

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24601006

研究課題名(和文)ホウ素中性子捕捉療法のための線量分布イメージング用ピンホールカメラの開発

研究課題名(英文)Development of a pinhole camera system for online dose imaging in the boron neutron capture therapy

研究代表者

片渕 竜也(Katabuchi, Tatsuya)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教

研究者番号：40312798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ホウ素中性子補足療法におけるオンライン線量評価システムとしてピンホールカメラを開発する。本研究では、実証試験を行うためのピンホールカメラシステムを構築した。加速器中性子源からの中性子ビームを用いて実験を行った。中性子ビームを水ファントムに照射し、中性子ホウ素の核反応で発生するガンマ線を検出した。中性子ホウ素反応率の空間分布を再構成するための測定を行った。十分な空間分解能で反応率空間分布を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The feasibility of a pinhole camera system for online dosimetry in boron neutron capture therapy was studied. A test version of the pinhole camera system was designed and built. The system was tested in accelerator experiments using neutrons from an accelerator neutron source. The results showed that the system can give a reaction rate distribution of the boron-neutron reaction with an enough spatial resolution.

研究分野：原子核物理、放射線計測、核データ

キーワード：中性子補足療法 ガンマ線計測 中性子 線量評価

1. 研究開始当初の背景

中性子とホウ素の原子核反応 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ を利用したホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、細胞レベルの選択的治療の可能性があることから、浸潤性の腫瘍に対する有望な治療法として期待されている。特に悪性脳腫瘍の中でも悪性神経膠芽腫は浸潤性であるため、外科手術により完全に切除することは困難である。また、対象が脳という重要器官であるため、不用意に腫瘍周辺の正常組織まで切除すると患者に重大な障害をもたらす危険性がある。BNCT は、この切除しきれない浸潤癌細胞を選択的に死に至らしめることができる。また、最近では、脳腫瘍以外に頭頸部、口腔内の癌にも適用が試みられており、治療対象の拡大が進められている。さらに、中性子源としても従来用いられてきた原子炉だけでなく、加速器中性子源を用いた BNCT のプロジェクトが進められており、今後、病院併設型の BNCT も可能になると期待されている。

このように有望な治療法として期待される BNCT であるが、現在大きな課題を抱えている。それは、どこにどれだけの吸収線量を与えたかという計測がなされていないことである。現在行われている方法では、空間中性子束分布、ホウ素濃度分布を個別に求め、それをもとに線量評価を行っている。中性子束分布は計算機シミュレーションと金線の放射化測定から、ホウ素濃度分布は ^{18}F 付きホウ素化合物を用いた事前の PET (陽電子放射断層撮像法) 診断と血中ホウ素濃度測定から算出する。これらは、あくまで間接的な手法であり、信頼性の高いものではない。特にホウ素濃度は、患者の体調により代謝が異なるため、事前に行ったホウ素濃度の評価と照射当日では違いが生じる可能性がある。したがって、得られた吸収線量は、大きな不確かさをともなう。そのため、照射中に吸収線量分布を計測するオンライン線量分布イメージングシステムの実現が切望されてきた。

このような背景から、現在までにいくつかのグループによって、オンライン線量イメージングシステムの基礎研究およびプロトタイプの開発が行われてきたが、BNCT 照射場特有の事情が障害となっている。原理的にはオンライン線量評価は、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応で生じる 0.478 MeV の即発ガンマ線を検出し、反応率分布を得ることで可能となる。しかし、BNCT 照射場に存在する強いバックグラウンドガンマ線が測定を難しくしている。バックグラウンドガンマ線は、主に生体内の水素による中性子捕獲反応で生じる 2.22 MeV のガンマ線であり、その強度は、測定対象の 0.478 MeV ガンマ線のおよそ 100 倍にも達する。また、照射室内に充満する熱中性子も周辺構造物と反応して高エネルギーガンマ線

(鉄に吸収された場合、最大 7.6 MeV) を発生するため、バックグラウンド源となる。現在までに開発されたシステムは全て、信号対バックグラウンド比の向上が大きな課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、今までの研究で明らかとなった課題 (信号対バックグラウンド比の向上) を克服するため、新たな方式としてピンホールカメラに着目した。

本研究では BNCT 用ピンホールカメラのテスト用システムを構築し、実際に加速器中性子源により実験を行い、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

CdZnTe 検出器とピンホールコリメータを組み合わせた BNCT のためのオンライン線量イメージングシステムのテスト用システムを製作し、加速器実験により、その有効性を検証する。先行研究で問題となった信号対バックグラウンド比を向上するために次の 2 つの手段を採用する。

- コンプトン抑制検出器
高エネルギーガンマ線が検出器内で起こすコンプトン事象が大きなバックグラウンドとなるため、コンプトン事象抑制用の検出器を加え、非同時計測を行うことでバックグラウンドとなる事象を抑制する。
- 遮蔽体
バックグラウンド中性子およびガンマ線を低減するため、同位体濃縮リチウム 6、ボロン入りポリエチレン、鉛を用いて遮蔽体を構築する。実際の中性子場で遮蔽体を最適化することでコンピュータシミュレーションだけでは得られないより実際に近い遮蔽体配置を得ることができる。

4. 研究成果

製作したピンホールカメラシステムの幾何学的な配置を図 1 に示す。ピンホールコリメータは鉛で製作した。撮像対象の中心からコリメータ表面までの距離は 30 cm とした。撮像対象中心位置で視野が 20 cm となるようにコリメータを設計した。コリメータ径が一番小さくなる部分ではナイフエッジとせず、直径 5 mm の穴とした。検出器はコリメータの直後に配置した。検出器はステッピングモータ駆動の移動機構の上に設置し検出器位置を遠隔操作で変えられるようにした。システム全体はボロン入りポリエチレンブロック、鉛で遮蔽し、バックグラウンド中性子、ガンマ線を低減した。コリメータ前面は同位体濃縮リチウム 6 で遮蔽した。

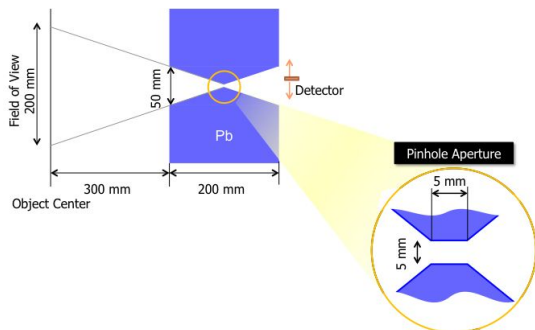


図 1 製作したピンホールカメラシステムの幾何学的配置

実験は東京工業大学原子炉工学研究所で行った。ペレット加速器からの陽子ビームをリチウム標的に照射し、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応により中性子を発生させた。中性子ビームを水ファントム（直径 180 mm、長さ 200 mm）に照射し、そこから発生するガンマ線をピンホールカメラシステムで測定した。ファントム中心付近にはイメージング試験用に腫瘍領域を模擬した直径 30 mm のホウ素濃度の高い領域を 2 つ設定した。製作したシステムで測定した波高スペクトルを図 2 に示す。腫瘍模擬領域を持つファントムと持たないファントムの測定を比較した。腫瘍模擬領域を持つ測定のみで ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^*$ 反応からの 478 keV ガンマ線が測定されていることが分かる。検出器に含まれる Cd は中性子捕獲断面積が大きいのでバックグラウンドとして ${}^{113}\text{Cd}$ からの中性子捕獲ガンマ線（559 keV）が観測された。CdZnTe 検出器は十分なエネルギー分解能を持つため ${}^{113}\text{Cd}$ からのガンマ線は 478 keV ガンマ線と分離できることが分かった。

さらにイメージング試験として検出器を

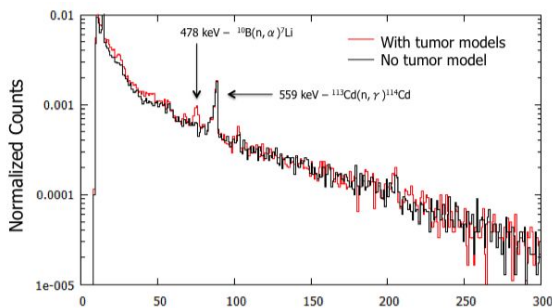


図 2 測定で得られた波高スペクトル

動かして測定を行い、コリメータ通過後の 478 keV ガンマ線計数の射影像を得た。また、ファントムを回転させることで異なる角度の射影像を取得した。こうすることで、ひとつの検出器で多数の検出器からなる位置検出器を模擬した。測定で得られた射影像を図 3 に示す。二つのホウ素濃度の高い領域がきれいに観測されていることが分かる。

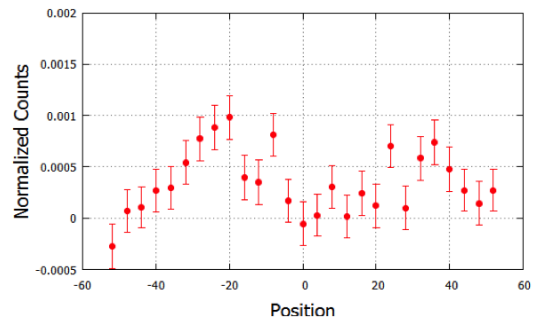


図 3 ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^*$ 反応率の射影像

回転して得られた多数の射影像からファントムの回転対称性を仮定して ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^*$ 反応率の空間分布の再構成を行った。画像再構成アルゴリズムとして ML-EM (Maximum Likelihood - Expectation Maximization) 法を採用した。再構成処理により得られた ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^*$ 反応率の空間分布を図 4 に示す。二つのホウ素濃度の高い領域が分離できることが実証された。

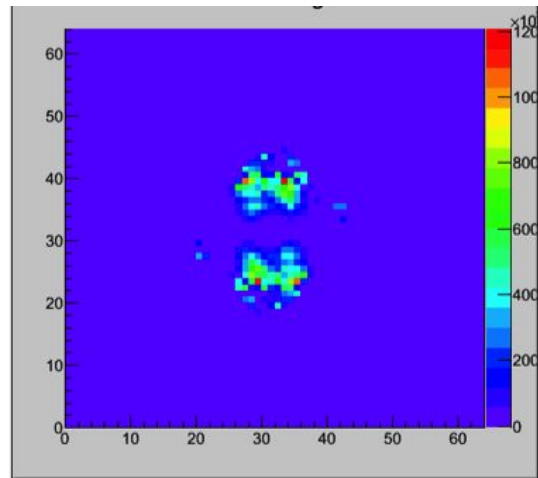


図 4 再構成処理により得られた ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^*$ 反応率の空間分布

本研究において、ピンホールカメラのテスト用システムを構築した。これまで問題になっていたバックグラウンドを低減するための対策としてコンプトン抑制用検出器、適切な遮蔽を施した。実際の中性子照射場でテスト実験を行い、1 cm 以下の空間分解能で ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^*$ 反応の空間分布を得ることができると実証された。

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)

T. Katabuchi, B. Hales, N. Hayashizaki, M. Igashira, Z. Khan, T. Kobayashi, T. Matsuhashi, K. Miyazaki, K. Ogawa, K. Terada, Feasibility study on pinhole camera

system for online dosimetry in boron neutron capture therapy, Applied Radiation and Isotopes, 88, pp. 139-142 (2014). 査読有り DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.12.026

〔学会発表〕(計3件)

B. Hales, T. Katabuchi, N. Hayashizaki, K. Terada, M. Igashira, T. Kobayashi, Shielding Design of Prompt-Gamma SPECT for Boron Neutron Capture Therapy, 日本原子力学会 2013 年秋の大会、2013 年 9 月 3 日～5 日、八戸工業大学(青森県八戸市)。

T. Katabuchi, B. Hales, N. Hayashizaki, M. Igashira, Z. Khan, T. Kobayashi, T. Matsuhashi, K. Miyazaki, K. Ogawa, K. Terada, Feasibility study on pinhole camera system for online dosimetry in boron neutron capture therapy, 15th International Congress on Neutron Capture Therapy, Tsukuba, Japan, 10 – 14 September, 2012、つくば国際会議場(茨城県つくば市)。

片瀧竜也、宮崎皓一、Brian Hales、井頭政之、林崎規託、古林 徹、ホウ素中性子捕捉療法のためのオンライン線量イメージング用ピンホールカメラの基礎研究、日本原子力学会 2012 年春の年会、2012 年 3 月 19 日～21 日、福井大学(福井県福井市)。

〔図書〕(計0件)

〔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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

片瀧 竜也 (KATABUCHI, Tatsuya)
東京工業大学 原子炉工学研究所・助教
研究者番号：40312798

(2)研究分担者

井頭 政之 (IGASHIRA, Masayuki)
東京工業大学・原子炉工学研究所・教授
研究者番号：10114852

(3)連携研究者

古林 徹 (KOBAYASHI, Tooru)
京都大学 原子炉実験所・准教授
研究者番号：90089136

尾川 浩一 (OGAWA, Koichi)
法政大学 理工学部・教授
研究者番号：00158817