

学 位 論 文 題 名

高性能スポレーションパルス中性子源の
中性子工学に関する研究

学位論文内容の要旨

中性子散乱は凝集体（液体や固体）の原子・分子レベルでの構造およびそれらの運動を調べる上で最も重要な手法の一つである。中性子散乱実験は原子炉または加速器中性子源を用いて行われている。原子炉は技術的問題から中性子強度増が困難となっているが、加速器中性子源の方は中エネルギー陽子（0.5～3 GeV）を用いた核破砕（スポレーション）反応による強力中性子源（スポレーション中性子源）が作られるようになり、最近では原子炉に代わるものとして重要視されてきている。既に、0.5 GeV 陽子を用いる小中強度施設、0.8 GeV 陽子を用いる大強度施設が日本におよび欧米で各2施設稼働している。しかし、大強度施設では陽子ビーム出力の増加分に見合う中性子強度増が得られていないのが現状である。更に強度の高いスポレーション中性子源の建設が我国および欧米で計画されており、既存の施設に比べはるかに効率の高い中性子源を開発することが強く望まれている。

本研究は高性能スポレーションパルス中性子源実現のために、減速材集合体（ターゲット・減速材・反射体からなるシステム）の中性子工学について実験および数値解析による検討を行い、その最適化を行うとともに、特に高性能パルス冷中性子源を開発することを目的としている。

第1章では物質研究における中性子の有用性とスポレーション強中性子源の必要性及びその現状、さらにこれまでの研究と本論文の目的について記述する。

第2章では中性子散乱実験の概要および中性子散乱研究用減速材集合体の性能を評価するための指標として用いられる利得指数について述べる。

第3章ではスポレーションターゲットに関する検討を数値計算によって行う。陽子エネルギーを0.5から3 GeV まで変えた場合に中性子収量がどうなるかを、ターゲット材料、形状、サイズを種々変えて検討した。ターゲット物質として、核分裂性物質である劣化ウランと種々の非核分裂性物質について調べ、後者のなかではタングステン、金が良い特性を持つこと、有効なターゲットサイズおよびターゲットと減速材の最適配置を明らかにした。また、減速材から放出される低

エネルギー中性子強度の陽子エネルギー依存性を調べ、これまで不利と考えられていた 3 GeV でも有用であることを示した。

第 4 章では熱中性子減速材について検討する。従来から用いられてきているウィング配置減速材の中性子特性を測定し、スラブ配置のものと比較した。ウィング配置減速材の最適厚さはスラブ配置と比べてかなり違っており、これまでスラブ配置のデータをもとに設計を行ってきた傾向があったが、ウィング配置のデータにもとづく最適設計を行う必要があることを明らかにした。また、ウィング配置減速材の性能は総合的に判断すると、スラブ配置と比べてそれほど劣っていないことが示された。従って、実験室内の放射線レベルが非常に高くなることが避けられないスラブ配置を、強度を上げる目的のためだけに無理に採用することは得策ではないと考えられる。新しい型の配置であるフラックストラップ型減速材について、数値計算によって種々最適化を行った。この減速材の強度はウィング配置のものと同程度であるが、より高い強度を得るための種々の工夫を取り入れることができ、ウィングと比較して約 1.5 倍まで強度が上げられることを示した。この値はスラブ配置と同程度の強度であり、しかも放射線レベルを上げるという欠点がないため、垂直陽子ビーム入射と組み合わせたフラックストラップ型は有用な配置であることが明らかとなった。

減速材の中性子特性をより深く理解するために、減速材における中性子輸送過程を、ソース分布と減速材中での中性子輸送過程に分けて数値解析により調べた。その結果、ウィング及びスラブ配置減速材における中性子特性を支配する要因が明らかとなった。ここで得られた知見は、体系の異なる減速材集合体における中性子輸送過程を理解する上でも役立つと考えられる。

第 5 章では反射体の効果を実験及び数値計算によって調べ、最適材料について検討する。反射体効果は減速材の大きさ、ターゲットで発生する中性子の空間分布によって影響を受けることが明らかとなった。これによって、これまでそれぞれの実験あるいは計算で矛盾した結果が報告されていた反射体の最適化について、統一した説明ができるようになった。一般に、反射体材料としては減速が弱くマクロ断面積が大きい物質が良い特性を示すことを明らかにした。放出中性子の時間分布は、反射体によっては大きな影響を受けず、デカップラーをつけた場合には変わらないことが分かった。具体的な反射体材料としてはこれまで考えられていなかった鉄、ニッケルなどが良い特性を持っており、デカップリングエネルギーが低い場合には、従来用いられてきたベリリウムが良い反射体であることが示された。

第 6 章では高性能パルス冷中性子源の開発研究について述べる。現在最も中性子特性が優れていると考えられている 20 K 固体メタン冷中性子源は、放射線損傷のために強力中性子源では使用

できない。それに代わるものとしてデカップリング型の液体水素減速材が使用されているが、冷中性子強度が非常に弱い。そのため、より強度の高い冷中性子源の開発が強く望まれている。その候補として、プレモデレータ付カップリング型液体水素減速材を新たに提案し、実験的にその特性を調べた。種々の最適化研究の結果、冷中性子強度を従来型の液体水素減速材に比べて約6倍まで上げることに成功した。パルス幅の広がりとは従来型の2~3倍、ピークの高さは約2倍である。冷中性子実験用に新たに利得指数を定義し、この減速材の性能を評価した結果、典型的な冷中性子実験である中性子小角散乱及び高分解能散乱実験において従来型よりもそれぞれ6倍及び2倍高い性能が得られることが分かった。固体メタン冷中性子源との比較でもその性能は優れていた。このことから、本研究で開発された新冷減速材システムは大強度スポレーションパルス中性子源にとって非常に有用なものであることが明らかになった。

第7章は総括で、本論文のまとめと、ここで得られた結果を用いることによって、同じ加速器を用いても既存の施設に比べて総合性能が約10倍優れた施設を作ることができることを述べる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	山崎	初男
副査	教授	成田	正邦
副査	教授	榎戸	武揚
副査	教授	渡辺	昇

中性子をプローブとして、中性子線の回折や散乱により固体・液体を研究する方法は、光やX線等をプローブとする方法とは異なった独特の情報が得られる点で非常に有用である。本論文は、中性子散乱により固体・液体の原子・分子レベルの構造と原子・分子の動きを調べるために必要とする中性子源のうちで、陽子加速器を用いたスポレーション反応によるパルス中性子源の中性子工学設計に関するものである。この種の中性子散乱実験には、非常に高い中性子束の低エネルギー中性子源を必要とし、従来、原子炉よりの中性子または線形電子加速器による中性子が用いられてきたが、更に強度の高い中性子源を求めてスポレーションパルス中性子源へ向かっているのが世界の趨勢である。

この中性子源は、加速器から出力される陽子のスポレーション反応により中性子を発生する

ターゲットと、発生した速中性子を減速して低エネルギーにする減速材、減速材の周りを取り囲む反射材からなり、これらを合わせて減速材集合体を構成する。この集合体に対する要請は、同じ陽子ビーム入力に対する低エネルギー中性子の収量をできるだけ多く、放出時間幅の拡大を抑えて、かつ、バックグラウンド放射線が低いように供給することである。既存のスプレーション中性源では、減速材集合体に関する中性子工学的研究が系統的に行われていないために、十分に最適化されていない嫌いがあった。本論文は、ターゲット、減速材、反射材について、それらの大きさ、空間的配置、材質が出力パルス中性子の強度、放出時間特性にどのように影響するかを中性子輸送計算により系統的に調べ、要所について線形電子加速器による中性子を用いた実験を行い、計算結果の裏付けを行った結果を述べている。

以下に著者の研究成果を列記する。

(1) ターゲットに関して、核分裂性物質のウラン、非核分裂性物質のうちで特性の優れていたタングステンにつき、ターゲットの形状、サイズと中性子収量との関係、及びターゲットと減速材の最適配置を明らかにした。また、中性子収量の陽子エネルギー依存性を調べ、従来の定説と異なり、3 GeV までは収量の増加に有効であることを示した。

(2) ターゲットに対する減速材の配置の仕方の区別であるウィング配置とスラブ配置につき、減速材の中性子特性を測定し、減速材の最適厚さが両者で異なることを示した。これは、ウィング配置減速材の最適設計に有用なデータを提供する。また、減速材中の中性子輸送の数値解析を行い、ウィング、スラブ両配置における中性子特性の違いはターゲットにより減速材中に形成される速中性子ソースの空間分布の差で説明できることを示した。

(3) 新しい型の減速材配置であるフラックストラップ型に対し、数値計算によって、種々の最適化を行い、ウィング配置より優れていることを示した。

(4) 反射体効果を実験及び数値計算によって調べ、反射体効果は減速材の大きさや減速材・反射材中での速中性子ソース(ターゲットにより形成される)の空間分布により影響を受けること、反射体材料としては減速が弱くマクロ断面積が大きい物質が良い特性を示すことを明らかにした。

(5) エネルギーが0.005eV 以下の中性子を供給する高性能パルス冷中性子源について、プレモデレーター付カップリング型液体水素減速材を新たに提案し、実験的にその特性を調べ、格段の性能向上が期待できることを示した。

これを要するに、著者は、スプレーションパルス中性子源の最適設計に必要な広範な知見とデータを系統的な実験と数値解析により得たもので、これを用いるならば、同じ能力の陽子加速器で

従来より高性能な中性子源が実現可能と考えられる。陽子加速器のコストが極めて大きいことを考慮するならば、著者は、中性子散乱実験を利用する物質研究（生物物質を含む）の進展に大きく寄与すると言う意味で非常に効用の高い、放射線源工学上の優れた成果を得たものである。

よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。