

氏名	いさ やま あき ひこ 諫 山 明 彦
学位の種類	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	論エネ博第39号
学位授与の日付	平成16年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	JT-60Uにおける電子サイクロトロン放射測定による新古典テアリングモードの抑制に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 佐野史道 教授 近藤克己 教授 前川 孝

### 論文内容の要旨

本論文は、JT-60Uにおける電子サイクロトロン放射 (ECE) 測定装置の開発と、それを用いた新古典テアリングモード (NTM) の特性の解析、およびNTM抑制による高 $\beta$ pHモード放電の性能向上に関して研究した結果についてまとめたものであり、全6章から成っている。

第1章では、トカマク型装置におけるプラズマ性能の進展、核融合炉実現のための要件、新古典テアリングモードの抑制の必要性、電子サイクロトロン放射測定装置の重要性などを述べることにより、本論文の目的及び位置づけや意義を説明している。

第2章では、JT-60Uにおける閉じ込め磁場コイル用電源、中性粒子ビーム (Neutral Beam, NB) 入射装置や電子サイクロトロン (Electron Cyclotron, EC) 波入射装置などの加熱・電流駆動装置、電子密度やイオン温度や電流分布などの測定装置の概要について述べている。また、NBや電磁波入射による電流駆動や自発電流の原理について説明している。

第3章では、ECE測定装置の開発について述べている。高性能プラズマを維持するためにはプラズマ中に発生する電磁流体力学的 (MHD) 不安定性を制御する必要がある。ECE測定は局所的な電子温度を高時間分解能で得ることができるという点でMHD不安定性研究には最も有効な測定法である。本論文では高時間・高空間分解能で電子温度・電子温度揺動分布を測定するために行ったECE測定装置の開発について述べている。まず、コルゲート導波管を導入することにより、伝送損失を約半分に低減することに成功し、高SN比での電子温度測定を可能とした。また、ヘテロダイナミックラジオメータの開発を行った。ヘテロダイナミックラジオメータは高時間・高空間分解能で電子温度が測定できるという長所があるが、IF帯域が広くできないために1台で測定できる範囲が狭いという欠点があった。これを克服するために、194GHz帯ヘテロダイナミックラジオメータと164GHz帯ヘテロダイナミックラジオメータを導入することにより測定領域を拡大することができた。特に、164GHz帯ヘテロダイナミックラジオメータでは、広帯域のIFアンプを導入することにより従来の2倍の周波数帯域をカバーすることができた。この結果、ヘテロダイナミックラジオメータの測定範囲を従来の4倍に拡大することができた。さらに、回折格子型分光装置用の検出装置の開発を行った。開発に当たっては、検出素子冷却用クライオスタットやプリアンプにおいて既設装置の性能を上回るものを開発している。クライオスタットの導入により、既設の検出装置では問題となっている電磁ノイズが皆無となり、微小な電子温度揺動も測定が可能となっている。また、プリアンプとして直流結合型アンプを開発することにより、ディスラプションやELMなど、電子温度が急激に変化した場合の電子温度測定が可能となった。直流結合アンプにおいて問題となるバイアス電圧は、JT-60Uの放電シーケンスで用いられている信号を取り込み放電直前に打ち消すことにより解消できている。さらに、ノイズ測定用チャンネルが不要になったため全てのチャンネルでECE測定ができるようになった結果、内部輸送障壁近傍の電子温度を詳細に測定することが可能となった。

ECE測定装置の開発に加え、データ解析手法の開発も行い、特異値分解を用いたデータ解析手法を考案しECEデータ解析に適用している。その結果、特異値の大きい項のみを取り出すことにより、電子温度分布やMHD不安定性の特徴を失う

ことなくノイズを除去することに成功している。また、特定の項を取り出すことによりMHD不安定性の特徴が抽出できることを明らかにした。今回の手法は、不安定性の構造を自動的に解析できる可能性があり、将来の炉心計測にも適用できると期待できる。さらに、最大エントロピー法を用いたフーリエ分光法の開発を行っている。従来、ELMyHモードフェーズでは非熱的放射パルスのためにフーリエ分光による電子温度分布測定ができなかった。本論文では、非熱的放射パルスを除去する方法、および欠損の生じた干渉信号からスペクトルを推定する方法を開発した結果、電子温度分布測定が可能となったことを説明している。

第4章では高 $\beta$  pHモード放電におけるNTMの特性について述べている。高 $\beta$  pHモード放電はJT-60Uで開発された運転モードで、ITERの運転方式とも整合性がある。本論文で、定常高 $\beta$  pHモード放電におけるNTMの特性の解析を行っている。NTMは高 $\beta$  pHモード放電など、ベータ値の高い正磁気シアプラズマにおいて問題になると考えられ、ITERの標準運転モードにおいても発生すると考えられる。本論文では、規格化衝突度および規格化ラーマー半径が1より十分小さいプラズマにおけるNTMの特性を調べている。特に、中心安全係数が1よりも大きく、鋸歯状振動などのMHD不安定性が発生していないときの特性は他装置ではほとんど解析されていないので、本論文の結果はこの点からも重要である。本解析により、(i)  $n=2$  および  $n=3$  モード ( $n$ はトロイダルモード数) 発生時のポロイダルベータ値は0.6以上である、(ii) 圧力勾配が高い領域の有理面に対応するモード数が現れやすい、(iii) NTM発生時の規格化ベータ値 $\beta_N^{\text{on}}$ は消滅時の規格化ベータ値 $\beta_N^{\text{off}}$ よりもかなり大きく、その比 $\beta_N^{\text{off}}/\beta_N^{\text{on}}$ は0.1-0.4程度である、(iv) 電子温度分布測定から評価した磁気島幅は新古典テアリングモード理論から予測される幅と同程度である、(v) テアリングモード発生時の実験パラメータを用いて計算コードで安定性解析を行った結果、テアリングパラメータ $\Delta'$ は負である、という結果を得ている。また、 $m/n=3/2$  ( $m$ はポロイダルモード数)のNTM発生時の規格化ベータ値は規格化衝突度 $\nu_e$ および規格化ラーマー半径 $\rho_i$ を用いて、 $\beta_N^{\text{on}} \propto \nu_e^{0.4} \rho_i^{1.0}$ と書けることも明らかにしている。当初、高 $\beta$  pHモード放電で観測されるテアリングモードがNTMかどうかは明らかではなかったが、上記の結果により、NTMである可能性が高いことを説明している。なお、発生・消滅時のベータ値に関して得られた $\beta_N^{\text{on}} \gg \beta_N^{\text{off}}$ という結果は、一度NTMが発生するとベータ値を大幅に下げないかぎり消滅しないことを意味していて、NTMの抑制(発生回避または安定化)が重要であることを示している。

第5章はNTMの抑制による高 $\beta$  pHモード放電の定常化および高性能化について述べている。NTMを抑制するため、(i) 電流分布や圧力分布の最適化によるNTMの発生回避、(ii) 電子サイクロトロン波入射による安定化を行った。その結果、1.8MAのプラズマ電流を、NB駆動電流、ブートストラップ電流、EC駆動電流により維持し、非誘導電流駆動のもとでの核融合三重積の世界最高値 $3.1 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ を達成している。これはこれまでの値を50%上回るものである。この成果の達成にあたり、(i)の方針で再現性よくNTMの発生を回避することに成功している。また、得られたプラズマの規格化衝突度はITERと同程度、規格化ラーマー半径は約4倍であり、これまでよりさらにITERに近い領域に到達できている。また、駆動電流の半分を自発電流により維持し、ITERにおける駆動電流割合 $I_{\text{NB}}:I_{\text{BS}}=1:1$ を実現することができている( $I_{\text{NB}}$ 、 $I_{\text{BS}}$ はそれぞれNB駆動電流、自発電流)。さらに、規格化ベータ値やHファクタはITERでの想定値の80%以上達成できていて、総合性能の高いプラズマを得ることに成功している。また、NTMが発生するベータ値に漸近するような放電シナリオを採用することにより、NTM発生後も顕著な閉じ込め劣化を引き起こさずに高ベータプラズマが維持できている。その結果、規格化ベータ値が2.7のプラズマを7.4秒間(電流拡散時間と同程度)維持することに成功している。この結果は、NBの入射パルス幅の上限や三角度コイルの電源容量等、機器性能で決まる領域まで高ベータプラズマを維持できた点で重要である。

さらに、EC電流駆動によるNTM安定化を行うため、NTM発生位置の同定とEC波入射角の最適化を実時間で行うシステムを世界で初めて開発している。このシステムでは、まず、コーシー条件面法により実時間でプラズマ形状を計算してNTM発生位置のおおよその位置を算出する。次に、ヘテロダイナジオメータで測定した電子温度揺動分布から磁気島中心位置を実時間で同定する。さらに、磁気島中心にECCDを行うようにEC波入射装置の可動ミラーを駆動する。この一連の計算は10ms以内ででき、NTMが成長する時間スケール(数100msオーダー)よりも十分短い。この実時間NTM安定化システムを用い、高ベータ領域( $\beta_p=1.1$ 、 $\beta_N=1.5$ )における $m/n=3/2$ のNTMの安定化に成功し、安定化によりベータ値やHファクタが10%程度改善している。EC波の入射角度を実時間で最適化しNTMを安定化することはITERでも想定さ

れていて、今回の結果は、このシナリオを実証するものである。

第6章は総括で、本論文で得られた成果を要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、高い閉じ込め性能の高温プラズマを得ることを目的とした、臨界プラズマ実験装置JT-60Uにおける電子サイクロトロン放射（ECE）測定装置の開発、高ポロイダルベータ（ $\beta_p$ ）Hモードにおける新古典テアリングモード（NTM）特性の理解およびNTM発生の抑制による高 $\beta_p$ Hモードプラズマの高性能化について研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 核融合プラズマにおいてECE測定装置は電子温度測定のための重要な位置を占める。本論文では、ECE測定装置のヘテロダイナラジオメータおよび回折格子型分光装置用検出装置の開発を行い、電子温度分布の高時間・高空間分解能測定を実現した。さらに、特異値分解および最大エントロピー法を用いた信号処理法を開発し、ECE信号に適用して、前者に関しては不安定成分の分離やノイズ除去を、また後者に関してはELMyHモード中のフーリエ分光法による電子温度分布測定を可能にした。

2. NTMはベータ値の高いプラズマにおいて発生し、閉じ込め性能を劣化させるため、その特性を明らかにすることは重要である。本論文では、(1) NTMの発生領域として圧力勾配の増大する有理面に現れやすいこと、(2) NTM発生時のベータ値とNTM消滅時のベータ値にヒステリシスが存在すること、(3) NTM発生時の規格化ベータ値には、規格化衝突周波数依存性や規格化ラーマー半径依存性があることを明らかにした。

3. NTMの抑制によるプラズマ高性能化の手法として、電流分布や圧力分布の最適化によるNTM発生回避および電子サイクロトロン波電流駆動によるNTM安定化を検証した。その結果、1.8MAのプラズマ電流をNB駆動電流、EC駆動電流及び自発電流により維持し、完全非誘導電流駆動を達成するとともに、核融合三重積を向上させることができた。更に、このプラズマは閉じ込め改善度、規格化ベータ値や総合性能の点からも優れていることを検証した。

4. 上記の手法を活用し、ポロイダル磁場コイルの電源容量の改良と放電シナリオの最適化により、規格化ベータ値が2.7のプラズマを7.4秒間（電流拡散時間程度）維持することに成功し、機器性能で決まる運転領域までJT-60Uの高ベータプラズマ維持時間の伸長を可能にした。

5. また、電子サイクロトロン波入射による実時間NTM安定化を行うため、ECE測定装置を用いたNTM発生位置の同定とEC波入射角の最適化を実時間でを行うシステムを開発した。このシステムを用いることにより高ベータ領域におけるNTMの実時間安定化が可能となり、ベータ値やHファクタの増加に寄与することができた。

以上、要するに本論文は、核融合プラズマの定常維持において課題となるNTMの特性を明らかにするとともに、その抑制方法を見出し、プラズマ閉じ込めの高性能化及び核融合炉の早期実現に貢献したもので、学術上、実際上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年2月23日実施した、論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。