

VIII プラズマ研究グループ

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	小波蔵純子、平田真史、立松芳典、吉川正志
技術専門官	平田久子
技術専門職員	大川和夫
大学院生	20名

共同研究者

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

研究協力者

技術専門職員	杉山昭彦、和所保規
技官	遠藤洋一、嶋 頼子
研究支援推進員	土肥三郎
大学院生	9名

【1】プラズマ研究グループの研究の概要

(1) 研究概要と研究目的

当プラズマ研究グループでは、核融合実用に必要不可欠で未解決な課題である、電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の解明に向け、タンデムミラー装置を基盤に研究を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に貢献するブレークスルーを喚起する一層の研究展開を図ることを基本的な研究目標として、研究を推進している。

殊に、目標とする電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された国際原子力機関 (IAEA) の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議」[1]において、当研究グループが世界で初めてその有効性を実証した、先駆的実績を持つテーマである。

以来、この成果は、タンデムミラーの研究 [2-7] はもとより、国際熱核融合実験炉ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持って発展・展開を見ている。

このように、本学のオリジナリティー・世界的先駆性を基盤に、プラズマ核融合研究の世界的プロジェクトの心臓部である炉心プラズマ閉じ込めの、メカニズムや比例則に内在する物理の解明にも普遍的に繋がりを、上記の研究目標に沿って研究を推進している。

プラズマの電位閉じ込め研究の必要不可欠な重要性とその意義は、① 長年にわたり研究された磁場のみによるプラズマ閉じ込めに比べ、閉じ込め性能が著しく改善・向上すること。② ITER等のトカマク型・ヘリカル型の環状系プラズマ閉じ込めの改善 (高プラズマ閉じ込めモード: Hモード) も含む、広く普遍的で顕著なプラズマ閉じ込め改善・向上方法であること。③ このHモード/電位による高効率プラズマ閉じ込めの発見・これによる比例則により初めてITER装置の巨大化が避けられ、経済的最終設計が可能になったこと。以上の事実が、「核融合エネルギー実用に対する電位によるプラズマ閉じ込め向上の研究の必要不可欠性・重要性の証左」を与えている。

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

当研究グループは、このように、世界的先駆的研究成果をあげそれを発展させてきた電位閉じ込め研究実績を礎に、また核融合発電の実用化の鍵を握るプラズマ閉じ込め性能向上、更にその物理機構の解明を目指して、「電位形成・電位によるプラズマ閉じ込め向上のメカニズムの解明」を推進・展開することを、今後の研究展開・将来構想の柱として描いている。

(2) 研究成果：電位生成と電位閉じ込め物理則

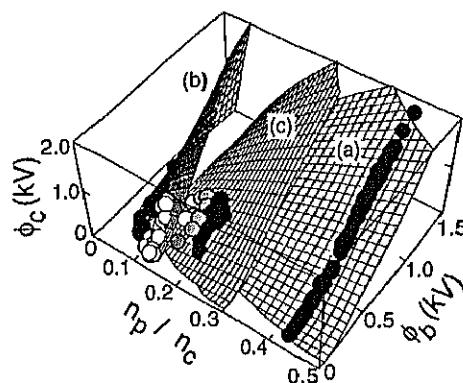
我々は先ず、今後の中長期計画の基盤となる、これまでに研究されてきたガンマ10の代表的2つのプラズマ・モードの物理解明と、個々のモードの比例則の構築を行った。即ち、ガンマ10の主要なタンデムミラー・プラズマ・モードである (i) kV オーダーのプラズマ閉じ込め電位生成を達成した「高電位モード」、及び (ii) 10 keV を超えるバルク・イオン温度を達成し核融合生成中性子の発生に成功した「高温イオン・モード」に対して、夫々のモードで、(i)従来タンデムミラープラズマ閉じ込め電位生成理論の定説であったコーエンの「強い電子サイクロトロン加熱(ECH)理論」[8] と、(ii)「生成電位のプラズマ閉じ込めへの効果」の定説であるパスツコフ理論 [9] の成立を実験により証明した。

そして更に、上述の個別モードの物理比例則解明により、タンデムミラー核融合研究の本質である、電位生成と生成電位の効果に対する、今後の研究の発展への新たな「物理的基盤」を与える「統合物理比例則の構築」を目指して、米国物理学会誌 *Physical Review Letters* [3] 等に、新しい「電位生成電位効果の統合理論」を提唱し、加えて2002年のIAEA [7]で詳しいデータと共にその有効性を報告するに到った。これを第1図に示す。

「高電位モード」、及び「高温イオン・モード」の電位生成機構に共通する物理法則を見出す事は、両モードを統合し高電位・高温プラズマを同時に維持する電位生成手法の、将来への比例則・予測をする上で、学術基盤としての本質を成す。

そのために、我々が提唱した、「コーエンの強い ECH 理論」[8] による生成電位式 $\phi_c = T_e [0.665 (n_p/n_c) \exp(1.19 \phi_b/T_e)]^{2/3} - \phi_b$ に対し、この式の電子温度 T_e [keV]を決める物理機構として、パスツコフの電位閉じ込め効果に関する式 [9] を用いサーマルバリア電位 ϕ_b [kV] による電子エネルギー閉じ込め時間を導出し、エネルギー・バランス式からの予想温度式を求め上式の T_e に代入した。[即ち、 $x = \phi_b/T_e = f^{-1} (2.01 \times 10^4 n_c^2 \ln \Lambda T_e^{-1/2} P_e^{-1})$ 、茲に $f(x) = [x \exp(x)] / [(2/3)x + I(x^{-1})]$ 。また $I(x) \approx (1+x/2)/(1+x^2/4)$ 。 P_e [Wm⁻³] は電子加熱電力項。 n_c [10¹⁸ m⁻³] はセントラル部密度。] 同時に、この T_e に関する予想を、X線計測により実証した。[7]

これは、コーエンの理論 [8] のソース項として、サーマルバリア電位を越えて磁力線に沿ってプラグ部に流入するセントラル部電子をパスツコフ理論から求め、プラグ部 ECH がこれを



第1図：我々が新たに提唱した電位生成理論面図「イオン閉じ込め電位 ϕ_c 対 サーマルバリア (熱輸送障壁) 電位 ϕ_b 」の相関則 (電位生成物理機構・生成比例則) を、プラグ部対セントラル部密度比 n_p/n_c の関数として、実験データ点と共に示す。更にセントラル部 ECH を用いた本比例則の拡張性の実証 (第1図(c)) を示す。

加速して、プラグ電位、或いはイオン閉じ込め電位 ϕ_c [kV] を生成すると考え、この2大理論を初めて結合・統合する、電位生成と電位の効果の新たな物理式を意味するものである。

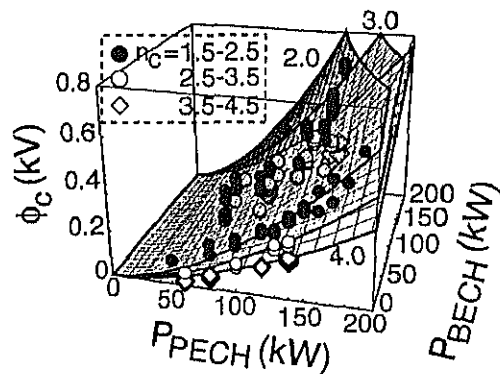
第1図では、この「新統合理論」が記述する、「高電位モード」[第1図の平面(a)]、及び「高温イオン・モード」[第1図の平面(b)]の予想平面を表すと共に、各モードでの実験データを示す。尚、両モードの加熱項の差によるパワーバランス式の差から T_e と ϕ_c の関数関係が(a)(b)2平面で異なり、これら異なる2平面を形成する。記号の差異はプラグ部対セントラル部の密度比 n_p/n_c が異なる。第1図より「新統合理論」と実験データの良好一致が分かる。また、電子加熱項 P_e が、クーロン衝突によるスローイングダウン電力のみであれば、 P_e は n_c^2 に依存するため、 x の n_c 依存性はキャンセルし、この ϕ_c 比例則自体が n_c に依存しない。

更に、今回新たにセントラル部に 50 kW の ECH を印加する予備実験を行った。これは、セントラル加熱により T_e が増大し、 ϕ_c を越える電子が増えるので、プラグ部に到達する電子が増え n_p/n_c が増大し、第1図で平面(b)がより大きな n_p/n_c を持つ新平面 第1図(c)に移行し、(a)(b)両モードを「橋渡し」する、「新統合モード」の創成をこの理論から予想する試みである。本理論の拡張による第1図の平面(c)の予想に対して、実験データがよく一致している事がわかり、本電位生成理論の有効性・拡張性の証左を示すものである。

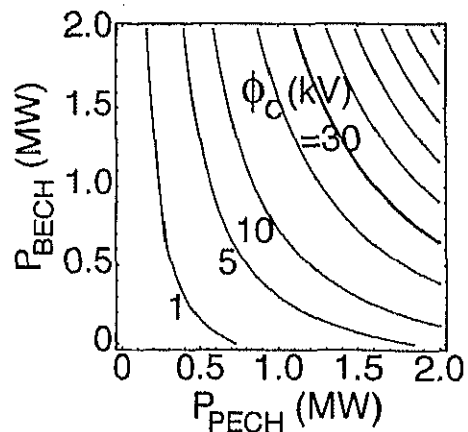
更に、この「新統合理論」の「物理パラメータ表示」に対し、実用上外部制御可能な加熱電力との関連付けを行うべく、「電位生成とそれに必要な ECH 電力」の比例則を、2000年に発表したプラグ ECH 電力のみでなく、新たにバリア ECH 電力とプラグ ECH 電力の両方に対して総合比例則を確立した。これは、2002年10月に開催された IAEA 主催の国際会議である「核融合エネルギーに関する国際会議」において初めて示し、この比例則を第2図に示す。ここでは、 n_c をパラメータとする3種類・3平面に区分して示す。対応するデータ点を、 n_c の区分に対して記号を分けてプロットした。尚、本比例則の式を得るにあたり、我々の「新統合理論」における ϕ_c (或いは ϕ_e とも等価 [第1図参照]) を、 P_{PECH} 並びに P_{BECH} に対する ϕ_c の比例則データ (第2図の ϕ_c とも等価 [第1図参照]) で置き換えて求めたため、本「統合入射電力比例則」は本質的に第1図の関数関係を満たすものとなっている。

上記の比例則より、パスツコフ理論 [9] が予想する臨界プラズマ条件 $Q=1$ 達成に必要な電位 30kV を含む、必要 ECH 電力を計算し、今後のミラー核融合の展望を与えるべく第3図を示した。

これらにより、 $Q=1$ 達成に必要な事がパスツコフ理論より予想されているイオン閉じ込め電位 30 kV を得るには、プラグ ECH のみを用いた場合 [4] に比べ、バリア ECH 及びプラグ ECH を併用する方が、この場合電力の合計で 54% 節減できる事がわかり (サーマルバリア電位効果) [7]、両 ECH 入射の電位生成経済性での意義を定量的に示すものである。この様に、本比例則の特長は、



第2図：第1図の「電位生成に関する新統合理論」の「物理パラメータ表示」に対し、実用上外部制御可能なプラズマ加熱電力との関連付けを行うべく、「電位生成とそれに必要な ECH 電力」の比例則として密度データをパラメータとして区分して示す。



第3図：第1・2図の比例則を用いた、臨界プラズマ $Q=1$ (パスツコフ理論より予想されているイオン閉じ込め電位 30 kV) を得るために必要な ECH 電力。

関数関係としてコーエンとパスツコフ理論を下敷き・基盤にしており、単なる経験則ではない点、即ち、台数が限られる今後の大型装置やタンデムミラー研究の将来構想において、本比例則のように、閉じ込めの基盤物理原理を明確にしなが、単なる経験則ではない普遍的な物理理論を背景に持つ点が重要なポイントである。

以上を整理すると、(1)「電位生成・生成電位効果に関する新統合理論・物理則」とその拡張性、(2)この物理パラメータを外部制御可能な ECH 電力に置き換えるための「電位生成とそれに必要な ECH 電力比例則」、(3)これらの理論基盤を持つ比例則式に基づく、ミラー核融合の将来展望について、纏めて示した。

- [1] S. Miyoshi *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th IAEA International Conference, Innsbruck., 1978)* 2, 437 (1979).
- [2] S. Miyoshi *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 13th Int. Conf. Washington D.C., 1990)* Vol. 2, IAEA, Vienna (1991) 539; *Plasma Physics Rep.* 23, 723 (1997) [*Soviet Journal of Plasma Physics*].
- [3] T. Cho *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 86, 4310 (2001).
- [4] T. Cho *et al.*, *Nucl. Fusion* 41, 1161 (2001).
- [5] Y. Kiwamoto *et al.*, *Phys. Plasmas* 3, 578 (1996).
- [6] T. Cho *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 64, 1373 (1990); *Phys. Rev. A* 45, 2532 (1992).
- [7] T. Cho *et al.*, in *Fusion Energy (Proc. 19th IAEA Int. Conf. Lyon, 2002)* IAEA-CN-94/EX/C1-4Ra; *Nuclear Fusion* 43 (2003) *in press*.
- [8] R. H. Cohen, *Phys. Fluids* 26, 2774 (1983).
- [9] 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).

【2】 コアプラズマの径方向電場に起因するタンデムミラーのバウンスイオン径方向輸送の研究

タンデムミラー閉じ込め装置はプラズマの両端部近傍に電位を生成する。プラグ部での電位形成に伴い軸方向の閉じ込めが改善された結果、径方向の高電場発生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。径方向輸送を磁場に沿ってバウンスするバウンスイオンの観点から検討した。各ミラー磁場及び電位により反射され中央ソレノイド部に戻るバウンスイオンの概略を、磁場強度分布及び電位分布と共に下図に示す。

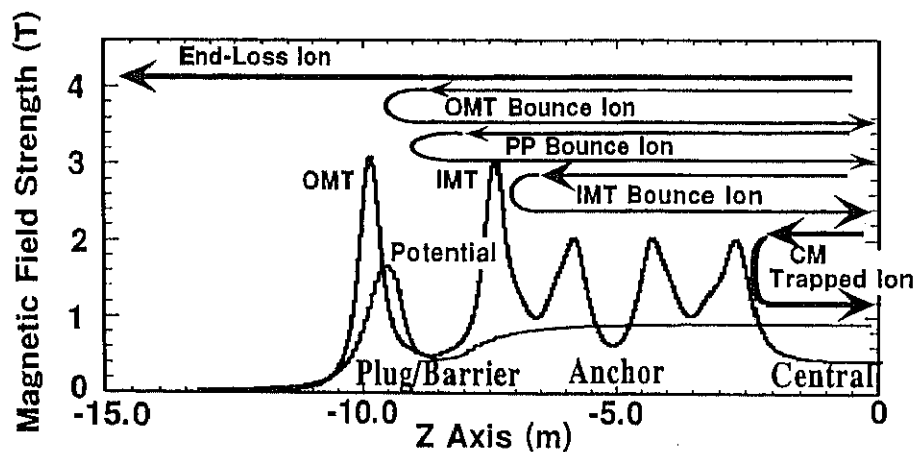


図1 磁場強度分布及び電位分布と各種バウンスイオン

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 kG、その両端のミラーズロート磁場強度及びアンカー部のミラーズロート磁場強度は20 kG、プラグ/バリア部の外側及び内側ミラーズロート (IMT) 部の磁場強度は30 kG、プラグ部の磁場強度は10 kGである。中央ソレノイド部からのイオンは、そのミラーズロート (20kG) 近傍の磁場により跳ね返るCM (Central Mirror) トラップトイオン、ミラーズ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ズロートで跳ね返る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 (磁気能率) 空間での各領域を図2に示す。

タンデムミラー装置では、プラズマ内に発生する巨視的不安定性を安定化するために、極小磁場配位を持つアンカー部が組み込まれており、タンデムミラーの特徴を示すIMT, PP, OMT 各バウンスイオンは全てアンカー部を通過する。複雑な当磁場部での径方

向電場によるバウンスイオンの軌道への影響を数値計算により調べた。

中央ソレノイド部のミッドプレーン上で断面が円形の磁力管は、アンカーミラー部では離心率が 0.999819 になり強く扁平化される。中央ソレノイド部に軸対称な径方向電位分布が存在し、当部からの磁力線に沿っての電位がほぼ等しいとすると、扁平化された半径方向の電場は極めて大きくなり、プラズマが強い電場を緩和する方向に向かうと、扁平な磁力管の形と等電位面の形がずれる。

磁力管と等電位面とのずれは、バウンスイオン

に磁場を横切るドリフトを与え、径方向輸送を促進させる。アンカーミラー部での磁力管と等電位面とのずれに対するイオン軌道の径方向への影響を解析した。下図にガンマ 10 装置のコイルと磁力線を示す。

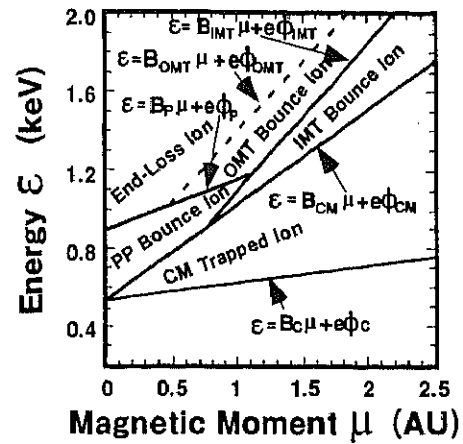


図2 各種バウンスイオン領域

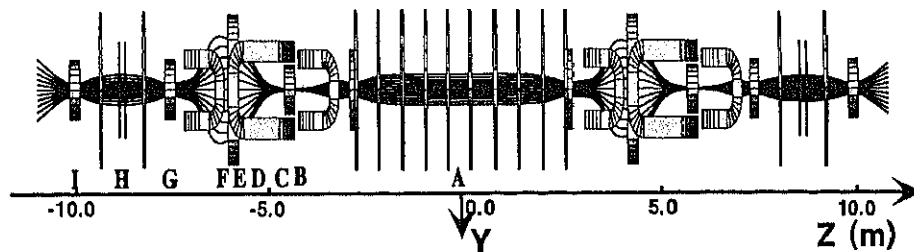


図3 ガンマ 10 装置のコイル位置及び磁力線

イオンは $z=0\text{m}$ (A 点) の中央面上で半径 0.05m の円周に沿って 20° 間隔の位置からエネルギー 1keV で出発し、ピッチ角として、アンカー部を通過する角を含む 21° から 1° 刻みに 27° まで変化させた。中央ソレノイド部の径方向電位分布はビームプローブ測定器を用いて出した測定値を用い、中心電位 300V 、半値直径 14cm のガウス型で近似した。磁力管の形と等電位面の形とのずれに対しては、断面が円形の場合は両者が一致するとし、扁平度が大きくなるに従いずれが大きくなるとのモデルで、ずれの程度を示すパラメータ $-Df$ を導入した。イオンの軌道計算に際しては、軌道を直接計算する方式と案内中心を計算する方式の 2 種類の方法を試み、両者が一致することを確かめて計算の正当性を確認した。案内中心を記述する 2 種の方方程式を以下に示す。IMT 間をバウンスする軌道計算に対しては案内中心方程式を使用した。中央ソレノイド部の中央面上で半径 0.05m の円周上から出発し IMT 間を 4 バウンスさせた後の中央面上のイオン位置に注目した。

$$\frac{dv_{\parallel}}{dt} = -\frac{\mu\nabla B}{m} \cdot \frac{\vec{B}}{B} + \frac{e}{m} \frac{\vec{E} \cdot \vec{B}}{B}$$

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

磁力管と等電位面とのずれ因子 Df を 0 から 0.3 まで変化させ、出発時の方位角変化 (9 種類) 及びピッチ角変化 (5 種類) に対し、4 バウンス後セントラル部中央面 (A 点) で半径が 0.13m を越えるイオンの割合を算出した。その結果、磁力管と等電位面とのずれが無い時 ($Df=0$) は半径 0.13m を越えるイオンが皆無で、 $Df=0.3$ の場合は 44% に達し、等電位面の形のずれが大きくなるに従い径方向のイオン輸送が促進されることが明らかになった。この径方向イオン輸送の促進は、アンカー部が非軸対称であるため軸の回りの角度に依存する。径方向の輸送に依りプラズマリミターに衝突する割合を、径方向電場の有無及び電場存在での Df の関数として調べ、径方向輸送を減少させるには $Df=0$ または径方向電場が 0 であることが有効であることを見出した。この計算ではイオンの衝突時間がバウンス時間より大きいため粒子衝突の効果は無視した。等電位面の形状を人工的に設定しているが、アンカー部でモッド B 面が閉じているのに対し中央ソレノイド部では開いており、またプラズマ加熱法も異なっている等を考慮すると、両面が全く一致するとは考えにくい。この効果は径方向電場が強い時に現れ、アンカーミラー部での $Df=0$ が保証されない時は、径方向電場の減少即ち径方向電位分布の平坦化が有効であるとの結論を導く。タンデムミラーの閉じ込めを更に増進させるためには、閉じ込め電位形成用マイクロ波の入射方法の適正化を含めた径方向電場制御が重要になる。同軸分割型エンドプレートのセグメント電位を制御して、コアプラズマの径方向電位平坦化の初期実験を行い、バウンスイオンの径方向輸送の抑制を与える良好な結果も得られた。

【3】 金の中性粒子ビームプローブ (GNBP) による高周波揺動の測定 (速度空間内のイオン輸送の研究)

開放端型磁場閉じ込め装置はプラズマの速度空間内に損失領域が存在し、捕捉領域から損失領域に移行したプラズマ粒子は磁力線に沿って装置端へと流出する。タンデムミラーでは、プラズマの両端部近傍に電位の壁を設けて低エネルギー側の損失領域を捕捉領域に変換し、軸方向の閉じ込めを大幅に増進させている。ICRF イオン加熱に伴い発生する AIC (アルヴェン・イオンサイクロトロン) モードの高周波揺動は、この揺動にカップルしたイオンの速度空間内の輸送現象を発生させる。揺動にカップルしたイオンは、主として 1~5 keV 程度の軸方向エネルギーを持ち損失領域に移行するが、閉じ込め電位を越えて損失領域に排出されるイオンのエネルギーは揺動の励起状態に依存する。従って、揺動の空間的発生構造及び径方向や軸方向の波数、周波数等揺動特性の検出と共に、損失領域内のイオン分布及び時間発展の知見は、タンデムミラーの閉じ込めと加熱方法の研究に対して極めて重要である。

この観点に立って、マイクロ波反射計では測定することが難しいプラズマ柱の中心部を含めた AIC 揺動の空間構造を検出するために、金の中性粒子ビームプローブを使用したプラズマ密度揺動の測定の妥当性を検討した。AIC 揺動は電磁揺動であるが密度揺動に反映されるため、密度揺動の局所測定の妥当性を軌道積分効果を考慮に入れて検討した。その結果、十分に精度良く局所測定が出来ることが示され、また実測した。、金の中性粒子ビームプローブでの測定と平行して、プラズマ周辺では小型高精度の新型マイクロチップインダクターを用いた磁気プローブを用いて測定し比較検討した。下図に、ガンマ 10 のコイル、磁場強度分布及び電位分布の概念図を示す。ビームプローブ位置及び磁気プローブ位置は $Z=1.18\text{m}$ に設置され、コアプラズマ内の揺動と周辺プラズマでの揺動との比較がなされた。

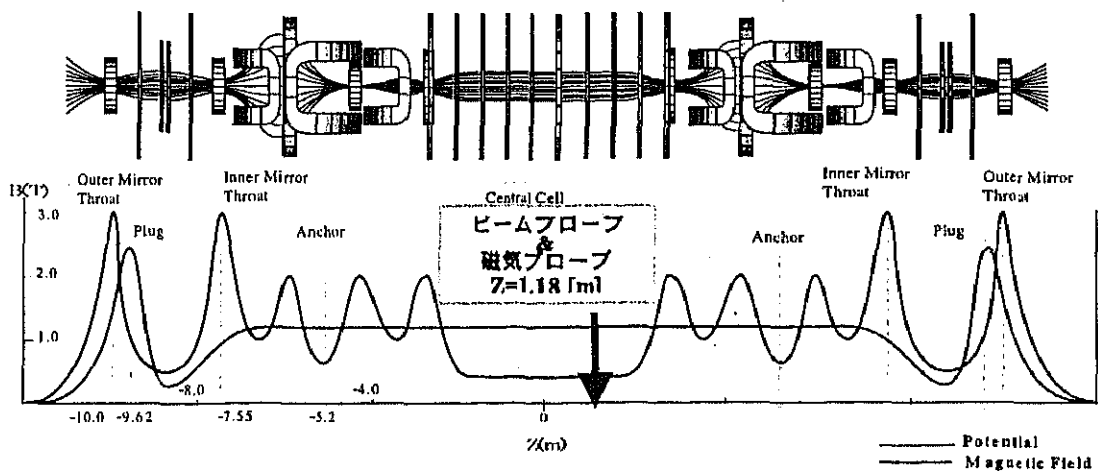


図1 上図：磁場コイル及び磁力線、下図：測定位置及び磁場強度と電位分布

AIC 測定 の 検討

密度揺動測定で重要なことは、軌道積分効果と呼ばれている注目すべき局部以外の揺動が混入することである。当ビームプローブ法は1次ビームである金の中性粒子をプラズマに入射し、特定の微小部で一価にイオン化した2次イオンビームをプラズマ外で検出し、微小部でのプラズマの密度揺動及び電位揺動を測定する方法である。特定の微小部に至るまでに1次ビームが受けるプラズマ揺動、及び2次ビームがプラズマ中で受ける揺動の割合を算出した。

$$\Delta I_{\text{secondary}}(r) = Q_{\text{pri-sec}} I_0(r) \Delta \exp \left[- \int Q_{\text{primary}} dl_{\text{primary}} - \int Q_{\text{secondary}} dl_{\text{secondary}} \right]$$

$$Q_{\text{pri-sec}} = \frac{n_e S_{01}}{v_b}, \quad Q_{\text{primary}} = \sum_n \frac{n_e \langle \sigma_{0n} v_e \rangle}{v_b} = \sum_n \frac{n_e S_{0n}}{v_b} = \frac{n_e S_0}{v_b}, \quad Q_{\text{secondary}} = \sum_n \frac{n_e \langle \sigma_{1n} v_e \rangle}{v_b} = \sum_n \frac{n_e S_{1n}}{v_b} = \frac{n_e S_1}{v_b}$$

$$\frac{\Delta I_{\text{secondary}}}{\Delta I_{\text{secondary}}} = \frac{Q_{\text{pri-sec}}}{Q_{\text{pri-sec}}} - \int \tilde{Q}_{\text{primary}} dl_{\text{primary}} - \int \tilde{Q}_{\text{secondary}} dl_{\text{secondary}}$$

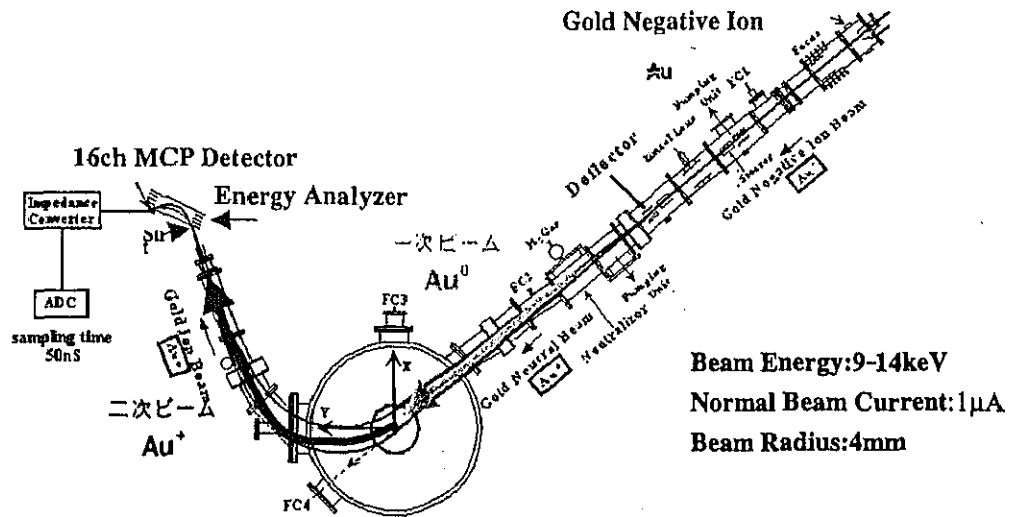
$$\omega = 6.0 \text{ [MHz]}, \quad \frac{\tilde{n}_e}{n_e} = 1.0 \times 10^{-3}, \quad \frac{\tilde{T}_e}{T_e} = 0 \Rightarrow \frac{Q_{\text{pri-sec}}}{Q_{\text{pri-sec}}} = 1.0 \times 10^{-3}$$

$$\int \tilde{Q}_{\text{primary}} dl_{\text{primary}} = \tilde{I}_1 / I_1 \approx 4.28 \times 10^{-5}$$

$$\int \tilde{Q}_{\text{secondary}} dl_{\text{secondary}} = \tilde{I}_2 / I_2 - \tilde{I}_3 / I_3 \approx 4.0 \times 10^{-8}$$

$$\int \tilde{Q}_{\text{secondary}} dl_{\text{secondary}} \ll \int \tilde{Q}_{\text{primary}} dl_{\text{primary}} \ll \tilde{Q}_{\text{pri-sec}} / Q_{\text{pri-sec}}$$

検討結果は上述の如くイオン化点の微小体積における密度揺動を反映し、局所的な揺動を測定し得ることが知れた。



図

図2 1次ビーム Au^0 、微小イオン化点及び2次ビーム Au^+

AIC 揺動の測定

磁気プローブとビームプローブの両方で同時に AIC 揺動を測定した。下図で示される様に極めて良く類似した周波数帯に揺動が観測され、ビームプローブによる揺動測定の妥当性が明白に示された。ビームプローブはプラズマ中心部で、磁気プローブは半径 25 cm の周辺プラズマ部での揺動を観測しているため、揺動の半径方向分布の知見も得られる。AIC モードの揺動が実測されると同時に、更に精度を上げる問題点も明確になり、将来に向けた揺動測定の確立の基礎を与えた。

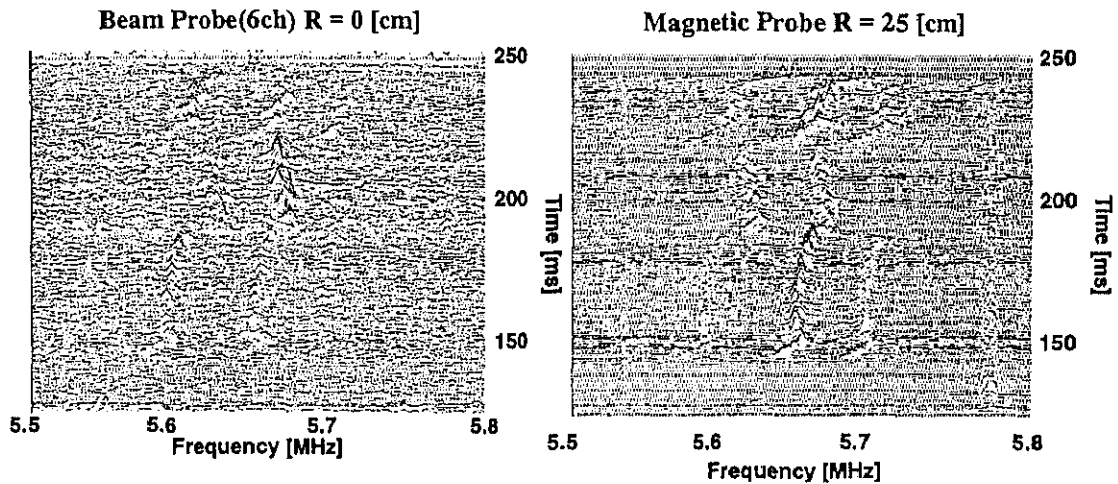


図 3 左図：ビームプローブでの測定、 右図：磁気プローブでの測定

次に、1 次ビームを半径方向に掃引させて AIC 揺動強度の半径分布を測定した。AIC 揺動はセントラルプラズマの境界条件により大よそ 3 種類の周波数を持つ。各周波数の揺動は時間と共に変化し相関関係が得られた。半径方向分布の時間発展を下図に示す。

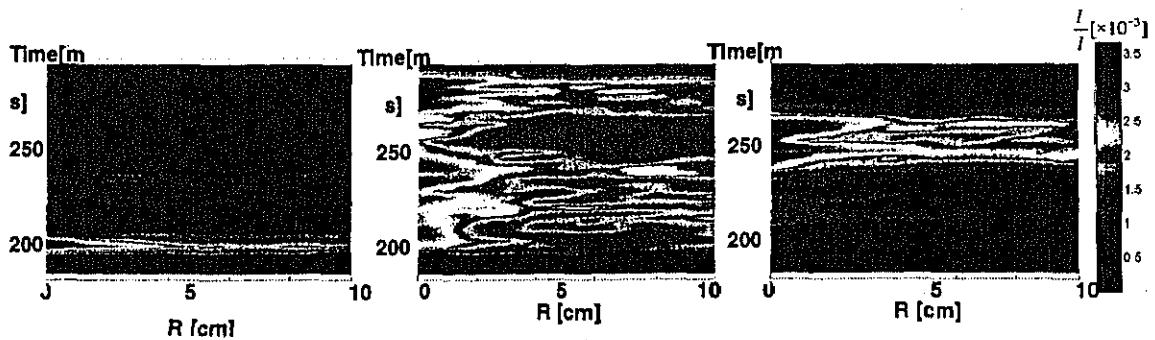


図 4 左図：低い周波数 AIC、中図：中間周波数 AIC、右図：高い周波数 AIC

<学位論文>

理学修士（理工学研究科）小島有志

金の中性粒子を用いたビームプローブ法による高周波プラズマ揺動の測定

理学士（工学基礎学類）荒川純

タンデムミラーGAMMA10における端損失イオンの検討

理学士（工学基礎学類）宮田良明

ガンマ10におけるIMTバウンスイオンの軌道計算

<講演>

1. 石井亀男, 武村裕一郎, 宮田良明, 小島有志, 萩澤一久, 荒川純, 片沼伊佐夫, 谷津潔:
[タンデムミラーにおけるバウンスイオンの径方向輸送の検討]
29pB10P プラズマ・核融合学会第19回年会（犬山国際観光センター「フロイデ」, 犬山市, 2002年11月）
2. 武村祐一郎, 石井亀男, 萩澤一久, 小島有志, 荒川純, 宮田良明, 板倉昭慶, 片沼伊佐夫,
谷津潔:
[金中性粒子ビームプローブ法に金被膜検出器を適用した電位と密度分布の同時計測]
28pB26P プラズマ・核融合学会第19回年会（犬山国際観光センター「フロイデ」, 犬山市, 2002年11月）
3. 小島有志, 石井亀男, 武村祐一郎, 萩澤一久, 荒川純, 宮田良明, 板倉昭慶, 市村真,
谷津潔:
[金の中性粒子ビームプローブ法による高周波揺動の径方向分布測定]
26pB06P プラズマ・核融合学会第19回年会（犬山国際観光センター「フロイデ」, 犬山市, 2002年11月）
4. 石井亀男, 武村裕一郎, 宮田良明, 小島有志, 萩澤一久, 荒川純, 片沼伊佐夫, 谷津潔:
[タンデムミラーの径方向輸送と径方向電位分布]
IA007 第4回核融合エネルギー連合講演会（大阪大学コンベンションセンター,
2002年6月）
5. 武村祐一郎, 石井亀男, 萩澤一久, 小島有志, 荒川純, 宮田良明, 板倉昭慶,
片沼伊佐夫, 谷津潔:

[ガンマ 10 における金中性粒子ビームプローブと金被膜検出器を用いた電位と密度の同時計測]

1 E123 第 4 回核融合エネルギー連合講演会 (大阪大学コンベンションセンター, 2002 年 6 月)

6. 小島有志, 石井亀男, 武村祐一朗, 萩澤一久, 荒川純, 宮田良明, 板倉昭慶, 市村真, 谷津潔:

[AIC 揺動によるイオン損失の研究]

1 E125 第 4 回核融合エネルギー連合講演会 (大阪大学コンベンションセンター, 2002 年 6 月)

<外国講演>

1. K.Ishii, Y.Takemura, A.Fueki, M.Shimoo, K.Tsutsui, K.Hagisawa, A.Kojima, I.Katanuma, T.Saito, A.Itakura, K.Yatsu.

[Radial Potential Control for Plasma Confinement in the Tandem Mirror GAMMA 10].

(The 4th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Jeju Island, Korea, 1-4 July 2002)

2. A.Kojima, K.Ishii, Y.Takemura, K.Hagisawa, I.Katanuma, A.Itakura, M.Ichimura, K.Yatsu.

[Development of Alfvén Ion Cyclotron Fluctuation Measurement by Use of a Gold Neutral Beam Probe in the Tandem Mirror Gammma 10].

(The 4th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Jeju Island, Korea, 1-4 July 2002)

3. Y.Takemura, K.Ishii, A.Fueki, K.Hagisawa, A.Kojima, A.Itakura, K.Yatsu.

[Measurement of Plasma Density Using a Gold Film Detector in the Inner Mirror Throat of the GAMMA 10 Tandem Mirror].

(The 4th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Jeju Island, Korea, 1-4 July 2002)

4. K.Ishii, A.Fueki, Y.Takemura, A.Kojima, H.Hagisawa, I.Katanuma, K.Yatsu.

[Influence of Radial Electric Field on Trajectories of Plug Potential Bounce Ion in the Tandem Mirror].

(5th Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement and Exhaust, Montreux, Switzerland, 23-24 June 2002)

5. K.Ishii, Y.Takemura, A.Fueki, M.Shimoo, K.Tsutsui, K.Hagisawa, A.Kojima, I.Katanuma, T.Saito, A.Itakura, K.Yatsu.
[Role of Radial Electric Field Control in the Tandem Mirror Plasma].
P-5.082 (29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Montreux, Switzerland, 17-21 June 2002 ECA Vol. 26B, P-5.082 (2002) pp.1-4)

< 発表論文 >

- K.Ishii, Y.Takemura, A.Fueki, K.Hagisawa, A.Kojima, A.Itakura, M.Yoshikawa, I.Katanuma, K.Yatsu.
[A Gold Film Detector for Radial Profile Measurement of Plasma Density by Using a Gold Neutral Beam Probe].
Review of Scientific Instruments, Vol. 73, No.11 (2002) pp.3806-3812.

- K.Ishii, A.Itakura, M.Ichimura, I.Katanuma, E.Kawamori, J.Kohagura, T.Saito, Y.Takemura, Y.Tatematsu, T.Cho, Y.Nakashima, H.Higaki, M.Hirata, H.Hojo, K.Yatsu, M.Yoshikawa.
[Ion Transport in Real and Velocity Space and Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror].
Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 78, No.11 (2002) pp.1239-1250.

- K.Ishii, A.Fueki, Y.Takemura, A.Kojima, H.Hagisawa, I.Katanuma, K.Yatsu.
[Influence of Radial Electric Field on Trajectories of Plug Potential Bounce Ion in the Tandem Mirror].
Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 52, No.10 (2002) pp.1135-1142.

- K.Ishii, Y.Takemura, A.Fueki, M.Shimoo, K.Tsutsui, K.Hagisawa, A.Kojima, I.Katanuma, T.Saito, A.Itakura, K.Yatsu.
[Radial Potential Control for Plasma Confinement in the Tandem Mirror GAMMA 10].
Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.43, No.1T (2002) pp.142-146.

- A.Kojima, K.Ishii, Y.Takemura, K.Hagisawa, I.Katanuma, A.Itakura, M.Ichimura, K.Yatsu.
[Development of Alfvén Ion Cyclotron Fluctuation Measurement by Use of a Gold Neutral Beam Probe in the Tandem Mirror Gamma 10].
Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.43, No.1T (2002) pp.274-276.

- Y.Takemura, K.Ishii, A.Fueki, K.Hagisawa, A.Kojima, A.Itakura, K.Yatsu.
[Measurement of Plasma Density Using a Gold Film Detector in the Inner Mirror Throat of the GAMMA 10 Tandem Mirror].
Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.43, No.1T (2002) pp.283-285.

【4】 ガンマ10における磁力線方向の電位の連動[1]

ガンマ10では、プラグ部のECRHにより、真空容器を基準とするプラズマ各部の電位が大きく変化し、軸方向のイオン閉じ込め電位が形成される。このとき、ECRHによって駆動される強い軸方向電子流は、プラグ電位の形成機構を考える上で非常に重要である。特に、プラグ部を通る磁力線はエンドプレートを貫通しているため、プラグ電位 Φ_P とエンドプレート電位 Φ_{EP} の連動の原因となる。

図1は、ガンマ10の2つの実験モード；(a) 高温高密度プラズマの生成と閉じ込めを指向する高温イオンモードと (b) 低密度時の高電位モードに対して、プラズマ各部の電位のECRH電力に対する依存性を示している。ECRH電力とともに、各部の電位は直線的に変化して行く。このことは、(a)、(b) 両モードとも同じである。しかし、高温イオンモードでは Φ_P の上昇に対して、 Φ_{EP} の下降率が大きい。高電位モードはこの逆の特徴を示す。一方、プラズマに対して意味をもつのは電位差 $\Delta\Phi = \Phi_P - \Phi_{EP}$ である。この電位差を軸方向電子流が規定する。図2は、 $\Delta\Phi$ の端損失電子の平均エネルギー T_{eff} に対する依存性を、高温イオンモードに対しては白丸で、高電位モードに対しては黒丸でプロットしている。両モードで $\Delta\Phi$ の T_{eff} 依存性に違いがない。

以上より、プラグ部の電子加熱で駆動される電子流の磁力線方向の運動を通して、 Φ_P と Φ_{EP} が連動して変化することがわかる。すなわち、同等の電子加熱によりほぼ等しい T_{eff} をもつ軸方向電子流が駆動されても、プラグ電位はエンドプレート電位に強く依存することになる。よって、各プラズマ生成モードにおいてエンドプレート電位の決定機構を明らかにすることが非常に重要である。

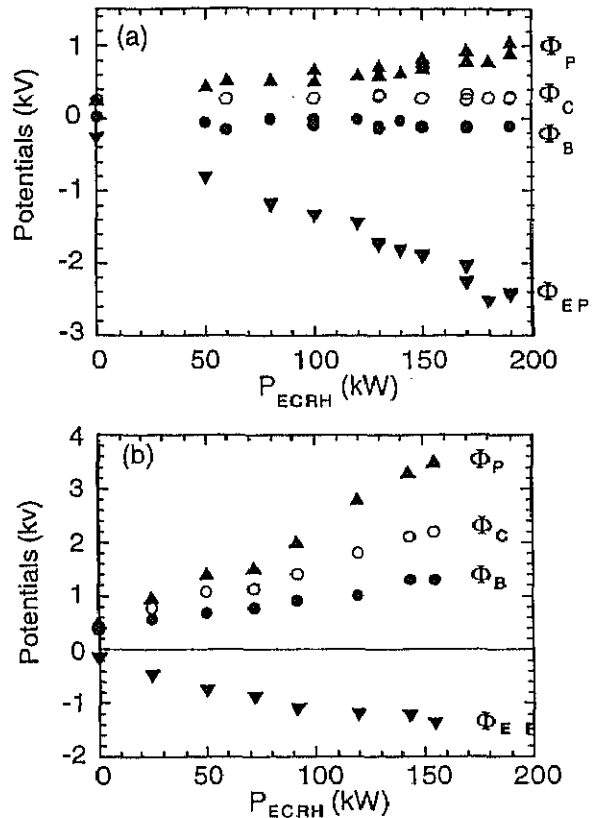


図1 高温イオンモード(a)と高電位モード(b)でのプラズマ各部の電位のECRH電力依存性

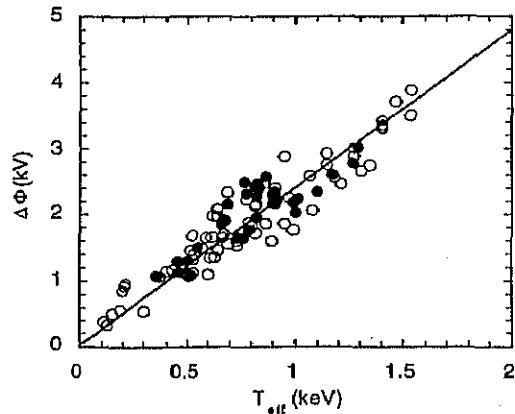


図2 高温イオンモード(白丸)と高電位モード(黒丸)での電位差 $\Delta\Phi$ の T_{eff} 依存性

[1] SAITO Teruo, TATEMATSU Yoshinoro, KATANUMA Isao, YATSU Kiyoshi; Journal of Plasma and Fusion Research 78 (2002).591.

【5】 バリア部密度増大時の電位構造の変化[1]

前項では、ガンマ10におけるプラズマ各部の電位のECRH電力に対する依存性と磁力線方向の電位の連動を考察した。このとき、プラズマ生成モードが同じなら、ECRH電力に対して電位差は変化するが電位構造は変化しなかった。これに対して最近、バリア部の密度が大きく変化すると、各電位も大きく変化し、電位構造が変わる現象が見つかった。

その典型的な例を図1に示す。 $T = 140$ ms からプラグECRHが入射されている。130 ms での小さい変化はバリアECRH入射のためである。プラグECRHによって Φ_p 、 Φ_{EP} が大きく変化するのは通常である。このショットでは、図中に示す時間帯にバリア部にNBIが入っている。NBIには低温の中性ガスが付随するので、電離によりバリア部の捕捉プラズマの密度が増大する。すると

Φ_p は下降し Φ_{EP} は上昇する。このとき、図の下のトレースで示すように、プラズマ周辺部に流出するイオン電流が増大し、対応して端損失電子電流も増大している。図には示していないが I_{ref} (エンドプレートと真空容器間に流れる電流) も増大する。端損失電子電流および付随する I_{ref} の増加に伴い、 Φ_{EP} が上昇している。このショットの特徴は、 Φ_p が下降することである。これは一見、 Φ_p と Φ_{EP} の連動を示した前項の結果に反している。

この解釈として、バリア部に捕捉されるプラズマが増えて、プラグ→真空容器電流 I_{PV} の経路の実効抵抗が小さくなり、 I_{PV} が大きくなっても Φ_p としては降下するのだと考えられる。もう一つの重要な点は、起電力としての $\Delta\Phi = \Phi_p - \Phi_{EP}$ の低下である。これは現象論的には、プラズマと真空容器から構成される回路中、ECRHの機能としての電源の電流容量が有限のため、回路電流が一定値を越えると出力電圧が低下するのだと考えればよい。なお、起電力の規定要因である T_{ref} には若干の低下が見られるが、図1のショットでは明らかに前項図2のスケールから外れている。このことも、捕捉プラズマによる電圧降下を裏付けている。現在、これらの点はさらに詳しくデータ解析中であり、改めて発表する予定である。

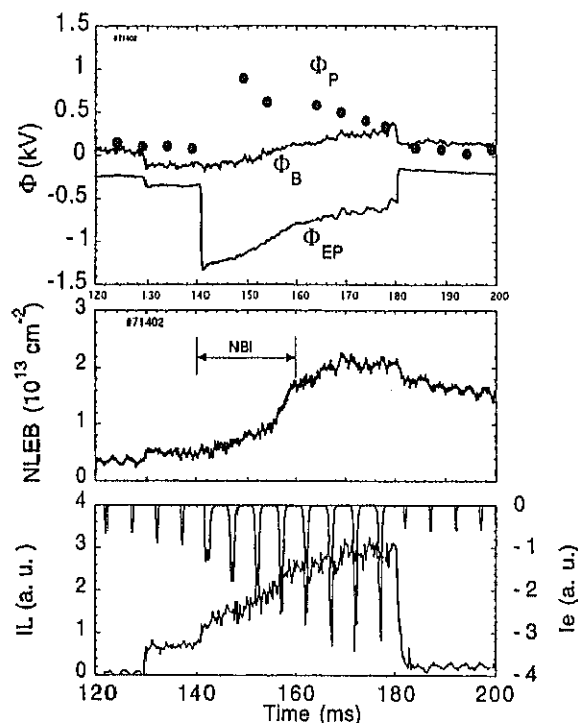


図1 バリア部の密度増大時のプラズマ電位、端損失電子束および周辺部イオン電流の変化

[1] T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Imaizumi, E. Tsuda, T. Yasuoka, I. Katanuma, K. Yatsu, Transaction of Fusion Science and Technology Vol.43 (2003) 167.

【6】 ECRHに伴う軸方向及び径方向熱流計測[1]

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) により、数百電子ボルトの暖かい電子が生成される。この暖かい電子は、電場・磁場閉じ込めにより磁力線に沿って往復したのち、磁力線に沿って装置端の端壁にあたるか、磁力線を横切る拡散により真空容器・内部構造物にあたる。したがって、ECRHにより生成された熱流が端壁や真空容器で測定される。この熱流量を測定することは、電子加熱により電子に吸収されたエネルギーの流れを明らかにし、ミラー磁場中の電子サイクロトロン共鳴加熱の物理機構解明のためのデータとなる。

ガンマ10において、電子加熱で生成される熱流を測定するため、エンド壁面と、加熱をおこなっているプラグ/バリア部でガンマ10軸からの距離がもっとも近い構造物であるミラー部補助コイル壁面上に、赤外線放射率の高い(~ 0.8)SiCの板をとりつけた。熱流は、SiC板の温度上昇として観測できる。日本アビオニクス社の赤外線カメラを用いて、真空容器外からCaF₂窓と鏡を通して、それぞれの壁面にとりつけたSiC板の温度上昇を測定した。

ガンマ10ではプラグ/バリア部で、プラグ(P)ECRHと呼ばれる基本波加熱とバリア(B)ECRHと呼ばれる第2高調波加熱を併用している。P-ECRH、B-ECRH片方使用、両方使用及び加熱なしのとき、エンド壁とコイル壁のSiC板で測定された温度上昇分布を図1、2に示す。温度上昇はECRH印加が終了し、板の厚み(1mm)方向に準平衡になった時間でのプラズマショット前からの温度上昇をプロットしている。この時間での、SiC横方向への拡散距離は厚み程度であり、また、放射による冷却は無視できる大きさであるので、温度上昇分布はその場所で流れ出す熱流量を反映していると考えてよい。

エンド壁では、ECRHなしのときでも、磁力線に沿って粒子は損失するので、ガンマ10軸をピークとした熱流分布が観測される。P-ECRH印加により暖かい電子が生成され、大きな熱流がエンドで観測される。一方、コイル壁の温度上昇は、磁力線を横切る熱流の結果を表すが、ECRHが印加されないときは、ほとんど温度上昇はない。P-ECRH、B-ECRHそれぞれ単独印加でも温度上昇はみられるが、両方が同時に印加されると顕著な上昇を示す。温度上昇のピーク位置は、磁気ミラーのミッドプレーンの位置に一致する。

いろいろなプラズマショットで熱流測定を行った結果、PB同時印加に対してはマイクロ波に吸収されたエネルギーの約12%がエンド壁へ、約60%がコイル壁に達し、合計約70%

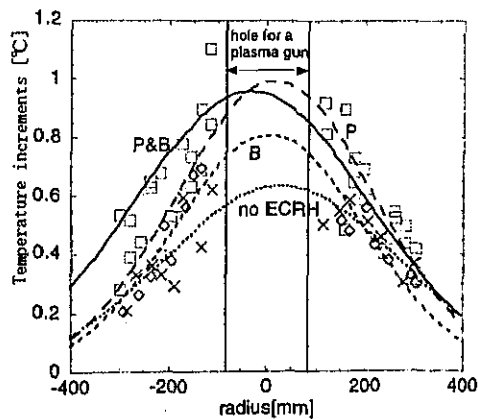


図1 エンド壁 SiC の半径方向温度上昇分布

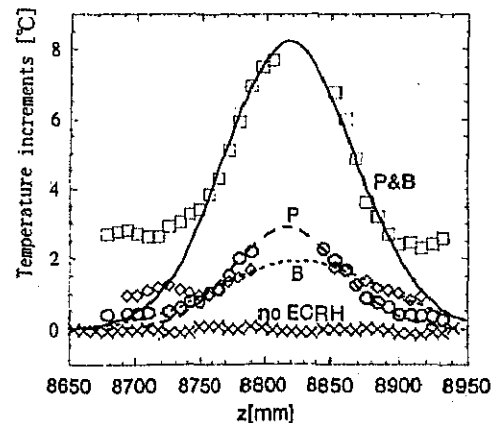


図2 補助コイル壁 SiC の軸方向温度上昇分布

の熱の行方を同定できた。

[1] Y. Tatematsu, T. Saito, H. Abe et al. Transaction of Fusion Science and Technology Vol. 43, No. 1T, 98-100 (2003).

【7】 プラグ部電子加熱領域の広域化と円形化[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、磁場勾配のある磁場強度1 Tの位置に周波数2.8 GHzのマイクロ波を入射し、基本波電子サイクロtron共鳴加熱(E CRH)をおこなっている。当初は、共鳴領域でのマイクロ波ビーム断面は、鉛直方向が水平方向に比べ約2倍長い卵型の形状であったが、マイクロ波ビーム経路中に、円筒反射鏡を入れることで、ほぼ円形に近い形状にした。

しかし、円筒反射鏡では、共鳴領域でのマイクロ波ビームの半径は5cm程度で、プラズマ半径10cmに比べて小さく、閉じ込め電位が形成される領域が限られていた。そこで昨年度、共鳴領域でビーム断面の円形を保ちながらその照射面積を広げることを目的として反射鏡を設計した。この反射鏡による共鳴面でのビーム形状を測定すると、等電力分布線は、ガンマ10の軸上ではほぼ円形であったが、外側にいくにつれて鉛直下側に伸びた分布となった。

そこで今年度は、この非軸対称性を改良し、広域化と同時に円形化できる反射鏡の設計を行った。非対称性の原因として、アンテナからの放射波及び反射波がガウスビームであるというこれまでの仮定が、実際は成り立っていないことがあげられる。昨年度設計した鏡は、反射波が上下対称のガウスビームであるとしてフェイズマッチング法を用いて設計した。その鏡に対して、測定で得られた共鳴面でのビーム断面の鉛直方向の非対称度を求めた。次に反射波がガウスビームからその非対称度分ずれているとして、共鳴面で放射分布が対称となる条件を用いることで、新たな鏡面を決定した。

再設計した反射鏡による共鳴面でのマイクロ波の放射電力パターンの測定例を図1に示す。共鳴面における目標のマイクロ波ビーム幅は、ピーク電力の1/e幅(図の最外円)を14cmとした。共鳴面で設計意図通りの大きさのほぼ円形の放射分布が得られた。このときの、反射ビームの電力1/e幅をプロットしたものを図2に示す。鉛直方向には、ほぼ平行ビームであり、

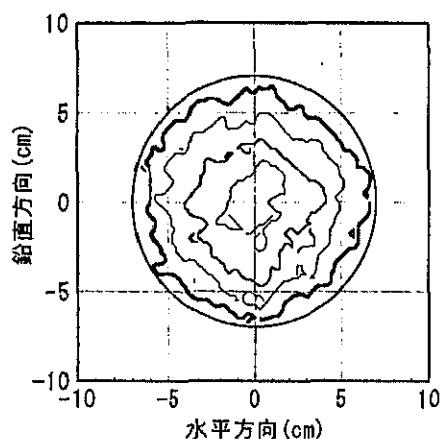


図1 新たに製作した反射板による共鳴面でのビームの電力分布

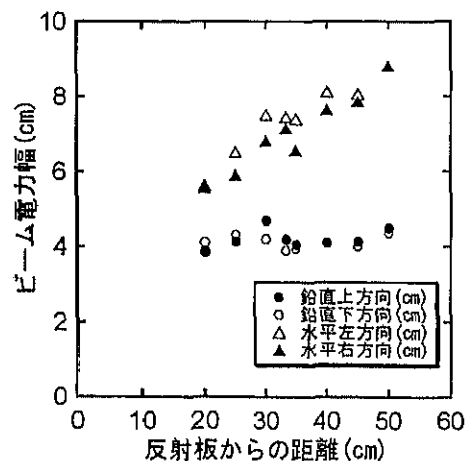


図2 反射ビームの電力1/e幅の反射板からの距離依存

対称性がなりたっている。

[1] 津田英介、立松芳典、斉藤輝雄、安岡輝晃、池上博和、関根貴之、遠藤洋一、谷津潔、ガンマ10のプラグ部 ECRH 領域広域化と円形化、プラズマ・核融合学会第19回年会 28pC10P

【8】 ガンマ10における中性粒子入射実験 [1-3]

ガンマ10では、近年高密度プラズマの電位閉じ込めを目的として、セントラル部及びアンカー極小磁場部に、燃料補給・プラズマ加熱の為の中性粒子入射装置 (NBI) が整備されている。図1は、ガンマ10の真空容器と中性粒子入射装置及び関係する計測系の配置を示している。図のように、セントラル部 NBI (NBI-c) はセントラル中央面から 123cm 東側に磁力線に対して垂直に入射され、アンカー NBI (NBI-a) は東西アンカー部中央面上 ($z = \pm 520\text{cm}$) にそれぞれ磁力線に対して 82 度で入射される。NBI-c の定格は、ビームエネルギー 25 keV、ビーム電流 (ドレイン値) 30 A であり、NBI-a では各々 25 keV、60 A である。東西アンカー部 NBI の入射タンクには、400000 l/sec の排気速度を持つ液体ヘリウムクライオパネルが、イオン源からの低温ガスの差動排気用として設置されている。本年度に NBI-c の入射タンク上部にも差動排気用の排気速度 10000 l/sec のクライオポンプが設置された。

本実験の主目的は、NBI によるプラズマ密度上昇であり、粒子補給量に関する情報が不可欠である。その為、入射ビームの強度及びプロファイルを測定するためのファラデーカップ型検出器 (BAD)、及びカロリメーター (CM) が各ビームライン上に設置されている。またセントラル部中央から東アンカー外側変換部に亘って、プラズマからの $H\alpha$ 発光強度を測定する検出器が設置されている。今回 NBI-c のビームライン上に新たに $H\alpha$ 検出器を追加設置した。また、NBI-c 用ダンプタンクには炭素繊維材を用いた新着想の表面ポンプ (CSP) が開発・設置され、現在実機による性能評価を行っている。既に、東アンカー部及びセントラル部の NBI ダンプタンク内に設置した BAD と CM を用いて、各部ビーム強度の空間分布を測定し、ビーム軌道の数値計算とを組み合わせたビーム発散角やイオンビームの中性化効率の評価も行っており、 $1/e$ 半値幅として東アンカー部ビームで 1.2 度、セントラル部で約 1.0 度、及び中性化効率 73 % という結果を得ている。これらの結果より、プラズマ中心でのビームの密度として、アンカー部で約 $6.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 、セント

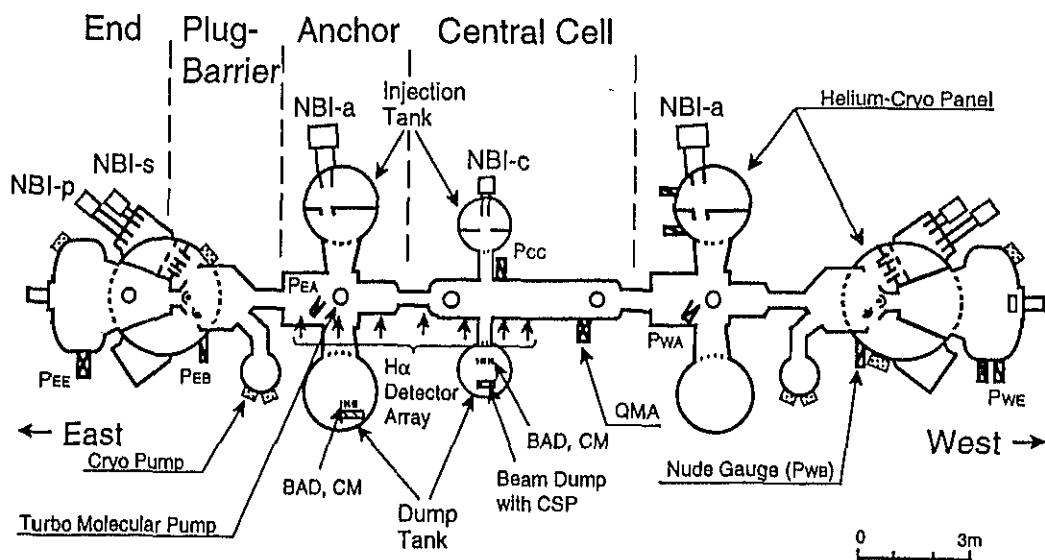


図1 ガンマ10真空容器と中性粒子入射装置及び計測系の配置図

ラル部において約 $1.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ が得られている。

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

近年、ターゲットプラズマの密度を上昇させる目的で、高次高調波を用いたイオンサイクロトロン周波数帯波動加熱装置 (RF3) が導入され、高密度実験が進められている。図 3 は、RF3 と NBI を併用して密度上昇を目指した実験で観測されたイオン温度と電子の線密度の相関図 (N-T ダイアグラム) を表している。図中の○は、過去において測定されたホットイオンモードのパラメータ領域にあり、線密度の上昇に伴い温度が大きく減少している。●は、高密度実験開始直後のまだ間もない時期で、壁コンディショニングが進んでいない状態での結果でありイオン温度と線密度が同時に高くなる条件まで到達していない。一方、■で表されている今回の実験結果では、ビームライン近傍のコンディショニングも進行し、今までに得られていない (破線の右側) 領域まで到達していることが分

かった。今後、壁コンディショニングを含めた実験条件の最適化を進めることにより、C-NBI を入射中にイオン温度が維持、または上昇しつつ密度の上昇するショットが期待できる。

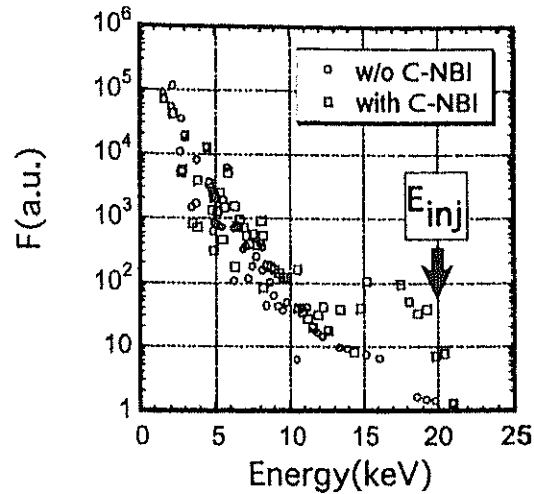


図 2 荷電交換中性粒子エネルギースペクトル

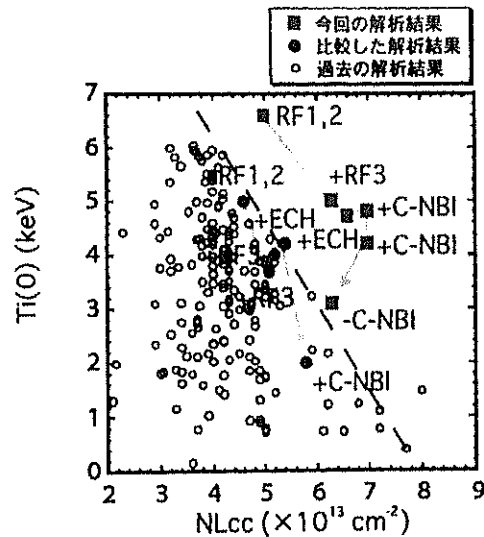


図 3 イオン温度-線密度の相関図

- [1] 渡辺一浩, 中嶋洋輔, 他「中性粒子ビーム入射による GAMMA10 プラズマの加熱と粒子供給」プラズマ・核融合学会第 19 回年会 (2002 年 11 月, 犬山市, フロイデ) 29pB09P.
- [2] Y. Nakashima, et al., "Recent Results of High Density Experiments in the GAMMA 10 Tandem Mirror", Trans. Fusion Technol. 43 No.1T (2003) 135-141.
- [3] Y. Nakashima, et al., "Fueling Experiments Using Neutral Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror", J. Nucl. Mater. 313-316 March (2003) 556-561.

【9】 ガンマ10セントラル部中性粒子入射実験時におけるH α 線計測 [1]

GAMMA10 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が重要となっている。以前より、セントラル部 NBI (N25c) ビームライン近傍でH α 線放射輝度が測定され、中性粒子密度が評価されてきた。今回、新たにセントラル部 NBI ビームライン上にH α 線検出器を設置し、セントラル NBI が直にプラズマに寄与する効果について、中性粒子の挙動の観点から検討した。

図1は、セントラル部 NBI 実験時における、ビームライン上に設置したH α 線測定器 ($z=-123.5\text{cm}$) と近傍のもの ($z=-141\text{cm}$) の測定結果を比較している。NBI 印加時におけるH α 線放射輝度は、ビームライン上で350%、ビームライン近傍で200%程度の増加が認められた。この時 NBI 印加時の電子線密度の増加率が、20%程度であることから、セントラルNBIによる中性粒子密度の増加の効果が大きいと考えられる。

図2は、ビームライン上を前方からビームに向かって観測している分光器を用いて、観測されたH α 線近傍の分光スペクトルを示す。ビーム水素原子が直に発光しているH α 線強度は、ドップラーシフトを生じているのに対して、ドップラーシフトしないH α 線輻射の強度が著しく高いことが分かる。このことから、ビームライン上におけるH α 線放射輝度の増加率は、ビームに起因するリサイクリングH α 発光が大部分を占めるものであることが推察できる。また、5ch 検出器を用いた、アンカー中央部におけるH α 線放射輝度の測定から、同部においてもビーム起源のH α 発光が支配的であるという結果は観測できなかった。

以上の結果から、ビームライン上で観測されているNBI 時におけるH α 線強度の急激な上昇は、ビームが直にH α 発光しているのではなく、ビーム入射に起因して、壁等から中性水素ガス放出され、プラズマ中に侵入した結果、励起されたリサイクリングH α 発光が支配的となっていると考えられる。

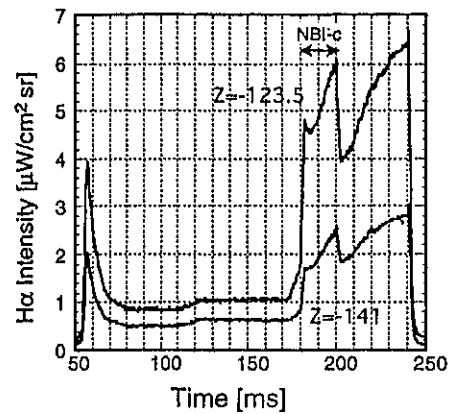


図1 セントラル部H α 線強度の時間変化

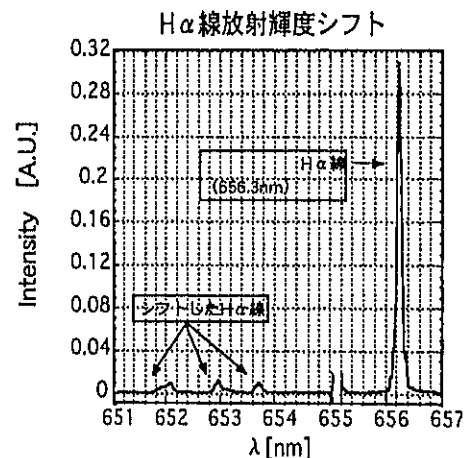


図2 H α 線近傍の分光スペクトル

[1] 大木俊和, 中嶋洋輔, 他「GAMMA10 セントラル部NBIビームライン近傍におけるH α 線計測」プラズマ・核融合学会第19回年会(2002年11月, 犬山市, フロイデ) 29pB05P.

【10】ガンマ10極小磁場部における中性粒子挙動解析 [1,2]

プラズマ閉じ込め装置において粒子閉じ込めを評価するために、中性水素原子・分子密度を測定することが必要不可欠となっている。そのため、従来から水素の遷移光であるバルマー系列線のH α 線放射輝度の測定から、中性水素原子・分子密度を求めるプラズマ分光モデルが確立されている。GAMMA10では、モンテカルロ法による中性粒子輸送コード(DEGAS コード)を用いてシミュレーション計算を行ない、z軸方向各所に設置されたH α 線測定器で測られた実測値で規格化することによって、中性水素原子・分子密度の空間分布を求めている。

近年 DEGAS ver.63 を用いた3次元中性粒子輸送シミュレーション解析が始まった事により、磁場形状が非軸対称であるアンカー部における中性粒子の挙動が明らかになってきた。本研究では、同部におけるプラズマ境界と容器間の粒子流を、より正確に反映させるため、メッシュ数を以前の二倍以上に増やし、メッシュジオメトリの最適化を行なった。図1に新旧真空容器壁形状、プラズマ形状を示す。

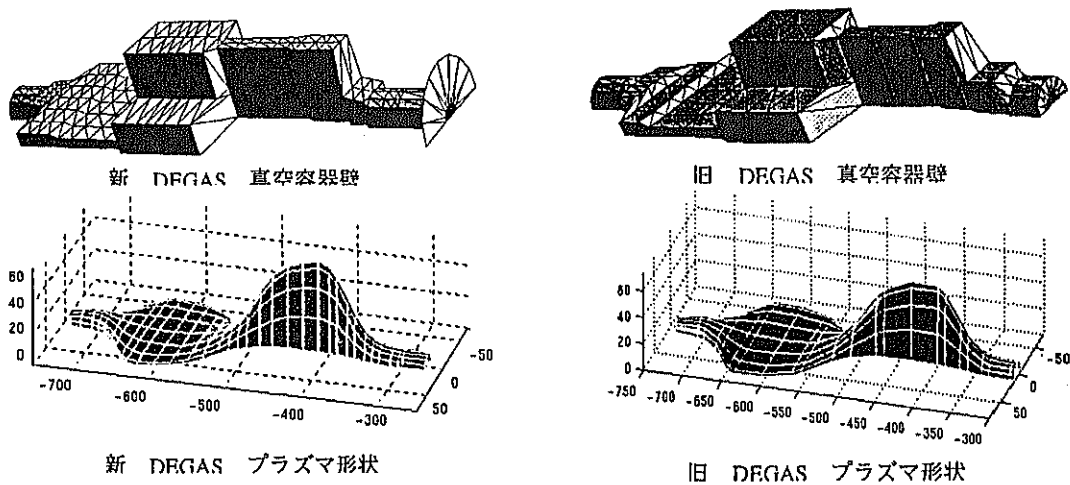


図1 DEGAS コードに用いた新旧真空容器壁形状とプラズマ形状

今回改良を施した新メッシュの特長は、(1)メッシュ数を大幅に増やし、形状をより実際の真空容器に近づけ、(2)シミュレーション領域をセントラルセル付近まで拡張し、(3)アンカー一部のNBIタンクの部分にポンプに相当するガスの出口を設けたことである。これによって、今までに比べてより精度の高いモデリングができると考えられる。

図2は、東アンカー部にて測定されたH α 線強度の軸方向プロファイルと、DEGASコードを用いた中性粒子輸送シミュレーションの結果から算出したH α 線の強度分布を示す。計算値と実測値は各々ミラースロット部(Z=-300cm)で規格化されている。(◇)のシンボルは旧メッシュの計算結果を示し、内側変換部(z=370cm付近)において、実測値(▲)と食い違いを見せているのに対して、(●)で表される新しいメッシュでの計算値は、実測値と非常に良い一致を示していることがわかる。このことは、新しいメッシュがセントラル部とアンカー部とのコンダクタンスを、より精度よくモデリング出来ていることを示唆するものである。

また、外側変換部（670cm 付近）において実測値との有意な差があることに関して、シミュレーション計算に基づいて、その粒子源を推定した結果、アンカー外側変換部に設置されている可動リミターからの脱ガスが支配的である可能性を示唆する結果が得られた。

アンカーの内外変換部におけるプラズマ密度の計測は、その計測器に対する近接性の悪さから行われていない。そこで、密度分布の違いが中性粒子輸送シミュレーション計算に及ぼす影響を調べるために、図3に掲げる2つの密度モデルを用いて、中性粒子輸送シミュレーションを行った。これらのモデルを用いた計算結果から、粒子生成量の軸方向分布として示したものを図4に示す。この結果では、プラズ

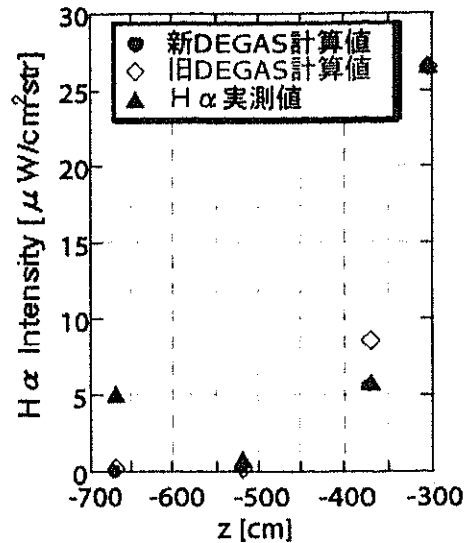


図2 アンカー部のH α 線強度軸方向

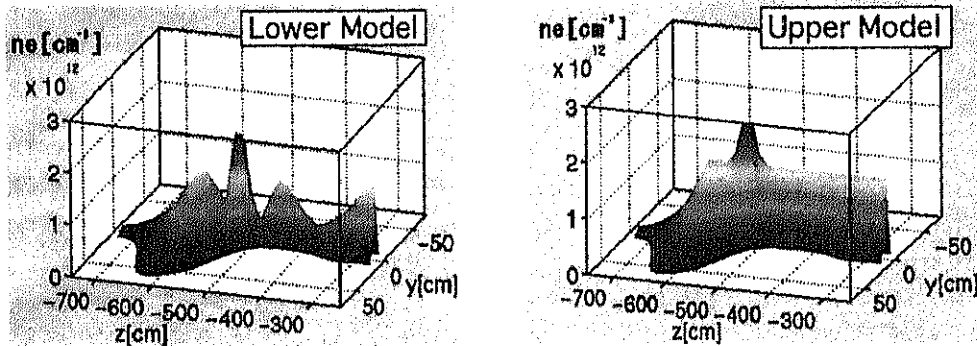


図3 DEGASコードに用いたアンカー部における2種類の密度モデル

マの実効半径を 20cm としたプラズマカラム全体の粒子生成量を求めている。この図から分かるように、両者に大きな差が認められなかった。

[1] 深澤尊浩, 中嶋洋輔, 他「3D-DEGASを用いた極小磁場部における中性粒子挙動解析」プラズマ・核融合学会第19回年会(2002年11月, 犬山市, フロイデ) 29pB04P.

[2] Y. Nakashima, et al., "H α Measurements on Hot-Ion Mode plasmas in the Minimum-B Anchor Cell of the GAMMA 10 Tandem Mirror", Rev. Sci. Instrum. 74 No.3 (2003) 2115-2118.

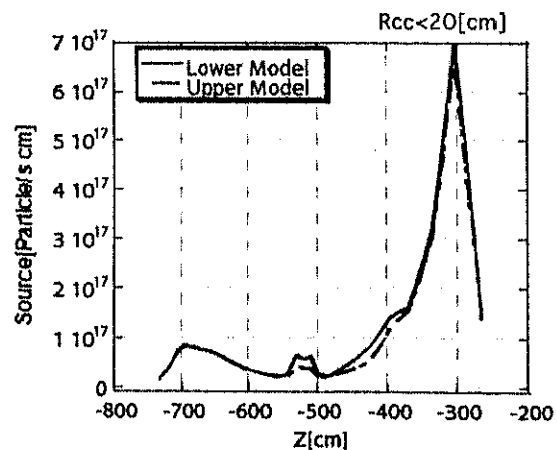


図4 粒子生成量のz軸方向プロファイル

【11】ガンマ10 NBI 実験における荷電交換中性粒子分析器を用いたイオン温度の計測[1]

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め実験装置 GAMMA10 のセントラル部において、荷電交換中性粒子分析器(CX-NPA)を用いたイオン温度の計測を行っている。本研究の目的は、イオンサイクロトロン高次高調波発振器(RF3)、セントラル部の中性粒子ビーム入射装置(C-NBI)などを用いて得られたプラズマ密度上昇時におけるセントラル部イオン温度の径方向分布を CX-NPA を用いて明らかにし、加熱系のプラズマへの効果について検討を行うことである。またイオンのエネルギー損失量を評価し、より効果的なプラズマ加熱のための知見を得ることである。

図1は、図1に本実験における加熱シーケンスとセントラル部電子線密度(NLcc)、反磁性量(DMcc)の時間変化を示す。CX-NPA の測定結果から求めた中心のイオン温度 ($T_i(0)$) は 100ms:6.6keV → 145ms:5.0keV → 155ms:4.7keV → 170ms:4.8keV → 180ms:4.2keV → 195ms:3.1keV という結果になった。このようなイオン温度の増減が起こる原因を探ることを目的として、イオンのエネルギーバランスの観点からエネルギー損失量を評価している。

エネルギー損失量は以下のような3つの古典的エネルギー損失量が考えられる。

- ・イオンと電子とのクーロン衝突
- ・イオンと中性水素原子との荷電交換反応
- ・イオンと中性水素分子との荷電交換反応

従来、長さ 300cm の円柱プラズマと考えるとセントラル部のエネルギー損失量を評価していたが、C-NBI 入射中において Z 方向で中性水素原子密度の変化が異なっ
てしまい、正確なエネルギー損失量が評価できない。そこで 300cm の円柱を 8 分割することで C-NBI 入射中のエネルギー損失量を評価した。損失エネルギー量から求めた入力エネルギー量の増加が C-NBI の入力エネルギー量 PNBI によるものとする、概ね C-NBI の入力エネルギー PNBI のうち 25%程度がプラズマ加熱に寄与したと考えられる。

[1] 荻田猛史, 中嶋洋輔, 他 「GAMMA10 セントラル部における荷電交換中性粒子分析器を用いたイオン温度の計測」 プラズマ・核融合学会第 19 回年会 (2002 年 11 月, 犬山市, フロイデ) 29pB06P.

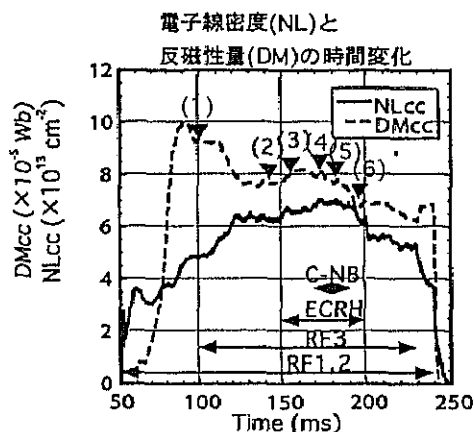


図1 NBI 実験時のプラズマパラメータ

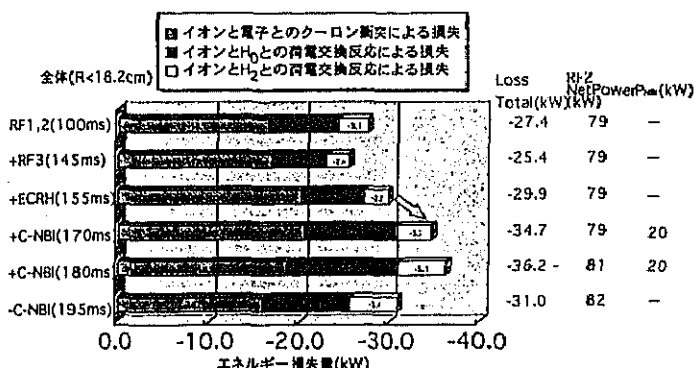


図2 エネルギー損失量の評価

【12】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]

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。本研究では、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) の排気性能を評価する為の実験を進めている。今までに CSP の排気効果は確認されているが、更なる性能の改善や実機への適合性を検討するために、サンプル駆動装置付きポンプモジュールを用いて、カーボンシートポンプのサンプルへの実機プラズマの照射も行っている。このサンプル駆動装置は、第一壁の候補になっている物質のサンプルを実際の高温プラズマに曝すことができる。また、サンプルを本体の真空を破ることなく容易に交換することができるため、照射時間等の実験パラメータを任意に設定できる利点がある。

本研究では、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 のビームダンプの開発を行った。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、適切な形状・材料の選択により、CSP は NBI ビームダンプとして使用可能であるという結果を得たため、この結果をもとに装置の設計・製作を行った。

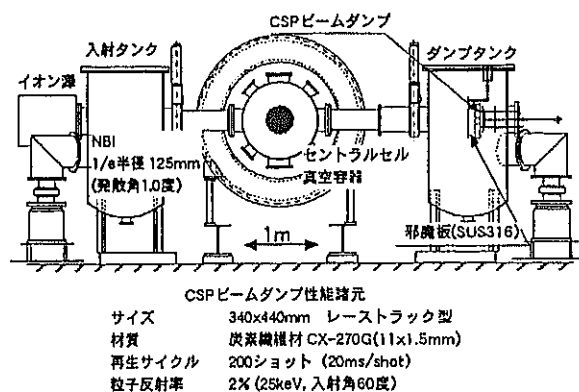


図1 CSP ビームダンプ概略図

図1に GAMMA10 に新設されたセントラル NBI の透過ビーム処理を目的とした CSP ビームダンプの概略図を示す。GAMMA10 プラズマを透過した中性粒子ビームがダンプタンク中の CSP ビームダンプに入射する配位になっており、その前面には排気効果を検証するための可動式の邪魔板が設置してある。図2に 21keV、20A の NBI を用いた排気実験の結果を示す。実験は、CSP を用いた場合(CSP-on)と邪魔板に入射した場合(CSP-off)のそれぞれについて、NBI のパルス幅を 10、20、30ms と変化させて行われた。いずれの場合も CSP-on の方が CSP-off の場合より圧力が低くなっており、CSP-on と off の圧力差もビームのパルス幅の増加とともに大きくなっている。これらの結果から NBI に対する CSP の排気効果を実証できたといえる。

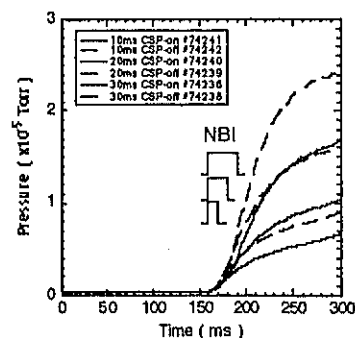


図2 CSP ビームダンプ排気実験結果

[1] Y. Ishimoto, Y. Nakashima, et al., "Surface analysis and a novel application of Carbon Sheet Pump in the GAMMA 10 Tandem Mirror", J. Nucl. Mater. 313-316 March (2003) 194-198.

【13】高周波を用いたプラズマ生成と加熱、及び、加熱プラズマの挙動解析

タンデムミラー研究の一つの大きな課題であるプラズマの高密度化に向けて、周波数がイオンサイクロトロン周波数に比べて十分に高い、高次高調波(HHFW)を用いた実験が進められている。従来の発振器システム (RF1, RF2) で生成・加熱維持されたプラズマに対して、HHFW(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ている。平成14年度は、磁気プローブを用いた励起波動の測定と計算機コードを用いた励起波動の計算、また、観測された高エネルギーイオン生成に関する理論的評価を行った。

A. 高次高調波の励起

RF3は、サイクロトロン周波数の6倍から10倍の周波数の高周波を発振する。セントラル部西側に設置されたダブルハーフトーン型(DHT)のアンテナに印加されプラズマ中に波動を励起する。RF3による密度上昇の機構を明らかとするため、実際にプラズマ中に励起される波動の分散関係の測定を行った。セントラル部に設置されている2本の磁気プローブを用いて、プローブ信号間の位相差から伝搬する波動の波数を求めた。図1に、大きな密度上昇が観測された周波数41.5MHzの場合(a)と、明らかな密度上昇が観測されなかった37.7MHzの場合(b)の位相差を示した。西側DHTアンテナのすぐ近くに設置された磁気プローブを用いた。プラズマの線密度を横軸としてその依存性がわかる。右側の軸に、磁力線方向の波数に換算したものを記している。図(a)では、線密度の増大とともに波数が大きくなり、ある密度に達すると不連続的に別のモードに遷移することが示されている。RF3により励起されるアルベン速波は、径方向の境界条件で決まる固有モードであり、密度の上昇とともにその次数の大きなモードが次々と現れてくることが予想されている。一つの径方向固有モードが、密度の増大とともに軸方向の波数が大きくなり、次の次数のモードに遷移することで密度上昇を持続できることを示唆している。有限要素法を用いたアンテナ-プラズマ結合コード(京都大学との共同研究)による励起波動の計算が進行中である。

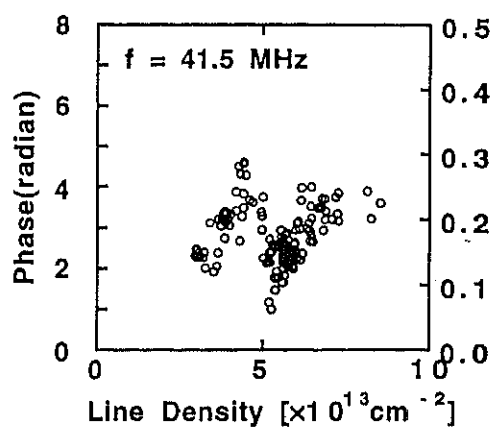


図1(a)

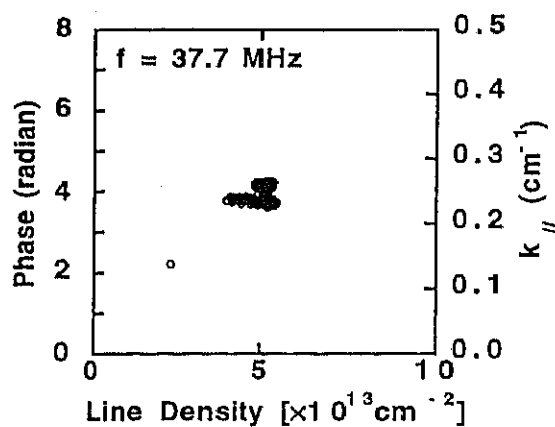


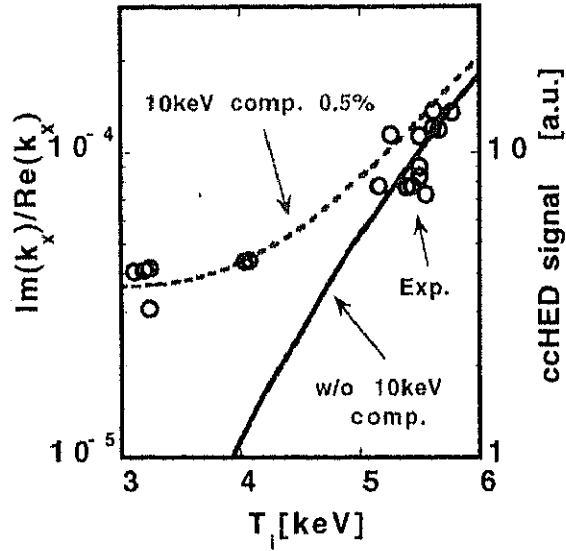
図1(b)

B. 高次高調波加熱の検討

RF3印加による高エネルギーイオン生成を解析するため、熱いプラズマ中での分散式を解き、その高調波減衰を計算した。(核融合科学研究所との共同研究) 昨年度に得られた、高エネルギーイオン生成の初期プラズマ温度依存性の実験結果(○印)を図2に示した。初期温度の増大とともに、高エネルギーイオンが効率良く生成されることが示されている。初期プラズマの温度を一成分として計算した10倍の高次高調波減衰の温度依存性を図中実線で示した。10倍の

高調波減衰は、高エネルギーイオンの存在に強く依存するため、実験で得られた温度依存性を説明できないことが明らかとなった。定性的に実験結果を評価するため、初期プラズマの温度分布に高温成分を含む二成分を仮定してその依存性を計算した。10keVの高温成分が0.5パーセント含まれるとして計算した例を図中点線で示した。少量の高温成分が含まれることで、初期温度3keV付近での減衰が大きくなり、観測された温度依存性を定性的に説明できることが明らかとなった。

図 2

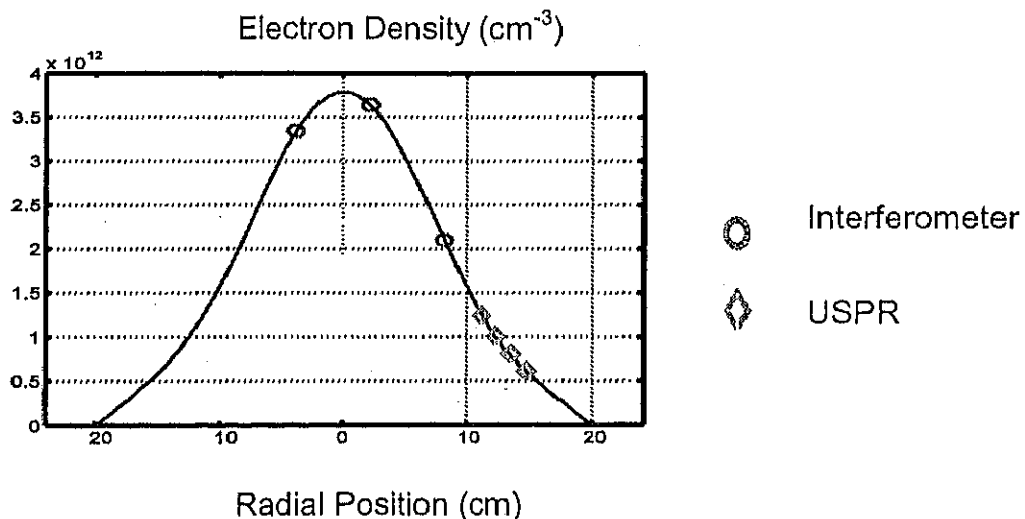


【14】 マイクロ波によるプラズマ計測

今年度は主として超短パルス反射計による密度分布並びに揺動計測、マイクロ波干渉計による揺動計測及び密度揺動によるフラウンホーファー回折に関する研究を実施した。以下に、超短パルス反射計と通常のマイクロ波干渉計との組合せ計測について述べる。

超短パルス反射計とマイクロ波干渉計との組合せによる密度分布計測

プラズマ中の電子密度はプラズマの特性を決める基本量のひとつである。現在の核融合を指向するプラズマ装置では標準的計測器としてはトムソン散乱法と並んでマイクロ波反射計が干渉計に替わろうとしている。ガンマ 10 においても数年来研究を続けている（平成 13 年度学系報告）。しかし、ガンマ 10 のような直線型装置ではプラズマ中の断面内で磁場が一定の為、一方からのみ観測したのでは中心（密度最大）の反対側の情報が分からないと言う欠点がある。また、中心軸のずれがあると密度揺動との区別が出来ない。そこで、従来から設置しているマイクロ波干渉計と組合せて 3~4 ショットで密度中心位置と概形を求め、側面を超短パルス反射計(USPR)で測定する方法を考案した。これにより、密度分布を得るのに従来はホーンの位置を変えた測定を約 10 ショット繰返す必要があったが、この方法により最低 3 ショットで観測出来るようになった。目下、同時に 3 コード測定出来る装置を計画しており、それが完成すれば 1 ショットで密度の半径方向分布が得られるようになる。下図に測定結果の例を示す。



【15】ガンマ10プラズマにおける衝突・輻射モデルを用いた不純物イオンスペクトルの研究

核融合プラズマの研究においては、プラズマに影響を与えないでプラズマの情報を得ることができる分光計測は非常に重要な計測手法である。これまで、ガンマ10では軟X線から可視光にかけてそれぞれの波長域についての分光器を開発、設置し、プラズマ放射光の径方向分布の時間変化の測定ができるようにしてきた。本研究では、真空紫外（VUV）分光測定システムを用いて、不純物イオンスペクトル測定結果と分光モデルである衝突・輻射モデル計算結果を比較することによって、不純物イオン密度及びプラズマ電子密度、温度等の情報を得て、ガンマ10プラズマ中の不純物イオンの振る舞いを調べることを目的とした。

使用したVUV分光測定システムは、絶対感度校正実験を行い、プラズマからのスペクトルの絶対放射輝度の径方向分布を測定できるようにした。その後、高イオン温度モードプラズマにおける不純物イオンスペクトル計測を行った。このプラズマは、イオンサイクロトロン共鳴加熱(ICRH)でプラズマ生成、維持を行い、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)を用いて軸方向閉じ込め電位を生成し、プラズマ閉じ込めの改善を行っている。このときの不純物イオン、特に、炭素イオン(CII:C⁺, CIII:C²⁺)に注目して放射スペクトルの径方向分布の時間変化を調べた。これと衝突・輻射モデル計算結果を比較して、CII、CIIIの径方向密度分布の時間変化を調べた。図1にVUV分光測定システムで測定した不純物イオンスペクトルを示す。酸素、炭素イオンが主に観測されている。

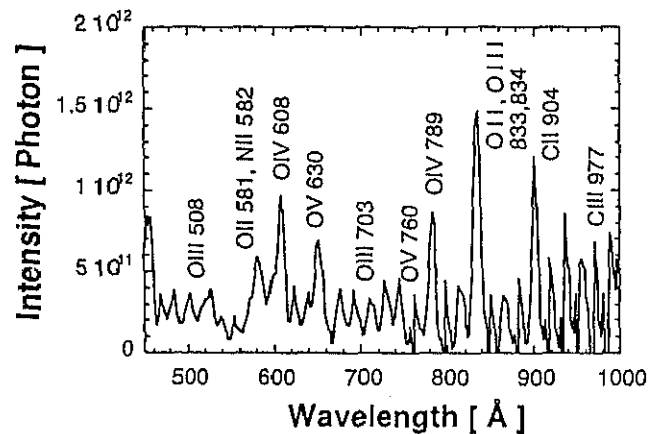


図1：VUV分光測定スペクトル

図2に、衝突・輻射モデルを用いて計算した、電子密度 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度50 eVの時のCII, CIIIイオンスペクトル分布を示す。図3にVUV分光システムによって観測されたCII 904 Å, CIII 977 Åの径方向分布、図4に衝突・輻射モデルとの比較によって得られるCII, CIIIイオン密度の径方向分布を示す。これから、CII, CIIIイオン密度は、 $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ であることがわかる。測定誤差は $\pm 30\%$ である。図5(a), (b), (c)に100 ms→140 ms, 140 ms→180 ms,

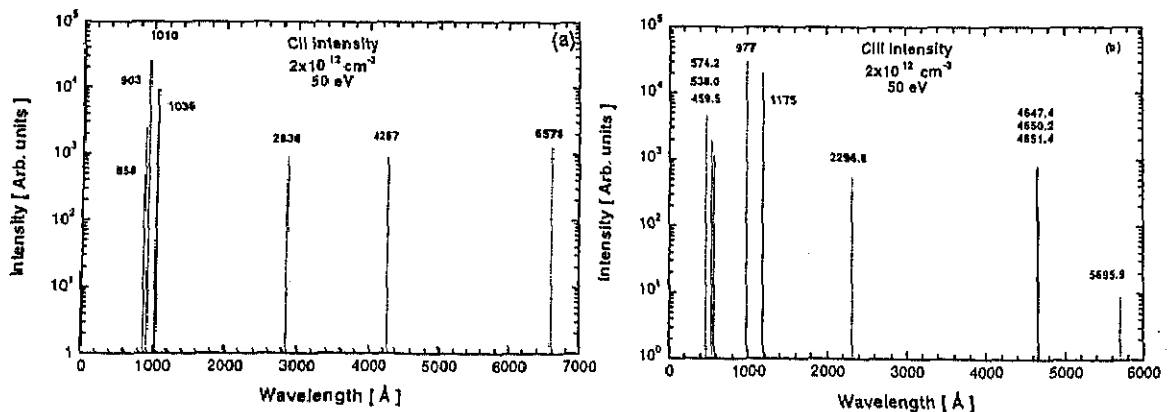


図2：衝突・輻射モデル計算によるCII, CIIIイオンスペクトル

180 ms→240 msのCII, CIIIイオンの径方向分布の時間変化をそれぞれ示す。図5(a)では、CII、

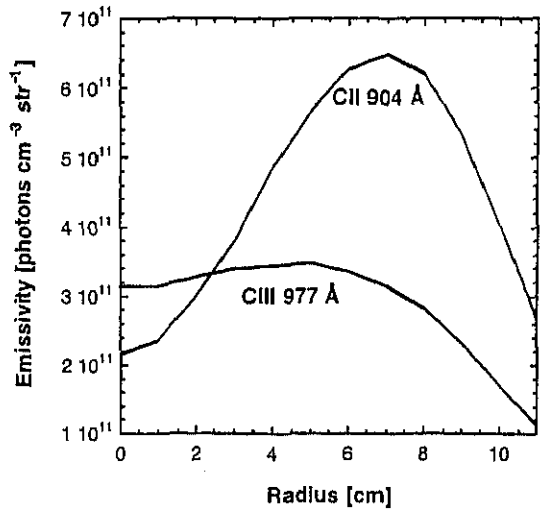


図3 : CII, CIII の体積輻射率径方向分布

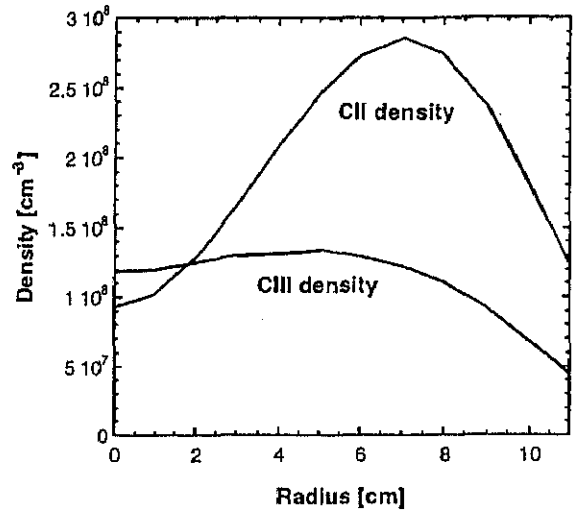


図4 : CII, CIII イオン密度径方向分布

布
CIIIイオンとともにプラズマ中心部で密度が減少している。これは、より高い価数CIVへの電離が進みCII, CIIIイオン密度が減少したためと考えられる。図5(b)では、ECRH印加の前後を示しているが、ECRH印加による電子温度の上昇による電離の進行と電位閉じ込めによる効果でプラズマ中心部でCIIイオン密度が減少し、CIIIイオン密度が増加する。図5(c)では、ECRH印加中と印加後の密度分布を示しているが、ECRH終了後にECRH印加前の状態に戻っていること

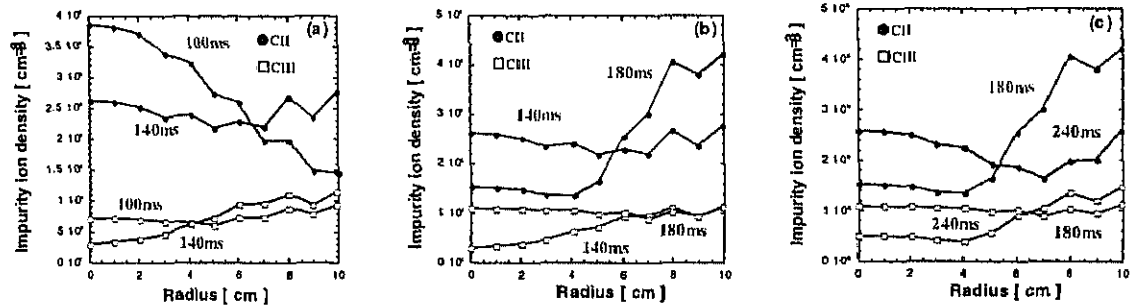


図5 : CII, CIII イオン密度の径方向分布の時間変化

がわかる。今後、より詳細に不純物イオンの径方向分布の時間変化を調べることによって、不純物発生機構、不純物輸送に関する知見を得ることが期待される。

次に、衝突・輻射モデルを使用してプラズマ電子温度を求める手法に関して調査した。これまでにも、電子温度や電子密度を求める方法として、特定の価数の不純物イオンスペクトル強度比を使用する方法があげられている。しかし、実際に測定したという報告は少ない。それは、適当な光源が無い場合VUV/SX分光測定装置の相対波長感度較正が困難であるからである。以下に、我々の使

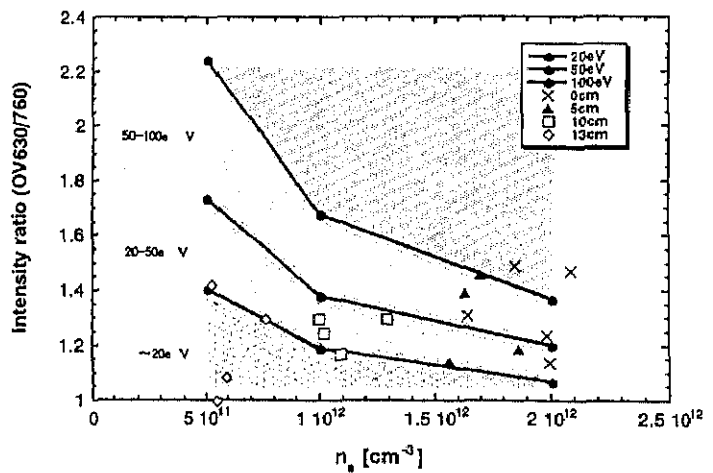


図6 : OV(630/760)スペクトル強度比と測定データ

用している絶対波長感度較正済みのVUV分光測定装置システムを用いて行った、電子温度測定とその問題点、解決法について示す。使用するスペクトルは、OV (O^{4+} 630 Å, 760 Å)である。この2つのスペクトル強度比と電子温度、密度との関係を図6に示す。図6中には、ガンマ10プラズマにおける実際のスペクトル強度比の各半径での測定データ (×:0cm, ▲:5cm, □:10cm, ◇:13cm) も合わせてプロットしてある。これを見ると、誤差の範囲内で、径方向の電子温度分布と一致していることがわかる。ただ、本測定で電子温度を精度良く求めることは難しいことがわかる。このスペクトル強度比で電子温度を求めるためには、検出器の読みとり性能のアップが求められる。現在の読みとり性能は8bitであるが、これを少なくとも12bitまであげる必要がある。さらに、より精度の良い電子温度測定のためには、電子温度によるスペクトル強度比の変化が大きいスペクトルペアを選択する必要があり、そのスペクトルがガンマ10で観測されている必要がある。図7にCII 858 Å, CII 904 Åの線強度比を示す。このスペクトルペアは電子温度に依存して比較的大きな強度比を持っているので電子温度測定に向いていることになる。しかし、現在のVUV分光器の波長分解能では分離して測定できないため、検出器の解像度を上げる必要があることがわかった。今後、検出器の読みとり精度と解像度を上げることを予定している。

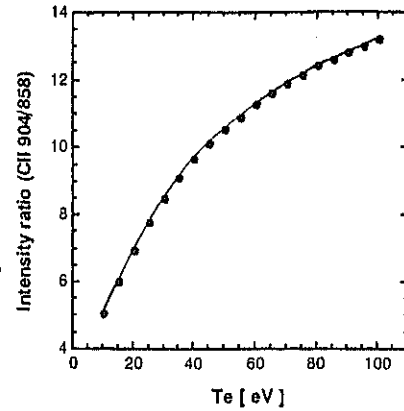


図7 : CII (904/858 Å)の電子温度依存

【16】Ho線検出器を用いた GAMMA 10 における粒子補給に関する研究

これまでの核融合装置では、プラズマの生成及び密度の維持においてガスパフが重要な役割を果たしてきた。しかし、プラズマの高温高密度化につれて、ガスパフのみでは十分な粒子補給を行うことが出来ず、様々なトカマク装置においてプラズマの密度限界が観測されている。プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10 においても、プラズマの生成、維持のためにガスパフによる粒子補給では密度限界が観測され始めている。これに対して、新イオンサイクロトロン共鳴加熱 (RF3) 等の加熱系の導入と共に、NBI (Neutral Beam Injection) や開放端型の装置としては世界初となるペレット入射等による粒子補給実験を行い、プラズマの密度増加に向けた実験を行っている。ガスパフと共に、これらの粒子補給方法のプラズマへの影響を調べることは、プラズマの高密度化及び密度維持と共に、開放端系における粒子補給の効果、影響を調べる上でも重要となる。

プラズマへの粒子補給の影響を検証するためには、プラズマの密度変化が重要になるが、それと共に、その他のプラズマパラメータも考慮する必要がある。特に、粒子補給は多量の低温中性粒子をプラズマ中に持ち込むため、プラズマの閉じ込め (粒子、エネルギー) やプラズマの蓄積エネルギーに影響が出ることが予想される。従って、プラズマの温度の変化や中性粒子の動向が粒子補給の効果を検証する上で重要になる。

本研究では、上述の方法のうち粒子補給装置としての NBI に注目し、NBI がプラズマに及ぼす影響を解明することを目的として、電子線密度、反磁性量、Ho線の計測を用いてプラズマ中の電子密度、イオン温度、中性粒子密度、粒子生成量の導出を行い、NBI の効果について考察を行った。

(1) 中心電子密度 ($n_e(0)$)、中心イオン温度 ($T_i(0)$) の時間発展

プラズマの密度、温度の径方向分布を仮定することにより、電子線密度、反磁性量から $n_e(0)$ 、 $T_i(0)$ を見積もることができる。そこで、NBI による粒子補給を行ったショットについて $n_e(0)$ 、 $T_i(0)$ の時間発展を求めた (図 1)。図 1 において old はガスパフによる粒子補給を行ったショット及び粒子補給を行っていないショットのデータ点である。図 1 から、 n - T 空間上において、old のデータ点では到達し得なかった領域に、NBI による粒子補給を行ったショットでは到達していることがわかる。また、この新領域への到達は RF3、ECH、NBI の重畳によるものである。特に RF3 は、old のプロット点の時にはなかった装置であり、old の点のある領域からない領域へとプロット点を移行させており、新領域到達に大きく寄与している。NBI はターゲットとなるプラズマの密度が高いほどその効果が大きくなるため、RF3、ECH の印加によって NBI の効果がより大きくなると考えられる。

(2) 各加熱系によるプラズマパラメータの変化

各加熱系のプラズマに及ぼす影響を調べるために電子密度分布、中性粒子密度分布、粒子生成量分布とそれぞれの変化を調べた。図 2 に中性粒子密度分布の変化量を示す。これらのパラメータの変化から、RF3 による効果は、ガスパフにより供給されたガスの電離効率の改善によるものであると考えられる。また、ECH はプラグ電位の形成によって軸方向の閉じ込めを改善していると考えられる。NBI についてはさらに詳しい解析を行った。

(3) NBI によるプラズマパラメータの変化

NBI がプラズマに及ぼす効果を調べるために、NBI 中の時間を細かく分けて、各パラメータの変化を調べた。図 3 に中性粒子密度分布の変化量を示す。これらの各パラメータの変化と、各 Z 位置 (GAMMA 10 磁力線方向) での Ho 線の変化の違いから NBI による効果は、NBI に起因したガス (リサイクリングによる真空容器壁からの脱ガスと NBI イオン源から流入する低温ガス) によるものが支配的であり、中性粒子ビーム自身による効果は小さいことが示唆された。これは、現在の GAMMA 10 のプラズマパラメータでは、電子密度が十分に高くない為に中性水素分子の平均自由行程がプラズマ断面長に比べて無視できず、プラズマによる中性ガスの遮蔽が十分に働かないことが原因であると推測している。今後、RF3 の最適化や ECH のパワー増により、NB 入射前のターゲットプラズマ密度を増加させることができれば、ビームの捕捉率が上昇し

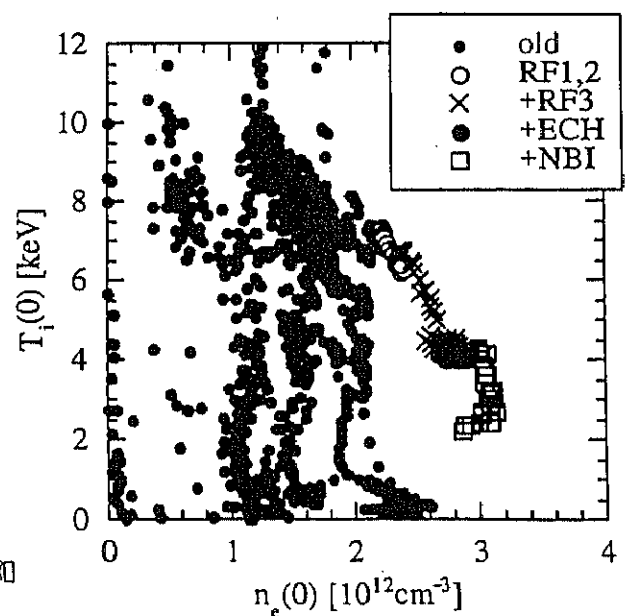


図 1 $n_e(0)$ 、 $T_i(0)$ の時間発展

ビーム自身による効果が増大してくるものと期待される。

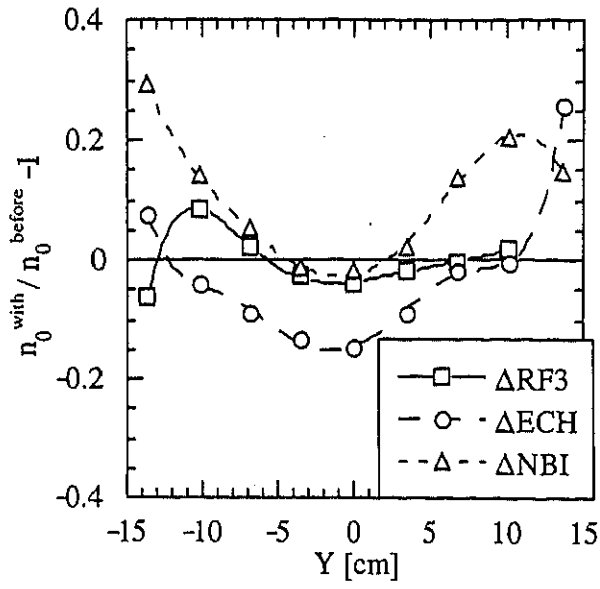


図2：中性粒子密度分布の変化量

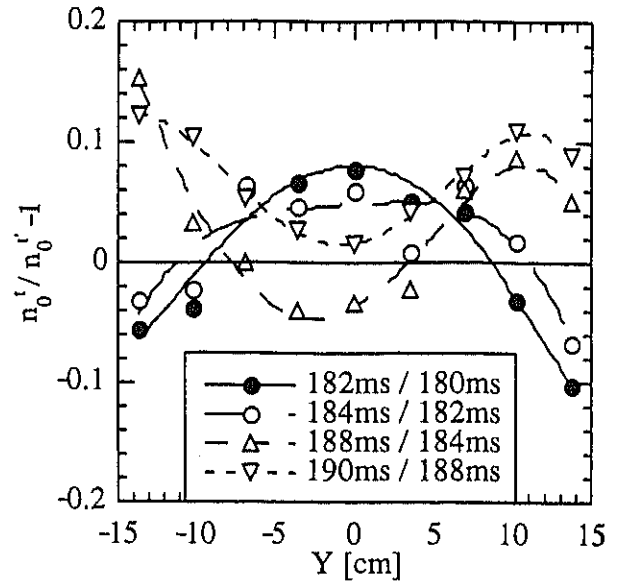


図3：中性粒子密度分布の変化量の時間変化

【17】理論・シミュレーション解析

(1) LHDプラズマにおける超短パルス伝搬シミュレーション

核融合科学研究所のヘリカル系磁場閉じ込め装置 LHD では、超短パルス反射法を用いたプラズマ密度分布計測を進めている。超短パルス反射法計測に関する本センターの先駆的研究を活かすために、核融合科学研究所の LHD 計画共同研究に参画している。本研究では、LHD プラズマ中における超短パルス電磁波の伝搬に関する計算機シミュレーションを行った。シミュレーションすべき一般化された Full Wave 方程式は、

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

$$\mu_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 (\sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}),$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{J} = \varepsilon_0 \omega_{pe}^2 \mathbf{E} - \frac{e}{m_e} \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0$$

である。ここでは、装置壁境界を取り入れるためにプラズマの周囲に誘電媒質を導入している（誘電媒質の電気伝導率 σ 、誘電率の実部 ε 、プラズマ領域では $\varepsilon = \varepsilon_0$ 、 $\sigma = 0$ ）。シミュレーションスキームは FDTD 法を用いており、プラズマ密度分布 $n(r)$ と閉じ込め磁場分布 $B_0(r)$ 及び入射電磁波の条件

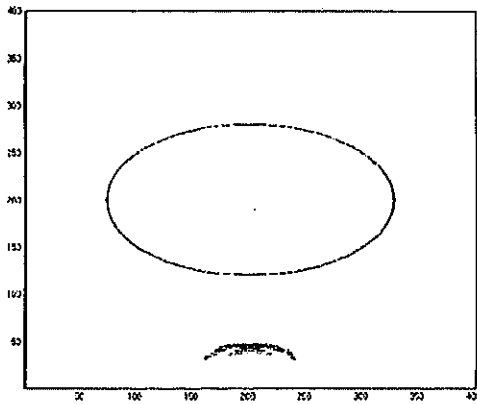


図 1. 真空領域での入射パルスの波形

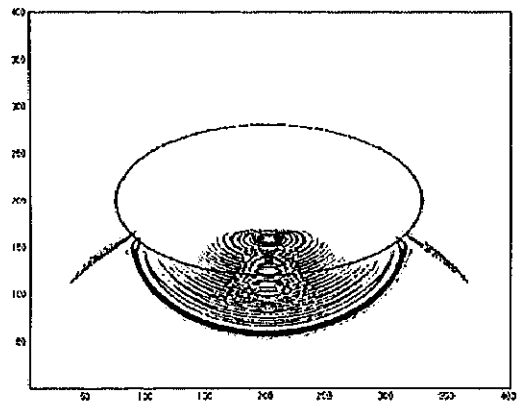


図 2. 電場の E_y 成分

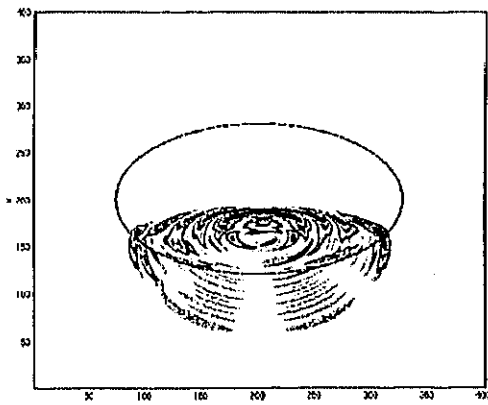


図 3. 電場の E_x 成分

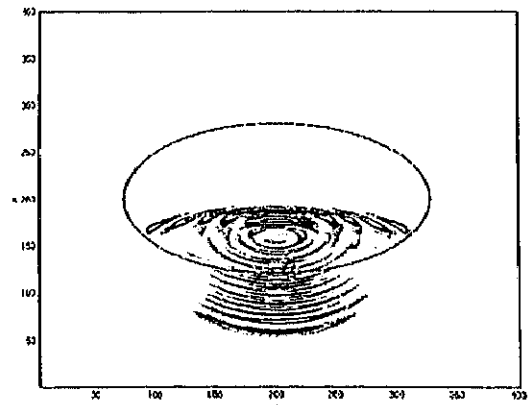


図 4. 電場の E_z 成分

を指定すれば計算を実行できる。以下に、2次元シミュレーションの結果を示す。

図1～4はLHDプラズマにおける超短パルス電磁波 (FWHM = 30ps) の伝搬の様子を示したスナップショットで、図1は紙面 (x, z) に垂直な電場成分 E_y の入射パルスの波形、図2～4はプラズマ領域での電場成分の波形 (図2 : E_y , 図3 : E_x , 図4 : E_z) を表す。LHD装置内の磁場分布に関しては渡辺, 赤尾の解析式を仮定し、密度分布に関しては $n(r) = n_0(1 - \Psi/\Psi_0)^2$ を仮定した (Ψ はフラックス関数で、 Ψ_0 は最外殻磁気面に対応する)。図中にある楕円は最外殻磁気面 Ψ_0 の位置を示している。また密度は $n_0 = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ を仮定した。シミュレーションにより反射波はプラズマに対してかなり広がることが分かった。この計算結果は、超短パルス反射法による検出器アレイを用いたイメージング計測の可能性を示唆している。今後、逆変換を用いた密度分布の再構成等の研究を進めていく。

(2) ミリ波イメージング反射法計測に関するシミュレーション

プラズマの密度分布や密度揺動計測のためのミリ波イメージング反射法に関して、米国のプリンストン大学プラズマ物理学研究所との共同研究をスタートさせた。この共同研究の目的は、同研究所や日本の核融合科学研究所で現在進行している実験計画を計算機シミュレーションによりサポートすることにある。このミリ波イメージング反射法は、プラズマの密度分布や密度揺動の多次元的な計測、従って、プラズマの可視化が可能になるということで現在その研究動向が注目されている。

本研究では、そのためのシミュレーションコードの開発や準備研究を行った。電磁波の集光ビーム等を解析するためにガウシアンビーム解がよく用いられるが、電磁波伝搬シミュレーションにおいてこのガウシアンビームの伝搬を一般的に取り扱えるように、先ずシミュレーションコードの改良を行った。図6は、ガウシアンビーム電磁波の円筒ミラーによる反射と再集光に関する2次元シミュレーションの結果を示している。

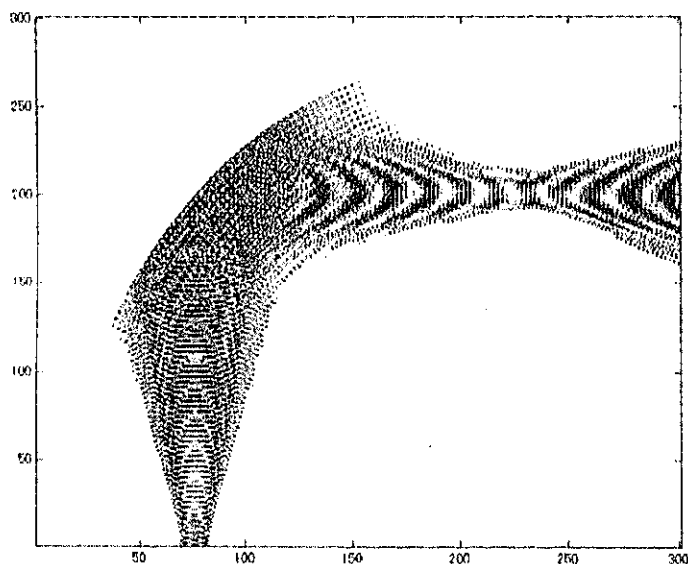


図5. ガウシアンビームの円筒ミラーによる反射と再集光

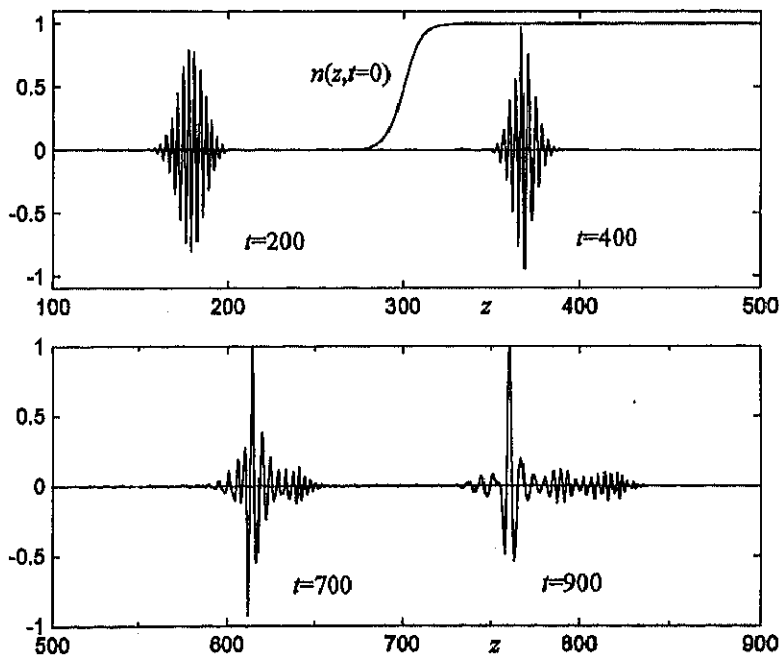
この改良されたシミュレーションコードを用いてプラズマ密度揺動によるミリ波散乱に関する2次元シミュレーションを行い、密度揺動と散乱波の波形との関係について解析し、簡易プラズマモデルの場合に得られる理論解析解を数値的にきれいに再現できることが分かった。

(3) レーザープラズマ相互作用におけるサブサイクル電磁波生成シミュレーション

高強度レーザーとプラズマの非線形相互作用によるサブサイクル電磁波の生成に関する相対論的流体シミュレーションについて報告する。シミュレーションのための基礎方程式は、以下のような冷たいプラズマを仮定した1次元の二流体方程式である。ここで電子 (n, p) は相対論的に、一方イオン (N, V) は非相対論的に扱う。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} &= -\nabla \times \mathbf{E} \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} &= \nabla \times \mathbf{B} + n \frac{\mathbf{p}}{\gamma} - N \mathbf{V} \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{p_z}{\gamma} \frac{\partial}{\partial z} \right) \mathbf{p} &= -E - \frac{\mathbf{p}}{\gamma} \times \mathbf{B} \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \mathbf{V} &= \frac{m}{M} (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \\ n &= N - \frac{\partial}{\partial z} E_z \\ \frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial z} (N V_z) &= 0 \end{aligned}$$

ここで、 $\gamma = (1+p^2)^{1/2}$ であり、質量比 $m/M = 1/1836$ を仮定する。方程式は適当に無次元化されている。図6にシミュレーションの一例を示す。真空領域からプラズマ中に向かって入射されたガウス分布のレーザーパルス (電場 E_x , 中心周波数 $\omega = 2\omega_{pe}$, ω_{pe} は電子プラズマ周波数) が、プラズマ中で非線形相互作用によりバルク部分と非常にパルス幅の短いサブサイクルパルスに分離して伝搬することが分かった。図6において $n(z, t=0)$ は初期の密度分布を表す。入射パルスのバルク部分は波の分散効果により時間とともに広がっているが、ほぼ光速で伝搬している。一方サブサイクルパルスの方は、時間的に振動しているが波形はほぼ保存されて孤立波の性質を保っている。その伝搬速度は時間とともにゆっくりと減少しているようであるが、 $t=1200$ で光速の6割位の速さであった。また、サブサイクルパルスの後には、強い航跡場 (Wake Field, E_z) が形成されることも明らかになった。



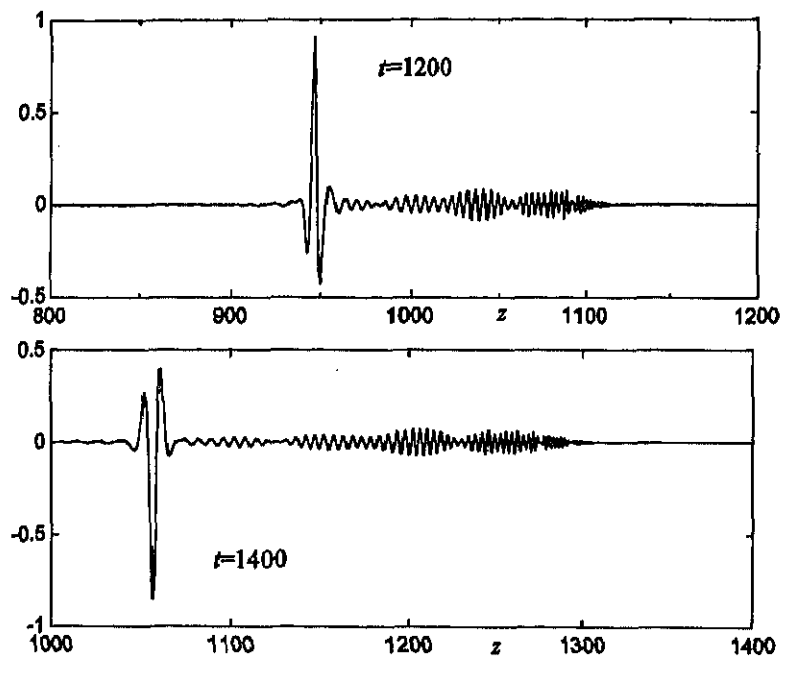


図6. 入射レーザーパルスの時間発展に伴うサブサイクルパルス (E_s) の形成

〔18〕 大型真空容器の洩れ探しの一例

概要

大型のプラズマ閉じ込め用真空容器の洩れについては、生じないことが望ましいが、現実には殆どありえない。今般起こった洩れと思われる現象については、真空の教科書の方法では特定できなかつたが、いくつかの方法を試して洩れ箇所を辿り着いた。本報告はその経緯について纏めたものである。

筆者はガンマ10の真空担当となっているが、装置自体大きいのと真空は研究グループ全員の問題であるので、個々の参加者、関係者の協力の下に実験を行った。

1 はじめに

筑波大学プラズマ研究センターのタンデムミラー型プラズマ閉じ込め実験装置ガンマ10（以下、ガンマ10と記す）の真空容器の内容積は180立米ある。この大きさだけでも真空洩れ探しについては一概に教科書のやり方では対応しきれない。併せて気体分子を機械的に外に排出するポンプ系だけでなく、液体ヘリウムパネルを用いており、気体分子の運動エネルギーを奪うことにより気体分子を排出することなく容器内に閉じ込める…実質、圧力は下がる…方式を併用し、排気系を一時的に閉じる、又は停止することができず、小さな洩れの場合にはヘリウムパネルの効果で洩れ入った気体分子を吸着してしまい、洩れとして検出し難い。

また、装置が大きくなるにつれ、神経質なほど内蔵物に拘っても自ずと内蔵物は増えていく。真空に曝される部分の素材を厳選したとしても内蔵物の放出ガスは皆無には抑えられない。従い、前述の真空排気系の中で放出ガスと洩れのガスを分離させた認識をもつことは大きな課題である。

2 装置概要

ガンマ10装置の真空容器の概要を図1に示す。基礎真空としては真空容器の下部の軸流分子ポンプ6台、実効排気速度総計 3.3×10^3 l/s で排気している²⁾。動的真空としてはアンカー部中性粒子入射装置（後述）の入射容器、エンド部、それぞれ上面の液体ヘリウムパネル2式、更にそれを補う為に各所に分散して配置されたクライオポンプ10台で排気している^{3,4)}。図中では軸流分子ポンプの位置はTで、液体ヘリウムパネルはハッチングで示している。クライオポンプは略す。電離真空計ヌードゲージは黒丸で、質量分析計測定子は矩形で示す。矢印はガス導入系（以下ガスパフと記す）である。

3 洩れを判断するための測定系

180立米の真空容器は蒸気機関車略1台分の大きさで、全長27米余、幅は広いところで5米程ある、細長い直線の円筒状である。この円筒状の真空容器はところどころにプラズマ性能の為に括れを設けている。従い、トラス型のように1点で全ての場の真空度を代表できない構造である。その為に各部に真空計を配置し、都合7箇所（東エンド、東バリア、東アンカー、中央、西アンカー、西バリア、西エンド）に同性能・同規格の電離真空計が配置されている。この点において真空洩れがあった場合、場所を特定するのに有利である。更に、これとは別に2個の電離真空計も配置され、各部の全圧を測定している。

上記の7箇所の真空計は時間応答の速いプラズマショットに対応するようにヌード型にし、磁場通電するショット中も読み取れるように磁気シールドを施し、夫々独立した過電流保護を設けた切り替え回路を経て、コンピュータ出力する。プラズマショットの無い時は信号を送らせるトリガーが無いので本体現場近くに設置したコントローラで直接読み取る。

前述の全圧とは別に、分圧を計る為の質量分析計がガンマ10の両端及び中央に設置されている（東エンド、中央、西エンド）。この分析計の導入時期は夫々異なるが、同一メーカーの同じ測定原理に基づくもので揃えている。これも2台は磁気シールドを施している（図1）。

また、固定の質量分析計とは別にヘリウムリークディテクターを1台備え、ガンマ10の300箇所あるポートのうち、空いている何れかに取り付けて適宜計れるようにしている。

いうまでもなく真空容器を大気圧から排気した際は、これらを用いて、真空容器の洩れが測定系の検出感度以下であることが認められてから実験を行っている。

4 事象1

ガンマ10の真空度は東西対称になっているのが原理であり理想である。今回の対象になった洩れと思われる現象については東西バリアで平常時 3.6×10^{-6} Pa程度の真空度であるのに対しプラズマショットを積み重ねていくと、排気系はショット分のガスを十分排気する能力を有している⁵⁾にも拘らず、電離真空計コンピュータ出力でプラズマショット寸前の値が平成10年9月から1日あたりでは変化に気付かない程度に漸増した。これは平成11年4月には凡そ 2×10^{-5} Paとなった。

検討策として、プラズマショット前後数秒の電離真空計コンピュータ出力とプラズマショット寸前の目視による現場直読の値を比較してみると、両者の値がかなり異なる。増幅器の増幅率、オフセットの変動、回路の不備を考へ同種のアンプと交換、各出力を点検したが、問題は無く、電気信号としては正しいとしかいえない。ところが4秒間の磁場通電ショットの合間の現場直読の真空度（表示器の応答時間0.1秒）は相変わらず悪くない値を示していた。アンプ系の信号は正しいという前提のもとに、ここでコンピュータ出力の真空度の変化の波形を解析すると、磁場が定常値に立上がり、ガスパフ（通常は立上がり後、数10ミリ秒にてヴァルヴ開）のガスが入る前に、僅

かであるが真空度の値が平常値より高く、且つ微分形となっており、ガスの流入を示唆するものであった(図2)。参考までに東西アンカー部により東西の対称性を示している。バリアにおいて対称性が著しく崩れている。東バリア部の波形は平常時のものと同じである。西バリア部はどうか磁場通電時のみの洩れらしいと判断するに至った。図の時間軸の0は磁場電流がフラットトップになってからの時間である。磁場電流は $t=0$ までの凡そ1秒で立ち上がる。図2の西バリアの真空度表示の初期の微分波形は磁場電流がフラットトップになる前にガスの流入があったことを示すものである。更に調べると、一定の値以上の磁場強度の際に洩れは生じていることが判明した。因みにこれ程顕著な波形の相違が見逃されていた理由は、プラズマ実験はエラーバーの大きい現象であるが、そのうちに一過性のガスパフのミストリガーがあるのでその扱いをしてしまったことである。今回の洩れ探しに際しては、この異常波形には十分な再現性があった。

5 事象1の対応

ここで真空洩れ探しの教科書⁶⁾通りに磁場非通電時にヘリウムガスを用い洩れ探しを行った。洩れ探しの基本であり、また、ガンマ10の磁場は決して弱くはないので作業中に人が磁場に曝れる危険を考慮すると、磁場非通電で洩れが探せれば理想である。しかしながらこのやり方では、可能性の考えられる場所からさえ予想通り洩れは検出できなかった。特に、洩れの値が小さく、ガーゼの繊維一筋が0リングを跨いでいる時の洩れ量より一桁程小さいことが難物である。

次に、磁場コイル冷却時間を挟んだパルス運転でしか行えないが磁場通電を行い、該当する真空計の付近で、通電時に洩れが生じ得る構造を持つ箇所を幾つかに絞り込んだ。この時点は未だ実験中で、液体ヘリウムパネルに液体ヘリウムを供給するヘリウム冷凍機が運転中であり、ビルドアップにより内蔵物の放出ガスか外からの洩れかの分別をする機会は得られていなかった。ここで可能性の候補に挙げられた箇所は、①ガスパフ：ピエゾバルブを介し一定の圧力に保たれたリザーバタンクの水素ガスをガンマ10本体に導入する系である。このピエゾバルブは経年変化により真空保持力が劣化をきたすものである。磁場通電の信号をノイズとしてバルブが開いて了う可能性がある。②中性粒子入射装置：これもピエゾバルブを介し、イオン源～中性化セルを経てプラズマにエネルギーの高いガスを導入するものである。上記同様にバルブのノイズ作動があり得る。③電子サイクロトロン共鳴加熱装置：ガスを導入せず、高周波を導入するものである。構造的に真空容器の中に大気圧程度の圧力をもつ配管が入り込む逆圧構造になっていて、洩れが生じ易く、洩れを探し難い構造であるといえる。この真空容器に入り込んだ容器は電極にかかる高電圧の放電を抑える為に不活性の六弗化硫黄ガスが充填されている。以上の3箇所が洩れの原因として考えられる。

6 事象2

上記とは別に遡って調べると平成10年9月頃からガンマ10中央部の質量分析計の出力のうち分子量を電荷で除した値 $M/e=19$ が漸増していた。

図3に示すように、この時点ではパターンの手前の $M/e = 18$ が、プラズマ実験ではお定まりの水で大きな値を示しており、更に次の隣の20はアルゴン($M = 40$)の2価で平常時に定常的に安定した信号が出ていて、この信号を讀取することに注意を払い $M/e = 19$ の信号の値を無視していた程であった。しかしこれが東西エンドの質量分析計では $M/e = 19$ の信号の大きさが安定しているにも拘らず中央部では長期的に漸増していた。そこで事象1と対応させ $M/e = 19$ が1価の弗素の洩れではないか?というところに辿り着いた。弗素は一般に大気の組成としては考えられない。従って真空容器内部の残留ガスからプラズマショットにより生成されるか又は外から強制的に入れたガスしか考えられない。これにより前節の3つの洩れ箇所候補のうち、西バリア部真空度に影響を及ぼす位置に設置されてる電子サイクロトロン共鳴加熱装置に封入されている絶縁用の六弗化硫黄が原因として思い当たった。ただ中央部には六弗化硫黄を出す装置は無く、細かい括れを挟んだ東西プラグ・バリアエリアにある。ここで比較のために東西エンドの質量分析計の出力を見ても $M/e = 19$ の信号の大きさは殆ど無視できる大きさであった。なお六弗化硫黄のもう一つの成分である硫黄は $M = 32$ でガンマ10残留ガスの質量分析によりこのスペクトルは定常的にある。尤も $M/e = 32$ は常識的に酸素 O_2 であるとする。32が酸素分子であることの裏付けとして $M/e = 16$ の酸素原子のスペクトルが常時検出されている。六弗化硫黄の質量 $M = 146$ について、常時はモニターはしていない。不定期に質量分析計をモニターした際に $M/e = 150$ までスキャンしているが、信号は検出感度以下で累積もしていない。また西バリアの真空度に影響が出る洩れに対し、中央部の質量分析計に出る信号と同程度の信号が西エンド部の質量分析計で検出される筈なのに信号が現れない疑問が残る。

7 事象2の対応

弗素のパターンにより電子サイクロトロン共鳴加熱装置ではないかということ洩れ探しを行った。前にも述べたように逆圧構造となっており、リークチェック用エアガンを入れられない。従い、先ず充填している六弗化硫黄ガスを排気し大気状態で磁場通電し、 $M/e = 19$ の値と大気の組成、窒素($M = 28$)、酸素($M = 32$)の上昇を窺った。しかし、もとより極めてスローなリークである故に顕著な変化は見られなかった。次に逆圧の部分をお油回転ポンプで排気し同じに試みたが同様であった。更には小さい隙間にも入り易い分子構造の小さいヘリウムガスを逆圧となる部分に1気圧充填しリークチェックを行ったがこれも検出できなかった。5節第1段に記したように1通電当たり非常に小さい洩れ量なので、検出感が及ばないとしかいえない。

8 一つの試み

前節までの受動的な試験に対し、次には能動的に洩れを探することを試みた。洩れのありそうなエリアの近くのガスパフを磁場通電時に投入し、ガスパフの既に知られている電離真空計応答波形に対し洩れ付近の真空計に現れる真空度の劣化の程度、時間応答、等の変化を見ようというものである。即ちこ

の波形の応答の比較で洩れの箇所や大きさを可成り絞りに込めると予想した。使用したガスのパフは、今で洩れの箇所や大きさを可成り絞りに込めると予想した。リア部の真空計で、明らかたし、早い矢印で示している。この時の示すのは、最も近い箇所、西隣による。この方法によって、結果として、場所が明らかたし、早い矢印で示している。この時の示すのは、最も近い箇所、西隣による。この方法によって、結果として、場所が明らかたし、早い矢印で示している。この時の示すのは、最も近い箇所、西隣による。

9 新たな展開

前節で洩れ箇所を特定できないまま、実験スケジュールが押ししており、洩れを上回る排気能力をガンマ10は有している。このとき件の西バリア部電離真空計の値が突然劣化した。通水を止めることにより、洩れ箇所から水分子M/e = 18の増加を質量分析計で確認し、そこが原因であることと認め、その上で洩れ箇所を特定し、勿論西バリア部に近いところであった(図1に▼で示す)が、応急処置を施した。これにより、事象1である磁場通電時の圧力上昇の現象は見られなくなった。勿論、次の機会に恒久的な処置を行った。後日、現物を詳細に調べてみると、高温の中性粒子ビームの熱を吸収する冷却管付の板で、1ミリ米厚の冷却管を溶接する際に曲げた時に生じた長さ2ミリ米程の傷であった。冷却水管の傷で当然の事として、質量分析計の信号にM = 18の増加が見られた筈であるが、6節に記したように、もとより信号が大きいので、その変動を見逃していた。

10 事象2の次段階

前節の処置にも拘らず事象2については改善が見られないということで、事象1と事象2については関連が無いことになった。次いで、中央部質量分析計に出力する弗素の要素として次に弗素樹脂を疑わざるをえなくなった。ガンマ10では真空容器そのものの材質を限定しているばかりでなく、測定器等、真空容器に内蔵するものの材質を限定しており、構造材、導電材は不銹鋼SUS316、純銅、純アルミニウム等に限られ、絶縁物にあってはセラミック、パイレックス硝子等に限られている。勿論、黄銅や盤陀、プラスチックのよう不安定な物質は認めない。ただし、プラズマが当たらないという条件下に限り、弗素樹脂テフロンだけは容認している。従って、今回の状況では弗素樹脂に高温プラズマが当たり、一般に高温で安定な筈の弗素樹脂が分解したと考へざるをえない。凡そプラズマショットが無い場合はM/e = 19の信号波形の増加は顕著ではない。因みに質量分析計の分析管納入時の洗浄剤であるフロン化合物の成分である弗素の分解排気速度は速く、経験的に、ここでは無視できるといえる。

現実には真空容器の中に入り、質量分析計の測定範囲にあるテフロン[®]の状況を観察しなければならないが、残念ながらその機会が得られていない。少なくとも大気開放の度に $M/e = 19$ の信号レベルは減少している傾向にある。真空容器内部の点検が今後の課題として残される。

11 結論

8節に述べた方法、ガスパフ入射応答と洩れ信号の大きさと形を比較することにより、洩れの形状、大きさを推量して洩れ箇所を特定することは今回能わなかったが、その傾向は把握できたといえよう。状況によっては有効であろうと思う。真空容器の洩れはあって欲しくはないが必要な場合に再度試してみたいと思っている。

また9節では材料の金属疲労による、小さな傷の成長が今回の洩れの一要因であった。この時のように、いわばたなぼたではあったが、冷却水通水という周辺圧力変化、時には温度変化により洩れが見つかったことについては教科書には無いが、今後利用できる方法ではないか、と思う。大型の特殊な真空容器の洩れ探しについては、凡ゆる手立てを利用し、更に、小さい信号も現象を反映していることを考慮し、見逃さない注意力が解決の緒であると結論する。

謝辞

ガンマ10の洩れテストに関わったすべての教官、技官、学生に感謝の意を表します。

実験にあたってギブアップしないという精神を植え付けて下さいました筑波大学名誉教授、三好昭一先生に敬意を以て感謝申し上げます。また、困難な洩れ探しに立ち向かったプラズマ研究センター中嶋洋助教授に尊敬と感謝の意を表します。信号の解釈・解析については、物理学系、長照二教授、プラズマ研究センター板倉昭慶助教授、市村真助教授に指導をいただきましたことを感謝申し上げます。更に現場にあっては物理学系大川和夫技術専門職員の尽力があったことを記します。

参考文献

- 1) 三好昭一編 ミラー型核融合装置 アイピーシー
- 2) 平田 筑波大学技術報告 No.6 (1986. 3) 5
- 3) 平田 筑波大学技術報告 No.9 (1989. 3) 1
- 4) 平田 筑波大学技術報告 No.12 (1992. 3) 9
- 5) 中嶋洋輔、ほか 真空 第33巻第8号 (1990. 8) 664
- 6) 熊谷寛夫 真空の物理と応用 裳華房

添付図

- 図1 ガンマ10本体、排気系、真空計、質量分析計、ガスパフ配置図
- 図2 磁場通電時の真空計応答波形
- 図3 質量分析パターンの例
- 図4 ガスパフ入射による真空計応答波形

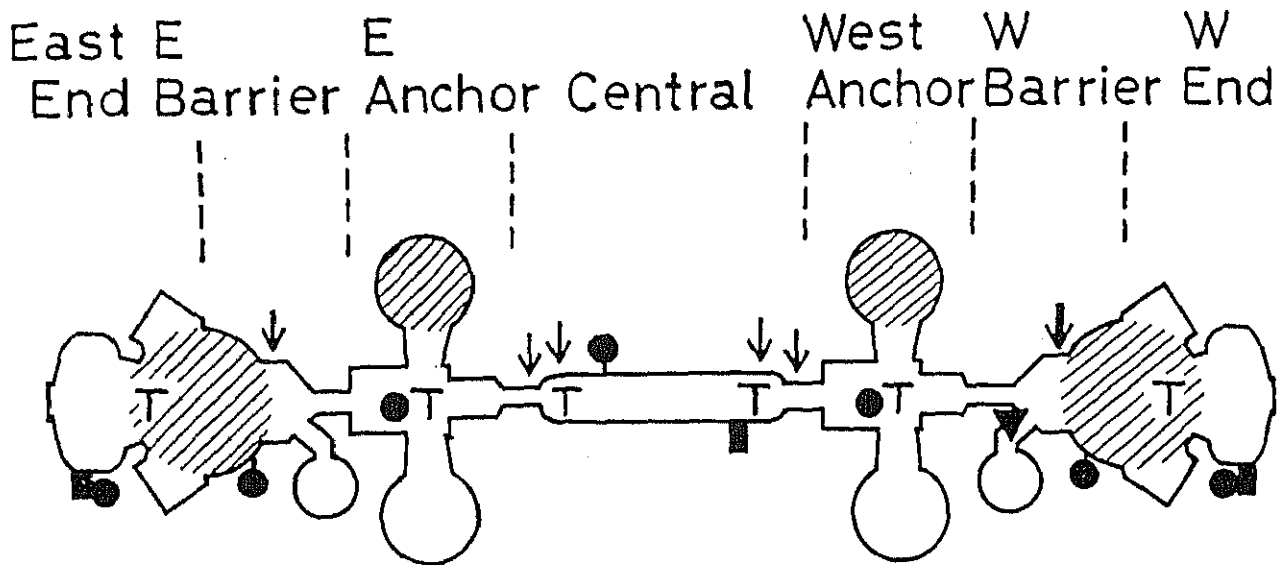


Figure 1

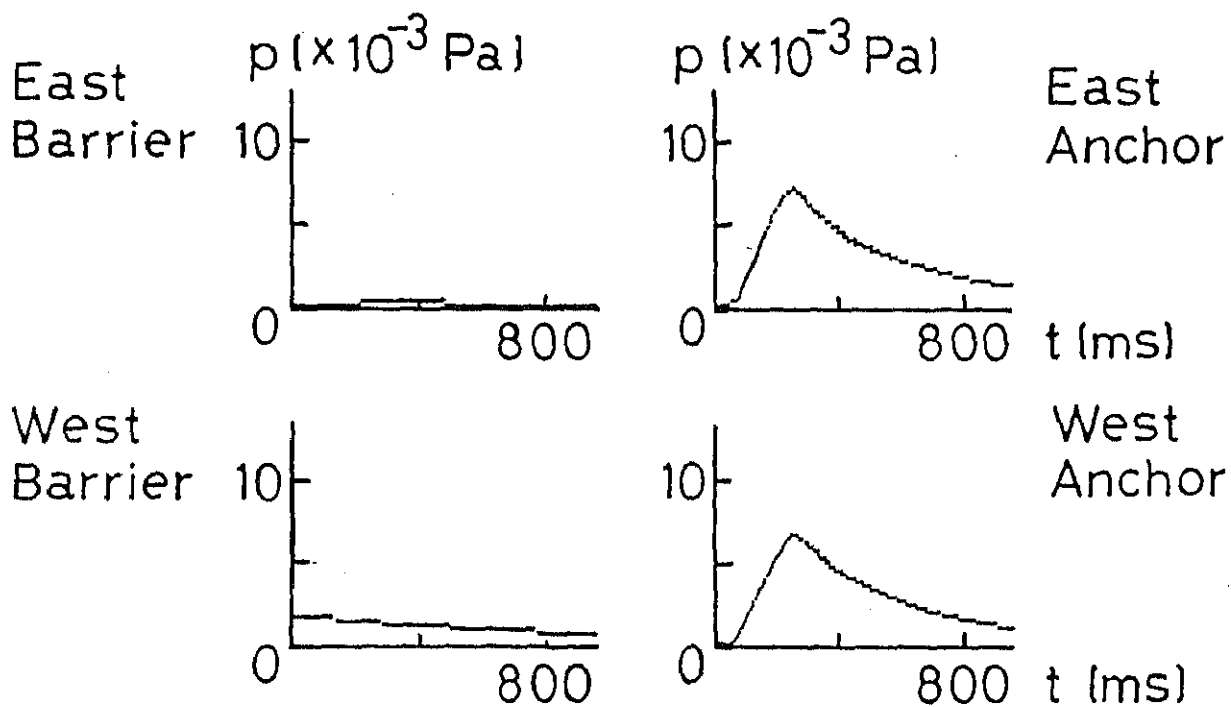


Fig. 2

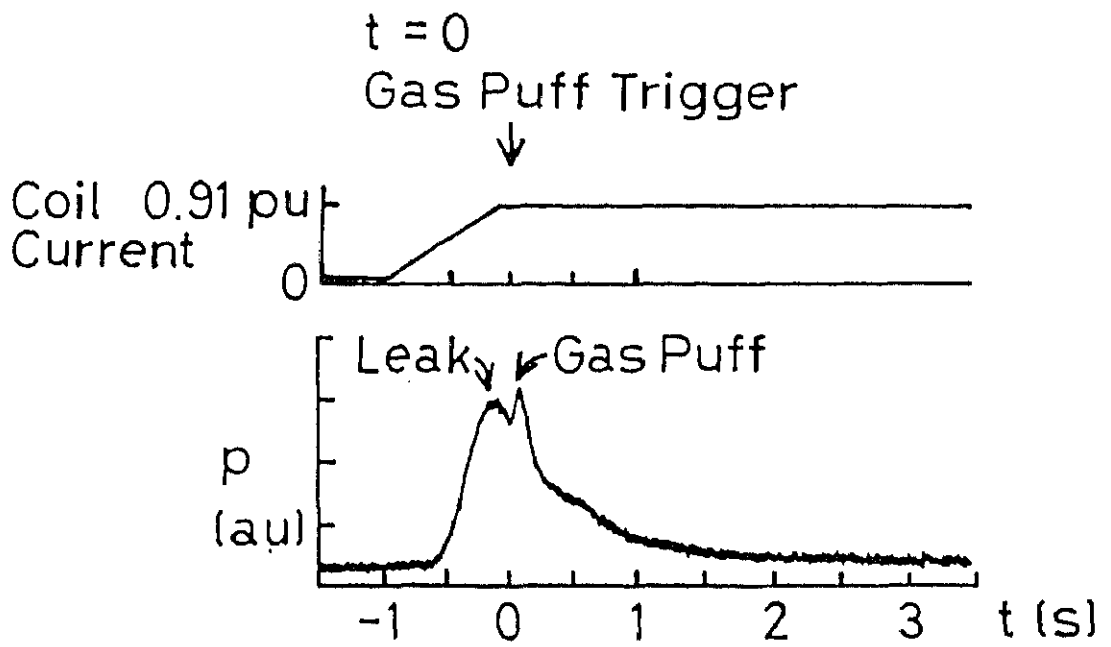
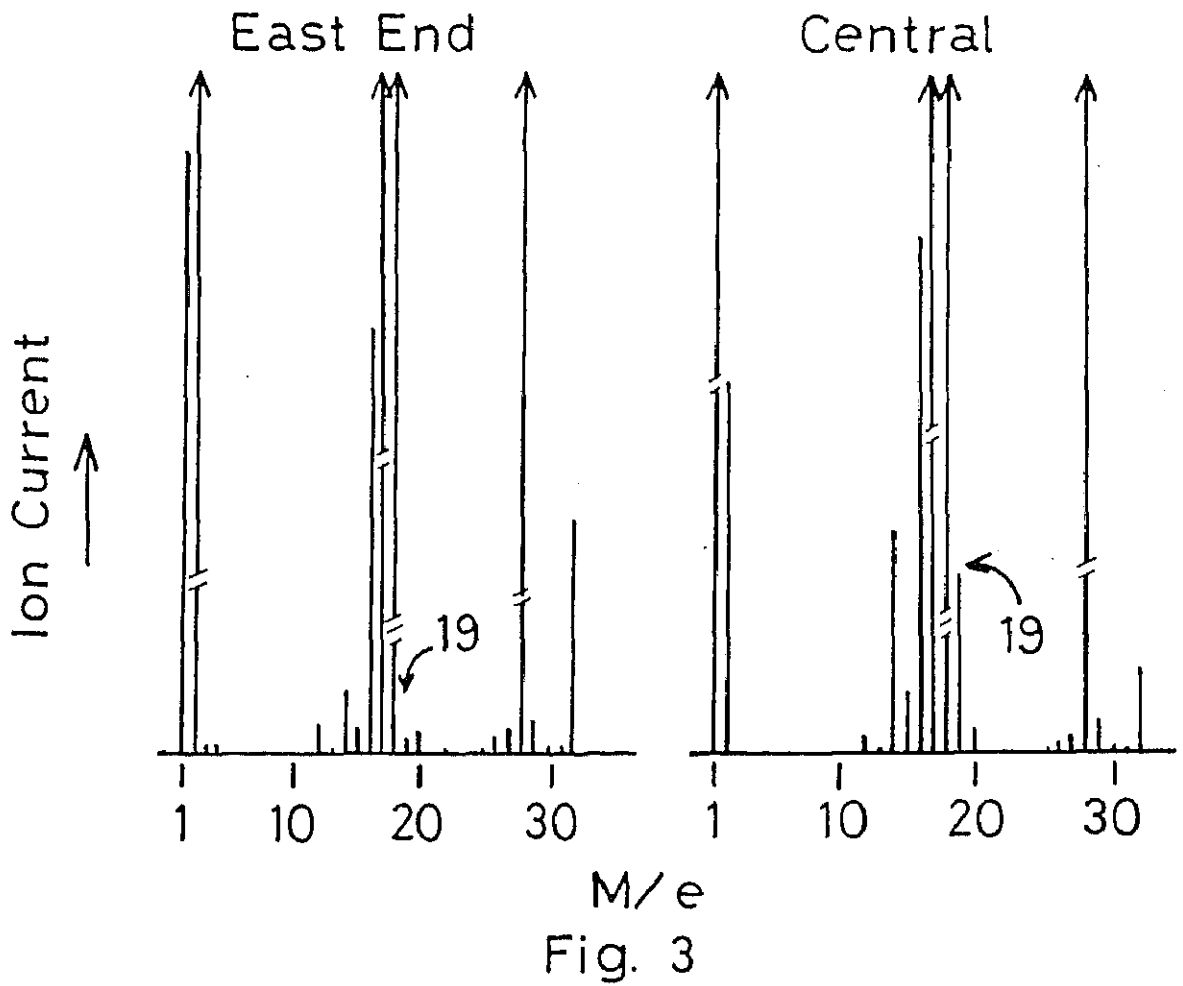


Fig. 4

[19] 大型プラズマ閉じ込め実験装置で 実験する人のための真空技術の基礎

概要

筑波大学プラズマ研究センター（以下、センター、と記す）の大型タンデムミラー形プラズマ閉じ込め実験装置『ガンマ10』（以下、ガンマ10、若しくは、本体、と記す）にあっては設置目的にうたっているように、学生の教育も柱である。そこで毎年10数名の大学院生、学群生を新たに受け入れられている。彼等をプラズマ閉じ込め実験活動に組み込む際に基礎的、且つ、共通的作業として真空系のモニターの当番がある。ところがセンターに来るまでの各人の履歴が他大学、自然学類、工学基礎学類、と異なるため、真空技術の知識・経験に差異がある。従い、年度の初めに、新人に対し、筆者は一对一で各人に机上論でなく現場重視で一日間講習を行い、当番の作業を一人でできるように教育をしている。

少なくとも自然学類生の場合は「物理実験学」の講義を修めてはいるが、講義は机上のものであり実践に乏しく、又、真空技術は装置固有のものであるので、改めて体系的に講義をしている。

この様なことをここ10年行っているが、筆者においても日々の変化に対応するため、及び、各学生の理解力に応じて内容を変化させているので、今までにテキストは作ってはいない。結果、各学生は自分でノートを作ることになるので習得効果があるようである。（テキストを与えると、習得した気になってしまうのが教える方も教わる方も人間の常である。）

1 単位系

現在は真空度の国際単位系としてパスカル (Pa) が用いられているが、真空の概念を把握させるために Torr (Torr) の説明から始める。Torr の語源となっている中学校の理科の授業で教わっているはずのトリチェリの実験…大気圧は水銀柱 760 mm の高さの重さに等しい…を記憶している学生が凡そ半分ほどしか居ない。

長期に用いられた単位 Torr 以前には、atm、 kg/cm^2 、bar、気圧、なる単位もあった。更には JIS 以外に psi、psf もあったが、ここでは大気圧は水柱 10 米に匹敵する圧力で、水銀柱では略 760 mm に相当する、という推論が実証されたことで、「大気圧イコール 760 mmHg であり、それを 760

Torrとする」と定義する。

次に現在の単位系は真空、高圧にも共通のMKS単位系で、双方の換算をしやすくするばかりでなく他の単位系とも換算をしやすくしている統一単位パスカルを定義する。パスカルの定義は N/m^2 である。そこで大気圧をパスカルで計算すると101325となる。話は変わり天気予報の1気圧を1013ミリバールとしていた名残から1013という数値でとらえ、一般には「大気圧イコール1013ヘクトパスカル(hPa)」としているが、科学の場ではMPaやkPaが好ましい。

以上両者の関係、1 Torrイコール133 Paとなり、 $400/3$ という一桁のファクターの2度の計算で容易く換算できる。

なお、センターではガンマ10建設当初、単位系はTorrが標準であった故、データ処理装置の設定上、Torrで真空度をモニターし、対外的に発表する際にPaに換算している。

2 実験装置概要

ガンマ10^{1), 2), 3)}真空容器は全長27メートル余り、内容積180立米である。これはプラズマ性能のために真空度の異なる区域に作っている。そのためには真空容器に括れを設け、東エンド、東アンカー、セントラル、西アンカー、西エンドの5つにし、6系統の真空ポンプで基礎排気している。更に2式の液体ヘリウムパネルで動的排気を行っている。又、それらの真空度をモニターするために、東西エンド、東西バリア、東西アンカー、セントラルの7箇所⁴⁾に電離真空計を配置している(図1)。図ではT:軸流分子ポンプ、斜線:液体ヘリウムパネル、黒丸:電離真空計、矩形:質量分析計を表している。

3 真空排気装置

先ずガンマ10真空容器を大気圧から真空排気するために油回転ポンプを使用する。これについては学群3年生までの学生実験で(名前は知らないまでも)使った記憶を確認し、メカニズムを説明する⁴⁾(図2)。このポンプでの到達真空度は 10^{-1} Pa台で、到底プラズマを点けられる真空度ではない。

次に 10^{-1} Pa台から性能を発揮する軸流分子ポンプ(Turbo Molecular Pump、通称TMP)を用いてガンマ10真空容器を 10^{-5} Paまで排気する。ここでタービン、自動車エンジンのターボチャージャーを引き合いにしてTMPのメカニズムの説明をする⁴⁾(図3)。ここまでは機械、メカニズムの範疇である。これでも未だ性能の良いプラズマは点かない。

更に真空度を良くするために、ガンマ10東西エンドタンクと東西NB1(中性粒子入射装置)真空容器に液体ヘリウムパネルを設ける^{5), 6)}。この液体ヘリウムパネルの原理を説明するために、ガラスコップに氷水を入れた際のコップ表面の結露で対応させて理解させる。物理の物性である。この時、同じく中学校にて習っているはずのパスカルの原理を復習させる…単位系に

名前がつけられている所以となる…。

この液体ヘリウムパネルの使用により、 10^{-4} Pa台の真空度が得られ、良好なプラズマが点く要件が叶えられることになる。

ガンマ10は大型なので真空容器は常時排気していて、排気系の起動、停止の作業が年間に数回程度しかない。従って排気作業のタイミングや目安は機会がある限り極力学生を立ち合わせ、細かいメカニズムや特徴を現場で教えるようにしている。

4 真空計

プラズマ主体の研究テーマを持つ学生が殆どで、真空そのものを研究テーマにする学生でない限り、学生への教育は時間の制約、本人の吸収力に応じて測定範囲と測定原理にとどめる。

真空度を測定するものには様々な原理を用いたものがある。トリチェリの実験にあるような水銀柱によるもの…絶対値は得られるがプラズマ生成時のように高速の真空度の変化には追従できない…、隔膜を設け、真空と大気圧との圧力差による膜の変位をみるダイヤフラム真空計、真空度により熱伝導度の変化する金属を用いてその状態で計るピラニ真空計、気体の状態方程式を用いるマクラウド真空計、分子密度を用いる電離真空計⁷⁾、等があると概説し、夫々の測定範囲を示す。その中で、ガンマ10真空容器の主たる真空領域を信頼性をもって指示する電離真空計について測定原理を説明する。

ふた昔前までは自然学類物理学専攻のカリキュラムでの「エレクトロニクス」では真空管（現在では電子管と呼ぶ）の二極管、三極管等を説明し、その理解の上に半導体のダイオード、トランジスタを教えた。10年前には同カリキュラムで電子管を端折って半導体から教育した。この時点では未だ三極管の一種である電離真空計を pnp型トランジスタに対応させて説明し得た。ところが最近はその半導体ですら教えないので、エレクトロニクスの基本中の基本である電子管から説明しなければならなくなった。

電離真空計 (Ionization Gauge, IG) の測定原理を説明する (図4)。電子とイオンの動きのメカニズムで説明する。いわば電子回路の初歩である。

ここでその測定原理を踏まえ

$$\text{イオン電流} = f (\text{熱電子電流、バイアス電圧、電離度、粒子数、幾何学的構造、etc.})$$

の要素を質問して考えさせる。この時、物理のセンスをチェックできる。解答の仕方でも凡そその学生が実験を行うときの発想の柔らかさ、対応の広範さが想像できる。次いで現場にて実際の電離真空計ベイヤー・アルパート型 (通称 B-Aゲージ) を見せ、説明する。精度よく計れる割に単純な構造なのに学生は驚いている。また、窒素感度、水素感度の両方の出力を示し、電離真空計の感度係数についても説明する。この時に、測定子の取扱や出力の処理を改めて説明する。また現場では幾何学的に東西対称に配置してあることを示し、ガンマ10は理想の真空状態であれば、東西対称の表示をする筈で

あることを示す。

更に磁場を用いているガンマ10の磁力線の向きを示し、測定子中の電離気体が磁場の影響で正しく計れないことを示し、対策としての磁気遮蔽を解説する。ここでコンダクタンスの概念、速い真空度変化に対する応答、工夫について概説する。

次の手順であるコンピュータへ信号を送り、出力すること、及び資料を作成する実際の作業まで含み、説明する。

5 残留ガス分析

ガンマ10では質量分析計を用い、真空容器内の残留ガス分析を行い、正常な安定した状態にあるか、外からの大気や油の流入…「洩れ」という…、内蔵物からのガス放出、プラズマが容器壁または内蔵物を叩いて（そうならないよう設計しているが）出すガス、その他の異常によるガス放出、等の区別をつけ、良い状態のプラズマを点けられる条件をモニターしている。分析管はガンマ10の東西エンド、中央部の三箇所にある。これらを定常時は定常時に、異常時は随時スキャンして記録をとり、判断資料を作るのが真空当番の作業のもう一つの柱である。

記録をとるべきガスの信号は M/e （四重極共鳴を原理とするため分子量を電荷で割った値）を基準値として出力信号を読みとる。ここでの M/e の値は

$$M/e = 2, 4, 12, 14, 16, 18, 20, \\ 28, 32, 40, 44 (\text{, } 56)$$

で、その際のイオン電流の信号を読みとる。経験的にガンマ10において長期のプラズマショットによるエイジングの結果、主にこのガスのみが残っている。

ここで新入生に測定原理を概説し、 M/e の夫々の値について何のガスかを質問する。中学校の化学の復習である。傾向として原子番号は憶えているが原子量を憶えてはいない。従ってここでは原子核と電子からできている原子の概念の説明から始めることを要する。また、真空排気で一般に使用を避けて通れない油の分子の不安定性、その理由も概説する。この辺りは原子の構造から化学の領域である。質量数に対する理解が済んだところで、制御装置、記録計の取扱いを教える。次いで出力の整理方法を教える。更に整理したデータの読解を説明する。

6 液体窒素タンクのモニター

真空監視には直接関係ないが、危険な操作を要しないので他の共通作業との分担で、前述の液体ヘリウムパネルの予冷等に用いている2基ある液体窒素容器の液面、圧力の定時モニターを学生当番に課している。低温物質の特

性を知る、取扱いを経験することは学生の将来のためにも決して無駄にはならないと思う。

ここでは圧力計、液面計の測定原理、単位系、読取り値の判断等を説明する。また、真空に比して格段に高い高圧ガスとしての危険度を述べ、注意を促す。

7 洩れ探し

新人講習では時間が限られている上に、現場重視の講習の際に、現実に恰度よい洩れのサンプルを随時設定し難いので講習の際には行わないが、真空洩れ探しは実験上重要である。ここでは不定期ではあるがガンマ10真空容器における洩れ探しの際に学生に与える注意点を記す。

冒頭に述べたようにガンマ10真空容器の大きさは、市販のヘリウム・リーク・ディテクタ（HLD）で直ぐ計れる規模でない。大きさ、容量、取り付けポートの数、取り付け部品の何れをとっても一筋縄ではいかない。しかし幸いなことには大きな立方体ではなく細長い装置なのでエリアを区切りやすい。更にそれ故に分散して設置されている10箇所 of 測定器を活用できる。

まず最初に、洩れと思われるものがあるか否かは第4節に述べたように、東西対称となっている筈の真空度の東西バランスを検討する。その絶対値、時間経過による変化を検討し、先ず洩れの区域を絞り込む。真空計を多数設置しなければならないタンデムミラー装置の特権である。

次に真空度の劣化が洩れか、そうでなく他のガス放出であるかを判断する。ここでは矢張り27米の長さを利用して東西エンド及びセントラルに設置されている質量分析計を利用する。3台の夫々のパターンが洩れ特有の信号を出しているか否かを平常時、及び他のエリアの値と比較する。これにより真空洩れであることの大きな疑いを決定づける。

ガンマ10では余所の大型装置同様に携わる人数が多いので、ポートへの勝手な取り付けやバルブの開閉は許されていない。公正な判断ができることと、障害が起こった際に的確に対処できるとした担当教官の承認を受けることとしている（後述）。従ってその許可の記録や、受動的な天変地異の影響を含めた真空度の動向を逐一記入した真空ノートを参考に、先ず原因を予想する。それで洩れ箇所を特定できない場合には、該当するエリアを虱潰しに調べていく。

勿論ガンマ10真空容器を大気から排気した際には、TMPの到達圧力になった段階で関わった全ての箇所の洩れ探しをする。この際には本体取り付け物品許可証に基づき、現地に番号符号を貼付、一覧表を作成し、順次洩れ探しを行う。

ガンマ10真空容器は本体に300もの取り付けポートがあり、常時全てのポートが塞がってはいない。また、短管の延長や枝管、変換ポートにより多数の取り付け口を利用できるので、疑わしき場所の近傍にヘリウムリークディテクタを取り付け、分析管を排気し、測定するのが原則である。しかし乍ら3箇所の質量分析計は既に待機中であるので、これを利用しヘリウム感度に設定し、速やかに測定できる。勿論HLDも併用できる。その際の本体排

気についてはこれもまた他の装置のように1箇所では排気してはならず、27米に分散してTMPを配置してあるので、質量分析計の感度を上げる可く、随時ポンプ頭のバルブを閉じて排気速度、ガスの流れを調整できる。当然のこととして、到達圧力が大幅に悪い時は排気系全系運転で行う。その使い分けも教えなければならない。

新人教育の際は、サーチガスとして何故ヘリウムガスを用いて洩れテストをするかを考察させる。ヘリウムの特性を全てとは言えないまでも必ず1つ2つの理由を考えさせる。

次にサーチガスヘリウムのボンベ、圧力調整器の取扱いを教える。更にヘリウムガスのかけ方、治具をヘリウムの軽さを理由に現場で注意点を教える。

またガンマ10真空容器は大きいのでサーチガスの応答は早くない。ポート数も多いのでチェックシートを工夫しなければならない。併せて広い実験室での共同作業の連携を実践する。等々を現場作業立ち会い時に教える。

8 問題点と真空管理

大型の真空容器は一度大気圧にすると、排気に長い時間を要する。ひいては真空の再現性が悪くなる。従ってガンマ10真空容器では、全学停電、特定の装置取り付け、真空に重大な支障が起きたとき以外は四六時中排気をして高真空を維持している。この点は良好な真空を維持するためには大変好ましいことである。しかし反面、1~2年間の短期在籍の学生にとっては、大気に解放する作業、ポートへの部品取り付け、真空排気、洩れ探しという小型装置では日常に行われている作業の経験をできないといえる。折角プラズマ畑の研究経験をし乍ら、その基礎の技術の経験をすることが得られないのは、学生の将来に惜しいと思える。職員にとっても同様で、起動・停止の通常の作業もガンマ10の真空特性を把握する機会が少ない。ガンマ10真空排気系起動・停止の際は特定の関係者だけでなく周辺のものも極力立ち会う、更には当番の分担が偏らないように手配し、真空排気特性を把握する機会を設ける。また、幸いにもセンターには小さいテストスタンドがあるので、その使用やガンマ10本体への取り付け物品の事前洩れテスト(後述)等の機会に真空の取扱を再確認して、経験を積むようにしている。

ガンマ10真空容器には取り付けポートが30.0箇所ある。そのガンマ10に関わる人数は年度での差はあるが凡そ50名以上いる。従って個々のポートの状況、バルブの開閉状態等を真空担当だけでは把握しかねる。そこでバルブの開閉及び、真空に影響を与える作業については許可を要する制度を設けている。即ち、各機器の担当者が事前に作業を申告し、当日の実験全体を取り纏める教官(ショットリーダー、SL)若しくは週の研究を統括する教官(実験リーダー、EL)の許可を得ることとする。以前は当番教官2名の許可を要したが、1名で充分事足りることとプラズマショットを円滑に進める意味もあり、現在では教官1名の許可を求めることにしている。実績ではその教官が許可を出さないこともあった。

また取り付けポートへの物品の取り付けについては取り付け以前に申告書(担当者、取り付け場所、真空洩れの無いことの事前の試験結果、個々の部

品の材料、大きさ、容積、取り付け方法、ガasketの交換状況、真空グリース使用の有無等を記載)を提出し、許可を得る。これらを本体に取り付け、真空排気をする際、大気圧からの排気は目途がつくまで相当の時間を要し、交替で対応するので、必ずしも関係者全員が立ち会うことはない。また排気立ち上げ時の学生の教育を兼ねていることもあり、更に洩れ探しの際に当事者が立ち会えないこともあり得るので、これらを鑑み、取り付け作業終了後に洩れチェックに該当することの標識を現場に付けることにしている。

以上、新たな課題を克服しつつ更に有機的に機能するように努力しなければならない。

9 まとめ

以上を当番の際、一定の作業時間内にこなせることを目標にして指導し、実現している。既に述べたようにプラズマの実験は広範な基礎知識・技術を要するというのを再度認識させることになる。真空技術の基礎という排気速度の計算、洩れ探し⁸⁾、真空の質を向上させるための焼き出し、放電洗浄⁹⁾、様々な排気系、真空計、ひいては簡単な真空装置の設計までであるが、当該講習、本報告にあっては定常的にプラズマ実験をできる状態でのモニタリングを目安としているので、今まで述べた範囲に留める。これ以外については夫々の状況が生じたときに解説している。特に洩れ探しは、各学生の卒業迄には経験できるように実験の際の人員配置にて考慮している。少なくとも近い将来に学生が社会に出た際に、プラズマ実験をやったと言えるに相応しい程度の真空技術の経験は踏ませたい。

また直接の真空ではないが、高圧ガスに関しては関連が強い。学生の真空当番での6節に述べた作業がある。この点は毎年度初め恒例のセンター安全講習会において概説し、更に本大学低温センター主催の低温寒剤取扱い説明会受講を義務付けている。それ以上の事柄は必要が生じた際に現場で実地に水素ガス等の高圧ガスボンベ、減圧弁の取扱等を教えることにしている。

あとがき

冒頭にも記したようにこの件について筆者はテクストを作る意思は無い。今回、永らく自称、幻のセンター真空委員会委員長であった物理学系谷津潔教授(プラズマ研究センター長)の停年を機に、その幻の真空委員会委員として講習のシナリオをまとめた。

謝辞

先ず、皮肉にもこの講習を必要と感じさせてくれた学生に感謝したい。彼等は筆者が厳しく突き放しても必死でついてきたことを記しておく。また、このレクチャーを、将に物理実験学の講義であると言って下さったプラズマ

研究センター市村真助教授の一言のお陰で毎年10～20名の学生に対し続けられることを感謝し、記したい。遑れば、核融合実証を目指したプラズマ物理実験における真空の重要性を在任中から力説され、本報告にも助言を下された筑波大学名誉教授三好昭一先生に深く感謝の意を捧げる。

参考文献

- 1) 三好昭一編 ミラー型核融合装置 アイピーシー
- 2) 三好昭一、ほか Plasma Physics Reports Vol. 23 No.9 (1997. 9) 781
- 3) 平田 筑波大学技術報告 No.6 (1986. 3) 5
- 4) 熊谷寛夫 真空の物理と応用 裳華房
- 5) 中嶋洋輔、ほか 真空 第33巻第8号 (1990. 8) 664
- 6) 平田 筑波大学技術報告 No.12 (1992. 3) 9
- 7) 平田 筑波大学技術報告 No.3 (1983. 3) 85
- 8) 平田 筑波大学技術報告 No.21 (2001. 3) 1
- 9) 坂本雄一、ほか Journal of Nuclear Materials 128 & 129 (1984) 893

添付図

- 図1 ガンマ10真空容器全体図
- 図2 油回転ポンプの機構
- 図3 軸流分子ポンプの機構
- 図4 電離真空計の測定原理

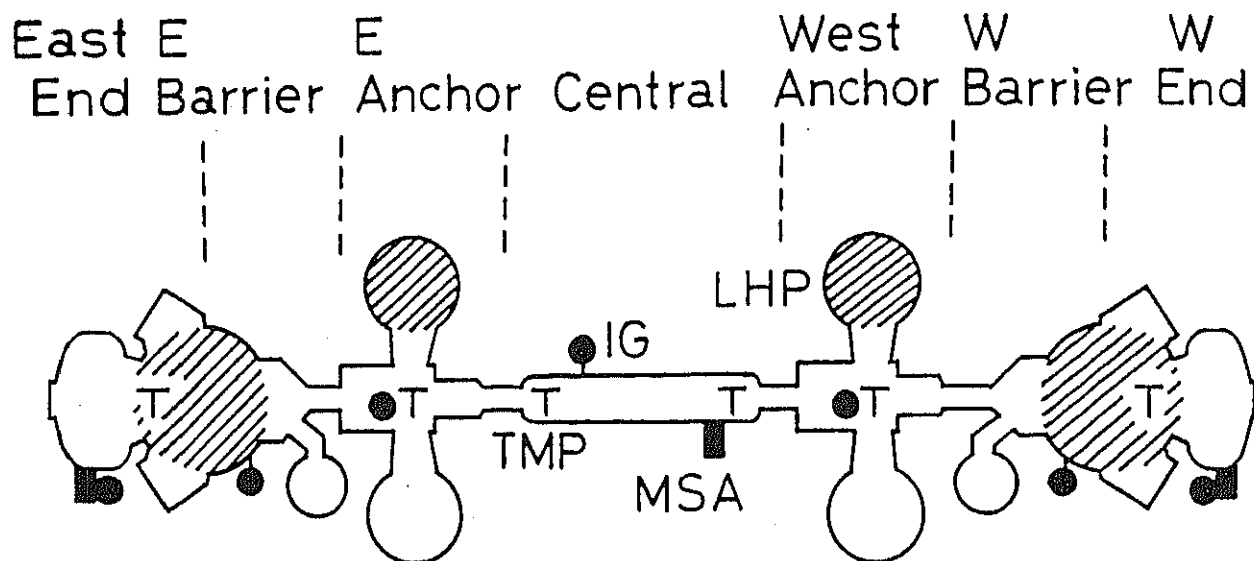


Figure 1

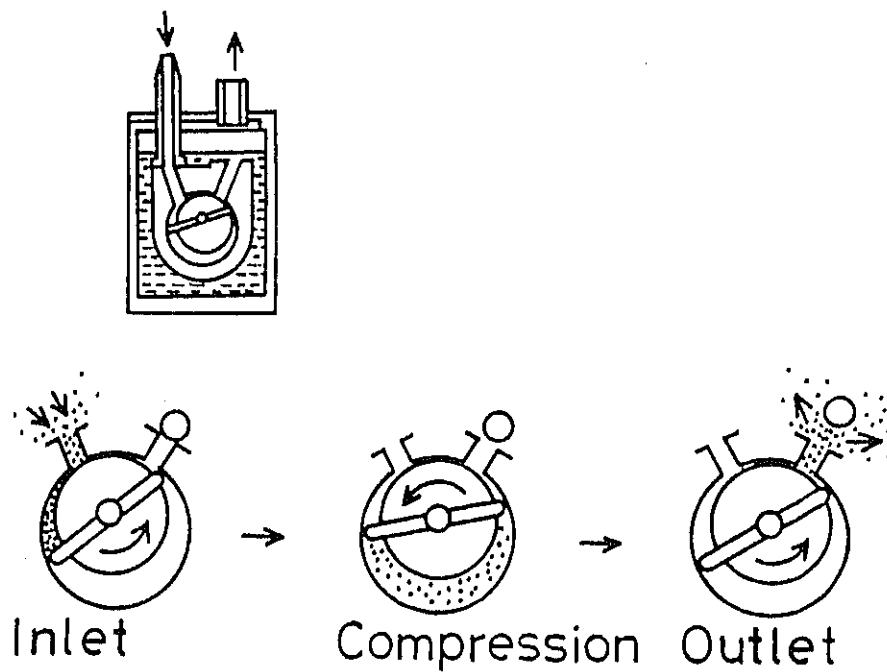


Figure 2

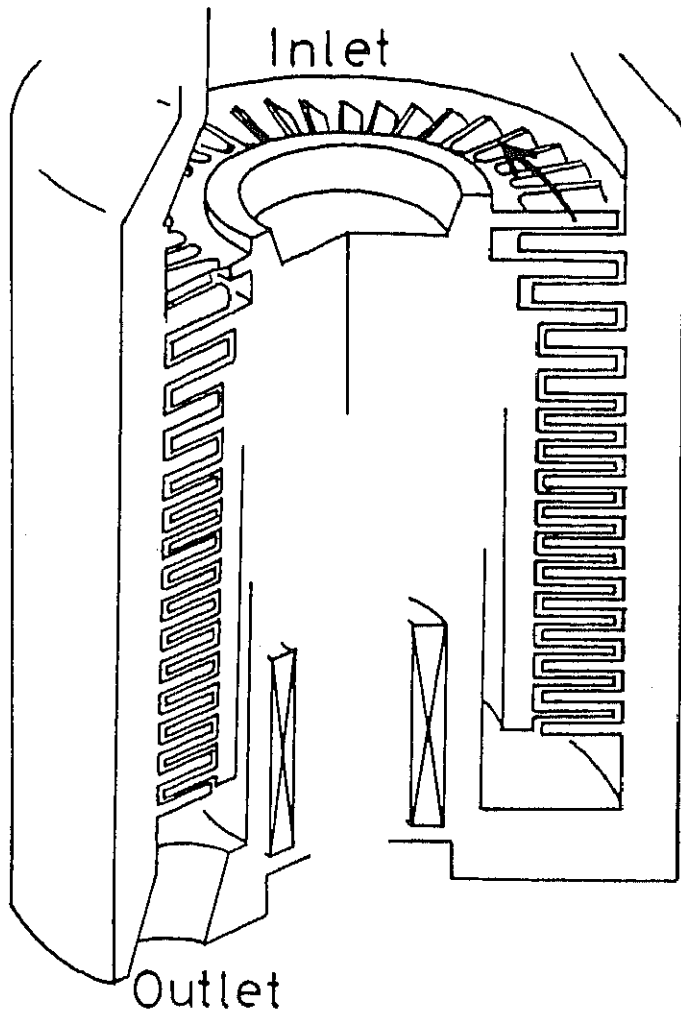


Figure 3

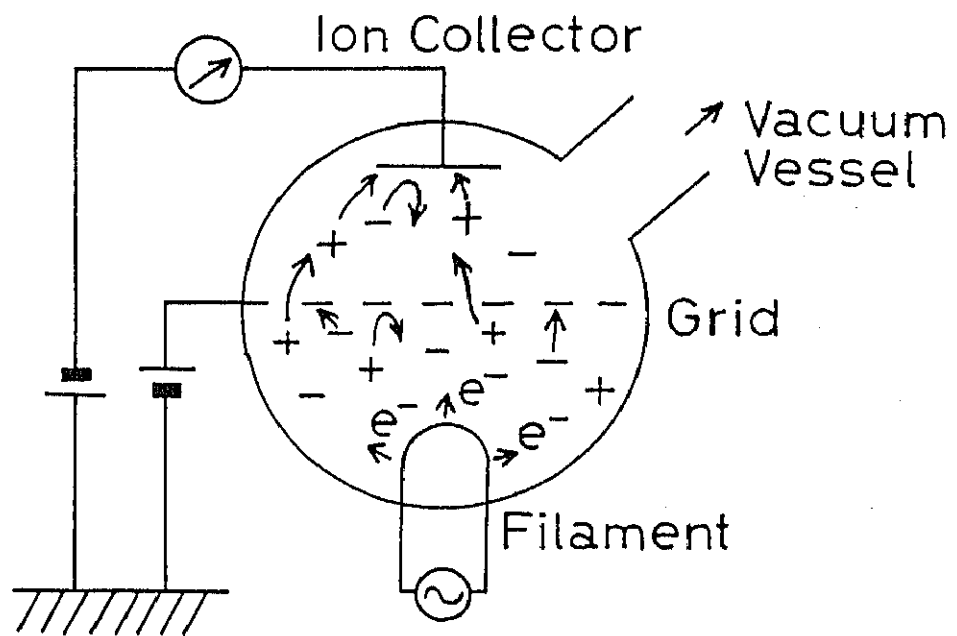


Figure 4

<論文>

- 01 M. Yoshikawa, Y. Okamoto, E. Kawamori, Y. Watanabe, C. Watabe, T. Furukawa, Y. Kubota, K. Sedo, T. Cho, K. Yatsu and N. Yamaguchi,
Space-Resolving VUV and Soft X-Ray Spectroscopy in the Tandem Mirror GAMMA 10 Plasma,
Surface Review and Letters **9**, 1 (2002) 555-559.
- 02 H. Hojo, G. Uruta, K. Nakayama, A. Mase,
2D Full Wave Simulation on Electromagnetic Wave Propagation in Toroidal Plasma,
Journal of Plasma and Fusion Research **78**, 5 (2002) 387-388.
- 03 A. Mase, Y. Kogi, A. Yamamoto, M. Ohashi, S. Osako, L.G. Bruskin, H. Hojo,
Development and Application of Millimeter-Wave Imaging Radar,
Journal of Plasma and Fusion Research **78**, 5 (2002) 439-446.
- 04 H. Hojo, T. Watanabe, K. Akimoto,
Stationary Solitary Electromagnetic Waves Generated in Relativistic Laser-Plasma Interaction,
Journal of Plasma and Fusion Research **78**, 6 (2002) 495-496.
- 05 T. Saito, Y. Tatematsu, I. Katanuma, K. Yatsu,
Potential Linkage between the Plug Region and an End Plate in GAMMA 10,
Journal of Plasma and Fusion Research **78**, 6 (2002) 591-598.
- 06 E. Yokoyama, T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Imaizumi, K. Nishida, E. Tsuda, T. Yasuoka, M. Ichimura, H. Higaki, K. Yatsu,
Effects of Alfvén Ion Cyclotron Waves on End-Loss Electrons from the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Japanese Journal of Applied Physics **41**, 6A (2002) 3961-3962.
- 07 M.K.Islam, M.Salahuddin, A.K.Banerjee, and M.Salimullah,
Dust-lower-hybrid instability in the presence of dust charge fluctuation in a streaming dusty plasma,
Phys. Plasmas **6**, 7 (2002) 2971-2975.
- 08 R. Minami, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, H. Watanabe, M. Yoshida, Y. Nakashima, M. Ichimura, T. Tamano, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Observations of temporal and spatial behaviour of plasmas in relation to the interchange stability boundary scaling in GAMMA 10,
Plasma Physics and Controlled Fusion **44**, 7 (2002) 1363-1375.
- 09 I.Katanuma, Y.Tatematsu, K.Ishii, T.Saito, K.Yatsu,
On the Plug Potential Formation Mechanism in a Tandem Mirror,
Physics of Plasmas **9**, 8 (2002) 3449-3458.
- 10 M.Ichimura, H.Higaki, S.Saasaki, H.Kano, S.Kakimoto, K.Tokumoto, Y.Yamaguchi, H.Hojo, M.Inutake, K.Yatsu,
Ion Cyclotron Range of Frequency Heating in the Magnetic Mirror Plasmas,
Plasma Physics Reports **28**, 9 (2002) 727.
- 11 I.Katanuma, Y.Tatematsu, K.Ishii, T.Saito, M.Ichimura, Y.Nakashima, K.Yatsu,
A Single Minimum-B Ambipolar Trap,

- Plasma Physics Reports **28**, 9 (2002) 734-749.
- 12 K. Ishii, A. Fueki, Y. Takemura, A. Kojima, H. Hagiwara, I. Katanuma, K. Yatsu,
Influence of Radial Electric Field on Trajectories of Plug Potential Bounce Ion in the
Tandem Mirror,
Czechoslovak Journal of Physics **52**, 10 (2002) 1135-1142.
 - 13 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, M. K. Islam, A. Itakura, I.
Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Takemura, Y. Tatematsu, M. Yoshida, M.
Yoshikawa,
Potential Formation and High Density Plasma Production on the Tandem Mirror GAMMA
10,
Czechoslovak Journal of Physics **52**, 10 (2002) 1143-1148.
 - 14 K. Ishii, A. Itakura, M. Ichimura, I. Katanuma, E. Kawamori, J. Kohagura, T. Saito, Y.
Takemura, Y. Tatematsu, T. Cho, Y. Nakashima, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, K. Yatsu, M.
Yoshikawa,
Ion Transport in Real and Velocity Space and Confinement in the GAMMA 10 Tandem
Mirror,
Journal of Plasma and Fusion Research **78**, 11 (2002) 1239-1250.
 - 15 K. Ishii, Y. Takemura, A. Fueki, K. Hagiwara, A. Kojima, A. Itakura, M. Yoshikawa, I.
Katanuma, K. Yatsu,
A Gold Film Detector for Radial Profile Measurement of Plasma Density by Using a Gold
Neutral Beam Probe,
Review of Scientific Instruments **73**, 11 (2002) 3806-3812.
 - 16 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, M. K. Islam, A. Itakura,
I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, and M. Yoshikawa,
Plasma confinement in the GAMMA10 tandem mirror,
Recent Res. Devel. Physics **3**, (2002) 257-268.
 - 17 M. Ichimura, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, K. Ishii, K. A. Itakura, I. Katanuma,
E. Kawamori, J. Kohagura, Y. Nakashima, Y. Okamoto, T. Saito, Y. Tatematsu, K. Yatsu,
M. Yoshikawa,
Plasma confinement in an RF-driven tandem mirror with a strong temperature anisotropy,
J. Plasma and Fusion Res. SERIES **5**, (2002) 94-99.
 - 18 I. Katanuma, Y. Tatematsu, K. Ishii, T. Saito, Y. Nakashima, M. Ichimura, K. Yatsu,
A New Design of a Tandem Mirror,
J. Plasma and Fusion Res. SERIES **5**, (2002) 373-376.
 - 19 Y. Nakashima, T. Natori, Y. Kawasaki, S. Kobayashi, Y. Ishimoto, T. Kato, K. Orito, T.
Fukasawa, I. Katanuma, M. Ichimura, T. Cho, and K. Yatsu,
Behavior of the Edge Plasmas near the Anchor Conducting Plates and Their Effect on the
Plasma Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
J. Plasma and Fusion Res. SERIES **5**, (2002) 428-432.
 - 20 T. Watanabe and H. Hojo,
The Marginally Stable Pressure Profile and a Possibility of High Beta Plasma Confinement
in LHD,
J. Plasma and Fusion Res. SERIES **5**, (2002) 487-490.

- 21 Y. Nakashima, T. Kato, Y. Ishimoto, K. Orito, T. Natori, T. Fukasawa, K. Watanabe, S. Kobayashi, M. Shoji, Y. Kubota, E. Kawamori, M. Yoshikawa, I. Katanuma, M. Ichimura, T. Cho, and K. Yatsu,
 Fueling Experiments Using Neutral Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Journal of Nuclear Materials **313-316**, (2003) 556-561.
- 22 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, K. Morita, J. Yuhara, S. Kobayashi, M. Yoshikawa and K. Yatsu,
 Surface analysis and a novel application of Carbon Sheet Pump in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Journal of Nuclear Materials **313-316**, (2003) 194-198.
- 23 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, M. K. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa,
 Review of Experiments on the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 10-15.
- 24 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, H. Itoh, R. Minami, S. Nagashima, T. Numakura, H. Watanabe, M. Yoshida, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
 Summarized Scaling Laws of Plasma Confining Potential Formation and Effects in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 37-43.
- 25 M. Ichimura, H. Higaki, S. Saosaki, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi, K. Horinouchi, H. Hojo, and K. Yatsu,
 Plasma production and heating with ICRF in the GAMMA 10 tandem mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 69-72.
- 26 S. Kakimoto, H. Kano, M. Ichimura, H. Higaki, S. Saosaki, Y. Yamaguchi, H. Hojo, T. Watanabe, and K. Yatsu,
 Production of High Energy Ions by High Harmonic Fast Waves in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 86-88.
- 27 Y. Tatematsu, T. Saito, H. Abe, K. Nishida, Y. Imaizumi, E. Yokoyama, E. Tsuda, T. Yasuoka, I. Katanuma, K. Yatsu,
 Axial and Radial Heat Flows Induced by ECRH in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 98-100.
- 28 Y. Nakashima, T. Cho, T. Fukasawa, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, M. K. Islam, A. Itakura, T. Ito, I. Katanuma, S. Kobayashi, J. Kohagura, Y. Kubota, R. Minami, T. Numakura, T. Saito, S. Saosaki, Y. Takemura, Y. Tatematsu, M. Yoshida, M. Yoshikawa, and K. Yatsu,
 Recent Results of High Density Experiments in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 135-141.
- 29 K. Ishii, Y. Takemura, A. Fueki, M. Shimoo, K. Tsutsui, K. Hagiwara, A. Kojima, I. Katanuma, T. Saito, A. Itakura, K. Yatsu,
 Radial Potential Control for Plasma Confinement in the Tandem Mirror GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 142-146.

- 30 T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Imaizumi, E. Tsuda, T. Yasuoka, M. Ichimura, K. Ishii, I. Katanuma, K. Yatsu,
Study of the Potential Structure from the Plug-Barrier Cell to the End Plate in GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 167-171.
- 31 M. K. Islam, Y. Nakashima, T. Natori, Y. Ishimoto, D. Sato, A. Wada, T. Fukasawa, K. Watanabe,
T. Ogita, S. Kobayashi, I. Katanuma, and K. Yatsu,
Edge-Plasma Behavior in the Asymmetric Region of Minimum-B Anchor Cell in the
GAMMA 10 Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 177-179.
- 32 M. Yoshikawa, T. Furukawa, Y. Kubota, K. Sedo, T. Kobayashi, Y. Takemura, K. Ishii, T. Cho,
K. Yatsu,
Study of Impurity Ions Behavior in the GAMMA 10 Plasma,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 189-191.
- 33 H. Higaki, M. Ichimura, K. Kadoya, S. Saosaki, H. Kano, S. Kakimoto, Y. Yamaguchi,
K. Horinouchi, H. Hojo, and K. Yatsu,
EXCITATION OF THE LOW FREQUENCY SLOW ALFVEN WAVES ASSOCIATED
WITH THE ALFVEN ION CYCLOTRON WAVES IN THE GAMMA 10 TANDEM
MIRROR,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 213-215.
- 34 I. Katanuma, Y. Tatematsu, K. Ishii, T. Saito, M. Ichimura, Y. Nakashima, K. Yatsu,
A Single Minimum-B Tandem Mirror,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 219-221.
- 35 T. Numakura, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Effects of Thermal-Barrier Potentials on the Central-Cell Electron Energy Confinement,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 222-224.
- 36 A. Itakura, T. Hirai, H. Hojo, J. Kohagura, Y. Shima, S. Tsunoda, M. Yoshikawa, K. Yatsu,
Ultra-Short Pulse Refractometry in the GAMMA 10 Device,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 243-247.
- 37 M. Hirata, S. Nagashima, T. Cho, J. Kohagura, M. Yoshida, H. Ito, S. Tokioka, T. Numakura, R.
Minami, Y. Nakashima, T. Kondoh, K. Yatsu, S. Miyoshi,
A Novel Electrostatic Ion-Current Absolute-Value Detector under Circumstances with
Simultaneous Electron Incidence by the Use of a Proposed "Self-Collection" Method for
Secondary Electron Emission,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 262-264.
- 38 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, H. Watanabe, M. Yoshida, S.
Nagashima, H. Ito, K. Yatsu, S. Miyoshi, T. Kondoh, J. Hori, and T. Nishitani,
Effects of Fusion Produced Neutrons on Semiconductor Detectors,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 271-273.
- 39 A. Kojima, K. Ishii, Y. Takemura, K. Hagiwara, I. Katanuma, A. Itakura, M. Ichimura, K. Yatsu,
Development of Alfven Ion Cyclotron Fluctuation Measurement by Use of a Gold Neutral
Beam Probe in the Tandem Mirror Gamma 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 274-276.
- 40 R. Minami, T. Cho, T. Numakura, J. Kohagura, M. Hirata, H. Watanabe, M. Ichimura, K. Yatsu,

- and S. Miyoshi,
 Analyses of Temporally and Spatially Resolved Plasma Behavior Using X-Ray Data in a
 Single Plasma Discharge on GAMMA 10,
 Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 280-282.
- 41 Y. Takemura, K. Ishii, A. Fueki, K. Hagsawa, A. Kojima, A. Itakura, K. Yatsu,
 Measurement of Plasma Density Using a Gold Film Detector in the Inner Mirror Throat of
 the GAMMA 10 Tandem Mirror,
 Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 283-285.
- 42 M. Yoshida, T. Cho, M. Hirata, S. Nagashima, H. Ito, J. Kohagura, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
 Relation of the Spatial Profile of Ion Confining Potentials with the Improvement in Plasma
 Confinement Using Novel Ion-Energy Spectrometer Arrays in GAMMA 10,
 Transactions of Fusion Science and Technology **43**, 1T (2003) 289-291.
- 43 I. Katanuma, Y. Tatematsu, K. Ishii, T. Saito, K. Yatsu,
 Collision effects on the saturated electrostatic potential along a magnetic field line,
 Physics of Plasmas **10**, 3 (2003) 677-682.
- 44 M. K. Islam, Y. Nakashima, K. Yatsu and M. Salimullah,
 On low-frequency dust-modes in a collisional and streaming dust plasma with dust charge
 fluctuation,
 Physics of Plasmas **10**, 3 (2003) 591-595.
- 45 Y. Kogi, A. Mase, S. Ohsako, A. Yamamoto, T. Yasuda, L.G. Bruskin, H. Hojo,
 Ultrashort-Pulse Reflectometry for Steady-State Plasma,
 Review of Scientific Instruments **74**, 3 (2003) 1510-1513.
- 46 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, H. Watanabe, R. Minami, T. Numakura, M. Yoshida, H. Ito, Y.
 Tatematsu, K. Yatsu, S. Miyoshi, K. Ogura, T. Kondoh, T. Nishitani, M. Kwon and A. C.
 England,
 Calibration Experiments of ^3He Neutron Detectors for Analyzing Neutron Emissivity in the
 Hot-Ion Mode on the GAMMA 10 Tandem Mirror,
 Review of Scientific Instruments **74**, 3 (2003) 1757-1760.
- 47 M. Yoshida, T. Cho, M. Hirata, H. Itoh, J. Kohagura, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
 Observations of Differences in the Spatial-Profile Symmetry of Ion-Confining Potentials in
 the Cases with and without the Central-Cell Density Increase during an Ion-Plugging Period,
 Review of Scientific Instruments **74**, 3 (2003) 1909-1912.
- 48 M. Hirata, S. Nagashima, T. Cho, J. Kohagura, M. Yoshida, H. Ito, T. Numakura, R. Minami, T.
 Kondoh, Y. Nakashima, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
 A Novel Electrostatic Ion-Energy Spectrometer by the Use of a Proposed "Self-Collection"
 Method for Secondary-Electron Emission from a Metal Collector,
 Review of Scientific Instruments **74**, 3 (2003) 1913-1916.
- 49 Y. Nakashima, S. Kobayashi, H. Aminaka, T. Fukasawa, M. Shoji, Y. Ishimoto, Y. Kubota, M.
 Yoshikawa, E. Kawamori, M. Ichimura, M. K. Islam, and K. Yatsu,
 $H\alpha$ Measurements on Hot-Ion Mode plasmas in the Minimum-B Anchor Cell of the
 GAMMA 10 Tandem Mirror,
 Review of Scientific Instruments **74**, 3 (2003) 2115-2118.
- 50 T. Numakura, T. Cho, R. Minami, J. Kohagura, M. Hirata, Y. Nakashima, K. Yatsu, and S.

- Miyoshi,
 Simultaneous Measurements of Temporally and Spatially Resolved Ion and Electron
 Temperatures Using a Semiconductor Detector Array in a Single Plasma Discharge,
Review of Scientific Instruments **74**, 3 (2003) 2144-2147.
- 51 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, M. Yoshikawa and K. Yatsu,
 Development of Carbon Sheet pump for control of hydrogen recycling in the GAMMA 10
 tandem mirror,
 1st Int. Workshop on Innovative Concepts for Plasma-Interactive Components in Fusion
 Devices, (Osaka, Japan, May 23-May 25, 2002) Session 5, p27.
- 52 Y. Nakashima, T. Kato, Y. Ishimoto, K. Orito, T. Natori, T. Fukasawa, K. Watanabe, S.
 Kobayashi, M. Shoji, Y. Kubota, E. Kawamori, M. Yoshikawa, I. Katanuma, M. Ichimura, T.
 Cho, and K. Yatsu,
 Fueling Experiments Using Neutral Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
 15th Int. Conf. On Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, (Gifu,
 Japan, May 27-May 31, 2002) P1-70.
- 53 Y. Ishimoto, Y. Nakashima, A. Sagara, K. Morita, J. Yuhara, S. Kobayashi, M. Yoshikawa and K.
 Yatsu,
 Surface analysis and a novel application of Carbon Sheet Pump in the GAMMA 10 Tandem
 Mirror,
 15th Int. Conf. On Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, (Gifu,
 Japan, May 27-May 31, 2002) P1-71.
- 54 I.Katanuma, Y.Tatematsu, K.Ishii, T.Saito, M.Ichimura, Y.Nakashima, K.Yatsu,
 A Single Minimum-B Ambipolar Trap,
 The 29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled
 Fusion, (Montreux, June 17-June 21, 2002) **26B**, P-2.084.
- 55 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, A. Itakura, I.
 Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, S. Saosaki, Y.
 Takemura, Y. Tatematsu, M. Yoshida, M. Yoshikawa,
 Potential Formation and Confinement in High Density Plasma on the Tandem Mirror
 GAMMA 10,
 The 29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled
 Fusion, (Montreux, June 17-June 21, 2002) **26B**, P-2.104.
- 56 K. Ishii, Y. Takemura, A. Fueki, M. Shimoo, K. Tsutsui, K. Hagiwara, A. Kojima, I. Katanuma,
 T. Saito, A. Itakura, K. Yatsu,
 Role of Radial Electric Field Control in the Tandem Mirror Plasma,
 The 29th European Physical Society Conference on Plasma Physics and Controlled
 Fusion, (Montreux, June 17-June 21, 2002) **26B**, P-5.082.
- 57 K.Ishii, A.Fueki, Y.Takemura, A.Kojima, H.Hagisawa, I.Katanuma, K. Yatsu,
 Influence of Radial Electric Field on Trajectories of Plug Potential Bounce Ion in the
 Tandem Mirror,
 5th Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement and Exhaust,
 (Montreux, Switzerland, June 23-June 24, 2002) No.15.
- 58 M.Ichimura, H.Higaki, M.Nakamura, S.Saosaki, H.Kano, S.Kakimoto, K.Horinouchi,

- Y. Yamaguchi, H. Hojo, Y. Nakashima, T. Watanabe, K. Yatsu,
Excitation of Alfvén Waves in Mirror Plasmas with a Strong Temperature Anisotropy,
11th International Congress on Plasma Physics, (Sydney, Australia, July 15-July 19,
2002).
- 59 K. Akimoto, H. Hojo, Y. Saitou,
Particle Acceleration by Generalized Electrostatic Pulses,
11th International Congress on Plasma Physics, (Sydney, Australia, July 15-July 19,
2002).
- 60 M. Yoshida, T. Cho, M. Hirata, H. Ito, J. Kohagura, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Spatial Profile Measurements of Ion Confining Potentials Using Novel Position-Sensitive
Ion-Energy Spectrometer Arrays,
The 6th International Conference on Position Sensitive Detectors, (University of
Leicester, UK, September 9-September 13, 2002) 20.
- 61 R. Minami, T. Cho, J. Kohagura, M. Hirata, T. Numakura, K. Yatsu, and S. Miyoshi,
Relations of spatially resolved electron temperatures with magnetohydrodynamic activities
and electron cyclotron plasma heatings using novel matrix-type X-ray semiconductor-
detector arrays in the GAMMA 10 tandem mirror,
The 6th International Conference on Position Sensitive Detectors, (University of
Leicester, UK, September 9-September 13, 2002) 45.
- 62 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, M. Yoshida, K. Yatsu, S. Miyoshi, K.
Hirano, H. Maezawa, T. Kondoh, J. Hori, and T. Nishitani,
Deterioration and Recovery Effects in Energy Responses of Semiconductor X-ray Detectors
due to Nuclear-Fusion Produced Neutron Irradiation,
The 6th International Conference on Position Sensitive Detectors, (University of
Leicester, UK, September 9-September 13, 2002) 46.
- 63 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, A. Itakura, I.
Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, T. Saito, S. Saosaki, Y.
Takemura, Y. Tatematsu, M. Yoshida, M. Yoshikawa,
Potential Formation and Confinement in High Density Plasma on the GAMMA 10 Tandem
Mirror,
Domestically and Internationally Refereed, The 19th IAEA Fusion Energy Conference,
(Lyon, France, October 14-October 19, 2002) IAEA-CN-94/EX/P2-09.
- 64 T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J.
Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa, R. Minami, T. Numakura, M.
Yoshida, K. Yatsu, S. Miyoshi,
Extended Consolidation of Scaling Laws of Potentials Covering over the Representative
Tandem-Mirror Operations in GAMMA 10,
Domestically and Internationally Refereed, The 19th IAEA Fusion Energy Conference,
(Lyon, France, October 14-October 19, 2002) IAEA-CN-94/EX/C1-4Ra.
- 65 S. Ishida, K. Abe, A. Ando, T. Cho, T. Fujii, T. Fujita, S. Goto, K. Hanada, A. Hatayama, T.
Hino, H. Horiike, N. Hosogane, M. Ichimura, S. Tsuji-Iio, S. Itoh, Y. Kamada, M. Katsurai, M.
Kikuchi, A. Kitsunozaki, A. Kohyama, H. Kubo, M. Kuriyama, M. Matsukawa, M. Matsuoka, Y.
Miura, Y. M. Miura, N. Miya, T. Mizuuchi, Y. Murakami, K. Nagasaki, H. Ninomiya, N.

Nishino, Y. Ogawa, K. Okano, T. Ozeki, M. Saigusa, M. Sakamoto, A. Sakasai, M. Satoh, M. Shimada, R. Shimada, M. Shimizu, T. Takagi, Y. Takase, S. Takeji, T. Tanabe, K. Toi, Y. Ueda, Y. Uesugi, K. Ushigusa, M. Wakatani, Y. Yagi, K. Yamaguchi, T. Yamamoto, K. Yatsu, K. Yoshikawa,

Objectives and Design of the JT-60 Superconducting Tokamak,
Domestically and Internationally Refereed, The 19th IAEA Fusion Energy Conference,
(Lyon, France, October 14-October 19, 2002) FT/2-5.

- 66 O.Motojima, N.Ohyabu, A.Komori, O.Kaneko, H.Yamada, K.Kawahata, Y.Nakamura, K.Ida, T.Akiyama, N.Ashikawa, W.A.Cooper, A.Ejiri, M.Emoto, N.Ezumi, H.Funaba, A.Fukuyama, P.Goncharov, M.Goto, H.Idei, K.Ikeda, S.Inagaki, M.Isobe, S.Kado, H.Kawazome, K.Khlopenkov, T.Kobuchi, K.Kondo, A.Kostrioukov, S.Kubo, R.Kumazawa, Y.Liang, J.F.Lyon, A.Mase, S.Masuzaki, T.Minami, J.Miyazawa, T.Morisaki, S.Morita, S.Murakami, S.Muto, T.Mutoh, K.Nagaoka, Y.Nagayama, N.Nakajima, K.Nakamura, H.Nakanishi, K.Narihara, Y.Narushima, K.Nishimura, N.Nishino, N.Noda, T.Notake, H.No zato, S.Ohdachi, Y.Oka, H.Okada, S.Okamura, M.Osakabe, T.Ozaki, B.J.Peterson, A.Sagara, T.Saida, K.Saito, S.Sakakibara, M.Sakamoto, R.Sakamoto, M.Sasao, K.Sato, M.Sato, T.Seki, T.Shimozuma, M.Shoji, H.Suzuki, Y.Takeiri, N.Takeuchi, N.Tamura, K.Tanaka, M.Y.Tanaka, Y.Teramachi, K.Toi, T.Tokuzawa, Y.Tomota, Y.Torii K.Tsumori, K.Y.Watanabe, T.Watari, Y.Xu, I.Yamada, S.Yamamoto, T.Yamamoto, M.Yokoyama, S.Yoshimura, Y.Yoshimura, M.Yoshinuma, N.Asakura, T.Fujita, T.Fukuda, T.Hatae, S.Higashijima, A.Isayama, Y.Kamada, H.Kubo, Y.Kusama, Y.Miura, T.Nakano, H.Ninomiya, T.Oikawa, N.Oyama, Y.Sakamoto, K.Shinohara, T.Suzuki, H.Takenaga, K.Ushigusa, T.Hino, M.Ichimura, Y.Takase, F.Sano, H.Zushi, T.Satow, S.Imagawa, T.Mito, I.Ohtake, T.Uda, K.Itoh, K.Ohkubo, S.Sudo, K.Yamazaki, K.Matsuoka, Y.Hamada, M. Fujiwara,

Recent Advance in LHD Experiment,
Domestically and Internationally Refereed, The 19th IAEA Fusion Energy Conference,
(Lyon, France, October 14-October 19, 2002) OV/1-6.

- 67 M. K. Islam, M. Salimullah, K. Yatsu, Y. Nakashima, and Y. Ishimoto,
Fusion oriented plasma research in Bangladesh: Impact of dust plasma,
Domestically and Internationally Refereed, The 19th IAEA Fusion Energy Conference,
(Lyon, France, October 14-October 19, 2002) IAEA-CN-94/EX/P2-10.
- 68 H. Zushi, S. Itoh, K. Hamada, K. Nakamura, M. Sakamoto, E. Jotaki, M. Hasegawa, Y.D. Pan, S. V. Kulkarni, A. Iyomasa, S. Kawasaki, H. Nakashima, N. Yoshida, K. Tokunaga, T. Fujiwara, M. Miyamoto, H. Nakano, M. Yuno, A. Murakami, S. Nakamura, N. Sakamoto, K. Shinoda, S. Yamazoe, A. Iwamae, T. Fujimoto, A. Komori, T. Morisaki, H. Suzuki, S. Masuzaki, Y. Hirooka, Y. Nakashima, O. Mitarai,
Overview of steady state tokamak plasma experiments on TRIAM-1M,
Domestically and Internationally Refereed, The 19th IAEA Fusion Energy Conference,
(Lyon, France, October 14-October 19, 2002) IAEA-CN-94/OV/4-6.
- 69 K. Yatsu, T. Cho, H. Higaki, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, M. K. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Yoshida, M. Yoshikawa,

High Density Plasma Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror,

- Bulletin of the American Physical Society, (Orlando, Florida, November 11-November 15, 2002) 47, 9, 212, KP1 112.
- 70 Y. Nakashima, T. Fukasawa, M. Shoji*, S. Kobayashi, Y. Ishimoto, K. Watanabe, T. Ogita, Y. Kubota, M. Yoshikawa, M. K. Islam, M. Ichimura, T. Cho, and K. Yatsu,
Analysis of neutral particle behavior based on $H\alpha$ measurement and neutral transport simulation in the GAMMA 10 tandem mirror,
Sixth Japan-Australia Plasma Diagnostics Workshop, (Univ. Sydney, Australia, December 9-December 11, 2002) N/A.
- 71 Y. Nakashima,
荷電交換中性粒子とプラズマ対向壁材料との相互作用,
核融合科学研究所共同研究成果報告書, (2002) 29.
- 72 Y. Nakashima,
長時間プラズマにおける中性粒子の挙動,
九州大学応用力学研究所平成 13 年度共同研究成果報告, 5 (2002) 178-180.
- 73 滝塚知典、北條仁土、羽鳥伊承,
プラズマの非局所輸送現象と様々な構造形成,
J. Plasma and Fusion Res. 78, 9 (2002) 878-884.
- 74 Yoshikawa, M., Furukawa, T., Kubota, Y., Sedo, K., Kobayashi, T., Kato, T., Murakami, I.,
Study of Impurity Ion Line Radiation Intensity in the GAMMA 10 plasma,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2001-March 2002, (2002) 374.
- 75 Nakashima Y., Ishimoto Y., Kobayashi S., Yoshikawa M., Yatsu K., Morita K., Yuhara J., Sagara A., Shoji M., Suzuki H.,
Surface analysis of carbon samples exposed to GAMMA10 plasmas by the use of the Monte Carlo simulation,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2001-March 2002, (2002) 83.
- 76 J. Kohagura, T. Cho, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, H. Watanabe, M. Yoshida, H. Ito, K. Yatsu, S. Miyoshi, J. Hori, T. Kondoh, T. Nishitani, K. Hirano, H. Maezawa,
Recovery of x-ray energy responses of neutron irradiated semiconductors,
Photon Factory Activity Report 2001 #19, (2002) 123.
- 77 Masayuki YOSHIKAWA, Takatoshi FURUKAWA, Keiichiro SEDO, Yuusuke KUBOTA, Takayuki KOBAYASHI1, Naohiro YAMAGUCHI and Teruo TAMANO,
ABSOLUTE CALIBRATION OF SPACE-RESOLVING VACUUM ULTRAVIOLET SPECTROGRAPH FOR PLASMA DIAGNOSTICS,
Photon Factory Activity Report 2001 #19, (2002) 217.
- 78 T. Watanabe, Y. Matsumoto, T. Nagaura, Y. Itoh, S. Oikawa, H. Hojo,
Proton-Boron Fusion Reactor of LHD Type Helical Magnetic Field,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2001-March 2002, 206.
- 79 T. Watanabe, H. Hojo,
The Magnetically Stable Pressure Profile and a Possibility of High Beta Plasma Confinement in LHD,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2001-March 2002, 208.

80 T. Watanabe, K. Takayama, A. Tonegawa, K. Kawamura, H. Hojo,
Bootstrap Transition to $\beta=1$ Plasma Confinement by Surface Magnetic Field,
Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2001-March 2002, 209.

<学位論文>

博士論文

(物理学研究科)

石本祐樹 [博士 (理学)]

Study of the Carbonized Plasma Facing Component and Its Application to the GAMMA 10 Tandem Mirror

: 炭素材料を用いたプラズマ対向機器に関する研究とその GAMMA 10 への適用
沼倉友晴 [博士 (理学)]

Novel Principle and Method of Simultaneous Ion and Electron Temperature Measurements for Potential Confinement Investigations

: 新原理並びに新手法を用いたイオン温度及び電子温度同時計測による電位閉じ込めの研究

南龍太郎 [博士 (理学)]

Study of Plasma Stability and Confinement Using a Novel Matrix-Type Semiconductor X-Ray Detector

: 新型マトリックス型半導体 X 線検出器によるプラズマの安定性と閉じ込めの研究

(物理学研究科(連携大学院))

石川正男 [博士 (理学)]

Study of Fast Ion Transport using Neutron Emission Profile Measurement on JT-60U

: JT-60U における中性子発生分布測定を用いた高速イオンの輸送 に関する研究

修士論文

(数理物質科学研究科)

久保田雄介 [修士 (物理学)]

H α 線検出器を用いた GAMMA 10 における粒子補給に関する研究

渡辺裕之 [修士 (理学)]

核融合生成 中性子絶対計測システムの構築

(理工学研究科)

伊藤浩一 [修士 (工学)]

半導体検出器を用いた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

小島有志 [修士 (理学)]

金の中性粒子を用いたビームプローブ法による高周波プラズマ揺動の測定

清土桂一郎 [修士 (理学)]

ガンマ 10 プラズマにおける衝突・輻射モデルを用いた不純物イオンスペクトルの解析

津田英介 [修士 (理学)]

ガンマ 10 プラグ部電子加熱領域の広域化と円形化

平井太郎 [修士 (理学)]

超短パルス反射計を用いた GAMMA 10 密度分布計測

深澤崇浩 [修士 (理学)]

H α 計測及びモンテカルロシミュレーションに基づく GAMMA 10 中性粒子輸送解析

<講演>

- 01 石本祐樹,
高熱・粒子負荷条件下におけるカーボンシートポンプの排気特性,
「第13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,(核融合科学研究所,2002年5月8日).
- 02 中嶋洋輔,
H α 計測に基づくタンデムミラープラズマ中の中性粒子計測,
「第13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,(核融合科学研究所,2002年5月8日).
- 03 石井 亀男、武村 祐一郎、小島 有志、萩澤 一久、笛木章亘、下尾真理、筒井圭一、
斉藤輝雄、板倉昭慶、片沼 伊佐夫、谷津 潔,
タンデムミラーの径方向輸送と径方向電位分布,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)A007.
- 04 渡辺二太、高山一男、利根川昭、河村和孝、北條仁士,
表面磁場による完全 $b=1$ プラズマ閉じ込め配位への自発転移,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)A058.
- 05 吉川正志、古川卓俊、清土桂一郎、久保田雄介、小林貴之、岡本裕司、山口直洋、石
井亀男、長照二、谷津潔,
タンデムミラーガンマ10における不純物イオン分光測定,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)1E118.
- 06 吉川正志、清土桂一郎、小口治久、八木康之,
逆磁場ピンチ型プラズマTPE-RXにおける真空紫外不純物分光測定,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)1E119.
- 07 武村 祐一郎、石井 亀男、笛木章亘、萩澤 一久、小島 有志、下尾真理、筒井圭一、
板倉昭慶、片沼 伊佐夫、谷津 潔,
ガンマ10における金中性粒子ビームプローブと金被膜検出器を用いた電位と密度
の同時計測,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)E123.
- 08 小島 有志、石井 亀男、武村 祐一郎、下尾真理、筒井圭一、笛木章亘、萩澤 一久、
板倉昭慶、市村 真、谷津 潔,
AIC揺動によるイオン損失の研究,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)E125.
- 09 宇留田豪、北條仁士、中山和徳、間瀬淳,
プラズマ診断のための電磁波伝搬シミュレーション,
第4回核融合エネルギー連合講演会,(大阪大学コンベンションセンター,2002年
6月13日-14日)J162.

- 10 中嶋洋輔,
 タンデムミラー極小磁場アンカー部における周辺プラズマ・中性粒子挙動,
 「ダイバータにおける複合現象」研究会,(核融合科学研究所,2002年8月6日-7日).
- 11 石本祐樹,
 GAMMA10におけるTDSデータ解析,
 「第14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,(核融合科学研究所,2002年9月3日).
- 12 飽本一裕,北條仁士,
 分散性電磁パルスによる粒子加速,
 日本物理学会2002年秋季大会,(中部大学,2002年9月6日-9日)6pSS1.
- 13 福知敦,宇留田豪,北條仁士,中山和徳,間瀬淳,
 プラズマ診断のための電磁波伝搬シミュレーション,
 プラズマ科学のフロンティア研究会,(核融合科学研究所,2002年10月9日-11日).
- 14 渡辺二太,松本裕,日紫喜雅仁,及川俊一,北條仁士,
 LH型磁場配位を用いた水素・硼素核融合炉の理論研究,
 プラズマ・核融合学会第19回年会,(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市),2002年11月26日-29日)26aA19P.
- 15 小波蔵純子,長 照二,平田真史,沼倉友晴,南 龍太郎,吉田麻衣子,渡辺裕之,横山 昇,伊藤浩一,時岡 優,谷津 潔,堀 順,近藤 貴,西谷健夫,平野馨一,前澤秀樹,
 半導体計測器 X線感度特性に対する核融合生成中性子照射の影響,
 プラズマ・核融合学会第19回年会,(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市),2002年11月26日-29日)27aB01P.
- 16 渡辺裕之,長 照二,小波蔵純子,平田真史,沼倉友晴,南 龍太郎,吉田麻衣子,永嶋賢史,伊藤浩一,立松芳典,谷津 潔,小椋一夫,近藤 貴,西谷健夫, M. Kwon, A.C.England,
 ガンマ10重水素バルクプラズマ核融合実験のための高効率 He^{3} 中性子計測器の絶対計測較正・最適化実験,
 プラズマ・核融合学会第19回年会,(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市),2002年11月26日-29日)27aB02P.
- 17 沼倉友晴,長 照二,平田真史,小波蔵純子,南 龍太郎,渡辺裕之,吉田麻衣子,伊藤浩一,横山 昇,時岡 優,中嶋洋輔,谷津 潔,
 半導体検出器を用いたイオン温度並びに電子温度の空間分布・時間変化の同時計測法の開発と電位のプラズマ閉じ込めへの効果,
 プラズマ・核融合学会第19回年会,(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市),2002年11月26日-29日)27aB03P.
- 18 南 龍太郎,長 照二,小波蔵純子,平田真史,沼倉友晴,渡辺裕之,横山 昇,吉田麻衣子,伊藤浩一,時岡 優,吉川正志,中嶋洋輔,市村 真,谷津 潔,
 新型半導体 X線計測器を用いた単一プラズマ・ショット X線解析に基づく電子サイクロトロン加熱によるプラズマ加熱・閉じ込めの研究,
 プラズマ・核融合学会第19回年会,(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市),2002年11月26日-29日)27aB04P.

- 19 吉田麻衣子、長 照二、平田真史、小波蔵純子、伊藤浩一、時岡 優、渡辺裕之、沼倉友晴、南 龍太郎、横山 昇、谷津 潔、
新型イオン・エネルギー・スペクトル計測器アレイに拠る電位空間二次元分布構造の密度上昇に与える影響の研究、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB05P.
- 20 伊藤浩一、長 照二、平田真史、小波蔵純子、吉田麻衣子、時岡 優、横山 昇、渡辺裕之、沼倉友晴、南 龍太郎、谷津 潔
半導体検出器を用いた 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 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB06P.
- 21 平田真史、長 照二、小波蔵純子、吉田麻衣子、伊藤浩一、時岡 優、沼倉友晴、南 龍太郎、渡辺裕之、横山 昇、中嶋洋輔、谷津 潔、
二次電子自己回収型イオン・電子電流量同時計測器の開発、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB07P.
- 22 清土 桂一郎、吉川正志、岡本裕司、久保田雄介、小林貴之、齋藤将志、杉田俊也、長照二、谷津潔、
タンデムミラーガンマ 10 における衝突・輻射モデルを用いた不純物イオンスペクトルの解析、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB10P.
- 23 久保田雄介、吉川正志、中嶋洋輔、深澤崇浩、清土桂一郎、小林貴之、齋藤将志、杉田俊也、長照二、谷津潔、
GAMMA 10 における 2 次元 $H\alpha$ 線計測による中性粒子密度・粒子生成量の測定、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB15P.
- 24 小林 貴之、吉川正志、古川卓俊、久保田雄介、清土桂一郎、齋藤将志、杉田俊也、長照二、谷津潔、
GAMMA10 アンカー部における不純物イオンスペクトルの軸方向測定、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB17P.
- 25 福知敦、宇留田豪、北條仁士、間瀬淳、
磁場閉じ込めプラズマ中の電磁波伝搬シミュレーション、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 27aB23P.
- 26 安岡 輝晃、斉藤輝雄、立松芳典、津田英介、池上博和、関根貴之、市村真、谷津潔、
イオンセンシティブプローブを用いたガンマ 10 周辺プラズマのイオン温度・イオン密度測定、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 28pB25P.

- 27 武村 祐一朗、石井 亀男、萩澤 一久、小島 有志、荒川 純、宮田 良明、板倉 昭慶、片沼 伊佐夫、谷津 潔、
金中性粒子ビームプローブ法に金被膜検出器を適用した電位と密度分布の同時計測、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 28pB26P.
- 28 津田英介、立松芳典、斉藤輝雄、安岡 輝晃、池上博和、関根貴之、遠藤洋一、谷津潔、
ガンマ 10 プラグ部 ECRH 領域の広域化と円形化、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 28pC10P.
- 29 長 照二、小波蔵純子、檜垣浩之、平田真史、北條仁士、市村 真、石井亀男、板倉昭慶、片沼伊佐夫、中嶋洋輔、斉藤輝雄、立松芳典、吉川正志、沼倉友晴、吉田麻衣子、南 龍太郎、渡辺裕之、伊藤浩一、谷津 潔、三好昭一、
タンデムミラー電位生成・電位閉じ込めの統合統一新理論の提唱と実証、並びにこれに基づく今後の展望、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29aB05.
- 30 斉藤輝雄、立松芳典、津田英介、安岡 輝晃、池上博和、関根貴之、石井亀男、市村真、片沼伊佐夫、谷津潔、
ガンマ 10 バリア部捕捉プラズマの電位構造への影響、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29aB06.
- 31 片沼 伊佐夫、Linjin Zheng、立松芳典、石井亀男、斉藤輝雄、谷津潔、
タンデムミラーエンドミラー部の粒子径方向損失について、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29aB07.
- 32 大迫周平、近木祐一郎、安田泰造、間瀬淳、L.G. Bruskin、北條仁士、
高密度プラズマへの超短パルス反射計の適用、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29aB11.
- 33 立松芳典、斉藤輝雄、津田英介、安岡 輝晃、池上博和、関根貴之、片沼伊佐夫、谷津潔、
ガンマ 10 における電子加熱マイクロ波ビームの吸収パワー空間分布、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB01P.
- 34 平井太郎、板倉昭慶、小波蔵純子、吉川正志、嶋頼子、角田諭宣、北條仁士、谷津潔、
超短パルス反射計を用いた GAMMA10 密度分布計測、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB02P.
- 35 角田諭宣、板倉昭慶、小波蔵純子、吉川正志、嶋頼子、平井太郎、市村真、谷津潔、
GAMMA10 セントラル部における密度揺動測定、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB03P.

- 36 深澤崇浩、中嶋洋輔、大木俊和、石本祐樹、庄司主、小林進二、吉川正志、久保田雄介、渡辺一浩、荻田猛史、東園雄太、村上亮平、山田正樹、谷津潔、
3D-DEGAS を用いた、極小磁場部における中性粒子挙動解析、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB04P.
- 37 大木俊和、中嶋洋輔、深澤崇浩、石本祐樹、庄司主、小林進二、吉川正志、久保田雄介、渡辺一浩、荻田猛史、東園雄太、村上亮平、山田正樹、谷津潔、
GAMMA10 セントラル部における NBI ビームライン近傍の $H\alpha$ 線計測、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB05P.
- 38 小島有志、石井 亀男、武村 祐一朗、萩澤 一久、荒川 純、宮田 良明、板倉 昭慶、市村 真、谷津 潔、
金の中性粒子ビームプローブ法による高周波揺動の径方向分布測定、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB06P.
- 39 荻田猛史、中嶋洋輔、山田正樹、石本祐樹、深澤崇浩、渡辺一浩、大木俊和、東園雄太、村上亮平、谷津潔、
GAMMA10 セントラル部における荷電交換中性粒子分析器を用いたイオン温度の計測、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB07P.
- 40 吉川 正志、小林貴之、久保田雄介、清土桂一郎、齋藤将志、杉田俊也、谷津潔、
CCD カメラを用いたガンマ 10 プラズマ挙動の研究、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB08P.
- 41 渡辺一浩、中嶋洋輔、加藤達也、東園雄太、石本祐樹、深澤崇浩、荻田猛史、大木俊和、村上亮平、山田正樹、大川和夫、谷津潔、
中性粒子ビーム入射による GAMMA10 プラズマの加熱と粒子供給、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB09P.
- 42 石井 亀男、武村 祐一朗、宮田 良明、小島 有志、萩澤 一久、荒川 純、片沼 伊佐夫、谷津 潔、
タンデムミラーにおけるバウンスイオンの径方向輸送の検討、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB10P.
- 43 桧垣浩之、市村真、竿崎宗春、柿本真吾、山口裕資、堀ノ内賢太郎、内海拓、井出幸兵、B.H.Park、北條仁士、谷津潔、
ガンマ 10 における高密度ミラープラズマ生成実験での波動計測、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会、(犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB12P.
- 44 堀ノ内賢太郎、市村真、桧垣浩之、竿崎宗春、柿本真吾、山口裕資、井出幸兵、内海拓、北條仁士、谷津潔、
GAMMA10 における高次高調波加熱プラズマの巨視的振舞い、

- プラズマ・核融合学会第 19 回年会, (犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB13P.
- 45 山口裕資、市村真、桧垣浩之、B.H.Park、竿崎宗春、柿本真吾、堀ノ内賢太郎、井出幸兵、内海拓、北條仁士、福山淳、谷津潔、
GAMMA10 における高次高調波印加時のアンテナ負荷、
プラズマ・核融合学会第 19 回年会, (犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB14P.
- 46 Md. Khairul Islam、中嶋洋輔、石本祐樹、深澤崇浩、渡辺一浩、大木俊和、荻田猛史、東園雄太、山田正樹、村上亮平、谷津潔、
Study of Plasma Behavior at the Asymmetric Magnetic Field Region of the GAMMA 10 Anchor Cell,
プラズマ・核融合学会第 19 回年会, (犬山国際観光センター フロイデ(愛知県犬山市), 2002 年 11 月 26 日-29 日) 29pB15P.
- 47 小口治久、吉川正志、清土桂一郎、八木康之、平野洋一、関根重幸、島田俊男、榊田創、
TPE-RXÇ...â6ÇØÇÈVUV İ™âi,
LHDÇ÷ÇĂCTİ,éÀçİãΔñãÔ, (核融合科学研究所, 2002 年 12 月 6 日).
- 48 吉川正志、清土桂一郎、小口治久、八木康之、
真空紫外を用いた TPE-RX プラズマの不純物スペクトル測定、
平成 14 年度核融合科学研究所共同研究 研究会「プラズマ原子・分子過程の展望」, (核融合科学研究所, 2002 年 12 月 25 日-26 日).
- 49 中嶋洋輔、
H α 計測及びモンテカルロシミュレーションに基づくガンマ 10 タンデムミラープラズマにおける中性粒子輸送解析、
「プラズマ原子・分子過程の展望」研究会, (核融合科学研究所, 2002 年 12 月 25 日-26 日).
- 50 中嶋洋輔、
ガンマ 10 タンデムミラーにおける中性粒子輸送解析、
「周辺ダイバータプラズマの理論・シミュレーション研究」研究会, (核融合科学研究所, 2003 年 1 月 15 日-16 日).
- 51 久保田雄介、吉川正志、
ガンマ 10 における中性粒子・不純物輸送、
第 6 回若手科学者によるプラズマ研究会, (日本原子力研究所 那珂研究所, 2003 年 3 月 5 日-7 日).
- 52 遠藤洋一 立松芳典 齊藤輝雄 谷津潔、
赤外線カメラによるマイクロ波伝送用コルゲート管の透過率測定、
平成 14 年度東京大学総合技術研究会, (安田講堂, 2003 年 3 月 6 日-7 日) P2-8.
- 53 嶋頼子、
GAMMA10 におけるアップコンバータを用いた干渉計の開発、
平成 14 年度東京大学総合技術研究会, (安田講堂, 2003 年 3 月 6 日-7 日) P2-9.
- 54 中嶋洋輔、
ガンマ 10 における高温イオンの加熱緩和過程に関する計算機シミュレーション、
平成 14 年度共同研究成果報告会, (核融合科学研究所, 2003 年 3 月 13 日-14 日).

- 55 谷津潔,
GAMMA10 におけるプラズマ閉じ込め,
プラズマ研究センターフォーラム, (筑波大学プラズマ研究センター, 2003 年 3 月
26 日).
- 56 飽本一裕, 北條仁士,
分散性電磁パルスによる粒子加速 I I,
日本物理学会第 58 回年次大会, (東北大学, 2003 年 3 月 28 日-31 日) 31aZL1.
- 57 渡辺二太, 松本裕, 日紫喜雅仁, 及川俊一, 北條仁士,
ICRF を用いたアルファ粒子からプロトンへのエネルギー直接移転,
日本物理学会第 58 回年次大会, (東北大学, 2003 年 3 月 28 日-31 日) 29aZJ11.
- 58 桧垣浩之, 市村真, 山口裕資, 堀ノ内賢太郎, 柿本真吾, 竿崎宗春, 内海拓, 井出幸
兵, 北條仁士, 谷津潔,
ミラープラズマにおける ICRF 高次高調波のモード遷移,
日本物理学会第 58 回年次大会, (東北大学, 2003 年 3 月 28 日-31 日) 31aYJ-8.