

学位論文要旨

氏名 水上 慎也



論文題目

「ナノコンポジットフリッケルゲル線量計を用いた
重粒子線の3次元線量測定の検討」

指導教授承認印

五味 勉



ナノコンポジットフリッケゲル線量計を用いた

重粒子線の 3 次元線量測定 of 検討

水上 慎也

【背景・目的】

放射線治療において、標的とする腫瘍に照射線量を集中させつつ、周囲の正常組織に与える線量を最小限に抑えることが重要となる。外部放射線治療では、腫瘍の 3 次元形状や位置に応じて、複雑な線量分布を達成させる高精度放射線治療が広く実施されている。高精度放射線治療を実現するためには、治療計画時の線量分布計算や治療装置の操作においても高い精度が求められる。そのため、治療前に線量計算や装置による潜在的な誤差を明確にすることが重要となる。

化学線量計のひとつであるゲル線量計は、高精度放射線治療における線量検証ツールとして注目されている線量計であり、3 次元線量分布を測定するが可能である。ナノコンポジットフリッケゲル (Nanocomposite Fricke gel: NC-FG) 線量計は、放射線による鉄イオンの酸化反応を利用するゲル線量計である。NC-FG 線量計に照射された線量は、縦緩和率 (R1) という磁気共鳴の縦緩和時間 (T1) の逆数から変換が可能である。R1 の測定には、スピンエコー (spin echo: SE) シーケンスやインバージョンリカバリーシーケンスが一般的に使用されている。しかし、このシーケンスを用いた 3 次元測定は長時間を要するため、現状では 2 次元線量分布の取得にとどまっている。本研究では、高速撮像が可能なグラディエントエコー (gradient echo: GRE) シーケンスを用いて NC-FG 線量計の 3 次元線量分布の取得を検討した。

【方法】

ガラスバイアルに封入した NC-FG ゲル線量計を作成し、千葉重粒子線加速器 (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba: HIMAC) にて炭素線 (290 MeV/u) を照射した。炭素線は直径 10 cm およびペンシルビーム ($\sigma=27.6$ mm) の 2 種類の照射野を使用し、エネルギー吸収体 (アクリル樹脂) を用いて NC-FG 線量計内にブラッグピークが形成されるように照射した。また、電離箱線量計と二次電子モニタを用いて線量測定を行った。

NC-FG 線量計の R1 測定は、3.0 T magnetic resonance imaging (MRI) 装置およびボディアレイコイルを使用して、3 次元 GRE シーケンスを撮像して行った。R1 測定では縦緩和に参与する撮像パラメータを変更して、最低 2 つの信号強度の比を求める必要がある。本研究では、RF パルスの印可強度もしくは印可時間を設定するパラメータのフリップ角 (flip angle: FA) を変更して R1 を算出する可変フリップ角 (variable flip angle: VFA) 法を用いた。

NC-FG 線量計のリファレンス物質として、異なる Fe³⁺濃度に調整したバイアルを作成した。リファレンスバイアルに対して、VFA-GRE シーケンスと TR 可変による 2 次元 SE シーケンスで R1 を測定し、Fe³⁺濃度に対する各シーケンスの R1 応答特性を測定した。

【結果・考察】

VFA-GRE シーケンスで取得した 3 次元 R1 マップは、空間分解能が $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ と高く、多段面からの観察が可能であり、ボリュームレンダリング法による線量の立体的表示が可能であった。表面線量が 600 Gy の NC-FG 線量計において、VFA-GRE シーケンスによる R1 は、入射面から 15 mm の位置で $1.30\pm 0.01\text{ s}^{-1}$ 、ブラッグピークがある 48 mm の位置で $2.89\pm 0.04\text{ s}^{-1}$ であった。また、R1 のばらつきは少なく、画像ノイズの影響は小さかった。

照射線量別の NC-FG 線量計を用いた線量応答曲線は、直線性の高い応答を示した。そのため、入射面から 15 mm を基準とした深部量百分率 (percentage depth dose: PDD) は照射表面線量によらず同一であった。PDD は電離箱線量計で取得した物理線量とほぼ同等であったが、ブラッグピークでは R1 が過大評価となり、ピーク前後では過小評価となった。これは、MRI におけるフーリエ変換のエラーに起因するトランケーションアーチファクトが原因であると考えられた。画像マトリクス数を増加させることでトランケーションアーチファクトは対策できるが、MRI の撮像時間延長と信号雑音比 (signal noise ratio: SNR) の低下を招くため、最適な MRI 撮像条件の検討が必要であった。

リファレンス物質における Fe^{3+} 濃度依存性において、VFA-GRE シーケンスと SE シーケンスの両者で高い直線性が確認された。しかし、 Fe^{3+} 濃度に対する感度を示す直線の傾きは、VFA-GRE シーケンスの方が小さくなった。MRI 撮像条件を再検討することで測定感度が改善する可能性はあるが、線量計では R1 を線量への変換する際に高い直線性を有することが最も重要である。そのため、VFA-GRE シーケンスでも SE シーケンスと同様に線量変換が可能であることが示された。リファレンス物質で測定した SNR は VFA-GRE シーケンスの方がやや劣る結果であったが、VFA-GRE シーケンスは SE シーケンスの 2 次元撮像と同等の撮像時間で 3 次元データが得られた。SE シーケンスで 3 次元データを得るためには、撮像回数を増やさなければならないため、VFA-GRE シーケンスで信号加算回数を増加させて、SE シーケンスと同等の SNR を得ることも可能である。

【結語】

本研究では、NC-FG 線量計の線量測定に VFA-GRE シーケンスを用いることで、短時間で 3 次元データの取得を試みた。VFA-GRE シーケンスによる測定は、現在の主流である 2 次元データ取得と同等の撮像時間で、3 次元データを取得することが可能であり、NC-FG 線量計を用いた重粒子線による放射線治療の線量検証に有用であった。