

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23602008

研究課題名(和文)炭素線治療における中性子被ばくの低減化に関する研究

研究課題名(英文)Reduction of neutron exposure for carbon-ion radiotherapy

研究代表者

小森 雅孝 (Komori, Masataka)

名古屋大学・医学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30392228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：拡大照射法を用いた粒子線治療における二次中性子による被ばく量を、照射野形成装置にコリメータを最適化して配置することにより低減可能であることを示した。炭素線治療装置HIMACを例にしてモンテカルロシミュレーションを用いて研究を行った。特定の条件ではあるが、本研究の方法により最大40%程度の被ばく量の低減効果があることが分かった。各粒子線治療施設においても、照射野形成装置のコリメータを中性子被ばくに最適化することで、被ばく量の低減が可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In passive particle radiotherapy, secondary neutrons are produced by nuclear reaction because most incident particles collide with collimators. We additionally set a fixed-aperture collimator (FC) to the upper stream in a beam delivery system to reduce neutron exposure.

This study was performed by Monte Carlo toolkit Geant4. The beam delivery system of Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) was constructed in Geant4. We calculated the neutron ambient dose equivalent at patient position with and without FC. Incident particle was carbon-ion of 290 and 400 MeV/n. The diameter of laterally uniform irradiation field was 100 and 200 mm.

The measured secondary neutron ambient dose equivalent without FC was reproduced in Geant4. The neutron dose equivalent was approximately reduced to 40% for 400 MeV/n carbon-ion beam, by inserting the FC optimized not to affect the lateral dose distribution. We can find out that the neutron exposure can be reduced by inserting the FC.

研究分野：医学物理学

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：炭素線治療 拡大照射法 中性子被ばく モンテカルロシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

高エネルギーに加速された陽子または炭素イオンを用いた粒子線治療は、標的腫瘍への線量集中性がよく、障害が少ない治療が可能である。加速器から供給された粒子線のビームサイズは1 cm 程度と腫瘍の大きさより小さい。腫瘍に均一に線量を照射するために、一様照射野を形成する。ビームを横方向、深さ方向ともに一様に拡大し、コリメータを用いて必要ない部分を遮蔽することで、腫瘍形状に合致したビームを照射する拡大照射法が、現在では主流である。

拡大照射法の欠点の一つとしては、中性子被ばくがあげられる。重荷電粒子である陽子と炭素イオンは、コリメータなどの照射野形成装置と衝突すると、二次中性子が発生し、患者は不要な被ばくを受ける。もちろん、腫瘍を制御するメリットの方がはるかに大きいので、粒子線を照射するが、晩発性障害のリスクが全くないわけではない。若年者ほど治療後の人生が長いこともあり、小児に対する粒子線治療を日本では積極的に行っていない理由の一つである。

放射線医学総合研究所の炭素線治療装置 HIMAC においては、患者直上流のコリメータが、主な中性子の発生源であるという報告がなされている。さらに上流にコリメータを追加配置し、不要なビームをなるべく上流で遮蔽すれば、中性子発生源と患者との距離が大きくなり、被ばく量の低減が可能となる。拡大照射法を用いた粒子線治療施設は、概ね同じ機器構成となっているので、粒子線治療全般にわたって、中性子による被ばく量の低減が期待できる。

2. 研究の目的

炭素線治療装置 HIMAC を例にして、これまでのコリメータ位置より、さらに上流にもコリメータを追加配置することで、中性子による被ばく量を低減することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究はモンテカルロシミュレーションコード Geant4 を用いて行った。計算体系は HIMAC にて行われた炭素線線量分布および中性子線量当量の測定を再現した。HIMAC 水平照射室の照射野形成装置、治療室の床、壁、天井等を Geant4 内に組み込み、アイソセンタに設置した水ファントムに炭素線を照射した(図 1 参照)。研究は以下の手順で行われた。

1. 炭素線の深部線量分布、側方線量分布が実測値を再現することを確認、
2. 実測条件での中性子エネルギースペクトルを計算し、線量当量を実測値と比較、
3. コリメータを上流位置に追加した条件で、線量当量の低減を検証。

使用した炭素線のエネルギーは 290 及び 400 MeV/n、拡大照射野の大きさは直径 100 及び 200 mm、拡大プラグピーク(SOBP)は

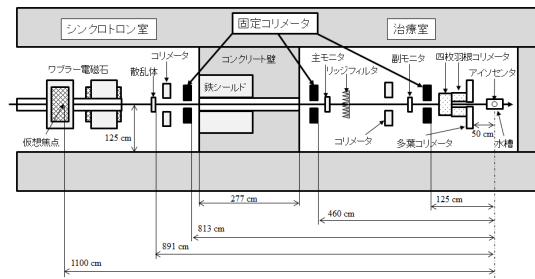


図 1 Geant4 にて構築した照射野形成装置

60 mm である。マルチリーフコリメータの開度は、炭素線線量分布、中性子線量当量それぞれの測定条件に一致するように変更した。中性子線量当量の導出は、アイソセンタ側方に 50 cm から 200 cm の位置で中性子エネルギースペクトルを計算し、ICRP74 に記載されている換算係数を用いて行った。

炭素線線量分布、中性子線量当量の計算が実測を再現していることを確認した上で、アイソセンタから 125、460、813 cm 上流にアルミ製コリメータをそれぞれ追加し、一様照射野に影響を及ぼさないように、開口径を最適化した。最適化したコリメータを、それぞれの位置に配置した条件で中性子線量当量を計算し、コリメータを配置しない場合の線量当量と比較することで、低減効果を評価した。また、コリメータの材質を鉄、タングステン、ニッケルポリメタクリル酸メチル樹脂 (PMMA) に変更した場合の低減効果を評価した。

4. 研究成果

図 2 に炭素線の深部線量分布、図 3 に側方線量分布の実測値及び、それを Geant4 で再現した計算値をそれぞれ示す。計算値は実測値をよく再現しており、Geant4 による炭素線の線量分布計算が正しく行われていることを確認できた。

図 4 に炭素線エネルギー 400 MeV/n における単位照射線量当たりの中性子線量当量の実測値と、それを再現した計算値を示す。中性子は電荷をもたない粒子であり、測定及び

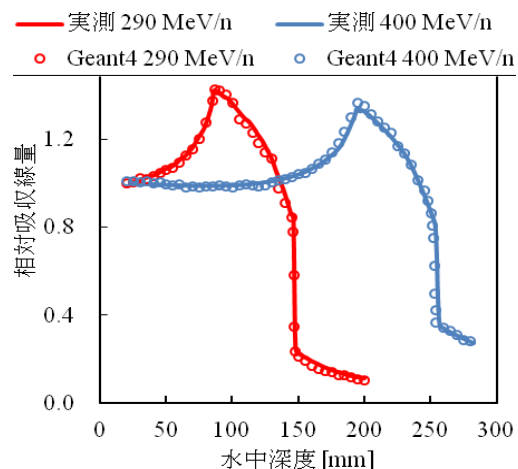


図 2 深部線量分布の比較

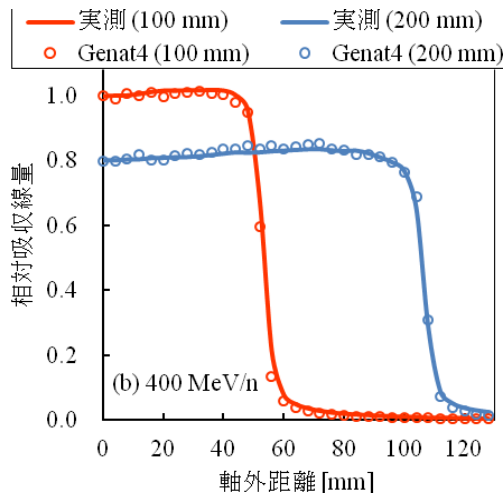


図3 側方線量分布の比較

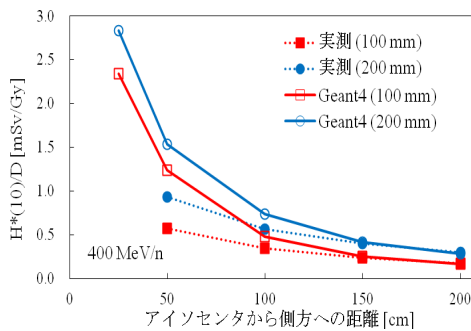


図4 単位照射線量当たりの中性子線量当量の比較

計算が炭素線より難しいことを考慮すると、中性子線量当量の計算も、正しく行われているといえる。

図5に炭素線エネルギー400MeV/n、直径100mmの均一照射野における、アルミ製コリメータを追加した際の中性子線量当量を示す。アイソセンタから135、470cm上流に追加した場合は最大35%程度の低減効果が見られた。また側方距離による低減効果の違いは、アイソセンタに近いほど、大きな低減効果が見られた。アイソセンタ側方の近い位置では、高エネルギー中性子の寄与が大きいと考えられる。高エネルギー中性子は直進性が高く、中性子の発生点から前方に強く分布する。コリメータを追加配置することによって、中性子の発生点をアイソセンタから遠ざけることが可能となり、アイソセンタでは高エネルギー中性子の分布が拡散される。結果として、線量当量が低減されたと考えられる。一方、アイソセンタ側方の遠い位置では、低エネルギー中性子の寄与が大きいと考えられる。低エネルギー中性子は照射野形成装置及び、治療室の床、天井、壁面などで散乱され、治療室内に広く分布すると考えられる。よって、中性子発生源を上流に遠ざけたとしても、上記散乱により広く分布することになるので、線量当量の低減効果が少ないと考えられる。

コリメータ配置位置での低減効果の違い

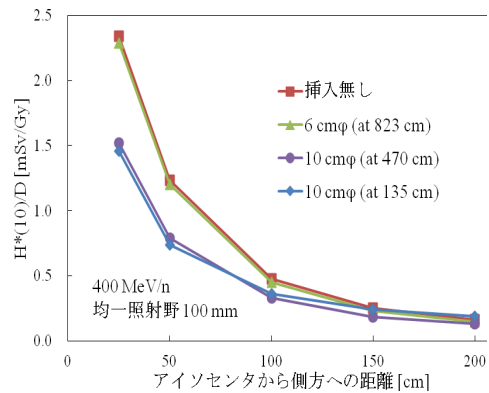


図5 コリメータを追加配置した中性子線量当量

に関しては、アイソセンタから823cm上流位置に追加した場合には、均一照射野の形成が十分ではなく、炭素線の遮蔽効果が小さかったためである。また、470cmと135cm位置で低減効果がほぼ同じなのは、コリメータの開口径が同じことが原因である。両位置でそれぞれ開口径を最適化したが、470cm位置の直下流にSOBPを形成するためのリッジフィルタがあり、炭素線は散乱される。このため、470cm位置ではコリメータ開口径が、アイソセンタ位置での側方線量分布に影響を及ぼしやすい。リッジフィルタ下流にコリメータを追加すれば、線量当量の低減効果がより大きくなるのではと考えている。

図6にアイソセンタから470cm上流にコリメータを追加した際に、コリメータの材質を変更した条件での、中性子線量当量の低減効果を示す。アルミよりも密度の高い材質では、低減効果は少し大きくなった。しかしながら、材質の原子番号、密度の増加割合と比べると、低減効果の増加率は小さい。これは、高原子番号物質では、高エネルギー中性子の減速効果が期待できるが、一方で中性子の発生割合も増加するので、それらが相殺されて

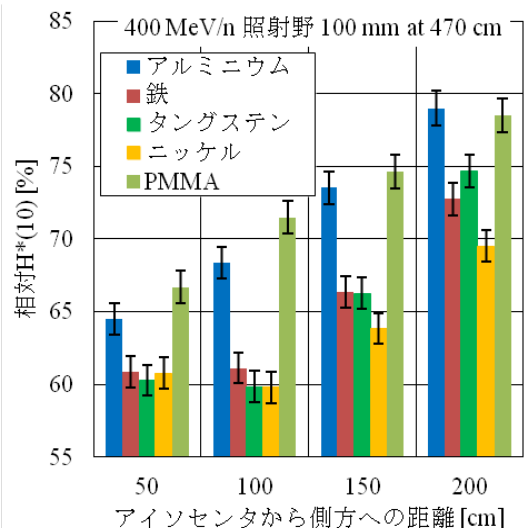


図6 追加配置したコリメータの材質による、中性子線量当量低減率の変化

低減効果が期待したほど大きくは変わらないものと考えられる。

本研究によって、照射野形成装置に組み込まれているコリメータを、中性子被ばくを考慮して最適化すれば、最大 40%程度の中性子線量当量の低減効果があることが示された。特定の照射野条件で最適化したこと、また各粒子線施設で照射野形成装置の配置が異なる事があるので、各施設での最適化が必要であるが、既存のコリメータの開口径を最適化し置き換えることで、中性子被ばくの低減が十分可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

1. A. Takeuchi, M. Komori, H. Oguchi, Y. Iwamoto, M. Tamura, T. Rachi, M. Niwa, T. Harada, Monte Carlo study on reduction in the secondary neutron exposure in passive carbon-ion radiotherapy, Jpn. J. Med. Phys. 33 Suppl. No.1 (2013) 177 (査読なし)

[学会発表](計 3 件)

1. 竹内瑛彦、小森雅孝、小口宏、岩本康史、田村命、良知寿哉、丹羽まい子、原田崇臣、モンテカルロシミュレーションを用いたパッシブ炭素線治療時の二次中性子被ばくの低減、第 105 回日本医学物理学学会学術大会、2013 年 4 月 11-14 日、横浜
2. A. Takeuchi, M. Komori, H. Oguchi, Y. Iwamoto, M. Tamura, T. Rachi, M. Niwa, T. Harada, Monte Carlo study on reduction in the secondary neutron exposure in passive carbon-ion radiotherapy, European Congress of Radiology (ECR) 2013, 2013 年 3 月 7 日, Vienna, Austria
3. 竹内瑛彦、小森雅孝、岩本康史、田村命、良知寿哉、丹羽まい子、モンテカルロシミュレーションによる炭素線治療における二次中性子の低減に関する検討、第 5 回中部放射線医療技術学術大会、2012 年 11 月 3-4 日、浜松

6. 研究組織

(1)研究代表者

小森雅孝 (MASATAKA KOMORI)
名古屋大学・医学系研究科・准教授
研究者番号：30392228

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし