

平成7年度
石田（實）記念財団研究助成
研究成果報告書

電磁流体现象の解明とその応用研究

1996年11月

犬竹 正明

東北大学工学部電気工学科

1、はじめに

将来、枯渇するであろう石油に代表される化石燃料の代替エネルギー資源として核融合エネルギーが期待されている。これは、従来の原子力発電方式の核分裂炉に比べ燃料が無尽蔵であること、燃焼による放射性廃棄物が発生しないこと、メルトダウンなどの暴走が起こらないことなどの特徴から21世紀のエネルギー源として期待されている。この核融合エネルギーを得るには高温高密度のプラズマを一定時間閉じ込めなければならない。そこでプラズマが高密度高ベータになってくると磁力線の再結合などを伴った電磁流体现象が重要になってくる。自然界では、太陽コロナや地球磁気圏プラズマ中で激しい電磁流体现象が人工衛星等によって観測されている。宇宙船の大気再突入時や太陽活動期における地球電離層での磁気嵐は通信障害を引き起こす。これらは、プラズマと電磁波の相互作用の物理現象に関連したものである。これら一連のプラズマを理解する上で特にプラズマ中の電磁流体现象の基礎過程を解明するには、能動的に実験条件が変えられる高密度磁化プラズマ源を用いた電磁流体力学試験装置の開発が切望されている。一方、高密度プラズマ源を利用した工学的応用として、核融合炉におけるダイバータ部での高密度プラズマ流と動的ガスとの相互作用に関する研究、先進的核融合プラズマ閉じ込め方式やMPDアークジェットプラズマ源を用いた宇宙電気推進機の開発などが挙げられる。さらに、高密度プラズマを非接触で測定する新しい計測法の開発も行っていく必要がある。

本研究の目的は、核融合や宇宙における複雑な電磁流体现象を解明するため、大口径・大容量・高エンタルピーの高密度プラズマ源を用いた電磁流体力学試験装置(HITOP)を開発しプラズマ物理の基礎を明らかにし、さらには高密度プラズマ応用を行うことである。ここでの報告は、HITOP装置およびMPD型アークジェットで生成した高密度プラズマ特性の測定結果を報告する。また、電磁波を用いた新しい計測法である反射計について紹介する。

2、実験装置

図1に実験装置を示す。HITOPは、直径80cm、長さ330cmの真空容器と11個の直線型ソレノイドコイルからなっている。真空容器は、ターボ分子ポンプ(排気量2000 l/sec) 2台で排気し、到達圧力は 4×10^{-6} Torrである。コイルは、内径100cm、外形140cmである。このコイルによって発生される軸方向磁場 B_z 分布の1例を下図に示す。このコイルは最大2 kGaussの定常磁場を発生させる事ができるが、現在設備の電源供給の制限から最大0.23kGaussまでしか発生できない。

図2にプラズマ源であるMPDアークジェットの断面の概略図を示す。MPDアークジェットは、宇宙用電気推進機として開発されたものであり、開放端系プラズマ閉じ込め装置であるタンデムミラーの初期プラズマを入射するためにも用いられている。この構造は、タングステン(直径1cm)の陰極(直径1cm)にモリブデンの陽極(内径2cm)を同軸状に配列したもので、プラズマは、高速電磁弁で噴出された作動ガス(ヘリウムガス)をアーク放電により電離し、約1msec間準定常的に生成される。この発生したプラズマ中の電流とそ

の電流が作る磁場によって $J \times B$ 力によりプラズマは真空容器内に加速される。アーク放電の電源供給は、コンデンサ総容量 $5000 \mu\text{F}$ 、総インダクタンス $75 \mu\text{H}$ のパルス整形回路 (PFN: Pulse-Forming-Network) を用いている。プラズマ生成時の典型的な放電電流は 10kA 、放電電圧は 200V である。

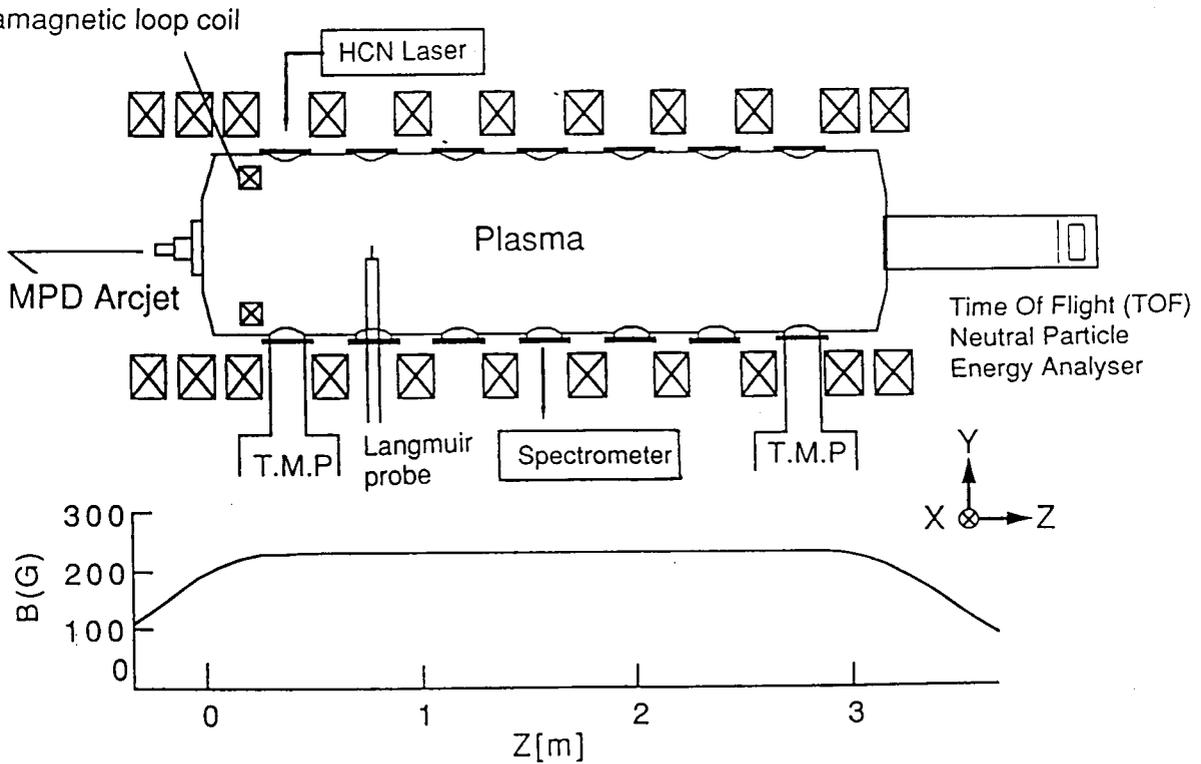


図1 HITOPの概念図および軸方向磁場分布

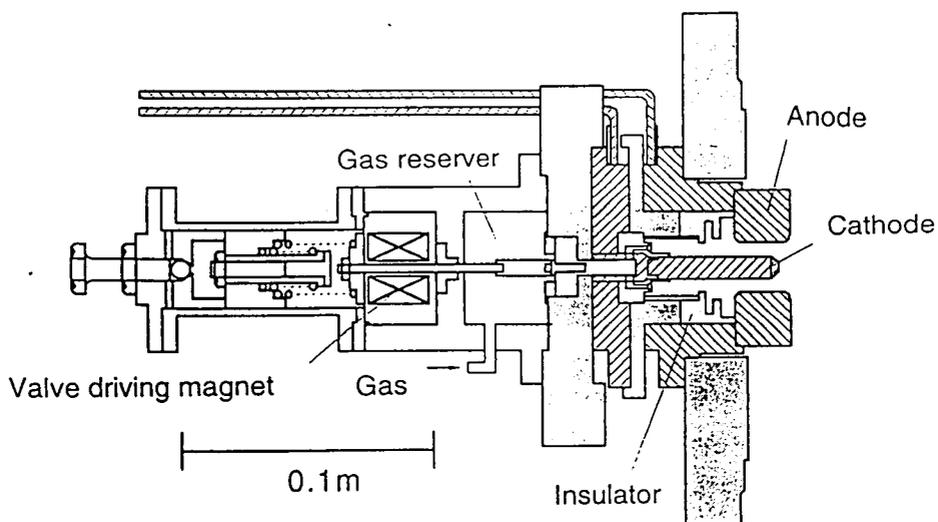
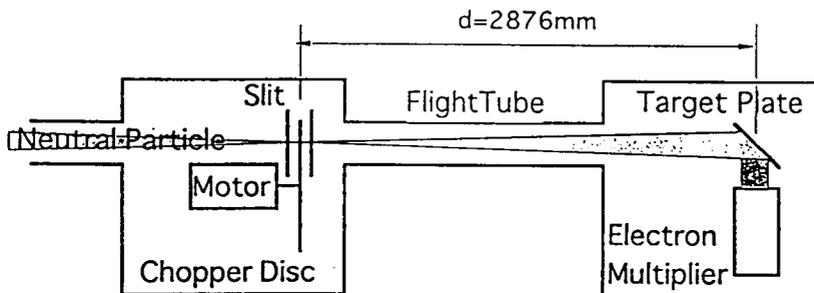
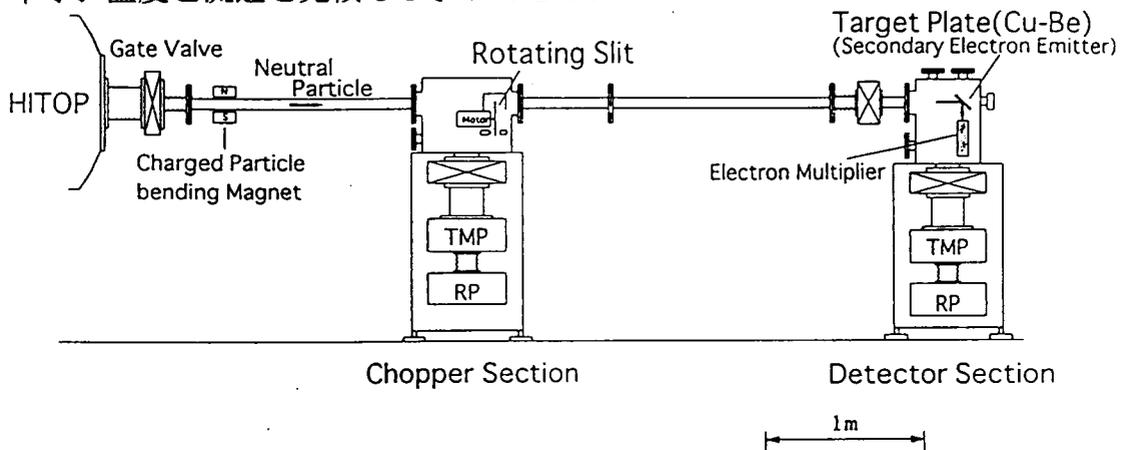


図2 高密度プラズマ源 (MPDアークジェット)

電子密度および電子温度は静電プローブを用いて測定している。プラズマの流速は、マッハプローブを用いて計測している。マッハプローブは、プラズマの流れに対して平行な電極端面を持つものと、垂直な面を持つものを使用した静電プローブである。このプローブで測定された2方向のイオン飽和電流の比からマッハ数が求められる。ここでのマッハ数とは、イオン音速に対するプラズマの流速の比として定義される。

また、イオン温度およびプラズマの流速を測定するために、MPDアークジェットに対向するHITOPの片端には飛行時間型エネルギー分析器 (TOF) が設置されている。TOFシステムを図4に示す。TOFは、主に2つの部分から構成されている。まず、プラズマ中のイオンが荷電交換反応によって中性粒子となり、高速に回転するスリットを持ったチョッパーを通過する。この時同時に入射した荷電粒子は、偏向マグネットにより曲げられスリットを通過できない。このチョッパーは、円周方向に12個のスリット (幅0.25mm) をもったディスク (直径160mm) が約30000rpmで回転し、中性粒子流を170 μ sごとにチョップする。スリットを通過した中性粒子は、チョッパーディスクから2.8m後方に設置されたCu-Be製のターゲット板に当たりそこから2次電子を放出する。この2次電子を電子増倍管によって増幅し検出する。チョッパーからターゲット板までの到達時間の遅れが粒子の速度分布を表わし、これを解析する事によってプラズマのイオン温度と流速を見積もる事ができる。

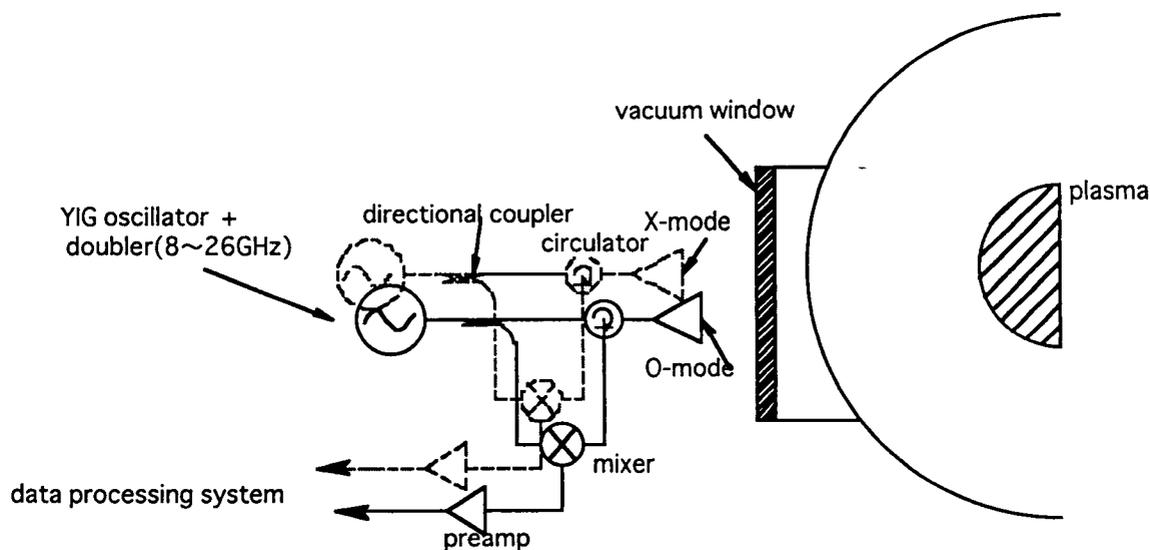


	Diameter	160mm	Detection Interval	170 μ s
	Number of Slits	12	Gate Time	1.95 μ s
	Slit Width	0.245mm	(30000rpm)	
	Slit Height	15mm		
	Number of Rotation	30000~90000rpm		

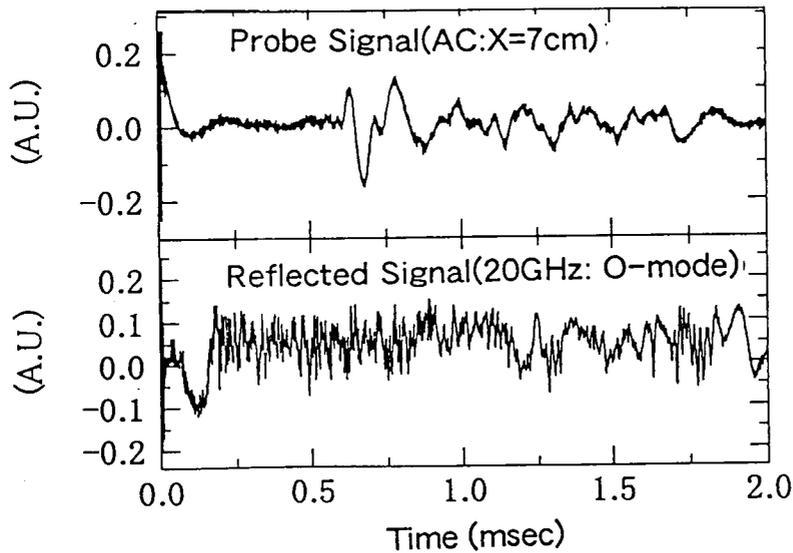
図3 TOFの概念図 (上図; 全体図、下図; チョッパー部および検出部)

さらに詳細なプラズマ特性を計測するための計測器として、現在準備を進めているものは、HCNレーザー干渉計（プラズマ電子密度測定）、多チャンネル磁気プローブ（磁気揺動分布測定）、多チャンネル静電プローブ（プラズマ密度、温度、電位分布測定）などである。また、分光器を用いてHeIIのスペクトル線のドップラーシフト量からイオン温度、流速を測定する。さらに、MHD現象における密度揺動や磁場揺動の分布測定ができるようにマイクロ波反射計の開発ならびに測定を行っている。

このマイクロ波反射計は、近年大型磁場プラズマ実験装置で研究が始まった測定法である。これは、プラズマ密度分布と密度揺動が同時に測定できる非接触計測法であり、高密度・高温プラズマ診断法として極めて重要な測定法である。この原理は、プラズマのカットオフ密度領域で反射してくる電磁波の位相シフト量からプラズマカットオフ密度の空間的位置を測定するものであり、カットオフ領域の局所的な情報を得ることができる。この計測法としての信頼性確立のために他の計測法とのクロスチェックが必要となる。また、この反射計を用い入射波を正常波モード（Oモード）および異常波モード（Xモード）を同時に入射し、その反射パワーの値、モード変換成分の測定から密度揺動と磁場揺動レベルを同時に測定できることが期待されている。プラズマ中の磁気揺動測定の検証については、高密度プラズマ中に発生するアルフェン波（磁気流体波）を利用するため、高密度プラズマが必要であり、静電プローブや磁気プローブによって容易に比較できる小型装置が望ましい。そこで、このHITOPを用いて、反射計による密度揺動ならびに磁気揺動の同時測定を行うためのシステムを構成し、この測定法を確立するため実験を行っている。図4 (a)にOモードおよびXモード同時入射の8～26 GHz帯反射計システムの概念図を示す。また、図4 (b)に周波数20 GHzのOモードを入射した時の反射信号および静電プローブによる揺動信号を示す。



(a) 反射計システムの概念図



(b) 静電プローブおよび反射計を用いた密度揺動計測
 図4 反射計を用いたHITOPプラズマ揺動計測

3、実験結果

高密度プラズマをMPDアークジェットにより真空容器内で生成した。このHITOPプラズマの時間変化を図5に示す。放電電流 I_d は、コンデンサの充電電圧によって制御される。放電電圧 V_d と放電電流 I_d は約1ms間準定常の放電を行っている。イオン飽和電流 $J_{is\perp}$ と $J_{is\parallel}$ の比を図6(e)に示す。このイオン飽和電流は、MPDアークジェットから下流 ($Z=280\text{cm}$) の軸上 ($X=0\text{cm}$) で測定した。 $J_{is\perp}$ と $J_{is\parallel}$ は、それぞれプラズマの流れ方向に対して電極面を垂直および平行に向けた場合のイオン飽和電流である。 $J_{is\parallel}$ と $J_{is\perp}$ の比は、マッハ数に対応し $M=0.61 (J_{is\parallel} / J_{is\perp})$ で計算することができる。HITOPプラズマでは、この実験条件で $M=2\sim 3$ 程度である。

図6には、 $J_{is\perp}$ と放電電力 $P_d (I_d \times V_d)$ の関係を示す。 P_d が増加するに従って $J_{is\perp}$ も比例して増加する。高い電力値では $J_{is\perp}$ が飽和する傾向が見られる。これは放電エネルギーが、プラズマの加速に使われているためと考えられる。

プラズマの径方向分布は、静電プローブを掃引することで測定した。磁場に対するイオン飽和電流の半径分布を図7に示す。磁場を強くしていくと、プラズマの半値直径 d_p が小さくなり、それにともないプラズマ中心密度が上昇する。このとき Z 方向のプラズマ直径は、あまり変わっていない。磁場強度230Gaussにおいて、 $Z=208\text{cm}$ では $d_p=18\text{cm}$ である。このときの中心電子密度は $7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 、電子温度5 eVであった。

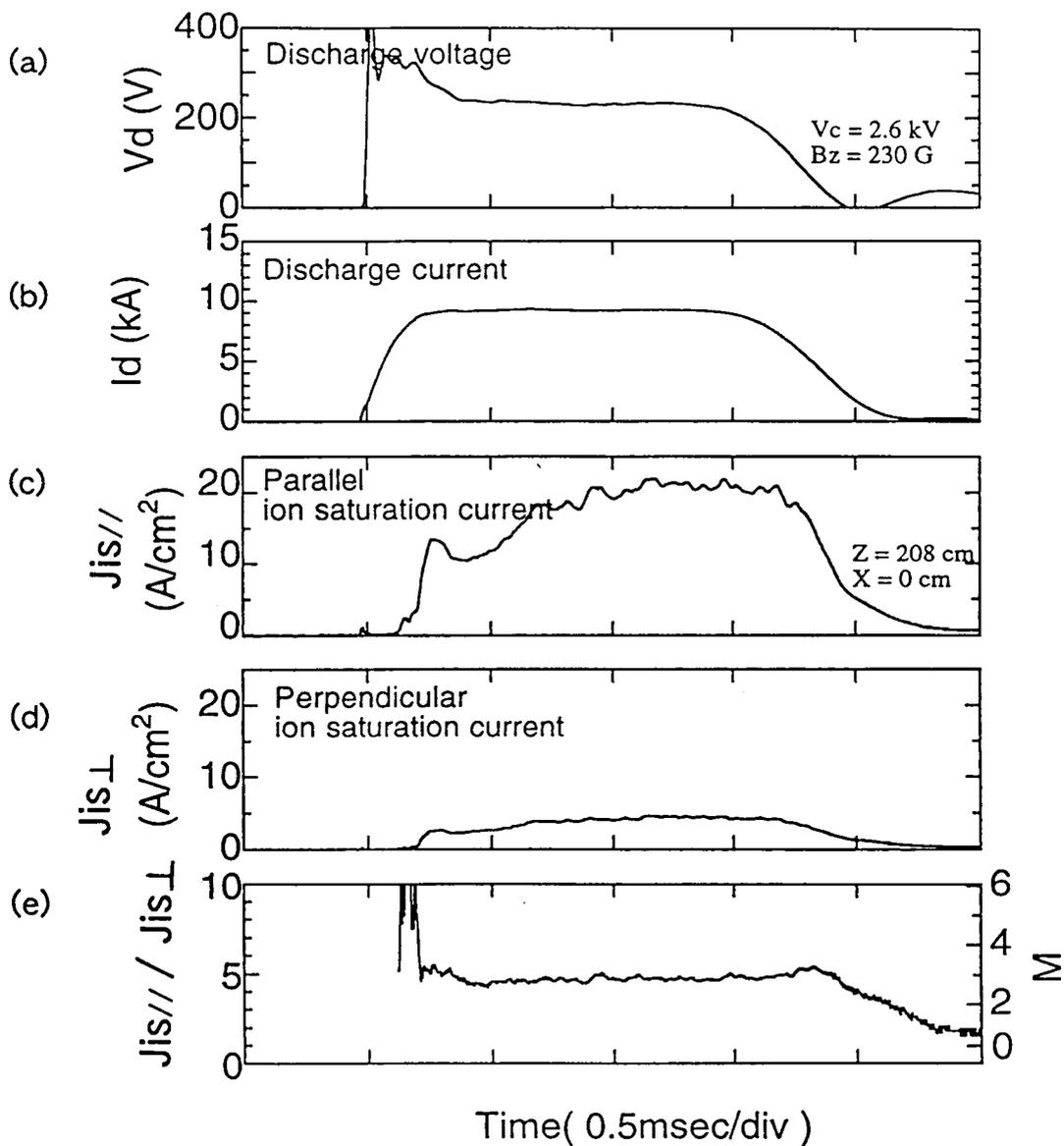


図5 HITOPプラズマの時間変化

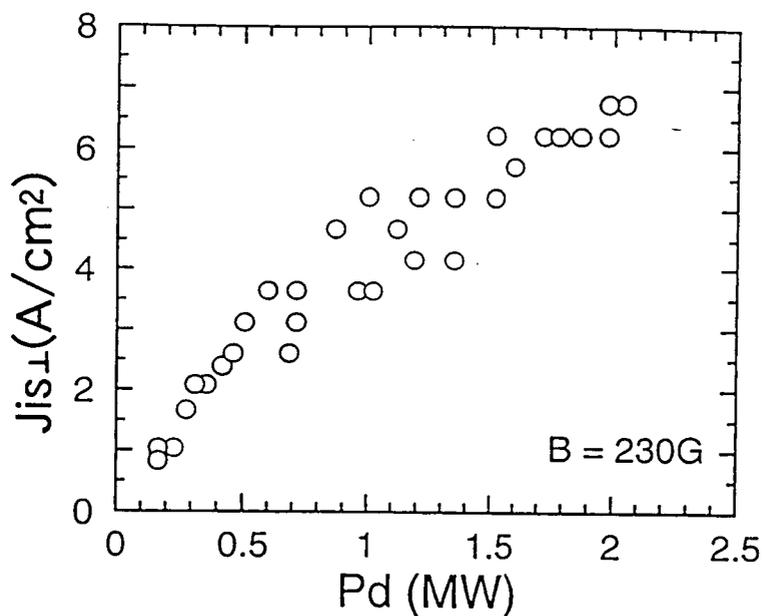


図6 放電電力 P_d とイオン飽和電流 J_{is} の依存性

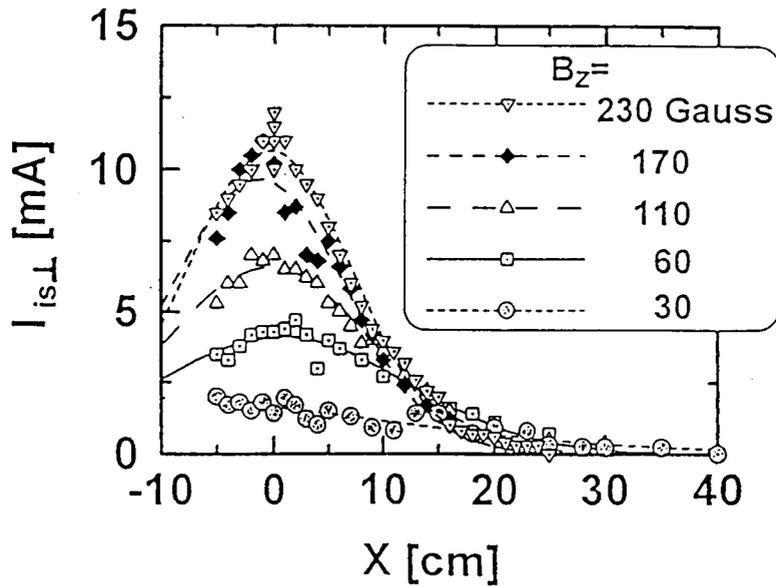


図7 磁場強度と半径方向分布

イオン温度と流速は、TOFを用いて測定した。図8 (a) にはTOFの典型的な信号を示す。初期時間の信号はプラズマからのUV光による信号である。このUV光からの遅れの信号が中性粒子の速度分布に対応し、その粒子速度の分布を示したのが図8 (b) である。

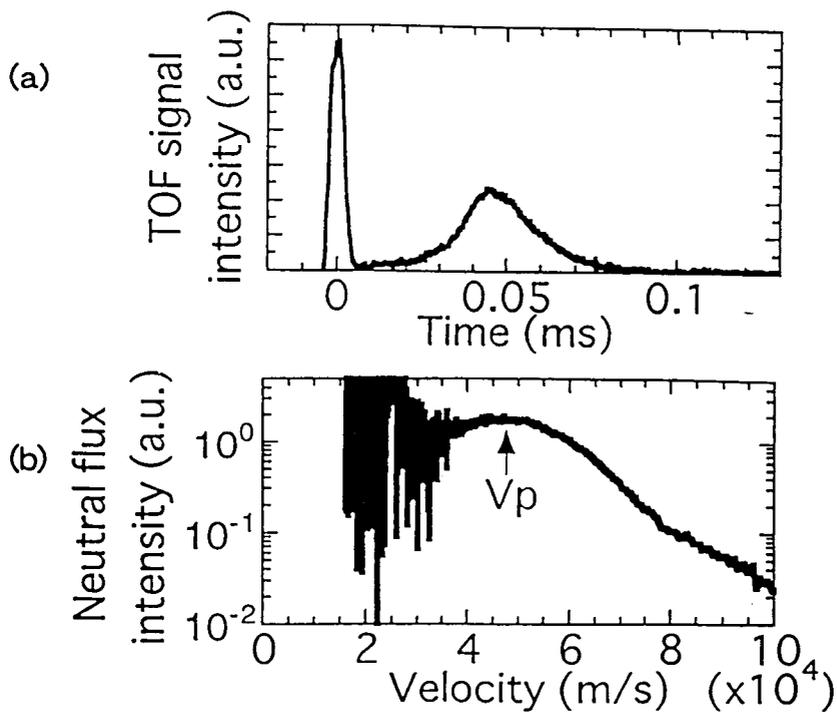


図8 TOFの検出器信号
(上図；生信号、下図；中性粒子の速度分布)

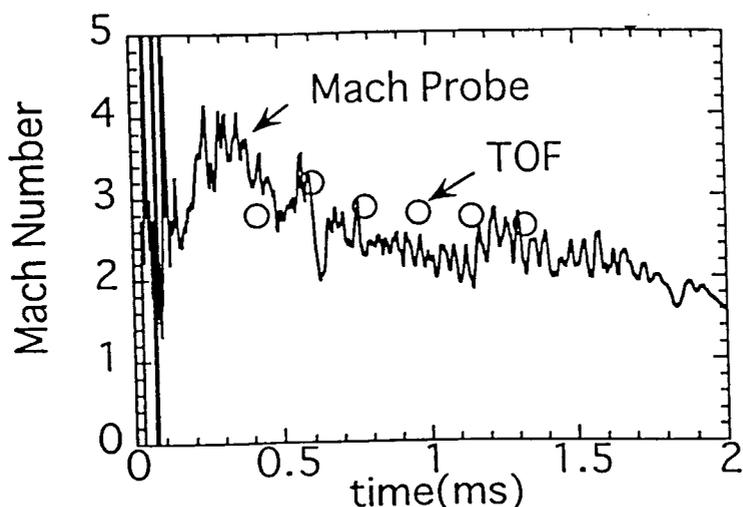


図9 マッハ数の時間変化

この時の中性粒子束の強度は、ターゲット板から放射される2次電子放出係数で補正されている。中性粒子束強度のピーク時の速度 V_p は、プラズマの流速を示している。この速度分布を $E_n = (1/2)m_{He}(V_n - V_p)^2$ の関係から粒子のエネルギー分布に換算する。さらにイオン温度 T_i は、求められたエネルギー分布関数の傾きから算出することができる。これらから求めた T_i および V_p から求められるマッハ数 $M = V_p / (T_i/m_{He})^{1/2}$ とマッハプローブで求めたマッハ数の時間変化を図9に示す。この結果からマッハプローブと、TOFで測定されたマッハ数はほぼ一致していることがわかる。

4. おわりに

我々は、高密度プラズマ中のMHD現象を研究するための装置HITOPを開発した。プラズマ源としてMPDアークジェットを用いて高密度プラズマを生成し、230Gaussの一樣磁場中で半値直径18cm、 $7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ を得た。また、磁場強度、放電電流を変えることでプラズマ密度ならびにプラズマ半径を制御することができた。マッハプローブとTOFを用いて流速を測定したところ両者はほぼ一致していた。

今後は、この装置を用い高密度プラズマ中に大振幅磁気流体波の励起実験やプラズマ渦の生成などの物理実験を行うとともに、工学的応用として核融合炉におけるダイバータ部の研究や電気推進機の開発を行っていく予定である。また、非接触計測法である反射計や超短パルス反射計の開発、電磁波計測における2次元イメージング計測の開発を行う予定である。

謝辞

最後に、本研究に対して御援助頂きました石田（實）記念財団に深く感謝致します。

参考文献

- 1) K.Kuriki, M.Inutake, Phys. Fluids.17(1974)92.
- 2) For example; D.E.Voss, S.A.Cohen, Rev. Sci. Instrum. 53(1982)1696.

3) N.Bretz, Phys. Fluids B 4(1992)2414.

論文発表および学会発表

- 1) M.Inutake, M.Ichimura, A.Ishihara, R.Katsumata, et al.,
"Potential profile control and MHD stability of GAMMA10 tandem mirror",
Invited paper, Proc. Int. Conf. on Open Confinement System for Fusion,
(1993) 1-24.
- 2) M.Inutake, T.Tamano, T.Cho, M.Hirata, et al.,
"Confinement scaling, heating and stability in the GAMMA10 and HIEI
tandem mirrors", Nuclear Fusion Suppl. 1992, 2 , (1993) 651-658.
- 3) M.Ichimura, M.Inutake, R.Katsumata, et al.,
"Observation of pressure anisotropy relaxation associated with
Alfven-ion-cyclotron fluctuation observed in ion-cyclotron range of
frequency heated mirror plasma",
Phys. Rev. Lett., 70, No.18 (1993) 2734-2737.
- 4) H.Hojo, A.Mase, R.Katsumata, M.Inutake, et al.,
"Density fluctuations associated with electromagnetic waves in ion
cyclotron range of frequencies",
Jpn. J. Appl. Phys., 32, No.7 (1993) 3287-3288.
- 5) H.Hojo, M.Inutake, M.Ichimura, R.Katsumata and T.Watanabe,
"Interchange stability criteria for anisotropic central-cell plasmas in the
tandem mirror GAMMA10",
Jpn. J. Appl. Phys., 32, No.5A (1993) 2116-2117.
- 6) M.Ichimura, R.Katsumata, M.Inutake, A.Ishihara, H.Hojo, et al. ,
"Experimental Study of Alfven-Ion Cyclotron mode in the GAMMA10
Tandem Mirror",
Proc. Int. Conf. on Open Confinement Systems for Fusion, (1994) 69-78.
- 7) T.Saito, Y.Kiwamoto, Y.Tatematsu, Y.Yoshimura, T.Takahashi, M.Inutake
and T.Tamano,
"Suppression of Secondary Electrons from an Endplate of a Tandem Mirror
by Use of a Biased Mesh", Phys. Plasmas, 2, (1995) 352-354.
- 8) M.Ichimura, M.Inutake, R.Katsumata, A.Ishihara, et. al.,
"Stability of ICRF-Heated Plasmas in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Fusion Engineering and Design, 26, (1995), 251-258.
- 9) A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, Y.Ito, M.Inutake, et. al.,
"Measurement of ICRF Waves in the GAMMA 10 Tandem Mirror Using
Reflectometers", Rev. Sci. Instrum., 66, (1995), 821-823.

- 10) A.Ando, K.Hattori, T.Suzuki, M.Yoshinuma, K.Ikeda, H.Kobayashi, M.Inutake, "Characteristics of the HITOP(High density Tohoku Plasma) device for magneto-hydro-dynamic studies", Proceedings of the International Conference on Plasma Physics(ICCP96), Nagoya, (1996).
- 11) M.Yoshinuma, K.Hattori, A.Ando, M.Inutake, T.Kaneko, R.Hatakeyama, N.Sato, "Control of Radial Potential Profile and Related Low Frequency Fluctuations in an ECR-Produced Plasma", Proceedings of the Fifth Symposium on Double Layers - Potential Formation and Related Nonlinear Phenomena in Plasmas, Sendai, (1996).
- 12) 犬竹正明、安藤晃、服部邦彦、「核融合の宇宙推進機への応用」NE-96-6、電気学会資料(1996).
- 13) 服部邦彦、安藤晃、鈴木崇之、池田宏一、小林英樹、吉沼幹朗、今野秀俊、谷本英之、佐藤 健、犬竹正明、「高密度電磁流体実験装置(HITOP)の開発」EP-96-96、電気学会資料(1996).
- 14) 鈴木崇之、吉沼幹朗、池田宏一、小林英樹、服部邦彦、安藤 晃、犬竹正明、「MPDアークジェットを用いた電磁流体実験装置の開発」第12回秋季講演会、プラズマ核融合学会26aB27 (1995).
- 15) 吉沼幹朗、服部邦彦、安藤 晃、犬竹正明、金子俊郎、畠山力三、佐藤徳芳「エンドプレートによる径方向電位分布制御と低周波揺動I」第12回プラズマ核融合学会秋季講演会27pB24 (1995).
- 16) 鈴木崇之、河野秦信、渡部雅文、池田宏一、小林英樹、吉沼幹朗、比嘉 晃、小畑 悟、今井俊博、今野秀敏、服部邦彦、安藤 晃、犬竹正明「MPDアークジェットを用いた大口径プラズマの生成」第13回プラズマ核融合学会年会23pC1 (1996).
- 17) 吉沼幹朗、小関豪弥、谷本英之、服部邦彦、安藤 晃、犬竹正明、金子俊郎、畠山力三、佐藤徳芳「エンドプレートによる径方向電位分布制御と低周波揺動II」第13回プラズマ核融合学会年会23aC6 (1996).
- 18) 池田宏一、鈴木崇之、吉沼幹朗、小林英樹、今野俊博、今井秀敏、佐藤 健、谷本英之、服部邦彦、安藤 晃、犬竹正明、市村 真「TOFを用いたHITOPプラズマのイオン温度・流速測定」第13回プラズマ核融合学会秋季講演会1aA2 (1996).
- 19) 小林英樹、服部邦彦、鈴木崇之、吉沼幹朗、池田宏一、安藤 晃、犬竹正明、間瀬 淳「マイクロ波反射計とプローブ計測による密度および磁場揺動の径方向分布の比較」第13回プラズマ核融合学会秋季講演会3pB18 (1996).