

高周波立ち上げ球状トカマクにおける電子温度密度分布計測

複雑理工学専攻 47-186132 松崎亨平

指導教員 江尻晶 准教授

キーワード：プラズマ、トカマク

修了年月 2020 年 3 月

1.背景・目的

核融合発電の実現にはプラズマが引き起こす様々な現象を理解する必要がある、そのための重要な要素に電子温度 T_e 、電子密度 n_e がある。この T_e 、 n_e を計測する信頼性の高い手法としてトムソン散乱計測がある。トムソン散乱計測では、プラズマ中に高出力のレーザーを入射し、プラズマ中の電子の散乱光を検出することで温度密度の空間分布を算出することができる。本研究では、東京大学のTST-2と九州大学のQUESTを研究対象としており、それぞれの装置で電子温度密度分布を計測することによってプラズマの振る舞いを知ることが目的である。

2.TST-2 における実験

TST-2 では、低域混成波を用いたプラズマの立ち上げ・電流駆動を主に研究しており、低域混成波は T_e の高い条件の方が波の吸収が良く、損失の少ない電流駆動を行うためにはプラズマ中心付近の T_e が高くなる必要があると考えられる。そこで、 T_e の主な決定要素と考えられる n_e と RF パワー P_{RF} 、トロイダル磁場 B_t 、プラズマ電流 I_p の4つのパラメータに注目し、それぞれのパラメータが様々に異なるプラズマを計測することによって T_e の依存性を調べた。また、重水素、軽水素を燃料とした場合、上側アンテナ (top)、外側アンテナ (out)から波を入射した場合、磁場順転 (CW)、反転 (CCW)の場合の比較も行った。また、このような複数パラメータを変更した実験は時間と手間がかかるため、今まで手動で行われていた計測データ収集を自動化し、計測を行った。注目した各パラメータはお互いにある程度の相関を持っているため、各パラメータの T_e 依存性は単純には評価が難しかった。そのため、最もデータ点の多い重水素 topCW のデータについて各パラメータにフィッティングを行い、 T_e に対するスケーリング則を導出した。その結果、電子温度に対する各パラメータの依存性は、電子密度の約-1.2 乗、トロイダ

ル磁場の約 0.72 乗、RF パワーの約 0.11 乗となり、 I_p についてはほとんど依存性が見られなかった。重水素 topCW のスケーリング結果を基準にして軽水素 topCW、重水素 outCW、重水素 topCCW の場合での電子温度を算出し、重水素 topCW と比較した。比較した結果を図 1、図 2 に示す。軽水素 topCW と重水素 topCW の間に大きな差は見られなかったが、重水素 topCCW、重水素 outCW は重水素 topCW と比較して値が高い傾向が見られた。

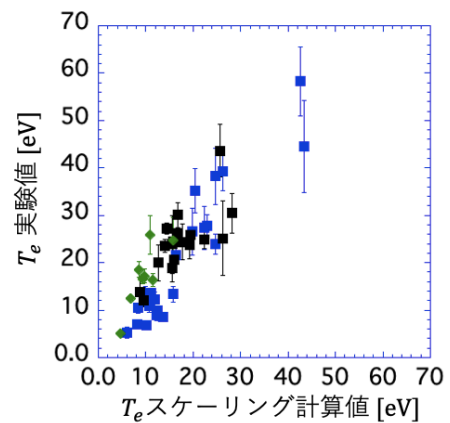


図 1 重水素 topCW(青)と重水素 topCCW(緑)重水素 outCW(黒)の電子温度比較

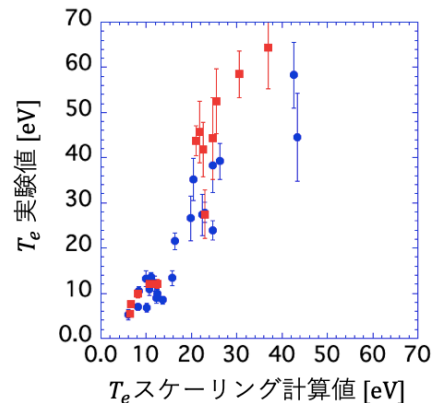


図 2 重水素 topCW(青)と軽水素 topCW(赤)の電子温度比較

3. QUEST における実験

QUEST においては、昨年 TST-2 で行った手法を用いて迷光対策を行ったほか、28 GHz 電子サイクロトロン波を用いて立ち上げられたプラズマの計測を行った。迷光とは、トムソン散乱光以外の信号のことで、ショットノイズを引き起こすため、密度の低いプラズマを計測する際には大きな障害となる。迷光は入射レーザーの光軸から必要以上に広がった光が真空容器内部で反射することによって引き起こされると考えられる。そのため、ビーム径を絞るアパーチャーによる対策が一般的だが、その径や配置は最適化されていなかった。そのため、昨年開発した、スクリーンとカメラから構成される広がり計測システムを使用し、アパーチャーの径と配置を変えて試験した。試験結果を図 3 に示す。入射管に直径 15 mm のアパーチャーを 5 枚実装するのが最も効果的とわかった。図 4 に QUEST にアパーチャーを実装する前後の各空間点の迷光の比較を示す。実装後は実装前と比較して約 1/5 まで減少させることに成功した。

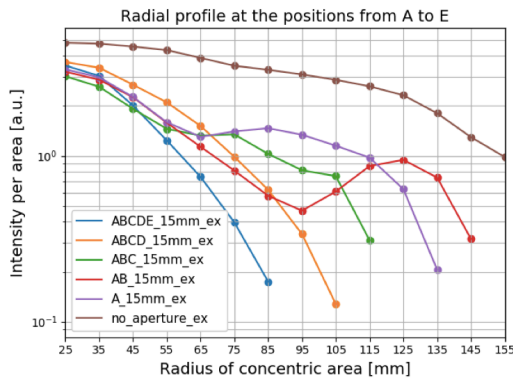


図 3 スクリーン径方向の強度分布解析の結果例。スクリーン上の散乱光の一定領域のプロット

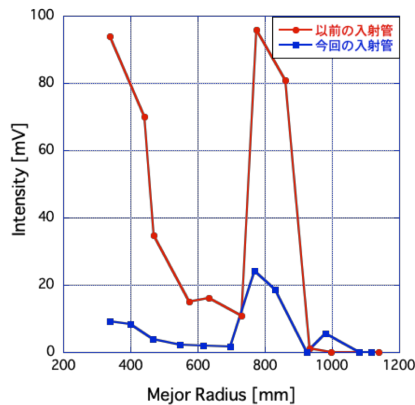


図 4 迷光対策前(赤)と迷光対策後(青)の迷光信号量比較

次に、28 GHz 電子サイクロトロン波をプラズマに入射する際に、入射する角度を変えることで共鳴層位置が見かけ上変化し、波が吸収される電子のエネルギー帯が変化すると予想されており、検証実験を行なった。垂直入射の場合と斜め入射の場合で計測を行った。図 5 に I_p 、硬 X 線の時間変化、図 6 に電子温度密度分布を示す。垂直入射の条件ではバルク電子が最大 200 eV 程度まで加熱されたのに対し、斜め入射の条件では高温度の分布は観測されなかった。また、 I_p 、硬 X 線のカウンタ数は垂直入射の条件よりも斜め入射の条件の方が高かった。本結果は予想と矛盾しない結果となった。

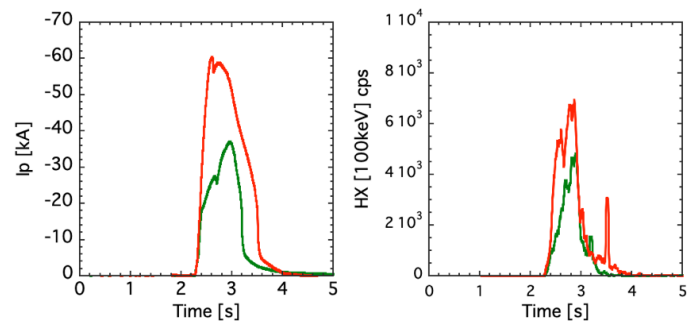


図 5 I_p (左)と HXR(右)の時間変化。
緑が垂直入射、赤が斜め入射。

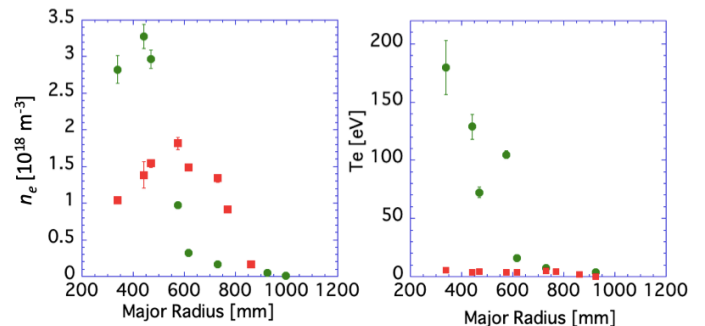


図 6 垂直入射(緑)と、斜め入射(赤)の
電子密度分布(左)と電子温度分布(右)

4. 結論

TST-2 ではプラズマ中心の T_e のスケーリング則を導出し、密度と磁場に比較的大きな依存性を持つことがわかった。QUEST においては、入射管のアパーチャーの径と配置を最適化し、迷光を 1/5 に減らすことに成功した。また、EC 波の入射角度による加熱の性質の違いを実験的に確かめることができた。