

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大石 鉄太郎

核融合発電の実現を目指したトラスプラズマの磁場閉じ込め研究において、H モード (high confinement mode) に代表される閉じ込め改善現象の理解と制御は重要な課題である。プラズマが H モード状態に遷移すると粒子または熱の閉じ込めが改善され、プラズマ周辺部で圧力勾配が急峻になる「周辺部輸送障壁(ETB: edge transport barrier)」という領域が形成される。一方、ETB 形成に伴い、周辺部の急峻な勾配に起因すると考えられる不安定性が成長し、それらが粒子輸送を促進して閉じ込めを劣化させる現象も観測されてきた。これらを制御するためには、揺動レベルの局所値、空間分布、空間相関、発生するタイミングなどの性質を計測することが重要である。プラズマとの衝突によって励起した中性粒子ビームからの線放射スペクトル(ビーム輝線)を観測する密度揺動計測法であるビーム放射分光法(BES: beam emission spectroscopy)は、いくつかのトカマク型装置に適用され、閉じ込め性能の変化と密度揺動との相関を示唆する計測結果が報告されている。しかし、ヘリカル型装置では、磁場構造が複雑で観測位置の確保が困難であり、本研究以前には適用例は無かった。本論文は、自然科学研究機構核融合科学研究所のヘリカル型プラズマ閉じ込め装置 CHS(compact helical system)において、ヘリカル型装置での BES 計測システムの開発を行い、観測された揺動が粒子輸送に及ぼす寄与を考察したものである。

本論文は5章よりなる。

第1章は序論であり、研究背景としてトラスプラズマ閉じ込め研究における密度揺動計測の意義、及び密度揺動計測法としての BES 法の位置付けを指摘している。

第2章では本研究の主旨である密度揺動計測法である BES 法の原理について説明し、従来この手法を用いて行われてきた密度揺動計測に加えて、密度勾配も計測可能であることを示している。

第3章では CHS 装置に BES 法を適用するための計測システムの構築について記述されている。磁場形状を考慮して径方向の分解能を最適化するための観測ポート設計について述べられている。

第4章では構築したシステムを用いて、CHS における ETB を伴うプラズマを計測対象として、密度勾配と密度揺動を同時計測した結果について述べられている。まず、ETB 遷移時の最外殻磁気面(LCFS: last closed flux surface)付近の密度の経時変化が、BES を用いて詳細に観測されている。ETB 遷移時には LCFS 内側で遷移時に密度が増加し、外側で減

少することが示されている。これにより、輸送障壁が形成される位置が LCFS 近傍であることが特定されている。次に、ETB 形成後には、4~5kHz 程度の周波数を持つコヒーレントな揺動とその 2 倍の周波数を持った高調波が、LCFS のすぐ内側に存在する有理面上に発生することが示されている。この揺動は、周辺部の有理面に局在し、高調波を持つ点において、トカマク型装置の QH モード(quiescent H-mode)で発生する境界層高調波振動(EHO: edge harmonic oscillation)と類似していることが指摘されている。この類似性に着目し、本論文でも、CHS で観測されたこのコヒーレントな揺動を EHO と呼んでいる。CHS における EHO と、ETB 形成による密度勾配の増加との相関については、障壁部の密度勾配がある閾値に達すると EHO が発生すること、および EHO 発生後には密度勾配の増加は飽和することが示されている。さらに、EHO を伴わない放電では、加熱パワーの増加に伴い ETB 形成後の密度勾配は急峻になるが、EHO を伴う放電では、加熱パワーを増加させても密度勾配は増加しなくなることが示されている。多点同時計測を活かして、EHO の伝播方向と位相速度が計測されており、トーラス外側向きに数 100m/s という値が得られている。これは他のトカマク型装置における EHO の径方向伝播の速度と同程度の値であることが指摘されている。これらの結果より、EHO 発生後の密度勾配上昇の飽和に見られるように、EHO により粒子輸送が促進され、粒子閉じ込め改善が制限されている可能性が高いと結論付けられている。

第 5 章は総括であり、結論と今後の展望が述べられている。

以上要するに、本論文では、BES 計測のヘリカル型装置への適用が可能なシステムが提案・実証され、閉じ込め改善時の密度揺動計測に成功し、観測された揺動が輸送に及ぼす寄与が解明されたものである。これらはシステム量子工学、特に核融合プラズマの揺動と輸送の関連性の解明に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。