

(12)核セキュリティのための中性子検出器開発

日本原子力研究開発機構 小泉 光生、高橋 時音、弘中 浩太、持丸 貴則
近畿大学原子力研究所 山西 弘城、若林 源一郎

1. はじめに

大規模公共イベント等において核・放射線テロを防ぐためには、イベント会場への核・放射性物質持ち込みを防ぐとともに、たとえ持ち込まれたとしても、それを迅速に検知し、処理することが肝要である。核物質などの中性子を放出するものを探す場合、ガンマ線を検出するよりも、透過力が高く遮蔽が難しい高速中性子を検出することが有効な場合がある。そこで、高速中性子の検知に着目し、比較的安価で、加工・取り扱いが容易なプラスチックシンチレータが有効と考えられるが、高速中性子とガンマ線の両方に感度を有するため、環境中で微量な中性子を検出するには、ガンマ線の感度を抑える必要がある。

波形弁別 PSD(Pulse Shape Discrimination)法は、高速中性子とガンマ線による発光減衰時間が異なることを利用し、出力波形を分析することで放射線の種類を区別する測定法である。ガンマ線による信号と区別して測定ができるため、中性子を S/N(signal と noise の比)良く計数することができる。近年、PSD 測定が可能なシンチレータとしては、液体シンチレータに加え、プラスチックシンチレータ(ELJEN社製、EJ-276)が開発されている[1,2]。

本研究では、原子力機構が開発した EJ-276 シンチレータを組み込んだ検出器を、近大炉の所有する原子炉起動用(α, n)中性子線源(Pu-Be: 1.4×10^6 n/sec)[3]からの高速中性子の測定実験を実施し、核セキュリティ分野への適用性の可能性を調べたので報告する。

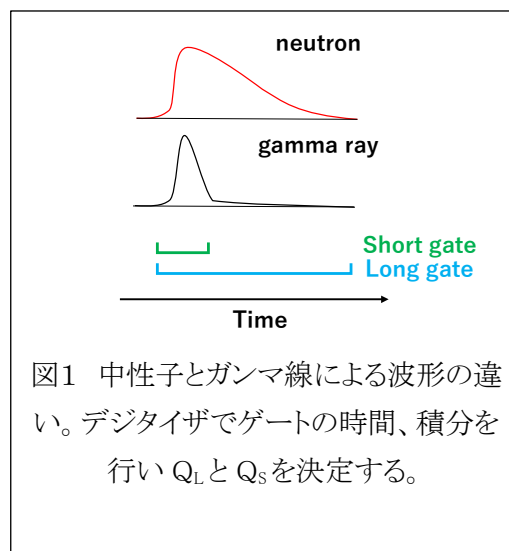
2. 波形弁別型プラスチックシンチレーション検出器

2.1 波形弁別(PSD)測定試験

波形弁別型シンチレータは、ガンマ線、中性子により蛍光の時間分布に違いが生じる。図1は、シンチレータから得られる発光信号のパルス出力電圧を模式的に示したもので、中性子由来のパルスの方が、ガンマ線由来のパルスより減衰時間が長い。放射線計測には、デジタイザを導入し、波形をとりながら、図1に示すように、Long Gate と Short Gate の時間で積分を行い、 Q_L 、 Q_S を決定する。波形情報(PSD)は、下記の式で求める。

$$PSD = \frac{(Q_L - Q_S)}{Q_L} \quad (1)$$

本試験に用いた EJ-276 プラスチックシンチレータは長尺形状(25×25×250 mm)で、テフロンテープを反射材として巻いた後に Al ケースに収納し、両端に光電子増倍管 PMT(Hamamatsu H11934-100-010)を取り付けたものである。図2は測定に用いた検出システムの概略である。デジタイザ(CAEN V1730D)は、PMTからの出力を直接受け、信号の立ち上が



りを検出し、 Q_L 、 Q_S とタイムスタンプをリスト形式にしてデータをコンピュータに送る。送られたデータはコンピュータで解析される。

本検出器を用いた試験に先立ち、中心にガンマ線を入射し、同程度の波高が得られる PMT の印加電圧を調べ、実験ではそれを用いた。データは、ノイズ抑制のため両端の光電子増倍管で同時に出力される同時事象のみを用いた。また、最終的に得られる Q_L 、 Q_S は、両端の出力の和を用いた。図3は、近大炉が所有する Pu-Be 線源を測定した時の Q_L と PSD の 2 次元ヒストグラムである。PSD = 約 285 を境に上下に分かれ、ガンマ線と中性子の弁別ができることを確認した。以下の実験では、PSD の値で弁別した中性子計数を用いる。

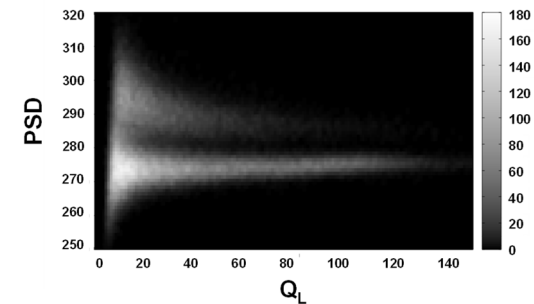
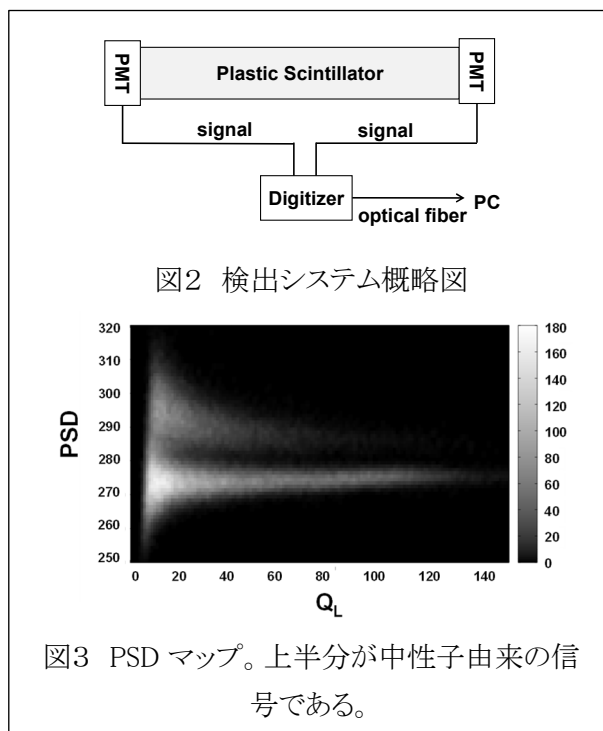


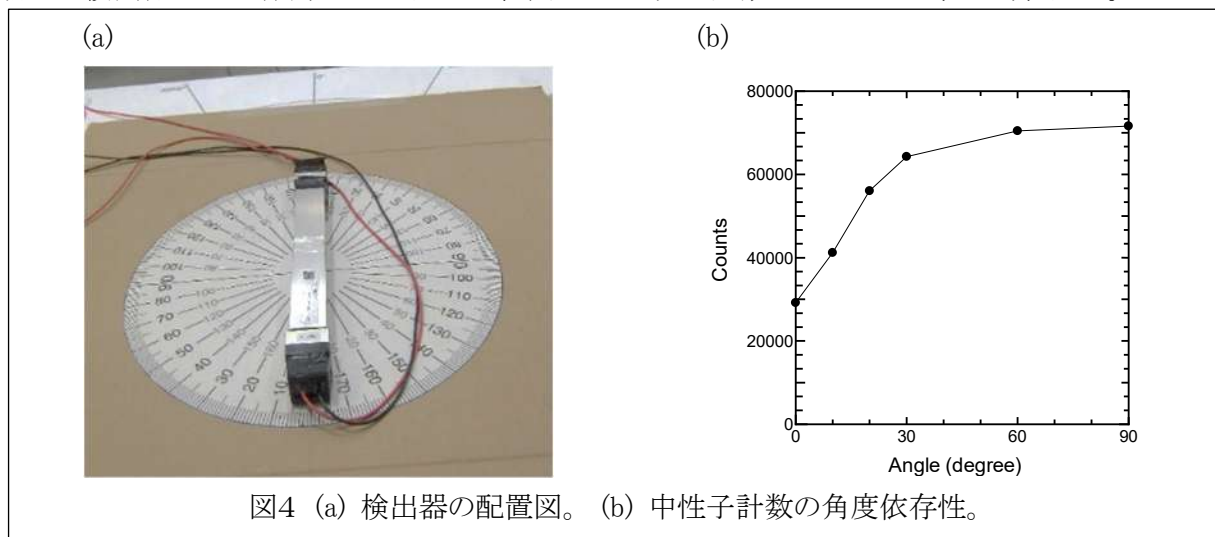
図3 PSD マップ。上半分が中性子由来の信号である。

2.2 シンチレーション検出器の感度方向依存性

本研究で導入したプラスチックシンチレータは長尺であるため、中性子感度に方向依存性がある。そこで、近大炉の所有する Pu-Be 線源を用いて、中性子のカウント数の角度依存性を測定した。検出器は線源との角度が分かるようには図4のように角度を記した板の上に置いた。線源は検出器の中心から 1 m の位置に、長辺側と線源が一直線に並ぶ状態を角度 0° として設置し、10 分間測定した。

検出器の検出効率(計数を入射中性子数で割ったもの)は、線源が 0° 方向にある場合で約 4%、 90° で 1.5%であった。この差は、中性子から見たプラスチックシンチレータの厚さが検出器の角度により変わることによる。1 m 位置にある線源からの中性子検出効率(計数を中性子数放出数で割ったもの)は、線源が 0° 方向にある場合で約 0.0035%、 90° にある場合で 0.0085%であった。この差は線源から見た検出器の立体角が変化することによる。

図4(b)に中性子カウント数(10 分間測定)の角度依存性を示す。回転角度が大きくなるにつれ、線源から検出器への立体角は大きくなるが、中性子から見た実効シンチレータ厚さは薄くなる。これらの



複合効果が表れている。0°から30°の範囲では角度が変わるにつれ計数が鋭く変化している。しかし、30°以上の角度では、ほぼ同じような計数となった。検出器の向きが線源方向と一致する(0°)と鋭く計数が下がることから、中性子線源探索に有用となる可能性がある。

3. ポリエチレン減速体との組み合わせ

線源方向を特定する手法として、山西らは、He-3 や Li ガラスといった熱中性子検出器とポリエチレンを組み合わせ、回転角による計数の変化を用いて、中性子の線源方向を特定する手法を提案している[4,5]。図5は、手法を模式的に示したものである。He-3 などの検出器は熱中性子に感度があるため、中性子は、ポリエチレンによって減速した後に、検出器に到達したものが計数されている。実験結果から、線源に正対している検出器の計数は多く、ポリエチレンで影になっている側の計数は少なくなっている。

EJ-276 プラスチックシンチレーション検出器を、ポリエチレンと組み合わせて、同様な試験を行った。図6は、実験における装置の配置を示したものである。ポリエチレンブロックは 100×100×250 mm を用い、長尺プラスチックシンチレーション検出器をポリエチレンの前面と背面に取り付けた。

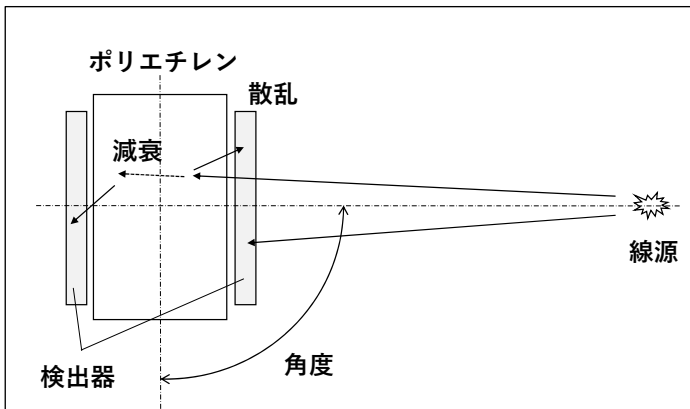


図5 筒型検出器を用いた線源方向探索法

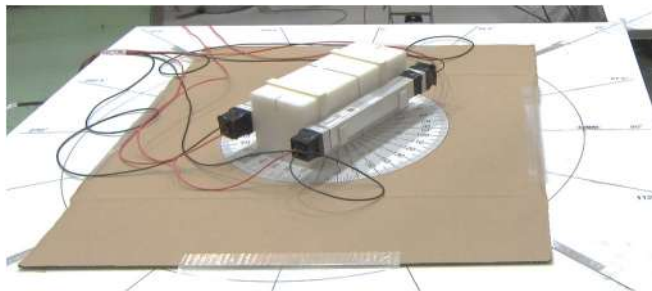
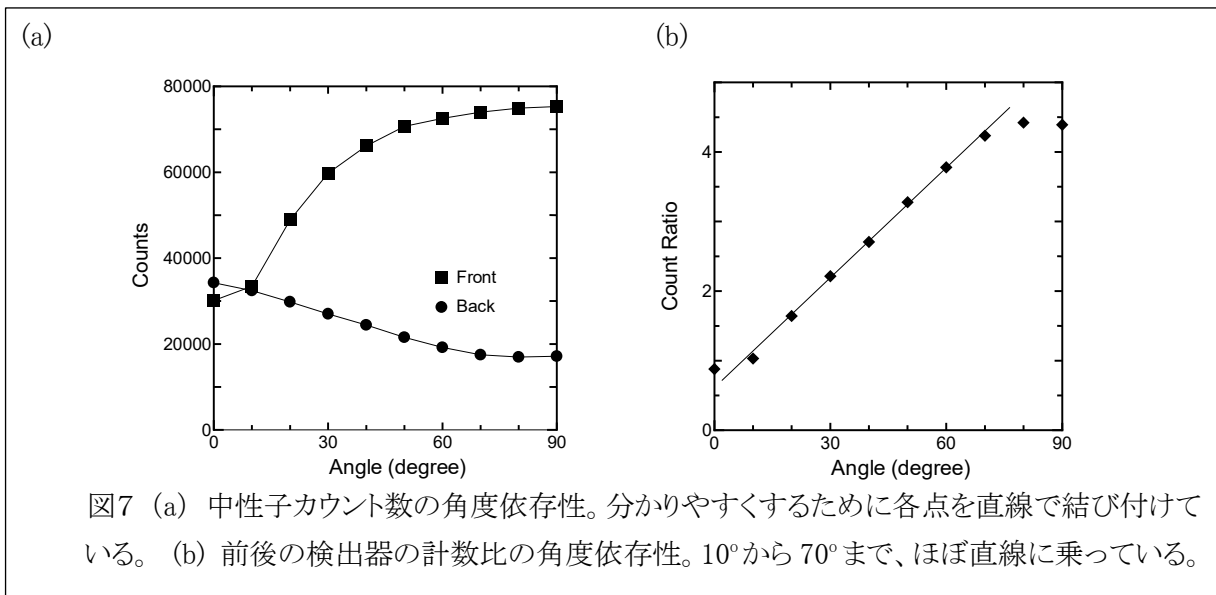


図6 ポリエチレンと EJ-276 シンチレーション検出器を組み合わせた試験

図7(a)に得られた中性子カウント数(10 分間測定)の角度依存性を示す。プラスチックシンチレータ



は高速中性子に感度を持つが、熱中性子に対しては感度を持たない。線源の反対側に設置した検出器においては、高速中性子がポリエチレンで減速され検出効率が下がる。実験では、角度が大きくなるにつれ、計数率が下がっていくことが分かった。一方、線源に面している検出器は、高速中性子を直接検出するので、単体で角度依存性を試験したときと同じような角度分布となった。0°付近で、若干ゆるやかにしているのは、単体の検出器の中心軸は、装置の中心軸と5 cm 離れているためと考えられる。図7(b)は、表側と裏側の検出器の計数比の角度依存性を示したものである。図から10~70°の範囲で、直線に乗ることが分かった。これは、Pu-Be からの高速中性子のエネルギー分布、ポリエチレンの大きさ、シンチレータの検出効率など、偶然、条件が整ったためと考えられる。しかし、原理的に、計数比は角度依存性を有することは明らかで、線源位置の探索に有効な技術となる可能性がある。今後、シミュレーションなどと比較しながら、検出器の組み合わせを模索していく計画である。

4. まとめ

近大炉所有の原子炉起動用 Pu-Be 中性子線源を用いて、長尺の EJ-276 シンチレーション検出器の中性子・ガンマ線弁別能力と角度依存性を調べた。実験により、EJ-276 はガンマ線と区別して中性子を計測できることを確認することができた。また、検出器を長尺型にして角度依存性を持たせ、ポリエチレンブロックと組み合わせることによって、中性子線源の探知に利用できることがわかった。今後は、シミュレーション研究と組み合わせた実験解析を行い、中性子線源の探索に適用可能な装置開発を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」の一環として行ったものである。

参考文献

- [1] E.V. Pagano et al., “Pulse shape discrimination of plastic scintillator EJ 299-33 with radioactive sources”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 889 (2018) 83–88.
- [2] EJ-276 PSD Plastic Scintillator Data Sheet,
(https://eljentechnology.com/images/products/data_sheets/EJ-276.pdf).
- [3] G. Wakabayashi et al., “History and Present Situation of Kinki University Reactor”, Proceedings of Int. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, 2012.
- [4] H. Yamanishi. “Design of a portable directional neutron source finder” Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 544 (2005) 643–648.
- [5] H. Yamanishi, “Proposal for a Portable Directional Neutron Source Finder”, Jpn. J. Health Phys., 38 (2003) 267-269.

業績一覧

【学会発表】

高橋時音、小泉光生、木村祥紀、富川裕文、佐藤優樹、寺阪祐太、鳥居建男、山西弘城、若林源一郎、持丸貴則、「大規模公共イベントなどにおける核・放射性物質モニタ技術開発(1)広域モニタ

リングシステムの開発」日本原子力学会 2020 秋の大会、2020 年 9 月 16 日、1J01.

実験・測定補助者

なし