

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13474

研究課題名(和文) 微細孔ガラス素材を用いた中性子イメージング検出器の開発

研究課題名(英文) Development of neutron imager with glass capillary plate

研究代表者

門叶 冬樹 (Tokanai, Fuyuki)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：80323161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：微細な電極構造を持つマイクロパターンガス検出器(MPGD)を用いて中性子イメージングの開発を行った。MPGDの素材として、結晶化感光性ガラスPEG3Cおよびファネル構造を持つガラスキャピラリープレートを開発した。続いて中性子変換材として¹⁰Bが蒸着されたAl窓を用い、封じ切り型のMPGDを製作した。中性子と¹⁰Bの相互作用によりNe(90%) + CF₄(10%)混合ガス中に飛び出した線または⁷Liの飛跡をCMOSカメラで撮像できる中性子イメージング検出器を試作し、X線および中性子源を用いて撮像試験を行った。またPHITSコードを用いて検出効率および位置分解能特性についての評価を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed a micro pattern gaseous detector (MPGD) for neutron imaging. A crystallized photosensitive etching glass (PEG3C) and a funnel type glass capillary plate (CP) were developed as the new material of MPGD. We have also successfully developed an optical imaging gas detector, which consists of a holee-type MPGD, a mirror, and a CMOS camera system, for neutron imaging. The gas detector was filled with Ne (90%) + CF₄ (10%) gas mixture at 1 atm. Its performance was investigated using an X-ray beam and a thermal neutron beam at KUANS. Owing to the high imaging capability of the optical imaging gas detector, tracks of alpha rays or ⁷Li produced by the interaction between neutrons and ¹⁰B were clearly observed. The characteristics of detection efficiency and spatial resolution were assessed on the basis of the results of Monte Carlo simulations using a particle and heavy ion transport code system (PHITS).

研究分野：宇宙・原子核実験

キーワード：中性子 検出器 イメージング 微細加工技術

1. 研究開始当初の背景

中性子が元素の原子核と相互作用を起こすことを利用することで、原子核特有のコントラストを持つ透過像が得られる。例えば中性子が H、B、Li などの軽元素と相互作用を起こす確率は、Fe、Cu、Pb などの重元素と比較して大きく、原子番号依存性を持つ X 線と物質との相互作用とは異なる。このため中性子線の物質の透過像を用いた中性子イメージングは、重金属を主に含む容器中に蓄積された水分や、水素を多く含む物質の画像化に有効で、高度経済成長期に大量に建設された高架道路や橋など、大型構造物内部の劣化状態や、燃料電池内の水発生の現象を可視化する非破壊検査への応用に大きな期待が寄せられている。従来の中性子源には原子炉や大型加速器を用いた大規模な施設が必要で、その利用機会は限られていたが、近年、小型加速器を用いた中性子源システムが開発され、オンサイトで中性子イメージングが現実的なものになってきた。しかしながら、小型中性子源の場合、大規模な施設と比較して中性子の強度が下がってしまうという問題点がある。そのため、中性子イメージングの汎用性を上げるためには、感度が高く、優れた位置分解能と大きな有効面積を持つ中性子撮像システムを開発し、実用化に近づける必要がある。

2. 研究の目的

我々はこれまで、高磁場環境中のシンチレーション光やチェレンコフ光などの微弱光検出、宇宙 X 線の高感度偏光観測などを目的に、後述するマイクロパターンガス検出器 (MPGD) の開発研究を進めてきた。そして、微細な細孔で形成される細孔型 MPGD の細管中に、放射線とガス分子との相互作用を限定することで、高感度かつ高い位置分解能を有する『放射線イメージング』が実現できることを見出した。細孔型 MPGD は数十 μm 径の小さな穴が薄い絶縁層に規則正しく無数に開いており、その上下面に電極として金属蒸着が施され電圧が印加できる構造となっている。本研究では、中性子に高い感度を持つ ^{10}B 膜を用いて MPGD の入射窓を作成し、封じ切り型で可搬型の細孔型 MPGD を開発する。そして、素材中の水素による散乱の影響が少ないガラスを新素材として使い、酸処理によるエッチング技術や吹きつけ加工の一種『サンドブラスト加工』を用いて新しく細孔型のマイクロパターンガス検出器を開発し、高い空間分解能を持つ中性子イメージング検出器の実用化に向けた研究を行う。

3. 研究の方法

MPGD は、微細加工技術や半導体製造技術を用いて製作した微小な電極から構成されるガス放射線検出器の一つで、優れた位置分解能と高い時間分解能、そして高計数率での動作が特徴である。

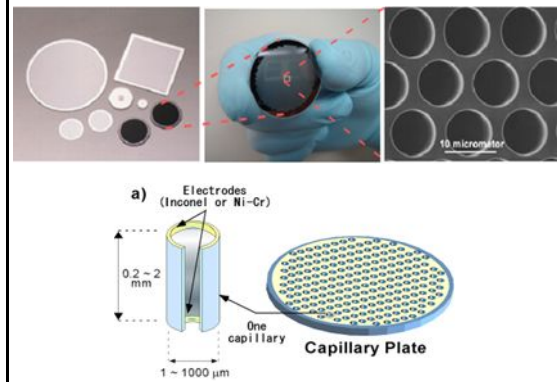


図1. キャピラリープレートの概念図。

図1に我々が世界に先駆けて開発を進めているキャピラリープレート (CP) を示す。MPGD の素材中の水素に中性子が散乱され、中性子測定へ影響を与えない素材からなるガラス CP を細孔型 MPGD の素材に採用した。中性子変換材に ^{10}B を蒸着した透過型および反射型 CP の概念図を図2に示す。透過型 CP は検出器の入射窓部に、反射型 CP は CP の陰極を構成する電極部に ^{10}B が蒸着されている。中性子と ^{10}B の相互作用により発生した α 線または ^7Li は、ガス中を通過する際に一次電子を生成する。この一次電子を CP の細管内に導き、管内部で電子増殖および光増殖を起こさせ、その信号を読み出す方法である。

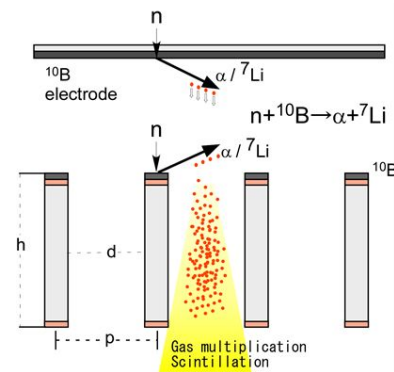


図2. 中性子変換材に ^{10}B を蒸着した透過型および反射型 CP の概念図。

4. 研究成果

まず、原子力研究開発機構で開発されたモンテカルロ計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) を用いて中性子に対する細孔型 MPGD の応答性を評価した。使用した CP は、絶縁体である 300 μm 厚のガラス基板に直径 50 μm 径の小さな穴が 58 μm 間隔で規則正しく無数に開いており、中性子変換材として ^{10}B が蒸着されている。図3 (左) はシミュレーションで作製した CP のモデルを示す。図3 (右) は反射型 CP の PHITS シミュレーションにより得られた、 ^{10}B と中性子の相互作用により飛び出す α 線

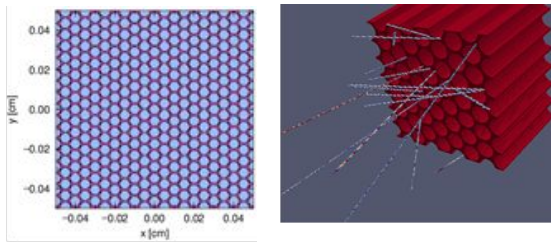


図3 . PHITS シミュレーションで用いた CP のモデル (左) と反射型 CP の表面に蒸着された ^{10}B と中性子との相互作用によりガス中に放出された ^3Li の飛跡 (右)

の Ne (90%) + CF_4 (10%) 混合ガス中の飛跡である。図4に ^{10}B の膜厚を変えて蒸着した透過型および反射型 CP の 2.5×10^{-2} 、 2.5×10^{-3} 、 2.5×10^{-4} eV の中性子に対する検出効率を示す。同じ厚みの ^{10}B の場合、エネルギーの低い中性子に対する検出効率は、 $1/\nu$ 則に従う捕獲反応のため高くなることがわかった。透過型 CP では、 ^{10}B の膜厚が増すにつれて検出効率は高くなりプラトーとなるが、低いエネルギーの中性子 (2.5×10^{-4} eV) では約 $2 \mu\text{m}$ の ^{10}B 膜でピークとなり、その後徐々に低下する。これは中性子の入射面近傍で捕獲され飛び出した ^3Li が、厚い ^{10}B 膜の途中で止まってしまい、検出器に充填したガスの有効領域まで到達できないためであることがわかった。反射型 CP の検出効率は、どのエネルギーの中性子に対しても膜厚と共に上昇し、プラトーとなることがわかった。また、反射型 CP は穴の開いていない領域のみに ^{10}B が蒸着されているため、透過型 CP と比較して CP の開口率 (67%) 分、検出効率が低くなる事が予想される。しかし、CP に蒸着し

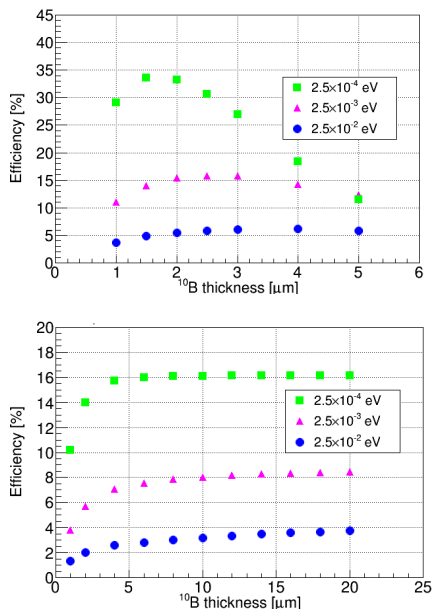


図4 .PHITS シミュレーションで得られた透過型 (上) および反射型 (下) CP の ^{10}B 蒸着厚に対する中性子の検出効率。

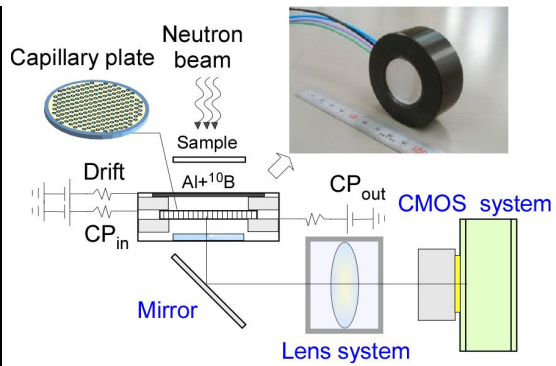


図5 . CP を用いた撮像型中性子検出器の概念図。

た ^{10}B 膜が厚くなると、その側面の領域から放出された ^3Li も検出器のガス領域を通過しエネルギーをロスするため、反射型 CP では開口率で期待された検出効率よりも高い値を持つことがわかった。

PHITS コードを用いたシミュレーションの結果から、 $3 \mu\text{m}$ の厚みを持つ ^{10}B を Al 窓に蒸着し入射窓を作製し、中性子イメージング検出器を試作した。その概念図を図5に示す。実用化を見据えてコンパクト化した専用真空容器に CP を設置し、Ne (90%) + CF_4 (10%) 混合ガス 1 気圧を封入した。中性子のイメージング試験は、京都大学加速器中性子源 KUANS からの熱中性子ビームを用いて行った。イメージング用のサンプルを透過した中性子は ^{10}B で捕獲され、放出された ^3Li を ^{10}B が蒸着された Al 窓と CP の上面部間の有感領域 (3 mm) で検出した。有感領域に作られた一次電子は、CP の細孔内でガス分子を雪崩的に電離・励起し、その際に発生したガスシンチレーション光を、ミラー光学系で反射し CMOS カメラシステムで撮像した。図6に、 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の穴の開いた B_4C シートをサンプルに使い、CMOS カメラの撮像時間を 1 秒 (左) および 2 分 (右) に設定して得られた中性子像を示す。1 秒間の積算時間で約 20 発の ^3Li の飛跡が観測され、2 分間の積算時間により B_4C シートの開口部 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ を鮮明に撮像することができた。

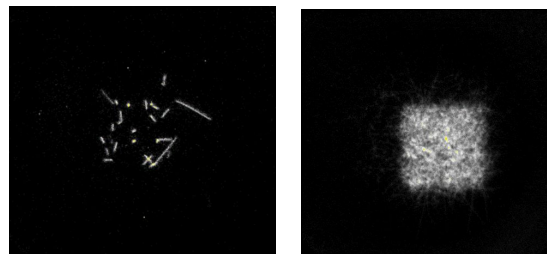


図6 . CP を用いた撮像型中性子検出器で撮像した中性子像。 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の穴の開いた B_4C シートを通過した中性子を 1 秒 (左) および 2 分 (右) 積算したイメージ。

実験と同じ構造を持つ透過型 CP の中性子に対する応答を PHITS シミュレーションにより評価した。図 7 は ^{10}B と中性子の相互作用により飛び出した線(左)および ^7Li (右)の Ne (90%) + CF_4 (10%) 混合ガス 1 気圧中の飛跡であり、実験により得られたイメージを良く再現していることがわかる。撮像性能は、電極から飛び出した線(^7Li)の比較的長い飛跡の影響を受け、約 2 mm 程度の空間分解能に制限される事がわかった。現在、X 線イメージング試験で開発した高解像度化を応用し、空間分解能 100 μm を持つ中性子イメージング用 MPGD の実用化に向けて開発を進めている。

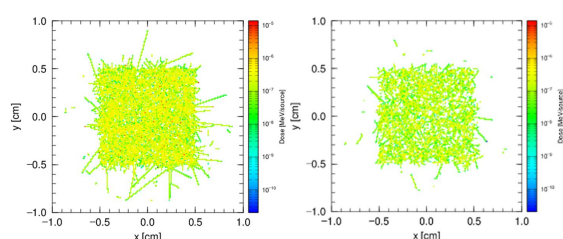


図 7 PHITS シミュレーションにより得られた 1 cm × 1 cm の中性子イメージ。 ^{10}B と中性子の相互作用により飛び出した線(左)および ^7Li (右)。

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 3 件)

H. Kondo, F. Tokanai, T. Sumiyoshi et al., “Development of a Sealed-Type Capillary Plate Gas Detector for Thermal Neutron Imaging”, Plasma and Fusion Research, 13, (2018), 2406018-1-4.

住吉 孝行、門叶 冬樹、近藤 治靖、 “細孔型 MPGD を用いた中性子イメージング検出器の開発”、波紋：Neutron network news、27、(2017)、pp.16-19.

R. Ito, F. Tokanai, T. Sumiyoshi et al., “Basic Performance of Hole-Type MPGD with Fine-Pitch PEG3C”, JPS Conf. Proc., 11, (2016), 10005.

〔学会発表〕(計 7 件)

R. Ito, F. Tokanai, T. Sumiyoshi et al., “Development of neutron imaging detector with glass capillary plate”, ISRD2018: International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses, 2018 年 01 月, Tsukuba-Japan

伊藤 龍太郎、門叶 冬樹、住吉 孝行 他、 “キャピラリープレートを用いた中性子イメージング検出器の開発”、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 03 月、福岡国際会議場(福岡県福岡市)

伊藤 龍太郎、門叶 冬樹、住吉 孝行 他、 “キャピラリープレートを用いた中性子イメージング検出器の開発 II”、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、2018 年 09 月、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

伊藤 龍太郎、門叶 冬樹、住吉 孝行 他、 “ファネル型キャピラリープレートを用いた MPGD の開発”、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 09 月、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

R. Ito, F. Tokanai, T. Sumiyoshi et al., “Basic Performance of Hole-Type MPGD with Fine-Pitch PEG3C”, First International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses, 2016 年 01 月, Tsukuba-Japan

S. Ishizawa, F. Tokanai, T. Sumiyoshi et al., “Development of hole-type MPGD with funnel-capillary plate”, 14 th Vienna Conference on Instrumentation, 2016 年 02 月, Vienna-Austria

H. Sugiyama, F. Tokanai, T. Sumiyoshi et al., “Progress of the Capillary Plate-based Gaseous Detector for high energy photon imaging”, The 4th International Conference on Micro-Pattern Gas Detector, 2015 年 10 月 12 日, Trieste - Italy

〔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：
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

門叶 冬樹 (TOKANAI, Fuyuki)
山形大学・理学部・教授
研究者番号： 2 1 8 6 3 2 2 8

(2) 研究分担者

住吉 孝行 (SUMIYOSHI, Takayuki)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号： 3 0 1 5 4 6 2 8

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()