

平成 30 年 5 月 11 日現在

機関番号：23903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K15349

研究課題名(和文)原子核乾板を使った陽子線治療即発ガンマ線イメージング

研究課題名(英文) Prompt gamma-ray imaging with a nuclear emulsion for in vivo dose verification in proton therapy

研究代表者

歳藤 利行 (TOSHITO, Toshiyuki)

名古屋市立大学・大学院医学研究科・研究員

研究者番号：30377965

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：がん治療用陽子線ビームと人体の反応から発生する即発ガンマ線を測定するための原子核乾板検出器の設計、組み立ておよびビーム実験による性能評価を行った。設計にはモンテカルロシミュレーションを用いて、プロトタイプ検出器の構造や設置位置、照射する陽子線の線量を決定した。62.5 × 50 mm²、厚さ0.3 mmの原子核乾板フィルムを作成し、10枚積層して一つのモジュールとした。200 MeV陽子線ビームを照射し、フィルムの現像、飛跡の読み取りを行い、ガンマ線事象の候補となる数MeVのガンマ線による電子、陽電子の対生成事象を一例検出した。これにより原子核乾板によるガンマ線検出の原理が検証された。

研究成果の概要(英文)：A first prototype emulsion gamma camera was tested at Nagoya Proton Therapy Center (NPTC) in Japan. The gamma camera which measures 62.5 × 50 × 3.2 mm³ was put on the sidewall of a water phantom. The camera was assembled by stacking 10 emulsion films. The phantom was irradiated with 200 MeV protons using a spot scanning nozzle at NPTC. After development of emulsion films, films were scanned by using a high-speed emulsion read-out system at Nagoya University. After a pilot analysis to localize gamma-ray events which have e⁺/e⁻ pair topology in the emulsion films, a candidate event of a several-MeV gamma-ray which converts to e⁺/e⁻ pair was detected. We examined a first prototype nuclear emulsion gamma-ray camera system for proof-of-principle. The detector system operated within expectations. Our developed emulsion gamma camera confirmed its potential as a detector for emulsion SPECT system for in vivo dose verification in proton beam radiotherapy.

研究分野：医学物理学

キーワード：医学物理学 陽子線治療 原子核乾板 ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

(1)放射線治療においては、患者の体内に治療計画どおりの線量分布で放射線が正しく照射されているかどうかという疑問が常に存在する。この疑問を解決するために、陽子線や炭素線を用いる粒子線治療においては、粒子線が体内の物質と反応して即発的に生じるガンマ線を測定し、SPECT(単一光子放射断層撮影)の原理を用いてその発生点を再構成しイメージングする手法が提案されている()。例えばコンプトンカメラの手法を用いた即発ガンマ線のイメージングが試みられているが、中性子や制動放射などに起因するバックグラウンドや、パイルアップによるデータ収集の困難さから、臨床利用に向けての見通しは立っていない。

(2)本研究ではガンマ線検出の新しい手法として原子核乾板を使用し、最新の高速飛跡読み取り技術()を用いてバックグラウンドとイベントレートの問題を克服し、イメージング画像の分解能もコンプトンカメラと同等なシステムを開発する。この原子核乾板を用いる手法は素粒子物理学であるニュートリノ反応の測定のために名古屋大学で30年以上かけて開発されてきた技術である。近年ガンマ線天文学の分野では、原子核乾板を用いた気球搭載型ガンマ線望遠鏡が開発され、日本のグループによって10 MeV以上のエネルギー領域を狙った天体観測が既に開始されている()。陽子線照射による即発ガンマ線の大部分は10 MeV以下のエネルギーを持つため、ガンマ線の計測領域をこのような低エネルギーまで広げ、イメージングに有用な情報として利用することが重要である。本研究では検出器の構造や顕微鏡画像の解析方法の改良によってこれらの課題を克服する。原子核乾板でこのような低エネルギーのガンマ線を系統的に計測した前例はなく、大きなチャレンジ性を有している。

2. 研究の目的

陽子線を使った放射線治療は照射ごとに患者体内の線量分布を可視化(イメージング)し、治療計画どおりの照射ができていることを確認できれば、さらなる高精度化と信頼性の向上が可能となる。本研究の目的は図1に示すような原子核乾板を使ったガンマ線検出システムを設計、開発し、陽子線照射により発生する即発ガンマ線のイメージングができることを実験的に検証することである。ガンマ線の検出に原子核乾板を使うことで、高解像度でノイズが少なく、臨床のビーム強度での測定に耐えるシステムを実現することができる。

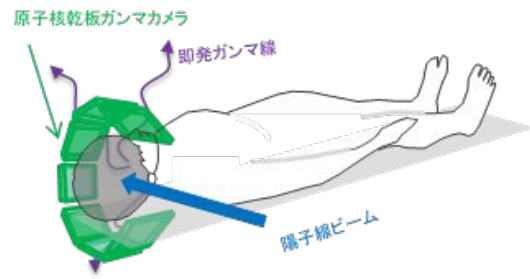


図1. 原子核乾板 SPECT の概念図

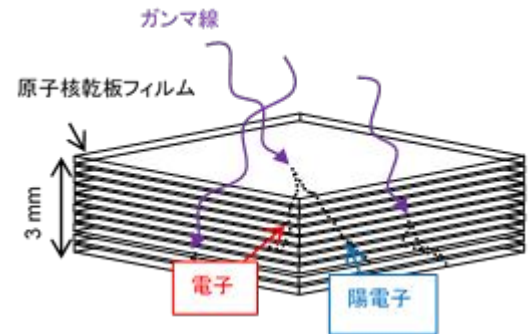


図2. 原子核乾板を用いたガンマカメラの概念図

3. 研究の方法

(1)原子核乾板を用いて陽子線照射に伴って発生する即発ガンマ線のイメージングを行うために、平成28年度はコバルト60や電子線ビームを用いて1-10 MeV領域のガンマ線の検出と計測についての基礎的研究を行う。原子核乾板とチェンバーの設計を行い、さらに飛跡読み出しに使用する顕微鏡画像からガンマ線の到来方向を精度よく再構成するための画像処理アルゴリズムを開発する。平成29年度は前年度の成果を踏まえて即発ガンマ線によるイメージングに最適な検出器システムを設計し、陽子線ビームを使った検証実験を行い、イメージング画像の性能評価をする。原子核乾板の製作、チェンバーの組み立て、現像、飛跡の読み出しは全て名古屋大学大学院理学研究科F研において、連携研究者である中村の指導と協力のもとで実施する。

(2)ガンマカメラのプロトタイプを作成し、名古屋陽子線治療センターにおいてガンマ線検出の原理を実証するためのビーム試験を行った。62.5 × 50 mm² (厚さ3.2 mm, 0.28放射長)のガンマカメラを水ファントムの側壁に張り付けた。ガンマカメラは図2に示すように10枚の原子核乾板フィルムを積層したものである。フィルムは180 μm厚のトリアセートセルロースのベースの両面に70 μm厚の乳剤を塗布したものである。2 × 10¹¹個の200 MeV陽子線ペンシルビームを水ファントムに照射した。実験のセットアップを図3に示す。乾板を現像した後、各フィルムの40 × 40 mm²の領域を、名古屋大学の飛跡読み取り装置を用いてスキャンした。その後NETSCANソフトウェア()を使

ってオフラインのデータ処理とイベントの再構成を行い、ガンマ線の信号である電子-陽電子の対生成を探索した。

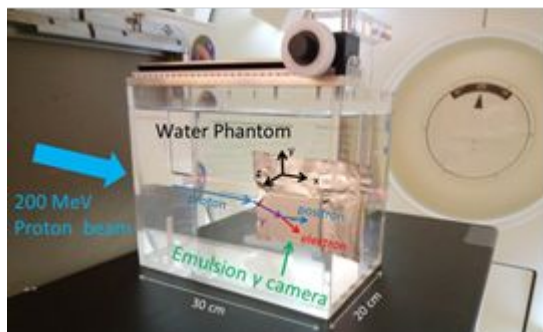


図 3. 実験セットアップ

(3) プロトタイプとして試験した検出器は、性能評価により飛跡の検出効率が十分でないことが明らかになった。陽子線線量分布のイメージングのために 10 cm × 20 cm スケールの大型検出器の設計製作およびビーム実験による性能検証を行った。この検出器では電子・陽電子の飛跡の検出効率の向上をねらって臭化銀結晶のサイズを大きくした。さらに頭頸部治療を想定して、20 cm × 20 cm × 20 cm スケールの SPECT(単一光子放射断層撮影)型の検出器の設計および組み立てを行った。

4. 研究成果

(1) ガンマカメラのプロトタイプの解析から数 MeV のガンマ線が電子-陽電子対生成を起こす事象の候補を 1 例検出した(図 4)。これにより当初の目的である原子核乾板システムによる即発ガンマ線検出の原理が証明されたといえる。

(2) 本研究の対象である陽子線照射に伴う即発ガンマ線は、様々な放射線検出器による線量分布測定にも影響を与えることになる。本研究により得た着想をもとに、実験システムの構築とモンテカルロシミュレーションの手法を用いることにより陽子線による水の発光現象の解析を行った。

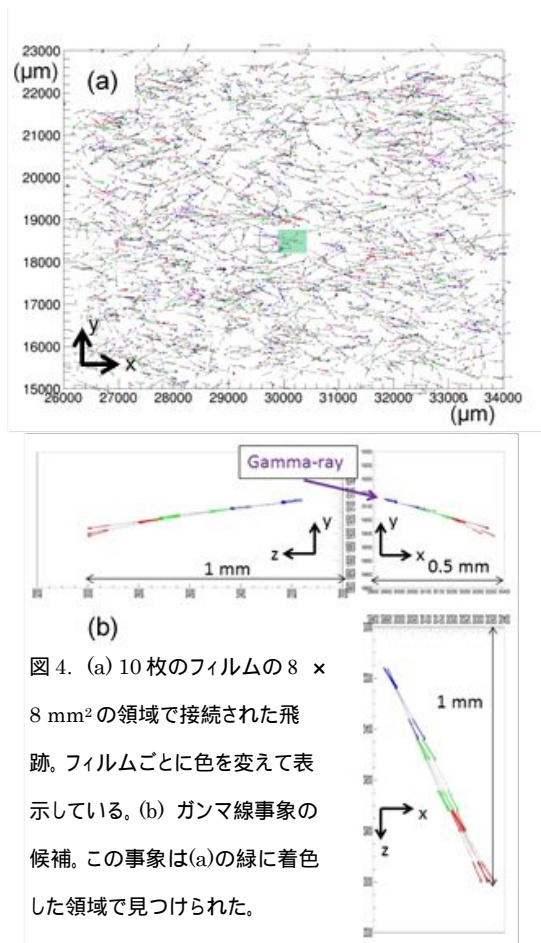


図 4. (a) 10 枚のフィルムの 8 × 8 mm² の領域で接続された飛跡。フィルムごとに色を変えて表示している。(b) ガンマ線事象の候補。この事象は(a)の緑に着色した領域で見つげられた。

<引用文献>

CH. Min et al., Prompt gamma measurements for locating the dose falloff region in the proton therapy, Appl. Phys. Lett. 89, 183517, 2006.
M. Yamaguchi et al., Secondary-electron-bremsstrahlung imaging for proton therapy, Nucl. Instrum. Methods A 833, 199, 2016.
S. Kurosawa et al., Prompt gamma detection for range verification in proton therapy, Current App. Phys. 12, 364, 2012.
C. Richter et al., First clinical application of a prompt gamma based in vivo proton range verification system, Radiation and Oncology 118, 232, 2016.
K. Morishima and T. Nakano, Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out, JINST. 5, P04011, 2010.
S. Aoki et al., Gamma ray observation with emulsion hybrid telescope, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 196, 50, 2009.
K. Kodama et al., Detection and analysis of tau-neutrino interactions in DONUT emulsion target, Nucl. Instrum. Methods A 493, 45, 2002.

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 3件)

M. Komori, E. Sekihara, T. Yabe, R. Horita, T. Toshito and S. Yamamoto, Luminescence imaging of water during uniform-field irradiation by spot scanning proton beams, Physics in Medicine and Biology 査読有 印刷中

T. Yabe, M. Komori, T. Toshito, M. Yamaguchi, N. Kawachi and S. Yamamoto, Estimation and correction of produced light from prompt gamma photons on luminescence imaging of water for proton therapy dosimetry, Physics in Medicine and Biology 査読有 63, 2018, 04NT02
DOI: 10.1088/1361-6560/aaa90c

Takuya Yabe, Masataka Komori, Ryo Horita, Toshiyuki Toshito, Seiichi Yamamoto, Estimation of the optical errors on the luminescence imaging of water for proton beam, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A 査読有 888 (2018) 163-168
DOI: 10.1016/j.nima.2018.01.030

[学会発表](計 6件)

Toshiyuki Toshito, Mitsuhiro Kimura, Hiroyuki Ogino, Yuta Shibamoto, Mitsuhiro Nakamura, Osamu Sato, Prompt gamma imaging with a nuclear emulsion for in vivo dose verification in proton therapy, Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG) 56 (国際学会) 2018年

Toshiyuki Toshito, Mitsuhiro Kimura, Hiroyuki Ogino, Yuta Shibamoto, Osamu Sato, Mitsuhiro Nakamura, Prompt gamma-ray imaging for particle beam therapy using nuclear emulsion, Internal Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (ICMaSS 2017) (国際学会) 2018年

Prompt gamma-ray imaging with a nuclear emulsion for in vivo dose verification in proton therapy, Toshiyuki Toshito, Mitsuhiro Kimura, Hiroyuki Ogino, Yuta Shibamoto, Mitsuhiro Nakamura, Osamu Sato, 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会) 2018年

歳藤利行、粒子線がん治療の高精度化に向けた原子核乾板技術、日本写真学会年次大会(招待講演)2018年

木村充宏、歳藤利行、原子核乾板技術で切り拓く陽子線がん治療の未来、原子核乾板技術研究発表会 2017年

木村充宏、歳藤利行、原子核乾板技術を用いた陽子線がん治療の高精度化にむけた研究、第31回固体飛跡検出器研究会 2017年

6. 研究組織

(1)研究代表者

歳藤 利行 (TOSHITO, Toshiyuki)
名古屋市立大学・大学院医学研究科・研究員
研究者番号: 30377965

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

中村 光廣 (NAKAMURA, Mitsuhiro)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 90183889

(4)研究協力者

なし