

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24年 5月25日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760698

研究課題名（和文）

周辺 MHD 安定性解析による大振幅エッジローカライズモード抑制機構の解明

研究課題名（英文）

Edge MHD stability analysis for suppressing giant edge localized modes

研究代表者

相羽 信行 (AIBA NOBUYUKI)

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：20414584

研究成果の概要（和文）：

将来の大型熱核融合炉において発生が懸念されている大振幅エッジローカライズモード（ELM）について、その発生の抑制につながる物理機構を明らかにすることを目的に、同モードの原因である周辺 MHD モードの数値安定性解析を行った。その結果、実験的に観測されている ELM 小振幅化の有力な手法であるプラズマ回転制御の実現には、トロイダル方向のみならずポロイダル方向の回転も重要な役割を果たす可能性が高いことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This research analyzed numerically the MHD stability near plasma edge pedestal to identify the physics mechanism which is important to suppress or mitigate large amplitude edge localized mode (ELM), because this ELM will damage future large fusion reactors. As the result of this research, it was shown that plasma poloidal rotation plays an important role to suppress or mitigate ELM with the plasma toroidal rotation control, which is one of the promising ELM suppressing/mitigating methods confirmed experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

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：理論シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

ITER での標準運転モードとして考えられているトカマクプラズマの高閉じ込め運転（H モード）において、ELM と呼ばれる表面付近が間欠的に崩壊する現象がしばしば観測される。ITER 等の大型反応炉ではこの ELM による熱・粒子放出量の絶対量が多くなるため、ダイバータ板等への熱負荷の増大が懸念されている。そのため、ELM 現象によってス

クレイプオフ層（SOL）に放出される熱・粒子量を減少させる（ELM を抑制・小振幅化する）方法を確立することは、現在の炉心プラズマ研究開発における最大の課題の一つとなっている。

この ELM 現象の物理機構に関する理論・数値的な研究は近年急速に進展しており、プラズマ周辺領域における線形 MHD 安定性解析を可能にしたコードにより、type-I ELM と呼ば

れる熱・粒子放出量の大きい ELM の原因が理想 MHD モードであることが明らかとなり、またペデスタルにおけるプラズマ圧力限界の定量的な評価が実現している。しかし、前述の課題であるペデスタル崩壊に伴う熱・粒子放出量を減少させる方法については十分な成果が得られていない。

一方 ELM に関する実験解析では、国外の大型・中型トカマク装置において誤差磁場印加による ELM 抑制や、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）の JT-60U 装置においてプラズマのトロイダル回転制御による ELM 小振幅化についての成果が得られている。これらの手法による ELM 制御の物理機構の解明は重要な課題であるが、このうち ELM とトロイダル回転との相関については、その原因が回転による輸送現象・安定性いずれの変化によるものかは明らかになっていない。そのため、ITER 等において ELM による熱・粒子放出量の制御にプラズマ回転が重要な物理量となるかを判断するには、流れを考慮した MHD 安定性解析等による物理機構の究明が不可欠である。

2. 研究の目的

上記の研究課題を克服するために、本研究は“周辺 MHD 安定性に対して影響を与える物理量の同定・評価”を主目的として、今回の申請研究期間内では特に“トロイダル回転”、“ポロイダル回転”、および“2 流体効果”に着目して、これらの安定性に与える影響を明らかにするための数値コード開発および定性的・定量的数値解析を行う。特に、これまでの ELM に関する実験研究において有力な ELM 小振幅化手法とされているプラズマ回転制御について、回転が ELM の安定性に与える影響を数値的に明らかにすることで、ELM 小振幅化を実現する物理機構の解明を試みる。

3. 研究の方法

上記の研究目的の達成には、周辺 MHD 安定性解析を定量的に行うことが可能な数値安定性解析コードの開発が必須である。そのため本研究では課題開始までに開発を進めてきた数値解析コード MINERVA を用いて、トロイダル回転と周辺 MHD モードの安定限界、モード構造に対する影響を定量的に評価し、その結果を実験結果と比較することで、トロイダル回転周波数と ELM 周波数との相関を引き起こす物理機構の解明を行った。その後、まずポロイダル回転を考慮した安定性解析を実現するために物理モデルの検討・導出を行い、数値コードへの実装を行った。これにより開発された数値コードの妥当性の確認を進めた後に、周辺 MHD 安定性に対するポロイダル回転の影響の解析を実現した。また 2 流体効果については、反磁性ドリフト効果を考

慮する簡易的なモデルを用いて、その影響についての定量的な評価を進めた。

4. 研究成果

2009 年度は、安定性解析コード MINERVA を用いて周辺局在理想 MHD モードの安定限界に対するプラズマのトロイダル回転の影響に関して定量的な数値解析、特に原子力機構の JT-60U などの実験装置で観測されている ELM 現象に対するトロイダル回転の影響について数値解析を行い、実験的に観測されている ELM の抑制・小振幅化に対するプラズマ回転の影響に関する物理機構の解明を目指すことを目的としていた。そのために、まず“トロイダル回転による周辺局在 MHD モードの不安定化の原因”を特定するための数値解析を行い、この不安定化は“不安定モードの振動数とプラズマの回転周波数のずれによって生じる”ことを明らかにした。この成果は、プラズマ回転が差動回転であること、また不安定モードが径方向に広がった構造を持つことが不安定化に重要であることを示すものであり、H-mode ワークショップやアメリカ物理学会などの国際・国内会議で発表するとともに、投稿論文が”Destabilization mechanism of edge localized MHD mode by a toroidal rotation in tokamaks”という題名で Nuclear Fusion 誌に掲載された。

また、この成果を元に、JT-60U における type-I ELMy H モードプラズマのトロイダル回転による ELM の性質および閉じ込め性能の変化の原因を調べるために、JT-60U の周辺 MHD 安定性に対するトロイダル回転の影響を評価した。その結果、トロイダル回転が電流に対して逆向きに回転している場合は周辺領域に強い回転シアが存在することで波長の短い MHD モードが不安定化され、ペデスタルの安定限界圧力が低下することを明らかにした。この成果は、同方向に回転しているプラズマでペデスタル圧力が低下する、および ELM によるペデスタル崩壊幅が狭まるといった実験計測結果と矛盾せず type-I ELM とトロイダル回転との相関の原因を示したものであり、APFA 2009 などの学会で発表するとともに投稿論文が”Numerical analysis of a toroidal rotation effect on the type-I ELM in JT-60U”という題名で JPFR 誌に掲載された。

2010 年度は、研究計画で実施する予定であった安定性解析コード MINERVA の拡張を行い、MHD 安定性に対するプラズマのトロイダル回転のみならずポロイダル回転の影響を摂動的に取り扱う事を可能にした。この拡張した数値コードを用いて ELM の原因となる周辺 MHD モードに対するプラズマのトロイダル回転のみならずポロイダル回転の影響を数値的に評価し、ポロイダル回転を考慮すること

で、トロイダル回転の向きによって周辺 MHD モードの安定性に対するトロイダル回転の影響が変化することを明らかにした。この結果は、JT-60U における小振幅 ELM (grassy ELM) の重要な特徴である“トロイダル回転の向きに対する依存性 (回転の向きを電流と同じ向きから逆向きに変化させることで ELM の振幅が小さくなる)”を定性的に説明するものであり (下図参照)、“Mechanisms of the plasma rotation effect on the type-I ELM in tokamaks” というタイトルで第 23 回 IAEA 核融合エネルギー会議、“Effects of plasma parallel/poloidal rotation on edge MHD stability in tokamaks” というタイトルで第 19 回 ITPA 会合 (周辺物理・ペダスタル) においてそれぞれ発表を行った。また、第 27 回プラズマ・核融合学会においても“トカマク周辺 MHD 安定性に対する磁力線方向・ポロイダル方向の回転の影響”というタイトルで発表を行い、同学会の若手優秀発表賞を受賞した。さらに、この成果は Nuclear Fusion 誌に掲載された。

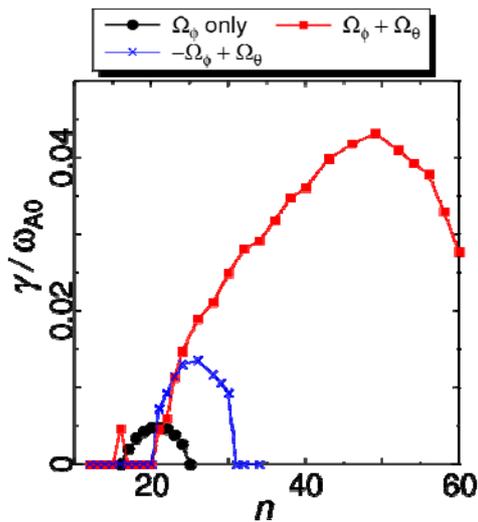


図:回転分布を変えた場合の MHD モードの成長率の変化。トロイダル回転のみ (黒線) の場合に比べ、ポロイダル回転を加えた場合 (赤線、青線) は成長率が高くなること がわかる。さらに、トロイダル回転の向き が電流と同じ向きの場合 (赤線) は、逆向きの場合 (青線) と比べて成長率が高くなるとともに短波長 (n が大きい) の MHD モードが不安定化しやすくなっている。
横軸:トロイダルモード数, 縦軸:成長率

2011 年度は、小振幅エッジローカライズモード (ELM) の原因を明らかにすることを目的として、短波長電磁流体 (MHD) 安定性に影響を与える運動論効果を簡易的に考慮した周辺 MHD 安定性解析を行った。このために、運動論効果のうち“イオン反磁性ドリフト効果”と呼ばれる安定化効果とともに“電子ドリフト音波効果”と呼ばれる効果を考慮した分散関係式を、前年度までに開発・拡張を進めてきた理想 MHD 安定性解析コード MINERVA の結果を用いて解くことで、上記の周辺 MHD 安定性解析を可能にした。

この数値コード・分散関係式を用いた解析の結果、従来から知られていた“イオン反磁性ドリフト効果による短波長 MHD モードの安定化”は“電子ドリフト音波効果”によって無効化されうることを定量的に評価・解明した。この安定化効果の無効化により、短波長 MHD モードの発生領域は JT-60U において grassy ELM と呼ばれる小振幅 ELM が発生する領域に近いことを示すと同時に、その場合に発生する MHD モードの固有関数は周辺ペダスタル領域に局在化していることを明らかにした。この傾向は、JT-60U における密度揺動計測による ELM 崩壊幅の評価結果と定性的に一致しており、これらの結果から grassy ELM の原因として上記の 2 つの運動論効果を考慮した短波長 MHD モードが極めて有力であることを示した。これらの成果は、第 13 回 H モード物理に関する国際ワークショップにおいて発表を行うとともに、Nuclear Fusion 誌に投稿・受理された。

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 4 件)

- (1) N. Aiba, M. Furukawa, M. Hirota, N. Oyama, A. Kojima, S. Tokuda and M. Yagi
“Mechanisms of plasma rotation on the type-I edge-localized mode in tokamaks”, Nuclear Fusion 51, 073012, 2011. (査読有)
- (2) N. Aiba, N. Oyama, A. Kojima, S. Tokuda, ” Numerical analysis of a toroidal rotation effect on the type-I ELM in JT-60U”, Special issue of the Japan Plasma Science and Nuclear Fusion Research SERIES, vol. 9, 74 (2010). (査読有)
- (3) N. Aiba, M. Furukawa, M. Hirota, S. Tokuda, ” Destabilization mechanism of edge localized MHD mode by a toroidal rotation in tokamaks”, Nuclear Fusion 50, 045002, 2010. (査読有)

他

[学会発表] (計 17 件)

- (1) N. Aiba, N. Oyama, “Numerical analysis about key factors of grassy ELM in tokamak plasma”, 13th H-mode Workshop, Oxford, United Kingdom, 2011/10/10-12.
- (2) N. Aiba, M. Furukawa, M. Hirota, N. Oyama, A. Kojima, S. Tokuda and M. Yagi, “Mechanisms of the plasma rotation effect on the type-I ELM in tokamaks”, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejon, Korea, 2010/10/16-23.
- (3) 相羽信行, 古川勝, 廣田真, 徳田伸二, “プラズマ回転シアによる周辺 MHD モードの不安定化機構について”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山、日本, 2010/03/20-23.

他

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相羽 信行 (AIBA NOBUYUKI)
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 : 20414584