

京都大学	博士（工学）	氏名	高田卓志
論文題目	硼素中性子捕捉療法のための加速器中性子照射場の効率的生成に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、粒子線治療の一種である「硼素中性子捕捉療法（BNCT）」に関する物理学の中で、加速器中性子源に着目したものである。本療法に必要な熱外中性子ビームの生成効率改善の観点から検討を行い、その成果をまとめたものであり、5章からなっている。 第1章は緒言であり、BNCTの歴史的背景、現状、放射線治療における位置付け、課題、等について解説するとともに、本研究の目的を提示している。特に、BNCTのための加速器中性子源について詳細に記述し、本研究の重要性を明確にしている。 第2章では、「ベリリウムの評価済み中性子生成断面積データの補正」に関する検討について記述している。 本論文で検討する中性子照射場では、中性子発生量とエネルギースペクトルの観点から、タングステン、タンタル、ベリリウムをターゲット物質として選択している。中性子発生量とエネルギースペクトルは、設計検討において最も重要な要素の一つであり、それらは照射ビームの熱外中性子強度および高速中性子混在割合に大きく影響する。 ターゲットからの中性子発生量とエネルギースペクトルを算出するためには、十分に検証された陽子反応断面積データが必要である。タングステンおよびタンタルの評価済み断面積データに関しては、実験データとの比較から、設計検討に対して十分検証されている。一方、ベリリウムの断面積データに関しては実験による検証はほとんど報告されていない。また、応用分野での使用実績が少ないために、その有効性もほとんど確認されていない。 本論文では、数十 MeV 陽子によるベリリウムの中性子生成に関して、文献の実験データを再現でき、かつ、評価済み断面積データの詳細な情報を反映した発生量およびエネルギースペクトルを算出している。まず、ベリリウムの中性子生成の評価済み断面積データを文献に示されている実験データと比較し、それらの違いを明確にしている。続いて、その違いに基づいて評価済み断面積データの補正を行っている。 第3章では、「ハイブリッドターゲットによる中性子発生量およびエネルギースペクトルの改善」に関する検討について記述している。 タンタルとタングstenは蒸発中性子により数 MeV 程度の中性子を多く発生する。しかしながら、これらのターゲット物質では、陽子エネルギーが 10 MeV 以下になると中性子生成断面積が急激に小さくなる。一方、ベリリウムは 10 MeV 以下においても比較的大きな断面積を有する。これらの各ターゲット物質の断面積の陽子エネルギー依存性を活かして、中性子発生量の増加と高エネルギー中性子の減少を目指した「ハイブリッドターゲット」の検討が行われている。 ここで検討しているハイブリッドターゲットでは、陽子ビームの上流側の層にタンタルまたはタングstenを用い、下流側の層をベリリウムとする。このハイブリッド化により、タンタルおよびタングstenを単体で用いた場合よりも大きい中性子発生量が期待できる。また、ベリリウムを単体で用いた場合よりも高エネルギー中性子の発			

生が低減され、減速体を薄くできる可能性がある。

本論文では、このハイブリッドターゲットによる中性子発生量の増加および高エネルギー中性子の減少を確認している。まず、シミュレーションにより、ハイブリッドターゲットからの中性子発生量とエネルギースペクトルを算出し、タンタル、タングステン、ベリリウム単層ターゲットのものとを比較している。続いて、ベリリウムターゲットとハイブリッドターゲットに対する中性子発生実験を行い、ハイブリッド化による高エネルギー中性子の減少を確認している。

第4章では、「ハイブリッドターゲットを用いた硼素中性子捕捉療法用熱外中性子照射場の特性改善」に関する検討について記述している。

加速器を用いて熱外中性子照射場を形成する場合、陽子電流当たりの熱外中性子強度の改善が重要となる。また、ビームの線質に関しては、高速中性子の混在割合を可能な限り低減する必要がある。

熱外中性子強度および高速中性子混在割合の評価を行うためには、照射ビーム形成アセンブリーを含めた検討が必要である。第3章で検討したハイブリッドターゲットによる中性子発生量とエネルギースペクトルの改善の効果は、これらの照射場特性を単層ターゲットと比較することにより、より明確にできる。

本論文では、ハイブリッドターゲットを用いたBNCT用熱外中性子照射場を設計し、照射場特性の評価を行い、ハイブリッド化による改善を確認している。陽子電流当たりの熱外中性子フラックス、高速中性子混在割合、そして、生体内で得られる線量分布の観点から、ハイブリッドターゲットを用いる場合と単層ターゲットを用いる場合とを比較している。

第5章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、「硼素中性子捕捉療法 (BNCT)」に関する物理工学研究の一環として、陽子線加速器をベースにした熱外中性子源について、ビームの生成効率改善の観点から検討を行い、その成果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 本論文で用いた陽子エネルギーの範囲では、核データライブラリー「ENDF/B-VII」の直接反応による中性子生成断面積データの大部分は、実験データをよく再現していることが確認された。しかしながら、連続的なエネルギー分布を持つ成分に関しては、発生量が過大評価となっていることが判明した。また、He-5 の崩壊に起因する成分が含まれていることが確認された。

2. 文献データの解析により算出した補正係数により、He-5 に起因する成分の全中性子発生量に対する割合が増加した。同時に、複合核反応成分の割合が減少し、ENDF/B-VII による計算と文献データ間に見られた差を小さくすることができた。この補正により、実験データを再現し、かつ、ENDF/B-VII の詳細な情報を反映した中性子発生量およびエネルギースペクトルの算出が可能となった。

3. ベリリウム単層ターゲットとハイブリッドターゲットの比較を目的とした中性子発生実験において、アルミニウムおよびニッケルの放射化を利用して、ハイブリッドターゲットにより高エネルギー中性子の割合が減少することを実証した。また、シミュレーションにより、ハイブリッドターゲットでは、タングステン単層ターゲットに比べて全中性子収量を増加できることを示した。つらに、ベリリウム単層ターゲットと比べて、発生する高エネルギー中性子の割合を少なくできることを確認した。

4. 同一の照射ビーム形成アッセンブリーを用いる条件では、ハイブリッドターゲットシステムでは、タングステン単層ターゲットシステムに比べて陽子電流当たりの熱外中性子フラックスが増加し、ベリリウム単層ターゲットシステムに比べて中性子線量率／熱外中性子フラックス比が改善することを示した。また、ベリリウム単層ターゲットに比べて、線量分布の特性指標が改善されることを示した。

5. 中性子線量率／熱外中性子フラックス比が一定となるアッセンブリーを用いる条件では、タングステンおよびベリリウムのどちらの単層ターゲットシステムに対しても、陽子電流当たりの熱外中性子フラックスが増加することを示した。さらに、線量分布の特性指標は、これら1つの単層ターゲットシステムのものとほとんど差がないことを確認した。

本論文は、BNCT用の加速器中性子照射場の効率的生成について詳細に検討されており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年6月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。