

令和4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5年11月
国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究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4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」の成果をとりまとめたものです。

目次

1	はじめに.....	1
1.1	委託業務の目的.....	1
1.2	業務の方法.....	1
2	実施内容.....	2
2.1	【1B. アノード Rev2】.....	2
2.1.1	アノード Rev1 の知見.....	2
2.1.2	アノード Rev2 の設計・製作.....	7
2.1.3	放電性能の評価試験.....	9
2.1.4	プラズマ測定および最適作動点の選定.....	9
2.1.5	推進性能の評価.....	10
2.2	【2B. カソード Rev2】.....	12
2.2.1	Rev1 性能評価試験結果および電子粒子計算結果の概要.....	12
2.2.2	Rev2 の設計・構築.....	12
2.2.3	温度評価試験.....	13
2.2.4	性能評価試験.....	15
2.3	【3. 水スラスタベース開発】.....	18
2.3.1	レジストジェットスラスタ.....	18
2.3.2	イオン用高電圧電源、水供給系.....	19
2.3.3	ホールスラスタ用アノード電源の構築.....	20
2.3.4	ホールスラスタ用アノード電源構成要素の要件.....	21
2.3.5	ホールスラスタアノードとアノード電源の統合試験.....	22
2.3.6	ホールスラスタアノードとアノード電源の統合試験結果.....	23
2.3.7	ホールスラスタ用アノード電源の結論.....	32
2.4	【4. 水イオン実証機】.....	33
2.4.1	打ち上げ.....	33
2.4.2	成果の発信と国際動向の把握.....	33
2.4.3	新たな実証機会の獲得.....	34
2.5	【5. 水ホール実証機】.....	35
2.6	【6. 水ホールスラスタ開発】.....	36
2.6.1	組み合わせ作動準備.....	36
2.6.2	組み合わせ作動による性能評価.....	37
2.6.3	結論.....	39
	参考文献.....	40
3	まとめ.....	41

1 はじめに

1.1 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。

1.2 業務の方法

令和4年度における実施内容は、以下の通りである。

【1B. アノード Rev2】水ホールスラスタのアノード(主放電部)開発は、Rev1 と Rev2 の 2 段階で実施する。本年度は、Rev1 試験での知見を活用しつつ Rev2 の性能評価試験およびプラズマ測定を実施し、最適作動点の選定および性能評価を行うまでを目標とする。

【2B. カソード Rev2】水ホールスラスタのカソード(電子供給部)開発は、Rev1 と Rev2 の 2 段階で実施する。本年度は Rev1 の性能評価試験の結果ならびに電子粒子計算の結果をフィードバックして Rev2 の設計・構築を行い、性能評価試験および温度評価試験を行うまでを目標とする。

【3. 水スラスタベース開発】水スラスタベース開発においては、各コンポーネントの製造と作動試験を完了、全コンポーネントの統合試験および環境試験を実施し、アノードとカソードを水スラスタベースで作動することができる状態とすること、および組み合わせの作動を目標とする。

【4. 水イオン実証機】実証機に向けた FM 開発は完了しているため、本年度は開発業務を実施しない。一方、完成した FM、その試験成果、およびそれらの宇宙実証結果については、国際的に影響力のある学会・展示会において積極的に発信を行うとともに、国際動向の把握をすすめる。

【5. 水ホール実証機】計画している水ホールスラスタに対して、国内外の機関・企業と軌道上実証および実利用機会について交渉を実施、搭載に必要なインターフェースなどの条件を入手する。このために、国際的に影響力のある学会・展示会における発表や展示を積極的に活用する。

【6. 水ホールスラスタ開発】項目 1,2 で開発したアノード・カソードを組み合わせ水ホールスラスタとして作動させ、性能評価試験を行う。またその結果を受けて統合試験・環境試験の目途を立てるまでを目標とする。

2 実施内容

2.1 【1B. アノード Rev2】

2.1.1 アノード Rev1 の知見

アノード Rev2 の設計にあたり、当該年度に行ったアノード Rev1 での試験により得られた知見について報告する。まず、水供給系の加熱や適切な作動点の選定等の工夫により、Rev1 の標準モデルである加速チャンネルの平均直径(D)が 20 mm、幅(W)が 6 mm の D20W6 型を用いて水蒸気での定常作動の実現に成功した。流量 0.81 mg/s の条件下において磁場や電圧を変化させた際の放電特性を図 1-1 に示す。水蒸気作動では磁場に対して極小値を持つ傾向が見えており、また高磁場側ではプラズマを維持できていないことがわかる。また、キセノンの同程度の流量の際と比べて、放電電流の絶対値も大きいことがわかる。また、電圧感度についても、水蒸気はキセノンと比べて、電圧上昇に対する電流上昇が大きいことが確認された。ホールスラスタにおける主要な物理現象である放電振動波形についても取得を行った。図 1-2 に示した代表的な振動波形からもわかる通り、水蒸気作動においてはキセノン作動時と比べて顕著な振動は確認されなかった。これは電離を経ずに流れる中性粒子の割合が多いことに起因するものと考えられる。

続いてプラズマ計測の手法を用いて行った性能評価について、表 1-1 にキセノン作動と水蒸気作動における典型的な性能をまとめた。水蒸気作動においては、放電電力がキセノン作動と比べて大きくなっており、これに伴って推進機の温度が高温になっていることを確認した。100 W 級のスラスタ実現のためには、より小型なモデルの作成が必要となることが示唆された。

図 1-3 にファラデープローブおよび逆電位アナライザを用いた測定により得られた各効率を、水蒸気・キセノン作動それぞれについて記載する。水蒸気とキセノンを比較すると、推進剤利用効率が著しく低下していることがわかる。これは大多数の中性粒子が電離を経ずに排出されていることを意味する。水蒸気はキセノンと比べて電離衝突断面積が小さいガス種であるため、推進剤利用効率は低くなりやすい。性能向上に向けて、この効率を上げていくことが必要となる。電圧に対する依存性を見ると、特に水蒸気では作動電圧の増加が推進剤利用効率の向上に効果的であることが示唆された。ビーム効率や電流利用効率については若干減少し、電圧効率についてはキセノンの場合とほとんど変化がないことを確認した。これらの結果をまとめ、国際的な専門雑誌に投稿し、文献[1]の英文雑誌論文として掲載された。

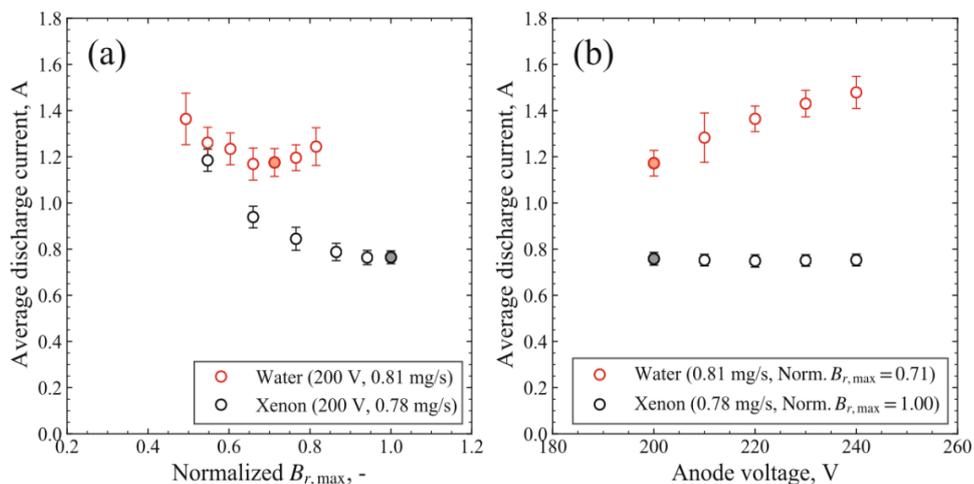


図 1-1 磁場(左)・電圧(右)に対する放電電流のプロファイル。赤が水蒸気作動で黒がキセノン作動 [1].

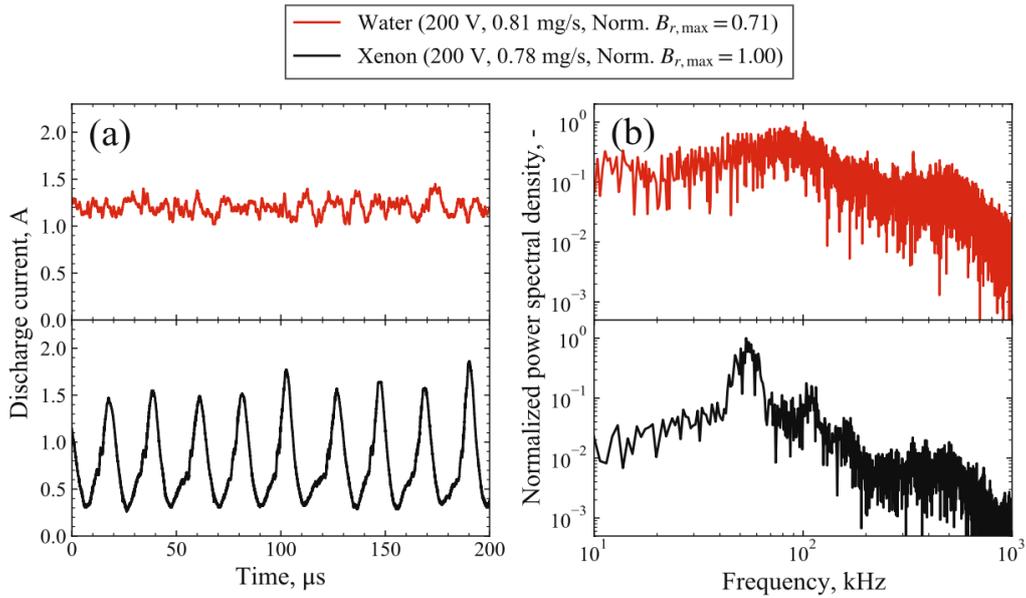


図 1-2 典型的な振動波形とその周波数成分. 赤が水蒸気で, 黒がキセノン作動 [1].

表 1-1 Rev1 スラスタにおける典型的なキセノンと水蒸気作動それぞれの性能 [1].

Propellant	$\dot{m}_a, \text{mg/s}$	V_a, V	I_d, A	P_a, W	T, mN	$T/P_a, \text{mN/kW}$	I_{sp}, s	$\eta_a, \%$
Water	0.81 ± 0.06	200 ± 0.7	1.16 ± 0.06	233 ± 11	4.4 ± 0.7	19 ± 3	550 ± 100	5 ± 2
Water	0.81 ± 0.06	240 ± 0.7	1.49 ± 0.07	358 ± 17	6.8 ± 1.0	19 ± 3	860 ± 140	8 ± 3
Xenon	0.78 ± 0.02	200 ± 0.7	0.76 ± 0.03	153 ± 6	10.3 ± 1.3	67 ± 9	1340 ± 170	44 ± 12
Xenon	0.78 ± 0.02	240 ± 0.7	0.75 ± 0.03	180 ± 6	11.8 ± 1.4	66 ± 8	1540 ± 190	50 ± 13

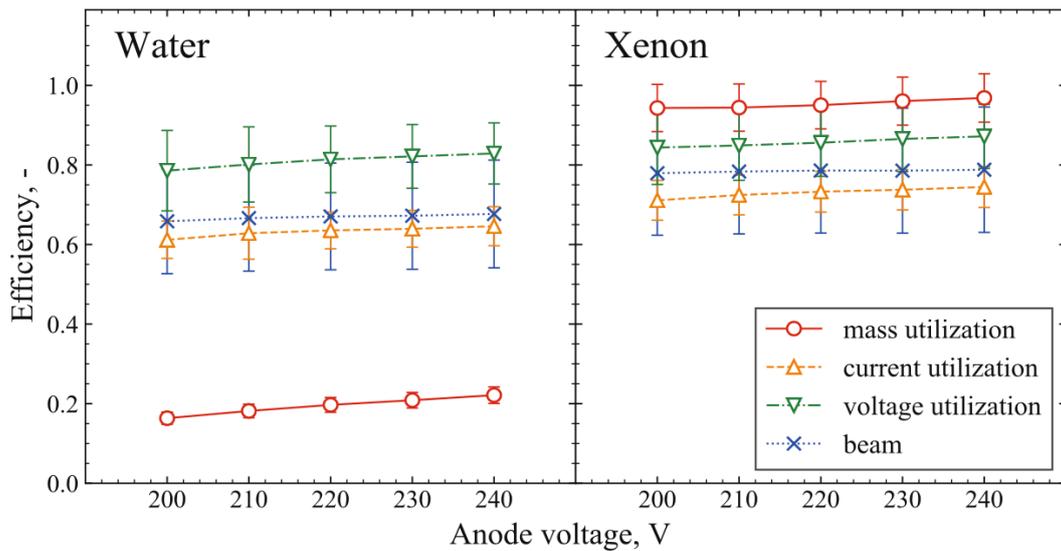


図 1-3 性能指標となる各効率の電圧依存性. 左が水蒸気で, 右がキセノン作動 [1].

水蒸気作動について、チャンネル幅や平均径を変更した実験を実施した。図 1-4 にチャンネル平均直径 20 mm のモデルについて径を変更させた際の結果を示す。放電電流のトレンドの変化が見られた一方で、効率については、電力に比例するような傾向が見られており、モデルごとの大きな差異は見られなかった。チャンネル平均径を変更すると、作動できる磁場範囲が狭くなるという傾向が確認された。D24W5 型では作動に成功した一方で、D30W4 型ではプラズマの着火および維持が困難であった。平均径を広くすることでチャンネルの体積表面積比は小さくなるため、壁面への散逸等の効果が大きくなっているためであると考えられる。効率については幅同様に大きな差は見られなかった。ただし、熱的定常に至れないモデルも多く、厳密な性能比較には更なる工夫が必要である。以上の結果から Rev2 設計に向けては、小電力化に向けてチャンネル断面積を減らす一方で、チャンネル平均直径・幅の比率は D20W6 型と同程度が好ましいという知見を得た。

さらに、中性粒子密度を高めるために、Rev1 モデルを対象にして、二種類の実験を行った。図 1-5 左図に示したのが、前面に外部壁を設けるという変更である。この方法では壁面高さを変更しても優位な性能向上は確認できなかった一方で、カソードからの熱輻射を直に受けることとなり、温度がさらに高くなってしまい、期待していた効果を得ることができなかった。図 1-5 右図に示したのが、Rev1 のチャンネルのみを延長させる方法である。こちらでは、いくつかの条件において推進剤利用効率を高めることはできた一方で、アノード効率の増加は確認できなかった。原因としては中性粒子密度が高まったことにより推進剤利用効率は上昇したものの、壁面へのプラズマロスの増加やイオンビームの直撃により、推進剤利用効率を上回る低下が生じたためと考えられる。以上より、チャンネル出口近傍やチャンネル長については、アノード Rev1 から大きく変更する必要はないことが確かめられた。

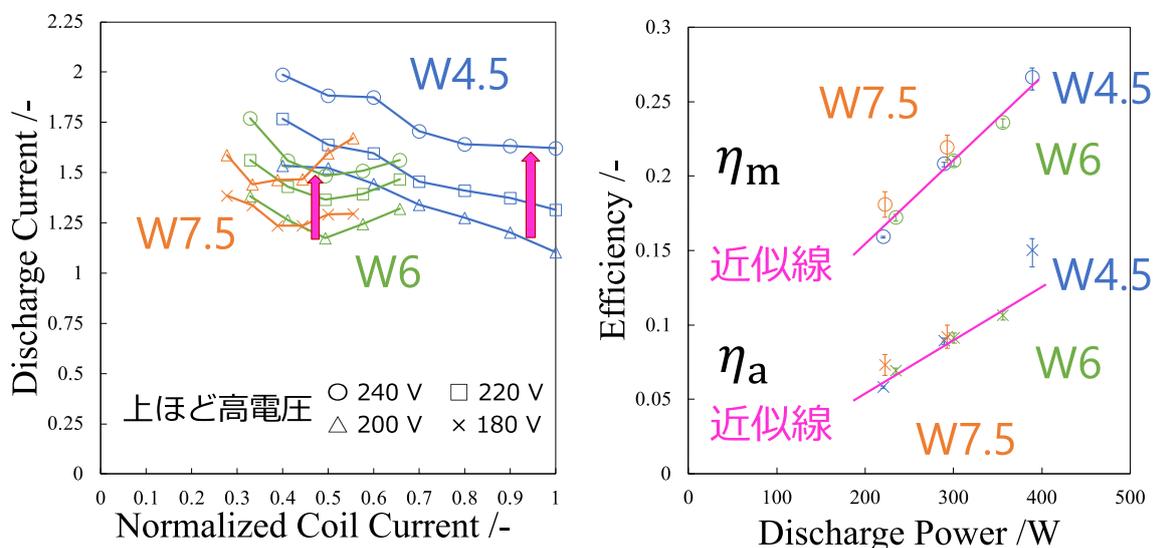


図 1-4 D20 の 3 モデルについて、放電電流の磁場に対する依存性(左図)と放電電力で整理した際のアノード効率および推進剤利用効率のプロット(右図)。電力に効率が比例するような関係が見られた。

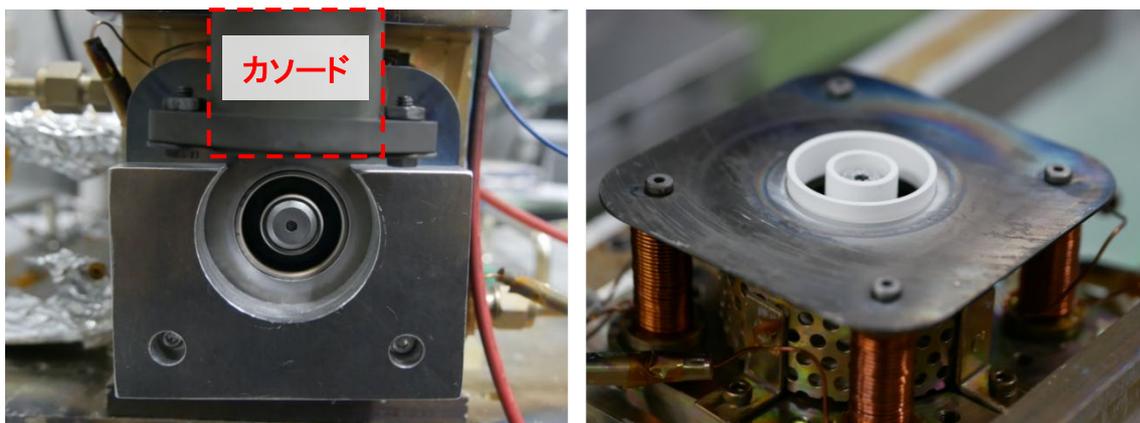


図 1-5 前面に外部壁を設けた Rev1(左図)およびチャンネルのみを延長した Rev1(右図).

将来的な長寿命化に向けて、マグネティックシールディング(MS)の適用に関する検討を実施した。マグネティックシールディングとは、最大磁場領域をチャンネル出口よりも下流に引き出すことで磁力線がなるべく壁面と交わらないようにして壁面損耗を抑える技術であり、比較的大電力のホールスラスタでは既にその効果が実証されている。アノード Rev2 の設計に先立ち、100 W 級のホールスラスタにマグネティックシールディングを適用した場合の効果について確認するために、Rev1 の D24W5 型の磁場構造を MS 仕様に変更して推進性能の評価および内部プラズマの測定を行った。図 1-6 に D24W5 型のオリジナルおよび MS 仕様の磁場分布を示す。なお、マグネティックシールディングに関連する実験は全てキセノンを推進剤として実施した。

推進性能はファラデープローブおよび逆電位アナライザによるプルーム診断に基づき評価し、結果として MS 仕様の場合には多くの作動点で効率が低下することが分かった。これは、プラズマがより下流で生成されることによる推進剤の電離量および加速電圧の低下に起因していると分析されている。本検討では、図 1-7 (a)に示すリニアステージを用いてチャンネル内部へのラングミュアプローブの高速掃引を行い、チャンネル内部のプラズマ諸量の観測も実施した。プローブ掃引時のスラスタの様子を図 1-7 (b)に示す。測定の結果、図 1-8 に示すようなイオン飽和電流(～プラズマ密度)の分布を得た。これより、MS 仕様では確かにプラズマの分布が下流に移動していることがわかり、プラズマと壁面との干渉が抑えられていることが示唆された。このことは、作動後のチャンネル損耗部の比較からも読みとれる(図 1-9)。以上のように、マグネティックシールディングは多少の効率の低下は伴うものの、小型ホールスラスタにおいても有用であることを確かめた。

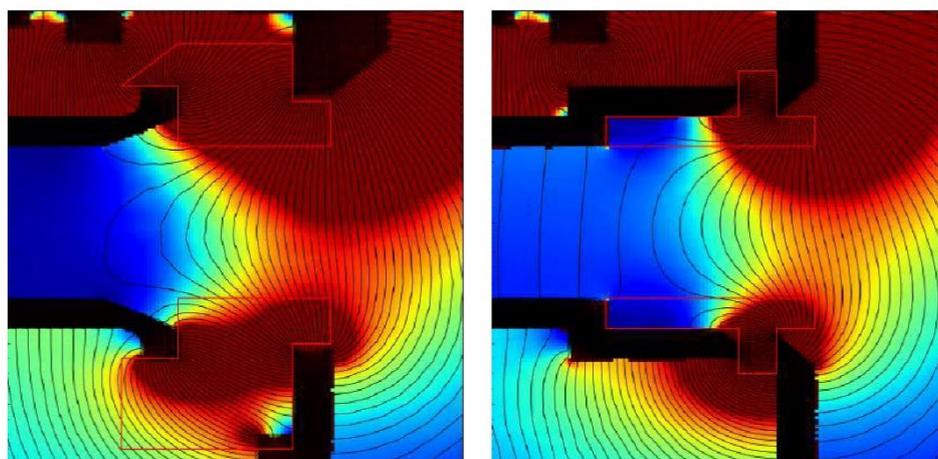


図 1-6 オリジナル(左図)および MS 仕様(右図)でのチャンネル周辺の磁力線形状および磁束密度分布。

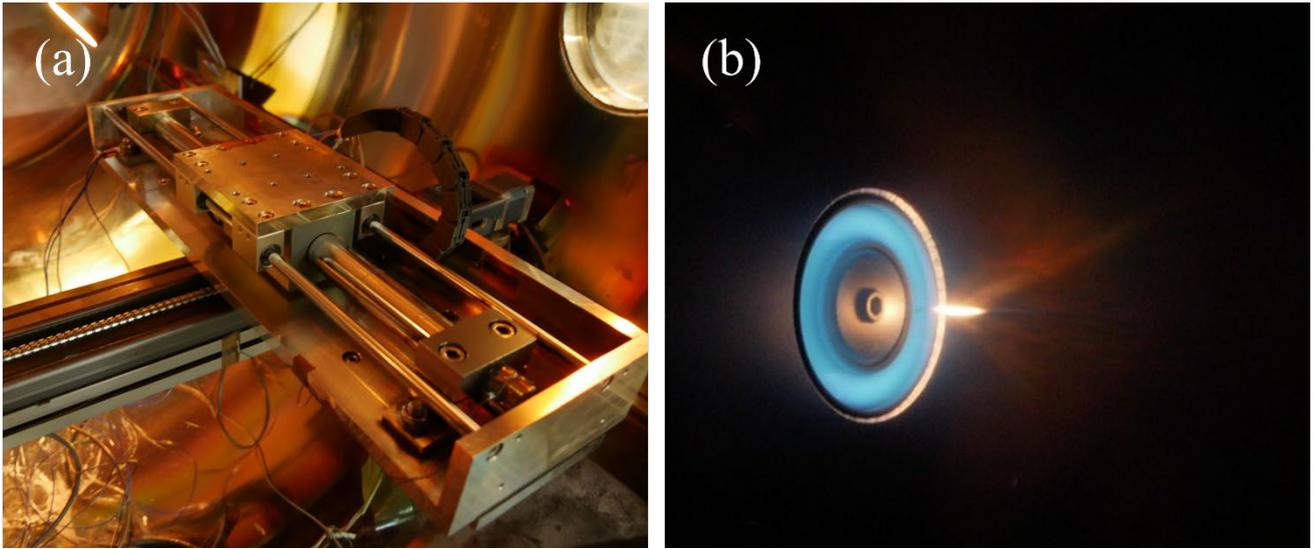


図 1-7 (a) リニアステージおよび(b) これを用いてラングミュアプローブをチャンネル内部に高速掃引した様子.

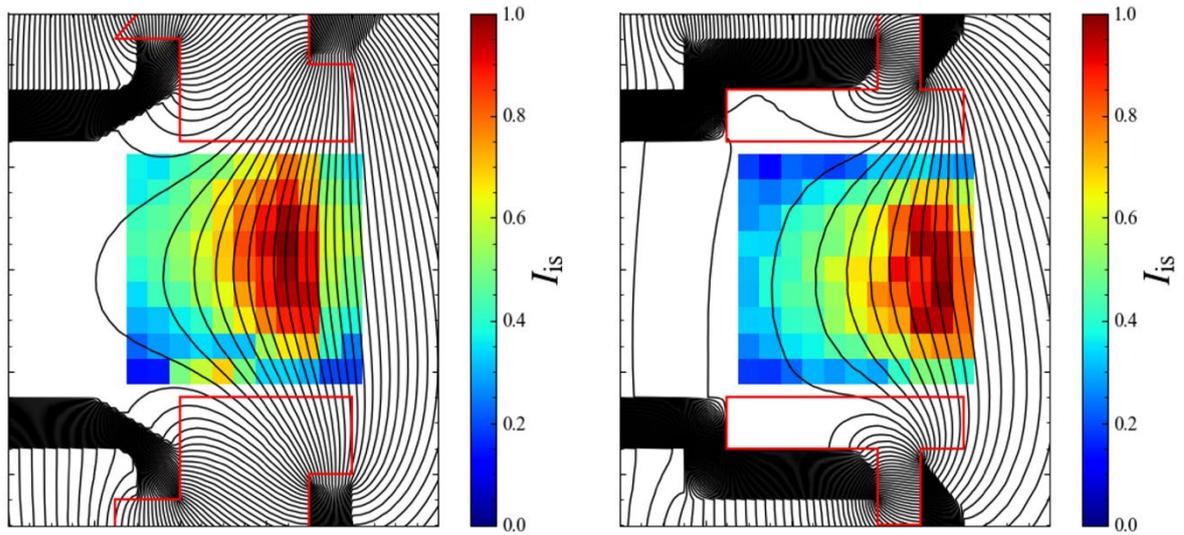


図 1-8 オリジナル(左図)とMS仕様 (右図)の異なる磁場配位で測定したイオン飽和電流の2次元分布.

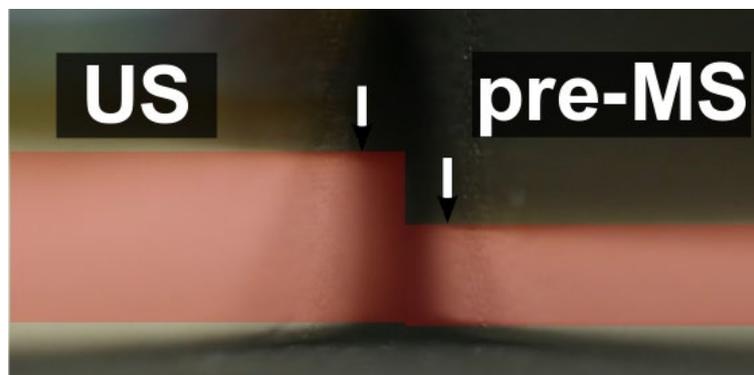


図 1-9 作動後のチャンネル損耗量の比較.

2.1.2 アノード Rev2 の設計・製作

アノード単体で 100 W という作動電力目標の達成に向けて、アノード Rev1 試験から得られた以下の知見に基づいてアノード Rev2 の設計および製作を実施した。

- D20W6 型の最小作動電力が約 200 W であったことから、チャンネル断面積はその半分程度が指針となる。
- 作動時の熱負荷を効果的に取り除くことで作動領域の拡大が見込める。
- Rev1 と同程度の磁場強度が達成され、かつバランスの取れたチャンネル直径・幅の設計が必要とされる。

まず、チャンネル形状について、チャンネル平均径 15 mm, チャンネル幅 5 mmとした。この断面積は $75\pi \text{ mm}^2$ となり、これはアノード Rev1 No.1 比で約 60 % であるから、概ね指針を満たしている。また、直径と幅の比率については後述する磁場設計と着火・維持性の観点から決定した。磁場強度の観点ではチャンネル幅を狭くするほど有利に働くが、先述の通り Rev1 の試験から幅の狭いモデルではプラズマ着火や放電維持が困難になることが確認されてきた。そこで、水蒸気での安定作動に実績のある D20W6 型の比率を参考に、磁場設計とのバランスを考慮して上記の値に決定した。

次に、作動時の熱負荷の低減について、主な熱源である加速チャンネルと磁場生成コイルを熱的結合度を下げた配置を採用するとともに、放熱部材と加速チャンネルの熱結合を高める構造を採用することで対応した。放熱部材や磁場生成コイルの構造は Rev1 から特に大きく変更になったが、無駄のない配置を取ることで全体としてコンパクトに収まる設計を実現した。なお、アノードからの排熱は Rev1 同様に冷却水を使用した。

設計開始時点では、加速チャンネルを小型化すると中心磁極の磁気飽和により磁場強度が下がることが懸念されていた。しかし、中心磁極をヨークのみとし磁気生成コイルをチャンネルの上流側に配置する構造に変更することで Rev1 と同程度の磁場強度および磁力線形状が達成されることを 2 次元静磁場解析ソフト FEMM により発見した。この構造の変更は、小型かつ強磁場の達成のみならず、前述のようにコイルと加速チャンネルの熱的な干渉を緩和させる効果も見込まれた。なお、本設計ではマグネティックシールディングは適用していない。これは、現状の水ホールスラストでは効率の低下が著しく、この維持・向上に重点を置いたためである。

以上のように設計されたアノード Rev2 の模式図を図 1-10 に示す。設計完了後、加工部品の製作を業者に依頼・発注した。加工品の納品後、アノード Rev2 の組立てを実施し、設計通りに組みあがることを確認した。組立て後のアノード Rev2 の外観を図 1-11 に示す。さらに、組みあがったアノード Rev2 に対してガウスプローブを用いて磁場強度の測定を実施し、図 1-12 に示すように設計値通りの磁場が生成されることを確認した。

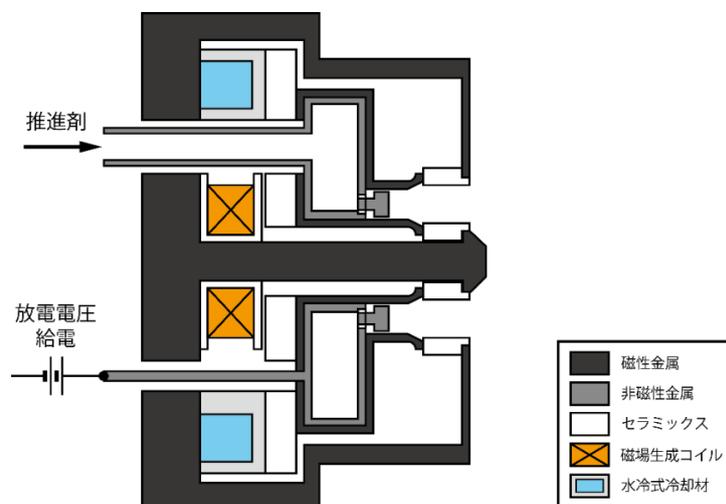


図 1-10 設計したアノード Rev2 の模式図。

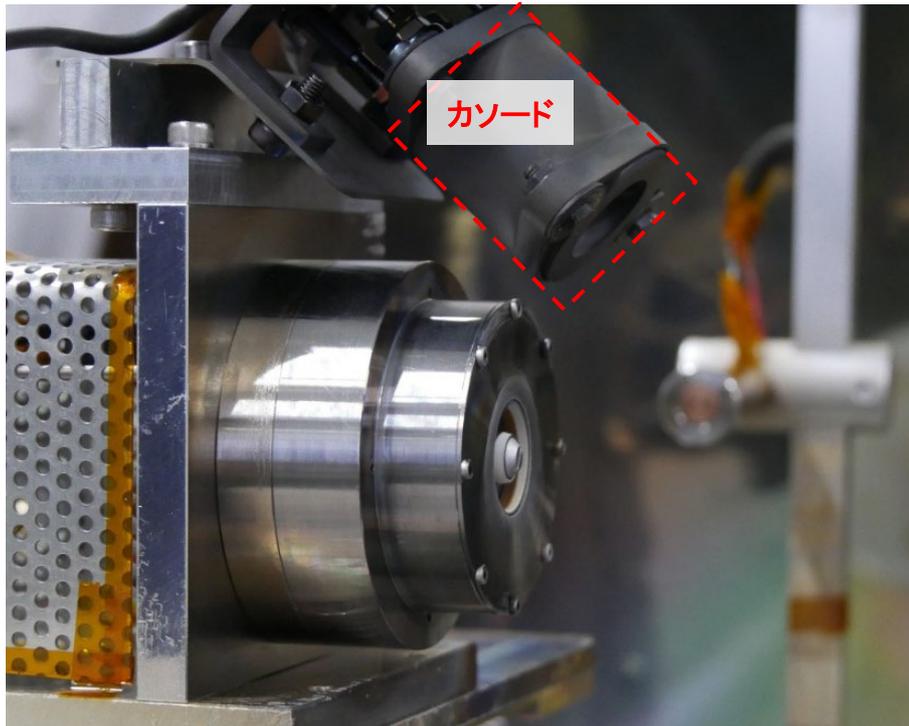


図 1-11 製作したアノード Rev2 の外観.

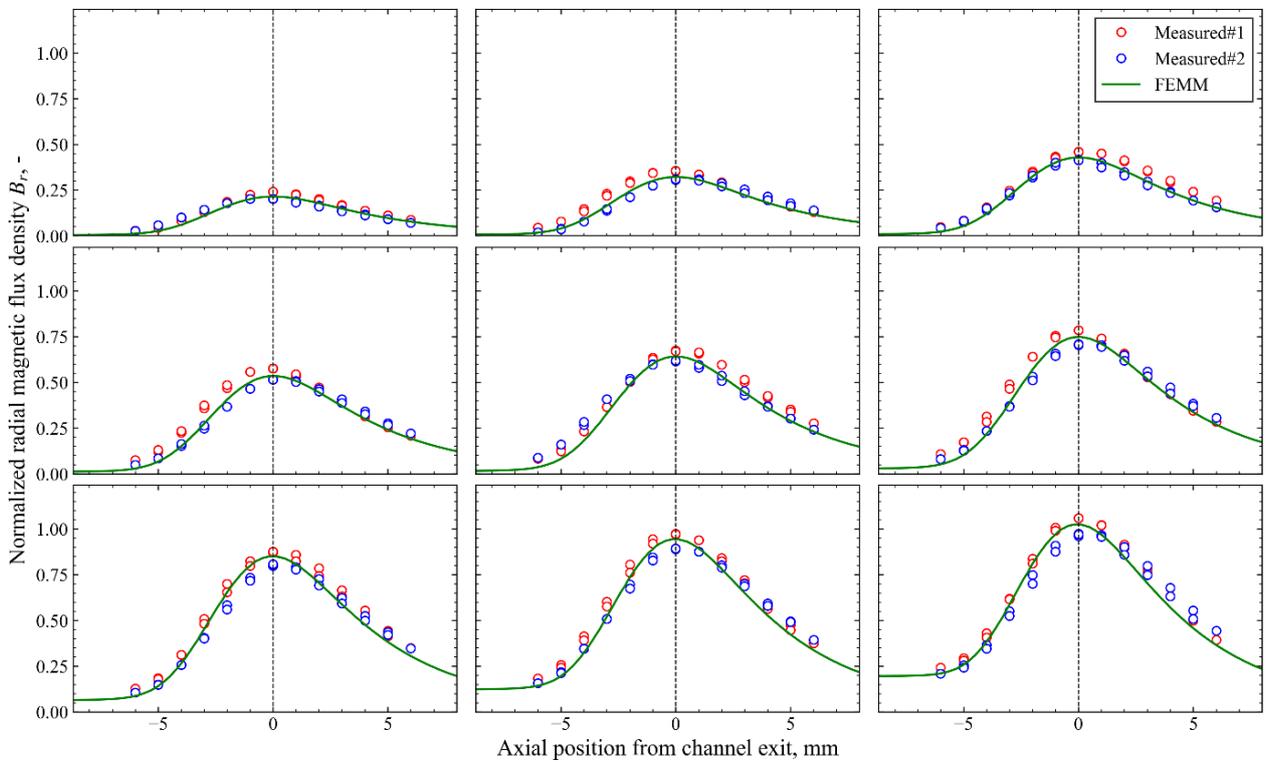


図 1-12 アノード Rev2 のチャンネル中心における磁場強度の計算結果および実測結果.

2.1.3 放電性能の評価試験

新たに設計したアノードの健全性確認を兼ねて、従来推進剤であるキセノンを用いた作動試験を実施した。キセノンでの作動試験では、推進剤流量 3-5 sccm (0.3-0.5 mg/s)、放電電圧 200-400 V の広い領域で安定的に作動することを確認した。さらに、最小作動電力は放電電圧 200 V で 40 W を達成し、小型化により想定したような電力低減が可能であることを確認した。

続いて、水蒸気での作動試験を実施し、200-300 V での放電電流特性を計測した。まず、作動可能な最小の流量について探索したところ 0.46 mg/s となった。これは、Rev1 の最小作動流量 (0.81 mg/s) のおよそ半分程度であり、低流量側まで作動領域を広げることにも成功した。図 1-13 (a) に、上記の電圧および流量条件下で磁場強度を振った際の放電電力のトレンドを示す。200 V かつ高磁場領域において放電電力が 0.5 A まで抑えられ、設計時に目標とした作動電力 100 W の実現に成功した。また、同図 (b) に作動時の放電電流振動の強度を示した。これを見ると、Rev1 と異なり特定の磁場領域で比較的大きな振動が発生している。しかし、後述の結果から、この振動はカソードからのガスの流入の影響を受けたものであり、アノード単体の特性とは異なることが示唆されている。

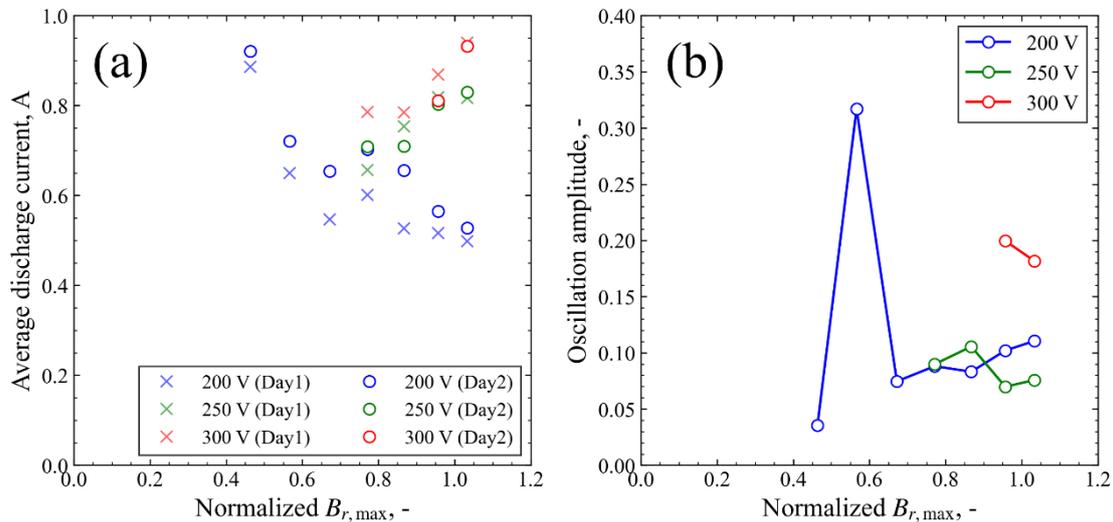


図 1-13 アノード Rev2 を水蒸気 (流量 0.46 mg/s) で作動させた場合の放電電流特性.

2.1.4 プラズマ測定および最適作動点の選定

続いて、ファラデープローブおよび逆電位アナライザを用いたプルーム診断を実施した。推進剤流量は 0.46 mg/s に固定し、放電電圧および磁場強度の広い範囲で実験を行った。計測したビーム電流密度およびビームエネルギーから推定されたアノード効率のトレンドを図 1-14 に示す。これより、各作動電圧において特に高磁場領域で高い効率を取る直線上に乗ることがわかった。そこで、代表的な最適作動点として以下を選定した。

- 推進剤流量 0.5 mg/s, 放電電圧 200 V, 磁場強度 (Normalized $B_{r,max}$) 0.8
- 推進剤流量 0.5 mg/s, 放電電圧 250 V, 磁場強度 (Normalized $B_{r,max}$) 1.0
- 推進剤流量 0.5 mg/s, 放電電圧 300 V, 磁場強度 (Normalized $B_{r,max}$) 1.0

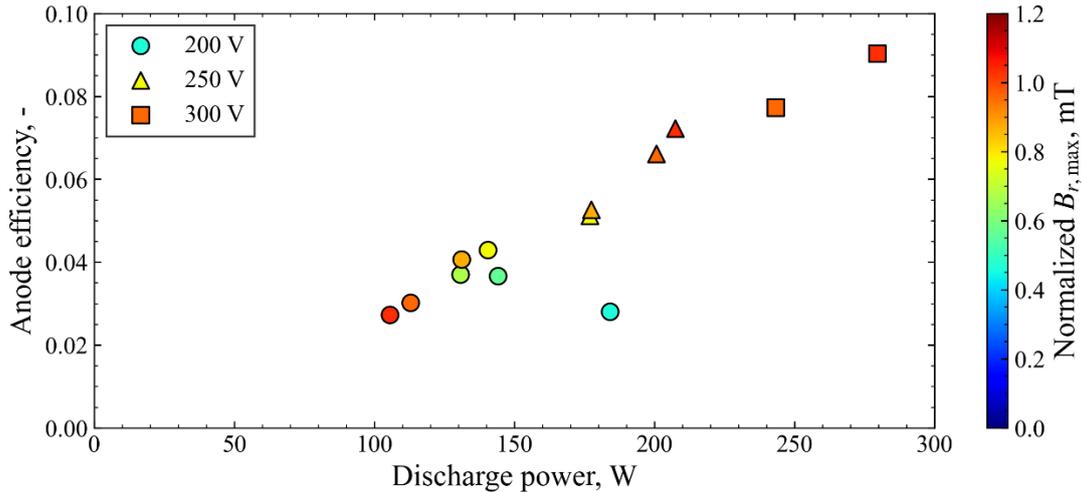


図 1-14 プルーフ計測から推定されたアノード効率のトレンドマップ。

2.1.5 推進性能の評価

選定された最適作動点において、推進性能の評価を実施した。これまで推進性能の評価はプルーフ診断からの推定で行ってきたが、信頼性の高いデータを取得するために図 1-15 に示すスラストスタンドを用いた推力の直接計測を併せて実施した。また、カソードの位置についても検討を重ね、これまでのようなチャネル出口の近傍(図 1-5)ではなく、ビームが直撃せずかつカソードからのガス流入の影響を受けにくい位置(図 1-11)に変更して作動を実施した。さらに、より軌道上での実力に近づけるために、放電回路のコモンをグランドに落とさずにフローティングさせた状態で計測を実施した。作動時のプルーフの様子を図 1-16 に示す。推力計測により得られたアノード Rev2 の最適作動点における推進性能を表 1-2 にまとめた。結果として、アノード Rev2 ではアノード Rev1 から小型化されたものの推進性能は大きく落ちることなく、作動電力の 100 W 近傍への低減と作動領域の拡大に成功したと言える。

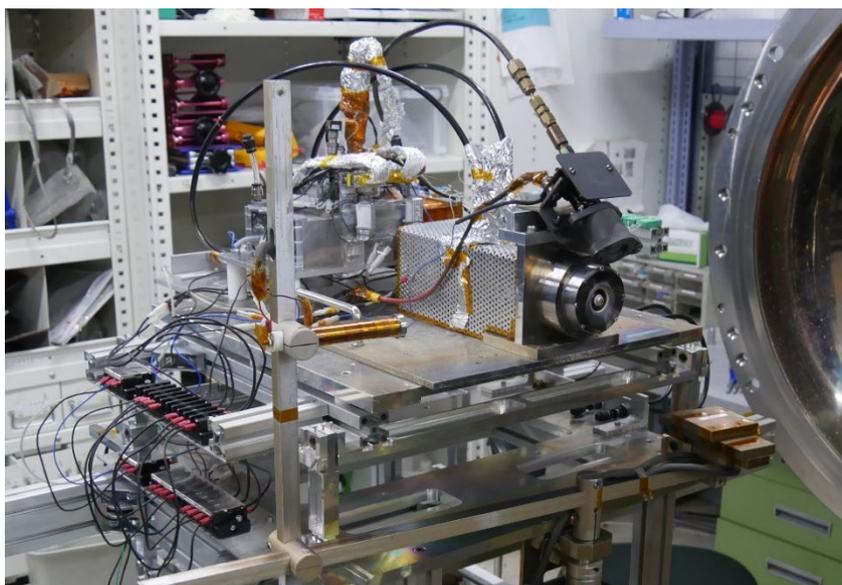


図 1-15 推力スタンドにマウントされたアノード Rev2 の様子。

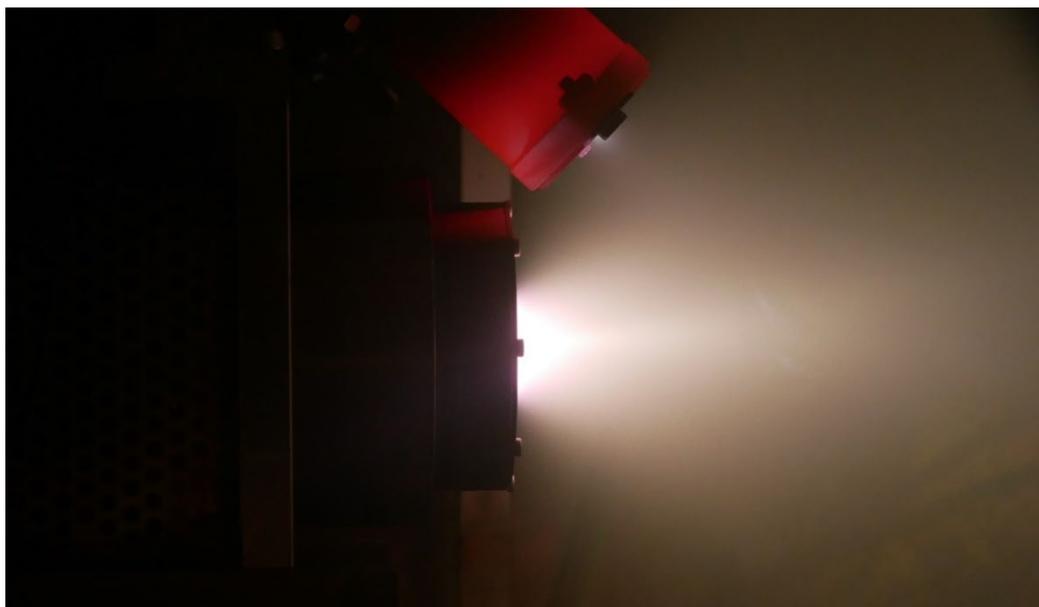


図 1-16 水蒸気を推進剤として作動するアノード Rev2 のプルーム.

表 1-2 アノード Rev2 の推進性能.

推進剤流量 [mg/s]	放電電圧 [V]	Norm $B_{r,max}$	放電電流 [A]	放電電力 [W]	推力 [mN]	推力電力比 [mN/kW]	比推力 [s]	アノード効率 [%]
0.5	200	0.86	0.53	107	1.8	17	350	3.0
0.5	250	1.0	0.90	227	3.6	16	670	5.5
0.5	300	1.0	1.07	321	4.7	15	900	6.4

2.2 【2B. カソード Rev2】

2.2.1 Rev1 性能評価試験結果および電子粒子計算結果の概要

カソード Rev1 では、電子放出性能を評価するために単体作動試験を実施した。単体作動試験では、カソードへの投入電力、電子捕集用コレクタへの印加電圧を作動パラメータとして実験を実施し、電流-温度特性および電流-電圧特性を取得した。本実験により、カソード Rev1 の電子放出量を制限する要因が空間電荷制限であると推定した。さらに、単体作動試験と同等の条件で電子粒子計算を実施し、実験結果の再現に成功するとともに、空間の電位分布や電子数密度分布等を取得した。これにより、電子放出量を制限する要因が空間電荷制限であることを確認した。

2.2.2 Rev2 の設計・構築

前項の結果より、電子放出性能の向上には空間電荷制限の緩和が不可欠であることが判明した。空間電荷制限の緩和には、電圧印加が効果的である。このような設計思想のもと、電流引き出し電極を備えたカソード Rev2 を設計した。

図 2-1 に、カソード Rev2 の断面図と組み上げた外観を示す。図 2-1(左)中に示した加速電極(Electrode)を新たに設け、任意の電圧を印加できるようにすることで電子電流量の向上を狙った。加速電極は MLI 第1層によって支持され、セラミック製ボルトとスペーサによって電氣的に絶縁されている。加速電極の設計にあたっては、電子粒子計算を用いて電極位置や電極の穴径、印加電圧に対するパラメトリックスタディを実施し、加速電極の効果を確認するとともに電極形状の最適化を実施した。なお、電子源の多結晶 LaB₆ や、電子源の加熱機構、MLI の支持機構をカソード Rev1 から流用することで、開発期間の短縮やコスト低減を図った。

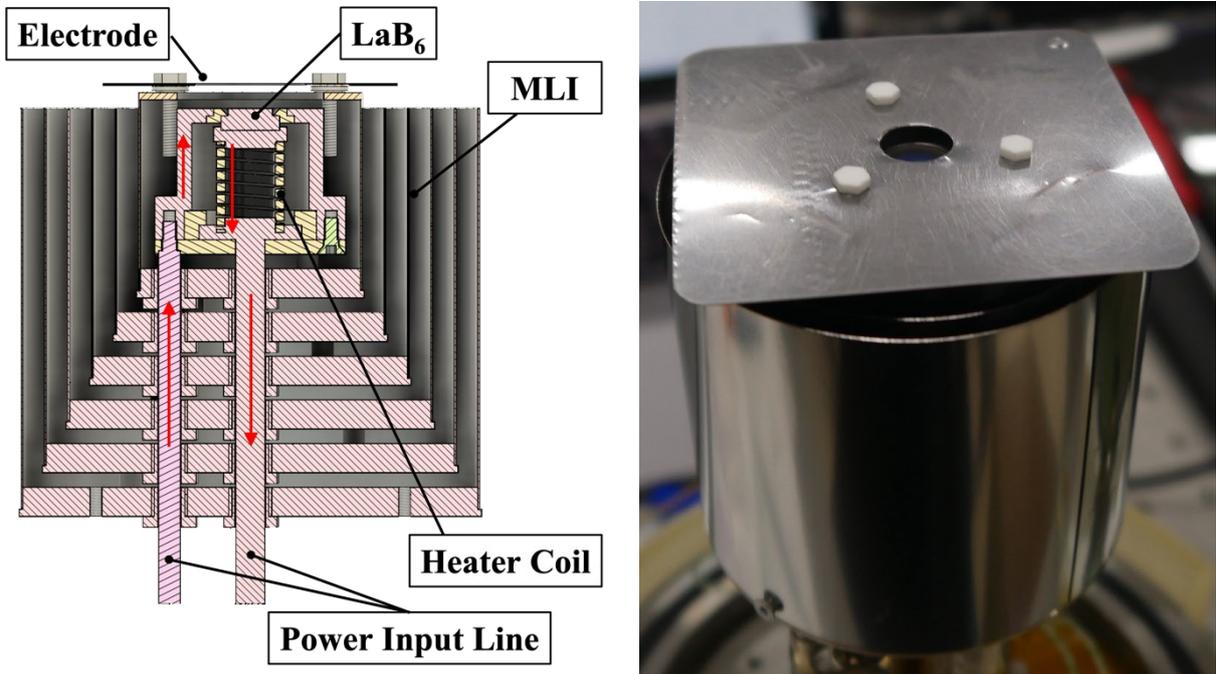


図 2-1 カソード Rev2 の断面図(左), 外観(右)

2.2.3 温度評価試験

本項では、カソード Rev2 に対して実施した温度評価試験について報告する。熱電子放出を利用する本カソードでは電子源 LaB6 の温度が電子放出量に直接影響を与えるため、熱性能の評価が必須であった。本試験では、カソードへの投入電力と LaB6 表面温度の関係を発光分光法によって取得し、カソード Rev1 の性能と比較した。

本試験では分光測定により LaB6 表面温度を非接触で測定した。図 2-2 に、本試験の実験系の写真および模式図を示した。LaB6 からの放射光を真空チャンバ外に設置したレンズによって集光し、光ファイバーを通して分光器へと入力した。このようにして得た分光放射輝度をプランクの法則から得られる理論式でフィッティングすることで LaB6 表面温度を求めた。なお、実験環境による波長ごとの減衰や分光器の感度特性を正確に校正するため、標準光源を利用した感度校正を実施している。

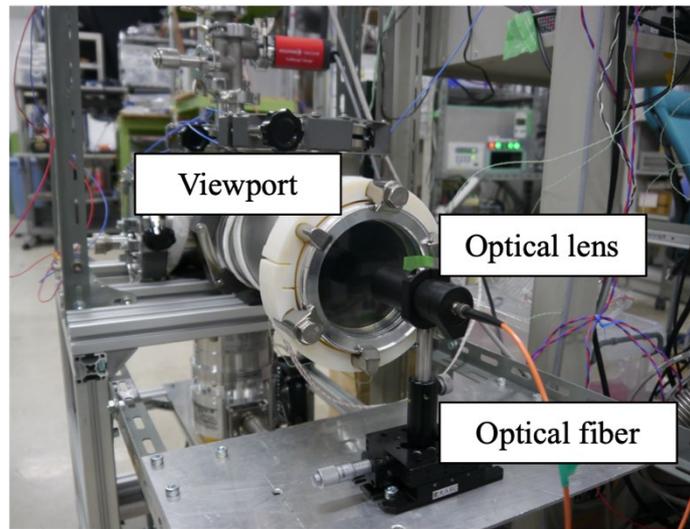


図 2-2 温度評価試験系の写真

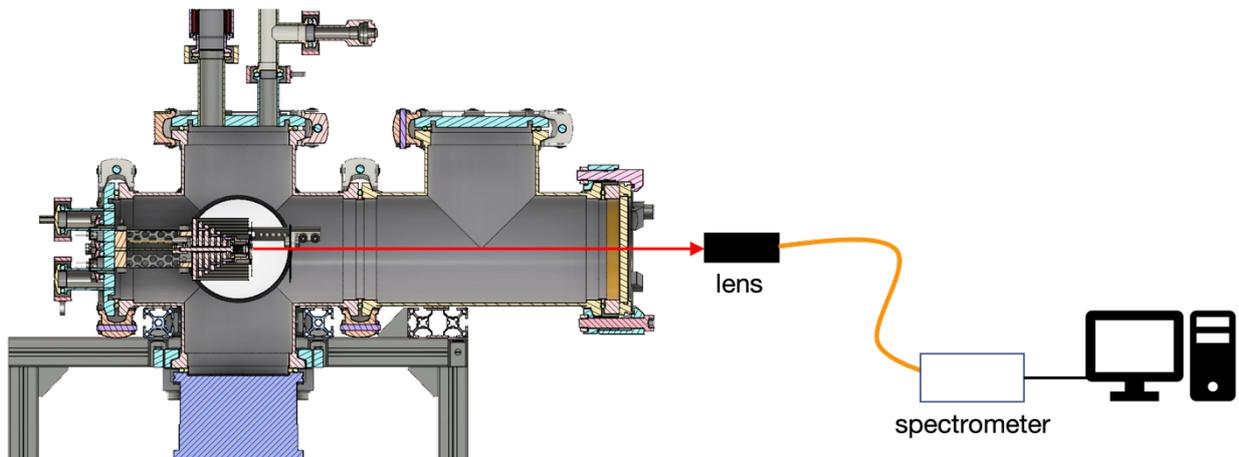


図 2-3 温度評価試験系の模式図

本試験で取得した分光放射輝度を図 2-4 に示す。また、投入電力と温度の関係を図 2-5 に示す。カソード Rev2 は Rev1 よりも熱効率が低く、投入電力に対する表面温度が低くなっている。これは底面 (LaB6 に対向する面) の断熱性が低下したためと考えられる。カソード Rev1 では底面に 6 層の断熱構造を有していたが、Rev2 で

は加速電極取り付けのために断熱構造を廃止している。熱効率の低下は Rev2 設計段階から想定していた通りの結果であり、性能評価試験を実施するにあたり問題にはならないと判断した。

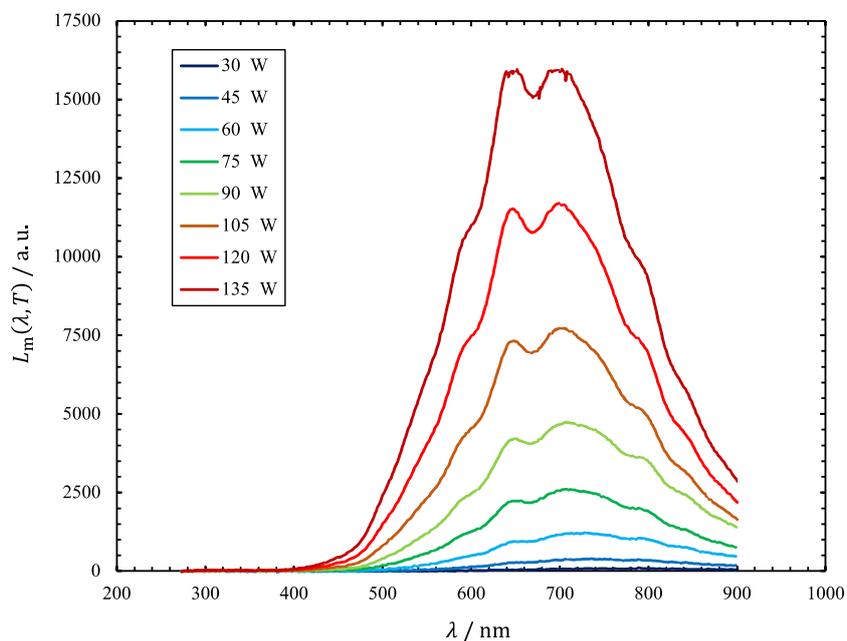


図 2-4 温度評価試験で測定した複数のカソード投入電力に対する分光放射輝度

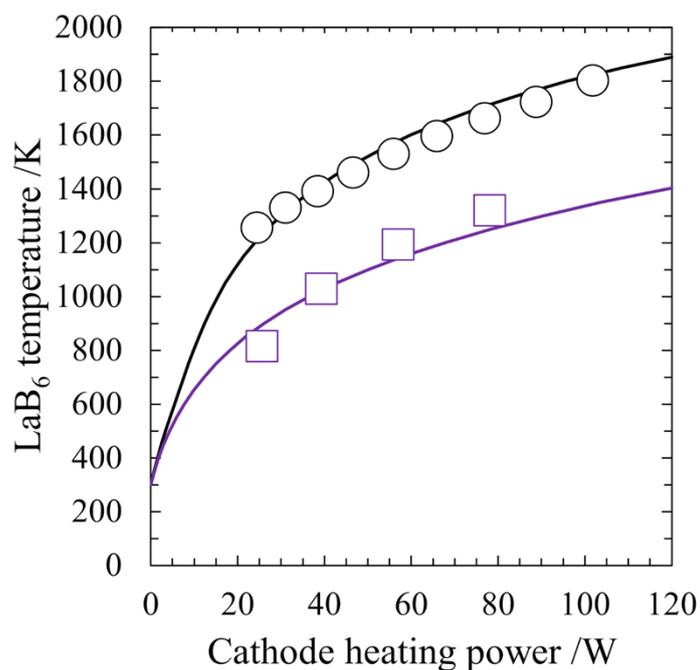


図 2-5 投入電力と LaB6 表面温度の関係。丸のプロットはカソード Rev1, 四角のプロットはカソード Rev2 を表している。

2.2.4 性能評価試験

本項では、カソード Rev2 に対して実施した性能評価試験について報告する。性能評価試験では、カソード Rev2 の電子放出性能を評価することを目的としている。まず、カソード Rev2 の実機を単体で作動させ、コレクタによって電流を捕集する単体作動実験を実施した。さらに、単体作動実験と同様の条件で電子粒子計算を実施し、電子放出量を制限する要因について調査した。

カソード Rev2 単体作動実験系の模式図を図 2-6 に示す。また、作動時の様子を図 2-7 に示す。本実験は温度評価試験と同様の真空チャンバ内で実施し、作動時の背圧は 3.0×10^{-4} Pa以下に維持した。加速電極および電流捕集用のコレクタにはそれぞれ電圧が印加され、流入した電流量を計測した。コレクタ底面には分光観測用の穴を開けており、電流捕集と同時に分光観測による表面温度測定を実施した。本実験では、加速電極への印加電圧、コレクタへの印加電圧、LaB6 表面温度に対する電子電流量の関係を測定することで電子放出性能を評価した。

次に、電子粒子計算における計算領域の模式図を図 2-8 に示す。本計算では、図 2-8 中のオレンジの四角で示した範囲内における電子の挙動を調べた。境界条件として、計算領域の端および Emitter (図中赤), Electrode (図中青), Collector (図中緑) の電位を固定した。また、電子は Emitter の領域から計算領域内に流入させ、流入する電子電流量は想定する LaB6 表面温度に応じて Richardson-Dushman の式から決定した。各境界を通過した電子は計数した後計算から除外され、電流値に変換される。本計算では計算条件として Emitter 温度, Electrode 電圧, Collector 電圧を与えたが、それぞれの値は単体作動試験に準拠した。

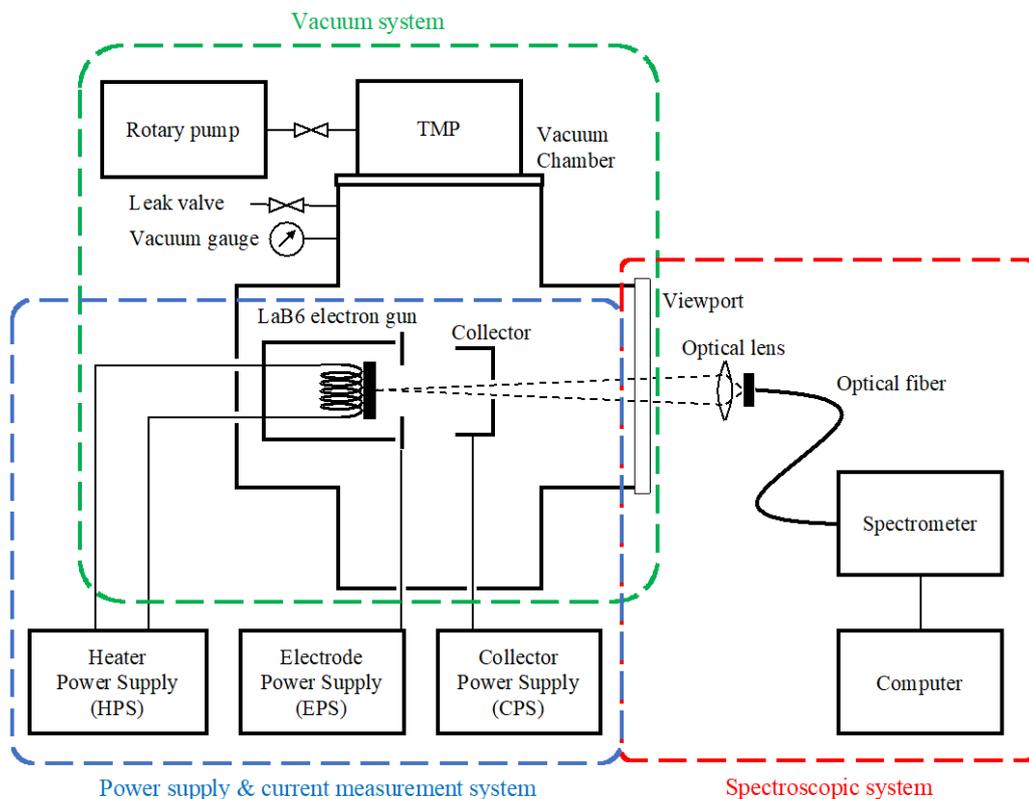


図 2-6 カソード Rev2 単体作動実験系の模式図.

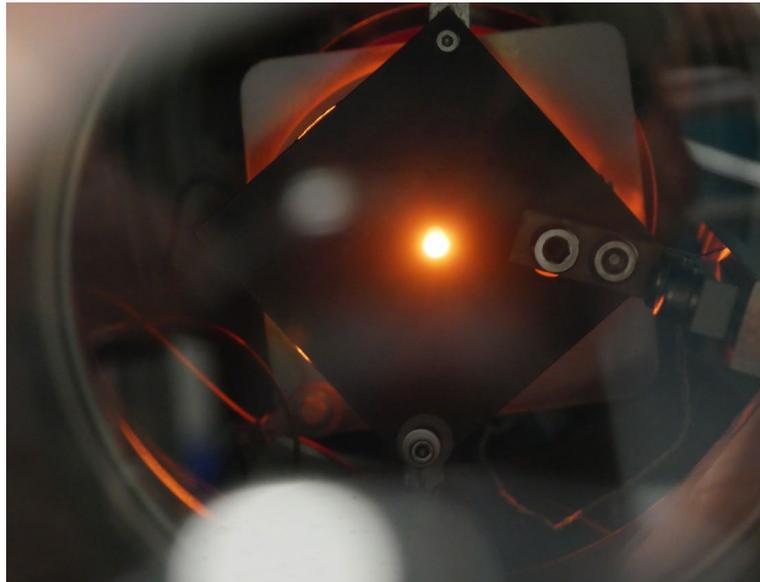


図 2-7 性能評価試験時のカソード Rev2 作動の様子. 写真手前の黒色四角形の板はカップ型コレクタの底面で、穴を通して電子放出材 LaB6 の発光の様子が確認できる

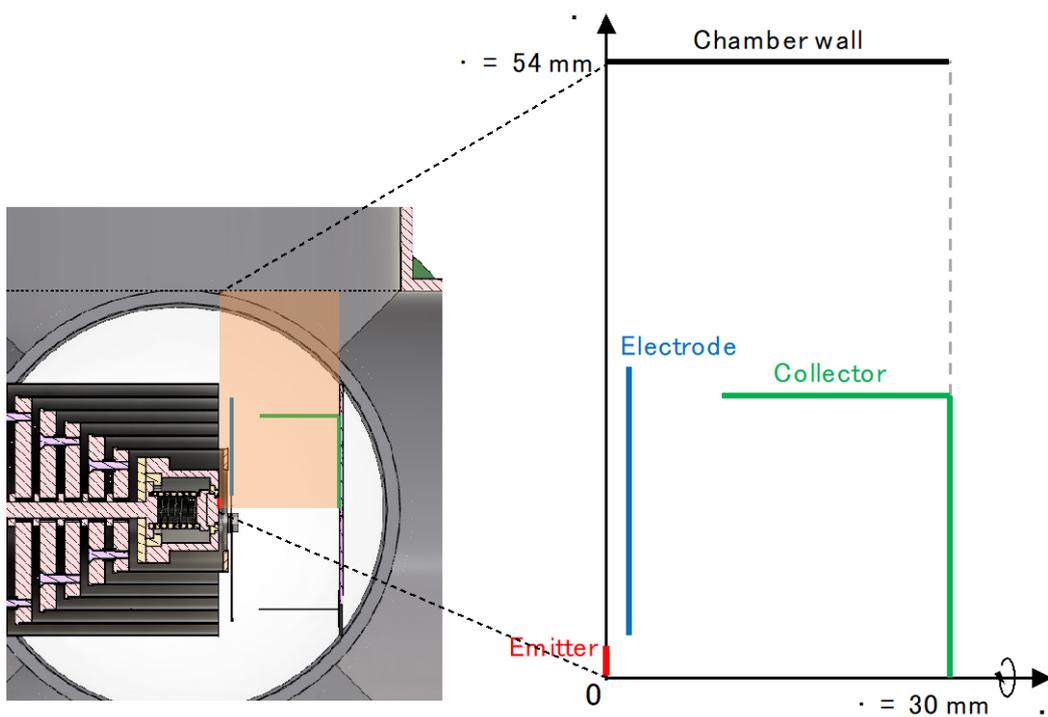


図 2-8 電子粒子計算における計算領域の模式図

図 2-9(左)に LaB₆ 表面温度に対する各種電流値のトレンドを示す. また, 図 2-9(右)に加速電極電圧に対する各種電流値のトレンドを示す. ここで, 実線で単体作動実験の結果を表し, 波線で電子粒子計算の結果を表している. なお, 単体作動実験では加速電極への印加電圧, コレクタへの印加電圧, LaB₆ 表面温度を幅広く変更して電流値を測定したが, 代表的な作動条件を選んで示している. 単体作動実験の結果, 最大で 23 mA の電子

電流の引き出しに成功した。これは、カソード Rev1 の単体作動試験で得られた電子電流量の約 10 倍であり、電圧印加による空間電荷制限の緩和が電流量の向上に効果的であることが実験的に確かめられた。また、実験結果と計算結果は定性的に良く一致し、多くの作動点で定量的に一致が見られた。図 2-10 には、電子粒子計算で得られた電位分布(左)ならびに電子数密度分布(右)を示した。図 2-9~2-10 より、本作動点は温度制限領域にあり、カソード Rev2 の電子放出量は、電子放出材 LaB6 からの熱電子放出量によって制限されていると推察される。以上の結果より、さらなる電子放出性能の向上にあたっては、より低仕事関数の電子放出材を使う、電子放出材の面積を広くする、作動温度を上げる等対策が有効であるとの知見が得られた。

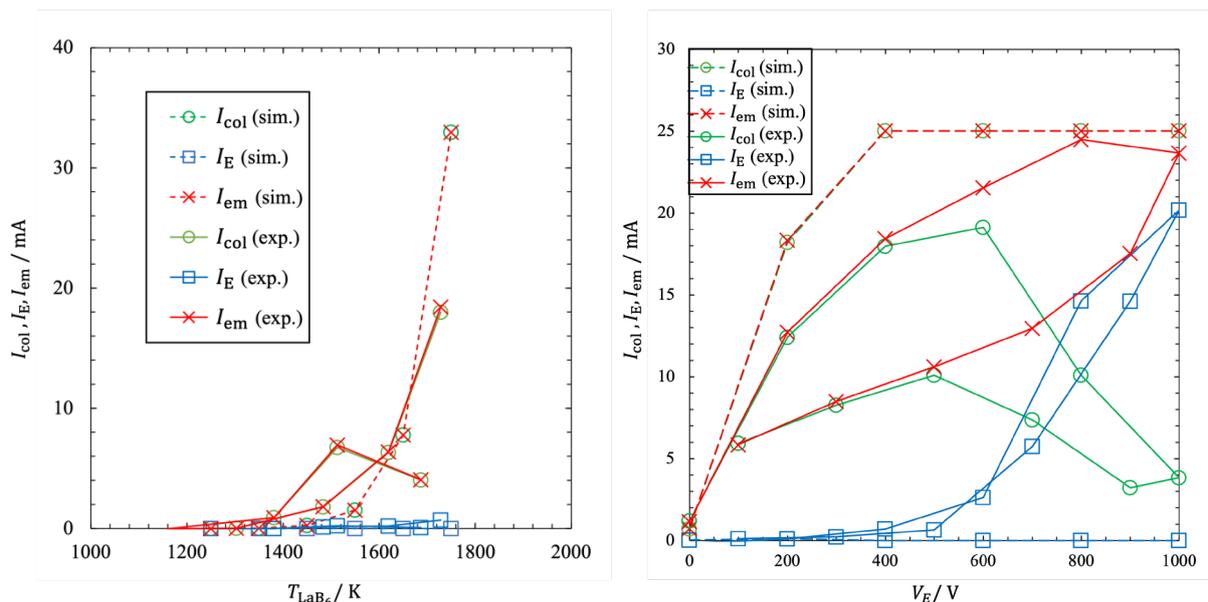


図 2-9 単体作動実験結果(実線)および電子粒子計算結果(破線). (左)LaB6 表面温度に対する各種電流値のトレンド. (右)加速電極電圧に対する各種電流値のトレンド

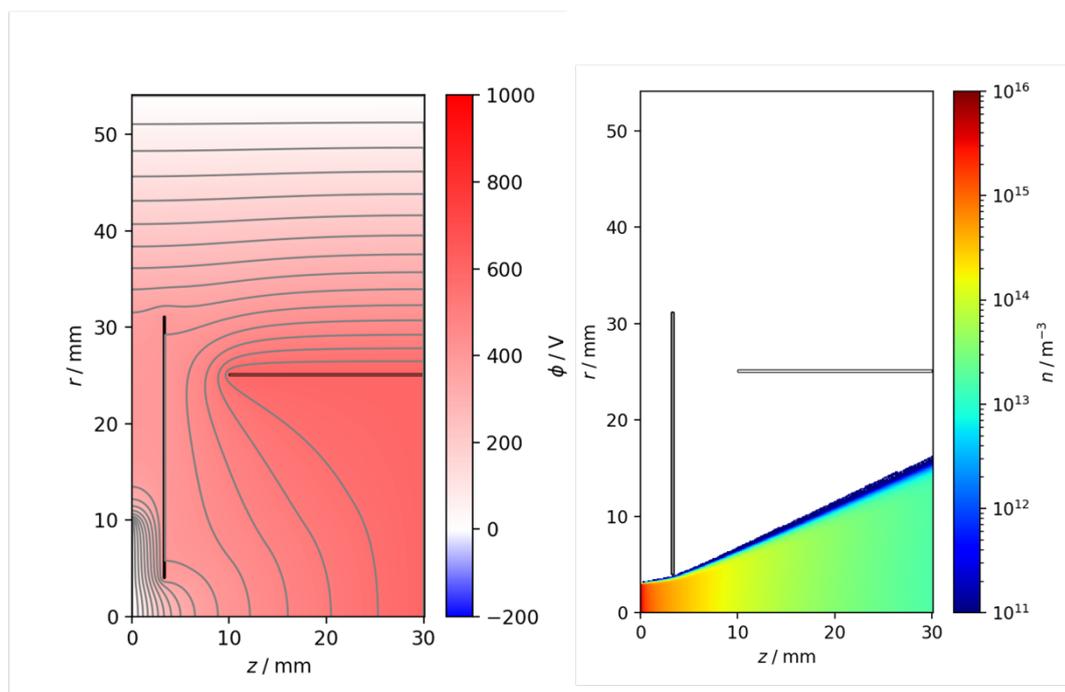


図 2-17 電子粒子計算の計算結果. (左)電位分布. (右)電子密度分布

2.3 【3. 水スラスタベース開発】

2.3.1 レジストジェットスラスタ

レジストジェットスラスタの高比推力化に取り組み、地上試験の実測で最大 92 s まで向上した。本事業の実績外ではあるが、同タイプの水レジストジェットスラスタの軌道上試験では地上試験と比較して約 32%の比推力向上が報告されている[参考文献]。すなわち、高比推力化したレジストジェットスラスタは、軌道上では目標であった比推力 100s 以上の性能達成が見込まれると考えられる。

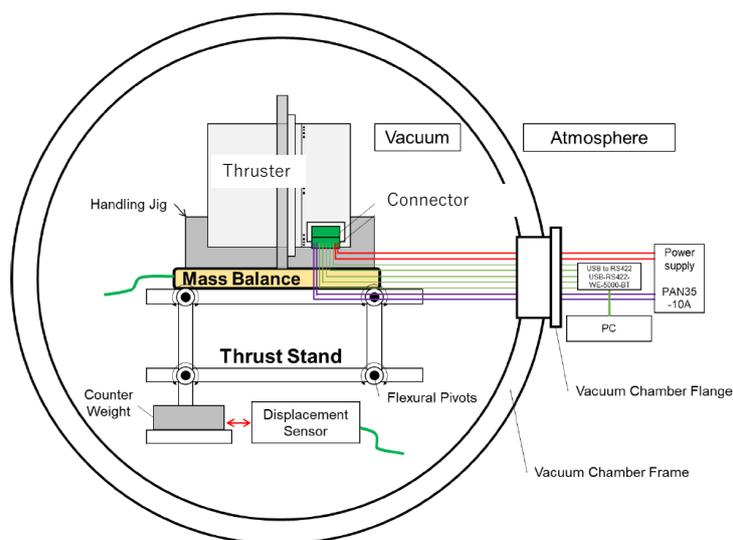


図 3-1 実験系のスキマティック

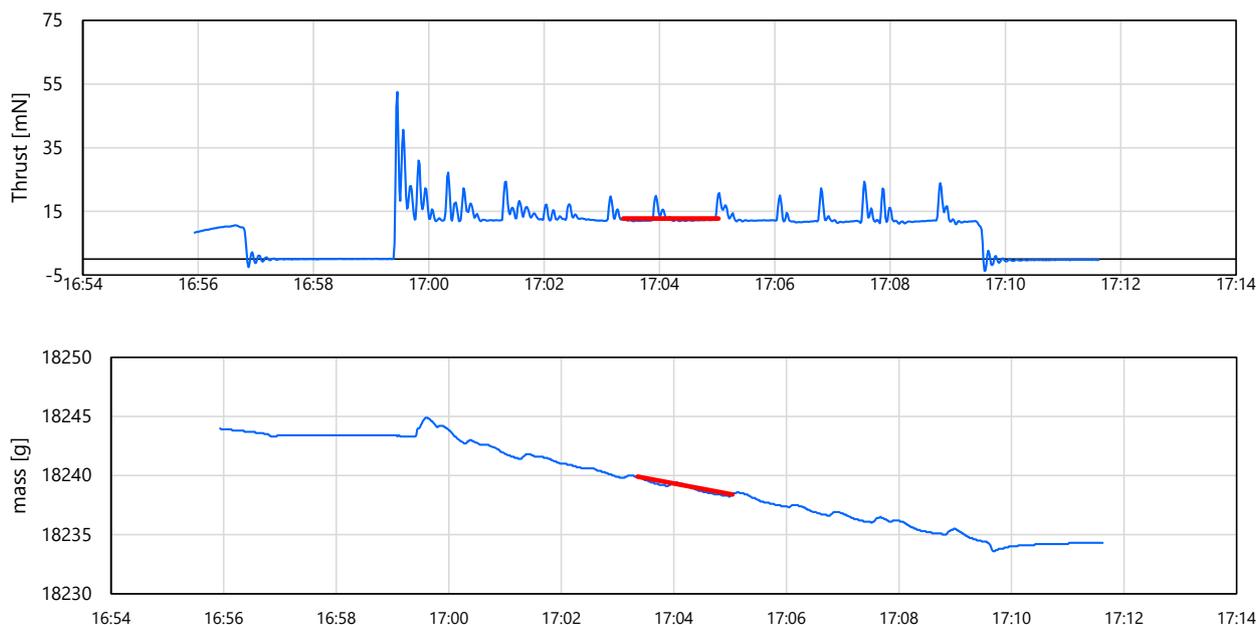


図 3-2 推力・推進機質量の時間履歴。赤線部は性能算出のために使用したデータ区間を示す。

表 3-1 レジストジェットスラスタの実験結果

スロート径 [mm]	開口比	半頂角 [deg]	電力 [W]	推力 [mN]	比推力 [s]	推力電力比 [mN/W]
2.7	144	30	54.5	12.4	92.3	0.27

2.3.2 イオン用高電圧電源、水供給系

イオン用高電圧電源及び水供給系の製造、作動試験はすべて完了した。統合が可能な形状、電力での設計製造を完了し、後述の【4. 水イオン実証機】において統合試験・環境試験を実施した。

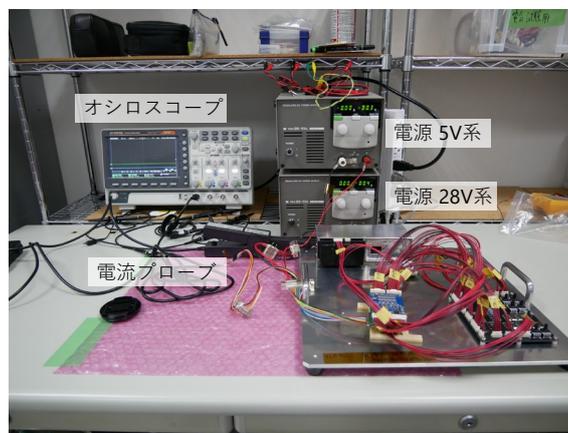


図 3-3 イオン用高電圧電源等の実験系

表 3-2 イオン用高電圧電源等の作動試験結果

供給電圧 [V]	電流 [A]	電力 [W]
28	1.04	29.1



図 3-4 水供給系を含むコンポーネント

表 3-3 水供給系への推進剤充填結果

充填量 [g]	押しガス圧力 [kPa]	推進剤圧力 [kPa]
101.8	46.8	67.4

[参考文献] 関根北斗 他, 超小型探査機 EQUULEUS 推進系:水レジストジェット“AQUARIUS”の軌道上運用と成果, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 3N09, 2023.

2.3.3 ホールスラスタ用アノード電源の構築

- 電源仕様

水ホールスラスタ用アノード電源の仕様として下記を目指した。

- ① 出力電圧上限 +400V の CV/CC コントロール能力を持つこと。
- ② 出力電流上限 500mA の電流容量を持つこと。
- ③ キセノン ホールスラスタにおける出力電流振動の周波数は数 10kHz であり, 制御時 駆動回路がこの電流振動影響を受けないこと。

- 回路構成

本電源開発は、初期検討と実証検討の2段階で進めた。初期検討では FET 1 個とダイオードで駆動する非同期整流型 DC-DC コンバータ回路を採用し, 実証検討では FET 2 個で駆動する同期整流型 DC-DC コンバータ回路を採用した。それぞれのブロック図を下記に示す。

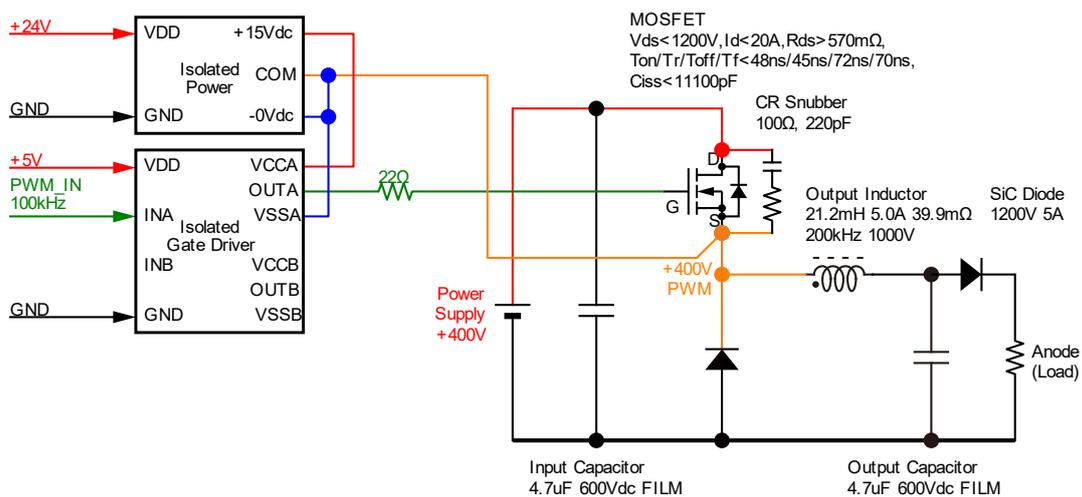


図 3-5 非同期(FET+ダイオード)整流型 DC-DC コンバータ ブロック図。

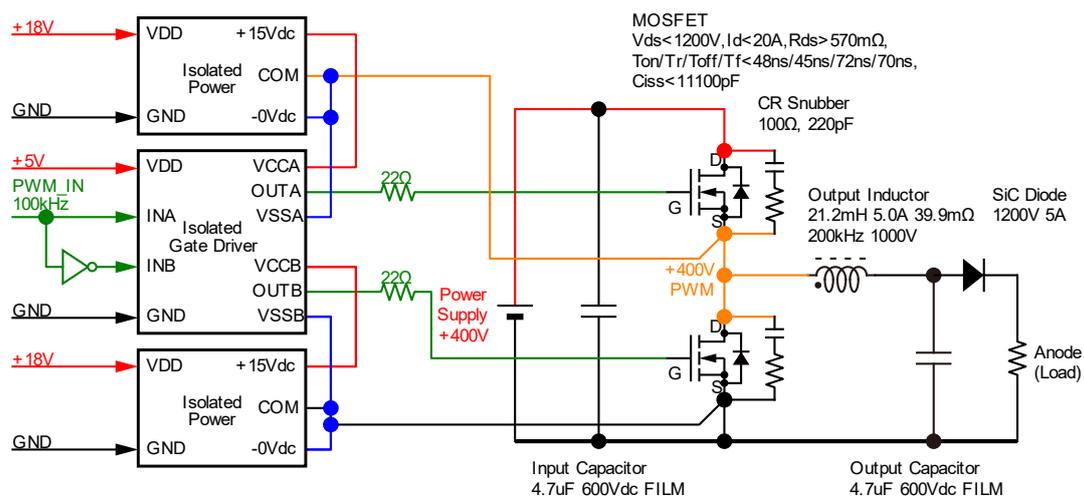


図 3-6 同期(2-FET)整流型 DC-DC コンバータ ブロック図.

2.3.4 ホールスラスト用アノード電源構成要素の要件

開発時に得た各構成要素の要件について下記に記す。

- FET

FET が PWM 駆動される際、ドレイン-ソース間インピーダンス R_{ds} は、ほぼ 0Ω とほぼ無限大の間を行き来する。この2つの状態を行き来する遷移中、 R_{ds} は有意な抵抗値を持つため、FET は電力を消費し電源効率を悪化させ発熱する。この FET 自体の消費電力を減らすには、遷移時間を極力短くする必要がある。同時に FET は、PWM 駆動の遷移時に生じるリングングのピーク電圧に対し十分に大きな耐圧も求められる。この要求事項を満たす入手可能な駆動素子として、下記の FET を選定し評価を行った。

・Nch MOSFET : $V_{ds} < 1200V, I_d < 20A, R_{ds} > 570m\Omega, T_{on}/T_r/T_{off}/T_f < 48ns/45ns/72ns/70ns, C_{iss} < 11100pF$

- ゲートドライバ IC

FET の遷移時間を極力短く動作させるには、ゲートチャージ時間を短くすることが求められる。これには、FET のゲート入力に十分に大きな電圧と十分に多い電流を供給できるゲートドライバが必要になる。また、同期整流型 DC-DC コンバータにおいては、2つの FET が同時に ON になると貫通電流が流れるため、片側の FET が ON になる前にもう1つの FET が確実に OFF にする必要がある。この2つの FET を同時に OFF にする時間 (Dead-Time) の長さは、使用する FET やアノードの負荷インピーダンスによって異なる。そこで、本開発では Dead-Time を抵抗で設定できるゲートドライバ IC を選定した。

・ゲートドライバ IC : $I_{out} < 2.6A(\text{Source}), 7.0A(\text{Sink}), V_{dd}-V_{ss} < 33V, R_{oh} < 2.7\Omega$

- High Side ゲートドライバ用 電源 IC

High Side ゲートドライバに供給する電源の GND は、その電位が常に PWM 出力と等しいため、DC-DC コンバータのドレイン電圧を振幅とする PWM 波形で変化する。このため High Side ゲートドライバ用電源は GND 分離された絶縁電源を用いるが、その回路に絶縁2次系から絶縁1次系に向けたフィードバックを持つものは、

GND 電位の変化でフィードバック電圧が揺すられ、期待される電圧出力を安定供給出来ない。そこで、High Side ゲートドライバ用電源には、フィードバックが不要なフォワードコンバータを選定した。なお 本開発では、High Side ゲートドライバ出力がソース電位に対し+15V/-0V の電圧を出力する設定にした。

- 出力コイル・コンデンサ

本開発の DC-DC コンバータ構成における PWM 出力は、コイルとコンデンサを介して負荷であるアノードに接続される。このコイルとコンデンサは初期検討から実証検討までを通じて下記特性のものを採用した。これらは PWM と負荷に挿入された LC LPF と見なすことができるが、そのカットオフ周波数は約 500Hz である。

・コイル:21.2mH 5.0A 39.9mΩ 200kHz 1000V

・コンデンサ:4.7uF±10% 600Vdc 2.7mΩ ポリプロピレン

2.3.5 ホールスラストアノードとアノード電源の統合試験

東京大学 小紫・小泉研究室が持つホールスラストのアノードに、本開発で作成したアノード電源を接続する結合試験を行った。2023/07/04 はキセノンを推進剤とするホールスラストの噛み合わせ試験を実施し、2023/08/03 は水を推進剤とするホールスラストの噛み合わせ試験を実施した。

- キセノン ホールスラスト 噛み合わせ試験 (2023/07/04)

前半は研究室が従来用いているアノード電源で動作を行い、後半はアノード電源のみ Pale Blue が作成した DC-DC コンバータに変更して試験を実施した。

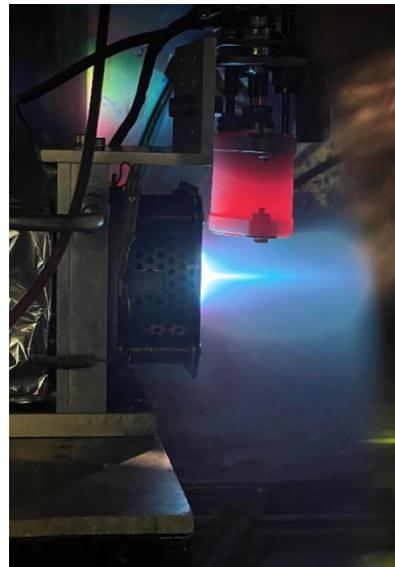


図 3-7 キセノン ホールスラスト 噛み合わせ試験。

- 水ホールスラスト 噛み合わせ実験 (2023/08/03)

前半は研究室が従来用いているアノード電源で動作を行い、後半はアノード電源のみ Pale Blue が作成した DC-DC コンバータに変更して試験を実施した。

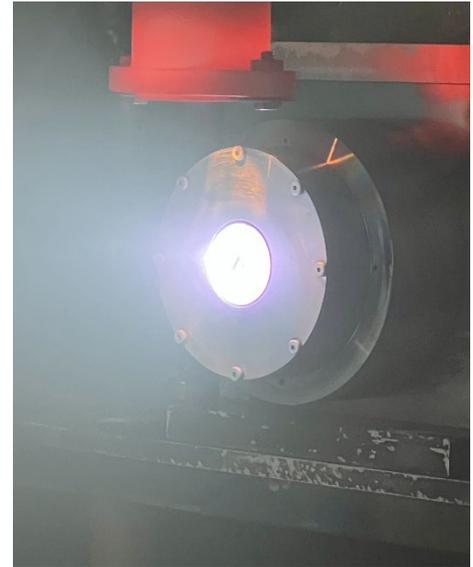
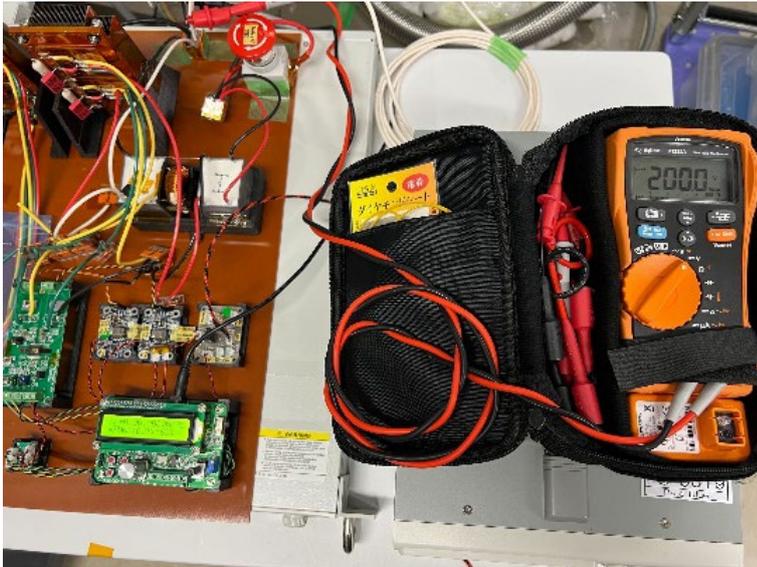


図 3-8 水ホールスラスト 噛み合わせ試験.

2.3.6 ホールスラストアノードとアノード電源の統合試験結果

- キセノン ホールスラスト

キセノン ホールスラストを Pale Blue 製 DC-DC コンバータ(Nch MOSFET 使用)を用いて駆動した時のデータ波形を以下に示す. アノード電源 ON の後、速やかにコイル電源を ON にすると、アノード電流が減少するプロセスが判る.

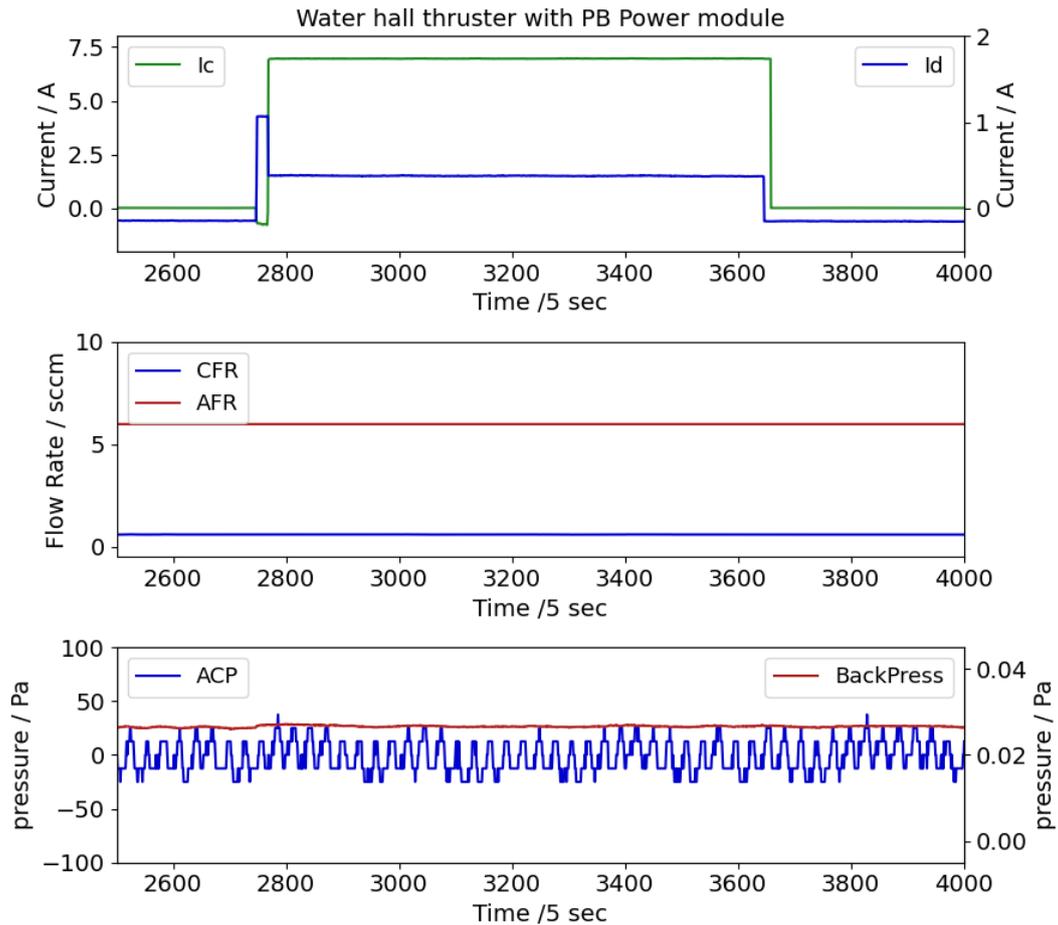


図 3-9 Pale Blue アノード電源を用いたキセノン ホールスラスタ動作時波形.

上図の凡例詳細は以下の通りである.

- I_c コイル電流 [A]
- I_d アノード電流 [A] (電流プローブの初期値較正が取れてない)
- CFR カソード流量 [sccm]
- AFR アノード流量 [sccm]
- ACP 気化室圧力 [Pa]
- BackPress 背圧 [Pa]

Pale Blue のアノード電源は、コイル電流を手動で減少させると減少量に応じてアノード電流が増加することが観測された。

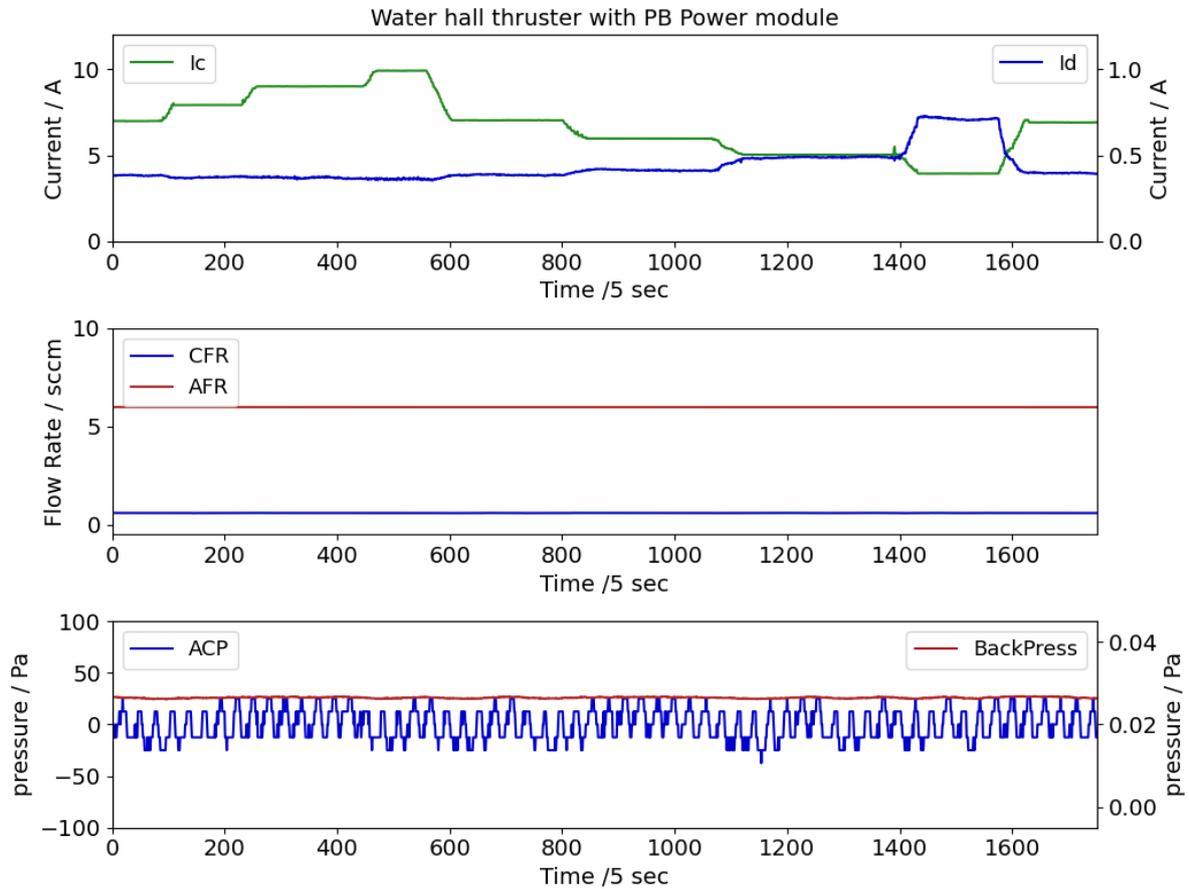


図 3-10 Pale Blue アノード電源を用いたコイル電流変化時波形。

上図の凡例詳細は以下の通りである。

- Ic コイル電流 [A]
- Id アノード電流 [A] (電流プローブの初期値較正が取れてない)
- CFR カソード流量 [sccm]
- AFR アノード流量 [sccm]
- ACP 気化室圧力 [Pa]
- BackPress 背圧 [Pa]

Pale Blue アノード電源を On にした時の、Pale Blue アノード電源電流のオシロ波形とその周波数解析を下記に示す。起動後は一様なノイズ分布に約 25kHz の成分が少し重畳していることが判る。

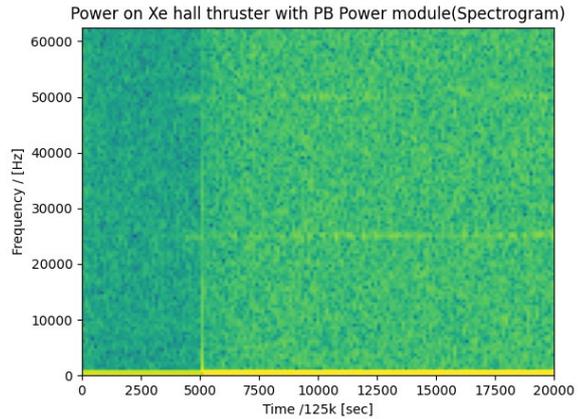
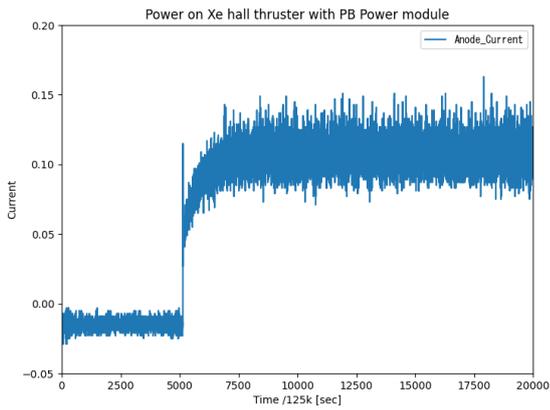


図 3-11 Pale Blue アノード電源を用いた キセノン ホールスラスタ起動時 電流波形と周波数成分変化.

コイル電流を On にした時の, Pale Blue アノード電源電流のオシロ波形とその周波数解析を下記に示す. コイル電流を On にした後, 約 15kHz で始まり約 50kHz で安定する周期の振動が重畳していることが判る.

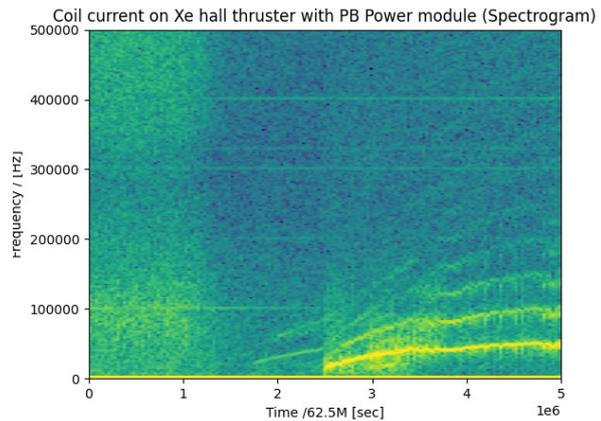
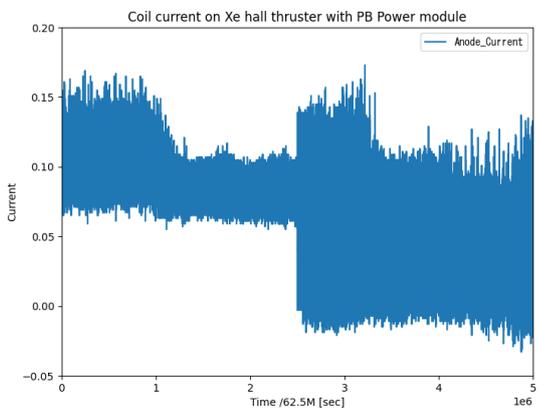


図 3-12 Pale Blue アノード電源を用いた コイル電流 On 時 電流波形と周波数成分変化.

参考として, 上記オシロ波形において, コイル電流を On にした時と, 約 50kHz で安定振動している時のデータを時間軸方向に拡大したものを下記に示す.

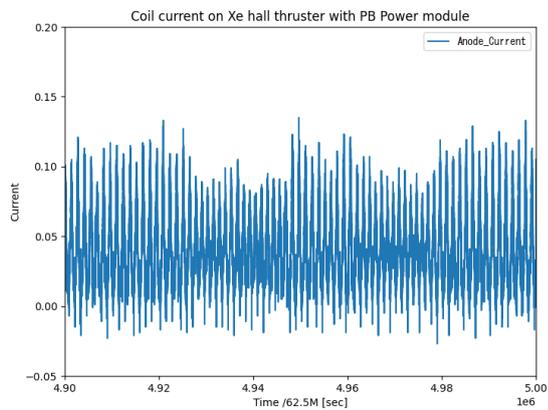
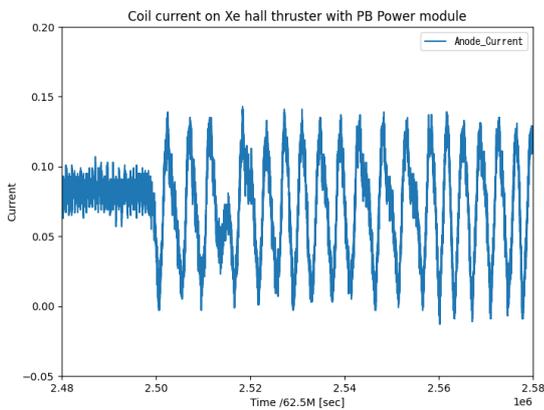


図 3-13 Pale Blue アノード電源を用いた コイル電流 On 時 電流波形(拡大波形).

ホールスラストのアノード電流振動が, Pale Blue アノード電源の PWM 周波数の影響を受けていないことを確認するため, PWM 周波数を変化させた時のアノード電流振動を確認したので下記に示す. アノード電源の PWM 周波数を変えても, ホールスラストのアノード電流振動の周期は一定で影響を受けてないことが判る.

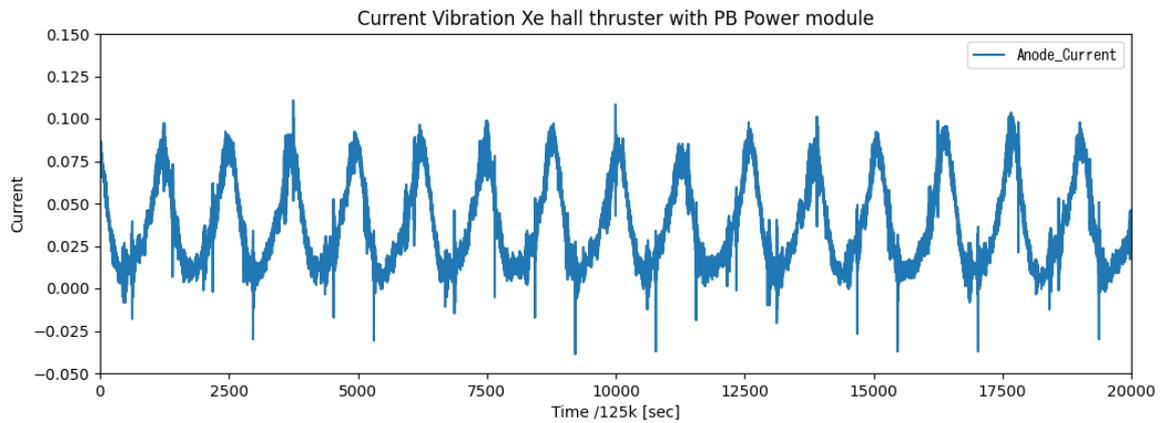


図 3-14 Pale Blue アノード電源を用いた キセノン ホールスラストのアノード電流振動(PWM 80kHz).

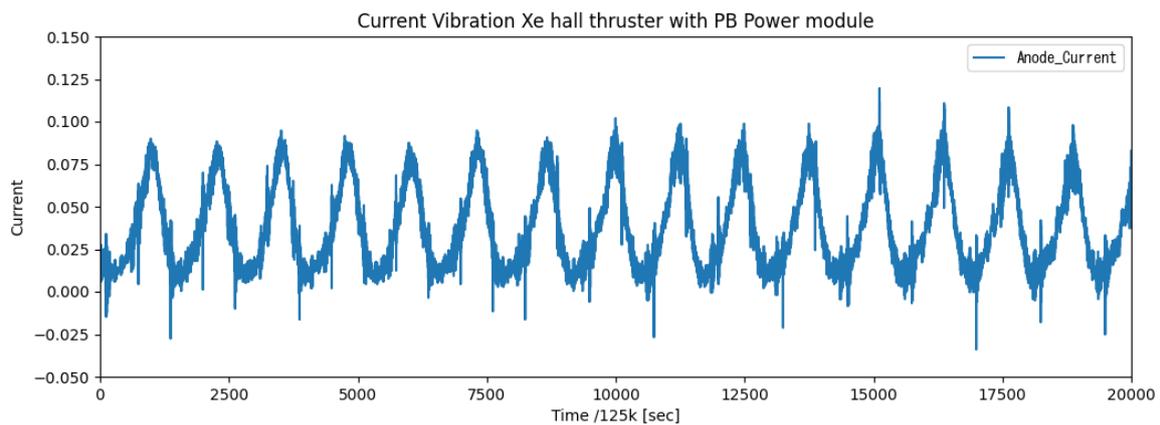


図 3-15 Pale Blue アノード電源を用いた キセノン ホールスラストのアノード電流振動(PWM 100kHz).

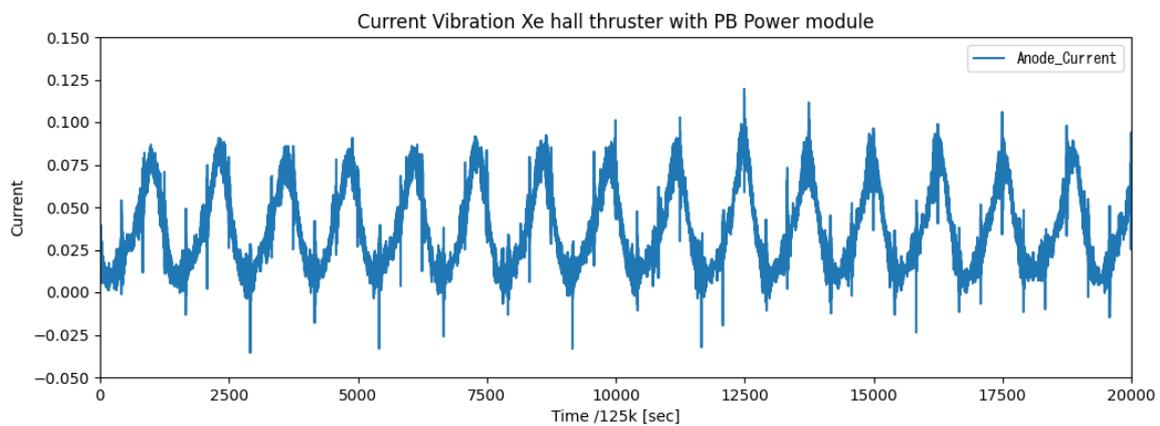


図 3-16 Pale Blue アノード電源を用いた キセノン ホールスラストのアノード電流振動(PWM 150kHz).

● 水ホールスラスタ

水ホールスラスタを東京大学 小紫・小泉研究室が通常用いている外部電源を用いて駆動した時のデータ波形をいかに示す。

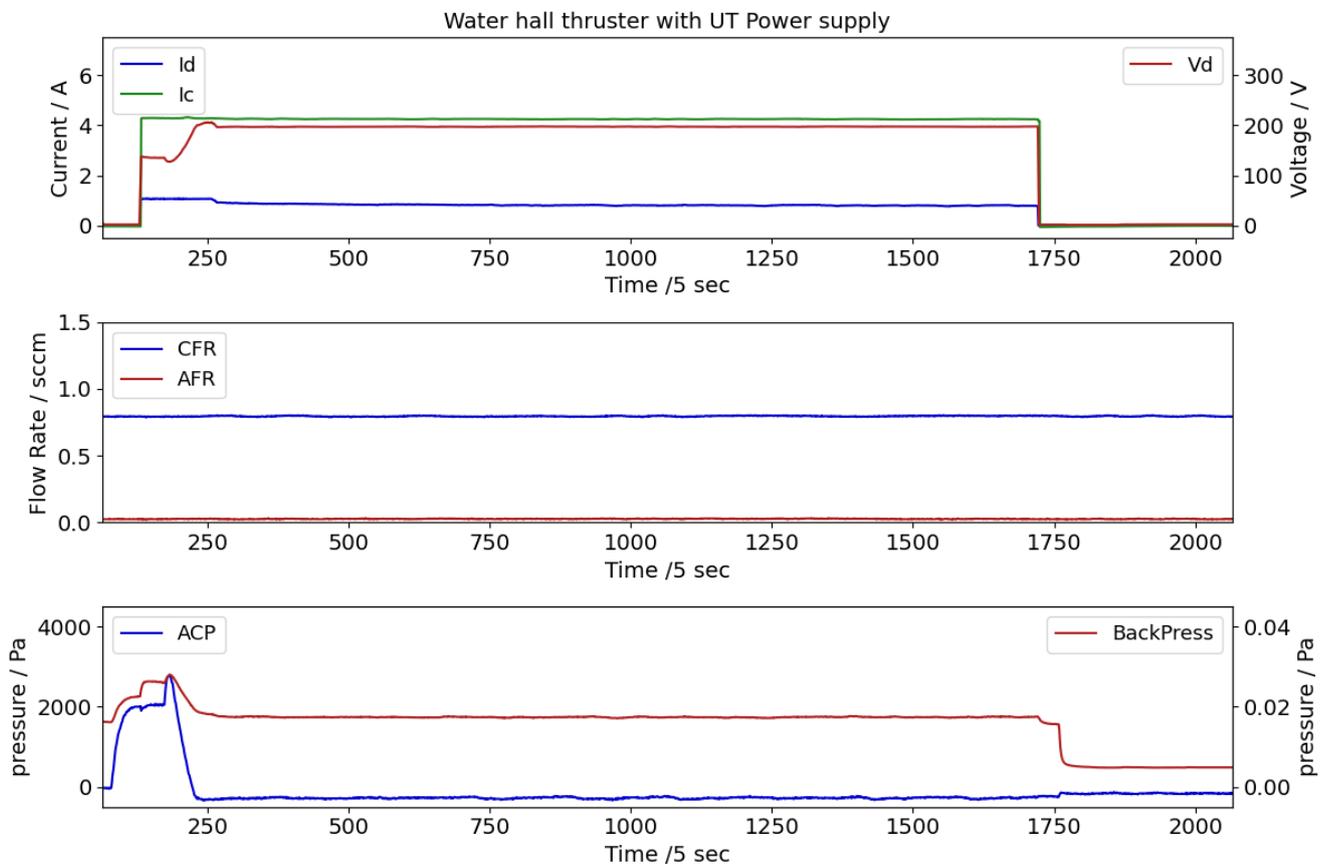


図 3-17 東大アノード電源を用いた 水ホールスラスタ動作時波形.

上図の凡例詳細は以下の通りである.

- I_c コイル電流 [A] (測定器故障により、コイル電流 On の時 約 4.2 を示す)
- I_d アノード電流 [A]
- V_d 放電電圧 [V]
- CFR カソード流量 [sccm]
- AFR アノード流量 [sccm]
- ACP 気化室圧力 [Pa]
- BackPress 背圧 [Pa]

水ホールスラスタを Pale Blue 製 DC-DC コンバータ(Nch MOSFET 使用)を用いて駆動した時のデータ波形をいかに示す。ホールスラスタ起動後、アノード電源の電圧を+200V に下げた時の波形が、Time 1200 近傍において観測できる。

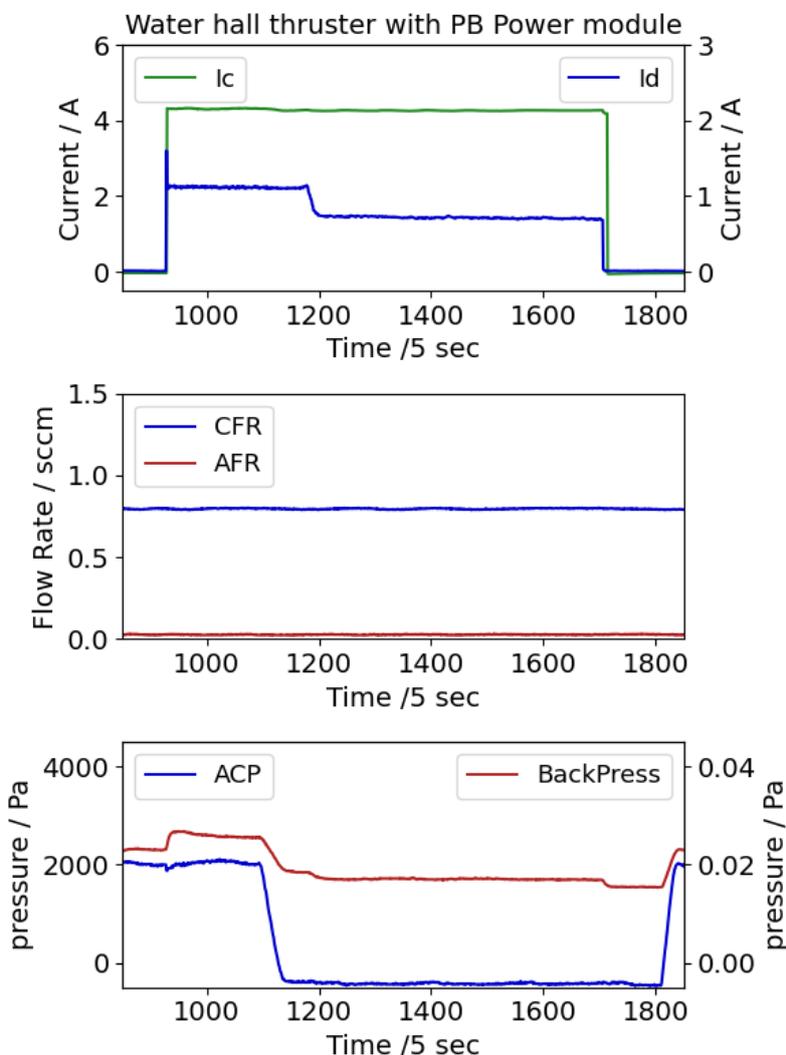


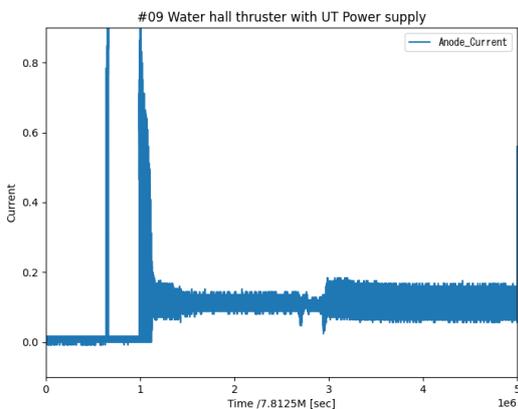
図 3-18 Pale Blue アノード電源を用いた 水ホールスラスタ動作時波形.

上図の凡例詳細は以下の通りである。

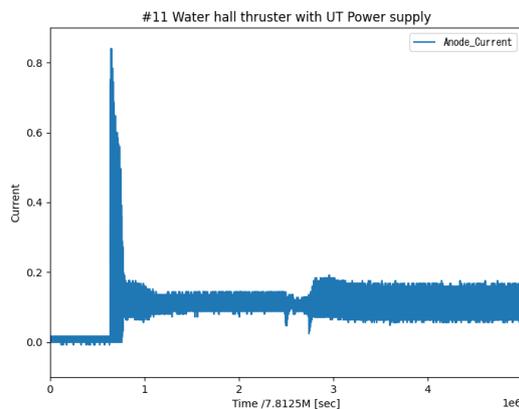
- Ic コイル電流 [A] (測定器故障により、コイル電流 On の時 約 4.2 を示す)
- Id アノード電流 [A]
- CFR カソード流量 [sccm]
- AFR アノード流量 [sccm]
- ACP 気化室圧力 [Pa]
- BackPress 背圧 [Pa]

水ホールスラスタを東京大学 小紫・小泉研究室が通常用いている外部電源を用いて駆動した時と、Pale Blue アノード電源を用いて駆動した時の、それぞれ、動作中に放電が発生した時と発生しなかった時のオシロ波形が

得られたので以下に示す. 各波形における 0.2~0.4 sec における振幅変化は, コイル電流 On のタイミングである.

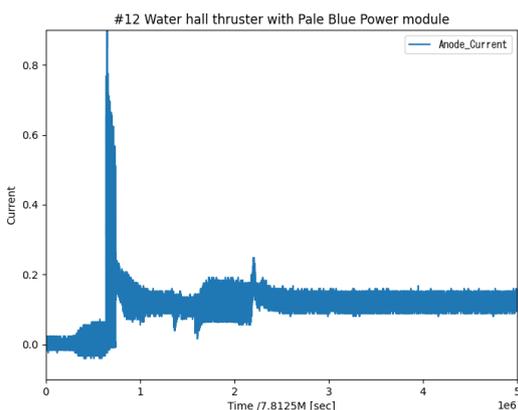


#09 東大電源(起動時 放電発生)

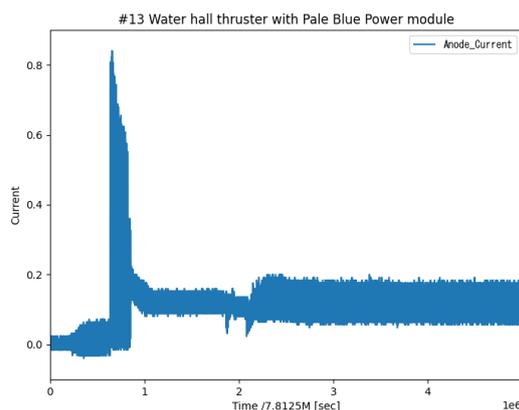


#11 東大電源(起動時 放電なし)

図 3-19 東大が通常使用しているアノード電源を用いた 水ホールスラスタ起動電流波形.



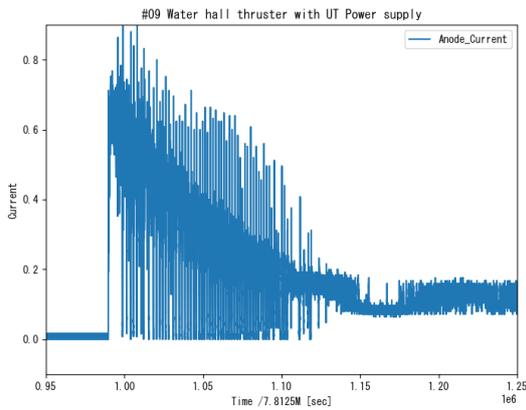
#12 Pale Blue 電源(起動時 放電発生時)



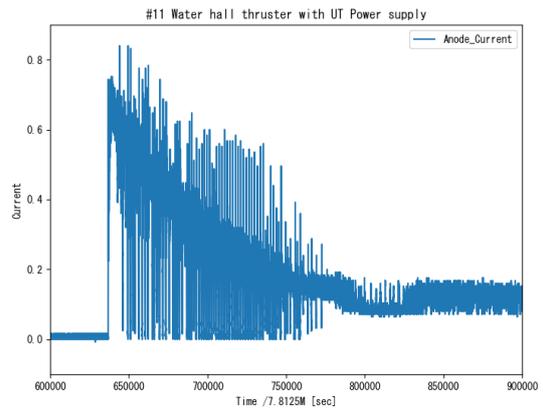
#13 Pale Blue 電源(起動時 放電なし)

図 3-20 Pale Blue 製アノード電源を用いた 水ホールスラスタ起動電流波形.

下記に、各波形の Power On 直後を時間軸方向に拡大したオシロ波形を示す。

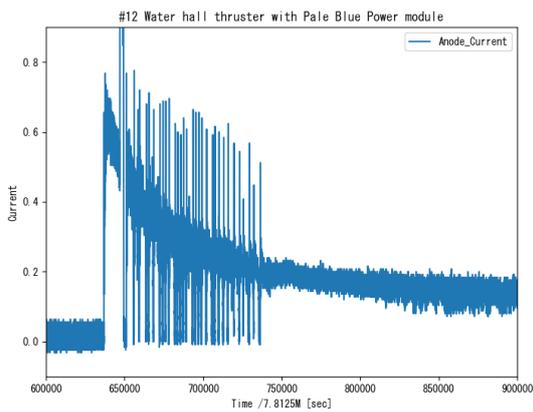


#09 東大電源(起動時 放電発生)

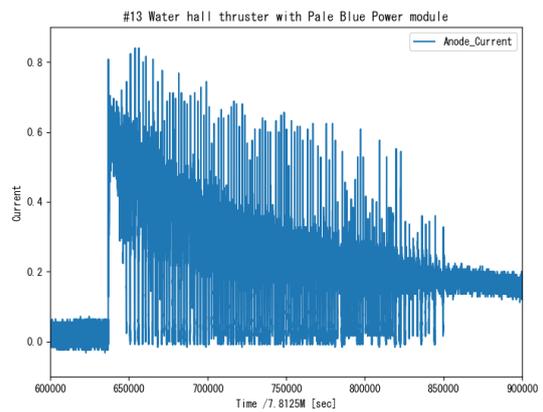


#11 東大電源(起動時 放電なし)

図 3-21 東大が通常使用しているアノード電源を用いた 水ホールスラスタ起動電流波形.



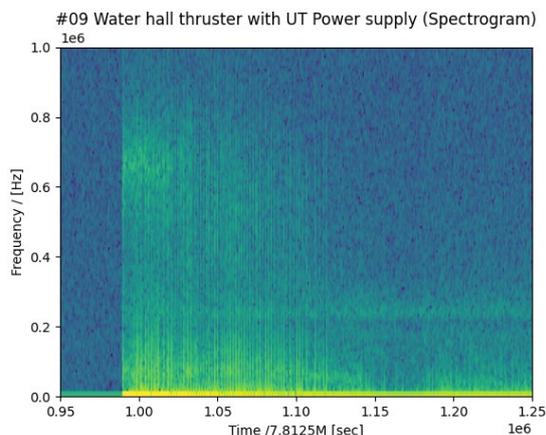
#12 Pale Blue 電源(起動時 放電発生時)



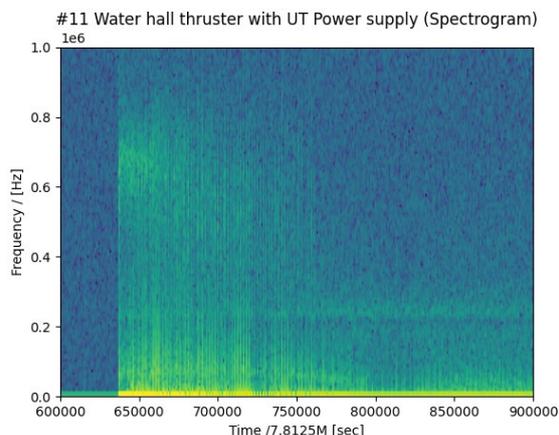
#13 Pale Blue 電源(起動時 放電なし)

図 3-22 Pale Blue 製アノード電源を用いた 水ホールスラスタ起動電流波形.

下記に、各波形の Power On 直後を時間軸方向に拡大したオシロ波形の周波数成分変化を示す。東大が通常使用しているアノード用安定化電源と Pale Blue 製アノード電源は、両者とも約 800kHz を上限とするノイズ成分が周期的に発生していることが判る。また、Pale Blue 製アノード電源は全域にわたり PWM 周波数 100kHz の高調波成分が重畳していることが判る。これにより、オシロ波形において電源 On になる前に観測されるノイズ成分は PWM から発せられるノイズと推測できる。

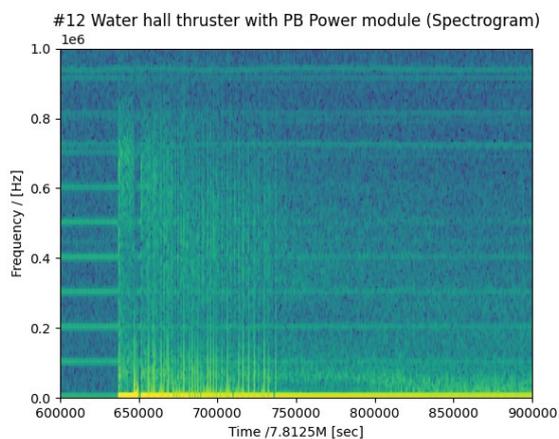


#09 東大電源(起動時 放電発生)

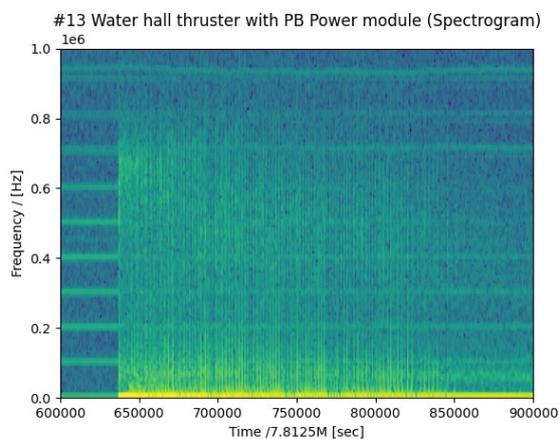


#11 東大電源(起動時 放電なし)

図 3-23 東大が通常使用しているアノード電源を用いた 水ホールスラスタ起動電流の周波数成分変化.



#12 Pale Blue 電源(起動時 放電発生時)



#13 Pale Blue 電源(起動時 放電なし)

図 3-24 Pale Blue 製アノード電源を用いた 水ホールスラスタ起動電流の周波数成分変化.

2.3.7 ホールスラスタ用アノード電源の結論

Pale Blue 製アノード電源が、本回路構成の駆動力で実現可能なことを示した。今後、効率向上を主目的とした PWM 動作のチューニング、定電流自動制御などの付加機能を追加していく。

2.4 【4. 水イオン実証機】

2.4.1 打ち上げ

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。統合試験及び環境試験を完了し、2021年11月にJAXAに引き渡しを完了し、2022年10月12日に鹿児島県のJAXA内之浦宇宙空間観測所(鹿児島県肝付町)から打ち上げられた。しかし、ロケット第2段燃焼終了後、3段分離と点火前の姿勢制御がうまくいかなかったために、打ち上げは失敗し、当初予定していた宇宙実証はできなかった。

2.4.2 成果の発信と国際動向の把握

水イオン実証機の開発成果について、以下のような国内外で影響力のある会議にてプレゼンテーション発表を行った。また以下に限らず、国内外の多くの展示会に参加し、情報発信及び国際動向の把握を行った。

- International Electric Propulsion Conference
 - 開催地: アメリカ
 - 開催時期: 2022年6月
 - 発表題目: 1U+ Water Ion and Resistojet Thruster Module for On-orbit Demonstration



図 4-1 International Electric Propulsion Conference での発表

- Small Satellite Conference
 - 開催地: アメリカ
 - 開催時期: 2022年8月
 - 発表題目: Pre-Flight Testing Results of Multiple Water Propulsion Systems – Resistojet and Ion Thruster for SmallSats



図 4-2 Small Satellite Conference での発表



図 4-3 Small Satellite Conference での企業展示

- 宇宙科学技術連合講演会
 - 開催地: 日本
 - 開催時期: 2022 年 11 月
 - 発表題目: 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と開発状況

2.4.3 新たな実証機会の獲得

2023 年 2 月に革新的衛星技術実証 3 号機の再チャレンジとして、「水を推進剤とした小型ホールスラストシステムの軌道上実証」の実証テーマで応募し選定され、搭載に必要なインターフェース情報を入手した。その後、国際動向の調査結果等を踏まえ、証テーマを水ホールスラストから水イオンスラストに変更した。

2.5 【5. 水ホール実証機】

本委託事業への申請時から宇宙実証機会の候補として挙げていた革新的衛星技術実証 4 号機について、2022 年 4 月に公募に関する情報が公開された。実証テーマ「水を推進剤とした小型ホールスラストシステムの軌道上実証」で応募した。その後、2022 年 10 月に、水イオン実証機を搭載した革新的衛星技術実証 3 号機は、ロケット側不具合により打上げ失敗となり、予定していた宇宙実証が出来なかった。革新的衛星技術実証 3 号機の実証テーマのうち、再チャレンジを希望する 11 件について、「革新的衛星技術実証 4 号機」及び「革新的衛星技術実証 5 号機」にて再チャレンジの機会を提供することが JAXA によって決定された。設計変更を行った上での再チャレンジ希望を提案した結果、変更希望内容を踏まえて実証の意義価値が評価され、再チャレンジテーマとして「水を推進剤とした小型ホールスラストシステムの軌道上実証」が選定され、水ホールの宇宙実証機회를獲得し、搭載に必要なインターフェース情報を入手した。その後、【4. 水イオン実証機】における国際動向の把握において、イオンスラストの実証意義価値の維持・向上等が見られたため、事業状況を鑑み、実証テーマを水ホールスラストから水イオンスラストに変更した。

上記とは別に、国内外の機関・企業と軌道上実証および実利用機会について継続的に交渉を実施し、搭載に必要なインターフェースなどの条件を入手した。

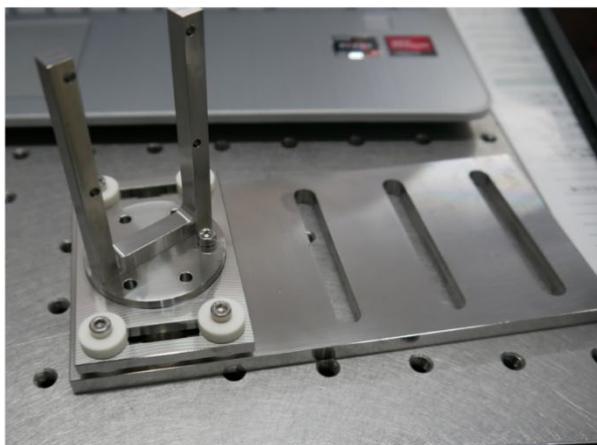
2.6 【6. 水ホールスラスト開発】

2.6.1 組み合わせ作動準備

アノードとカソードを組み合わせ作動させる性能評価試験の実施に向けて、実験系の準備を行った。具体的には、本委託業務にて製造されたアノード Rev1 とアノード実験用のプラズマブリッジカソードを用いてキセノンプラズマを放電させ、その脇で LaB₆ 熱電子カソード Rev1 を作動させる形式とした。

組み合わせ作動は、これまでアノード実験で用いてきた真空チャンバ内で行う。セッティングのために、本実験用の LaB₆ カソード固定ジグを設計し、組み上げた。このジグは、LaB₆ カソードと接地プレートとの電氣的絶縁がなされ、かつカソードの角度を離散的に変更して取り付けられるような設計にした。アノードとカソードの位置関係は、60 度および 90 度の 2 通りの角度をなすように配置して実験を行った。カソード固定ジグの外観を図 6-1 に、カソードとアノードが設置された様子を図 6-2 に、それぞれ示す。

(a) LaB₆ cathode jig

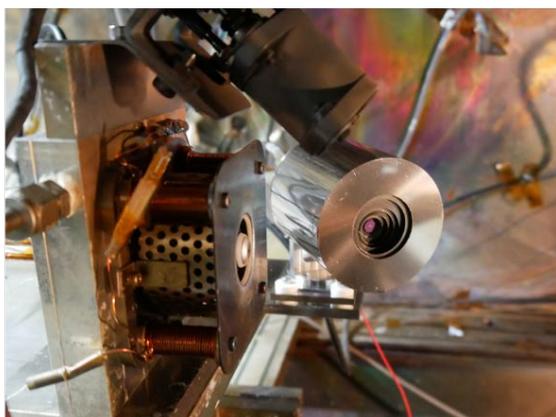


(b) Jig with LaB₆ cathode



図 6-1 (a) 組み合わせ作動用の LaB₆カソードジグ外観. (b) ジグにカソードを取り付けた状態の外観.

(a) 60-degree angle setup



(b) 90-degree angle setup

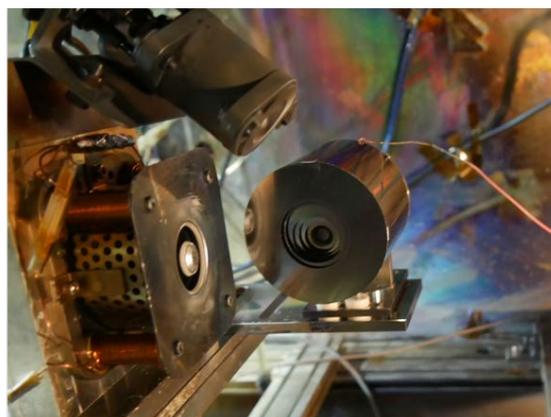


図 6-2 プラズマ下実験セットアップの外観. アノードとカソードの角度が(a) 60 度のとき、および(b) 90 度.

2.6.2 組み合わせ作動による性能評価

実験中は, LaB₆ 熱電子カソードの電位は 0 V - 40 V の範囲でチャンバ壁面に対して負にバイアスさせた. 更にその状態で, MLI をバイアス電位と同電位および+20 V の 2 通りの条件で電子電流を測定した. また, アノードおよびプラズマブリッジカソードの作動パラメータは表 6-1 に示す通りで, 実験中常に一定とした. 作動している時のアノード及びカソードの外観を図 6-3 に示す.

表 6-1 組み合わせ作動におけるアノードおよびプラズマブリッジカソードの作動条件.

Anode	Model	D20W6
	Mass flow rate(xenon)	6 sccm
	Inner coil current	7 A
	Discharge voltage	200 V
Plasma bridge cathode	Mass flow rate(xenon)	0.6 sccm
	Filament heating current	11.3 A
	Keeper current	2.0 A

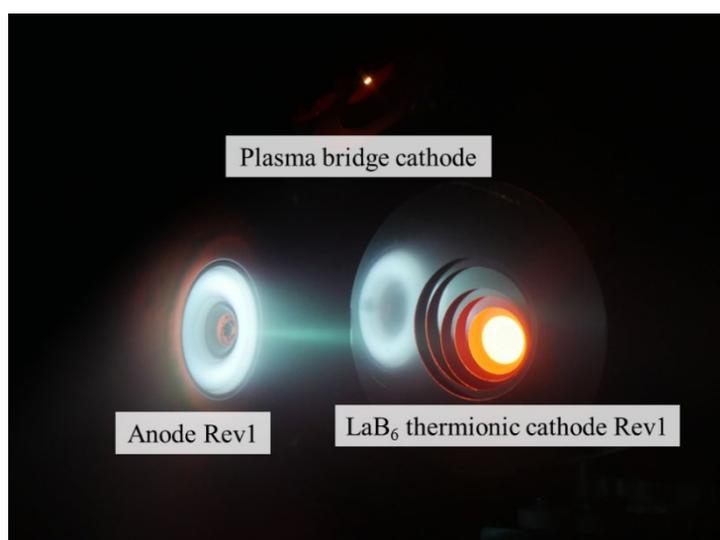


図 6-3 プラズマ下実験で作動中のアノードおよびカソードの外観.

実験結果として, まず角度 60 度の実験について, カソード加熱電力と LaB₆カソードの電子電流値の時間履歴を図 6-4 に示す. ここで, 本実験で測定された電流は, LaB₆表面から放出された熱電子電流と LaB₆表面に流入するイオン電流の和である. 図 6-4 の実験より, LaB₆電流の信号について一部区間でオフセットが載っているような挙動を得た. オフセット分のおよそ 25 mA を差し引きすると, 測定された最大の LaB₆電流は加熱電力 120 - 140 W における 17 mA であった.

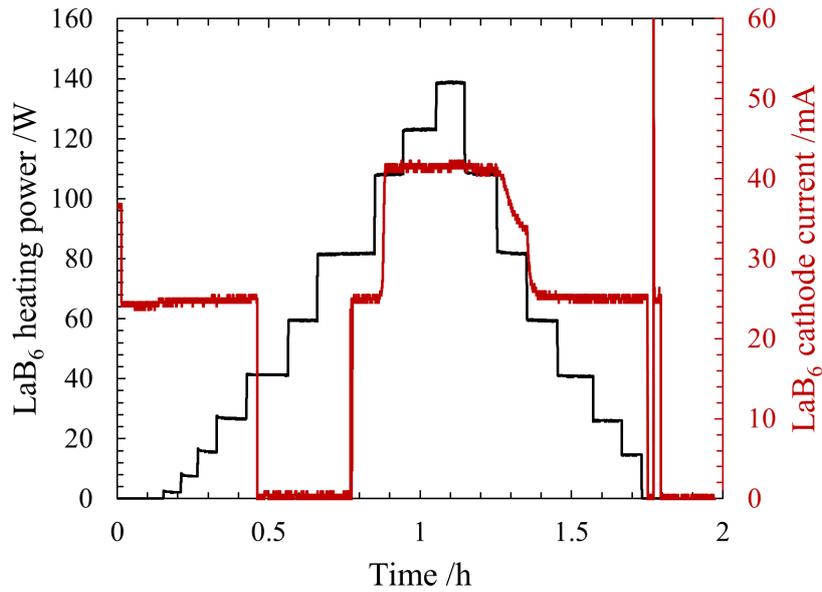


図 6-4 角度 60 度の実験における LaB₆ 加熱電力および LaB₆ 電流の時間履歴. 一部範囲の LaB₆ 電流に関して, 25 mA 程度のオフセットのような信号が確認された.

次に, 角度 90 度の実験について, カソード加熱電力と LaB₆ カソードの電子電流値の時間履歴を図 6-5 に示す. 緑の網掛けがされている範囲では MLI とバイアス電圧を変化させており, それ以外の範囲では両者とも 0 V としている. MLI およびバイアス電圧が 0 V の作動においては, LaB₆ 電流は最大で 60 mA であった.

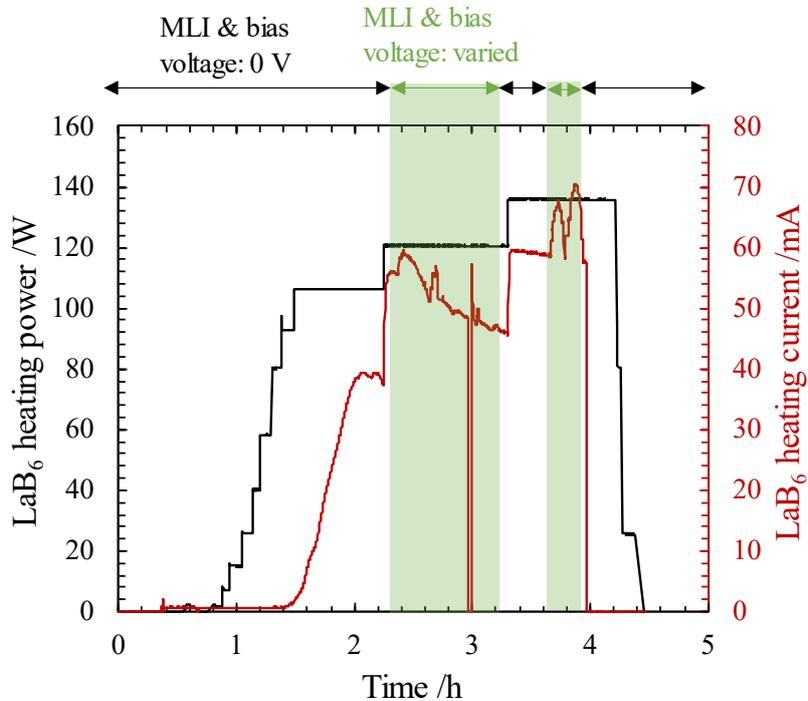


図 6-5 角度 90 度の実験における LaB₆ 加熱電力および LaB₆ 電流の時間履歴.

両者の実験において、キセノンプラズマが存在しない状態でも同様に LaB₆カソードを加熱したが、有意な LaB₆電流は測定できなかった。従って、キセノンプラズマの存在によって、カソードの電子電流値が増加することがわかった。また、その値はアノードとカソードを配置する角度に強く依存することが示唆された。角度依存性を生じる要因は、アノードからのビーム電流が濃い場所に LaB₆カソードを配置することによって空間電荷制限緩和の効果が高まるためと解釈できる。

また、より高い LaB₆電流値が確認できた角度 90 度の実験においては、LaB₆カソードのバイアス電圧および MLI 電圧を変化させた。図 6-5 の時間履歴における緑色の網掛けに対応した範囲について、LaB₆カソードバイアス電圧に対する熱電子電流を整理したグラフを図 6-6 に示す。カソード全体へのバイアス電位印加及び MLI への電圧印加によって各作動点での電子電流値が増加することがわかった。同じ加熱電力においてもバイアス電圧と MLI 電圧の変化により電流量が変化することから、緩和されたものの未だに空間電荷制限によって電流値が律速されていることが示唆される。

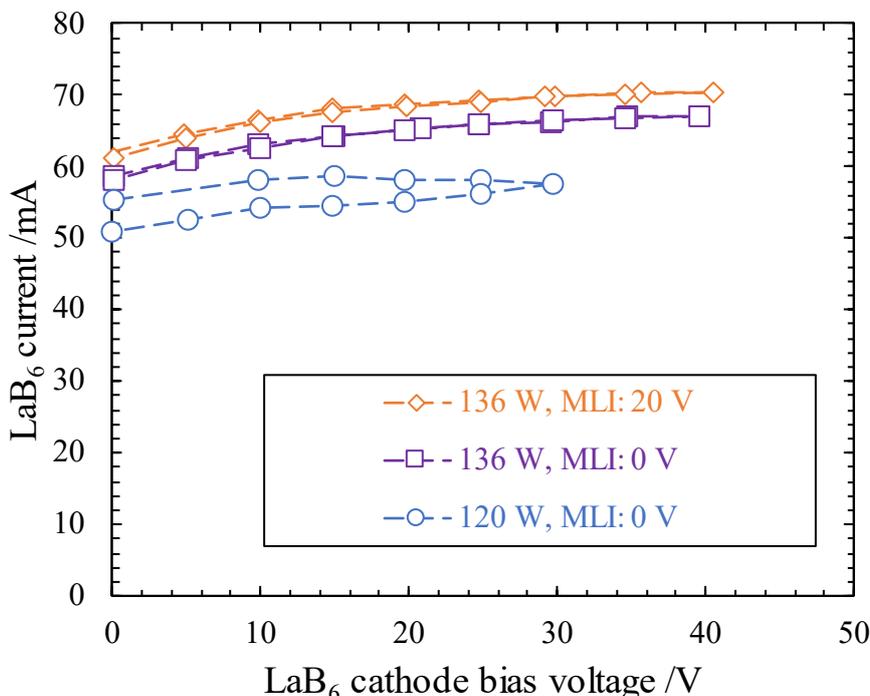


図 6-6 LaB₆カソードバイアス電圧および MLI 電圧を変化させた時の、LaB₆電流のトレンド。

2.6.3 結論

角度 90 度、加熱電力 136 W、バイアス電圧 40 V、MLI 電圧 20 V の作動において LaB₆電流の最大値 69 mA を得た。この値は、昨年度のカソード Rev1 単体作動実験において観測された電子電流値の 10 倍以上であり、空間電荷制限の大幅な緩和が示唆される。一方で、本作動点が未だに空間電荷による電流制限に律速されている作動領域にあることも確認された。本実験よりアノードとカソードの位置関係がカソード性能に大きく影響することがわかり、よりイオン密度の高い場所にカソードを配置することで、空間電荷制限のさらなる緩和が見込め

る。その上で、電子をより引き出しやすいカソード Rev2 の MLI 形状と、要求放電電流値を絞れるアノード Rev2 を組み合わせて実験を実施することで、プラズマブリッジカソードに頼らない電流ループの形成が見込める。アノード Rev2 およびカソード Rev2 の組み合わせ作動は、今年度に設計した取付角度可変のカソード固定ジグを用いて同様に実施可能である。以上より、本性能評価試験において統合試験・環境試験の目処が立ったといえる。

参考文献

[1] K. Shirasu, H. Kuwabara, M. Matsuura, H. Koizumi, Y. Nakagawa, H. Watanabe, H. Sekine, K. Komurasaki: Demonstration and experimental characteristics of a water-vapor Hall thruster, Journal of Electric Propulsion, 2023

3 まとめ

【1B. アノード Rev2】

目標：「本年度は、Rev1 試験での知見を活用しつつ Rev2 の性能評価試験およびプラズマ測定を実施し、最適作動点の選定および性能評価を行うまでを目標とする。」

- ✓ アノード Rev1 試験より、水蒸気作動で 100 W を目指すためにはキセノン推進剤とするホールスラストよりもアノードを小型化する必要があること、放電振動は比較的小さいこと、高電圧ほど効率改善が見込めること、チャンネル幅を狭めるとプラズマの着火および維持が困難になること、マグネティックシールドリングは損耗の低減に一定の効果が見込めることが知見として得られた。
- ✓ アノード Rev1 に対して加速チャンネルの直径・幅の比率が同程度で断面積が約半分のアノード Rev2 を設計・製作した。放電性能評価試験の結果、放電電圧 200 V にて作動電力 100 W を達成した。
- ✓ プラズマ測定から最適作動点を見出し、200-300 V の放電電圧で推力測定による推進性能の評価を実施した。結果として、放電電圧 200 V で作動電力 107 W、推力 1.8 mN、比推力 350 s、アノード効率 3.0 %、放電電圧 300 V で作動電力 321 W、推力 4.7mN、比推力 900 s、アノード効率 6.4 %を達成した。

【2B. カソード Rev2】

目標：「本年度は Rev1 の性能評価試験の結果ならびに電子粒子計算の結果をフィードバックして Rev2 の設計・構築を行い、性能評価試験および温度評価試験を行うまでを目標とする。」

- ✓ カソード Rev1 の性能評価試験ならびに電子粒子計算の結果、電子放出性能の向上には電圧印加による空間電荷制限の緩和が有効であると示唆された。この知見をもとに、形状を電子引き出しに最適化した加速電極を備えたカソード Rev2 を設計・構築した。
- ✓ 温度評価試験の結果、カソード Rev2 の熱性能はカソード Rev1 よりもやや低いだが性能評価試験を実施する上で問題はなく、設計時の予測の範囲内であることが確かめられた。
- ✓ 性能評価試験では、カソード Rev2 の単体作動および電子粒子計算を実施した。単体作動試験では引き出し電流量 23 mA を達成し、電圧印加によって電流量向上が達成可能であることを示した。また、電子粒子計算を合わせた検討から、現在の作動点は温度制限領域にあたり、更なる電流量向上には電子放出材の材質、形状の変更やより高い温度での作動が必要となることが示唆された。

【3. 水スラストベース開発】

目標：「各コンポーネントの製造と作動試験を完了、全コンポーネントの統合試験および環境試験を実施し、アノードとカソードを水スラストベースで作動することができる状態とすること、および組み合わせの作動を目標とする。」

- ✓ レジストジェットスラストの高比推力化に取り組み、地上試験の実測で 92s まで向上した。本事業の実績外ではあるが、同タイプの水レジストジェットスラストの軌道上試験では地上試験と比較して約 32% の比推力向上が報告されている[参考文献]。すなわち、本事業で取り組んだ高比推力化したレジストジェットスラストは、軌道上では目標であった比推力 100s 以上の性能達成が見込まれると考えられる。
- ✓ レジストジェットスラスト・イオン用高電圧電源・水供給系の製造と作動試験、全コンポーネントの統合試験および環境試験を実施した。

- ✓ 開発したホールスラスト用アノード電源を、東京大学にて開発したアノードと組み合わせて作動試験を実施し、設計した回路構成の駆動力で実現可能なことを示した。今後、効率向上を主目的とした PWM 動作のチューニング、定電流自動制御などの付加機能を追加していく。

【4. 水イオン実証機】

目標：「完成した FM, その試験成果, およびそれらの宇宙実証結果については, 国際的に影響力のある学会・展示会において積極的に発信を行うとともに, 国際動向の把握をすすめる。」

- ✓ 完成した FM を搭載した衛星(革新的衛星技術実証 3 号機)は、ロケット側不具合により打上げ失敗となり、予定していた宇宙実証は出来なかった。
- ✓ 完成した FM や地上試験成果は、Small Satellite Conference 等の国際的に影響力のある学会や展示会で積極的に発信し、併せて国際動向も把握した。
- ✓ 革新的衛星技術実証 4 号機にて宇宙実証を行う機会を得た。

【5. 水ホール実証機】

目標：「国内外の機関・企業と軌道上実証および実利用機会について交渉を実施, 搭載に必要なインターフェースなどの条件を入手する。」

- ✓ 革新的衛星技術実証 3 号機の再チャレンジとして、「水を推進剤とした小型ホールスラストシステムの軌道上実証」の実証テーマで応募し選定され、搭載に必要なインターフェース情報を入手した。
- ✓ 【4. 水イオン実証機】の成果を踏まえ、証テーマを水ホールスラストから水イオンスラストに変更した。
- ✓ 国内外の機関・企業と軌道上実証および実利用機会について交渉を実施し、搭載に必要なインターフェースなどの条件を入手した。

【6. 水ホールスラスト開発】

目標：「項目 1,2 で開発したアノード・カソードを組み合わせて水ホールスラストとして作動させ, 性能評価試験を行う。またその結果を受けて統合試験・環境試験の目途を立てるまでを目標とする。」

- ✓ 項目 1,2 で開発したアノード Rev1 およびカソード Rev1 を組み合わせて性能評価試験を実施した。一定のアノード作動条件を維持した状態で、カソードの電子放出性能を評価した。カソード単体作動時と比較して、カソード放出電子電流値の増加が確認された。
- ✓ 性能評価試験結果を踏まえ、要求放電電流の小さいアノード Rev1 および電子引き出しに要点をおいた設計のカソード Rev2 を組み合わせることで、プラズマブリッジカソードに頼らない電流ループの形成が見込まれる。以上より統合試験・環境試験の目処が立った。

3 年間のまとめ

- ✓ アノード Rev1 を設計・製作し、世界でも類を見ない水蒸気による 200 W 級の作動を実現した。また、ブルーム診断から推進性能の評価を行い、代表的な特性を明らかにした。得られた成果は学術雑誌に掲載された。
- ✓ 12 通りのチャンネル形状を持つ Rev1 モデルを用いて、チャンネル幅やチャンネル平均直径がホールスラストの作動や効率に及ぼす影響の評価を行った。また、小型ホールスラストに対するマグネティックシー

ルディングなどを試み、将来設計に向けた知見を獲得した。

- ✓ アノード Rev1 試験の知見を活かしてアノード Rev2 の設計・製作を実施し、電力 100 W での安定作動を実現した。また、推進性能の評価から、放電電圧 300 V においてアノード単体で比推力 900 s 効率 6.4 %を達成した。
- ✓ カソード Rev1 として、LaB6 を電子放出材として用いた熱電子式のカソードを設計・製作し、LaB₆ 温度が 1800 K に達することを実証した。また、0.5 mA の電子引き出しを実験的に確認するとともに、電子軌道シミュレーションにより電子電流増加に向けた知見を獲得した。
- ✓ カソード Rev1 で得られた知見をもとに、電子加速用の電極を備えたカソード Rev2 を設計・制作し、最大で 23 mA の電流引き出しに成功した。また、カソード Rev 2 の性能評価試験の結果から、更なる電子電流量増大に向けた知見を獲得した。

アノード Rev1 およびカソード Rev1 を組み合わせて性能評価試験を実施した。カソードの放出電子電流の増加が確認された。試験結果を踏まえて、アノード Rev2 およびカソード Rev2 の統合試験・環境試験の目処が立った。

学会等発表実績

委託業務題目「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」

機関名 国立大学法人 東京大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別
水を推進剤とする 200 W 級ホールスラストの放電特性および推進性能(口頭)	白須 健人、桑原 宙暉、松浦 将行、小泉 宏之、中川 悠一、渡邊 裕樹、関根 北斗、小紫 公也	令和 4 年度宇宙輸送シンポジウム	2023/01/12	国内
水を推進剤とする小型ホールスラストへの外部壁付加による推進性能の評価(口頭)	松浦 将行、白須 健人、桑原 宙暉、小泉 宏之、中川 悠一、渡邊 裕樹、関根 北斗、小紫 公也	令和 4 年度宇宙輸送シンポジウム	2023/01/12	国内
多層断熱構造を有する LaB6 熱電子カソードの熱モデル解析による性能向上(口頭)	高崎 大吾、藤森 蒼天、関根 北斗、小泉 宏之、渡邊 裕樹、中川 悠一、小紫 公也	第 66 回宇宙科学技術連合講演会	2022/11/01	国内
小型水ホールスラストの推進性能に対するチャンネル幅の影響(ポスター)	松浦 将行、白須 健人、桑原 宙暉、川嶋 嶺、関根 北斗、小泉 宏之、渡邊 裕樹、中川 悠一、小紫 公也	第 66 回宇宙科学技術連合講演会	2022/11/01	国内
マグネチックシールドリングを適用した 100 W 級ホールスラストの設計と初期作動(ポスター)	桑原 宙暉、白須 健人、関根 北斗、中川 悠一、渡邊 裕樹、小泉 宏之、小紫 公也	第 66 回宇宙科学技術連合講演会	2022/11/01	国内
Challenge for lifetime extension of a 100 W-class Hall thruster with magnetic shielding(ポスター)	H. Kuwabara, K. Shirasu, H. Sekine, H. Koizumi, R. Kawashima, Y. Nakagawa, H. Watanabe, K. Komurasaki	36th Small Satellite Conference	2022/08/06	国外
A 100 W-class Water Hall Thruster: System Evaluation for Missions beyond LEO(ポスター)	A. Fujimori, K. Shirasu, D. Takasaki, H. Sekine, H. Koizumi, H. Watanabe, Y. Nakagawa, K. Komurasaki	36th Small Satellite Conference	2022/08/06	国外

Performance Measurements of a Propellant-free LaB6 Thermionic Cathode(口頭)	D. Takasaki, A. Fujimori, H. Sekine, H. Koizumi, H. Watanabe, Y. Nakagawa, K. Komurasaki	International Electric Propulsion Conference 2022	2022/06/19	国外
Far-Field Plume Diagnostics of Low-Power Water Hall Thruster(口頭)	K. Shirasu, H. Kuwabara, M. Matsuura, H. Koizumi, R. Kawashima, Y. Nakagawa, H. Watanabe, H. Sekine, K. Komurasaki	International Electric Propulsion Conference 2022	2022/06/19	国外
Initial Experiments of the Low-power Anode and the LaB6 thermionic Cathode for a Water Hall Thruster(口頭)	D. Takasaki, K. Shirasu, H. Sekine, H. Koizumi, H. Watanabe, Y. Nakagawa, K. Komurasaki	Space Propulsion Conference 2022	2022/05/09	国外
放電チャンネル形状最適化による小型ホールスラスターの効率向上(口頭)	上瀧 優希、白須 健人、桑原 宙暉、藤森 蒼天、峯松 涼、松浦 将行、相澤 脩登、川嶋 嶺、関根 北斗、小泉 宏之、渡邊 裕樹、中川 悠一、小紫 公也	第 61 回航空原動機・宇宙推進講演会	2022/03/09	国内
水を推進剤とする小型ホールスラスターの開発状況(口頭)	高崎 大吾、白須 健人、関根 北斗、小泉 宏之、渡邊 裕樹、中川 悠一、川嶋 嶺、小紫 公也	第 7 回 SSPS シンポジウム	2021/12/17	国内
耐腐食性を有する推進剤不要 LaB6 熱電子カソードの設計と初期作動(ポスター)	高崎 大吾、白須 健人、関根 北斗、藤森 蒼天、小泉 宏之、渡邊 裕樹、中川 悠一、小紫 公也	第 65 回宇宙科学技術連合講演会	2021/11/09	国内(オンライン)
100 W 級ホールスラスターの加速チャンネル形状に対する推進性能の依存性調査(ポスター)	白須 健人、高崎 大吾、関根 北斗、小泉 宏之、渡邊 裕樹、中川 悠一、川嶋 嶺、小紫 公也	第 65 回宇宙科学技術連合講演会	2021/11/09	国内(オンライン)
Demonstration of the low-power Hall thruster with water propellant(口頭)	K. Shirasu, D. Takasaki, H. Sekine, H. Koizumi, Y. Nakagawa, H. Watanabe, K. Komurasaki	72nd International Astronautical Congress	2021/10/25	国外

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(口頭)	小泉 宏之	超小型探査機を用いた月以遠深宇宙に関する研究会	2021/02/06	国内(オンライン)
----------------------------------	-------	-------------------------	------------	-----------

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・ 外の別
Demonstration and experimental characteristics of a water-vapor Hall thruster	Kento Shirasu, Hiroki Kuwabara, Masayuki Matsuura, Hiroyuki Koizumi, Yuichi Nakagawa, Hiroki Watanabe, Hokuto Sekine & Kimiya Komurasaki	Journal of Electric Propulsion	2023/03/27	国外
水を推進剤とする小型ホールスラストの開発状況	高崎 大吾, 白須 健人, 関根 北斗, 小泉 宏之, 渡邊 裕樹, 中川 悠一, 川嶋 嶺, 小紫 公也	宇宙太陽発電 2022 年 7 巻	2022/03/02	国内

(注)発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。