

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420900

研究課題名(和文) 高圧カプラズマにおける磁気流体不安定性安定化と3次元効果の研究

研究課題名(英文) Study of stabilization of the magneto-hydro dynamic instability and three dimensional effects of MHD stabilization on the high pressure plasma

研究代表者

武智 学 (Takechi, Manabu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 トカマクシステム技術開発部・主幹研究員(定常)

研究者番号：40370423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマの高圧力化は核融合炉の実現において、これを最終的に阻害する磁気流体不安定性である抵抗性壁モード(Resistive wall mode(以下「RWM」という。))の安定化が不可欠である。RWMの安定化に用いる外部コイルによる3次元平衡への影響を調べた。外部コイルを用いたトカマクプラズマのRWM安定化実験の実験結果を3次元平衡コードで再構成しうることを示した。また、JT-60SAにおいて予定されている小面積のコイルを用いた場合には側帯派の影響が大きいことを示し、3次元平衡コードでプラズマに対する影響を調べうることを示した。

研究成果の概要(英文)：It is very important to stabilize resistive wall mode (RWM), which finally limits the beta value, in order to increase the plasma beta value for realization of the fusion reactor. We conducted a research on the effect of the external RWM stabilization coil on three dimensional equilibrium. We reconstructed the plasma for RWM stabilization experiment by RWM control coil with three dimensional equilibrium code. We indicated that the side band effect of the small JT-60SA RWM coils is not negligible and it can be evaluated by three dimensional equilibrium codes.

研究分野：工学

キーワード：トカマク フィードバック制御 磁気流体不安定性 核融合プラズマ 3次元平衡

1. 研究開始当初の背景

ITERや核融合炉では、核融合出力はプラズマ圧力の2乗に比例し、圧力が高いほど、大きな核融合出力が得られる。しかしながら、プラズマ近傍に导体壁が無い場合、プラズマ圧力が高くなると、非常に早い成長率(数マイクロ秒)を持つ不安定性が発生してプラズマが変形し、高規格化プラズマ圧力状態を維持出来なくなってしまう(壁なし安定限界)。一方、プラズマを完全导体の导体壁で囲むと、导体壁に流れるうず電流によりこの不安定性は安定化されるが、さらにプラズマ圧力が高くなると早い成長率の不安定性が発生する。実際には壁には有限抵抗があり、これによって壁なし安定限界を越えるプラズマ圧力に達すると成長率の違い(数-数10ms)抵抗性壁モード(Resistive wall mode, RWM)と呼ばれる不安定性に変わる。RWMを安定化する手法として閉じ込め磁場の変形を外部コイルで修正するRWM補正コイルを用いた手法がある。RWM補正コイルによる安定化実験はDIII-D、RFX、NSTXなどで精力的に行われている。DIII-Dで以前成功していたと思われていたRWM補正コイルによる安定化は、理論的に予想されていたRWM安定化のプラズマ回転の閾値が非常に小さいと言うことが明らかになったため[PRL 2007 M. Takechi]、新たな安定化機構の解明と再検証が必要となり、現在精力的に行われている。一方、RFXはRFP配位及びトカマク配位における電流駆動型RWMの制御で大きな成果を上げている。補正コイルの数や大きさは装置による制約で制限されるため、RWMのモード構造に最適な補正磁場を発生させることは困難であるが、このような状態での安定化の可否については、これに関連するRWMのmode-rigidityを調べる必要がある。RFXでは図1に示すようなポロイダル方向に4個の制御コイルを持つモジュールが、トロイダル方向に48個設置されており計192個もの制御コイルが独立に制御できるシステムを有する。申請者はこの多数のコイルに注目し、コイルを間引きする、もしくはトロイダル方向、ポロイダル方向に直列に接続することにより制御に用いる実質的なコイル数を減らすことによりmode-rigidityの実験を行った[EPS 2010, M. Takechi]。図2に示すように192個のうちトロイダル方向に1列の8個のコイルまで減らしても最も成長率の大きい $m/n=-6/1$ のRWMを制御出来ることが確認された。非常に小型のコイルでもRWMを安定化が可能であることはITERやDEMO等の設計においては非常に有利であるが、コイルが小さいことによる側帯波の励起によって、磁気面が3次元的な変形を受けてプラズマの性能が著しく低下し、プラズマ消滅に至ることがあることや、準不安定なRWMが不安定化される等の問題点があることが明らかとなった。

一方、トカマク配位やRFP配位のようなプラズマ電流を有する軸対称プラズマに対し

て、3次元MHD平衡解析コードが整備され適用されている[NF 2003 Y. Suzuki]。特に最近はITERのトロイダルコイル、フェライト鋼及びテストブランケットによる磁場リップルの計算等が精力的に行われている。これらの計算によって有限ベータが大きくなることによりプラズマ形状のリップルが大きくなる、つまりプラズマの変形が大きくなることが予測されている。

本研究ではトカマクプラズマにおける摂動磁場によって生じる3次元効果を磁場形状、及び磁気流体不安定性の安定性等に対して実験的に調べ、3次元MHD平衡解析コードを用いて解析を行う。これまで、トカマクプラズマにおける摂動磁場に対する3次元効果を調べる実験は系統的には行われておらず、これらの3次元効果の解明とこれに使用可能な平衡解析コードの適用性の確認が急務となっている。

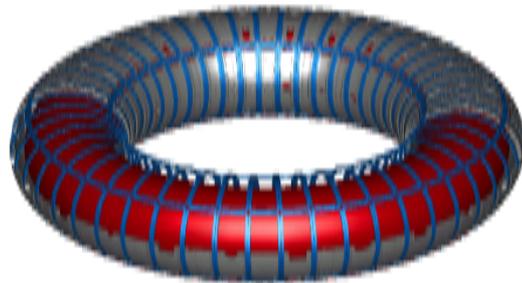


図1 RFXの192個の独立制御が可能なRWM制御コイル

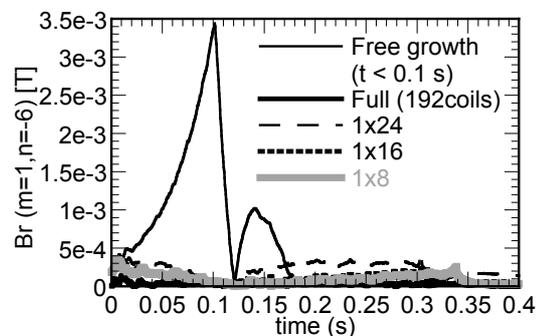


図2 RFXのRFP配位において $m/n=-6/1$ のRWMを制御した例。全てのコイル(太実線)、24個(破線)、16個(点線)、8個(灰実線)

2. 研究の目的

核融合プラズマの磁気流体不安定性の安定化、誤差磁場の補正等に外部磁場による摂動磁場が用いられる。特に核融合炉の定常化、高効率化には磁気流体不安定性の一種であるRWMの安定化によるプラズマの高圧力化が必須である。本研究において摂動磁場によるプラズマ平衡への影響を3次元的な効果を含めて調べるために実験の遂行及び3次元解析コードを用いた解析を行う。得られた知見は、ITERにおける定常運転やJT-60SAにおける運転、さらに高ベータ定常運転シナリオに基づく原型炉のデザイン等に貢献するとともに

に、トカマクへの3次元平衡の適用性の解明に資する。

### 3. 研究の方法

本研究は、1) 摂動磁場に対する磁気面形状への効果を調べる実験研究と、2) これらの実験結果を3次元平衡解析コードで解析し、これらのコードの適用性を判断し、さらにJT-60SAやITER等の外捜を行う事、から成る。

1) RFXにおける摂動磁場に対する磁気面形状への効果を調べる実験研究

RFXのトカマクプラズマにおいて、様々なモード及び大きさの磁場を制御コイルで印可することにより行う。RFXでは192個のコイルを独立に制御可能である。コイルの個数が多く、またプラズマ全体を覆うため、単色に近いモードを励起可能であることが大きな特長となる。また、実際にRWM制御を行う場合に印可する摂動磁場による影響を調べる。これらのコイルの使用個数、位置及び結線を変えることにより、コイルの実効的なコイルの配置(個数、大きさ、位相)を変えて、主に $m/n=2/1$ の電流駆動型RWMの制御を行う。コイルの位相を変えることにより、側帯波の振幅や、モード数を変えることが可能である。また、RWMの成長率、RWMの制御初期の大きさを変えることにより側帯派の大きさも変わる。これらの手法によって側帯派の大きさ、モード数が磁気面形状にどのような効果を持つかを調べる。磁気面形状の計測には制御コイルと同位置にある磁気センサー192組を用いる。

2) 3次元平衡解析コードを用いた実験結果の解析

解析には3次元MHD平衡解析コードVMECとビオ・サバルの法則から外部磁場を計算するKMAGやCOILを用いる。これらのコードをRFXに適用できるように改変を行い、これまで行ってきたRFX実験の実験結果の解析を行い、磁気センサー信号から同定した磁気面形状と、コードで計算した平衡の磁気面形状との比較を行う。

### 4. 研究成果

1) 摂動磁場による磁気面への影響の解析に対する3次元平衡解析コードの妥当性の確認

当研究課題の連携研究者が開発した3次元平行解析コード、HINT2コードを含む複数の平衡解析コードを用いた摂動磁場による磁気面への影響の解析に対するコードの妥当性の確認を目的として磁気流体不安定性及び磁場構造に対する3次元効果に関するDIII-Dの実験に参加した。DIII-Dのプラズマに対して真空容器内に設置されたコイルにて摂動磁場を与えた場合、VMECコードに代表される、3次元MHD平衡解析コードと、Mars-F、IPECコード等の軸対象平衡解析コードに外部磁場の効果を線形的に取り入れたコードとを比較して、プラズマの3次元的な構造の変化がプラズマの低磁場側では比較的合っている

のに対し、高磁場側では大きく相違があるため、新たに高磁場側に設置された3次元磁場計測用磁気センサーを用いてコードの計算結果との比較を行った。コードの妥当性の検証までには至らなかったが、上下非対称のプラズマを解くことができるコードと上下対称なプラズマのみ解くことができるコードがある中で、上下の対称性が高磁場側のプラズマの3次元的な変位に影響を与えうるとの新たな知見を得た。

2) RWM制御における制御アルゴリズム及び3次元計測に適した磁気センサーの検討と開発

JT-60SAではRWM制御で先進的結果を得ているRFP及びトカマク装置であるRFXで行われている側帯派を考慮したRWM制御、いわゆるクリーンモードコントロールを元に制御を行うこととし、これに必要な磁気センサーの開発を行った。また、制御に必要な制御周期、検出器の数及びアクチュエータの数からアルゴリズムの構築を行った。磁気センサーについては3次元磁場計測に適した実機の製作と試験が行われ、先のDIII-Dでの実験の結果を踏まえ、位置については調整を行った。その内容についてFusion Engineering and Designにて論文化された。

3) RFXにおける摂動磁場に対する磁気面形状への効果を調べる実験研究と3次元平衡解析コードを用いた実験結果の解析

核融合炉の定常化及び高効率化には、磁気流体不安定性の一種であるRWMの安定化が必須であり、JT-60SAでは制御コイルを用いて安定化する予定である。しかしながら、コイルの面積は小さく、またコイル数も少数にとどまるため、これまでに、この問題に関連する実験をRFXのトカマク放電で行っている。この結果、制御コイル192個のうち6個のコイルまで減らしても制御対象のRWMを安定化出来ることを確認した。しかしながら、実効的なコイル面積が小さいことによる側帯波の励起によって、磁気面が3次元的な変形を受けてプラズマの性能が著しく低下し、プラズマ消滅に至ることがあることが明らかとなった。JT-60SAにおいても、高ベータ運転を行うためにはプラズマと壁の距離を小さくする必要があるので、3次元的な変形によりプラズマが壁に接触するおそれがある。一方、これまでヘリカル装置にのみ適用されていた3次元MHD平衡解析コードが整備され、トカマク配位に対して適用されつつある。本研究において、トカマクプラズマにおける外部磁場によって生じる3次元効果を、3次元MHD平衡解析コードを用いることによって解析可能であるところに着目し、RFX-modで様々な制御コイル配位で行ったトカマクプラズマに対して特に最外殻磁気面に注目して解析を行うこととした。

観測されるMHD不安定性等から電流分布の予想を行い、これを用いて輸送解析コードにて放電開始から終了までのシミュレーション

を行った。図3に示すように、圧力と電流分布に関連する値( $\beta_p+1/2i_i$ )が実験値とシミュレーションの値がほぼ一致することを確認している。これにより、電流分布と圧力分布を得た(図4)。これらとコイルの電流の情報、プラズマ中の単位電流あたりの磁場の分布を入れることにより、3次元MHD平衡解析コードVMECの計算を行った。トカマクプラズマの3次元的な平衡が得られることを確認し、RWM補正コイルの電流を変えることによって、その平衡が有為に変化することを確認した(図5)。

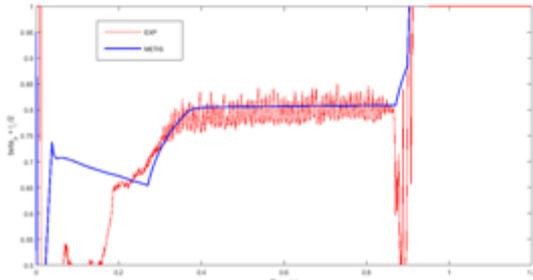


図3 圧力と電流分布に関連する値( $\beta_p+1/2i_i$ )の実験値(赤線)とシミュレーションの値(青線)の比較

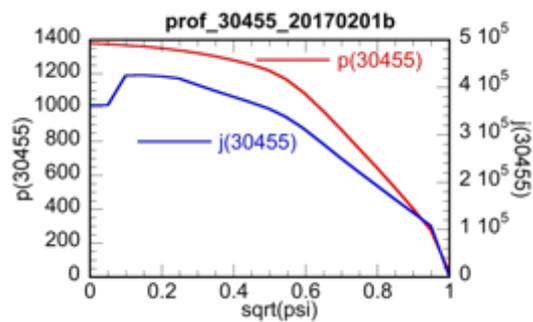


図4 輸送解析コードを用いたシミュレーションで得られた電流分布と圧力分布

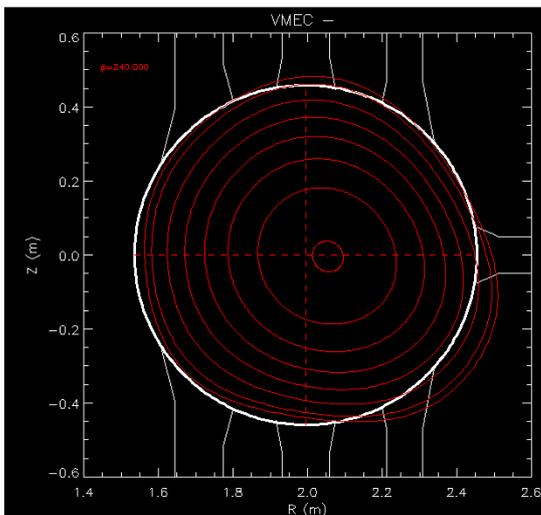


図5 VMECを用いて計算した外部磁場コイルによって摂動磁場を与えた場合のRFXの3次元平衡。

#### 4) JT-60SAのRWM制御における側帯派の影響の評価

JT-60SAのRWM制御コイルの発生する磁場の2次元フーリエ展開を行い、側帯派の計算を行った。 $m=2, n=1$ の摂動磁場を主に発生させるコイル電流値としたが、図6に示すように、比較的大きな振幅を有する多くのモードの側帯派が発生し、その影響が無視できないことが確認された。さらにVMECにて計算を進め、このためにコイルが作る磁場のマッピングデータを作るコードを開発し(図7)、計算を行った。

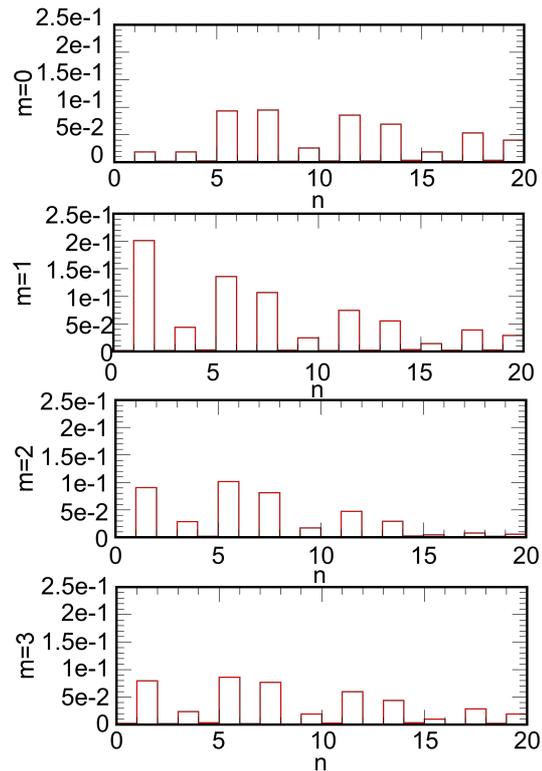


図6 JT-60SAのRWM制御コイルによって発生する磁場成分。

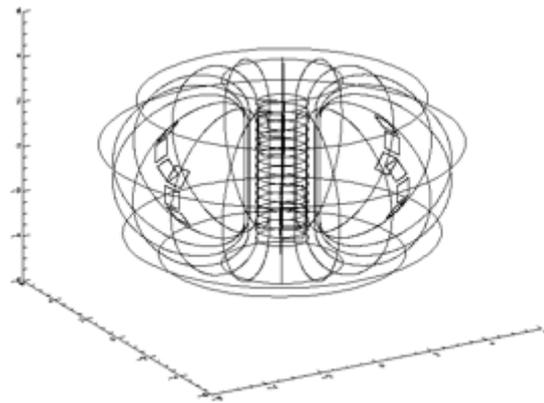


図7 VMEC用のマッピングデータを作るコードに用いられたJT-60SAのコイル群。

## 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5件)

- ① T. Bolzonella, M. Takechi (8番目), 他7名, "Securing high  $\beta_N$  JT-60SA operational space by MHD stability and active control modelling", proceedings of 2016 IAEA Fusion Energy Conference, 査読有, 2017, P1-18
- ② S. Mastrostefano, M. Takechi (8番目), 他7名, "Three-dimensional analysis of JT-60SA conducting structures in view of RWM control", Fusion Engineering and Design, 査読有, Volumes 96-97, October 2015, Pages 659-663
- ③ M. Takechi, 他12名, "Development of magnetic sensors for JT-60SA", Fusion Engineering and Design, 査読有, Volumes 96-97, October 2015, Pages 985-988
- ④ G. Matsunaga, M. Takechi (2番目), 他4名, "In-vessel coils for magnetic error field correction in JT-60SA", Fusion Engineering and Design, 査読有, Volumes 98-99, 2015, Pages 1113-1117
- ⑤ M.E. Puiatti, M. Takechi (119番目), 他140名, "Overview of the RFX-mod contribution to the international Fusion Science Program", Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 104012

[学会発表] (計9件)

- ① M. Takechi, 他8名, "Progress of the magnetic sensors development for JT-60SA", 29th Symposium on Fusion Technology, 5<sup>th</sup>-9<sup>th</sup>, September 2016, Prague, (CZECH REPUBLIC)
- ② S. Inoue, J. Shiraishi, G. Matsunaga, M. Takechi, A. Isayama and S. Ide, "Active control/stabilization of locked mode in tokamaks at high magnetic Reynolds number" in Proceedings of 26rd IAEA Fusion Energy Conference, ICC 京都 (京都市・京都市), TH/P1-13 (2016)
- ③ 武智 学, 他8名, "JT-60SAにおける磁気計測の進展", プラズマ・核融合学会第32回年会, 2015年11月24日-27日, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- ④ 武智 学, 他6名, "JT-60SAのMHD制御における3次元効果", Plasma Conference 2014 (PLASMA 2014), 2014年11月18日-21日, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)

- ⑤ M. Takechi, 他8名, "Development of the magnetic sensors for JT-60SA", 28th Symposium on Fusion Technology, 29<sup>th</sup> September-3<sup>rd</sup> October 2014, San Sebastian, Spain
- ⑥ 栗田 源一, 武智 学 (4番目), 他3名, "Simulations of locked mode and rotation drive in a tokamak" 2014 Joint meeting of US-Japan MHD workshop and ITPA MHD Stability Topical Group, 2014年3月10日, NIFS (岐阜県・土岐市)
- ⑦ 武智 学, 他8名, "JT-60SAにおける磁気計測", プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013年12月03日-06日, 東京工業大学 (東京都・目黒区)
- ⑧ 松永 剛, 武智 学 (3番目), 他5名, "JT-60SAにおける誤差磁場及び補正コイルとその応用", プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013年12月03日-06日, 東京工業大学 (東京都・目黒区)
- ⑨ T. Bolzonella, M. Takechi (8番目), 他7名, "Physics and Control of External Kink Instabilities with Realistic 3D Boundaries: a Challenge for Modern Experiments and Modeling" 23rd International Toki Conference, 18<sup>th</sup> -21<sup>st</sup> November 2013, NIFS, Toki, Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武智 学 (Takechi, Manabu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 トカマクシステム技術開発部

主幹研究員

研究者番号: 40370423

### (2) 連携研究者

中村 祐司 (Nakamura, Yuji)

京都大学大学院エネルギー科学研究科  
・エネルギー基礎科学専攻・教授

研究者番号: 20198245

鈴木 康浩 (Suzuki, Yasuhiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 20397558