

令和2年度地球観測技術等調査研究委託事業
「超小型探査機の大電力化時代に向けた統合「水」推進系の発展」
委託業務成果報告書

令和3年5月
国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省の宇宙探査基盤技術高度化プログラム委託事業による委託業務として、国立大学法人 東京大学が実施した令和2年度「超小型探査機の大電力化時代に向けた統合「水」推進系の発展」の成果を取りまとめたものです。

【目次】

【目次】	3
【委託業務の目的】	4
【実施内容】	5
項目 1A. アノード REV1	5
項目 2A. カソード REV1	14
項目 3. 水スラスタベース開発	23
項目 4. 水イオン実証機	27
【まとめ】	28

【委託業務の目的】

本業務では、超小型宇宙探査機に静止軌道圏から月以遠へ航行するための技術として、150-W 級と 60-W 級という 2 つの「水」統合推進系を開発し、両者の宇宙実証の見通しを立てる。まず、月以遠への航行に伴う高 ΔV の獲得には、近年の大電力化の流れに乗り電気推進を活用する。大電力用として「水ホールスラスタ」を開発、小電力用としては並行して研究開発が進んだ「水イオンスラスタ」を適用する。そして、両者に使用できる「水スラスタベース」を改良することで、上記 2 つの統合推進系を実現し、超小型探査機の活用幅を大きく増大させる。

【実施内容】

項目 1A. アノード Rev1

<アノードの設計・試作>

➤ アノードの型式選定

ホールスラスタのアノードとして様々な型式が提案されており、本年度に試作するアノード Rev1 では SPT, TAL, CHT の 3 型式を候補に選定を行った。宇宙作動実績、本業務の目標とする電力帯（150 W 級）での研究実績、水プラズマでの実現性等を総合的に評価し、SPT を選定した（図 1-1）。

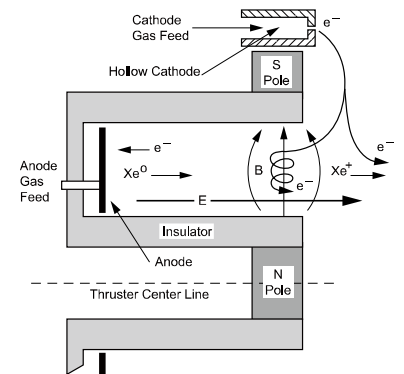


図 1-1 SPT 型式の基本構造 ¹⁾

➤ チャネル形状および磁場の設計

アノードにおける主放電領域であるチャネルの形状（平均直径、幅）と、チャネル内の磁場の設計を行った。

まず、ホールスラスタの一般的な相似則に水推進剤の特性を適用することを試みたが、これまでに実績のある推進剤（Xe, Kr 等）と大きく傾向が異なるために明確な指針を得ることが困難であった。そこで、共同参画者である渡辺裕樹氏の研究成果 ²⁾に基づいてチャネル平均直径およびチャネル幅の基準を決定し、Xe 等の推進剤で確実に作動できるアノードを用いて水での作動がどのように異なるか検証する形をとることに決定した。さらに、基準とするチャネル形状をもとに、推力密度を一定にする方針で平均直径および幅を変更した複数のモデルを製作し、計 12 通りのチャネル形状でデータを取得することで今後の Rev2 以降の設計指針とする。決定したチャネル形状 12 通りの平均直径および幅を表 1 に記載する。

次に、チャネル内での磁場強度分布および磁場形状を決定するために、二次元有限要素法のフリーソフト（FEMM）を用いてアノード全体での磁気回路設計を実施した。Xe 推進剤を用いた同電力帯の先行研究 ²⁾では設計範囲より大きな最大磁場強度で性能の改善が示唆されたことや、水を用いた場合には電離が起こりにくくなるためより強力な磁場が要求される可能性があること、一方で分子量が軽いために排出されるイオンが磁化しやすく磁場強度の限界が存在する可能性があることなどを踏まえ、それぞれのチャネル形状でなるべく広い範囲の磁場形状および磁場強度を生成でき

表 1 チャネル形状 12 通りの設計値

No.	平均直径 [mm]	幅 [mm]	No.	平均直径 [mm]	幅 [mm]
1 (基準)	20	6	7	30	4
2	20	7.5	8	30	5
3	20	4.5	9	30	3
4	24	5	10	40	3
5	24	6.2	11	40	3.8
6	24	3.8	12	40	2.2

るような設計方針を立てた。そこで、チャンネルの内側および外側にコイルを組み込む設計を行った。さらに、チャンネルにシールドヨーク構造を取り入れることでチャンネル内のプラズマの安定性向上と損失低減を図るとともに、その形状を工夫することで最大磁場強度の取り得る範囲を広げた。図 1-2 に、FEMM を用いて算出した 12 通りのモデルのチャンネル中心における磁場強度分布を示す。また、同様に FEMM を用いて算出したチャンネル内の磁場形状例として、モデル No. 1 の出力結果を図 1-3 に示す。

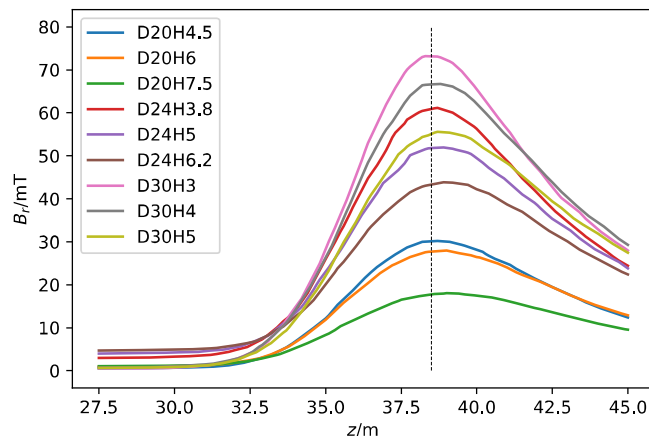


図 1-2 12 通りの形状ごとのチャンネル中心における磁場強度分布

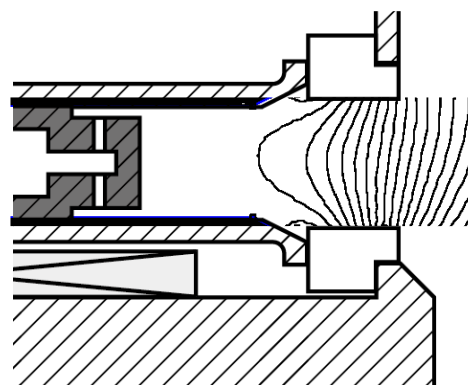


図 1-3 No. 1 の磁場形状計算結果

➤ 熱設計

アノード作動中の過度な温度上昇を抑制するために、アノード全体での熱設計を実施した。アノード温度分布の取得には、磁場設計と同様に二次元有限要素法のフリーソフト（FEMM）を用いた。

まず、二次元計算に必要な境界条件を設定するために、エネルギー保存の関係からチャンネル内のプラズマによる入熱を見積もった。計算は、単純化のために、チャンネル壁からの二次電子放出は考慮しない、チャンネル内のイオン流速は考慮しない等の仮定を置いて進めた。また、本計算では入熱量の算出にアノードの効率を用いており、これは実際に試験を行ってみないとわからない、かつ試験条件によって異なる値となり得るが、なるべく厳しい条件で見積もるために 6%程度と設定した。その結果、100 W 作動時にチャンネル内の総入熱量が 80 W 程度になる可能性があると見積もられた（図 1-4）。

次に、見積もった入熱量をチャンネル壁での境界条件として FEMM による二次元計算を実施した。その結果、スラスタ背面を水冷して室温程度に保てば、最も温度の上昇する箇所でも高々 100 °C 程度に抑えられることがわかった（図 1-5）。また、水冷を行わない場合でもアノードの放射面積を拡大することで最高温度を 300 °C 程度に抑えられることを確認した。

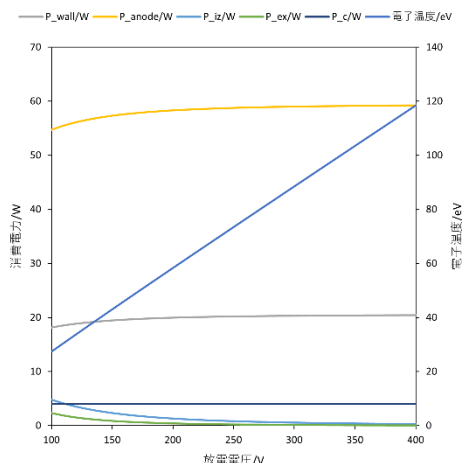


図 1-4 入熱計算結果

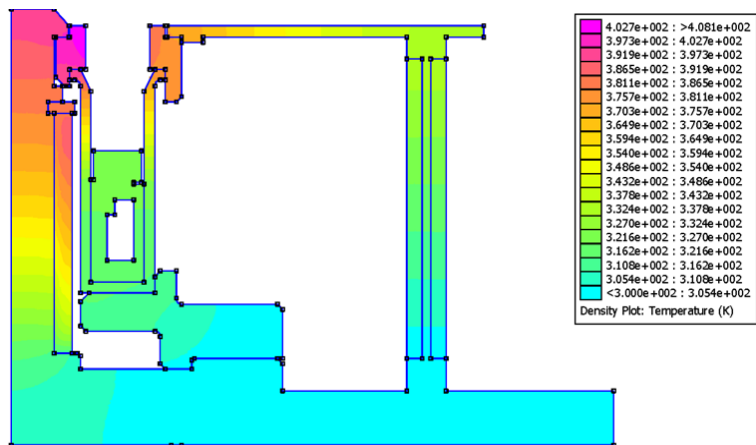


図 1-5 FEMM によるアノードの温度分布

➤ チャンネル内電極（拡散室）の設計

アノードのチャンネル内電極は、高電圧を印加することで放電回路を形成するとともに、推進剤を拡散させて均一にチャンネルに供給する役割を果たす構成要素であり、この設計を実施した。設計にあたっては、基準となるモデル No. 1 で十分に拡散が行われるよう検討し、その他 11 通りではこれをスケーリングした。

設計したチャンネル内電極の基本的な構造を図 1-6 に示す。上流から供給される推進剤は領域 1 で周方向に十分に拡散され、領域 2、3 を通過してなるべく均等にチャンネル内へ流れるように設計した。領域 1 のおける周方向のコンダクタンスと領域 1 からチャンネルへと抜ける流路（領域 2、3）の合成コンダクタンスを表 2 に示す。

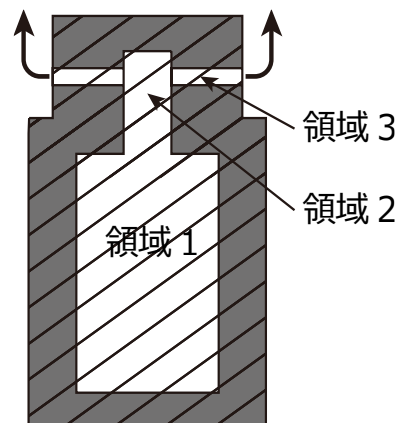


図 1-6 チャンネル内電極の基本構

表 2 チャンネル内電極のコンダクタンス設計値

領域 1 の周方向コンダクタンス [m^3/s]	5.0×10^{-4}
領域 2 と 3 の合成コンダクタンス [m^3/s]	2.8×10^{-5}
コンダクタンス比	17.4

➤ アノード全体の機械設計と発注

以上の設計値に基づき、CAD ソフト（Autodesk Inventor）を用いて 12 通りのモデルのアノード全体の機械設計を実施した。設計した 3D モデルの例として、モデル No. 1 の外観図を図 1-7 に示す。これをもとに、各構成部品の詳細な図面を作成し、加工業者に各部品の発注を行った。

➤ アノードの組み上げ

発注したアノード部品の納品を確認し、アノード Rev1 のモデル No. 1 について組み上げを行った。設計通りに問題なく組み上がることを確認した。モデル No. 1 の組み上がり状態の写真を図 1-8 に示す。

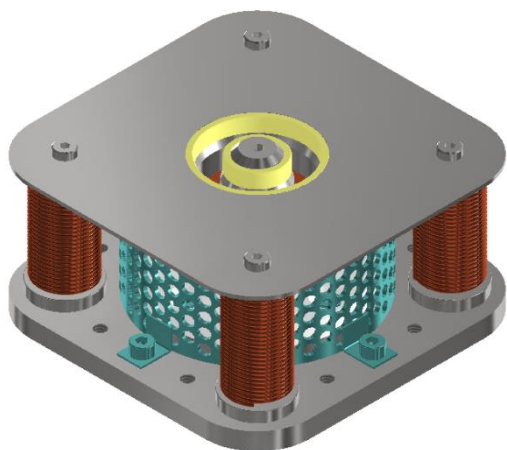


図 1-7 CAD ソフトで設計を行ったモデル No. 1 の外観

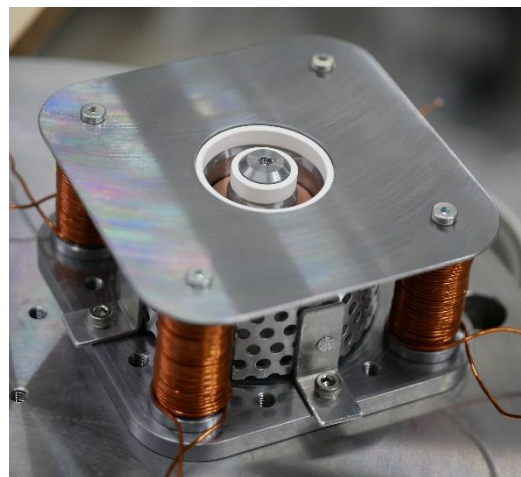


図 1-8 実際に組み上げたモデル No. 1 の外観

➤ ガス分配器の設計と製作

上流からアノードの拡散室部分へのガス供給口を 3 か所設けたため，なるべく 3 か所に均等にガスが供給されるように上流で分岐する機構の設計を行った．また，上流での放電の発生を防ぐガスアイソレータとしての働きも兼ねる構造とした．実際に製作したガス分配器の外観を図 1-9 に示す．また，アノードと結合した様子を図 1-10 に示す．



図 1-9 ガス分配器の外観

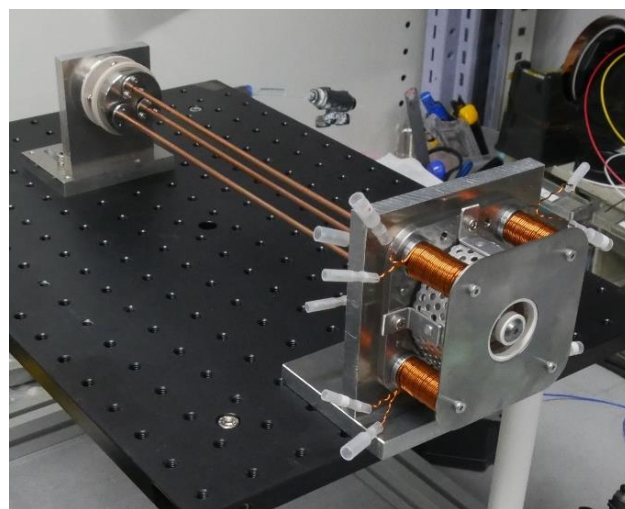


図 1-10 アノードと分配器を結合した様子

＜初期作動の目途＞

➤ 実験機器の整備

アノード作動に必要な電子機器，特に電源とマスフローコントローラを新たに購入して整備した．購入した電源およびマスフローコントローラの製品情報や用途を表 3，表 4 にそれぞれ記載する．

表 3 アノード作動用に新規に購入した電源一覧

型番	製造元	用途
PWR401-H	菊水電子	アノード放電用電源
PAN35-20A	菊水電子	カソードフィラメント加熱用電源
KX-S-100-H	高砂製作所	カソードキーパ用電源
PAN16-30A	菊水電子	アノード内側コイル用電源
PAN35-10A	菊水電子	アノード外側コイル用電源

表 4 アノード作動用に新規に購入したマスフローコントローラ一覧

型番	製造元	用途
S48-32HMT	堀場エステック	アノード Xe (Ar) ガス供給用
S48-32HMT	堀場エステック	カソード Xe (Ar) ガス供給用

➤ 真空環境の整備

アノードの作動試験は研究室で所有する直径 1 m，奥行き 2.6 m の真空チェンバを用いて行うが，既存の排気系ではアノードの流量に対して排気速度が追いついておらず，作動時の背圧が十分に下がらないことが懸念された．そこで，排気速度のより大きな真空ポンプを新規に取り付けることに決定した．選定にあたっては，排気速度の大きさに加えて，特に水を効率的に排気できることを重視した．最終的に，ダイキン工業製のクライオポンプを選定し，これを購入した．既存の真空ポンプと新規に購入した真空ポンプの主なスペックを表 5 に示す．納品されたクライオポンプは，既に真空チェンバに取り付けられている（図 1-11）．クライオポンプを取り付けた後，クライオポンプを用いて真空引きを行い，問題なく動作することを確認した．既存の排気系で真空引きを行った場合の結果と比較したものが図 1-12 であり，想定通り真空チェンバ内の背圧が改善していることが確認された．

表 5 排気用ポンプのスペック

型式	型番	製造元	排気速度 [m ³ /s]
ロータリーポンプ（既存）	VD301	ULVAC	500
ターボ分子ポンプ（既存）	TG800F	大阪真空	820
クライオポンプ（新規）	CRYOTEC-10	ダイキン工業	2400



図 1-11 取り付けしたクライオポンプ

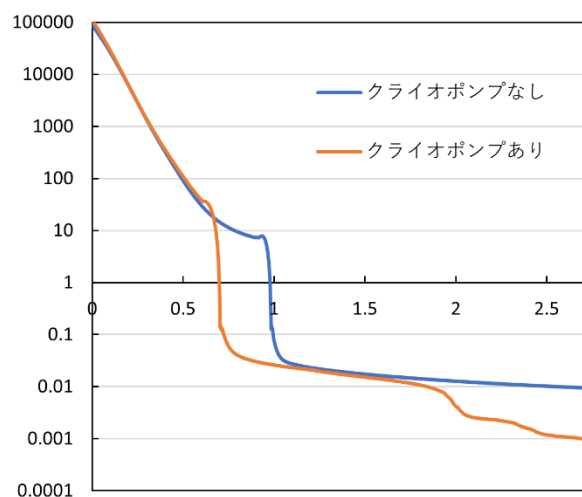


図 1-12 クライオポンプの有無による真空度の比較

➤ アノードの磁場測定

組み立てたアノード Rev1 のモデル No. 1 について、設計値通りに磁場が生成されるか確認するために、磁場強度分布の実測を行った。測定は、ガウスプローブと可動ステージを用いて行った。まず、チャンネル中心およびチャンネル内側壁面、外側壁面近傍における磁場強度の半径方向成分分布について、FEMM の計算とガウスプローブによる実測値の比較を図 1-13 に示す。これより、比較的良好な一致を示していることが確認できた。次に、チャンネル内および出口近傍における磁場強度の二次元分布を取得し FEMM の計算結果と比較した (図 1-14)。こちらも設計値と良く一致しており、磁場形状も問題なく再現できていることが確認できた。

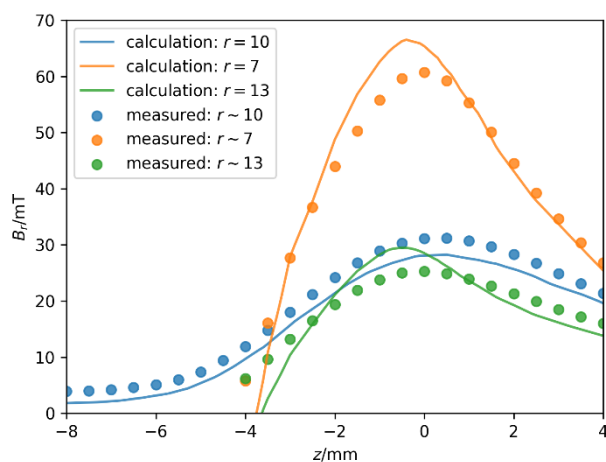


図 1-13 チャンネル中心、チャンネル内側壁面近傍、チャンネル外側壁面近傍における磁場強度半径方向成分分布の計算値と実測値の比較

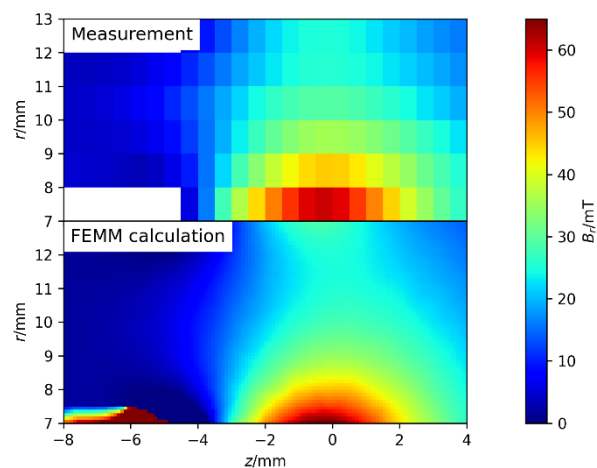


図 1-14 磁場強度半径方向成分の二次元分布の計算値と実測値の比較

➤ 実験用カソードの選定

アノード作動には、アノードに電子を供給するカソード（電子源）が必要である。最終的に水推進剤下で用いるカソードの試作品であるカソード Rev1 とは別に、実験用として使用するカソードの選定を行った。

カソードは以下の 3 つの候補から選定を行った。

- ✓ ホローカソード
- ✓ ガス使用型のフィラメントカソード
- ✓ ガス不使用のフィラメントカソード

このうち、ホローカソードは一般にインサートに使用される含侵剤が酸化に弱いいため、水雰囲気下での作動に不安があると判断し候補から除外した。ガス使用型のフィラメントカソードは、先行研究²⁾で小型ホールスラストのカソードとして使用されており、フィラメントを交換すれば再利用が可能という利点もあることから、実験用としてこれを選定し購入した。購入したカソードの外観を図 1-15 に示す。一方、ガス不使用のフィラメントカソードについて、ほとんど費用をかけずに製作できたため、こちらも試作し電子放出性能を確かめた。しかしながら、単体作動において電子を引き出すことはできたものの再現性が低かったこと、アノードと隣り合わせで用いたときにアノードの表面が強い熱輻射を受け（図 1-16）ダメージになりかねないことなどを理由に、使用を断念した。

➤ 実験用カソードの健全性確認

納品された実験用カソードについて、健全性を確かめるために単体で作動試験を実施した。カソードの作動ガスにはアルゴンガスを使用した。また、アノードの代わりに電子捕集用のコレクタ電極を用意し、これを用いて電子電流を評価した。

カソード単体試験の実験回路を図 1-17 に示す。また、実験条件を表 6 に示す。試験の結果、100 mA – 700 mA の範囲で電子電流を引き出すことに成功し、健全性が確認できた。作動時のブルームの様子を図 1-18 に示す。また、それぞれの電子電流下において、各制御パラメータの依存性を調査し、アノード作動に向けて必要なカソードの特性を取得することができた（図 1-19、1-20 はその一例）。

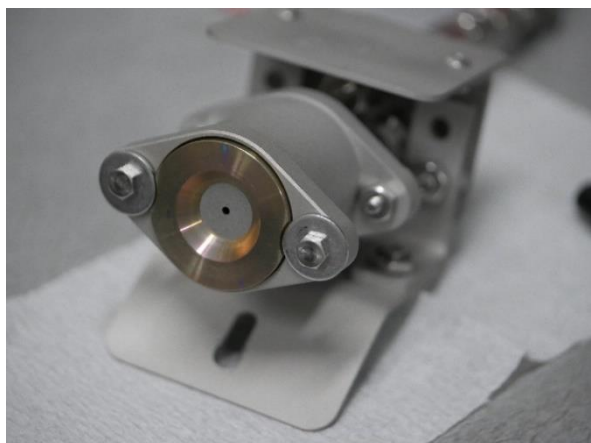


図 1-15 実験用カソードの外観

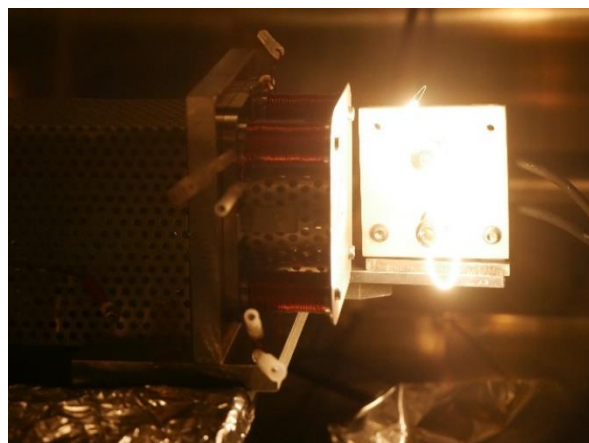


図 1-16 ガス不使用のフィラメントカソードを用いた際、アノード表面が強い熱輻射を受ける様子

表 6 実験用カソード単体試験における実験条件

パラメータ名	実験条件
ガス (Ar) 流量 [sccm]	6
コレクタ電流 [mA]	100 – 700
フィラメント電力 [W]	< 100
コレクタ電圧 [V]	< 300
キーパ電流 [mA]	0 – 1000

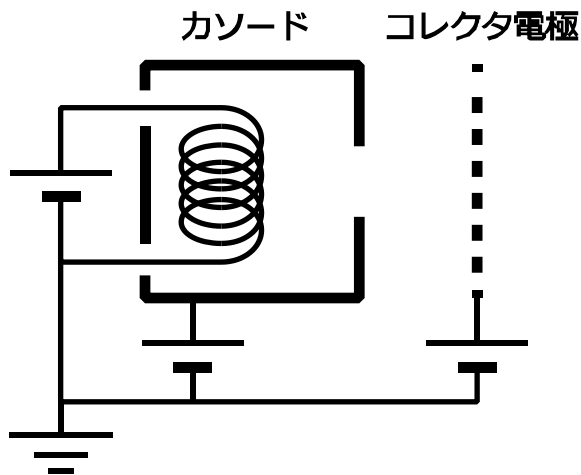


図 1-17 実験用カソード単体試験の実験回路

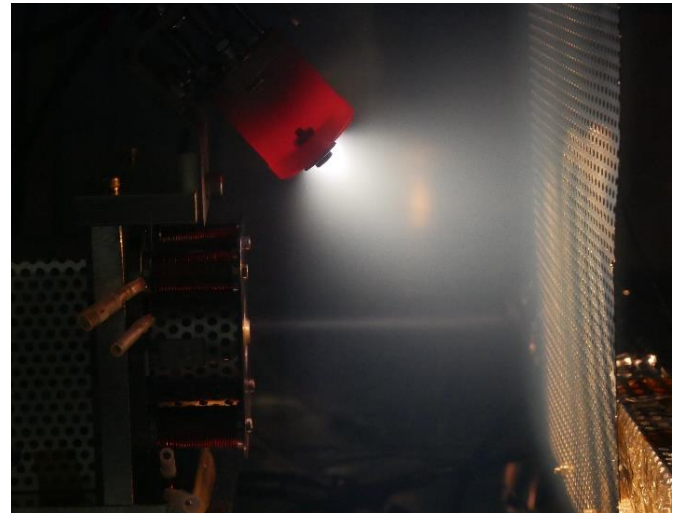


図 1-18 カソード単体作動時のプルームの様子

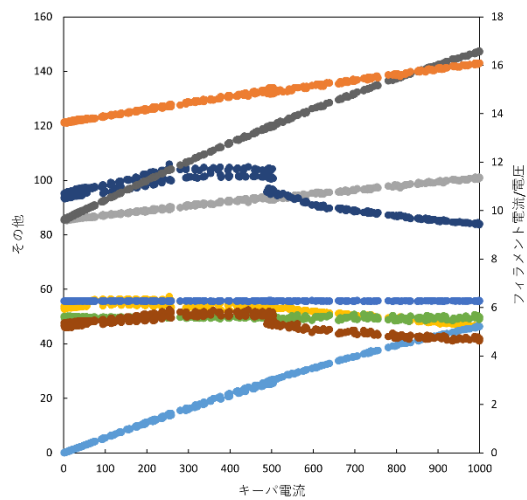


図 1-19 コレクタ電流を 500 mA に制御した状態でキーパ電流を変化させたときの依存関係

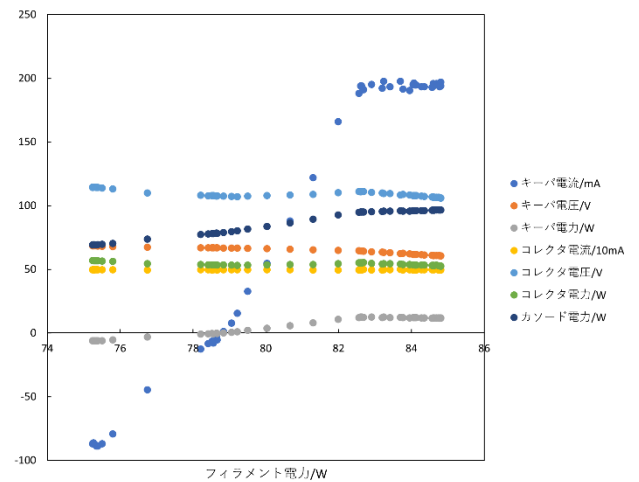


図 1-20 コレクタ電流を 500 mA に制御した状態でフィラメント電力を変化させたときの依存関係

➤ アルゴンを用いたアノードの作動試験

実験用カソードを用いて、アノード Rev1 のモデル No. 1 について作動試験を行った。アノードの健全性を確認する目的のため、作動ガスにはアルゴンを用いた。

作動試験の実験回路および実験条件を図 1-21 および表 7 にそれぞれ示す。本試験では、特にアノードの着火性とプラズマ維持に着目したため、コイルは用いなかった。試験の結果、アノードの着火が確認された（図 1-22）。一方で、プラズマが安定的に維持できないことや本来想定していない箇所で放電が起きることも確認された。この主な原因として、アノードと組み合わせたときにカソードの電子供給が足りていないということが挙げられ、これは今後作動方法を工夫することで改善できると思われる。また、本試験ではクライオポンプを使用しなかったため、背圧が十分に下がっていなかった影響があると考えられる。今後はクライオポンプを使用し、背圧を十分に下げた状態で作動試験を行う必要がある。

以上のように、安定作動に必要な実験条件はまだ確立されていないが、アノードを作動することができる試験環境の整備は完了しており、水推進剤を用いた初期作動を数か月以内に実施できる目途が立った。

表 7 アノード作動試験の実験条件

パラメータ名	実験条件
アノードガス流量 [sccm]	10 – 50
アノード電圧 [V]	< 680
カソードガス流量 [sccm]	6
カソードキープ電流 [A]	> 1. 0
カソードキープ電圧 [V]	~ 20

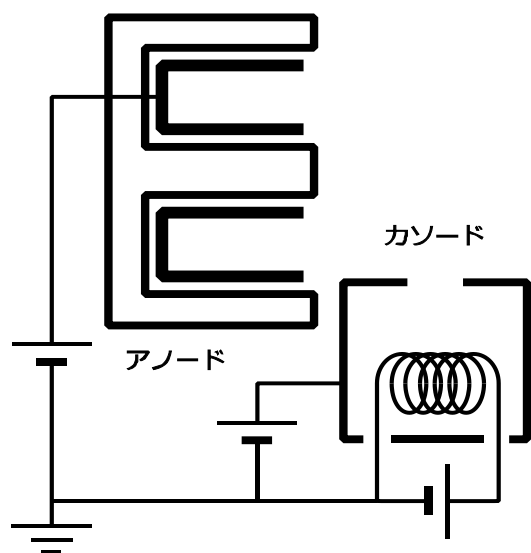


図 1-21 アノード作動試験の実験回路

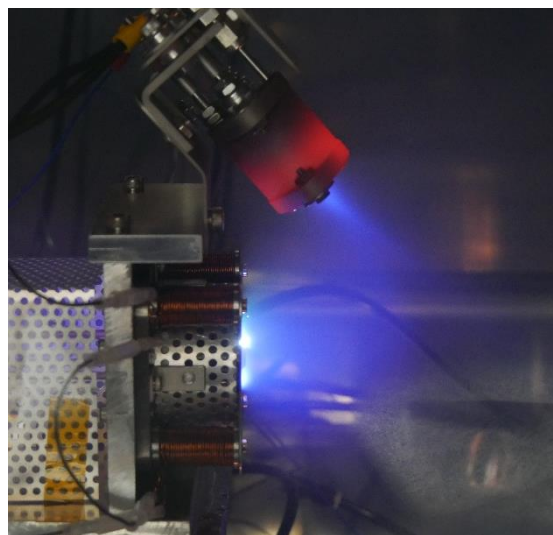


図 1-22 着火したアノードの様子

<カソードの方式選定>

➤ 電子生成方式の選定

代表的なカソード方式から、150 W 級水ホールスラストに適する電子生成方式を選定した。候補として検討した方式とその特徴は次の通り。

✓ ホローカソード

推進剤および電子源を使用する。消費電力が低く、電子電流値が大きい。従来使用されてきた電子源は酸素雰囲気さらさらされることで電子放出能力が大きく低下するため、推進剤を水として作動させることはできない。

✓ RF カソード

推進剤のみを使用する。電子源は必要とせず、酸素雰囲気でも問題なく作動できる。キセノンガスを推進剤とした場合において、カソード目標性能に近い作動点での作動実績が存在する。しかし、着火の際には kW 級の大電力が必要である。また、RF 電源の小型化に難があるという点が、小型宇宙機搭載を考えた際の障壁となる。

✓ ホットカソード

電子源のみを使用する。推進剤を使用しない。単純な構造ゆえ小型化しやすいが、電子電流あたりに必要な消費電力が高い。高い電子電流を得るには電子源を高温にする必要があり、熱設計も重要となる。また、宇宙作動実績が存在しない。

水で作動できないという点でホローカソードは棄却した。RF カソードにおける着火性能向上および電源小型化の難しさと、ホットカソードにおける低消費電力化および熱設計の難しさを比較検討し、ホットカソード方式の採用を決定した。

➤ 電子源の選定

ホットカソードの電子源候補として、タングステン、多孔質タングステンに酸化バリウムを添加した含浸材(BaO-W)、六ホウ化ランタン(LaB₆)などを候補として検討した。これらはいずれも仕事関数が低く、ホローカソードの電子放出材料として使用されてきた。今回は酸素雰囲気中でも電子放出性能の低下が比較的起きにくい LaB₆を採用した。これは、ホットカソード自体には水を使用しないものの、水アノードとのカップリング作動の際にはカソード周囲が水蒸気雰囲気圧になることを考慮したためである。

<カソードの基礎設計>

➤ LaB₆加熱温度の計算

設計にあたって、最初に LaB₆の電子放出表面積および加熱温度を決定した。電子電流 300 mA を目標作動点とすると、LaB₆表面積が大きくなるほど作動温度は低くてもよい。作動温度の低下は熱放射による損失の低下につながる。一方で空間への暴露面積が大きくなるに比例して熱放射による損失増加の効果も存在する。以上のトレードオフを考慮し、作動温度を 1700 K に決定した。このとき、LaB₆表面から損失する熱量はおよそ 10 W と計算された。この熱量は、熱放射による熱量と放出される熱電

子が持つエネルギーの合計である。

➤ 加熱方法の検討

LaB₆の加熱方式として、ヒーターによってLaB₆を加熱する方式とLaB₆に直接電流を流してジュール熱により発熱させる2方式を検討した。それぞれの特徴は次の通り。

✓ ヒーター方式

LaB₆よりも電気抵抗率の高い素材をヒーターとすることで、効率的に発熱ができる。さらにLaB₆自体の形状の自由度が高い。これはLaB₆加工および機械固定の観点から有利である。一方で、LaB₆とヒーターの両方が高温になるため、熱損失量が大きくなると予想される。

✓ ジュール熱方式

高温になる部分がLaB₆に限られるため、熱損失量が抑えられる。また、部品点数の少なさが小型化につながる。一方で、LaB₆の電気抵抗率の小ささが律速し、加熱に10 A級の大電流を流す必要がある。また、この問題点の克服のために電気抵抗値を稼ごうとすると細長い棒状に形状が制限されるが、加工および機械固定の難易度が上がる。

検討の結果、要求される加熱電流値が小さいヒーター方式を採用した。10 A級の大電流の取り扱いには実験上および将来的な実機開発において難があると判断したためである。

➤ 詳細設計

CADソフトを用いてカソードの詳細設計を行った。設計したカソードは、LaB₆を昇温する加熱部と、高温の加熱部からの熱放射を抑えるヒートシールド部に大別できる。以下、それぞれの詳細設計について記載する。

✓ 加熱部

高温になったLaB₆は金属と反応し電子放出能力が低下するため、金属とは直接触れないような設計とする必要がある。そこで、LaB₆に接触する部品は全てカーボン製にした。カーボンはLaB₆よりも電気抵抗率が高く、コイル状に設計することでLaB₆を加熱するヒーターとして機能する。また、コイルの反発力を利用してLaB₆を機械固定する設計とした。LaB₆に触れない部分は、耐熱性の観点からタンタルあるいはモリブデン製の部品で構成した。電氣的に絶縁したい部分については窒化ホウ素(BN)を用いた。

加熱部3Dモデルの外観および断面図を図2-1、図2-2にそれぞれ示す。



図 2-1 加熱部 3D モデル外観

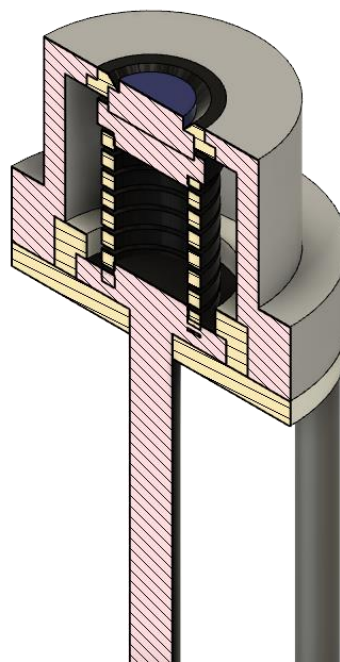


図 2-2 加熱部 3D モデル断面

✓ ヒートシールド部

高温の加熱部から熱放射による損失を防ぐため、断熱ヒートシールドを設けた。薄いシールドを複数層重ねることで、外側の層の表面温度が低下し、熱放射による損失を減らす。層の数は多ければ多いほど表面温度が低下するが、表面積も増加するため、熱放射低下の効果は小さくなっていく。断熱効果とカソードの取り回しやすさを照らし合わせて 6 層と決定した。ヒートシールドには厚み 0.2 mm のタンタルを用いた。

ヒートシールド各層の間の締結には、アルミナネジを使用した。締結部分を絶縁体とすることで、将来的に各ヒートシールドを異なる電位にしての作動や、各ヒートシールドに流入する電流を個々に測定することを可能とした。ヒートシールド同士の接触面積が大きいと、締結部から熱伝導によって損失する熱量が増えてしまう。よって締結部分の面積が小さくなるようにネジの呼び径は M2、締結本数は 2 本とした。

加熱部にヒートシールド 6 層を締結した状態の外観および断面図を図 2-3, 2-4 にそれぞれ示す。



図 2-3 ヒートシールド取り付け時外観

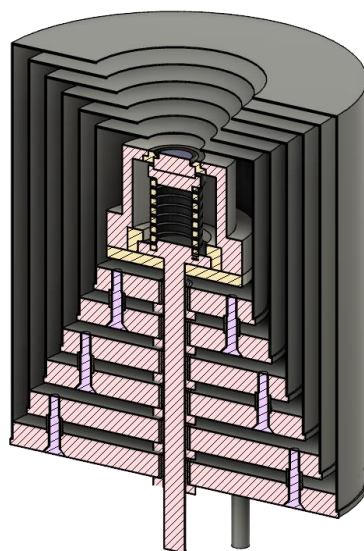


図 2-4 ヒートシールド取り付け時断面

➤ 断熱効果計算

上記の通り設計したヒートシールドによる断熱効果を計算した。計算に際して、以下のような仮定をしてモデル化を行った。

- ✓ 加熱部温度は 1700 K で一定とする。
- ✓ ヒートシールド間の熱の移動は熱放射および締結部分の熱伝導のみを考慮する。
- ✓ 熱放射と熱伝導のバランスにより各ヒートシールドの定常状態温度が定まる。
- ✓ 2次元軸対称を仮定する。

計算結果として、加熱部およびヒートシールド各層の温度を表 1 に示す。これより、最も外側の 6 層目から熱放射によって損失する熱量は 23 W と計算された。先述の LaB_6 表面から損失する熱量 10 W と合わせて、消費電力は 33 W と性能予測がなされた。

表 1 ヒートシールド断熱効果計算結果

	加熱部	1 層目	2 層目	3 層目	4 層目	5 層目	6 層目
温度 /K	1700	1510	1346	1196	1051	903	752

<カソードの製造>

➤ 設計部品の発注

詳細設計に沿って各種部品を発注した。部品発注に関して、特に言及すべきと思われる特殊部品について表 2 に示す。また、表 2 にまとめた部品の外観を図 2-5, 6, 7 にそれぞれ示す。

表 2 カソード構成部品として発注した特殊設計品

部品名	発注業者	備考
LaB ₆ チップ	株式会社光学技研	LaB ₆ 内部不純物の組成の違いから、発注業者によって電子放出性能が異なる可能性がある。
カーボンコイル	イビデン株式会社	炭素を複雑形状に加工する技術を有する。コイル電気抵抗の設計値は、常温にて 2.1 Ω, 1400℃にて 1.3 Ω である。
ヒートシールド	株式会社ナガノ	厚さ 0.2 mm のタンタルを、スポット溶接によって円筒+片側底面、の形状に加工。



図 2-5 LaB₆チップ外観



図 2-6 カーボンコイル外観



図 2-7 ヒートシールド外観

➤ 組み上げ

上記以外の設計部品も全て発注し、カソードを組み上げた。ただし、組み上げの際に 5 層目と 6 層目のヒートシールドを締結するアルミナネジが破損するという不具合が起きた。これは、ヒートシールドを取り付けたカソードの質量が大きく、アルミナが荷重に耐えられなかったためと考えられる。同様の不具合再発防止のため、3 層目と 4 層目締結のネジおよび 4 層目と 5 層目締結のネジをモリブデン製に取り替えた。また、5 層目と 6 層目締結ネジは計算より温度が比較的低めだとわかっているため、SUS 製のボルトに取り替えた。この不具合対処によりヒートシールド 3 層目から 6 層目までが電氣的に導通してしまうこととなったが、直近の初期作動試験に関しては何も問題ない。

以上の経緯を経て組み上がったカソードの外観を図 2-8 に示す。ヒートシールド 6 層を取り付けた状態で、直径・軸方向長さ共に 6-7 cm 程度の大きさである。

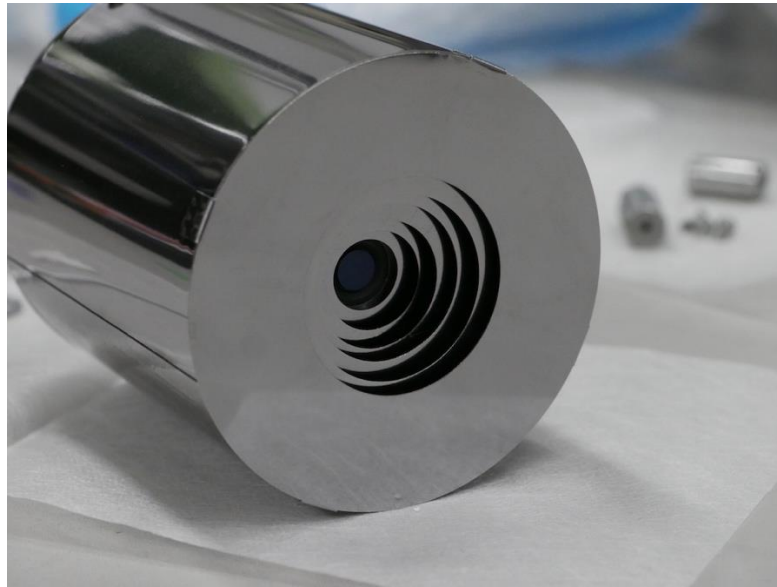


図 2-8 組み上げたカソードの外観

➤ カソード Rev2 設計に向けた改善点

カソード Rev1 の組み上げを受けて、Rev2 の設計に向けた改善点を以下に挙げる。

- ✓ ヒートシールド固定方法を改良する。現状ヒートシールドは円筒側面から 2 箇所ねじ止めによって固定されているが、カタカタとわずかに動く。これは 2 箇所のねじ止めが同一直線上に配置されているのが原因であり、同様の方法で固定する場合 Rev2 では固定箇所の増加が必要となる。
- ✓ 加熱部中心から伸びている炭素棒をタンタルに変更する。この炭素棒は LaB_6 加熱用の電流導入ラインとして電源に接続される。炭素棒破損のリスクを考えて径を太く設計しているが、これにより電流ラインを伝っての熱伝導による損失が生じる。損失を抑えるには径を細くすることが有効であり、Rev2 ではより強度のあるタンタルへと素材変更をすることを考えている。

初期作動試験はまだこれからのため、上記に加えて作動試験の結果を受けた改善点も含めて Rev2 開発を進める。

＜カソード実験系の構築＞

➤ 実験系全体の設計

今後のカソード実験の円滑化のため、カソード単体作動専用の実験系を設計した。この実験系では、SUS 製の 6 方クロス内部にカソードおよび電子補修コレクタを配置し、6 方クロス内部を真空引きすることでカソード実験を行う設計とした。6 方クロスの 1 方には排気系を接続、1 方にはカソードを配置、1 方には圧力計を接続、残り 3 方はガラス窓にするという設計にした。設計した実験系の 3D モデル外観を図 2-9 に示す。図 2-9 に示すように、各種フランジを取り付けた 6 方クロスはアルミフレームによって構築される固定フレームの上に搭載される。また、実験系の真空系統図を図 2-10 に示す。真空引きはロータリーポンプ (RP) とターボ分子ポンプ (TMP) によってなされる。

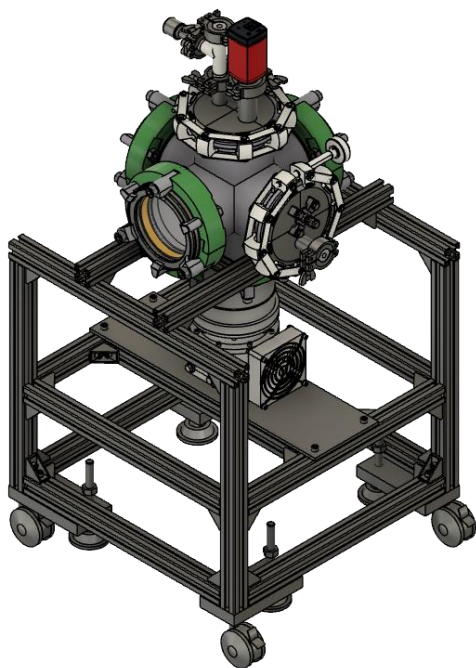


図 2-9 カソード実験系の 3D モデル

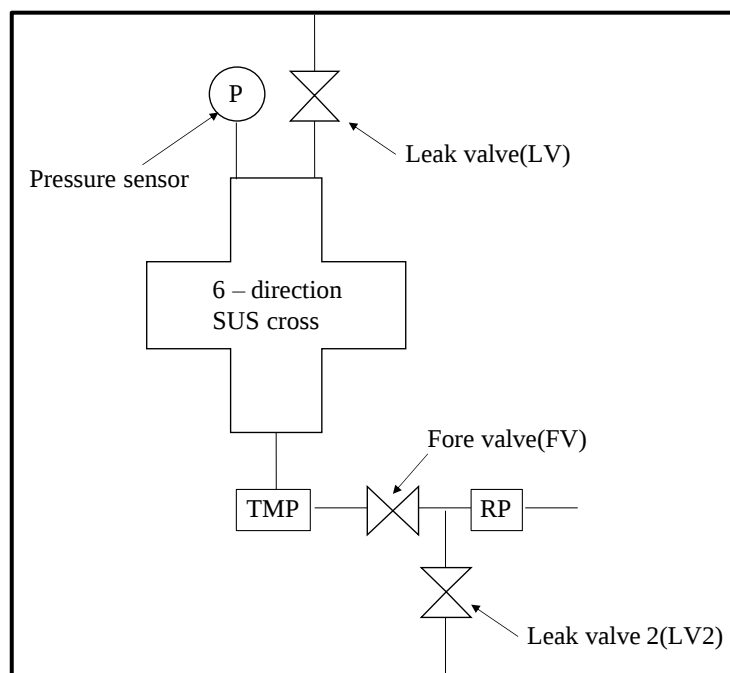


図 2-10 カソード実験系の真空系統図

➤ カソード機械固定部の設計

この実験系では、カソードは真空フランジに直接機械固定され、フランジとともに 6 方クロスへ付け替えが可能な設計とした。真空フランジにカソードが接続されている 3D モデル外観図を図 2-11 に示す。

図 2-11 に示されているように、カソードとフランジの機械固定は 4 本のパンチングメタル製支柱によって行う。これは、パンチングメタルを使用することによって、支柱の実効的な断面積が減り、カソードからフランジへと熱伝導によって損失する熱量を抑えることができるためである。カソード温度を 800 K、フランジ温度を 300 K と仮定しての簡略化した計算により、4 本の支柱から熱伝導によって損失する熱量の合計は 12 W 程度と見積もることができた。



図 2-11 カソードとフランジが固定されている様子

➤ カソード加熱用電流導入部分の熱設計

さらに、図 2-11 に示されているフランジには電流導入端子を取り付け、カソード後方から伸びている炭素棒およびタンタル棒に接続される設計とした。この電流ラインに数 A 級の電流を流すことで LaB_6 が加熱される。

電流導入部分に関して、ここでも熱伝導によるカソードからフランジへの熱損失が懸念点としてあげられた。従って電流導入端子とカソードとの間に熱伝導率の低いチタン棒を介して電氣的に接続させることによって、熱伝導による損失を抑える設計を行った。この設計を踏まえた簡易的な計算により、2 本の電流導入部分から熱伝導によって損失する熱量の合計が 3 W 程度と見積もることができた。ただし、高温になったチタン棒からの熱放射による損失は全く考慮していない。これは、2 本の電流導入ラインに SUS 箔を何重にも巻くことによって熱放射を極力抑える設計を採用したためである。

➤ 実験系の構築

以上のような思想に基づいて設計された実験系は現在構築中である。以下、現在のところ構築が完了したものを記載する。

まず、組み上げた実験系固定フレームの外観を図 2-12 に示す。4 角にはキャスターとレベリングフットを 1 つずつ取り付けており、6 方クロスおよび TMP が搭載されている状態のままフレームごと移動・静置が可能な構造とした。キャスターとレベリングフットは、学内の工作機械を用いて加工したアルミブロックを介してフレームに取り付けられている。



図 2-12 組み上げたカソード実験系固定フレーム外観

また、6 方クロスにカソード固定フランジおよび圧力計接続フランジを取り付けた様子を図 2-13 に示す。この状態ではまだカソードは 6 方クロス内部に固定されていない。なお、圧力計には Pfeiffer 社製 PKR-361 を使用する。ガラス窓および TMP については 6 方クロスとの配管規格の違いがあり、専用の接続ジグの作成を行ってから接続をする。



図 2-13 6 方クロスに圧力計，カソード固定フランジを取り付けた様子

最後に，カソードに電流導入チタン棒が接続された様子を図 2-14 に示す．チタン棒の接続には自作の接続端子を用いた．この接続端子は比較的高温にさらされることを考慮してモリブデンにより作成した．側面からモリブデンネジを締めることによりチタン棒をカソードから出ている炭素棒およびタンタル棒と接続する．

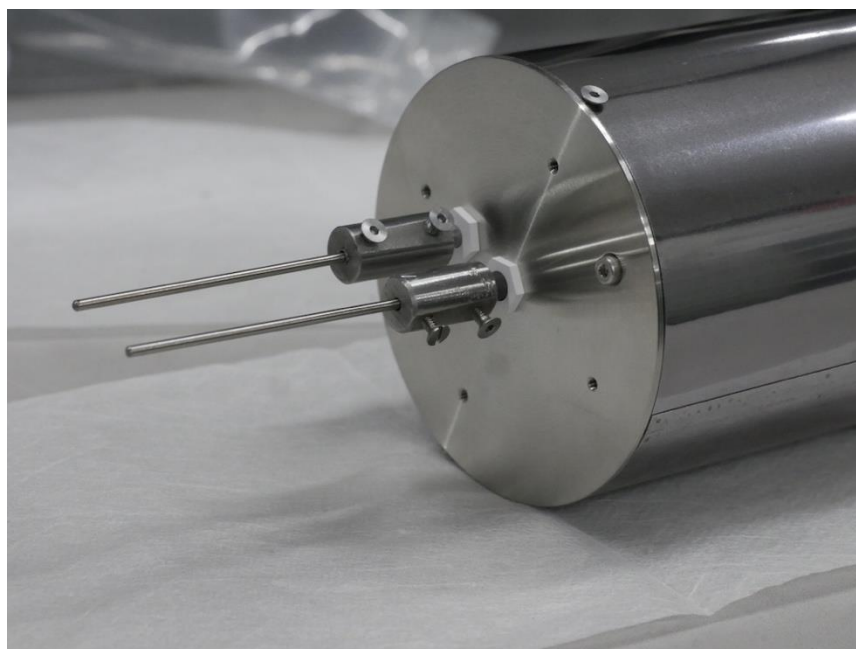


図 2-14 チタン棒の接続時のカソード外観

以上，項目 2A の活動においてはカソード Rev1 の方式選定，基礎設計，組み上げまでが終了しており，初期作動に向けてカソード作動用実験系の構築を進めている．

項目 3. 水スラスタベース開発

<レジストジェットスラスタの高性能化>

➤ 比推力増大のための検討

比推力増大のための方策の整理・検討を実施した。現状のレジストジェットスラスタにおいて、比推力はおよそ 70 s であり、目標として掲げる 100 s の比推力を達成するためには、ノズル出口における気体温度の上昇、ノズル効率の上昇などの方策が考えられる。気体温度の上昇は直接的な比推力の上昇をもたらすが、消費電力の上昇、流路内圧損の上昇が想定される。ノズル効率は、現状、一般的な化学推進のノズルに比べて著しく低く、その改善が比推力の上昇につながる。本委託業務では、電力密度の上昇や流路内圧損を許容することで、気体温度を上昇させ、比推力の向上を目指すこととした。

➤ ヒーターに関する検討

一般的に、人工衛星内部では、ポリイミドヒーターが使用されている。従来使用しているヒーターは、特に電力密度を上昇させたもので、おおよそ 1 W/cm^2 の電力密度が達成されていた。しかし、形状の制限があり、ノズルでの十分な昇温を実現するためには、上記の電力密度では不十分であった。そのため代替のヒーターとして、窒化アルミヒーター（坂口電熱社製の WALN-5 もしくは WALN-6 など）もしくは、表面実装型の大電力チップ抵抗（KOA 社製 W3A2 シリーズなど）を選定した。

➤ 設計の状況

上記等の検討を通して、気体温度の上昇を行うレジストジェットスラスタの概念設計が完了した。今後は、機械設計を実施し、上記のコンセプトの実証を行っていく予定である。

<高電圧電源の開発>

➤ 要求仕様の整理

水ホールスラスタおよび水イオンスラスタに使用する高電圧電源の仕様の整理した。主要な要求仕様は以下の通り。水ホールについては並行して開発中のため、電圧や電流は暫定値となるが、研究目標として掲げた値よりは大きい値を設定している。

✧ 電圧：500 V (Max, 水ホール, 暫定値) / 1500 V (Max, 水イオン)

✧ 電流：500 mA (Max, 水ホール, 暫定値) / 20 mA (Max, 水イオン)

✧ 共通する要求

➤ 宇宙環境耐性

✧ ロケットによる振動環境耐性

✧ 真空環境下で破壊せずに作動すること

✧ 真空環境下での熱特性

✧ 対放射線耐性

➤ プラズマ電源としての耐性

✧ 短時間 (ms オーダー) の短絡に対する耐性

✧ 十分な EMC 性能 (負荷側のノイズへの耐性および周辺への放射が十分小さい)

➤ 既製品高電圧電源モジュールの選定

上記の要求仕様を基に、高電圧電源開発のベンチマークとなる、既製品の高電圧電源モジュールを選定した。共通する要求である宇宙環境耐性とプラズマ電源としての耐性を検証することが目的となる。具体的には、①他研究機関における真空中での作動実績のある既製品（Ultravolt 社製 2AA24-P20-M、以下既製品①）、②作動実績はないが、内部の部品を真空作動用にカスタムしたカスタムメイド品（Dean Technology 社製 UMR-AA-JC113、以下既製品②）の 2 種の高電圧電源を選定した。上記の要求仕様の中で、振動耐性と熱特性については、全体の設計によるところが大きいため、真空中で作動ができること、対放射線耐性が十分にあると想定されることを主な基準として選定した。既製品②は、真空環境下での作動、および十分な EMC 性能を実現するため、使用するコンデンサを電解コンデンサからタンタルコンデンサへと変更し、メタルシールドを実装するなどのカスタムを施している。また、作動点近辺での性能を向上させることで、排熱を抑制し、熱特性も有利になるように変更した。

➤ 既製品高電圧電源の作動試験

既製品の高電圧電源 2 種を作動させるための回路および基板を開発し、作動試験を実施した。この回路は、高電圧電源の出力電圧を制御するとともに、出力電圧と出力電流を測定し、デジタル信号に変換、I2C 通信で上流の PC もしくはマイコンによって制御・監視を行う回路である。実際の運用状態である、マイコンを通した作動試験を実施し、回路が正常に作動していることを確認した。

➤ 既製品によるイオンスラスタ作動

既製品①と項目 4 の水イオン実証機において開発中の制御回路（本委託業務外の開発成果品）を用いて、イオンスラスタの作動を実施し、真空環境下での作動特性、熱特性およびプラズマ電源としての耐性を検証した。この作動により、現状の設計では十分に排熱が実施され、真空環境下での作動に問題がないことが確認された。また、本作動において該当高電圧電源は、1 秒間に数回程度の激しい放電（短時間の電源短絡）を数秒間にわたり複数回経験しており、放電に対する耐性も確認された。今後、既製品②についても同様の試験を行い、長時間作動を続けることによって、比較的長い時間スケールにおける不具合の洗い出し、検証を進めていく予定である。

➤ 小型化した高電圧電源の設計

既製品①及び既製品②の初期検証において、要求仕様を満たすために必要な事項がおおよそ整理された。この情報を基に、上記既製品の評価と並行して、Pale Blue においてさらに小型の高電圧電源の開発を実施した。基本的には、既製品において要求仕様よりも大幅に性能が良い部分となっている、出力電圧の可変幅や電源のリップル、基板上での放電に対する耐性について妥協することによって、基板全体の面積を小さくすることができる。そのうえで、真空環境下での作動における熱パスを検討し、必要最低限の熱伝達材を充填することで、大幅な小型化ができると考えた。この方針に基づき、回路設計を実施、設計上は十分な性能が得られることを確認した。

<水供給系>

➤ 系統図の決定

水イオンスラスタおよびホールスラスタと、レジストジェットスラスタの両方を作動させることのできる、水供給系の系統図を設定した（図 3-1）。特にプラズマを使用する推進機の課題である着火の問題にフォーカスし、流量の一時的な増大を実現する系になっている。また、イオンスラスタやホー

ルスラスタと、レジストジェットスラスタの片方が故障した際、他方へと故障が波及しない設定になっている。後述する水イオンスラスタの実証機にも本系統図が採用されている。

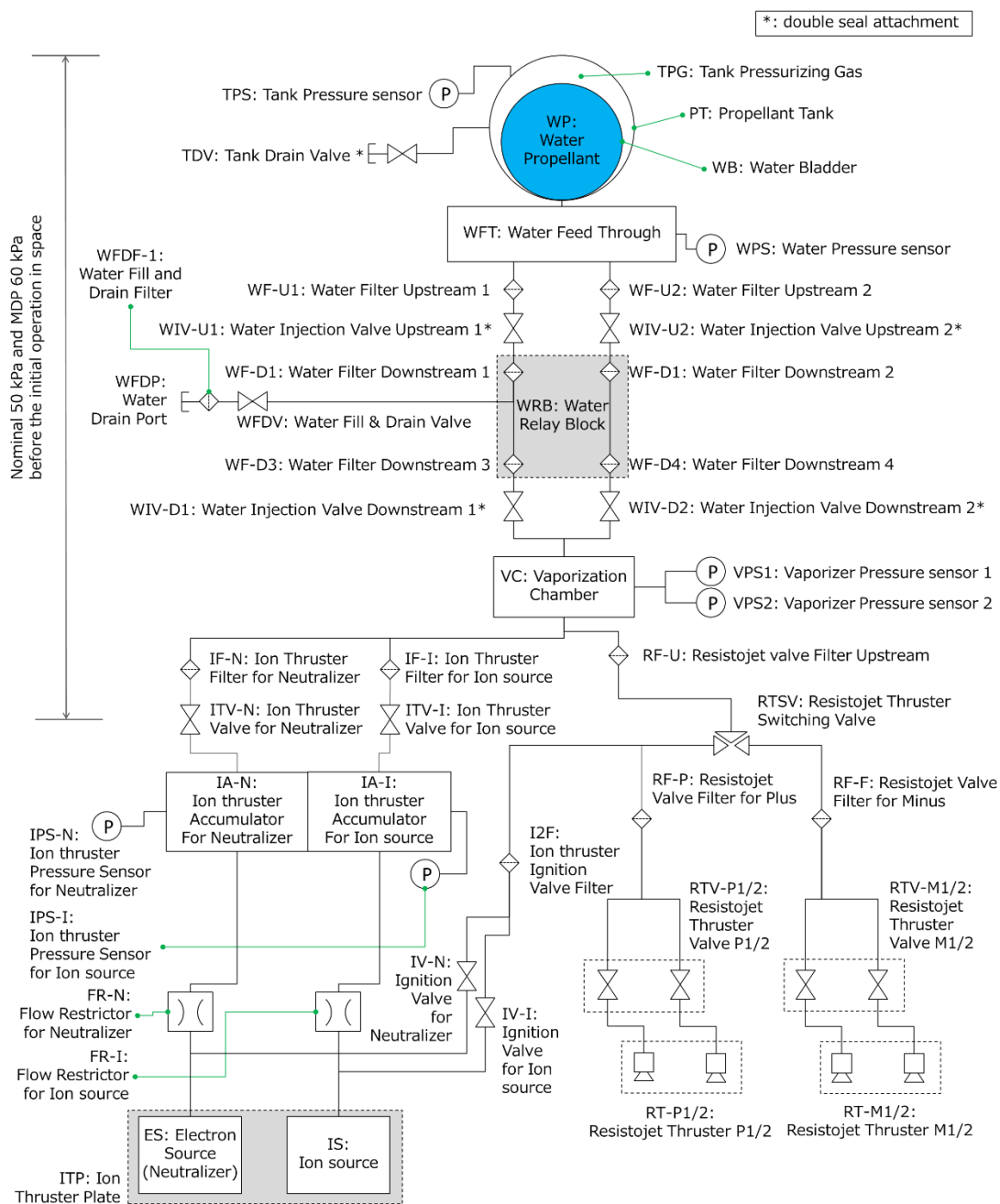


図 3-1 水供給系系統図

➤ 流量制御部の真空中での作動実施

流量制御系のブレッドボードモデル（BBM）を作成し、現状コンセプトによって流量制御を行うことができることを確認した。従来の水イオンスラスタの研究では、気化室を用いず気液分離は重力を利用して行っていた。この方法は宇宙空間で使用することができない。気化室を用いることによって、宇宙空間（無重力空間）でも使用できるシステムとなり、その作動を確認することで、上記系統図のシステムによる流量制御が成立することを確認した。

➤ 気化部小型化の実施と流量制御系の設計

水供給系の気化部体積を AQT-D に比べて大きく削減する設計を実施した。気化室内部の体積を削減し、かつヒーター貼り付け部の面積をヒーターの大きさに最適化することで、従来の気化部に比べて、占有体積は大きく削減された。一方、特に流量制御のためにバルブが増加しており、その分体積が増加している。特に流量制御のために必要なアキュムレータの体積が大きく、AQT-D に比して小さくすることは難しい。そこで、システム全体の寿命とのトレードオフで、アキュムレータの体積を減少させ小型化を実施、AQT-D に比べて崩落域体積としてほぼ変わらない設計を実現した。

➤ 水タンクの容量増加

従来の水供給系において、タンクの容量が最大 1.25kg に制限されていたのは、タンクを拡大する方向に制限があったことが大きな要因である。タンクに関する容量を変更して、水タンク自体の大きさを変更することはなく、同一設計品を複数個搭載することで水の容量を増加させるコンセプトで設計を実施している。また同時に、タンク自体を大型化するための設計検討も行った。

➤ 製造の状況

各部品の製造は完了している。システムとしての組み立てを実施しており、今年度イオンスラスタを使って作動試験を実施する予定となっている。

項目 4. 水イオン実証機

<開発状況>

➤ 概要

JAXA の革新的衛星技術実証プログラムに、Pale Blue 社の提案した「水を推進剤とした超小型統合推進システムの軌道上実証」が選定されており、本委託業務の水スラストベースと共通した要素が使用されている。現在、JAXA と合意した開発スケジュールに沿って開発が進められている。本委託業務による新規開発要素はないが、水ホールスラストの宇宙実証に向けた重要なマイルストーンとなる。以下、開発状況を報告する。

➤ 電気モデル

電氣的負荷を模擬するモデルを製造し、制御基板および各種電源系の健全性確認を実施した（図 4-1）。制御基板上で不具合が発生し、その対応を実施し、本年度末時点で、各種電装系の機能が全て確認された。上記で述べた高電圧電源に関する検証結果も反映されている。

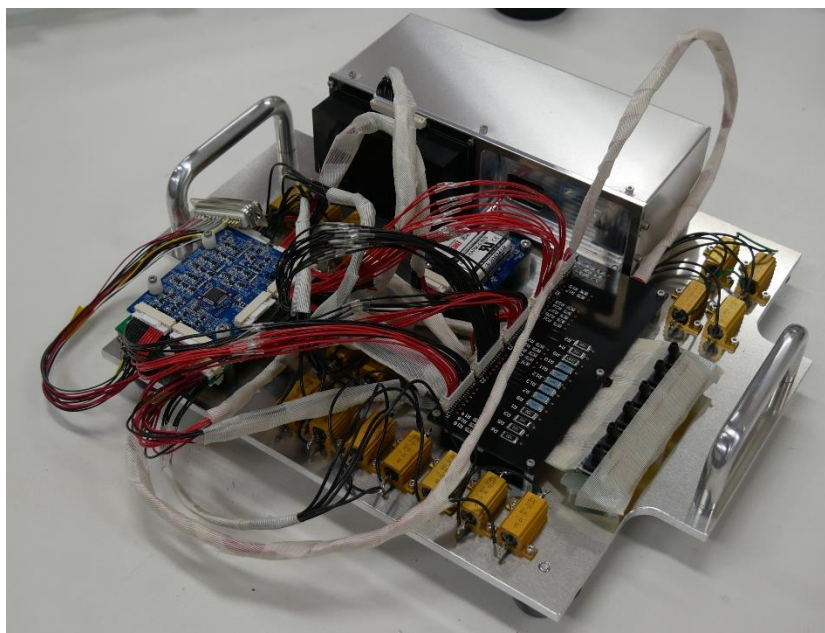


図 4-1 電気モデル外観

➤ エンジニアリングモデル

エンジニアリングモデルとして、Pale Blue 社内部での検証用のモデルが開発されている。本年度末時点で、おおむね部品の製造が完了している。

<実証機会の模索>

ここまで述べた研究活動のほかに、株式会社 Pale Blue を中心に、実証機会の模索を行っている。JAXA の革新的衛星技術実証プログラムに採択されたことはその一つである。同時に多くの企業にアプローチし、民間企業からの受注も予定している。

【まとめ】

本年度における成果目標及びそれに対する結果を示す。

- 1A. アノード Rev1
 - ✓ アノード Rev1 の設計・試作をする
 - ✧ 12 通りのチャンネル形状を設計し、それぞれに対して磁場設計と熱設計を行った。
 - ✧ そのうちの 1 つのモデルについて組み上げを完了し、目標を達成した。
 - ✓ アノード Rev1 の初期作動の目処を立てる
 - ✧ 初期作動に向けて実験機器および真空環境の整備を行った。
 - ✧ アノードが作動できる試験環境整備が完了し、目標を達成した。
- 2A. カソード Rev1
 - ✓ カソード Rev1 の方式選定をする
 - ✧ いくつかの方式の中から小型水ホールスラスタに適する方式選定を行い、目標を達成した。
 - ✓ カソード Rev1 の基礎設計の目処を立てる
 - ✧ CAD を用いた詳細設計を行い、目標を達成した。
 - ✧ さらに発注した設計部品を用いて組み上げまで完了した。
 - ✧ カソードの初期作動に向けた実験系の構築が進捗している。
- 3. スラスタベース開発
 - ✓ レジストジェットスラスタの比推力を 70 s 前後から 100 s 以上に引き上げる設計を行う
 - ✧ 引き上げのための課題を明らかにし、ヒーターの選定などを実施した
 - ✧ 概念設計が完了し、目標をおおむね達成した。
 - ✓ 高電圧電源の小型化と高効率化を目標とした設計を行う
 - ✧ 既製品の性能を評価し、ベンチマークとした。
 - ✧ 従来品の半分程度の電源を新規設計し、目標を達成した。
 - ✓ 水供給系の体積を 10%削減させた設計を行う
 - ✧ 想定していた気化部の体積は 30%以上削減され、目標を達成した。
 - ✧ 一方、流量制御のための体積が課題であることが明らかになった。
 - ✓ タンクの水搭載量を最大 1. 25 kg から 8. 0 kg に引き上げる設計を行う
 - ✧ タンクを複数個搭載することによる水の容量を増加させる設計を実施した。
 - ✧ 平行して、タンク自体を大きくする設計は実施している。
- 4. 水イオン実証機
 - ✓ 革新実証衛星 3 号への搭載に必要な開発を進め、JAXA が指定する開発スケジュールに沿う見込みを立てる
 - ✧ JAXA と合意したスケジュールに沿って開発を進めている。
 - ✧ 現在、想定したスケジュール通りに開発が進捗している。
 - ✓ 上記に加えての実証機会(Pale Blue からの実機販売を含む)の可能性を模索するとともに、それが

得られた場合はその開発見込みを立てる

- ☆ 主に株式会社 **Pale Blue** として、実証機会の模索を実施し、民間企業からの受注も含めて検討段階にある。

また、本年度の活動による波及効果を以下に示す。

- 2021 年 2 月 8 日に、九州工業大学 趙教授、宇宙航空研究開発機構 宮崎教授／船瀬教授らと共に「超小型探査機を用いた月以遠深宇宙探査に関する研究会」を主催（オンライン開催）し、また、本研究開発活動に関しての発表を行った。本研究会への参加は計 165 名に上り、JAXA 等の宇宙機関や大学・高専研究者はもとより、大学の院生、学部生や一般企業からの参加があり、パネルディスカッションを含めて盛況なものとなり、同テーマに関する理学・工学の連携を強めることができた。

参考文献および出典を以下に示す。

- 1) Dan M. Goebel, Ira Katz: Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, 2008.
- 2) H. Watanabe, S. Cho, K. Kubota: Performance of plume characteristic of an 85Wclass Hall thruster, Acta Astronautica 166, 2020.