

平成22年 5月31日現在

研究種目： 基盤研究 (C)

研究期間： 2007 ~ 2009

課題番号： 19560827

研究課題名 (和文) プラズマ生成に伴うヘリカル磁場構造の変化

研究課題名 (英文) Modification of helical field configuration caused by plasma

研究代表者

水内 亨 (MIZUUCHI TOHRU)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号： 20135619

研究成果の概要 (和文) : 高温プラズマをヘリカル磁場に閉じ込める際、プラズマ圧力やプラズマ加熱効果によりヘリカル磁場構造が変化することをヘリオトロンJ装置を用いて実験的に検証した。とくに、この磁場降雨増の変化は、状況によってはプラズマ対向壁への負荷分布を大きく変え得ること、閉じ込め領域周辺の磁場構造を変えることにより、プラズマ閉じ込め状態の遷移現象の発現に関係していることを示した。

研究成果の概要 (英文) : Spontaneous modification of magnetic field configuration from a vacuum one in a helical system caused by plasma pressure and/or plasma current produced by non-inductive plasma heating is experimentally studied in the Heliotron J device. The effects on the position of divertor plasma legs and the edge rotational transform are examined and clearly shown by experiments. The former is important to design and control the divertor heat/particle road. The latter seems to be related to H-mode transition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：磁場核融合、ヘリカル系磁場、非誘導電流、回転変換、ダイバータ、磁気島

1. 研究開始当初の背景

高温・高密度プラズマをトーラス磁場で閉じ込める場合、電磁流体であるプラズマの存在により、その閉じ込め磁場構造はプラズマのない場合（真空磁場）から変形を受ける。閉じ込め領域内では、よく知られたシャフランフ (Shafranov) シフトや、磁気島の発生・

消滅など、プラズマ閉じ込め性能に関連する変形が予測され、従来、研究が行われてきた。一方、閉じ込め領域周辺部の磁場構造にも変形が予測され、ダイバータ磁力線構造に影響を与え得る。ダイバータ磁力線に沿って流入するプラズマのもたらす粒子束・熱流束は非常に大きく、プラズマ生成に伴うダイバータ

磁力線構造の変化によるダイバータプラズマ位置ならびに負荷分布の変動を放置すると、ダイバータ機能が十分発揮されないばかりか、装置自体に重大な損傷を与えかねない。

従来、国内ヘリカル系装置は、閉じ込め領域周辺部での回転変換や磁気シアの大きなヘリカルヘリオトロン配位を持つものが多く、プラズマ生成に伴う周辺磁場構造変形効果は現れ難いと考えられてきた。この様な高磁気シア装置では、ダイバータ負荷のプラズマ加熱による不均一性の発生が問題となっており、この観点からの研究は、従来、国外のヘリカルヘリオトロン型装置 U-3M (ウクライナ) の他、最近、ヘリアック型装置 TJ-II (スペイン) でも行われているが、本研究の観点、即ち周辺磁場構造自体の変化と言う観点からの研究は行われていなかった。一方、我々のグループは、低磁気シア装置であるヘリオトロン J において、外部磁場一定にもかかわらず、プラズマ放電中にダイバータプラズマ位置が移動することを初めて発見、この観測が、本研究の出発点となっている。

国外においては、W-7AS 装置 (独) が低磁気シア装置であり、実験の初期段階から、トロイダル電流が周辺領域の磁気島構造を変えることによるプラズマ閉じ込め領域の矮小化を懸念し、外部からの電流駆動により正味のトロイダル電流を零にする実験手法が採用された。しかしながら、ダイバータプラズマ位置への影響やプラズマ電流分布による違いなどに関する報告は見あたらない。トロイダル電流によるダイバータ磁力線構造の変動も考慮されていると思われるが、詳細な検討に関する公表はない。

2. 研究の目的

本研究は、ヘリカル系装置を対象に、プラズマの存在に起因する磁場構造変化を実験的に検証し、その閉じ込めへの影響を明らかにすることを目指すものである。その中において、とくにプラズマ生成に伴う磁場構造の自発的変形、とくにトロイダルプラズマ中に自発的に生ずるブートストラップ電流や加熱に伴って生ずるプラズマ電流による周辺磁場構造に与える影響を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、プラズマによる影響が現れやすい低磁気シアを持つヘリカル系装置による実機実験並びに 3 次元有限 β 平衡計算コード (HINT2) による磁場構造計算により、プラズマ生成に伴う磁場構造の自発的変形、とくにトロイダルプラズマ中に自発的に生ずるブートストラップ電流や加熱に伴って生ずるプラズマ電流など、非誘導電流による周辺磁場構造並びに閉じ込めに与える影響を検証することを目指す。

4. 研究成果

(1) 非誘導電流によるダイバータプラズマ位置のシフトの確認: 上下対称位置にあるダイバータプローブアレイによるダイバータプラズマ位置の時間変化、放電管壁上の計測器保護管と周辺プラズマ接触位置のポロイダルシフトの接軌カメラ計測、非誘導電流によるダイバータ磁力線の位置変化の数値シミュレーション等により、非誘導電流が、真空磁場の回転変換を増加させる方向に流れるとき、その電流値に依存したダイバータプラズマ位置のポロイダルシフトが明確になることを確認した (図 1 参照)。また、プラズマ電流を考慮した 3 次元平衡計算により、電流の向きにより、ダイバータ磁力線位置のシフト量に大きな差があることを示し (図 2)、実験結果の半定量的裏付けを得た。

(2) トーラス内外二箇所での可動プローブ計測により、ある磁場配位で非誘導電流の大きさが特定の値になると、イオン飽和電流値が急に増加する場所が存在することを発見した。これは、非誘導電流によるポロイダル磁場により、最外殻磁気面の外側に磁気島様の構造が出現した可能性を示唆する、すなわち、非誘導電流の影響は、ダイバータ磁力線位置のみではなく、閉じ込め領域周辺部にも出現することを示唆するものであり、W-7X が提唱するような磁気島ダイバータ構想におけるダイバータの実現

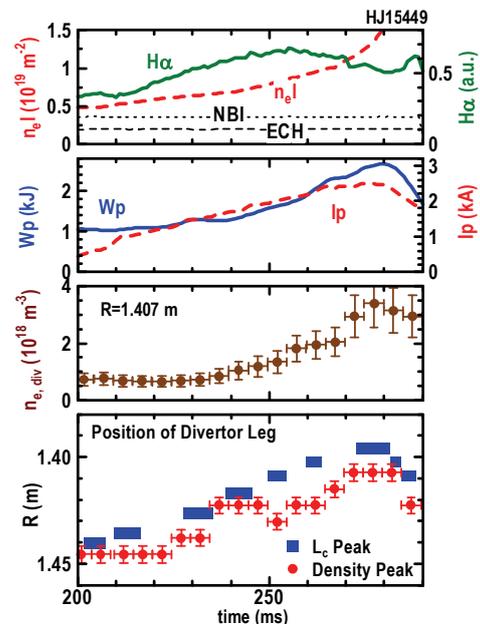


図 1. プラズマ放電時の各パラメータ時間変化例。際下図にダイバータプローブによるダイバータプラズマ径方向位置の時間変化例を示す。

性・制御性に大きなインパクトを与えるものである。

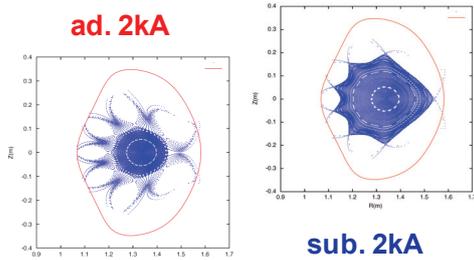


図2. 3次元平衡コードHINT2による磁気面構造計算例。全電流2kAを想定し、その向きの違いによる磁気面の変化を比較している。

圧力分布や電流分布は下記の通り。

$$: (s) = 0.5 \cdot (1-s)^2 [\%], j_p = j_{p0} \cdot (1-s)^2$$

(3) NBI プラズマの H-mode 遷移に関し、非誘導プラズマ電流による磁場構造変化が一つの条件となっていることを見出した(図3参照)。これは、プラズマ閉じ込めにおける遷移現象発現と周辺回転変換の関係の議論に一石を投ずる結果である。一方、ECHプラズマの H-mode 遷移に関しても同様な調査を行ったが、少なくとも、H-mode 遷移が生じるような比較的密度の高い ECH プラズマでは、NBI プラズマで観測されたような明確な非誘導プラズマ電流と H-mode 遷移の相関はないことが明らかになり、回転変換のみが遷移に条件となっているのではないことを示した。

(4) 非誘導電流による回転変換変化に伴う有理面位置の移動を推定する方法として、

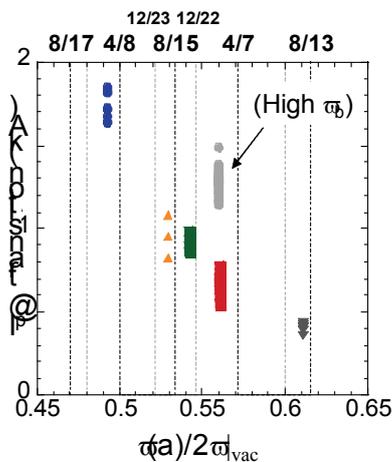


図3. Co入射NBI時のH-mode遷移のための非誘導プラズマ電流閾値の真空回転変換依存性。

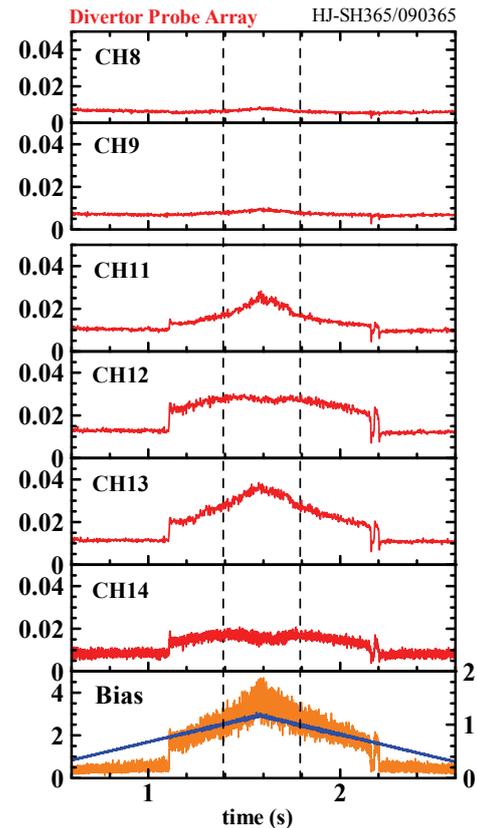


図4. バイアス実験時におけるダイバータプローブ各チャンネルのイオン飽和電流時間変化例。最下図にバイアス電圧を示す。とくに破線で囲まれた時間帯でプローブ位置(chで表示)により応答が異なり、ダイバータプラズマ分布が変化していることが示されている。

磁気プローブやSX線分布計測等を用いたMHD揺動構造解析を利用することを提案し、限られた磁場配位ではあるが、実験的にこの手法の検証を行った。

(5) 共鳴フーリエ成分磁場が存在する場合、プラズマ電流がなくとも、プラズマが回転すると、相対的に共鳴磁場が回転している状況となり、磁場構造が変化し得ることが、最近指摘された。これに伴い、低磁場での電極バイアス実験における、ダイバータプラズマ分布を観測し、実際、ダイバータプラズマ分布が変化していることを確認した(図4参照)。この観点から、強磁場放電におけるプラズマ回転データの取得の重要性が増してきた。プラズマ回転に関しては、これまでの静電プローブを用いた周辺プラズマ計測では、トロイダル方向の流れの変化が示唆されており、今後、計測器の整備を行い、プラズマ回転の効果も併せ

て、プラズマ性異性に伴う磁場構造変化を、総合的に議論していく必要がある。

(6) また、ヘリオトロン J を用いた実験では、 β 値が必ずしも高くないため、3 次元平衡シミュレーションによれば、これによる磁場構造変化は無視できると考えられる。このため、本研究では主として非誘導電流による効果を調べることができたが、今後は、(5) 項に述べたプラズマ回転効果とともに、 β 効果に関しても実験的な検証を進めて行く必要がある。

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 14 件)

- ① T. Mizuuchi, S. Kobayashi, S. Yamamoto, H. Okada, K. Nagasaki, G. Motojima, S. Watanabe, A. Matsuyama, Y. Nakamura, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano and Heliotron J Group, “Configuration control experiments in Heliotron J”, Journal of Plasma Fusion Research SERIES, Vol. 8 (2009) pp981-986 (査読有)
- ② G. Motojima, K. Nagasaki, H. Okada, K. Watanabe, T. Mizuuchi, A. Matsuyama, K. Hanatani, S. Yamamoto, S. Kobayashi, Y. Suzuki, K. Kondo, Y. Nakamura, Angela C. FERNÁNDEZ, Álvaro A. CAPP, Y. Yoshimura, S. Watanabe, K. Mukai, F. Sano, “Experimental Study of Non-Inductive Current in Heliotron J”, Journal of Plasma Fusion Research SERIES, Vol. 8 (2009) pp1010-1014 (査読有)
- ③ T. Mizuuchi, K. Murai, S. Watanabe, S. Yamamoto, S. Kobayashi, K. Nagasaki, H. Okada, G. Motojima, H. Arimoto, F. Hamagami, D. Katayama, H. Matsuoka, A. Nakajima, H. Takahashi, H. Yasuda, K. Mukai, Y. Kowada, K. Hosaka, S. Mihara, N. Nishino, Y. Nakashima, Y. Nakamura, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano, “Comparison of edge plasma behavior at different poloidal positions in Heliotron J”, Journal of Nuclear Materials 390-391 (2009) pp428-431 (査読有)
- ④ T. Mizuuchi, S. Kobayashi, S. Yamamoto, H. Okada, K. Nagasaki, G. Motojima, S. Watanabe, H. Arimoto, K. Murai,

F. Hamagami, D. Katayama, H. Matsuoka, A. Nakajima, H. Takahashi, H. Yasuda, K. Mukai, A. Matsuyama, Y. Kowada, K. Hosaka, S. Mihara, N. Nishino, T. Minami, Y. Nakashima, Y. Suzuki, S. Murakami, K. Watanabe, M. Yokoyama, Y. Nakamura, K. Hanatani, K. Kondo, S. Okamura, F. Sano,

“Configuration Control Studies in Heliotron J” American Institute of Physics Conf. Proc. 996, (2008) pp, 259-268 (査読有)

- ⑤ G. Motojima, S. Yamamoto, H. Okada, S. Sakakibara, K. Watanabe, K. Nagasaki, Y. Suzuki, T. Mizuuchi, S. Kobayashi, B. D. Blackwell, Y. Nakamura, K. Kondo, K. Hanatani, H. Arimoto, S. Watanabe, F. Sano “Effect of Toroidal Current on Rotational Transform Profile by MHD Activity Measurement in Heliotron J”, Plasma and Fusion Research 3 (2008) s1067 (査読有)
- ⑥ T. Mizuuchi, H. Nagata, H. Okada, G. Motojima, S. Kobayashi, K. Nagasaki, Z. Feng, N. Nishino, Y. Suzuki, M. Yokoyama, Y. Nakamura, S. Yamamoto, S. Watanabe, H. Arimoto, S. Matsuoka, M. Nosaku, T. Tomokiyo, N. Watanabe, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano, ” Spontaneous shift of divertor plasma footprints during a discharge in a helical-axis heliotron device”, Nucl. Fusion 47 (2007), pp395-402 (査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- ① S. Yamamoto, H. Okada, S. Sakakibara, Y. Suzuki, S. Kobayashi, T. Minami, T. Mizuuchi, K. Mukai, K. Nagasaki, Y. Nakamura, Y. Narushima, F. Sano, K. Y. Watanabe, “Development of magnetic island detector by magnetic measurement in helical plasmas”, 19th International Toki Conference (ITC19) (2009 年 12 月 8 日, 土岐)
- ② 岡田浩之、山本聡、榊原悟、鈴木康浩、小林進二、長崎百伸、中村祐司、南貴司、水内亨、木島滋、渡邊清政、成嶋吉郎、向井清史、岸真太郎、李炫庸、高島優、南桂史、佐野史道、” 磁気計測による磁気島検出器の開発”, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会 (2009 年 12 月 4 日, 京都)
- ③ S. Kobayashi, K. Nagaoka, S. Yamamoto,

T. Mizuuchi, K. Nagasaki, H. Okada, T. Minami, S. Murakami, H. Y. Lee, Y. Suzuki, Y. Nakamura, Y. Takeiri, M. Yokoyama, K. Hanatani, K. Hosaka, S. Konoshima, S. Ohshima, K. Toshi, F. Sano, “Energetic particle transport in NBI plasmas of Heliotron J”, 17th International Stellarator Workshop/Heliotron Workshop (2009年10月18日, プリンストン)

④ T. Mizuuchi, F. Sano, K. Nagasaki, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Konoshima, K. Hanatani, Y. Nakamura, K. Mukai, S. Kishi, H. Y. Lee, K. Minami, Y. Takabatake, N. Nishino, Y. Nakashima, Y. Suzuki, M. Yokoyama, “Study of Improved Confinement Modes in Heliotron J”, 17th International Stellarator Workshop/Heliotron Workshop (2009年10月15日, プリンストン)

⑤ T. Mizuuchi, S. Kobayashi, H. Okada, K. Nagasaki, S. Yamamoto, G. Motojima, S. Watanabe, K. Mukai, K. Hosaka, Y. Kowada, S. Mihara, H. Lee, Y. Takabatake, A. Matsuyama, Y. Nakamura, K. Hanatani, Y. Suzuki, S. Konoshima, K. Kondo and F. Sano, “Recent Progress in Heliotron J Experiments for Exploration of the Helical-Axis Heliotron Concept”, JSPS-CAS Core University Program Seminar on Production and Control of High Performance Plasmas with Advanced Plasma Heating and Diagnostic systems (2008年11月5日, 麗江)

⑥ T. Mizuuchi, S. Kobayashi, S. Yamamoto, H. Okada, K. Nagasaki, G. Motojima, S. Watanabe, A. Matsuyama, Y. Nakamura, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano and Heliotron J Group, “Configuration control experiments in Heliotron J”, International Congress Plasma Physics 2008 (2008年9月8日, 福岡)

⑦ T. Mizuuchi, K. Murai, S. Watanabe, S. Yamamoto, S. Kobayashi, K. Nagasaki, H. Okada, G. Motojima, H. Arimoto, F. Hamagami, D. Katayama, H. Matsuoka, A. Nakajima, . Takahashi, H. Yasuda, K. Mukai, Y. Kowada, K. Hosaka, S. Mihara, N. Nishino, Y. Nakashima, Y. Suzuki, Y. Nakamura, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano, “Similarity and difference

in edge plasma behavior observed at different poloidal positions in Heliotron J”, 18th International Conference on Plasma Surface Interactions (2008年5月29日、トレド)

⑧ T. Mizuuchi, S. Kobayashi, S. Yamamoto, H. Okada, K. Nagasaki, G. Motojima, S. Watanabe, H. Arimoto, K. Murai, F. Hamagami, D. Katayama, H. Matsuoka, A. Nakajima, H. Takahashi, H. Yasuda, K. Mukai, A. Matsuyama, N. Nishino, T. Minami, Y. Nakashima, T. Mutoh, Y. Suzuki, S. Murakami, K. Y. Watanabe, M. Yokoyama, Y. Nakamura, K. Hanatani, K. Kondo, S. Okamura, F. Sano, “Studies of Configuration Control Effects on Dynamic Behavior of Heliotron J Plasmas”, Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 17th International Stellarator/Heliotron Workshop (2007年10月16日, 土岐)

⑨ S. Kobayashi, “Study of spontaneous transition by toroidal current control in a low magnetic shear helical device”, 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers (2007年9月27日, つくば)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水内 亨 (MIZUUCHI TOHRU)

京都大学・エネルギー工学研究所・教授
研究者番号：20135619

(2) 研究分担者

岡田 浩之 (OKADA HIROYUKI)

京都大学・エネルギー工学研究所・准教授
研究者番号：50169116

小林 進二 (KOBAYASHI SHINJI)

京都大学・エネルギー工学研究所・助教
研究者番号：70346055