

氏 名 DU Xiaodi (杜 晓第)

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1785 号

学位授与の日付 平成27年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Resistive Interchange Mode destabilized by Helically  
Trapped Energetic Ions in Helical Plasma

論文審査委員 主 査 教授 藤堂 泰  
准教授 大館 暁  
教授 長壁 正樹  
教授 藤澤 彰英 九州大学  
研究主幹 篠原 孝司 日本原子力研究開発機構

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

本論文は磁場閉じ込め型核融合実験装置において、高エネルギー粒子によって不安定化される新しい種類の磁気流体 (MHD) 不安定性を調べたものである。磁場閉じ込め型の核融合炉は、核融合反応によって生成するアルファ粒子によるプラズマの自己加熱を前提としている。そのためアルファ粒子などの高エネルギー粒子のプラズマ中の挙動を理解することは極めて重要である。高エネルギー粒子の閉じ込め特性の劣化を招く原因の一つとして高エネルギー粒子と磁気流体(MHD)不安定性との相互作用があげられる。トカマクプラズマ実験でしばしば観測されるフィッシュボーン不安定性は内部キンクモードと高エネルギー捕捉粒子との相互作用によって発生する不安定性であり、高エネルギー粒子の損失をもたらすことが知られている。大型ヘリカル装置の実験において、高速中性粒子ビーム入射(NBI)に起因する高エネルギー粒子と交換型モードの相互作用によると考えられる新しい種類の不安定性を観測した。この不安定性を EIC (Energetic particle driven resistive InterChange mode: 高エネルギー粒子駆動抵抗性交換型モード)と呼ぶ。

MHD 揺動の空間構造を検出するためには新たに開発した軟 X 線計測装置や、電子サイクロトロン放射計測装置の揺動信号を用いた。また、Empirical Mode Decomposition (EMD) 法を用いて、揺動信号を時間スケールの異なる複数の成分に分解し、MHD 揺動に対応する揺動成分を切り出す手法を用いた。

EIC は急速な周波数変化を伴う爆発的な磁場揺動として、垂直方向の NBI 入射を行っている時間帯に観測される。閉じ込め磁場の磁場強度の弱い部分に捕捉される高エネルギー捕捉粒子の軌道を解析し、高エネルギー捕捉粒子の軌道周波数と抵抗性交換型不安定性の周波数が共鳴条件を満たす時に不安定性が発現することを見出した。さらに、EMD 法を用いて、電子温度揺動分布の時間発展を詳細に解析し、EIC は発生段階では抵抗性交換型不安定性と同様に有理面に局在化した構造を持つが、高エネルギー粒子との共鳴時には振幅が急速に増大するとともに空間分布が小半径内側に拡大し、後期には磁気島と同様の構造に変化することを見出した。EIC が発生するパラメータ領域を調べると、高エネルギー粒子の圧力の高い低密度実験時に観測されることがわかった。また高エネルギー粒子圧力の上昇に伴って不安定モードが抵抗性交換型モードから EIC に遷移する現象も、本論文で提案する不安定性の発現メカニズムを強く支持する。

EIC と高エネルギー粒子の共鳴時には高エネルギー粒子の急速な輸送現象を観測した。非両極性の急速な高エネルギー粒子の掃出しによるプラズマ中心部の 10kV 以上の電位変化とプラズマ周辺部における -85kV/m に及ぶ径電場の生成が観測された。さらに、EIC 発生時にはトロイダル流速分布の大きな変化と電子密度揺動の減少を伴うことがわかった。電位形成の過程を単純化した物理モデルを使うことで、これらのバルクプラズマへの影響を説明できる可能性があることを示した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

磁場閉じ込め型核融合炉は、核融合反応によって生成するアルファ粒子によるプラズマの自己加熱を前提としている。そのためアルファ粒子などの高エネルギー粒子のプラズマ中の挙動を理解することは極めて重要である。高エネルギー粒子の閉じ込め特性の劣化を招く原因の一つとして高エネルギー粒子と磁気流体(MHD)不安定性との相互作用が挙げられる。トカマクプラズマ実験でしばしば観測されるフィッシュボーン不安定性は内部キンクモードと高エネルギー捕捉粒子との相互作用によって発生する不安定性であり、高エネルギー粒子の損失をもたらすことが知られている。

出願者は、高速中性粒子ビーム入射(NBI)に起因する高エネルギー粒子と交換型モードの相互作用によって発現する新しい種類の不安定性を大型ヘリカル装置(LHD)の実験において発見し、この不安定性をEIC (Energetic particle driven resistive InterChange mode: 高エネルギー粒子駆動抵抗性交換型モード)と名づけた。出願者は実験データを詳細に解析し、EICの物理特性を解明するとともに、EICがバルクプラズマの閉じ込め特性に及ぼす影響を明らかにした。

論文の第1章では研究の背景が述べられるとともに、高エネルギー捕捉粒子が駆動するMHD不安定性の理論が整理されている。第2章は実験で使用した軟X線計測システムなどの計測装置の概要とEmpirical Mode Decomposition (EMD)法をはじめとした揺動信号の数値解析法の説明にあてられている。

第3章ではEICに関する明瞭な実験結果が示され、EICの物理特性が明らかにされている。出願者は、EICの磁場揺動と周波数の典型的な時間発展とともに、EICが垂直方向NBIによって不安定化することを示した。次に、高エネルギー捕捉粒子軌道の数値解析により、高エネルギー捕捉粒子の軌道周波数と抵抗性交換型不安定性の周波数が共鳴条件を満たすことを確認した。さらに、EMD法を用いて電子温度揺動分布の時間発展を詳細に解析し、EICは発生段階では抵抗性交換型不安定性と同様に有理面に局在化した構造を持つが、高エネルギー粒子との共鳴時には振幅が急速に増大するとともに空間分布が小半径内側に拡大し、後期には磁気島と同様の構造に変化することを解明した。また、EICの発生条件を線平均電子密度とプラズマ中心電子温度について整理し、EICが発生するパラメータ領域を明らかにするとともに、高エネルギー粒子圧力を連続的に上昇させた実験により高エネルギー粒子圧力の上昇に伴って不安定モードが抵抗性交換型モードからEICに遷移することを実証した。

第4章ではEICがバルクプラズマの閉じ込め特性に及ぼす影響が述べられている。出願者は、EICと高エネルギー粒子の共鳴時において高エネルギー粒子の急速な輸送現象を観測し、非両極性の急速な高エネルギー粒子の掃出しによるプラズマ中心部の10kV以上の電位変化とプラズマ周辺部における-85kV/mに及ぶ径電場の生成を見出した。さらに、EIC発生時におけるトロイダル流速分布の大きな変化と電子密度揺動の減少を明らかにした。

第5章ではEICがバルクプラズマに与える影響を説明する理論モデルとバルクプラズマの閉じ込め特性の過渡的な改善が議論されており、第6章では全体のまとめが簡潔に述べ

(別紙様式 3)  
(Separate Form 3)

られている。

以上のように、本論文は、ヘリカル型装置において重要な交換型不安定性と高エネルギー粒子の相互作用を初めて明らかにしたという意味で物理的に大変興味深いだけでなく、LHD をベースとした核融合炉を構想するうえで極めて重要な知見を与えるものであり、核融合研究の進展に大きく貢献することが期待される。よって、本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、合格と判定した。