

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600142

研究課題名(和文) GM管の様に使いやすい高速中性子サーベイメータの開発についての基礎研究

研究課題名(英文) Basic study on development of easy-handling fast-neutron survey meter like as a GM tube.

研究代表者

納富 昭弘 (Nohtomi, Akihiro)

九州大学・医学(系)研究科(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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管で観測されるパルス立ち上がり時間特性が、中性子入射の場合とガンマ線入射の場合で異なる特徴的な振る舞いを示す現象に着目し、両者を弁別することにより簡便な高速中性子サーベイメータに応用する為の基礎的検討を行った。

ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の検出感度のエネルギー依存性を調べたところ、数100keV以上の領域でのエネルギー応答特性が「レム応答」にほぼ一致することが分かった。その換算係数は約4.4 nSv/カウントであり、高速領域において市販レムカウンターの約1/5～1/50程度の感度を有する、中性子線量当量率測定器として動作することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Basic response characteristics of a polyethylene-lined recoil proton proportional counter have been examined, aiming at developing an easy-handling fast-neutron survey meter like as a GM tube; especially the pulse rise-time discrimination property between fast neutrons and gamma-rays.

It has been revealed that energy-dependence of sensitivity of the polyethylene-lined recoil proton proportional counter indicates so called "Rem response property" for fast neutrons from a few hundred keV to a few MeV. The conversion factor is estimated to be about 4.4 nSv/neutron, whose sensitivity corresponds to 1/5～1/50 of the commercially-available neutron rem counters. In conclusion, the polyethylene-lined recoil proton proportional counter is usable for an evaluation of the fast neutron dose-equivalent.

研究分野：放射線計測学

キーワード：高速中性子 ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管 バイズの定理 レム応答 中性子線量当量 エネルギー依存性

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、エネルギーが 100keV~10MeV 付近の高速中性子は他の種類の放射線に比べて生物学的効果が著しく大きく、単位物理線量あたりの生物効果の指標となる放射線加重係数は 10~20 (X線の10倍~20倍)に達する。このため、医療放射線防護の観点から、高速中性子の発生を検知する技術は重要であると考えられる。

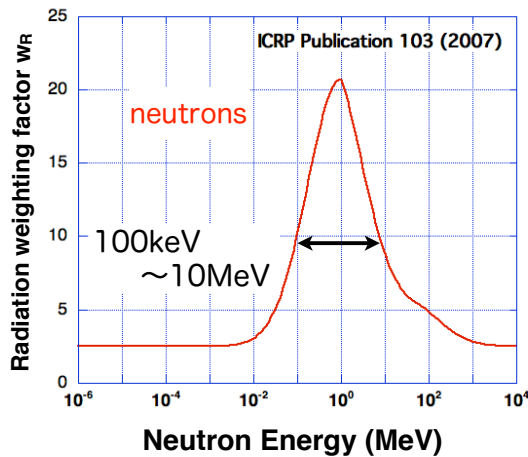


図1 中性子の放射線加重係数の中性子エネルギー依存性¹⁾

(2) 汎用の中性子線量測定器としては、レムカウンターの使用が一般的である。レムカウンターは熱中性子から高速中性子までの広いエネルギー領域に対して感度を持ち、その線量当量を直接的に読み取ることができるという点で優れている。しかしながら、一般的に高価であり、また、ポリエチレンなどの中性子減速材(モデレータ)が付属しているためその重量は数 kg 程度を超え、持ち運びに不便である。このため、医療現場に常備して使用することには、困難がある。

2. 研究の目的

(1) 我々は上記のレムカウンターの欠点に鑑み、これを克服する新たな検出器の必要性を感じ、その候補として、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管による、より直接的な高速中性子の可能性について検討を行った。反跳陽子比例計数管は、主として中性子標準場等で高速中性子フルエンス率を測定することなどに用いられているが、ベータ・ガンマ線用 GM 管の様な、一般的なサーベイメータへの応用はなされていない。このため「独創的な発想に基づく、挑戦的で高い目標設定を掲げた芽生え期の研究」であると考え「挑戦的萌芽研究」に応募した。

(2) 本研究は、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管で観測される立ち上がり時間特性が、中性子入射の場合とガンマ線入射の場

合で異なる特徴的な振る舞いを示す現象に着目し、両者を弁別することにより簡便な高速中性子サーベイメータに応用する為の基礎的検討を行うことを目的とする。

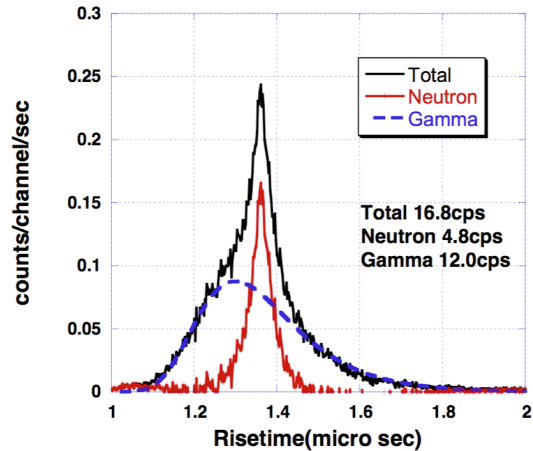


図2 ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の典型的なパルス立ち上がり時間分布

(3) 高速タイムデジタイザを用いて個々の出力パルス波形を測定し、中性子・ガンマ線弁別の機構とその信頼性についての検討を行う。この結果を利用して、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の中性子検出効率のエネルギー依存性を明らかにする。

(4) ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管を汎用の高速中性子サーベイメータとして利用するには、逐次型のオンライン波形弁別処理が不可欠であると考え。そこで、逐次型のベイズの定理の本手法への適用と改良を検討する。

3. 研究の方法

(1) 高速タイムデジタイザを用いて、RI 中性子源 (Cf-252 など) と標準ガンマ線源 (Co-60, Cs-137 など) による照射で得られる個々のパルス波形を観測し、パルス立ち上がり時間に基づく中性子線・ガンマ線弁別の信頼性についての検討を行った。また、立ち上がり時間波高変換器を利用した場合の結果との比較を行った。

(2) 異なる計数ガスを封入した二種類のポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管を用いて、ふたつの検出器の応答特性を比較し、計数ガスが中性子線・ガンマ線弁別に与える影響を調べた。

(3) 粒子輸送モンテカルロコード PHITS を用いて、計数管内に生じる放射線のエネルギー付与の定量的な検討を行った。

(4) 測定された波形データを、オンラインにて弁別処理するために、逐次比較型のベイズの定理に基づくアルゴリズムを作成し、その適用性について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 異なる種類の封入ガスを充填した2本の反跳陽子比例計数管 [LND-28220:メタン(100%)及び LND-2823:アルゴン(90%)+メタン(10%)]に対するパルス出力特性を調査し比較を行った。その結果、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管に見られるパルス立ち上がり時間特性が、使用する封入ガスに依存しない一般的な現象であることを明らかにした。また、粒子輸送モンテカルロコードPHITSを用いて計数管ガスに生じる放射線のエネルギー付与の定量的な評価を行った。Cf-252の自発核分裂から放出される中性子を入射した場合には、メタンガス中の相互作用により発生する反跳陽子と、内張されたポリエチレンから放出される反跳陽子のエネルギー付与に寄与する割合が、ほぼ同程度であることが分かった。

(2) 米 Agilent Technologies 社製の高速タイムデジタイザ U1071A-004 を用いて波形取得実験を行い、中性子とガンマ線の分離性能の信頼性について検討した。U1071A-004は入力信号を8bit、最大200MS/sでサンプリングすることが可能である。また、2つの入力チャンネルを持つので、異なる信号を同時に取得することが可能である。個々のパルス波形の自動観測システムを構築し、立ち上がり時間と波高値の関係を解析したところ、立ち上がり時間は波高値の低い信号で広がりを示した。また測定系のシミュレーション計算を行った結果、これが電子回路雑音の寄与であることが確かめられた。

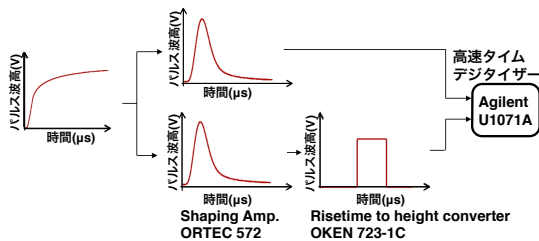


図3 パルス波形測定系概要

(3) 以上の知見をもとに、波形弁別された中性子成分に対するガンマ線の影響を見積る方法を考案した。これを用いて、英国・国立物理学研究所 (National Physical Laboratory: NPL) の中性子標準場でいくつかの RI 中性子源を用いて取得した実験データを補正・評価し、中性子エネルギーに対するポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の検出感度のエネルギー依存性を明らかにした。

図4には、今回評価されたポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管 LND-28220 の検出感度のエネルギー依存性を、他の市販のレムカウンターと比較して示してある。ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の検出下限エネルギーは数 10keV 程度と見積もられるが、

今回の評価結果は、450keV以上の領域でのエネルギー応答特性がフルエンス・線量当量換算曲線(いわゆる「レム応答」)にほぼ一致することを示している。すなわち、換算係数を評価してみると、中性子の1カウントは約4.4 nSvに対応しており、計数率を直接的に線量当量率に変換することが可能である。以上をまとめると、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管は高速領域において、比較的低感度の市販レムカウンターの約1/5程度、比較的高感度の市販レムカウンターの約1/50程度の感度を有する、高速中性子線量当量率測定器として動作することが明らかになった。

表1 NPLの中性子線源の諸元ならびに、中性子検出感度の算出方法

$$\text{検出感度} = \frac{r[\text{counts/s}]}{\phi[\text{neutron}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]}$$

中性子線源	平均エネルギー [MeV]	中性子計数率 [cps]	中性子フルエンス率 [1/cm ² /s]
²⁴¹ Am-Be	4.5	169.7	1.661 × 10 ³
²⁴¹ Am-B	3.0	25.1	2.992 × 10 ²
²⁴¹ Am-F	1.3	8.5	9.090 × 10 ¹
²⁴¹ Am-Li	0.45	6.8	1.506 × 10 ²

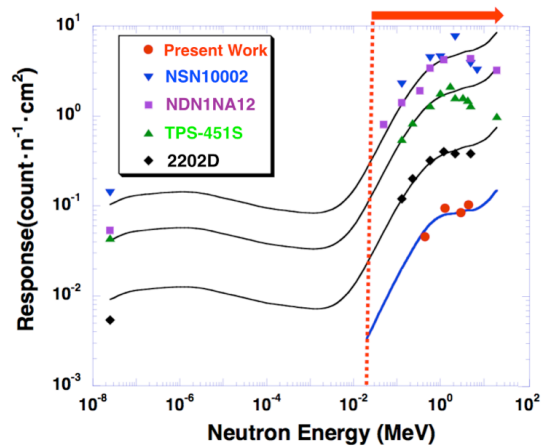


図4 ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の中性子検出感度のエネルギー依存性と典型的なレムカウンターのそれとの比較

(4) 以上で見出された現象を、簡易高速中性子サーベイメータとして応用するために、ベイズの定理にもとづいた、逐次処理型繰り込み式データ処理手法を新たに開発した。ベイズの定理は最適化のための繰り返し計算を必要とせず、計算が単純であるため、逐次評価が可能である。また、原理的に解の非負性が保証されており、スペクトル情報の蓄積も必要としない。以上のことから、ベイズの定理はサーベイメータの読み値を表示するのに適していると考えられる。

ベイズの定理は、事象がただひとつの確率密度関数に従っている場合に、そのパラメータを推定する問題に適している。しかし、事

象が複数の確率密度関数に従っている場合に、それらの強度比を推定する問題には適さない²⁾。本研究も高速中性子線と γ 線の強度比を求める問題であるためそのままでは適用は難しい。そこで、式(1)に示す事後確率集積法を用いた。これはベイズの定理を拡張して定式化したものであり、重み係数 α により結果の変化量を変えることができる。本研究では本公式をさらに改良し、重み係数 α の値を動的に変化させることにより、収束時間(カウント数)を短縮することを試みた。

$$P(H_1|D) = \left(P(H_1) + \alpha \frac{P(D|H_1)P(H_1)}{P(D|H_1)P(H_1) + P(D|H_2)P(H_2)} \right) / (1 + \alpha) \quad \text{式(1)}$$

本研究では、結果 D をパルス立ち上がり時間、原因 H を高速中性子線またはガンマ線の検出とした。また、各種パラメータに関しては以下のように設定した。

① 事前確率

前の計算で得られた事後確率をベイズ更新によって更新したものを用いた。ただし1カウント目の事前確率は、理由不十分の法則より、高速中性子線、ガンマ線を等しい割合で検出しているとして計算を行った。

② 尤度

高速中性子線、ガンマ線それぞれのパルス立ち上がり時間分布を、総計数が1になるよう正規化して用いた。

③ 重み係数 α

重み係数 α による結果の変化を確認するため、以下の4種類で計算を行った。

- [a] 小さい場合 ($\alpha=0.001$)
- [b] 大きい場合 ($\alpha=0.1$)
- [c] 段階的に変化させた場合
- [d] 連続的に変化させた場合

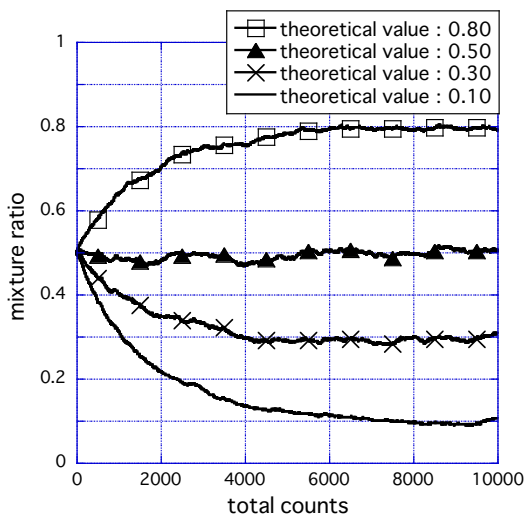


図5 固定重み係数にて評価された事後確率 ($\alpha=0.001$ [a])

重み係数を小さい値 ($\alpha=0.001$) に固定した場合[a]の計算結果を図5に示す。横軸は総計数、縦軸は高速中性子線の混合割合の計算結果である。これより、数千カウント以上のデータが得られた場合、確実に精度の高い結果が得られるが、数百カウントのデータが得られた時点では理論値へ十分には近づいていないことが分かる。サーベイメータは少ない計数で結果を算出する必要がある。したがってこの方法は、サーベイメータの読み値の表示には適していないと判断される。一方、重み係数が大きい場合は、計算精度は低いが少ないカウント数で理論値付近の値を算出できることが分かった。そこで、それぞれの利点を生かし、少ない計数値で精度の高い結果を得るため、重み係数を次のように段階的に小さくする計算を試した[d]。

- $\alpha = 0.1$ ($1 \leq \text{total counts} < 100$)
- $\alpha = 0.01$ ($100 \leq \text{total counts} < 400$)
- $\alpha = 0.001$ ($400 \leq \text{total counts} \leq 500$)

この結果、図6に示すように、はじめの方の重み係数が大きい部分の計算で理論値付近の値を算出し、中程度の重み係数から小さな重み係数へと移行していくことで、500カウント以下の少ない情報にて、精度の高い結果を得ることができた。

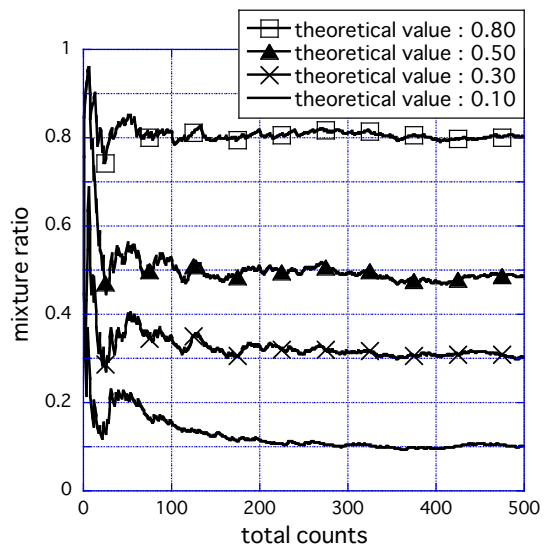


図6 重み係数を動的に変化させて評価された事後確率 [d]

ベイズの定理と最小二乗法の特徴の比較を、表2に示す。ベイズの定理は最適化のための繰り返し計算を必要とせず、計算が単純であるため、逐次評価に適している。また、原理的に解の非負性が保証されており、スペクトル情報の蓄積も必要としない。以上のことから、ベイズの定理は本研究で検討したサーベイメータの読み値を表示するアルゴリズムとして有用であると言える。

表 2 ベイズの定理と最小二乗法の特徴比較

	Bayes' theorem	least squares fit
Complication of calculation	Simple	Complicated
Sequential evaluation	Possible	Difficult
Non-negative values	○	×
Storage of spectrum	Necessary	unnecessary

<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) 岩崎 信 放射線 Vol. 21 No. 3 (1995) pp. 12-26

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 松尾亮子、納富昭弘、栗原凌佑、若林源一郎、 “反跳陽子比例計数管によるオンライン n/γ 分離測定へのベイズの定理の応用” 放射線 (査読有) 2016 (to be published)
- ② Akihiro Nohtomi, Fukai Toyofuku, Ayaka Sato, Syuji Nagamine and Genichiro Wakabayashi, “An observation of the pulse-shape property of a polyethylene-lined proportional counter for fast neutrons and gamma-rays” Proceedings of the 27th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses (査読有) KEK Proceedings 2013-9, 2014, 51-62
- ③ Daiki Nakanishi, Akihiro Nohtomi, Ryoji Tanaka and Genichiro Wakabayashi, “A method of neutron-energy evaluation based on the position distribution of recoil protons” Progress in Nuclear Science and Technology (査読有) Volume 4, 2014, 653-656

[学会発表] (計 7 件)

- ① 松尾亮子、納富昭弘、栗原凌佑、若林源一郎、反跳陽子比例計数管によるオンライン n/γ 分離測定へのベイズ推定法の応用、第 111 回日本医学物理学会、2016/4/17 (神奈川県・パシフィコ横浜)

- ② Ryoko Matsuo, Akihiro Nohtomi, Ryosuke Kurihara and Genichiro Wakabayashi, “Application of Bayesian inference to the on-line n/γ discrimination with a recoil-proton proportional counter”, The 11th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring, 2015/12/6 (Oarai, Ibaraki)

- ③ 松尾亮子、納富昭弘、栗原凌佑、若林源一郎、反跳陽子比例計数管によるオンライン n/γ 分離測定へのベイズ推定法の応用、第 27 回応用物理学会・放射線夏の学校、2015 8/5 (和歌山市・和歌浦温泉)

- ④ 松尾亮子、納富昭弘、栗原凌佑、若林源一郎、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の出力パルス波形の解析、第 9 回九州放射線医療技術学術大会、2014/11/1 (北九州市・北九州国際会議場)

- ⑤ Ryosuke Kurihara, Akihiro Nohtomi and Genichiro Wakabayashi, “Rise-time distributions of a polyethylene-lined recoil proton proportional counter for fast neutrons and gamma-rays”, The 7th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, 2014/9/27 (BEXCO, Busan, Korea) 【Oral Presentation Award 受賞】

- ⑥ 栗原凌佑、納富昭弘、若林源一郎、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の出力パルス波形の観測、第 26 回応用物理学会・放射線夏の学校、2014 8/6 (高知市・桂浜)

- ⑦ 栗原凌佑、納富昭弘、ポリエチレン内張型反跳陽子比例計数管の出力パルス波形の解析、第 8 回九州放射線医療技術学術大会、2013/11/24 (佐賀県・佐賀市文化会館)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

納富 昭弘 (NOHTOMI, Akihiro)
九州大学・大学院医学研究院・准教授
研究者番号：80243905

(2) 研究分担者

若林 源一郎 (Wakabayashi, Genichiro)
近畿大学・原子力研究所・准教授
研究者番号：90311852