

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420858

研究課題名(和文) 磁場閉じ込め核融合プラズマにおける磁場遮蔽効果の実験則の確立

研究課題名(英文) Establishment of empirical scaling of mode penetration in magnetic confined fusion plasma

研究代表者

榊原 悟 (Sakakibara, Satoru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：90280594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め核融合炉において高いプラズマ性能を維持するためには、乱れのない磁場構造を維持する必要があるが、コイル設置の精度の低下等によって誤差磁場(摂動磁場)が存在する場合、ある閾値を超えた時に不安定性を励起し、プラズマを崩壊させる現象が観測されている。本研究では、ヘリカルプラズマにおいて摂動磁場に対するプラズマの応答を実験的に調べ、摂動磁場の蔽閾値について明らかにすることを目的としている。摂動磁場の遮蔽閾値が磁気シア、磁気丘などのパラメータに依存すること、プラズマのアスペクト比を変化させた場合、遮蔽閾値の密度依存性が正から負に変化することなど、トカマクとは大きく異なる依存性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Nested magnetic flux surface is required to maintain high performance plasma in magnetic confined fusion reactor. However, when an error field (perturbation field) due to misalignment of magnetic coils exceeds a certain value, MHD instability leading to major disruption is excited. In this study, we had investigated a plasma response to perturbation field in helical plasma in order to clarify the threshold of penetration of perturbation field to the plasma. Experiments show that the penetration threshold strongly depend on magnetic configuration such as magnetic shear, magnetic hill and so on, and the density dependence of the threshold largely changes when the plasma aspect ratio is changed. These results are quite different from those from tokamaks.

研究分野：核融合学、プラズマ物理学

キーワード：ヘリカルプラズマ MHD平衡 MHD不安定性 摂動磁場

### 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め装置において健全な磁場構造を維持することは高いプラズマ閉じ込め性能を実現、維持する上で重要である。しかしながら、閉じ込め磁場を形成するためのコイルのフィーダー部や装置周辺部の磁性体の存在により誤差磁場が生じた場合、共鳴面上においては磁気島と呼ばれる島状の領域が形成され、プラズマ閉じ込め性能が劣化し、不安定性が励起される。これまでの実験研究において、誤差磁場により形成された磁気島が急激に成長し、プラズマを急激に崩壊させる現象（ディスラプション）が観測されている。また、間接的ではあるが、誤差磁場の存在によりプラズマの流れがせき止められ、結果として不安定性が成長しプラズマを崩壊に導く場合がある（抵抗性壁モード等）。

このような誤差磁場は、ある閾値以下ではプラズマによって遮蔽されることがわかっており、国際熱核融合実験炉（ITER）や将来の核融合炉における許容磁場強度（遮蔽される磁場強度）を見積もるための装置間実験が、現在もなお精力的に行われている。また、このような誤差磁場を外部より積極的にプラズマ中に与え、磁場構造を乱すことにより不安定性を制御し、真空容器内の構造物への熱負荷を低減させる実験が行われている。その際にも磁場遮蔽が生じている可能性が指摘されており、磁場遮蔽効果に対するさらなる物理研究が要求されている。

### 2. 研究の目的

本研究は、磁場閉じ込め装置において閉じ込め劣化や不安定性成長を引き起こす摂動磁場（誤差磁場）の遮蔽および自発的成長についての物理現象を明らかにし、磁場構造の異なる装置での比較を通じて共通の物理機構を理解することを目的としている。具体的には、ヘリオトロン配位を持つ大型ヘリカル装置（LHD）において、プラズマ内部にしみこむ摂動磁場（磁気島）を高い精度で同定する磁場計測システムを構築し、広範なプラズマ領域、磁場配位における実験を通じて、外部より与えた摂動磁場がプラズマによって遮蔽されるしきい値を明らかにし、トカマクやRFPにおける実験結果との対比を通じて磁場閉じ込め装置における共通の実験則の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

LHDにおいて広範な磁場配位において外部摂動磁場を印加する実験を遂行し、磁場配位、プラズマパラメータに対する摂動磁場の遮蔽閾値に対する依存性を明らかにする。本科学研究の枠組みでは、摂動磁場の振る舞いを計測する磁場計測システムに利用する積分器を増設し、摂動磁場計測の精度を向上させた。磁場遮蔽閾値におけるプラズマパラメータ同定は、精度向上のため荷電交換分光器によるプラズマ流、電場計測、摂動磁場同定のための

磁気計測、トムソン散乱計測によるプラズマ分布計測を詳細に行い、ヘリカルプラズマにおける磁場遮蔽効果について明らかにする。また、国際共同研究の枠組においてトカマクやRFPにおける磁場遮蔽閾値に関する議論を通じ、ヘリカルプラズマとの対比を行う。

### 4. 研究成果

本研究では、摂動磁場の遮蔽閾値に対する磁場構造依存性、及びプラズマパラメータ依存性を明らかにするための実験を行った。磁気シアに対する依存性については、過去の実験において明らかにしていることから[1]、磁気シアを一定に保ったまま磁気丘を変化させるため、磁気軸位置を外方向にシフトさせた。図1に磁気軸位置と磁気シア、磁気丘の関係を示す。

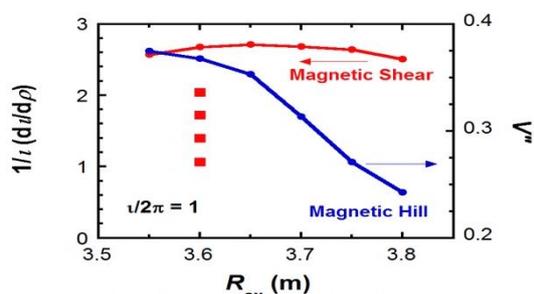


図1 磁気軸位置に対する磁気シアと磁気丘の関係

実験では10組の共鳴摂動磁場（RMP）コイルを用いて、 $m/n=1/1$ の磁気島を形成する摂動磁場を印加した。図2に結果を示す。

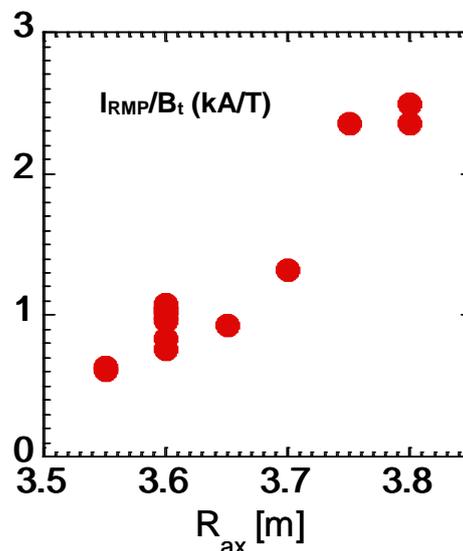


図2 磁気軸位置に対する摂動磁場遮蔽閾値

磁気軸位置を外側にシフトさせることにより、プラズマ中に摂動磁場が浸み込むRMP電流値が上昇していくことがわかった。本結果は、磁気丘が低下した場合に、摂動磁場が浸み込みにくくなっていくことを示している。この実験においてプラズマ流計測を行ったが、有

意なプラズマ流の差異は観測されなかった。結果として、磁気シアの低下、磁気丘の上昇など、よりプラズマが不安定になる条件に近くにより磁場遮蔽閾値が低下していくことがわかった。このような依存性はトカマクの実験則には含まれていない。

次に、プラズマパラメータ依存性に対する実験結果を示す。トカマクでは、磁場遮蔽閾値は密度の上昇に伴いほぼ線形に増加していくことが知られている。LHD では、プラズマアスペクト比を変化させ、各アスペクト比において密度スキャンを行った。

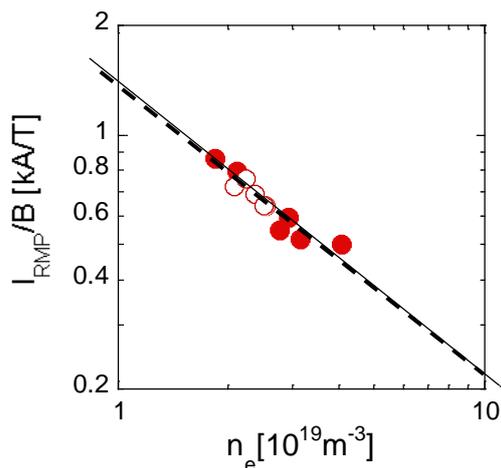


図3 アスペクト比 7.1 の場合の密度に対する磁場遮蔽閾値の変化

結果として、アスペクト比が 7.1 の場合には遮蔽閾値は密度の $-0.81$ 乗に比例し、トカマクとは逆の依存性を持つことがわかった。一方、アスペクト比を低下させた場合、密度依存性が連続的に弱くなり、アスペクト比が 5.7 で正の依存性を持つことがわかった。プラズマ流計測からは、ポロイダル流の増加より遮蔽閾値が増加する傾向は見られるが、誤差が大きく、プラズマ流の遮蔽閾値に対する効果については今後明らかにする必要がある。

結論として、ヘリカルプラズマにおける摂動磁場閾値は、磁場配位やプラズマパラメータなどに強く依存し、トカマク実験則とは大きく異なることが分かった。物理機構の差異を明らかにするために引き続き研究を進める予定である。

#### <引用文献>

[1] S. Sakakibara et al., “Response of MHD stability to resonant magnetic perturbation in the Large Helical Device”, Nuclear Fusion 53 (2013) 043010.

#### 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 10 件)

- ① T. Tokuzawa, Y. Takemura, K.W. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima et al., “Distorted magnetic island formation during slowing down to mode locking in helical plasmas”, Nuclear Fusion 57 (2017), 076003.
- ② S. Sakakibara, K.Y. Watanabe, H. Funaba, Y. Suzuki, S. Ohdachi et al., “Extension of high-beta plasma operation to low-collisionality regime”, Nuclear Fusion 57 (2017), 066007
- ③ Y. Narushima, S. Sakakibara, Y. Suzuki, K.Y. Watanabe, S. Ohdachi et al., “Observations of sustained phase shifted magnetic islands from externally imposed  $m/n=1/1$  RMP in LHD”, Nucl. Fusion 57 (2017) 076024.
- ④ Y. Hayashi, Y. Suzuki, N. Ohno, M. Okamoto, Y. Kikuchi, S. Sakakibara et al., “Influence of external resonant magnetic perturbation field on edge plasma of small tokamak HYBTOK-II”, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 463-466.
- ⑤ S. Sakakibara, K.Y. Watanabe, Y. Takemura, M. Okamoto, S. Ohdachi et al., “Characteristics of MHD instabilities limiting beta value in LHD”, Nuclear Fusion 55 (2015) 083020.
- ⑥ Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Suzuki et al., “Experimental observation of response to resonant magnetic perturbation and its hysteresis in LHD”, Nuclear Fusion 55 (2015) 073004.
- ⑦ K. Ichiguchi, S. Sakakibara, S. Ohdachi, B.A. Carreras, “Multi-scale MHD analysis of LHD plasma with background field changing”, Nuclear Fusion 55 (2015) 043019.
- ⑧ K. Ida, T. Kobayashi, S. Inagaki, Y. Suzuki, S. Sakakibara et al., “Topology bifurcation of a magnetic flux surface in toroidal plasmas”, Plasma Physics and Controlled Fusion 57 (2014) 014036.
- ⑨ Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi et al., “Observation of Hysteretic Magnetic Island Response to Resonant Magnetic Perturbation in LHD”, Plasma and Fusion Research 9 (2014) 1202066.
- ⑩ K. Ichiguchi, Y. Suzuki, S. Sato, Y. Todo, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Narushima, “Three Dimensional Numerical Analysis of Pressure Driven Mode in RMP-Imposed LHD Plasma”, Plasma and Fusion Research 9 (2014) 3403134.

[学会発表] (計 7 件)

- ① S. Sakakibara, “Extension of high-beta plasma production to low Collisional regime”, IAEA Fusion Energy Conference (Oct.16-22, 2017, 京都国際会館、京都府・京都市) EX/4-4 (口頭発表) .
- ② S. Sakakibara, “Current status of the LHD project and its prospect for deuterium experiment”, The 10<sup>th</sup> West Lake International Symposium on Magnetic Fusion (May 9-13,

- Hangzhou Zhejiang, China) (招待講演)
- ③ S. Sakakibara, “Plasma Response to Resonant Magnetic Perturbation in LHD”, 20<sup>th</sup> MHD Stability Control Workshop (Nov.22-24, 2015, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA) (招待講演)
  - ④ S. Sakakibara, “Recent Progress of LHD Experiments”, A3 Foresight Program Workshop, Jan.6-9, 2015, Nanning, China) (口頭発表)
  - ⑤ S. Sakakibara, “MHD Instabilities Limiting Beta Value and Interaction with Error Field in LHD”, Annual meeting of APS-DPP (Oct.27-Nov.1, 2014, New Orleans, USA) (ポスター発表)
  - ⑥ S. Sakakibara, “Characteristics of MHD Instabilities Limiting Beta Value in LHD”, IAEA Fusion Energy Conference (Oct.12-15, 2014, St. Petersburg, Russia) EX/P6-37 (ポスター発表)
  - ⑦ 榑原 悟, 「ヘリカルプラズマにおけるベータ限界に関する研究」、第10回核融合エネルギー連合講演会 (2014年6月19、20日、つくば国際会議場、茨城県・つくば市) (ポスター発表)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榑原 悟 (SAKAKIBARA, Satoru)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：90280594

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

成嶋 吉朗 (NARUSHIMA, Yoshiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：40332184

大館 暁 (OHDACHI, Satoshi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：00270489

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

武村 勇輝 (TAKEMURA, Yuki)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：60705606

(4) 研究協力者  
なし