

ホウ素中性子捕捉療法専用線量計算プログラムの基礎的性能評価

南東北BNCT研究センター 放射線治療品質管理室 ○竹内 瑛彦(Takeuchi Akihiko)

加藤 亮平 小森 慎也 山崎 雄平

南東北BNCT研究センター 放射線治療科 高井 良尋 廣瀬 勝己 佐藤 まり子 原田 麻由美

南東北BNCT研究センター 診療放射線科 本柳 智章 原田 崇臣

福島県立医科大学 保健科学部 加藤 貴弘

【背景・目的】

2020年6月より切除不能な局所進行又は局所再発の頭頸部癌のホウ素中性子捕捉療法(Boron neutron capture therapy; BNCT)が保険診療として開始された。加速器BNCT治療装置の概要についての報告は散見されるが、商用のBNCT専用治療計画装置については詳細な報告はされていない。本研究では、BNCT専用治療計画装置の基本的な性能である計算精度と計算時間を検証することにより、臨床応用の実用性について検討することを目的とした。

【方法】

BNCT専用治療計画装置における線量計算プログラムには住友重機械工業により開発されたNeuCureドーズエンジン(NDE)を用いた。NDEにおける線量計算は汎用のモンテカルロ計算コードであるPHITS¹⁾を使用して行われる。治療計画装置のユーザーインターフェースにはRayStationが使用されており、線量計算時のみNDEが起動してPHITS計算を行い、計算終了後、RayStation上に計算結果が表示される仕様となっている。

はじめにNDEにおけるビームモデリング精度の評価を行うため、水ファントム中での熱中性子フラックス分布およびガンマ線量率分布について計算と実測の比較を行った。熱中性子については深部方向および軸外方向の比較を、ガンマ線については深部方向について比較を行った。照射野条件は現在臨床使用可能である直径100, 120, 150 mmの円形コリメータを使用した。熱中性子束の計測は金を使用した放射化法にて行い、ガンマ線量の計測は熱蛍光線量計を用いて行った。

次に臨床体系における計算条件の検討を行うため、人体ファントムを用いた線量計算を行った。人体ファントムとしてRandoファントムを使用し、ファントムのCT画像上に腫瘍、軟部組織、骨、空気、粘膜の輪郭を入力し、物質定義を行った。腫瘍局在は、耳下腺、中咽頭、眼窩の3部位を想定し、それぞれの腫瘍に対して最適となるようビーム軸を設定した。線量処方方は粘膜最大線量に対して12 Gy(RBE)にて行った。上記条件において計算グリッドサイズおよびモンテカルロ計算の統計誤差を変化させてNDE計算を実施し、MU値および計算時間について評価を行った。

【結果】

Fig.1に水ファントム中の熱中性子束およびガンマ線量率の深部方向の分布の結果を示す。ファントム表面付近および60 mm以深の測定点を除き3%以内で一致した。Fig.2に水ファントム中の熱中性子束の軸外方向の分布の結果を示す。同様にファントム表面付近および60 mm以深の測定点を除き3%以内で一致した。Fig.3に人体ファントムでの計算における各グリッドサイズに対するMU値の変化を示す。3部位ともグリッドサイズが粗いほどMU値を過大評価する傾向が見られた。Fig.4に各計算パラメータにおける計算時間の変化を示す。計算時間は統計誤差の2乗に、グリッドサイズの約4乗に反比例する傾向が見られた。

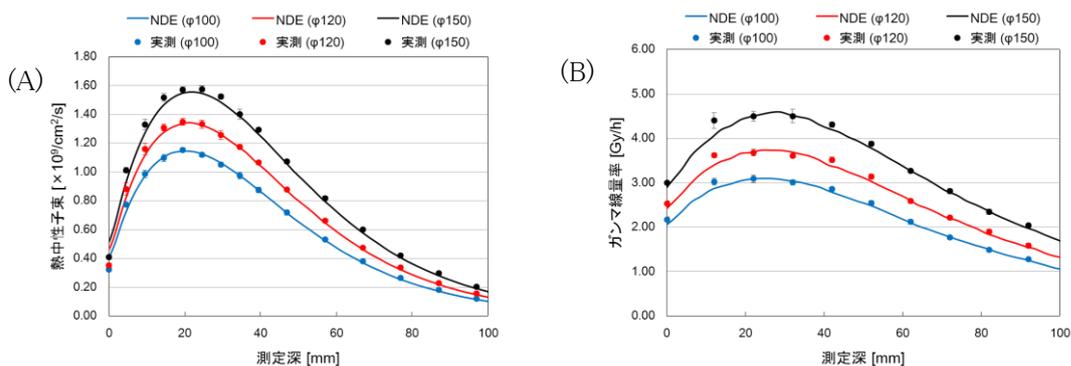


Fig.1 NDE計算値および実測値の深部分布比較。(A) 熱中性子束 (B) ガンマ線量率

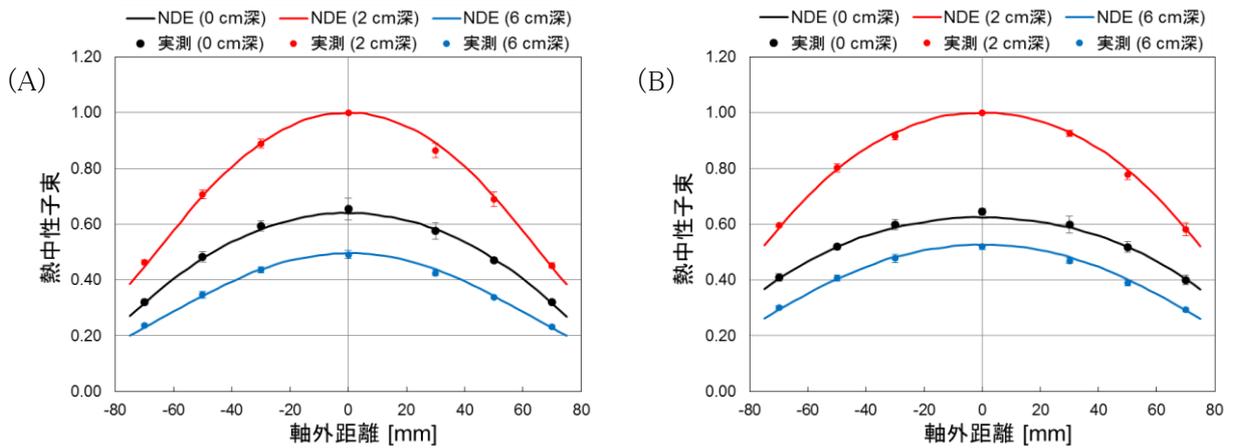


Fig.2 NDE計算値および実測値の軸外分布比較。(A) コリメータ直径120 mm (B) コリメータ直径150 mm

【考察】

水ファントムでの計算結果より、NDEの線源データにおけるエネルギー分布および角度分布のビームモデリング精度は概ね良好であったと考えられるが、一部においてやや実測と乖離する傾向が見られた。この要因にはNDEのコミッションング方法の他に実測の測定誤差も影響している可能性もあり、BNCTの臨床コミッションングにおける継続課題と考えられる。

また、グリッドサイズの影響について、RayStationでは体輪郭として設定されたROIをすべて含めるように計算体系を構築するため、実際の計算体系は設定したROIに対して外側に膨らむことになる。このことが粗いグリッドサイズを設定した場合に顕著となり、細かいグリッドサイズに比べて線量規定点までのPath lengthが長くなりMU値が過大評価された要因の一つと考えられた。検討の結果、MU値を決定するための最終計算は2 mm以下での計算が望ましいと考えられた。

計算時間について、PHITSでは2種類の並列化方式が利用でき、NDEでは自動で計算時間が短くなる方式にて計算を開始するように最適化されプログラムされている。並列化方式の最適化がなされているものの、2 mmの計算には6時間程度要する結果となった。ただし、5 mmグリッドと2 mmグリッドでは分布形状に大きな違いは見られないため、現状では5 mmの計算でビーム軸の最適化を行い、2 mmでの最終計算を夜間等に行うことで運用を成立させている。しかしながら、更なる計算の高速化は必要であると考えられる。

【結論】

NDEの基礎的性能評価として線量計算精度および計算時間の検証を行った。実測の精度も踏まえるとNDEのビームモデリング精度は許容できるものと考えられた。臨床条件で計算精度を担保するためには2.0 mm以下のグリッドサイズの使用が望ましいが、計算時間が約6時間と長時間要することが課題として残る。夜間に計算を実行することにより運用上、実用に耐えうるが、さらなる高速化が求められる。

【参考文献】

- 1) Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, et al. : Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. J. Nucl. Sci. Technol, 55(5-6), 684-690, 2018

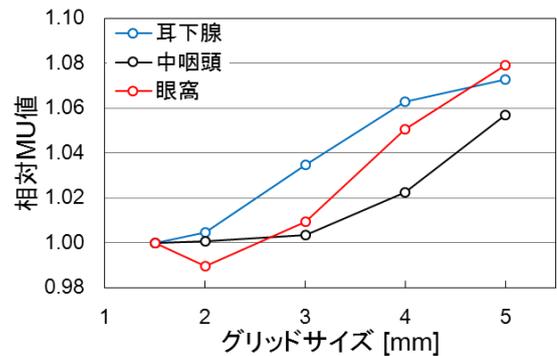


Fig.3 グリッドサイズに対するMU値の変化

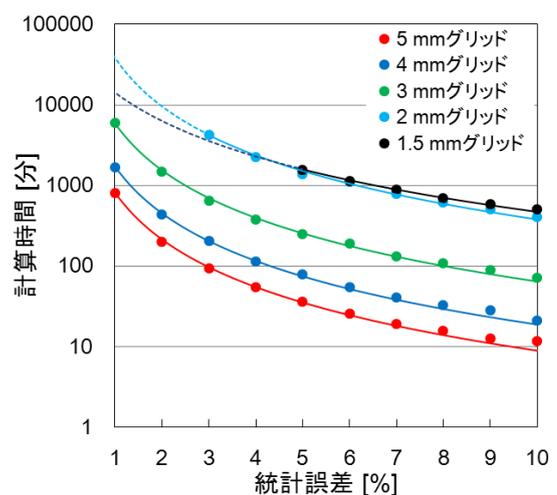


Fig.4 統計誤差およびグリッドサイズの違いによる計算時間の変化。(耳下腺)