大強度加速器パルス中性子源用減速材集合体の 高性能化に関する研究

学位論文内容の要旨

現在、日本とアメリカで MW 級パワーの陽子加速器を用いたスプレーション反応によるパルス中性子源が建設中である。このパワーは既存の最大パワーの施設の 6 倍以上となる。このような大幅な加速器出力の増加に伴い、様々な新しい問題が生じてくる。減速材集合体は、主にターゲット、減速材、反射体および減速材周囲に取り付ける中性子吸収材デカップラーから構成されるが、減速材においては、減速材材料の放射線損傷の問題がある。反射体においては、反射体内における発熱密度の増加に伴う冷却、および放射化が問題となる。そして、デカップラーにおいては、 B_4C デカップラーの He 生成と組成変化が指摘されている。本研究においては、これらの問題を考慮した上で、MW という条件において優れた中性子ビームを供給するため、減速材集合体の高性能化に関する研究を行なった。

減速材：MW 級中性子源では、冷減速材として液体水素が使用される。これは、放射線損傷の問題の為に最も優れた減速材であるメタン減速材が使用できないからである。しかしながら、液体水素減速材はメタンに比べ水素数密度が低いなどの欠点があり、メタン減速材に比べ強度が 1/3 以下になる。そこで、水素減速材の特性を向上させる方法として、パラ水素減速材の利用を提案した。これを実証するため、中性子測定を測定し、シミュレーション計算の結果と比較を行なった。実験と計算には多少の差が見られたが、水素のオルソ・パラ比に対して同じ傾向を示したので、計算での中性子源の最適化が可能であるという見通しが出来た。その結果、結合型減速材は、減速材の厚さを増やすことで中性子強度が増加し、メタン減速材と同程度の中性子強度になり、また、非結合型減速材は、5cm で最も特性が優れており、総合性能としてメタンと同程度、最も悪い場合でも 1/2 の性能を引き出す事ができた。

デカップラー：これまでの中性子源では、デカップラーとして、カドミウムと B_4C が使用されている。しかしながら、カドミウムでは、デカップリングエネルギー(E_d)が低く (0.4eV) 減速材から放出される中性子のパルス (放出時間分布) が広く減衰も遅い。そして、検討の結果 1eV 程度の E_d が必要であると言う結論に達した。1eV の E_d を実現できるデカップラーとしては、 B_4C が一般的であるが、大強度化に伴いデカップラーの発熱や組成変化の為に MW 級中性子源での使用が困難である。そこで、デカップラー材料として新たに AIC、ユウロピウム、サマリウム-銀合金について検討した。AIC は銀、インジウム、カドミウムの合金で、カドミウムの吸収と、インジウム、銀の共鳴吸収を利用している。また、ユウロピウムとサマリウムはそれ自身で $E_d=1eV$ を実現できて、核変換後も高い吸収断面積を有しているため、長期間の使用が可能である。これらをデカップラーとして使用

した場合の中性子特性を比較したところ、どの材料を用いてもほぼ同じ中性子特性が得られた。また、時間変化については、AIC デカッパラーは 1MW で 6 年程度使用すると、Cd の燃焼の為に中性子吸収特性に変化が現れるが、減速材から放出される中性子のパルス特性には殆ど変化は現れない。また、Eu、Sm デカッパラーについては、中性子透過特性の時間変化は無視出来る程度であり、6 年以上継続して使用することが可能である。特に Eu は、厚さ 1mm で 1eV のデカッピングエネルギーを実現出来るので、発熱量も低く出来る。

また、従来のデカッパラーシステムとは異なるパルス特性の改善方法として、マルチデカッパラーを提案した。パルス波形、特にパルスの裾を改善するためには、通常高いデカッピングエネルギーが用いられるが、この場合パルスのピーク強度まで減少させてしまう。そこで、パルスの裾の原因となる、反射体内で多数回散乱し、そこに長時間留まった中性子を効率よく減衰させることを目的に、反射体内に複数層のデカッパラーを配置する。これにより、通常の高エネルギー以上のエネルギーの中性子で、反射体内で減速した中性子の減衰を促進した。結果として、鉛の様な非減速型の反射体材料の場合に、パルスのピーク強度はそのままに、減衰を早くでき、特性が改善できることが分かった。

反射体：従来のパルス中性子源における反射体は、反射体内の発熱密度が低く、反射体冷却は簡便なものであった。しかしながら、MW 級の中性子源を考えた場合、発熱密度は数 W/cm^3 に達する事が予想されるので、反射体の健全性を維持するため冷却が重要になる。これまでに行なわれてきた反射体研究は、反射体冷却水などの影響を考慮しない研究が殆どであった。MW 級中性子源においては、反射体冷却のための反射体構造材料及び冷却水の影響を考慮する必要があるため、水冷構造まで考慮した反射体研究が必要である。

反射体構造材料としては、SUS とアルミ合金を比較した。結合型減速材においては、反射体構造材を省略した物理モデルに比べ、どちらの場合も中性子強度は減少した。特に SUS を用いた場合の変化が大きく、10%以上中性子強度が減少した。アルミ合金の場合には、約 5%の減少であった。非結合型減速材においては、SUS を用いた場合の中性子強度の減少が 3%程度と小さく、アルミ合金の場合には、5%程度減少であった。これは、SUS は中性子散乱断面積も大きいですが、比較的中性子吸収の強い物質であり、結合型減速材においては、デカッパラーに似た働きをし、一方、アルミ合金は中性子散乱断面積が小さいので、鉛や鉄などの通常の反射体に比べボイドに近いからだと考えられる。

反射体の冷却構造について検討を行なうにあたり、各反射体材料を用いた場合の反射体内の発熱密度を評価し、十分に冷却可能な冷却水流路を設定した。反射体材料としては、ベリリウム、鉛、鉄、銅、ニッケル、水銀について検討を行なった。1MW の場合、反射体内の発熱密度はニッケルの場合に最も高く最大 $3.9W/cm^3$ であった。これらの数値を元に反射体の冷却構造をそれぞれの反射体材料について決定し、中性子特性を比較したところ、結合型減速材においてはベリリウム及び鉛反射体が他の材料に比べ 10%以上高い中性子強度を示した。非結合型減速材においては、鉛反射体が最も良く、他の材料に比べ 10~15%高い強度を示した。他の材料については、程度の差はあるが概ね 5%の範囲内に収まっているので、殆ど違いは無いと言える。

本研究では、加速器出力 1 MW のスプレーンパルス中性子源について、中性子工学的側面から研究を行なった。その結果、減速材については、パラ水素濃度依存のパルス中性子特性を世界で始めて測定し、液体水素減速材の特性改善方法を示した。また、計算コードの信頼性について検証した。デカッパラー及び反射体についても、今後の中性子源開発において参考になる検討結果を示した。これらの結果の一部は、現在日本で建設中の JSNS 中性子源計画にも取り入れられている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鬼 柳 善 明
副 査 教 授 澤 村 貞 史
副 査 教 授 澤 村 晃 子
副 査 教 授 島 津 洋 一 郎

学 位 論 文 題 名

大強度加速器パルス中性子源用減速材集合体の 高性能化に関する研究

中性子の利用は、物質科学のみならず広く産業応用の領域へ広がってきており、科学・技術を支える重要なプローブの一つとして認識されている。このような背景のもと、現在、日本とアメリカで MW 級パワーの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が建設中である。MW のパワーは、日本の既存施設の約 330 倍、世界最高性能のイギリスの施設の 6 倍以上であり、このような大幅な加速器出力の増加に伴い、中性子源設計においても様々な新しい問題が生じている。

加速器中性子源の減速材集合体の主たる構成要素は、中性子発生ターゲット、中性子減速材、デカップラー（減速材周囲に取り付ける中性子吸収材）および反射体である。減速材においては、減速材材料の放射線損傷の問題があり、デカップラーにおいては、ボロン系デカップラーの組成変化、また、反射体においては、反射体内における発熱密度の増加に伴う冷却水量の増加などが指摘されており、これらの影響による中性子特性の劣化が問題となっている。本研究においては、これらのことを考慮した上で、MW という条件において、特性の優れた中性子ビームを安定に供給するために、減速材集合体の高性能化に関する研究を行なったものである。

本論文で得られた成果を要約すると以下のようなになる。

(1) 冷中性子減速材として、最も優れた減速材物質であるメタン減速材が、このようなハイパワーのもとでは、放射線損傷のために使用できなくなる。そのため、損傷に強い液体水素の使用が余儀なくされるが、今までの研究では、メタンに比べ強度が大幅に減少することが知られている。そこで、水素減速材の特性を向上させる方法として、パラ水素減速材の使用を提案し、その中性子特性の測定を初めて行なうとともに、シミュレーション計算も実施し、その有用性を検証した。その結果、大強度実験用の結合型減速材では、減速材の厚さを増やすことで中性子強度を増加させることができ、メタン減速材と同程度となること、また、高分解能実験用の非結合型減速材

においても、減速材から放出される中性子の時間分布を大幅に改善でき、総合性能としてメタンと同程度の性能を引き出すことが可能であることを明らかにした。

(2) 高分解能実験用の非結合型減速材で使用されるデカップラーについては、これまで使用されていたボロン系材料は、中性子吸収によるヘリウム生成による材料特性の劣化やボロンの減少による中性子特性の変化が問題となっていた。これに代わって、長期間に渡って中性子特性が変化しないビームを供給できる材料を見出すために、新しい材料、AIC（銀、インジウム、カドミウムの合金）、ユウロピウム、サマリウム-銀合金について検討を行なった。その結果、いずれの材料も5年以上の長期にわたって、中性子特性が変化しないことを明らかにした。特に、独自に提案したユウロピウムは、発熱量も他に比べて小さいため、熱除去の観点からも優れていることを明らかにした。

また、中性子特性を向上させるために、全く新しいデカップラー配置として、反射体内に複数層のデカップラーを配置するマルチレイヤーデカップラーを提案した。これを用いることによって、鉛の様な非減速型の反射体材料の場合に、中性子放出時間分布（中性子パルス）のピーク強度をあまり減らさないうえ、パルスの減衰だけを早くできることがわかり、中性子特性の改善が行えることを明らかにした。

(3) 反射体に関する研究は、これまで反射体中の構造材や冷却水配管などの影響を考慮しない研究が殆どであった。MW級中性子源においては、これらの割合が増えるため、実際の体系を出来るだけ忠実に反映したモデルでの中性子特性の検討が必要となる。構造材としてアルミとステンレスを、反射体材料としてベリリウム、鉛、鉄、銅、ニッケル、水銀について検討を行なった。冷却水配管も各反射体材料に対して個々に最適化した体系について中性子特性を比較し、結合型減速材においては鉛およびベリリウム反射体が他の材料に比べ10%以上高い中性子強度となること、非結合型減速材においては、鉛反射体が最も良く、他の材料に比べ10~15%高い強度を示すことを明らかにした。

ここで、得られた結果は現在計画中の MW 級スポレーション中性子源の設計にとって重要な知見であり、その成果は実際の設計にも取り入れられている。

以上要するに、本論文は大強度加速器パルス中性子源の減速材集合体について、中性子工学的側面から研究を行ない、その高性能化に関して有用な知見を得たものであり、原子力工学の発展に貢献すること大である。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。