

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340072

研究課題名(和文)高抵抗素材を用いた次世代高輝度ハドロン衝突実験用粒子線検出器の開発

研究課題名(英文)Development of MPGDs for future intense hadron collider experiments using resistive electrodes

研究代表者

越智 敦彦(Ochi, Atsuhiko)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40335419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、次世代の高輝度ハドロン衝突実験で予想される実験環境下で安定に動作するマイクロパターンガス検出器を開発した。電極部に高抵抗素材を用いることで、独自にデザインした高抵抗電極型 μ -PICでは高速中性子環境下の放電確率を3桁以上抑制することに成功した。また、大型かつ微細(2m \times 50cmの面積かつ400 μ mピッチ)のマイクロメガス用高抵抗微細電極を量産する技術開発に成功し、ATLAS 実験の検出器アップグレードに採用されることになった。

研究成果の概要(英文)：New MicroPattern Gaseous Detectors have been developed for particle experiments operating under intense hadron collider in future date. The spark rate of the Micro Pixel Chamber with fast neutron has been suppressed more than 3 order using resistive material on electrodes. Also resistive electrodes for MicroMEGAS with large size (up to 2 m \times 50 cm) and fine structure (line pitch of 0.4mm) has been successfully produced. As results of those researches, our detector technology is adopted for LHC upgrade in ATLAS experiment.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 粒子測定技術 LHC実験 MPGD ガス放射線検出器 μ -PIC マイクロメガス ATLAS

1. 研究開始当初の背景

ハドロン衝突実験は、LHC 実験に代表されるように最高エネルギーにおける物理探究の手段として、新粒子発見や宇宙の初期状態探索など、多くの成果が期待されている。一方で最高エネルギー領域での興味ある物理事象は発生頻度が低いため、実験に必要な統計量を得るためには非常に強いビームの輝度が必要である。例えば現在稼働している LHC 実験の輝度は $10^{34}/\text{cm}^2/\text{sec}$ が設計値であるが、2023 年までに計画されている LHC アップグレード(HL-LHC)では、その 5 倍の輝度となる。

このような次世代の高輝度ハドロン衝突実験では、検出器に対して非常に高い耐入射粒子線許容量が要求される。ATLAS 検出器を例にとると、興味ある事象のトリガとして使われる μ 粒子線の検出器設置場所では、HL-LHC 時に最も強い場所で 5000 粒子/ cm^2/sec の入射量が予想されている。これは現行の検出器の設計限界値を上回るため、新たに、(a)高頻度の粒子線(特に中性子)環境下で安定に動作し、(b)初段トリガレートを下げるために高い位置分解能($\sim 100 \mu\text{m}$)を持つ、新たな測定器の開発が必要である。

当時計画中の HL-LHC などでは、先行していくつかの新測定器が欧米のグループなどから提案されているが、基本的には従来から用いられてきたワイヤーを使ったガス検出器を改良したものが主であり、高輝度粒子線環境下での動作と高い位置・時間分解能について十分に両立し得るかどうか課題も多い。一方、近年研究が盛んになってきたマイクロパターンガス検出器(MPGD)は非常に高い頻度の粒子線環境下で動作し、微細加工ゆえに位置分解能にも優れていることから、次世代高輝度ハドロン衝突実験に向け新たに提案する検出器として、非常に魅力のあるものである。

本研究課題では、MPGD の一つであるマイクロピクセル検出器(μ -PIC)をベースとして新たに考案した、高抵抗電極型 μ -PIC を用いた次世代ハドロン衝突実験用の荷電粒子検出器の開発(図 1)を当初提案した。 μ -PIC は、これまで国内では X 線画像検出器や宇宙線の観測、医療診断などの分野で開発実績がある。さらに高抵抗素材を用いた電極構造

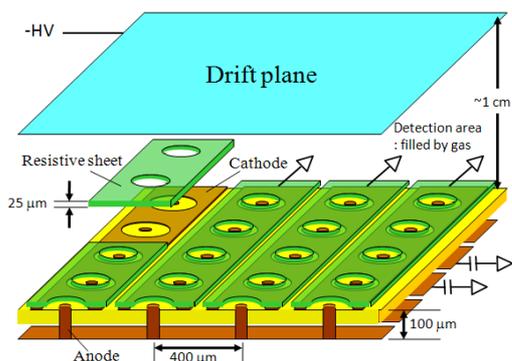


図 1 : 高抵抗電極型 μ -PIC の当初の構造図

を実現することにより、検出器中の一次電子生成が小さい(数十個程度) μ 粒子に対して高いガス増幅率を維持しつつ、一次電子生成数が巨大となる中性子由来の信号や放電に対して、電極抵抗により電場が減少され自動的にガス増幅が抑制(放電を停止)される。これらより、位置・時間分解能、高入射粒子許容量の何れにも優れ、高速のトリガ生成と粒子位置の精密測定を同時に可能とする、理想的な測定器システムが期待できる。

2. 研究の目的

本課題は、新たな着想による測定器開発を目指したものであるが、応用ターゲットとして HL-LHC 実験の検出器としての採用を目指し、以下の目標を設定した。

- (a) 検出器構造の試作と最適化
ガス放射線検出器を μ 粒子のトリガ検出器として用いるためには、1 万以上の高い増幅率が必要であるが、粒子や中性子の反跳陽子などにより数万個以上の電離が局所的に起こると増幅後の電子数が 10^{7-8} 個以上となり、最悪の場合引き起こされる放電が検出器を破壊することが知られている。これを解決するために高抵抗電極型 MPGD を開発し、さらにその抵抗素材の抵抗率、安定な作製方法などについて試作を繰り返し、最適化を行う。
- (b) 高負荷環境下におけるビームテスト
ハドロン衝突実験においては高入射粒子環境下での動作が要求されるため、高輝度の線、高速中性子などのビームテストを行い、概ね 10000 粒子数/ cm^2/sec における動作安定性や特性の劣化などを評価する。
- (c) 読み出し回路と大型検出器の開発
 μ 粒子トリガ検出器として用いるための多チャンネル高速エレクトロニクスを開発を行う。さらに、将来の量産を見据え数十 cm 角サイズの大型検出器を試作し、大型の国際協力実験への採用を目指す。

3. 研究の方法

前節で述べた研究目的(a)~(c)に合わせ、以下の様な形で研究を遂行した。

- (a) 検出器構造の試作・最適化のために、高抵抗電極型の MPGD としてマイクロピクセル検出器(μ -PIC)をベースとしたものを開発する。また、放電抑制のために重要な要素となる高抵抗電極素材について、適度な抵抗値や製作に適した材質や実装方法などを開発する。また研究後半においては、2018 年度から予定されている LHC Phase-I upgrade で MPGD の一種であるマイクロメガスの採用が決まったことから、これに向けたマイクロメガス検出器の開発を、特に高抵抗電極素材の開発を中心に進める。

- (b) 検出器のハドロンバックグラウンド環境下での放電耐性を見るためのビームテストとしては、高速中性子を用いるのが適している。このために神戸大海事科学部のタンデム加速器を用いて複数回のビームテストを行う。この他、SPring-8 の LEPS ビームライン、CERN H8 ビームラインなどの荷電粒子のビームラインを用いて、検出器の位置分解能や検出効率なども測定する。
- (c) 読出エレクトロニクスとしては、多チャンネル高速のものが要求される。当初は独自開発を目指していたが、RD51 collaboration との協力で MPGD 汎用型読出システム (SRS) が開発されたため、このシステム導入をもってエレクトロニクス開発に代えた。また、現実に LHC アップグレードで用いられることが決まったマイクロメガス検出器について、2mを超える大型の検出器開発が必要となるため、大型の高抵抗電極薄膜を製作するための技術開発も行い、実際の LHC 実験の中で我々のグループの技術が採用されることを目指す。

4. 研究成果

(1) 本課題研究の当初 (平成 23 年度~) は、放電耐性を持つ MPGD の開発として、高抵抗電極型マイクロピクセル検出器の開発を中心に行った。最初は導体である陰極上に直接高抵抗物質を塗布する図 1 で示すタイプの検出器をベースに試作したが、この手法では放電の抑制能力が十分でないことが明らかになってきたため、陰極として高抵抗物質のみを用い、信号読出しは絶縁膜を隔てた導体電極から誘起電荷として読み出す新しい方法 (図 2) を考案し試作した。構造が複雑となるため、製作精度などの問題で当初は満足な動作をしなかったが、カソードの高抵抗素材を改良する研究の進捗 (科研費研究課題 No.24654067) もあり、複数回の試作を繰り返した結果 (図 3)、翌年度 (24 年度) には動作を成功させ、ミュオン粒子トラッキングに必要な増幅率を大幅に上回る 70000 近いガス増幅率を得ることができた (図 4)。

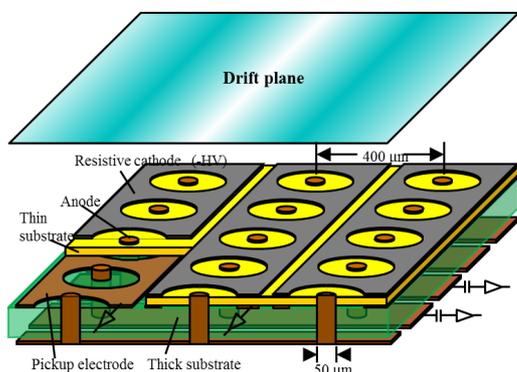


図 2 : 誘起電荷読出による高抵抗電極型 μ -PIC の構造図

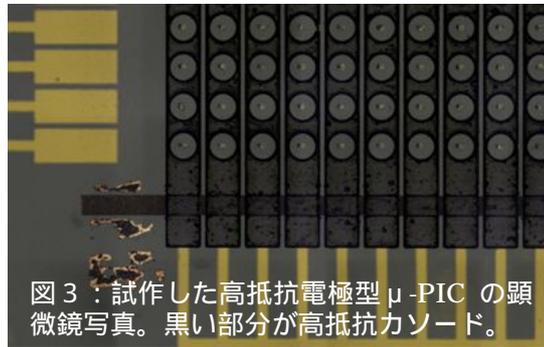


図 3 : 試作した高抵抗電極型 μ -PIC の顕微鏡写真。黒い部分が高抵抗カソード。

また、検出器の放電耐性は、神戸大学内のタンデム加速器による高速中性子 ($>1\text{MeV}$) を用いることにより評価した。高速中性子は検出器の構造体やガス中の原子核を反跳させることで、放電を引き起こしやすい非常に大きなエネルギーデポジットを生じるためである。この結果、開発した高抵抗電極型 μ -PIC は、従来の通常型に比べて放電率 (中性子照射量に対する放電の割合) が 1000 倍~10000 倍抑制できることが示された (図 5)。

この他に、検出器のベースガスとしてこれまで一般的に用いられてきたアルゴンガスに比べて、ネオンガスが優れていることや、構造体にプラスチック等水素の多く含まれている物質が含まれていると放電確率が上昇することなど、多くの知見が得られた。

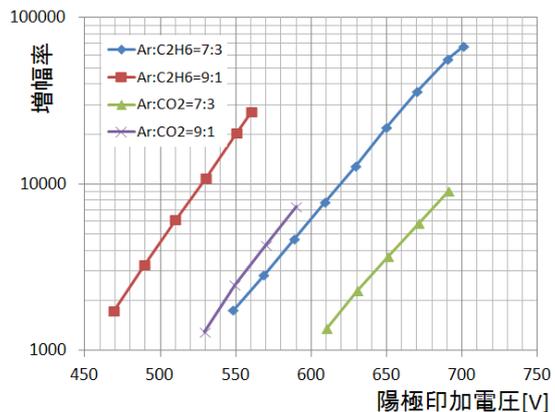


図 4 : 高抵抗電極型 μ -PIC の増幅率曲線。

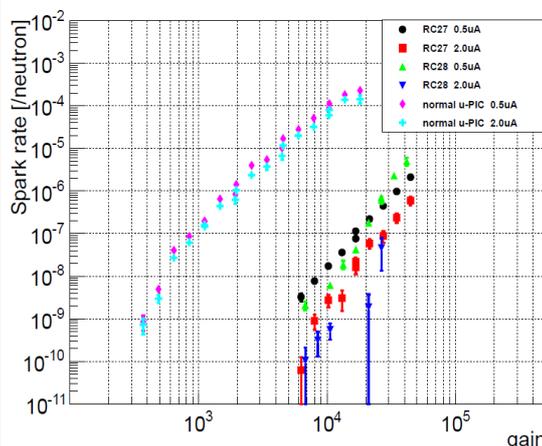


図 5 : 高速中性子に対する μ -PIC の放電確率を、それぞれの動作増幅率でプロットしたもの。通常型 μ -PIC (シアン、マゼンタ) に比べ、高抵抗 μ -PIC (黒、赤、緑、青) の放電率が数桁小さいのがわかる。

(2) LHC 実験は、2018 年のシャットダウン時に検出器の部分的なアップグレードを予定している。このうち ATLAS 測定器の内層エンドキャップミュオン検出器は新たに開発したもの(NSW: New Small Wheel)に取り換えることが決まっており、2012 年に MPGD の一種であるマイクロメガス検出器が採用されることになった。この検出器は高頻度のハドロン環境下で放電を抑制する必要がある、この分野では本課題による研究が先行していたことから、平成 24 年度以降は ATLAS MicroMEGAS 開発グループに参加することになった。この中で本課題研究では、放電抑止のための高抵抗電極について量産と大型化を見据えた開発を中心に行うことになる。

平成 24 年度は、まず高抵抗電極型 μ -PIC と同じ抵抗電極素材(ポリイミドベースのカーボンブラック)をスクリーン印刷により形成する手法や、インクジェットのような手法で塗布する手法を試した。この結果、スクリーン印刷法は比較的良好な電極形成が可能になり、これにより 10cm \times 10cm のマイクロメガスを試作し、動作を成功させた(図 6)。この試作機は高速中性子試験で十分な放電抑制効果が認められ、また CERN H8 ビームラインや SPring-8 における荷電粒子ビームテストでも試験され、150 μ m 以下の位置分解能を持つことが示された。

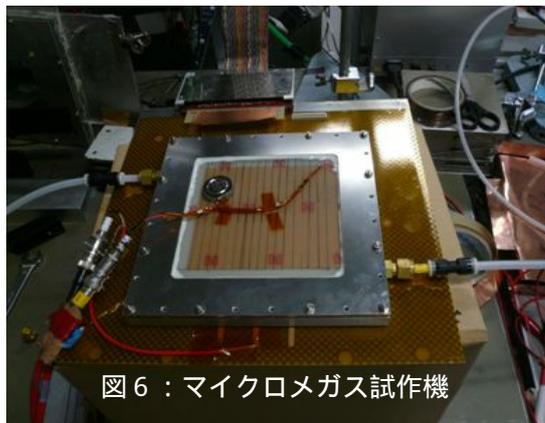


図 6 : マイクロメガス試作機

(3) ATLAS 実験で要求される検出器に必要な面積は、最大で 200cm \times 50cm という大型のものであるが、大面積にわたって精度よく 400 μ m 間隔の微細な電極を印刷法により作製するのは非常に困難であった。

こうした中、平成 25 年には新たに炭素スパッタとリフトオフを用いて微細電極構造を形成する手法を開発した。この手法は電極構造をリソグラフィ技術をベースとして形成するため数 μ m 程度の工作精度が実現できる。一方で国内に大型のスパッタ炉を持つメーカーが存在するため、数 m² の規模の電極パターンも一度に形成できる。

そこで、このスパッタ技術とリフトオフによる抵抗電極を用いた 10cm \times 10cm のマイクロメガスを作成し、高速中性子や荷電粒子を用いた動作試験を行った。この結果、スクリーンプリント等と同等の性能や安定性を示

すことができ、特に電極パターンの精度においてスパッタによる製作手法の優位性を示すことができた。さらに、中型(80cm \times 40cm)の抵抗電極薄膜(図 7)の開発にも成功し、CERN グループとの協力でこれを用いた大型マイクロメガス検出器を試作した。



図 7 : 大型マイクロメガス高抵抗電極薄膜

(4) ATLAS MicroMEGAS に要求される抵抗値(約 500k /)を実現するためのスパッタ条件(膜厚)は、実測値で約 300nm であることがわかったが、炭素は非常にスパッタ効率の悪い物質であり、薄膜の成長が非常に遅い(大型炉を使った実績で、50nm/h 程度)ことが問題となった。NSW 建設のためには、約 2000 枚の大型検出器が必要となるため、量産のためには製作のスピードも必要となる。

こうした中、平成 26 年度には、炭素スパッタに窒素をドーピングして抵抗値を下げるという、全く新たな手法を考案した。当初は、この手法を実証するために、スパッタガス(通常はアルゴン)に窒素をある程度の量混ぜる試みを行い、その結果数%の窒素を混ぜることで抵抗値の大幅な低下が得られたため、窒素導入量とスパッタ時間に対する抵抗値の定量的な関係を調査し、ATLAS 実験に適したドーピング条件を得ることができた(図 8)。これにより抵抗値のコントロールと製作時間の大幅な短縮を実現することに成功した。

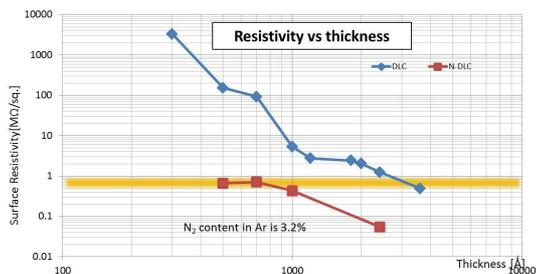


図 8 : スパッタにより形成した炭素の厚膜と抵抗値の関係。青線は炭素のみのスパッタで、赤線はスパッタガス(Ar)に 3%の窒素を混ぜて炭素をスパッタしたもの。

(5) 平成 26 年度は高抵抗電極を安価に量産するためにスクリーンプリントによる作製する手法も継続的に開発し、高抵抗インクとしてエポキシベースの素材を用いることにより、スパッタに若干精度が劣るものの ATLAS マイクロメガスには十分な品質で安価な抵抗電極薄膜の開発に成功した。

(6) 本研究課題による開発により、「窒素ドーパ炭素スパッタ法」と「エポキシベース炭素インクによるスクリーンプリント」の2種類の方法で、ATLAS マイクロメガスに必要な大型抵抗電極薄膜が作成可能となった。そこで実際にこれら両方の方法で大型(最大で2m×50cm程度)の抵抗フォイルの試作を行った。これらの試作品の評価から、ATLAS マイクロメガスの抵抗電極の量産に関しては、我々の研究グループの製作技術が採用されることになり、本研究課題の最終的な研究目的として設定した、「国際協力による大型の加速器実験への採用」について達成することができた。本研究の実績をもとに、今後のATLAS マイクロメガス検出器開発研究は、平成27年度より採択された科学研究費 基盤 A (15H02092)「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」へ引き継ぐ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Yuji Yamazaki, Fumiya Yamane, Tsuyoshi Takemoto, Tatsuo Kawamoto, Yousuke Kataoka, Tatsuya Masubuchi, Yuki Kawanishi, Shingo Terao, "Carbon Sputtering Technology for MPGD detectors", Proceedings of Science (TIPP2014) 351 (2014), 査読有

A. Ochi, Y. Edo, Y. Homma, H. Komai and T. Yamaguchi, "Micro Pixel Chamber with resistive electrodes for spark reduction", JINST 9 C01039 (2014), 査読有

DOI:10.1088/1748-0221/9/01/C01039

Atsuhiko Ochi, "MPGD R&D Activities in JAPAN", Journal of Physics: Conference Series 469 (2013) 012005, 査読無

DOI:10.1088/1742-6596/469/1/012005

H. Komai, A. Ochi, Y. Homma, Y. Edo and T. Yamaguchi, "Performance studies of Micro Pixel Chamber for the ATLAS upgrade", JINST 8 C03010 (2013), 査読有

Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Hidetoshi Komai, Yuki Edo, Takahiro Yamaguchi and Rui de Oliveira, "New Development of μ -PIC with Resistive Cathode and Capacitive Readout", IEEE Conference Record N14 (2012) 131, 査読無

Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Hidetoshi Komai, Yuki Edo, Takahiro Yamaguchi, "Development of a Micro Pixel Chamber for the ATLAS Upgrade",

Physics Procedia 37, 554-560 (2012), 査読有

Y. Edo, T. Yamaguchi, A. Ochi, Y. Homma, H. Komai, "Neutron beam tests for Micro Pixel Chamber (μ -PIC)", JINST 7 C07003 (2012), 査読有

A. Ochi, Y. Homma, H. Komai, Y. Edo, T. Yamaguchi, R. de Oliveira

"Development of Micro Pixel Chamber with resistive electrodes", JINST 7 C05005 (2012), 査読有

〔学会発表〕(計 31 件)

山根史弥, "LHC-ATLAS 実験に向けた MicroMEGAS 検出器の CERN-SPS/H4 ビームラインを用いた性能評価", 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21 日-24 日、早稲田大学)

A. Ochi, "Production of resistive foils for ATLAS/NSW", 2nd Academy-Industry Matching Event on Neutron Detection and 15th RD51 Collaboration Meeting (2015 年 3 月 16 日-20 日、CERN, Switzerland)

竹本強志, "MicroMEGAS 読み出し回りの resistive foil の特性テスト", 第 11 回マイクロパターンガス検出器研究会 (2014 年 12 月 19 日-20 日、東北大学)

山根史弥, "スパッタリングによる炭素薄膜電極を用いた MicroMEGAS 検出器の性能評価", 第 11 回マイクロパターンガス検出器研究会 (2014 年 12 月 19 日-20 日、東北大学)

山根史弥, "ATLAS-Micromegas 検出器のための高抵抗電極薄膜の開発", 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 18 日-21 日、佐賀大学)

A. Ochi, "Micro Pattern Gas Detector group at Kobe", KUBEC International Workshop on Dark Matter Searches, 招待講演 (2014 年 8 月 27 日 - 29 日、Brussels, Belgium)

A. Ochi, "New resistivity control method for carbon sputtering for fast production", RD51 mini week (2014 年 6 月 16 日 - 19 日、CERN, Switzerland)

A. Ochi, "Carbon Sputtering Technology for MPGD detectors", TIPP2014 (2014 年 6 月 2 日 - 6 日、Amsterdam, Netherlands)

竹本強志, "炭素スパッタリングを用いた抵抗電極を持つ MicroMEGAS の開発", 日本物理学会第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日-30 日、東海大学)

山根史弥, "高速中性子を用いた新型 MicroMEGAS の動作テスト", 日本物理学会第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日-30 日、東海大学)

山根史弥, "ATLAS アップグレードに向けた MicroMEGAS の性能評価", 第 10 回

- マイクロパターンガス検出器研究会 (2013年12月13日-14日、京都大学)
越智敦彦, "スパッタリングによる高抵抗薄膜電極を用いたMPGDの開発", 日本物理学会2013年秋期大会 (2013年9月20日-23日、高知大学)
A. Ochi, "Development of Micromegas using sputtered resistive electrodes for ATLAS upgrade", 11th RD51 collaboration meeting (2013年7月5日-6日、Zaragoza, Spain)
A. Ochi, "Micro Pixel Chamber with resistive electrodes for spark reduction", MPGD2013 (2013年7月1日-4日、Zaragoza, Spain)
越智敦彦, "高抵抗陰極型 μ -PICの電場及び構造の最適化", 日本物理学会第68回年次大会 (2013年3月27日、広島大学)
駒井英俊, "高抵抗陰極を用いた内層読出し型 μ -PICの開発", 第9回マイクロパターンガス検出器研究会 (2012年12月7日-8日、長崎総合科学大学)
山口貴弘, "ハドロン衝突実験に向けた μ -PICの読み出し回路の開発", 第9回マイクロパターンガス検出器研究会 (2012年12月7日-8日、長崎総合科学大学)
江戸勇樹, "ATLAS アップグレードに向けたMicroMEGASと μ -PICの性能評価", 第9回マイクロパターンガス検出器研究会 (2012年12月7日-8日、長崎総合科学大学)
A. Ochi, "New Development of μ -PIC with Resistive Cathode and Capacitive Readout", 2012 IEEE NSS/MIC (2012年10月27日-11月3日、Anheim, CA, USA)
A. Ochi, "Developments and tests of Micro Pixel Chamber with Resistive Cathode", 10th RD51 MPGD Workshop (2012年9月30日-10月5日、Stony Brook Univ, NY, USA)
- 21 越智敦彦, "高抵抗電極を用いた放電抑制型 μ -PICの開発", 日本物理学会2012年秋季大会 (2012年9月13日、京都産業大学)
- 22 山口貴弘, "高抵抗陰極及び容量性読み出しを用いた μ -PICの開発", 日本物理学会第67回年次大会 (2012年3月26日、関西学院大学)
- 23 駒井英俊, "ハドロン衝突実験の高輝度化に向けた μ -PICの開発のための高速中性子照射試験", 日本物理学会第67回年次大会 (2012年3月26日、関西学院大学)
- 24 A. Ochi, "Development and tests of Micro pixel chamber with resistive cathode and capacitive readout", 9th RD51 Collaboration Meeting (2012年2月20日-22日、CERN, Switzerland)
- 25 江戸勇樹, "ATLAS upgradeに向けた μ -PICの7MeV中性子照射試験", 第8回マイクロパターンガス検出器研究会 (2011年12月9日-10日、近畿大学)
- 26 駒井英俊, "放電抑制型 μ -PICの開発", 第8回マイクロパターンガス検出器研究会 (2011年12月9日-10日、近畿大学)
- 27 駒井英俊, "次世代ハドロン衝突実験に向けた μ -PICの開発", 日本物理学会2010年秋季大会 (2011年9月16日、弘前大学)
- 28 H. Komai, "Performance studies of Micro Pixel Chamber for ATLAS", MPGD2011 (2011年8月29日-9月1日、Kobe, Japan)
- 29 T. Yamaguchi, Y. Edo, "Fast neutron beam test for Micro Pixel Chamber", MPGD2011 (2011年8月29日-9月1日、Kobe, Japan)
- 30 A. Ochi, "Development of Micro Pixel Chamber with higher resistive electrodes", MPGD2011 (2011年8月29日-9月1日、Kobe, Japan)
- 31 A. Ochi, "Development of Micro Pixel Chamber for ATLAS upgrade", TIPP2011 (2011年6月8日-14日、Chicago, USA)

〔産業財産権〕
取得状況 (計 1 件)

名称: 高抵抗電極を用いたピクセル型電極による粒子線画像検出器
発明者: 越智 敦彦
権利者: 国立大学法人神戸大学
種類: 特許
番号: 第5604751号
出願年月日: 平成22年5月23日
取得年月日: 平成26年9月5日
国内外の別: 国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/upic/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
越智 敦彦 (OCHI, Atsuhiko)
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 40335419
- (3) 連携研究者
藏重 久弥 (KURASHIGE, Hisaya)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20205181
- 山崎 祐司 (YAMAZAKI, Yuji)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 00311126