

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	中山 武
論文題目	磁気閉じ込め核融合装置における強磁性鋼最適配置に関する研究		
(論文内容の要旨)			
低放射化フェライト鋼は、その低放射化特性から核融合炉構造材の有力候補と目されているが、反面、強磁性鋼であるため、磁気閉じ込め核融合装置への適用に懸案が持たれていた。本論文は、磁気閉じ込め核融合装置へ強磁性鋼を適用した場合のプラズマ放電への影響を定量的に明らかにすると共に、強磁性鋼の磁場調整能力に着目し、これを積極的に利用するために開発した強磁性鋼最適配置設計手法について纏めたものである。 第1章では、序論として、研究の背景として、核融合エネルギー利用の重要性、核融合開発研究の歴史等を概観し、その中で、核融合炉構造材としての低放射化フェライト鋼の位置付け、ならびに問題点等を指摘し、本研究の目的・意義を記述している。 第2章では、強磁性鋼の作る不整磁場の評価を行った。小型磁気閉じ込め核融合装置である日立トカマクHT-2の真空容器内部に強磁性鋼板を配置することを想定して、数値解析コードMAGFICによる解析を行い、強磁性鋼の作る不整磁場は、トロイダルコイルの作る非軸対称磁場を低減し、また軸対称成分は十分小さいため、プラズマの着火性に影響のないこと、強磁性鋼による磁場応答遅れに伴う制御性への影響も実用上問題はないことを示した。 第3章では、前章での評価結果を受けて実施した、強磁性鋼のプラズマ放電への影響の実験的検証結果を記述している。強磁性鋼のプラズマ放電への影響を実験的に調べるため、小型磁気閉じ込め核融合装置である日立トカマクHT-2の真空容器内部に強磁性鋼板を配置してプラズマ放電を試み、強磁性鋼板を配置する前と同じプラズマ制御方法で、従来と同じプラズマ放電を得ることを実証した。これをもとに、中・大型装置へ適用した場合を考察し、中・大型装置の真空容器を強磁性鋼としてもプラズマ放電が可能であると結論づけた。 第4章は、強磁性鋼による磁場調整能力の実証を行った結果を述べている。ここでは、とくに、実機におけるトロイダル磁場コイルの離散配置により不可避免的に発生していたトロイダル磁場リップルに着目し、その低減を試みている。対象は中型磁気閉じ込め核融合装置である高性能トカマク開発試験装置JFT-2Mとし、その真空容器外部に強磁性鋼板を配置することにより、トロイダル磁場リップルにより発生するプラズマ対向壁上の熱負荷低減			

を試みた。既設機器との干渉を避け、目標仕様を達成可能な強磁性鋼板形状と支持方法を設計、配置した。その結果、プラズマ放電制御に成功すると共に、強磁性鋼板の存在を考慮した数値解析から期待されるとおりのプラズマ対向壁の熱負荷低減を確認している。

第5章では、強磁性鋼の磁場調整能力を活かす最適な強磁性鋼形状を求めるために行った、所望のトロイダル磁場分布を生成可能な強磁性鋼板配置決定ツールの開発に関して記述している。ここでは、強磁性鋼板がトロイダル方向にのみ磁化するという近似により問題を線形化し、強磁性鋼板の板厚分布からトロイダル磁場分布への応答行列の逆行列を特異値分解法により求めることにより、所望のトロイダル磁場分布を生成する強磁性鋼板厚分布を得ることができる。本手法をJFT-2Mの真空容器内部に設置する強磁性鋼に適用し、水平ポートとの干渉を無視した体系でトロイダル磁場リップルの大きさを1/10に低減可能な強磁性鋼配置を求めた。

さらに、実際の核融合装置においては、加熱装置や計測装置等との干渉のため赤道面付近への強磁性鋼板の設置には制約が多いことに鑑み、実機で問題となるのはトロイダル磁場リップル低減ではなく、磁場リップルに起因するプラズマ対向壁の熱負荷集中であるとの観点から、この熱負荷低減に最適な強磁性鋼形状を探索した。上記で得られた理想的な強磁性鋼配置結果から赤道面付近の強磁性鋼板を除去することによりプラズマ領域の赤道面付近に高トロイダル磁場リップル領域を作り出し、プラズマ対向壁熱負荷の変化を数値解析により調べた。単一荷電粒子の無衝突軌道追跡計算をした結果、粒子軌道の反射点付近のトロイダル磁場リップルを悪化させない限り、軌道に大きな乱れは生じないことを明らかにした。続いて軌道追跡モンテカルロコードOFMCを用いて、より現実的に近い形でプラズマ対向壁熱負荷を計算した結果、JFT-2Mの体系では、赤道面を挟んでトロイダル角で48度の領域の強磁性鋼板は、強磁性鋼板が低減可能な全壁熱負荷の1/10程度しか担っていないことを明らかにし、従って、プラズマ領域に全体に亘ってトロイダル磁場リップルが落とせない場合には、赤道面付近の強磁性鋼設置が省略できる見通しを得た。

第6章は、本論文の結言として、上述の成果をまとめ、磁気閉じ込め核融合装置への強磁性鋼導入に関し、従来懸念されていたプラズマ放電制御への影響が實際上問題ないばかりではなく、実機において不可避免的な離散的コイル配置に起因するプラズマ対向壁熱負荷を低減することが可能であることを実証し、そのための強磁性鋼最適設計手法の開発に成功したと結論づけている。さらに、今後の課題・発展性にも言及している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉構造材の最有力候補である低放射化フェライト鋼を磁気閉じ込め核融合装置に適用する際に懸念となる、強磁性鋼のプラズマ放電への影響を定量的に明らかにするとともに、強磁性鋼の磁場調整能力によりプラズマ対向壁熱負荷低減が可能であることを実証、さらに、これの積極的利用を可能とするために開発した強磁性鋼最適配置設計手法について纏めたものである。得られた主な結果は以下のとおりである。

1. 小型トカマク装置HT-2を対象とした、数値解析を含む実験的研究により、従来懸念されていた強磁性鋼のプラズマ放電への影響、すなわち、放電の着火性ならびに既存の放電制御手法の有効性を検証、強磁性鋼を導入してもプラズマ放電制御が可能であることを世界に先駆けて実証した。
2. 高性能トカマク開発試験装置JFT-2Mを用い、強磁性鋼板配置により、トロイダル磁場コイルの離散配置に起因するトロイダル磁場リップルの低減に成功、同磁場リップルの存在が引き起こす熱損失によるプラズマ対向壁熱負荷の低減を確認し、強磁性鋼の「磁場調整能力」を実証した。
3. 所望のトロイダル磁場分布を生成可能な強磁性鋼板配置決定ツールを開発し、効率良く、磁気閉じ込め核融合装置に対する最適な強磁性鋼形状を求めることを可能とした。
4. トロイダル磁場リップル低減の観点のみからは強磁性鋼最適配置が困難な場合が生じることを想定し、装置保全にとって重要なプラズマ対向壁熱負荷低減の観点から最適な強磁性鋼形状を検討、プラズマ領域全体に亘ってトロイダル磁場リップルが落とせない場合には、赤道面付近の強磁性鋼設置を省略可能となる見通しを得た。

以上、本論文は、核融合炉構造材の最有力候補である低放射化フェライト鋼の磁気閉じ込め核融合装置への適用の道を開くばかりではなく、その積極的利用によりプラズマ対向壁熱負荷の低減を可能とできることを示すとともに、それらを実現するための設計手法も提案しており、学問上・實際上、寄与するところが少なくない。実際、本研究の成果を受けて、大型磁気閉じ込め核融合装置JT-60Uにおいて真空容器内部に強磁性鋼板を配置した試験が実施され、本研究の予想通り、問題なくプラズマ放電制御に成功すると共に、トロイダル磁場リップルにより発生していたプラズマ対向壁の熱負荷の低減にも成功している。また、国際熱核融合実験装置ITERにおける磁場調整用強磁性鋼配置設計にも本研究が活かされている。また、強磁性体による磁場調整手法は、核融合装置以外にも、MRI装置をはじめ、多くの応用が期待できる。

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、平成21年11月4日に実施した論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、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