

論文の内容の要旨

論文題目 Electron temperature and density profile measurement in spherical tokamaks started-up by radio frequency waves

(高周波波動で立ち上げられた球状トカマクにおける電子温度・密度分布計測)

氏名 富樫 央

核融合発電の実証には、高温・高密度プラズマの長時間維持が重要である。現在の主流は、外部磁場とプラズマ自身の電流によって形成される「トカマクプラズマ」の研究である。その中でも、外形を球状に近づけた「球状トカマク (ST)」は閉じ込め効率と安定性に優れている。通常型トカマクではプラズマ電流の立ち上げに中心ソレノイド (CS) を用いるが、コンパクトなST型核融合炉を実現するにはCSの除去が求められる。従って、CSを用いない電流立ち上げ手法の確立がSTの最大の課題である。通常型トカマクであるJT-60Uにおいては、電子サイクロトロン波 (ECW) 及び低域混成波 (LHW) と呼ばれる周波数の異なる高周波 (RF) 波動を用いて、CSを用いないプラズマ電流立ち上げに成功した。しかしながら、STにおいてはRFの伝搬が通常型トカマクと大きく異なることから、同様のシナリオが適用できるかが不明である。これを検証するため、多くのST装置でRFによる電流立ち上げ実験が行われている。しかしながら、通常型トカマクで行われたような高い電流駆動効率は未だ得られておらず、立ち上げシナリオの最適化に向けた研究が行われている。

本研究では、ST装置であるTST-2およびQUESTを対象として、LHWおよびECWによる電流立ち上げ・維持の実験を行った。電子温度および電子密度の分布はプラズマの基礎パラメータであるが、LHWで駆動されたSTプラズマの電子温度・密度分布計測はこれまでに行われていない。そこで、本研究では、高性能なトムソン散乱 (TS) 計測システムの開発を行う。また、LHWの吸収分布を示す高速電子由来の硬X線のエネルギー流束分布を計測するため、硬X線計測システムの開発を行う。種々のプラズマに対してこれらの計測を行い、プラズマや波動の評価を行う。

TS計測法は、高出力のYAGレーザーをプラズマ中に入射して得られるトムソン散乱光を分光することにより、電子温度・密度分布を計測する手法である。TST-2ではこれまでにCSで立ち上げられたプラズマに対するTS計測に成功している。一方、LHW駆動プラズマに対しては、LHWの伝搬条件がCS駆動のプラズマよりも電子密度が1-2桁低いところにあり、TS計測で得られる信号量もそれに比例して小さくなるため、これまで計測が不

可能であった。そこで、高い信号対雑音比(SN比)を得るため、いくつかの改善を試みた。また、バルク電子の温度の非等方性は、バルク電子の閉じ込め、高速電子の閉じ込めや減速を反映しているため、測定する意義があり、本研究では電子温度非等方性を計測するシステムの開発も行う。

プラズマや波動の評価やアンテナの設計には、光線追跡コードGENRAYおよびフォッカー・プランクコードCQL3Dによるシミュレーションが有用であり、電子温度・密度分布計測の結果はそれらの境界条件として使用される。また、硬X線計測で得られるエネルギー流束分布はシミュレーション結果の妥当性を評価する上で重要である。

QUESTでは、先行研究において高効率の集光光学系を持つトムソン散乱計測法が開発され、ECW駆動プラズマに対して空間6点の分布計測に成功している。本研究では計測点を12点に拡大し、時間的な計測精度をこれまでの ± 50 msから μ sのオーダーまで高めた。このシステムを用いてECW駆動プラズマの分布の時間発展を計測する。またQUESTでは、先進的な燃料補給法であるコンパクトトラス(CT)入射法を用いた実験が行われている。CT入射とTS計測のタイミングを同期させることで、CT入射前後の密度分布変化を計測する。

TS計測におけるSN比向上のため、同軸マルチパス光学キャビティを開発した。これは、ポッケルスセルを用いてレーザーの偏光を高速制御することにより、同軸光路上にレーザーパルスを閉じ込めることで信号量を増倍する手法である。TST-2では過去にプロトタイプ光学キャビティが開発され、高密度のCS駆動プラズマの同軸マルチパスTS計測に成功している。本研究では光学キャビティに必要な最小限の素子のみで構成される光学系を開発し、一往復ごとの光学損失をこれまでの30%から20%に抑えた。真空容器に導入した窒素ガスに対してラマン散乱計測を行い、得られたマルチパス信号から、最大2倍のSN比が得られることが予測された。

TST-2におけるマルチパスTS計測システムは、計測視線と磁場の向き関係から電子温度の非等方性が計測可能である。レーザーパルスを何往復もさせるマルチパス方式は、光学的に不安定になりやすく、低密度プラズマ計測において実用化には至らなかったが、1往復させる同軸ダブルパスTS計測は比較的容易である。この手法を適用したところ、TST-2のLHW駆動プラズマの温度は10%程度の誤差の範囲内で等方的であった。

その他に、検出器であるアヴァランシェ・フォトダイオード(APD)の高性能化および印加電圧の最適化により、SN比を数倍向上させるなど、種々の改善を図った。

本研究における硬X線計測システムの要求性能は、ミッドプレーン上で分布計測が可能であることと、数十keVから数百keVのエネルギー帯を誤差 ± 10 %程度以下の分解能で計測できることである。TST-2では数十keVの硬X線を計測するために3 mm厚の薄いホウケイ酸ガラスを計測窓として使用している。この窓を用い、しかも広い範囲での分布計測を可能とするには、システムをコンパクトにして、トロイダル磁場コイル内側の空間

に配置しなければならない。硬X線計測においてはシンチレータと光電子増倍管（PMT）を用いるのが一般的であるが、PMTの増幅率は磁場の影響を大きく受けるため、TFコイル内部に設置することはできない。PMTの代替と成り得る半導体検出器は、TST-2の先行研究において、低エネルギー帯の計測には不向きであった。そこで、直径1インチのシンチレータ、PMT、およびシンチレーション光を伝送する直径25 mmの亚克力ライトガイドを用い、要求性能を満たす硬X線計測システムを開発した。視線は鉛のピンホールによってコリメートされており、回転ステージと直線ステージを用いることで赤道面上の幅広い領域を計測できる。このシステムを用いて再現性の高い放電を複数回行い分布を計測する。

TST-2では、これまでの最大値である25 kAのプラズマ電流を80 kWのLHWで立ち上げることに成功した。TS計測法により再現性の高い放電に対して空間10点の電子温度・密度分布計測を行った。結果として、LHWで駆動された球状トカマクの電子温度・密度分布が初めて得られた。密度分布は $7 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 程度のピークを持つ分布であった。一方で、電子温度分布は内部が10 eV前後で周辺が50 eV前後の高温となるホローな分布であった。異なる電流を持つプラズマに対して同様の計測を行った際にも同様にホローな分布が得られた。また、電子温度がプラズマ電流値に依存していることが示唆された。

高い吸収効率が期待される上側入射アンテナが新たに開発され、そのアンテナを用いた初期実験においてTS計測を行った。結果として、期待されていた電子温度の中心ピーク分布は得られず、これまでと同様のホローな電子温度分布であった。この結果から、アンテナの設計時に想定していたターゲットプラズマを上側入射アンテナ単独で生成するのは難しいことが分かり、外側入射アンテナを併用する同時入射シナリオが提案された。

硬X線計測の結果、高速電子の速度分布関数をマクスウェル分布だと仮定した時の実効的な温度は10 keVオーダーであると見積もられ、プラズマ電流とともに実効温度が増加する傾向が見られた。また、30 keVにおけるエネルギー流束分布は、CS側の視線でより大きい値をとるような分布であった。

これらの結果をもとに、TST-2におけるLHW駆動プラズマの平衡について考察する。TS計測で得られた電子温度・密度から計算したバルク電子の圧力は1 Pa程度であった。一方で、磁気計測および平衡解析コードEFITを用いて見積もられたプラズマ圧力は中心で200 Pa程度であった。また、ドップラー分光法で得られる典型的なイオン温度は1-10 eVである。従って、バルクの電子およびイオンだけでは200 Paの圧力を説明できず、LHWによって生成された高速電子がプラズマ平衡において支配的であることが示唆される。硬X線計測によって得られた実効温度は30 keV程度であることから、高速電子の実効的な密度は 10^{15} m^{-3} のオーダーであり、バルク電子に対する存在比は0.1 %のオーダーであると計算できる。

QUESTにおけるECWによって駆動されたポロイダルフィールドヌル(IPN)配位の放電においてTS計測を行った。分布計測の結果、EC共鳴層において数百eVの高温となる今日磁場側と弱磁場側で非対称な分布が得られた。TS計測によって得られたバルク電子の圧力は1 Paのオーダーであり、IPN配位が準平衡状態となることで規定されるポロイダルベータ値に対してTS計測から計算される値は2桁小さい。従って、QUESTでの先行研究やTST-2における今回の結果と同様に、プラズマ全体の平衡を担っているのはECWによって加速された高速電子であることが示唆される。また、CT入射実験においてTS計測を行ったところ、CT入射前後の密度分布変化の測定に初めて成功し、CT入射後にプラズマコアにおける電子密度の増加が観測された。

本研究において、高性能のトムソン散乱計測システムを開発し、LHWで駆動された球状トカマクの電子温度・密度分布の計測に初めて成功した。また、硬X線計測システムを開発し、TST-2における硬X線エネルギー流束分布の計測に成功した。その結果、通常型トカマクとは異なる平衡状態となっていることが示唆された。QUESTにおけるECW駆動のプラズマにおいても同様の平衡が得られた。RFで駆動されたプラズマの更なる理解には、低温のバルク電子、低密度の高速電子、低温のバルクイオンを考慮した3流体非対称平衡モデルなどの理論構築が望まれる。