

氏名	このちから 今野力
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年5月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和60年3月 京都大学大学院理学研究科修士課程(物理学第二専攻) 修了
学位論文題目	国際熱核融合実験炉(ITER)の炉構造物に対する 遮蔽設計計算精度の実験的評価に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 中村尚司 東北大学教授 平川直弘 東北大学教授 北村正晴 東北大学助教授 馬場 護

論文内容要旨

現在、核融合炉の実現を目指した研究開発は、燃料を持続的に燃やすことのできる「自己点火条件」とGW級の「長時間燃焼」を実現するとともに「核融合炉技術の総合的実証」を行う核融合「実験炉」の段階へと移りつつある。この核融合「実験炉」を日本、米国、欧州連合、ロシアの4極の協力で実現しようというのが、国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)計画で約3年間の概念設計活動(CDA: Conceptual Design Activities)に引き続いて、1992年から6年計画で工学設計活動(EDA: Engineering Design Activities)が実施されている。工学設計活動の目的はITERの建設に必要なすべての情報を整えることで、様々な工学R&Dが世界的規模で進められている。本研究は、このITERの工学設計活動の工学R&Dの一つとして原研FNS(Fusion Neutronics Source)で実施したITERを想定した核融合炉バルク遮蔽実験の成果をまとめたものである。

ITERのような核融合実験炉では、炉構造物、特に超伝導コイルでできたトロイダル磁場(TF)コイルを照射損傷や発熱から守り、その健全性を保つこと、あるいは、ブランケットの再溶接ができるようにブランケットの再溶接部でのヘリウム生成を低減させること等が、生体遮蔽とともに遮蔽の重要な課題の一つになっている。このような炉構造物に対する遮蔽設計に対する精度は、構造上、経済上の観点から生体遮蔽に対する精度よりも高いものが要求されている。そこで、ITERの炉構造物に対するバルク遮蔽設計計算の精度を実験で明らかにすることを最終目標に、遮蔽上極めて重要ではあるが測定法が無かったためにこれまで測定できなかった1MeV以下の中性子スペクトル、 γ 線スペクトルの測定法を新たに開発し、ステンレス鋼316LN(SUS316LN)と水で構成されるITERの遮蔽体に即した一連のバルク遮蔽実験を原研FNS(Fusion Neutronics Source)で実施した。本研究で実施した遮蔽実験の特徴としては、1)ITERの構造材であるSUS316を主体にした実規模に匹敵する大きさの実験体系、2)バックグラウンドの低減、3)ITERの中性子場の模擬、4)遮蔽上重要な様々な実験データ(特に、低エネルギー中性子や γ 線に関する実験データ)の取得、等があげられる。具体的には、本バルク遮蔽実験は、

- 1) ITERの構造材であるSUS316の主要元素である鉄の核データの精度を検証する鉄遮蔽実験
- 2) ITERの構造材であるSUS316単体での遮蔽性能を調べるSUS316遮蔽実験
- 3) 構造材であるSUS316と冷却材の水の組み合わせでの遮蔽性能を調べるSUS316/水遮蔽実験
- 4) 超伝導コイルに含まれる核種の影響を調べる超伝導コイル模擬実験

の4つについて段階を追って行った。これらの実験の解析をITERの遮蔽設計で用いられているMCNP、DORT

コード及び FENDL-1 核データライブラリーを用いて実施し、実験と解析の比較を通して核データライブラリーの問題点、ITER の遮蔽設計計算の問題点を明らかにするとともに、実験データをもとに遮蔽設計計算の精度を評価し、遮蔽キーパラメータに対する補正係数を導出することを試みた。

以下、本論文の構成及び内容について述べる。

第 2 章では、本研究で使用した中性子源及び測定手法について詳細に述べた。本研究で実施した遮蔽実験はすべて原研 FNS の第 1 ターゲット室で行い、基本的な実験体系（テスト領域）は円筒形状で、鉄遮蔽実験以外では D-T 中性子源を囲む厚さ 20cm の SUS316 の中性子源反射体をテスト領域の前に設置した。測定は、テスト領域の中で、表面から 914mm（ITER のインボードの遮蔽体の厚さ約 0.9m に対応）の深さまで行った。測定項目は、

- 1) 2MeV 以上の中性子スペクトル(14 φ NE213)
- 2) 10keV から 1MeV までの中性子スペクトル(反跳陽子ガス比例計数管)
- 3) 10keV 以下の中性子スペクトル(減速時間法)
- 4) ^{235}U 、 ^{238}U 核分裂率(マイクロフィッションチェンバー)
- 5) 反応率(放射化箔、 BF_3)
- 6) γ 線スペクトル (40 φ C_6D_6)
- 7) γ 線発熱率(TLD)

で、ほぼ全エネルギー領域の中性子、 γ 線をカバーしているのが特徴である。

第 3 章では、実験解析で用いた計算コード、核データライブラリーの概要を述べた。遮蔽実験の解析には、ITER の遮蔽設計で標準的に用いられている連続エネルギーモンテカルロコード MCNP-4A と 2 次元 Discrete Ordinates コード DORT3.1 を用いた。核データライブラリーは、事実上 ITER の遮蔽設計の標準ライブラリーとして用いられている FENDL/E-1.1（FENDL-1）を採用し、必要に応じて JENDL Fusion File も用いた。

第 4 章では、ITER の構造材である SUS316 の主要元素である鉄の核データの精度検証のために、円筒形状の大型鉄体系を用いた遮蔽実験を行った。MCNP-4A コードを用いた実験解析から、10MeV 以上のデータに若干の問題はあるものの、FENDL-1、JENDL Fusion File の鉄の核データの精度は高く、MCNP 計算は 80cm の深さまでの実験データを γ 線発熱率も含めて 20%以内で再現できることを示した。適切な近似（自己遮蔽補正、詳細メッシュ、 P_5S_{16} 近似）を行えば DORT コードでも、MCNP コードと同様の結果を得ることができるとを示し、バルク遮蔽体系での DORT 計算の妥当性を明らかにした。また、DORT 計算の近似の影響を調べ、断面積の自己遮蔽補正の影響が極めて大きいことを示した。更に、FENDL-1 の多群ライブラリーの一部の核種の自己遮蔽補正の不備を指摘し、その改訂に貢献した。

第 5 章では、ITER の構造材である SUS316 単体での遮蔽性能を調べるとともに ITER の構造材 SUS316LN に含まれる核種の核データ及び遮蔽設計計算精度の検証のために、SUS316 でできた大型の実験体系を用いた遮蔽実験を行った。FENDL-1、JENDL Fusion File の核データを用いた MCNP-4A、DORT コードによる実験解析から、鉄以外の核種では SUS316 に含まれるわずか 2%程度の Mo が 1keV 以下の中性子に大きな影響を及ぼし、また、Mo の 110eV と 45eV 付近の共鳴の断面積に問題がある可能性を指摘した。FENDL-1、JENDL Fusion File には以上述べた問題はあるものの、これらの核データを用いた MCNP-4A、DORT3.1（詳細近似）による 90cm 厚の SUS316 に対する遮蔽計算の精度は 40%以内であると結論できた。DORT 計算での近似では、鉄遮蔽実験と同様に断面積の自己遮蔽の影響が極めて大きく、91cm の深さでファクター 2～5 もの過小評価を引き起こすことがわかった。

第6章ではITERの基本性能確認段階での遮蔽体の基本構成であるSUS316LNと水複合系の遮蔽設計計算精度の検証のために、SUS316と水の層状構造をした大型の実験体系を用いた遮蔽実験を行った。SUS316遮蔽実験と比べ、1MeV以下の中性子に対する遮蔽性能が大幅に向上することを実験で確認した。また、水が入ることにより実験と計算の一致もSUS316遮蔽実験と比べて良くなり、FENDL-1、JENDL Fusion Fileを用いたMCNP、DORT（詳細近似）の計算は体系内の測定データを20%以内で再現し、SUS316/水遮蔽体のバルク遮蔽設計精度が20%以下であることを明らかにした。また、DORT計算での近似の影響を詳細に調べ、多群ライブラリーの群構造、 P_1 展開次数、角度分点による影響は小さく、核データライブラリーの自己遮蔽、空間離散化のメッシュによる影響が大きいことがわかった。

第7章では、ITERの超伝導コイルでできたトロイダル磁場コイルに含まれている様々な核種（ニオブ、銅、タンタル等）の影響を総合的に調べるために、第6章のSUS316/水遮蔽実験のテスト領域の一部を超伝導コイル模擬物質で置き換えた体系を用いた遮蔽実験を行った。FENDL-1、JENDL Fusion Fileを用いたMCNP、DORT（詳細近似）の計算は、概ね30%以内で実験と一致し、超伝導コイルに含まれる様々な核種があっても遮蔽設計精度はSUS316実験やSUS316/水遮蔽実験とほぼ同じであることがわかった。また、超伝導コイルの導体部にわずか1.2%しか含まれていない ^{181}Ta が、1keV以下の中性子及び γ 線発熱率に大きな影響を及ぼすことを示した。 ^{181}Ta はDORT計算での断面積の自己遮蔽の影響も大きく、eV領域の中性子の大きな過小評価を引き起こすことも明らかになった。遮蔽設計計算は、微量の核種まで含めた超伝導コイルの正確な組成に基づいて行う必要があることを指摘した。更に、ITERの概念設計で提案されていた補助遮蔽体 $\text{B}_4\text{C}/\text{Pb}$ の遮蔽効果も実験で調べ、 $\text{B}_4\text{C}/\text{Pb}$ はeV領域の中性子と γ 線を約半分に低減することを実験で明らかにするとともに、5cm程度の厚さの $\text{B}_4\text{C}/\text{Pb}$ では、FENDL-1、JENDL Fusion Fileを用いた核設計計算に大きな誤差を持ち込まないことがわかった。

第8章では、本研究で行った4つの遮蔽実験・解析の結果を総合的に検討し、ITERの遮蔽設計精度の評価を行った。本研究で実施した4つの遮蔽実験は、これまでの遮蔽実験と比べると実験と計算の一致は大幅に改善されており、測定データの質及び解析に用いたFENDL-1、JENDL Fusion Fileの精度が高いことを指摘した。また、詳細近似を行えば、DORT計算でもMCNP計算と同程度の精度で4つの遮蔽実験の実験データを再現することができることを示し、DORT計算の妥当性を明らかにした。更に、4つの遮蔽実験の解析結果の相互比較を通して、なお若干残っているFENDL-1、JENDL Fusion Fileのデータの問題点をまとめた。次に、SUS316/水遮蔽実験データを基に測定の困難なITERの遮蔽キーパラメータ値を推定し、FENDL-1を用いたMCNP及びDORTコードによる遮蔽設計の遮蔽キーパラメータに対する補正係数を導出した。レスポンスの不確かさを除くと、MCNP計算、DORT計算の補正係数がそれぞれ1.69、2.27であることを示し、ITERの概念設計で決められた1.5という補正係数では小さすぎ、特に、DORT計算に対しては、改訂する必要があることを指摘した。

第9章では、これまで述べた研究成果を総括し、今後の研究の方向を示した。

審査結果の要旨

国際熱核融合実験炉(ITER)のような次期核融合実験炉では、炉構造物に対する遮蔽が、生体遮蔽とともに遮蔽設計の重要な課題の一つになっている。このような炉構造物に対する遮蔽設計計算精度は、構造上、経済上の観点から生体遮蔽に対する精度よりも高いものが要求されている。著者は、ITERの遮蔽体に即した4つのバルク遮蔽実験を実施し、その実験解析を通して核データライブラリーの問題点を明らかにするとともに、ITERの炉構造物に対するバルク遮蔽設計計算の精度を実証した。本論文は、この研究成果についてまとめたもので、全文9章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、本研究で使用した中性子源及び測定手法に関して述べている。遮蔽上極めて重要であるが、これまで測定がほとんど行われてこなかった体系内での1MeV以下の中性子スペクトル、 γ 線スペクトル、 γ 線発熱率の測定法を新たに開発、確立するという成果を得ている。

第3章では、実験解析で用いた計算コード、核データライブラリーの概要を記述している。

第4章では、ITERの構造材であるSUS316の主要元素である鉄の核データの精度検証のために行った鉄遮蔽実験について述べている。10MeV以上のデータに若干の問題はあるものの鉄の核データの精度は高く、計算で80cmの深さまでの実験データを20%以内で再現できることを明らかにしている。

第5章では、ITERの構造材であるSUS316LNに含まれる核種の核データ及び遮蔽設計計算精度の検証のために行ったSUS316遮蔽実験について述べている。Moの核データに問題がある可能性を指摘するとともに、90cm厚のSUS316に対する遮蔽計算の精度が40%以内であることを実証している。

第6章ではITERの基本性能確認段階での遮蔽体の基本構成であるSUS316LNと水複合系の遮蔽設計計算精度の検証のために行ったSUS316/水遮蔽実験について述べている。水が入ることにより実験と計算の一致はSUS316遮蔽実験と比べて良くなり、SUS316/水遮蔽体のバルク遮蔽設計精度が20%以下であることを実証している。

第7章では、ITERのトロイダル磁場コイルに含まれている様々な核種の影響を総合的に調べるために行った超伝導コイル模擬実験について述べている。Taのように超伝導コイルに数%しか含まれていないにもかかわらず、遮蔽性能に大きな影響を及ぼす核種があることを指摘している。またこのような複雑形状における遮蔽設計精度が、SUS316実験やSUS316/水遮蔽実験の場合とほぼ同じであることを明らかにしている。

第8章では、4つの遮蔽実験の解析結果の相互比較を通して核データの問題点をまとめるとともに、SUS316/水遮蔽実験データを基にITERの遮蔽キーパラメータ値を推定し、遮蔽設計計算の遮蔽キーパラメータに対する補正係数を導出している。これは今後のITERの遮蔽設計にとって非常に重要な成果である。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、ITER の遮蔽設計で使われている核データの問題点を指摘するとともにITER の炉構造物に対するバルク遮蔽設計精度を初めて実証したものであり、核融合工学、遮蔽工学の分野で極めて有用な成果である。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。