

IX プラズマ研究グループ

教授 長 照二、今井 剛
助教授 北條仁士、中嶋洋輔、吉川正志、假家 強 (2月1日より)
講師 小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴、立松芳典 (11月30日まで)
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 (研究機関研究員) 渡邊 理、南 龍太郎

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 板倉昭慶
大学院生 5名

【1】大学法人化に向けての、当該プラズマグループの研究の方針・基本理念

当プラズマ研究グループでは、平成16年度から実施された大学の法人化に伴う筑波大学の「中期計画」に則り、筑波大学が世界に広く貢献できる優れた研究成果の創出の一端を担うことを使命として、下記のように研究の新展開を図ることを基本方針・基本理念としている。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、一貫して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。

法人化後の新制度のもと、教職員学生一丸となり急発進・急進展を成し遂げるべく研究に邁進し、平成18年度を終えた時点で、既に以下に詳述する中期計画に則した新成果を得、これらの当該プラズマ研究グループの主要成果は、2年続けて米国物理学会誌 *Physical Review Letters* [1] [2] (参考文献は【3】参照)等に発表させて戴いた。更に、これらの新たな物理究明は、プラズマ・パラメータの急進展/目覚ましい向上をもたらし、法人化前に比し、イオン加熱のみの時間帯に比べ、自ら開発した高電力ジャイロトロンを用いて、イオン閉じ込め電位が4倍、電子温度が10倍、電位閉じ込めイオン温度が5倍、更には従来からの磁場閉じ込めイオン (7.5 keV) の蓄積エネルギー(ディアマグ値)を越えるエネルギーを、電位閉じ込めイオンにより形成する、新局面へと研究を急進展させた。

以下に、このように法人化後に急進展する、当該プラズマ研究グループの成果を纏めて報告する。

先ず、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、国立大学法人筑波大学の「中期計画」に於いて、「I大学の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するためにとるべき措置」の「2研究に関する目標を達成するための措置」の内、「(2)研究実施体制等の整備に関する目標を達成するための措置」に、「①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、法人化後の一貫した研究姿勢である。

本学にとり、平成18年度末の中間評価に向けて、平成18年4月に実施される本学プラズマ研究センターの外部評価に対応し、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、全国共同利用・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、法人化後の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計画・新しい筑波大学規則・規定に則した研究目的の柱である。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、電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行う」という、プラズマ核融合全体に広く役立つ、重要な位置づけを持つ。

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

実際に、以上の研究課題に関する物理機構として、下記に詳述するように、電位のプラズマ半径方向（径方向）2階微分量である「電場の径方向シア dE_r/dr 」が深くこれらの現象に関わることが判明し、上述の米国物理学誌 *Physical Review Letters* 誌 [1,2]、並びに種々の国際会議 [3-7等]で基調招待講演（プレナリートーク）[3-6]、招待講演 [3-6, 8-11]、並びにレビュー講演 [3,5]として報告する機会を得、学術普遍性の高い、極めて重要な本研究課題の更なる究明を進めている。

当プラズマグループの電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された 国際連合の原子力部門である国際原子力機関（IAEA）の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議」[12]において、当研究グループが世界で初めて電位閉じ込めの有効性を実証した、先駆的実績を持つテーマであることは、斯界では広く知られており、かつて米国のサイエンス誌の表紙を筑波大学のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。

以来、この成果は、タンデムミラーの一連の研究 [13-32] に発展し、国際熱核融合実験炉ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持って発展・展開を見ている。

プラズマの電位閉じ込め研究の必要不可欠な重要性とその意義は、① 長年にわたり研究された磁場のみによるプラズマ閉じ込めに比べ、閉じ込め性能が著しく改善・向上すること。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。④ ITER装置等のトカマク型装置やヘリカル型装置の径方向エネルギー閉じ込めを、著しく向上させる内部輸送障壁（ITB）が発見され、ITB形成のためには、プラズマ内に形成された電場Eと外部磁場Bによる $E \times B$ シアーフローによる乱流安定化機構が物理的に本質を与えることが予測されているが、この電場/電位効果の究明とこれを用いた制御が急務であること。以上の事実が、「核融合エネルギー実用に対する電位/電場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、これらHモードやITB形成の物理機構は依然明確にされておらず、経験則等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。

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

【概要】

平成18年度は、当該プラズマ研究グループに於いては、下記のように、研究の急進展を主導した。即ち、① プラズマパラメータの急激な向上への貢献、② 「外部評価の実施」や国内外のプレス報道を含め高い客観評価を頂戴し、更には③ 「国際会議の主催」、④ 「学会の主催」への大きな貢献、⑤ 17年に続き、斯界を代表する、米国物理学会誌フィジカル・レビュー・レターズ誌を含む主要論文誌への成果報告・成果の公開、⑥ 多数の学生の教育・育成、⑦ 斯界を支える共同研究の視点から、本学の中期計画に明記されている「双方向型共同研究」の著しい進展への貢献（関連する査読付き学術論文数119編、国際会議等の発表数195件）等、多岐にわたる成果を得た画期的な1年となった。

当該プラズマ研究グループの研究の柱は、「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解明に向け、プラズマ物理・核融合研究の進展を喚起する一層の研究展開を図ることを、当センターの基本的な研究目標とその役割と位置づけている。殊に、目標とする電位閉じ込めの研究は世界に先駆けてその有効性を当該プラズマ研究グループが実証を主導し、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・位置づけを持つ。斯かる本学のオリジナリティー・世界的先駆性を基盤に、炉心プラズマ閉じ込めのメカニズムや比例則に内在する物理の解明に繋がりうる、本研究目標に則して研究を推進すると共に、人材の育成・輩出という大学の責務を果たしつつ、以上の教育・研究の推進・展開を図る。」以上のように目標を掲げている。18年度にはこれらの達成度等に関する外部評価を実施した。

○ 平成18年度に実施・達成した具体的な顕著な成果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、本学プラズマ研究センターの世界最大のタングステンミラー型プラズマ閉じ込め装置 **ガンマ10**に於ける学内共同利用を行い、以下の新しい成果・発見を行った。

代表的成果内容として、平成18年度には法人化前の10年間に得られたプラズマ閉じ込め電位 ϕ_c を4倍に急進展させる成果を得、斯界最高電位生成に成功すると共に、イオンサイクロトロン加熱時間帯（セントラル部磁場閉じ込めイオン温度約5 keV）に比し、セントラル部イオン温度がこの1.5倍（7.5 keV）に上昇し、同電位閉じ込めイオン温度が5倍に、また電子温度も10倍に増大する飛躍的成果を得た。この成果は、国際原子力機関IAEAの「第21回核融合エネルギー国際会議」に際し、文部科学省での国内審査、IAEAでの国際審査を通過後、本会議で平成18年10月に報告され、本国際会議の最後のサマリーセッション／総括で、他に先駆けて、筑波大学の本成果が報告される榮譽に浴し、広く世界の注目を集めた。

また、効率的に或る一定のプラズマ半径位置に局所的電子サイクロトロン加熱（ECH）を行うと、円筒状の高電位ハンプ構造が形成でき、プラズマを取り囲む高速プラズマ・シア一流が生成され、これが本学の新手法で外部制御できることに世界に先駆けて実証した。これにより、高強度半径方向電場 E_r のシアー（ dE_r/dr ）形成に基づくプラズマの閉じ込めを劣化させる乱流渦の抑制、並びにこれに伴う内部エネルギー閉じ込め保持のための輸送障壁ITBの生成と、世界に先駆けたプラズマ閉じ込め改善・制御の成功、これによるプラズマ閉じ込めの向上への電位・電場シアーの有効性の実証と、そのメカニズムの究明を進展させた。この成果は、米国物理学会誌フィジカル・レビュー・レターズ誌に発表すると共に、2006年の第6回プラズマ閉じ込め開放磁場国際会議での冒頭の基調招待講演、2007年3月のワシントンD.C.での国際原子力機関IAEAが共催する「第7回国際核融合研究の最新の動向」国際会議における基調招待講演、我が国の「第23回プラズマ・核融合学会年会」での招待講演等、国内外の高い評価を頂戴した。

2) 本現象の発見の重要な意義として、国際熱核融合実験炉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）やITBの物理予想の実証・究明に繋がることが指摘

されている。このことは、科学雑誌「パリティ」（丸善 出版）の2006年1月号にも取り上げられ、更に2006年のプラズマ・核融合学会のカレンダーのデザインにも用いられたように、プラズマ核融合分野の広範で普遍的な重要性を持つ成果である。

同時に、これら電位・電場の生成物理メカニズム・比例則も、フィジカル・レビュー・レターズ誌等に発表・提唱した。これらの結果は、ジャイロトロンで発振させた大電力マイクロ波によるECH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勾配を制御し、半径方向電場シアを制御できるという、「端部を持つ当センターのミラー装置にしかできないこと、ミラーでなら制御・学術解明・普遍化ができること」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、トカマク等の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・学術普遍化として位置づけられ、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で普遍的な独自の貢献を果たしている。

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を、着実に進展させている。

3) 新たな高効率ミラー閉じ込め安定配位としてのダイバータ配位についても、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・韓国原子力研究所との共同研究が進展している。

4) 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、双方向型共同研究の主要課題の1つとして神戸大学の八坂教授のグループと共に進んでおり、既に発電の実証としてランプを点灯させることに成功した。この成果はIAEAの国際会議で報告した。これは同時に本学システム情報工学研究科石川教授のグループ等とも学内共同研究として急進展している。

5) 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otonファクトリーや産業総合研究所の放射光を用い、計測器開発・較正研究が進展している。また、日本原子力研究開発機構との協力研究を実施し、ミラー特有のイオン波動加熱物理から発した、他形式にも普遍的なプラズマ安定性研究が進展し、本学がリーダーシップをとってIAEAで報告した。

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目指し、研究を着実に進展させている。

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、センターでの実験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。科学立国を標榜する我が国に於ける大学としての責務を、このように十全に果たす教育・研究実施体制の整備・充実に努めている。

教育活動の一環として、学生の多数の学位論文・学術論文・学会・特に国際会議での発表等の創出と、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・研究体制の整備を推進するという具体的改善目標に沿って、18年度には、自然学類の卒研17名、大学院の研究科にあっては、数理物質科学研究科・大学院生28名の日々の研究指導を行った。この内から卒業論文17編、修士論文11編、博士論文2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58編を刊行し、国際会議での発表は64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21名が巣立った。

7) その他、日本学術振興会の二国間交流事業に採択された、韓国基礎科学研究所との交流を積極的に行った。ロシアとの共同研究としては、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を行い、数編の共著論文に結実させた。その他、米・ロ・英・韓・独・スウェーデン・伊・西等、世界第一線のプラズマ理工学の研究者が多数本学を訪れ、当該プラズマ研究グループとの研究討論・共同研究が著しく進展した。

【4】研究成果の内容

(1) 概要

- (1) 径方向エネルギー閉じ込めを著しく向上させる、径方向エネルギー輸送障壁 (*transverse energy-transport barrier*) を、他に先駆けて外部制御することに初めて成功した。(図4-9) [1]
- (2) 強い E_r シアーフローにより取り囲まれたプラズマコア部の電子温度 T_e 、イオン温度 T_i が共に増大した。(図8) これはLモードプラズマの乱流状揺動 (*L-mode-like intermittent turbulent vortex-like structures*) を E_r シアーフローにより抑制できるメカニズムと相似性を持つ。(図5) [2]. 径方向エネルギー輸送障壁生成に伴い、径方向電子並びにイオン拡散係数 (radial thermal diffusivity) χ_{e1} 並びに χ_{i1} が、この輸送障壁領域で著しく改善され古典拡散係数に近づくことが分かった。(図9) [3] また、この振る舞いは、トカマクやヘリカル装置の内部輸送障壁 [internal transport barrier (ITB)] 形成とよく類似していることが分かった。[4]
- (3) 電場シアー効果がガンマ10で最近顕在化された物理的背景は、イオン閉じ込め電位 ϕ_c が3 kV という 法人化以前の1992-2002年に比べ4倍に急進展したことに起因する。(図2) これに伴い自動的に強い E_r シアーが形成され [2]、これのみをもってしても、径方向輸送を著しく軽減できることが分かった。また、イオン閉じ込め電位 ϕ_c はプラグ部 ECH パワー P_{PECH} と共に急激に増大する比例則に則して、年々増大している。(図2)
- (4) セントラル部 ECH (先ず250 kW を入射) を開始し、既にセントラル部バルクプラズマ電子温度 $T_{e0}=750$ eV を達成した。これは ICH のみで作ったターゲットプラズマの電子温度を1桁向上させる画期的なデータであり、今後の更なる本格 ECH 実験が期待される。この時のセントラル部磁場閉じ込めイオン温度 T_{i10} は6.5 keV、東西両プラグ部間に閉じ込められる電位閉じ込めイオン温度 $T_{i/p0}$ は2.5 keV と、5倍上昇した。これに伴い、従来イオンエネルギー閉じ込めを劣化させていた電子によるクーロンドラグ時間が大きく改善され、イオンエネルギー閉じ込め時間を制限する軸上のエネルギードラッグ時間が、タンデムミラーの2大イオン構成要素である「セントラル部磁場閉じ込めイオン」、「電位閉じ込めイオン」それぞれに対して、0.14秒、0.16秒に改善された。[3]
- (5) プラズマパラメータの急進展に伴い、特筆すべきは、電位で閉じ込められた蓄積エネルギー量が、セントラル部ミラー磁場に捕捉された高温イオンのもつ蓄積エネルギーに対し、これを逆転するに到る[図10(b)]、タンデムミラー史上初めてのデータが得られた事である。[3]
- (6) イオン閉じ込め電位 ϕ_c 生成に関する、密度 n_c 及び P_{PECH} に対する比例則の研究を行い [5]、 n_c に関して 10^{19} m^{-3} まで依存性を求めたところ、 ϕ_c は n_c に対し徐々に減少することが分かった。しかしながら、 P_{PECH} を増大させることにより、その減少分は十分に回復できる事が示された。[図3(b)]

(2) 研究成果

ガンマ10 [図1] は、単純ミラー磁場配位を持ち主要な高温プラズマを閉じ込めるための「セントラル部」、極小磁場配位により電磁流体力学的安定化を確保する「アンカー部」、更にもその外側に、単純ミラー配位の欠点であるプラズマの端損失を抑制するためのイオン閉じ込め電位 ϕ_c 形成用の「プラグ部」、並びに電子閉じ込めとプラグ部電位の高效率生成に資するサーマルバリア電位 ϕ_b を生成する「バリア部」より構成されている。

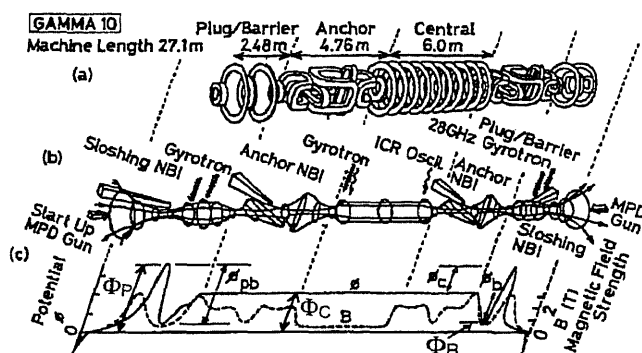


図1 Schematic view of the GAMMA 10 tandem mirror; (a) magnetic coil set, (b) magnetic flux tube with heating systems, as well as (c) axial magnetic field (dashed curve) and potential profiles (solid curve).

ガンマ10の全長は27m、真空容器容積150m³、セントラル部のプラズマ径を制限するリミター直径は36cm、セントラル部中央磁場0.405T、ミラー比5.2であり、6.36GHzのイオンサイクロトロン加熱(ICH)を行っている。また、今年度より**大電力ジャイロトロン(28GHz, 500kW)を新たに設置し、電子サイクロトロン(ECH)による電子の本格的な直接加熱を、ミラー研究史上初めてスタートさせた。**これは、これまでにセントラル部高温イオン(~5keV)のエネルギー閉じ込めを劣化させ、またイオンのピッチ角散乱をマスクしてきた電子によるクーロンドラッグを著しく軽減させ、電位閉じ込めイオンを含めkeVオーダーの高温プラズマでガンマ10を満たし、無衝突プラズマを生成・制御、新たなプラズマ閉じ込め改善法の普遍的な究明等を目指して新規設置した。この新設計大電力ジャイロトロンの導入は、ミラープラズマ研究に於ける、新たなブレークスルーを喚起し、ミラーの命運を左右すると言っても過言ではない、革新的なミラー実験の開始を意味する。

(I) プラズマイオン電位閉じ込め向上、及び半径方向電場シア- dE_r/dr_c 生成の基盤となる、イオン閉じ込め電位 ϕ_c の進展； $\phi_c=3$ kVの斯界最高イオン閉じ込め電位値の達成。[図2]

プラグ部ジャイロトロンの高電力化に伴う、プラグ部電位 Φ_p の著しい増大は、イオン閉じ込め電位 ϕ_c の値を、従来よりも4倍大きくする成功をもたらした。これに伴い、セントラル部電位 Φ_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。この時、径方向電場シア- dE_r/dr_c 形成による径方向に速度差を持つプラズマ流速の差異により、後述のようにプラズマの径方向エネルギー輸送損失の原因として、トカマク等のLモード閉じ込めの元凶である「プラズマ中の乱流渦」を著しく抑制することに成功した。[1,2]

この、より正確な数学的表現である回転流の速さの大きさの尺度を与える、渦度(dynamic vorticity) W が Φ_{c0} と共に大きくなる理由は、先ずプラグ部ECH印加で Φ_p が増大し、プラグ部とセントラル部間の磁力線に沿ったトランジット電子による電気伝導で Φ_c も増大する。以下の式に示すよう、 $dE_r/dr_c = -d^2/dr_c^2(\Phi_{c0}\exp[-(r_c/a)^2]) = 2(1/a^2)[1-2(r_c/a)^2](\Phi_{c0}\exp[-(r_c/a)^2]) \propto \Phi_{c0}$ 。また、 $W = (\nabla \times [n(r)V_{ExB}(r)])_z/n_0 = (1/n_0)(1/r)\partial(rnV_{ExB})/\partial r = (1/n_0)(1/r)(1/B)\partial(nrE_r)/\partial r$ 。

実験データより $n(r)$ 及び $\Phi_c(r)$ はガウス分布で $W = (1/B)[\exp(-2r^2/a^2)]\Phi_{c0}(4/a^2)[1-(2r^2/a^2)] \propto \Phi_{c0}$ 。

この $n(r)$ 及び $\Phi_c(r)$ の形状は電位を作るプラグ部ECHパワーのガウス分布形状のマイクロ波ローブ $P_{ECH}(0)(\exp[-(r_c/a)^2])$ と良く一致する。[2,3]

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。[2]

これらの成果は、IAEA核融合エネルギー国際会議における発表 [3] や、IAEA共催の Current Trends In International Fusion Research (2005年3月、及び2007年3月、Washington D.C.) 国際会議に於ける基調招待レビュー講演 [4,5]、更には米国物理学会誌 Physical Review Letters 94, 085002 (2005) [2]、並びに Physical Review Letters 97, 055001 (2006) [1] 等に発表した。

このデータに対応して、この E_r シア-の効果は、従来からトカマク等のHモード理論の基礎過程として理論予測されてきており、図2の J. W. Connor 等のレビュー論文 “Review of theories of the L-H transition” 等の説明図が有名である。[6]

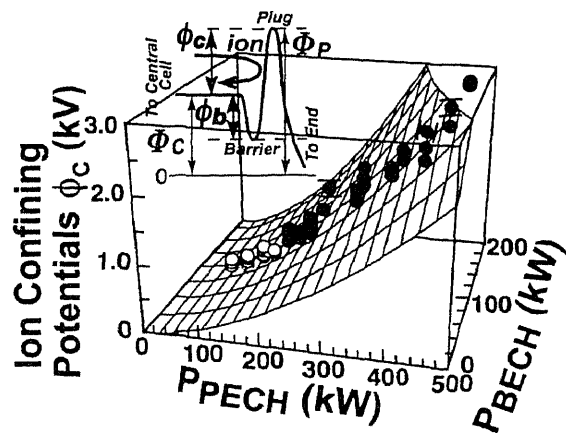


図2 Four-time progress in ϕ_c for confining central-cell ions (filled symbols) [see ϕ_c during 1992-2002 (open circles)] in accordance with a favorably rising scaling surface of plug and barrier ECH powers. T_i =several keV (the hot-ion mode).

(II) 「プラズマ閉じ込め改善のための高電位生成や電場シアアの形成」の背景を成すメカニズムである、電位生成機構・物理比例則。

ガンマ10の代表的プラズマ・モードであるHigh Potential Mode [7,8]、並びにHot Ion Mode [9] 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、**Physical Review Letters 86, 4310 (2001)**で我々が提唱した [10]、「コーエンのStrong ECH理論[11] による電位生成物理機構の定説 $\phi_c = T_e [0.665(n_p/n_c) \times \exp(1.19\phi_b/T_e)]^{2/3} - \phi_b$ 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[12] を用いサーマルバリア電位 ϕ_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い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 ϕ_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。[10]

今回、図3(a)に示す比例則平面の理論予想と、実験データのプロットを比較したところ、最新のデータも含め、理論と実験がよく合う事がわかった。物理機構の予想とデータの合致が成立している事は、我々が提唱した電位生成理論比例則 [即ち、プラグ部ECHによりにプラグ部にプラトー型電子速度分布関数が生成され、この時の速度空間での電子拡散を求め (電子拡散により減少した電子量から) 生成電位を計算し、これをパスツコフ理論の電位の項に組み込んで、電子エネルギー閉じ込め時間を媒介変数として連立させて、導出したもの] が有効に比例則理論として伸張しうること、更に今後の電位生成への拡張性・伸張性の将来展望の基盤を与えるるばかりでなく、上記のように、今後の電位・電場シアア形成・制御法にも広く拡張・適用しうる理論的基盤を与えるという重要な位置づけを併せ持っている。

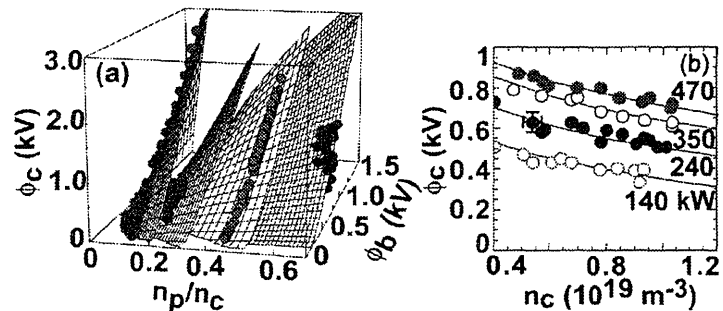


図3 Scalings of ion-confining potential formation for central-cell ions in (a) various operations, and (b) as a function of plug ECH powers and central-cell densities n_c . A weak decrease in ϕ_c with increasing n_c ranging to $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ is obtained along with the recovery of ϕ_c with increasing P_{PECH} in (b). These scalings encourage the control scenario of potentials, which contributes to both E_z axial (z) plugging and E_r sheared radial (r_c) confinement improvement.

更に、図3(b)に、イオン閉じ込め電位 ϕ_c のプラズマ密度 n_c に対する依存性を示す。ここでは、 $n_c \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ までの依存性を、プラグECH電力を媒介変数にして140から470kW まで調べた。

その結果、密度の上昇とともに、 ϕ_c は緩やかに減少はするものの、プラグECH電力を増大させる事で、その減少分は容易にリカバーできる事が示された。

(III) 高電位生成に拠る、強い半径方向電場 E_r シアア (dE_r/dr_c) の形成と、これによるプラズマ内の乱流渦(vortex)の抑制に基づく、プラズマ径方向拡散の抑制とプラズマ閉じ込めの改善。

この10年来の値に比し、4倍にまで急増大・急進展した生成高電位により、上式のように、強い半径方向電場 E_r シアア ($dE_r/dr \sim$ 数 10 kV/m^2) の形成が行われ、プラズマ安定化並び

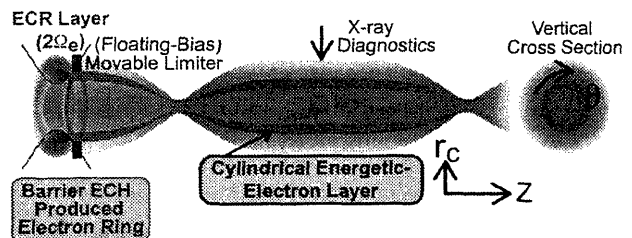


図4 Experimental configuration for radial transport barrier formation by the use of off-axis barrier ECH.

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。この時、プラグ部ECH印加と共に高電位が形成されると、セントラル部の乱流揺動成分がきれいに消え、それに伴いイオン温度が4 keVから5 keVに増大し、エネルギー閉じ込めが改善される様子が計測された。この成果は、既に***Physical Review Letters* 94, 085002 (2005) [2]**に報告したことは、以上で報告したところである。

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モードの物理予想に対応し、「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、2次元実験データとして他に先駆けて可視化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、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。これらの実験事実をもとに考えると、もしも局所的に電位を生成・制御し、電場のシアアを作ることができれば、局在化した $E_r \times B_z$ ドリフト速度シアアが形成され、恰もトカマクやヘリカルの内部輸送障壁 (ITB) に相当する領域を創ることができはるはずである。このことは、トカマク等の内部輸送障壁ITB理論予想において、「磁気シアアが消失するq-min面の領域 $r=r_{\min}$ で、強いドリフト波乱流が発生し大きな熱輸送を引き起こし、しかしその乱流はやがて半径方向に伝播しながら波長変換を起こし、ポロイダル方向にマクロな構造を持つ長波長層流 (帯状流) を形成する」というITB形成シナリオの基盤物理機構を彷彿させる。但し、我々の場合の特長は、この電場シアアを、ECHで外部制御し、径方向輸送を自在に制御するという、他の装置では未だやられたことのない、「径方向輸送制御用の内部輸送障壁の生成と制御」を世界に先駆けて行う点にある。

(IV) ECH局所加熱による高温電子流を用いた、「径方向輸送障壁」の生成・制御と、これによるプラズマ閉じ込めの改善。

輸送障壁の生成・制御を行うべく、径方向輸送障壁を作成する計画の半径位置に、ECH局所加熱を行い (図4)、ECH加速生成電子流をつくり、加速した電子の一部を磁力線に沿ってミラー端へ流し出す事で、その磁力管内の電子を減少させる。

その結果、この磁力管内に (周りの半径位置に対する) 局所的両極性正電位 Φ の**パンプ**を作る (Poissonの法則) [図7(a)に後述]。その半径 r 微分である径方向電場 E_r を生成して、 $E_r \times B_z$ (θ) フローシアアを形成し、径方向エネルギー (内部) 輸送障壁を作る。

このように、ミラーなら簡便に E_r シアア効果による輸送障壁がつかれるという、ミラー独自の生成アイデアを用いて、**初めての、径方向輸送障壁を生成・制御**実験を行った。

本方法は、 E_r シアアを効かせて $E_r \times B_z$ (θ) フローシアアを径方向に作り、他形式装置との輸送障壁物理生成機構を比較検討できる点に特長があるが、特に本論文では、**新たな径方向輸送障壁形成方法**として、中心から離れた (off-axis) 半径位置 $r_c=5.5\text{cm}$ 付近を中心に、バリア部ECH共鳴加熱層を位置させることで、半値幅約1.5cmの円環シェル状の高温電子層を生成する [図5(b)] 方法を用いた。(尚、磁場のシアアが閉じ込めにどう効くか等、この電場 E_r シアア効果のデータと、円環状トラス装置の比較

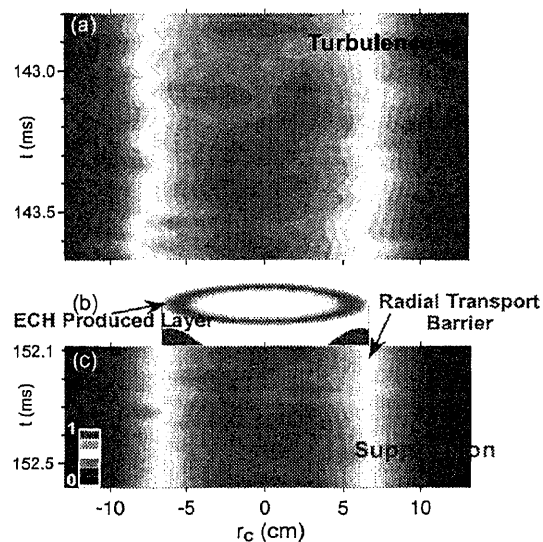


図5 *Contours of central-cell X-ray brightness (a) with and (c) without cylindrically shaped energetic electron layer formation in (b) due to off-axis barrier ECH. Hot-colored areas show higher plasma pressure locations. Strong turbulence with vortex-like structures continues to exist at $r_c < 4\text{ cm}$ in (a) and (c). However, its quietly suppressed region in (c) is observed in the energetic-electron layer [$5 < r_c < 7\text{ cm}$] and the outer surrounding cylindrical layer ($7 \leq r_c < 10\text{ cm}$). ($I \propto n_e n_i T_e^{2.3}$.)*

を行うことで、輸送障壁の電磁場のシア効果の物理究明が更に進む事も期待できる。) この結果、この円環シェル状の高温電子層の領域とその外側に「 $E_r \times B_z$ (θ) フローシア層が強く形成」され[図 7 (c)(d)に後述] (しかも電位 Φ のピーク $r_c=7\text{cm}$ を挟んだ両側で、電場 $E_r = -\text{grad } \Phi$ が正負逆転するためフローの向きも反転し) $E_r \times B_z$ (θ) フローシア層が径方向に大きく変化する領域が生成される。[図 7 (b)(d)に後述]

こうして作られた $E_r \times B_z$ (θ) フローシア層-或いは、「プラズマ・フロー θ 回転強度」vorticity W (渦度) の大きな領域は、off-axis ECH入射 $t > 149.2$ ms より前の、イオンサイクロトロン加熱 (ICH)生成ターゲットプラズマの中で見られる、プラズマ半径全体にわたる乱流状渦構造 [図 5 (a)] (文献[1,2]に詳報) に対して、off-axis ECH入射後の $E_r \times B_z$ (θ) フローシア層生成領域では、乱流が抑制されている事がわかる。図 5 (c)では、フローシア層形成中はX線の等強度位置が時間的に静かに一定で (即ち、時間変化がほとんど無いため、時間軸に対して等高線が平行)、乱流状態が抑制されている様子が分かる。

図6(a)-(d)に、 $r_c=2.7$ and 10 cm におけるX線のフーリエ成分を、この輸送障壁生成のためのECHの無い場合、在る場合について $t=146.5$ 及び 152.5 ms に対しそれぞれ示す。同様に、イオンエネルギースペクトルメータアレーのデータについても、 $r_c=2.6$ [図 6(e) 及び (f)]、及び 8.3 cm [図 6(g) 及び (h)] の位置のものを、ECHの無い場合 [図 6(e) 及び (g)]、並びに在る場合 [図 6(f) 及び (h)] について示す。乱流状のスペクトルが、ECHの無い場合にはすべてで [図 6(a), (c), (e), 及び (g) 参照]、また ECHが障壁レイヤーを作っても、その内側では [図 6(b) 及び (f) 参照]、X線信号も、イオン信号も同様に、共に乱流状の信号が得られている。

これに対し、輸送障壁領域の信号 [図 6(d) 及び (h)] には、著しい乱流抑制が計測された。

X線並びにイオンエネルギースペクトルメータアレーのデータに対し、広帯域にわたる乱流状信号の周波数積分を行い、半径各位置に対しプロットしたのがそれぞれ 図 6(i) 及び (j) である。ここに、図 6(i) 及び (j) の黒丸と白丸は、それぞれ輸送障壁生成時と、生成していない場合について示している。それぞれの図ともに、輸送障壁の領域並びにその外側の $5 < r_c < 10$ cm で、著しい乱流抑制が起こっていることが分かる。これは図 5 で可視化されたX線信号とコンシステントである。

図7(a)の実線と破線は Φ_c の径方向分布をそれぞれ輸送障壁有り無しについて示した。茲に、ECHにより生成された電子流の存在領域を $4 < r_c < 7$ cm に挿入図として示している。これは可動式ELAにより計測したものである。

輸送障壁層の有り無しに対し、セントラル部の重イオンビームプローブ(HIBP) 並びに西側イオンエネルギースペクトルメータアレー (IES arrays) のデータが、それぞれ、黒丸白丸でプロットされている。この図より、確かに (東バリア部) ECHで生成された高温電子流のごく一部が端部から放出されることにより、(Poissonの式からも分かるように) 両極性電位 Φ_c のバンプが形成されていることが分かる。

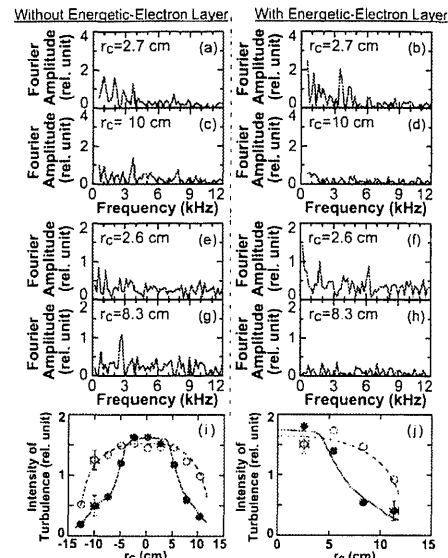


図 6 Fourier amplitudes of (a)-(d) the central-cell X-ray signals in Fig. 5 and (e)-(h) those of ions with IES arrays are plotted at various r_c . The data sets are obtained in the absence [(a), (c), (e), (g)] and presence [(b), (d), (f), (h)] of the cylindrical energetic electron layer [Fig. 5(b)]. Frequency integrated amplitudes over the broadband turbulent fluctuations in the X-ray and IES array data are summarized in (i) and (j), respectively. The filled and open circles show the cases with and without the layer, respectively. A significant reduction of the turbulence is attained in the layer and outside the layer ($5 < r_c < 10$ cm). These behaviors are consistent with those in Fig. 5.

この Φ_C のバンプは、そのピーク位置 $r_c \approx 7$ cm $= r_p$ の左右 (r_c の大小両側) で、勾配である $\text{gradient } \Phi_C$ 即ち E_r の記号が反転することを意味している。これは即ち、方位角方向(θ)に対し、 $E_r \times B$ ドリフトフローが、 $r_c = r_p$ を横切る位置で反転することを意味し、この反転 $E_r \times B$ シアー流が、 $r_c = r_p$ を境にプラズマを2つの外と内側に領域に分けることを意味する。この様子は角速度 Ω の正から負への反転として、図7(b)の実線で示されている。

更なる本質的なパラメータとして、 E_r シアー [図7(c)] 及び渦度[dynamic vorticity] W [図7(d)]が重要である。即ち W は非一様密度を持つ磁化プラズマの、回転運動に関するカノニカルモーメントを意味しており、非圧縮流体の速度シアーの目安を与える渦度ベクトル $w = \nabla \times V$ の拡張と位置づけられる。規格化された dynamic vorticity の z -成分は、 $W = [\nabla \times (nV_E)]_z / n_0 = d/dr_c [nr_c^2 \Omega] / (n_0 r_c)$ であり、茲に、 n_0 は軸上の密度である。これにより、 $E \times B$ 速度 (V_E) シアーを特徴付けることができる。輸送障壁層を作った場合、図7(a)の Φ_C のバンプは、図7(b)のように Ω の急激な変化をもたらし、図7(c) 及び

(d)のそれぞれ dE_r/dr_c 及び W の顕著なバンプを創る。 W の大きな値を持つ領域 (高シアー回転領域) は $r_c = 7$ cm を中心にバンプを持ち、乱流揺動を著しく抑制する $5 < r_c < 10$ cm 領域を綺麗にカバーしていることが分かる。他方、 $r_c < 4$ cm の弱いシアー領域で、 W の小さな、低シアー回転領域では、強い揺動が観測されることが分かる。

図8(a) 及び (b) にそれぞれのデータをX線解析、並びに荷電交換中性粒子解析により求め、実線と破線で、それぞれ径方向輸送障壁有り無しについて示す。 T_e 、 T_i 双方に対し、 W が大きなシアーの強い領域 [図7(c) 及び (d)参照] で、輸送障壁形成と共に温度勾配が急峻になり、この輸送障壁で囲まれたプラズマコア部の温度が大きくなっていることが分かる。これは、トカマクやヘリカル装置の内部輸送障壁の形成時と同様な振る舞いを示しており、双方の比較検討により、メカニズムの解明のみならず、将来のトロイダル系での、未だ実現できていない内部輸送障壁の能動制御に対する端緒を与えるものとして注目されている。これらの結果から、大きなスケール長を持つ乱流は弱いシアー回転を持つ径方向にスムーズなRFプラズマの通常領域に存在すること。また、ストカスティックな乱流渦構造は、プラズマ半径とコンパラブルなスケール長を持ち、それに沿った径方向エネルギー輸送を増大させていること。大きな W を持つ領域は乱流揺動を抑制し、その領域を横切っては急峻な T_e 、 T_i 勾配を生じさせること [図8]。その時に、この輸送障壁領域を横切って外側と内側では、渦構造が独立で相関がないこと。このデカップリングの様子は、径方向の相関を輸送障壁が断ち切っていることを示しており、シアーフローの効果と威力を示している。

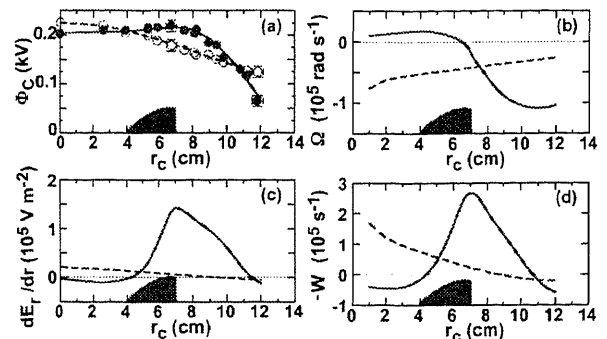


図7 Central-cell potential data from HIBP and IES arrays are plotted with the filled and open circles, respectively, along with the solid and dashed fitting curves for the presence and absence of the energetic-electron layer, respectively. The inserted shaded region shows the observed profile of the electron-current density [$4 < r_c < 7$ cm]. (b) The angular velocity having direction reversal of the $E_r \times B$ azimuthal drift flow across the bumped locations of (c) E_r shear and (d) dynamic vorticity at $r_c \approx 7$ cm is plotted in the presence of the energetic-electron layer (the solid curves). A significant reduction of the turbulent fluctuations ($5 < r_c < 10$ cm), and a high level of fluctuations in the core plasma at $r_c < 4$ cm (Figs. 5 and 6) are observed. ($n_e = 1.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ at $r_c = 6$ cm.)

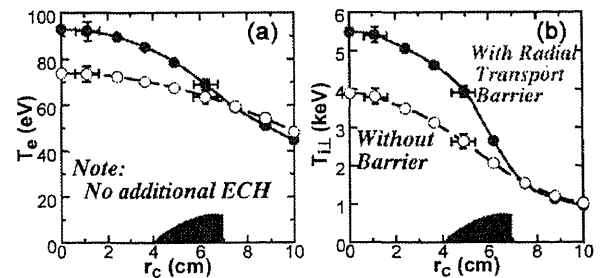


図8 The solid and dashed curves show (a) T_e and (b) T_i profiles from X-ray and charge-exchanged particle analyses in the presence and absence of the energetic electron layer (illustrated shaded regions), respectively. Steep gradients in both T_e and T_i in a large W_r regime along with rather flat and higher T_e and T_i in the inner region surrounded by the layer are found. For simplicity, neither plug nor central ECH is injected.

図8(a)において、コア部の T_e の上昇は、径方向の熱拡散係数 (thermal diffusivity) χ_{e1} が大きな W を持つ径方向輸送障壁領域で、古典拡散係数に近い $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ にまで抑制され、軸方向輸送は浮遊電位を持つエンドプレート電位 ($\approx 3T_e$) で抑制されている事に基づき、得られたものと解釈される。更に、セントラル部ミラー閉じ込めイオンの T_i の上昇は、古典的な電子ドラッグにより決まっており、他の異常拡散が抑制されていることによりよく説明できる。[図8(b)] (高 W 領域に於ける、小さなdiffusivity χ_{i1} [図9(b)]を参照。)従って、通常の内部輸送障壁 ITB [4] の定義を用いるならば、我々は、ECHを用い端損失電子流を制御することにより、「外部制御により高シア・高 W 領域を創ることによって、初めて内部輸送障壁を生成・制御するに到った」ということができよう。

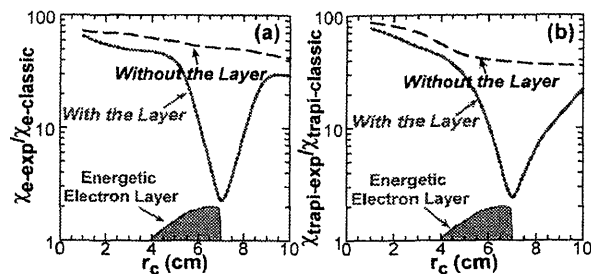


図9 For reference, thermal diffusivities of central-cell mirror trapped ions and electrons are compared with those calculated from classical (Coulomb collision transport) theories in the case with energetic electron layer formation due to the off-axis barrier ECH application. In the high vorticity [strong E_r shear] region, significant suppression of transverse ion and electron losses is indeed identified (see the solid curves).

(V) セントラル部電子直接加熱 (Central ECH) 初期実験結果。

ミラーではこれまでに、セントラル部の電子の直接加熱を本格的に大電力ECHにより実施した先例がない。今年度より、いよいよセントラル部ECHの実験を開始した。先ず、380 kW のプラグ部ECHを入射することにより、強い E_r シアーフローを創りつつ、セントラル部 ECH (250 kW) を標準的なタンデムミラー運転モード (高温イオンモード) に重畳入射した。これは、上述のように軸方向閉じ込め E_z プラギング、並びにこれに伴い自動的に形成される強い径方向電場シアーフローによる、径方向閉じ込め改善を同時に行う

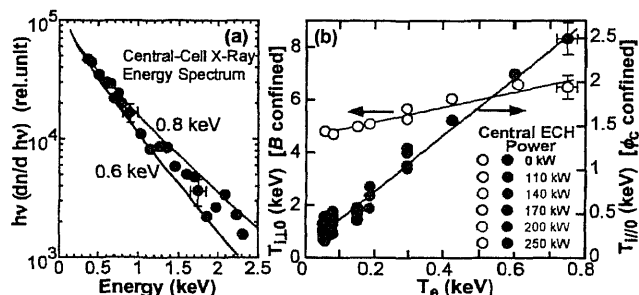


図10 (a) Direct heating due to central-cell ECH raises T_e over 0.7 keV (i.e. X-ray PHA). ($T_{e0}=0.75 \text{ keV}$ from X-ray tomography). (b) Reduction of electron drag for central-cell ions highlights that the stored energy of ϕ_c potential confined ions between both plugs exceeds that (diamagnetism) of central-cell magnetically mirror trapped ions.

ことを狙ったタンデムミラー独自の運転モードである。この結果、中心電子温度は T_{e0} ICHのみの時間帯の70 eV から 750 eV [図10(a)] に急進展し、同時にセントラル部磁場閉じ込めイオン温度は $T_{i10}=6.5 \text{ keV}$ に、更には $\phi_c (=2.5 \text{ kV})$ 電位閉じ込めイオン温度が $T_{i/10}=2.5 \text{ keV}$ に増大するという、著しい成果を得た。この時、サーマルバリア電位 $\phi_0=0.93 \text{ kV}$ であり、入射ICH電力は 86 kW (このうち波動のプラズマへの吸収効率 $\eta_{CH}=0.37 [n_{i0}=4.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}]$)で実験を行った。得られたプラズマのエネルギー閉じ込め時間は、セントラル部磁場閉じ込めイオンについては、電子によるドラッグが0.14秒で、この値はこのイオンがピッチ角散乱し、2.5 kVの ϕ_c によるパスツコフ電位エネルギー閉じ込め時間0.23秒に迫ろうという値であり、従来の低温電子によるエネルギー損失時間を1桁上回る、エネルギー閉じ込め時間の著しい改善を成したものである。他方、プラグ部イオン閉じ込め電位を往復する ϕ_c 電位閉じ込めイオンは、磁場閉じ込めイオンとほぼ等量の密度を持っていることが計測されているが、2.5 kVの ϕ_c によるパスツコフ電位エネルギー閉じ込め時間は0.16秒、電子によるドラッグが0.26秒となる。

今回のように、高電場シアーの生成下では、乱流抑制計測からも示されるように径方向損失は小さく、軸方向の損失と電子によるエネルギードラッグが主要エネルギー損失項となる。パスツコフ閉じ込め時間とこの電子ドラッグ時間を並列に入れることにより、それぞれのイオン成分に対するエネルギー閉じ込め時間を評価できる。ガンマ10のイオンは、主に上記の2種類のイオンにより構成されており、高温イオンモードに於いて、半径方向の強い E_r シアー生成条件下で、それぞれのイオンが0.1秒オーダーのエネルギー閉じ込め時間を持つに到ったことが、今回初めて得られた重要点である。

タンデムミラーとしては最も特徴的な電位捕捉イオンの蓄積エネルギーを、「空間に浮遊する電

位」によりエネルギーを閉じ込め、蓄積することに成功したことは、セントラル部ECHにより電子温度が1桁上昇し、その結果電子ドラッグが減り、電位閉じ込めの効果が顕在化された、従来無かった画期的な成果であると言えることができる。[1-35] 現在、更にジャイロトロンコンディショニングを進め、長パルス・大電力発振を行うべく、調整を進めており、一方、セントラル部リミターの改造等を進めており、平成19年度の本格的実験実施により、電位/電場閉じ込め効果がより際だった、タンデムミラー[1-35]の、新たな歴史を拓く総合実験を実施する計画である。

(参考文献)

- [1] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 055001 (2006).
- [2] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 085002 (2005).
- [3] T. Cho et al., in Fusion Energy (Proc. 21st IAEA Int. Conf. Chengdu, 2006) IAEA-CN-149/EX/P7-14.
- [4] M. Hirata et al., Plenary Invited Review Talk in the 7th Symposium on Current Trends in International Fusion Research: A Review (Washington D.C., 2007).
- [5] T. Cho et al., Plenary Invited Review Talk in the 6th Symposium on Current Trends in International Fusion Research: A Review (Washington D.C., 2005).
- [6] Y. Kishimoto *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 667 (2000); S. Ide and JT-60 Team, *ibid.* **45**, S48 (2005); J. W. Connor *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **42**, R1 (2000); P. H. Diamond *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, R35 (2005).
- [7] 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; S. Miyoshi, Plasma Physics Rep. **23**, 723 (1997) [Soviet Journal of Plasma Physics].
- [8] T. Cho *et al.*, Phys. Rev. Lett. **64**, 1373 (1990); Phys. Rev. A **45**, 2532 (1992).
- [9] Y. Kiwamoto et al., Phys. Plasmas **3**, 578 (1996).
- [10] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 4310 (2001).
- [11] R. H. Cohen, Phys. Fluids **26**, 2774 (1983).
- [12] 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).
- [13] T. Cho et al., Plenary Invited Talk in the 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Tsukuba, 2006).
- [14] T. Cho et al., Plenary Invited Talk in the 5th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Novosibirsk, 2004).
- [15] M. Yoshikawa et al., Invited Talk at the JSPF 23rd Annual Meeting (2006, Tsukuba).
- [16] J. Kohagura et al., Invited Talk at the JSPF 22nd Annual Meeting (2005, Tokyo).
- [17] T. Saito et al., Invited Talk at JSPF 21st Meeting (2004, Shizuoka); J. Plas. and Fusion Res. **81**, 288 (2005).
- [18] T. Cho et al., Invited Talk at JSPF 20th Annual Meeting (2003, Mito); J. Plasma Fusion Res. **80**, 81 (2004).
- [19] S. Miyoshi *et al.*, in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th IAEA International Conference, Innsbruck, 1978) **2**, 437 (1979).
- [20] M. Inutake et al., Phys. Rev. Lett. **55**, 1939 (1985).
- [21] A. Mase et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 2281 (1990).
- [22] M. Inutake et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 3397 (1990).
- [23] H. Hojo et al., Phys. Rev. Lett. **66**, 1866 (1991).
- [24] M. Ichimura et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 2734 (1993).
- [25] T. Saito et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 1169 (1999).
- [26] K. Ishii et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 3438 (1999).
- [27] T. Tamano et al., in Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Research (Proc. 15th IAEA International Conference, Seville, 1994) **2**, 399 (1995).
- [28] T. Cho et al., Nucl. Fusion **27**, 1421 (1987).
- [29] I. Katanuma et al., Nucl. Fusion **27**, 2041 (1987).
- [30] T. Cho et al., Nucl. Fusion **28**, 2187 (1988).
- [31] M. Hirata et al., Nucl. Fusion **31**, 752 (1991).
- [32] M. Ichimura et al., Nucl. Fusion **39**, 1995 (1999).
- [33] T. Cho et al., Nucl. Fusion **41**, 1161 (2001).
- [34] T. Cho et al., Nucl. Fusion **43**, 293 (2003).
- [35] J. Kohagura et al., Phys. Rev. E **56**, 5884 (1997).

【5】ガンマ10の ECRH 増力実験とジャイロトロン開発研究

ガンマ10では、タンデムミラーの閉じ込めの特長を大きく引き出すため、プラグ及びセントラル部 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 200kW ジャイロトロンの拡張運転を試み 30% のパワーアップを得、その結果、イオン閉じ込め電位 $\phi_c = \Phi_p - \Phi_c$ (プラグ部 Φ_p 、中央部 Φ_c 及びバリア部電位 Φ_b) の記録値 1.4kV を達成し、本センターが提唱する電位生成のスケーリングの初期的な検証に成功した[1]。これを受け、平成16年度からは、第二段階として、日本原子力研究開発機構と協力して 500kW 級の新規高電力ジャイロトロン (図1) の開発を進め、これまでにない、高パワーでの高電位生成実験とセントラル部ミラーの電子加熱実験を目指した。2004年、2005年とジャイロトロンの改良と調整を進めながら、新規 500kW ジャイロトロンのパワーアップと長パルス化実験を進めた[2]。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 470kW で、従来の4倍となる世界最高の閉じ込め電位 3kV が得られた[2]、[3]。さらに高電位、高密度での高電位生成には、プラグジャイロトロンの 1MW 化が必要となることから、1MW ジャイロトロンの検討も開始するとともに、1MW ジャイロトロンに関する核融合科学研究所との協力も開始した。タンデムプラズマ閉じ込めの向上には、中央部の高エネルギーイオンの電子冷却を抑制することが重要である。これに必要な中央部の高パワーの電子加熱のためのシステムの増強を行うため、シャットダウンした日本原子力機構の JFT-2M の ECH 用電源を本センターに移設し、セントラル部ジャイロトロンの専用電源とし、これまでの2倍近いパワーでの実験が可能となった。

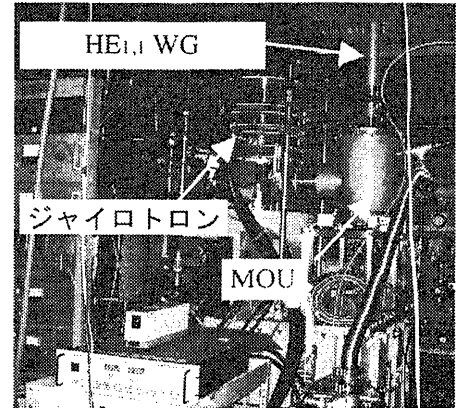


図1 高電圧用油タンクに組み込んだ 500kW ジャイロトロンと導波管に整合させるための整合器 (MOU)

プラグ ECRH の増力に向け開発した 500kW ジャイロトロンでは、効率よく開発を進めるため ITER 工学 R&D で得られた技術成果を取り入れ[4]、原子力機構と協力して設計を進め、設計通りの 500kW 出力を成功させ[5]、その結果、3節でのべる実験成果を得た。しかし、磁場コイルなど既存の装置の制限の範囲内で開発を進めたため、性能限界があり、次のステップとなる 1MW 管では、これらの制限をなくし、設計を行った。従来の 200kW ジャイロトロン、増力管 500kW ジャイロトロン、計画中的の新設計 1MW ジャイロトロンの設計の比較を表1に示す。1MW ジャイロトロン設計では、大電流のビームが必要なことから、カソード面積を増やすために 500kW 管で採用した TE_{4,2} モードより、さらに高次の TE_{8,3} モードを採用し、ガウスビーム出力用モード変換器を内蔵するタイプとした。500kW ジャイロトロンでは 2 極タイプの電子銃とを採用したが、1MW 管では 3 極電子銃にして、制御の柔軟性を持たせた。

	従来型	増力管	新設計 1MW 管
周波数	28GHz	28GHz	28GHz
出力	200kW	500kW	1MW
共振器モード	TE _{0,2}	TE _{4,2}	TE _{8,3}
出力モード	TE _{0,2}	ガウスビーム型	ガウスビーム型
パルス幅	0.075	0.1	0.5
効率	34%	40%	>50% (CPD)
電子銃極数	3 極管	2 極管	3 極管

表1 ジャイロトロンの設計仕様表 (CPD はエネルギー回収時)

図2に、1MW 管の設計例として、ビーム電流に対する出力の計算結果を示す。ビーム電流 30A で 1.3MW 以上の出力が得られている。これは、共振器での出力であるので、導波管へ結合する有効な出力が、20%程度へるとしても、1MW 出力が期待できる。また、効率もエネルギー回収 (CPD) なしで 50%近い値が得られていることから、CPD を使用すれば、50%を超える効率は十分可能である。

さらに、共振器部の最適化をすることにより、高効率が可能である計算結果も得られている[6]。

また、この1MW ジャイロトロン開発の一貫として、また、核融合科学研究所(NIFS)との共同研究を進展させるために、NIFS と協力協定を結び、NIFS の大型ヘリカル(LHD) 装置用のジャイロトロンの共同開発を開始し、77GHz で、1MW 長パルス、300kW で連続運転可能なジャイロトロン研究を進めている。第1号管は既に製作が完了し、試験を開始した。

ECRHの増力計画の最も重要な課題は、プラグ部の高電力電子加熱による閉じ込め電位の増大であり、これまでに統合理論のスケージングに沿った電位が得られている。

図3は、新增力ジャイロトロンを用いたプラグ電位生成の従来のジャイロトロンでの結果からの進展を示し、横軸ジャイロトロンのパワー、縦軸に閉じ込め電位の高さを示した。パワーの増大とともに、飽和することなく大きく閉じ込め電位が増大しているのがわかる。従来のジャイロトロンを用いていた2002年以前の高イオン温度モードのデータ0.7kVに対して、2005~2006年にかけてパワーの増大とともに、従来の4倍となる3kVのイオン閉じ込め電位が得られている[3]。これは、従来の成果を大きく上回る世界最高のデータである。今のところ飽和が見られないことから、パワーアップによる更なる電位の増大が期待できると予測されることから、前節でのべたように、ジャイロトロンをさらにパワーアップし、1MWにする計画であり、開発に着手している[7]。

セントラル部のイオンは、6keV~7keV と高温であるが、電子は100eV以下で、このコールド電子によるドラッグが高温イオンの閉じ込めの制限やイオン温度の大きな異方性の一因となっていた。これを改善するために、セントラル部のECRHの本格的な加熱計画を進めた。JFT-2MのECH用電源を原子力機構から譲り受け、セントラルECRH用の専用電源を増設し、また、セントラル用伝送系、アンテナ系を大きく改良した。ジャイロトロンについては、増力した500kW管を導入し、伝送系を高効率のHE11コルゲート導波管にし、さらに、プラズマでの吸収が最適となるように、偏波器を採用し[8, 9]、アンテナ系については、従来のブラゾフタイプの放射器から、2枚の楕円ミラーを用いた高効率、かつ、共鳴面での収束性の良いアンテナを設計し取り付け実験を行った。これらの改良により、従来、セントラルECRHでは100kWレベル以下でしか実験が出来なかったのに対して、最大、250kWまでの入射実験を行い、タンデムミラーでは世界最高値となる750eVの高電子温度を得ると共に、電子ドラッグを大幅に減少させることにより、イオン温度の上昇と、イオン温度の等方化率の改善に成功した。

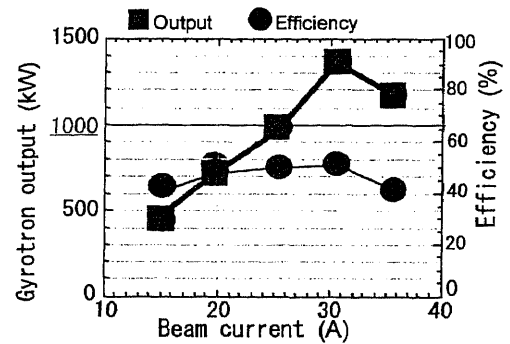


図2 新設計1MW ジャイロトロンのビーム電流に対する出力

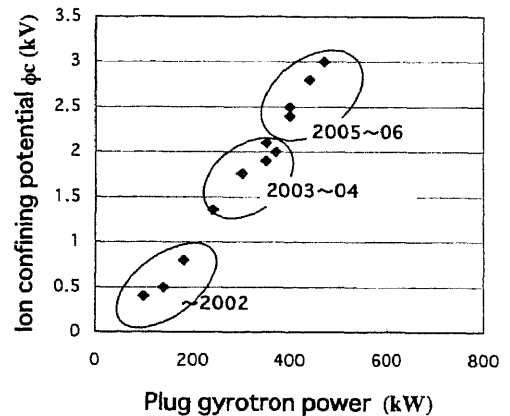


図3 増力による電位形成の進歩

[1] T. Cho, et al., Phys. Rev. Lett. 94, (2005) 085002-1~085002-4.
 [2] T. Imai et al., "Upgrade Program of ECRH System for GAMMA 10", Trans. of Fusion Science and Tech., 51, 2T(2006)208-212.
 [3] T. Cho, et al., Trans. of Fusion Science and Tech., 51, 2T(2007)11-16..
 [4] 今井剛, プラ核学会誌 81, No. 3 (2005), 178-182.
 [5] T. Kariya, et al., Trans. of Fusion Science and Tech., 51, 2T(2006)397-399.
 [6] 鎌田康宏, 坂本慶司, 今井剛他, 「GAMMA10用1MW 28GHz ジャイロトロンの高効率発振設計」第23回プラズマ核融合学会年会 (2006) 28aC16P.
 [7] T. Imai et al., "ECRH Upgrade Program in GAMMA 10", Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2006, Nara, 26-30 Sept. 2006 (T05).
 [8] R. Minami, et al., Trans. of Fusion Science and Tech., 51, 2T(2006)403-405.
 [9] Y. Tatsumatsu, et al., Trans. of Fusion Science and Tech., 51, 2T(2006)400-402.

【6】ガンマ10における偏波器を用いた高効率電子サイクロトロン加熱の研究

ガンマ10 セントラル部では、イオン温度に比べて電子温度が低く、イオン・サイクロトロン加熱 (ICH) により生成されたイオン温度が数 keV の高温イオンが、電子との衝突により、エネルギーを損失する事が問題となっている。従って、セントラル部の電子温度を上げて、高温イオンの電子ドラッグによるエネルギー損失を抑制することが重要な研究課題の一つである。

ガンマ10 セントラル部の電子サイクロトロン加熱 (ECH) システムでは、ジャイロトロンから出力した 28 GHz のマイクロ波は、Matching Optical Unit (MOU) を用いて伝送用コルゲート導波管に HE11 モードで結合された後、3 枚のマイターバンドにより反射・伝送され、ガンマ10 上部の 2 インチ直径のポートから真空容器内に入射される。アンテナから放射されたマイクロ波ビームは、2 枚の楕円鏡により、共鳴条件を満たす磁場強度 1 T の位置へ、35.1 度の角度で入射されている。

今回新たに、伝送系途中のマイターバンドに偏波器を適用し、入射偏波の制御を行うことで、高効率な電子加熱を試みた。今回製作しセントラル部の ECH システムに適用した偏波器では、2 枚の偏波器を用いることで、原理的には全ての偏波を生成できる。偏波器を使った基本原理は、溝の表面で反射する Fast polarization と、溝の奥で反射する Slow polarization の、位相差を利用する。1 枚の偏波器 (circular polarizer) で、直線偏波から楕円偏波を生成し、もう 1 枚の偏波器 (twister) により楕円偏波の軸を回転させる。今回用いた circular polarizer 及び twister の溝の深さは、それぞれ 1.7 mm と 2.9 mm である。この入射偏波制御の可能な新しい ECH システムを、実際のガンマ10 セントラル部の電子加熱実験に適用した。

図1にセントラル部 ECH の入射偏波制御実験を行ったプレリミナリーな結果を示す。図2(a)は、反磁性量の時間変化を示している。入射偏波に対して、X モードを支配的にした場合と O モードを支配的にした場合とで比較したところ、X モードを支配的にしたことにより、効率的に電子を加熱することで、大幅な電子温度の増大に成功した。これにより、電子ドラッグによる高温イオンのエネルギー損失を低減することが出来、電位によるプラズマ閉じ込め効果を顕在化させることに成功した。図2(b)は、従来の ECH システムにより得られた電子温度データと、今回新たに適用した ECH システムにより得られた電子温度データを比較したものを示している。縦軸が電子温度で、横軸がジャイロトロンの発振出力となっている。入射偏波の制御により効率的に電子を加熱させる事に成功し、従来の 5 倍以上の 0.75 keV の電子温度を達成することに成功した。

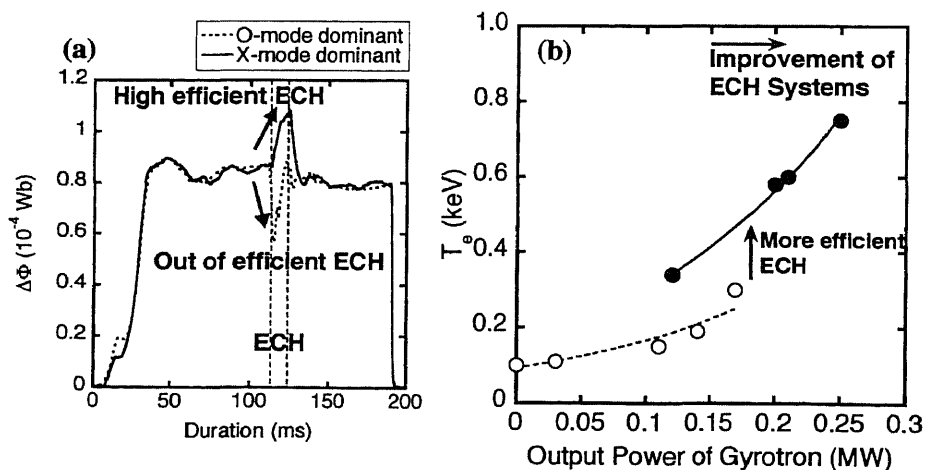


図1 入射偏波制御によるセントラル部高効率電子加熱実験

- [1] T. Imai et al., Transactions of Fusion Science and Technology 51 (2007), No. 2T, pp.208-212.
- [2] T. Kariya et al., Transactions of Fusion Science and Technology 51 (2007), No. 2T, pp.397-399.
- [3] Y. Tatematsu et al., Transactions of Fusion Science and Technology 51 (2007), No. 2T, pp.400-402.
- [4] R. Minami et al., Transactions of Fusion Science and Technology 51 (2007), No. 2T, pp.403-405.

【7】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

主として、イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の高周波を用い、プラズマ中における電位形成やプラズマ閉じ込め物理を研究するための標的プラズマ生成、イオン加熱、また、高性能プラズマを制御するうえで不可欠なプラズマの巨視的・微視的挙動の解析を進めている。平成18年度には、タンデムミラー実験において最も重要な課題の一つである高密度プラズマ生成に関する実験が進展した。従来の高周波発振器系を用い、アンテナ間の位相制御による最適配位を実現することを試みた。また、プラズマ中の揺動に起因するイオンの径方向輸送に関連する実験として、ドリフト型の不安定性の発生時に観測されるプラズマ周辺部での高エネルギーイオンの情報を解析した。平成16年度より着手したプラズマ流計測に関して、セントラル部に新たに製作したマッハプローブを設置し、中央面から磁力線に対してピッチ角を持って端方向に流出する流れを確認した。ICRF領域に観測される自発励起波動に関して、ミラープラズマ中のアルベンイオンサイクロトロンモード、トカマクプラズマ中のイオンサイクロトロン放射等の共通物理の解明を目的として、日本原子力研究開発機構、及び、核融合科学研究所との共同研究を継続している。また、韓国基礎科学研究所との共同研究が継続され、韓国側国立核融合研究センター(NFRC)との交流を実施した。

A. 位相制御による高密度プラズマ生成

タンデムミラー装置における重要な課題の一つである高密度プラズマ生成に関しては、これまでも幾つかの方法が試行されてきた。入射ガス量を積極的に増大させ、高電力の高周波を印加する方法や、小型のペレット入射による中心部へのガス供給もその一つの方法であった。また、これまでに観測された密度飽和に関して詳細な解析を行い、境界条件に強く依存して励起される固有モード形成が重要な役割を担うことを明らかとした。従来よりも高い周波数の高周波を用い、プラズマ中の励起波動強度や径方向の固有モードの増大による高密度化に関してもその有効性を確認してきた。しかしながら、ガス量を極端に増大させた場合、プラズマ中の中性粒子の増大にともなう荷電交換損失により、高温プラズマを維持する事が困難となってくる。平成18年度は、これまでの試みに加えて、セントラル部に設置されている既存の高周波アンテナ間の位相制御を行い、効率良く波動を励起し高密度プラズマを生成することを念頭に実験を行った。セントラル部の西側端に設置されている隣接するTypeIIIアンテナとTypeIIアンテナを用い、プラズマ生成用高周波(RF1)発振器の西側最終段(PA2)とプラズマ加熱用発振器(RF2)の西側最終段(PA4)を同一周波数で駆動し、位相制御してそれぞれに高周波を印加した。図1に両アンテナ間の位相差に対する生成されたプラズマ線密度の依存性を示した。図1において、位相差180度の付近にデータ点がないことはプラズマが安定に生成されなかったことを

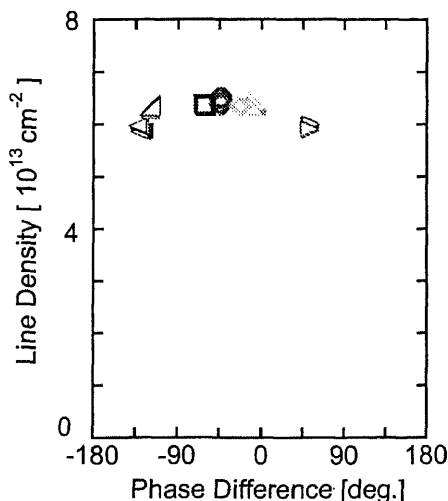


図1 セントラルセル線密度のアンテナ位相差依存性

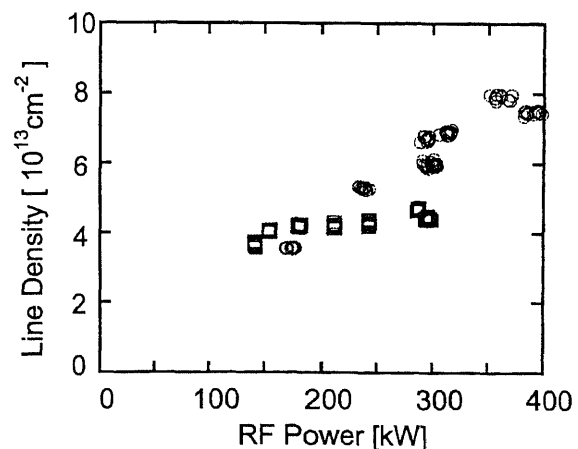


図2 セントラルセル線密度のRF電力依存性

表している。プラズマが生成される位相差においては、その依存性は強く見られないが、位相差0度の付近で線密度が最大となることが明らかとなった。現在の配位における位相差0度は、両アンテナが誘起する電磁界が打ち消し合わずお互いに補う関係であり、波動が効率良く励起されたことが予想される。また、プラズマ生成に関連するアルペン速波の励起には、TypeII型のアンテナが有効であることが知られており、セントラル部の境界条件に強く依存しない波動の効率の良い励起が高密度化に寄与するものと考えている。図2に、従来の東西 TypeIII アンテナを用いた時に観測される密度飽和と今回用いた位相制御アンテナにより得られた結果をプロットしたものを示した。横軸は、印加したプラズマ生成用高周波電力を表しており、その増大とともにセントラル部線密度が増大することが実験的に明らかとなった。

B. 高周波加熱プラズマ中のドリフト型揺動と高エネルギーイオンの挙動

GAMMA 10 では、イオンサイクロトロン周波数帯の高周波を用いてプラズマの生成・加熱を行っている。プラズマ加熱に伴い、周辺部において低周波数の密度揺動が観測されるときがある。特にプラズマ生成用の高周波 (RF1) が印加されたとき、ドリフト型揺動の発生が観測されており、プラズマ閉じ込めに影響を及ぼすことが予想される。揺動によるイオンの径方向輸送に関する情報を得る事を目的として、この揺動と高エネルギーイオンの挙動との相関を調べ、相互の関係を解析している。GAMMA 10 セントラル部における高エネルギーイオンの挙動は、セントラル部中央に磁力線に直角方向から挿入する表面障壁型シリコン半導体素子を用いた高エネルギーイオン検出器 (central cell High Energy-ion Detector : ccHED) により、そのピッチ角分布を含めて測定している。半導体素子の前面には光をさえぎるためのアルミニウム膜が蒸着されており、約 10keV 以上のエネルギーを持った水素イオンを検出できる。ccHED をプラズマ中心から 25cm の位置に設置し、ピッチ角 80 度付近で計測した時、バースト的に高エネルギーイオン信号が受かることが明らかとなった。一方、プラズマ中の揺動はプラズマの中心から半径 18cm の位置に設置されている静電プローブ (ESP) を用いて観測している。ESP によって得られたプラズマ周辺部の密度揺動信号と、ccHED によって検出された高エネルギーイオン信号を Fast Fourier Transform (FFT) を用いて周波数解析を行ったところ、同じ周波数にピークを持つことが明らかとなった (図3)。ccHED 信号の周波数スペクトルと一致する揺動は、方位角方向にモード数 $m=2$ を持ち、電子サイクロトロン運動方向に回転するドリフト型の揺動であることがこれまでに明らかとなっている。GAMMA 10 ではプラズマ径を制御するためにセントラルセル中央付近に半径 18cm のリミターを設置していることから、周辺部にあたる $R=25\text{ cm}$ において ccHED で得られた信号は、プラズマの揺動に関連して高エネルギーイオンが周辺部に輸送されていることを示唆している。

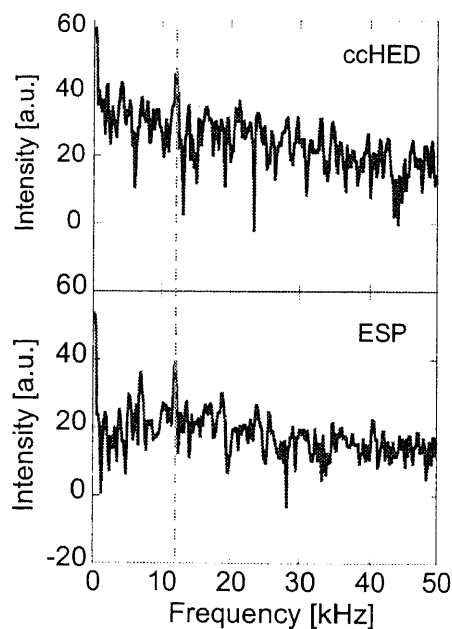


図3 ccHED 信号と静電プローブ信号の周波数スペクトル

C. セントラルセルにおけるプラズマ流の測定

平成 16 年度から開始された東北大学との双方向型共同研究の一環として、プラズマの流れに関する研究に着手した。高温プラズマ中の流れは、プラズマ中の乱流や閉じ込め改善に関連して最近注目を集めている。これまでに GAMMA10 の東西両端に設置されている MPD アークジェットを用いた初期プラズマ生成用プラズマ銃の特性をマッハプローブを用いて測定した。また、平成 17 年度からは、新たにセントラル部にマッハプローブを設置し、ミラー磁場に捕捉されたプラズマ中における流れに関する

情報をエンド部から開放端磁場に沿って流出するプラズマ流との比較を含めて解析を行っている。GAMMA10 セントラル部においては、高電力のICRF加熱に伴い周辺部にも高温プラズマが存在することから、平成18年度においては、新たに耐熱性を改善した3方向型マッハプローブを製作し、セントラル部中心から西側120cmの位置に設置した。図4に、マッハプローブ測定により導出されたマッハ数の磁場に対する角度依存性（ピッチ角分布）を示した。中心から外側に向かって、磁力線に対して有限な角度を持って流れが存在する事が明らかとなった。現在この流れを駆動する原因について考察を行っている。

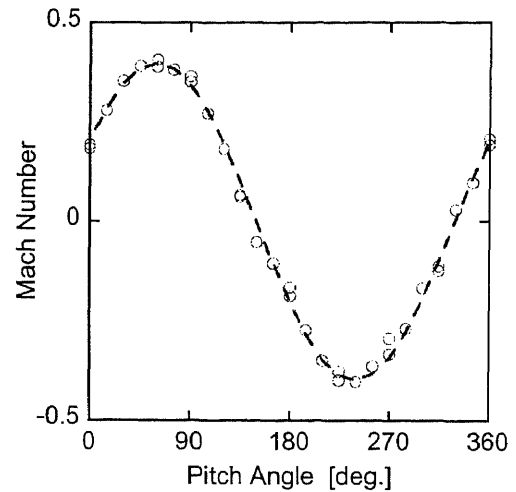


図4 セントラルセル周辺部におけるプラズマ流マッハ数のピッチ角依存性

D. 高周波プローブ法の開発

高温・高密度プラズマにおいては、高エネルギー粒子の存在に起因したアルベン波動の励起が数多く報告されている。これらの波動は、プラズマ全体に渡って発生するグローバルなモードであり、逆にモードの存在からプラズマパラメータを推定することも可能である。イオンサイクロトロン周波数帯の高周波を用いたプラズマ診断法はこれまでに多くはなく、大型トカマク装置で2例ほど報告されているのみである。受動的診断法としては、次節に述べるプラズマ中に自発的に励起される波動を検出し、その励起機構からプラズマパラメータを推定することがある。ここでは、外部よりイオンサイクロトロン周波数帯の高周波を印加して、アンテナの応答（負荷抵抗）及び実際にプラズマ中に励起されるアルベン波動を調べ、プラズマの巨視的なパラメータに関する情報を得ることを目的とした能動的な高周波プローブ法の開発を行っている。平成18年度は、GAMMA10 セントラル部にアンテナを設置し、低電力のICRF入射系を整備した。同じ周波数帯に感度を持つ磁気プローブをプラズマ表面近傍に設置し、プラズマパラメータに影響を与えない程度の低電力（ $<500\text{W}$ ）でアンテナに周波数掃引した高周波を印加してプラズマ中の励起波動を検出している。アンテナ電流を入力、プラズマ中を伝播し磁気プローブにより検出される信号を出力として、入出力信号のFFT(Fast Fourier Transform)解析により求めた複素振幅を用いて伝達関数を導出する。内部に共振を持つ系では、共振周波数の周辺で、伝達関数が複素平面上に円形の軌跡を描くことが知られているが、固有モード形成はプラズマの境界条件に起因する共振現象であり、伝達特性の変化から、固有モード形成の有無を知ることができる。GAMMA10 セントラル部で実験では、固有モード形成を示す伝達関数の特徴が観測されている。現在詳細な実験と解析を継続している。

E. 非等方速度分布に起因するICRF波動の自発励起

タンデムミラー装置 GAMMA10 セントラル部においては、ミラー磁場中央面付近に共鳴層を置くイオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）の高周波加熱時に、イオン温度非等方性に起因してアルベンイオンサイクロトロン（AIC）波動が自発的に励起される。AIC波動は、ミラー捕捉イオンのピッチ角散乱を引き起こし、磁力線方向に高エネルギーイオンを排出する。従って、電位の物理や電位による閉じ込め改善を目指すGAMMA10の標的プラズマの高性能化には、このAIC波動の制御は不可欠である。ICRF領域の自発励起電磁波動としては、ミラー磁場配位中のAIC波動や核燃焼プラズマで観測されるイオンサイクロトロン放射（ICE）、また、周波数は低くなるがTAEモード等のグローバルアルベン固有モード（GAE）等が報告されている。局所的なイオンの分布関数が、非一様となることによるこれらの自発励起高周波波動の共通物理を、GAMMA10装置とLHD装置、また、JT-60U装置での実験結果を比較することにより理解することが本研究の目的である。LHD装置における実験的研究に関しては、別途NIFS一般共同研究、また、JT-60U装置に関しては、日本原子力研究開発機構との協力研究を実施している。

【8】金中性粒子ビームプローブを用いた径方向電場シア効果の観測

熱・粒子輸送は核融合プラズマにおいて重要なテーマの一つである。コアプラズマから周辺プラズマへの輸送など、プラズマ中の揺動によって粒子や熱が輸送される過程は、揺動の特性やプラズマパラメータの分布によって異なるため、揺動を計測し、輸送を評価することはプラズマの状態を知り、輸送を制御する手がかりとなる。

GAMMA 10 では装置端部にイオン、及び電子の閉じ込め電位を生成し、粒子を静電的に反射させることにより、軸方向の閉じ込めを改善させている。近年、従来の 2.5 倍の出力をもつ高出力ジャイロトロンの開発の成功とその導入により、この 10 年間超えることの出来なかった「プラズマ閉じ込め電位 $\phi_c = 1 \text{ kV}$ の壁」を破り、この 10 年に比し、プラズマ閉じ込め電位が 4 倍となる 約 3 kV の新界での最高値が達成された。更に、閉じ込め電位 ϕ_c の値を、従来よりも飛躍的に大きくすることができたため、閉じ込め主要部の電位の 2 階微分である電場のシア dE_r/dr_c が従来よりも著しく大きくなった。この高電位形成により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が、2 次元 X 線断層撮像により観測されている。

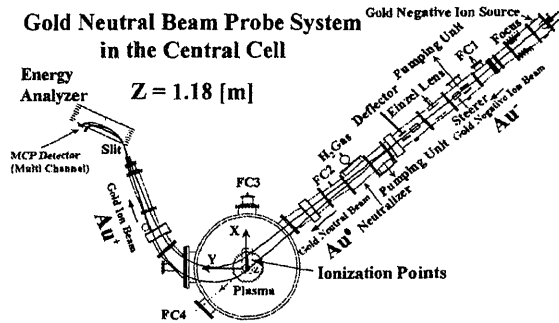


図 1. セントラル部金中性粒子ビームプローブ

電位を計測するために、GAMMA 10 では金中性粒子ビームプローブ (GNBP) を採用し計測を行っている。GNBP はプラズマの主閉じ込め領域となるセントラル部、サーマルバリアを生成するバリア部に設置されており、プラズマ外へと導出される二次ビームのエネルギー変化からコアプラズマにおけるプラズマ電位を計測し、二次ビーム強度がプラズマの密度、温度に依存することから密度に関する情報も同時に得ることができる。GNBP を利用する利点の一つに、コアプラズマの密度、電位の情報が同時にかつ独立に得られることが挙げられ、コアプラズマの密度揺動、電位揺動、及びそれらの位相差を計測し、揺動の発生、抑制に本質的な、密度分布、電場分布も同時に測定することができる。

本研究では強い径方向電場シア形成時の乱流抑制ならびにプラズマ閉じ込め改善効果を検討するために、この GNBP による径方向電場シアが強い場合と弱い場合の乱流揺動計測を行い、既設の検出器と結果の比較を行った。シアの弱い場合に存在する乱流揺動 (図 2) は、シアが強くなるに伴い、晴れ渡るように消失 (図 3) したことが確認された。これは、X 線断層撮像による結果と同じである。

参考文献

- [1] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. 94, 085002 (2005).
- [2] T. Cho et al., Nucl. Fusion 45, 1650 (2005).
- [3] Y. Miyata et al., Rev. Sci. Instrum. 77, 10E908 (2006).
- [4] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. 97, 055001 (2006).
- [5] Y. Miyata et al., Trans. Fusion Sci. Tech. 51, 298(2007).

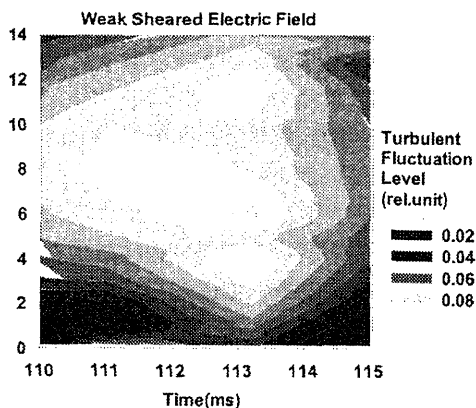


図 2. 弱い径方向電場シア形成時

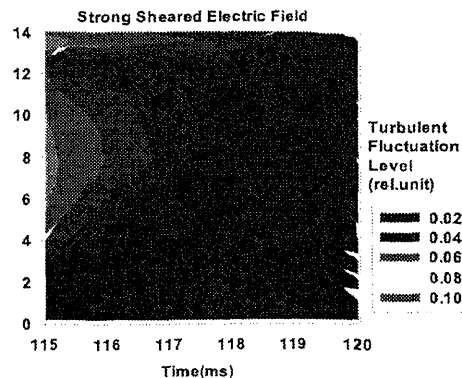


図 3. 強い径方向電場シア形成時

【9】 GAMMA 10 プラズマにおける分光計測と衝突・輻射モデルを用いた分光診断

GAMMA 10 プラズマの性能向上、特に高出力ジャイロトロンを用いた直接電子加熱によって、これまでない高電子温度が形成されることにより、不純物は容易に電離され、高電離不純物が生成されるとともに、閉じ込め性能の向上によりコア部への不純物の蓄積が起こる可能性がある。このような状態を予測、評価するためには、現状のプラズマにおける定量的な不純物密度分布、輸送過程の評価を基盤とした研究が必須である。また、GAMMA 10 では電位閉じ込めの普遍的物理基盤・物理機構の研究により、国際熱核融合実験炉 (ITER) を含む核融合プラズマ研究への貢献をしている。このような研究において、電場分布計測は必須であり、電場分布計測手法の開発は重要な課題である。

本研究では、GAMMA 10 における不純物密度分布の絶対値測定を基盤とし、開放端磁場中の不純物粒子の挙動の研究を行った。まず、GAMMA 10 プラズマ診断に適した衝突・輻射モデルを核融合科学研究所との共同研究において独自に構築し、GAMMA 10 プラズマ診断に初めて適用した。さらに、衝突・輻射モデルを用いた不純物診断の結果を応用し、分光測定に基づく

軸対称プラズマ中の電場分布計測手法の開発を行い、新手法として確立した。衝突・輻射モデルは水素原子、水素様イオン、ヘリウム様イオン、水素分子等の開発が行われてきており、OV 以上については比較的详细なモデルが構築されていたが、低電離酸素イオンについて GAMMA 10 プラズマ診断に適用可能なモデルが確立していなかった。そこで、本研究では核融合科学研究所との共同研究により、低電離酸素イオン (OII、OIII 及び OIV) の衝突・輻射モデルを独自に構築した。図 1 に、新規構築した衝突・輻射モデルにより得られた、 $n_e = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、 $T_e = 100 \text{ eV}$ の電離進行プラズマにお

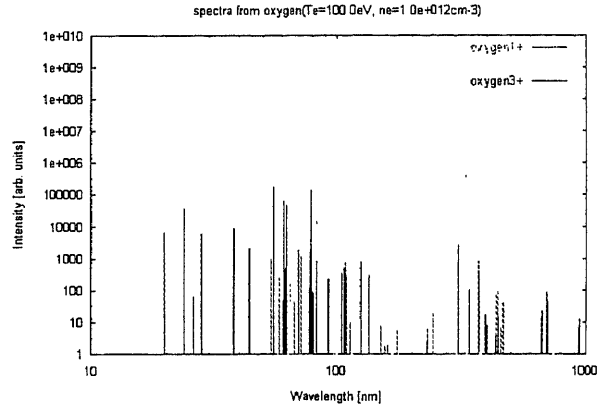


図 1 衝突・輻射モデルより得られた、電離進行プラズマからの放射。

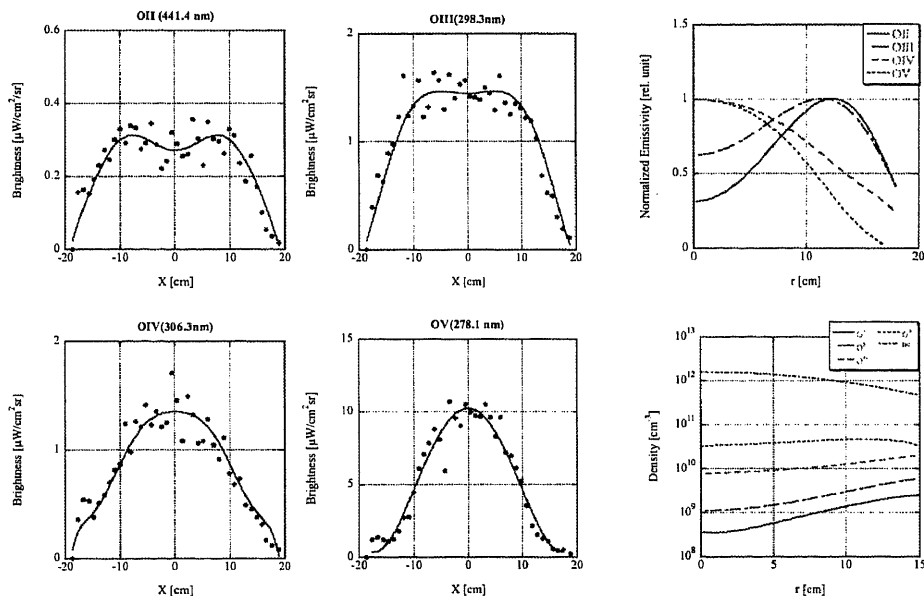


図 2 酸素イオンスペクトル計測結果および衝突・輻射モデルを用いて導出した密度分布

る低電離酸素イオンからの放射輝度を示す。以上により、炭素イオン密度分布の解析に加え、低電離酸素イオン密度分布の解析が可能となり、GAMMA 10 不純物診断に初めて適用した。GAMMA 10 センtral部における酸素イオンスペクトルは OII、OIII、OIV 及び OV が全て紫外・可視域で観測され、強度も炭素より強い為、酸素イオンの密度分布を評価することで、より詳細に不純物イオンの挙動を知ることができる。酸素イオンについての計測も炭素と同様に、高温イオンモードの電子サイクロトロン共鳴加熱（ECRH）を印加していないターゲットプラズマについて行い、放射輝度分布、体積放射率分布、密度分布を各価数において評価した。図 2 にその結果を示す。得られた密度分布は、すでに示した炭素の高電離イオンについての推定結果と非常に類似しており、本研究における不純物電離・輸送モデルの妥当性を支持する結果といえる。

電位閉じ込めの普遍的物理基盤・物理機構の研究において、電場分布計測は必須であり、電場分布計測手法の開発は重要な課題といえる。本研究では、上述の衝突・輻射モデルを用いた不純物診断の結果を応用し、分光測定に基づく軸対称プラズマ中の電場分布計測手法の開発を行った。軸対称プラズマ中の不純物イオンの回転は、不純物イオン温度の勾配を無視すると以下で与えられる。

$$v_{\alpha}(r) = \frac{E(r)}{B(r)} - \frac{k_B T_{\alpha}}{Z_{\alpha} e B(r) n_{\alpha}(r)} \frac{1}{dr} \frac{dn_{\alpha}(r)}{dr}, \quad (1)$$

ここで、第 1 項は $E \times B$ ドリフトを、第 2 項は反磁性ドリフトを表す。本研究では不純物密度分布を計測と衝突・輻射モデルから定量的に導出している為、反磁性ドリフト項が評価できる。また、左辺の回転速度は不純物スペクトルのドップラーシフトから評価でき、磁場強度 B は機知であるため、電場 E が原理的に導出可能である。また、計測されるスペクトルは視線積分された結果である為、繰り返し計算による再構成法を構築した。これまでに、CII スペクトルのドップラーシフト及び密度分布計測により、本計測の原理実証実験を行い、既存の計測手法であるビームプローブ（BP）の電位計測結果と比較を行った結果、本計測法が電場分布計測手法として有効であることが実証されている。本研究では、高温イオンモードにおいて ECRH を印加せず、電場の小さい放電条件において計測を行う為、CII よりも放射輝度が大きく、S/N の良い酸素イオンスペクトルを用いて計測を行った。これは本研究において低電離酸素イオンの衝突・輻射モデルを構築することにより始めて可能となった成果である。計測には広い放射輝度分布を持ち、イオン温度が比較的小さいことから反磁性ドリフトの影響が小さい、OIII スペクトルを用いた。さらに、ドップラーシフトの計測精度を向上させるため、イメージ検出システムを新規構築し、約 2 倍の波長分解能を得た。以上の成果により得られたドップラーシフトと電場分布を図 3 に示す。本計測により、非常に弱い電場分布形成時の分布が初めて分光計測により推定された。本計測の利点は、ビームプローブや荷電交換再結合分光と比較して、ビームを必要としないこと、磁場強度の制限を受けないこと、システムが比較的小型かつ安価であることなどが挙げられる。本計測法を様々な領域での計測に適用することで、今後の電位閉じ込めの普遍的物理基盤・物理機構の研究が進展すると考えられる。

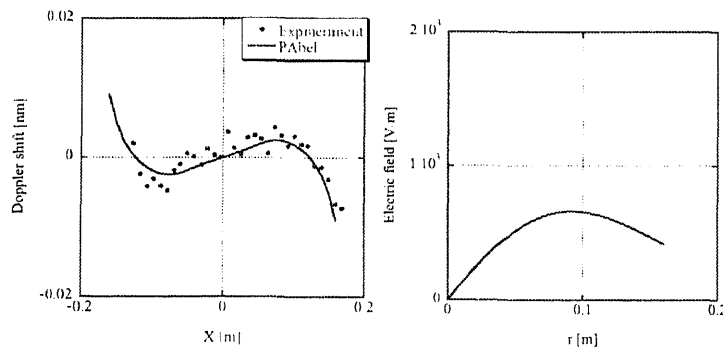


図 3 弱い電場の計測結果

【10】核融合プラズマにおける粒子補給用定常ペレット入射の研究

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、プラズマ粒子補給が重要となる。プラズマ粒子補給詳細制御法の一つとして、ペレット入射法が有効であり、ペレットの輸送を行うガイドチューブ内でのペレットの損耗過程、輸送メカニズム等に関する研究が重要である。さらに、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。本研究ではペレット装置における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した。特に、ペレットのガイドチューブ内での形状、速度、質量計測器の開発を行った。また、ペレット入射によるタンデムミラープラズマガンマ10における高密度プラズマ生成を行なうことにした。

これまでに製作してきたペレット計測システムを用いてプラズマ入射直前のペレットの測定をガンマ10で行なった。図1にガンマ10におけるペレット入射実験時の測定データを示す。図2にペレット入射器射出直後のペレットの写真(a)、ガンマ10入射直前のペレット写真(b)を示す。この結果、これまでに構築してきたペレット第三計測部はガイドチューブ通過後のペレットの形状、速度等を十分測定可能であることが確認できた。今後、この測定装置を用いて、ガイドチューブ内で損耗、速度の変化、形状の変化等について調べていくことにする。

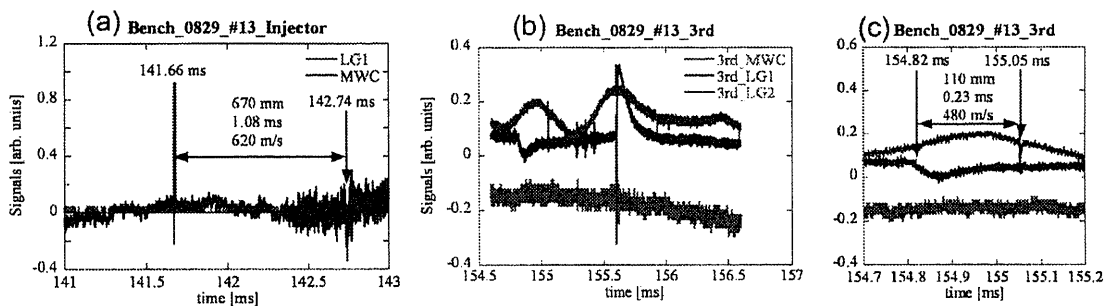


図1：(a)は、ペレット入射器射出直後のライトゲートシステムとマイクロ波質量計の信号、(b)はガイドチューブ通過後の第三計測部における、ライトゲートシステムと質量計の信号、(c)は、(b)の信号時間幅を拡大したものを示す。

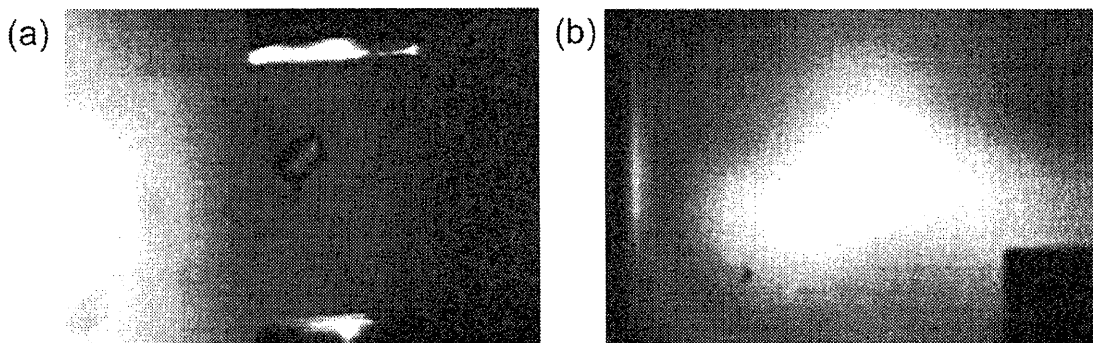


図2：(a)はペレット入射器射出直後のペレットの写真、(b)は第三計測部でのペレット写真。

一方、ガイドチューブを通過したペレットのプラズマへの入射実験をガンマ10において行い、ガイドチューブ内でのペレットの速度、質量の変化について調べた。プラズマ中に入射した場合のペレットの測定は、ペレットの入射軌道に沿って径方向に設置した $H\alpha$ 線計測器、及び、マイクロ波干渉計、高速カメラで行った。図3に、ガンマ10ペレット入射システムとガイドチューブ、計測システムについて示す。高イオン温度モードプラズマに、プラグ電位閉じ込み及びセンทรัล部電子直接加熱を行い、ペレット入射実験を行った。ガンマ10ペレット入射器は、8本

のバレルを持ち、直径 0.33, 0.58, 0.78, 0.99 mm の 4 種類の直径のペレットを作成でき、入射速度

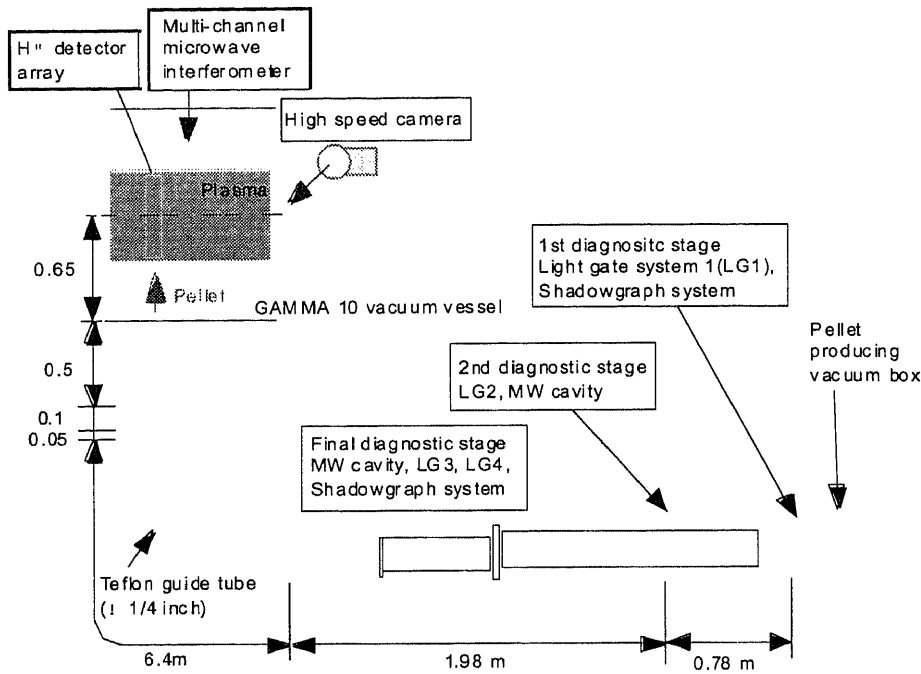


図 3 : ガンマ 10 ペレット入射システムと計測システム

は、約 500 - 1000 m/s の間で調整可能である。図 4 にペレット入射時の反磁性量と電子線密度の時間変化を示す。ペレット入射によって、電子線密度が急上昇し、反磁性量が逆に急激に減少するのがわかる。また、電位閉じ込めによって、プラズマ密度は急減した後も、ペレット入射前よりも高い値で数 ms 間維持されていることがわかる。図 5 に H α 線計測器アレイによる H α 線放射輝度の径方向分布の時間変化を示す。これを見ると、ペレットがプラズマ中に入射するとすぐに溶発している様子がわかる。これは、セントラル部に入射したセントラル部電子直接過熱によって生成された高温電子によるペレット溶発効果によると考えられる。プラズマ中に入射されたペレット速度は入射器内では、630 m/s であったものが、ガイドチューブを通過する間に、530 m/s まで減速していることがわかった。また、ペレット入射によりプラズマ密度は $1.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、従来のプラズマ密度の 5 倍程度まで急上昇していることがわかった。今後、詳細に H α 線放射、電子密度、電子温度、ペレット複合計測システムのデータを検討することにより、ペレット入射による粒子補給効率等について調べていくことにする。

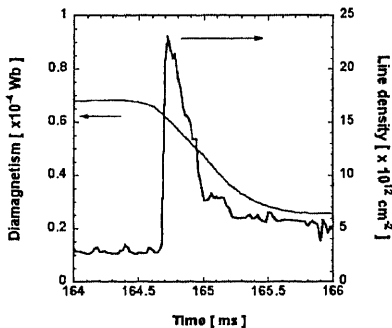


図 4 : ペレット入射時の反磁性量と電子線密度

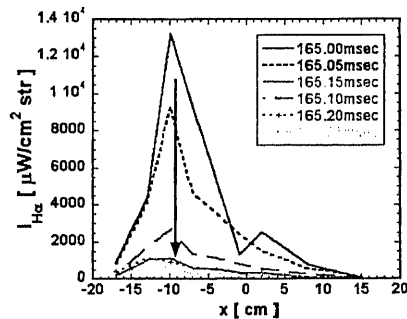


図 5 : H α 線計測器アレイによる径方向 H α 線放射輝度の時間変化

【11】多チャンネルマイクロ波干渉計による密度分布計測

ガンマ10ではマイクロ波干渉計を用いてプラズマ線密度測定を行ってきた。マイクロ波干渉計は、マイクロ波をプラズマ内部に透過させてその位相の変化を計測する。このマイクロ波干渉計は、アップコンバーターを使用したヘテロダイン型干渉計である。ガンマ10では、セントラル部、セントラル西スロート部、東西アンカー部、東西バリア部、東西プラグ部の各部にマイクロ波干渉計を設置して、それぞれの位置での線密度計測を行い、プラズマ閉じ込めとの関連を調べている。プラズマ密度測定を行う場合は、線密度の測定位置をプラズマショットごとに移動して径方向の各位置での線密度を計測し、それを Abel 逆変換して密度分布を導出する。プラズマ中の位置 y における x_1 から x_2 の距離をマイクロ波が伝搬した場合の位相の変化量 $\phi(y)$ は、次のように表される。

$$\phi(y) \cong \frac{k_0}{2n_e} \int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx \quad (1)$$

ここで、 k_0 は真空中の波数、 n_e は電子密度、 $\int_{x_1}^{x_2} n_e(r) dx$ は電子線密度である。しかし、この方法では、プラズマショットを合計 10 ショット程度必要とし、同一プラズマを繰り返し生成する必要がある。

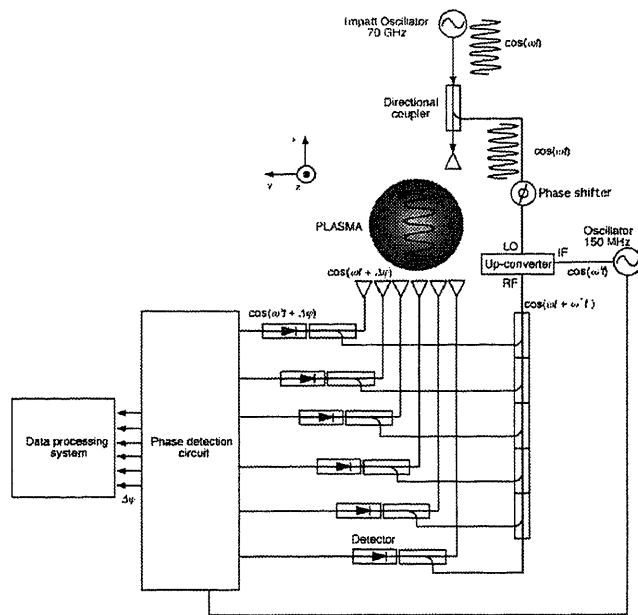


図1：多チャンネルマイクロ波干渉計概略図

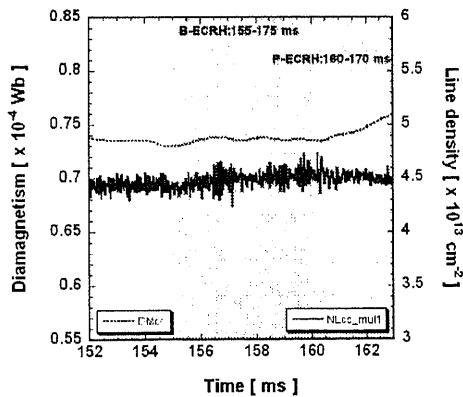


図2：高イオン温度モードプラズマの反磁性量と電子線密度

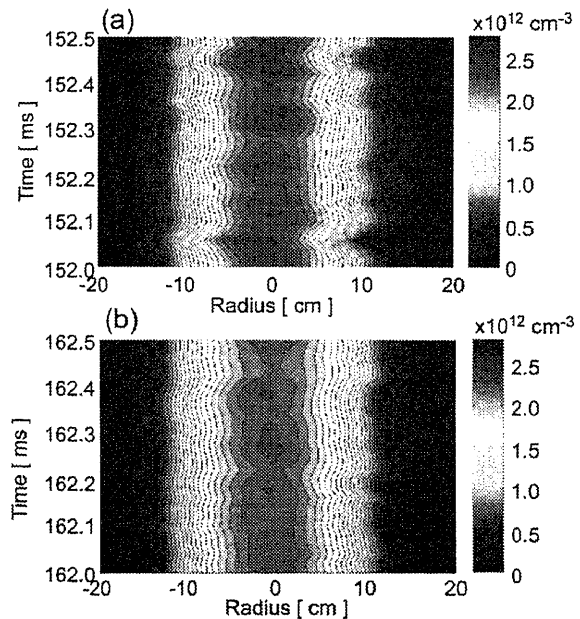


図3：電子密度の径方向分布の時間変化。(a)は電子加熱前、(b)は電子加熱中

ある。そのため、単発現象などの場合にはプラズマ密度を導出することができないという問題があった。そこで、昨年度来、多チャンネルマイクロ波干渉計を設計、設置してきた。設置したマイクロ波干渉計の概略図を図1に示す。70GHzのImpatt発振器(1W)のマイクロ波を方向性結合器で分岐して、片方を1個の送信ホーンからプラズマ中に入射し、もう片方を参照波とする。参照波は、アップコンバーターを使用して低周波発振器(150 MHz)からの出力とミックスし、6個の受信ホーンで受けたそれぞれの位置における透過波との位相差を低周波で計測できるようにする。それぞれの位置(チャンネル)に対応する位相差を位相検出回路で検出し、計測位置に対応した線密度を得る。これをAbel逆変換を用いて線密度分布から密度分布に変換して径方向径方向密度分布を得る。これまでは、送信ホーン位置を $y = 0 \text{ cm}$ に設置してきたが、本年度は、 $y = -14 \text{ cm}$ に移動して、プラズマ半径位置、 $y = -1.7 \text{ cm}$ (ch. 1)、 -3.7 cm (ch. 2)、 -6.3 cm (ch. 3)、 -9.3 cm (ch. 4)、 -11.4 cm (ch. 5)、

-14.4 cm (ch. 6)を測定できるように受信ホーンを設置した。高イオン温度モードプラズマにプラグ電子加熱によってイオン閉じ込め電位生成を行なったプラズマショットについて密度、密度揺動について調べた。図2に反磁性量と電子線密度の時間変化を示す。プラグ電子加熱によって閉じ込め電位が形成され、反磁性量が増加し、電子線密度の揺動が抑制されていることがわかる。図3に多チャンネルマイクロ波干渉計を用いて測定した電子線密度の径方向分布の時間変化を示す。(a)は152-152.5 msの電子加熱前、(b)は162-162.5 msの電子加熱中を示す。これを見ると、(b)の電子加熱中のイオン閉じ込め電位形成時に揺動が抑制されていることがわかる。今後、詳細に電位形成によるプラズマ閉じ込め改善について密度分布、密度揺動の抑制について調べていくことにする。このとき、ECRH印加により、電子密度が $4.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ まで上昇していることがわかる。また、ECRH印加によって強い揺動も観測されている。今後、より詳細な計測を行い、プラズマ電位閉じ込めと密度上昇、密度揺動について調べていくことにする。また、現在の送信ホーンの位置($y = 0 \text{ cm}$)から $y = 15 \text{ cm}$ に移動することにより、これまでは、プラズマ中心部を主に測定していたが、よりプラズマ径の外側までの広い範囲を測定できる様にする予定である。これと平行して、レンズシステムの設計を行い、空間分布測定の精度をあげることを計画している。

【12】ガンマ10におけるH α 線と高速カメラ計測、並びにモンテカルロシミュレーションに基づく中性粒子輸送解析

1. はじめに

ガンマ10では、従来の光学的な計測手法である水素のバルマー線であるH α 線計測に加え、近年新たにプラズマを視覚的に観測することのできる高速カメラを導入し、プラズマのマクロな挙動を始め周辺プラズマと対抗表面との相互作用やプラズマ揺動の計測を行ってきた。今回H α 線計測と同期した、高速カメラを用いた観測によって、より明確にプラズマの情報を得ることができるようになった。図1にガンマ10セントラル部から東アンカー部にわたるプラズマ・真空容器形状と、各部に取り付けられているH α 線計測器、高速カメラ、及び本研究で使用した装置を示している。プラズマの閉じ込めや、エネルギー収支、容器壁のリサイクリング輸送を考えるために、プラズマ中の中性粒子の情報は必要不可欠であり、ガンマ10では、先に述べたH α 線計測、高速カメラを用いた計測に加え、中性粒子モンテカルロシミュレーションコード(DEGAS)を用いて、三次元中性粒子挙動の解析を行っている。

本研究の目的は、H α 線計測・高速カメラを用いた実験結果と、それに基づくDEGASを用いた計算結果から、ガンマ10における三次元的な中性粒子輸送の解明を行なうことである。この研究によって、高速カメラを用いた計測がガンマ10プラズマの安定な閉じ込めや、中性ガスの挙動を解析する上で有効な手段であることを実証した。

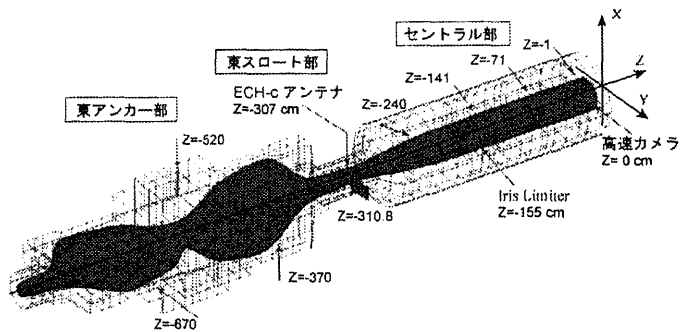


図1 ガンマ10真空容器及び計測系の配置図

2. ガンマ10セントラル部におけるH α 線計測と3次元中性粒子輸送解析

昨年度に完成した、中性粒子輸送モンテカルロコードDEGAS (Ver. 63) に用いるガンマ10セントラル部メッシュを用いて、ガスパフイメージング(GPI)実験時における中性粒子輸送シミュレーション計算を行い、H α 線放射強度のプロファイルの実測値を比較した。図2の上図は、制作したセントラル部の完全3次元体系のメッシュモデルである。円筒形の真空容器壁内に独立したリミター、ICRFアンテナ、ガスボックスなどが実物に即した形状でモデリングされている。これにより、NBIやガスパフ、ペレット入射など、局所的で非対称な粒子源に対応したシミュレーションが可能になった。図2下の右側の図は、上記モデルを用いたシミュレーション結果であり、左側の写真に示す高速カメラによって観測されたプラズマ発光の2次元イメージを非常に良く再現出来ていることが分かる。これによって、同部でのNBI実験や局所ガスパフ実験(ガスパフイメージング, GPI)の解析基盤を確立することが出来た。

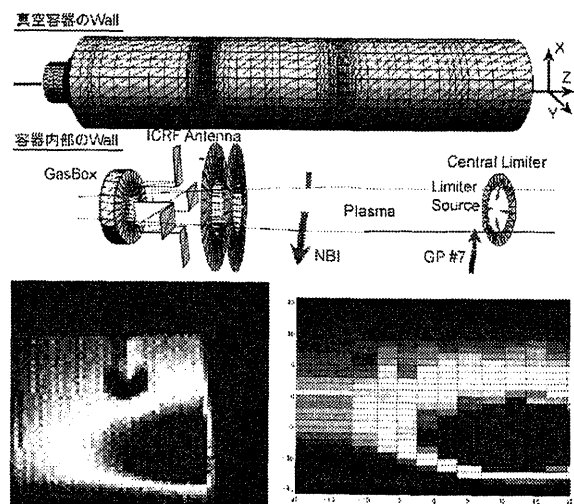


図2 上図: ガンマ10セントラル部の3次元メッシュモデル, 下図左: セントラル部GPI実験の2次元イメージ図, 下図右: シミュレーション結果

3. 高速カメラを用いたGAMMA 10セントラル部プラズマ計測

昨年度から開始された、高速カメラ (Photron, Fastcam Ultima SE, 及び NAC, MEMORECAM fx-K4) を用いた、セントラル部プラズマの高時間分解画像測定を、今年度も引き続いて行い、加熱系に対する応答やガスパフ依存性、ペレット入射等についてのデータを収集することが出来た。図3は、セントラル部中央における真空容器断面上での高速カメラの配置と、同部真空容器の内部写真を示す。高速カメラは、セントラル部リミター (内径φ360mm) と下部から入射されるガスパフ (GP#7) 及び、ペレット入射口を臨む形で、設置されている。これまでに、加熱系入射 (特にセントラル部 ECH) に伴うプラズマとリミターとの相互作用によるリミター周辺での発光現象について、反磁性量との相関や壁コンディショニングとの関連から、加熱系印加に伴うリサイクリングの増加はプラズマカラムの回転や振動などについての知見が得られた。

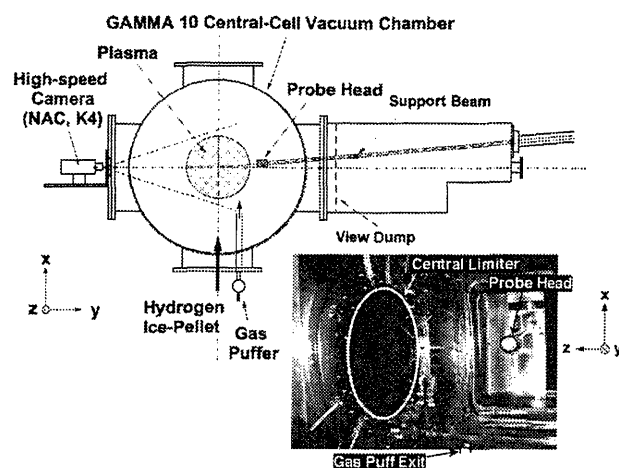


図3 セントラル部真空容器断面上における高速カメラの配置と同部真空容器の内部写真

図4は、セントラル部中央の下部から固体水素ペレットを入射した際の、高速カメラによる観測した溶発光を示している。図から判るように、ペレット入射に伴う溶発光の軸方向への拡散する様子や磁力線に沿って発光部分の興味深い構造の明瞭な視覚化に初めて成功した。本ペレット入射実験では、セントラル部 ECH による電子加熱の有無でのプラズマ中へのペレット侵入長の違いが明らかになり、ECH により加熱された電子が、固体水素ペレットの溶発に寄与していること、並びにそれに伴う電子密度の上昇に有意な差が認められていることから、ペレット溶発効率に対する ECH の効果が確認されている。

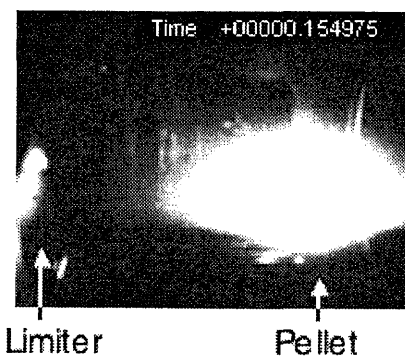


図4 ペレット入射実験時に高速カメラで観測されたペレットの溶発光

- [1] Y. Nakashima, *et al.*, 17th Int. Conf. Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (May 22-26, 2006, Hefei, China). [発表論文が J. Nucl. Mater. 誌に掲載決定]
- [2] Y. Nakashima, *et al.*, 6th Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (July 17-21, 2006, Tsukuba, Japan). [Trans. Fusion Sci. Technol. 51 No.2T (2007) 82.]
- [3] Y. Higashizono, Y. Nakashima, *et al.*, 同上 [Trans. Fusion Sci. Technol. 51 No.2T (2007) 367.]
- [4] N. Nishino, Y. Nakashima, *et al.*, Plasma and Fusion Res. 1, 035 (2006).
- [5] 中嶋洋輔, 第21回トリアム研究会, 2006年8月, 九大応力研
- [6] 東園雄太, 中嶋洋輔, 他 プラズマ・核融合学会第23回年会, 2006年11月, 筑波 29aB12P.
- [7] 久保田雄介, 吉川正志, 中嶋洋輔, 他 プラズマ・核融合学会第23回年会, 2006年11月, 筑波 29aB14P.
- [8] 西野信博, 中嶋洋輔, 他 プラズマ・核融合学会第23回年会, 2006年11月, 筑波 30pB06.
- [9] 河野博一, 中嶋洋輔, 他 プラズマ・核融合学会第23回年会, 2006年11月, 筑波 01aC05P.
- [10] Y. Nakashima, *et al.*, 16th Int. Toki Conf. (December 5-8, 2006, Toki, Japan).
- [11] N. Nishino, *et al.*, 16th Int. Toki Conf. (December 5-8, 2006, Toki, Japan).
- [12] Y. Higashizono, Y. Nakashima, *et al.*, 16th Int. Toki Conf. (December 5-8, 2006, Toki, Japan).
- [13] H. Kawano, Y. Nakashima, *et al.*, 16th Int. Toki Conf. (December 5-8, 2006, Toki, Japan).
- [14] 中嶋洋輔, 第22回トリアム研究会, 2006年12月, 九大応力研

【13】 直接エネルギー変換装置のガンマ10への適用

1. はじめに

D-³He 核融合炉から流出する荷電粒子を直接エネルギー変換する場合、装置内における荷電分離が課題となる。神戸大学工学部では、直接エネルギー変換装置 (Kobe-cusp) を設計・製作し、電子、熱イオンに着目し、カusp磁場により分離する模擬実験を行われてきた。昨年度より筑波大、神戸大、核融合研の間の双方向型共同研究に基づいて、Kobe-cusp をGAMMA10 エンド部に設置し、タンデムミラーからの漏洩粒子の分離実験を開始した。Kobe-cusp はGAMMA10 西エンド部の左下部のフランジの下流に設置した。GAMMA10 の磁力線の計算結果に基づいて傾斜させた架台を設計・製作し、その上にGAMMA10 から漏洩する端損失粒子をKobe-cusp に導入する延長ダクトを設置した。

図1は、ガンマ10西エンド部真空容器とKobe_Cusp本体及び延長ダクト部の概略図を示す。GAMMA10 エンド部付近での垂直方向の磁場強度は、延長ダクト入り口付近約80G、Kobe-cusp 本体入り口付近では約30Gである。GAMMA10 エンド部からの端損失粒子は磁力線に巻きくように運動しており、ダクトの内径と長さを考えた場合、導入した粒子はKobe-cusp に到達できない。そのためダクト内に磁場をつくることによって端損失粒子をKobe-cusp により多く導くためのガイド磁場コイルをダクトに合わせ設計し設置した。これにより、端損失粒子をKobe-cusp へ引き込むことができるようになった。

図2は、DEC前面のチャンバー内に設置した端損失粒子分析器を用いて測定した端損失電子電流のガイド磁場依存性を示している。図から判るようにガイド磁場が4A以上で、電子電流の大幅な増加が認められるようになり、ガイド磁場により端損失粒子が効率よくDECに誘導されていることが判った。また、今回のガイド磁場を用いることによって、端損失粒子検出器を用いて、イオンの磁力線方向に沿ったエネルギーの計測が可能になった。

図3は、DECの後部 (ポイントカusp部) に設置されている荷電粒子収集用電極にネオン球を接続し、ガンマ10から端損失してくる荷電粒子 (イオン流) を導いて発電し、ネオン球を点灯させることに成功した際の写真を示す。

[1] Y. Yasaka, *et al.*, 6th Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (July 17-21, 2006, Tsukuba, Japan). [Trans. Fusion Sci. Technol. 51 No.2T (2007) 171.]

[2] 鈴木未来, 中嶋洋輔, 他 プラズマ・核融合学会第23回年会, 2006年11月, 筑波29aB09P.

[3] 八坂保能, 他 プラズマ・核融合学会第23回年会, 2006年11月, 筑波30pB05.

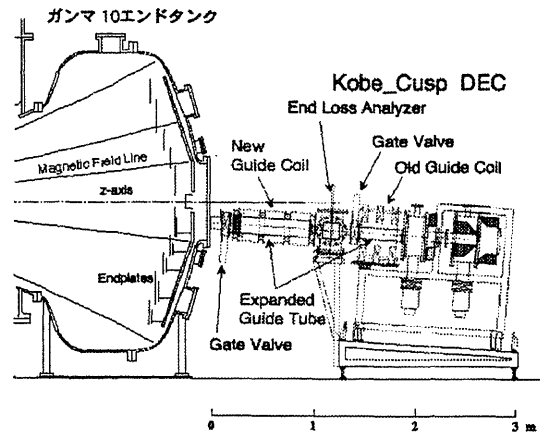


図1 ガンマ10西エンド部真空容器及びDECの配置図

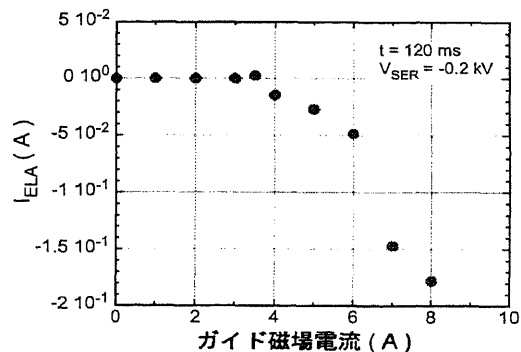


図2 前置端損失粒子検出器を用いたガイド磁場の効果

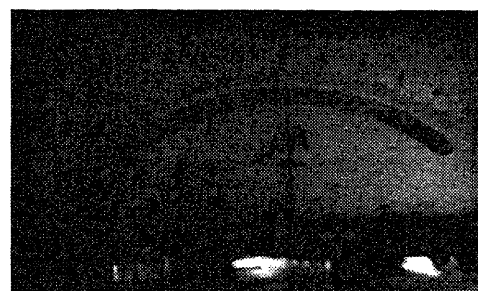


図3 ガンマ10からの端損失粒子により、点灯させたネオン球の写真

【14】ダイバータ磁場配位での交換型モード安定性の運動論的解析、および粒子軌道解析に関する研究

我々のグループはタンデムミラー GAMMA10 の波動加熱、静電位形成、新古典共鳴拡散、電位の非等方性に起因する粒子径方向輸送、ダイバータ磁場配位設置に関する設計等の研究を行なっている。

平成 18 年度は主としてダイバータ磁場に関する安定性解析、ダイバータ磁場の磁場零近傍の粒子軌道解析に関する研究を行なった。

1. ダイバータ磁場配位での交換不安定性の基礎方程式の導出

ダイバータ磁場配位での安定化機構は磁力線の良い曲率とイオンの有限ラーモア半径効果である事が期待されるので、そのための安定性解析にはブラソフ方程式を用いる必要がある。ダイバータ磁場の安定性解析に関しては B. Lane, R. S. Post, and J. Kesner, Nucl. Fusion 27, 227(1987) および V.P.Pastukhov and A. Yu.Sokolov, Sov.J. Plasma Phys. 17(1991)603 の論文があるが、それらはマックスウェル分布をしたイオンと電子を仮定して方程式の導出と解析が行なわれている。しかし彼らの解析ではイオンが非等方マックスウェル分布である事が予想される GAMMA10 ダイバータ磁場配位に対する交換型モード解析には適用できない。

従って、本研究において、上記論文で用いられた方法を利用して bi-Maxwellian プラズマに対して適用できる基礎方程式を導出した。

この基礎方程式は "Magnetic-divertor Stabilization of an Axisymmetric Plasma with Anisotropic Temperature" Y.Sasagawa, I.Katanuma, Y.Mizoguchi, T.Cho, V.P.Pastukhov, Physics of Plasmas, Vol.13, No.12, 122506 (2006) (10 pages) に掲載された。

我々の導出した基礎方程式は $T_{i\perp} = T_{i\parallel}$ の等方イオン分布関数の場合は V.P.Pastukhov and A. Yu.Sokolov, Sov. J. Plasma Phys. 17 (1991) 603 の論文結果と完全に一致する。従ってここで導出した式はその論文をより一般的に拡張した方程式になっている。特に今年度はこの基礎方程式を実際のダイバータ磁場配位に適用して安定性境界を導出した。

2. ダイバータ磁場配位での交換不安定性境界の数値解析

この節では前節で導出した基礎方程式をダイバータ磁場配位に適用して、安定性境界を実際に決定した。以下にその計算例を紹介する。

ダイバータ配位のモデル磁場として次の式を用いた。

$$B_z = B_0 \left(1 - \frac{1}{I_0 \left(\pi \frac{R_s}{L} \right)} I_0 \left(\pi \frac{r}{L} \right) \cos \left\{ \pi \frac{z}{L} \right\} \right), \quad B_r = -B_0 \frac{1}{I_0 \left(\pi \frac{R_s}{L} \right)} I_1 \left(\pi \frac{r}{L} \right) \sin \left\{ \pi \frac{z}{L} \right\}, \quad (1)$$

このモデル磁場配位は V.P.Pastukhov and A. Yu.Sokolov, Sov. J. Plasma Phys. 17 (1991) 603 の論文で採用されていた磁場配位である。

この計算で用いる密度と温度の径方向分布は

$$n_i(\psi) = n_{i0} \left(1 - \frac{\psi}{\psi_s} \right) \exp \left\{ -\gamma_D \frac{\psi}{\psi_s} \right\}, \quad T_{i\perp}(\psi) = T_{i\perp 0} \left(1 - \alpha_T \frac{\psi}{\psi_s} \right), \quad (2)$$

を仮定した。ここで密度と温度分布は $\psi = \psi_s$ の磁場零の径方向位置で零になるように選んでいる。 γ_D と α_T が密度分布を温度分布を変える定数パラメータである。

図 1(a), (b) は安定性解析の数値計算結果である。図 1(a) 中の a は密度の径方向半値幅である。また ρ_i はダイバータミラー磁場の軸上中央部でのイオンラーモア半径である。図 1(a) はイオン温度が径方向に一様であると仮定したときの計算結果であり、特に a/R_s つまり密度の半値幅がある程度以上大きくなると、イオン温度が零、つまりイオン有限ラーモア半径効果がなくても、ダイバータ磁場中でプラズマが交換型モードに対して安定化されることを示している。しかし温度分布が存在すると交換型モードが直ちに不安定化

することが図 1(b) で示された。この結果から、温度と密度の径方向分布が交換型モードの安定化に大きな効果のある事がはじめて示された。

この節の結果は Y.Sasagawa, I.Katanuma, Y.Mizoguchi, T.Cho, V.P.Pastukhov, Physics of Plasmas, Vol.13, No.12, 122506 (2006) (10 pages) に掲載されている。

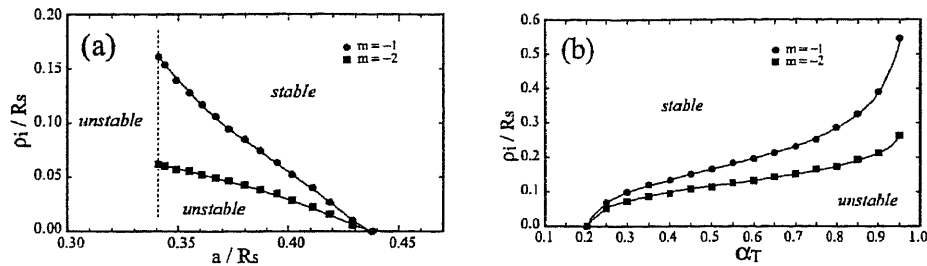


図 1:

3. ダイバータ磁場配位における X-point 近傍の粒子軌道解析の研究

ダイバータ磁場は磁場がゼロになる領域(ヌル点)を持ち、その領域に粒子が進入した場合粒子の断熱不変量の一つである磁気モーメントが保存されない為、粒子がヌル点を通って径方向に損失してしまう可能性がある。そこで、粒子がヌル点領域に進入した場合の軌道を解析し、粒子の径方向損失領域(径方向ロスコーン)の導出を行った。

軌道解析に用いたヌル点に進入する粒子の運動方程式は、軸対称磁場 ($\mathbf{B} = B(r, z) = \nabla \times A_\theta \hat{e}_\theta$) 中の荷電粒子のラグランジアン $L = T + \frac{q}{c} \mathbf{A} \cdot \mathbf{v} = \frac{m}{2}(r^2 \dot{\theta}^2 + \dot{r}^2 + \dot{z}^2) + \frac{q}{c} A_\theta r \dot{\theta}$ から、Hamilton の原理よりオイラー方程式 $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$ を用い導出された。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad r \frac{d\theta}{dt} = -\frac{q}{mcr} (\Psi - \Psi_0) \quad (3)$$

ここで $\Psi = \Psi(r, z) = r A_\theta = \int_0^r B_z(r', z) r' dr'$ 、 $\Phi = \frac{q^2}{2m^2 c^2} \left(\frac{\Psi - \Psi_0}{r} \right)^2$ である。上記の運動方程式は擬ポテンシャル Φ 中の粒子の運動を表している。この方程式に基づいて粒子の初期座標、ピッチ角、運動エネルギーを変えながら粒子軌道を追い、ヌル点を通じて壁方向に損失する粒子のロスコーンを求めた。

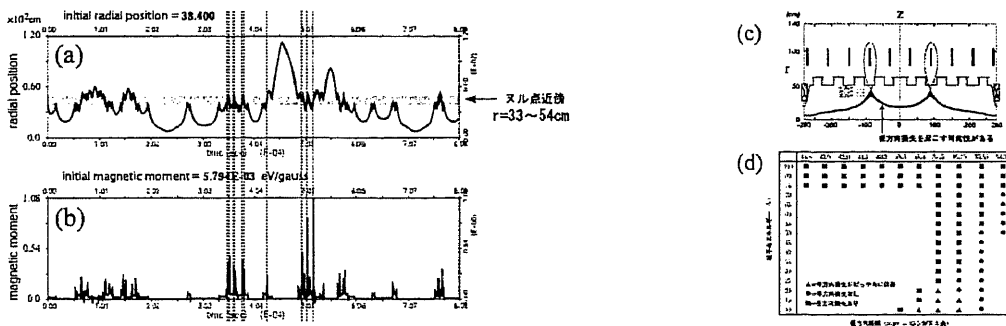


図 2: イオンの径方向位置 (a) と磁気モーメントの時間変化 (b) イオンの径方向損失領域

まず図 2(a), (b) に GAMMA10 ダイバータ磁場配位 [図 2(c)] での磁気モーメント保存の破れの様子を示した。粒子がヌル点の領域に進入すると、磁場の急勾配の影響を受けて図のように保存が破れている。

図 2(c), (d) に粒子の径方向損失をまとめた。図からわかる通り、粒子の初期位置及び運動エネルギーに依存して損失の割合が大きくなる事がわかる。しかしエネルギーが低く初期位置がヌル点から遠い粒子でも損失が起きている場合も確認できた。これにより径方向損失の要因として粒子のジャイロ位相も考慮する必要がある事が明らかになった。

【15】理論・シミュレーション解析

1. マイクロ波反射法における高温電子の相対論的効果

マイクロ波反射法はプラズマ密度分布や密度揺動計測の研究において重要な役割を担っている。最近では超短パルス反射法やドップラー反射法、イメージング反射法等の新たな手法も開拓され、今後益々重要な計測法になってくると予想される。このマイクロ波反射法をITERのような超高温の核反応プラズマに適用するに当たっては、従来のスキームでは不完全であり補正を必要とする。即ち、電子が10keV以上の超高温になると、電子の相対論的効果を取り入れる必要がでてくる。これは相対論的効果で電子質量が重くなり、これからカットオフに対応する電子プラズマ周波数が実効的に小さくなるため、この相対論効果で電磁波の反射点がずれることになる。

本研究では、先ず2次元のFDTDシミュレーションによって電子の相対論的効果による電磁波の反射点のシフトをOとXの両モードに対して解析し、これに関する理論の予測値と一致することを確認した。次に、電子の相対論的効果を取り入れたOモード利用超短パルス反射法に関する1次元FDTDシミュレーションを実施して、アーベル逆変換を用いたプラズマ密度分布の再構成の解析を行った。また、この電子の相対論的効果によるカットオフのシフトを利用したプラズマの電子温度分布を求めた新しい計測法についても提案を行った。

2. ECRプラズマにおける表面波の解析

これまでプロセスプラズマの生成・加熱研究に関連して表面波の研究を進めてきたが、これまでは無磁場のプラズマであった。この他にも、表面波によるプロセスプラズマの生成・加熱に外磁場によるECR効果も重畳させるという試みも企業等で研究されている。しかしながら、外磁場を有するECRプラズマにおいて非磁化プラズマ中の表面波の伝搬特性がどのような影響を受けるかについては十分には解析されていないように思っている。本研究では、磁化プラズマ中においていわゆる表面波の伝搬特性がどのようなものになるかについて解析する。簡単のため、外磁場及びプラズマとも一様であると仮定して、表面波がプラズマとクォーツ板との境界周辺にエバネッセント波として局在化するための条件を導出した。このとき、非磁化プラズマの誘電関数 $\epsilon(\omega)$ を磁化プラズマの誘電テンソルで置き換えた波動方程式が発点となり、磁場方向を波の伝搬方向にとった場合、TMモードが磁化プラズマ中でエバネッセント波になる条件として

$$\left[\lambda^2 - k_0^2 \epsilon_2 \right] \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} > 0, \quad k_0 = \frac{\omega}{c}, \quad \epsilon_1 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{ce}^2}, \quad \epsilon_2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$$

が得られる。ここで、 ω_{pe} は電子プラズマ周波数、 ω_{ce} は電子サイクロトロン周波数、また λ は径方向の波数である。外磁場がゼロの場合、上式は明らかに従来の表面波の条件に帰着する。TMモードに対する表面波の分散式を求めて、磁化プラズマ中の表面波の伝搬特性が電子サイクロトロン周波数 ω_{ce} の影響によってどのように変わるかを明らかにした。

その他、微分方程式ソルバを利用したプロセスプラズマの生成・加熱のシミュレーション研究やこれまでのプラズマ計測技術を応用したミリ波を利用した異物混入検査システムの開発に関するシミュレーション研究等を行った。

<論文>

- 01 T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, M. Hirata, H. Higaki, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K. Md. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, R. Minami, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, O. Watanabe, M. Yoshikawa, A. Kojima, Y. Miyake, Y. Miyata, K. Shimizu, Y. Tomii, M. Yoshida, K. Sakamoto, T. Imai, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, and GAMMA 10 Group,
Observation and Control of Transverse Energy-Transport Barrier due to the Formation of an Energetic-Electron Layer with Sheared ExB Flow,
Physical Review Letters **97**, 5 (2006) 055001-1-4.
- 02 R. Kumazawa, T. Mutoh, K. Saito, T. Seki, Y. Nakamura, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, K. Ohkubo, Y. Takeiri, Y. Oka, K. Tsumori, M. Osakabe, K. Ikeda, K. Nagaoka, O. Kaneko, J. Miyazawa, S. Morita, K. Narihara, M. Shoji, S. Masuzaki, M. Goto, T. Morisaki, B. J. Peterson, K. Sato, T. Tokuzawa, N. Ashikawa, K. Nishimura, H. Funaba, H. Chikaraishi, T. Watari, T. Watanabe, M. Sakamoto, M. Ichimura, Y. Takase, T. Notake, N. Takeuchi, Y. Torii, F. Shimpo, G. Nomura, C. Takahashi, M. Yokota, A. Kato, Y. Zhao, J. G. Kwak, J. S. Yoon, H. Yamada, K. Kawahata, N. Ohyabu, K. Ida, Y. Nagayama, N. Noda, A. Komori, S. Sudo, O. Motojima and LHD experiment group,
Long Pulse Plasma Discharge on the Large Helical Device,
Nuclear Fusion **46**, 3 (2006) S13-S21.
- 03 Kikuchi M, Tamai H, Matsukawa M, Fujita T, Takase Y, Sakurai S, Kizu K, Tsuchiya K, Kurita G, Morioka A, Hayashi N, Miura Y, Itoh S, Bialek J, Navratil G, Ikeda Y, Fujii T, Kurihara K, Kubo H, Kamada Y, Miya N, Suzuki T, Hamamatsu K, Kawashima H, Kudo Y, Masaki K, Takahashi H, Takechi M, Akiba M, Okuno K, Ishida S, Ichimura M, Imai T, Hashizume, Miura Y, Horiike H, Kimura A, Tsutsui H, Matsuoka M, Uesugi Y, Sagara A, Nishimura A, Shimizu A, Sakamoto M, Nakamura K, Sato K, Okano K, Ida K, Shimada HR, Kishimoto Y, Azechi H, Tanaka S, Yatsu K, Yoshida N, Inutake M, Fujiwara M, Inoue N, Hosogane N, Kuriyama M, Ninomiya H ,
Overview of the National Centralized Tokamak programme,
Nuclear Fusion **46**, 3 (2006) S29-S36.
- 04 I. Katanuma, Y. Sasagawa, Y. Tatematsu, Y. Nakashima, T. Cho and V. P. Pastukhov,
Magnetic divertor design in GAMMA 10 central cell,
Nuclear Fusion **46**, 5 (2006) 608-617.
- 05 O. Watanabe, T. Watanabe, K. Ogura, T. Imai, and T. Cho,
Numerical Study of Electromagnetic Surface Wave on Corrugated Metal Surface,
Plasma and Fusion Research **1**, (2006) 025-1-2.
- 06 H. Higaki, M. Ichimura, D. Inoue, K. Nakagome, Y. Yamaguchi, S. Kakimoto, R. Kumazawa, T. Watari, T. Mutoh, T. Seki, K. Saito,
High frequency Alfvén eigen modes observed in LHD,
Plasma and Fusion Research **1**, (2006) 034-1-2.
- 07 N. Nishino, Y. Nakashima, Y. Higashizono, S. Kobayashi, K. M. Islam, Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Mishima, T. Cho,
First observation of plasma motion in GAMMA 10 using fast camera,
Plasma and Fusion Research **1**, (2006) 035-1-2.
- 08 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, K. Nakagome, K. Nemoto, M. Katano, H. Nakajima, A. Fukuyama, T. Cho,
Eigenmode formation of $m=1$ fast Alfvén waves in the ion-cyclotron frequency range in the GAMMA 10 central cell,
Plasma Physics and Controlled Fusion **48**, 8 (2006) 1155-1163.
- 09 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K. Md. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, O. Watanabe, Y. Kubota, T. Kobayashi, Y. Yamaguchi, Y. Higashizono, Y. Miyata, H. Saimaru, A. Mase, Y. Yasaka, A. Kojima, M. Yoshida, W. Horton, T. Imai, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, and GAMMA 10 Group,
Progress in Potential Formation and Radial-Transport-Barrier Production for Turbulence Suppression and Improved Confinement in GAMMA 10,
21th IAEA Fusion Energy Conference, (2006) IAEA-CN-149/EX/P7-14.
- 10 M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Nemoto, M. Katano, M. Ishikawa, S. Moriyama, T. Suzuki,
Observation of Spontaneously Excited Waves near the Ion Cyclotron Range of Frequency on JT-60U,
21th IAEA Fusion Energy Conference, (2006) IAEA-CN-149/EX/P6-7.
- 11 Y. Tatematsu, N. Machida, T. Saito, K. Nozaki, D. Nagai, M. Nakamura, T. Kaitsuka, Y. Kamata, O. Watanabe, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Imai and T. Cho,
Improvement of Power Transmission for Fundamental Electron Cyclotron Resonance Heating System in GAMMA 10 Central Cell,
Japanese Journal of Applied Physical **45**, 10A (2006) 7911-7913.
- 12 Y. Yasaka, A. Sakae, N. Sugimoto, H. Takeno, and H. Hojo,
Spatial Structure of Waves and Plasma Uniformity in Planar Microwave Discharges,
Japanese Journal of Applied Physical **45**, 10B (2006) 8059-8064.
- 13 M. Hirata, Y. Miyake, T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, K. Shimizu, M. Ito, S. Kiminami, N. Morimoto, K. Hirai, T. Yamagishi, Y. Miyata, Y. Nakashima, S. Miyoshi, K. Ogura, T. Kondoh, T. Kariya,
Simultaneous measurements of ion and electron currents using a novel compact electrostatic end-loss-current detector,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10E719-1-3.
- 14 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, K. Nakagome, K. Nemoto, M. Katano, H. Nakajima, A. Fukuyama, T. Cho,
Active Diagnostics of the Eigenmode Formation in the Ion-Cyclotron Frequency Range in the GAMMA 10 Central Cell,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10E904-1-3.

- 15 M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, A. Nakahara, N. Yanagi, A. Itakura, H. Hojo, T. Kobayashi, K. Matama, Y. Tatematsu, T. Imai, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Nakashima, and T. Cho,
Electron Density Fluctuation Measurements Using a Multichannel Microwave Interferometer in GAMMA 10,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10E906-1-3.
- 16 Y. Miyata, K. Ishii, A. Kojima, S. Fujimoto, T. Yamaguchi, N. Kaidou, H. Kakiuchi and T. Cho,
Measurement of plug potential bounce ion in the tandem mirror GAMMA 10,
Review of Scientific Instruments **77**, (2006) 10E908-1-3.
- 17 A. Mase, Y. Yokota, K. Uchida, Y. Kogi, N. Ito, T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Nagayama, H. Hojo,
Remote Experiment of Ultrashort-Pulse Reflectometry for Large Helical Device Plasmas,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10E916-1-3.
- 18 K. Matama, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Kubota, and T. Cho,
Measurements of impurity spectra using UV/visible spectroscopic system in a GAMMA 10 plasma,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10F103-1-3.
- 19 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, Y. Miyata, Y. Tomii, Y. Miyake, S. Kiminami, K. Shimizu, N. Morimoto, M. Itou, K. Ogura, T. Imai, and S. Miyoshi,
Experimental Estimation of the Local Energy Balance of the Potential-Confining Electrons in Tandem-Mirror Plasmas,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10F302-1-3.
- 20 H. Hojo and A. Mase,
Fabry-Perot Interferometry for Microwave Diagnostics,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10F329-1-3.
- 21 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, T. Fukai, Y. Tomii, S. Kiminami, N. Morimoto, T. Ikuno, S. Namiki, K. Shimizu, M. Ito, Y. Miyata, R. Minami, S. Miyoshi, K. Ogura, N. Saito, T. Saito, T. Kariya,
X-ray diagnostics for investigating electron distribution functions in the central cell of the GAMMA 10 tandem mirror,
Review of Scientific Instruments **77**, 10 (2006) 10F332-1-3.
- 22 I. Katanuma, T. Ito, H. Saimaru, Y. Mizoguchi, Y. Tatematsu, T. Saito, K. Ichii, T. Imai and T. Cho,
The Analytical Formulation of a Neoclassical Resonant Transport in a Mirror,
Fusion Engineering and Design **81**, (2006) 2797-2800.
- 23 H. Saimaru, I. Katanuma, Y. Sasagawa and T. Cho,
The Study of the Orbits and Diffusion of Ions Trapped in the Magnetic Field in GAMMA10 by Mapping Equation,
Fusion Engineering and Design **81**, (2006) 2801-2805.
- 24 M. K. Islam and Y. Nakashima,
Instability of a high-frequency wave in irradiated and streaming dusty plasmas,
Journal of Plasma Physics **72**, 6 (2006) 997-1000.
- 25 Y. Nakashima, Y. Higashizono, M. Shoji, S. Kobayashi, Y. Kubota, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, M. K. Islam, and T. Cho,
Monte-Carlo simulation of neutral transport in non-axisymmetric region of the GAMMA 10 anchor-cell,
Journal of Plasma Physics **72**, 6 (2006) 1123-1126.
- 26 Y. Sasagawa, I. Katanuma, Y. Mizoguchi, T. Cho, V. P. Pastukhov,
Magnetic-divertor Stabilization of an Axisymmetric Plasma with Anisotropic Temperature,
Physics of Plasmas **13**, 12 (2006) 122506-1-10.
- 27 A. Kojima, K. Ishii, Y. Miyata, T. Yamaguchi, S. Fujimoto, H. Kakiuchi, N. Kaidou, H. Higaki, M. Yoshikawa, A. Itakura, M. Ichimura and T. Cho,
Observations of the Radial Particle Flux Induced by the Phase Difference between Density and Potential Fluctuations Using a Gold Neutral Beam Probe in the Tandem Mirror GAMMA 10,
Journal of the Korean Physical Society **49**, (2006) S100-S104.
- 28 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, K. Matama, Y. Kubota and T. Cho,
Study of impurity ion radiation and density profiles by using ultraviolet/visible spectrometer in the GAMMA 10 tandem mirror,
Journal of the Korean Physical Society **49**, (2006) S105-S108.
- 29 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, K. Nakagome, K. Nemoto, M. Katano, H. Nakajima, T. Cho, A. Fukuyama,
Radio-Frequency Transmission Spectroscopy in the Ion Cyclotron Frequency Range in the Minimum-B Anchor of the GAMMA10 Tandem Mirror,
Journal of the Korean Physical Society **49**, (2006) S109-S112.
- 30 M. Yoshikawa, A. Itakura, A. Nakahara, N. Yanagi, Y. Shima, H. Higaki, T. Kobayashi and T. Cho,
Density fluctuation measurements in the tandem mirror GAMMA 10,
Journal of the Korean Physical Society **49**, (2006) S113-S117.
- 31 Y. Tatematsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, T. Imai, K. Ishii, K. Md. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, K. Sakamoto, O. Watanabe, M. Yoshikawa, N. Machida, D. Nagai, K. Nozaki, Y. Yamaguchi,
High Power ECRH Experiments in the GAMMA10 Tandem Mirror,
Journal of the Korean Physical Society **49**, (2006) S406-S411.
- 32 H. Ninomiya, M. Akiba, H. Azechi, T. Fujii, T. Fujita, M. Fujiwara, K. Hamamatsu, H. Hashizume, N. Hayashi, H. Horiike, N. Hosogane, M. Ichimura, K. Ida, Y. Ikeda, T. Imai, N. Inoue, S. Itoh, Y. Kamada, H. Kawashima, M. Kikuchi, A. Kimura, K. Kizu, H. Kubo, Y. Kudo, K. Kurihara, G. Kurita, M. Kuriyama, K. Masaki, M. Matsukawa, M. Matsuoka, Y. Miura, Y. M. Miura, N. Miya, A. Morioka, K. Nakamura, A. Nishimura, K. Okano, K. Okuno, A. Sagara, M. Sakamoto, S. Sakurai, K. Sato, R. Shimada, A. Shimizu, T. Suzuki, H. Takahashi, Y. Takase, M. Takechi, H. Tamai, S. Tanaka, K. Tsuchiya, H. Tsutsui, Y. Uesugi, T. Yamamoto, K. Yatsu and N. Yoshida,

- Overview of National Centralized Tokamak Program - Mission, Design and Strategy to Contribute ITER and DEMO,
Journal of the Korean Physical Society **49**, (2006) S428-S432.
- 33 M. Yoshikawa, H. K. Na, D. C. Seo, A. Iwamae, K. Sawada, T. Kobayashi, Y. Kubota, M. Saito, T. Cho, Study of Radiated Spectral Intensities in the HANBIT Plasma for Plasma Diagnostics, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 7, (2006) 40-44.
- 34 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Kato, Y. Kubota, M. Saito, K. Matama, A. Itakura, T. Cho, Study of Carbon Ion Behavior by Using Collisional Radiative Model in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 7, (2006) 45-49.
- 35 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, K. Sawada, T. Kobayashi, M. Saito, Y. Higashizono, A. Itakura, T. Cho, Behavior of Atomic and Molecular Hydrogen by Using the Measurements of H α Line Emission in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 7, (2006) 118-122.
- 36 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, O. Watanabe, Y. Kubota, T. Kobayashi, Y. Yamaguchi, H. Saimaru, Y. Higashizono, Y. Miyata, S. Kiminami, K. Shimizu, M. Ito, T. Ikuno, A. Mase, Y. Yasaka, K. Sakamoto, M. Yoshida, A. Kojima, K. Ogura, N. Nishino, W. Horton, T. Kariya, T. Imai, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, GAMMA 10 Group, Overview of Recent Progress in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 11-16.
- 37 W. Horton, J. Pratt, H. L. Berk, M. Hirata, Energy Confinement Scaling Predictions for the Stabilized Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 23-28.
- 38 A. Mase, Y. Kogi, H. Hojo, M. Yoshikawa, A. Itakura, T. Cho, T. Tokuzawa, K. Kawahata, Y. Nagayama, N. Oyama, N. C. Luhmann, Jr., H. K. Park, E. Mazzucato, Progress in Microwave Diagnostics and Physics Issues in Magnetically Confined Plasmas, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 52-57.
- 39 M. Yoshikawa, Y. Kubota, T. Kobayashi, K. Matama, Y. Nakashima, A. Itakura, T. Kato, and T. Cho, Plasma Spectroscopy in the Tandem Mirror GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 75-78.
- 40 Y. Nakashima, Y. Higashizono, N. Nishino, H. Kawano, M. K. Islam, Y. Mishima, S. Kobayashi, M. Shoji, Y. Kubota, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, H. Higaki, T. Cho, Investigation of Neutral Particles Using High Speed Camera and Monte-Carlo Simulation in the GAMMA 10 Central-cell, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 82-85.
- 41 I. Katanuma, H. Saimaru, Y. Mizoguchi, K. Yashiro, T. Cho, V. P. Pastukhov, Concept of the magnetic divertor in GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 122-125.
- 42 T. Watanabe, S. Masuzaki, Y. Nakamura, LHD Experimental Group, and H. Hojo, Role and Contribution of the Open Field Line Region in the Large Helical Device, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 147-149.
- 43 M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Nemoto, M. Katano, I. Kozawa, H. Muro, M. Ishikawa, S. Moriyama, T. Suzuki, T. Watanabe, T. Cho, Wave excitation in magnetically confined plasmas with an anisotropic velocity distribution, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 150-153.
- 44 T. Kaneko, K. Takahashi, R. Hatakeyama, T. Saito, Y. Tatematsu, K. Nozaki, N. Machida, T. Kaitsuka, A. Itakura, M. Yoshikawa, T. Cho, Nonlinear Effects of High Power Plug/Barrier Electron Cyclotron Resonance Heating on Propagation and Radiation of Cyclotron Waves, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 154-159.
- 45 H. Hojo, Y. Tatematsu and T. Saito, Full-Wave Maxwell Simulations for Electron Cyclotron Resonance Heating, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 164-167.
- 46 Y. Yasaka, T. Yamamoto, Y. Kurumatani, H. Takeno, Y. Nakashima, Y. Higashizono, M. Hirata, T. Cho, Y. Tomita, M. Ishikawa, Direct Energy Conversion Experiment on the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 171-176.
- 47 Y. Tomita, Y. Yasaka, H. Takeno, M. Ishikawa, Y. Nakashima, I. Katanuma, T. Cho, Effects of non-axisymmetric magnetic field on characteristics of axisymmetric cusp DEC, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 177-179.
- 48 M. Hirata, T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, K. Shimizu, M. Ito, S. Kiminami, N. Morimoto, K. Hirai, T. Yamagishi, T. Ikuno, S. Namiki, Y. Miyata, R. Minami, K. Ogura, T. Kondoh, T. Kariya, T. Imai, and S. Miyoshi, Study of the Effects of Plasma-Confining Potentials Using End-Loss Analysing Systems, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 183-185.
- 49 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, Y. Tomii, S. Kiminami, N. Morimoto, K. Shimizu, M. Ito, T. Ikuno, S. Namiki, K. Hirai, T. Yamagishi, Y. Miyata, R. Minami, K. Ogura, T. Kariya, T. Imai, and S. Miyoshi, Investigation of Electron Distribution Functions in the Plug Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 204-207.
- 50 T. Imai, Y. Tatematsu, T. Numakura, K. Sakamoto, R. Minami, O. Watanabe, T. Kariya, Y. Mitsunaka, Y. Kamata, N. Machida, T. Kaitsuka, M. Nakamura, T. Saito, T. Cho, Upgrade program of ECRH system for GAMMA10,

- Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 208-212.
- 51 A. Kasugai, R. Minami, K. Takahashi, N. Kobayashi, T. Kariya, Y. Mitsunaka, K. Sakamoto, High Power and High Efficiency Operation of 170 GHz Gyrotron, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 213-216.
- 52 A. Ando, H. Tobar, M. Shibata, H. Isobe, K. Hattori, M. Inutake, K. Nemoto, H. Higaki, M. Ichimura, Plasma flow measurement by Mach Probes in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 217-219.
- 53 K. Nemoto, M. Ichimura, H. Higaki, A. Ando, H. Tobar, H. Isobe, Y. Yamaguchi, K. Hattori, M. Inutake, M. Katano, H. Muro, I. Kozawa, and T. Cho, Measurement of flow velocity of MPD Arcjet in GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 223-225.
- 54 A. Iwamae, M. Atake, A. Sakaue, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, K. Matama, Plasma Polarization Spectroscopy on Cusp Plasma and GAMMA10 Tandem Mirror Plasma, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 244-246.
- 55 K. Matama, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Kubota, and T. Cho, Spectroscopic measurement using wide range UV/visible spectroscopic system in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 253-255.
- 56 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Kato, I. Murakami, Y. Kubota, K. Matama and T. Cho, Study of Oxygen Ions Behavior by Using Collisional-Radiative Model in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 256-258.
- 57 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, T. Kobayashi, Y. Higashizono, K. Matama, A. Itakura and T. Cho, Behavior of fueled particles and its effects on plasma parameters in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 259-261.
- 58 A. Kojima, K. Ishii, Y. Miyata, H. Kakiuchi, N. Kaidou, M. Yoshikawa, A. Itakura, M. Ichimura and T. Cho, Observation of Radial Particle Transport Induced by the Fluctuation Measured with a Gold Neutral Beam Probe, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 274-276.
- 59 A. Nakahara, M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, N. Yanagi, A. Itakura, A. Mase, Y. Kogi, and T. Cho, Measurements of 2-dimensional plasma density distributions by the phase-imaging method in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 277-279.
- 60 H. Kakiuchi, K. Ishii, T. Yamaguchi, A. Kojima, Y. Miyata, S. Fujimoto, N. Kaidou, T. Cho, Density Measurement Using a Lithium Beam Probe at the Inner Mirror Throat of the Tandem Mirror GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 280-282.
- 61 M. Katano, M. Ichimura, H. Higaki, K. Ide, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Nakagome, K. Nemoto, T. Cho, Behavior of high energy ions during drift type instability in the GAMMA 10 tandem mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 289-291.
- 62 N. Kaidou, K. Ishii, A. Kojima, Y. Miyata, H. Kakiuchi, M. Ichimura, T. Cho, Observation of Fluctuation Appeared in End-Loss Ion Current and Ion Transport in Velocity Space Induced by AIC Waves in the Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 292-294.
- 63 Y. Miyata, K. Ishii, A. Kojima, T. Yamaguchi, S. Fujimoto, N. Kaidou, H. Kakiuchi, T. Cho, Detection of bounce ions by use of a charge exchange bounce ion analyzer, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 298-300.
- 64 H. Hojo and A. Mase, Electron Density Measurements of a Thin Plasma Layer by Surface Plasmon Interferometry, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 304-306.
- 65 H. Hojo, Stability Study of Kelvin-Helmholtz Modes Due to Radial Electric Field Shear, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 307-309.
- 66 M. K. Islam, Y. Nakashima, Y. Higashizono, T. Cho, On the Experiment of Electron Cyclotron Resonance Heating in the Central Cell of the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 316-318.
- 67 O. Watanabe, Numerical Study of Microwave Generation by Electromagnetic Surface Waves on Deeply Corrugated Metal Plate, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 322-324.
- 68 S. Aoyama, Y. Miyazawa, K. Ogura, A. Sugawara, M. Hirata, Improved Performance of Oversized Backward Wave Oscillator Driven by Weakly Relativistic Electron Beam, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 325-327.
- 69 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, K. Nemoto, M. Katano, H. Muro, I. Kozawa, A. Fukuyama, T. Cho, Effective Excitation of ICRF Waves by use of Phased Antennas in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 328-330.
- 70 Y. Kiuchi, H. Tanaka, K. Ogura, O. Watanabe, T. Cho and Md. R. Amine, Slow Cyclotron and Cherenkov Instabilities in Weakly Relativistic Oversized Backward wave Oscillator, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 331-333.
- 71 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Miyata, R. Minami, S. Kiminami, K. Shimizu, N. Morimoto, M. Itou, T. Ikuno, S. Namiki, T. Yamagishi, K. Hirai, K. Ogura, T. Kariya, T. Imai and S. Miyoshi, Effects of Plasma Confining Potentials and the Associated Radially Sheared Electric Fields on the Plasma Energy Confinement, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 343-345.
- 72 Y. Mizoguchi, I. Katanuma, Y. Sasagawa, T. Cho, Stability analysis of flute interchange mode in GAMMA10 divertor configuration, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 349-351.

- 73 H. Higaki, M. Ichimura, Y. Yamaguchi, H. Kawano, Y. Higashizono, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, T. Cho, Visible Light and H α Imaging of Mirror Confined Plasmas in the Central Cell of GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 361-363.
- 74 Y. Higashizono, Y. Nakashima, M. Shoji, N. Nishino, S. Kobayashi, M. K. Islam, Y. Mishima, H. Kawano, T. Cho, Analysis of Neutral Transport in Fully 3-Dimensional Geometry in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 367-369.
- 75 H. Saimaru, I. Katanuma, Y. Mizoguchi, T. Cho, On the ion radial diffusion in the end-mirror cell of GAMMA10 analyzed by mapping equation, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 370-372.
- 76 R. Kawana, S. Okayama, M. Ishikawa, Y. Nakashima, Y. Yasaka, H. Takeno, Y. Tomita, Numerical Study of Charge Separation of Cusp DEC Installed at GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 385-387.
- 77 H. Yonemori, Y. Yasaka, H. Takeno, Y. Nakashima, M. Hirata, T. Cho, Fast and Efficient Data Acquisition System for Ubiquitous Participation in DEC Experiment on GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 394-396.
- 78 Y. Tatematsu, T. Saitou, O. Watanabe, N. Machida, T. Kaitsuka, Y. Kamata, M. Nakamura, R. Minami, S. Kubo, T. Shimoduma, M. Saigusa, T. Imai, T. Cho, Recent development of transmission systems for ECRH in the GAMMA 10 tandem mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 400-402.
- 79 R. Minami, Y. Tatematsu, T. Imai, O. Watanabe, Y. Endo, N. Machida, T. Kaitsuka, Y. Kamata, M. Harigae, M. Nakamura, S. Kiuchi, Y. Sakagoshi, A. Yoshizawa, M. Saigusa, T. Kariya, Y. Mitsunaka and T. Cho, Study of Efficient Electron Cyclotron Wave Coupling with Grooved Mirror Polarizer in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 403-405.
- 80 N. Machida, Y. Tatematsu, T. Saito, K. Nozaki, D. Nagai, T. Kaitsuka, Y. Kamata, M. Nakamura, O. Watanabe, T. Imai, T. Cho, Performance Test of Power Transmission System Newly Designed for ECRH in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 406-408.
- 81 Y. Kamata, T. Imai, Y. Tatematsu, O. Watanabe, R. Minami, T. Saitou, K. Sakamoto, T. Kariya, Y. Mitsunaka, N. Machida, T. Kaitsuka, M. Nakamura, T. Numakura, T. Cho, Characteristics of 28GHz gyrotron for ECRH on GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 412-414.
- 82 T. Kaitsuka, Y. Tatematsu, T. Saito, D. Nagai, K. Nozaki, N. Machida, Y. Kamata, M. Nakamura, O. Watanabe, T. Imai, T. Cho, Study of Spatial Distribution of Microwave Power Deposition for Plug ECRH in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **51**, 2T (2007) 415-417.
- 83 M. Hirata, Y. Miyake, K. Shimizu, T. Cho, T. Numakura, M. Ito, N. Morimoto, S. Tokioka, J. Kohagura, T. Kondoh, S. Miyoshi, A Novel Position-Sensitive Ion-Current Detector Array Using a Self-Collection Method for Secondary-Electron Suppression, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **573**, 1-2 (2007) 34-37.
- 84 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Tomii, S. Kiminami, K. Shimizu, N. Morimoto, Y. Takahashi, T. Imai, S. Miyoshi, X-ray Tomography Systems for Observations of Electron Cyclotron Heated Plasmas Using Novel Position-Sensitive X-ray Semiconductor-Detector Arrays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **573**, 1-2 (2007) 53-56.
- 85 今井 剛, 大電力ジャイロトロンを用いた強力なECHによるプラズマの高性能化研究, LHD 計画共同研究成果報告書, 核融合科学研究所 平成 17 年度, (2006) 96-98.
- 86 H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, M. Ichimura, R. Kumazawa, T. Watari, T. Mutoh, T. Seki, K. Saito, Excitation of High Frequency Fluctuation and Their Effects on High Energy Ions in LHD, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 75.
- 87 A. Mase, Y. Yokota, K. Uchida, Y. Kogi, H. Hojo, K. Kawahata, T. Tokuzawa, Application of Ultrashort-Pulse Reflectometer to LHD, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 147.
- 88 H. Hojo, A. Mase, K. Kawahata, Development of Millimeter-Wave Diagnostic Simulator, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 148.
- 89 Y. Yasaka, H. Takeno, M. Ishikawa, Y. Nakashima, T. Cho, M. Ohnishi, K. Sato, Y. Tomita, Experiment on Charge Separation and Direct Energy Conversion Using a Slandted CUSP field, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 211.
- 90 Y. Tomita, Y. Yasaka, H. Takeno, M. Ishikawa, Y. Nakashima, I. Katanuma, T. Cho, Effects of Non-Axisymmetric Magnetic Field on Characteristics of Non-Neutral Plasma, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 214.
- 91 M. Yoshikawa, Y. Kubota, T. Kobayashi, K. Matama, Y. Nakashima, H. Yamada, R. Sakamoto, Study of the Fueling Pellet Transportation in the Guide Tube, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 217.
- 92 T. Imai, T. Cho, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Ichimura, M. Hirata, J. Kohagura, H. Hojo, T. Numakura, K. Sakamoto, M. Saigusa, S. Kubo, T. Shimozuma, Improvement of Plasma Performance by strong ECH with High Power Gyrotron, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 227.

- 93 A. Mase, Y. Kogi, M. Ignatenko, K. Kudo, M. Yoshikawa, A. Nakahara, A. Itakura, H. Hojo, T. Cho, Y. Nagayama, Study of Potential Confinement Mechanism via Plasma Visualization Technology, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 481.
- 94 M. Yoshikawa, Y. Kubota, T. Kobayashi, K. Matama, T. Kato, I. Murakami, Study of Impurity Ion Radiation Intensity in the GAMMA 10 Plasma, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 482.
- 95 A. Fukuyama, Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, ICRF Wave Excitation and Propagation in the GAMMA 10 Tandem Mirror, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 483.
- 96 T. Saito, Y. Tatematsu, T. Imai, H. Hojo, S. Kubo, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, M. Saigusa, T. Notake, D. Nagai, K. Nozaki, N. Machida, Development of High Performance Antenna for Electron Heating in GAMMA 10, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 484.
- 97 R. Hatakeyama, T. Kaneko, K. Takahashi, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, Propagation and Radiation of Cyclotron Waves and Excitation of Fluctuations Due to High Power Plug ECRH, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 485.
- 98 A. Ando, H. Tobar, M. Shibata, K. Hattori, M. Inutake, M. Ichimura, H. Higaki, ICRF Heating and Ion Acceleration at Open End in GAMMA 10, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 486.
- 99 A. Iwamae, M. Atake, A. Sakaue, T. Kobayashi, K. Matama, M. Yoshikawa, Plasma Polarization Spectroscopy on GAMMA10 Tandem Mirror Plasma, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 487.
- 100 M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, T. Watari, R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Seki, K. Saito, Excitation of RF Waves in GAMMA 10 and in the Local Magnetic Mirror Configuration on LHD, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 488.
- 101 K. Ogura, H. Saito, Y. Miyazawa, M. Hirata, T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, T. Fukai, N. Yokoyama, S. Tokioka, Y. Tomii, Y. Miyake, Comprehensive Study of Relationship between Electron Distributions and Performances of Microwave and Mirror Devices, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 489.
- 102 K. Ishii, T. Saito, I. Katanuma, M. Yoshikawa, A. Kojima, Y. Miyata, T. Yamaguchi, S. Fujimoto, H. Iguchi, K. Nakamura, Study of Radial Transport of Bounce Ions by Use of a Lithium Beam Probe Method, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 490.
- 103 H. Takeno, Y. Yasaka, H. Hojo, M. Ichimura, T. Cho, H. Higaki, Cross Correlation Measurement between Density and Potential Fluctuations in a Tandem Mirror for the Purpose of Radial Transport Control, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 491.
- 104 Y. Nakashima, M. Yoshikawa, K. Md. Islam, N. Nishino, S. Kobayashi, K. Sawada, Y. Ishimoto, Y. Kubota, Y. Higashizono, M. Shoji, A. Sagara, T. Morisaki, T. Masuzaki, Analysis of Neutral Particle Transport and Recycling Behavior in Open Magnetic Field Configuration Plasmas, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 492.
- 105 Y. Yasaka, H. Takeno, Y. Tomita, M. Ishikawa, Y. Nakashima, M. Hirata, T. Cho, Initial Results of CUSPDEC Applied to the GAMMA 10 Tandem Mirror, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 494.
- 106 Y. Tomita, Y. Yasaka, H. Takeno, M. Ishikawa, Y. Nakashima, I. Katanuma, T. Cho, Effects on Non-Axisymmetric Magnetic Field on Characteristics of Axisymmetric Cusp DEC, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 495.
- 107 Y. Nakashima, M. Yoshikawa, K. Md. Islam, T. Mizuuchi, S. Kobayashi, Y. Kubota, Y. Higashizono, H. Yabutani, M. Shoji, Study on Neutral Particle Transport in Non-Axisymmetric Helical Plasmas, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 503.
- 108 Y. Nakashima, M. Yoshikawa, K. Md. Islam, T. Mizuuchi, S. Kobayashi, M. Sakamoto, H. Zushi, Y. Kubota, Y. Higashizono, M. Ogawa, K. Takagi, M. Shoji, Neutral Particle Transport in Steady-State Torus Plasmas, Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2005-March 2006**, (2006) 529.
- 109 北條仁士, 間瀬淳, 食品中の異物混入に関するミリ波検査システムの開発, 浦上財団研究報告書 **14**, (2006) 36-45.
- 110 北條仁士, 間瀬淳, プラズマフォトニック結晶とプラズマフォトリクス, Extended Abstract in Optics & Photonics Japan 2006, (2006) 548-549.
- 111 岩田武徳, 間瀬淳, 北條仁士, ニューラルネットワークを用いたミリ波異物検査システムの研究, 九州大学大学院総合理工学府報告 **28**, 3 (2006) 337-342.
- 112 M. Yoshikawa, Y. Kubota, T. Kobayashi, K. Matama, Absolute Sensitivity of the VUV Spectrograph for Plasma Diagnostics, Photon Factory Activity Report **#23**, (2006) 248.
- 113 今井剛, 春日井敦, 桧垣浩之, 核融合炉を魅力的にする要素技術の展望, 電気学会全国大会講演論文集 **7**, (2007) 24-27.

- 114 嶋頼子,
装置の監視システムの開発に向けて一様な研修を通して,
筑波大学「技術報告」第6回筑波大学技術職員技術発表会報告書, 27(2007) 50-54.
- 115 平田久子,
筑波大学プラズマ研究センター防災訓練実施記録,
筑波大学「技術報告」, 27(2007) 91-94.
- 116 竹村素直, 間瀬 淳, 近木祐一郎, 北條仁士,
超短パルスレーダによる生体イメージングの研究,
九州大学大学院総合理工学府報告 29, 1(2007).

<学位論文>

博士論文

- 小林 貴之 [博士 (理学)]
Spectroscopic Measurements and the Application of a Collisional-Radiative Model to Impurity Profile Analysis in GAMMA 10
ガンマ10における分光計測と衝突・輻射モデルの不純物分布解析への適用

修士論文

- 貝塚 徹也 [修士 (理学)]
ガンマ10プラグ部におけるマイクロ波パワー吸収の空間分布に関する研究
- 海藤 展弘 [修士 (理学)]
ELECA 測定器を用いた端損失イオンの測定と解析
- 垣内 秀人 [修士 (理学)]
GAMMA10におけるECH印加時の径方向電位分布及び電位揺動測定
- 鎌田 康宏 [修士 (理学)]
ガンマ10用高出力ジャイロトロンの研究
- 木南 瀬里奈 [修士 (理学)]
X線計測に基づくガンマ10の高電位・高電場シア形成効果の研究
- 中原 章智 [修士 (理学)]
位相イメージ法によるガンマ10プラズマの2次元密度分布測定
- 真珠 健 [修士 (理学)]
多チャンネル分光器を用いたGAMMA10プラズマ分光計測
- 三嶋 良幸 [修士 (理学)]
荷電交換中性粒子分析に基づくGAMMA10セントラル部イオンエネルギー解析
- 柳 直行 [修士 (理学)]
GAMMA10における超短パルス反射計を用いた密度揺動計測

<講演>

- 01 M. Hirata, Y. Miyake, T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, K. Shimizu, M. Ito, Y. Tomii, S. Kiminami, N. Morimoto, Y. Nakashima, K. Ogura, T. Kondoh, S. Miyoshi,
Simultaneous Measurements of Ion and Electron Currents Using a Novel Compact Electrostatic End-Loss-Current Detector,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 02 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, Y. Tomii, S. Kiminami, N. Morimoto, Y. Miyake, K. Shimizu, M. Itou, K. Ogura, N. Saito, T. Saito, S. Miyoshi,
X-ray diagnostics for investigating electron distribution functions and plasma spatial structures in the GAMMA 10 tandem mirror,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 03 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Tomii, Y. Miyake, S. Kiminami, K. Shimizu, N. Morimoro, M. Itou, Y. Miyata, K. Ogura, T. Imai, S. Miyoshi,
Experimental Estimation of the Local Energy Balance of the Potential-Confining Electrons in the Tandem-Mirror Plasmas by the use of a Semiconductor Detector Array,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 04 H. Hojo and A. Mase,
Fabry-Perot Interferometry for Microwave Diagnostics,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 05 M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, A. Nakahara, N. Yanagi, A. Itakura, H. Hojo, T. Kobayashi, K. Matama, Y. Tatematsu, T. Imai, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Nakashima, and T. Cho,
Electron Density Fluctuation Measurements Using a Multichannel Microwave Interferometer in GAMMA 10,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 06 A. Mase, Y. Yokota, K. Uchida, Y. Kogi, N. Ito, T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Nagayama, H. Hojo,
Remote Experiment of Ultrashort-Pulse Reflectometry for Large Helical Device Plasmas,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 07 K. Matama, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Kubota and T. Cho,
Measurements of impurity spectra using UV/Visible spectroscopic system in a GAMMA 10 plasma,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 08 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, K. Nakagome, K. Nemoto, M. Katano, H. Nakajima, A. Fukuyama, T. Cho,
Active Diagnostics of the Eigenmode Formation in the Ion-Cyclotron Frequency Range in the GAMMA 10 Central Cell,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 09 Y. Miyata, K. Ishii, A. Kojima, S. Fujimoto, T. Yamaguchi, N. Kaidou, H. Kakiuchi and T. Cho,
Measurement of plug potential bounce ion in the tandem mirror GAMMA 10,
16th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics, (Williamsburg, Virginia, USA, 2006.5.7).
- 10 Y. Nakashima, N. Nishino, Y. Higashizono, H. Kawano, S. Kobayashi, M. Shoji, Y. Kubota, M. Yoshikawa, M. K. Islam, Y. Mishima, D. Mimura and T. Cho,
Edge plasma behavior in the GAMMA 10 tandem mirror based on gas puff imaging experiments with a fast camera,
7th Int. Conf. Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, (Hefei, China, 2006.5.22).
- 11 M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, A. Nakahara, N. Yanagi, A. Itakura, H. Hojo, T. Kobayashi, Y. Tatematsu, T. Imai, J. Kohagura, M. Hirata, and T. Cho,
Electron density fluctuation measurements in the tandem mirror GAMMA 10,
33th European Physical Society Conference on Plasma Physics, (Roma, Italy, 2006.6.19).
- 12 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Kato, Y. Kubota, M. Matama, T. Cho,
Development of collisional-radiative model for lower charge state of oxygen ions in GAMMA 10,
33th European Physical Society Conference on Plasma Physics, (Roma, Italy, 2006.6.19).
- 13 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, O. Watanabe, Y. Kubota, T. Kobayashi, Y. Yamaguchi, H. Saimaru, Y. Higashizono, Y. Miyata, S. Kiminami, K. Shimizu, M. Itou, T. Ikuno, A. Mase, Y. Yasaka, K. Sakamoto, M. Yoshida, A. Kojima, K. Ogura, N. Nishino, W. Horton, T. Kariya, T. Imai, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, GAMMA 10 Group,
Overview of Recent Progress in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 14 A. Mase, Y. Kogi, H. Hojo, M. Yoshikawa, A. Itakura, T. Cho, T. Tokuzawa, K. Kawahata, Y. Nagayama, N. Oyama, N. C. Luhmann, Jr., H. K. Park, E. Mazzucato,
Progress in Microwave Diagnostics and Physics Issues in Magnetically Confined Plasmas,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 15 M. Yoshikawa, Y. Kubota, T. Kobayashi, K. Matama, Y. Nakashima, A. Itakura, T. Kato, and T. Cho,
Plasma Spectroscopy in the Tandem Mirror GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 16 Y. Nakashima, Y. Higashizono, N. Nishino, H. Kawano, M. K. Islam, Y. Mishima, S. Kobayashi, M. Shoji, Y. Kubota, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, H. Higaki, T. Cho,
Investigation of Neutral Particles Using High Speed Camera and Monte-Carlo Simulation in the GAMMA 10 Central-cell,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 17 I. Katanuma, H. Saimaru, Y. Mizoguchi, K. Yashiro, T. Cho, V. P. Pastukhov,
Concept of the magnetic divertor in GAMMA10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).

- 18 A. Ando, H. Tobar, M. Shibata, H. Isobe, K. Hattori, M. Inutake, K. Nemoto, H. Higaki, M. Ichimura,
Plasma flow measurement by Mach Probes in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 19 K. Nemoto, M. Ichimura, H. Higaki, A. Ando, H. Tobar, H. Isobe, Y. Yamaguchi, K. Hattori,
M. Inutake, M. Katano, H. Muro, I. Kozawa, and T. Cho,
Measurement of flow velocity of MPD Arcjet in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 20 A. Iwamae, M. Atake, A. Sakaue, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, K. Matama,
Plasma Polarization Spectroscopy on Cusp Plasma and GAMMA10 Tandem Mirror Plasma,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 21 K. Matama, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Kubota, and T. Cho,
Spectroscopic measurement using wide range UV/visible spectroscopic system in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 22 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Kato, I. Murakami, Y. Kubota, K. Matama and T. Cho,
Study of Oxygen Ions Behavior by Using Collisional-Radiative Model in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 23 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, T. Kobayashi, Y. Higashizono, K. Matama, A. Itakura and T. Cho,
Behavior of fueled particles and its effects on plasma parameters in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 24 A. Kojima, K. Ishii, Y. Miyata, H. Kakiuchi, N. Kaidou, M. Yoshikawa, A. Itakura, M. Ichimura and T. Cho,
Observation of Radial Particle Transport Induced by the Fluctuation Measured with a Gold Neutral Beam Probe,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 25 A. Nakahara, M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, N. Yanagi, A. Itakura, A. Mase, Y. Kogi, and T. Cho,
Measurements of 2-dimensional plasma density distributions by the phase-imaging method in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 26 H. Kakiuchi, K. Ishii, T. Yamaguchi, A. Kojima, Y. Miyata, S. Fujimoto, N. Kaidou, T. Cho,
Density Measurement Using a Lithium Beam Probe at the Inner Mirror Throat of the Tandem Mirror GAMMA10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 27 M. Katano, M. Ichimura, H. Higaki, K. Ide, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Nakagome, K. Nemoto, T. Cho,
Behavior of high energy ions during drift type instability in the GAMMA 10 tandem mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 28 N. Kaidou, K. Ishii, A. Kojima, Y. Miyata, H. Kakiuchi, M. Ichimura, T. Cho,
Observation of Fluctuation Appeared in End-Loss Ion Current and Ion Transport in Velocity Space Induced by AIC
Waves in the Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 29 Y. Miyata, K. Ishii, A. Kojima, T. Yamaguchi, S. Fujimoto, N. Kaidou, H. Kakiuchi, T. Cho,
Detection of bounce ions by use of a charge exchange bounce ion analyzer,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 30 H. Hojo and A. Mase,
Electron Density Measurements of a Thin Plasma Layer by Surface Plasmon Interferometry,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 31 H. Hojo,
Stability Study of Kelvin-Helmholtz Modes Due to Radial Electric Field Shear,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 32 M. K. Islam, Y. Nakashima, Y. Higashizono, T. Cho,
On the Experiment of Electron Cyclotron Resonance Heating in the Central Cell of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 33 O. Watanabe,
Numerical Study of Microwave Generation by Electromagnetic Surface Waves on Deeply Corrugated Metal Plate,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 34 S. Aoyama, Y. Miyazawa, K. Ogura and M. Hirata,
Improved Performance of Oversized Backward Wave Oscillator Driven by Weakly Relativistic Electron Beam,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 35 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, K. Nemoto, M. Katano, H. Muro, I. Kozawa, A. Fukuyama, T. Cho,
Effective Excitation of ICRF Waves by use of Phased Antennas in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 36 Y. Kiuchi, H. Tanaka, K. Ogura, O. Watanabe, T. Cho and Md. R. Amin,
Slow Cyclotron and Cherenkov Instabilities in Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillator,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 37 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Miyata, R. Minami, S. Kiminami, K. Shimizu,
N. Morimoto, M. Itou, T. Ikuno, S. Namiki, T. Yamagishi, K. Hirai, K. Ogura, T. Kariya, T. Imai and S. Miyoshi,
Effects of Plasma Confining Potentials and the Associated Radially Sheared Electric Fields on the Plasma Energy
Confinement,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 38 Y. Mizoguchi, I. Katanuma, Y. Sasagawa, T. Cho,
Stability analysis of flute interchange mode in GAMMA10 divertor configuration,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 39 H. Higaki, M. Ichimura, Y. Yamaguchi, H. Kawano, Y. Higashizono, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, T. Cho,
Visible Light and He α Imaging of Mirror Confined Plasmas in the Central Cell of GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 40 Y. Higashizono, Y. Nakashima, M. Shoji, N. Nishino, S. Kobayashi, M. K. Islam, Y. Mishima, H. Kawano, T. Cho,

- Analysis of Neutral Transport in Fully 3-Dimensional Geometry in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 41 H. Saimaru, I. Katanuma, Y. Mizoguchi, T. Cho,
On the ion radial diffusion in the end-mirror cell of GAMMA10 analyzed by mapping equation,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 42 R. Kawana, S. Okayama, M. Ishikawa, Y. Nakashima, Y. Yasaka, H. Takeno, Y. Tomita,
Numerical Study of Charge Separation of Cusp DEC Installed at GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 43 H. Yonemori, Y. Yasaka, H. Takeno, Y. Nakashima, M. Hirata, T. Cho,
Fast and Efficient Data Acquisition System for Ubiquitous Participation in DEC Experiment on GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 44 Y. Tatematsu, T. Saitou, O. Watanabe, N. Machida, T. Kaitsuka, Y. Kamata, M. Nakamura, R. Minami, S. Kubo,
T. Shimoduma, M. Saigusa, T. Imai, T. Cho,
Recent development of transmission systems for ECRH in the GAMMA 10 tandem mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 45 R. Minami, Y. Tatematsu, T. Imai, O. Watanabe, Y. Endo, N. Machida, T. Kaitsuka, Y. Kamata, M. Harigae,
M. Nakamura, S. Kiuchi, Y. Sakagoshi, A. Yoshizawa, M. Saigusa, T. Kariya, Y. Mitsunaka and T. Cho,
Study of Efficient Electron Cyclotron Wave Coupling with Grooved Mirror Polarizer in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 46 N. Machida, Y. Tatematsu, T. Saito, K. Nozaki, D. Nagai, T. Kaitsuka, Y. Kamata, M. Nakamura, O. Watanabe,
T. Imai, T. Cho,
Performance Test of Power Transmission System Newly Designed for ECRH in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 47 Y. Kamata, T. Imai, Y. Tatematsu, O. Watanabe, R. Minami, T. Saitou, K. Sakamoto, T. Kariya,
Y. Mitsunaka, N. Machida, T. Kaitsuka, M. Nakamura, T. Numakura, T. Cho,
Characteristics of 28GHz gyrotron for ECRH on GAMMA10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 48 T. Kaitsuka, Y. Tatematsu, T. Saito, D. Nagai, K. Nozaki, N. Machida, Y. Kamata, M. Nakamura, O. Watanabe,
T. Imai, T. Cho,
Study of Spatial Distribution of Microwave Power Deposition for Plug ECRH in GAMMA 10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 49 T. Watanabe, S. Masuzaki, Y. Nakamura, LHD Experimental Group, and H. Hojo,
Role and Contribution of the Open Field Line Region in the Large Helical Device,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 50 M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Nemoto, M. Katano, I. Kozawa, H. Muro,
M. Ishikawa, S. Moriyama, T. Suzuki, T. Watanabe, T. Cho,
Wave excitation in magnetically confined plasmas with an anisotropic velocity distribution,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 51 T. Kaneko, K. Takahashi, R. Hatakeyama, T. Saito, Y. Tatematsu, K. Nozaki, N. Machida, T. Kaitsuka, A. Itakura,
M. Yoshikawa, T. Cho,
Nonlinear Effects of High Power Plug/Barrier Electron Cyclotron Resonance Heating on Propagation and Radiation of Cyclotron Waves,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 52 H. Hojo, Y. Tatematsu and T. Saito,
Full-Wave Maxwell Simulations for Electron Cyclotron Resonance Heating,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 53 Y. Yasaka, T. Yamamoto, Y. Kurumatani, H. Takeno, Y. Nakashima, Y. Higashizono, M. Hirata, T. Cho, Y. Tomita,
M. Ishikawa,
Direct Energy Conversion Experiment on the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 54 Y. Tomita, Y. Yasaka, H. Takeno, M. Ishikawa, Y. Nakashima, I. Katanuma, T. Cho,
Effects of non-axisymmetric magnetic field on characteristics of axisymmetric cusp DEC,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 55 M. Hirata, T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, K. Shimizu, M. Ito, S. Kiminami, N. Morimoto, K. Hirai,
T. Yamagishi, T. Ikuno, S. Namiki, Y. Miyata, R. Minami, K. Ogura, T. Kondoh, T. Kariya, T. Imai, and S. Miyoshi,
Study of the Effects of Plasma-Confining Potentials Using End-Loss Analysing Systems,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 56 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, Y. Tomii, S. Kiminami, N. Morimoto, K. Shimizu, M. Ito, T. Ikuno,
S. Namiki, K. Hirai, T. Yamagishi, Y. Miyata, R. Minami, K. Ogura, T. Kariya, T. Imai, and S. Miyoshi,
Investigation of Electron Distribution Functions in the Plug Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 57 T. Imai, Y. Tatematsu, T. Numakura, K. Sakamoto, R. Minami, O. Watanabe, T. Kariya, Y. Mitsunaka, Y. Kamata,
N. Machida, T. Kaitsuka, M. Nakamura, T. Saito, T. Cho,
Upgrade program of ECRH system for GAMMA10,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 58 A. Kasugai, R. Minami, K. Takahashi, N. Kobayashi, T. Kariya, Y. Mitsunaka, K. Sakamoto,
High Power and High Efficiency Operation of 170 GHz Gyrotron,
The 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, (Tsukuba, Japan, 2006.7.17).
- 59 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, H. Higaki, K. Nemoto, M. Katano, H. Muro, I. Kozawa, A. Fukuyama, T. Cho,
Active Diagnostic of the Eigenmode Formation in the Ion-Cyclotron Frequency Range in the GAMMA 10 Tandem

- Mirror,
The 3rd Japan/Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, (Matsushima, Miyagi, Japan, 2006.8.31).
- 60 T. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Kato,
Study of oxygen ions behavior by using collisional-radiative model,
The 3rd Japan/Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, (Matsushima, Miyagi, Japan, 2006.8.31).
- 61 Y. Higashizono,
Analysis of Neutral Transport Based on $H\alpha$ measurement and 3-Dimensional Monte-Carlo Simulation in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
The 3rd Japan/Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, (Matsushima, Miyagi, Japan, 2006.8.31).
- 62 H. Hojo and A. Mase,
Microwave Diagnostic Study Aiming for Burning Plasmas,
Eleventh Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, (Sendai, Japan, 2006.9.4).
- 63 H. Hojo, N. Uchida, Y. Yasaka and A. Mase,
Theory of Surface Waves in Non-Uniform Plasmas with Plasma Resonance,
VI Int. Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, (Zvenigorod, Russia, 2006.9.11).
- 64 T. Imai, Y. Tatematsu, R. Minami, O. Watanabe, T. Numakura, K. Sakamoto, T. Kariya, Y. Mitsunaka, Y. Kamata, N. Machida, T. Kaitsuka, M. Harigae, M. Nakamura, S. Kiuchi, Y. Sakagoshi, A. Yoshizawa, T. Cho,
ECRH Upgrade Program in GAMMA 10,
Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas 2006, (Nara, Japan, 2006.9.26).
- 65 M. Ichimura, GAMMA 10 Group, and JT-60 Team,
ICRF waves for plasma diagnostics in GAMMA 10 and JT-60U,
Workshops on Physics and Technology of RF Heating of Fusion Plasmas, (Nara, Japan, 2006.9.26).
- 66 N. Sugimoto, Y. Yasaka, A. Tsuji, H. Hojo, H. Takeno,
Experiment and Modelling of Large-Diameter Microwave Discharges with Material Gases of Nitrogen and Fluorocarbon,
Proc. 13th Asian Conference on Electrical Discharge, (Hokkaido University, Japan, 2006.10.16).
- 67 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, O. Watanabe, A. Kojima, Y. Kubota, T. Imai, V. P. Pastukhov, and S. Miyoshi,
Progress in Potential Formation and Radial-Transport-Barrier Production for Turbulence Suppression and Improved Confinement in GAMMA 10,
The 21st IAEA Fusion Energy Conference, (Chengdu, China, 2006.10.16).
- 68 M. Ichimura, H. Higaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Nemoto, M. Katano, M. Ishikawa, S. Moriyama, T. Suzuki,
Observation of Spontaneously Excited Waves near the Ion Cyclotron Range of Frequency on JT-60U,
The 21st IAEA Fusion Energy Conference, (Chengsu, China, 2006.10.16).
- 69 T. Iwata, A. Mase and H. Hojo,
Study of Millimeter Waves Alien Substance Detection System Using Neural Network,
The 8th Cross Straits Symposium on Materials, Energy and Environmental Sciences, (Busan, Korea, 2006.11.9).
- 70 M. Hirata, T. Cho, J. Kohagura, Y. Numakura, K. Shimizu, S. Kiminami, M. Ito, N. Morimoto, K. Hirai, T. Yamagishi, T. Ikuno, S. Namiki, Y. Miyata, R. Minami, K. Ogura, T. Kondoh, T. Kariya, T. Imai and S. Miyoshi,
Effects of Radially Sheared Electric Field Analyzed with End-Loss Ion-Energy Spectrometers,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 71 H. Hojo, A. Mase and K. Kawahata,
Simulation Studies on Advanced Microwave Diagnostics and Related Technology,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 72 M. Yoshikawa, Y. Shima, T. Matsumoto, A. Nakahara, N. Yanagi, A. Itakura, H. Hojo, Y. Kubota, T. Kobayashi,
Electron Density Measurement by Using a Multi-Channel Interferometer System in the Tandem Mirror GAMMA 10,,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 73 Y. Nakashima, N. Nishino, Y. Higashizono, H. Kawano, S. Kobayashi, M. Shoji, Y. Kubota, T. Kobayashi, M. Yoshikawa, H. Higaki, M. K. Islam, Y. Mishima and T. Cho,
High-speed visible imaging of the central-cell plasmas in the GAMMA 10 tandem mirror,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 74 Y. Kubota, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, T. Kobayashi, Y. Higashizono, K. Matama, M. Noto and T. Cho,
Behavior of Hydrogen Fueled by Pellet Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 75 K. Matama, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Kubota, M. Noto, J. Yokoshima, T. Cho,
Spectroscopic measurements of emission spectra by using multichannel UV/visible impurity monitor,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 76 Y. Higashizono, Y. Nakashima, M. Shoji, S. Kobayashi, N. Nishino, H. Kawano, Y. Kubota, T. Kobayashi, M. Yoshikawa, Y. Mishima, M. Suzuki, K. Mori, T. Cho,
The Neutral Transport Analysis Based on Visible Light Measurement of Recycling and 3-dimensional Simulation in GAMMA 10,
16th International Toki Conference on "Advanced Imaging and Plasma Diagnostics", (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 77 H. Kawano, Y. Nakashima, Y. Higashizono, N. Nishino, T. Kobayashi, Y. Mishima, M. Suzuki, K. Mori, Y. Kubota, M. Yoshikawa, T. Cho,
Development of the Monitoring System of Plasma Behavior Using a CCD Camera in the GAMMA 10 Tandem Mirror,

- 16th International Toki Conference on “Advanced Imaging and Plasma Diagnostics”, (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 78 Y. Miyata, T. Cho, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, M. Hirata, N. Kaidou, H. Kakiuchi, M. Motegi, S. Goshu, M. Mizuguchi, T. Numakura, J. Kohagura,
Observation of the effects of radially sheared electric fields by the use of a gold neutral beam probe,
16th International Toki Conference on “Advanced Imaging and Plasma Diagnostics”, (Toki, Japan, 2006.12.5).
- 79 M. Ichimura,
RF reflectometry for plasma diagnostics,
International Workshop on Microwave Devices, Systems, and their Applications, (Kyushu University, Japan, 2006.12.12).
- 80 H. Hojo and A. Mase,
Simulations for Advanced Microwave Diagnostics and Related Technology,
International Workshop on Microwave Devices, Systems, and their Applications, (Kyushu University, Japan, 2006.12.12).
- 81 M. Ichimura,
ICRF waves for plasma diagnostics,
Plasma Seminar at National Fusion Research Center, (NFRC, Korea, 2007.1.30).
- 82 H. Saimaru,
A study of diffusion in mirror magnetic and non-uniform electrostatic field,
Plasma Seminar at National Fusion Research Center, (NFRC, Korea, 2007.1.30).
- 83 Y. Miyata,
Observation of the effects of radially sheared electric fields by the use of a gold neutral beam probe,
Plasma Seminar at National Fusion Research Center, (NFRC, Korea, 2007.1.30).
- 84 Y. Nakashima,
Two-Dimensional Image Diagnostics in High Temperature Plasmas Using High-Speed Camera,
Plasma Seminar at National Fusion Research Center, (NFRC, Korea, 2007.1.31).
- 85 Y. Higashizono,
Neutral Transport Analysis in Plasma Confining Devices by Using 3-Dimensional Monte-Carlo Simulation,
Plasma Seminar at National Fusion Research Center, (NFRC, Korea, 2007.1.31).
- 86 M. Yoshikawa, T. Kobayashi, K. Matama, T. Cho,
Spectroscopic measurements and the Application of a Collisional-Radiative Model to Impurity Profile Analysis in GAMMA 10,
The Third KR-JP/JP-KR Joint Workshop on Atomic and Molecular Physics and Data for Plasmas, (KAIST, Daejeon, Korea, 2007.1.31).
- 87 Y. Nakashima,
Neutral transport simulation by means of Monte-Carlo code --- Current status and perspective ---,
Seminar on Plasma-Wall Interaction Modeling, (NIFS, Japan, 2007.2.15).
- 88 M. Hirata, T. Cho, J. Kohagura, T. Numakura, H. Hojo, M. Ichimura, A. Itakura, T. Kariya, I. Katanuma, R. Minami, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, Y. Yamaguchi, Y. Higashizono, Y. Miyata, V. P. Pastukhov, W. Horton, T. Kondoh, K. Sakamoto, T. Imai, S. Miyoshi, and GAMMA 10 Group,
Keynote Speech: Recent Progress in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
7th Symposium on Current Trends in International Fusion Research: A Review, (Washington, DC, U.S.A, 2007.3.5).
- 89 Y. Yamaguchi, M. Ichimura, A. Fukuyama, H. Hojo, I. Kozawa, K. Nemoto, M. Katano, Y. Motegi, H. Muro, and T. Cho,
Effective Excitation of RF Eigenmodes with Phase-Controlled Antennas in an Inhomogeneous Plasma,
4th International Symposium on Future-Oriented Interdisciplinary Materials Science, (Tsukuba, Japan, 2007.3.12).
- 90 嶋頼子,
装置の監視システムの開発に向けて様々な研修を通してー,
第6回筑波大学技術職員技術発表会, (筑波大学, 2006.3.25).
- 91 小波蔵純子, 長照二, 平田真史, 沼倉友晴, 檜垣浩之, 北條仁士, 市村真, 石井亀男, Islam Khairul, 板倉昭慶, 片沼伊佐夫, 中嶋洋輔, 立松芳典, 渡邊理, 吉川正志, 今井剛, 三好昭一,
ガンマ10プラズマの電位・電場シア形成による乱流抑制と輸送改善効果のX線計測を用いた研究,
日本地球惑星科学連合2006年大会, (幕張メッセ国際会議場, 2006.5.14).
- 92 小林貴之, 吉川正志, 加藤隆子,
Study of impurity behavior by using collisional-radiative model in tandem mirror plasma,
日本地球惑星科学連合2006年大会, (幕張メッセ国際会議場, 2006.5.14).
- 93 中嶋洋輔,
長時間プラズマにおける中性粒子の挙動解析,
九州大学応用力学研究所RIAMフォーラム2006, (九州大学応用力学研究所, 2006.6.1).
- 94 吉川正志, 長照二, 小波蔵純子, ガンマ10グループ, 井口春和, 藤澤彰英, 斉藤輝雄, 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,
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」平成18年度総轄班第一回会合, (東北大学工学部, 2006.6.2).
- 95 市村真,
イオンサイクロトロン周波数帯の高周波入射によるプラズマ診断法の開発,
特定領域拡大総括班会議, (東北大学, 2006.6.3).
- 96 山口裕資, 市村真, 檜垣浩之, 柿本真吾, 中込賢一郎, 根本健樹, 片野誠, 中嶋元, 福山淳, 長照二,
GAMMA10におけるICRF固有モード形成時の伝搬特性計測,
第6回核融合エネルギー連合講演会, (富山国際会議場, 2006.6.13).
- 97 今井剛,
核融合炉の基盤工学研究の進展と拡がりーはじめにー,

- 第6回核融合エネルギー連合講演会,(富山国際会議場,2006.6.13).
- 98 今井 剛,立松芳典,渡辺理,永井大智,野崎潔,町田紀人,鎌田康広,貝塚徹也,中村真理亜,斉藤輝雄,坂本慶司,南龍太郎,沼倉友晴,長照二,
ガンマ10 ECRH 実験増力実験,
第6回核融合エネルギー連合講演会,(富山国際会議場,2006.6.13).
- 99 吉永智一,打田正樹,田中仁,前川孝,前原直,今井剛,
LATEでのECHによる球状トカマク平衡の自発的形形成機構,
第6回核融合エネルギー連合講演会,(富山国際会議場,2006.6.13).
- 100 打田正樹,吉永智一,田中仁,前川孝,前原直,今井剛,
LATEでのマイクロ波球状トカマク形成実験,
第6回核融合エネルギー連合講演会,(富山国際会議場,2006.6.13).
- 101 渡邊理,渡邊仁太,小椋一夫,今井剛,長照二,
金属表面近傍の電磁表面波の数値解析,
第6回核融合エネルギー連合講演会,(富山国際会議場,2006.6.13).
- 102 市村 真,
局所的ミラー磁場配位中におけるAIC波動励起の観測,
平成17年度核融合研究施設を利用する研究協力成果報告会,(東京,2006.6.15).
- 103 小波蔵純子,長 照二,平田真史,沼倉友晴,木南瀬里奈,森本直道,清水清昭,伊藤万梨絵,
近藤 貴,中尾 誠,山内通則,西谷健夫,平野馨一,
核融合生成中性子量に対する半導体計測器X線感度特性依存性とその機構の解明,
平成17年度核融合研究施設を利用する研究協力成果報告会,(東京,2006.6.15).
- 104 北條仁士,
電磁波解析シミュレータの開発と物理・工学への応用,
(福井大学遠赤外領域開発研究センター,2006.6.16).
- 105 中嶋洋輔,東園雄太,河野博一,西野信博,小林進二,庄司 主,
高速カメラを用いたガンマ10周辺プラズマ計測と中性粒子輸送シミュレーション,
第21回トライアム研究会 & 核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会,(九州大学応用力学研究所,2006.8.3).
- 106 東園雄太,中嶋洋輔,
モンテカルロシミュレーションコードを用いたTRIAM-1Mにおける中性粒子輸送解析,
第21回トライアム研究会 & 核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会,(九州大学応用力学研究所,2006.8.3).
- 107 北條仁士,八坂保能,間瀬 淳,
ECRプラズマにおける表面波の解析,
第67回応用物理学学会学術講演会,(立命館大,2006.8.29).
- 108 渡辺二太,赤尾英毅,北條仁士,
LHDにおける磁気軸の3次元形状および回転変換の高速・高精度数値計算法,
日本物理学会秋季大会,(千葉大学,2006.9.23).
- 109 岩田武徳,間瀬淳,北條仁士,
ミリ波を用いた異物検査システムの研究,
電子情報通信学会九州支部学生会講演会,(宮崎大学,2006.9.27).
- 110 渡邊理,
変調コルゲート円筒導波管を用いた自律収束型出力アンテナの提案,
「新型プラズマ電磁波源によるプラズマ航跡場診断」に関する研究会(2006),(宇都宮大学農学部日光演習林宿泊施設,栃木県,2006.10.1).
- 111 北條仁士,間瀬淳,
プラズマフォトニック結晶とプラズマフォトニクス,
日本光学会年次学術講演会・日本分光学会秋季講演会,(学術総合センター,2006.11.8).
- 112 平田真史,ガンマ10グループ,
ポテンシャル計測・電場とプラズマ閉じ込め研究,
プラズマ・核融合学会第23回年会,(筑波大学大学会館,2006.11.28).
- 113 鎌田康宏,坂本慶司,今井剛,立松芳典,南龍太郎,渡辺理,斉藤輝雄,貝塚徹也,町田紀人,中村真理亜,
張替学,木内茂,坂越祐介,吉澤史,沼倉友晴,長照二,
GAMMA10用1MW 28GHz ジャイロトロンの高効率発振設計,
プラズマ・核融合学会第23回年会,(筑波大学大学会館,2006.11.28).
- 114 中村真理亜,立松芳典,今井剛,渡辺理,永井大智,野崎潔,貝塚徹也,鎌田康宏,町田紀人,張替学,
木内茂,坂越祐介,吉澤史,南龍太郎,斉藤輝雄,長照二,
ECRH用アンテナ系特性評価のためのマイクロ波パワー測定装置の開発,
プラズマ・核融合学会第23回年会,(筑波大学大学会館,2006.11.28).
- 115 張替学,今井剛,立松芳典,南龍太郎,三枝幹雄,中村真理亜,吉沢史,渡邊理,町田紀人,
貝塚徹也,鎌田康宏,木内茂,坂越祐介,長照二,
GAMMA10のECRH用マイターバンド型偏波器の開発と偏波制御実験,
プラズマ・核融合学会第23回年会,(筑波大学大学会館,2006.11.28).
- 116 町田紀人,立松芳典,斉藤輝雄,野崎潔,貝塚徹也,鎌田康宏,中村真理亜,張替学,坂越祐介,木内茂,
吉沢史,山口裕資,渡邊理,南龍太郎,今井剛,長照二,
低電力試験によるGAMMA10セントラル部ECRHアンテナ系の性能評価,
プラズマ・核融合学会第23回年会,(筑波大学大学会館,2006.11.28).
- 117 貝塚徹也,立松芳典,斉藤輝雄,永井大智,野崎潔,町田紀人,鎌田康宏,中村真理亜,張替学,坂越祐介,
木内茂,吉沢史,渡邊理,南龍太郎,今井剛,長照二,
ガンマ10プラグ部ECRHにおけるマイクロ波パワー吸収の空間分布に関する研究,

- プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 118 平田真史, 清水清昭, 長 照二, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 伊藤万梨絵, 平井克明, 山岸徹, 木南瀬里奈, 森本直道, 生野利典, 並木翔平, 端損失粒子計測に基づくガンマ10の高電位・高電場シアアによる閉じ込めの研究, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 119 森本直道, 長 照二, 小波蔵純子, 平田真史, 沼倉友晴, 木南瀬里奈, 生野利典, 並木翔平, 清水清昭, 伊藤万梨絵, 平井克明, 山岸 徹, X線エネルギー波高分析に基づくガンマ10の電位による電子エネルギー閉じ込めの研究, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 120 木南瀬里奈, 小波蔵純子, 長 照二, 平田真史, 沼倉友晴, 森本直道, 生野利典, 並木翔平, 清水清昭, 伊藤万梨絵, 平井克明, 山岸 徹, X線計測に基づくガンマ10の高電位・高電場シアア形成による閉じ込めの研究, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 121 市村 真, 山口 裕資, 小林 貴之, 小島 有志, Kwon M., England A.C., Park B.H., Yoon S.W., You K.-I., Yoo S.J., 吉川 正志, 今井 剛, 長 照二, 日韓協力によるタンデムミラーにおける高ベータプラズマ生成の研究, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 122 山口裕資, 市村真, 桧垣浩之, 福山淳, 北條仁士, 根本健樹, 片野誠, 小澤功, 室大志, 長照二, GAMMA10におけるアンテナ間位相制御によるICRF速波励起の最適化, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 123 根本健樹, 市村真, 桧垣浩之, 安藤晃, 磯部裕和, 山口裕資, 片野誠, 戸張博之, 服部邦彦, 大竹正明, 室大志, 小澤功, 長照二, GAMMA10 セントラル部におけるプラズマ流速測定, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 124 高橋 和貴, 金子俊朗, 畠山力三, 斉藤輝雄, 立松芳典, 野崎潔, 町田紀人, 貝塚徹也, 中村真理亜, 板倉昭慶, 吉川正志, 長照二, 大電力電子サイクロトロン波と低周波プラズマ波動の非線形結合特性, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 125 鈴木未来, 中嶋洋輔, 東園雄太, 八坂保能, 竹野裕正, 富田 幸博, 石川 本雄, 山本 宗, 車谷 宣亮, 辻本 剛志, 山本 隆喜, 根本 忠明, 川名 亮, 平田 真史, 清水 清昭, 伊藤 万梨絵, 三嶋 良幸, 河野 博一, 森 圭司, 大川 和夫, 長 照二, 直接エネルギー変換装置のタンデムミラーへの適用, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 126 東園雄太, 中嶋洋輔, 庄司 主, 西野信博, 小林進二, 河野博一, 久保田雄介, 大川和夫, 三嶋良幸, 鈴木未来, 森 圭司, 長 照二, 完全3次元モデルを用いたGAMMA10 セントラル部の中性粒子輸送解析, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 127 三嶋良幸, 中嶋洋輔, 東園雄太, 森 圭司, 鈴木未来, 大川和夫, 長 照二, ガンマ10 セントラル部でのイオン温度測定に基づくイオンの損失エネルギー量評価, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 128 久保田雄介, 吉川正志, 中嶋洋輔, 西野信博, 小林貴之, 東園雄太, 真珠 健, 能登将光, 河野博一, 横島淳一, 長 照二, ガンマ10におけるペレット入射実験, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 129 中原章智, 吉川正志, 嶋頼子, 柳直行, 松本俊昭, 根岸真佑, 谷田部弘樹, 板倉昭慶, 長照二, 間瀬淳, 近木祐一郎, 位相イメージ法によるプラズマ2次元密度分布の研究, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 130 溝口祥也, 片沼伊佐夫, 笹川遥, 八代勝也, 西丸浩, 長照二, GAMMA10 セントラルダイバータ磁場配位における運動論的フルートモードの安定性解析, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 131 西丸 浩, 片沼伊佐夫, 溝口祥也, 八代勝也, 長照二, ミラー磁場と非一様静電場内におけるイオンの軌道不安定性と拡散の研究, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 132 南龍太郎, 今井剛, 立松芳典, 渡邊理, 遠藤洋一, 貝塚徹也, 鎌田康宏, 町田紀人, 中村真理亜, 張替学, 木内茂, 坂越祐介, 吉沢史, 三枝幹雄, 假家強, 満仲義加, 坂本 慶司, 斉藤輝雄, 長照二, GAMMA10 グループ, タンデムミラーにおける大電力電子サイクロトロン加熱の高性能化, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 133 吉川正志, 市村真, 今井剛, 板倉昭慶, 片沼伊佐夫, 小波蔵純子, 立松芳典, 中嶋洋輔, 沼倉友晴, 平田真史, 北條仁士, 久保田雄介, 南龍太郎, 渡邊理, 小林貴之, 山口裕資, 西丸浩, 東園雄太, 宮田良明, 嶋頼子, 長照二, ガンマ10 グループ, ガンマ10における電位生成の進展と電位・電場の効果によるプラズマ閉じ込めの改善, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 134 沼倉友晴, 長 照二, 小波蔵純子, 平田真史, 宮田良明, 木南瀬里奈, 森本直道, 生野利典, 並木翔平, 清水清昭, 伊藤万梨絵, 平井克明, 山岸 徹, 南龍太郎, 假家 強, 今井 剛, 三好昭一, 高電位・強径電場シアア形成によるプラズマ閉じ込め改善効果の評価, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 135 片沼伊佐夫, 西丸浩, 溝口祥也, 八代勝也, 中嶋洋輔, 長照二, V. P. Pastukhov, GAMMA10 アンカー部ダイバータ磁場配位設置に関して, プラズマ・核融合学会第23回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).

- 136 八坂保能, 山本隆喜, 車谷宜亮, 竹野裕正, 中嶋洋輔, 東園雄太, 平田真史, 長 照二, 富田幸博, 石川本雄,
タンデムミラーにおけるカusp型直接エネルギー変換,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 137 西野信博, 中嶋洋輔, 東園雄太, 河野博一, 吉川正志, 久保田雄介, 小林貴之, 小林進二,
三嶋良幸, 鈴木未来, 森 圭司, 長 照二,
高速カメラを使った GAMMA10 プラズマの計測,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 138 小波蔵純子, 長 照二, 平田真史, 沼倉友晴, 木南瀬里奈, 森本直道, 清水清昭, 伊藤万梨絵, 生野利典,
並木翔平, 平井克明, 山岸 徹, 宮田良明, 南龍太郎, 小椋一夫, 假家 強, 今井 剛, 三好昭一,
X線計測に基づくガンマ 10 の電位形成機構と電位・電場シア形成効果の研究,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 139 伊藤万梨絵, 平田真史, 長 照二, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 清水清昭, 平井克明, 山岸 徹,
木南瀬里奈, 森本直道, 生野利典, 並木翔平,
端損失粒子計測に基づくガンマ 10 の円環状高温電子層形成効果の研究,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 140 小林貴之, 吉川正志, 加藤隆子, 村上泉, 久保田雄介, 真珠健, 横島淳一, 能登将光, 長照二,
分光計測と衝突・輻射モデルを用いた開放端磁場プラズマ中の不純物輸送の研究,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 141 真珠健, 吉川正志, 小林貴之, 久保田雄介, 横島淳一, 能登将光, 長照二,
マルチチャンネル分光器を用いた GAMMA 10 セントラル部のプラズマ分光計測,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 142 河野博一, 中嶋洋輔, 東園雄太, 西野信博, 小林貴之, 三嶋良幸, 鈴木未来, 森 圭司,
大川和夫, 長 照二,
中速カメラを用いた GAMMA10 セントラル部のプラズマ挙動観測,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 143 柳直行, 吉川正志, 嶋頼子, 松本俊昭, 中原章智, 板倉昭慶, 長照二,
GAMMA 10 ペレット入射時における超短パルス反射計を用いたプラズマ密度揺動計測,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 144 松本俊昭, 吉川正志, 嶋頼子, 中原章智, 柳直行, 板倉昭慶, 根岸真佑, 谷田部弘樹, 長照二,
多チャンネル干渉計を用いた水素ペレット入射実験におけるプラズマ電子密度計測,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 145 宮田良明, 長照二, 吉川正志, 中嶋洋輔, 平田真史, 沼倉友晴, 海藤展弘, 垣内秀人,
茂木ゆき美, 江州俊亮, 水口正紀,
金中性粒子ビームプローブ法を用いた乱流揺動計測,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 146 垣内秀人, 吉川正志, 宮田良明, 海藤展弘, 茂木ゆき美, 江州俊亮, 水口正紀, 長照二,
タンデムミラー-GAMMA 10 における熟障壁電位の解析,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 147 海藤展弘, 吉川正志, 平田真史, 宮田良明, 垣内秀人, 茂木ゆき美, 江州俊亮, 水口正紀, 長照二,
GAMMA 10 における端損失イオンの揺動測定,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 148 片野誠, 市村真, 檜垣浩之, 山口裕資, 根本健樹, 小澤功, 室大志, 長照二,
GAMMA 10 におけるドリフト型揺動発生時の高エネルギーイオンの挙動,
プラズマ・核融合学会第 23 回年会, (筑波大学大学会館, 2006.11.28).
- 149 真珠健,
多チャンネル分光器を用いた GAMMA 10 プラズマ分光計測,
H18 年度 核融合科学研究所 研究会「プラズマの素過程と分光診断の最前線」(核融合科学研究所,
2006.11.28).
- 150 吉川正志, 小林貴之, 真珠健, 能登将光, 横島淳一,
ガンマ 10 における分光診断と衝突輻射モデルの適用,
H18 年度 核融合科学研究所 研究会「プラズマの素過程と分光診断の最前線」(核融合科学研究所,
2006.11.28).
- 151 岩田武徳, 間瀬淳, 北條仁士,
Neural Network によるミリ波異物検査の研究,
電気学会・電子情報通信学会合同講演会, (琉球大学, 2006.12.13).
- 152 竹村素直, 間瀬淳, 近木祐一郎, 北條仁士,
超短パルスレーダを用いた生体情報計測,
電気学会・電子情報通信学会合同講演会, (琉球大学, 2006.12.13).
- 153 中嶋洋輔,
双方向型共同研究「定常トラスプラズマにおける中性粒子輸送」の現状と今後の展開,
第 2 回トリアム研究会「球状トカマクプラズマ研究の進展」, (九州大学応用力学研究所, 2006.12.14).
- 154 H. Hojo and A. Mase,
Metallic Made Waveguide and Beam Former,
(九州大学産学連携センター, 2007.2.2).
- 155 中嶋洋輔, 東園雄太, 河野博一, 西野信博, 庄司 主, 小林進二,
ガンマ 10 プラズマの 2 次元化シイメージ計測,
「境界プラズマ挙動とそれを取り巻く周辺の科学」及びフォーラム物理クラスター:周辺ペDESTAL サブ
クラスター会合」合同研究会, (核融合科学研究所, 2007.3.8).
- 156 東園雄太, 中嶋洋輔, 小林進二, 水内 亨,
非軸対称系における中性粒子輸送解析,
「境界プラズマ挙動とそれを取り巻く周辺の科学」及びフォーラム物理クラスター:周辺ペDESTAL サブ

- クラスター会合」合同研究会, (核融合科学研究所, 2007.3.8).
- 157 今井剛, 春日井敦, 桧垣浩之,
核融合炉を魅力的にする要素技術の展望,
平成 19 年電気学会全国大会, (富山大学, 2007.3.15).
- 158 東園雄太, 中嶋洋輔, 河野博一, 庄司主, 小林進二, 西野信博, 坂本瑞樹, 関子秀樹,
久保田雄介, 小林貴之, 真珠健, 吉川正志, 三嶋良幸, 鈴木未来, 森圭司, 長照二,
3次元中性粒子輸送コード及び可視光計測に基づく中性粒子輸送解析,
日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007.3.18).
- 159 渡辺二太, 北條仁士,
高ベータプラズマを保持する LHD 磁場の三重構造,
日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007.3.18).
- 160 飽本一裕, 北條仁士,
大振幅電磁パルスによるサイクロトロン共鳴加速機構,
日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007.3.18).
- 161 間瀬淳, 近木祐一郎, 伊藤直樹, 横田裕也, 迫田卓也, 徳沢季彦, 山口聡一郎, 川端一男,
長山好夫, 北條仁士, Zuowei Shen, Neville Luhmann,
核融合プラズマのための新しいミリ波計測技術,
日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007.3.18).
- 162 市村 真, 桧垣浩之, 山口裕資, 根本健樹, 片野 誠, 小澤 功, 室 大志, 石川正男,
森山伸一, 鈴木 隆, 長 照二,
GAMMA 10 及び JT-60U における ICRF 波動を用いたプラズマ診断,
日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007.3.18).
- 163 吉川正志, 中原章智, 柳直行, 松本俊昭, 嶋頼子, 根岸真佑, 谷田部弘樹, 板倉昭慶, 北條仁士,
小波蔵純子, 平田真史, 宮田良明, 長照二, 間瀬淳, 近木祐一郎,
ガンマ 10 プラズマにおける先進密度揺動計測,
日本物理学会 2007 年春季大会, (鹿児島大学, 2007.3.18).
- 164 岩田武徳, 間瀬淳, 北條仁士,
ニューラルネットワークを用いたミリ波異物検査,
電子情報通信学会総合大会, (名城大学, 2007.3.20).
- 165 吉川正志, 長照二, 小波蔵純子, ガンマ 10 グループ, 井口春和, 藤澤彰英, 斉藤輝雄, 岩前敦,
電場と閉じ込め,
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」シンポジウム平成 18 年度総轄班 第一回会
合, (KKR 鹿児島敬天閣, 2007.3.21).
- 166 北條仁士,
マイクロ波反射法計測の多様性,
(核融合科学研究所, 2007.3.26).