

平成 22 年 5 月 6 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860089

研究課題名（和文） ヘリカル系プラズマにおける閉じ込め改善モード遷移に対する
イオン粘性の役割の検証研究課題名（英文） Verification of role of ion viscosity for a transition to
improved confinement mode in helical plasmas

研究代表者

高橋 裕己 (TAKAHASHI HIROMI)

核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 助教

研究者番号：00462193

研究成果の概要（和文）：

LHD、Heliotron-Jにおいて電極バイアス実験を行った。ECRH放電中に電極に三角波の電極電圧を印加することにより、負性抵抗を伴う閉じ込め状態の遷移を実現する事に成功した。遷移時において、蓄積エネルギーの増大、電子密度揺動の低減等、閉じ込めの改善を示す結果が観測された。閉じ込め遷移が発生する電極電圧は順遷移・逆遷移時で異なり、電極電圧-電極電流曲線がヒステリシスを有する結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

We carried out electrode biasing experiments in the LHD and the Heliotron-J. The transition with the negative plasma resistance was successfully achieved during applying triangular-waveform voltage in ECRH discharges. The improvement of the stored energy, the depression of the density fluctuation and the other phenomena indicating the confinement improvement are observed in the forward transition. The threshold voltage was different between forward transition and backward one and the hysteresis was observed in the voltage-current curve.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,330,000	399,000	1,729,000
21年度	1,190,000	357,000	1,547,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,520,000	756,000	3,276,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：核融合、プラズマ、磁場閉じ込め、閉じ込め改善モード、イオン粘性、
ポロイダルフロー、ヘリカル系、電極バイアス

1. 研究開始当初の背景

トロイダルプラズマにおける閉じ込め改善モードの物理はこれまでに実験、理論共に盛んに研究が行われてきた。しかしながら何

が原因となり閉じ込め改善モードに遷移するのは、理論的な予測はされているものの、実験的な明確な検証結果はこれまで得られていない。閉じ込め改善モードの物理を解明

する上で、高閉じ込めモードへの遷移過程を明らかにすることは非常に重要である。

高閉じ込めモード時の閉じ込め改善に関して、『プラズマ中に径電場が形成され、それによって流れる径電流と閉じ込め磁場によってローレンツ力が誘起され、ポロイダルフローが駆動される。径電場にシアがあるとポロイダルフローは径方向で流速の異なるシアフローとなりプラズマ中の揺動が抑えられ、結果として異常輸送が低減し、閉じ込めが改善される』というシナリオが考えられている。また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の影響が指摘されている。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フロー流速に対して、イオン粘性に極大値が存在し、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。

2. 研究の目的

径電場制御の手法の一つとして電極バイアス実験が挙げられる。電極バイアス実験では、プラズマ中に挿入した電極を真空容器等に対してバイアスする事により、プラズマ中に能動的に径電場を形成する事が可能である。電極バイアス実験には、①電極電圧および電極電流を変化させる事により、外部からの径電場の形成が可能である、②電極電流からポロイダル回転の駆動力を実験的に評価できる、という利点がある。

本研究ではヘリカル型装置である LHD に対し、電極バイアス実験を行い、径電場制御を試みる。これによりポロイダルフロー駆動力を実験的に評価し、径電場の形成機構、並びに遷移に対する新古典粘性の役割を明らかにする事を目的とする。

3. 研究の方法

LHD でバイアス実験を行うにあたり、まずハードウェアの整備を行う。電極設計の際の主たる検討要素は表面積の大きさ、材質である。他のトロイダル装置における電極バイアス実験での仕様実績、加工のし易さ、耐熱性を考慮すると、カーボン (C)、モリブデン (Mo) が候補として挙げられる。一方、バイアス電極は表面積が大きい程、同一のバイアス電圧に対して大きな電極電流の駆動が期待できるが、電極挿入によってプラズマに与える擾乱の観点からは、極端な大型化は困難であるといえる。より小さな表面積で大きな電極電流を実現するためには、電極の材質としてタングステン (W) やランタンヘキサボライド (LaB_6) を選択し、電子エミッションにより、

大きな電極電流を実現させる手法も考えられる。 LaB_6 を用いた電極バイアス実験は TU-Heliac、CHS 等で十分な実績がある。以上の点を検討し、遷移電流を実現し得る適切な電極素材・表面積の電極の設計・製作を行う。他、電極バイアス条件のリモート制御システム、計測系、データ収集系を構築し、実験環境を整備する。

電極バイアス実験の対象プラズマとして、ジャイロトロン ECRH によって生成されるプラズマを選択する。ECRH 放電では、安定したプラズマの生成、高電離度、NBI プラズマに比べてイオン温度・密度が比較的強く抑えられる(電極への熱負荷が小さい)といった利点が存在する。この ECRH で生成される比較的低密度のプラズマ(イオン温度 100 eV, イオン密度 $2.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$)を対象とした場合に、電極バイアスによって閉じ込め改善を達成させるためには、15 A 程度の電極電流駆動が要求されることが Shaing の新古典イオン粘性モデルから予測される。また、ターゲットプラズマの周辺領域における浮動電位は +150 V 程度である事が実験的に確認されているので、バイアス電源には、1 kV/30 A 程度の容量を有するフローティング電源を使用する。本年度は電極バイアス条件(電極位置、バイアス電圧・電流、注入ガス圧等)に対するプラズマの振舞いの系統的なデータを取得し、実験条件を最適化した後、電極バイアスによる閉じ込め改善モードへの遷移を目指す。

次に上記の実験的に最適化されたプラズマパラメータを用いてイオン粘性のポロイダルフローに対する依存性を再計算し、実験結果との整合性を確認する。計算には遷移電流を見積もる際に用いた Shaing の新古典イオン粘性モデルを使用する。Shaing のモデルは、ヘリカル系装置に特有のヘリカルリップルの効果も含まれるため、本研究における粘性の評価モデルとして妥当である。イオン粘性の評価は LHD における代表的な幾つかの磁場配位に対して、同一のプラズマパラメータでの仮定の下で実施し、臨界イオン粘性(粘性の極大値)を評価する事により、各磁場配位で遷移に要求される電極電流がどの程度であるかを見積もる。その後、LHD において複数の磁場配位で電極バイアス実験を行い、ポロイダルフロー駆動力(電極電流)に関する遷移条件のリップル構造依存性を取得する。得られたフロー駆動力の閾値の磁場配位依存性と先に評価した臨界粘性力の磁場配位依存性を比較し、整合性を確認する。

イオン粘性の磁場構造依存性を明らかにし、遷移に対する粘性の役割を明らかにするために、LHD 並びに、LHD とは装置サイズ・磁場構造の大きく異なるトロイダル装置である TU-Heliac、CHS、Heliotron-J での粘性の

振舞いを規格化したパラメータで整理し、データベース化する。この際、ポロイダルフロー駆動力・イオン粘性はイオン圧力勾配で、ポロイダルフロー速度はイオン熱速度(プラズマ中の音速)によって規格化を行う。TU-Heliac, CHS では、かねてより精力的に電極バイアス実験が行われており、粘性の磁場配位依存性も取得されつつある。それらのデータの解析を進め本データベースへと反映させる。Heliotron-J では平成 19 年度からバイアス実験のシステムの立ち上げが開始されており、プレリミナリなデータが取得されている。本研究では Heliotron-J でのバイアス実験にも積極的に参加し、ハードウェアの拡充を行った上で、閉じ込め改善モード実現のための実験条件の最適化を行う。最終的には遷移閾値の磁場配位依存性を取得し、データベースに統合する。

4. 研究成果 平成 20 年度

LHD でバイアス実験を行うにあたり、まずハードウェアの整備を行った。製作した電極を図 1 に示す。電極は高温・高密度のプラズマ中に挿入されるため、電極システムは熱特

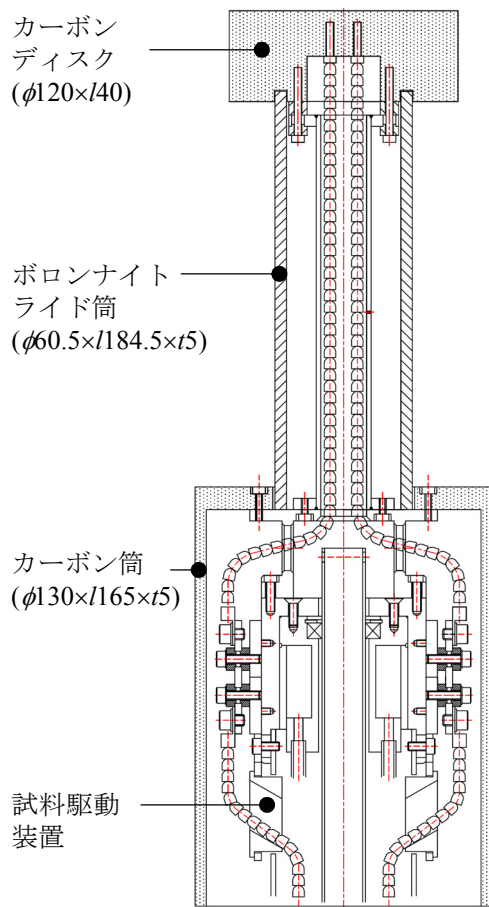


図 1. 試料駆動装置に設置されたカーボン製電極

性の良好な材質のコンポーネントで構築する必要がある。電極はカーボン製のディスクを採用し、LHD 既設の駆動装置に設置した。さらに、磁力線による電極-駆動装置間での電位の短絡を回避するために、ボロンナイトライド製の筒を介在させ、且つ、駆動装置をカーボン製の筒で覆った。他、電極バイアス条件のリモート制御システム、計測系、データ収集系を構築し、実験環境の整備を行った。

本年度はさらに、LHDと同様のヘリカル型プラズマ閉じ込め装置である Heliotron-J において、ランタンヘキサボライト製熱陰極を用いた電極バイアス実験を行った。図2に電極バイアス時におけるプラズマパラメータの典型的な時間発展波形を示す。プラズマは2.45 GHz ECRHによって生成され、放電中に三角波形の負バイアスを行っている。電極バイアス時、電子密度・蓄積エネルギーの増大、密度勾配の急峻化、負の径電場形成、浮動電位揺動レベルの低減が観測された。さらに、この閉じ込め状態の変化に対して、バイアス電圧に閾値が存在する事も確認できる。以上の結果は、電極バイアスによって、プラズマ中に電場形成がなされ、閉じ込め改善モードへ遷移した事を示唆する結果である。

平成21年度

大型ヘリカル装置(LHD)で電極バイアス実験を行うにあたり、平成20年度のバイアス実験で最適化されたプラズマパラメータをもとに、標準配位を含む幾つかの磁場配位に対して Shaing のモデルを用いてイオン粘性のポロイダルフローに対する依存性を計算し、閉じ込め状態の遷移に要求される電極電流閾値を評価した。Shaing のモデルは、ヘリカル系装置に特有のヘリカルリップルの効果も含まれ

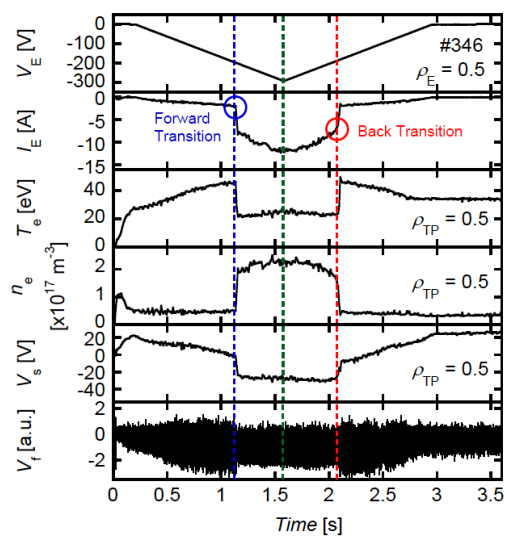


図 2. Heliotron-J の電極バイアス実験におけるプラズマパラメータの典型的な時間発展波形

るため、本研究における粘性の評価モデルとして妥当である。この計算結果を基に、対象磁場配位として標準配位を選択し、バイアス電極としてカーボンディスクを用いて電極バイアス実験を行った。図3に電極バイアス時におけるプラズマパラメータの典型的な時間発展波形と電極電流の特性曲線を示す。実験ではECRHによって生成されたプラズマをターゲットとした。放電中に電極に三角波の電極電圧を印加し、電極電圧のランプアップ/ランプダウンによる順遷移/逆遷移を試みた結果、負性抵抗を伴う閉じ込め状態の遷移を観測する事に成功した。遷移時において、蓄積エネ

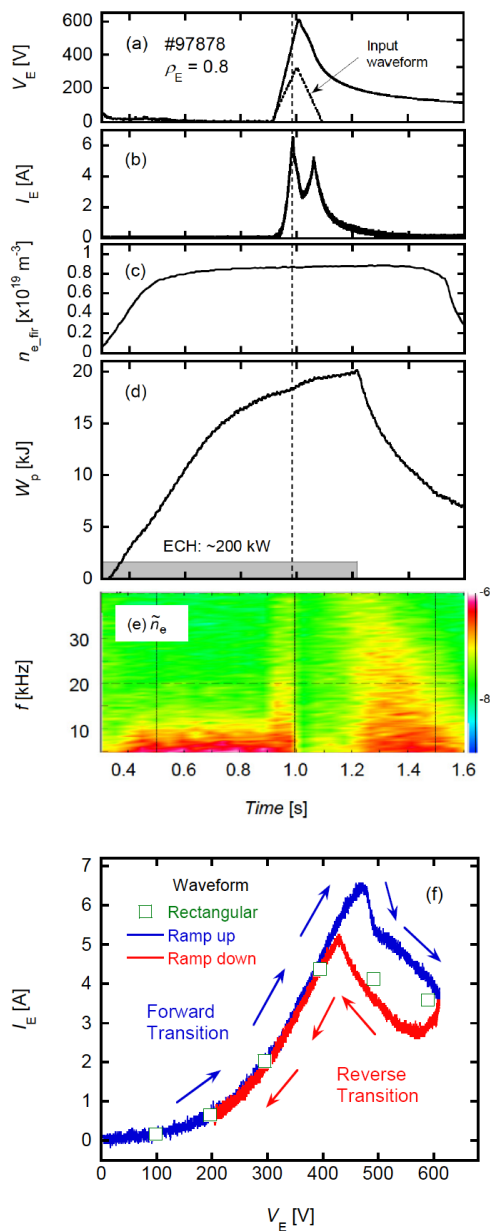


図 3. LHD の電極バイアス実験におけるプラズマパラメータの典型的な時間発展波形と電極電流の特性曲線

ルギーの増大、プラズマコア部での密度増加、周辺部での電子密度減少・電子密度揺動の低減が確認された。また、閉じ込め遷移が発生する電極電圧は順遷移・逆遷移時で異なり、電極電圧-電極電流曲線がヒステリシスを有する結果が得られた。

これらの特性は、電極バイアスによってプラズマの小半径方向に流れた電流が誘起するポロイダル回転駆動力が、イオン粘性の極大値を超えることによって(逆遷移の場合は駆動力が極小値を下回ることによって)、閉じ込め状態が遷移するというシナリオによって解釈され得ることを示唆している。

また、本研究では TU-Heliac, CHS, Heliotron-J, LHD において、実効ヘリカルリップルに対する規格化遷移駆動力の依存性を評価することにより、電極バイアス実験における遷移条件の装置間比較としてプレリミナリな結果を得ている

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 H. Utoh 他, "High Beta Discharges with Hydrogen Storage Electrode Biasing in the Tohoku University Helic" J. Plasma Fusion Res. SERIES, **8** (2009) 1052-1057. (査読有)
- ② S. Kitajima, H. Takahashi 他, "Study of Ion Viscosity by Spontaneous L-H Transitions under Marginal Hot Cathode Biasing in the Tohoku University Helic", *Nuclear Fusion*, **48** (2008) 035002. (査読有)
- ③ S. Kitajima 他, "Study of Ion Viscosity by Spontaneous L-H Transitions under Marginal Hot Cathode Biasing in the Tohoku University Helic", e-Proc. 22th IAEA Fusion Energy Conf., EX/P5-12 (2008) 1-8. (査読有)
- ④ S. Kitajima 他, "Effects of Rotating Magnetic Islands Driven by External Perturbation Fields in the TU-Heliac", *Plasma and Fusion Research*, **3** (2008) S1027, 1-4. (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 高橋裕己 他, "ヘリカルプラズマにおける電極バイアスによる閉じ込め遷移に対するリップル構造依存性," プラズマ核融合学会第 26 回年会, 京都市国際交流会館, 2009 年 12 月 3 日.
- ② S. Kitajima, H. Takahashi 他 "Experimental study of flow bifurcation by an electrode biasing in TU-Heliac, CHS and Heliotron J," 12th International Workshop on "H-mode

Physics and Transport Barriers", USA, Princeton University, Plasma Physics Laboratory, 2009. 10. 1.

- ③ 佐藤淳弥 他, “東北大学ヘリアック装置におけるバイアスプラズマ中での密度崩壊と揺動計測,” 日本物理学会秋季大会, 熊本大学黒髪キャンパス, 2009年9月27日.
- ④ H. Utoh 他, “High Beta Discharges with Hydrogen Storage Electrode Biasing in the Tohoku University,” 14th International Congress on Plasma Physics, Fukuoka, Fukuoka International Congress Center, 2009. 9. 8.
- ⑤ H. Takahashi 他, “Study of Transition Mechanism Based on Ion Viscosity by Electrode Biasing in Helical Plasmas,” 36th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Bulgaria, National Palace of Culture, 2009. 6. 29

[その他]

ホームページ等

<http://www.nifs.ac.jp/phprd/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 裕己 (TAKAHASHI HIROMI)

核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部
助教

研究者番号 : 00462193