

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760666

研究課題名（和文） 周辺部輸送障壁における周期的崩壊現象の制御研究

研究課題名（英文） Research on control of periodical collapse at edge transport barrier

研究代表者

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・研究主幹

研究者番号：80354596

研究成果の概要（和文）：複数装置において比較実験を実施し、周辺部輸送障壁における周期的崩壊現象(ELM)を能動的・受動的に制御する研究を行った。受動的な手法である小振幅 ELM の研究に関しては、小振幅 ELM の発生条件を比較し、規格化衝突度の大小で異なる種類の小振幅 ELM が発生することを明らかにした。また、能動的制御研究に関しては、電子サイクロトロン波や低域混成波をプラズマ周辺部に局所的に入射することで ELM 周波数が増加できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Active and passive control methods of Edge Localized Modes (ELMs) at the edge transport barrier have been investigated through comparative experiments using some devices. In the research of small ELMs as a passive control, conditions to obtain small ELMs have been compared. Then, it is revealed that the different type of small ELMs can be obtained depending on the value of the edge collisionality. As for an active control, it is confirmed that the localized injection of the electron cyclotron wave or the lower-hybrid wave to the edge plasma region can increase the ELM frequency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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・核融合、周期的崩壊現象 (ELM)、輸送障壁

1. 研究開始当初の背景

改善閉じ込めモード(Hモード)では、周辺部輸送障壁に局在する周期的崩壊現象(ELM)の発生により準定常状態を維持している。ほとんどのトカマク装置では、Type I ELM と呼ばれる振幅の大きな ELM が共通して観測されるが、このとき発生する瞬間的な熱負荷がダイバータ板の寿命を決定するため、ELM の振

幅を低減することが将来の核融合炉や ITER で求められている。ITER で検討されている 2 つの能動的 ELM 制御手法(燃料ペレットの入射により強制的に ELM を発生させる手法とプラズマ周辺部に外部磁場を加えて ELM を安定化する手法)の開発が精力的に進められているが、制御技術が確立されていないことから、代替方式の開発も急務であった。

ELM を発生させる MHD 不安定性に重要なパラメータとして輸送障壁における圧力勾配と電流分布が上げられるが、それ以外にトラス方向のプラズマ回転(トロイダル回転)、プラズマ断面形状、周辺部局所加熱等によって ELM 特性が大きく変化することが実験的に明らかになりつつあった。そこで、JT-60 装置における ELM 制御研究の成果をもとに、装置に依存しない ELM 制御手法の研究が国際トカマク物理活動(ITPA)で開始され、ELM 制御性と ELM 振幅低減の物理機構を理解することが必要との国際的な共通認識であった。

2. 研究の目的

受動的 ELM 制御手法である grassy ELM 運転に関しては、MHD 不安定性の固有関数の径方向広がり極小化することで崩壊領域が減少している可能性が考えられる。そこで、プラズマの大きさ、形状、プラズマ回転の異なる他のトカマク装置において小振幅 ELM 運転を再現し、そのプラズマにおいて MHD 安定性解析を行い、ELM の大きさと MHD 不安定性の固有関数の径方向広がりについて定量的に比較する。これらの研究を通して、プラズマ周辺部のどのような物理量(規格化衝突周波数や電場構造)が輸送や MHD 安定性を変化させ grassy ELM が発生しているのかを理解し、ITER への外挿性を明らかにする。

能動的 ELM 制御手法である局所加熱による ELM 制御に関しては、JT-60 装置以外のトカマク装置でも ELM 特性を変化させることができるか確認する。ELM 特性の変化が観測された場合、それが電子加熱によるものか周辺電流駆動によるものかを切り分ける。また、ELM 特性を変化させるために必要な加熱条件を同定することにより、JT-60SA および ITER の加熱装置設計へフィードバックする。

3. 研究の方法

これまでに JT-60 装置で考案・実証してきた ELM 制御手法が、他のトカマク装置においても有効に機能することを実験的に検証することは、ELM 制御の物理機構を理解する上で重要である。そこで、ITPA で推進している国際装置間比較実験を活用し、Alcator C-Mod 装置、ASDEX Upgrade 装置、KSTAR 装置等において ELM 制御実験を提案・実施し、JT-60 装置の結果と比較した。また、研究の進展や各装置の運転状況を考慮して具体的な実験内容を調整することが重要であるため、ITPA 会合において研究成果を発表するとともに、次年度の研究計画について議論した。

4. 研究成果

(1) 受動的 ELM 制御手法の研究では、ASDEX Upgrade 装置における小振幅 ELM 実験を実施し、JT-60 装置と比較した。小振幅 ELM 発生

の物理機構を理解するため、プラズマの MHD 安定性に重要な役割を果たしている自発電流の大きさを通して ELM 特性の変化と重要な関係がある規格化衝突周波数を段階的にスキャンした。

JT-60 装置では、grassy ELM が発生しているプラズマにおいて規格化衝突周波数を上昇させるためにプラズマの密度を上昇すると、ELM の振幅が大きくなることため、grassy ELM は規格化衝突度が 1 より小さい領域でのみ発生する ELM と考えられる。実験で得られた温度・密度分布を基にプラズマ周辺部の安定性解析を実施した結果、高 n バルーンモードが grassy ELM 発生に重要であることがわかった(雑誌論文①)。

一方 ASDEX Upgrade 装置では、規格化衝突度が 1 より大きい領域でも type II ELM と呼ばれる小振幅 ELM が得られている。そこで、規格化衝突度を下げるために密度を低下させるとともに、加熱パワーを増やしてポロイダルベータ値を 2 程度まで上げたところ、規格化衝突度が 1 以下の領域で grassy ELM に良く似た小振幅 ELM を得た(図 1)。

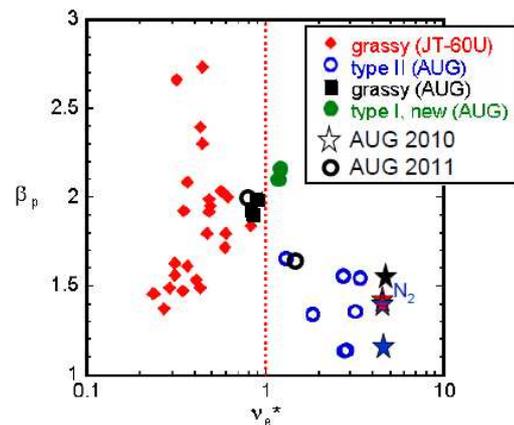


図 1 規格化衝突度(ν_{e^*})とポロイダルベータ値(β_p)空間における grassy ELM と type II ELM の発生領域。Type I ELM は振幅の大きな ELM。

また、type II ELM と grassy ELM に良く似た小振幅 ELM の異同を確認するため、type II ELM 発生時に ELM の振幅が小さくなっている理由を調べた。その結果、ELM の振幅が小さくなっている時間帯に限り、周波数が 40kHz 程度の電子温度揺動が観測された(図 2 (a))。この温度揺動はプラズマ小半径の 70%よりも外側の領域に局在化しており(図 2 (b))、揺動に起因する熱流速の増加によってプラズマ周辺部の温度勾配が 30%程度小さくなっていることがわかった。このような温度揺動は grassy ELM に似た小振幅 ELM では観測されておらず、type II ELM と grassy ELM では物理機構の異なる小振幅 ELM であると考えられる。

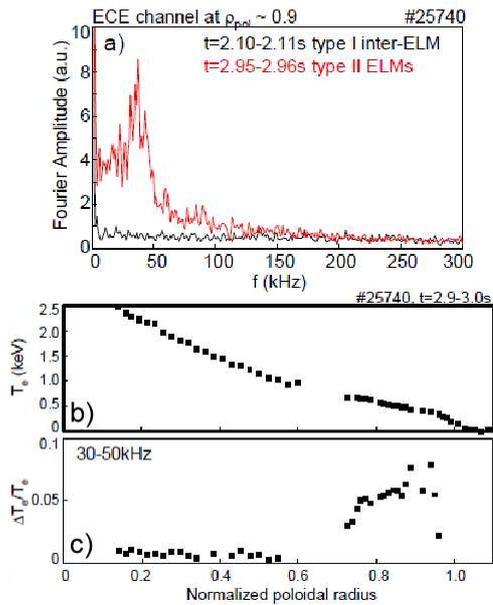


図2 (a)プラズマ周辺部の温度揺動スペクトル、(b)プラズマの電子温度分布、(c)電子温度揺動分布

(2) 電子サイクロトロン波(ECW)を用いた能動的ELM制御手法の研究では、ASDEX Upgrade装置におけるプラズマ周辺部電子加熱実験のデータを解析するとともに、ITPA国際装置間比較実験の枠組みを通してTCV装置の実験結果と比較した(図3)。その結果、どの装置においても、プラズマ周辺部にECWを入射することにより、周辺プラズマの電子温度が

上昇し、ELM周波数が増加した。また、電子密度の減少も同様に観測されるが、電子温度やELM周波数の変化に比べて反応が遅いことから、ELM周波数の増加の結果として密度が減少したものと考えられる。

次に、ELM周波数とELMの振幅について比較した(図4)。JT-60装置やTCV装置では、ELM周波数の増加に伴いELMの振幅が低減することが明らかであるが、ASDEX Upgrade装置では明確な違いが観測されなかった。JT-60装置とTCV装置ではプラズマ周辺部のみでECWが吸収される条件で実験が行われたのに対し、ASDEX Upgrade装置における実験では、ECWパワーの一部がプラズマ中心部で吸収される条件になっていることが理由として考えられる。そこで条件を変えてASDEX Upgrade装置の実験を実施することを試みたが、プラズマ対向壁の材料を炭素からタングステンに変更したことに伴い本実験に必要な低密度プラズマ運転が難しく、図3に示す実験結果を再現することができなかった。

低密度運転が可能なトカマク装置での実験が必要であるため、KSTAR装置における周辺プラズマ加熱実験を提案・実施した。加熱装置と計測装置が限られているため詳細な比較は今後の追加実験が必要であるが、ECWをプラズマ周辺部に入射することでELM周波数が2倍程度に上昇することが確認できた。計測装置の整備が進み、ELM振幅の評価が可能になった段階でより詳細な実験を実施する予定である。

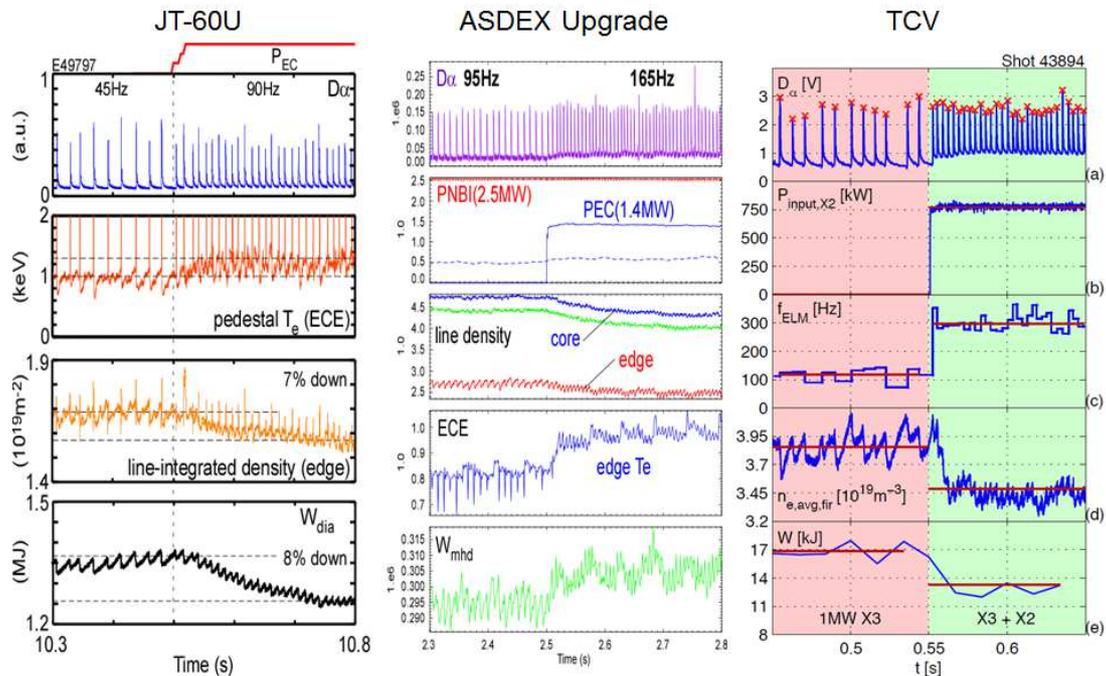


図3 JT-60装置、ASDEX Upgrade装置、TCV装置におけるプラズマ周辺部への電子サイクロトロン波(ECW)入射実験の結果。全ての装置でECW入射時にELM周波数の増加が観測された。

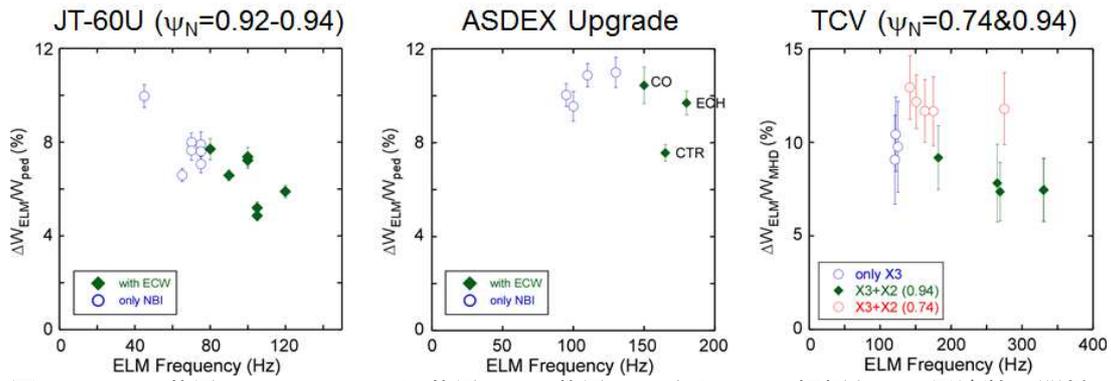


図4 JT-60 装置、ASDEX Upgrade 装置、TCV 装置における ELM の振幅と ELM 周波数の関係。ELM の振幅はペDESTAL部に蓄えられている蓄積エネルギー (W_{ped}) もしくはプラズマ全体の蓄積エネルギー (W_{MHD}) で規格化。

(3) 低域混成波 (LHW) を用いた能動的 ELM 制御手法の研究では、Alcator C-Mod 装置と EAST 装置における実験を実施した。

はじめに、Alcator C-Mod 装置において LHW のパワーや位相をスキャンし、プラズマ周辺部の密度・温度分布がどのように変化するかを調べた (図5)。その結果、LHRF パワーの増加に伴い、プラズマ密度の減少率と減少量が大きくなること、0.3MW 以上の LHRF パワーでは、プラズマ密度の減少量に大きな違いはないこと、プラズマパラメータの有意な応答を得るには 0.2MW 程度の LHRF パワーが必要なこと、プラズマ中心部に LHRF が伝播しない条件でもプラズマ密度が減少すること、を明らかにした。これらの結果は、ELM が発生していない H モード運転で得られたものである。

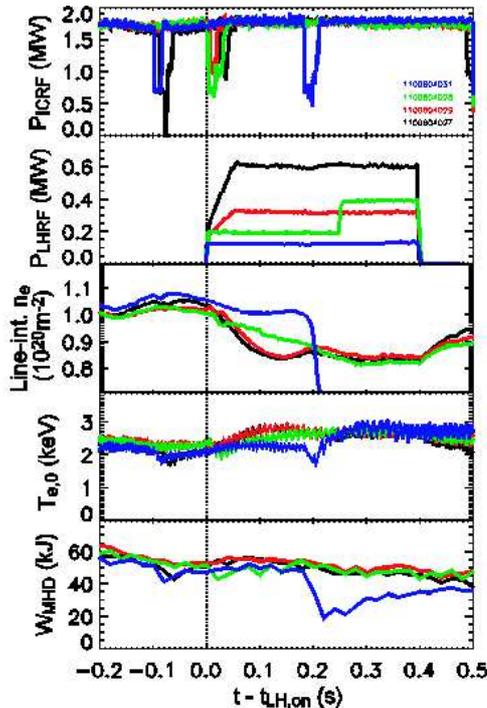


図5 LHW パワースキャン時の密度変化

LHW 入射が周辺プラズマ特性を変化させることが確認できたため、次に LHW 入射による ELM 制御性を検証するべく、LHW 入射装置が装備されかつ ELM のある H モード運転が確立している EAST 装置での LHW 入射実験を実施した。LHW パワーが限られているため、LHW パワーを変調することで ELM 特性の変化を調べた。その結果、LHW のオンオフに同期して ELM が発生すること、変調周波数を大振幅 ELM の周波数 ($\sim 15\text{Hz}$) の 3 倍程度の 50Hz 以上にするると ELM 振幅が低減すること、250Hz の変調周波数でも同期すること、がわかった。今後、LHW 入射が ELM を駆動する物理機構の研究を実施予定。

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2件)

① N. Aiba and N. Oyama, Numerical analysis of key factors for the appearance of grassy ELMs in tokamak plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, 52, 2012, 114002.

② N. Oyama, N. Hayashi, N. Aiba, A. Isayama, H. Urano, Y. Sakamoto, Y. Kamada, T. Takizuka and the JT-60 Team, Characteristics and control of the type I edge localized mode in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 51, 2011, 033009.

[学会発表] (計5件)

① 大山直幸、プラズマ周辺部への電子サイクロトロン波入射による ELM 特性の変化、プラズマ・核融合学会 第 29 回年会、2012 年 11 月 29 日、福岡県春日市

② N. Oyama, Controllability of pedestal and ELM characteristics by edge ECH/ECCD/LHCD, 国際トカマク物理活動 第 23 回周辺ペDESTAL物理トピカルグループ会合、2012 年 10 月 17 日、米国サンディエ

ゴ

③N. Oyama, Controllability of pedestal and ELM characteristics by edge ECH/ECCD/LHCD, 国際トカマク物理活動 第21回周辺ペデスタル物理トピカルグループ会合, 2011年10月7日、英国ヨーク

④大山直幸、JT-60UにおけるType I ELMの特性と制御、プラズマ・核融合学会 第27回年会、2010年12月2日、北海道 札幌市 北海道大学

⑤N. Oyama, Characteristics and control of the type I edge localized mode in JT-60U, 第23回IAEA核融合エネルギー会議, 2010年10月15日、韓国デジョン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・研究主幹

研究者番号：80354596