

## (2) シンチレータの自己放射化を用いた高感度中性子検出方法の研究

九州大学大学院医学研究院保健学部門 納富昭弘  
 九州大学大学院医学系学府保健学専攻 栗原凌佑、徳永将瑛、柿野 諒  
 近畿大学原子力研究所 植木大志  
 若林源一郎、伊藤哲夫

### 1. はじめに

我々はこれまで、NaIやCsIなどの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シンチレータ自身が放射化して内部放射能により発光することを利用した中性子検出方法について検討してきた<sup>1)</sup>。本年度は、CsIシンチレータ結晶から発生する信号を発光の積分値としてCCDカメラでとらえて中性子強度分布を測定することについて検討した<sup>2)</sup>。

### 2. UTR-KINKIでの照射実験

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。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×7.5cm×0.2cmの大型CsI板を、図1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知るために、同様にアルミニウム容器に封入された2cm×2cm×0.2cmの小型CsI板3枚を図2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。

中性子の照射終了後、暗箱(SCIENTEX:DM-A6057)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。

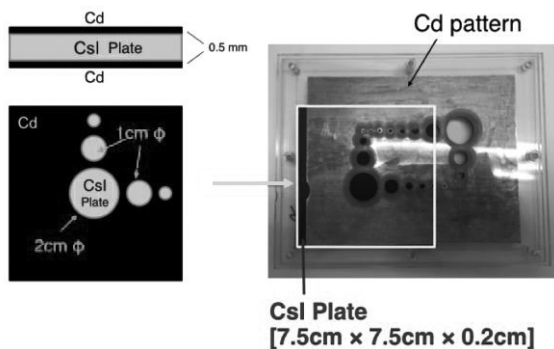


図1 Cdパターンで挟んだ大型CsI板

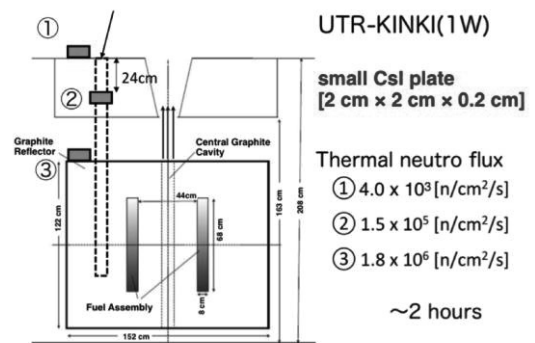


図2 小型CsI板の照射配置

### 3. ”Decaying self-activation imaging technique”による解析

大型CsI板(図1)で得られた最初の画像を図3に示す。Cdパターン形状に対応したいくつかの発光領域が確認できる。Cd有無のふたつの領域(w/ Cd, w/o Cd)において壊変曲線を解析した結果、I-128(半減期25分)の初期輝度値のCd比は2.8、Cs-134m(半減期174分)のそれは3.6であった。

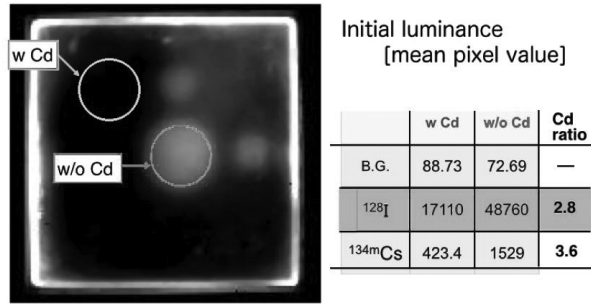


図3 Cdパターンで挟んだ大型CsI板で観測された最初の画像

次に、同様の壊変曲線の解析を、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、 $\gamma$ 線のアフターグローに起因しているものと考えられる。

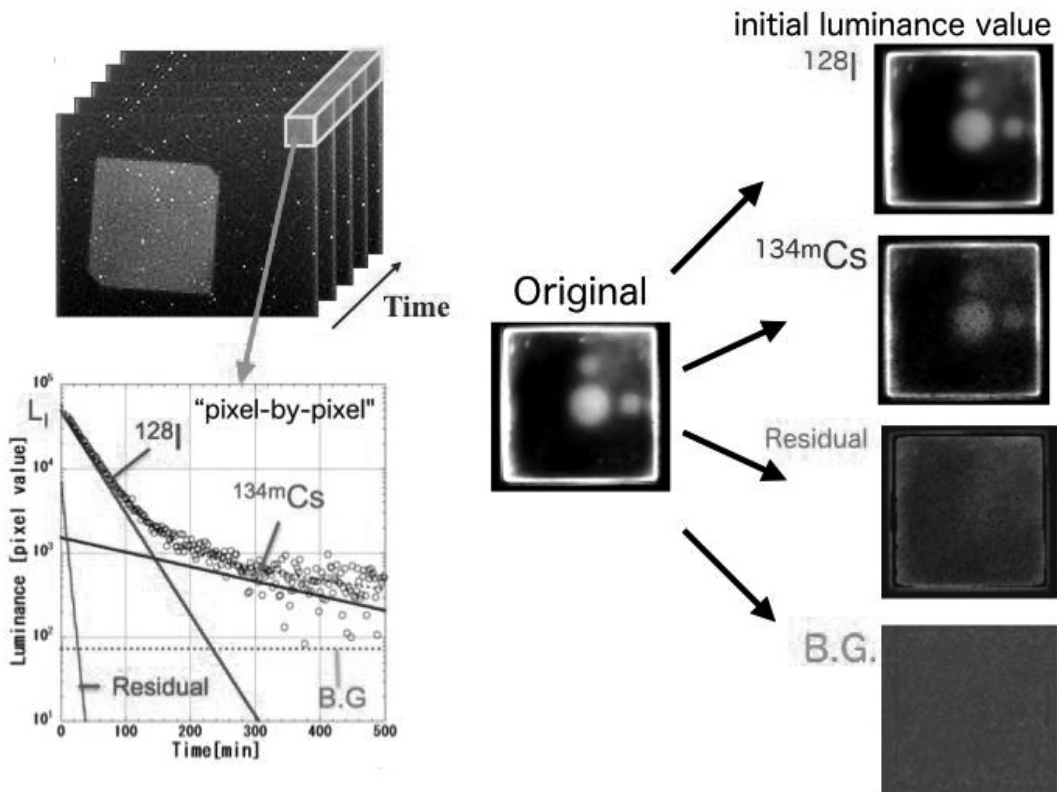


図4 ”decaying self-activation imaging technique”による画像の分離抽出

大型のCsI板を管電圧70kVの診断用X線で一様に照射した場合においても、そのアフターグローの画像上に固有の非一様性が観測される。これは、使用したシンチレータ結晶の局所的な厚さの違いや表面状態の欠陥によるものと推察される。そこで、この画像を基準参照画像として用いることにより、CsI板の感度のばらつきを補正することを試みた。図5に示す様に、この補正により画質が向上していることが分かる。

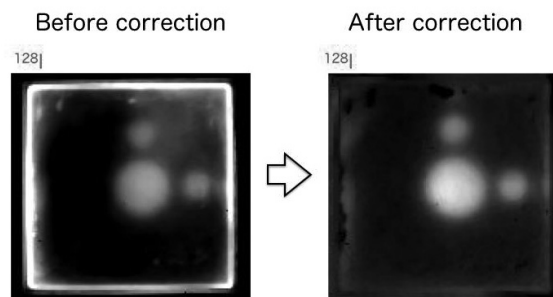


図5 CsI板の感度の非一様性の補正

#### 4. CsIに生じた放射能と発光量の関係

CCDカメラによる観測では、輝度値はある固定された光学系におけるADU値として与えられる。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、図6に示す様に変換係数Light Yieldを定義することにする。

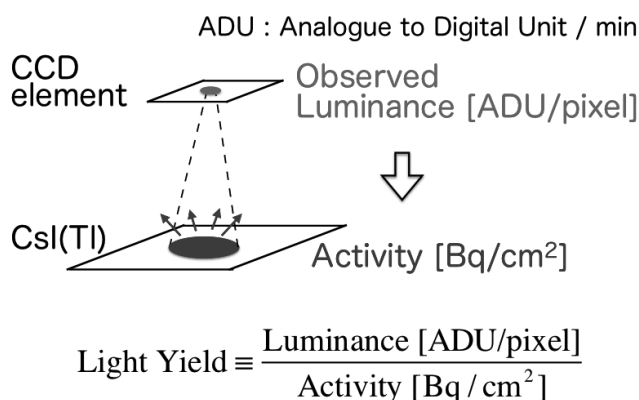


図6 CCD読み出しにおけるLight Yieldの定義

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[3]。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。

$$\text{Light Yield} \left[ \frac{\text{ADU/pixel}}{\text{Bq/cm}^2} \right] = \varepsilon \frac{E_{\text{mean},\beta} \cdot e}{E_{\text{light}}} \zeta \theta L \eta \cdot \omega \cdot \frac{N_{\text{bin}}}{N_{\text{elec}}} A_{\text{pix}} \times 60 \quad (1).$$

ここで、optical efficiency  $\omega$ 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/cm<sup>2</sup>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

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

次に、図2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7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(図5の右側)を放射能分布に変換したものを3次元表示にて図8に示す。

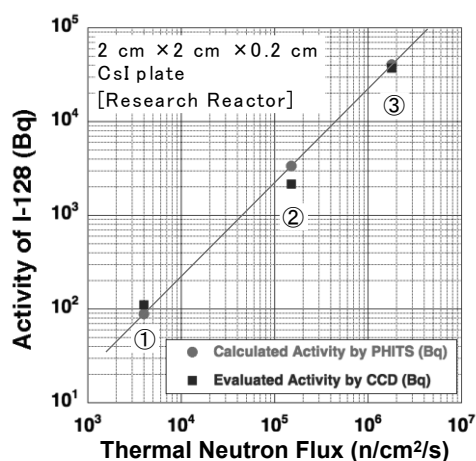


図7 小型CsI板に生成した放射エネルギー

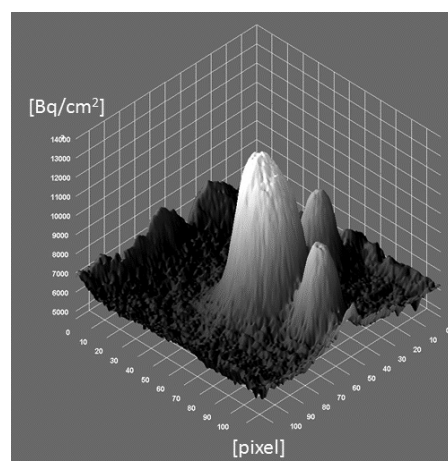


図8 大型CsI板中の放射能分布

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、近畿大学原子力研究所の皆様にはたいへんお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。本研究は、JSPS 科研費 JP16K10320の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) G. Wakabayashi, A. Nohtomi, et al., Radiological Physics and Technology **8** (2015) pp.125-134.
- 2) A.Nohtomi et al. , Nuclear Instruments and Method A832(2016) pp. 21-23
- 3) S. N. Boon et al., Medical Physics 25 (1998) pp.464-475

## 業績一覧

### [研究発表]

- M.Tokunaga et al., "An image analysis for neutron distribution measurement by CsI plates with CCD camera using a decaying self-activation imaging technique" 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Atlanta、2017年10月21日～28日)
- R.Kurihara et al., "A design study of a handy neutron energy spectrometer for BNCT daily QA procedure" 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Atlanta、2017年10月21日～28日)
- R.Kakino et al., "Simplification of neutron-monitoring System by using Cs-134m conversion electrons in a self-activated CsI scintillator" 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Atlanta、2017年10月21日～28日)
- A.Nohtomi et al., "Neutron distribution measurement by the self-activation of a CsI plate with CCD camera using a decaying self-activation imaging technique" ISRD2018: International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (Tsukuba、2018年1月23日～26日)

### [原著論文]

- S. Honda, A.Nohtomi et al., "Shape distortion of  $^{128}\text{I}$   $\beta$ -spectrum observed by a self-activated CsI(Tl) scintillator for high-sensitivity neutron measurements" NIM A871 (2017) pp.148-153

## 実験・測定補助者リスト

栗原凌佑	九州大学大学院医学系学府医用量子線科学分野	博士2年
徳永将瑛	九州大学大学院医学系学府医用量子線科学分野	修士2年
柿野 諒	九州大学大学院医学系学府医用量子線科学分野	修士2年
植木大志	九州大学大学院医学系学府医用量子線科学分野	修士1年

(計4名)