

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03686

研究課題名（和文）高感度中性子2次元画像検出器の開発

研究課題名（英文）Development of high sensitive neutron detector

研究代表者

宇野 彰二（UNO, Shoji）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：70183019

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：放電耐性に強いセラミックガス電子増幅器（GEM：両面基板に多数の孔をあげ、ガス中でその表裏間に高電圧を印可して、ガス増幅を起こして、放射線検出器とするもの）にボロン（中性子と吸収して、アルファ粒子を生成する）を薄く蒸着させて、それを積層することで高感度な中性子検出器の開発を進めた。蒸着時に条件を工夫することによって、比較的小型のGEMであれば、表裏間の抵抗値を十分に高く保ちながら、中性子感度を低下させずにすることに成功した。しかし、この科研費期間中には、標準である10cm角の大きなGEMでは、よいものを製作することができなかった。今後、さらなる条件出しが必要であると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発を目指している高い感度をもつ中性子2次元画像検出器は、同時に高精度の時間情報を得ることができるものであって、これを用いることによって、波長別中性子ラジオグラフィを行うことができる。原子ごとの成分を場所ごとに調べたり、X線で見ることができない金属内部の微細構造を明らかにすることが可能となる。この検出器は、中性子強度のあまり強くない小型中性子源で、特に、有効になると考えられる。また、ボロン中性子捕捉療法に用いられる中性子ビームの強度分布を2次元的にリアルタイムに調べることができるようになる

研究成果の概要（英文）：A neutron detector has been developed as stacked several ceramic gas electron multipliers (GEMs) with boron coating. The GEM is a radiation detector using the gas amplification in many holes as applied high voltage between both surfaces of commercial thin electric board. The neutron is absorbed in thin boron layer on the GEM surface and alpha particle is produced. The ceramic GEM was used for this development to get better resistivity against the electrical spark. The sputtering was successfully done on the surface with high resistivity just for small GEM as keeping high neutron efficiency. But, good one with standard 10 cm square GEM cannot be produced during this grant period. Further optimization is necessary in the sputtering process.

研究分野：高エネルギー物理学、量子検出器

キーワード：量子ビーム 放射線 中性子 高感度 2次元画像 放射線検出器 両面セラミック基板 高速データ転送

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

これまでに科学研究費補助金の基盤研究(B)の助成によって、高計数率に耐えられるガス電子増幅器(GEM)を用いたコンパクトな中性子画像検出器を素粒子原子核分野における測定器システムの開発能力を生かして開発してきた。その成果として、2次元位置分解能や時間分解能において、これまで使用されてきたヘリウム-3 カウンターよりもすぐれた性能を持っていることを実証してきて、実際に中性子ビームモニターとして使用されている。しかしながら、検出効率の点でまだ改良の余地があることも分かった。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、検出効率の向上を主眼において、開発することを目的としている。具体的には、中性子に感度のあるボロン 10 を付加した GEM または多孔付き薄板を積層することによって、検出効率の向上を達成する。

### 3. 研究の方法

本研究では、ボロンを付加した GEM を製作して、それを積層して、検出効率を上げる。これまでこの試みを行ってきたが、なかなかうまく動かすことができなかった。その1つの大きな理由が、ボロンを付加する際にそれが孔内に入ってしまって、放電の原因になり、GEM が損傷して使えなくなることであった。最近、放電しても壊れない GEM として、テフロン GEM やセラミック GEM が開発されつつある。本研究では、セラミック GEM にボロンを付加して、試験することを計画している。

これと並行して、まったく別の方法も試す。中性子を荷電粒子に変換する部分は、増幅度はいらないので、GEM である必要がない。そこで、細孔のある箔板の両側にボロンを付加しただけでもよい。ただし、箔板を積層する際に細孔が精度よくアラインされていなければならぬ(GEM の場合はこのアラインが必要ではなく、しかも、荷電粒子から発生した電子を有効に収集可能であるので有利であることは間違いない)。細孔の径、ピッチなどを電場計算と製作精度との兼ね合いで決定する。もし、この方法がうまくいけば、GEM の場合より安価に製作できるので、広い領域をカバーしたい場合に有利になる。

### 4. 研究成果

(1) 中性子検出器の検出効率を向上させるために、ガス電子増幅器(GEM)の表面にボロンを付加して、積層することを開発の基本としている。先行研究では、ボロンを付加したGEM(ボロンGEM)の使用中に放電が発生するとGEMの孔内で炭化が起こり、高電圧を印加できなくなるという問題があった。そこで、本研究では、放電によっても炭化が起きなく、壊れてしまうことのないセラミックGEMにボロンを付加することで、ボロンGEMを製作することにした。まず、小さなサンプルGEMにボロンを付加する試みを行った。その結果、ピール試験等により、ボロンがセラミックGEMに強固に付加することができることを確認した。しかしながら、ボロンがGEMの孔内に入ってしまって、高電圧を印加できないことも分かった。これを回避するために、まず、ボロンを付加してから、GEMの孔加工を行う工程とした。これによって、出来上がった小さなサンプルにおいて、高電圧を印加することに成功した。また、ガス中で動作させたところ、ボロンGEMとして必要なガス増幅度が得られることも確認した。また、これと並行して、2種類のセラミック材料の単体試験を行った。LTCCと呼ばれる比較的低温で焼結する材料とHTCCと呼ばれる高温で焼結する材料である。LTCCの方が、低温で焼結でき、電極に金をもちいることができることから先にGEMとしては確立していたが、材料内にボロンが含まれることから中性子吸収が心配された。2種類の材料単体試験の結果、やはり、LTCCでは中性子吸収が大きく、HTCCでないと不都合であることが分かった。HTCCでは電極がこれまでに実績のない白金となるが、試験の結果、それでも問題なく使用できることも確認した。

(2) 穴加工する前のセラミックGEMにボロンを付加して、その後、穴加工する方法でGEMを製作して試験を行った。この場合は、GEMとして使用できる電圧をかけられることは確かめられた。しかし、焼結させる段階で、ボロンが表面からなくなってしまうようで、中性子に対して、感度がないことも判明した。そこで、まず、ボロンを数種類の方法でアル

ミ板につけることを試みた。そうするとある一つの方法で、ボロンを安定して付加することができ、しかも、中性子感度がそれほど劣化しないことが確かめられた。また、その方法で、穴加工が終わった小さなセラミックGEMにボロンを付加しても、GEMとして動作させることができる電圧を印可することができることも確かめられた。

(3) 将来の発展を期待して、ボロンカソードを製作して試験を行った。ここで製作したカソードは、熱中性子に対しては、ボロン層で反応させて、アルファ粒子を出すことを念頭に置いている。また、ボロンを蒸着させる母材として水素を多く含んだプラスチック(PET)を利用した。それは、高速中性子に対しては、水素と反応して、陽子を出すことによって、検出することを考えた。もちろん陽子は、薄いボロン層は容易に通過することが可能である。評価試験では、Cf-252放射線源を利用して、熱中性子と高速中性子は、ポリエチレン減速材の有無で切り分けた。アルファ粒子と陽子がガス中で失うエネルギー損失の違いから、信号の種の大きさが違うことを利用して、熱中性子の場合は、低めの印可電圧、高速中性子の場合は、高めの印可電圧をかけることによって、それぞれを検出可能であることを確認した。また、2次元画像データも同時に取得して、きれいな画像を取得することにも成功した。

(4) 中性子をボロンと反応させて、発生する荷電粒子であるアルファ粒子を捕える検出器の開発を行った。中性子の検出感度を向上させるためには、ボロン層を厚くすればよい。しかし、発生するアルファ粒子の飛程は、ボロン内であっても非常に短く、せっかくボロン層を厚くしても発生したアルファ粒子がボロン層から外に飛び出すことができない。そこで、放電耐性に強いセラミックガス電子増幅器(GEM:両面基板に多数の孔をあけ、ガス中でその表裏間に高電圧を印可して、ガス増幅を起こして、放射線検出器とするもの)にボロンを薄く蒸着させて、それを積層するという方針で開発を進めてきた。この開発において、ボロンをGEM表面に蒸着させる際に、そのボロンがGEMの孔内にも付着して、GEMの表裏の抵抗値が小さくなってしまい、高電圧が印可できないということが問題であった。そこで、蒸着させる際に、少量の窒素を加えると窒化ボロンとして蒸着されて、高い抵抗値を得ることができることがわかった。しかし、窒素の量が多すぎると中性子がボロンと反応して発生したアルファ粒子が窒素によって飛程が短くなり、ガス中に飛び出す割合が小さくなってしまいうこともわかっている。そこで、窒素の量をうまく調整すると中性子感度を保ちながら、しかも絶縁性をもたせることが可能であることを見出すことに成功した。しかし、それは、比較的小さなGEMで達成できたのみで、標準である10cm角になるとまだよいものを製作することができないでいる。今後、さらなる条件出しが必要であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小宮一毅、武内陽子、宇野彰二、小池貴久
2. 発表標題 LTCC-GEMの中性子検出器への応用
3. 学会等名 第15回MPGD研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shoji Uno
2. 発表標題 Neutron Detector with Ceramic GEM
3. 学会等名 10th ASIAN FORUM FOR ACCELERATORS AND DETECTORS (AFAD 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------