

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究(S)  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17106013  
 研究課題名(和文) 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  
 研究課題名(英文) Investigation on the edge structure of tokamak plasmas by edge current profile measurement with ultra-high spatial resolution  
 研究代表者  
 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  
 研究者番号：70354602

研究成果の概要：核融合プラズマの計測装置として、高輝度低発散角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。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	29,300,000	8,790,000	38,090,000
2006年度	45,900,000	13,770,000	59,670,000
2007年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
総計	83,200,000	24,960,000	108,160,000

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、リチウムビーム、ゼーマン偏光

## 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。また、ELMによる輸送障壁崩壊時の密度分布の時間発展を実測した例はなかった。

## 2. 研究の目的

大型装置に適した高輝度低発散角の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、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。また、密度分布の高時間分解能測定により輸送障壁崩壊時の密度分布の時間発展を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本計画の中心であるリチウムビーム偏光

分光計測システム（リチウムビームプローブ；LiBP）は、リチウムビーム入射部と偏光分光測定部から構成される（図1）。JT-60U装置上部に設置されたイオン銃から、リチウムビームをプラズマに入射し、その発光を水平ポート部に設置された光学系で観測し、プラズマ境界部における電流分布および密度分布等を評価する。

リチウムビーム入射部については大口徑（50mm）の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。ナトリウム蒸気を用いた中性化セルでイオンビームを中性原子ビームに変換し、上方よりプラズマへ入射する。イオン銃からプラズマ表面までの距離が6.5mに達するため低発散角のビームが必要となる。偏光分光測定部は、20点の測定点を有し、1点あたりコア径1mmの光ファイバーをトロイダル方向に4本使用することにより高い空間分解能（1cm）を保ちつつ大光量を得る。バンドパスフィルターと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。

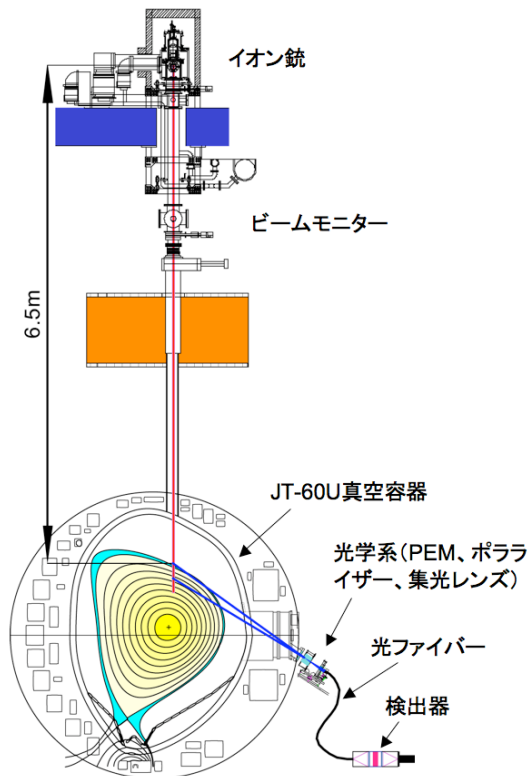


図1. JT-60Uにおけるリチウムビームゼーマン偏光分光計測システム

#### 4. 研究成果

##### (1) 高輝度低発散イオン銃の開発と運転

電子ビームを用いてリチウム化合物を含む浸した多孔質タンゲステンを加熱してリチ

ウムイオンを生成する電子ビーム加熱型イオン源（図2）を設計・製作し、表面温度1500度で引き出し電流10mAを達成し、イオン源寿命52.5A秒を得た。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静電収束レンズ等の電極配置を最適化した（図3）。JT-60Uの周辺プラズマ計測に適した10keV程度の比較的低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、低エネルギー領域でも高電流ビームを生成できるようにした。テストスタンドでの調整により、ビームエネルギー10keVにおいて、観測点（中性化セルから6.5m下流）に到達した等価ビーム電流3mA、発散角0.2度、ビームパルス幅50秒を達成した。ビームの発光スペクトルの広がり0.055nmであり、ゼーマン分離幅（3.5Tで0.074nm）より狭く、ゼーマン偏光計測に十分適応できることを確認した。

多孔質タンゲステン+βユークリプタイト

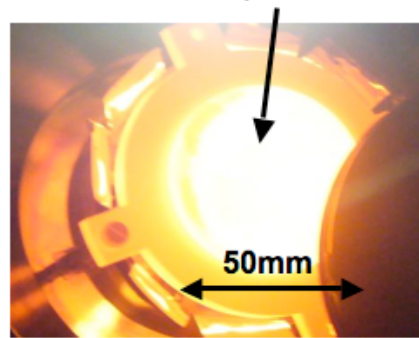


図2. 電子ビーム加熱型イオン源

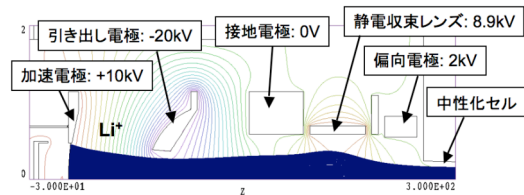


図3. イオン銃の構成とビーム軌道の計算結果

##### (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。密度計測時には、ビームエネルギー10keVでゼー

マン分離の $\pi$ 成分を、電流計測時には、ビームエネルギー7.5-7.8keVでゼーマン分離の $\sigma$ -成分を観測するようにした。PEMとポラライザーを透過した後の光強度信号をロックイン検波し、円偏光と直線偏光の強度比から、磁場の仰角 $\alpha$ （電流分布の変化によるトロイダル磁場の変化に比例）を計測した。

### (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、以下の成果を得た。

① 大振幅(type I) 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)より短く、また崩壊割合は最大となる位置において30%程度であることを観測した。また、干渉計による線積分密度とLiBPによるペDESTAL密度との時間発展の比較から、中心部から周辺部への粒子供給により密度ペDESTALが回復する過程を示した。

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、密度崩壊割合および崩壊領域が小さいことを明らかにした。

③ 発生周波数が高い小振幅(grassy) ELMにおける周辺密度の崩壊現象の観測に世界で初めて成功し、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 I) ELMの場合よりも小さいことを明らかにした(図4)。

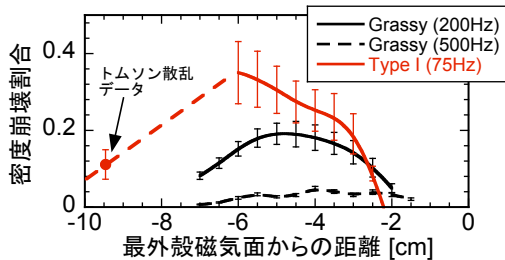


図4. 大振幅(type I) ELMおよび小振幅(grassy) ELMにおける電子密度崩壊割合の分布。

### (4) 周辺電流分布の高空間分解能計測

JT-60Uで初めて周辺電流分布を高空間分解能(1cm)にて計測し、小振幅ELMを伴うHモードプラズマの境界輸送障壁部に局在化した電流ピークの存在を世界で初めて示した。

高三角度配位(95%磁束面での三角形度0.46)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。2秒間程度の信号を時間平均することにより仰角 $\alpha$ の誤差を必要なレベルである0.1度程度まで低減した。低

加熱パワーで輸送障壁のないLモードで磁場の仰角 $\alpha$ 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 $\alpha$ の分布を求めた(図5(b))。局所的な電流密度の大きさは、 $\alpha$ の傾きとして現れるので、 $Z=0.85\text{m}$ 付近で $\alpha$ 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ことを示している。実際、滑らかな電流分布(図5(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 $\alpha$ の計測値をよく再現する。電流ピークの半幅幅を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 $0.2\text{MA/m}^2$ 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トストラップ電流に対応すると考えられる。今後、ブート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。

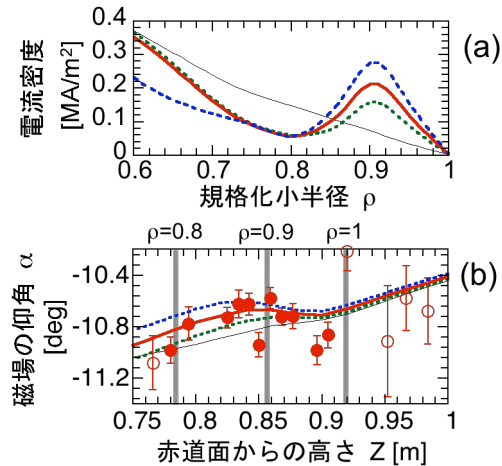


図5. Hモードにおける(a)電流分布と(b)磁場の仰角の分布。丸印が測定値。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① A. Kojima, N. Oyama, Y. Sakamoto, Y. Kamada, H. Urano, K. Kamiya, T. Fujita, H. Kubo and the JT-60 Team, "Fast Dynamics of Type I and Grassy ELMs in JT-60U", in Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference 2008 (Geneva, 13-18 October 2008) (Vienna: IAEA), 査読なし, 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, "Development of a high-brightness and low-divergence lithium neutral beam for a Zeeman polarimetry on JT-60U",

Rev. Sci. Instrum., 査読有り, 79 巻, 093502-1~5 (2008).

- ③ N. Oyama, “Progress and issues in understanding the physics of ELM dynamics, ELM mitigation and ELM control”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有り, 123 巻, 012002-1~17 (2008).
- ④ A. Kojima, K. Kamiya, H. Iguchi, T. Fujita and Y. Kamada, “Numerical Simulation of a High-Brightness Lithium Ion Gun for a Zeeman Polarimetry on JT-60U”, Plasma Fusion Res., 査読有り, 2 巻, 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, “ELM frequency dependence on toroidal rotation in the grassy ELM regime in JT-60U”, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有り, 49 巻, 249-259 (2007).
- ⑥ K. Kamiya, H. Urano, Y. Koide, T. Takizuka, N. Oyama, Y. Kamada and the JT-60 Team, “Characterization of Type-I ELMs in tangential co-, balanced- and counter- plus perpendicular NBI heated plasmas on JT-60U”, Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有り, 48 巻, 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, “Pedestal conditions for small ELM regimes in tokamaks”, Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有り, 48 巻, A171-A181 (2006).

[学会発表] (計9件)

- ① 藤田 隆明, “JT-60Uにおけるリチウムビーム偏光分光による周辺電流分布計測”, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学(東京都)
- ② K. Kamiya, “Edge current density measurement using Li-beam on JT-60U”, 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of APS, November 20, 2008, Dallas, Texas.
- ③ 小島 有志, “JT-60Uにおけるリチウムビームプローブを用いた周辺密度分布の研究”, 第25回プラズマ核融合学会年会, 2008年12月2日, 宇都宮大学(宇都宮市)
- ④ A. Kojima, “Fast dynamics of type I and grassy ELMs in JT-60U”, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, October 13-18, 2008, Geneva, Switzerland.
- ⑤ 藤田 隆明, “JT-60Uにおけるリチウムビ

ーム偏光計測装置の開発”, 第7回核融合エネルギー連合講演会, 2008年6月19日, 青森市

- ⑥ 小島 有志, “JT-60Uにおける周辺電流分布計測を目的とした高輝度低発散リチウムイオン銃の開発”, 第24回プラズマ核融合学会年会, 2007年11月29日, 姫路市
- ⑦ A. Kojima, “Numerical Simulation of a High-Brightness Lithium Ion gun for a Zeeman Polarimetry on JT-60U”, 16th International Toki Conference, December 5-8, 2006, Ceratopia Toki, Gifu, JAPAN.
- ⑧ 藤田 隆明, “JT-60Uにおけるリチウムビームを用いたゼーマン偏光計測計画”, 第23回プラズマ核融合学会年会, 2006年12月1日, 筑波大学(つくば市)
- ⑨ 小島 有志, “JT-60Uにおけるゼーマン偏光計測のための高輝度リチウムイオン銃の開発”, 第23回プラズマ核融合学会年会, 2006年12月1日, 筑波大学(つくば市)

[図書] (計1件)

プラズマ・核融合学会編(井口春和共著)、コロナ社、「プラズマ診断の基礎と応用」、2006年、第7章：ビームプローブ法の高温プラズマへの応用、p206-237

[その他]

ホームページ

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

研究者番号: 70354602

### (2) 研究分担者

神谷 健作 (KAMIYA KENSAKU)

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・研究職

研究者番号: 60360426

小島 有志 (KOJIMA ATSUSHI)

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・任期付研究員

研究者番号: 50446449

### (3) 連携研究者

井口 春和 (IGUCHI HARUKAZU)

核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 40115522

久保 博孝 (KUBO HIROTAKA)

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

研究者番号: 40354584

大山 直幸 (OYAMA NAOYUKI)  
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・研究副主幹  
研究者番号: 80354596

鈴木 隆博 (SUZUKI TAKAHIRO)  
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・研究副主幹  
研究者番号: 60354594

鎌田 裕 (KAMADA YUTAKA)  
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・研究主席  
研究者番号: 30354567

三浦 幸俊 (MIURA YUKITOSHI)  
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・研究主席  
研究者番号: 60354586