

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25390129

研究課題名(和文) 熱蛍光線量計を用いた粒子線がん治療線量分布測定におけるフラグメント粒子の影響評価

研究課題名(英文) Influence evaluation of fragments in dose distribution measurements for particle therapy by using thermoluminescent dosimeters

研究代表者

若林 源一郎 (WAKABAYASHI, Genichiro)

近畿大学・原子力研究所・准教授

研究者番号：90311852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計(TEP-TLD)に粒子線治療ビームを照射したときに核反応によって生成するフラグメント粒子を測定することを目的として研究を行った。シミュレーション計算によりTEP-TLDやタフウォーターファントムを標的とした場合の線量分布及びフルエンス分布を調査した後、放射線医学総合研究所の重粒子線加速器施設HIMACにおいて検出器システムのテスト実験を行った。その結果、検出器システムは治療場で発生する二次中性子による放射化に大きく影響されることが分かった。

研究成果の概要(英文)：This study was carried out to measure the fragments produced in a tissue equivalent phantom thermoluminescent dosimeter (TEP-TLD) irradiated by a particle therapeutic beam. Several experiments were performed to check detector performance by using the heavy ion medical accelerator HIMAC at NIRS after the dose and fluence distribution of each fragment produced in TEP-TLDs and tough water phantoms as targets was simulated. As result, it was found that the performance of the detector system was largely influenced by activation by secondary neutrons in treatment field.

研究分野：放射線工学

キーワード：組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計 重粒子線 フラグメント粒子 線量分布測定 二次中性子

1. 研究開始当初の背景

近年、高エネルギーの陽子線や重粒子線を使った粒子線がん治療に大きな期待が寄せられるようになり、すでに数多くの治療が実施されている。粒子線がん治療は、粒子線の飛程終端における急峻なブラッグピーク的位置をコントロールすることにより、正常組織への損傷を低く抑えながら腫瘍を集中的に破壊することが可能であることから、従来のX線や電子線を使ったがん治療に比べて腫瘍部位への線量集中性に優れた治療法であるとされている。一方、その線量集中性の高さから、治療計画のわずかな誤差によって正常組織に大線量を被ばくさせる可能性があり、正確な治療を行うためには、粒子線が人体中で適切な線量分布を形成しているか否かを高い精度で測定し、確認することが大変重要である。

従来の線量分布測定では、水ファントム中で電離箱を用いて行うのが一般的であったが、検出器によって治療粒子線場が乱されることなく、患者体内での3次元線量分布を精度よく測定する方法が強く求められるようになった。そのような方法の一つとして、人体組織と組織等価な熱蛍光線量計を使った3次元線量分布測定システムの開発が行われている。このシステムでは、四ホウ酸リチウム系の熱蛍光物質の組成と密度を制御することにより、実効原子番号と密度が組織等価になるように作られた組織等価ファントム熱ルミネッセンス線量計 (TEP-TLD: Tissue Equivalent Phantom Thermoluminescent Dosimeter) を用いる。これを板状に成型し、数十枚を重ねて1つの組織等価ファントムとして使用すると、ファントム自身が検出器として機能する。治療用の放射線を照射した後、TEP-TLD に記録された2次元の線量分布を1枚ずつ読み出し、全体を再構成することにより、ファントム内の3次元線量分布を測定することができる (図1参照)

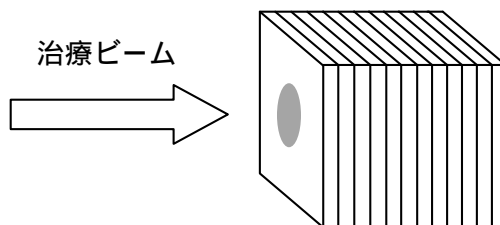


図1 組織等価ファントム熱ルミネッセンス線量計を用いた3次元線量分布測定概念図

現在、TEP-TLD を用いた3次元線量分布測定システムは、X線や電子線による線量分布測定のテストが行われており、位置分解能の高い3次元線量分布が得られることが分かっている。さらに次のステップとして、近年需要が急増している陽子線や重粒子線による粒子線がん治療の治療ビームによる線量分布測定に応用することが計画されている。しかしながら、TEP-TLD の組織等価性は、あくまで実効原子番号すなわちファントム内の電子密度の再現性に関するものであり、原子番号は近いものの、ファントムを構成する元素は実際の人体構成元素とは大きく異なる。よく知られているように、高エネルギーの陽子線や重粒子線は、人体もしくはファントム内で原子核反応を起こすので、治療ビームには核反応によって生成したフラグメント粒子が混入する。そのため、TEP-TLD を粒子線による線量分布測定に応用した場合、構成元素の違いから核反応によって生成するフラグメント粒子の成分が異なることになり、これが線量評価値に影響を与える可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、TEP-TLD に粒子線治療ビームを照射したときに核反応によって生成するフラグメント粒子を測定するための検出器システムを開発する。さらに、放射線医学総合研究所の重粒子線加速器施設 HIMAC において検出器システムのテスト実験を行い、必要な改良を行った後、重粒子線照射によって TEP-TLD 中で生成、放出されるフラグメント粒子の実測を行う。最終的には、TEP-TLD を用いた3次元線量分布測定においてフラグメント粒子が線量評価値に与える影響を調査することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、治療ビームを TEP-TLD に照射した際に生成するフラグメント粒子のエネルギー分布を、核種を識別しながら測定する検出器システムとして、プラスチックシンチレータや無機シンチレータを組み合わせた検出器を開発することとした。そのための基礎データとして、まずシミュレーション計算によって実験体系や検出器システムの検討を行った。シミュレーション計算に用いた計算コードは、粒子・重粒子輸送計算コード PHITS2 である。

次にシミュレーション計算によって得られた結果を用いて、検出器システムの製作とテスト実験を行った。まず、標準線源を用いたテスト実験を行った後、重粒子線を用いた実条件に近い条件でのテスト実験を放射線医学総合研究所の重粒子線加速器施設 HIMAC

を用いて行った。その際、重粒子ビームとして 290 MeV/u の炭素ビーム (MONO、10 cm) を用いた。実験体系は、タフウォーターファントムをターゲットとしてその周囲に検出器システムを配置し、50 Gy の照射を行った。これらの実験結果をもとにして、更なる検出器システムの最適化の検討を行った。

得られた成果の一部は、国内外の学会・研究会等で報告した。

4. 研究成果

(1) シミュレーション計算の結果

シミュレーション計算は、治療ビームとして想定した 290 MeV/u の炭素ビームをタフウォーターファントム及び組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計に入射し、核反応によって生成するフラグメント粒子のターゲット内及びターゲット周辺の検出器設置位置におけるフルエンスを計算した。また、ターゲット内における吸収線量分布と各フラグメント粒子の吸収線量への寄与を計算した。

その結果、入射炭素ビームのターゲット内におけるブラッグピーク付近のフルエンスの約 50% を水素、約 30% をヘリウムが占め、水素とヘリウムがフラグメント粒子の主成分であることを確認した。また、吸収線量への寄与についても、水素とヘリウムが主成分となることが分かった (図 2 参照)。

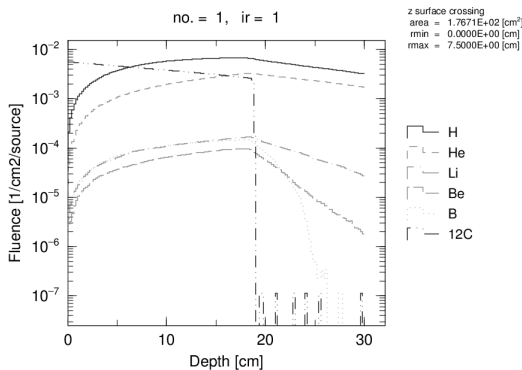


図 2 組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計内におけるフラグメント粒子のフルエンス分布

(2) ビーム実験の結果

シミュレーション計算による検討及び標準線源を用いたテスト実験の結果から、検出器システムはカウンターテレスコープと飛行時間法 (TOF) 法を組み合わせる方法とした。カウンターテレスコープの部分はプラスチックシンチレータと無機シンチレータを組み合わせるものとし、無機シンチレータとして CsI シンチレータを用いることとした。

テスト実験は、照射ターゲットをタフウォーターファントムとしてその周囲に検出器システムを配置して行った。

1 回目のテスト実験では、ビーム軸上に検

出器システムを配置して実験を行った。その結果、検出器システムに入射するフラグメント粒子の強度が大きいと、シンチレータや光電子増倍管などの構成成分が核反応によって放射化し、検出器システムからの出力が不安定となった。図 3 に照射終了後に CsI シンチレータと光電子増倍管からの線スペクトルを HPGe 検出器で測定した結果を示す。

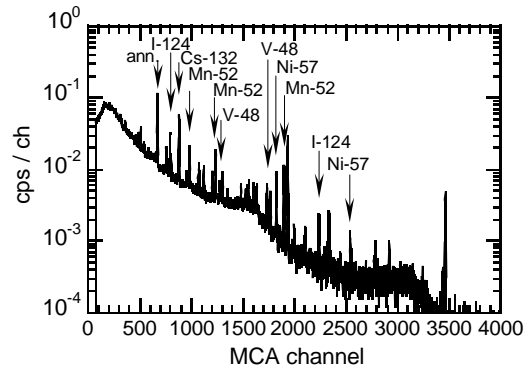


図 3 照射終了後に HPGe 検出器で測定した CsI シンチレータ及び光電子増倍管からの線スペクトル

2 回目のテスト実験では、検出器システムをタフウォーターファントムの側面、すなわちビーム入射方向から 90° の位置に設置して実験を行った。その結果、CsI シンチレータ内に I-128 と Cs-134m が生成されたことが観測された。これは、重粒子線とタフウォーターファントム構成材料との核反応によって生成された二次中性子により、I-127 と Cs-133 が放射化されたことが原因である。したがって、検出器システムの無機シンチレータとして CsI を用いるとシンチレータ自身が二次中性子によって大きく放射化されることが分かった。図 4 に照射後に CsI シンチレータ自身で測定されたエネルギースペクトルの時間変化を示す。

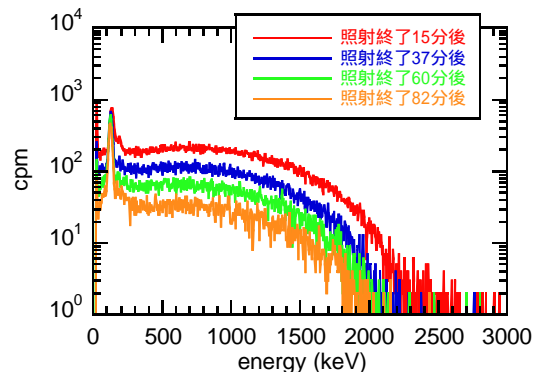


図 4 照射後に CsI シンチレータ自身で測定されたエネルギースペクトルの時間変化

このことは、重粒子線照射により TEP-TLD から発生するフラグメント粒子を測定する上ではデメリットとなるが、一方で重粒子線照射場で発生する二次中性子を高感度で測

定する方法として利用できる可能性がある。

以上のような実験結果を受けて、重粒子線治療場に存在する二次中性子の影響が少ない無機シンチレータを検討した。

残念ながら本研究の最終年度は、HIMAC のビームタイムを確保することができなかったため、研究期間内に組織等価ファントム熱ルミネセンス線量計を標的とした系統的なフラグメント粒子測定を行うことができなかった。しかしながら、先に行ったテスト実験に基づいて、実験を実施するために必要な検出器システムの整備は行うことができた。今後、本研究で構築したシステムを維持し、早期にビーム実験を行いたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

眞正浄光、古場裕介、福田茂一、若林源一郎、川路康之、大坪圭介、張維珊、大島梨奈、小山千絵、柳澤伸、齋藤雄介、「熱蛍光板状線量計による重粒子線の線量と線質分布に関する研究」、平成27年度放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、NIRS-M-289、pp.234-235, 2016. (査読無)

W. Chang, Y. Koba, S. Fukuda, G. Wakabayashi, H. Saitoh, K. Shinsho, "Absorbed dose estimation using LET dependence in glow curve of thermoluminescent phosphor $\text{Li}_3\text{B}_7\text{O}_{12}:\text{Cu}$ in therapeutic carbon beam", Journal of Nuclear Science and Technology, 53, pp. 2028-2033, 2016. (査読有)

〔学会発表〕(計3件)

鷲尾知也、向井崇一郎、吉中悠二、若林源一郎、納富昭弘、眞正浄光、古場裕介、「重粒子線治療場におけるCsIシンチレータの放射化を用いた中性子測定」、日本原子力学会2015年秋の大会(2015/9/10)、静岡大学

鷲尾知也、若林源一郎、納富昭弘、眞正浄光、古場裕介、「重粒子線治療場におけるCsIシンチレータの放射化」、第62回応用物理学会春季学術講演会(2015/3/12)、東海大学

T. Washio, G. Wakabayashi, A. Nohtomi, K. Shinsho, Y. Koba, "Activation of CsI(Tl) scintillator at heavy ion irradiation field", The 10th international workshop on ionizing radiation monitoring (2015/3/1), Oarai, Japan.

〔図書〕(計0件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者
若林 源一郎 (WAKABAYASHI, Genichiro)
近畿大学・原子力研究所・准教授
研究者番号：90311852

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし