

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740179

研究課題名(和文) J - P A R C の高計数率環境下で動作する 3 次元飛跡検出器の開発

研究課題名(英文) Development of a 3-dimentional tracking detector for a high-counting rate experiment

研究代表者

白鳥 昂太郎 (Shirotori, Kotaro)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号：70610294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000 円、(間接経費) 1,020,000 円

研究成果の概要(和文)：J-PARCにおける大強度ビーム実験を行うためにMicro Pixel Chamber( $\mu$ -PIC)を用いた3次元飛跡検出器(TPC)の開発を行った。検出器の $\mu$ -PIC本体と真空容器、TPCのドリフトケージをデザインした。 $\mu$ -PIC本体上部に信号増幅に用いる2段のGEMを設置し、ガスはP10を用い適切な電圧を印可することで、10の4乗以上のゲインが得られた。宇宙線による信号の読み出しを行った。宇宙線の通過事象があったタイミングから約10マイクロ秒後に電離作用によって発生した電子が $\mu$ -PICに届き信号が得られている事を確認した。各種テストにより目標とする性能の達成を期待させる結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：A 3-dimentional tracking detector for a high-counting rate experiment at J-PARC was developed. To use the detector in the high-counting rate environment, Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC) was used for a readout pad. The vacuum chamber for installing  $\mu$ -PIC and the drift cage which is an upper part were designed. Two GEM pad is installed above  $\mu$ -PIC for obtaining high gain. By using a P10 gas and applying a proper high-voltage, we obtained a gain of 4th power of 10. The operation and signal reading of the detector was tested by the cosmic-ray. From the readout board of  $\mu$ -PIC, we checked 10-microsec delayed signals which were generated by the cosmic-ray passing through the detector. From several testes, we expected to obtain the required performance.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：マイクロパターンガス検出器 Micro Pixel Chamber  $\mu$ -PIC Time projection chamber

## 1. 研究開始当初の背景

J-PARC では様々な実験プログラムが計画されており、最大の目標は大強度の K 中間子ビームを用いたユニークな実験を遂行し新しいハドロン・原子核物理の知見を得ることである。想定される K 中間子ビーム強度は 10 MHz となり、この大強度ビームに耐えられる性能を持った飛跡検出器が実験を行う上で必要である。既存のビームラインに設置している検出器は、従来のワイヤーを用いた MWPC やドリフトチェンバーを細密化し、想定ビーム強度 5 MHz を達成している。しかしながら、技術的に可能な 1 mm 間隔の MWPC を用いても、ワイヤー当たりの計数率が 200 kHz を超えており限界に差し掛かっている。また、実験では固定標的に 2 次粒子ビームを照射するため、前方方向への散乱粒子や周辺方向への崩壊粒子の測定は標的近傍で行わねばならない。そのため、設置する標的近傍検出器に対しても大強度ビームが照射され、ビームの通過による高計数率環境下での動作が必要である。また、このような検出器は広い範囲で粒子を測定する必要があるため従来のワイヤーを用いた検出器で細密化した構造を取る場合、物質量の増加による多重散乱やワイヤーテンションを支える構造的な問題から実現が難しい。よって、ワイヤー間隔が広くなり大強度ビームに耐える標的近傍検出器を作ることが困難であった。

近年、IC や電子回路基盤作製技術に支えられた微細加工技術を用いたマイクロパターンガス検出器(MPGD) が研究・開発されるようになった。代表的な MPG D である MSGC (Micro Strip Gas Chamber) は優れた位置分解能( $\sim 30 \mu\text{m}$ )と時間分解能(10 nsec)を持ち、高計数率に対する許容量もワイヤーを用いたガス検出器に比べて 1000 倍以上である。また、Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC)[1] は PCB (Print Circuit Board) 技術を用いて作製されており、原理的には大面積化・量産が可能である。すなわち、MPGD を用いることは J-PARC の大強度ビームに耐える標的近傍の大型検出器の開発において必須であると考えられる。

[1] A. Ochi *et al.*, NIM A 471 (2001) 264-267

## 2. 研究の目的

研究では 10 MHz の高計数率環境下で動作する 3 次元飛跡検出用の Time Projection Chamber (TPC) の開発を行う。TPC は 2 次元読み出しのパッド上に高電場をかけて粒子をドリフトさせる空間を作り、ドリフト時間とパッドの 2 次元情報から 3 次元的な飛跡を検出する。また、TPC は物質量を少なくでき高計数率環境に耐える MPG D を用いることで、J-PARC で用いる大型の 3 次元飛跡検出器として幅広い応用が可能である。

研究期間内では検出器のプロトタイプを

開発し、実際に J-PARC の大強度ビームを用いた照射実験を行う。高計数率環境下で安定動作し検出効率や位置分解能等の基本的な性能が得られているかのテストを行う。特に強度上昇の際にはドリフト時間の間に粒子の飛跡が多重となる確率が増える。多重粒子の分離が 100 ns 以下の時間で可能とすることが最大の目標である。これらの研究を行い高計数率環境下で安定動作し大強度ビームでの実験が遂行可能となる新しい技術の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

10 MHz の高計数率環境下における新しい飛跡検出技術の確立を目的とした 3 次元飛跡検出用の Time Projection Chamber (TPC) 検出器のプロトタイプの開発を行う。TPC は 2 次元読み出しのパッド上に高電場をかけて粒子をドリフトさせる空間を作り、ドリフト時間とパッドの 2 次元情報から 3 次元的な飛跡を検出する(図:1)。TPC 用の 2 次元読み出しのパッドとして“Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC)”を使用する。 $\mu$ -PIC はマイクロパターンガス検出器の一種である。表面部分は直径 50  $\mu\text{m}$  のピクセル状のアノードの回りを直径 200  $\mu\text{m}$  のカソードが取り囲む形をしている。アノードは下部の絶縁層(ポリイミド)部分を貫き、裏面でストリップにつながっている。また、カソードは絶縁層の上に置かれていて、裏面のアノードストリップとは垂直方向に区切られており、アノード・カソード両方から読み出しをすることにより、400  $\mu\text{m}$  の間隔で 2 次元情報を得ることができ、100  $\mu\text{m}$  を切る分解能が達成できる。PCB (Print Circuit Board) 技術を用いて作製されており、原理的には大面積化・量産が可能である。そして、細密化による高計数率耐性、高いガス増幅率や放電損傷に強く、低ノイズでの動作が可能であるという特徴を有する。 $\mu$ -PIC の特徴は高計数率下で長期的に実験を行うという、本研究の実験条件に適している。また、 $\mu$ -PIC は京都大学宇宙線研究室などで $\gamma$ 線カメラや暗黒物質探索、医療装置として開発が進められており、基本的な技術のノウハウの蓄積がある。よって、応用する際の技術協力を得る環境が整っている。

研究期間内では検出器のプロトタイプを開発し、実際に J-PARC の大強度中間子ビームを用いた照射実験を行う。検出器が高計数率環境下で安定動作し、実験に必要な性能(位置分解能 100  $\mu\text{m}$  以下)が得られているかのテストを行う。特に強度が上昇するにつれて粒子の飛跡が多重となる。高計数率環境下で多重粒子の分離を 100 ns 以下の時間で達成することが最大の目標である。段階的に TPC 検出器の開発を行う。各段階で検出効率や位置分解能、時間分解能力のテストを行い、比較検討を行いながら次の段階へと進む。

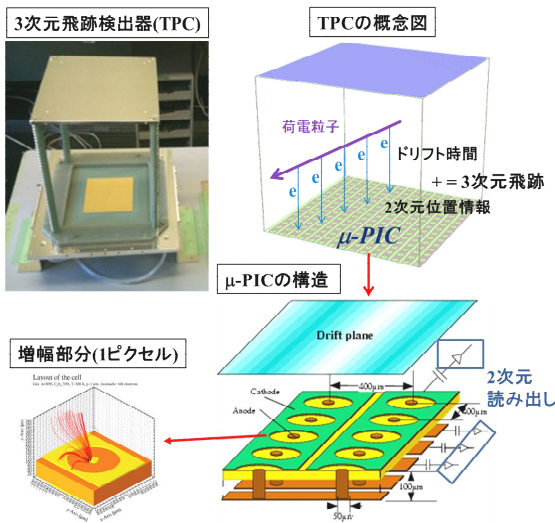


図1: 3次元飛跡検出器の概念図。増幅と2次元の読み出しを行う部分にμ-PICを用いる。

#### (1) デザインと製作

TPCのデザインは電場計算ソフト(Garfield等)を用いて行い、最適な仕様を決定する。設計を行い、プロトタイプを製作する。読み出し用の2次元パッドとして、10cm×10cmのμ-PICを使用する。増幅部分は2段とし、1段目はGEMを用いる。1段目で10倍程度、2段目で3000–6000倍の増幅を行い最小電離粒子の検出に必要な $10^4$ 以上のゲインを得る。ドリフトスペースの長さは実験に必要な20cmとする。ドリフトスペースには高電圧を使用するため筐体への放電対策も行う。

#### (2) 線源や宇宙線によるビームを用いないテスト

プロトタイプの完成後は基本的な動作のテストを行う。印加電圧や封入するガスを変えてのゲインの電圧依存性を測定し、線源や宇宙線を用いて実際に飛跡の検出を行い、位置分解能(100 μm以下)を評価する。また、高い計数率下では多重粒子飛跡が増える。よって、ドリフト方向への時間分離能力が100 ns以下に達しているかを測定する。実験期間の1–2か月を考慮し長期的に安定的に動作するかを確認するテストを行う。

#### (3) RCNPにおけるビーム照射テスト

RCNPはエネルギー400 MeVの一次陽子ビームを $1-10^{10}$  Hzとコントロールされた強度で使用することが出来る。 $10^5-10^8$  Hzの強度を変えた陽子ビームを用いて、3次元飛跡検出のテストを行う。テストでは宇宙線等の(2)と同様の印加電圧やガス依存性のテストを高計数率環境下で行い、必要な性能の達成が出来ているかをチェックする。また、ビーム強度依存性から実際の高計数率環境下で必要なオペレーションの最適値を決定する。

#### 4) J-PARC K1.8 ビームラインにおけるビーム照射テスト

J-PARC K1.8 ビームラインにて、1–2 GeV/c

のπ中間子ビームの照射テストを行う。本実験のコミッショニングの時間を利用して標的周辺に設置してビームを照射する。実際に実験を行う10 MHzの高計数率環境下にて飛跡検出テストを行い、位置分解能100 μm以下と100 ns以下の時間差での多重粒子分離を達成する。

#### 4. 研究成果

検出器の基幹部分であるμ-PIC本体と真空容器の製作を行い、動作確認のテストを行った。μ-PIC本体は真空容器底板に取り付けられ、その上部をドリフトケース並びに真空容器で覆う形になっている。真空容器底板以外のパーツは京都大学宇宙線研究所で動作テストに使用されている既存の物を使用した。μ-PICの動作の際には容器内部をいったん真空にしてからP10ガスを封入し封切る。封じきった状態で2週間ほどのオペレーションが可能である。封じ切りの際の真空引きの時間はオペレーションを行う期間を考慮して行う。長期の場合はアウトガスによる劣化が無いよう2,3日の真空引きを行う。動作確認のテストの場合は短時間の真空引きで良く、今回は3時間ほど行った。真空引き後はあらかじめ繋いであるP10ガスボンベからガスを注入する。ガスの充填の際はいったん1気圧までP10ガスを封入したあと、真空引きで $10^{-2}$ Pa程度まで減圧しまたガスを注入する。ガス注入を3回繰り返し、バルブを閉めP10ガスを封入する。真空容器の上部がTPCとなっており、高圧電場をかけることでドリフトした電子が下部のGEMおよびμ-PICで増幅され、μ-PICのストリップによって読み出される。読み出し部分は真空容器底板からストリップ部にCR基盤を取り付け、そこに読み出しボードを取り付けて行う。読み出しボードは信号処理用のASICとFPGAで構成されており、適切なトリガータイミング信号とコントロールシグナルを送ることでμ-PICからの信号を処理し出力部分に送る。読み出しボードはメモリモジュールにつながり、VMEバスを通してPCにボードからのデータが取り込まれる。

動作のテストと読み出しボードからの信号のテストを行った。図2に示すセットアップを構成し、μ-PICおよび2段のGEM、ドリフトケースにそれぞれ400V、500V、800V、3.2kVを印加する。GEM間の電位差を300Vとすることでμ-PICにおいて $10^4$ の信号増幅となる。信号の確認は読み出しボードのアナログ出力とデジタル出力から行った。電圧印可後に $^{90}\text{Sr}$ 線源をドリフトケース付近に当てることで信号が生成されていることを確認した。また、ドリフトケースをプラスチックシンチレーションカウンターで挟み、宇宙線と同期した信号が得られるか確認作業を行った。カウンターの同時計測で宇宙線のトリガーを使用し、読み出しボードにトリガー信号とドリフトタイム(約10 μs)を考慮した読み

出しタイミング信号を送ることで、適切な宇宙線の信号が読み出しボードから送られていることを確認した。また、テスト期間中は放電等が起こることが無く安定に動作した。よって、製作した $\mu$ -PIC が適切に動作していることを確認することが出来た。ビームテストによって高計数率環境下での放電耐性や飛跡検出等のテストを行うことはできなかったが、各種テストにより目標とする性能の達成を期待させる結果が得られた。

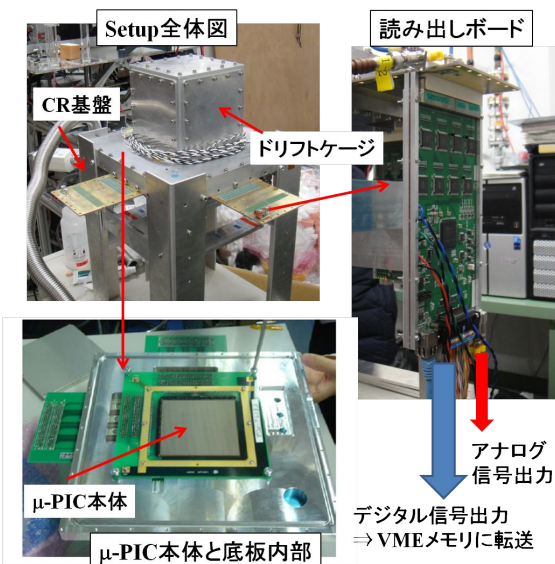


図2: 動作テストを行ったセットアップ。  
 $\mu$ -PIC 本体上部には2段のGEMを設置する。

取得年月日：  
 国内外の別：

〔その他〕  
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白鳥 昂太郎 (SHIROTORI, Kotaro)  
 大阪大学・核物理研究センター・助教  
 研究者番号：70610294

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

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0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況 (計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：