

平成 22年 6月 4日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間： 2007～2009
 課題番号：19760603
 研究課題名（和文） 高時間分解能リチウムビーム放射分光計測を用いた周辺輸送現象の解明
 研究課題名（英文） Study of the edge transport barrier by using the lithium beam emission spectroscopy with high-temporal resolution
 研究代表者
 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

研究成果の概要（和文）：

トカマクプラズマにおける周辺輸送障壁部の密度分布の振る舞いを知るには、高時間・高空間分解能な計測器が必要であり、本研究では、リチウムビームプローブ計測法を高時間分解能計測に発展させて計測を行った。その結果、周辺局在化モードの発生による周辺密度分布の崩壊・回復現象の時間発展を明らかにして、密度崩壊領域が周辺局在化モードの種類によって異なる事が分かり、周辺輸送障壁部の動的挙動に新たな知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：

Diagnostics of the edge plasma density in the edge transport barrier region need high-spatial and high-temporal resolutions. In this study, a lithium beam emission spectroscopy with a high-temporal resolution was developed, in order to study the edge density behavior. As a result, the crash and recovery profiles due to the edge localized modes were observed by using the lithium beam diagnostic. It contributes the H mode study and the mitigation of the divertor heat load due to the modes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	0	3,000,000
2008年度	300,000	90,000	390,000
2009年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	180,000	3,780,000

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：プラズマ閉込め・安定性、リチウムビーム、周辺輸送障壁

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合炉 ITER の標準運転モードに採用されている閉じ込め改善モード（Hモード）では、プラズマ周辺部に熱や粒子の輸送

が減少する輸送障壁が形成される。この輸送障壁は、プラズマ半径と比較して狭い空間領域（JT-60U では約 5cm）でプラズマパラメータが大きく変化するため、周辺輸送障壁部に

おける詳細構造や動的振る舞いを理解するには高時間かつ高空間分解能を有する計測が必須となる。核融合炉を目指す上では、輸送障壁部の急峻な圧力勾配やそれに起因して流れる周辺部の電流に強く依存して間欠的に発生する不安定性 (ELM) が、プラズマ対向材 (ダイバータ) の損耗を促進するため、ELM の物理を理解して制御し、ダイバータへの熱負荷を低減する必要がある。現在世界のトカマク装置において、ELM を小さくして、熱負荷を低減する手法が研究されているが、その物理モデルに実測の分布を用いた解析が求められている。

2. 研究の目的

電場シアーによって輸送を低減する周辺輸送障壁部には高い圧力勾配が形成され、それによるブートストラップ電流が流れて磁気シアーが形成される。ELM は MHD 不安定性であるため、この圧力勾配と周辺電流が ELM を駆動する。ペDESTAL 部ではそれらの輸送と MHD 安定性が密接に関連して構造が形成される。しかし、この圧力を知るのに必要な電子密度分布及び周辺部に流れる電流分布を今まで高時間・高空間分解能で計測した例はなかった。その理由は、トムソン散乱による密度分布計測はレーザーの繰り返し率で決まる時間分解能が悪く、プラズマ電流は加熱用 NBI を診断ビームとしたモーショナルシュタルク分光測定 (MSE) が利用されているが、周辺輸送障壁部に形成される強い径方向電場を原理的に排除できないからである。ペDESTAL 構造や ELM を予測・制御するためには、周辺密度分布及び周辺電流分布を計測し、圧力・電流のループで決まるペDESTAL 構造形成や ELM による崩壊・回復のサイクルを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、JT-60U における周辺電流分布計測用リチウムビームプローブを高時間分解能化し、周辺輸送障壁部の早い動的現象を明らかにして、ELM の物理を理解する事を目的とする。

3. 研究の方法

(1) リチウムビームプローブを高時間分解能化するために、ビーム電流の増大、安定なビーム制御を可能とする装置及び手法の開発を行う。具体的には、リチウムイオン銃のビーム電流の増大には電子ビーム加熱を利用した大口径リチウムイオン源の開発を行う。また、大電流に見合う加速電極体系を、空間電荷を考慮した軌道計算により最適化し、テストスタンドを用いて、大電流リチウムビームの実証を行う。そして、計測用ビームとして重要な、ビーム電流やビーム位置の安定性を向上するために、ワイヤープローブを用いてビームの位置や電流を計測して制御する手法を開発する。

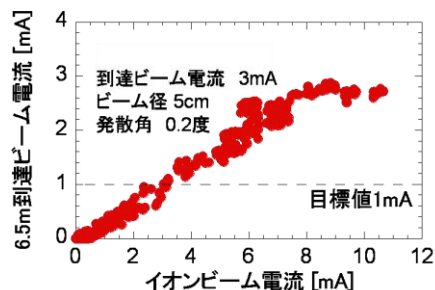
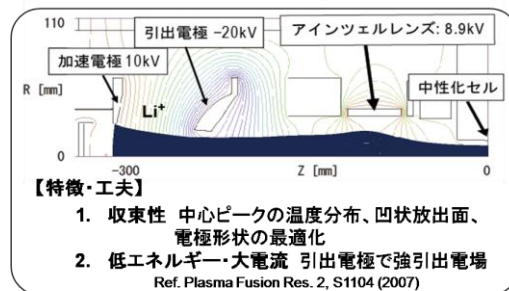


図1. 今回開発した高輝度リチウムイオン銃の軌道計算結果及び、実際の計測配位を模擬したテストスタンドでの中性リチウムビーム等価電流の計測結果。

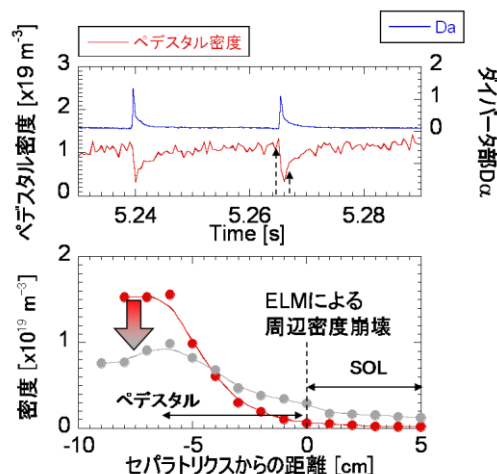


図2. Type I ELM 発生時の周辺密度の時間変化

(2) JT-60U プラズマに中性リチウムビームを入射して、プラズマ中でビームが減衰する際のビームの発光 (波長は 670.8nm) を観測して、ビーム軸上の密度分布を測定する。プラズマ周辺部が H モードとなり ELM が発生して間欠的に周辺輸送障壁が崩壊する現象をリチウムビームプローブで計測する。そして、プラズマの三角度やトロイダル回転を変化させて ELM による密度崩壊・回復現象の違いを密度分布の時間発展として観測し、ELM による崩壊・回復時に起きている現象を明らかにする。そして、type I ELM (大振幅) や grassy ELM (小振幅) 等の大・小振幅 ELM による密度崩壊領域を調べることで ELM の大きさを

決める物理を明らかにする事、ELM サイクル中のペデスタル圧力の時間変化に着目し、ELM 発生の起因となる物理を明らかにする事を目的とした。

4. 研究成果

(1) リチウムビームの高輝度化のために、まず、大電流を引き出すためのイオン源として、リチウムソースとなるβユークリプタイト(Li₂₀・Al₂₀3・2SiO₂)を多孔質タングステンに浸み込ませて電熱線ヒーターで加熱する方式を用いたリチウムイオン源を試験したところ、十分な温度(1200度)まで加熱されず、2μAのビーム電流しか得る事ができなかった。そこで、高温(1500度)まで加熱できる電子ビームを用いたイオン源(図5a)を新たに開発し、5000倍のリチウムイオンビーム電流10mAを得ることに成功した。

次に、中性ビームの低発散角化のために、イオン放出面を凹状にすると共にイオン発生分布を中心ピーク型にすると、生成したイオンビームの収束性が良くなる事を、空間電荷を考慮した軌道計算により発見した。イオン発生分布はイオン源の表面温度の分布に依存するため、多孔質タングステンの加熱分布を制御することでイオン発生分布が変化することに着目し、電子ビームを生成するファイラメント形状を新規に設計して、中心ピークの温度分布を得た。

次に、ビーム電流を増加した際に問題となる空間電荷を考慮した軌道計算を用いてビーム軌道及び電極形状・配置等の最適化を実施した。具体的には図1の様に引出電極を設けた加速体系により、密度計測に必要な低エネルギーで大電流なイオンビームを引き出せるようにした。また、10mA級のビームを中性化セルに平行ビームとして収束させる静電レンズを最適化した。そして、ビーム制御手法として十字型のワイヤープローブを製作してビームの位置検出を行った。その結果、10mAのリチウムイオンビームを50秒間安定に引き出す事に成功し、また図1に示す様に、JT-60Uに設置した際にビームの発光を観測する位置となるリチウムイオン銃から6.5m先での等価電流が3mA得られ、高時間分解能化に必要となる性能が得られた。

(2)

① JT-60U プラズマにリチウムビームを入射して、ビームの発光分布から周辺密度の計測を行った。(1)で得られた高輝度ビームを活用したリチウムビームプローブを利用して、図2に示す様に、周辺プラズマの密度分布を空間分解能1cm、時間分解能0.5msで得ることに成功した。その結果、ELMに起因する周辺密度の崩壊分布を分布の時間発展として観測することが可能になった。図3に示

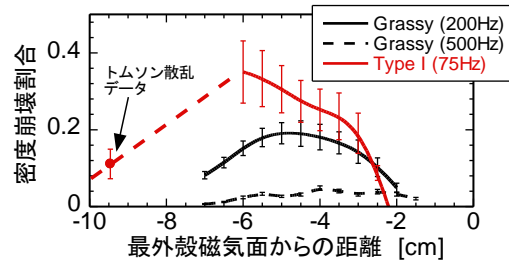


図3. Type I ELM と grassy ELM の崩壊領域の違い

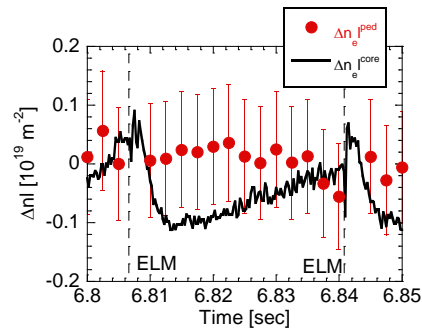


図4. Type I ELM による崩壊から回復過程。ペデスタル部の線密度とプラズマ中心を通る線密度の比較

すように通常のHモードで観測されるType I ELMではペデスタル密度の30%程度が崩壊し、その領域が最外殻磁気面からプラズマ半径の10%程度まで広がっていることが明らかになった。また周波数が高く(>200Hz)、振幅が小さいため、ダイバータへの熱負荷が小さいgrassy ELMの崩壊分布も捉えることに成功し、その崩壊する割合が周波数に依存して減少する事、崩壊領域がより外側に局在化していることを明らかにした。

また、リチウムビームプローブで得られた周辺密度分布を従来の温度分布計測と合わせることで、実測した圧力分布から安定性解析が可能となった。この安定性解析によりELMの発生や崩壊に至る圧力や電流のサイクルを明らかにするのが次の課題である。それにより、ELMの物理を理解してダイバータへの熱負荷を制御することができる。

② 図4に示す様に、ELMによる周辺密度の崩壊から回復する過程を、同視線で計測を行うFIRレーザー干渉計による線密度計測と比較した。大振幅で崩壊領域の広いType I ELMにより崩壊した密度ペデスタル構造は10ms以内に回復するが、その回復の過程で、ペデスタル領域全体では密度の収支はほぼゼロとなっている事が分かった。同時にプラズマの中心部をも通る視線をもつ線密度計測ではELMと同じタイミングで線密度が減少するが、ペデスタル領域が崩壊する時刻よりも2ms程遅れている。これは、リチウムビームプローブで計測したペデスタル領域での密度の収支は釣り合っているため、ELMによ

て粒子が吐き出された後、プラズマ中心部からの密度が補給されて密度ペDESTALが回復している事を示唆している。しかし、小振幅で崩壊も小さい grassy ELM の場合は線密度に変化は見られず、密度が回復する際に中心部からではなく SOL 領域から中性粒子が侵入し密度を補給している事が考えられる。これらの結果により、ELM ダイナミクスの研究に新たな知見が得られた。

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 6 件)

(1) Atsushi Kojima, Kensaku KAMIYA, Takaaki FUJITA, 他 4 名, "Development of a Lithium Beam Probe and Density Pedestal Measurement in JT-60U", Plasma Fusion Res. 5, 015 (2010). 査読有

(2) N. Oyama, A. Kojima, N. Aiba 他 7 名, "Effects of edge collisionality on ELM characteristics in the grassy ELM regime", Nucl. Fusion 50 (2010) 064014. 査読有

(3) K. Kamiya, T. Fujita, A. Kojima, and H. Kubo, "Zeeman polarimetry measurement for edge current density determination using Li-beam probe on JT-60U" Rev. Sci. Instrum. 81, 033502 (2010) 査読有

(4) A. Kojima, N. Oyama, Y. Sakamoto, Y. Kamada, 他 5 名, "Fast Dynamics of Type I and Grassy ELMs in JT-60U", Nucl. Fusion 49, 115008 (2009). 査読有

(5) Atsushi Kojima, Kensaku Kamiya, Harukazu Iguchi, Takaaki Fujita, Hideto Kakiuchi and Yutaka Kamada "Development of a high-brightness and low-divergence lithium neutral beam for a Zeeman polarimetry on JT-60U" Rev. Sci. Instrum. 79, 093502 (2008) 査読有

(6) Atsushi Kojima, Kensaku KAMIYA, Harukazu IGUCHI, Takaaki FUJITA and Yutaka KAMADA, "Numerical Simulation of a High-Brightness Lithium Ion Gun for a Zeeman Polarimetry on JT-60U" Plasma Fusion Res. 2, S1104 (2007). 査読有

[学会発表] (計 3 件)

(1) A. Kojima, "Fast dynamics of type I and grassy ELMs in JT-60U", 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 17 October 2008, Geneva, Switzerland.

(2) 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, 栃木県宇都宮市

(3) 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, 兵庫県姫路市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.naka.jaea.go.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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: 5 0 4 4 6 4 4 9

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: