

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H01223
研究課題名（和文）次世代マイクロパターンガス検出器の研究開発

研究課題名（英文）R&D of next Micro-pattern gaseous detectors

研究代表者

増淵 達也（MASUBUCHI, Tatsuya）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：20512148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代のマイクロパターンガス検出器(MPGD)を用いたミュオン検出器の候補として有望と考えている、micro-Resistive WELL(μ -RWELL)の開発研究を行った。また、MPGDのアノード部となる重要部品である高抵抗層をDiamond-Like-Carbon(DLC)を使用し、その抵抗値の安定性や狙った抵抗値を得るための製作技術の研究開発も行った。さらに、もう一つの有望な検出器の候補である、 μ -PICもDLCを用いて製造し、性能評価や放射線耐性を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、次世代高エネルギー実験のミュオン検出器として実用可能な、MPGD検出器(μ -RWELL、 μ -PIC)をDiamond-Like-Carbon(DLC)高抵抗薄膜を用いて製造し、検出器の性能評価や高放射線下での動作試験などを行っている。大面積の検出器を作るためにはDLCの抵抗値の安定化や一様性などが検出器の性能を決めるといっても過言ではなく、安定製造に関する様々なパラメータでDLCを製造し、知見を得られた学術的意義は大きい。また、 μ -RWELL検出器は、構造が他のMPGD検出器と比べて簡単であり、検出器を製造し、動作試験を行った意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This research aims at the novel development and optimization of next-generation micro-pattern gaseous detectors (MPGD) for muon detectors in high-energy particle experiments. In particular, this research focuses on two promising MPGD, micro-Resistive WELL(μ -RWELL) and μ -PIC. In this R&D, Both MPGD uses a high resistive layer to mitigate spark rate in a high background environment. This layer is fabricated using the carbon sputtering method and forms Diamond-Like-Carbon(DLC). However, the control of resistivity is not well established. R&D to control resistivity in sputtering is performed. Also, several performances, gain, position/timing resolution and spark rate in the beam test and neutron irradiation test. Furthermore, the simulation studies of μ -RWELL and μ -PIC have been performed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：MPGD ガス検出器 ミュオン

1. 研究開始当初の背景

2012年にLHC ATLAS/CMS実験でヒッグス粒子が発見され、精密測定が進められており、ヒッグス粒子とW/Zボソンの結合やトップクォーク、タウレプトンとの結合も観測されていた。また、ヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊するモードの証拠も 3σ 以上の有意度で観測され、その当時の観測精度では、標準模型と無矛盾であった。しかしながら、第2世代クォーク・レプトンとの結合はまだ観測には遠い感度であり、ミューオンに崩壊するモードの探索で崩壊分岐比に標準模型の約3倍の上限値がつけられていた。また、Run3実験に向けて2019-2020年に計画されていたATLAS Phase-Iアップグレード計画が進んでおり、ATLASミューオン検出器のEnd-cap領域($1.3 < |\eta| < 2.7$)にインストールされるマイクロパターンガス検出器(MPGD)であるマイクロメガス検出器の量産が進んでいた。ATLAS実験は、2023年のアップグレードで $2.7 < |\eta| < 4.0$ の前方領域にミューオン検出器導入を計画しており、その領域の高バックグラウンド環境化で要求性能を満たす検出器を研究・開発が進んでいた。特に、次世代MPGD検出器として有望な高抵抗薄膜を用いるmicro-Resistive WELL(μ -RWELL)やmicro-Pixel(μ -PIC)検出器が候補として挙げられており、研究開発が進められていた。

2. 研究の目的

本研究では、次世代マイクロパターンガス検出器として有望と考えている μ -RWELLと μ -PICの研究開発を行い、ミューオン検出器として高エネルギー実験への導入実現へ向けての最適化、性能評価を行うことを主目的としている。ATLAS実験は2023年のアップグレードで $2.7 < |\eta| < 4.0$ の前方領域にミューオン検出器導入を計画している。その領域の高バックグラウンド環境化で要求性能を満たす検出器を研究・開発する。特に、増幅部に採用している高抵抗層が安定動作の鍵になると考え、高抵抗層の安定製造技術の確立も計画している。さらに、50-100cm²の大型 μ -RWELLや μ -PICの製造も視野に入れ、テストビームや放射線照射実験で長期安定性や性能の一様性なども研究し、実用的な検出器としての性能を精査する。

3. 研究の方法

μ -RWELLはまだ黎明期であり、WELL構造、ガスの選択、ドリフト・増幅電圧の最適化など基礎研究が重要である。申請者は、高バックグラウンドでの占有率を減らすため、2次元読み出し小型 μ -RWELL検出器(10cm²)を製作し、線源や宇宙線を用いて動作試験・基礎特性測定を進めている(図1)。2次元読み出し μ -RWELL検出器は世界初の試みのため、今後検出器の性能評価・最適化を行うことが喫緊の課題である。また、高バックグラウンド環境下で安定動作をさせるために高抵抗層の抵抗値コントロールも不可欠である。また、検出器性能の最適化をするために μ -RWELL検出器の検出器シミュレーションも行い、実機での性能と比較することで検出器の理解も深め、最適なパラメータを導出することも行う。

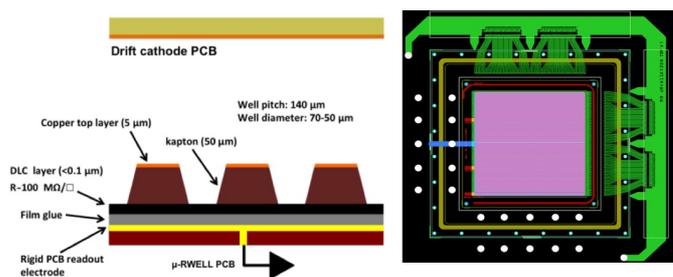


図1 μ -RWELLの構造の断面図と実際に試作した2次元読み出し μ -RWELLの設計図

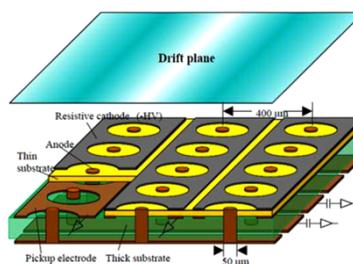


図2 μ -PICの構造の模式図

また、高抵抗薄膜を用いた μ -PIC検出器の性能評価も行う。本研究で使用する μ -PICは μ -RWELLと同様に2次元読み出しを可能にしており、カソードに高抵抗薄膜を使用することで放電を抑え、高放射線下での動作の安定性を向上させている(図2)。高抵抗薄膜を使用することで放電耐性が得られるが、高レート環境では電圧降下を起こしてしまい、ゲインが下がってしまう。そのため使用する高抵抗薄膜の抵抗値のコントロールは重要な課題である。高抵抗薄膜の素材には、カプトン薄膜にグラファイトスパッタ手法を用いて、Diamond-Like-Carbon(DLC)と呼ばれるsp²-sp³アモルファス結晶構造を作り出すことで、高抵抗を実現している。抵抗値のコントロール手法はまだ確立がされていないため、スパッタ時間で厚みを変えることや、窒素ドーピングなどの手法を用いて50k Ω /sq. -3G Ω /sq.のDLC薄膜の抵抗値のコントロールを行っている。

4. 研究成果

(1) μ -RWELL, μ -PIC 検出器の動作試験と性能評価

DLC 高抵抗薄膜を用いた $10 \times 10 \text{ cm}^3$ の μ -PIC を製作し、性能評価を行った。 ^{55}Fe の 5.9 keV X 線を用いて、様々なガスの種類と混合配率でアノード電圧の関数としてゲインの測定を行った。使用したガスは Ar:CO₂(93:7) と Ar:C₂H₆ を 90:10 から 70:30 まで変えたものを使用した。試験に使用したガス混合配率で 6000 を超えるゲインが得られ、Ar:C₂H₆=90:10 と Ar:CO₂=93:7 でゲインが 10000 を超えるアノード電圧で安定動作させることに成功した (図 3-4)。また、ゲインの位置依存性も測定し、アノード (カソード) で 10%(13%) の標準偏差で一様であることを確認した。

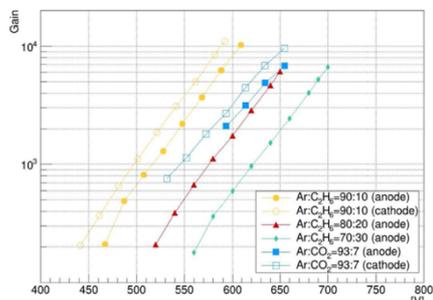


図 3 μ -PIC のゲインとアノード電圧の関係

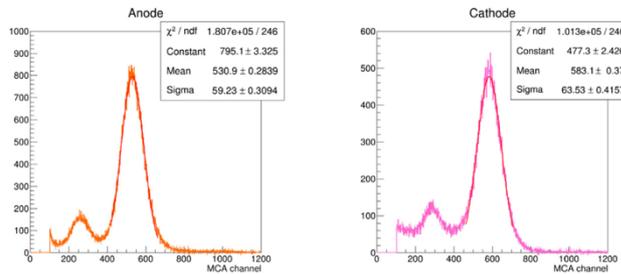


図 4 ^{55}Fe の X 線で得られた信号の電荷分布。左:アノード, 右:カソードで得られた電荷分布を示している

さらに、CERN SPS テストビームラインを用いて μ -PIC の位置分解能や検出効率を測定した。CERN で稼働している SPS H4 ビームラインを使用し、約 150GeV/c のミュオンやパイオンビームを用いた。ビームテストでは 4 台の μ -PIC を用いており、RC37/38 は 3kV/cm を 3mm ドリフト空間に印加し、RC41/42 では 1kV/cm を 1mm ドリフト空間に印加した (図 5-6)。



図 5 SPS テストビーム時の実験のセットアップ

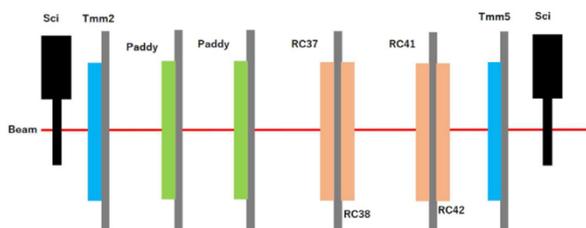


図 6 SPS テストビーム時の各検出器とトリガーに使われるシンチレーターの配置図

この実験のセットアップでは、Ar:CO₂=93:7 と Ar:C₂H₆:70:30 を使用した。検出効率をリファレンスであるマイクロメガス検出器 (Tmm) で観測されたビームの検出位置から μ -PIC の検出器で予想される検出位置に内挿し、 μ -PIC の検出効率を測定した。

図 7 は Ar:CO₂ を使用したときの検出効率を示しており、98%以上の検出効率を得られた。同様に Ar:C₂H₆ でも 99%以上の検出効率を得られた。また、Tmm マイクロメガス検出器から内挿された検出位置と μ -PIC で観測された位置を用いて μ -PIC の位置分解能を測定した。図 8 は測定された位置分解能とアノードの印加電の関係を表しており、100 μm 以下の位置分解能が得られることを確認した。

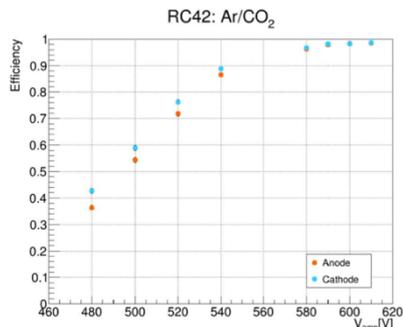


図 7 検出効率と増幅電圧の関係図

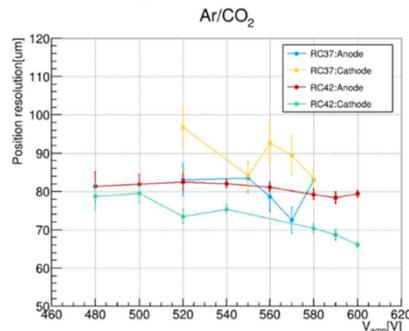


図 8 位置分解能と増幅電圧の関係図

時間分解能も測定し、13.5-16ns の時間分解能が得られた。

また、LHC などの高エネルギー高放射線バックグラウンド下での安定動作は実際の運用上非常に重要であるため、高速中性子照射試験を行い、 μ -PIC 検出器の高レート耐性を調査した。

図 9 は中性子照射時の電流モニター（ガスゲインは 2000 に設定）を表しており、 $1\mu\text{A}$ を閾値として照射した中性子に対する放電レートは 10^{-6} 以下であった（図 10）。DLC 高抵抗薄膜を使用しなかった μ -PIC と比較し、 10^{3-5} 倍放電レートが低下していることが確認され、DLC 高抵抗薄膜を用いることで大きな改善が観測された。

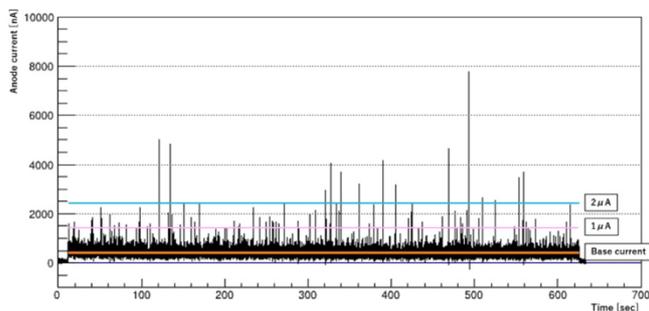


図 9 中性子照射時の電流モニターの時間分布

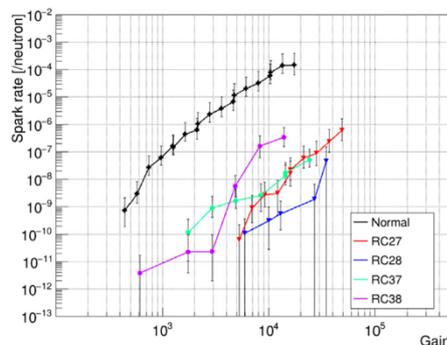


図 10 放電レートとゲインの関係図

$1\text{M}\Omega/\text{sq.}$ - $500\text{M}\Omega/\text{sq.}$ まで表面抵抗率の異なる DLC を用いた μ -PIC を使い、基本性能を評価し、放電耐性やゲインの測定も行うことができた。さらに、今までの検出器測定で使用してきた APV25 フロントエンドチップから ATLAS New small wheel (NSW) のマイクロメガス検出器用に開発が進められた VMM フロントエンドチップを用いたデータ取得し、VMM の性能測定を行うことに成功した。

また、 μ -RWELL に関しても、基本性能を測定するために ^{55}Fe 等の線源を用いて、今回製作した 2 次元 μ -RWELL 検出器で信号の測定や検出器パラメータによるゲインの違いを確認した。さらに、 μ -RWELL 検出器のパラメータ評価のために Garfield++ を用いて μ -RWELL の検出器シミュレーションの開発研究も試み、既存のマイクロメガスや GEM の検出器シミュレーションから μ -RWELL の構造をシミュレートすることに成功し、シミュレーション環境を構築した。検出器の動作試験やシミュレーションの高度化が進んでおり、将来的には高放射線環境下での動作試験やテストビームを用いた検出効率、位置分解能の測定に進む計画である。

(2) Diamond-Like Carbon (DLC) の安定した製造技術確立のための研究開発

μ -RWELL 検出器に欠かせないスパッタリングを用いた Diamond-Like-Carbon (DLC) 高抵抗層の安定した製造技術の確立、特に抵抗値の安定性に起因するパラメータの理解について研究を行った。高抵抗層の製造で抵抗値が安定しない問題は様々な要因が関係していると考えられており、特にスパッタリングを行う土台であるカプトンのタイプとスパッタリング時間（厚み）毎にカプトン中に含まれる水分量を変えたサンプルを作成し、スパッタリングを行うことでどのように抵抗値に影響が出るかを調査した。カプトンは、HN タイプと EN タイプという他のガス検出器でよく用いられる素材を利用し、素材による安定性の違いを測定対象とした。今回用いた $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ サイズで $50\mu\text{m}$ 厚みのカプトンでは 200°C で約 20 分の乾燥でほぼ水分量はなくなることがわかり、室内では 20 分晒すことにより水分量は乾燥前に戻ることが明らかになった。また抵抗値は、HN タイプ 10-20%程度ほど乾燥したフォイル方で抵抗値が低めに製造される傾向が観測されたが、EN タイプでは HN タイプほど水分量で大きな差は見られなかった。しかしながら、製造バッチ中では抵抗値の一様性は安定しているが、バッチ毎に抵抗値にばらつきがあることも観測された。まだ、スパッタリングでコントロールできていないパラメータがあることが示唆された。

(3) LHC ATLAS 実験の陽子陽子衝突データをヒッグス粒子の精密測定

計画していた研究課題に加え、コロナ禍で実験施設入構ができない期間は、現行のミュオン検出器を用いて取得した 13TeV の陽子陽子衝突データを用いたヒッグス粒子の精密測定も行った。特に、ミュオン検出器が重要な役割を果たすヒッグス粒子が Z ボソンと随伴生成され Z ボソンが荷電レプトン対に崩壊し、ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊する過程に注目し、解析を行った。この過程では 2 つのボトムクォーク由来のジェット (b-jet) を同定し、ヒッグスの質量を再構成する。b-jet 由来のミュオンが検出器で同定された場合は、その運動量をジェットのエネルギーに加えることで、b-jet の運動量分解能とヒッグスの質量分解能を向上させることに成功した。また、ZH→11bb 過程ではニュートリノなどの検出されない粒子がボトムクォーク由来のジェット以外からは放出されない。レプトン対 (ミュオンや電子) の運動量が精度よく実験的に測定されることを利用し、運動学的尤度からヒッグス粒子の質量分解能を改善した (図 11)。このような改善のもとで、ZH→11bb 過程でヒッグス粒子の信号を 4.2σ の有意度で観測することに成功した。また、他の VH 過程を統計的に統合することにより 6.7σ の有意度でヒッグス粒子がボトムクォークに崩壊する信号の観測に成功した。さらに、標準模型を超える物理に感度があるボソンの運動量の微分断面積も測定した。

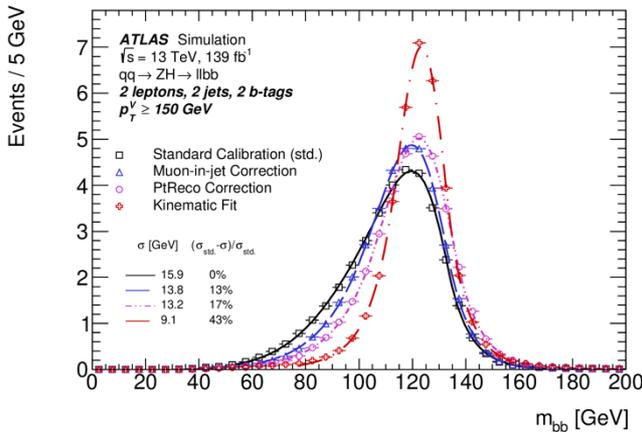


図 11 2つの b-jet から再構成されたヒッグスの質量分布のシミュレーション結果。それぞれのグラフは b-jet の補正手法の違いを表す

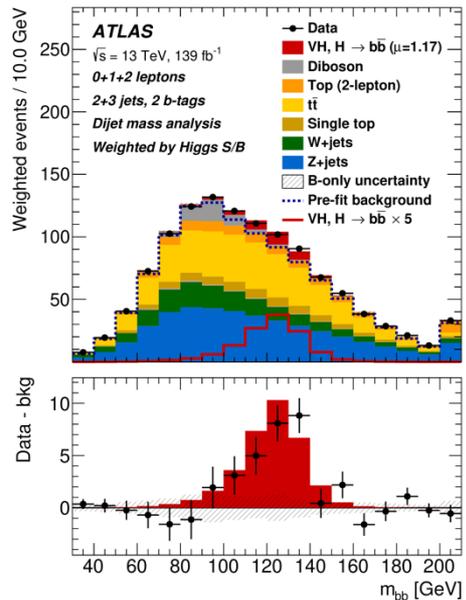


図 12 観測された質量分布をすべての VH 生成過程で足し合わせたもの。下図はデータから背景事象を引いている

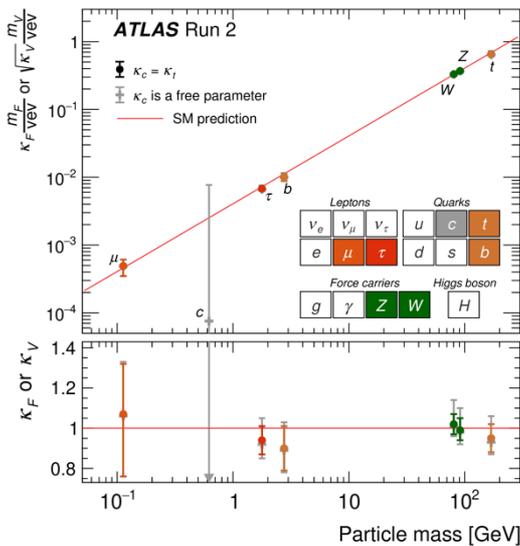


図 13 観測されたヒッグス粒子と標準模型粒子の結合定数を規格化したもの。赤線は標準模型のヒッグス機構で予想される値を示している

また、他の様々なヒッグス粒子の生成・崩壊過程の測定結果を統計的に統合することでヒッグス粒子と W/Z ボソン、第 3 世代フェルミオンとの結合は約 10% またはそれ以下の精度で測定し、標準模型と無矛盾であることを確認した。第 2 世代荷電レプトンであるミュオンとの結合は、約 30% の精度で測定することに成功したが、5σ の有意度に到達するには感度が足りず、今後ミュオン検出器をアップグレードし、更にデータを蓄積する必要があることを明らかにした。この結果は、ネイチャーに投稿された (図 13)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fumiya Yamane, Atsuhiko Ochi, Kohei Matayoshi, Keisuke Ogawa, Yusuke Ishitobi	4. 巻 951
2. 論文標題 Development of the Micro Pixel Chamber with DLC cathodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nucl. Instr. Meth.	6. 最初と最後の頁 162938
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2019.162938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Masubuchi, A. Ochi, et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 81
2. 論文標題 Measurements of WH and ZH production in the H->bb decay channel in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-020-08677-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Masubuchi, A. Ochi, et al., The ATLAS Collaboration	4. 巻 607
2. 論文標題 A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 52 ~ 59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-022-04893-w	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bencivenni G., Felici G., Gatta M., Giovannetti M., Morello G., Poli Lener M., de Oliveira R., Ochi A., Tskhadadze E.	4. 巻 1498
2. 論文標題 High space resolution μ -RWELL for high rate applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012003 ~ 012003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1498/1/012003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Development and performance tests of mu-PIC with DLC electrodes
3. 学会等名 6th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Past Experience with DLC and Workshop Goals
3. 学会等名 Workshop on Resistive Coatings for Gaseous Detectors (RCGD2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Micro-patterning techniques for DLC layers in MicroMegas and uPic detectors
3. 学会等名 Workshop on Resistive Coatings for Gaseous Detectors (RCGD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Industrialization of the DLC deposition process
3. 学会等名 Workshop on Resistive Coatings for Gaseous Detectors (RCGD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 説田暉
2. 発表標題 LTCC μ -PICの基本性能測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Testbeam for resistive μ -PIC
3. 学会等名 RD51 Collaboration meeting and "MPGD Stability" workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Testbeam for resistive μ -PIC (results)
3. 学会等名 RD51 Collaboration meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Introduction to Resistive DLC Collaboration
3. 学会等名 RD51 mini week (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石飛由介
2. 発表標題 CERN H4 ビームラインを用いたDLC μ -PICの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Precision manufacturing techniques (electrical and mechanical properties of detector components), additive manufacturing and new materials (low mass, radio-purity)
3. 学会等名 ECFA Detector R&D Roadmap Symposium of Task Force 1 Gaseous Detectors ((招待講演) (国際学会))
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長崎大智
2. 発表標題 SRSシステム (APV25, VMM3a) を用いたDLC μ -PICの性能測定
3. 学会等名 MPGD&Active媒質TPC2021研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下翼
2. 発表標題 DLCを用いたResistive μ -PICの電極構造と絶縁素材の改良
3. 学会等名 MPGD&Active媒質TPC2021研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋真斗
2. 発表標題 Resistive μ -PICの増幅率のガス依存性および最適電極構造の研究
3. 学会等名 MPGD&Active媒質TPC2021研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下翼
2. 発表標題 Solder Resist薄膜を絶縁性素材に使用したDLC μ -PICの基本性能の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2022年 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下翼
2. 発表標題 DLC μ -PICの光学的読み出しの研究
3. 学会等名 MPGD & Active媒質TPC2022研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsuhiko Ochi
2. 発表標題 Micro-pixel chamber with photo readout
3. 学会等名 RD51 Mini-Week workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	越智 敦彦 (OCHI Atsuhiko) (40335419)	神戸大学・理学研究科・准教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スイス	欧州原子核研究機構			