個もの陽子が含まれている。全てのイベントに対する検出器の情報を記録しようとするとデータ が余りに莫大な量となるので記録するべきイベントはオンライン状態で選別する必要がある。このイベント選 別のためシステムがトリガーシステムであり、図 2.8 に示すように LEVEL 1 トリガーとハイレベルトリガー (HLT) の二段階から成る [5]。



図 2.8 ATLAS のトリガーシステム [5]: LEVEL 1 トリガーとハイレベルトリガー (HLT) から成り、 40 MHz の入射イベントを1 kHz 程度まで削減する。

LEVEL 1 トリガーではハードウェアベースの情報を用いるので、2.5 µs という高速処理が可能である。カ ロリメータとミューオン検出器によってエネルギーや運動量について選別して各種のトリガーを発行するこ とで、入射したイベントを 100 kHz 程度まで削減する。また、LEVEL 1 トリガーが発行された周辺領域を Region of Interest (RoI) として定義し、その情報を HLT に送信する。HLT ではまず RoI の領域のイベント に対して位置情報を基にしたソフトウェアベースのオフラインに近い精密なトリガー判定を行い、その後 RoI に依らない全領域での精密なイベント選別を行う。HLT での処理時間は約 200 ms であり、入射イベントレー トは平均で 1 kHz まで削減される。

第3章 New Small Wheel (NSW)

3.1 LHC アップグレード

現在の CERN の LHC は、陽子-陽子衝突における重心系エネルギーが 13 TeV、最大瞬間ルミノシティが $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ で稼動している。LHC では更なる高エネルギー状態の実現と統計量の確保のために重心系 エネルギーの向上や瞬間ルミノシティの増大を目指した段階的なアップグレードが計画されており、図 3.1 が その計画表である。



図 3.1 CERN LHC アップグレード計画 [6]

計画表においては、LHC を稼動させて実験を行う Run 期と、実験を停止して加速器の改修を行うロング シャットダウン (LS) 期に大別されている。計画では今後衝突の重心系エネルギーを 14 TeV まで向上させ、 2024 年から 2026 年にかけて予定されている LS3 における改修で最大瞬間ルミノシティを 7×10^{34} cm⁻²s⁻¹ まで上げる。LS3 以降の LHC は High Luminosity–LHC (HL–LHC) と呼ばれ、その後 10 年間稼動させて 最終的に 3000 fb⁻¹ の統計量を得ることを目標としている。

3.2 NSW 計画

ATLAS 検出器は当初瞬間ルミノシティ 1×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ までを想定して設計されており、HL–LHC の 最大瞬間ルミノシティでは安定動作が期待できない。HL–LHC 環境での莫大なルミノシティに対応するため に ATLAS 検出器もアップグレードが計画されている。2.3.3 節で述べた通り現在の ATLAS のミューオン検 出器においてビーム衝突点に近いエンドキャップ領域を担当する部分は Small Wheel (SW) と呼ばれており、 SW を New Small Wheel (NSW) へと置き換える NSW 計画はそのアップグレード計画の一つである。NSW は Micromegas と TGC から成る検出器複合体である。SW はビーム衝突点に近いため、HL–LHC でのルミ ノシティ増大による影響を強く受ける。例えば、現行の SW で精密位置測定に用いられている MDT はドリフ ト時間の 700 ns 程度という長さから、ヒットレートが多くなるほどイベントを処理しきれず検出効率の低下 が起こる。図 3.2 に示すのはヒットレート増加に伴う MDT のチューブー本あたりの検出効率と飛跡の再構成 の成功率である。ルミノシティ 5×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ に相当するヒットレート 300 kHz/Tube において検出効率 が 70 % 程度まで減少していることが分かる。また、高ヒットレート環境では空間電荷効果が大きくなるため 位置分解能も低下する。

ルミノシティの増加によって、トラッキング性能の低下だけでなくフェイクトリガーの増加という問題も発



図 3.2 MDT のチューブー本あたりの検出効率(実線)と飛跡再構成の成功率(破線)のヒットレート依存性 [7]

生する。フェイクトリガーとはビームの衝突点由来ではない粒子の飛跡によって発行されてしまうトリガーの ことである。例えば Run1 の LEVEL 1 ミューオントリガーは、図 3.3 にある Big Wheel (BW) の TGC に よって再構成された飛跡の曲率から運動量を算出し、衝突点とヒット位置とを結んだ角度の情報を用いること で衝突点由来のミューオンを選別していたが、図 3.3 のトラック B と C のような飛跡の粒子が入射した場合 正しいミューオントラック (A) と区別できなくなってしまい、誤ったトリガーが発行される。フェイクトリ ガーの原因となる B や C のような飛跡をとる粒子は、ビーム衝突後に ATLAS 検出器に入射した陽子や中性 子がビームパイプや磁石を構成する物質と反応して生じた二次生成粒子であると考えられる。



図 3.3 エンドキャップミューオン検出器における衝突点由来のミューオントラック (A) とフェイクトリ ガーの原因となる衝突点由来でないトラック (B と C) [7]

図 3.4 は 2012 年の Run 1 において運動量 10 GeV 以上の LEVEL 1 ミューオントリガーと、オフラインで 再構成されたミューオンの η についての分布である。ミューオントリガーとオフラインデータの分布には大き な差が生じており、この差が衝突点以外から飛来した粒子によるフェイクトリガーによるものである。オフラ イン再構成した運動量 10 GeV 以上のミューオン分布は η にほぼ依存しない傾向を示しており、エンドキャッ プ部では磁場の影響が大きく運動量分解能が悪化していることもトリガーレートの増加に影響していることが 考えられる。

Run 2 以降は SW の TGC の情報をエンドキャップトリガーシステムに組み込むことでフェイクトリガー の削減を行っている。しかし検出器の分解能の限界から、レートの削減率は 30 % に留まっている。前述した とおり、 LEVEL 1 トリガーではイベントレートが 40 MHz の入射から 100 kHz まで削減されているが、そ のうちミューオントリガーに割り当てられているのは約 20 kHz である。



図 3.4 LEVEL 1 トリガーにおける運動量 10 GeV 以上のミューオントリガーとオフライン再構成の ミューオンの η 分布 [7]

表 3.1 に示すのは、ルミノシティ 5×10³⁴ cm⁻²s⁻¹、重心系エネルギー 14 TeV、バンチ間隔 25 ns と仮定し、現在の LEVEL 1 のミューオンの運動量閾値 20 GeV を維持した場合と閾値を 40 GeV まで上げた場合、及び SW を NSW に更新した場合のミューオントリガーレートである。SW のままで運動量閾値 20 GeV を維持した場合、ミューオンレートが高くなり過ぎることが分かる。閾値を 40 GeV まで上げるとレートは抑えられるが、図 3.5 に示すように、ヒッグスの崩壊過程 $H \to WW \to l_{\nu}l_{\nu}$ におけるレプトンの運動量分布は 20 GeV から 40 GeV にかけて多いので、LEVEL 1 トリガーの運動量閾値を上げる事は得策ではない。SW を NSW へ更新した場合運動量閾値は維持したままレートを抑えることが出来るので、NSW の導入は高ルミノシティ環境への有効な対応策であることが分かる。

ミューオン運動量閾値 [GeV]	LEVEL 1 ミューオンレート [kHz]
> 20	60 ± 11
> 40	29 ± 5
> 20 with NSW	22 ± 3

表 3.1 重心系エネルギー 14 TeV、バンチ間隔 25 ns、ルミノシティ 5 × 10³⁴ cm⁻²s⁻¹ の場合において 予想される LEVEL 1 ミューオンレート [7]

3.2.1 NSW の構造

NSW は図 3.6 に示すように、ビーム衝突点に面する Small sector (青色) と反対側の Large sector (水 色) それぞれ 8 セクターの計 16 セクターから成る。不感領域をなくすため、各セクターの縁の一部は互いに 重なり合って配置されている。それぞれのセクターは図 3.7 で示すように sTGC (small strip TGC) 4 層、 Micromegas 4 層、Micromegas 4 層、sTGC 4 層の計 16 層で構成されている。sTGC は外側に配置され、主



図 3.5 ヒッグスの崩壊過程(赤で示される部分) $H \rightarrow WW \rightarrow l_{\nu}l_{\nu}$ におけるレプトンの運動量分布 [7]



図 3.6 NSW の概略図 [7]:青色で着色された部分が衝突点側で Small sector、水色の部分がその反対側 で Large sector と呼ばれる。

にトリガーとして使用される。内側に配置された Micromegas は主に精密位置測定に利用され、図 3.8 に示す ように 4 層の内始めの 2 層は r 方向の読み出し、後の 2 層は ϕ 方向の読み出しのために各々 ±1.5° 傾けて配 置されている。

Micromegas については第5章で詳述するので、ここでは sTGC について説明する。sTGC は図 3.9 に示 すような構造をしており、2 枚のカソードと 1.8 mm 間隔で並んだ直径 50 μm の金メッキタングステンワイ ヤーのアノードから成る多段式ガスカウンターである。ワイヤー層とカソードの距離は 1.4 mm で、1 枚のカ ソードにはワイヤーと直交する向きにストリップがあり、もう一方のカソードはパッドが配置されている。ス



図 3.7 セクターの構成 [2]:セクターーつは 8 層ずつの Micromegas と sTGC で構成されている。8 層 の Micromegas の両端の距離は約 17 cm である。



図 3.8 セクター内の Micromegas の配置 [8]:前方 2 層は r 方向の読み出し、後方 2 層は φ 方向の読み出しに用いる。

トリップピッチが 3.2 mm と現在のエンドキャップミューオン検出器として使用されている TGC に比べて狭 くなっているため sTGC と呼ばれている。



図 3.9 sTGC の構造 [7]:カソードパッドとカソードストリップ、アノードワイヤーから成る。

3.2.2 NSW の性能要求

NSW は Run 3 及び HL–LHC において約 10 年間の運用が見込まれているため、その長期の高ヒットレート環境でも現行の SW と同等のトラッキング性能が維持できることが求められている。NSW はオンライントリガーとして以下のことが要求される。

• BW の TGC の遅延時間が 1.088 µs なので、その時間内にミューオントリガーシステムに飛跡情報を

送信すること

- η 方向の再構成飛跡の角度分解能が 1mrad 以下
- 現在のミューオントリガーシステムの飛跡再構成と合わせるために、 $\eta \phi$ 平面での飛跡再構成精度について、 $|\Delta \eta| \times |\Delta \phi|$ が 0.04 × 0.04 以下に収まること
- 1.3 < |η| < 2.5 の範囲での飛跡再構成効率が 95 % 以上

飛跡再構成では η 方向について 1 mrad 以下の角度分解能が要求されるため、セクター内での両端の Micromegas の距離が 17 cm であることとピラーによる不感領域の存在等を考慮に入れると、検出器 1 層での η 方向の位置分解能は 100 μm 以下が要求される。その他、NSW で要求される性能は以下の通りである。

- 運動量 10 GeV 以上のミューオンに対して飛跡再構成の成功率が 97 % 以上
- 検出効率及び位置分解能が高運動量のミューオンに対しても悪化しないこと

3.2.3 NSW におけるバックグラウンド

ATLAS 環境には中性子やガンマ線といったバックグラウンド粒子が多数存在する。ルミノシティ 1× 10^{34} cm⁻²s⁻¹ における ATLAS ミューオン検出器の各部分でのバックグラウンドフラックスのシミュレーション値を図 3.10 に示す。検出器に対するバックグラウンドのヒットレートはその検出器の場所でのフラックスと検出器自体の感度の積によって見積もられる。検出器の感度については主に GEANT4 シミュレーションから求められている。NSW において最もバックグラウンドのヒットレートの大きい場所は現在 CSC が設置されているビームパイプ付近であり、その場所では中性子 79 kHz/cm²、ガンマ線 25 kHz/cm² のバックグラウンドフラックスが見積もられている [2]。Micromegas に入射する最大のバックグラウンドの見積もりは 表 3.2 に示す。この見積もりはルミノシティ 5×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ を想定しており、総ヒット数は NSW 10 年間の運用における値である。



図 3.10 ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ での ATLAS ミューオン検出器におけるバックグラウンドの見 積もり:単位は、中性子とガンマ線が kHz/cm²、ミューオンと陽子が Hz/cm² となっている。[4]

表 3.2 NSW における Micromegas のバックグランド最大値の見積もり [2]: Total はガンマ線と中性子 以外の荷電粒子も全て含んだ値である。

粒子	フラックス $[\rm kHz/cm^2]$	感度	ヒットレート $[\rm kHz/cm^2]$	総ヒット数 [/cm ²]
γ 線	375	$4 imes 10^{-3}$	1.5	9×10^{10}
中性子	1200	1×10^{-4}	0.12	7.2×10^9
Total	-	-	5	$3 imes 10^{11}$

第4章 ガス検出器

4.1 粒子と物質の相互作用

ガス検出器は入射した粒子線と検出器内部の物質(ガス)の相互作用による電離電子を収集して得られる電 気信号から入射粒子についての様々なパラメータを得る検出器であり、NSW に導入される Micromegas 検出 器と sTGC もガス検出器である。本項では入射粒子としての荷電粒子と光子のガスとの相互作用について述 べる。

4.1.1 荷電粒子

電子や陽電子などを除く荷電粒子が物質中に入射すると、主にクーロン力による相互作用で電離が起こ り荷電粒子のエネルギーが失われる。物質中で距離 *x* を移動した荷電粒子が失う平均エネルギーは以下の Bethe-Bloch の式に従う。

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

ここで、E が荷電粒子のエネルギー、 z_e が粒子の電荷、 ν が速度であり、Z は物質の原子番号、N は原子数 密度、I は平均イオン化エネルギーである。典型的な荷電粒子であるミューオンについて銅を吸収体とした時 のエネルギー損失を図 4.1 に示す。エネルギー損失は粒子の速度が小さいほど β^2 に反比例して小さくなり、 $\beta\gamma \approx 3$ で最小値をとる。それ以上エネルギーが大きくなると $\beta\gamma \approx 1000$ までエネルギー損失がほぼ一定の 領域となる。このようなエネルギー損失がほぼ一定の領域にある粒子を最小電離損失粒子 Minimum Ionizing Particle (MIP) と呼ぶ。ATLAS のミューオン検出器で検出するミューオンは MIP として扱う。



図 4.1 ミューオンの物質中でのエネルギー損失 [9]: $\beta \gamma \approx 3$ から $\beta \gamma \approx 1000$ までの領域にある粒子はエネルギー損失が $\beta \gamma$ についてほぼ一定で MIP と呼ばれる。

4.1.2 光子

光子と物質の相互作用として主なものは光電効果、コンプトン散乱、対生成の三つである。これらの相互作 用の断面積は光子のエネルギーに依存し、光電効果は 1/*E*^{3.5}、コンプトン散乱は 1/*E* に比例する。このこと から光子のエネルギーが 100 keV 程度以下では光電効果、100 keV オーダーから 10 MeV 程度まではコンプ トン散乱、10 MeV 以上では対生成が主な相互作用となる。図 4.2 では光子が炭素と鉛に入射した場合の断面 積を示す。



図 4.2 光子の物質中での反応断面積 [9]:上(a) が炭素、下(b) が鉛に入射した場合の断面積である。

光電効果

光電効果は、原子中の束縛電子が入射光子のエネルギーを吸収し、光子のエネルギーと電子の結合エネ ルギーの差分のエネルギーの電子が放出される効果である。原子核に最も近い K 殻の電子が反応しや すく、電子が放出された空孔は外側の電子又は自由電子が埋める。この時、結合エネルギーと同等のエ ネルギーを持つ特性 X 線又はオージェ電子が放出される。光電効果の反応断面積は物質の原子番号に大 きく依存し、ほぼ Z^{4.5} に比例する。

コンプトン散乱

コンプトン散乱は入射光子が原子の軌道電子と非弾性散乱をする現象である。散乱光子のエネルギーは 散乱角によって変動し、以下の式で表される。ここで散乱前の光子のエネルギーを *E*_γ、散乱後の光子 のエネルギーを *E*'_γ、光子の散乱角を *θ* とする。

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

コンプトン散乱の断面積は原子番号 Z に比例する。

対生成

対生成は光子のエネルギーが電子の静止質量 511 keV の 2 倍を超える場合に起こり、光子と物質中の クーロン場の相互作用によって電子–陽電子対が生成される反応である。反応断面積は Z² に比例する。

4.2 ガス増幅

ガス検出器中のガスは一般的に希ガスを主成分とし、クエンチングガスが少量添加されている。ガス中に粒 子が入射すると相互作用によって電子が電離されて電子イオン対が生成される。ガス中にかけられた電場に よってイオンはカソードへ、電子はアノードへ移動する。その際、加速によってエネルギーを得た電子は更に ガス中の原子と衝突して電離させる。この反応が連鎖的に発生して電子が大幅に増幅される現象が電子雪崩と 呼ばれる。クエンチングガスは多原子分子から成るガスであり、電子との衝突で励起した原子から放出される 光子を吸収して光電子の発生を防ぎ、過剰な電子雪崩を抑制する役割を持っている。

4.3 Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD)

Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) 以前のガス検出器は比例計数管や Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) などのワイヤーチェンバーが主流であった。しかしチェンバー内のワイヤーは静電気力 によって互いに反発しあうためその間隔が数 mm までに制限され、位置分解能に限界があった。また、高レート環境ではワイヤー電極の周囲に生じたイオンの空間電荷効果によるゲイン低下やドリフト時間の長さによる 無視できない不感時間の存在などの問題もあった。MPGD は基板上にマイクロメートルレベルという細かい ピッチで電極が配置されたガス検出器で、フォトリソグラフィなど近年の微細加工技術の進歩によって開発さ れた。

以下に幾つかの代表的な MPGD について述べる。

MSGC

前述したワイヤーチェンバーの問題を解決するために開発された最初の MPGD が Micro Strip Gas Chamber (MSGC) である [24]。エッチング法を用いて絶縁層の上にアノードとカソードのストリップ を図 4.3 に示すように数百 μm 以下のピッチで交互に繰り返し配置している。アノードの構造は 10 μm 程度まで微細化されており、MSGC での電場構造は図 4.4 のようになっている。アノードとカソードが 非常に近いため、生じた陽イオンが即座にカソードに吸収されるので高レート下でも動作できる。絶縁 層を挟んだ下層にはアノードと直交するバックストリップが配置されており、誘起電荷から上層のスト リップに対し直交する方向の信号を読み出すことができる。

MSGC の問題点として、アノードとカソードの間に露出している絶縁層が陽イオンを捕らえてしま う事によって表面電荷が蓄積し、電場に歪みが生じることと、両電極間の距離の近さから放電が発生し やすくなっており、電極が破壊される恐れがあるため増幅率が 10⁴ 以下に制限されることが挙げられる。

GEM

Gas Electron Multiplier (GEM) はポリイミドなどの薄い絶縁体フィルムの表裏両面を銅で覆い、直径 70 µm の穴を 140 µm 間隔で多数空けた構造をしている [25]。図 4.5 は電子顕微鏡による GEM の拡 大写真である。表と裏の銅電極に電位差を与えることで穴内部に高密度の電場が作られるので、GEM



図 4.3 MSGC の構造 [10]:カソードとアノードのストリップが数百 µm 以下のピッチで交互に配置されている。絶縁層を挟んだ下層には上層のストリップと直交するバックストリップが配置されている。



図 4.4 MSGC における電場構造 [11]:アノードとカソードの距離が近いので、陽イオンを即座にカソードで吸収させることができる。

に入射した電子は内部での電子雪崩によって大幅に増幅される。単純な構造であるため複数の層を構成 しやすく、それぞれの層で増幅させることで 10⁵ 程度の増幅率を得ることが出来る。

 μ -PIC

μ-PIC は図 4.6 のような構造をしている。ポリイミドの絶縁基板上にカソードストリップが並べられ、 ストリップに空けられた円穴内にアノードのピクセル状電極が配置されている [13]。アノードピクセル は絶縁層の下で読み出しストリップと繋がっており、直交するカソードストリップとアノードストリッ プによって電荷の二次元読み出しが可能となっている。



図 4.5 電子顕微鏡による GEM の拡大写真 [12] : 直径 70 μ m の穴が 140 μ m 間隔で空けられている。穴 の内部に高密度の電場が作られ、入射した電子が大幅に増幅される。



図 4.6 μ-PIC の構造 [13]:ポリイミド基板上にカソードストリップが並べられている。ストリップには円 穴が空けられており、穴の内部にはピクセル状のアノードが配置されている。絶縁層の下層にあるアノード ストリップはカソードストリップと直交していて二次元読み出しが可能になっている。

第5章 Micromegas 検出器

Micro-mesh gaseous structure (Micromegas) 検出器は MPGD の一つであり、1996 年に Y.Giomataris 氏 らによって開発された [26]。一般的には図 5.1 に示すような構造をしている。金属製のマイクロメッシュが基 板上に配置された絶縁体のピラーによって基板から高さ 50 ~ 150 μ m の位置で支えられており、このマイク ロメッシュによって電子のドリフト領域と増幅領域が隔てられている。ドリフト領域は数 mm、増幅領域はピ ラーの高さと等しく 50 ~ 150 μ m 程度である。増幅領域がドリフト領域と分けられ狭くなっているため空間 分解能が高く、高レートの放射線環境でも動作することができる。



図 5.1 Micromegas 検出器の構造 [7]: 基板上に立てられた絶縁ピラーによって金属製のマイクロメッシュが支えられている。マイクロメッシュと基板の間の数百 µm の領域が増幅領域である。

5.1 ATLAS NSW のために開発した Micromegas 検出器

Micromegas 検出器を含む一般的な MPGD が抱える問題として放電耐性が挙げられる。ATLAS NSW で は MIP 粒子をほぼ 100 % に近い効率で検出する必要があるが、そのためには *O*(10⁴) のゲインが求められる。 MPGD では数百 μm 程度の狭い増幅領域に高電場を形成して高いゲインを達成するので、電極間の放電が非 常に起こりやすい。特に LHC では荷電粒子のほか高速中性子や α 粒子なども生じるため検出器に対して大き なエネルギーデポジットが起こりやすく、放電の危険性が大きい。放電が起これば検出器の電極などの構造自 体が破壊される恐れがある。

そのため、ATLAS NSW に向けて放電耐性を高めた Micromegas 検出器として Resistive Micromegas が 開発された。Resistive Micromegas は図 5.2 に示すように陽極に高抵抗ストリップが用いられている。高抵 抗ストリップと絶縁層を隔てた下部に読み出しストリップが配置されている。高抵抗ストリップ及び読み出し ストリップの配置間隔は 400 μm である。

高抵抗ストリップは炭素ペーストを用いてスクリーンプリントで作られている。ATLAS NSW で使用する Resistive Micromegas の高抵抗ストリップの研究開発及び生産は日本グループが担当しており、現在は量産 体制に入っている。



図 5.2 Resistive Micromegas の構造 [14]: 放電を抑えるため、陽極には炭素ペーストで作られた高抵抗 ストリップ電極が用いられている。絶縁層を隔てた下層に読み出しストリップが配置されている。

5.1.1 検出器の動作

検出器に入射した粒子はドリフト領域でガスと反応して電子を生じる。マイクロメッシュを通過し増幅され た電子は高抵抗ストリップに引き寄せられ、そこで誘起された電荷を読み出しストリップで読み出すことで信 号を得ている。高抵抗ストリップは抵抗値を高く設計するほど放電を抑制することが出来るが、高レート環 境においてその抵抗値が高すぎると電圧降下によってゲインが低下するという問題が生じる。NSW に用いる Micromegas では放電耐性と電圧降下の影響を鑑み、最終的に高抵抗ストリップの抵抗値は 10 ~ 20 MΩ/cm と決定した [7]。

3.2.2 で述べたように NSW では η 方向について 1 mrad 以下の角度分解能が要求されるので、Micromegas 一層に対しては 100 μm 以下の位置分解能が要求されている。Micromegas における粒子のヒット位置は、 各ストリップでの読み出し電荷から計算された電荷重心により決定するため、読み出しストリップの間隔が 400 μm でも 100 μm 以下の位置分解能を実現することができる。

5.1.2 放射線による検出器の劣化

ATLAS 実験などの高い粒子線フラックス環境においてガス検出器を長期間動作し続けると検出器内部の電 極などに不純物が付着する例が確認されている。図 5.3 と図 5.4 は MWPC のワイヤーの写真で、それぞれガ ス中の炭化水素が重合した物質とシリコン化合物が付着していると考えられる [15, 16]。このように長期間の 放射線環境での動作は検出器内の不純物の付着を引き起こし、性能の低下を招く一因となるため対策が必要と なっている。本論文では先行研究 [18] に基づき劣化対策を施した Micromegas 検出器に対して、NSW 環境で 長期間稼動させた場合と同等のガンマ線を照射し、性能の劣化が起こらないことを確認することを目的として いる。



図 5.3 表面に不純物が付着したワイヤー [15]:動作 ガス中の炭化水素が重合し付着している



図 5.4 表面に不純物が付着したワイヤー [16]:シリ コン化合物が付着している

5.1.3 小型試作器

NSW で用いる Micromegas 検出器は 1 セクターあたり 1.8 m×3.7 m の面積を持つ。研究室レベルで用 いる小型試作器は有感領域 10 cm×10 cm であり、図 5.5 に示すように金属のパッケージで覆われポリエチ レンの入射窓が付いている。図 5.5 の下側は電圧供給用のコネクタであり、上側は信号読み出しのコネクタで ある。信号読み出し用コネクタは一つにつき 128 チャンネルのものが二つ付いており合計 256 チャンネルの 読み出しが可能である。図 5.6 は検出器の蓋を外した状態で、ここに見えている金属製のメッシュはドリフ トメッシュと呼ばれるドリフト電極である。図 5.7 は更にドリフト電極を取り外した状態で、マイクロメッ シュが見えている。マイクロメッシュはグラウンドに接続されている。図 5.8 が検出器の基板で、ポリイミド の上に炭素を用いた高抵抗ストリップが 400 µm ピッチで並んでいる。ストリップはラダー構造をしており、 1 cm 毎に隣のストリップと繋がっている。これによって仮にストリップの一部が何らかの理由で切断された としても電圧供給が絶たれないようになっている。メッシュを支えるピラーは直径 300 µm、高さ 128 µm で、 2.5 mm 間隔で並んでいる。読み出しストリップは高抵抗ストリップの印刷されているポリイミドの下にある リジッド基板に銅でプリントされている。



図 5.5 Micromegas 検出器の小型試作器:検出面は 金属パッケージで覆われポリエチレン製の窓が付いて いる。画像上部には信号読み出しコネクタが、下部に は電源コネクタが付いている。



図 5.6 Micromegas 検出器の小型試作器の蓋を外した状態:金属のドリフトメッシュが見えている。



図 5.7 Micromegas 検出器のマイクロメッシュ:金 属製のマイクロメッシュをフレームに固定している。 フレームは自由に取り外すことができる。



図 5.8 Micromegas 検出器の小型試作器の基板:高抵抗炭素ストリップが印刷されている。

小型試作器のマイクロメッシュ構造は、フレームごと取り外しが可能でピラー上に乗せて支えるタイプのフ ローティング型メッシュと、メッシュがピラーに挟まれて固定されているバルク型メッシュ [28] の二種類であ る。バルク型はメッシュが折れたりたわんだりすることが無いため増幅領域が歪む危険が無いが、検出器表面 を直接観察したり手入れをすることが出来ず、メッシュの内側にゴミが紛れた場合に掃除することが出来ない など研究室では扱い辛いという欠点がある。今回の研究ではガンマ線の照射試験前後での検出器の状態の変化 を観察する必要があることと、実際に NSW で用いるメッシュがフローティング型であること [7] からフロー ティング型メッシュを選択した。

第6章 CERN Gamma Irradiation Facility++ におけるガンマ線照射試験

NSW において Micromegas はバックグラウンドとして多量の中性子やガンマ線に曝されることとなる。 Micromegas でのヒットレートは中性子が 0.1 kHz/cm²、ガンマ線が 1.5 kHz/cm² である。このような高放 射線環境下で 10 年という長期に渡って稼動すると検出器の劣化による動作安定性の低下が問題となる。実際 に NSW に導入する前に検出器の高放射線環境における性能を測定するため、CERN の Gamma Irradiation Facility++ (GIF++) という施設を利用して Micromegas 検出器のガンマ線照射試験を行った。

6.1 Gamma Irradiation Facility++ (GIF++)

Gamma Irradiation Facility++ (GIF++) は 強いガンマ線を照射し、HL-LHC の高ヒットレート環境に おける検出器の性能や安定性を試験するために建設された CERN の施設である [27]。ガンマ線源として強度 14 TBq の ¹³⁷Cs が用いられており、HL-LHC での数年分のガンマ線を数日から数ヶ月で照射することができ る。図 6.1 は GIF++ の俯瞰図、図 6.2 は GIF++ の全体の外観写真である。GIF++ はガンマ線の漏洩を防 ぐために全体を厚いコンクリートブロックで囲まれている。GIF+ の稼働中に人間が立ち入る事はできないた め、内部に設置した検出器の電源やガス、信号読み出し類などのコントロールはコンクリートブロック壁の外 側から全て行うことができる。



図 6.1 Gamma Irradiation Facility++ (GIF++)の俯瞰図 [17]: irradiator と示された所が線源であり、主に γ - field とある領域にガンマ線が照射される。



図 6.2 GIF++ の全体写真 [17]:施設はガンマ線の漏れを防ぐために全体を厚いコンクリートで覆われている。

線源の¹³⁷Cs は図 6.3 の中央に見える柱の形状をした照射装置内部の地下に格納されており、照射時のみ 装置の窓の高さまで上昇する。ガンマ線を照射する対象となる検出器は照射装置の手前と奥側に配置されて いる。



図 6.3 GIF++ の照射装置(中央)

6.2 高放射線環境における動作試験の先行研究

Micromegas のガンマ線照射試験では 2016 年までに先行研究が行われており [18]、本節ではこの結果の概略を説明する。先行研究で使用した Micromegas 検出器の小型試作器は J14 という個体番号で呼称する。J14の高抵抗ストリップは module 0 という実験で用いられる試作型の炭素ペーストを材料として作られている。

GIF++ でのガンマ線照射試験に当たり、HL-LHC での NSW における Micromegas 検出器に対するガン マ線の照射量を次のように見積もる。 HL–LHC は 10 年間の稼動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から 6 × 10⁷ 秒となる。

$$\frac{3000 \, [\text{fb}^{-1}]}{5 \times 10^{34} \, [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]} = \frac{3000 \times 10^{15} \times 10^{28} \, [\text{m}^{-2}]}{5 \times 10^{34} \, [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]} = 6 \times 10^7 \, [\text{s}]$$
(6.1)

NSW での Micromegas 検出器に対するガンマ線の最大ヒットレートは 1.5 kHz/cm² であり、GEANT4 シ ミュレーションによる Micromegas 中でのガンマ線の平均エネルギー損失は 10 keV なので、HL–LHC10 年 間の稼動における Micromegas に対する照射量は以下の計算から 28 mC/cm² である。

照射量 =
$$(ヒットレート) \times (衝突時間) \times (種電子数) \times (増幅率) \times (素電荷)$$
 (6.2)

$$= 1.5 \ [\text{kHz/cm}^2] \times 6 \times 10^7 \ [\text{s}] \times \frac{10 \ [\text{keV}]}{26 \ [\text{eV}]} \times 5000 \times 1.6 \times 10^{-19} \ [\text{C}]$$
(6.3)

$$= 28 \ [mC/cm^2]$$
 (6.4)

照射試験におけるガンマ線の照射量は、照射中の Micromegas のアノード電流から算出する。照射中の Micromegas のアノード電圧と電流はそれぞれ図 6.4 と図 6.5 のように常時モニターされているので、アノー ド電流の積分値から照射中に Micromegas で検出された電荷の総量を求めることができる。例えば図 6.5 の場 合、電圧或いは線源がオフの時間を考慮すると照射時間は約 210 時間であり、総照射量は 28 mC/cm² であっ た。

先行研究では1回目の照射として2015年9月にJ14に対してNSW環境で稼動した場合の10年分の量の ガンマ線を照射し、その時点での検出器性能を測定した後、2回目の照射として2015年11月から2016年 4月までの期間で更にガンマ線の照射を行いJ14には最終的にNSW環境での80年分の量のガンマ線が照射 された。



図 6.5 GIF++ での照射試験中の J14 のアノード電流モニター [18]

ガンマ線照射前後の J14 の増幅率は図 6.6 のようになった。1 回目の照射後は増幅率の大きな変化は無いが、2 回目の照射後は照射前と比べて約 20 % の増幅率低下が確認された。

また、照射試験前後での J14 の検出面状態の測定と評価も行った。表面抵抗は図 6.7 のように J14 の検出面 を 4 分割してそれぞれの領域で抵抗値を測定して平均の値をとった。照射前後の抵抗値の変化は図 6.8 に示 す。照射量の増加に伴って表面抵抗が増加することが分かる。



図 6.6 J14 の増幅率 [18]:黒が照射前の増幅率、橙色が HL-LHC 10 年分のガンマ線を照射した後、赤が HL-LHC 80 年分のガンマ線を照射した後の増幅率である。



図 6.7 J14 の表面抵抗の測定範囲 [18]:10 cm × 10 cm の有感領域を 4 分割して測定した



図 6.8 J14 の表面抵抗 [18]: 横軸は GIF++ でのガンマ線の照射量が HL-LHC での何年分に相当するかを示している。

ガンマ線照射試験によって表面抵抗が増加した原因を究明するため、J14の高抵抗ストリップ表面の検査と

して走査型光電子分析装置 (SPES) を用いて元素組成分析を行った。SPES では試料表面に X 線を照射し、光 電効果によって放出される光電子の運動エネルギースペクトルを見ることで深さ数 nm までの試料表面の元素 組成を分析することができる。照射試験前後の J14 の高抵抗ストリップでのスペクトルはそれぞれ図 6.9 と図 6.10 に示す通りで、横軸は光電子の運動エネルギー、縦軸は各エネルギーで得られた光電子数である。表 6.1 にはガンマ線照射前後での J14 の高抵抗ストリップ表面の元素組成の比率を示す。照射前の J14 は高抵抗スト リップの素材であるインクペーストに主に含まれる C と O が顕著に現れているが、照射後には C が減少し照 射前には殆ど見られなかった Si が現れている。これはガンマ線照射によって Micromegas 内部の部品やガス チューブなどに含まれているシリコンが遊離し、検出器表面に付着したことを示すと考えられる。



図 6.9 ガンマ線照射前の J14 の高抵抗ストリップでの元素分析スペクトル [18]: ストリップの素材である インクに含まれる C と O が顕著。



図 6.10 ガンマ線照射後の J14 の高抵抗ストリップでの元素分析スペクトル [18]: C が減少して Si が増加 しており、ストリップ表面でシリコンが蓄積していると考えられる。

表 6.1 J14 の検出面上における元素比率: C の割合が減少し、照射前に殆ど見られなかった Si の割合が増加している。

	C (%)	O (%)	Si (%)
J14 (非照射)	75.1	20.3	3.6
J14 (照射後)	13.6	60.2	26.2

6.3 小型試作器の改良

先行研究によって、Micromegasの小型試作器は HL-LHC 環境のガンマ線を最大 80 年分照射するとシリコ ン系の物質の蓄積によって高抵抗ストリップの表面が覆われて抵抗値が増加し、電圧降下によって増幅率の低 下が起こることが確認された。本研究では、ガンマ線が照射されることによる検出器の性能の低下を防ぐため に、その原因となった Si を極力排除した小型 Micromegas を試作し再度 GIF++ におけるガンマ線照射試験 を行った。先行研究で使用した小型試作器に用いられているシリコンを素材に含む部品は図 6.11 に示すよう に、マイクロメッシュを支えるフレームや接着剤、検出器とガスチューブを繋ぐコネクタや検出器の密閉に用 いる O リングなどがある。



図 6.11 Micromegas の小型試作器内部に含まれるシリコン源となる部品:メッシュを支えるフレームや 接着剤、ガスチューブや O リングなどが挙げられる。

マイクロメッシュを支えるフレームはガラスエポキシから出来ており、マイクロメッシュをフレームに固定 するためにシリコン系の接着剤が用いられている。このフレーム部品は素材をシリコンを含まないポリエーテ ルエーテルケトン (PEEK) へ変更した上で、接着剤が不要となるようにメッシュをフレームにはめ込んで固定 する構造で新たに作成した。

接着剤はポリエチレンシートを入射窓として検出器の蓋に取り付けるためにも使われる。新たな試作器の入 射窓はカプトンシートを用い、検出器外縁のネジで挟み込んで固定する方式とした。

ガスチューブコネクタや O リングはシリコン製であったため、プラスチック製の製品に変更した。改良後の Micromegas 試作器の外観と内部の様子はそれぞれ図 6.12 と図 6.13 に示す。



図 6.12 シリコンを極力排除した改良型 Micromegas 試作器の外観:入射窓をパッケージで挟 んで固定する構造にし、ガスチューブのコネクタはプ ラスチック製に変更した。



図 6.13 改良型 Micromegas 試作器の内部:メッシュ を支えるフレームは PEEK 製、O リングはプラス チック製に変更した。

6.4 ガンマ線照射試験のセットアップ

本研究で使用した Micromegas の小型試作器は三台あり、それぞれの個体番号は J31、J32、J34 である。これらの小型試作器は上述したシリコンを削減する改良のほか、高抵抗ストリップを作成する材料として実際に NSW に導入する量産型 Micromegas で使用されるものと同じ炭素ペーストを用いる点が先行研究と異なっている。CERN の GIF++ における試作器の配置は図 6.14 と図 6.15 に示す通りで、高さは線源の位置に合わせており、線源から垂直距離 91 cm で、横に 53.5 cm ずれた位置に設置した。線源と検出器の直線距離は 105.6 cm である。



図 6.14 今回の照射試験における GIF++ での Micromegas 検出器の配置:照射装置と検出器を横と上 から見た様子。薄緑色が照射装置で内部の赤い×印が 線源の位置、オレンジの四角形が Micormegas 検出 器を表す。



図 6.15 GIF++ に設置された Micromgeas 検出器 (右側):左側には別の実験の検出器が並べられている。

図 6.16 は GIF++ におけるガンマ線フラックスの測定値を距離の 2 乗の関数でフィットしたグラフである。 GEANT4 シミュレーションによる Micromegas のガンマ線に対する感度は 1.0 × 10⁻⁴ なので [2]、このグラ フから今回の検出器の設置地点におけるガンマ線フラックスは約 130 MHz/cm² である。

三つの小型試作器に対するガンマ線照射はそれぞれ表 6.2 に示す通り、まず J32 に試験的に照射を行い、

増幅率などの基本性能の変化を確認してから J34 と J31 に長期の照射を行った。総照射時間は線源が ON になっている時間の合計である。照射量は先行研究と同様に各検出器の電流値を照射時間で積分して算出 し、それが HL-LHC での稼動時に照射されるガンマ線に換算して何年分であるかを示した。照射試験中の Micromegas の基本的な印加電圧はドリフト電場を 600 V/cm とし、アノード電圧は 580 V である。ガスは Ar/CO₂(93:7)を供給した。



図 6.16 GIF++ におけるガンマ線のフラックス: [19] での測定値を距離の -2 乗の関数でフィットした。 横軸は線源からの距離を表す。測定値を距離の 2 乗の関数でフィットしている。

表 6.2 Micromegas の改良型小型試作器に対する照射試験スケジュール

試作器番号	照射期間	総照射時間 [hour]	照射量 $[mC/cm^2]$	HL–LHC 換算
J32	5月10日~6月3日	123	16	5.7 年分
J34	6月9日~7月4日	444	35	12.5 年分
J31	6月9日~10月10日	1365	117	42 年分

6.5 照射試験中のアノード電流

図 6.17 と図 6.18、図 6.19 はそれぞれ J31、J32、J34 の照射試験中のアノード電流を示す。J32 の平均電流 は 3.4 µA であるが、それに対し J31 と J34 の平均電流は 2.2 µA と 35 % 程度低くなっている。照射後の J31 の検出面を目視で観察したところ、図 6.31 のように白く変色した領域と照射前の状態を維持した領域が見ら れ、後者の領域ではガンマ線の照射量が小さかったことが分かる。このような違いが生じた理由は第 6.7.2 節 で詳述する。



図 6.17 ガンマ線照射試験中の J31 のアノード電流:平均電流は 2.2 µA



図 6.18 ガンマ線照射試験中の J32 のアノード電流:平均電流は 3.4 µA



図 6.19 ガンマ線照射試験中の J34 のアノード電流:平均電流は 2.2 µA

6.6 照射試験前後の増幅率の変化

6.6.1 増幅率測定

ガンマ線照射試験の前後には、金属製のコリメータによってコリメートした⁵⁵Fe から放射される X 線を用 いて J32、J34、J31 の増幅率の測定を行った。図 6.20 は CERN での増幅率測定の様子である。J34 の入射 窓上に乗った金属のブロックがコリメータであり、上下を貫通する細い穴が空いている。測定時のセットアッ プは図 6.21 に示す。測定に用いられている MCA (Multi Channel Analyzer) は信号の最大波高を測定して MCA 内のチャンネルとして記録する装置であり、PC に接続することでデータを読み出し最大波高のヒスト グラムを作成することができる。MCA は AMPTEK 社製の Pocket MCA 8000D を用いた。MCA で得られ たヒストグラムの一例を図 6.23 に示す。この例ではガンマ線照射後の J32 を用いており、動作アノード電圧 は 580 V である。ヒストグラムでは横軸が MCA のチャンネル数となっており、どのチャンネルが何 C の電 荷に相当するか分からないので、パルスジェネレータで作ったある電圧を持つテストパルスを 1 pF の電気容 量を持つコンデンサを通して任意の電荷量として MCA に入力することで波高-MCA チャンネル間のキャリブ レーションを行う。キャリブレーション時のセットアップは図 6.22 に示す。テストパルスの MCA ヒストグ ラムは図 6.24 であり、針状のピークのひとつひとつが左から順に 50 fC、100 fC、200 fC、300 fC に対応し、 以降 700 fC まで 100 fC ごとの電荷を持つ信号によるピークが見えている。これらのピークが MCA チャン ネルのどの値にあるかを見ることによってキャリブレーションができる。



図 6.20 増幅率測定の様子:⁵⁵Fe 線源を用いて測定した。放射線は金属のコリメータを通して検出器に入射させた



図 6.22 パルスジェネレータを用いたキャリブレーションのセットアップ



図 6.23 MCA で取得した ⁵⁵Fe のヒストグラム: Micromegas の信号の最大値を MCA チャンネルとして ヒストグラムにした。



図 6.24 テストパルスの MCA ヒストグラム:針状のピークは左から順に 50 fC、100 fC、200 f C、 300 fC、400 fC、500 fC、600 fC、700 fC の電荷を持つ信号のピークである。それぞれのピークに対応す る MCA チャンネル値によってキャリブレーションを行う。同時に測定した ⁵⁵Fe のスペクトルも見えて いる。

キャリブレーションを経ることで Micromegas の増幅率の絶対値を求めることができる。増幅率は次の式の ように MCA ヒストグラムで得られたメインピークの電荷量を X 線がガス中で作る一次電子の電荷量で割っ たものと定義する。

増幅率 =
$$\frac{\text{MCA} \ \tilde{c}$$
得られた Micromegas の出力電荷
 $\frac{55}{\text{Fe}} \text{ or } X \,$ 線がガス中で作る一次電子の電荷量 (6.5)

ガス中で一対の電子-イオン対が生成されるのに必要なエネルギーは W 値と呼ばれ、ガスの種類によって変 化する。今回 Micromegas にフローさせているガスは 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。⁵⁵Fe は電子捕獲によって ⁵⁵Mn に変化する際、電子を失った K 殻に外側の軌道か ら電子が遷移して 5.9 keV の X 線を放出する。よって ⁵⁵Fe の X 線によって生じる一次電子数は

$$\frac{5.9 \,[\text{keV}]}{26 \,[\text{eV}]} \times 0.93 + \frac{5.9 \,[\text{keV}]}{34 \,[\text{eV}]} \simeq 222 \,\text{@} \tag{6.6}$$

となり、電気素量 1.6×10^{-19} C を掛けると一次電子の電荷量は 3.6×10^{-5} pC となる。 増幅率は各検出器のアノード電圧について 520 V から 600 V まで 20 V 刻みの各電圧で測定した。なお、 J31 は 600 V での動作が不安定だったため照射試験前は 500 V から 580 V までで測定し、照射試験後は 590 V までのアノード電圧で測定した。ガンマ線照射試験前後の J32、J34、J31 の増幅率測定結果をそれぞ れ図 6.25、図 6.26、図 6.27 に示す。それぞれの検出器でガンマ線の照射量は異なるが、いずれも現実的なア ノード電圧で NSW での標準的な動作増幅率である 5000 を達成し、ガンマ線照射による増幅率の有意な低下 は引き起こされていないことが確認された。



図 6.25 J32 の各電圧での増幅率:青で示された点が照射前、オレンジで示された点が照射後の増幅率である。



図 6.26 J34 の各電圧での増幅率:青で示された点が照射前、オレンジで示された点が照射後の増幅率である。



図 6.27 J31 の各電圧での増幅率:青で示された点が照射前、オレンジで示された点が照射後の増幅率である。

6.7 照射試験前後の表面検査

先行研究で照射試験後に観測された Micromegas の検出面の変化が今回の照射試験で起こっているか確認す るための表面検査を行った。まずガンマ線照射後の各検出器の高抵抗炭素電極の表面抵抗を測定し、CERN の走査型電子顕微鏡 (SEM) と東京大学のキーエンス社製 VK-X200 レーザー顕微鏡を使用した詳細な観察を 行った。その後に神戸大学の走査型光電子分析装置 (SPES) による元素組成分析も行った。

6.7.1 表面抵抗測定

5.1 節で述べたように ATLAS NSW に導入する Micromegas では放電抑制のためにアノードに炭素ペース トを用いた高抵抗ストリップを用いている。この抵抗値は低すぎると放電を抑制できないが、高くし過ぎると 高レートの放射線環境で電圧降下が生じ増幅率の低下を招いてしまう。NSW における高抵抗ストリップの抵 抗値の許容量は 0.14 ~ 2.6 MΩ/sq と定められている [7]。

今回の照射試験で使用した小型試作器 J32、J34、J31 の表面抵抗は図 6.28 のように 1 cm 角の立方体のゴ ムを金属メッシュで覆ったプローブを 2 つ用意し、その距離を 1 cm 離して測定した。測定は検出面を図 6.29 のように 9 箇所に分割して行い、その平均値を取ることでその検出器の表面抵抗とした。表面抵抗の測定結果 は図 6.30 と表 6.3 に示す。図 6.30 は照射試験でのガンマ線照射量が HL-LHC での何年分に相当するかを横 軸にとり、抵抗値を縦軸とした。また、比較のため先行研究での結果も同時に示している。この結果では、ガ ンマ線照射後の表面抵抗は照射前と比べて最大で 1.8 倍程度まで増加するが、最大で HL-LHC 42 年分のガン マ線を照射しても先行研究で見られた 10 倍を超えるような大幅な抵抗値の増加は起こらず、全ての試作器で NSW の抵抗許容値が満たされていることが確認できた。



図 6.28 Micromegas の表面抵抗測定の様子:1 cm 角のプローブを1 cm 離して抵抗を測定した。



図 6.29 検出面を 9 分割して表面抵抗を測定し、その平均値を取った。



図 6.30 表面抵抗測定結果: 横軸は照射試験でのガンマ線照射量が HL-LHC での何年分に相当するかである。first trial として先行研究の結果も併記している。赤で表した点が照射前の試作器の表面抵抗である。

HL-LHC 換算照射量 (年)	表面抵抗 $[M\Omega/sq]$
0	1.3 ± 0.3
5.7	2.0 ± 0.5
12.5	2.4 ± 0.4
42	1.8 ± 0.3

表 6.3 表面抵抗測定結果

6.7.2 表面の観察

ガンマ線照射後の J31 の検出面を目視で観察したところ、図 6.31 に示したように全体は白みがかっている のに対し主に左側の一部ではそのような変色は見られなかった。この事が、6.5 節で述べたように一つの検出 器中でも場所によってガンマ線の照射量が少ない部分が存在していることを表しており、それが原因で J31 の 照射中のアノード電流が J32 と比べて低かったのだと考えられる。

GIF++ では検出面に対しほぼ完全に均一なガンマ線が照射され、照射中に J31 と線源の間を遮る物体も 存在しなかったことから、場所によって照射量が異なる原因はフローティングのマイクロメッシュにあると推 測された。5.1.3 節で述べたように、Micromegas のマイクロメッシュの構造は 2 種類あり、それぞれピラー にメッシュを挟み込んで固定したバルク型とメッシュが取り外し可能なフローティング型である。今回の小型 試作器で用いているのはフローティング型であり、メッシュが検出器本体から取り外し可能でメンテナンス性 が高い代わりにメッシュがたわんでで張りが不均一になる可能性がある構造である。そのため、J31 ではメッ シュの表面のムラに重なっていた部分がたわみ増幅領域が膨らむことでその部分での電場が小さくなり十分な 電荷増幅が行われず、増幅後の電子数に換算した照射量が小さくなったのだと考えられる。逆に、メッシュ がたわまなかった部分では電子が十分に増幅されたことで検出面の高抵抗電極に変色が起きたものと考えら れる。



図 6.31 HL-LHC 42 年分のガンマ線照射後の J31 の表面。白みがかった部分が多いが、左側など一部に 色の異なる領域が見られる。一部、ピラーが通電するなどにより放電に弱い箇所があったため、写真の上部 や中央付近の右下に見えるように絶縁体のカプトンでカバーしている部分がある。

J34 も J31 同様に照射中のアノード電流が低かったが、照射量が少なかったため図 6.32 に示すように照射 後の検出面における変色が見られておらず、アノード電流の低さの原因が J31 と同様のフローティングメッ シュの歪みによる増幅領域の不均一性によるものかは確かめられていない。



図 6.32 HL-LHC 12.5 年分のガンマ線照射後の J34 の表面。照射前から変化は見られない。

6.7.3 レーザー顕微鏡による観察

東京大学にあるキーエンス社製 VK-X200 レーザー顕微鏡を使用して HL-LHC 環境 42 年分のガンマ線を 照射した J31 試作器の高抵抗ストリップ電極の詳細な観察を行った。レーザー顕微鏡はレーザー光の焦点が合 う位置を観察することで対象の高さ位置の情報を得ると同時に、白色光源も用いることで色情報も取得するこ とができるため表面の細かな傷や汚れを観察することができる。

図 6.33 と図 6.34、図 6.35 と図 6.36 はそれぞれ J31 の白色領域と変色していない領域での高抵抗ストリッ プの拡大画像とストリップの高さを表している。拡大画像の倍率は左側が 10 倍の倍率であり、灰色の部分が 抵抗ストリップである。右側は 150 倍の拡大画像である。抵抗ストリップの高さはどちらもおよそ 10 µm か ら 15 µm 程度であり、二つの領域間で大きな違いは見られなかった。



図 6.33 J31 表面における白色領域の高抵抗ストリップの拡大図:左は 10 倍、右は 150 倍の倍率である。



図 6.34 J31 の白色領域での高抵抗ストリップの高さ:10~15 µm



図 6.35 J31 表面における変色していない領域の高抵抗ストリップの拡大図:左は 10 倍、右は 150 倍の倍率である。



図 6.36 J31 の変色していない領域での高抵抗ストリップの高さ:およそ 10 ~ 15 µm

6.7.4 走査型電子顕微鏡(SEM)による観察

CERN の走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて照射試験後の検出面の詳細な観察を行った。SEM は観察対象 の表面に細い電子ビームを当てることで生じる二次電子などの放射線を測定することで画像を作る。図 6.37 と図 6.38 は J31 の白色領域、図 6.39 は非変色領域での高抵抗ストリップの拡大画像である。白色領域では非 変色領域には見られない黒い点が複数ある。これは照射試験中に、増幅が十分に行われている領域で放電が起 こった跡であると考えられる。但し、放電によって高抵抗ストリップが破壊されるようなダメージは見られな かった。



図 6.37 J31 の白色領域の高抵抗ストリップの拡大 画像:放電の跡と思われる黒い点が見られる。



図 6.38 J31 の白色領域の高抵抗ストリップの拡大 画像:放電の跡と思われる黒い点が見られる。



図 6.39 J31 の非変色領域での高抵抗ストリップの拡大画像:放電痕は見られない。

図 6.40 は J32、図 6.41 は J34 の高抵抗ストリップの拡大写真である。どちらも J31 の白色領域同様に放電 の跡と思われる黒い点が見られるが J31 よりは少ない。SEM での観察から、高レートのガンマ線を照射され る環境で放電は起こるが、その影響は検出器性能に重篤な問題を及ぼすものではないことが分かった。



図 6.40 J32 の高抵抗ストリップの拡大画像:放電の跡と思われる黒い点が見られるが、J31 よりは少ない。



図 6.41 J34 の高抵抗ストリップの拡大画像: 放電の 跡と思われる黒い点がわずかに見られる。

6.7.5 走査型光電子分析装置 (SPES) を用いた元素組成分析

先行研究のように検出面上にシリコンなどの不純物が蓄積していないか確かめるために、神戸大学の走査型 光電子分析装置 (SPES) を用いた元素組成分析を行った [20]。6.2 節で述べたように、SPES は試料に X 線を 当てて放出される光電子のエネルギーを測定することによって表面(数 nm 程度の深さまで)の元素組成を分 析する装置である。図 6.42 が SPES の外観である。写真中央の銀の扉から試料サンプルをセットする。サン プルは図 6.43 のように、Micromegas 試作器の表面を数 mm 程度の大きさで切り出したものを専用のプレー トに並べて分析する。図 6.43 において Point 1、Point 2 と示されているサンプルが J31 から切り出されたも ので、Point 1 が白色領域、Point 2 が非変色領域のサンプルである。J32 から切り出したサンプルは Point 3 から Point 5 で、J34 は Point 6 と Point 7 である。J32 と J34 は目視では部分ごとの状態の差異はなく、参 考のため複数のサンプルを用意したが各サンプル間に大きな違いは見られなかった。

図 6.44 は Point 1 から得られた元素分析のスペクトルで、横軸は X 線によって放出された光電子の運動 エネルギー、縦軸はそれぞれのエネルギーで観測された光電子の個数である。同様に、図 6.45 は Point 2 で 得られたスペクトルである。図 6.46 と図 6.47 はそれぞれ J32 の Point 3 と J34 の Point 7 のサンプルから 得られたスペクトルである。表 6.4 は各スペクトルのピークから求めた元素組成の割合を表している。J31 の 白色領域と非変色領域ではどちらも C と O が多く、6.2 節で述べた先行研究で見られたような C の割合が大 幅に減少し Si が増加するという現象は見られない。J32 と J34 でも同様で未照射の検出面との大きな変化は 見られなかった。参考として、CERN の SEM を用いてエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) という手法で 検査を行った。図 6.48 は J31 の白色領域で得られたスペクトルで、僅かに他の元素も見られるが大部分は C と O が占めており SPES と同様の結果が得られた。以上の結果から、シリコン源を削減した試作器は最大で HL-LHC での 42 年分のガンマ線を照射しても検出面上に、シリコンベースの不純物の蓄積は起こらないこと が確認できた。



図 6.42 SPES の外観 [20]:正面の銀色の扉からサ

ンプルを導入する

Point 1 Point 2 Point 4 Point 5

図 6.43 SPES で分析する試料: Point 1、Point 2 はそれぞれ J31 の白色領域と非変色領域から切り出 したサンプル。Point 3 から 5 は J32、Point 6 と 7 は J34 のサンプルである。



図 6.44 J31 白色領域 (Point 1) の元素分析スペクトル

43



図 6.45 J31 非変色領域 (Point 2) の元素分析スペクトル



図 6.46 J32 の元素分析スペクトル



図 6.47 J34 の元素分析スペクトル

	C (%)	O (%)	Si (%)	N (%)	Al (%)
J31 (白色領域)	55.2	27.8	5.3	10.0	1.7
J31 (非変色領域)	55.5	34.2	4.9	2.9	2.5
J32	78.7	12.2	3.9	5.2	-
J34	61.0	24.3	8.2	6.6	-

表 6.4 各試作器の検出面上における元素比率



図 6.48 CERN の SEM で得られた J31 の白色領域のスペクトル:C と O が多く、僅かに他の種類の元素も含まれている

6.8 ガンマ線照射試験のまとめ

CERN の GIF++ でガンマ線照射試験を行い、照射前後での Micromegas の小型試作器の増幅率、高抵抗 ストリップの表面抵抗、元素組成の変化を調べた。先行研究では HL-LHC 80 年分のガンマ線を照射したとこ ろ、増幅率は最大で 20 % 低下し、表面抵抗値は照射量の増加に伴って 10 倍以上まで上昇した。SPES での表 面検査の結果、内部部品に含まれているシリコンが遊離して高抵抗ストリップ上に覆い被さるかたちで蓄積し ており、これによって表面抵抗が上昇し電圧降下が生じて増幅率が低下していることが分かった。

本研究では内部部品からシリコンを極力排除した三台の試作器を作成して照射試験を行い、それぞれ HL-LHC 5.7 年分、12.5 年分、42 年分のガンマ線を照射した。それぞれの試作器は J32、J34、J31 と呼称す る。照射試験後はいずれの検出器でも表面抵抗が僅かに上昇したが、増幅率の低下は起こっておらず、高抵抗 ストリップ上でのシリコンなどの不純物の蓄積も見られなかった。J31 の検出面では白色に変色した領域と変 色していない領域が見られたが、これはフロートメッシュの張りが不十分でたわんでいる部分ができることで 増幅領域が膨らみ電場が小さくなるため電荷増幅が行われず、照射の効果が小さい領域が生じたことによると 考えられる。このような照射のムラを避けるため、Micromegas のメッシュの張り方には細心の注意が必要で ある。結果として、シリコンを排除した Micromegas では最大で HL-LHC 42 年分までのガンマ線を照射して も問題となるような特性の変化は起こらないことが確かめられた。

第7章 CERN H4 ビームラインにおけるトラッキング試験

NSW では精度の高いミューオントリガーのためにトラッキング検出器である Micromegas に対して高い検 出効率と空間分解能を要求する。高放射線環境における Micromegas 試作器のトラッキング性能を確認するた め、GIF++ において HL-LHC 42 年分のガンマ線を照射した小型試作器 J31 に対して CERN の H4 ビーム ラインで 運動量 150 GeV/c のミューオンビームを用いた試験を行った。本章ではビームラインの概要と試験 で用いた読み出しシステム、そして測定結果を述べる。

7.1 CERN H4 ビームライン

LHC の前段加速器である SPS (Super Proton Synchrotron) で 450 GeV まで加速された陽子ビームは、 North Area と呼ばれる実験エリアで図 7.1 のようにその一部が取り出されて T2 というターゲットに照射さ れる。H4 ビームラインは T2 ターゲットで生成された二次ビームのラインである。本研究のトラッキング試 験では二次ビームにミューオンを用いた。ミューオンビームは検出面に対し一様かつ平行に入射させる。



図 7.1 North Area におけるビームライン [21]: H4 ビームラインは T2 ターゲットからの二次ビームを利用している。

7.2 トラッキング試験の内容

NSW における一層の Micromegas に対する要求性能は検出効率 99 % 以上、位置分解能 100 µm である。 GIF++ で HL-LHC のバックグラウンドガンマ線 42 年相当のガンマ線を照射した Micromegas 小型試作器 J31 に対してミューオンビームを照射し、上記の要求性能を満たすかどうかを確認する。第6章で述べたよう に、J31 には増幅領域が小さくガンマ線照射量が少ないことが原因と考えられる色ムラが生じている領域が見 られた。本トラッキング試験では検出面の1 cm × 1 cm の領域ごとにそのトラッキング性能を測定して領域 間に性能の違いが生じていることを確かめた。

7.3 検出器のセットアップ

トラッキング試験における検出器のセットアップを図 7.2 に示す。図 7.3 はセットアップの写真である。この試験では本研究で用いる Micromegas 試作器の J31 だけでなく、CERN で製作された二次元読み出し型の Micromegas である Tmm2 と Tmm5 や、その他の研究で用いられる複数の検出器の計 8 台が検出面の位置 を揃えてアルミニウムのフレームに並べられている。Tmm2 と Tmm5 は検出効率と位置分解能を測定する際

にビームのトラックを決定するための検出器である。10 cm × 10 cm のシンチレータが 8 台の検出器の前後 を挟むように固定されており、このコインシデンス信号をトリガーとした。ミューオンビームは図 7.2 では向 かって左側から照射される。



図 7.2 検出器のセットアップ:各検出器はアルミフレームに固定して設置している。ミューオンビームは 向かって左側から照射され、二つのシンチレータでコインシデンスをとりトリガーとした。



図 7.3 ビームラインにセットされた検出器:各検出器はアルミフレームに固定している。ビームは向かっ て左側から照射される。電源やガス系統、読み出し用のケーブル類はビームラインの外まで繋がっており外 部から操作できる。

7.4 読み出しシステム

トラッキング試験における Micromegas のデータは APV25 をフロントエンドチップとして読み出し、 HDMI ケーブルを通してバックエンドエレクトロニクスの Scalable Readout System (SRS) [22] へ送られて Gigabit Ethernet ケーブルによって PC へ転送される。転送されたデータは mmDAQ という Micromegas のデータ処理用ソフトウェアによって処理、記録される。読み出しシステムの概略を図 7.4 に示す。



図 7.4 トラッキング試験時の読み出しシステム: APV25 によって Micromegas のデータを読み出し、 HDMI ケーブルで SRS に送り、Gigabit Ethernet で PC に転送され mmDAQ で処理される。

7.4.1 APV25

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フロントエンドチップであり、 Micromegas での信号読み出しにも使用される。信号の取得は 25 ns 毎に行われる。チャンネルは 128 ch あ り、各チャンネルで信号の増幅と整形を行うことができる。図 7.5 は APV の回路構造である。APV 内部で は、検出器から得られた電荷がプリアンプによって積分され、インバータによって波形の極性が反転する。そ の後 CR-RC 回路によって波形がピーク時間 50 ns で整形されてパイプラインで 40 MHz のサンプリング レートで吸い出され、トリガースレッショルドを超えた信号がサンプリングホールドされた後 128 ch がまと めて送信される。



図 7.5 APV チップの回路構造

読み出しストリップが 400 μm ピッチで、検出面 10 cm 角の一次元 Micromegas の測定では一台につき二 枚の APV25 が用いられ計 256 ch の信号を取得する。APV25 チップの実際の写真を図 7.6 に示す。

7.4.2 Scalable Readout System (SRS)

SRS は MPGD 開発の国際コラボレーション組織である RD51 が開発した汎用読み出しシステムであり、 Analog Digital Converter (ADC) ボードと Front-End Concentrator card (FEC) ボードから成る。ADC ボードと FEC ボードの実際の写真を図 7.7 と図 7.8 に示す。ADC は HDMI ケーブルを通して APV25 から 送られたアナログ信号をデジタル信号に変換し、FEC はトリガー信号に基づいて ADC から信号を受け取り、 Gigabit Ethernet で PC に転送する。



図 7.6 APV25 チップを搭載する読み出しカード:カード中央の黒いチップが APV25 チップである。左 側に入力コネクタがあり、右上に出力の HDMI (type D) コネクタが付いている。



図 7.7 ADC ボード [22]: APV25 から送られたアナ ログ信号をデジタル信号に変換する。



図 7.8 FEC ボード [22]:トリガー信号に基づいて ADC から信号を受け取り、PC に転送する。

7.4.3 mmDAQ

PC に送信されたデータは MAMMA (Muon ATLAS Micromegas Activity) グループが開発した mmDAQ と呼ばれるソフトウェアを用いて処理した。mmDAQ では、まず Pedestal run を行い Pedestal の平均値 と標準偏差を取得し、 Physics run ではその標準偏差から計算される閾値を超えた ADC 値のみを採用す る。なお、閾値を超えた ADC 値は Pedestal の平均値を差し引いた値で保存される。mmDAQ で取得された Micromegas の信号の例を図 7.9 に示す。strip は Micromegas の読み出しストリップの番号を示し、time bin はイベント中の時間で 1 time bin が 25 ns であり 1 イベントにつき 27 time bin 保存される。ADC count が 各 strip、time bin における ADC 値である。一つのイベントにおいて隣り合って信号を出力したストリップ の束をクラスターと呼ぶ。

7.5 検出効率

検出効率とは検出器の有感領域を通過したビームの内、検出されて信号として出力された割合である。本ト ラッキング試験では参照用検出器のTmm2とTmm5を用いて検出効率を以下のように定義した。

検出効率 =
$$\frac{J31 \& Tmm2, Tmm5 \\ of exact on the set of the set of$$



図 7.9 mmDAQ で取得された Micromegas の信号の例:底面がストリップ番号と time bin。1 time bin = 25 ns で、1 イベントにつき 27 time bin 保存される。高さ方向が ADC 値である。

図 7.10 に動作アノード電圧 580 V における J31 の 1 cm × 1 cm の位置ごとの検出効率を示す。また、図 7.11 は各位置でのヒット数である。外側の 20 mm 程度の領域はヒット数が少ないが、内側の領域では多くの 部分で検出効率 99 % 以上が達成されている。

図 7.10 で青い線で囲んだ領域では検出効率が他と比べて著しく低くなっているが、6.7.2 節の図 6.31 を見る と分かる通りこの部分は第 6 章で述べた非変色領域に当たり、増幅領域が膨らむことで電場が小さくなり電荷 増幅が十分に行われていない領域なので検出効率が低くなっていると考えられる。また、検出面の一部ではピ ラーが通電しているなどで放電に弱い部分があったため、図 6.31 上部と中央付近の右下部に見えるように放 電対策として絶縁体のカプトンでカバーしている部分があるため、その部分でも検出効率が低くなっている。 これらの部分を除いた領域での平均検出効率は 99.5 % である。図 7.12 と表 7.1 には、同じ条件でのアノード 電圧 520 V から 580 V までの 20 V ずつの各電圧での検出効率を示す。



-40 -50⊑ _50 -40 -30 -20 -100 図 7.11 J31 の 1 cm × 1 cm の位置ごとのヒット

Y [mm]

50

40E

30

20

10

0

-10

-20

-30

20 ŝ

260

Å. Ň

శ్

図 7.10 J31 の 1 cm × 1 cm の位置ごとの検出効 率 (アノード電圧 580 V): ヒット数の少ない外側の 20 mm 程度の領域を除いて多くの部分では 99 % 以 上の検出効率。増幅が十分に行われない領域 (青い線 で囲んだ領域) では検出効率が低くなっている様子を 見ることができる。

数 (アノード電圧 580 V): 外側の 20 mm 程度の部 分ではヒット数が少ない。

J31_hit_580V

18 19

S Ś

298 <u>_</u>8

> 10 20 30 40 50

-SV

-Sto

35(

30(

25(

20(

15(

10(

50

0

X [mm]



図 7.12 J31 の各電圧での検出効率:アノード電圧の上昇に従って向上している様子が分かる。580 V で NSW の要求である 99 % を達成している。

7.6 位置分解能

この節では動作アノード電圧 580 V での J31 の位置分解能を求める。一次元検出器である J31 の位置分解 能 σ_{J31} は、前節の検出効率と同様に外側の 20 mm と非増幅領域を除いた領域で 1 cm × 1 cm の位置ごと に決定する。まず Tmm2 と Tmm5 でのヒット位置からイベントごとの飛跡を作り J31 で推定されるヒット

Anode Voltage [V]	Efficiency [%]
520	80.9 ± 1.3
540	92.6 ± 0.6
560	97.1 ± 0.3
580	99.5 ± 0.1

表 7.1 J31 の各電圧での検出効率

位置の x 座標 X₀ を計算する。その計算式は図 7.2 に示した検出器の位置関係から次のようになる。

$$X_{0} = \frac{X_{T}mm2 \times 636 \ [mm]}{636 \ [mm] + 386 \ [mm]} + \frac{X_{T}mm5 \times 386 \ [mm]}{636 \ [mm] + 386 \ [mm]}$$
(7.2)

全てのイベントについて X_0 と実際に J31 で観測されたヒット位置 X_{J31} との差 ΔX のヒストグラム作る と、ガウシアンフィットした時の標準偏差 $\sigma_{\Delta X}$ から J31 の位置分解能 σ_{J31} は式 7.3 のように求められる。

$$\sigma_{\rm J31} = \sqrt{\sigma_{\Delta \rm X}^2 - (\frac{386 \ [\rm mm]}{636 \ [\rm mm]} \times \sigma_{\rm Tmm2})^2 - (\frac{636 \ [\rm mm]}{636 \ [\rm mm]} \times \sigma_{\rm Tmm5})^2} \tag{7.3}$$

ここで、図 7.13 は [23] での Tmm チェンバーの Residual 分布である。分布の中心部分のガウスフィット と、エレキ系統の影響によって生じたと考えられる裾部分でのガウスフィットを重み付けして足すことで求め たガウスフィットの σ_{weight} から、Tmm チェンバーの位置分解能は 70 μ m と求められている。図 7.14 には 例として X 軸 0 mm から 10 mm、Y 軸 -10 mm から 0 mm の領域での ΔX のヒストグラムを示す。この場 所での $\sigma_{\Delta X}$ は 108 μ m であり、位置分解能は 93 μ m と分かる。

図 7.15 に各位置での位置分解能を示す。各位置での位置分解能をその位置でのイベント数で重み付けしたヒストグラムが図 7.16 である。加重平均を取ると全体での位置分解能は 97 ± 13 μ m となり、NSW でのMicromegas に対する要求である 100 μ m を達成している。



図 7.13 Tmm チェンバーの位置分解能 [23]:裾部分でのガウスフィットと中心部分でのガウスフィット を重み付けして足したガウスフィットから *σ_{weight}* を求めた。



図 7.14 X 軸 0 mm から 10 mm、Y 軸 -10 mm から 0 mm の領域での ΔX



図 7.15 J31 の各位置での位置分解能(動作アノード電圧 580 V):ヒット数の少ない外側と、非増幅領域は省いている



図 7.16 J31 の図 7.15 の領域における各位置の分解能をイベント数によって重み付けしたヒストグラム

7.7 トラッキング試験のまとめ

GIF++ で、HL-LHC での 42 年分に相当する量のガンマ線を照射した Micromegas 試作器の J31 に対し て、NSW での Micromegas に対する要求性能である検出効率 99 % と位置分解能 100 µm を満たすことを確 認するために、CERN H4 ビームラインでミューオンビームを用いたトラッキング試験を行った。J31 の検出 面上の1 cm × 1 cm で分割された各位置についてその検出効率を測定した結果、ヒット数の少ない外側とマ イクロメッシュのたわみや放電対策用の絶縁体カバーを施した部分を除いた領域では動作アノード電圧 580 V で検出効率 99 % 以上であることが確認された。同様の領域で位置分解能を測定した結果、動作アノード電圧 580 V での位置分解能が 97±13 μ m と求められた。以上の結果から、HL–LHC での 42 年分に相当する量の ガンマ線を照射された J31 小型試作器において NSW での Micromegas に対する要求トラッキング性能が満た されていることが確認できた。

第8章 結論

先行研究 [18] において、トラッキング用検出器として ATLAS 検出器の NSW への導入が計画されている Micromegas 検出器の小型試作器に対して CERN の GIF++ (Gamma Irradiation Facility ++) でのガンマ 線照射試験を行った。Micromegas 検出器は HL-LHC 環境下の NSW において受ける 80 年分相当の量のガン マ線を照射されると、照射前と比較して 20 % の増幅率の低下が引き起こされることが確認された。ガンマ線 照射後の Micromegas 試作器は検出面の表面抵抗が照射前から 10 倍以上に増加しており、神戸大学の SPES (走査型光電子分析装置) による元素分析では高抵抗ストリップの元素組成は照射前は C と O が支配的だった が、照射後には C が減少し Si が大幅に増加している様子が見られ、高抵抗ストリップ電極上には不純物として シリコンが蓄積していることが分かった。蓄積したシリコンは検出器内部に使用されている接着剤や、密閉に 用いる O リング、ガスチューブなどに含まれている Si がガンマ線照射によって遊離したものだと考えられる。

本研究では、不純物の蓄積を防ぐために Si を含まない部品を用いた改良型の Micromegas 試作器三台を作成 した。三台の改良型試作器は J32、J34、J31 と呼称し、GIF++ でそれぞれ HL-LHC での 5.7 年分、12.5 年 分、42 年分に相当するガンマ線を照射した。照射中は J32 と比較して J31 と J34 の平均アノード電流が低い という傾向が見られた。照射後の J31 の検出面には照射の影響による変色が見られる部分とそうでない部分が あり、少なくとも J31 についてはマイクロメッシュの歪みによって増幅領域が膨らんだことで電場が小さく なり十分な電荷増幅が行われず、検出器の動作が異なる部分があったために全体としてのアノード電流が低く なったのだと考えられる。J34 は検出面の観察で部分ごとに異なった様子は見られなかったため、アノード電 流の低さが J31 と同様の原因によるものかは不明である。

各試作器について、 55 Fe を用いて照射前後の増幅率を測定したところ、いずれの試作器においても増幅率の 変化は見られず、NSW における標準的な動作増幅率 5000 を達成していることが確認された。各試作器の表 面抵抗値は照射前と比較して最大で 1.8 倍程度の増加が見られたが、先行試験時と比較して上昇率は小さく、 NSW での基準抵抗値である 0.14 ~ 2.6 MΩ/sq を満たしていることも確認された。

検出面では、前述したように J31 の表面に照射の影響によって白く変色した領域と、照射が十分でないため に色が変化していない領域が見られ、SEM(走査型電子顕微鏡)による観察で前者には放電の跡と思われる黒 点が複数見られた。放電痕と思われる黒点は J32 と J34 にも見られたがその数は少なく、いずれの検出器にお いても照射中の放電による重篤な変化は起こらないと考えられる。また、SPES による元素組成分析では先行 試験で見られたような C が減少し Si が増加するといった変化は見られず、高抵抗電極の元素組成は C と O が 支配的であった。

トラッキング試験は CERN の H4 ビームラインで運動量 150 GeV/c のミューオンを用いて行い、J31 の検 出効率と位置分解能を測定した。J31 は電荷増幅が十分に行われていない領域が確認されているため、検出効 率と位置分解能は検出面を 1 cm × 1 cm ずつの領域に区切って求めた。結果として、増幅が十分に行われた部 分では検出効率が 99.5 %、位置分解能が 97 ± 13 μ m と求められ、HL–LHC での 42 年分のガンマ線を照射 した Micromegas 試作器において NSW での要求である検出効率 99 % 以上、位置分解能 100 μ m 以下という 性能が満たされていることが確認できた。

謝辞

本研究を進めるに当たり、とても多くの方々からの支えを受けてきました。指導教官である越智敦彦先生は、 いつでも朗らかで優しく、私が分からないことを尋ねればどんなときでも親身に教えてくださいました。疑問 に嬉々として答えるその姿も含めて、研究に携わっている越智先生はいつも楽しそうで私もこんな風に楽しん で仕事ができる男になりたいと感じました。知識や技術だけでなく、その生き方の片鱗さえも伝えてくださっ て本当にありがとうございます。研究以外でも、私が CERN 出張に行った際には格安で宿を与えて頂きまし たし、空港のラウンジに入れて貰ったお陰で美味しいカレーやお寿司を食べることができました。その他にも 感謝すべきエピソードを挙げると数え切ることができません。越智先生から頂いた多くの事、はこれからの人 生の中できっと輝き続けることと思います。改めて、ありがとうございました。

身内賢太朗先生には、学部四年生の卒業研究でもお世話になりました。力強く、時に厳しい身内先生の下で 研究生活の基礎を鍛えることができました。また、粒子物理研究室がいつも明るい研究室だったのは身内先生 の溢れるエネルギーのお陰だったと思います。藏重久弥先生は忙しく会議に行ったり来たりしていらした姿が 印象的でしたが、休憩時間には物理の話題だけでなくミリタリーをはじめとする様々なカルチャーのお話を聞 かせてくださいました。出張での書類などについても多くのご助力を頂いたお陰で本当に救われました。山崎 祐司先生は特にゼミや学生実験の TA など多くの場面でお世話になりました。我々学生に対して常にとても積 極的に働きかけてくださり、その優しさがとても暖かく感じました。チケットを頂いたオーケストラのコン サートは初めての経験でとても楽しかったです。竹内康雄先生はゼミやコロキウムで分からなかったり、間違 えてしまった時も優しく語りかけるように教えてくださりました。鈴木州先生は、いつも研究室に居て楽しい 話題を我々に提供してくださいました。前田順平先生は、よく修士部屋に来てくださったお陰で質問や相談が しやすく、何度も助けて頂きました。既に神戸大を離れてしまった矢野先生も、研究の質問やとりとめの無い 雑談に付き合って頂き本当にありがとうございます。清水先生はつい最近元気な姿で研究室に戻ってきてくだ さってとても安心しました。中村輝石さんは研究室にいらっしゃる日は少ないですが、趣味の話でとても面白 い話を聞かせてくださり、中村さんが来られる火曜日は私にとって楽しみな日になっています。伊藤博士さん はお世話になり始めて比較的日は浅いですが、いつも優しくしてくださってありがとうございます。先代秘書 の横山有美さんは研究生活に必要なあらゆる場面で助けてくださりました。秘書の吉田和美さんも、多くの書 類手続きで既に数え切れないほど助けてくださっておりいくら感謝しても足りないほどです。

東大 ICEPP の川本辰男先生や増渕達也先生、山崎友寛さんと山谷昌大さん、前川光貴くんと木村光太郎くんにも Micromegas の研究や CERN での生活の上で大いに助けて頂いてきました。

CERN での実験では、Givi Sekhniaidze 氏、Eraldo Oliveri 氏を始めとする RD51 ラボや ALTAS の皆 さんには、リスニングも碌にできず拙い英語を話す私をとても親切に助けて頂きました。皆でやったバーベ キューは沢山肉を食べれて、愉快な写真も撮れて楽しかったです。

μ-PIC グループの先輩である山根史弥さんは、自分の研究で大変なときでもいつも私の研究にアドバイス を授けてくださいました。山根さんがグループの隊長として我々を引っ張ってくださったからこそ、安心して 研究に取り組むことができたと思います。そしてアニメやゲームなどの共通の趣味を話せる先輩の存在はとて も得がたいものでした。後輩の石飛由介くんは、先輩らしく助けてやろうと思っていたら逆に助けられてしま うようなしっかり者です。特に、長い間一人で CERN で過ごした石飛くんのそのタフネスと適応力にはとて も驚かされました。

研究室では博士課程の先輩方にも多く助けられました。いつも(本人曰くわざと)不思議な言動で場を盛り 上げてくれる矢ケ部遼太さん、困っている時に優しく助けてくれる陳叶さん、色々なことを知っている長谷川 誠さん、CERN での生活を助けてくださった木戸将吾さん、やたらゲーミング PC の購入を勧めてくる上最近 では私の隣席の人への S.H. が過激化してきているものの基本的には明るく愉快な橋本隆さん、初めは怖そう だと思っていたけれど本当は優しく、共に非常勤講師のバイトで絆を深めた池田智法さん。皆さん一人ひとり が偉大な先輩です。

同期で同グループに所属する小川圭将くんは、研究内容は違ってもいつも助けてくれました。インフェルノ (ダン・ブラウン著)は一体いつになったら読むのでしょうか。ハーゲンダッツもまだ冷凍庫に入ってますよ ね。先輩でありながらいつの間にか同期になっていた阿部圭悟さんもよく私の隣の積に遊びに来ていた姿が印 象的です。その余波で一緒に盛り上がれて楽しかったです。様々な方法で私に無数の笑いを提供してくれた竹 田康亮くん。人間は笑うと寿命が延びるといいますが、それが本当なら貴方のお陰で私は長生きできそうで す。光モードと闇モードを持つ若宮光太郎くんはとてもしっかり者で、光モードの時は何度もお世話になりま した。闇の時はその毒が大変に強烈でした。隣の席の中澤美季さんはいつも明るく元気でしたが、そのパワー が受け止めきれないことも多々ありましたが基本的に楽しかったです。

元気な一年後輩の皆さん。研究室でいつでも寝息を立てている宮辺裕樹くん、体に気をつけて欲しい礒部裕 太くん、ふと見ると動画サイトを開いている酒井貴義くん、よく見ると元気いっぱいでよく喋る堀口楠日くん、 趣味の方向性がいまいちよく分からない杉本太郎くん、いつも頑張っている姿を見る吉田登志輝くん、とても 美しい写真を見せてくれる岡田健くん、学年だけ見ると後輩ですが実際先輩で、分からないことを訊くと優し く教えてくれる石浦宏尚さん。後輩の皆さんのお陰で明るい研究室生活を送ることができました。

私を支えてくださった方々で、ここに挙げることができた方は本当に一部でしかありません。多くの人に助 けられて修士論文を書くことができたことに、最大の感謝を示します。

最後に、この日まで長い長い学生生活を支援してくれた家族に、心からの感謝を述べます。

平成 30 年 2 月 2 日 又吉康平

参考文献

- [1] ATLAS EXPERIMENT PUBLIC RESULTS LuminosityPublicResultsRun2 https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2
- [2] 山崎友寛, "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",東京大学修士論文,2016
- [3] ATLAS Experiment Photos http://atlasexperiment.org/photos/lhc.html
- [4] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 2008, JINST 3 S08003, DOI:10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [5] Arantxa Ruiz Martinez on behalf of the ATLAS Collaboration, "The Run-2 ATLAS Trigger System", ATL-DAQ-PROC-2016-003, 28/02/2016
- [6] The HL-LHC project. http://hilumilhc.web.cern.ch/about/hl-lhc-project
- [7] ATLAS Collaboration, Technical Design Report New Small Wheel.
- [8] R & D of resistive strip foil and quality control for MicroMegas detector, https://indico.cern.ch/event/587667/contributions/2368336/attachments/1370741/ 2078841/MMQAQC.pdf
- [9] Particle Data Group, The Review of Particle Physics, 2016, Chin. Phys. C40 10001.
- [10] 越智敦彦, "MSGC 開発史", MPGD 研究会, 2004.
 http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/mu-PIC/workshop/2004.html
- [11] A.Oed,"Properties of micro-strip gas chambers (MSGC) and recent developments,"NuclInstrum. and Meth. A 367 (1995) 34-40
- [12] EP-DT-DD Gas Detectors Development, GAS ELECTRON MULTIPLIER GENERAL. http://gdd.web.cern.ch/GDD/
- [13] A. Ochi, T. Nagayoshi, S. Koishi, T. Tanimori, T. Nagae, and M. Nakamura, A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 471 no. 1-2, (2001) 264-267,
- [14] Y. Kataoka, et al., Performance Studies of a Micromegas Chamber in the ATLAS Environment, 2014, arXiv:1310.8603v2.
- [15] F. Sauli, "Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications". Cambridge University Press, 2014.
- [16] M. TITOV, RADIATION DAMAGE AND LONG-TERM AGING IN GAS DETECTORS, 2004. arXiv:0403055v2.
- [17] R. Guida, GIF++:The new CERN Irradiation Facility to Test Large-Area Detectors for the HL-LHC Program, 2015, CERN Detector Seminar https://indico.cern.ch/event/387753/attachments/ 774726/1062498/DetectorSeminarGIFMay2015RobertoGuida_v3reduced.pdf
- [18] 長坂憲子,"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",神戸大学 修士論文,2017.

- [19] R. Guida, "CERN-GIF++: A new Irradiation Facility to Test Large-Area Detectors for the HL-LHC Program", https://indico.cern.ch/event/387753/.
- [20] 神戸大学研究基盤センター http://www.csrea.kobe-u.ac.jp/syousaispes.html
- [21] Advanced European Infrastructures for Detectprs at Accelerators http://aida2020.web.cern.ch/content/cern
- [22] Hans Muller, "SRS Readout architectures" https://indico.cern.ch/event/236266/contributions/507853/attachments/ 395969/550721/Summary on SRS readout systems of RD51draft.pdf
- [23] https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/NSWPublicResults
- [24] A.Oed,"POSITION-SENSITIVE DETECTOR WITH MICROSTRIP ANODE FOR ELECTRON MULTIPLICATION WITH GASES",
 1988, Nucl.Instrum.Meth. A263 (1988) 351-359, DOI:10.1016/0168-9002(88)90970-9.
- [25] F. Sauli, GEM: A new concept for electron ampli cation in gas detectors, Nucl. Instrum. Meth. A386 (1997) 531-534.
- [26] Y. Giomataris, P. Rebourgeard, J. Robert, and G. Charpak, MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle- flux environments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: 376 no. 1, (1996) 29 - 35.
- [27] EP-DT Detector Technologies GIF++ https://ep-dep-dt.web.cern.ch/irradiation-facilities/gif
- [28] I.Giomataris, R. De Oliveira, S. Andriamonje, S. Aune, G. Charpak, P. Colas, G. Fanourakis, E. Ferrer, A. Giganon, Ph. Rebourgeard, P. Salin "Micromegas in a bulk", https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900205026501