

# 動的エルゴディックダイバータを用いた先進トカマクに関する研究

著者	上杉 喜彦
著者別表示	Uesugi Yoshihiko
雑誌名	平成16(2004)年度 科学研究費補助金 基盤研究(B) 研究成果報告書
巻	2002-2004
ページ	16p.
発行年	2005-03-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/47968">http://hdl.handle.net/2297/47968</a>



# 動的エルゴディックダイバータを用いた 先進トカマクに関する研究

研究課題番号 14380219

平成14年度—平成16年度

科学研究費補助金 基盤研究(B)(2)

研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 上杉喜彦

(金沢大学自然科学研究科教授)

金沢大学附属図書館



0500-04114-8

# 動的エルゴディックダイバータを用いた 先進トカマクに関する研究

研究課題番号 14380219

平成14年度－平成16年度  
科学研究費補助金 基盤研究(B)

研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 上杉喜彦  
(金沢大学自然科学研究科)

# 目 次

はしがき	.....	i
研究組織	.....	ii
交付決定額（配分額）	.....	iii
研究成果発表	.....	iv
研究成果	.....	1
1. はじめに	.....	1
2. 動的エルゴディックダイバータ(DED)実験のためのトカマク プラズマの最適化とIGBTインバーターのハイブリッド化	.....	6
3. 外部印加された回転ヘリカル摂動磁場とトカマクプラズマとの 相互作用	.....	81
4. 周辺プラズマ静電・磁場揺動特性および粒子輸送に対する 回転ヘリカル磁場印加の効果	.....	134
5. 小型トカマクにおけるディスラプション特性の解明	.....	150
6. 謝 辞	.....	221

## はしがき

現在、国内で稼働する標準トカマク装置は数少なくなっている。本研究は、トカマク放電制御の高度化を目指したもので、動的エルゴディックダイバータによる先進的トカマク装置の実現に向けて基礎的にアプローチする洗練された研究として位置づけることができる。TEXTORのDEDで採用される強磁場側連続ヘリカルコイルに比べて、対称性の高い局所ヘリカルコイル系を用いることにより、モード純度の高い外部摂動磁場を印加することが出来るなど、実験条件が明確な研究と言える。またプラズマ内部への摂動磁場の浸透が磁気プローブを用いて直接計測できるなどTEXTORに対し先導的であり、かつ相補的な研究である。回転ヘリカル磁場によるトカマク周辺プラズマの制御に関する我々の独創的初期研究は18年前に遡る(S.Takamura, et al., Nucl. Fusion, 28(1988)183)。周辺プラズマ制御法として我々の一連のエルゴディックダイバータ研究と共に世界的に高く評価され、その象徴としてドイツのTEXTORではDED(動的エルゴディックダイバータ)プロジェクトとして実験が進められている。その間、我々はやや温度の低いトカマクプラズマにおけるDEDに関する先導的研究(M.Kobayashi et al. Nucl. Fusion, 40(2000)181; Physics of Plasmas, 7(2000)3288)により、磁気島の形成によるプラズマ電流の再配分を実験的に明らかにする成果を挙げ、これらはDEDの先導的研究として高く評価されている。これを踏まえて本研究では、より高温のトカマクプラズマ中において、時間的に変化する外部摂動磁場が共鳴層において高い導電率のためにより大きな遮蔽電流が流れ、 $j \times B$ 電磁力がプラズマに作用することを明らかにするものであり、DED概念検証の先導的基礎研究として位置づけられる。

このような研究背景のもとに、以下の研究目的を掲げて研究を展開した。

- (1) 外部ヘリカル磁場を比較的温度の高いトカマクプラズマに印加することにより生み出される、回転変換共鳴点ならびにアルフヴェン共鳴点における電磁波エネルギーの吸収過程を明らかにする。
- (2) 外部ヘリカル磁場の有する電磁場運動量のトカマクプラズマへの伝達によるポロイダル回転とそのシアーフローの生成過程を明らかにする。
- (3) プラズマのポロイダルシアーフローと微視的不安定性との関連を解明する。
- (4) リサイクリング水素原子への運動量伝達過程と粒子排気制御機能を解明する。

## 研究組織

研究代表者：上杉喜彦（金沢大学自然科学研究科 教授）

研究分担者：高村秀一（名古屋大学工学研究科 教授）

研究分担者：大野哲靖（名古屋大学エコトピア科学研究機構 助教授）

研究分担者：田中康規（金沢大学自然科学研究科 助教授、平成16年度）

研究分担者：津田 孝（日本原子力研究所 主任研究員、平成14～15年度）

海外共同研究者：K. H. Finken（(独)ユーリッヒ研究機構 教授）

海外共同研究者：叶 民友（(独)マックスプランクプラズマ物理研究所 研究員、平成14～15年度）

## 交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成14年度	10,800	0	10,800
平成15年度	3,000	0	3,000
平成16年度	1,400	0	1,400
総計	15,200	0	15,200

## 研究成果発表

### (1) 学術雑誌等

1. V. P. Budaev, Y. Kikuchi, M. Toyoda, Y. Uesugi, S. Takamura, “ Effect of Rotating Helical Magnetic Field on the Turbulence Fractal Structure and Transport in the Tokamak Edge Plasma”, Plasma and Fusion Research Series, Vol. 5, pp. 418-421, 2002.
2. Y. Kikuchi, V. P. Budaev, M. Toyoda, Y. Uesugi, S. Takamura, “Control of Rotating Helical Magnetic Field Penetration into Tokamak Plasmas using Electrode Biasing in HYBTOK-II”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 313-316. pp. 1272-1276, 2003.
3. 豊田光洋、菊池祐介、上杉喜彦、高村秀一、「DSPとIGBTインバータ電源を組み合わせたプラズマ水平方向位置の高速フィードバック制御」、電気学会論文誌123-A (2003) 285.
4. V. P. Budaev, Y. Kikuchi, M. Toyoda, Y. Uesugi, S. Takamura, “Effect of Rotating Helical Magnetic Field on the Turbulence Fractal Structure and Transport in the Tokamak Edge Plasma”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 313-316. pp. 1309-1313, 2003.
5. S. Takamura, Y. Kikuchi, Y. Uesugi, M. Kobayashi, “Dynamic Effects of Rotating Helical Magnetic Field on Tokamak HYBTOK-II”, Nucl. Fusion, Vol. 43, pp. 393-405, 2003.
6. V. P. Budaev, S. Takamura, Y. Kikuchi, Y. Uesugi, N. Ohno, “Intermittent Structures in the High Field Side Boundary of the HYBTOK-II Tokamak”, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 53, pp. 863-868, 2003.
7. 上杉喜彦、M. A. Razzak、近藤健二、菊池祐介、高村秀一、今井貴博、豊田光洋、「プラズマ生成・制御のための高速・高機能インバータ電源とその特性」、プラズマ・核融合学会誌、Vol. 79, pp. 1062-1077, 2003.
8. Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, A. G. Elfimov, “Direct Observation of Tokamak Plasma Response to Externally Applied Rotating Helical Magnetic Field in the Small Tokamak HYBTOK-II”, Nuclear Fusion, Vol. 44, pp. S28-S36, 2004.
9. V. Budaev, Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, “Effects of Rotating Helical magnetic Field on the Turbulent Fractal Structure and Transport in the Tokamak Edge Plasma”, Nuclear Fusion, Vol. 44, pp. S108-S117, 2004.

## (2) 国際会議プロシーディング等

1. Y. Kikuchi, V. P. Budaev, M. Toyoda, Y. Uesugi, S. Takamura, "Control of Rotating Helical Magnetic Field Penetration into Tokamak Plasmas using Electrode Biasing", 15 th International Conference Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Gifu, Japan, May 27-31, 2002, P2-72.
2. V. P. Budaev, Y. Kikuchi, M. Toyoda, Y. Uesugi, S. Takamura, "Effect of Rotating Helical Magnetic Field on the Turbulence Fractal Structure and Transport in the Tokamak Edge Plasma", 15 th International Conference Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Gifu, Japan, May 27-31, 2002, P3-57.
3. Y. Kikuchi, V. P. Budaev, Y. Uesugi, M. Toyoda, S. Takamura, "Dynamic Behaviors of Tokamak Plasma Induced by Externally Rotating Helical Magnetic Field", 29 th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion Montreux, 17-21 June 2002 ECA Vol. 26B, P-5.071, 2002.
4. S. Takamura, Y. Kikuchi, H. Kojima, Y. Uesugi, M. Toyoda, Y. Shiota, M. Kobayashi, V.P. Budaev, "Dynamic Effects of Rotating Helical Magnetic Fields on Tokamak Edge", 19 th IAEA Fusion Energy Conference, Lyon, France, 14-19 October 2002, EX/P5-09.
5. Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, V.P. Budaev, "Dynamic Responses of Tokamak Plasmas Induced by Externally Applied Rotating Helical Magnetic Field in Dynamic Ergodic Divertor", 44th APS Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Orlando, FL, 11-15 November 2002, FP1-86.
6. Y. Kikuchi, H. Takahashi, Y. Uesugi, S. Takamura, "Suppression of Externally Induced Magnetic Island by Plasma Current Oscillation in HYBTOK-II", to be presented in 30th IEEE International Conference on Plasma Science, Jeju, Korea, June 2-5, 2003.
7. Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, A. G. Elfmov, "Contribution of Alfvén Wave Dissipation to Penetration of Externally Applied Rotating Helical Field into Tokamak Plasma", 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St. Petersburg, Russia, 2003, ECA27A, P-2.119, 2003.
8. V. P. Budaev, S. Takamura, Y. Kikuchi, Y. Uesugi, N. Ohno, "Intermittent Structures in the High Field Side Boundary of the HYBTOK-II Tokamak", 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St. Petersburg, Russia, 2003, ECA27A, P-3.173, 2003.
9. Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, A. E. Elfmov, "Observation of Electrostatic Fluctuation Induced by Externally Applied Rotating Helical Magnetic Field in HYBTOK-II", 1st Int. Workshop on Stochasticity in Fusion Edge Plasmas, Juelich, Germany, Oct. 6~8, 2003.



10. V. P. Budaev, Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, "Effect of Roatating Helical Magnetic Field on the Turbulent Fractal Structure and Transport in the Tokamak Edge", 1st Int. Workshop on Stochasticity in Fusion Edge Plasmas, Juelich, Germany, Oct. 6~8, 2003.

11. S. Kokubo, M. Okamoto, Y. Kikuchi, N. Ohno, S. Takamura, Y. Uesugi, M. Sugihara, T. Ozeki, M. Shimada, "Evaluation of Current Quench Decay Time in Tokamaks and Investigation of Its Behaviors" Proc. 31st EPS Conference on Plasma Physics, P2.137, London, 2004.

12. M. Okamoto, S. Kokubo, Y. Kikuchi, N. Ohno, S. Takamura, Y. Uesugi, T. Ozeki, Y. Kono, M. Sugihara, "Dynamic Behavior of Internal Magnetic Field during Disruption in the Small Tokamak HYBTOK-II", 2nd International Workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas, Juelich, Germany, March 15-17, 2005.

13. M. Okamoto, S. Kokubo, Y. Kikuchi, N. Ohno, S. Takamura, Y. Uesugi, T. Ozeki, Y. Kono, M. Sugihara, "Dynamic Behavior of the Disruptive Plasma in the Small Tokamak HYBTOK-II", to be presented in 32nd EPS Conference on Plasma Physics, June, 2005.

### (3) 口頭発表

1. 菊池祐介、V. P. Budaev、豊田光洋、上杉喜彦、高村秀一、「小型トカマク HYBTOK-IIにおける周辺エルゴディック磁場構造の回転を用いた熱・粒子制御法に基礎研究」、第4回核融合エネルギー連合講演会（於 大阪大学コンベンションセンター、平成14年6月13日）

2. 上杉喜彦、菊池祐介、豊田光洋、高村秀一、「小型トカマク装置HYBTOK-IIにおけるIGBTインバーター電源とDSPを組み合わせたプラズマ水平方向位置の高速フィードバック制御」（於 大阪大学コンベンションセンター、平成14年6月13日）

3. 上杉喜彦、近藤健二、M. A. Razzak、菊池祐介、豊田光洋、今井貴博、高村秀一、「インバーター電源を用いたプラズマ生成・加熱・制御」、プラズマ・核融合学会第19回年会（於 犬山市観光センター、平成14年11月26日）

4. 菊池祐介、上杉喜彦、高村秀一、「トカマクプラズマ中への回転ヘリカル摂動磁場の浸透過程に関する基礎研究(II)」、プラズマ・核融合学会第19回年会（於 犬山市観光センター、平成14年11月27日）

5. 菊池祐介、上杉喜彦、高村秀一、「回転ヘリカル摂動磁場印加時のトカマクプラズマの動的挙動」、第6回若手科学者によるプラズマ研究会（於 原研那珂研究所、平成15年3月5日）
6. 高橋秀嗣、菊池祐介、豊田光洋、上杉喜彦、高村秀一、「小型トカマク装置HYBTOK-IIにおけるプラズマ電流の高速変調によるMHD不安定性の制御」、平成15年度電気学会全国大会（於 東北学院大学、平成15年3月19日）
7. 小久保慎平、菊池祐介、上杉喜彦、高村秀一、「ディスラプション実験のためのジュールコイル電源の改造とトカマク放電特性」、平成15年度電気関係学会東海支部連合大会（於 名古屋大学、平成15年10月2日）
8. 神宮寺悠、菊池祐介、高橋秀嗣、上杉喜彦、高村秀一、「小型トカマクHYBTOK-IIにおけるディスラプション特性に関する研究」、平成15年度電気関係学会東海支部連合大会（於 名古屋大学、平成15年10月2日）
9. 松野広樹、菊池祐介、上杉喜彦、高村秀一、「回転ヘリカル摂動磁場によるプラズマ回転駆動のための電子加熱実験」、平成15年度電気関係学会東海支部連合大会（於 名古屋大学、平成15年10月2日）
10. Y. Sadeghi, Y. Kikuchi, Y. Uesugi, S. Takamura, 「Improvement of the feedback control system on HYBTOK-II tokamak by modifying DPSP program」、平成15年度電気関係学会東海支部連合大会（於 名古屋大学、平成15年10月2日）
11. 高橋秀嗣、菊池祐介、豊田光洋、上杉喜彦、高村秀一、「小型トカマク装置HYBTOK-IIにおけるプラズマ電流変調によるMHD不安定性の制御」、プラズマ・核融合学会第20回年会（於 茨城県立文化センター、平成15年11月26日）
12. 小久保慎平、菊池祐介、上杉喜彦、高村秀一、「ハイブリッドインバータジュール電源を用いたディスラプション基礎実験」、第20回プラズマ・核融合学会年会（於 茨城県立民文化センター、平成15年11月26日）
13. 大野哲靖、古田賢寛、三好秀暁、高村秀一、菊池祐介、上杉喜彦、増崎 貴、V. P. Budaev、「周辺プラズマ中の非拡散的プラズマ輸送と統計的揺動データ解析」、プラズマ・核融合学会第20回年会（於 茨城県立文化センター、平成15年11月27日）
14. 小久保慎平、岡本征晃、菊池祐介、大野哲靖、上杉喜彦、高村秀一、「小型トカマクHYBTOK-IIにおけるディスラプション発生時の内部磁場構造計測と電流減衰時間の評価」、第7回若手科学者によるプラズマ研究会（於 原研那珂、平成16年3月18日）

15. 小久保慎平、岡本征晃、菊池祐介、大野哲靖、高村秀一、上杉喜彦、河野康則、杉原正芳、小関隆久、嶋田道也、「電流クエンチ特性の解明と減衰時間の評価」、第5回核融合エネルギー連合講演会（於 仙台市民会館、平成16年6月18日）
16. 岡本征晃、小久保慎平、菊池祐介、大野哲靖、高村秀一、上杉喜彦、「小型トカマクHYBTOK-IIにおけるディスラプション時の内部磁場構造計測」、平成16年度電気関係学会東海支部連合大会（於 名古屋工業大学、平成16年9月28日）
17. Y. Uesugi, "Suppression of Islands in HYBTOK-II ", 9TH WORKSHOP ON MHD STABILITY CONTROL: "CONTROL OF MHD STABILITY: BACK TO THE BASICS"（於 プリンストンプラズマ物理研究所、平成16年11月22日）
18. 岡本征晃、小久保慎平、菊池祐介、大野哲靖、高村秀一、上杉喜彦、「小型トカマクHYBTOK-IIにおけるディスラプション時の内部磁場構造ダイナミックスの観測」、第21回プラズマ・核融合学会年会（於 静岡大学、平成16年11月24日）
19. 岡本征晃、小久保慎平、菊池祐介、大野哲靖、高村秀一、上杉喜彦、「トカマクプラズマ崩壊時の内部磁場構造ダイナミックスの観測」、プラズマ科学シンポジウム2005/第22回プラズマプロセッシング研究会（於 ウィル愛知、平成17年1月26日）
20. 松野広樹、高村秀一、菊池祐介、上杉喜彦、「DEDによるプラズマ回転駆動制御のための低域混成波電子加熱」、平成17年電気学会全国大会（於 徳島大学、平成17年3月17日）

# 研究成果

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景・位置付け

回転ヘリカル磁場によるトカマク周辺プラズマの制御に関する我々の独創的初期研究は18年前に遡る(S.Takamura, et al., Nucl. Fusion, 28(1988)183)。周辺プラズマ制御法として我々の一連のエルゴディックダイバータ研究と共に世界的に高く評価され、その象徴としてドイツのTEXTORではDED(動的エルゴディックダイバータ)プロジェクトとして実験が進められている。その間、我々はやや温度の低いトカマクプラズマにおけるDEDに関する先導的研究(M.Kobayashi et al. Nucl. Fusion, 40(2000)181; Physics of Plasmas, 7(2000)3288)により、磁気島の形成によるプラズマ電流の再配分を実験的に明らかにする成果を挙げ、これらはDEDの先導的研究として高く評価されている。これを踏まえて本研究では、より高温のトカマクプラズマ中において、時間的に変化する外部摂動磁場が共鳴層において高い導電率のためにより大きな遮蔽電流が流れ、 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  電磁力が作用することを明らかにするものであり、DED概念検証の先導的基礎研究として位置づけられる。本研究は、トカマク放電制御の高度化を目指したもので、動的エルゴディックダイバータによる先進的トカマク装置の実現に向けて基礎的にアプローチする洗練された研究として位置づけることができる。TEXTORのDEDで採用される強磁場側連続ヘリカルコイルに比べて、対称性の高い局所ヘリカルコイル系を用いることにより、モード純度の高い外部摂動磁場を印加することが出来るなど、実験条件が明確な研究と言える。またプラズマ内部への摂動磁場の浸透が磁気プローブを用いて直接計測できるなどTEXTORに対し先導的であり、かつ相補的な研究である。

### 1.2 研究の目的

上記の研究背景のもと、小型トカマクHYBTOK-IIを用いた実験研究を中心として、以下の研究目的を掲げて研究を展開した。

- (1) 外部ヘリカル磁場を比較的温度の高いトカマクプラズマに印加することにより生み出される、回転変換共鳴点ならびにアルフヴェン共鳴点における電磁場エネルギーの吸収過程を明らかにする。
- (2) 外部ヘリカル磁場の有する電磁場運動量のトカマクプラズマへの伝達によるポロイダル回転とそのシアーフローの生成過程を明らかにする。
- (3) プラズマのポロイダルシアーフローと微視的不安定性との関連を解明する。

(4) リサイクリング水素原子への運動量伝達過程と粒子排気制御機能を解明する。

### 1.3 得られた研究成果の概要

#### (1) 動的エルゴディックダイバータ (DED) 実験のためのトカマクプラズマの最適化

- ・ 現有 IGBT ジュールコイル電源とデジタル信号プロセッサ (DSP) を用いた詳細なプラズマ電流制御および位置制御により、種々のプラズマ条件下で安定したプラズマ  $q$  分布を得る目処を得た。
- ・ 200 MHz 帯低域混成波加熱による電子加熱用遅波アンテナを設計・製作し、小型トカマク HYBTOK-II に取り付けした後、インピーダンス整合特性およびプラズマ結合特性を調べた。初期実験より、プラズマ負荷抵抗は 1 ~ 2  $\Omega$  程度あるものの、数 kW 以上の入力電力レベルにおいてアンテナ付近での絶縁破壊による反射異常が観測された。現在、10 kW まで入力可能なアンテナを設計・製作し、アンテナのプラズマ結合特性を明らかにしつつある。

#### (2) 外部印加された回転ヘリカル摂動磁場とトカマクプラズマとの相互作用

- ・ テアリングモードの基礎理論・安定性について記述し、線形解析と実験結果から RHMP に対するトカマクプラズマの応答を評価した。線形解析では以下の 2 つのモデルにより解析した結果を示した。
  - (1) Finken の行ったプラズマの表皮効果を基にした解析モデル
  - (2) Pankratov らが行った  $E \times B$  回転速度、0 次の磁場の変化 (磁気島形成の効果) を取り入れた解析モデル (1) では RHMP の周波数と電子温度を変化させた時の摂動磁場の浸透過程を計算し、表皮効果で決まると考えた単純なモデルの場合の結果を示した。(2) では RHMP の位相速度とプラズマの回転速度 ( $E \times B$  回転速度と反磁性ドリフト速度) とのポロイダル回転速度差を考慮し、プラズマ電流分布の再分配の効果も取り入れている。
- ・ 実験では実験条件を様々に変えることで線形解析との比較を行ったところ、共鳴面での摂動磁場の振る舞いについて良い一致が見られた。また、電極バイアス印加によりドップラーシフトした RHMP の周波数が高くなることで、プラズマ中での Br1 の強い遮蔽を確認した。このような摂動

磁場の強い遮蔽は、CSTN-IV の低温プラズマを用いた実験では観測されなかった結果である。モデル解析の結果を実験的に実証することで、さらに高温プラズマである TEXTOR の DED 実験につながる実験結果を示すことができた。磁気島の成長の抑制という観点から、プラズマ電流の高速時間変調を RHMP 印加中に行った時のプラズマ中での摂動磁場の振る舞いについても計測を行った。

- ・ 静電プローブおよび磁気プローブを用いて、外部ヘリカル摂動磁場により励起される高周波磁場およびアルフベン共鳴層近傍でのモード変換により誘起されると期待される静電波モードの検出を試みた結果、磁気共鳴層 ( $q=m/n$ ) の両側において駆動周波数帯の静電場信号がピークを持つことが観測された。また、駆動周波数を掃引することで静電場信号のピークも径方向に移動することが見いだされ、アルフベン共鳴による静電波モードへのモード変換の可能性が示唆された。
- ・ アルフベン波励起に伴うアルフベン波の伝搬・吸収およびアルフベン波励起によるポロイダル駆動への効果に関する数値計算を行い、実験で観測された静電場分布と比較した。現在、より効率的にポロイダル回転駆動を行うためのプラズマ条件について解析を行った。

### (3) 周辺プラズマ静電・磁場揺動特性および粒子輸送に対する

#### 回転ヘリカル磁場印加の効果

- ・ 可動静電プローブにより測定されたトカマク周辺プラズマにおける静電揺動が有している間欠性 (Intermittency) とその乱流構造・フラクタル性の解析を行った。その結果、測定された静電・密度揺動は、強磁場側、弱磁場側双方とも強い間欠性を有しており、周辺プラズマの輸送過程は、この間欠的 (バースト的) な揺動特性に支配されていることが示唆された。
- ・ 外部印加される回転ヘリカル磁場の間欠的な輸送特性に対する効果として、ヘリカル共鳴面 ( $m/n=6$  および  $7$ ) 近傍の領域において、乱流粒子束の変化が見られた。また、そのフラクタル性にも共鳴面依存性や DED 駆動周波数依存性が見られたが、明確な結論を得るためには今後、より詳細な実験・解析が必要である。

#### (4) プラズマ電流高速変調による MHD 不安定性の制御

- ・電磁場による周辺プラズマ制御研究の一環として、高速プラズマ電流変調による磁気共鳴面の高速移動とその MHD 不安定性成長の抑制効果に関する実験を行った。制御対象として、(i) 外部印加されたヘリカル摂動磁場による磁気島成長と (ii) ティアリングモード等の自発的に誘起される MHD 不安定性の成長過程に対する影響を実験的に調べた。
- ・外部印加された回転ヘリカル摂動磁場による磁気島形成に対して、プラズマ電流変調（変調周波数：1~10 kHz）による磁気共鳴面の高速移動は、磁力線の繋ぎ変えを抑制し、磁気島の成長が強く抑制されることが磁気プローブによる内部磁場構造の測定から明らかになった。
- ・ディスラプションを引き起こすような強いティアリング不安定性 ( $m/n=2, 3$ ) に関しては、明確な成長抑制効果は見られなかった。強いプラズマ電流変調を行うことは、磁気共鳴面の移動をもたらす以外に、低  $q$  放電による不安定化の要因も含むことからこれらの効果が相殺して明確な結果を得るに至っていないことが考えられる。

#### (5) 小型トカマクにおけるディスラプション特性の解明

- ・ティアリング不安定性によるディスラプションを再現性よく、かつ、ディスラプション時にジュール電源からの加熱入力を極力低減させるために現有 IGBT インバーター電源にコンデンサーバンク電源を並列接続し、外部トリガー入力によりインバーター電源からコンデンサーバンク電源に転流出来るように改造し（インバーター電源のハイブリッド化）、ディスラプション実験を安定に行えるようにした。
- ・多チャンネル磁気プローブによる内部磁場測定および外部磁気プローブ測定から、 $m/n=2/1$  および  $3/1$  不安定性の成長に伴い、中心部の電子温度がゆっくり低下し始め、50~60 $\mu$ s 後、 $q\sim 2.5$  内部のプラズマ電流が外部に急速に吐き出され、その後 $\sim 20\mu$ s 程度遅れてプラズマ電流の低下が始まることを見出した。このように、巨視的な電流分布や内部磁場構造が抵抗性拡散時間よりはるかに早く変化し、その後、速い磁場揺動 ( $\sim 200$  kHz) を伴いながら  $\sim 0.5$  ms 程度のゆっくりとした時間スケールでプラズマ電流は減少していく。

- ・電流減衰時間の評価法として、新たに電流変化率から算出する方法を提案し、従来の振幅値から求めた値と比較した結果、よりバラツキの少ない評価になることが確認された。本手法は、電流減衰に2段階の過程 (Fast Decay と Slow Decay) が現れるような場合において有効と思われる。また、ディスラプションに伴う電流減衰時間の電子温度依存性を調べた結果、L/R の抵抗性減衰時間でほぼプラズマ電流は減衰していくことが示された。

次項以降に、得られた研究成果の詳細について各項目毎に掲載する。



## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、名古屋大学工学部技官 高木誠氏、名古屋大学大学院工学研究科 菊池祐介、高橋秀嗣、小久保慎平、岡本征晃、松野広樹の各氏、RRC クルチャトフ研究所 V. Budaev 氏、サンパウロ大学 A. G. Elfimov 氏に多大な援助を受けました。また、ディスラプションに関する実験・解析について、日本原子力研究所那珂研究所 河野康則、小関隆久の両氏ならびに ITER 国際チーム 杉原正芳、嶋田道也の両氏に貴重な助言を頂きました。ここに、深く感謝いたします。