

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Study of Evaluating Method for Tritium Breeding Performance inside Blanket with
Neutronics Simulation and Experiment

核融合炉ブランケット内部における中性子輸送及びトリチウム増殖性能の実験解析の研究

申請者 荻野靖之

最終学歴 令和 4年 3 月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻博士後期課程
(修了見込)

学識確認 令和 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(主査) 教授 小西哲之

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 長崎百伸

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
講師 八木重郎

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	荻野 靖之
論文題目	Study of Evaluating Method for Tritium Breeding Performance inside Blanket with Neutronics Simulation and Experiment (核融合炉ブランケット内部における中性子輸送及びトリチウム増殖性能の実験解析の研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合エネルギーの成立性を左右するトリチウム燃料の自己充足性に関して、その増殖を担うブランケット内での中性子挙動と増殖性能の実験的評価法を検討したものである。従来、核融合炉建設前には核融合中性子を得難いため、ブランケットのトリチウム増殖性能についてはもっぱら数値的方法によっており、核データや現実の装置や材料で発生する誤差が懸念されていた。本研究はこの問題に対し、小型の中性子源と高感度の中性子計測法を用いた新たな手法を開発し、3次元中性子輸送計算の検証の可能性を検討し、実験と解析の両面から、わずかな中性子により複雑なブランケット体系における中性子束の空間分布とエネルギースペクトルの両方を高い精度で実測可能なことを示した成果を報告するものであり、全5章よりなる。</p> <p>第1章は序論で、まず世界の核融合炉開発および設計の現状、特にトリチウムを燃焼しながら生成し、燃料自給を行う増殖ブランケットを備えたプロジェクト、いわゆる原型炉が世界各国で検討されていること、この増殖ブランケットにおいては、増殖率1.05程度を十分な確度で確保するよう最適化されるが、そのために必要な要素と、これを中性子輸送計算によって評価するための手法をとりあげ、特に課題となるブランケット内部でのトリチウム生成量、それを左右する核エネルギー領域の中性子の空間分布について考察し、本論文の目的として、ブランケット体系内部の中性子輸送計算を実験的測定によりベンチマークするための問題設定を行っている。特にブランケット体系では、冷却材等による吸収や外部への散逸による中性子の損失を補うために、高エネルギー領域で起こる $n-2n$ 反応の寄与が重要であるがこの計算精度は十分でなく、ブランケット内の中高エネルギー領域での中性子束分布の計算の誤差評価が原型炉設計では不可欠であり、従来その実験的確認が不可能とわれてきた研究の現状と課題を分析している。</p> <p>第2章では、中性子計測法の現状を考察し、放射化箔とイメージングプレートを組み合わせることで、中性子のエネルギーと空間分布を、きわめて高感度、高精度で計測しうることを指摘し、そのための方法の開発について述べている。ブランケット内部のトリチウム生産量は分布をもつため、従来の気送管を用いた定点計測による放射化分析ベンチマークではブランケット体系内の構造による詳細な中性子挙動への影響が評価できず、原型炉全体のトリチウム自給可能性の確証が困難であることを指摘し、空間分布計測に必要な感度、精度を考察している。その結果、二次元放射線計測器イメージングプレートを数種の放射化箔と組み合わせることによって、中性子の空間分布計測が高感度高精度で可能であることを示した。イメージングプレートの計測精度は極めて高く、中性子束分布の空間変化の代表長さが分解能</p>			

となる。ガンマ線の影響の除去やフェーディング、放射化核種の半減期などから、最適な時間的組み合わせを検討し、照射の蓄積効果により 10^7n/s 程度以上の強度の中性子源で十分な測定が可能であることを明らかにした。

第3章では、複数の放射化箔を用いる中性子エネルギースペクトル計測の手法開発およびトリチウム生産量の評価手法について述べている。既存の手法として、アンフォールディング法を用いることで複数放射化箔からエネルギースペクトルの高度な導出が可能である。しかし、トリチウム生成量の計測ではスペクトルの詳細な把握が必要ではなく、イメージングプレートによる計測では少数の金属試料の放射化との組み合わせで最適化を図った。特定のエネルギー領域（熱中性子、熱外中性子、高速中性子）を対象として放射化箔の選定を行い、これらエネルギー領域を分別して計測イメージングプレートを用いることで可能であることを明らかにした。また、本法での計測精度についてエネルギー領域とトリチウム生成量の関係の検討を行なっている。

第4章では、実在の 14 MeV 中性子源を用いたブランケット模擬体系中の中性子分布計測の事前計算と評価手法を検討し、実際の中性子生成によりブランケット体系のトリチウム増殖性能評価の具体的な手法を検討した。第2章、第3章に示した中性子の空間分布計測、特定エネルギー領域の分別計測をもとに、実際に 14 MeV 中性子源を使用したトリチウム生産量の計測手法を示し、加速器型の **DT** 中性子源（中性子発生率 10^{10}n/s 程度に対して、ブランケット材料として候補となるタングステン含有ステンレス鋼、リチウム化合物およびベリリウムで構成される模擬体系を形成し、数時間の照射により中性子の空間分布およびトリチウム生産に寄与する特定エネルギー領域の中性子フルエンスが計測できることをシミュレーションによって示した。この結果を用いることで、現存する中性子発生装置において十分高い精度で現実的な原型炉ブランケット体系のトリチウム増殖性能を評価することが可能となることを示している。

第5章は全体のまとめであり、核融合炉ブランケットのトリチウム生産量を実証するために核融合炉の完成を待たずに体系構築・計測手法の確立をもってトリチウム生産量が評価可能であることを結論づけた。また、本論文によって明らかにした現状の課題、および確立した中性子の計測手法は、ブランケットを搭載した核融合炉において不可欠な要素であるトリチウム生産量の計測、および核融合炉工学分野におけるブランケット中性子計測について新たなベンチマーク手法の必要性を示唆するものであることを述べている。

論文全体として、以上の結果が、核融合のエネルギー源としての成立性を左右するトリチウム増殖性能の評価において、構造を持つブランケット体系内での中性子の空間分布とエネルギースペクトルを高感度で実験的に評価し、中性子輸送計算と比較することによって、原型炉のトリチウム自給可能性について、信頼性の高い確証が可能となることを明らかにしている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合エネルギーの成立性を左右するトリチウム燃料の自己充足性に関して、その増殖を担うブランケット内の中性子挙動と増殖性能の実験的評価法という従来にない方法の開発を通じて、核融合炉工学における中性子輸送問題を実験と解析の両面から検討し、空間分布とエネルギースペクトルの実測を可能とする新たな成果を報告するもので、全 5 章よりなる。

まず核融合ブランケットの開発において、体積的な広がりを持つ核融合中性子源が存在しないことから、核融合エネルギーの成否を握るトリチウム増殖性能の評価が解析的手法によらざるを得ず、その実験的評価が試みられないまま核融合原型炉が設計されていることを指摘している。特に複雑体系中の中性子束の空間分布、エネルギースペクトルの測定法はこれまで知られていない。本論文は、異なるエネルギー感受性をもつ放射化箔を 3 次元的に展開し、イメージングプレートに転写する方法を示し、しかもその分解能と感度が、小型中性子源でも十分実用的な評価に耐えることを明らかにした。次にその測定法を、簡略化したブランケット体系を用いて実験的に適用して中性子輸送計算と比較することでその有用性を確認し、特性を評価した。さらに、現存する小型の中性子源を用いて、実用的な核融合炉ブランケット体系の性能を実験的に評価する方法を具体的に示している。得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 核融合ブランケットにおけるトリチウム増殖性能が体系内部の中性子束分布とエネルギースペクトルに依存すること解析的に示し、それらを実験的に測定して輸送計算をベンチマークする方法の開発が必要であることを指摘した。
- (2) 複数の異なる中性子エネルギー感受性を持つ放射化箔を配置して照射し、イメージングプレートに転写することで体系内の 3 次元の中性子分布とエネルギースペクトル高い感度と空間分解能で得る方法を示した。
- (3) 独自開発の小型中性子源とブランケット体系のモデルを用いてこの中性子測定法を検証し、中性子輸送計算の実験的評価法としての成立性を示した。
- (4) 実用的なトリチウム増殖性能の実験的評価法を、実存する核融合中性子源とブランケットモジュール構造を想定して解析し、具体的な実験方法を設計して提案し、実際の原型炉設計に応用可能であることを示した。
- (5) 以上の結果から、従来にないブランケットトリチウム増殖性能の実験的評価方法を見出し、その具体的方法を提案することで核融合炉開発戦略に重要な貢献を行うとともに、中性子計測の学術において独創的な方法を明らかにした。

これはエネルギー環境問題に大きな貢献を示しうる独創的な成果であって、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(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和 4 年 2 月 22 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降