

氏 名	吉 村 智
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2134 号
学位授与の日付	平 成 12 年 1 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	電子サイクロトロン加熱によるトカマクプラズマの磁気流体不安定性の抑制

論文調査委員 (主 査) 教 授 曄 道 恭 教 授 蔵 本 由 紀 教 授 石 黒 武 彦

論 文 内 容 の 要 旨

トカマクプラズマの閉じ込めを左右するテアリング不安定性の電子サイクロトロン加熱による抑制の試みはこれまでも行われて来たが体系的になされたわけではないため、断片的な報告しかない。不安定性の検出にこれまで主に使われて来た磁気プローブ以外に、軟エックス線計算機トモグラフィーを使って、プラズマ小断面上の軟エックス線放射強度分布からテアリングモードの挙動を解析する手法を導入し、プラズマ小半径のおよそ 0.8 倍の位置にポロイダルモード数が 2 でトロイダルモード数が 1 のモードが存在し、その挙動は磁気プローブで観測されるものと一致することを明確に示した。また、小半径のおよそ 0.3 倍の位置にポロイダルモード数、トロイダルモード数が共に 1 のモードが存在することを見出した。ポロイダルモード数 2 または 1 のそれぞれの振幅が最大となる位置のプラズマ小断面上の軌跡は安全係数がそれぞれ 2 または 1 の磁気面に対応すると考えられる。トーラスの赤道面と安全係数が 2 の磁気面とが交差する位置が電子サイクロトロン第 2 高調波共鳴になるようにトロイダル磁場を設定して、収束性の良い加熱マイクロ波ビームの光軸を赤道面に一政させ、異常波モードで電子サイクロトロン第 2 高調波加熱を行うと、ポロイダルモード数が 2 のモードばかりでなく 1 のモードも同時に抑制されることを見出した。安全係数が 1 の磁気面が交差する位置で加熱を行ってもモード数 1, 2 のモードが同時に抑制されることを見出した。共鳴位置を細かく変えて調べた結果、いずれの場合も共鳴の位置には極めて敏感で、安全係数が 1 または 2 の磁気面が赤道面と交差する位置にあるときのみ完全に抑制でき、抑制効果が認められるのはその極く近傍に限られることを明確に示した。

プラズマパラメーターによっては、電子サイクロトロン加熱ほど局所性は明確ではないが低域混成波電流駆動を使ってもプラズマ電流分布を変え、テアリングモードを抑制できる場合がある。これまでの実験例ではポロイダルモード数 2 及び 1 のモードが一旦同時に抑制されるが、その後、モード数 1 の不安定性が突然励起される。このモードの成長率は大きく、1 周期にも満たない時間で飽和振幅に達する。大型トカマクの低域混成波電流駆動の実験報告にも類似の不安定性が励起され、プラズマ中心温度の上昇を妨げていると思われる実験データが散見されるが、この現象に注目して言及している例は無い。

上述の軟エックス線計算機トモグラフィーと電子サイクロトロン局所加熱の手法を駆使して、このモードの同定と抑制を試みた。低域混成波電流駆動によってポロイダルモード数 1 のテアリングモードが抑制される過程の時間発展を詳細に見ると磁場の拡散時間程度の時間で振幅が減少していき、従来あった安全係数 1 の磁気面の内側即ち磁気軸に近い領域に微小振幅ながら検出可能なポロイダルモード数 1 のテアリングモードが新たに励起される、即ち、いわゆるダブルテアリングモードが観測される。これは安全係数 1 の磁気面の内側の安全係数が平坦化して行く過程で安全係数が 1 を横切るところが 2 ヶ所出来、電流密度勾配が小さいながらも存在するために励起されるものと考えた。さらに平坦化が進むとテアリングモードは完全に抑制される。その後、元々の安全係数 1 の磁気面内側のポロイダルベータ値が増加し、急速に振幅が増大しながら安全係数 1 の磁気面の内側へ磁気軸に向かって成長して行くポロイダルモード数、トロイダルモード数が共に 1 の不安定性が励起される。その成長率は電流密度分布の変化では説明できない程早く、また、そのモード構造がいわゆる三日月型を示

すことから交換型不安定性である圧力駆動型の内部キンクモードであると同定した。次いで、電子サイクロトロン局所加熱により安全係数1の磁気面の内側の圧力分布を変えて、この不安定性の抑制を試みた。電子サイクロトロン加熱によりプラズマ小半径方向に正の圧力勾配を持つ部分を作り安全係数1の磁気面内側のポロイダルベータ値を下げるごとにより抑制出来ることを示した。

論文審査の結果の要旨

トカマクプラズマでは安全係数が1または2の磁気面上で発生する磁気流体不安定性がプラズマの閉じ込めに大きな影響を与える。これらの不安定性を如何に抑制するかが重要な研究課題となっている。抵抗性磁気流体不安定性であるテアリング不安定性と理想磁気流体不安定性である内部キンク不安定性が代表的なものである。前者は磁力線の再結合を伴い磁気面構造のトポロジーが変る電流駆動型の不安定性で安全係数が有理数となる磁気面上での小半径方向のプラズマ電流密度勾配によって引き起こされる。安全係数が2の磁気面上で発生するものはプラズマ主崩壊の引金になる最も危険な不安定性である。後者は交換型不安定性で磁気面構造のトポロジーは不変である。安全係数が1の磁気面の内側の圧力分布の如何によって励起される圧力駆動型の不安定性である。中心の高温部を破壊する内部崩壊を引き起こす。

これまで電子サイクロトロン局所加熱によるテアリング不安定性の抑制の試みがなされて来たが、断片的な報告があるのみで、一見互いに矛盾する報告例があるぐらい混乱している。

申請者は、プラズマ小断面上の軟エックス線放射強度分布から不安定性を解析する手法を導入し、プラズマ小半径のおよそ0.8倍と0.3倍の位置にそれぞれ、ポロイダルモード数が2と1でトロイダルモード数が共に1のモードが同時に存在することを示した。トーラスの赤道面上で安全係数が2または1の磁気面を加熱すると、ポロイダルモード数が2のモードばかりでなく1のモードも同時に完全に抑制され、抑制効果が認められる加熱領域の幅は安全係数が2または1の磁気面の極近傍に限られることを明確に示した。

プラズマパラメーターによっては、低域混成波電流駆動でプラズマ電流分布を変え、テアリング不安定性を抑制できる場合がある。これまでの実験例ではポロイダルモード数2及び1の不安定性が一旦同時に抑制されるが、その後、モード数1の不安定性が突然励起される。大型トカマクの低域混成波電流駆動の実験報告にも類似の不安定性が励起されてプラズマ中心温度の上昇を妨げていると思われる実験データが散見されるが、この現象に注目して言及している例は無い。

申請者は、この不安定性の同定と抑制を試みた。低域混成波電流駆動によってテアリング不安定性が完全に抑制された後、安全係数1の磁気面の内側の圧力勾配が増加し、1周期にも満たない時間で飽和振幅に達するポロイダルモード数、トロイダルモード数が共に1の不安定性が励起されることを明らかにした。その成長の早さは電流密度分布の変化では説明できない程早く、また、そのモード構造がいわゆる三日月型を示すことから交換型不安定性である圧力駆動型の内部キンク不安定性であると同定した。次いで、電子サイクロトロン局所加熱により安全係数1の磁気面内側に小半径方向に正の圧力勾配を持つ部分を作ることにより抑制出来ることを示した。

申請論文は、トカマクプラズマの閉じ込めを左右する長波長の磁気流体不安定性、テアリング不安定性と内部キンク不安定性の電子サイクロトロン加熱による抑制について、極めて明確な実験結果を初めて体系的に示したものであり、プラズマ物理、核融合研究の分野に重要な貢献をしたものと評価できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心に、関連する研究分野について試問した結果、合格と認めた。