

2023年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】

中性子医療照射における体幹部被ばく線量評価手法の開発

【課題番号】

TK23-030

【代表機関】

産業技術総合研究所

【調査研究代表者（氏名）】

増田 明彦

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

筑波大学：熊田 博明

【TIA 外連携機関】

京都大学複合原子力科学研究所

【報告書作成者】 増田 明彦

【報告書作成年月日】 2024 年 4 月 22 日

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）は、がん細胞に特異的に集積するホウ素薬剤と中性子ビームを用いたがんの治療法である。BNCT で用いる中性子の特性により、頭部などの患部周辺の照射範囲以外への放射線による患者の全身被ばくが見込まれる。一方で、BNCT の治療で用いられる中性子は原子力や一般的な放射線利用施設の中性子とは強度やエネルギー分布といった特性が大きく異なるため、既存の市販の中性子線量計測器では正確な線量測定ができない。

そこで、本研究では、市販の中性子線量計測器に対する簡易な改造によって BNCT 治療照射中の線量測定にどの程度適用できるのかを調査し、課題を明らかにし、より BNCT に適した中性子線量計測器開発の技術的な指針を設定するべく、産総研および筑波大学を中核とする連携活動を計画した。

産総研は中性子の国家標準を整備しており、中性子線量計測器に対する幅広い知見に基づき、既存の市販の中性子線量計測器のなかでも、もともと中性子感度の低いガス検出器を採用したものに着目し、メーカーとも連携してその特注試作機を筑波大学と共同で準備し、その応答特性を産総研の中性子標準施設で評価した。筑波大学では、BNCT 実証機を開発・運用しており、これを利用して試作機の実地試験を行った。さらに、試作機の表示線量を評価する指標として、モンテカルロシミュレーションによる線量計算も行われた。筑波大学の BNCT 実証機は筑波大学自らが開発しており、詳細な体系を再現した精度の良いモンテカルロシミュレーションが可能である。また、京都大学複合原子力科学研究所には、長年 BNCT の研究に用いられてきた原子炉中性子

照射設備があり、筑波大学の BNCT 施設の中性子ビームとはやや特性が異なるため、試作機により幅広い適用性評価の実施に協力を得ることとした。

一方で、BNCT 施設のモンテカルロシミュレーションでは治療室内での散乱中性子の評価などに課題があることも知られているため、本研究の指標として中性子スペクトラルフルエンスの実測に基づく参照用中性子線量も強く望まれる。そこで、光ファイバーを用いた小型シンチレーション検出器を採用することで BNCT の大強度中性子計測に対応させたボナー球スペクトロメーターの開発を行った。小型シンチレーション検出器の採用においては名古屋大学、九州大学、日本原子力研究開発機構の協力を得た。

これらの連携活動により、がんの新しい治療法である BNCT の安全性を評価・検証・担保するための計測技術及び装置開発に資する調査研究を行い、現状理解が進み、技術的課題を明らかにするとともに、関連技術の開発が加速された。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

市販の中性子線量計測器の特注試作機をメーカーの協力も得て準備し、その特性を産総研の中性子国家標準場で評価した。Cf 中性子源を用いた校正結果は、1.03（基準の中性子周辺線量当量率/表示された中性子周辺線量当量率）であり、設計通りの超低感度が実現されていることが確認できた。また、長期安定性も確認された。

試作機を筑波大学の BNCT 施設に導入し、実地試験を行った。試作機内部から取り出した検出器信号のパルス波高分布および計数率を確認し、治療に用いられる大強度中性子に対しても正常に中性子検出信号が得られ、正常に処理されていることを確認した。当初は BNCT 用中性子源の加速器に起因する高ノイズ環境における安定測定に課題が見られたものの、電源や配線の工夫により解決され、特有の測定環境に対するノウハウも蓄積された。

筑波大学の中性子源のビームポートを患者の頭部に模したポリエチレンブロックで塞いだ状態で、患者の体幹部や医療機器が設置される可能性がある地点の中性子周辺線量当量を試作機で測定した。モンテカルロシミュレーションで予想される中性子周辺線量当量と比較したところ、患者の体幹部を想定した 4 箇所でも $\pm 40\%$ 以内で一致した。更なる改善のためには、熱外中性子に対する応答の改良が期待されることが実験的に明らかになった。ビーム軸から遠い壁面・床面近くでは最大で 70% 程度の差異も見られたが、これらの地点では室内散乱中性子の影響が相対的に大きく、モンテカルロシミュレーションの精度に制約があることを考慮すれば十分に妥当な結果であった。

より信頼性の高い実地試験を行うためには、試作機の表示値と比較する基準値をモンテカルロシミュレーションによる中性子線量から、中性子スペクトラルフルエンスの実測結果に基づく中性子線量へと転換させる必要がある。そのため、産総研では大強度用中性子スペクトロメーターの開発を進めた。名古屋大学・九州大学・日本原子力研究開発機構の協力を得て小型シンチレーション検出器をボナー球スペクトロメーターに導入することで大強度への対応を実現した。作製した大強度用ボナー球検出器を京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉 KUR に持ち込み、BNCT 用中性子の測定に成功した。

以上の活動により、BNCT の照射野外の中性子線量の評価において、市販の中性子線量計測器の簡便な仕様変更で達成可能な精度について分析し、更に精度を向上させるために着目すべき技術要素を明らかにすることができた。また、実地測定の精度評価基準を計算値から実測値に転換するための大強度中性子スペクトラルフルエンス計測技術の開発を加速することができた。

【今後の活動予定】

筑波大学の BNCT 施設において大強度ボナー球スペクトロメーターによる測定を行い、中性子線量計測器試作機の精度評価の基準を中性子スペクトラルフルエンスの実測に基づく基準にアップグレードする。筑波大学の施設と特性の異なる京都大学 KUR の BNCT 用中性子でも試作機の測定を行う。これらの結果を受けて、BNCT における照射野外の中性子線量計測に必要な課題をより明確にし、新たな中性子線量計測器を開発に役立てる。

【SDGs17 目標について、調査研究成果について、貢献ができると思われる項目があれば、最大3つまで☑をご記載下さい。】

研究成果に関連する SDGs 目標がある。

関連する SDGs 目標は無い

1 <input type="checkbox"/> 貧困をなくそう	2 <input type="checkbox"/> 飢餓をゼロに
3 <input checked="" type="checkbox"/> すべての人に健康と福祉	4 <input type="checkbox"/> 質の高い教育をみんなに
5 <input type="checkbox"/> ジェンダー平等を実現しよう	6 <input type="checkbox"/> 安全な水とトイレを世界中に
7 <input type="checkbox"/> エネルギーをみんなに、そしてクリーンに	8 <input type="checkbox"/> 働きがいも経済成長も
9 <input checked="" type="checkbox"/> 産業と技術革新の基盤を作ろう	10 <input type="checkbox"/> 人や国の不平等をなくそう
11 <input type="checkbox"/> 住み続けられるまちづくりを	12 <input type="checkbox"/> つくる責任、つかう責任
13 <input type="checkbox"/> 気候変動に具体的な対策を	14 <input type="checkbox"/> 海の豊かさを守ろう
15 <input type="checkbox"/> 陸の豊かさを守ろう	16 <input type="checkbox"/> 平和と公正をすべての人に
17 <input type="checkbox"/> パートナリーシップで目標を達成しよう	

以上