

氏名(本籍)	くま だ ひろ あき 熊田博明(茨城県)
学位の種類	博士(医学)
学位記番号	博甲第3807号
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	人間総合科学研究科
学位論文題目	Verification of the computational dosimetry system in JAERI (JCDS) for boron neutron capture therapy (ホウ素中性子捕捉療法のための JAERI Computational Dosimetry System (JCDS) の検証)
主査	筑波大学教授 博士(医学) 秋根康之
副査	筑波大学教授 医学博士 浦山修
副査	筑波大学教授 医学博士 豊岡秀訓
副査	筑波大学助教授 医学博士 高野晋吾
副査	筑波大学助教授 博士(医学) 和田哲郎

論文の内容の要旨

(目的)

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、ホウ素同位体 ^{10}B の熱中性子に対する捕獲反応によって放出される α 粒子とリチウム原子核を利用した治療であり、悪性神経腫瘍に対する BNCT は基礎及び臨床研究途上の放射線治療である。

これまで実施されてきた BNCT では、病巣とその周辺脳組織に付与される吸収線量の評価は、脳表面に配置した金線の放射化量を実測することによって実施してきた。しかしこの評価方法では、脳内深部領域の評価ができない、評価が金線を配置した場所に限定される等の問題があった。特に熱中性子が脳内深部まで到達する熱外中性子ビームを使った BNCT を実施するためには、この実測手法に代わる評価手法の確立が不可欠であった。これを踏まえ、病巣及びその周辺脳組織の吸収線量を数値シミュレーションによって評価する手法を検討し、適切な治療計画作成を支援するシステムについての研究を行った。

本研究目的は、BNCT の線量評価を実施できるシステム・JCDS の計算精度を明らかにすることである。JCDS の計算性能を検証するため、円筒水ファントム実験値との比較及び、実測手法で実施された BNCT から得られた実測データとの比較を実施した。

(対象と方法)

1. JAERI Computational Dosimetry System (JCDS)

JCDS は、CT, MRI データを基に患者の頭部 3 次元モデルを作成し、このモデルを 1cm^3 メッシュに分割したボクセルモデルに変換し、このボクセルモデルに対し中性子・光子輸送計算コード MCNP を使ってモデル内の吸収線量分布を求めるシステムである。

2. 円筒水ファントム実験値との比較

日本原子力研究所の研究用原子炉・JRR-4において、円筒水ファントムを用いた中性子ビーム照射実験を実施し、ファントム内の熱中性子束分布及び、 γ 線量率分布を測定した。このファントム実験をJCDSを使って照射シミュレーションを行い、ファントム内の熱中性子束分布、 γ 線量分布を算出し、JCDS計算値と実験値とを比較した。評価は熱-熱外混合中性子ビームモード(TNB-1モード)及び、熱外中性子ビームモード(ENBモード)について行った。

3. 混合ビームIOBNCTの実測データとの比較

これまでJRR-4において実測評価によって実施されたBNCTに対し、患者のCT、MRIデータと照射時の患者の照射位置データを用いて照射を再現し、JCDSによる事後評価を実施した。このJCDS事後評価結果と実際のBNCTで得られている熱中性子束実測値とを比較した。

(結果)

1. 円筒水ファントム実験値との比較

ファントム内の熱中性子束分布について実験値とJCDS計算値とを比較した結果から、TNB-1モード、ENBモードともに、ファントム表面近傍を除き実験値に対するJCDSの計算誤差は $\pm 5\%$ 以下であった。しかしTNB-1モードでは、表面から深さ1cmまでの領域において、計算値は実験値に対して約5~10%低い値を算出し、ピークを再現できなかった。ENBモードにおいても、ファントム表面値は実験値に対して約40%高い値を示した。

γ 線量率分布に関しては、両ビームモードともに、実験値に対するJCDS計算値は、表面から深部領域にわたり $\pm 5\%$ 以下の精度で一致していた。

2. BNCTの事後評価

JCDSを使って事後評価を行った12症例に対し、患部周辺の熱中性子束実測値の最大値とJCDSの脳表面領域の熱中性子束最大値とを比較した結果、実測値に対するJCDS計算値の差異は $\pm 10\%$ であった。

(考察)

ファントム実験値との比較結果から、JCDSは表面近傍を除く領域の熱中性子束計算と γ 線量計算に関しては、BNCTの線量評価に十分適用できる計算精度を有していることを確認した。一方、表面近傍の熱中性子束計算においては、特性的な計算誤差を伴うことも確認した。BNCT照射においては、中性子ビームが入射する表面近傍で熱中性子が急激にビルドアップし、大きな分布変化を生じる。これに対しJCDSの 1cm^3 ボクセルによる計算手法では、ボクセル内の分布が平均化されるため、表面近傍で生じる分布変化に追従することができず、特性的な計算誤差を生じるものと考えられる。ボクセルの大きさを小さくすることによって計算精度を改善することが可能であると考えられる。しかし、ボクセルのサイズと計算時間は相関関係があるため、実際の運用面を考慮して最適なボクセルサイズと組み合わせについて検討する必要がある。

過去の12症例の実測値と計算値との比較結果から、JCDSを使って実際のBNCT照射を再現し事後評価を行うことによって、JCDSがBNCTの線量評価を実施できることを確認した。頭部表面の最大熱中性子束の誤差については、 1cm^3 ボクセル計算手法も影響していると考えられるが、金線による熱中性子束実測値は、金線を配置した位置での最大値であるため、表面全領域の最大値を捕らえていない可能性も考えられる。

(結論)

BNCT研究において、患者に付与される吸収線量を数値シミュレーションによって評価できるシステム・JCDSの計算性能を検証した結果から、BNCTの線量評価に重要な熱中性子束分布計算及び、 γ 線量率分計

算に対して表面近傍を除いて十分な計算精度を有していることを確認した。表面近傍の熱中性子線量計算に関しては、 1cm^3 ボクセル計算特有の誤差を伴う可能性がある。この特性的な計算誤差については、ボクセルサイズをさらに微細化するなどを検討し、評価精度の向上を図る。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究はホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の際に行う線量の推定の基礎をなす原子炉からの遅中性子とガンマ線が、生体の中でどのように分布するかを計算するプログラムを作成し、この計算結果を実測値と照合し、計算プログラムが正確である事を確かめたものである。この研究成果は BNCT の吸収線量分布を推定するに当たり欠かす事のできないものであり、高く評価できる。しかしながら、BNCT における遅中性子に起因する吸収線量は熱中性子と窒素、水素、ホウ素その他の生体内の原子との複雑な反応を介して生じるものであり、その意味で本研究の目的は限定的なものである。また、先行する同種プログラムが存在しているが、これらとの比較対照も興味ある所である。本研究を基礎とした発展が期待される。

よって、著者は博士 (医学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。