

令和元年5月19日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K10320

研究課題名(和文)放射線治療で発生する中性子被ばく評価の為に簡便で高精度な分布測定システムの開発

研究課題名(英文) Development of a simple and precise measurement system for the neutron dose distribution around medical linacs

研究代表者

納富 昭弘 (Nohtomi, Akihiro)

九州大学・医学研究院・准教授

研究者番号：80243905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、ヨウ素を含有したシンチレータに中性子が入射することにより自己放射化することに着目した中性子検出方法の研究を行っている。本課題では、CsIシンチレータ結晶の発光信号を積分値としてCCDカメラでとらえて中性子強度分布を測定する手法について検討した。大型CsI板に照射を行ったところ、中性子の入射量に対応した輝度分布を観測することができた。また、画像の各ピクセル毎の輝度値の経時変化を処理することにより、I-128、Cs-134m、バックグラウンドに対応する個別の画像に分離することに成功した。さらに、輝度値から換算された放射エネルギーと計算で求めた放射エネルギーを比較したところ、両者はよい一致を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、放射線医療現場で中性子の発生が懸念される状況が増加してきている。特に、X線治療用加速器から発生する中性子は生物学的効果が著しく大きく、放射線加重係数は10～20に達する。この為、放射線防護の観点からこれらの中性子を検知する技術は重要であると考えられる。

本研究では、中性子によって放射化したヨウ素含有シンチレータの自己発光をCCDカメラで観測することにより、中性子分布を測定するシステムを開発した。これはCsI等のヨウ素含有シンチレータにI-128(半減期25分)が生成することに着目したものである。これにより、中性子の強度分布情報を簡便かつ高精度で得られる手法が実用化された。

研究成果の概要(英文)：Neutron intensity distribution on a CsI scintillator plate has been observed by a CCD camera and analyzed by using a “decaying self-activation imaging technique”. The decaying self-activation imaging, which has been proposed recently by our group, is based on the analysis of time variation of specific radio-activities generated and remained inside the CsI plate after the termination of neutron irradiation. The luminance distributions of a CsI plate are recorded every one minute as a series of images by a cooling type CCD camera with a telescope lens in a black box. Then the time variations of luminance of the images are fitted on a “pixel-by-pixel basis” with a multi-exponential function. By this, two components of I-128 and Cs-134m are extracted as the fitting curves. The initial luminance values of individual component of radioactivity, which correspond to the values at the termination of neutron irradiation, are plotted as separate images.

研究分野：放射線計測・線量評価

キーワード：ヨウ素含有シンチレータ 自己放射化法 CsI 中性子 放射線治療 CCDカメラ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、放射線医療現場で中性子の発生が懸念される状況が増加してきている。特に、高エネルギーX線治療用加速器から発生する中性子は生物学的効果が著しく大きく、放射線加重係数は10~20に達する。この為、放射線防護の観点からこれらの中性子を検知する技術は重要であると考えられる。

(2) 汎用の中性子測定技術としては、レムカウンターを用いる方法、従来の放射化法等があるが、いずれもX線治療用加速器からのパルス放射線場の短時間測定には適していない。そこで我々は、独自にヨウ素含有シンチレータへの中性子入射に伴う自己放射化法を提案して、CsIシンチレータ等から得られる電気パルス信号を検出することにより中性子を測定する方法を検討してきた。その結果、この手法により、中性子を簡便かつ高精度に検出することが可能となった。

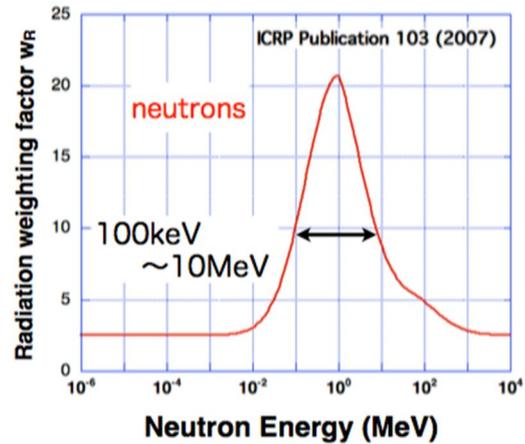


図1 中性子の放射線加重係数の中性子エネルギー依存性¹⁾

2. 研究の目的

(1) 本研究では、自己放射化したシンチレータの発光を電気パルス信号としてとりだすのではなく、発光成分自身の積分値を CCD カメラでとらえることにより、発光強度分布を観測して、その情報から入射中性子強度分布を評価するシステムの開発を目的とする。

(2) 中性子入射により、シンチレータからの発光には I-128 以外の成分(Cs-134m 等)も存在することが考えられるが、輝度値の経時変化を解析することにより、半減期の違いを利用してそれぞれの成分を分離して画像化することを試みる。

(3) シンチレータ中に生成した I-128 の放射能濃度と、CCD が観測する輝度値の間には比例関係が成立するはずである。この変換係数を原理的に算出し、輝度値から生成放射能を評価する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 結晶の潮解を防ぐため石英ガラス窓付きのアルミニウム容器に封入された 7.5cm x 7.5cm x 0.2cm の大型 CsI 板、同様にアルミニウム容器に封入された 2cm x 2cm x 0.2cm の小型 CsI 板を、九州大学病院 10MV-X 線治療装置 Varian True-Beam の光中性子場、および近畿大学原子力研究所の研究用原子炉 UTR-KINKI (熱出力 1W) の中性子場で照射した。その際、中性子強度分布を形成するために、適宜カドミウム板等の中性子フィルターを用いた。

(2) 中性子の照射終了後、暗箱(SCIENTEX:DM-A6057)内にて望遠レンズ(SIGMA:30mm F1.4 DC)を取付けた冷却型 CCD カメラ(SBIG:STF8300M)を用いて CsI 板の発光分布を観測した。画像は 16bit JPEG 形式で 1 分毎に記録され、関心領域の平均輝度値の経時変化を Image-J で解析した。得られた経時変化曲線から、異なる放射能成分(I-128, Cs-134m)をフィッティング処理により抽出した。

(3) CCD が観測する輝度値と、シンチレータ中に生成する放射エネルギーの関係を定量的に検討するために、PHITS を用いて、I-128 と Cs-134m の生成量を計算により評価した。

4. 研究成果

(1) 九州大学病院 10MV-X 線治療装置 Varian True-Beam の光中性子場において、ベッド上のアイソセンターから異なる位置に小型 CsI 板 4 枚を並べ、30 分間の照射を行った。その後、CCD カメラにて輝度値の経時変化を記録したところ、半減期が 25 分の成分(I-128)と、半減期が 174 分の成分(Cs-134m)が観測された。また、分離されたそれぞれの成分の輝度値は、アイソセンターに近いほど高く、その分布は他の手法(電気パルス信号を用いた自己放射化法)の結果とおおむね一致した。このことから、CsI の発光を観測した輝度値がその場の中性子強度を反映していることが分かった。

(2) 近畿大学原子力研究所の UTR-KINKI (熱出力 1W)にて、CsI 板の照射実験を行った。7.5cm x 7.5cm x 0.2cm の大型 CsI 板を、図 2 の様に厚さ 0.5mm の Cd パターンに挟み、グラファイト反射体上で 2 時間照射した。また、生成放射エネルギーと発光量の関係を調べるために、2cm x 2cm x 0.2cm の小型 CsI 板 3 枚を図 3 に示す炉内の異なる位置に配置して 2 時間の照射を行った。

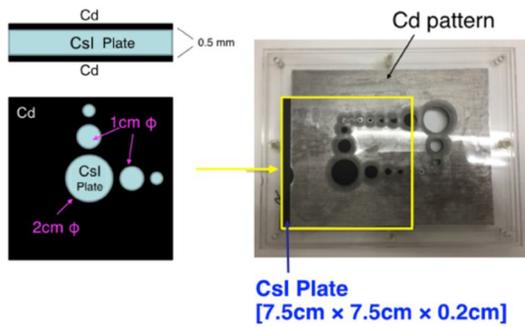


図2 Cdパターンで挟んだ大型CsI板

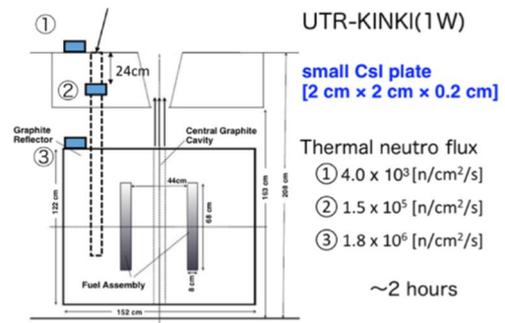


図3 小型CsI板の照射配置

(3) (2)の大型CsI板で得られた輝度値の経時変化に対して、壊変曲線の解析を画像のピクセル毎に行った。これにより図4に示す様に異なる半減期を持った成分が別々の曲線として分離され、その初期輝度値をプロットすることによりそれぞれの成分に対応する画像が得られる。我々はこの手法を”decaying self-activation imaging technique”と呼ぶこととした。分離された画像も図4中に示してあるが、I-128とCs-134mの画像では中性子の寄与が明らかである。残余成分は、線のアフターグローに起因しているものと考えられる。

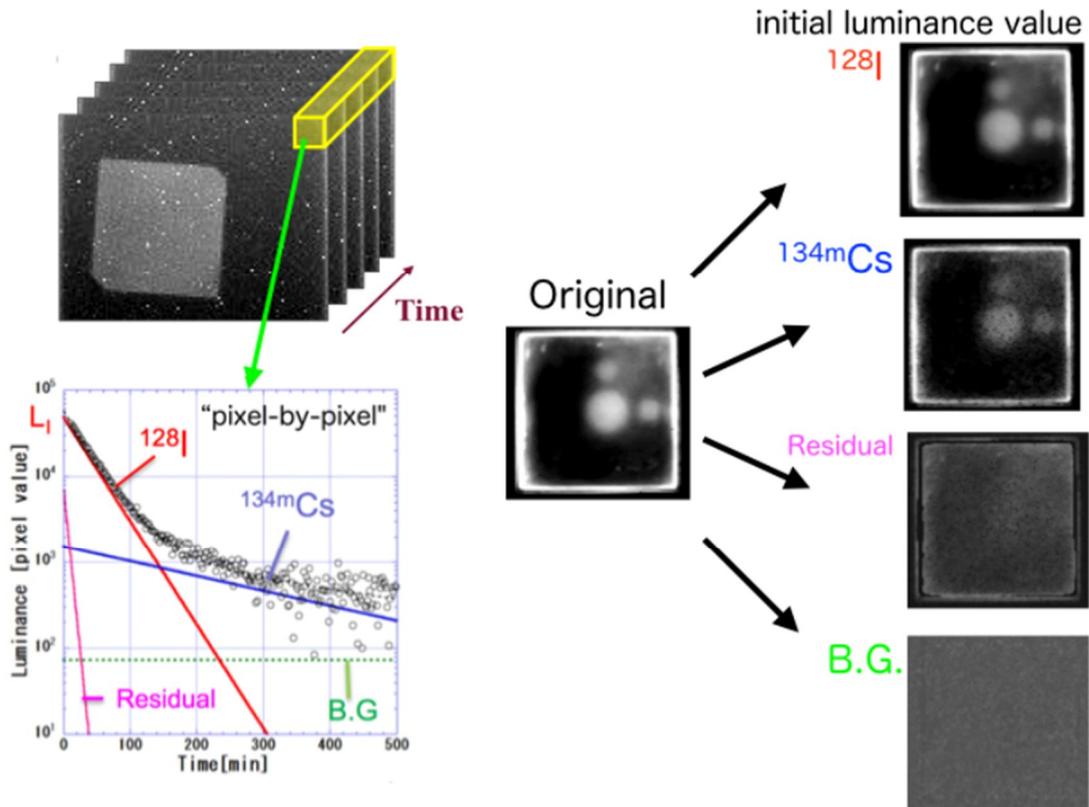


図4 ”decaying self-activation imaging technique”による画像の分離抽出

(4) CsIに生じた放射能と発光量の間係を調べるために、CCDカメラで観測される輝度値に対応したADU値を放射能に変換する係数について考察した。ここでADUはAnalogue to Digital Unitの略でありCCD素子で読み出されたデジタル値である。観測される輝度値はCsIの単位面積あたりに生成する放射能に比例するはずであるので、式(1)に示す様に変換係数Light Yieldを定義することにする。

$$\text{Light Yield} \equiv \frac{\text{Luminance [ADU/pixel]}}{\text{Activity [Bq/cm}^2\text{]}} \quad (1)$$

Boon 等は陽子線や X 線で照射された蛍光板の発光を CCD で観測するタイプの線量測定システムを報告している²⁾。彼等の手法を参考にすることにより、我々の場合の Light Yield は次式の様に表示される

$$\text{Light Yield} \left[\frac{\text{ADU/pixel}}{\text{Bq/cm}^2} \right] = \varepsilon \frac{E_{\text{mean},\beta} \cdot e}{E_{\text{light}}} \zeta \theta L \eta \cdot \omega \cdot \frac{N_{\text{bin}}}{N_{\text{elec}}} A_{\text{pix}} \times 60 \quad (2)$$

ここで、optical efficiency は、使用した望遠レンズの幾何学的条件(F 値や拡大率など)を含む光学系に依存するパラメータである。我々の用いたシステムにて I-128 についての上記の変換係数 Light Yield を評価するためのパラメータを表 1 にまとめている。これらのパラメータから、I-128 に対する Light Yield は、3.0 ADU/pixel per Bq/cm² と決定された。この値を使用することにより、輝度値を放射能値に変換することが可能となる。

表 1 I-128 に対する Light Yield を評価するのに用いたパラメータ

| | |
|---|-------------------------------------|
| ε : scintillation efficiency of CsI | 0.092 |
| $E_{\text{mean},\beta}$: β -ray mean energy | 0.662 [MeV] |
| E_{light} : mean photon energy @550nm | 2.25 [eV] |
| e : β -ray emission probability of ¹²⁸ I | 0.931 |
| ζ : escape fraction of CsI | 0.22 |
| θ : angular anisotropy light of CsI | 4.0 |
| L : transmission of the lens | 0.9 |
| η : quantum efficiency of CCD @550nm | 0.572 |
| ω : optical efficiency (solid angle) | 4.51×10^{-4} |
| N_{elec} : number of the electrons for a response of 1 ADU | 0.37 |
| A_{pix} : area of scintillation corresponding a single pixel | $1.58 \times 10^{-5} [\text{cm}^2]$ |

(5) 図 3 に示す様に 2cm × 2cm × 0.2cm の小型 CsI 板を炉内の異なる位置で照射した場合の放射エネルギーを定量的に評価するために壊変曲線の解析を行った。それぞれの I-128 成分の初期輝度値を得て、変換係数を用いて放射エネルギーを求めた。評価された I-128 の放射エネルギーをモンテカルロコード PHITS で計算した値と比較して図 5 に示す。図に見られるように、評価値と計算値はよい一致を示していることが分かる。

デモンストレーションとして、大型 CsI 板で得られた I-128 の輝度分布を放射能分布に変換したものを 3 次元表示にて図 6 に示す。

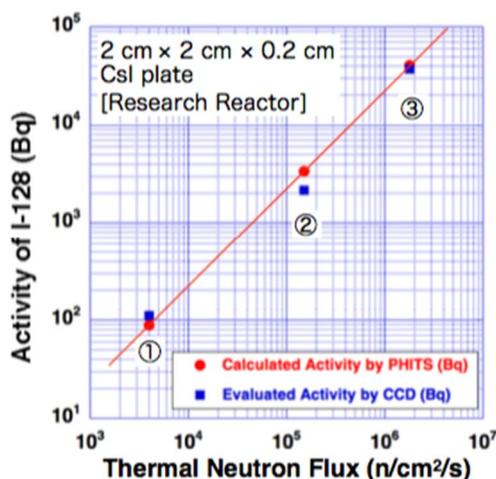


図 5 小型 CsI 板に生成した放射エネルギー

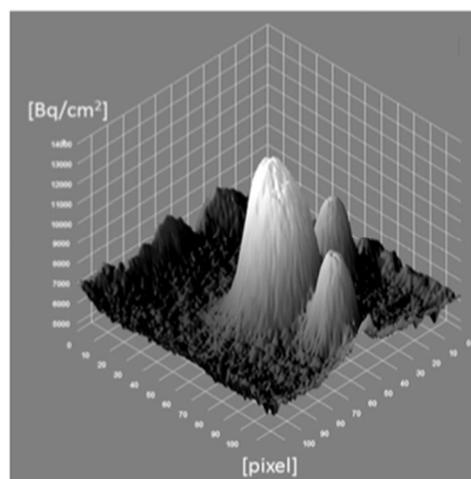


図 6 大型 CsI 板中の放射能分布

<引用文献>

- 1) 国際放射線防護委員会の2007年勧告(ICRP Publication 103)、社団法人日本アイソトープ協会 (丸善)
- 2) S. N. Boon et al., Medical Physics 25 (1998) pp.464-475

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

- A.Nohtomi, M.Tokunaga, G.Wakabayashi, K.Shinsho “Neutron Distribution Measurement by the Self-activation of a CsI Plate with CCD Camera using a Decaying Self-activation Imaging Technique” JPS Conf. Proc. 24, 011041 (2019) 査読有
- R.Kurihara, A.Nohtomi, G.Wakabayashi, Y.Sakurai, H.Tanaka “Preliminary design study of a simple neutron energy spectrometer using a CsI self-activation method for daily QA of accelerator-based BNCT” JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY Vol.56 (2019) pp.70-77 査読有
- R.Kakino, A.Nohtomi, G.Wakabayashi “Improvement of neutron spectrum unfolding based on three-group approximation using CsI self-activation method for evaluation of neutron dose around medical linacs” Radiation Measurements 116 (2018) pp.40-45 査読有
- S.Honda, A.Nohtomi, K.Machidori, G.Wakabayashi “Shape distortion of ^{128}I β -spectrum observed by a self-activated CsI(Tl) scintillator for high-sensitivity neutron measurements” NIM A871 (2017)pp.148-153 査読有

[学会発表](計 7 件)

- T.Ueki, A.Nohtomi and G.Wakabayashi “A Design Study of an Application of the CsI Self-activation Method to the Neutron Rem-counter Technique” 2018 IEEE NSS/MIC/RTSD, November 10-17,2018 , Sydney, Australia.
- 神崎祐依、納富昭弘、福永淳一、大賀才路 “CCDカメラとCsI板の自己放射化を用いた高エネルギーX線治療場における光中性子分布の観察” 第13回九州放射線医療技術学会大会、2018年11月10日-11日、那覇市
- A.Nohtomi, M.Tokunaga, G.Wakabayashi, K.Shinsho “Neutron Distribution Measurement by the Self-activation of a CsI Plate with CCD Camera using a Decaying Self-activation Imaging Technique” 2018 ISRSD, January 23-26, Tsukuba, Japan.
- 松本正郷、納富昭弘、福永淳一、大賀才路 “CsI板とCCDカメラを用いた簡易中性子分布測定手法の検討” 第12回九州放射線医療技術学会大会、2017年11月18日-19日、鹿児島市
- M.Tokunaga, A.Nohtomi, J.Fukunaga, Y.Nakamura, Y.Umezu, S.Ohga, G.Wakabayashi, Y.Koba, K.Shinsho “An imaging analysis for neutron distribution measurement by CsI plates with CCD camera using a decaying self-activation imaging technique” 2017 IEEE NSS/MIC/RTSD, October 21-27,2017, Atlanta, USA.
- R.Kurihara, A.Nohtomi, G.Wakabayashi, Y.Sakurai, “A design study of a handy neutron energy spectrometer for BNCT daily QA procedure” 2017 IEEE NSS/MIC/RTSD, October 21-27,2017, Atlanta, USA.
- R.Kakino, A.Nohtomi, G.Wakabayashi, J.Fukunaga, Y.Umezu, Y.Nakamura, S.Ohga “Simplification of Neutron-Monitoring System by Using Cs-134m Conversion Electrons in a Self-Activation CsI Scintillator” 2017 IEEE NSS/MIC/RTSD, October 21-27,2017, Atlanta, USA.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：真正浄光

ローマ字氏名：Kiyomitsu Shinsho

所属研究機関名：首都大学東京

部局名：人間健康科学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：20449309

研究分担者氏名：若林源一郎

ローマ字氏名： Genichiro Wakabayashi

所属研究機関名：近畿大学

部局名：原子力研究所

職名：准教授

研究者番号(8桁): 90311852

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。