

主 論 文 の 要 旨

論文題目 炭素線治療の *in vivo* ドジメトリーのための
光刺激蛍光体と光ファイバーを用いた小
型線量計の開発
(Development of small-size dosimeter
using OSL and an optical fiber for *in vivo*
dosimetry of carbon-ion radiotherapy)

氏 名 平田 悠歩

論 文 内 容 の 要 旨

炭素線治療は正常細胞への線量付与を抑え、腫瘍にのみダメージを与えることができる。しかし、患者と炭素線照射装置のアライメントエラーや炭素線エネルギーの誤認に起因する照射位置のずれは、正常細胞への線量付与を高め重大な事故を引き起こす可能性がある。このような事故を防ぐため治療中の検出器による測定が求められる。炭素線照射による腫瘍や周辺の細胞に対する影響は様々な検出器や計算により評価を行う必要がある。その中でも、体内に線量計を挿入して放射線測定を行えば患部周辺の放射線情報を直接取得できるため堅実な評価が行える。既存の線量計は体内に挿入するには検出器サイズが大きすぎることや、小さくても S/N 比が悪く十分な感度が得られないなどの問題があった。

光刺激蛍光体は積分型の放射線誘起蛍光素子のひとつで、照射された放射線の線量情報を蛍光体の内部に蓄積することができ、照射後に読み出し用の刺激光を照射することにより線量情報の読み出しが可能である。光刺激蛍光体と光ファイバーを用いた小型線量計は小さくても比較的大きな出力を得ることができる。炭素線は高い線エネルギー付与 (LET) を有しており、高 LET 領域においては光刺激蛍光体の発光効率が消光現象により低下することが分かっている。

本論文では、体内に挿入し患部付近において炭素線の照射範囲や線量に誤りがないか評価を行う小型線量計の開発を目指し、光刺激蛍光体を用いた小型線量計システムの設計・製作、炭素線照射時に発生する消光現象の発生原理の理解と対策を行った。そしてこれらを加

味して実際の治療場における小型線量計の使用法を提示した。

本論文は7章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章 序論

本章では炭素線治療について利点や危険性について説明を行い、炭素線治療において小型線量計を利用する必要性を示した。また現状の炭素線治療における安全管理や研究開発中のその他の線量評価手法についてレビューを行い、それらと比較したときの本研究の位置づけを示した。小型線量計では光刺激蛍光体を放射線検出素子として使用する。光刺激蛍光体について基本的な原理の説明を行い、炭素線治療場の線量評価を行う上での課題を述べた。そして本研究の目的と本論文の構成を述べた。

第2章 光刺激蛍光体を用いた小型線量計の概要

本章では小型線量計の構成に関して、各要素の性能や特性について説明を行った。また比較的高線量場な放射線治療領域において使用するため、小型線量計が十分な放射線耐性を有するか検証を行った。

小型線量計が必要とする条件に合った光刺激蛍光体として Eu:BaFBr と Ce:CaF₂ を選択した。また、それぞれの光刺激蛍光体に適した測定システムを構築した。Eu:BaFBr はイメージングプレートから削りだしたものを使用し、Ce:CaF₂ は透明セラミックス状のサンプルを作製し粉碎した小片を使用した。作製した二種類の小型線量計に X 線照射を行ったところ線量に対して線型な出力を示した。

小型線量計が放射線治療場において安定的に動作するか確認するため、 γ 線照射による放射線耐性試験を行った。小型線量計の炭素線治療において一回の治療で照射される線量範囲ではほとんど放射線損傷による変化が見られないことが分かった。

第3章 炭素線に対する小型線量計の応答

本章では作製した小型線量計を用いて炭素線照射実験を行い、炭素線に対する小型線量計の応答を調査した。高 LET 領域において発生する消光現象について発生メカニズムを仮定し、消光現象がどのようなパラメータに依存するかいくつかの光刺激蛍光体を用いた実験結果をもとに議論を行った。

小型線量計に対して HIMAC において治療用の炭素線照射を行い、その応答を調査した。290 MeV/u の単色炭素線を照射した結果、Eu:BaFBr、Ce:CaF₂ の小型線量計により炭素線が形成するブラッグピークを確認した。しかし、ブラッグピークにおいて光刺激蛍光体の発光効率が低下し、電離箱と比べて小型線量計は低い線量計出力を示した。これは、そのほかの蛍光体においても観測される消光現象であった。

消光現象の発生過程を光刺激蛍光体において炭素線の電離密度が高くなったため生じる局所的な飽和現象であるとするモデルについて考察を行った。このモデルにより消光現象

と関連する要素として δ 線の飛程、トラップ中心の密度、励起電子の移動度の3つが挙げられた。 δ 線の飛程については実効原子番号の異なる Eu:BaFBr と Ce:CaF₂ の発光効率を比較したときに実効原子番号の小さい Ce:CaF₂ の発光効率のほうが高かったことから、実効原子番号が大きく δ 線の飛程が小さいと消光現象の程度が大きくなることが分かった。Ce:CaF₂ の Ce 濃度を変えて比較した結果、トラップ中心の密度が高いと考えられる Ce 濃度が高い Ce:CaF₂ の発光効率が高かったことから、トラップ中心の密度が高いと消光現象の影響は小さくなることが分かった。そして、Ce:CaF₂ の透明セラミックスサンプルにおいて焼結温度が最も高く、結晶粒が大きい Ce:CaF₂ の発光効率が高かったことから、励起電子が移動しやすいほうが消光現象の影響が小さくなることが示唆された。

第4章 小型線量計の消光現象の補正に関する検討

本章では第3章において議論を行った消光現象に関して、補正手法を提案し補正用のシステム構築を行った。構築した補正システムにより実験結果の補正を行い、その有用性や問題点について議論した。

Eu:BaFBr と Ce:CaF₂ の発光効率の違いを利用して炭素線に対する消光現象の補正を試みた。この手法を用いるためには二つの光刺激蛍光体の発光を別々に取得する必要がある。そこで、Eu:BaFBr と Ce:CaF₂ を一本の光ファイバー上に配したハイブリッド線量計を作製した。読み出しにダイクロイックミラーを用いた波長分解を行うことに加え、励起光照射の時間を分けることで二種類の光刺激蛍光を別々に取得できた。Ce:CaF₂ の上に Eu:BaFBr を配する層状にすることでそれぞれの LET 特性を損ねることなくハイブリッド線量計からそれぞれの光刺激蛍光を取得できた。

単色エネルギー炭素線を照射した場合は、発光効率と Eu:BaFBr と Ce:CaF₂ の発光量比の間に相関がみられた。この関係を用いることで単色エネルギー炭素線に対しては実測で得られる発光量比から補正を行うことができた。一方リッジフィルタを用いて形成される炭素線の拡大ブラッグピーク (SOBP) をハイブリッド線量計に単色エネルギー炭素線を照射して得られた発光効率と発光量比の関係から補正を行った。SOBP のピーク後半部分においてフラグメント粒子の影響により補正結果が電離箱の値と比較してずれることが分かった。

第5章 消光現象の照射粒子依存性の評価

第4章の結果から消光現象の照射粒子依存性が補正を行う際に問題となることが分かった。本章では消光現象の照射粒子依存性について、実際に様々な粒子線を照射し小型線量計の応答を評価したのち、消光現象の粒子依存性についてモンテカルロシミュレーションを利用した評価手法を用いて議論を行った。

小型線量計に対して陽子線、ヘリウム線、ネオン線の照射実験を行った。Eu:BaFBr は照射粒子の種類にかかわらず、平均 LET と発光効率の関係が一つの曲線状に分布したが、

Ce:CaF₂は粒子の種類により同じLETでも異なる発光効率であった。

粒子線照射における消光現象の発生モデルについて解析するため、マイクロドジメトリを用いた評価を行った。消光現象の発生が局所的な飽和現象であるとする、線量計全体の飽和傾向とマイクロドジメトリにより得られる局所的なエネルギー付与への飽和傾向は同様であると考えられる。Eu:BaFBrを用いた小型線量計に⁶⁰Coのγ線照射を行い、飽和による感度変化を調査した。また、実験により得られた飽和による蛍光体感度の応答関数を用いて、炭素線、ヘリウム線、ネオン線を照射したときの発光効率変化を再現した。マイクロドジメトリ計算において用いるサンプリング球を150 nmとすることで、発光効率変化を再現することができた。これにより、粒子線の種類が分かれば蛍光体の発光効率を予測することが可能であることがわかった。

第6章 治療場での使用を目指した模擬実験

本章では炭素線治療が用いられている前立腺がんの治療時に小型線量計を尿道に挿入して使用することを想定して、治療場を模擬した実験を行い小型線量計が炭素線治療場に適用できるか議論を行った。

前立腺がんに対して炭素線をスキヤニング法により照射する治療法が開発されている。スキヤニング法を用いた治療状況を模擬するためイオン減速材を用いてエネルギーを変えた炭素線を水槽に照射した。イオン減速材の厚さを変えて積層することにより前立腺への線量付与を模擬した。水槽内の一部を尿道と仮定して、その部分の線量を低下させ、付近の線量分布を小型線量計により測定した。

積層照射をすべて行った後、読み出しを行うと消光現象に影響され線量変化が小さくなった。一方各層の照射ごとに読み出しを行うことにより、炭素線ビームの照射範囲がずれた状況を検知することができた。炭素線ビームに垂直な分布を測定したところ、小型線量計において発光効率の変化はなく、電離箱と同様な線量分布を測定できた。

第7章 結論

本章では本研究の結論として研究内容を要約し、今後の展望を述べた。

本研究では、炭素線治療時に体内に挿入して使用する光刺激蛍光体と光ファイバーを用いた小型線量計の開発を行った。炭素線に対する小型線量計の応答評価として、光刺激蛍光体における消光現象に関する調査やその補正方法の検討を行った。また、スキヤニング法を模擬した試験から体内に挿入し患部付近において炭素線の照射範囲のずれに対して評価を行うことができた。補正や治療計画と組み合わせることで線量についても評価できると考えられ、小型線量計としての使用法を提示することができた。

今後の展望として、光刺激蛍光体のフェーディングによる放射線情報損失に関する評価、小型線量計の再現性の高い作製方法の開発、小型線量計による治療の安全性評価プロトコルの検討などがあげられる。