

氏 名 舟場 久芳

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大乙第249号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 LHDにおける高ベータプラズマの熱輸送特性に関する実験的研究

論文審査委員 主 査 教授 横山 雅之
教授 長壁 正樹
教授 坂本 隆一
教授 政宗 貞男 京都工芸繊維大学
教授 長崎 百伸 京都大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

核融合発電炉の開発のためには、炉心プラズマの閉じ込め性能を精度よく予測することが必要である。また、経済的なヘリカル型核融合発電炉の実現には、体積平均で 5% 程度の高いベータ値が必要とされている。ここで、ベータ値とは、プラズマの圧力の磁場による圧力に対する比である。以上の理由により、核融合炉心に相当する高ベータ領域でのプラズマの閉じ込め特性の解明が重要である。本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において、巨視的エネルギー閉じ込め特性と局所熱輸送特性を実験的に調べた。

LHD は、ヘリカル方式の磁場閉じ込め核融合実験装置であり、ヘリカル型で世界最高の核融合炉心に匹敵する高ベータプラズマを生成・維持していること、また、空間分解能の高い電子温度・電子密度分布の計測が可能なことから、核融合炉心に相当する閉じ込め性能を研究できる唯一の環境を持っている。本研究ではこの利点を生かし、ベータ値上昇に伴うプラズマ形状の変化の高精度な評価や、低ベータ領域における幅広いプラズマパラメータ領域及び磁場配位に対する系統的な解析により、ベータ値そのものに起因する効果と磁場配位の変化に起因する効果を分離して、巨視的エネルギー閉じ込め性能及び局所熱輸送特性に対するベータ上昇の効果を初めて解明した。また、電磁流体力学 (MHD) 駆動型乱流輸送モデルを例にとり、それが局所熱輸送に与える影響も初めて明らかにした。その結果、高ベータヘリカルプラズマに適用可能な熱輸送係数のモデルを提案し、LHD のより低衝突・高ベータ領域におけるプラズマの閉じ込め特性のシミュレーションへの適用や核融合炉心に相当するような高ベータプラズマの閉じ込め性能の予見を可能とした。

本論文の構成は以下の通りである。第 1 章では、研究の目的と意義、及び関連する先行研究について述べている。本論文では、ISS04 スケーリング (国際ステラレータ 04 スケーリング) 則をエネルギー閉じ込めの基準とし、高ベータ領域における閉じ込め特性を評価する。ISS04 は 2004 年当時までの装置の実験結果から求められ、パラメータ依存性は異なる装置間において共通であるが、装置や磁場配位による差を表す比例係数として、リノーマリゼーションファクター f_{ren} が導入されている。LHD の場合、この f_{ren} が磁気面中心の大半径位置に依存すると仮定して、閉じ込め特性の磁場配位依存性を表すことができる。なお、ISS04 の導出には LHD の場合には低ベータプラズマのデータが用いられた。

第 2 章では、大型ヘリカル装置、計測装置、加熱装置及び熱輸送解析方法について述べている。

第 3 章では、ISS04 スケーリング則を基準に、中性粒子ビーム入射 (NBI) で生成・維持した電子密度が $1.5\sim 4\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、体積平均ベータ値が 0.2~3.2 % の LHD の高ベータプラズマに対して、巨視的エネルギー閉じ込め特性を調べた。ベータ値が上昇すると、ISS04 スケーリング則で導入され f_{ren} が、ベータ効果により磁気面が外側にシフトし小さくなる。ベータ上昇による磁場配位の変化の影響を考慮して、ISS04 を基準に LHD 高ベータプラズマの巨視的エネルギー閉じ込め特性を調べた結果、LHD の標準的なアスペクト比の配位で、高ベータ領域でも ISS04 の閉じ込め性能を有することがわかった。巨視的スケーリ

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

ング則は、無次元パラメータ(規格化ラーマー半径、ベータ、規格化衝突周波数、等)に対する依存性として表すことができる。局所熱輸送に関して、磁場配位と小半径位置の異なる低ベータ領域のプラズマの解析を行った結果、低ベータ領域での局所熱輸送特性の無次元プラズマパラメータ依存性は、ISS04と同じ無次元パラメータ依存性を持つ熱輸送モデルに従うことがわかった。この依存性を基に、小半径位置、磁場配位の違いによる比例係数の値を実験データから決定し、低ベータ領域の局所熱輸送モデルを構築した。この「局所 ISS04 熱輸送モデル」を基準にした熱輸送特性の振舞いから、ベータ値自体の局所熱輸送に対する影響を推定した結果、周辺部の熱輸送係数は、ベータ上昇につれて低ベータ領域の基準モデルより劣化することがわかった。一方、コア領域では、熱輸送係数はベータ上昇により小さくなる傾向にあることがわかった。

第 4 章では、高ベータプラズマにおける周辺部の熱輸送特性の解明のため、周辺の MHD 特性が異なる磁場配位における熱輸送特性を調べた。アスペクト比が大きい磁場配位になるほど、高ベータ領域でのジャイロボーム型モデルからの逸脱が大きくなった。高ベータ放電の輸送モデルとして、抵抗性 g モード乱流輸送モデルを基準として、周辺部での熱輸送係数の評価を行った。異なる MHD 安定特性を持つ磁場配位において、高ベータ領域の周辺部の熱輸送係数は、抵抗性 g モード乱流輸送モデルで説明しうるベータ依存性を示していることがわかった。さらに、抵抗性 g モード乱流輸送モデルは磁気レイノルズ数や規格化衝突周波数への依存性がある。このモデルで規格化した実験結果の熱輸送係数のこれらに対する依存性の指数の大きさは、どの磁場配位に対しても 0.3 乗よりも小さく、モデルと実験結果のパラメータ依存性は近いと考えられる。

第 5 章では、内部拡散障壁のある高密度プラズマの熱輸送について述べている。LHD では、高中心ベータプラズマの生成方法として、第 3、4 章で主に扱った NBI による高いプラズマ加熱特性を利用した「磁気軸トーラス内寄せ配位」以外に、「磁気軸トーラス外寄せ配位」において、高速で入射される個体水素燃料(ペレット)を複数個連続に供給し、超高密度(中心電子密度が最大 $5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 以上)で高中心ベータプラズマを生成する方法が開発されている。このようなプラズマは、コア領域に急峻な密度勾配を持つことから、内部拡散障壁プラズマと呼ばれている。この内部拡散障壁を達成できるか否かは、磁気軸のトーラス大半径方向の位置に大きく依存することが従来から知られていた。このようなプラズマに対し、加熱特性と熱輸送特性に注目して調べた結果、高い密度領域では、磁気軸の大半径位置により中性粒子ビーム入射加熱分布が大きく異なり、磁気軸外寄せ配位ではプラズマ中心部を加熱できるのに対し、磁気軸内寄せ配位では主にプラズマ周辺部が加熱され中心部での加熱パワーは小さいことがわかった。ペレットの溶発は電子温度への依存性が大きく、この加熱分布の違いが、磁気軸トーラス外寄せ配位においてコア領域に急峻な密度勾配を持つ一方、磁気軸トーラス内寄せ配位では大きな密度勾配が形成されないことの原因であるという可能性を示した。

第 6 章で本論文のまとめと今後の展望について述べている。本研究の成果を基にした高ベータのヘリカル型核融合発電炉における閉じ込め特性について考察し、第 4 章で危惧された周辺領域の閉じ込め性能の劣化が、核融合炉心プラズマでは大きな懸念にはならない可能性を示した。また、本論文の第 3、4 章の結果をもとにした輸送モデルにより、LHD

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

のより低衝突・高ベータ領域のプラズマの閉じ込め性能予測を行った例を示し、本論文の研究の意義を実例によって示した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、ヘリカル型核融合研究で世界最高のベータ値（閉じ込め磁場の圧力に対するプラズマ圧力の比）を達成している LHD の実験データベースを活用して、巨視的エネルギー閉じ込め時間（プラズマへの入力エネルギーがプラズマ中に保持される特徴的時間）や、局所（プラズマの小半径位置に依存する）熱輸送特性のベータ値上昇に伴う変化について、ベータ値自体による効果とベータ上昇に伴う磁場配位の変化による効果とを分離した上で初めて解明するとともに、抵抗性圧力勾配駆動型モードに起因する乱流輸送がプラズマ周辺部の局所熱輸送に与える影響についても初めて系統的に明らかにしたものである。

LHD 高ベータプラズマの熱輸送特性について研究を進める基準として、巨視的エネルギー閉じ込め時間に関する国際ステラレータスケーリング則（ISS04）を用いている。ISS04 は、2004 年までの世界のヘリカル型実験装置における実験データから導出されたもので、ジャイロボーム的な特性（熱輸送係数がプラズマ温度の $3/2$ 乗、磁場の -2 乗に比例）を示す。装置や磁場配位の差異を繰り込むために規格化因子が導入されている。LHD からは低ベータプラズマのデータが用いられた。よって、ISS04 を基準として高ベータプラズマの熱輸送特性を論じることは、低ベータプラズマとの系統的な差異を調べる有用な手法である。

まず、中性粒子ビーム入射（NBI）によって加熱されたプラズマに対して、ISS04 を基準として巨視的エネルギー閉じ込め特性を調べた内容が述べられた。ベータ値が高くなるにつれて、ISS04 の規格化因子が磁気軸（プラズマ中心部）位置の外側シフトによって小さくなることを考慮した結果、LHD の標準的なアスペクト比（プラズマ大半径と小半径の比）の磁場配位で、高ベータ状態でも ISS04 相当の閉じ込め性能を有することを示した。さらに、磁気軸位置が異なる磁場配位での低ベータ状態で、プラズマパラメータの径方向分布も考慮した局所熱輸送解析を行い、規格化衝突周波数や規格化ラーマー半径（プラズマ粒子の旋回半径とプラズマ小半径の比）といった無次元パラメータへの熱輸送係数の依存性が、ISS04 の無次元パラメータ依存性と同様であることを明らかにした。これを基に、磁場配位や小半径位置の違いによる熱輸送係数に対する比例係数を低ベータ状態の実験データから決定することで「局所 ISS04 熱輸送モデル」の構築に成功した。このモデルに基づいて熱輸送係数に対するベータ値自体の影響を推定することで、ベータ値の上昇につれて周辺部で閉じ込めが劣化するという知見を得た。

続いて、高ベータ状態の周辺部における熱輸送特性解明のため、周辺部の電磁流体的安定性が異なる磁場配位（アスペクト比が異なる）における解析結果が紹介された。アスペクト比が大きくなるほど、高ベータ状態でジャイロボーム型輸送モデルからの逸脱が大きくなることを見出した。そこで、ベータ値に比例する熱輸送係数を有するモデルとして知られる抵抗性圧力勾配駆動型モードに起因する乱流輸送モデルを参照とした系統評価を行い、高ベータ状態の周辺部における熱輸送係数のベータ値依存性を説明しうることを示した。この乱流輸送モデルは規格化衝突周波数にも依存している。解析に用いた熱輸送係数データ群の規格化衝突周波数への依存性がモデルにおける依存性に近いことも確かめられ

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

ている。

さらに、高ベータ状態の中でも、内部拡散障壁（急峻な密度勾配の形成、以下 IDB）を有する超高密度高ベータプラズマの熱輸送解析への研究展開についても述べられた。IDB 実現の可否が、プラズマの大半径位置（外寄せ、内寄せ）に依存することが従来から知られていた。NBI による加熱特性と熱輸送特性に着目して調べた結果、入射ビームがプラズマ中心部へ届かなくなる高密度状態でも、外寄せでは中心部を加熱できるのに対して、内寄せでは主に周辺部が加熱されて中心部の加熱割合が小さくなることを明らかにした。IDB 形成に必須となる固体水素ペレットによる粒子供給は電子温度への依存性が大きいいため、この加熱分布の違いが IDB 実現の可否の原因であるという可能性を示した。

本論文は、LHD における高ベータプラズマの熱輸送特性のベータ値上昇に伴う変化について初めて解明するとともに、乱流輸送モデルを参照とした系統解析による理解に基づいて、低衝突周波数領域における高ベータプラズマの熱輸送特性予測を行うなど、LHD の今後の研究動向を見据えた意義づけも行っている。以上のことから、審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な価値を有し、博士学位を授与するに値すると判定した。