

VIII プラズマ研究グループ

教授	長 照二
助教授	石井亀男、板倉昭慶、北條仁士、斉藤輝雄、中嶋洋輔
講師	小波蔵純子、平田真史、立松芳典、吉川正志
技術専門官	平田久子
技術専門職員	大川和夫
大学院生	22名

共同研究者

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

研究協力者

技術専門職員	杉山昭彦、和所保規、遠藤洋一
技官	嶋 頼子
研究支援推進員	土肥三郎
大学院生	8名

【1】大学法人化に向けての、当該プラズマグループの研究の方針・基本理念

当プラズマ研究グループでは、平成16年度から実施される、大学の法人化に伴う筑波大学の中期目標中期計画を見据えながら、その実効を上げる事を基本方針・基本理念として、その準備研究を平成15年度から先行して推進し、以下のような急進展を得ている。

また、数理物質科学研究科の中期目標中期計画の一般広範な記載の推進はもとより、特に、プラズマに関しては、平成16年度発足の国立大学法人筑波大学の「中期目標・中期計画」（案）に於いて、「Ⅱ 大学の教育研究等の質の向上に関する目標」の「2 研究に関する目標」の内、「（2）研究実施体制等の整備に関する目標においては、世界的に評価されている研究及び成果が期待できる萌芽的研究に資源を重点配分して、研究面の個性化を図る。」に、「○全国共同研究に関する具体的方策 ②国内外の研究機関との連携を深め、共同研究等の推進を図る。特に、プラズマの研究に関しては、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所との連携を強めて、双方向型共同研究等を推進するとともに、全国共同研究のための整備を図る。」と明記されていることは、本学のプラズマ研究の歴史を拓いた当該グループとしても、その責務を大変に重く受け止め、応分の貢献を行うことを目指す。

国立大学法人筑波大学にとり、3年後に間近に控える中間評価に向けて、当該グループも、学内共同利用を通して上記の中期目標・中期計画の実行の一端を、学術的に積極的に究明し支える方針である。更に、当グループとしての特長を活かし、全国共同研究の実を挙げるべく、また学内外・国際的な貢献を縦横に果たすべく、新制度に於けるグループの在り方として、以上の、本学の中期目標中期計画への成果の実現に向けて、最大限の貢献を果たす事を基本方針としている。

【2】プラズマ研究グループの研究目的と意義・位置づけ

「プラズマ物理学、特に電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うことが、当該グループの上記中期目標中期計画・新しい筑波大学規則・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である、電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行うという、重要な位置づけを持つ。この研究は、延いては国際熱核融合実験炉ITERの心臓部である、核融合炉心プラズマの高閉じ込めHモードの物理解明にも繋がる、極めて重要な研究課題という位置づけを併せ持っている。

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」[1]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物理学系のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。

以来、上記のように、この成果は、タンデムミラーの一連の研究 [2-9] 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和その意義は、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。以上の事実が、「核融合エネルギー実用に対する電位によるプラズマ閉じ込め向上の研究の必要不可欠性の証左」を与えている。

しかしながら、これらHモードの物理機構は依然明確にされておらず経験則に頼る現状において、本研究目的である「電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上のメカニズムの解明」は、核融合装置の実用的経済的なコンパクト化・プラズマ閉じ込め方法の理解とそれによる核融合プラズマ制御のために、必要欠くべからざる研究内容であるという意義を持つばかりでなく、プラズマ特性の学術研究・応用研究という観点からも、大学の研究の在り方として最適な学術研究内容とその意義、研究規模であると位置づけられる。

更に最近、プラズマエネルギーの、プラズマの内部に熱の損失を防ぐことのできる「内部輸送障壁 (ITB) の発見があり、この物理機構にも、我々の研究成果が深く関連していることが分かってきた事により、平成15年度末には成果評価として、プラズマ核融合学会での招待講演や速報論文 [10] の発表、加えて国際会議冒頭の基調招待講演、文部科学省でのIAEA国内論文審査でのA評価等、この1年で急激に研究が進展してきている。

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

（1）平成15年度の主要な研究成果の要約

①「高温イオンモード」において、この10年来突破できなかったイオン閉じ込め電位 $\phi_e=1$ kV の壁を突破し、この10年来の最高電位を約2倍に高める $\phi_e=1.4$ kVの達成に成功した。[以下の図 1]

② この高電位生成に伴い、プラズマ半径 r_c 方向の 電場 E_r のシア dE_r/dr_c が大きくなり、

今回初めて計測に成功した「turbulentな渦状のプラズマ内の構造」が、高電位生成・高電場シア dE_r/dr_e の形成により、渦が「晴れ渡るように」抑制される事を初めて示した。

[以下の図 2 に揺動周波数分析・揺動径方向分布・シア分布。図 3 に (b)シアのない場合の渦の分布と、(a) シア形成と共に、渦が消え、温度も高くなる X 線断層撮像結果を示す。]

③ この時、電場 E_r のシア dE_r/dr_e が、H モードや内部輸送障壁 (ITB) の物理機構に本質的であるという最近の環状系の議論と対応するように、シア形成とともに、径方向の非両極性 (non-ambipolar) 輸送が確かに改善され、閉じ込めが改善されている事も同時に得られ、径方向電場 E_r のシア効果の普遍性をうかがわせる成果を得た。[図 2(j)]

④ 加えて、上記の電位やこれに伴う電場のシア形成のための、生成物理機構・比例則を研究することは、延いては、電位や電場のシアの効果を生成・制御するために、本質を成す研究課題である。この数年来、我々は米国物理学会誌 *Physical Review Letters*、並びに リオンで開催された斯界最大の国際会議である第 19 回 IAEA 主催 *Fusion Energy Conference* [9] に於いて提唱した (最終日の、会議の纏めのセッションの冒頭で、我々の発表した理論と比例則データの良い合致が報告された) 「電位生成 及び 生成電位効果の新統合理論・比例則」の予想に対して、今回の電位生成データの 2 倍の進展に対しても充分に拡張・適用できること [図 5]、また本「電位生成電位効果の統合理論」の拡張性として、新たなセントラル電子サイクロトロン加熱 (ECH) や中性粒子入射 (NBI) 加熱等の、外部加熱電力重畳時にも、本提唱理論が成立する事を初めて実証した。

本研究結果は、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と共に、上記のように、今後の電位・電場シア形成・制御法にも広く繋がりを、著しい成果と位置づけることができる。

(2) 研究成果の詳細

(I) 高温イオンモードにおいてこの 10 年来突破できなかったイオン閉じ込め電位 $\phi_e=1\text{ kV}$ の壁を初めて突破し、これまでの最高電位を約 2 倍に高める、 $\phi_e=1.4\text{ kV}$ の達成に成功した。
[図 1]

即ち、今回プラグ部電位 Φ_p の著しい増大の成功に伴い、イオン閉じ込め電位 ϕ_e の値を、従来よりも 2 倍大きくすることができたため、セントラル部電位 Φ_c も著しく上昇 (プラグ部からのウォーム電子による伝導) し、その電位の 2 階微分である電場のシア dE_r/dr_e が従来よりも著しく大きくなった。

この高電位形成は、従来とは質の異なる E_r シア効果、即ち 図 2・3 に示す 不均一な乱れであるプラズマ渦 (Vortex) の明白な抑制・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初めての観測をもたらした。

また、本結果の新規性としては、(i) イオン閉じ込め電位 $\phi_e (= \Phi_p - \Phi_c)$ の生成値に関する新たな記録を塗り替え (この 10 年来の最高値の約 2 倍) プラズマ中の高閉じ込め電位生成を実証すると共に、この高電位生成により、径方向電場のシアが自動的に大きくなり、(ii) 「無衝突プラズマにおける E_r シア効果」を、開放端系で世界に先駆けて今回初めて示したものである。(E_r シア効果は、以下の図 2・3 の説明として後述。)

これにより、20% ECH 電力の増大による高効率電位生成予想の実証を、「リオンの IAEA で我々が提唱した電位生成に関する ECH 電力比例則」[9] 通りに示した。

これらは、最近の韓国 HANBIT (ハンビット) tandem mirror やロシアの AMBAL-M tandem mirror、更には従前の米国の TMX-U 装置の結果を含め、本結果は高温イオンモード ($T_i=5\text{ keV}-20\text{ keV}$) に於ける、最大の閉じ込め電位生成新記録であると共に、「無衝突ミラープラズマにおける E_r シア効果」としては世界的にも先例を見ないものである。

(II) 高電位生成 (図 1) に拠る、強い半径方向電場 E_r シア (dE_r/dr_c) の形成 [図 2] と、これによるプラズマ内の乱流渦(vortex)の抑制・消滅 [図 3] の発見。それに基づくプラズマ閉じ込め改善 (非両極径方向拡散の抑制:図 2j) とプラズマ・パラメータ向上。

今回新たに得られた高電位生成により、以下の式からもわかるように、強い半径方向電場 E_r シア $(dE_r/dr_c \sim \text{数}10\text{ kV/m}^2)$ の形成が自動的に行われ、下記の様に、プラズマ安定化並びに閉じ込めの改善が行われる事がプラズマ内部構造と共に初めて明らかになり、電場シアの効果の新たな知見が得られた。これは今後のトカマクやヘリカル等の他形式のプラズマ閉じ込め改善に対するメカニズムの究明・普遍化への、端緒となる可能性を与える成果である。

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

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

また、同時に $dE_r/dr_c = 2(1/a)^2[1-2(r_c/a)^2] \times (\Phi_c(0)\exp[-(r_c/a)^2])$ より、 $[1-2(r_c/a)^2]=0$ 、即ち $r_c = (\sqrt{2}/2)a \approx 0.71a$ で、必ずシアが 0 になる位置がある事になり、この位置近傍でのシア効果の空間分析結果が「シアのない空間で何が起きているかを観測する」事 (延いては逆にシアが現象の主因であるかどうかのチェック) に繋がる。

右の図 2 は、Plug ECH 印加前 (70-75ms) と印加中 (96-101ms) のデータセットを比べた物である。ECH印加前のプラズマ断面の方位角 θ 方向の位相相関のあるコーヒーレントなドリフト波 (マイクロ波フラウンホーファー法や表面のLangmuirプローブで同定:例えば、A. Mase et al., 文献[5]) に加え、乱雑でturbulentな振動成分 (θ 方向の位相相関は検出されない) [図 2(b)]が見られ、(c)(d)に示すように、これは半径全体に渡り存在している。

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

この時に、上記のHIBPやIESで求めた電位分布から、 E_r シア分布を求めたものが夫々(e)(i)で、ECHと共に確かに大きなシア $-dE_r/dr_c$ が形成され[図 2 (i)]、また図 2 (i)でよく見ると6cm近傍で確か確かにシア $-dE_r/dr_c$ が無くなっており、

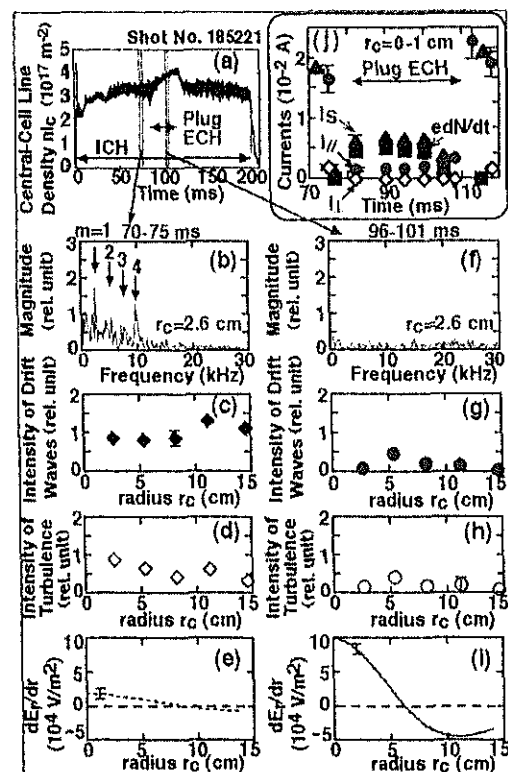


図 2. "Quiet plasmas" during ECH with improved confinement having a strong shear dE_r/dr for fluctuation suppression.

上の予想と合致する。

尚、茲で、 a の値は実験では9cmであるので、シアアの無くなる $r_c=(\sqrt{2}/2)a \approx 0.71a$ は 6.4 cmと計算され、上記の実験値6cmと比較的よく一致している。

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

更に、この現象の空間構造のX線撮像に今年1月に初めて成功したデータが図3である。トカマク等のアイランドの撮像にも似て、図3では、(b)のECH印加前に局所的な渦構造が、時間と共に不安定に変化しながら、生成されたり消滅する時間変化を繰り返す。しかしながら(a)のECH印加と共に、これらの渦構造が「晴れ渡るように」消えて行き、温度も上昇する。(尚、このときにイオン温度(≈ 5 keV)も同様に上昇する。)

この時の、プラズマ閉じ込めについては、こうした渦構造は、渦に沿った拡散を誘起するであろう事が先例からも予想できるが、確かに以下の粒子バランス式を計算すると、図2(j)に示すように、

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

の密度上昇(磁力管内のプラズマ粒子数 N の上昇)が、中性粒子数を示すソース電流 I_s から端損失電流 $I_{||}$ を差し引いた量とECH印加中には一致し、径方向拡散電流 I_{\perp} が無視できる事がわかる。(粒子バランスの議論の詳細は、例えば文献[3]。)

尚、本年2月号のプラズマ核融合学会誌[10]にも示したように、ECH電力を下げて、電位を大きくせずに実験を行うと、シアアも図4(e)のように小さくなると共に、drift波やturbulentな揺動は抑制されず、(f)に示すように、径方向拡散電流 I_{\perp} が無視できなくなる。この時、プラズマ中の渦構造が残っており、閉じ込めを悪くしている上記の描像と一致する。また、(a)に示すように、密度もECH印加後すぐに飽和状態となり、上昇しなくなる。

以上はタンデムミラー実験では初めての研究成果である。また、渦の明確な特定は、ITBの生成要因として極めて重要視され、世界的にも理論予想が多数報告されているにも拘わらず、実験的実証は殆ど成されていない。

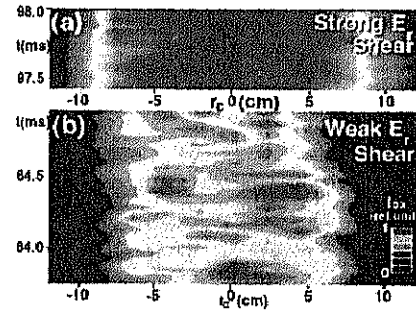


図3. Contours of central-cell x-ray intensities in (a) strong and (b) weak E_r shear cases. "Hot-colored areas" illustrate higher plasma-pressure locations. Vortex-like structures are found in (b).

[The X-ray intensities being proportional to $(nT)^2$; more precisely $(n^2 T^{2.5})$.]

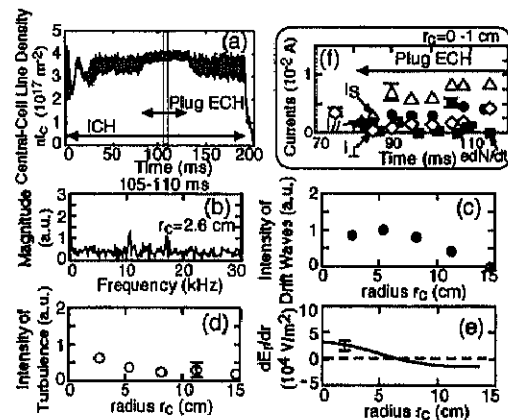


図4. Poor confinement with a weak shear formation providing strong fluctuations of drift waves and incoherent turbulence. An appreciable transverse transport loss I_{\perp} is observed [diamonds in (f)] under the weak shear conditions.

(III) 今回の高電位生成や E_r シアア(dE_r/dr_c)の形成の背景を成す物理原理である、電位生成機構・物理比例則について[図5]。特に、これまで我々が提唱してきた電位生成理論の拡張性(電位・電場シアア形成・制御法に繋がる)について。

1979年以来のガンマ10の代表的プラズマ・モードはHigh Potential Mode [図 5の平面(a)に対応]と、Hot Ion Mode [図 5の平面(b) に対応] に大別される。

本研究でこれらの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、電位や電場のシアの効果を生成・制御するための学術基盤としての本質を成す。

そのために、*Phys. Rev. Lett.* **86**, 4310 (2001)で我々が提唱した、「コーエンのStrong ECH理論[11]による電位生成物理機構の定説 $\phi_c = T_e [0.665 (n_p/n_c) \exp(1.19 \phi_b/T_e)]^{2/3} - \phi_b$ 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。[即ち、 $x = \phi_b/T_e = f^{-1} (2.01 \times 10^4 n_c^2 \ln \Lambda T_e^{-1/2} P_e^{-1})$, where $f(x) = [x \exp(x)] / [(2/3)x + I(x^{-1})]$ and $I(x) = (1+x/2)/(1+x^2/4)$, P_e [Wm⁻³]は電子加熱電力項。 n_c [10¹⁸ m⁻³]はセントラル部密度。]

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_i [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。

今回の結果は、上記のガンマ10の代表的プラズマ・モードにおいて見出した「電位生成及び生成電位効果の新統合理論・比例則」の予想と、電位生成の今回の進展に伴う生成電位データが合致し [図 5]、本「電位生成電位効果の統合理論」の拡張性が、新たなセントラルECH [図 5の平面(c)に対応] や、プラグ電位生成用スロッシングNBI [図 5の平面(d)に対応] 等の 外部加熱電力重畳時にも成立する事を初めて実証するものである。これは、今後の電位生成への拡張性・伸張性の将来展望を与える、重要な比例則実証結果である。

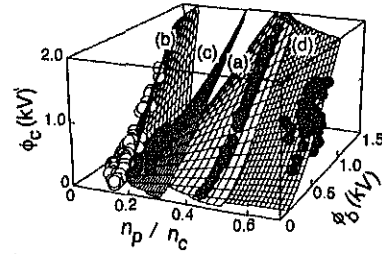


図 5. Our proposed surfaces [6] for studying potential formation physics with data fit are well extended in an advanced mode (d).

- [1] S. Miyoshi *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th IAEA International Conference, Innsbruck., 1978)* **2**, 437 (1979).
- [2] S. Miyoshi *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 13th IAEA Int. Conf. Washington D.C., 1990)* Vol. 2, IAEA, Vienna (1991) 539; *Plasma Physics Rep.* **23**, 723 (1997) [*Soviet Journal of Plasma Physics*].
- [3] T. Cho *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1373 (1990); *Phys. Rev. A* **45**, 2532 (1992).
- [4] Y. Kiwamoto *et al.*, *Phys. Plasmas* **3**, 578 (1996).
- [5] A. Mase *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2281 (1990).
- [6] T. Cho *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4310 (2001).
- [7] T. Cho *et al.*, *Nucl. Fusion* **41**, 1161 (2001).
- [8] T. Cho *et al.*, *Nucl. Fusion* **43**, 293 (2003).
- [9] T. Cho *et al.*, in *Fusion Energy (Proc. 19th IAEA Int. Conf. Lyon, 2002)* IAEA-CN-94/EX/C1-4Ra.
- [10] T. Cho *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 81 (2004).
- [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).

【4】 ガンマ10プラグ部における高電力電子加熱実験[1-3]

1. はじめに

ガンマ10では、プラグ部 ECRH の高電力化計画が進行中である。平成15年度ではこの第一段階として、ジャイロトロン電源の改造及び導波管の高電力伝送性能を改善することにより、既設ジャイロトロンの定格値 200kW を越えて運転することを試みた。この運転は成功し、高イオン温度モードにおいて加熱電力 240kW の時に、イオン閉じ込め電位の記録値 1.4kV を達成した。その後、高電位モードでの高電位形成に努力を集中した。入射最高電力は 260kW である。

プラグ ECRH は、強い軸方向電子流を誘起する。この一部は真空容器端壁に設置されているエンドプレートに到達して端損失電子になる。端損失電子は高電力電子加熱効果のよい観測媒体である。さらに、端損失電子の平均エネルギーとしての実効温度 T_{eff} は軸方向電位構造の規定因子である。このことは、高電位モードにおいても成り立つ。実効温度は加熱電力とともに上昇し、260kW では 3keV に達した。プラグ部の電位 Φ_p とエンドプレートの電位 Φ_{EP} の差は両実験モードで同じスケーリング則に従い、 T_{eff} とともに増大する。高電力加熱実験でこのスケーリング則が拡張され、電位差 $\Phi_p - \Phi_{EP}$ は最大 5 kV に達した。

2. ジャイロトロンの高電力化試験

まず、既設の 28GHz, TE02 モード、定格出力 200kW ジャイロトロンの高電力化試験の結果を述べる。これまでに、ジャイロトン定格出力 200kW にほぼ等しい 190kW まで上げた実験がなされている。この実験によると、ジャイロトロンの出力電力とともに、真空容器を基準にしたプラグ部の電位が上昇することが分かっている。同時に、プラグ部電位と中央部電位の差としてのイオン閉じ込め電位も大きくなる。これから、さらに高電力を用いた実験をすればより高い電位が得られると期待される。ところが、ジャイロトロンの出力はビーム電流で決まっており、これまではジャイロトロンの保護のため、既設ビーム電源は定格出力 200kW に対応する定格電流値 8A の約 10%増の 9A 以上流さないように制限されていた。一方、ジャイロトロンの試験データによると、特性のよいジャイロトンを選定すれば、ビーム電流をさらに流すことにより、200kW 以上の高電力が得られることが期待された。そこで、電源を改造してこの電流制限をはずし、ジャイロトロンをより高電力で運転することが可能かどうかの試験を行った。

図1にビーム電流に対するマイクロ波出力の変化を調べた結果を示す。縦軸は水負荷を用いて測定したマイクロ波出力である。測定時には発信周波数が 28GHz であり、TE02 モードで発振していることを確認している。図中白丸印はこのジャイロトロンの納入時の試験データ、黒丸印が今回の高電力化試験時のデータを示している。ビーム電流 8A 以下で両者はよく一致しており、測定の信頼度の高いことがわかる。ビーム電流の増大により最大 280kW の出力を得た。ただし、ビーム電流が 10A を越えると、ピッチファクターの低下による

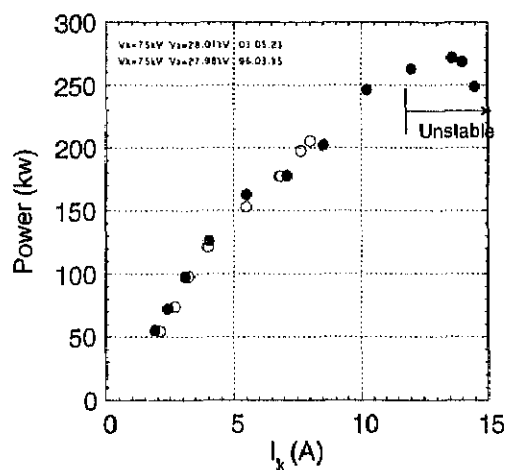


図1 既存ジャイロトロンの出力のビーム電流依存性

と思われる出力の飽和傾向が見られる。さらにビーム電流を上げると発振が不安定になる。安定発振領域では 260kW 程度の出力が得られた。これからジャイロトロンの高電力運転の見通しを得たので、プラグ部の電子加熱実験に適用した。

3. プラグ部高電力加熱と高電位形成

実験は、ガンマ 10 における主要な二つの運転モードの一つである高イオン温度モードでの高電力入射から始めた。図 2 にその結果を示す。図中の上向き三角印はプラグ電位、丸印は中央部電位、下向き三角印はエンドプレート電位である。それぞれ真空容器を基準にした電位である。黒塗り記号がこれまでの実験結果、白抜き記号が最近の高電力加熱実験に対応している。入射電力に対する各部の電位の変化はこれまでの傾向に一致し、入射電力にほぼ比例してプラグ電位は上昇し、電氣的に浮遊のエンドプレート電位は大きく負に沈む。これに対して、中央部の電位は加熱電力に対する依存性が弱くあまり上昇しない。この結果、イオン閉じ込め電位は加熱電力とともに大きくなる。240kW 入射でイオン閉じ込め電位の最高値 1.4kV を得た。

はじめに述べたように、プラグ部の電子加熱は強い軸方向電子流を誘起する。これらの電子の一部は負のエンドプレート電位を乗り越え端損失電子として観測される。測定には、エンドプレート上の小孔後部に設置した多重グリッド型の静電エネルギー分析器 LED を用いた。図 3 に測定例を示す。これまでの実験に対応する 100kW 加熱の場合と 240kW 加熱の場合のデータがプロットされている。図の横軸は、LED の電子リペラー電圧の絶対値である。図の左側で電流値が一定になっているのは、リペラー電圧がエンドプレート電位より負値になるまでは、エンドプレートが実効的な電子リペラー電極の役割を果たすからである。実際、データの肩の電圧はエンドプレート電位に等しい。

加熱電力の増大により、端損失電子の中で高いエネルギーをもつ電子の割合が大きくなっている。端損失電子のエネルギースペクトルは単一温度では表現できないが、温度 T_L の低温成分、温度 T_H の高温成分からなる 2 成分のマックスウェル分布でよく近似できる。このとき、次のように定義された実効温度 $T_{eff} = (1-\beta)T_L + \beta T_H$ は端損失電子の平均エネルギー

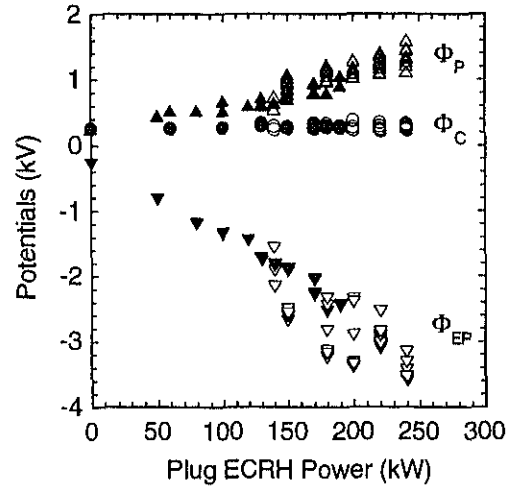


図 2 プラグ電位、中央部電位、エンドプレート電位の加熱電力依存性

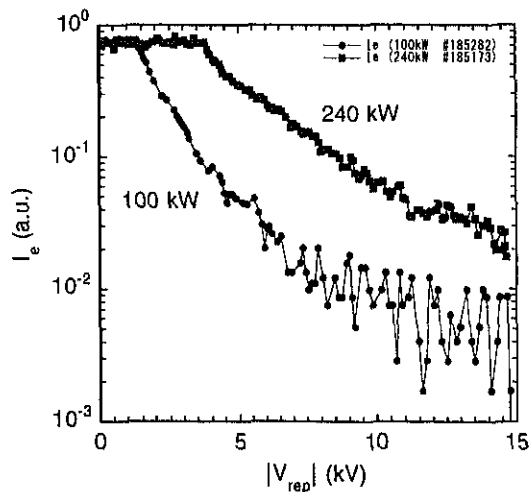


図 3 LED による端損失電子の電流—電圧特性

ギーのよい指標となる。 β はエンドプレート電位で見た高温電子成分のフラックス比である。これまでの実験で、加熱電力 260kW のとき、 T_{eff} は最大 3keV に達した。

4. 電位分布のスケーリング則の拡張

プラグ部電子加熱により駆動される軸方向電子流は軸方向の電位構造に対する重要な因子であり、実効電子温度が電位差 $\Phi_P - \Phi_{EP}$ を規定することが報告されている。高電力加熱時にこのスケーリング則の妥当性を調べることは、電位形成機構を理解する上で重要である。

そこで両者の関係をプロットして図 4 を得た。黒丸は以前のデータ点を示し、白抜きデータ点が今回の高電力加熱実験で得られたものである。これから、 $\Phi_P - \Phi_{EP}$ と T_{eff} の間のスケーリング則が拡張されることがわかる。なお、図中の白四角印は高電位モードにおいて得られたデータを表している。高電位モードにおいても、同一のスケーリング則の拡張が確認された。さらなる高電力加熱を行った場合の指標となる。

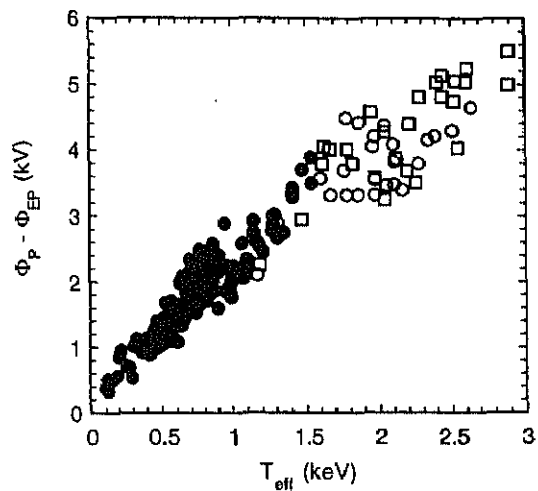


図 4 軸方向電位差と端損失電子の実効温度の間のスケーリング則

- [1] 斉藤輝雄、立松芳典、池上博和、関根貴之、市川智也、永井大智、野崎 潔、渡辺裕美他、ガンマ 10 におけるプラグ部高電力電子加熱実験、プラズマ・核融合学会第 20 回年会 28pB03
- [2] 池上博和、斉藤輝雄、立松芳典、関根貴之、市川智也、永井大智、野崎潔、渡辺裕美他、ガンマ 10 における端損失電子のエネルギースペクトルの分析、プラズマ・核融合学会第 20 回年会 27pB14P
- [3] SAITO Teruo, TATEMATSU Yoshinori, IKEGAMI Hirokazu, SEKINE Takayuki, NAGAI Daichi, NOZAKI Kiyoshi, YOSHIDA Maiko, ISHII Kameo, CHO Teruji, Expansion of Scaling Law of Field-Aligned Potential Difference with Increased Plug ECRH Power in GAMMA 10, to be published in J. Plasma and Fusion Research (2004).

【5】 アンテナ設計のための電磁界計算コードの開発[1,2]

ガンマ10では、プラグ・バリア部でのプラズマ閉じ込め高電位形成とセントラル部電子温度上昇を目的として、ECRHを行っている。プラグ部ECRHでは、高パワー入射をめざして、既存の電源の改造による既設ジャイロトロンの定格値以上の運転の試みと並行して、高出力ジャイロトロンの新規設計を行っている。既存ジャイロトロンは円形 TE_{02} モードのマイクロ波を発振し、導波管の伝送モードも同じく TE_{02} モードで、ガンマ10内へ伝送し、ブラゾフアンテナにより直線偏波ビームをプラズマ中へ入射している。これに対して、新規ジャイロトロンは、 TE_{42} モードで発振し、ジャイロトロン内でモード変換し、直線偏波のガウスビームとしてジャイロトロン窓からマイクロ波を放射する。導波管伝送モードは、ガウスビームとよく結合する HE_{11} モードとなる。このため、これまで用いてきた TE_{02} モード用ブラゾフアンテナに替わるアンテナ系を設計する必要がでてきた。

また、セントラル部基本波ECRHシステムは、共鳴層からかなり離れた小さなポートからECRH用のマイクロ波をガンマ10内へ入射している。現在のガンマ10内の伝送系はパワー伝送の面で最適化されておらず、入射パワーの1割程度しか、共鳴層プラズマコア部に達していない。これを改善するために、アンテナ・反射鏡の改良・新規設計を行う必要がある。

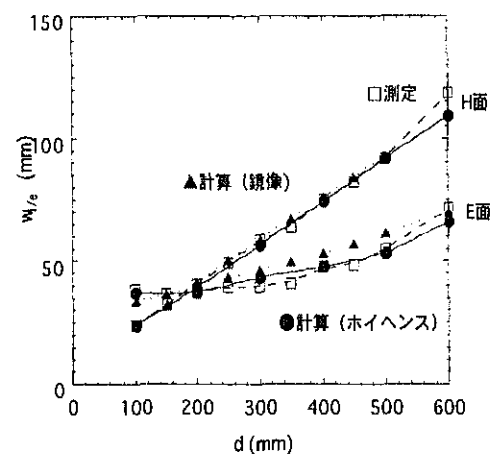
昨年まで、プラグ部ECRHにおいて、既存ブラゾフアンテナからの放射ビームの共鳴層での断面を広域化かつ円形化するために、アンテナ系の鏡の設計を行ってきた。この設計には、鏡面の焦点距離の決定に幾何光学を用いる手法や位相マッチング法を用いてきた。しかし、設計を元に製作した鏡で低電力試験を行ったところ、意図通りのビームを得ることができなかった。マイクロ波が鏡の法線に対して大きな角度を持って入射するため、上の手法はその適用範囲を超えている。

以上の理由から今回電磁界コードを作成し、これを用いて鏡の設計を行った。電磁界コードは、アンテナの導波管開口面での電磁場分布を与えて、これが仮定した鏡面上につくる電磁場をホイヘンスの原理より

$$\mathbf{E}' = \int_S (-i\omega\mu_0(\mathbf{n} \times \mathbf{H})g + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \nabla g + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})\nabla g) dS$$

$$\mathbf{H}' = \int_S (i\omega\epsilon_0(\mathbf{n} \times \mathbf{E})g + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \times \nabla g + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{H})\nabla g) dS$$

で計算する。ここで、被積分関数中の \mathbf{E}, \mathbf{H} は開口面 S 上の電磁場、 g はヘルムホルツ方程式のグリーン関数、 \mathbf{n} は面の法線を表す。次に、反射鏡面上の電磁界分布から、鏡面上に流れる誘起電流を計算し、これからの放射電磁界を計算することで、鏡反射後の電磁場を求める。この電磁界コードを用いた計算例として、現在使用しているブラゾフアンテナの放物鏡からの放射ビームの電磁場を、幾何光学的鏡像を用いた計算例と比較する。その結果を図1に示す。ビーム半径の鏡像法による計算結果を▲、今回作成した電磁界コードによる計算結果を●で表し、低電力試験による測定結果を□で示す。E面の計算では、鏡像による計算は、現実のビームからのずれがみられる。これは、取り扱う波長が約1cmとアンテナサイズに比べても



小さくなく、回折効果がきくためと考えられる。一方、電磁界コードの結果は測定結果とよくあう結果を得た。このコードを用いて、プラグ部・セントラル部 E C R H 用のアンテナ系の設計を行った。

- [1] Y. Tatematsu, T. Saito and the GAMMA 10 group, Design of a reflecting mirror on the plug-ECRH system in the GAMMA 10 tandem mirror, in *Joint workshop of annual US-JA workshop on RF heating technology and the 6th EU-JA workshop on RF Antenna and related technology*.
- [2] 野崎潔、立松芳典、斉藤輝雄、津田英介、池上博和、関根貴之、市川智也、永井大智、渡辺裕美、久保伸、下妻隆、長照二、ガンマ 10 プラグ部 E C R H 用反射鏡の設計、プラズマ・核融合学会第 20 回年会 27pA22P.

【6】 磁場形状の第2高調波ECRHに及ぼす影響[1]

ガンマ10では、周波数 28GHz のマイクロ波を入射し、バリア部・セントラル部の磁場強度 0.5T の点で、第2高調波ECRHを行っている。バリア部ECRHは、サーマルバリア高電位形成に使用されている。セントラル部ECRHは、電子温度上昇によるイオンの電子ドラッグ軽減のために、今後の実験で重要な役割を担うと期待されている。基本波加熱であるプラグ部ECRHにおいては、マイクロ波パワー吸収の空間分布が、プラズマ閉じ込め改善の重要なキーになっており、その空間分布を制御するために、入射ビームの整形を行ってきた。第2高調波加熱についても、吸収分布の制御は加熱の効率化のために重要である。マイクロ波パワー吸収量はプラズマパラメータの他、磁場形状の影響も受ける。このような背景から、加熱配位の最適化のため、磁場形状が第2高調波ECRHに及ぼす影響をレイレーシングを用いて調べた。モデル磁場として、ガンマ10セントラル部・バリア部の他、プラグ部磁場分布を採用した。プラグ部ECRHは実際は基本波加熱であるが、仮想的に 56GHz の波を入射して、第2高調波加熱の振る舞いを調べた。

図1にセントラル・バリア・プラグ部の中心レイに沿った磁場強度の変化を示す。プラグ部は、レイに沿って磁場強度が大きく変わるのに対し、セントラル部・バリア部では磁場強度の変化が小さい、この理由は、磁場形状の違いにある。セントラル部の軸方向の磁場のスケール長は約 25m、バリア部は 5m であるのに対し、プラグ部は 0.4m と小さい。磁場のスケール長が大きいと、全体の吸収量は大きくなるが、吸収範囲が大きくなる分、空間分布の制御は難しくなる。

図2にそれぞれの場所で磁場強度を変化させたときの吸収率の変化をしめす。プラグ部では、数パーセント磁場が変化しただけでは、吸収量はほとんど変化しないのに対し、セントラル部では磁場強度が 1% 変化すると、吸収量は大きく減少する。この理由も磁場のスケール長の違いにあり、スケール長が大きいと、吸収量は大きい、その分磁場強度の変化に敏感である。プラズマ温度が上がり、反磁性量が大きくなり、磁場強度がさが

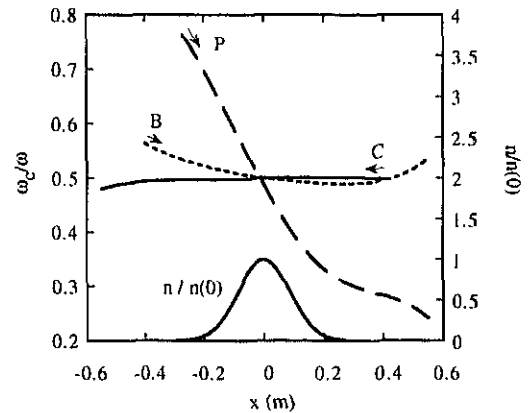


図1 レイに沿った磁場強度変化とセントラル部密度分布

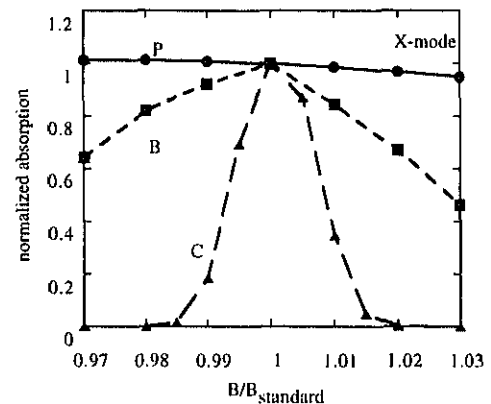


図2 磁場強度を変化させたときの中心レイの相対吸収量（標準磁場を1）

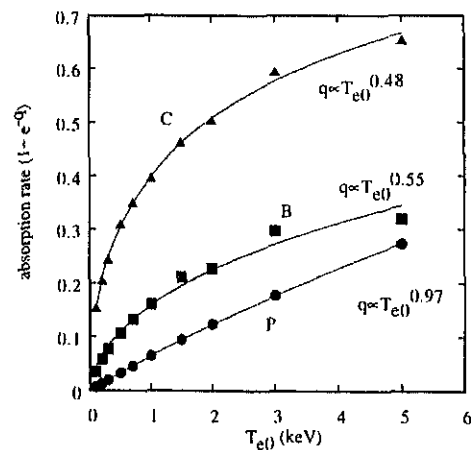


図3 レイの光学的厚みの温度依存性

ると、吸収効率が低下することになるため、現在のセントラル部第2高調波加熱では、電子温度上昇の頭打ちが起きる。

図3に軸上温度に対する吸収率の依存性をしめす。セントラル部・バリア部のマイクロ波の光学的厚みは、軸上温度の $\sim 1/2$ 乗に比例するのに対し、プラグ部では軸上温度に比例する。この違いも、レイにそっての磁場強度の変化から説明することができる。

- [1] Y. Tatematsu, T. Saito, I. Katanuma, and T. Cho, Effects of magnetic field distribution on power absorption through second harmonic electron cyclotron resonance heating in mirror machines, in *13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, P2-65.

【7】 高周波加熱プラズマからの端損失電子へのAIC波動の作用[1]

ガンマ10の高イオン温度モードでは、イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICRH)によりイオン温度が数 keV に達するが、ミラー磁場配位のため、加熱されたイオンは大きな温度非等方度 ($T_{\perp}/T_{\parallel} \geq 10$) をもつ。そのため Alfvén Ion Cyclotron (AIC) 不安定性が励起される。この AIC 波動は有限半径のプラズマ中に励起されるので、磁力線方向の波動電場をもつ。波動の位相速度と電子の熱速度がほぼ等しければ、電子ランダウ減衰機構による共鳴的な相互作用が生じる。

端損失電子の測定を通してこの相互作用を調べることができる。測定には多重グリッド型静電エネルギー分析器 LED を用いた。イオンサイクロトロン速波によりプラズマが生成され、別に励起されたイオンサイクロトロン遅波による ICRH が行われると、AIC 波動が励起される。このとき、電子ランダウ減衰による磁力線方向の電子加速の結果として、端損失電子の温度 T_e ・電流 I_e がともに増加する。図1はこの加速を高温イオンへの電子ドラッグとの対比で示している。横軸は電子ドラッグの指標 $n_i T_i / T_e^{1.5}$ に対応し、縦軸は装置端へのパワーフロー密度 $2T_e I_e$ である。AIC 波動が励起されると、パワーフローは黒丸でプロットされている電子ドラッグで決まる値の2~3倍に増大する。これは、電子へのAIC波動の強い作用を示している。

電子のパワーバランスに対する電子ランダウ減衰の効果をパワーバランス式

$$\frac{3}{2} \frac{dnT_e}{dt} = \frac{L_c}{L} (P_{drag} + P_{LD}) - \frac{3}{2} \frac{nT_e}{\tau_e E}$$

を用いて解析した。図2にその結果を示す。黒丸は電子ドラッグに対する電子ランダウ減衰の大きさの相対値の変化、実線はこの補間曲線である。AIC 波動の位相速度が時間的に大きく変化するので、特定の時間帯でのみ電子ランダウ減衰による共鳴相互作用が生じる。白丸は端損失電子温度の測定値、実線は上式による計算値である。計算結果は、測定された電子温度の時間変化をよく再現している。このことは端損失電子の測定を通して、AIC 波動の電子への共鳴的作用が観測されたことを示している。なお、磁力線方向への電子の輸送はイオン束とバランスしなければならない。上のパワーバランス式では、このことはエンドプレート電位で決まる電子の閉じ込め時間 τ_e^E を通して取り入れられている。

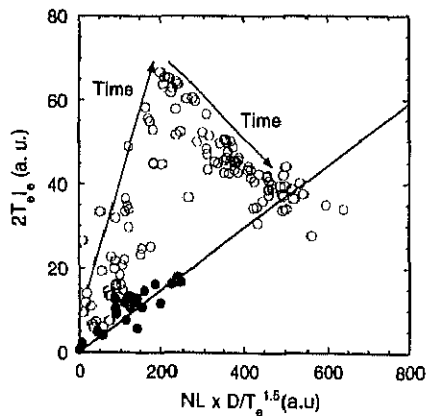


図1 電子ドラッグパワーに対する端損失電子のパワーフロー

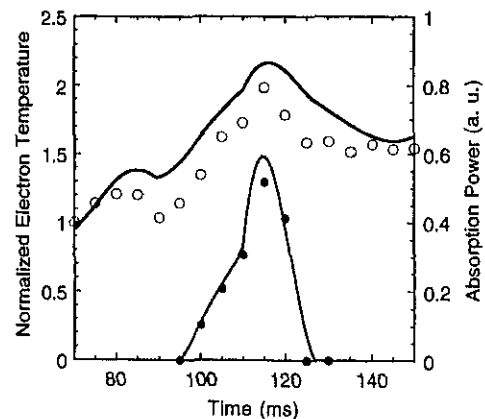


図2 電子温度の測定値とパワーバランス式による評価の比較

[1] Teruo SAITO, Eiji YOKOYAMA, Yoshinori TATEMATSU, et al., Journal the Physical Society of Japan Vol. 72, No.8 (2003) pp.1977-1982.

【8】 径方向電場に起因する電位捕捉イオンの輸送の研究

プラズマ両端部近傍に形成される電位が閉じ込め向上の本質であるタンデムミラー装置に於いて、電位捕捉された無衝突イオンの径方向電場に起因する輸送現象を研究した。閉じ込め電位及び強磁場部で反射されるバウンスイオンの存在は、閉じ込め時間を向上させ、プラズマ密度を増加させるための必須条件であるため、バウンスイオン存在量の径方向電場依存性に着眼し、望まれる径方向電位分布を見出すことを目的とする。

(1) プラグポテンシャル (P P) バウンスイオン

標準磁場配位では、中央ソレノイド部の磁場強度は4 k G、その両端のミラースロート (C M) 磁場強度及びアンカー部のミラースロート磁場強度は20 k G、プラグ/バリア部の外側ミラースロート (O M T) 及び内側ミラースロート (I M T) 部の磁場強度は30 k G、プラグ部の磁場強度は10 k Gである。図1に加熱系位置と共に磁場コイルと磁力線の上面図、及び磁場強度分布と電位分布を示す。

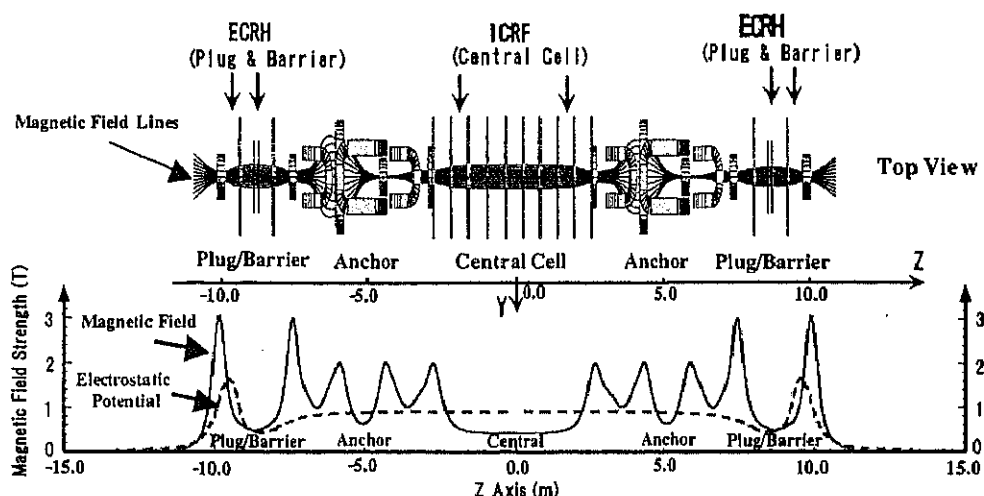


図1 : GAMMA 10 タンデムミラーの磁場コイル及び磁場強度と電位分布

中央ソレノイド部からのイオンは、そのミラースロート (20kG) 近傍の磁場により跳ね返る C M (Central Mirror) トラップトイオン、ミラースロートとアンカー部を通過し I M T 近傍の磁場により跳ね返る I M T (Inner Mirror Throat) バウンスイオン、I M T 磁場を通過しプラグ部電位により跳ね返る P P (Plug Potential) バウンスイオン、プラグ電位も通過しプラグ/バリア部の外側ミラースロートで跳ね返る O M T (Outer Mirror Throat) バウンスイオン、電位及び磁場の何れの障壁にも跳ね返され無く磁力線に沿って流出する端損失イオンに分類され、図2に概略図を示す。

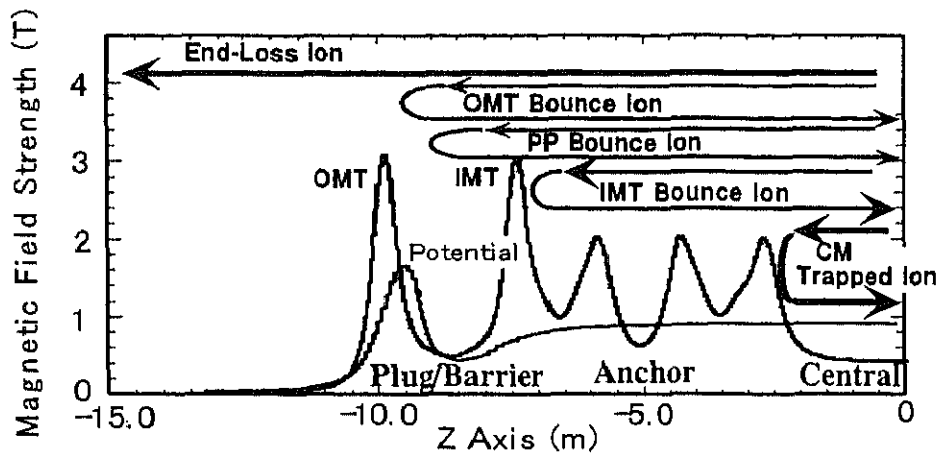


図2 磁場強度分布及び電位分布と各種バウンスイオン

各OMT, PP, IMTバウンスイオンの存在は実験的に確かめられている。今研究では、プラグ電位により跳ね返り非軸対称磁場配位を持つアンカー部を往復するプラグポテンシャル(PP)バウンスイオンの径方向電場に対する輸送について、以下の点に注目し検討した。即ち、中央ソレノイド部の中央断面上で円形の磁力管は、アンカーミラ一部では離心率が0.999819の強く扁平化した楕円形になり、中央ソレノイド部の軸対称な径方向電場は扁平部では局所的に極めて強くなる。高電位形成に伴いこの傾向は増大するため、平衡状態からのずれに起因し扁平な磁力管形状と等電位面形状とがずれる可能性が考えられ、ずれの輸送に及ぼす影響を検討した。

(2) PPバウンスイオン輸送の径方向電場依存性

セントラル部中央面内での径方向電位分布を、中心電位が300V、半値直径($2r_h(0)$)が0.14mの軸対称ガウス型とし、非軸対称磁場配位のアンカー部を通し磁力線に沿って電位が保たれているとする。従って、アンカー部ではx軸及びy軸方向に半値直径の異なる2種のガウス分布で、磁力管と等電位面とは完全に一致する。z軸方向には、図3で示す如くz軸上電位 $\phi_0(z)$ がプラグ/バリア部で変化する電位分布であるとした。即ち、 $\phi(r(0))$ を $z=0$ mでの電位分布とし、 $r_h(0)=0.07$ mとすると、 $\phi(r(0))=300\exp(-(\ln(2)/r_h(0)^2)r(0)^2)$ である。またz位置に於けるx軸、y軸

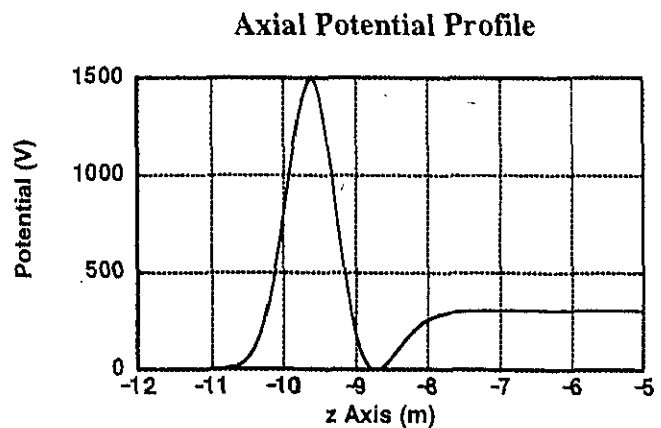


図3 電位のz軸方向分布の例

方向の電位分布は各々次の形になる。

$$\Phi_x(r_x(z)) = \Phi_0(z) \exp(-(\ln(2)/r_{xh}(z)^2)r_x(z)^2),$$

$$\Phi_y(r_y(z)) = \Phi_0(z) \exp(-(\ln(2)/r_{yh}(z)^2)r_y(z)^2),$$

ここで、 $r_{xh}(z) = r_{xhf}(z) - (r_{xhf}(z) - r_h(0))D_f$ 及び $r_{yh}(z) = r_{yhf}(z) - (r_{yhf}(z) - r_h(0))D_f$ であり、 $2r_{xh}(z)$ 、 $2r_{yh}(z)$ は z 位置に於ける電位分布の半値直径で、 $r_{xhf}(z)$ 、 $r_{yhf}(z)$ は座標(0.07, 0, 0)、(0, 0.07, 0)を通過する磁力線の z 軸からの距離を示す。磁力管と等電位面とのずれ因子として上式で定義された D_f を導入した。 $D_f = 0$ の場合は、アンカー部で磁力管と等電位面とは完全に一致し、 D_f が正の方向に向かうと、アンカーミラー部の等電位面の扁平度が緩和する。

イオンは $z = 0$ m の中央面上で半径 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09 m の円周に沿って 20° 間隔の位置から、ピッチ角 12° , 16° , 20° 、エネルギー 0.5, 1.0 keV で出発するとした。損失角は 21.2° で PP バウンスイオンの条件を満たす。下記の案内中心近似式によるイオン軌道を直接計算により確かめた後、軌道の径方向変位を検討した。

$$\frac{dv_{\parallel}}{dt} = -\frac{\mu \nabla B}{m} \cdot \frac{\vec{B}}{B} + \frac{e}{m} \frac{\vec{E} \cdot \vec{B}}{B}, \quad \vec{v}_{\perp} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} - \frac{\mu \nabla B \times \vec{B}}{eB^2} + \frac{mv_{\parallel}^2}{e} \frac{\vec{B}}{B^2} \times \left(\frac{\vec{B}}{B} \cdot \nabla \right) \frac{\vec{B}}{B}$$

半径 0.03m でセントラル部中央面から出発した軌道の計算例を図 4 に示す。電位捕捉されていたイオンが損失イオンになっていることが分かる。例えば $D_f = 0.05$ は楕円の離心率で 0.07 % の減少に対応し大きな変化ではない。アンカーミラー部の

扁平な等電位

断面の長軸近傍での

$E \times B$ ドリフトが磁力線を横切る大きな運動を与える。当箇所を通過するイオンは軌動変化を受け端損失イオンになる場合が大きい。同時に、セントラル部中央面での径方向電位分布の半値直径を、0.08, 0.14, 0.28m 変化させ、電場効果を検討した。これは、最大径方向電場が、約 5.0, 3.0, 1.5 kV/m に対応する。

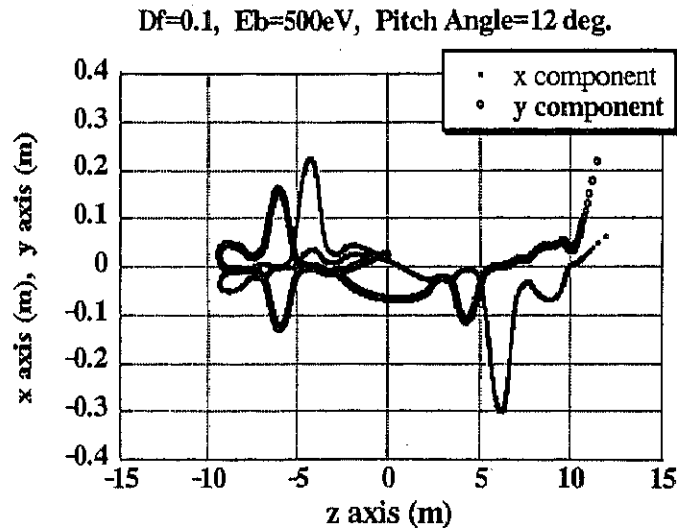


図 4 PP バウンスイオンの軌道例

D_r の変化及び出発点の位置変化に対応する損失率（1往復間で損失したイオン数の比：損失イオン数／初期捕捉イオン数）を算出した。例を図5に示す。電位分布の半値直径が0.28mと広がっている場合には、1往復間での損失率は殆ど現れなかったが、半値直径を0.08mと狭くすると、図の如く初期には電位捕捉されていたイオンが損失領域に落ち込む率を増加させることが知れた。

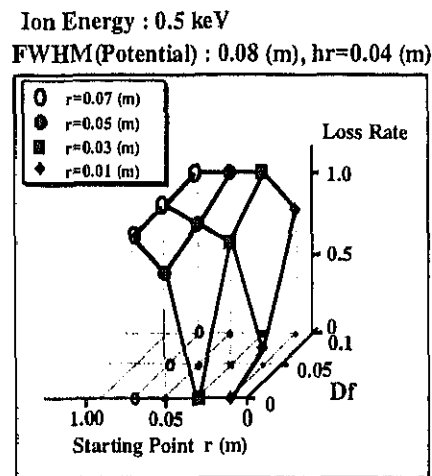


図5 1往復間での損失率の例

(3) 電位閉じ込めに適する径方向電位分布の検討

非軸対称磁場配位を持つアンカー部の磁力管断面が極めて扁平になるミラー位置において、平衡からのずれに起因する磁力管と等電位面との微小なずれで、アンカー部を往復するプラグポテンシャル (P P) バウンスイオンの軌道が影響を受け、電位捕捉領域内にあるイオンの損失領域への移行の促進が見出された。特に、軸方向閉じ込めを向上させる為に高閉じ込め電位を形成させる場合、プラズマ断面上で局部的に高電位を形成させることは得策ではなく、コアプラズマに亘り径方向電場を緩和させる方向に径方向電位分布を制御する方策を構築することが重要と考えられる。コアプラズマの径方向電位分布制御に対し、磁力線が繋がっている同軸分割型エンドプレートの径方向電位分布を外部から変化させる方策、及びプラグ電位を形成させるマイクロ波の入射パターンを変化させる方策を検討している。

【9】 多様な磁場配位に適応し得る電位及び揺動計測用の金中性粒子ビームプローブ(GNB
・BP : Gold Neutral Beam Probe) 法の開発

タンデムミラー装置を用いた閉じ込め研究は、プラズマの両端部に電位を形成させる電位閉じ込めが根幹をなし、電位計測が重要な役割を果たす。より効果的な閉じ込め向上を目指す磁場配位を探る目的で、磁場強度分布を変化させる実験も考慮されている。多様な磁場配位に適応し、セントラル部のプラズマ断面に亘る電位の2次元分布、及び電位揺動、磁場揺動、密度揺動の知見を得る為に、金の中性粒子を用いたビームプローブ法(GNBP)を考案した。1次ビームとして1価のイオンを使用し、2次ビームとして2価のイオンを用いる通常のHIBP(Heavy Ion Beam Probe)と異なり、中性粒子を入射し、2次ビームとして1価のイオンビームを用いる当方法は、当装置に内蔵された極小磁場コイルに起因する漏洩磁場の影響を極力避けることが出来、且つ揺動計測に対する軌道積分効果も減少させることが出来る等、優れた特徴を有する。

(1) セントラル部GNBP (Gold Neutral Beam Probe) の概要

x-y平面に投影したGNBPの全体図を図1に示す。金の負イオンビームは水素ガスにより中性化され、1次ビームとして $z=1.18\text{m}$ の場所でx-y平面に沿ってプラズマに入射される。正一価のイオンビームが分析器に入り、エネルギー及び各種揺動が測定される。プラズマ断面に亘る2次元電位測定に対しては、不規則漏洩磁場の下で2次ビームが常に分析器の入射孔に収束する条件が必要である。

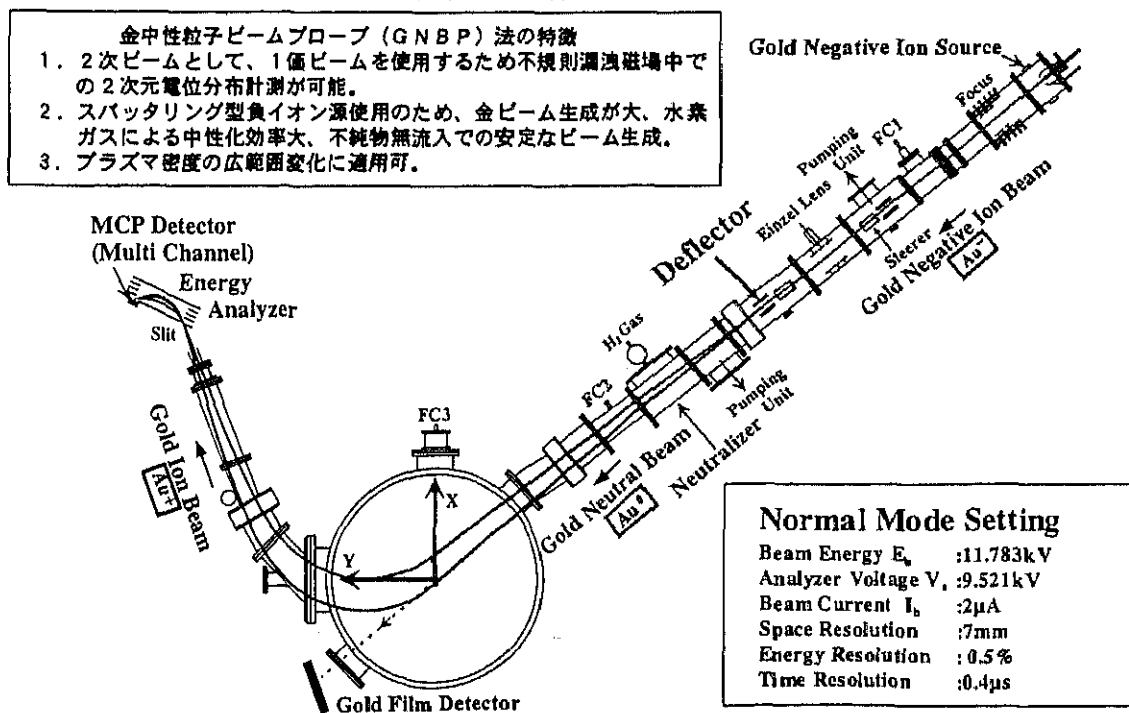


図1 セントラル部GNBPの全体図

(2) 磁場強度分布とGNBPの対応

実験として考慮すべき4種類の磁場配位 (Normal Mode, Second Harmonics ECH Mode, Fundamental ECH Mode, Modified Anchor Mode) に対し、GNBPの対応を検討した。各磁場強度分布と特徴を図2に示す。

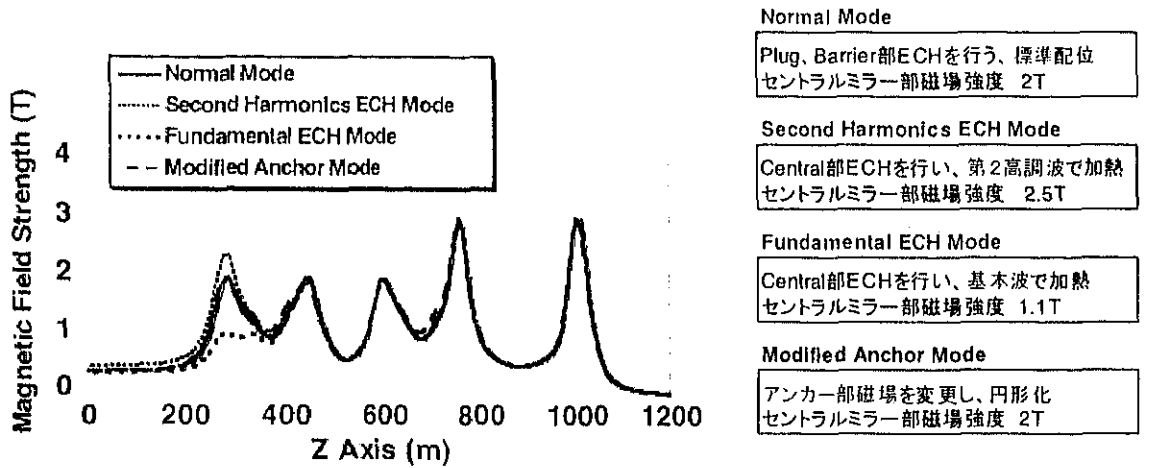


図2 各種の磁場強度分布と磁場モードの特徴

イオン軌道は磁場配位に依存する為、各磁場モードにより異なる。図3に標準モードと基本波ECHモードでの等磁気面の径方向の断面を示す。各磁場モードを通して注意すべき点は、2次ビームの軌道がアンカー部の漏洩磁場等の影響でz軸方向にずれ、完全に分析器の入射孔で再収束する解は存在しないことである。各磁場モードに対する微小なずれの修正用として、分析器に位置調整駆動機構を付加し解決した。

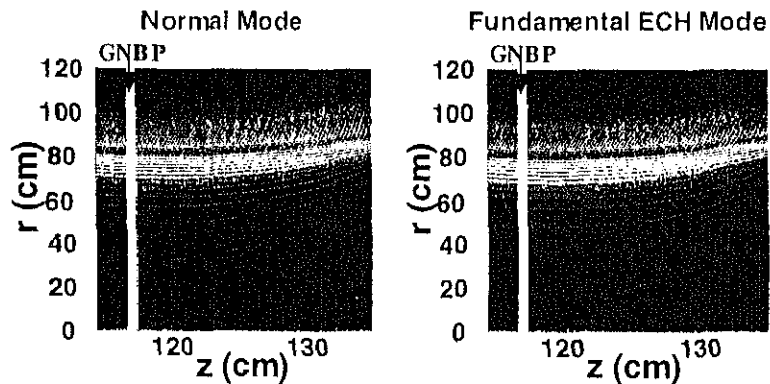


図3 等磁気面の径方向断面の例、違いが現れている。

ビーム検出器は電位測定用と磁場揺動測定用に2系統のマイクロチャンネルプレート (MCP) を用意した。45度入射型平行平板静電エネルギー分析器内でビームの到達方向に多チャンネルを持つ検出器は、電位測定に加え電位揺動、密度揺動が測定できる。また、ビーム到達方向と直交する方向に多チャンネルを持つ検出器により、磁場揺動に起因するz軸方向の軌道のずれを検出することが出来る。

プラズマ断面に亘る2次元電位分布測定は、ビームのエネルギーと共に入射角を掃引することにより得られる。2次元電位分布のグリッドマップの例を図4に示す。

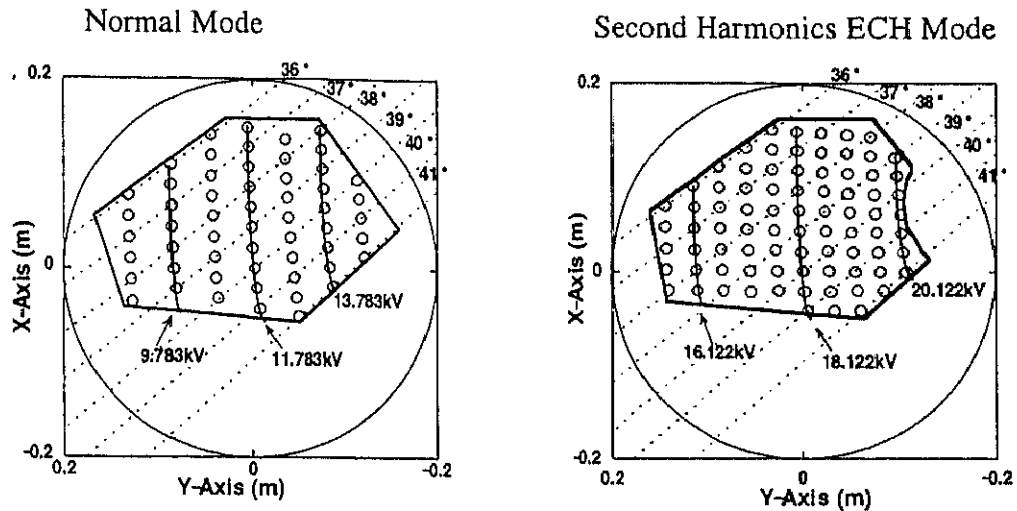


図4 標準磁場配位と第2高調波ECH磁場配位でのグリッドマップ、多角領域内が測定可能範囲、GAMMA10 真空ポートのサイズにより制限されている。

(3) 高電位測定に対する Iteration 法

プラズマ電位が高くなると、電位の影響を受け2次ビームの軌道が変化する。実際のイオン化点を求める方策として、Iteration 法を採用し検討を行った。低電位の軌道計算より

得られる電位導

出式を用いて電位

分布を出し、次にそ

の電位分布を基準

にし軌道計算を行

い、逐次精度を高め

る方法である。径方

向電位分布をガウ

ス型とし、算出する

と、1kVの電位であって

も2回行くと真値との

差が10V程度にまで近

づけることが出来る。

1kVより低い時は修正の

程度は低い。2kV以上の

高電位に対しても当

方法が有効であること

が見出された。計算結果

の例を図5に示す。

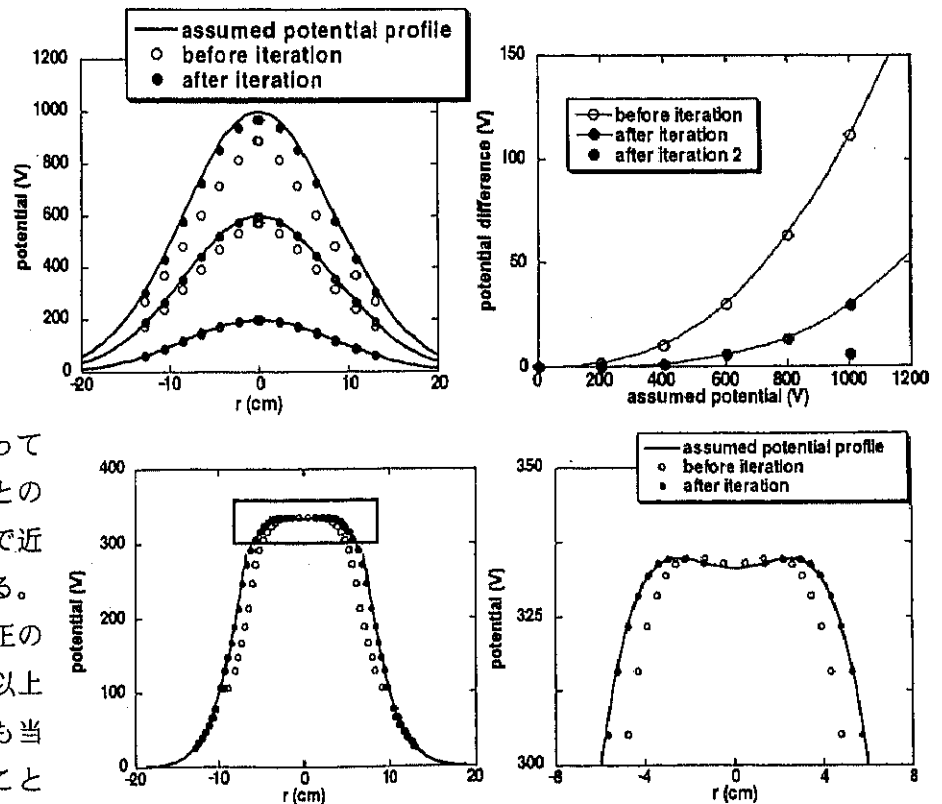


図5 上図：分布はガウス分布、下図：上部は4次式近似

(4) 校正実験及び測定例

分析器、検出器及びイオン源等の配置の妥当性を確認する為に、校正実験を行い軌道計算による理論結果との一致を確認した。標準磁場配位に於いて、ビームエネルギーとビーム入射角とを変化させ、実測したビームの検出位置を図6にプロットしてある。実線はビームの軌道計算を行い、ビーム検出位置を数値として直接求めたものである。分析器位置調整を慎重に行った結果、測定値と理論値の良い一致が得られ、測定器の設置位置の妥当性と軌道計算法の妥当性が確かめられた。このことにより実験では得られにくい測定範囲に迄、電位導出式を計算により算出することが出来る。

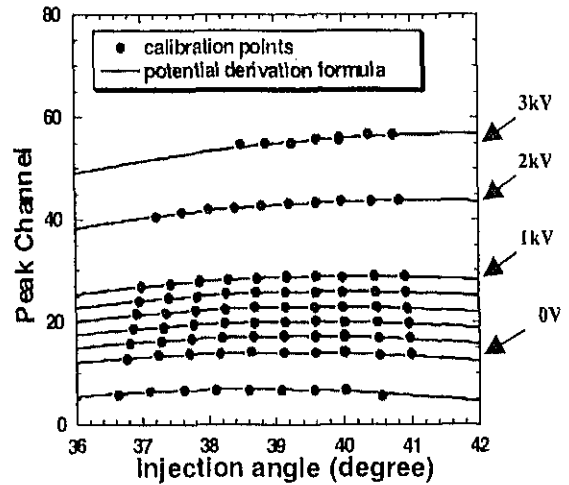


図6 実測値と計算値との比較

開発したGNBP測定器及び校正実験値を用いて、セントラル部の電位測定をした結果を図7に示す。左図は検出器の各チャンネルに入る電流値分布、右図は解析結果である。

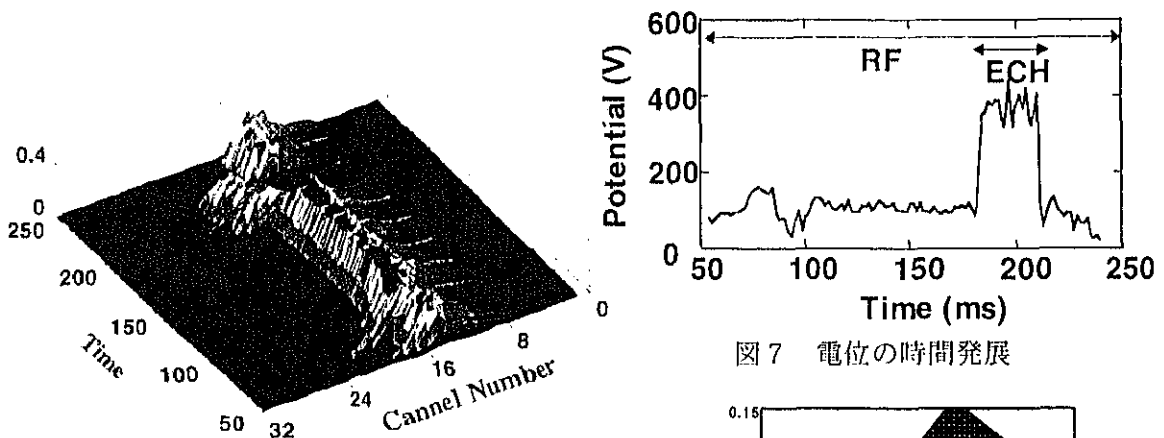


図7 電位の時間発展

セントラル部のプラズマ断面に亘る2次元電位分布を測定した。測定結果を図8に示す。比較的軸対象に電位は生成されていることが分かる。

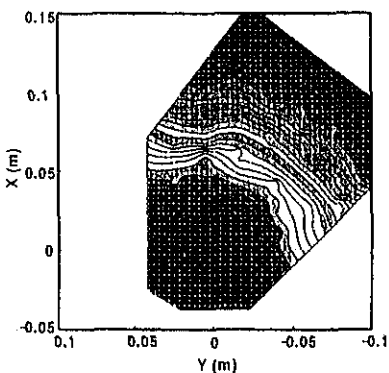


図8 2次元電位分布の即定例

【10】 プラグ／バリア部内側ミラースロート（IMT）でのバウンスイオンの測定と高エネルギー中性粒子測定用トロイダル型分析器の検討

プラグ／バリア部内側ミラースロート（IMT）（Inner Mirror Throat）近傍のセントラル部寄りに、ピッチ角指定小型高効率エネルギー分析器を設置した。イオンのピッチ角を選定することにより、IMT バウンスイオン、プラグポテンシャル（PP）バウンスイオン及びプラグ／バリア部外側ミラースロート OMT（Outer Mirror Throat）バウンスイオンを測定する。角度調整機構の確認と初期計測を行い、高パワー加熱による高イオン温度化に向けて新たな高エネルギー中性粒子分析器を検討した。

（1）ピッチ角指定小型高効率エネルギー分析器

荷電交換中性粒子の放出角とエネルギーを分析するピッチ角指定小型高効率エネルギー分析器（CXNPA）（Charge Exchange Neutral Particle Analyzer）の設置場所を図1に示す。プラグ／バリア部内側ミラースロートのセントラル部寄りに z 軸と約 65 度の傾斜で取り付けられており、傾斜角を変化させることが出来る。

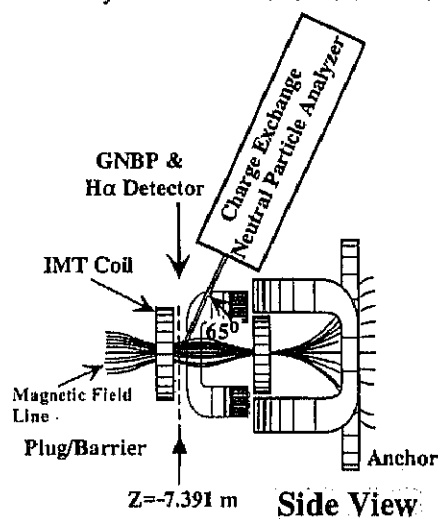
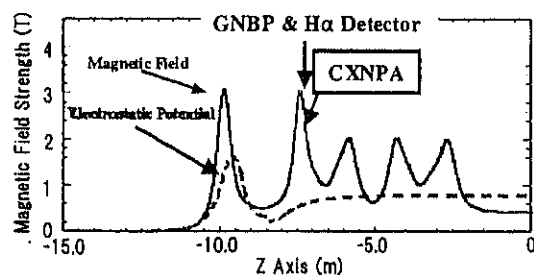


図1 左図：磁場強度に対する設置位置、

右図：コイルと設置位置との関連図

分析器は 63.6 度の偏向角を持ち、平行入射ビームに対し出口部で 1 次の収束性を持つ為、入射孔を大きくしても高エネルギー分解能を保つことが出来る利点がある。この特長は、入射孔を拡げて入射粒子数の増加を図ることが出来、且つ出口部の検出器を多チャンネル化するのに適する。中性粒子のイオン化には水素ガスによるストリッピング現象を利用している為、散乱角は大きく無くほぼ平行ビームと見なすことが出来る。従って、中性粒子の角度選別が出来、小型化の割りに分解能を落とさず大きな面積の入射孔を使用することにより出力計数を増加させる利点を有する。分析器のサイズ及び構成図を図2に示す。測定エネルギー範囲は約 300eV～10keV である。

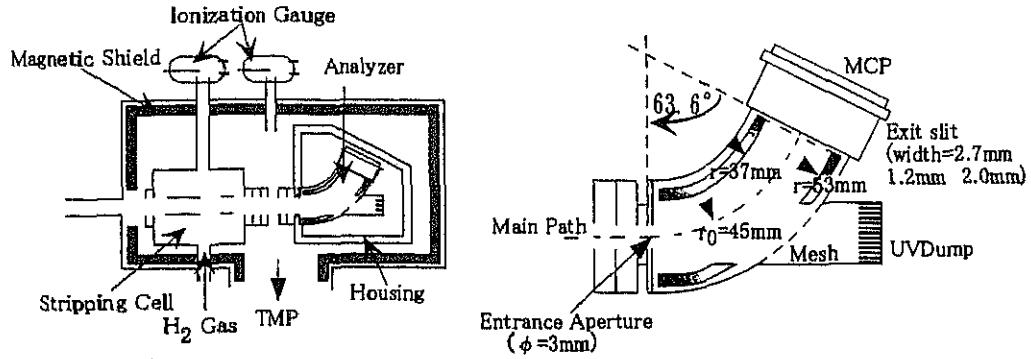


図2 左図：全体図、右図：分析器の拡大図

当分析器で測定を予定しているバウンスイオンは、イオンエネルギーを ε 、イオンの磁気能率を μ とした場合の ε - μ 空間図(図3)においてシャドウで示された領域に当たる。図3は閉じ込め電位が形成された場合であるが、電位が形成されない時は主としてプラグ/バリア部内側ミラースロート(INT)バウンスイオンが測定対象になる。荷電交換中性粒子数の見積もりにはプラズマ内の中性粒子密度の情報が必要であるが、当部には $\text{H}\alpha$ 線計測装置が取り付けられており、稼動し始めた。

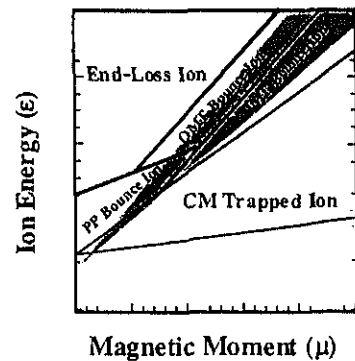


図3 ε - μ 空間図

閉じ込め電位が形成されていない時のINTバウンスイオンの測定結果を図4に示す。その時の端損失イオンのエネルギー分布関数と比較した図が右図である。プロット点は2 kVの箇所で規格化してある。端損失イオンと

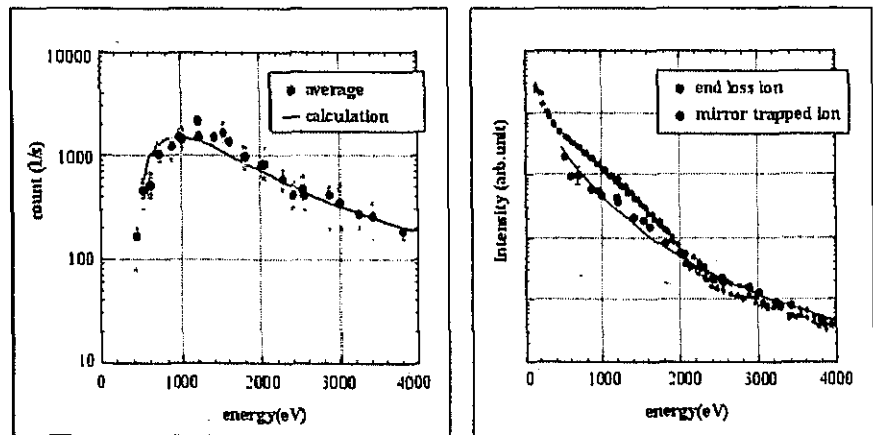


図4 INTバウンスイオンの測定結果

ほぼ一致した結果が得られ、測定方法の妥当性が示された。閉じ込め電位形成時は $\text{H}\alpha$ 線測定の結果を考慮して解析され、興味ある結果が得られている。

(2) 高エネルギー用中性粒子分析器の検討

高電位形成に伴い加熱系の増強が重要になってくる。セントラル部のイオン加熱において加熱機構及び緩和過程の解明には、捕捉されたイオンの速度空間内の分布の知見が必要である。荷電交換中性粒子のエネルギーが高くなると、ガスを用いたストリッピング反応ではイオン化効率が悪くなる為、薄膜によるイオン化と散乱に対して再収束するトロイダル型分析器の併用を検討した。

50 Åの炭素薄膜に1 keV のエネルギーを持つ水素原子が入射したとき、イオン化する効率は6%、エネルギーが10 keV になったときは22%になる。現在使用しているガストリッピングセルと比較した場合を図5に示す。変換効率はおよそ10倍以上になる。他方、エネルギーの拡がり及び角度の拡がりが発生する為、モンテカルロ法を用いたTRIMコードにより計算した。その結果を図6に示す。

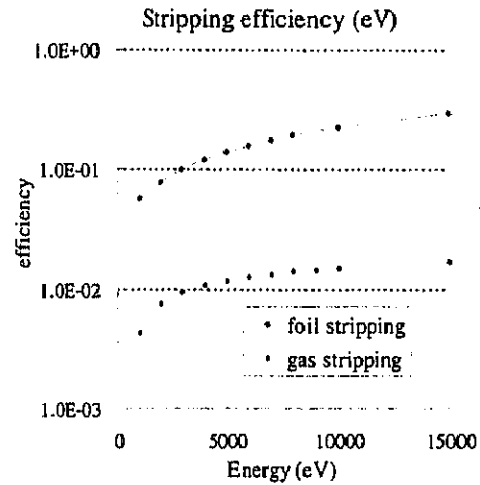


図5 ストリッピング効率の比較

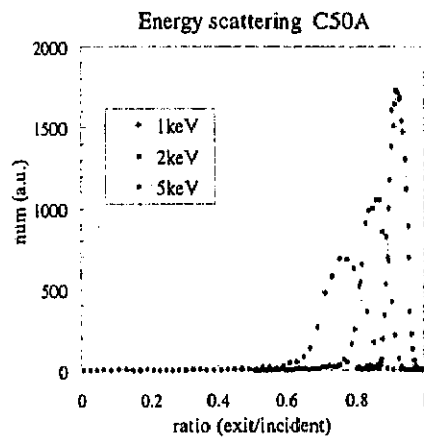
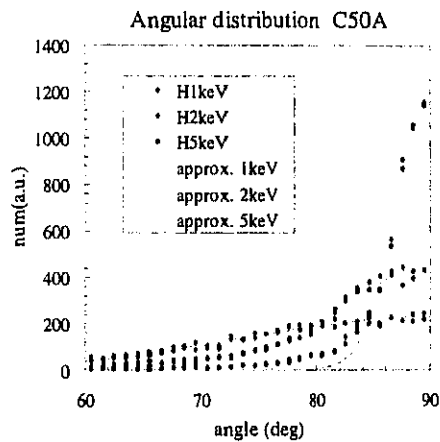


図6

ビームエネルギー：1 keV, 2keV, 5keV に対する薄膜後の角度及びエネルギー拡がり

散乱角を再収束させる為に図7に示す様なトロイダル型エネルギー分析器を検討した。特長は方位角及び天頂角方向に収束する2重収斂型分析器である。ピンホールを通してピッチ角の異なるビームを入射させると、多チャンネル型の分析器が得られる。具体例を図8に示す。

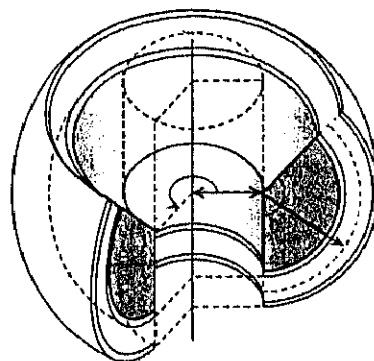


図7

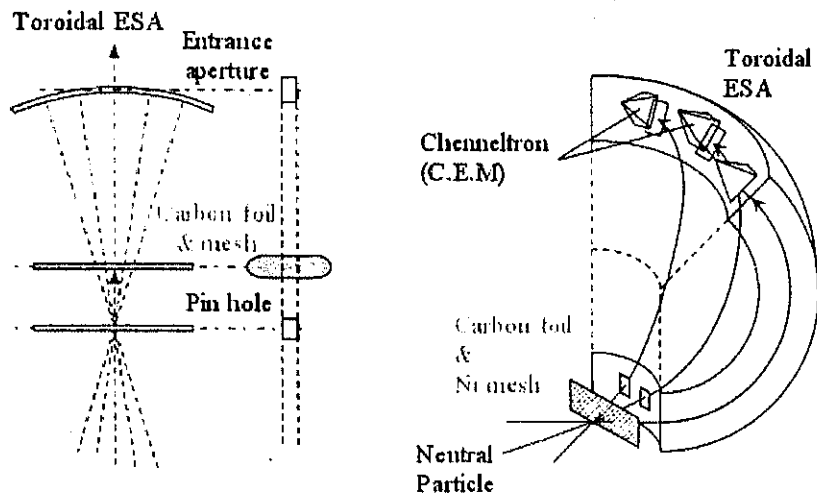


図8 多チャンネル型トロイダルエネルギー分析器

この分析器を使用した場合のイオン化効率をガス使用と比較した。図9に示す如く約ビームエネルギーが3 keV程度で一致し、以下であると悪くなる。これは低エネルギー側では角度拡がりが大きくなり過ぎ、トロイダル分析器でもカバーしきれないことを示している。しかし、5 keV以上であると明らかに勝っており、10 keVを超えると10倍以上の効率が見込まれる為、高エネルギーイオン検出には効果的であることが知れた。

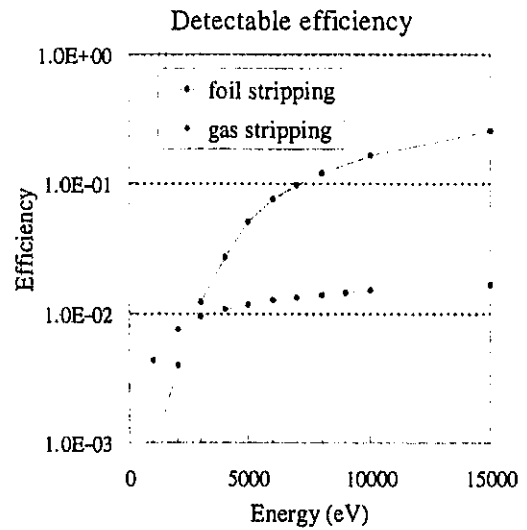


図9 分析器を併用した時の変換効率

【11】 金中性粒子ビームプローブ (GNBP) 法による磁場揺動測定の詳細

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

磁場揺動が存在すると、2次ビームの軌道が影響を受け z 軸方向に変化する。 z 軸方向の電場は、磁力線に沿う方向であるため小さくビーム軌道を z 軸方向には変化させないとしてまずは考えた。図1に示す如く分析器に磁場揺動測定用にMCP2の取り付けを考えた。磁場揺動に起因する z 軸方向のビーム軌道の変化を検討した。

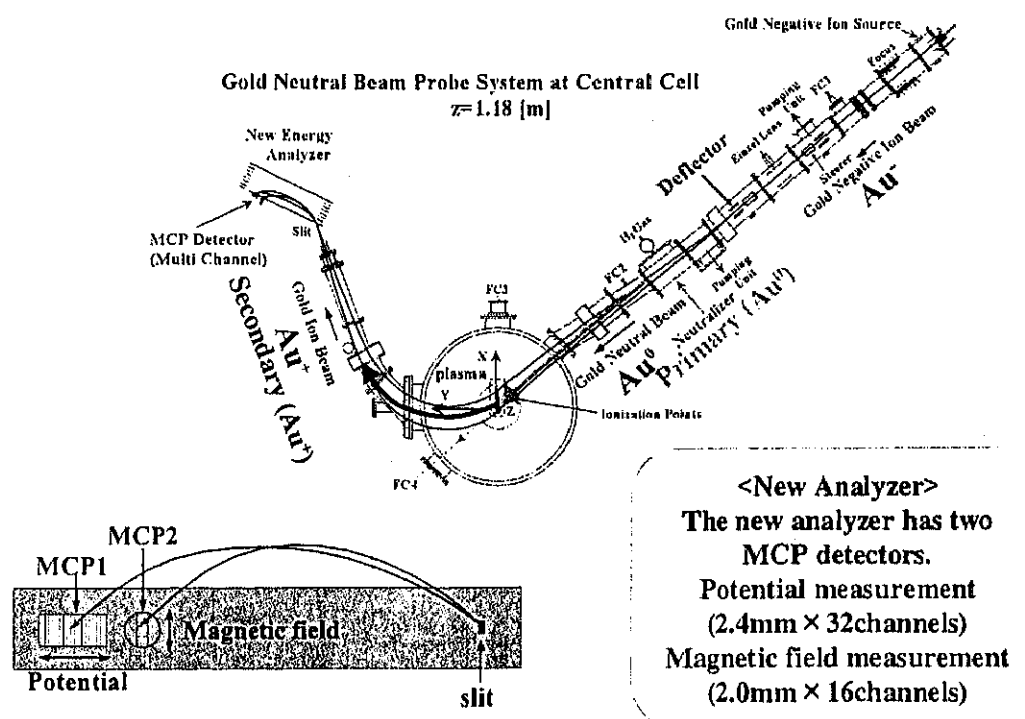
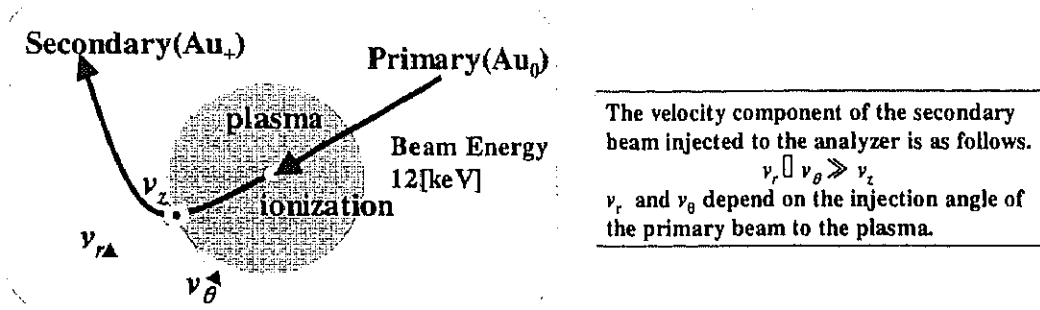


図1 GNBP システム

図2にビームが受ける力の成分をしめす。



$$\begin{pmatrix} \Delta F_r \\ \Delta F_\theta \\ \Delta F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_\theta \Delta B_z - v_z \Delta B_\theta \\ v_z \Delta B_r - v_r \Delta B_z \\ v_r \Delta B_\theta - v_\theta \Delta B_r \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} v_\theta \Delta B_z \\ -v_r \Delta B_z \\ v_r \Delta B_\theta - v_\theta \Delta B_r \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \text{Change of injection angle} \\ \text{Movement in direction of } \theta \text{ at the slit point} \\ \text{Movement in direction of } z \text{ at the slit point} \end{pmatrix}$$

図2 ビームが受ける力、 θ 方向の磁場揺動は軌道を z 方向に変化させる。

入射ビームを垂直方向に掃引させイオン化点を x 軸の沿う場合と、ビームエネルギーを掃引させイオン化点を入射ビーム軌道に沿う場合とについて検討した。図3にビーム軌道とイオン化点及び径方向の速度成分を示す。

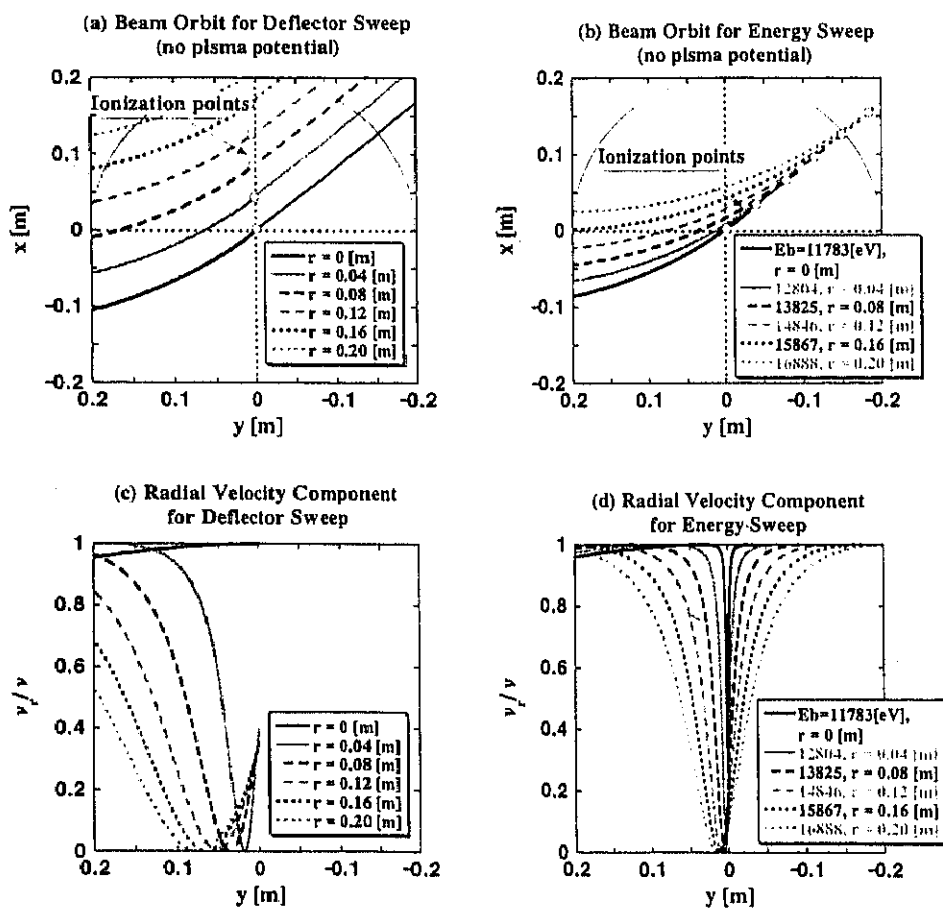


図3 ビーム軌道及び径方向速度成分

磁場揺動を下式で近似し、軌道に与える効果を算出した。

$$\vec{B}_1(r, \theta, z) = \begin{cases} B_1 \cos(\omega t + \phi) \cdot \hat{r} & (r \leq 0.2[\text{m}]), \quad 0 & (r > 0.2[\text{m}]) \\ B_1 \cos(\omega t + \phi) \cdot \hat{\theta} & (r \leq 0.2[\text{m}]), \quad 0 & (r > 0.2[\text{m}]) \\ B_1 \cos(\omega t + \phi) \cdot \hat{z} & (r \leq 0.2[\text{m}]), \quad 0 & (r > 0.2[\text{m}]) \end{cases}$$

角周波数 ω を 100kHz とした場合、磁場揺動の各成分に依存する z 軸方向のビームのずれを図 4 に示してある。エネルギー掃引を行うと方位角方向の磁場揺動成分は、径方向及び z 軸方向の磁場揺動成分とは切り離して測定することが出来ることを示している。また、垂直軸に沿ってイオン化させると径方向成分を強く反映させる領域があることも知れた。

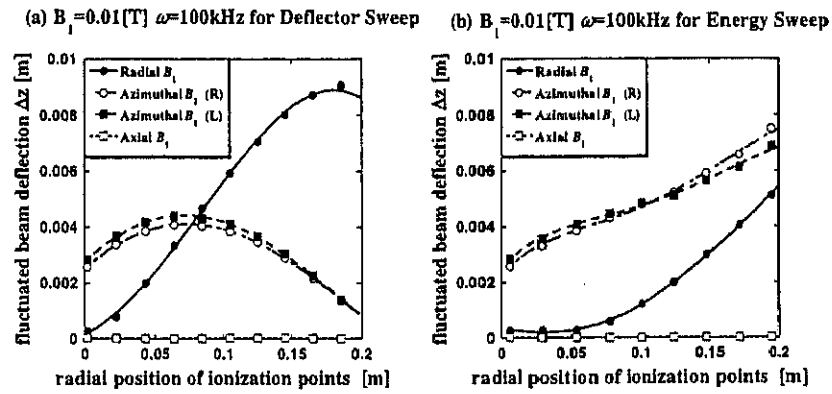


図 4 角磁場揺動成分が軌道に与える影響

電位揺動と密度揺動の同時測定より、両揺動の位相差を測定することが出来、径方向のプラズマ輸送を見積ることが出来る。解析に備えその場合の軌道積分効果についても検討した。

【12】新型端損失粒子計測器を用いたガンマ10端損失粒子の計測

開放端型プラズマ閉じ込め装置において、開放磁場端部から流出する端損失粒子の計測は、端損失電流量、プラズマ閉じ込め電位、イオン温度等、プラズマ閉じ込め性能を評価する上で大変重要な計測として位置づけられる。また、これらの計測から、プラズマ閉じ込め電位生成機構、及び電位生成比例則の解明に加え、生成電位がもたらす磁力線方向のプラズマ・エネルギー輸送の制御を見いだすことは、開放端型プラズマ閉じ込め研究に本質的な寄与を果たす。

そこで、端損失イオン計測を主目的とした新型イオン計測器の開発を行い、計測性能の向上を進めている。今回新たに開発した計測器(図1)は、対向する一対の平行平板電極から成る簡易構造かつコンパクトながら、(1)電場を用いて、入射イオンと電子の軌道を偏向させることにより、プラズマ端損失イオンと電子を確実に分別・計測が可能であり、偏向電極印加電圧を正から負に反転することにより、イオンだけでなく電子についても計測が可能である事。(2)プラズマ閉じ込め磁場を利用し、コレクタに入射したイオン、あるいは電子により発生した二次電子を、磁力線の周りに回転させることで、自らは磁場を作る必要なく、コレクタに自己再回収することができ、二次電子の抑制が可能である事。(3)リペラー電圧を正弦波で掃引することで、入射イオン・電子のエネルギー分析が可能である事等、実用性・汎用性に優れた計測器であることが挙げられる。

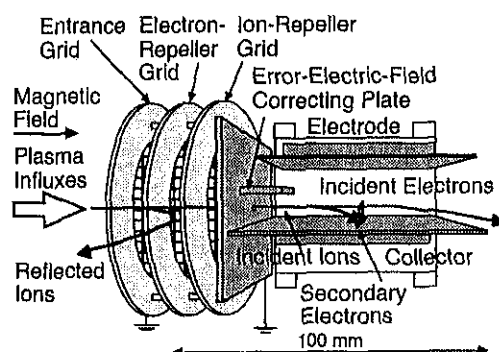


図1 新型端損失イオン計測器
(イオン計測時)

この新型端損失粒子計測器を確立するため、有限要素法による計測器内部の電場分布計算、ルンゲ・クッタ法による入射粒子の軌道計算を行い、実際にガンマ10装置(エンド部)に適用し、端損失イオン計測、端損失電子計測、さらに、端損失イオン電流量と端損失電子電流量の同時計測を行った。

本計測器によるイオン・エネルギー・スペクトル分析により導出したプラズマ閉じ込め電位と、エンド部に半径方向にアレイ状に設置され、既に端損失イオン計測器として確立している新型イオン・エネルギー・スペクトル計測器アレイによる電位分布を比較した結果(図2)、閉じ込め電位の半径方向分布が一致した。また、偏向電極板印加電圧を正・負に切り替え、プラズマの端損失イオン電流量と端損失電子電流量の同時計測を行い、新型イオン・エネルギー・スペクトル計測器によるイオン電流量と、多重グリッド型静電エネルギー分析器による電子電流量を比較した結果、本計測器による電流量と一致した(図3)。

以上により、本計測器は、入射イオン・入射電子を個々あるいは同時に計測可能で、かつ二次電子の影響を受けない「新型端損失粒子計測器」として開発・確立した。

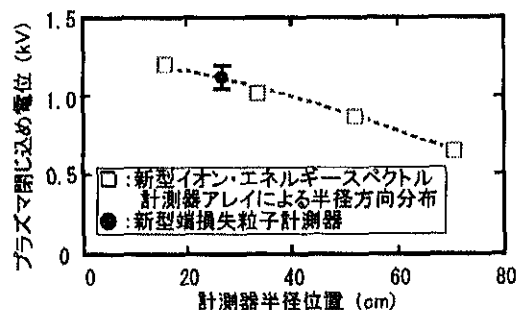


図2 端損失イオン計測による
プラズマ閉じ込め電位分布

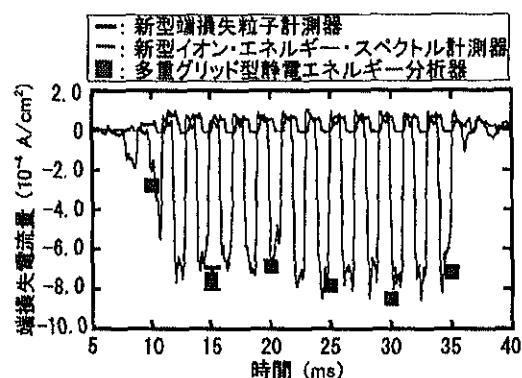


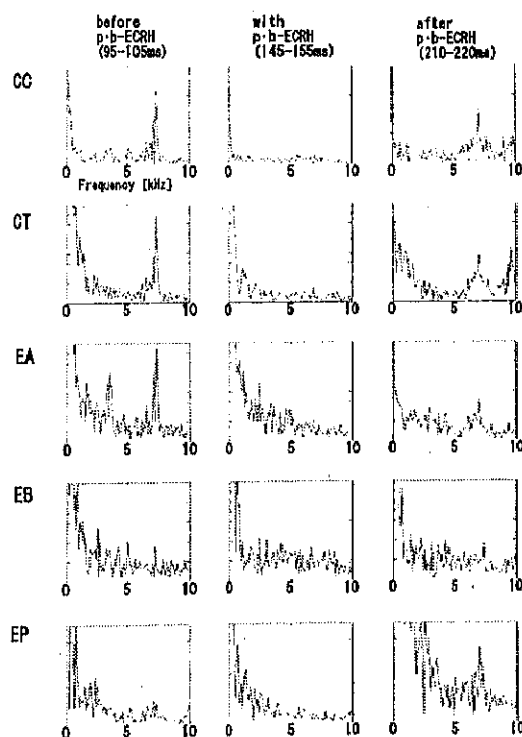
図3 端損失イオン・電子電流量同時計測

【13】 タンデムミラーガンマ 10 に於ける電子密度揺動

タンデムミラーガンマ 10 に於いてはイオンサイクロトロン周波数近傍の高周波により生成されたプラズマに電子サイクロトロン共鳴加熱を行い、閉込電位を形成する。この時、半径方向の電位勾配、即ち電場の大きさ、或いは密度勾配も変化するので高周波生成プラズマ中に励起されていた密度揺動が周波数、強度ともに変化する。この様子をマイクロ波を用いた干渉計、反射計、フラウンホーファー回折法により観測する。いずれの方法もプラズマ中に物体を挿入することなく、又、入射するマイクロ波も十分に弱いのでプラズマを乱さない利点がある。干渉計は入射したマイクロ波が、プラズマにより経路に沿って受けた位相変化を測定するもので、揺動が経路内のどこに有っても検出出来る代わりに位置が特定出来ない。反射計は遮断現象を利用してマイクロ波の、プラズマによる反射を利用するもので、位置が分かる代わりにその点より内部の現象が見えない。フラウンホーファー回折法は一種の前方散乱法で、波数を求める事が出来るのが特徴である。

プラズマを生成した後、時刻 130-170 ms に電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)を行い、閉込電位を形成すると装置中央部で密度が上昇するとともに密度揺動の強度が減少する。マイクロ波干渉計で観測された揺動に高速フーリエ変換を施し、周波数スペクトルを求めたのが第 1 図である。横軸は周波数を、縦軸は強度を示している。CC 及び CT は中央の閉込部の揺動を、EA はその隣のアンカー部、EB はその外側の熱障壁形成部、EP は更に外側の閉込電位形成部を示している。中央部からアンカー部迄揺動はほぼ同じ変化を示し、電子サイクロトロン共鳴加熱印加中には強度が抑制されている。フラウンホーファー回折法からは波数が $0.1 - 0.2 \text{ cm}^{-1}$ と分かった。

ビームプローブ法による電位の測定から閉込電位形成中は電位の径方向分布、即ち径方向電場が変化している事が示され、電位形成と揺動の抑制及び閉込改善が密接に関係している事が分かる。



第 1 図 揺動の周波数スペクトル
(左) ECRH 印加前 (中) 印加中
(右) 印加終了後

【14】 高周波を用いたプラズマ生成と加熱、及び、加熱プラズマの巨視的・微視的挙動解析

プラズマ中での電位形成や閉込めの物理を研究するうえで基盤的なプラズマ生成や加熱、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15年度は、イオンサイクロトロン周波数近傍(ICRF)の高周波を用いた高密度のプラズマ生成時に観測される密度の飽和に関して、境界条件に依存する固有モード形成が強く関与することを実験及び理論的計算から明らかとした。巨視的な挙動に関して、小型で簡便な可視光検出器を用いて、プラズマから放射される可視光領域の光の強度とその揺動解析を行い、プラズマの振舞いを解析した。また、GAMMA10に特徴的な微視的不安定性であるアルペンイオンサイクロトロン (AIC) 波動励起は、温度非等方性をもつプラズマには共通の現象である。トーラス型装置においても、垂直方向からの中性粒子入射(NBI)時には、周辺部に局在するミラー磁場配位中に捕捉される高エネルギーイオンに起因するAIC波動の励起が示唆される。全国双方向共同研究の一つとして、平成15年度に日本原子力研究所と締結した協力研究により、那珂研究所で現在稼働中の大型トーラス装置JT-60U装置でICRF帯の自発励起磁場揺動の計測を行った。

A.固有モードの形成とその周波数・密度依存性

京都大学・福山教授との共同研究により、有限要素法を用いたアンテナ-プラズマ結合コードを用いた励起波動の計算を行った。アンカー部にサイクロトロン共鳴層を持つ高周波 (RF1) の周波数は、セントラル部中央で1.5倍のサイクロトロン周波数に相当する。図1に現在のGAMMA10密度において計算されたアルペン速波の分散関係を示した。図に示すように、この周波数帯 (10MHz付近) のアルペン速波は、径方向に基本的構造をもつ一つの固有モードしか存在せず、その励起強度は、軸方向の境界条件に強く依存する。一方、サイクロトロン周波数の6倍以上の周波数で駆動されるRF3は、同じ密度において、径方向に複数の構造を持つ固有モードを励起できることがわかる。磁気プローブを用いて、実際に励起された波動を計測した結果を図2に示した。横軸に線密度、縦軸に波動強度をプロットすると、明らかに密度に強く依存して波動の励起が観測され、軸方向の境界条件を満たす固有モードの存在が示されている。計算により得られた励起波動の強度と定性的に良く一致することがわかった。実験で観測される

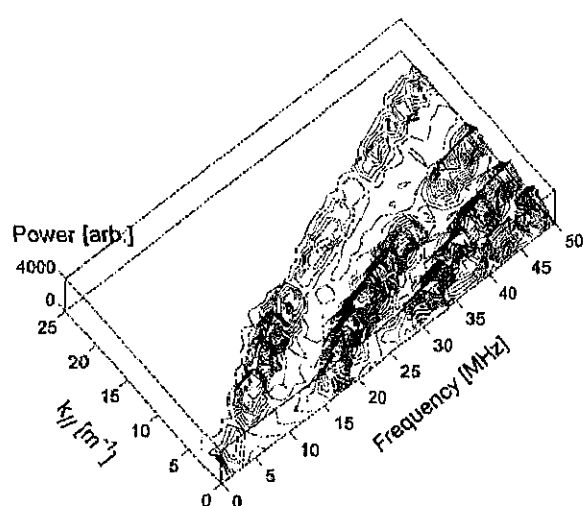


図1 軸対称円筒プラズマ中のアルペン速波の分散関係

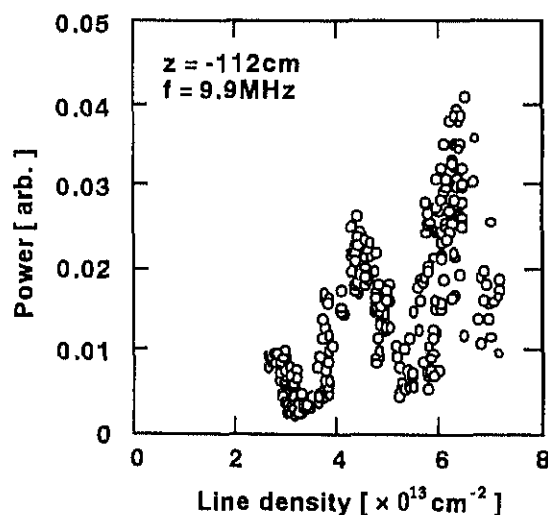


図2 磁気プローブによるRF1波動強度の線密度依存性

密度の飽和は、密度の上昇とともに現れる $4 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ のピーク付近で観測され、この固有モード形成が密度飽和の一因であることが明らかとなった。RF3を重畳することにより、再度の密度上昇と励起波動が観測されていることが示されている。

B. 可視光検出器によるドリフト型密度揺動の計測

ミラー磁場中のプラズマの巨視的振舞いを観測するために、従来よりプラズマ周辺部に設置した静電プローブを用いてきた。今回、高温イオン生成閉じ込めモードにおいて不安定なプラズマ放電の際に観測される電子ドリフト波とフルート揺動を計測し、その方位角方向の分散関係を決定することができるようデータ処理系を改良した。これにより、マイクロ波反射計を用いて電位との関係から決定されていた電子ドリフト波の分散関係がより容易に方位角回転方向を含めて決定できるようになった。図3(a)は、静電プローブによって測定された分散関係で、横軸に方位角方向の波数、縦軸に周波数をプロットしてある。データ点のばらつきはプラズマ密度やイオン温度の揺動を反映しているものと考えられる。ここでは、電子ドリフト波の回転方向を負の方向に定義しており、従ってフルート揺動の回転方向は正の向きとなる。方位角方向の回転の向きが明確に計測されていることがわかる。

上記のように、静電プローブはプラズマの局所的なパラメーターを測定するのに非常に優れた計測方法ではあるが、電子温度が高くなるとプローブそのものが損傷を受けて計測できなくなってしまうという欠点がある。ここでは、静電プローブに代わる計測器として小型で安価な可視光検出器の特性を評価した。この可視光検出器はプラズマと非接触でプラズマからの可視光を受動的に計測するので、将来的にプラズマの電子温度が数keVになっても計測可能であるという利点がある。可視光検出器によって計測された巨視的揺動の方位角方向の分散関係は図3(b)のようになり、静電プローブによる測定結果と良い一致が得られた。測定可能な周波数が静電プローブに比べて低いのは視野幅が原因と考えられ、今後の改善点である。

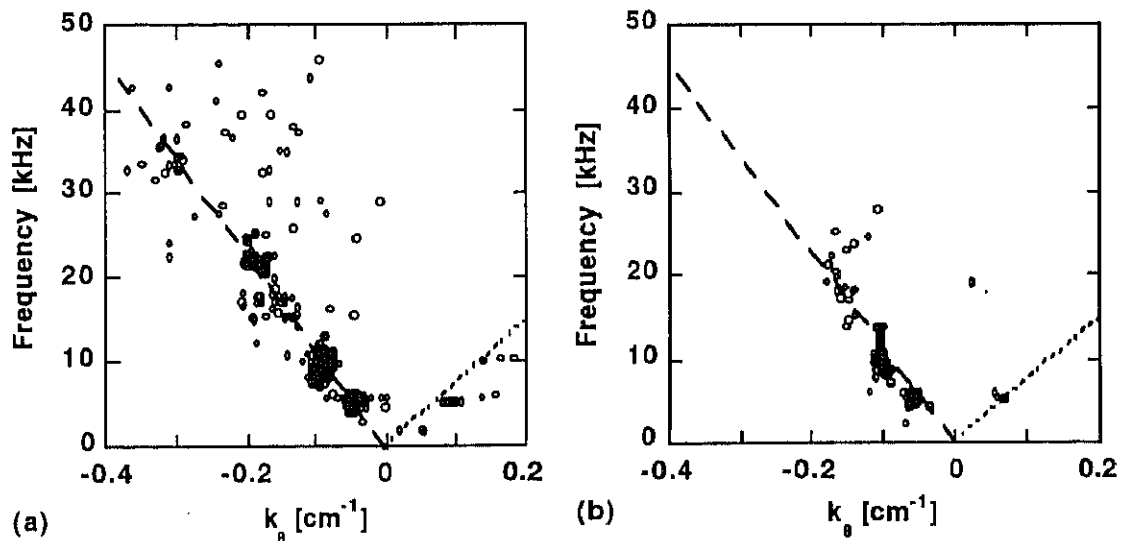


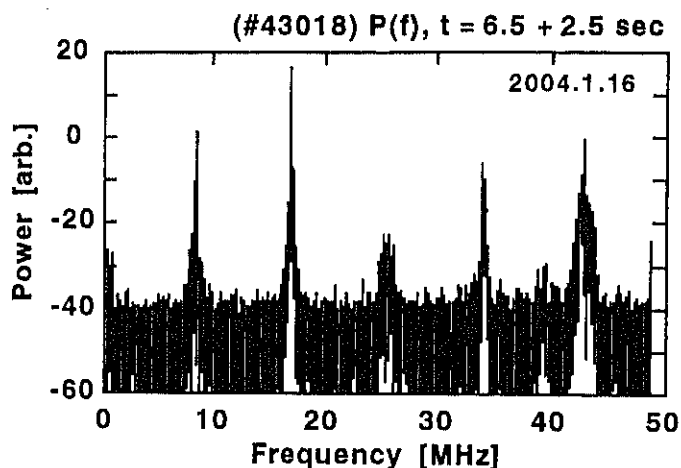
図3 (a)静電プローブ (b)可視光検出器 によるドリフト型密度揺動の分散関係測定

C. JT-60U トーラスにおけるICRF帯の磁場揺動の観測（全国双方向共同研究）

平成15年度から開始された日本原子力研究所との協力研究において、那珂研究所で稼働中の大型トーラス装置JT-60Uでの磁場揺動観測実験を行った。真空容器内部に設置されたICRFアンテナを検出器として用い、高速中性粒子入射時のイオンサイクロトロン周波数付近の磁場揺動を検出した。トーラス装置においては、これまでにサイクロトロン基本周波数やその高調波

領域に静電的な揺動が観測されており、イオンサイクロトロン放射 (ICE) として研究が進められてきた。GAMMA10において特徴的に観測される温度非等方性に起因するサイクロトロン周波数近傍のAIC波動との関連については、これまで議論されたことがなく、両者を統一的に解釈することで、より一般的なこれらの自発励起不安定波動を議論することができる。図4に実際に計測されたサイクロトロン周波数近傍の信号を示した。最初の10MHz近傍に観測されるピークが基本周波数に対応するものでトーラスの最外郭磁気面の磁場強度に対するサイクロトロン周波数よりも低周波数であることが明らかとなった。引き続くピークはサイクロトロン高調波に対応し、いずれもプラズマ領域にサイクロトロン共鳴が存在しない。今後、この揺動を同定するために、磁場揺動であることの確認、波数測定と分散関係の測定を行い、プラズマに及ぼす影響を含めて議論する。

図4 ICRFアンテナによって観測された中性粒子入射時の磁場揺動の周波数スペクトル



【15】プラズマ回転分光計測を用いた GAMMA 10 プラズマの電場計測

GAMMA 10 では電位の制御による軸方向の閉じ込め改善は本質的な課題であるが、さらに電場の径方向分布と径方向閉じ込め改善の関係も指摘されており、GAMMA 10 各領域における電場分布制御の重要性が高まっている。また、トカマクやヘリカル等のトーラス系プラズマ閉じ込め装置においても径電場分布の変化を伴う大幅な閉じ込め改善が確認されている。従って、これらタンデムミラー及びトーラス系の双方に見られる閉じ込め改善の物理の解明のため、プラズマ中の電場分布の測定は非常に重要である。本研究では、新たな電場分布計測法を確立することを目的とし、紫外・可視分光器を用いた不純物イオンの回転速度の計測、衝突・輻射モデルの計算、数値計算を詳細に行い、GAMMA 10 セントラル部の電場分布を測定した。本計測法は、受動的計測のためプラズマに影響を与えず、典型的電位計測法であるビームプローブ法に比べ磁場による測定位置の制限が無く、小型で、光ファイバーによる遠隔計測可能という多くの独自の特徴を持つ。本研究では、既設装置による電位分布計測結果と比較を行い、本計測法の有効性を示した。

プラズマ中の不純物イオンから放射される線スペクトル(波長 λ)は、不純物イオンが検出器に対して速度 v で運動しているときドップラーシフトにより検出される波長が $\Delta\lambda$ だけ変化し、 $\Delta\lambda$ は光速を c として(1)式で表される。

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{v}{c} \quad (1)$$

そのため、分光測定によりドップラーシフトを測定することで不純物イオンの速度が得られる。

一方、軸対称プラズマ中の不純物イオンの回転は(2)式で表される。

$$v_{\alpha}(r) = -\frac{1}{B} \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} - \frac{k_B T_{\alpha}}{Z_{\alpha} e B} \frac{1}{n_{\alpha}(r)} \frac{\partial n_{\alpha}(r)}{\partial r} \quad (2)$$

ここで右辺第1項は $E \times B$ ドリフト、第2項は反磁性ドリフトと呼ばれる。衝突・輻射モデルの計算と分光測定を用いることで反磁性ドリフトを求めることができるため、回転速度から $E \times B$ ドリフトが得られ、磁場 B が既知であるため電場 $E(r)$ の測定が原理的に可能である。実際の測定においては、検出器の視線上の各位置のプラズマからの放射が積分された形で線スペクトルが得られる。そこで局所量を仮定し、数値計算により仮定した局所量から構成される視線積分量と計測される視線積分量の比較を行い、誤差の範囲で一致する値を得る。

プラズマから放射された光は 40 チャンネルの光ファイバーによって空間分解されて分光器に入射する。分光器では 200-700nm の波長領域を分光することができ、分光した光をイメージインテンシファイアで増幅し、CCD カメラで撮影し、パーソナルコンピュータにデジタル化し

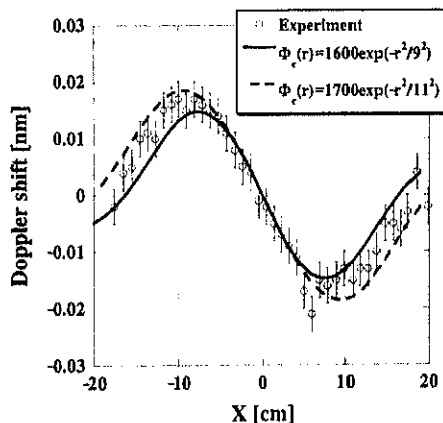


図1. ドップラーシフト

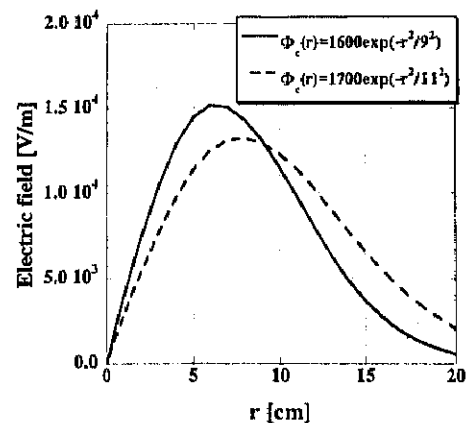


図2. 電場分布

て取り込み、解析を行う。本システムの実効的な波長分散は約0.016nm、波長分解能は約0.066nmである。

C⁺イオンの放射光(426.726nm)について、ドップラーシフトを測定した。また、衝突・輻射モデルの計算により反磁性ドリフトを求め、数値計算によりドップラーシフトを計算した。ドップラーシフトの測定値及び計算値を図1に、この結果得られた GAMMA 10 セントラル部の電場分布を図2に示す。2つの計算値はそれぞれ誤差の最大・最小を表す。さらに、本計測の有効性を確認するため本計測によって得られた電場分布から電位分布を推定し、既設の測定装置であるビームプローブによる電位分布の測定結果と比較を行った。その結果を図2に示す。この結果、本計測法とビームプローブの測定結果は誤差の範囲内でよい一致を示した。

本計測の精度を向上させるためには、CCD カメラ以降のシステムの改良、イメージインテンシファイア前でのスペクトルの伸張が有効であり、今後の課題である。さらに、C⁺イオン以外のスペクトルでの測定を可能にするため、衝突・輻射モデルの構築も重要な課題である。

本研究では、紫外・可視分光器を用いたプラズマ回転測定、衝突・輻射モデルの計算、数値計算による局所量の解析によってプラズマ中の電場分布の計測を行い、既設の装置との比較からその測定法の有効性を示し、新たな電場分布測定法として確立した。これによって、GAMMA10プラズマにおける電位によるプラズマ閉じ込めに関する研究に重要な、径方向分布計測がいろいろな場所において可能となり、今後の電位閉じ込めに関する研究の進展が期待される。

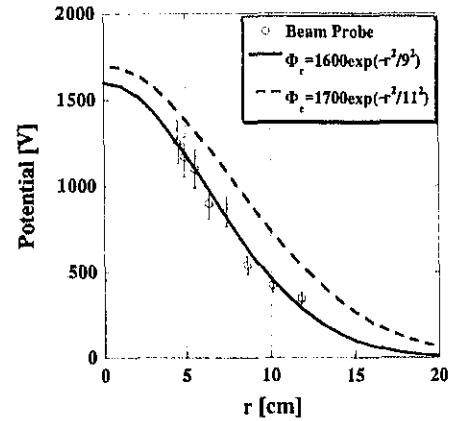


図3. 電位分布

【16】 $H\alpha$ 線計測器を用いたガンマ10プラズマの中性粒子挙動の研究

GAMMA 10では、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) を用いてプラズマを立ち上げ、高電位生成、高電位閉じ込めプラズマ生成を目的とした、高電位生成モードの実験が開始された。このモードはこれまで行われてきたイオンサイクロトロン共鳴周波数帯 (ICRF) 加熱による高イオン温度モード実験とは、加熱系のシーケンスなどの実験条件が大きく異なっている。そのため、様々なプラズマパラメータの変化が考えられる。特に高電位生成モードの初期実験においては、初期プラズマ生成用のICRF(RF1)が印加されていないため、高イオン温度モード実験に比べてセントラル部の電子密度が低い。ゆえに、プラズマの中心部にまで多量の中性水素が浸入している可能性がある。また、電位生成用ECRHが印加されているプラグ・バリア部における粒子閉じ込めについても調べるのが重要である。したがって、本研究では、GAMMA 10プラズマの各部 (セントラル部、プラグ・バリア部) における $H\alpha$ 線放射強度測定を行い、各部の中性粒子挙動を調べ、粒子閉じ込めに関する情報を得ることを目的として、高電位生成モード実験と高イオン温度モード実験における中性粒子密度の変化について調べた。

まず、セントラル部における2つの実験モードでの中性粒子密度分布の違いについて調べた。高電位生成モード実験時のプラズマパラメータを図1に示す。この高電位生成モード実験時には、セントラル部の電子加熱のためのセントラルECH(c-ECRH)印加の有無 (図1(a): c-ECRH有り、図1(b): c-ECRH無し) について比較した。図2(a) に $H\alpha$ 線体積輻射率分布の径方向分

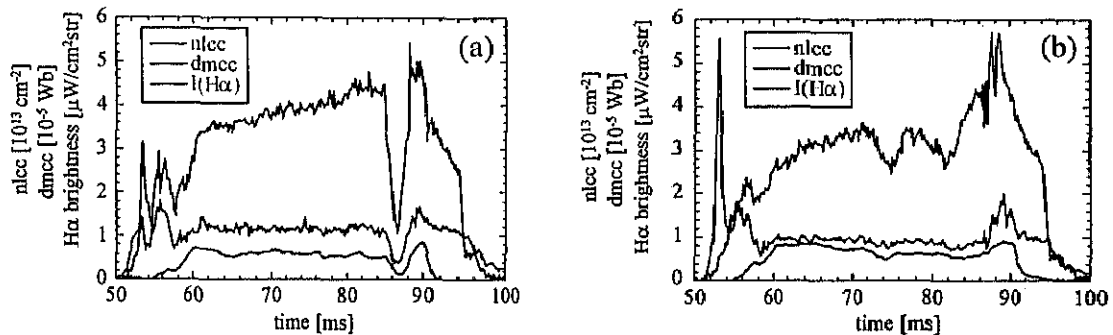


図1. 高電位生成モード時のプラズマパラメータ

布、図2(b)に放射輝度のGAMMA 10軸方向分布を示す。ミッドプレーン近傍の $H\alpha$ 線強度の径方向分布は、c-ECRH印加によって全体的に増加し、一方、軸方向には全体的に増加し、特に

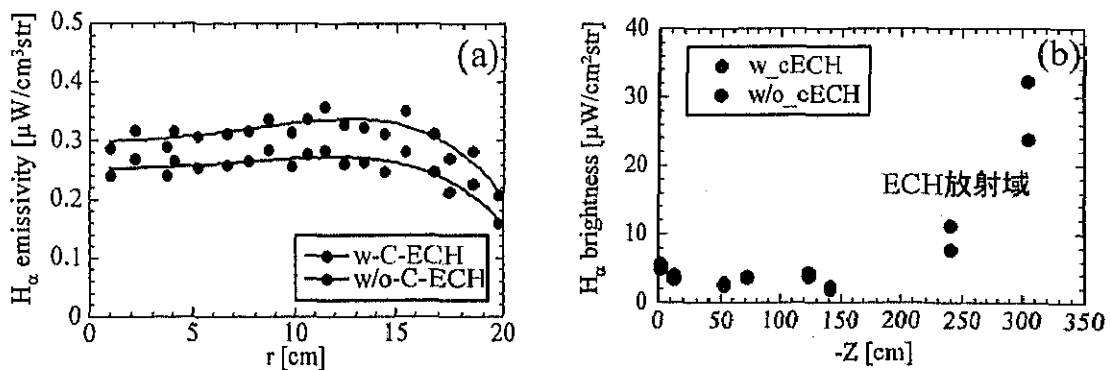


図2. $H\alpha$ 線強度の径方向分布および、軸方向分布

スロート部近傍で大きく増加していることがわかる。スロート部での電子線密度は、c-ECRH印加によって約20%上昇しており、これはセントラル部ミッドプレーン近傍における線密度増量とほぼ等しい。図3に中性粒子密度分布の径方向分布を示す。中性粒子密度の径方向分布は、c-ECRHの印加によって周辺部で増加している。これは、c-ECRHにより壁からの脱ガスの増加、および、電子密度の増加による荷電交換反応の増加によるリサイクリングガスの増加によるものが考えられる。高電位生成モード実験時と高イオン温度モード実験時との中性粒子密

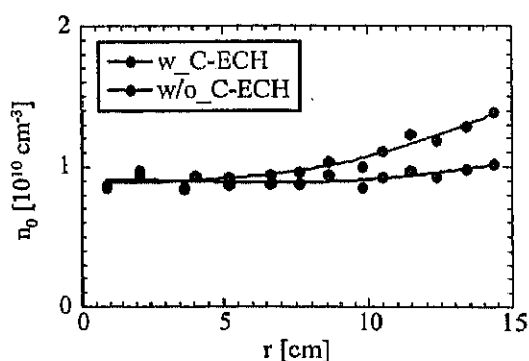


図3. 中性粒子密度の径方向分布

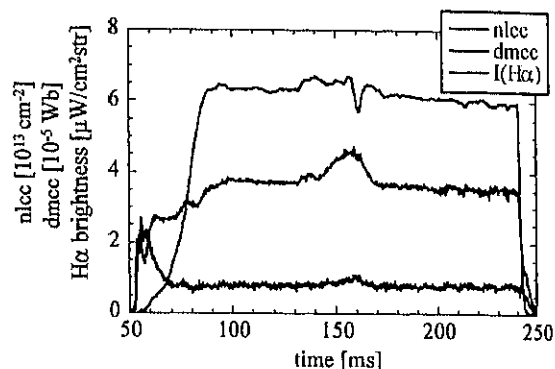


図4. 高イオン温度モード時のプラズマパラメータ

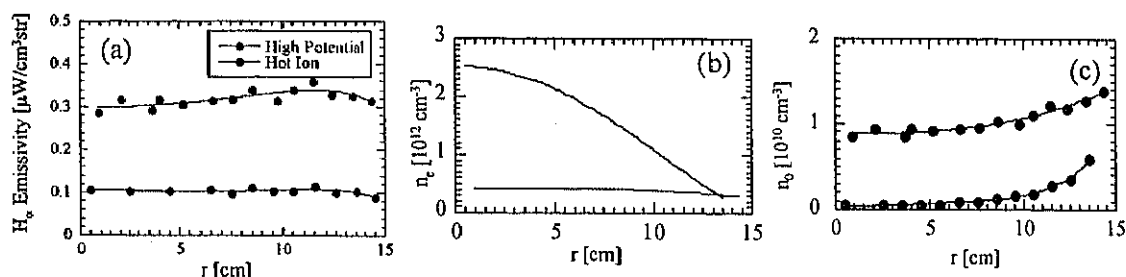


図5. 高電位生成モードと高イオン温度モード実験時の径方向分布の比較

度の比較を行った。このときの高イオン温度モードのプラズマパラメータを図4に示す。高電位生成モード実験と高イオン温度モード実験時の $H\alpha$ 線体積輻射率分布を図5(a)に、電子密度分布を図5(b)に、中性粒子密度分布を図5(c)に示す。これによると、高電位生成モードでは、高イオン温度モードに比べて、 $H\alpha$ 線放射輝度が約3倍ほど大きく、中性粒子密度も電子密度が低いいため約10倍程度大きくになっている。これは、高電位生成モードでは粒子補給用入射ガス圧が高イオン温度モードの場合よりも約3倍程度高くしていることと、イオン加熱用のICRF (RF1) が高電位生成モードでは印加されていないこと等が理由と考えられる。

次に、プラグ・バリア部における $H\alpha$ 線放射輝度の2つのモードでの変化について比較した。図6(a)、(b)、(c)に高電位生成モードにおけるc-ECRH有り、無し、高イオン温度モード実験の各実験時のバリア部の線密度(nl-b)、 $H\alpha$ 線放射輝度(プラグ・バリア部)を示す。これを見ると、ほぼプラグ・バリア部の $H\alpha$ 線放射輝度の時間変化は、nl-bの時間変化にほぼ一致していることがわかる。バリア部の $H\alpha$ 線放射輝度、電子線密度よりバリア部の中性粒子密度をセントラル部の各プラズマパラメータを元に、衝突・輻射モデルを用いて導出した結果、高電位生成モードの場合、 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、高イオン温度モードの場合、 $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 程度になることがわかった。これは、セントラル部の中性粒子密度の約10倍になり、この部位の中性粒子挙動を知ることが、GAMMA 10プラズマ全体の粒子閉じ込め、粒子バランスを調べる上で重要であることがわかる。従って、プラグ・バリア部の中性粒子径方向、軸方向分布をより詳細に調べる必要がある。平成15年度中に、バリア部の多チャンネル $H\alpha$ 線計測器を新たに準備し、さらに、

スロート部における多チャンネルH α 線計測器の設計を行ったので、今後、GAMMA 10プラズマ各部のより詳細なH α 線計測を通して、GAMMA 10プラズマ全体の粒子閉じ込めの研究を進めることにする。

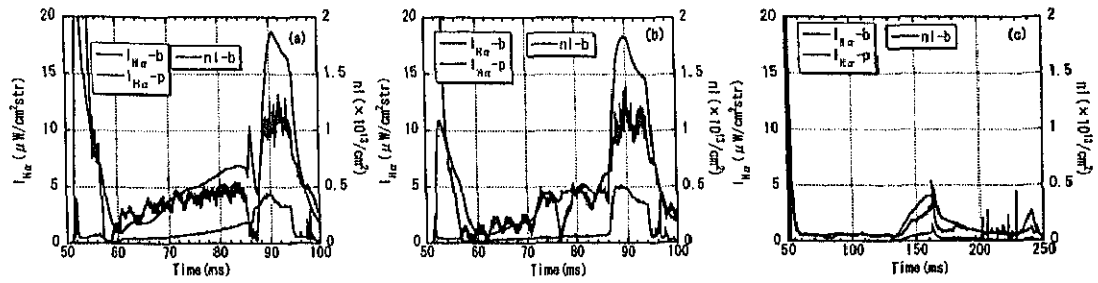


図6．高電位生成モードと高イオン温度モードにおけるプラグ・バリア部のH α 線強度と電子線密度

【17】核融合生成中性子損傷に拠る半導体計測器X線感度特性変化の解明

将来の本格的な核融合実験に伴い更に著しい発生が予想される、ニュートロン、高エネルギー粒子、並びにX線等に拠る、半導体X線計測器や CCD を含む各種半導体、計算機の CPU 素子への影響、グラスファイバー等のシリコン製品への影響を、実際の核融合装置環境下で、或いは基礎的・体系的に平行して、研究・検討しておくことは、プラズマ・パラメータの向上と一対を成して進めるべき、現下の緊要な研究課題である。

例として、プラズマ電子の空間分布を計測[1, 2]する、半導体X線検出器感度に於いては、(i) プラズマ温度に依存して変化する広範な輻射光子・エネルギー $h\nu$ の個々の値に対し、検出器感度劣化がニュートロン照射量に依存して異なり、また (ii) 印加バイアスにより $h\nu$ 感度特性が変化することも定性的に分かっている。この定量化を行わない限り、将来のプラズマ電子の空間変化の振る舞いをトモグラフィー法等で解明し、その結果を用いてプラズマを解析・制御することは、困難を極めることとなる。

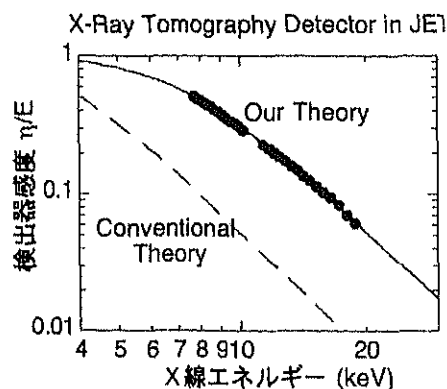
このような、複雑に見えるニュートロン照射に伴う計測器感度の変化を、いかにして解明し定式化し、実用上どのような手だてを今後講じて行くかは、プラズマ計測に半導体を用いるためには、或いは上述のグラスファイバーや CPU 等を、核融合装置や同様な極限的環境下で広く活用するためには、避けることのできない研究課題である。

以上に基づき、現在 JET [3, 4]、DIII-D [5]、ASDEX-U トカマク [6]、Wendelstein 7AS ステラレータ等のX線グループの研究依頼に協力すべく、以下の様に研究を進めている。

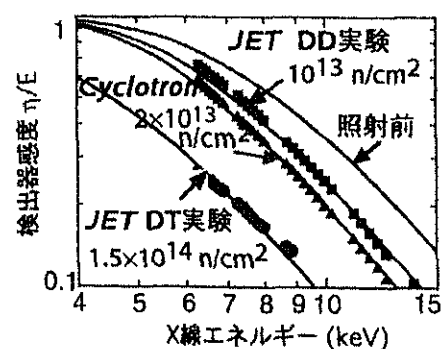
特に、JET の DT 核融合プラズマ実験で用い、ニュートロンに因り影響を受けた、半導体X線トモグラフィー検出器をサンプルに、この結果を一般化し、それを基盤に広く種々の装置に拡張・適用すべく、ニュートロンの検出器出力に与える影響を系統的に研究している。

実際に我々が現在進めている研究手法は、(i) JET の DT プラズマ実験で使用後、直接搬入された半導体X線検出器の物理・物性的特性の調査・解析に加え、(ii) DT 反応を用いる FWS 装置、並びに DD 反応を用いるサイクロトロン加速器実験により、定量化されたニュートロンの、各種X線検出器への照射実験を行い、更に (iii) これらの検出器のニュートロンの影響を、詳しくX線感度変化から解析すべく、シンクロトロン放射光を用いた研究を行い、加えて (iv) 半導体感度領域へのニュートロンの影響を、我々の提唱した、湯川方程式型の解を特徴とする「半導体X線計測器新感度理論」[7, 8]の拡張に拠り定式化すべく、以上を、基礎研究・実用対策両面から、体系的に研究している。

先ず、第1図に、JET で用いている半導体X線トモグラフィー検出器に対して、ニュートロ



第1図



第2図

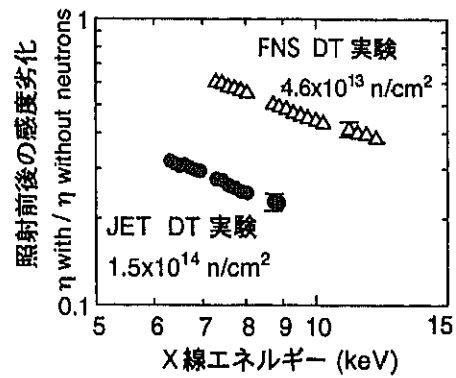
ン入射を行わない場合に、我々の提唱した「半導体X線計測器新感度理論」を用いた場合と、「従来から標準的に使用されている Price 等の教科書にある感度式」に拠る場合の量子効率理論値の差異と、実験結果を比較して示す。

これに対して、第2図に、JETのDD、並びにDT プラズマ実験で、ニュートロン照射を0.1並びに 1.5×10^{14} n/cm²、更にはサイクロトロン実験でDDニュートロンを 0.2×10^{14} n/cm² 受けた場合について、シンクロトロン放射光を用いた検出器のX線感度変化データを示す。

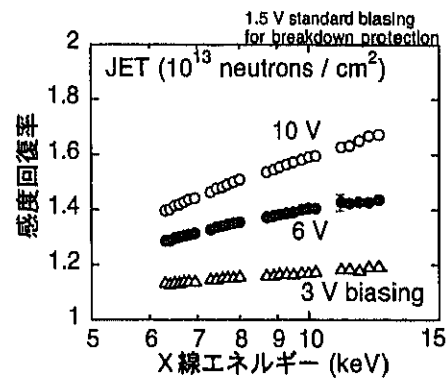
第3図に、DTニュートロンをFNS並びにJETで、0.46及び 1.5×10^{14} n/cm² 照射し、それぞれの場合の、照射前に比した感度劣化の割合を示す。照射量増に伴い、大きな感度劣化を起こしているが、「劣化はX線エネルギーに対する依存性を持つ」特徴が見られ、高エネルギーほど、劣化が顕著である。しかし、この 10^{14} n/cm² 照射に対しても、まだ照射前に比べ20%以上の感度を持っていることが分かる。

更に今回新たに、第4図に示す様に、この感度劣化は、半導体に与える印加バイアスを高くすることにより、改善されることが見出された。

以上の物理機構は、感度劣化に関しては、「新感度理論」の示す、ニュートロン生成欠陥準位生成に拠る拡散電荷の捕捉に伴う「拡散長 L の減少」で、またバイアス印加による感度の回復は、マイノリティー・キャリアの信号出力特性距離 $\exp(-r/L)/r$ [6] に対し、空乏層の増大に伴う検出器深部の無電場基板領域で生成される高エネルギーX線生成拡散電荷の回収効果の改善 (r 効果) に拠り、理論描像とコンシステントに説明される。



第3図



第4図

- [1] T. Cho *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 4310 (2001).
- [2] T. Cho *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 1164 (2001); Nucl. Fusion **43**, 293 (2003).
- [3] J. Kohagura *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **477**, 215 (2002).
- [4] J. Kohagura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 805 (2001).
- [5] T. Cho, R. Snider *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 540 (1995).
- [6] T. Cho, M. Bessenrodt-Weberpals *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **68**, 774 (1997).
- [7] T. Cho *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **348**, 475 (1994).
- [8] J. Kohagura *et al.*, Phys. Rev. E **56**, 5884 (1997).

(1) ECRH 波動加熱解析のためのマクスウェルシミュレーションコードの開発

電磁波伝搬解析のための基礎方程式系にサイクロトロン共鳴等の波・粒子相互作用の効果を取り入れることについて研究を行った。結果として、マクスウェル方程式に電気伝導率テンソルを導入することによって、サイクロトロン基本共鳴とランダウ共鳴の効果を近似的に取り入れることが可能であることが分かった。この工夫により、数値計算コードをECRH波動加熱解析にも応用できるようになった。簡単のためいま磁場配位が $\mathbf{b} = \mathbf{B}_0 / B_0 = b_x(x, z)\hat{x} + b_z(x, z)\hat{z}$ で与えられる2次元系を考えると、シミュレーションのための方程式系は下記ようになる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} &= -\nabla \times \mathbf{E} \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} &= c^2 \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{\varepsilon_0} \mathbf{J} - \frac{1}{\varepsilon_0} \vec{\sigma} \cdot \mathbf{E} \\ \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{J} &= \omega_{pe}^2 \mathbf{E} - \frac{e}{\varepsilon_0 m_e} \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0 - \frac{\nu}{\varepsilon_0} \mathbf{J} \\ \vec{\sigma} &= \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 b_z^2 + \sigma_3 b_x^2 & -i\sigma_1 b_z & -(\sigma_1 - \sigma_3)b_x b_z \\ i\sigma_1 b_z & \sigma_1 & -i\sigma_1 b_x \\ -(\sigma_1 - \sigma_3)b_x b_z & i\sigma_1 b_x & \sigma_1 b_x^2 + \sigma_3 b_z^2 \end{pmatrix} \\ \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0 \omega} &= \sqrt{\pi} \frac{\omega_{pe}^2}{2\omega |k_{\parallel}| v_{te}} \exp \left[-\left(\frac{\omega - |\omega_{ce}|}{|k_{\parallel}| v_{te}} \right)^2 \right], \quad \frac{\sigma_3}{\varepsilon_0 \omega} = \sqrt{\pi} \frac{\omega \omega_{pe}^2}{(|k_{\parallel}| v_{te})^3} \exp \left[-\left(\frac{\omega}{|k_{\parallel}| v_{te}} \right)^2 \right]\end{aligned}$$

このとき、サイクロトロン基本共鳴及びランダウ共鳴による電磁波の吸収エネルギー密度 W は

$$\begin{aligned}W &= \frac{1}{2} \text{Re} \{ \mathbf{E}^* \cdot \vec{\sigma} \cdot \mathbf{E} \} = \frac{1}{2} \sigma_1 (b_z^2 |E_x|^2 + |E_y|^2 + b_x^2 |E_z|^2) + \frac{1}{2} \sigma_3 (b_x^2 |E_x|^2 + b_z^2 |E_z|^2) \\ &+ \frac{1}{2} (\sigma_3 - \sigma_1) b_x b_z (E_x^* E_z + E_x E_z^*) + \frac{i}{2} \sigma_1 [(b_z E_x - b_x E_z) E_y^* - (b_z E_x^* - b_x E_z^*) E_y]\end{aligned}$$

となる。これは一様磁場 $b_z = 1, b_x = 0$ の場合には

$$W = \frac{1}{2} \sigma_3 |E_z|^2 + \frac{1}{2} \sigma_1 |E_x - iE_y|^2$$

に帰着し、 σ_1 を含む項がR波による電子サイクロトロン基本共鳴によるエネルギー吸収、 σ_3 を含む項がランダウ共鳴によるエネルギー吸収に対応していることが分かる。マクスウェル方程式に基づく波動伝搬と σ_1 及び σ_3 における磁力線方向の波数 k_{\parallel} をセルフコンシステントに取り扱っていないので、波・粒子相互作用の取り扱いは完全に厳密ではない。ここでは σ_1 及び σ_3 における波数 k_{\parallel} は局所近似の分散式 $D(k_{\parallel}, \omega, r) = 0$ から求めた値 $k_{\parallel}(r, \omega)$ を用いる。この改良によって、マクスウェル方程式によ

る電磁波伝搬解析において波・粒子共鳴相互作用による電磁波の吸収エネルギーの問題も同時に取り扱えるようになった。

このシミュレーションコードの応用として、R波のトンネル伝搬についての解析を行った。共鳴層とカットオフ層で挟まれた領域はR波の非伝搬領域であり、この領域内ではR波はエバネッセント波となる。しかし非伝搬領域とR波の波長との関係で、R波の一部はこの非伝搬領域をトンネル伝搬することができる。図1は、密度一様な不均一磁場中でのR波のトンネル伝搬に関する2次元シミュレーションの結果を示したものである（電場 E_y は、横方向にガウス分布を持たせて励起した2次元ビームの中心位置 $z = 0$ での値を表す）。位置 $x = 1600$ 近傍に共鳴層とカットオフ層で挟まれたR波の非伝搬領域があり、R波の一部がそこを横切ってトンネル伝搬している様子が分かる。図2は、共鳴層とカットオフ層間の距離 L を変化させた場合のR波の透過率 T （●は1次元計算、■は2次元計算）の変化を示したもので、実線はBuddenの理論式 $T = \exp(-\pi kL)$ を表す。計算結果と理論とがよく一致していることが分かる（ここで、 k はR波の波数を表す）。

参考文献：

1. H. Hojo, N. Uchida, A. Shimamura, T. Saito and Y. Tatematsu, Full-Wave Maxwell Simulation on R-Mode Tunneling in Electron Cyclotron Resonance Heating Study, J. Plasma Fusion Res. 80, No.3 (2004), 175-176.
2. H. Hojo, T. Saito and Y. Tatematsu, Full-Wave Maxwell Simulations for ECRH, Joint Meeting of US-Japan JIFT Workshop on Theory-Based Modeling and Integrated Simulation of Burning Plasmas and 21 COE Workshop on Plasma Theory (Kyoto, Dec. 2003), 7.

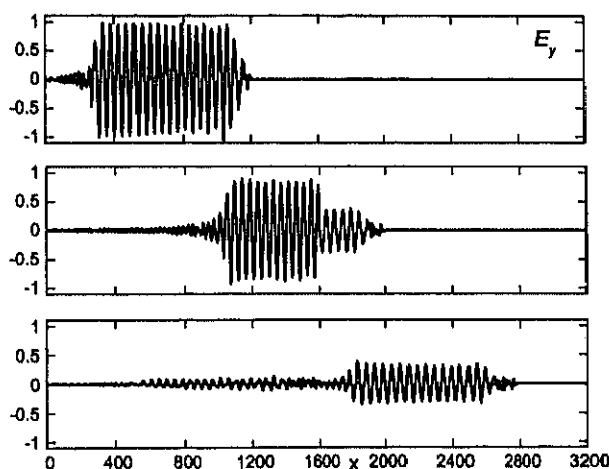


図1. R波のトンネル伝搬の様子

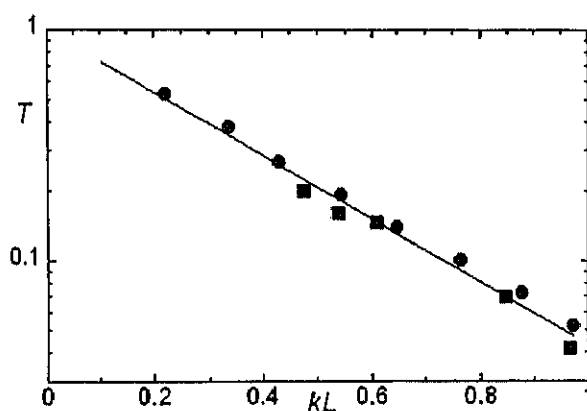


図2. R波の透過率と kL の関係

(2) ヘリカルプラズマに対する超短パルス反射法シミュレーション

本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル系磁場閉じ込め装置 LHD のプラズマに対して超短パルス反射法に関するシミュレーション解析を行った。シミュレーションのための基礎方程式系は、

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} = c^2 \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{\varepsilon_0} \mathbf{J},$$

$$\frac{1}{\epsilon_0} \frac{d}{dt} \mathbf{J} = \omega_{pe}^2 \mathbf{E} - \frac{e}{m_e \epsilon_0} \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0,$$

である。数値計算スキームは FDTD 法を用いており、プラズマ密度分布 $n(r)$ と閉じ込め磁場分布 $B_0(r)$ 及び入射電磁波の条件を指定すればシミュレーションを実行できるようになっている。先ずヘリカルプラズマにおける超短パルス電磁波 (FWHM = 30ps) の伝搬の様子を示したスナップショットを図3と図4に示す。図3は紙面 (x, y) に垂直な電場成分 E_z の入射パルスの波形, 図3は同じく E_z のプラズマからの反射波の波形である。ここで LHD プラズマ内の閉じ込め磁場分布に関しては渡辺, 赤尾の解析式[T. Watanabe and H. Akao, J. Plasma Fusion Res. 73 (1997) 186.]を仮定して, また密度分布に関しては $n(x,z) = n_0(1 - \Psi/\Psi_0)$ を仮定した (Ψ はフラックス関数で, Ψ_0 は最外殻磁気面に対応する)。密度は $n_0 = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ を仮定した。図中にある楕円は最外殻磁気面 Ψ_0 の位置, 即ちプラズマと真空の境界を示している。

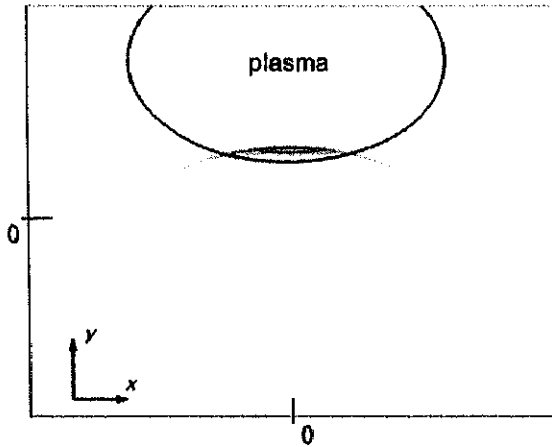


図3. 入射パルスの波形 (E_z)

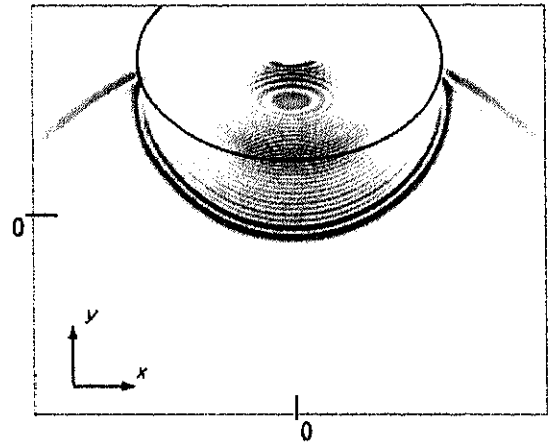


図4. プラズマからの反射波の波形 (E_z)

図5は, 位置 $x=z=0$ に設置した検出器上の波動電場 E_z の時間変化を示している。信号の前部分が入射パルスに対応し, 後者がプラズマからの反射波の信号を表している。zero-crossing 法を用いて反射波の信号から波の遅延時間の周波数依存性 $\tau(\omega)$ を求め, 波動電場 E_z がOモード的であることを利用してアーベル逆変換の公式

$$x_r(\omega_{pe}) = \int_0^{\omega_{pe}} d\omega \frac{c\tau(\omega)}{\pi \sqrt{\omega_{pe}^2 - \omega^2}}$$

を用いて密度分布を再構成した結果が図6である。黒丸が計算結果で, 実線は波の伝搬に対して仮定した密度分布を表す。図から計算結果は元の密度分布に非常に良く一致していることが分かる。

参考文献:

3. H. Hojo, A. Fukuchi, A. Mase, T. Watanabe, A. Ejiri, Ultrashort-Pulse Reflectometry for LHD Plasmas, Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves (Otsu, Sept.-Oct. 2003), 49-50.
4. A. Mase, Y. Kogi, L. Bruskin, M. Ignatenko, T. Yasuda, K. Uchida, K. Nishiyori, K. Kawahata, Y. Nagayama, H. Hojo, M. Matsukuma, M. Aoi, E. Sakata, Advancement of Millimeter-Wave Imaging Diagnostics on LHD (Invited), Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves (Otsu, Sept.-Oct. 2003), 83-84.
5. A. Fukuchi, H. Hojo, A. Itakura and A. Mase, Computer Simulation on Ultrashort-Pulse Reflectometry in Helical Plasmas, 13th Int. Toki Conf. Plasma Phys. Controlled Nuclear Fusion (Toki, Dec, 2003), PII-93.

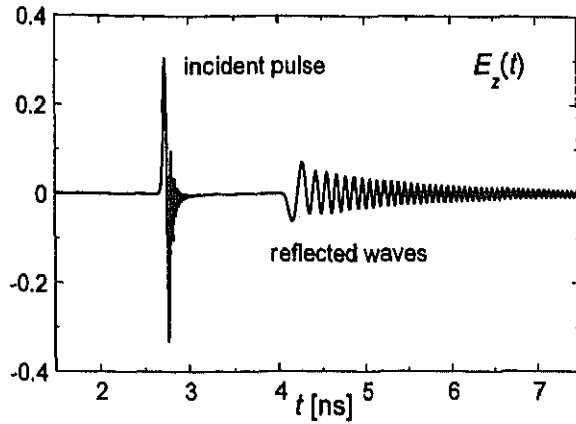


図5. 位置 $x=z=0$ での電場 E_z の信号

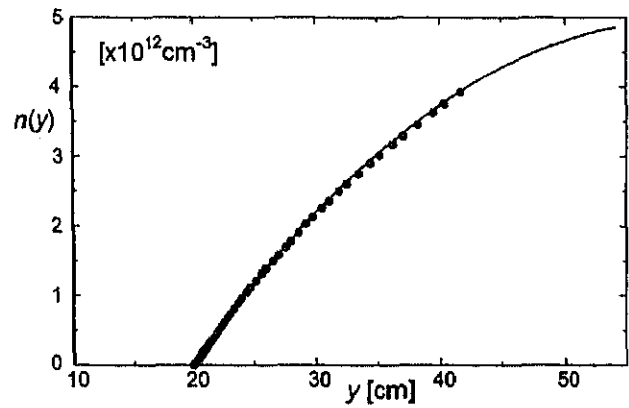


図6. y 軸上 ($x=0$)での密度分布の再構成結果

(3) 過密度プラズマを用いたファブリー・ペロー干渉計

ファブリー・ペロー干渉計は、可視光やX線領域において波長フィルター、分光器、モード選択器として現在広く用いられている。この干渉計の分解能は、 $\Delta\lambda/\lambda = \lambda(\text{wavelength})/L(\text{optical-path difference})$ の公式に従えば可視光域では高分解能が得られるが、より長波長のミリ波帯域等では高分解能を期待できないことになる。本研究では、エタロンとして $\omega < \omega_{pe}$ (ω_{pe} は電子プラズマ振動数) の条件を満たす過密度プラズマを用いたファブリー・ペロー干渉計を考え、この干渉計におけるファブリー・ペロー共鳴の特性、干渉計を透過する電磁波の透過率、分解能の性能等について解析した。

過密度プラズマを利用したファブリー・ペロー干渉計のモデルを図7に示す。干渉計は二つのシートプラズマとその間に挟まれた誘電体の物質とで構成されている。ここでは簡単のため各シートプラズマは電磁波に対して透明である非常に薄い物質で閉じ込められていると仮定する。またプラズマ中における電磁波の散逸効果はここでは無視して考える。このときファブリー・ペロー干渉計を透過する電磁波は、以下の波動方程式で記述される。

$$\left[\frac{d^2}{dz^2} + k^2 \varepsilon(\omega, z) \right] E(z) = 0, \quad \varepsilon(\omega, z) = \begin{cases} 1, & z < 0 \\ 1 - \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega} \right)^2, & 0 \leq z \leq L \\ \varepsilon_a, & L < z < 2L \\ 1 - \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega} \right)^2, & 2L \leq z \leq 3L \\ 1, & z > 3L \end{cases}$$

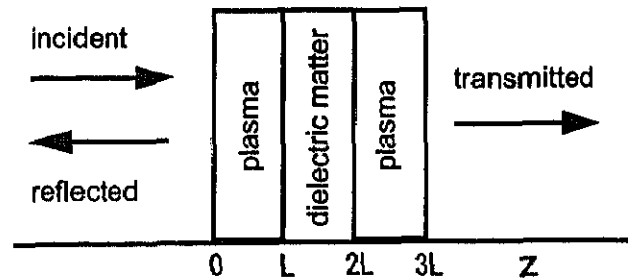


図7. ファブリー・ペロー干渉計のモデル

ここで $k = \omega/c$ であり、 ω_{pe} は電子プラズマ振動数である。

先ず、この干渉計におけるファブリー・ペロー共鳴の特性と、干渉計を透過する電磁波の透過 T に

ついて解析する。電磁波の透過率は方程式(1)を解くことによって解析的に求められる。図8に過密度プラズマ領域 ($\omega < \omega_{pe}$) における電磁波の透過率 T の周波数依存性を幾つかの $\omega_{pe}L/c$ の値に対して示す。 $\omega_{pe}L/c$ はプラズマ密度とプラズマ層の厚さに依存しており、図から $\omega_{pe}L/c$ の値が小さい時にはファブリー・ペロー共鳴は現れないが、大きくなるに従って共鳴の数も増加していくことが分かる。二つのプラズマ層の間に挟む誘電体の誘電率 ϵ_a を変化させた場合、 ϵ_a の値が大きくなるにつれて共鳴周波数が低周波側へシフトすることが分かった。また、周波数が共鳴周波数に一致するとき透過する電磁波は干渉計内に非常に強く局在した分布を持つことも分かった。

次に、この過密度プラズマを用いたファブリー・ペロー干渉計の性能を表す分解能について考える。ファブリー・ペロー干渉計の分解能は共鳴幅に比例すると考えられる。ここではファブリー・ペロー共鳴における第1共鳴周波数と $\omega_{pe}L/c \sim 4$ から現れる第2共鳴周波数に注目する。図9は第1及び第2共鳴周波数における共鳴ピークの半値幅 (FWHM) の $\omega_{pe}L/c$ 依存性を示したものである。図から明らかなように $\omega_{pe}L/c$ が大きくなるに従って (即ち、プラズマがより高密度になる、或いは、プラズマ層がより厚くなるに従って)、共鳴ピークの半値幅 (FWHM) が小さくなっていくことが分かる。従って、干渉計の分解能は $\Delta\omega/\omega_R$ で評価できるから、 $\omega_{pe}L/c$ の値が大きくなるに従ってより高分解能の干渉計が得られることになる。

参考文献：

6. H. Hojo and A. Mase, Fabry-Perot Interferometer Using Over-Dense Plasmas, Extended Abstracts of Optics Japan 2003 (Hamamatsu, Dec., 2003), 230-231.
7. H. Hojo, K. Akimoto and A. Mase, Enhanced Wave Transmission in One-Dimensional Plasma Photonic Crystals, Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves (Otsu, Sept.-Oct. 2003), 347-348.
8. H. Hojo, K. Akimoto and A. Mase, Reflectionless Transmission of Electromagnetic Wave in One-Dimensional Multi-Layer Plasmas, J. Plasma Fusion Res. **80**, No.3 (2004), 177-178.
9. H. Hojo and A. Mase, Millimeter-Wave Fabry-Perot Interferometry, International Microwave Diagnostic Meeting (Kyushu University, March 2004).

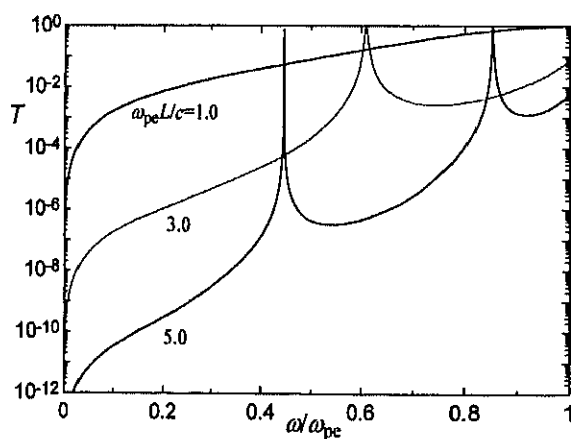


図8. ファブリー・ペロー共鳴の周波数依存性

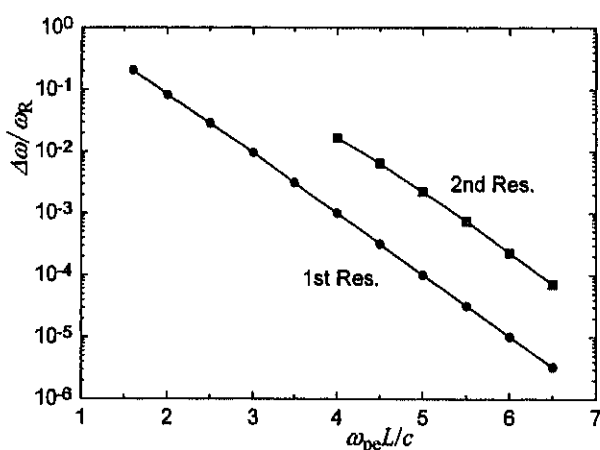


図9. 共鳴幅の $\omega_{pe}L/c$ 依存性

<論文>

- 01 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, M. Yoshikawa and K. Yatsu,
Development of Carbon Sheet pump for control of hydrogen recycling in the GAMMA 10 tandem mirror,
Fusion. Eng. Design **65**, (2003) 429-432.
- 02 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, S. Saosaki, Y. Takemura, Y. Tatematsu, M. Yoshida, M. Yoshikawa,
Improved GAMMA 10 Tandem Mirror Confinement in High Density Plasma,
Nuclear Fusion **43**, 5 (2003) 358-361.
- 03 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, R. Minami, T. Numakura, M. Yoshida, K. Yatsu, S. Miyoshi,
Extended Consolidation of Scaling Laws of Potential Formation and Effects Covering the Representative Tandem Mirror Operations in GAMMA 10,
Nuclear Fusion **43**, 5 (2003) 293-298.
- 04 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, M. Yoshida, Y. Nakashima, T. Tamano, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
A Proposal for both Plasma Ion- and Electron-Temperature Diagnostics under simultaneous Incidence of Particles and X-rays into a Semiconductor on the Basis of a Proposed Model for a Semiconductor Detector Response,
Plasma Physics and Controlled Fusion **45**, 5 (2003) 807-821.
- 05 S. Ishida, K. Abe, A. Ando, T. Cho, T. Fujii, T. Fujita, S. Goto, K. Hanada, A. Hatayama, T. Hino, H. Horiike, N. Hosogane, M. Ichimura, S. Tsuji-Iio, S. Itoh, Y. Kamada, M. Katsurai, M. Kikuchi, A. Kitsunozaki, A. Kohyama, H. Kubo, M. Kuriyama, M. Matsukawa, M. Matsuoka, Y. Miura, Y.M. Miura, N. Miya, T. Mizuuchi, Y. Murakami, K. Nagasaki, H. Ninomiya, N. Nishino, Y. Ogawa, K. Okano, T. Ozeki, M. Saigusa, M. Sakamoto, A. Sakasai, M. Satoh, M. Shimada, R. Shimada, M. Shimizu, T. Takagi, Y. Takase, S. Takeji, T. Tanabe, K. Toi, Y. Ueda, Y. Uesugi, K. Ushigusa, M. Wakatani, Y. Yagi, K. Yamaguchi, T. Yamamoto, K. Yatsu and K. Yoshikawa,
Objectives and Design of the JT-60 Superconducting Tokamak,
Nuclear Fusion **43**, 7 (2003) 606-613.
- 06 T. Saito, E. Yokoyama, Y. Tatematsu, M. Ichimura, H. Higaki, E. Tsuda, T. Yasuoka, K. Yatsu,
Study of Action of Unstable AIC Waves on Electrons in a Tandem Mirror Plasma from Measurement of End Loss Electrons,
Journal of the Physical Society of Japan **72**, 8 (2003) 1977-1982.
- 07 M. K. Islam, M. Salimullah, K. Yatsu, Y. Nakashima, and Y. Ishimoto,
Fusion oriented plasma research in Bangladesh: theoretical study on low-frequency dust modes and edge plasma control experiment in tandem mirror,
Nuclear Fusion **43**, 9 (2003) 914-921.
- 08 M. K. Islam and Y. Nakashima,
Comment on "Charging of dust grains in a plasma with negative ions" [Phys. Plasmas **10**, 1518 (2003)],
Phys. Plasmas **10**, 10 (2003) 4185-4187.

- 09 M. Yoshida, T. Cho, M. Hirata, H. Ito, J. Kohagura, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Spatial Profile Measurements of Ion-Confining Potentials Using Novel Position-Sensitive
Ion-Energy Spectrometer Arrays,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **513**, 1-2 (2003) 99-
102.
- 10 R. Minami, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Spatially Resolved Electron Cyclotron Heated Plasmas Using Novel Matrix-Type X-ray
Semiconductor-Detector Arrays,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **513**, 1-2 (2003) 304-
307.
- 11 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, M. Yoshida, H. Watanabe, H. Ito, N.
Yokoyama, K. Yatsu, S. Miyoshi, K. Hirano, H. Maezawa, T. Kondoh, J. Hori, and T. Nishitani,
Deterioration and Recovery Effects in Energy Responses of Semiconductor X-ray Detectors
due to Nuclear-Fusion Produced Neutron Irradiation,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **513**, 1-2 (2003) 300-
303.
- 12 H. Zushi, S. Itoh, K. Hanada, K. Nakamura, M. Sakamoto, E. Jotaki, M. Hasegawa, Y.D. Pan,
S.V. Kulkarni, A. Iyomasa, S. Kawasaki, H. Nakashima, N. Yoshida, K. Tokunaga, T. Fujiwara,
M. Miyamoto, H. Nakano, M. Yuno, A. Murakami, S. Nakamura, N. Sakamoto, K. Shinoda, S.
Yamazoe, H. Akanishi, K. Kuramoto, Y. Matsuo, A. Iwamae, T. Fujimoto, A. Komori, T.
Morisaki, H. Suzuki, S. Masuzaki, Y. Hirooka, Y. Nakashima and O. Mitarai,
Overview of steady state tokamak plasma experiments in TRIAM-1M,
Nuclear Fusion **43**, 12 (2003) 1600-1609.
- 13 S Sudo, Y Nagayama, B J Peterson, K Kawahata, T Akiyama, N Ashikawa, M Emoto, M Goto,
Y Hamada, K Ida, T Ido, H Iguchi, S Inagaki, M Isobe, T Kobuchi, A Komori, Y Liang, S
Masuzaki, T Minami, T Morisaki, S Morita, S Muto, Y Nakamura, H Nakanishi, M Narushima,
K Narihara, M Nishiura, A Nishizawa, S Ohdachi, M Osakabe, T Ozaki, R O Pavlichenko, S
Sakakibara, K Sato, M Shoji, N Tamura, K Tanaka, K Toi, T Tokuzawa, K Y Watanabe, T
Watanabe, H Yamada, I Yamada, M Yoshinuma, P Goncharov, D Kalinina, T Kanaba, T
Sugimoto, A Ejiri, Y Ono, H Hojo, K Ishii, N Iwama, Y Kogi, A Mase, M Sakamoto, K Kondo,
H Nagasaki, S Yamamoto, N Nishino, S Okajima, T Saida, M Sasao, T Takeda, S Tsuji-Iio, D S
Darrow, H Takahashi, Y Liu, J F Lyon, A Yu Kostrioukov, V B Kuteev, V Sergeev, I Viniar, A V
Krasilnikov, A Sanin, L N Vyacheslavov, D Stutman, M Finkenthal, O Motojima and LHD
Group,
Recent Diagnostic Developments on LHD,
Plasma Phys. Control. Fusion **45**, 12A (2003) A425-A443.
- 14 H.Tamai, M.Matsukawa, G.Kurita, N.Hayashi, K.Urata, Y.M.Miura, K.Kizu, K.Tsuchiya,
A.Morioka, Y.Kubo, S.Sakurai, K.Masaki, T.Suzuki, M.Takechi, Y.Kamada, A.Sakasai, S.Ishida,
K.Abe, A.Ando, T.Cho, T.Fujii, T.Fujita, S.Goto, K.Hanada, A.Hatayama, T.Hino, H.Horiike, N
Hosogane, M.Ichimura, S.Tsuji-Iio, S.Itoh, M.Katsurai, M.Kikuchi, A.Kohyama, H.Kubo,
M.Kuriyama, M.Matsuoka, Y.Miura, N.Miya, T.Mizuuchi, K.Nagasaki, H.Ninomiya, N.Nishino,
Y.Ogawa, K.Okano, T.Ozeki, M.Saigusa, M.Sakamoto, M.Satoh, M.Shimada, R.Shimada,
M.Shimizu, T.Takagi, Y.Takase, T.Tanabe, K.Toi, Y.Ueda, Y.Uesugi, K.Ushigusa, Y.Yagi,
T.Yamamoto, K.Yatsu, and K.Yoshikawa,

- Progress in Physics and Technology Developments for the Modification of JT-60,
Plasma Science and Technology **6**, 1 (2004) 2141-2150.
- 15 T. Cho, M. Yoshida, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimur, K. Ishii, M. K. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, Y. Takemura, V. P. Pastukhov, S. Miyoshi, and GAMMA 10 Group,
Sheared Radial Electric-Field Effects on Turbulence Suppression due to Doubly Advanced Potential-Height Formation,
Journal of Plasma and Fusion Research **80**, 2 (2004) 81-82.
 - 16 M. Ignatenko, A. Mase, L. Bruskin, Y. Kogi and H. Hojo,
Microwave Imaging Reflectometry of Corrugated Metal Targets,
J. Plasma Fusion Res. **80**, 2 (2004) 85-86.
 - 17 H. Hojo and A. Mase,
Dispersion Relation of Electromagnetic Waves in One-Dimensional Plasma Photonic Crystals,
J. Plasma Fusion Res. **80**, 2 (2004) 89-90.
 - 18 H. Hojo, N. Uchida, A. Shimamura, T. Saito and Y. Tatematsu,
Full-Wave Maxwell Simulation on R-Mode Tunneling in Electron Cyclotron Resonance Heating Study,
J. Plasma Fusion Res. **80**, 3 (2004) 175-176.
 - 19 H. Hojo, K. Akimoto and A. Mase,
Reflectionless Transmission of Electromagnetic Wave in One-Dimensional Multi-Layer Plasmas,
J. Plasma Fusion Res. **80**, 3 (2004) 177-178.
 - 20 A. Itakura, T. Hirai, H. Hojo, J. Kohagura, Y. Shima, S. Tsunoda, K. Yatsu and M. Yoshikawa,
Measurement of a Density Profile Using Microwave,
6th International Reflectometry Workshop, (General Atomics, San Diego, USA, May 5-7, 2003).
 - 21 A. Mase, Y. Kogi, M. Ignatenko, L. G. Bruskin, H. Hojo, T. Tokuzawa, N. Inagaki, Y. Nagayama, K. Kawahata,
Application of Ultrashort Pulse Reflectometry to Large Helical Device,
6th Int. Reflectometry Workshop, (GA, San Diego, May 5-7, 2003).
 - 22 H. Higaki, M. Ichimura, Y. Yamaguchi, S. Kakimoto, K. Horinouchi, K. Ide, H. Utsumi, D. Inoue, H. Hojo, and K. Yatsu,
The Radial Mode Transition of Excited Fast Alfvén Waves in the Mirror Plasmas,
AIP Conference Proceedings, (Moran, WY, USA, May 19-21, 2003) **694**, 114-117.
 - 23 M. Ichimura, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, K. Horinouchi, K. Ishii, M. K. Islam, A. Itakura, S. Kakimoto, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, K. Yatsu, M. Yoshikawa,
Production of High Density Plasmas with High Harmonic Fast Waves in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Invited, 30th IEEE International Conf. on Plasma Science, (Jeju, Korea, June 2-5, 2003) **5D03-04**.
 - 24 Y. Kogi, A. Mase, S. Ohsako, M. Ignatenko, T. Yasuda, L. G. Bruskin, H. Hojo, T. Tokuzawa, S. Inagaki, Y. Nagayama and K. Kawahata,

- Application of Ultrashort-Pulse Reflectometry to Large Helical Device,
30th IEEE Int. Conf. Plasma Science, (Jeju, Korea, June 2-5, 2003) 7PA32.
- 25 S Sudo, Y Nagayama, B J Peterson, K Kawahata, T Akiyama, N Ashikawa, M Emoto, M Goto, Y Hamada, K Ida, T Ido, H Iguchi, S Inagaki, M Isobe, T Kobuchi, A Komori, Y Liang, S Masuzaki, T Minami, T Morisaki, S Morita, S Muto, Y Nakamura, H Nakanishi, M Narushima, K Narihara, M Nishiura, A Nishizawa, S Ohdachi, M Osakabe, T Ozaki, R O Pavlichenko, S Sakakibara, K Sato, M Shoji, N Tamura, K Tanaka, K Toi, T Tokuzawa, K Y Watanabe, T Watanabe, H Yamada, I Yamada, M Yoshinuma, P Goncharov, D Kalinina, T Kanaba, T Sugimoto, A Ejiri, Y Ono, H Hojo, K Ishii, N Iwama, Y Kogi, A Mase, M Sakamoto, K Kondo, H Nagasaki, S Yamamoto, N Nishino, S Okajima, T Saida, M Sasao, T Takeda, S Tsuji-Iio, D S Darrow, H Takahashi, Y Liu, J F Lyon, A Yu Kostrioukov, V B Kuteev, V Sergeev, I Viniar, A V Krasilnikov, A Sanin, L N Vyacheslavov, D Stutman, M Finkenthal, O Motojima and LHD Group,
Recent Diagnostics Development on LHD,
Invited, 30th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, (St. Petersburg, July 7-11, 2003) I-5-2.
- 26 H. Hojo, K. Akimoto and A. Mase,
Enhanced Wave Transmission in One-Dimensional Plasma Photonic Crystals,
Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, (Otsu, Shiga, September 29-2, 2003), 347-348.
- 27 H. Hojo, A. Fukuchi, A. Mase, T. Watanabe, A. Ejiri,
Ultrashort-Pulse Reflectometry for LHD Plasmas,
Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, (Otsu, Shiga, September 29-2, 2003), 49-50.
- 28 A. Mase, Y. Kogi, L. Bruskin, M. Ignatenko, T. Yasuda, K. Uchida, K. Nishiyori, K. Kawahata, Y. Nagayama, H Hojo, M. Matsukuma, M. Aoi, E. Sakata,
Advancement of Millimeter-Wave Imaging Diagnostics on LHD,
Invited, Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, (Otsu, Shiga, September 29-2, 2003), 83-84.
- 29 H. Hojo and A. Mase,
Coherent THz Radiation from Bunched Electrons Produced by Subcycle Laser Pulses,
11th Int. Conf. Terahertz Electronics, (Sendai, September 24-26, 2003) P1-10, 58.
- 30 北條仁士, 間瀬淳,
過密度プラズマを利用したファブリー・ペロー干渉計,
Optics Japan 2003, (Actcity Hamamatsu, December 8-9, 2003) 9aA2, 230-231.
- 31 I.Katanuma, H.Saimaru, Y.Tatematsu, T.Saito, K.Ishii, T.Cho,
Ion radial transport due to a non-uniform electrostatic potential in a magnetic mirror,
13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003) P1-96.
- 32 T.Ito, I.Katanuma,
Particle Orbits and Radial Loss in the GAMMA10 Tandem Mirror,
13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003) P2-23.
- 33 Yamaguchi Yuusuke, Ichimura Makoto, Higaki Hiroyuki, Kakimoto Shingo, Horinouchi

- Kentarou, Ide Kouhei, Inoue Daisuke, Nagai Hirohito, Nakagome Kenichirou, Fukuyama Atsushi, Cho Teruji,
 High harmonic fast wave propagation in the GAMMA10 tandem mirror,
 13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion,
 (Toki, Japan, December 9-12, 2003) P2-64.
- 34 Y. Tatematsu, T. Saito, I. Katanuma, and T. Cho,
 Effects of magnetic field distribution on power absorption through second harmonic electron
 cyclotron resonance heating in mirror machines,
 13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion,
 (Toki, Japan, December 9-12, 2003) P2-65.
- 35 Kakimoto Shingo, Inoue Daisuke, Ichimura Makoto, Higaki Hiroyuki, Horinouchi Kentarou,
 Ide Kouhei, Yamaguchi Yuusuke, Nagai Hirohisa, Nakagome Kenichirou, Watanabe Tsuguhiro,
 Cho Teruji,
 Excitation of the Alfvén ion cyclotron mode due to an anisotropic heating,
 13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion,
 (Toki, Japan, December 9-12, 2003) P2-92.
- 36 K. Akimoto and H. Hojo,
 Cyclotron Resonance Accelerations by a Generalized EM Wave,
 13th Int. Toki Conf. Plasma Phys. Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-
 12, 2003) PI-92.
- 37 K. Ishii, Y. Takemura, A. Kojima, K. Hagiwara, Y. Miyata, I. Katanuma, and T. Cho,
 Radial Electric Field Control for Retardation of Radial Transport of Bounce Ions in the
 Tandem Mirror,
 13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion,
 (Toki, Japan, December 9-12, 2003) PII-24.
- 38 H. Hojo, K. Akimoto and T. Watanabe,
 Fluid Simulation on Subcycle Pulse Generation in Relativistic Laser-Plasma Interactions,
 13th Int. Toki Conf. Plasma Phys. Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-
 12, 2003) PII-40.
- 39 T. Watanabe, Y. Matsumoto, M. Hishiki, S. Oikawa and H. Hojo,
 Ignition Condition for p-11B Reactor with LHD Type Magnetic Field Configuration,
 13th Int. Toki Conf. Plasma Phys. Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-
 12, 2003) PII-53.
- 40 A. Kojima, K. Ishii, Y. Takemura, K. Hagiwara, Y. Miyata, A. Itakura, M. Ichimura, and T. Cho,
 Simulation of Path Integral Effects for the Magnetic Field Fluctuation Measurement by a
 Gold Neutral Beam Probe in the Tandem Mirror GAMMA 10,
 13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion,
 (Toki, Japan, December 9-12, 2003) PII-67.
- 41 K. Hagiwara, K. Ishii, Y. Takemura, A. Kojima, Y. Miyata, and T. Cho,
 Observation of Mirror Trapped Ions and Development of a High Energy Neutral Particle
 Analyzer in GAMMA 10,
 13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion,
 (Toki, Japan, December 9-12, 2003) PII-68.
- 42 A. Fukuchi, H. Hojo, A. Itakura and A. Mase,

- Computer Simulation on Ultrashort-Pulse Reflectometry in Helical Plasmas,
13th Int. Toki Conf. Plasma Phys. Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003) PII-93.
- 43 Masayuki YOSHIKAWA, Keiichiro SEDO, Yusuke KUBOTA, Takayuki KOBAYASHI, Akiyoshi ITAKURA, Junko KOHAGURA, Izumi MURAKAMI, Takako KATO and Teruji CHO,
Study of impurity ion radiation intensities using collisional-radiative model in the GAMMA10 plasma,
13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003).
- 44 KUBOTA Yuusuke, YOSHIKAWA Masayuki, NAKASHIMA Yousuke, KOBAYASHI Takayuki, SAITO Masashi, OHKI Toshikazu, HIGASHIZONO Yuta, ITAKURA Akiyosi, TSUNODA Satonobu and CHO Teruji,
Temporal behavior of electron and neutral hydrogen density profiles during NBI in the GAMMA 10 tandem mirror,
13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003).
- 45 NAKASHIMA Yousuke, HIGASHIZONO Yuta, OHKI Toshikazu, SHOJI Mamoru 1), S. KOBAYASHI Shinji 2), KUBOTA Yuusuke, YOSHIKAWA Masayuki, ISLAM Md. Khairul, FUKASAWA Takahiro, ISHIMOTO Yuki, WATANABE Kazuhiro, OGITA Takeshi, YAMADA Masaki, MURAKAMI Ryouhei and CHO Teruji,
Neutral transport analysis in non-axisymmetric anchor region of the GAMMA 10 tandem mirror using a Monte-Carlo simulation,
13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003).
- 46 Md. Khairul ISLAM and Y. Nakashima,
Theoretical Investigation of Langmuir Wave Instability in Irradiated Dusty Plasmas,
13th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Toki, Japan, December 9-12, 2003).
- 47 H. Hojo, T. Saito and Y. Tatematsu,
Full-Wave Maxwell Simulations for ECRH,
Joint Meeting of US-Japan JIFT Workshop on Theory-Based Modeling and Integrated Simulation of Burning Plasmas and 21 COE Workshop on Plasma Theory, (Kyoto, December 15-17, 2003), 7.
- 48 M. Ichimura, H. Higaki, M. Nakamura, S. Saosaki, H. Kano, S. Kakimoto, K. Horinouchi, Y. Yamaguchi, H. Hojo, Y. Nakashima, T. Watanabe, K. Yatsu,
Excitation of Alfvén Waves in Mirror Plasmas with a Strong Temperature Anisotropy,
AIP Conference Proceedings, (2003) **669**, 170-174.
- 49 Yoshikawa, M., Kubota, Y., Sedo, K., Kobayashi, T., Saito, M., Nakashima, Y., Yamada, H., Sakamoto, R.,
Study of the Fueling pellet Transportation in the Guiding Tube,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2002-March 2003**, (2003) 78.
- 50 Y. Nakashima, Y. Ishimoto, S. Kobayashi, M. Yoshikawa, K. Yatsu, K. Morita, K. Yuhara, A.

Sagara, M. Shoji, H. Suzuki,

Quantitative Analysis of Hydrogen in the CFC Material Exposed to GAMMA 10 plasmas by Means of Elastic Recoil Detection Technique,

Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2002-March 2003**, (2003) 87.

51 T. Watanabe, H. Hojo, Y. Matsumoto and S. Oikawa,

Ignition Condition of Proton-Boron Fusion Reactor,

Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2002-March 2003**, (2003) 200.

52 Yoshikawa, M., Kubota, Y., Sedo, K., Kobayashi, T., Saito, M., Kato, T., Murakami, I.,

Study of Impurity Ion Radiation Intensity in the GAMMA 10 Plasma,

Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2002-March 2003**, (2003) 380.

53 T. Watanabe, Y. Matsumoto, T. Nagaura, Y. Itoh, S. Oikawa and H. Hojo,

Ignition Condition for p-11B Reactor,

Research Report, National Institute for Fusion Science **NIFS-PROC-53**, (2003) 24-36.

54 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, H. Watanabe, M. Yoshida, H. Ito, K.

Yatsu, S. Miyoshi, J. Hori, T. Kondoh, T. Nishitani, K. Hirano, H. Maezawa,

Neutron Fluence Dependence of X-ray Energy Responses for Tomography Detector Arrays,

Photon Factory Activity Report 2002 #20, Part B (2003) 145.

55 Masayuki YOSHIKAWA, Keiichiro SEDO, Yuusuke KUBOTA, Takayuki KOBAYASHI1,

Masashi Saito, Naohiro YAMAGUCHI,

ABSOLUTE CALIBRATION OF SPACE-RESOLVING VUV SPECTROGRAPH FOR PLASMA DIAGNOSTICS,

Photon Factory Activity Report 2002 #20, Part B (2003) 278.

56 小波蔵純子、長 照二、平田真史、沼倉友晴、南 龍太郎,

小特集「高分解能プラズマX線計測の最前線」

3.磁場閉じ込めプラズマの時間空間分解分光計測

3.2 マトリックス型半導体検出器を用いた電子温度の時間空間分解計測,

Journal of Plasma and Fusion Research **79**, 4 (2003) 370-376.

57 平田久子、橋野正美,

実験室の法規制,

筑波大学技術報告, 24 (2004) 126-132.

<学位論文>

博士論文

(物理学研究科)

武村祐一朗 [博士 (理学)]

Observation of the radial potential profile by use of an improved gold neutral beam probe

: 改良型金中性粒子ビームプローブによる径方向電位分布の観測

吉田麻衣子 [博士 (理学)]

Study of the Spatial Profile of Ion Confining Potentials Using Novel Ion-Energy Spectrometer Arrays

: 新型イオン・エネルギー・スペクトル計測器アレイを用いたイオン閉じ込め電位空間分布の研究

修士論文

(理工学研究科)

大木俊和 [修士 (理学)]

H α 線強度計測に基づく中性粒子ビーム入射時の中性粒子挙動解析

荻田猛史 [修士 (理学)]

セントラル部中性粒子ビーム入射実験におけるイオンエネルギー収支の時間発展解析

小林貴之 [修士 (理学)]

紫外・可視分光器を用いたプラズマ回転測定による電場計測

福知敦 [修士 (理学)]

ヘリカルプラズマの超短パルス反射法計測に関するシミュレーション研究

渡辺一浩 [修士 (工学)]

中性粒子ビーム入射による GAMMA10 プラズマの加熱と粒子供給

<講演>

- 01 H.Higaki, M.Ichimura, K.Kadoya, Y.Yamaguchi, S.Kakimoto, K.Horinouchi, K.Ide, H.Utsumi, D.Inoue, H.Hojo, and K.Yatsu,
Alfven waves in the mirror confined plasma,
US-Japan workshop, (Moran, WY, USA, May 21).
- 02 Y. Nakashima,
Edge plasma and PSI studies in the tandem mirror GAMMA 10,
2003 US-Japan Workshop on High Heat Flux Components and Plasma Surface
Interactions for Next Fusion Devices & High Power Density Devices and Design, (Port
Townsend, Washington, USA, July 28-31).
- 03 H.Higaki, M.Ichimura, K.Kadoya, Y.Yamaguchi, S.Kakimoto, K.Horinouchi, K.Ide, H.Utsumi, D.Inoue, H.Hojo, and K.Yatsu,
Alfven waves in the mirror confined plasma,
Plasma Seminar at Korea Basic Science Institute, (KBSI, Korea, August 7).
- 04 Y. Nakashima,
Edge plasma and PSI studies in the tandem mirror GAMMA 10,
Seminar at KBSI, (Daejeon, Korea, August 7).
- 05 Y. Tatematsu, T. Saito and the GAMMA 10 group,
Design of a reflecting mirror on the plug-ECRH system in the GAMMA 10 tandem mirror,
Joint workshop of annual US-JA workshop on RF heating technology and the 6th EU-JA
workshop on RF antenna and related technology, (Tokaimura, Japan, September 25-26).
- 06 Kameo Ishii, Gamma 10 experimental group,
Potential Measurement and Control of Radial Electric Field of the Core Plasma in the
Tandem Mirror,
Seminar at KBSI, (KBSI, Korea, February 20).
- 07 Y. Tatematsu,
ECRH in GAMMA 10,
Seminar at KBSI, (KBSI, Korea, February 20).
- 08 H. Hojo and A. Mase,
Millimeter-Wave Fabry-Perot Interferometry,
International Microwave Diagnostic Meeting, (Kasuga, Fukuoka, March 22).
- 09 A. Mase, Y. Kogi, K. Uchida, T. Yasuda, L. Bruskin, M. Ignatenko, K. Nishiyori, H. Hojo, K.
Kawahata, T. Tokuzawa, Y. Nagayama,
Ultrashort-Pulse Reflectometry for Steady State Plasmas,
International Microwave Diagnostic Meeting, (Kasuga, Fukuoka, March 22).
- 10 長 照二,
特別報告 I 「ガンマ 10 の研究の進展」,
第 1 回センター・核融合研 T V 会議, (核融合科学研究所・筑波大学プラズマ研
究センター・九州大学応用力学研究所, 2003 年 8 月 5 日).
- 11 西丸 浩、片沼 伊佐夫,
ミラー磁場中プラズマの静電位の非一様性に起因する径方向輸送について,
「プラズマ科学のフロンティア 2003」研究会, (核融合科学研究所 管理棟 4 階
大会議室, 2003 年 8 月 20 日-22 日) 12.

- 12 北條仁士,
多層プラズマにおける電磁波の共鳴伝搬,
研究会「プラズマ科学のフロンティア 2003」,(核融合科学研究所, 2003 年 8 月 20 日-22 日).
- 13 北條仁士, 飽本一裕, 間瀬淳,
高強度レーザーパルスによる高強度サブサイクル波生成シミュレーション,
第 64 回応用物理学学会学術講演会,(福岡大学, 2003 年 8 月 30 日-2 日) 30a-ZB-6/III.
- 14 小林 貴之,
紫外・可視分光測定システムを用いたプラズマ中の電位分布測定,
プラズマ若手夏の学校(ポスター発表),(平安会館, 京都市, 2003 年 8 月 4 日-7 日).
- 15 石井 亀男,
タンデムミラーにおけるゴールドビームを用いた電位及び揺動計測(プラズマ計測の開発),
原子力研究会,(工学院大学新宿キャンパス, 2003 年 9 月 9 日) NE-03-2.
- 16 飽本一裕, 北條仁士,
電磁パルスによる粒子加速 III,
日本物理学会秋季大会,(岡山大学, 2003 年 9 月 20 日-23 日) 23aYF11.
- 17 福知敦, 北條仁士, 板倉昭慶, 間瀬淳, 江尻晶, 渡辺二太,
LHD プラズマに対する長短パルス反射法のシミュレーション,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会,(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 25aA26P.
- 18 村上亮平, 中嶋洋輔, 石本祐樹, Md. Khairul ISLAM, 吉川正志, 松島由卯子, 大木俊和, 渡辺一浩, 荻田猛史, 東園雄太, 山田正樹, 長 照二,
GAMMA10 セントラル部における高 Z 材料を用いた高速中性粒子の排気特性,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会,(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 25aB07P.
- 19 井上大輔, 市村真, 桧垣浩之, 柿本真吾, 山口裕資, 堀ノ内賢太郎, 井出幸兵, 永井博久, 中込 賢一郎, 長 照二,
ガンマ 10 における AIC 不安定性のパラメータ依存性,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会,(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pA21P.
- 20 野崎潔, 立松芳典, 斉藤輝雄, 津田英介, 池上博和, 関根貴之, 市川智也, 永井大智, 渡辺裕美, 久保伸, 下妻隆, 長照二,
ガンマ 10 プラグ部 ECRH 用反射鏡の設計,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会,(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pA22P.
- 21 立松芳典, 斉藤輝雄, 池上博和, 関根貴之, 市川智也, 永井大智, 野崎 潔, 渡辺裕美, 遠藤洋一, 市村 真, 桧垣浩之, 長 照二,
ガンマ 10 セントラル部基本波 ECRH 計画,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会,(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pA25P.
- 22 柿本 真吾, 井上大輔, 井出幸兵, 市村真, 桧垣浩之, 堀ノ内賢太郎, 山口裕資, 永井博久, 中込賢一郎, 北條仁士, 渡辺二太, 長照二,

- GAMMA10 での高次高調波によるイオン加熱の効果,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pA26P.
- 23 桧垣浩之, 市村真, 柿本真吾, 山口裕資, 堀ノ内賢太郎, 井出幸兵, 井上大輔, 永井博久,
 中込賢一郎, 北條仁士, 長照二,
 ガンマ 10 高温イオンモードでの ICRF によるプラズマ生成、加熱,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB02P.
- 24 山口裕資、市村真、桧垣浩之、柿本真吾、堀ノ内賢太郎、井出幸兵、井上大輔、永井
 博久、中込賢一郎、福山 淳、長照二,
 GAMMA10 におけるイオンサイクロトロン高次高調波波動伝搬解析,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB03P.
- 25 関根貴之 斉藤輝雄 立松芳典 池上博和 市川智也 永井大智 野崎潔 渡辺裕美
 長照二,
 ガンマ 10 での高電力 ECRH 入射に伴う周辺プラズマの変化,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB04P.
- 26 石井亀男、武村祐一朗、小島有志、萩澤一久、宮田良明、山口智弘、増田能人、片沼
 伊佐夫、斉藤輝雄、板倉昭慶、吉川正志、市村真、長照二,
 タンデムミラーにおける径方向電場分布と閉じ込めの検討,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB05P.
- 27 Md. Khairul ISLAM, 中嶋洋輔, 片沼伊佐夫, 渡辺一浩, 大木俊和, 萩田猛史, 山田正
 樹, 東園雄太, 村上亮平, 松島由卯子, 長 照二,
 Study on Anchor-cell Plasma Properties of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB06P.
- 28 宮田良明、石井亀男、武村祐一朗、小島有志、萩澤一久、山口智弘、増田能人、片沼
 伊佐夫、長照二,
 等電位面の形状変化に伴う IMT バウンスイオンの軌道への影響,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB07P.
- 29 萩田猛史, 中嶋洋輔, 山田正樹, Md. Khairul ISLAM, 大木俊和, 渡辺一浩, 東園雄太,
 村上亮平, 松島由卯子, 長 照二,
 GAMMA10 セントラル部におけるイオン温度計測、及びイオンエネルギー収支の
 時間発展解析,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB08P.
- 30 井出幸兵、市村真、桧垣浩之、柿本真吾、堀ノ内賢太郎、山口裕資、井上大輔、永井博久,
 中込賢一郎、長照二,
 GAMMA10 における高エネルギーイオンの振舞いとプラズマの挙動の相関,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB09P.

- 31 山田正樹, 中嶋洋輔, 荻田猛史, Md. Khairul ISLAM, 大木俊和, 渡辺一浩, 東園雄太, 村上亮平, 松島由卯子, 長 照二,
GAMMA10 中性粒子ビーム入射実験における中性粒子分析器を用いた高速イオン計測,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB10P.
- 32 渡辺一浩, 中嶋洋輔, 東園雄太, 石本祐樹, Md. Khairul ISLAM, 荻田猛史, 大木俊和, 村上亮平, 山田正樹, 松島由卯子, 大川和夫, 長 照二,
中性粒子ビーム入射実験による GAMMA10 プラズマでのホットイオンの生成と挙動解析,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB11P.
- 33 東園雄太, 中嶋洋輔, 渡辺一浩, 大木俊和, 庄司 主, 小林進二, Md. Khairul Islam, 荻田猛史, 山田正樹, 村上亮平, 松島由卯子, 大川和夫, 長 照二,
GAMMA10 セントラル部中性粒子ビーム入射実験における中性粒子の挙動,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB12P.
- 34 久保田雄介, 吉川正志, 小林貴之, 齋藤将志, 沼田直大, 中嶋洋輔, 板倉昭慶, 斉藤輝雄, 立松芳典, 長照二,
GAMMA 10 における ECH による中性粒子の挙動,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB13P.
- 35 池上博和, 斉藤輝雄, 立松芳典, 関根貴之, 市川智也, 永井大智, 野崎潔, 渡辺裕美, 長照二,
ガンマ 10 における端損失電子のエネルギースペクトルの分析,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB14P.
- 36 平田真史, 長 照二, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 吉田麻衣子, 横山 昇, 時岡 優, 深井隆行, 三宅泰宏, 富井大和, 三好昭一,
ガンマ 10 電位生成・電位閉じ込め総合比例則の拡張による電位閉じ込め効果の研究,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB15P.
- 37 吉田麻衣子, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 時岡 優, 三宅泰宏, 沼倉友晴, 横山 昇, 深井隆行, 富井大和,
新型イオン・エネルギー・スペクトル計測器アレイに拠る電場 / 電位構造と電位による閉じ込め向上の研究,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB16P.
- 38 沼倉友晴, 坂本慶司, 長 照二, 小波蔵純子, 平田真史, 吉田麻衣子, 横山 昇, 深井隆行, 時岡 優, 富井大和, 三宅泰宏, 斉藤輝雄, 立松芳典, 假家 強, 満仲義加, 今井剛, 三好 昭一,
電位生成によるプラズマ閉じ込め改善のための高出力ジャイロトロンの開発,
プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),

- 2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB17P.
- 39 齋藤 将志、吉川正志、久保田雄介、小林貴之、沼田直大、板倉昭慶、長照二、
GAMMA10 プラグ・バリア部の $H\alpha$ 線測定、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB18P.
- 40 角田、板倉、吉川、嶋、市村、長、
GAMMA10 におけるブラウンホーファー回折法を用いた電子密度揺動測定、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB19P.
- 41 堀ノ内賢太郎、市村真、桧垣浩之、W.H.Ko、柿本真吾、山口裕資、井出幸兵、井上大
輔永井博久、中込賢一郎、北條仁士、長照二、
GAMMA10 セントラル部における高周波加熱時の低周波密度揺動の解析、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 27pB20P.
- 42 松尾保宣、坂本瑞樹、中嶋洋輔、油野政人、北口将博、彌政敦洋、東島亜紀、中島寿
年、川崎昌二、長谷川真、出射浩、上瀧恵里子、花田和明、中村一男、岡子秀樹、伊
藤智之、
TRIAM-1M における DEGAS コードを用いた中性粒子挙動の解析、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB14P.
- 43 内田和之、近木祐一郎、間瀬 淳、L. Bruskin、北條仁士、江尻 晶、徳沢季彦、川端
一男、田中謙治、長山好夫、
LHD における超短パルス反射計実験、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB23P.
- 44 小波蔵純子、長 照二、平田真史、沼倉友晴、横山 昇、深井隆行、富井大和、吉田麻衣
子、時岡 優、三宅泰宏、山内 通則、近藤 貴、西谷健夫、平野馨一、前澤秀樹、
p 型並びに n 型シリコン半導体 X 線検出器に対する核融合 生成中性子照射の影響、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB34P.
- 45 横山 昇、小波蔵純子、長 照二、平田真史、沼倉友晴、深井隆行、富井大和、吉田麻衣
子、時岡 優、三宅泰宏、
新型半導体 X 線計測器を用いた電子サイクロトロン加熱時の電子温度と電子閉じ
込め電位の相関の研究、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB35P.
- 46 深井隆行、小波蔵純子、長 照二、平田真史、沼倉友晴、横山 昇、富井大和、吉田麻衣
子、時岡 優、三宅泰宏、中嶋 洋輔、
超低エネルギー X 線波高分析可能半導体検出器の開発と感度特性評価並びにプラズ
マ計測への適用、
プラズマ・核融合学会第 20 回年会、(茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市)、
2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB36P.
- 47 時岡 優、平田真史、長 照二、小波蔵純子、吉田麻衣子、沼倉友晴、三宅泰宏、深井隆
行、横山 昇、富井大和、

- 新型イオン・エネルギー分析器の開発、並びに小型イオン電流量絶対値計測器の開発、
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB37P.
- 48 小林 貴之, 吉川 正志, 久保田 雄介, 齋藤 将志, 沼田 直大, 武村 祐一朗, 石井 亀男,
 板倉 昭慶, 長 照二,
 紫外・可視分光測定システムを用いた GAMMA 10 プラズマ中の電位分布測定,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB38P.
- 49 吉川正志、久保田雄介、小林貴之、齋藤将志、沼田直大、板倉昭慶、長 照二、山口
 直洋,
 大口径プラズマ測定用真空紫外分光器を用いたガンマ 10 プラズマの不純物イオン
 分光測定,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB39P.
- 50 小島有志、石井亀男、武村祐一朗、萩澤一久、宮田良明、山口智弘、増田能人、板倉
 昭慶、市村真、長照二,
 GAMMA10 高電位生成モードにおける金の中性粒子ビームプローブを用いた揺動
 測定,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB40P.
- 51 武村祐一朗、石井亀男、萩澤一久、小島有志、宮田良明、増田能人、山口智弘、長照
 二,
 ガンマ 10 セントラル部の多様な磁場に対応する金中性粒子ビームプローブ法のエ
 ネルギー分析器の設計と計測,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB41P.
- 52 M. Ignatenko, 間瀬淳, L. Bruskin, 近木祐一郎, 北條仁士,
 Simulation Study of Microwave Imaging Reflectometry,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28aB44P.
- 53 長 照二, 檜垣浩之, 平田真史, 北條仁士, 市村 真, 石井 亀男, K イスラム, 板倉昭
 慶, 片沼伊佐夫, 小波蔵純子, 中嶋洋輔, 沼倉友晴, 齊藤輝雄, 立松芳典, 吉川正志, 武
 村祐一朗, 吉田麻衣子, 三好昭一,
 ガンマ 10 の電位生成・電位閉じ込め統合理論の提唱・実証・拡張、並びにこれ
 に基づく今後の展望,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28pB02.
- 54 齊藤輝雄、立松芳典、池上博和、関根貴之、市川智也、永井大智、野崎 潔、渡辺裕
 美、吉田麻衣子、石井亀男、遠藤洋一、長 照二,
 ガンマ 10 におけるプラグ部高電力電子加熱実験,
 プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市),
 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28pB03.
- 55 萩澤一久、石井亀男、武村祐一朗、小島有志、宮田良明、山口智弘、増田能人、吉川

正志、長照二、

GAMMA10 における荷電交換中性粒子計測法を用いた捕捉イオンの速度空間分布計測、

プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 28pB42P.

- 56 大木俊和, 中嶋洋輔, 東園雄太, 庄司 主, 小林進二, 吉川正志, 久保田雄介, イスラム・エムデー・カイルル, 荻田猛史, 渡辺一浩, 山田正樹, 村上亮平, 松島由卯子, 長 照二,

H α 線強度計測に基づく中性粒子ビーム入射時の中性粒子挙動解析,

プラズマ・核融合学会第 20 回年会, (茨城県立県民文化センター(茨城県水戸市), 2003 年 11 月 25 日-28 日) 20SPD-03.

- 57 板倉、マイクロ波グループ、

GAMMA10 におけるマイクロ波計測、

マイクロ波研究会, (ひたちなか市, 2003 年 11 月 28 日-29 日).

- 58 斉藤輝雄、

ガンマ 10 における ECRH による電位形成、

平成 15 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, (東北大学, 2003 年 12 月 3 日-4 日).

- 59 中嶋洋輔、

タンデムミラー非軸対称極小磁場部における周辺プラズマトリサイクリング挙動、

共同研究研究会「閉じ込め領域周辺の科学」, (核融合科学研究所, 2004 年 1 月 6 日-7 日).

- 60 吉川正志、岩前敦、澤田圭司、小林貴之、久保田雄介、

Hanbit プラズマの分光測定、

「スペクトル線プロファイルの精密分光によるプラズマ診断」研究会, (核融合科学研究所, 2004 年 1 月 27 日-28 日).

- 61 小林貴之、吉川正志、久保田雄介、

CII 線スペクトルのドップラーシフト計測による GAMMA 10 プラズマ中の電場測定、

「スペクトル線プロファイルの精密分光によるプラズマ診断」研究会, (核融合科学研究所, 2004 年 1 月 27 日-28 日).

- 62 久保田雄介、吉川正志、小林貴之、中嶋洋輔、

加熱シーケンスの違いによる H α 線発光の変化、

共同研究研究会「プラズマ分光研究の新展開」, (核融合科学研究所, 2004 年 1 月 28 日-29 日).

- 63 大木俊和, 中嶋洋輔, 東園雄太, 庄司 主, 小林進二, 吉川正志, 久保田雄介, Md. Khairul Islam, 荻田猛史, 渡辺一浩, 山田正樹, 村上亮平, 松島由卯子, 長 照二,

H α 線強度計測に基づく中性粒子ビーム入射時の中性粒子挙動解析、

共同研究研究会「プラズマ分光研究の新展開」, (核融合科学研究所, 2004 年 1 月 28 日-29 日).

- 64 北條仁士、

サブサイクル波の物理、

レーザー研共同研究による高エネルギー密度プラズマのミニワークショップ, (大阪大学, 2004 年 1 月 29 日).

- 65 長照二, 吉田麻衣子, GAMMA 10 グループ,
ガンマ 10 における最近の研究の展開と電場シアによるプラズマの安定化,
第 4 回プラズマ研究センターフォーラム
—電場による不安定性制御を考える—, (筑波大学プラズマ研究センター, 2004 年
2 月 24 日).
- 66 八木康之、浅井朋彦、池田長康、木山学、小口治久、早瀬喜代司、平野洋一、榊田創、
佐藤康宏、島田壽男、杉本久也、長田正義、政宗貞男、吉川正志、B. E. Chapman, G. Fiksel,
L. Frassinetti, P. Innocente, J. S. Sarff, G. Serianni, P. Scarin, G. Spizzo, D. Terranova,
TPE-RX, TPE-QS 研究概要,
逆磁場ピンチ研究会, (AIST つくばセンター, 2004 年 3 月 1 日).
- 67 西丸 浩、笹川 悠、片沼 伊佐夫,
タンデムミラー GAMMA10 の非等方電位による径方向輸送およびダイバータ磁場
について,
第 9 回NEXT研究会, (原子力研究所・計算科学技術推進センター (上野), 2004
年 3 月 4 日-5 日) 5.
- 68 中嶋洋輔,
ガンマ 10 タンデムミラーにおける荷電交換中性粒子測定と中性粒子輸送シミュレ
ーション解析,
京都大学エネルギー理工学研究所講演会, (京都大学エネルギー理工学研究所,
2004 年 3 月 5 日).
- 69 吉田麻衣子、長 照二、平田真史、小波蔵純子、時岡 優、三宅泰宏、沼倉友晴、横
山 昇、深井隆行、富井大和,
新型イオン・スペクトル二次元計測器に拠る電位空間構造/径電場シアと 閉じ込め
改善の相関の研究,
第 7 回若手研究者によるプラズマ研究会, (原研那珂研, 2004 年 3 月 17 日-19 日).
- 70 西依幸一郎、間瀬淳、レオニド・ブルスキ、北條仁士、井手元浩、坂本剛,
ミリ波を用いた非破壊検査システムの研究,
電子情報通信学会総合大会, (東京工業大学, 2004 年 3 月 22 日-25 日).
- 71 飽本一裕、北條仁士,
分散性電磁パルスによる粒子加速 IV,
日本物理学会第 59 回年次大会, (九州大学, 2004 年 3 月 27 日-30 日) 27aWH3.
- 72 桧垣浩之、市村真、堀ノ内賢太郎、中込賢一郎、柿本真吾、山口裕資、井出幸兵、井
上大輔、永井博久、北條仁士、長照二,
高イオン温度ミラープラズマにおける電子ドリフト波の挙動,
第 59 回日本物理学会年会, (九州大学箱崎地区, 2004 年 3 月 27 日-30 日) 28aWH-
4.
- 73 渡辺二太、北條仁士,
ヘリカルプラズマの平衡解析,
日本物理学会第 59 回年次大会, (九州大学, 2004 年 3 月 27 日-30 日) 28aXH2.