

## IX プラズマ研究グループ

|        |                      |
|--------|----------------------|
| 教授     | 長 照二、今井 剛、板倉昭慶       |
| 助教授    | 石井亀男、北條仁士、斉藤輝雄、中嶋洋輔  |
| 講師     | 小波蔵純子、平田真史、立松芳典、吉川正志 |
| 技術専門官  | 平田久子                 |
| 技術専門職員 | 大川和夫                 |
| 大学院生   | 23名                  |

### 共同研究者

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| 助教授         | 市村 真、片沼伊佐夫（物理工学系） |
| 講師          | 檜垣浩之（物理工学系）       |
| 講師（研究機関研究員） | M. K. イスラム、沼倉友晴   |

### 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 | 土肥三郎           |
| 大学院生    | 8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目標・中期計画に伴い、これに資することを基本方針・基本理念として研究を推進し、以下のような研究成果の急進展を得ている。

まず、当該グループとして、数理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、特に、プラズマに関しては、平成16年度発足の国立大学法人筑波大学の「中期目標・中期計画」に於いて、「Ⅱ 大学の教育研究等の質の向上に関する目標」の「2 研究に関する目標」の内、「（2）研究実施体制等の整備に関する目標においては、世界的に評価されている研究及び成果が期待できる萌芽的研究に資源を重点配分して、研究面の個性化を図る。」に、「○全国共同研究に関する具体的方策 ②国内外の研究機関との連携を深め、共同研究等の推進を図る。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、昨年来の一貫した研究姿勢である。

本学にとり、2年後に控える中間評価に向けても、当該グループも、学内共同利用を通して上記の中期目標・中期計画の実行成果の一端を、学術的に積極的に究明し支える方針である。更に、当グループとしての特長を活かし、全国共同研究の実を挙げるべく、また学内外・国際的な貢献を縦横に果たすべく、新制度に於けるグループの在り方として、以上の、本学の中期目標・中期計画への成果の実現に向けて、最大限の貢献を果たす事を基本方針としていることは、一貫した研究姿勢である。

## 【2】プラズマ研究グループの研究目的と意義・位置づけ

「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、当該グループの上記中期目標・中期計画、新しい本学の法人化後の規則・規定に則した研究目的の柱である。

即ち、本研究目的は、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、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モードの物理解明にも繋がり、更には最近特に、ITERを含む環状系プラズマ閉じ込め改善効果が顕著でその究明が急がれている、プラズマエネルギーのプラズマ半径方向閉じ込めに有効な事が発見された「内部輸送障壁 (ITB)」に、電場の径方向シア  $dE_r/dr$  が深く関わることも判明し (当該グループの主導する学内共同利用成果として、米国物理学会誌 *Physical Review Letters* 誌 2005年3月号に掲載) [1]、世界的に学術普遍性の高い、極めて重要な研究課題という位置づけを持っている[1-4]。

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」[5]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、先駆的実績を持つ研究課題・研究成果であることは、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物理学系のガンマ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、上記のように、この成果は、タンデムミラーの一連の研究 [6-14] 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 磁場のみによるプラズマ閉じ込めに比べ、電位・電場を併用すると閉じ込め性能が著しく改善・向上すること。② ITER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。以上の事実が、「核融合エネルギー実用に対する電位によるプラズマ閉じ込め向上の研究の必要不可欠性の証左」を与えている。

しかしながら、Hモードの電場シア形成のプラズマ閉じ込め有効性にもかかわらず、Hモード生成の物理機構の詳細は依然明確にされておらず、経験則に頼る現状において、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、必要不可欠な研究内容であるという意義を持つばかりでなく、プラズマ特性の学術研究・応用研究という観点からも、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。更に最近、上述のように、プラズマエネルギーの、プラズマの内部からの熱の損失を防ぐことのできる「内部輸送障壁」 (ITB) に関連する発見を行い、この物理機構にも、我々の研究成果が深く関連していることが分ってきた。

平成16年度には、成果評価の一端として、①「プラズマ閉じ込めのための Open Magnetic System 国際会議」の冒頭の基調・招待講演 (プレナリー・トーク) (ノボシビルスク, 2004年7月) [2]、②プラズマ核融合学会 招待講演 (2004年11月)、③ 国内及び国際選考審査を経て、国際原子力機関 (IAEA) 核融合エネルギー国際会議での発表 (2004年11月) [3]、④ *Current Trends In International Fusion Research* (2005年3月, Washington D.C.; IAEA共催) 国際会議に於ける招待レビュー講演 [4]、⑤ 更には 米国物理学会誌 *Physical Review Letters* **94**, 085002 (2005) [1]への刊行等々、新しい研究成果を次々に発表し、急激な研究成果の進展を広く内外に示した。

本稿では、これらの学術的具体的成果について、以下に纏めて報告する。

### 【3】研究成果の概要

#### (1) 平成16年度の主要な研究成果の要約

平成16年度に実施・達成した事項は以下の通りである。

(1) 「核融合実用に必要不可欠で未解決な研究課題である、電位閉じ込めの普遍的物理基盤・物理機構・将来の展望・展開に係る比例則の研究。」については、以下の新しい発見を行った。

まず、この10年間超えることの出来なかった「高温イオンモードでのイオン閉じ込め電位  $\phi_c = 1 \text{ kV}$  の壁」を破り、この10年に比しイオン閉じ込め電位が3倍となる  $2.1 \text{ kV}$  の世界最高値にまで急進展し、しかもこの進展は、我々が2001年に *Physical Review Letters* 誌に提唱した理論比例則予想によく合致する事が分かったこと。

この急進展は、高温プラズマ中の存在が計算機シミュレーション等で予想されていた、プラズマをかき乱す渦（電磁流体乱流）のX線断層撮像による世界で初めての可視化実証と、この乱流渦をジャイロトロン発振器を用いて生成した高強度半径方向電場  $E_r$  のシア ( $dE_r/dr$ ) による「渦の晴れ渡り」の発見、更にそれに伴うプラズマの高閉じ込め・高温化の実証に結実した。本現象の発見の重要な意義として、ITERの心臓部の高温核融合プラズマの閉じ込め原理である、Hモード（高閉じ込めモード）の物理予想の実証・究明に繋がる事が指摘されている。

(2) 同時に、これら電位・電場の生成物理メカニズム・比例則も、*Physical Review Letters* 誌等に発表・提唱した。以上の結果は、ジャイロトロンで発振させたマイクロ波による、電子サイクロトロン・プラズマ局所加熱を行い、ミラー開放端へ磁力線に沿う端損失高温電子流を生成し電子の掃き出しを行えることに基盤を持つ。即ち、加熱領域の電子密度をイオン密度よりも少なくすることで正に帯電させ、これにより正の電位を生成できること。更にこの生成電位のプラズマ半径方向の勾配を制御し、延いては半径方向電場シアを制御できるという、「端部を持つミラー装置にしかできないこと、ミラーでならITER等の環状プラズマ形式にも普遍的で且つ解明すべき中心課題を学術究明できること」を背景に、研究を推進している。

このように、他装置との差別化を行いミラーの特長を縦横に活かして、環状系核融合装置でも本質的現象ながら「端部が無い環状装置」では自在な電場制御ができないという欠点を補って余りある、学術要素還元・学術普遍化を行い、世界の核融合への他所にはできない貢献、しかし核融合研究には必要不可欠な独自の貢献を果たしている。

(3) 以上のように、電位・電場生成によるプラズマの高閉じ込め・高温化の実証、電場シアによるプラズマ安定閉じ込めの研究、これらによる高プラズマパラメータ領域の開拓と比例則の研究成果は、上記IAEAでの発表を含め、着実に進展している。

(4) 新たな高効率ミラー閉じ込め安定配位として、セントラル部ダイバータ配位について、学術交流協定に基づく国際共同研究により、ロシア科学アカデミー・クルチャトフ研究所の世界的理論家であるパスツコフ博士との共同研究が進展しており、既に安定配位についての計算機シミュレーション結果を得ている。また、

(5) ミラー特有の、他形式にはない利点として、ミラー端部を利用する直接発電の研究が進展している。これは特に全国双方向型共同研究、学内共同利用研究として研究が進んでおり、現在直接発電装置設計が進み、次年度のガンマ10での実験に向けた準備が着々と進んでいる。また、地域連携研究として、つくば市の高エネルギー物理学研究機構フォトンファクトリーや産業総合研究所の放射光を用いた、計測器開発・較正研究が進展している。

以上の研究の重点施策とその中期計画の実施を通して、電位生成のメカニズム・比例則の整理・構築・究明、電位の核融合高効率化に果たす役割を明らかにすることを旨とし、研究を着実に推進している。

(6) 一方、これらの世界的・先端的研究への参加・実施・経験を通して、大学の役割であ

る、将来のプラズマ核融合研究の基盤を支える人材の教育・育成・輩出の一層の充実を図り、研究成果を基に学術論文・学位論文を書き、様々な研究所や先端企業に多数の学生を送り出している。

特に、「学生の多数の学位論文・学術論文・学会等の発表の創出と、先端知識と哲理を備えた学生の社会への輩出、そのための教育・研究体制の整備を図る。」という当初目標に対し、また、教育面での「学生の多数の学位論文・学術論文・学会等の発表の創出」を行うという具体的改善目標に沿って、平成16年度には、学生の育成を図るべく、自然科学類の卒研究生6名、大学院の研究科にあつては、物理学研究科・数理物質科学研究科・理工学研究科大学院生23名の日々の研究指導を行った。この内から卒業論文6編、修士論文11編、博士論文1編が作成された。

殊に、学生の、国際的学術誌への論文発表成果として56編を刊行し、国際会議での発表は44件を数え、その数は斯界では主導的数に及ぶ。

科学技術産業や初等中等教育等を広範に支える人材供給・輩出の目標に対し、今年度は10名が巣立った。

また、当該グループの教員の指導下で、数理物質科学研究科「優秀論文表彰」修士課程学生表彰、関連して理工学研究科長賞表彰をそれぞれ得たことは、これらの教育・研究成果の一端を示すものである。

## (2) 研究成果の詳細

(1) 高温イオンモードにおいてこの10年来突破できなかったイオン閉じ込め電位  $\phi_c=1\text{kV}$  の壁を突破し、これまでの最高電位を3倍に高める、 $\phi_c=2.1\text{kV}$ の斯界で最高イオン閉じ込め電位値の達成に成功した。[図1]

即ち、今回プラグ部電位  $\Phi_p$  の著しい増大の成功に伴い、イオン閉じ込め電位  $\phi_c$  の値を、従来よりも3倍大きくすることができたため、セントラル部電位  $\Phi_c$  は更に著しく上昇（プラグ部からのウォーム電子等による電気伝導）し、その電位の2階微分  $(-d^2\Phi_c/dr_c^2)$  である電場のシア  $dE_r/dr_c$  が従来よりも著しく大きくなった。

この高電位形成は、従来とは質の異なる  $E_r$  シア効果、即ち、不均一な乱れであるプラズマ中の電磁流体渦(Vortex)の明白な抑制・プラズマ閉じ込めの改善を含む、径方向電場シアによるプラズマ安定化効果の顕在化現象の、世界に先駆けての2次元X線断層撮像観測の成功を導いた。

この成果の大きな意義は、プラズマ閉じ込め改善Hモード理論で予測されていた、「径方向電場シア形成による電磁流体渦の抑制がこのHモードを形成する鍵」であるという物理メカニズムを、初めて2次元実験データとして実証したという点にある。

これらの成果は、上述の IAEA核融合エネルギー国際会議における発表や、Current Trends In International Fusion Research (2005年3月, Washington D.C.; IAEA共催) 国際会議に於ける招待レビュー講演、更には 米国物理学会誌 *Physical Review Letters* **94**, 085002 (2005) [1]等に発表した。

尚、この電位生成は、最近の韓国HANBIT(ハンビット)tandem mirror やロシアのAMBAL-M

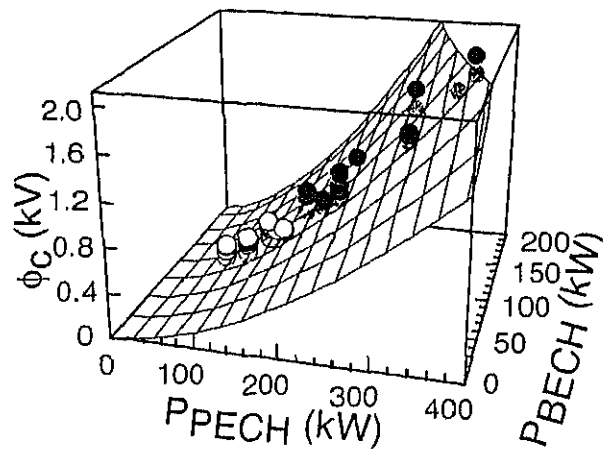


図1 Three-time progress in ion-confining potentials  $\phi_c$  including the world's record of 2.1 kV (filled circles), in comparison to  $\phi_c$  attained 1992-2002 (open circles), fits well to the scaling surface of  $\phi_c$  with plug ( $P_{PCH}$ ) and barrier ( $P_{BECH}$ ) ECH powers.

tandem mirror、更には従前の米国のTMX-U装置の結果を含め、本結果は高温イオンモード ( $T_i = 5 \text{ keV} - 20 \text{ keV}$ ) に於ける、最大の閉じ込め電位生成新記録であると共に、「無衝突ミラープラズマにおける $E_r$ シアア効果」としても世界的に先例を見ないものである。

(II) 高電位生成 [図 1] に拠る、強い半径方向電場 $E_r$ シアア( $dE_r/dr_c$ ) の形成 [図 2] と、これに伴うプラズマ閉じ込め改善 (非両極径方向拡散の抑制: 図 3) とプラズマ・パラメータ向上、更にはプラズマ内の乱流渦(vortex)の抑制・消滅 [図 4] の発見。

この10年来の値に比し、3倍にまで急増大・進展した生成高電位により、以下の式のように、強い半径方向電場 $E_r$ シアア( $dE_r/dr_c \sim \text{数}10 \text{ kV/m}^2$ )の形成が行われ、下記の様に、プラズマ安定化並びに閉じ込めの改善が行われる事がプラズマ内部のX線断層撮像画像データと共に初めて明らかになり、電場シアアの効果の更なる新たな知見が得られた。これは今後のトカマクやヘリカル等の他形式のプラズマ閉じ込め改善に対するメカニズムの究明・普遍化への、端緒と成りうる斯界に強力なインパクトを与える成果である。

即ち、 $dE_r/dr_c$  がセントラル部電位( $\Phi_c$ ) 或いはプラグ部電位( $\Phi_p$ ) に比例する事は、 $dE_r/dr_c = d/dr_c(-d\Phi_c(r)/dr_c) = -d^2/dr_c^2 (\Phi_c(0)\exp[-(r_c/a)^2]) = 2(1/a^2)[1-2(r_c/a)^2] \times (\Phi_c(0)\exp[-(r_c/a)^2])$ 。(茲に、セントラル部電位 $\Phi_c$ は、セントラル部重イオンビームプローブ (HIBP) や セントラル部からの端損失イオンエネルギースペクトル計測器(IES)等の実験データから  $\Phi_c(r) = \Phi_c(0) \exp[-(r_c/a)^2]$  の形で、ガウス型の半径分布形状をしており、電位を作るプラグ部ECHパワーのガウス分布形状のローブ  $P_{ECH}(0)(\exp[-(r_c/a)^2])$  と良く一致する。また プラグ部とセントラル部はwarm electron等による伝導があり、 $\Phi_c(r_c)$  と  $\Phi_p(r_c)$  は実験的にも良い比例関係になっており、プラグ電位の上昇・向上は、セントラル電位の上昇をもたらす比例則データが得られている。)

以上より、セントラル部中心電位値  $\Phi_c(0)$  が大きいほど、シアア $dE_r/dr_c$  も大きくなる事がわかる。

右図 2(I)(II)は、高温イオンモードに於いて、プラグ ECH 印加前 (70-75ms) とプラグ ECH 電力180kWで印加中(96-101ms) のデータセットを比べたものである。ECH印加前のプラズマ断面の方位角 $\theta$ 方向の位相相関のあるコーヒーレントなドリフト波(マイクロ波フラウンホーファー法や表面のLangmuirプローブで同定:例えば、A. Mase et al., 文献[9])に加え、乱雑でturbulentな振動成分[図 2(b)]が見られ、図 2(c)(d)に示すように、これは半径全体に渡り存在している。

一方、ECH印加と共に高電位が形成されると、図 2(g)に見られるように、(b)に見られた揺動成分がきれいに消える。空間分布を見ても、 $r_c \approx 6 \text{ cm}$ 近傍 (電場シアア0) で drift波も turbulentな揺動成分も残っているが、他の空間ではきれいに消える。

この時に、上記のHIBPやIESで求めた電位分布から $E_r$ シアア分布を、更に密度分布を併せて考慮したnormalized vorticity  $W_r$ を求めたものが夫々図 2(f)(k)並びに(e)(j)で、

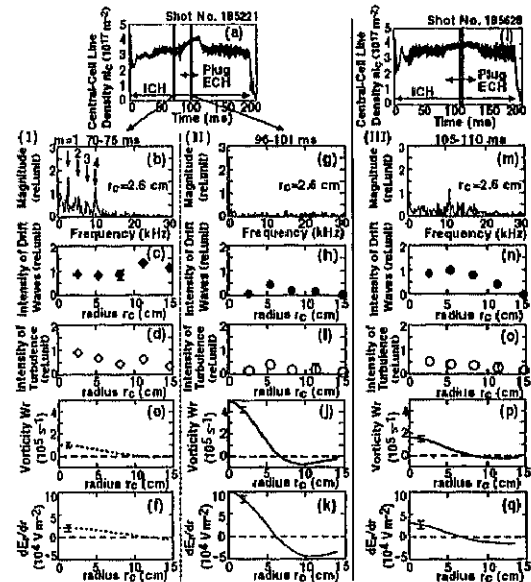


図 2 Data sets of (I) ICH plasmas having a weak shear (a small  $W_r$ ) [(b)-(f)], and (II) with plug ECH (180 kW) producing a strong shear (a large  $W_r$ ) [(g)-(k)]. (III) Another data set during weaker plug ECH (120 kW) in (l)-(q) having a weaker shear as compared to that in (g)-(k). Noisier and earlier-saturated density rise in (l) during ECH is found in comparison to that in (a).

ECHと共に確かに大きなシアード $E_r/dr_e$ が形成され[図 2(k)], また図 2(k)でよく見ると6cm近傍で確かにシアード $E_r/dr_e$ が無くなっており、上の予想と合致する。尚、茲で、 $a$ の値は実験では9cmであるので、シアアの無くなる $r_e=(\sqrt{2}/2)a \approx 0.71a$ は6.4cmと計算され、上記の実験値6cmと比較的よく一致している。

このことは、絶対値もさることながら、Hモード生成時のように、 $E_r$ シアアの効果が、主要なメカニズムとして、これらのdrift波やturbulentな揺動の抑制に効いていることを強く示唆している。

図 2(III)は、(I)(II)と同様のデータセットを示したもので、プラグECH電力を120kWに下げ (II)に比べて電位を大きくせずに行ったものである。図 2(m)-(o)より、プラグECH印加中に於いてもdrift波やturbulentな揺動成分が抑制されずに残っていることが分かる。このとき、図 2(q)に示すように、ECH印加中ではあるが図 2(k)に比べると弱い電場シアアが形成されていることが分かる。また、このような弱いシアアの場合は、ECH印加中の電子線密度の時間的上昇は低いレベルで飽和している[図 2(l)]。これとは対照的に、ECH印加中に強いシアアが形成されると、電子線密度信号の揺動が減少すると共に、密度が上昇している[図 2(a)]。

このような密度上昇の差異について、以下の粒子バランス式に基づく詳細な検討を行う。強い電場シアアが存在する場合について計算すると、図 3(a)に示すように、

$$e \frac{dN}{dt} = I_S - I_{||} - I_{\perp}$$

の密度上昇(磁力管内のプラズマ粒子数 $N$ の上昇)が、中性粒子数を示すソース電流 $I_S$ から端損失電流 $I_{||}$ を差し引いた量とECH印加中には一致し、径方向拡散電流 $I_{\perp}$ が無視できる事がわかる。(粒子バランスの議論の詳細は、例えば文献 [7].) 一方で、ECH電力を下げた、比較的弱い電場シアア形成時には、図3 (c)に示すように、径方向拡散電流 $I_{\perp}$ が無視できなくなる。

ここで、 $I_{||}$ はイオン・リペラー電圧を正弦波掃引して得られるIESの端損失電流信号、即ち、図 3(b)(d)に示す鋸歯状信号のエンベロープより得られる。これらは、 $I_{\perp}$ を無視できると仮定したパスツコフ理論から予想される $I_{||}$  [図3(b)(d)の黒丸]と良い一致を示すことから、図 3(a)で得られた $I_{||} \gg I_{\perp}$ とコンシステントな結果となっている。

この現象の空間構造のX線撮像に初めて成功したデータが図 4である。図 4では、(b)のECH印加

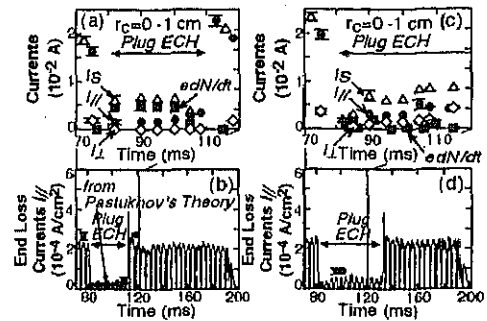


図 3 Improved confinement having a strong shear during ECH in Figs. 2(g)-(k) is analyzed from (a) a particle-balance equation; no appreciable transverse loss  $I_{\perp}$  and consistently good agreement with (b) Pastukhov's predicted  $I_{||}$  (filled circles) are found. On the other hand, poor confinement with a weak shear [Figs. 2(l)-(q)] is accompanied by an appreciable  $I_{\perp}$  in (c).

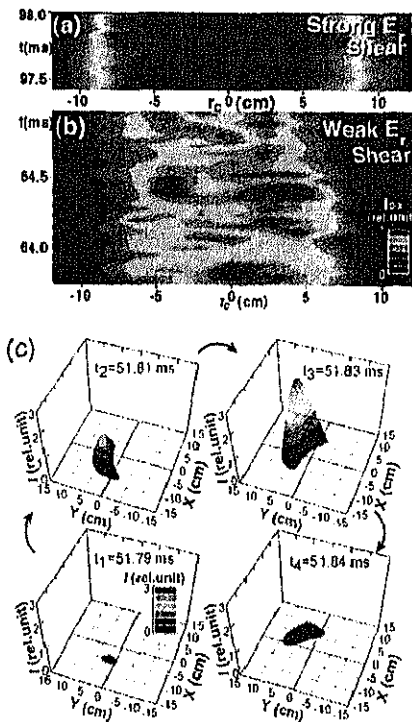


図 4 Contours of central-cell x-ray intensities in (a) strong and (b) weak  $E_r$  shear cases. Vortex-like structures are found in (b). The temporal evolution of a vortex is exemplified in (c) by the use of our developed x-ray tomography systems.

前に局所的な渦構造が、時間と共に不安定に変化しながら、生成されたり消滅する時間変化を繰り返す。しかしながら(a)のECH印加と共に、これらの渦構造が「晴れ渡るように」消えて行き、温度も上昇する。(尚、このときにイオン温度( $\approx 5$  keV)も同様に上昇する。)

更に図4(c)は、二方向からのX線トモグラフィ計測により、初めてその詳細が明らかとなった渦構造の空間時間変化を表す。渦構造は発生から消滅までの典型的なライフタイムが $100\mu\text{s}$ 程度であり、 $E_r \times B_z$ ドリフト速度程度の速さで回転していることが確認された。また図4(c)より、渦構造の中心位置が、初期には $r_c \approx 5$  cmであるのに対し、検出器のノイズレベル近くまで減衰する頃には $r_c \approx 7$  cmと径方向外側に向かい移動していることが分かる。このような渦構造の時間変化の描像は、図3(c)(d)に示した電場シアアが弱く、このような渦構造が存在しているときに、プラズマの閉じ込めの劣化(即ち、径方向拡散電流 $I_{\perp}$ が無視できなくなる状態)が生じている描像とも一致する。

本成果の意義は、ITERの要となる高温核融合プラズマ閉じ込め原理であるHモードの物理予想の実証・究明として、「径方向電場シアア形成による電磁流体渦の抑制がこのHモードを形成する鍵」であるという物理メカニズムを、初めて2次元実験データとして実証したという点が挙げられる。また、乱流渦と電場シアアの相関を初めて示したものであり、今後はITB生成との関係を究明することが緊要な課題となっている。

( III ) 高電位生成や電場シアアの形成の背景を成す物理原理である、電位生成機構・物理比例則について。特に、これまで我々が提唱してきた電位生成理論の拡張性(電位・電場シアア形成・制御法に繋がる)について。

ガンマ10の代表的プラズマ・モードであるHigh Potential Mode、並びにHot Ion Modeの両モードの電位生成機構に普遍的に共通する物理法則を見出す事は、両モードを統合し高電位・高温プラズマを同時に維持する電位生成手法の、将来への比例則・予測をする上で、また、電位や電場のシアアの効果を生成・制御するための学術基盤としての本質を成す。

そのために、*Phys. Rev. Lett.* 86, 4310 (2001)で我々が提唱した、「コーエンのStrong ECH理論[15]による電位生成物理機構の定説 $\phi_c = T_e [0.665 (n_p/n_e) \exp(1.19 \phi_b/T_e)]^{2/3} - \phi_b$ に対して、この式の電子温度 $T_e$  [keV]を決める物理機構として、パスツコフの電位閉じ込め効果に関する定説[16]を用いサーマルバリア電位 $\phi_b$  [kV]による電子エネルギー閉じ込め時間を導出し、エネルギー・バランス式からの予想温度式を求め上式の $T_e$ に代入する。更にコーエンの理論のソース項として、サーマルバリア電位を越えて磁力線に沿ってプラグ部に流入するセントラル部電子をパスツコフ理論から求め、プラグ部ECHがこれを加速してプラグ電位、或いはイオン閉じ込め電位 $\phi_c$  [kV]を生成すると考え、この2大理論をエネルギーバランスの式を介して初めて結合・統合する、電位生成と電位の効果の「新統合理論」を提唱した。

本成果は、上記のガンマ10の代表的プラズマ・モードにおいて見出した「電位生成及び生成電位効果の新統合理論・比例則」の予想と、電位生成の今回の進展に伴う生成電位データが合致し、本「電位生成電位効果の統合理論」の拡張性が、新たなセントラルECHや、プラグ電位生成用スロッシングNBI等の外部加熱電力重畳時にも成立する事を初めて実証するものである。これは、今後の電位生成への拡張性・伸張性の将来展望を与える、重要な比例則実証結果である。

[1] T. Cho et al., *Phys. Rev. Lett.* 94, 085002 (2005).

[2] T. Cho et al., Plenary Invited Talk in the 5th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Novosibirsk, 2004).

[3] T. Cho et al., in *Fusion Energy* (Proc. 20th IAEA Int. Conf. Vilamoura, 2004).  
IAEA-CN-116/EX/9-6Rd.

- [4] T. Cho et al., Invited Review Talk in the 6th Symposium on Current Trends in International Fusion Research: A Review (Washington D.C., 2005).
- [5] S. Miyoshi *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th IAEA International Conference, Innsbruck., 1978)* **2**, 437 (1979).
- [6] S. Miyoshi et al., in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 13th IAEA Int. Conf. Washington D.C., 1990)* Vol. 2, IAEA, Vienna (1991) 539; Plasma Physics Rep. **23**, 723 (1997) [*Soviet Journal of Plasma Physics*].
- [7] T. Cho *et al.*, Phys. Rev. Lett. **64**, 1373 (1990); Phys. Rev. A **45**, 2532 (1992).
- [8] Y. Kiwamoto et al., Phys. Plasmas **3**, 578 (1996).
- [9] A. Mase et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 2281 (1990).
- [10] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 4310 (2001).
- [11] T. Cho et al., Nucl. Fusion **41**, 1161 (2001).
- [12] T. Cho et al., Nucl. Fusion **43**, 293 (2003).
- [13] T. Cho et al., in Fusion Energy (*Proc. 19th IAEA Int. Conf. Lyon, 2002*) IAEA-CN-94/EX/C1-4Ra.
- [14] T. Cho et al., J. Plasma Fusion Res. **80**, 81 (2004).
- [15] R. H. Cohen, Phys. Fluids **26**, 2774 (1983).
- [16] V. P. Pastukhov, Nucl. Fusion **14**, 3 (1974); R. H. Cohen, M. E. Rensink, T. A. Cutler, and A. A. Milin, Nucl. Fusion **18**, 1229 (1978); R. H. Cohen, *ibid.* **19**, 1295 (1979); **19**, 1693 (1979).

以下に、個々のより詳しい研究成果について述べる。



#### 【4】 高電力ジャイロトロンを用いた高電位形成実験 [1-3]

##### 1. はじめに

ガンマ10では、プラグ部ECRHの高電力化計画が進行中である。平成15年度ではこの第一段階として、既設ジャイロトロン定格値200kWを越えて運転することを試みた。その結果、高イオン温度モードにおいて加熱電力240kWで、イオン閉じ込め電位の記録値1.4kVを達成した。しかし、本来200kW定格として設計されているジャイロトロンの高電力化には限界がある。そこで、平成16年度は高電力加熱の第二段階として、15年度から日本原子力研究所との協力で開発を進めてきた新規高電力ジャイロトロンを導入して、さらに高電位を形成する実験を行った。

まず、新規ジャイロトロンを西側プラグ部に設置し、発振試験を行った。その結果、ジャイロトロン出力窓部で500kW以上、MOUを経てコルゲート導波管を経由してプラグ部に入射する前で測定した伝送電力400kW以上を得た。そこで高電位形成実験を行ったところ、イオン閉じ込め電位は入射電力とともに上昇し、プラグ部入射電力370kWで最大閉じ込め電位2.1kVが得られた。高電力電子加熱効果のよい観測媒体として、端損失電子の計測も継続し、加熱電力とともに端損失電子の平均エネルギーとしての実効温度 $T_{eff}$ が大きくなることを確認した。また、端損失電子の特徴的なエネルギースペクトルを解析し、基本波共鳴層より弱磁場側でも電子が加熱されることを示した。

##### 2. 新規ジャイロトロン導入と性能試験

ジャイロトロンは高電力化のため空洞径を大きくする必要があるので、TE42モード動作とした。高電力発振のためビーム電流値を増大させようとする、カソード径を大きくしなければならぬ。ただし、既存設備を利用するので、ボディー部の外径はマグネットのボア径80mm以内という条件がある。アノードを用いた3極管構造では、この条件を満たすことができないので、アノードなしの2極管とした。プランソ型放射器と3枚のミラーからなる内蔵モードコンバータを経て、ほぼガウスビームとして水平方向にマイクロ波電力が放射される。この出力は非球面ミラー1枚からなるMOU (Matching Optics Unit)を通り、垂直上方のコルゲート導波管のHE11モードに結合する。マイクロ波電力は、マイターバンド2個を経由してガンマ10の真空容器内に導入される。その後、HE11モード対応として新たに設計されたアンテナ系から、プラグ部基本波共鳴層に向けて放射される。共鳴層上の放射分布はほぼ軸対称である。

図1は、マイターバンド2個通過後に水負荷で測定した伝送電力をジャイロトロンビーム電流に対してプロットしたものである。この電力がプラズマに入射されると考えられる。ビーム電流18Aで400kWが得られている。ジャイロトロン真空窓直後で測定すると500kW以上が得られる。この差は、ジャイロトロン内の不要モード発振、MOUが1枚ミラー構成のためコルゲート導波管への結合が完全でないこと、マ

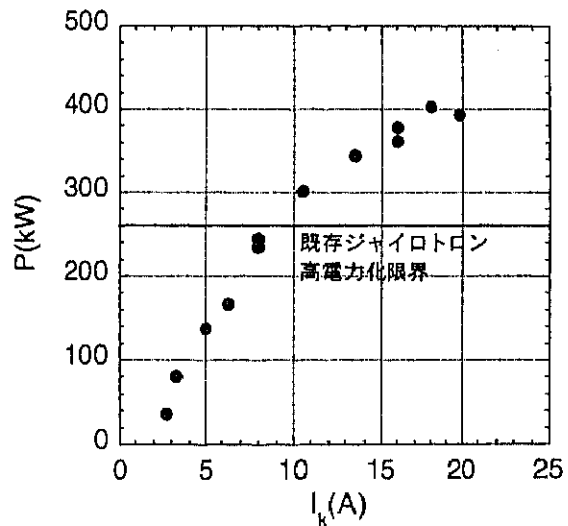


図1 新規ジャイロトロンによる入射電力のビーム電流依存性

イターバンドによるモード変換損失等によると考えられる。しかし、図1でわかるように、既存ジャイロトロンの高電力運転の限界を大きく超える加熱電力を手にすることが出来た。2号機ではこれらの点を改良してさらに高電力をプラズマに入射できると期待している。

## 2. 新規ジャイロトロンを用いた高電位形成

新規ジャイロトロンをガンマ10の西側プラグ部に設置して、高電位形成実験を開始した。東プラグ部は、既存ジャイロトロンの高電力運転に対応した。このため、16年度の実験では東西プラグ部の加熱電力が非対称である。

図2(a)に、入射電力300 kWの時のプラグ部 $\Phi_P$ 、中央部 $\Phi_C$ 及びバリア部電位 $\Phi_B$ の変化を示す。ECRHによりプラグ電位が大きく上昇して、高いイオン閉じ込め電位 $\phi_c = \Phi_P - \Phi_C$ が形成されている。この時、図(b)の示すように、端損失イオン束は大きく減少する。また、中央部電子密度が上昇する。

図3は、加熱電力に対してプラグ電位の到達値をプロットしたものである。図中、×印、白抜き三角および黒三角はそれぞれ、これまでの実験からのデータ、プラグ部高電力加熱の第一段階としての既存ジャイロトロンの高電力運転実験からのデータ及び新規ジャイロトロンを用いた実験からのデータを示す。これらのデータは、ガンマ10の高イオン温度モードの実験から取っている。加熱電力とともに、プラグ電位の到達値が直線的に上昇することがわかる。新規ジャイロトロンを導入により16年度に得られたイオン閉じ込め電位の最高値は2.1 kVである。これは、15年度の既存ジャイロトロン高電力運転により得られた1.4 kV

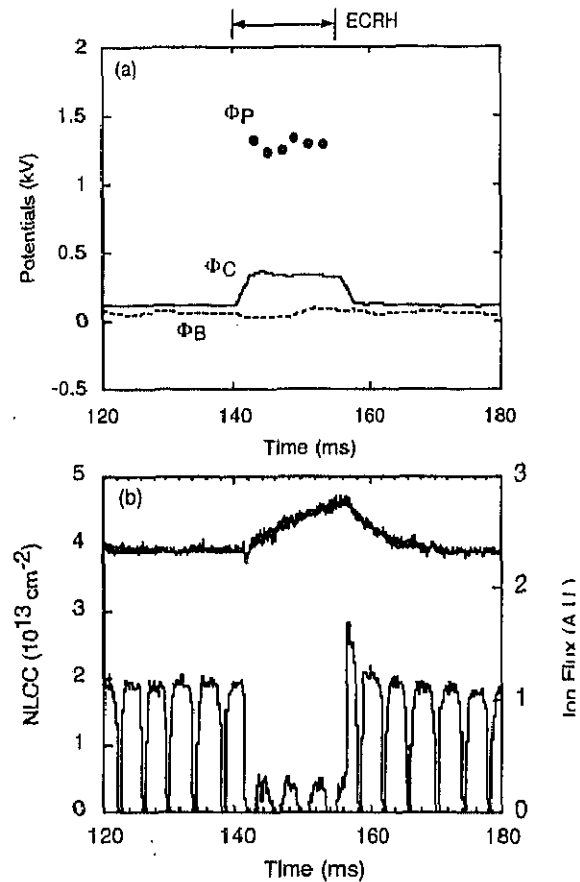


図2 (a) 300 kW 入射時のプラグ部、中央部およびバリア部電位、(b) 端損失イオン束と中央部線密度。

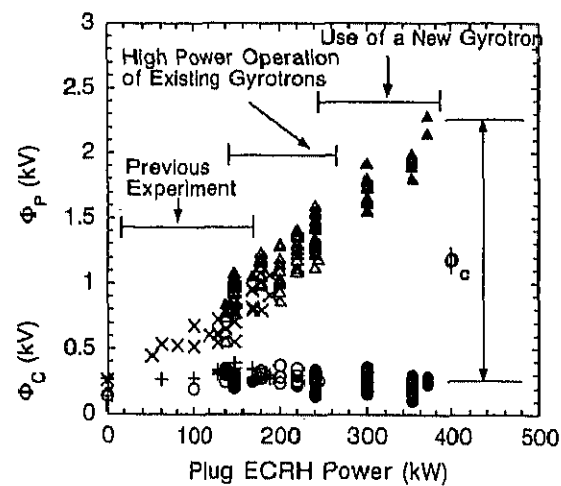


図3 プラグ電位、中央部電位の加熱電力依存性

を大きく上回る。実験点には加熱電力に対する飽和傾向は見られない。今後さらに高電力化することにより、いっそう高電位が得られると期待される。

### 3. 端損失電子の $V - I$ 特性と生成起源

これまで、ECRHにより生成される軸方向電子流が軸方向電位分布の決定要因であること、よって電位形成の理解には端損失電子が重要な情報を与えてくれることを示してきた。また、端損失電子のエネルギースペクトルは電子加熱過程を反映している。

図4に、高電力加熱時の静電エネルギー分析器で測定した端損失電子の  $V - I$  特性の変化を示す。端損失電子のエネルギースペクトルは単一温度では表現できないが、高電力加熱でも温度  $T_L$  の低温成分、温度  $T_H$  の高温成分からなる2成分のマックスウェル分布でよく近似できる。加熱電力の増大により、端損失電子の中で高いエネルギーをもつ電子の割合が一層大きくなっている。

このようなエネルギースペクトルの形成原因を調べることは、電子加熱の物理過程を通して電位形成を理解するという立場からは、非常に重要である。とくに  $T_L$ 、 $T_H$  の両成分の起源を知る必要がある。詳しいデータ解析により、低温成分は東西のエンドプレートの負電位間を往復運動している電子群、高温成分はプラグ/バリア部のミラー磁場に捕捉された電子群が加熱電磁波の共鳴的な作用による速度空間拡散の結果として端損失してることが確認された。また、共鳴層の弱磁場側での電子加熱を強く示唆するデータを得た。17年度の課題は、加熱電力に対して多くのデータを分析するとともに、共鳴層近傍における加熱波の吸収分布を実験・理論の両面から詳細に調べて、端損失電子の生成過程をECRH物理の観点から、より一層明らかにすることである。

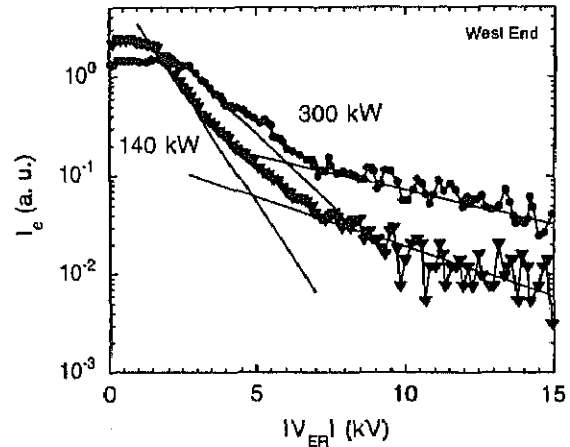


図4 静電エネルギー分析器で測定した端損失電子の  $V - I$  特性

- [1] 斉藤輝雄, 石井亀男, 板倉昭慶, 市村 真, M. K. Islam, 片沼伊佐夫, 立松芳典他, ガンマ10プラグ部における高電力電子加熱実験, プラズマ・核融合学会第21回年会 25pA01
- [2] 池上博和, 斉藤輝雄, 立松芳典, 関根貴之, 永井大智, 野崎潔, 町田紀人, 片沼伊佐夫他, ガンマ10における高電力電子加熱実験での端損失電子計測, プラズマ・核融合学会第21回年会 26aB08P
- [3] SAITO Teruo, ISHII Kameo, ITAKURA Akiyoshi, ICHIMURA Makoto, ISLAM Md. Khairul et al., High Power Electron Heating Experiments at the Plug Region of GAMMA 10, Journal of Plasma and Fusion Research 81, No. 4 (2005) pp.288-295.

【5】 マクスウェルシミュレーションによるプラグ部電子加熱マイクロ波パワー吸収率の評価 [1]

ガンマ10プラグ部では、基本波電子サイクロトロン共鳴加熱を用いて、プラズマ閉じ込め電位の形成を行っている。28GHzの高電力マイクロ波ビームをプラズマ中に入射し、共鳴磁場強度1Tで、局所的に電子加熱を行っている。入射するマイクロ波ビームは直線偏波で、磁場にほぼ垂直に入射されるため、Xモードほぼ100%で伝播すると考えられる。プラグ部は希薄なプラズマの条件を満たし、Xモード入射がマイクロ波パワーのよい吸収条件になっている。

マイクロ波は高磁場からの入射で、いわゆるビーチ加熱の配位を満たす。共鳴点でのガンマ10軸方向の磁場の変化のスケール長は0.4mであり、温度1keVの電子に対する共鳴層の軸方向の厚さを見積もると約2cmである。このように、局所加熱が実現され、狭い領域で大きなマイクロ波パワーの吸収が起こっており、その吸収量の正確な評価は難しい。

昨年度報告した第2高調波による加熱吸収量の評価には3次元レイトレーシングが適用されているが、プラグ部基本波加熱においては吸収が大きく、波数の虚数部 $k_i$ が実数部 $k_r$ に匹敵するほど大きくなるため、WKB近似の条件は満足されず、レイトレーシングによる計算結果の信頼性ははっきりしない。そこで、最近北條らによって開発されたマクスウェルシミュレーションに、誘電テンソルを通して基本波加熱吸収の効果を取り入れ、基本波電子サイクロトロン共鳴加熱によるマイクロ波パワーの吸収率を計算した。

電子の密度及び温度分布は磁気フラックス $\psi$ の関数として与えた。図1に規格化軸上密度 $x_0 = (\omega_{pe0}/\omega)^2$  に対してのマイクロ波の吸収率の計算結果を示す。ここで $\omega_{pe0}$ はガンマ10軸上の電子プラズマ振動数で、電子密度に比例する。28GHzの周波数のとき $x_0$ は軸上密度 $n_0$ と $x_0 \approx n_0 [cm^{-3}] / 10^{13}$ の関係がある。ガンマ10実験での典型的な値は $x_0 \approx 0.01$ である。図中□がマクスウェルシミュレーションによる結果を示す。これらは、誘電テンソルの吸収をとりいれた場合ととりいれない場合との共鳴点軸上におけるパワーの比を縦軸にプロットした。●はレイトレーシングによる結果で波数の虚数部をレイにそって積分することで、波の強度変化を計算して、吸収率を求めた。

実線は吸収率の解析的評価により求めた。ただし、密度、温度分布は一樣としているため、実際より過大評価になっている。 $x_0 > 0.1$ においては、有限密度の領域で、Xモードについては密度が増加すると吸収率が悪くなることが表れている。3つの手法による計算を比較する。マクスウェルシミュレーションとレイトレーシングの計算結果はよい一致を示した。また、解析評価も一樣プラズマの仮定による吸収の過大評価を考えると、矛盾のない結果といえる。

図2にマクスウェルシミュレーションによるビームに沿った吸収量および磁場強度の値を示

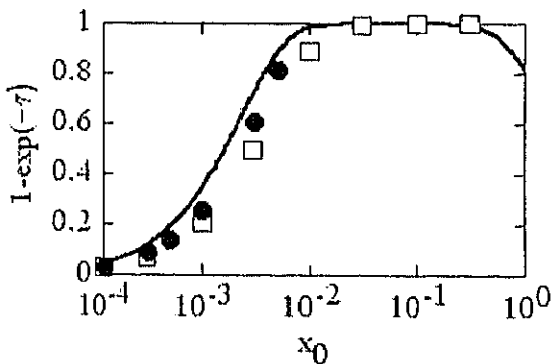


図1 吸収率の計算

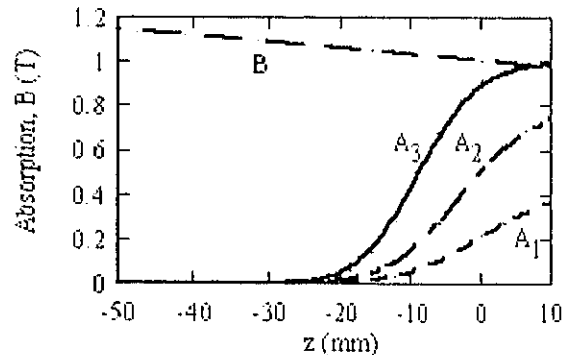


図2 ビームに沿った吸収量

す。  $z=0$  が磁場強度 1T の点である。 3つの太線は、異なる規格化軸上密度  $x_0 = 0.001$  (A1), 0.003 (A2), 0.01 (A3) に対する吸収率である。 ビーチ加熱では通常  $B > 1T$  のみで吸収が起こると考えられているが、有限温度で密度が低い場合は、  $B < 1T$  であっても吸収が起きている。

- [1] TATEMATSU Yoshinori, SAITO Teruo, HOJO Hitoshi,  
Evaluation of Absorption Rate by Using Full-Wave Maxwell Simulation for plug ECRH in  
the GAMMA 10 tandem mirror.  
Journal of Plasma and Fusion Research 80, No.5 (2004) pp.360-361.

## 【6】 ガンマ10中央部基本波電子加熱実験の進展 [1]

ガンマ10セントラル部では、イオンの効果的な加熱によりイオン温度が数 keV まで上昇するのに対し電子温度は 100eV 以下であった。電子温度に比べてイオン温度がかなり高いので、加熱されたイオンは冷たい電子との衝突によりエネルギーを失ってしまう。したがって、中央部の電子温度を上げることが重要なプロジェクトの一つである。この目的で、中央部の基本波サイクロトロン加熱による電子の直接加熱がスタートした。

中央部電子加熱アンテナシステムは、ジャイロトロンで発振した 28GHz, TE02 モードのマイクロ波をガンマ10上部の2インチ直径のポートから入射し、ブラゾフアンテナにより直線偏波に変換してプラズマ中に入射している。共鳴条件を満たす磁場強度 1T の位置はアンテナ位置から遠いため、アンテナからのビームを共鳴層に伝送させるのに、真空容器下部の反射鏡が必要である。

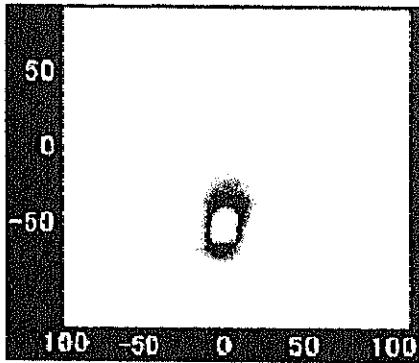


図1 昨年までの電力分布

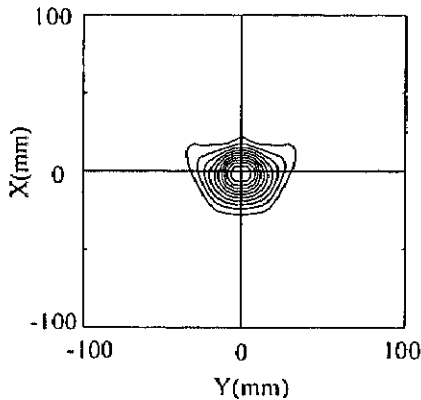


図2 反射鏡改良後の分布

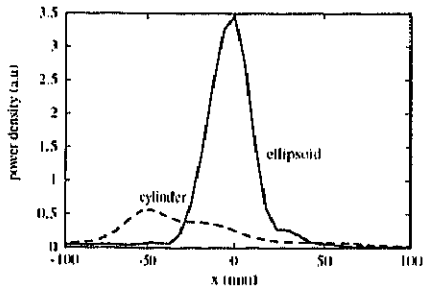


図3 電力分布の比較

昨年まで、この反射鏡として円筒真空容器の内面に沿った円筒鏡を用いていた。図1に低電力テストで測定したこのアンテナシステムの共鳴層断面でのビーム形状を示す。ビームのピークは軸から 50mm ほど離れたところにあり、加熱効率はよくなかった。

そこで、新しい反射鏡を設計し、今年度始めにガンマ10に設置した。新鏡は回転楕円体であり2つの焦点を、アンテナ近傍及び共鳴層軸近傍に選ぶことで、共鳴層軸上にパワーを集光できる。図2は計算によってもとめた新鏡による共鳴層断面上でのパワー分布である。ピークの位置は軸上に移動し、軸に近いところでほぼ軸対称の分布をしている。図3は共鳴層において鉛直方向の電力密度分布を示す。点線が、昨年までの円筒鏡によるもの、実線が新しい楕円体鏡によるものである。新しい鏡では、ピークの位置が軸上に移動したばかりでなく、その大きさもこれまでのものより約6倍にあがっている。

これは、鏡を楕円体にするだけで軸方向にもパワーを集光させているためである。プラズマコア部に到達するポインティングフラックスは、以前の約5倍に増加した。この鏡を用い

て電子加熱実験を行った。図4に

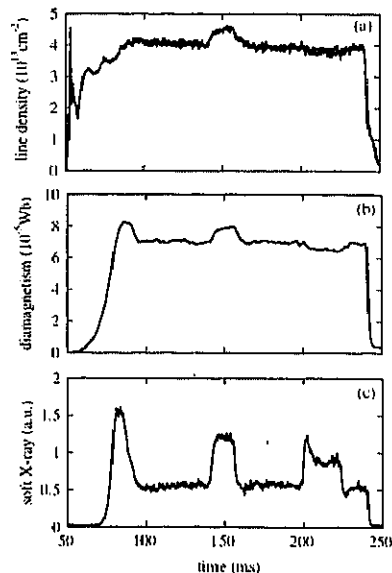


図4 実験での波形信号

上から実験で得られた線密度、反磁性量、ソフト X 線量を示す。プラズマはイオン加熱により生成、維持される。中央部電子加熱は 30kW のパワーで 200-225ms 間に印加されている。ソフト X 線信号は、以前の鏡では中央部の加熱印加直後には一瞬上昇するが、すぐに、もとのレベルまで落ちてしまっていた。それに対し、鏡を替えたのちでは、加熱の間、ソフト X 線信号の有限の増加が維持されている。電子温度は、印加前 60eV であったのが印加途中で最大 110eV まで上昇した。また他のショットにおいては、これまでの最高値 215eV の電子温度を達成した。このように、反射鏡の改善によって、電子加熱効率を上昇させることに成功した。

- [1] Y. Tatsumatsu, T. Saito, H. Ikegami, T. Sekine, D. Nagai, K. Nozaki et al.,  
Plan of Fundamental ECRH in the GAMMA 10 Central Cell,  
Transaction of Fusion Science and Technology 47 (2005) pp96-100.

## 【7】 イオンセンシティブプローブによる中央部周辺プラズマ測定 [1,2]

ガンマ10プラズマの閉じ込め特性を理解するためには、周辺プラズマの振る舞いを知ることが必要である。特に、ECRH による電位形成時の周辺部イオンを直接測定することは非常に重要である。イオンセンシティブプローブは通常、実験室の低温低密度プラズマに適用されるが、局所的かつ直接的にイオンを測定できる。そこで、ガンマ10中央部の周辺プラズマ測定に適用した。

イオンセンシティブプローブはコレクター面が磁力線に平行で、電子温度に対応するラーマー半径の数倍程度の高さ  $h$  の障壁をコレクターの外周に設ける。これで、電子はコレクターに入射できなくなる。ほとんどのイオンのラーマー半径は  $h$  より大きいので、サイクロトロン運動をしながらプローブ前面を運動するイオンの一部はコレクターに入射して、イオン信号となる。これから、イオンのみの情報を得ることができる。ガンマ10のセントラル部では高温イオンが生成されるので、このスキームに対して好都合である。

実際の信号でも電子電流はほとんど抑制され、イオン電流のみが検出される。測定では、三角波的に時間変化するバイアス電圧をコレクターに印加して電流電圧特性を記録する。図1はその一例で、三角波1周期分のバイアス電圧に対してイオン電流を片対数プロットしている。空間電位よりバイアス電圧が高くなると直線的に信号が減少する。これからイオン温度が評価される。このデータでは200 eV 弱である。空間電位で測定したイオン飽和電流からイオン密度を求めることができる。

ところで、この信号とイオン密度・イオン温度等の定量的関係は、電極の幾何学的配位に依存する。そこで、設定したイオン温度のマックスウェル分布を再現するように乱数的に発生させた多数のイオンに対して軌道計算を行い、イオン密度とイオン電流の関係をイオン温度の関数として評価した。また、有限要素法を用いて、コレクターに与えるバイアス電圧に対して前面の電位分布を求め、この電位分布を軌道計算に取り入れて、プローブの  $V - I$  特性を計算した。これを片対数にプロットするとほぼ直線となり、初めに設定したイオン温度に対して誤差10% 程度の温度評価が得られることがわかつ

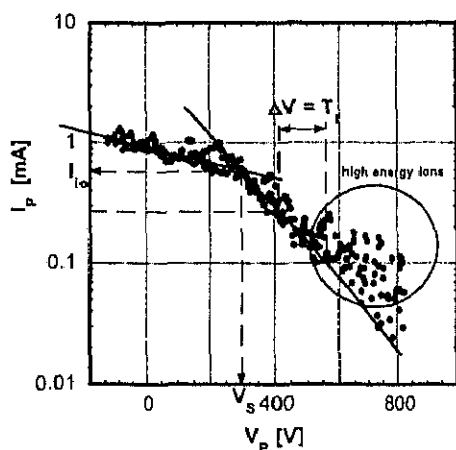


図1 周辺部イオンの  $V - I$  特性

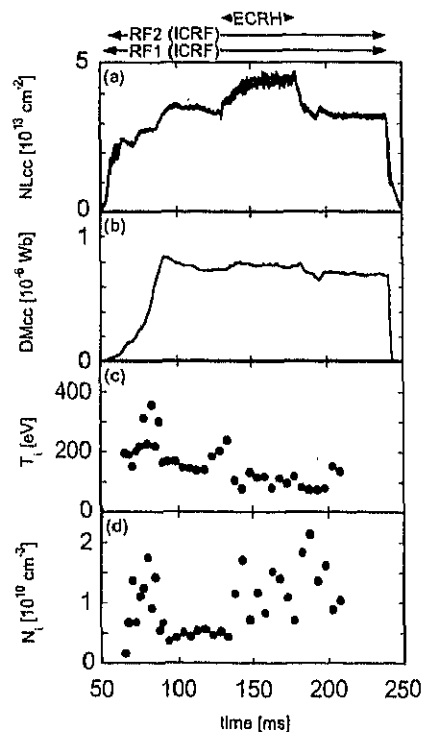


図2 周辺部イオンの温度・密度の時間変化



た。

こうして求めたプローブの基礎特性をもとにして、測定された信号を解析し、時間変化として示したのが図2である。これは典型的な高イオン温度モードのプラズマにプラグ ECRH が入射されたショットである。上から中央部線密度、中央部反磁性量、周辺プラズマのイオン温度、イオン密度を示す。イオンセンシティブプローブを用いた測定で、高イオン温度モードプラズマの周辺イオン温度が 100 - 200 eV、密度が  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  程度であることが初めてわかった。また、プラズマ立ち上がり時、イオン温度、密度ともに一旦高い値になりその後定常値に落ち着くことも明らかになった。イオン温度がピーク値をもつことは、AIC 波動の励起と強く関係している。多くのショットで、プラグ ECRH の印加により周辺部のイオン温度は減少し、イオン密度は増大することもわかった。

これらの特徴の他に、プラグ ECRH 印加時、プローブに流入するイオン電流が一瞬減少することがある。これは中央部線密度や反磁性量の増大と相関がある。ECRH による径方向輸送の変化の観点からの着目点である。また、イオン信号の低周波揺動の解析も可能である。ECRH 印加前の揺動の周波数スペクトルにより、ECRH 印加時の線密度上昇率に違いがあるというデータも得られている。プラズマの拡散と揺動の関係も調べて行く必要がある。

- [1] 関根貴之、齊藤輝雄、立松芳典、池上博和、永井大智、野崎 潔、町田紀人、市村 真他  
イオンセンシティブプローブによる GAMMA10 セントラル周辺部でのイオン測定、プラズマ・核融合学会第 21 回年会 25pB29P
- [2] T. Sekine, T. Saito, Y. Tatematsu, T. Yasuoka, H. Ikegami, D. Nagai, K. Nozaki, M. Ichimura et al.,  
Ion Measurement of the Edge Plasma in the GAMMA 10 Tandem Mirror Device with an Ion Sensitive Probe,  
Rev. Sci. Instrum. 75, No. 10 (2004) pp. 4317-4319.

## 【8】 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

プラズマ中での電位形成や閉込め物理を研究するための標的プラズマとなる初期プラズマ生成やイオン加熱、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16年度は、高周波による初期プラズマ生成の種となる、アーク放電を用いた高密度プラズマ源MPDアークジェット(プラズマガン)の特性測定(東北大学との双方向型共同研究)や、高周波波動計算コードの整備(京都大学との双方向型共同研究)、高周波プローブの開発を行なった。また、高周波加熱によって引き起こされるドリフト型の静電的揺動の解析とそのプラズマ挙動に与える影響についての解析が進展した。GAMMA10 に特徴的な微視的不安定性であるアルベンイオンサイクロロン(AIC)波動解析の高次高調波領域への拡張、日本原子力研究所と締結した協力研究により、那珂研究所の大型トラス JT-60U 装置でのイオンサイクロロン周波数帯(ICRF)の自発励起磁場揺動計測、双方向型共同研究に基づき実施された核融合科学研究所におけるLHD装置での揺動計測を行った。

### A. MPD アークジェットの放電特性とその流速の評価

初期プラズマ生成の種として用いられるMPDアークジェットは、タングステン陰極、モリブデン陽極の同軸構造を持つ直流放電プラズマ源である。東西両エンド部中心軸上に設置され、磁力線に沿ってセントラル部まで入射される。放電時間は1msと短パルスであるが、放電部では、 $10^{15}\text{cm}^{-3}$ を超す高密度プラズマが生成される。図1に東西プラズマガンの放電電圧電流特性を示した。コンデンサーバンク1kVの充電電圧で約6kAの放電電流が流れることがわかる。磁力線に沿って流れるプラズマの制御は、実験室ばかりでなく宇宙における電気推進等においても重要な課題であり、ミラー磁場配位における磁力線方向の流速、ICRF等による磁力線方向の加速に関する情報を得ることも目的の一つである。MPD放電の最適化は、放電電圧とガス流入量の調整でおこなうが、現在の動作領域ではガス圧、ガス入射電圧に強く依存しないことが明らかとなった。

プラズマ流速を計測するために、東北大学との双方向型共同研究として、マッハプローブをエンド部に設置した。プラズマ流の上流下流からのイオン電流、または、直角方向からのイオン電流を測定しマッハ数を評価するものである。図2に算出したマッハ数の径方向依存性を示した。径方向外側ほどマッハ数が大きく1に近づくことが明らかとなった。物理的内容を今後検討してゆく予定である。

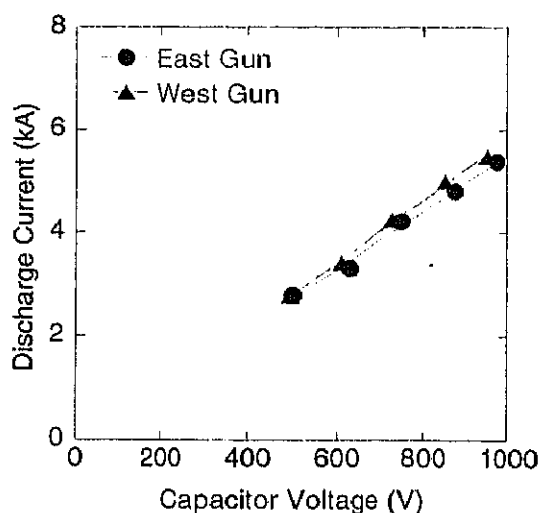


Fig.1

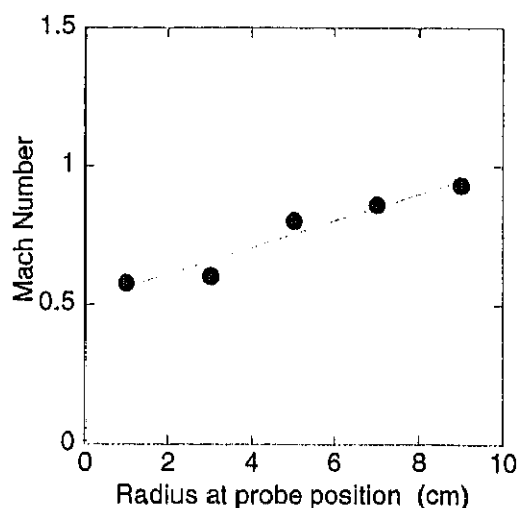


Fig.2

### B. 電子ドリフト波動の分散関係計測

ミラー磁場中のプラズマの巨視的振舞いを観測するために、従来プラズマ周辺部に設置した静電プ

ロープを用いて低周波揺動の方位角方向の分散関係を測定してきた。平成16年度は、高温イオン生成モードにおいて不安定なプラズマ放電の際に中心閉じ込め領域で観測される電子ドリフト波の磁力線方向の分散関係を測定できるように、静電プローブを新たに磁力線に平行に設置した。結果として、方位角方向と軸方向の分散関係の同時計測が可能となり、電子ドリフト波の典型的な分散関係を得ることができた。図3(a)に示したのが不安定なプラズマ放電の例であり、電子線密度、反磁性量の時間的変動が大きくなっている。これは加熱系のパワーや、水素供給ガス圧を調整することにより、不安定性が強く励起されるようにした放電である。このときの静電プローブの信号を高速フーリエ変換により周波数スペクトルの時間変化として示したのが図3(b)である。この例では 170msec~190msec の間に電子共鳴加熱に伴いフルート揺動が励起されていると考えられ、それ以外の時間帯では電子ドリフト波が励起されている。

図4(a), (b)に示したのが図3(a)の放電で静電プローブにより測定された分散関係で、横軸にそれぞれ方位角方向と磁力線方向の波数、縦軸に周波数をプロットしてある。ここでは、電子ドリフト波の回転方向を負の方向に定義しており、従ってフルート揺動の回転方向は正の向きとなる。また、この例では方位角方向の位相速度は約7 km/s で、磁力線方向の位相速度は約42km/sとなっている。本研究での典型的なプラズマパラメーターでは磁力線方向の位相速度は方位角方向の位相速度よりも4~7倍大きくなっていることが判明した。

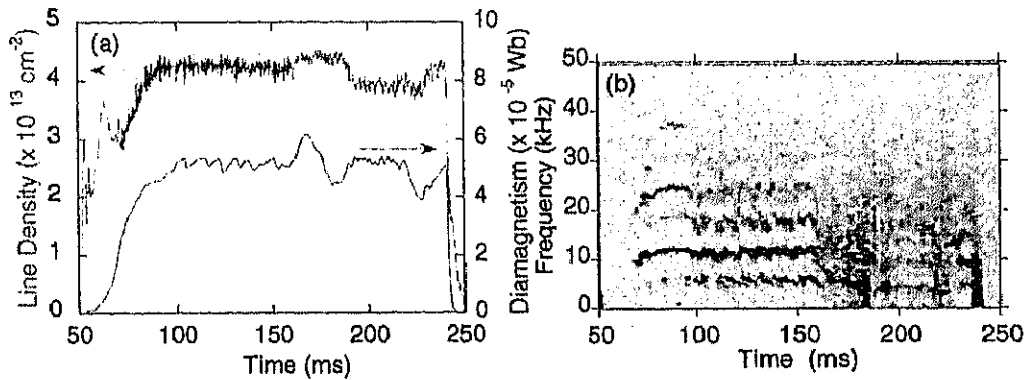


Fig.3

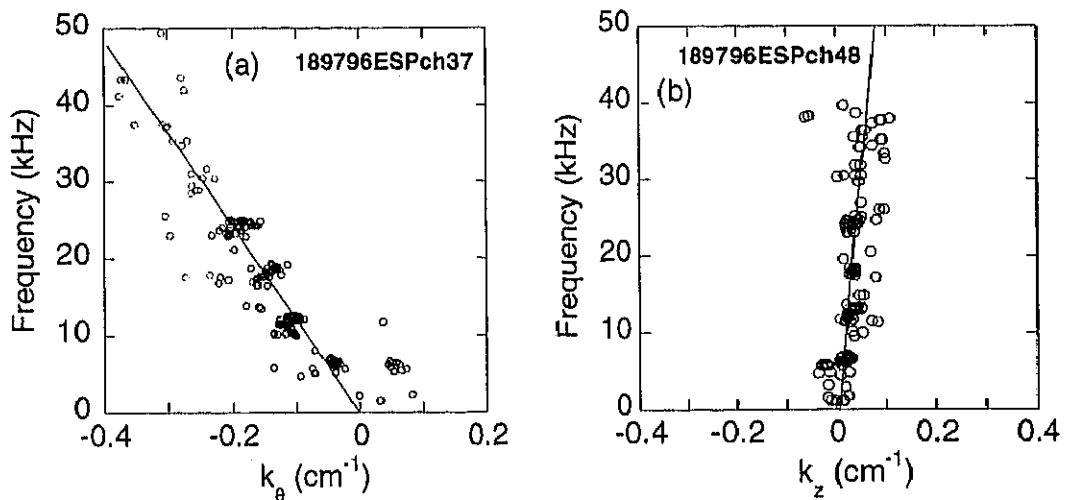


Fig.4

### C. 電子ドリフト波動と高エネルギーイオンの振舞い

セントラル部中央に設置した半導体を用いた検出器(ccHED)により、高周波印加時、及び、微視的不安定性に起因するに高エネルギーイオンの振舞いを計測している。イオンサイクロトロン共鳴加熱による高エネルギーイオンの生成、温度非等方性に起因してプラズマ中に自発的に励起されるAIC波動によるピッチ角散乱、高次高調波による高エネルギーイオンの選択的加速等の特徴的な振舞いに加えて、前項で述べた電子ドリフト型揺動発生時に、磁力線に垂直な方向へ高エネルギーイオンが輸送されることを示すデータが得られた。図5には、反磁性量の劣下を伴う電子ドリフト型揺動発生時のccHED信号(a)に現れた高周波数の変動と静電プローブによる揺動(b)の周波数スペクトルを示した。双方とも同じ周波数スペクトルを示し、20kHz付近に強い揺動が観測されていることがわかる( $m=+2$ の電子ドリフト波)。磁力線に垂直な方向に輸送される高エネルギーイオンは、ミラー磁場によるイオンの反射点付近の電子ドリフト型揺動に強く影響され、イオンのバウンス運動によって共鳴的に輸送される可能性が示唆された。

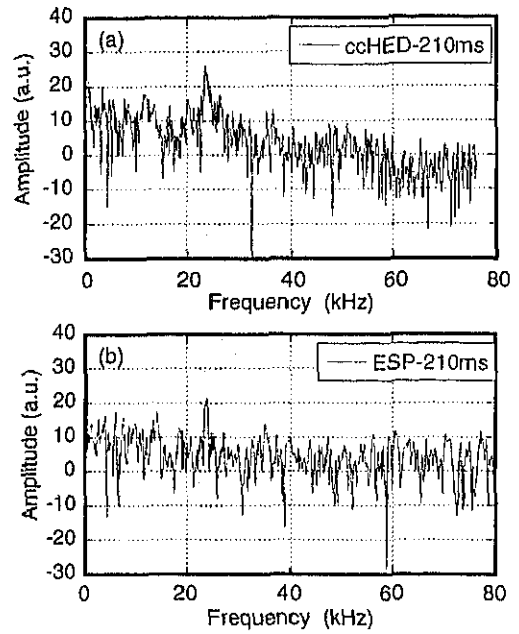


Fig.5

### D. 高次高調波領域でのAIC波動の解析

図6にGAMMA10で観測される基本周波数帯のAIC波動とその2倍付近の高調波波動の一例と線密度、反磁性信号を示した。反磁性量と線密度の上昇に伴いAIC波動が励起され、パラメタの変化とともにその周波数・強度が変化することがわかる。2倍の高調波揺動の特徴は、その励起周波数範囲が基本周波数帯の波動に比べて狭く、計算から予測される不安定領域が狭いことと定性的に一致することがわかる。プラズマパラメタに対する励起周波数、強度の依存性について解析を進めている。

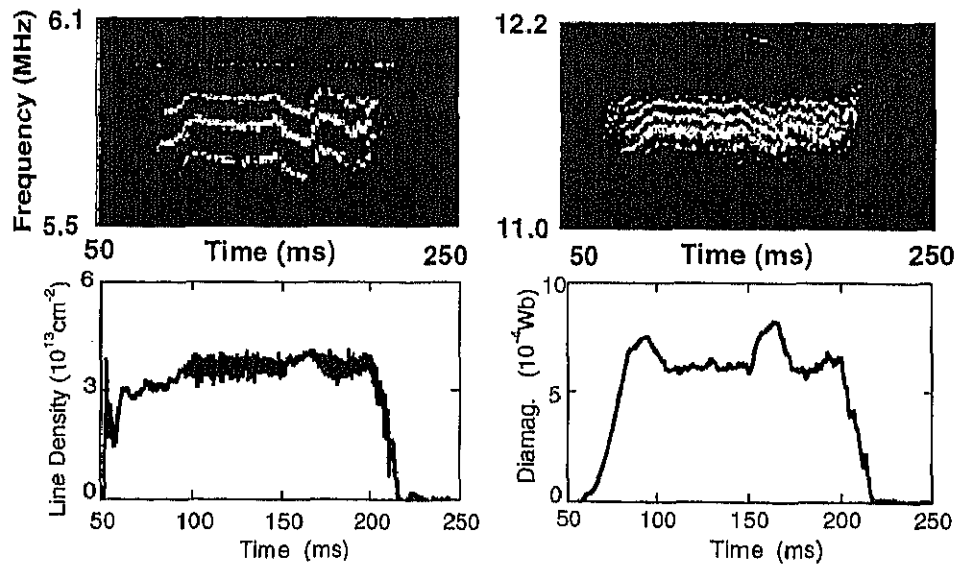


Fig.6

## 【9】 プラグ電位で跳ね返されるプラグポテンシャル(PP)バウンスイオンの径方向輸送の研究

タンデムミラー装置に於いて、プラズマ両端部近傍の閉じ込め電位及び強磁場部で跳ね返されるバウンスイオンを安定に存在させることは、閉じ込め時間を向上させプラズマ密度を増加させるための必須条件である。高出力ジャイロトロンの使用による閉じ込め電位増大に伴い、プラグ電位で跳ね返されるプラグポテンシャル (PP) バウンスイオンの径方向輸送が重要課題となる。PPバウンスイオンの径方向輸送が、通過する過程の半径方向の電位分布にどのように依存するかに着目し研究した。バウンスイオンの直接測定には、プラグ/バリア部の内側ミラースロート (IMT) 部に取り付けた荷電交換バウンスイオン分析器 (CXBIA: Charge Exchange Bounce Ion Analyzer) を用いて行なわれた。高閉じ込め電位生成時に於いて、PPバウンスイオンを安定に存在させる観点から、望まれる径方向電位分布を見出すことを目的とする。

### (1) プラグポテンシャル (PP) バウンスイオン残存比の検討

標準磁場配位では、中央ソレノイド部の磁場強度は4 kG、その両端のミラースロート (CM) 磁場強度及びアンカー部のミラースロート磁場強度は20 kG、プラグ/バリア部の外側ミラースロート (OMT) 及び内側ミラースロート (IMT) 部の磁場強度は30 kG、プラグ部の磁場強度は10 kGである。中央ソレノイド部からのイオンは、そのミラースロート (20kG) 近傍の磁場により跳ね返るCM (Central Mirror) トラップトイオン、ミラースロートとアンカー部を通過しIMT近傍の磁場により跳ね返るIMT (Inner Mirror Throat) バウンスイオン、IMT磁場を通過しプラグ部電位により跳ね返るPP (Plug Potential) バウンスイオン、プラグ電位も通過しプラグ/バリア部の外側ミラースロートで跳ね返るOMT (Outer Mirror Throat) バウンスイオン、電位及び磁場の何れの障壁にも跳ね返され無く磁力線に沿って流出する端損失イオンに分類され、図1に概略図を示す。

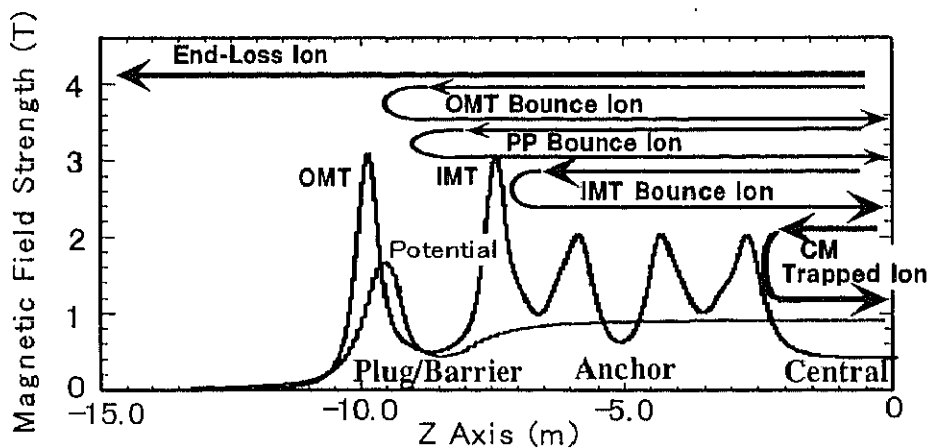


図1 磁場強度分布及び電位分布と各種バウンスイオン

今研究では、プラグ電位により跳ね返り非軸対称磁場配位を持つアンカー部を往復するPPバウンスイオンの径方向電場に対する輸送について、以下の点に注目し検討した。即ち、中央ソレノイド部の中央断面上で円形の磁力管は、アンカーミラー部では離心率が0.999819の強く扁平化した楕円形になり、中央ソレノイド部で軸対称な径方向電場は扁平部では局所的に極めて強くなる。高電位形成に伴いこの傾向は増大するため、平衡状態からの微小変位に起因し扁平な磁力管形状と等電位面形状とに微小差異が発生する可能性が考えられ、微小差異の輸送に及ぼす影響を検討した。セントラル部中央面内での径方向電位分布、及びz軸上での電位分布を下図の様に仮定した。セントラル部での径方向電位分布中心電位が300 V、半値直径 ( $2r_h(0)$ ) を持つ軸対称ガウス型とし、非

軸対称磁場配位のアンカー部を通し磁力線に沿って電位が保たれているとする。従って、アンカー部ではx軸及びy軸方向に半値直径の異なる2種のガウス分布で、磁力管と等電位面とは完全に一致する。

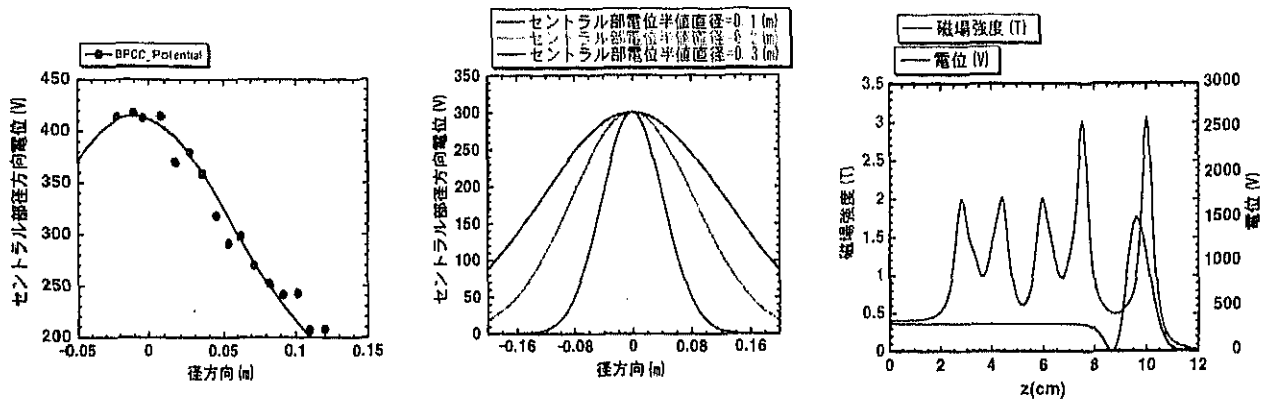


図2 左図：セントラル部電位分布実測図、中図：径方向電位分布例、右図：軸方向電位分布

z軸上電位を $\phi_0(z)$ とするとx軸、y軸方向の電位分布は各々次の形になる。

$$\phi_x(r_x(z)) = \phi_0(z) \exp(-(\ln(2)/r_{xh}(z)^2)r_x(z)^2), \quad \phi_y(r_y(z)) = \phi_0(z) \exp(-(\ln(2)/r_{yh}(z)^2)r_y(z)^2),$$

ここで、 $r_{xh}(z) = r_{xhl}(z) - (r_{xhl}(z) - r_h(0)) D_1$  及び  $r_{yh}(z) = r_{yhl}(z) - (r_{yhl}(z) - r_h(0)) D_1$  であり、 $2r_{xh}(z)$ 、 $2r_{yh}(z)$  はz位置に於ける電位分布の半値直径で、 $r_{xhl}(z)$ 、 $r_{yhl}(z)$  は座標 $(r_h(0), 0, 0)$ 、 $(0, r_h(0), 0)$  を通過する磁力線のz軸からの距離を示す。磁力管と等電位面とのずれの因子として上式で定義された $D_1$ を導入した。 $D_1 = 0$ の場合は、アンカー部で磁力管と等電位面とは完全に一致し、 $D_1$ が正の方向に向かうと、アンカーミラー部の等電位面の扁平度が緩和する。これらの電位分布条件の下で、イオンをセントラル部中央面から出発させ軌道計算を行った。径方向移動は、PPバウンスイオンのアンカー部ミラーズロート通過位置に強く依存するため、中央ソレノイド部の中央面での出発位置の影響を受ける。中央ソレノイド部の中央面( $z = 0$  m)でのPPバウンスイオンの初期条件として、以下の出発位置を採用した。半径方向に対しては、径方向電位分布の半値半径上、半値半径の0.9倍位置、0.8倍位置、0.7倍位置、0.6倍位置、0.5倍位置上の各円周上を初期位置として設定した。方位角方向に対しては、10度刻みの場所を初期位置として設定した。磁場の対称性を考慮して、合計108個のバウンスイオンの軌道を計算した。

計算条件をまとめると、

イオンエネルギー：500 eV、ピッチ角：12度（損失錘角：21.3度）、PPバウンスイオン数：108個、中央面上( $z = 0$  m)の電位分布：中心電位が300 Vのガウス分布、半値半径：0.025m, 0.075m, 0.15m、熱障壁電位の深さ：300 V、閉じ込め電位(z軸上)：1200 V、等電位線変形因子 $Df$ ：0, 0.025, 0.05, 0.075、計算終了バウンス回数：8回。

PPバウンスイオン残存比は、次式で表わされる様に、108個のバウンスイオンが8回バウンス計算する間にバウンスする回数を、864で割った比として定義する。

$$(\text{PPバウンスイオン残存比}) = \frac{(\text{全イオンバウンス回数の和})}{(\text{全イオン数}) \times (8\text{バウンス})}$$

PP バウンスイオン残存比を、半径方向電位分布の半値半径の変化、および等電位線の変形因子  $Df$  の変化に対し計算した。その結果を下図に示す。変形因子  $Df$  が大きくなるに従い PP バウンスイオンの残

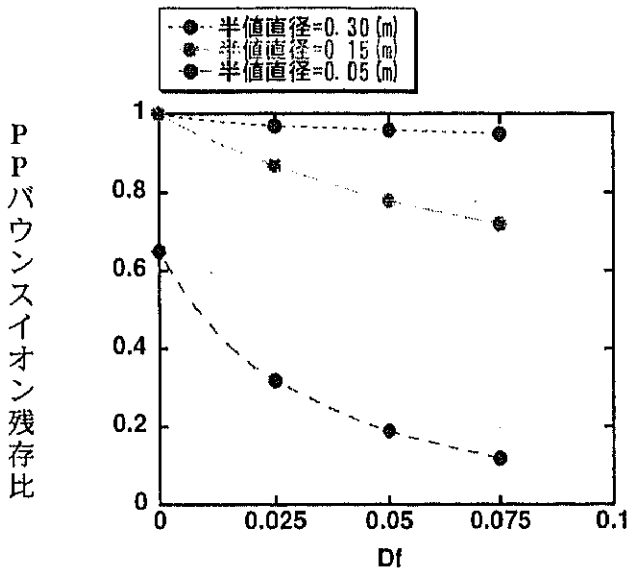


図3 PPバウンスイオン残存比の  $Df$  依存

存比は小さくなり、従って、8バウンスする以前に閉じ込め電位を乗り越えて端損失イオンとなって流出し易くなることを意味している。しかし、径方向電位分布の半値半径が大きくなり広がると、PP バウンスイオン残存比は大きくは減少しなくなる傾向にある。今回の計算では、電位分布を仮定し、更に非軸対称磁場配位を持つアンカー部のミラースロート近傍に於いて、磁力管断面と等電位面断面とに差異が発生すると仮定して、PP バウンスイオン残存比を算出し、一定の方向性が見出された。実際の  $Df$  値は未だ特定されていないが、プラズマの平衡状態からの微小変位は十分にあり得ることであり、PPバウンスイオンの閉じ込めの観点からは、コアプラズマの径方向電位分布は平坦化する方向が適しているということが出来る。

## (2) バウンスイオンの直接測定

PPバウンスイオンを2通りの方法で測定した。1つは、プラグ電位で閉じ込められたPPバウンスイオンはプラグ電位消失時に装置端に流出するが、このピーキング端損失イオンを測定する方法。他は、プラグ/バリア部の内側ミラースロート部に設置し、プラグ電位及び強磁場によりバウンスしてくるイオンのピッチ角と同時にイオンエネルギーを分析して、バウンスイオンを選択的に測定する方法である。今研究では、主として第2の方法を用いた。

イオンエネルギーを  $\epsilon$ 、イオンの磁気能率を  $\mu$  とした場合の  $\epsilon-\mu$  空間図で占めるバウンスイオン領域を右図に示す。バウンスイオンの荷電交換反応により発生した荷電交換中性粒子のピッチ角と共にエネルギーを測定する荷電交換バウンスイオン分析器 (CXBIA: Charge Exchange Bounce Ion Analyzer) を使用することにPPバウンスイオン、OMT及びIMTバウンスイオンを選別することができる。

CXBIAの設置位置を下図に示す。

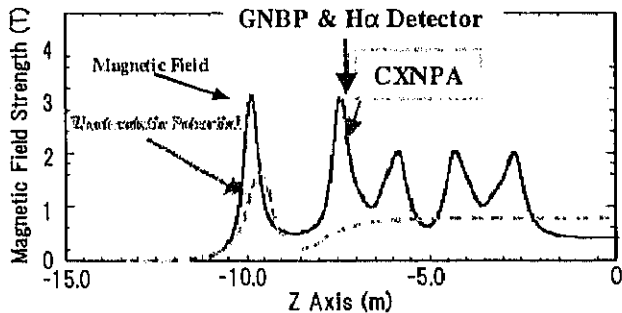
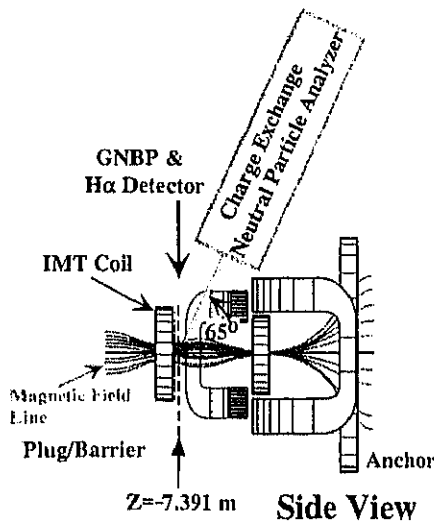
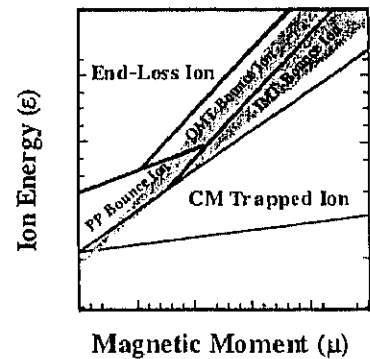
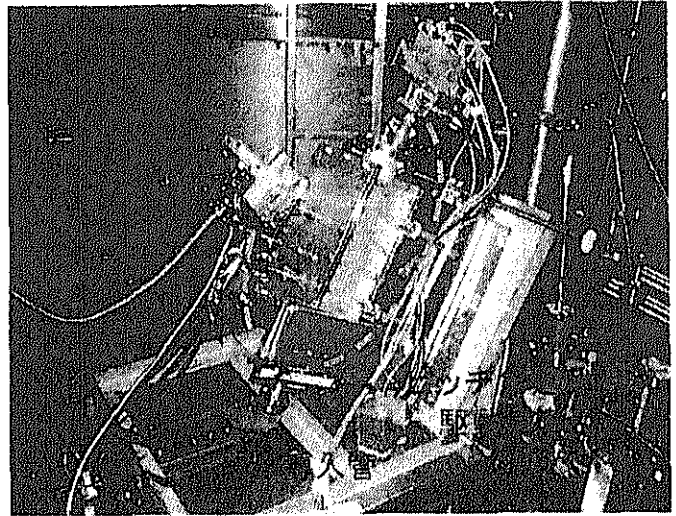


図4 荷電交換バウンスイオン設置位置

CXBIAはプラグ/バリア部内側ミラースロートのセントラル部寄りにz軸と約65度の傾斜で取り付けられており、傾斜角を変化させることができる。

高温イオンモードでプラグ部及びバリア部に150~190msecの時間幅でマイクロ波を入射した時、マイクロ波入射に伴い、中央ソレノイド部電位が約150~200V、プラグ電位が約1200V程度にまで上昇、同時にバリア電位が降下し、中央ソレノイド部の線密度が上昇した。電位形成に従い発生するバウンスイオンが、荷電交換バウンスイオン分析器により測定された。プラグ電位形成前は信号量が少なく閉じ込め電位が形成されると、プラグポテンシャル・バウンスイオンとOMT・バウンスイオンが発生する。ピッチ角とエネルギーを選別し、プラグ電位及びOMT近傍磁場によりバウンスするイオンを選択的に測定することに成功した。下図に示す。



荷電交換バウンスイオン分析器

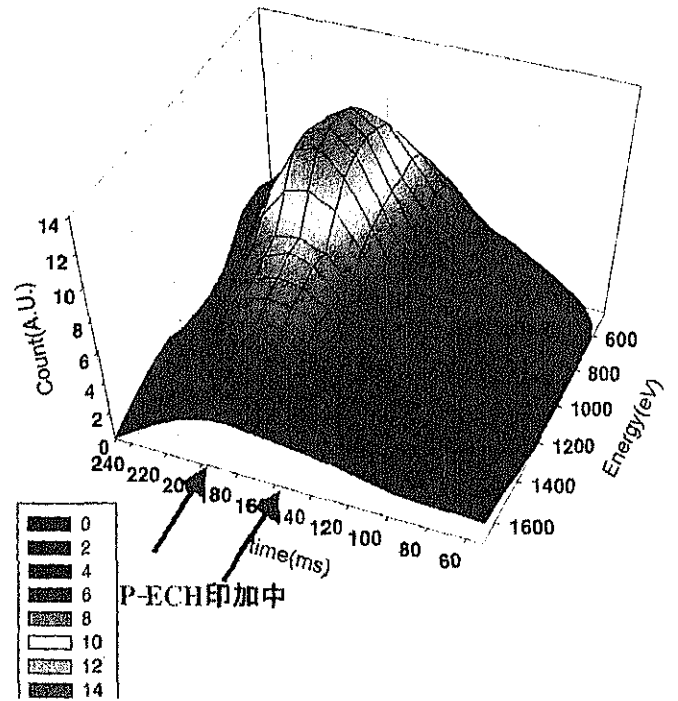
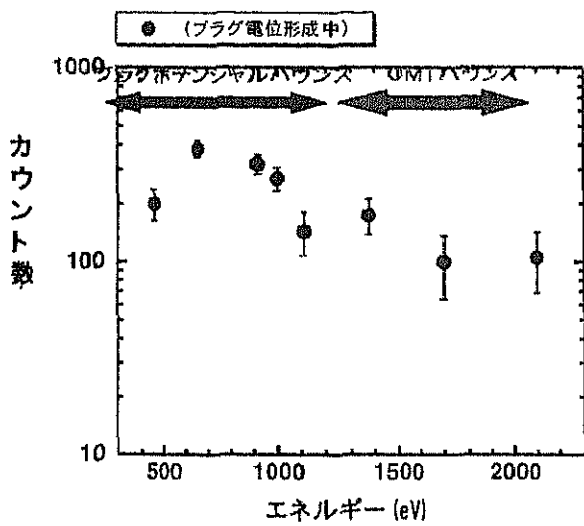


図5 P Pバウンスイオン及びOMTバウンスイオンの測定



## 【10】 端損失イオン領域に現れる揺動測定

タンデムミラー装置では、プラズマの速度空間内に損失領域が存在し、捕捉領域から損失領域への移行がプラズマの閉じ込め時間を決める。粒子間衝突に加え、プラズマ内に励起された揺動は、プラズマ粒子のピッチ角を変え、損失領域への移行を促進させる可能性がある。揺動に起因するイオンの損失領域への移行を研究する為、端損失イオンに現れる揺動を測定した。セントラル部でのイオンはICRF高周波により加熱されるが、イオンの非等方加熱に原因するアルヴェン・イオンサイクロトロン(AIC)モードの電磁揺動が、損失領域へのイオン輸送を促進させることが知られている。今研究ではAICモードの揺動を含めた、約20MHzまでの周波数を持つ揺動について検討することを目的とした。

### (1) 端損失イオン速度分布関数測定

端損失イオンのピッチ角とエネルギーを同時に測定する端損失イオンエネルギー成分分析器(ELICA)には、127度偏向円筒型静電エネルギー分析器を使用し、入口側にはピンホール入口孔とその前面に円筒軸方向に沿った入口スリットを用い、出口側には円筒軸方向に沿った出口スリットと、その背面に同様に円筒軸に沿って配置された20チャンネルの検出器を設置した。入口スリットの幅を $\delta w_{es}$ 、入口スリットと入口孔との距離を $l_{es}$ 、入口孔の面積を $\delta s$ 、分析器のエネルギー分解能を $R_A$ 、イオン主軌道の長さを $l_{mp}$ 、検出器チャンネルの位置を $z_a$ 、1チャンネルの検出器の幅を $\Delta z_a$ 、 $\epsilon$ と $\epsilon + \Delta \epsilon$ との間のエネルギーを持つイオンによる $z_a$ チャンネルでの電流を $\Delta I(\epsilon, z_a)$ とした時、端損失イオンの速度分布関数は以下の式で記述される。

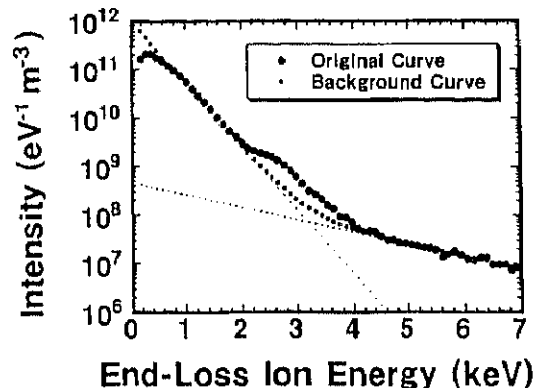
$$f(v_{\parallel}, v_{\perp}) = \frac{m^2 l_{es} l_{mp} \Delta I(\epsilon, z_a)}{2e \delta s R_A \delta w_{es} \epsilon^2 \Delta z_a},$$

入口スリットを引き出した時の端損失イオンのエネルギー分布関数は、 $z_a$ チャンネルの電流を $\Delta I_s(\epsilon, z_a)$ とした時以下の式で記述される。

$$f_{\epsilon}(\epsilon) = \frac{\sqrt{m_i}}{\sqrt{2e \delta s R_A} \sqrt{\epsilon^3}} \sum_{z_a=0}^{z_{max}} 2 \Delta I_s(\epsilon, z_a),$$

### (2) 端損失イオンのエネルギー分布関数に現れるハンプ構造

端損失イオンのエネルギー分布関数に現れたハンプ構造の例を右図に示す。1keV~5keVの間のエネルギー帯にハンプ構造が現れ、セントラル部のイオン温度の非等方性及びセントラル部で励起されたAICモードの電磁揺動と関連付けられる。端損失イオンの速度分布関数に分解しイオン分布の等高線を調べた結果、ハンプ構造が現れるエネルギー帯では、粒子間衝突による微小角散乱よりも大きな角度で損失領域に散乱される結果が得られている。AIC揺動による速度空間内の輸送現象と考えられる。



### (3) 端損失イオン電流に現れる揺動解析

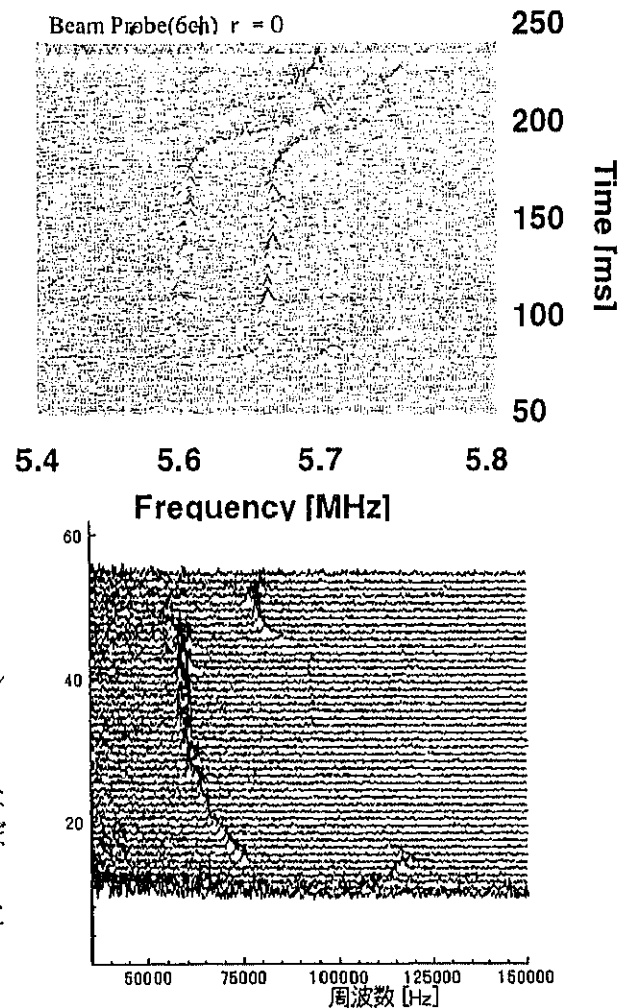
端損失イオンに現れるハンプ構造が、セントラル部で励起されたA I Cに起因するものであることが知られている。右図はセントラル部の金中性粒子ビームプローブにより測定された、A I C電磁揺動の一例である。z 軸方向の境界条件に依存し、この場合3種の周波数に対応するA I C揺動が観測されている。

今研究では、端損失イオン電流、特にハンプ構造が現れるエネルギー帯における揺動に注目し検討した。第1に、A I Cが多種の周波数を持つことより、周波数差に対応する比較的低い周波数(50 kHz~100 kHz)の分析を行うこと。第2にA I C揺動を直接端損失イオン電流で測定し、同時に測定したセントラル部での金中性粒子ビームプローブでのA I C励起結果と比較すること、である。

右図は、A I C揺動の周波数差に対応する低周波揺動の1例を示している。縦軸は時間スケールで、解析した時間帯は80 msec~240 msecである。セントラル部上図との同時測定ではなく、また加熱系の入射等も異なる為、両図での厳格な対応は付かないが、A I C揺動の周波数差にほぼ対応する周波数が観測されている。

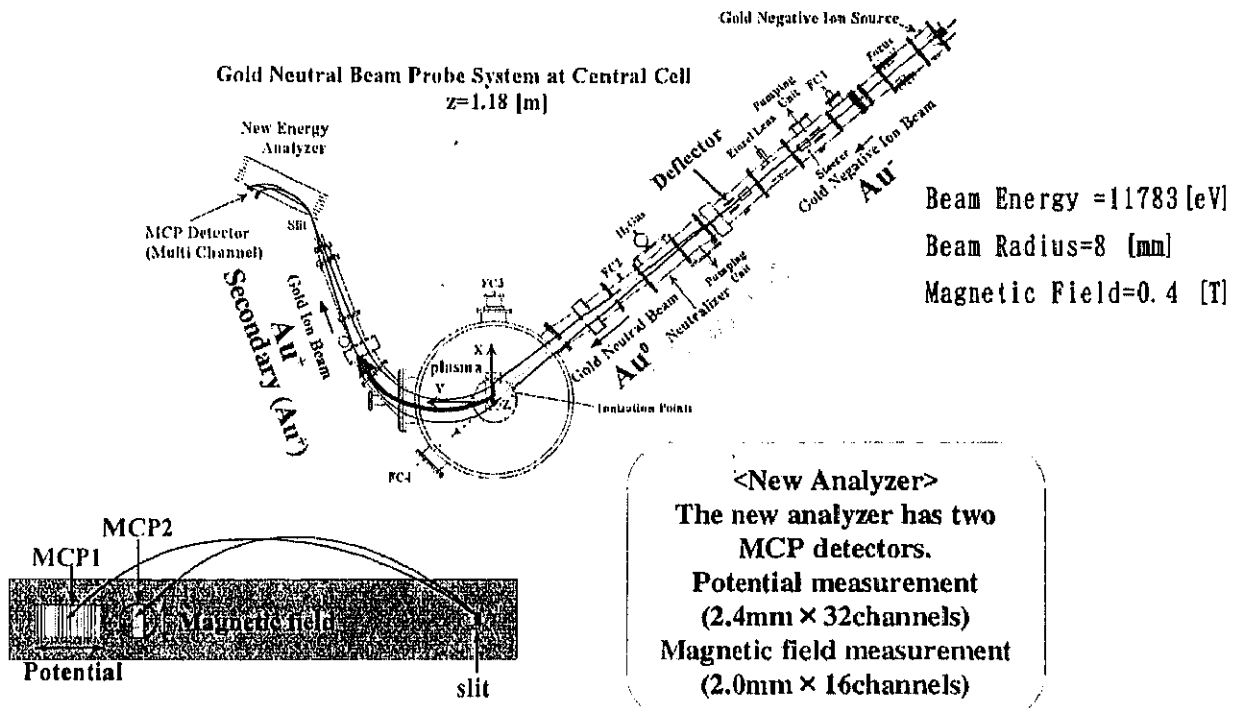
端損失イオン電流の高周波成分を分解した結果には、同様のA I C揺動が観測されている。

この他、セントラル部に励起されたドリフト波、及びフルート波に対応した揺動が端損失イオン電流に観測されている。



【11】 金中性粒子ビームプローブ(GNBP)を用いた密度電位揺動及び位相差の同時計測

ビームプローブ法は、電位揺動と密度揺動の同時測定が可能であると共に磁場揺動の測定も可能である点で極めて有用な計測法である。他方、ビームをプラズマに入射する為ビーム軌道に沿う軌道積分効果を考慮しなければならない。磁場揺動に対し、中性粒子を入射する当方法 (GNBP) は、通常の1価のイオンビームを入射する方法 (HIBP) に比較して、2次ビーム (金の1価イオン) のみが影響を受ける為、軌道積分効果が減少する利点がある。磁場揺動は、プラズマ周辺では磁気プローブにより測定されるが、プラズマ中心近傍の測定にはビームプローブ法が極めて有効である。今回、密度揺動と電位揺動の間に生じる位相差の計測を行った。ビームプローブ系及びフラックスの算出を以下に示す。



実験的に得られるビーム電流揺動はビームのイオン化係数を

$$Q_{Beam} = n_e \times (\text{cross-section}) / (\text{beam velocity}) \text{ とおくと}$$

$$\frac{\tilde{I}_{secondary}}{I_{secondary}} = \frac{\tilde{Q}_{pri-sec}}{Q_{pri-sec}} = \int \tilde{Q}_{primary} dl_{primary} - \int \tilde{Q}_{secondary} dl_{secondary} \approx \frac{\tilde{n}_e}{n_e}$$

とあらわすことができる。

第2, 3項の軌道上でビームが減衰することによる効果を Path Integral Effects と呼んでいる。

フラックス計測を行うにあたり、

$$\tilde{I} / I \approx \tilde{n}_e / n_e$$

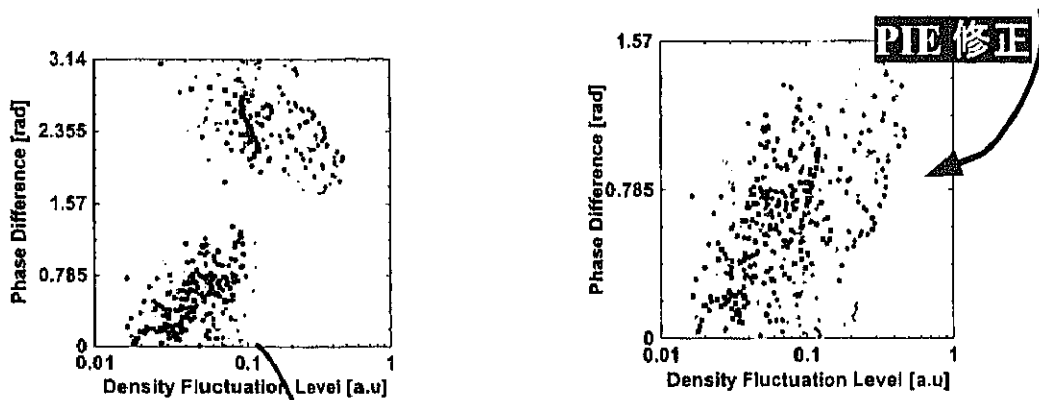
として、 $\tilde{I} / I$ 、 $\tilde{\phi}$ 、それらの位相差  $\alpha_{r\phi}$  を見積もった。

また、本研究では  $k_\theta = \frac{m}{r}$  (m:モード数)として、フラックスを

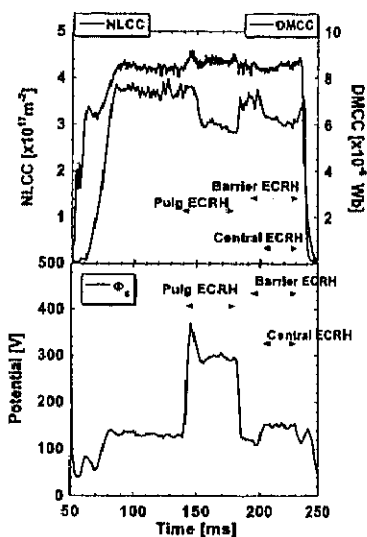
$$\Gamma = \frac{\Gamma_r B_z}{n_e m} = \frac{1}{r} \frac{\tilde{I}}{I} \tilde{\phi} \sin \alpha_{n\phi}$$

とした。

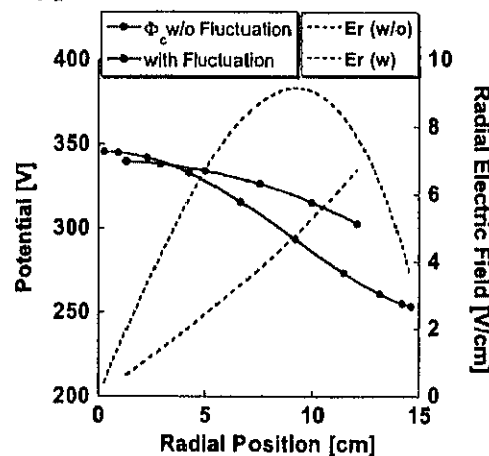
位相差の測定に際し、軌道積分効果の影響を受けるため、補正を行った。フルート不安定の場合、右図の様に位相差にジャンプがある様に測定されたが、軌道積分効果を考慮して補正された。



フルート不安定が顕著に現れた 140msec~180msec 時において、電場と位相差、フラックスの関係を調べた。

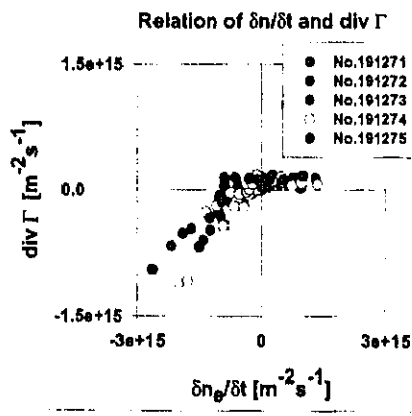


Typical Profile of Potential &  $E_r$



密度揺動レベルの増大と共に位相差が大きくなり、電場が大きくなると位相差が小さくなる傾向が見られた。この傾向は、反磁性ドリフトによる荷電分離と  $E \times B$  ドリフトの有限ラーマー半径効果による荷電分離の中和と考えられる。

連続の式より、ソースは時間的に不変であるとし、フラックスは径方向成分のみ存在していると仮定して揺動に起因するフラックスと粒子輸送の関係を調べた。右図に示される様に、密度変化と揺動から見積もられるフラックスとの間に相関があることを見出した。



<学位論文>

理学修士（数理物質科学研究科）宮田良明

タンDEMミラーにおけるバウンスイオンの測定

“数理物質科学研究科優秀論文表彰”受賞

<講演>

1. K. Ishii, K. Hagiwara, Y. Takemura, A. Kojima, Y. Miyata, M. Yoshikawa, T. Saito, I. Katanuma, T. Cho. :  
[Direct measurements of the electro-statically and magnetically bounced ions in the tandem mirror]  
15th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, ( B40, 2004/4/19-22)
2. A. Kojima, K. Ishii, Y. Takemura, K. Hagiwara, Y. Miyata, Y. Maeda, T. Yamaguchi, A. Itakura, M. Ichimura, T. Cho. :  
[Measurement of the magnetic field fluctuations by use of a gold neutral beam probe in the tandem mirror GAMMA 10]  
15th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, (B53, 2004/4/19-22)
3. K. Ishii, A. Kojima, Y. Miyata, Y. Takemura, K. Hagiwara, T. Yamaguchi, S. Fujimoto, Y. Masuda, T. Saito, I. Katanuma, M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Cho. and GAMMA 10 Group. :  
[Effect of the Radial Potential Profile on the Transport of the Bounced Ions by the Plug Potential and Radial Potential Control in the Tandem Mirror]  
5th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 2004/7/5-9.
4. A. Kojima, K. Ishii, Y. Takemura, K. Hagiwara, Y. Miyata, T. Yamaguchi, Y. Masuda, A. Itakura, M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Cho. :  
[Measurement of the Radial Flux Induced by the Fluctuations Using the Gold Neutral Beam Probe in the Tandem Mirror GAMMA 10]  
5th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 2004/7/5-9.
5. K. Ishii, A. Kojima, Y. Miyata, T. Yamaguchi, I. Katanuma, T. Saito, M. Yoshikawa, T. Cho. :  
[Radial Potential Profile of the Core Plasma and Confinement of the Bounced Ions by Electrostatic and Magnetic Hills in the Tandem Mirror]  
12th International Congress on Plasma Physics, 2004/10/25-29.
6. K. Ishii, A. Kojima, Y. Miyata, T. Yamaguchi, I. Katanuma, T. Saito, M. Yoshikawa, T. Cho. :  
[Transport of the Bounced Ion by the Plug Potential Caused by Radial Electric Field in

the Tandem Mirror]

Workshop on the Electric Field, Structure, and Relaxation in Edge Plasmas, 2004/10/26-29.

7. 小島有志、石井亀男、武村祐一朗、萩澤一久、宮田良明、山口智弘、増田能人、板倉昭慶、吉川正志、市村真、長照二。  
[GAMMA 10における金の中性粒子ビームプローブを用いた揺動測定]  
第5回核融合エネルギー連合講演会, E31p, 2004年6月.
8. 宮田良明、石井亀男、武村祐一朗、小島有志、萩澤一久、増田能人、山口智弘、長照二。  
[プラグ・バリア部内側ミラースロットでバウンスされるイオン軌道の径方向電場の影響]  
第5回核融合エネルギー連合講演会, E32p, 2004年6月.
9. 石井亀男、小島有志、宮田良明、山口智弘、藤本省吾、斉藤輝雄、片沼伊佐夫、吉川正志、市村真、長照二。  
[タンデムミラーにおけるバウンスイオンの径方向輸送の検討]  
第21回プラズマ・核融合学会年会, 26aA10P, 2004年11月.
10. 山口智弘、石井亀男、小島有志、宮田良明、藤本省吾、長照二。  
[GAMMA 10内側ミラースロット部におけるH $\alpha$ 線計測]  
第21回プラズマ・核融合学会年会, 25pB03P, 2004年11月.
11. 小島有志、石井亀男、宮田良明、山口智弘、藤本省吾、板倉昭慶、吉川正志、桧垣浩之、市村真、長照二。  
[金の中性粒子ビームプローブを用いた密度電位揺動及び位相差の同時測定]  
第21回プラズマ・核融合学会年会, 25pB21P, 2004年11月.
12. 宮田良明、石井亀男、小島有志、山口智弘、藤本省吾、長照二。  
[タンデムミラーにおけるバウンスイオンの測定]  
第21回プラズマ・核融合学会年会, 25pB27P, 2004年11月.
13. 藤本省吾、石井亀男、小島有志、宮田良明、山口智弘、長照二。  
[GAMMA 10における端損失イオンの揺動測定]  
第21回プラズマ・核融合学会年会, 25pB28P, 2004年11月.

【12】 ガンマ10における中性粒子入射とそれに伴う中性粒子の挙動 [1-4]

ガンマ10では、近年高密度プラズマの電位閉じ込めを目的として、セントラル部及びアンカー一極小磁場部に、燃料補給・プラズマ加熱の為の中性粒子入射装置（NBI）が整備されている。図1は、ガンマ10の真空容器と中性粒子入射装置及び関係する計測系の配置を示している。図のように、セントラル部 NBI（NBI-c）はセントラル中央面から 123cm 東側に磁力線に対して垂直に入射され、アンカーNBI（NBI-a）は東西アンカー部中央面上（ $z = \pm 520\text{cm}$ ）にそれぞれ磁力線に対して 82 度で入射される。ガンマ10には粒子補給量に関する情報を得る為、入射ビームの強度及びプロファイル測定するためのファラデーカップ型検出器（BAD）、及びカロリメーター（CM）が各ビームライン上に設置され、セントラル部中央から東アンカー外側変換部に亘って、プラズマからの  $H\alpha$  発光強度を測定する検出器が設置されている。更に、NBI-c のビームライン上には新たに  $H\alpha$  検出器が追加されている。

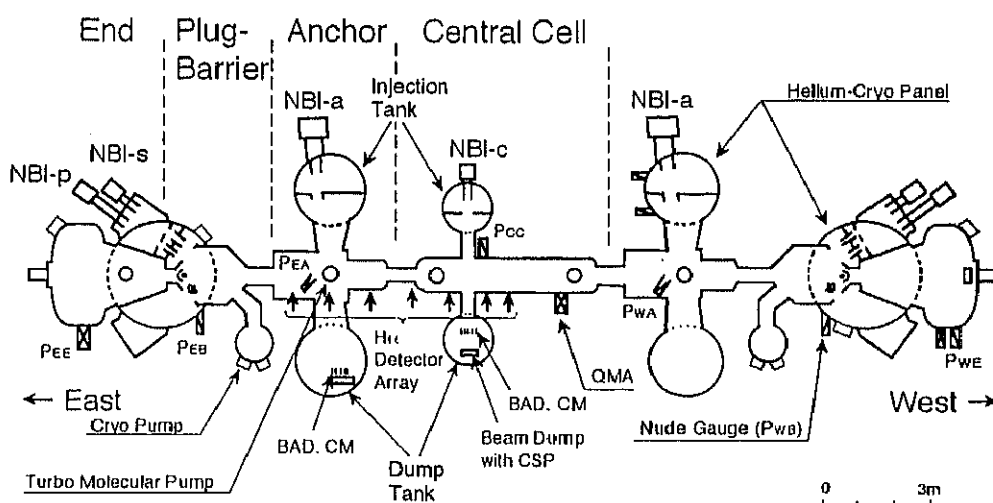


図1 ガンマ10真空容器と中性粒子入射装置及び計測系の配置図

標準的なホットイオンモードプラズマに対し、セントラル部の NBI 実験が行われ、セントラル部に設置されている中性粒子エネルギー分析器（NPA）を用いて荷電交換中性粒子エネルギースペクトルが測定された。図2から分かるように、NBI 時においてビームエネルギーに対応するエネルギー（ $E_{inj}$ ）を上限として数 keV のエネルギー領域にわたってビームに起因する高エネルギーイオンの存在が確認されている。

図3は、ビーム入射中に観測された高エネルギー荷電交換中性粒子の空間分布を示している。フ

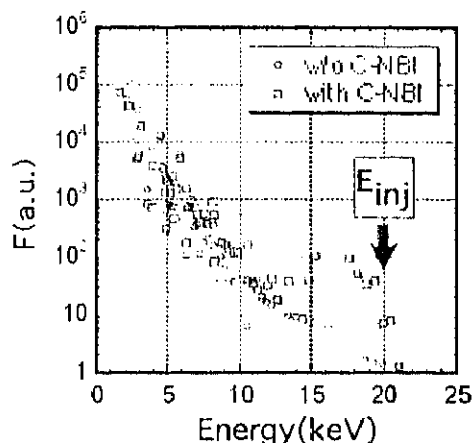


図2 荷電交換中性粒子エネルギースペクトル

アラデーカップおよびカロリメータで測定された入射ビームのプロファイルとセントラル部電子密度の空間分布に基づいて計算された NBI による高エネルギーイオンの生成プロファイルと各プロファイルのピークの位置が良く一致していることから、高速イオンの増加は、セントラル NBI に起因するものと考えられる。現在、NBI による高エネルギーイオンのエネルギー分布、空間分布のプラズマパラメータに対する依存性を検討する為、フォッカープランクコードを用いたシミュレーション解析を開始し、空間分布を考慮した解析結果が実験結果を良く説明することを確認している。

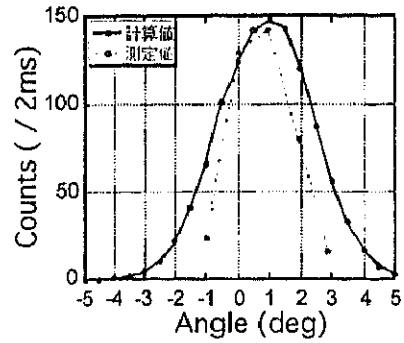


図3 高エネルギー中性粒子束の空間分布

一方、ガンマ10のNBI実験では、ビーム入射による明確な密度上昇は観測されているが、同時に、反磁性量の急減も認められていた。その原因の解明と抑制を目的として、NBI時のH $\alpha$ 線計測の詳細な計測、並びにシミュレーション解析も開始されている。図4は、DEGASコードを用いたセントラル部NBIビームライン直下の中性水素分子密度分布の計算結果を示す。図から分かるように、ビームの入射方向に著しい非一様性が見取れる。また磁力線方向に沿った中性粒子の局在化も実験的に観測されている。

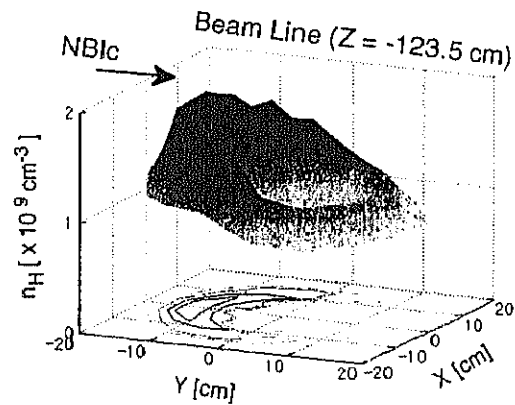


図4 ビームライン上の中性水素分子密度分布 (DEGASによるシミュレーション)

上述した NBI に起因した中性ガスの流入による入射終了後の反磁性量の低下は、ビーム入射に起因するリサイクリング水素の急増とビームラインから流入するイオン源からの低温ガスによる荷電交換損失の増加が原因であると推察されてきた。この問題を低減するために、入射タンクの差動排気能力を高めるための改造が行われた。図5は、セントラル部 NBI ビームラインの概略図を示す。入射タンクの上部にチャンバーを増設し、ここにイオン源からの低温ガスを導いて効率よく差動排気が可能となるような構造としている。簡単な圧力バランスの数値解析の結果、

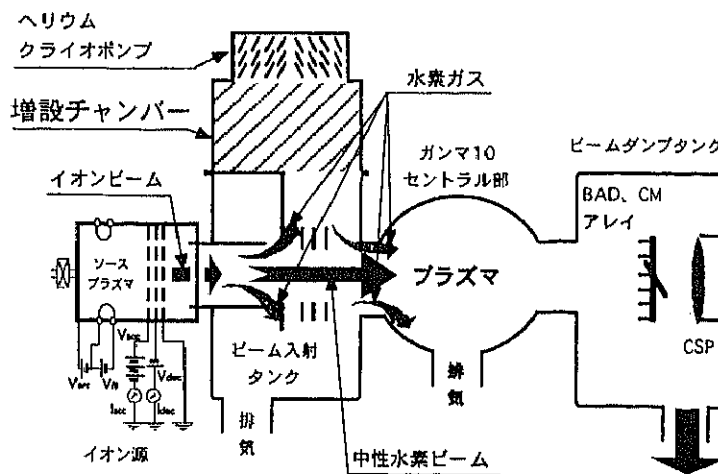


図5 セントラル部NBIビームラインの概略図



本改造により流入ガス量が半減されていることがわかった。

上記ビームライン差動排気系の改造後、その効果を検証する実験が行われた。図5は、改造前後での NBI 実験時のプラズマ電子の線密度と反磁性量の時間変化を示す。改造後に行ったショットでは、まだガンマ10本体及びビームライン真空容器壁のコンディショニングが不十分で、壁からの脱離ガスの多い状況下の為、正当な比較は難しいが、ビーム入射中およびその後のセントラルセル中のガス圧力の上昇は大幅に低減され、図に示すように両者同様の線密度領域で、反磁性量の低下が著しく改善されていることがわかる。

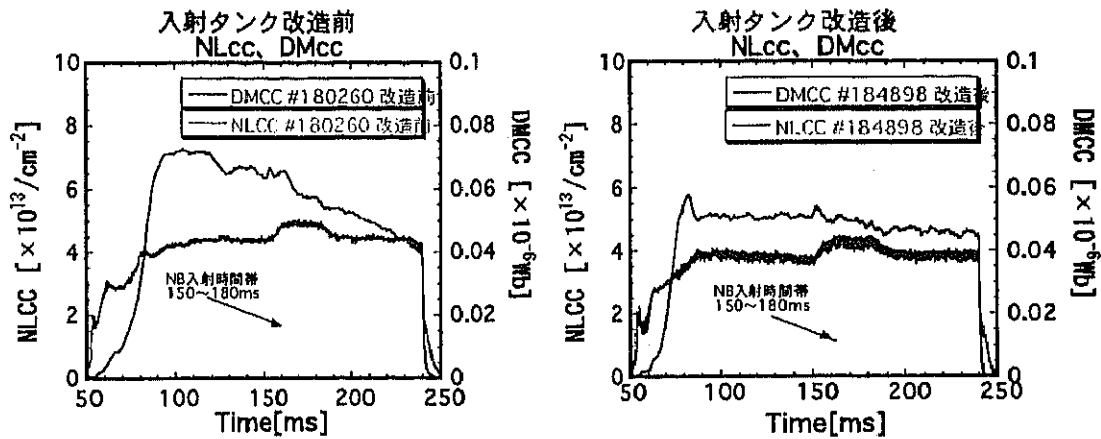


図6 セントラル部 NBI 時のプラズマ電子線密度と反磁性量の時間変化。(a) 改造前, (b) 改造後

一方、NBI による密度及び温度上昇を評価するための、0次元レート方程式に基づくイオンのビルドアップ数値計算を行っており、ビームパラメータ（ビームエネルギー、ビーム電流、ビーム組成）などに対するイオンのビルドアップへの効果について検討を開始している。初期的な計算結果より、水素リサイクリング低減による反磁性量改善効果の最も高いことが判明した。

今後、壁コンディショニングを含めた実験条件の最適化を進めてゆけば、C-NBI の入射中にイオン温度と共に密度の上昇するショットが期待できる。

- [ 1 ] Y. Nakashima, et al., "Modeling of three-dimensional neutral transport in the tandem mirror plasmas using a Monte-Carlo code", Book of Abstracts 16th Int. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (Portland, Maine, USA, May 24-28, 2004) P1-41.
- [ 2 ] 中嶋洋輔, 他「GAMMA10 における中性粒子ビーム入射とそれに伴う中性粒子の挙動」プラズマ・核融合学会第 21 回年会 (2004 年 11 月, 静岡県, コンベンションセンター) 26aA08P.
- [ 3 ] 山田正樹, 中嶋洋輔, 他「中性粒子分析器を用いた GAMMA10 高速イオン計測とシミュレーション解析」プラズマ・核融合学会第 21 回年会 (2004 年 11 月, 静岡県, コンベンションセンター) 26aA09P
- [ 4 ] 中嶋洋輔, 他「ガンマ 10 における中性粒子ビーム入射に伴う中性粒子輸送解析」NIFS 共同研究研究会「閉じ込め周辺領域の科学」(2005 年 2 月, 核融合科学研究所)

### 【13】 ガンマ10セントラル部における高速イオン計測とシミュレーション解析 [1]

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め実験装置 GAMMA10 のセントラル部において、荷電交換中性粒子分析器(CX-NPA)を用いたイオン温度の計測を行っている。本研究の目的は、同部に設置された荷電交換中性粒子分析器 (CX-NPA) の測定結果より、C-NBI によって生成された高速イオンの空間分布及び、高速イオンのエネルギー緩和過程等を検討し、より効果的なプラズマ加熱のための知見を得ることである。

本実験では、180ms から数 ms の間、反磁性量が増加し、電子密度も若干の上昇が認められている。(前節図2参照) C-NBI 入射前 (160ms) と入射中 (180ms) を比較すると、入射エネルギーに対応する高エネルギー領域で C-NBI 入射中に粒子が増加していることが分かっている。従って、反磁性量及び電子密度の増加は C-NBI に起因するものと考えられる。また、高速イオンの加熱についてより詳しく調べるため、フォッカー・プランクコードを用いたシミュレーションを行った。

図1にセントラル部 NBI の入射配位における速度空間内での分布関数を示す。C-NBI により生成された高速イオンが、CX-NPA 測定視線のピッチ角まで散乱していることが分かる。これを基に作成したスペクトルを図1に示す。今回初めて、C-NBI 入射により、高速イオンの増加を再現することができ、そのピークが入射エネルギーより僅かに低いところにあること、また入射エネルギーの半分のエネルギーを持つ粒子が増加することも確認できた。ピーク位置が入射エネルギーと異なることは、C-NBI 入射ピッチ角と CX-NPA の測定ピッチ角が約 6 度離れているため、ピッチ角散乱の過程で減衰したものと考えられる。

図2は、フォッカー・プランクシミュレーションによって得られたエネルギースペクトルと実験結果とを比較したものである。本解析では、典型的なホットイオンモードプラズマにおけるイオン温度や電子密度、中性水素原子分子密度の径方向分布に基づいて、プラズマ断面の領域を4つの同心円領域に分割して計算を行ない、得られたスペクトルを NPA の視線に沿って積分した値を導出している。この解析手法により、これまで単一成分のプラズマに対して、中性粒子ビーム入

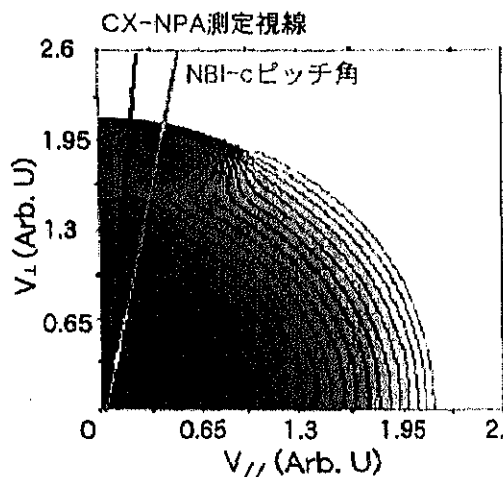


図1 速度空間における分布関数

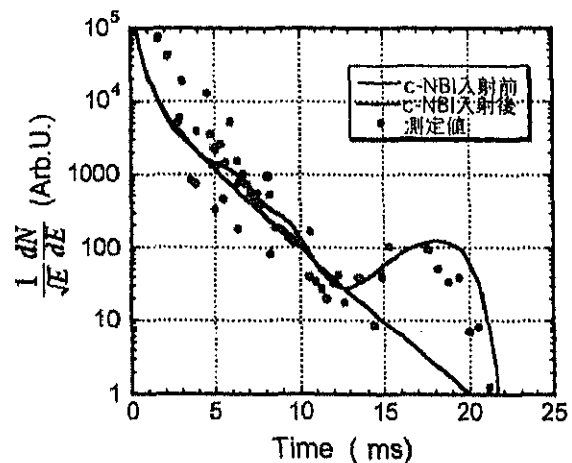


図2 シミュレーション結果と測定結果

射により生成された高速イオンに対してなされたシミュレーションでは、低エネルギー側や入射エネルギーの直下のエネルギー領域に食い違いが認められたのに比べて、今回のシミュレーションでは、測定された全エネルギー領域に亘って、実験結果を上手く再現していることが確認され、高速イオンの減衰過程が概ね古典的な機構に支配されていることが判った。

- [1] 山田正樹, 中嶋洋輔, 他「中性粒子分析器を用いた GAMMA10 高速イオン計測とシミュレーション解析」プラズマ・核融合学会第 21 回年会 (2004 年 11 月, 静岡県, コンベンションセンター) 26aA09P

## 【14】 ガンマ10アンカー外側変換部におけるH $\alpha$ 線計測と中性粒子輸送解析 [1-4]

アンカー部では、プラズマ安定化の観点から、極小磁場配位により非軸対称な磁力管構造が形成される。アンカー部磁場変換部において、プラズマの長半径方向からH $\alpha$ 線を観測する際、検出器とプラズマ中心との距離が長く、またプラズマ半径が極端に狭いため（セントラル部18cmの磁力線は、変換部付近のプラズマ中心から2cm程度まで減少する）、従来の検出器ではプラズマ中の局所的な分布を計測することはできない。さらに、外側変換部において、可動リミター(MLO; Z=±706cm)付近では、MLOとプラズマの相互作用により、局所的な中性粒子の輸送が考えられるが、同様に従来の検出器では、ポート位置(Z=-670cm)が離れているため、観測が困難である。本研究では、このようなアンカー部の特徴的なプラズマに対して、空間分解能の高い可動式5ch-H $\alpha$ 検出器を用いた測定結果と、完全3次元体系のモンテカルロ中性粒子輸送コード(DEGAS)の計算結果を合わせて考察を行ない、非対称な形状をもつプラズマ中の中性粒子輸送の研究を行なうことである。

図1に示すような、視野が狭く、空間分解能の高い可動式の5ch-H $\alpha$ 検出器を新たに設計・製作した。検出器内部には干渉フィルター、レンズが入っている。レンズの焦点距離検出器が長いため、検出器はH $\alpha$ 光が通る方向に長い形状をしている。今回、GAMMA 10実験に使用するに先だって、点光源を用いた校正実験を行なった。その結果、プラズマ中心付近では、全チャンネルで2.5mm前後の半値幅を示し、アンカー部プラズマを測定するのに十分な分解能であることを確認した。本検出器を東アンカー外側変換部に設置し、初めて磁場変換部の分布計測に成功した。

図2には、東アンカー部のプラズマ形状、及び設置されているH $\alpha$ 検出器とともに可動式5ch-H $\alpha$ 検出器の上下・左右方向での測定模式図を示す。アンカー部では、可動式5ch-H $\alpha$ 検出器のほかに、内側変換部(Z=-370cm)で1ch-H $\alpha$ 検出器、アンカーミッドプレーン部(Z=-520cm)で内蔵型5ch-H $\alpha$ 検出器を用いて測定をおこなっている。

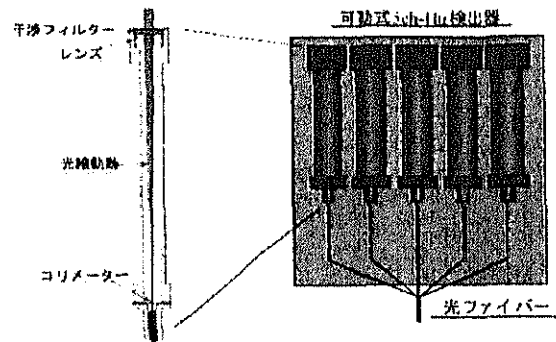


図1 可動式5ch H $\alpha$ 検出器の模式図

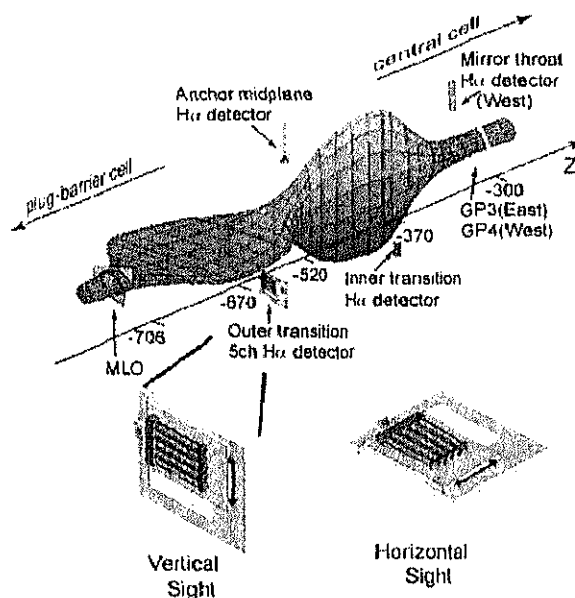


図2 アンカー外側変換部での測定模式図

図3に1ショットごとに上下・左右方向に検出器の調節ねじを振って、観測視線を変化させたときの可動式5ch-H $\alpha$ 線強度分布と測定模式図を示す。上下方向のH $\alpha$ 線測定結果は、ある位置でピークをもつような山なりの形状になっていることがわかる。そのピークの半値全幅を計ったところ、約2.5~3.0 cmの間であった。これは、この付近でのプラズマ上下方向の直径に対応していると考えることができる。また、左右方向ではZ軸方向に全チャンネルで顕著な差はみられなかった。これは、H $\alpha$ 線の測定値の定義から、H $\alpha$ 線の視線方向線積分量が、この付近ではZ軸方向にほとんど変化がないことを示している。

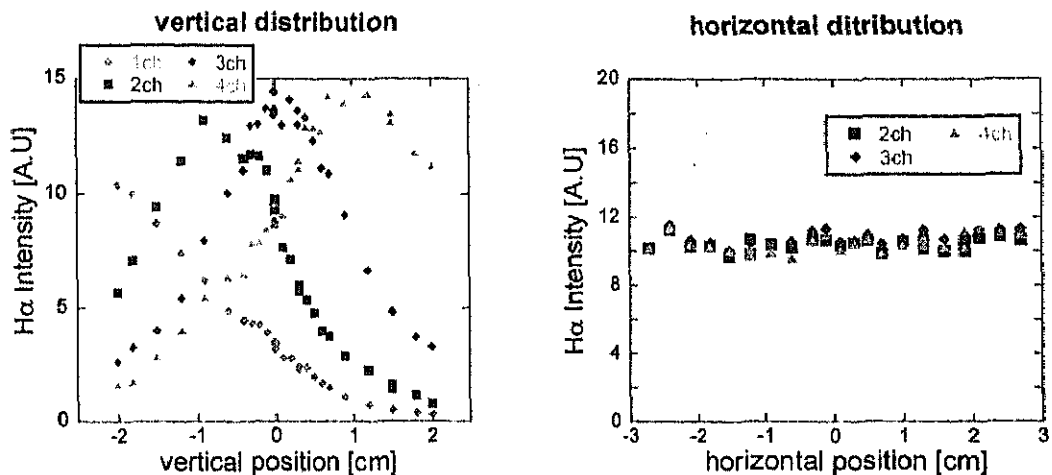


図3 可動式5ch H $\alpha$ 検出器を用いた上下及び軸方向の分布計測結果

実験から得られた結果を粒子輸送の観点から研究するために、外側変換部領域を中心としたアンカー一部中心からバリア部まで拡張したDEGAS-ver.63用のモデルを作成した。図4にはそのメッシュ構造を示しており、このモデルを用いて、MLOからのリサイクリングを想定した粒子輸送を解析するために、外側の壁モデルとは別にメッシュ内部に入り込んだSecond-Wallを適用させ、より実際に近い粒子放射を実現した。このモデルで算出された中性粒子密度から、各メッシュの

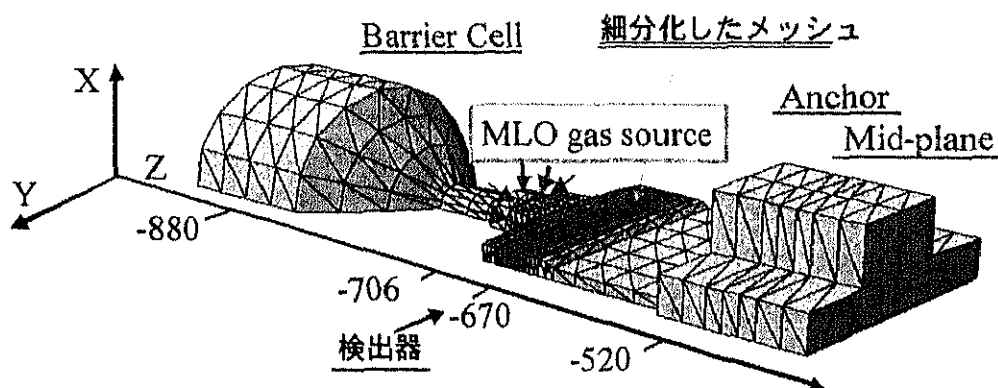


図4 DEGAS ver.63用アンカー外側変換部・バリア部モデル

H $\alpha$ 線強度を計算した。得られた H $\alpha$ 線計算結果から実験結果を検討する上で、可動式 5ch-H $\alpha$ 検出器の細かい視野幅と計測方向を考慮して、図 5 に示すような式に基づいて計算を行った。

この計算では、ある Z 軸上の位置において、XY 方向での空間分布を考慮した計算を行っており、グラフに見られるように Z 軸上の各位置における値を導出している。グラフから判るように、計算で得られた H $\alpha$ 線の体積輻射率 ( $\epsilon_{H\alpha}$ ) や中性粒子密度 ( $N_0$ ) は、MLO から離れるにつれて減少するのに対して、H $\alpha$ 線の線積分量 ( $I_{H\alpha}$ ) は、水平方向に変化が少なく、実験結果を良く再現していることがわかった。これは、アンカー部中心へ向かって MLO から放出した粒子の密度が拡散により減衰することと、磁場変換部プラズマ半径の増加による視線積分量の増加が、H $\alpha$ 線強度を一定にしたと考えられる。上記に示したように、複雑な三次元形状をもつアンカー変換部において、モンテカルロ輸送シミュレーションに基づく、中性粒子輸送の解明に有効な手段を確立することができた。

以上の結果、アンカー部磁場変換部の特徴的なプラズマ形状に対して、空間分解能の高い可動式の 5ch-H $\alpha$ 検出器を用いて分布計測が可能となり、その視野幅・視線長と DEGAS シミュレーションによる考察によって、複雑なプラズマ形状での中性粒子の輸送に対して、新たな知見を得ることができた。

$$\epsilon_{H\alpha} = \sum_x \sum_y \epsilon_{H\alpha} \cdot \nu_{mesh} / \sum_x \sum_y \nu_{mesh}$$

$$N_0 = \sum_x \sum_y \epsilon_{H\alpha} \cdot \nu_{mesh} / \sum_x \sum_y n_e \cdot \nu_{mesh}$$

$$I_{H\alpha} = \sum_y \epsilon_{H\alpha} \cdot \Delta y$$

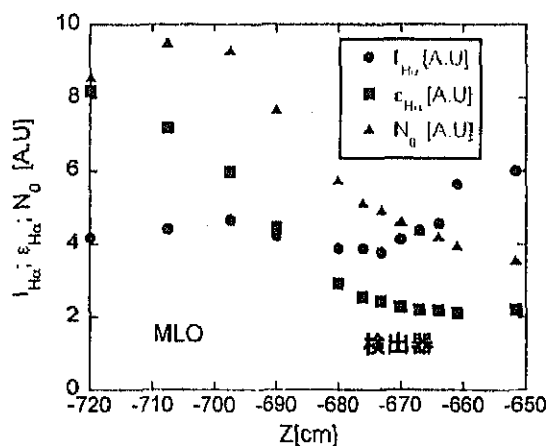


図 5  $I_{H\alpha} \cdot \epsilon_{H\alpha} \cdot N_0$ の計算式(上)と各 Z 軸方向における計算結果(下)

- [1] Y. Nakashima, et al., "Modeling of three-dimensional neutral transport in the tandem mirror plasmas using a Monte-Carlo code", Book of Abstracts 16th Int. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (Portland, Maine, USA, May 24-28, 2004) P1-41.
- [2] Y. Nakashima, et al., "Neutral Beam Injection Experiments and Related Behavior of Neutral Particles in the GAMMA 10 Tandem Mirror", Abstracts: 5th Int. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Novosibirsk, Russia, July 5-9, 2004) p.45.
- [3] Y. Higashizono, Y. Nakashima, et al., "Analysis of Neutral Transport in the GAMMA 10 Anchor-Cell Using H $\alpha$ -Emission Detectors", 5th Int. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Novosibirsk, Russia, July 5-9, 2004) p.90.
- [4] 中嶋洋輔, 「モンテカルロコード DEGAS を用いた中性粒子輸送シミュレーションの技法 - ガンマ 10 への適用 -」プラズマ・核融合学会誌 Vol.80, No.10 (2004) pp813-824.

## 【15】 粒子補給用ペレットの複合計測器の開発

核融合プラズマにおいて、プラズマの高温、高密度化、及び定常維持のためには、プラズマ粒子補給は重要な意味をもつ。プラズマ粒子補給の詳細制御法の一つとして、ペレット入射法が有効であるが、高磁場側からのペレット入射の有効性が近年の研究で明らかとなり、ペレットの輸送を行うガイドチューブの使用が重要となってきた。しかし、ペレットのガイドチューブ内での損耗過程、輸送メカニズム等に関しては、未だ明らかとなっていない。さらに、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）においても定常運転を行った場合の連続ペレット入射時におけるガイドチューブ内での圧力上昇による速度、質量の変化等、連続ペレット入射を行った場合の問題が考えられる。そこで、本研究では、LHDでの連続ペレット装置における定常運転時のガイドチューブ内での損耗過程、輸送メカニズムを明らかにすることを目的とする。特に、ペレットのガイドチューブ内での形状、速度、質量計測器及び圧力上昇センサーの開発を行い、定常運転ペレットに関する詳細研究を行う。また、プラズマへ入射後のペレット溶発雲からのH $\alpha$ 線計測と併せて、プラズマへの粒子補給効率について総合的に調べることにする。本研究では、筑波大学プラズマ研究センターのガンマ10に設置されているペレット入射器をテストベンチとして計測器の開発研究を行い、核融合科学研究所のLHD定常ペレット入射器に設置して、ペレットのガイドチューブ内での損耗過程、輸送メカニズムについて調べ定常運転に最適なペレットガイドチューブの設計のための情報を得る。本研究は、核融合科学研究所のLHD計画共同研究の共同研究として採択されている。

本研究では、第1段階としてガイドチューブ通過後のペレットの質量、形状を測定する計測器の開発及び改良、連続ペレット入射時のガイドチューブ内の圧力上昇測定センサーの開発、第2段階としてガイドチューブの長さ、直径、曲率、材質を変えた場合のペレットの輸送データベースの構築、第3段階として透明なガイドチューブ内でのペレット計測と連続ペレット入射のためのガイドチューブの設計という段階を踏んで進めていく。これまでに、ガイドチューブ通過後のペレット形状、質量測定器の開発、改良を行い、質量計のキャビティを製作しなおして感度を上昇させた。これによって、LHDペレットのガイドチューブ通過後の質量、速度形状測定が可能となった。

ペレットのガイドチューブ内での損耗過程を調べるための計測器の開発として、これまでにライトゲートシステムを利用した速度計測システム、シャドウグラフシステム、マイクロ波質量測定器を構築してきた。しかし、この質量測定器は、信号強度が弱いため、信号強度を増大させるように調整を進めること、アンプを入れることが必要であった。H16年度は、この質量測定器のキャビティを改良し、マイクロ波の発信機の調整を行い、またアンプを入れることにより、信号強度を増大させることに成功した。また、シャドウグラフシステムを新規に製作し、ガイドチューブ通過後のペレット形状をライトゲートシステム、質量測定器と同時に測定することを可能とした。図1にLHD連続ペレットを利用し、一連のペレット計測システムで測定した信号波形を示す。

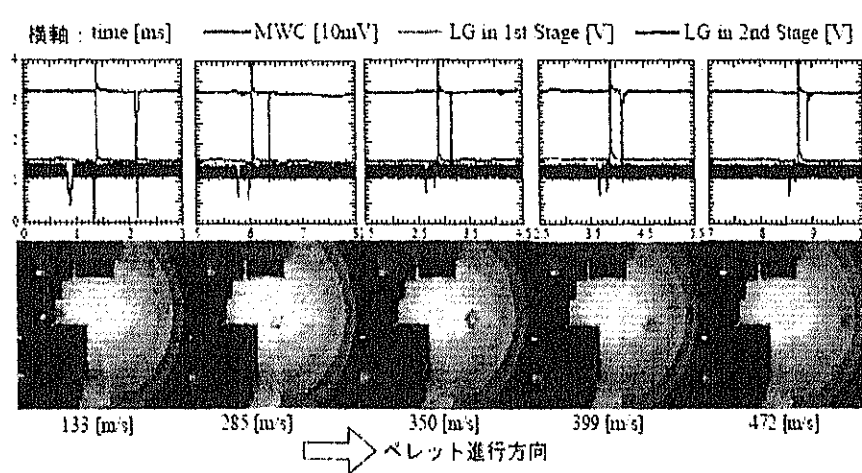


図1： ペレット入射システムの各測定器による信号

図1では、左から右にかけてペレット入射速度が上がっているが、それに従って、写真上でのペレットの位置が右側に移動しており、また、ライトゲートシステム (LG) 間やマイクロ波質量計 (MWC) の信号間隔が短くなっていることがわかる。

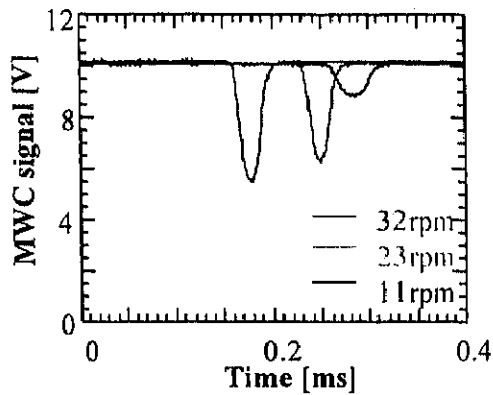


図2： MWCのペレット質量を変えた場合の信号波形

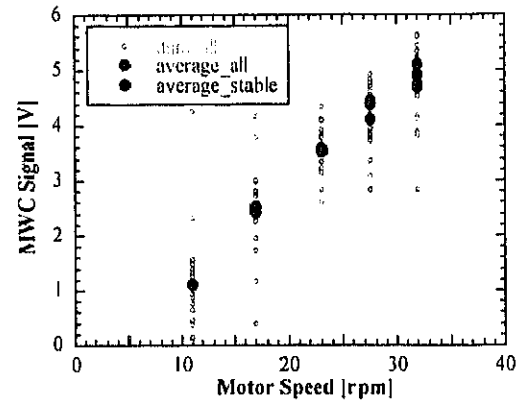


図3： MWC信号のペレットサイズ依存

図2に、ペレットの質量を変えた場合のMWCの信号出力波形を示す。ペレット質量によって信号出力が変化していることがわかる。図3に、ペレットサイズを変えるペレット生成部のペレット押し出しモーターのスピードを横軸にとったものを示す。モータースピードを早くするとペレットは大きくなる。よって、ペレットサイズとMWC信号出力が比例していることがわかる。また、マイクロ波出力信号が Volt オーダーとなり、S/N比が十分測定に耐えるレベルになっていることがわかる。

本研究によって、ガイドチューブ通過後のペレットの詳細計測が可能となった。今後、ペレットのガイドチューブ内でのペレットの損耗過程、輸送メカニズムを調べるため、ガイドチューブの曲率を変えた実験を行うことにする。



## 【16】 ガンマ10プラグ/バリア部のH $\alpha$ 線計測

プラズマ中に存在する中性粒子は、電離によるプラズマ生成、及び荷電交換によるエネルギー損失などを通してプラズマ閉じ込めに関与している。したがって、中性粒子密度の測定により、プラズマ粒子生成量や荷電交換反応の特性時間など、プラズマの閉じ込めに関する量を評価することができる。また、プラズマから飛び出したイオンや荷電交換中性粒子などが真空容器壁やリミターなどに衝突した際に、内部構造物に付着していたガスが放出され、それが再びプラズマ内に侵入するといった過程で起こる水素リサイクリングは、プラズマ内に低温のイオンを生成し、また、プラズマへのガスの供給の制御を困難にするため、プラズマ閉じ込めの妨げになる。この壁からの水素リサイクリングの状態を評価することにおいても、プラズマ中の中性粒子密度の測定は有用である。現在GAMMA10では、干渉フィルターを用いたH $\alpha$ 線計測器や、紫外・可視分光器、中性粒子シミュレーションコード(DEGAS)、衝突・輻射モデル(CR-model)を用いて、セントラル部、アンカー部、IMT(インナーミラースロート)部の中性粒子密度を見積もっている。しかし、GAMMA10全体の閉じ込めを詳細に評価するには、セントラル部、アンカー部以外の他の部位の中性粒子密度の量も評価する必要がある。そこで、本研究では、GAMMA10全体のプラズマ閉じ込めを考える上で、これまで測定されていないプラグ/バリア部の粒子生成量を評価することを目的として、初めてH $\alpha$ 線計測器をプラグ/バリア部に設置し、中性粒子密度測定を行った。また、本年度から、高電位生成プラズマ閉じ込めを目指してプラグ/バリア部への大強度ECRH印加実験が始まっており、プラグ/バリア部の壁コンディショニングの調査等のためにバリア部におけるH $\alpha$ 線計測が重要になっている。本研究では、新たに5chのH $\alpha$ 線計測器アレイを設計し、プラグ/バリア部プラズマのH $\alpha$ 線放射輝度分布を測定し、プラズマ中の中性粒子密度を測定し粒子生成量を調べることを目的とした。

新たに設計した多チャンネルH $\alpha$ 線計測器を用いて、高イオン温度モードのプラズマを解析した。図1に放射輝度とプラズマx方向の計測位置、時間の3次元グラフを示す。H $\alpha$ 線放射輝度と電子線密度からバリア部とセントラル部の中性粒子密度の相対量の時間変化を図2に示す。これによると、ECRHとs-NBI印加中に中性粒子密度が徐々に増加しているのが分かる。中性粒子密度の増加の要因については、s-NBIによる可能性と、ECRH印加によりリサイクリングが増大している可能性、またはその両方の効果による可能性が考えられる。バリア部の中性粒子密度のプラズマ径方向分布を見積もるため、軸対称を仮定し、H $\alpha$ 線放射輝度分布を偶関数でフィッティングを行い、それをAbel逆変換することにより体積放射率の径方向分布を求めた。ECRH印加中と、ECRH-p印加終了直後の電子線密度及びH $\alpha$ 線が増大する時間帯に着目し、70msと82msの時を解析した。H $\alpha$ 線の体積放射率からn(3)を求め、CR-modelにn(3)、n $_e$ 、T $_e$ を与えて、中性粒子密度n $_H$ を見積もった。ここで、バリア部のn $_e$ の径方向分布は、現在は測定されていないので、磁力線に沿ってセントラル部のn $_e$ 径方向分布と同様の分布であると仮定し、セントラル部のn $_e$ 径方向分布とバリア部電子線密度を考慮し、バリア部のn $_e$ 径方向分布を導出した。また、現在バリア部では電子温度は測定されていないため、

50-1000(eV)の範囲にあると予想し、その範囲で中性粒子密度の径方向分布の導出を行った。以上により導出した中

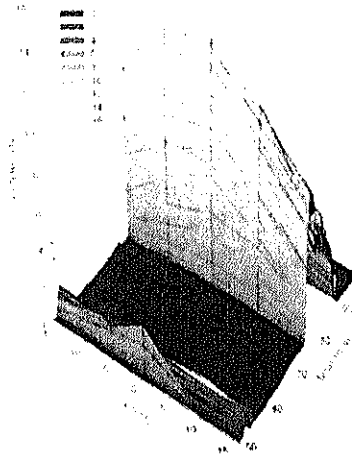


図1: 多チャンネルH $\alpha$ 線計測器によるH $\alpha$ 線放射輝度分布

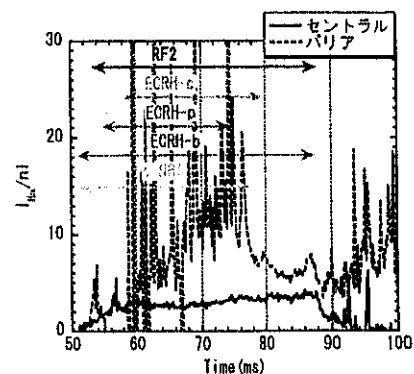


図2: バリア部とセントラル部の中性粒子密度の相対量の時間変化

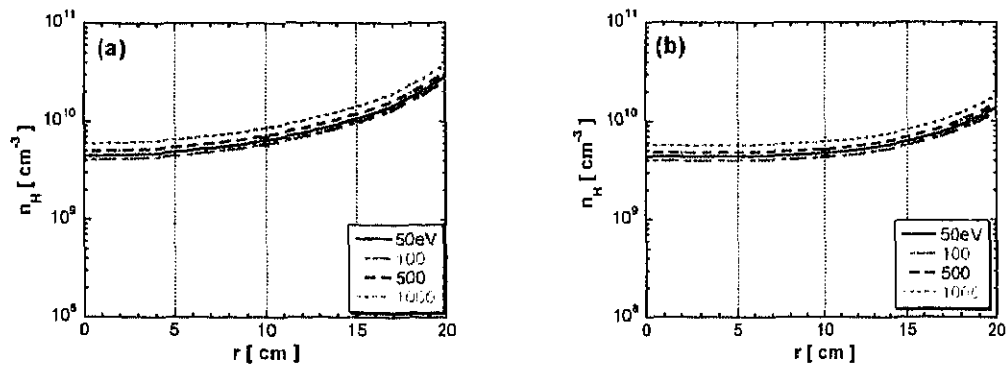


図3: (a)は、70msの時の中性粒子密度分布、(b)は、82msの時の中性粒子密度分布を示す。

性粒子密度分布を図3に示す。図3(a)は70msの時の中性粒子密度分布、図3(b)は82msの時の中性粒子密度分布である。この結果、70ms、82ms共に、プラズマ中心部では $\sim 10^9(\text{cm}^{-3})$ 、外側に行くにしたがって増加し、プラズマ周辺部では $\sim 10^{10}(\text{cm}^{-3})$ 程度となった。高温イオンモードのプラズマでは、セントラル部の中性粒子密度は $10^9(\text{cm}^{-3})$ 程度であるので、バリア部の中性粒子密度はセントラル部と比較して大きいという結果になった。この原因として、バリア部ではECRH-p、ECRH-b印加により真空容器壁からのリサイクリング粒子が増大しているということが考えられる。したがって、本多チャンネル $\text{H}_\alpha$ 線計測器によって、バリア部のリサイクリング状況のモニターとして使用できることがわかる。一方、バリア部の粒子生成量を見積もりセントラル部と比較を行ったところ、バリア部の粒子生成量は約 $1.6 \times 10^{18}(\text{s}^{-1})$ 、セントラル部の粒子生成量は $1.6 \times 10^{20}(\text{s}^{-1})$ であり、バリア部の粒子生成量はセントラル部のおよそ1%ということがわかった。この粒子生成量は、水素分子密度の影響が大きいので、今後、水素分子の測定も行なう必要がある。本研究によって、本多チャンネル $\text{H}_\alpha$ 線計測器での測定によって、バリア部の中性粒子密度分布の時間変化が測定できるようになり、バリア部における壁コンディションのモニターとして機能することが確認できた。今後、全 $\text{H}_\alpha$ 線計測器を用いて、ガンマ10全体の粒子バランスについて調べる予定である。

## 【17】 衝突・輻射モデルを用いたGAMMA 10プラズマの炭素イオン挙動の研究

プラズマから放射される不純物スペクトルは、不純物の温度・密度、放射損失量、回転速度など、様々な重要な情報を持っており、衝突・輻射モデルを適用することでプラズマ閉じ込めに対する多くの知見が得られる。衝突・輻射モデルでは電離進行プラズマを仮定することで、電子密度、電子温度に依存する不純物イオンの励起準位占有密度を決定する。現在、炭素、酸素の各イオンに対する衝突・輻射モデルの開発が進められており、実験との比較による検証を進めている。本研究においては、GAMMA 10 セントラル部における炭素イオンの振る舞いについて調べることを目的とし、紫外・可視分光測定システムにより計測された炭素イオン(CII:C<sup>+</sup>, CIII:C<sup>2+</sup>)のスペクトルと衝突・輻射モデルとの比較から、各価数の炭素イオン密度分布を推定し、放射される炭素イオンスペクトルについて考察を行った。

本研究で使用した紫外・可視分光測定システムは、絶対感度校正を行い、CCDカメラを用いることで空間・時間・波長分解されたスペクトル情報を得ることが可能である。高イオン温度モードのGAMMA 10 セントラル部から放射されたCII(426.7 nm)およびCIII(464.7 nm)の視線積分された放射輝度の空間分布を図1に示す。また、アーベル逆変換により得られる体積輻射率の半径方向分布を図2に示す。さらに、衝突・輻射モデルとの比較により得られたCII及びCIIIの密度分布を図3に実線で示す。これより、GAMMA 10 セントラル部でのCIIの密度は、プラズマ中心部で 10<sup>7</sup> cm<sup>-3</sup>、周辺部で 10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup>程度であり、CIIIの密度はCIIより一桁程度大きいことが分かる。

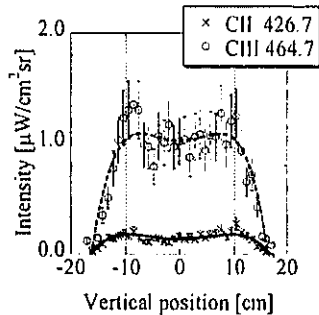


図1: 放射輝度(視線積分)

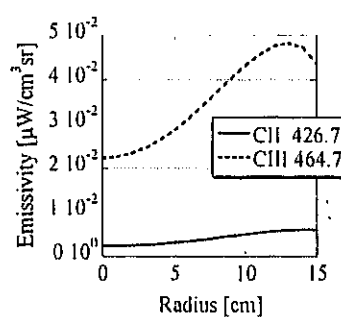


図2: 体積輻射率

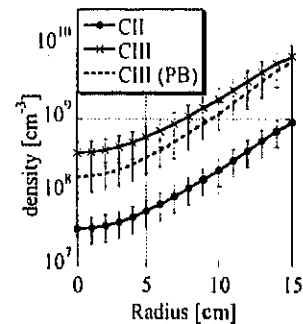


図3: CII, CIII 密度

以上により求められたCII、CIIIの密度分布から炭素イオンの粒子バランスを考察した。z 価の炭素イオンについての粒子バランス式は以下で表される。

$$\frac{d}{dt}n_z = S_{z-1}^{eff}n_e n_{z-1} - S_z^{eff}n_e n_z + \alpha_{z+1}n_e n_{z+1} - \alpha_z n_e n_z + \Gamma_z^in - \Gamma_z^{out} \quad (1)$$

ここで、 $S^{eff}$ は実効的電離速度係数、 $\alpha^{eff}$ は実効的再結合速度係数で、衝突輻射モデルの計算により求められる。 $\Gamma$ はそれぞれ輸送による流入(in)、流出(out)を表す。CIIIについては電離による項が支配的であると考えると、定常状態においては以下のように表される。

$$0 = S_{CII}^{eff}n_e n_{CII} - S_{CIII}^{eff}n_e n_{CIII} \quad (2)$$

図3の実線で表されるCII密度を(2)式に代入し各位置におけるCIIIの密度を求めたものが、図3の破線で表されるCIII密度である。この結果は実線で表されるCIII密度と誤差の範囲内で一致しており、CIIIの粒子バランスは電離による項が支配的であることが分かった。価数の大きいイオンほど電離時間が長くなるため、高電離イオンの粒子バランスを評価するうえでは輸送の効果が無視できなくなると考えられる。そこで、GAMMA 10 セントラル部での炭素イオンの輸送は軸方向へのミラー閉じ込め時間に支配されると仮定すると、粒子バランス式から、各価数のイオン密度は以下のように表される。

$$n_z = \frac{S_{z-1}^{eff} n_{z-1}}{S_z^{eff} + 1/(\tau_M^z n_e)} \quad (3)$$

ここで $\tau_M$ はミラー閉じ込め時間を表す。GAMMA 10 セントラル部の典型的なプラズマパラメータから計算した各価数の炭素イオンの電離時間、ミラー閉じ込め時間の値から(5)式及び計測されたCII密度(図3実線)より順次計算した各価数の炭素イオン密度を図4に示す。炭素イオンの輸送がミラー閉じ込め時間に支配されると仮定すると、GAMMA 10 セントラル部においては中心部ではCV(C<sup>4+</sup>)が最も多く存在し、周辺部ではCIIIとCIV(C<sup>3+</sup>)が同程度存在することが分かった。

次に放射スペクトルについての考察を行った。GAMMA 10 セントラル部で計測されている炭素イオンスペクトルはCII、CIIIからの放射のみである。図4の $r=0$ で示される密度の時の、各イオンからの放射強度について衝突・輻射モデル計算を行った。その結果とGAMMA 10の分光計測システムの計測波長領域を図5に示す。これよりCVIは $10^9 \text{ cm}^{-3}$ 以上存在したとしても放射強度が小さいことが分かる。これはCVがヘリウム様イオンであり、励起エネルギーが数100 eVであるため、GAMMA 10の電子温度(約100 eV)では十分に励起されないことに起因する。また、CIVは154.8 nmのスペクトルが多く放射される結果が得られた。しかし、この波長領域は図5に示した現在のGAMMA 10分光測定システムの測定波長領域外になっている。以上から、GAMMA 10 セントラル部では、スペクトルは観測されていないが、CV及びCIVが多く存在する可能性が示された。

今後はCIVが強く放射される可能性のある100 nmから200 nmの波長領域の計測、及び、衝突・輻射モデルの構築・改良により炭素イオン以外の不純物の振る舞いについて調べることを計画している。

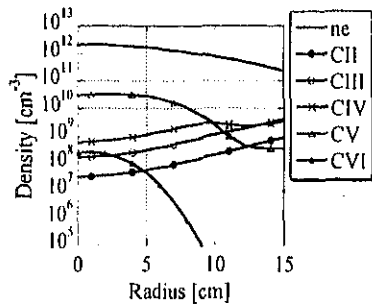


図4: 炭素イオン密度分布

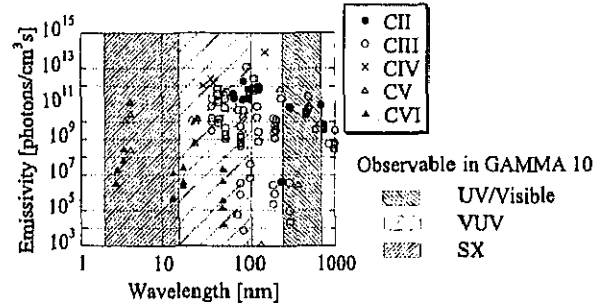


図5: 放射輝度( $r=0$ )と GAMMA 10 計測波長領域

## 【18】 ガンマ10における超短パルス反射計によるプラズマの密度揺動計測

超短パルス反射計はパルスレーダーの一種であり、プラズマの電子密度及び密度揺動の計測法として注目されている。光源には1台で広帯域のフーリエ周波数成分を持つインパルス発振器を用いており、プラズマからの反射波の中の反射層（カットオフ層）の径方向微小変位の情報をパルスの飛行時間（Time-of-Flight）として測定する。本研究では、プラズマ密度揺動のプラズマ加熱による変化を調べることを目的として、超短パルス反射計を用いたプラズマ密度揺動計測法の確立を目指した。本計測システムは、4チャンネルの異なる中心周波数（7, 8, 9, 10 GHz）を持つバンドパスフィルターにより、飛行時間の径方向分布の測定結果が得られる。これらの情報を基に各チャンネルの飛行時間を同時測定しプラズマの密度揺動を計測する。本計測システムは、光源として半幅幅 65 ps のインパルス発振器を用いている。

インパルス発振器の出力は、導波管を通すことにより、測定に不要な低周波数成分を抑制し、さらに各周波数成分の群速度の違いにより分散させることにより、その後のアンプの飽和を防ぐ。プラズマからの反射波はシールドボックス内の受信システムまで送られる。シールドボックス内では、40 dB・6-18 GHz のアンプで増幅し、パワースプリッターで4つの信号に分けられる。分けられた信号はバンドパスフィルターによりそれぞれ7, 8, 9, 10 GHzの周波数成分のみが取り出され、ディテクターにより自乗検波される。検波された信号は40dB・100kHz-1GHzのプリアンプにより増幅され、ディスクリミネーターへと送られる。ディスクリミネーターによりストップ信号が時間-電圧変換器へ送られ、他方、インパルス発振器からのトリガーパルスを時間-電圧変換器のスタート信号として使うこと

により、両入力信号の時間差の情報を得る。これを100 kHzの繰り返し周波数で行う。ただし、この周波数は発振器からの出力周波数であり、受信信号周波数はその半分の50 kHzとなるので、サンプリングの定理より、実効サンプリング周波数は25 kHzまでとなる。本装置は超短パルスに含まれる広い周波数帯の周波数に依存するカットオフ層までの飛行時間情報を測定データとして抽出する。図1に超短パルス反射計の概略図を示す。Oモードにおける各受信周波数（7, 8, 9, 10 GHz）のカットオフ層の密度は、順に $6.09 \times 10^{11}$ 、 $7.96 \times 10^{11}$ 、 $1.01 \times 10^{12}$ 、 $1.24 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ である。今回は、10 GHzの信号が弱かったため、使用しなかった。

高温イオンモードにおけるプラズマの揺動測定結果を図2に示す。7, 8, 9 GHzの測定結果を横軸に時間、縦軸に揺動周波数を示す。ECRH印加前（50-180ms）、印加中（180-210ms）について各チャンネルの揺動について調べた。ECRH印加前は、3チャンネルとも10 kHz前後（揺動が最大値の時の周波数：9.2 kHz）の揺動が最も強く検出されていることが分かる。8 GHzでは、10 kHzの揺動について、20 kHz前後の揺動が強く、さらに5 kHz、15 kHzの揺動も強く検出された。このことより、この固定ショットで生成されたプラズマには、「基本波として5 kHz付近の周波数を持った密度揺動があり、さらにその高調波も励起されている。」と考えられる。一方、マイクロ波干渉計による $r = 12 \text{ cm}$ の位置の揺動スペクトルをみると、5 kHz、15 kHz付近に鋭いピークが見られ、10 kHz前後にも揺動が励起されている。これは、反射計による結果とよく一致している。次に、ECRH印加中では、3チャンネルともECRH印加直後に揺動が増大し、印加中は強い揺動が出ていることが分かる。また、ECRH印加前では揺動のピーク10 kHz前後にあったが、

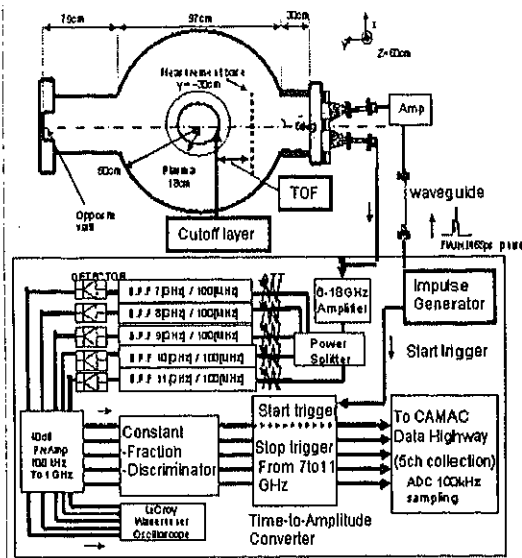


図1: 反射計概略図

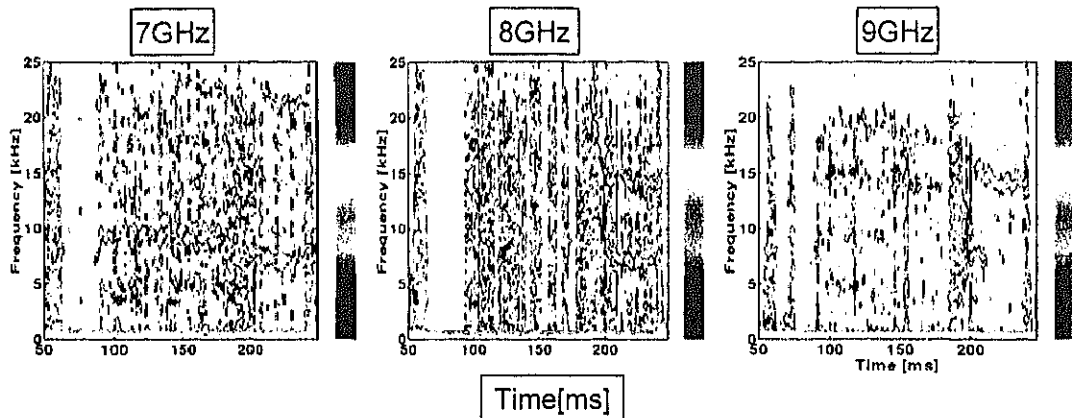


図2: 反射計による揺動スペクトル

ピークは 7kHz 付近に出ている。そして、ピーク値は小さくなっているものの全体的に強度が強くなっている。一方、マイクロ波干渉計から得られた密度揺動と比較すると ECRH 印加中のほうが、ECRH なしの時間帯に比べて揺動は抑えられており、超短パルス反射計で得られたデータとは異なる結果を示している。この原因として、マイクロ波干渉計と反射計の測定方法の違いが考えられる。これは、反射計の ECRH 印加中の各チャンネルの反射点の中心部からの距離は、7 GHz : 12.5 cm、8 GHz : 11.5 cm、9 GHz : 10.3 cm であり、プラズマの中心部近くを測定することができず、各々、局所的な揺動測定となる。一方、マイクロ波干渉計は送信、受信ホーンの間をプラズマすべてを見ている。よって、ECRH が印加されるとプラズマ周辺部で局所的に揺動が励起されるが、プラズマ中心部では揺動が抑えられていると考えられる。

本研究によって、プラズマの局所的な揺動計測が可能となった。そして、ECRH 印加による揺動成分の変化が観測された。今後、この揺動についてより詳細に調べ、ECRH による揺動抑制効果について調べていくことにする。

【19】 理論・シミュレーション解析

(1) プラズマ共鳴が存在する場合の表面波の理論

表面波は最近プロセスプラズマの生成・加熱に良く利用されている。これまでの表面波に対する解析の多くは一様プラズマの仮定に基づいていたが、実際にはプラズマ表面のシース領域ではプラズマは不均一であり、プラズマ密度の不均一性を考慮した解析が必要であった。ここでは軸方向へのプラズマ密度の不均一性を取り入れた表面波の解析を行った。

出発方程式はマクスウェル方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_r \mathbf{E}) = c^2 \nabla \times \mathbf{B}$$

である。ここで、 $\epsilon_r$  はプラズマを有する系の比誘電率である。図1に解析モデルを示す。Metal はスロットアンテナを表し、クォーツ窓を通して2.45GHzのTMマイクロ波がプラズマ中に入射される。プラズマ中に表面波を励起するために一様プラズマ領域の電子プラズマ周波数は2.45GHzより

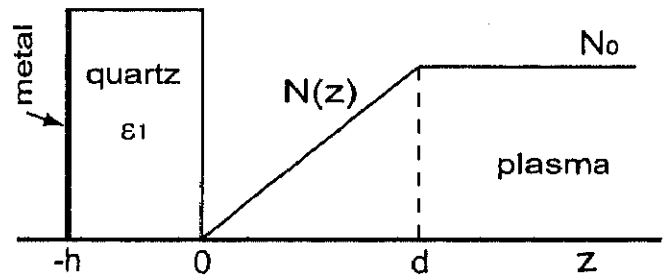


図1. 表面波の解析モデル

も大きい。これから、プラズマ密度が不均一なシース領域に $\omega = \omega_{pe}$ のプラズマ共鳴を満たす共鳴層が形成されることになる。このプラズマ共鳴の効果が表面波にどのように作用するのかを明らかにすることが重要である。ここで電場を $E_z$ と $E_{\perp}$ に分離して考えると、各々に対して

$$\nabla_{\perp}^2 \frac{\partial}{\partial z} E_z - \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \epsilon_r \right) \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{E}_{\perp} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{E}_{\perp} - (\nabla_{\perp}^2 + k_0^2 \epsilon_r) E_z = 0$$

が得られる。これらに対して変数分離形の解

$$E_z(r, \theta, z) = \psi(r, \theta) F(z)$$

$$\nabla_{\perp} \cdot \mathbf{E}_{\perp}(r, \theta, z) = \psi(r, \theta) G(z)$$

を仮定すると、径方向分布を与える $\psi$ に関しては

$$(\nabla_{\perp}^2 + \lambda^2) \psi(r, \theta) = 0$$

が得られ、また軸方向分布に関する $F$ と $G$ に対しては

$$\lambda^2 \frac{d}{dz} F + \left[ \frac{d^2}{dz^2} + k_0^2 \epsilon_r(z) \right] G = 0$$

$$\frac{d}{dz} G + [\lambda^2 - k_0^2 \epsilon_r(z)] F = 0$$

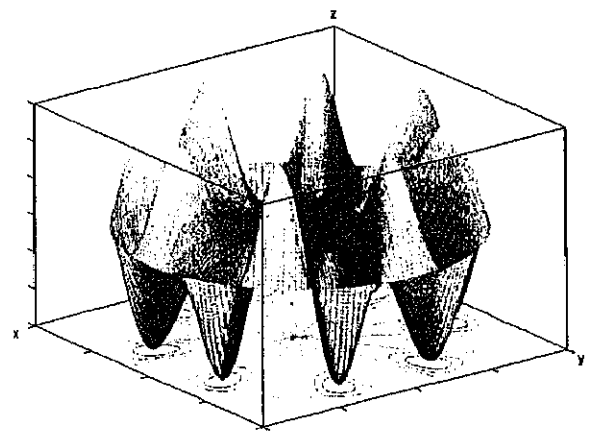


図2. 表面波 ( $m=8, n=1$ ) の径方向分布

の連立微分方程式が得られる。これから、径方向分布はベッセル関数で与えら、境界条件からパラメータ  $\lambda$  が固有値として求められる。即ち、 $\lambda = j_{mn}/a$  である。ここで、 $a$  は装置の内径であり、 $j_{mn}$  はベッセル関数  $J_m$  の  $n$  番目のゼロ点である。

一方軸方向に関しては、領域を  $-h < z < 0$ ,  $0 < z < d$ ,  $d < z$  の3つの領域に分けて各々の領域で解析解を求めて、 $z=0$  と  $z=d$  で解をなめらかに接続するという境界条件を課する。これから TM 表面波の分散式

$$\frac{I_0(z_d) - t_2 I_1(z_d)}{K_0(z_d) + t_2 K_1(z_d)} = \frac{I_0(z_0) + t_1 I_1(z_0)}{K_0(z_0) - t_1 K_1(z_0)}, \quad t_1 = \frac{p_1}{\lambda} \tanh(p_1 h), \quad t_2 = -\frac{p_2}{\lambda}$$

が得られる。ここで、 $p_j = (\lambda^2 - k_0^2 \epsilon_j)^{1/2}$ ,  $k_0 = \omega/c$ ,  $\epsilon_1 = 4$ ,  $\epsilon_3 = 1 - (\omega_{p0}/\omega)^2$ ,  $z_d = \lambda(d - z_{rc})$ ,  $z_0 = \lambda z_{rc}$ ,  $z_{rc} = d\alpha(\omega + i\nu)/\omega_{p0}^2$  である。また、 $\nu$  は衝突周波数であり、 $I_n$ ,  $K_n$  は変形ベッセル関数である。図3に  $m=8$ ,  $n=1$  の表面波の固有値を  $(\omega_{p0} a/c)^2$  の関数として示す。固有値の虚部はマイナスであるから、表面波は減衰モードになっている。図4は、 $(\omega_{p0} a/c)^2 = 50$  の場合の軸方向の固有関数を示している。図から明らかなように、固有関数は  $\omega = \omega_{pe}$  のプラズマ共鳴層の位置で強くピーキングしていることが分かる。即ち、プラズマが均一である場合には表面波はプラズマとクォーツ窓の境界に局在しているが、プラズマが不均一になると表面波はプラズマ共鳴層の位置に強く局在するようになることが明らかになった。プラズマ共鳴層近傍に強く局在したこの電場がプラズマの生成や加熱に大きく寄与していることが想像される。プロセスプラズマにおいても、電場が  $\omega = \omega_{pe}$  のプラズマ共鳴層の位置に局在している実験結果が最近幾つか報告されている。

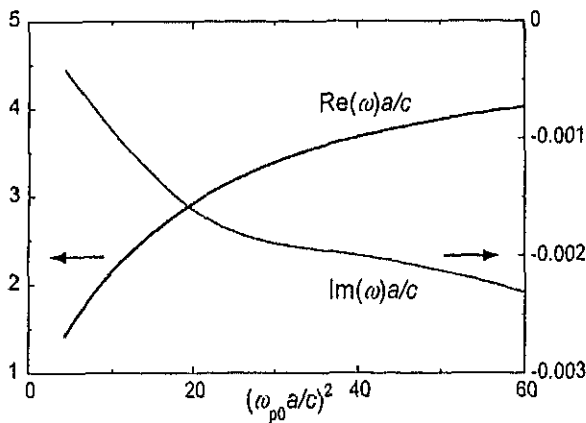


図3. 表面波 ( $m=8, n=1$ ) の固有値

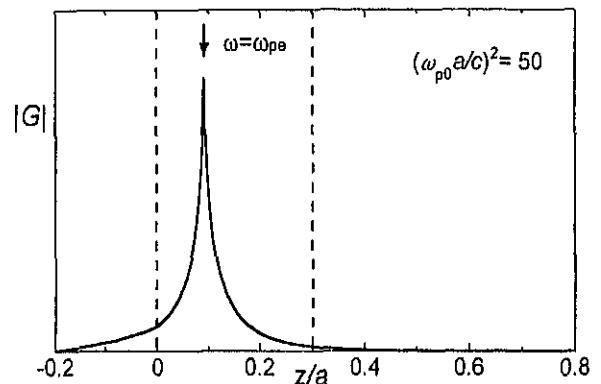


図4. 表面波 ( $m=8, n=1$ ) の軸方向分布

#### 参考文献

1. H. Hojo, A. Shimamura, N. Uchida, Y. Yasaka, and A. Mase, Surface Wave Analysis with Plasma Resonance, J. Plasma Fusion Res. **80**, No.9 (2004), 719-720.
2. A. Shimamura, H. Hojo, N. Uchida, Y. Yasaka and A. Mase, Theory of Surface Waves in Non-Uniform Plasmas with Plasma Resonance, Proc. Plasma Science Symposium 2005 and The 22<sup>nd</sup> Symposium on Plasma Processing (Nagoya, Jan. 2005), 241-242.



(2) ファブリー・ペロー干渉法を用いた電子密度計測

ファブリー・ペロー干渉計は現在波長フィルターやモード選択器として広く用いられているが、物性定数の分かっているエタロンを用いてファブリー・ペロー共鳴を利用して入射波の波長をセレクトしている。ここでは逆の発想をして、ファブリー・ペロー干渉計を電子密度等の物質計測に利用することを考える。いまエタロンを未知試料と考えると、ファブリー・ペロー共鳴によってエタロンの試料を透過してくる電磁波や光の周波数を直接計測することによって逆にエタロンの誘電率 $\epsilon(\omega)$ を決定できることが分かる。もしエタロンの誘電率 $\epsilon(\omega)$ がドルーデモデル等でうまく近似できる場合、この誘電率 $\epsilon(\omega)$ の計測から電子プラズマ周波数、そして伝導電子密度等を求めることが可能となる。

本研究では、図4に示すようなシートプラズマをエタロンとして用いたファブリー・ペロー干渉計を考え、透過波の計測によるファブリー・ペロー共鳴周波数の測定からプラズマの電子密度を求める手法について報告する。本手法は、シートプラズマに限らず半導体薄膜や金属フィルム中の伝導電子の密度計測にも適用可能である。

図5に示すファブリー・ペロー干渉計は2つの過密度シートプラズマとその間に挟まれた誘電体物質( $\epsilon_0$ )とで構成されている。ここでは簡単のため各シートプラズマを閉じ込めている容器は非常に薄く、かつ電磁波に対して透明であるとして無視する。プラズマ中における電磁波の散逸効果もここでは無視して考える。高い周波領域ではプラズマの誘電率はドルーデモデルで近似できるので、このときファブリー・ペロー干渉計を透過する電磁波は、比誘電率を $\epsilon$ として波動方程式

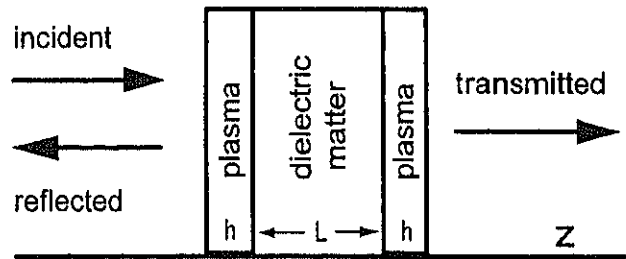


図5. ファブリー・ペロー干渉計の解析モデル

$$\left[ \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \epsilon(\omega, z) \right] E(z) = 0$$

$$\epsilon(\omega, z) = \begin{cases} 1, & z < 0 \\ \epsilon_{\text{core}} - \left( \frac{\omega_{pe}}{\omega} \right)^2, & 0 \leq z \leq h \\ \epsilon_a, & h < z < h+L \\ \epsilon_{\text{core}} - \left( \frac{\omega_{pe}}{\omega} \right)^2, & h+L \leq z \leq 2h+L \\ 1, & z > 2h+L \end{cases}$$

で記述される。ここで、 $k = \omega/c$ 、 $\omega_{pe}$ はシートプラズマの電子プラズマ周波数である。また、 $\epsilon_{\text{core}}$ はシートプラズマに対しては1で、半導体薄膜等に対しては価電子密度に関係したバルクの誘電率である。例えばGaAsでは $\epsilon_{\text{core}} = 13.13$ である。

この微分方程式を解くことによって、このファブリー・ペロー干渉計における電磁波の透過率  $T$  やファブリー・ペロー共鳴の特性について解析することができる。図6は過密度のプラズマ領域 ( $\omega < \omega_{pe}$ ) における電磁波の透過率  $T$  の周波数依存性を示したものである ( $L = h$ )。  $\omega_{pe}L/c$  の値が大きくなるに従

って共鳴の数が増加していくことが分かる。図7はこれらの共鳴周波数と $\omega_{pe}L/c$ の関係を示したものであり、 $\omega_{pe}L/c$ の値が大きくなるに従って各共鳴周波数が小さくなっていくことが分かる ( $L=h$ )。

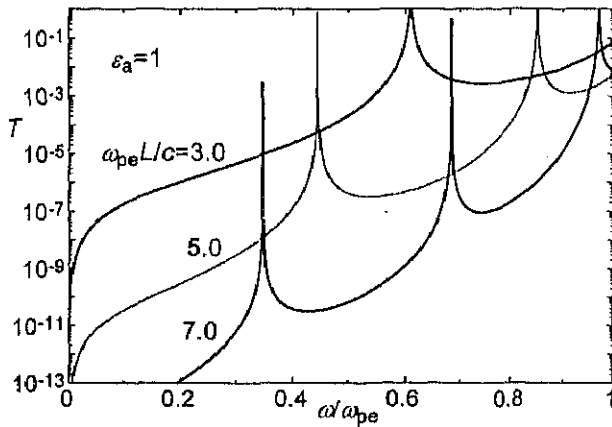


図6. ファブリー・ペロー干渉計の透過率  $T$

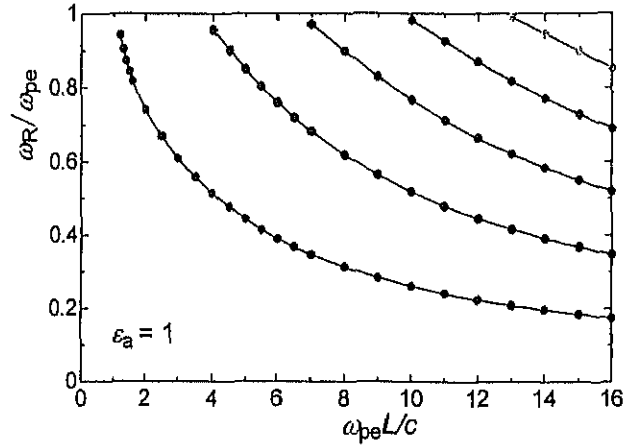


図7. 共鳴周波数の $\omega_{pe}$ 依存性

次に、シートプラズマの電子密度の決定法について述べる。いまプラズマの厚さ  $h$  や  $L (=h)$ 、 $\epsilon_a$  が既知であるとする、図7は共鳴周波数と電子プラズマ周波数の関係を与えていることが分かる。これから第1共鳴周波数 $\omega_R$ を $\omega_{pe}$ の関数として、或いは逆に $\omega_{pe}$ を $\omega_R$ の関数として表すことが可能となる。図8及び図9はこうして求めたシートプラズマの電子密度 $N$ と第1共鳴周波数 $\omega_R$ の関係を示したものである。これらの図から、第1共鳴周波数 $\omega_R$ を測定することによってエタロンとしてのプラズマの電子密度 $N$ を決定できることが分かる。また、プラズマに限らず半導体薄膜や金属フィルム中の伝導電子密度の計測等にも応用することが可能である。より高次の共鳴周波数を同時計測することによって電子密度に加えて他の物性定数を決定することも可能になる。

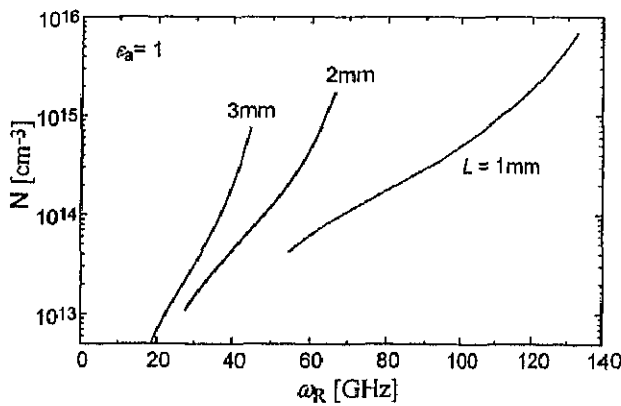


図8. 電子密度と $\omega_R$ の関係 ( $L=1, 2, 3\text{mm}$ )

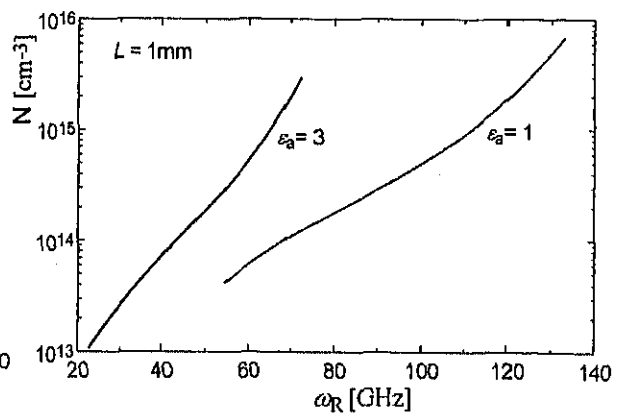


図9. 電子密度と $\omega_R$ の関係 ( $\epsilon_a=1, 3$ )

#### 参考文献

1. H. Hojo and A. Mase, A New Method of Electron Density Measurement by Fabry-Perot Interferometry, J. Plasma Fusion Res. 80, No.5 (2004) 358-359.
2. H. Hojo and A. Mase, Measurements of Thin Film Materials Using Fabry-Perot Interferometry, Extended Abstracts of Optics Japan 2004 (Osaka Univ., Nov. 2004) 330-331.

### (3) 薄膜状プラズマにおける電磁波の透過現象

プラズマの厚さが入射電磁波の波長程度の非常に薄いシートプラズマにおける電磁波の透過現象に関するシミュレーションについて報告する。用いる方程式は、静止イオンを仮定して

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} &= -\nabla \times \mathbf{E} \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} &= \nabla \times \mathbf{B} - \mathbf{J} \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{J} &= f\mathbf{E}\end{aligned}$$

である。ここで、 $\omega_0 t \rightarrow t$ ,  $\omega_0 r/c \rightarrow r$ ,  $E/E_0 \rightarrow E$ ,  $cB/E_0 \rightarrow B$ ,  $J/\varepsilon_0 \omega_0 E_0 \rightarrow J$ 。また  $f = (\omega_{pe}/\omega_0)^2$ ,  $\omega_{pe}$  は電子プラズマ周波数,  $\omega_0$  はある基準周波数である。計算スキームは FDTD 法を用い、境界条件は Out Going Wave 条件を用いる。以下に、2次元シミュレーション結果について報告する。 $\omega_0 = 3 \times 10^{11}$  を仮定すると、長さのユニット  $c/\omega_0$  は 1 mm となる。シートプラズマは  $x$  軸に沿っているとして密度分布として

$$n(x) = n_0 \exp\left[-\left(\frac{x}{d}\right)^4\right]$$

を仮定する ( $d = 1$ ,  $n_0 = 6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ )。この場合、最大密度  $n_0$  に対する電磁波のカットオフ周波数は 69.6GHz になっている。

先ず、入射周波数が  $\omega = 82\text{GHz}$  の場合の透過率のシミュレーション結果を図 10 に示す。この場合入射波の周波数は最大カットオフ周波数よりも大きい。角度  $\theta$  は電磁波の入射角で  $\theta = 0$  が垂直入射に対応している。垂直入射の場合は TE モードと TM モードの透過率は等しくなるが、 $\theta = 0 \sim 50$  の領域では TM モードの透過率が TE モードの透過率よりも大きくなっている。この現象は誘電体 (屈折率  $n_1$ ) から別の誘電体 ( $n_2 > n_1$ ) への電磁波の透過現象において見られる透過率の関係に類似しているように見える。次に、入射周波数が  $\omega = 66\text{GHz}$  の場合の透過率のシミュレーション結果を図 11 に示す。入射波の周波数は最大カットオフ周波数よりも小さくなるので、この場合 TM モードに対してはプラズマ内に  $\omega = \omega_{pe}$  のプラズマ共鳴層が存在することになる。垂直入射の場合には誤差の範囲内で TE モードと TM モードの透過率は等しくなっているが、今度は逆に TE モードの透過率の方が TM モードのそれよりも大きくなっていることが分かる。これは TM モードの場合に対してはプラズマ共鳴層で電子プラズマ波が励起されるので、入射電磁波のエネルギーの一部が電子プラズマ波の励起に費やされるので、その分透過する電磁波のエネルギーが少なくなり、結果として透過率が TE モードのそれよりも小さくなると想像される。

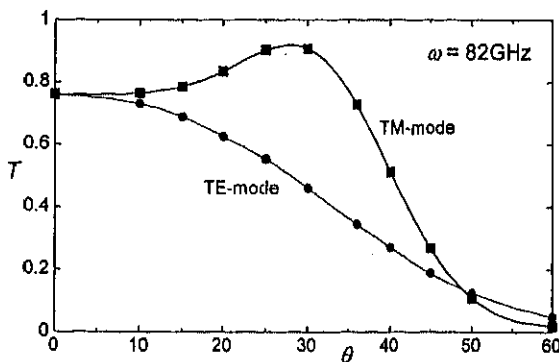


図 11.  $\omega > \omega_{pe}$  の場合の透過率

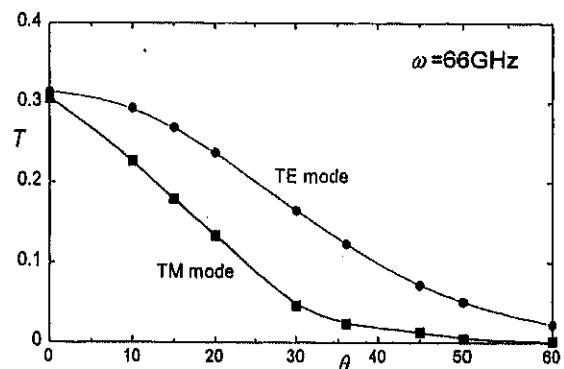


図 12.  $\omega < \omega_{pe}$  の場合の透過率

<論文>

- 01 K. Akimoto and H. Hojo,  
Cyclotron-Resonance Accelerations by a Generalized EM Wave,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 446-448.
- 02 I.Katanuma, H.Saimaru, Y.Tatematsu, T.Saito, K.Ishii, T.Cho,  
Ion Radial Transport due to a Non-uniform Electrostatic Potential in a Magnetic Mirror,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 461-464.
- 03 T.Ito and I.Katanuma,  
Particle Orbits and Radial Loss in the GAMMA10 Tandem Mirror,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 538-541.
- 04 K.Ishii, Y.Takemura, A.Kojima, K.Hagisawa, Y.Miyata, I.Katanuma, T.Cho,  
Radial Electric Field Control for Retardation of Radial Transport of Bounce Ions in the  
Tandem Mirror,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 542-545.
- 05 H. Hojo, K. Akimoto and T. Watanabe,  
Fluid Simulation on Subcycle Wave Generation in Relativistic Laser-Plasma Interactions,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 593-596.
- 06 T. Watanabe, Y. Matsumoto, M. Hishiki, S. Oikawa, H. Hojo,  
Ignition Condition for p-11B Reactor with LHD type Magnetic Field Configuration,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 630-633.
- 07 TATEMATSU Yoshinori, SAITO Teruo, KATANUMA Isao, CHO Teruji,  
Effects of Magnetic Field Distribution on Power Absorption through Second Harmonic  
Electron Cyclotron Resonance Heating in Mirror Machines,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 669-672.
- 08 NAKASHIMA Yousuke, HIGASHIZONO Yuta, OHKI Toshikazu, SHOJI Mamoru 1),  
KOBAYASHI Shinji 2), KUBOTA Yuusuke, YOSHIKAWA Masayuki, ISLAM Md. Khairul,  
FUKASAWA Takahiro, ISHIMOTO Yuki, WATANABE Kazuhiro, OGITA Takeshi,  
YAMADA Masaki, MURAKAMI Ryouhei and CHO Teruji,  
Neutral transport analysis in non-axisymmetric anchor region of the GAMMA 10 tandem  
mirror using a Monte-Carlo simulation,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 673-676.
- 09 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, T. Kobayashi, M. Saito, T. Ohki, Y. Higashizono, A.  
Itakura, S. Tsunoda and T. Cho,  
Temporal behavior of electron and neutral hydrogen density profiles during NBI in the  
GAMMA 10 tandem mirror,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 673-676.
- 10 A.Kojima, K.Ishii, Y.Takemura, K.Hagisawa, Y.Miyata, A.Itakura, M.Ichimura, T.Cho,  
Simulation of Path Integral Effects for the Magnetic Field Fluctuation Measurement by a  
Gold Neutral Beam Probe in the Tandem Mirror GAMMA 10,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 677-680.
- 11 K.Hagisawa, K.Ishii, Y.Takemura, A.Kojima, Y.Miyata, T.Cho,  
Observation of Mirror Trapped Ions and Development of a High Energy Neutral Particle  
Analyzer in GAMMA 10,

- Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 681-684.
- 12 M. Yoshikawa, K. Sedo, Y. Kubota, T. Kobayashi, A. Itakura, J. Kohagura, I. Murakami, T. Kato and T. Cho,  
Study of Impurity Ion radiation intensities using collisional-radiative model in the GAMMA 10 plasma,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 685-688.
- 13 ISLAM Md. Khairul and NAKASHIMA Yousuke,  
Theoretical Investigation of Langmuir Wave Instability in Irradiated Dusty Plasmas,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 738-740.
- 14 S.Kakimoto, D.Inoue, M.Ichimura, H.Higaki, K.Horinouchi, K.Ide, Y.Yamaguchi, H.Nagai, K.Nakagome, T.Watanabe, T.Cho,  
Excitation of the Alfvén ion cyclotron mode due to an anisotropic heating,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 741-744.
- 15 A. Fukuchi, H. Hojo, A. Itakura and A. Mase,  
Computer Simulation of Ultrashort-Pulse Reflectometry in Helical Plasmas,  
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 6, (2004) 745-747.
- 16 H. Hojo and A. Mase,  
A New Method of Electron Density Measurement by Fabry-Perot Interferometry,  
Journal of Plasma and Fusion Research 80, 5 (2004) 358-359.
- 17 TATEMATSU Yoshinori, SAITO Teruo, HOJO Hitoshi,  
Evaluation of Absorption Rate by Using Full-Wave Maxwell Simulation for plug ECRH in the GAMMA 10 tandem mirror,  
Journal of Plasma and Fusion Research 80, 5 (2004) 360-361.
- 18 SAITO Teruo, TATEMATSU Yoshinori, IKEGAMI Hirokazu, SEKINE Takayuki, NAGAI Daichi, NOZAKI Kiyoshi, YOSHIDA Maiko, ISHII Kameo, CHO Teruji,  
Expansion of Scaling Law of Field-Aligned Potential Difference with Increased Plug ECRH Power in GAMMA 10,  
Journal of Plasma and Fusion Research 80, 6 (2004) 425-426.
- 19 H. Hojo, A. Shimamura, N. Uchida, Y. Yasaka, and A. Mase,  
Surface Wave Analysis with Plasma Resonance,  
Journal of Plasma and Fusion Research 80, 9 (2004) 719-720.
- 20 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Fukai, N. Yokoyama, Y. Tomii, R. Minami, K. Sakamoto, T. Imai, S. Miyoshi,  
Measurements of the relaxation of ion anisotropic distribution functions in tandem-mirror plasmas,  
Review of Scientific Instruments 75, 10 (2004) 3616-3618.
- 21 K.Ishii, K.Hagisawa, Y.Takemura, A.Kojima, Y.Miyata, M.Yoshikawa, T.Saito, I.Katanuma, T.Cho,  
Direct measurements of the electro-statically and magnetically bounced ions in the tandem mirror,  
Review of Scientific Instruments 75, 10 (2004) 3619-3621.
- 22 M. Hirata, S. Tokioka, T. Cho, J. Kohagura, M. Yoshida, Y. Miyake, T. Numakura, N. Yokoyama, T. Fukai, Y. Tomii, Y. Nakashima, S. Miyoshi, T. Kondoh,  
Novel compact electrostatic ion-current detector using a self-collection method for

- secondary-electron suppression,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3631-3633.
- 23 M. Ichimura, H. Higaki, T. Kawabata, D. Inoue, H. Nagai, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Horinouchi, K. Ide, K. Nakagome, T. Cho,  
 Measurement of the plasma pressure profile with a time-of-flight type neutral-particle-analyser,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3637-3639.
- 24 Y. Takemura, K. Ishii, A. Kojima, K. Hagiwara, Y. Miyata, Y. Masuda, T. Yamaguchi, A. Itakura, T. Cho,  
 Two-dimensional potential profile and density measurements by use of an improved gold neutral beam probe,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3649-3651.
- 25 A. Kojima, K. Ishii, Y. Takemura, K. Hagiwara, Y. Miyata, Y. Maeda, T. Yamaguchi, A. Itakura, M. Ichimura, T. Cho,  
 Measurement of the magnetic field fluctuations by use of a gold neutral beam probe in the tandem mirror GAMMA 10,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3652-3654.
- 26 H. Hojo, A. Fukuchi, A. Itakura and A. Mase,  
 Full-Wave Simulations on Ultrashort-Pulse Reflectometry for Helical Plasmas,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3810-3812.
- 27 M. Ignatenko, A. Mase, L. Bruskin, Y. Kogi and H. Hojo,  
 Effects of Asymmetry and Target Location on Microwave Imaging Reflectometry,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3813-3815.
- 28 J. Kohagura, T. Cho, T. Numakura, M. Hirata, N. Yokoyama, T. Fukai, Y. Tomii, S. Tokioka, Y. Miyake, S. Kiminami, K. Shimizu, S. Miyoshi,  
 X-ray tomography systems for observations of the effects of radially sheared electric fields on fluctuations in plasmas,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 3992-3994.
- 29 H. Higaki, M. Ichimura, K. Horinouchi, K. Nakagome, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Ide, D. Inoue, H. Nagai, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, and T. Cho,  
 Measurement of low frequency plasma fluctuations with a visible light detector in GAMMA10,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4085-4087.
- 30 M. Yoshikawa, Y. Kubota, T. Kobayashi, M. Saito, N. Numada, Y. Nakashima, T. Cho, H. Koguchi, Y. Yagi, N. Yamaguchi,  
 Absolute calibration of vacuum ultraviolet spectrograph system for plasma diagnostics,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4088-4090.
- 31 Y. Higashizono, Y. Nakashima, T. Ohki, Y. Kubota, M. Yoshikawa, M. K. Islam, K. Watanabe, T. Ogita, T. Kobayashi, R. Murakami, M. Yamada, and T. Cho, M. Shoji, S. Kobayashi,  
 Diagnostic system of H $\alpha$  emission on neutral beam injection experiments in the GAMMA10 central cell,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4094-4096.
- 32 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, Y. Kubota, M. Saito, M. Numada, K. Ishii, T. Cho,  
 Measurement technique of electric field using ultraviolet/visible spectroscopy in cylindrical

- plasmas,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4121-4123.
- 33 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, H. Yamada, and R. Sakamoto,  
 Development of an integrated pellet diagnostic system for fueling pellets,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4228-4230.
- 34 Y. Nakashima, M. K. Islam, T. Natori, I. Katanuma, T. Ohki, K. Watanabe, Y. Higashizono,  
 and T. Cho, Y. Ishimoto,  
 Edge plasma measurements near the minimum-B anchor cell of GAMMA 10 using  
 Langmuir probe and calorimeter arrays,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4308-4310.
- 35 T. Sekine, T. Saito, Y. Tatematsu, T. Yasuoka, H. Ikegami, D. Nagai, K. Nozaki, M. Ichimura,  
 H. Higaki, T. Cho,  
 Ion Measurement of the Edge Plasma in the GAMMA 10 Tandem Mirror Device with an  
 Ion Sensitive Probe,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4317-4319.
- 36 M. Yoshida, T. Cho, M. Hirata, S. Tokioka, Y. Miyake, T. Numakura, J. Kohagura, S. Miyoshi,  
 Observations of sheared radial electric-field effects on turbulence suppression,  
*Review of Scientific Instruments* **75**, 10 (2004) 4344-4346.
- 37 M. Sasaki, Y. Morimoto, H. Kimura, K. Takahashi, K. Sakamoto, T. Imai, K. Okuno,  
 Energetic deuterium and helium irradiation effects on chemical structure of CVD diamond,  
*Journal of Nuclear Materials* **329-333**, (2004) 899-903..
- 38 K. Takahashi, T. Imai, N. Kobayashi, K. Sakamoto, and A. Kasugai, A. Hayakawa, S. Mori and  
 K. Mohri,  
 Design Performance of Front Steering Type Electron Cyclotron Launcher for ITER,  
*Fusion Science and Technology* **47**, 1 (2005) 1-15.
- 39 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K. Md. Islam, A. Itakura, I.  
 Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, S.  
 Tokioka, N. Yokoyama, Y. Miyake, Y. Tomii, Y. Kojima, Y. Takemura, T. Imai, M. Yoshida,  
 K. Sakamoto, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, the GAMMA 10 Group,  
 Recent Progress in the GAMMA 10 Tandem Mirror,  
*Transactions of Fusion Science and Technology* **47**, 1T (2005) 9-16.
- 40 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Fukai, M. Yoshida, R. Minami, S. Kiminami,  
 K. Sakamoto, T. Imai, S. Miyoshi,  
 A Scaling Law of Plasma Confining Potential Formation with Electron Cyclotron Heating  
 Powers in GAMMA 10,  
*Transactions of Fusion Science and Technology* **47**, 1T (2005) 100-103.
- 41 M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Horinouchi, K. Ide, D. Inoue, H. Nagai,  
 K. Nakagome, H. Hojo, and T. Cho,  
 Low frequency fluctuations in ICRF-heated plasmas on GAMMA 10,  
*Transactions of Fusion Science and Technology* **47**, 1T (2005) 104-107.
- 42 M. Ignatenko, A. Mase, L. Bruskin, Y. Kogi and H. Hojo,  
 Numerical Study of Microwave Imaging Reflectometer for a Tandem Mirror Device,  
*Transactions of Fusion Science and Technology* **47**, 1T (2005) 183-186.
- 43 M. Hirata, T. Cho, M. Yoshida, J. Kohagura, T. Numakura, N. Yokoyama, T. Fukai, S. Tokioka,

- Y. Tomii, Y. Miyake, T. Kondoh, S. Miyoshi,  
Comparison of the Radially Produced Electric-Field Shear Effects Analyzed from End-Loss  
Current and Central-Cell Soft X-ray Data,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 215-217.
- 44 H.Higaki, M.Ichimura, Y.Yamaguchi, S.Kakimoto, K.Ide, D.Inoue, K.Nakagome, H.Nagai,  
H.Hojo, and T.Cho,  
Measurement of excited fast Alfvén waves in the GAMMA 10 tandem mirror,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 243-245.
- 45 Y. Tatematsu, T. Saito, H. Ikegami, T. Sekine, D. Nagai, K. Nozaki, T. Cho,  
Plan of Fundamental ECRH in the GAMMA 10 Central Cell,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 257-259.
- 46 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, K. Ide, D. Inoue, H. Nagai, K. Nakagome,  
A. Fukuyama, T. Cho,  
Numerical analysis for controlling the eigenmode formation of Alfvén waves in the  
GAMMA 10 tandem mirror,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 260-262.
- 47 I. Katanuma, T. Ito, H. Saimaru, Y. Sasagawa, V. P. Pastukhov, K. Ishii, Y. Tatematsu, T. Saito,  
Md. K. Islam, Y. Nakashima, T. Cho,  
The Radial Loss of Ions Trapped in the Thermal Barrier Potential and the Design of  
Divertor Magnetic Field in GAMMA 10,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 276-278.
- 48 Y. Nakashima, K. Watanabe, Y. Higashizono, T. Ohki, T. Ogita, M. Shoji, S. Kobayashi, M. K.  
Islam, Y. Kubota, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, M. Yamada, R. Murakami, and T. Cho,  
Neutral Beam Injection Experiments and Related Behavior of Neutral Particles in the  
GAMMA 10 Tandem Mirror,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 288-290.
- 49 M. K. Islam, Y. Nakashima, Y. Higashizono, I. Katanuma, and T. Cho,  
Study on Axially Distributed Divertor Magnetic Field Configuration in a Mirror Cell,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 297-299.
- 50 A. Itakura, S. Takagi, S. Tsunoda, T. Hirai, H. Hojo, Y. Shima, M. Yoshikawa and T. Cho,  
Fluctuation Measurement Using an Ultrashort-Pulse Reflectometry on the GAMMA 10,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 300-302.
- 51 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, N. Yokoyama, T. Fukai, Y. Tomii, S. Tokioka, Y.  
Miyake, S. Kiminami, K. Shimizu, S. Miyoshi, K. Hirano, M. Yoshida, M. Yamauchi, T.  
Kondoh, T. Nishitani,  
X-Ray Energy Responses of Silicon Tomography Detectors Irradiated with Fusion Produced  
Neutrons,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 303-305.
- 52 A. Kojima, K. Ishii, Y. Takemura, K. Hagiwara, Y. Miyata, T. Yamaguchi, Y. Masuda, A. Itakura,  
M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Cho,  
Measurement of the Radial Flux Induced by the Fluctuations Using the Gold Neutral Beam  
Probe in the Tandem Mirror GAMMA 10,  
Transactions of Fusion Science and Technology 47, 1T (2005) 306-308.
- 53 M. Yoshikawa, M. Saito, Y. Kubota, T. Kobayashi, Y. Nakashima, Y. Higashizono, A. Itakura,



- M. Hirata, Y. Miyake, J. Kohagura, and T. Cho,  
 $H\alpha$  MEASUREMENTS IN THE PLUG/BARRIER CELLS OF THE TANDEM MIRROR  
 GAMMA 10,  
 Transactions of Fusion Science and Technology **47**, 1T (2005) 339-341.
- 54 Y. Higashizono, Y. Nakashima, T. Ohki, M. K. Islam, M. Shoji, S. Kobayashi, M. Yoshikawa,  
 Y. Kubota, T. Kobayashi, R. Murakami, M. Yamada, and T. Cho,  
 Analysis of Neutral Transport in the GAMMA 10 Anchor-Cell Using  $H\alpha$ -Emission  
 Detectors,  
 Transactions of Fusion Science and Technology **47**, 1T (2005) 461-470.
- 55 K. Ishii, A. Kojima, Y. Miyata, Y. Takemura, K. Hagiwara, T. Yamaguchi, S. Fujimoto, Y. Masuda,  
 T. Saito, I. Katanuma, M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Cho, and GAMMA 10 Group,  
 Effect of the Radial Potential Profile on the Transport of the Bounced Ions by the Plug  
 Potential and Radial Potential Control in the Tandem Mirror,  
 Transactions of Fusion Science and Technology **47**, 1T (2005) 78-83.
- 56 T. Saito, Y. Tatematsu, H. Ikegami, T. Sekine, D. Nagai, K. Nozaki, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo,  
 K. Ishii, T. Numakura, K. Sakamoto, Y. Takemura, M. Yoshida,  
 High Power Electron Heating Experiments at the Plug Region of GAMMA 10,  
 Transactions of Fusion Science and Technology **47**, 1T (2005) 96-100.
- 57 Y. Nakashima, Y. Higashizono, T. Ohki, M. Shoji, S. Kobayashi, Y. Kubota, M. Yoshikawa, M.  
 K. Islam, K. Watanabe, T. Ogita, M. Yamada, R. Murakami and T. Cho,  
 Modeling of three-dimensional neutral transport in the tandem mirror plasmas using a  
 Monte-Carlo code,  
 Journal of Nuclear Materials **337-339**, (2005) 461-470.
- 58 M. Goniche, F. Kazarian, P. Bibet, S. Maebara, M. Seki, Y. Ikeda, T. Imai,  
 Outgassing of lower hybrid antenna modules during high-power long-pulse transmission,  
 Journal of Vacuum Science and Technology **A23**, 1 (2005) 55-65.
- 59 T. Cho, M. Yoshida, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, H. Higaki, H. Hojo, M. Ichimura, K.  
 Ishii, K. Md. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M.  
 Yoshikawa, Y. Kojima, S. Tokioka, N. Yokoyama, Y. Tomii, T. Imai, V. P. Pastukhov, S.  
 Miyoshi, and GAMMA 10 Group,  
 Observation of the Effects of Radially Sheared Electric Fields on the Suppression of  
 Turbulent Vortex Structures and the Associated Transverse Loss in GAMMA 10,  
 Physical Review Letters **94**, 8 (2005) 085002-1-4.
- 60 H. Hojo, Y. Yasaka and A. Mase,  
 Surface Modes in Two Step-Wise Cylindrical Plasmas,  
 7th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology, & 17th Symposium on  
 Plasma Science for Materials, (Fukuoka, June 29-2, 2004) 29P-126.
- 61 H. Hojo,  
 Simulations on Micro and Millimeter-Wave Propagation in Plasmas,  
*Invited*, Summer School for Diagnostics for Fusion Plasmas, (Daejeon, Korea, August  
 25-27, 2004), 399-417.
- 62 M. Yoshikawa, H. K. Na, D. C. Seo, A. Iwamae, K. Sawada, T. Kobayashi, Y. Kubota, M. Saito,  
 and T. Cho,  
 Study of radiated spectral intensities in the HANBIT plasma for plasma diagnostics,

- Joint meeting of 14th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion & 4th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, (Ceratopia-Toki Conference Hall, Toki, Japan, October 5-8, 2004) P1-47.
- 63 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Kato, Y. Kubota, M. Saito, M. Matama, A. Itakura, and T. Cho,  
Study of Carbon Ion Behavior by Using Collisional Radiative Model in the GAMMA 10 Tandem Mirror,  
Joint meeting of 14th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion & 4th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, (Ceratopia-Toki Conference Hall, Toki, Japan, October 5-8, 2004) P1I-49.
- 64 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, K. Sawada, T. Kobayashi, M. Saito, Y. Higashizono, A. Itakura, and T. Cho,  
Analysis of the effect of neutral hydrogen for the particle balance in the GAMMA 10 tandem mirror,  
Joint meeting of 14th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion & 4th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, (Ceratopia-Toki Conference Hall, Toki, Japan, October 5-8, 2004) PII-50.
- 65 Itakura, A., Tsunoda, S., Fukuhara, M., Higaki, H., Hojo, H., Ichimura, M., Ishii, K., Shima, Y., Takiue, M., Yoshikawa, M., Cho, T,  
Density Fluctuation in the Tandem Mirror GAMMA 10,  
12th International Congress on Plasma Physics, (Nice, France, October 25-29, 2004) P1-079.
- 66 K. Akimoto, H. Hojo, Y. Saitou,  
Kinetic Effects in Strong Langmuir Turbulence,  
12th International Congress on Plasma Physics, (Nice, France, October 25-29, 2004) P2-037.
- 67 K. Akimoto and H. Hojo,  
Nonlinear Cyclotron-Resonance Accelerations by a Generalized EM Wave,  
12th International Congress on Plasma Physics, (Nice, France, October 25-29, 2004) P3-030.
- 68 K.Ishii, A.Kojima, Y.Miyata, T.Yamaguchi, I.Katanuma, T.Saito, M.Yoshikawa, T.Cho,  
Radial Potential Profile of the Core Plasma and Confinement of the Bounced Ions by Electrostatic and Magnetic Hills in the Tandem Mirror,  
12th International Congress on Plasma Physics, (Nice, France, October 25-29, 2004).
- 69 K.Ishii, A.Kojima, Y.Miyata, T.Yamaguchi, I.Katanuma, T.Saito, M.Yoshikawa, T.Cho,  
Transport of the Bounced Ion by the Plug Potential Caused by Radial Electric Field in the Tandem Mirror,  
Workshop on the Electric Field, Structure, and Relaxation in Edge Plasmas, (Nice, France, October 26-29, 2004).
- 70 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, M. K. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa,

- M. Yoshida, T. Imai, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi,  
 Advances in Potential Formation and Findings in Sheared Radial Electric-Field Effects on  
 Turbulence and Loss Suppression in GAMMA 10,  
*Invited*, The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November  
 1-6, 2004) IAEA-CN-116/EX/9-6Rd.
- 71 T. Maekawa, H. Tanaka, M. Uchida, T. Yoshinaga, H. Igami, M. Konno, K. Katsuura, K.  
 Hayashi, Y. Abe, J. Yamada, S. Maebara, T. Imai,  
 Formation of Spherical Tokamak Equilibria by ECH in the LATE Device,  
 The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November 1-6, 2004)  
 EX/P4-27.
- 72 A. Kasugai, Sakamoto, R. Minami, K. Takahashi, T. Imai,  
 Performance of 170 GHz high-power gyrotron for CW operation,  
 The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November 1-6, 2004)  
 FT/1-1Rb.
- 73 T. Inoue, M. Hanada, T. Imai, M. Kashiwagi, T. Morishita, M. Taniguchi, K. Watanabe,  
 R&D on a High Energy Accelerator and a Large Negative Ion Source for ITER,  
 The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November 1-6, 2004)  
 FT/1-2Ra.
- 74 H. ZUSHI, K. NAKAMURA, K. HANADA, K.N. SATO, M. SAKAMOTO, H. IDEI, M.  
 HASEGAWA, A. IYOMASA, S. KAWASAKI, H. NAKASHIMA, A. HIGASHIJIMA, T.  
 KURAMOTO, A. TANAKA, Y. MATSUO, K. ESAKI, H. AKANISHI, H. AYATSUKA, S.  
 IMADA, T. SUGATA, H. HOSHIKA, K. SASAKI, N. MAEZONO, M. KITAGUCHI, N.  
 IMAMURA, T. HAYASAKI, K. ICHIZONO, S. KUGIMIYA, N. YOSHIDA, K.  
 TOKUNAGA, T. FUJIWARA, M. MIYAMOTO, M. TOKITANI, K. UEHARA, Y.  
 SADAMOTO, Y. NAKASHIMA, Y. KUBOTA, Y. HIGASIZONO, Y. TAKASE, A. EJIRI, S.  
 SHIRAIWA, S. KADO, T. SIKAMA, S. TSUJI-IIO, T. TAKEDA, Y. HIROOKA, K. IDA, Y.  
 NAKAMURA, T. FUJIMOTO, A. IWAMAE, T. MAEKAWA, O. MITARAI,  
 Overview of steady-state tokamak operation and current drive experiments in TRIAM-1M,  
*Invited*, The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November  
 1-6, 2004) IAEA-CN-116/OV5-3.
- 75 M. Sakamoto, Y. Matsuo, H. Zushi, K. Nakamura, K. Hanada, K.N. Sato, H. Idei, M. Hasegawa,  
 A. Iyomasa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, T. Kuramoto, M. Kitaguchi, T.  
 Sugata, N. Maezono, N. Yoshida, K. Tokunaga, T. Fujiwara, M. Miyamoto, M. Tokitani, Y.  
 Nakashima, Y. Kubota, Y. Higashizono, Y. Hirooka, S. Kado, T. Shikama,  
 Toroidal Structure of Hydrogen Recycling in Ultra-long Discharges on TRIAM-1M,  
 The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November 1-6, 2004)  
 IAEA-CN-116/EX/P5-30.
- 76 H. Sakakita, Y. Yagi, T. Asai, G. Fiksel, L. Frassinetti, K. Hayase, Y. Hirano, P. Innocente, S.  
 Kiyama, H. Koguchi, Y. Sato, T. Shimada, G. Spizzo, D. Terranova, M. Yoshikawa,  
 Characteristics of the TPE Reversed-Field Pinch Plasmas in Conventional,  
 The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November 1-6, 2004)  
 EX-P2-17.
- 77 T. Watanabe, Y. Matsumoto, M. Hishiki, S. Oikawa, H. Hojo, M. Shoji, S. Masuzaki, R.  
 Kumazawa, T. Mutoh, A. Komori, and LHD Experimental Group,

- Magnetic Field Structure and Confinement of Energetic Particles in LHD,  
The 20th IAEA Fusion Energy Conference, (Vilamoura, Portugal, November 1-6, 2004)  
EX/P4-47.
- 78 A. Shimamura, H. Hojo, N. Uchida, Y. Yasaka and A. Mase,  
Theory of Surface Waves in Non-Uniform Plasmas with Plasma Resonance,  
Plasma Science Symposium 2005 and The 22nd Symposium on Plasma Processing,  
(Nagoya, January 26-28, 2005) P2-012, 241-242.
- 79 N. Uchida, H. Hojo, A. Shimamura and A. Mase,  
Wave-Guiding Simulation in 2-d Plasma Photonic Crystals,  
Plasma Science Symposium 2005 and The 22nd Symposium on Plasma Processing,  
(Nagoya, January 26-28, 2005) P1-011, .
- 80 T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, H. Higaki, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K. Md. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, T. Imai, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, and GAMMA 10 Group,  
PROGRESS IN MIRROR PLASMA ACTIVITIES,  
*Invited Review*, The 6th Symposium on "CURRENT TRENDS IN INTERNATIONAL FUSION RESEARCH: A REVIEW", (Washington, D.C., USA, March 7-11, 2005), 48-50.
- 81 Yoshikawa, M., Kubota, Y., Kobayashi, T., Saito, M., Nakashima, Y., Yamada, H., Sakamoto, R.,  
Study of the Fueling pellet Transportation in the Guiding Tube,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2003-March 2004, (2004) 98.
- 82 Yoshikawa, M., Kubota, Y., Kobayashi, T., Saito, M., Kato, T., Murakami, I.,  
Study of Impurity Ion Radiation Intensity in the GAMMA 10 Plasma,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2003-March 2004, (2004) 415.
- 83 Masayuki YOSHIKAWA, Keiichiro SEDO, Yuusuke KUBOTA, Takayuki KOBAYASHI1, Masashi Saito, Naohiro YAMAGUCHI,  
ABSOLUTE CALIBRATION OF SPACE-RESOLVING VUV SPECTROGRAPH FOR PLASMA DIAGNOSTICS,  
Photon Factory Activity Report 2003 #21, Part B, (2004) 262.
- 84 北條仁士, 西依幸一郎, 近木祐一郎, L. Bruskin, 間瀬淳,  
ミリ波非破壊検査システムの開発とシミュレーション研究,  
超高速高周波エレクトロニクス実装研究会論文集 4, 1 (2004) 001-006.
- 85 北條仁士, 間瀬淳,  
ファブリー・ペロー干渉法を用いた薄膜物質計測,  
Optics Japan 2004, (2004) 330-331.
- 86 中嶋洋輔,  
モンテカルロコード DEGAS を用いた中性粒子輸送シミュレーションの技法  
- ガンマ 10 への適用 - ,  
J. Plasma and Fusion Res. **80**, 10 (2004) 813-824.
- 87 板倉昭慶、檜垣浩之,  
はじめてのデータ収集 2.システムを選ぼう,

J. Plasma and Fusion Res. **81**, 2 (2005) 106-111.

88 今井 剛,

ITER における高周波加熱・電流駆動の計画と展望,

J. Plasma and Fusion Res. **81**, 3 (2005) 178-184.

89 平田久子,

実験室の法規制(2),

筑波大学技術報告, 25 (2005) 73-75.

## < 学位論文 >

### 博士論文

(数理物質科学研究科 物理学専攻)

伊藤 融 [博士 (理学)]

Study of neoclassical resonant transport in the GAMMA10 tandem mirror  
: タンデムミラー GAMMA10 における新古典共鳴拡散に関する研究

### 修士論文

(数理物質科学研究科 物理学専攻)

齋藤 将志 [修士 (理学)]

多チャンネル H $\alpha$  線計測器を用いた GAMMA10 バリア部の中性粒子密度測定  
西丸 浩 [修士 (理学)]

ガンマ 10 サーマルバリア一部のイオン径方向損失に関する研究

東園 雄太 [修士 (理学)]

モンテカルロシミュレーション及び H $\alpha$  線計測に基づく中性粒子輸送の研究

深井 隆行 [修士 (理学)]

超低エネルギー X 線波高分析用半導体検出器を用いた電子エネルギー閉じ込めの研究

宮田 良明 [修士 (理学)]

タンデムミラーにおけるバウンスイオンの測定

横山 昇 [修士 (理学)]

X 線空間分布計測に基づく電位閉じ込め効果の研究

(理工学研究科)

池上 博和 [修士 (理学)]

ガンマ 10 における電子加熱時の端損失電子エネルギースペクトル分析

関根 貴之 [修士 (理学)]

ガンマ 10 セントラル部におけるイオンセンシティブプローブを用いた周辺イオン計測

時岡 優 [修士 (工学)]

小型端損失イオン電流量計測器の開発とプラズマ空間分布計測への適用

村上 亮平 [修士 (理学)]

GAMMA10 におけるプラズマと対向壁材料との相互作用の研究

山田 正樹 [修士 (理学)]

GAMMA10 中性粒子ビーム入射実験時における中性粒子分析器を用いた高速イオン計測

<講演>

- 01 Y. Tatematsu, T. Saito and GAMMA 10 Group,  
ECRH in the GAMMA 10 Central Cell,  
US-Japan Workshop on Application of RF Physics for Plasma Heating and Current  
Drive, (Tsukuba, July 14-16, 2004).
- 02 T. Saito,  
High Power Electron Heating at the Plug Region of GAMMA 10,  
US-Japan Workshop on Application of RF Physics for Plasma Heating and Current  
Drive, (Tsukuba, July 14-16, 2004).
- 03 H. Hojo,  
Full-Wave Maxwell Simulations on Electron Cyclotron Heating and Wave Tunneling,  
US-Japan Workshop on Application of RF Physics for Plasma Heating and Current  
Drive, (Tsukuba, July 14-16, 2004).
- 04 H. Tanaka, Y. Abe, K. Hayashi, J. Yamada, T. Matsumoto, T. Yoshinaga, M. Uchida, S. Yamaguchi,  
T. Maekawa, S. Maebara, T. Imai,  
Spontaneous Formation of Spherical Tokamak by ECH on LATE,  
10th Spherical Tokamak Workshop, (Kyoto, September 29-1, 2004).
- 05 T. Imai, T. Saito, Y. Tatematsu, T. Numakra, K. Sakamoto, R. Minami, T. Cho,  
Upgrade Program of ECRH System for GAMMA 10 Tandem-Mirror Device,  
U.S./Japan/Europe RF technology workshop, (Amsterdam, Holland, October 4-5, 2004).
- 06 H. Hojo, M. Ignatenko and A. Mase,  
Development of Microwave Diagnostic Simulator for Fluctuation Measurements,  
US-Japan Workshop on Study of Advanced Fluctuation Diagnostic Method, (Princeton,  
USA, March 21-23, 2005).
- 07 A. Mase, L. Bruskin, Y. Kogi, M. Matsukuma, M. Ignatenko, K. Uchida, K. Nishiyori, K. Kudo,  
K. Nishiyama, H. Hojo, K. Kawahata, Y. Nagayama, T. Tokuzawa, H. K. Park, N. C. Luhmann,  
Jr.,  
Microwave Imaging and Reflectometry for LHD Plasma,  
US-Japan Workshop on Study of Advanced Fluctuation Diagnostic Method, (Princeton,  
USA, March 21-23, 2005).
- 08 T. Imai, T. Saito, Y. Tatematsu, T. Numakra, K. Sakamoto, R. Minami, T. Cho,  
Status and Upgrade plan of ECRH System for GAMMA10,  
Plasma Seminer at Korea Basic Science Institute, (KBSI, Korea, March 24-25, 2005).
- 09 M. Ichimura,  
Spontaneously Excited Waves in Magnetically Confined Plasmas,  
Plasma Seminer at Korea Basic Science Institute, (Korea Basic Science Institute, March  
24-25, 2005).
- 10 Y. Yamaguchi,  
The excitation of Alfvén waves in ICRF in the GAMMA 10 tandem mirror,  
Plasma Seminer at Korea Basic Science Institute, (Korea Basic Science Institute, March  
24-25, 2005).
- 11 齊藤輝雄, 石井亀男, 板倉昭慶, 市村 真, M. K. Islam, 片沼伊佐夫, 小波藏純子, 武  
村祐一郎, 立松芳典, 長 照二, 中嶋洋輔, 沼倉友晴, 桧垣浩之, 平田真史, 北條仁士,

- 吉川正志, 吉田麻衣子,  
ガンマ10におけるプラグ部高電力加熱と電位形成,  
第5回核融合エネルギー連合講演会, (仙台市民会館, 2004年6月17日-18日)  
A67p.
- 12 桧垣浩之, 市村真, 堀ノ内賢太郎, 中込賢一郎, 柿本真吾, 山口裕資, 井出幸兵, 井上大輔, 永井博久, 吉川正志, 中嶋洋輔, 長照二,  
可視光検出器による電子ドリフト波の計測,  
第5回核融合エネルギー連合講演会, (仙台市民会館, 2004年6月17日-18日) E19p.
- 13 小島有志, 石井亀男, 武村祐一朗, 萩澤一久, 宮田良明, 山口智弘, 増田能人, 板倉昭慶, 吉川正志, 市村真, 長照二,  
GAMMA10における金の中性粒子ビームプローブを用いた揺動測定,  
第5回核融合エネルギー連合講演会, (仙台市民会館, 2004年6月17日-18日) E31p.
- 14 宮田良明, 石井亀男, 武村祐一朗, 小島有志, 萩澤一久, 増田能人, 山口智弘, 長照二,  
プラグ・バリア部内側ミラースロットでバウンスされるイオン軌道の径方向電場の影響,  
第5回核融合エネルギー連合講演会, (仙台市民会館, 2004年6月17日-18日) E32p.
- 15 小島有志,  
金の中性粒子ビームプローブを用いた密度電位揺動及び位相差の同時計測,  
「プラズマ科学のフロンティア 2004」研究会, (核融合科学研究所, 2004年8月18日-20日) 12.
- 16 宮田良明,  
タンデムミラーにおけるバウンスイオンの測定,  
「プラズマ科学のフロンティア 2004」研究会, (核融合科学研究所, 2004年8月18日-20日) 13.
- 17 西丸浩,  
GAMMA10 ミラー磁場に非一様電位を与えた場合の粒子軌道の写像について,  
「プラズマ科学のフロンティア 2004」研究会, (核融合科学研究所, 2004年8月18日-20日) 16P.
- 18 北條仁士, 間瀬淳,  
ファブリー・ペロー干渉法を用いたプラズマ密度計測法,  
第65回応用物理学会学術講演会, (東北学院大学, 2004年9月1日-4日) 3aS19.
- 19 嶋村亮宏, 北條仁士, 内田直人, 八坂保能, 間瀬淳,  
マイクロ波プラズマにおける表面波の解析,  
日本物理学会秋季大会, (青森大学, 2004年9月12日-15日) 14pQA8.
- 20 内田直人, 北條仁士, 嶋村亮宏, 斉藤輝雄, 立松芳典,  
電子サイクロトロン波動加熱におけるR波のトンネル伝搬,  
日本物理学会秋季大会, (青森大学, 2004年9月12日-15日) 14pQA9.
- 21 渡辺二太, 北條仁士,  
ヘリカルプラズマの平衡解析 II,  
日本物理学会秋季大会, (青森大学, 2004年9月12日-15日) 15aXB5.
- 22 吉川正志, 長照二, 石井亀男, 斉藤輝雄, 小波蔵純子, 井口春和, 藤澤彰英, 岩前敦,  
先進シナリオに則した電位閉じ込め効果究明のための新しい電位計測,  
平成16年度第1回総括班会合, (仙台, 2004年9月30日-1日).
- 23 中嶋洋輔,



- ガンマ10における周辺プラズマ研究,  
第18回 TRIAM 研究会「周辺プラズマの進展」,(九州大学応用力学研究所,2004年10月14日-15日).
- 24 間瀬淳, 近木祐一郎, Leonid Bruskin, 松隈正明, Maxim Ignatenko, 内田和之, 西依幸一郎, 工藤光生, 西山恵介, 北條仁士,  
マイクロ波プロフィールメータの開発と応用,  
産学実用化研究成果発表会,(北九州市西日本総合展示場,2004年11月16日-17日).
- 25 吉川正志,  
HANBIT プラズマの分光診断,  
平成16年度核融合科学研究所「プラズマ分光研究の新展開」、「境界層プラズマにおける分光診断」、および「スペクトル線プロファイルの精密分光によるプラズマ診断」合同研究会プログラム,(核融合科学研究所,2004年11月17日-19日).
- 26 小林貴之,  
衝突・輻射モデルを用いた GAMMA 10 プラズマ中の炭素イオン分布及び放射スペクトル解析,  
平成16年度核融合科学研究所「プラズマ分光研究の新展開」、「境界層プラズマにおける分光診断」、および「スペクトル線プロファイルの精密分光によるプラズマ診断」合同研究会プログラム,(核融合科学研究所,2004年11月17日-19日).
- 27 市村真, 桧垣浩之, 石川正男, 森山伸一, 鈴木隆博, 柿本真吾, 井上大輔, 永井博久, 山口裕資, 井出幸兵, 中込賢一郎, 根本健樹, 渡辺二太, 長照二,  
JT-60U 及び GAMMA10 におけるイオンサイクロトロン周波数近傍の自発励起波動計測,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)24aA07P.
- 28 柿本真吾, 市村真, 桧垣浩之, 井上大輔, 井出幸兵, 山口裕資, 永井博久, 中込賢一郎, 根本健樹, 北條仁士, 石川正男, 森山伸一, 鈴木隆博, 渡辺二太, 長照二,  
イオンサイクロトロン高調波帯における不安定波動の励起,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)24aA08P.
- 29 坂本瑞樹, 小川正訓, 高木健太郎, 中嶋洋輔, 久保田雄介, 東園雄太, 関子秀樹, 出射浩, 彌政敦洋, 川崎昌二, 北口将博, 中島寿年, 中村一男, 長谷川真, 花田和明, 佐藤浩之助, 東島亜紀,  
TRIAM-1M 長時間放電における壁リサイクリングの空間構造,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)24aA30P.
- 30 東園雄太, 中嶋洋輔, 久保田雄介, 坂本瑞樹, 関子秀樹, 小川正訓, 高木健太郎, 庄司主, 小林進二, MK イスラム, 吉川正志, 長照二,  
TRIAM-1M における H-alpha 計測及び DEGAS に基づく中性粒子輸送解析,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)24aA31P.
- 31 中嶋浩太, 関子秀樹, 前園伸美, 佐々木啓介, 西野信博, 中嶋洋輔, 廣岡慶彦, 四竈泰一, 岩前敦, 吉田直亮, 徳永和俊, 時谷政行, 菅田智志, 中村一男, 佐藤浩之助, 花田和明, 坂本瑞樹, 出射浩, 長谷川真, 彌政敦洋, 川崎昌二, 中島寿年, 花田和明, 東島

亜紀,

TRIAM-1Mにおけるプラズマ対向材の表面温度と金属不純物再堆積及び入射束の観測,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 24aA32P.

- 32 吉川正志、久保田雄介、小林貴之、齋藤将志、板倉昭慶、長照二、山口直洋、小口治久、八木康之、

大口径プラズマ測定用真空紫外分光器を用いた核融合プラズマの不純物イオン分光測定,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 24aB04.

- 33 桧垣浩之、市村真、中込賢一郎、山口裕資、柿本真吾、井出幸兵、井上大輔、永井博久、根本健樹、長照二、

高イオン温度ミラープラズマにおけるドリフト型低周波揺動の特性,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25aA08P.

- 34 齊藤輝雄、石井亀男、板倉昭慶、市村真、M. K. Islam、片沼伊佐夫、小波蔵純子、立松芳典、中嶋洋輔、沼倉友晴、桧垣浩之、平田真史、北條仁士、吉川正志、坂本慶司、今井剛、長照二、三好昭一、

ガンマ10プラグ部における高電力電子加熱実験,

第21回プラズマ・核融合学会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pA01.

- 35 小波蔵純子、長照二、平田真史、沼倉友晴、横山昇、深井隆行、富井大和、時岡優、三宅泰宏、木南瀬里奈、清水清昭、吉田麻衣子、三好昭一、

ガンマ10の高電位・高電場シア形成による渦構造の抑制とプラズマ閉じ込め改善の研究,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pA02.

- 36 山口智弘、石井亀男、小島有志、宮田良明、藤本省吾、長照二、

GAMMA 10内側ミラースロット部におけるH $\alpha$ 線計測,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB03P.

- 37 小林貴之、吉川正志、加藤隆子、真珠健、久保田雄介、齋藤将志、板倉昭慶、長照二、紫外・可視分光器と衝突・輻射モデルを用いた炭素イオンスペクトルの解析,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB04P.

- 38 小島有志、石井亀男、宮田良明、山口智弘、藤本省吾、板倉昭慶、吉川正志、桧垣浩之、市村真、長照二、

金の中性粒子ビームプローブを用いた密度電位揺動及び位相差の同時測定,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB21P.

- 39 平田真史、長照二、小波蔵純子、沼倉友晴、時岡優、横山昇、深井隆行、三宅泰宏、富井大和、清水清昭、木南瀬里奈、三好昭一、

ガンマ10端損失イオン及びセントラル部X線の空間分布計測による電位閉じ込め

効果の研究,

第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB23P.

- 40 深井隆行, 小波蔵 純子, 長 照二, 平田 真史, 沼倉 友晴, 横山 昇, 富井 大和, 木南 瀬里奈, 時岡 優, 三宅 泰宏, 清水 清昭, 齋藤 則生, 齋藤 輝文,  
X線計測に基づく高強度電子加熱下でのプラズマ電位閉じ込めの評価,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB24P.
- 41 三宅泰宏, 平田 真史, 長 照二, 小波蔵 純子, 沼倉 友晴, 時岡 優, 清水 清昭, 横山 昇, 深井 隆行, 富井 大和, 木南 瀬里奈,  
新型イオン・電子電流同時計測器の開発,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB25P.
- 42 時岡 優, 平田真史, 長 照二, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 三宅泰宏, 清水清昭, 深井隆行, 横山 昇, 富井大和, 木南瀬里奈,  
小型イオン電流量絶対値計測器の開発と端損失イオン計測への適用,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB26P.
- 43 宮田良明, 石井亀男, 小島有志, 山口智弘, 藤本省吾, 長照二,  
タンデムミラーにおけるバウンスイオンの測定,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB27P.
- 44 藤本省吾, 石井亀男, 小島有志, 宮田良明, 山口智弘, 長照二,  
GAMMA 10における端損失イオンの揺動測定,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB28P.
- 45 関根貴之, 斉藤輝雄, 立松芳典, 池上博和, 永井大智, 野崎 潔, 町田紀人, 市村 真, 桧垣浩之, 今井 剛, 長 照二,  
イオンセンシティブプローブによるGAMMA10セントラル周辺部でのイオン測定,  
第23回プラズマ・核融合学会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB29P.
- 46 久保田雄介, 吉川正志, 中嶋洋輔, 坂本隆一, 山田弘司, 星野光保, 小林貴之, 齋藤将志,  
水素ペレット入射における複合計測システムの開発,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 25pB36P.
- 47 沼倉友晴, 坂本慶司, 長 照二, 小波蔵純子, 平田真史, 横山 昇, 深井隆行, 富井大和, 木南瀬里奈, 時岡 優, 三宅泰宏, 清水清昭, 斉藤輝雄, 立松芳典, 今井 剛, 三好昭一,  
開発した高パワージャイロトロンを用いた電位生成によるプラズマ閉じ込め改善及び電位形成比例則,  
第21回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004年11月23日-26日) 26aA01P.
- 48 富井大和, 小波蔵純子, 長 照二, 平田真史, 沼倉友晴, 深井隆行, 横山 昇, 木南瀬里奈, 時岡 優, 三宅泰宏, 清水清昭, 齋藤則生, 齋藤輝文,

- X線計測による高強度電子加熱下における電子速度分布関数の研究,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA02P.
- 49 横山 昇,小波蔵純子,長 照二,平田真史,沼倉友晴,深井隆行,富井大和,木南瀬里奈,時岡 優,三宅泰宏,清水清昭,  
X線計測に基づく高電位生成時のプラズマ閉じ込め効果の研究,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA03P.
- 50 中込賢一郎,市村真,桧垣浩之,柿本真吾,山口裕資,井出幸兵,井上大輔,永井博久,根本健樹,長照二,  
GAMMA10における低周波密度揺動の分散関係の測定,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA05P.
- 51 山口裕資,市村真,桧垣浩之,福山淳,柿本真吾,井出幸兵,井上大輔,永井博久,中込賢一郎,根本健樹,長照二,  
ミラー配位における Alfv 始 波の固有モード制御,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA06P.
- 52 井上大輔,柿本真吾,市村真,桧垣浩之,山口裕資,井出幸兵,永井博久,中込賢一郎,根本健樹,北條仁士,渡辺二太,長 照二,  
GAMMA10における高次高調波領域での AIC 波動励起,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA07P.
- 53 中嶋洋輔,東園雄太,山田正樹,庄司主,小林進二, MKイスラム,久保田雄介,吉川正志,小林貴之,村上亮平,三嶋良幸,長照二,  
GAMMA10における中性粒子ビーム入射とそれに伴う中性粒子の挙動,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA08P.
- 54 山田正樹,中嶋洋輔,片沼伊佐夫, MKイスラム,東園雄太,村上亮平,長照二,  
中性粒子分析器を用いた GAMMA10 高速イオン計測とシミュレーション解析,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA09P.
- 55 石井亀男,小島有志,宮田良明,山口智弘,藤本省吾,齊藤輝雄,片沼伊佐夫,吉川正志,市村真,長照二,  
タンデムミラーにおけるバウンスイオンの径方向輸送の検討,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA10P.
- 56 井出幸兵,柿本真吾,市村真,桧垣浩之,山口裕資,井上大輔,永井博久,中込賢一郎,根本健樹,齊藤輝雄,長照二,  
GAMMA10における高エネルギーイオンの径方向損失,  
第21回プラズマ・核融合学会年会,(静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」,2004年11月23日-26日)26aA11P.
- 57 西丸浩,片沼伊佐夫,  
GAMMA10 サーマルバリア部の非一様電位に起因した粒子の径方向輸送,

- 第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aA12P.
- 58 笹川悠、片沼伊佐夫、西丸浩、長照二、中嶋洋輔、イスラムカイルル、  
GAMMA10 ダイバータ磁場配位の巨視的安定性解析,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aA12P.
- 59 池上博和、斉藤輝雄、立松芳典、関根貴之、永井大智、野崎 潔、町田紀人、片沼伊佐夫、今井 剛、長 照二,  
ガンマ 10 における高電力電子加熱実験での端損失電子計測,  
第 24 回プラズマ・核融合学会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aA13P.
- 60 齋藤将志、吉川正志、久保田雄介、小林貴之、真珠健、板倉昭慶、中嶋洋輔、長照二,  
多チャンネル H $\alpha$  線測定器を用いた GAMMA10 バリア部プラズマの測定,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aA14P.
- 61 村上亮平、中嶋洋輔、石本祐樹、MK イスラム、東園雄太、山田正樹、三嶋良幸、長照二,  
GAMMA10 セントラル部と西エンド部における壁コンディショニングの分析,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aA17P.
- 62 柏木美恵子、花田磨砂也、山名貴志、井上多加志、今井剛、渡辺和弘、坂本慶司,  
プラズマ中性化セル開口部からの漏洩プラズマの抑制,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aB.
- 63 立松芳典、斉藤輝雄、池上博和、関根貴之、永井大智、野崎 潔、町田紀人、中島研也、山口祐資、小波蔵純子、中嶋洋輔、石井亀男、久保 伸、下妻 隆、今井 剛、長 照二,  
ガンマ 10 セントラル部基本波 ECRH 実験,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aB08P.
- 64 永井大智、斉藤輝雄、立松芳典、池上博和、関根貴之、野崎 潔、町田紀人、北條仁士、今井 剛、長 照二,  
ガンマ 10 プラグ部における加熱用マイクロ波の透過率測定,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aB09P.
- 65 野崎 潔、斉藤輝雄、立松芳典、池上博和、関根貴之、永井大智、町田紀人、久保 伸、下妻 隆、今井 剛、長 照二,  
放射電磁場計算によるガンマ 10 プラグ部電子加熱用反射鏡の設計,  
第 21 回プラズマ・核融合学会年会, (静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」, 2004 年 11 月 23 日-26 日) 26aB13P.
- 66 M. Ignatenko, A. Mase, L. Bruskin, Y. Kogi, R. Pavlichenko, K. Kawahata, Y. Nagayama, H. Hojo,  
Numerical Model of Microwave Reflectometry with Optical System for Plasma Measurements,

- 第8回プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部大会, (九州大学, 2004年12月3日-3日) K-8.
- 67 内田和之, 近木祐一郎, 間瀬淳, L. Bruskin, 北條仁士, 江尻晶, 徳沢季彦, 川端一男, 田中謙治, 長山好夫,  
LHDにおける超短パルス反射計装置の遠隔制御,  
第8回プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部大会, (九州大学, 2004年12月3日-3日) P-10.
- 68 平田真史, 長 照二, 小波蔵純子, 今井 剛,  
ガンマ10端損失イオン及び中央部X線の空間分布計測による高電位形成に伴うプラズマ閉じ込め改善の研究,  
第1回 科研費特定領域「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」シンポジウム, (KKR ホテル熱海, 2005年2月1日-2日) C01-2.
- 69 吉川正志, 長 照二, 石井亀男, 斉藤輝雄, 小波蔵純子, 井口春和, 藤澤彰英, 岩前 敦,  
先進シナリオに則した電位閉じ込め効果究明のための新しい電位計測,  
第1回 科研費特定領域「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」シンポジウム, (KKR ホテル熱海, 2005年2月1日-2日).
- 70 中嶋洋輔,  
ガンマ10へのKobe\_Cuspの適用,  
LHD計画共同研究第3回研究作業会, (神戸大学工学部, 2005年2月16日-17日).
- 71 中嶋洋輔,  
ガンマ10における中性粒子ビーム入射に伴う中性粒子輸送解析,  
NIFS共同研究研究会「閉じ込め周辺領域の科学」, (核融合科学研究所, 2005年2月23日-24日).
- 72 東園雄太,  
TRIAM-1MにおけるH $\alpha$ 計測及びDEGASに基づく中性粒子輸送解析,  
NIFS共同研究研究会「閉じ込め周辺領域の科学」, (核融合科学研究所, 2005年2月23日-24日).
- 73 今井剛, 坂本慶司,  
ジャイロトロン開発の現状,  
第2回電気学会球状トカマク調査専門委員会, (東京大学, 2005年2月24日-25日).
- 74 西丸浩, 笹川悠, 片沼伊佐夫,  
GAMMA10の静電位および静磁場の非等方性と粒子の径方向輸送について,  
第10回NEXT研究会, (航空会館, 2005年3月7日-8日) 21P.
- 75 中嶋洋輔,  
ガンマ10タンデムミラーにおける高速イオンの挙動と中性粒子輸送解析,  
京都大学エネルギー理工学研究所講演会, (京都大学エネルギー理工学研究所, 2005年3月11日-11日).
- 76 小島有志, 宮田良明,  
金の中性粒子ビームプローブを利用した密度電位揺動及び位相差の同時計測,  
第8回若手科学者によるプラズマ研究会, (日本原子力研究所那珂研究所, 2005年3月16日-18日).
- 77 飽本一裕, 北條仁士,  
ラングミュア乱流の散逸,  
日本物理学会第60回年次大会, (東京理科大学, 2005年3月24日-27日) 27pXA5.

- 78 渡辺二太, 北條仁士,  
ヘリカルプラズマの平衡解析 III,  
日本物理学会第 60 回年次大会, (東京理科大学, 2005 年 3 月 24 日-27 日) 27pXB4.
- 79 絵垣浩之、市村真、中込賢一郎、山口裕資、柿本真吾、井出幸平、井上大輔、根本健樹、  
北條仁士、長照二、竹野裕正、八坂保能,  
高イオン温度ミラープラズマにおける電子ドリフト波の特性,  
日本物理学会第 60 回年次大会, (東京理科大学, 2005 年 3 月 24 日-27 日) 27pXG-7.
- 80 内田直人, 北條仁士, 嶋村亮宏, 間瀬淳,  
2次元プラズマフォトニック結晶における電磁波伝搬シミュレーション,  
日本物理学会第 60 回年次大会, (東京理科大学, 2005 年 3 月 24 日-27 日) 27pXG8.
- 81 嶋村亮宏, 北條仁士, 内田直人, 八坂保能, 間瀬淳,  
不均一プラズマにおける表面波励起シミュレーション,  
日本物理学会第 60 回年次大会, (東京理科大学, 2005 年 3 月 24 日-27 日) 27pXG9.
- 82 北條仁士, 嶋村亮宏, 内田直人, 八坂保能, 間瀬淳,  
表面波はどこで強く励起されるのか?,  
第 5 2 回応用物理学関連連合講演会, (埼玉大学, 2005 年 3 月 29 日-1 日) 29pF2.

### <受賞>

数理物質科学研究科優秀論文表彰,

宮田 良明,

タンデムミラーにおけるバウンスイオンの測定,

2005 年 3 月 25 日.

理工学研究科 研究科長賞,

時岡 優,

小型端損失イオン電流量計測器の開発とプラズマ空間分布計測への適用,

2005 年 3 月 25 日.