

# プラズマ推進機用イオン加熱の大電力化と課題

安藤 晃\*<sup>1</sup>

## Challenge to High Power Ion Heating for the Advanced Plasma Thrusters

Akira ANDO\*<sup>1</sup>

### 概 要

高比推力という特長をもつ電気推進機の大電力化は物資補給や有人探査計画にとって必須の開発項目の一つである。長期ミッションに対応しうる無電極イオン加熱手法として、高周波加熱と磁気ノズルを用いた電気推進技術があるが、今回、大型推進機を指向した大電力化を目指し、数 10 kW レベルのイオン加熱実験と磁気ノズル加速を行った。水素およびヘリウムガスに対し、印加高周波電力を制御することで噴出イオン流の運動エネルギーを変化させることが実験的に示された。大電力高周波を用いたイオン加熱と加速研究の内容と、大電力化に伴って生じる問題点などについて報告する。

**Keywords:** 電気推進機, イオン加熱, 磁気ノズル, VASIMR, HITOP

### 1. はじめに

近年の人工衛星の小型化、高機能化に対応し、ペイロード比を増やすことのできる電気推進機が注目され実用に供され、すでに小電力 DC アークジェットやホールスラスタといった推進効率の高い電気推進機が地球周回衛星に搭載されている<sup>[1]</sup>。一方、宇宙探査機の主力エンジンとして電気推進機が利用され始めたのは 10 年ほど前からで、我が国でも小惑星「ITOKAWA」の探査衛星として 2003 年に打ち上げられた「はやぶさ」に 4 台のイオンエンジンが搭載され運用されている<sup>[2]</sup>。今後月から火星に向けた有人の惑星探査計画が本格化するにつれ、化学推進機に比べ比推力が高く、大きなペイロード比が確保できる大型の電気推進機の需要が増すものと考えられる。イオンエンジンやホールスラスタ、MPD スラスタなどが有望な推進機となりうるが、高い推力を出すために大電力動作をした際に、長期のミッションに耐えて推進機を動作させるためには電極の損耗など解決すべき課題は多い。

近年、電極を使わずにイオン加速を行う試みが始められ基礎実験に成功している。この無電極イオン加速手法として NASA の Dr. F.R. Chang Díaz らが提案した比推力可変電気推進機 VASIMR (Variable Specific Impulse Magneto-plasma Rocket) エンジンの開発が進められている<sup>[3]</sup>。このエンジンでは、ヘリコン波を用いてプラズマ生成を行い、高周波を用いたイオンサイクロトロン共鳴によって加熱した後、その下流部に形成した発散型磁気ノズルによってその熱エネルギーを推力に変換する。この手法によれば、プラズマを生成する電力と加熱する電力を制御することで、一定の印加電力下で噴出されるプラズマ粒子の密度と流速を変化させることができる。すなわち推力と比推力を自由に制御することができ、ミッションの状況に応じた様々なエンジン動作が実現可能となる。

このシステムを実現するには高周波によるプラズマ流の生成と加熱、また磁気ノズルによるプラズマ流の加速と離脱に関する技術を確立することが求められている。当初 ASPL (Advanced Space Propulsion Lab.) で開発実験が開始された

\* 1 Tohoku University

VASIMR 開発であるが<sup>[3-5]</sup>、ヘリコン波による高密度プラズマ生成や高い中性ガス粒子密度のために十分なイオン加熱が起こらず、原理実証に手間取っていた。その間に東北大学の HITOP (High density TOhoku Plasma) 装置において、MPDT (Magneto-Plasma-Dynamic Thruster) をプラズマ源として行った高速プラズマ流の波動加熱と磁気ノズルによる加速効果の研究が進み、原理検証に成功した<sup>[6,7]</sup>。現在では、Chang Díaz らのグループは NASA をスピンオフして Ad Astra 社を立ち上げ、VX (VASIMR eXperiment) 研究として大電力化、大型化を指向した開発を進めている。東北大学においても HITOP 装置でのイオン加熱電力を 10 kW レベルから 50 kW レベルへと増強し、大電力加熱実験を進めている。本稿では、HITOP 装置におけるこれまでの研究の概略と特に大電力化を目指して実施した高周波イオン加熱実験結果について報告する。第 2.1 節では実験装置 HITOP の概要とヘリウムガスを用いて行ったイオンサイクロトロン加熱結果と、加熱で得たプラズマの熱エネルギーを、プラズマ流が磁気ノズルを通過させることで推進方向のエネルギーへと変換した実験に関して述べる。第 2.2 節では推進剤としてより軽量な水素ガスを用いた際の加熱効果や、推進方向のエネルギー測定値をヘリウムプラズマと比較した結果について、第 2.3 節では大電力化を目指し、印加電力を増加させた際の実験結果について述べる。

## 2. HITOP 装置での高周波イオン加熱と磁気ノズルによるイオン加速実験

### 2.1. 実験装置

本研究で用いた HITOP 装置を図 1 に示す。全長 3.4 m、直径 0.8 m の円筒状真空容器中に、プラズマ源として MPDT を用いてイオンマッハ数約 1 程度の高速プラズマ流を形成している<sup>[8,9]</sup>。11 個の大型外部磁場コイルを用いて種々の磁場形状を生成することが可能である。

MPDT 下流約 0.6 m のところにイオン加熱用の高周波を励起するライトヘリカルアンテナを設置している。このアンテナは右回りに 180°ねじった形状をしているが、ヘリカル型アンテナを用いることにより、アンテナ長の 2 倍の波長を持ち、下流方向にイオンサイクロトロン方向と同じ左回りに回転する周方向モード数  $m = -1$  の波動を効率よく励起できる<sup>[6]</sup>。また、このアンテナに流す高周波電流を発生する高周波電源として、インバータ型電源を用いて実験を行った。インバータ型電源は従来の真空管方式と比較して高い効率(約 90%)で高周波電力を生成可能である。本研究では励起周波数 20 kHz ~ 500 kHz、入力パワーは 60 kW 以下の範囲で実験を行った。

図 1 には実験を行った磁場配位も示す。励起されたイオンサイクロトロン波の吸収効率を上げるため、MPDT 出口およびアンテナ近傍での磁場強度 ( $B_U$ ) からプラトー部の磁場強度 ( $B_D$ ) へと徐々に磁場強度を弱めた磁気ビーチ配位となっている。さらにその下流部では、加熱されて得た熱エネルギーを推進エネルギーへと変換させるための発散型磁気ノズル部を設けている。

HITOP 装置には高周波電源のほか、電子温度・密度計測のための静電プローブ、流速測定用マッハプローブ、波動観測

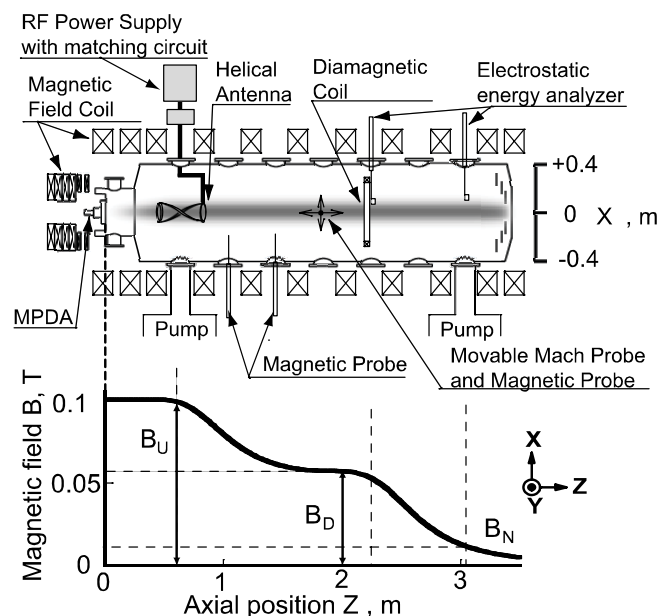


図 1 HITOP 装置概略 (上方から見た図) と磁場配位

用の磁気プローブなど各種プローブをはじめ、イオン温度測定用静電エネルギー分析器、プラズマ蓄積エネルギー計測用の反磁性コイルなどが設置され、種々のプラズマパラメータを計測している。

## 2.2. イオン加熱と磁気ノズル加速の実験結果

MPDTによって生成されたヘリウムプラズマ流に対し、ヘリカルアンテナを用いて高周波電力を印加した際の加熱効果を計測するために、アンテナ下流1.4 mの位置に設置した反磁性コイルを用いてプラズマ熱エネルギー  $W_{\perp}$  の変化を測定した。典型的な放電波形を図2に示す。この図に示すように、高周波励起中に急激に熱エネルギー  $W_{\perp}$  が上昇し、MPDAにより生成された高速プラズマ流の高周波加熱が起こっていることがわかる<sup>[6]</sup>。

このとき、プラトー部の磁場強度 ( $B_D$ ) を変化させたときの  $W_{\perp}$  の増加率 ( $\Delta W_{\perp} / W_{\perp}$ ) の変化を図3に示す。印加高周波の周波数を変化させた際に増加率が最大となる位置 (図中で点線で表示) が変化しており、最大となる最適な磁場はイオンサイクロトロン共鳴条件 ( $\omega / \omega_{ci} = 1$ ) を満たす磁場強度 (図中で実線で表示) よりもやや弱い磁場強度であった。この傾向は励起周波数を変えた際にも同様に現れており、プラズマ流に起因するドップラー効果の影響と考えられる。

このような高周波電力印加によるイオンサイクロトロン加熱では、イオンと中性ガス粒子との荷電交換反応によって大きな影響を受ける。チャンバ内にあらかじめヘリウムガスを充填し、同条件で加熱実験を行ったところ、背景ガス圧が  $10^{-4}$  Torr の時には加熱による  $W_{\perp}$  の増加率は半減した。今回の実験では約1 msのMPDA動作に対し約3 msの高速動作可能なガス供給弁を用いて、0.1 g/sのヘリウムガスを導入した。そのため動作時にはガスが下流部まで到達せず、中性ガスとの荷電交換による影響の少ない実験が可能となった。

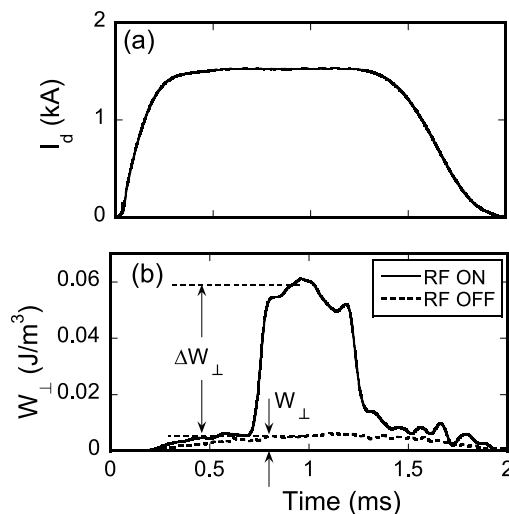


図2 典型的な放電波形 (a) MPDT 放電電流  $I_d$ , (b) 反磁性信号  $W_{\perp}$ .  $P_{RF} = 15$  kW,  $f_{RF} = 0.24$  MHz,  $n_1 = 5.0 \times 10^{17}$  m<sup>-3</sup>,  $B_U = 0.1$  T, and  $B_D = 58$  mT. (参考文献 [6])

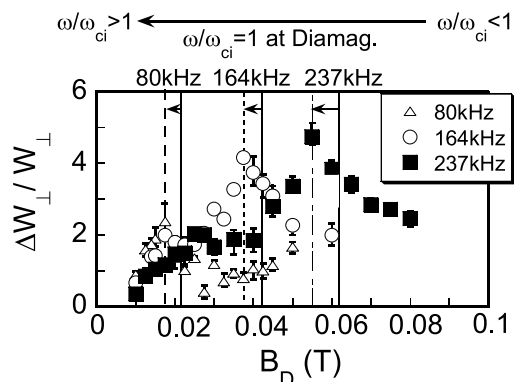


図3 反磁性信号  $W_{\perp}$  の増加量比 ( $\Delta W_{\perp} / W_{\perp}$ ) の磁場依存性.  $B_U = 0.1$  T. (参考文献 [6])

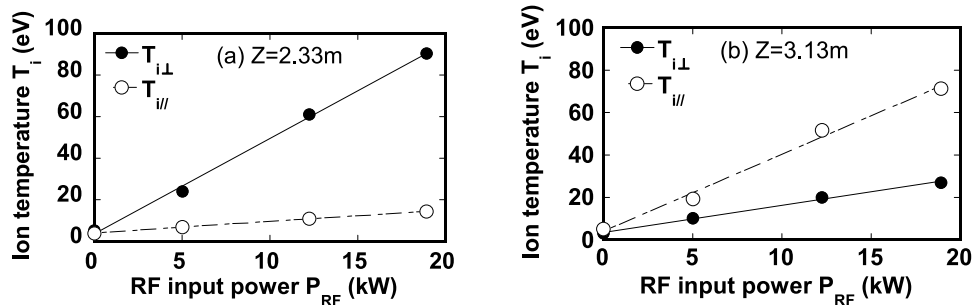


図4 イオン温度 ( $T_{i\parallel}$  と  $T_{i\perp}$ ) の高周波電力依存. (a)  $Z = 2.33$  m 及び (b)  $3.13$  m.  $f_{RF} = 0.24$  MHz,  $n_i = 1.0 \times 10^{17}$  m $^{-3}$ ,  $B_D = 57.5$  mT, and  $B_N = 17.2$  mT.

プラトー部 (加熱部) 下流部 ( $Z = 2.33$  m) と、発散型磁気ノズル下流部 ( $Z = 3.13$  m) に静電エネルギー分析器を設置して、磁力線と垂直方向のイオン温度と平行方向のイオン温度を計測した. 図4に印加高周波電力を変化させた場合の依存性を示す. 加熱部下流 ( $Z = 2.33$  m) では、加熱によって増加した熱エネルギー (磁場に垂直なエネルギー成分) が強く増加しているのがわかる.

一方で、磁気ノズル下流部 ( $Z = 3.13$  m) では、磁力線と垂直方向の温度は加熱部下流より減少する一方で推進エネルギー (磁場に平行なエネルギー成分) が増加しており、磁気ノズルによって熱エネルギーから推進エネルギーへと変換されているのがわかる. このとき、垂直方向の温度減少は断熱不変量  $\mu$  一定の条件で予想される値とほぼ一致した. 印加する高周波電力を変化させたとき、印加電力の上昇とともにほぼ線形に推進エネルギーが上昇しており、この手法によって比推力を変化させることが出来ることがわかる<sup>[4,7,8]</sup>.

以上述べたように、MPDTにより生成された高速・高密度プラズマ流に高周波加熱実験を行ったところ、磁気ビーチ磁場配位においてイオンサイクロトロン共鳴加熱が起り、プラズマ流の熱エネルギーが増加する. さらに、この熱エネルギーは、発散型磁気ノズル部において推進エネルギーへと変換されていることを確認することができた.

### 2.3. 高比推力化のための推進剤の検討

推進機応用を考えた際に、推進剤の種類を軽量のガスに変えることで高比推力を図り、ペイロード比の向上が期待できる. 図5はヘリウムプラズマおよび水素プラズマにおけるイオンサイクロトロン周波数  $f_{ci}$  とイオン-イオン衝突周波数  $\nu_{ii}$  が等しくなるときの磁場強度  $B_{ci}$  のプラズマ密度依存性を示した図である.

ICRF加熱を効率よく行うためには、 $f_{ci} > \nu_{ii}$  という条件を満たさなくてはならないため、同じ磁場強度で比較すると水素の方が高密度化にとっても有利であることが分かる. そこで動作ガスとして水素を使用し、ICRF加熱および磁気ノズル加速の実験を行い、ヘリウムを用いた場合との比較、検討を行った<sup>[10,11]</sup>.

水素プラズマ流中に高周波波動を励起し、プラズマ蓄積エネルギー  $W_L$  を  $Z = 2.33$  m の位置の反磁性コイルで測定した結果を図6に示す. 実験条件はMPDアークジェット of 放電電流  $I_d = 2.5$  kA, 測定位置のプラズマ密度  $n_i = 1.6 \times 10^{11}$  cm $^{-3}$  である. 磁場配位はアンテナ位置の磁場強度  $B_u = 1000$  G, 反磁性コイル位置の磁場強度  $B_D = 275$  G で磁気ビーチ配位を形成している. 周波数 500 kHz の高周波波動を 0.1 ms 間励起することで  $W_L$  が大きく増加していることが分かる. また、アンテナ

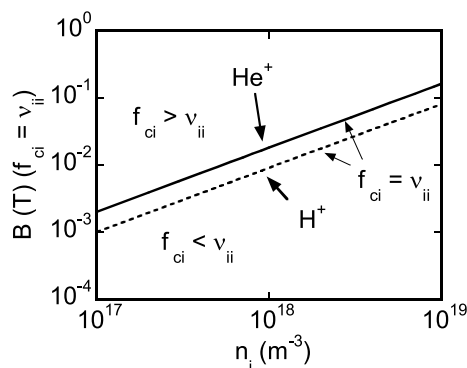


図5  $f_{ci} = \nu_{ii}$  となる磁場強度  $B_{ci}$  の  $n_i$  密度依存性

への投入電力の増加にともなって  $W_{\perp}$  も増加しており、水素プラズマ流の ICRF 加熱が行われていることが確認できた。

図7は  $Z = 2.33$  m において水素プラズマに対してプラズマ蓄積エネルギー  $W_{\perp}$  の下流磁場強度  $B_D$  依存性を測定した結果である。ヘリウムの時と同様にサイクロトロン共鳴磁場近傍で  $W_{\perp}$  のピークが表れ、ICRF 加熱が起こっていることが示された。ヘリウムの時と比較して共鳴磁場が広がっているが、周波数を上げるに従ってより高磁場条件でエネルギー上昇が観測されている。またこのピークは共鳴磁場（点線）よりも小さく、高速プラズマ流に起因するドップラーシフトの効果が現れている。プラズマ密度  $n_i = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$  の条件下で、 $f_{\text{RF}} = 900 \text{ kHz}$   $P_{\text{RF}} = 6.9 \text{ kW}$  で高周波を印加した際、垂直方向のイオン温度 ( $Z = 2.33$  m)  $T_{\perp i}$  が  $60 \text{ eV}$  まで上昇した結果が得られている。

図8は  $W_{\perp}$  のプラズマ密度  $n_i$  依存性を測定した結果である。MPD アークジェット of 放電電流値を変えることで生成されるプラズマの密度を変化させている。405 kHz, 500 kHz, 900 kHz の3通りで波動を励起した結果、どの周波数においても低密度領域では  $W_{\perp}$  の増加率が大きく、密度が  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  より高い領域では励起波動の有無による  $W_{\perp}$  の変化が小さくなっていることが分かる。密度が  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  以上の領域では、イオン-イオン衝突周波数  $\nu_{ii}$  が大きくなるために衝突加熱が

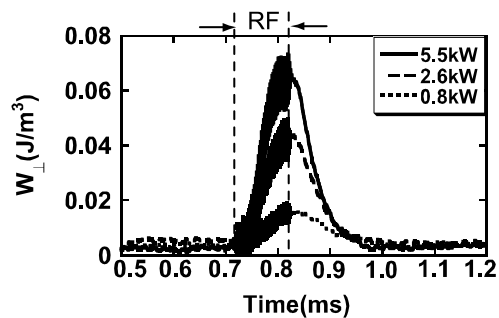


図6 水素プラズマにおけるプラズマ蓄積エネルギー  $W_{\perp}$  の時間変化

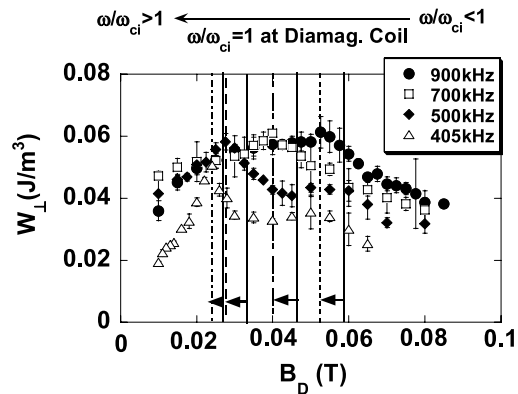


図7 水素プラズマにおけるプラズマ蓄積エネルギー  $W_{\perp}$  の下流磁場強度  $B_D$  依存性

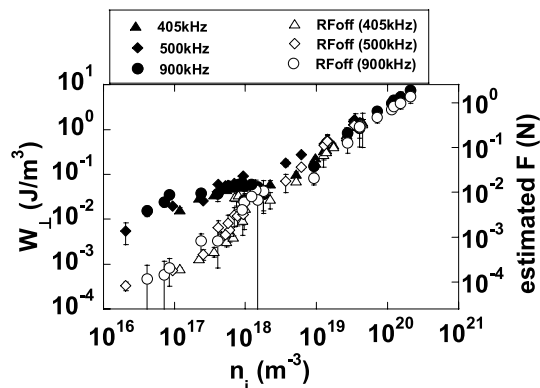


図8 水素プラズマにおけるプラズマ蓄積エネルギー  $W_{\perp}$  の密度依存性

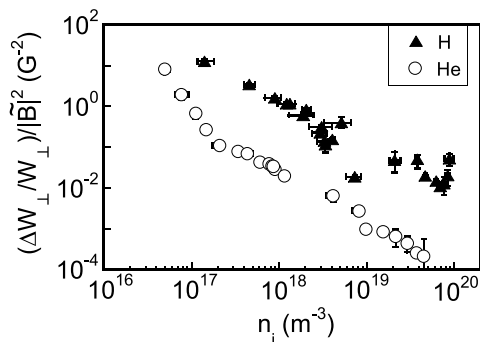


図9 水素プラズマおよびヘリウムプラズマにおける  $(\Delta W_{\perp}/W_{\perp}) / |\tilde{B}|^2$  の密度依存性

表1 比推力の見積もり

	He	H
$f_{RF}$ (kHz)	238	900
B (G)	1000-575-69	1000-525-112
$P_{RF}$ (kW)	19	6.9
$T_{  }$ (eV)	93	51
$U_{  }$ (km/s)	73	112
F (mN)	22	14
$I_{sp}$ (s)	7400	11400

支配的になり効率よくサイクロトロン加熱が起こらないと考えられる。

水素プラズマとヘリウムプラズマでの加熱効率の密度依存性を比較した結果を図9に示す。図の縦軸は  $W_{\perp}$  の上昇率  $(\Delta W_{\perp}/W_{\perp})$  を励起された波動のエネルギー  $(\propto |\tilde{B}|^2)$  で規格化した値である。この磁場揺動量  $\tilde{B}$  はアンテナ下流 0.2 m の位置に置いた磁気プローブで測定したもので、波動伝搬とは垂直方向の磁場揺動を計測したものである。この時、磁場条件を同じにするため動作周波数はヘリウムプラズマでは 0.24 MHz、水素プラズマでは 0.41 MHz を用いた。アンテナから励起された波動のエネルギーで規格化することで、加熱効率を比較することが出来る。この図から水素プラズマの方がヘリウムプラズマよりも高い密度まで効率よく加熱が行われていることが分かる。これは図5で期待された結果と一致する。

ICRF 加熱により増加した水素プラズマ流の熱エネルギーを発散型磁気ノズルを通過させることにより流れのエネルギーへと変換させることで水素プラズマ流の噴出エネルギーが増加した。この結果から比推力の評価を行い、投入電力 6.9 kW に対して 11400 秒という値を得た。これはヘリウムの場合の投入電力 19 kW に対する比推力 7400 秒よりも高い値となっている。本実験で得られた結果を表1にまとめて示す。

## 2.4. 大電力 ICRF 加熱

VASIMR 計画では有人宇宙探査への応用を目指し、ロケットエンジン一台あたり 4 MW の高周波投入電力を利用することを想定としている。そこで ICRF 加熱への投入電力を従来よりも増強し、大電力条件での加熱効率の検討を行った。以降の実験では推進剤としてヘリウムを用いている。

励起アンテナへの高周波投入用電源としてこれまで使用してきたインバータ型電源を高出力化し、50 kW 程度までの電力を投入することが可能となった。これを利用し大電力での ICRF 加熱の実証を目指し、実験を行った。図10に従来の電源 (Single Stage) と高出力化を行った電源 (Dual Stage) それぞれでの、 $Z = 2.33$  m の位置の反磁性コイルで計測したプラズマ蓄積エネルギー  $W_{\perp}$  の投入電力依存性を示す。実験条件は、放電電流  $I_d = 1.8$  kA、測定位置におけるプラズマ密度  $n_1 = 1.0 \times 10^{11}$  m<sup>-3</sup>、磁場配位は励起アンテナ位置で  $B_u = 1000$  G、測定位置の共鳴磁場強度  $B_D = 575$  G の磁気ビーチ配位である。

印加電力が 20 kW 以上になると徐々に  $W_{\perp}$  が飽和する傾向が観測された。これは投入電力の増加によってプラズマ流中のイオン温度が上昇し、イオンラーマー半径が大きくなり、プラズマ径と同程度となってプラズマから外部へと損失していることが原因と考えられた。実際、共鳴磁場強度 575 G、イオン温度 100 eV とすれば、イオンラーマー半径はおよそ 6 cm 程

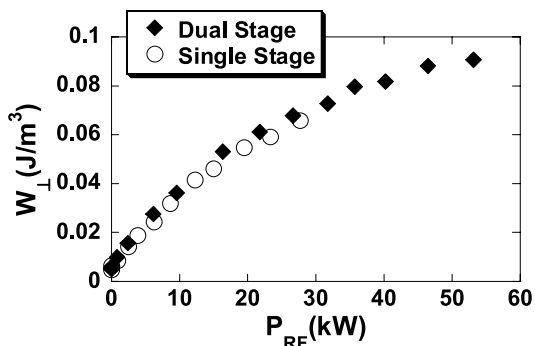


図10 ヘリウムプラズマにおけるプラズマ蓄積エネルギー  $W_{\perp}$  の投入電力  $P_{RF}$  依存性

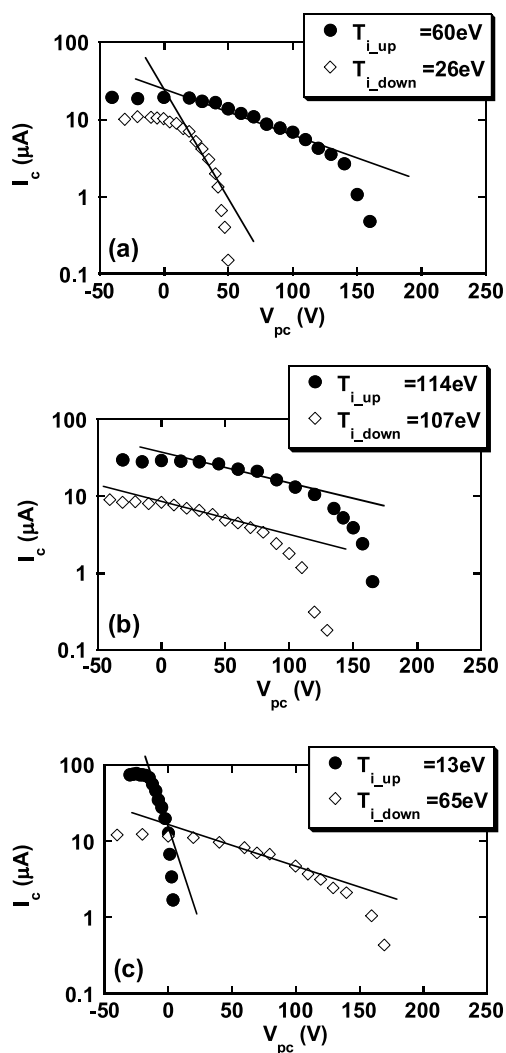


図11 ヘリウムプラズマの加熱領域における (a)  $X = +10$  cm, (b)  $X = 0$  cm, (c)  $X = -10$  cm の位置でのイオン温度  $T_{\perp}$  の異方性

度となり、プラズマ径 (約 5 cm) と同程度となっている。

このような大電力での ICRF 加熱を行った際のイオンラーマー運動の影響を確認するために次のような実験を行った。加熱領域下流部の  $Z = 2.33$  m において半径方向三ヶ所で、静電エネルギーアナライザを +Y 方向 (上方向) に向けた場合と -Y 方向 (下方向) に向けた場合のイオンエネルギー分布の測定を行った。実験条件は先の実験と同様に、放電電流  $I_d = 1.8$  kA, 測定位置におけるプラズマ密度  $n_i = 1.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ , 磁場配位は励起アンテナ位置で  $B_U = 1000$  G, 測定位置の共鳴磁場強度  $B_D = 575$  G の磁気ビーチ配位である。図 11 は (a)  $X = +10$  cm, (b)  $X = 0$  cm, (c)  $X = -10$  cm の位置での静電エネルギーア

ナライザの測定結果を表している。この図で横軸は静電エネルギーアナライザ内の電極に印加する抑制電圧で縦軸はそのときに観測された電流値である。X=0 cm のプラズマ中心部では静電エネルギーアナライザの捕集面の向きを変えてもイオン温度の測定結果はほぼ一致しているが、X = +10 cm, X = -10 cm の位置では測定方向によってイオン温度が大きく異なる結果となっている。この時、イオンのラーマー運動によって高速のイオンが流入してくる方向に捕集面を向けた際に、静電エネルギーアナライザの信号は高いエネルギー値を示している。

このように、大電力加熱時にはプラズマ中のイオン温度が急激に上昇し、ラーマー半径が大きくなってしまったため、加熱された高速イオンが磁力線を横切り損失してしまい、投入電力の増大に対してプラズマの熱エネルギーが徐々に飽和する傾向になったと考えられる。このようなイオンラーマー運動の影響を抑えるためには、今後磁場強度をさらに上げる必要がある。

### 3. ま と め

長期ミッションに対応しうる電気推進技術として、高周波加熱と磁気ノズルを用いた VASIMR 型推進機の実現を目指し、東北大学の HITOP 装置において高比推力化および高密度 ICRF 加熱に関する実験を行った。その結果、推進剤としてヘリウム及び水素ガスを用いて高周波によるイオン加熱と磁気ノズルを用いたエネルギー変換により高速イオンの生成を確認し、印加電力を変えることで推進エネルギーの制御を行うことが出来ることが示された。この際、水素を用いることでヘリウムを用いた場合よりも高い加熱効率を得ることができた。さらに、加熱した水素プラズマ流を、磁気ノズルを用いて加速することで1万秒以上の高比推力を達成した。一方で、投入電力を増加し、大電力 ICRF 加熱を行ったところ、イオンラーマー半径がプラズマ径と同程度となり損失が生じたためにプラズマ熱エネルギーの飽和現象が観測された。

### 参 考 文 献

- [1] Frisbee R.H., "Advanced space propulsion for the 21 st century", J. Propulsion and Power, Vol. 19, p. 1129 (2003).
- [2] Kuninaka H, *et al.*, "Powered might of electron cyclotron resonance ion engines on Hayabusa explorer", J. Propulsion and Power, Vol. 23, p. 544 (2007).
- [3] Chang Díaz F.R. *et al.*, "The Physics and Engineering of the VASIMR Engine", Proc. of 36 th Joint Propulsion Conference, (Huntsville, AIAA-2000-3756), p. 1 (2000).
- [4] Chang Díaz F.R. *et al.*, "Plasma propulsion for interplanetary flight", Thin Solid Films, Vol. 506, p. 449 (2006).
- [5] Squire J.P., *et al.*, "High power light gas helicon plasma source for VASIMR", Thin Solid Films, Vol. 506, p. 579 (2006).
- [6] Ando A., *et al.*, "Alfven wave excitation and single-pass ion cyclotron heating in a fast-flowing plasma", Physics of Plasmas, Vol. 13, 057103 (2006).
- [7] Ando A., *et al.*, "ICRF heating and plasma acceleration with an open magnetic field for the advanced space thruster", Transaction of Fusion Science and Technology, Vol. 51, p. 72 (2007).
- [8] Inutake M., *et al.*, "Generation of supersonic plasma flows using an applied-field MPD arcjet and ICRF heating", Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 49, p. A 121 (2007).
- [9] Tobar H., *et al.*, "Characteristics of electromagnetically accelerated plasma flow in an externally - applied magnetic field", Physics of Plasmas, Vol. 14, p. 093507 (2007).
- [10] Ando A., *et al.*, "Ion heating and acceleration experiment in hydrogen plasma for the VASIMR-type Thruster", Proc. of the 30 th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2007-191 (2007).
- [11] Hagiwara T., *et al.*, "Experiments of Ion Acceleration in a Magnetic Nozzle for an Advanced Plasma Thruster", Proc. of the 30 th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2007-255 (2007).