

修士学位論文

ATLAS ミューオン検出器
アップグレードのための
MicroMegas 検出器の放射線耐性の研究
(Study of radiation tolerance of the MicroMegas
detector for the ATLAS muon upgrade)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

川本研究室

木村 光太郎

2018年1月

概要

スイスのジュネーブ郊外とフランスの国境にまたがる欧州原子核研究機構(CERN)で行われている A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS) 実験では、2026年より HL-LHC として従来の性能をアップグレードした高輝度のルミノシティで実験が行われる。この実験に向けた 2019年 - 2020年の検出器のアップグレードにおいて新たに導入されるミューオン検出器 New Small Wheel(NSW)では、主に精密位置測定を目的として MicroMegas が導入される。しかし設置される位置においては高ヒットレートの放射線バックグラウンドがあるため、高レート放射線環境下における安定動作と長期間の使用での経年劣化をしないことが要求される。

本論文では大量生産段階に入った MicroMegas 検出器の放射線耐性の評価を目的とし、実際に NSW で ATLAS にインストールされる素材・手法で製造した小型 MicroMegas 試験器の加速劣化試験を行った。まず、CERN にある γ 線照射施設において HL-LHC 44年分のヒットに相当する γ 線を照射した。照射開始時と終了時ではカレントに 13%の低下が認められたが、検出器は問題なく動作していた。照射前後のゲイン、検出効率、位置分解能にも変化は見られなかったが、検出器のドリフト領域と増幅領域を分けるグラウンドメッシュがたわんでいたために、うまく増幅が起きなかった領域や、他のチェンバーでは放電による電極の破壊などが起き、グラウンドメッシュの張りかたの重要性を再確認した。本論文では以上の詳細を記す。

目次

第1章 序論	5
第2章 LHC-ATLAS 実験	7
2.1 LHC 加速器	7
2.2 ATLAS 実験	8
2.3 LHC アップグレード計画	15
第3章 New Small Wheel 計画	16
3.1 NSW の目的	16
3.2 NSW の要求性能	21
3.3 NSW の構造	22
3.4 予想されるバックグラウンド	24
第4章 ガス検出器	26
4.1 放射線と物質の相互作用	26
4.2 ガス検出器の原理	29
4.3 MPGD (Micro-Pattern Gas Detector)	30
4.4 ATLAS NSW 用に開発した MicroMegas	33
4.5 放射線による検出器の劣化	34
第5章 MicroMegas 試作器	36
5.1 小型試作機	36
5.2 量産型試作機の仕様	36
第6章 γ 線を用いた耐久試験	40
6.1 γ 線照射施設 GIF++	40
6.2 照射中のカレント測定	41
6.3 照射前後の増幅率測定	49

6.4 照射前後の表面変化	53
6.5 まとめ	59
第7章トラッキング試験	60
7.1 読み出しシステム	60
7.2 クラスタリング	62
7.3 セットアップ	63
7.4 検出効率	65
7.5 位置分解能	67
7.6 まとめ	69
第8章 結論	70
参考文献	74

第 1 章

序論

スイスジュネーブ郊外に位置する欧州原子核研究機構（CERN）で行われている A Toroidal LHC ApparatuS（ATLAS）実験では、大型陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider（LHC）を用いて世界最大の衝突エネルギーでの素粒子実験が行われている。2012 年には ATLAS 実験と競合相手である CMS 実験により、標準模型において唯一未発見であった Higgs 粒子が発見され、現在は Higgs 粒子の精密測定や標準模型の矛盾点を補う超対称性粒子や余剰次元などを含めた新物理の発見を目指している。

現在は重心系エネルギー 13 TeV、瞬間ルミノシティを $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で稼働しているが、2026 年からは High Luminosity LHC（HL-LHC）として、瞬間ルミノシティはルミノシティ $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで増大し、約 10 年間の稼働で 3000 fb^{-1} の統計量を目指している。しかし現在の ATLAS 検出器はルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を想定して設計されており、LHC のアップグレードによって 1 イベントあたりの衝突粒子数の増加が引き起こすヒットレートの増加に対応できない。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予定に合わせ、ATLAS 実験でも段階的に検出器や DAQ システムの改良が計画されている。

新しいミュオン検出器 New Small Wheel（NSW）もアップグレード計画の中で設置が計画されているひとつである。既存の Small Wheel（SW）で問題となっている、高ヒットレートに対する位置分解能の低下、フェイクトリガー問題への対処として New Small Wheel へと置き換えられる。NSW に使用される検出器の一つである MicroMegas は精密位置測定・トリガー判定を目的として導入が計画されており、その速い応答と優れた位置分解能は高ヒットレート環境下での飛跡検出器として適している。しかし MicroMegas は高輝度 LHC-ATLAS 実験環境下に設置され、2035 年頃の実験終了時まで交換せずに使用される予定であるため、高ヒットレート環境での安定動作と長期間の使用での放射線耐性が要求される。

CERN にある γ 線照射施設 Gamma Irradiation Facility（GIF++）では 14 TBq の ^{137}Cs を

線源として検出器などの加速劣化試験が行われ、MicroMegas の耐久試験も行われている。先行研究では HL-LHC 10 年分の γ 線照射にはパフォーマンスの低下は見られていないが、80 年分の照射では検出器の密閉のために用いた O-ring やガスチューブから 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高抵抗ストリップ表面に SiO₂ が付着し、表面抵抗の増加に伴い増幅率の低下がパフォーマンスの低下につながっていると考えられている。

そのため本研究では、MicroMegas の改善として Si 製の素材を使うことをやめポリエチレン製のゴムを使用した。また、高抵抗ストリップのプリント手法も新たにし、ESL スクリーンプリントという手法を用いてプリントをし、赤外線 200°C (IR200) で焼き付けた。これらの手法で作製した MicroMegas 試験器を用い、大量生産段階の MicroMegas 検出器の性能評価を行った。

まず試験機を GIF++ で γ 線照射し、照射前後のゲインの変化を測定、位置分解能と検出効率の評価、 π ビームを用いたトラッキング試験、レーザー顕微鏡を用いた 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分析などを行った。

本論文ではこれらの結果をまとめ、HL-LHC に導入される MicroMegas の評価を行なった。

第 2 章

LHC-ATLAS 実験

2.1 LHC

スイスのジュネーブ郊外、フランスとの国境に位置する欧州原子核研究機構（CERN）では大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider）通称 LHC と呼ばれる加速器で素粒子の実験が行われている。既存の加速器の中では最大の重心系エネルギーを持ち、周長は約 26.7 km と世界最大の陽子衝突型の円形加速器でもある。これまでの研究では Higgs 粒子が発見され、引き続き Higgs 粒子の精密測定や標準理論を超える物理の実験が行われている。LHC では 4 箇所のビーム衝突点があり、それぞれの実験の検出器が設置されている。4 つの実験施設は ATLAS、CMS、LHCb、ALICE と呼ばれ、ATLAS・CMS 実験では陽子・陽子衝突による実験、ALICE では重イオン（鉛）衝突実験、LHCb では B 中間子による CP 対称性の破れに注目した実験が行われている。LHC は Run と呼ばれる実験期間ごとに段階的に加速器の性能を上げて行き、実験期間終了までに、合計で 3000 fb^{-1} の統計を溜めることを目標としている。表 2.1 に LHC のパラメータを示す。また、LHC では粒子を加速させるため、複数の前段加速を用いて段階的に粒子を加速させて行く、前段加速器を含めた実験施設全体の概略図を図 2.1 に示す。

表 2.1 LHC のパラメータ

期間	Run1 (2009 ~ 2013)	Run2 (2015 ~ 2018)	HL-LHC (2021 ~ 2035)
重心系エネルギー [TeV]	7,8	13	14
最大瞬間ルミノシティ [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	8×10^{33}	2×10^{34}	5×10^{34}
バンチ間隔 [ns]	50	25	25

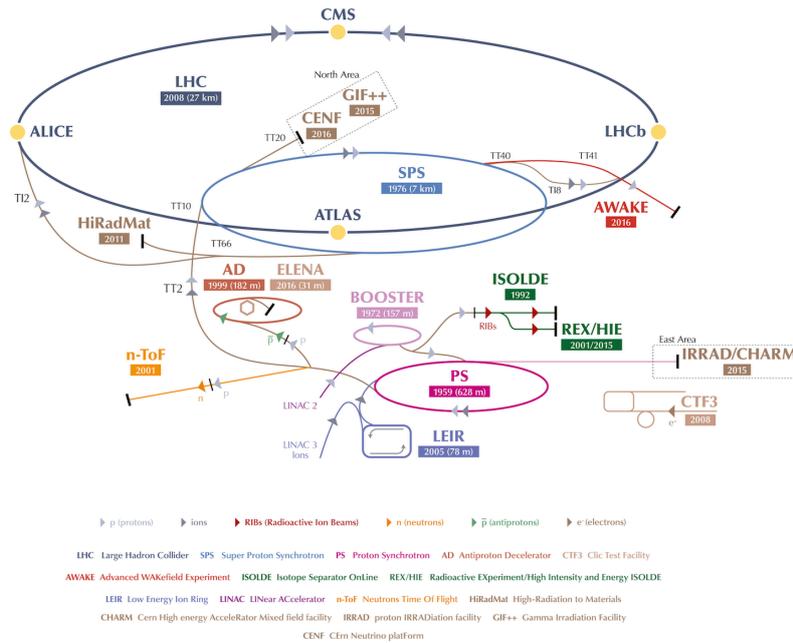


図 2.1 LHC の概略図[2]：陽子ビームは前段加速器を介し、最終的な加速器である LHC へと送られる。

2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は陽子・陽子衝突で生じた粒子の検出器である。図 2.2 に示すように内側から、内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータの順に配置され、内部飛跡検出器の外側にソレノイドマグネット、カロリメータの外側にトロイダルマグネットが設置されている。その大きさは直径 25m、長さ 44m の円筒形で、総重量 7000t に及ぶ大型の汎用粒子検出器である。

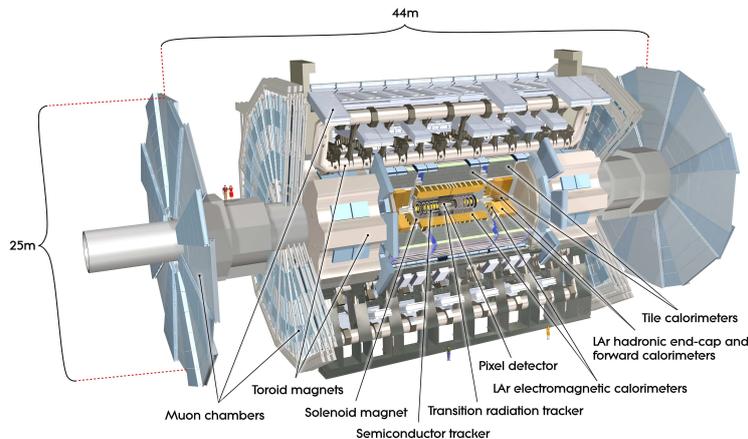


図 2.2 ATLAS 検出器[1]：全方向を覆うように円筒形になっており、側面部分をバレル部、底面部をエンドキャップ部と呼ぶ。

2.2.1 内部飛跡検出器

図 2.3 に内部飛跡検出器の概要図を示す。内部飛跡検出器は ATLAS 検出器の中でも最内層に位置し、荷電粒子の飛跡を検出する。内側からピクセル検出器 (Pixel detectors)、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)) の順で構成されている。また、衝突点から近い放射線の影響が強く、長期間の安定的な運用を考慮して放射線に対する耐性が重要である。

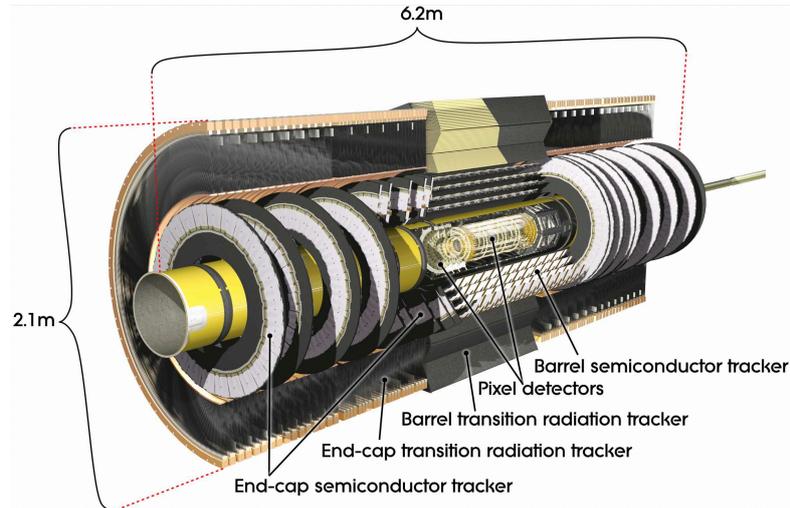


図2.3 内部飛跡検出器[1]：高い位置分解能と多層構造により、高精度で荷電粒子の曲率を計算している。

2.2.2 カロリメータ

図 2.4 に示したカロリメータは、内側に電磁カロリメータとそれを囲むようにハドロンカロリメータから構成され、電子、光子、タウ粒子、ジェットのエネルギーや角度を測定する。

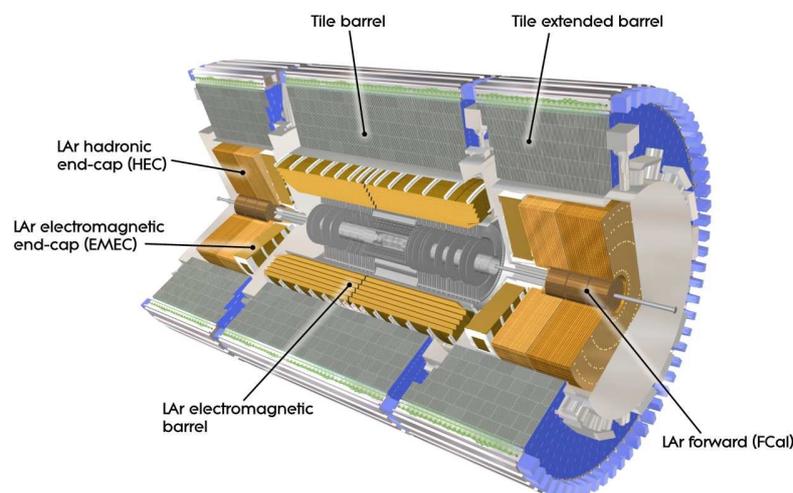


図2.4 カロリメータ[1]

2.2.3 ミューオンスペクトロメータ

図 2.5 に示したミューオンスペクトロメータは、ミューオンの精密位置測定とトリガー発行を行う検出器である。検出器は計 4 種類から構成され、検出器側面のバレル部と底面のエンドキャップ部に分けられている。Monitored Drift Tube (MDT)、Cathode Strip Chamber (CSC) は精密位置測定を目的に、Resistive Plate Chamber (RPC)、Thin Gap Chamber (TGC) は主にトリガーに用いられる。なお MDT と RPC がバレル部、MDT と高レート耐性の CSC がエンドキャップ部に設置されている。図 2.6 にミューオンシステムの平面断面図を載せる、また各検出器の性能を表 2.2 にまとめた。なお座標はビーム軸方向を z 軸、ビーム軸方向に垂直な平面を xy 平面とし、衝突点からの天頂角 θ を用いて擬ラピディティ角 η を定義している。

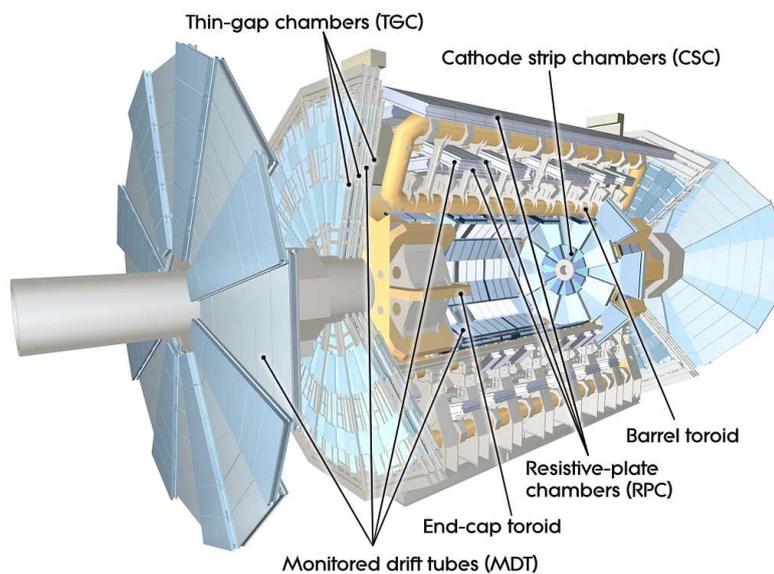


図2.5 ミューオンスペクトロメータ[1] : MDTとCSCが精密位置測定を、RPCとTGC がトリガー判定を行っている。

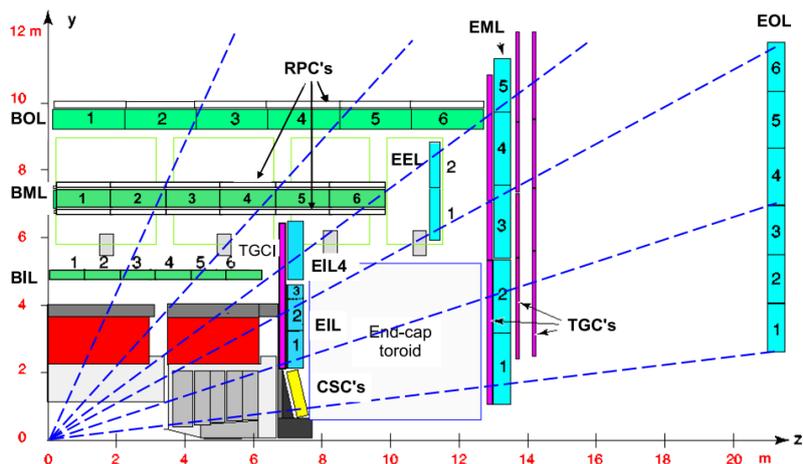


図 2.6 ミューオン検出器の yz 平面断面図[5]：色と検出器の対応は、緑 MDT、白 RPC、黄 CSC、水色 MDT、紫色 TGC で表している。赤、灰色はカロリメータである。検出器の領域は衝突点を中心に分けられており、バレル部は衝突点から近い方から、Barrel Inner Large (BIL)、Barrel Middle Large (BML)、Barrel Outer Large (BOL) と分けられ、エンドキャップ部は End-cap Inner Large (EIL)、End-cap Middle Large (EML)、End-cap Outer Large (EOL) と区分される。

表 2.2 ミューオンスペクトロメータを構成する検出器の性能[1]

	MDT	CSC	RPC	TGC
機能	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	35 μm	40 μm	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
領域	$ \eta < 2.7$	$2.0 < \eta < 2.7$	$ \eta < 1.05$	$1.05 < \eta < 2.7$

2.2.4 マグネットシステム

図2.7にあるようにATLASのマグネットシステムは、ソレノイドコイルとトロイドコイルで構成されており、直径22 m、長さ26 mで、1.6 GJの貯蔵エネルギーを有する。これを用いて荷電粒子の飛跡を曲げることにより、運動量を測定する。

- ソレノイド磁石

図2.8のソレノイドコイルは内部飛跡検出器と電磁カロリメータの間にあり、ビーム軸方向に約2 Tの磁場を与え、運動量を測定する。また、外側のカロリメータへの影響を考え、厚さは4.5 cmと物質量を出来る限り少なくした薄い構造になっている。

- トロイド磁石

トロイドコイルは、図2.9、図2.10に示すように、オクタント対称の構造の空芯コイルがバレル領域とエンドキャップ領域設置されている。ミューオンの運動量を測定するために ϕ 方向の磁場を発生させている反面、複雑な磁場を形成し、曲率の計算を煩雑にしてしまう側面もある。

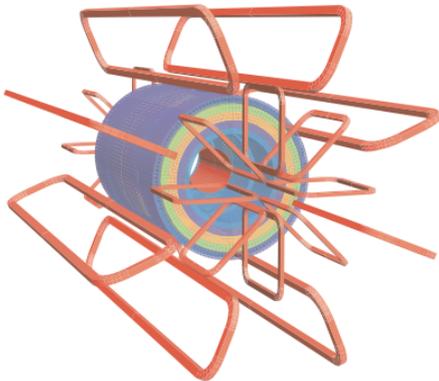


図 2.7 マグネットシステム[1]



図 2.8 ソレノイドコイル[1]

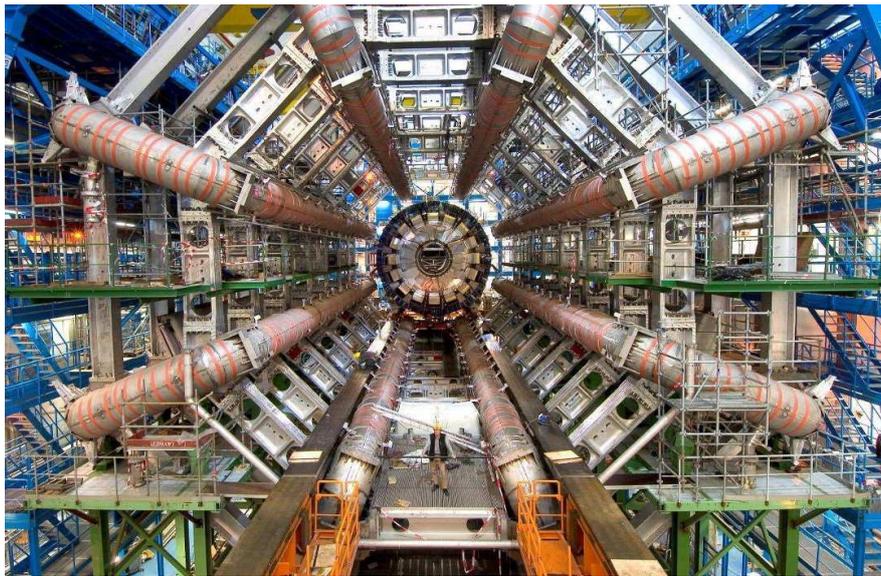


図2.9 ATLAS検出器のバレルトロイドコイル[1]：対称性を保つためオクタント対称であるが、複雑な磁場を形成してしまう側面もある。

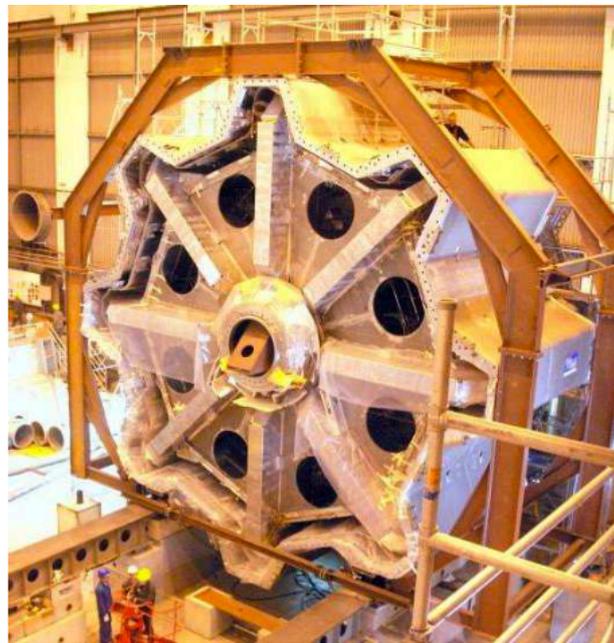


図 2.10 エンドキャップトロイド[1]

2.2.5 トリガーシステム

ATLAS では 40 MHz で陽子衝突によるイベントが発生する。そのため送られてくるデータを全て記録するのは、記憶容量の制限からして不可能である。また送られてくるデータは QCD 由来の必要のない情報であり、興味のあるデータをオンラインで選別している。図 2.11 に示す

ATLAS のトリガーシステムは、カロリメータとミュオンスペクトロメータを用いた Level 1 トリガー、ソフトウェアベースのハイレベルトリガー (HLT) から構成される。

Level1 トリガーでは 40 MHz のイベントレートを 2.5 μ s 以内に 100 kHz に、HLT では 550 ms 以内の処理時間に 1 kHz まで減らし、ストレージに情報が保存される。

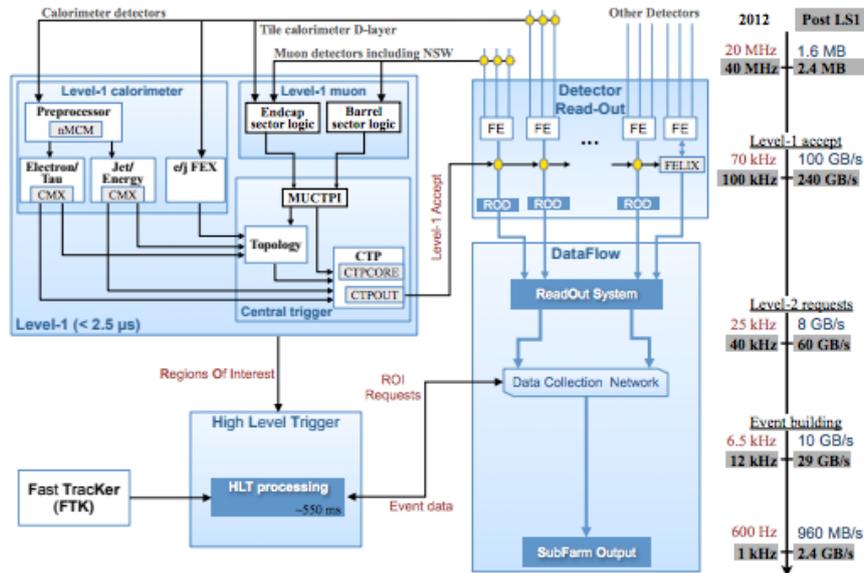


図 2.11 トリガーシステムの概要 [7]

2.3 アップグレード計画

LHC は Long Shutdown1 (LS1) でのアップグレードを経て 2015 年から Run 2 として始動し、2017 年現在は重心系エネルギー 13 TeV、最大瞬間ルミノシティ $5.2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で稼働を続けている。図 2.12 にあるように今後は段階的にアップグレードを重ね、2026 年からは High-Luminosity LHC (HL-LHC) として、エネルギーを 14 TeV、瞬間ルミノシティ $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で LHC を運用し、10 年で 3000 fb^{-1} の統計を溜めることを目標としている。

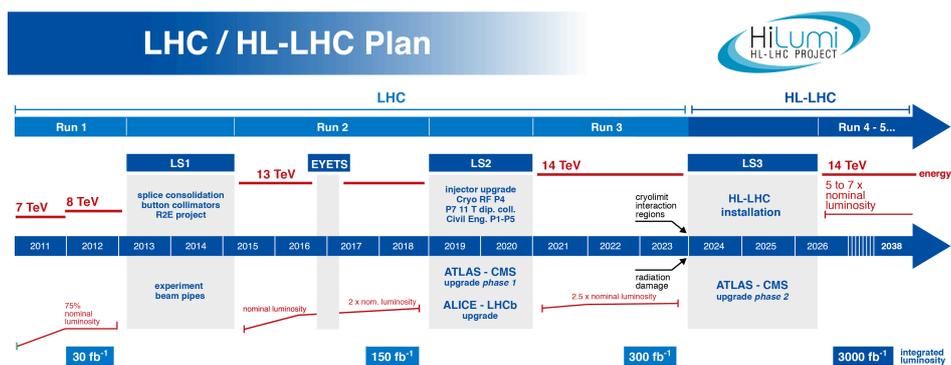


図 2.12 LHC のアップグレード計画[3]

第3章

New Small Wheel (NSW) 計画

3.1 NSW の目的

前章の3節のアップグレード計画で述べたように、ATLAS 検出器は LHC の性能の増強に合わせてアップグレードを行う。HL-LHC の高ヒットレートにおける、検出効率低下の防止、ミューオントリガーのフェイクの削減を目的とし、Run2 の後に行われる Long Shutdown2 (LS2) では図 3.1 の $z = 7.5\text{m}$ にあり、TGC, CSC, MDT で構成されている Small Wheel を図 3.2 に示す New Small Wheel へとアップグレードする。NSW は主に精密測定を目的としたに MicroMegas 検出器、トリガーを目的としたに sTGC 検出器で構成される。

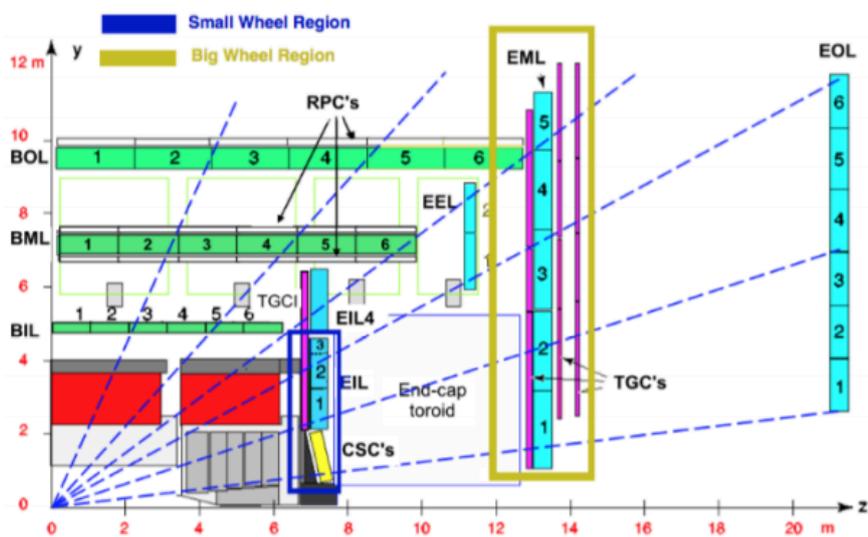


図 3.1 ATLAS 検出器の yz 平面断面図[5]: TGC, CSC, MDT で構成される図中の青枠で囲ってある部分を Small Wheel (SW)、TGC, MDT で構成される図中の黄枠で囲ってある部分を Big Wheel (BW) と呼ぶ。図 2.6 と同図である。

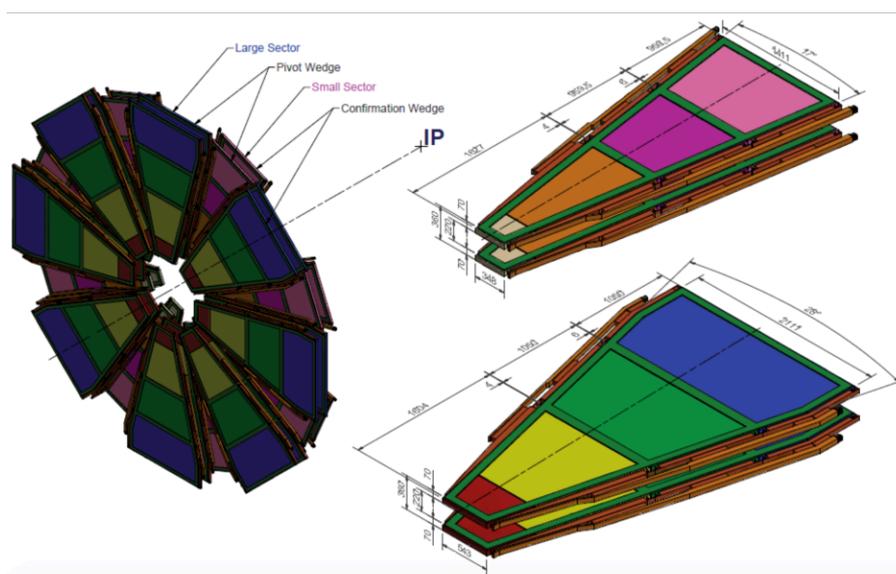


図 3.2 NSW の概要図[6] : 1 枚の NSW は Large Sector と Small Sector 8 枚ずつで構成される。衝突点側が Small Sector である。

●検出効率低下の防止

HL-LHC ではアップグレードにより、ルミノシティは $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ へと増加するが、現行の SW に用いられた MDT では、ドリフト時間の約 700 ns という長さが高ヒットレート的环境下で問題になって来る。図 3.3 に示すように、MDT 1 本と、チェンバーの検出効率は、ヒットレートが増加すると低下する。HL-LHC に対応するヒットレート 300 kHz / Tube では、約 35% の検出効率の低下も確認されている。また検出器内の空間電荷の増加により位置分解能も低下し、ミューオンの運動量の測定にも影響が出る。ミューオンの運動量は図 3.1 の EI, EM, EO の 3ヶ所によって測定するため、SW が設置された EI の精度が低下すると、運動量の測定精度も低下する。上記の理由により、SW は改善が必要である。

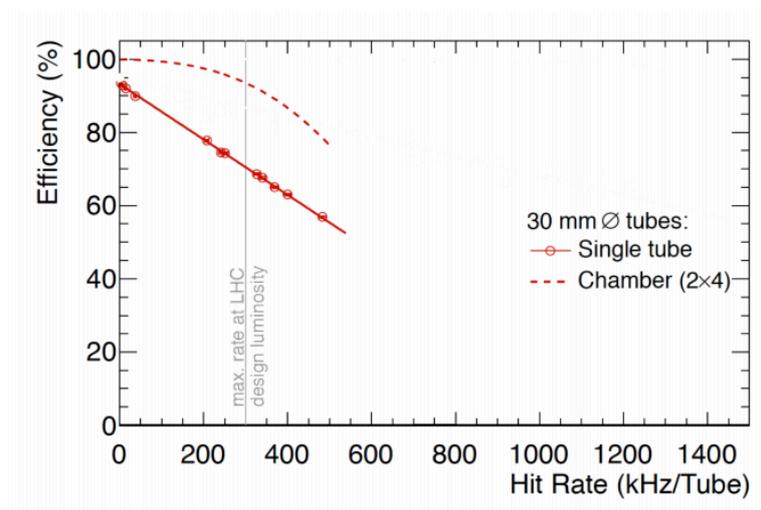


図 3.3 MDT のチューブ 1 本あたりの検出効率（実線）とチェンバーにおけるトラック再構成効率（破線）のヒットレートとの相関[1]：瞬間ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ は 300 kHz/Tube でのビームテストにおける測定データを用いている。ヒットレートの増加により MDT の検出効率は低下していくことがわかる。

●ミューオントリガーのフェイクの削減

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 を用いて、飛跡の曲率からミューオンの横運動量 p_T を求め、飛跡を再構成しているが、図 3.4 で示すように、BW ではフェイクトリガーも発行されてしまう。A は衝突由来における正しい信号であるが、B や C は IP での陽子・陽子衝突後に ATLAS 検出器内に残った陽子や中性子がビームパイプや磁石に衝突し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フェイクトリガーである。

図 3.5 に Run 1 で取得した 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。エンドキャップ部はバレル部よりもフェイクトリガーが大きいことがわかる。2015 年の Run 2 からは SW の TGC の情報をエンドキャップトリガーに取り入れてフェイクトリガーを削減しているが、30%ほどのレートしかフェイクは削減できていない。

前述したように Level1 トリガーでは 40 MHz の信号を 100 kHz まで落としているが、このうちミューオントリガーに与えられたイベントレートは約 20 kHz である。

今後はアップグレードによるルミノシティの増加により、シグナル、バックグラウンド共に信号は増加する。表 4.1 は重心系エネルギー 14 TeV、バンチ間隔 25 nsec、ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ において予想される Level 1 でのミューオンレートを示している。 p_T (Transverse Momentum) 閾値を維持するとした場合、NSW なしではトリガーレートが大幅に上がってしま

う。かといって閾値を上げると図 3.6 に示すように $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ 過程におけるレプトン p_T の分布より、Higgs 信号からのレプトンは p_T が 20 GeV から 40 GeV に多いため、有用な情報をカットしてしまうことになる。上記の二つの理由からフェイクトリガーを減らし、 p_T 閾値を減らさないためにも NSW の導入が望まれる。

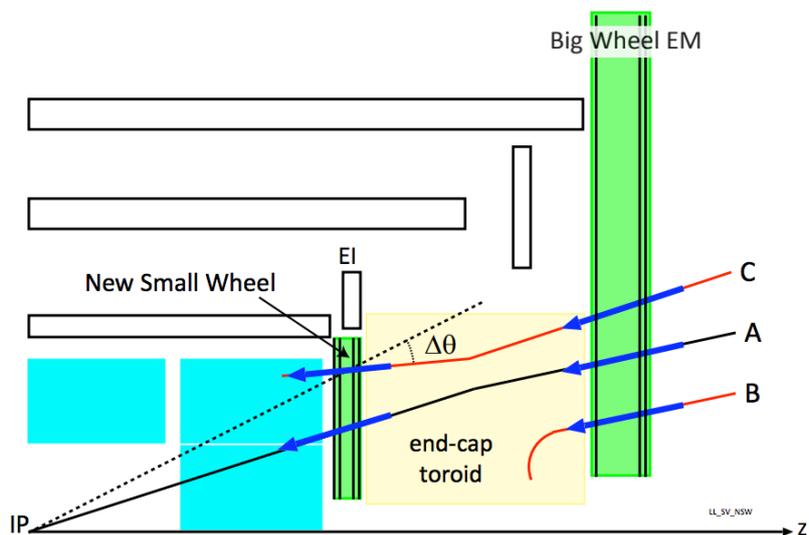


図3.4 BWにおいてミューオントリガーとして発行される信号の例[1]: Aは衝突点由来の正しい飛跡であるが、B, Cは衝突点由来ではないフェイクトリガー。

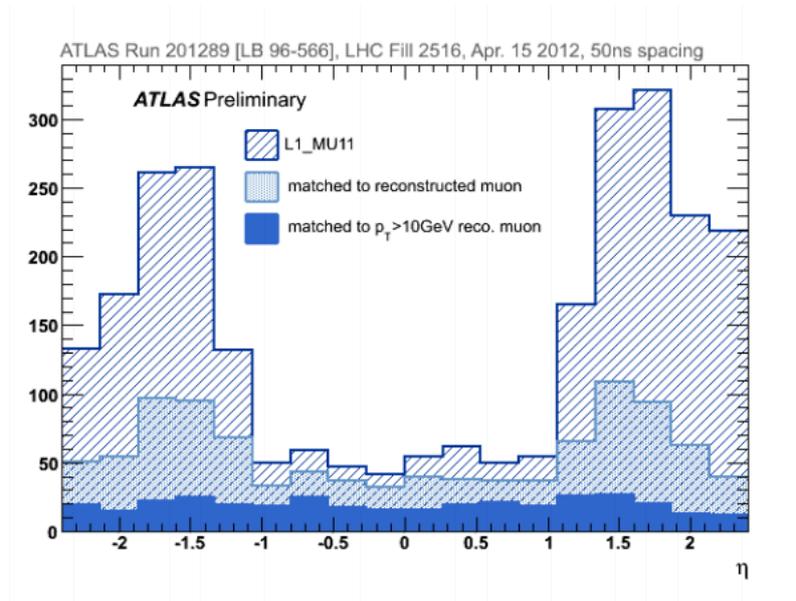


図 3.5 Run 1 におけるミュオンの η 分布[1]: 青色の斜線部が L1 トリガーにおいてミュオンと判断されたもの、水色の斜線部がその中でオフラインの解析でミュオンと判断されたもの、青色の部分はさらに p_T 10 GeV 以上と判定されたものを示す。

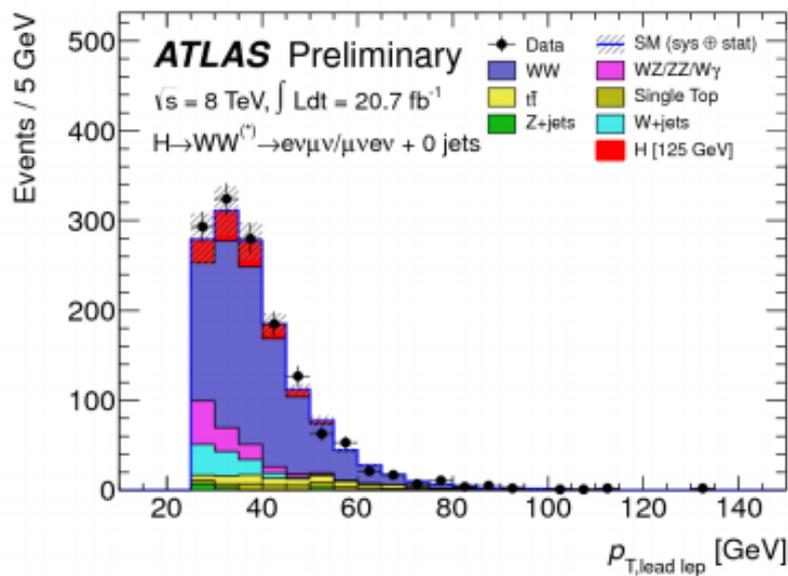


図 3.6 $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ 過程におけるレプトン p_T の分布[1]: Higgs の信号は赤色で示した部分であり、低い p_T を持つレプトン由来であるため、 p_T 閾値を上げてしまうと信号をカットしてしまうことがわかる。

表 3.1 2011 年のデータから外挿した $\sqrt{s} = 14$ TeV、バンチ間隔 25 nsec、ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ において予想される Level 1 でのミュオンレート[7]

L1 ミュオン p_T 閾値 [GeV]	Level 1 ミュオントリガーレート [kHz]
$p_T > 20$	60 ± 11
$p_T > 40$	29 ± 5
$p_T > 20$ with NSW	22 ± 3

3.2 NSW の要求性能

NSW は Run 3 から稼働し、HL-LHC においても運用されるため、その高ヒットレート環境下で現行の SW と同程度のトラッキング性能と、さらに 3.1 節で記したように、トリガーにおけるフェイクを除去する性能が求められる。以上を満たすため具体的に以下のことが要求される

- 1 層の検出器で η 方向の位置分解能 100 μm 以下
 - ϕ 方向の位置分解能が 1 – 2 mm 以下
 - p_T が 10 GeV 以上のミュオンに対して、NSW 上でのトラック再構成効率が 97% 以上
 - 検出効率や位置分解能がシャワーや δ 線を出す高い p_T のミュオンでも悪化しないこと
- さらに、Level 1 トリガーにおける p_T 閾値 20 GeV を維持するため、オンラインのトリガー検出器として以下のことが要求される：
- 現在の BW の TGC の処理による遅延時間である 1.088 μs 以内に L1 ミュオントリガーシステムにトラックの情報を送る
 - NSW 上で再構成したトラックの角度分解能が 1 mrad 以下
 - 現在のミュオントリガーシステムとトラックを統合させるために、 $\eta - \phi$ 平面において、 0.04×0.04 の精度でトラックを再構成
 - トラックが $1.3 < |\eta| < 2.5$ の範囲で、95% 以上の効率で再構成

3.3 NSW の構造

図 3.7 に示すように NSW は衝突点側に **Small Sector**、衝突点とは逆側に **Large sector** とがあり、それぞれ 8 枚の検出器を円盤状に並べている。また不感領域をなくすために、検出器は少し重なるように配置されている。図 3.8 に 1 枚のセクターの断面図を示す。再構成されるトラックの角度分解能をよくするため図 3.9 に表されるように、外側にトリガー用の **Small strip TGC (sTGC)**、内側には精密位置測定用に **MicroMegas** の 2 種類の検出器からなる。また図 3.10 にあるように、**MicroMegas** は 4 枚を 1 セットとして 2 枚を r 方向読み出し、2 層は ϕ 方向の読み出しとして各々 $\pm 1.5^\circ$ の角度をつけて並べられている。多層構造になっているのは放射線などの影響による故障時にもカバーできるのが主な理由であるが、正確な飛跡を再構成することにも寄与している。

sTGC の構造を図 3.11 に示す、現在もエンドキャップ部で使用されている TGC と比較し、strip pitch が 3.2 mm と短いことより sTGC と呼ばれている。**MicroMegas** の構造は次章で詳しく説明する。

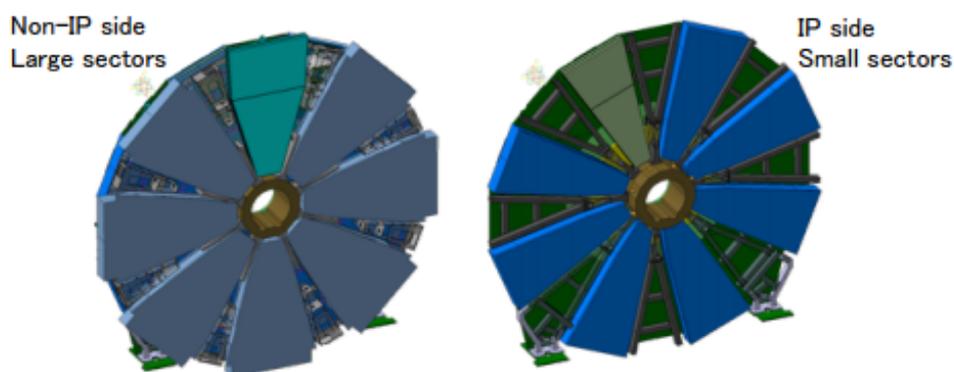


図 3.7 NSW の概略図[8]：衝突点と逆側に配置された **Large Sector** と衝突点側に配置された **Small Sector** は不感領域をなくすために少しずつ重なるように配置されている。

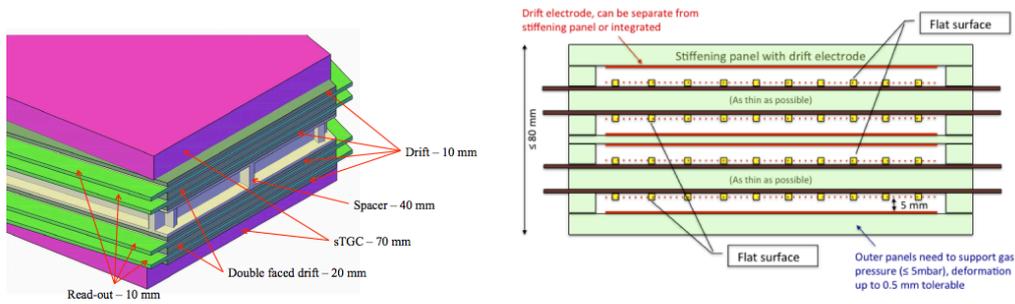


図 3.8 NSW の 1 つのセクターの側面図と MicroMegas の断面図[1]: 左の側面図の、外側のピンク色部分はトリガー用の sTGC、内側の緑色部分は精密位置測定用の MicroMegas である。右の断面図は 1 層の MicroMegas の構造であり、2 枚で背中合わせになった MicroMegas が、2 つあることで、1 層に 4 枚の MicroMegas がある。

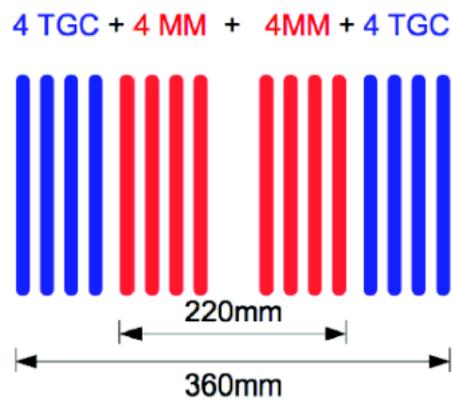


図 3.9 セクターあたりの sTGC と MM の枚数と並び順: 1 層につき 4 枚ずつで構成された sTGC と MicroMegas があり、外側に sTGC、内側に MicroMegas の順番で配置されている。

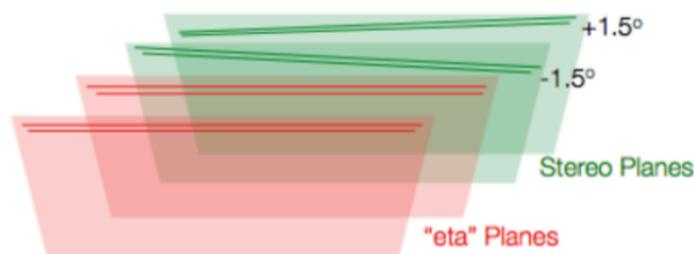


図 3.10 MicroMegas の 4 層構造[9]: 赤 2 層は r 方向の読み出し、緑 2 層は ϕ 方向の読み出しのために 各々 $\pm 1.5^\circ$ 傾けて配置されている。

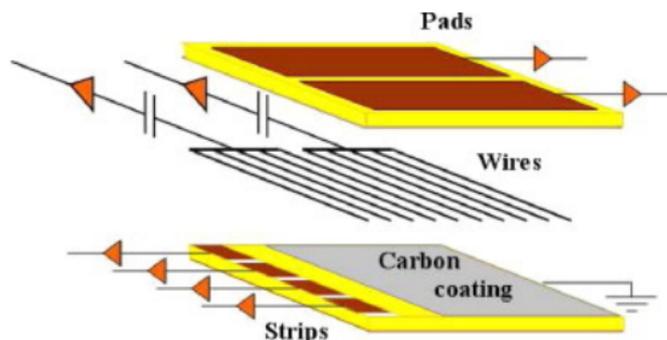


図 3.11 sTGC の構造[1]

3.4 予想されるバックグラウンド

中性子や γ 線などのバックグラウンドは、ミュオン検出器にとって、フェイクトリガーとして判定されることがあり、ミュオントリガーの検出効率を下げてしまう。ATLAS 内部も例外ではなく、大量のバックグラウンドが存在する。特にビームパイプに近い CSC の位置では放射線の影響が強く、故障してしまうと言う状況も考えられる。図 3.12 はルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ における、ミュ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。NSW に設置される MicroMegas のバックグラウンドは[8]において先行研究がされており、その結果を表 3.2 に示す。ATLAS における各検出器のヒットレートは検出器が設置されている位置のフラックスと検出器の感度の積によって見積もることができる。また、総ヒット数を計算するために、HL-LHC の稼働時間を求めると、ルミノシティ $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ で積分ルミノシティ $300 \text{fb}^{-1} / \text{year}$ を 10 年間続け 3000fb^{-1} を取得することを目標にしていることより、LHC の稼働時間は $6 \times 10^6 \text{sec} / \text{year}$ 程度と計算でき、表 3.2 の総ヒット数は、この 10 年分のヒットに対応する。

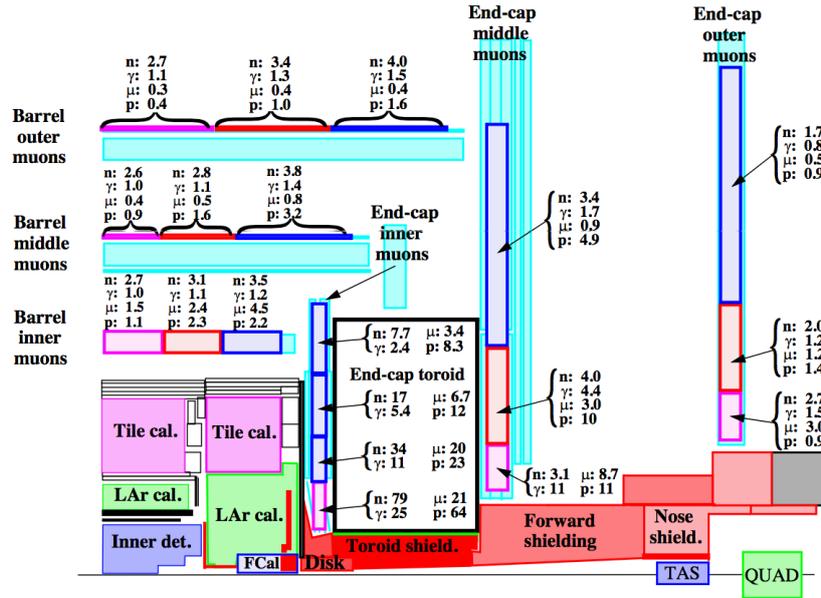


図 3.12 ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ において、ミュオン検出器におけるバックグラウンドのフラックスのシミュレーション結果 [7]: 単位は中性子と光子で kHz/cm^2 、ミュオンと陽子で Hz/cm^2 である。

表 3.2 MicroMegas 1 層に対するバックグラウンドの最大値の見積り [8]: シミュレーション結果を元にルミノシティ $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に外挿した値を示す。感度は、Geant4 によるシミュレーションにより 1MeV の γ 線を用いて得た値である。

粒子	フラックス [kHz/cm^2]	感度	ヒットレート [kHz/cm^2]	総ヒット数 [/cm^2]
γ 線	375	4×10^{-3}	1.5	9×10^{10}

第4章

ガス検出器

4.1 放射線と物質の相互作用

4.1.1 荷電粒子

荷電粒子が物質に入射すると、荷電粒子のほとんどのエネルギーは物質中の原子とのクーロン相互作用により、原子を電離させ電子イオン対の生成、もしくは励起させるために使われる。この際に荷電粒子が損失するエネルギーは以下の Bethe-Bloch の式で与えられる。またこの式の記号の意味を表 4.1 にまとめる

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

表 4.1 Bethe-Bloch の式に含まれる記号一覧

記号	意味	値
c	光速	299792458 [m/s]
m_e	電子質量	0.511 [MeV]
e	電気素量	$1.60217662 \times 10^{-19}$ [C]
E	入射粒子のエネルギー	
x	入射粒子の移動距離	
v	入射粒子の速度	
z_e	入射粒子の電荷	
Z	物質の原子番号	
N	物質の単位体積あたりの原子の個数	
I	物質のイオン化エネルギー	

入射粒子 μ^+ に対して吸収物質を Cu とした時、入射粒子の $\beta\gamma$ とエネルギー損失の関係を図 4.1 に示す。図 4.1 の β, γ はそれぞれ $\gamma = v/c$, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ である。

エネルギー損失は、速度が小さいとき 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 4.1 中の $1 - v^2/c^2$ の寄与が支配的になり増加する。 $\beta\gamma$ が 1000 より低く、制動放射の無視できる範囲で入射した荷電粒子ではエネルギー損失が増加しつつもほぼ一定に落ち着き、このような範囲の粒子を最小電離損失粒子 Minimum Ionizing Particle (MIP) と呼ぶ。ATLAS において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。

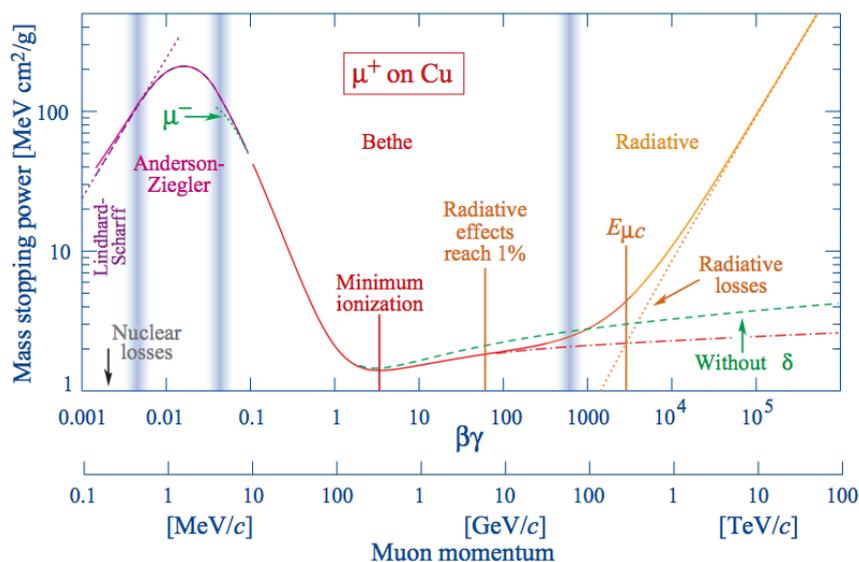


図 4.1 銅における μ^+ のエネルギー損失 [10]

4.1.2 光子

光子と物質の相互作用には 3 種類あり、光子と物質 (C と Pb) の相互作用の断面積の関係を図 4.2 に示す。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し、その相互作用は光子のエネルギーの低い方から光電効果、コンプトン散乱、電子対生成に分かれる。

●光電効果

光電効果では物質中の軌道上に束縛された電子を光電子として光子が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、光子のエネルギーが

ら束縛エネルギーを引いた分のエネルギーを持った光電子が放出される。この反応は原子核に最も近い K 殻の電子が反応しやすく、放出された電子の空孔は外側の電子や自由電子によって埋められる。またその時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、またはオージェ電子が放出される。検出器内でオージェ電子が放出された場合は、そのほとんどの場合エネルギーを検出器内に落とし、元々の光子のエネルギーが検出される。特性 X 線の場合は検出器の外に逃げた場合は、元々の光子のエネルギーをから特性 X 線のエネルギーを差し引いたエネルギーが検出される。

反応断面積は原子番号の 5 乗に比例する。電子を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。

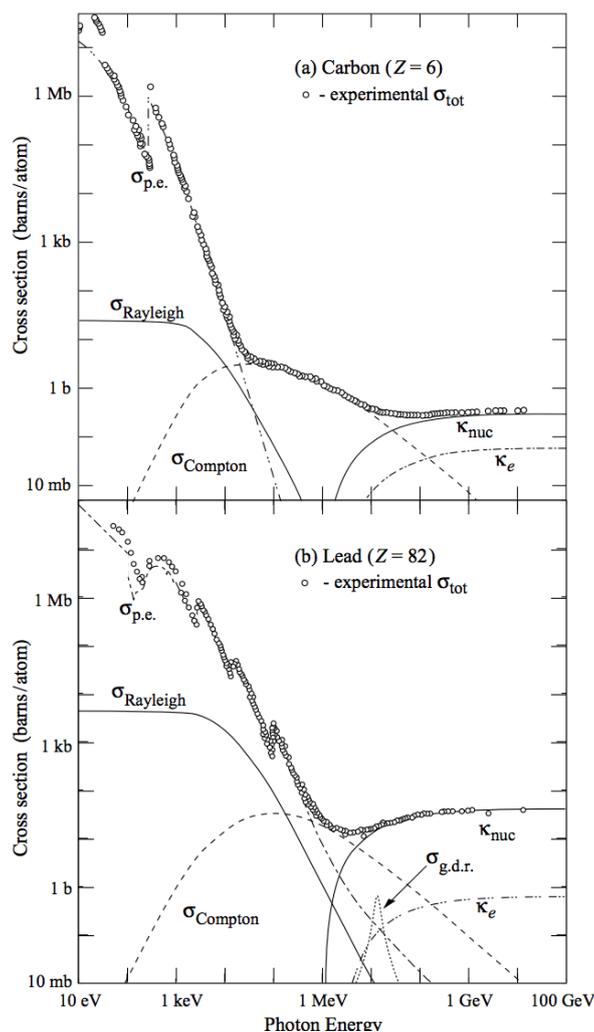


図 4.2 光子と炭素・鉛の相互作用の断面積 [10]: $\sigma_{p.e.}$ は光電効果、 $\sigma_{Rayleigh}$ は原子のイオン化や励起 伴わないレイリー散乱、 $\sigma_{Compton}$ はコンプトン散乱、 κ は電子対生成を表す。それぞれの相互作用の断面積は、光子の入射エネルギーと物質の原子番号に依存する。

●コンプトン散乱

コンプトン散乱は光子と電子による非弾性散乱現象である。そのため入射光子は電子に与えたエネルギーの分だけ低いエネルギーをもつ光子になる。式は (4.2) のようにあたえられ、反応断面積は原子番号に比例する。散乱された電子のエネルギー分布は散乱角によって決まり、光子と電子が正面衝突を起こした場合に電子は最大のエネルギーを持つ。またその時の電子のエネルギー値をコンプトンエッジと呼ぶ。式中の記号の意味を表 4.2 にまとめる

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

表 4.2 コンプトン散乱の式に含まれる記号一覧

記号	意味
E'_γ	散乱後の光子のエネルギー
E_γ	光子の入射エネルギー
θ	光子の散乱角を

●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である $2 m_e c^2 = 511 \times 2 \text{ keV}$ を超えるときに起こる反応で、物質中の電磁場により、光子が消滅し、エネルギーが電子と陽電子の対を生成させる反応である。

4.2 ガス検出器の原理

ガス増幅には大きく分けて電離・ドリフト・増幅の3つのプロセスがある。

●電離

ガス検出器の第一段階である電離では、検出器に主成分の希ガスとともに多原子分子のガスを混ぜたものが用いられる。検出器に入射した放射線は、ガス中の原子の電子を電離し、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、またガスの種類にも依存する。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、電場をかけて電子をドリフトさせこれを防ぐ。希ガスを用いるのは電離した原子から電子を吸着し陰イオンになるのを防ぐためである。

●電子のドリフト

電離させられた電子とイオンは電場の影響により電子は陽極、イオンは陰極へとドリフトされる。ドリフトされた電子はガス中の原子と衝突しエネルギーを落とし、電場によってまた加速されるということを繰り返し移動していく。この時の電子のドリフト速度と拡散はガスの種類に依存する。

●増幅

ガス原子との衝突時に、電子の運動エネルギーがガス原子のイオン化エネルギーを超えると、ガス原子が電離され電子がはじき出される。この電子も同じように加速されガス原子と衝突することで、連鎖的に電子の数が増えていく。この現象を電子雪崩と呼び、電子が増幅される。

4.3 MPGD (Micro-Pattern Gas Detector)

MPGD は、Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) などを前進とし、微細加工技術の発展と共に開発された放射線検出器である。従来の検出器では高レートの放射線環境下において、増幅したイオンが電極であるワイヤーの周囲に蓄積し、空間電荷が増幅率の低下を引き起こしたり、イオンの長いドリフト時間で検出器の不感時間が大きくなったりする問題があった。MPGD では μm オーダーピッチの構造で解決した。以下に主な MPGD を示す。

●GEM (Gas Electron Multiplier)

GEM は絶縁体であるポリイミドの層の両面に銅製電極を設け、直径 $100\mu\text{m}$ ほどの小さな穴を規則的に多数開けた構造をしている。図 4.3 に表面の構造を示す。両面を異なる電極にすることで図 4.4 のように穴の中には強い電場が生じ、この中を引き寄せられた電子が通過することによってガス増幅を起こす。この時、一層での増幅率を抑え、多層構造にすることで、放電による電極破壊の抑止と求める増幅率の両方を実現している。

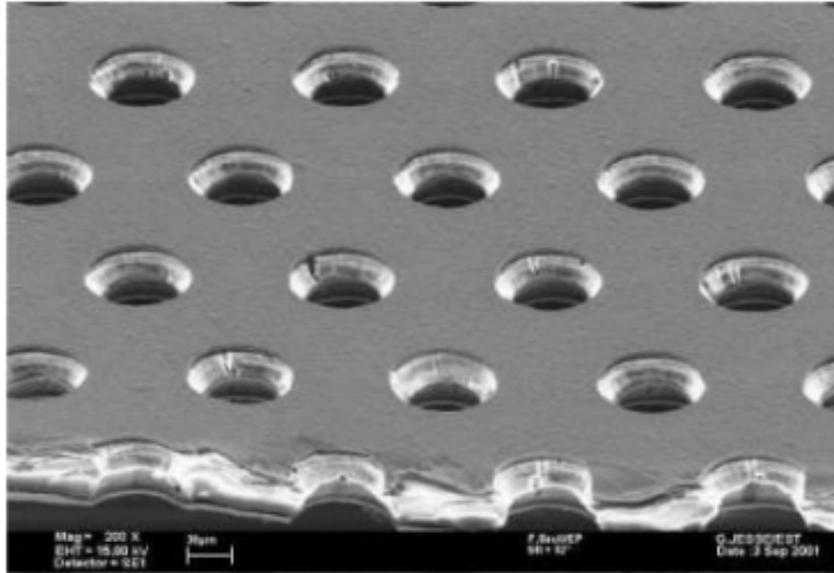


図 4.3 GEM の表面構造[12]: $140\ \mu\text{m}$ の間隔で直径は $70\ \mu\text{m}$ の穴が並んでいる。

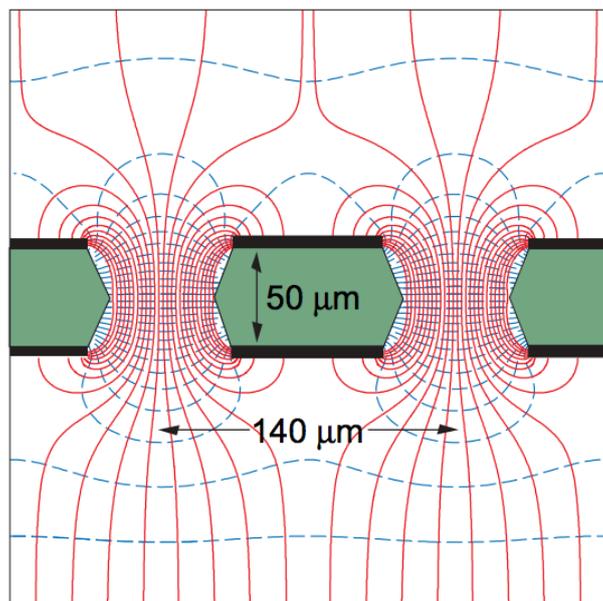


図 4.4 GEM の電場構造 [13]: 穴を通り抜ける際に電子が増幅される。

● μ -pic (Micro Pixel Chamber)

図 4.5 に示す μ -pic は、ポリイミドの絶縁基盤上に円状の穴をあけたストリップの陰極を並べ、円状の穴の中の中心部に陽極ピクセルを置いた構造である。絶縁層の裏側には陽極ピクセルと繋がった陽極ストリップが並んでおり、陰極ストリップはそれに対し垂直に配置されているため、2次元位置情報を取得することができる。

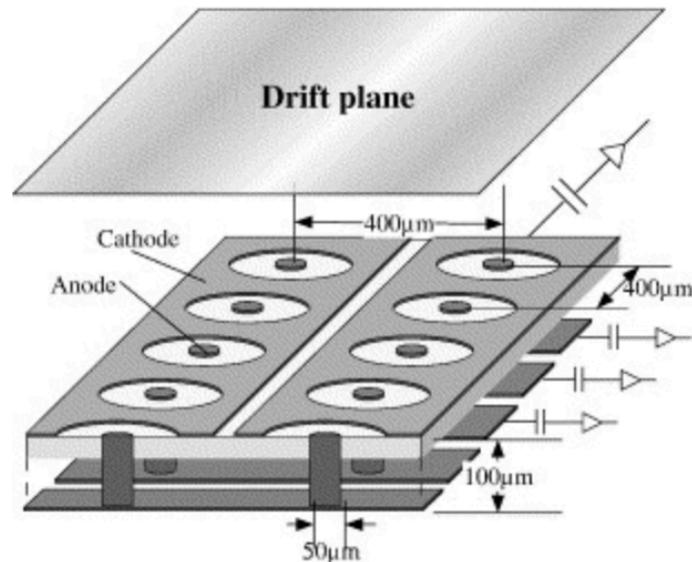


図 4.5 μ -pic の構造 [14]: ピクセル単位で増幅し、陽極と陰極ストリップによる二次元読み出しが可能である。

● MicroMegas (Micro-Mesh Gaseous Structure)

図 4.6 に示す MicroMegas は 1 次元読み出しのガス検出器である。ドリフト領域と増幅領域とを分け、増幅領域の厚さを小さくすることで、高ヒットレート環境下で問題になっていたイオンの回収に時間に優れていることが最大の特徴である。領域はそれぞれの数 mm オーダー数百 μ m オーダーで電場の大きさも異なる。2つの領域は基盤上につけられたピラーによって支えられたメッシュによって区切られている。次節で ATLAS NSW 用に開発した MicroMegas の詳しい説明をする。

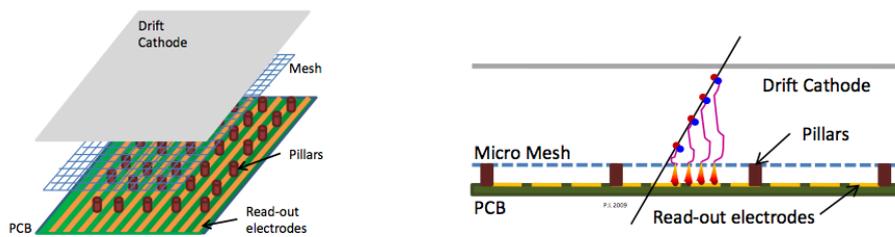


図 4.6 MicroMegas の構造[7]: 絶縁体のピラーによって支えられたグラウンドメッシュにより、ドリフト領域と増幅領域に分けられている。

4.4 ATLAS NSW 用に開発した MicroMegas

従来の MicroMegas には放電に対する問題があり、MIP の粒子をほぼ 100% 検出するためには $O(10^4)$ のゲインが必要であるが、増幅された結果の電子数が Raether limit と呼ばれる 10^7 個を超えると陽極において放電が発生するようになる。

そのため入射した荷電粒子が 1000 個ほどの電子を電離させると、放電に結びつく。MIP 粒子であれば電離する電子は 50 個ほどであるが、LHC のようなハドロン衝突型加速器においては、中性子によって叩き出された原子核や、 α 粒子などは放電を生じさせるのに十分な数の電子を電離させる。

この放電の問題を解決するために、図 4.7 に示された陽極読み出しストリップ上に絶縁層を介し、高抵抗ストリップを用いた Resistive MicroMegas が NSW 用に開発された。これにより、増幅領域で増幅された電子は読み出しストリップに直接落ちることはなく、高抵抗ストリップに落ちる。高抵抗ストリップ上に誘起された電荷を読み出しストリップが読み出すことによって信号が得られる。高抵抗ストリップの抵抗は大きい方が放電を抑えられるが、大きすぎると電圧降下により、求めるゲインを得ることができなくなってしまう。そのため NSW で用いられる Resistive MicroMegas では、ストリップの抵抗値を $20 \text{ M}\Omega / \text{cm}$ になるように設定されている。NSW 用 MicroMegas のパラメータを図 4.8 に示す。

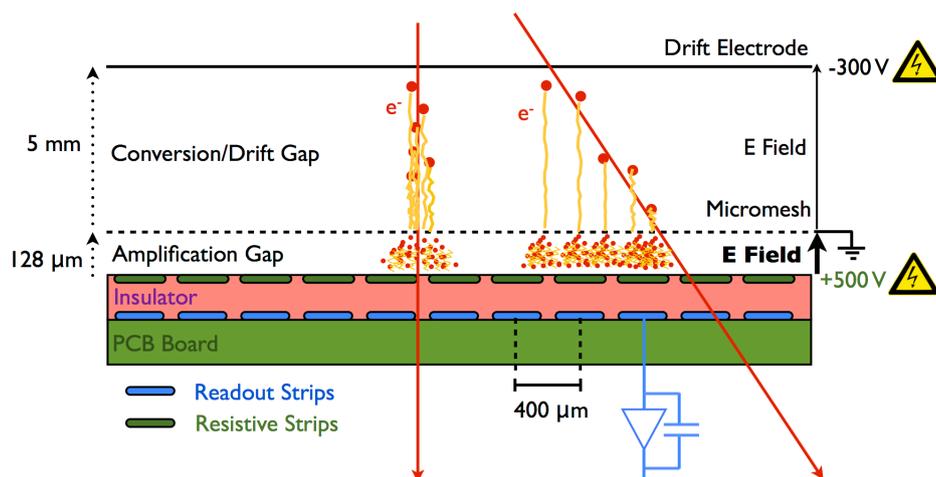


図 4.7 Resistive MicroMegas の構造[11]：図 4.6 で示した一般的な MicroMegas の読み出しストリップの上に絶縁層を介して高抵抗ストリップを加えている。

Item/Parameter	Characteristics	Value
Mesh	Stainless steel separate from readout board	325 lines/inch
Amplification gap		128 μm
Drift/conversion gap		5 mm
Resistive strips	Interconnected	$R = 10\text{--}20 \text{ M}\Omega\text{m/cm}$
Readout strip pitch		0.425–0.445 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 V
Amplification field		40 kV/cm
Drift field		600 V/cm

図 4.8 NSW で使用される Resistive MicroMegas のパラメータ[7]

4.5 放射線による検出器の劣化

ATLAS のような実験では高フラックス下において長期間検出器を取り出せないまま使用し続けることになっている。このような環境で検出器を使用し続けるには検出器の劣化を考える必要がある。MWPC のようなワイヤー構造を持つ検出器では長期間の使用により図 4.9 に見られるような付着物がつくことがある。これはガスの主成分である炭化水素がワイヤー表面上で重合したものと考えられている。このように付着物が見られる場合、検出器の性能を低下させる危険性がある。先行研究[19]で行われたように、Si が使われているガステーブや O-ring 由来のものと思われる SiO₂ が、HL-LHC 80 年分の γ 線照射後に検出器表面に付着し、表面抵抗値が数十倍ほど増加していることも確認された。



図 4.9 炭化水素の重合によって劣化したワイヤー[15]

第 5 章

MicroMegas 試作器

5.1 量産型試作機の仕様

我々、日本 MicroMegas チームは NSW で使用される高抵抗ストリップが印刷された Resistive Foil の製作を担当している。2016 年 5 月から製造が始まり、2017 年 9 月に 2000 枚の製造・検査が終了した。この Resistive Foil の性能を評価するために、同様の素材・製法で作製された小型試作機のエイジングテストも同時並行で行われた。本論文でも、MicroMegas 小型試作機の性能の評価を論ずる。

5.2 小型試作機

ATLAS 実験で用いられる MicroMegas は高抵抗ストリップの大量生産段階に入っているが、量産型の試験として何種類かの小型試作機を作製している。10 cm × 10 cm の有感領域を持ち、今までには検出器のパラメータを変えて多数の小型試験機が作製された。これまでに作製されたチェンバーを図 5.1 に示す。

チェンバーの命名規則はアルファベット・番号であるが、J の頭文字は日本で作製されたという意味で Japan の頭文字である。また番号は若いほど前に作製された試験機であることを示す。アルファベット mm 番号のものは 2 次元読み出しが可能な MicroMegas を指す。

グラウンドメッシュの構造には 2 種類あり、Bulk 型、Floating Mesh 型がある。Bulk 型ではピラーにグラウンドメッシュが挟まれ固定されている、そのために増幅領域も固定され安定した増幅率が供給できるが、製造過程や動作中にゴミの混入などがあつた場合に取り出しにくいこと、また検出器表面の観察などがしにくいこと、本番と同じ型を用いることなどから、今回は Floating Mesh 型を検出器に用いた。これは静電気力によってメッシュをピラーに貼り付け

るものである。また、高抵抗ストリップは電圧供給部から遠い部分にも電荷が供給されるために、途切れても電圧を供給できるようにするために図 5.2 に見られるラダー構造で繋がっている。

今回の実験で用いた J31, J32, J34 は NSW に用いられる MicroMegas と同じ高抵抗ストリップ素材の ESL 社製カーボンペーストを用いて、パターン形成をしたスクリーンに炭素を混ぜたインクを押し出す方法であるスクリーンプリントを用いて印刷し、IR200 によるキュア（赤外線焼き付け）も NSW の量産と同じ手法で使用される方法で行なっている。また先行研究で γ 線照射後に Si が表面に付着していたことを踏まえ、Si 製ではない O-ring やガスチューブを用い、今までアラルダイトで貼り付けていた 50 μm のカプトンの window を直接 O-ring で抑えつけ、ガスコネクタもアラルダイトの使用を変更し、内部の動線に被覆を使わず、フレームの絶縁を保つためのテープを避けるなどの改善を行った。そのほかにもメッシュを固定するためのメッシュフレームを抑える形に変更した。他だしフレームに G10 というシリコンを含んだ素材を使っていることが発覚したため、これについては注意しなければならない。

ここで MicroMegas 小型試験機の写真を図 5.3 に示す。写真では手前にアノードとカソードの電圧供給コネクタが写っている。NSW に用いられるドリフト用の電極には銅板を用いるが、小型試作機では線源を用いた実験を可能にするため、X 線などを通し易いメッシュを用いたり、G10 素材の影響を抑えるために、Al Prate が用いられりしている。図 5.3 (a),(b)では小型試作機のドリフト電極であるメッシュと Al Plate が写されている。図 5.3 (c)は電位が 0 V のグランドメッシュ。図 5.3 (d)は高抵抗ストリップが印刷されたフォイルの写真である。

Type	Resistive strip type	Resistive strip pitch	Amp. gap	Mesh	Comment
J1/J2	Print Screen	400um(Ladder structure)	100um	Bulk	
J3/J4	Sputter	200um(Ladder structure)	128um	Bulk	
J5/J6	Sputter	200um(Ladder structure)	128um	Floating	
J7/J8	Sputter	400um	128um	Floating	N-dope in sputter
J9/J10	Sputter	400um(Ladder structure)	128um	Floating	
J11-13, 17	ESL Screen Print	400um (Ladder)	128um	Floating, 20um diameter, 290lpi	EN Kapton
J14-16, 18	ESL Screen Print	400um (Ladder)	128um	Floating	HN Kapton
J19/J20	ESL Print Screen	400um(Ladder)	100um	Floating	EN Kapton
J21-J24	-	-	-	-	-
J25-J28	Sputter	full coating	128um	Floating	EN Kapton
J29-32	ESL screen print	400um	128um	Floating	EN Kapton (IR200 cure)
J33-J34	ESL screen print	400um	128um	Floating	EN Kapton (IR200 cure)
Jmm1-2	Sputter	250um(Ladder)	128um	Floating	2D (Tmm-like)
Jmm3-4	Sputter	full coating	128um	Floating	2D

図 5.1 作成された MicroMegas 小型試作機の詳細 [16]：型によって高抵抗ストリップの貼るかたやストリップの形、ピッチなどが異なる。

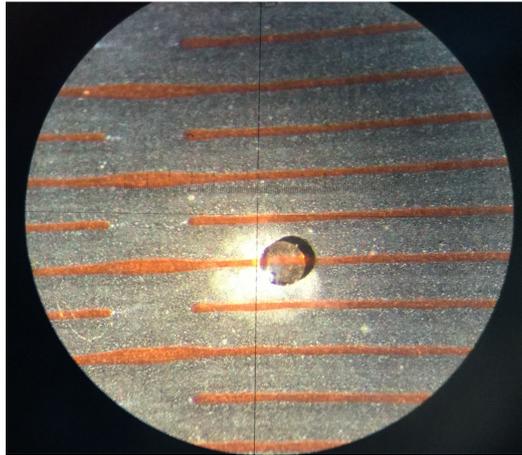
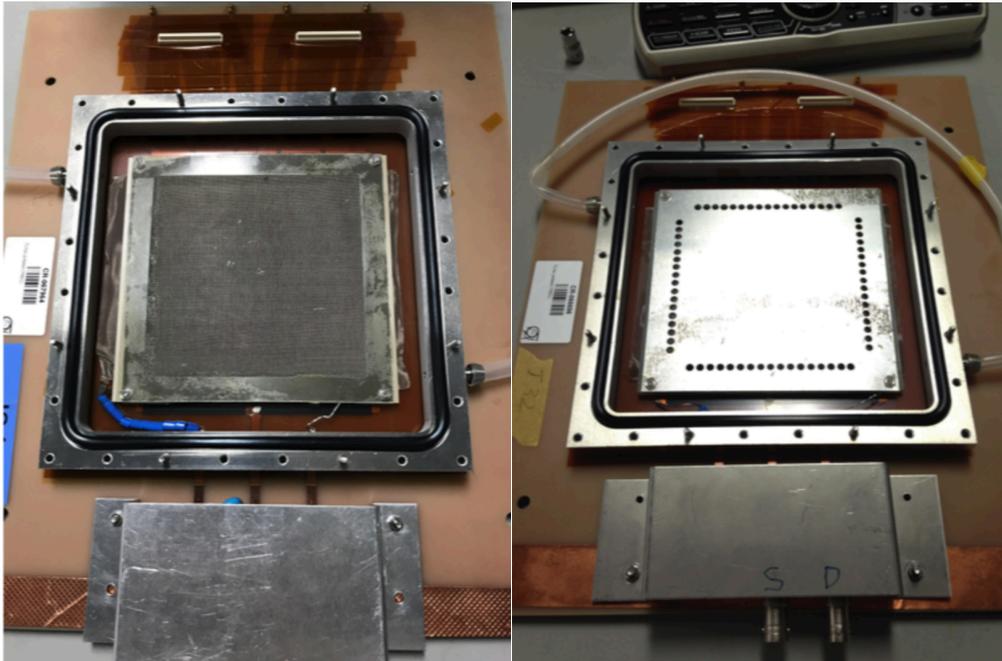
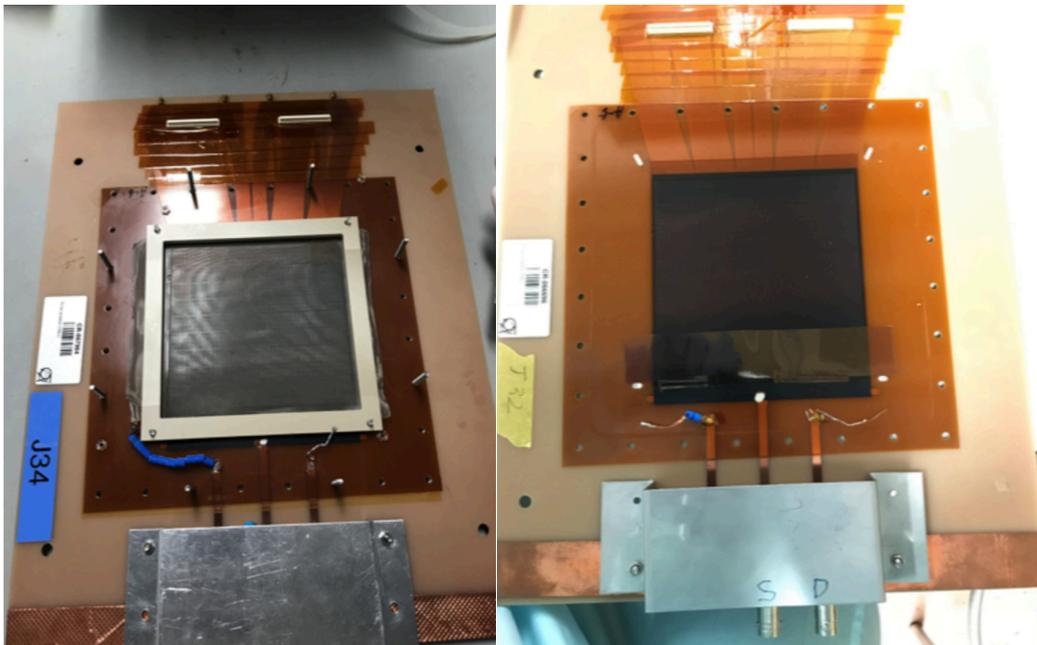


図 5.2 高抵抗ストリップのラダー構造：写真の灰色の部分が高抵抗ストリップ、茶色の部分は絶縁体のカプトンである。高抵抗ストリップをラダー構造にすることによって、ストリップが切れた場合でも電流を流れるようにすることができる。



(a) ドリフト電極のメッシュ

(b) ドリフト電極の Al Plate



(c) グラウンドメッシュ

(d) 高抵抗ストリップとピラー

図 5.3 MicroMegas 小型試験機を各層を上から見た写真

第6章

γ 線を用いた耐久試験

HL-LHC ではルミノシティの増加により、バックグラウンドの増加が予想される。そのため、NSW に挿入される MicroMegas 試験機の長期的な動作確認を行うために γ 線を用いた耐久試験を行った。今回は、量産型として新たに変更された ESL のペーストとキュアの方法と同じ条件で作成したフォイルの劣化試験をするのが目的である。具体的には J31, J32, J34 を用いて、照射中のカレント測定、照射前後の増幅率測定、照射前後の表面抵抗値の測定、照射領域と非照射領域での表面観察を行った。

6.1 γ 線照射施設 GIF++

γ 線照射試験は、CERN にある Gamma Irradiation Facility ++ (GIF++) で行った。 γ 線源は強度が 14 TBq の ^{137}Cs が用いられている。HL-LHC の高ヒットレート耐性、バックグラウンド環境下における性能評価、Aging 試験などを目的として作られた施設であるため、HL-LHC の実験期間に相当する線量を数ヶ月と短い時間で実現することが可能である。照射装置には、角度補正レンズとフラックス調整用フィルターが取り付けられており、照射装置の窓と平行の面ではフラックスが均等になるよう補正している。

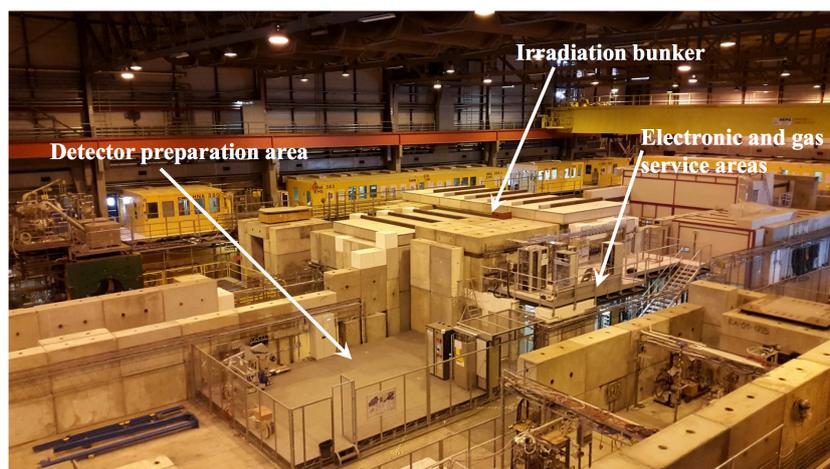


図 6.1 GIF++の写真[17]

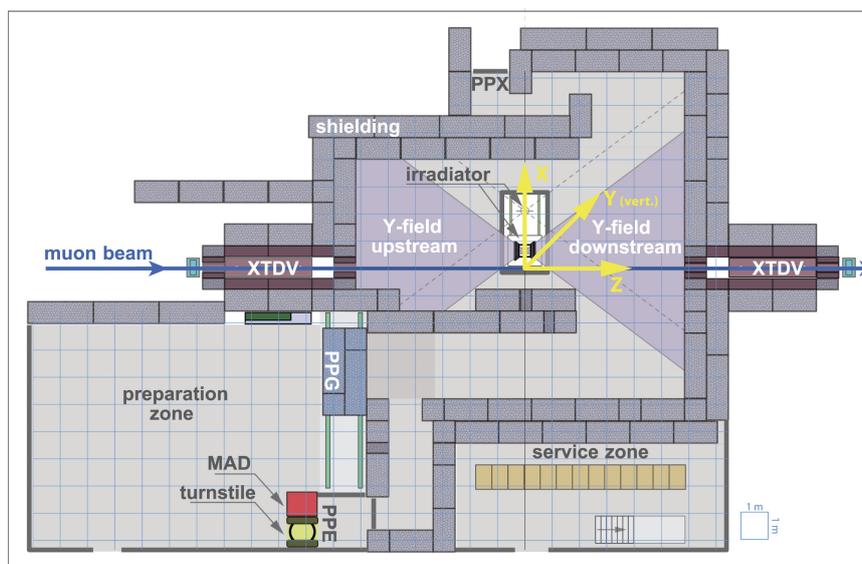


図 6.2 GIF++の概要図[18]：照射場所は薄紫色で示した箇所であり、全体で 100 m² であるため、幅広い大きさの検出器の同時試験が可能である。

6.2 照射中のカレント測定

●セットアップ

今回の照射試験では線源から 1 m の距離に試験機を設置した。設置した様子を図 6.3 に示す、左側の緑色の物体の中に線源が固定され、1 m 離れたところに MicroMegas 小型試験機のポリリミドの窓がある表向きを線源に向けて設置されている。またカソードとして J31, J34 は Al Plate, J32 は mesh を用いている。

図 6.4 に示す線源からの距離とフラックスの関係式より、線源から 1 m の距離でのフラックスは 130 MHz/cm^2 である。先行研究[8]より、表向き MicroMegas の γ 線に対する感度は 1.0×10^{-3} であるため、今回の γ 照射試験でのヒットレートは 130 kHz/cm^2 と予想される。ガスは NSW で用いられるのと同じ、 $\text{Ar} : \text{CO}_2 = 93 : 7$ の混合ガスを用いた。流量は 5 L/hour で常流した。ドリフト電場は -300 V 、アノード電圧を 580 V に固定し高抵抗ストリップに流れる電流の値を 1 秒おきに取得した。照射試験のスケジュールを表 5.1 にまとめる。



図 6.3 GIF++照射試験セットアップの写真：緑色の領域に線源が格納されている。検出器は線源から 1 m の距離に設置してある。

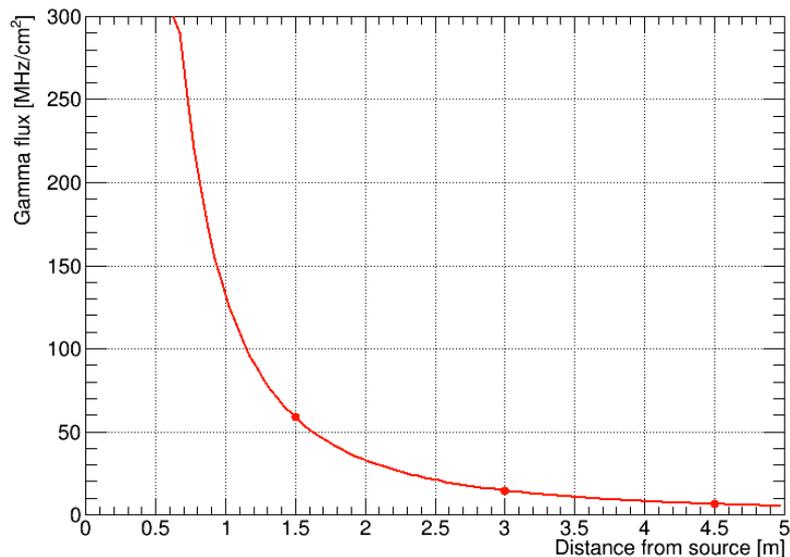


図 6.4 GIF++におけるフラックスの測定値を $1/r^2$ で fit したもの[20]：今回の試験では線源と検出器の距離は 1 m なので、 γ 線のフラックスは 130 MHz/cm^2 となる。

表 5.1 照射試験のスケジュール

小型試験機	ドリフト電極	期間 2017 年
J31	Al Plate	06/09 ~ 08/17, 08/22 ~ 10/10 (120 日間)
J32	メッシュ	04/26 ~ 06/03 (39 日間)
J34	Al Plate	06/09 ~ 07/04 (26 日間)

● 結果

図 6.5 ~ 図 6.7 に J31, J32, J34 の時間と電流の関係を示す。図のデータはアノード電圧 575 V - 585 V、attenuation はなしでイベントカットを行なっている。実験の結果、合計照射量は表 5.2 のようになった。

次に、今回の照射試験で HL-LHC の何年分の照射になるかを見積もる。HL-LHC の瞬間ルミノシティは $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、10 年間で積分ルミノシティ 3000 fb^{-1} を目標としている。よって実際の衝突時間は以下式より $6 \times 10^7 \text{ s}$ と計算できる。

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

また、前述した NSW における MicroMegas の最大ヒットレート 1.5 kHz/cm^2 と、Geant4 シミュレーションより得られた、 γ 線がガスギャップに落とすエネルギーの平均値が 10 keV という結果[8]より、HL-LHC においての γ 線のみ合計照射量は以下のように計算でき、値は 28 mC/cm^2 となる。

$$(\text{照射量}) = (\text{Rate}) \times (\text{Time}) \times (N_{\text{seed}}) \times (\text{Gain}) \times q_e \quad (6.2)$$

$$= 1.5 \times 10^3 [\text{Hz/cm}^2] \times 6 \times 10^7 [\text{s}] \times \frac{10 [\text{keV}]}{26 [\text{eV}]} \times 5000 \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}] \quad (6.3)$$

$$= 28 [\text{mC/cm}^2] \quad (6.4)$$

以上を踏まえて、より、今回の HL-LHC 照射相当年数は表 5.2 のように計算される。

γ 線照射中、試験機の電流は大きな変化はないが、図 6.8 で見られるように若干のふらつきが見え、これには大気圧と時間の図 6.9 から関係がありそうである。そこで、図 6.10 に示すように、任意で選んだ 9/24, 25 の気圧と電流の関係をみると、何かしらの相関が見えているが、原因は現在も調査中である。

電流値 I はシミュレーションで得られたガスギャップに落とすエネルギーが 10 keV であることを使うと予測することができ

$$I = (N_{\text{seed}}) \times q_e \times (\text{Gain}) \times (\text{Rate}) \times (\text{Area}) \quad (6.5)$$

$$= \frac{10 [\text{keV}]}{26 [\text{eV}]} \times 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}] \times 5000 \times 100 [\text{kHz/cm}^2] \times 100 [\text{cm}^2] \quad (6.6)$$

$$= 3 [\mu\text{A}] \quad (6.7)$$

であり、ほぼ期待どおりの電流値が得られているといえる。

今回の測定で小型試作に流れた平均の電流は、J31, J34 は $2.2 \mu\text{A}$ 、J32 では $3.4 \mu\text{A}$ と測定された。J34 に比べ J31 の電流は約 35% も低い理由は、J31 の表面で、 γ 線からの信号がうまく増幅されなかったためと考えられる。J31 の試作機では、 γ 線照射ののちに表面を確認したところ、図 6.11 に示すように目で黒色領域が見られた。これは試験機のドリフトメッシュが適当に張られておらず、たるんでしまったため、十分な増幅が得られず、高抵抗フォイル表面に正しく信号が落ちずに、変化が現れなかったことが考えられる。逆に、白色領域では電子が十分に増幅された結果、高抵抗フォイル表面に白色の変化が見られたと考えられる。このドリフト

メッシュが浮いてしまった黒色領域は目視で約 30%と考えられる。これより J34 の電流は J31 に比べ 35%ほど低いと予測できる。一方で J34 の電流値が低い理由は、J31 と同じようにグラウンドメッシュのたるみのせいで増幅が十分にされなかった領域があると予想されるが、照射量が少ないため、照射が不十分な領域を確認できなかった。

γ 線照射による電流値の低下を調べるため、大気圧が同じ条件で、照射初期と終盤での電流を調べた。照射開始時と終了時で J31 が同じ大気圧、966.0 hPa - 966.1 hPa の時のカレントを比較したところ図 6.12 に見られるように約 13%程度の変化が見られたが安定して動作をしていることを確認した。

表 5.2 各試験機の合計照射量

小型試験機	ドリフト電極	合計照射量[mC/cm ²]	HL-LHC 照射相当年数
J31	Al Plate	121	約 44 年
J32	メッシュ	32.3	約 12 年
J34	Al Plate	42.6	約 15 年

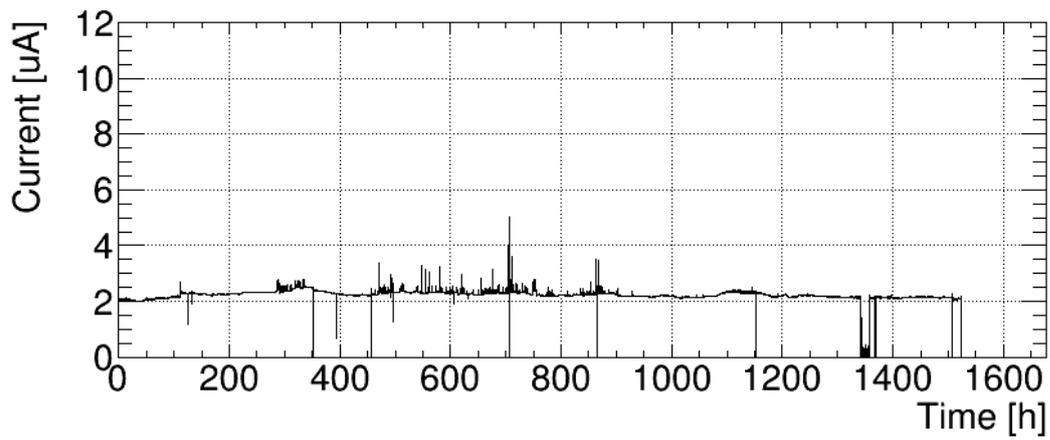


図 6.5 J31 のアノード電流の時間経過

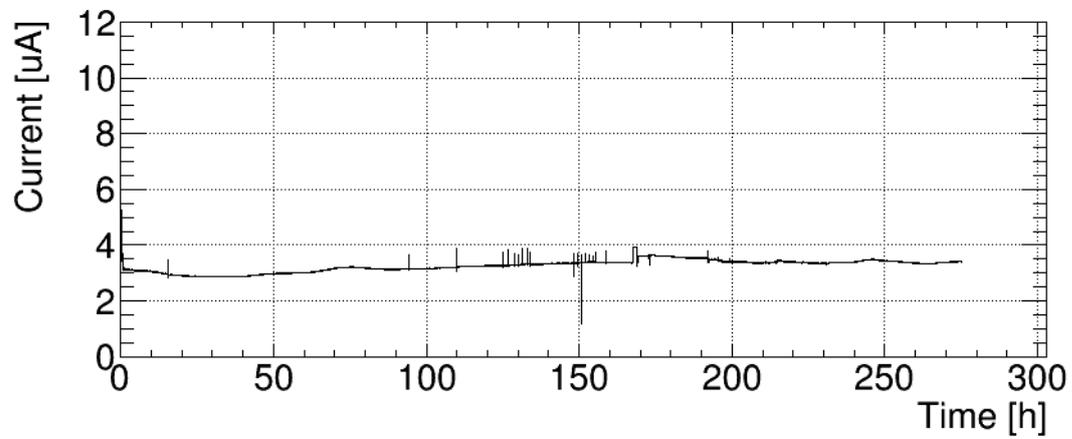


図 6.6 J32 のアノード電流の時間経過

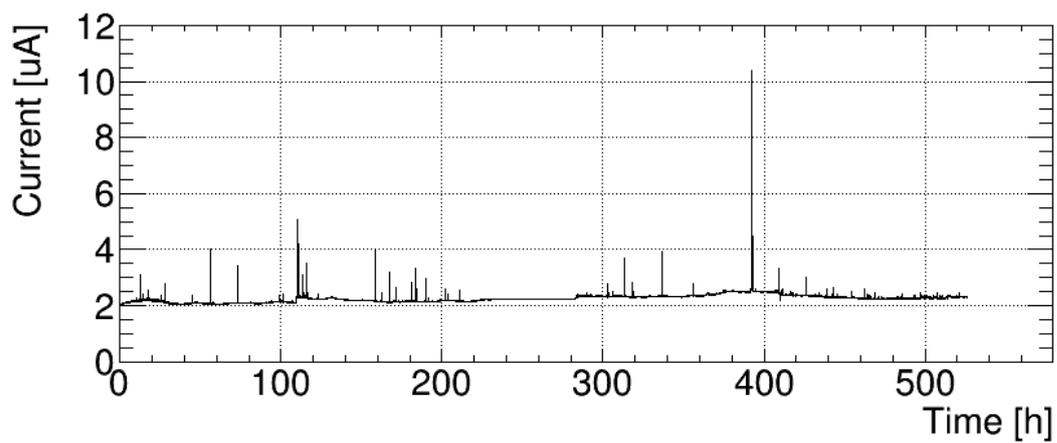


図 6.7 J34 のアノード電流の時間経過

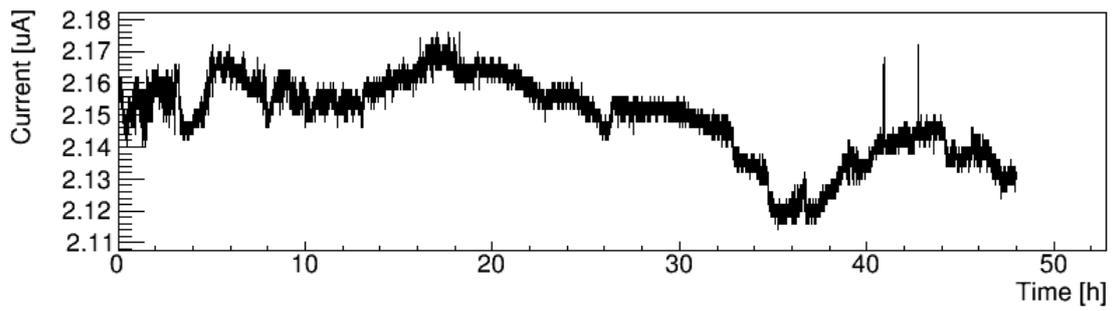


図 6.8 9/24, 25 の電流値の時間変化：図 6.9 に示す気圧との相関がみれる

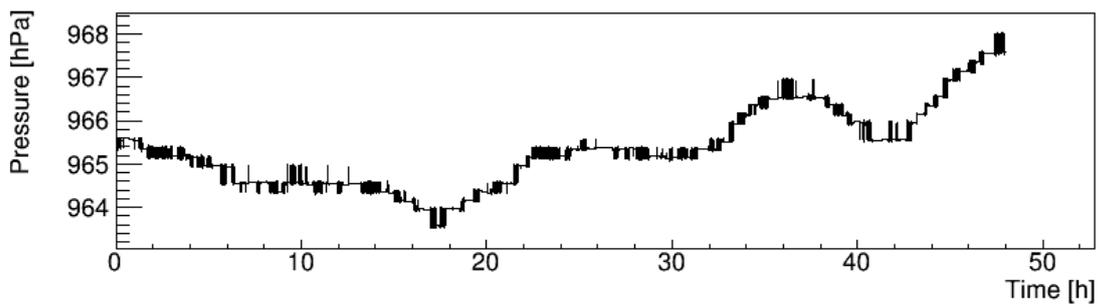


図 6.9 9/24, 25 の気圧の時間変化：図 6.8 に示す電流との相関がみれる

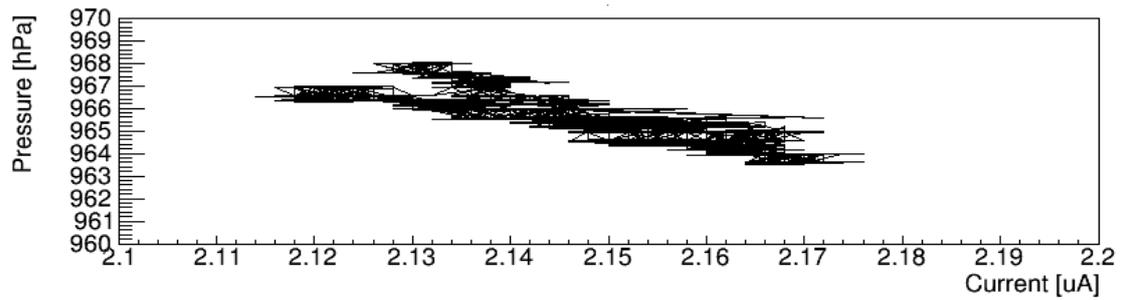


図 6.10 9/24, 25 の電流と気圧の相関：図 6.8 と図 6.9 の相関をみた



図 6.11 照射後の J31 の表面:表面に貼られているのはカプトンテープ

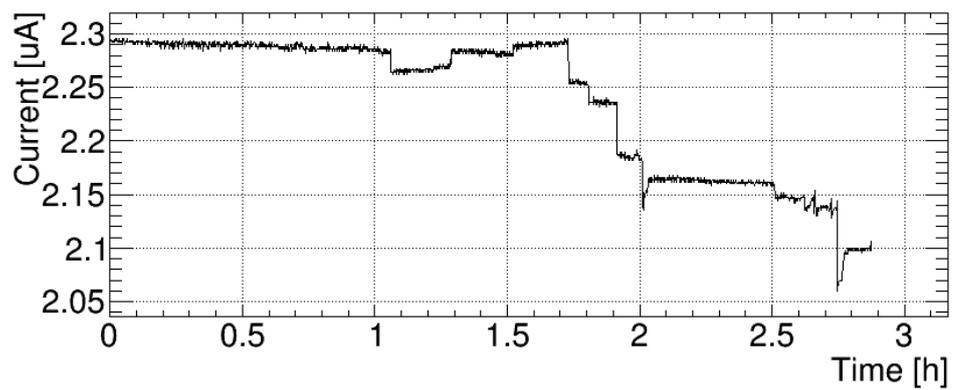


図 6.12 照射開始時と終了時で、J31 が同じ大気圧、966.0 hPa - 966.1 hPa の時のカレントを比較した :
図の前半部分は照射開始時、後半部分が終了時である。

6.3 照射前後の増幅率測定

●セットアップ

照射前後において、試験機の増幅率の変化を測定するために、図 6.13 にあるように、 ^{55}Fe を用いて増幅率を測定した。照射前における測定場所は神戸、照射後においては CERN で行なった。実験はいずれも大きな違いはなく、機器は Pre-Amp、Shaping Amp、MCA を用いて測定した。Pre-Amp には ORTEC PC142, Multi Channel Analyzer (MCA) には AMPTEK 社製の Pocket MCA 8000D を使用して測定した。Pre-Amp、Shaping Amp、で成形された信号の最大波高を MCA でカウントする。MCA で得られた波高の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。測定のセットアップの概要は図 6.14 に示す。ガスは NSW で用いられるのと同じ、 $\text{Ar} : \text{CO}_2 = 93 : 7$ の混合ガスを用いた。

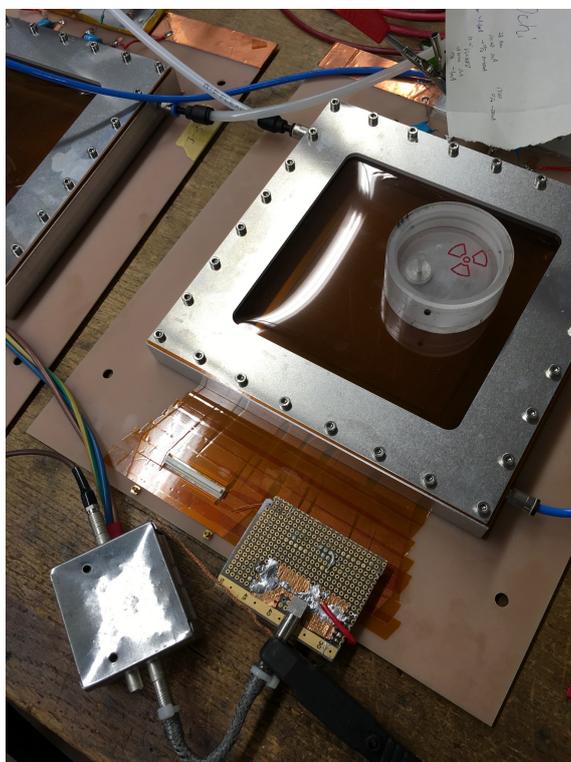


図 6.13 ^{55}Fe を使ったゲイン測定の様子

● キャリブレーション

セットアップを用いて得た電荷信号が MCA チャンネルのどこに対応しているかを知るためにパルスジェネレータを用いたキャリブレーションを行った。セットアップは図 6.15 に示す。パルスジェネレータの電圧値を変え $\Delta Q = C \times \Delta V$ の関係式を用いて、電荷と MCA チャンネルの対応関係を調べた。パルスジェネレータより 50mV, 100 mV, 200 mV, 300 mV, 400 mV の矩形波を出力し、出力電圧に対応した電荷量のヒストグラムを得る。電荷量と MCA channel より図 6.16 に示す校正曲線を得た。その結果、MCA Channel の値 x 、電荷量を y として

$$y = 0.0009x + 0.0028 \quad (6.8)$$

を得た。これにより増幅率が算出可能となる。

Gain Mesurement

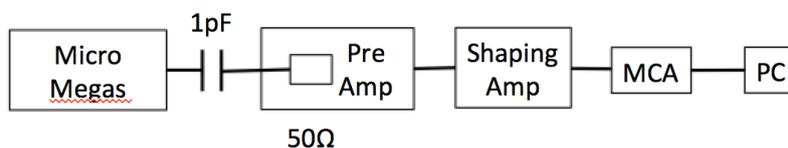


図 6.14 ゲイン測定の設定アップ

Callibration

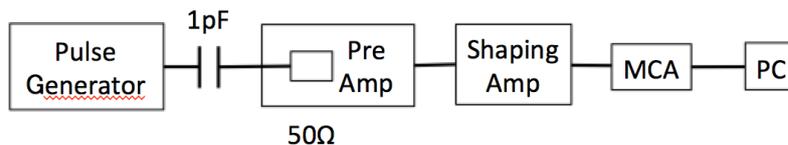


図 6.15 キャリブレーションの設定アップ

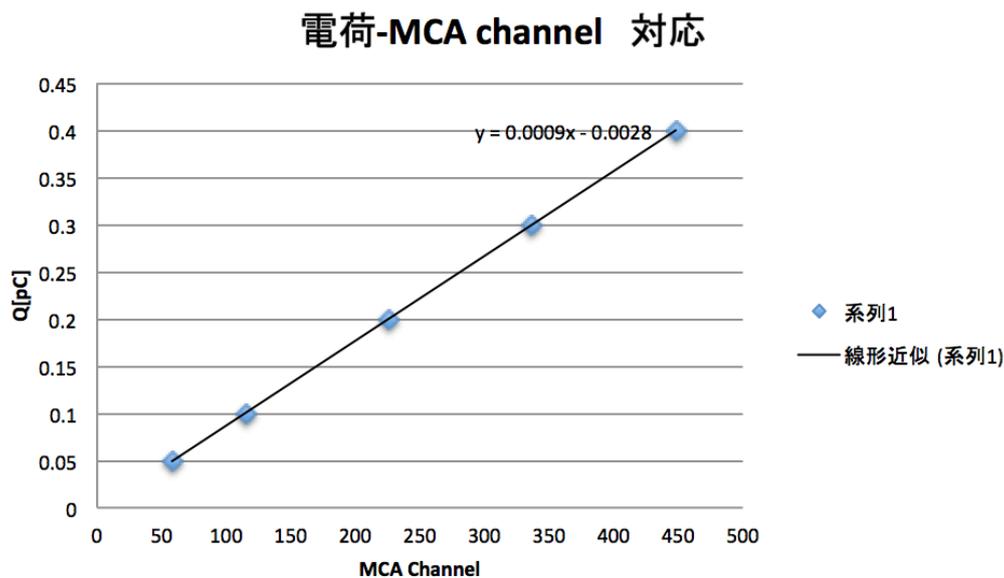


図 6.16 ゲインの校正曲線：横軸が MCA で測定されたヒストグラムの中心値、縦軸がパルスジェネレータで指定した短波形に対応する電荷量。

● 増幅率結果

^{55}Fe の信号の例として、J31 を用いてドリフト電圧 300 V、アノード電圧 580 V に設定した時の、MCA で取得したヒストグラムを図 6.17 に示す。

J31 の γ 線照射前後の増幅率測定の結果を図 6.18 に、照射前のゲインの値を分母とし、照射後のゲインの値を分子とした値を図 6.19 に示す。測定結果より、今回の照射実験において、HL-LHC γ 線約 44 年分相当の照射において MicroMegas のゲインは低下しないことが確認された。これは図 6.12 で議論した 13% 程度の電流の低下と矛盾するように思われるが、ゲインは測定場所や測定環境によって 10% ほど増減することが経験的にわかっているため、想定範囲内だと見込まれる。

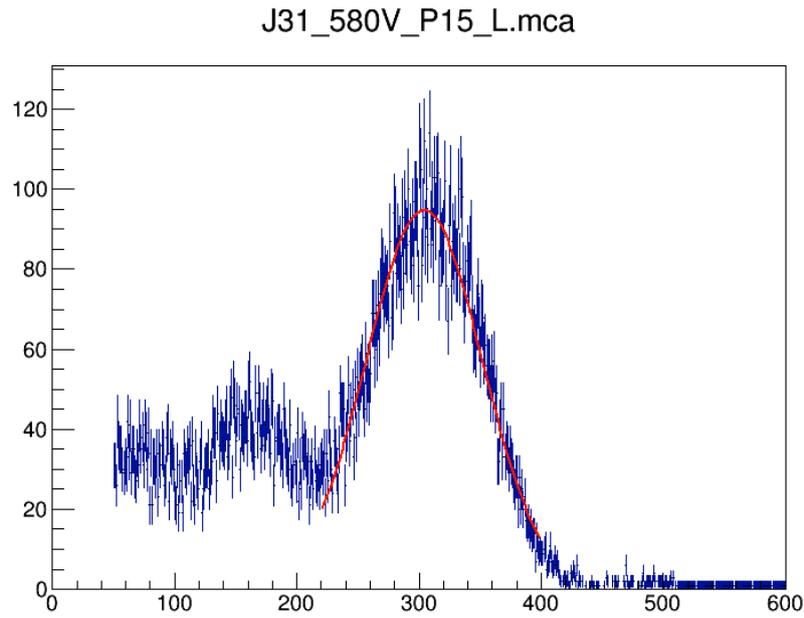


図 6.17 アノード電圧 580 V の時の ^{55}Fe の MCA のヒスタグラムをフィットしたもの : 5.9 keV のメインピークは MCA Channel において 306 付近にある。

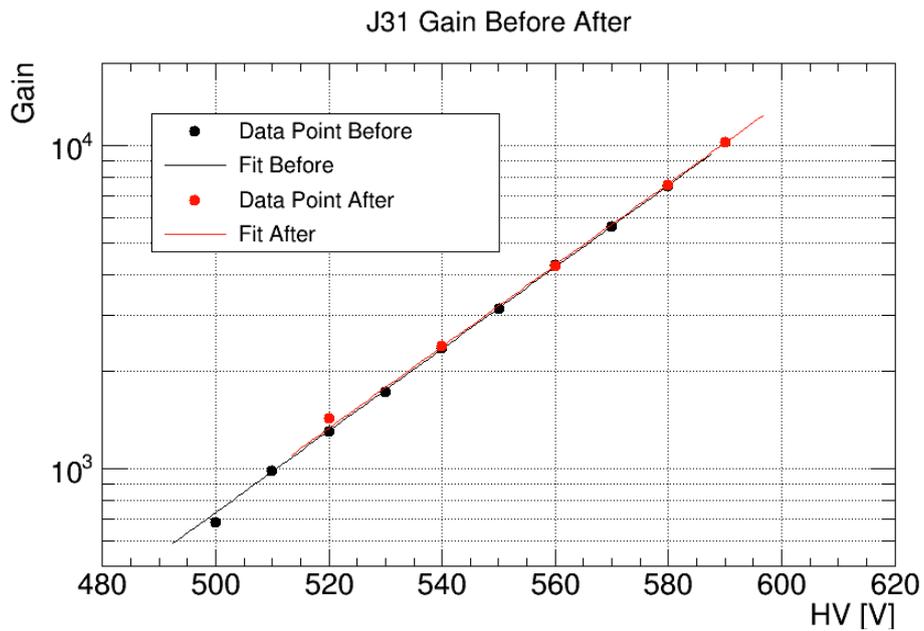


図 6.18 J31 のゲイン照射前後比較

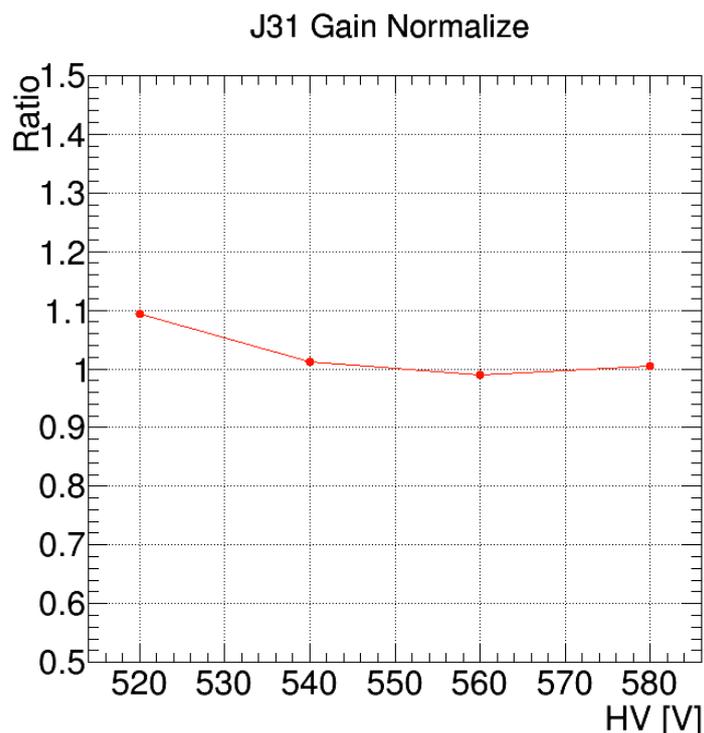


図 6.19 J31 のゲイン照射前後比較：分母に照射前、分子に照射後のゲインの値を取ったもの。

6.4 照射前後の表面変化

今回行った γ 線照射試験の後に、J31, J32, J34 の表面変化の有無を観察した。表面の元素分析を行うためにエネルギー分散型 X 線分光 Energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) を、表面の形状測定を行うために 3 次元形状測定レーザー顕微鏡と走査型電子顕微鏡 Scanning Electron Microscope (SEM) を、用いて測定を行った。測定場所は図 6.20 に示す三点である。図 6.20 は J31 についての 3 点だが、J32, J34 についてもほぼ同じ場所で測定をした。図 6.20 を見ると、J31.1, J31.3 で白化が見られた。これは γ 線の照射による影響と予想できる。逆に J31.2 の周りや、有感領域左端においての黒色領域では測定前と変色が見られず、これはグラウンドメッシュがピラーにうまくつかず浮いてしまったため、電子が増幅されていないためと予想できる。また図 6.21 に示す J34 の照射後の有感領域の写真では白黒領域などは見られない。

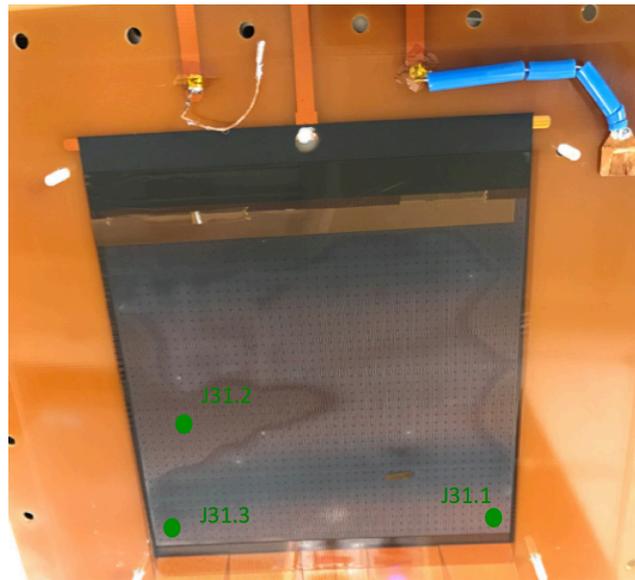


図 6.20 γ 線照射後の J31 の有感領域の写真:緑の点は表面の測定を行ったポイント : J31.1, J31.3 は照射が認められた白色領域、J31.2 は増幅が十分に行われなかった黒色領域。

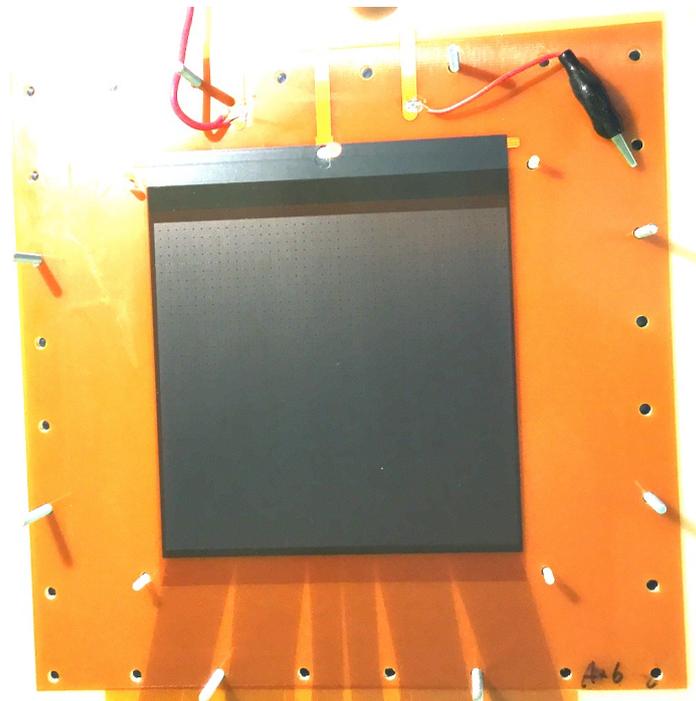
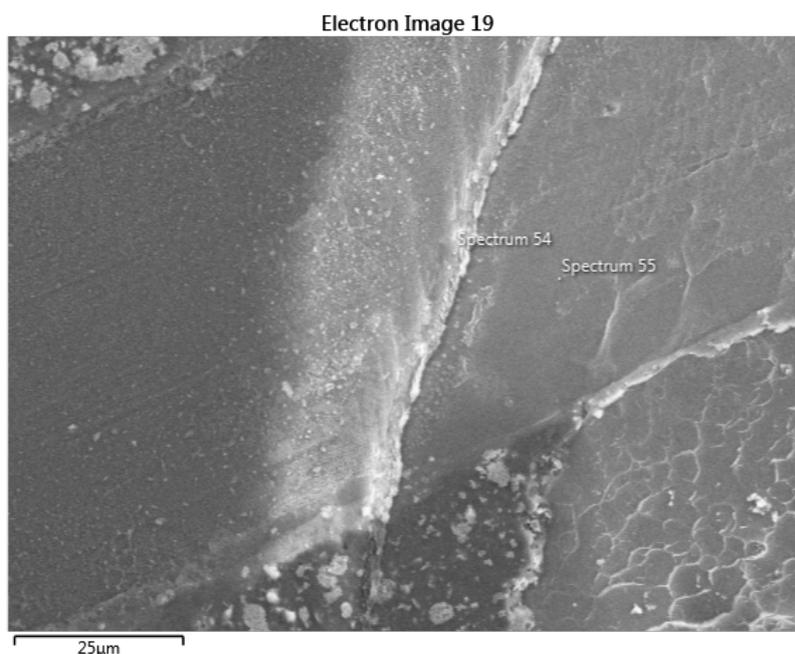


図 6.21 γ 線照射後の J34 の有感領域の写真

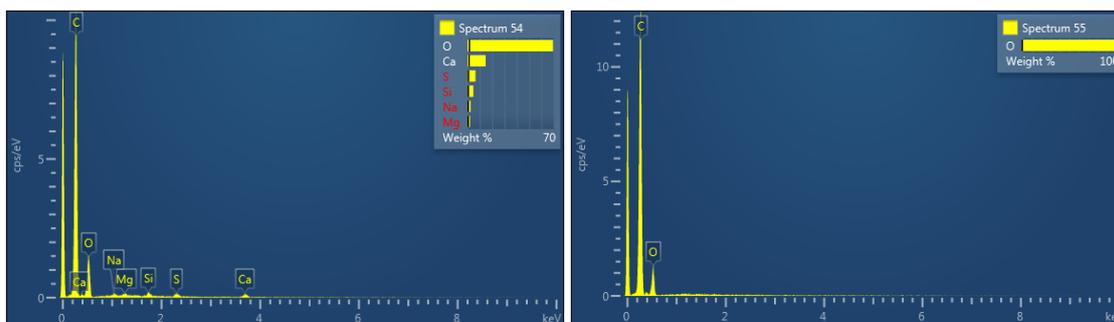
●EDX を用いた元素分析

電子線を対象物に照射した際に発生する特性 X 線を半導体検出器に導入し、発生したイオン対の個数とエネルギーから物体を構成する元素とその比率を測定する元素分析手法である。広いエネルギー範囲での測定が可能であるため、多数の元素を同時に分析することが可能である。

EDX を用いた J31.3 の γ 線照射領域と、照射後までピラーがあった、非照射領域のカプトン表面の分析結果を図 6.22 に示す。J31.3 は γ 線が約 44 年分照射された領域である。図 6.22(b) の Spectrum55 より、ピラーが立っていた非照射領域ではカプトンに含まれる C, O のピークが見られ、他の成分はあまり検出されていないことがわかる。図 6.22(a) の Spectrum54 の照射領域でも変わらず C, O のピークが見られ、少量の Na, Mg, S, Ca, Si の増加が見られた。この中で少量の Na, Mg, S, Ca は手で触ったことによる汚染であると考えられ、Si についてもごく少量のみが検出された。以上より、約 44 年間の γ 線照射でも、表面には大きな変化がなかったことがわかる。



(a)J31.3 のカプトン領域の写真、Spectrum と書いてある点の元素分析結果を以下の(b), (c)に示す。



(b)Spectrum54

(c) Spectrum55

図 6.22 J31.3 の EDX を用いた元素分析

- レーザー顕微鏡を用いた形状測定

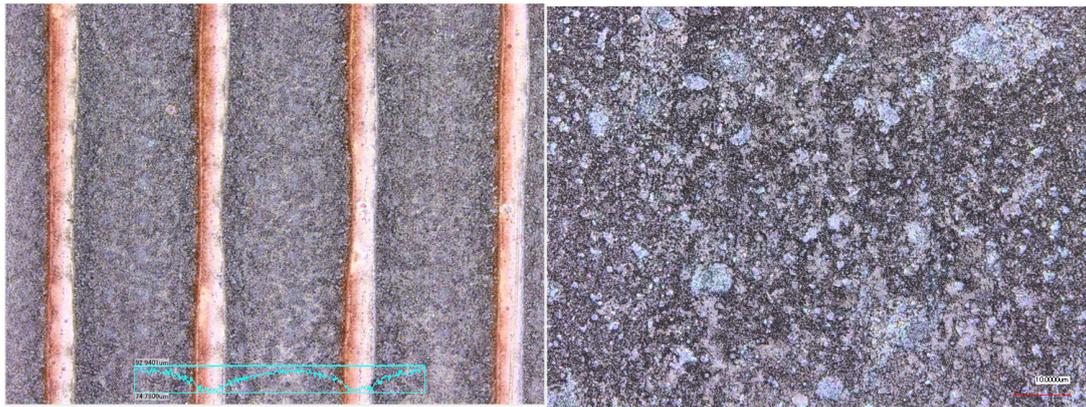
レーザー顕微鏡は図 6.23 に示す VK-X200 (Keyence 社) を用いた。レーザー光で高さの焦点を合わせ、白色光を用いて色情報を得るため、表面状態の細かな凹凸や色情報を見るのに適している。図 6.24, 図 6.25 に示す測定結果はそれぞれ、図 6.20 の J31.1 の白色領域と、J31.2 の増幅が行われなかった黒色領域の測定結果である。倍率は 10 倍, 150 倍でストリップの観察を行なった、10 倍は横の長さが約 1060 μm 、150 倍は横の長さが約 7 μm である。図中の青線は高さの測定結果を表している。また、茶色の部分が絶縁層であるポリイミド層、灰色の部分が高抵抗ストリップである。ストリップの高さは 15 μm - 20 μm ほどと確認できる。

照射前後では高抵抗ストリップに高さの変化を見ると、図 6.24, 図 6.25 の (b) の結果より、照射領域の表面の荒さが 2-3 μm 程度なのに比べ、非照射領域の表面の荒さが 5 μm 程度と大きくなっていることが確認された。更に詳しく観察するために 150 倍の測定画像を比較すると、非照射領域では滑らかな表面であるが、照射領域では結晶化した構造が見られる。これは図 6.24, 図 6.25 の (b) の結果から考えて測定の結果と矛盾すると考えられるが原因は調査中である。

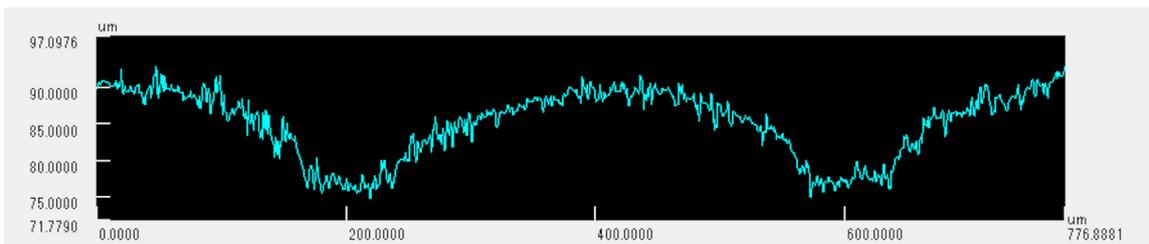
図 6.26 に示す先行研究[19]の非照射領域の高抵抗ストリップの表面と比べると、昨年の高抵抗ストリップ表面は 1 μm ほどギザギザしていたのに対し、今回のストリップは 5 μm ほど大きくギザギザと波打っていることがわかる。これは研磨過程に原因があると疑われるが、現状では理由は定かではない。



図 6.23 レーザー顕微鏡 VK-X200 (Keyence 社)

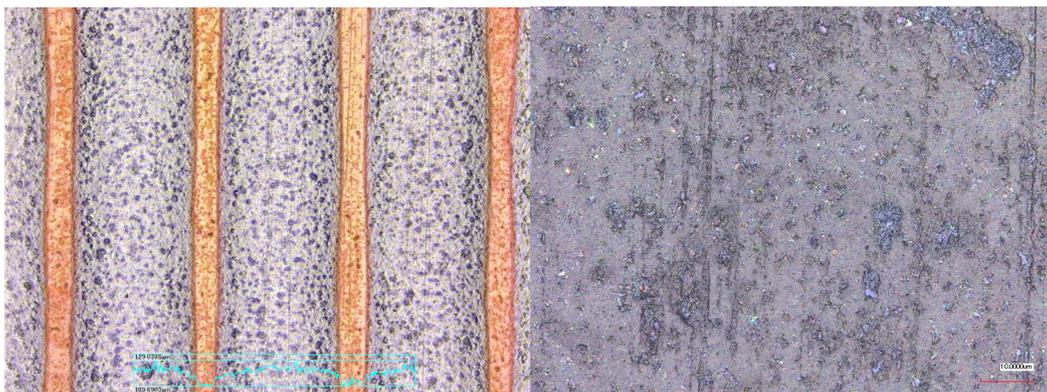


(a) 表面状態 左 10 倍, 右 150 倍

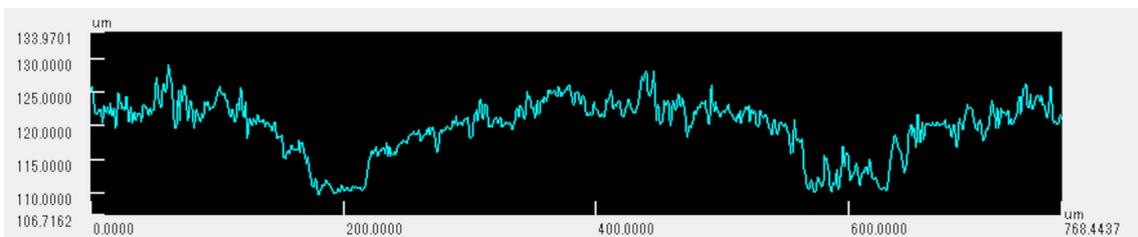


(b) 高さの測定結果 (a)における青い線で示した部分の高さ

図 6.24 レーザー顕微鏡で観察した約 44 年照射の点 J31.1 白色領域のストリップ表面



(a) 表面状態左 10 倍, 右 150 倍



(b) 高さの測定結果 (a)における青い線で示した部分の高さ

図 6.25 レーザー顕微鏡で観察した J31.2 のメッシュがたるんで増幅が十分に行われなかった領域

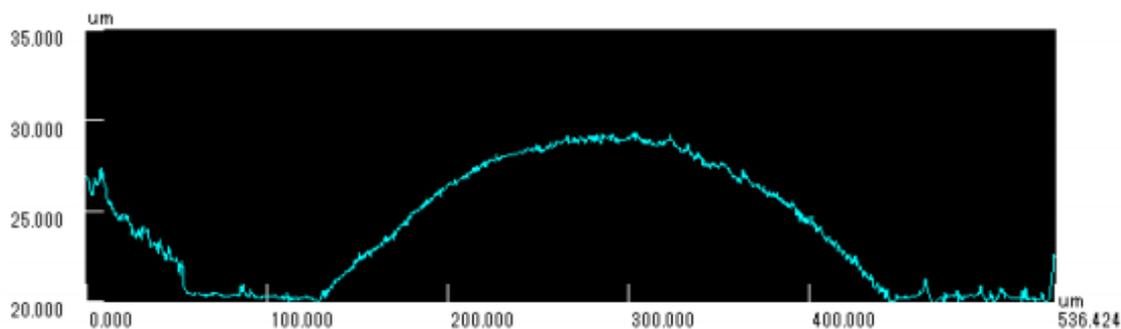


図 6.26 レーザー顕微鏡で観察した非照射の MicroMegas 試験機の表面の高さの測定結果[19]

●SEM を用いた形状測定

SEM は絞った電子線を対象物に照射し、放出される二次電子や X 線を検出することで対象物を観察する。ピントをずらしながら観察する必要があり、表面の構造を苦手とする光学顕微鏡に比べ、SEM は表面を観察するのに適している。

図 6.27 に示されるように照射領域の J31.1 とメッシュがたるんで十分な増幅が起こらなかった J31.2 の領域で比較すると、J31.2 では綺麗な表面であるのに比べ、J31.1 では放電の痕跡とみられる黒い穴が多く空いていることがわかる。ただし、高抵抗ストリップがなくなるほど破壊されておらず、約 44 年分の γ 線照射後においても、問題なく使用できると思われる。一方で J34.2 のメッシュがたわんで激しい放電が起きた領域では、図 6.28 に示されるように高抵抗ストリップの破壊が認められた。ストリップが破壊された領域では電流が流れないため、これは 6.2 章で J34 の電流値が低かった原因であることが考えられる。

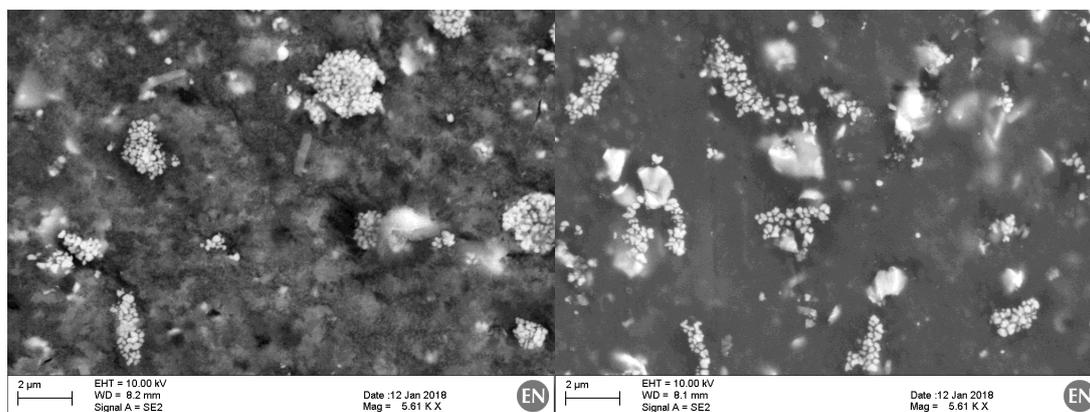


図 6.27 右:照射領域 J31.1 と左:メッシュがたるんでいた部分 J31.2

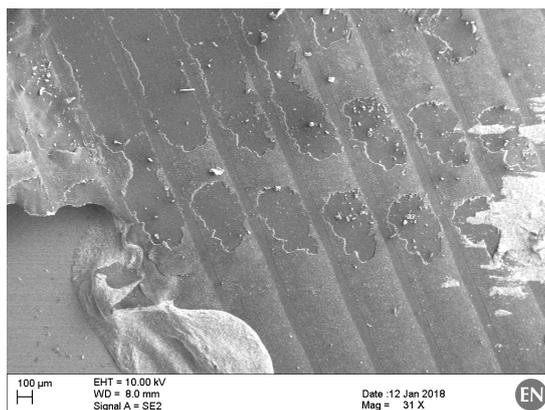


図 6.28 J34.2 の領域においてメッシュがたわんで激しい放電が起き、高抵抗ストリップの破壊が確認された。

6.5 まとめ

NSW に導入される MicroMegas と同じ製法で作製された小型試作機の γ 線照射試験を行い、J31 には HL-LHC 約 44 年分の γ 線照射を行い、照射中の電流値の測定、照射前後の性能の変化を調べるために増幅率測定と表面検査の比較を行った。照射期間中の電流値では、照射開始時と終了時の同大気圧下において電流値を比較したところ、約 13% 程度の低下が見られたが、安定して動作をしていることを確認した。増幅率での低下も認められず、表面検査に関しても、メッシュがたるまず張られている領域ではストリップの破壊などはみられなかった。

性能に関して問題はなかったが、先行研究[19]において非照射の高抵抗ストリップ表面のざらつきが $1\mu\text{m}$ だったものが、今回の測定の結果 $5\mu\text{m}$ ざらついていた。スクリーンプリント手法と、赤外線 200°C (IR200) で焼き付けたことが新しくなった点であるため、新たな手法に要因があると思われる。また、性能の変化を正確に知るため、大気圧と電流値の相関を調べ、照射期間中の正確な電流値を算出することも望まれる。

今後の展望としては、メッシュがたるまずにしっかり張れることの重要性という点が明らかになった。

第7章

トラッキング試験

3.2章で記したように、NSWでは高い検出効率と位置分解能が要求される。MicroMegasに要求される性能を満たすかどうかを判定するため、 γ 線照射後にトラッキングのビームテストを行った。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100 μm である。なお100%ではなく99%となるのは、検出器の有感領域におけるピラーによる不感領域の占有率が1%となるためである。

7.1 セットアップ

実験は10月14,15日に行われ、使用したビームはCERNのH4ビームラインにおける運動量120 GeVのミューオンビームを利用した。図7.1、図7.2のように角度を調節できるアルミ製のフレームにチェンバーを配置し、図の左側からビームを照射した。トリガーは10cm \times 10cmの2つのシンチレータをチェンバー前後に固定し、コインシデンスの信号をとった。なお他のグループと共同して試験を行ったため他グループのチェンバーもシステムの中に入っている。

検出効率を測定する際には、CERNで作成された10 cm \times 10 cmの2次元型トラッキング用チェンバーのTmm2, Tmm5を用いた。TmmチェンバーのストリップピッチはJチェンバーの400 μm と比べ250 μm と分解能がよく、トラックを要求するための検出器として設置した。Tmmチェンバーの仕様は図7.3に示す。以上のセットアップでJ31の γ 線照射前後の性能を評価した。

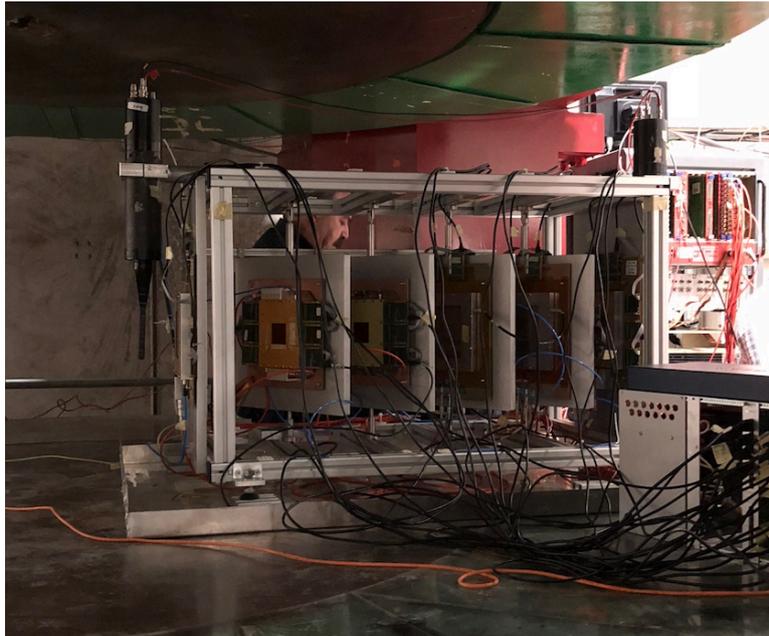


図 7.1 検出器のセットアップ：各検出器はアルミニウムのフレームにネジで固定されている。

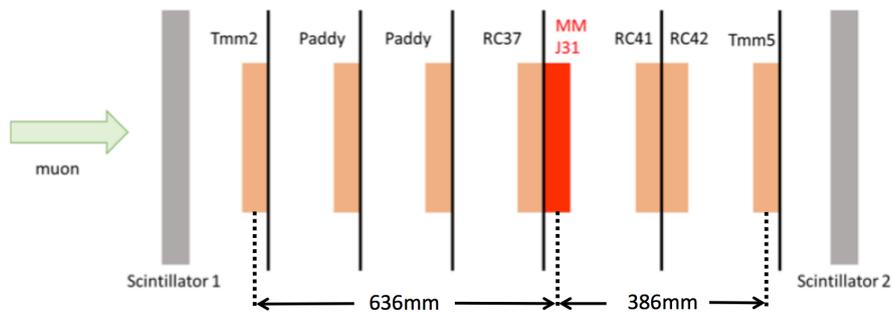


図 7.2 検出器の並び順：2次元型トラッキング用チェンバーの Tmm2, Tmm5 で J31 チェンバーを挟んで性能の評価をする。

Type	Resistive strip type	Resistive strip pitch	Amp. gap	Drift gap	Mesh	Pillar pitch	Comment
Tmm2/3/5/6	Print Screen?	250um	<128um	2.5mm -> 5mm	Fix	2.5mm (pillar diameter 300um), 18um diameter, 400pi	Used as telescope in test beam, XY 2D readout (X readout is in parallel with resistive strip)

図 7.3 Tmm の仕様[16]

7.2 読み出しシステム

MicroMegas の読み出しシステムには図 7.4 と図 7.5 に示す 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ている。

APV25 は CMS のシリコンストリップ検出器用に開発されたチップで、1 枚のチップには 128 チャンネルあり、読み出しコネクタから信号を増幅、整形する。256 チャンネルある小型検出器には 2 枚の APV25 が用いられる。APV から出力信号は HDMI ケーブルを通して SRS へと送られる。

SRS は Analog Digital Converter (ADC) ボードと Front-End Concentrator card (FEC) ボードから構成される MPGD 用の汎用読み出しシステムである。APV25 から送られたアナログ信号を ADC ボードでデジタル信号に変換し、FEC ボードではトリガー情報を元に ADC からの信号を受け取り、PC に転送する。

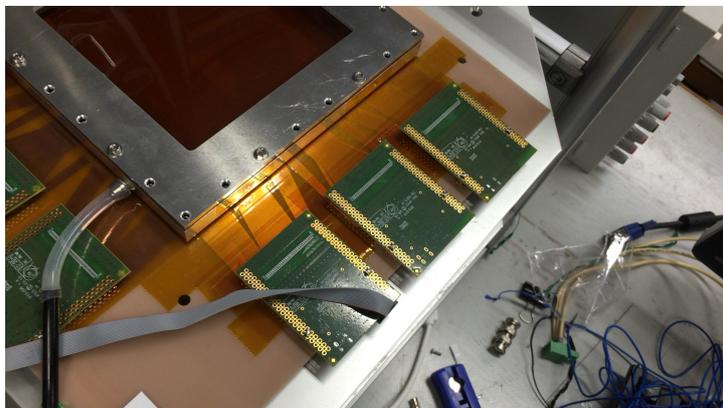


図 7.4 APV25 図は Tmm チェンバーについてのもの

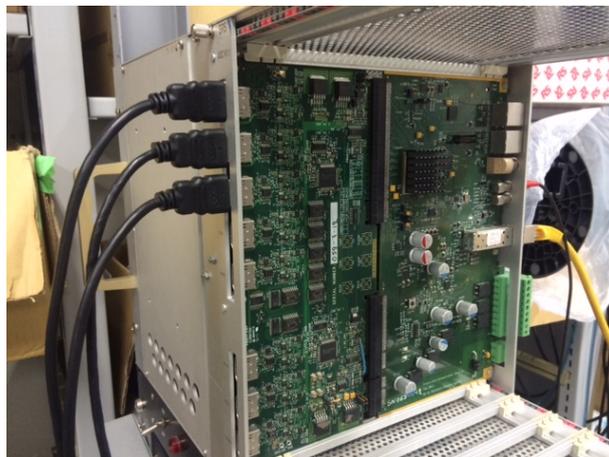


図 7.5 SRS システム

7.3 クラスタリング

APV25 で取得した MicroMegas の信号から、入射した粒子の位置と時間を再構成する方法をクラスタリングと呼んでいる。MicroMegas のドリフトギャップ内を荷電粒子が通過すると、2-10 ストリップ程度の幅をもったヒットが生じ、このストリップ数はトラックがチェンバーに対して垂直であるとき最も少なく、傾きが大きくなるにつれてヒットするストリップも増える。各ストリップに対してその電荷とヒット時間を図 7.6 で示すように定める。MicroMegas の信号の立ち上がりの部分は、Fermi-Dirac 関数

$$FD(t) = \frac{A}{1 + \exp[-(t - t_{FD})/B]} + C \quad (7.1)$$

で記述できることが経験的にわかっている。これを用いて各ストリップにおける電荷を $Q_{max} = A - C$ 、ヒット時間を t_{FD} と定義する。1つのトラック由来の複数のストリップのヒット情報をまとめて粒子のヒット位置、チェンバーに落としたエネルギー、通過した時間を再構成する。オンラインとオフライン共にストリップの波形の大きさに閾値を定めている。ペDESTALの典型的な標準偏差の大きさは図 7.6 の ADC カウントで 15 程度であり、オンラインでの閾値はデータサイズを抑えるため適宜変えているが、波形のピークの高さの閾値を 15 ADC カウント程度にしている。オンラインでも波形のピークの高さに対して閾値を設定し、それを超えたストリップをヒットがあったとして扱う。連続したストリップにヒットがある場合、これらは 1つの粒子由来だと考え、それらの情報を統合する。ただし、デッドチャンネルがある場合や、ピラーの影響によりでヒットがあるべきストリップにヒットがない場合がある。この場合についても正しく再構成するために、ストリップ間にヒットがないストリップが 2 本以内であれば、同一のクラスターとして統合する。クラスターの電荷 Q_{clus} 、ヒット位置 x_{clus} 、ヒット時間 t_{clus} は、各ストリップの位置 x_i 、FD フィットした時間 t_i 、ピークの高さ q_i を用いて次のように定義する。

$$Q_{clus} = \sum q_i \quad (7.2)$$

$$x_{clus} = \sum x_i \cdot q_i / \sum q_i \quad (7.3)$$

$$t_{clus} = \min_i \{t_i\} \quad (7.4)$$

図 7.7 はミューオンビームを用いたテストビームにおける 1 イベントの MicroMegas の信号である。256 チャンネルのそれぞれのストリップに対して、信号の波形を表して、時間情

報は 1 time bin = 25 nsec として保存され、1 イベントにつき 15 time bin で保存されるため 375nsec に対応している。

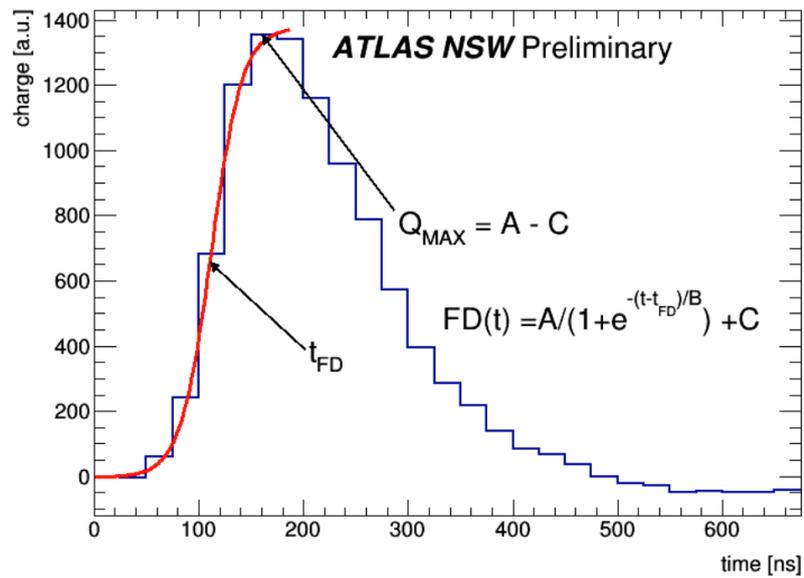


図 7.6 一つのストリップのにおける波形 [21]

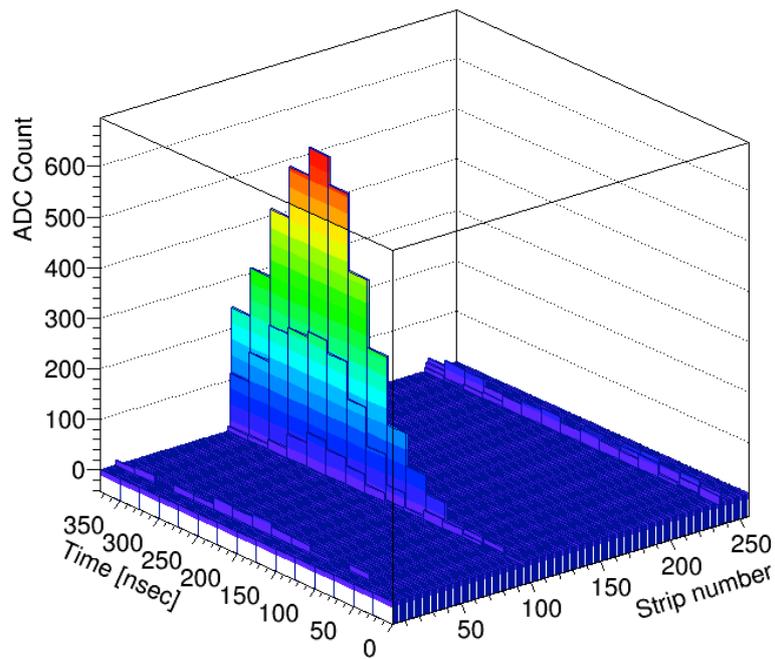


図 7.7 ミューオンビームを用いたテストビームにおける MicroMegas のイベントディスプレイ: 1 イベントの時間は 15 time bin \times 25 nsec = 375 nsec となる。

7.4 検出効率

検出効率の定義は以下のようにした

$$\text{検出効率} = \frac{\text{分母のトラック上に測定対象のチェンバーでヒットがあったイベント数}}{\text{2台の Tmm チェンバーで1本のトラックが再構成されたイベント数}} \quad (7.5)$$

分母のイベントは、次の条件を満たすものを選んだ。

- ・Tmm チェンバー2つに対してクラスターが1個ずつ

また分子のイベントは次の条件を満たすものとした

- ・Tmm チェンバー2つのクラスター位置からトラックを引き、J31 へ内挿した点から 3 mm × 3 mm 以内に J31 のクラスターが存在する

アノード電圧を変え、それぞれの電圧下での検出効率を求めた。図 7.8 にアノードを 580 V にした時の Efficiency Map を示す。図 7.9 で見られた黒色領域では検出効率が低く、20%前後であることがわかる。そのため、今回は検出効率を正しく評価できていると思われる $x = 20 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$ 付近において検出効率を求めた。なお、検出器の端で検出効率が見えない理由は Tmm のアライメントが、線源に対して傾いているためである。表 7.1 に $x = 20 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$ 付近における各電圧での検出効率を示す。またその時の値をグラフにしたものを図 7.10 に示す。結果よりアノード電圧 580 V において検出効率は 99% を満たしていることがわかる。

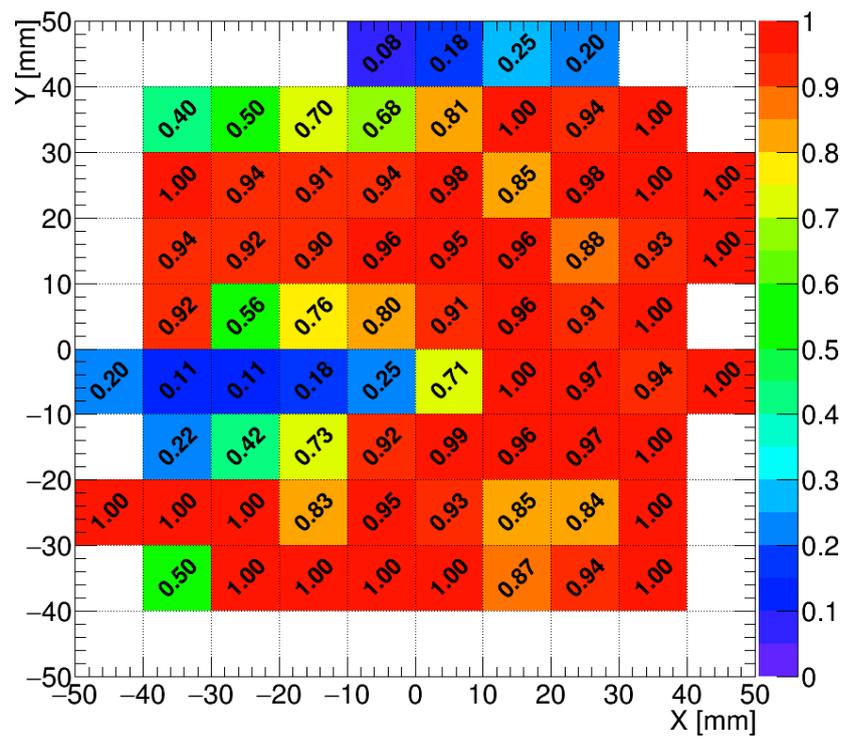


図 7.8 580V における Efficiency Map

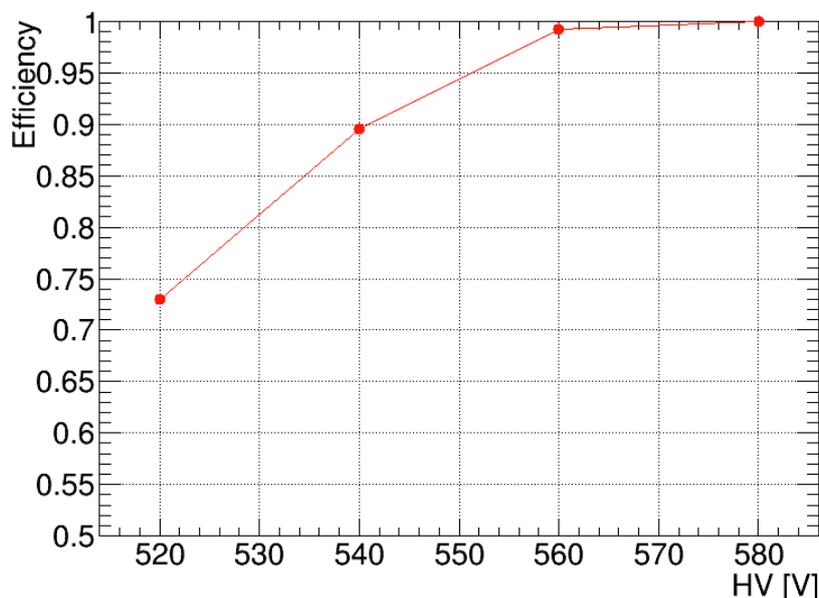


図 7.9 照射後の J31 の表面：図 7.8 の Efficiency Map と比べ、黒色領域で検出効率が低いことがわかる。

図 6.11 と同じ。

表 7.1 $x = 20 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm}$ 付近において検出効率

HV [V]	520	540	560	580
Efficiency	0.73	0.90	0.99	1

図 7.10 J31 の $x = 20 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm}$ 付近においての検出効率

7.5 位置分解能

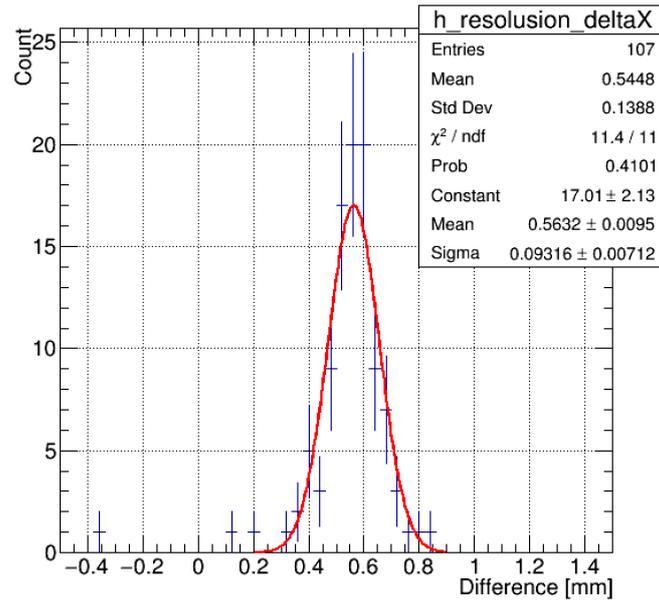
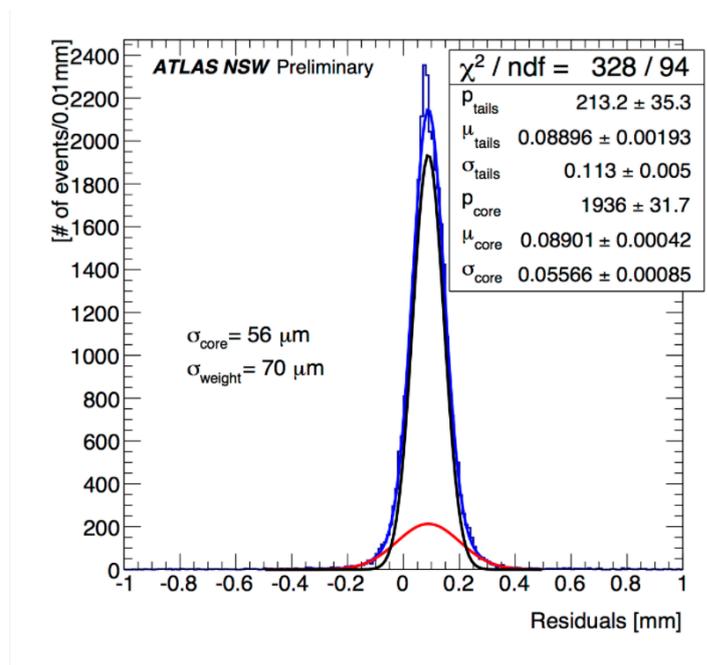
Tmm2, Tmm5 の性能が同じだと仮定し、J31 と Tmm2, Tmm5 の J31 への内挿点の差から取ったものを ΔX とすると、J31 の位置分解能は以下のように計算できる。

$$\sigma_{J31} = \sqrt{\sigma_{\Delta X}^2 - \left(\frac{386[\text{mm}]}{(636[\text{mm}] + 386[\text{mm}])} * \sigma_{Tmm2} \right)^2 - \left(\frac{636[\text{mm}]}{(636[\text{mm}] + 386[\text{mm}])} * \sigma_{Tmm5} \right)^2} \quad (7.6)$$

$\sigma_{\Delta X}$, σ_{Tmm} の値をそれぞれ図 7.11, 図 7.12 より、 $\sigma_{\Delta X} = 93 \mu\text{m}$, $\sigma_{Tmm} = 70 \mu\text{m}$ である。これらの値を用いて、求めた σ_{J31} の値と、先行研究[8]で求められた照射前の J13 の位置分解能の値を表 7.2 に示す。式(7.6)を用いた計算結果より、 γ 線約 44 年分を照射した J31 と照射前の J チェンバーとを比較し位置分解能に変化は見られなかった。

表 7.2 照射前と照射後の位置分解能の比較

検出器	位置分解能[μm]
J13-J14 照射前	75 ± 1
J31 約 44 年照射後	78 ± 7

図 7.11 $x = 20\text{mm}$, $y = 0\text{mm}$ 付近における $\sigma_{\Delta X}$ 図 7.12 σ_{Tmm} の値[21]: 中心部分と裾部分でフィットした値に重みをつけて出した σ_{weight} を用いた

7.6 まとめ

6章で γ 線照射試験を行った、NSWに導入される MicroMegas と同じ製法で作製された小型試作機が、性能要求である検出効率 99%以上、位置分解能 100 μm 以下を満たすことを確認するために、CERN H4において運動量 120 GeV のミューオンビームを用いたトラッキング試験を行った。 γ 線が約 44 年照射された J31 では検出効率 99%以上、位置分解能 100 μm 以下を満たしていることがわかった。

第 8 章

結論

ATLAS 実験において、2025 年から運用される HL-LHC に導入される NSW で使用される Resistive-MicroMegas の γ 線に着目した Resistive-MicroMegas の放射線耐性の評価を行った。

NSW は衝突点から 7m 付近に配置され、ミューオンだけでなく、 γ 線や中性子などのバックグラウンドによるフラックスが大きく、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、本番で導入される MicroMegas と同じ製法で作製した小型試作機を用いて、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 Irradiation Facility ++ (GIF++) において、MicroMegas の γ 線に対する耐久試験を行った。J31 には HL-LHC 約 44 年分の γ 線照射を行い、照射中の電流値の測定、照射前後の性能の変化を調べるために増幅率測定と表面検査の比較を行った。照射期間中の電流値では、約 13% 程度の低下が見られたが、安定して動作をしていることを確認した。増幅率での低下も認められず、表面検査に関しても、メッシュがたるまず張られている領域ではストリップの破壊などはみられなかった。照射後の表面検査においても表面状態のざらつきの変化などはみられたが、グラウンドメッシュが正しく張られている領域では、放電によるストリップの破壊などはみられなかった。

γ 線照射後の MicroMegas の要求性能を評価するために、CERN H4 においてミューオンを用いたトラッキング試験を行った。HL-LHC における、約 44 年分の γ 線照射された J31 で試験を行ったところ、検出効率 99% 以上、位置分解能 100 μm 以下を満たしていることがわかった。本番における NSW の運用期間は 10 年であり、今回の実験において、約 44 年分の γ 線照射でも性能の低下は見られなかったことから、本番での運用でも問題なく作動すると予想される。

全体を通した、懸念点としては、グラウンドメッシュの張りが弱いと、メッシュがたるんでしまい、目標とした増幅が得られず信号を検出できなかったり、増幅領域が狭まり過ぎて放電が発生し、高抵抗ストリップの破壊につながったりすることが確認された。本番で使用される

MicroMegas では $1\text{m} \times 2\text{m}$ のような巨大なフォイルやメッシュを張るセクターがあり、運用期間中の交換は容易ではない。そのため、グラウンドメッシュをたわまないように正しく張ることが重要であることを再確認した。

謝辞

修士論文を書くにあたり、周りの方々には多大なるご協力を頂き、またご迷惑もお掛け致しました。この場を持ってお礼と感謝の気持ちを述べさせて頂きたいと思います。

川本さん、3年間を通じて川本さんには感謝しかありません。どんなにできなくても途中で休学しても、ここまで論文を書くことができたのは、変わらず接して頂いた川本さんの存在があったからです。鋭い考察や博識な知識、いつでも受け入れてくれる大きな心、本当に人間として見習うことが多くあります。川本さんのように広い心を持ち、博識で論理的な人間に私もなりたいです。増渕さん、お忙しい中論文の内容全てにおいて助けて頂き本当にありがとうございました。どんなにできなくても変わらず接して頂き、増渕さんがいなければ論文を書き上げることはできませんでした。最後には帰国パーティーなども開いて頂き本当にありがとうございました。齋藤さん、一年生の時はトリガーで色々教えてくださいありがとうございました。普通ではないことでも普通にしてしまう齋藤さんの思考には感銘を受けました。ザキさん、ツンデレでデレが出てくるまで食いつくのは大変でしたが、本当にたくさん教わり助けて頂きました。プログラミングが不得意な私にググると言う技を教えてくださいました。山谷、学部時代から同期ということもあって私を川本研に導いてくれました。先導してくれる存在がいることは非常に心強かったです、CERNでは家に泊めてもらってお世話になりました、末永くお幸せに。前川くん、途中から同期となり焦ったかもしれませんが、一人ではなかったことは心強かったです。科学的な知見から幸福について話し合っただけで興味深かったです。越智さん、気さくで若々しく、キャリアブレーションでは一から丁寧にとてもわかりやすく説明して頂き勉強になりました。山根さん、ラフに接して頂き、神戸ではラーメン屋に連れていってもらったり、土地柄について説明していただいたり、神戸で良い思い出が作れました。又吉くん、抵抗値測定やトラッキングで詳しく教えてもらいとても助かりました。人柄のいい沖繩感のある青年でした。小川くん、萌え萌えカレー食べました。まずかったです。

同期の周くん、優しくて頭が良くて、孫さんのような尊い存在でした。阪神、いつも常人では考えられない意見に、人間の多様性を学ばせてもらいました。清野、いつも自分のくだらない話にムツリとした感じで対応してくれました。グチョす、同期としては早くから結婚し

て偉大だと思いました、ヨメチョすと末永くお幸せに。宇野ちゃん、普通を装ってるけど実はかなり怪しい宇野ちゃんは話しやすくたくさん助けてもらいました。うっちー、常に正解があるうっちーは面白かった。りょうと、早くから研究所に行き、接する時間は少なかったけど、純粋でイケメンでよかったです。中尾、りょうとと同じく接する時間が短かったけど良かったです。中西、藤倉、私より一足先に社会に飛び込んでいつかまたお世話になるかと思います。私がそちらの世界へ行くのはいつになるのだろうか。

ICEPP秘書さん、私たちにとって必要な手続きをいつも丁寧に対応して頂き、秘書室に行ったときにも暖かく受け入れてくださり、研究に集中することができました。ILOの皆様、皆様には寮生活からCERN出張まで大変お世話になりました。いつも元気で、事務室に行ったときには暖かく受け入れて頂き、心落ち着く空間でした。教務の皆様、休学期や原付の件では大変ご迷惑をおかけしました。それにもかかわらずごつくばらんに接して頂き本当にありがとうございました。皆様は母親のような存在です。

浅井さん、いつも大変興味深く、私の大好きな分野のお話をしてくださりました。CERNでは化石掘りの道具を貸してくださったり、偏った食事を気にして食べ物をくださったりしました。難波さん、大部屋の守護神です。江成さん、ポーカフェイスですが大変思慮深く、教育的な質問をたくさんしてくださいました。愛音さん、CERNでは色々なところに連れて行ってくださり、純粋で本当に優しい方です。チンさん、食べ物を蒔いて土に還元したり、ブロッコリーの秘話など心から尊敬しています。嶺岸さんにとって時間はあつてないに等しく、時間に縛られることのない嶺岸さんの概念には驚かされるばかりです。快くドライブをしてくださりありがとうございました。安達さんはいつもニヤニヤしています。山道さん、アングラな話を毎回してくださり興味関心を刺激してもらいました。これからも本を借りにおじゃまします。マッチさん、大変博識で、どんな質問にも的確に親切に教えて頂きありがとうございます。加納さん CERNにいるときにドライブで観光に連れて行ってくださりありがとうございました、切羽詰まっている状況でとても良い息抜きができました。

そして最後に、この年齢まで学生生活を送っているにもかかわらず、なんだかんだいつでも味方になってくれて、色々助けてもらった家族に感謝したいと思います。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 2008 , JINST 3 S08003
- [2] <https://cds.cern.ch/record/331068>.
- [3] The HL-LHC project.
<http://attikis.web.cern.ch/content/hl-lhc-plan>
- [4] HL-LHC PROJECT
<https://project-hl-lhc-industry.web.cern.ch/content/project-schedule>
- [5] 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.
- [6] Performance of a Full-Size Small-Strip Thin Gap Chamber Prototype for the ATLAS New Small Wheel Muon Upgrade
<https://arxiv.org/pdf/1509.06329.pdf>
- [7] ATLAS Collaboration Collaboration, ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System, Tech. Rep. CERN-LHCC-2013-018. ATLAS-TDR-023, CERN, Geneva, Sep, 2013. <https://cds.cern.ch/record/1602235>. Final version presented to December 2013 LHCC.
- [8] 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
- [9] ATLAS NOTE ATL-MUON-COM-2015- XXX
<https://indico.cern.ch/event/587667/contributions/2368336/attachments/1370741/2078841/MQAQC.pdf>
- [10] Particle Data Group, The Review of Particle Physics, 2016, Chin. Phys. C40 10001.
- [11] Y. Kataoka, S. Leontsinis, and K. Ntekas, Performance studies of a MicroMegas chamber in the ATLAS environment, Journal of Instrumentation 9 no. 03, (2014) C03016
- [12] <http://rd51-public.web.cern.ch/RD51-Public/>

- [13] Particle Data Group Collaboration, K. A. Olive et al., Review of Particle Physics, Chin. Phys. C38 (2014) 090001.
- [14] 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,
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201009962,%20Imaging%202000>.
- [15] M. TITOV, RADIATION DAMAGE AND LONG-TERM AGING IN GAS DETECTORS, 2004. arXiv:0403055v2.
- [16] ICEPP MicroMegas Activities
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Main/ICEPPMM>
- [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/774726/106.2298/DetectorSeminarGIFMay2015RobertoGuida_v3reduced.pdf
- [18] Dorothea Pfeiffer, Georgi Gorine, Hans Reithler, Bartolomej Biskup, Alasdair Day, Adrian Fabich, Joffrey Germa, Roberto Guida, Martin Jaekel, Federico Ravotti, The radiation field in the Gamma Irradiation Facility GIF++ at CERN, 11 September 2017,
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900217306.123>
- [19] 神戸大学修士論文” 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”, 長坂 憲子, 2017
http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/2013/seminar/pdf/Nagasaka_thesis.pdf
- [20] R. Guida, CERN-GIF++: A new Irradiation Facility to Test Large-Area Detectors for the HL-LHC Program, <https://indico.cern.ch/event/387753/>.
- [21] ATLAS EXPERIMENT PUBLIC RESULTS,
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/NSWPublicResults>

