

4. MR リニアックにおける技術と物理学的側面

恒田 雅人 千葉大学大学院医学研究院MR画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座

エレクタ社が提供する次世代の放射線治療装置「Elekta Unity」は、フィリップス社製のMRIシステムと放射線治療装置(linear accelerator: リニアック)が統合されたシステムである。Elekta Unityを用いることで、高解像度かつ軟部組織コントラストに優れたMR画像を取得し、この画像を基にMR画像誘導即時適応放射線治療(MR-guided online adaptive radiation therapy: MRgART)を施行することができる。照射中は多断面の二次元シネMR画像を撮像することで、腫瘍やメルクマール、周辺正常臓器のモニタリング(リアルタイムモニタリング)が可能である。がん治療において、より効果的、かつ安全な治療を提供することに貢献する。しかし、現状のリアルタイムモニタリングは、腫瘍などの監視と手動のビーム制御に限られている。

本稿では、文献を参考にしてリニアック編とMR編に分けて、最新の技術・物理学的なトピックスを紹介する。

技術と物理学的側面のトピックス: リニアック編

1. 磁場下における線量計測

1) 線量指標

磁場下にて水吸収線量を決定するために磁場補正係数が使用される。この係数は、磁場に起因する水吸収線量校正定数の変化を補正するために用いられる。当院では、Malcovらの報告を参考に磁場補正係数を採用した¹⁾。線量指標

は、一定の線源検出器間距離にて、照射野サイズ10cm×10cmにおいて水中10cm深での線量に対する水中20cm深での線量の比として定義される $TPR_{20,10}$ を用いる。磁場の影響を受けない(受けにくい)指標が必要であり、AAPM TG51プロトコルの%dd(10)xではなく、IAEA TRS-398プロトコルの $TPR_{20,10}$ が最適線質指標として推奨されている^{1), 2)}。 $TPR_{20,10}$ が採用される理由は、ビルドアップ領域よりも下流で、磁場の有無による深部線量の変化が小さく、深部線量の変化が各深さでキャンセルされるためである²⁾。また、測定の際は、磁場に対して平行に設置することが推奨される²⁾。現在、米国医学物理士会(American Association of Physicists in Medicine: AAPM) Task Group-351として、磁場下での標準計測法に関するガイドラインの作成が進んでおり、途中経過がAAPM Annual Meeting 2022にてポスター発表された³⁾。

2) Electron return effect

磁場下での媒質中の電子軌道はローレンツ力との相互作用によって円軌道となり、入射してきた方向に電子が戻る。これをelectron return effect (ERE)と言う。特にEREの影響が大きくなるのは、水・空気といった媒質の密度が大きく異なる境界領域である。例え

ば、肺野(=空気)に浮かぶ孤立性腫瘍(=水)を考える(図1)。腫瘍のビーム射出領域では、腫瘍で発生した電子が肺野に放出された時、EREによって電子が再度腫瘍内へ戻る。この場合では、図内左側へシフトする。不均質ファントム内で磁場の有無によって大きく線量分布が変化することが確認できる。また、物質中における粒子の飛跡をシミュレーションするソフトウェアである「Geant4」を用いて、不均質ファントム中の深部線量分布を計算した報告もある。参考にされたい⁴⁾。

3) Electron streaming effect

磁場方向と入射ビーム方向が垂直の場合、空気中で生成された電子は磁力線に沿って、照射野外へ移動する。これをelectron streaming effect (ESE)と言う。この際、電子軌道はらせん軌道となる。入射ビームにより発生した混入電子はESEによって排除されるため、照射野内の表面線量が減少する。しかし、予期せず移動した電子が照射野外

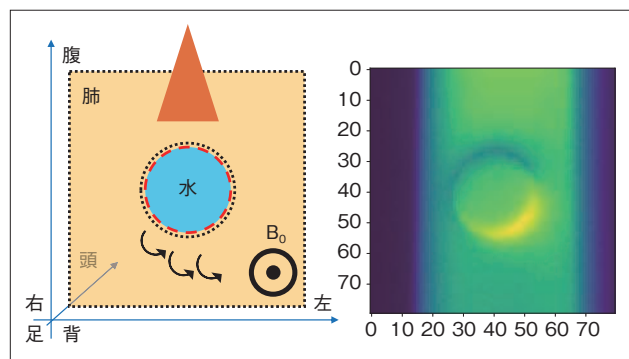


図1 肺がんを模擬したファントム横断面の概略図とフィルムを用いた線量測定の一例