

VIII プラズマ

VIII-1 ガンマ10グループ

教授 谷津 潔、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 近藤（平田）真史、立松芳典、吉川正志
助手 小波蔵純子
前任技術専門職員 平田久子
技術専門職員 大川和夫
大学院生 (32名)

共同研究者

助教授 市村 真 片沼伊佐夫（物理工学系）
講師（研究機関研究員）田中 覚
技術専門職員 杉山昭彦
技官 和所保規、遠藤洋一、嶋 頼子
大学院生 (3名)

【1】序論

研究では、電位閉じ込めの長時間維持、プラズマの高密度化、電位閉じ込めの改善を目標として実験を進めた。電位閉じ込めの長時間維持では、バリアー部のマイクロ波をプラグ部に移して、プラグマイクロ波とともに二つのパルスを時間的に連続して入射することにより、150ms間電位閉じ込めが維持されていた。平成12年度には、パルス幅500msの新しいマイクロ波電源が完成し、更に長時間の実験を目標として試運転を開始した。プラズマの高密度化に関しては、新しく導入した36-76MHzの高周波発振器と、アンカー部中性粒子ビーム入射を併用することにより、従来より1.5倍高い密度が達成され、更に高い密度達成の見通しも得られた。電位閉じ込めの改善に関しては、以前より高い密度領域で電位閉じ込めのデータが得られた。各テーマで新しいデータが得られ始めたのであるが、高真空を得るために使用している液体ヘリウムクライオポンプが6月頃から故障がちになり、原因を調べながら運転をしていたが、10月から実験を止めて3ヶ月間修理に要したため、十分には実験を進めることができなかった。修理後さらにいくつかの問題点が見つかり、問題点を解決して実験が再開された。

教育では、物理学研究科大学院生9名、数理物質科学研究科大学院生2名、理工学研究科大学院生21名、自然学類4年の卒業研究生14名、その他これらの学生と緊密に教育研究の関連を保ちながら、工学研究科大学院生3名、ならびに基礎工学類4年の卒業研究生4名の研究指導にあたり、教育においても大きな役割をはたした。

国際交流においては、学術交流に関する協定を締結しているロシア連邦ノボシビルスクのブドカー原子物理学研究所、並びにモスクワのクルチャトフ研究所との間で研究者交流を行い、共同研究を進めた。韓国の韓国基礎科学研究所とも8月に学術交流に関する協定を締結して、密接な研究交流を開始した。また、日本学術振興会国際研究集会の援助を得て、第3回開放磁場系プラズマ閉じ込め国際会議を主催して、平成12年7月3日-6日にエポカルつくばで開催し、参加者は国外研究者20名を含む86名であった。同会議で発表された論文は、アメリカ原子力学会の Transaction of Fusion Technology, Vol.39, No.1T FUSTE8(1) 1-420 (2001) として公表された。

【2】 タンデムミラー・ガンマ10におけるプラズマの電位閉じ込め

ガンマ10における研究は、プラズマの高密度化において進展が得られた。プラズマの高密度化は、新しく導入した36-76 MHz ($\omega/\omega_{ci}=6\sim 12$; ω は発振器周波数、 ω_{ci} はセントラウ部のイオンサイクロトロン周波数)の高周波発振器(RF3)と、アンカー部中性粒子ビーム入射(NBI)を併用することにより、従来より1.5倍高い密度が達成され、高密度における電位閉じ込め実験を進めた。セントラル部線密度と反磁性量(プラズマエネルギー)の時間変化の一例を図1に示す[1]。本実験は、従来の高周波加熱で維持されたプラズマにRF3とNBIを重畳して、高密度プラズマの電位閉じ込めを行ったものである。密度は従来の1.5倍が達成されているが、電位閉じ込め中に反磁性量は減少している。これは壁リサイクリングによるガスにより、高エネルギーイオンが荷電交換損失したものと考えられ、壁コンデショニングの進展と共に改善できるものと判断される。平成12年度には、液体ヘリウムクライオポンプの修理のため、壁コンデショニングを進めた実験ができず、電位閉じ込めにより密度と反磁性量共上昇する結果を得ることができなかったが、平成13年度には目標とする結果が得られるものと期待される。高密度における電位閉じ込めの密度依存性のデータが得られるようになり、一例を図2に示す。図2で横軸は電位閉じ込めの前の密度で、縦軸は電位閉じ込めによる密度変化を示している。密度が高くなると電位閉じ込めによる密度上昇率が減少するので、この上昇率を高密度でいかに高くするかが今後の課題である。

[1] K. Yatsu, et al., Fusion Energy (2000)
IAEA-CN-77/EXP1/10.

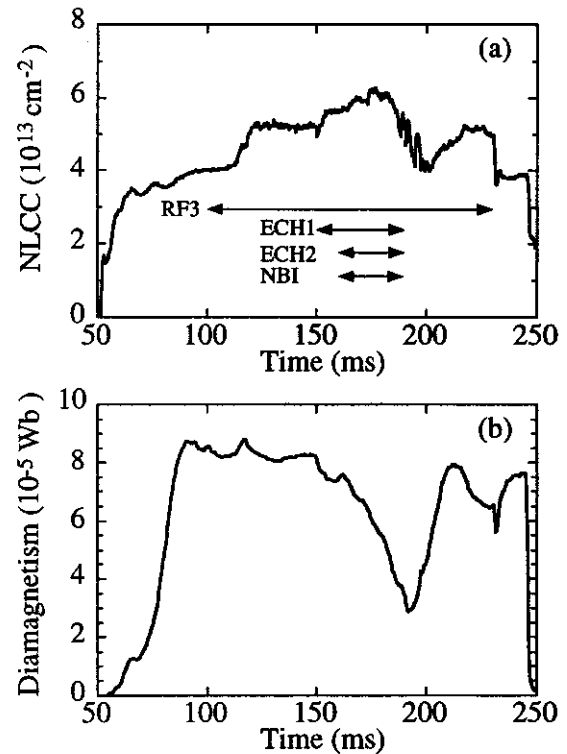


図1 RF3、NBI、ECRHを重畳したときのセントラル部の(a)線密度、並びに(b)反磁性量の時間変化。RF1、RF2、及びRF3のパワーはそれぞれ240kW、100kW、80kW。

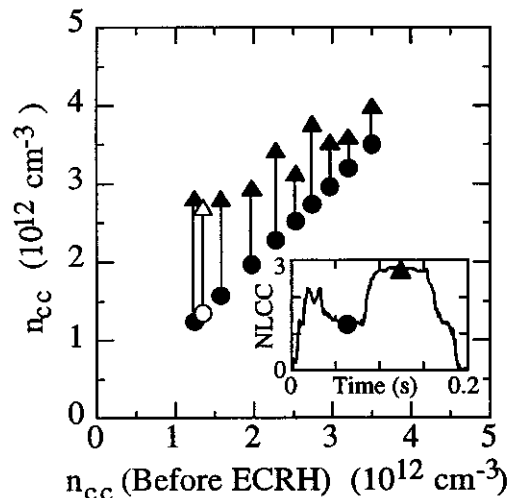


図2 ECRH印加前(●)並びに印加中(▲)のセントラル部電子密度(n_{cc})のECRH印加前電子密度に対するプロット。白抜き記号は1998年IAEA会議に於いて報告したデータを示す。

【3】電位生成物理機構（Cohen の強い電子サイクロトロン加熱理論）と、生成された電位の効果に関する理論（Pastukhov 電位閉じ込め理論）の統合理論の提唱とその実証

「電位生成物理機構・比例則」の解明は、タンデム・ミラー・プラズマ研究の最も本質的な研究テーマの一つである。我々は、イオン閉じ込め電位 ϕ_c のサーマル・バリア電位 ϕ_b に対する比例則を、ガンマ10の代表的なプラズマである、(i) kV オーダーのプラズマ閉じ込め電位生成を達成した「高電位モード」[1]、並びに (ii) 10-20 keV のバルク・イオン温度を達成し、核融合生成ニュートロンの発生に成功した「高温イオン・モード」[2] について研究し、両モード双方に共通する基本原理を研究してきた。両モードでは、熱輸送障壁電位 ϕ_b の増大に伴う、著しい ϕ_c の増大が見られるものの、一見するとプラグ部と、セントラル部密度の比 n_p/n_c に対して、両者では異なる依存性を持つように見えた。もしもこれらに共通する物理法則が存在しないならば、これらの特性を併せ持つ、統合された画期的プラズマ・モードを新たに生み出すことは、困難であると考えられよう。しかしながら、「電子温度 T_e と ϕ_b の比例則」を、夫々のモードに対して新たに導入する事に拠り、これら「 ϕ_c 、 ϕ_b 、 n_p/n_c に対する統合され一般化された新比例則（拡張された強い電子サイクロトロン[ECH]加熱理論 [3])」が新たに得られた。これは、今後、高電位・高温イオン温度特性を併せ持つ、新モードの創成の可能性を示唆する物理基盤を与えるものである。

以上は、平成12年度に開催された、国際原子力機関(IAEA) 主催の「核融合エネルギーに関する国際会議」[4]、並びに「開放端磁場によるプラズマ閉じ込めに関する国際会議」、さらにはこれらをまとめ、米国物理学会誌 *Physical Review Letters* [5] に報告した。

以上の生成電位が、プラズマの閉じ込めにどのような効果を発揮するかは、電位生成の意義として、タンデム・ミラー閉じ込めに対する本質的な研究課題である。従来から、タンデム・ミラーの電位の効果としては、バスツコフの電位閉じ込め理論 [6] が有名であり、特にイオンの閉じ込めについて、ガンマ10では詳しく研究を進めてきた [1]。

このバスツコフの電位閉じ込め理論は、強い電子サイクロトロン[ECH]加熱理論 [3]とともに、これまでには、「電位の効果と、電位生成原理」としての、2大理論の様相を呈しており、タンデム・ミラーの電位閉じ込めに対する、2つの骨格をなす理論であると考えられてきた。

今回我々は、この2大理論が、「電位」というキーワードにより、実はその本質において統合・統一されるべきものではなかろうかという視点で、研究を進めた。特に、エネルギー閉じ込めの観点から、より複雑な中性粒子による荷電交換等が無い、「サーマル・バリア電位で閉じ込められた電子の振る舞い」について研究することにより、この問題に挑戦した。

今、サーマル・バリア電位 ϕ_b により閉じ込められる、セントラル部やアンカー部を通過して両バリア部を往復する電子について、その密度と電子温度をそれぞれ n_e 並びに T_e と書く。これらの電子を加熱するソース項として、プラグ部から流入しこれらの電子とクーロン相互作用を行うプラグ部生成高温電子、並びにセントラル部等で生成加熱され同様に電子を加熱する高温イオンの効果を、それぞれ P_{wb} 並びに P_{hb} と記述する。また、これらの高温電子とイオンの体積をそれぞれ V_{BB} 、及び V_b とする。セントラル部等に、サーマル・バリア電位に拠って閉じ込められる電子のエネルギー閉じ込め時間を τ_E と書くと、電子のエネルギー・バランスの式は、以下のように書くことができる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} n_e T_e \right) = \left[P_{wb} + P_{hb} \left(\frac{V_b}{V_{BB}} \right) \right] - \frac{\left(\frac{3}{2} n_e T_e \right)}{\tau_E} \quad (1)$$

この式の τ_E にバスツコフの電位閉じ込め理論が予想する τ_E の表式を代入する [6]。

これにより以下の式を得る。

$$\frac{7.48 \cdot 10^{-5} \frac{T_e^{3/2}}{n_c \ln \Lambda} x \exp(x) \frac{1}{I(x^{-1})}}{\frac{2}{3} x \frac{1}{I(x^{-1})} + 1} = \frac{\frac{3}{2} n_c T_e}{\frac{V_h}{V_{BB}} P_{hb} + P_{wb}} \quad (2)$$

この式で、 $I(x)$ は、 $x = \phi_b / T_e$ と置くと、 $(1+x/2)/(1+x^2/4)$ と近似できる。更に、詳しく計算することにより、 $f(x) = [x \exp(x)] / [(2/3)x + I(x^{-1})]$ の式が成り立つことがわかる。

これらを用いると、

$$f(x) = \frac{2.01 \cdot 10^4 n_c^2 \ln \Lambda}{T_e^{1/2} \left[\frac{V_h}{V_{BB}} P_{hb} + P_{wb} \right]} \quad (3)$$

また

$$x = \frac{\phi_b}{T_e} = f^{-1} \left[\frac{2.01 \cdot 10^4 n_c^2 \ln \Lambda}{T_e^{1/2} \left[\frac{V_h}{V_{BB}} P_{hb} + P_{wb} \right]} \right] \quad (4)$$

茲に T_e , ϕ_b , n_c , P_{hb} 及び P_{wb} の単位は、それぞれ keV, kV, 10^{18} m^{-3} , $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$, and $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ である。

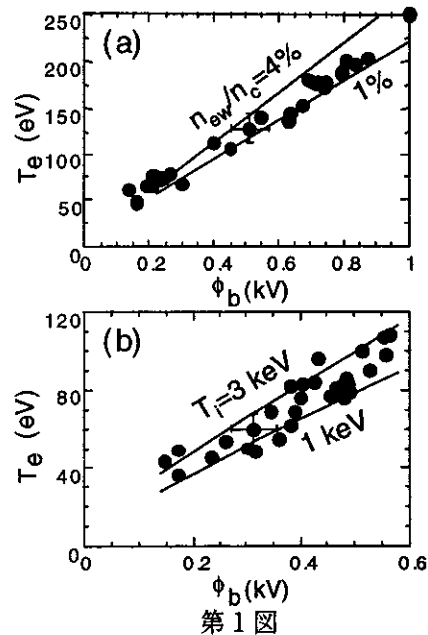
この、第(4)式に対して、 $f^{-1}(x) = 0.04 + 0.97 \ln [f(x)]$ なる関係式が見出され、これを用いれば、例えば、高電位モードに対して、X線計測等で従来実験的に求められていた T_e に関する関係式

$$T_e \approx 0.23 \phi_b + 0.03 \quad (5)$$

を得ることができる。

第1(a)(b)図に、それぞれ高電位モード並びに高温イオンモードに於ける、 T_e 対 ϕ_b の実験データに対して、一方で、第(4)式から導いた、「パスコフの電位閉じ込め理論と、強い電子サイクロトロン加熱理論を、エネルギー・バランス式を用い統合」した、新しい「電位生成と生成電位の効果の統合式」から求めた、 T_e 対 ϕ_b の予想曲線を併せて示す。

実験データと本新統合理論予想曲線の良い一致を見ることができる。この事は、電子エネルギー閉じ込め性能が、電位の増大とともに向上し、電子加熱・電子温度増大に熱輸送障壁としてサーマル・バリア電位が寄与している事を、定量的に明らかにしたものである。現在、この T_e 或いは ϕ_b の値は、電位生成用 ECH 電力の最大値 200 kW で制限されており、

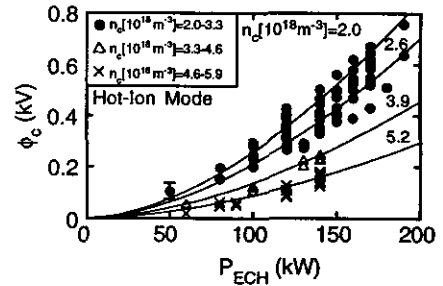


第1図

また、この時にセントラル部電子の直接の ECH 等による追加熱は行われていない。

次に、プラグ部のイオン閉じ込め電位 ϕ_c の生成効率について、外部制御可能なパラメータであるプラグ部 ECH パワー P_{ECH} [kW] に対する、密度 n_c [10^{18} m^{-3}] への依存性を調べることは、今後の電位生成に対するシナリオや研究目標を設定するために、現実の問題として、重要である。

第2図に実験データを示すと共に、これらのデータを最適にフィットした実験曲線を併せて示す。茲で、得られた曲線の実験式として



第2図

$$\phi_c = k P_{ECH}^{(1.73 \pm 0.02)} \exp[-(0.33 \pm 0.05)n_c] \quad (6)$$

ここで、第2図に対しては、 k は $(1.73 \pm 0.05) \times 10^{-4}$ であるが、更に詳しく高電位モードと高温イオンモードに対して解析した結果、 k として $1.0 \times 10^{-4} [c(n_p/n_c)^{2/3} - 1]$ の関係が得られ、茲に c は両モードではファクター3程度の範囲(即ち、5.5及び17.4)で、記述できることがわかった。このファクターの差は、両モードに於いて、プラズマの半径分布や、パラメータの差異による、ECHのカップリング効率が異なっている事等が、考えられる。

以上の実験的に証明された比例則理論・関係式の外挿の有効性を仮定するならば、今後のタンデム・ミラー核融合研究のシナリオを描くことができよう。即ち、物理的にも良く解明された比例則として、(i) 高電位、高温イオン・モード双方に適用できる拡張された強いECH理論[キー・パラメータは ϕ_c , ϕ_b , T_e 及び n_p/n_c で、 $\phi_c = c_1 f_1(T_e, \phi_b, n_p/n_c)$ なる関数 f 、定数 c を用いて記述できる]、(ii) ϕ_b の T_e への効果に関する比例則[即ち、 $T_e = c_2 f_2(\phi_b)$ 、一般化すると第(4)式]、(iii) ϕ_c 或いは ϕ_b の生成に関するECH電力の比例則[即ち、 ϕ_c or $\phi_b = c_3 f_3(P_{ECH}, n_c, n_p/n_c)$ 、第(6)式]、更に、(iv) ϕ_c , ϕ_b , T_e , T_i 及び n_c に対するパスツコフの比例則[6]。以上が、キーとなる比例則である。

これら拠り、先ず比例則(ii)の T_e を、比例則(i)の f_1 に代入し、更にこの(i)の ϕ_b を、 ϕ_b の比例則(iii)を用いて P_{ECH} に置換すると、 ϕ_c の P_{ECH} に対する比例則 $\phi_c = c_4 f_4(P_{ECH}, n_c, n_p/n_c)$ が得られる。

以上の電位生成の総合比例則の検討から、例えば、 $Q=1$ のプラズマを達成するためには、パスツコフ理論に拠り裏付けられる関係式(iv)と(iii)の将来の伸長性を仮定するならば、30 kVの ϕ_c を必要とし、 n_p/n_c が0.1の時、 $n_p = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_i = 16 \text{ keV}$, $n_c \tau_E = 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ に対して、直接発電の効率0.8を想定すると、5.6 MWのECHパワーが必要である。今後は、理論に裏付けられた比例則という、トカマクやヘリカルには無い、タンデム・ミラーの比例則の優れた独自の長を基に、更なる比例則・パラメータの伸長・有効性の検証の研究に挑んで行きたい。

- [1] S. Miyoshi et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 13th Int. Conf. Washington D.C., 1990) Vol. 2, IAEA, Vienna (1991) 539.
- [2] K. Yatsu et al., Nucl. Fusion **39**, 1707 (1999).
- [3] R. H. Cohen, Phys. Fluids **26**, 2774 (1983).
- [4] T. Cho et al., in Fusion Energy Conference (Proc. 18th Int. Conf. Sorrento, 2000) (IAEA, Vienna, 2001) in press.
- [5] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 4310 (2001).
- [6] 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 アンカー部における中性粒子入射 [1]

ガンマ10 アンカー部中性粒子入射装置 (NBI) (定格:ビームエネルギー 25 kV,ビーム電流 60A) は、東西両極小磁場中央部 (アンカー部) において、装置のz軸に対して、ほぼ直角にビームが入射するように設置され、高ベータプラズマ生成の為にプラズマ加熱、メインプラズマへの粒子補給の2つの役割を担っている。本研究の目的は、近年粒子補給の効果をあげるべく改造されたアンカー-NBIの効果を検証することである。

NBI によるビーム入射の問題点の一つとして、NBI に起因する低温なガスの流出が挙げられる。このガス流出には二つの原因が考えられ、一つは NBI 自体から流出するガスであり、もう一つはプラズマを透過したビームが反対側のダンプタンクの壁に衝突して壁からたたき出される脱離ガスである。図1には NBI によるビーム入射の模式図が示されているが、ガスの影響を軽減するために、タンクの容積を大きくとって圧力の急増を抑え、仕切り板を設置してガスを差動排気し、液体ヘリウムクライオパネル (LHP)による真空排気を行うといった対策がなされている。これまでの実験から、ビーム入射時に、プラズマ線密度 NL は増加

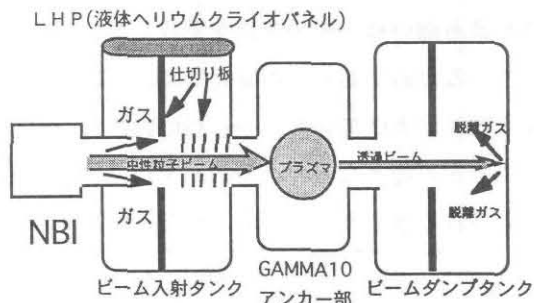


図1 NBIによるビーム入射の模式図

するが、プラズマ反磁性量 DM は減少する事が分かっている。図2に示すように、中性粒子ビーム入射によりアンカー部のプラズマ線密度 NLea は約 75%上昇し、セントラル部のプラズマ線密度 NLcc も、約 4%の増加の傾向が見られた。

今回の結果から、プラズマ持続時間のビーム電流に対する依存性も見出された。この原因について MHD 的安定性の観点からより詳細に調べるために、今後は β 値の指標となるアンカー部のプラズマ反磁性量のビーム電流依存性を調べる。

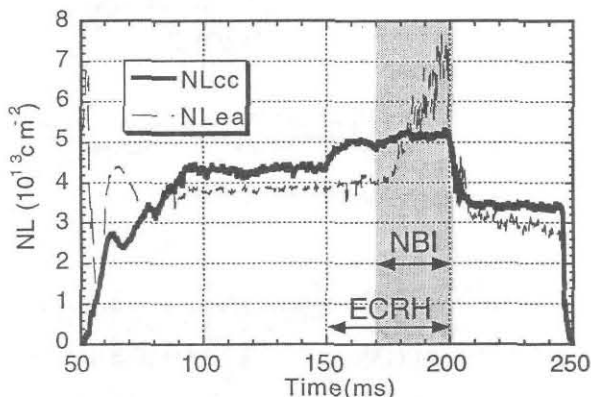


図2 セントラル部とアンカー部電子線密度

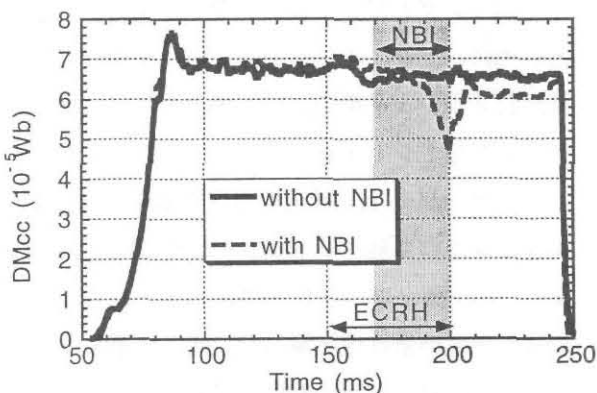


図3 セントラル部反磁性量

[1] 加藤達也, 中嶋洋輔, 他 「ガンマ10 アンカー部における中性粒子入射」プラズマ・核融合学会第17回年会 (平成12年11月, 北大) 30pB03p.

【5】 ガンマ10 アンカー部における中性粒子密度分布 [1]

ガンマ10において、閉じ込め時間、粒子生成量等を評価するために中性水素密度を測定することは重要な研究課題である。ガンマ10 セントラル部では以前より $H\alpha$ 線放射輝度が測定され、中性粒子密度が評価されてきた。しかし、アンカー部では測定が難しく、中性粒子の挙動はほとんど未解明であった。なぜなら、アンカー部は、磁力管が楕円になっている磁場変換部および中央の磁場が最も弱い極小磁場配位を形成している中心部で構成され、図1に示すような複雑な磁場形状をしているためである。本研究では、アンカー部で測定できるように改良した $H\alpha$ 線検出器を内側磁場変換部およびアンカー中心部に設置し、初めてアンカー部全体にわたる $H\alpha$ 線強度分布を測定することが可能となった。その結果に基づき、セントラルスロート部に設置されているガスバフから導入された水素ガスがどのようなメカニズムでアンカープラズマに粒子供給しているのか調べた。

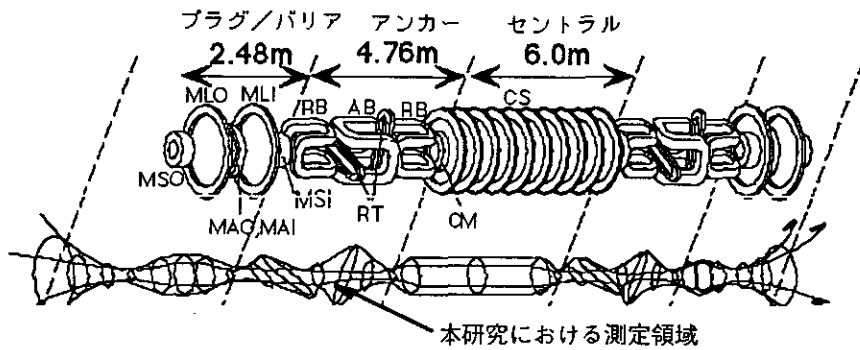


図1 ガンマ10全体図と測定位置

また、中性粒子の挙動を解析するため中性粒子輸送シミュレーションコード (DEGAS コード) を用いた。DEGAS コードは、プラズマ中の中性粒子密度をモンテカルロ法を用いて求めるシミュレーションコード[2]で、シミュレートする領域をメッシュ状に区切り、実際の測定から得られた電子密度、イオン密度、温度を入力して計算を行う。通常は軸を中心に回転させた円筒形メッシュをモデリングしてシミュレーションするが、前述したようにアンカー部は複雑な磁場形状をしているために、上述の手法が使えない。そのため楕円率の大きい内側磁場変換部では楕円形断面を持つ無限長メッシュを用い、楕円率の小さい (楕円率 ≤ 2) アンカー部ミッドプレーンでは円筒形をモデリングしてシミュレーション計算を行った。

アンカー部の $H\alpha$ 線放射輝度を測定した結果から、内側磁場変換部はスロート部、ミッドプレーンはセントラル部ミッドプレーンの $H\alpha$ 線放射輝度の径方向分布と類似していることがわかった。また、アンカー部への粒子供給のメカニズムを解明するためにガスバフのリザーバ圧に対する $H\alpha$ 線放射輝度の依存性を調べた。図2に示すように内側磁場変換部の $H\alpha$ 線放射輝度はガスバフのリザーバ圧に対して正の相関が見られたが、アンカー部ミッドプレーンではほとんど相関が見られなかった。ここで、 $H\alpha$ 線放射輝度は、

$$I_{H\alpha} = R_1(p)n_H n_e + R_2(p)n_{H_2} + n_e \quad (R \text{ は定数})$$

で表されることから、測定された $H\alpha$ 線放射輝度を電子線密度で規格化し、中性粒子密度のガスバ

フ依存性を相対的に調べた。その結果、内側磁場変換部ではガスパフのリザーバ圧に対し正の相関が見られたが、アンカー部ミッドプレーンでは認められなかった。

図5に DEGAS コードを用いて求めた水素分子密度分布を示す。H α 線放射輝度と同様に、内側磁場変換部はスロート部、ミッドプレーンはセントラル部ミッドプレーンの径方向分布と類似していることがわかった。しかし、中性粒子密度の数値は両者で大きく異なり、スロート部と比較した場合、内側磁場変換部で数倍、アンカー部ミッドプレーンの中心部では数100倍も小さいことがわかった。また、水素原子密度分布においても、スロート部と比較した場合、内側磁場変換部で約10倍、アンカー部ミッドプレーンで数10倍小さいことがわかった。

以上の結果より、シミュレーションからもアンカー部に流れ込む中性粒子はスロート部のガスパフによる供給量と比べて少ないことがわかった。また、スロート部に設置されたガスパフより供給された水素ガスは、中性粒子の状態ではアンカー部ミッドプレーンに到達する割合は少なく、スロート部で生成されたプラズマがアンカー部ミッドプレーンに到達するというメカニズムが支配的だと考えられる。

今回のH α 線強度の計測並びに DEGAS コードを用いた中性粒子輸送シミュレーションから、アンカー部のイオン化量は、従来から推測されてきたイオン化量より2倍程度大きいことがわかり、ガンマ10全体のイオン化量の約20%程度を占めると見積られた。

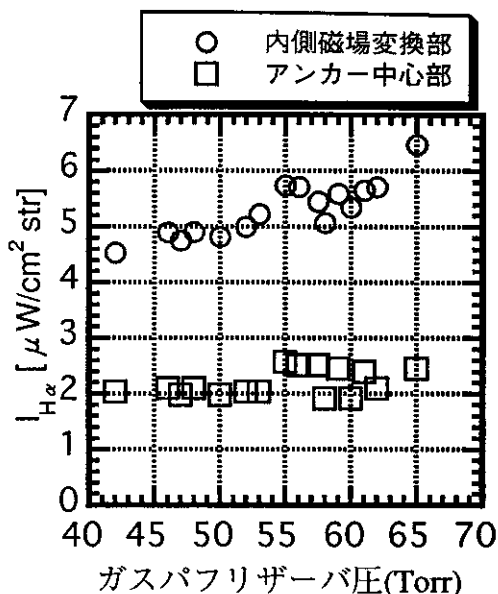


図2 H α 線放射輝度のガスパフ依存性

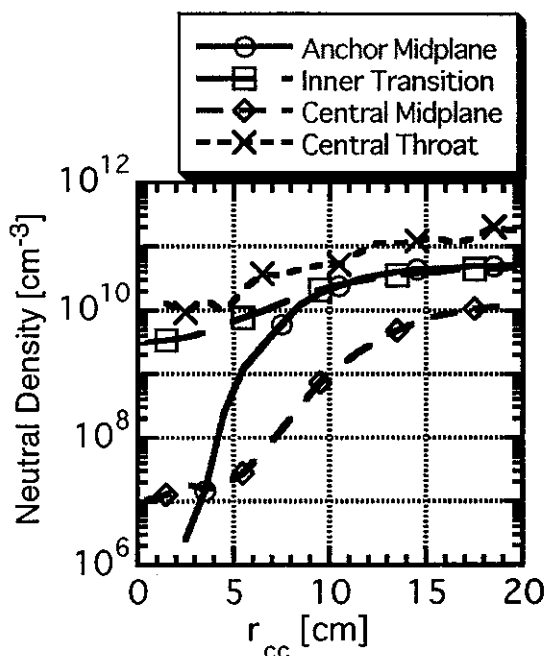


図3 各部水素分子密度の半径方向分布

- [1] 網中洋明, 中嶋洋輔, 他 「ガンマ10 アンカー部におけるH α 線分布計測」 プラズマ・核融合学会第17回年会 (平成12年11月, 北大) 30pB12p.
- [2] D. Heifetz et al., J. Comp. Phys. **46** (1982) 309.

【6】 ガンマ10 極小磁場変換部における周辺プラズマの挙動 [1,2]

ミラー型プラズマ閉じ込め装置において、装置端からのプラズマ損失（端損失）を抑制することは重要な課題である。ガンマ10では、電位を用いた軸方向プラズマ閉じ込めの改善を図ってきたが、装置径方向からのプラズマ損失（径方向損失）の抑制も大きな課題となっており、極小磁場形成により磁力線が大きく湾曲している極小磁場変換部での径方向損失についての研究を行ってきた。そこで、径方向損失抑制を目的として、極小磁場変換部に、プラズマを挟み込む形でステンレス製導体壁（アンカープレート）が設置された。本研究の目的は、東外側変換部の南北のサイドプレート上に設置されている、熱電対・静電プローブを用いて、周辺プラズマの挙動を調べることで、径方向損失抑制の手がかりを得ることである。

アンカープレートは、外部回路の抵抗を変えることにより、接地電位から浮遊電位に変更することが出来る。そこでアンカープレートが接地電位の状態（Ground Mode）から、浮遊電位の状態（Floating Mode）に変更すると、セントラル部プラズマ密度の ECRH 印加による密度上昇が増大し、プラズマ閉じ込めの改善がみられた（図1）。一方、熱電対を用いた計測において、Ground Mode では、サイドプレートに到達する熱流密度の大きさに南北差が見られ、南北非対称になっていたが、Floating Mode にすると、熱流量は減少し、その非対称性も減少することが分かった。

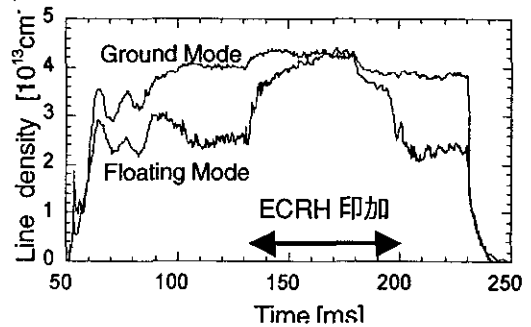


図1 プラズマ線密度の時間変化

図2に示すように、極小磁場変換部での周辺プラズマの南北非対称性と、プラズマ閉じ込めとの関係に着目し、静電プローブ計測で得られたイオン・電子飽和電流の北と南の差 ($I_{sat}(\text{North}) - I_{sat}(\text{South})$) を、セントラル部プラズマ線密度についてプロットしたところ、イオン・電子ともに、強い相関があることが分かった。特に主な熱流源であると考えられるイオンは、南北非対称性が減少するほど、プラズマ線密度が高くなる傾向がみられることから、南北非対称性解消はプラズマ閉じ込めの改善につながるのではないかと考えている。

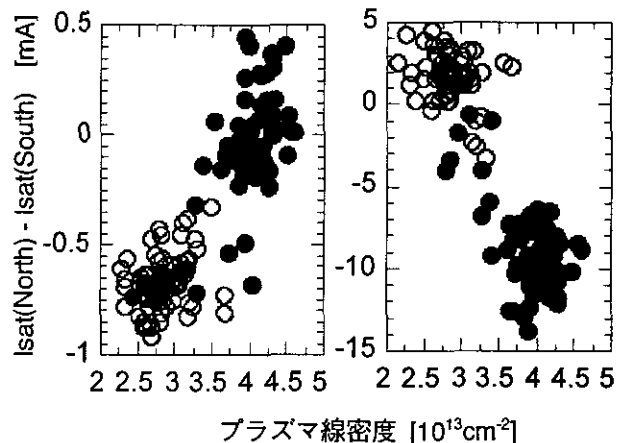


図2 プラズマ線密度と南北非対称性の関係

そこで、南北非対称性が生じる要因として以下の3点について、さらに詳

しく調べた。

1. アンカープレート・サイドプレート電位変更

プレート電位を Ground Mode から Floating Mode に変更することで、南北非対称性が減少することから、アンカープレート電位の変化は南北非対称性を生じる原因の一つであると考えられる。さらに、非対称性が減少に伴い、サイドプレートに到達する総熱流量・イオン飽和電流量が減少することが認められており、このことから、プラズマ閉じ込めの改善が示唆される。

2. 加熱パワー依存性

ガンマ 10 の加熱系 (RF1,RF2,ECRH) のパワーに対する熱流密度の依存性を調べたところ、RF2,ECRH パワーにより、北側と南側が反対の依存性を持ち、南北非対称性を生じていることが分かった。また、飽和電流についても調べた結果、イオン飽和電流は、熱流密度と同様に加熱パワーに依存しており、イオンが主な熱流源であることを支持する結果が得られた。さらに、この加熱パワーによる変化は、電子には見られないことから、RF2、ECRH によりセントラル部のイオン温度や密度が変化することで、このような南北非対称性が生じているのではないかと推測できる。

3. アンカープレートの間隔変更

RF1 によるアンカー部イオン加熱の効率を上げるため、アンカープレートをプラズマから遠ざける方向にアンカープレートの間隔を拡大したところ、Floating Mode であっても、ECRH 印加によるプラズマ線密度の上昇があまり見られなくなり、極小磁場変換部周辺プラズマの南北非対称性の減少も認められなくなった (図3)。また、アンカープレート間隔変更後、サイドプレートの浮遊電位が、接地電位近傍の値をとるようになった。つまり、サイドプレートは Ground Mode に近い状態になっていると考えられる。

以上の結果を用いて、別途行ったアンカープレートモードの変更実験の結果と総合的に検討することにより、間隔変更がもたらした南北非対称性の発生過程に関する定性的な説明が可能となった。

[1] Y. Nakashima, K. Md. Islam, et al., "Studies of Edge Plasmas in an Anchor Minimum-B Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror" 14th Int. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (Rosenheim, 2000, May 22-26) P-2.36.

[2] 川崎陽子, 中嶋洋輔, 他「GAMMA10 極小磁場変換部における周辺プラズマ計

測」プラズマ・核融合学会第 17 回年会 (平成 12 年 11 月, 北大) 30pB13p.

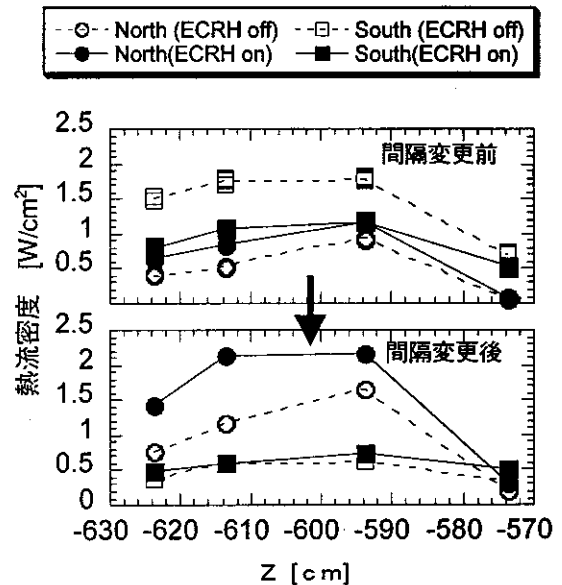


図3 ECRH 印加による熱流密度の変化

【7】 ガンマ10 ECR 放電洗浄時の水素・不純物ガス輸送 [1]

ガンマ10において、高温・高密度プラズマの生成および閉じ込めには、清浄な真空容器壁の状態を必要とし、プラズマ生成ガスである水素ガスのリサイクリングや、ミラー型閉じ込め装置特有の現象であるプラズマポンピングについての情報は重要である。プラズマポンピングとは、セントラル部のプラズマが周囲のガスをイオン化し、水素イオンや不純物イオンが磁力線に沿ってセントラル部からエンド部へ流れていくという現象である。本研究の目的は、真空容器壁状態の評価手段の一つであるPID(Plasma Impact Desorption)計測システムを、セントラル部、西エンド部に設置することにより、プラズマポンピングを中心とした、ECR 放電洗浄の機構について考察することである。この測定法はQMA(四重極質量分析管)を用いて、プラズマ中に生成、脱離されるガス分子を分析し、プラズマ燃料粒子の輸送やプラズマ対向壁の清浄度を評価するものである。

ガンマ10 実験シリーズ初期段階において、セントラル部と西エンド部のPID計測をECR放電洗浄時に行った。ECR放電洗浄時の測定結果である図1において、セントラル部における水分子(M=18)の減少は、西エンド部に比べて早いことが判る。これについて、後述の考察においてECR放電洗浄のモデル化による検討を行った。

また、ECR放電洗浄時にアンカー部において、マッハプローブを用いたプラズマ流速の計測を行ない、シングルプローブで電子温度(Te)の計測も行った。実験のタイミングとしては、不純物ガスの少なくなった状態、つまりECR放電洗浄開始後10数時間後の、洗浄がある程度進んだ状態で計測を行った。計測点は、ガンマ10 東から西の方向をZ軸正の方向とし、セントラル部中心をZ=0cmとしたときの、Z=-360cmの位置である。プラズマ流速として、図2のような結果を得た。また、電子温度の径方向分布も同図に結果を示す。アンカー部におけるプラズマ流速は $2.5\sim 3.5 \times 10^6$ (cm/s)、電子温度は4~5(eV)で、径方向にはほぼ一様、という結果を得た。

さらに、ECR放電洗浄時にセントラル部よりヘリウムガス及び水素ガスを入射した際の、ガスの分圧の計測を行った。水素ガス入射実験の結果を図3に示す。西エンド部の推移は、セントラル部の推移に比べてはるかに遅く、各々のピーク値に10秒程度の差が認められた。また、ECRプラズマのありなしで、大きな違いが見られなかった。一方、水素ガス入射時の西エンド部においては、減衰時の

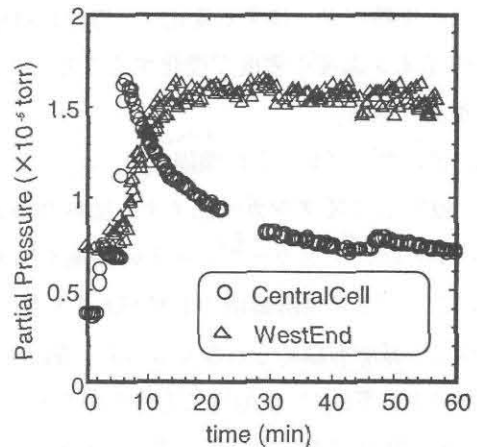


図1 ECR 放電洗浄時の水分子分圧

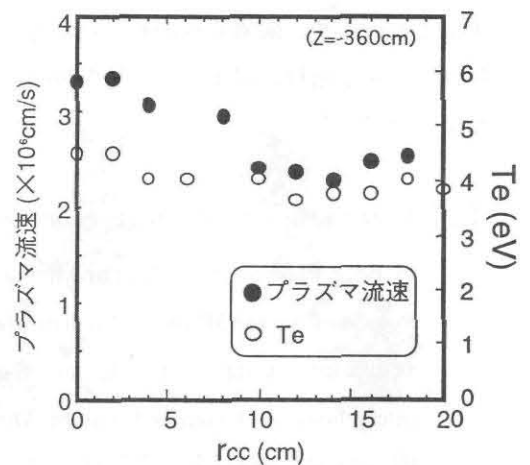


図2 プラズマ流速と電子温度分布

時定数に有意と思われる違いが見られた。

プラズマポンピングのモデル化の検討を行った。以下のような、セントラル部・エンド部におけるガス流量のバランスの連立方程式を用いた。

$$V_{cc} \frac{dP_{cc}(t)}{dt} = Q_{cc}^{WR}(t) - Q^P(t) - Q_{cc}^{TMP}(t)$$

$$V_{we} \frac{dP_{we}(t)}{dt} = Q_{we}^{WR}(t) + \alpha Q^{PP}(t) - Q_{we}^{TMP}(t)$$

ここで、 Q^{WR} は壁からのガスの量、 Q^{PP} はプラズマポンピングによるガスの輸送量、 Q^{TMP} はターボ分子ポンプによるガスの排気量である。プラズマポンピングでセントラルからエンドに流れてくるガスの割合 α を、実験

結果に基づいて算出したところ、0.1 という結果を得た。これは、セントラル部で捕捉された水分子のうち、プラズマポンピングにより 10% 程度の水分子がエンド部に流れてくる、ということを示している。

セントラル部における水素ガスのプラズマポンピング量として、原子・分子過程に基づくポンピング量を算出したところ、1.7 (torr·l/s) という結果を得た。一方、マッハプローブによる計測結果から、アンカー部における水素ガスの流量は 1.3 (torr·l/s) であった。以上のように、マッハプローブによる流量の計測結果は、原子・分子過程に基づくポンピング量と計測誤差の範囲内ではほぼ同程度と考えられる流量を得た。

水素ガス入射実験については、プラズマのあり・なしで、セントラル部において減衰に差は見られなかった。これは、セントラル部より供給したガスの流量は 16.5 (torr·l/sec) であり、原子・分子過程に基づいた水素ガスのイオン化の量は 1.0 (torr·l/sec) 程度であることから考えて、セントラル部に供給した水素ガスが、プラズマによってイオン化されるガスよりも多かったために、イオン化せずにエンド部の方向へ流れてしまったためであると考えられる。一方、西エンド部においては、プラズマのある場合の方が、プラズマのない場合よりも、圧力の減衰時間が早い、という結果が得られた。西エンド部における減衰時の時定数を求めたところ、プラズマのある場合の方が時定数は小さかった。時定数の差が、ポンピングによる効果の差であると考えられる。

以上の結果より、ECR 放電洗浄時の PID 測定結果並びにアンカー部におけるマッハプローブの計測により、プラズマポンピング作用に起因するセントラル部で捕捉された水分子のエンド部への輸送を定量的に評価する事が初めて行うことが出来た。

- [1] 石貫英一, 中嶋洋輔, 他「GAMMA10 における ECR 放電洗浄時のプラズマポンピングの研究」プラズマ・核融合学会第 17 回年会 (平成 12 年 11 月, 北大) 30pB01p.

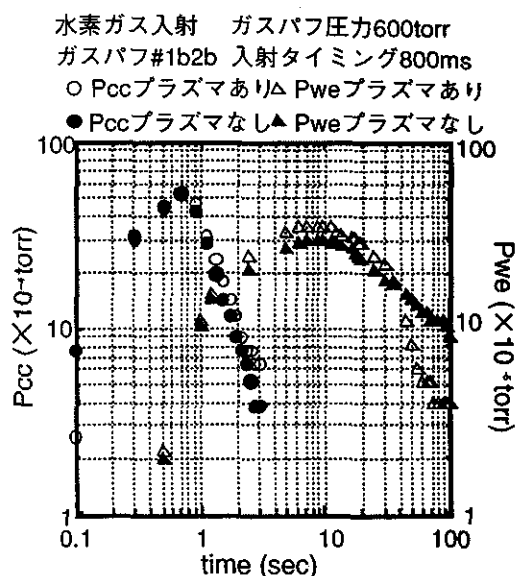


図3 ECR 放電プラズマへの水素ガス入射実験

【8】カーボンシートポンプの高エネルギー粒子ビーム排気への応用 [1,2]

水素リサイクリングを制御し、高温高密度プラズマの生成を目的として、高速荷電交換中性粒子の排気に適したカーボンシートポンプ (CSP) [1]の排気性能を評価する為の実験を進めている[2]。今回は、CSP の応用例として CSP が高エネルギー粒子の排気に適しているという特性を利用した NBI のビームダンプを提案する。CSP は、低熱流束の場所で使用することが想定されていたため、NBI のような高熱流束の環境下における高エネルギービームの処理能力に関して、ビーム入射時の CSP の温度の数値計算、寿命、粒子反射率等から検討を行った。その結果、現在 GAMMA10 で用いられている NBI を粒子源・熱源として考えた場合、粒子反射率は 10-3 程度となり、また、毎ショット NBI を用いたと仮定した場合、寿命は一週間程度であると推定される。

排気効率に最も影響を与える運転温度については、熱流束が表面に入射した場合の温度の表面・深さ方向分布の時間発展を数値計算により求めた。CSP の排気効率は運転温度が 200℃程度ならば室温と差がないという結果が既に得られている[3]。熱流束としてピーク値が 4MW/m^2 ・発散角 1.7 度のガウス分布ビームを仮定し計算した結果、現在 CSP として用いている 2次元炭素繊維材料 (CX-270, 東洋炭素) では、30ms 程度で表面温度が 300℃程度まで上昇し、排気効率に影響を与える恐れがあることがわかった。(図 1) そこで、図 2 に示すように、熱伝導率の良いフェルト炭素繊維材料 (CX-2002U, 東洋炭素) を用い、更に CSP をビームの入射方向に対して角度をつけることにより、表面に到達する熱流束を実効的に低下させ、温度上昇をビーム幅 30ms で数 10 度に低減することが可能である結果を得た。また、最近の焼結温度を高め熱伝導率を向上させた 2次元繊維材でも 100℃以内に押さえられる事が判明した。

[1] Y. Ishimoto, Y. Nakashima, et al., "Operational Method of Carbon Sheet Pump in the GAMMA 10 Tandem Mirror" Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Tsukuba, 2000, July 3-6) PI-14.

[2] 石本祐樹, 中嶋洋輔, 他「カーボンシートポンプを用いた高エネルギー粒子ビーム排気装置の検討」プラズマ・核融合学会第 17 回年会 (平成 12 年 11 月, 北大) 29pA30p.

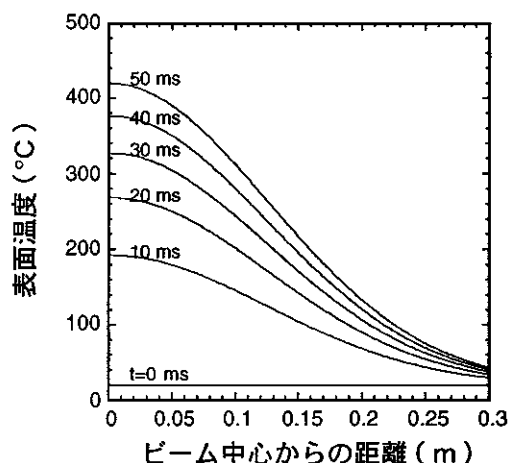


図 1 2次元炭素繊維材への垂直入射における表面温度分布の時間変化

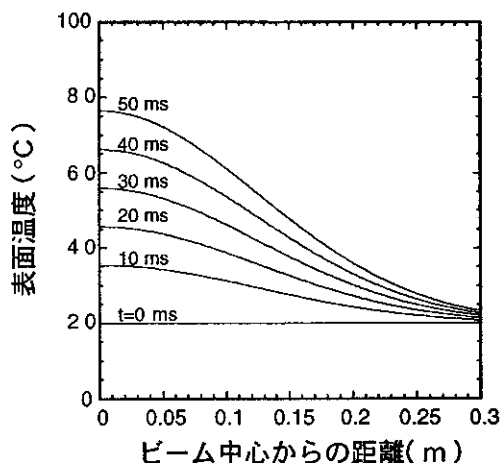


図 2 フェルト系炭素繊維材への 60 度入射における表面温度分布の時間変化

【9】磁気プローブによるアルベン高次高調波の計測

昨年度、高密度プラズマ形成を目的としてイオンサイクロトロン周波数の6-12倍の高調波を印加する高周波発振器システム (RF3) が導入された。従来の発振器システム (RF1) で維持したプラズマに対してRF3を印加することにより、反磁性量を減少させることなく密度を上昇させる得ることが確認された。今年度の実験では、セントラル部中央で10倍の高次高調波に相当する63MHzの周波数を用いた。磁気プローブを用いて、励起される波動の同定を行った。軸方向に配列された3本の磁気プローブを用い、2本のプローブ間の信号の位相差を各々測定することにより、励起波動の波数を測定した。図1は、無限一様円筒プラズマ中に励起されるアルベン速度の分散関係を波数の密度に関する関数として計算したものである[1]。複数の曲線は、異なる径方向の固有モードを示しており、密度の上昇と伴にその数が増大することがわかる。計算に用いたパラメタは、方位角方向のモード数 $m=-1$ 、周波数63MHz、磁場強度4T、プラズマ半径18cmである。磁気プローブで測定された波数をプラズマ中心の密度に対して図中にプロットした。データのばらつきは大きい、波数 0.2cm^{-1} であり、波長約30cmであることが明らかとなった。この波動は、理論的に計算したアルベン速度の固有モードで径方向に基本波構造を持ったものであることが明らかとなった。

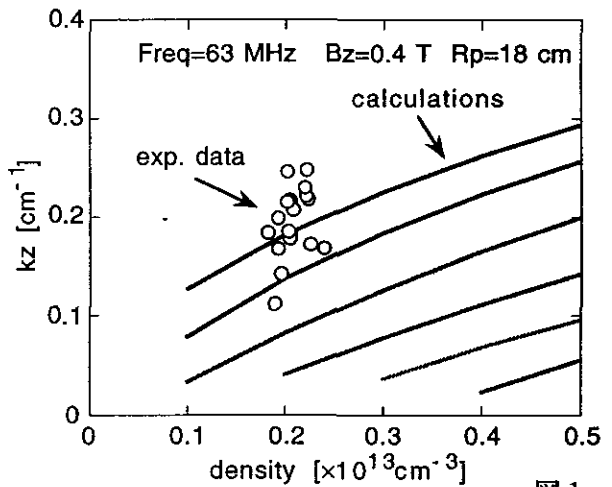


図1

【10】アルベン高次高調波による高エネルギーイオンの加速

前項で述べた様に、イオンサイクロトロン周波数の10倍の高次高調波(RF3)を印加することにより密度の上昇が観測されている。RF3印加時の高エネルギーイオンの振舞いをセントラル部中央に挿入されたイオン検出器(ccHED)[2]を用いて測定した。図2に典型的な反磁性量とccHEDの信号を示した。RF3印加後少し遅れてccHED信号が急激に増大する事がわかる。反磁性量にほとんど変化が見られない事から、少数の高エネルギーイオンが選択的に加速されている事が示唆される。このccHED信号の立上がりの遅れ時間、信号強度の到達値は、RF3印加前の反磁性量に依存し、印加前のプラズマが高温であるほど早く立上がり、その到達値も大きい事が明らかとなった。有限ラーマ半径効果により、高次高調波加熱が、高エネルギーイオンが多く存在する高温プラズマほど有効に働く事を示している。

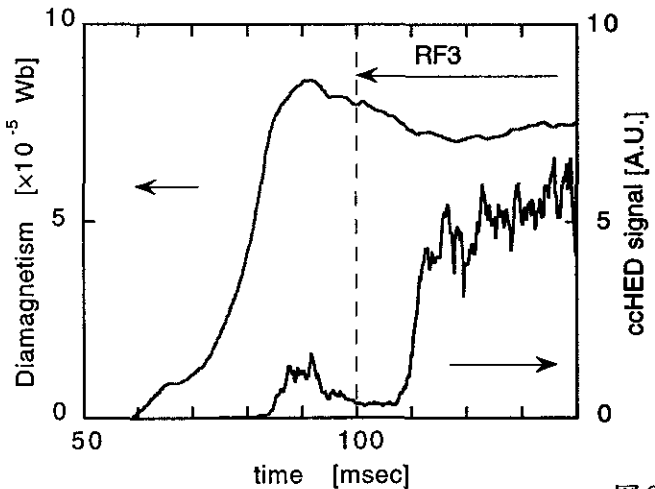


図2

参考文献

- [1]M.Ichimura et al., Phys. Plasmas 8 (2001) 2066.
- [2]M.Ichimura et al., Rev. Sci. Instrum. 70 (1999) 834.

【11】 ガンマ10エンドミラー部における径方向電流の測定[1]

ガンマ10では、プラズマ閉じ込め電位形成のために、装置両端のプラグ部において基本波サイクロトロン共鳴による電子加熱(ECRH)を行っている。ECRH印加により、イオン閉じ込め電位(プラグ電位)が形成され、イオンの磁力線方向の閉じ込めは大きく改善される。しかし、このときの中央部の密度上昇率は必ずしも期待通りではない。最近、この原因として、ECRH印加に伴い磁力線を横切るプラズマ粒子の損失(径方向損失)が増大することが想定されている。この場所はまだ同定されていないが、一つの可能性としてECRHが印加されているエンドミラー部での径方向損失の有無を調べる必要がある。さらに、エンドミラー部で粒子の径方向損失があれば、プラグ電位の形成機構を理解する上で非常に重要な要素となる。一方、磁力線に沿ってエンドミラー部から装置端のエンドプレートに流入する電流が見いだされている。よって、径方向粒子束(電流)は金属製の真空容器(電極が接続されている)を介して軸方向電流とつながり、閉回路を構成している可能性が考えられる。このことは、タンデムミラー中の電位分布と粒子束分布の関係を3次元的に考察する上で重要なポイントになる。

以上の観点から、エンドミラー部において、既存のものに加え、プラズマを取り囲む円環電極を新たに2ヶ設置し、どのような電流が検出されるかを調べた。ECRH印加前は検出される電流値は非常に小さいが、ECRH印加中大きなイオン電流が検出される。軸方向に流れるのは電子電流であるから、確かに回路系を構成している可能性がある。このことを調べたのが図1である。(a)図は、軸方向電子流(絶対値でプロット)の、エンドミラー部線密度依存性である。線密度の上昇と共に軸方向電子電流が増大する。これに対して(b)図は電極で測定されるイオン電流の線密度依存性を示す。やはり線密度と共に増大する成分がある。y切片の値は別の成分であり、ここでは議論しない。

これらのデータは、軸方向電子電流と径方向イオン電流の強い相関を示す。これは、上で想定したように、ECRH印加時、プラズマと真空容器が閉回路を構成していることを示す。ECRHは電子にエネルギーを注入するので、回路の起電力を生成していると考えられる。これを図式的に示したのが図2である。エンドミラー部とエンドプレート間に起電力があり、エンドミラー部の径方向電流とエンドプレート-真空容器間の電流がこの起電力に見合う電位降下をもたらしている。

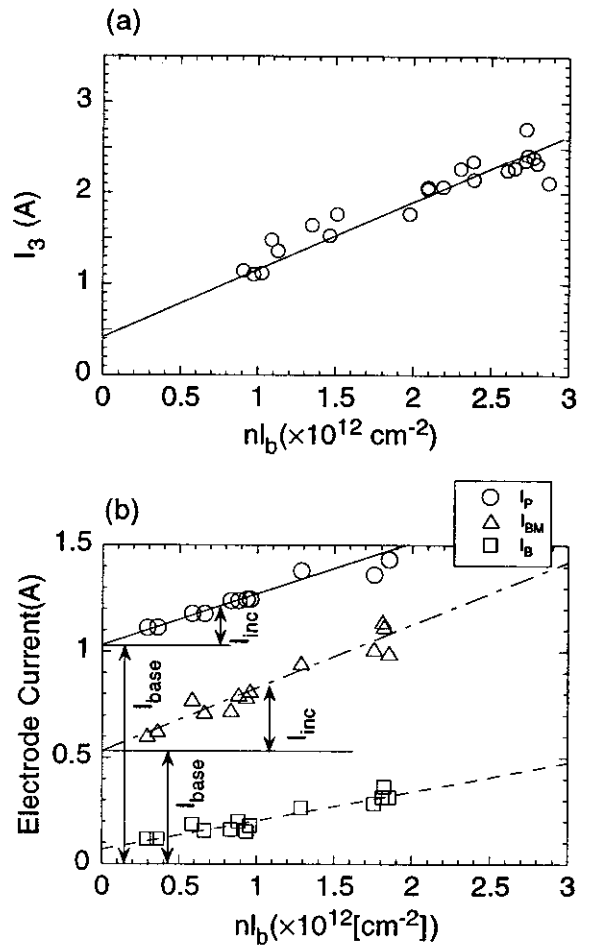


図1 軸方向、径方向電流の密度依存性

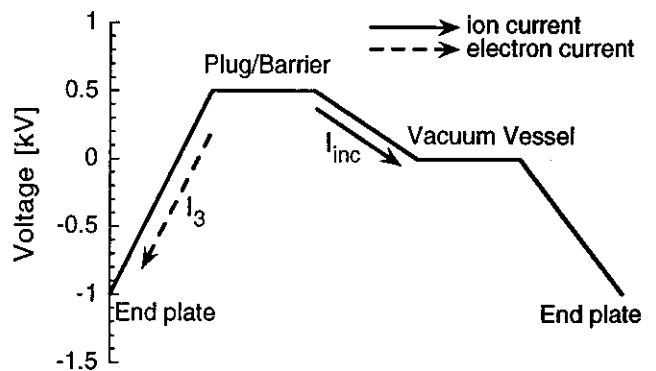


図2 電流回路に沿う電位の変化

[1] K. Kajiwara, T. Saito, Y. Tatsumatsu, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001) 421.

【12】 高周波加熱プラズマからの端損失電子測定 [1]

ガンマ10のプラズマは中央部の高周波加熱で生成されている。ECRH印加中のパラメータは詳しく解析されるが、高周波加熱プラズマ自体の特性は必ずしも十分理解されているとはいえない。特に、高周波加熱時の電子の特性の理解は、プラズマ生成機構の観点からも重要である。このためには放電開始当初から定常状態に達するまでの時間変化を追う必要があるが、既存の電子温度測定では、細かく時間変化を追うことが出来ない。

そこで、磁力線に沿って装置端に流出する粒子の分析から電子温度の時間変化を調べた。また、同時にイオン温度の変化も追うことにより、高周波プラズマにおける電子へのエネルギー注入の機構を知ることが出来る。図1(a)は、ガンマ10での高周波生成プラズマから装置端に流出する電子およびイオンの温度の時間変化をプロットしている。放電開始当初の電子温度は20 eV程度である。イオン温度の上昇と共に電子温度も上昇し、定常状態では40ないし50 eVに達する。この値は実験条件に依存するが、特にイオン温度が決定要因である。このことを見るため、図1(b)に電子温度とイオン温度の比の時間変化をプロットした。定常時、この比は約7になることが分かる。

ところで、高周波加熱プラズマのイオンは大きな温度非等方度を持っているので、装置端で測定されるイオンの温度は中央部ミラー捕捉イオンの温度そのものではない。このことを考慮して電子のパワーバランスを考えると、定常時

$$\frac{\chi T_i}{T_e} = \frac{3}{2} \frac{\tau_{ie} L}{\tau_e^E L_i}$$

となる。ここで χ はイオンの温度非等方度である。また、装置端の弱磁場部に閉じ込め電位があることを考慮した電子の軸方向エネルギー閉じ込め時間 $\tau_e^E = (3\sqrt{\pi}/8)\tau_e^P(e^{\hat{\phi}} - 1)/\hat{\phi}$ を用いている。これを解析し、ガンマ10中央部に生成されるミラー捕捉高温イオンからのクーロン衝突を介したエネルギー輸送（電子ドラッグ）の大きさを評価

する。電子温度で規格化された閉じ込め電位 $\hat{\phi}$ と、実現される温度比をプロットしたものが図2である。実験値 $\hat{\phi} = 7$ に対して、想定される $\chi = 10$ では温度比は約7になることが予想され、図1(b)の比をよく再現する。これから、定常時、ガンマ10における高周波生成プラズマの電子への主たるエネルギー供給機構は、高温イオンへの電子ドラッグであることが分かる。

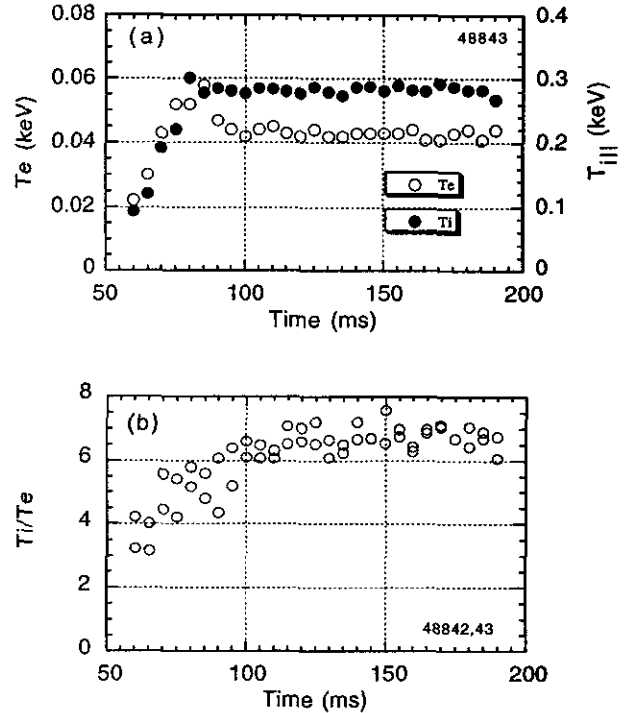


図1 端損失電子とイオンの温度変化

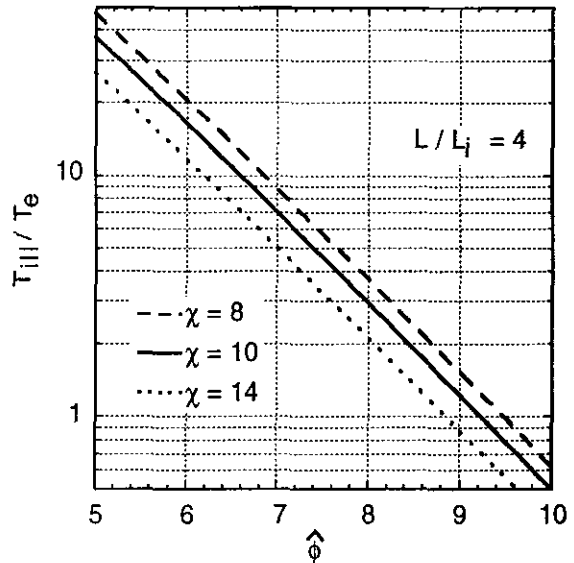


図2 規格化電子閉じ込め電位と温度比

[1] T. Saito, Y. Tatematsu, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001) 305.

【13】 2ビームマイクロ波入射による電子サイクロトロン共鳴加熱[1]

ガンマ10では、プラズマ閉じ込め電位形成のために、装置端部のプラグ部において、基本波電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)をおこなっている。これまでのプラグECRHアンテナ(第1アンテナ)に加え、新アンテナ(第2アンテナ)を増設し、2つのマイクロ波ビームを同時に共鳴領域に照射する重畳実験が行えるようになったことは、昨年に報告した。

今回重畳実験に関する結果とその検討を報告する。2つのアンテナからのマイクロ波ビームを同時入射したときの効果は、1ビームずつ独立に入射した場合の効果の単純な足し算に同等であるかどうかに興味のある点である。これまでの実験で、エンドへの損失電子の実効温度やエンドプレート電位の深さが、電子加熱の実効的な効果を表す指標であるという結果を得ている。図1に第1アンテナのみからマイクロ波を入射したときにできるエンドプレート電位と、2つのアンテナからのマイクロ波を同時入射したときに得られたエンドプレート電位を、入射マイクロ波ビームの電子加熱に寄与する有効パワーに対してプロットした。その結果エンドプレート電位は、有効パワーが同じ時、1ビーム入射の方が、2ビーム同時入射より深い電位ができることがわかった。

この理由を調べるために、2ビームマイクロ波下での電子軌道計算を行った。また、電子サイクロトロン共鳴加熱応答関数[2]を用いて、2ビーム同時加熱の物理過程を考察した。すなわち、共鳴加熱による電子の速度変化を、それぞれのビームに対して独立に計算し、これを足しあわせた場合と、1つめのビームによる共鳴加熱後の電子の速度分布を次の加熱の初期条件として、2つめのビームに対する加熱を行うという順次加熱の場合の2通りで速度分布変化を計算した。図2に加熱後の電子速度のピッチ角分布を、軌道計算、応答関数を用いた独立加熱の和、および順次加熱に対してプロットした。直接の軌道計算の結果は、順次加熱の結果とよい一致を示した。

順次加熱の場合と1ビーム加熱において、共鳴加熱前後の電子1個の平均エネルギーの増分を計算した。図3に結果を示す。実験結果と同様に、2ビーム加熱の方が1ビーム加熱よりも5-10%程度加熱効率が悪い。

以上のことから、2ビーム加熱の効果が、2つの加熱の効果の単純な足しあわせにならない理由は以下のように説明できる。2つのビームは入射角度が異なるため、磁力線に沿った波数 $k_{||}$ が異なる、したがってドップラーシフトによる共鳴点がわずかにずれるため、2つの加熱が独立ではなく、2つめの加熱が1つめの加熱結果の影響を受ける順次加熱となる。現在の電子の速度分布に対しては、2ビーム順次加熱の効率は、1ビーム加熱効率より、わずかではあるが悪い。

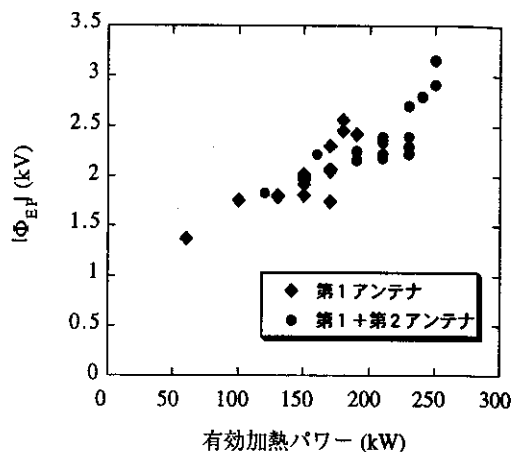


図1 エンドプレート電位の比較

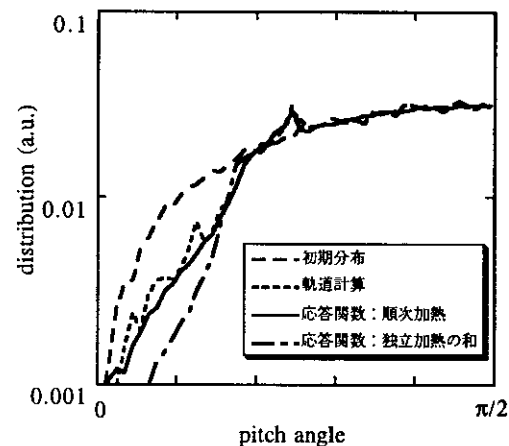


図2 計算の違いによるピッチ角分布

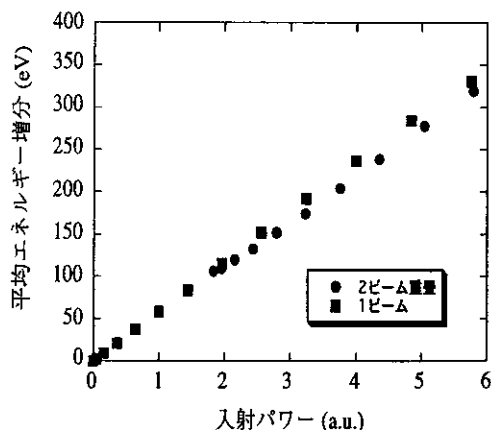


図3 平均エネルギー増分の計算

[1] Y. Tatematsu, T. Saito, M. Ishikawa et al., Trans. Fusion Tech. Vol. 39, 179 (2001).

[2] Y. Kiwamoto, T. Saito, Y. Tatematsu et al., Phys. Plasmas Vol. 1, 834 (1994).

【14】 ネット電流のあるエンド部電位モデル[1]

ガンマ10エンド部には、エンドプレートとよばれるステンレス鋼板が挿入され、プラズマの非両極性拡散の抑制と電位制御を行っている。通常エンドプレートは高抵抗を介して真空容器とつながれており、フローティング条件を満たすと考えられている。しかし、これまでの計測により、プレート前面から流れ込むイオン流、電子流、プレートから放出される二次電子流はバランスしておらず、プレートにはネットに負の電流が入り込んでいるという測定結果が得られている。

そこで、能動的にプレートと真空容器間の抵抗を変えて、エンドプレート電位とそこに流れ込むネット電流の関係を測定した。その関係を図1に示す。ネット電流が大きくなるにつれて、エンドプレートとミラースロートの電位差は小さくなっている。

これまで、エンドプレートのフローティング条件を仮定してエンド部の電位モデルを構築して来た。エンド部の電位は、ミラースロートとエンドプレートで与えられたイオン、電子と二次電子の速度分布関数の磁場強度空間変化から計算されるそれぞれの場所での荷電中性条件に加え、エンドプレートでのフローティング条件を境界条件として決定される。今回、境界条件としてネット電流を許すように、これまでのモデルを拡張した。ネット電流パラメータ ζ に対する規格化したミラースロートとエンドプレート電位差 ψ_{EP} の計算結果を図2に示す。ここで、二次電子放射係数 $\gamma=0.5$ とした。 ζ が大きいことは電子ネット電流が大きいことに対応する。 ζ が大きいと、フローティング条件が成り立つ($\zeta=0$)時に比べ、ミラースロートから損失する電子を反射する量が小さくてよいので、エンドプレート電位の深さ ψ_{EP} は浅くなる。

次に、エンドプレート抵抗替え実験で、ネット電流を能動的に替えたときの、 ψ_{EP} とプレートでのネット電流と電子電流の比 I_{net}/I_e の関係を求め、モデルによる計算結果を比較する(図3)。二次電子放射係数 γ は、これまでの実験より $\gamma=0.5$ 程度と評価されており、この値を用いたモデル計算は通常の高抵抗で得られる $|\psi_{EP}|=3$ によく一致する。小さな $|\psi_{EP}|$ に対しては、 $\gamma=0.4$ が実験データ点に一致する。 $|\psi_{EP}|$ が浅くなると、二次電子の電位による加速が小さくなり、磁気ミラーの効果が増大し、実効的な二次電子放射係数が小さくなるためである。

今回のモデルは磁場変化の効果を取り入れているが、Ordenez [2]による磁場のないプラズマにおいて、ネット電流があるときの電位モデルがあるので、比較のためそのモデルによる結果を同時に図3に示した。Ordenezのモデルによると、 $|\psi_{EP}|>2.6$ で、ネット電流はイオン過剰となる。ガンマ10の実験では、 $|\psi_{EP}|=3$ でも依然として電子過剰であり、Ordenezの磁場のないモデルでは実験結果を説明できない。

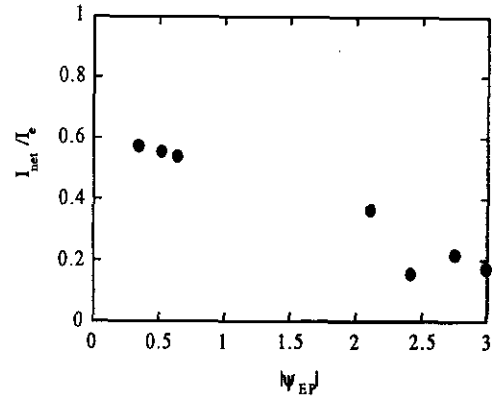


図1 エンドプレート電位とネット電流の関係

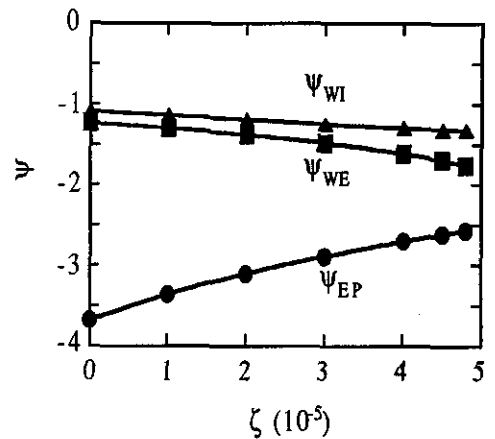


図2 ネット電流と電位の関係

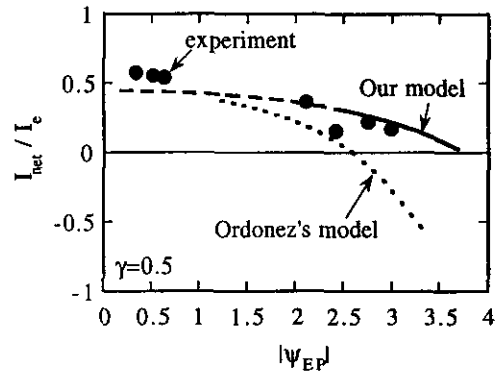


図3 モデルと実験の比較

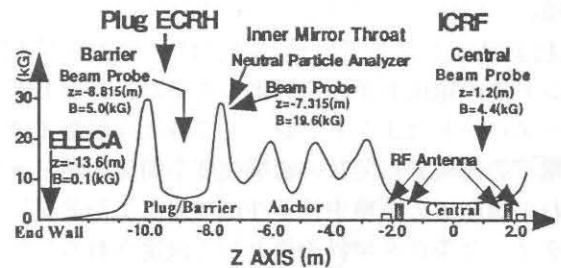
[1] Y. Tatematsu, T. Saito, et al., Proceedings of the 11th Int. Toki Conf. (Dec. 5-8, 2000, Toki, Japan), PII-5.

[2] C. A. Ordenez, Phys. Fluids B Vol. 4, 778 (1992).

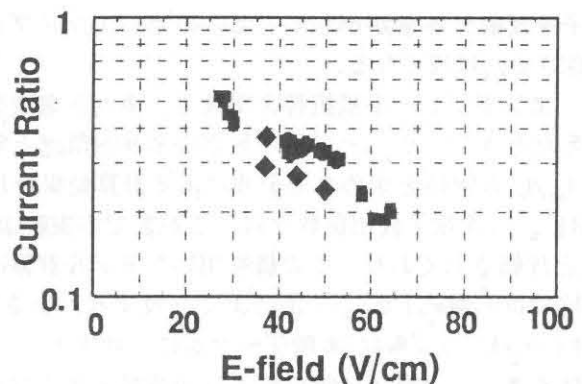
【15】 径方向輸送抑制を目的としたコアプラズマの径方向電位分布制御

タンデムミラーの実験において、プラグ部での電位形成に伴い軸方向の閉じ込めは改善されたが、高電位形成に伴うプラズマの径方向輸送が問題視されるようになった。コアプラズマの径方向電場が径方向輸送に大きな影響を与えるとの観点より、径方向電場を制御する実験を行った。コアプラズマの径方向電位分布は、主としてプラグ部に入射するマイクロ波の入射方法により決まる。[1] マイクロ波の入射パターンを大幅に変える方法の代わりに、磁力線に沿って設置してある同軸分離型エンドプレートセグメントの電位分布を変化させることにより、コアプラズマの径方向電位分布を制御した。コアプラズマの径方向電位分布は、バリア部とセントラル部で測定され、プラグ電位を超えるエネルギーを持つ端損失イオン量が測定された。磁場強度分布と測定器の位置を下図に示す。

実験に際し、同軸分離型エンドプレートの電位はプラズマへの影響が少ない様に浮遊電位にし、エンドプレート電位変化によりプラズマが乱されないように浮遊電位を基準にして径方向電位分布を変化させた。コアプラズマの径方向電位分布はビームプローブにより測定され、端損失イオンは ELECA (End-Loss Energy Component Analyzer) により測定された。



閉じ込め電位形成による端損失イオン減少の効果を避けるために、閉じ込め電位を十分超えたエネルギーを持つ端損失イオンに着目し、閉じ込め電位形成前の端損失イオンに対する電位形成後の端損失イオン量の比較を行った。径方向電場変化に対する端損失イオン電流比を右図にプロットしてある。径方向電場の増大に伴い閉じ込め電位形成時の電流量が減少する傾向が見られた。[2] この現象は径方向電場の増大が径方向輸送の増大を与えることを示唆している。

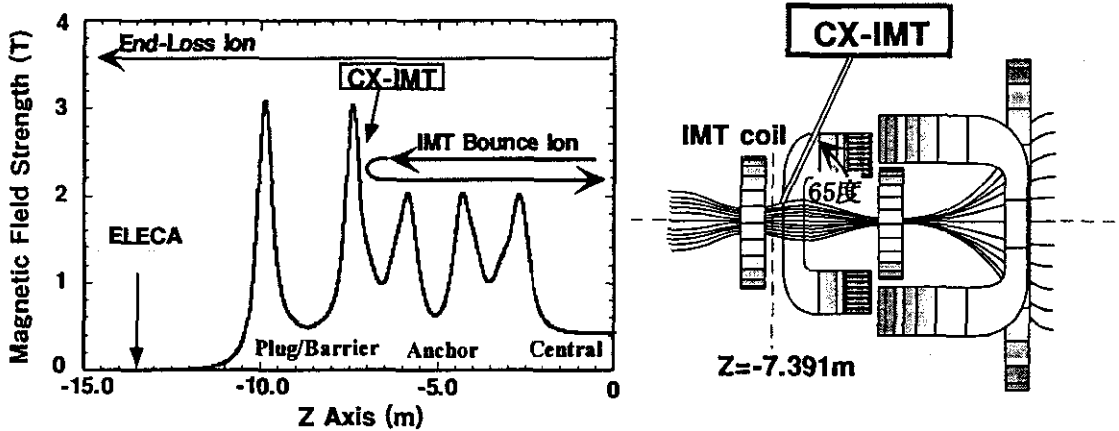


参考文献

- [1] Kikuno, K. Ishii, N. Ishibashi, et al., Rev. Sci. Instrum. Vol. 70, No. 11 (1999) pp. 4251-4259.
- [2] Y. Takemura, K. Ishii, M. Yamanashi, et al., Transactions of Fusion Technology Vol. 39, No. 1T, (2001, January) pp. 273-276.

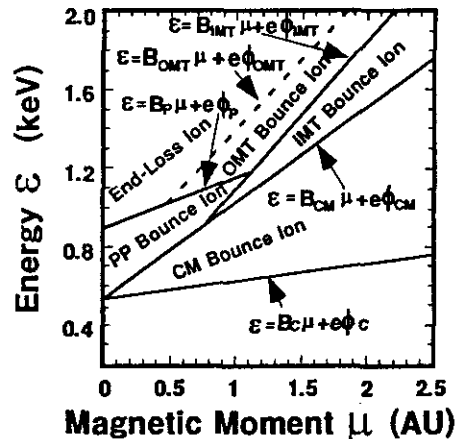
【16】 プラグ/バリア部の内側ミラースロート (IMT) バウンスイオンの測定

タンデムミラー磁場閉じ込め装置は、中央ソレノイド部とその両側に設置された非軸対称磁場配位を有するアンカー部及びアンカー部の外側に連結された軸対称のプラグ/バリア部から成立している。下図に磁場強度分布と IMT バウンスイオン測定器の設置位置を示す。

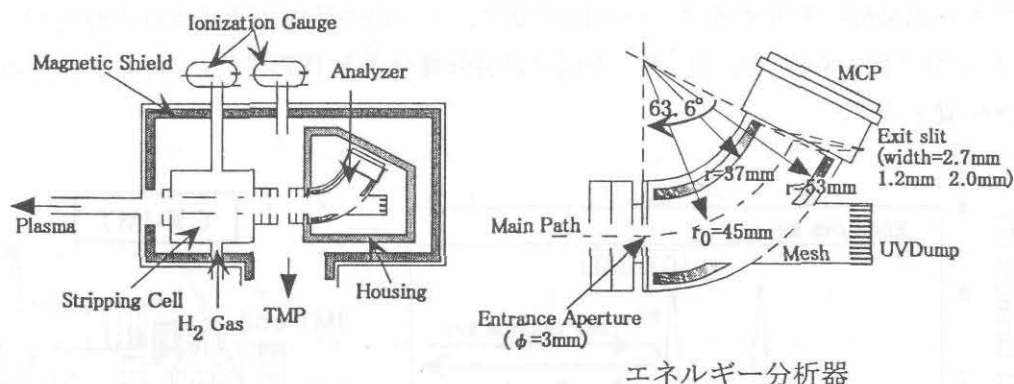


標準磁場配位の実験では、中央ソレノイド部の磁場強度は 4 k G、その両端のミラースロート磁場強度及びアンカー部のミラースロート磁場強度は 20 k G、プラグ/バリア部の外側及び内側ミラースロート (IMT) 部の磁場強度は 30 k G、プラグ部の磁場強度は 10 k G である。中央ソレノイド部からのイオンは、そのミラースロート (20kG) 近傍の磁場により跳ね返る CM (Central Mirror) バウンスイオン、ミラースロートとアンカー部を通過し IMT 近傍の磁場により跳ね返る IMT (Inner Mirror Throat) バウンスイオン、IMT 磁場を通過しプラグ部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

(マグネティックモーメン) 空間での各領域を右図に示す。 $\epsilon = B_{IMT}\mu + e\Phi_{IMT}$ で表される境界線上の IMT バウンスイオンのピッチ角は 64 度である。測定器は 65 度の角度に設置されている為、IMT バウンスイオンのみを測定することが出来る。IMT バウンスイオンのエネルギー分析は、イオンとの荷電交換で中性粒子になった荷電交換中性粒子のエネルギーを測定することにより行



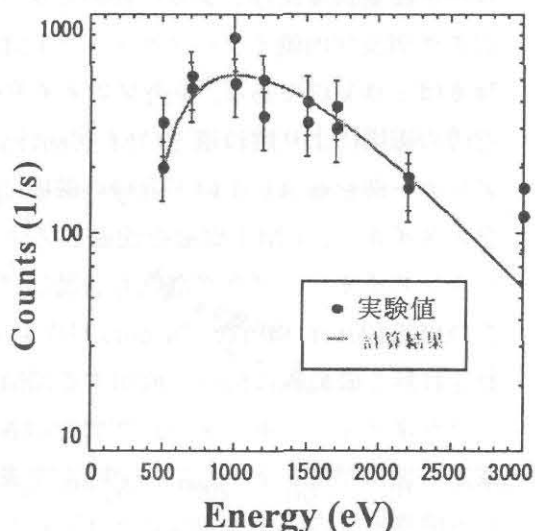
われた。ピッチ角指定の微小立体角に起因する測定粒子数の減少は、大きな入射孔に対しても高エネルギー分解能を保つ $\pi/2\sqrt{2}$ 偏向型分析器を採用した。分析器を下図に示す。



エネルギー分析器

荷電交換中性粒子はストリッピングセルでイオン化され、静電エネルギー分析器でエネルギーが分析されてマイクロチャンネルプレート (MCP) 検出器により検出される。

当箇所でのバウンスイオンの測定は、測定イオンのピッチ角を変える事により IMT バウンスイオンのみならず OMT バウンスイオン及び PP バウンスイオンも測定することが出来る。そのイオン量を見積もることは、バウンスイオンの径方向輸送の知見を与え、タンデムミラーの閉じ込めを研究する上で極めて重要であると考えられる。今回は計測系を全体に亘って建設した直後であるので、全系の動作状態をチェックすることを優先した。微小測定立体角及びストリッピング効率の低さを考慮し、計数法を用いた。右図に IMT バウンスイオンのエネルギーに対する計数測定の一例を示す。測定の妥当性を調べるために、MCP 検出器に入射する粒子数を算出し同時に実験値上にプロットした。算出に際し多少の不明な物理量を仮定してはいるが、実験値を良く反映しており、測定器全体として正常に動作していることが確認された。[1] 今後、まだ測定されていない必要な物理量を実測すると共に、測定ピッチ角を変化させ、各バウンスイオンの定量的な知見を得る。

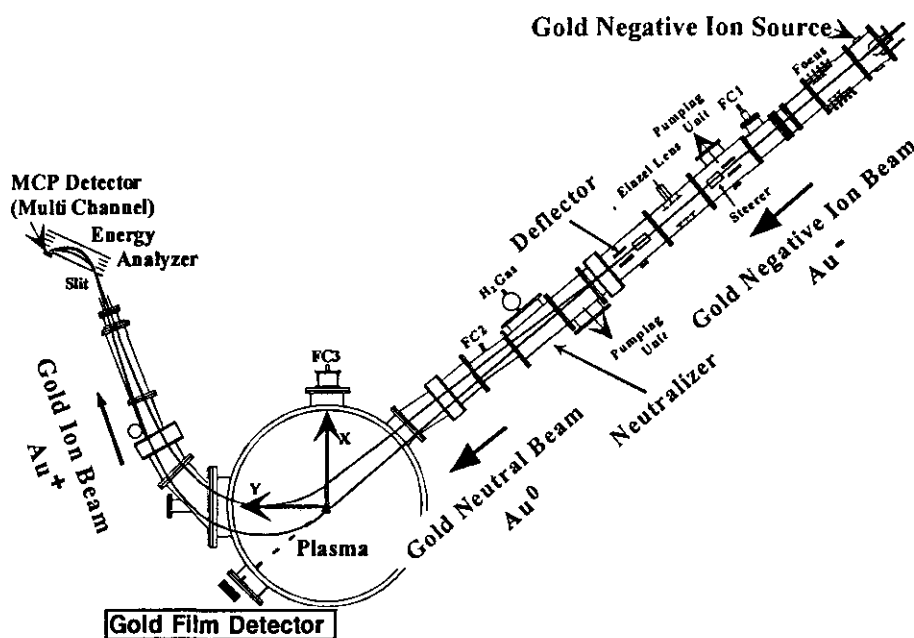


参考文献

- [1] 卒業論文 (基礎工学類) 萩澤一久: 荷電交換中性粒子分析器によるインナーミラー スロート部のイオンエネルギー分布測定

【17】 ビームプローブ法に金の被膜検出器を併用したプラズマの電位と密度同時測定法の開発

タンデムミラープラズマの電位閉じ込めの研究において、電位の情報は勿論のこと同時に同場所におけるプラズマ密度の情報も必要不可欠である。特にプラグ/バリア部の内側ミラーズロート (IMT) の電位は、セントラル部とプラグ/バリア部との効果的な熱障壁 (サーマルバリア) の生成場所として重要視されている。当部の電位測定には、近接性を考慮して新方式のビームプローブ法が開発され、効果的なサーマルバリアを与える電位降下が測定された。[1] この現象は、セントラル部及びアンカー部でのイオンサイクロトロン共鳴に起因するイオンの非等方加熱によるものと考えられる。イオンはミラー効果により強磁場部で跳ね返されるが、イオン温度の磁場に垂直な成分が平行成分より大きくなると跳ね返りは効果的になりイオン密度減少から電位降下を引き起こす。現タンデムミラーでは、電位形成及び加熱に局所的な電子とイオンのサイクロトロン共鳴を利用しているため、閉じ込めを考慮する上において加熱に伴うIMT部の密度変化と電位降下との関連を理解しておく必要がある。電子密度の測定にはマイクロ波干渉法が通常用いられているが、当部では場所的に電位との同時測定が困難なため、電位測定と共存する金の被膜検出器を用いた密度測定法を考案した。IMT部での測定に先立ち、セントラル部での測定を行った。セントラル部のビームプローブシステム及び被膜検出器の配置を下図に示す。



セントラル部の電位及び密度同時測定用ビームプローブシステムと被膜検出器位置

プラズマの直径に亘って透過した金の中性粒子ビームの密度 n_{0trans} は、プラズマの半径方向密度分布を $n_e(r) = n_e(0) \exp(-ar^2)$ とすると、以下の式で記述される。ここで、 N_0 は

プラズマに入射する前の中性粒子ビーム密度、 $n_e(0)$ はプラズマの中心密度、 v_b はビームの速度、 T_e は電子温度である。

$$n_{0trans} = N_0 \exp\left[-\frac{2n_e(0)}{v_b^2} \int_{-r_0}^{r_0} \left\{ \sqrt{\frac{m_e}{2\pi k T_e(r)}} \exp\left(-ar^2 - \frac{m_e v_b^2}{2k T_e(r)}\right) I_{ionz}(r) \right\} dr\right],$$

$$\text{ここに, } I_{ionz}(r) = \int_0^{\infty} \left\{ \sigma_{e(0+)}(v) v^2 \exp\left(-\frac{m_e v^2}{2k T_e(r)}\right) \sinh\left(\frac{m_e v_e v}{k T_e(r)}\right) \right\} dv, \text{ } \sigma_{e(0+)}(v) \text{ は中性粒子の電}$$

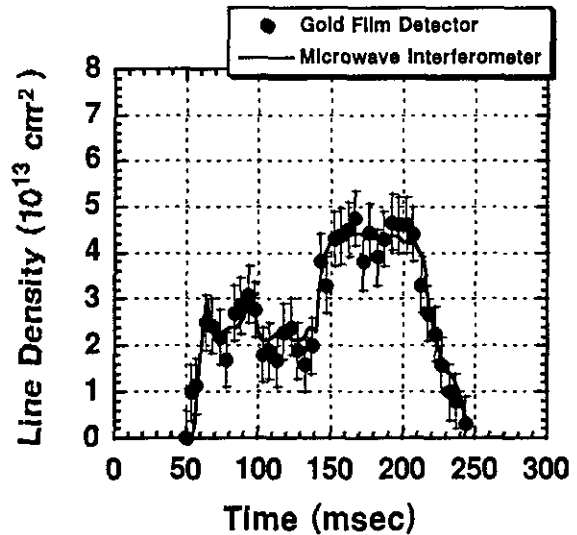
子によるイオン化断面積、 v は電子とビームの相対速度、 m_e は電子の質量である。

一方、ビームプローブ法により、中性ビームの入射角度を掃引することにより、プラズマの半径方向の分布の拡がり (a) が知れ、両者のデータを組み合わせることにより、 $n_e(r) = n_e(0) \exp(-ar^2)$ を求めることができる。

実際の測定に際しては、プラズマから放出される紫外線、高速中性粒子等の金の中性粒子ビーム以外に起因する信号を極力減衰させるために、金の被膜の厚みを 400 Å 及び斜入射方式とし、チョッピングビームを用いてビーム信号を他信号から分離した。[2]

セントラル部で測定した結果を、マイクロ波干渉計の測定値と比較した結果を下図に示す。

被膜検出器とマイクロ波干渉計から得たセントラル部プラズマの線密度は良い一致を示した。今後、これまでの結果を反映させて IMT 部に適応させて行く。適応に当たり、近接性の悪さや金の被膜からの 2 次電子測定に対し、検出器の幾何学的形状及び入射角の調整など考慮すべきことが多い。



参考文献

- [1] Y. Katsuki, K. Ishii, A. Fueki, Y. Takemura, K. Tsutsui, M. Shimoo, K. Yatsu.
Potential Measurement at the Inner Mirror Throat of the Tandem Mirror.
Transactions of Fusion Technology Vol. 39, No. 1T, (2001, January) pp. 269-272.
- [2] 卒業論文 (自然科学類) 2001 年 3 月 小幡健太郎、山内一郎：ビームプローブ法に金の被膜検出器を併用した径方向プラズマ密度分布の測定

【18】 ガンマ10プラズマ中の不純物イオンの分光測定

核融合プラズマにおける分光診断は、プラズマに影響を与えずにプラズマ中の情報を得る手段として非常に有効である。ガンマ10では、電位閉じ込めと不純物の振る舞い、不純物の発生機構、プラズマパラメーターについて調べ、プラズマ閉じ込めに役立つ情報を得ることを目的として軟X線から可視光にかけての波長領域での分光測定を行っている。プラズマから放射される線スペクトルは、波長によって原子・イオン種が特定でき、その絶対強度は、電子密度と原子・イオン密度と電子温度によって決まっている。放射線スペクトルの絶対強度を測定し、適当な分光モデルを利用することにより原子・イオン密度、電子密度、電子温度の同時測定も可能となる。これまでに、多波長、空間、時間分解計測可能な軟X線、真空紫外、紫外・可視の各分光測定システムを構築してきた。そして、分光測定システムの絶対波長感度較正を行うことでプラズマからの不純物放射スペクトルの絶対強度測定が可能となり、ガンマ10プラズマの不純物イオン分光による不純物の振る舞い、放射損失、有効荷電数について調べることが可能となった[1-3]。

ガンマ10で使用している分光測定システムは、軟X線分光システム (50~350 Å)、真空紫外分光システム (150~1050 Å)、紫外・可視分光システム (2000~5000 Å) がある。それぞれ、プラズマからの不純物スペクトル放射の径方向分布及び、時間変化を2次元検出器を用いて測定することができる。各分光測定システムは、適当な光源を利用して絶対波長感度較正済みであり、プラズマからの放射光の絶対強度を測定できるようになっている。

ガンマ10プラズマからの不純物イオンスペクトルを軟X線から可視光まで測定した結果、ガンマ10における主な不純物は酸素、炭素及び窒素であることがわかる。(図1) 炭素イオンのCIIイオンスペクトル (904Å) の絶対強度と分光モデルである衝突・輻射モデルによる計算との比較からC⁺イオンの密度は、プラズマ中心軸近傍で 10^{17} cm^{-3} のオーダーであることがわかった。分光

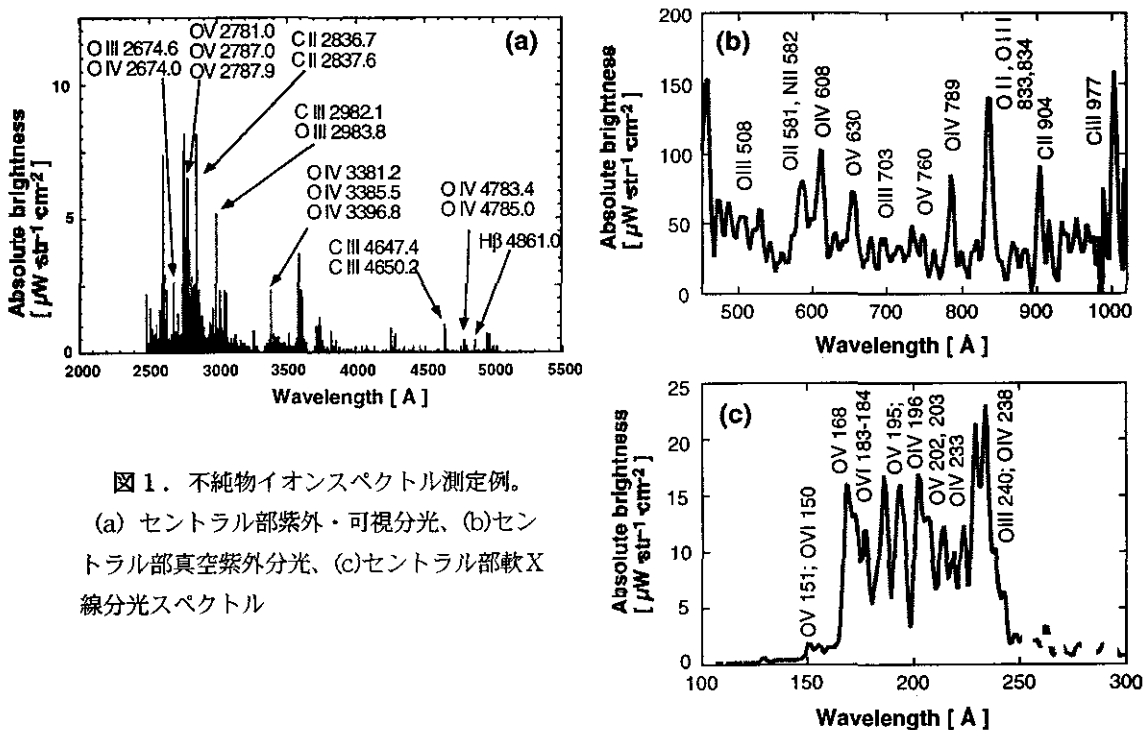


図1. 不純物イオンスペクトル測定例。
 (a) セントラル部紫外・可視分光、(b) セントラル部真空紫外分光、(c) セントラル部軟X線分光スペクトル

測定システムの絶対感度較正によって、プラズマ放射光による放射損失量を求めることができる。セントラル部からのプラズマ放射光の全放射強度は、測定した波長範囲内で、約6kWとなった。

これは、プラズマ加熱パワーの約9%程度となり、ガンマ10への加熱入射パワーに比べると十分小さいことがわかる。電位閉じ込め時には電子温度の上昇と電子密度上昇により、プラズマ中心部

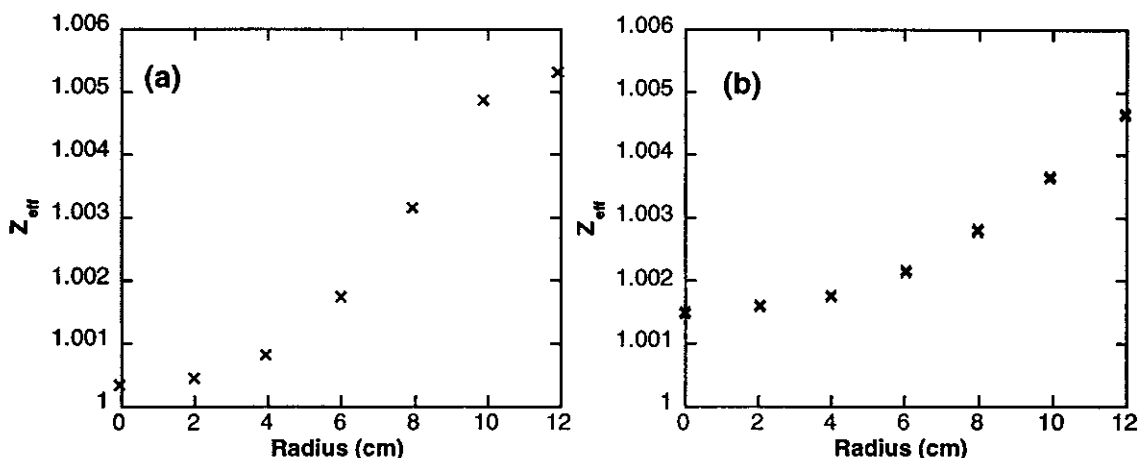


図2. Z_{eff} の径方向分布。(a)軸方向閉じ込め電位なし、(b)軸方向閉じ込め電位あり。

での放射損失が上昇するため、全放射損失量は上昇することが分かった。プラズマ有効荷電数 (Z_{eff}) について、真空紫外分光測定による不純物イオン密度測定から初めて求めた。図2に径方向分布を示す。(a)は、軸方向閉じ込め電位なし、(b)軸方向閉じ込め電位有りである。これを見ると、プラズマ中心軸上で、軸方向閉じ込め電位形成前が1.0003であり、電位形成時には1.0015であった。これは、軸方向閉じ込め時にプラズマ中心付近で不純物イオンが電子温度の上昇とともに価数の高い方へと電離されていることを示唆している。この不純物イオンの振る舞いと軸方向閉じ込め電位との関連についてはより詳しく調べていく必要がある。

- [1] M. Yoshikawa, et al., *J. Plasma and Fusion Res. SERIES*, **3**, 402 (2000).
- [2] M. Yoshikawa, et al., *Transaction of Fusion Technology*, **39**, 289 (2001).
- [3] Y. Okamoto, et al., *Transactions of fusion technology*, **39**, 293 (2001).

【19】 マイクロ波によるプラズマ計測

(1) 超短パルス反射計による密度計測

プラズマ中のマイクロ波の周波数 ω と波数 k との関係、即ち分散式は $\omega^2 = \omega_{pe}^2 + c^2 k^2$ で表される。但し、 c は光速、 ω_{pe} は電子プラズマ周波数で電子密度の関数である。この事からプラズマにマイクロ波を入射した時、 $\omega < \omega_{pe}$ ならば遮断され、プラズマ中を伝播出来ない。入射周波数を変化させて反射点の変化を求められれば電子密度の空間分布が得られる。

パルス幅65psの超短パルスをプラズマの軸に対して垂直に入射する。この信号はパルス幅が短いためにマイクロ波領域迄広がる広帯域周波数成分を有しており、入射装置が簡単になる。プラズマで反射された各周波数成分毎に反射波の飛行時間を測定して径方向の密度分布を再構成する。密度に揺動がある場合は飛行時間の揺らぎとして現れるので、周波数解析を行う事で揺動の分布も同時に求める事が出来る。

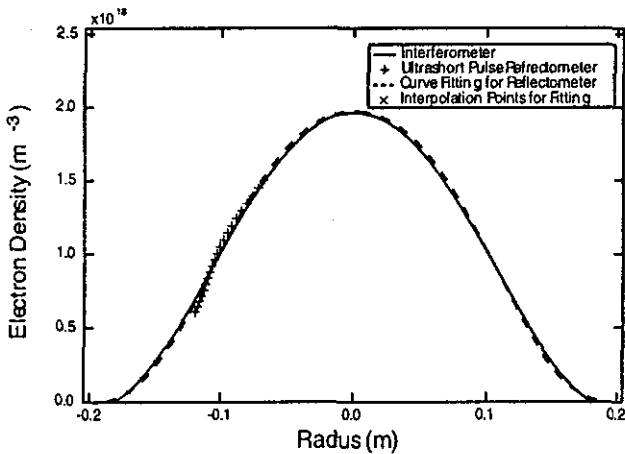
上記分散式で示されるように、プラズマ中のマイクロ波の速度は密度に依存しているので、飛行時間を求めるには密度分布を仮定するか、周波数の低い領域から逐次積分する必要がある。

この方法で得られた密度分布を可動ホーン型干渉計による分布測定と比較した例を第1図に示す。プラズマはパルスの生成されているので、干渉計の場合は位置を変えて測定する為に約10ショットを必要としているが、反射計では1ショットで分布が得られている。

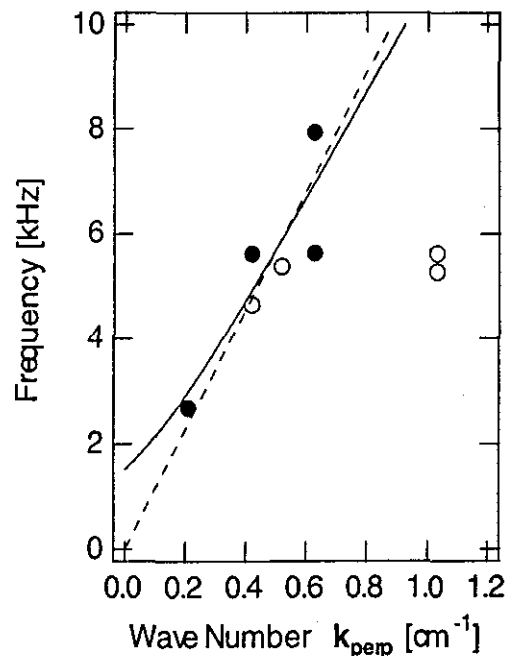
(2) クロスポラリゼーション散乱法

プラズマによるマイクロ波の遮断現象を利用した診断法にクロスポラリゼーション散乱法がある。プラズマにO-モードで入射されたマイクロ波は $\omega = \omega_{pe}$ となる地点で遮断されX-モードに変換される。X-モードに変換された散乱波の強度の観測からプラズマ中の磁場揺動の測定が可能となる。この方法はサーチコイルを用いた磁気探針と異なり、プラズマに接触することなく磁場揺動が測定出来る重要な研究課題である。また、入射波、反射波、磁場揺動の間に波数及び周波数の整合条件が認められ、角度を変えて散乱波を観測すれば分散関係を得る事が可能である。

第2図に得られた分散関係の例を示す。白丸は黒丸と逆方向の角度の場合で、反射波の影響を受けているものと思われる



第1図



第2図

【20】 超短パルス反射法による2次元プラズマ計測に関する計算機シミュレーション

ミリ波帯域の超短パルス電磁波を用いた超短パルス反射法によるプラズマの2次元計測に関する計算機シミュレーションを行って、プラズマ密度分布2次元計測について検討を行った。プラズマの2次元計測では、入射超短パルスに対する検出器をアレイ状に配置して各検出器で受信した反射信号を基にプラズマの密度分布等を再構成する。計算機シミュレーションでは、マクスウェル方程式とプラズマ電流に関する運動方程式を空間は差分法で、時間に関してはルンゲ・クッタ法を用いて解く。2次元シミュレーションの結果の一例を図1及び図2に示す。図1は入射超短パルスのプラズマからの反射波のスナップショットである。密度分布 $n(x,z)$ は実線で示されている。 $x=0$ の位置にある R1から R9の点は反射波を受信するための検出器の位置を表す。図2は各検出器で受信された反射波信号を基にアーベル逆変換を用いて再構成された（各検出器とプラズマ中心を結ぶ線上での）密度分布（白丸）を表す。実線は数値計算で用いた密度分布である。再構成結果は元の密度分布をうまく再現できていることが分かる。これらの計算結果を合成することにより、プラズマ密度の2次元分布を再現することが可能となる。

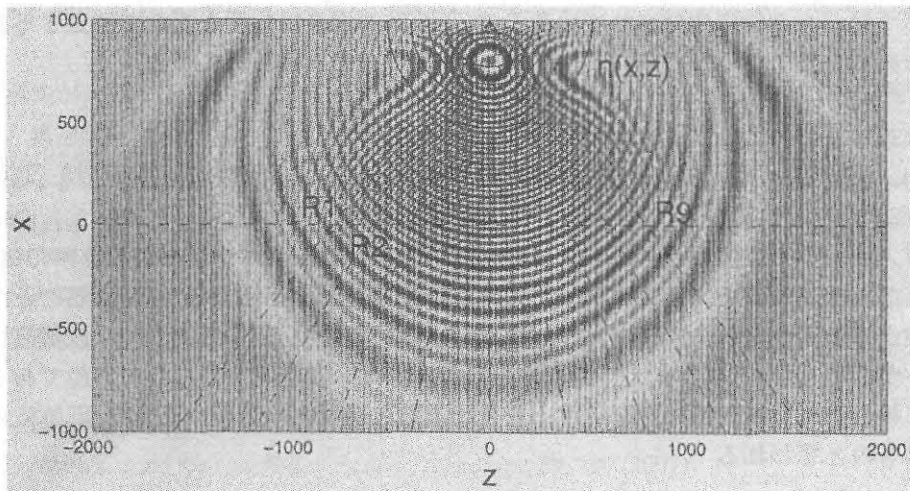


図1. プラズマからの反射波のスナップショット (R1, ..., R9 は検出器の位置を示す)

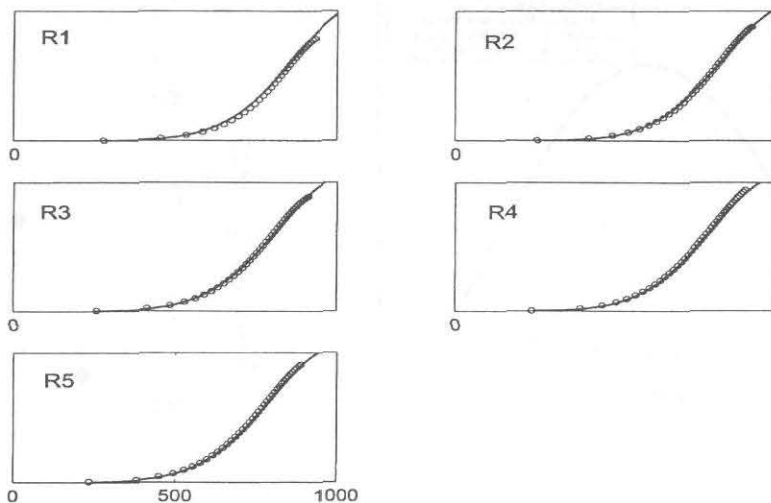


図2. 各検出器上で再構成されたプラズマ密度分布 (白丸, 実線は計算で用いた密度分布)

【21】 レーザー・プラズマ相互作用におけるサブサイクルソリトン形成

高強度レーザーパルスとプラズマの非線形相互作用における電磁波のソリトン形成について解析した。基礎方程式はマクスウェルの方程式と電磁流体に対する連続の式と運動方程式である。イオンは一様なバックグラウンドとして近似できる。簡単のため、1次元波動伝播を考えるが、高強度レーザーパルスを扱うため相対論効果を取り入れている。レーザーパルスの電磁場を適当に規格化したベクトルポテンシャル a とスカラーポテンシャル ϕ で表現し、円偏波モードを考えると、

$$\frac{d^2}{d\xi^2} a = \frac{1}{1-V^2} \frac{a}{\gamma-b} - \omega^2 a, \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{d\xi^2} \phi = \frac{b}{\gamma-b}, \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{1+a^2+V^2b^2} = 1 + \phi + V^2b, \quad (3)$$

が得られる。ここで、 $\xi = z - Vt$ 、 γ は相対論的因子で、 a は伝播に垂直方向のベクトルポテンシャルの大きさ、 Vb は伝播方向の運動量、 V は光速で規格化した伝播速度、また ω は非線形周波数シフトを表す。上記の方程式が局在解を持つための条件から、非線形周波数シフト ω の大きさが固有値として求まる。

数値計算によって得られたソリトン解の一例を図3に示す。この電磁パルス解はサブサイクルなソリトンになっていることが分かった。図で n はプラズマ密度を表し、電磁波が局在している領域（ $\xi = 0$ 近傍）では、電磁波の作るポンドロモーティブ力により密度のキャビティーが形成されていることが分かる。高強度レーザーパルスとプラズマの非線形相互作用による有限速度で伝播するサブサイクルな電磁波ソリトンの形成は本研究によって初めて明らかになった。一方これまでの研究では、静止したサブサイクルな電磁波ソリトンの形成しか分かっていなかった。また、図3のサブサイクルソリトンは ξ に関して対称解であるが、波の進行方向の反対側にあたる下流側に航跡場が励起されるような非対称解も存在することを明らかにした。

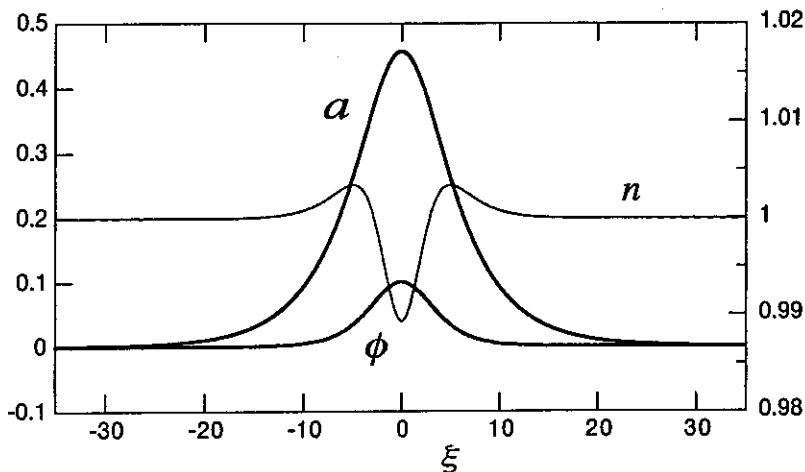


図3. 計算で得られたレーザーパルスのサブサイクルソリトン解 ($V=0.2$, $\phi(0)=0.1$)

<論文>

- 1 H. Hojo,
Ambipolar Steady State of a Mirror Plasma,
J. Phys. Soc. Jpn. **69**, No.5 (2000) 1570-1571.
- 2 Y. Yasaka and H. Hojo,
Enhanced Power Absorption in Planar Microwave Discharges,
Phys. Plasmas **7**, No.5 (2000) 1601-1605.
- 3 M. Ichimura, S. Tanaka, S. Kanazawa, M. Nakamura, S. Motegi, S. Saosaki, K. Sakata,
C. Nakagawa, Y. Ohta, K. Kadoya, T. Kawabata, H. Hojo, T. Saito, K. Yatsu,
Alfvén Eigenmode Excitation near Ion Cyclotron Frequency in the GAMMA 10 Tandem
Mirror,
J. Accelerator and Plasma Research, **5** No.1 (2000) 76-86.
- 4 K. Yatsu, R. Baba, T. Cho, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, K. Islam, I. Katanuma,
S. Kobayashi, J. Kohagura, Y. Nakashima, Y. Nishizawa, T. Saito, T. Sasuga, S. Tanaka,
Y. Tatematsu, D. Sato, A. Wada, and M. Yoshida,
Recent development of potential confinement in the GAMMA 10 tandem mirror;
J. Accelerator Plasma Res. **5** No.1 (2000) 34-42.
- 5 T. Goto, K. Ishii, Y. Goi, N. Kikuno, Y. Katsuki, M. Yamanashi, M. Nakamura, M. Ichimura,
T. Tamano, and K. Yatsu,
Ion diffusion in a velocity space induced by Alfvén ion cyclotron mode observed in a mirror
plasma,
Physics of Plasmas **7** No.6, (2000, June) pp.2485-2493.
- 6 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, et al,
カーボンシートポンプの GAMMA 10 による性能評価,
真空, 第 43 巻, No 7, (2000) 734-740.
- 7 Md.K. Islam, Y. Nakashima, K. Yatsu, I. Katanuma, D. Sato, A. Wasa, K. Kajiwara,
S. Kobayashi, Y. Ishimoro, M. Oishi, R. Baba and Y. Kawasaki,
Investigation of Edge Plasmas in the Anchor Cell Region of GAMMA 10,
J. Phys. Soc. Jpn. **69** No.8 (2000) 2493-2497.
- 8 I. Katanuma, Y. Tatematsu, K. Ishii, T. Tamano, and K. Yatsu,
Ideal Ballooning Modes in the GAMMA10 Tandem Mirror,
Journal of the Physical Society of Japan **69**, No.10 (2000) 3244-3252.
- 9 K. Yatsu, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma,
J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, S. Tanaka, Y. Tatematsu, and M. Yoshikawa,
Progress in Long Sustainment and High Density Experiments with Potential Confinement
on GAMMA 10,
Fusion Energy (2000) IAEA-CN-77/EXP1/10.

- 10 K. Ishii, T. Goto, A. Itakura, I. Katanuma, Y. Katsuki, T. Saito, T. Tamano, A. Mase,
Influence of Anisotropic Ion Heating on Confinement of the Tandem Mirror,
Fusion Energy (2000) IAEA-CN-77/ EXP4/15.
- 11 T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura,
Y. Nakashima, T. Saito, S. Tanaka, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, T. Tamano, K. Yatsu, and
S. Miyoshi,
Summarized General Scaling Laws Covering Over the Representative Tandem-Mirror
Operations in GAMMA 10,
Fusion Energy (2000) IAEA-CN-77/EXP5/10.
- 12 A. Itakura, M. Katoh, S. Kubota, A. Mase, T. Onuma, H. Hojo, K. Yatsu,
Simultaneous Measurement of an Electron Density Profile and a density Fluctuation Using
Ultrashort-Pulse Reflectometry,
J. Plasma Fusion Res. **76**, No.11 (2000) 1198-1202.
- 13 K. Ito, Y. Kiwamoto, T. Saito, Y. Tatematsu,
Strong Narrow-Band Cyclotron Emission near Heating Frequency,
Physics of Plasmas **7**, No. 12 (2000) 4923-4930.
- 14 B. Rau, T. Tajima and H. Hojo,
Reply to Comment on "Coherent Acceleration by Subcycle Laser Pulses",
Phys. Rev. Lett. **84**, No.14 (2000) 3210.
- 15 H. Hojo and A. Mase,
Ultrashort-Pulse Cross Polarization Scattering in Plasmas with Magnetic Shear,
J. Plasma Fusion Res. SERIES **3** (2000) 597-600.
- 16 M. Ichimura, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura,
Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, S. Tanaka, Y. Tatematsu, K. Yatsu, M. Yoshikawa,
Long-Pulse Operation of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
J. Plasma and Fusion Research SERIES **3** (2000) 58-62.
- 17 M. Yoshikawa, Y. Okamoto, E. Kawamori, T. Ito, C. Watabe, Y. Watanabe, K. Ikeda,
N. Yamaguchi, T. Tamano, and K. Yatsu,
Impurity Ion Diagnostics in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Volume **3**, (2000) 402-406.
- 18 S. Kobayashi, Y. Nakashima, M. Shoji, K. Tsuchiya, Y. Ishimoto, H. Aminaka, N. Yamaguchi,
M. Yoshikawa, T. Tamano and K. Yatsu
Hydrogen Recycling in a Long-Pulse Discharge Plasma on the Tandem Mirror GAMMA 10,
J. Plasma Fusion. Res. SERIES **3** (2000) 303-306.
- 19 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, E. Ishinuki, S. Kobayashi, M. Yoshikawa, T. Tamano
and K. Yatsu
Particle balance analysis on carbon sheet pump applied to the GAMMA10 tandem mirror
plasmas,
J. Plasma Fusion. Res. SERIES **3** (2000) 307-311.
- 20 E. Kawamori, T. Tamano, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, S. Kobayashi, T. Cho, K. Ishii,
A. Mase and K. Yatsu,
Preliminary Pellet Injection Experiment in the GAMMA 10 Tandem Mirror;
J. Plasma Fusion. Res. SERIES **3** (2000) 473-476.

- 21 H. Hojo, S. Tanaka, S. Saosaki, M. Ichimura,
Flute Stability Analysis of a Quadrupole-Anchored Tandem Mirror Plasma,
Transactions of Fusion Technology **39**, No.1T (2001) 343-346.
- 22 H. Hojo,
Energetic Particle Effects on MHD Stability of a Tandem Mirror Plasma,
Transactions of Fusion Technology **39**, No.1T (2001) 347-349.
- 23 T. Saito, Y. Tatematsu, K. Kajiwara, H. Abe, M. Ishikawa, Y. Kiwamoto, Y. Imaizumi,
K. Nishida, E. Yokoyama, M. Ichimura, K. Ishii, I. Katanuma, K. Yatsu,
Response of Currents Circulating in an End Region of a Tandem Mirror to Variation of End
Plate Resistance,
Transaction of Fusion Technology **39**, No. 1T (2001) 143-146.
- 24 Y. Tatematsu, T. Saito, M. Ishikawa, H. Abe, Y. Imaizumi, K. Nishida, E. Yokoyama,
Y. Kiwamoto, I. Katanuma, K. Yatsu,
Study of Electron Cyclotron Resonance Heating with Two Microwave Beam Injection in a
Magnetic Mirror,
Transaction of Fusion Technology **39**, No. 1T (2001) 179-182.
- 25 M. Nakamura, M. Ichimura, K. Sakata, M. Oikawa, Y. Ohta, H. Kano, S. Tanaka, S. Saosaki,
K. Kadoya, T. Kawabata, S. Kobayashi, H. Hojo, Y. Nakashima, T. Watanabe, K. Yatsu,
Stability boundary and interaction with confined plasmas of Alfvén ion cyclotron modes,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 339-342.
- 26 S. Saosaki, M. Ichimura, S. Tanaka, M. Nakamura, Y. Ohta, K. Kadoya, T. Kawabata,
M. Oikawa, H. Kano, S. Kobayashi, M. Yoshikawa, H. Hojo, Y. Nakashima, M. Inutake,
K. Yatsu,
Analysis of MHD behaviour by using optical detectors in the GAMMA 10 tandem mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 261-264.
- 27 M. Ichimura, S. Tanaka, C. Nakagawa, M. Nakamura, S. Saosaki, Y. Ohta, K. Kadoya,
T. Kawabata, M. Oikawa, H. Kano, H. Hojo, K. Yatsu,
High-density plasma production with fast Alfvén waves in the GAMMA 10 tandem mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 167-170.
- 28 M. Yoshikawa, Y. Okamoto, E. Kawamori, C. Watabe, Y. Watanabe, T. Furukawa, K. Ikeda, N.
Yamaguchi, T. Tamano and K. Yatsu,
Impurity Ion Diagnostics in the GAMMA 10 Plasma,
Transactions of fusion technology **39** (2001) 289-292.
- 29 E. Kawamori, T. Tamano, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, S. Kobayashi, Y. Watanabe,
H. Aminaka, T. Cho, K. Ishii, A. Mase and K. Yatsu,
Study of Pellet-Plasma Interaction in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of fusion technology **39** (2001) 257-260.
- 30 Y. Okamoto, M. Yoshikawa, N. Yamaguchi, C. Watabe, E. Kawamori, Y. Watanabe, T.
Furukawa, T. Tamano and K. Yatsu,
STUDIES OF IMPURITY ION SPECTRUM IN THE GAMMA 10 PLASMA BY USING
VUV SPECTROGRAPH,
Transactions of fusion technology **39** (2001) 293-296.

- 31 K. Ishii, T. Goto, M. Shimoo, K. Tsutsui, Y. Takemura, A. Fueki, I. Katanuma, M. Ichimura, K. Yatsu,
Observation of Fine Structure in the Velocity Distribution Function of the End-Loss Ions in
the Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 147-150.
- 32 Y. Katsuki, K. Ishii, A. Fueki, Y. Takemura, K. Tsutsui, M. Shimoo, K. Yatsu,
Potential Measurement at the Inner Mirror Throat of the Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 269-272.
- 33 Y. Takemura, K. Ishii, M. Yamanashi, N. Kikuno, A. Fueki, K. Tsutsui, M. Shimoo, T. Saito, K. Yatsu,
Effect of Flattened Radial Potential Profile of the Core Plasma in the Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 273-276.
- 34 A. Itakura, N. Goto, M. Katoh, Y. Kogi, Y. Shima, H. Hojo, K. Yatsu, S. Kubota, A. Mase, T. Onuma,
Microwave Reflectometry in the GAMMA 10 Device,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 265-268.
- 35 K. Yatsu, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, S. Tanaka, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa,
Progress in High Density Experiments with Potential Confinement on GAMMA 10,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 3-9.
- 36 Y. Nakashima, D. Sato, A. Wada, Y. Kawasaki, T. Natori, K. Md. Islam, S. Kobayashi, Y. Ishimoto, I. Katanuma, H. Aminaka, E. Ishinuki, K. Orito, T. Kato, and K. Yatsu,
Plasma Control with Conducting Plates in the Anchor Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 139-142.
- 37 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, E. Ishinuki, S. Kobayashi, M. Yoshikawa, K. Yatsu,
Operational Method of Carbon Sheet Pump in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 249-252.
- 38 S. Kobayashi, Y. Nakashima, M. Shoji, Y. Ishimoto, H. Aminaka, T. Cho, M. Yoshida, T. Tamano, K. Yatsu,
Investigation of Radial Particle Transport in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 253-256.
- 39 T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, S. Tanaka, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, M. Yoshida, Y. Nishizawa, S. Nagashima, T. Numakura, R. Minami, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Summarized Scaling Laws of Potential Confined Plasmas in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 33-40.

- 40 M. Hirata, T. Sasuga, T. Cho, J. Kohagura, M. Yoshida, Y. Nishizawa, S. Nagashima, T. Numakura, R. Minami, H. Ito, H. Watanabe, T. Kondoh, Y. Nakashima, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Development of Novel Ion-Energy Spectrometer Using a Semiconductor Detector Collector Under a Circumstance of Simultaneously Incident Ions and Electrons with X rays,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 281-284.
- 41 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, M. Yoshida, S. Nagashima, H. Watanabe, H. Ito, T. Tamano, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Characterization of X-ray-Energy Responses of Semiconductor Detectors after Fusion Produced Neutron Exposure,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 159-162.
- 42 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, Y. Nakashima, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Simultaneous Measurements of Spatial Profiles of Ion and Electron Temperatures Using a Semiconductor Detector Array,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 277-280.
- 43 R. Minami, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, M. Yoshida, H. Watanabe, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Temporal Evolution of Spatially Resolved Electron Temperature Using Single-Shot X-ray Data on Both Circular Central-Cell and Elliptical Anchor-Region Plasmas in GAMMA 10,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 297-300.
- 44 M. Yoshida, R. Minami, T. Cho, Y. Nishizawa, T. Sasuga, S. Nagashima, Y. Nakashima, J. Kohagura, M. Hirata, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Investigations of the Relation Between Radial Profiles of Ion-Confining Potentials and End-Loss Ions in the Tandem Mirror GAMMA 10,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 285-288.
- 45 Y. Tatematsu, T. Saito, Y. Kiwamoto, K. Ito, H. Abe, M. Ishikawa, H. Koyama, I. Katanuma, K. Yatsu,
Cyclotron Emission Spectra from Collisionless Electrons Resonantly Heated by Cyclotron Waves in a Magnetic Mirror,
Fusion Engineering and Design **53** No. 1-4 (2001) 229-236.
- 46 T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Kiwamoto, H. Abe, M. Ishikawa, K. Kajiwara, H. Koyama, A. Suzuki, T. Cho, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, A. Mase, N. Oyama, K. Yatsu,
Axi-Symmetrization of Radiation Pattern and Two Wave Heating of Fundamental ECRH in GAMMA 10,
Fusion Engineering and Design **53** No. 1-4 (2001) 267-275.
- 47 T. Saito, Y. Tatematsu, K. Kajiwara, M. Ishikawa, Y. Imaizumi, K. Nishida, E. Yokoyama, M. Ichimura, K. Yatsu,
Measurement of End Loss Electrons and Ions from a Hot Ion Plasma in a Tandem Mirror,
Journal of Physical Society of Japan **70** No. 1 (2001) 305-306.

- 48 M.Ichimura, Y.Ohta, S.Motegi, M.Nakamura, S.Tanaka, S.Kanazawa, S.Saosaki, C.Nakagawa, K.Sakata, K.Kadoya, T.Kawabata, M.Oikawa, H.Kano, M.Sasaki, H.Hojo, K.Yatsu,
Probe wave system for studying excitation of Alfvén eigenmodes in the ion cyclotron range of frequency,
Review of Scientific Instruments **72** (2001) 398-401.
- 49 M.Nakamura, M.Ichimura, Y.Ohta, M.Oikawa, S.Tanaka, Y.Kogi, Y.Shima, S.Saosaki, K.Kadoya, T.Kawabata, H.Kano, A.Itakura, H.Hojo, A.Mase, K.Yatsu,
Axial profile measurement of Alfvén ion cyclotron eigenmodes,
Review of Scientific Instruments **72** (2001) 394-397.
- 50 Y. Kogi, A. Mase, H. Hojo, A. Itakura, M. Ichimura, T. Tamano,
Measurement of cross-Polarization Scattering Using Ultrashort Pulse Microwaves,
Review of Scientific Instruments **72** (2001) 355-358.
- 51 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, M. Yoshida, S. Nagashima, H. Watanabe, K. Yatsu, S. Miyoshi, T. Kondoh, T. Nishitani, and H. Takeuchi,
Investigation of X-ray-Energy Responses of Semiconductor Detectors under Deuterium-Tritium Fusion-Produced Neutron Irradiation,
Review of Scientific Instruments **72** (2001) 805-808.
- 52 R. Minami, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, M. Yoshida, H. Watanabe, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Simultaneous Observations of Temporally and Spatially Resolved Electron Temperatures of Both Circular Central-Cell and Elliptical Anchor-Region Plasmas in GAMMA 10,
Review of Scientific Instruments **72** (2001) 1193-1196.
- 53 M. Yoshida, T. Cho, M. Hirata, J. Kohagura, Y. Nishizawa, T. Sasuga, S. Nagashima, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Simultaneous Observations of Temporally and Spatially Resolved Two-Dimensional Profiles of Ion-Confining Potentials and Ion Fluxes Using Novel Ion-Energy Spectrometer Arrays,
Review of Scientific Instruments **72** (2001) 619-622.
- 54 K. Kajiwara, T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Kiwamoto, H. Abe, K. Ito, M. Ishikawa, K. Ishii, K. Yatsu,
Observation of a Radial Current at a Plug/Barrier Cell in GAMMA 10,
Journal of Physical Society of Japan **70** No. 2 (2001) 421-427.
- 55 Y. Nakashima, K. Md. Islam, A. Wada, D. Sato, S. Kobayashi, Y. Ishimoto, Y. Kawasaki, I. Katanuma, T. Saito, M. Yoshikawa, R. Baba, H. Aminaka, E. Ishinuki, and K. Yatsu
Studies of Edge Plasmas in an Anchor Minimum-B Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
J. Nucl. Mater. **290-293** (2001) 683-687.
- 56 T. Inoue, M. Nakai, A. Tanaka, K. Kawakami, A. Iwamae, T. Fujimoto, M. Yoshikawa, T. Ito and T. Tamano
Polarization of impurity ion emission lines from the GAMMA 10 tandem mirror plasma,
Plasma Physics and Controlled Fusion **43** (2001) L9-L15.

- 57 H. Hojo and A. Mase,
Theory and Simulation on Cross Polarization Scattering of Ultrashort-Pulse Electromagnetic Waves,
Bulletin of the American Physical Society **45**, No.7 (2000) CP1-94.
- 58 H. Hojo and K. Akimoto,
Subcycle Solitary Pulse in Ultraintense Laser-Plasma Interactions,
Bulletin of the American Physical Society **45**, No.7 (2000) MP1-70.
- 59 I. Katanuma, T. Ito, T. Natori, Y. Tatematsu, K. Ishii, Y. Nakashima, T. Saito, K. Yatsu,
The Dependence of Ballooning Mode Stability of the GAMMA10 Tandem Mirror on the Various Ellipticities of Magnetic Flux Tube in the Anchor Cell,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 331-334.
- 60 T. Ito, I. Katanuma, T. Ishimaru, Y. Nakashima, K. Yatsu,
Numerical Calculation of High Energy Ion Production by Neutral Beam Injection in the GAMMA10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Technology **39** (2001) 335-338.
- 61 M. Ichimura, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, S. Tanaka, Y. Tatematsu, K. Yatsu, M. Yoshikawa,
High density plasma production with potential confinement in the GAMMA 10 tandem mirror,
Invited: 2000 Int. Congress on Plasma Phys. combined with 42nd Annual Meeting of the Division of Plasma Phys. of APS, Oct 23-27, 2000, Quévec City,
Bull. Am. Phys. Soc. **45** No.7 (2000) 290.
- 62 M. Yoshikawa, Y. Okamoto, E. Kawamori, N. Yamaguchi and T. Tamano,
Absolute Calibration of Time- and Space-Resolving Vacuum Ultraviolet Spectrograph for Plasma Diagnostics,
Photon Factory Activity Report 1998 #17, Part B, (2000), p. 314 (No.98G017).
- 63 Y. Nakashima, Y. Ishimoto, S. Kobayashi, S. Ishinuki, M. Yoshikawa, K. Yatsu, A. Sagara, M. Shoji, H. Suzuki
Development of Operational Method for Reducing Adsorbed Gases on the Surface of Carbon Sheet Pump,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 1998 - March 2000 (National Institute for Fusion Science, 1999) 91.
- 64 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, M. Yoshida, S. Nagashima, H. Watanabe, K. Yatsu, S. Miyoshi, K. Hirano, and H. Maezawa ,
Investigation of Fusion Produced Neutron Effects on Silicon Semiconductor X-ray Detectors,
Photon Factory Activity Report 1999 **17** (High Energy Accelerator Research Organization, 2000) 335.

< 学位論文 >

博士論文

(物理学研究科)

岡本裕司

Study of Impurity Ions in GAMMA 10 by Using Vacuum Ultraviolet Spectrograph

河森栄一郎

Study of the Pellet Fueling in the GAMMA10 Tandem Mirror

小林進二

Study on Particle Confinement and Transport in the GAMMA 10 Tandem Mirror

修士論文

(物理学研究科)

武村祐一郎

ビームプローブを用いたコアプラズマの径方向電位分布測定と電位分布制御

吉田麻衣子

新型イオン・エネルギー・スペクトル計測器に拠る電位空間分布とプラズマ閉じ込めの研究

(理工学研究科)

網中 洋明

GAMMA 10 アンカー部における中性粒子密度分布の研究

石貫英一

GAMMA10 における ECR 放電洗浄時の水素・不純物ガス輸送に関する研究

太田百合子

周波数掃引型 ICRF プローブの開発

角谷 清臣

ガンマ 10 セントラル部における低周波数磁場揺動の解析

川崎陽子

GAMMA10 極小磁場変換部における周辺プラズマの挙動

川端 敏毅

ガンマ 10 アンカー部における軸方向イオン温度分布計測

渡辺吉彦

高速 H α 線検出器を用いた GAMMA10 プラズマの 2 次元測定

渡部力

軟 X 線分光器を用いたガンマ 10 プラズマの不純物イオンスペクトルの絶対放射測定

<講演>

- 1 Y. Nakashima, K. Md. Islam, A. Wada, D. Sato, S. Kobayashi, Y. Ishimoto, Y. Kawasaki, I. Katanuma, T. Saito, M. Yoshikawa, R. Baba, H. Aminaka, E. Ishinuki, and K. Yatsu,
Studies of Edge Plasmas in an Anchor Minimum-B Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
14th int. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (Rosenheim, 2000, May 22-26) P-2.36.
- 2 T. Inoue, M. Nakai, A. Tanaka, K. Kawakami, A. Iwamae, T. Fujimoto, M. Yoshikawa, T. Ito and T. Tamano
Polarization of impurity ion emission lines from the GAMMA 10 tandem mirror plasma,
EPS 27th Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 12-16 June 2000 (Budapest, Hungary).
- 3 Y. Kogi, A. Mase, H. Hojo, A. Itakura, M. Ichimura, T. Tamano,
Measurement of Cross-Polarization Scattering Using Ultrashort Pulse Microwaves,
The 13th APS topical Conf. High Temperature Plasma Diagnostics, (Tuscon, 2000, June 18-22).
- 4 I. Katanuma, T. Ito, K. Shiotani, Y. Tatematsu, K. Ishii, T. Saito, K. Yatsu,
The Electrostatic Potential Profile in the End Mirror Cells of a Tandem Mirror,
25th International Conference on Phenomena in Ionized Gasses, July 17-22, 2000, Nagoya, Japan.
- 5 M. Yoshikawa, Y. Okamoto, E. Kawamori, Y. Watanabe, C. Watabe, N. Yamaguchi and T. Tamano,
Absolute calibration of space-resolving soft x-ray spectrograph for plasma diagnostics,
7th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 22-26 August 2000. (Berlin, Germany).
- 6 A.Mase, A.Itakura, H.Hojo, K.Watabe, K.Mizuno, H.Matsuura, K.Uchida, A.Miura, C.W.Domier, N.C.Luhmann Jr.,
Development of Advanced Millimeter-Wave Plasma Diagnostics,
Invited: Proc.25th Intern.Conf. Infrared and Millimeter-Waves, (Beijing, 2000, Sept. 12-15).
- 7 H. Hojo, S. Kubota, A. Itakura and A. Mase,
Ultrashort-Pulse Reflectometry and GAMMA 10 Experiments,
Japan/Korea Seminar 2000 "Advanced Diagnostics for Steady-State Nuclear Fusion Plasma", Gero-onsen, Gifu, Sept. 25-27, 2000.
- 8 K.Ishii,
Hump Structure on Energy Distribution Functions of End-Loss Ions Caused by AIC Fluctuations in the Tandem Mirror,
Workshop on Confinement and Stability of Alternative Fusion Concepts, (Varenna,Italy, 2000, October 12-16) (Magnetic Transport/Relaxation).
- 9 I. Katanuma, T. Ito, K. Shiotani, Y. Tatematsu, K. Ishii, T. Saito, K. Yatsu,
On the Ion Distribution Function around the Plug in a Tandem Mirror,
11th International Toki Conference on Potential and Structure in Plasmas, December 5-8, 2000, Ceratopia, Toki.

- 10 T. Saito, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, K. Ishii, M. Ichimura, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, Y. Tatematsu, K. Yatsu, M. Yoshikawa,
Axial and Radial Potential Structure and Current Flow in GAMMA 10,
11th international Toki conference on potential and structure in plasmas, (Dec. 5-8, 2000, Toki, Japan), V-1 (invited).
- 11 Y. Tatematsu, T. Saito, Y. Imaizumi, K. Nishida, E. Yokoyama, M. Ishikawa, K. Kajiwara, I. Katanuma, K. Yatsu,
Potential Study of GAMMA 10 End Region under Variation of End Plate Resistance,
11th international Toki conference on potential and structure in plasmas, (Dec. 5-8, 2000, Toki, Japan), PII-5.
- 12 K. Ishii, Y. Takemura, A. Fueki, M. Shimoo, K. Tsustui, I. Katanuma, A. Itakura, T. Saito, K. Yatsu.
Role of the Radial Potential Profile Control of the Core Plasma in the Tandem Mirror,
11th International Toki Conference on Potential and Structure in Plasmas,
(Ceratopia Toki, 2000, December 5-8)
- 13 A. Itakura, N. Goto, M. Katoh, Y. Kogi, S. Kubota, A. Mase, Y. Shima, M. Yoshikawa, H. Hojo, K. Yatsu,
Observation of electron Density Using Reflectometry,
The 5th Intern. Reflectometry Workshop, (Toki, 2001, Mar. 5-7).
- 14 H. Hojo, K. Nakayama, G. Uruta and A. Mase,
Two-Dimensional Simulation for Ultrashort-Pulse Imaging Reflectometry,
5th Int. Workshop on Reflectometry (NIFS, Toki, March 5-7, 2001).
- 15 T. Saito,
ECRH-induced currents and these effects on potential generation in GAMMA 10,
US-Japan Workshop on RF Physics FY2000, (March 22-24, 2001, Nara, Japan).
- 16 伊藤 透,
タンデムミラー GAMMA10 における高温イオン生成について,
「プラズマ科学のフロンティア」研究会, 2000年7月26日-28日 核融合科学研究所.
- 17 北條仁士, 飽本一裕,
レーザー・プラズマ相互作用におけるサブサイクル波の伝播,
日本物理学会第55回年次大会(2000年9月, 新潟大学) 25pXF7.
- 18 大沢美美子, 吉川正志, 李且烈, 安藤利得, 鎌田啓一, 増崎克,
IREB・プラズマ相互作用時のキャビトン電場によるヘリウム線の偏光の分光測定,
日本物理学会第55回年次大会(2000年9月, 新潟大学) 25pXF-1.
- 19 立松芳典, 斉藤輝雄, 今泉祐介, 西田啓一, 横山栄司, 際本泰士, 片沼伊佐夫,
谷津 潔,
磁場分布と第2高調波 ECRH による加熱パワーの吸収,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30aB5.

- 20 中山和徳, 北條仁士, 市村真,
イオンサイクロトロン周波数領域での速波の吸収電力計算,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館) 30aB14.
- 21 齊藤輝雄, 立松芳典, 今泉祐介, 西田啓一, 横山栄司, 石川正男, 小林進二,
吉田麻衣子, 石井亀男, 板倉昭慶, 長 照二, 谷津潔,
ガンマ 10 プラグ部第二アンテナによる電位形成の特性,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館) 30aB6.
- 22 今泉祐介, 齊藤輝雄, 立松芳典, 西田啓一, 横山栄司, 石川正男, 梶原健, 谷津 潔
ガンマ 10 における接地抵抗変化時のエンドプレート電位の解析,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB10p.
- 23 横山栄司, 齊藤輝雄, 立松芳典, 今泉祐介, 西田啓一, 中村基征, 市村真, 板倉昭慶,
谷津潔,
ガンマ 10 における AIC 波動の端損失電子への作用,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB11p.
- 24 太田百合子, 市村真, 茂木信二, 中村基征, 田中覚, 竿崎宗春, 角谷清臣, 川端敏毅,
及川正崇, 加納英和, 辻智之, 徳本公平, 西原伸太郎, 北條仁士, 板倉昭慶, 谷津潔,
ICRF 波動入射によるプラズマ計測 IV,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB14P.
- 25 加納英和, 西原伸太郎, 市村真, 田中覚, 中村基征, 竿崎宗春, 川端敏毅, 角谷清臣,
太田百合子, 及川正崇, 辻智之, 徳本公平, 北條仁士, 中嶋洋輔, 渡辺二太, 谷津潔,
GAMMA10 におけるイオンサイクロトロン高調波印加時の高エネルギーイオン測定,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB06P.
- 26 角谷清臣, 市村真, 田中覚, 中村基征, 竿崎宗春, 太田百合子, 川端敏毅, 及川正崇,
加納英和, 西原伸太郎, 徳本公平, 辻智之, 北條仁士, 谷津潔,
GAMMA10 における低周波磁場揺動の解析 II,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB02P.
- 27 竿崎宗春, 辻智之, 市村真, 田中覚, 中村基征, 太田百合子, 角谷清臣, 川端敏毅,
及川正崇, 加納英和, 徳本公平, 西原伸太郎, 小林進一, 吉川正志, 北條仁士,
中嶋洋輔, 犬竹正明, 谷津潔,
ガンマ 10 における光検出器を用いた巨視的不安定性の解析 II,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB04P.
- 28 川端敏毅, 加納英和, 西原伸太郎, 市村真, 中村基征, 竿崎宗春, 太田百合子,
角谷清臣, 及川正崇, 辻智之, 徳本公平, 齊藤輝雄, 中嶋洋輔, 谷津潔,
飛行時間型中性粒子分析器によるガンマ 10 アンカー部イオン温度測定 II,
プラズマ・核融合学会第 17 回年会(2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pB07P.

- 29 吉川正志, 岡本裕司, 河森栄一郎, 渡部力, 渡辺吉彦, 古川卓俊, 玉野輝男, 山口直洋, 谷津潔,
ガンマ10プラズマの不純物イオンスペクトルの測定,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30aA04.
- 30 渡辺吉彦, 吉川正志, 岡本裕司, 河森栄一郎, 小林進二, 吉田麻衣子, 渡部力, 古川卓俊, 久保田雄介, 清土桂一郎, 玉野輝男, 谷津潔,
2次元多チャンネルH α 線検出器を用いたGAMMA10プラズマ挙動の研究,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30pA22P.
- 31 渡部力, 吉川正志, 岡本裕司, 河森栄一郎, 渡辺吉彦, 古川卓俊, 長照二, 玉野輝男, 谷津潔,
軟X線分光器を用いたGAMMA10プラズマの不純物分光,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30pA23P.
- 32 古川卓俊, 吉川正志, 岡本裕司, 河森栄一郎, 渡辺吉彦, 渡部力, 久保田雄介, 清土桂一郎, 長照二, 谷津潔,
GAMMA10プラズマにおける可視紫外スペクトルの測定,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30pB09P.
- 33 石本祐樹, 中嶋洋輔, 石貫英一, 相良明男, 土屋勝彦, 庄司主, 小林進二, 網中洋明, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 深澤崇浩, 渡辺一浩, 谷津潔,
カーボンシートポンプを用いた高エネルギー粒子ビーム排気装置の検討,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 29pA30p.
- 34 名取尊良, 中嶋洋輔, 川崎陽子, 小林進二, 石本祐樹, 片沼伊佐夫, 網中洋明, 石貫英一, 織戸公成, 加藤達也, 深澤崇浩, 渡辺一浩, 谷津潔,
GAMMA10アンカー部磁場配位の最適化に関する研究,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30pB01p.
- 35 加藤達也, 中嶋洋輔, 渡辺一浩, 小林進二, 石本祐樹, 網中洋明, 石貫英一, 川崎陽子, 織戸公成, 名取尊良, 深澤崇浩, 大川和夫, 谷津潔,
ガンマ10アンカー部における中性粒子入射,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30pB03p.
- 36 石貫英一, 中嶋洋輔, 石本祐樹, 小林進二, 網中洋明, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 深澤崇浩, 渡辺一浩, 吉川正志, 谷津潔,
GAMMA10におけるECR放電洗浄時のプラズマポンピングの研究
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館) 30pB01p.

- 37 織戸公成, 中嶋洋輔, 庄司 主, 小林進二, 石本祐樹, 網中洋明, 石貫英一, 川崎陽子, 加藤達也, 名取尊良, 市村 真, 長 照二, 深澤崇浩, 渡辺一浩, 谷津 潔, ガンマ10セントラル部における密度上昇時のイオン温度計測,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pB08p.
- 38 網中洋明, 中嶋洋輔, 小林進二, 深澤崇浩, 石本祐樹, 石貫英一, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 渡辺一浩, 吉川正志, 河森栄一郎, 渡辺吉彦, 庄司 主, 谷津 潔,
ガンマ10アンカー部におけるH α 線分布計測,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pB12p.
- 39 川崎陽子, 中嶋洋輔, 名取尊良, 小林進二, 石本祐樹, 網中洋明, 石貫英一, 織戸公成, 加藤達也, 深澤崇浩, 渡辺一浩, 片沼伊佐夫, 谷津 潔,
GAMMA10極小磁場変換部における周辺プラズマ計測,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pB13p.
- 40 小波蔵純子, 長 照二, 平田真史, 沼倉友晴, 南 龍太郎, 渡辺裕之, 吉田麻衣子, 永嶋賢史, 伊藤浩一, 近藤 貴, 西谷健夫, 竹内 浩, 前澤秀樹, 谷津 潔,
半導体X線計測器に対する核融合反応生成ニュートロン照射の影響と評価実験,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pA17p.
- 41 沼倉友晴, 長 照二, 小波蔵純子, 平田真史, 南 龍太郎, 吉田麻衣子, 永嶋賢史, 渡辺裕之, 伊藤浩一, 織戸公成, 中嶋洋輔, 谷津 潔,
半導体検出器を用いた新しいイオン温度並びに電子温度空間分布の単一プラズマショット同時計測・解析法の開発,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pA18p.
- 42 南 龍太郎, 長 照二, 小波蔵純子, 平田真史, 沼倉友晴, 吉田麻衣子, 永嶋賢史, 渡辺裕之, 伊藤浩一, 吉川正志, 谷津 潔,
新型半導体X線計測器によるガンマ10セントラル部及びアンカー部の単一プラズマショット電子温度空間分布・時間変化計測,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pA19p.
- 43 吉田麻衣子, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 永嶋賢史, 伊藤浩一, 渡辺裕之, 沼倉友晴, 南 龍太郎, 谷津 潔,
新型イオン・スペクトル二次元計測器開発に拠る電位空間分布とプラズマ閉じ込めの相関の研究,
プラズマ・核融合学会第17回年会(2000年11月, 北海道大学学術交流会館)
30pA20p.

- 44 永嶋賢史, 長 照二, 吉田麻衣子, 平田真史, 小波蔵純子, 伊藤浩一,
沼倉友晴, 南 龍太郎, 谷津 潔,
高速電子照射下における新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 17 回年会 (2000 年 11 月, 北海道大学学術交流会館)
30pA21p.
- 45 吉川正志, 岡本裕司, 渡部力, 古川卓俊, 清土桂一郎,
ガンマ 10 プラズマの不純物イオンスペクトルの測定,
平成 12 年度 核融合科学研究所共同研究 研究会「プラズマ分光研究のフロンテ
ィア」 2000 年 12 月 14 日, 15 日 核融合科学研究所.
- 46 遠藤洋一, 立松芳典, 斉藤輝雄, 谷津潔,
ガンマ 10 における ECRH 用ジャイロトロンが発振安定化について,
平成 12 年度東北大学技術研究会 (2001.3.1-2, 東北大学川内記念講堂) P-246.
- 47 吉川正志,
VUV 分光器, SX 分光器の偏光に対する絶対感度較正,
偏光プラズマ分光の開拓と組織化, 2001 年 3 月 6 日, 7 日 (水) 核融合科学研
究所.
- 48 大東睦夫, 田中聡寛, 岩前敦, 藤本孝, 古川卓俊, 吉川正志, 玉野輝男,
GAMMA10 タンデムミラー型プラズマに対する偏光分光実験,
日本物理学会第 56 回年次大会 (2001 年 3 月, 中央大学多摩キャンパス) 28pXH12.