

## IX プラズマ研究グループ

教授	今井 剛
准教授	北條仁士、中嶋洋輔、吉川正志、假家 強
講師	小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴、南龍太郎
技術専門官	平田久子
技術専門職員	大川和夫
研究員	設楽弘之
大学院生	12名

### 共同研究者

教授	市村 真、(物理工学系)
准教授	片沼伊佐夫(物理工学系)

講師(研究機関研究員) 山口 裕資、宮田良明

### 研究協力者

技術専門職員	杉山昭彦、和所保規、遠藤洋一
技官	嶋 頼子
研究支援推進員	際本泰士、板倉昭慶
大学院生	3名

### 【1】大学法人化に向けての、当該プラズマグループの研究の方針・基本理念

当プラズマ研究グループでは、平成16年度から実施された大学の法人化に伴う筑波大学の「中期計画」に則り、筑波大学が世界に広く貢献できる優れた研究成果の創出の一端を担うことを使命として、下記の様に研究の新展開を図ることを基本方針・基本理念としている。

法人化後の新制度のもと、グループ教職員学生一丸となり研究に邁進し、当該グループとして、数理工学物質科学研究科の中期目標・中期計画の一般広範な記載の推進はもとより、国立大学法人筑波大学の「I 大学の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するためにとるべき措置」の2の(2)の「研究実施体制等の整備に関する目標を達成するための措置」に、「特に、プラズマの研究に関しては、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所との連携を強めて、双方向型共同研究等を推進するとともに、全国共同研究のための整備を図る。」と明記されていることは、本学のプラズマ研究の歴史を拓いた当該グループとしても、その責務を重く受け止め、応分の貢献を行うことを目指すことは、法人化後の一貫した研究姿勢である。

更に、以下で述べる新たな物理究明は、プラズマ・パラメータの進展をもたらし、法人化前に比し、自ら開発した高電力ジャイロトロンを用いて、イオン閉じ込め電位、電子温度、電位閉じ込めイオン温度の大きな進展を得、また、第II期中期目標、計画に向けた準備研究も進展している。

また、上記「筑波大学 中期計画」等に基づき、16年度から新たに立ち上った双方向型共同研究の枠組みを背景に、核融合科学研究所と、筑波大学、京都大学、大阪大学、九州大学の4大学を中心に、更に講座単位の各大学との、共同研究を積極的に推進し、普遍性の高い学術成果と、それに基づく核融合実用への基盤研究を進めており、新しい研究成果を得るとともに、第II期中期計画にむけて、さらに発展しつつある。

学内にあっては、数理工学物質科学研究科、プラズマ研究センター、並びにシステム情報工学研究科のグループをはじめとする連携協力研究・教育、その他の学内の関連グループとの共同研究、更には国内・国外のプラズマ研究グループとの緊密な連携・研究協力の下に、顕著な成果の創造・推進を図ることを基本理念・基本目標・基本方針に掲げ、教職員学生一丸となり、日夜努力を積み重ねている。

## 【2】プラズマ研究の研究目的と意義・位置づけ

物理学専攻のプラズマ実験グループが主体となって研究しているプラズマ研究センターでは、「プラズマ物理学、特に電位/電場によるプラズマ閉じ込めの向上並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うことが、中期計画・新しい筑波大学規則・規定に則した研究目的の柱である。

この研究は、「核融合実用に必要不可欠で未解決な課題である、電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行う」という、プラズマ核融合分野全体に広く役立つ、重要な位置づけを持つ。

この研究は、延いては国際熱核融合実験炉ITERの心臓部である、核融合炉心プラズマの高閉じ込めHモードの生成メカニズムの解明や、最近トカマクやヘリカル型プラズマのエネルギー閉じ込めの改善に注目を集めているドリフト波とそれに基づく乱流の生成、更には層状流(ラミナーフロー)形成に関連する内部輸送障壁(ITB)の形成機構とその効果の究明にも繋がりを、先端的な極めて重要な研究課題という意義・位置づけを併せ持っている。

実際に、以上の研究課題に関する物理機構として、電位のプラズマ半径方向(径方向)2階微分量である「電場の径方向シア  $dE_r/dr$ 」が深くこれらの現象に関わることを示唆する結果が得られ、学術普遍性の高い、極めて重要な本研究課題の更なる究明を進めている。

当プラズマグループの電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された国際連合の原子力部門である国際原子力機関(IAEA)の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議において、当研究グループが世界で初めて電位閉じ込めの有効性を実証した、先駆的実績を持つテーマであることは、斯界では広く知られており、かつて米国のサイエンス誌の表紙を筑波大学のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。

以来、この成果は、タンデムミラーの一連の研究に発展し、国際熱核融合実験炉ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持って発展・展開を見ている。

プラズマの電位閉じ込め研究の必要不可欠な重要性とその意義は、①長年にわたり研究された磁場のみによるプラズマ閉じ込めに比べ、閉じ込め性能が著しく改善・向上すること、②ITER等のトカマク型 或いはヘリカル型の環状系プラズマ閉じ込めの改善Hモードも含む、広く普遍的で顕著なプラズマ閉じ込め改善・向上方法であること、③このHモード/電位による高効率プラズマ閉じ込めの発見・これによる比例則により初めてITER装置の巨大化が避けられ、経済的最終設計が可能になったこと、④ITER装置等のトカマク型装置やヘリカル型装置の径方向エネルギー閉じ込めを、著しく向上させる内部輸送障壁(ITB)が発見され、ITB形成のためには、プラズマ内に形成された電場Eと外部磁場BによるExBシアフローによる乱流安定化機構が物理的に本質を与えることが予測されているが、この電場/電位効果の究明とこれを用いた制御が急務であることにある。これらHモードやITB形成の物理機構は依然明確にされておらず、本研究目的である「電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上のメカニズムの解明」は、核融合装置の実用的経済的なコンパクト化・プラズマ閉じ込め方法の理解とそれによる核融合プラズマ制御のために、必要不可欠な研究であると同時に、プラズマ特性の学術研究・応用研究であり、大学の研究の在り方として最適な学術研究内容とその意義、研究規模であると位置づけられる。さらに、第II期中期計画では、核融合炉の重要かつ緊急の課題である境界プラズマの研究に、これまでの成果を拡張する計画である。

これらの重要課題に対し、装置端部を持つ当センターのミラー型実験装置は、電子を選択的に電子サイクロトロン加熱により高温・高速化し、ミラー端部に対しマイナスの電荷を持つ電子フローの一部を制御し、これによりプラズマ内部のプラス電荷を持つイオンの過不足による電位/電場を自在に形成・制御できるという、「ミラーにしかできないこと、ミラーならば他形式プラズマ装置にも普遍的な物理機構解明を含めてできること」、こうしたミラー装置独自の特色を活かした研究を推進している

### 【3】研究成果の概要

プラズマ研究グループの目標である「電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」に則して、プラズマ物理学の重要な学術的課題を中心とする具体的な研究の成果について、我々が中心となって研究しているガンマ10（図1）において、今年度に得られた内容を中心に主な結果を示す。第I期中期計画の課題として、ITER含む磁場閉じ込め装置に普遍的に重要なHモード・内部輸送障壁（ITB）などの閉じ込め改善の鍵の一つである「プラズマ中に生成される電場の $E \times B$ フロー構造によるプラズマ輸送改善」に重点を置き研究を進めた。この電場構造に起因するフロー生成の物理機構の解明はプラズマ輸送の能動制御につながり、ITER及び核融合炉の実用化に大きなインパクトをもつ研究である。当センターのミラー型の特長を活かす事によりプラズマ中の電位を制御可能なことから、この輸送改善の物理の研究を効果的に実施できる。法人化第I期計画で、プラズマ輸送の改善の機構解明を通じてHモードやITB等の研究に貢献し、さらに、第II期ではその能動制御方法の研究、また、その応用としての輸送制御による境界プラズマ研究を行う計画である。H21年度は、第I期中期計画の最終年度であることから、電位・電場と揺動、輸送との関係について重点を置くと共に、第II期中期計画に向けた準備実験として、制御ツールであるMW級ジャイロトロン開発、トムソン散乱やビームプローブ等の計測装置開発・高度化を進め、また、ダイバータ模擬の予備実験を進め、10MW/m<sup>2</sup>相当の熱流束を得た。また、個別の研究成果のさらに詳しい内容については、[4]以降に述べられている。

(1) 本センターのテーマの一つである電位による閉じ込め改善を目的とする電位形成実験において、プラグ部の電位形成用電子サイクロトロン加熱（P-ECH）により、第1期期間でのイオン閉じ込め電位の比例則に関して、従来の200kWレベルから約400kWまでのデータが得られるとともに、ELECA(End Loss Energy Component Analyzer of Cylindrical Type)によっても、2.3～2.5kVの閉じ込め電位生成に関する比例則を検証する結果が得られた。また、このP-ECHの印加によりセントラル部中心の電位制御実験が可能となる。

(2) 電位・電場による揺動・プラズマ輸送への効果については、高イオン温度モード実験時にドリフト型揺動が観測され、その揺動がプラグ部ECH（P-ECH）印加とともに減衰していることがこれまでにわかっている。これは、トカマク等環状系装置におけるH-modeにも関連した電位・電場による閉じ込め改善につながる現象と考えられることから、本年度は、このドリフト型揺動の抑制現象をより詳細に調べるため、電位計測用の金中性粒子ビーム（GNBP）の測定モードを変更し、空間2点の電位、電位揺動を1ショットで計測できるよう、ビーム偏向電極に矩形波を印加して計測した。さらに、主閉じ込め部であるセントラル部における電位形状を変化させ、揺動の抑制との関係を調べるため、

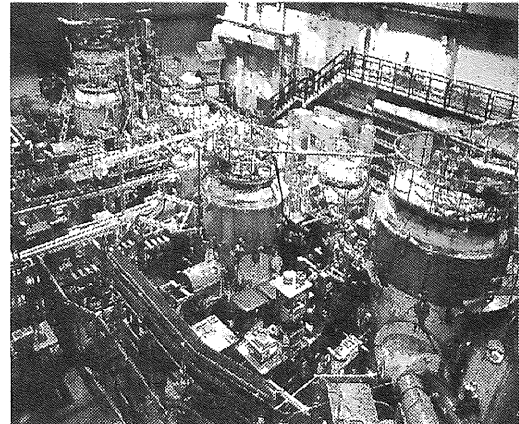


図1 世界最大のミラー型閉じ込め装置である筑波大学プラズマ研究センターのGAMMA10 タンデムミラー

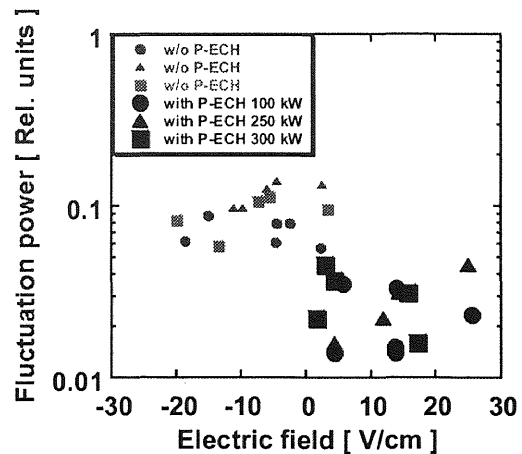


図2 径方向電場と揺動レベルの相関図

P-ECH パワーを変えて、電位・電場を詳細に計測した。2点同時計測により電場の計測がより精度よく行えるようになった。P-ECH 印加前の電位分布は、プラズマ中心部で外側より低くなっている下に凸の形状をしているが、P-ECH 印加中は中心部の電位が上昇して上に凸の電位形状になっていることが解った。また、GNBP で測定した揺動強度と電場強度の関係をみると、図2に示すように電場が正になると揺動強度が低くなっていることがわかる。以上のことから、プラグ ECH 印加前は、電位分布が中心部で下に凸のため E×B ドリフトも反磁性ドリフト型揺動と同じ方向に回転している。これが、P-ECH 印加によって電位分布形状が変化し、E×B ドリフトも反磁性ドリフト型揺動と逆方向に回転することになる。この E×B ドリフト構造変化とドリフト速度の実効的な減少により揺動が抑制されていると考えることができる。

(3) 次期計画に向けたダイバータ模擬の予備実験では、西エンド部ミラースロート出口直近にカロリメータ/プローブを設置し、さらに、真空容器内の仕切り板の一部を切り欠いて観測ポートを整備した。エンド部観測ポートからは高速カメラで捕らえた端損失プラズマが観測できた。熱流計測の初期測定実験では、スロート直下の計測部において、プラグ ECH 入射 (約 300kW) 時に ECH 高温電子が熱流に大きく寄与していることも明らかになり、ECH 時には  $8\text{MW}/\text{m}^2$  に相当する熱流が得られていることがわかり、次年度からのダイバータ模擬実験が期待できる。

(4) セントラル部のECHでは、電子加熱の高効率化と加熱時の閉じ込め変化の解明を目指し、入射位置、偏波、パワーレベルによる加熱効果の詳細な実験を行った。また、軟X線、周辺部のイオン損失などの計測結果も加えて、特性を調べ、前年度得られた加熱効率の向上に重要な one path 吸収効率の向上と軸対称な加熱が、加熱時の閉じ込め改善にも重要であることがわかった。

(5) 開放磁場端部を持つミラー特有の利点である、ミラー端部を利用した直接発電の研究が、双方向型共同研究課題の柱の一つの神戸大学のグループとの共同研究も、これまでの成果に加えて、さらに高度な研究が進展している。また、ITERや大型の環状磁場閉じ込め装置の最重要課題であり、次期計画の重点課題の一つである環状磁場で重要な役割を持つダイバータ配位についても、共同研究を基盤に、着実に研究が進展している。また、東北大学や広島大学のグループとの共同研究によるプラズマ回転計測やプラズマの高速カメラによる観測は、ITB/TTB等の輸送障壁による閉じ込め改善の物理の解明研究に大きく貢献している。核融合科学研究所、さらに、プラズマ性能評価や輸送研究に重要なトムソン散乱計測の導入も共同研究により進展している。

(6) 磁場閉じ込めのプラズマの高性能化のキーツールであり、電位制御のツールであるジャイロトロンの開発では、28GHz、500kWジャイロトロンを開発し、ガンマ10実験でパワーにほぼ比例する閉じ込め電位の増大、セントラル部のプラズマ電位制御性の拡大、電子加熱が得られ従来の～3倍に相当する2kV以上のプラグ電位が得られている。この500kW管に続き、ガンマ10用28GHz-1MWジャイロトロンを開発を実施し、試作管(図3)を製作し、電源の制約で数msでの試験であるが、28GHzで1MWの出力を実証した。筑波大のジャイロトロン試験装置も長パルス増力を21年度に終え、次年度から長パルス試験を計画している。LHD用の77GHz管では、平成18年度から共同研究を開始し、現在までに、3本の管を開発、3号管で最大1.5MWの1.6秒の出力を達成し、3本がLHD実験に供され、3MW以上のパワーをLHDに入射している。

これらの成果のさらに詳しい内容については、先に述べたように次節以降で記述されている。以上のように、大学及びプ

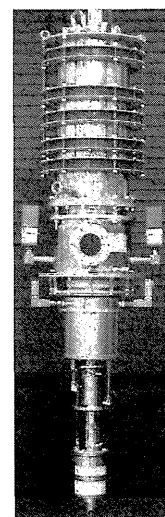


図3 1MWを実証したガンマ10用28GHz、1MW級ジャイロトロン。

ラズマ研究センターの中期目標、中期計画に沿って、核融合研究に広く貢献できる、双方向型共同研究と整合性を保ちながら、新たな研究展開への普遍性の高い研究内容として、端部を持つミラー配位の特徴を有効に活かした、電位・電場、シアフローやITBの物理機構の研究と、そのITERを含むトーラス装置への普遍化・応用研究・将来の外部制御への準備研究、更に広く斯界に貢献する大電力ジャイロトロンの開発研究を推進している。また、それを基盤から支える人材育成・輩出の実績を、積み上げ、核融合研究の進展と活性化に大きく貢献している。今後これらを更に発展・展開し、ITBや電場制御、シアフローの外部能動制御に加え、電場・電位による輸送制御を境界プラズマへ拡張し、開放端磁場配位を利用した境界プラズマ・ダイバータプラズマ研究への展開を視野に入れ、今後も一步一步着実に研究を推し進めていきたい。

#### 【4】 GAMMA10 における電位・電場形成によるドリフト型揺動抑制の研究

GAMMA10 では、磁場による閉じ込めに加えて電位・電場による閉じ込めを行っている。電位は、装置両端部（プラグ・バリア部）に設置された高出力マイクロ波による電子サイクロトロン加熱（ECH）によって、サーマルバリア電位およびプラグ電位を形成し、電子、イオンを効率よく閉じ込めている。GAMMA10 では、高イオン温度モード実験時にドリフト型揺動が観測されており、これがプラグ部 ECH (P-ECH) 印加とともに減衰していることがわかっている。これは、トカマク等環状系装置における H-mode にも関連した現象であり、電位・電場による閉じ込め改善に関してより詳しく調べる必要がある。本年度は、このドリフト型揺動の抑制現象をより詳細に調べるため、電位計測用の金中性粒子ビーム (GNBP) の測定モードを変更し、空間 2 点の電位、電位揺動を 1 ショットで計測できるよう、ビーム偏向電極に矩形波を印加して計測した。さらに、主閉じ込め部であるセントラル部における電位形状を変化させ、揺動の抑制との関係をしらべるため、P-ECH パワーを変えて、電位・電場を詳細に計測した。Fig. 1 に反磁性量（赤の点線）と電子線密度（青線）、電位の時間変化を P-ECH パワー 100 kW, 250 kW, 300 kW 変えて測定したものを示す。P-ECH 100 kW, 250 kW, 300 kW の場合の反磁性量と電子線密度は((a), (c), (e))に示し、P-ECH 100 kW, 250 kW, 300 kW の場合の電位の時間変化は((b), (d), (f))に示した。このとき、 $t = 150$  ms からバリア部 ECH (B-ECH) が印加され、 $t = 155$  ms から P-ECH が印加され、反磁性量、電子線密度、電位が上昇している。Fig. 2 に P-ECH 印加パワーを 100 kW, 250 kW, 300 kW と変化させたときの電位の径方向分布((a) - (c))、及び、電場の径方向分布((d) - (f))を示す。P-ECH 印加前は赤●で示し、印加中は青■で示した。2 点同時計測により電場の計測がより精度よく行えるようになった。P-ECH 印加前の電位分布は、プラズマ中心部で外側より低くなっている下に凸の形状をしているが、P-ECH 印加中は中心部の電位が上昇して上に凸の電位形状になっていることがわかる。Fig. 3 に GNBP で測定した P-ECH パワー毎の電位揺動のドリフト型揺動(8 ~ 12 kHz)に対応するパワースペクトルの最大値をプロットしたものを示す。赤●が P-ECH 印加前、青□が P-ECH 印加中を示す。これを見ると径方向位置に関係なく、ほぼ全位置で電位揺動が減少していることがわかる。次に、Fig. 4 に揺動強度と電場強度の関係を示す。これによると電場が正になると揺動強度が低くなっていることがわかる。以上のことから、GAMMA10 におけるドリフト型揺動の抑制は、次のような解釈ができる。P-ECH 印加前は、電子密度分布、温度分布形状による反磁性ドリフト型揺動が成長し、このとき電位分布も中心部で下に凸のため  $E \times B$  ドリフトも反磁性ドリフト型揺動と同じ方向に回転している。これが、P-ECH 印加によって電位分布形状が変化し、 $E \times B$  ドリフトも反磁性ドリフト型揺動と逆方向に回転して、 $E \times B$  ドリフトシアーにより揺動が抑制されていると考えることができる。今後、GNBP の計測装置の改良によって空間 2 点同時計測を行うこと、ドリフト型揺動の成長過程の計算等を通して、電位による揺動の抑制と閉じ込め改善に関してより詳細に研究を進めていく予定である。

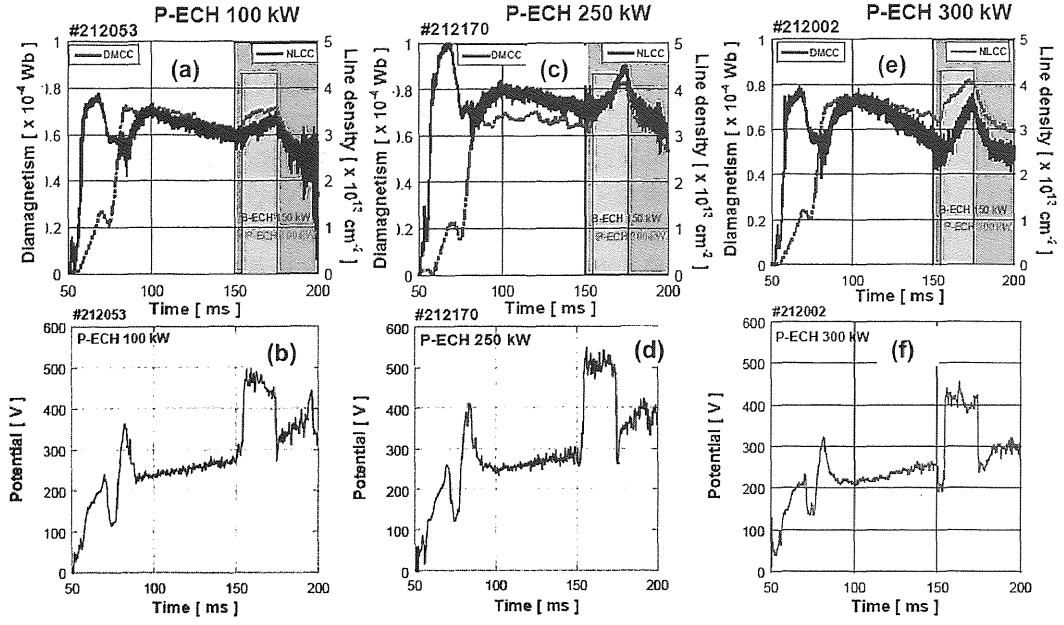


Fig. 1: Temporal evolution of line density (blue solid line) and diamagnetism (red solid line) in (a), (c), and (e), and potentials in (b), (d), and (e) with changing the P-ECH powers of 100 kW, 250 kW, and 300 kW, respectively.

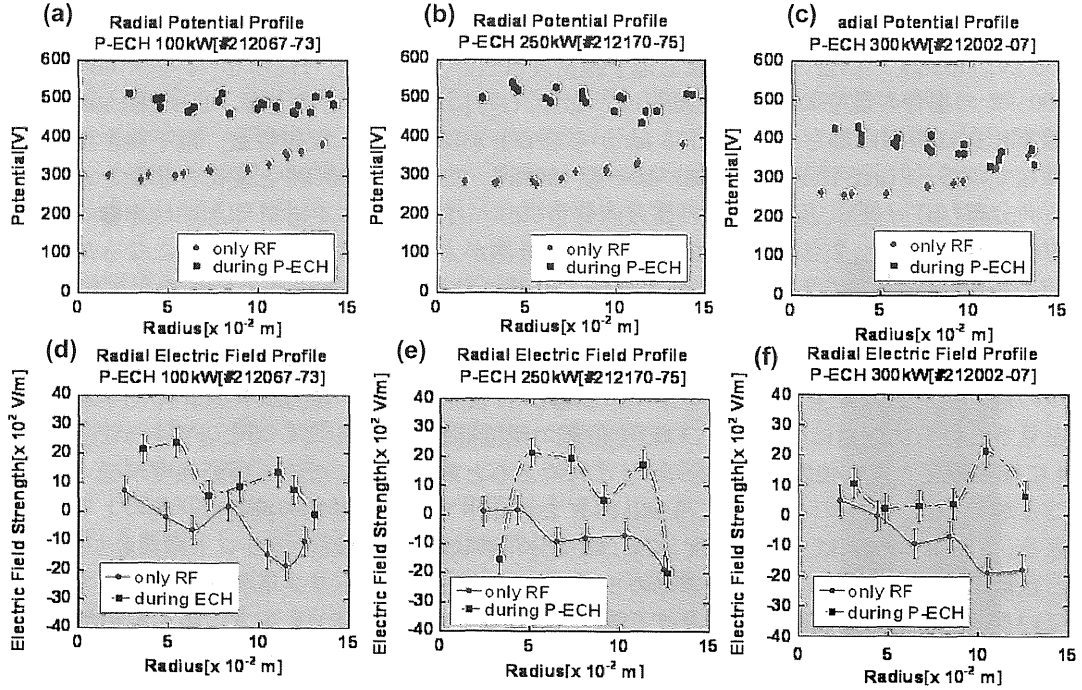


Fig. 2: The radial potential profiles of P-ECH powers of 100 kW (a), 250 kW (b), and 300 kW (c), and the radial electric field profiles of P-ECH powers of 100 kW (d), 250 kW (e), and 300 kW (f), respectively.

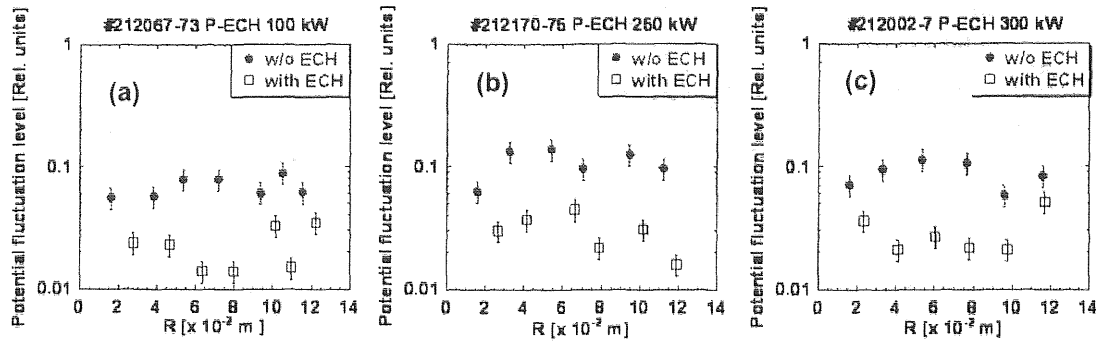


Fig. 3: The potential fluctuation peak around the frequency from 8 kHz to 12 kHz of radial profiles with changing P-ECH powers of 100 kW (a), 250 kW (b), and 300 kW (c), respectively.

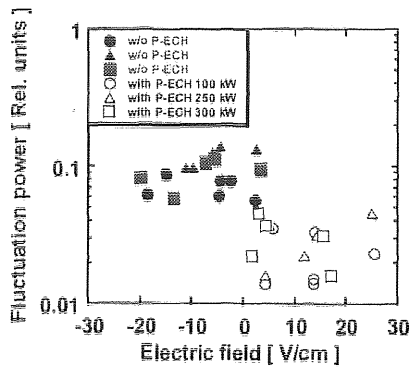


Fig. 4 Relation between the potential fluctuations and the electric fields.

## 【5】 GAMMA 10における金中性粒子ビームプローブ及びエンドプレートを用いた電位低周波揺動の相関解析

### 1. はじめに

タンデムミラー型閉じ込め装置 GAMMA 10 では、磁場に加え、電位・電場を形成して効率のよいプラズマ閉じ込めを形成し、核融合実用に必要不可欠で、未解決な課題である、電位形成並びに電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明を目的に研究を推進している。

生成された電位を計測するために、重イオンビームプローブの一種である金中性粒子ビームプローブ (GNBP) を採用し、計測を行っている (図 1)。GNBP はプラズマの主閉じ込め領域となるセントラル部、電子閉じ込めを担う熱障壁を生成するバリア部に設置されており、加速された金中性粒子をプラズマ中で電離させ、プラズマ外部へと導出される二次ビームのエネルギー変化からコアプラズマにおけるプラズマ電位を計測している。更に、二次ビーム強度がプラズマの密度、温度に依存することから密度に関する情報も同時に得ることができる。

一方、GAMMA 10 両端部にはステンレス製極板のエンドプレートが設置されており、プラズマと接触している (図 2)。エンドプレートは周方向に 4 分割あるいは 8 分割、径方向に 6 分割されており、通常、周方向は短絡している。エンドプレートはセメント抵抗を介して接地されており、これまで抵抗値変更によるプラズマ制御に用いられてきたが、データ取得系の改良を施し、揺動計測に適用した。

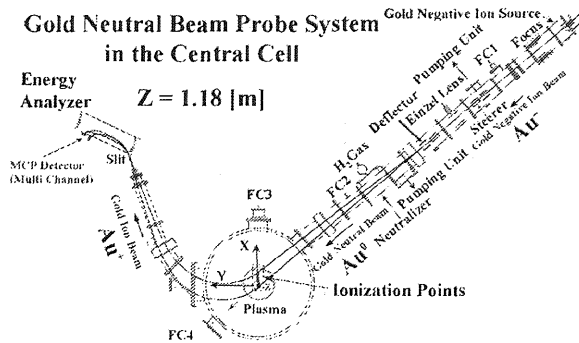


図 1. セントラル部金中性粒子ビームプローブ  
概念図

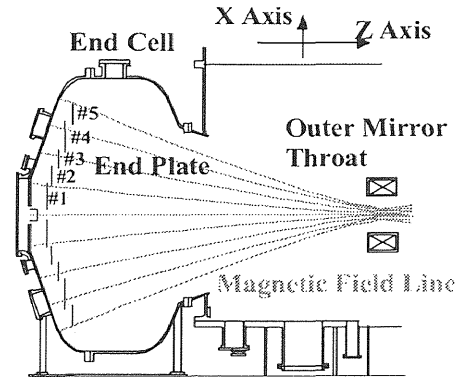


図 2. エンドプレート概念図

## 2. セントラル部GNBPとエンドプレート計測を用いた電位揺動の相関解析

GNBPで観測されたコアプラズマ中の電位揺動において、イオンサイクロトロン加熱時間帯に低周波揺動が観測されている。この低周波領域の揺動は、セントラル部周方向に設置された静電プローブによる波数解析からドリフト波揺動であることを確認した。本研究では、セントラル部に設置されたGNBPと、エンド部に設置されたエンドプレート計測において観測された低周波揺動の相関を検討し、磁力線方向、径方向、周方向への揺動伝搬、径方向輸送の物理機構の究明と共に、今回、新たに適用したエンドプレート計測の評価を行った。

図3(a)、(b)にそれぞれセントラル部GNBPで観測された径方向電位の時間変化、及びエンドプレートで観測された径方向エンドプレート電位の時間変化を示す。GNBPとエンドプレートで観測された径方向電位は両者共に100msから定常になることが分かる。また、セントラル部GNBPで

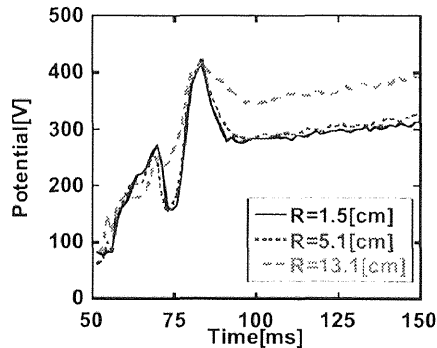


図 3(a). セントラル部径方向電位の時間変化

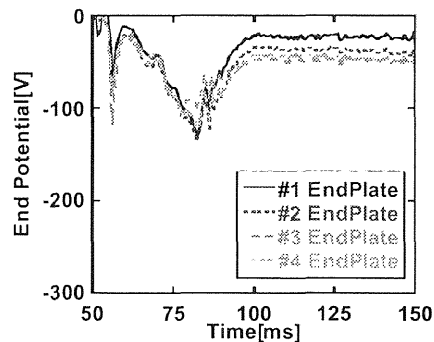


図 3(b). 径方向エンドプレート電位の時間変化

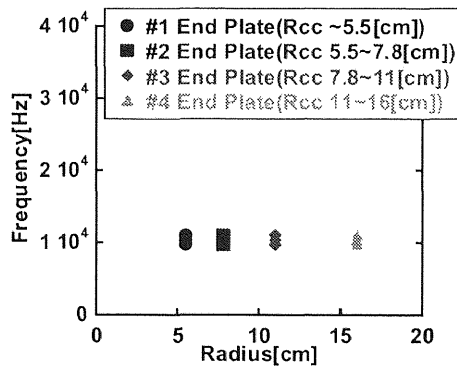


図 4. 径方向エンドプレート電位揺動の周波数分布

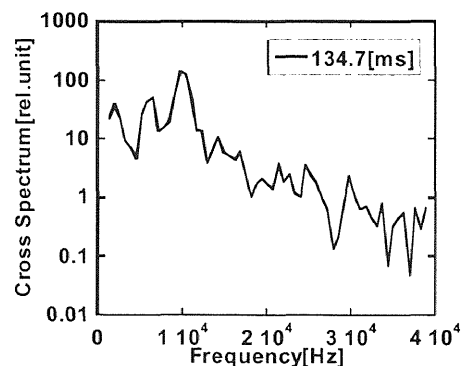


図 5. クロススペクトル



観測された電位揺動スペクトルにおいて、10 kHz 近傍にコヒーレントな揺動が観測され、径方向位置に依らず、周波数、強度共にほぼ一定の値を示した。この 10 kHz 近傍に観測された揺動はセントラル部における高いプラズマ圧力に起因したドリフト波揺動であると考えられる。更に、エンドプレート計測で観測された電位揺動スペクトルにおいても、セントラル部 GNB の計測結果と同様に、10 kHz に強い揺動が観測され、径方向位置に依らず、周波数、強度共にほぼ一定の値を示した(図 4)。エンド部では磁力線が拡散しており、プラズマ圧力が低いため、揺動が発生する可能性が低い。そこで、エンド部で観測された低周波揺動を解明するため、セントラル部電位揺動との相関解析を行った。

図 5 にセントラル部 GNB の電位揺動とエンドプレート電位揺動のクロススペクトルを示す。クロススペクトルにおいて、10 kHz 近傍に強いピークが観測され、コヒーレンスが 0.7 程度と強い相関があることが分かった。エンドプレート計測で観測された 10 kHz 近傍の揺動はセントラル部で観測されたドリフト波揺動と同一のものと考えられる。以上の結果から、高いプラズマ圧力を持つセントラル部で発生したドリフト波揺動は磁力線方向に伝搬し、その特性を維持しつつ、装置端部であるエンド部まで到達していることが分かった。また、エンドプレート計測において、コアプラズマ中の径方向同時計測が可能なが証明された。

## 【6】タンデムミラー GAMMA 10 におけるトムソン散乱計測システムの導入

### 1. はじめに

タンデムミラー GAMMA10 では、高出力マイクロ波による電子加熱を行って高電位生成を行い、磁場に加えて電位でもプラズマを閉じ込めることによってプラズマ性能を向上させている。近年、主閉じ込め領域であるセントラル部への電子直接加熱を行うことによって、電子温度を上昇させる実験を行っている。この電子温度計測は、これまで X 線を利用した計測が主であったため、本研究では、多くの核融合プラズマ実験装置でも実績のあるトムソン散乱計測システムを導入し、これを用いて電子温度を計測し、タンデムミラー型プラズマにおける電子直接加熱による電子温度上昇を調べることを計画した。

### 2. GAMMA10 トムソン散乱計測システム

GAMMA10 で採用したトムソン散乱計測システムは、NIFS の CHS や LHD で採用しているシステムと同様の方式を用いている。高出力の YAG レーザー (1064 nm, 2 J/pulse) をプラズマに入射し、90° 散乱光を集光ミラー ( $\phi$  600 mm, R = 1200 mm) で集光し、光ファイバーバンドル (各チャンネル: input 2 × 3.5 mm, output  $\phi$  3 mm, NA:0.47, 最高 9 チャンネル (現状 3 チャンネル)) で分光器 (5 チャンネルフィルター付き APD 分光器) まで光を伝送するタイプである。GAMMA10 のトムソン散乱計測システムの予定性能は、次のとおりである。計測電子温度範囲: 0.02 ~ 10 keV ( $\Delta T_e \sim 10$  eV)、計測可能範囲:  $\pm 200$  mm ( $\Delta d \sim 20$  mm)、時間分解能: 10 Hz。図 1 に GAMMA10 トムソン散乱計測システムの概略を図 1 に示す。

### 3. システム校正実験

トムソン散乱計測システムの校正として、ポリクロメーターの光学フィルターの校正を核融合科学研究所の標準光源を用いて行った。さらに、GAMMA10 本体の大気開放前を利用して、真空容器内に窒素ガスを 300 Torr まで詰めて、ラマン散乱およびレーリー散乱計測を行い、YAG レーザー光路と散乱光集光系の位置調整とシステム感度の校正を行った。その結果、トムソン散乱光の測定も原理的に S/N 比 1.5 以上で測定可能であることがわかった。真空容器内からの迷光は少なく、本体内までのレーザーの導入部からの迷光の影響が強いことがわかった。

### 4. まとめ

実際に、プラズマ中に YAG レーザーを入射したが、まだ散乱光信号を計測するまでにはいたっていない。今後、光学系の調整、迷光の除去、トリガー系の整備、データ収集系の構築等を行って、温度データおよび密度分布を取得できるようにする計画である。

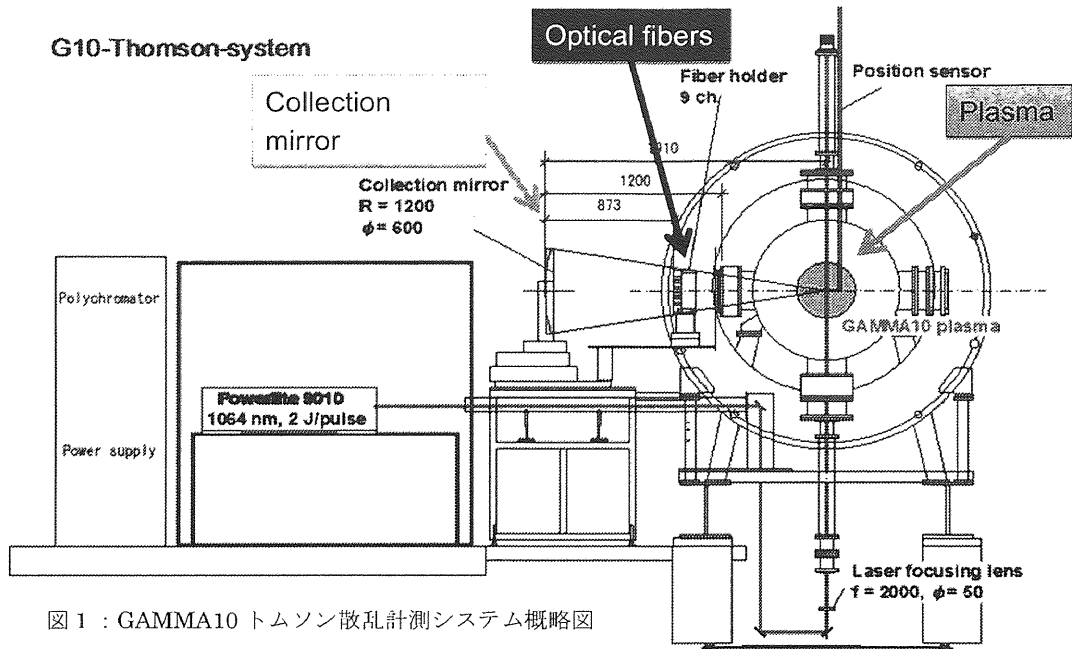


図1：GAMMA10 トムソン散乱計測システム概略図

## 【7】ガンマ10におけるジャイロトロン開発研究と ECRH システム高性能化

### 1. はじめに

タンデムミラーGAMMA10では、プラズマ閉じ込め性能の研究と改善のため、プラグ及びセントラル部 ECRH(電子サイクロトロン共鳴加熱)の大電力化を進めている。2004、2005年に新規 500kW ジャイロトロンを導入し、大電力 ECRH 実験を進めることで、イオン閉じ込め電位は入射電力とともに上昇し、従来の電位を大きく上回る世界最高の閉じ込め電位を達成した。プラズマ・パラメータ向上の為に、さらに高密度において、より高い閉じ込め電位を生成すること、中央部の高エネルギーイオンの電子冷却を抑制すること、プラズマの不安定性と揺動の物理的解明、及びその抑制が重要な課題である。そのためには、ジャイロトロンを中心とした ECRH システムの大電力化、長パルス化が必要である。

2009年度においては、ECRH アンテナ性能/プラズマ加熱効率の向上を目指した研究、既存ジャイロトロンの高出力/長パルスでの安定動作を行うための研究を実施するとともに、新規に設計・製作した 28GHz-1MW ジャイロトロン動作性能試験を行った。合わせて、核融合科学研究所(NIFS)との共同研究として、出力を 1.5MW に増強した NIFS の LHD 装置用 77GHz ジャイロトロン動作性能試験、新規 154GHz ジャイロトロン概略設計を行った。また、ジャイロトロンの高出力/長パルス動作に必要な電源の増力改造を進めた。

### 2. ガンマ10 ECRH システムの高性能化

#### (1) セントラル ECRH 用アンテナ・伝送系の改良

セントラル部のイオンは 6keV~7keV と高温であるが、電子は 100eV 以下で、この低温電子が、高温イオンの閉じ込めの制限やイオン温度の大きな異方性の一因となっていた。これを改善するために、セントラル部 ECRH において、ジャイロトロンの大電力化、偏波器の導入やアンテナシステムの高効率化等の RF 伝送系の改良を進めてきた。2008年度に、RF の垂直方向吸収位置制御のため M1 ミラーを可動式とし、M2 ミラー形状を改良し伝送効率を改善したアンテナ系をガンマ10に取り付け、プラズマ実験に適応した。

2009年度は、垂直入射位置を前年度に得られた最適位置に固定、水平方向入射位置を制御するアンテナ系を導入し最適化実験を行った。プラズマ蓄積エネルギーに比例する反磁性量測定、軟 X

線測定より、Xモード100%となる偏波において、アンテナ角度0度で入射する場合が最適である事が確認された。また、最適入射条件で無い場合に、電子温度上昇の傾向があるが、反磁性量が減少する事が観測された。この時、径方向軟X線強度分布は非軸対称となっており、非軸対称加熱によるイオンの径方向拡散の増大が考えられた。又、非吸収RFの周辺プラズマ加熱に起因する境界部放出中性ガスによる荷電交換損失も考えられた。2010年度は、非吸収RFを低減するためRF伝送効率を向上したアンテナ系を設置し、ECRH加熱の高効率化と加熱物理の探求を進める予定である。

## (2) 28GHz-500kW ジャイロトロン長のパルス化

ジャイロトロンを用いた ECRH の最も重要な課題は、プラグ部の電子加熱による閉じ込め電位形成である。GAMMA10 セントラル部の高温イオンは、この閉じ込め電位により軸方向に閉じ込められる。さらに、ECRHにより形成される径方向電場シアによって、セントラル部プラズマは安定に閉じ込められると考えられている。この事により、セントラル部におけるプラズマの蓄積エネルギーは、ECRHの印加時間とともに増大する。プラズマ・パラメータ向上のためには、ECRHの加熱源であるジャイロトロンの高出力、長パルス化は必要不可欠である。このため、既設28GHz-500kW ジャイロトロンにおいては、前年度に引き続き、ジャイロトロンが発振、動作に影響する反射波を吸収/抑制するために、整合器(MOU)内のRF吸収機構の強化を行った。RF吸収機構は、テフロンチューブに水を流すことでRFを吸収すると同時に、水出入り口の水温変化より吸収RFの絶対値を測定できるようにした。図1にジャイロトロン設定出力に対するMOUにおけるRF損失率を示す。設計上のMOU伝送損失に加え、RFビームのモード純度やMOUミラー等のアライメントずれ等による損失が存在する。プラズマへの入射の場合、MOU損失電力が増加しておりプラズマからの反射が予想以上に大きい事が解った。これらの損失電力の抑制/処理が、今後の長パルス化の課題である。

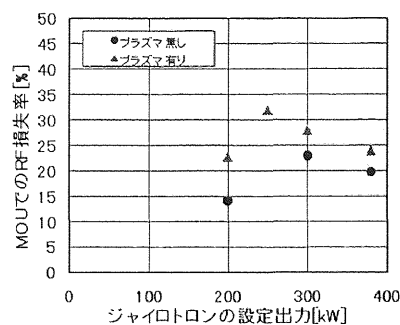


図1 整合器損失電力測定

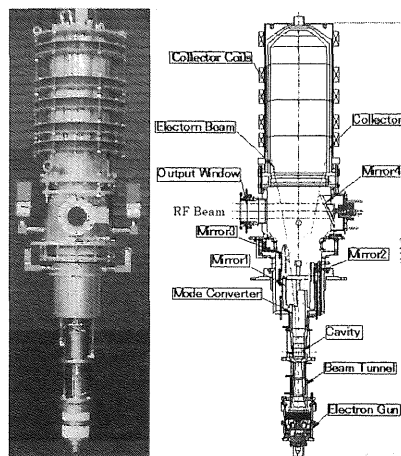


図2 28GHz-1MW ジャイロトロン

## 3. ジャイロトロン開発研究

### (1) 28GHz-1MW ジャイロトロン試験

プラズマの閉じ込め電位は、プラグ部 ECRH の電力増加につれ増大し、現状において飽和傾向は観測されていない。閉じ込め電位向上の為には、ジャイロトロン出力アップが必須であり、28GHz-1MW ジャイロトロン設計を進め、2008年度に、ジャイロトロン製作を完了した。図2にジャイロトロン外観写真と構造断面図を示す。

2009年度においては、動作に必要な超電導電磁石(SCM)をNIFSより借用し動作試験を実施した。図3にRF出力及び出力効率のビーム電流依存性を示す。ビーム電流  $I_k=40A$  にて、出力1.05MWを得、目標性能を達成した。最大効率は40%であった。本年度、下記(4)に示すように、電源の長パルス化改造も実施しており、

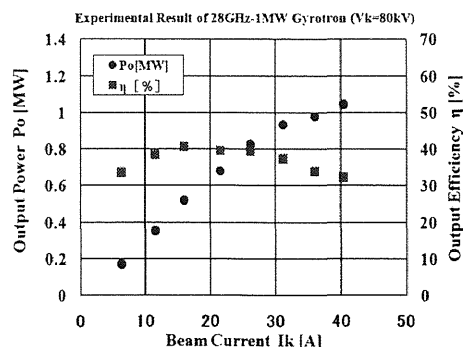


図3 28GHz-1MW ジャイロトロン出力特性

2010 年度に 1MW-1s 以上の動作を目標に長パルス試験を行う予定である。

### (2) NIFS 用 77GHz-MW ジャイロトロンの開発

ジャイロトロン開発の共同研究は、NIFS と筑波大学間の共同研究協力協定を基軸に、ITER 用ジャイロトロンの開発を行っている日本原子力研究開発機構 (JAEA) と筑波大学間、大電力ジャイロトロン製造メーカーである東芝電子管デバイス株式会社 (TETD) と筑波大学間の共同研究協力も踏まえ実施されている。2006 年度に周波数 77GHz、目標出力 1 MW の NIFS の大型ヘリカル装置 (LHD) 用ジャイロトロン 1 号管の開発を開始し、2007 年度には、2 号管の開発を行った。短パルス試験において、整合器 (MOU) 出力で 1MW 以上の出力を確認するとともに、2008 年度末までに 0.76MW-5s、0.8MW-3s 等の長パルス動作を達成した。また、LHD 実験において 300kW-60s (#1)、120 kW-60s (#2) のプラズマ入射が行われ、LHD 実験に貢献した。2008 年度には、1 号管、2 号管の試験結果をフィードバックし、単管出力 1.5MW でパルス幅 2s 以上、1.2MW で 10s 以上、0.3MW で連続運転を設計目標とした 3 号管の設計を行い、ジャイロトロンの製作を行った。3 号管においては、出力を 1.5MW に増強するため、電子銃、空洞共振器、モード変換器/ミラー系の設計改良を行った。

2009 年度においては、3 号管の動作試験を実施した。図 4 に PRC 試験における窓出力、及び出力効率のビーム電流依存性を 1 号管及び 2 号管の試験結果と合わせて示す (CPD 無し)。3 号管において、最大出力 1.26MW、最大出力効率 31.2% を得た。1, 2 号管の PRC での試験結果に比べ、出力効率が ~3% 改善された (PRC 試験電源は、電源定格、安定性の問題で、ビーム電流  $I_k < 50A$  で制限)。1, 2 号管に比べ CPD 電圧を深く印加できるようになり、電子銃パラメータの改善が確認され、これまでで最高の総合効率 49.4% を得た。筑波大学における動作試験の後、NIFS の実機装置に装着し試験を実施した。ビーム電流 70A で 1.55MW が得られ、設計目標の 1.5MW 出力を達成した。MOU の透過率の測定値は 96% であり、ジャイロトロン窓出力では 1.6MW となる。1~3 号管の長パルス試験を行い 1MW-5s、1.5MW-1.6s、0.1MW-1800s、0.2MW-1260s 等を達成した (表 1)。LHD 実験においては、3 台の 77GHz ジャイロトロンにより 3.1MW のプラズマ入射が達成され、効果的な局所加熱、長時間プラズマの維持に必要な密度制御などにおいて、顕著な結果が得られた。ECH プラズマにおける 2MW の入射を行い、過去の最大蓄積エネルギー 150kJ を上回る 200kJ を記録した。また、NBI プラズマへの 2MW 入射においてバルク電子温度が 1.7keV より 2.2keV に上昇するなど、77GHz ジャイロトロンによる ECH の有効性が確認された。

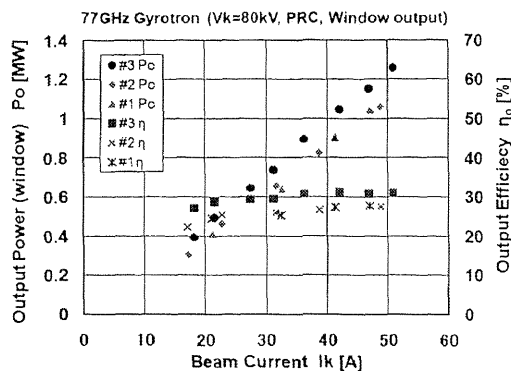


図 4 77GHz ジャイロトロン出力特性

表 1 77GHz ジャイロトロン達成パラメータ

Achieved Parameter of 77GHz Gyrotrons (MOU Output)			
Tube No.	Design	Short Pulse Operation	Long Pulse Operation
#1	1MW/5s 0.3MW/CW	1.11MW/33.9%(28.6%)/4ms	1.01MW/33.0%(25.6%)/5s
		1.07MW/39.4%(30.5%)/4ms	0.29MW/29.2%(22.6%)/60s 0.13MW/21.7%(16.3%)/935s
#2	1.2MW/5s 0.3MW/CW	1.06MW/(27.5%)/1ms	1.10MW/29.8%(24.2%)/1s
		0.75MW/36.6%(28.4%)/4ms	1.02MW/30.3%(24.6%)/5s 0.2MW/19.8%(15.4%)/370s 0.12MW/11.3%(9.7%)/1800s
		Anode Voltage Control	1.31MW/38.2%(26.7%)/1s
#3	1.5MW/2s 1.2MW/10s 0.3MW/CW	1.55MW/34.0%(27.6%)/4ms	1.60MW/36.6%(29.7%)/0.5s
		1.2MW/10s	1.53MW/36.0%(29.3%)/1.6s
		0.64MW/49.4%(28.4%)/2ms	0.91MW/40.9%(33.2%)/1.8s 0.2MW/33.7%(25.3%)/1260s

### (3) NIFS 用 154GHz ジャイロトロンの設計

LHD における ECH の第 2 高調波加熱用として 154GHz ジャイロトロンの設計を開始した。154GHz ジャイロトロンの設計仕様を表 2 に示す。RF 出力と動作パルス幅としては、1MW 以上の出力で 5s 以上、0.3MW 以上で連続動作を設計目標とした。設計においては、既設 77GHz ジャイロトロンとその設備との共通性/互換性を可能な限り持たせる事を考慮する事とした。空洞共振器の発振モードとして、 $TE_{31,8}$ 、 $TE_{28,8}$ 、 $TE_{28,12}$  モードを候補とし、空洞共振器、電子銃、モード変換器、コレクタ、

超電導電磁石 (SCM)の概略設計を進めた。図 5 にピッチファクタ  $\alpha$  をパラメータとした、発振電力と発振効率のビーム電流依存性の一例を示す。整合器出力 1MW 以上を得るための空洞発振電力 1.1MW がビーム電流  $k=50A$ 、 $\alpha=1.0$  で得られている。又、スペントビームの最低エネルギーは 35kV 以上であり、実際の電子ビームパラメータの劣化を低く抑えられれば、CPD 印加により総合効率 50%を得られると期待される。今後、SCM の磁場分布設計と、それに平行して進めるコレクタ設計等の結果も踏まえ、発振モードを決定する。決定された発振モードに対し、各コンポーネントの詳細設計を進める予定である。

表 2 154GHz ジャイロトロン設計パラメータ

周波数	154GHz
出力	1MW以上 0.3MW以上
パルス幅	5s以上 連続動作
総合効率	50%
ビーム電圧	80kV
ビーム電流	50A以上
電子銃	3極
ビームトンネル	SiCろう付け
放射器/ミラー	TEM <sub>00</sub> 出力 モード純度90%以上
出力窓	ダイヤモンド
DCブレード	SiN
コレクタ	CPD 強制水冷

#### (4) 1MW 長パルス・ジャイロトロン試験電源の増力

前記 3. (2) (3) に示した様に、NIFS との共同研究として MW・長パルス・ジャイロトロンの開発を行っているが、筑波大学における性能試験に使用する電源は、41GHz-200kW ジャイロトロン用電源を改造したものであり、短パルス試験のみで、長パルス試験が行えない状況にある。ジャイロトロンの共同研究を進展させる上で、電源の長パルス化改造は大変重要な課題であり、2008 年度に引続き増設、改造を実施した。制御装置を中心とした機器の製作/配線、総合調整/運転試験を実施し、電源の長パルス化改造をひとまず終えた。電源の動作試験は模擬負荷抵抗試験で実施した。抵抗容量制限により、41.6kV-5.8A-0.5s、60.8kV-8.4A-0.2s までの試験となったが、この範囲において大きな問題は無かった。2010 年度に、超電導電磁石を借用し、28GHz-1MW ジャイロトロン負荷にて 50A-1s 以上の動作確認を目標に試験を行う予定である。

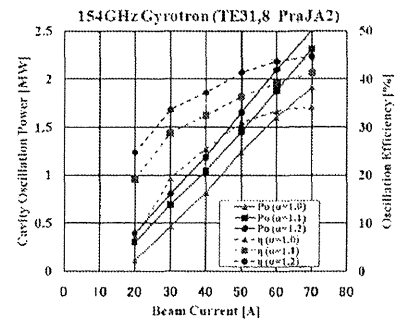


図 5 154GHz 空洞共振器設計

### 【8】ガンマ 10 セントラル部基本波電子加熱実験

ガンマ 10 において、電子サイクロトロン加熱 (ECH) は、高いプラズマ閉じ込め電位の生成及び高い電子温度の達成に、本質的なツールである。主要閉じ込め領域であるセントラル部では、イオン温度に比べて電子温度が低く、イオン・サイクロトロン加熱 (ICH) により生成されたイオン温度が数 keV の高温イオンが、電子との衝突により、エネルギーを損失する事が問題となっている。従って、セントラル部の電子温度を上げて、高温イオンの電子ドラッグによるエネルギー損失を抑制することは重要な研究課題である。

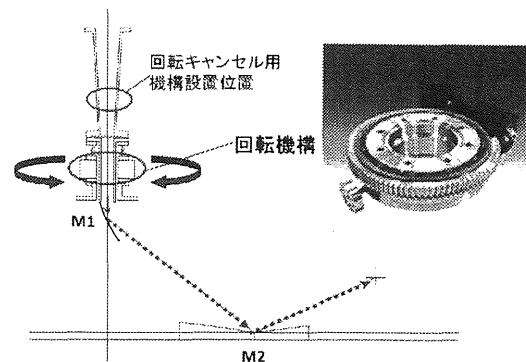


図 1 セントラル部 ECH アンテナの回転機構。

平成 21 年度は、セントラル部 ECH 伝送ミラーの導波管と一体となっている反射鏡 (M1) を回転させることで、共鳴層での入射位置を調整できるようにした (図 1)。また、プラズマへの効率的な加熱を行えるように、偏波器による入射偏波依存性を調べた。これらの、入射位置依存性、入射偏波依存性のプラズマ応答を詳細に調べるため、制動放射 X 線の空間分布計測が可能なマイクロ・チャンネル・プレートを用いた X 線空間分布計測を実施した。以上の改良・実験の結果、次の結果が得られた。①入射偏波の 0-mode 割合が高くな

ると、X線強度分布の非対称性が大きくなる。②入射パワーが高くなると、X線強度分布の非対称性が大きくなる。③入射位置を変化させると、反磁性量等に最適な位置(中心軸上)がある。以上のことから、プラズマに吸収されていないパワー、回折による散乱パワーが大きいほど、プラズマの非対称性が大きくなり、プラズマ性能が劣化する傾向があることがわかった(図2, 図3)。

以上のことから、より安定・高効率な電子加熱を行うためには、伝送途中で回折等により散乱される不要なRFモードをさらに低減させる必要があると考えられる。

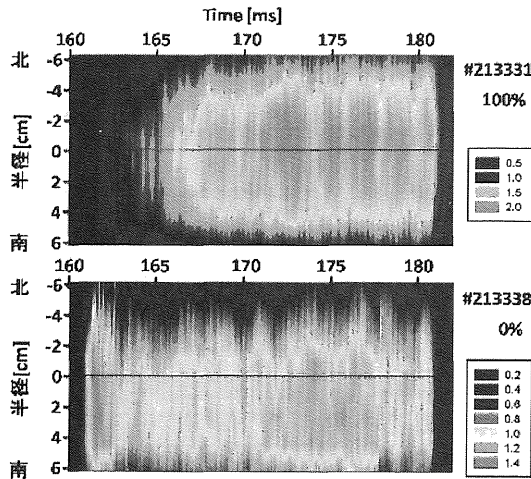


図2 軟X線強度の空間分布。上のグラフが、入射偏波モードX-modeの割合が100%のデータ。下のグラフは、入射偏波モードX-modeの割合が0%の時のデータ。X-modeの割合が100%の時は、X強度のピークが中心軸に対して、対称であるのに対して、0%の時は、強度のピークが南側にずれている。

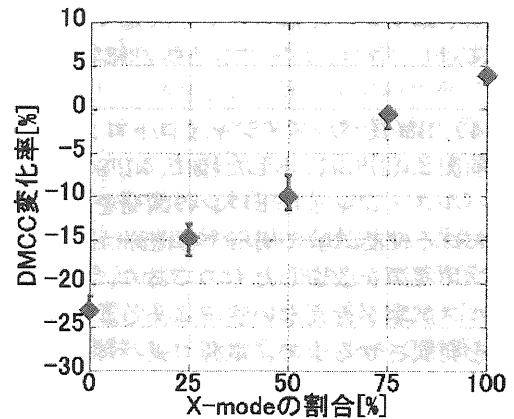


図3 反磁性量変化の入射偏波依存性。ECH印加前に対して印加後の反磁性量の変化量を縦軸に、入射偏波のX-modeの割合を横軸にプロット。X-modeの割合が低い程、反磁性量の劣化が大きくなる傾向が見られる。

## 【9】H $\alpha$ 線検出器を用いたガンマ10セントラル部におけるプラズマ挙動解析

### 1. はじめに

H $\alpha$ 線は水素の遷移光であるバルマー系列線で、その発光強度は電子密度と中性粒子密度の積に比例する。従って、プラズマから放射されるH $\alpha$ 線の発光強度には水素の中性粒子密度及びプラズマ密度の情報が直接に反映されていることから、H $\alpha$ 線の発光強度はプラズマ挙動の解析への有力な指標となる。タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置ガンマ10には軸方向H $\alpha$ 線検出器がガンマ10の磁力線に沿って設置されており、それぞれミッドプレーン(Z=0 cm)より、西側へ2か所、Z = +370 cm, +100 cm, 東側へ7か所、-1 cm, -71 cm, -141 cm, -240 cm, -310 cm, -520 cm, -670 cmに設置されている。また、ガンマ10の内部にはプラズマ径を制御するための円盤状のリミターが設置してある。Z=+30cm付近にセントラルリミター(CCリミター), z=+100 cm, -155 cm付近に、それぞれ西アイリスリミター(Iris-W), 東アイリスリミター(Iris-E)がある。CCリミタ

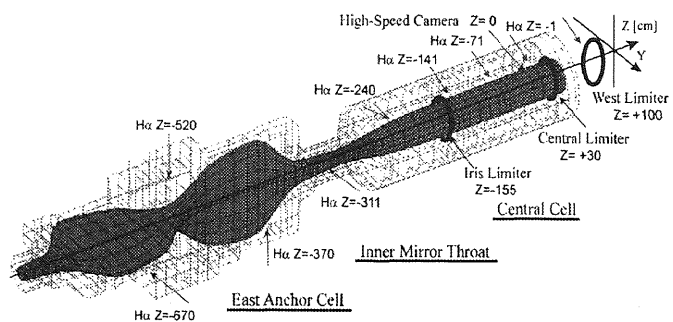


図1 H $\alpha$ 線検出器と各リミターの配置

一の内径は $\phi = 400$  mmで固定されている。一方、アイリスリミターは東西に同じものが設置されており、真空容器外部から歯車を回すことで、内径を $340 \text{ mm} \leq \phi \leq 400$  mmまで変化させることが出来る。図1に $H\alpha$ 線検出器と各リミターの配置図を示す。

ガンマ10では、電子サイクロトロン加熱(ECH)によって、軸方向の閉じ込め電位の形成(P-ECH)とセントラル部の電子加熱(C-ECH)を行っている。これらのECH実験において、各ECHの時間帯にプラズマ性能の劣化が観測されることがある。また、それらのプラズマ性能の劣化は、リミター径に依存性があることが分かった。ここでは、各ECHの効果的な運用に必要なリミター径の最適値を模索するために、プラズマ・壁相互作用の観点から、プラズマ性能の劣化のメカニズムについて考察を行った。本研究は、リミターによるプラズマ制御によってプラズマ閉じ込め性能を向上させるため、プラズマのリミター径依存性とプラズマ持続性を調べることにより、リミター径の最適化条件を模索することである。

## 2. セントラル部リミター変更実験

今回、各ECHのパワーを比較的高い設定にして、セントラル部プラズマの高性能化を目的として、セントラル部の東西に設置されているアイリスリミター(Iris-E, Iris-W)を変化させた実験を行った。図2はリミター径が350mm (a)と380mm (b)の場合のプラズマパラメータと $H\alpha$ 発光輝度の時間変化を示したものである。(a)では、各ECH時間帯において蓄積エネルギーが大きく減少しており、減少に伴って $H\alpha$ 発光輝度が強くなっていることがわかる。これはリミター近傍でリミターとプラズマとの強い相互作用により大量のリサイクリングガスが生成され、これによるガス冷却が蓄積エネルギーの減少の原因となっていると考えられる。一方、(b)の場合、P-ECH時間帯では電位閉じ込めによって蓄積エネルギーが増加する。リミター径が十分に広いことから、(a)のようなリミターとの強い相互作用を起こすことはない。しかし、C-ECH時間帯ではプラズマが消滅してしまうことが分かった。

以上のことから、P-ECH時間帯では、プラズマ性能の劣化のメカニズムはリミターとの強い相互作用に伴うガスによるプラズマの冷却であると考えられる。しかし、C-ECH時間帯では、(b)の場合に、同様のメカニズムではプラズマ性能の劣化の説明がつかない。C-ECH時間帯に径方向損失が増加することは、プローブによる周辺プラズマ計測等より分かっているため、この観点から検証してみる。図3は各リミター径に対する、各ECH印加直前の電子線密度(a)と $H\alpha$ 発光輝度(b)の依存性を示したものである。この図から、リミター径が広い時は、リミターとの相互作用が小さく

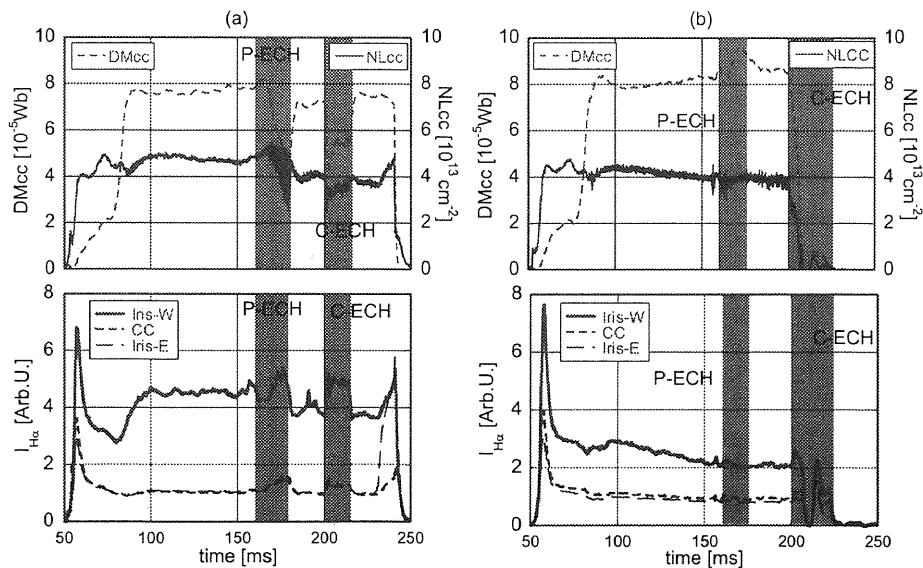


図2 リミター変更実験におけるプラズマパラメータの時間変化  
リミター径： $\phi=350$ mm (a),  $\phi=380$ mm (b)

なり、リサイクリングガスによるガス供給が少なくなっていることがわかる。つまり、プラズマへのガス供給が少ない状態でC-ECHを印加すると、C-ECHによる径方向損失の助長がプラズマ粒子の枯渇を引き起こし、このことがC-ECH印加によるプラズマ消滅のメカニズムであると考えられる。

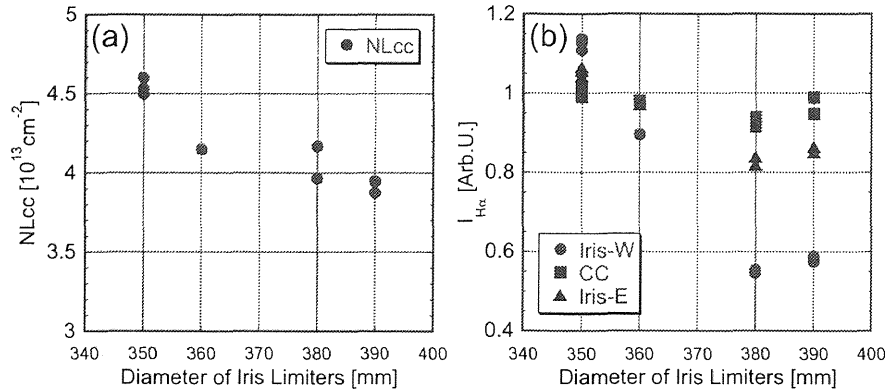


図3 リミター径依存性：プラズマ電子線密度(a)、 $H\alpha$ 線強度(b)

### 3. モンテカルロ中性粒子輸送シミュレーション解析

以上の仮説を検証するために、中性粒子輸送コード( DEGAS )を用いて、リミター径に対するリサイクリングガスの量の変化とZ軸方向の拡散の度合いを調べた。今回シミュレーションで用いた三次元モデルを図4に示す。従来のガンマ10セントラル部メッシュは、図1に示すようにセントラル部リミター ( $Z = +30 \text{ cm}$ ) から東アンカー部 ( $Z = -760 \text{ cm}$ ) にかけて構築されていたのに対して、今回セントラル部西スロート部 ( $Z = +300 \text{ cm}$ ) まで拡張されている。一方東側はアンカー中央部 ( $Z = -520 \text{ cm}$ ) までに限定している。内部には、東西のアイリスリミターが設定されている。

図5は、GP#3とIris-Eに粒子源を与え、各ソースからの $H\alpha$ 発光輝度のZ軸分布を示したものである。図から、リミター径に対してリサイクリングガスの量が顕著に対応することがわかる。また、 $z = -245 \text{ cm}$ 付近にあるC-ECH共鳴層でのリサイクリングガスの量に注目してみると、GP#3の影響が大きいとはいえ、リミター径の違いが共鳴層付近でのリサイクリングガス量の差に表れている。C-ECHによってリサイクリングガスが電離

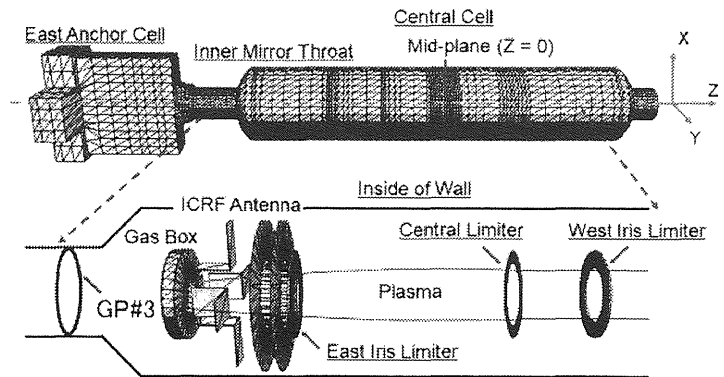


図4 DEGASにおける三次元メッシュモデル

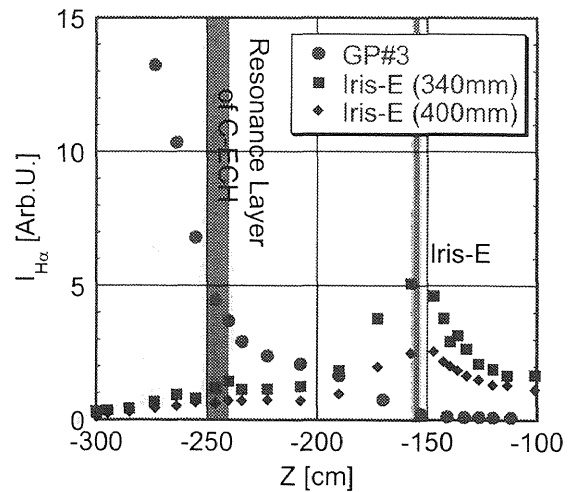


図5 DEGASシミュレーション結果



されることにより、プラズマ粒子となることを考慮すると、共鳴層近傍のリサイクリングガスの量がプラズマ粒子の生成量に影響があると考えられる。したがって、DEGAS によるシミュレーションから仮説を裏付けるのに十分な結果が得られた。

#### 4. まとめ

各 ECH 印加に対するプラズマ性能の劣化を引き起こすメカニズムの解明に有益な知見を得た。今後はセントラル部全体に対するリサイクリングガスの影響を調べ、RF によるプラズマ生成に対する影響も併せて調べてゆく。

### 【10】 高速カメラによる ECH 印加時のガンマ 10 プラズマの挙動解析

#### 1. はじめに

筑波大学プラズマ研究センターでは、タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置ガンマ 10 (図 1) を用いて、磁場と電場によるプラズマの閉じ込めを研究している。このガンマ 10 のセントラル部には、高速カメラが設置されており、プラズマの二次元イメージ観測が行われている。この高速カメラを用いた観測から、瞬間的な二次元イメージを捉えることができ、プラズマの形状や位置、動きに関する有用な情報を得ることができる。ガンマ 10 では、高速カメラはセントラル部ミッドプレーンに設置されており、水平方向にプラズマを観測している。セントラル部ミッドプレーン付近には、セントラルリミターが設置されているため、プラズマとリミターとの相互作用によって発光する様子を観測することが出来る。

本研究の目的は、プラズマの発光の揺動・回転などが複合した複雑な乱流、動きの計測を通して、プラズマの乱流構造や形成過程について物理的なメカニズムを理解することである。

#### 2. セントラル部 ECH 実験における高速カメラ計測

セントラル部に設置されている ECH ジャイロトロン(28GHz-500kW)が入射条件最適化のため、その入射アンテナが垂直方向へ可動できるように改造された。アンテナ位置を変更することによって、ジャイロトロンによる高周波のプラズマへの吸収面が、従来固定されていた位置から 10 mm 程度、垂直方向へずらすことが可能となる。それぞれのアンテナ位置におけるプラズマの挙動を高速カメラを用いて計測を行った。

図 2 は、各アンテナ位置におけるプラズマの反磁性量と電子線密度を表しており、(a)、(b) はそれぞれ C-ECH アンテナ位置が +10 mm、-9 mm である。ただし、従来のアンテナ位置を 0 mm としている。この図から判るように、両ショットにおいて、C-, P-, B-ECH 重畳によって、反磁性量が上昇しているものの、アンテナ位置が高い場合(図 2 (a))では、186ms 辺りあたりから減少を始めることが判る。一方、図 2 (b) から ECH 重畳中において反磁性量は上昇後、安定している。これらのショットにおける高速カメラによる計測結果を図 3 に示す。図 3 (a) では、計測時のプラズマの発光の様子を表し、(b)、(c) では図 3 (a) における白線上の発光輝度の時間変化を表しており、それぞれ C-ECH アンテナ位置が +10mm、-9mm である。アンテナ位置の高い場合(図 3 (a))では反磁

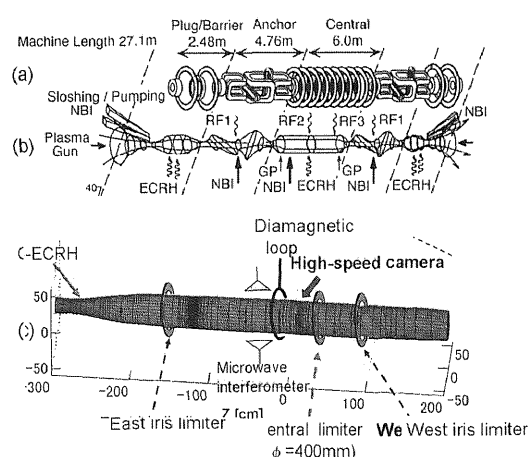


図 1: GAMMA 10 の概念図。(a) : コイルの配置, (b) : 加熱装置の配置 (c) : リミターと計測器の配置

性量が減少を始める 186ms あたりからリミター下部で発光が強まっていくことがわかる。一方で図 3 (c) ではそのような発光は見られない。

以上のことから、従来の入射アンテナが設定されていた位置よりも高い場合には、ECRH 重畳中にリミターとの相互作用によって強い発光が生じ、反磁性量が減少する現象が観測された。このとき、周波数解析を行ったところ、およそ 5-6kHz の揺動が生じていることが判った。またこの現象について、電子密度との相関を調べたところ、ECH 印加によってプラズマ中心部の電子密度が上昇し、なんらかの限界に至ると、径方向粒子拡散が生じ、電子密度径方向分布が平坦化することがわかった。この粒子拡散によって、プラズマ周辺部の電子密度が増加し、リミターとの相互作用が強まり、発光が増大していることがわかった。また、この現象は ECH のアンテナ位置が高い場合ほど、粒子拡散は強く生じていることが考えられる。この点は、発光が強くなる傾向があることから、定性的に確認することができた。

### 3. まとめ

高速カメラを用いて、セントラル部 ECH アンテナ位置の最適化実験における、アンテナ位置に対するプラズマの発光とプラズマのマクロなパラメータに重要な相関があることが明らかになった。今後、ECRH 入射によるプラズマ加熱の最適化とプラズマ性能向上のために、データを蓄積し、解析を進めていく必要がある。

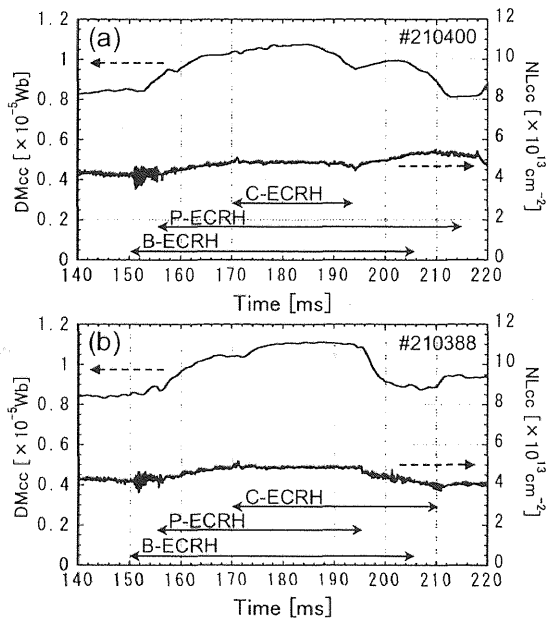


図2 反磁性量と電子線密度の時間変化。(a)アンテナ位置 +10 mm, (b): アンテナ位置 -9 mm

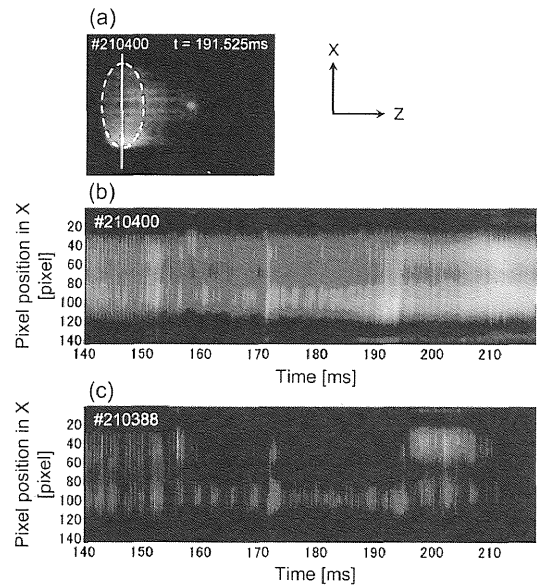


図3 (a): 高速カメラによる観測例. (b): (a)における白線上の発光輝度の時間変化(アンテナ位置 +10 mm) (c): (a)における白線上の発光輝度(アンテナ位置 -9mm).

### 【11】 初期プラズマ生成と高周波を用いた加熱、及び、加熱プラズマの巨視的・微視的挙動の解析

イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の高周波を用い、プラズマ中における電位形成やプラズマ閉じ込め物理を研究するための標的プラズマ生成、イオン加熱、また、高性能プラズマを制御するうえで不可欠なプラズマの巨視的・微視的挙動の解析を進めている。平成 21 年度には、計画の中の GAMMA10 装置改造を念頭に、プラズマ全体の MHD 安定化を東アンカー部のみで確保することを試みた。東アンカー部に設置されている棒状アンテナに低周波数で動作するように改造した RF3

システムを用いてイオンサイクロトロン共鳴加熱を行った。アンカー部反磁性量の増大とフルート型揺動の抑制を確認した。また、プラズマ中に発生する低周波数揺動とイオンとの相互作用を明らかとすることを目的に半導体検出器 (ccHED) の高エネルギーイオン信号上に観測される揺動に着目し、静電プローブによる揺動信号との位相差を計測した。高エネルギーイオンのピッチ角に強く依存する位相差を確認し、ミラー反射点における粒子-波動相互作用に関連するデータの取得を行った。原子力研究開発機構との協力研究に関して、重水素放電中の DD 反応生成プロトンに起因するイオンサイクロトロン放射を初めて同定するとともにその励起機構に関して考察を行った。

### 1. アンカー部直接加熱によるプラズマの安定維持

GAMMA10 においては、セントラル部に設置した高周波アンテナにより 10MHz 付近の高周波 (RF1) を用いたプラズマ生成とアンカー部の加熱を実現している。アンカー部の加熱においては、セントラル部から内側変換部を伝播するアルベン速波が遅波にモード変換してアンカー部におけるサイクロトロン共鳴層でイオンを加熱することがこれまでの研究で明らかとなっている。アンカー部の加熱の最適化とプラズマ生成の最適条件を別々に設定することを念頭に、アンカー部への高周波電力の直接入射を試みた。また、将来計画として検討を進めている西側アンカー部を軸対称ダイバータ配位に置き換えるとき、これまでと同じ東側アンカー部の安定効果だけではプラズマを安定維持できない可能性があることから、特に東側アンカー部に設置されたアンテナを用いて直接アンカー部を加熱し、GAMMA10 全体の安定化が確保されることを確認することが必要である。新たに動作周波数を RF1 同じ周波数帯に改造した RF3 を用いて、東西アンカー部に設置されている棒状アンテナに給電した。図 1 (a) に典型的な線密度と反磁性量の信号を示した。図 1 (b) は、プラズマ生成とアンカー加熱に用いられる RF1 とセントラル加熱に用いられる RF2 及び RF3 の各アンテナへの入射電力を示している。放電の後半 200msec より RF3 が印加され顕著なアンカー部反磁性量の増加が観測される。図 1 (c) は、それぞれのアンテナにおける負荷抵抗を示しており、高周波波動励起の効率を表している。RF1 に用いられる TypeIII アンテナにおいては、プラズマ生成を含むため波動励起の効率の指標とならないことから負荷抵抗を算出していない。

RF2 によるセントラルセルイオン加熱と RF3 によるアンカー部イオン加熱を比較することができる。RF3 における小さなアンテナ負荷抵抗は、アンテナ設置位置における磁場強度との関係が計算より示されている。フルート型の揺動の発生に起因してプラズマが崩壊する放電後半において、RF3 によるアンカー部加熱を重畳することにより、揺動の抑制と放電の持続を確認した。現在、アンカー部加熱用の高周波アンテナの設計とアンカー部直接加熱による GAMMA10 運転領域の拡大を目指した実験を継続している。

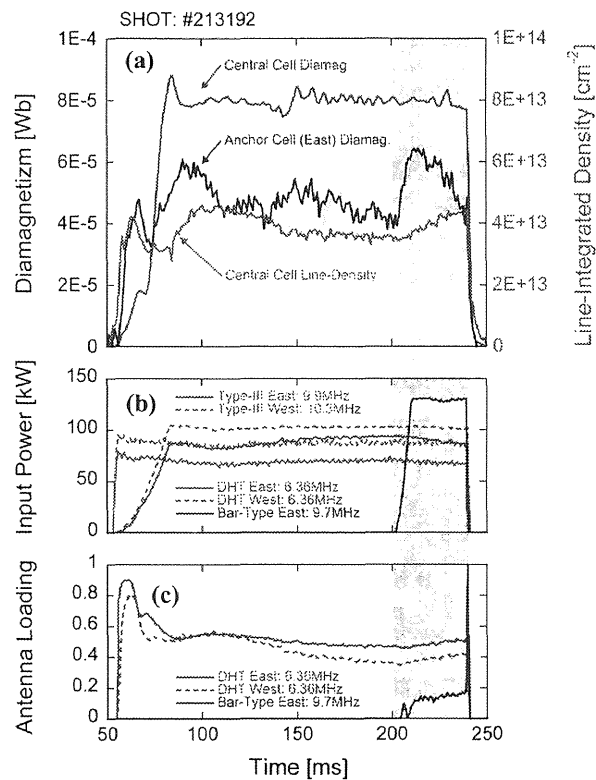


図 1 (a) セントラル部線密度と反磁性量およびアンカー部反磁性量、(b) プラズマ生成加熱に用いられる高周波入射電力、(c) セントラル部加熱とアンカー部加熱に用いられる高周波の入射効率の時間変化

## 2. ドリフト型揺動に起因する高エネルギーイオンの径方向輸送

GAMMA 10 では、低周波数の典型的な密度揺動としてフルート型とドリフト型の 2 種類が観測されることがこれまでに報告されている。また、高周波加熱により 10keV 以上に加速された高エネルギーイオンの振る舞いに関して、セントラル部に設置し磁力線に対して直角方向に輸送されるイオンを計測する ccHED (Central-cell High Energy Ion Detector) と磁力線方向に輸送されるイオンを計測する eeHED (East-end HED) が東エンドの開放端部に設置されている。平成 21 年度においては、ドリフト型揺動による高エネルギーイオンの径方向輸送を明らかとすることを目的として、静電プローブで観測される揺動信号とセントラル部中央面上に設置された ccHED 信号との相関計測に着手した。ccHED は、磁力線に対して直角方向から挿入され、その入射角を回転させることにより、イオンのピッチ角分布を計測することができる。セントラル部ミラー磁場に捕捉されたイオンのピッチ角は、捕捉イオンの磁力線方向速度が零となりミラー反射を起こす空間位置を表している。静電揺動との相関を詳細に解析することにより、揺動と高エネルギーイオンの相互作用に関する知見が得られることになる。ccHED 信号上に静電プローブ等で観測されるドリフト型揺動と同じ周波数の揺動が観測されることは、これまでに報告した。図 2 は、典型的に得られたピッチ角 85 度と 65 度における ccHED 信号上の揺動と静電プローブ信号の揺動との位相差を示している。図 2 より明らかなように、ドリフト型揺動の周波数変化に対応して位相差が変化していること、その位相差はピッチ角に強く依存し揺動との相互作用が高エネルギーイオンのミラー反射点と関連することが明らかとなった。現状では、両信号間の絶対的な位相差に関しては不明であるが、より遠い位置で反射するイオンほど大きな位相差を持つと考えられる。反射点において強く揺動の影響を受けることが示唆されている。

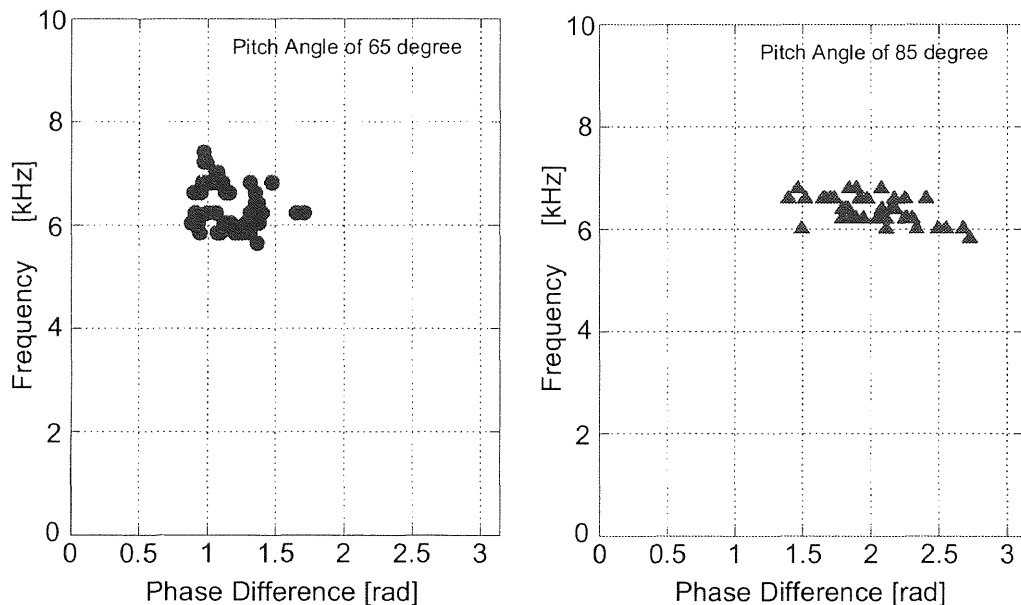


図 2 セントラル部高エネルギーイオン信号と静電プローブ信号上の揺動間の位相差のピッチ角依存性 (a)ピッチ角 65 度、(b)ピッチ角 85 度

## 3. 核融合反応生成プロトンに起因するイオンサイクロトロン放射の観測

日本原子力研究開発機構との協力研究において、プラズマ中に自発励起される ICRF 波動に関する実験的研究を継続している。トーラス外側ポートに設置されている ICRF 加熱用アンテナを用い、プラズマ中に励起された波動との電磁的及び静電的結合を信号として検出する。大きく分けて 3 つの異なる揺動が検出されている。最初に接続方向正イオン源 NB (80keV) が入射されるとほぼ同時に、鋭い周波数ピーク、その後、垂直方向 NB (80 keV) が入射されると比較的幅広い周波数ピーク、

3番目として負イオン源 NB(350keV)の入射により最も低い周波数(10MHz以下)の鋭いピークが現れる。これらの揺動の周波数は、外側最外殻磁気面磁場強度における ${}^3\text{He}$ 、D及びTのサイクロトロン周波数とその高次高調波周波数にそれぞれ対応することがこれまでの研究で明らかとなった。図3は、従来より少し高密度領域の放電で観測された典型的揺動信号を示している。従来から観測されているNB入射による重水素イオンの基本周波数ICE(D)、2倍高調波(広い周波数ピークを持つ)信号と2倍高調波信号の低周波数側に比較的鋭いピークを持つ揺動が観測されている。これまでの計測から、Dイオンに起因するICEは、トロイダル方向に波数を持たず、核融合反応生成(FP)イオンに起因するICEは有限な波数を持つこと、また、FPイオンに起因するICEは、外側最外殻磁気面磁場強度に相当するサイクロトロン周波数よりやや低い周波数を持つことがわかっている。このことから、新たに観測された鋭いピークを持つICEは、FP水素イオンに起因するものと同定した。ICEの励起機構を含めて解析を継続している。

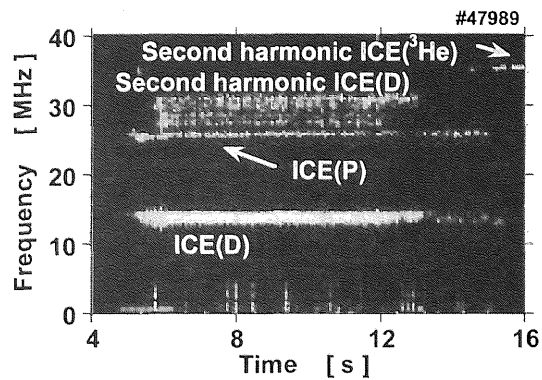


図3 Hイオンに起因するICEが観測される放電例

## 【12】 開放端磁場を用いたダイバータ模擬の為の基礎実験

### 1. はじめに

筑波大学プラズマ研究センターでは、次期将来計画として、これまでの「電位/電場によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」を更に発展させ、電位/電場による閉じ込め・輸送の改善の物理を、コア領域から境界部まで拡張する方向への研究の展開を図っている。そのために、既存タンデムミラー装置に新ダイバータ装置を導入し、ダイバータ様プラズマにおける境界プラズマの研究を計画している。

図1に、今回計画している新しいダイバータの概念図を示す。本計画では、片側の極小磁場配位に換えてダイバータ磁場配位を導入することによって、新しい「境界プラズマ研究装置部(A-Div.部)」を設計・製作し、セパトリックス磁場配位を持つ境界プラズマを含む、磁力線に沿った方向と磁場に垂直方向の輸送研究を可能にする。また、開放磁場端部を利用した高熱・粒子束実験が可能となるように新たな計測部(E-Div.部)を追加し、ダイバータ開発における急務な課題 ①ELM様パルス及び定常時の高熱粒子束制御、②ダイバータ板としての高Z材の評価、③デタッチトプラズマの定常維持の物理などの解決に向け貢献する。

本研究では、E-Div.計画において、実際のダイバータ研究の為に必要な性能を得ることが出来るかどうかを実証する為に、ガンマ10西エンド部においてミラー出口から流出するプラズマ流を計測し、数値計算に基づいた検討を行う。これによって、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

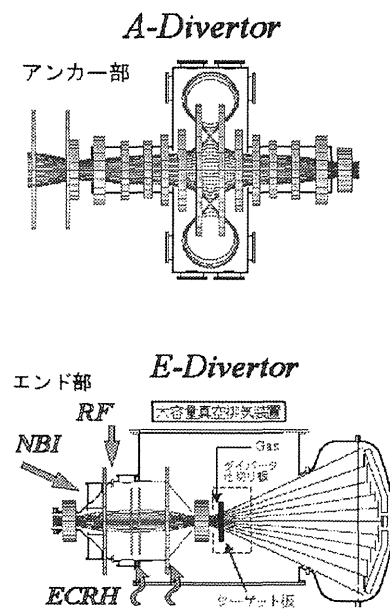


図1 新しいダイバータの概念図

## 2. 西エンド部における熱流・粒子束密度計測

今年度ミラー端部からの熱流および粒子束の同時計測を目的として、カロリメータとマッハプローブの計測器アセンブリを製作した。図2はその完成写真を示す。カロリメータの先端部(チップ)は直径10mmの銅製円盤で、セラミック材によって一方向からの熱流のみを感じるように設計されている。チップの後面には熱電対が固定されていて、プラズマ照射による温度上昇をショット・バイ・ショットでレコーダに記録する。マッハプローブは、直径8mmのSUS製円筒に90度おきに4方向からタングステン製電極が組み込まれていて、一方向からのプローブ電流が計測されるようになっている。

完成した計測器をガンマ10西エンド部のミラー出口に設置した。図3は西エンド部真空容器と設置した計測器の位置を示している。計測器は真空容器下部のポートから軸上まで挿入することができる。また、計測器はシャフトを軸にして回転することができる。これらの機構によって、ガンマ10からの流出プラズマの半径方向分布とプラズマ流束の磁力線に沿った角度分布を測定する。図4に示すように、計測器は、エンドミラー出口の直近に設置されている。

典型的なホットイオンモードプラズマでの電位閉じ込め実験(セントラル部  $2\text{--}3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , イオン温度 5 keV)においてエンドミラー出口での熱流計測の予備実験を行った。図5は、カロリメータ/マッハプローブにより計測した熱流・粒子流の測定結果を示す。実験ではプラズマ生成・加熱用のICRF波動加熱(150kW, パルス幅0.2秒)およびプラグ電位形成用のECHが150~300kWで20ms印加されている。図5(a)に示した熱流密度の径方向分布からわかるように、RFのみでのプラズマ生成において、軸上で  $0.6 \text{ MW/m}^2$ , 300kWのECH印加時で  $2 \text{ MW/m}^2$ の熱流密度が、半値幅で直径5~8cmの領域にわたって得ることができた。また、ECHのパワー増加に伴って熱流密度が大きく上昇しており、300kWのECH印加中の熱流密度は、 $10 \text{ MW/m}^2$ 台に到達していることが推察される。この値は、ITERにおけるダイバータ板の熱負荷に匹敵する値であり、今後の端部プラズマ加熱系の増強により、さらに高熱流束を発生できる見通しが得られた。図5(b)は、RFのみのプラズマ生成時に計測器を回転させることによって得られた熱流と粒子流(イオン飽和電流)の磁力線に対する角度依存性を示す。図から熱流も粒子流も同様の角度依存性を示していることから、エンド部出口上流から流出してくるものが大部分であり、RF加熱時の粒子束からイオン流が支配的であることがわかる。

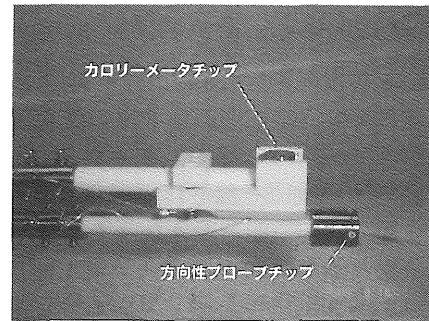


図2 カロリメータとマッハプローブの計測器アセンブリの完成写真

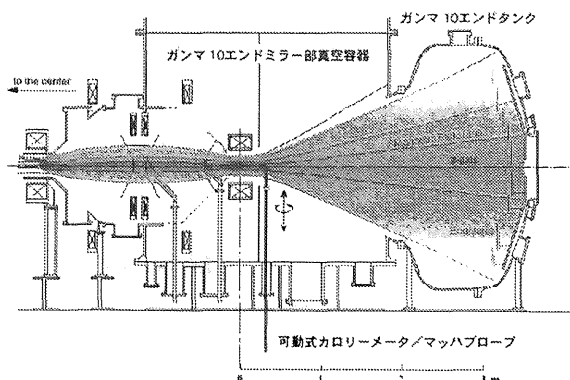


図3 ガンマ10西エンド部真空容器と計測器位置

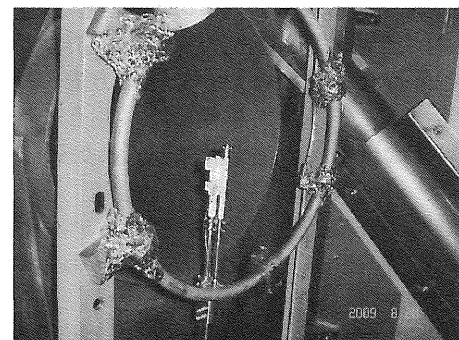


図4 西エンド部真空容器内部と設置された計測器の写真

## 3. 高速カメラによる端部流出プラズマ流の観測

図6は、西エンド部の真空容器に開口部を新たに設け、エンド部から流出するプラズマを高速カメラで初めて計測を行ったものである。図6(a)は、プラズマ銃による初期プラズマを入射した

時に観測された可視光イメージである。プラズマ銃からの初期プラズマが、磁力線に沿って絞られてセントラル部に向かって流入している様子がうかがえる。一方、図 6 (b)はプローブを軸上まで挿入した際に、流出プラズマとの相互作用により、プローブ先端付近で強く発光している様子が認められる。

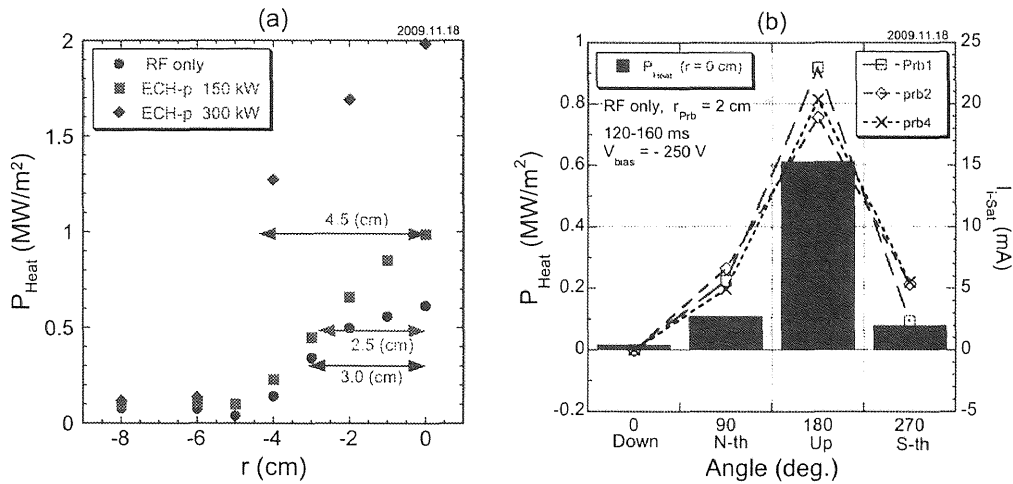


図5 カロリーメータ/マッハプローブを用いたエンド部熱流・粒子流測定結果

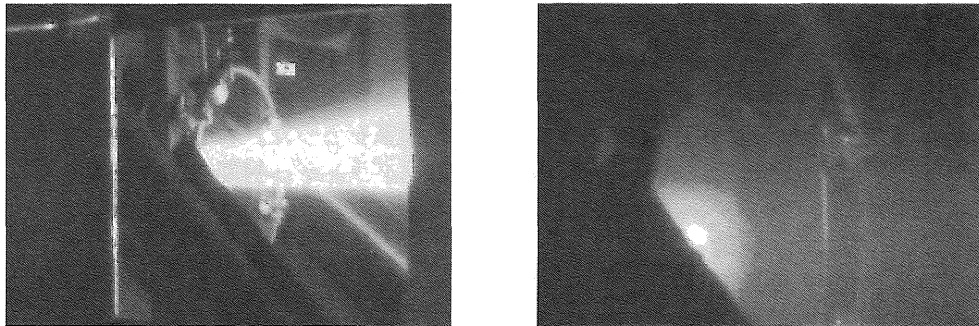


図6 西エンド部ミラー出口の高速カメラによる可視光イメージ計測

(a) プラズマ銃による初期プラズマ入射時, (b) プローブ軸上挿入時のプラズマ発光

#### 4. まとめ

次期研究計画として、新ダイバータ装置を導入した境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を課題に掲げ、ダイバータ模擬の研究を進めている。この将来計画に基づいて、本共同研究の課題を掲げ、ガンマ 10 端部ミラー出口において予備実験を開始した。その結果、1~10MW/m<sup>2</sup> オーダーの熱流密度が観測され、ダイバータ模擬をする為に必要な熱流密度を発生できる見通しが得られた。今後は更に熱流密度の強化に向けてプラズマ生成・加熱の最適化を図り、エンド部における熱流、粒子流の特性について詳細に調べてゆく。

#### 【13】 GAMMA10 A-divertor におけるフルート揺動と輸送および粒子軌道追跡コードの開発

本年度は主として GAMMA10 アンカー・ダイバータ磁場に対するフルート不安定性と非線形飽和状態でのフルート揺動に起因する径方向輸送に関する研究を行った。またダイバータ部 x-point 近傍のイオンの運動を正確にかつ高速に計算する為の計算機コードを作成した。

## 1. フルーツ揺動に関する計算

GAMMA10 A-divertor におけるフルート不安定性に関する研究を行った。GAMMA10 A-divertor に対するフルートモードは、コア領域では残りの非軸対称アンカー部に高圧力のプラズマを形成する事で安定化する。また周辺部ではダイバータ磁場による主としてプラズマの圧縮によるフルートモードの安定化をおこなう。ところで、GAMMA10 A-divertor 磁場配位での中央ミラー部でプラズマを生成すると、やがてアンカー部の高圧力プラズマに打ち勝ちフルート揺動が発生する。簡約 MHD 方程式系を基礎方程式として開発した計算機シミュレーションを実行してフルート不安定性の線形成長領域と非線形飽和領域でのプラズマの径方向輸送に関する研究をおこなった。フルートモードの線形成長フェーズでは非局所線形理論から求めた線形成長率と固有関数の径方向分布がシミュレーションで観測された成長率とモードの径方向分布と非常に良く一致した。フルート不安定性はやがて非線形飽和状態に移行した。この非線形飽和状態では静電ポテンシャルの等電位面とプラズマの等温度面に不一致が発生し、これによってプラズマの  $E \times B$  ドリフトによる大きな径方向が発生する事が初めて明らかになった。またこの事によってプラズマの生成と径方向輸送の発生が長周期で繰り返されている。さらにこの動電位面と等温度面の不一致によってフルートモードのさらなる成長が抑制されている事が新たに分かった。

## 2. 粒子軌道追跡コードの開発

ダイバータ磁場領域では磁場零の領域があり、その近傍を粒子が通過すると磁気モーメント保存が破れる。この事によって粒子がダイバータ磁場の閉じ込め領域から外側のダイポール領域へ移動する事が出来る。ダイバータ板はダイポール領域に設置されるので、ダイバータ板に流入するイオンの量と速度分布を予想する事が重要になる。ミラー磁場ではエネルギーと磁気モーメントの保存が重要であり、粒子軌道を追跡するときも計算時間に関して高速でかつ計算精度が充分良い事が要求される。この為に空間メッシュ点上に磁場データを保存して粒子位置の磁場はメッシュデータからの補間で求めることにした。粒子の軌道を解く為の座標系は  $(\phi, \theta, \zeta)$  を用いる。ただし  $B = \nabla\phi \times \nabla\theta = \nabla\zeta$  を満たすように座標系をとった。粒子の時間発展方程式を6段5次のルンゲ・クッタ法で、メッシュからの内挿はラグランジュ補間を用いて粒子軌道と解いた。ここでは示さないがメッシュ点上磁場の内挿から解いた粒子軌道は、磁場計算コードで粒子位置の磁場を求めた粒子軌道と非常に良い一致をした。計算の一例として非等方静電ポテンシャル分布内でのイオンの運動をこのコードで追跡した。イオンの磁力線に沿った周期運動は、 $\theta$  方向に  $\pi$  の周期を持った静電ポテンシャルと共鳴するように選んでいる。コア領域に捕捉されていたイオンは非等方静電ポテンシャルとの共鳴によってダイポール領域に排出された。イオンは x-point 近傍に長く滞在して時折ダイポール部をぐるりと一周する軌道をとっている。この軌道によって効率的なダイバータ板（形状および配置）に関する設計が可能になった。尚、イオンの運動エネルギーは  $\epsilon = 2.500 \pm 8.126 \times 10^{-5} \text{keV}$  の精度で保存した。

<論文>

01. T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, Y. Takita, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Mizuno, H. Idei, T. Notake, M. A. Shapiro, R. J. Temkin, F. Felici, T. Goodman, O. Sauter, R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Mutoh, Handling Technologies of Mega-Watt Millimeter-Waves for Optimized Heating of Fusion Plasmas, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy **43**, 1 (2009) 60-70.
02. T. Imai, Present Progress of the ECH Experiments in Mirror Devices, Journal of Plasma and Fusion Research **85**, 6 (2009) 378-382.
03. Y. Hirooka, H. Zushi, R. Bhattacharyay, M. Sakamoto, H. Idei, T. Yoshinaga, Y. Nakashima, Y. Higashizono, The CPD group, Active particle control in the CPD compact spherical tokamak by a lithium-gettered rotating drum limiter,



- Journal of Nuclear Material **390-391** (2009) 502-506.
04. Y. Nakashima, Y. Higashizono, H. Kawano, N. Nishino, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, M. Shoji, K. Nagasaki, H. Okada, F. Sano, K. Kondo, Y. Yoneda, R. Yonenaga, M. Yoshikawa, T. Imai, Recycling Studies Based on Two-dimensional Visible Light Measurements and Monte-Carlo Simulation in Mirror and Helical Systems, Journal of Nuclear Material **390-391** (2009) 511-515.
  05. M. Hirata, and GAMMA 10 Group, Recent Progress in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Current Trends In International Fusion Research: Proceedings of the 7th Symposium - Selected Presentations **1154** (2009) 73-74.
  06. M. Yoshikawa, Y. Miyata, T. Matsumoto, M. Mizuguchi, Y. Yoneda, S. Negishi, N. Imai, K. Kimura, Y. Shima, Y. Oono, A. Itakura, H. Hojo, T. Imai, Density and Potential Fluctuation Measurements in the Tandem Mirror GAMMA 10 Plasma, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES **8** (2009) 1020-1024.
  07. M. Ichimura, Y. Yamaguchi, Y. Motegi, H. Muro, T. Ouchi, S. Sato, Y. Sekihara, T. Murakami, T. Imai, Parametric Excitation of Low Frequency waves in ICRF-Produced Plasmas on GAMMA 10, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES **8** (2009) 893-896.
  08. A. C. England, D. K. Lee, S. G. Lee, M. Kwon, S. W. Yoon, Y. Yasaka, N. Sugimoto, I. Katanuma, K. Yashiro, T. Imai, Mirror stabilization experiments in the Hanbit device, Nuclear Fusion **49**, 12 (2009) 12500.
  09. H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, S. Ito, S. Kobayashi, Y. Yoshimura, H. Igami, Y. Mizuno, Y. Takita, T. Mutoh, T. Kariya, R. Minami, T. Imai, The Development of a 77-GHz, 1-MW ECRH System for the Large Helical Device, Fusion Science and Technology **57**, 1 (2010) 19-26.
  10. I. Katanuma, K. Yagi, Y. Nakashima, M. Ichimura and T. Imai, Flute mode fluctuations in the divertor mirror cell, Physics of Plasmas **17** (2010) 032303.
  11. H. Hojo, Y. Yasaka, A. Mase, Effects of Plasma Resonance on Surface Waves in Axially Non-Uniform Plasmas, Plasma and Fusion Research **5** (2010) 006-1-006-7.
  12. H. Hojo, Flute-Mode Stability of Quadrupole-Anchored Tandem Mirror Plasmas, Plasma and Fusion Research **5** (2010) 008-1-008-9.
  13. M. Ichimura, M. Katano, Y. Yamaguchi, S. Sato, Y. Motegi, H. Muro, T. Ouchi, S. Moriyama, M. Ishikawa, K. Shinohara, Y. Sakamoto, A. Kojima, T. Kobayashi, T. Watanabe, Study of Ion Cyclotron Emissions due to DD Fusion Product Ions on JT-60, Review of JT-60U Experimental Results in 2007 and 2008 **JAEA-Review 2009-045**, (2009) 80-83.
  14. 假家強、高橋裕己, LHD 用 77GHz ジャイロトロンの開発, NIFS NEWS **188**, (2009) P2-3.
  15. Takahashi, T., Asai, T., Takahashi, T., Matsuzawa, Y., Itagaki, H., Okada, S., Katanuma, I., Yoshikawa, M., Inomoto, M., Ono, Y., Hirano, Y., Koguchi, H., Mizuguchi, N., Tomita, Y., Narushima, Y., Review of a Required Condition for D-3He Fusion in a Field-reversed Configuration Plasma, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 317.
  16. Yoshikawa, M., Miyata, Y., Sugiyama, A., Washo, Y., Katanuma, I., Yamaguchi, Y., Nakanishi, H., Nagayama, Y., Data Transfer from GAMMA 10 to LHD Virtual Laboratory via SNET, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 335.
  17. Mase, A., Kogi, Y., Yoshikawa, M., Negishi, S., Itakura, A., Hojo, H., Nagayama, Y., Imaging Study of Dynamic Behaviors of Plasma Using Phase-Imaging Interferometer, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 471.
  18. Yoshikawa, M., Miyata, Y., Yoneda, Y., Negishi, S., Mizuguchi, M., Miura, Y., Goto, M., Development of Spectroscopy Method Using a Collisional-radiative Model in the GAMMA 10 Plasma, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 472.
  19. Takeno, H., Yasaka, Y., Tomita, Y., Ishikawa, M., Nakashima, Y., Initial Results of TWDEC Experiments in GAMMA 10 Tandem Mirror, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 473.
  20. Nakashima, Y., Yoshikawa, M., Nishino, N., Kobayashi, S., Higashizono, Y., Yonenaga, R., Shoji, M., A., Morisaki, T., Analysis of Edge Plasma Turbulence and Neutral Particle Transport in Open Magnetic Field

- Configuration Plasmas,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 474.
21. Ogura, K., Oe, H., Yamakawa, M., Sugawara, A., Imai, T., Yoshikawa, M., Minami, R.,  
Study on Electron Distribution Function and Spatial Structure of Weakly Relativistic Electrons in  
Microwave and Mirror Devices,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 476.
22. Nakashima, Y., Mizuuchi, T., Okada, H., Kobayashi, S., Higashizono, Y., Yonenaga, R., Hosaka, K.,  
Shoji, M.,  
Study of Da Line-Emission Spectroscopy and Edge Neutral Transport in Non-Axisymmetric System,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 486.
23. Nakashima, Y., Yoshikawa, M., Sakamoto, M., Higashizono, Y., Zushi, H., Kobayashi, S., Yonenaga, R.,  
Shoji, M.,  
Study of Hydrogen Recycling and Neutral Particle Behavior in Spherical Torus Plasmas,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 509.
24. Hanada, K., Sato, K.N., Yoshida, N., Nakamura, K., Sakamoto, M., Mitarai, O., Nishino, N., Nagata, M.,  
Fukumoto, N., Kikkuchi, Y., Liu, D., Masamune, S., Sanpei, A., Maekawa, H., Tanaka, H., Takase, Y.,  
Ejiri, A., Nakashima, Y., Miyamoto, M., Nagayama, Y., Hirooka, Y., Tokitani, M.,  
Experiment of Current Start-up by RF on QUEST,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 517.
25. Nakanishi, H., Yamamoto, T., Emoto, M., Nagayama, Y., Kawahata, K., Hasegawa, M., Higashijima, A.,  
Nakamura, K., Yoshikawa, M.,  
Japanese Fusion Virtual Laboratory between LHD, QUEST, and GAMMA10,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 519.
26. Zushi, H., Uchino, K., Mase, A., Shiratani, M., Inagaki, S., Hanada, K., Sakamoto, M., Idei, H.,  
Nagasaki, K., Shikama, T., Minami, T., Nishino, N., Morisaki, T., Tanaka, K., Nagaoka, K., Osakabe,  
M., Tokitani, M., Yoshinaga, T., Nakano, T., Kado, S., Nakashima, Y., Miyamoto, M.,  
Development of the Advance Diagnostics for Steady State Operation in Spherical Tokamak QUEST,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2008-March 2009**, (2009) 520.

<学位論文>

- 今井 寧央 [修士 (理学), 数理解物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10 セントラル部における電子密度分布及び揺動の閉じ込め電位依存性
- 大野 洋平 [修士 (理学), 数理解物質科学研究科物理学専攻]  
金中性粒子ビームプローブを用いた GAMMA 10 プラズマの東西可変式リミター径  
依存の研究
- 佐藤 翔一 [修士 (工学), 数理解物質科学研究科電子・物理工学専攻]  
D-D 核融合反応生成プロトンに起因するイオンサイクロトロン放射の観測
- 青木 瞳 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
GAMMA 10 水平可動 ECRH アンテナによるプラズマ加熱特性の向上研究
- 飯泉 英昭 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
軟 X 線計測による GAMMA 10 セントラル部 ECRH 特性の研究
- 石井 貴 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
ガンマ 10 NBI 実験におけるセントラル部プラズマ計測
- 井田 達也 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
GAMMA10 1MW ECRH 用ジャイロトロン開発と端損失電子計測
- 太田 雄也 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた ECRH 印加時の GAMMA 10 プラズマの  
電子密度測定
- 金澤 美保 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
ジャイロトロン出力モードの評価による大電力伝送の研究

- 小林 大介 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
多チャンネルH $\alpha$ 線計測器を用いた GAMMA 10 セントラル部プラズマの  
H $\alpha$ 放射分布計測
- 小林 英紀 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
多波長同時計測分光器を用いた GAMMA 10 セントラル部プラズマの不純物イオン  
スペクトル計測
- 近藤 秀幸 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
GAMMA 10 ECRH 実験における偏波モードによる電子加熱と周辺プラズマ特性の  
変化の研究
- 武田 寿人 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
ダイバータ模擬を目指したガンマ 10 エンド部における熱・粒子流に関する研究
- 田中 佑樹 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
人体モデルを用いた電磁波によるウェスト測定のシミュレーション研究
- 中村 武義 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
可視光 2 次元イメージ計測による開放端部プラズマの挙動観測
- 松田 奈々子 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
GAMMA 10 における金中性粒子ビームプローブを用いたプラズマ密度分布計測
- 松永 祐樹 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
超短パルス反射計を用いた GAMMA 10 セントラル部の密度揺動のプラグ部 ECH 出力  
依存の研究
- 村田 英剛 [学士 (理学), 自然科学類物理学主専攻]  
端損失粒子エネルギー成分検出器を用いた GAMMA 10 プラグ電位のプラグ ECH 出力  
依存性の解析
- 市岡 伸行 [学士 (工学), 工学基礎学類応用物理主専攻]  
ダイポール磁場配位での粒子軌道計算コードの開発とそれを用いた排気効率の計算
- 真崎 俊 [学士 (工学), 工学基礎学類応用物理主専攻]  
ダイバータ磁場配位での粒子軌道計算コードの開発とそれを用いた排出速度の計算
- 横山 拓郎 [学士 (工学), 工学基礎学類応用物理主専攻]  
GAMMA 10 極小磁場部における高周波を用いた直接加熱実験

<講演>

01. I. Katanuma, K. Yagi, M. Ichimura, T. Imai and V. P. Pastukhov,  
Numerical simulation on the interchange mode instabilities in the mirror field,  
Fourth IAEA-Technical Meeting on the Theory and Plasma Instabilities (Kyoto University, Japan,  
2009.5.18-2009.5.20) p2-16.
02. T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, R. Ikeda, N. Tamura, S. Kobayashi,  
S. Ito, Y. Mizuno, Y. Takita, T. Mutoh, R. Minami, T. Kariya, T. Imai, H. Idei, M. A. Shapiro,  
R. J. Temkin, F. Felici, T. Goodman, and O. Sauter,  
Activities on Realization of High-Power and Steady-State ECRH System and Achievement of High  
Performance Plasmas in LHD,  
The 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (Gent, Belgium,  
2009.6.24-2009.6.26) 32D, P1.085.
03. T. Imai, T. Kariya, R. Minami, N. Murofushi, M. Oota, H. Shidara, Y. Endo, S. Kubo, T. Shimozuma,  
T. Mutoh, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, K. Sakamoto, Y. Mitsunaka,  
Development of over-1 MW gyrotron for LHD and GAMMA 10,  
The 3rd Japan-Korea WorkShop on Plasma Heating and Current Drive Systems (National Institute for  
Fusion Science, Japan, 2009.8.5-2009.8.7).

04. M. Yoshikawa, S. Negishi, A. Itakura, Y. Shima, H. Hojo, A. Mase, Y. Kogi, and T. Imai,  
Two dimensional density and its fluctuation measurements by using phase imaging method in the tandem mirror GAMMA 10,  
International Workshop on “Microwave - Laser diagnostics for burning plasma experiment”  
(IWML-2009) (Otsu, Japan, 2008.8.4-2008.8.8).
05. H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, S. Kobayashi, Y. Mizuno,  
Y. Takita, T. Mutoh T. Kariya, R. Minami, T. Imai,  
System Upgrade of ECRH System for the LHD,  
US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop (Kyushu National Museum, Japan,  
2009.9.16-2009.9.18).
06. H. Shidara, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, N. Murofushi, M. Oota, Y. Endo, S. Kubo, T. Shimozuma,  
T. Mutoh, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, K. Sakamoto, Y. Mitsunaka,  
Development of 1MW Gyrotron and antenna for ECH in the University of Tsukuba,  
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2009 (Kyushu National Museum, Japan,  
2009.9.16-2009.9.18).
07. Y. Yamaguchi, M. Ichimura, A. Fukuyama, T. Ouchi, H. Muro, S. Sato, T. Murakami, Y. Sekihara,  
H. Hojo, and T. Imai,  
Three-Dimensional Analysis of ICRF Wave Excitation on the GAMMA 10 Central Cell,  
The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2009) and the  
Asia-Pacific Plasma Theory Conference (APPTC2009) (Aomori, Japan, 2009.10.27-2009.10.30)  
P27p1-10.
08. Y. Miyata, M. Yoshikawa, M. Mizuguchi, Y. Oono, F. Yaguchi, N. Matsuda, H. Murata, M. Ichimura,  
T. Murakami and T. Imai,  
Correlation of low-frequency fluctuations measured by the gold neutral beam probe and end plates in  
GAMMA 10,  
Asia Plasma and Fusion Association in 2009 (Aomori, Japan, 2009.10.27-2009.10.30) P27p1-11.
09. T. Imai, M. Ichimura, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, I. Katanuma, T. Kariya, H. Hojo, R. Minami,  
Y. Miyata, Y. Yamaguchi, H. Shidara and GAMMA 10 group,  
Present status of the GAMMA 10 and future plan in University of Tsukuba,  
American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (Atlanta, USA,  
2009.11.2-2009.11.6) BM9.4.
10. M. Yoshikawa, Y. Miyata, M. Mizuguchi, N. Imai, H. Hojo, M. Ichimura, T. Kariya, I. Katanuma,  
Y. Nakashima, R. Minami, H. Shidara, Y. Yamaguchi, Y. Shima, Y. Ohno, F. Yaguchi, K. Kawahata,  
I. Yamada, H. Funaba, T. Imai,  
Potential and density fluctuation suppressions by the potential formation and the newly installing  
Thomson scattering system,  
American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (Atlanta, USA,  
2009.11.2-2009.11.6) BM9.3.
11. I.Katanuma, K.Yagi, Y.Nakashima, M.Yoshikawa, M.Ichimura, T.Imai,  
The design of anchor divertor of GAMMA10,  
American Physical Society 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (Atlanta, USA,  
2009.11.2-2009.11.6) CM9.2.
12. M.Ichimura, Y.Yamaguchi, S.Sato, S.Moriyama, T.Kobayashi, A.Kojima, and GAMMA 10 group and  
JT-60U experimental group,  
Spontaneously excited waves in the ion cyclotron range of frequency on fusion devices,  
2009 International Workshop on Frontiers In Space and Fusion Energy Sciences (Tainan, Taiwan,  
2009.11.30-2009.12.3).
13. M. Yoshikawa, Y. Miyata, M. Mizuguchi, N. Imai, H. Hojo, M. Ichimura, T. Kariya, I. Katanuma,  
Y. Nakashima, R. Minami, H. Shidara, Y. Yamaguchi, Y. Shima, Y. Kiwamoto, Y. Ohno, F. Yaguchi,  
T. Imai,  
Study of the fluctuation suppressions during the potential formation in the tandem mirror GAMMA 10,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu,  
Japan, 2009.12.8-2009.12.11) I-6.
14. H. Ozawa, Y. Nakashima, R. Yonenaga, K. Hosoi, T. Ishii, H. Takeda, K. Okawa and T. Imai,  
Evaluation of the heating effect in neutral beam injection experiments of the GAMMA 10 tandem mirror,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu,  
Japan, 2009.12.8-2009.12.11).
15. R. Yonenaga, Y. Nakashima, N. Nishino, Y. Higashizonob, S.Kobayashic, K. Hosoi, H. Ozawa,  
T. Ishii, H. Takeda, H. Shidara, T. Imai,  
Plasma imaging by using a high-speed camera in the GAMMA 10 tandem mirror,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu,

- Japan, 2009.12.8-2009.12.11).
16. K. Hosoi, Y. Nakashima, Y. Higashizono, S. Kobayashi, H. Ozawa, R. Yonenaga, T. Ishii, H. Takeda, Y. Yamaguchi, M. Ichimura, T. Imai,  
Investigation on optimal limiter condition for stable sustainment of the potential confined plasma in GAMMA 10,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu, Japan, 2009.12.8-2009.12.11).
  17. I. Katanuma, K. Yagi, N. Ichioka, S. Masaki, Y. Nakashima, M. Ichimura, and T. Imai,  
The role of flute modes in the GAMMA10 tandem mirror,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu, Japan, 2009.12.8-2009.12.11) P1-24.
  18. S. Sato, M. Ichimura, Y. Yamaguchi, M. Katano, Y. Imai, T. Murakami, Y. Miyake, T. Yokoyama, S. Moriyama, T. Kobayashi, A. Kojima, T. Shinohara, N. Sakamoto, T. Watanabe, H. Hojo, T. Imai,  
Observation of the Ion Cyclotron Emission due to D-D fusion-product H-ions on JT-60U,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu, Japan, 2009.12.8-2009.12.11) P2-42.
  19. Y. Ishii, H. Hojo, A. Mase, M. Yoshikawa, M. Ichimura, Y. Haraguchi, and T. Imai,  
Preliminary Simulation Study for Doppler Reflectometry,  
19th International Toki Conference (ITC19) on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research (Gifu, Japan, 2009.12.8-2009.12.11) P1-78.
  20. Y. Nakashima, M. Ichimura, I. Katanuma, M. Yoshikawa, T. Kariya, R. Minami, Y. Kiwamoto, Y. Miyamoto, H. Shidara, Y. Yamaguchi, R. Yonenaga, H. Takeda and T. Imai,  
Research plan for divertor simulation making use of a large tandem mirror device,  
2nd NIFS-CRC International Symposium on Plasma-Surface Interactions (NIFS, Japan, 2010.1.18-2010.1.20).
  21. M. Ichimura, GAMMA 10 Group,  
Recent ICRF experiments and future plan on GAMMA 10,  
2010 KO-JA Joint Workshop on RF Heating Physics in Fusion Plasmas (NFRI, Daejeon, 2010.3.8-2010.3.9).
  22. 假家 強、南龍太郎、遠藤洋一、設楽弘之、今井剛、久保伸、下妻隆、高橋裕己、伊藤哲、吉村泰夫、伊神弘恵、武藤敬、満仲義加、安武浩人、岡崎行男、坂本慶司、  
LHD 用 77GHz ジャイロトロンの開発、  
LHD 成果報告会、(核融合科学研究所, 2009.4.13-2009.4.14).
  23. 山本孝志、中西秀哉、長山好夫、江本雅彦、鷹見重幸、石黒静児、長谷川真、東島亜紀、中村一男、吉川正志、平木敬、稲葉真理、谷田直輝、  
核融合研究が望む広帯域ネットワーク、  
広帯域ネットワーク利用に関するワークショップ (ADVNET2009), (東京大学 小柴ホール, 2009.6.30).
  24. 今井 剛,  
プラズマ研究センターの現状と計画、  
平成 21 年度プラズマ研究センターシンポジウム、(筑波大学, 2009.7.16-2009.7.17) .
  25. 假家 強,  
ガンマ 10 における ECH の現状とジャイロトロン開発、  
平成 21 年度プラズマ研究センターシンポジウム、(筑波大学, 2009.7.16-2009.7.17) .
  26. 中嶋洋輔、ガンマ 10 グループ、  
開放端磁場配位を活かした境界プラズマ輸送制御研究計画、  
平成 21 年度プラズマ研究センターシンポジウム、(筑波大学, 2009.7.16-2009.7.17) .
  27. 中嶋洋輔、ガンマ 10 グループ、  
筑波大プラズマ研究センターにおける開放端磁場配位を活かした新研究計画の進展、  
平成 21 年度 PWI 合同研究会、(核融合科学研究所 2009.8.4-2009.8.5).
  28. 高橋裕己、下妻隆、久保伸、伊藤哲、吉村泰夫、小林策治、水野嘉識、伊神弘恵、多喜田泰幸、武藤敬、假家強、今井剛、南龍太郎、  
LHD における高出力長パルス 77 GHz ジャイロトロンを導入、  
平成 21 年度『ミリ波・サブミリ波応用の新展開のための調査研究』研究会、(核融合科学研究所, 2009.8.5).
  29. 今井寧央、吉川正志、水口正紀、木村一貴、太田雄也、小林秀樹、松永祐樹、嶋頼子、宮田良明、今井剛、  
GAMMA10 センtral部における電子密度分布及び揺動の閉じ込め電位依存性、

- プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 1pE04P.
30. 大野洋平、吉川正志、宮田良明、水口正紀、谷口文彬、松田奈々子、村田英剛、今井寧央、今井 剛  
金中性粒子ビームプローブによる GAMMA 10 プラズマ電位の可変式リミター依存,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 1pE05P.
  31. 谷口文彬、吉川正志、宮田良明、水口正紀、大野洋平、松田奈々子、村田英剛、村上達也、今井 剛,  
GAMMA 10 における金中性粒子ビームプローブを用いたフルート型揺動の観測,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 1pE06P.
  32. 宮田良明、吉川正志、水口正紀、大野洋平、谷口文彬、松田奈々子、村田英剛、今井 剛,  
GAMMA 10 における金中性粒子ビームプローブ及びエンドプレートを用いた電位低周波揺動の  
相関解析,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 1pE07P.
  33. 水口正紀、吉川正志、宮田良明、大野洋平、谷口文彬、松田奈々子、村田英剛、今井 剛,  
GAMMA 10 セントラル部における金中性粒子ビームプローブを用いたプラズマ径方向電場及び  
電位揺動の解析,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 1pE08P.
  34. 吉川正志、宮田良明、谷口文彬、嶋頼子、北條仁士、中嶋洋輔、市村真、今井剛、山田一博、  
川端一男、舟場久芳、林浩、高橋千尋、南貴司,  
タンデムミラーGAMMA 10 におけるトムソン散乱計測システムの導入,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 2aD02P.
  35. 水内亨、小林進二、山本聡、岡田浩之、長崎百伸、南貴司、向井清史、岸真太郎、李弦庸、  
南桂史、高島優、大島慎介、西野信博、中嶋洋輔、中村祐司、花谷清、佐野史道,  
ヘリオトロン J における超音速分子ビーム入射法の適用とその効果,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4aA02.
  36. 假家強、南龍太郎、太田真雄、設楽弘之、遠藤洋一、今井剛、久保伸、下妻隆、高橋裕己、  
吉村泰夫、伊神弘恵、伊藤哲、武藤敬、満仲義加、坂本慶司,  
LHD 用 77GHz-1.5MW ジャイロトロンの開発と加熱実験,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4aB02.
  37. 八木厚太郎、片沼伊佐夫、今井 剛,  
ダイバータ付きタンデムミラーにおける巨視的安定性解析,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4aD01P.
  38. 米永理央、中嶋洋輔、西野信博、東園雄太、細井克洋、小澤博樹、石井貴、武田寿人、  
設楽弘之、今井剛,  
GAMMA 10 における高速カメラを用いた ECH 印加時のプラズマ挙動計測,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4aE26P.
  39. 小澤博樹、中嶋洋輔、米永理央、細井克洋、石井貴、武田寿人、大川和夫、今井剛,  
GAMMA10 高密度実験における中性粒子ビーム入射加熱,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4pD03P.
  40. 設楽弘之、今井剛、假家強、南龍太郎、青木瞳、近藤秀幸、市村真、中嶋洋輔、吉川正志、  
西野信博、GAMMA10 実験グループ,  
GAMMA 10 におけるセントラル部 ECRH 可動アンテナを用いた実験,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4pD18P.
  41. 太田真雄、假家強、坂本慶司、今井剛、南龍太郎、設楽弘之、遠藤洋一,  
GAMMA10 ECRH 用 28GHz-1MW ジャイロトロンの開発,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4pD19P.
  42. 山口裕資、市村真、佐藤翔一、今井康隆、村上達也、横山拓郎、三宅勇一郎、福山淳、  
北條仁士、今井剛,  
GAMMA10 極小磁場アンカー部におけるイオンサイクロトロン共鳴加熱,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4pD23P.
  43. 今井康隆、市村 真、山口 裕資、佐藤 翔一、村上 達也、三宅 勇一郎、横山 拓郎、今井 剛,  
GAMMA10 セントラル部における損失高エネルギーイオンのピッチ角分布と低周波揺動の相関  
の考察,  
プラズマ・核融合学会第 26 回年会, (京都市国際交流会館, 2009.12.1-2009.12.4) 4pD24P.
  44. 佐藤翔一、市村真、山口裕資、片野誠、今井康隆、村上達也、三宅勇一郎、横山拓郎、

- 森山伸一、小林貴之、小島有志、篠原孝司、坂本宜照、渡辺二太、北條仁士、今井剛、  
JT-60UにおけるD-D反応生成プロトンに起因するICEの研究、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) 4pD26P.
45. 中嶋洋輔、片沼伊佐夫、市村真、假家強、北條仁士、南龍太郎、吉川正志、際本泰士、設楽弘之、宮田良明、  
山口裕資、米永理央、武田寿人、大川和夫、今井剛、  
開放端磁場配位を活かしたダイバータ模擬に関する研究計画、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) 4pE21P.
46. 片沼伊佐夫、八木厚太郎、市岡伸行、真崎 峻、中嶋洋輔、市村 真、今井 剛、  
開放端系ダイバータ磁場中プラズマの径方向輸送について、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) 4pE22P.
47. 村上達也、市村真、山口裕資、佐藤翔一、今井康隆、三宅勇一郎、横山拓郎、谷口文彬、  
水口正紀、宮田良明、吉川正志、今井剛、  
GAMMA10における静電プローブを用いた電子共鳴加熱印加時の低周波揺動解析、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) 4pE24P.
48. 細井克洋、中嶋洋輔、東園雄太、小澤博樹、米永理央、石井貴、武田寿人、山口裕資、  
市村真、今井剛、  
GAMMA10におけるセントラル部リミターによるプラズマ制御、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) 4pE25P.
49. 中嶋洋輔、  
境界プラズマ模擬実験計画の概要と準備状況、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) インフォーマル  
ミーティング V.
50. 吉川正志、假家強、  
双方型共同研究のこれまでの成果概要、  
プラズマ・核融合学会第26回年会、(京都市国際交流会館、2009.12.1-2009.12.4) インフォーマル  
ミーティング V.
51. 中嶋洋輔、ガンマ10グループ、  
開放端磁場配位を活かした境界プラズマ模擬実験計画の概要と準備状況、  
平成21年度PWI合同研究会、(核融合科学研究所、2009.12.24-2009.12.25).
52. 中嶋洋輔、  
ヘリオトロンJにおける多チャンネルH $\alpha$ 線放射計測器を用いた中性粒子輸送解析、  
NIFS 双方型共同研究成果報告会、(核融合科学研究所、2010.1.21).
53. 中嶋洋輔、ガンマ10グループ、  
開放端磁場配位を用いたダイバータ模擬研究計画と準備実験、  
NIFS 共同研究合同研究会、(核融合科学研究所、2010.1.26-2010.1.27).
54. 米永理央、中嶋洋輔、ガンマ10グループ、  
高速カメラによるECH印加中のGAMMA10プラズマ挙動解析、  
NIFS 共同研究合同研究会、(核融合科学研究所、2010.1.26-2010.1.27).
55. 細井克洋、中嶋洋輔、ガンマ10グループ、  
GAMMA10におけるセントラル部リミターによるプラズマ制御、  
NIFS 共同研究合同研究会、(核融合科学研究所、2010.1.26-2010.1.27).
56. 吉川正志、宮田良明、水口正紀、大野洋平、谷口文彬、嶋頼子、今井剛、市村真、片沼伊佐夫、  
假家強、岩前敦、藤沢彰英、井口春和、  
タンデムミラープラズマにおける電位・密度揺動の抑制、  
特定領域「プラズマ燃焼のための先進計測」「核融合エネルギーフォーラム計測サブクラスター」  
合同シンポジウム、(核融合科学研究所、2010.2.24-2010.2.26).