

京都大学	博士（工学）	氏名	鈴木 俊介
論文題目	リチウムターゲットを用いた加速器ホウ素中性子捕捉療法システムの照射場特性評価		
（論文内容の要旨） 本論文は、安全かつ効果的なホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy: BNCT）を臨床で実施するために、リチウムターゲットと静電加速器を用いた BNCT システムの照射場特性に関する結果をまとめたものであり、5 章からなっている。 第 1 章は序論であり、がん治療における放射線治療の役割、BNCT の原理、加速器中性子源による BNCT の現状、そして放射線治療における品質管理・品質保証（Quality Assurance/Quality Control: QA/QC）について解説している。特に、安全かつ効果的な BNCT を臨床で実施するためには、加速器 BNCT システムに適した QA/QC の重要性を強調している。 また、新たに加速器 BNCT システムを医療機関に導入する際には、患者への投与線量や医療従事者の被ばく低減の観点から、照射場特性の適切な評価と定期的な QA/QC の実施が必要であることを述べている。そこで本研究では、加速器 BNCT システムの導入に際し、装置特性および QA/QC の課題を踏まえた照射場特性を明らかにし、今後普及が期待されるリチウムターゲットを用いた加速器 BNCT システムに適した QA/QC 手法の確立を研究目的としている。 第 2 章では、リチウムターゲットと静電加速器を用いた加速器 BNCT システムの特性評価について述べている。BNCT を臨床で行う際、まず治療中に安定した十分な強度の中性子出力が確保されていることが重要である。また、医療従事者の被ばくリスクを軽減するためにも、中性子照射後の放射化による空間線量率の評価、および継続的な使用における中性子出力の定常性の評価が必要である。本研究では、加速器 BNCT システムの特性評価項目として、出力安定性、熱中性子束、中性子出力の定常性、中性子照射後の放射化による空間線量率を設定している。 出力安定性の評価では、システムの標準仕様である陽子ビームエネルギー 2.6 MeV、電流量 30 mA の条件下で、1 時間の照射が可能であることを示した。熱中性子束および中性子出力の定常性については、アルミニウム-マンガン（Al-Mn）箔、アルミニウム-金（Al-Au）箔、PMMA（Polymethyl methacrylate）円柱ファントム、および高純度ゲルマニウム（HP-Ge）検出器を用いた放射化法により評価を行った。その結果、ピーク付近の 2 cm の深さで $2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上の熱中性子束が得られ、計算値と測定値の誤差がすべての深さで $\pm 5\%$ 以内に収まることが確認された。また、定常性の変動は $\pm 2\%$ 以内に収まっていることが示された。 空間線量率の評価では、実際の治療を想定し、一辺 20 cm の立方体水ファントムに 1 時間中性子を照射した後、時間経過に伴う空間線量率の変化を電離箱式サーベイメーターで測定した。その結果、鉛シャッターを用いることで、空間線量率を $5 \text{ } \mu \text{ Sv/h}$ 程度に抑えられることが示された。 第 3 章では、中性子出力における最適な QA/QC 条件の評価について述べている。中性子出力の QA/QC には、一般的に金属試料と HP-Ge 検出器を使用した放射化法が用いられる。リチウムは融点が低く劣化しやすいため、精度を保ちながら効率的な QA/QC 条件を設定することが重要となる。			

京都大学	博士（工学）	氏名	鈴木 俊介
本研究では、リチウムターゲットを用いた加速器 BNCT システムにおける中性子出力の QA/QC において、測定の不確かさを考慮し、照射陽子電荷量および測定時間の観点から最適な条件を決定した。欧州および日本の文献を参考にして、Daily、Weekly、Monthly、Annually の中性子出力に関する QA/QC 実施項目リストを作成した。第 2 章で行った PMMA 円柱ファントム内での Al-Mn 箔および Al-Au 箔を用いた測定、水ファントム内でのカドミウムカバー有無による金線を用いた測定も実施した。QA/QC に関わる不確かさを評価し、総合的な不確かさを一定に保つために、カウント不確かさを 1%以内に抑えることを目標とし、最適な照射および測定条件を探索した。その結果、PMMA 円柱ファントムと Al-Mn、Al-Au 箔を用いた測定では、照射電荷を 36 C、測定時間を 900 秒とすることが最適と判断された。一方、水ファントムと Au ワイヤを用いた測定では、照射電荷 7.0 C、測定時間 900 秒が適切であると決定した。また、カドミウムカバーと Au ワイヤを用いた測定では、深さ 0～2.2 cm の範囲で測定時間 900 秒、より深い範囲では 3600 秒が最適とした。これにより、リチウムターゲットを用いた加速器 BNCT システムにおける中性子出力の QA/QC を行うための条件が確立できた。 第 4 章では、熱蛍光ルミネセンス線量計と ${}^6\text{LiF}$ 焼結体を用いた γ 線線量評価手法の開発について述べている。加速器 BNCT システムの照射口から放出される放射線には、広範囲のエネルギーを持つ中性子だけでなく、直接治療に寄与しない γ 線も含まれている。さらに、患者体内では ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$ 反応により強力な γ 線が発生するため、照射場の評価において γ 線線量の測定も重要となる。しかし、現状では施設ごとに γ 線線量の測定手法が異なり、測定結果の不確かさが大きいことから、汎用性があり、かつ精度が保証された測定手法が求められている。本研究では、市販の熱蛍光ルミネセンス線量計（Thermoluminescence dosimeter Mg_2SiO_4: TLD-MSO-S）と ${}^6\text{LiF}$ 焼結体カプセルを組み合わせた測定手法を考案し、その有用性を検討している。 まず、6 MV の X 線を使用した医療用線形加速器で校正試験を行い、X 線線量と TLD-MSO-S の読み取り値が良好な線形関係を示すことを確認した。また、TLD-MSO-S の感度の個体差を補正するための感度補正係数も明らかにした。さらに、中性子輸送計算を用いて ${}^6\text{LiF}$ による摂動および中性子線量への寄与を計算し、影響を評価した。 加速器 BNCT システムを用いて、水ファントム中に設置した TLD-MSO-S を使った照射試験を実施したところ、測定値は計算結果と $\pm 7\%$ の誤差範囲内でよく一致していることが確認された。また、従来使用されているマグネシウム壁電離箱を用いた測定試験との比較においても、誤差範囲内で一致し、計算結果の妥当性が示された。 この手法は、加速器 BNCT システムにおける γ 線線量の評価に有用であり、適切な校正および補正計算を行うことで、異なる加速器 BNCT システムにおいても同様の精度と再現性をもって γ 線線量を評価できることが可能であると考えられる。したがって、本手法は、今後の γ 線線量評価に関する QA/QC の標準化やその改善に大いに貢献できると結論付けている。 第 5 章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、安全かつ効果的な治療を実現するために、静電加速器とリチウムターゲットを用いたホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) システムの照射場特性を明らかにした研究成果をまとめたものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. システムの特性として、中性子出力の安定性、熱中性子束強度、中性子出力の定常性、および中性子照射後の残留放射能による空間線量率を評価した。中性子出力は 1 時間にわたって安定して維持されていることが確認され、熱中性子束強度はファントム内の深さ 2 cm で $2.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上を達成した。定常性の変動は $\pm 2\%$ 以内に収まり、実測値は中性子輸送計算結果と $\pm 5\%$ 以内でよく一致していた。また、中性子照射後の治療室内の空間線量率は $5 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ 程度に抑えられていることが示された。これらの評価結果により、リチウムターゲットを用いた加速器 BNCT システムが、臨床応用に必要な特性を十分に満たしていることを示した。

2. 治療の安全性を確保するための品質保証および品質管理において、放射化法を用いた中性子出力測定の不確かさを評価した。放射線治療において要求される投与線量の不確かさを満たすため、放射化法におけるカウントの統計的不確かさを 1% 以内に抑えるための最適な照射および測定条件を明らかにした。これにより、臨床においてもその条件が適用可能であることを示した。

3. 品質保証および品質管理に必要なファントム内での γ 線線量を測定するために、熱ルミネセンス線量計と ${}^6\text{LiF}$ 焼結体カプセルを組み合わせた新たな測定方法を開発した。線量校正試験により、読み取り値と線量の間には良好な線形性が確認され、各素子の感度補正係数も導出した。さらに、中性子輸送計算により中性子線量の影響を評価し、ファントム内での γ 線線量を測定した結果、計算結果との良好な一致を確認し、この手法が臨床で応用可能であることを示した。本手法は異なる種類の加速器ホウ素中性子捕捉療法システムにおいても γ 線線量を評価できることから、今後の品質保証及び品質管理の標準化や改善にも貢献することが期待できる。

本論文は、静電加速器とリチウムターゲットを用いた加速器ホウ素中性子捕捉療法システムの照射場特性を明らかにし、治療に必要な品質保証・品質管理項目を確立し、安全かつ効果的な治療の実現に大きく貢献するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 10 月 25 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。