

超高空間分解能周辺電流分布測定によるトカマクプラズマの境界構造の解明

Investigation on the edge structure of tokamak plasmas by edge current profile measurement with ultra-high spatial resolution

藤田 隆明 (Fujita Takaaki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹



研究の概要

核融合プラズマの計測装置として、リチウムビームを用いたゼーマン偏光分光システムを開発し、JT-60U装置のプラズマ周辺部における詳細な密度分布・電流分布を測定した。その結果、閉じ込め改善モード(Hモード)において、境界輸送障壁の間欠的崩壊時の動的挙動や境界輸送障壁内の局所的な電流ピークの存在を明らかにした。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：磁場核融合、プラズマ閉じ込め・安定性、Hモード、ELM

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER の標準運転シナリオである H モードにおいては、急峻な圧力勾配がプラズマ境界部に形成され(境界輸送障壁)、その特性は閉じ込め性能に密接に関係している。また、境界輸送障壁部で間欠的に発生する不安定性(ELM)によるパルス的な熱負荷はプラズマ対向材(ダイバータ)の損耗を引き起こし、その制御が求められている。境界輸送障壁の安定性は周辺部の圧力分布・電流分布に依存するが、電流分布の測定例は極めて少なかった。

2. 研究の目的

診断用リチウムビームを用いたゼーマン偏光計を開発して JT-60U トカマクの境界輸送障壁における詳細な密度分布および電流分布を測定する。温度分布・圧力分布等の従来の計測データと合わせて、境界輸送障壁の構造を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究遂行の上で根幹となるリチウムビーム入射部については大口径(50mm)の電子ビーム加熱型イオン源を用いることにより、高輝度ビーム(目標 10mA)を生成する。偏光分光測定部は、20 点の測定点を有し、高い空間分解能(1cm)を達成する。狭帯域のエタロンを使用して 0.1nm 程度のゼーマン分離スペクトルを抽出し、光弾性変調器(PEM)を用いて偏光成分を計測し、磁場のピッチ角を求める。密度分布は、ビーム発光分布からビームの減衰を考慮して

求める。

4. 研究の主な成果

(1) 高輝度低発散イオン銃の開発と運転

電子ビーム加熱型イオン源を設計・製作し、表面温度 1500 度で引き出し電流 10mA を達成した。また、空間電荷を考慮したビームの軌道計算を用いて、低発散角が得られるよう電極配置を最適化した。JT-60U の周辺プラズマ計測に適した 10keV 程度の比較的低いエネルギー領域で高電流ビームを生成するため、加速電極と接地電極の間に引き出し電極を設け、ビームエネルギーと引き出し電場強度を独立とした。テストスタンドでの調整により、観測点(中性化セルから 6.5m 下流)に到達した 10keV の中性リチウムビームでの等価ビーム電流 3mA、発散角 0.2 度、ビームパルス幅 50 秒、イオン源寿命 52.5A 秒を達成した。ビームの発光スペクトルの広がり は 0.055nm であり、ゼーマン偏光計測に十分適応できることを確認した。

(2) ゼーマン偏光計測部の開発と調整

エタロンの波長調整のため、ヒーターによる温度制御に加えて精密回転ステージによる入射角調整機能を有する検出器システムを開発した。1 放電中のビーム加速電圧スキャンにより、ビーム発光のドップラーシフトを変化させてエタロンの中心波長位置のずれを決定する新しい較正・調整手法を考案し、全測定点のエタロンの波長を調整した。

(3) 周辺密度分布の高空間時間分解能計測

JT-60U で初めて周辺密度分布を高空間(1cm)・高時間(0.5ms)分解能にて計測し、HモードプラズマにおけるELMによる輸送障壁崩壊現象の観測に成功し、以下の知見を得た。

- 1) 大振幅(type D) ELMによる崩壊後の境界輸送障壁密度の回復時間は10ms程度で、電子温度の回復時間(約20ms)より短い。崩壊割合は最大となる位置において30%程度。
- 2) トロイダル回転がプラズマ電流と反対方向の場合、同方向の場合よりもELM発生時のプラズマ蓄積エネルギーの減少割合が小さいことに対応し、崩壊割合が小さい。
- 3) 発生周波数が高い小振幅(grassy) ELMにおける境界輸送障壁密度の崩壊割合および崩壊領域は大振幅(type D) ELMの場合よりも小さい(図1)。

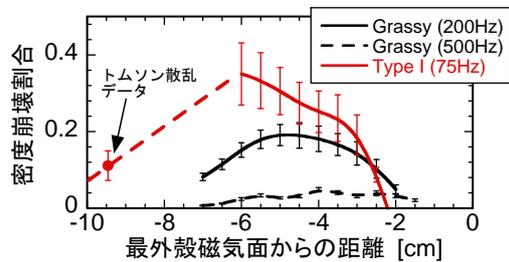


図1. 大振幅(type D) ELMおよび小振幅(grassy) ELMにおける電子密度崩壊割合の分布。

(4) 周辺電流分布の高空間分解能計測

高三角度配位で小振幅 ELM を有する H モードにおいてデータを取得した。低加熱パワーで輸送障壁のない L モードで磁場の仰角 α の計測値の較正係数を求め、それを用いて H モードにおける α の分布を求めた(図 2(b))。局所的な電流密度の大きさは、 α の傾きとして現れるので、 $Z=0.85\text{m}$ 付近で α がほぼ水平となるのはその付近で局所的にプラズマ電流が大きくなっている

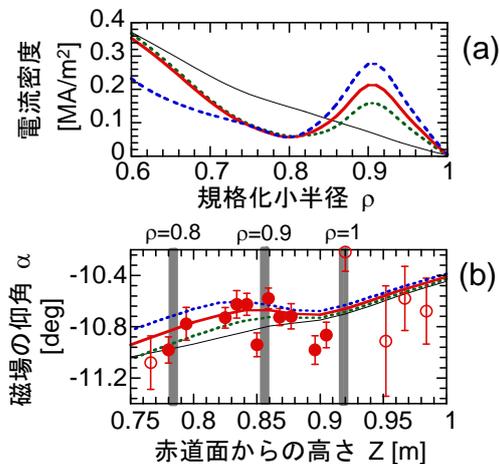


図2. Hモードにおける(a)電流分布と(b)磁場の仰角の分布。丸印が測定値。

ことを示している。実際、滑らかな電流分布(図 2(a)の黒細線)よりも局所的な電流ピークを有する電流分布(赤太線)の方が α の計測値をよく再現する。電流ピークの半値幅を9cm(プラズマ小半径の10%)程度と仮定したとき、電流ピークの大きさは 0.2MA/m^2 程度と評価された。この電流ピークは輸送障壁内の圧力勾配によって生成されるブーツストラップ電流に対応すると考えられる。今後、ブーツストラップ電流の計算値との比較、およびMHD安定性解析を実施する予定である。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

(i) トロイダル回転の異なる H モードや小振幅 ELM を有する H モードの周辺密度分布を0.5msの時間分解能で連続的に計測したこと、および(ii) 小振幅 ELM を有する H モードでブーツストラップ電流に起因する電流ピークを測定したことは、いずれも世界初の成果であり、Hモードの研究に大きく貢献するものである。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

- [1] **A. Kojima**, N. Oyama, Y. Sakamoto, Y. Kamada, H. Urano, K. Kamiya, **T. Fujita**, H. Kubo and the JT-60 Team, in Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference 2008 (Geneva, 13-18 October 2008) (Vienna: IAEA), PD/P1-6 (2009).
 <http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/FEC/FEC2008/html/node489.htm#97452>.
- [2] **A. Kojima**, K. Kamiya, H. Iguchi, **T. Fujita**, H. Kakiuchi and Y. Kamada, Rev. Sci. Instrum., **79**, 093502-1~5 (2008).
- [3] N. Oyama, Journal of Physics: Conference Series, **123**, 012002-1~17pp (2008).
- [4] **A. Kojima**, K. Kamiya, H. Iguchi, **T. Fujita** and Y. Kamada, Plasma Fusion Res., **2**, S1104-1~4 (2007).
- [5] N. Oyama, Y. Kamada, A. Isayama, H. Urano, Y. Koide, Y. Sakamoto, M. Takechi, N. Asakura and the JT-60 Team, Plasma Physics and Controlled Fusion, **49**, 249-259 (2007).
- [6] K. Kamiya, H. Urano, Y. Koide, T. Takizuka, N. Oyama, Y. Kamada and the JT-60 Team, Plasma Phys. Control. Fusion, **48**, A131-139 (2006).
- [7] N. Oyama, P. Gohil, L. D. Horton, A. E. Hubbard, J. W. Hughes, Y. Kamada, K. Kamiya, 他9名, and the ITPA Pedestal Topical Group, Plasma Phys. Control. Fusion, **48**, A171-A181 (2006).

ホームページ等

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/index.html>