

## STEP-2012-082

# 誘導結合プラズマを用いた電子源の大電力作動特性

○ 鳥井夏実（首都大学東京）、渡邊裕樹（宇宙航空研究開発機構）、笠上聡志、青柳潤一郎、竹ヶ原春貴（首都大学東京）

Recently, in order to achieve 1 N level of thrust by electric propulsion system, electron emission current performance of electron source needs to be improved. The inductively coupled plasma cathode (ICP/C) has been proposed as substitution of hollow cathode (H/C). In this study, to achieve a high electron emission current, the effects of radio-frequency (RF) power on electron emission characteristics were investigated. 7.0 A of electron emission current was obtained at 400 W of RF power with 13.56 MHz. In the range between 0 to 400 W of RF powers, electron emission current was linearly increased.

Key Words: Electric propulsion, Electron source, Cathode, Inductively coupled plasma, Radio frequency

### 1. 序論

近年、軌道間輸送や月・小惑星における有人探査での適用を目的とした電気推進機の大推力化が研究されており、候補に挙げられているのがホールスラストである。ホールスラストは推進剤を放電によってプラズマ化し、静電加速によって噴射し推力を得ている。動作には主陰極と中和器を担う電子源が必要であり、例として 100 A の電子放出性能が求められており、その大電流化が課題となっている<sup>1)</sup>。ここで、一般的に電子源にはホローカソード（Hollow Cathode: H/C）が使用されている。H/C は内部に熱電子放出を行う酸化陰極が挿入されており、酸化バリウム等の活性剤が含浸されている。特徴として低ガス流量と低電力で大電子電流を得ることができる反面、以下の問題点を抱えている。

- (1) 活性剤の劣化及び損耗による性能低下がある。
- (2) 活性ガスによる劣化を避けるため、厳重な管理が要求される。
- (3) ガス種や純度の制限が存在する。
- (4) 点火に際して行う予熱に用いるヒータの ON・OFF サイクルによる断線の可能性がある。

近年、これらの問題点を持たない電子源としてヘリコン波<sup>2)</sup>等の高周波放電を用いた電子源が注目されており、本研究では誘導結合プラズマを用いた電子源（Inductively Coupled Plasma Cathode: ICP/C）に着目した。ICP/C は無磁場、低電力で高密度のプラズマを得ることができるのが特徴である。また、ホールスラストの陰極へ適用した場合も動作や性能に影響が無いことは実証されている<sup>3)</sup>。しかし、H/C に比べて電子電流を得るための消費電力が高く、また最大電子電流性能も低いのが現状である。そこで、性

能向上を目的として ICP/C の BBM (BreadBoard Model) を製作し、形状変更試験を行うことで電子放出用のオリフィス形状、イオン捕集用の電極形状、プラズマ生成・維持に用いるコイルの巻き数からプラズマ点火性能と電子放出性能の向上に対する設計指針を得た<sup>4),5)</sup>。

設計指針に基づいて製作した放電室内径 20 mm と 40 mm の ICP/C EM (Engineering Model) を用いて実験を行った結果、それぞれ高周波電力 140 W、200 W にて電子電流 4 A を得た。また、20 mm に比べ、40 mm ICP/C EM は大高周波電力における熱の影響を受けにくい結果が確認された<sup>6)</sup>。

### 2. 研究目的

本研究では、高周波電力による熱の影響を受けにくいと考えられる 40 mm ICP/C EM を用い、大高周波電力で ICP/C を作動させた時の電子放出性能を取得する。高周波電力に対する電子電流値から、大電力での動作性能の傾向を確認し、さらなる大電子電流を得るための指針を得ることを目的としている。

### 3. 実験装置および手順

#### 3.1. 誘導結合プラズマを用いた電子源 (ICP/C EM)

ICP/C EM の放電室内径が 40 mm である 40 mm ICP/C EM の構造を図 1、ICP/C の放電室を金属製とした ICP/C Metal Body (MB) の構造を図 2、これらに ICP/C BBM を含めた構成一覧を表 1 に示す。まず ICP/C BBM と EM について述べる。プラズマを生成・維持する放電室はアルミナ製の円筒形状で、その下流に電子放出用のオリフィスがある。放電室内部にはタングステン製のイオンコレクタと呼ばれ

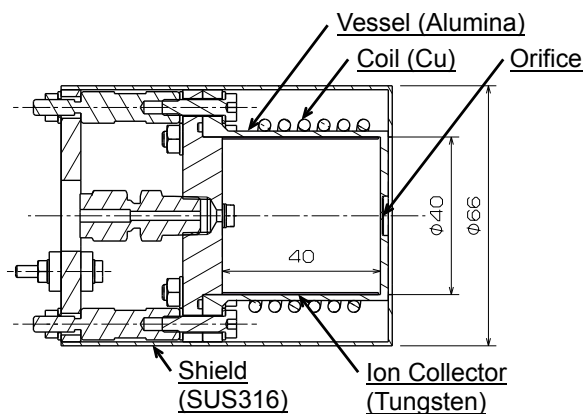


図1 ICP/C EM 概要図

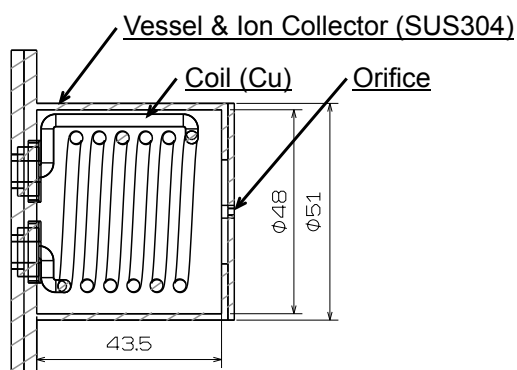


図2 ICP/C MB 概要図

表1 各 ICP/C の構成一覧

		ICP/C BBM	40 mm ICP/C EM	ICP/C MB
Discharge Vessel	Diameter (mm)	40	40	48
	Length (mm)	25	40	43.5
Orifice	Diameter (mm)	2	1.7	1.7
	Length (mm)	0.5	0.5	1.5
Ion Collector		Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical
Coil		5 turns	4 turns	6 turns

る円筒形状の電極が内壁に沿うように挿入されており、放出した電子と同量のイオンを捕集する。またイオンコレクタには一部に開口部があり、渦電流を抑制し、また開口部で放電が起きることで ICP/C 単体でプラズマ点火が可能となっている。また、イオンコレクタの寸法はそれぞれの放電室内径、放電室長さと同じ。放電室外部には銅製のコイルが巻いてあり、高周波電流を流すことでプラズマの生成・維持を行っている。なお、コイルの冷却は行っていない。ICP/C EM の設計においては、ICP/C BBM での各部の変更によって得られたプラズマ点火性能と

電子放出性能の兼ね合いにより決定されている。イオンコレクタは図3に示す2種類の形状があり以下のようにになっている。

(a) 円筒形状：プラズマ点火特性が良い。

(b) 柱形状：円筒形状よりイオン捕集面積が大きい。ICP/C EM および ICP/C BBM では円筒形状を採用している。オリフィス直径は電子放出における最適値が 1.0~2.0 mm であると考えられるため 1.7 mm とした。オリフィス長さは短いほど電子放出性能が向上するため 0.5 mm とした。また、外部コイルの巻き数は増やすほどプラズマ点火性能と電子放出性能が向上するが、同時に抵抗成分も増加し熱損失が増えるため、兼ね合いから最適な巻数を選択した<sup>4),5)</sup>。

また、今回の実験においては、従来のアルミナ製の放電室である ICP/C に加え、図2で示した金属製の ICP/C MB についても実験を行った。ICP/C MB の特徴として、放電室が SUS304 であり、放電室内部にイオンコレクタが挿入されていない点が挙げられる。イオンコレクタの役割は放電室が担っており、放電室内壁がイオンを捕集する。また、放電室が透磁率の高い素材となったため、コイルは放電室内部に設置されている。ICP/C MB の長所として、熱膨張による構造破壊が起きにくいことが挙げられる。従来のアルミナ製の放電室では内部に金属、外部に非金属の組み合わせであったために、熱膨張率の違いから熱応力に対して脆弱であったが、ICP/C MB は金属で構成されているため、熱膨張率の違いによる破壊が起きにくい。その反面、コイルがプラズマに暴露され、スパッタリングされるなどの問題点を抱えている。ただし、コイルを絶縁体で覆うなどすることで対策は可能である。今回は動作確認のみが目的のため、絶縁体のコーティングはなく純銅をそのまま使用している。

### 3.2. 実験装置概要

実験装置の概要を図4と図5に、用いた各実験機器の性能については表2に示す。実験は2つの実験

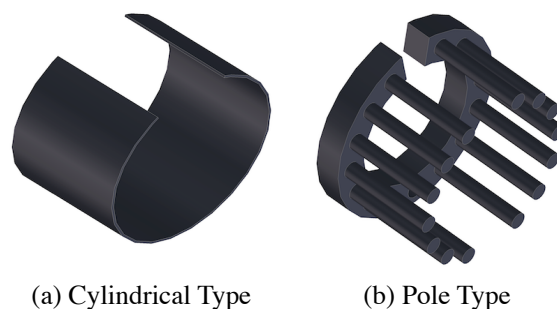


図3 イオンコレクタ形状

環境で行った. 今回の大電力作動実験においては, (a) 高周波電力 1 kW, 周波数 13.56 MHz の高周波電源, (b) 13.56MHz 以外の周波数の高周波電源, この 2 つが必要であったため, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙科学研究所 (ISAS) の実験設備で実験を行なった. この実験条件を図 4 に示し, 以降の呼称を ISAS 実験条件とする. また, ICP/C MB の動作実験は図 5 に示した首都大学東京で行い, これを TMU 実験条件とする. 実験は真空環境で行い, ISAS 実験条件では直径 0.7 m, 長さ 4.9 m の円筒形状の真空槽, TMU 実験条件では直径 1.6 m, 長さ 3.2 m の円筒形状の真空槽で行い, 内部はクライオポンプを用いることで, ICP/C の定常動作における作動ガス導入時もそれぞれ  $7.0 \times 10^{-3}$  Pa,  $1.8 \times 10^{-4}$  Pa の高真空状態に保っている. 真空槽内部には ICP/C および, 一辺が長さ 200 mm, 厚さ 0.5 mm の正方形のステンレス板であるアノード電極を設置し, ICP/C のオリフィスとアノード電極間の距離を 50 mm の状態で固定した.

次に各実験機器について述べる. ICP/C にはガス流量  $\dot{m}$  を調整するマスフローコントローラ (MFC) を介し, 作動ガスのキセノンが電子源内部に供給されている. また電子源の直前にはガス絶縁器を導入し, 配管内部でのプラズマ生成を抑制している. MFC は MFC 1 に Aera Japan 製の FC-260J, MFC 2 に HORIBA STEC 製の SEC-Z512KX の 2 種類を用いている. なお, キセノンガスにおいては  $1.0 \text{ SCCM} = 0.097 \text{ mg/s}$  である.

また, 高周波電源 (RFG) はインピーダンスマッチング回路 (Matching Box) を介して ICP/C のコイルに接続されており, 高周波電力  $P_{RF}$  が導入されている. 高周波電源は ISAS 実験条件において, 13.56MHz での実験では RFG 1 のサムウエイ製:T161-6013H-TN, マatchingボックスはサムウエイ製:T161-6013H-TN, 8MHzの実験では RFG 2 のサムウエイ製:T146-6756A, マatchingボックスはサムウエイ製:T020-6326A を用いた. TMU 実験条件では RFG 3 の Ion Tech 製: RF5-S と Matchingボックスに Ion Tech 製: AM-5 & AMPS-2A を用いた. 全ての実験条件で電源内部において進行電力と反射電力を測定しており, インピーダンスの Matching 回路は, 2 個の変可コンデンサによって構成されている. 全ての実験条件において, Matching をとることで反射電力は 0 W となっており, 高周波電力と進行電力は等しい.

実験において, 直流電源 (PS Anode) によってアノード電極に電圧を印加し, ICP/C から電子を引き出

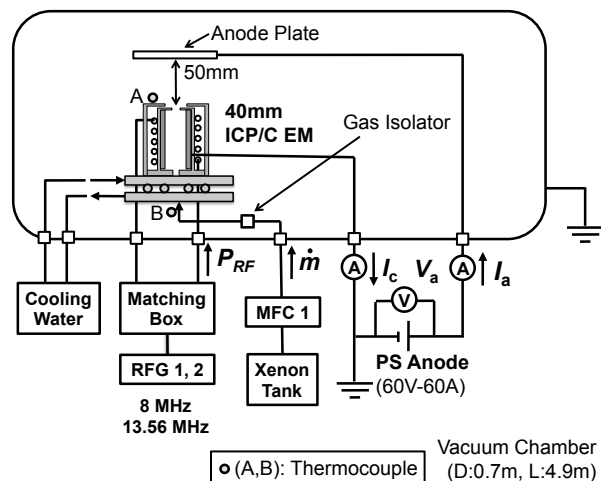


図 4 ISAS 実験条件概要

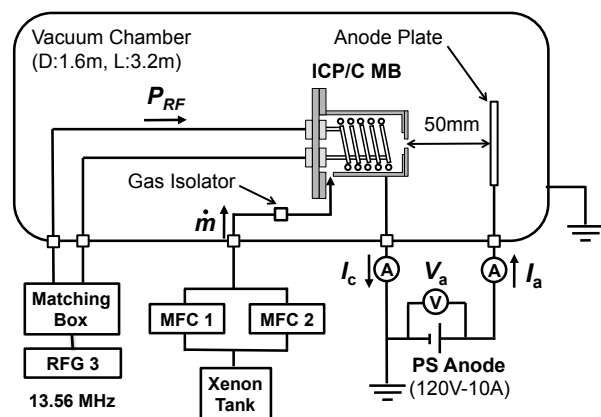


図 5 TMU 実験条件概要

表 2 実験機器の性能一覧

(a) Mass Flow Controller			
	Calibration gas	Control range	Accuracy
MFC 1	Xenon	0.5 - 10.0 SCCM	$\pm 0.2$ SCCM
MFC 2	Xenon	0.04 - 2.0 SCCM	$\pm 0.01$ SCCM

(b) Radio Frequency Generator			
	Frequency	Output Power	Regulation mode
RFG 1	13.56 MHz	0 - 1000 W	CW
RFG 2	5 - 15 MHz	0 - 1000 W	CW
RFG 3	13.56 MHz	0 - 500 W	CW

(c) DC Power Supply of Anode Plate			
	Output Voltage	Output Current	Regulation mode
PS Anode 1	0 - 60 V	0 - 60 A	CV, CC
PS Anode 2	0 - 120 V	0 - 10 A	CV, CC

している. ISAS 実験条件では直流電源に PS Anode 1 の菊水電子工業製: PAD60-60L, TMU 実験条件では PS Anode 2 の NISTAC 製: NH-120/OMS を用いた. それぞれ, レギュレーションモードを CV にして動作させている. また, イオンコレクタは電流計を介

してグラウンドに接続している。

### 3.3.電子放出実験手順

次に実験手順について示す。実験は電子放出特性について調べた。電子放出性能の取得では、一定のガス流量と高周波電力に固定し、アノード電圧を0Vから上げて電子を放出させ、そのときのアノード電流 $I_a$ とイオンコレクタ電流 $I_c$ を記録した。

## 4. 結果および考察

まず、ICP/Cの電子放出特性について述べる。図6は高周波電力 $P_{RF} = 40\text{ W}$ 、ガス流量 $\dot{m} = 0.2\text{ mg/s}$ のときの典型的な電子放出特性である<sup>6)</sup>。横軸にアノード電圧 $V_a$ 、縦軸にアノード電流 $I_a$ となっている。ICP/Cではあるアノード電圧においてアノード電流は最大値をとり、以降は電圧に関わらず一定になる。この飽和点でのアノード電流を飽和電子電流 $I_{sa}$ として以降は述べる。また、ICP/Cの電子放出において、最大飽和電子電流を得るための最適なガス流量が存在することが確認されており、今回の実験は全てそれぞれの最適流量で測定を行なっている。40 mm ICP/Cでは過去の実験結果より $\dot{m} = 0.2\text{ mg/s}$ にて実験を行った<sup>6)</sup>。

次に大電力作動特性について述べる。高周波電力による飽和電子電流への影響を調べるため、40 mm ICP/C EMで最大飽和電子電流が得られた $\dot{m} = 0.2\text{ mg/s}$ にガス流量を固定し、高周波電力を0~400 Wまで変化させた結果を図7に、図7の0~120 Wの範囲を拡大したものを図8に示す。それぞれ、横軸に高周波電力 $P_{RF}$ 、縦軸に最大飽和電子電流 $I_{sa}$ をとっている。図7上において、TMU実験条件で行った測定値を40 mm ICP/C EM (TMU)、ISAS実験条件のうち13.56 MHzで行った測定値を40 mm ICP/C EM (13.56 MHz)、8 MHzで行ったものを40 mm ICP/C EM (8 MHz)としてプロットしてある。また、今回得られた電子電流値を線形近似し、その近似直線を図7、8上に示した。過去のTMU実験条件では、 $P_{RF} = 0\sim 200\text{ W}$ の範囲において高周波電力に対する電子電流の比例関係が確認されているが、今回のISAS実験条件においても同様の比例関係が確認され、また $P_{RF} = 400\text{ W}$ の電力で $I_{sa} = 7.0\text{ A}$ を達成した。ICP/Cが大電力においても電力に比例した電子電流を得ることができたと言える。

また、図8において13.56 MHzと8 MHzを比較すると、高周波電力に対する最大飽和電子電流の線形近似はほぼ同様の結果となったが、13.56 MHzに対し

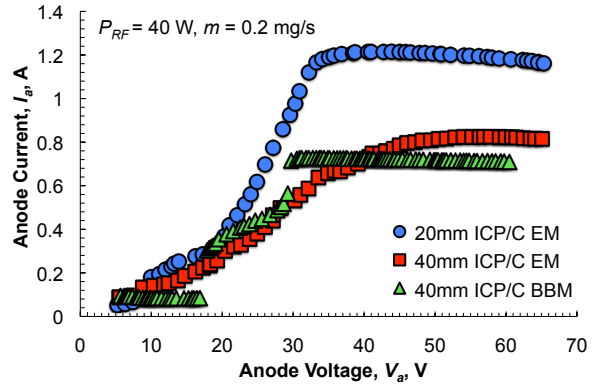


図6 アノード電圧に対するアノード電流

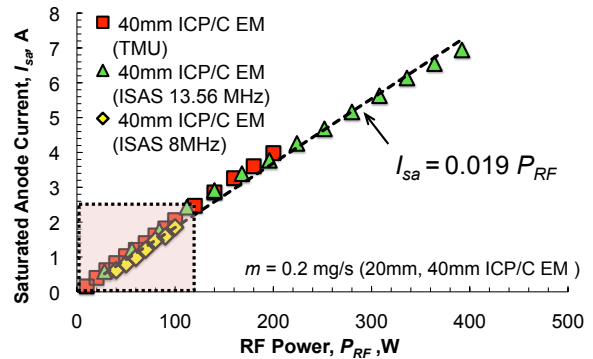


図7 高周波電力に対する最大飽和電子電流

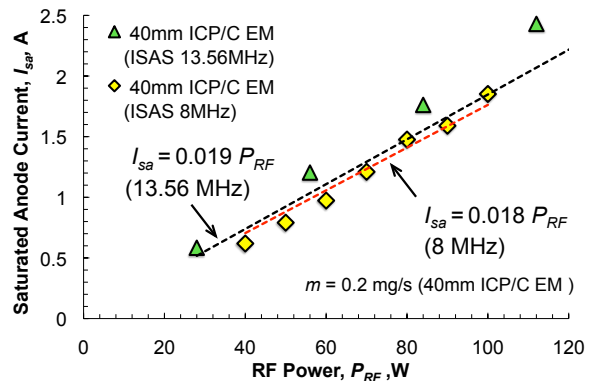


図8 高周波電力に対する最大飽和電子電流

て8 MHzの高周波電力あたりの電子電流値がわずかに下がったことで電子放出性能自体は低下している。ここで、周波数を変更することで起きる影響として表皮厚さが変化することが挙げられる。表皮厚さは高周波の振動電場によって粒子衝突が起き、加熱されるなどの形で電力が吸収される領域を指す。高周波電源による駆動角周波数 $\omega$ がプラズマの電子と中性粒子の衝突周波数 $\nu_{en}$ よりも小さい時、表皮厚さ $\delta$ はプラズマの直流導電率 $\sigma_{DC}$ からなる以下の式で求まる<sup>7)</sup>。

$$\sigma_{DC} = \frac{e^2 n_0}{m_e (v_{ei} + v_{en})} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma_{DC}}} \quad (2)$$

ここで、直流導電率  $\sigma_{DC}$  を求めるため、ICP/C BBM において行ったプラズマ診断から各値を代入する。高周波電力  $P_{RF} = 20$  W, ガス流量  $\dot{m} = 0.15$  mg/s のときに、内圧  $P = 15$  Pa, 電子温度  $T_e = 1.27$  eV, 電子数密度  $n_e = 9.51 \times 10^{18}$  m<sup>-3</sup> である<sup>5)</sup>。また、これらの値から電子と中性粒子の衝突周波数  $v_{en} = 2.6 \times 10^8$  Hz と電子と1価の正イオンの衝突周波数  $v_{ei} = 1.7 \times 10^8$  Hz と求まり、これは駆動角周波数  $\omega$  よりも十分に大きく前提条件を満たす。以上より、式 (1), (2) から 13.56 MHz での表皮厚さは  $\delta = 5.5$  mm, 8 MHz では  $\delta = 7.1$  mm と求まる。8 MHz に周波数を下げることによって表皮厚さが大きくなり、電力吸収体となる加熱領域が増えることによる電子放出性能の変化を期待したが、今回の高周波電力  $P_{RF} = 0 \sim 120$  W の範囲では影響を確認できなかった。

また、今回の大電力作動実験における高周波電力  $P_{RF} = 500$  W 投入時に 40 mm ICP/C EM の放電室が破損する事態が発生した。図 9 は破損後の 40 mm ICP/C EM である。また、初期状態と実験時のイオンコレクタの概要図を図 10 に示す。図 10 は左側に初期状態のイオンコレクタ、右側は今回の実験時における補助リング併用時のイオンコレクタである。図において青色はタングステン、赤色は SUS304 を表している。補助リングの形状はイオンコレクタと同じだが、軸方向の長さがイオンコレクタの 40 mm に対し 10 mm となっている。この補助リングは、初期状態のイオンコレクタについているネジ穴部分が破損したため、補助リング上に同形状のネジ穴を作り、イオンコレクタと放電室の間に挟むことで、補助リングを介して放電室外部のネジとイオンコレクタを電気的に接続するために用いた。今回の放電室の破損は、プラズマ生成に用いた高周波の変動磁場によって内部の金属が誘導加熱されたことによって起きたと考えられるが、イオンコレクタはタングステン製であり透磁率が低く、ほとんど誘導加熱されないため、加熱されたのは SUS304 製の補助リングであると思われる。そのため、通常の補助リングのない ICP/C EM では高周波電力  $P_{RF} = 500$  W で熱応力による破損は起きないと言える。ただし、今後のさらなる大電力投入時においては、電子電流による直流成分のジュール加熱の影響が大きくなるため、さらなる熱設

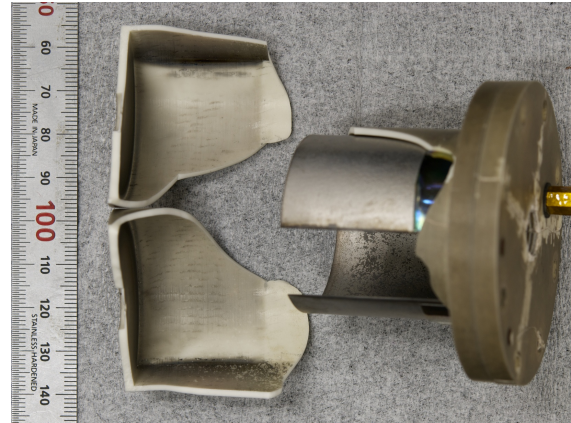


図 9 大電力作動時における放電室破損

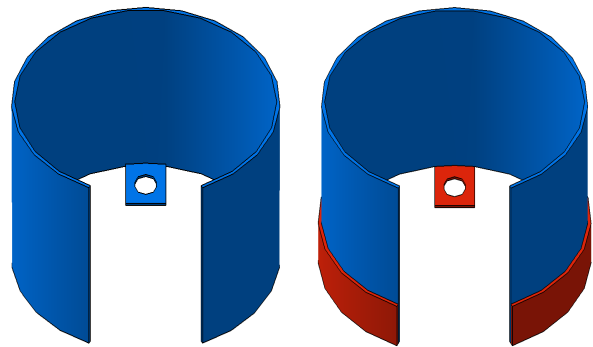


図 10 初期状態と実験時のイオンコレクタ概要

計や構造の見直しは必要だと考えられる。

そこで、熱応力による破壊が起きにくい構造として、金属製の放電室を用いた ICP/C を考案した。それが ICP/C MB である。図 11 は ICP/C MB の電子放出特性となっており、横軸にアノード電圧  $V_a$ , 縦軸にアノード電流  $I_a$  となっている。また、ICP/C MB の動作は高周波電力あたりの飽和電子電流が最大となったガス流量  $\dot{m} = 0.4$  mg/s にて性能を取得している。ICP/C MB の電子放出特性の特徴として、電子電流が飽和するアノード電圧が従来の ICP/C よりも高くなった。また、アノード電流が 40 mm ICP/C EM の  $I_a = 0.8$  A に比べ  $I_a = 1.1$  A と向上したが、これはイオン捕集面積が大きいためと考えられる。今後は、プラズマに暴露されている内部コイルの保護や、より大電力での動作確認などが必要だと思われる。

ここまで得られた電子放出時の ICP/C の性能を評価するために、ICP/C ごとの電子生成コスト  $C_e$  とガス利用ファクタ  $U$  について示したのが図 12 である。横軸に ICP/C の種類と実験条件を示し、縦軸の第 1 軸に電子生成コスト、第 2 軸にガス利用ファクタをとっている。各値は高周波電力  $P_{RF} = 40$  W 時の最大飽和電子電流取得時の値を用いて計算を行った。な



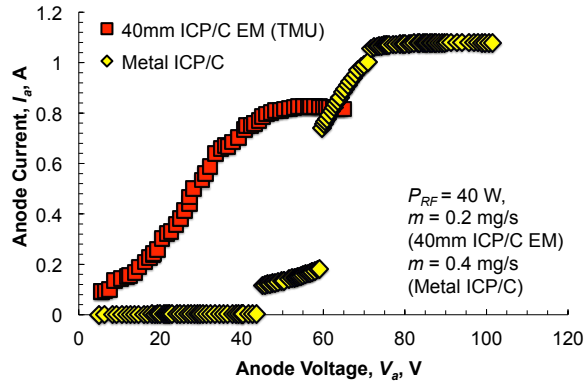


図 11 大電力作動時における放電室破損

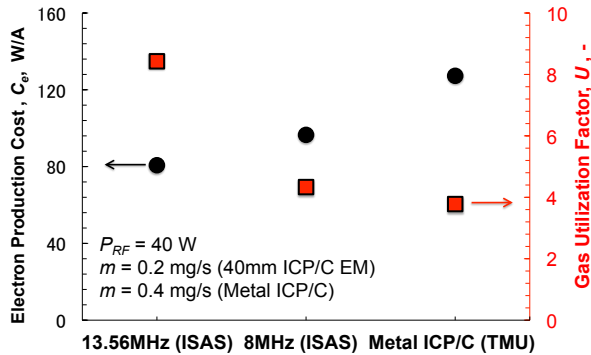


図 12 電子生成コストとガス利用ファクタ

お、電子生成コスト  $C_e$  とガス利用ファクタ  $U$  は以下の式より求まる<sup>8)</sup>。

$$C_e = \frac{I_a V_a + P_{RF}}{I_a} \quad (3)$$

$$U = \frac{I_a}{\dot{m}} \quad (4)$$

ここで  $\dot{m}$  の単位は等価電流値 [Aeq] である。この単位は作動ガスが全て一価のイオンに電離したときに得られる電流値で、キセノンの場合では 1.0 SCCM = 0.072 Aeq となる。今回の実験における電子生成コストは ICP/C MB が最も高い  $C_e = 127$  W/A であり、ISAS 実験条件での 13.56MHz の 40 mm ICP/C EM が  $C_e = 81$  W/A と最も低かった、また、ガス利用ファクタも同様の傾向であり、ISAS 実験条件での 13.56MHz の 40 mm ICP/C EM が最も高い結果となった。

## 5. 結論

ICP/C の大電流化を目的とし、40 mm ICP/C EM の大電力作動実験と ICP/C MB の作動実験により電子放出性能を取得し、評価を行うことで以下の結論を得た。

- (1) 高周波電力  $P_{RF} = 400$  W にて最大飽和電子電流  $I_{sa} = 7.0$  A を達成した。
- (2) 高周波電力  $P_{RF} = 0 \sim 400$  W において、高周波電力に対する電子電流の比例関係が一定の傾きであると確認した。
- (3) 金属放電室の ICP/C において従来の ICP/C と同様の電子放出特性が確認された。

以上より、さらなる大電子電流取得のためには、熱を考慮した構造の改善を行った上で、より大電力を投入することで可能である。

本研究を実施するにあたり、宇宙科学研究所名誉教授 栗木恭一 博士には新たな発想と多大な助言を頂いた。また、実験の実施にあたっては、JAXA/ISAS 船木一幸 准教授と長岡技術科学大学 黒澤昌弘 氏に多大なるご支援とご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 山本直嗣, 宮坂武志, トニーションヘル, 横田茂, 尾崎敏之, 大須賀弘行, 田原弘一, 小紫公也, 小泉宏之, 船木一幸: In space propulsion としての大型ホールスラストの検討, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-017, 2012.
- 2) B. Longmier, N. Hershkowitz: Improved operation of the nonambipolar electron source, *Rev. Sci. Instrum.*, 79, 093506, 2008.
- 3) Satoshi Kasagami, Takuji Okuma, Naoji Yamamoto, Hiroki Watanabe, Takuya Nakabayashi, Taichiro Tamida, Hiroyuki Osuga, Junichiro Aoyagi and Haruki Takegahara: Feasibility Study on Hall Thruster with Inductively Coupled Plasma Cathode, *Advances in Applied Plasma Science*, No.8, pp.27-30, 2011.
- 4) Hiroki Watanabe, Takuya Nakabayashi, Satoshi Kasagami, Junichiro Aoyagi and Haruki Takegahara: Experimental Investigation of Inductively Coupled Plasma Cathode for the Application to Ion Thrusters, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2011-5989, San Diego, USA, Jul. 31 - Aug. 3, 2011.
- 5) Hiroki Watanabe, Takuya Nakabayashi, Satoshi Kasagami, Junichiro Aoyagi and Haruki Takegahara: Study on Ignition and Electron

Emission Characteristics of Inductively Coupled Plasma Cathode, *AeroSpace Technology Japan*, Vol.10 No. ISTS 28, p. Pb\_37-Pb\_4, 2012.

- 6) 鳥井夏実, 渡邊裕樹, 笠上聡志, 太田知里, 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴: 誘導結合プラズマを用いた電子源の性能向上およびスケールアップに関する研究, 平成 24 年度宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2012-4431, 2012
- 7) 菅井秀郎: プラズマエレクトロニクス (インターユニバーシティ), オーム社, 2000.
- 8) Hiroki WATANABE, Asami OKUTSU, Takuji OKUMA, Junichiro AOYAGI and Haruki TAKEGAHARA: Feasibility Study on Inductively Coupled Plasma Cathode for Ion Engines, *Frontier of Applied Plasma Technology*, Vol. 2, Jul. 2009, pp. 25-30, ISSN 1883-5589.