

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2007 ~ 2008  
 課題番号： 19560825  
 研究課題名 (和文)  
 電子サイクロトロン加熱によるプラズマ能動制御と閉じ込め改善  
 研究課題名 (英文)  
 Plasma control and confinement improvement with electron cyclotron heating  
 研究代表者  
 今井 剛 (IMAI TSUYOSHI)  
 筑波大学 大学院数理工学物質科学研究科 教授  
 研究者番号 80354637

## 研究成果の概要：

タンデムミラー装置ガンマ10の電子サイクロトロン加熱 (ECH) による強力な電子加熱を目指し、ジャイロトロンの高性能化、さらに、マイクロ波入射ミラーアンテナの改良、偏波器の導入により、ミラーでの ECH によるプラズマ加熱・制御特性を明確にした。また、高パワーの中央部ミラーの ECH 時に大電力のプラグ ECH 重畳し、高電子温度に於ける電位閉じ込め改善を達成すると共に、ECH によるドリフト型揺動の抑制、ECH による径方向輸送の改善効果が示唆されるデータを得た。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	1,800,000	540,000	2,340,000
平成20年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： プラズマ理工学

科研費の分科・細目： 総合工学 核融合学

キーワード：

電子サイクロトロン加熱、磁場閉じ込め核融合、閉じ込め改善、プラズマ制御、タンデムミラー、ジャイロトロン、アンテナ、マイクロ波

## 1. 研究開始当初の背景

電子サイクロトロン加熱 (ECH) はプラズマの局所加熱や電流駆動が可能であり、また、パワー源のジャイロトロン発振管の開発が進展し、さらに、タンデムミラーガンマ10では電位・電場生成実績が培われて来た。一方、トカマク等の磁場閉じ込め装置でも電場がプラズマ径方向輸送や閉じ込め改善に関係している事を示唆するデー

タが観測されるようになってきた。

ガンマ10では、これまで電位を利用した閉じ込め改善研究を行い、エンドミラー部での ECH により閉じ込め電位の生成に成功し、この電位制御が軸方向のみならず、磁場に垂直方向のプラズマの輸送、閉じ込め改善に重要な役割を果たす可能性、また、直線装置のみでなくトカマクやヘリカルなどの環状系磁場装置にも普遍的な輸送の物理に関与している可能性が指摘され、

電位の制御の重要性が注目を浴びてきた。また、電位が能動的に制御可能なミラーの最大の利点と他にはない強力な電子加熱装置を利用でき、ガンマ-10にしかできない実験である。

## 2. 研究の目的

タンデムミラーの本質は両端の電位障壁の生成/制御である。この電位制御を可能にするツールが大電力ジャイロトロンを用いた電子サイクロトロン加熱である。本研究では、

- (1) ITER用ジャイロトロンで開発した技術を用いたジャイロトロン大電力化とアンテナ・伝送系の性能改良により、主プラズマの有効な電子加熱パワーを2倍以上にする。
- (2) ECHによる電位生成と閉じ込めに関する「電位生成・電位効果統合理論」を本研究の物理基盤とし、タンデムミラー史上で初めての高密度、高プラズマ温度領域での電位障壁の能動的制御を実証する。
- (3) 上記(1)で増力した装置で電子温度を大幅に増大させるとともに、イオンサイクロトロン加熱で生成された高温イオンの電子冷却をなくし、イオンの高温化と等方化を実現する。

以上、大電力ジャイロトロンを用いた本研究における高温/高密度プラズマ領域への電位効果の拡張性・適用性の実証、さらに、高密度、高プラズマ温度領域における電場構造と閉じ込めの関係の詳細な研究により、トカマクやヘリカル系装置を含む磁場閉じ込めに普遍的な新しいプラズマ輸送の制御法の開拓の鍵となる物理の明確化を目指す。

## 3. 研究の方法

電位生成・電位効果統合理論とその実証成果を基盤として、1) セントラル部プラズマ用大電力 ECH 装置高性能化、2) 高性能新型アンテナと伝送系の製作・配備、3) 計測結果に基づく 高密度領域での加熱と電位・電場制御の拡張性の検証を行う。1)と2)によるハードの整備とともに、それを用いた「高密度プラズマでの電位生成と、ECH 電力に対するセントラル部電子加熱とそれによる生成電位・電場の拡張性の検証実験を開始する。

具体的研究計画・方法として

- ① 本研究以前にガンマ10装置に設置した、ミラー研究史上最大出力の1台 0.5MW級のジャイロトロン（1台当り従来の世界

のミラー実験の最大パワーの2.5倍)を用いて、合計入射パワー1MW級の実験を行う。これにより、今までのタンデムミラー電位生成電位閉じ込めの2大理論（パスツコフ理論、コーエン理論）の統合理論に基づき、高密度プラズマでの軸方向電位障壁を能動的に制御する。

- ② 強力な電子加熱に向け、実験技術面からも世界最高レベルのジャイロトロン開発技術・マイクロ波伝送・ECH入射技術、また、セントラルの主プラズマ部の電子加熱用高周波源の高性能化、更にこれまでに開発した独自の計測器群技術を総合的に用いる、最高レベルの専門家と技術を結集・投入した、電位生成電位閉じ込め系の加熱とプラズマ制御の共同実験を遂行・実施する。

- ③ 加熱効果をさらに高めるための ECH アンテナ・伝送系の最適化設計に従って、プラズマ・パラメータと ECH 電力・入射法を最適化する。従来に比べ2倍以上中心軸に集中した伸アンテナと高効率で有効なモードを生成する伝送系を製作することにより、より高く広いプラズマ・パラメータ領域への、更なる拡張性・適用性と物理機構の実証・確立を行う。ECHのミラー研究史上初めての0.5MW級の入射を行い、トカマクプラズマに匹敵する密度領域での、磁場・電場複合閉じ込め系の定量的検証と電場構造制御による閉じ込め改善の研究を行う。

- ④ これまでの比例則の沿った成果をさらに発展させ、本格的な数kVオーダーの閉じ込め電位の生成・制御による両側高電位プラズマ閉じ込め実験と併行して、セントラル部の強力な電子加熱実験を行う。

- ⑤ 上の②により、実質的な入射パワーをこれまでの2倍以上に増大し、高密度での強力な電子加熱を実現するとともに、吸収分布を軸対称化し、加熱の効果を一層高める。実験によるプラズマの変化は、センターで整備された「半導体電子分布関数・電子温度計測器」、プラグ部電位分布計測器(新型イオン・スペクトル計測器アレー)、重イオンビームプローブ セントラル部電位空間分布計測器等の計測結果を総合して、加熱効果と電位生成の全体像を分布関数の詳細・理論との詳細比較まで行い、今回の目的の高密度化、高温化の実現を確認する。

#### 4. 研究成果

(1) ECH 装置は、タンデムミラーでの電位の形成に不可欠な加熱装置である。タンデムミラー装置ガンマ10の中央部ミラーのプラズマ閉じ込め部の強力な電子加熱を目指し、ECH 装置の心臓部となる電子管ジャイロトロン高周波発振部の高性能化を実施し、従来マイクロ波出力が 200kW 程度であったジャイロトロンを2倍の 400kW 以上に高性能化した。発振管には 28GHz ジャイロトロンを使用するが、図1に示すように出力部に取り付けた整合器(MOU)でコルゲート導波管へ結合させる。この MOU 部で大電力時に放電が起り高出力が阻害されていた。それに対して、その原因がジャイロトロン内での回折損や MOU 内での回折損に起因することを突き止め、MOU 内部に SiC の吸収体を導入することにより、不要な高周波 (RF) を大幅に低減し(図2)、放電抑制に成功し大電力入射を可能にした。

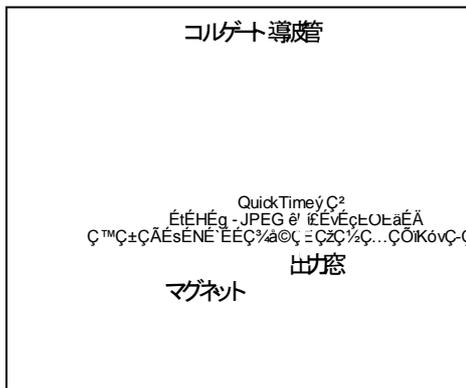


図1 28GHz ジャイロトロン高周波発振部

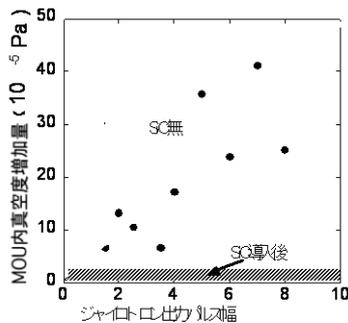


図2 MOU の真空度のジャイロトロン発振のパルス長に対する変化。SiC の導入により、放電が抑制され、真空度の増大が抑制された。

(2) マイクロ波をプラズマに効率よく入射するミラー型アンテナをさらに改良し、より集光性や伝送効率を向上させた。図3はガンマ10におけるアンテナ配位を示す。ミラー2の拡大と改良により伝送効率の10%の改善が得られると共に、図4に示す

ようにビーム軌道修正と集光性の改善を目指した設計・製作を行い、低電力試験により改善効果を確認した。

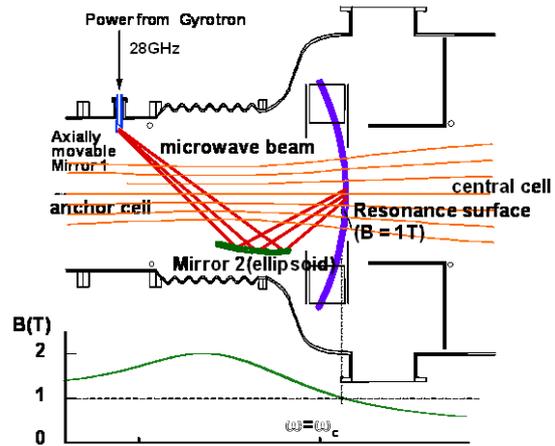


図3 ガンマ10のミラー・アンテナ配位図

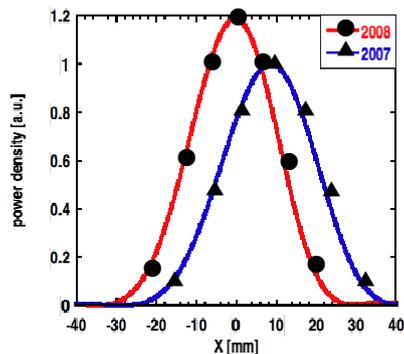


図4 アンテナミラー2の改良による共鳴位置でのパワー密度分布の計算結果の比較。Xは上下方向。

ガンマ10では密度や電子温度が比較的低いため強磁場側からの X モード入射が効率よく吸収される。そのため図3に示すように強磁場側から100% X モードに結合させるべく偏波器を導入し、最適な楕円偏波としてマイクロ波入射ができるようにした。偏頗によるプラズマの応答の違いを図5に示す。Xモード100%の偏波に相当する条件で蓄積エネルギーの上昇や X 線の増大が最大となり、効果的な吸収が得られていることがわかる。また、Oモード入射では、最初の吸収位置で吸収されないことからパワーが壁での反射の後、周辺部や非対称な加熱の原因となり、蓄積エネルギーの減少をもたらすことから、閉じ込め劣化を招くことがわかった。

図5 強磁場側入射の偏波による加熱特性の違い。

また、共鳴層での垂直方向の吸収位置を可変できる可動アンテナを導入し、吸収位置の影響を調べた。空間的な制約から図3のミラー1を上下に可動とし、吸収位置を変化させた。ミラーを標準位置から10mm下方へ動かした時が最も加熱効果が高く、逆に上方へ動かすと加熱効果が見られなくなる。10mmのミラー1の上下移動は吸収位置では約5mmの吸収位置の変化に対応していることから、最適な状態から、10mm程度の吸収位置の変化で加熱効果が大きく変化することが明らかとなり、軸対称な加熱が重要である事がわかった。

最適化したECHでの蓄積エネルギーの変化から、電子温度上昇による蓄積エネルギーの増分よりも大きい上昇が観測されていること、また、磁場方向のイオンのエネルギー分布からも磁場方向のエネルギー上昇が観測されていることから、電子温度の上昇に伴う高速イオンの電子冷却の減少を確認できた。

(3) 0.5MW級ジャイロトロンにより東西プラグ部に各380kWのパワーを入射し、このプラグECH重畳し、高パワーの中央部ミラーECHを行い高電子温度に於ける電位閉じ込めを実験を実施した。高電子温度に於

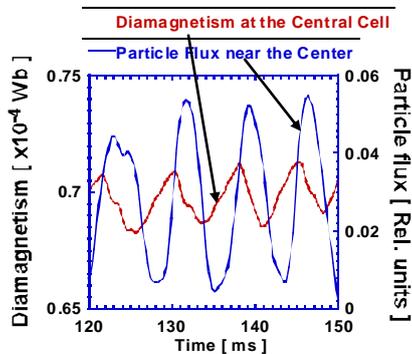


図6 蓄積エネルギーに対応する反磁性量と粒子束の時間変化

いても従来と同様のイオン閉じ込め電位の生成を確認すると共に、中央部ミラーの中心軸上での電位の上昇に伴うドリフト型密度、電位揺動の振る舞いを調べた。この実験に先立ち、このドリフト型の密度揺動と電位揺動の位相差から、揺動による径方向の粒子束が外側へ流れていること、また、図6に見られるように、その粒子束と蓄積エネルギーの相関が明確にみられる事を明確にした。さらに、金中性粒子ビームプローブ (GNBP) やマイクロ波干渉計による電位や密度揺動の解析においてもドリフト型揺動が ECRH 印加によって抑制されていることが確認されている。図7にGNBPを用いて測定した9kHz付近の揺動に関して、径方向位置  $X = 0 \text{ m}$ 、 $0.06 \text{ m}$ 、 $0.12 \text{ m}$  の電位揺動、密度揺動についても調べた結果で、(a)は ECRH 印加前と印加中の密度揺動強度の空間分布、(b)は同じく電位揺動強度の空間分布を示す。プラグ ECRH によって高い閉じ込め電位が形成されるとともに、密度揺動、電位揺動ともにすべての径方向位置で急激に減少することが確認された。このことは、径方向電場及び電場シア等の電場構造の制御により、異常輸送の原因であるドリフト型揺動を抑制できる可能性を示しており先の前述したドリフト型揺動による径方向の粒子の異常輸送の増大を示す結果と合

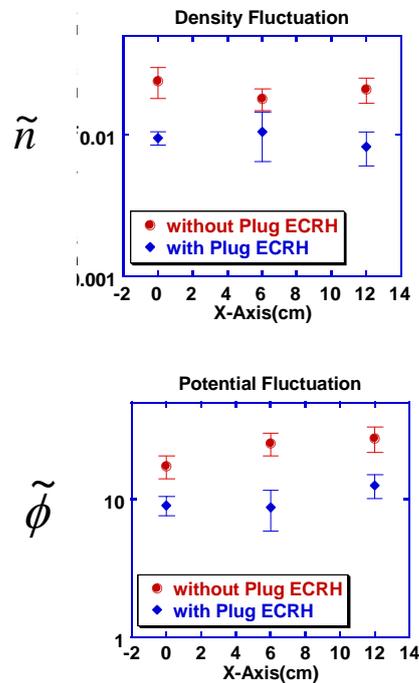


図7 密度揺動(a)および電位揺動強度(b)の空間分布。●はプラグ ECRH 印加前、◆はプラグ ECRH 印加中を示す

わせて考えれば、ECH による電位制御による揺動抑制を通じた径方向輸送の改善効果を示唆するデータを得た。電位分布を ECH の吸収分布に近いガウス型の分布を過程すると電場勾配の大きいところでの揺動抑制が顕著であることもわかった。これは環状磁場系での H モード、ITB の形成に電場勾配が大きな役割を果たしている事を示す重要な結果と言える。

ジャイロトロンを用いた ECH による電子加熱を制御ツールとして、電位・電場野制御と加熱、輸送の改善、制御の物理解明を吸収分布や揺動分布データの解析を通じて明らかにして来た。今後は、さらに、電子温度分布や電位、電場分布の精密、詳細な研究をすることにより、この成果を更に発展させて行く。また、この電位・電場のプラズマの字句方向と径方向輸送制御性を拡張し、境界プラズマの輸送研究に応用していく予定である。

#### 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 4 件)

① Y.Sakagoshi, T.Imai, H. Shidara, T. Kariya, R. Minami, 他 6 名, Development of the High Performance ECRH Antenna for GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology, 55, 2T, 118-121(2009). 査読有

② Y.Miyata, M.Yoshikawa, M.Mizuguchi, Y. Oono, Y. Nakashima and T. Imai, Study of Radial Particle Flux due to Phasae Difference between Potential and Density Fluctuations, Transactions of Fusion Science and Technology, 55, 2T,168-171(2009). 査読有

③ H. Shidara, Y. Sakagoshi, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, and GAMMA 10 group, Steering antenna performance for the central cell ECRH in the GAMMA 10 device, Transactions of Fusion Science and Technology,55, 2T,131-135(2009). 査読有

④ M. Harigae, R. Minami, T. Imai, M. Saigusa, H. Shidara, M. Nakamura, Y. Kudo, T. Kariya, Study of a Miter Bend Polarizer for Central ECRH on GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology,55, 2T,136-139(2009). 査読有

[学会発表] (計 7 件)

① T. Imai, T.Kariya, R. Minami, H. Shidara, K. Sakamoto, 他 14 名, , Development of 1MW

Gyrotron and Progress of ECH System for the GAMMA 10 Tandem Mirror in Tsukuba. Proc. 22th IAEA Fusion Energy Conf. (Geneva, 2008) IAEA/FT/P2-25. (14, Oct., 2008, Geneva, Switzerland).

② H. Shidara, T. Imai, Y. Sakagoshi, M. Henderson, T. Kariya, R. Minami, GAMMA 10 group, ECRH antenna performance in a limited spatial availability, Global Congress on Microwave Energy Application(GCMEA) 2008 MAJIC 1st (4, Aug. 2008, Ohtsu, Japan).

③ 南 龍太郎, 假家 強, 今井 剛, 設楽 弘之, 他 13 名, 筑波大学における大電力 ECH システムの高性能化研究, 第 25 回 プラズマ核融合学会年会(宇都宮、2008. 12. 2-12. 5)、4pC01.

④ 坂越祐介, 今井剛, 立松芳典, 設楽弘之, 假家強, 南龍太郎, 他 6 名, GAMMA 10 セントラル部高性能電子加熱用アンテナ系の開発, 第 25 回 プラズマ核融合学会年会(宇都宮、2008. 12. 2-12. 5)、3aB06P.

⑤ 設楽 弘之, 坂越祐介, 今井剛, 假家強, 南龍太郎, 遠藤洋一, GAMMA10 グループ, GAMMA 10 におけるセントラル ECRH 可動アンテナの改良, 第 25 回 プラズマ核融合学会年会(宇都宮、2008. 12. 2-12. 5)、3aB16P.

⑥ 宮田良明, 今井剛 (8 番目), 他 6 名, 金中性粒子ビームプローブを用いた低周波揺動の特性研究, 第 25 回 プラズマ核融合学会年会(宇都宮、2008. 12. 2-12. 5)、4aC03P.

⑦ 吉川正志, 松本俊昭, 宮田良明, 今井剛 (11 番目) 他 7 名, タンデムミラー-GAMMA 10 における閉じ込め電位生成時の密度揺動計測, 第 25 回 プラズマ核融合学会年会(宇都宮、2008. 12. 2-12. 5)、5aB01P.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

今井 剛 (IMAI TSUYOSHI)  
筑波大学 大学院数理物質科学研究科  
教授  
研究者番号 : 80354637

##### (2) 研究分担者

假家 強 (KARIYA TSUYOSHI)  
筑波大学 大学院数理物質科学研究科  
准教授

研究者番号：30451678

南 龍太郎 (MINAMI RYUUTARO)  
筑波大学 大学院数理物質科学研究科  
講師  
研究者番号：70370476

三枝 幹雄 (SAIGUSA MIKIO)  
茨城大学 大学院工学研究科  
教授  
研究者番号：10292476

宮田 良明 (MIYATA YOSHIAKI)  
筑波大学 プラズマ研究センター  
研究員  
研究者番号：40510029

(3)連携研究者

設楽 弘之 (SIDARA HIROYUKI)  
筑波大学 大学院数理物質科学研究科  
研究員  
研究者番号：80463818