

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12503

研究課題名（和文）大強度中性子環境下で安定動作するホウ素被覆型中性子検出器nTGCの開発

研究課題名（英文）Development of a boron-lined neutron detector for stable operation in high-intensity neutron environments

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・技師

研究者番号：00625163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：茨城県東海村にあるJ-PARC MLFは世界最高強度のパルス中性子源施設である。MLFでは、3-ヘリウム位置敏感型中性子検出器（3He-PSND）が広く使用されているが、近年、入手性の問題に加えて、レート特性や耐放射線特性などの検出器性能においても問題が発生している。本研究では、3He-PSNDの代替検出器であるnTGCの開発がおこなわれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発されたnTGCはμ粒子トリガー用のガス放射線検出器TGCをベースとしている。TGCはレート特性と耐放射線特性に優れており、3He-PSNDの欠点をカバーすることが期待できる。本研究は、世界中でおこなわれている3He-PSNDの代替検出器開発の1つであり、今後さらに発展することが期待されている。また、本研究で開発を進めた読み出しモジュールは他の中性子検出器にも使用できる有用なものである。

研究成果の概要（英文）：The J-PARC MLF in Tokai-mura, Ibaraki Prefecture, is the world's highest intensity pulsed neutron source facility. 3-He position sensitive neutron detectors (3He-PSNDs) are widely used at MLF. However, in recent years, in addition to availability issues, there have been problems in detector performance such as rate characteristics and radiation tolerance. In this study, an alternative detector to the 3He-PSND, the nTGC, was developed.

研究分野：中性子実験

キーワード：中性子検出器

1. 研究開始当初の背景

茨城県東海村にある J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) は世界最高強度を誇るパルス中性子源であり、2022 年頃を目標に 1 MW の最高ビームパワーに到達する予定である。2008 年の稼働開始以降、これまでの加速器の積算電力量は 6,650 MWh に相当し、最高ビームパワーで換算した場合、約 1.5 年分の電力量となる。MLF における中性子発生量は電力量と良い相関関係があるため、MLF に建設された中性子実験装置においても、最高中性子強度による換算で約 1.5 年分の中性子が照射された状況である。MLF の BL21 に建設された高強度中性子全散乱装置 (NOVA) は液体、ガラスなど非晶質物質の構造解析を得意とする中性子実験装置である。NOVA で期待される中性子強度は 3.4×10^7 neutrons/s \cdot cm² \cdot MW であり、通常の中性子実験に利用される中性子強度としては、最も強いビームラインの 1 つである。NOVA では、試料を取り囲むように約 900 本の 3-ヘリウム位置敏感型中性子検出器 (³He-PSND) [1] が設置されている。NOVA の ³He-PSND の形状は外径 1/2 インチ、有感長 80 cm の同軸円筒型であり、ガス封入型の比例計数管として動作する。チェンバーストとして、³He と CF₄ の混合ガスが充填 (充填圧はそれぞれ 20 atm と 0.6

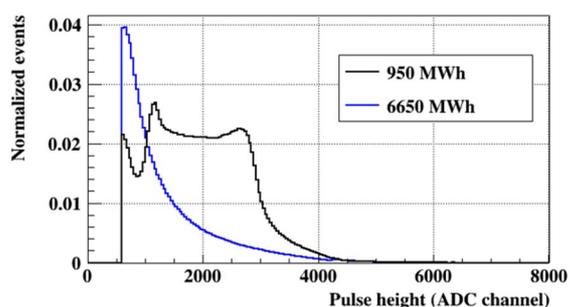


図1 加速器の積算電力量の異なるパルス波高分布の比較

atm) されている。中性子の検出は $n(^3\text{He}, p)^3\text{H}$ 反応で放出された荷電粒子を測定することでおこなう。CF₄ はストップングガスとしてふるまい、チェンバースト中に放出された荷電粒子と、より多く電離相互作用する。なお、シグナル生成に影響するガス増幅作用に対しては、イオン化エネルギーの低い CF₄ が主に寄与すると考えられる。³He-PSND は抵抗値の高い陽極ワイヤの両端からシグナルを読み出し、その比

率を算出することで位置検出を実現している。NOVA の ³He-PSND の計数率は試料からの距離、立体角に加えて、試料を含む試料環境によって大きく異なるが、標準試料であるバナジウム棒に対しては、8 Hz/cm² \cdot MW ~ 48 Hz/cm² \cdot MW である。ガス充填圧が 20 atm を超える ³He-PSND の計数限界は 100 Hz/cm² 程度であるため、中性子散乱能の高い軽水素を含む試料を測定するような場合は、数え落としの問題が表面化する。また、近年、図 1 に示すように、NOVA における ³He-PSND の放射線劣化現象が判明している。図 1 は、加速器の積算電力量の異なるパルス波高分布の比較である。950 MWh の時に、明確に確認できた $n(^3\text{He}, p)^3\text{H}$ 反応に起因したピーク形状が放射線劣化現象によって、6650 MWh の時には、指数関数的な分布に変化している。図 1 は最も顕著な例であるが、NOVA の ³He-PSND の半数において 20% を超えるパルス波高値の減少が確認されており、それらは検出器に入射する中性子強度に依存することもわかっている。放射線劣化現象の原因として、CF₄ の分解 (消費) によるガス増幅率の低下が考えられ、CF₄ の補充によって動作の回復が期待できるが、その作業は非常に困難である。NOVA の検出器システムは非常に高価 (2.2 億円) であるため、現実的には ³He-PSND の動作電圧を下げることによって、CF₄ の消費を減らした延命がなされるが、引き続き入射粒子頻度特性と放射線耐性に問題を抱えているため、将来的には ³He-PSND の代替検出器の開発が必要となる。³He-PSND の代替検出器には、40% を超える熱中性子感度を維持した上で、100 Hz/cm² をはるかに超える高い入射粒子頻度特性と MLF における 20

年（バナジウム棒による計数率で、陽極ワイヤーの単位長さ当たり 1.6×10^{10} ヒット/cm）以上の安定動作を担保する高い放射線耐性が求められる。さらに、30 cm × 30 cm 程度の広い有感領域を安価に実現することも重要である。現状では、これらの要求性能を完全に満足する中性子検出器は存在しないため、新しい発想に基づく代替検出器が切望されている。1つのアイデアは素性の良い放射線検出器を中性子検出器として仕立て直すことであり、本研究では、 μ 粒子トリガ用の検出器である TGC の陰極面を中性子コンバータであるボロンカーバイド ($^{10}\text{B}_4\text{C}$) 面に置き換えたホウ素被覆型中性子検出器 nTGC を開発する。

2. 研究の目的

本研究では、 ^3He -PSND の代替検出器の開発として、素性の良い μ 粒子トリガ用検出器である TGC をホウ素被覆型中性子検出器 nTGC に仕立て直すことを目的としている。さらに、nTGC の小型プロトタイプによる評価試験をおこない、nTGC が ^3He -PSND の代替検出器となり得ることを実証する。

3. 研究の方法

ヒッグス粒子の発見に貢献した ATLAS 実験用に、日本の ATLAS TGC グループは 1,100 台の Thin Gap Chamber (TGC) [2] を量産した。TGC は図 2 に示すように、ガスフロー型の Multi Wire Proportional Chamber の 1 つであり、2 枚の FR4 基板で陽極ワイヤーを挟み込んだ構造をしている。チェンバーガスとして、 CO_2 と $n\text{-C}_3\text{H}_{12}$ の混合ガス（混合比は 55:45）が使われている。大きな特徴は、陽極ワイヤー間の距離（1.8 mm）に比べて、陽極と陰極間の距離（1.4 mm）が短いことである。また、二次元読み出しを実現するため、FR4 基板のチェンバー外側にはワイヤー方向に垂直なストリップラインが刻まれ、チェンバー内部には $1 \text{ M} \Omega$ の面抵抗値を持つカーボン面が塗布されている。高い面抵抗値を持つカーボン面はストリップライン上に局所的に電荷を誘導する役割を担っている。本研究では、カーボン面の代わりボロンカーバイド面を塗布し、中性子の検出を可能とする。ボロンカーバイドを被覆した場合、中性子の検出は $n(^{10}\text{B}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応でチェンバーガス中に放出された荷電粒子を測定することでおこなう。ボロンカーバイドは導電性で、カーボンと同様に取り扱うことができ、無水ホウ酸の炭素還元法などで比較的容易に生成できるため、コスト的にも優れている。検出器性能として、TGC は高い入射粒子頻度特性を持ち、 100 kHz/cm^2 まで安定に動作することが確認されている [3]。放射線耐性についても、 ^{90}Sr を用いた加速劣化試験が実施され、陽極ワイヤーの単位長さ当たりの収集電荷量として、 1 C/cm 以上の安定動作が確認されている [3]。この結果は、1 ヒット当たりの典型的な収集電荷量が 1 pC であることを考慮すると、陽極ワイヤーの単位長さ当たり 10^{12} ヒット以上の安定動作に相当

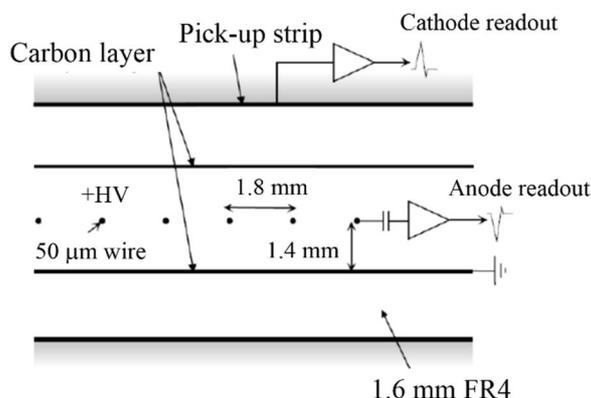


図2 TGCの断面図

する。ATLAS TGC グループで量産された TGC の典型的な有感領域の大きさは $1.2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ の巨大なものであり、1 台当たりの製造コストは 100 万円であった。TGC にとって、 μ 粒子と中性子の検出の違いはシグナルのタネとなる一次電子数の違いだけであり、タネの多い中性子の検出の場合は動作電圧を下げることで、中性子検出器としても同等の性能が得られる。したがって、TGC は中性子感度以外の要求性能を既に満

足している。図3にnTGC(カーボン面をボロンカーバイド面に置き換えたTGC)の熱中性子感度の膜厚依存性を示す。熱中性子はnTGCに垂直に入射するとした。得られる熱中性子感度は $n(^{10}\text{B}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応で生成した荷電粒子の最大飛程によって制限される。熱中性子の入射方向に対して同じ方向(Back side)に荷電粒子が放出され検出される場合は、3

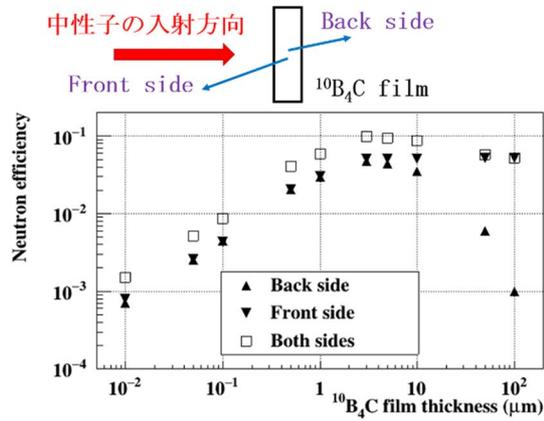


図3 nTGCの熱中性子感度の膜厚依存性

μm 程度の $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚で最大となった後、膜厚に依存して熱中性子感度は減少する。また、熱中性子の入射方向に対して逆方向(Front side)に荷電粒子が放出され検出される場合は、3 μm 程度の $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚まで直線的に熱中性子感度が増加した後、ほぼ一定となる。これらの特徴を反映し、 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 3 μm 厚 \times 2層(Back side + Front side)のnTGCで期待される熱中性子感度は10%である。nTGCは多層構造にすることで、より高い熱中性子感度を実現することが可能であり、 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 3 μm 厚 \times 2層のnTGCを積層した場合、三層構造($^{10}\text{B}_4\text{C}$ 3 μm 厚 \times 6層)と六層構造($^{10}\text{B}_4\text{C}$ 3 μm 厚 \times 12層)で期待される熱中性子感度はそれぞれ25%と42%と算出された。このような構造は、各層が独立した中性子二次元検出器であるため、検出器システムとして、高い入射粒子頻度特性と高い中性子感度を両立できる他、位置検出におけるパララックスの効果も無視できる。

4. 研究成果

本研究では、nTGCの小型プロトタイプ製作をおこなった。nTGCの大きな特徴であるボロンカーバイド面の成膜については、研究初年度より取り組み、最終的には、既存のカーボン塗料にボロンカーバイド粉末を混合した塗料が用いられた。成膜作業の再現性などは、良い状態が実現されたが、面抵抗値が小さくなる傾向は解消することができなかった。また、ボロンカーバイドの混入量もそれほど高くすることができなかった。これらの問題については、カーボン塗料の製造メーカーのサポートを受けたボロンカーバイド塗料を実現することによって解消されることが期待できる。一連の研究期間の中で開発された読み出しモジュールは、中性子実験に使用する他の中性子検出器に対しても利用されることが期待できる。

[1] R. W. Hendricks, Trans. Am. Crystallogr. Assoc. **12** (1976) 103.

[2] S. Majewski, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **217** (1983) 265.

[3] H. Fukui, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **419** (1998) 497.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------