

学位論文題名

Neutronic Design of a Coupled Hydrogen Moderator
for High-intensity Pulsed Neutron Sources

(大強度パルス中性子源用結合型水素モデレータの中性子工学設計)

学位論文内容の要旨

現在、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構は、共同で陽子加速器と組み合わせた大強度の短パルス核破砕中性子源の建設を行っている。本研究は、この中性子源に導入される結合型モデレータについて、最適な中性子特性を獲得することを目的として実施されたものである。核破砕中性子源は陽子ビームが直接入射するターゲットと、ターゲットで発生した高速中性子を減速する冷モデレータ、これらを取り囲む反射体等により構成されている。モデレータには、高強度を最優先とした結合型、パルス幅の狭さやパルステイル減衰の早さを優先した非結合型やボイゾン板入り非結合型がある。それぞれのモデレータから得られる中性子ビームは、核破砕中性子源を取り囲む 23 台の実験装置に提供され、それぞれ物質や生命体の構造解析等に利用される。実験装置のうち 11 台が結合型モデレータからの中性子を利用する予定となっているが、結合型モデレータからの中性子ビームは、広い角度範囲に提供する必要がある。一般にモデレータ表面の法線方向からの角度が大きくなるに従って、中性子特性は劣化する。そこで、本研究では、法線方向のビームを対象に結合型モデレータの中性子特性を最適化した後、広角度へのビーム取り出しでのビーム劣化の程度を評価し、劣化の程度を最小にする方策を検討した。

モデレータ材として使用する水素の分子には、2 原子のスビンの方向が平行なオルソ水素と、反平行なパラ水素とがある。パラ水素の全断面積は 60 meV 以下で急激に低下し、10 meV 付近ではオルソ水素の約 1/50 となるなど、両者の全断面積は低エネルギー領域で大きく異なっているため、パラ水素濃度は、モデレータの中性子特性に大きな影響を及ぼす。従って、最適なモデレータの厚さは、パラ水素濃度に大きく影響されると考えられる。そこで、パラ水素濃度とモデレータ厚さを関数として、時間積分中性子強度 (15 meV 以下)、パルス特性 (2, 10, 50 meV) の変化を評価した。その結果、100% パラ水素の場合に、最大の時間積分中性子強度と 2、10 meV のパルスピーク強度が得られることが分かった。しかしながら、時間積分中性子強度はモデレータ厚さ (220 mm 程度まで) とともに増加するが、最大のパルスピーク強度が得られるモデレータ厚さは、120 mm (2 meV) ~ 100 mm (10 meV) であった。また、50 meV では、モデレータが薄いほど (40 mm 以下)、高いパルスピーク強度が得られた。評価対象とした中性子特性によって、最適なモデレータ厚さが異なっていることが分かった。仮にモデレータ厚さを 140 mm とした場合、最大到達値に対する割合は、時間積分中性子強度、2、10、50 meV パルスピーク強度で、それぞれ、87%、98%、96%、88% と妥当な値であることが分かった。

さらに、パラ水素を 100% とし、モデレータの最適な幅 (高さも同様) の検討を行った。時間積分中性子強度は、モデレータの幅が中性子ビーム取り出し孔の幅と同じときに最大となり、モデレータ幅が大きくなるに従って小さくなることが分かった。この結果は、前述の厚さの影響評価で得られた、厚いほど高い時間積分中性子強度が得られる、という結果と正反対である。そこで、モデレータ表面における中性子強度の空間分布を求めたところ、モデレータ中心部で強度が最も低く、プリモデレータに近い周辺部に向かって強度が増加していることが分かった。モデレータ幅を大きくした場合、この周辺部が中性子ビーム取り出し孔から見えなくなるために、強度が減少して

いたものと考えられる。このような特異な中性子強度分布は、モデレータに流入する熱中性子の平均自由行程が短いこと、及び、低エネルギーで散乱断面積が極端に小さくなることが原因であると考えられる。しかしながら、これまでに同様の報告例がないことから、実験を行い、計算と同様の分布が得られることを確認した。実験では、位置敏感型ヘリウム3検出器を8本組として利用し、モデレータと検出器の間に、ピンホールを設けて、モデレータ表面上の強度分布を測定した。得られた強度分布は、計算による予測と同様に、プリモデレータに近い部分で高くなっていることが分かった。このことから、計算による予測は十分に信頼できるものであると判断した。

また、水素モデレータ周辺に配置する軽水プリモデレータについて、最適な厚さを検討した。最大の時間積分中性子強度が得られるプリモデレータの厚さは、ターゲット側で15 mm、その他の部分で10 mmであった。パルスピーク強度の観点では、エネルギーが高くなるほど最適なプリモデレータ厚さは薄くなることが分かったが、上述のプリモデレータ厚さを採用した場合であっても、パルスピーク強度の犠牲は、2 meVで1%、10、50 meVで7%であった。さらに、プリモデレータ拡張の効果を評価した。鉛反射体では、プリモデレータをビーム取り出し方向に200 mm延長することにより、時間積分中性子強度が1.6倍になることが分かった。しかしながら、ベリリウム反射体では、プリモデレータ拡張による強度の増加は、1%程度であり、大きな効果が見込まれないことが分かった。

上記の検討により求められた、最適なモデレータ、及びプリモデレータの大きさを元に、時間積分中性子強度、取り出し角度、及び取り出し角度範囲の関係を評価した。取り出し角度の最大値が取り出し角度範囲であり、これに応じて中性子ビーム取り出し孔の大きさ、即ち反射体欠損が大きくなる。評価の結果、中性子強度は、取り出し角度に対して余弦分布を示しており、角度範囲に比例して角度平均強度が低下することが分かった。取り出し角度の増加に伴う強度低下の一因として、法線方向から見込んだモデレータは長方形であるが、ある角度から見込むと平行四辺形となが、モデレータ幅が小さいため、平行四辺形の一部が欠けてしまうことが挙げられる。一方でモデレータ幅を大きくすると、前述のように、法線方向の中性子強度が低下することから、全体の強度が最も大きくなるモデレータ幅の選択が必要となる。検討の結果、最適なモデレータ幅は120 mmであることが分かったが、取り出し角度が大きい場合に、中性子強度の空間分布も不利になることが分かった。法線方向から25°に向けて取り出されるビームでは、取り出し面の半分では法線方向と遜色ない中性子強度が得られているものの、残り半分で強度が大きく低下していることが分かった。このような分布は、実験装置の設計に大きな制約を生じることとなる。そこで、強度分布を平坦化するため、円筒型のモデレータを提案し、中性子特性を評価した。その結果、取り出し角度範囲全体での時間積分中性子強度は直方型と同程度で、強度の空間分布が平坦化されることが分かった。また2、10 meVではパルスピーク強度が増加することが分かった。

以上の研究により、円筒型の結合型モデレータを用いることにより、広い角度範囲で全体の特性を大きく劣化させることなく、ビームを提供することが可能であることが分かった。本研究で提案した結合型モデレータは、上記の核破砕中性子源で採用され、現在製作が進められている。

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 古 坂 道 弘

学 位 論 文 題 名

Neutronic Design of a Coupled Hydrogen Moderator for High-intensity Pulsed Neutron Sources

(大強度パルス中性子源用結合型水素モデレータの中性子工学設計)

現在、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構は、物質・生命科学等の研究を推進するため、これまでに無い大強度の陽子加速器を用いた短パルス核破砕中性子源の建設を共同で行っている。本研究は、この中性子源に導入される結合型モデレータについて、高性能な中性子特性を達成することを目的として実施されたものである。

この核破砕中性子源は、陽子ビームが直接入射するターゲットと、ターゲットで発生した高速中性子を減速する冷モデレータ、これらを取り囲む反射体等により構成されている。モデレータには、高強度を最優先とした結合型や、モデレータ周りに中性子遮蔽体を設置して狭いパルス幅とパルステイル減衰の早さを優先させる非結合型、よりパルス幅を狭くするために中性子吸収体をモデレータ内に挿入したタイプの非結合型がある。これらのモデレータからの中性子ビームは 23 台の実験装置に提供されるが、そのうち 11 台が結合型モデレータを利用する予定である。従って、結合型モデレータはこの実験施設の成否の鍵を握る重要なモデレータである。

大強度中性子源で唯一使用可能な冷モデレータ材は水素分子で、これにはオルソ水素とパラ水素があり、両者の全断面積は低エネルギー領域で大きく異なっている。そのため、パラ水素濃度は、モデレータの中性子特性に大きな影響を及ぼす因子であるが系統的研究は無かった。そこで、最初に一般的に採用されている直方体形状のモデレータについて最適化を行っている。その結果、低エネルギー中性子について、パラ水素が 100% の場合に、時間積分中性子強度とパルスピーク強度双方について最大強度が得られることを明らかにしている。しかしながら、時間積分中性子強度はモデレータ厚さが 220mm までは増加するが、最大のパルスピーク強度が得られるモデレータ厚さは、その半分程度であった。時間積分強度とパルス特性の両者を考慮して、モデレータ厚さとして 140 mm を最適厚さとして決定している。これは一般的な厚さ 50mm に比較して 3 倍近いものとなっている。

さらに、パラ水素を 100% として、モデレータの最適な幅と高さの検討を行った結果、時間積分中性子強度は、モデレータの幅が中性子ビーム取り出し孔の幅と同じときに最大となり、モデレータ幅が大きくなるに従ってむしろ減少していた。高さについても同様であった。この結果は、これまで常識的に考えられていたものと大きく異なっている。その原因を明らかにするため、モデレータ

表面における中性子強度の空間分布を調べ、モデレータ中心部で強度が最も低く、プリモデレータに近い周辺部に向かって強度が増加していることを、計算・実験の両方で明らかにした。これは、これまで使用されてきたモデレータには無い特性である。この原因が、パラ水素モデレータに遅い中性子が入射する場合に起きる特殊なものであることを明らかにしている。

また、水素モデレータ周辺に配置する軽水プリモデレータについて、最適な厚さを検討し、最大の時間積分中性子強度が得られるプリモデレータの厚さは、ターゲット側で 15 mm、その他の部分で 10 mm という最適値を得ている。

先に述べたように、このモデレータは多くの装置にビームを供給するため、通常の倍近い角度でもビームを取り出すことが必要になる。この場合、ビーム取り出しが、モデレータ表面の法線方向からずれると、一般的に中性子特性が劣化する。そこで、上記の検討により求められた、最適化された直方体形モデレータについて、広い角度のビーム取り出しにおける時間積分中性子強度の変化を調べた。その結果の一例として、法線方向から 25° 方向に取り出されるビームでは、取り出し面の半分からのビーム強度は法線方向と遜色ないが、残り半分では強度が大きく低下することを示した。この原因は、ビームを取り出す方向によって減速材厚さが実質的に変化するためであることを明らかにした。

このような強度の偏りは、ビーム実験を行う上で大きな問題であるので、これを改善することが必要となった。原因に対する考察から、強度分布を平坦化する方策として、円筒形状のモデレータを提案し、その中性子特性を評価している。その結果、取り出し角度範囲全体での時間積分中性子強度は直方体形と同程度で、その空間分布は平坦化されること、また、パルス特性の劣化が直方体形に比べて大きく改善されることを示した。これらの優れた特性によって、ここで提案された円筒形の結合型モデレータが、日本の核破砕中性子源で最終的に採用された。

これを要するに、著者は大強度中性子源で使用される結合型水素モデレータについて詳細な検討を行い、広い角度に渡って優れた中性子特性を持ったビームを供給できる高性能な円筒形結合型モデレータの開発を行い、加速器中性子源工学の発展に貢献した。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。