

令和元年6月3日現在

機関番号：14501
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2016～2018
課題番号：15KK0166
研究課題名（和文）高ルミノシティLHCに向けたATLASミュオン検出器システムの高度化（国際共同研究強化）
研究課題名（英文）Upgrading of ATLAS muon detector system for high luminosity LHC experiment
(Fostering Joint International Research)
研究代表者
越智 敦彦（Atsuhiko, Ochi）
神戸大学・理学研究科・准教授
研究者番号：40335419
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円
渡航期間： 11ヶ月

研究成果の概要（和文）：世界最高エネルギーの素粒子衝突実験であるLHC実験はその衝突輝度の強化を計画しており、これに伴いATLAS検出器は大強度の粒子線に対応するためのアップグレードを行う必要がある。本研究課題により約一年間、実験サイトであるスイス・ジュネーブのCERNに滞在し、ATLAS Micromegas 検出器の高放射線環境下における長期動作試験、ATLAS phase II upgrade の高 検出器の開発、ATLAS Micromegas 検出器の大型実機の放電解消へ向けた研究、及びMPGD抵抗電極としてのDLCに関する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LHC実験は世界最高の衝突エネルギー（13TeV）を持ち、エネルギーフロンティアを観測するための唯一の探針である。ヒッグス粒子の詳細な性質や、標準理論の先を探索するためには、高い統計量のデータが必要であり、そのために加速器・検出器いずれも輝度アップグレードに対応した研究開発が必要である。本研究は新物理現象に感度の高いミュオン検出器のアップグレードに関わるもので、実験サイトである現地に滞在し、検出器アップグレードに関する様々な共同研究を行うことで、検出器高度化に対する大きな貢献をした。

研究成果の概要（英文）： LHC experiment is world highest particle collider experiment, and luminosity upgrade is scheduled for future experiment. Then we need to develop the new devices for ATLAS detector for upgrading experiment. I have stayed at CERN in Geneva, Switzerland, and researched the following items as international collaboration;
(1) Aging study fo ATLAS Micromegas using high flux gamma ray, (2) New detector development for ATLAS phase-II upgrade, (3) R&D of suppressing the spark in large scale ATLAS Micromegas, (4) Collaborative research of DLC for MPGD electrodes.

研究分野：素粒子実験

キーワード：測定器開発技術 LHC実験 ATLAS実験 MPGD Micromegas μ -PIC ガス検出器

1. 研究開始当初の背景

本課題研究の基課題は、2015年4月より採択された、科研費(基盤A)「高ルミノシティ LHC に向けた ATLAS ミューオン検出器システムの高度化」である。ATLAS はスイス・ジュネーブ近郊にある陽子・陽子衝突型加速器 LHC を用いた汎用測定器のうちの一つである。これまでの実験では標準理論で最後まで見つかっていなかったヒッグス粒子を発見し、さらにその性質が詳細に調べられている。現在までの LHC 実験で得られている統計量では、標準理論を超える物理は見つからないが、一方で標準理論に限界があることもわかっている。例えば、宇宙観測から示されているダークマターの存在や、ニュートリノが有限の小さな質量を持つこと、ヒッグスの相互作用で真空が不安定になることを防ぐための未知の機構などである。これらの説明には標準理論を超える物理が必要であり、その手掛かりは TeV(10^{12} eV)スケールにあると考えられている。LHC はこのスケールの物理を直接探索するための現時点で唯一の加速器であり、加速器のルミノシティ(輝度)を増加させることで探索可能な物理を拡張する計画が検討されている。

研究代表者は、ATLAS 実験に参加しており、特にミュオン検出器とトリガの改良の重要性に着目し、それに向けた研究を行ってきた。2020年に LHC のルミノシティが $3 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (当初の設計の3倍)となるのに伴い、最内層エンドキャップ部のミュオン検出器は高入射頻度に起因する検出性能の悪化とバックグラウンド増加に伴うトリガレートの増大が問題となる。これに対応するためにマイクロパターンガス検出器(MPGD)の一種であるマイクロメガスを用いた測定器(NSW と呼称)の導入が決まっており、研究代表者はこれまでその検出器の開発、中でも心臓部分となる高抵抗の陽極電極の開発研究等を行ってきた。高性能なスパッタリング法と低コストなスクリーン印刷法のいずれかが ATLAS マイクロメガスへ適応可能な技術として有力となった。一方、大面積の高抵抗ストリップを量産する技術や信号処理技術の確立はこれからの課題である。また、さらなる高バックグラウンドで動作させる必要のある Phase-II 用の検出器開発も課題である。

2. 研究の目的

基課題では、ATLAS 実験のエンドキャップミュオン検出器アップグレードの計画に合わせ、2019年度までの5年間で研究期間として設定している。当初の2年のうちに、大面積の高抵抗ストリップ量産技術を確立することで、2016年度から予定されているマイクロメガス検出器の建設に間に合わせる。一方で日本での陽極基板作成後、検出器システムとしてマイクロメガスを組立、動作させるのはスイスの CERN 研究所においてであり、17カ国47機関/大学から参加している国際共同研究グループと一緒に行われる。この共同研究の中でイニシアチブを持ち、最終的に優れた物理成果を出すための検出器システムを組み上げるためには、長期にわたる大強度放射線環境下での検出器動作テストに基づく、安定な運用条件の導出や、組み上げた検出器プロトタイプのパフォーマンス評価が必要である。特に検出器のシステムとしての組み立てと動作検証が始まる2017年度から2018年度にかけての時期は、できるだけ現地において、共同研究グループと一緒に直接システムを扱える環境で研究を推進することが望ましい。そこで、本研究課題では、

- (1) マイクロメガスの検出器システムとしての組み上げ
- (2) プロトタイプ検出器性能の評価。

の2点について、2017年度から2018年度にわたって、現地で集中的に取り組む。また、Phase-II以降に要求される検出器性能も見越した新しい検出器開発への取り組みも行っていく。こうした中で、国際共同研究グループの中で主導的な立場を確立し、かつ基課題の研究を飛躍的に発展させることを目的とする。また広く他の国際協力実験と情報を交換し、研究開発の成果を隣接分野に広げていくことも視野に入れる。

3. 研究の方法

本研究課題による国外での研究遂行にあたっては、2017年秋頃から約1年 CERN 研究所に滞在するものとした。ATLAS 実験は国際共同研究であり、このアップグレードの一つである NSW プロジェクトも同様に多くの国や機関を含む共同研究である。研究代表者はこのプロジェクトの中でマイクロメガス検出器生産にあたっての、陽極基板部分の責任者を務めている。また、ガス放射線検出器開発に関する国際研究グループである RD51 の検出器開発研究のためのインフラが CERN 内に構築されており、研究代表者はこのグループの Collaboration board 副議長を務めていることなどから、現地の研究拠点を RD51 内に設置し、RD51 の実験室・設備などを最大限に活用できる環境を構築した。

この拠点をベースに、ATLAS Micromegas グループメンバーと共に、マイクロメガスの検出器システムとして組み上げる際の問題点の解決、及びプロトタイプ検出器を用いた、CERN

線照射施設(GIF++)を用いた大強度 線照射試験、及び CERN H8 ビームラインを用いた 140GeV μ 粒子による検出器の位置分解能・タイミング分解能などの基礎パラメータ測定などを行った。また RD51 グループメンバーと共に、Phase-II における ATLAS 小散乱角検出器開発に向けた独自の検出器、Resistive Micro Pixel Chamber の開発・試験を行った。

4. 研究成果

本課題研究に掛かる国際共同研究のために、平成 29 年 9 月下旬より約一年間、スイス・ジュネーブにある CERN(欧州素粒子研究機構)への長期滞在した。本研究課題による CERN 滞在中の共同研究による実績の主なものは、(1) ATLAS Micromegas 検出器の、高放射線環境下における長期動作試験、(2) ATLAS phase II upgrade の高 検出器の開発、(3) ATLAS Micromegas 検出器の大型実機の放電現象の解決へ向けた共同研究、の三項目が挙げられる。また、CERN 滞在前後にわたって、RD51 グループを通じて新たな共同研究として(4) MPGD 抵抗電極としての DLC に関する研究も新たに加わった。

(1) ATLAS Micromegas 検出器の、高放射線環境下における長期動作試験

高ルミノシティ LHC 実験においては、使用する検出器は長期に渡って強い放射線環境下に晒されることになる。先行研究では ATLAS エンドキャップミュオン検出器(NSW)上での動作に匹敵する放射線量 10 年分以上の 線を Micromegas 検出器に照射した状況では、検出器陽極部の高抵抗ストリップ部分の抵抗値の大幅な増加が見られ、長期動作に対して大きな懸念が生じていた。この時に高抵抗ストリップの表面物質を検査した結果、高放射線照射後の検出器表面には、照射前には無かったシリコンの成分が多く含まれていたことが突き止められていた。本課題研究では、このシリコンの供給源となる物質を含んでいた検出器ガスパッケージの O リング、カプトンテープの接着剤など検出器内部から慎重に取り除き、ATLAS HL-LHC 40 年分以上に匹敵する照射試験を CERN のガンマ線照射施設 GIF++で行った。この結果、検出器に目立つ劣化は現れないことを確認し、さらに高抵抗ストリップ表面を SPES(二次電子分光)で検査した結果、シリコンの含有はほとんど認められなかった。この研究結果により、検出器を高放射線環境下で長期間動作させた場合の、性能劣化の原因へついで理解が進み、またその解決法を見出すことができた。この結果として、ATLAS Micromegas 検出器の長期動作における安全性を確立した。

(2) ATLAS phase II upgrade の高 検出器の開発

ATLAS phase II upgrade では、ATLAS NSW とほぼ同じ位置で、高 (小散乱角度) に挿入する μ 粒子検出器の開発を目指している。この部分には現状では検出器が存在しないが、これを挿入することにより、衝突点からの高エネルギーのレプトンへの崩壊事象をより高い検出効率で得られることが期待できる。一方で、この高 領域の検出器では、より高い放射線雑音環境下で信号となる μ 粒子のトラックを捉える必要が出てくる。このために検出器には、10Mcounts/mm² 以上の入射許容レート、100 μ m 程度以下の 2 次元位置分解能などの性能が求められる。本研究課題では、従来開発を進めてきた高抵抗電極 μ -PIC を ATLAS 高 検出器として開発する研究を CERN にて進めた。CERN の SPS ビームライン、及び RD51 collaboration の実験室の X 線発生装置など、現地の RD51 collaboration をベースにした共同研究により、多くの実験装置を使い、二次元のデータ読出しについての実証実験を行った。この結果、ビームラインを用いた 140GeV μ 粒子ビームでは、縦・横いずれの方向も 100 μ m 以下の位置決定分解能を持つことがわかり、さらに検出器面から角度をつけて入射する粒子に対しては、信号検出のタイミング情報を利用してマイクロ TPC として検出器を動作させる手法を開発した。また、X 線を用いた試験では、X 線の透過イメージを鮮明に捉えることに成功し、この場合の位置分解能としては、150 μ m 程度を実現した。これらの結果から、この μ -PIC 検出器は、ATLAS phase II upgrade へ向けたミュオン検出器の一つとして提案されることになり、ATLAS Muon Spectrometer Phase-II Upgrade Technical Design report に含まれることになった。

(3) ATLAS Micromegas 検出器の大型実機の放電現象の解決へ向けた共同研究

高ルミノシティ LHC 実験においては、ATLAS 実験ではエンドキャップの μ 粒子検出器として Micromegas 検出器を採用することになっており、実機に向けた量産は既にスタートしているが、一方で放電などの動作不安定が大きな問題となることが現地滞在中に明らかになってきた。そこで、CERN に集まる ATLAS Micromegas 共同研究者らと共に、検出器の素材やガス・デザインなど基本的なパラメータに立ち返り、放電を抑制するための方法について研究を進めた。この結果、検出器読出しボードの湿度管理、表面抵抗値が低い場合の対処など、多くのノウハウを共同研究グループ内で共有することができた。

(4) MPGD 抵抗電極としての DLC に関する研究

ATLAS Micromegas を始めとして、近年の MPGD は放電抑制のために電極に抵抗素材を用いることが多くなってきた。この抵抗素材として、研究代表者の先行研究、及び基課題の初期の研究において、炭素スパッタによる DLC(Diamond Like Carbon)を用いる研究開発が行われ、同素

材を用いた大型 Micromegas の試作機が作られて動作確認されるなど、一定の成果を収めていた。この DLC は、その後 ATLAS Micromegas での採用はコスト面から見送られたものの、技術は高く評価され、他のいくつかの実験における検出器開発のために研究協力を求められるようになった。具体的には T2K 実験の近接検出器の TPC 読出し用 Micromegas (France Saclay 研究所) や、LHC CMS 実験 phase-II アップグレードに向けた RWELL 検出器開発 (Italy, INFN) などへの協力が挙げられる。ガス検出器については、CERN は国際的に大きな拠点となっていることから、滞在中に DLC を使った検出器を検討している研究者、DLC の製造自体に参入してきた研究者などと情報交換する機会が多くなり、平成 30 年より、RD51 common project (RD51 グループの枠内で、共同研究を行うグループ) を立ち上げ、共同研究を開始した。この中で DLC フォイルの抵抗値コントロール手法、様々な検出器に応用するための加工手法などについて共同で研究を行っている。特に、2019 年 5 月に、MPGD のための DLC に特化したワークショップをイタリアで開催し、研究代表者からは 3 件の口頭発表をおこなったことを始め、物性研究者なども交えた活発な議論を行った。

5 . 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Ochi Atsuhiko, on behalf of the ATLAS Muon Collaboration, Development of large area resistive electrodes for ATLAS NSW Micromegas, EPJ Web of Conference, 査読有, 174 巻, 2018, 03001

<https://doi.org/10.1051/epjconf/201817403001>

Yamane Fumiya, Ochi Atsuhiko, Homma Yasuhiro, Yamauchi Satoru, Nagasaka Noriko, Hasegawa Hiroaki, Kawamoto Tatsuo, Kataoka Yosuke, Masubuchi Tatsuya, EPJ Web of Conference, 査読有, 174 巻, 2018, 04001

<https://doi.org/10.1051/epjconf/201817404001>

[学会発表](計 24 件)

Atsuhiko Ochi, Industrialization of the DLC deposition process, Workshop on Resistive Coating for Gaseous Detectors, 2019

Atsuhiko Ochi, Micro-patterning techniques for DLC layers in MicroMegas and u-Pic detectors, Workshop on Resistive Coating for Gaseous Detectors, 2019

Atsuhiko Ochi, Past Experience with DLC and Workshop Goals, Workshop on Resistive Coating for Gaseous Detectors, 2019 (基調講演)

Atsuhiko Ochi, Development and performance tests of u-PIC with DLC electrodes, 6th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, 2019 (ポスター発表)

越智 敦彦, LHC アップグレードにおける MPGD の TPC 読出し、アクティブ媒質 TPC 開発座談会、2019 (招待講演)

説田 暉、越智 敦彦、他、LTCC μ -PIC の開発に向けた研究、日本物理学会第 74 回年次大会、2019

越智 敦彦, RD51 報告及び国際会議 MPGD2019 のご案内、第 15 回 MPGD 研究会、2018

石飛 由介、越智 敦彦、他、CERN H4 ビームラインにおける resistive μ -PIC の性能評価、第 15 回 MPGD 研究会、2018

説田 暉、越智 敦彦、他、LTCC μ -PIC の開発に向けた性能シミュレーション、第 15 回 MPGD 研究会、2018

Atsuhiko Ochi, Introduction to Resistive DLC Collaboration, RD51 Collaboration meeting workshop, 2018

Atsuhiko Ochi, Testbeam for resistive μ -PIC (results), RD51 Collaboration meeting workshop, 2018

石飛 由介、越智 敦彦、他、CERN H4 ビームラインを用いた DLC μ -PIC の性能評価、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年

Atsuhiko Ochi, Testbeam for resistive μ -PIC, RD51 Collaboration meeting and “MPGD stability” workshop, 2018

石飛 由介、越智 敦彦、他、CERN H4 ビームライン及び X 線発生器を用いた高抵抗電極 μ -PIC のビームテスト結果、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年

山根 史弥、越智 敦彦、他、高抵抗陰極を用いた μ -PIC の開発、24th ICEPP Symposium, 2018

Atsuhiko Ochi, First results of imaging properties and test beam for Resistive μ -PIC, RD51 Open Lectures and Mini Week, 2017

又吉 康平、越智 敦彦、他、CERN GIF++における Micromegas の 線 aging 試験、第 14 回 MPGD 研究会、2017

石飛 由介、越智 敦彦、他、CERN beam facility を用いた DLC μ -PIC のイメージング試験、第 14 回 MPGD 研究会、2017

山根 史弥、越智 敦彦、他、150GeV μ / ビームを用いた高抵抗陰極 μ -PIC の性能評価、第 14 回 MPGD 研究会、2017

Atsuhiko Ochi, MPGD Overview, International Workshop on High Energy Electron Positron Collider, 2017 (招待講演)

⑲ 山根 史弥、越智 敦彦、他、Scalable Readout System を用いた高抵抗 μ -PIC の性能評価、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年

⑳ 又吉 康平、越智 敦彦、他、高放射線環境における Micromegas 検出器の動作試験、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年

㉑ Fumiya Yamane, A new design of Micro Pixel Chamber using DLC electrodes, 5th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, 2017

㉒ Atsuhiko Ochi, Japan MPGD Community, 5th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, 2017 (招待講演)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：パウロ イエンゴ

ローマ字氏名：Paolo Iengo

所属研究機関名：CERN

部局名：EP-ADE-MU

職名：Researcher

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：ステファニー ウルリケ ジンマーマン

ローマ字氏名：Stephanie Ulrike Zimmermann

研究協力者氏名：レチェック ロペルフスキー

ローマ字氏名：Leszek Ropelewski

研究協力者氏名：エラルド オリベリ

ローマ字氏名：Eraldo Oliveri

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。