

永久磁石による発散磁場を用いた 高周波プラズマスラスターの開発

桑原大介

Development of divergent magnetic field radio-frequency plasma thruster using permanent magnet

Daisuke Kuwahara

We proposed a divergent magnetic field radio-frequency plasma thruster using permanent magnet as a future electric thruster for space vehicle such as a deep space explorer and manned spacecraft. To suppress the wall loss of plasma, a prototype thruster has high magnetic field source made by separated C-shape and disc neodymium magnets. We developed the prototype thruster and constructed a test environment such as a vacuum vessel for the discharge experiment, and conducted the initial discharge experiment. Through several discharge experiments, the parasitic discharge around the RF antenna was successfully suppressed.

Keywords : *Radio-frequency plasma thruster, permanent magnet, divergent field*

1. はじめに

宇宙用推進機である電気推進機は人工衛星や宇宙探査機等で採用が進んでいる¹⁾。一般的にロケットエンジンといって想像される燃料を燃焼させて噴射する化学推進機は、推進剤の加速に使用できるエネルギーは推進剤自体が持つ化学エネルギーに限られるため、燃費につながるその排気速度は原理的に 300~400 m/s に留まる。一方、電気推進機は一般的に物質の第 4 の状態と呼ばれるプラズマを生成・加速して噴射し、その反力として推力を得る。プラズマは高温電離気体であり、電子・イオン（電離していない中性粒子も含む）で構成されるため、静電・電磁力を外部の電極や電磁コイルから作用させることができる。このため加速エネルギーに制約が無く、現在実用化されているホールスラスターやイオンエンジンなどでは排気速度が化学推進機の 10 倍程度であり、排気速度と比例する燃費性能(比推力)も同じく 10 倍程度である。燃料補給が地上(空中も含む)に比べて格段に難しい宇宙機において燃費は推進剤の積載量に直結するため、打ち上げコストや運用期間を考えると電気推進機は宇宙用推進機として優れている。

問題点としては、噴射速度は極めて高速であるものの噴射量が少ないため推力が弱いことであり、供給電力にもよるが現在実用化されている電気推進機では数十～数百 mN に留まる。加えて、ホールスラスターやイオンエンジンはプラズマの生成・加速にプラズマと接触する電極を用いるため、この電極が

高温のプラズマによる損耗を受け寿命や大推力化が制限されている。このため、将来の有人火星ミッション等のための大型宇宙機や長期運用人工衛星の主推進機としては現有電気推進機では推力が十分でなく、新たな方式が求められている。この解決のために、プラズマ生成・加速の両方でプラズマと接触する電極を持たない『高周波プラズマスラスター』が提案され、国内外で実用化に向けた高性能化研究が行われている。

1.1. 高周波プラズマスラスターの原理

Fig. 1 に高周波(RF: Radio-frequency)プラズマスラスターの原理図を示す^{1,2)}。石英やセラミック等の絶縁体製放電容器の外周に RF アンテナが巻かれており、数~数十 MHz の高周波が供給されると放電容器内に交流電場・磁場が印加される。放電容器には推進剤となる中性粒子、一般的にはアルゴン、クリプトン、キセノン等の不活性ガスが供給され、高周波により電離しプラズマとなる。このプラズマを単に熱圧力により噴射するだけでは推力に寄与しない方向への噴射成分は電力・推進剤損失に繋がり、また、放電管壁へ衝突する成分は放電管壁を損耗させてしまう。このため、電磁石や永久磁石などで軸方向磁場を印加し、プラズマが磁力線に巻き付いて運動する(ラーマー運動、サイクロトロン運動)性質を利用して、磁力線のノズルで方向制御してプラズマを噴射する。プラズマ生成と加速の両方でプラズマと接触する電極が存在せず、また放電管に用いられるセラミックはプラズマ耐力が高いため、本方式は原理的に長寿命であり、大電力化による大推力化に向く方式である。

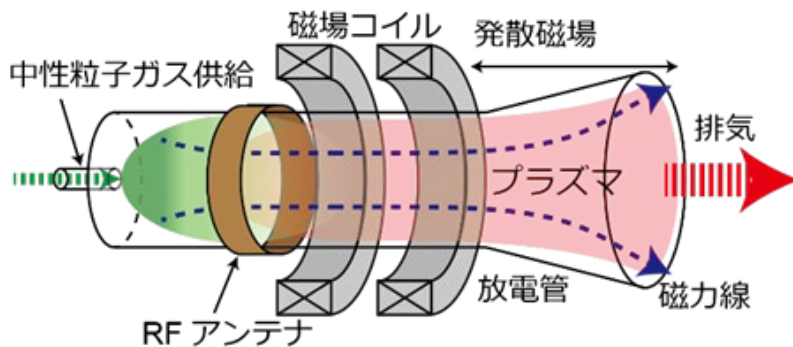


Fig. 1 Schematic diagram of radio-frequency plasma thruster.

しかしながら、現在の RF プラズマスラスターの性能は推力で約 10 mN/kW^{3,4)}、イオンエンジンやホールスラスターと比較して数分の 1 に留まっているため、電力効率や燃費効率改善のために磁場形状や高周波アンテナの方式、燃料供給法など様々な要素において様々な研究が試みられている。

1.2. 強力永久磁石を用いた発散磁場型高周波プラズマスラスター

多くの RF プラズマスラスターの研究では磁場源として、磁場強度や磁力線形状の制御が容易な電磁石を用いている。しかしながらプラズマ損失の主な要因となる放電壁への衝突を防ぐには、強力な軸方向磁場による半径方向拡散抑制が必要であり、強力な磁場を電磁石で生成するためには大型・大重量のコイルや電源装置が必要となるが、宇宙機において重量軽減は大きな要請である。一方、永久磁石は電力を必要とせず、またネオジム磁石などの希土類磁石は比較的小型・軽量に強力な磁場を生成できる特徴がある。このため、永久磁石による磁場装置を用いたスラスター研究も行われてきているが、電磁石と違い磁場強度が変更できないことや、永久磁石よりも複雑な磁力線構造となるため磁場設計が難しい

こと、強磁場を作る場合は磁石間の吸引・反発力を抑えるための構造が必要と敷居が高く、放電容器内の大半で 100 mT を超え、口径 100 mm 程度のスラスターは研究されていなかった。

本研究は永久磁石型 RF プラズマスラスターの推進特性、プラズマ特性を明らかにするため、放電容器内磁場強度 100 mT 程度、放電容器口径 100 mm 程度のスラスターに加え、放電実験用真空容器などの実験環境を開発することを目指す。

2. スラスター開発

Fig. 2 に製作した永久磁石型 RF プラズマスラスターの磁場装置、放電容器および高周波アンテナを示す。磁場装置は 3 つの磁石リングと 2 つのディスク磁石で構成されている。リング磁石の磁化方向は中心軸側、ディスク磁石の磁化方向は排気方向となっており、円盤磁石の磁力線を石英放電容器の内部に押し込む形の分布をとる。プラズマは磁力線に沿って流れるため、放電容器壁は磁力線に並行するようテーパ形状としている。磁場強度は放電容器内側の上方部で 0.4 T、排気端で 0.05 T であり、放電容器内は平均して 0.1 T 程度の高磁場かつ強力な磁場勾配が形成される。放電容器はコップのような形状の石英製で、上流端は内径 80 mm、排気端は内径 120 mm と RF プラズマスラスターとしては比較的大口径としている。高周波アンテナはリング磁石 2 と 3 の隙間から挿入され、放電容器外側に 2 巻された単純ループアンテナとしている。なお、推進剤供給については、従来機であれば放電容器上流端の開口部から行うが、本機ではガス供給位置の変化による推進効率変化を評価するため、放電容器排気端からガラス細管を挿入して行う設計である。

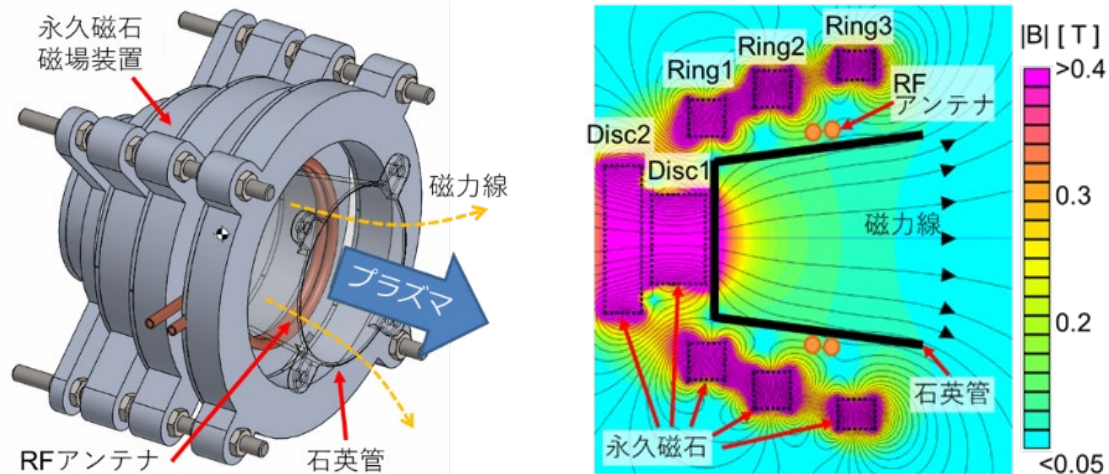


Fig.2 Structure of permanent magnet RF plasma thruster and its magnetic field.

2.1. 永久磁石装置

永久磁石装置は 3 つのリング磁石と 2 つのディスク磁石で構成されるが、磁化方向が内側のリング磁石は製造が難しいため、リングを 45 度で 8 分割した C 型磁石を 8 個組み合わせてリング磁石を構成している。Fig.3 に磁石構造と放電容器、これらの断面図およびリング 2 用のネオジム磁石を示す。リング磁石、ディスク磁石はネオジム磁石であり、それぞれには吸引・反発の強力な磁気力が作用する。とくにリング磁石を構成する C 型分割磁石は同じ極同士で隣接するため、強力な反発力が働く。この反発力を抑えるため、リング毎にアルミ合金製のホルダーで保持し、それぞれのリング、ディスク磁石は Fig.2

に示されるように 4 本の M10 ステンレスボルトで連結される。なお、製作した磁場装置は 3 軸ホールセンサーと 3 次元ステージを使用して空間 3 軸・磁力線方向 3 軸の磁場計測を行っている。C 型分割磁石の合成によるリング磁石では磁石隣接部で磁力線の乱れが発生するが、放電容器内部においては理想的な一体成型リング磁石と比較して磁場強度誤差 5% 以下の均一な磁力線形状をとることを確認している。

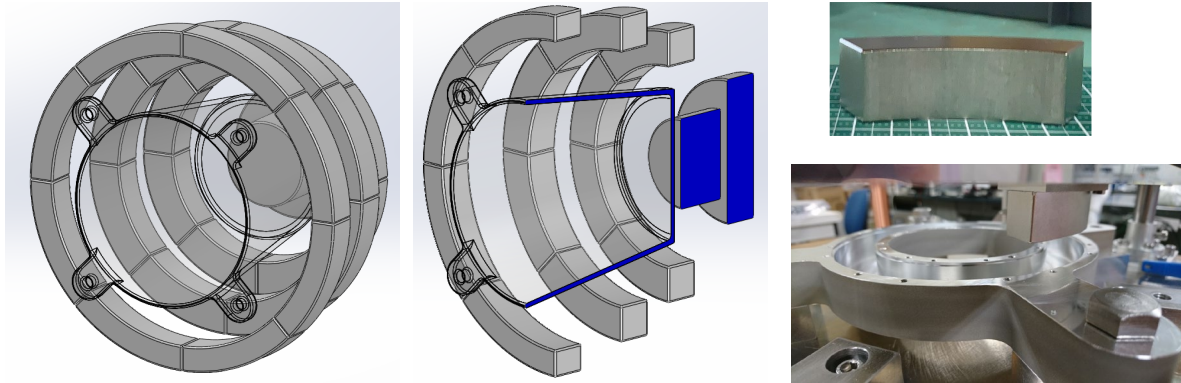


Fig. 3 Separated magnets structure, 45 degree C-shape magnet and ring magnet holder.

2. 2. RF アンテナ

高周波アンテナは数 MHz～十数 MHz の高周波電力を用いて容量性結合プラズマ、誘導性結合プラズマおよびヘリコン波などの波動伝搬プラズマなどの高周波プラズマ生成を行う。Fig. 2 のようにリング磁石の隙間から挿入し、放電管外周を 2 ターンするループアンテナである。素材は 1/4 インチなまし銅管で、連続運転時の冷却を考え水冷できるようになっている。なお、銅管の外周は絶縁のため厚さ 1 mm の熱収縮チューブが隙間なく被覆される。Fig. 4 は製作した RF アンテナである。アンテナは真空容器に接続できるように VF150 フランジに固定されている。大気側は大電力用 RF コネクタである LC コネクタが設けられており、真空側とは樹脂封止を通して配線・アンテナ本体である銅管に接続されている。この構造をとることで真空側のアンテナ導体は全て絶縁体で被覆され、アンテナ導体間で発生する異常放電の抑制が為されている。

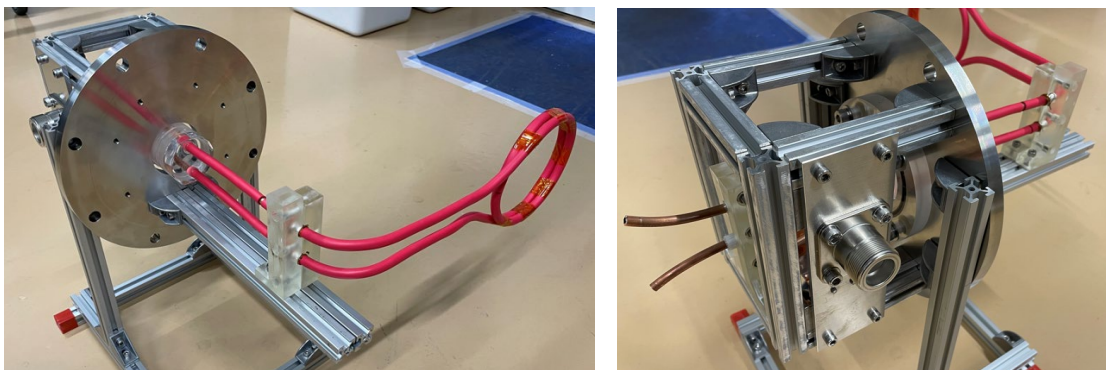


Fig. 4 prototype RF antenna.

3. スラスタ実験用真空容器・推力スタンド開発

電気推進機は宇宙空間で運用する推進機であり、放電を伴う運転は真空容器で行う必要がある。放電容器の要件は 1) ガス供給を行っても背景ガス圧が十分低く抑えられる ($< 10^{-2}$ Pa 以下)、2) 放電、プラズマの排気に影響が出ない程度の内部空間を持つこと、3) 計測装置を設置する空間・真空ポートを持つ

ことなどが挙げられる。計測器としては最も大事な推力を計測するための推力スタンドがあり、電子密度や温度を計測する静電プローブなどが挙げられる。推力スタンドには様々な方式があるが、今回はスラスターを振り子に設置し、推力による振り子の振れ幅を計測して推力を算出する振り子型推力スタンド方式を採用した。

3.1. 真空容器本体

本研究用に新設した真空容器(ChuChamber: Chubu University Vacuum Chamber for Electric Propulsion)を Fig. 5 に示す。内径 750 mm, 長さ 1,500 mm のステンレス製で、本体には VG300 フランジ 3 箇所、VF150 フランジが 12 箇所あり、スラスター設置側フランジと後端フランジは VF750 フランジとなっている。真空ポンプに排気量 2,400 l/s のターボ分子ポンプ 1 台、ガス供給は Ar 用 100 sccm のマスフローコントローラ、真空計はピラニゲージ($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)、電離真空計($10^{-10} \sim 10^{-7}$ Pa)が設置されている。真空容器内には M6 タップが施されたレールが 4 本設置されており、3 軸電動ステージや様々な機器が設置可能である。スラスター設置側 VF750 フランジは角度調整機能を持ったレールによるスライド機構の上に設置されている。また、このフランジの真空側には多数 M6 タップ穴が施されており、これを使ってスラスターを設置する推力スタンド、スラスター本体、高周波アンテナ、ガス供給系、計測器などが取り付けできるようになっている。この構造によってフランジを開けてスラスター機構を調整したのち、そのままフランジをスライドさせて真空封止でき、従来の真空容器で難しかった調整と封止の間の位置ずれなどを抑制することが可能となっている。

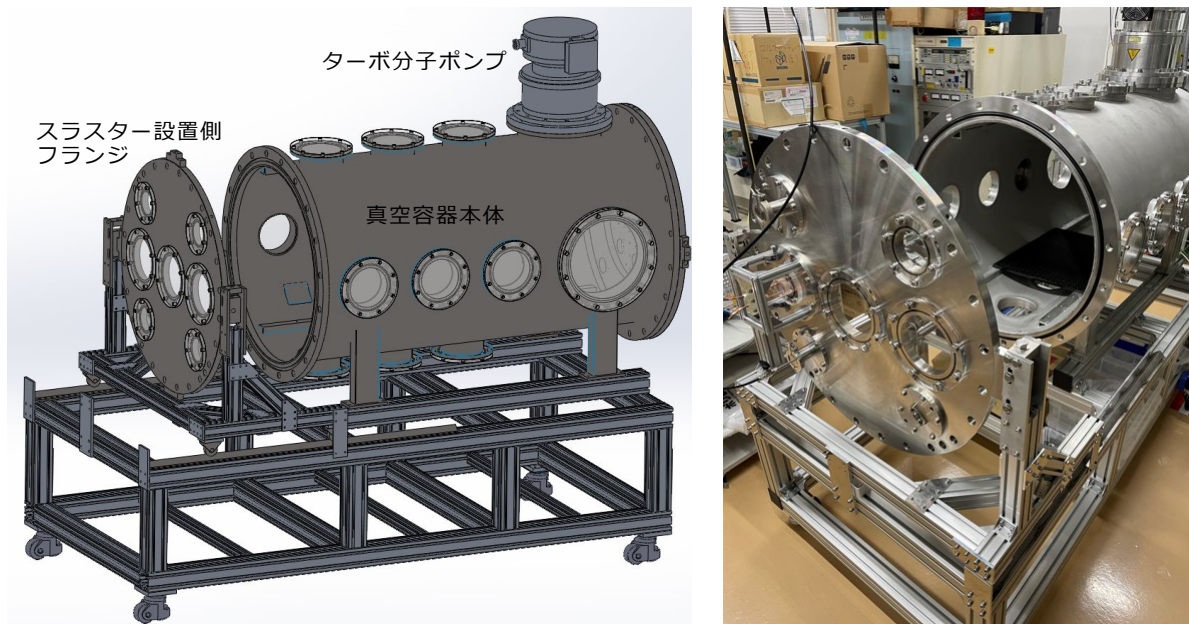


Fig. 5 Developed vacuum chamber (ChuChamber).

3.2. 推力スタンド

推力計測は振り子型推力スタンドを採用した。この方式は、スラスターを振り子構造に吊るし、推力による振り子の振れから推力算出するものである。Fig.6 に真空容器スラスター設置側フランジに設置された、製作したスラスターおよびスラストスタンドを示す。スラスター設置側フランジには 2 個のスパイクで振り子を支持する支持台が取り付けられており、振り子はスパイク頂点を結ぶ直線を回転軸に推力で回転振動する。スラスターは同じくスラスター設置フランジに設置される RF アンテナと結合するが、真空容器や磁石ホルダーとのクリアランスは 1 mm 程度であるため、支持台は左右・上下、軸方向

に位置調整機構を有する。また、スラスタを含めた振り子構造は 11 kg 程度の重量があるため、歪みが発生しないよう位置調整機構に剛性を持たせている。振り子構造はスパイク 2 個に合致する円錐状の凹みに噛み合う。振り子構造はスラスタと一体化しており、スラスタの軸中心は真空容器軸中心と合致している。スラスタ下部には振り子の振幅を計測するレーザー変位計(計測範囲 30 mm, 精度 1 μm)と、校正用に既知応力を振り子に印可するロードセル(定格 100 mN)が設置されている。振り子に働いた応力、すなわちスラスタの推力は回転運動方程式にスラスタを含めた振り子構造の慣性モーメントを入力し、レーザー変位計で振幅を計測することで算出できる。校正のためのロードセルは計測部に加わった応力を電圧で出力するもので、微動ステージでロードセルをスラスタの応力印可板に押し当て、出力電圧から応力を算出し、その際の変位をレーザーセンサーで計測することで推力(トルク)-変位の変換式を得る。

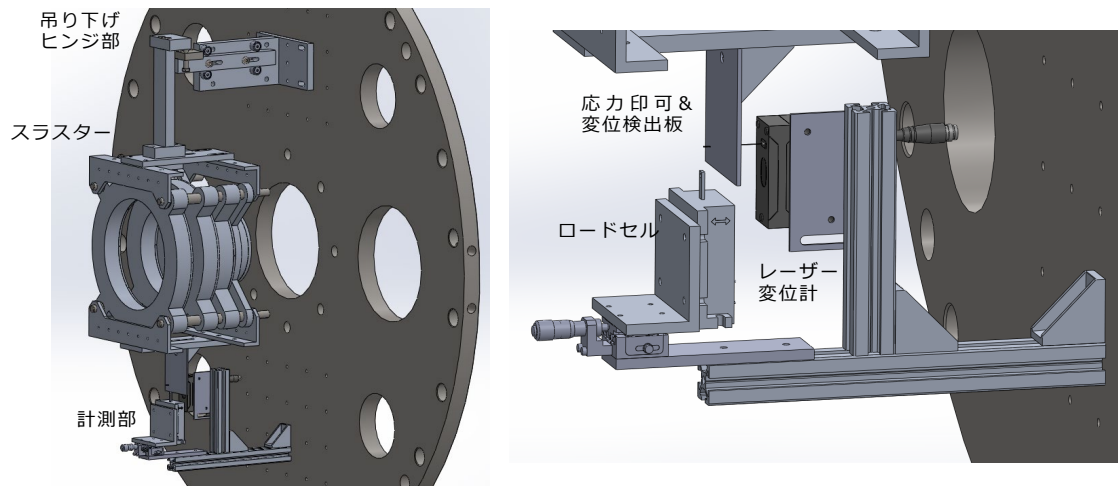


Fig. 6 Pendulum-type thrust stand (left) and sensor section (right).

4. 放電実験

製作したスラスタによる放電実験を実施した。Fig.7 に放電の様子を示したが、放電アンテナの導体間での強い異常放電は見られなかったが放電容器からアンテナフィーダー下部に向かって、磁力線に沿って濃いプラズマ流が流れる様子が見られた。アンテナフィーダーは上側配線が真空容器に設置され、下側配線が高周波電源ホット側となっているため、ホット側にプラズマ流が導かれたものと考えられる。アーク放電状の強い異常放電ではないが、エネルギーロスに繋がるため対策を行った。

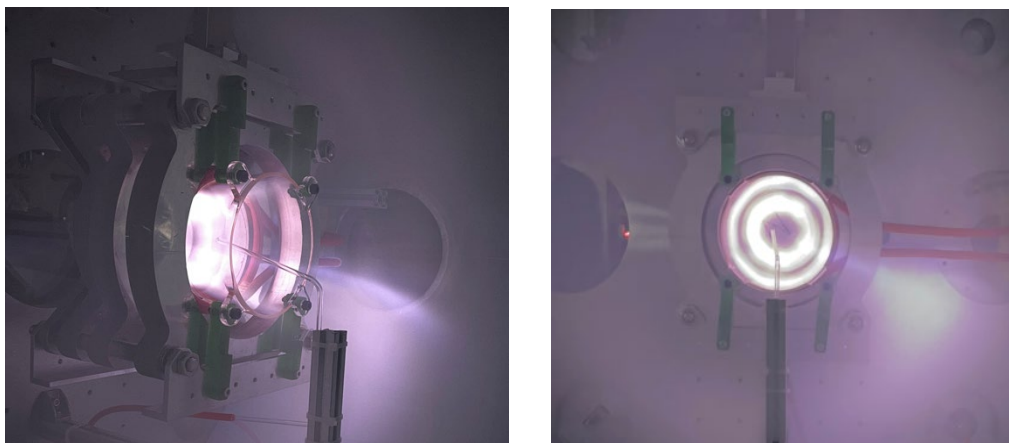


Fig. 7 Photographs of first discharge experiment (left: side view, right: front view).

Fig. 8 はアンテナフィーダー部に薄銅板とアルミ箔で遮蔽を施した改良版 RF アンテナである。銅板とアルミ箔は設置されており、これによってアンテナフィーダーの電場は遮蔽される。磁場については漏れが生じる可能性があるが、Fig. 9 はこれを用いて行った放電の様子を見る限り異常放電の抑制に成功している。先の放電で見られたアンテナフィーダー下部と繋がるプラズマ流は見られず、正常に放電容器内のみでプラズマ生成が為されている。なお、放電パラメータは高周波電力 3 kW (75 ms パルス放電、インターバル 1.5 s)、推進剤(Ar)供給は 80 sccm とし、放電の安定のためにタングステン細線に電流を流し赤熱させたフィラメントを用いている。

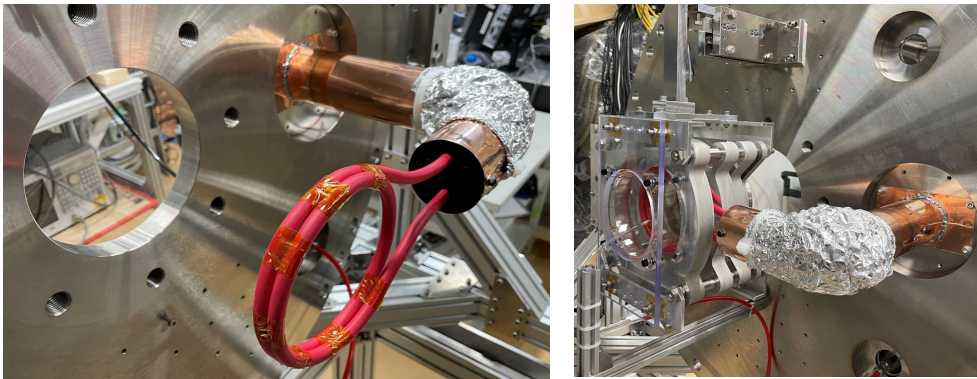


Fig. 8 Shielding RF antenna

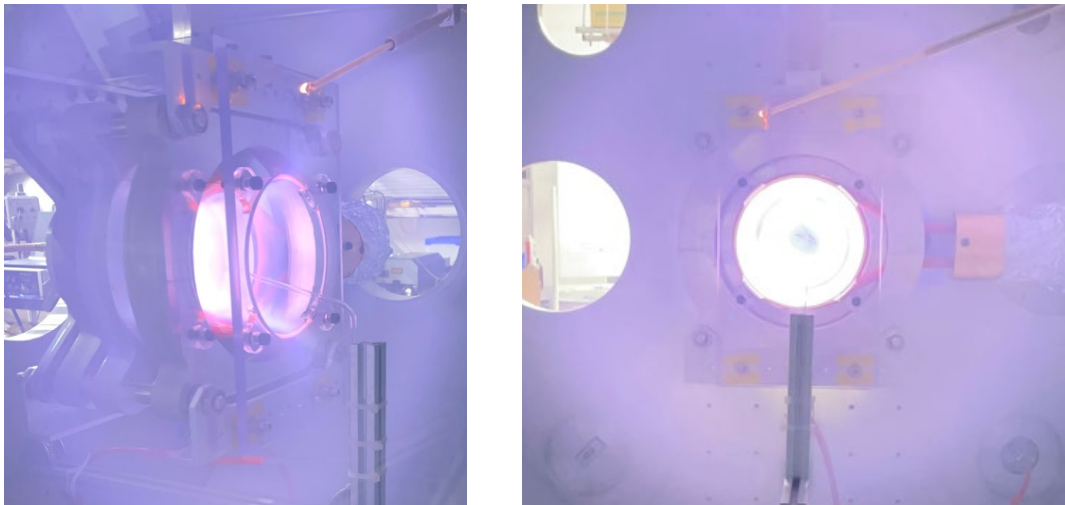


Fig. 9 Photographs of discharge using upgraded RF antenna (left: side view, right: front view).

5. まとめ

長寿命電気推進機として実用化に向けた性能向上実験が行われている RF プラズマスラスタについて、永久磁石を使用した強力発散磁場方式を提案し、その試験機の製作および放電実験のための真空容器などの試験環境の構築、初期放電実験を行い異常放電の抑制に成功した。現在、スラストスタンドの校正作業を行っており、推力計測は近日中に可能となる見込みである。そのほか、本真空容器で用いる 3 軸電動ステージや推力と強い相関のあるイオン流速を 3 次元計測するレーザー誘起蛍光法⁵⁾、電子密度を計測する静電プローブやマイクロ波干渉計装置⁶⁾を開発中であり、RF プラズマスラスタの統合試験環境が整いつつある。

謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2021 年度プロジェクト 3、公益財団法人大幸財団 2020 年度自然科学系学術研究助成、公益財団法人日東学術振興財団 2020 年度研究助成、一般財団法人東海産業技術振興財団 2020 年度第 33 回研究助成、公益財団法人立松財団 2021 年度研究助成、援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) C. Charles, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 163001 (2009).
- 2) S. Shinohara *et al.*, *Phys. Plasmas* **16**, 057104 (2009).
- 3) D. Kuwahara *et al.*, *J. Propul. Power* **33**, 420 (2017).
- 4) K. Takahashi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 194101 (2016).
- 5) D. Kuwahara *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **10**, 3401057 (2015).
- 6) D. Kuwahara *et al.*, *J. Instrum.* **10**, C12031 (2015).