

学位論文題名

医療用10-40 MeV電子リニアックから発生する放射線の
挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

現在の日本人の最大の死亡原因は、がん(悪性新生物)であり、約30%を占めている。日本は急速に進む高齢化によってがん罹患者が増大しており、将来的には2人に1人ががんになると予測されている。がんの治療方法として、今後日本でも米国と同様に生活の質(Quality of Life QOL)に優れた放射線治療の割合が大きく増加する見通しである。そのための放射線治療装置としては、臨床例も多くかつ低価格というコストの優位性もある電子線線型加速器(リニアック)が最も普及しており、国内で900台以上が稼働している。近年、10 MeVより高い電子エネルギーの医療用リニアックの導入が、がん治療における照射方法の高度化や適用範囲の拡大及び最適化に伴って増加している。電子エネルギーが10 MeVを超える場合、光子と電子以外に制動放射光子の光核反応によって中性子、陽子、重陽子、三重陽子(トリトン)、 ^3He 、 α 線が生成する可能性がある。これらの中で透過性が最も高くかつ生成収率も高い中性子の挙動が問題となる。そのため、光中性子の挙動を精度良く解析できる手法によって遮蔽設計を実施する必要があり、エネルギー角度分布を含めた光中性子反応を計算できる輸送計算コードの使用が不可欠である。しかし、光中性子反応を含む遮蔽計算は、計算精度を評価できる電子ライナック施設での遮蔽実験データがないため、その信頼性が十分には検証されていない。

本研究では、北海道大学大学院工学院の45 MeV電子ライナック施設において、電子を照射した金属ターゲットから生成する制動放射光子と光中性子の角度分布を測定し、実験解析によってモンテカルロ計算コードMCNP5の精度検証を行った。更に、制動放射光子と光中性子による鉄とコンクリートの遮蔽実験体系内における線量率分布を測定し、その実験結果との比較からMCNP5の精度検証を行い、その上で最適遮蔽構造を検討した。

第2章では、C, Ni, In, Au放射化検出器及びガラス線量計(FGD)と酸化アルミニウム(OSL)の2種類の線量計を用いて、18, 28, 38 MeV電子を照射した銅とタングステンターゲットからの制動放射光子の0, 30, 45, 60, 90, 120度での角度分布データを取得した。これにより、制動放射光子の角度分布の検証だけでなく、光核反応断面積の評価精度を検証する上でも重要な実験データである放射化検出器で測定した光核反応の $^{12}\text{C}(\gamma, n)$, $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)$, $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')$, $^{115\text{m}}\text{In}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$ の反応率及び線量計で測定した光子線量率が得られた。これらの実験値との比較により、制動放射光子の角度分布についてのMCNP5コードの計算精度は、医療用リニアックで使用されている28 MeV以下では50%以内の精度であることがわかった。特に、18 MeV電子照射における計算値と実験値は、20%以内の良い一致であることがわかった。但し、ターゲット周辺の線量率の評価では、散乱され

た電子の寄与を考慮しなければならない。

第3章では、Al, In, Auの放射化検出器とADCプラスチックを用いた2種類の固体飛跡中性子線量計を使用して、18, 28, 38 MeV電子を照射した銅とタングステンターゲットからの-10~25, 30, 45, 60, 90, 120度での光中性子の角度分布データを取得した。これにより、これまでに報告例のない初めての光中性子収率の角度分布の実験データである放射化検出器で測定した中性子反応の $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$, $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$, $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ の反応率及び線量計で測定した中性子線量率が得られた。このデータは、医療用の高エネルギーリニアックに対応し、がん患者の被ばく評価だけでなく、遮蔽設計と放射化解析の検証及び高度化にとっても必要不可欠なものである。これらの実験値との比較により、光中性子の角度分布についての光核反応断面積ライブラリLA150を使用したMCNP5の計算精度は、医療用リニアックで使用されている28 MeV以下ではファクター1.5の精度であることがわかった。 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 反応率と中性子線量率の実験値は、0度近傍に急峻なピークが存在するけれども、光中性子の角度分布がほぼ等方であるため、計算ではこのような0度ピークを再現できない。この0度ピークは、放射化検出器と線量計自体の光核反応の寄与が主体であることを見出した。しかし、0度ピークは、計算結果にこれらの寄与を加えても実験値を過小評価しているが、(e,n)反応で生成した中性子の寄与を追加することによって良く一致することを見出した。

第4章では、18, 28, 38 MeV電子を銅ターゲットに照射し、そこで生成した制動放射光子と光中性子を鉄とコンクリートから成る7種類の遮蔽実験体系に入射させる実験を行った。2種類の固体飛跡中性子線量計と2種類の光子線量計(FGDとOSL)を使用して、実験体系内及び体系の前面と後面における中性子と光子の線量率のデータを取得した。医療用リニアック室の遮蔽壁内部における放射線挙動の研究成果の報告が存在しないため、遮蔽設計の高度化に大きく貢献する貴重なベンチマーク実験データが得られた。これらの実験値との比較により、コンクリート及び鉄遮蔽体系内の中性子と光子の線量率についてのMCNP5の計算精度は、実験値の解析から30%以内の精度であることがわかった。また、医療用リニアック室の遮蔽壁について、鉄+コンクリート体系の最適な構造は、厚さ40~50 cmの鉄層を遮蔽壁の最前部に配置したものであることがわかった。医療用リニアック室の遮蔽壁を100 cm程度の薄さにするためには、鉄40 cm+ポリエチレン10 cm+鉄20 cm+鉛10 cm+ポリエチレン10 cm+コンクリート10 cmの遮蔽壁構造が、施工性の確保とコスト面から見ても最適な複合遮蔽構造である。この複合遮蔽構造の遮蔽性能を実証するための実験を行い、MCNP5はこの遮蔽構造でも30%の精度で評価できることがわかった。

本研究では、近年導入が増加している10 MeVより高い電子エネルギーの医療用リニアックの遮蔽設計と患者の被ばく評価のために必要な3次元モンテカルロ輸送計算コードMCNP5の計算精度を検証するための実験を行い、その計算精度を明らかにした。以上のことから、本研究で得られた成果は、医療用リニアック施設における放射線挙動評価法と遮蔽設計に関する高度化及び高精度化に貢献するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鬼 柳 善 明
副 査 教 授 古 坂 道 弘
副 査 教 授 住 吉 孝

学位論文題名

医療用10-40 MeV電子リニアックから発生する放射線の 挙動に関する研究

現在の日本人の最大の死亡原因は、がん（悪性新生物）であり、約30%を占めている。日本は急速に進む高齢化によってがん罹患者が増大しており、将来的には2人に1人ががんになると予測されている。がんの治療方法として、今後日本でも米国と同様に生活の質（Quality of Life QOL）に優れた放射線治療の割合が大きく増加する見通しである。そのための放射線治療装置としては、臨床例も多くかつ低価格というコストの優位性もある電子線型加速器（リニアック）が最も普及しており、国内で900台以上が稼動している。近年、10 MeVより高い電子エネルギーの医療用リニアックの導入が、がん治療における照射方法の高度化や適用範囲の拡大及び最適化に伴って増加している。電子エネルギーが10 MeVを超える場合、光子と電子以外に制動放射光子の光核反応によって中性子、陽子、重陽子、三重陽子（トリトン）、 ^3He 、 α 線が生成する可能性がある。これらの中で透過性が最も高く、かつ生成収率も高い中性子の挙動が問題となる。そのため、光中性子の挙動を精度良く解析できる手法によって遮蔽設計を実施する必要があり、エネルギー角度分布を含めた光中性子反応を計算できる輸送計算コードの使用が不可欠である。しかし、光中性子反応を含む遮蔽計算は、計算精度を評価できる電子ライナック施設での遮蔽実験データがないため、その信頼性が十分には検証されていない。

本研究では、北海道大学大学院工学研究院の45 MeV電子リニアックを用いて、電子を照射した金属ターゲットから生成する制動放射光子と光中性子の角度分布を測定し、実験解析によってモンテカルロ計算コードMCNP5の精度検証を行った。更に、制動放射光子と光中性子による鉄とコンクリートの遮蔽実験体系内における線量率分布を測定し、その実験結果との比較からMCNP5の精度検証を行い、その上で最適遮蔽構造を検討した。

第2章では、C, Ni, In, Au放射化検出器及びガラス線量計(FGD)と酸化アルミニウム線量計(OSL)の2種類の線量計を用いて、18, 28, 38 MeV電子を照射した銅とタングステンターゲットからの制動放射光子の0, 30, 45, 60, 90, 120度での角度分布データを取得した。これにより、制動放射光子の角度分布の検証だけでなく、光核反応断面積の評価精度を検証する上でも重要な実験データである放射化検出器で測定した光核反応の $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$, $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$, $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ の反応率及び線量計で測定した光子線量率が得られた。これらの実験値との比較により、制動放射光子の角度分布についてのMCNP5コードの計算精度は、医療用リニアックで使用されている28 MeV以下では50%以内の精度であることがわかった。特に、18 MeV電子照射

における計算値と実験値は、20% 以内の良い一致であることがわかった。但し、ターゲット周辺の線量率の評価では、散乱された電子の寄与を考慮しなければならない。

第3章では、Al, In, Au の放射化検出器と ADC プラスチックを用いた2種類の固体飛跡中性子線量計を使用して、18, 28, 38 MeV 電子を照射した銅とタングステンターゲットからの-10~25, 30, 45, 60, 90, 120 度での光中性子の角度分布データを取得した。これにより、これまでに報告例のない初めての光中性子収率の角度分布の実験データである放射化検出器で測定した中性子反応の $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$, $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$, $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$, $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ の反応率及び線量計で測定した中性子線量率が得られた。このデータは、医療用の高エネルギーリニアックに対応し、がん患者の被ばく評価だけでなく、遮蔽設計と放射化解析の検証及び高度化にとっても必要不可欠なものである。これらの実験値との比較により、光中性子の角度分布についての光核反応断面積ライブラリ LA150 を使用した MCNP5 の計算精度は、医療用リニアックで使用されている 28 MeV 以下ではファクター 1.5 の精度であることがわかった。 $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ 反応率と中性子線量率の実験値は、0 度方向で急激に増加している。しかし、光中性子の角度分布がほぼ等方であるため、計算ではこのような 0 度方向の傾向を再現できない。この原因は、放射化検出器と線量計自体の光核反応の寄与が主体であることを見出した。しかし、計算結果にこれらの寄与を加えても実験値を過小評価しているが、(e,n) 反応で生成した中性子の寄与を追加することによって良く一致することを見出した。

第4章では、18, 28, 38 MeV 電子を銅ターゲットに照射し、そこで生成した制動放射光子と光中性子を鉄とコンクリートから成る7種類の遮蔽実験体系に入射させる実験を行った。2種類の固体飛跡中性子線量計と2種類の光子線量計 (FGD と OSL) を使用して、実験体系内及び体系の前面と後面における中性子と光子の線量率のデータを取得した。医療用リニアック室の遮蔽壁内部における放射線挙動の研究成果の報告が存在しないため、遮蔽設計の高度化に大きく貢献する貴重なベンチマーク実験データが得られた。これらの実験値との比較により、コンクリート及び鉄遮蔽体系内の中性子と光子の線量率についての MCNP5 の計算精度は、実験値の解析から 30% 以内の精度であることがわかった。また、医療用リニアック室の遮蔽壁について、鉄とコンクリートを用いた体系の最適な構造は、厚さ 40~50 cm の鉄層を遮蔽壁の最前部に配置したものであることがわかった。医療用リニアック室の遮蔽壁を 100 cm 程度の薄さにするためには、鉄 40 cm、ポリエチレン 10 cm、鉄 20 cm、鉛 10 cm、ポリエチレン 10 cm、コンクリート 10 cm の積層遮蔽壁構造が、施工性の確保とコスト面から見ても最適な複合遮蔽構造である。この複合遮蔽構造の遮蔽性能を実証するための実験を行い、MCNP5 はこの遮蔽構造でも 30% の精度で評価できることがわかった。

以上、本論文は、最近導入が増加している 10 MeV より高い電子エネルギーの医療用リニアックの遮蔽設計と患者の被ばく評価のために必要な3次元シミュレーション計算精度検証を実験・計算の両面から明らかにしたものであり、放射線挙動評価法と遮蔽設計に関する高度化・高精度化に対する貢献は大きなものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。