

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656573

研究課題名(和文)新しい3次元位置有感型放射線検出器の実証

研究課題名(英文)Basic study of a new three dimensional position sensitive radiation detector

研究代表者

小林 進悟 (Kobayashi, Shingo)

独立行政法人放射線医学総合研究所・研究基盤センター・研究員

研究者番号：10434325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高速中性子は放射線加重係数が大きいいため線量管理では特に重要な粒子であるが、実用的な高速中性子カメラはいまだ存在しない。高速中性子をイメージングするためには、大きな有感体積をもつ高速中性子用の3次元位置有感型放射線検出器が必要である。本研究では、高速中性子カメラのセンサの実証モデルとして、透明な立方体をしたアクリル容器に液体シンチレータを封入し光電子増倍管をとりつけた検出器(Monolithic Cubic Detector)を開発し試験を行った。実験結果はMCDはバックグラウンドとなるガンマ線を排除しつつ、高速中性子のエネルギー付与量と散乱位置の両方を決めることができることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：The fast neutron camera with sufficient detection efficiency has not been commercially available so far, although the fast neutron is important for radiation protection because the fast neutron has a high radiation weighting factor. In order to develop a fast neutron camera, a three-dimensional position sensitive radiation detector with large sensitive volume is necessary. We developed the liquid scintillator sealed in a transparent cubic acrylic container coupled with two photo-multipliers (Monolithic Cubic Detector, MCD) as a candidate of the fast neutron camera sensor and tested it. The experimental result suggests that the MCD can determine both of the recoil energy and the position where the fast neutron is scattered, while discriminating neutrons and gamma rays.

研究分野：放射線計測学

キーワード：高速中性子

1. 研究開始当初の背景

原子炉、核燃料施設、加速器施設、宇宙ステーション等においては、高い線量を付与する高速中性子の発生源、フラックス、エネルギースペクトルを把握することが肝要である。しかし、このような高速中性子が四方に飛び交う環境において、高速中性子をリアルタイムでイメージングする技術はいまだ確立されていない。高速中性子が発生している場所では、その線量を把握する事が肝要である。高速中性子 (> 0.1 MeV) は高い放射線荷重係数を持ち、線量に大きな寄与があるからである。高速中性子の線量を計測する方法はいくつかあるが、中性子の入射方向はわからず、フラックスやエネルギーの測定は間接的なものである。高速中性子の入射方向やエネルギー、フラックスの測定ができる高度な放射線検出器が必要である。

ところで、中性子に限らずガンマ線や荷電粒子線を含めた放射線検出器の研究動向へと視点を移すと、近年は放射線検出器の3D化、すなわち放射線の相互作用した3次元位置を計測できる検出器の開発が重要視され、時代は2Dから3Dへの道を歩み始めている。例えば、陽電子断層撮影装置においては画像の高解像度化のために、シンチレータを多素子化し、ガンマ線が相互作用した位置を得る研究が進められている (e.g. Tsuda et al. IEEE Trans., 51, 2004, p.2537)。半導体検出器では2次元位置有感型の両面ストリップ検出器を多段に重ねることで3D化し、分子イメージングやホームランドセキュリティのための高度なガンマ線カメラが開発されている (e.g. Takada et al. NIMA, 662, 2010, p.619; Zhang et al. IEEE Trans., 54, 2007, p.843)。

以上の既存の研究は、放射線の3D情報を得るための方針として検出部の多素子化と信号処理回路の多チャンネル化を柱としている。ところが、高速中性子やガンマ線検出器では、よほどの高線量下でない限り、数十cc以上の有効体積がなければ実用的な感度が得られず、現状よりもさらなる大容量化が必要であるが、技術面やコスト面から多チャンネル化の手法では今後限界が訪れる可能性が高い。例えば半導体検出器で有効体積が50 mm角の立方体で1 mmの3次元の位置分解能を得るには、方式によって異なるが、少なくとも5,000 ch、多くて125,000 chもの信号処理回路が必要となる。これは3D化を目指すすべての検出器が抱える問題である。そこで、大きな有効体積を持ちながらも少ない信号線数で3D情報を得られる放射線計測の原理・手法を開発すべきとの認識に至った。

我々は、この少ない信号線数で3D情報が得られる放射線検出器の開発をめざし、3.(1)に示した Monolithic Cubic Detector (MCD)の測定原理を着想した。本研究は、このMCDを用いて高速中性子を検出するための基礎研究と位置づけられる。

2. 研究の目的

本研究では、高速中性子に対応したMCDの開発を進め、高速中性子の散乱位置の決定ができることを実証する。

3. 研究の方法

(1) 実証用中性子検出器の製作

①3次元位置有感型検出器の原理

3次元位置有感型検出器を構成するために、立方体状のモノリシックなシンチレータに光センサ (Photo multiplier (PMT), Avalanche Photodiode (APD), Multi Pixel Photon Counter (MPPC)など) を各面6台取り付け (図1)。高速中性子やガンマ線が有効体積に入射し、散乱を起こすと、反跳粒子を生成しシンチレーションが起こる。シンチレーションは等方的に発せられるため6台の光検出器の出力は、入射窓の立体角 Ω_i で決まる。各面に届いたシンチレーション光量比からx, y, z座標を求めることができ、全発光量から吸収されたエネルギーを知ることができる。つまり、センサ内での入射粒子の3次元散乱位置とエネルギー付与量を決めることができる3次元位置有感型検出器となる。3次元位置検出をMonolithicな立方体状のシンチレータを使用して行うことから、ここではこの3次元位置検出原理に基づいた検出器をMonolithic Cubic Detector (MCD)と呼ぶことにする。

MCDの3次元位置検出原理において、シンチレーション光が、シンチレータと光検出器の境界面で全反射すると位置情報が失われてしまう。そのためシンチレーション光の反射光でなく、直接光を検出することが重要である。シンチレータ、シンチレータを封入する容器、光学グリッド、光検出器の窓材の屈折率を一致させ、直接光ができるだけ光センサに入射する工夫がMCDには必要である。

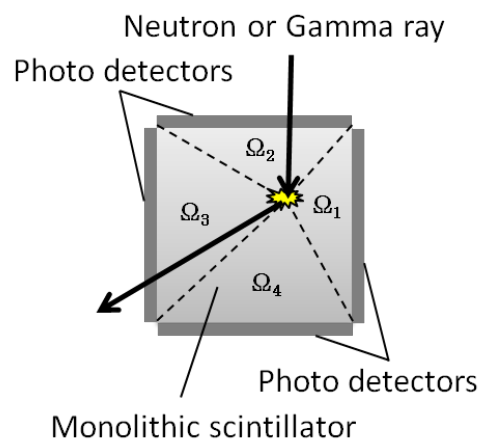


図1 MCDの概念図。光検出器は6台中4台が示されている。

MCD方式の利点は大容量化が可能な点であり、従来から問題となっている検出感度不足を改善する手段の1つとなる。また、シンチレータを多素子化した方式と比べ、MCDはモノリシックなシンチレータを使うためにシンチレータを安価に製造できる。さらに、

信号線数が少なくなるために読み出し回路も安価に製造できる。

②実証用高速中性子検出器の製作

高速中性子用のMCDの実証のための試作器を製作した。図2に示すように透明なアクリル容器（内容積50mm×50mm×50mm）を製作し、液体シンチレータ（EJ-321HまたはEJ-325A, Eljen社）を封入したものとした。封入は独自で行い、気泡を逃がすためにアクリル容器の角には2本のチューブが取り付けられ、片方から液体シンチレータを導入し、片方からは空気が逃げようになっており、ゴムチューブを留めることで封入できる。

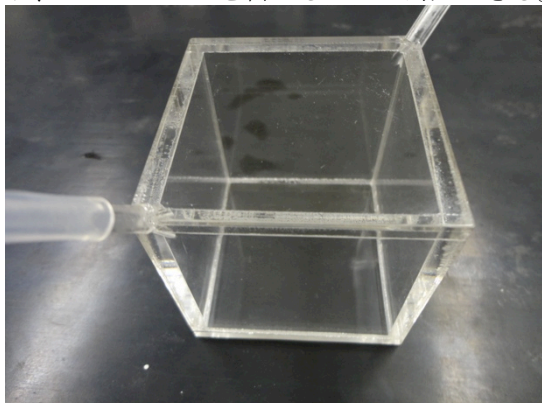


図2 液体シンチレータを封入するアクリル容器

このアクリル容器に2本の光電子増倍管（H2431-50, 浜松ホトニクス）を光学グリス（BC-630, Saint-Gobain）で取り付けている。屈折率は液体シンチレータがEJ-325Aの場合1.55でEJ-321Hの場合は1.49、アクリルは1.49、光学グリスが1.47、光電子増倍管のガラスが1.49であり、できうる限り屈折率を近づけてある。EJ-321Hを封入した場合の様子を図3に示す。光電面と平行に近い角度からも光電面が確認でき、屈折率がマッチングしている様子がわかる。

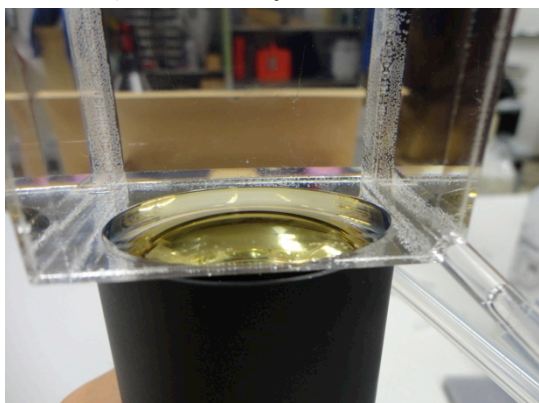


図3 EJ-321Hを封入し光電子増倍管を取り付けた様子

しかし、EJ-321Hはガンマ線・中性子弁別ができないため、試行錯誤の結果、実験ではEJ-325Aを用いることとした。EJ-325Aの屈折率は1.49より若干大きめであり、シンチレーション光が光電面に対して平行にごく

近い角度から入射した場合には全反射が起こってしまいわずかに有感体積が減ってしまう。将来、屈折率が1.49に近い中性子・ガンマ線弁別ができる液体シンチレータが開発されることを期待する。

PMTを取り付けない面は黒色ビニールテープを貼り付け反射を防止し、全体を黒色ビニールテープを巻きつけ遮光し、実証用高速中性子検出器とした（図4）。

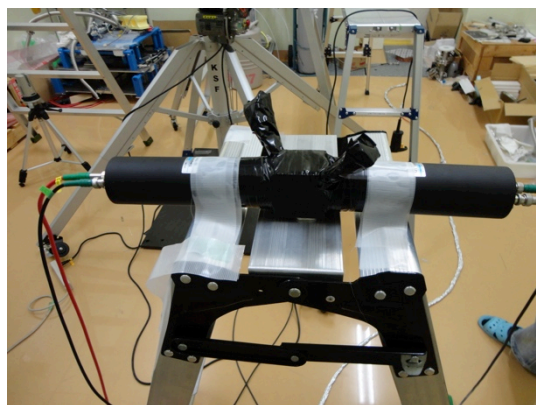


図4 実証用高速中性子検出器

③実証用高速中性子検出器の読み出し回路

読み出し回路のフローチャートを図5に示す。2つの光電子増倍管からの電流信号を入力インピーダンス50Ωのデジタルオシロスコープ（Wave Runner 625zi, Lecroy）にちなぎ信号波形を取り込めるようにした。また、2つ光電子増倍管からの信号をそれぞれをタイミングフィルターアンプ（474, ORTEC社）に通し、微分時定数50ns、積分時定数50nsの波形整形およびゲインの調整をおこなった後、ディスクリミネータを用いてデジタル信号に変換し、コインシデンスモジュールにて2つの光電子増倍管が同時に応答したイベントを取り出すためのトリガー信号を作成し、オシロスコープのデータ収集のトリガーとした。オシロスコープはトリガーイベントが起こると、1マイクロ秒間、10Gs/sにて、2つの光電子増倍管の信号波形を取り込めるようにした。2つの光電子増倍管、光電子増倍管#1, #2には-2.99kVの高電圧を掛けて、高速中性子検出器を動作させた。

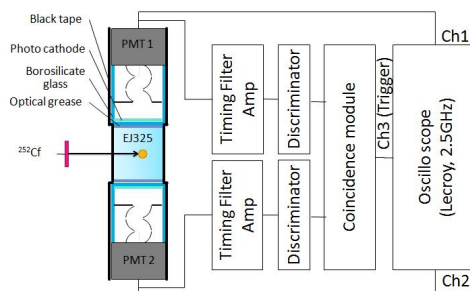


図5 読み出し回路フローチャート

(2)中性子照射試験

実証用高速中性子検出器の性能を確かめるために、²⁵²Cfからの高速中性子をセンサに

一様に照射した。また、 ^{137}Cs のガンマ線も照射した。実験では、光電子増倍管の出力波形（電流）をデジタルオシロスコープで 10 万イベント記録し、PC 上でデータの解析を行なった。

4. 研究成果

(1) ガンマ線・中性子弁別

一般的に高速中性子が存在する環境ではガンマ線も共存して発生しているため、中性子とガンマ線の弁別をすることが求められる。実証用高速中性子検出器に使用している EJ-325A は中性子によるシンチレーション光は、ガンマ線によるものに比べ遅発発光成分が大きくなることを利用し、中性子とガンマ線を弁別する。

まず、デジタルオシロスコープで記録した光電子増倍管の出力波形（電流）を時間積分することで、1 イベントのシンチレーションの全発光量に相当する、光電子増倍管の総電荷量 (Q_{total}) を計算した。次に、発光開始から 20ns 以降を遅発成分と定義し、遅発成分のみの電荷量 ($Q_{>20\text{ns}}$) も計算した。ガンマ線照射により得られた $Q_{>20\text{ns}}$ と Q_{total} の関係のプロットを図 6a (光電子増倍管#1 の結果) に示す。この図の解析では、2つの光電子増倍管の信号共に正しくトリガーがかかり、電流波形の大きさがオシロスコープのダイナミックレンジを越えておらず、かつ、総電荷量と遅発成分電荷量が正しく計算されたイベントを選別してプロットしてある。総電荷量と遅発成分電荷量との間には比例関係があり、回帰直線を求めた。また、この回帰直線を平均としてデータ点がどのように分布するかを示したのが図 6b である。分布は正規分布に近く、標準偏差を求めた。

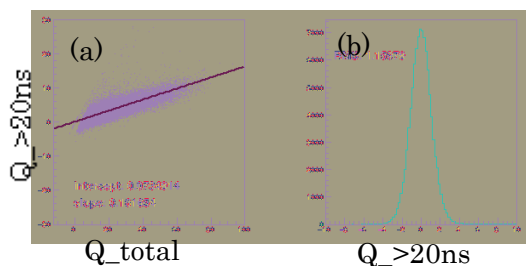


図 6 光電子増倍管#1 のガンマ線照射時の(a) Q_{total} と $Q_{>20\text{ns}}$ の関係と(b)回帰直線の周りでのデータ点の分布

高速中性子のイベントであれば、ガンマ線のイベントと比べ、遅発成分の電荷量が大きくなることを期待される。そのため、図 6a で求めた回帰直線よりも上側に位置するイベントは高速中性子と判定できる。高速中性子を照射した場合における総電荷量と遅発成分電荷量の関係を図 7 に示す。ガンマ線を照射した場合と異なり、2本の帯状のデータクラスタが確認でき、中性子とガンマ線によるイベントがそれぞれ認識できる。図 7 の赤線は図 6 で求めた回帰直線から $Q_{>20\text{ns}}$ が大きいほうへ 3σ 離れた境界であり、赤線より

も上を中性子、下をガンマ線と判定した。

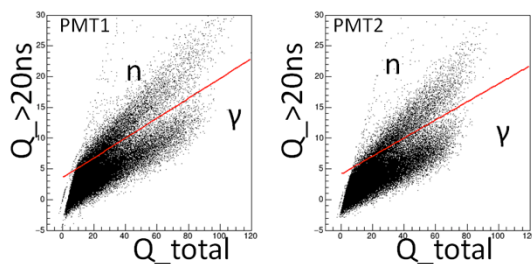


図 7 総電荷量と遅発成分電荷量のプロット。光電子増倍管#1 (左)、光電子増倍管#2 (右)

(2) 高速中性子の散乱位置の決定

4-(1)で中性子とガンマ線の弁別ができたので、光電子増倍管#1 と光電子増倍管#2 の両方で中性子と判定されたイベントを取り出し、それぞれの Q_{total} の関係を調べたものを図 8 (左)、ガンマ線と判定されたイベントの結果を図 8 (右) に示す。中性子イベント、ガンマ線イベントの両方共に、若干のゆがみはあるが概ね $y=x$ を軸として線対称となっていることがわかる。この事実は、中性子・ガンマ線の散乱位置に依存して、光電子増倍管の出力電荷の値が変化していることを示しており、また、光電子増倍管#1 と#2 の出力の和は高速中性子のエネルギー付与量が計算できることを示している。

このように比較的大容量のセンサにおいて、中性子とガンマ線を弁別しながら、中性子の散乱位置とエネルギー付与量を MCS 方式で決められることが実証できた。

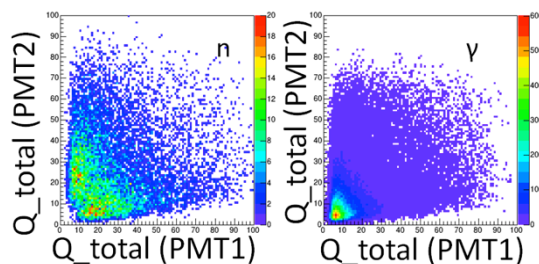


図 8 光電子増倍管 1 と 2 の総電荷量のプロット。中性子と判定されたイベント (左)、ガンマ線と判定されたイベント (右)

(3) まとめと今後の展望

3次元位置有感型高速中性子検出器開発のために実証用のセンサを開発した。動作実験の結果、50 mm 角の比較的大きな体積をもつ液体シンチレータを中性子・ガンマ線弁別をしながら、1次元だけではあるが高速中性子散乱位置情報が得られることを実証した。

研究開発当初は 50mm 角程度の有感面積をもつ光センサは光電子増倍管のみが利用できる状態であり、光電子増倍管は大きいため MCS のスタックやアレイ化ができなかった。しかし、現時点では数 cm 角の薄い MPPC 方式の光センサが入手可能になり、光電子増倍管を大面積 MPPC に置き換えることで、MCS の原理に基づいて、有感体積が大きくかつ信号線数が少なく、コンパクトな 3次元位置検出器が構成できることが期待できる。さらに MCS をスタック・アレイ化することで、コンプト

ンカメラ方式の高速中性子カメラを実現してゆきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 小林進悟、北村尚、内堀幸夫、白川芳幸、新しい高速中性子イメージングセンサの基礎開発、第9回技術と安全の報告会報告集、放射線医学総合研究所、pp01/46-49 (査読無)

〔学会発表〕(計2件)

1. 小林進悟、北村尚、内堀幸夫、白川芳幸、新しい高速中性子イメージングセンサの基礎開発、平成26年度「第9回技術と安全の報告会」、平成27年3月10日、放射線医学総合研究所(千葉県・千葉市)
2. 小林進悟、植村優、内堀幸夫、柴村英道、長谷部 信行、立方体状シンチレータによる大容量3次元放射線検出器の基礎研究、第60回応用物理学会春季学術講演会、平成25年3月27日-30日神奈川工科大学(神奈川県・厚木市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 進悟 (Shingo Kobayashi)
放射線医学総合研究所
研究基盤センター・研究員
研究者番号：10434325

(2) 連携研究者

内堀 幸夫 (Yukio Uchihori)
放射線医学総合研究所
企画部・経営戦略室長
研究者番号：50342879

柴村 英道 (Eido Shibamura)
早稲田大学・理工研・客員研究員
研究者番号：30100605