OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Development of A Novel Wide Dynamic Range Epi-Thermal Neutron Spectrometer for Boron Neutron Capture Therapy
Author(s)	藤原, 悠
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105464
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（藤　原　悠）	
論文題名	Development of A Novel Wide Dynamic Range Epi-Thermal Neutron Spectrometer for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT のための広ダイナミックレンジ熱外中性子スペクトル測定手法の開発)

論文内容の要旨

本論文は、ホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy、 BNCT）に用いる熱外中性子領域（0.5 eV - 10^4eV）のエネルギースペクトルの実験的評価手法についてまとめたものである．エネルギースペクトルは、BNCT において患者への被ばく量及び治療時間を決定するために重要であり、従来手法では困難な 5 桁に及ぶスペクトルの評価を 1 度の実験で高精度に測定することを目的とした。本論文は、^{3}He 位置敏感型比例計数管（Position Sensitive Proportional Counter, PSPC)、 PSPC と放射化箔の同時利用、そして中性子用イメージングプレート（IP-ND）を用いた計測手法を提案しており、全 7 章から構成されている。

第 1 章は序論で、放射線治療の歴史から BNCT の位置づけ、その原理、開発・治療実績についてまとめ、工学的側面から見た BNCT の課題へと論を展開し、これらを基に設定した研究目的について述べた。

第 2 章は理論の紹介で、中性子の検出原理、測定装置、そしてエネルギースペクトル評価手法の unfolding について整理し、熱外中性子領域におけるスペクトル評価手法についても従来手法の試みを詳述した。

以下、第 3 章から第 5 章は PSPC に関する内容であり、第 6 章は IP-ND に関する内容の報告である。

第 3 章では、PSPC によるスペクトル推定精度向上のため、入射中性子をビーム状に整形する中性子源の開発を実施した。著者の研究室が所有する中性子源に基づいて、ビーム状中性子源を得るためのコリメータについて、材質、長さ、線源との距離、穴径をシミュレーションによって検討し、それぞれポリエチレン、70 cm、3 m 、7 mm Φ と定まった。得られた中性子源をもとにシミュレーションで PSPC での検出からスペクトル導出までのプロセスを模擬し、スペクトルの評価精度が改善することを明らかにした。一方で、コリメータ導入による検出中性子数の減少などを考慮して、ビーム状中性子源に頼らない汎用的な測定システムの必要性を論じた。

第 4 章では、コリメータを用いない代わりに、unfolding に必要な応答関数について、PSPC 周辺に配置する構造材の寄与を考慮したものとするため、シミュレーション計算によって解析的に応答関数を導出する手法を検討した。実験体系を模擬して応答関数を計算し、先述の手法でスペクトルを評価した結果、測定範囲を 5 keV まで拡張させることに成功した。さらに、遮蔽材として用いたコンクリートに含まれるナトリウムの共鳴反応がスペクトル評価精度の向上に大きく影響していることを明らかにした。

第 5 章では、従来のスペクトル評価手法の箔放射化法と PSPC を組み合わせ、放射化と吸収反応による異なる物理法則に基づく相補的な推定精度向上の可能性について検討した。10 種類の材料から多重箔を構成し、先述の手法で応答関数を導出、スペクトル推定を実施し、100 keV まで測定範囲を拡張することに成功した。よって、材料およびその寸法を最適化することで、両者を併用して高精度なスペクトル推定が実施できることを明らかにした。

第 6 章では、IP-ND のスペクトロメータへの応用のため、熱外中性子の測定可能性について、京都大学複合原子力科学研究所の熱外中性子場にて実験的に検証した。熱外中性子の吸収性能を有するホウ素ブロックを複数枚フィルターとして取り付けた IP-ND を設置し、それらの反応率の違いからスペクトルを推定することができないか検討した。照射実験の結果、ホウ素設置領域における IP の画素値・発光量の減少が確認された。シミュレーションで実験体系を模擬し解析した結果、ホウ素領域における中性子量が減少していたため、減速材フィルターとしての機能を確認したほか、中性子量と発光量の線形性を確認した。これはシミュレーションの結果から実験結果を再現できることを意味するとともに、原理的には、スペクトロメータとしての機能を有することを明らかにした。

第 7 章では、これらの知見をまとめ、これらの成果によって期待される成果について論じた。

全体として、エネルギースペクトルの評価精度を向上させるためのメカニズムを明らかにしており、BNCT に用いる熱外中性子のエネルギー帯をカバーするスペクトロメータを開発することができたと結論付けた。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　藤原　悠　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	村田　勲
	副 査　教授	佐藤　文信
	副 査　准教授	秋山　庸子
	副 査　教授	吉橋　幸子（名古屋大学）

論文審査の結果の要旨

本論文は、ホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy、 BNCT）に用いる熱外中性子領域(0.5 eV～10^4eV）のエネルギースペクトルの実験的評価手法についてまとめたものである．エネルギースペクトルは、BNCTにおいて患者への被ばく量及び治療時間を決定するために重要であり、従来手法では困難な 5 桁に及ぶスペクトルの評価を 1 度の実験で高精度に測定することを目的としている。本論文は、^{3}He 位置敏感型比例計数管（Position Sensitive Proportional Counter, PSPC)、 PSPC と放射化箔の同時利用、そして中性子用イメージングプレート（IP-ND）を用いた計測手法を提案しており、全 7 章から構成されている。

第 1 章は序論で、放射線治療の歴史から BNCT の位置づけ、その原理、開発・治療実績についてまとめ、工学的側面から見た BNCT の課題へと論を展開し、これらを基に設定した研究目的について述べている。

第 2 章は理論の紹介で、中性子の検出原理、測定装置、そしてエネルギースペクトル評価手法の unfolding について整理し、熱外中性子領域におけるスペクトル評価手法についても従来手法の試みを詳述している。

以下、第 3 章から第 5 章は PSPC に関する内容であり、第 6 章は IP-ND に関する内容の報告である。

第 3 章では、PSPC によるスペクトル推定精度向上のため、入射中性子をビーム状に整形する中性子源の開発を実施している。著者の研究室が所有する中性子源に基づいて、ビーム状中性子源を得るためのコリメータについて、材質、長さ、線源との距離、穴径をシミュレーションによって検討し、それぞれポリエチレン、70 cm、3 m 、7 mmΦ と定まっている。得られた中性子源をもとにシミュレーションで PSPC での検出からスペクトル導出までのプロセスを模擬し、スペクトルの評価精度が改善することを明らかにしている。一方で、コリメータ導入による検出中性子数の減少などを考慮して、ビーム状中性子源に頼らない汎用的な測定システムの必要性を論じている。

第 4 章では、コリメータを用いない代わりに、unfolding に必要な応答関数について、PSPC 周辺に配置する構造材の寄与を考慮したものとするため、シミュレーション計算によって解析的に応答関数を導出する手法を検討している。実験体系を模擬して応答関数を計算し、先述の手法でスペクトルを評価した結果、測定範囲を 5 keV まで拡張させることに成功している。さらに、遮蔽材として用いたコンクリートに含まれるナトリウムの共鳴反応がスペクトル評価精度の向上に大きく影響していることを明らかにしている。

第 5 章では、従来のスペクトル評価手法の箔放射化法と PSPC を組み合わせ、放射化と吸収反応による異なる物理法則に基づく相補的な推定精度向上の可能性について検討している。10 種類の材料から多重箔を構成し、先述の手法で応答関数を導出、スペクトル推定を実施し、100 keV まで測定範囲を拡張することに成功している。よって、材料およびその寸法を最適化することで、両者を併用して高精度なスペクトル推定が実施できることを明らかにしている。

第 6 章では、IP-ND のスペクトロメータへの応用のため、熱外中性子の測定可能性について、京都大学複合原子力科学研究所の熱外中性子場にて実験的に検証している。熱外中性子の吸収性能を有するホウ素ブロックを複数枚フィルターとして取り付けた IP-ND を設置し、それらの反応率の違いからスペクトルを推定することができない

か検討している。照射実験の結果、ホウ素設置領域における IP の画素値・発光量の減少が確認されている。シミュレーションで実験体系を模擬し解析した結果、ホウ素領域における中性子量が減少していたため、減速材フィルターとしての機能を確認したほか、中性子量と発光量の線形性を確認している。これはシミュレーションの結果から実験結果を再現できることを意味するとともに、原理的には、スペクトロメータとしての機能を有することを明らかにしている。
第 7 章では、これらの知見をまとめ、これらの成果によって期待される成果について論じている。
以上のように、本論文はエネルギースペクトルの評価精度を向上させるためのメカニズムを明らかにしており、BNCT に用いる熱外中性子のエネルギー帯をカバーするスペクトロメータを開発したと言える。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。