

高度放射線医療に向けた局所線量評価手法に関する研究

中村, 吏一朗

<https://hdl.handle.net/2324/4475113>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 中村 吏一朗

論 文 名 : 高度放射線医療に向けた局所線量評価手法に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

がん治療は外科治療・化学治療・放射線治療の3つに大別される。現在は基本的にこれらを複合的に組み合わせた治療が行われているが、体への負担が比較的小さく Quality of Life の維持が可能である放射線単独でのがん治療の実現に大きな期待が寄せられている。その実現には線量評価手法の高度化が必要不可欠であり、特に局所的な効果を反映し線量を正當に評価することが求められている。本研究は、放射線治療に使われているホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) と重粒子線治療の2つの療法について、線量評価手法における課題解決をはかることを目的とした。

BNCTはホウ素の中性子捕獲反応で放出される飛程の短い ($\sim 10 \mu\text{m}$) 2つの荷電粒子で選択的に腫瘍細胞を破壊する療法である。放射線がん治療では、治療効果を判断する光子等価線量の算出において、治療に用いられる放射線量と同じ細胞生存率を与える基準放射線量との逆比で表される Relative Biological Effectiveness (RBE) が用いられている。これまで BNCT では固定値の RBE が使用されてきたが、本研究では、細胞生存率を推定するモデルを粒子・重イオン輸送コードシステム (PHITS) と組み合わせ、微小領域でのエネルギー付与を考慮したホウ素含有細胞の生存率を推定することにより、RBE を評価した。

一方、重粒子線治療は荷電粒子が飛程近傍で形成する Bragg ピークを腫瘍位置と合わせることで集中的に線量を付与する治療法であり、Bragg ピーク近傍の急峻な線量変化を評価する必要がある。治療ビームの質を評価する Quality Assurance (QA) 作業では現状、位置分解能を持たない電離箱を多列に並べた検出器が使用されているが、その分解能は良くても 4 mm 程度と mm 単位で急峻に変化する線量場においては必ずしも十分とは言えない。本研究では、CCD カメラとガラス基板 Gas Electron Multiplier (GEM) を組み合わせたイメージング検出器で炭素線を計測し、その性能を評価し、粒子線 QA 時の局所線量測定に応用できる可能性を示した。

以下に本論文の構成を記す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、中性子場の線量評価に用いた $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ 領域における放射線エネルギー付与構造を考えるマイクロドジメトリ概念と細胞生存率推定モデル (MK モデル) について述べた。さらに、重粒子線の線量測定に用いた GEM 検出器の原理について説明した。

第3章では、BNCT 中性子場における細胞生存率と光子等価線量推定の手法と結果について述べた。まず、先行研究で提案されていた加速器中性子場シミュレーション体系から得られる中性子スペクトルについて説明した。次に MK モデルを PHITS コードに組み込まれているマイクロドジメトリ関数と組み合わせ、加速器中性子場におけるファントム内に配置したホウ素含有細胞の中性子ビ

ーム深度方向の生存率を推定した。150 MeV 陽子により生成される中性子スペクトルに対し、ファントム表面から約 2 cm で生存率が最も低くなり、BNCT の治療効果はその地点で最も高くなる事がわかった。さらに、推定した細胞生存率から RBE を算出し、深度方向で変化する RBE 値を考慮する場合としない場合の光子等価線量を比較した。その結果、従来の固定値を採用した場合は RBE 値の変化を考慮した場合と比較して約 2 cm 地点で 30%ほど光子等価線量が小さくなり、RBE 値の細胞生存率と線量への依存性の考慮の重要性が示された。

第 4 章では、ガラス基板 GEM イメージング検出器を用いた炭素線の測定とその結果について述べた。まず、チャンバー・暗箱・CCD カメラの 3 要素からなる検出器の構成について説明した。検出器の性能は放射線医学総合研究所の医療用重粒子線加速器 HIMAC で加速された 290 MeV/u 炭素線を用いて測定し、同様に測定した電離箱の性能と比較し評価した。粒子線治療に本検出器を適用するために求められる性能は電離箱と同等の線量応答性を示すこと、および高い空間分解能力を持つことである。まず、炭素線の Bragg ピーク部分の線量と Bragg 曲線の入り口部分の線量との比により線量応答性を評価した結果、ガラス基板 GEM イメージング検出器では $4.17 \pm 3.8\%$ と、治療現場で使用されている電離箱の性能 ($4.38 \pm 1.1\%$) と比肩する線量応答性が得られた。次に、コリメーターで切り取った炭素ビームの断面を GEM 検出器で測定し、ビーム像の半影部分をフィッティングすることにより、空間分解能を評価した。解析の結果、1.00 mm ($\pm 1.9\%$) の分解能を得、4 mm 程度の分解能の電離箱の利用に対して優れた空間分解能の測定が可能であることを示した。以上より、GEM 検出器が急峻な線量場に対応でき、治療用線量測定器として有用であると結論付けた。

第 5 章では、本論文のまとめと今後の課題、今後の展望を示した。