

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K16484

研究課題名（和文）光子線治療ビーム照射時に対する体内線量投与領域のモニタリング計測の革新的技術開発

研究課題名（英文）Development of delivery dose monitoring system for photon beam radiotherapy

研究代表者

花田 剛士（Hanada, Takashi）

慶應義塾大学・医学部（信濃町）・講師

研究者番号：30571054

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：高エネルギーX線による治療ビーム照射中で発生する陽電子が起因の消滅線放出作用を利用し、患者体内の線量投与領域情報を非侵襲で取得可能な、リアルタイムによるモニタリング計測の技術を構築することを目的とした。製作した計測装置による単一検出器の実測定では、治療ビーム照射中の大局的な信号の計測には成功したが、治療ビーム照射中の空間では大量のバックグラウンドが発生しコンタミネーションとして同時に計測されているため、治療ビームの照射対象に起因する消滅線とバックグラウンドの信号弁別が困難である課題があり、クリアできれば放射線治療中（ビーム照射中）の患者体内の線量投与領域を取得できる道が開かれると考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外部照射による放射線治療では、治療ビーム照射中に標的領域に計画した線量が確実に投与されている事象を確認する手段が未だ存在せず、現在でも投与線量の過剰・過少照射事故が起きている現状がある。本研究計画で推進した計測技術は、成功すれば安全な線量投与が担保された次世代型の治療支援システムの基盤構築の一助となる。そして、外部放射線治療技術を抜本的に転換し、治療ビーム照射中にフィードバックをかけることで投与線量の精度向上や事故の未然防止等が可能になる道が開かれる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a detector system consisting of crystal scintillator was designed and assessment of annihilation radiation signal emerged from prompt pair production induced by therapeutic high energy x-ray beams used in medical linear accelerator was performed. It was successfully operated to confirm the entire radiation signals by real-time measurements of counting rates, which were found to be proportional to the intensity of the photon beam. On the other hand, measurements disclosed a severe background that does not solely stem from scattered primary photons but from radiation directly emitted from the treatment head, result in no success in identifying annihilation radiation. However, by improving the techniques, the proposed method has potential that could be used for the real-time monitoring of the irradiation dose and field during the beam irradiation.

研究分野：医学物理

キーワード：放射線治療 放射線計測 消滅線

1. 研究開始当初の背景

放射線を患者体外から照射する治療では、電子線形加速器(リニアック)からの高エネルギーX線の治療ビームを利用する。治療ビームの照射技術は、強度変調放射線治療や定位放射線治療などに代表される高精度放射線治療が近年普及されているが、治療ビームの照射中に対して安全な照射を確実に担保した治療支援システムが存在しない。

高エネルギーX線は多数の光子の集合であり、その光子は相互作用を起こして放射線のエネルギーを物質に移行する。治療ビームを構成している光子のエネルギーが 1.022 MeV を超えると、一部の光子は自身のエネルギーを物質に転化し、電子・陽電子を生成する反応を起こす。その生成点の分布は照射領域に対応していると考えられる。生成された陽電子は電子の反物質であるため、生成後体内分子中の軌道電子と結合して消滅し、それぞれ約 0.511 MeV の2本の消滅 γ 線が互いに約 180°の放出角度で飛び出す。理論的には、患者体内から放出される消滅 γ 線を対角上の検出器により同時計数処理で検出し、その発生点分布を知ることにより、患者体内の線量投与領域情報の取得が可能になると考える。

2. 研究の目的

放射線治療の高エネルギーX線による治療ビーム照射中で発生する陽電子が起因の消滅 γ 線放出作用を利用し、患者体内の線量投与領域情報を非侵襲で取得可能な、リアルタイムによるモニタリング計測の技術を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1)モンテカルロシミュレーション(MCS)の粒子輸送コードの一つである Geant4 (ver. 10.3) ツールキットを使用し実測定を模したビーム照射空間を構築、高エネルギーX線による治療ビームで利用されているエネルギー領域で生じる消滅 γ 線の発生割合、発生位置などを算出した。

(2)高エネルギーX線による治療ビームで発生した消滅 γ 線を検出するため、エネルギースペクトルが測定可能な放射線の計測装置を製作した。検出器の材質にはヨウ化ナトリウム(NaI)の無機シンチレータ(結晶サイズ:直径1インチ×長さ1インチ)を採用した。計測用回路には、同時計数処理の機能を備えたデジタル信号処理ボードを組み込んだ。製作した計測装置により、治療ビームと水等価型ファントムとで起こる反応により生成された消滅 γ 線を含む副次的な放射線の信号をリアルタイムで計測した(図1)。

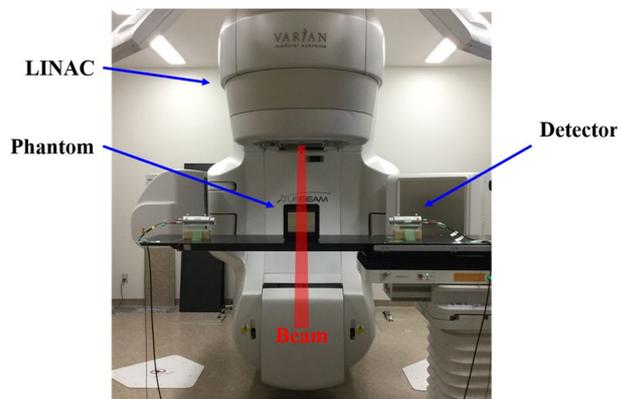


図1 信号計測の実験系。対角上に設置した検出器で消滅 γ 線を含む副次的な放射線の信号をリアルタイムで計測した。

4. 研究成果

(1)MCSによる放射線輸送計算の展開例を図2に示した。解析した結果、エネルギーの公称値が6MV及び10MVの治療ビームでは、照射対象の水ファントムに対する陽電子発生率はビームの入射光子数に対して各々約1%及び2%であり、陽電子生成の反応位置はビームの照射領域に対応していた。検出器に入射した消滅 γ 線の発生機序を解析すると、照射対象(水等価型ファントム)から発生した消滅 γ 線、治療ビームの照射領域(照射野)を形成するために装備されている高原子番号物質で構成された絞り機構(リニアックのヘッド部分)これら、に起因する消滅 γ 線が大半を占め、各々同等の割合で検出器に入射した計算結果を示した。

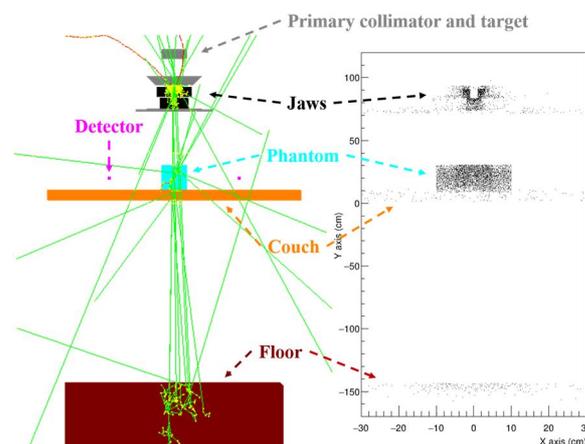


図2 放射線輸送計算の展開例。右図の散布図は、左図のMCSにより検出器に入射した光子の発生位置の計算結果に対応している。

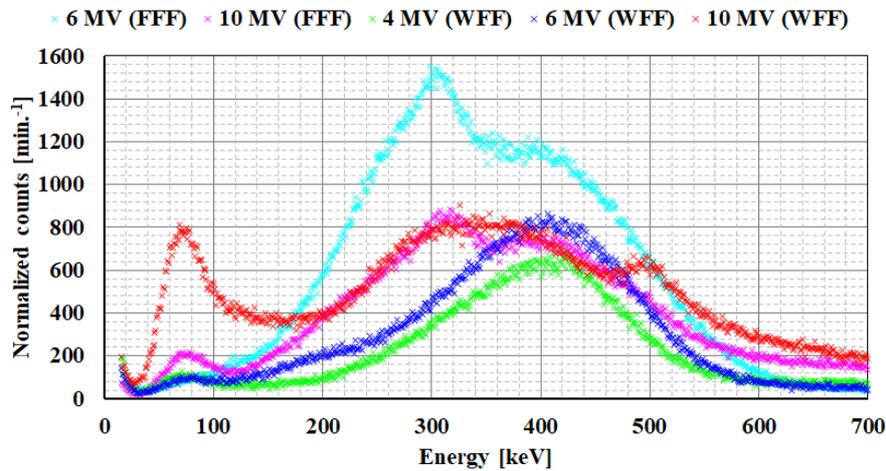


図3 各治療ビームのエネルギーから取得したエネルギースペクトル。照射野 5.0×5.0 cm²、計数率は各エネルギーの線量率を 250 MU/min. に正規化して算出している。

(2) 製作した計測装置による単一検出器の実測定では、治療ビーム照射中の大局的な信号の計測には成功した(図3)。500 keV 付近のピークは、フラットニングフィルタ付(WFF) 10 MV の治療ビームのみで認められた。しかし、理論的に光子のエネルギーが 1.022 MeV を超えれば陽電子生成の反応が起こるため、フラットニングフィルタフリー(FFF)を含む他のエネルギーに対しても、消滅 γ 線の光電吸収ピークを認めるはずである。治療ビーム照射中の空間では大量のバックグラウンド(BG)が発生しコンタミネーションとして同時に計測されているため、絞り機構で形成する照射野の大きさによっては、数え落としにより治療ビームの照射対象に起因する消滅 γ 線の信号が BG の信号に埋もれた可能性もあり、消滅 γ 線と BG との信号弁別が困難である課題があった。また、絞り機構には高原子番号の材質(タングステン)が使用され、このタングステンから発生した放射線(中性子捕獲による捕獲 γ 線)は約 480 keV に光電吸収ピークを有する研究報告も海外からある。そのため、今回使用した検出器である NaI シンチレータのエネルギー分解能を考えると、このタングステンに起因する γ 線のスペクトルと重複してしまった可能性も否定できない。

治療ビーム 10 MV のエネルギーに対して、消滅 γ 線を含めた副次的な放射線の信号(計数率)は、照射野や線量率(1分当たりのモニタユニット)といったリニアックの治療ビームの照射条件に対して依存性を示した(図4、図5)。消滅 γ 線に対する同時計数の実測定も試みたが、现阶段では今後の重要課題である。

消滅 γ 線に対して今回使用した検出器の材質よりも更に高感度、高エネルギー分解能な材質や BG を除去する遮蔽物を利用するなど、上記に挙げた課題をクリアできれば放射線治療中(治療ビームの照射中)の患者体内の線量投与領域を取得できる道が開かれると考え、今後も開発を進めていく。

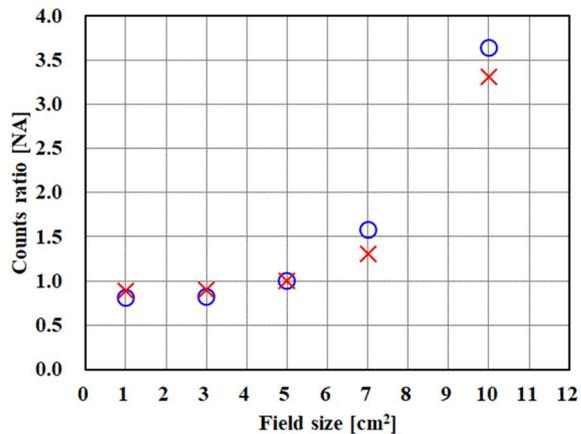


図4 10 MV のエネルギーに対する照射野と計数率の関係(照射野 5.0×5.0 cm² で正規化)。×は計測した全 BG、○は 400-600 keV の範囲に存在する BG。

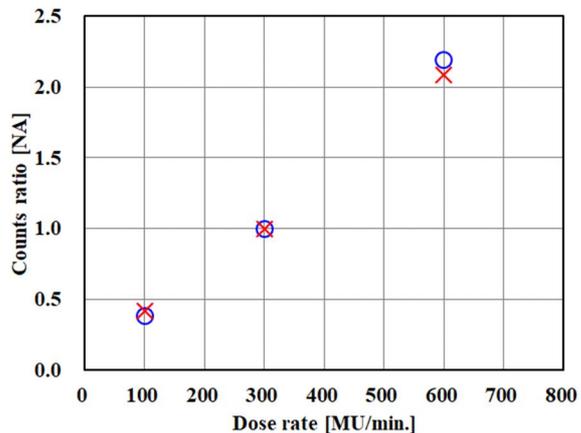


図5 10 MV のエネルギーに対する線量率と計数率の関係(線量率 300 [MU/min.] で正規化)。×は計測した全 BG、○は 400-600 keV の範囲に存在する BG。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋健太郎, 花田剛士, 長谷川智之
2. 発表標題 X線治療で放出される消滅放射線の測定に関する研究
3. 学会等名 第7回先端技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahashi K, Hanada T, Hasegawa T, Hashimoto M
2. 発表標題 Monte Carlo study on annihilation photons and related background produced in x-ray therapy
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahashi K, Hanada T, Miyauchi H, Tanaka Y, Hashimoto M, Hasegawa T
2. 発表標題 Physical characteristics of annihilation and related background photons produced in x-ray irradiation with medical linear accelerator
3. 学会等名 2020 Joint AAPM COMP Virtual Meeting
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	長谷川 智之 (Hasegawa Tomoyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	高橋 健太郎 (Takahashi Kentaro)		