

1D02 中型イオンエンジン用陰極の原子状酸素耐性評価

○長野寛, 早川幸男 (宇宙航空研究開発機構)
稲永康隆, 尾崎敏之, 首藤和雄 (三菱電機)

The effect of atomic oxygen for the hollow-cathode in a 20 mN class ion thruster

Hiroshi Nagano, Yukio Hayakawa (JAXA)

Yasutaka Inanaga, Toshiyuki Ozaki, Kazuo Shuto (MELCO)

Key Words: Hollow-cathode, Atomic oxygen, Ion engine

Abstract

The super-low earth orbits under the altitude of 250 km are very attractive for earth and atmospheric observation. JAXA plans to launch the first test satellite in super-low altitude called SLATS. Such satellites use ion thrusters to compensate for air drag and keep their altitude. However, there are a lot of atomic oxygen in super-low earth orbit. The dispenser cathodes generally show degradation by oxidation. Therefore, the effect of atomic oxygen for the hollow-cathode was evaluated here. First, the electron emission test and physical analyses were conducted using pellet samples of cathode parts. Secondly, the discharge test was conducted using a dummy cathode whose parts can be replaced. The results show that no degradation occurs with appropriate operations in orbit.

1. はじめに

軌道高度 250km 以下の超低高度軌道の衛星は地表面に近いことから各種用途に利用されることが期待されており、JAXA は最初に超低高度衛星技術試験機 (SLATS) を打ち上げて、超低高度軌道を開拓することとしている^{1,2)}。超低高度軌道では大気抵抗が大きいため、それを補償する推進機が必要となるが、必要推力、推進剤量および長時間動作を考慮すると、イオンエンジンが最も適している。ただし、超低高度軌道は宇宙ステーション軌道と比べても一桁以上原子状酸素(AO)密度が高い。イオンエンジンに使用されている陰極は、大気等に触れて表面酸化が進むと性能が劣化する場合があるが、AO による性能劣化については過去に文献もなく、今回初めて実験等で評価した。最初に陰極部品のペレットサンプルを用いて評価し、続いて、部品を交換できる模擬陰極を製作して放電試験で評価した。ここではそれらの評価結果を報告する。

2. 陰極部品の評価

2.1 試験の概要

中型イオンエンジンで使用されている陰極の概略構造を図1に示す。左側から推進剤のXeが流入し、上流側からインサート、オリフィス、キーパの順に

構成されている。インサートは含浸型陰極でポーラスタングステンにBaO、CaO、Al₂O₃組成の電子放射物質を含浸させたもので、電子放出源として使用している。この種のインサートは、10⁻⁷Torr レベルの酸素成分で電子エミッションが大きく低下することが過去に報告されている³⁾。オリフィスはトリアタングステンでインサートと同電位である。キーパは中心に孔の空いたタンタル製円板で、キーパとインサート(オリフィス)間に電圧を加えることで気体放電を発生させる。インサートが円筒型のため、中空陰極と呼ばれている。この構造・材料から分かるように、陰極性能を左右するのは第一にインサートである。また、オリフィスも放電点火にある程度寄与していると考えられる。そこで、インサートとオリフィスのペレットサンプルを使用して、電子エミッション測定と各種の材料分析を実施した⁴⁾。

製作したペレットサンプルとその使用目的を表1に示す。ペレットサンプルはすべて円板状であるが、

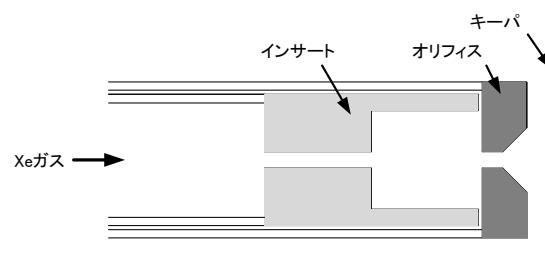


図1 イオンエンジン陰極概略構造

電子エミッション測定用のペレットサンプルだけは裏面から加熱できるように加熱用ヒータを取り付けられる構造としている。酸素により電子エミッションが低下するメカニズムとしては、Ba 近傍の酸素により表面の仕事関数が上昇することや、酸素がポーラスタングステンと結合し W 酸化物を形成し導電率低下で電子放出を妨げることが考えられている。表面での酸素成分の増大が劣化を引き起こすことから、材料分析として、SEM、昇温脱離ガス分析 (TDS)、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX)、オージェ電子分光分析 (AES)、X 線光電子分光分析 (XPS) を実施することとした。SEM/EDX の目的は、表面への特異な酸化物の形成、含浸剤の湧き出しなどの変化が生じていないか確認することである。また、AES と XPS は表面の水や酸素による酸化を評価することが目的である。インサートサンプルは含浸剤を測定すると含浸剤の酸化物を測定してしまうため、焼結金属粒より測定径が十分小さくできる AES を用いた。一方、オリフィスサンプルは酸素との結合に関する価数評価ができる XPS を使用した。それぞれ、イオンエッチングによる深さ方向分析を実施した。TDS は材料表面および含浸剤への大気成分の吸着量の評価を目的とし、脱離温度から吸着状態、化学結合状態の推定を行った。

曝露条件を表 2 に示す。AO 曝露のみだけでなく、大気曝露、AO 曝露と大気曝露の複合、そして比較用の非曝露サンプルも用意した。case 2 は過去の実験で中型イオンスラストで問題なしと判断している大気曝露レベルである。case 3 は、これに耐えられれば射場でのイオンスラストの窒素パージを省略できるという大気曝露レベルである。case 4～6 は AO 曝露であるが、陰極の AO 耐性が全く予測できないことから SLATS イオンスラストの予測 AO 曝露量の 1/3 を上限とし、その 1/3 と 1/10 を選択した。case 7、8 は複合曝露であり、case 3 と case 5 または 6 を組み合わせた。

大気曝露には恒温恒湿槽を用いた。また、AO 曝露には、つくば宇宙センターの真空複合環境試験設備 (AO 照射装置) を使用した。この AO 照射装置はパルス CO₂ レーザを用いたレーザデトネーション方式で AO を生成する。AO ビーム速度は～8 km/sec、フラックスは～5×10¹⁵ atoms/cm²s である。

2.2 試験・分析結果

インサートサンプルの電子エミッション測定は、真空槽の中で、サンプルを 5 mm の間隔でアノードと

表 1 AO 曝露耐性評価サンプル

サンプル	サイズ	外観	使用目的
インサートサンプル	φ 1.45 t0.6		電子エミッション測定 (EE)
	φ 7 t2		TDS
	φ 2 t2		SEM-EDX AES
オリフィスサンプル	φ 5 t1		TDS SEM XPS

表 2 サンプル曝露条件

case1	非曝露
case2	大気曝露 42day, 25°C, 湿度 60%
case3	大気曝露 72day, 35°C, 湿度 60%
case4	AO 0.3E20/cm2
case5	AO 1.0E20/cm2
case6	AO 3.0E20/cm2
case7	複合 72day, 35°C, 60%+1.0E20/cm2
case8	複合 72day, 35°C, 60%+3.0E20/cm2

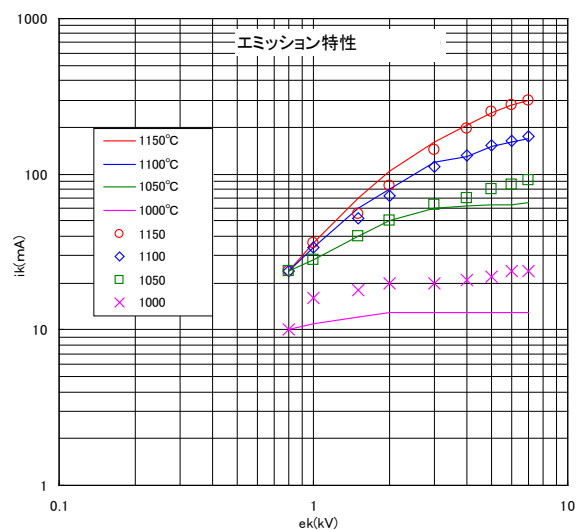


図 2 エミッション測定結果 (温度は輝度温度) (実線 : case 2 離散点 : case 6)

対向させて設置し、サンプル温度をパラメータとして、エミッション電流対印加電圧の関係を測定した。印加電圧はアノードを GND 電位として、サンプル側に $3\mu\text{s}$ 幅 100 Hz のパルス負電圧を与えている。なお、測定前の準備としては、ベーキング、ヒータフラッシング ($1,200^\circ\text{C}_b$ 、20 分)、エミッションエージング ($1,150^\circ\text{C}_b$ 、120 分、2 kV) を行った。ここで C_b は放射温度計による輝度温度である。42day 大気曝露 (case 2) と $3 \times 10^{20}/\text{cm}^2$ AO 曝露 (case 6) の測定結果を図 2 に示す。 $1,050^\circ\text{C}_b$ 以上では両者にほとんど差はない。また $1,000^\circ\text{C}_b$ では AO 曝露品の方が大気曝露品より相対的に少し電子が出やすい結果となっている。case 1 ~ 8 の測定結果をまとめると、

- 大気/AO 曝露品は非曝露品に対して有意な劣化がある。インサート温度が低いほど劣化は顕著。
- AO 曝露では、試験を行った曝露レベルでは、性能劣化は曝露時間に比例せず、すべて 42day 大気曝露品 (case 2) と同等の劣化を示している。AO 曝露品の劣化はハンドリング上の大気曝露 (3 時間程度) が影響している可能性も考えられる。
- 72day 大気曝露品 (case 3) は劣化が顕著だが、10 時間程度の真空中放置で case2 レベルまで性能回復する。

となる。case 2 相当の陰極はこれまでの実績で問題ない性能を示しており、case 4 ~ 8 の場合も、エミッション測定結果からは問題点は見い出せない。

TDS 分析は、測定温度範囲は常温 ~ $1,000^\circ\text{C}$ 、温度変化率は 200deg/hr 、測定質量数範囲 M/Z 1~150 で実施した。インサートサンプルの TDS 結果の一部を図 3 に示す。水分の脱着温度は 200°C 未満、 240°C 付近および 340°C 付近にある。含浸剤成分からの水の脱離によるピークと考えられる。また、検出された主なガスである H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 の全温度領域で積算した概算放出量を表 3 に示す。その結果、ガス脱離

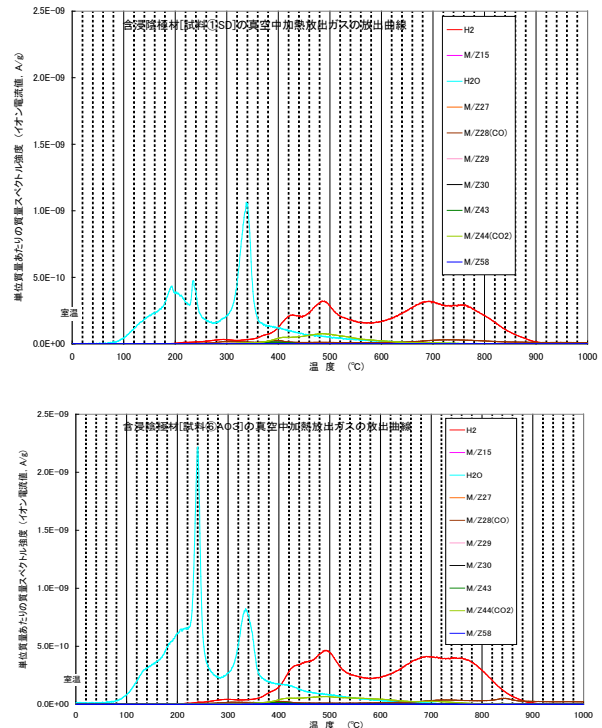


図 3 インサートサンプル TDS 結果 (上: case 1、下: case 6)

表 3 TDS 検出成分の概算放出量 (単位: $\times 10^{-3}\text{ml/g}$)

ケース	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	その他	合計
1	132.7	117.2	13.6	16.5	4.5	284.5
2	115.1	110.3	11.2	14.9	3.6	255.1
3	107.3	167.7	11.3	14.2	2.9	303.4
4	146.2	145.3	16.5	19.0	4.9	331.9
5	188.3	130.5	16.8	19.7	5.2	360.5
6	184.5	192.1	19.8	20.9	5.5	422.8
7	144.0	175.2	14.6	15.5	3.1	352.4
8	180.5	167.6	10.9	14.5	3.0	376.5

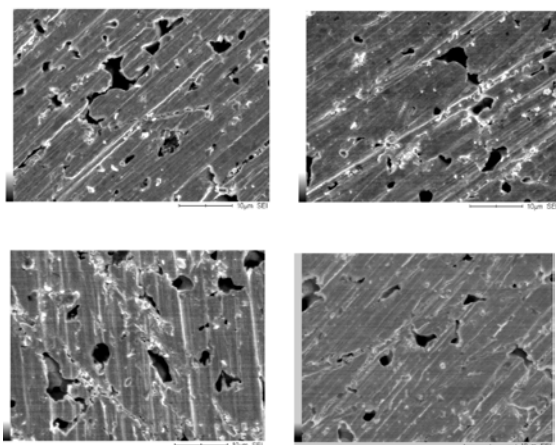


図 4 SEM 像 (上左から case1,2,下 case6,8)

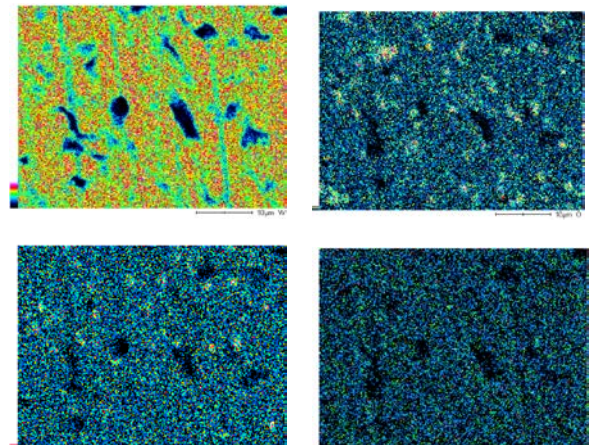


図 5 case 8 EDX 像 (上左から W,O,下 Ba,C)

状態は AO/大気曝露量に依存しない結果となっていることが分かった。

インサートサンプル (case 1、2、6、8) の SEM 像を図 4 に示す。他のケースも含めて表面の状態に特に有意な差はなかった。また、EDX 元素マッピング分析 (W,Ba,O,C) (分析深さ約 $1\mu\text{m}$) についても各ケースで特に有意な差はなかった。例として複合曝露インサートサンプル (case 8) の EDX 像を図 5 に示す。

非曝露 (case 1) および AO 曝露 (case 6) インサートサンプルの AES 分析結果を図 6 に示す。横軸は深さ方向で、左端が表面、右端が深さ 40nm (エッチング時間 5 分) である。非曝露品表面の O は自然酸化膜であり、大気曝露品も同等の結果である。一方、AO 曝露品では深さ 2~20nm 程度のところで非曝露品より O 成分が大きい。これは AO 曝露の影響とも考えられるが、複合曝露品では AO 曝露品のような O 成分の増大が認められず、必ずしも断定はできない。

オリフィスサンプルの SEM および TDS については各ケースで有意な差は見出せなかった。一方、表面 XPS (進入深さ 3nm 程度) の結果を図 7 に示す。図 7 は非曝露品 (case 1) と AO 曝露品 (case 6) の分析結果であるが、case 3~case 8 は case 6 とほぼ同等である。W 金属結合のピークは 31eV と 33eV の付近にあり、酸化物ができると、その組成に応じて異なるエネルギーシフト量のエネルギー位置にピークが検出される。WO₂、WO₃ のシフト量は夫々 1.4eV、4.4eV であることを考慮すると、図 7 は生成酸化物が WO₃ であることを示している。深さ方向の XPS 分析については、AO 曝露品 (case 6) の表裏 (表は AO 照射面) の結果を図 8 に示す。エッチングレートは 5.7nm/min (SiO₂ 換算) である。図 8 から、表と裏で酸化状態が異なることが分かる。裏面は非曝露品と同等であり、AO 曝露の影響が AO 照射面に生じている。その酸化膜厚は 4nm 以下と推定される。表面 XPS の結果から酸化物/金属組成比を算出すると、case 1 から case 8 まで単調に増大しており、case 8 は case 2 の 6 倍を超えている。大気曝露と AO 曝露は、重畳して酸化物を生成していると考えられる。

3. 模擬陰極を用いた評価

ペレットサンプルを用いた電子エミッション測定や材料分析では陰極に対する AO 曝露の重大な影響は見出せなかったが、イオンエンジンでは陰極をガス放電で用いるため、やはり実機相当での放電点火

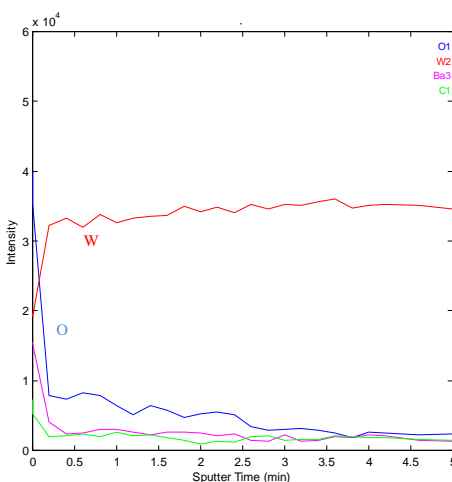
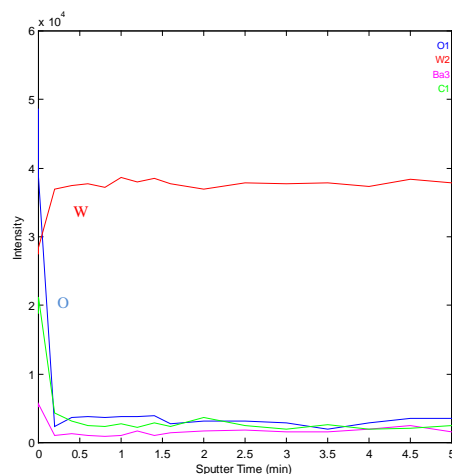


図 6 AES 結果 (上: case 1、下: case 6)

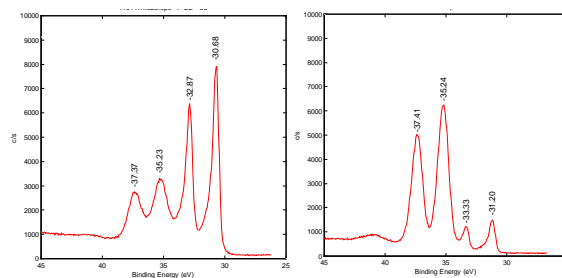


図 7 オリフィスサンプル表面 W の XPS スペクトル (左: case 1、右: case 6)

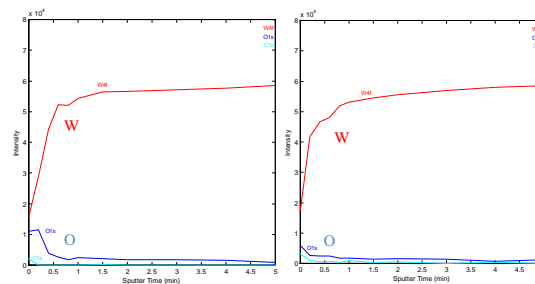


図 8 オリフィスサンプル深さ方向 XPS 結果 (case 6) (左: 表面、右: 裏面)

試験が必要と考え、模擬陰極を製作して試験で確認することとした⁵⁾。

3.1 模擬陰極の製作

模擬陰極が実機と異なる点は、インサートとオリフィスが交換できることである。実機ではインサートやオリフィスを含む各部品をろう付けや溶接で固定して組み上げているため、分解できない。交換可能にしたのは、AO曝露レベルの異なるインサートとオリフィスを使用して試験を行い、曝露レベルの相違が性能に与える影響を評価するためである。図9に模擬陰極の分解図を示す。左からサポートパイプ付インサート、陰極パイプ付オリフィス、pBN/PGヒータ、断熱構造、ケースの順でねじ止めによりはめ込めるように設計している。サポートパイプ付インサートと陰極パイプ付オリフィスは実機と同一品である。また、熱解析を行い、pBN/PGヒータでインサートを十分加熱できることと放電点火後は必要なインサート温度を維持できることを確認している。

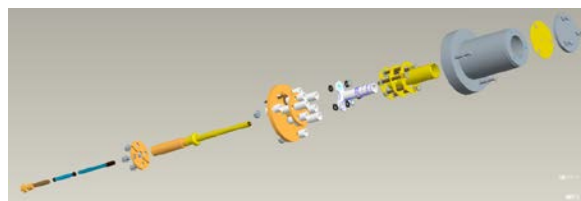


図9 模擬陰極分解図

表4 AO曝露量

部品	曝露量 (atoms/cm ²)
インサート1	1.8E+19
インサート2	4.3E+20
インサート3	9.8E+20
インサート4	9.8E+20
オリフィスA	4.3E+20
オリフィスB	9.8E+20

3.2 AO曝露

ペレットサンプルのAO曝露で使用した筑波のAO照射装置を用いて、インサート4個、オリフィス2個のAO曝露を実施した。表4にそれぞれの曝露量を示す。ペレットサンプルの電子エミッション測定と材料分析ではAO曝露の重大な影響を見出せなかったため、比較的耐性があると考え、今回は最大曝露量をSLATSのイオンスラストの全被曝量レベルとした。

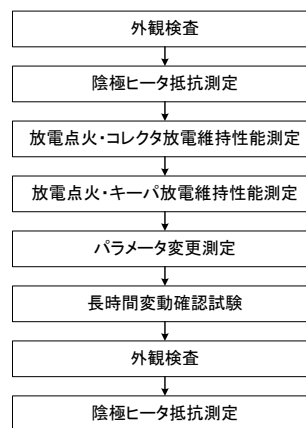


図10 模擬陰極試験フロー

3.3 試験および評価

図10、11に試験フローと試験コンフィギュレーションを示す。AO曝露前後に同一の試験をして、AO曝露の影響を調査した。ヒータ加熱時のオリフィス温度を測定するために真空槽外の二色放射温度計を用いた。そのために、模擬陰極を真空槽のビューポートに向けて設置した。インサートとオリフィスの組合せは、インサート1とオリフィスA（以下1-Aと表記）、2-A、3-B、4-Bの4ケースで実施した。また、軌道上運用を想定して図12の放電点火シーケンスを採用した。最初に低ヒータ電流でアイドリングを2時間行い、続いてヒータ電流を上げて活性化を行う。その後30分間冷却した後、再度ヒータON、Xeガスを供給するとともに、キーパとインサート間に150Vを印加して放電点火を行う。このシーケンス

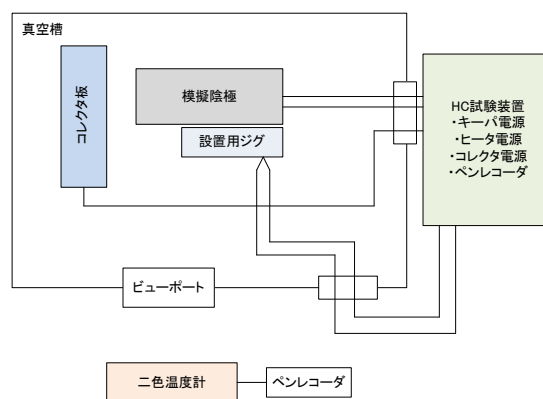


図11 試験コンフィギュレーション

は放電が点火するまで実行する。放電点火に要する時間は陰極の劣化を示す重要なパラメータである。

表5に放電点火時間の試験結果を示す。AO曝露の影響は出ていない。また、各組合せの放電電圧特性を表6に示す。キープ電圧はAO曝露前後でほぼ同等であるが、コレクタ電圧については、一部に電圧上昇が見られる。AO曝露により放電モードの遷移（低電圧から高電圧）が発生しやすい状況になっていると思われる。ただし、電圧上昇はXe流量が少ない領域で発生しており、流量2sccmのSLATSイオンスラストでは問題ない。

AO曝露の影響があまり出ていないのは、性能測定前に通常の大気曝露後の陰極表面処理に用いるアイドリングと活性化を行っていることが理由の一つとして考えられる。今回行った活性化では30分到達時のオリフィス温度として1,275℃（実温度）が計測された。模擬陰極の熱解析結果から推定すると、インサート温度は1,240℃程度に到達しており、ペレットサンプルでのヒータフラッシング温度程度である。これによりAO曝露で形成されたインサートおよびオリフィスの酸化膜を概ね除去できたことで点火特性、放電特性にAO曝露の影響が軽微であったと考えられる。酸化膜除去のためには温度上昇は有効であるが、陰極寿命を考えると1,300℃程度を超えて過度に昇温することは望ましくない。軌道上で放電が点火しにくいときは、温度を考慮しながらヒータ電力を上げていく必要がある。

4. まとめ

超低高度衛星向けにイオンエンジンを使用する場合、陰極へのAOの影響が懸念されたことから、陰極部品のペレットサンプルを使用した電子エミッション測定と材料分析、そして実機相当の模擬陰極を用いた放電試験を実施し、陰極のAO耐性を評価した。その結果、超低高度軌道上でAO曝露されても、アイドリングと活性化を行えば、陰極性能は低下しないことが分かった。本成果はSLATSおよびその後の超低高度衛星のイオンスラストの軌道上運用手法に反映される。

参考文献

1) Noda, A., et al.: The Study of a Super Low Altitude Satellite, 26th ISTS, 2008-f-05, Hamamatsu, Japan, 2008.

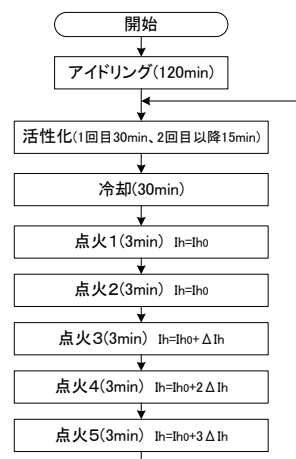


図12 放電点火シーケンス

表5 放電点火時間 (単位: 秒)

組合せ	1-A	2-A	3-B	4-B
AO曝露前	137~183	144~206	118~175	161~180
AO曝露後	124~206	107~190	135~189	143~211

表6 放電電圧特性

(上: キープ電圧 下: コレクタ電圧、括弧内 AO 曝露前)

コレクタ電流 A	Xe流量 sccm	1-A	2-A	3-B	4-B
0	0.6	19.8(20.8)	19.8(20.6)	20.0(20.6)	20.7(20.9)
0.3	0.5	15.6(16.0)	15.4(16.2)	15.5(15.7)	16.1(16.2)
	0.7	15.2(15.6)	14.9(15.6)	15.0(15.2)	15.7(15.9)
	2.0	14.3(14.9)	14.2(15.0)	14.0(14.3)	14.6(15.0)
0.4	0.5	14.7(15.0)	14.4(15.1)	14.2(14.8)	15.0(15.1)
	0.7	14.1(14.4)	13.7(14.8)	13.8(14.1)	14.5(14.6)
	2.0	13.3(13.7)	13.2(13.8)	13.0(13.0)	13.6(13.8)
0.5	0.5	13.6(14.0)	13.3(14.1)	N/A	N/A
	0.7	13.1(13.4)	12.9(13.6)	12.8(13.0)	13.4(13.6)
	2.0	12.6(12.9)	12.3(12.9)	12.3(12.2)	12.8(12.9)

コレクタ電流 A	Xe流量 sccm	1-A	2-A	3-B	4-B
0.3	0.5	43.7(44.1)	44.0(43.5)	43.9(42.6)	44.5(42.9)
	0.7	36.5(36.0)	36.2(35.9)	35.4(35.3)	36.3(35.5)
	2.0	34.5(34.4)	34.2(34.2)	32.6(33.9)	33.2(34.2)
0.4	0.5	43.1(43.6)	43.2(42.4)	45.0(41.8)	45.8(42.2)
	0.7	36.0(35.4)	35.7(35.0)	41.2(36.6)	42.1(40.4)
	2.0	32.7(32.6)	32.6(32.8)	30.8(31.7)	31.7(32.3)
0.5	0.5	55.0(57.6)	57.6(50.9)	>55(55.1)	>55(>55)
	0.7	44.1(45.7)	43.2(43.9)	48.6(46.1)	50.3(48.0)
	2.0	32.1(32.0)	32.0(32.2)	31.2(30.7)	31.6(31.8)

2) 高畑他: 2012年における超低高度衛星SLATSの開発状況, 宇科連, 3D01, 2012

3) J.L.Cronin,: Practical Aspects of Modern Dispenser Cathodes, Microwave Journal, vol.22, Sep. 1979

4) 長野他: SLATS用イオンエンジンの研究開発, 宇科連, 1G13, 2011.

5) 長野他: SLATS用イオンエンジンの開発, 宇科連, 3D05, 2012