

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560055

研究課題名(和文) 指向性比例計数管とデジタル波形処理による加速器中性子源のスペクトル評価

研究課題名(英文) Evaluation of neutron energy spectrum from accelerator neutron source using directional proportional counter and digital pulse processing

研究代表者

宮丸 広幸 (MIYAMARU, HIROYUKI)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80243187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年注目されている医療用中性子の計測のため、本研究では円筒形の比例計数管の内部にホウ素粉末を含有した薄い板を軸方向に複数枚並べた特徴ある検出器を開発した。設計段階の多数のシミュレーションの結果、中性子のエネルギーの違いが管内部に細かく分けられた各領域における検出率の差として現れることが分かった。また、この測定結果に対しベイズ推定法を適用することで中性子のエネルギー分布が推定できることを明らかにした。さらにホウ素濃度に勾配を付けると応答特性が改善し高い領域の中性子検出に有効であった。この検出器とベイズ推定法を組み合わせることで広いエネルギー範囲の中性子の測定が可能になることが示された。

研究成果の概要(英文)：A special cylindrical proportional neutron counter has been designed and developed to measure neutrons with wide energy range from a few eV to 1 MeV. A lot of thin plastic disks containing boron nitride powder were placed at 1 cm interval inside a counter to make an individual detection volume. Monte Carlo calculations repeated in a design cycle of the detector clarified that a neutron energy spectrum could be estimated by measuring the difference of neutron detection yield at each detection position. Bayesian estimation was employed to evaluate a neutron energy spectrum from the counting rate at each position. Manipulation of a density gradient of boron for each disc changed the instrumental function and reproduced the energy distribution of neutrons around 1 MeV. Combining with Bayesian estimation and the newly developed detector was found to be effective to evaluate neutrons in a wide energy area.

研究分野：放射線計測、放射線物理

キーワード：放射線計測 中性子

1. 研究開始当初の背景

近年“ほう素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT)” があたらしいがん治療法として目覚ましく発展している。BNCTは患者にホウ素薬剤を投与してがんの部位にホウ素を集積させた後、腫瘍に対して外部から高線量の熱外中性子を照射し、ホウ素と中性子との核反応により生成する高いエネルギーを持った荷電粒子によって細胞レベルのサイズで選択的にがん細胞を破壊できるという特徴を持っている。現在は原子炉で小規模に行われているが、近い将来に中性子発生に加速器を利用した“加速器駆動型 BNCT” が実現しようとしている。このがん治療に用いられる中性子のエネルギーは 0.5eV~10keV 程度の“熱外”と呼ばれるエネルギー領域に限られる。ところが加速器を用いて中性子発生させる場合には、そのままでは治療に用いることができず、適切なビームコリメーターや減速材を用いて中性子のエネルギーを調整する必要がある。さらに現在、提案されている多様な様式の加速器中性子源からは多様なエネルギー分布をもった中性子が発生することが予測できる。加速器を用いた BNCT を実現させるためには熱外中性子とその周辺の領域のエネルギースペクトルを正確に測定・評価することが BNCT の拡大のために非常に重要である。元来、熱外領域の中性子の計測は困難であることに加え、高線量のガンマ線も存在するため、中性子エネルギースペクトルのリアルタイム計測は非常に困難であった。特に BNCT という新しく中性子を用いた放射線医療において中性子検出器の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では BNCT を目的として将来用いられる現在開発中の加速器中性子源を想定し、その中性子場の計測、特に熱外領域を中心としたエネルギースペクトルの測定を可能にすべく、位置敏感型比例計数管を改良した専用の中性子検出器の製作とデジタル波形処理の手法を組み合わせることで検出手法を高度化し、より高性能の熱外中性子計測手法の確立を目指した。

3. 研究の方法

熱外中性子スペクトル評価のためヘリウム 3 ガスを用いた円筒形の比例計数管を用いた検出器の開発をこれまで進めてきた。本研究では比例計数管の通常の使い方と異なり、遮蔽材料やコリメーターの工夫により、円筒軸形状の片側から円筒軸に並行になるよう測定対象の中性子を入射させる。このとき、エネルギーが低い中性子は検出器前方のガス領域でヘリウム 3 ガスとの反応が起き、高いものはより奥側まで反応領域が広がる。このため中性子のエネルギー分布の情報は検出器の円筒軸方向の深さの違いによる反応率、つまり深さによる計数率の変化となって

現れる。図 1 にはヘリウム 3 ガスを充填した円筒形比例計数管に片側軸方向から 100eV の中性子を左から入射させた際の反応分布の計算例である。

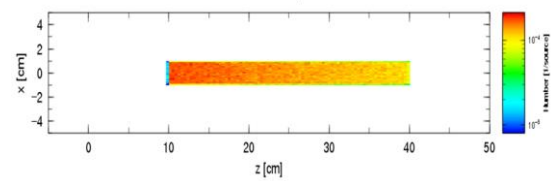


図 1 円筒形比例計数管に片側から中性子 (100eV) を入射させた際の反応分布の計算例

この位置情報と計数率の関係を開発した特殊な位置敏感型比例計数管で検出し、中性子スペクトルを推定するのが本手法の特徴的な測定原理となる。特に信号のデジタル波形処理を用いて比例計数管からの信号をデジタルで取得することで、より正確な位置情報を得ることを目指した。また反応位置とその計数率から中性子エネルギースペクトルを推定する際にはスペクトル型ベイズ推定法を用いることを特徴としている。

4. 研究成果

研究の初期段階において、ヘリウムガスの世界的な市場価格が大幅に上昇するという予測できない状況が生じた。中性子の検出効率を上げるにはヘリウム 3 ガスの充填圧力を数気圧まで上昇させなければならないが、本手法で必要な円筒形状では体積が大きくなること、開発段階でのガスの消費量を考えると想定していた高圧のヘリウム 3 ガスを用いた位置敏感型比例計数管の作成は困難となった。この不都合を克服し、かつ本研究で提案する測定原理を生かすための新しい検出方法の検討を行った。その結果、比較的安価な PR ガスを用い、中性子との反応する物質としてヘリウム 3 の代替として固体のホウ素粉末を用いることを検討した。新しい検出器では円筒形比例計数管の内部にホウ素を含有したプラスチック製の円筒薄板 (厚み 1mm 弱) を 1cm 程度の間隔ごとに複数枚管内に並べる。この区切られた空間をビンと呼ぶことにする。ホウ素と中性子との核反応により発生する α 線による信号はビンごとに位置検出することでヘリウム 3 ガスによる中性子検出と同等の感度や検出効率を目指した。

まず始めに、新たに考案したホウ素板アレイを用いた比例計数管について中性子検出に関するシミュレーションを進め、その応答特性を詳細に調べた。シミュレーションではモンテカルロシミュレーションコード PHITS を使い、核データファイルは

JENDL4 を用いた。ホウ素は固体であるために、密度の関係からヘリウムガスに比べて圧倒的の反応率が高くなるということがわかっている。このため、薄板のホウ素濃度が高くなりすぎると、中性子の吸収が著しいため、設計では板におけるホウ素の濃度を調整した。初期のシミュレーションでは天然存在比のホウ素を含む窒化ホウ素を薄板の材料と仮定し板の厚みを 100 ミクロンとした。この場合の中性子とホウ素の反応率は熱外中性子束が 10^5 n/cm^2 としたとき、およそ 1000cps 程度の計数率になることが計算によって分かった。BNCT の治療に用いる際の中性子束の強度は 10^9 n/cm^2 程度であるため、発生強度を下げた状態での測定が必要であることが分かった。この板を 11 枚用いることを想定し、ホウ素 10 と中性子との反応による α 線の生成量を T-product タリーを用いて各ビンごとに計算させた。図 2 にホウ素板配列による反応率を入射中性子のエネルギーを変化させて計算した結果である。入射中性子のエネルギーの範囲は 1eV から 1MeV を 9 つのエネルギービンに分けたものを入射させている。

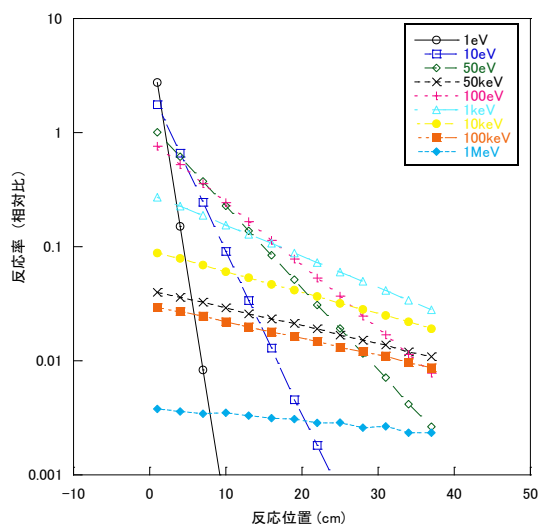


図 2 入射中性子のエネルギーの違いによる反応位置ごとの反応率の変化 (計算値)

図で分かる通り、中性子のエネルギーが低い場合は検出器の前方に配置されたホウ素板にのみ反応に限られ、中性子のエネルギーの上昇とともに深部の反応率が上がるということ予測通りの結果が得られた。この位置による反応率の違いを検出器応答関数として、中性子エネルギースペクトルの推定に用いる。ただし 50keV 以上の中性子入射では応答関数の傾きはほぼ等しくなり、収量差のみの違いとなった。これでは高いエネルギー領域のスペクトル推定に影響が出ることが分かった。次に得られた応答関数から中性子エネルギースペクトルを推定する手法としてスペクトル型ベイズ推定法を用いることを以下のような手順に従い検討した。

- (1) p-Li 中性子源と特定の減速材を用いた模擬体系を想定した体系を計算コード PHITS 上で構築し、放出される中性子スペクトル (エネルギー 11 群) を計算で得た。これを推定元となる中性子エネルギースペクトル (元スペクトル) とした。
- (2) 元スペクトルを先の検出器応答関数に代入し計数率と位置との関係を表す位置分布スペクトルつまり検出器の出力を得た。
- (3) この出力と応答関数を基にスペクトル型ベイズ推定法を適用して元のエネルギー分布の推定を行った。
- (4) 推定された中性子スペクトルを元と比較し、ベイズ推定法の有効性を調べた。

スペクトル型ベイズ推定法は以下の式で表される。

$$E_i^{(n+1)} = \sum_{j=1}^m H_j \frac{R_{ij} E_i^{(n)}}{\sum_i R_{ij} E_i^{(n)}}$$

$E_i^{(n)}$: n 回試行後の中性子エネルギー分布
 R_{ij} : 応答関数
 H_j : 位置分布スペクトル

ベイズ推定では中性子エネルギー分布の初期値から上式を繰り返しあてはめることで推定が進む。初期値は均一分布を想定し、また検出器の測定誤差を勘案して相対誤差 10%~30%程度のランダム誤差を位置分布スペクトルに入れたものを使ってベイズ推定を 50 回行った結果を図 3 に示す。

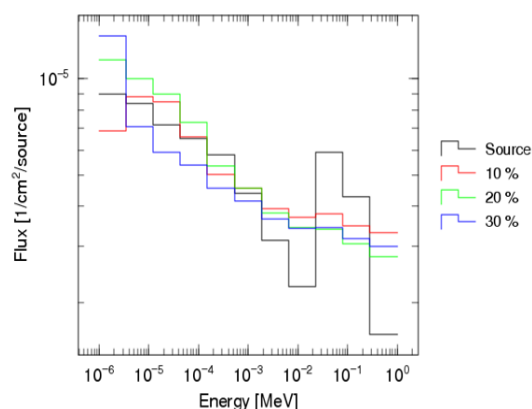


図 3 ベイズ推定された中性子エネルギースペクトル

図の Source が推定元のスペクトルで、他に色分けされて誤差の割合の違いによる推定値が示されている。これを見ると 1keV 以下

中性子エネルギー領域は良く一致しているが、高いエネルギー領域が再現されないことが明らかとなった。この結果を受けて、より高エネルギー部まで推定が可能となるよう、薄板の枚数を増やす改良を行った。しかしながら、シミュレーションでは 20 枚まで板を増加させたが、ベイズ推定の結果は 10keV を超える中性子束のスペクトル推定は困難であった。その原因として入射中性子のエネルギーが高くなると、配置された板の位置による変化が小さくなるためと考えられる。これは中性子とホウ素の核反応が高エネルギー側では $1/v$ 法則から外れるため、特徴が出にくいことが原因である。つまり、板を増やすだけでは推定の精度は上がらないことが数多くのシミュレーションした結果から明らかになった。

そこでこの問題を克服するための検出器開発を更に進めた。これまでのシミュレーションでは検出器内に挿入されるホウ素板については同じものを使うことを前提としていた。これを改良して板の枚数も 17 枚に増加させ、さらに検出器の深部に配置されたホウ素板 2 枚だけを感度を 10 倍程度に引き上げる工夫を行った。これは実際的にはホウ素濃度を上げれば対応できる。この場合、応答関数は図 4 のように非常に特徴的な形状を示すようになる。

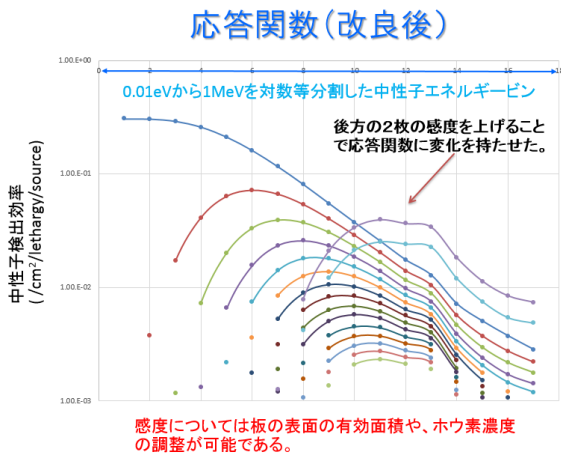


図 4 ホウ素濃度を变化させた検出器の応答関数の計算結果

この応答関数では後方の 2 枚の検出効率を意図的に増加させているが、その影響で他の部分との応答に差別化が可能となり、10keV 以上の高エネルギー中性子が入射していることを判別することができるようになった。ホウ素板の枚数を増やしすぎても検出器全長が長くなるため、遮へいの問題が生じる。このため板の配列を 1cm 間隔とし全体を 30cm 以内に納めるように設計した。このような応答関数をもつ検出器における中性子エネルギー

ギースペクトルの推定において、前述のようなベイズ推定での検証を行った結果が図 5 である。

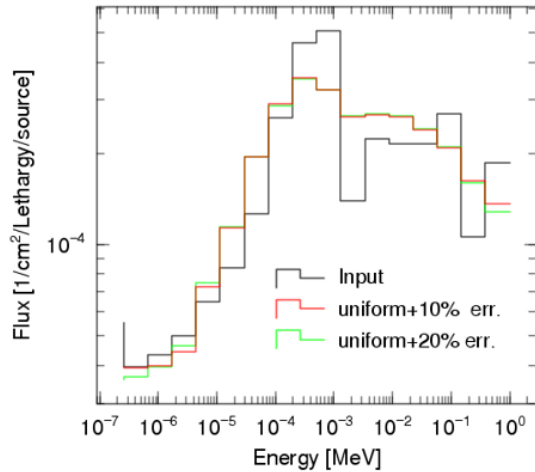


図 5 ベイズ推定された中性子束分布の比較

図では Input が元の中性子スペクトルで、推定後のスペクトルは位置分布スペクトルにランダム誤差 10%を加えて推定させたものが赤、20%加えたものが緑である。この元の中性子スペクトルは 1keV から 10keV という幅の狭いエネルギー領域で大幅な変化があるようなものを用意したが、このような中性子スペクトルは通常の一つの線源からの中性子の減速過程を反映したエネルギースペクトルとは異なるものである。このような複雑なスペクトル形状に対するベイズ推定の効果を検証した。結果は急激な谷間のような変化は再現できてきないが、1keV 付近までの上昇や、その後の形状が概ね一致した。特に特出すべきは、これまで熱外領域 (10keV 以上) を超える高いエネルギー領域での推定が困難であったが、この改良した応答関数を持つ検出器により 1MeV 程度までのスペクトル推定が可能となった。これらの結果については応用物理学会等にて発表を行い、成果を公表した。

以上の詳細なシミュレーション結果をふまえ、実機の検出器の設計と製作を行った。図 6 には作成した比例計数管を示す。外側はステンレス製、内部はアルミ製の円筒形状となっている。ホウ素粉末含有のプラスチック素材はエポキシ系樹脂に窒化ホウ素粉末を混ぜたものを用い、中心部の心線を通す穴を設けた 1mm 厚の円盤状のものを作成した。これを支持するためのテフロン棒により 17 枚の板を支持する形状である。前後に信号取り出しのための端子を設け、PR ガスを流しながら計測するためのガス流入口は検出器の上蓋に配置されている。



図 6 製作した比例計数管

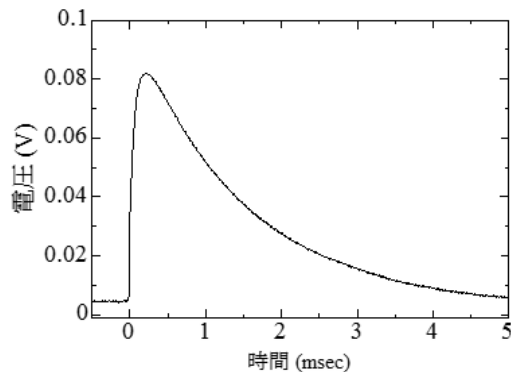


図 7 比例計数管とデジタル処理で得られた α 線パルス波形

デジタル波形処理に関しては高計数率に対応するため高スループットの処理が求められる。このため、本研究の提案時からプリアンプからの出力信号を高速 ADC によりデジタル化し、その波形情報を高速デジタル処理が可能な FPGA を用いることを提案しており、本研究では高速デジタイザーと LabVIEW FPGA モジュールを用いることでデジタル波形処理を実現させた。FPGA は一般的にそのプログラム作成において専門性が高く、煩雑だが本研究では LabVIEW FPGA を用いることで波形弁別、フィルター処理等のデジタル処理の仕組みを効率よく構築することが可能となった。

これら作成した検出器とデジタル処理の検証として、アメリカシウム線源からのアルファ線の応答を調べ、その得られたパルス波形を図 7 に示す。波形は初期の電子による電荷収集により急峻な立ち上がりを見せ、その後イオンの移動によるパルス波高の上昇が $200 \mu\text{sec}$ 程度の時間で進んでいることを示している。この結果により信号の立ち上がりトリガーとして $200 \mu\text{sec}$ 程度の時間幅で波高計測し、その後はリセットすることで高計数率に対応できることが明らかとなった。

折しも、本研究期間は東日本震災と福島第一原子力発電所事故に伴う原子炉安全基準の見直しから、研究所や大学の原子炉施設は

一斉の停止を余儀なくされている時期と重なり、高い線量の中性子場としての研究利用環境が得られなかった。また加速器中性子源については様々な企業と大学での開発競争の途上という事情もあり、いずれも開発段階途上であった。このため高い中性子束でのスペクトル測定に関する実験はできなかったが、今後環境が整い次第行う予定である。

本研究の成果のまとめとして、BNCT で将来用いられる現在開発中の加速器中性子源を想定し、その中性子場の計測、特に熱外領域を中心としたエネルギースペクトルの測定を可能にするためのホウ素板アレイを内部に配置した位置敏感型比例計数管の設計をモンテカルロシミュレーション PHITS を用いて設計した。ホウ素濃度の変化を与えることで検出器応答関数を変化させ、ベイズ推定法を組み合わせることで 50keV を越え 1MeV 付近までの中性子エネルギースペクトルの測定が可能となった。またデジタル波形処理により高計数率に対応した計測が可能となった。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 宮丸広幸 他、位置敏感型比例計数管とデジタル処理による熱外中性子検出器の開発 2、2014 年 9 月 18 日、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学 (北海道 札幌市)
- ② 宮丸広幸 他、位置敏感型比例計数管とデジタル処理による熱外中性子検出器の開発、2013 年 3 月 30 日、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、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

宮丸 広幸 (MIYAMARU, Hiroyuki)
大阪府立大学・地域連携研究機構・准教授
研究者番号：80243187