

修士論文要旨

修了年月	2019年3月
専攻名	複雑理工学専攻
氏名	飯田 勇介
学生証番号	47-176122
論文題目	TST-2 球状トカマクにおけるマイクロ波イメージング反射計を用いた電子密度揺動計測
キーワード	核融合、球状トカマク、プラズマ計測、不安定性
指導教員氏名	高瀬 雄一
指導教員役職	教授

当研究室では、核融合発電の実現を目指し、球状トカマク型装置 TST-2 を用いて高温プラズマの閉じ込めや立ち上げに関する研究を行っている。球状トカマクのプラズマでは、内部再結合現象 (IRE: Internal Reconnection Event) という現象がしばしば観測される。この IRE によってプラズマに蓄えられたエネルギーが失われ、時にプラズマが崩壊してしまうことが知られており、その発生機構や抑制方法を解明することが求められている。IRE についての先行研究では、磁場や軟 X 線 (SXR: Soft X-Ray) 放射、イオン温度、電流密度等の計測によって、IRE 前後の様々な物理現象が観測された。TST-2 の先行研究では、IRE の前兆現象の一つとして磁場や SXR 放射等の約 10 kHz の揺動が発生することが報告されている。また、先行研究のシミュレーションによって、IRE に伴い 3 次元的なプラズマの変形や物理量の変化が生じることが予測されている。

そこで、IRE 前後の物理現象の解明を目指し、プラズマの電子密度揺動を 3 次元計測することができるマイクロ波イメージング反射計 (MIR: Microwave Imaging Reflectometry) を TST-2 に新たに設置し、プラズマ計測を開始した。本研究では先行研究で報告された約 10 kHz の揺動に着目し、IRE に伴う物理現象の 3 次元構造を解明するための一つのステップとして、MIR によって計測された密度揺動と他の物理量の揺動との関係や、IRE 前後の密度揺動の 2 次元構造を明らかにすることを目的とした。TST-2 の OH 放電においてプラズマ計測を行い、取得したデータについて 4 つの解析を行った。

1 つ目は周波数解析およびコヒーレンス解析である。MIR の位相信号のスペクトログラムから約 10 kHz の電子密度揺動が観測された。また線積分密度や磁場、SXR 放射、 $H\alpha$ 発光の信号においても同程度の周波数の揺動が見られた。これらの信号と MIR 信号との相関を定量的に評価するためにコヒーレンスを計算したところ、約 10 kHz の周波数帯に $\text{coh}^2 \sim 0.6 - 0.9$ の相関があり、観測された揺動は密度や磁場、SXR 放射、 $H\alpha$ 発光に共通するコヒーレントな揺動であることがわかった。

2 つ目はこの約 10 kHz の揺動の振幅の解析である。MIR によって観測された密度揺動の振幅は、時間とともに成長することがわかった。この密度揺動の振幅の時間発展を、トカマク低磁場側 (LFS) の磁場・高磁場側 (HFS) の磁場・SXR 放射・ $H\alpha$ 発光の揺動と比較した。IRE 前後の時間帯において比較を行った結果、はじめに磁場揺動・SXR 揺動・ $H\alpha$ 揺動の成長が開始し、続いて MIR の密度揺動がピークを迎え、次に LFS の磁場揺動がピークを取り、その後 HFS の磁場揺動と SXR 放射の揺動がピークを迎え、そして $H\alpha$ 発光揺動のピークが続いて起こるという順序で、約 10 kHz の揺動の振幅が時間発展することが明らかになった。これは先行研究 Ref.[1] で報告された IRE 発生シナリオと矛盾せず、リコネクション発生前のプラズマの変形が電子密度揺動に影響を及ぼし、トラス外側でのリコネクション発生とともに LFS の磁場 \rightarrow HFS の磁場という順序で影響が広がったことを示唆する結果である。

3 つ目は相互相関関数を用いた揺動の伝搬方向の解析である。放電全体で見ると、約 10 kHz の密度揺動のトロイダル方向・ポロイダル方向の伝搬は、時間とともに向きが変化する。ポロイダル方向の揺動の伝搬は、時間平均するとポロイダル負方向を向いており、隣接チャンネル間の距離あたりの遅れ時間は、およそ -0.15 から $-0.05 \mu\text{s}/\text{mm}$ の値を取っていた。これを LFS の磁場揺動の伝搬と比較すると、絶対値は同程度で方向も一致する。密度揺動の伝搬方向がポロイダル正の向きであった時刻も存在したが、これは MIR の観測領域のスケールと LFS 磁気プローブの観測領域のスケールが異なるためだと考えられる。LFS 磁気プローブが観測するマクロなスケール ($\geq 4 \text{ cm}$) ではポロイダル負方向の伝搬が存在し、MIR が観測するマイクロなスケール ($\leq 4 \text{ cm}$) では局所的に伝搬方向が異なっていることが示唆された。また、IRE 発生時に注目し 7 つの放電についてトロイダル方向・ポロイダル方向の密度揺動の伝搬の特徴を調べたが、それらの放電においては再現性のある現象は確認されなかった。よって現状では IRE と約 10 kHz の揺動の伝搬方向との相関は明らかではない。サンプル放電の数を増やし、プラズマ電流・電子密度などのパラメータを変えたサンプルを用意し解析することで、特徴的な現象を抽出できるかもしれない。

4つ目は、計測の改善のために行った位相ランナウェイのプラズマ垂直位置依存性の評価である。位相ランナウェイとは実際の物理現象では想定できないような位相のジャンプやドリフトのことを指し、反射計の信号の質を悪化させる。解析の結果、プラズマの垂直位置を $z_{\text{out}} = 1.5, 2.0 \text{ cm}$ に維持することで、MIR の全チャンネルの位相ランナウェイの合計を最小化できることがわかった。

このように本研究では、MIR をはじめとする計測器を用いて IRE に関係する約 10 kHz の揺動の特徴や、密度揺動の 2次元構造について多くの知見を得た。さらなる計測の改善や揺動の 3次元解析を行うことで、揺動の空間的構造・時間的構造と IRE 発生との関係をより深く理解することができると期待される。

参考文献

- [1] N. Muzuguchi *et al.*, *Physics of Plasmas* **7**, 940 (2000)