

10cm 級マイクロ波放電式イオンエンジンの高比推力化に関する研究

Study on high specific impulse of 10 cm class microwave discharge ion thruster

○清水 裕介(東大・院)・西山 和孝・月崎 竜童・國中 均(宇宙航空研究開発機構)

○Yusuke Shimizu (The University of Tokyo)・Kazutaka Nishiyama・Ryudo Tsukizaki・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

This paper presents the new grid design of the μ 10HIsp microwave discharge ion thruster, which is currently under development for a Japanese Trojans asteroid probe. A software “JIEDI” simulated the performance under the condition that new designed grid was applied to μ 10HIsp in order to prevent electron backstreaming from the neutralizer and to improve the ion transparency, which were problems for the primary μ 10HIsp grid. The result shows that the larger tapered accelerator grid holes at low ion density position make it possible to adapt the new designed grid to μ 10HIsp. Performance evaluation experiment using real machine confirmed improvement of electron backstreaming suppression performance and ion withdrawal performance in the new designed grid compared with the primary grid. However, it turned out that the plasma becomes unstable with the combination of the new type discharge chamber and the new designed grid.

記号の説明

- ε_0 : 真空の誘電率 [$\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^4\text{A}^2$]
 η_u : 推進剤利用効率
 g : 重力加速度 [m/s^2]
 e : 電荷素量 [C]
 V_s : スクリーン電圧 [V]
 m_i : イオン質量 [kg]
 I_i : グリッド部に移送されてきたイオン電流 [A]
 I_s : スクリーングリッドから引き出されたイオン電流 [A]

1. 研究背景

マイクロ波放電式イオンエンジンは、マイクロ波放電により放電室内でキセノンを電離し、高電圧が印加された加速グリッドを用いて、キセノンイオンを静電的に噴射して推力を発生する電気推進器である(図1)。放電用ホローカソードを必要としないため、システムがシンプルであり、ヒータ断線や酸化による劣化の心配がないため耐久性や取扱いに優れている。イオンエンジンは他の推進器に比べ、推進器の燃費の指標である比推力が高く、深宇宙探査機の主推進システムとしてよく用いられている。比推力とは、単位質量の推進剤で単位推力を発生させ続けられる秒数を意味するもので、次元は秒である。イオンエンジンの比推力 I_{sp} は以下のように表される。

$$I_{sp} = \frac{\eta_u}{g} \sqrt{\frac{2eV_s}{m_i}} \quad (1)$$

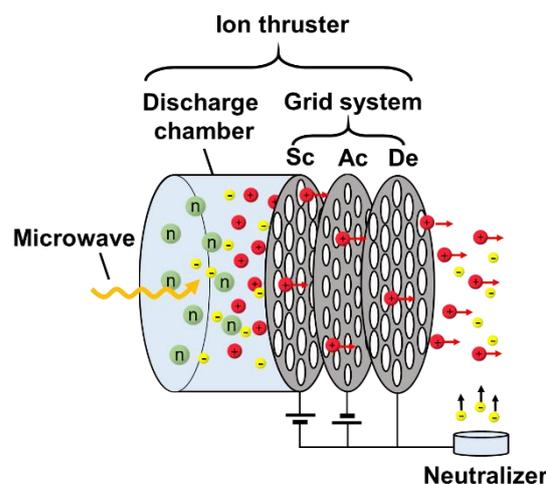


図1 イオンエンジンの概要

「はやぶさ」, 「はやぶさ2」に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジン μ 10 の比推力は約 3,000 秒であり、日本の深宇宙探査に大きく貢献しているが、現在 JAXA で計画されている木星トロヤ群小惑星探査¹⁾のような、より長距離・長期間の航行を実現するためには、比推力をより高くする必要がある。そのため JAXA では μ 10 の宇宙実績を活かし、高比推力マイクロ波放電式イオンエンジン μ 10HIsp の開発に取り組んでいる。 μ 10 用のイオン源と中和器をそのまま活用し、式(1)より加速グリッドに印加する電圧を μ 10 の 5 倍である 7.5 kV にすることで高比推力化を図る方針である。 μ 10

の性能が推力約 10 mN, 比推力約 3,000 秒であるのに対し, $\mu 10\text{HIsp}$ の目標性能は推力 25 mN, 比推力 7,000 秒となっている。

本研究では $\mu 10\text{HIsp}$ の目標性能の実現を最終目標とする。

2. 研究目的

過去に林らによって $\mu 10\text{HIsp}$ の基礎研究がなされており²⁾, DC ブロック (マイクロ波伝送系) やガスアイソレータ (推進剤ガス系) の絶縁技術が確立されている。加速グリッドに関しても高比推力仕様のものが新たに設計された。表 1 に $\mu 10$ グリッドと当時

設計された $\mu 10\text{HIsp}$ グリッド (以下, 初代グリッドとする) の諸元を示す。当時は放電室の生成イオン密度が低かったことから, シースが厚くなってプラズマが不安定になることを避けるために, $\mu 10$ に比べて Sc グリッドの孔径と厚さが大きくなっている。またグリッド開口率を同等にするために, 孔数が 1/5 程度になっている。

初代グリッド設計の際には三次元イオンビーム解析コード「igx」が用いられ, Sc 電圧 15 kV, Ac 電圧 -500 V において, Sc 電流 140mA, Ac 電流 0.14mA 以下を目標値として設計された。しかし実験では, Sc 電流 150mA, Ac 電流 20mA が計測された²⁾。Sc 電流が大きく計測された理由として, 中和器からの電子と Ac グリッドからの二次電子の逆流が考えられており, Ac 電流が大きく計測された理由として, イオンビームの直接衝突が考えられている³⁾。

現在は当時に比べ, $\mu 10$ イオン源のイオン生成性能が向上しており⁴⁾⁵⁾, 加速電圧も 15 kV から 7.5 kV に再設定されているため, 新たにグリッドを設計する必要がある。

本研究では, 初代グリッド設計の問題点を考慮し, かつ, 目標性能を実現する新たなグリッド設計案を数値解析で導き出し, 実機での性能評価を行った。

表 1 $\mu 10$ および $\mu 10\text{HIsp}$ 初代グリッド諸元

	$\mu 10$ (はやぶさ 2)	$\mu 10\text{HIsp}$ (初代)
孔径 (Sc / Ac / De) [mm]	3.05 / 1.5 / 2.8	7.0 / 4.2 / 6.0
厚さ (Sc / Ac / De) [mm]	0.8 / 1.0 / 1.0	1.5 / 3.0 / 1.5
孔数	855	163
加速電圧 [V]	1,500	15,000

3. 数値解析

3.1 解析ツール $\mu 10\text{HIsp}$ の加速部解析には「イオンエンジングリッド損耗解析ツール JIEDI (JAXA Ion Engine

Development Initiative)」(以下, JIEDI ツール)を用いた。JIEDI ツールとは, 多孔からなるイオンエンジン加速部の 1 孔に着目し, そこで引き起こされるグリッド損耗とイオン加速系の寿命評価を目的として開発されたツールである⁶⁾。初代グリッド設計時は, この JIEDI ツールはまだ開発されておらず, 前述のとおり igx を用いて設計が行われた。JIEDI ツールは特定の時刻における電位, イオンビームの流れ, グリッド電流, 損耗率などを計算することができる。

3.2 設計指針 初代グリッド設計の問題点は, 中和電子の逆流とイオンビームの直接衝突であった。

中和電子の逆流は, Ac グリッドに印加された負電圧が形成する孔中の空間電位の壁によって防がれる。しかし孔の中心に近いほどグリッド電圧の影響は小さくなるため, 中心における空間電位はグリッドに印加した負電圧よりも高い電位になる。また孔中には正の電荷を帯びたイオンが存在するため, 空間電位はさらに上昇する。初代グリッドは 1 孔が大きいため, 孔中心におけるグリッド電圧の影響が非常に小さく, また 1 孔あたりの正イオンの量が多いため, 中和電子の逆流を防ぐほどの負電位が保てなかった。このことから, 新設計では孔の大きさを小さくすることで, 中和電子の逆流を防ぐ。

イオンビームの軌道は, イオン密度の大小に依存する⁷⁾。 $\mu 10$ イオン源には図 2 のように径方向にイオン密度分布が存在しているため, 同一グリッド上でも孔によってビームの軌道が異なる。ビームが Ac グリッドに直接衝突する場合, 単純に Ac グリッド孔を大きくすれば回避できるが, 大きくしすぎると中性粒子が漏れ出てしまい, 推進剤利用効率の低下, すなわち比推力の低下につながる。したがって新設計では, イオンビームの直接衝突が生じやすいイオン密度が小さい孔において, Ac 孔をわずかに大きくし, ビーム軌道に沿ったテーパ形状にすることでビームの衝突を回避する。

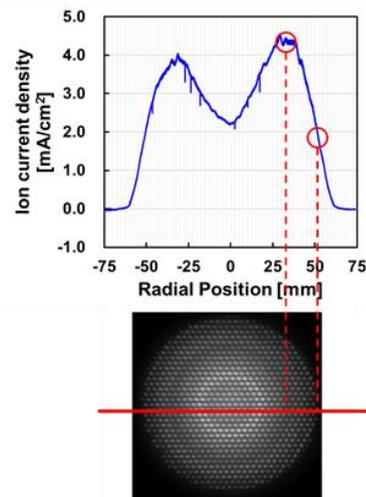


図 2 $\mu 10$ 下流 20 mm におけるイオン電流密度分布

3.3 解析条件 図3にグリッド設計値を示す。孔を小さくするという指針から、 $\mu 10$ のグリッドをベースとして用いることにした。Sc-Ac間距離は、グリッド材であるカーボン複合材の絶縁破壊強度（約35 kV/cm⁸⁾）を超えないように設定している。イオン密度が小さい孔では、Ac孔径を0.4 mm大きくし、Acでは15°、Deでは10°のテーパ加工を施した。

電流値には、図2の赤丸で示した最大密度と最小密度を用い、2孔での計算を行った。以下では各孔を「最大電流孔」、「最小電流孔」と呼ぶ。

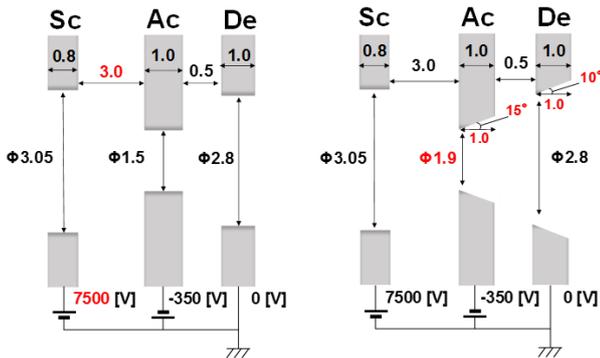


図3 $\mu 10$ HIsp グリッド新設計案
(左：最大電流孔，右：最小電流孔)

3.4 解析結果（性能） 図4に各孔におけるイオンビームの軌道を示す。各孔ともAcおよびDeグリッドへの直接衝突が見られず、イオンビーム軌道が最適となっている。

また、表2にイオン透過率を示す。イオン透過率とは、放電室で生成されグリッド部に移送されたイオンに対して、実際に引き出されたイオン（Scグリッドで損失しなかったイオン）の割合(I_s/I_f)のことである。表2には比較対象として、「はやぶさ2」でのイオン透過率と、 $\mu 10$ HIspの初代グリッドを現在のイオン源に適応した場合のイオン透過率も示している。新設計では「はやぶさ2」と同程度のイオン透過率となっており、初代グリッドよりも高い推力を発生させることができると予想される。

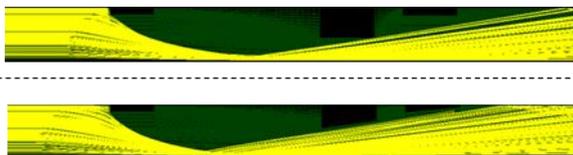


図4 イオンビーム軌道計算結果
(上：最大電流孔，下：最小電流孔)

表2 イオン透過率計算結果

	Maximum current hole	Minimum current hole
$\mu 10$ HIsp (new)	81.5 %	93.0 %
$\mu 10$ HIsp (primary)	72.4 %	86.0 %
$\mu 10$ (HAYABUSA2)	81.7 %	92.7 %

3.5 解析結果（寿命） 図5に新設計グリッドの作動直後および作動50,000時間後のAc・Deグリッド形状を示す。どちらも作動50,000時間後も構造的な寿命は迎えないことがわかる。またAcの上流側が比較的損耗しているが、これは、Sc-Acグリッド間距離がAc-Deグリッド間距離よりも大きいため、Sc-Acグリッド間で生成される電荷交換（CEX）イオンの量が多く、Acの負電位に引き寄せられて上流面で衝突しやすいことが理由として考えられる。

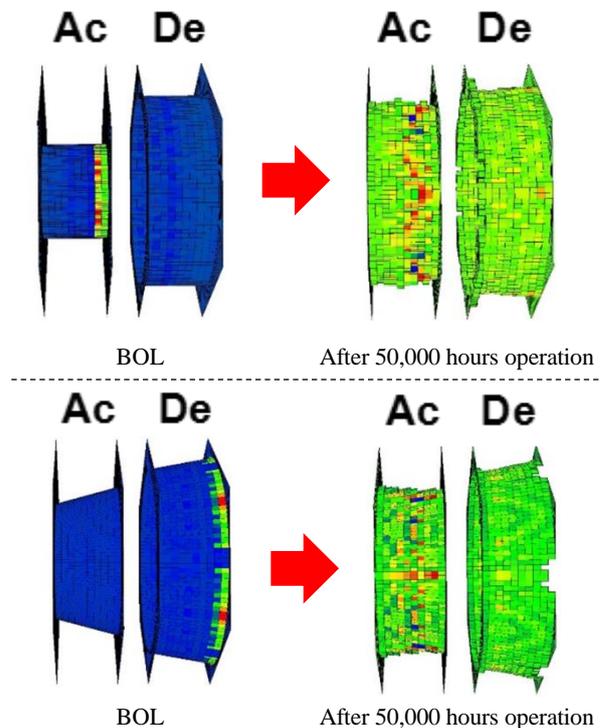


図5 Ac・Deグリッド形状変化
(上：最大電流孔，下：最小電流孔)

図6に孔軸上で最も低い空間電位の作動時間ごとの変化を示す。比較対象として「はやぶさ2」での変化も示している。最小電流孔は最大電流孔よりもAc孔径が大きいため、作動直後での最低電位は比較的高いが、最大電流孔の方が空間電位の上昇率が大きくなっており、約30,000時間後において-30 V以上の電位になってしまい、寿命を迎える結果となった。これは、CEXイオンの生成量が最大電流孔のほうが

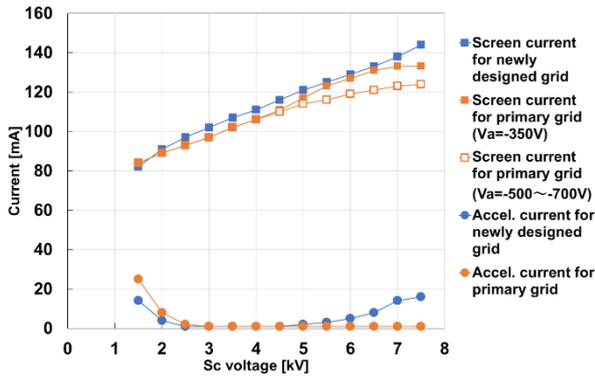


図 10 実験結果②

図 10 に②の実験結果を示す。橙色の白抜きデータの初代グリッドの電子逆流が生じていない状態でのデータである。エネルギーが 7.5 kV における $Xe^+ \rightarrow C$ の二次電子放出係数はおよそ 1 であるので、実際に Ac グリッドに衝突したイオンは計測された Ac 電流値の 1/2 である。また、二次電子がすべて高電位の Sc グリッド側に流れたとすると、実際に引き出されたイオン電流は計測された Sc 電流値から計測された Ac 電流値の 1/2 を引いた値になる。この二次電子の影響を考慮したうえで各グリッドでの引き出しイオン電流値を比較すると、新型グリッドの方が 8.1% 大きい結果となった。実験データをもとに JIEDI ツールで解析したところ、平均電流孔においてイオン透過率が新型グリッドの方が約 7.8% 大きい結果となり、実験結果と概ね一致した。このことから、イオン透過率の向上が Sc 電流値の増大に貢献したと考えられる。

4.3 電子逆流抑制性能および電流引き出し性能評価実験

図 11 に実験セットアップを示す。本実験では推進剤供給口を放電室として、Sc 電圧 7.5 kV、Ac 電圧 -350 V に固定して流量を変化させたときの Sc 電流値と Ac 電流値を計測した。使用したグリッドは新型グリッドのみで、放電室は通常のもの（ノミナル放電室）と外周磁石の向きを変更させたもの（新型放電室）の 2 パターンで実験を行った。放電室供給において 7.5 kV の加速は初の試みである。マイクロ波投入電力は 34 W に固定している。また、高耐圧ガスアイソレータは、導波管供給を想定して設計がなされており、放電室供給においては耐圧性能が 1 kV 程度しか有していない。そのため本実験ではガスアイソレータを使用せず、フランジ（グラウンド電位）から 10 m の PTFE チューブを伸ばし、先端に $\Phi 0.1$ のオリフィス設けて放電室に接続して、チューブ内圧力と絶縁距離を大きくすることで、Paschen 曲線の高 Pd 側で推進剤供給系の絶縁を施した。耐圧性能の評価は行っていないが、キセノンガス 1 sccm において 10 kV まで絶縁可能であることは確認できた。

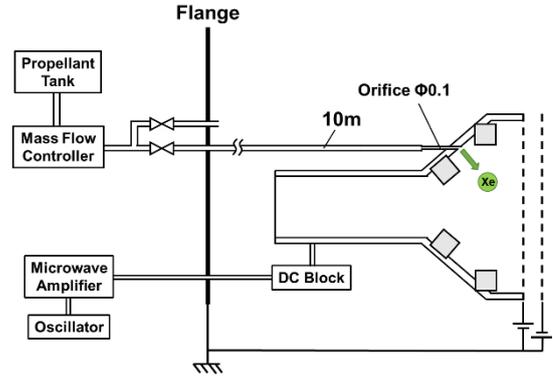


図 11 実験セットアップ

図 12 に実験結果を示す。ノミナル放電室では推進剤流量 3.3 sccm において、Sc 電流値 184 mA、Ac 電流値 10 mA が計測された。このことから $\mu 10$ モードと同程度のイオンが引き出されており、イオン源性能を損なわないイオン透過率が達成できていると考えられる。新型放電室においては、推進剤流量を増やしていくと一度 Sc 電流値が落ち、そこから更に流量を増やすと Sc 電流が増大するが、プラズマが不安定状態になった。さらに流量を増やすとプラズマは安定するが、Sc 電流が減少してしまった。不安定状態ではあるが 2.8 sccm において Sc 電流値 178 mA、Ac 電流値 12 mA が計測された。

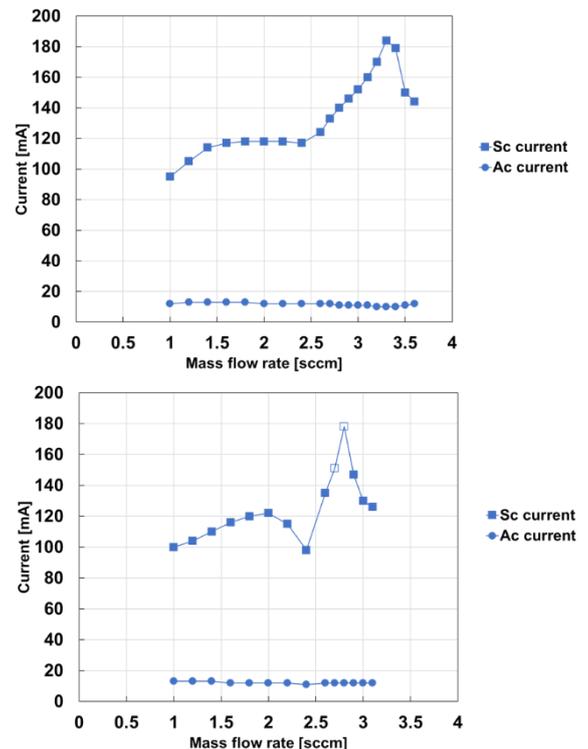


図 12 実験結果

(上：ノミナル放電室，下：新型放電室)

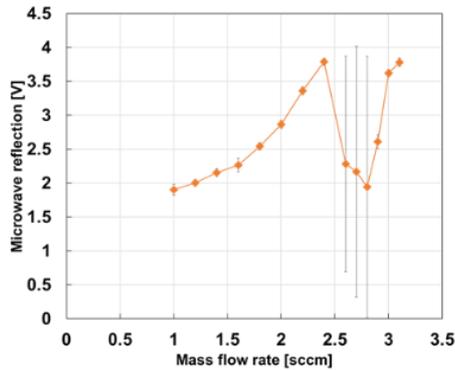


図 13 新型放電室での反射電力の様子

図 13 に新型放電室での実験におけるマイクロ波の反射の様子を示す。縦軸はマイクロ波反射電力を電圧に変換したものであり、エラーバーは反射電力が振動した範囲を表している。流量が大きくなるに従い反射電力が大きくなっており、2.4 sccm のところでは反射電力が最大となり Sc 電流の減少につながっている。プラズマが不安定だったところでは特に反射電力が大きく振動している。

新型放電室はノミナル放電室に比べ、推進剤流量に対するイオン生成量が多いため、イオン引き出しと中性粒子供給のバランスが崩れやすく、不安定な状態が顕著に現れたと思われる。

このプラズマの不安定状態は $\mu 10$ モードでは観測されていない。この原因としてはグリッドによるコンダクタンスの違いが考えられる。 $\mu 10$ グリッドは Sc-Ac グリッド間が Sc グリッド厚さより小さいため、中性粒子は入口が Sc 孔、出口が Ac 孔の管路のコンダクタンスに律速されると近似できる。一方 $\mu 10\text{HIsp}$ は Sc-Ac 間距離が Sc 厚さの 3 倍以上であるため、中性粒子を律速するのは主に Sc 孔であり、Ac グリッドで弾き返したとしても放電室内にとどまる可能性は低いと思われる。このことから、 $\mu 10\text{HIsp}$ では放電室内のグリッド近傍における中性粒子の閉じ込めが悪く、プラズマ生成が追いつかない状態になりやすいと考えられる。

5. 結言

本研究から以下の結論が得られた。

- 数値解析により、イオン密度が低い外縁部と中心部のアクセラグリッド孔径を大きくし、テーパ加工を施すことで、 $\mu 10$ グリッドを用いた高比推力化が可能であることが分かった。
- 実機を用いた性能評価実験により、初代グリッドに比べ新型グリッドでは、電子逆流抑制性能およびイオン引き出し性能の向上が確認された。
- 新型放電室と新型グリッドの組み合わせではプラズマが不安定になることが判明した。目標性能を達成するために対策を講じる必要がある。

参考文献

- 1) R. Funase, J. Matsumoto, O. Mori and H. Yano, "Conceptual Study on a Jovian Trojan Asteroid Sample Return Mission," J. Space Technol. Sci., Vol.27, No.1, 2013, pp.1-19.
- 2) 林寛, 碓井美由紀, 中山宜典, 清水幸夫, 西山和孝, 國中均, "マイクロ波放電式イオンエンジンの高比推力化に関する基礎研究," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.55, No.647, 2007, pp.604-611.
- 3) 清水裕介, 中野正勝, 西山和孝, 月崎竜童, 國中均, "JIEDI ツールを用いた高比推力イオンエンジン「 $\mu 10\text{HIsp}$ 」の数値シミュレーション," 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2E16, 新潟, 2017 年 10 月.
- 4) K. Nishiyama, S. Hosoda, M. Usui, R. Tsukizaki, H. Hayashi, Y. Shimizu and H. Kuninaka, "Feasibility Study on Performance Enhancement Options for the ECR Ion Thruster $\mu 10$," Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 7, No. ists26, 2009, pp.Pb_113-Pb_118.
- 5) 谷義隆, 西山和孝, 國中均, "10cm 級マイクロ波放電式イオンエンジンの性能向上に関する研究," 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2E19, 新潟, 2017 年 10 月.
- 6) 中野正勝, "イオンエンジン加速部グリッド寿命評価ツールの全体概要," プラズマ・核融合学会誌, Vol.90, No.4, 2014, pp.235-242
- 7) G. Aston, H. R. Kaufman and P. J. Wilbur, "Ion Beam Divergence Characteristics of Two-Grid Accelerator Systems," AIAA Journal, Vol.16, No.5, 1978, pp.516-524.
- 8) D. M. Goebel and A. C. Schneider, "High-Voltage Breakdown and Conditioning of Carbon and Molybdenum Electrodes," IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 33, No. 4, 2005, pp.1136-1148.