

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03755

研究課題名（和文）BNCT用に大きなダイナミックレンジを備えた電流モードガス検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a current-mode neutron gas detector with a large dynamic range for BNCT

研究代表者

松本 哲郎（Matsumoto, Tetsuro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・上級主任研究員

研究者番号：70415793

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,100,000円

研究成果の概要（和文）：ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）の施設への中性子線量のトレーサビリティ確立を目的として、既設校正施設と両方で利用ができる中性子測定器の開発を行った。測定器として<sup>3</sup>Heガスを利用した指頭型電離箱を試作した。シミュレーションによる評価を行った後、医療用リニアックを用いて電離箱として機能することの確認を行った。その後、産業技術総合研究所の熱中性子場、京都大学複合原子力科学研究所のリニアックを用いたパルス中性子ビームを用いて、中性子応答に関する特性評価を行い、BNCT施設において、十分機能することを示した。また、<sup>4</sup>Heガスを利用することによって、ガンマ線成分を除去することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の研究成果は、BNCT施設における中性子計測の品質向上のための一つのステップである中性子標準からのトレーサビリティ確立にも役立つものと期待される。さらに、BNCT施設におけるQA用中性子検出器や中性子源モニターの今後の候補としても期待される。また、これまで中性子分野において電離箱は多くは利用されていなかったが、耐放射線性のある新たな大強度中性子用検出器として進展が見られたことは意義がある。さらには、BNCTががん治療として普及しつつある中、大きな要素技術の一つである中性子計測の品質向上は、治療効果向上にも寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to establish traceability of neutron doses to facilities for boron neutron capture therapy (BNCT) from neutron standards, we developed a neutron measuring instrument that can be used in both BNCT and calibration facilities. In the present study, a prototype of a thimble type ionization chamber (IC) using <sup>3</sup>He gas was developed. After evaluating characteristics of IC with simulation, we measured photons from the medical linac to confirm work of IC. Subsequently, characteristics of the neutron response were experimentally evaluated using a thermal neutron field at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and a pulsed neutron beam using a linac of the Kyoto University. Experimental results indicate that the IC is useful at the BNCT facility. In addition, the gamma-ray component was successfully subtracted using <sup>4</sup>He gas instead of <sup>3</sup>He gas.

研究分野：量子ビーム

キーワード：ホウ素中性子捕捉療法 中性子計測 指頭型電離箱 中性子標準 中性子ビーム 大強度中性子 トレーサビリティ ガンマ線バックグラウンド

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

中性子を用いたがん治療であるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、2020 年に初めて頭頸部がんに対して保険適用が認められ、難治性がんの治療法の一つとして、今後の普及が期待されている。これらの施設では、治療に使用する中性子を測定、モニターするために中性子検出器が使用される。これらの中性子を定められた基準で構成できるようにすることは喫緊の課題である。そして、良質な中性子計測が、より良い治療効果につながるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

加速器ホウ素中性子捕捉療法で、異なる施設ごと統一的な基準で中性子を測定できる技術の確立を目的とした。従来課題とされている治療レベルの線量評価、中性子源モニターに加えて、BNCT で使用される中性子検出器の校正を可能にすることは喫緊の課題である。

一方で、治療施設の中性子強度と既設校正設備の中性子強度には、4 ~ 5 桁の違いがあり、両者をつなぐ大きなダイナミックレンジをもった測定技術が必要とされている。これまで、研究代表者らは、 ${}^6\text{Li}$  ガラスシンチレータを電流モードとして使用する[1]ことにより、上記要件を満たすことを確認してきた。しかし、感度の非等方性や光検出器の耐放射線性など、まだ完全ではない。本研究では、電流モード  ${}^6\text{Li}$  ガラスシンチレーション検出器と相補的に使用でき、耐放射線性にも優れた電流モード  ${}^3\text{He}$  ガス検出器の開発によって課題解決に導く。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、「BNCT の加速器中性子源からの中性子フラックスを秒単位で変化が見られること」、「従来よりも耐放射線性の優れた検出器」、「既設校正設備でも測定が可能なダイナミックレンジを持つ」の3要件を満たす必要がある。X線やガンマ線の計測分野では、電離箱を用いた電流モード測定を中性子計測にも適用して、中性子計測ならではの課題である ng 弁別をクリアにして、上記要件を満たした検出器の開発を行った。

### 4. 研究成果

本研究では、図1に示すような構造の指頭型電離箱チャンバーを試作した。このチャンバーは、中性子に有感なガスを封入することを可能にするために、Oリングを使った構造となっており、信号取り出し部分も真空用フィードスルーを用いて、ガスを封じ込められる構造にしている。

チャンバーは、アルミニウムで作られており、10 mm 直径、13 mm 長さで半分ドーム型の形状をしている。中心電極として、1 mm 直径のアルミニウム製細棒が使用している。電離箱からの信号は、当初予定通り電流モードで使用する場合に加えて、中心電極に電圧を印加してパルス信号を取り出せるようにもした。将来的には BNCT 施設でのスペクトル評価も可能にするために、ポナー球のセンサーと使用することも考慮に入れた形状となっている。

本研究では、中性子有感ガスとして  ${}^3\text{He}$  ガスを選択した。また、中性子との反応で生成した陽子やトリトンの電荷をなるべく多く電極に付与できる必要があり、この大きさのチャンバーではクエンチングガスを混合させる必要がある。MCNP6 コードを用いて、 ${}^3\text{He}$  ガスと組み合わせるガスについて系統的に計算を行った。結果の一部を図2に示す。基本的には示したガスの中で一番重い核種であるクリプトンを用いた時、効率的な測定が可能になる。一方で、2022 年からのウクライナ危機によって希ガスの入手は厳しい状況であり、購入が可能なアルゴンガスすると出力電流は小さくなるが、不可能ではないことを示している。

電離箱としての機能を確認するため、チャンバー内を大気圧の空気にし、産総研が所有する医療用リニアックによる治療レベル光子の照射試験を行った。図3は、光子照射試験の様子である。その結果、おおむね 4 Gy/min の照射に対して 1.7 nA の出力が得られた。また、2 Gy/min の照射に対して 0.86 nA の出力が得られ、本研究の課題の一つである線形性も確認できた。

次に、 ${}^3\text{He}$  : 0.55 atm、Ar:1.4 atm と  ${}^3\text{He}$  : 0.10 atm、Ar:1.75 atm の2種類のチャンバーを用意し、産総研黒

中心電極からの出力 相対ガス圧計

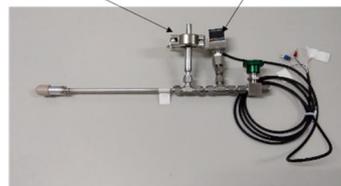


図1 試作した中性子用電離箱

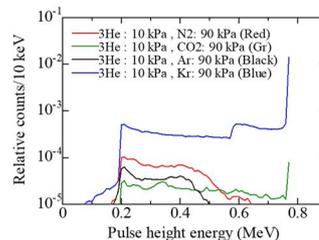
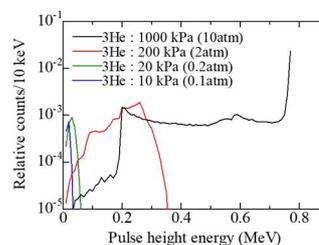


図2 MCNP6 による計算の一部

鉛パイルを用いた熱中性子場における測定を行った。ここでは、信号が中性子に起因するものかを確認するために波高信号を取得した。照射位置における中性子フルエンス率は  $60 \text{ cm}^2/\text{s}$  である。その結果、前者のチャンパーに対して  $0.48 \text{ cm}^2$ 、後者のチャンパーに対して  $0.07 \text{ cm}^2$  の検出効率が得られた。図 5 に波高スペクトルを示す。シミュレーションで得られた波高スペクトルの形状とは異なっている。現状の計算ではチャンパー内の電場がまだ考慮されていないと考えられるので、今後の研究課題となる。

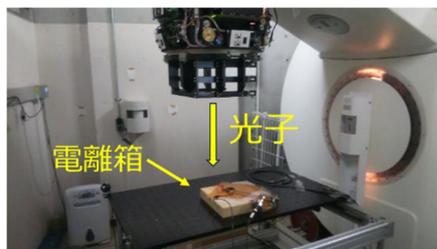


図 3 光子照射試験の様子

京都大学複合原子力科学研究所(京大複合研)の電子ライナックを用いたパルス白色中性子源を用いた試験では、中性子飛行時間測定を行い、熱中性子、熱外中性子に対して確実に測定できていることが確認でき、検出効率の結果も整合性の取れるものが得られた。さらに、前者 ( $^3\text{He}: 0.55 \text{ atm}$ ,  $\text{Ar}: 1.4 \text{ atm}$ ) のチャンパーを用いて、電流モードで測定した結果、京大複合研の  $1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$  の中性子ビームに対して、 $4.4 \text{ pA}$  の出力電流が得られた。中性子フルエンス率に対する出力電流の線形性評価は、今後の課題であるが、現時点において直線性があるとして、 $10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$  の加速器 BNCT のスペクトルに対する検出効率を換算する約  $5 \text{ nA}$  と推測され、測定可能である。ただし、BNCT 施設における実験データの蓄積を行い、ガス圧等のより詳細な検討が必要になる。電離箱としての特性評価として、印加電圧を変化させたときに出力電流の変化を測定した。図 7 は、その結果である。電離領域、その後の比例領域が明確に観測され、 $500 \text{ V} \sim 600 \text{ V}$  が電離箱と使用するのに適していることが分かった。最後に、 $^3\text{He}$  に変えて、 $^4\text{He}$  ガスを充てんしたチャンパーを用意し、中性子場におけるガンマ線に起因する信号のみを取り出すことにも成功した。 $^3\text{He}(n,\gamma)^4\text{He}$  反応に起因するガンマ成分のみが引き去れない成分であるが、BNCT で使用される中性子エネルギー領域では、その反応断面積は  $1 \mu\text{b}$  から  $10 \mu\text{b}$  の範囲であり、その寄与は極めて小さいと考える。今回試作した検出器の実用化に向けて複数の細かい課題があり、研究は引き続き進められる。また、本研究では有感ガスとして  $^3\text{He}$  を使用したが、チャンパーの内壁にリチウム等の中性子有感材をコーティングする方法など複数の応用が考えられ、良い安定な方法を検証していくこととなる。



図 4 産総研熱中性子場での実験

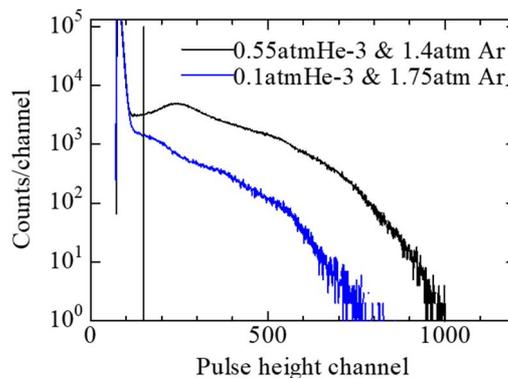


図 5 産総研熱中性子場での測定で得られた波高スペクトル

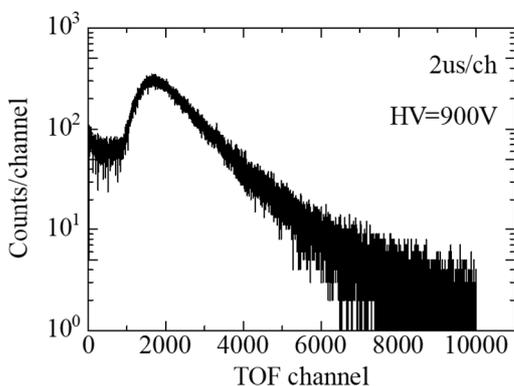


図 6 京大複合研中性子源で得られた TOF スペクトル

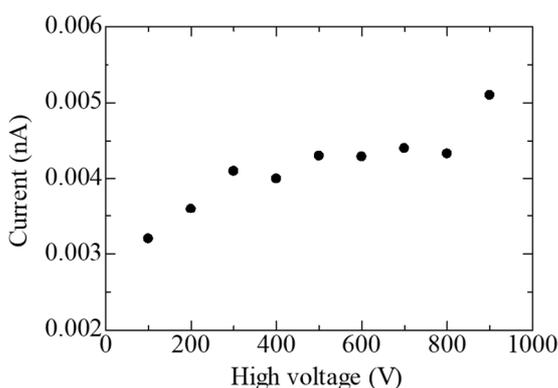


図 7 印加電圧を変化させたときの出力電流の結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Matsumoto, A. Masuda, S. Manabe, H. Harano, J. Hori, K. Terada	4. 巻 2022
2. 論文標題 Development and test of a current-mode 3 He gas neutron detectors for an intense neutron beam	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 KURNS Progress Report 2022	6. 最初と最後の頁 C02-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Matsumoto, A. Masuda, S. Manabe, H. Harano, J. Hori, K. Terada	4. 巻 2021
2. 論文標題 Development of a current-mode 3He gas neutron detector for BNCT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 KURNS Progress Report 2021	6. 最初と最後の頁 C02-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Matsumoto, A. Masuda, H. Harano, S. Manabe	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Simulation study for design of long counter for standard neutron fields from 1 keV to 20 MeV at NMIJ/AIST	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/rpd/ncae151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsumoto Tetsuro, Harano Hideki, Masuda Akihiko, Manabe Seiya	4. 巻 66
2. 論文標題 放射線標準のトレンド	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Atomic Energy Society of Japan	6. 最初と最後の頁 37～41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3327/jaesjb.66.1_37	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本哲郎
2. 発表標題 中性子標準の現在と今後
3. 学会等名 2023年日本原子力学会春の年会（招待講演）（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本哲郎、増田明彦、原野英樹、真鍋征也
2. 発表標題 中性子検出器開発と中性子標準の利用
3. 学会等名 電気学会原子力技術委員会「持続可能な社会構築に資する放射線技術の最前線」調査専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本 哲郎、丹羽 一樹、増田 明彦、真鍋 征也、原野 英樹
2. 発表標題 積分球を用いた中性子検出器ためのリアリティ評価手法開発
3. 学会等名 2023年第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本哲郎、増田明彦、真鍋征也、原野英樹、寺田和司、堀順一
2. 発表標題 中性子用電離箱の開発と試作
3. 学会等名 放射線安全と医学応用のための計測研究会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中性子標準ホームページ  
<https://unit.aist.go.jp/rima/ract-neu/neutron/newhp.html>

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
研究分担者	堀 順一  (Hori Jun-ichi)  (30362411)	京都大学・複合原子力科学研究所・教授   (14301)	
研究分担者	増田 明彦  (Masuda Akihiko)  (70549899)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員   (82626)	
研究分担者	黒澤 忠弘  (Kurosawa Tadahiro)  (90356949)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・その他部局等・室付   (82626)	

	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
研究協力者	真鍋 征也  (Manabe Seiya)  (40910005)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員   (82626)	

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