

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03911

研究課題名(和文)トロイダルプラズマにおけるポロイダルフロー能動制御による閉じ込め遷移研究

研究課題名(英文) Investigation of plasma confinement transition in toroidal system by active control of poloidal flow

研究代表者

高橋 裕己 (Takahashi, Hiromi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00462193

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)：トロイダル磁場装置における電場と粘性の制御研究のため、スペインCIEMAT研究所のTJ-II装置において、電極バイアスシステムの構築と実験を行った。COVID-19により計画に遅れが生じたが、乱流起因のExB輸送と、アルヴェン固有モード起因のExB輸送に対する電極バイアスの影響の違いを観測するなど、当初の想定に無い成果も得た。また、電極バイアス下での回転変換スキャン実験において、ポロイダル流速(径電場)が、回転変換分布、特に低次有理面と明確に関係する径方向構造を持つことが明らかになった。さらに、本研究を今後より発展させるため、中国西南交通大学のCFQSでの電場制御実験計画に先鞭をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御熱核融合炉の実現を指向とするトロイダル磁場閉じ込めプラズマ研究領域において、プラズマ中の電場、あるいは、フローはプラズマの熱閉じ込め性能を決定づける最も重要な物理量である。本研究において、電極バイアスによる電場制御下における特徴的な輸送の振る舞いや、磁場構造に強く関連したプラズマの構造形成を観測した。これらの研究成果は実験を行ったTJ-II装置でのみ得られたものであるが、今後、閉じ込め磁場構造の異なる他のプラズマ実験装置において、実験結果の蓄積とデータベース化を行い、メカニズムの定式化ができれば、電場やフロー、さらには、閉じ込め性能を機能的に制御する手段の確立につながる。

研究成果の概要(英文)：For the control of electric field and viscosity in toroidal field devices, construction of an electrode biasing system and electric field control experiments were carried out in the TJ-II in Spain. Although there were delays in the plan due to COVID-19, the unexpected results were obtained, including the observation of differences in the effects of electrode bias on ExB transport due to turbulence and ExB transport due to AE modes. In addition, in a rotational transformation scan experiment under electrode biasing, it was found that the poloidal flow velocity (radial electric field) has a radial structure that is clearly related to the rotational transform profile, especially the low-order rational surface. Furthermore, in order to further develop this research in the future, we have spearheaded a programme of controlled electric field experiments on the CFQS at Southwest Jiaotong University, China.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：電極バイアス ポロイダル粘性 径電場 閉じ込め改善 核融合プラズマ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1982年、ドイツの中型トカマク装置 ASDEX において、プラズマ中への追加熱がある臨界値を越えるとプラズマの閉じ込めが改善される H モードと呼ばれる現象が発見された [1]。この閉じ込め改善モードを解釈するために、ポロイダルフローの増加による乱流抑制のシナリオが提唱された [2]。以来、フローと閉じ込めの関係を解明するための研究が行われてきたが [3]、一方で、ポロイダルフロー駆動力の直接評価は困難であり、これまでほとんど行われていない。ポロイダルフローがどのような物理機構で駆動され、閉じ込めの遷移に影響を与えているのかを明らかにすることが本研究課題の核心であり、そのためには、フロー駆動力の直接評価が必要不可欠である。

2. 研究の目的

閉じ込め改善モードへの突然の遷移に対して、新古典理論の見地からイオン粘性による寄与が指摘されている。プラズマ中では、ポロイダル方向の運動量は駆動力であるローレンツ力と、ダンピング力として働くイオン粘性力と摩擦力によりバランスしている。新古典理論ではポロイダル方向のフロー流速に対して、イオン粘性に極大値が存在し、フロー駆動力がその値を超えると瞬間的に流速が増大し、閉じ込め改善モードに遷移すると考えられている [4]。また、トカマク装置では磁場リップルの主モードがトロイディシティであることから、新古典粘性の極大値はポロイダルマッハ数 = 1 近辺に現れるが、高次のヘリカルリップルが存在するヘリカル装置では、ヘリカルリップルの大きさとそのフリエモード数に依存して、粘性の極大値の大きさと極大値のマッハ数の値が変化すると予測されている [4]。しかしながら、これまでに、粘性とフローの関係を実験的に評価し、遷移理論との比較検証を行った例は非常に少ない [5]。本研究では閉じ込め遷移に対する粘性の役割を明らかにするために、磁場リップルが大きく異なる磁場配位で、閉じ込めの遷移が粘性の非線形性によって統一的に説明できるかどうかを検証することを目的とする。

3. 研究の方法

ポロイダルフローの制御手法として、プラズマ中に挿入した電極を真空容器に対してバイアスする電極バイアスが挙げられる [6]。電極バイアスの手法をトロイダルプラズマに適用することで、電極電圧および電極電流を変化させることによるポロイダルフロー制御、並びに、電極に流れた電流によるポロイダルフロー駆動力の実験的評価、が可能となる。本研究では、外部磁場コイルの電流比によって、閉じ込め磁場のリップル構造を制御可能なヘリカル型プラズマ装置を対象として、電極バイアス実験を行う。

4. 研究成果

2020年度は核融合科学研究所が所有する電源を、スペインの国立エネルギー環境技術研究センター (CIEMAT 研究所) に輸送し、申請者の指示のもと、現地の技術スタッフが、CIEMAT 研究所が保有する中型ヘリカル装置 TJ-II ステラレータにインストールした。その後、インストールされた電源を用いて予備的なプラズマ実験を行い、得られた結果をもとに、より大きなプラズマフローを駆動するための電源を新規に導入する予定であった。しかしながら、COVID-19 の世界的な広がりにより、渡航が困難な状況であったことから、申請者は CIEMAT 研究所への訪問を断念した。また、CIEMAT 研究所においても、スタッフの出勤制限によって、TJ-II 装置の実験キャンペーンの開始時期に遅れが生じたため、申請者のマシンタイムは 2021 年度に延期された。これにより、2020 年度内の実験実施は不可能となったため、CIEMAT 研究所、並びに、京都大学の研究協力者らとメール、ビデオ会議を通して実験内容の詳細や、実験遂行に必要な作業の策定、今後の実験スケジュール等について議論を行った。その結果、延期された実験は 2021 年の 6 月に実施することとなった。

2021 年度は TJ-II プラズマの閉じ込め遷移に必要な電流と電圧を出力可能な電源のスペックを明らかにすることをまず第一目的とした。2021 年度の 6 月に行われた実験において、TJ-II 装置の既設電極バイアスシステムを用いて、低バイアス時のプラズマの振る舞いを調べた。この際の、バイアス電圧と電極に流れた電流からプラズマの電気抵抗値を評価し、遷移に必要な臨界フロー駆動力と対応する臨界フロー速度を見積もった。フロー駆動力はプラズマの径方向電流に、フロー速度はバイアス電圧に相当するため、これらの値から、電極バイアスによる閉じ込め遷移に必要な電源スペックを評価した。最終的に、プラズマ閉じ込め遷移を達成するための、十分な電圧・電流出力尤度をもった新規の電源として、松定プレシジョン製の高出力電源 (850 V / 53 A) を調達した。TJ-II 装置において、2020 年度に予定していた実験が COVID-19 の影響により、2021 年度に実験スケジュールがずれ込んだため、計画に遅れが生じたが、一方で、乱流に起因する ExB 輸送と、アルヴェン固有モードによる ExB 輸送に対するポテンシャルバイアスの

影響の違いを観測するなど、当初想定していなかった成果も得た。すなわち、2021年度の電極バイアス実験において、周辺プラズマのプロープ計測を行った際に、電極バイアスは、プラズマ乱流に起因する ExB 輸送の振幅を小さくすることができるが、アルヴェン固有モードによる ExB 輸送にはほとんど影響を及ぼしていないことがわかった。このことは、密度揺らぎと電場揺らぎのクロスフェイズが ExB 駆動輸送のレベルを制御する上で重要な役割を果たすことを示唆している。

2022年度の TJ-II ステラレータの実験キャンペーンでは、バイアス電極を用いてプラズマ周辺に径電場を印加しながら回転変換をスキャンする実験が行われた。この実験において、ラングミュアプローブによりプラズマ周辺部を計測した結果、ポロイダルフロー速度(径電場)は、回転変換分布、特に低次有理面と明確に関係する径方向構造を持つことが明らかになった。2022年度は、本課題で行われたヘリカル装置におけるフロー形成と閉じ込め改善に関する研究をさらに発展させるために、今年度は準軸対称ステラレータ(Quasi-axisymmetric stellarator; QAS)配位を備える世界初の実機であるヘリカル型核融合プラズマ実験装置 CFQS (中国・西南交通大学) [7]での電極バイアス実験の検討を行った。QAS 配位はトカマクに比肩する良好な軸対称性を外部コイルによって実現する先進的な閉じ込め概念であり、トカマクの閉じ込め性能とヘリカルの定常保持特性の長所を併せ持つ。さらに、コイル電流比の制御によって、磁場に大きな非軸対称性を持たせることも可能である。QAS 配位を備える CFQS を用いることで、新古典ポロイダル粘性を連続的かつ極めて広範囲に制御でき、トカマクとヘリカルを接続する磁場領域での実験的閉じ込め研究が可能となる。2022年度は CFQS の実験責任者と複数回の会合を開催し、CFQS での電極バイアスシステム構築や実験計画の具体化について議論を行った。

<引用文献>

- [1] F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. 59, 1432 (1982).
- [2] H. Biglari, P.H. Diamond and P.W. Terry, Phys. Fluids B2, 1 (1990).
- [3] F. Wagner et al., Plasma Phys. Control. Fusion 49, B1 (2007).
- [4] K. C. Shaing and E. C. Crume, Jr., Phys. Rev. Lett. 63, 2369 (1989).
- [5] H. Takahashi et al., Plasma Phys. Control. Fusion 48 No. 1, 39-49 (2006).
- [6] R. J. Taylor et al., Phys. Rev. Lett 63, 2365 (1989).
- [7] Haifeng Liu et al., Nucl. Fusion 61, 016014 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 C. Hidalgo, E. Ascasibar, U. Losada, S. Ohshima, H. Takahashi 他130名	4. 巻 62
2. 論文標題 Overview of the TJ-II stellarator research programme towards model validation in fusion plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 042025 ~ 042025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac2ca1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. YOSHIMURA, M. KANDA, R. YANAI, A. SHIMIZU, H. TAKAHASHI, 他9名	4. 巻 17
2. 論文標題 Investigation of Capability of Current Control by Electron Cyclotron Waves in the Quasi-axisymmetric Stellarator CFQS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402039-2402039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.2402039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 A. Shimizu, M. Isobe, S. Okamura, S. Kinoshita, H. Takahashi, 他12名	4. 巻 17
2. 論文標題 Feasibility study of heavy ion beam probe in CFQS quasi-axisymmetric stellarator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C06004~C06004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/06/C06004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 R. SEKI, K. OGAWA, M. ISOBE, S. MURAKAMI, H. TAKAHASHI, 他11名	4. 巻 17
2. 論文標題 Prediction of Neutron Emission Rate in Deuterium Neutral Beam Heated CFQS Plasmas Using FIT3D-DD Code	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2403063-2403063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.2403063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 C. Hidalgo, E. Ascasibar, U. Losada, S. Ohshima, H. Takahashi 他130名
2. 発表標題 Overview of the TJ-II stellarator research programme towards model validation in fusion plasmas
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スペイン	国立エネルギー環境技術研究センター			
中国	西南交通大学			