

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24710103

研究課題名(和文) マイクロチャンネルプレートに窒化ホウ素を被覆した中性子コンバータの開発

研究課題名(英文) Development of neutron converter based on Boron nitride lined MCP

研究代表者

大下 英敏 (Ohshita, Hidetoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・博士研究員

研究者番号：00625163

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)：本研究は中性子検出用³-ヘリウムガスの代替コンバータとして、Micro-Channel Plate (MCP)の細孔内に窒化ホウ素を被覆した中性子コンバータを開発することを目指している。研究期間内において、新しい中性子コンバータの形状の最適化やガス放射線検出器としての動作条件の検討がおこなわれた。他にも、物理蒸着装置を整備し、簡単な形状に対する成膜作業が可能となった。

研究成果の概要(英文)：As alternative techniques to Helium-3 based detector, we have developing a new neutron converter based on a Boron nitride lined MCP. During the study period, the design of the neutron converter was optimized by the results of Geant4 simulation, the operation condition as a gaseous radiation detector was checked. A physical vapor deposition equipment for a flat plate was also prepared.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：中性子検出器 中性子コンバータ ホウ素蒸着 MCP GEM

1. 研究開始当初の背景

3-ヘリウムは熱中性子に対して高い感度を持ち、取り扱いも容易であることから、中性子検出用のコンバータ材(中性子を吸収して検出可能な荷電粒子を放出する物質)として、広く世界中で使用されている。3-ヘリウムの価格はアメリカ同時多発テロ事件以後、アメリカの国防政策や投機目的のため、過去2年間で10倍に高騰した。現在でも慢性的な供給不足の状態が続いており、3-ヘリウムに代わる代替のコンバータ材の開発が急務となっている。

3-ヘリウムに代わる中性子コンバータ材としては、フッ化リチウムや酸化ホウ素をドープした硫化亜鉛シンチレータが有力とされているが、一般にバックグラウンドである線に対する感度が高いこと、高価な光検出器を必要とすることが欠点として挙げられ、検出器システムの大面積化や低コスト化にも困難がともなう。検出器システムの大面積化や低コスト化の観点では、放射線ガス検出器による検出器システムの構築が今後も有力な候補であり、放射線ガス検出器と共に使用できる中性子コンバータの開発が必要である。

茨城県東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)内に世界最高強度の中性子実験施設として、物質・生命科学実験施設(MLF)が建設され、物質科学・生命科学分野での多大な貢献が期待されている。MLFの大強度中性子環境下で動作する中性子検出器として、申請者らはGas Electron Multiplier(GEM) [1]を用いた二次元中性子検出器を開発[2]し、MLF BL21の中性子ビームモニターとして実用化をおこなった(図1)。開発した二次元中性子検出器(以降、GEM型中性子検出器と呼ぶ)は中性子検出用に10-ホウ素を被覆したアルミ板を陰極として使用し、熱中性子に対して0.25%の中性子感度を有している。申請者らが開発したGEM型中性子検出器はコンパクトな検出器システム(580 mm×200 mm×120 mm、有感領域:100 mm×100 mm)であり、10 kHz/cm²の入射頻度特性、良好なn弁別能力に加え、良好な波長弁別能力と約1 mmの位置分解能を有していることがわかっている。唯一の欠点は中性子感度を高くできないことである。これは得られる中性子感度がn(¹⁰B, ⁷Li)反応で生成する荷電粒子(α粒子、Li原子核)の最大飛程によって制限されるため、その最大値は熱中性子に対して約6%である。このような被覆型の中性子コンバータを使用して、中性子感度を高くするためには薄い被覆層を中性子の飛行線上に数多く設置することが重要である。GEM型中性子検出器の中性子感度を高くするため、申請者らはGEM表面に10-ホウ素を蒸着したB-GEMを導入したが、次のような問題のため実用化には至っていない。(ア)中性子感度を高くするため、複数のB-GEMを同時に動作させる

必要があるが、5枚程度が限界である(この時の中性子感度は20%~30%)。(イ)B-GEMは壊れやすく、高価である(~30万円/枚)。(ウ)空間をあけて積層するため、入射ビーム拡がりの影響を受けやすく、位置分解能が悪い。

本研究ではB-GEMの欠点を克服するような中性子コンバータの開発を目指す。開発する中性子コンバータはMicro-Channel Plate(MCP) [3]の細孔内に窒化ホウ素を被覆した構造を持つ(図2)。MCPの母材はソーダ石灰ガラスで、両端部は電極素材が蒸着されている。細孔内に中性子コンバータ材が被覆されているので、高い中性子感度を得るためには、検出器を入射中性子ビームに対して傾けて設置する必要がある。また、MCPはGEM同様にバイアス電圧を印加し、細孔内に電場を形成して使用する。この電場によって、n(¹⁰B, ⁷Li)反応で生成した荷電粒子による電離電子が陽極側に導かれる。

なお、開発する中性子コンバータは簡単な作業によって、GEM型中性子検出器のアルミ板陰極と置き換えることが可能である。MCP内に電場を形成するためには、被覆層は絶縁体でなければならない。このため本研究では、被覆層に窒化ホウ素を用いる。図3に平板に窒化ホウ素とホウ素を被覆した際に期待される中性子感度のシミュレーション結果を示す。窒化ホウ素はホウ素に比べて、期待される中性子感度は半分程度になるが、MCPの形状を工夫することで、十分な中性子感度を得られる。また、MCP構造は位置分解能を改善することも可能である。なぜなら、n(¹⁰B, ⁷Li)反応で生成した荷電粒子の軌跡は1つの細孔内に限定されるからである。その一方、入射中性子は複数の細孔を横切った後にn(¹⁰B, ⁷Li)反応を起こす可能性がある。この現象はB-GEMを積層させた場合と同じく、ビーム拡がりの影響を受け、位置分解能を悪化させるので、MCPの厚みは可能な限り薄くする。厚さ3 mmのMCPであれば、入射角10°の入射粒子に対して、ビーム拡がりは~0.6 mmに抑えられる。

[1] F. Sauli, Nucl. Inst. and Meth. A 386 (1997) 531.

[2] H. Ohshita, et al., Nucl. Inst. and Meth. A 623 (2010) 126.

[3] J. L. Wiza, Nucl. Inst. and Meth. 162 (1979) 587.



図 1 GEM 型中性子検出器

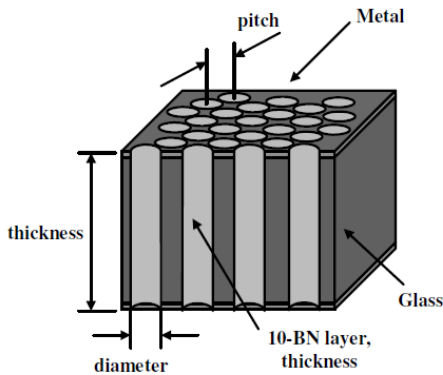


図 2 MCP を用いた中性子コンバータ

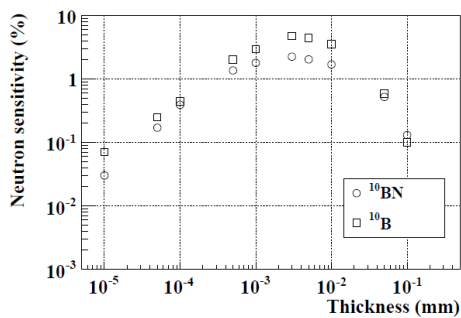


図 3 期待される中性子感度

2. 研究の目的

本研究では、Micro-Channel Plate (MCP) の細孔内に窒化ホウ素を被覆した新しい中性子コンバータを開発する。申請者らの開発した GEM 型中性子検出器と組み合わせて、高い中性子感度と優れた位置分解能を持つ二次元中性子検出器の実現をめざす。

3. 研究の方法

本研究では新しい中性子コンバータの形状デザインの最適化と窒化ホウ素の成膜技

術の確立、プロトタイプの実成と中性子検出器としての動作試験をおこなうことを目指す。

形状デザインの最適化

形状デザインの最適化には粒子輸送コードである Geant4 を使用する。Geant4 シミュレーションでは、中性子感度、位置分解能に加えて、SN 比の評価をおこなった上で形状のデザインを決定する。中性子コンバータのパラメータとして、MCP 細孔の直径、細孔のピッチ、MCP の厚み、窒化ホウ素の膜厚を考慮する。

窒化ホウ素の成膜技術の確立

単純な形状に対する成膜から始め、最終的には MCP に対する成膜を目指す。単純な形状に対する蒸着は物理蒸着でおこない、下地処理に対する知見を得ることや比較用の平板タイプの中性子コンバータを作成することを目的とする。MCP 細孔内部に成膜するためには、化学蒸着を用いる。この工法は母材の形状に依らず、一様な成膜が可能である。

プロトタイプの実成

GEM 型中性子検出器に新しい中性子コンバータを組み込んで、プロトタイプを作成する。プロトタイプの実成後、動作電圧などの動作条件の確認をおこなう。

中性子検出器としての動作試験

ラボテストにおいて、中性子線源による信号が確認できれば、北海道大学や J-PARC 等で中性子照射試験をおこない、性能評価する。

4. 研究成果

形状デザインの最適化は本研究の早い段階で完了している。Geant4 シミュレーションで得られた定性的な結果は次のとおりである。

- ・細孔のピッチを小さくすることで、中性子感度が高くなる
- ・中性子の入射角が小さい場合には、MCP を厚くすることで中性子感度が高くなる
- ・MCP 細孔の直径を小さくすることで、位置分解能が高くなる
- ・細孔のピッチを小さくすることや MCP の厚さを薄くすることでも同様に高い位置分解能が期待できる
- ・MCP 細孔の直径を大きくすることで SN 比を良くすることができる

現実的な 1 つの解として、MCP の細孔 40 μm 、ピッチ 50 μm 、厚み 3 mm、窒化ホウ素の膜厚 1 μm とすると、期待される中性子感度は約 60% であり、ほぼ入手可能な MCP の形状で高い中性子感度が期待できることがわかった。

窒化ホウ素の化学蒸着は設備確保に問題があり、実施できなかった。その一方で、ホウ素の物理蒸着設備が高エネルギー加速器

研究機構内に整備された(図4)この蒸着装置は電子ビーム蒸着装置で、100 mm×100 mmの母材に対して、10ナノメートル程度の成膜が可能である。



図4 高エネルギー加速器研究機構内に整備された電子ビーム蒸着装置

新しい中性子ビームモニターnGEMはプロトタイプ用のテストスタンドである。nGEMはGEM型中性子検出器のアップグレード版であり、中性子コンバータを取り換えることで、中性子コンバータの比較試験が可能となる。nGEMについては、これまでに北海道大学およびJ-PARC MLFにおいて中性子照射試験がおこなわれ、検出器システムとして、良好な結果が得られている。図5は北海道大学で取得されたnGEMの中性子感度の測定結果で、実測値とシミュレーション値が良く一致している。

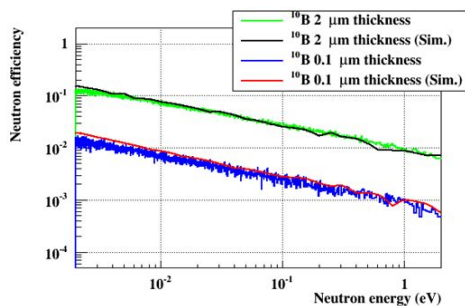


図5 nGEMの中性子感度測定

MCPを中性子検出用のガス放射線検出器として動作させた場合の動作条件を決定するため、ホウ素含有MCPをGEM検出器に組み込んで、中性子線源に対する応答を観察した(図6)。GEM型中性子検出器と同じ検出器構成での動作が確認された他、ホウ素含有MCPに電圧バイアスを印加しない状態でも信号を観察することができた。このことは、必ずしもMCP両端に電圧バイアスを印加する必要がないことを示しており、成膜材質もより高中性子感度が期待できる濃縮ホウ素で良いことを示唆している。

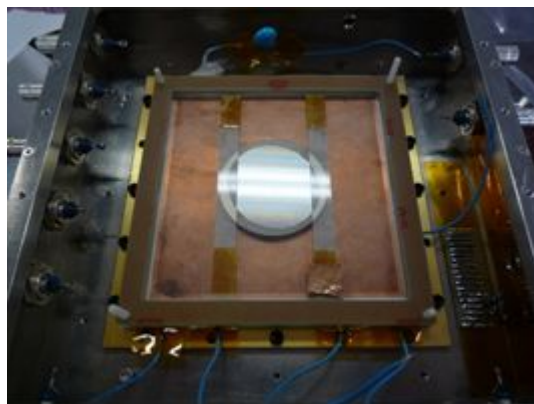


図6 ホウ素含有MCPのGEM検出器への組み込み

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

大下英敏、他、新しい中性子ビームモニターnGEMに対する中性子照射試験、物構研サイエンスフェスタ2013、2014年3月18日、つくば国際会議場

大下英敏、他、新しい中性子ビームモニターnGEMの開発、日本中性子科学会年会、2013年12月12日、さわかちば県民プラザ

大下英敏、他、新しい中性子ビームモニターnGEMに対する中性子照射試験、日本物理学会、2013年9月27日、徳島大学

大下英敏、他、中性子ビームモニター用読み出し回路システム“nGEM”の開発、日本物理学会、2013年3月26日、広島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大下 英敏 (Hidetoshi Ohshita)

高エネルギー加速器研究機構・

物質構造科学研究所・博士研究員

研究者番号：00625163