

## 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 6月 9日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560866

研究課題名（和文） プラズマの高圧力化を制限する磁気流体不安定性の安定化研究

研究課題名（英文） Stabilization study of the magnetohydrodynamic instability deciding the highest plasma pressure.

研究代表者

武智 学 (TAKECHI MANABU)

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・研究副主幹

研究者番号：40370423

研究成果の概要（和文）：核融合炉の実現においてプラズマの高圧力化は不可欠である。これを阻害する磁気流体不安定性の中で最終的にプラズマ圧力を制限する抵抗性壁モード(Resistive wall mode (以下「RWM」という。))の安定化の研究を行った。その結果、高速イオン励起モードによってRWMが不安定化される物理機構を解明した。また、外部コイルを用いたRWM安定化において非常に小さなコイルを少数用いた場合でも安定化しうることを確認した。しかしながら、条件においてはコイルが小さいことが原因となり側帯派の3次元効果等によってプラズマ性能が劣化する場合があることが判明した。

研究成果の概要（英文）：It is very important to increase the plasma beta value for realization of the fusion reactor. We conducted a research on stabilization of resistive wall mode, which finally limit the beta value. The mechanism of RWM triggered by energetic driven mode has been clarified. Stabilization of RWM with very small and few coils has been clarified. However, under certain conditions, the degradation of plasma by 3D effect of sideband effect due to small size of the control coils has been observed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：トカマク、フィードバック制御、RFP、プラズマ回転、磁気流体不安定性、核融合プラズマ

## 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おそい(数-数10ms)抵抗性壁モードと呼ばれる不安定性に変わる。

RWMを安定化する手法は主にプラズマ回転によって安定化する手法と閉じ込め磁場の

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の2つがある。前者については、当初の実験および理論解析では、RWM の抑制に必要な最小限の回転速度は ITER で想定されるプラズマ回転よりも速く、ITER では回転による抑制は困難であろうという予測がなされていた。しかしながら、最近の詳細な実験によりこの当初の予測のわずか約 1/6 程度の回転で RWM が安定できることが明らかとなった。これは ITER で予測されている回転速度よりも小さく、ITER においても高いプラズマ圧力であっても、RWM の抑制が期待出来ることを示した。しかしながら、この実験結果はこれまでの理論を覆す結果であったため、これまでと異なる安定化機構の構築と解明が必要となった。一方、最近の実験により、プラズマ回転がこの新たに発見された回転の閾値以上でも、H-mode に伴う ELM や高エネルギー粒子で励起される fishbone 等の磁気流体不安定性がトリガーとなり、RWM が発生しうることが報告されている。これは RWM 安定化のオプションとしていまだに RWM 補正コイルによる安定化を考える必要があることを示している。これらの RWM のトリガーとなる不安定性が誤差磁場となり、プラズマ回転が低下することにより、RWM の発生に起因していると予測されているが、これらの不安定性と誤差磁場と RWM のそれぞれの因果関係は明らかとなっていない。また、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や効率については、これに関連する RWM のモードレジディティについては解明されていない部分が多いため明らかになっていない。モードレジディティとは MHD 不安定性がモード構造を維持したまま成長及び減衰を行うという仮定であり、RWM 制御シミュレーション等ではこれを前提としている。

## 2. 研究の目的

抵抗性壁モードの安定化にはプラズマ回転による安定化と外部コイルを用いたフィードバック制御による安定化が有効であるが、本研究では、実験の遂行および解析コードを用いた解析を行うことにより、前者についてはプラズマ回転の分布を含めた RWM 安定化への影響や高速イオンや誤差磁場によるプラズマ回転及び RWM 安定性への影響等の物理機構の解明を目的とする。後者については RWM のモードレジディティの問題や誤差磁場の制御に対する影響等の物理機構の解明を目的とする。これらの知見は ITER における定常運転や JT-60SA における高ベータ定常運転、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。

## 3. 研究の方法

### (1) RWM の回転による安定化

#### ① これまで得られた JT-60U の RWM 安定化に関する実験データの収集／解析

JT-60U では 2006 年に少ないプラズマ回転で RWM の安定化が可能ということが発見されて以降、RWM の実験以外に壁安定化を用いた高ベータプラズマの定常化、および高自発電流割合のプラズマの高ベータ化等のプラズマの開発が活発化した。これらの開発のために負磁気シアプラズマを含む様々な電流分布、圧力分布、回転分布での RWM 安定化が試行された。2006 年以降は特に高速、高精度、高空間分解のプラズマ回転計測が可能となり、非常に精度の高いデータベースの構築が可能である。

#### ② DIII-D における実験

JT-60U との比較を行うため DIII-D において注目する放電と同様なプラズマパラメータで実験を行う。具体的には安全係数分布、圧力分布、壁なし安定限界のベータ値、理想壁有りでの安定限界のベータ値を揃えた実験を行い、RWM の物理機構の解明を目指す。さらに将来の炉への外挿に必要なデータの補完を行う。

### (2) RWM 制御コイルによる安定化

#### ① RWM のモードレジディティに関する研究

RFX の独立制御可能な 192 個のコイルを用いて実験を行う。具体的には、図 1 のとおりトロイダル方向に 2 個ずつ直列に (例えば図 1 にて 1 と 3、2 と 4 を等) 結線する、トロイダル方向に 2 個ずつ直列に (同 1 と 2、3 と 4 5 と 6 を等) 結線する、トロイダルおよびポロイダル方向にそれぞれ 2 個ずつ計 4 個直列に (同 1、2、3、4 を等) 結線する、トロイダル方向に 1 つおきに (3、4 を含むポロイダル方向のモジュール等) を間引きする、等の結線の変更により、少ないコイルを用いて、ある目的とするモード数の RWM を安定化した場合にどのような他のモード数を持つ RWM がどのような成長率を持って成長す

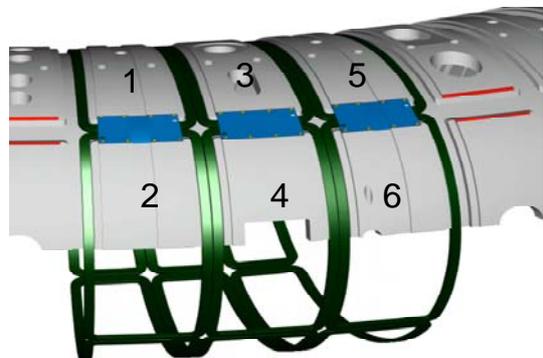


図 1 RFX の RWM 制御コイル。一部のコイルのみ使用する、もしくは複数のコイルを直列に繋ぐことにより実効的なコイル数を減らし、RWM のモードレジディティの研究を行う。

るかを調べる。

## ② 誤差磁場に関する研究

誤差磁場をRWM制御コイルで発生させ、RWMの成長の様子を調べる。誤差磁場はモード数、強度等をサーベイして依存性を調べる。さらに、RWM不安定化限界付近でのプラズマによる誤差磁場の増幅が問題となっているが、この問題に対しては定常の誤差磁場を掛けた上で、RWMの駆動源である電流勾配を電流ランプアップにより時間的に変化させることにより誤差磁場の振幅の変化を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) RWMの回転による安定化

#### ① これまで得られたJT-60UのRWM安定化に関する実験データの収集/解析

JT-60UのRWM実験において、抵抗性壁モードを安定化する上で十分なプラズマ回転を持つ場合においても高速イオンに励起されるバースト的な振動が繰り返される磁気流体不安定性が励起される場合に抵抗性壁モードが誘発される現象が観測された。すなわち、高速イオン励起モードがRWMの安定性に影響を与えることが推測された。このモードは高速イオン励起壁モード Energetic particle driven wall mode EWMもしくは非磁気軸上魚骨振動 off-axis fishboneと呼ばれる。また一方、理論によって回転以外のRWM安定化として、高速イオンの運動論的效果が大きく関わることを予測された。

#### ② DIII-Dにおける実験

RWM安定性に対する高速イオン励起モードの効果調べるために、DIII-Dにおいて、高

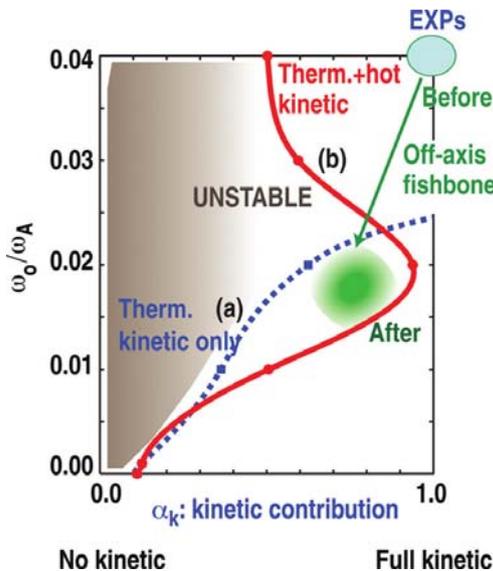


図2 RWM安定性解析コードMARS-Kに回転の効果に加え高速イオンの効果を加えて高速イオン励起モードによってRWMが不安定化されることを確認した。

速イオンが抵抗性壁モードの安定性に与える影響と、プラズマ回転と高速イオン励起モードおよび抵抗性壁モードとの相互作用を調べる実験を行った。非常に時間分解の良いプラズマ回転計測を行うことにより、高速イオン励起モードの励起されている短い時間だけ回転が急速に約30km/sから約20km/sに10km/s程度も低下し高速イオン励起モード後に直ちに回復する現象を観測し、高速イオンモードによってプラズマ回転に影響を与えることが確認された。その原因はイオンの吐き出しによる電場の生成による。また、RWM安定性解析コードMARS-Kに回転の効果に加え高速イオンの効果を加えて高速イオン励起モードによってRWMが不安定化されることを確認した。図2において、点線は高速イオンの運動論的效果無しでRWMの安定性を計算した結果である。横軸は主プラズマと高速イオンを含めた運動論的效果、縦軸はアルフベン速度で規格化したトロイダルプラズマ回転である。この場合、RWMが観測されない高速イオン励起モードが起きる前(Beforeの緑丸)でもRWMは不安定となるが高速イオンの運動論的效果を加えると赤実線のように安定となり、実験結果と矛盾しない。高速イオン励起モードが発生すると、高速イオンが吐き出され、回転が低下し、運動論的效果も減少する(Afterの緑丸)。この場合、図2に示すようにRWMが不安定領域に入ることが示され、高速イオン励起モードによってRWMが不安定化される物理機構が明らかとなった。

### (2) RWM制御コイルによる安定化

#### ① RWMのモードレジディティに関する研究

抵抗性壁モードの制御コイルを用いた安定化において、モードに対して小さい面積のコイルを用いて安定化する際にモードレジディティが維持されない場合、モードの変形や側帯波のモードが励起されるという問題が指摘されている。そこで、RFXのRFPプラズマを用いてRWMのモードレジディティの成り立ちと側帯波に関する実験を行った。

RFXは192個のRWM制御コイルを持ち、プ

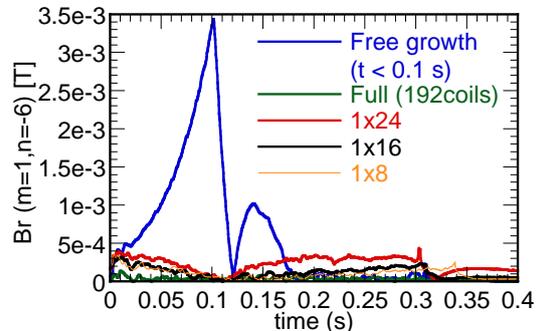


図3. RFXのRFPプラズマにおいてコイルの数を192個から48, 16, 8と減らしてm=1, n=6のRWMの安定化を試みた例。

ラズマ表面全体をこのコイルで覆っている。このコイルの個数を減らすことによって実験を行った。H23年度の実験ではRFP配位のプラズマに対し、192個から48、24、16、12、8、とコイルの数を減らしてRFXの今回のプラズマで最も不安定な  $m=1, n=6$  のモードの安定化を試みた。コイルを8個まで減らしてもコイル数がモードの節の数の約数の場合（例えば12個）を除き、安定化可能であることが確認された（図3）。しかしながらコイル数が少ない程、コイルが励起する側帯波の振幅は非常に大きくなり、プラズマが非軸対称の高次変形を伴い、プラズマ性能の悪化やプラズマの消滅に至ることが確認された（図4）。また、側帯波モードがプラズマの準安定なモードであった場合、プラズマに寄って側帯波モードが増幅される、いわゆる Resonant Field Amplify についても観測した（図5）。これらの実験によって抵抗性壁モードのモードレジディティが比較的維持されることが判明したが、側帯派の影響が大

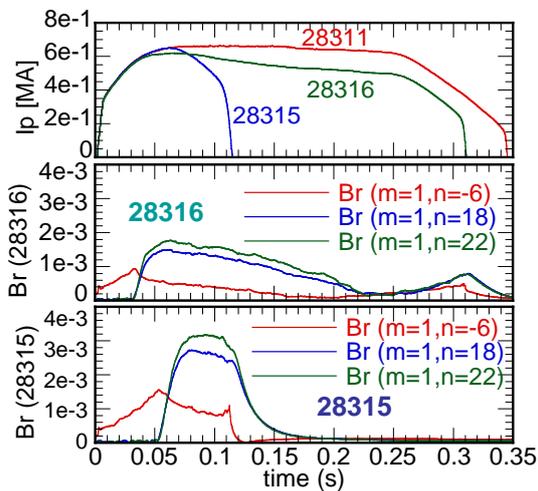


図4. RFXのRFPプラズマにおいて8個のコイルを用いてRWMを安定化した例。大きな側帯派によってプラズマ放電が早期に終了している(28315)。

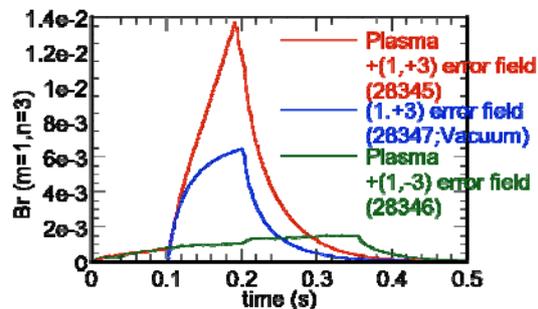


図5. RFXのRFPプラズマにおいて準不安定なRWM ( $m=1, n=3$ ) がプラズマによって増幅されている例。側帯派(青線)が不安定化され振幅が増大している(赤線)。

きいため、コイルの形状及び個数が制御に大きな影響を与えることが確認された。この結果はJT-60SAやITER等の将来の核融合炉の抵抗性壁モード安定化コイルの設計に大きな影響を与えると予想される。

さらにRFXのトカマク放電にて実験を行った。RFXのトカマク放電の最も大きな長は、他のトカマク装置では電流値を上昇させている場合のみ抵抗性壁モードが不安定化されるため抵抗性壁モードの成長率が時間とともに変化するのに対し、RFXのトカマク放電では電流値が一定の場合においても不安定化されるため、成長率が時間とともに変化しないことにある。このため、RFXに於いては成長率を決定することを非常に精度良く行うことが可能である。安定化実験は通常のトカマク同様に抵抗性壁モードの局在する低磁場側のコイルの動作数を48個、24個、12個、6個と減らしてプラズマ表面に対するコイルの面積を変えて行った。結果的には6個まで減らしてもRWMを安定化しうることが確認された。これはRWMが比較的リジッドであることを示唆している。図6に低磁場側のコイルのみのトロイダル方向に6個のコイルを用いて抵抗性壁モードを安定化した例を示す。今後、側帯波の影響等の解析を進め、これらの結果を基に、JT-60SAのコイルの詳細設計に反映させる。

モードレジディティの定量的な評価を行うには、計測された磁場揺動からコイルによる磁場成分、周辺の構造物からの磁場成分を静磁場だけでなく、渦電流まで含めたダイナミクスを考慮して差し引き、プラズマの磁場成分のみを抽出する必要がある。これらの効果を差し引くコードが新たに開発され、プラズマのみの磁場構造の変化を正確に計算することが可能となり、このコードを用いて、モードレジディティ実験の解析を行った。今後、トロイダル、ポロイダル2次元の空間に対してのフーリエ変換を行うことにより、定量的評価が可能となる。

### (3) 誤差磁場に関する研究

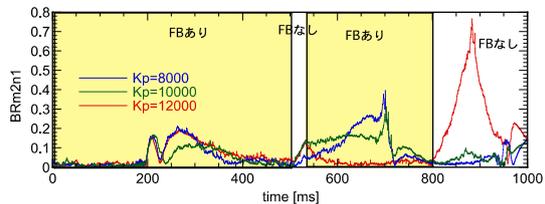


図6. RFXのトカマクプラズマにおいて低磁場側のコイルのみのトロイダル方向に6個のコイルを用いて抵抗性壁モードを安定化した例。RWM制御は  $t=530\text{ms}$  から行っている。FB比例ゲインは  $K_p=8000$  (青)、 $10000$  (緑)、 $12000$  (赤)。 $K_p=12000$  で  $m/n=2/1$ RWMが安定化されている。

抵抗性壁モードの安定化に於いて誤差磁場は抵抗性壁モードの安定性及び制御性に大きな影響を与える。抵抗性壁モードが準不安定になると誤差磁場は増幅され、抵抗性壁モードをさらに不安定化させることが懸念されている。

RFX のトカマク放電において  $m/n=2/1$  の RWM が準不安定な領域において外部コイルで  $m/n=2/1$  の誤差磁場を印可することによって実験を行った。誤差磁場の振幅を時間的に掃印することによって抵抗性壁モードによって増幅される場合の誤差磁場の振幅の閾値等を調べた。

図7に実験結果を示す。緑線はプラズマ無しの場合であるが、このような振幅を掃印した誤差磁場をかけると、プラズマがある場合、 $B_r=0.08\text{mT}$  あたりから誤差磁場が増幅された。赤のように時間を200ms前倒しにしても同様な結果が得られた。

この実験を元に、閾値付近の誤差磁場をトロイダル方向に10Hzで回転させながら印可した。図8に実験結果を示す。ピンクの線が示すように印可した誤差磁場は振幅の変動はほとんど無いが、プラズマがある場合、トロイダル方向に周期性を持つ振幅の増減が観測された。これについて、元からある誤差磁場とのカップリング、トロイダル方向に一つだけあるポロイダルギャップが原因としてあげられるが、説明はまだ出来ていない。今後は誤差磁場の増幅に関する理論計算との比較を行う予定であるが、この実験結果はこの計算において3次元効果を含める必要があることを示唆している。

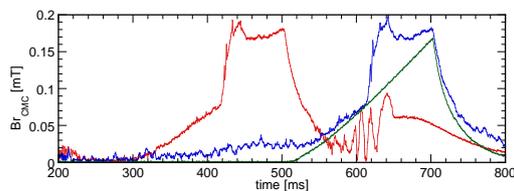


図7. 誤差磁場増幅に関する実験の実験結果。印可した誤差磁場（緑）とプラズマのレスポンス（青）200ms前倒した場合（赤）。

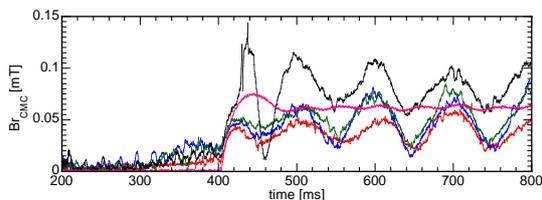


図8. 閾値付近の誤差磁場をトロイダル方向に10Hzで回転させながら印可（ピンク色の線）した場合の誤差磁場増幅トロイダル方向に大きな変動がある。

## 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 G. Matsunaga, N. Aiba (3番目), M. Takechi (8番目) 他8名, “Energetic particle driven instability in wall-stabilized high- $\beta$  plasmas”, *Nuclear Fusion*, 査読有, 50巻, 2010, 084003  
DOI:10.1088/0029-5515/50/8/084003
- ② M. Okabayashi, G. Matsunaga (2番目), M. Takechi (10番目) 他16名, “Off-axis fishbone-like instability and excitation of resistive wall modes in JT-60U and DIII-D”, *Physics of Plasmas*, 査読有, 18巻, 2011, 056112  
DOI:10.1063/1.3575159
- ③ 武智学, “トカマクにおける三次元 MHD 研究の現状と他閉じ込め配位からの寄与 4. 巨視的不安定性の制御における外部摂動磁場の効果”, *プラズマ・核融合学会誌*, 査読無, 88巻, 2012, 162-167
- ④ P. Martin, M. Takechi (117番目) 他133名, “Overview of the RFX fusion science program”, *Nuclear Fusion*, 査読有, 51巻, 2011, 094023,  
DOI:10.1088/0029-5515/51/9/094023

[学会発表] (計12件)

- ① M. Takechi, “Design of RWM control on JT-60SA”, 14th Workshop on Active Control of MHD Stability: Active MHD Control in ITER, 9-11 Nov. 2009, Princeton, USA.
- ② M. Takechi, G. Matsunaga (5番目) 他3名, “Mode rigidity study of RWM on RFX with reduced RWM control coils for JT-60SA RWM stabilization”, *Proc. 37th EPS Conf. on Plasma Physics (Dublin, Ireland, 2010)* paper P-2.192.
- ③ T. Bolzonella, M. Takechi, et al., “Active MHD control under different coil configurations in RFX-mod”, *Proc. 37th EPS Conf. on Plasma Physics (Dublin, Ireland, 2010)* paper P-2.176.
- ④ M. Takechi, G. Matsunaga, N. Aiba (7番目), “Design study of plasma control system on JT-60SA for high beta operation”, in *Proceedings of 23rd IAEA Fusion Energy Conference*, Daejeon, Republic of Korea (2010) paper FTP/P6-30.
- ⑤ G. Matsunaga, N. Aiba, K. Shinohara,

- Y. Sakamoto, M. Takechi, 他 11 人, in Proceedings of 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Republic of Korea (2010).
- ⑥ M. Okabayashi, G. Matsunaga, M. Takechi, 他 12 名, the 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Chicago (招待講演), Illinois November 8-12, 2010.
- ⑦ M. Takechi, G. Matsunaga, N. Aiba (7 番目), "Design study of plasma control system on JT-60SA" (招待講演), 15th Workshop on MHD Stability Control & Joint US-Japan Workshop: "3-D Magnetic Field Effects in Control" University of Wisconsin, Madison, USA. Nov 15-17 2010.
- ⑧ 武智学, 松永剛, 相羽信行 (6 番目) 他 3 名, JT-60SA における RWM 安定化システム、第 8 回核融合エネルギー連合講演会、2010 年 6 月 10 日、高山市民文化会館 (岐阜県)
- ⑨ 武智学, 松永剛, 相羽信行 (6 番目) 他 3 名, "JT-60SA の RWM 安定化システムのシミュレーション"、プラズマ・核融合学会 第 27 回年会、2010 年 12 月 2 日、北海道大学 (北海道)
- ⑩ M. Takechi, T. Bolzonella, M. Baruzzo, "RFX-mod における少数のコイルを用いた RWM 安定化実験 (招待講演)"、NIFS 共同研究 研究会「MHD 理論研究の進展と課題」、2010 年 12 月 21 日、核融合研 (岐阜県)
- ⑪ T. Bolzonella, M. Takechi, et al., "Current Driven RWM physics and stabilization under multiple active coil configurations in RFX-mod low q(a) tokamak plasmas", ITPA Topical Group on MHD Stability, October 4th-7th, 2011, Padova, Italy.
- ⑫ Matteo Baruzzo, M. Takechi, et al., "Resistive Wall Modes Identification and Control in RFX-mod low qedge tokamak discharges", 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 14-18, 2011, Salt Lake City, Utah.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武智 学 (TAKECHI MANABU)

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・研究副主幹

研究者番号：40370423

### (2) 研究分担者

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・研究副主幹

研究者番号：10391260

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・研究員

研究者番号：20414548