

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12638

研究課題名(和文) 加速器BNCTにおける日常QA測定のための中性子エネルギー分布評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of neutron energy distribution evaluation method for daily QA measurement for accelerator-based BNCT

研究代表者

増田 明彦 (Masuda, Akihiko)

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

研究者番号：70549899

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)：ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)のための中性子ビームの日常的なエネルギー分布安定性の検証を行うための手法を提案した。高密度ポリエチレン製の中性子減速材中に複数の低エネルギー中性子検出器を配置し、その出力比からエネルギー分布の変動を検出するエネルギー分布評価装置を開発した。モンテカルロシミュレーションにより、エネルギー分布変動への感度を最適化した検出器配置を求め、装置を試作し、検出器及び装置の特性評価試験を実施した。今後はBNCT施設での検証や、必要に応じて改良を行っていく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

BNCT用加速器中性子源で得られる中性子ビームのエネルギー分布を実験的に評価する技術はすでに研究代表者らのグループで取り組んでいたが、1日かかりの測定と高度な考察や経験を必要とする解析作業を伴うものであった。本研究で提案する手法は、医療機関の実態を考慮して日常的に短時間で簡便にエネルギー分布変動を確認できるようにすることを企図したものであり、実用化されればBNCTの安全安心な実施と治療実績の向上につながると思われる。

研究成果の概要(英文)：A quality assurance method to check the variation of neutron energy distribution of the accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy (BNCT) was proposed. A neutron energy distribution checker which consists of high-density polyethylene and low-energy neutron detectors was designed using Monte Carlo simulations to optimize the sensitivity for the variation of the neutron energy distribution. A prototype was manufactured, and its response characteristics has been investigated. Due to the COVID-19 situation, demonstration experiments at BNCT facilities in hospitals have not carried yet and they will be carried out in the near future.

研究分野：放射線計測

キーワード：放射線計測 中性子 ホウ素中性子捕捉療法 BNCT 中性子スペクトル 中性子医療

1. 研究開始当初の背景

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、中性子を使ったがんの放射線治療法である。従来は研究用原子で得られる中性子を用いて研究が行われていたが、近年は医療機関に配備可能な小型加速器中性子源を用いた実用化が進められている。BNCT では、患者に照射した中性子が患者体内でエネルギーを失い、がん細胞の位置で治療に適した熱中性子となりかつその強度を保っている必要がある。一方で中性子ビームが通過する正常細胞に対しては望ましくない被ばくを与えてしまう。これらの患者体内における中性子の挙動はシミュレーションによって評価され、治療高価と安全性が評価されるが、そのためには患者に照射する中性子ビームのエネルギー分布と強度を正確に把握する必要がある。研究代表者らは、BNCT 用中性子ビームのエネルギー分布と強度を実測する技術の開発を進めてきたが、その実測には専門的な技術や十分な測定・解析期間を要する。これは施設開発時に中性子ビームの特性評価として実施するには問題とならない。一方で、日々の治療に用いられる中性子ビームが特性評価したとおりのビームであることを確認する品質保証 (quality assurance, QA) の場面においては、医療従事者が利用可能な、より簡便に中性子エネルギー分布を確認する手段が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、BNCT 用加速器中性子源で得られる中性子ビームのエネルギー分布と強度の安定性を簡便に評価できる手法を提案することである。

研究代表者らは、ボナー球スペクトロメーターを用いたアンフォールディング法 (ボナーアンフォールディング法) によって BNCT 用加速器中性子ビームのエネルギー分布と強度を実験的に測定することに成功していた。ボナー球スペクトロメーターは多様な中性子エネルギー応答関数を持つボナー球検出器の群であり、各ボナー球検出器による測定結果と既知の各ボナー球検出器の応答関数とから測定対象の中性子ビームのエネルギー分布を逆問題的に求めるのがボナーアンフォールディング法である。この方法では、ボナー球検出器を入れ替えながら複数回 (通常は 10 回程度) の測定を行う必要があり、解析においてもアンフォールディング条件等を調整しながら高度な考察が必要である。BNCT 施設開発時の特性評価においては有用な手法であるが、医療施設において日常的な QA 活動として行うのは現実的ではない。

そこで、本研究では、中性子エネルギー分布を導出するのではなく、特性評価実施時と比べて有意な違いがあるかどうかを判定することに目的を絞った中性子エネルギー分布評価装置を考案・試作することとした。中性子エネルギー分布評価装置の概略を図 1 に示す。円柱形の高密度ポリエチレンの側面から複数の低エネルギー中性子検出器を挿入した構造であり、中性子が入射する表面からの深さの違いにより入射中性子に対する各検出器のエネルギー応答関数に差異が生じる。同じく高密度ポリエチレン製のアタッチメントを通じて BNCT 中性子源のビームポートに再現性よく挿入・固定できる機構とした。装置に入射するエネルギー分布が変化すると各検出器の出力の比が変化するため、日常測定においては各検出器の出力比を観測するだけでエネルギー分布の変化の度合いを確認することができる。

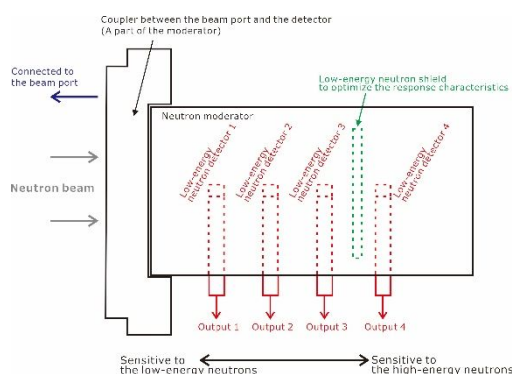


図 1 中性子エネルギー分布評価装置の概念図

3. 研究の方法

考案したエネルギー分布評価装置を設計するにあたり、検出器の深さと入射中性子に対するエネルギー応答関数をモンテカルロ計算コード MCNP6 で計算した。その結果に基づき、BNCT 用中性子ビームのエネルギー帯 (熱外中性子) においてエネルギー変化に対する十分な感度が得られるように検出器の設置深さを決定した。

BNCT 用中性子ビームは、中性子フルエンス $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の大強度である。この強度に対応するため、エネルギー分布評価装置に挿入する低エネルギー中性子検出器としては、電流モード動作させた光電子増倍管と接続した ^6Li および ^7Li ガラスシンチレーターペアを採用した。電流モード動作させることで大強度中性子を計測できる一方、波高弁別による中性子信号・ガンマ線信号の弁別ができないため、 ^6Li および ^7Li ガラスシンチレーターの中性子感度の差を利用してガンマ線の影響を差し引くものである。この低エネルギー検出器の運用については研究代表者らのグループで先行研究において提案しているものであるが、本研究においてはさらその応答の方向依存性等について理解を深めるための実験も実施した。

4. 研究成果

中性子エネルギー評価装置の設計にあたり、検出器の設置深さ毎の入射中性子に対するエネルギー応答関数を MCNP6 によるモンテカルロ計算により評価した結果を図 2 に示す。BNCT 用中性子ビームは 0.5 eV から 10 keV までの熱外中性子が主であるが、中性子入射方向の表面からの深さ 1.2 cm から 10 cm 程度までの間で大きな応答特性の違いが得られることが確認された。さらに、実際の BNCT 用加速器中性子源で得られる中性子ビームにはよりエネルギーが高い速中性子も含まれており、その上限は中性子発生方式等に依存し数百 keV ~ 数十 MeV であるが、深さ 20 cm 程度ではこれらの中性子エネルギーに対しても有意な応答の変動も得られることが明らかになった。

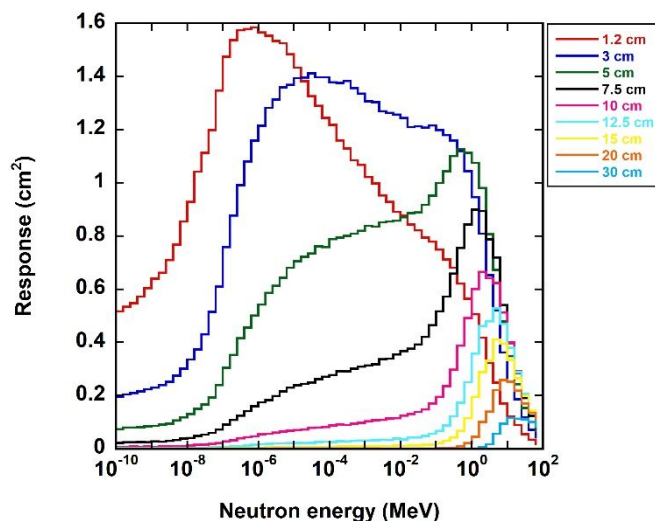


図 2 検出器設置深さ毎の入射中性子に対するエネルギー応答関数

応答関数評価シミュレーションの結果を受けて、中性子エネルギー分布評価装置の検出器設置位置を中性子入射方向の表面から 2.6 cm、7.3 cm、12.0 cm、20.0 cm、評価装置自体の長さを 30.0 cm と決定し、設計・製作した。

エネルギー分布評価装置に使用する低エネルギー中性子検出素子の応答の方向依存性を評価するため、京都大学複合原子力研究所の KUR B4 ビームラインにおいて実験を行った。その様子と結果を図 3 に示す。 ^6Li ガラスシンチレーター GS20 と ^7Li ガラスシンチレーター GS30 のペアに対し、対称性を考慮して 4 方向から熱中性子ビームを照射し、応答を測定した。基準とした方向 (1) に対して、中性子ビーム方向に対するシンチレーターの厚さが大きい (2) ~ (4) ではシンチレーターの自己遮へい効果により応答が低下した。GS20 側から照射した (2) では、GS20 による遮へいにより GS30 の出力が低下するため、ガンマ線影響補正後の応答は大きくなる。反対に GS30 側から照射した (3) では GS30 による若干の遮へいにより GS20 の出力が低下するため、ガンマ線補正後の応答は小さくなった。これらの結果は MCNP6 によるモンテカルロシミュレーションでも再現された。エネルギー分布評価装置では、中性子減速材である高密度ポリエチレン内で中性子の指向性が緩和されるうえ、対称性を維持できる (4) の方向からの照射となるが、室内散乱中性子は特に (2)、(3) の方向から寄与する。本装置はビームポートを高密度ポリエチレンを主とする装置本体で塞ぐ構造なため室内散乱中性子は抑制され、その影響はさらに限定的ではあるが、測定環境によっては考慮を要する。

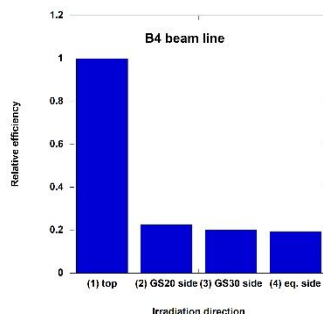
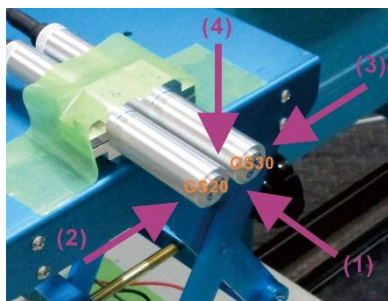


図 3 リチウムガラスシンチレーターペアを用いた低エネルギー中性子検出器の応答の方向依存性測定とその結果

試作したエネルギー分布評価装置の応答特性は、産業技術総合研究所の中性子標準場で実験的に評価している（図 4）。校正用線源として一般的な $^{241}\text{Am-Be}$ および ^{252}Cf 中性子に加え、BNCT 用中性子ビームと同様に熱外中性子を主成分とする重水減速 ^{252}Cf 中性子に対する測定を行っており、さらに加速器を用いた単色速中性子に対する測定も行うところである。

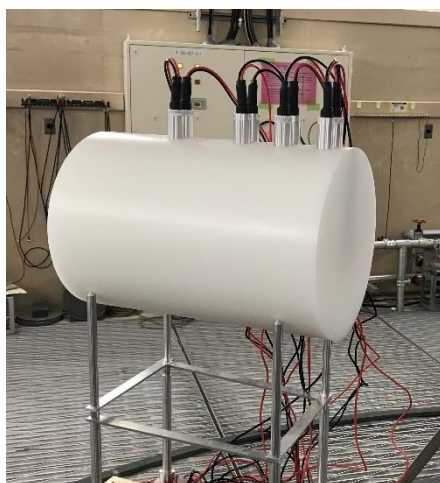


図 4 中性子標準場における応答特性評価実験

今後は、BNCT 施設において、判定が必要となる（=治療効果や正常細胞の被ばく等の観点での安全性に影響を及ぼす程度の）エネルギー分布変化に対して十分な判定制度が得られることを検証する予定である。

一方、もしサブ keV 領域の熱外中性子のエネルギー変動に対する感度を向上させようとした場合、より浅い位置への低エネルギー中性子検出器の追加が望ましいが、現状では低エネルギー中性子検出器の大きさが妨げとなる。そこで、より小型な中性子用シンチレーション検出素子と光ファイバーを組み合わせたファイバー検出器等を採用することによって検出器設置の自由度を向上させることも検討している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

1. 著者名 増田 明彦、松本 哲郎、原野 英樹	4. 巻 46
2. 論文標題 BNCTに関する中性子計測標準の取り組み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理学会 放射線分科会誌「放射線」	6. 最初と最後の頁 72-76
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 松本 哲郎、増田 明彦、原野 英樹	4. 巻 63
2. 論文標題 中性子標準の開発の現状と応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本原子力学会誌『ATOMO 』	6. 最初と最後の頁 -
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 Ishikawa Akihisa, Watanabe Kenichi, Yamazaki Atsushi, Yoshihashi Sachiko, Imai Shigefumi, Masuda Akihiko, Matsumoto Tetsuro, Tanaka Hiroki, Sakurai Yoshinori, Nogami Mitsuhiro, Hitomi Keitaro, Uritani Akira, Harano Hideki	4. 巻 1025
2. 論文標題 Evaluation of the thermal neutron sensitivity, output linearity, and gamma-ray response of optical fiber-based neutron detectors using Li-glass scintillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 166074 ~ 166074
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2021.166074	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 増田 明彦、松本 哲郎、原野 英樹
2. 発表標題 BNCTに関する中性子計測標準の取り組み
3. 学会等名 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会 シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田 明彦、松本 哲郎、原野 英樹
2. 発表標題 大強度加速器中性子源の特性評価のための検出器開発
3. 学会等名 2020年度 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihiko Masuda
2. 発表標題 Neutron measurements for boron neutron capture therapy
3. 学会等名 Emerging Scientist Workshop 2019 (ESW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihiko Masuda, Tetsuro Matsumoto, Hiroaki Kumada, Kenta Takada, Susumu Tanaka, Jun-ichi Hori, Tadafumi Sano, Yoshinori Sakurai, Hiroki Tanaka, Hideki Harano, Takeji Sakae
2. 発表標題 Neutron spectral fluence measurements of BNCT beams using Bonner sphere spectrometer
3. 学会等名 10th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting (YBNCT 10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田 明彦、松本 哲郎、原野 英樹、熊田 博明、田中 進、榮 武二、高田 健太
2. 発表標題 大強度中性子ビーム用ボナー球スペクトロメーターの開発と医療施設での測定
3. 学会等名 産業技術総合研究所 2019年度 計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田 明彦、松本 哲郎、熊田 博明、高田 健太、榮 武二
2. 発表標題 加速器BNCTにおけるQA測定のためのエネルギー分布評価手法
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田 明彦、松本 哲郎、真鍋 征也、原野 英樹
2. 発表標題 ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の大強度中性子に対応する 中性子スペクトロメーターの開発
3. 学会等名 2021年度 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田 明彦、松本 哲郎、原野 英樹、真鍋 征也、熊田 博明、高田 健太、田中 進、榮 武二、田中 浩基、櫻井 良憲
2. 発表標題 医療用加速器中性子源のエネルギー分布測定技術の開発と校正技術の検討
3. 学会等名 生体量子捕獲反応研究会2021 Early Summer Meeting (招待講演)
4. 発表年 2021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
研究 分担者	熊田 博明 (Kumada Hiroaki) (30354913)	筑波大学・医学医療系・准教授 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	高田 健太 (Takada Kenta) (10640782)	群馬県立県民健康科学大学・診療放射線学部・准教授 (22304)	
研究分担者	松本 哲郎 (Matsumoto Tetsuro) (70415793)	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	原野 英樹 (Harano Hideki) (60302775)	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・研究グループ長 (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