

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760818

研究課題名(和文)核燃焼・高圧力プラズマに向けた磁気流体不安定性とその相互作用に関する実験解析研究

研究課題名(英文) Experimental analysis of MHD modes and their interactions for burning high-beta plasmas

研究代表者

松永 剛 (Matsunaga, Go)

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 那珂核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：10391260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、核燃焼・高圧力プラズマで重要となる圧力および高エネルギーイオン駆動型MHDモードの物理およびその相互作用を明らかにすることを目的とする。JT-60で観測された高エネルギーイオン駆動モード(EWM)による周辺局在化モード(ELM)の誘発現象に着目し、JT-60既存データとDIII-Dにおける新たな実験データ解析により、EWMによる周辺への高エネルギーイオン輸送が周辺MHD安定性に影響を及ぼすことを明らかにした。また能動的MHD診断の実施、軸対称不安定性の実験解析を行い、高圧力プラズマにおける圧力および高エネルギーイオン駆動型MHDモードの総合的な物理解を進展させた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify physics and interaction mechanism of pressure-driven MHD modes and energetic-ion-driven MHD modes for future burning high-beta plasmas. In particular, the edge localized mode (ELM) triggering by energetic-ion-driven mode (EWM) is focused. Based on data analyses of JT-60 and DIII-D experiments, we have found that energetic-ions transported to edge region by EWM can affect ELM stability. Moreover, active MHD diagnostic and analysis of axisymmetric mode are conducted. These progressed comprehensive understanding of pressure and energetic-ion driven MHD modes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・炉心プラズマ

キーワード：核燃焼高圧力プラズマ 磁気流体不安定性 高エネルギーイオン 周辺局在化モード

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合炉心プラズマはプラズマ圧力が高く、かつ高エネルギーイオン圧力も高いため、圧力駆動型磁気流体不安定性(MHDモード)だけでなく、高エネルギーイオン駆動型MHDモードが発生し、プラズマ性能及び装置の耐久性を大きく左右する。

(2) 日本原子力研究開発機構のJT-60の壁なし圧力限界を超えた高圧力プラズマにおいて、高エネルギーイオン駆動型MHDモードが周辺で発生し突発的なエネルギー放出を伴う「周辺局在化モード(ELM)」と呼ばれるMHDモードを誘発(相互作用)することが観測されている。

(3) バルクプラズマで不安定化するMHDモードと高エネルギーイオンとの相互作用は、核融合研究が挑む新たな領域である核燃焼・高圧力プラズマにおいて非常に重要な現象であり、このような現象は高圧力領域に到達可能になった近年になって観測され、その全容は未解明のままである。

2. 研究の目的

(1) 核燃焼・高圧力プラズマで重要となる圧力駆動型MHDモードと高エネルギーイオン駆動型MHDモードの物理およびその相互作用を明らかにすることを目的とする。

(2) JT-60の観測結果をもとに、充実した高エネルギーイオン計測及び外部磁場摂動印加可能な他の装置で同様の現象を探求し、実験データの比較を行い、装置間を越えて存在する普遍的な物理機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) これまでのJT-60で実施された高プラズマ圧力実験により得られたデータの解析を進め高エネルギーイオン駆動型MHDモードとその相互作用に関するデータベースを構築する。

(2) 各種安定性コードまたは輸送コードを用いて定量的に物理機構を評価する。また同様の高エネルギーイオン駆動MHDモードが米国GA社のDIII-D装置で観測されているため、JT-60における観測との類似点・相違点を明らかにするとともに、さらなる比較実験を実施し装置間比較を行う。

(3) DIII-D装置が有する容器内コイルを用いたMHDスペクトルスコーピーを実施し、EWMの起原を実験的に同定するとともに、安定限界に近いMHDモードの能動的安定性診断を行う。

4. 研究成果

(1) 本研究課題では高圧力領域で発生する高エネルギーイオン駆動モードでありEWMと呼ばれる高エネルギーイオン駆動壁モードに着目し、そのMHDモードとの相互作用、特にELM誘発現象を中心に解析を実施した。このEWMによるELM誘発現象はJT-60の高圧力プラズマで観測されている。この誘発現象について、ELM発生頻度および放出エネルギーで統計的に整理することで、通常のELMに比べて、EWM誘発ELMが高頻度かつ低放出エネルギーであること、すなわちELM緩和していることを明らかにした(図1)。

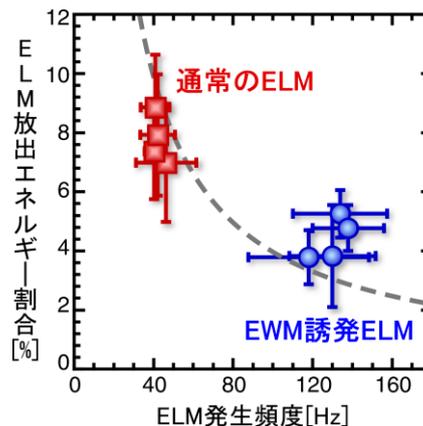


図1: EWMによるELM誘発現象。通常のELMとEWM誘発ELMの放出エネルギーと発生頻度の関係。

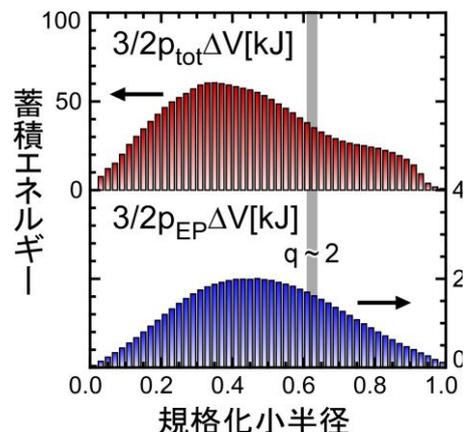


図2: バルクプラズマ(上)と高エネルギーイオン(下)の蓄積エネルギー分布。微小体積を乗じた分布。

また、高圧力プラズマにおける高エネルギー粒子分布をモンテカルロコードF3D-OFMCで評価した。EWMが不安定化している安全係数 $q=2$ 付近から外側の高エネルギーイオンの保有するエネルギーは、プラズマの周辺(ペダスタル)領域の蓄積エネルギーと同程度であることから、EWMによって周辺へ高エネルギーイオンが輸送されれば、ELMの安定性に影響する可能性があるかと推定した。

(2) JT-60 における高圧力プラズマ実験で観測した EWM による ELM 誘発現象では、高エネルギーイオンが関与していることを示唆するデータが周辺揺動計測により得られている。そこで、研究計画通り、高エネルギーイオン計測が充実している DIII-D において実験提案を行い実施した。その結果、JT-60 と同様に DIII-D においても EWM による ELM 誘発現象を観測した(図 3)。

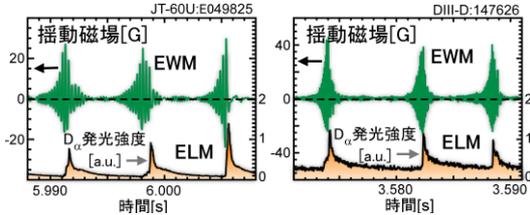


図 3: JT-60(左)と同様に DIII-D(右)においても観測した EWM による ELM 誘発現象。

これは高圧力プラズマにおいて、高エネルギーイオン駆動モードによる ELM 誘発が共通の物理であるを示唆するものである。DIII-D において、周辺への高エネルギーイオン輸送を複数の計測器(FIDA, BES, NPA, ICE 等)で実施したところ、EWM の振幅に同期した信号を検出した。これは、EWM によって、高エネルギーイオンが周辺に輸送され、最終的に損失したことを示す。しかしながら、周辺へ高エネルギーイオン輸送量と EWM の振幅が比例しないことから、詳細な揺動信号解析を実施した。その結果、EWM の振幅は基本周波数成分の振幅が成長すると高調波成分が発生していること、さらにこの高調波成分と周辺への高エネルギーイオン量が相関していることが分かった。図 4 に、EWM の基本波または高調波振幅と周辺へ高エネルギーイオン輸送量を示す。

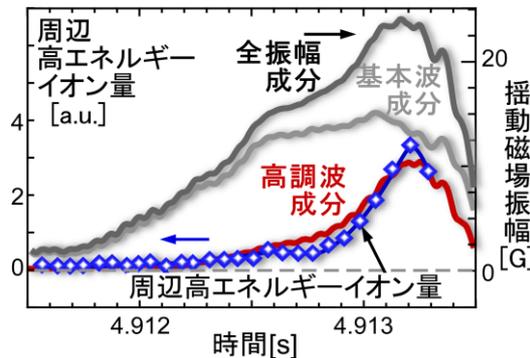


図 4: EWM の基本波または高調波振幅と周辺へ高エネルギーイオン輸送量。

線形 MHD 解析コード MARS-F によって、DIII-D 高圧力プラズマ実験データの安定性解析を実施したところ、EWM の基本周波数成分であるトロイダルモード数 $n=1$ のモードだけでなく、 $n=2$ のモードも安定限界に近いことが分かった。すなわち、 $n=1$ モードの成長に伴い、

$n=2$ モードも不安定化し、それが周辺へ高エネルギーイオン輸送量を引き起こしたと考えられる。その $n=2$ モードが、高調波として観測されている。基本波 ($n=1$) の成長に伴う高調波 ($n=2$) モードの発生機構および、高調波モードが周辺へ高エネルギーイオン輸送量と強く相関する機構については明らかではないが、 $n=1$ と $n=2$ モードの位相が常に同期していることから、それぞれが独立に発生したのではなく、 $n=1$ モードの発生に伴って $n=2$ モードが非線形的に不安定化したと推測する。

実験的に観測した EWM に伴う周辺への高エネルギーイオンの輸送がどのように ELM 安定性に影響するかを調べるため、高エネルギーイオンの運動論的効果を考慮した MHD 安定性モデルで解析を行った。このモデルにおいて、MHD モードは周辺に局在化する外部キンクモードを考え、円筒プラズマをモデル化している。その結果、高エネルギーイオン駆動モードによって周辺に輸送される高エネルギーイオンが十分であり、MHD 安定性が安定限界に近い状況であれば、ELM を不安定化する可能性があることがこのモデル計算から分かった(図 5)。したがって、周辺領域に高エネルギーイオンを分配することで、ELM の安定性に影響を与えることが可能と考えられる。

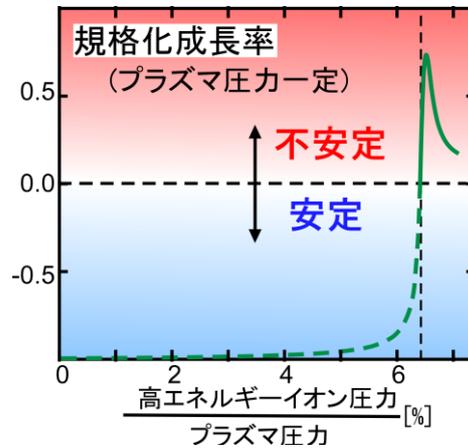


図 5: 周辺局在化モードの円筒プラズマモデル。高エネルギーイオン圧力に対する成長率。

(3) 高圧力プラズマでは、MHD モードが安定限界に近いため外部摂動に対して応答することが考えられる。そこで、DIII-D 装置が有する容器内コイルを用いて MHD 能動診断実験を行った。本研究では、プラズマの磁場応答を高感度で検出するためデジタルロックインアンプを購入し、DIII-D 装置に搬入・実装した。既存システムへの取り付けおよび各種試験を実施し、本計測器が外部印加揺動磁場を同期検波することを確認した。DIII-D の高圧力プラズマにおいて MHD 能動診断実験を実施したところ、プラズマの圧力の上昇に応じて、外部揺動磁場に同期するプラズマの

応答を観測した(図 6)。実験条件として、壁なし圧力限界以上の高圧力であり、抵抗性壁モード(RWM)が安定限界に近いことから、検出した応答は安定なRWMと考えられる。本診断手法をEWMについても応用したが、ELM発生に伴う応答信号の乱れにより検出信号が不十分であり検出するに至らなかったが、MHD能動診断が実証できた意義は大きい。

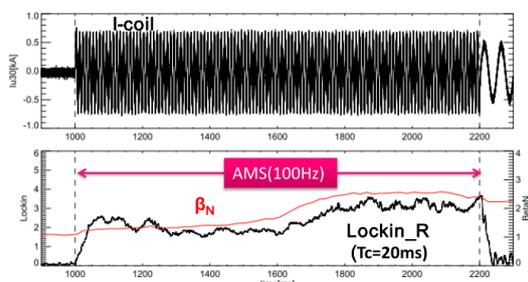


図 6: DIII-Dにて実施した外部摂動磁場 EWM 印加による MHD 能動診断。(上)外部磁場コイル電流と(下)ロックインアンプ出力。

(4) 本研究計画を拡張し、JT-60 における高圧力プラズマの立ち上げ時に発生する軸対称不安定性 ($n=0$) について解析を実施した(図 7)。このモードも高エネルギーイオンによって駆動されたと考えられ、高閉じ込めモード(Hモード)への遷移と深く関係のある測地線音波モード(GAM)の可能性がある。そこで、詳細な空間構造の解析により、その磁場揺動がポロイダル方向に二周期の幅を持つ定在波として振動していることを明らかにした。また、プラズマ電流と逆方向の中性粒子ビーム加熱時に顕著に発生することが分かった。今後更なるデータ解析を進める。

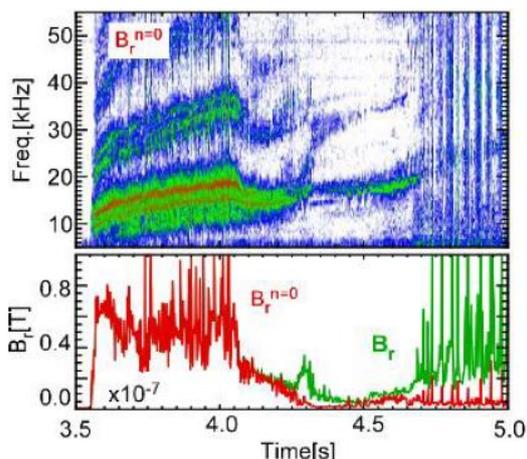


図 7: JT-60U 高圧力プラズマの立ち上げ時に観測した軸対称不安定性。(上)磁場揺動スペクトルと(下)軸対称磁場揺動振幅。

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 G. Matsunaga, 他 5 名, ELM triggering by energetic particle driven mode in wall-stabilized high- β plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, 53, 2013, 073046-1~073046-9, DOI:10.1088/0029-5515/53/7/073046.
- ② G. Matsunaga, 他 23 名, Dynamics of energetic particle driven modes and MHD modes in wall-stabilized high-beta plasmas on JT-60U and DIII-D, Nuclear Fusion, 査読有, 53, 2013, 123022-1~123022-13, DOI: 10.1088/0029-5515/53/12/123022.

[学会発表] (計 5 件)

- ① G. Matsunaga, Energetic particle driven instabilities and related physics : H-mode and transport barrier, 13th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 招待講演, 2011年10月11日、英国/オックスフォード.
- ② G. Matsunaga, 他 2 名, MHD behaviors in the JT-60U high beta plasmas, 12th US-Japan MHD Workshop, 2012年3月6日, 岐阜県土岐市.
- ③ G. Matsunaga, 他 5 名, Observation of energetic particle driven axisymmetric mode in the JT-60U tokamak, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2012年7月3日, スウェーデン/ストックホルム.
- ④ G. Matsunaga, 他 23 名, Dynamics of energetic particle driven modes and MHD modes in wall-stabilized high-beta plasmas on JT-60U and DIII-D, 24th IAEA Fusion Energy Conference, 2012年10月11日, 米国/サンディエゴ.
- ⑤ 松永 剛, 他 23 名, 高 β トカマクプラズマにおけるMHDモードの振舞い, 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.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松永 剛 (Matsunaga Go)

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 那珂核融合研究所・
研究副主幹

研究者番号: 1 0 3 9 1 2 6 0