

学位論文題名

Energy Confinement and Transport
of H-mode Plasmas in Tokamak

(トカマクにおけるHモードプラズマのエネルギー閉じ込めと輸送)

学位論文内容の要旨

次世代の核融合研究開発の世界的な中枢を担う国際熱核融合実験炉 ITER では、炉心プラズマの周辺部に形成される輸送障壁によって閉じ込めが改善される高閉じ込めモード (H モード) を標準運転モードとしている。しかし、この放電モードではプラズマの密度が増加するのに伴って、エネルギー閉じ込め性能が低下する傾向があるため、ITER におけるプラズマ密度の運転領域を大きく制限している。現在この原因を究明することは、ITER 物理 R&D 活動における最重要課題にも挙げられている。この課題解決のためには、H モードプラズマのエネルギー閉じ込め特性を解明することが重要であるが、H モードにおける輸送障壁で特性化されるプラズマ境界部によるコアプラズマの輸送へ及ぼす影響については未だ十分な研究がされていない。そこで本研究では、世界の3大トカマク型装置の1つである日本原子力研究所の臨界プラズマ試験装置 JT-60U の実験結果を用いて、H モードプラズマのエネルギー閉じ込め特性の (1)プラズマ密度依存性、(2)プラズマ形状効果、(3)不純物ガス導入の効果及び(4)加熱パワーの影響をそれぞれ境界プラズマの観点から解明することを目的とした。また国際マルチマシデータベースを用いて、JT-60U における H モードの閉じ込め特性の他装置との比較も本研究の目的とした。

H モードプラズマを乱流的輸送が支配するコア部と MHD 不安定性が支配するペDESTAL 部 (H モード化による圧力分布の嵩上げ部) に分離することによって、エネルギー閉じ込め特性のプラズマ密度依存性を解析した。ペDESTAL 部のプラズマ圧力 (密度×温度) は、境界プラズマに局在する不安定性 (Edge Localized Mode; ELM) によって、プラズマ密度に依らずほぼ一定に保たれ、プラズマ密度を増加させると、ペDESTAL 部の温度が低下することが分かった。さらに、このペDESTAL 部の温度の低下に比例して、コアプラズマ部の温度が低下し、エネルギー閉じ込め性能は低下することを解明した。これにより、ペDESTAL 構造が、コアプラズマ部の熱輸送を決定する境界条件として重要な役割を果たすことを明らかにした。

従って、エネルギー閉じ込め性能を改善するためには、ペDESTAL 部の温度を増加させる必要がある。高プラズマ密度領域における閉じ込め改善を狙った運転方法として、プラズマの高三角度化及び周辺部の放射損失の増大を伴う不純物注入等が報告されている。本研究では、これらの放電の閉じ込め特性もペDESTAL 部の温度上昇がコア部のエネルギー閉じ込め性能を向上させるという上記のメカニズムによって説明できることを示した。

次に、エネルギー閉じ込めに対するコア部の熱流束の影響を解析すべく、中性粒子ビーム(NBI)加熱パワーを変えた低三角度及び高三角度の重水素プラズマ放電、及びアルゴン入射による放射損失強度の増大によって、コア部の熱流束を変化させる放電を行った。これらの放電においてもコアプラズマの熱流束が増加(減少)すると、ペデスタル-コア間の比例関係を持つ温度分布を一定に保つように熱拡散係数が増加(減少)することが分かった。

最後に、国際マルチマシンデータベースを用いて、他のトカマク装置についてもエネルギー閉じ込め性能に対するペデスタル温度の境界条件としての役割を解析した。三角形度を大きくとることは高密度領域で高いペデスタル温度及び高いエネルギー閉じ込め性能を維持できるので、将来の核融合炉において適した運転手法であることを示した。

本研究では、Hモードプラズマのエネルギー閉じ込め特性を境界プラズマの観点から様々な放電条件下で解析した。本論文は、その中心的課題であるプラズマ中心部の熱輸送を決定する主要なファクターを抽出し、高性能のプラズマを維持するための最適化された運転条件・手法を定量的に明確にしたものであり、ITER 物理 R&D 活動及び広くトカマク炉開発の最重要課題に応える重要な意義をもつ。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 板 垣 正 文
副 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 日 野 友 明
副 査 助 教 授 及 川 俊 一

学 位 論 文 題 名

Energy Confinement and Transport of H-mode Plasmas in Tokamak

(トカマクにおけるHモードプラズマのエネルギー閉じ込めと輸送)

次世代の核融合研究開発の中核的装置となる国際熱核融合実験炉 ITER はじめ将来のトカマク炉の標準的な運転モードとして、炉心プラズマの周辺部に形成される輸送障壁によって閉じ込めが改善される高閉じ込めモード (H モード) が有望視されている。しかし、この放電モードではプラズマ密度が増加するのに伴って、エネルギー閉じ込め性能が低下する傾向があるため、ITERにおけるプラズマ密度の運転領域を大きく制限している。この原因の解明は、現在の ITER 物理 R & D 活動における最重要課題にも挙げられた急務であるが、輸送障壁という特徴を持つプラズマ境界部が炉心プラズマの閉じ込め性能に及ぼす影響については未だ十分な研究がされていない。

そこで本研究では、世界3大トカマク型装置の1つである日本原子力研究所の臨界プラズマ試験装置 JT-60U の実験結果を用いて、種々の観点から H モードプラズマのエネルギー閉じ込め特性を解明した。

- (1) H モードプラズマを乱流的輸送が支配するコア部と電磁流体力学的(MHD)不安定性が支配するペDESTAL部 (H モード化による圧力分布の嵩上げ部) に分離して解析した。その結果、ペDESTAL部のプラズマ圧力 (密度×温度) は、境界プラズマに局在する MHD 不安定性(Edge Localized Mode; ELM)によって、プラズマ密度に依らずほぼ一定に保たれ、プラズマ密度が増加すると、ペDESTAL部の温度が低下することが分かった。さらに、このペDESTAL部の温度の低下に比例して、コアプラズマ部の温度が低下し、エネルギー閉じ込め性能が低下することを示した。
- (2) 高プラズマ密度領域における閉じ込め改善を狙った運転方法として、プラズマ断面形状の高三角度化及び周辺部の放射損失の増大を伴う不純物 (アルゴン) ガス注入等が報告されている。これらについてはいずれも、ペDESTAL部の温度上昇がコア部のエネルギー閉じ込め性能を向上させるというメカニズムによって説明できることを示した。すなわち、高三角度プラズマでは、プラズマ周辺部の安定性改善によって、ペDESTAL部のプラズマ圧力を高く取れるため、低三角度プラズマと比較すると、同じプラズマ密度においてはペDESTAL部の温

度が高くなり、コアプラズマ温度が増加することを示した。またアルゴンガスを境界プラズマに入射した場合、ペDESTAL部のプラズマ圧力は大きく変化しないが、ペDESTAL部でのプラズマ密度が減少し、ペDESTAL部のプラズマ温度が高まることを示した。

- (3) エネルギー閉じ込めに対するコア部の熱流束の影響を解析すべく、中性粒子ビーム(NBI)加熱パワーを変えた高三角度の重水素プラズマ放電、及びアルゴン入射による放射損失強度の増大によって、コア部からの熱流束を増加させる放電を行った。これらの放電においてもコアプラズマの熱流束が増加すると、ペDESTAL温度に比例してコアプラズマ温度が決まり、このコアプラズマ温度を維持するように熱拡散係数が増加することが分かった。
- (4) 国際マルチマシンデータベースを用いて、他のトカマク装置についてもエネルギー閉じ込め性能に対するペDESTAL温度の役割を解析した。他の装置においても、三角形度を大きくすることは、高密度領域で高いペDESTAL温度が得られおり、高いエネルギー閉じ込め性能に寄与していることを確認した。

これを要するに、著者は、Hモードプラズマにおけるエネルギー閉じ込め性能を決定する要因を境界プラズマの観点から明らかにするとともに、将来のトカマク型核融合炉開発のために新たな知見を与えたものであり、核融合プラズマ工学の発展に寄与するところ大である。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。