

VIII プラズマ

VIII-1 ガンマ10グループ

教授	谷津 潔、玉野輝男、長 照二
助教授	石井亀男、北條仁士、斉藤輝雄
講師	板倉昭慶、中嶋洋輔、近藤（平田）真史、立松芳典
助手	吉川正志、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	（46名）

共同研究者

助教授	間瀬 淳、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	（13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。電位閉じ込めの維持時間は、電位形成用マイクロ波電源のパルス幅で75msに制限されていた。このパルス幅を、100msに延長するとともに、バリアー部のマイクロ波をプラグ部に移して、二つのパルスを時間的に連続して入射することにより、電位閉じ込めが150ms間維持された。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。アンカー部中性粒子ビームは、これまで中性粒子ビーム源から流入するガスのために効果を出せなかったのであるが、ガスの流入量を減らすように真空容器を改善することにより有効となり、アンカー部とともにセントラル部の密度上昇も達成されたものである。電位閉じ込めの改善に関しては、電位閉じ込めによる密度上昇125%が前年度に達成され、更なる上昇を目標に実験を進めたのであるが、125%以上の上昇は達成出来なかった。これまでの閉じ込め改善は、プラズマ加熱の軸対称化とアンカートランジション部への導体壁の設置で達成されたものであるが、更なる改善を行うためには新しい考えの導入が必要である。

教育では、物理学研究科大学院生16名、理工学研究科大学院生18名、自然科学類4年の卒業研究生13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7名、基礎工学類4年の卒業研究生3名、ならびに研究生1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。また、韓国の韓国基礎科学研究所とも研究者交流を行い、共同研究が進展した。同研究所とは、学術交流に関する協定を締結することで合意しており、手続を開始している。

【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、電位閉じ込めの長時間維持、プラズマの高密度化において進展が得られた。電位閉じ込めの改善では、前年度に達成された125%以上の上昇を目標に実験を進めたのであるが、これ以上の上昇は達成出来なかった。これまでの閉じ込め改善は、プラズマ加熱の軸対称化とアンカーランジション部への導体壁の設置で達成されたものであるが、更なる改善を行うためには新しい考えの導入が必要である。電位閉じ込めの維持時間は、電位形成用マイクロ波電源のパルス幅で75msに制限されていた。このパルス幅を、100msに延長するとともに、バリアー部のマイクロ波をプラグ部に移して、二つのパルスを時間的に連続して入射することにより、電位閉じ込めが150ms間維持された[1]。図1は電位閉じ込めを150ms間維持した時のセントラル部線密度と電位の時間変化を示す。電位が維持されている間、プラグ電位とサーマルバリアー電位はセントラル部の電位に対してそれぞれ250Vと-300Vが維持された。このショットでの電位閉じ込めによる密度上昇は50%である。大きな密度上昇を達成するためには、プラズマ生成条件の制御が必要であり、長時間維持のためには、その間に変化するプラズマ条件に合わせて運転条件を制御する技術の開発が必要となる。プラズマの高密度化に関しては、新しく導入した36-76MHz ($\omega/\omega_{ci}=6-12$; ω は発振器周波数、 ω_{ci} はセントラル中央部のイオンサイクロトロン周波数)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。アンカー部中性粒子ビームは、これまで中性粒子ビーム源から流入するガスのために効果を出せなかったのであるが、ガスの流入量を減らすように真空容器を改善することによりアンカー部の密度上昇に有効となり、アンカー部とともにセントラル部の密度上昇も達成されたものである。これまでセントラル部の反磁量を維持しながらセントラル部の密度を変えることが困難であったが、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。

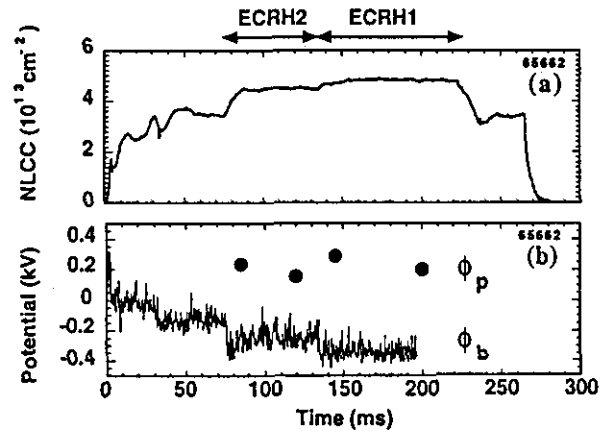


図1 (a)セントラル部線密度波形。(b)プラズマ閉じ込め電位 (ϕ_p) とサーマルバリアー電位 (ϕ_b) の時間変化。

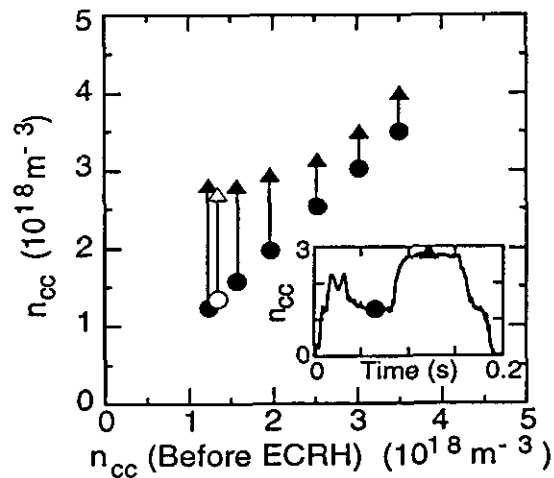


図2 ECRH 印加前(●)とECRH 印加中(▲)の中央部電子密度(n_{cc})の ECRH 印加前電子密度に対するプロット。白抜き記号は前回の IAEA 会議で報告したものである。ECRH:140kW/plug.

[1] T.Saito, et al., IAEA TCM on ECRH Physics and Technology for Fusion Devices, October 4-8, 1999, Oh-arai, Japan.

【3】ガンマ 10 タンデム・ミラーで 今までに達成された代表的プラズマの一般化された比例則

本論文では、ガンマ 10 タンデム・ミラーの現状を報告するとともに、これに基づく新たな核融合エネルギー開発への道筋を構築する目的で、ガンマ 10 で今までに達成された代表的プラズマに対する、統合され一般化された統一比例則と今後の展望について報告する。ガンマ 10 の 1979 年から 2000 年に互る主要なタンデム・ミラー・プラズマは、(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, 2]、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」[3, 4] に大別することができる。

第 1 図に、タンデム・ミラーに対し、最も本質的な比例則の一つである「電位生成に関する比例則」を示す。即ち、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、高電位モード（第 1 図 a）、並びに高温イオン・モード（第 1 図 b）について示す。両モードの比例則双方ともに、類似した熱輸送障壁電位 ϕ_b の増大に伴う、著しい ϕ_c の増大が見られる。しかしながら、プラグ部と、セントラル部密度の比 n_p/n_c に対して、両図では異なる数値依存性を持つように見える。（データは、図中の n_p/n_c 領域内に夫々存在する。）これら二つの代表的プラズマ・モードで、もしもこれらに潜在する共通の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今回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[2]）」が新たに得られた。第 1 図 c に、a、b 図のデータと共に、予想される三次元平面表示を行う。データと本拡張理論の良好一致が見られる。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。加えて、この理論拡張の妥当性は、X 線計測に基づくプラトー状電子速度分布関数の両モードに対する新たな発見に拠り、更に裏付けられた。

「熱輸送障壁電位 ϕ_b の増大に伴う T_e の増加に関する比例則」を、高温イオン・モードを例にとり、第 2 図に例示する。ここに図中の実線並びに破線は、バスツコフの電位閉じ込め理論[2]から予想される閉じ込め時間を用いた、エネルギー並びに粒子バランス計算から求めたものであり、実験データとの良好一致を見ることができる。この事は、電子エネルギー並びに粒子閉じ込め性能が、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電位が寄与している事を、新たに定量的に明らかにしたものである。同様な比例則は高電位モードでも得られ、 T_e が 250 eV まで ϕ_b とともに上昇して行く事が示された[1]。この T_e 或いは ϕ_b の値は、電位生成用 ECH 電力の最大値 150 kW で制限されており、更にはこの時にセントラル部電子の直接の追加熱は行われていない。

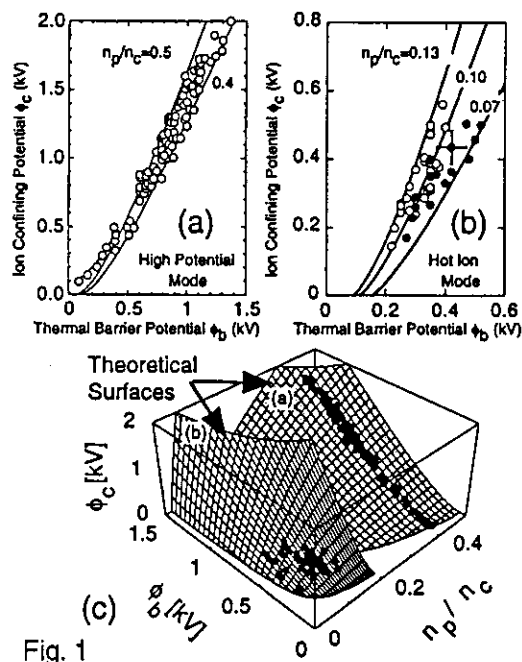


Fig. 1

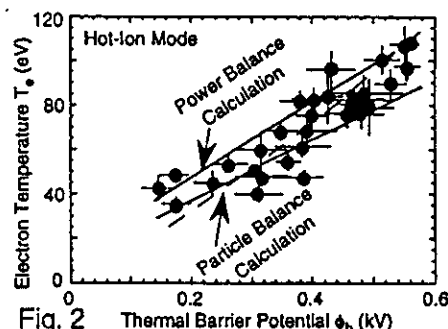


Fig. 2

最近のガンマ 10 実験では、プラズマ・パラメータの密度依存性を研究しており、第 3 図に実験データを示すと共に、外部制御可能なパラメータであるプラグ部 ECH 電力 P_{ECH} [kW] 及び n_e [10^{18} m^{-3}] の関数として、 $\phi_c = 1.73 \times 10^{-4} P_{ECH}^{1.73} \exp(-0.33 n_e)$ なる、 ϕ_c [kV] 或いは ϕ_b に対する比例則（第 1 図扱い ϕ_c は ϕ_b に変換できる）を、データと対応する n_e を代入した実線に拠り示す。（尚、 n_p/n_e は、バリアとなる ϕ_b 或いは P_{ECH} の増大と共に、実線に沿っては徐々に減少する。）この比例則からも、プラズマ閉じ込め電位の更なる向上が、現在のジャイロトロン最大電力 200 kW より大きな電力の使用に拠り期待できる事が分かる。尚、タンデム・ミラーの歴史に於いて、200 kW 以上の ECH 電力が入射された実験は皆無である。

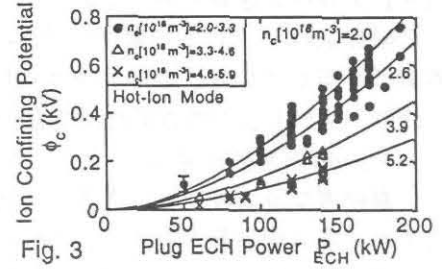


Fig. 3

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もしも仮定するならば、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。即ち以下に整理する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_e で、 $\phi_c = c_1 f_1(T_e, \phi_b, n_p/n_e)$ なる関数 f 、定数 c を用いて記述できる][5]、(ii) ϕ_b の T_e への効果に関する比例則 [即ち、 $T_e = c_2 f_2(\phi_b)$][2]、(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 $\phi_b = c_3 f_3(P_{ECH}, \text{and } n_e \text{ or } n_p/n_e)$]、更に、(iv) ϕ_c , ϕ_b , T_i , T_e 及び n_e に対するバスコフの比例則[6]。以上の様に整理できる。

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 $\phi_c = c_4 f_4(P_{ECH}, n_p/n_e)$ が得られる。第 4 図の、以上の電位生成の総合比例則の検討から、例えば、30 kV の ϕ_c は n_p/n_e が 0.3 の時、5 MW の ECH 電力で生成できることが予想される。他方、バスコフ理論に拠り 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、将来比例則に沿うとすれば、30 kV 領域の ϕ_c の生成は、タンデム・ミラー核融合のパラメータ領域への進展の可能性に対応する。今後は、高電位、高温イオン・モード夫々で実現されたプラズマ・パラメータ領域で確立された知識や、理論に裏付けられた比例則を基に、更なる比例則・パラメータの伸長・有効性の検証の研究に、着実に一步一步挑んで行きたい。

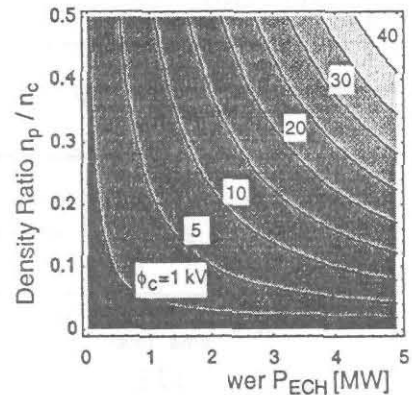


Fig. 4

- [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] T. Cho et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 1373 (1990); Phys. Rev. A **45**, 2532 (1992).
- [3] T. Tamano et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 15th Int. Conf. Seville, 1994) Vol. 2, IAEA, Vienna (1995) 399.
- [4] K. Yatsu et al., Nucl. Fusion **39**, 1707 (1999).
- [5] R. H. Cohen, Phys. Fluids **26**, 2774 (1983).
- [6] V. P. Pastukhov, Nucl. Fusion **14**, 3 (1974).

【4】アルペン速波を用いたプラズマの高密度化

GAMMA10における初期プラズマの生成・加熱は、イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の高周波を用いている。プラズマ生成ICRF(RF1)は、9.9MHzと10.3MHzの2つの周波数を用いており、セントラル部の両端に設置したアンテナより印加される。プラズマ加熱ICRF(RF2)は、6.36MHzの周波数を用いて、セントラル部中央付近でのイオンサイクロトロン共鳴加熱を行なう。高密度プラズマ生成の観点からは、RF1の周波数はイオンサイクロトロン周波数に比べてはるかに高い周波数が適する。しかしながら、RF1は、同時に隣接するアンカー部のイオン加熱を担っており、周波数はアンカー部中央付近のイオンサイクロトロン周波数に制限されている。このことを解決する為に、平成11年度には、周波数領域が36MHz～76MHzの発振器(RF3)が新たに導入された。RF3を用いた高密度プラズマ生成実験の初期的データを図1、2に示す¹。RF3の周波数は、セントラル部中央のイオンサイクロトロン周波数の約10倍に相当する63MHzに設定した。図1は、セントラル部の線密度波形であり、RF1を用いて典型的に形成されるプラズマにRF3を印加することにより、線密度が増大することを示している。この実験配位では、ガスパフ量及びRF1の電力を増大させても密度は増大せず飽和する傾向にある。図2は、セントラル部線密度のRF1電力依存性を示している(図中白丸)。同時にRF1の電力を180kWに固定して、RF3電力を増大させた場合の線密度をプロットした(図中黒丸)。RF3電力の増大とともに、線密度は急激に増大する。線密度の径方向分布測定より、RF3印加による密度は中心部で増大することが示されている。また、RF3印加時に高エネルギーイオンの増大が観測されており、高調波共鳴加熱が示唆される。RF3発振器の調整を進め、最大出力200kWでの密度増大の達成が今後の課題である。

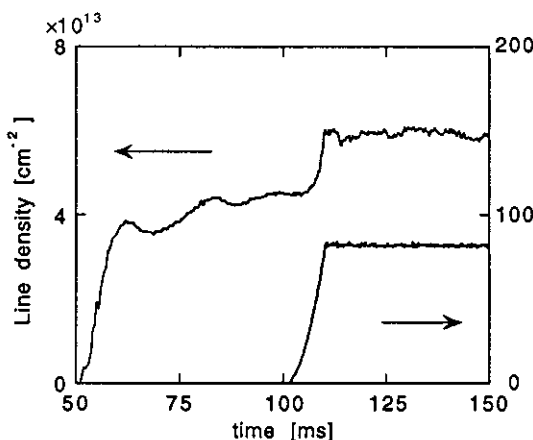


図 1

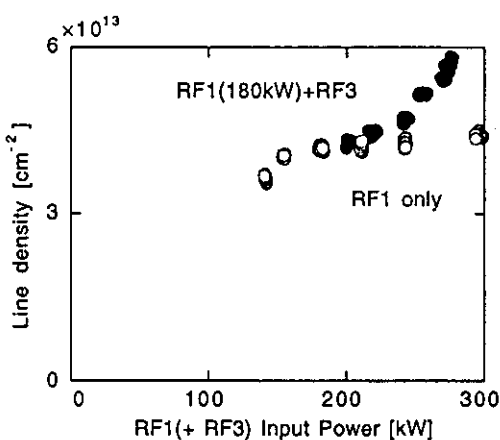


図 2

【5】セントラル部におけるアルペン固有モードの形成

RF2によるセントラル部イオン加熱の結果、磁力線に対して垂直方向と平行方向の温度が著しく異なる、温度非等方性の大きいプラズマが生成されている。ベータ値が高く温度非等方性の大きなプラズマでは、アルペンイオンサイクロトロン(AIC)波動が自発的に励起される。AIC波動は、イオンサイクロトロン周波数の0.9倍付近に、離散的なピークを持つ固有モードであり、この離散的なピークに関しては、空間的構造が既に明らかとなっている²。径方向、方位角方向には同じ構造を持ち、軸方向の波数が異なる固有モードである。この離散的なピークを持つAIC波動の特徴は、セントラル部中央より離れた位置($z=1.1\text{m}$)でその軸方向の波数を測定した時、時間と共に有限の値から0に漸近することである。軸方向に並んで設置された2本の磁気プローブ信号間の位相差が0または π になることは、軸方向に定在波が形成されていることを意味しており、時間と共に変化するプラズマパラメータにより、観測位置($z=1.1\text{m}$)が定在波領域に含

まれたことを示すと考えられる。セントラル部にAIC波動が定在波として形成されることを顕著に示すデータとして、セントラル部各部において測定した2本の磁気プローブ間の位相差を図3に示した。図3(a)は、中央から約1m離れた位置における位相差であり、最初有限（伝搬波を意味する）であった各々のモードの波数が、時間と共に0となることを示している。図3(b)は、より中央に近い位置における2本のプローブの位相差である。図3(a)と比べた時、AIC波動が励起されると同時に位相差は、0または π を示しており、すでに定在波となっていることがわかる。図3(c)では、(b)とほぼ同じ軸方向位置であるが、時間の経過と共に一つのモードの位相差が0から π に移動して、2本のプローブ間を定在波の節が通過したことを示している。また、図3(d)は、セントラル部両側に隣接する磁場変換部に設置したプローブとの位相差を示しており、有限の値で時間的に変動する様子が示されている。図3より、AIC波動は、セントラル部の中央付近から、定在波を形成しながら時間と共に軸方向に広がり、現在のプラズマパラメタでは、その定在波領域はセントラル部に局在すると解釈できる。

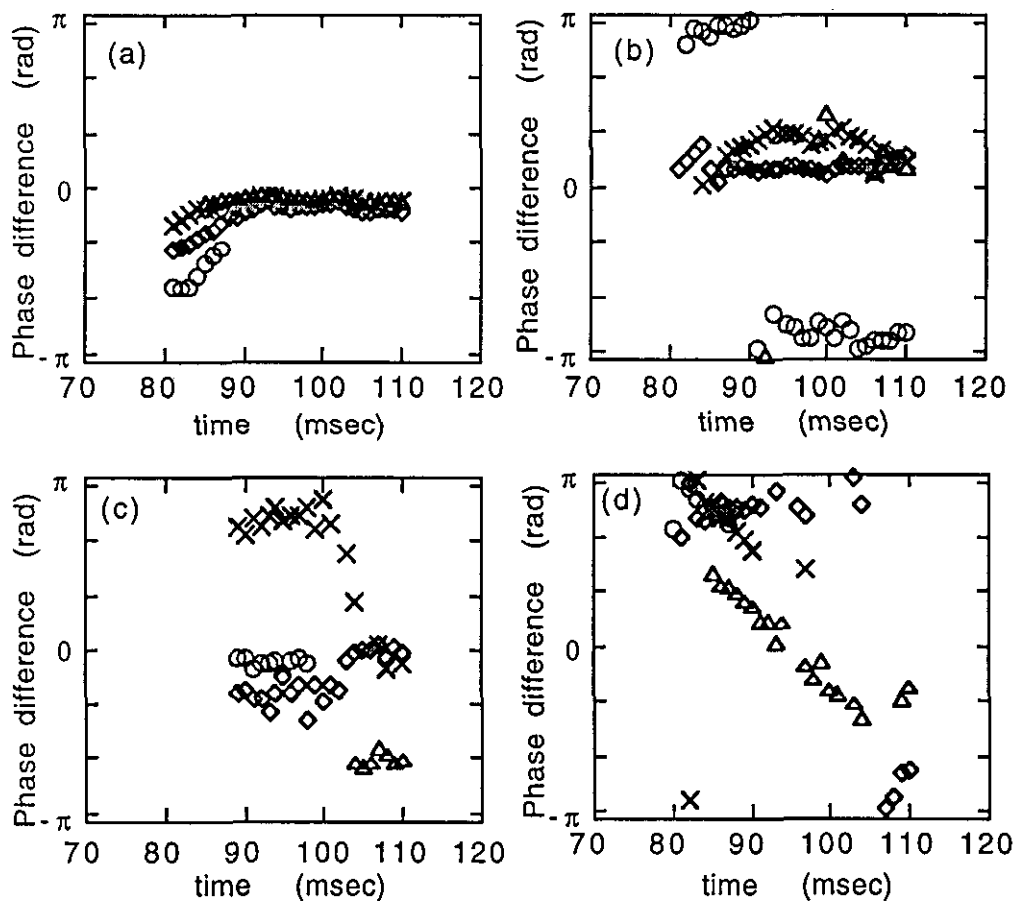


図3

【6】アルベンイオンサイクロトロン波動による高エネルギーイオンの散乱

強いイオン加熱によりAIC波動が励起される時、エンド部で観測される高エネルギー損失イオン信号(eeHED)の強度は、励起されたAIC波動強度と強い相関を持つことが明らかとなっている。セントラル部内の捕捉イオンの振舞を詳細に調べるために、高エネルギーイオンのピッチ角分布測定が可能である検出器(ccHED)を設置した³。図4にccHED信号の時間的振舞のピッチ角分布依存性を示す。ピッチ角90度では、加熱が進み非等方性が上昇するとともに、高エネルギーイオンが生成され、その強度は急激に上昇するが、AIC波動が励起され非等方性が飽和

する時、減少を始める。90度より小さなピッチ角では、同じく最初はその強度が上昇し、その後飽和するか徐々に増大を続けることが示されている。セントラル部で観測される高エネルギーイオンのピッチ角分布を含めた各パラメタの時間変化の特徴から、以下のことを議論することができる⁴。反磁性量が上昇する時間帯において、高エネルギーイオン信号のピークに達する時刻は、ピッチ角が小さいほど早い。このことは、時間と共にピッチ角の大きい粒子の数が相対的に増大する事を示しており、加熱による非等方性の増大を表している。信号が時間的にピークに達する時、反磁性量の値をピッチ角に対してプロットしたものが図5である。ピッチ角が大きいほど反磁性量が大きい時刻でピークに達することが示されている。また、ピーク値とピークに達した後5msecの値との比率をプロットしたものが図6である。ピッチ角が大きいほどAIC波動励起による減少率が大きいことが示されている。波動による散乱により非等方性が減少する事を表している。

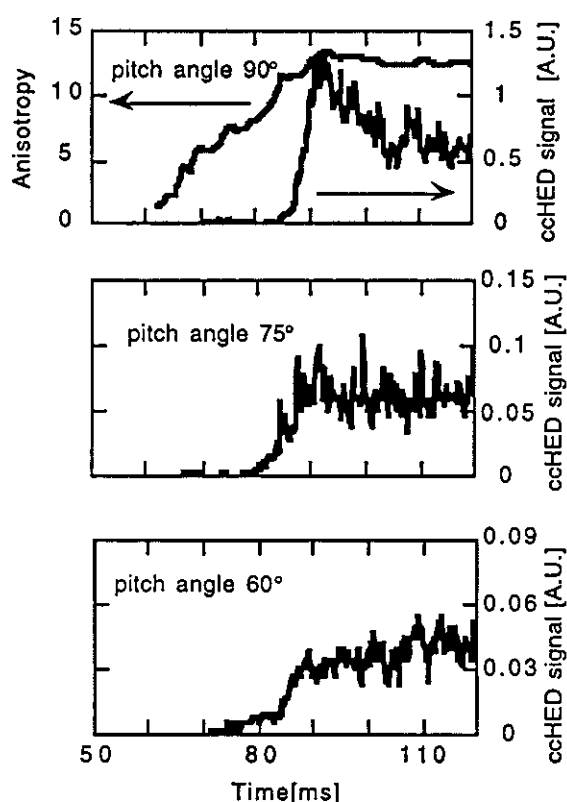


図4

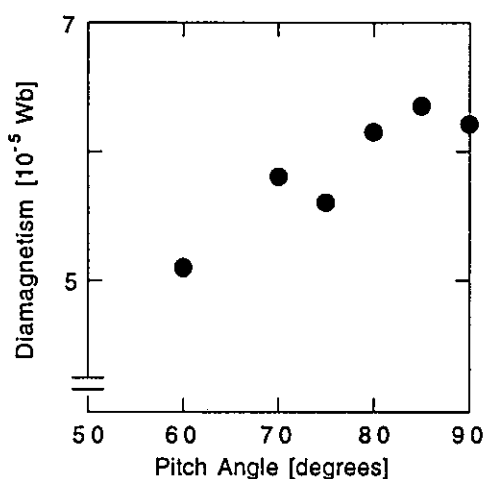
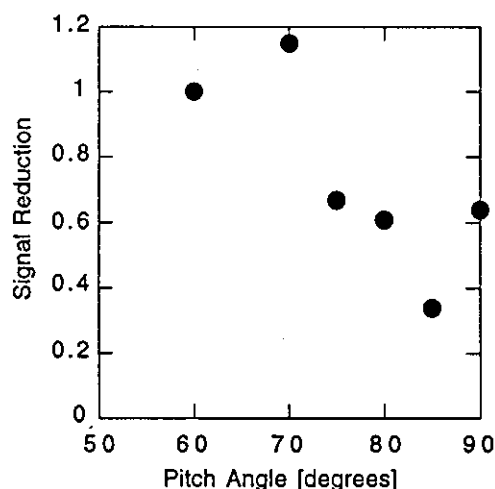


図5



参考文献

1. 中川智博、他 「GAMMA10における高周波 ($\omega/\omega_{ci} > 10$)を用いた高周波プラズマ生成」 プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA4p
2. R.Katsumata, et al., 'Eigenmode excitation of Alfvén ion cyclotron instability' Phys. Plasmas 3, 4489 (1996).
3. M.Ichimura, et al., 'Behaviour of high energy ions in the GAMMA 10 tandem mirror' Rev. Sci. Instrum. 70, 834 (1999).
4. 坂田勝亮、他 「GAMMA10における半導体検出器を用いた高エネルギーイオン測定Ⅱ」 プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA3p

【7】 ガンマ10 プラグECRH用新アンテナの導入 [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。最近、電子加熱の軸対称度がプラズマ閉じ込めの総合性能の向上に非常に重要であることが認識され、電子加熱用のマイクロ波を放射するアンテナの改良を進めている。この改良によりプラズマ閉じ込めの改善が見られているが、一方で、加熱領域を広げたことにより加熱の電力密度が低下した。また、最長75 msの既設ECRH用マイクロ波源(ジャイロトロン)のパルス幅では、タンデムミラーの定常化実験のためには不足である。そこで、これらの制約を緩和するため、ECRH用アンテナを増設した。このアンテナには、既設ECRH用ジャイロトロンとは独立のジャイロトロンからマイクロ波電力が供給され、両者の重畳あるいは連続印加が可能である。

図1に、新アンテナの設置位置を示す。プラグ部周辺スペースの制約のため、装置端部の強磁場発生用コイル内に新アンテナを設置している。このため、導波管の途中でマイターバンドにより90度方向を変えている。ジャイロトロンの発振モードであるTE02モードではマイターバンドの効率が悪いので、その前に階段型モードコンバータを挿入し、TE01モードに変換している。

このアンテナはマイターバンドの使用、また、磁力線に対するマイクロ波の入射角が直角からずれているので効率のよい電子加熱につながるXモードへの結合率が低いことが等のため、必ずしも電子加熱の効率が低いことが予想された。そこで端損失電子束の実効温度と熱流束を指標として、このアンテナによる電子加熱の特性を調べた。同じジャイロトロン電力で比較すると、いずれも既設アンテナを用いた場合の約50%と、ほぼ当初の予想通りであった。今後、この値を上げるために努力が必要である。

また、当初予想しなかったこととして、図2に示すように新アンテナによるECRH (ECRH 2) は既設ECRH (ECRH 1) より、総合的な閉じ込め改善効果が高いことを示唆する結果を得た。図の上図はガンマ10中央部の線密度の時間変化、下図は装置端に流出するイオン束である。ECRH 2の印加と同時に線密度が大きく上昇している。このとき、端損失イオン束は線密度の上昇に追従している。これは、径方向への損失が新たに誘起されていないことを示している。一方、既存のECRH 1の印加中は端損失イオン束が大きく減少したままであるが、線密度はわずかに増加していない。これは、既設アンテナを用いると、径方向損失が誘起されることを示すものである。両アンテナの特性の違いを調べ、プラズマ閉じ込めの総合性能を向上させることが重要な課題である。

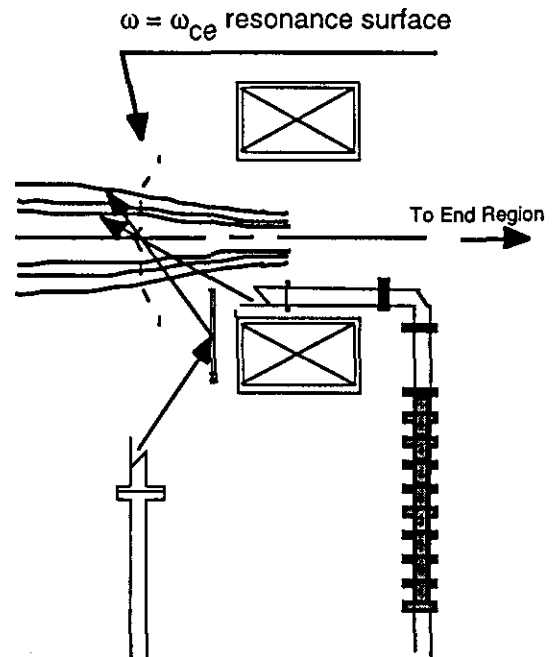


図1 新アンテナの設置位置

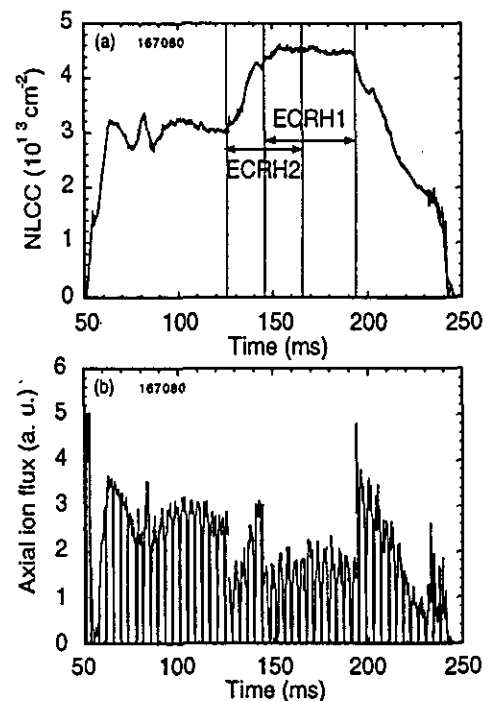


図2 新アンテナの閉じ込め改善効果

[1] T. Saito, Y. Tatematsu et al., Fusion Engineering and Design (2000). in press.
善効果

【8】 電子加熱の最適化による密度上昇と長パルス電位形成実験 [1]

前項で述べたようにガンマ1では現在、イオン閉じ込め電位（プラグ電位）形成用ECRHのアンテナを改良し、総合的な閉じ込め性能の向上に向けた実験が進行中である。アンテナ改良のポイントはプラグ部共鳴加熱領域（ $B = 1\text{T}$ ）に射影したマイクロ波放射パターンを軸対称化することである。しかし、加熱分布が装置に中心軸に大して対称になっていないと、形成される電位分布が非軸対称になり、総合的な閉じ込めの改善に結びつかない。よって、マイクロ波の放射方向を注意深く調整する必要がある。そのため、改良されたアンテナは角度可変の反射鏡により放射方向を調整できる機構になっている。

図1は、ECRH印加に伴う電位形成中、ガンマ10中央部の線密度上昇率が放射方向の調整に大きく依存することを示す。図の横軸は反射鏡の角度で、縦軸は中央部線密度の上昇率である。同時に、ビームプローブで測定されたプラグ部に隣接するバリア部の2次元電位分布から求めた、電位の軸対称度もプロットしてある。これから、マイクロ波の放射領域を注意深く調整し、装置の中心軸に対して対称性のよい電子加熱を行うと電位分布が軸対称になること、そしてそのとき、ECRH印加中、中央部の線密度が大きく上昇し、閉じ込めが改善されることがわかる。

アンテナ改良は、先ず放射分布を軸対称化することに主眼をおいていた。しかし、加熱分布は電位分布を大きく変えるから、単なる軸対称化以上にその形状も制御する必要があるだろう。径方向損失の誘起を出来る限り小さくする電位分布を理論的に予想し、その電位分布を実現する電子加熱分布に近づけていくのが、今後の重要な実験的課題である。

プラズマの性能評価では、定常状態になっているかどうか重要な要素である。これまでガンマ10では主として電源の制約により、プラグングの最長時間は75 msであった。そこで、出来るだけ長時間のプラグ電位維持のため、前項に示した2つ目のアンテナ（ECRH2）を用い、これまでのアンテナによるECRH1との重畳あるいは連続加熱ができるようにした。マイクロ波源は独立のジャイロトロンである。これにより、電源によるパルス幅、加熱電力の制限が緩和され、例えば、図2に示すように、150 msにわたる電位閉じ込めの持続が実現している。

[1] 斉藤輝雄 他、プラズマ・核融合学会第16回年会（1999年11月仙台）：25aA

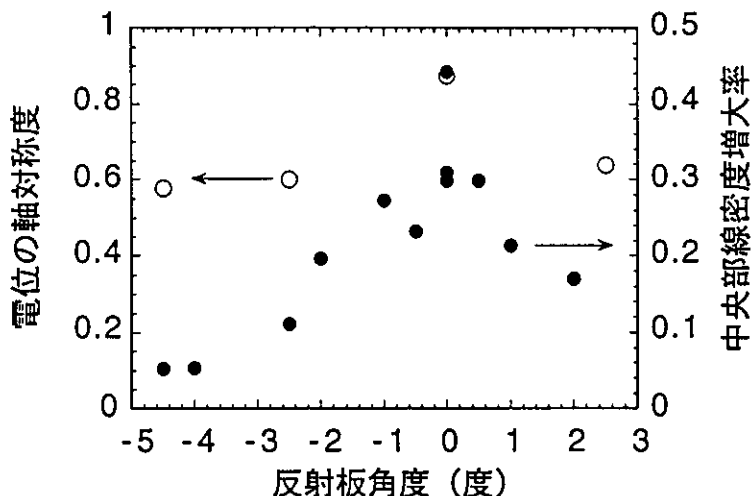


図1 反射板角度と線密度上昇率

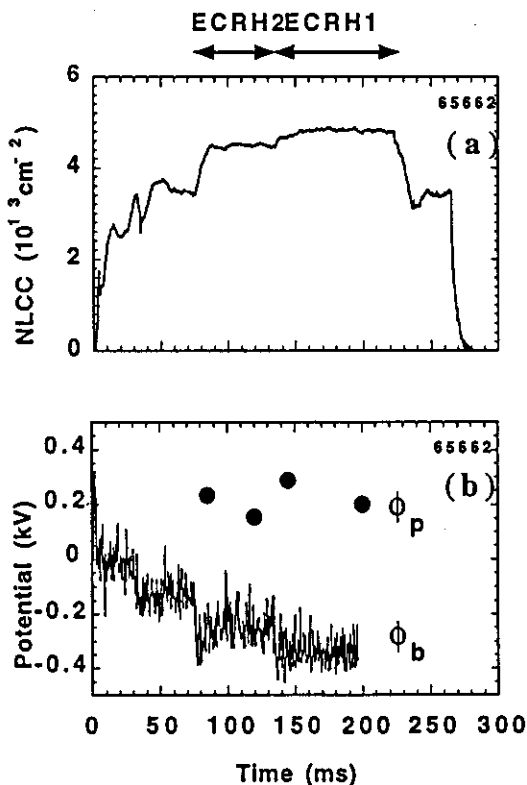


図2 両ECRHの連続印加による長時間プラグング

【9】 ガンマ10アンカー部における導体壁を用いたプラズマ制御

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置では、装置端部からのプラズマ損失（軸方向損失）を低減するため、電位に拠るプラズマ閉じ込めを研究してきた。近年、電位形成に伴う顕著なプラズマ密度の上昇が観測されるようになり、電位による軸方向閉じ込めを実証した。その際に、磁力線に垂直（径方向）への損失機構についても着目されるようになり、その原因として磁場構造が複雑であるアンカー極小磁場部における径方向粒子損失が検討され始めた。そこで、アンカー磁場とセントラル部、プラグ／バリア部の磁場を接続する極小磁場変換部に導体壁（アンカープレート）を設置し、それを用いてプラズマ閉じ込め性能の改善を試みている。

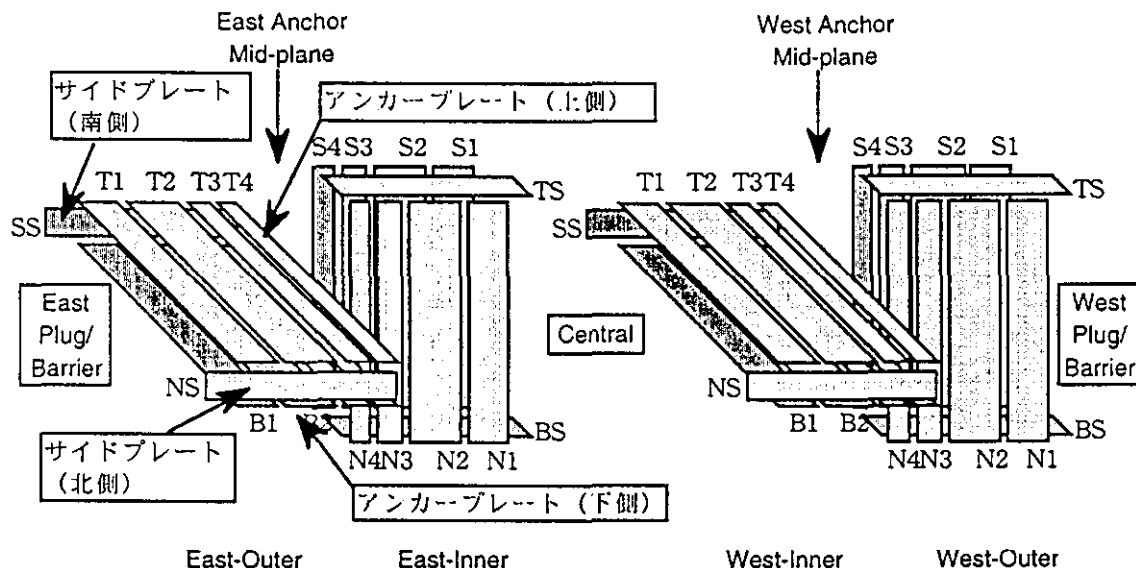


図1 アンカー電極板の概略図

アンカープレートは、図1に示すように、東西のアンカー部の両側（外側・内側）にある極小磁場変換部に、GAMMA10全体で40枚がプラズマを取り囲むように取り付けられており、それぞれはお互いに電氣的に切り離されている。それぞれのアンカープレートは任意の値の抵抗を介して接地されており、外部回路により抵抗値を1Ω、100Ω、10kΩ、1MΩと変更したり、アンカープレート間の電氣的な接続状態を簡単に変更したりできるようにした。また、この回路によりアンカープレートの浮遊電位、アンカープレートに流れ込む電流を計測する事も可能であり、各アンカープレートの状態を把握する事が出来る。さらに、アンカープレート上に、バイアス電圧を印加することで飽和電流を計測することができる静電プローブアレイと、熱流計測のための熱電対アレイを設置し、アンカープレートへの径方向損失の状態を調べた。

本実験では、アンカープレートの接地抵抗を変化させて、プラズマの巨視的パラメータがどの様に変化するかを調べた。ここでは、抵抗値が1Ω、100Ωの時（Groundモード）と10kΩ、1MΩの時（Floatingモード）の2つの状態を取り、Floatingモードの時にセントラル部プラズマの線密度・反磁性量の大幅な増大が見られることがわかった。図2にその典

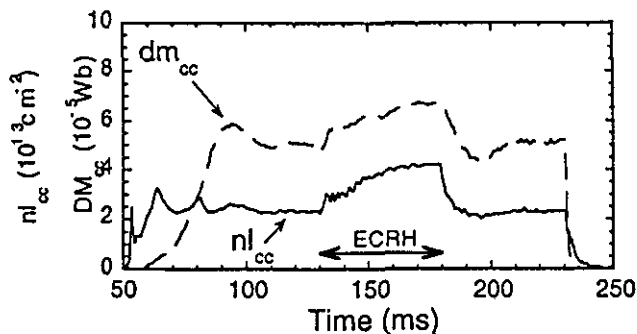


図2

型的な一例を示す。この時静電プローブによるイオン飽和電流計測から、サイドプレートに損失するイオン飽和電流も減少している事がわかった。

次に各アンカープレートがお互いに電氣的に切り離されている状態（独立 Floating モード）から接続した状態（接続 Floating モード）へと接続状態を変更すると、線密度・反磁性量の増大幅は小さくなり、イオン飽和電流は増大し、Ground モードに近い状態になる事がわかった。Ground モードも各プレートが電氣的に接続されているという点では接続 Floating モードと同じと考えれば、「各プレートを電氣的に切り離す」という事が、線密度・反磁性量の大幅な増大を得る条件であると考え、各プレートを電氣的に接続したときにプラズマによってプレート間に流れる電流が、径方向閉じ込めを劣化させると考えた。そこで、接続 Floating

モード時に、各プレート間を流れる電流量の推定を行った。図3にその推測結果の概要を示す。1A程度の電流が、メインプレートからサイドプレートに流れていることがわかった。

次に、電位モードが独立 Floating モードであっても、アンカープレートの設置位置を変えることで、セントラル部プラズマの線密度・反磁性量の増大幅が変化する「アンカープレート設置位置変更実験」に着目した。この結果より、アンカープレートが他から電氣的に切り離されていて、プラズマからの正味の損失電流が0であっても、イオン・電子の損失量が同時に増大したり、減少したりして径方向損失量変動すると考え、これを損失熱流計測より検証した（図4）。最後に周辺プラズマとアンカープレートの位置関係について磁場計算をもとに考察し、対向するプレート間隔を広げることで周辺

プラズマとアンカープレートの間隔が2倍程度に広がることがわかり、これによりアンカープレートと周辺プラズマの相互作用が小さくなって径方向閉じ込めが劣化したと考えられる。

以上の結果をまとめると各アンカープレートを電氣的に切り離し、プラズマによりプレート相互に流れる電流を抑制し、また、アンカープレートを周辺プラズマから適切な距離に設置する事が、径方向閉じ込めの改善を実現する上で重要であると言える。

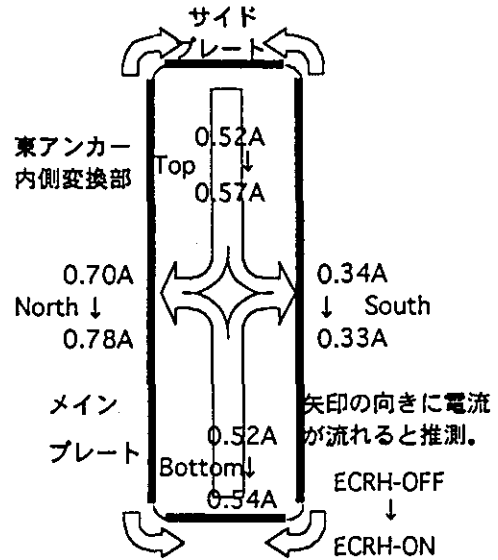


図 3

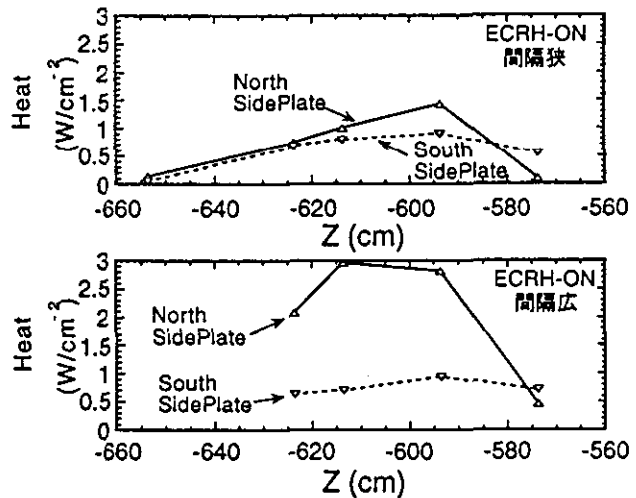


図 4

- [1] 中嶋洋輔 他、第2回核融合エネルギー連合講演会予稿集 1998年6月、A38 pp.80
- [2] 佐藤大輔 他、プラズマ・核融合学会 第15回年会予稿集 3aA2p, p.224.
- [3] ISLAM Md. Khairul 他、プラズマ・核融合学会 第15回年会予稿集 3aA3p, p.225.
- [4] 佐藤大輔 他、プラズマ・核融合学会 第16回年会予稿集 23pC16p, p.76.

【10】 極小磁場部における周辺プラズマのプロープ計測

磁場閉じ込めで核融合の実現を行うために、プラズマの粒子輸送過程を知ることは、より良い閉じ込めを行うために重要である。本研究ではアンカー部におけるプラズマの径方向輸送について調べることが目的として、磁力管が楕円形になる極小磁場変換部において、プラズマ形状を計測する静電プローブを設置し、周辺プラズマの計測を行った。

計測を行った領域における、磁力管に対する計測位置を図1に示す。磁力管は r_{cc} （セントラルセル換算径方向距離）= 8, 10, 12, 14, 16 cm のもので、 r_{cc} 16 計測とは $x=0$ で $r_{cc}=16$ cm の磁力管位置における x 方向分布計測と定義する。

この領域でのイオン飽和電流分布は、図2に示すように、 x 方向マイナス側に大きくなるという y 軸に対して非対称な測定結果となった。この非対称性と電子温度の分布に相関がないことから、主にプラズマの密度分布が非対称になっていることがわかる。さらに、 r_{cc} 8 での分布形状に対して、周辺部である r_{cc} 16 の分布の方が非対称になっている。

プローブ計測より、 r_{cc} 8 の分布形状に対して周辺部プラズマである r_{cc} 16 分布の方が非対称であることから、極小磁場変換部でのプラズマ形状が磁力管と一致しない現象の要因を、磁場勾配によるドリフトであると推測した。アンカー部における磁場形状は複雑な形状をしており、手計算ではドリフト方向及び速度を求めることは困難であることから、イオンの軌道計算コードを作成した。

極小磁場変換部のプラズマは、セントラル部、プラグ・バリア部、アンカー極小磁場部より流入するものと、変換部ミラー磁場に捕捉されたプラズマにより構成されている。よって、軌道計算開始位置をセントラルスロート、バリアスロート、アンカー極小磁場中心にとった。その結果得られた、プローブ計測位置付近の磁力管に対するイオン回旋中心位置を、図3に示す。アンカー極小磁場変換部の非対称性は、アンカー極小磁場部より流出するイオンドリフト方向とよく一致する。このことから、極小磁場変換部では、アンカー極小磁場部より流出するプラズマが支配的であると考える。

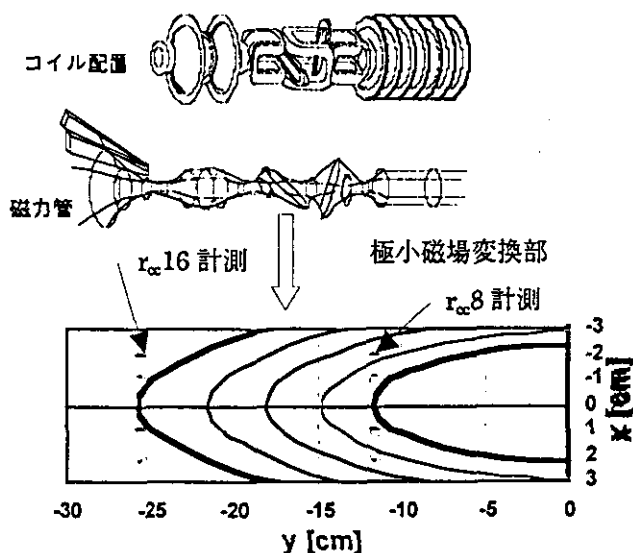


図 1

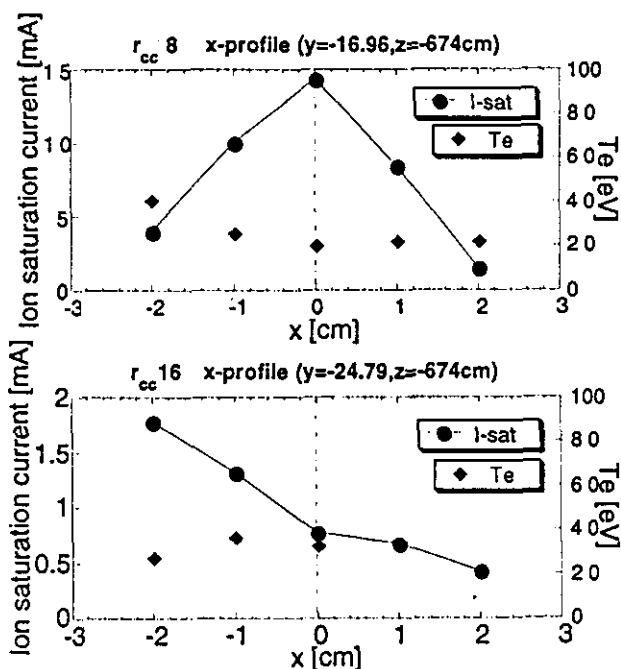


図 2

また、ブラグ・バリア電位形成時や、外側変換部可動式リミター（MLO）の効果を取り除くことにより対称性がよくなる計測結果も得られており、それもブラグ・バリア側から流入するイオンのドリフト効果で説明することができた。

アンカー極小磁場変換部でのプローブ計測結果から、判明したプラズマと磁力管とのずれは、イオンの軌道計算を行った結果、アンカー極小磁場部より流出するイオンのドリフトとよく一致した。さらに、ブラグ・バリア電位形成時における、ブラグ・バリア側からのプラズマの流入が増加した時の変化も軌道計算結果より説明でき、アンカー極小磁場変換部での非対称性は磁場勾配によるものと結論づけられる。

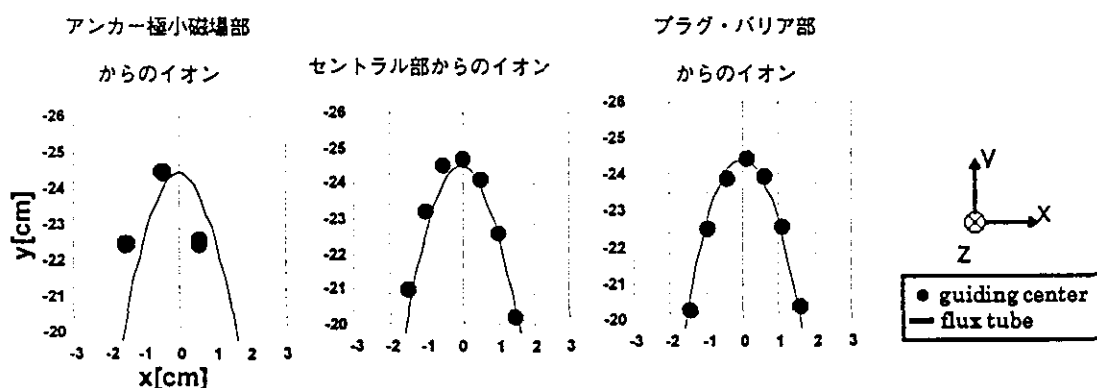


図 3 $r_{\alpha}=13\text{cm}$ の磁力管とイオン巡回中心（プローブ計測位置付近）

- [1] 中嶋洋輔 他, プラズマ・核融合学会 第 15 回年会予稿集 1pB7, p.105.
- [2] Y. Nakashima, et al., J. Plasma Fusion Research. 75, No.10 (1999) 1211.
- [3] 和田篤志 他, プラズマ・核融合学会 第 16 回年会予稿集 23pC16p, p.76.

【1 1】 極小磁場コイル径電流値の最適化と新磁場配位計算

ガンマ 10 において、径方向への粒子損失が極小磁場変換部（アンカー部）の内側変換部および外側変換部で起きている可能性が指摘されている。内側変換部および外側変換部の磁力管形状は、通常電流の場合では長軸と短軸の比（楕円率）が 50 程度に扁平している。このため、湾曲ドリフトによる径方向粒子拡散が懸念されている。本研究の目的は、極小磁場コイル系（AB 系、RT 系、RB 系）の電流値を従来の値から変更することにより、アンカー内側変換部・外側変換部の楕円率が 45～20 程度になるような新磁場配位を形成する極小磁場コイル系電流値の最適化条件を探ることである。その為に、既存の磁場計算コードに改良を加え、この計算コードを使用し、磁場の条件を満たす極小磁場コイル系電流の最適値を検索した。

新磁場配位を計算した場合、磁場はいくつかの条件を満たす必要がある。その初期的条件を下記に示す。

- 条件 1: アンカー部中央およびブラグ部中央において磁力管形状が円形になること（再円形化条件）。
 - 条件 2: 再円形化条件下でアンカー内側変換部・外側変換部の楕円率を 50～20 程度にすること。
 - 条件 3: 再円形化条件下でアンカー中央部において ICRF1（イオンサイクロトロン）共鳴層が割れないこと。
 - 条件 4: 再円形化条件下でアンカー内側変換部に ICRF1 共鳴領域が存在しないこと。
- 上記の条件を満たす極小磁場コイル系電流の最適値を探った。

プラグ部中央において、楕円率が1になるような電流値を検索したところ、条件1を満たす計算結果を得た。その結果を図1に示す。

図1から、再円形化を満たすAB系、RT系の電流値を任意に決めると、一意的にRB系の電流値が求められる。つまり、電流値の自由度を3から2にすることができる。これを極小磁場コイル系電流値の再円形化条件とする。この条件を基に、上記の条件2～4を満たす電流値の検索を行った。その結果を図2に示す。

再円形化条件下において、条件2～4を満たす電流値が広範囲に存在することが明らかになった。その中から条件2と条件3の交点を電流値候補として、AB系、RT系、RB系の電流値を6組選び、具体的に磁場計算を行った。その計算結果から、磁場配位は条件1～4を満たしていることを確認できた。

これらの計算結果と、1998年1月および最適化計算結果に基づき1999年12月に行われた計2回のアンカー部磁場変え実験結果との対応を考察した。その結果を図2に示す。1月の実験では楕円率が32程度でECRH加熱が行われてもプラズマは持続したが、楕円率が29程度になるとICRF加熱時にプラズマは持続した。更に楕円率を小さくするとプラズマは点火しなかった。一方、今回最適化された電流値ではECRH加熱時に、楕円率が26程度になってもプラズマは安定に持続した。また、1月の実験結果では、条件3に近い電流値ほどアンカー部のプラズマ線密度が高くなる傾向があることが分かった。

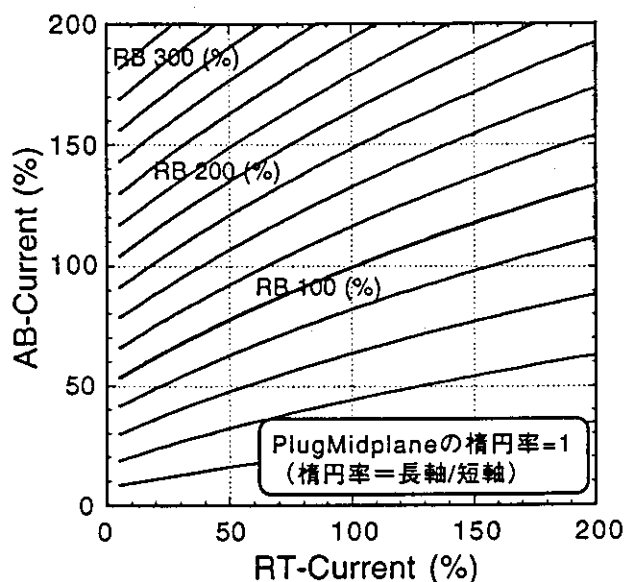


図 1

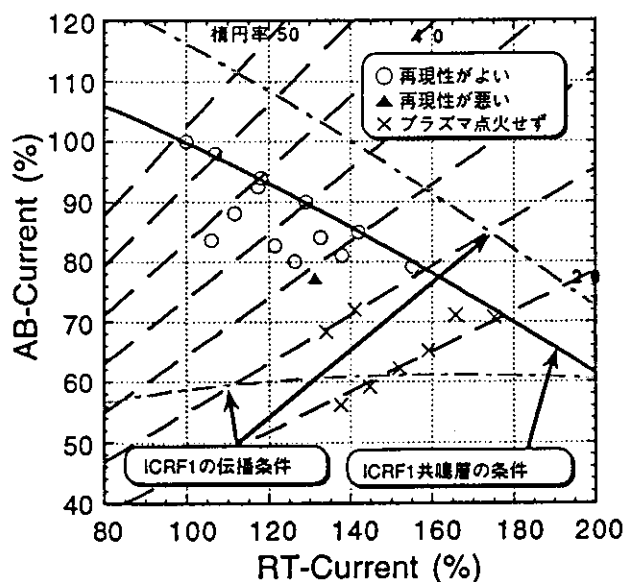


図 2

[1] 佐藤大輔 他、プラズマ・核融合学会 第16回年会予稿集 23pC16p, p.76.

【12】 ガンマ10セントラル部における電位形成に伴う密度上昇時のイオン温度・エネルギー収支の検討

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置ガンマ10では、ミラー型の磁場によってプラズマを閉じ込めている。ガンマ10の主プラズマ閉じ込め領域であるセントラル部では、荷電交換中性粒子分析器(CX-NPA)を用いて、イオン温度の径方向分布を求めることができる。ガンマ10では上記の他に電子サイクロトロン加熱(ECH)を用いて、ポテンシャルを形成し、閉じ込め性能を向上させているが、従来から反磁性量の増加に伴い上昇していたイオン温度が、ECH印加中に減少するという実験結果が認められた。(P-ECH実験)

本研究の目的は、以上の現象を解明するために、CX-NPAによる測定結果を用いてECH印加前及びECH印加中でのイオンのエネルギー損失がどのようになっているかについて解析を行い、電位閉じ込め時における、イオンの損失及び、加熱特性についての知見を得ることにある。

図1に本実験における、セントラル部プラズマ電子の線密度(NLcc)及び反磁性量(DMcc)の時間変化を示す。時間帯130ms~190msにかけてECHを印加し、電位形成により閉じ込めを向上させることによって、密度が大幅に上昇していることが確認できる。ECH印加前の時間帯110ms及びECH印加中の時間帯170msでのイオン温度を図2に示す。イオン温度はECH印加中に中心部で大幅に減少し、周辺部で上昇していることが分かる。

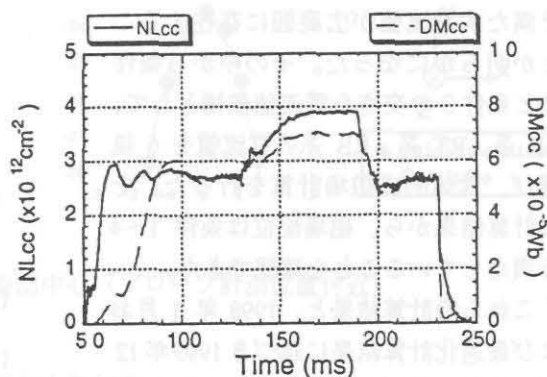


図 1

ガンマ10セントラル部においてミラートラップされた、プラズマ中のイオンの主要なエネルギー損失過程として、(1)電子のクーロン衝突(エレクトロンドラッグ)、(2)プラズマ中の中性水素原子との荷電交換反応、(3)プラズマ中の中性水素分子との荷電交換反応という3つの古典的過程が考えられる。本実験において、ECH印加前、印加中におけるイオンのエネルギー損失について解析を行ったところ、プラズマ全体($R < 18.2\text{cm}$; 図3)では損失エネルギー量が増加し、その中でも全損失に占めるエレクトロンドラッグの割合が35%から42%へと増加していること、また中心部($R < 3.25\text{cm}$; 図4)では逆に損失エネルギー量の合計値は減少していることが分かった。

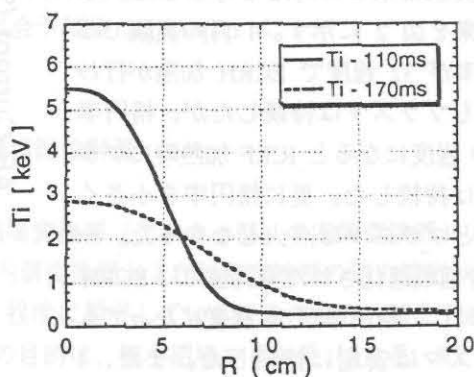


図 2

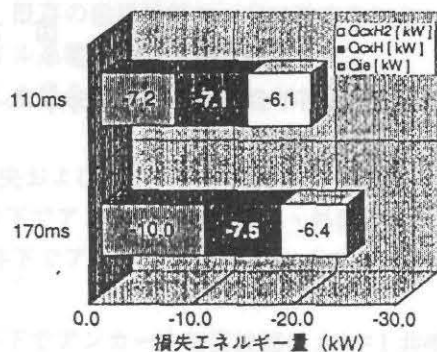


図 3 (全体)

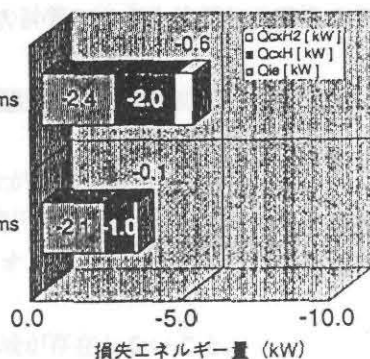


図 4 (中心部)

図5は、ECH パルスの印加中にイオンサイクロトロン (RF) 加熱の発振電力をの発振電力をステップ状に増加させた (サブパルス) 実験における、セントラル部反磁性及び線密度の時間変化を示している。この実験では、時間帯 130ms~200ms にかけて ECH が印加されており、更に RF 加熱のサブパルスを時間帯 140ms~235ms の間重畳している。この場合、図6に示すように、イオン温度の径方向分布は ECH 印加中でも ECH 印加前と比べて全体的に上昇しており、ECH 印加によるイオン温度の減少を、RF サブパルスを用いることによって抑制することができた。

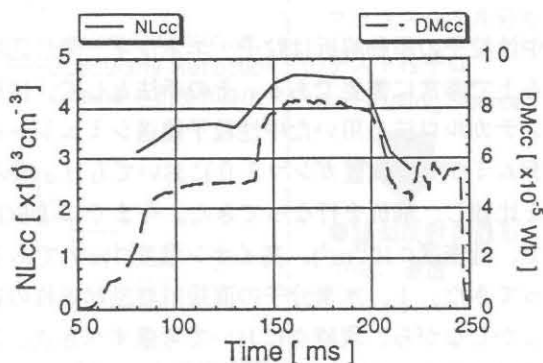


図 5

イオンのエネルギー損失について解析を行ったところ、RF のみの 120ms の時と比べて、170ms ではプラズマ全体 ($R < 18.2\text{cm}$: 図7)での損失エネルギーが増加しており、中心部 ($R < 3.25\text{cm}$: 図8)での損失とを比較し、周辺部での損失が大きくなっている事が分かる。120ms の場合に比べて、各時間帯とも全損失に占めるエレクトロンドラッグの割合が大きくなっており、時間帯 190ms では、支配的になっていることが分かった。

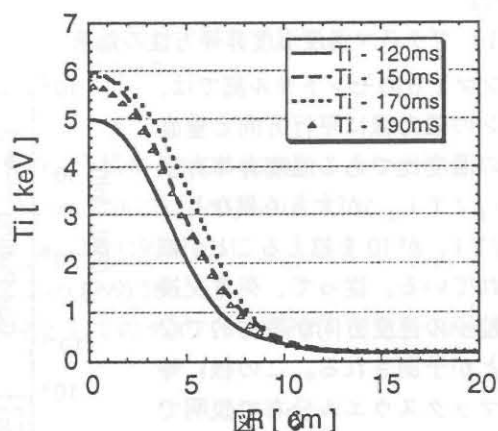


図 6

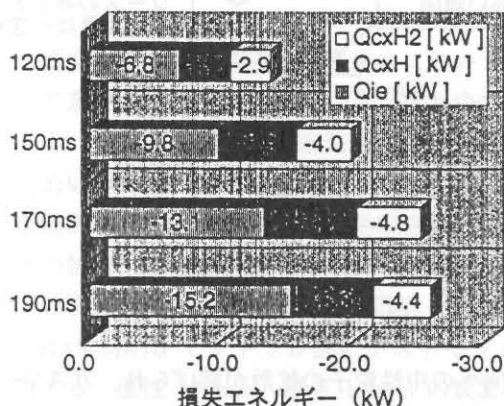


図 7 (全体)

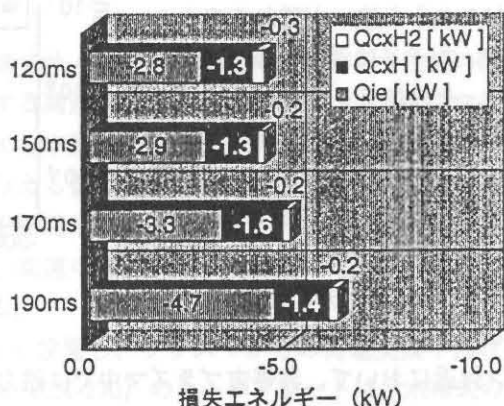


図 8 (中央部)

P-ECH 実験におけるイオンの損失エネルギーの解析結果から、イオン温度の減少が、中心部イオンへの加熱パワーの減少によるもので、エレクトロンドラッグによる損失の割合が増加していることが判明した。これを受けて RF サブパルス実験を行い、電位閉じ込めによる密度上昇時においても RF サブパルスを用いた付加パワーによって、イオン温度を上昇させることに成功した。また、この時エレクトロンドラッグの割合が大きくなっていることから、セントラル部の電子を選択的に加熱することで、更なるイオン温度の上昇が期待できる。

【13】 中性粒子輸送における容器壁での反射と温度非等方性の効果

中性粒子の挙動解析は粒子・エネルギー閉じ込めの評価や、密度制御・周辺プラズマの特性を調べる上で非常に需要である。その手法として、従来より水素のバルマー系列線の放射量計測、及びモンテカルロ法を用いた中性粒子輸送シミュレーションを組み合わせる方法が用いられてきた。タンデムミラー型装置ガンマ10においても $H\alpha$ 線の計測とDEGASコードを用いたシミュレーションを比較し、解析を行なってきた。今までにDEGASコードをガンマ10のプラズマに適用するうえで、低密度($\sim 10^{18}m^{-3}$)、高イオン温度($\sim keV$)であることを考慮に入れ、以下のような改良・計算を行ってきた。1. 水素分子の直接解離励起過程の組み込み、2. リサイクリング係数が1以外の計算しかしながら、現時点において考慮すべき点として、プラズマの温度非等方性の効果、壁面での粒子反射の効果が挙げられる。本研究では上の2点について以下のような輸送シミュレーションを行った。

(1) プラズマ温度温度非等方性の効果

ガンマ10のセントラル部では、イオンの磁力線に平行方向と垂直方向の温度比である温度非等方度($T_{i\parallel}/T_{i\perp}$)が大きく異なり、 $T_{i\parallel}/T_{i\perp}$ が10を超えることが観測されている。従って、荷電交換中性粒子の速度方向が等方的でないことが予測される。この様に等方性マックスウエル分布で説明できないプラズマ中では中性粒子輸送にどのような違いが現れるのか、DEGASコードに温度非等方性を導入し、その結果を検討した。

図1はガスパフからの粒子源とセントラル部ミッドプレーン周辺に粒子源を設定した場合に得られた中性粒子密度分布から $H\alpha$ 線強度に焼き直した軸方向分布を示している。非等方度の高いミッドブ

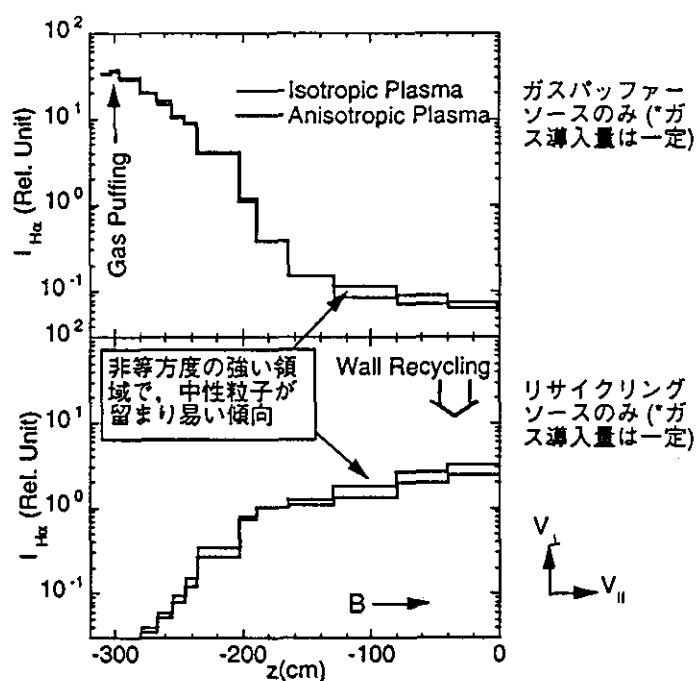


図 1

レーン付近において、非等方プラズマ中では磁力線方向への中性粒子の拡散が妨げられ、ガスソース（ここでは壁からのリサイクリングソース）付近に留まり易くなることが解った。この傾向はプラズマ密度を10倍($\sim 10^{19}m^{-3}$)にした場合においても認められた。これは磁力線垂直方向に運動する荷電交換中性粒子の数が増え、結果的にガスソース付近の水素密度が高くなった為であると考えられる。

(2) いくつかの壁面粒子反射角度モデルを用いた計算

従来より真空容器壁面における中性粒子の反射モデルが提唱され、そのメカニズムの解明が行われてきた。しかしながら実機での壁面の状態は非常に複雑であり、モデル化が困難である。今回、反射角度モデルとして現在考えられているコサイン分布、鏡面反射、及び両者の組み合わせの3モデルを用いて、中性粒子輸送に与える影響を調べた。図2は、ガンマ10での密度領域($\sim 10^{19}m^{-3}$)における、種々の反射モデルでの計算結果を示す。その結果、鏡面反射モデルを用いた計算において、最も中央部へ中性粒子が浸透し易いことが認められた。

今後、上記2つのテーマは、他のジオメトリー及び、プラズマパラメータによって、どのような変化が見られるかについて、系統的に調べる必要があると考えられる。

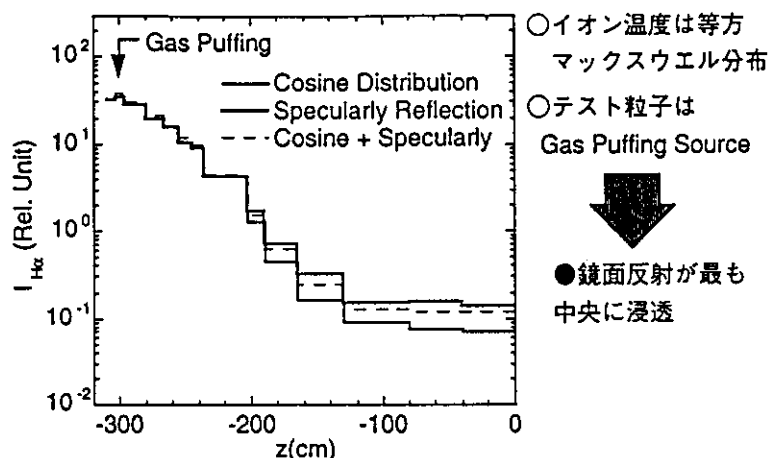


図 2

- [1] D.B.Heifetz, et al., J. Comp. Phys. 46 (1982) 309.
- [2] 中嶋洋輔 他、プラズマ・核融合学会 第12回年会予稿集 23aC1, p.261.
- [3] Y.Nakashima, N.Yamaguchi, K.Yatsu, et al., J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 580.
- [4] Y.Nakashima, M.Shoji, K.Yatsu, et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 1011.
- [5] S.Kobayashi, Y.Nakashima, et al., J. Nucl. Mater. 266-269 (1999) 566.
- [6] 小林進二 他、「荷電粒子-中性粒子-材料複合系としてのダイバータ科学」研究会 1999, 8月

【14】 カーボンシートポンプにおける荷電交換中性粒子の排気

高温プラズマの生成・閉じ込めにおいて、水素リサイクリングの低減はプラズマ性能の向上にとって重要な研究課題である。プラズマ中で発生する高速の荷電交換中性粒子は、プラズマ対向壁やダイバータ部周辺の壁を衝撃し、そこから放出する水素がリサイクリング抑制を妨げる。本研究の目的は、荷電交換中性粒子のリサイクリングに与える影響を定量的に把握し、プラズマ密度の適切な制御を可能とするための高効率の水素排気法を開発することである。そこで、水素リサイクリングの制御、高温高密度プラズマの生成をめざし、高速中性粒子の排気に適したカーボンシートポンプの実機への適用を目的とした研究を行っている。

GAMMA10 セントラル部にテストモジュールを設置し、プラズマからの荷電交換中性粒子を照射する。直径 170mm、厚さ 1.5mm の炭素繊維材 (CX-270) のカーボンシートは、水冷式の真空容器内に設置されている。カーボンシートは直接通電できるようになっており、3 kW 程度の電力で約 800℃ まで昇温される。加熱時には、クロメル-アルメル熱電対を用いて、カーボンシートの温度計測を行っている。カーボンシートの前面には回転式の邪魔板が設置されており、荷電交換中性粒子がカーボンシートに入射する場合と、入射するのを遮る場合とが選択できるようになっている。テストモジュール内の圧力変化は、電離真空計で計測される。また、QMS を設置し、プラズマショット時の脱離ガスと、昇温脱離実験での放出されるガスの組成分析をしている。GAMMA10 の場合、比較的高エネルギー (～数 keV 以上) の荷電交換中性粒子が存在していること、及び原理的にディスラプションが生じないため、電磁力がカーボンシートに及ぼす影響が非常に低いという利点を持っている。

これまでの実験の結果から、カーボンシートポンプの排気効果の確認はされているが、カーボンシートに吸着しているガス分子が多いことが示唆されている。今回は昨年度行ったゲートバルブ

(GV) の取り付けに加え、カーボンシートの温度を 30～250℃に保ち、吸着しているガス分子をさらに低減させた状態で荷電交換中性粒子の照射を行った。

図 1 は、昇温脱離実験中における GV の有無・運転温度別の圧力の時間変化である。運転温度が 200℃では GV の有無で圧力の時間変化に大きな差は認められないが、運転温度が 30℃と 200℃の場合を比べると、200℃の場合の方が大幅に圧力が小さくなっている。このことから、GV の有無に関わらず、カーボンシートを 200℃程度に保つことにより、吸着ガスを低減できることがわかった。また、プラズマ放電中にカーボンシートに入射した粒子数と捕捉した粒子数を見積もった結果、入射粒子の 40～100%が排気されており、運転温度の違いによる排気効率の顕著な差は見られなかった。

また、カーボンシートポンプの性能の改善及び実機への適合性の検討を行うために、今年度からサンプル駆動装置の製作を開始した。図 2 は同駆動装置の概略図である。サンプルは、照射チャンバーの真空を劣化させないように、ベローズとゲートバルブにより交換が可能になっている。また、サンプルは照射に先だって、ヒータで 800℃程度まで加熱され、脱ガスが施される。現時点では、ヒーター及び駆動機構の試験は既に終了しており、4月の実験シリーズから、サンプルへの荷電交換中性粒子の照射実験を開始する予定である。今後は、この装置を用いて炭素材料を始め、プラズマ対向壁の候補となっている材料に、実機のプラズマが与える影響についても研究を進めていく予定である。

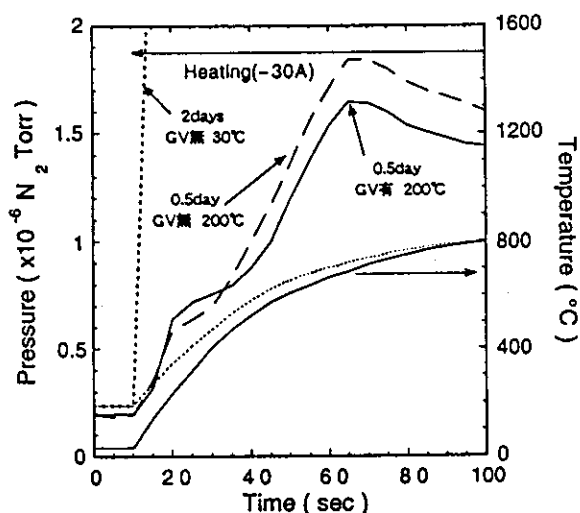


図 1

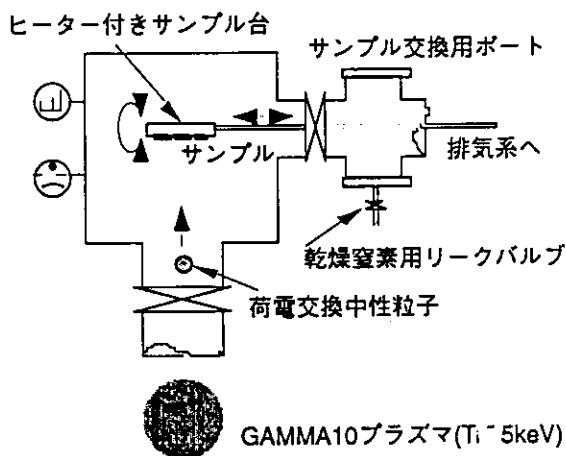


図 2

- [1] 中嶋洋輔 他、プラズマ・核融合学会第 13 回年会予稿集、21pE P.156 (1996)
- [2] 森脇武之 他、プラズマ・核融合学会第 13 回秋期講演会予稿集、3pA12 P.200 (1996)
- [3] A.Sagara, et al., J.Nucl. Mater. 220-222 (1995) 627.
- [4] Y. Nakashima, A. Sagara, et al., J. Nucl. Mater. 266-269 (1999) 901.
- [5] 石本祐樹 他、プラズマ・核融合学会第 16 回年会予稿集、26pA27p P.170 (1999)
- [6] Y. Ishimoto, et al., Book of Abstract, 10th Int. TOKI Conf. On Plasma Phys Controlled Fusion PI-45 P.97 (2000)

【15】 コアプラズマの径方向電位平坦化とプラズマ閉じ込めの改善

プラズマの輸送現象を調べるために、エンドプレートセグメントに接続してある抵抗値を変化させ、コアプラズマの径方向の電位分布を制御した。タンデムミラーの実験において磁場に平行方向の閉じ込めを改善するために、電子サイクロトロン共鳴加熱を利用したプラグ部へのマイクロ波入射による閉じ込め電位形成が行なわれている。タンデムミラープラズマの磁場軸方向電位分布状態は、セントラル部、プラグ／バリア部の部の各部で、金の中性粒子を使用したビームプローブ（GNBP）を用い、プラグ部の電位に対しては装置端に設置された端損失イオンエネルギー成分分析器（ELECA）を用いて、測定される。電位測定装置の設置場所を、軸上の磁場強度分布及び主要加熱系位置と共に図1に示す。また、セントラル部の半径方向電位分布、及びサーマルバリア部のプラズマ断面に渡る2次元電位分布が、GNBPにより測定されている。電位により閉じ込められなかった端損失イオンは、ELECAを用いて測定された。

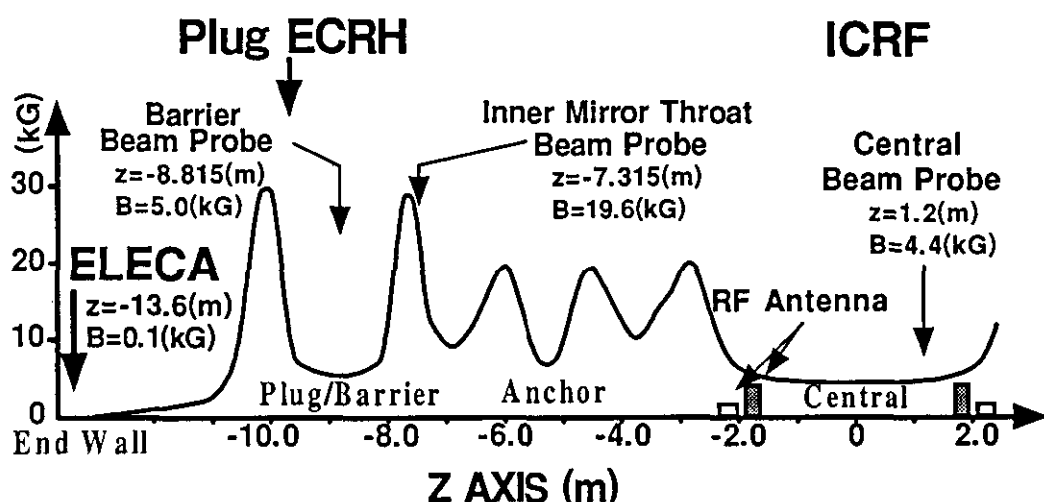


図1 磁場強度分布、電位測定装置位置、及び加熱系位置

タンデムミラー装置は磁力線が開いているため、磁力線に沿って流出したプラズマは両端部に取り付けられたエンドプレートに到達しガス化する。エンドプレートは磁力線を通してプラズマと繋がっており、閉じ込め電位形成時は通常電子サイクロトロン共鳴により加熱された電子が流入するため、エンドプレートの浮遊電位は大きく負となる。プラズマの半径方向の電位分布は中心が高い凸状態が実現されているため、半径方向に分割されたエンドプレートセグメントに異なる接地抵抗を接続し、エンドプレートの半径方向の電位分布を変化させた。セグメントの中心部側の抵抗を大きくし外周側の抵抗を小さくしてアース端子に接続し、更に、中心部側のエンドプレートの前面にメッシュを張りエンドプレートに対し負の電圧かけ、エンドプレートからの2次電子放出を押さ

えた。その結果、中心部のエンドプレート電位は更に低くなり電位分布は急峻になった。エンドプレートを中心より外周へ、No.1, No.2, No.3, No.4, No.5 とした場合、No.1:1 Ω , No.2:2k Ω , No.3~5:1M Ω の時、No.1~5:1M Ω の時、及びNo.1:1M Ω 、No.2~5:10k Ω の時に対応したエンドプレートの電位を、図2にそれぞれ、一点鎖線、実線、破線で示す。径方向の電位が明らかに変わっているのが分かる。一方、バリア部の電位をBPEBにより測定した結果を、図3に示す。図2に対応して、一点鎖線は黒塗りの菱形に、実線は黒丸に、破線は白丸に対応し、エンドプレートの電位変化に伴い、コアプラズマの電位分布の平坦化が実現されているのが分かる。更に、No.1のプレートにメッシュを張りエンドプレートに対し-70Vの負電位加えると、プレートからの2次電子が押さえられ、約1kVプレート電位が下がり、平坦化が進む。この時閉じ込め電位は50~100V上昇する。

同時に端損失イオンのエネルギー分布関数をELECA測定器で測定し、閉じ込め電位を超えるエネルギーの端損失イオンに着目すると、閉じ込め電位形成前後で変化し、電位形成後は寧ろ減少する傾向が見られた。このことは、閉じ込め電位形成時におけるプラズマの径方向損失の増加を示唆するものである。コアプラズマの電位平坦化に対しては、実験ショット数が多くないとはいえ閉じ込め電位上昇にも拘わらず閉じ込め電位を超える端損失イオン量が増加する傾向が認められた。この現象はプラズマの径方向損失の抑制を示唆すると考えられ、今後更に研究を進めて行く必要がある。

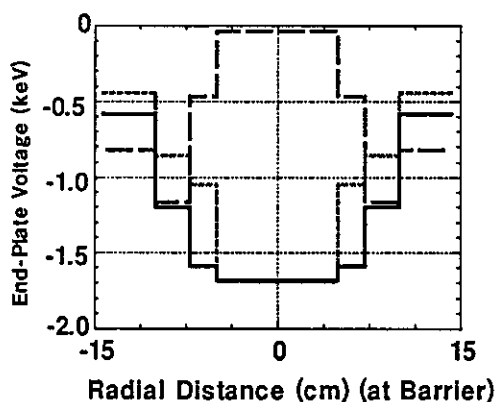


図2 バリア部換算エンドプレート電位

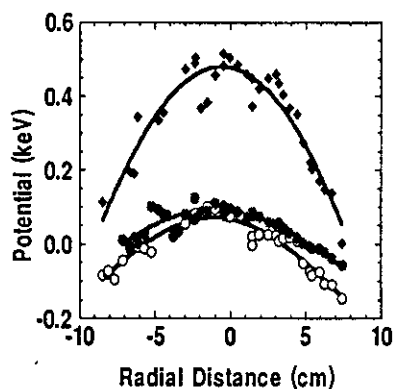


図3 バリア部コアプラズマ電位

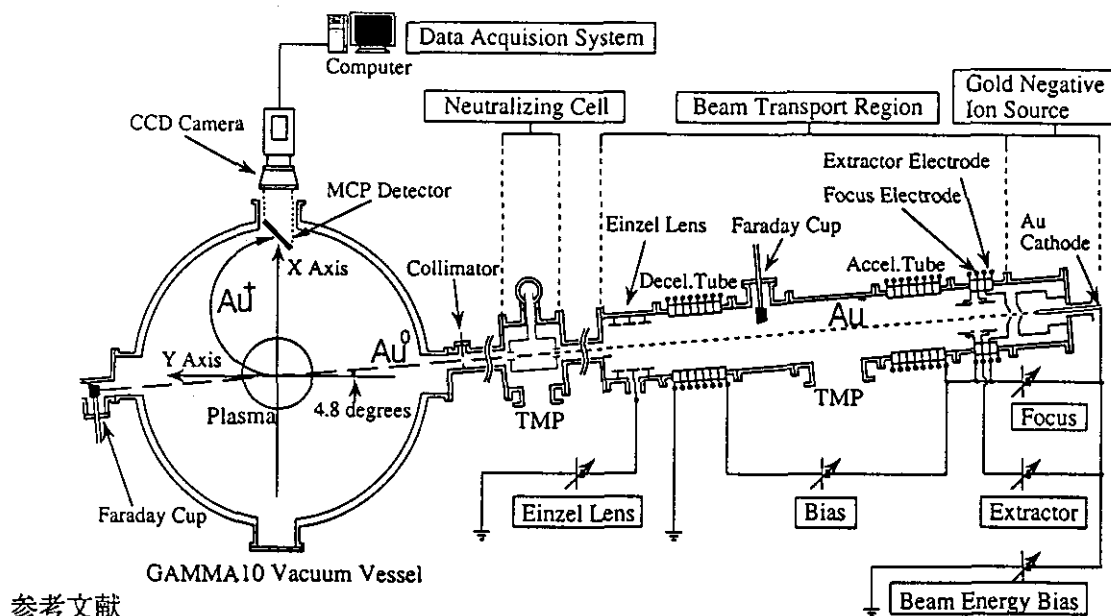
参考文献

- [1]第16回プラズマ・核融合学会年会(1999年) 23p C15p 山梨、石井、菊野、他

【16】 内側ミラースロット部の電位計測とサーマルバリアー

タンデムミラー磁場閉じ込め装置では、プラグ部にマイクロ波を入射し電子サイクロトロン共鳴加熱を利用して閉じ込め電位を形成する。また、イオン加熱に対してはセントラル部にICRF高周波を入射しイオンサイクロトロン共鳴を利用して、イオンの温度を上昇させている。電子、イオンは局所的に加熱され、磁場軸に対し非等方に加熱される結果、磁場の強い場所でミラー効果により荷電分離が起こり易く電位の変化が発生し易い。プラグ／バリア部の内側ミラースロット（IMT）部は最強磁場部で損失境界を決めている箇所であるため、当箇所の電位変化は粒子損失に影響を与える。非等方イオン温度はIMT部の電位を下げる可能性を与え、低いIMT電位はセントラル部からの低温電子のプラグ部への流入を妨げる。即ち、IMT部はセントラル部電子の損失境界を決定し、当部の電位は損失領域の増減を決め、効果的なサーマルバリアとしての機能を持つ。実際に当部の電位に対して、サーマルバリアとしての効果が検討算出され、通常のプラグ／バリア部中心電位の降下に対しIMT部の降下の方が効果的であることが示された。これらの観点に立って、IMT部の電位測定の開発が行われた。[1] 開発を行うに当たり、近接性の問題及びイオン検出器の高磁場下での使用等熟考を必要とする要素が多々有った。全系のシステムを下図に示す。

実験的に、セントラル部のICRF加熱に伴うIMT部の電位降下が示され、また閉じ込め電位形成に伴いIMT部の電位がより減少する傾向にあることが知れた。



参考文献

[1] 博士論文（物理学研究科）香月 勇三

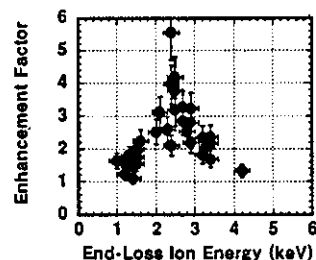
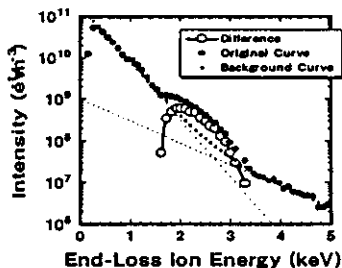
Study of Plasma Potential Using a Newly-Designed Beam Probe System at the Inner Mirror Throat

【17】 AIC 揺動による損失領域へのイオン拡散の促進と閉じ込めへの影響

タンデムミラー装置ガンマ10のセントラル部にICRF高周波加熱を行うと、イオンが磁場に対して非等方に加熱され、非等方イオン温度に起因するAIC揺動が励起される。AIC揺動は、プラズマコア部ではマイクロ波反射計により、周辺部では磁気プローブを使用して観測された。他方、ELECA測定器を用いて端損失イオンのエネルギー分布関数の時間発展が測定されており、特定の時間帯及びエネルギー分布関数上の特定のエネルギー帯にハンプ構造が発生することが観測された。ハンプ構造はAIC揺動による捕捉領域から損失領域へのイオン輸送により発生することが明らかになった。損失領域へのイオン輸送は閉じ込めを劣化させる可能性が有るため、損失領域への流出と閉じ込め電位との関係を調べた。

端損失イオンのエネルギー分布関数に出現したハンプ構造は、AIC揺動の加熱特性及び揺動とイオンとの共鳴条件を考慮する事により説明された。[1]更にハンプ構造が発生するエネルギー帯で、イオンのピッチ角を分解し端損失イオンの速度分布関数を測定して、AIC揺動によるイオンの散乱現象を直接測定した。通常のクーロン散乱とは異なり揺動との散乱から算出されるピッチ角を反映している結果が得られた。この揺動による損失領域へのイオン輸送の促進が、閉じ込めに与える影響を調べた。エネルギー分布関数に現われたハンプ構造の半値幅内のバックグラウンドエネルギー束に対するハンプ構造を含んだエネルギー束の比を促進度と定義すると、4を超える促進度が容易に得られ閉じ込めに対する影響を無視出来ないことが知れた。エネルギーに対しては、AIC揺動の周波数と波数は磁場強度、プラズマの境界条件及び磁場配位で決定され、共鳴するイオンのエネルギーに上限が有ることが示され、また実験的に確認された。即ちハンプ構造は約2.5 keVのピークエネルギーを持ち、2 keV程度の幅で発生することが分かった。

約3 keVを超える閉じ込め電位を形成させれば、流入イオンは電位により閉じ込められAIC揺動による捕捉領域から損失領域へのイオン流入の促進は抑制されることが知れた。



参考文献

- [1] 41st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (Seattle, Washington, 1999, November 15-19) pp.129 (No.5387, G02.17), K.Ishii, T.Goto, Y.Goi, et al.
- [2] Phys.Rev.Lett. Vol.83, No.12 (1999) pp.3438-3441, K.Ishii, T.Goto, Y.Goi, et al.

【18】 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

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。この方法で得られた密度分布の例を第1図に示す。

(2) 高速掃引反射計による密度計測

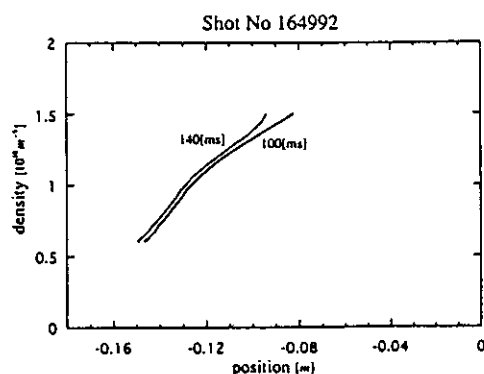
広範囲の周波数を入射するために信号発生器の周波数を高速で掃引する。反射波と参照波との間のビート周波数の解析から位相差を求め密度分布を再構成する。(1)の方法に比べて受信装置が簡単になる利点がある。又、この方法でも密度揺動を求められる。プラズマの密度上昇の手段として氷滴を入射した場合の密度分布の時間変化の例を第2図に示す。

(3) クロスポラリゼーション散乱法

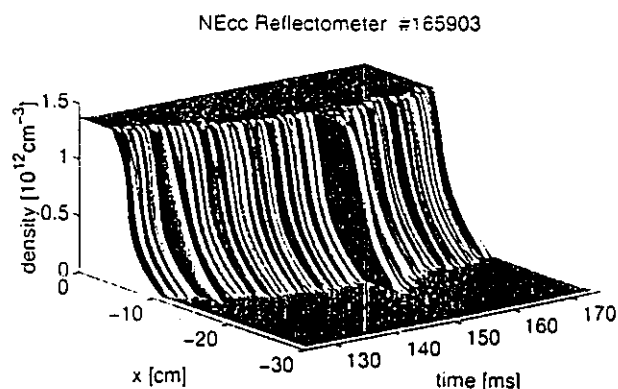
プラズマに0-モードで入射されたマイクロ波の、0-モードのままの散乱波とX-モードに変換された散乱波の強度の比較からプラズマ中の磁場揺動の測定が可能となる。受信部にデュアルモードホーンを用い同一地点で観測した入射周波数 10GHz の時の結果を示す。(a)はプラズマが無い時の0-モード、(b)はプラズマの中心密度が $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ の時の0-モード、(c)は同じくX-モードの信号を示す。この図からプラズマがある時には0-モードは遮断され、X-モードに変換されて透過している事がわかる。

(4) 電子サイクロトロン放射イメージング法の開発

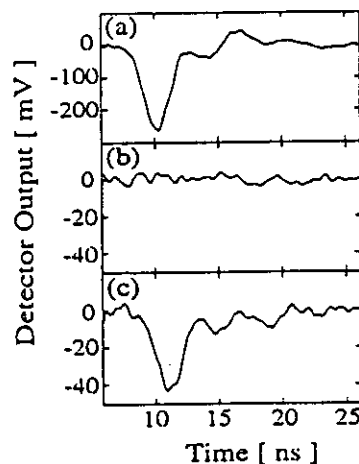
核融合研究所、(株)テラテックとの共同研究により、アンテナアレイ、検波器、前置増幅器を一体化したモノリシック検出器を開発した。これはガンマ10プラグ部に設置して試験が行われ、設計通りの広帯域ヘテロダイン特性が得られた。



第1図



第2図



第3図

【19】 プラグ部でのECEスペクトル[1]

タンデムミラーガンマ10 プラグ部では、電位形成のため、28GHzのマイクロ波を入射し、1 Tの磁場強度を持つ位置で基本波の電子サイクロトロン共鳴加熱（ECRHを行っている。大電力マイクロ波入射により加熱された電子は熱平衡にはないため、そこから放射される電子サイクロトロン放射（ECE）のスペクトルは、速度分布がマクスウェル分布に従うとして計算されるスペクトルとは、大きく異なる放射が観測されることが考えられる。逆に、その放射を観測することにより、共鳴点近傍での加熱の素過程を理解できる可能性がある。この動機の下にプラグ部でのECEを計測し[2]、その結果は今年のこの報告にまとめた。得られたスペクトルの特徴を簡単に記述すると、ECRH印加中に、共鳴周波数近傍の広い周波数領域でECRH印加前に比べて10dB程度高い強度を持つ広帯域の放射成分と、それに加えて共鳴周波数より少し高く非常に狭い周波数領域でECRH印加前に比べて約40dB強い狭帯域の放射成分が観測された。

このスペクトル分布を再現し、基本波加熱共鳴点近傍での共鳴加熱の物理過程を明らかにするために、電子共鳴加熱が起きているときのECEの計算を行った。計算方法は、ガンマ10のプラグ領域の磁気ミラーの磁場分布を考え、ミッドプレーンで電子の速度分布を与える。乱数を用いて粒子に速度を与え、多数の粒子で、速度分布関数を再現する。電子は基本波共鳴層において、いわゆるビーチ加熱で波と共鳴相互作用し、エネルギーのやりとりをおこなうが、この詳細については応答関数で記述できる[3]。ミッドプレーンで与えられた任意の速度分布をもつ電子が、加熱共鳴層を1回通過した後の、速度分布をこの応答関数を用いて決定する。ただし、波と粒子のジャイロ運動の位相差の分布は一様とした。共鳴層を除いては、電子のエネルギー・磁気モーメントは保存するとして、磁気ミラー中の各点での速度分布を計算できる。薄いプラズマからのECEは、1個の電子からのECEに電子の速度分布の重みを乗じて積分すればよい。

このようにして、1回加熱後の電子が磁気軸に対し60度の方向に放射するECEの計算結果を図1に示す。加熱前に比べて幅広い周波数帯で、10dB程度のECEの増加が見られる。プラグ部の電子は高温・低密度のため無衝突の条件を満たし、ミラー磁場からロスするまでにプラグ部で多重加熱を受ける。同様にしてN回加熱が起きた後の速度分布を用いて計算したECEを図2に示す。ここで、いったんロスコーンに入った電子は、ただちに損失するとした。強い放射が、加熱波よりわずかに高い周波数近傍に局在化する。以上の解析から実験で得られた広帯域の放射成分と狭帯域の放射成分は、それぞれ、少数回加熱と、多重回加熱による電子からのECEであると考えられる。

[1] Y. Tatematsu, T. Saito et al, Fusion Engineering and Design (2000). in press.

[2] K. Ito, Y. Kiwamoto et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES Vol.2, 303 (1999).

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

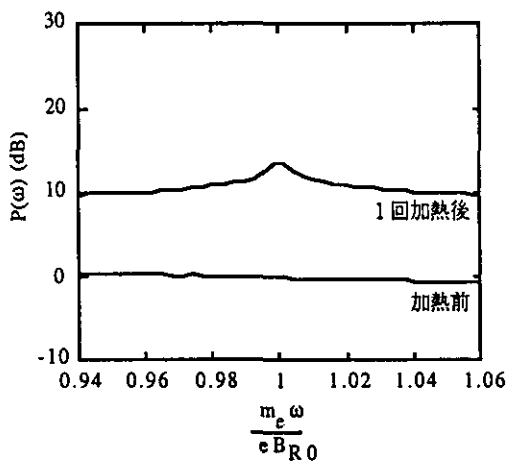


図1 1回加熱後の周波数スペクトル

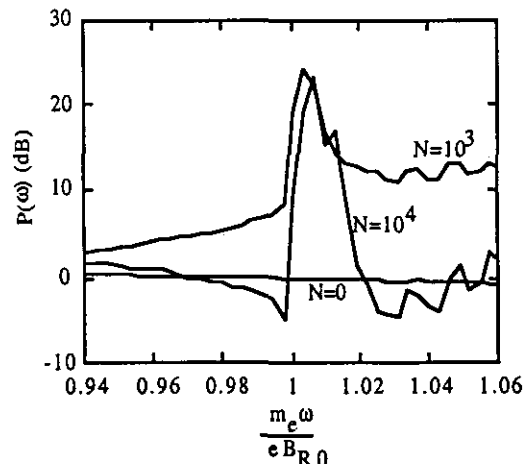


図2 N回加熱後の周波数スペクトル

ガンマ10セントラル部において、イオン温度空間分布は、高エネルギーのイオンが低速の中性粒子と荷電交換して生じた高速中性粒子を、静電型のエネルギー分析器でスペクトル解析することにより得られてきたが、この測定は計測の視野が一直線上に限られており、温度分布を決定するためのデータセットを得るためには、多数のプラズマショットを必要とした。今回、ピンホールカメラを、この荷電交換中性粒子の測定に用いた。ピンホールカメラ計測は、これまでプラズマからの軟X線を何種類かのフィルターを通して測定することで、数ショットの計測から空間・時間共十分の分解能をもつ電子分布の決定に用いられてきた。このフィルターを新たに選ぶことで、ピンホールカメラを荷電交換中性粒子の計測に適用できることが示唆された[2]。

ガンマ10のイオン計測では、数keVのエネルギーの中性粒子を計測するため、フィルターとしては、炭素の極薄い膜 ($10\sim 20\mu\text{g}/\text{cm}^2$) を選択した。ピンホールを通り、フィルターで減速された中性粒子はMCPに当たり2次電子を発生し、蛍光面で可視光へと変換され結像する。この画像をCCDカメラで撮影した。測定により得られた像は、次の特徴をもつ。輝度分布のピークの位置はプラズマの中心と一致せず、その位置は、ガンマ10の上方からみたとき、北側にずれている。プラズマの蓄積エネルギー (密度 \times 温度) を表す反磁性量と輝度のピークの中心からのずれの時間変化をプロットすると、両者の振る舞いは非常によく似ている (図1)。輝度分布は、プラズマの動きに応じて大きく変化し、そのような時間変化のある計測にピンホールカメラ計測は威力を発揮できている。

輝度分布の中心からのずれの原因は、イオンの半径方向分布、イオンの有限ラーマー半径効果及び磁場によるラーマー回転に方向性があることであると考えるのが妥当である。次に、数値計算の助けを借りて、得られた荷電交換中性粒子像から、プラズマ中のイオン温度を決定するスキームを確立した。一方向からの情報しかないため、イオンの密度・温度の空間分布は軸対称を仮定する。ただし、有限ラーマー効果を取り入れるため、実際にまず仮定するのは、イオンが旋回中心にあるとしたときの半径分布および速度分布である。衝突相手の中性粒子分布は別に求めた。仮定した分布のとき受かるべき輝度分布を計算し、それと観測結果を比べ、計算結果と観測結果が一致するように反復法によりイオンの旋回中心の分布と速度分布を決定する。その計算で得られた旋回中心が同じイオンの温度の空間分布と、そこから計算し直した、実際の温度 (厳密なマクスウェル分布でないので実際は平均エネルギー) の空間分布の一例を示す (図2)。実際の温度は旋回中心で求めた温度にくらべて、中心温度が低く、分布の半値幅は広がっている。

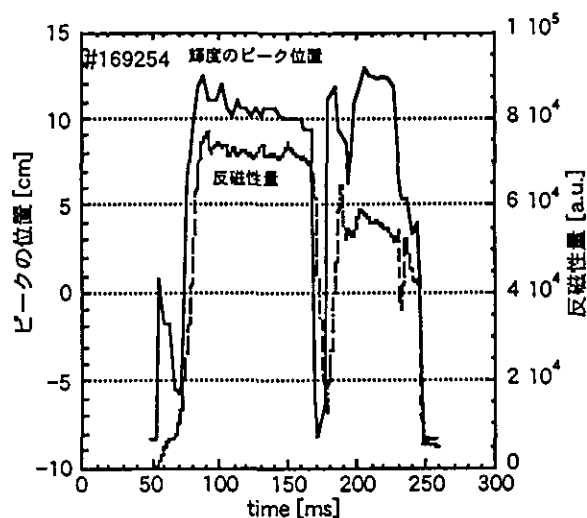


図1 輝度分布のピーク位置と反磁性量

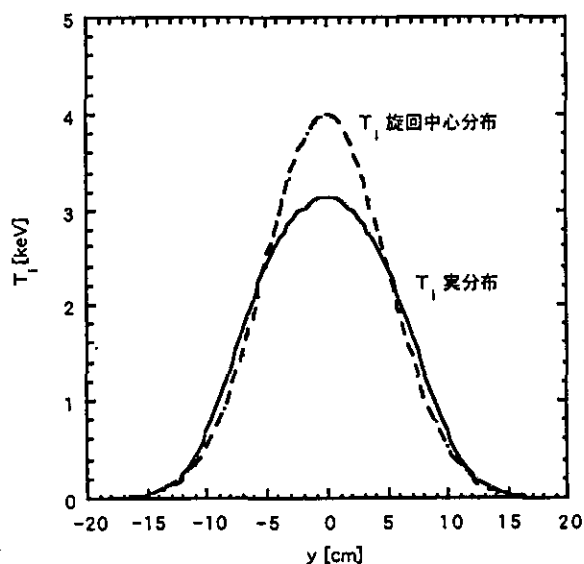


図2 イオン温度分布解析の例

[1] 小山大樹 他、プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999年11月仙台) 25pC23p

[2] Y. Kiwamoto et al., Rev. Sci. Instrum. 69, 2574 (1998).

【21】 ガンマ 10 におけるペレット入射実験

タンデムミラープラズマ装置ガンマ 10 において、密度限界の解決手段の一つとしてペレット入射実験が開始されている。核融合プラズマへのペレット入射は、トカマク等のトラス系プラズマ装置では一般的に行われてきたが、開放端系プラズマ閉じ込め装置では、これまで行われていなかった。本実験は開放系核融合プラズマ装置における初のペレット入射実験である。[1-2]

ペレット入射の目的の一つはプラズマ中心部への粒子補給である。ガンマ 10 では、セントラル部のほぼ中央に、真空容器の下方からプラズマに向かって入射される。ペレットが入射される位置から磁力線に沿い約 60cm 離れた位置での H_α 線計測によると、ペレット入射の場合、ガスバフに比べて、プラズマ周辺部よりも中心部に多くの粒子を供給できることが確認された (図 1)。

タンデムミラー装置では、磁力線に沿った粒子閉じ込めをプラズマ中に形成された電位により行う。従って、ペレット入射により供給した粒子の電位閉じ込めを検証することは、タンデムミラーにおけるペレット入射の本質的な課題である。本実験では、数バターンの電位形成条件下でペレット入射を行い、ペレット供給粒子数に対する端損失粒子数を計測した。その結果、少なくともイオンで 1 回以上の電位による反射があることが分かった。

ペレット入射に伴う閉じ込め電位の減少・消失はタンデムミラー装置において重要な問題である。これまでの実験結果では、ペレット溶発時には磁力線方向の電位分布は平坦になっていると思われる。その後のイオン閉じ込め電位の回復は、セントラル部電子温度の回復と比べて速いことが、ビームプローブによるセントラル部電位と軟 X 線測定器による電子温度から明らかになった。この結果は、サーマルバリア電位の効果であると推測している。

線平均プラズマ密度 n と平均イオン温度 T で表される n - T ダイアグラム上において、両者の相関を調べてみると、ガスバフのみを粒子供給法として用いた場合の密度に比べて、ペレット入射では 1ms 程度ではあるが、その上限を上回っていることが分かった (図 2)。これは、ガスバフと同様にペレット入射でもイオン・電子温度を減少させてしまうが、ペレット入射では中心部への粒子供給が行われるため、その影響がガスバフに比べて小さいからであると推測している。今後、ペレット入射時の密度分布等の詳細な計測、及びペレットで供給した粒子の径方向拡散の研究等を行う。

[1] 河森栄一郎 他、プラズマ・核学会 第 16 回年会予稿集 25aA5 (1999).

[2] E. Kawamori, et al., ITC-10 book of Abstract, PII-3, (Toki City, January 18-21, 2000).

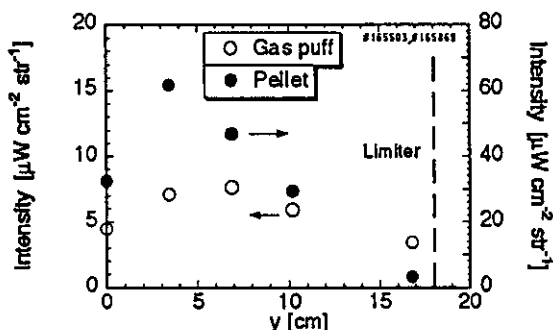


図 1 H_α 線空間分布

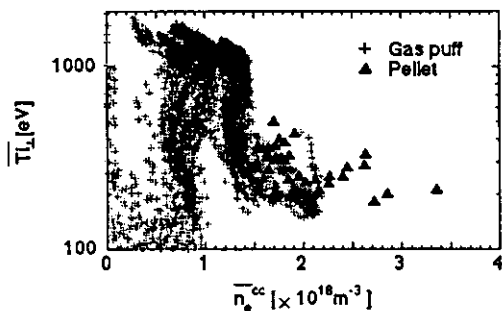


図 2 n - T ダイアグラム

【22】理論・シミュレーション解析

(1) ミラープラズマにおける両極性定常状態の解析

ミラープラズマの定常状態における、両極性条件から決まる密度及び電位分布について解析を行った。簡単のため、単純ミラープラズマを考えた。基礎方程式は電子及びイオン密度に対する1次元の輸送方程式で、半径方向に関しては拡散係数と移動度に関するアインシュタインの関係式を仮定した拡散過程を、また軸方向に関してはポイントモデルで用いる軸方向閉じ込め時間を導入した。即ち、イオンについてはミラー磁場の閉じ込め時間、電子については電位閉じ込めの効果を入れたバスツコフの式を仮定した。プラズマ生成については中性粒子との衝突による電離過程を仮定した。電子及びイオン密度に対する2つの輸送方程式に、荷電中性条件 $n_e = n_i$ と両極性条件 $\partial n_e / \partial t = \partial n_i / \partial t$ を課することにより、密度分布と電位分布が求められることになる。Fig. 1 は計算結果の一例である。ここで、 τ_{ic} はイオンの軸方向閉じ込め時間であり、また $\tau_{\perp} = a^2 / D$ (a はプラズマ半径、 D は拡散係数) は半径方向の閉じ込め時間に対応する。Fig. 2 は中心軸上の電位 ϕ_0 (白丸) 及び $N_0 \tau_{ion} / n \tau_{ic}$ (黒丸) の $\tau_{\perp} / \tau_{ion}$ 依存性を示している。ここで τ_{ion} は軸上での電離時間である。半径方向の閉じ込め時間が長い程、両極性電位は大きくなり、また中心密度 N_0 も高くなることが分かる。

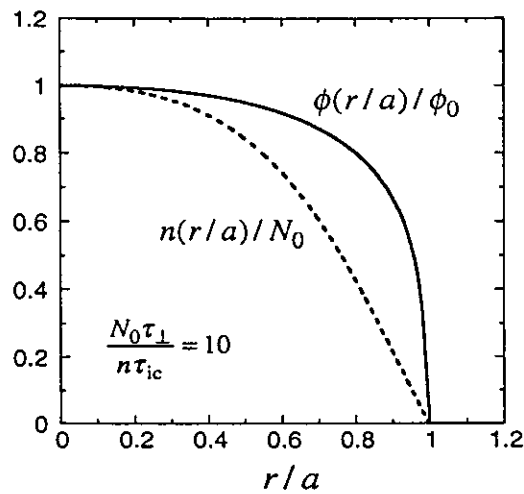


Fig.1 ミラープラズマの定常状態における両極性条件から決まる密度及び電位分布

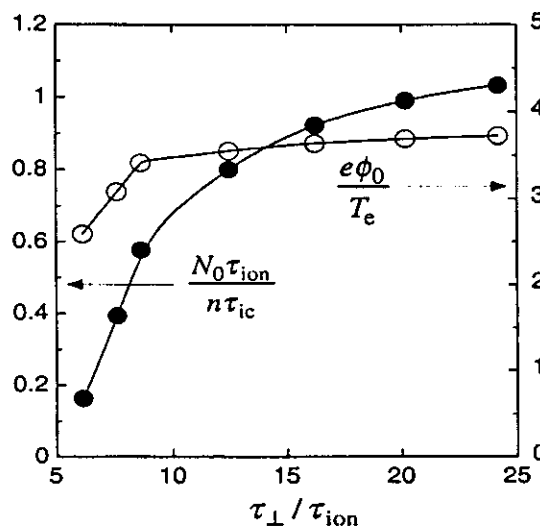


Fig.2 中心軸上の電位 ϕ_0 (白丸) 及び $N_0 \tau_{ion} / n \tau_{ic}$ (黒丸) の $\tau_{\perp} / \tau_{ion}$ 依存性

(2) 電磁波動のトンネル伝播の解析

平衡状態の磁場とプラズマ密度が不均一であるようなプラズマ中における電磁波動の伝播問題を考えた。このような均一系では、波の伝播に関してカットオフや共鳴が存在するので、波の伝播問題は一般に複雑なものになってくる。ここでは一例として、空間1次元の電子・陽電子プラズマを考えて、磁場に沿って伝播するアルヴェン波の伝播に関する相対論的流体シミュレーションを行った。基礎方程式はマクスウェルの式と電子と陽電子に対する連続の式及び運動方程式である。磁場に沿っての伝播モードは、Fig.3に示すようにアルヴェン波と電磁波につながる混成波の2つのモードで、この2つのモード間の共鳴とカットオフで挟まれた領域が伝播できないエバネツセント領域である。このエバネツセント領域を横切って通過する波のトンネル伝播を解析した。

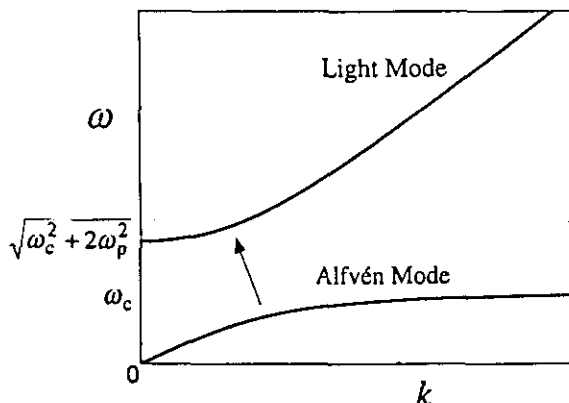


Fig.3 電子・陽電子プラズマにおける磁場に沿って伝播する電磁波動の分散関係

計算結果の一例をFig.4に示す。高密度・高磁場側で励起されたアルヴェン波の連続波が低密度・低磁場側へ伝播していく様子を示したもので、波の一部のみがエバネツセント領域を通過できていることが分かる。残りの殆どは共鳴層で吸収されていると考えられる。波の透過率は波の波長と共鳴・カットオフ間の距離に依存しており、透過率は共鳴・カットオフ間距離に対して指数関数的に減少することが分かった。また、この計算結果はBuddenの理論と定性的に一致していることが分かった。

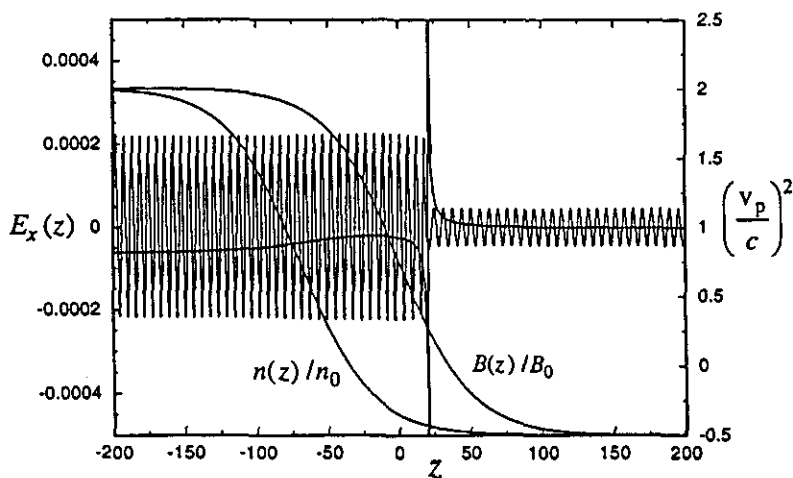


Fig.4 不均一プラズマ中におけるアルヴェン波のトンネル伝播の様子

<論文>

- 1 H.Hojo, M.Nakamura, S.Tanaka, M.Ichimura and A.Mase,
Tandem Mirror Energy Transport with AIC Fluctuations,
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 2, (1999) p.230-233.
- 2 M.Nakamura, M.Ichimura, S.Tanaka, S.Kanazawa, S.Motegi, S.Saasaki, K.Sakata,
C.Nakagawa, K.Kadoya, T.Kawabata, Y.Ohta, H.Hojo, A.Mase, T.Tamano, and K.Yatsu,
Alfvén Wave Excitation due to Pressure Anisotropy in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES.2, (1999) p.314-317.
- 3 M.Yoshikawa, K.Ikeda, Y.Okamoto, E.Kawamori, T.Ito, N.Yamaguchi, A.Mase, T.Tamano
and K.Yatsu,
Calibration of Time- and Space-Resolving Vacuum Ultraviolet Spectrograph for Plasma
Diagnostics in the Tandem Mirror GAMMA 10,
Japanese Journal of Applied Physics **38**, Part 1 No.4A (1999) p.2137-2140.
- 4 T.Goto, K.Ishii, A.Nagao, Y.Goi, Y.Katsuki, N.Kikuno, N.Ishibashi, Y.Ono, M.Yamanashi,
Y.Nakashima, T.Tamano, and K.Yatsu,
Characteristics of 63.6° cylindrical energy analyzer used as charge exchange neutral
particle analyzer,
Review of Scientific Instruments **70**, No.6 (1999) p.2661-2664.
- 5 北條仁士,
ミラープラズマの安定性,
Journal of Plasma and Fusion Research **75**, No. 6 (1999) p.695-703.
- 6 Y.Katsuki, K.Ishii, Y.Ono, N.Kikuno, T.Goto, Y.Goi, M.Nagasaki, N.Ishibashi, T.Tamano,
and K.Yatsu,
The characteristics of the newly designed microchannel plate detector in a strong magnetic
field,
Review of Scientific Instruments **70**, No.8 (1999) p.3319-3323.
- 7 H.Hojo, M.Nakamura, S.Tanaka, M.Ichimura and A.Mase,
Effects of Alfvén Ion Cyclotron Modes on Tandem Mirror Energy Transport,
Journal of Plasma and Fusion Research **75**, No. 9 (1999) p.1089-1094.
- 8 L.G.Bruskin, A.Mase, Y.Yagi, T.Tamano,
Application of Orthogonal Wavelet Decomposition to Plasma Fluctuation Study,
Japanese Journal of Applied Physics **39**, No.11B (1999, November) p.1345-1347.
- 9 Y.Nakashima, K.Yatsu, K.Islam, D.Sato, A.Wada, K.Ishii, A.Itakura, M.Ichimura,
I.Katanuma, K.Kajiwara, S.Kubota, J.Kohagura, S.Kobayashi, T.Saito, T.Sasuga,
Y.Tatematsu, T.Tamano, T.Cho, T.Tokuzawa, Y.Nishizawa, M.Hamada, R.Baba, M.Hirata,
L.Bruskin, H.Hojo, A.Mase, R.Minami, M.Yoshikawa,
Plasma Confinement and Behavior of Plasmas in the Minimum-B Region of the GAMMA
10 Tandem Mirror,

- Journal of Plasma and Fusion Research **75**, No.10 (1999) p.1211-1218.
- 10 K.Yatsu, L.G.Bruskin, T.Cho, M.Hamada, M.Hirata, H.Hojo, M.Ichimura, K.Ishii, A.Itakura, I.Katanuma, Y.Kiwamoto, J.Kohagura, S.Kubota, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, Y.Sakamoto, T.Tamano, Y.Tatematsu, T.Tokuzawa, and M.Yoshikawa,
Plasma Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Nuclear Fusion **39**, No.11Y (1999, November) p.1707-1712.
 - 11 M.Ichimura, H.Hojo, K.Ishii, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, K.Yatsu,
Characteristics of Hot Ions with a Strong Radiofrequency Heating in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Nuclear Fusion **39**, No.11Y (1999, November) p.1995-1999.
 - 12 N.Kikuno, K.Ishii, N.Ishibashi, M.Nagasaki, Y.Katsuki, T.Goto, Y.Goi, Y.Ono, M.Yamanashi, A.Nagao, T.Saito, Y.Tatematsu, A.Suzuki, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu,
Fast two-dimensional potential measurement at the thermal barrier region of the tandem mirror GAMMA 10,
Review of Scientific Instruments **70**, No.11 (1999) p.4251-4259.
 - 13 K.Ishii, T.Goto, Y.Goi, N.Kikuno, Y.Katsuki, M.Nagasaki, Y.Ono, N.Ishibashi, M.Yamanashi, M.Nakamura, I.Katanuma, A.Mase, M.Ichimura, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu,
Observation of Gentle Hump Structure on Energy Distribution Functions of End-Loss Ions in the rf-Driven Tandem Mirror Plasma,
Physical Review Letters **83**, No.12 (1999) p.3438-3441.
 - 14 T.Numakura, T.Cho, J.Kohagura, M.Hirata, R.Minami, Y.Nishizawa, T.Sasuga, M.Yoshida, Y.Sakamoto, Y.Nakashima, T.Tamano, K.Yatsu, and S.Miyoshi,
A Diagnostic Method for Both Plasma Ion and Electron Temperatures Under Simultaneous Incidence of Charge-Exchange Particles and X Rays Into A Semiconductor Detector Array,
Applied Physics Letters **76**, No.2 (2000, January) p.146-148.
 - 15 K.Yatsu, T.Cho, M.Hirata, H.Hojo, M.Ichimura, K.Ishii, A.Itakura, I.Katanuma, J.Kohagura, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, S.Tanaka, Y.Tatematsu, M.Yoshikawa
Potential Control for Improvement of Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Czechoslovak Journal of Physics **49**, Supplement S3 (1999) p.155-166.
 - 16 S.Kobayashi, Y.Nakashima, M.Shoji, K.Tsuchiya, Y.Hasegawa, M.K.Islam, N.Yamaguchi, M.Yoshikawa, A.Mase, T.Tamano, K.Yatsu,
Neutral particle transport under strong hydrogen recycling condition in the GAMMA 10 central cell,
J. Nucl. Mater. **266-269** (1999) p.566-570.
 - 17 Y.Nakashima, A.Sagara, T.Moriwaki, Y.Hironaga, S.Kobayashi, Y.Ishimoto, M.Yoshikawa, T.Tamano, K.Yatsu, K.Tsuchiya, M.Shoji, H.Suzuki, N.Noda, A.Komori, N.Ohyabu, and O.Motojima,
Characteristics of carbon sheet pump in application experiments to a high-temperature

- plasma device,
J. Nucl. Mater. **266-269** (1999) p.901-905.
- 18 A.Mase, H.Negishi, N.Oyama, K.Yatsu, Y.Nagayama, K.Kawahata, K.Watabe, K.Mizuno, H.Matsuura, K.Uchida, A.Miura,
ECE Imaging Work on GAMMA 10 and LHD,
Fusion Engineering and Design (in press).
 - 19 K.Yatsu, T.Cho, M.Hirata, H.Hojo, M.Ichimura, K.Ishii, A.Itakura, I.Katanuma, J.Kohagura, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, Y.Tatematsu, M.Yoshikawa,
Improvement and Longer Operation of Potential Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
26th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, (Maastricht, 1999, June 14-18) ECA Vol.23J p.461-464.
 - 20 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, M.Yoshida
Recent Development of Potential Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Invited: APFA/APPTC'99 Abstracts, (Olympic Parktel, Seoul, Korea, 1999, July 4-7) p.49.
 - 21 M.Yoshikawa, Y.Okamoto, E.Kawamori, T.Ito, C.Watabe, Y.Watanabe, K.Ikeda, N.Yamaguchi and T.Tamano,
Impurity Diagnostics in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Proceedings of the International Seminar on Atomic Processes in Plasmas, (Toki, Japan, 1999, July 29-30) NIFS-PROC-44, Jan. 2000 Eds. T.Kato and I.Murakami, p.140-141.
 - 22 Y.Okamoto, M.Yoshikawa, N.Yamaguchi, C.Watabe, T.Tamano, E.Kawamori and K.Yatsu,
Absolute Calibration of Space- and Time-Resolving Flat-Field Vacuum Ultraviolet Spectrograph for Plasma Diagnostics,
Proceedings of the International Seminar on Atomic Processes in Plasmas, (Toki, Japan, 1999, July 29-30) NIFS-PROC-44, Jan. 2000 Eds. T.Kato and I.Murakami, p.152-153.
 - 23 M.Ichimura, S.Tanaka, S.Kanazawa, M.Nakamura, S.Motegi, S.Saasaki, 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,
2nd General Scientific Assembly of Asian Plasma and Fusion Association joint with 4th Asia Pacific Plasma Theory Conference, (Seoul, 1999, July 4-7) Abstracts p.50.
 - 24 H.Negishi, A.Mase, N.Oyama, H.Matsuura, K.Uchida, A.Miura, Y.Nagayama, K.Kawahata,
A Fully Monolithic Millimeter-Wave Detector for Plasma Diagnostics,
Digest of 24th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, (Monterey, CA, 1999, September) TU-D2.
 - 25 H.Hojo, H.Negishi, Y.Kurosawa and A.Mase,
Ultrashort-Pulse Reflectometry for Off-Center Plasmas,

- Digest of 24th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, (Monterey, CA, 1999, September) TU-D3.
- 26 A.Mase, H.Negishi, N.Oyama, L.Bruskin, S.Kubota, H.Hojo, K.Yatsu, T.Tokuzawa, T.Tokuzawa, Y.Nagayama, K.Kawahata, K.Watabe, K.Mizuno, H.Matsuura, K.Uchida, A.Miura, C.W.Domier, N.C.Luhmann, Jr.,
Millimeter Wave Reflectometry and Imaging,
Invited: Proc. 9th Int. Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, (Lake Tahoe, 1999, Sept.26-Oct.1) p.255-260.
 - 27 T.Cho, T.Numakura, J.Kohagura, M.Hirata, R.Minami, T.Sasuga, Y.Nishizawa, M.Yoshida, S.Nagashima, Y.Nakashima, K.Ogura, T.Tamano, K.Yatsu, and S.Miyoshi
A Novel Method for Simultaneous Observations of Plasma Ion and Electron Temperatures Using A Semiconductor Detector Array,
5th International Conference on Position-Sensitive Detectors, (London, 1999, September 13-17) 36.
 - 28 M.Hirata, T.Cho, J.Kohagura, S.Kanke, T.Kondoh, R.Minami, T.Numakura, M.Yoshida, T.Sasuga, Y.Nishizawa, T.Tamano, K.Yatsu, and S.Miyoshi,
Tomographic Reconstruction of Plasma Electron Temperature Profiles Using Semiconductor Detector Arrays in the Elliptic Transition Region and the Circular Central Cell of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
5th International Conference on Position-Sensitive Detectors, (London, 1999, September 13-17) 37.
 - 29 J.Kohagura, T.Cho, M.Hirata, T.Numakura, R.Minami, T.Sasuga, Y.Nishizawa, M.Yoshida, S.Nagashima, T.Tamano, K.Yatsu, S.Miyoshi, K.Hirano, and H.Maezawa,
Effects of Nuclear-Fusion Produced Neutrons on Silicon Semiconductor Plasma X-ray Detectors,
5th International Conference on Position-Sensitive Detectors, (London, 1999, September 13-17) 38.
 - 30 T.Saito, Y.Tatematsu, Y.Kiwamoto, H.Abe, M.Ishikawa, K.Kajiwarra, 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,
Invited: IAEA TCM on ECRH Physics and Technology for Fusion Devices and 11th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Oh-arai, Japan, October 4-8, 1999.
 - 31 Y.Tatematsu, T.Saito, Y.Kiwamoto, K.Ito, H.Abe, M.Ishikawa, H.Koyama, I.Katanuma, and K.Yatsu,
Cyclotron Emission Spectra from Collisionless Electrons Resonantly Heated by Cyclotron Waves in a Magnetic Mirror,
IAEA TCM on ECRH Physics and Technology for Fusion Devices and 11th Joint

- Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating,
Oh-arai, Japan, October 4-8, 1999.
- 32 Y.Nakashima, H.Aminaka, R.Baba, T.Cho, M.Ichimura, K.Ishii, Y.Ishimoto, E.Ishinuki,
K.Md.Islam, I.Katanuma, J.Kohagura, Y.Kawasaki, S.Kobayashi, T.Saito, D.Sato,
Y.Tatematsu, A.Wada, M.Yoshikawa, and K.Yatsu,
Study of plasma confinement and plasma facing components for steady-state operation in
the GAMMA 10 tandem mirror,
2nd IAEA Technical Committee Meeting on Steady-State Operation of Magnetic Fusion
Devices, (Fukuoka, Japan, 1999, October 25 - 29) Vol.II, p.529.
- 33 M.Ichimura, S.Tanaka, M.Nakamura, K.Sakata, S.Kanazawa, S.Saasaki, C.Nakagawa,
Y.Ohta, K.Kadoya, T.Kawabata, M.Oikawa, H.Kano, M.Sasaki, H.Hojo, Y.Nakashima,
T.Saito, K.Yatsu,
Behaviour of Hot Ions and Spontaneously Excited Alfvén Ion Cyclotron Mode in the
GAMMA 10 Tandem Mirror,
6th IAEA Technical Committee Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement
Systems, (Naka, 1999, November 12-14), JAERI-memo 11-177, (2000) p.231-239.
JAERI-Conf 2000-04, p.113-p.116
- 34 K.Ishii, T.Goto, Y.Goi, N.Kikuno, Y.Katsuki, M.Yamanashi, Y.Takemura, M.Nakamura,
I.Katanuma, M.Ichimura, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu,
Gentle hump structure in the loss region of the velocity space in the RF driven tandem
mirror
41st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, (Seattle, Washington, 1999,
November 15-19) p.129 (No.5387, GO2.17).
- 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,
Development of Potential Confinement in GAMMA 10 Tandem Mirror,
41st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society,
(Seattle, Washington, 1999, November 15-19) BP1.96.
Bulletin of the American Physical Society 44, No.7 (1999, November) p.47.
- 36 T.Tamano, I.Katanuma,
Physics of Plasma Confinement with a Transport Barrier,
41st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society,
(Seattle, Washington, 1999, November 15-19) UP2 41.
Bulletin of the American Physical Society 44, No.7 (1999, November) p.315.
- 37 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,
10th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion
(ITC-10), (Toki City, 2000, January 18-21).

- 38 E.Kawamori, T.Tamano, Y.Nakashima, M.Yoshikawa, S.Kobayashi, T.Cho, K.Ishii, A.Mase, K.Yatsu,
Preliminary Pellet Injection Experiment in the GAMMA10 Tandem Mirror,
10th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (ITC-10), (Toki City, 2000, January 18-21).
- 39 H.Hojo and A.Mase,
Ultrashort-Pulse Cross Polarization Scattering in Plasmas with Magnetic Shear,
10th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (ITC-10), (Toki City, 2000, January 18-21).
- 40 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,
10th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (ITC-10), (Toki City, 2000, January 18-21) P I-42.
- 41 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 GAMMA 10 tandem mirror plasmas,
10th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (ITC-10), (Toki City, 2000, January 18-21) P I-45.
- 42 M.Ichimura, T.Cho, M.Hirata, H.Hojo, K.Ishii, A.Itakura, I.Katanuma, J.Kohagura, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, Y.Tatematsu, K.Yatsu, M.Yoshikawa,
Long-Pulse Operation of the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Invited: 10th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (ITC-10), (Toki City, 2000, January 18-21) VII-1, Abstracts P.31.
- 43 T.Tamano,
A Prospect of the Tandem Mirror Fusion Approach,
Current Trends in International Fusion Research, Proceedings of the Second Symposium (1999) p.197-202.
- 44 若谷誠宏、嶋田道也、玉野輝男、藤原正巳
特別「ITER 計画（国際熱核融合実験炉: International Thermonuclear Experimental Reactor）」
日本物理学会誌 **54**, No.6 (1999) p.417-422.
- 45 玉野輝男、岡田成文、須藤滋、井上信幸
会議報告「米国核融合・プラズマ研究の現状調査」
Journal of Plasma and Fusion Research **75**, No. 7 (1999) p.866-871.
- 46 T.M.オニール 著，玉野輝男 訳
捕捉された単一種電荷のプラズマ，
パリテイ Vol.14, No.11 (1999) p.4-12.

- 47 T.Tamano et al.,
小特集「ITER 物理 R&D の成果」
Journal of Plasma and Fusion Research **76**, No.1 (2000) p.19-64; **76**, No.2 (2000) p.116-165.
- 48 Y.Nakashima, Y.Ishimoto, S.Kobayashi, M.Yoshikawa, K.Yatsu, K.Tsuchiya, A.Sagara, M.Shoji, H.Suzuki, N.Noda, A.Komori, N.Ohyabu, O.Motojima
Characteristics of particle balance in the Carbon Sheet Pump,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 1998 - March 1999
(National Institute for Fusion Science, 1999) p.83.
- 49 M.Yoshikawa, N.Yamaguchi, K.Ikeda, Y.Okamoto, E.Kawamori, T.Tamano and K.Yatsu,
Absolute Calibration of Time- and Space-Resolving Soft X-Ray Spectrograph for Plasma Diagnostics,
Photon Factory Activity Report 1998 **16** Part B, (High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1999) p. 291(No.98G17).

< 学位論文 >

博士論文

(物理学研究科)

石島達夫 [博士 (理学)]

Study on Impurity Radiation and Transport of JT-60U Plasmas

香月勇三 [博士 (理学)]

Study of Plasma Potential Using a Newly-Designed Beam Probe System at the Inner Mirror Throat

後藤哲也 [博士 (理学)]

Observation of Ion Diffusion in a Velocity Space Induced by Microinstability in a Mirror Plasma

修士論文

(物理学研究科)

石川正男 [修士 (理学)]

ガンマ 10 プラグ部における基本波 E C R 加熱分布の軸対称化と新アンテナの導入

石本祐樹 [修士 (理学)]

GAMMA10 プラズマを用いたカーボンシートポンプの排気特性に関する研究中川智博 [修士 (理学)]

GAMMA10 におけるアルベン速波を用いた高密度プラズマ生成
沼倉友晴 [修士 (理学)]

半導体検出器を用いた新しいイオン及び電子温度同時計測・解析法の開発
根岸広和 [修士 (理学)]

モノリシック検出器を用いたミリ波イメージングアレイの開発
南龍太郎 [修士 (理学)]

新型半導体計測器アレイを用いたガンマ10のX線時間・空間同時計測
山梨 睦 [修士 (理学)]

ガンマ10におけるコアプラズマの径方向電位分布の平坦化と閉じ込め
(理工学研究科)

伊藤崇裕 [修士 (工学)]

ガンマ10不純物イオンからの紫外可視スペクトルの測定
流石岳史 [修士 (工学)]

半導体検出器を用いた新構造のイオン・エネルギー・スペクトル分析器の開発
とプラズマ計測への適用
佐藤大輔 [修士 (工学)]

GAMMA10 アンカー部における導体壁を用いたプラズマ制御
西沢祐樹 [修士 (工学)]

新型端損失イオン計測器の製作とイオン閉じ込め電位の研究
馬場隆太 [修士 (工学)]

電位閉じ込め実験における密度上昇時のイオン温度及びエネルギーバランスの
研究

和田篤志 [修士 (工学)]

プローブを用いた極小磁場変換部における周辺プラズマの輸送に関する研究

< 講演 >

- 1 H.Hojo,
Study of Electromagnetic Subcycle Pulse Propagation,
International Informal Workshop on Solitons in Ultraintense Laser-Plasma Interactions
(1999 年 5-6 月, 筑波大学).
- 2 A.Mase, H.Negishi, N.Oyama, L.Bruskin, S. Kubota, H.Hojo, K.Yatsu, T.Tokuzawa,
T.Tokuzawa, Y.Nagayama, K.Kawahata, K.Watabe, K.Mizuno, H.Matsuura, K.Uchida,
A.Miura, C.W.Domier, N.C.Luhmann, Jr.,
Millimeter Wave Reflectometry and Imaging,
特別講演: The Ninth International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics,
Lake Tahoe, Sept. 26 - Oct. 1 (1999).
- 3 A.Mase, H.Negishi, N.Oyama, K.Yatsu, Y.Nagayama, K.Kawahata, K.Watabe, K.Mizuno,
H.Matsuura, K.Uchida, A.Miura,
ECE Imaging Work on GAMMA 10 and LHD,
招待講演: The 11th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron
Cyclotron Resonance Heating, Oh-arai, Oct. 4-8 (1999).
- 4 H.Hojo,

- Ultra-Short Pulse Propagation and Subcycle Soliton,
JIFT Workshop for High Field Science (1999 年 10 月, 東京都立大学).
- 5 H.Hojo,
Theory and Experiment on MHD Stability of GAMMA 10,
US-Japan Workshop on Effects of Plasma Flows and Edge Plasmas in Mirror Devices
(1999 年 10 月, General Atomics, San Diego).
- 6 H.Hojo,
Temperature Anisotropy Driven Instabilities and Its Effects in Mirror Systems,
US-Japan Workshop on Effects of Plasma Flows and Edge Plasmas in Mirror Devices
(1999 年 10 月, General Atomics, San Diego).
- 7 H.Hojo,
Microwave Diagnostic Study in GAMMA 10,
US-Japan Workshop on Effects of Plasma Flows and Edge Plasmas in Mirror Devices
(1999 年 10 月, General Atomics, San Diego).
- 8 Y.Nakashima,
Fueling studies in the GAMMA 10 tandem mirror,
US-Japan Workshop on Plasma Fueling and Active Particle Control, (March 1 - 3, 2000,
Livermore, USA).
- 9 Y.Tatematsu,
Fundamental ECRH with simultaneous injection of two microwave beams and its effect on
plasma confinement in the GAMMA 10 tandem mirror,
US-Japan Workshop on RF Physics, (Princeton Univ., U.S.A., March 14-16, 2000).
- 10 北條仁士,
Physics of Subcycle Waves,
Seminar at Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin (2000 年 3 月,
The University of Texas at Austin).
- 11 中嶋洋輔,
閉じ込め装置における中性粒子の輸送解析,
第 1 回「PWI データベースの整備と関連コードのライブラリ化」作業会 (1999
年 4 月 21 日, 核融合科学研究所)
- 12 中嶋洋輔,
ガンマ 10 プラズマ壁相互作用における最近の話題,
平成 11 年度第 1 回 PFC/PSI 研究会 (1999 年 7 月 12,13 日, 北大)
- 13 小林進二, 中嶋洋輔,
中性粒子輸送における粒子反射及び温度非等方性の効果,
核融合科学研究所研究会「荷電粒子-中性粒子-材料複合系としてのダイバータ
科学」研究会 (1999 年 8 月 10 日, 核融合科学研究所)
- 14 吉川正志, 岡本裕司, 渡部力, 河森栄一郎, 伊藤崇裕, 渡辺吉彦, 池田勝則,
山口直洋, 玉野輝男,

ガンマ10プラズマの不純物イオンスペクトル計測

日本物理学会 1999 年秋の分科会 (1999 年 9 月, 岩手大学) 27aYN-3.

- 15 大沢美美子, 吉川正志, 安藤利得, 鎌田啓一, 増崎克,

ヘリウム線のキャビトン電場による偏光の分光測定,

日本物理学会 1999 年秋の分科会 (1999 年 9 月, 岩手大学) 24aYG-10.

- 16 井上武, 田中聡覚, 川上一樹, 藤本孝, 伊藤崇裕, 吉川正志,

トカマクプラズマに対する偏光分光,

日本物理学会 1999 年秋の分科会 (1999 年 9 月, 岩手大学) 26AYG-6.

- 17 中嶋洋輔,

DEGAS モンテカルロコードの移植作業,

第3回「PWI データベースの整備と関連コードのライブラリ化」作業会 (1999 年 11 月 12 日, 核融合科学研究所)

- 18 間瀬 淳, 徳沢季彦, BRUSKIN Leonid, 近木祐一郎, 久保田重之, 大山直幸,

板倉昭慶, 市村 真, 北條仁士, 玉野輝男, 谷津 潔, 小沼 剛, 後藤巨樹,

マイクロ波反射計による密度分布および揺動計測,

学会賞受賞記念講演: プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館).

- 19 齊藤輝雄, 阿部 拓, 石井亀男, 石川正男, 板倉昭慶, 市村 真, 片沼伊佐夫,

菊野長與, 小波蔵純子, 小林進二, 小山大樹, 流石岳史, 嶋 頼子, 立松芳典,

田中覚, 玉野輝男, 長 照二, 中嶋洋輔, 西沢祐樹, 馬場隆太, 平田真史,

北條仁士, 間瀬 淳, 谷津 潔, 吉川正志, 吉田麻衣子,

ガンマ10プラグ部電子加熱の軸対称化と電位閉じ込めの長時間維持,

招待講演: プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25aA3

- 20 長 照二, 平田真史, 北條仁士, 市村真, 石井亀男, 板倉昭慶, 片沼伊佐夫,

小波蔵純子, 中嶋洋輔, 齊藤輝雄, 立松芳典, 玉野輝男, 吉川正志, 谷津 潔,

タンデム・ミラー・プラズマの研究の現状と展望,

招待講演: プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) シンポジウム II-2.

- 21 北條仁士,

ミラープラズマの物理における高エネルギー粒子の効果,

招待講演: プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館), シンポジウム V.

- 22 玉野輝男, 片沼伊佐夫

輸送障壁の物理について,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) p.39.

- 23 近木祐一郎, 間瀬 淳, 加藤雅之, 後藤巨樹, 根岸広和, 嶋 頼子, 板倉昭慶,

市村 真, 北條仁士, 玉野輝男, 谷津 潔,

Cross-Polarization Scattering 法を用いたプラズマ内部磁場揺動計測,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館)

- 24 根岸広和, 間瀬 淳, 大山直幸, 松浦裕之, 内田賢治, 三浦 明, 長山好夫,
川端一男,
電子サイクロトロン放射イメージング計測の開発,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館)
- 25 北條仁士,
不均一プラズマにおける電磁波動のトンネル伝播,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館), 25aB2.
- 26 武村祐一郎, 石井亀男, 菊野長與, 山梨睦, 香月勇三, 後藤哲也, 五井康裕,
下尾真理, 筒井圭一, 市村真, 田中覚, 片沼伊佐夫, 板倉昭慶, 玉野輝男,
谷津潔,
タンデムミラーにおける径方向電場の変化と低周波揺動,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pC14p.
- 27 山梨睦, 石井亀男, 菊野長與, 武村祐一郎, 香月勇三, 後藤哲也, 五井康裕,
下尾真理, 筒井圭一, 齊藤輝雄, 阿部拓, 片沼伊佐夫, 板倉昭慶, 玉野輝男,
谷津潔,
ガンマ 10 コアプラズマの径方向電位分布の平坦化と閉じ込め,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pC15p.
- 28 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 南龍太郎, 西沢祐樹, 流石岳史,
吉田麻衣子, 永嶋賢史, 吉川正志, 中嶋洋輔, 坂本宜照, 前澤秀樹, 玉野輝男,
谷津 潔,
半導体新感度理論を拡張した新しい荷電交換中性粒子・X 線・イオンの同時計測
に基づく単一ショットイオン温度・電子温度同時計測・解析法の開発と適用,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC17p.
- 29 小波蔵純子, 長 照二, 平田真史, 沼倉友晴, 南龍太郎, 流石岳史, 西沢祐樹,
吉田麻衣子, 永嶋賢史, 吉川正志, 中嶋洋輔, 前澤秀樹, 玉野輝男, 谷津 潔,
JET DT 反応生成ニュートロンの半導体検出器に対する影響と X 線検出器新感度理
論に基づく感度変化計算法の提唱,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC18p.
- 30 沼倉友晴, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 南龍太郎, 流石岳史, 西沢祐樹,
吉田麻衣子, 永嶋賢史, 馬場隆太, 中嶋洋輔, 坂本宜照, 玉野輝男, 谷津 潔,
半導体検出器を用いた荷電交換中性粒子計測に拠る新しいイオン温度空間分布計
測・解析法の開発,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC19p.
- 31 南龍太郎, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 沼倉友晴, 流石岳史, 西沢祐樹,
吉田麻衣子, 永嶋賢史, 吉川正志, 玉野輝男, 谷津 潔,
半導体計測器アレイを用いたガンマ 10 アンカー部・セントラル部等の X 線時間・
空間同時計測,
プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC20p.
- 32 流石岳史, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 西沢祐樹, 吉田麻衣子, 永嶋賢史,

沼倉友晴, 南龍太郎, 中嶋洋輔, 坂本宜照, 玉野輝男, 谷津 潔,

半導体検出器のイオン感度特性を利用した新型イオン・エネルギー・スペクトル
分析器の開発とプラズマ計測への適用,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC21p.

- 33 西沢祐樹, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 流石岳史, 吉田麻衣子, 永嶋賢史,
沼倉友晴, 南龍太郎, 坂本宜照, 玉野輝男, 谷津 潔,

計測器への高速電子入射下における入射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 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC22p.

- 34 吉田麻衣子, 長 照二, 平田真史, 小波蔵純子, 西沢祐樹, 流石岳史, 永嶋賢史,
沼倉友晴, 南龍太郎, 坂本宜照, 玉野輝男, 谷津 潔,

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ガンマ 10 のイオン
閉じ込め電位及び端損失粒子の空間分布の相関の研究,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC23p.

- 35 田中覚, 市村真, 犬竹正明, 竿崎宗春, 角谷清臣, 金澤清光, 中村基征, 坂田勝亮,
中川智博, 川端敏毅, 太田百合子, 加納英和, 及川正崇, 佐々木誠, 北條仁士,
石井亀男, 玉野輝男, 谷津潔,

ガンマ 10 における巨視的安定性の制御実験,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 2aA4.

- 36 中村基征, 市村真, 太田百合子, 田中覚, 金澤清光, 竿崎宗春, 中川智博,
坂田勝亮, 角谷清臣, 川端敏毅, 及川正崇, 佐々木誠, 加納英和, 間瀬淳,
北條仁士, 玉野輝男, 谷津潔,

AIC 波動の軸方向構造 III,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 2aA13p

- 37 太田百合子, 市村真, 茂木信二, 中村基征, 田中覚, 金澤清光, 竿崎宗春,
坂田勝亮, 中川智博, 角谷清臣, 川端敏毅, 及川正崇, 加納英和, 佐々木誠,
北條仁士, 板倉昭慶, 玉野輝男, 谷津潔,

ICRF 波動入射によるプラズマ計測 III,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 2aA5p

- 38 坂田勝亮, 川端敏毅, 加納英和, 市村真, 中村基征, 田中覚, 金澤清光, 竿崎宗春,
中川智博, 太田百合子, 角谷清臣, 及川正崇, 佐々木誠, 齊藤輝雄, 北條仁士,
石井亀雄, 中嶋洋輔, 玉野輝男, 谷津潔,

GAMMA10 における半導体検出器を用いた高エネルギーイオン測定 II,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 2aA3p

- 39 角谷清臣, 田中覚, 市村真, 金澤清光, 中村基征, 竿崎宗春, 坂田勝亮, 中川智博,
太田百合子, 川端敏毅, 及川正崇, 佐々木誠, 加納英和, 玉野輝男, 谷津潔,

GAMMA10 における低周波磁場揺動の解析,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 2aA11p

- 40 竿崎宗春, 田中覚, 角谷清臣, 市村真, 金澤清光, 中村基征, 坂田勝亮, 中川智博,
太田百合子, 川端敏毅, 及川正崇, 佐々木誠, 加納英和, 小林進一, 吉川正志,

石井亀男, 北條仁士, 中嶋洋輔, 玉野輝男, 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,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 2aA12p

- 41 川端敏毅, 坂田勝亮, 佐々木誠, 市村真, 中村基征, 田中覚, 金澤清光, 竿崎宗春, 中川智博, 太田百合子, 角谷清臣, 及川正崇, 加納英和, 斉藤輝雄, 北條仁士, 石井亀雄, 中嶋洋輔, 玉野輝男, 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,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 2aA2p

- 42 中川智博, 市村真, 田中覚, 金澤清光, 中村基征, 竿崎宗春, 坂田勝亮, 角谷清臣, 太田百合子, 川端敏毅, 及川正崇, 加納英和, 佐々木誠, 斉藤輝雄, 玉野輝男, 谷津潔,

GAMMA10における高周波($\omega/\omega_{ci}>10$)を用いた高周波プラズマ生成,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 2aA4p

- 43 阿部拓, 斉藤輝雄, 立松芳典, 石川正男, 小山大樹, 際本泰士, 市村真, 石井亀男, 板倉昭慶, 谷津潔,

タンデムミラープラズマにおける熱流計測 (III)

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 23pC8p

- 44 石川 正男, 斉藤 輝雄, 立松 芳典, 際本 泰士, 阿部拓, 小山 大樹, 長 照二, 石井亀男, 谷津 潔,

ガンマ10におけるプラグ ECRH 用新アンテナの導入

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 23pC9p

- 45 立松芳典, 斉藤輝雄, 際本泰士, 阿部拓, 石川正男, 小山大樹, 片沼伊佐夫, 谷津潔,

ミラー磁場中における2ビームマイクロ波入射による電子加熱の検討,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 23pC10p

- 46 小山大樹, 斉藤輝雄, 立松芳典, 際本泰士, 阿部拓, 石川正男, 谷津潔,

吸収法による荷電交換高速中性粒子のエネルギー空間分布計測,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 25pC23p

- 47 馬場隆太, 中嶋洋輔, 織戸公成, 庄司 主, 小林進二, 石本祐樹, 佐藤大輔, 和田篤志, 網中洋明, 石貫英一, 川崎陽子, 市村 真, 長 照二, 玉野輝男, 谷津 潔, ガンマ10 電位閉じ込め実験におけるセントラル部イオン温度計測,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 23pC1p.

- 48 佐藤大輔, 川崎陽子, 中嶋洋輔, 和田篤志, 小林進二, 石本祐樹, 馬場隆太, 網中洋明, 石貫英一, 名取尊良, 織戸公成, 加藤達也, 片沼伊佐夫, 谷津 潔,

GAMMA10 アンカー部導体壁を用いたプラズマ制御,

プラズマ・核融合学会第16回年会(1999年11月, 宮城県民会館) 23pC16p.

- 49 和田篤志, 中嶋洋輔, 佐藤大輔, 川崎陽子, 名取尊良, 小林進二, 石本祐樹, 馬場隆太, 網中洋明, 石貫英一, 織戸公成, 加藤達也, 五井康裕, 武村祐一朗, 石井亀男, 片沼伊佐夫, 谷津 潔,

GAMMA10 極小磁場部における周辺プラズマのプロープ計測

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pC17p.

- 50 小林進二, 中嶋洋輔, 際本泰士, 石本祐樹, 佐藤大輔, 馬場隆太, 和田篤志, 網中洋明, 石貫英一, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 庄司 主, 玉野輝男, 谷津 潔,

タンデムミラーにおける粒子輸送,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pC18p.

- 51 石貫英一, 中嶋洋輔, 石本祐樹, 小林進二, 佐藤大輔, 馬場隆太, 和田篤志, 網中洋明, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 吉川正志, 玉野輝男, 谷津 潔, GAMMA10 における脱離ガス分析に基づくプラズマポンピングの研究,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pC19p.

- 52 網中洋明, 中嶋洋輔, 小林進二, 石本祐樹, 佐藤大輔, 馬場隆太, 和田篤志, 石貫英一, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 庄司 主, 谷津 潔, 吉川正志, 河森栄一郎, 渡辺吉彦,

ガンマ 10 アンカー部内側磁場変換部における $H\alpha$ 線分布計測,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25pC25p.

- 53 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, 佐藤大輔, 馬場隆太, 和田篤志, 網中洋明, 川崎陽子, 織戸公成, 加藤達也, 名取尊良, 玉野輝男, 谷津 潔,

カーボンシートポンプの実機への適用試験 V ~ 入射高速中性粒子と脱離粒子のバランス,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 26pA27p.

- 54 岡本裕司, 吉川正志, 山口直洋, 渡部力, 石島達夫, 河森栄一郎, 伊藤崇裕, 渡辺吉彦, 古川卓俊, 玉野輝男, 谷津潔,

真空紫外分光器を用いたガンマ 10 における不純物イオンスペクトルの測定 III,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pc6p

- 55 伊藤崇裕, 吉川正志, 古川卓俊, 石島達夫, 岡本裕司, 河森栄一郎, 渡辺吉彦, 渡部力, 玉野輝男, 谷津潔,

GAMMA10 における不純物イオンスペクトルの可視分光計測,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 23pc7p

- 56 河森栄一郎, 玉野輝男, 中嶋洋輔, 吉川正志, 岡本裕司, 小林進二, 伊藤崇裕, 網中洋明, 渡辺吉彦, 石井亀男, 市村真, 斉藤輝雄, 長照二, 谷津潔,

ガンマ 10 におけるペレット入射を用いた粒子供給,

プラズマ・核融合学会第 16 回年会 (1999 年 11 月, 宮城県民会館) 25aA5

- 57 北條仁士,

サブサイクル・モノサイクル領域における波動現象,

「プラズマ科学の新しい展開」研究会 (1999 年 12 月, 核融合科学研究所) .

- 58 北條仁士,

Recent Reflectometric Study in GAMMA 10,

- プラズマ中の揺動計測法の開発と改良」(2000 年 1 月, 核融合科学研究所) .
- 59 北條仁士,
Simulation on Tunneling Wave Propagation in an Electron-Positron Plasma,
第 3 回シミュレーション・サイエンス・シンポジウム (2000 年 1 月, 核融合科学研究所) .
- 60 北條仁士,
Physics Issues for Tandem Mirror Reactors,
「核融合炉心システム解析」研究会 (2000 年 1 月, 核融合科学研究所) .
- 61 小波蔵純子, 長 照二, 平田真史, 玉野輝男, 谷津 潔,
X 線計測に基づく電位捕捉電子の研究,
第 3 回「若手科学者によるプラズマ研究会」(2000 年 1 月 31-2 月 2 日, 日本原子力研究所) .
- 62 田中聡寛, 井上武, 川神一樹, 岩前敦, 藤本孝, WT-3 グループ,
GAMMA-10 グループ,
トカマクおよびタンデムミラープラズマに対する偏光分光,
核融合研究所 研究会「プラズマ分光研究会のフロンティア」(2000 年 2 月 核融合科学研究所)
- 63 吉川正志, 伊藤崇裕, 古川卓俊,
ガンマ 10 プラズマの紫外可視スペクトルの測定,
核融合科学研究所 研究会「プラズマ分光研究のフロンティア」(2000 年 2 月, 核融合科学研究所) .
- 64 岡本裕司, 吉川正志, 渡部力, 山口直洋,
ガンマ 10 プラズマ VUV 分光計測,
核融合科学研究所 研究会「プラズマ分光研究のフロンティア」(2000 年 2 月, 核融合科学研究所) .
- 65 渡辺吉彦, 吉川正志,
2 次元多チャンネル $H\alpha$ 線検出器を用いた GAMMA10 プラズマ挙動の研究,
核融合科学研究所 研究会「プラズマ分光研究のフロンティア」(2000 年 2 月, 核融合科学研究所) .
- 66 渡部力, 吉川正志, 岡本裕司,
軟 X 線分光器を用いた GAMMA10 プラズマの不純物分光,
核融合科学研究所 研究会「プラズマ分光研究のフロンティア」(2000 年 2 月, 核融合科学研究所) .
- 67 大沢美美子, 増崎克, 吉川正志, 安藤利得, 鎌田啓一,
ヘリウム線のキャビトン電場による偏光測定,
核融合科学研究所 研究会「プラズマ分光研究のフロンティア」(2000 年 2 月, 核融合科学研究所) .
- 68 中嶋洋輔,
ガンマ 10 タンデムミラーにおけるプラズマ閉じ込め改善,

核融合科学研究所研究会「ヘリカル系プラズマ閉じ込めの改善」作業会（2000年3月7,8日，京大）

- 69 大沢芙美子，吉川正志，安藤利得，鎌田啓一，増崎克，
ヘリウム線のキャビトン電場による偏光の分光測定Ⅱ，
日本物理学会 2000 年春の分科会（2000 年 3 月，関西大学）24aD-13.
- 70 田中 聡寛，井上武，川神一樹，岩前敦，藤本孝，伊藤崇裕，吉川正志，玉野輝男，
タンデムミラー型プラズマに対する偏光分光，
日本物理学会 2000 年春の分科会（2000 年 3 月，関西大学）25pH-9
- 71 吉川正志，増崎克，大沢芙美子，安藤利得，鎌田啓一，
大強度相対論的電子ビーム・プラズマ相互作用によって生じる強いラングミュア
乱流電場の分光測定，
核融合科学研究所 研究会「プラズマ偏光分光研究会」（2000 年 3 月，核融合科学研究所）

<受賞>

- 1 平成 11 年度プラズマ・核融合学会 学会賞 第 4 回技術進歩賞
間瀬 淳、徳沢季彦、Leonid Bruskin、近木祐一郎、久保田重之、大山直幸、
板倉昭慶、市村 真、北條仁士、玉野輝男、谷津 潔、小沼 剛、後藤巨樹
マイクロ波反射計による密度分布および揺動計測
プラズマ・核融合学会（1999 年 11 月）