

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06656

研究課題名(和文) 原型炉で実現可能なエッジローカライズモード抑制・小振幅化に向けた理論数値解析

研究課題名(英文) Theoretical and numerical analyses for suppressing or mitigating edge localized mode in DEMO

研究代表者

相羽 信行 (Aiba, Nobuyuki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・上席研究員 (定常)

研究者番号：20414584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：エッジローカライズモード(ELM)の安定性を正確に評価するために、新たな物理モデルを考案し、これに基づく数値解析コードMINERVA-DIを開発した。これを用いて、小振幅ELMの原因の一つと考えられる、短波長バルーニングモードの安定性に対するプラズマ回転・イオン反磁性ドリフト効果の影響を評価し、イオン反磁性ドリフト効果による同モードの安定化効果がプラズマ回転によって無効化されうことを明らかにした。

この成果を基に、国内JT-60装置、及び欧州JET装置におけるELM安定性解析を行い、小振幅ELMのみならず大振幅ELMの発生条件にプラズマ回転が影響を与えていることを定量的に示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new physics model and numerical code, MINERVA-DI, to evaluate the stability of edge localized mode (ELM). This code realizes to investigate the impacts of plasma rotation and the ion diamagnetic drift effect on the stability of short-wavelength ballooning mode, which is one of the origin of mitigated ELM. It was found that the ion diamagnetic drift effect, which usually stabilizes the mode, is found to be negligible when the rotation frequency is large compared to the ion diamagnetic drift frequency.

Based on the result, we have performed the quantitative analyses of the stability of ELMs in JT-60U (Japan) and JET (EU) experiments. It was found that the rotation affects the trigger condition of small and large ELMs observed in these experiments.

研究分野：核融合

キーワード：エッジローカライズモード 拡張MHDモデル トカマク 磁場閉じ込め核融合

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER では、トカマクプラズマの高閉じ込め運転 (H モード) が標準運転モードとして想定されている。しかし、この H モードではエッジローカライズモード (ELM) と呼ばれる表面付近の高閉じ込め領域 (ペデスタル) が間欠的に崩壊する現象がしばしば観測され、この ELM による熱・粒子放出によりダイバータ板等の損耗が懸念されている。特に ITER 等の大型反応炉において振幅の大きい ELM が発生することは許容できず、熱・粒子放出量を減少 (ELM を抑制・小振幅化) させる方法を確認することは、現在の炉心プラズマ研究開発における最大の課題の 1 つである。

ELM のうち振幅の大きい type-I ELM は、これまでの実験研究および理論・数値解析研究により、プラズマ周辺領域に局在した比較的波長の長い理想電磁流体 (MHD) モードであることがほぼ特定され、同モードが発生する運転領域の予測は定量的な数値解析により実現している。しかし、近年、ITER like wall と呼ばれる金属壁を導入した欧州 JET 装置において、この type-I ELM の発生条件が従来の物理モデルに基づく解析では説明できないことが明らかになった。このことは、ELM の抑制・小振幅化を検討するうえで必要条件となる、type-I ELM が発生しない運転領域を正確に評価・予測することができなくなったことを意味するため、このような実験結果と数値解析結果との間にずれが生じる原因を解明することが急務となった。

また、type-I ELM による熱・粒子放出量を減少させる方法に関しては、実験的には外部誤差磁場印加や外部からの粒子補給制御、プラズマ回転制御などによる ELM 抑制・小振幅化が提案されているが、それらの影響に関する物理機構の解明を含めて理論的には多くが未解明である。そのため、ITER や将来の核融合発電炉において、それらの制御手法の有効性の検討や、大型炉の特性を生かした制御手法の開発が不十分な状態にある。

2. 研究の目的

本研究では、ELM の抑制・小振幅化を検討するうえで必要となる、type-I ELM が発生しない運転領域の正確な評価・予測、および小振幅 ELM の発生条件に関する物理機構の解明することを目的として、従来の ELM 安定性解析で用いられてきた物理モデルの拡張、および数値解析コードの開発を行う。特に、研究代表者がこれまでに理論・数値的に明らかにしてきた、ELM の原因となる周辺局在理想 MHD 安定性に対するプラズマ回転の影響に加え、波長の短い不安定性に対して影響を与える非理想効果に着目し、これらを同時に自己無撞着に考慮できる拡張物理モデルの考案を行う。

その後、前述の従来の物理モデルに基づく解析では type-I ELM の発生条件が説明でき

ない実験結果について、考案した物理モデルに基づいた数値解析コードを用いて ELM の安定性解析を行い、今回着目したプラズマ回転および非理想効果が与える影響を詳細に評価する。

3. 研究の方法

ELM の原因であるプラズマ周辺部に局在した MHD モードの安定性に影響を与える非理想効果としてイオン反磁性ドリフト効果に着目し、プラズマが回転している場合に同効果が自己無撞着に考慮できる物理モデルを新たに考案する。その後、この物理モデルに基づいた数値解析コードを開発し、同モードにイオン反磁性ドリフト効果・プラズマ回転効果がどのような影響を与えるかを明らかにする。さらに、その結果を踏まえて、従来のモデル (理想 MHD モデル) に基づいた数値解析では ELM 発生条件が正しく評価できない実験結果について、本研究で開発した数値解析コードを用いて同条件を再評価し、上記の 2 つの物理効果の重要性について解析する。

4. 研究成果

2015 年度は、イオン反磁性ドリフトおよびプラズマ回転の時間スケール、MHD モードが不安定化する時間スケールおよび空間スケールに着目し、これら以外の時間・空間スケールを持つ物理効果を無視することで、上記 2 つの物理効果を自己無撞着に考慮した拡張 MHD モデルの考案に成功した。そして、同モデルに基づく数値解析コード MINERVA-DI を開発し、回転しているプラズマ中で発生する MHD モードの安定性に対するイオン反磁性ドリフト効果の影響を調べた。その結果、静止したプラズマ中ではイオン反磁性ドリフト効果は必ず MHD モードを安定化するが、差動回転するプラズマ中ではその影響が弱まり、同ドリフト周波数よりも回転周波数が高くなると、同行化による安定化よりも差動回転による不安定化効果が強く表れることを明らかにした。さらに、その物理機構について安定性を決めるエネルギーの収支を調べた結果、イオン反磁性ドリフト効果は、差動回転による MHD モード不安定化の原因である動圧の効果を補正する形で表現され、回転周波数と同ドリフト周波数が同程度であっても回転による不安定化の影響はおよそ 4 倍大きいことが原因であることを明らかにした。この成果は Plasma Physics and Controlled Fusion 誌に掲載された。

2016 年度は、昨年度に開発した MINERVA-DI コードを用いて、JT-60U 実験装置における ELM 安定性の定量解析を行った。同装置では、これまで実験的に観測されていた ELM の発生条件と数値解析によって評価された条件の間に大きな差があることが示され、その差を埋めるにはプラズマ回転が重要な役割を果たすことが研究代表者らによって明らかにされていた。しかし、当時の解析ではイオン

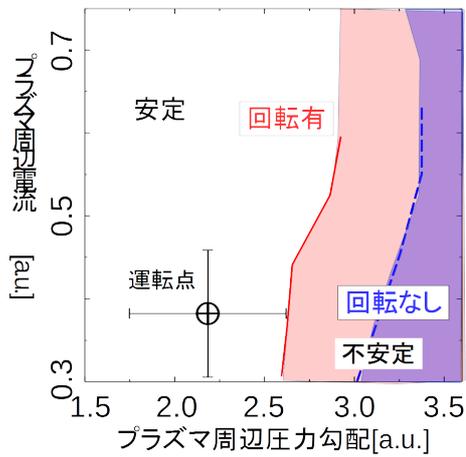


図1：JET-ILW 装置の ELM 安定性図。赤い(青い)領域は回転有(なし)の場合に ELM が不安定な領域。回転を考慮することで、ELM が不安定な領域が実験的に観測された運転点に大きく近づくことがわかる。

反磁性ドリフト効果が考慮されておらず、より高度な物理モデルに基づいた結果の再検証が求められていた。今年度、この再検証を行い、プラズマ回転が ELM 安定性に対するイオン反磁性ドリフト効果を大きく低減し、さらに ELM を不安定化することを明らかにした。この成果は、Nuclear Fusion 誌に掲載された。

2017 年度は、同じく MINERVA-DI コードを用いて、欧州 JET 装置における ELM 安定性の定量解析を行った。ITER like wall 設置後の同装置 (JET-ILW) において ELM 発生条件が従来モデルで説明ができなかった実験結果について再解析をした結果、プラズマ回転による ELM 不安定化効果が大きな影響を持ち、回転およびイオン反磁性ドリフト効果を考慮した数値解析により ELM 発生条件が説明できることを明らかにした (図 1 参照)。この成果は Nuclear Fusion 誌に掲載された。

また、MINERVA-DI を用いて、現在国内で建設中の JT-60SA 装置における ELM 発生条件の予測、および H モード時の周辺閉じ込め性能への影響について数値解析を行った。従来の ELM 発生条件予測ではプラズマ回転の影響は考慮されていなかったが、今回の回転を考慮した解析の結果、JT-60SA で想定されているプラズマの周辺閉じ込め性能が 10% 程度低下することを示した。この成果は、前述の欧州 JET 装置における ELM 発生条件の定量解析をさらに進めた結果とともに欧州物理学会における招待講演として報告し、併せて Plasma Physics and Controlled Fusion 誌に掲載された。

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 7 件)

- (1) N. Aiba, S. Pamela, M. Honda, C. Giroud, E. Delabie, L. Frassinetti, I. Lupelli, N. Hayashi, G. Huijsmans, the JET Contributors and JT-60SA Research Unit, "Analysis of ELM stability with extended MHD models in JET, JT-60U and future JT-60SA tokamak plasmas", Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, Vol. 60, 2018, 014032(11pp) DOI: 10.1088/1361-6587/aa8bec
- (2) N. Aiba, C. Giroud, M. Honda, E. Delabie, S. Saarelma, L. Frassinetti, I. Lupelli, F. J. Casson, S. Pamela, H. Urano, C. F. Maggi and JET Contributors, "Numerical analysis of ELM stability with rotation and ion diamagnetic drift effects in JET", Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 57, 2017, 126001(11pp) DOI: 10.1088/1741-4326/aa8178
- (3) N. Aiba, M. Honda and K. Kamiya, "Impact of ion diamagnetic drift on MHD stability at edge pedestal in JT-60U rotating plasmas", Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 57, 2017, 022011(10pp) DOI: 10.1088/0029-5515/57/2/022011
- (4) N. Aiba, C. Giroud, M. Honda, E. Delabie, S. Saarelma, L. Frassinetti, I. Lupelli, S. Pamela, H. Urano, C. F. Maggi, "Diamagnetic MHD equations for plasmas with fast flow and its application to ELM analysis in JT-60U and JET-ILW", Proceedings of 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016, Kyoto, 査読無, 2016, page 476 (IAEA-CN-234-0043)
- (5) N. Aiba, "Impact of ion diamagnetic drift on ideal ballooning mode stability in rotating tokamak plasmas", Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, Vol.58, 2016, 045020-1-13 DOI: 10.1088/0741-3335/58/4/045020
- (6) H. Urano, N. Aiba, K. Kamiya, Y. Kamada and the JT-60 Team, "Dependence of pedestal structure on collisionality at fixed beta in JT-60U", Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 56, 2015, 016005-1-8 DOI: 10.1088/0029-5515/56/1/016005
- (7) C. Giroud, J. Jachmich, P. Jacquet, A. Jarvinen, E. Lerche, F. Rimini, L. Aho-Mantila, N. Aiba et al., "Progress at JET in integrating ITER-relevant core and edge plasmas within the constraints of an ITER-like wall", Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, Vol. 57, 035004-1-20

DOI: 10.1088/0741-3335/57/3/035004

〔学会発表〕(計 6件)

- (1) 相羽信行, “MHD モデルの拡張によるエッジローカライズ発生条件の解明・予測”, 第23回数値トカマク(NEXT)研究会, 京都, 2018/2/28, 3/1, 招待講演
- (2) N. Aiba, S. Pamela, M. Honda, C. Giroud, E. Delabie, L. Frassinetti, I. Lupelli, N. Hayashi, G. Huijsmans, the JET Contributors and JT-60SA Research Unit, “Analysis of ELM stability with extended MHD models in existing and future JT-60SA plasmas”, 44th European Physics Society Conference on Plasma Physics, ベルファスト(英国), 2017/6/26-30, 招待講演
- (3) N. Aiba, C. Giroud, M. Honda, E. Delabie, S. Saarelma, L. Frassinetti, I. Lupelli, S. Pamela, H. Urano, C. F. Maggi, “JET-ILWにおけるELM安定性に対するプラズマ回転・イオン反磁性ドリフト効果の影響”, 第33回プラズマ核融合学会年会, 仙台, 2016/11/29-12/2
- (4) N. Aiba, C. Giroud, M. Honda, E. Delabie, S. Saarelma, L. Frassinetti, I. Lupelli, S. Pamela, H. Urano, C. F. Maggi, “Diamagnetic MHD equations for plasmas with fast flow and its application to ELM analysis in JT-60U and JET-ILW”, IAEA Fusion Energy Conference, 京都, 2016/11/17-22
- (5) 相羽信行、本多充、神谷健作、”回転トカマク中におけるエッジローカライズモードの安定性に対するイオン反磁性ドリフト効果“, 第32回プラズマ核融合学会年会, 名古屋, 2015/11/24-27
- (6) N. Aiba, M. Honda, K. Kamiya, “Impact of ion diamagnetic drift on MHD stability ad edge pedestal of rotating tokamaks”, H-mode workshop 2015, ガルヒング(ドイツ), 2015/10/19-21

〔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 件)

名称:

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相羽 信行 (AIBA Nobuyuki)
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部 上席研究員
研究者番号: 20414584

(2) 研究分担者

松永 剛 (MATSUNAGA Go)
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 那珂核融合研究所 トカマクシステム技術開発部 グループリーダー
研究者番号: 10391260

神谷 健作 (KAMIYA Kensaku)
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部 上席研究員
研究者番号: 60360426

浦野 創 (URANO Hajime)
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部 上席研究員
研究者番号: 70391258

(3) 連携研究者

松山 顕之 (MATSUYAMA Akinobu)
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門 六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部 主任研究員
研究者番号: 90581075

(4) 研究協力者

()