

ホウ素中性子捕捉療法における異なるモンテカルロコードで計算した線量分布の比較

南東北BNCT研究センター ○加藤 亮平(Kato Ryohei)

加藤 貴弘 廣瀬 勝己 竹内 瑛彦 本柳 智章

新井 一弘 原田 崇臣 高井 良尋

福島県立医科大学 加藤 貴弘

【背景】

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)では、中性子と物質の相互作用が複雑であるため、線量計算にはモンテカルロ (MC)法が用いられる。MCで線量計算を行う際、使用する核データライブラリの違いやMC計算コードの違いにより、計算結果が異なることが知られている。BNCTにおけるMC計算コードの計算精度は、均質な水ファントムや頭部模擬ファントム等で、実測や異なるMC計算コードとの比較により検証されてきた^{1, 2, 3)}。しかし、低密度物質における計算精度は、十分明らかにされていない。また、過去の報告は全て原子炉のビームデータが対象とされており、近年普及しつつある加速器のビームデータでは結果が異なる可能性がある。そこで本研究では、低密度物質を含む不均質ファントムと加速器のビームデータを用い、異なるMC計算コードで計算した線量分布を比較した。

【方法】

異なるMC計算コードで計算した線量分布を比較するために、本研究では数値ファントムを使用した。数値ファントムのサイズは $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ とし、水ファントムと軟部組織、正常肺から構成されるスラブファントムを作成した。物質の組成はICRU report46⁴⁾に基づいて設定し、ファントム中には1 ppmのホウ素 (^{10}B)が均一に分布していると仮定した。MC計算コードはSimulation Environment for Radiotherapy Applications (SERA)とParticle and Heavy Ion Transport cord System (PHITS)を使用した。なお核データライブラリについて、SERAでは内蔵されているオリジナルのものを用い、PHITSではJENDL-4.0を用いた。ファントムに対して12 cm ϕ のコリメータを使用し、計算グリッドサイズは一辺0.5 cmとして、SERAとPHITSで熱中性子フラックス、及びホウ素線量を計算した。ホウ素線量は、中性子とホウ素との相互作用に基づいて付与される吸収線量であり、MCで計算した中性子フラックスに核データライブラリから算出されたカーマファクタを乗じることで求めることができる。線量計算には、当院における加速器のビームデータを使用した。各MCで計算した熱中性子フラックスとホウ素線量は、ビーム中心軸上のプロファイルで比較した。また、水ファントム中における熱中性子フラックスは、金の放射化法による実測が可能であるため、実測も行った。

【結果】

水ファントムにおけるSERAとPHITSで計算した熱中性子フラックスは、どちらも実測に対してよく一致していることが確認できた。また、SERAとPHITSの熱中性子フラックスを比較すると、ピーク付近においては約0.8%以内で一致し、表面付近を除いて約4%以内で一致した (Fig.1)。不均質ファントムにおいて、表面付近の軟部組織領域における熱中性子フラックスは約9%以内で一致した (Fig.2)。また、低密度領域では深くなるほど誤差は小さく

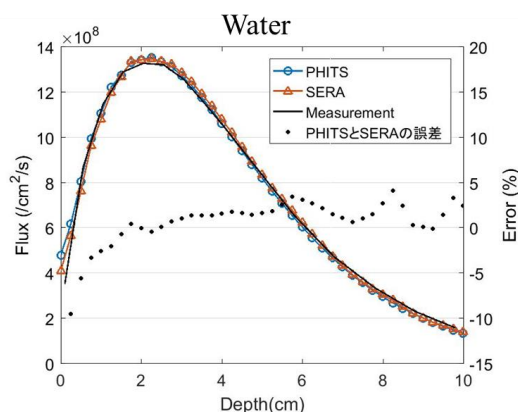


Fig.1 水ファントムにおける熱中性子フラックス

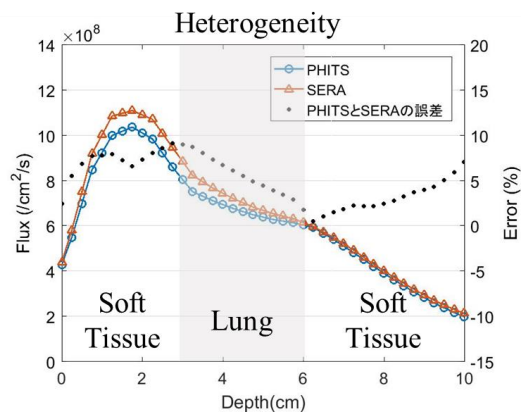


Fig.2 不均質ファントムにおける熱中性子フラックス

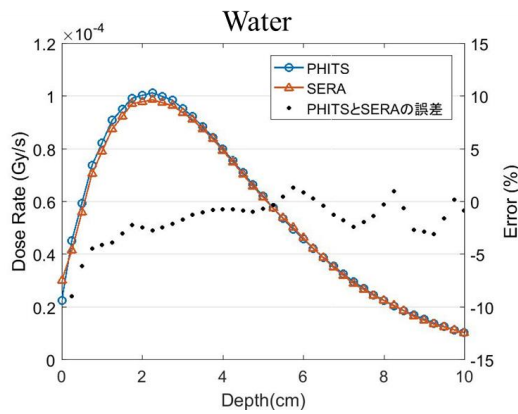


Fig.3 水ファントムにおけるホウ素線量

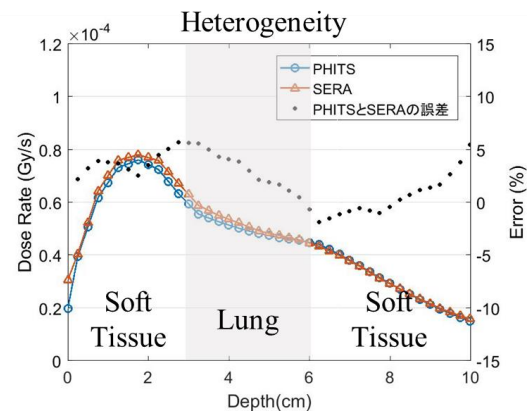


Fig.4 不均質ファントムにおけるホウ素線量

なり (2-9%)、その後の軟部組織領域では深くなるほど誤差が大きくなった (0.6-7%)。

水ファントムにおいてSERAとPHITSで計算したホウ素線量の誤差は、熱中性子フラックスにおける誤差と同じ傾向を示し、表面付近を除いて約3%以内で一致した (Fig.3)。不均質ファントムにおいて、表面付近の軟部組織領域では約6%以内で一致した (Fig.4)。また、低密度領域でも6%以内で一致し、その後の軟部組織領域でも5%以内で一致した。

【考察】

低密度物質を含んだ不均質ファントムにおけるSERAとPHITSで計算した熱中性子フラックスの誤差は9%以内であり、ホウ素線量の誤差は6%以内であった。この誤差は、水ファントムや頭部模擬ファントムを用いた先行研究と同程度の誤差範囲内であった^{1, 2, 3)}。また本研究では、水ファントムより不均質ファントムのほうが全体的な誤差は大きい傾向を示したが、不均質ファントムは水ファントムと比べて様々な元素を含んでおり、核データライブラリの誤差の影響を強く受けたと考えられる。

水ファントムにおいて熱中性子フラックスの実測は可能であるが、今回想定した不均質ファントムではシミュレーションによる比較しか行うことができなかった。そのため、今後は実測可能な不均質ファントムを用いて、MCによる計算結果の妥当性を評価していきたいと考えている。

【結論】

本研究では、低密度物質を含んだ不均質ファントムにおいて、SERAとPHITSで計算した熱中性子フラックスとホウ素線量を比較し、その誤差を明らかにした。不均質ファントムにおける熱中性子フラックスとホウ素線量は、SERAがPHITSよりも高い傾向を示したが、先行研究と同程度の誤差であることが確認できた。

【参考文献】

- 1) H Koivunoro, T Seppälä, J Uusi-Simola, et al. : Validation of dose planning calculations for boron neutron capture therapy using cylindrical and anthropomorphic phantoms. *Phys Med Biol*, 55, 3515-3533, 2010.
- 2) E Durisi, H Koivunoro, L Visca, et al. : Comparison of different MC techniques to evaluate BNCT dose profiles in phantom exposed to various neutron fields. *Radiat Prot Dosim*, 138, 213-222, 2009.
- 3) HS Li, Y-WH Liu, CY Lee, et al. : Verification of the accuracy of BNCT treatment planning system THORplan. *Appl Radiat Isot*, 67, S122-S125, 2009.
- 4) International Commission on Radiation Units and Measurements. : Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues. ICRU-46, Bethesda, MD, 1992.