

## 電気推進器開発に向けたシートプラズマの ICR 加熱特性

### Characteristics of the ICR heating on Sheet Plasma for Electric Propulsion Development

○西村 未来(東海大・院)・吉田 海理(東海大・学)・瀧本 壽来生(東海大・院)  
利根川 昭(東海大)・佐藤 浩之助(中部電力)・河村 和孝(東海大)

○Miku Nishimura ・ Kairi Yoshida ・ Toshikio Takimoto ・ Akira Tonegawa (Tokai University)  
Kohnosuke Sato (CHUBU Electric Power Co.,Inc.) ・ Kazutaka Kawamura (Tokai University)

#### Abstract (概要)

The electric propulsion using an ion cyclotron resonance (ICR) heating in the experimental device TPD-Sheet IV has been developed to control the thrust and specific impulse.

#### 記号の説明

- Z: 陽極からの位置
- $W_{\perp}$ : 垂直プラズマ熱エネルギー
- $B_0$ : 外部磁束密度
- R: 積分回路の抵抗
- C: 積分回路のコンデンサーの静電容量
- A: アンプ倍率
- $\mu_0$ : 真空の透過率
- S: 反磁性ループコイルのコイル面積
- N: 反磁性ループコイルの巻き数
- $V_0$ : アンプ後の出力電力

#### 1. はじめに

電気推進システムは、将来の宇宙探査プロジェクトにおける重要な要素の1つであり、様々な宇宙ミッションのために開発されている。有人惑星間推進機には、より高い推力及び比推力を有する推進機の開発が前提となる。その理由としては、月や小惑星への貨物輸送のための推進剤の質量を減らすことができ、ペイロードを稼げるという点と、火星や木星など、長期的に行われると予測されるミッションでの移動時間の短縮などがあげられる。現在 NASA では、2030 年までに火星に人類を到達させて探査を行うための具体的なプランとして、月に近い軌道を飛ぶ宇宙基地 Deep Space Gateway に物資や燃料、人員を運び込み、そこを拠点として別の宇宙船 Deep Space Transport に乗って火星を目指すと発表している<sup>1,2)</sup>。また、Ad Astra Rocket Company で VASIMR (Variable Specific Impulse Magneto-Plasma Rocket) 型 VX-200 エンジンの開発が進められている。VX-200 エンジンは、ヘリコンアンテナによるプラズマの生成を行い、ICR (Ion

Cyclotron Resonance)加熱及び磁気ノズルによって、プラズマ流の加速をおこなっている。様々なミッションに対応するために、推力及び比推力をより広範囲に変化させる能力を備えており、ヘリコンアンテナによるプラズマ生成を行なっていることから電極への損耗がなく、長寿命化が期待されている<sup>3)</sup>。

プラズマ加速は、不均一磁場中の電子サイクロトロン共鳴現象に基づいている。電子はサイクロトロン周波数近傍で共鳴現象を起こすことで垂直エネルギーが増幅し、磁場勾配の方向に移動し始める。またイオンはプラズマの電荷中立性に起因する静電界によって加速される。イオン加速の実験結果は、低密度プラズマ(約  $10^{18}\text{m}^{-3}$ ) がイオンサイクロトロン共鳴によって加熱され、続いて不均一磁場によって加速されることが報告されている<sup>4,5)</sup>。また、ダイバータプラズマシミュレータ NAGDIS-II で、イオンサイクロトロン周波数近傍において高密度プラズマの加熱(14kW)が実施されたことを報告している<sup>6)</sup>。

我々の実験装置 TPD-Sheet IV (Test Plasma produced by Direct current for Sheet plasma IV)では、直流で高密度シートプラズマ( $>10^{18}\text{m}^{-3}$ )を生成することが可能である。シートプラズマの厚さはイオンラーマ半径の約2倍と小さいため、通常の円筒形プラズマに比べて電場が浸透しやすいと推測される。また、シート状の中心にイオンが並列されているため、イオン同士の衝突頻度が少なく、ICR加熱による比較的低い電力での効率的なイオン加熱が期待できる。本研究では、RF (Radio Frequency)電極を変化させることによってシートプラズマにおける ICR 加熱の影響を調べた。

#### 2. 実験装置

2.1 TPD-Sheet IV 図1は、TPD-Sheet IV の概略図と磁

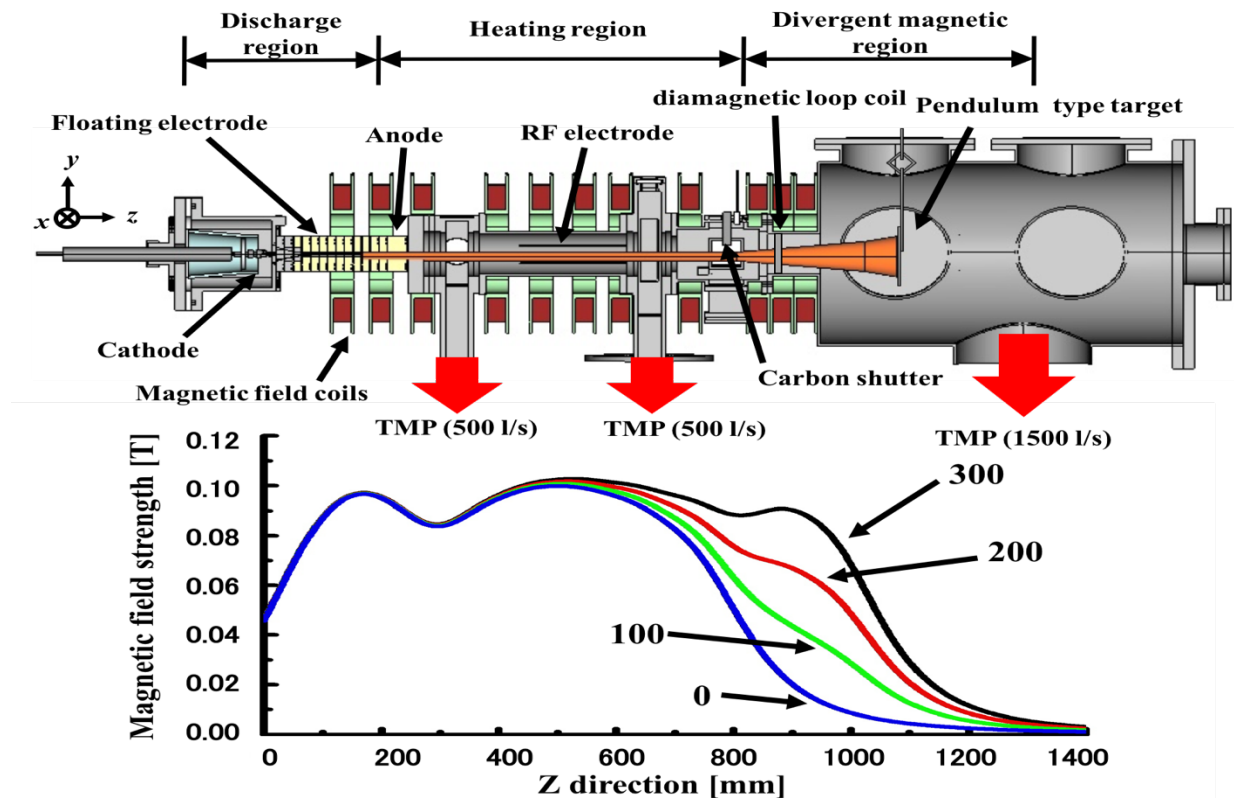


図1 TPD-Sheet IV の概略図と磁場強度

場強度を示す。TPD-Sheet IV は、シートプラズマ源、磁気コイル、RF 加熱部、測定部、エンドチャンバー、真空排気部から構成されている。主に3つの領域に分けられ、プラズマ生成領域、加熱領域、発散磁場領域の3つの領域がある。真空排気装置は、3台のターボ分子ポンプ（500 l/sec : 2台、1500 l/sec : 1台）と3台のロータリーポンプ（900 l/min : 2台、300 l/min : 1台）で構成されている。このため、真空装置内の到達真空度は、放電領域及び実験領域において約  $10^{-4}$  Pa ( $\sim 10^{-6}$  Torr) に達する。放電電源には、主電源（100 A、 $\sim 300$  V）と予備電源（10 A、 $\sim 500$  V）を用いている。直流のアーク放電により、最大 100 A の放電電流で定常の直流プラズマを発生させることができ、磁場電源（300A、 $\sim 60$ V）と9つの磁気コイルにより、加熱領域に最大 0.12 T の磁界を発生させることができ、後方の2つの磁気コイルに繋がれている小型磁場電源（300 A、 $\sim 10$  V）を操作することにより、磁場発散領域で様々な磁場構造を形成することができる。実験条件は、推進ガスにはヘリウムを用いている。放電電力は7~23 kW、小型磁場電源は300 A、加熱電力は最大 300 W となっている。

**2.2 加熱用回路** 図2に加熱用回路を示す。RF 電源は、ファンクションジェネレータ、RF アンプ、パワーメータで構成され、その後整合回路を通り、平行平板のRF電極に高周波が到達する。RF 電源の最大出力は 300 W である。整合回路は、LC 回路と BAL-UN 回路で構成され、損失のなく電力を伝送するように組まれている。RF 電極は、長さ 200 mm、幅 60 mm となり、電極間隔は 40 mm 及び 50 mm と変化させた。プラズマは、2つの平行なプレート電極の間を通

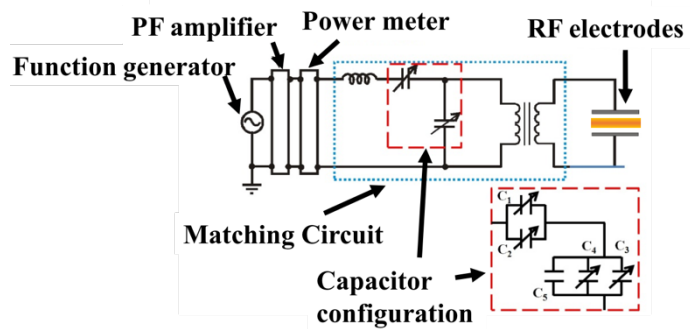


図2 加熱用回路

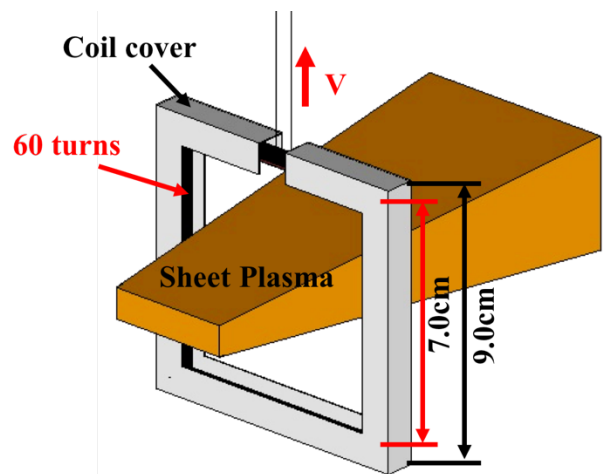


図3 反磁性ループコイル

り、524kHz の高周波を印可している<sup>7)</sup>。

**2.3 計測系** 計測には2つの装置を用いている。図1のZ軸方向からZ=850mmの位置に、磁力線から垂直方向のプラズマ熱エネルギーを計測する反磁性ループコイルがある。次に、Z=1100mmの位置に推力測定用の振り子式ターゲットが設置されている。前方Z=800mmの位置にあるカーボンシャッターが1秒間上昇することによりプラズマを後方に照射し、その際の反磁性ループコイルに流れた電流と、振り子式ターゲットの振れ幅より、垂直方向のプラズマ熱エネルギーと推力の算出を行う。図3に反磁性ループコイルの概念図を示す。ループコイルは長さ70mmの正方形のコイルとなっており、その巻き数は60巻となっている。蓄積されたエネルギーの時間微分は、ストークスの法則を用いて反磁性ループコイルで発生した起電力によって与えられる。旋回中央の垂直プラズマエネルギー密度は、時間積分によって以下のように計算される。

$$W_{\perp} = \frac{B_0 CR}{A\mu_0 SN} V_0 \quad [\text{J/m}^3] \quad (1)$$

ここで、 $B_0$ は外部磁束密度、 $R$ と $C$ は積分回路の抵抗とコンデンサーの静電容量、 $A$ はアンプの倍率、 $\mu_0$ は真空の透過率、 $S$ はコイルの面積、 $N$ は巻数で、 $V_0$ は積分回路からの出力電圧である<sup>8)</sup>。

図4に振り子式ターゲットの概念図を示す。振り子型ターゲットは、長さ100mm、幅150mm、厚さ0.3mmのモリブデンの板となっており、振り子の総重量は109gである。ターゲットの振れ幅は、ターゲットの後ろのレーザー変位計で測定し、推力を計算した<sup>9,10)</sup>。

### 3. 実験結果

図5にRF電力0W時の放電電流と垂直方向のプラズマ熱エネルギーの関係を示す。放電電流が上昇するごとにプラズマ熱エネルギーも上昇することから、正常に作動していることがわかった。次に、RF加熱を行なった際のプラズマ熱エネルギーを調べた(図6)。加熱時に得られたエネルギーから加熱なしのプラズマ熱エネルギーを引くことで、加熱電力毎の浸透エネルギーを算出した。図は黒のプロットがRF電極が50mm、赤のプロットが40mmとなっている。全ての放電電流でRF電極が40mmの方が、より加熱されていることがわかる。また、RF電力が300Wの場合が最も加熱効率が良いことがわかった。次に図7にRF電力と推力の関係を示した。放電電流が30, 40, 50Aの場合でも電極間隔が40mmの方が、推力が高い結果が得られた。しかし、放電電流30, 40Aにおいて、プラズマに浸透した熱エネルギーに比べて、推力の上昇率が低い、これは加熱によって上昇した垂直方向のエネルギーが平行方向の加速にうまく変換されていないと予想される。

### 4. まとめと今後の予定

本研究では、RF電極を変化させることによってシートプラズマにおけるICR加熱の影響を調べた。始めに、放電電流とRF電力が上昇する毎に垂直プラズマ熱エネルギー及

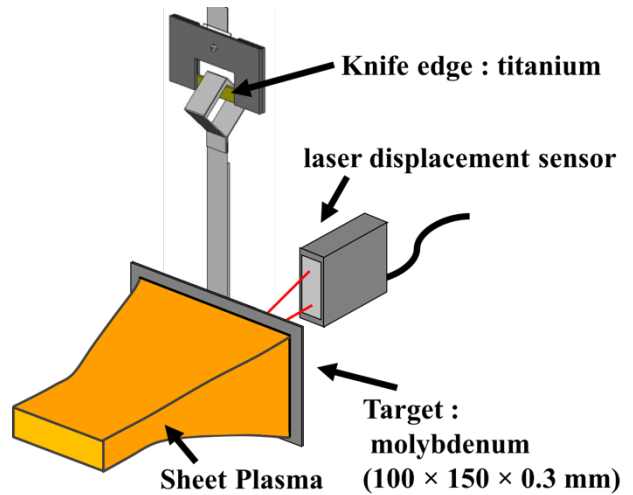


図4 振り子式ターゲット

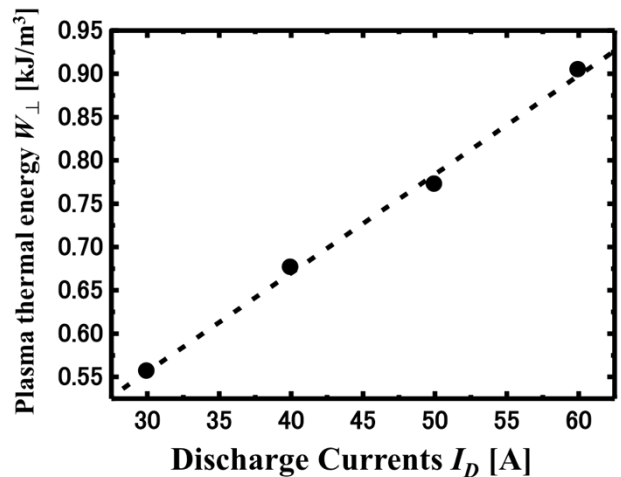


図5 放電電流とプラズマ熱エネルギーの関係

び推力は上昇傾向が見られた。その値は電極間隔が40mmの場合の方が大きい。しかし、プラズマ熱エネルギーと推力では同じ上昇率が見られず、プラズマに透過している熱エネルギーに比べ、推力が得られていない結果がでた。この原因としては、垂直方向に増加したエネルギーが平行方向のイオン加速へと上手く変換がされていないことが考えられる。今回得られたTPD-Sheet IVの推進性能を表1に示す。

表1 TPD-Sheet IVの推進性能

推進ガス	He
投入電力 [kW]	7~23
RF電力 [W]	0~300
推力 [mN]	1.1~5.9
比推力 [s]	840~4500
推進効率 [%]	10~86

以上の結果より、今後の予定としては、磁場発散と推力の関係を明らかにしていくことを目標とする。また、300W

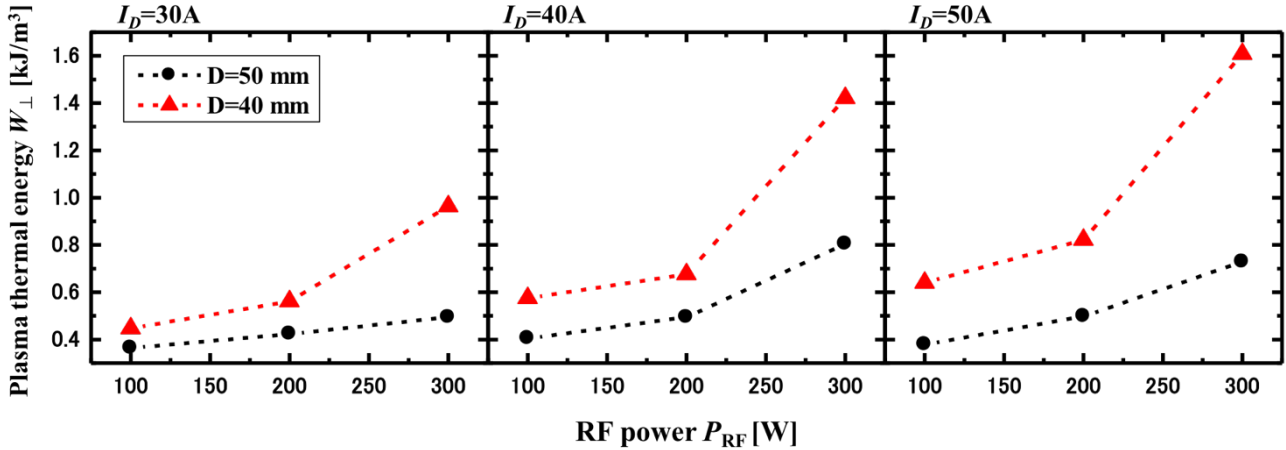


図6 RF電力とプラズマ熱エネルギーの関係

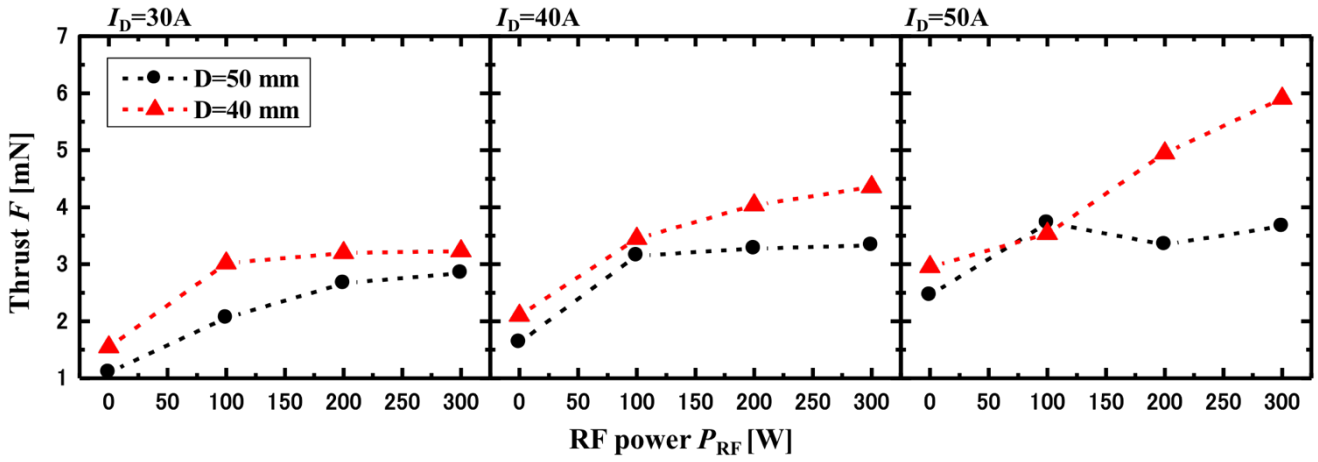


図7 RF電力と推力の関係

以上のRF加熱を目指し、真空容器の見直し及び設計が重要となってくる。さらに、宇宙への長期利用を考えると、無電極放電が必要となってくると考えられる。よってフィラメントレスの放電領域の設計も考えて行きたい。

5. 参考文献

- 1) A. Ando, K. Takahashi, Y. Izawa, K. Suzuki, Y. Hoshino, IEPC-2013-338, 33th Int. Electric Propulsion Conference, 2013.
- 2) A. Ando, JAXA research and development report. JAXA-RR-09-003, 2010 (in Japanese).
- 3) Benjamin W. Longmier, Jared P. Squire, Leonard D. Cassady, Maxwell G. Ballenger<sup>4</sup>, Mark D. Carter<sup>5</sup>, Chris Olsen<sup>6</sup>, Andrew V. Ilin<sup>7</sup>, Tim W. Glover<sup>8</sup>, Greg E McCaskill<sup>9</sup>, Franklin R. Chang Díaz, IEPC-2011-156, 32nd Int. Electric Propulsion Conference, 2011.
- 4) H. Toyama, M. Okabayashi and H. Ishizuka, Plasma Phys., 10, 319, 1968.
- 5) S. Miyake, T. Sato and K. Takayama, J.Phys.Soc. Japan, 27, 1611, 1969.
- 6) Y. Uesugi, T. Imai, H. Sawada, N. Hattori, S. Takamura, Vacuum, 59, 24, 2000.
- 7) T. Iijima, S. Hagiwara, Fusion Science and Technology. Vol.63, No. 1T, 417-419, 2013
- 8) Y. Amagishi, J. Phys. Soc. Jpn, 55, 2504, 1986.
- 9) D. Kuwahara, Y. Koyama, S. Otsuka, T. Ishii, H. Ishii, H. Fujitsuka, S. Waseda and S. Sshinohara, Plasma and Fusion Research, 9, 3406025, 2014.
- 10) T. Suzuki, N. Koyama, Y. Sugiyama, H. Sakoda, and H. Tahara, IEPC-2015-197, 34th Int. Electric Propulsion Conference, 2015.