

TST-2 球状トカマク型装置における周辺部電子温度密度計測  
高瀬・江尻・辻井研究室 修士課程 2 年 47-196104 大澤佑規  
指導教員 江尻晶 准教授

## 1. 研究背景と目的

核融合発電の実現のために、プラズマの内部状態を理解することは重要である。TST-2 球状トカマク型装置では、低域混成波 (LHW) を用いた非誘導的なプラズマ立ち上げ及び電流駆動実験を行なっている。プラズマの内部状態を知る上で、電子密度電子温度は基本的かつ重要なパラメータであり、TST-2 では非接触かつ信頼性の高い計測手法であるトムソン散乱計測法を用いてそれらの空間分布を計測している。

これまでの TST-2 での実験から、LHW で維持されたプラズマはその周辺部領域で電子温度が高くなり、中心部では電子温度が低くなることがわかっていった。また、特に内側の電子温度が外側の電子温度より高いことが示唆されていた。しかし、周辺部は電子密度が低く、トムソン散乱光は弱く、精度の良い測定を行うのは難しかった。周辺部領域における SN 比の改善に取組み、空間分布を測定することで、LHW の加熱機構の解明に貢献できると期待される。よって本研究では、周辺部の電子温度密度分布を取得し、LHW 駆動プラズマ中の電子の挙動を知ることが目的とした。

## 2. 実験結果

周辺部計測の SN 比を向上させるためにファイバーの変更、積算数の増加を試みた。ファイバーの開口数を従来の 0.37 から 0.48 にし、信号量の増加を図ったが、実験の結果、信号量は従来の 17 % に減少した。積算数に関して、従来は 5 放電を積算していたが、特に

電子密度の低い周辺部で SN 比を向上させるべく、積算する放電数を 5、10、15、20 とし、比較を行った。その結果、積算数の増加に伴い信号の相対誤差は減少し、5 放電積算時の相対誤差に対して 20 放電積算時の相対誤差が 60 % と最小になり、本研究では積算数を 20 とした。

以上を踏まえて実験、測定を行った。電子温度分布を図 1 に示す。分布を磁気面関数であるポロイダル磁束の平方根 ( $\chi^{1/2}$ ) の関数として表示すると (図 2)、同じ  $\chi^{1/2}$  に対して、エラーバーの範囲を超えて電子温度が異なることがわかる。通常、電子温度は磁気面上で一定であり、 $\chi^{1/2}$  の一価関数であると考えられるため、この結果は吟味する必要がある。

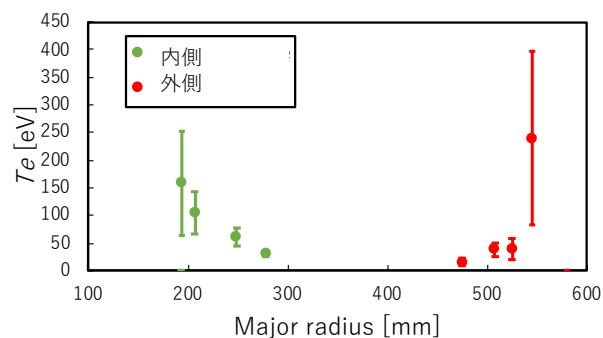


図 1. 大半径方向の電子温度分布

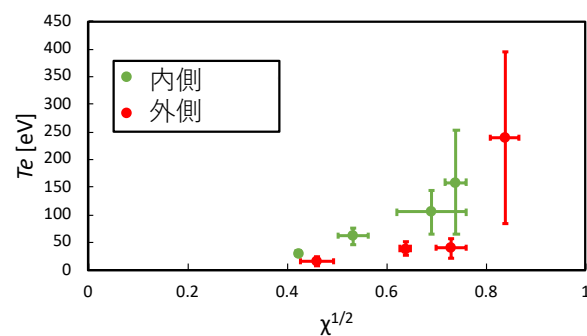


図 2.  $\chi^{1/2}$  を横軸にしたときの電子温度分布

### 3. 電子温度の非等方性

まず、周辺部において、内側電子温度が外側電子温度より高いと仮定し、電子温度の非等方性モデルを用いてその説明を試みた。速度分布に非等方性があると、異なる測定位置での、異なる散乱ベクトルのため、異なる温度として観測される。先行研究等から予測される電子温度の大小関係は  $T_{e,co} > T_{e,perp} > T_{e,ctr}$ （ここでこの3つは順に磁場に平行で電流を担う向きの温度、磁場に垂直な温度、磁場に平行で電流を担う向きと逆向きの温度）であるが、今回の実験結果は  $T_{e,ctr} > T_{e,perp}$  を示唆し、このモデルでは電子温度差の説明ができなかった。

### 4. 加熱・冷却モデル

次に、加熱・冷却モデルを用いて、温度差の説明を試みた。このモデルでは、ポロイダル断面において、プラズマ領域を内側と外側とに2分し、その間の輸送、加熱、冷却を評価した。その結果、閉じ込め時間 $\tau_E$ はバルク電子同士の衝突緩和時間 $\tau_{ee}$ 、内側から外側への電子の輸送時間 $\tau_{tr}$ より大きく、閉じ込めの悪さ（冷却）によって電子温度差の説明はできないことがわかった。より大きい冷却パワーを持つ冷却機構として、(1) 電子とイオンの衝突緩和（緩和時間は $\tau_{ie}$ ）、(2) 荷電交換反応の時定数 $\tau_{cx}$ 、(3) 電子によるイオン化に伴う冷却パワー $P_{ion}$ 、(4) 放射冷却による冷却パワー $P_{rad}$ 、(5) 放射再結合の冷却パワー $P_{rec}$ を検討した。衝突緩和時間 $\tau_{ie}$ は閉じ込め時間 $\tau_E$ より二桁程度スケールが大きく、荷電交換反応の時定数も十桁以上大きくなり、これらによる冷却の影響は少ないと考えられる。イオン化に伴う冷却パワー $P_{ion}$ が最も大きい値となったが、総冷却パワー $P_{sum}$ は加熱パワー $P_{RF}$ に

比べ10~33倍程度小さく、同様に冷却の影響は少ないと考えられる。

以上のように、電子温度差があると仮定して考察を行ったが、他に冷却パワーの大きい未知の冷却機構がある可能性や、実際は電子温度差がなく、測定上の精度がまだ悪いか、偶然（統計的な揺らぎによって）、電子温度差があるかのように算出されている可能性が考えられる。ただし、他の冷却パワーの大きい冷却機構については、温度の絶対値を説明できないという矛盾があることに留意する必要がある。また、測定、検討の精度をさらに高める必要がある。

### 5. 中心部における冷却機構

図1に示したホローな電子温度分布に対しても同様の冷却機構を考え、説明を試みた。結果として、中心部に流れ込む加熱パワー $P_{RFin}$ に対して総冷却パワー $P_{sum}$ の比は、最大で1/4倍程度となる。 $P_{sum}$ の主要な成分はイオン化に伴うエネルギー損失であるが、中性原子の密度に大きな不確定性があることを考慮すると、これら冷却機構によって電子温度分布がホローになっている可能性は否定できない。

### 6. 結論

本研究では、LHW駆動プラズマの周辺部における温度測定の精度を改善し、内側と外側の電子温度差の有無に関する吟味、差を生み出す機構の詳細検討を行い、未知の冷却機構の存在、測定精度の問題、統計的な揺らぎが今後の課題であることを明らかにした。また、同様の詳細検討をプラズマ中心部に適用し、中心部で低くなるホローな電子温度分布がイオン化に伴う損失を主とする冷却機構で説明できる可能性を見出した。