

テーマ2「最前線の研究報告（学生、若手研究者による）」



医療現場（加速器施設）における
リアルタイム
 γ 線スペクトル・線量同時測定装置開発

大阪大学 大学院工学研究科
D3 VOULGARIS NIKOLAOS

我々は、放射線医療従事者の被ばく量を低減するため、 γ 線のエネルギースペクトルと線量をリアルタイムで同時表示する計測器の開発を進めている。本計測器は γ 線の波高分布を計測し、逐次型ベイズ推定法を改良した $k-\alpha$ 法でエネルギースペクトルに変換、線量換算係数をかけて線量を導出している。これまで γ 線エネルギーの上限値を3 MeVとしていたが、BNCTでの使用を目指し、10 MeVまで拡張することを目指している。

医療現場（加速器施設）におけるリアルタイム γ線スペクトル・線量同時測定装置開発

大阪大学工学研究科
D3 VOULGARIS NIKOLAOS

1. はじめに

近年、放射線は医療現場で様々な形で利用されている。しかしながら、医療現場では患者の治療が第一優先で医療従事者の被ばくについてはあまり注目されない傾向がある。医療従事者がフルタイムでは線量計を使っていないとの報告もあり[1]、線量計の利用そのものに問題点と制限があるとの指摘もある[2]。我々は、このような状況の中、放射線医療従事者の被ばく量を最終的に低減するため、γ線のエネルギースペクトルと線量をリアルタイムで同時表示する計測器の開発を進めている。リアルタイムγ線スペクトル線量測定装置には、CsI (Tl) 結晶と Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を組み合わせたシンチレーション検出器を用いている。これまでの研究から、本モニターの実用性と低エネルギーの測定精度を確認した[3, 4, 5]。検証実験は、バックグラウンド環境（約 $0.08 \mu\text{Sv/h}$ ）及び核燃料貯蔵室内（約 $2 \mu\text{Sv/h}$ ）で、並びに標準ガンマ線源を用いて実施された。最近では、標準線源では得辛い 2.75 MeV の高エネルギーガンマ線による検証実験を完了している。これまで、モニターの計測エネルギーの上限は 3 MeV と設定してきたが、今後、ホウ素中性子補捉治療 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) を含む加速器施設での応用のために、その計測範囲を 10 MeV まで拡張することを計画している。

2. リアルタイムγ線スペクトル・線量同時測定装置について

2.1 装置の機器構成

シンチレーション検出器を用いた放射線スペクトル測定装置の機器構成を図1に示す。具体的には以下の通りである。

- CsI (Tl) シンチレータ 入射したγ線のエネルギーを光子に変換する素子
- Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) 光子を電気信号（パルス信号）に変換する光子計測デバイス
- 増幅器（アンプ） MPPCからの信号を増幅するモジュール
- MCA（マルチチャンネルアナライザ） アンプからのパルス信号の波高を分析する装置
- DP5（デジタルパルスプロセッサ） 従来は、MCAの波高分布データを使って、パソコン内でリサンプリングを行い、リアルタイムを模擬していた。現在は、DP5を用いて、実際にリアルタイムデータを得、逐次ベイズ推定 ($k-\alpha$) 法によりリアルタイム線量計測を実現している。

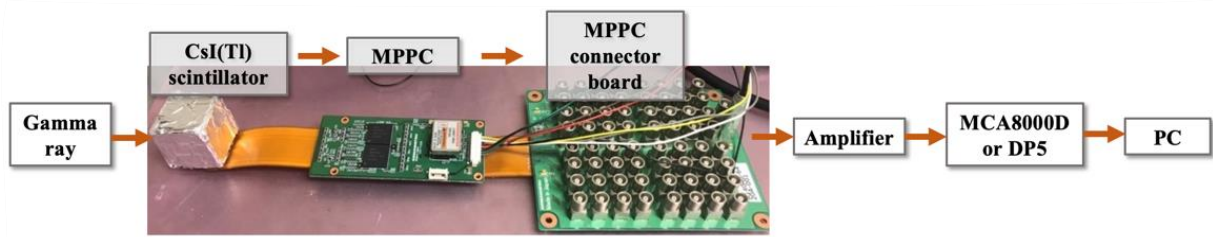


図1：リアルタイムγ線スペクトル・線量同時測定装置の構成要素の概要

なお、携帯性を重要視し、実用機の形状は図のような首に下げる薄型の箱状(スマートフォン形状) にしたいと考えている。実際の装置は EMF ジャパン株式会社 (<https://www.emf-japan.com/>) で開発を行っている。

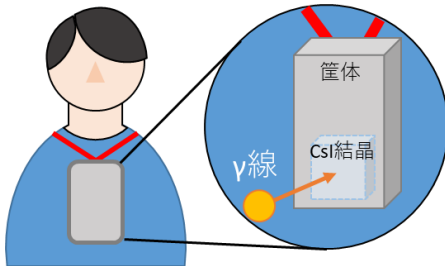


図2：実用器の形状案[6]

本研究では、実用化についても重要視しておりここでCsI(Tl)結晶の厚みを薄くして実用化できるかどうかとも検討した。

まとめると本装置の設計の方向と特徴は以下の通りである：

- 小型・軽量(スマートフォン程度の大きさで、身につけられる)
- 発光分布及びエネルギースペクトル評価(画面表示できる)
- リアルタイム計測
- 線量を正確に評価(リアルタイム表示可能、積算できる)
- 広いダイナミックレンジ(現状は3 MeV、10 MeV を目指している)

2.2 リアルタイムデータ処理

波高スペクトルはアンフォールディング(unfolding)によってエネルギースペクトルに変換される[7, 8]。岩崎は、放射線計測の unfolding 問題に初めてベイズ推定法を適用した[9]。ベイズ推定法は純粋に条件付き確率として知られるベイズの定理に基づく手法である。解くべき問題は以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mj} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_j \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$y_i = r_{ij} \cdot \phi_j \quad (2)$$

ここで：

y_i : チャンネル i における波高分布

r_{ij} : 検出器の応答関数

ϕ_j : エネルギースペクトル

本研究では、unfolding をリアルタイムで実施するため、逐次型ベイズ推定法(α 法)で実行する。以下に具体的に説明する。

1 つの放射線が波高チャンネル i の検出器によって計数された時、チャンネル j のエネルギースペクトルの事後確率 $P(j|i)$ は、次式の通り応答関数 r_{ij} を用いて記述できる。

$$P(j|i) = \frac{r_{ij}\phi_j}{\sum_{o=1}^l r_{io}\phi_o} \quad (3)$$

ここで：

$P(j|i)$ ：事後確率。検出されたチャンネル i での信号 1 カウントごとに寄与を加算してエネルギー j のスペクトル ϕ_j を改訂する。

それを用いると、エネルギースペクトル ϕ_j は逐次的に次のように評価される。

$$\phi_j^{N+1} = (1 - \alpha)\phi_j^N + \alpha \frac{r_{ij}\phi_j^N}{\sum_{o=1}^l r_{io}\phi_o^N} \quad (4)$$

ここで：

α ：事前確率が事後確率に影響する程度を制御する定数

N ：カウント数

この評価はカウントごと、つまり i チャンネルの波高信号が得られる度に行われる。次の評価に必要なデータ (事前確率) として、今回の評価 (事後確率) を割り当てることにより、連続的な推定が可能になる。パラメーター α は、事前確率が寄与する程度を制御する。しかし、この方法の収束はとても遅いことが知られている。また、最適な α の決定はかなり難しい。このため、次の方程式を満たすパラメーター k を導入し、実用可能な逐次型ベイズ推定法 ($k - \alpha$ 法) を確立した。

$$\alpha = \frac{1+kN}{N} \quad (\alpha = 1, \text{if } N < \frac{1}{1-k}) \quad (5)$$

ここで：

k 値(< 1)： $k - \alpha$ 法における定数。カウント数に依存する

N ：カウント数

この $k - \alpha$ 法により、測定中にエネルギースペクトルをカウントごとにリアルタイムで推定することができる。そして、カウントごとに推定されたエネルギースペクトルに線量変換係数を適用することにより、線量率を評価する。線量率の導出には日本原子力学会が定めた「放射線遮蔽計算のための線量換算係数 [10]」に掲載されている線量換算係数を使用する。これは人体に入射する光子のエネルギー別に線量換算係数が設定されている。線量率はこれを用いて次の式のように導出できる。

$$D = \sum_{j=1}^n d_j \cdot \phi_j \quad (6)$$

ここで：

D ：線量率[$\mu\text{Sv/h}$]

d_j ：単位フルエンスあたりの実効線量率[$(\mu\text{Sv/h})/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$]

ϕ_j ：単位フルエンスあたりのエネルギースペクトル($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

比較的放射線強度の強い核燃料庫前と放射線強度が最も弱いと考えられるバックグラウンド環境での測定により、スペクトルの再構成と線量の推定について検証を行った。その結果、従来の α 法 (逐次ベイズ法) では収束が遅く推定結果が得られないことが分かった。そこで、新たに $k - \alpha$ 法を開発し、上記の計測条件で、実用に耐えられる程度に高速で推定結果が収束

することを確認した。更に、複数の標準 γ 線源を用い、連続スペクトルを模擬した場での測定を行った。その結果、推定値と理論値は良い一致を示したことから、エネルギースペクトル及び線量の高速収束性が確認された。これらの実験結果から、一般的な条件（複数の線源が混在する連続スペクトル場）でも逐次型ベイズ推定法（ $k-\alpha$ 法）により、エネルギースペクトル及び線量を同時にリアルタイム推定できることが実証された。

3. 医療現場における測定を目指して

3.1 高エネルギー γ 線への拡張

本研究ではこれまで、医療現場における放射線モニターと線量計を兼ねるような測定装置を実現するため、その上限エネルギーを3 MeVに設定していた。これは、粒子線治療用の加速器の使用後や放射性医薬品の製造後に部屋に残存する放射線（放射化物等から放出される γ 線）のエネルギーが1-3 MeV程度であるということに起因している。図3には、 ^{24}Na 線源（1.368 MeVと2.754 MeVの γ 線が放出される）によるリアルタイム計測結果を示した。DP5を用いることにより、実際にリアルタイム使用が可能であることを確認済みである。しかしながら、例えば、ホウ素中性子捕捉療法など、中性子が存在しているような放射線機器の場合、その使用中には、 (n, γ) 反応により最大10 MeVまでの γ 線が放出されることが知られている。発表者の研究室では現在、上限エネルギーを引き上げるための研究を進めているところである。

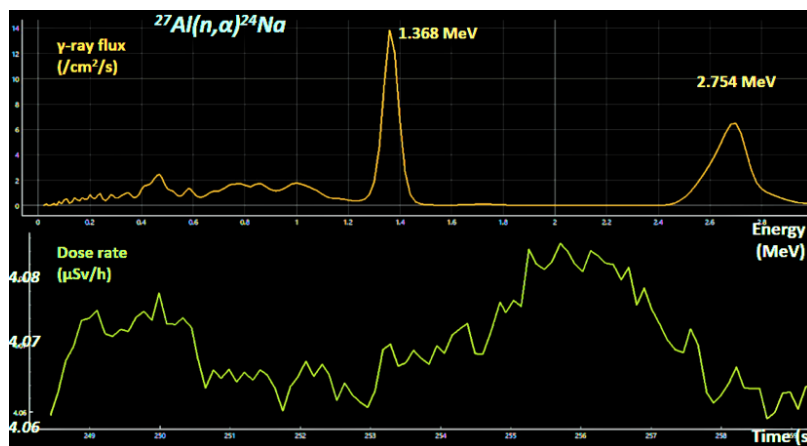


図3：リアルタイム測定のスクリンショット。ガンマ線フラックス(上)と線量率(下)がリアルタイム(秒)で視覚化されている。上の図からは、 ^{24}Na からの1.368 MeVおよび2.754 MeVのガンマ線ピークがはっきりと推定で来ている。下の図からは、線量が、4.06~4.08 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ の間で推移していることが確認できる。

図4には、2.6 cm角のCsI(Tl)シンチレータの10 MeVまでの γ 線応答関数の一部を示す。これは、3次元モンテカルロ輸送計算コードMCNP5を用い計算した結果に、検出器の有限の分解能を考慮して作成した。分解能は、標準線源により実験的に取得後、理論式により外挿することで評価し使用した。この分解能を用いて、MCNP5による計算応答関数は、ガウス分布でばかして評価応答関数としている。現在は、この評価済み応答関数を用いて、10 MeVまでの測定可能性の検討を進めているところである。

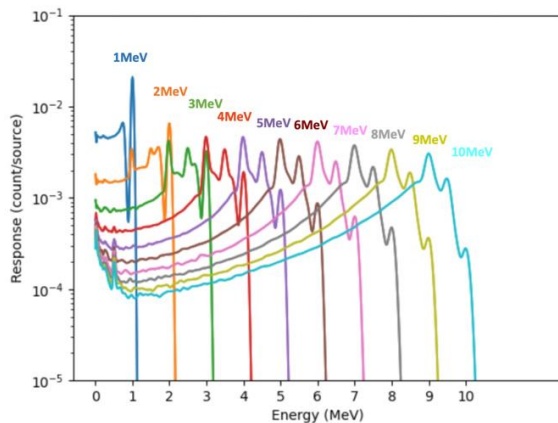


図4 : 2.6 cm 角のCsI(Tl)シンチレータの10 MeV の γ 線までの応答関数(一部)

3.2 中性子と γ 線の混在場における計測

本研究では、医療現場（加速器施設など）における γ 線の測定を目指してきたが、今後は、ホウ素中性子捕捉療法や粒子線治療装置を用いた装置稼働中における計測も実現したいと考えている。このためには、中性子と γ 線が同時に存在する場でも使用できるようにする必要がある。例えば、中性子と γ 線の波形弁別を可能とするため、結晶の変更（例えばCLYC[11, 12]）等の方法を調査しているところである。現在は、様々な材料及び結晶サイズの応答関数を10 MeVまで評価し、2.75 MeVでの数値実験を通じて線量推定の可否を検証しているところである。その後、実験的には、最大10 MeV程度までのガンマ線を生成できる（ p, γ ）反応、並びに $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)$ および $^{160}\text{(n, p)}$ 反応により放出される6.1 MeVガンマ線に対して検証を進める予定である。

4. まとめ

本研究では、医療従事者の被ばく量低減を目指し、リアルタイムで γ 線のエネルギースペクトルと線量を同時に表示する装置をCsI(Tl)結晶とMulti-Pixel Photon Counter (MPPC)を組み合わせたシステムとして開発した。実用機の形状は携帯可能なスマートフォン型で、実用性、軽量性、エネルギースペクトル評価、リアルタイム計測、正確な線量表示、広いダイナミックレンジ等の性能を同時に備えている。新たに導入したk- α 法により、逐次型ベイズ推定法の収束速度を向上させ、実験結果から線量とエネルギースペクトルをリアルタイムに推定できることが確認された。現在は10 MeVまで γ 線の測定範囲を拡張するための検討を進めているところである。一連の研究により、本計測装置の医療現場や加速器施設におけるより広範な応用が期待される。

参考文献

- [1] Qureshi F, Ramprasad A & Derylo B, Radiation Monitoring Using Personal Dosimeter Devices in Terms of Long-Term Compliance and Creating a Culture of Safety. 2022 Cureus. <https://doi.org/10.7759/cureus.27999>
- [2] Ortega X, Advantages and Limitations of Electronic Devices for Primary Occupational Dosimetry in International ISOE Symposia, Tarragona, Spain, ISOE Apr., 2000.

- [3] Kobayashi M, Sato F, Kusaka S, and Murata I, "Feasibility study on real-time γ -ray spectrum / dose measurement system," EPJ Web of Conferences, 2017; vol. 153, p. 07014, 201715307014
- [4] Nishimura H et al., "Experimental verification of real-time gamma-ray spectrum and dose monitor," Applied Radiation and Isotopes, (2022) p110226
- [5] Voulgaris N, Miyoshi T, Tamaki S, Kusaka S, Murata I, "Development of Real-time Gamma-ray Spectrum and Dose Monitor Investigation of true real-time convergence" (Revised proceedings article accepted for publication), presented at the 37th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 2023 Jan. 25-27; Tsukuba, Japan
- [6] 西村日加里、リアルタイム γ 線スペクトル・線量同時計測システムの開発-検出素子形状の検討-, (2021)大阪大学環境エネルギー工学専攻量子反応工学領域修士課程卒業論文
- [7] Amadè S, Bettelli N, Zambelli, N, Zanettini, S, Benassi, G & Zappettini, A. Gamma-Ray Spectral Unfolding of CdZnTe-Based Detectors Using a Genetic Algorithm. Sensors, 2020; 20(24), 7316. <https://doi.org/10.3390/s20247316>
- [8] Bouchet, L. A comparative study of deconvolution methods for gamma-ray spectra. Astron. Astrophys. Suppl. 1995; 113, 167-183.
- [9] Iwasaki S, A new approach for unfolding PHA problems based only on the Bayes Theorem, Reactor Dosimetry, H. A. Abderrahim, P. D' hondt, B. Osmera (Eds.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1998; 245
- [10] ICRP, and International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 74: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. 2017; Vol. 23. Elsevier Health Sciences
- [11] Jin, T.; Hao, S.; Shang, Y.; Lei, Z.; Yang, C. Recent Trends in Elpasolite Single Crystal Scintillators for Radiation Detection. Crystals 2022, 12, 887. <https://doi.org/10.3390/cryst12070887>
- [12] 吉川彰 放射線を可視化するシンチレーション検出器 応用物理 第 82 卷 第 12 号 (2013)

講演者略歴



VOULGARIS Nikolaos (ヴルガリス・ニコラオス)

所属 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 D3

住所 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

連絡先 TEL/FAX : 08076546660

E-mail : Voulgaris.Nikolaos@qr.see.eng.osaka-u.ac.jp

学職歴 2019年 アテネ国立工科大学大学 応用数学物理学科コース 科卒業
2019年 セントラルランカシャー大学 大学薬学部および生物医学科
学部にてがん生物学コース 入学
2020年 セントラルランカシャー大学 大学薬学部および生物医学科
学部にてがん生物学コース 修了
2021年 大阪大学 工学研究科 博士後期課程 環境エネルギー工学専
攻 エネルギー量子工学コース 通学

研究・活動分野など 現在、博士後期課程 3 年。放射線検出および放射線治療について研究している。