

トムソン散乱計測法による非誘導立ち上げ球状トカマクプラズマの電子温度密度分布計測

2018年3月修了 複雑理工学専攻

高瀬・江尻研究室 修士課程2年 47166124 松本直希

指導教員 江尻晶 准教授

キーワード：球状トカマク，トムソン散乱計測，電子温度，電子密度

1. 研究背景

核融合発電の実現には、高温高密度プラズマをある有限領域に長時間閉じ込める必要がある。そのプラズマの閉じ込め方式として、螺旋状の磁力線の籠で閉じ込めるトカマク方式がある。なかでも、球状トカマク (ST) はコンパクトで閉じ込め効率と安定性に優れている方式である。ST を利用した核融合炉を実現するには、中心ソレノイドコイル (CS) の除去が必須である。したがって、CS を用いない非誘導電流立ち上げシナリオの構築と確立が ST の研究課題である。ST の非誘導立ち上げシナリオを最適化するにはプラズマの基礎パラメータである電子温度 (T_e) と電子密度 (n_e) の分布を計測することは重要である。この電子温度密度分布を計測する手法としてトムソン散乱 (TS) 計測法がある。

2. 研究目的

本研究は、ST である TST-2 装置 (東京大学) で低域混成 (LH) 波を用いた非誘導電流立ち上げプラズマを対象とする。同様に、QUEST 装置 (九州大学) で電子サイクロトロン (EC) 波、同軸ヘリシティ入射 (CHI) による非誘導立ち上げプラズマを対象とする。これら各種プラズマに対して TS 計測法を用いて電子温度密度分布を計測することで、その性質と特徴、振る舞いを定量的に把握し調べることを第1の研究目的とする。さらに、これら種々のプラズマ計測と並行して、TS 計測システムの高性能化を目指した開発とその性能試験を行い、現行の TS 計測システムへの導入を目指すことを第2の研究目的とする。

3. トムソン散乱計測法

トムソン散乱計測法では、プラズマ中にレーザー

を入射し、プラズマ中の電子によるトムソン散乱光を測定する。その散乱光の波長スペクトルを観測し、スペクトルの半値幅と強度からそれぞれ電子温度と電子密度が得られる。図1は TST-2 におけるトムソン散乱計測システム概念図である。QUEST でも同様のシステムを用いている。本 TS 計測システムでは装置中央平面上の空間点に対して計測を行っており、図2にその計測される空間点の模式図を示す。

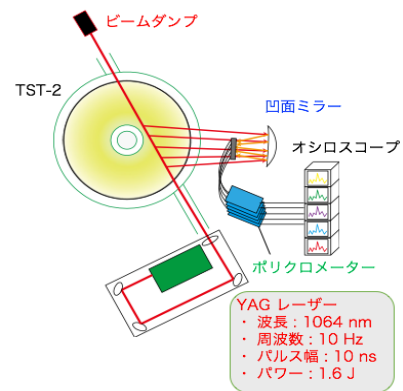


図 1. TST-2 トムソン散乱計測システム概念図

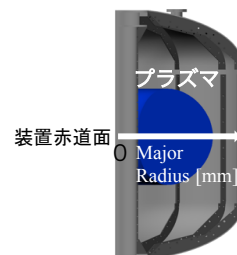


図 2. TST-2 ポロイダル断面における TS 計測空間点の模式図。

4. システムの高性能化

TS 計測システムの高性能化のために、本研究ではデータ収集の半自動化、迷光対策、アライメント自動化、周辺部専用 TS 計測システムの開発と性能試験を行った。データ収集の半自動化を行ったことで、

これまで問題となっていたデータ収集時に要する時間と人為的ミスによるデータ欠損を大幅に解消することに成功した。迷光対策では、迷光というTS計測の重大なノイズ源を解消するために新たに円錐形の迷光吸収部品と虹彩絞りをを用いて、迷光が減少するかの試験をそれぞれ行った。結果として、ある空間点では迷光は減少したが、ある空間点では迷光が増大し、全空間点で迷光を低減することは出来なかった。そのため今後の課題として迷光の発生機構の特定が必要と考えられる。アライメント自動化では、遠隔的にミラーとカメラを操作してレーザー位置の制御システムの構築を目指した。ミラーに関しては、遠隔アライメントに必要な要件を満たしたシステムの構築に成功した。レーザー位置をモニターするカメラに関してはレーザーの撮影には成功したが白飛び現象が発生し、撮影時の設定をさらに最適化する必要があることが判明した。周辺部専用TS計測システムでは、3枚組レンズを用いた現行のTS計測システムの集光光学系とは独立した新たな集光光学系を設計設置し、オーミックプラズマでその性能試験を行った結果、現行のシステムより約2倍の集光効率となる結果が得られた。

5. プラズマ測定結果と考察

TST-2では、プラズマ上部に設置されている上側アンテナと弱磁場側に設置されている外側アンテナでLH波を入射することでプラズマを非誘導的に立ち上げている。本研究では、特にバルク電子への加熱が期待される上側アンテナによるLH波駆動プラズマの性質を調べるため、外側と上側アンテナの比較やトロイダル磁場反転、LHパワー変調実験を行った。図3に外側アンテナ単独入射、外側と上側アンテナの同時入射、外側から上側アンテナへの切り替え入射の各場合でTS計測を行った時の電子温度密度分布を示す。結果として、各場合で大きな差は見られなかった。これは、入射アンテナによらずLH波の伝搬（ア

ップシフト）が大きくは変わっていないためと考えられる。QUESTでは8.2 GHz + 28 GHz EC波駆動プラズマとCHIプラズマのTS計測を行った。EC波駆動プラズマでは、8.2 GHzと28 GHz EC波が同時入射されている時間帯では、高温低密度となる傾向が見られた。28 GHz EC波が単独入射されている時間帯では、高密度低温となる傾向が見られた。また、電子温度が急激に減少する減少が見られ、これは28 GHz EC波のカットオフ密度によるためと考えられる。LH波駆動プラズマとEC波駆動プラズマともに、プラズマの平衡と電流を担っているのは高速電子であることが示唆された。CHIプラズマ計測では、NSTX装置(プリンストン大学)[1]のCHIプラズマと同様な高密度低温という計測結果が得られた。

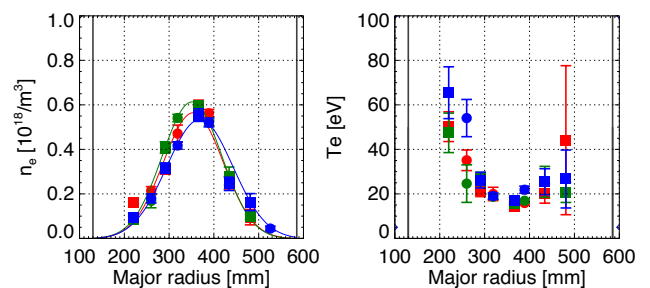


図 3. LHW 駆動プラズマに対する電子密度 (左) 温度 (右) 分布計測結果。横軸の Major radius [mm] は図 2 のように対応している。

6. まとめ

TS計測システムの高性能化のために各種開発と性能試験を行い、一定の成果を収めた。今後は現行のTS計測システムへの適用を目指す。TST-2, QUESTにおいて、非誘導的に立ち上げられた各種プラズマの電子温度密度分布計測を行った。LH波駆動プラズマとEC波駆動プラズマともに、プラズマの平衡と電流を担っているのは高速電子であることが示唆された。また、QUESTにおけるCHIプラズマの計測に初めて成功し、高密度低温という結果が得られた。

参考文献

[1] R. Raman *et al.*, Nuclear Fusion 47, 792 (2007).