

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21679

研究課題名（和文）加速器BNCT用中性子エネルギー分布測定技術の開発

研究課題名（英文）Development of neutron energy distribution evaluation technique 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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：ホウ素中性子補足療法（BNCT）のための加速器中性子ビームのエネルギー分布測定技術を開発した。まずは加速器施設開発段階にのみ利用可能であった微弱ビームに対して既存のボンナー球スペクトロメーター（BSS）による測定を行い、加速器BNCT用熱外中性子ビームに対するボンナーアンフォールディング法の適用性を検証した。さらに、治療レベルの大強度中性子ビームを直接測定できるシンチレーターベースの大強度中性子用BSSを開発した。光電子増倍管の電流信号測定とLi-6及びLi-7ガラスシンチレーターを用いたガンマ線影響の補正技術を導入し、実際の加速器BNCT施設において治療レベルの中性子ビームの測定に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器BNCTでは、小型加速器による大強度中性子発生技術が急速に進展した一方で、生成した中性子ビームを実験的に精密測定する技術の開発が強く望まれていた。本研究では、BNCT用加速器中性子源の実機に対する中性子スペクトル測定に成功し手法の有効性を実証するとともに、治療レベルの大強度中性子のエネルギー分布を直接測定できる検出器を開発した。これらの過程で、BNCT用中性子の特性に応じた測定ノウハウも蓄積された。これらを活用・発展させることで、BNCT治療実績の向上に貢献できるだけでなく、大強度中性子の測定技術そのものの発展にも寄与できると考えている。

研究成果の概要（英文）：Neutron energy distribution measurement technique for accelerator-based boron neutron capture therapy (BNCT) was developed in this project. Firstly, neutron spectral fluence of weak beams of an accelerator-based BNCT facility was measured using a conventional Bonner sphere spectrometer (BSS) based on a He-3 proportional counter and applicability of the Bonner unfolding method for BNCT neutrons was demonstrated. Thereafter, a new BSS using lithium-glass scintillators was developed to measure the therapy-level intense neutron beam directly. Gamma-ray correction method using a pair of the Li-6- and Li-7-glass scintillators and the current integration measurement of PMTs' output were employed. After characteristic evaluation, the new BSS was used to measure the intense neutron beams at the accelerator-based BNCT facility.

研究分野：放射線計測

キーワード：中性子線治療 放射線計測 ホウ素中性子捕捉療法 BNCT 大強度中性子 ボナー球 シンチレーター 放射

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

中性子を用いたがんの治療法であるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) では、従来は研究用原子炉を中性子源として用いて基礎研究が行われていたが、近年は病院等に医療機器として配備可能な加速器中性子源の開発が相次いでいることで急速な普及が期待されている。BNCT 用の加速器中性子源は、中性子の発生方式や環境条件が施設毎に異なり、生成される中性子ビームの特性に施設依存性が強い。安全かつ十分な治療効果を得るためには、患者に照射する中性子ビームの特性、特にエネルギー分布と強度を正確に把握し適切な治療計画を作成し治療照射を制御することが不可欠であり、モンテカルロ計算によるシミュレーションに加えて実測による評価が必要とされている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、BNCT 用の加速器中性子源で得られる中性子ビームの中性子の量とエネルギー分布、すなわち中性子スペクトラルフルエンスを測定する方法を開発することである。

加速器を用いた BNCT では中性子エネルギー 0.5 eV から 10 keV の熱外中性子ビームが求められており、実際にはこの範囲の熱外中性子に加えてより中性子エネルギーの低い熱中性子やより中性子エネルギーの高い速中性子が含まれる。熱中性子や速中性子は BNCT の治療照射においては望まない被ばくを引き起こすほか、体内深部のがん細胞位置における中性子エネルギー分布にも影響を及ぼすため、熱外中性子だけでなく熱中性子と速中性子も包含する幅広いエネルギーの中性子を測定する必要がある。幅広いエネルギーを持つ中性子の中性子スペクトラルフルエンスを測定する方法としては、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が一般的であるが、本研究では、まず、既存のボナー球スペクトロメーターを用いて、本手法が独特のエネルギー分布を持つ加速器 BNCT 中性子源の測定に有効であることを検証することを初期の目的とした。一方、BNCT では熱外中性子フラックス  $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  もの大強度の中性子ビームが求められており、既存のボナー球スペクトロメーターではこのような大強度の中性子を精度良く測定することは困難である。そこで、改良型の大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターを開発し、実際の加速器 BNCT 中性子ビームの測定を行えるようにすることを最終的な目的とした。

### 3. 研究の方法

加速器 BNCT 中性子ビームに対する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 (以下、ボナーアンフォールディング法) による中性子スペクトラルフルエンス測定の有効性を示すため、まずは茨城県東海村にあるいばらき中性子医療研究センターの加速器 BNCT 施設で、開発途上段階でのみ利用可能であった微弱な中性子ビームに対する従来型のボナー球スペクトロメーターによる測定を行った。ボナー球スペクトロメーターは、低エネルギー中性子に大きな感度を持つ検出器を異なる厚さの減速材の球殻で覆うことで多様な中性子エネルギー応答を持たせた複数の中性子検出器群で、各検出器の測定結果と既知の検出器群の中性子エネルギー応答関数とから逆問題的に中性子スペクトラルフルエンスを導出するものである。本研究では、熱外中性子領域で応答関数の形状に有意な差が得られる 8 種類のボナー球検出器からなるボナー球スペクトロメーター (以下、従来型ボナー球スペクトロメーター) を編成した。各ボナー球検出器の中心に用いた低エネルギー中性子検出器は  $^3\text{He}$  比例計数管である。測定は、図 1 に示すように、中性子ビーム軸上の、ビーム出口から 1 m 及び 2 m 離れた地点において行った。これは、検出器とビーム出口周辺のコリメーターもしくは後方遮蔽壁との間での散乱中性子の影響をなるべく避けつつ、特徴の異なる複数地点を選定したためである。また、ボナーアンフォールディング法に用いる初期推定スペクトルは、放射線挙動計算コード Phits を用いたモンテカルロ計算によって求めた。得られた中性子スペクトラルフルエンスの結果は次節で示す。

大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターの開発では、ボナー球検出器に用いる低エネルギー中性子検出器として、 $^3\text{He}$  比例計数管に替えてリチウムガラスシンチレーターを採用し、シンチレーターの発光を検出する光電子増倍管の出力信号を電流積分値として取得することにした。リチウムガラスシンチレーターによる中性子計測では、中性子による信号とガンマ線による信号をそのパルス信号波高の違いで弁別するのが一般的であるが、本研究では中性子検出イベントが大量発生し個々のパルス信号を適切に記録することが困難なため、個々のパルス波高情報を放棄している。そのことにより、中性子による信号とガンマ線による信号を区別することができなくなるが、図 2 に示すように中性子とガンマ線の両方に感度を持つ  $^6\text{Li}$  ガラスシンチレーターとガンマ線のみに感度を持つ  $^7\text{Li}$  ガラスシンチレーターをペアで使用しその差分を取ることで、中性子に対する信号電流のみを抽出した。産業技術総合研究所の中性子標準施設、京都大学複合原子力科学研究所の電子ライナック中性子施設および原子炉中性子導管施設においてシンチレーション検出器の特性を評価し、放射線挙動計算コード MCNP6 によるモンテカルロ計算と産業技術総合研究所における実験とから大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターとしての応答関数を評価した。

開発した大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターを用いて、いばらき中性子医療研究センターの加速器 BNCT 施設で、治療レベルの大強度中性子ビームを用いたデモンストレーション測定実験を実施した。

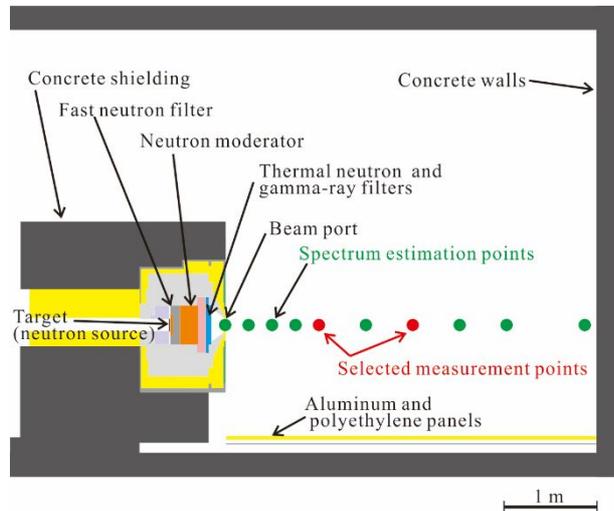


図 1：いばらき中性子医療研究センターの中性子源・治療室の断面図と測定地点

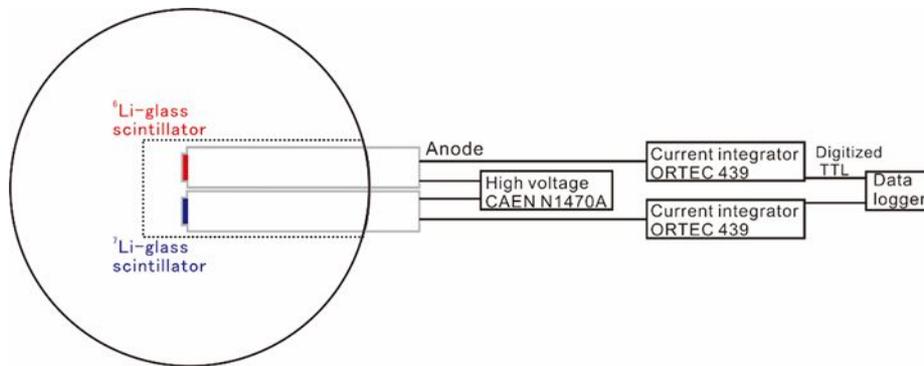


図 2：<sup>6</sup>Li 及び <sup>7</sup>Li ガラスシンチレーターを用いた大強度中性子用ボナー球検出器

#### 4. 研究成果

従来型ボナー球スペクトロメーターによる加速器 BNCT 中性子源の微弱ビームに対する測定で得られた、ビームポートから 1 m 及び 2 m の地点での中性子スペクトラルフルエンスを図 3 に示す。モンテカルロシミュレーションによる中性子スペクトラルフルエンスと比べて、相対的な中性子エネルギー分布は概ね一致したが、主に熱中性子領域において若干の差異が見受けられた。フリーエア測定で観測される熱中性子は室内散乱中性子が大部分を占めると考えられ、モンテカルロシミュレーションにおいて治療室のモデリングの不確かさに起因する差異が生じていたものと考えられる。一方、絶対値では両位置ともモンテカルロシミュレーションを 1 割ほど下回った。これは、モンテカルロシミュレーションに用いた陽子ビームとベリリウムターゲットによる中性子生成断面積データに起因するものと考えられ、その精度を勘案すれば 1 割程度の差異は妥当なものである。また、これらの結果から、実際に治療が行われるビームポートにおける中性子ビームの特性を評価した。ビームポートから 1 m 及び 2 m の地点でのモンテカルロシミュレーション結果と実測結果の比較から直接測定できないビームポートでのモンテカルロシミュレーション結果をスケールした結果もあわせて図 3 に示す。この結果から、ベリリウムターゲットに入射する陽子ビーム電荷量あたりの熱外中性子フルエンスは  $3.65 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ C}^{-1}$  であり、治療に有用な熱外中性子フラックスに対する熱中性子フラックス及び速中性子線量の比はそれぞれ 0.05 (無次元) 及び  $3.75 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$  であった。これらの結果は、いばらき中性子医療研究センターの加速器 BNCT 中性子源の中間的な性能評価及び陽子ビーム電流増強目標値の検証に活用された。

大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターの開発で、<sup>241</sup>Am-Be 及び <sup>252</sup>Cf 中性子に対する、パルス信号及び電流信号での各ボナー球検出の応答の比 (以下、応答比) を評価した結果を図 4 に示す。パルス信号の測定ではパルス信号波高を用いた中性子 - ガンマ線弁別を用い、応答は基準中性子フルエンスに対する中性子信号の計数 ( $\text{cm}^2$ ) で定義した。電流信号の測定では <sup>6</sup>Li 及び <sup>7</sup>Li ガラスシンチレーターの差分法によりガンマ線影響の補正を行い、応答は基準中性子フルエンスに対する光電子増倍管からの中性子信号電荷量 ( $\text{C cm}^2$ ) で定義した。当初、特

に中性子に対するガンマ線の比率が大きい  $^{241}\text{Am-Be}$  中性子に対する測定では応答比に減速材球径、すなわちエネルギー応答特性への顕著な依存性が見られたが、 $^6\text{Li}$  及び  $^7\text{Li}$  ガラスシンチレーターの個体差に起因する補正の精度を改善したことにより、応答比の平坦性が大きく改善した(図4の )。これらの結果を踏まえて、いばらき中性子医療研究センターの加速器 BNCT 施設において、推定熱外中性子フラックス  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の大強度中性子ビームに対するデモンストレーション測定を図5のように行った。想定通り  $\mu\text{A}$  のオーダーの電流信号が得られ、大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターが治療レベルの大強度中性子源の直接測定に対応できることが確認できた。

今後は、大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターの応答関数評価の精度を向上させ、中性子スペクトラルフルエンスの測定精度を向上させるとともに、他の大強度中性子源への適用性についても検証し、改良を重ねていく計画である。

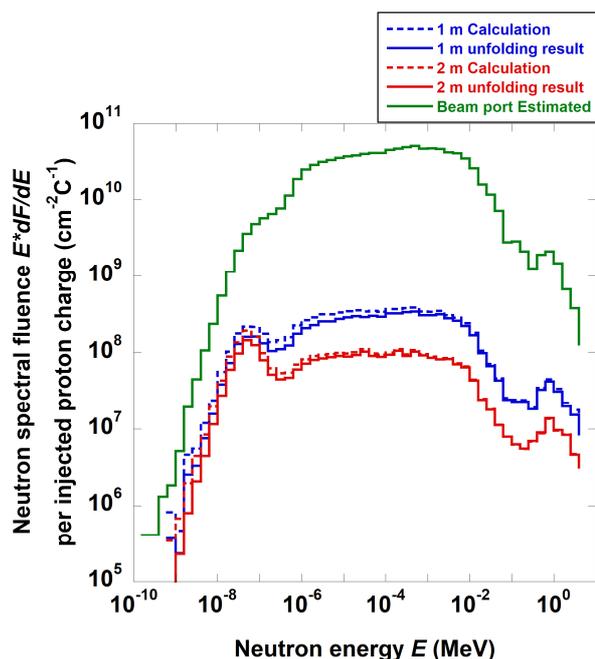


図3：従来型ボナー球スペクトロメーターで評価した加速器 BNCT 中性子源の微弱中性子ビームの中性子スペクトラルフルエンス

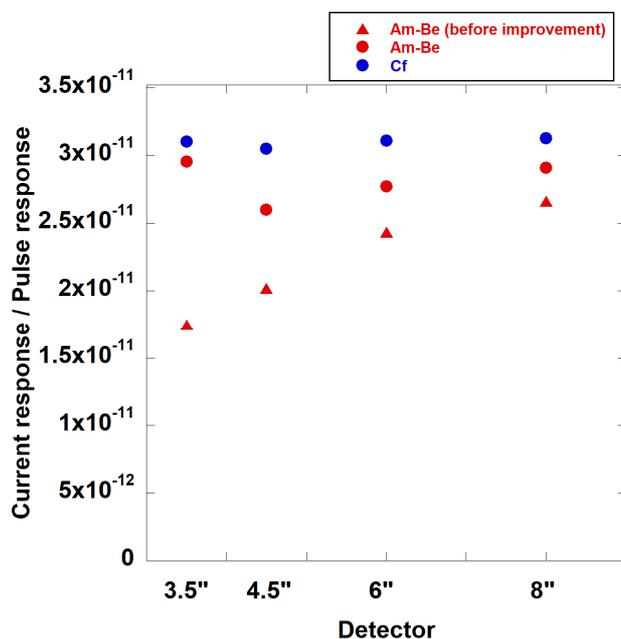


図4：大強度中性子用ボナー球検出器のパルス・電流応答比

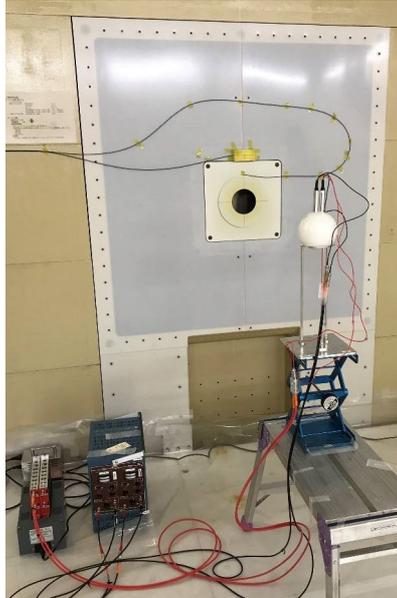


図 5 : 大強度中性子用ボナー球スペクトロメーターによる治療レベルの  
中性子ビームの測定

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計2件)

A. Masuda, T. Matsumoto, K. Takada, T. Onishi, K. Kotaki, H. Sugimoto, H. Kumada, H. Harano, T. Sakae, Neutron spectral fluence measurements using a Bonner sphere spectrometer in the development of the iBNCT accelerator-based neutron source, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 127, pp. 47-51, 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.05.010>

A. Masuda, T. Matsumoto, H. Kumada, K. Takada, J. Hori, Y. Sakurai, T. Sano, H. Harano, T. Sakae, Demonstration of BSS unfolding method for BNCT neutron field and development of new BSS using Li-glass scintillators coupled with current-mode-operated PMTs for intense neutron field, 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Conference Record, to be published.

### 〔学会発表〕(計7件)

増田 明彦、加速器 BNCT における中性子エネルギー分布測定技術の開発、京都大学複合原子力科学研究所 専門研究会 放射線治療と放射線防護のための放射線計測に関する研究会、2019年3月13日、京都大学(大阪府熊取町)。

増田 明彦、松本 哲郎、熊田 博明、高田 健太、田中 進、南 雄己、堀 順一、櫻井 良憲、佐野 忠史、原野 英樹、榮 武二、大強度中性子用 BSS の開発と加速器 BNCT 施設での測定、第66回応用物理学会春季学術講演会、2019年3月9日、東京工業大学(東京都目黒区)。

A. Masuda, T. Matsumoto, H. Kumada, K. Takada, J. Hori, Y. Sakurai, T. Sano, H. Harano, T. Sakae, Demonstration of BSS unfolding method for BNCT neutron field and development of new BSS using Li-glass scintillators coupled with current-mode-operated PMTs for intense neutron field, 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2018年11月14日、Sydney (Australia)。

増田 明彦、松本 哲郎、熊田 博明、高田 健太、堀 順一、櫻井 良憲、佐野 忠史、原野 英樹、榮 武二、加速器大強度中性子源用ボナー球スペクトロメーターの開発と特性評価、2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月21日、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)。

増田 明彦、中性子標準技術の応用研究(高エネルギー中性子、BNCT) 第69回 放射線計測研究会、2018年7月21日、三菱総合研究所(東京都千代田区)。

増田 明彦、松本 哲郎、熊田 博明、高田 健太、大西 貴博、原野 英樹、榮 武二、加速器 BNCT 施設における中性子スペクトラルフルエンス評価、第60回 放射線化学討論会 2017年9月27日、産業技術総合研究所(茨城県つくば市)。

増田 明彦、松本 哲郎、高田 健太、大西 貴博、小滝 幸平、杉本 英法、熊田 博明、原野 英樹、榮 武二、BNCT 加速器中性子源の開発段階における中性子スペクトラルフルエンスの実験的評価、2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 17 日、パシフィコ横浜（神奈川県横浜市）。

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：松本 哲郎

ローマ字氏名：(MATSUMOTO, Tetsuro)

研究協力者氏名：原野 英樹

ローマ字氏名：(HARANO, Hideki)

研究協力者氏名：熊田 博明

ローマ字氏名：(KUMADA, Hiroaki)

研究協力者氏名：高田 健太

ローマ字氏名：(TAKADA, Kenta)

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、研究者個人に帰属されます。