

有人火星探査用永久磁石搭載輻射冷却式 MPD スラスタの熱設計

Thermal Design of Fully Radiation-Cooled MPD Thrusters with Permanent Magnets for Manned Mars Exploration

○杉山 義和・鈴木 智也・知野 健吾・門畑 浩平・田原 弘一・高田 恭子(大阪工業大学)

○Yoshikazu Sugiyama・Tomoya Suzuki・Kengo Chino・Kohei Kadohata・Hirokazu Tahara・Kyoko Takada
(Osaka Institute of Technology)

Abstract

High power steady-state MPD thrusters for manned Mars exploration have been investigated at Osaka Institute of Technology. In this study, a fully radiation-cooled MPD thruster is designed. MPD thrusters we developed are not equipped with water-cooled coils but SmCo magnets, a kind of permanent magnet, to make the thruster system easier. One of the problems we have to solve so as to use a MPD thruster practically is a temperature of permanent magnets because the temperature of permanent magnets during operations should be lower than the irreversible demagnetization temperature of the permanent magnet. In order to confirm the temperature of permanent magnets, heat analysis was carried out, and a temperature of about 1,000K was obtained. It was higher than irreversible demagnetization temperature of SmCo magnet. In order to lower the temperature of permanent magnet, the structure of the fully radiation-cooled MPD thruster should be changed to better one; for example a larger radiation plate, a thicker insulator and so on are planned.

1. 緒 言

電磁加速プラズマスラスタ(Magneto-Plasma-Dynamic Thruster, 以下 MPD スラスタと記述する)は、将来想定される有人火星探査や月面基地建設のための物資輸送など、高推力・高比推力が必要となるミッションなどへの利用が期待され、研究が行われてきた¹⁾。推力密度と比推力のバランスがよく、大電力化が容易な点などが理由としてあげられる。MPD スラスタは実用化に向けた課題が多く、未だに実用例はない。宇宙空間で実用化するために解決すべき課題の一つが、スラスタから発生する熱である。MPD スラスタは作動時に多量の熱を発生するため、その熱をスラスタからいかに効率よく排熱するかが課題となっている。そのため、入念に熱設計を行い適切な構造を検討する必要がある。従来の MPD スラスタに磁場を印加するために用いられてきたソレノイドコイルは、冷却水による冷却が不可欠であった。宇宙空間での冷却水の使用は、冷却水の循環装置、宇宙空間で水が凍らないようにするためのヒーターなどが必要となり、スラスタシステムを複雑にし、実用化の妨げとされていた。そこで本学では冷却水による冷却を必要としない、永久磁石を使って外部磁場を印加する方法をとる。これにより、スラスタシステムが複雑になるのを防ぐことができる。大阪工業大学では宇宙空間での実用化に向けて、冷却水に頼らない輻射冷却式の定常作動型 MPD スラスタの設計を進

めている。

2. 実験設備

2.1 水冷式 MPD スラスタ 図1に本学で開発した水冷式 MPD スラスタの断面図、図2に水冷式 MPD スラスタの3Dモデルを示す。スラスタ開発時に、既存の MPD スラスタより強い外部磁場を印加できること、ロッド・ホローの2種類のカソードで作動が行えること、磁石の取り付け、取り外しが容易であること、以上の3種類のコンセプトを掲げた²⁾。前述のとおり、本学で開発した MPD スラスタには外部磁場を印加するために永久磁石を用いた。永久磁石には、他の永久磁石に比べて高温下でも使用でき、最大エネルギー積が大きいサマリウムコバルト磁石を用いた。アノード外周部にある磁石ホルダーに永久磁石を一つ一つ独立して取り付けることができるため、印加する外部磁場の大きさを自由に変更できる。この利点から、電熱加速が主となる加速モード、電磁加速が主となる加速モード、その2つの加速モードを併せ持つハイブリッド加速モードでの性能取得が可能である。アノードとカソードホルダはそれぞれ水冷されている。

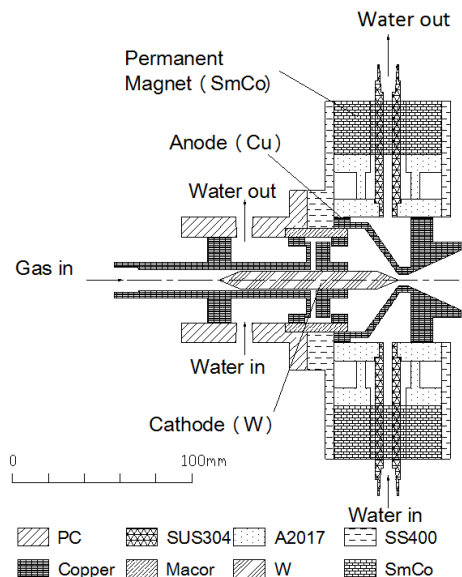


図1 水冷式MPDスラスタの断面図

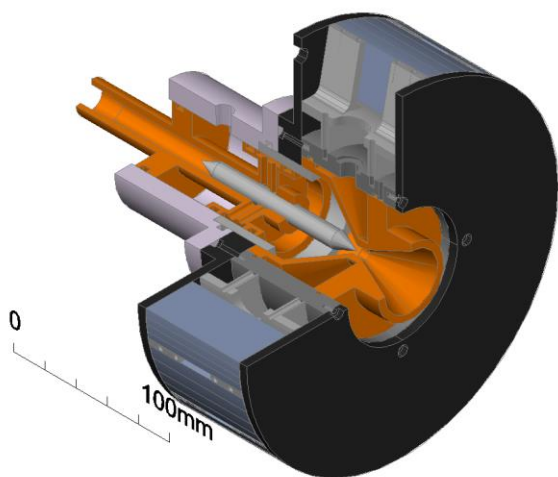


図2 水冷式MPDスラスタの3Dモデル

2.2 アノード輻射冷却スラスタ 定常作動型MPDスラスタの実用化を目指し、完全輻射冷却MPDスラスタを開発する前段階として、輻射冷却のノウハウを得る必要があり、また輻射冷却によってスラスタが作動するかを確かめなければならない。そこで、完全輻射冷却スラスタを設計・開発する前に、アノード輻射冷却スラスタを開発した。図3に本学で開発したアノード輻射冷却スラスタを断面図、図4に3Dモデルを示す。前述のMPDスラスタと違い、このスラスタには永久磁石が搭載されていないため、アークジェットスラスタと同じ作動原理となる。アノードには放射率が高く、高融点材料であるカーボンを使用し、発生した熱をより効率よく排熱できるようにした。カソードには従来のスラスタから用いられている純タングステンを用いた。アノードは輻射冷却だが、カソードホルダは従来のス

ラスタ同様、水冷されている。

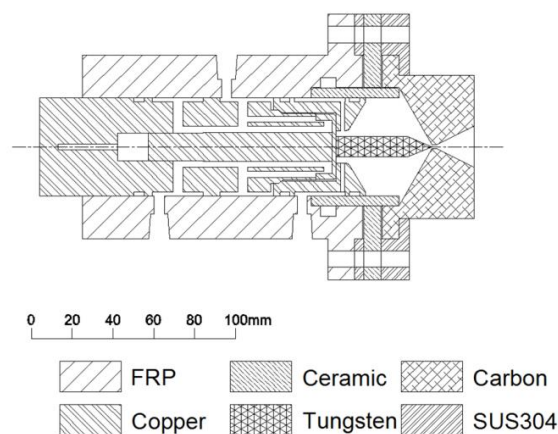


図3 アノード輻射冷却スラスタの断面図

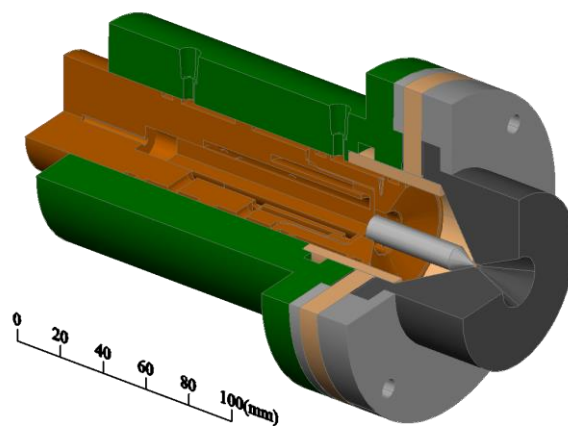


図4 アノード輻射冷却スラスタの3Dモデル

2.3 実験装置 本研究で用いた実験装置を図5に示す。直径1.2m、全長2.0mのステンレススティール製の真空チャンバを使用した。毎時間600m³/h排気することができるロータリーポンプと毎時間6,000m³/h排気することのできるメカニカルブースターが直列接続されている。実験中、真空チャンバ内圧力は約5Paを保っている。

3. 実験・解析

3.1 アノード輻射冷却スラスタ

3.1.1 作動実験及び温度測定実験 輻射冷却を行うスラスタが作動するかを確かめるため、本学で開発したアノード輻射冷却スラスタを用いた作動実験を行った。表1にアノード輻射冷却スラスタを用いた実験における条件を示す。推進剤に水素を用いた際に、初期着火が行え、安定に作動するかを確かめること、また投入電力、輻射アノードの表面温度を取得し、熱解析における目標値を取得することを目的とした。

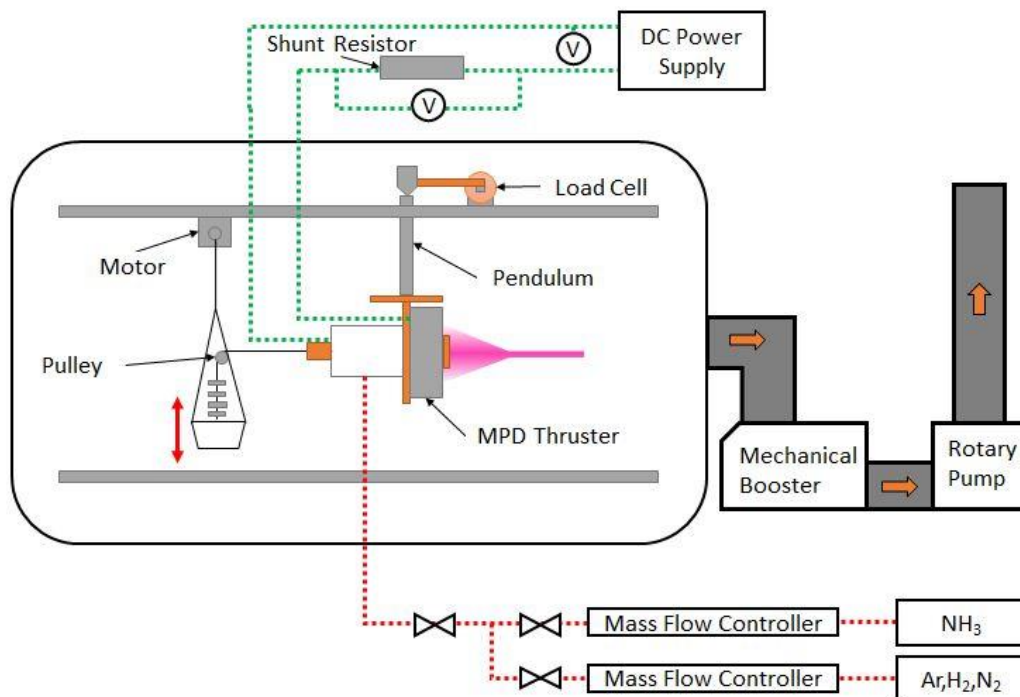


図5 実験装置

表1 実験条件

Propellant	N ₂	H ₂
Mass Flow Rate, mg/s	20	4.0
Discharge Current, A	100	

推進剤に水素を用いた際のアノード輻射冷却スラストの噴射の様子を図6に示した。水素、窒素、両推進剤において、終始安定した作動を確認し、約10分間の連続作動に成功した。

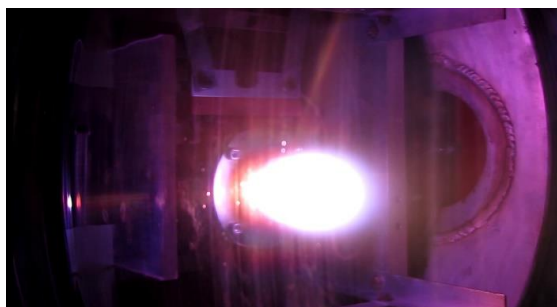


図6 噴射の様子

作動停止直後のアノードの様子を図7に示した。アノードは、水冷されておらず、輻射によって熱を放散している。そのため、作動中のアノードは高温となり、真っ赤に色づいていた。放射温度計(THI-800, 高温域専用ハンディ型放射温度計, タスコジャパン株式会社)を用いてアノードの表面温度を測定した。10分間の作動直後、アノードの表面温

度は、1,100Kであった。また、作動停止後2分程度、アノードの赤熱が続いていた。

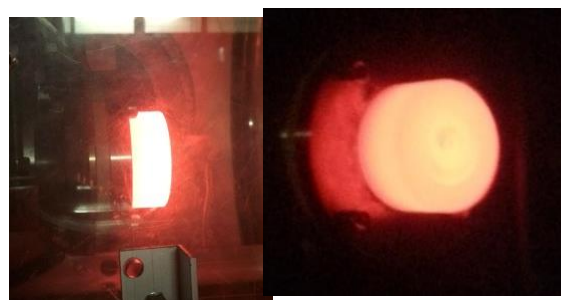


図7 作動停止直後のアノード

3.1.2 熱解析 本学で導入した熱解析ソフト「Thermal Desktop」の整合性を確かめるために、アノード輻射冷却スラストを用いた熱解析を行った。表2に解析条件、図8に解析モデルを示す。今回の解析は、作動実験時に得られた作動開始10分後の輻射アノードの表面温度1,100Kを目標値と設定したため、解析時間を600sとする。与えた熱量は、カソードに投入電力6.6kWの8%の528W、アノードに15%にあたる990Wとした。

表2 解析条件

Analytic Model	Fig. 8
Analysis Time, s	600
Applied Heat to the Cathode, W	528(8% of the input power)
Applied Heat to the Anode, W	990(15% of the input power)
Software	Thermal Desktop

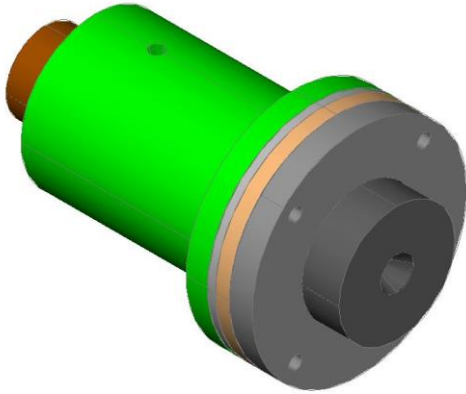


図8 アノード輻射冷却スラスタの解析モデル

図9にアノードのみの解析結果を示す。解析の結果、放射温度計によって測定された表面の解析温度が 1,106K となり、実測値と測定値がほぼ同じ値となり、整合性を確かめることができた。

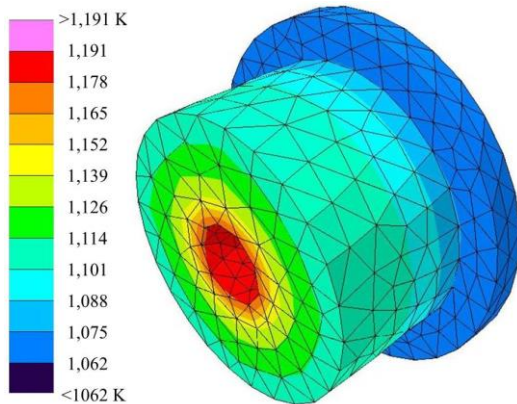


図9 輻射アノードの温度分布

3.2 水冷式MPDスラスタ 永久磁石の表面温度が永久磁石固有の不可逆減磁温度を超えると、不可逆減磁が生じてしまう。そのため、スラスタの作動中に永久磁石の温度が不可逆減磁温度を下回っているのかを確かめる必要がある。そこで、本学で開発された水冷式 MPD スラスタの作動中の温度を測定する。また、スラスタが定常状態のとき、永久磁石の温度が不可逆減磁温度を超えていないかどうかを確かめるため、熱解析ソフトを用いて、本学で開発した水冷式 MPD スラスタを解析した。

3.2.1 温度測定実験 水冷式 MPD スラスタに熱電対を取り付け、作動中のスラスタの表面温度の測定を行った。表3に実験条件を示す。熱電対を取り付けた位置を図10に示す。本実験では、永久磁石の表面温度を測定することを目的とするので、永久磁石のアノード上流部下流部にそれぞれ1点、また、磁気回路を形成しているヨークの上流側の温度を1点、計3点の温度を測定した。

表3 実験条件

Propellant	H ₂
Mass Flow Rate, mg/s	0.4
Magnetic Flux Density, T	0.157
Discharge Current, A	90
Operation Time, s	2,040
Electrode Distance, mm	0

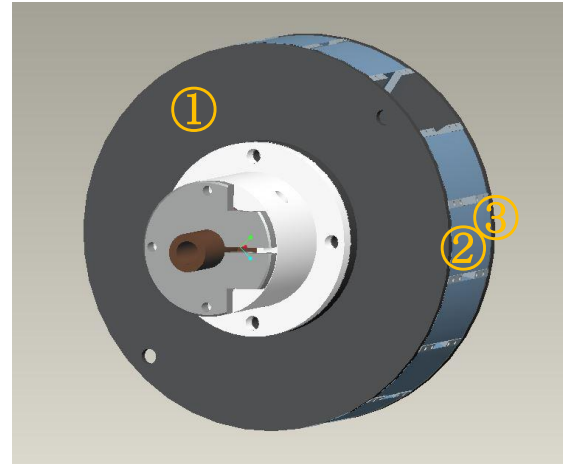


図10 熱電対の貼り付け位置

温度測定実験における噴射の様子を図11に示す。外部磁場によるプリュームの収束を確認することができ、ローレンツ力によってプラズマが加速されていると判断できる。最大投入電力は、5.2kWを記録した。表4に測定されたスラスタ表面温度を示す。最高温度は永久磁石のスラスタ下流部において作動開始30分後455Kに達した。しかし、SmCo磁石の不可逆減磁温度620Kに達しなかった。

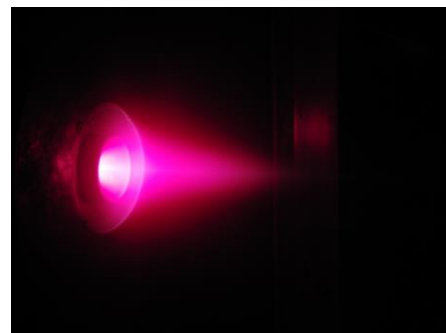


図11 噴射の様子

表4 温度測定結果

Time, s	Temperature, K		
	①	②	③
300	303	311	321
600	319	341	354
900	341	374	384
1,200	363	403	410
1,500	387	440	455

3.2.2 熱解析 温度測定実験の結果、30分間の作動においては、永久磁石の温度は不可逆減磁温度に達しないことが分かった。しかし、ヨーク、永久磁石共に定常温度になっておらず、さらなる温度上昇が予想される。そこで、熱解析ソフトを用いて、定常状態におけるスラスタの温度を解析し、永久磁石の温度が不可逆減磁温度に達していないかを調べた。図12に解析モデル、表5に解析条件を示す。カソードとアノードに与えた熱量は、実験中に測定した冷却水の温度上昇より導出した。

表5 解析条件

Analytic Model	Fig. 12
Analysis Time	Steady-State
Applied Heat to the Cathode, W	206
Applied Heat to the Anode, W	2,941

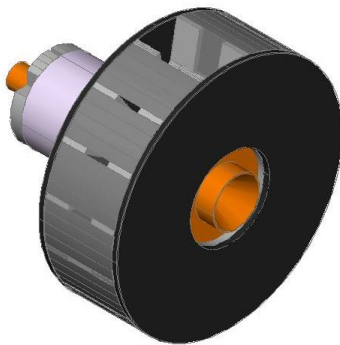


図12 解析モデル

水冷式MPDスラスタの永久磁石のみを抜粋した解析結果を図13に示した。定常状態において、永久磁石の温度は、アノード、カソードホルダを水冷していることによる冷却効果が大きく、SmCo磁石の不可逆減磁温度の620Kを超えていないため、この水冷式MPDスラスタは熱設計の観点から構造に問題ないと判断できる。また、スラスタの断面における温度分布を図14に示す。赤線で囲まれた部分が冷却水によって冷却されている箇所となる。図より明らかなが、冷却水によって冷却されている部分によって温度上昇が抑制されていることがわかる。

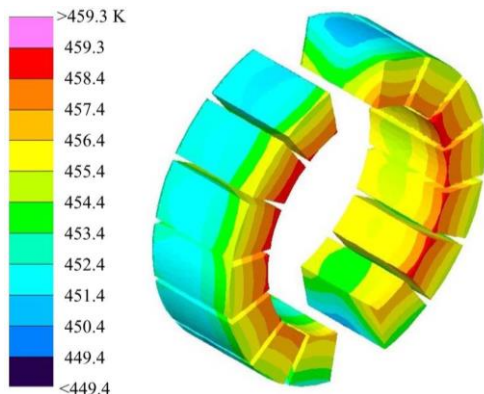


図13 解析結果

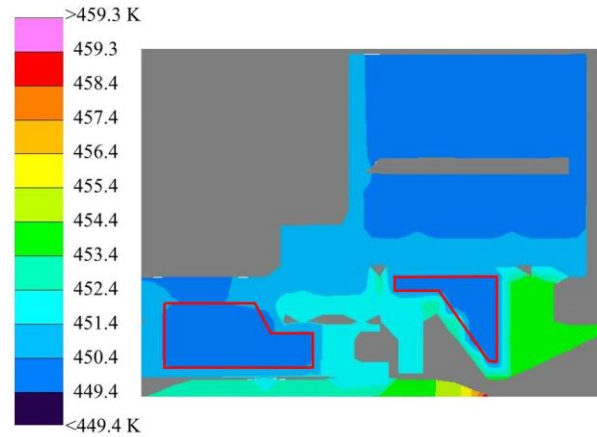


図14 スラスタ断面における温度分布

3.3 完全輻射冷却式MPDスラスタ 上述のとおり、アノード輻射冷却スラスタの10分間の安定作動の成功と、熱解析ソフトの整合性を確かめることができた。現在水冷されているアノード、カソードホルダの水冷を行わない構造にすることで、宇宙空間で使用する際、スラスタシステムの大幅な簡易化を実現することができる。本学では、水冷を一切行わない完全輻射冷却式MPDスラスタを設計した。しかし、実機での作動試験を行う前段階として、熱設計が正しく行えているかを確かめる必要があるため、このスラスタを用いた熱解析を行った。

3.3.1 スラスタ概要 図15、16に本学で設計をおこなった完全輻射冷却式MPDスラスタの断面図、3Dモデルを示す。設計されたMPDスラスタは、スラスタから発生する熱によって、高温にさらされることが予想されたため、スラスタを構成している部品のほとんどがタングステンなどの高融点材料によって構成されている。スラスタの磁気回路の周りには、カソードホルダから発生する熱を宇宙機へ逃がさないようにするために、熱伝導率の高い銅を用いて熱経路を設けている³⁾。

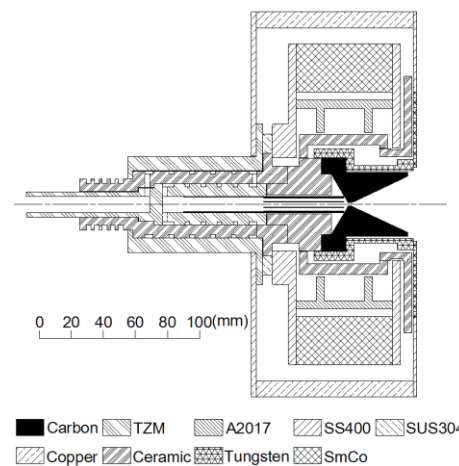


図15 完全輻射冷却式MPDスラスタの断面図

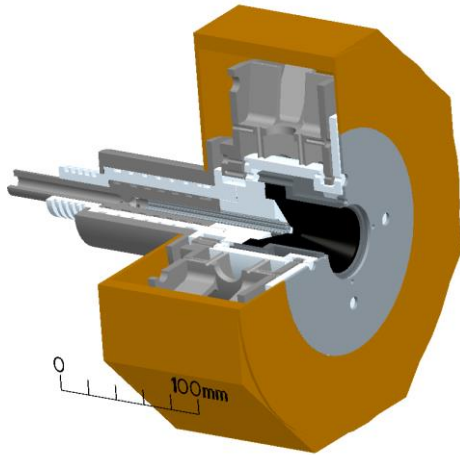
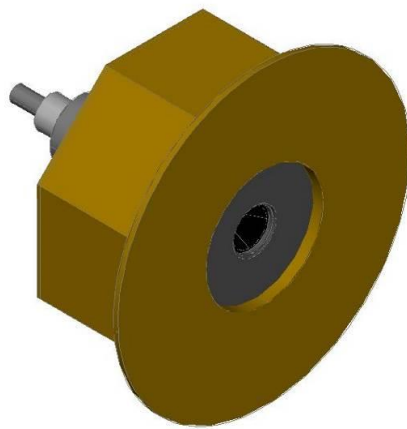


図 16 完全輻射冷却式 MPD スラスタの 3D モデル

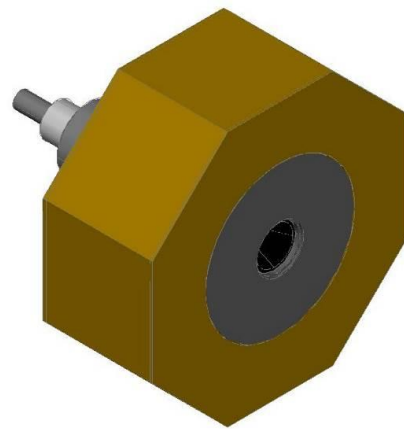
3.3.2 輻射プレート有無による影響 スラスタの表面積を増やすことによって、スラスタで発生する熱を効率よく逃がすことができると考えた。スラスタ下部部により大きな輻射プレートを取り付けることによって、永久磁石の温度を低くすることを目標に解析を行った。図 17 に解析を行った解析モデルを示す。また、解析条件を表 6 に示す。定常状態において永久磁石の温度が不可逆減磁温度に達するかどうかを調べるため、解析時間は Steady-State と定義した。また、投入電力は、先行研究において水冷式 MPD スラスタで最も多くの熱量が発生する 8kW と定義した。

表 6 解析条件

Analytic Model	Fig. 16
Analysis Time	Steady-State
Input Power, W	8,000
Applied Heat to the Cathode, W	300
Applied Heat to the Anode, W	4,770
Software	Thermal Desktop

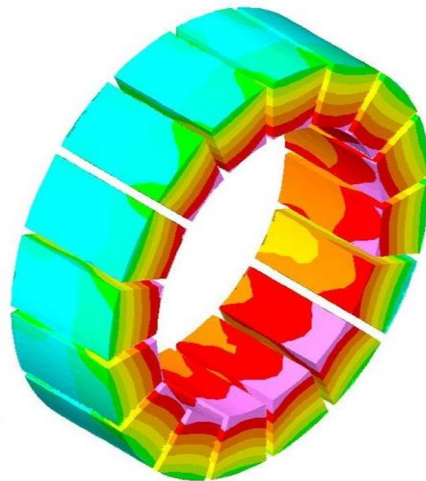
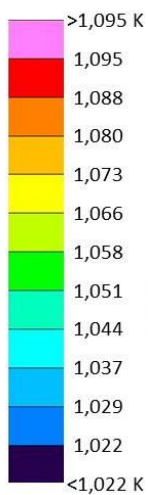


(a) 輻射プレートあり

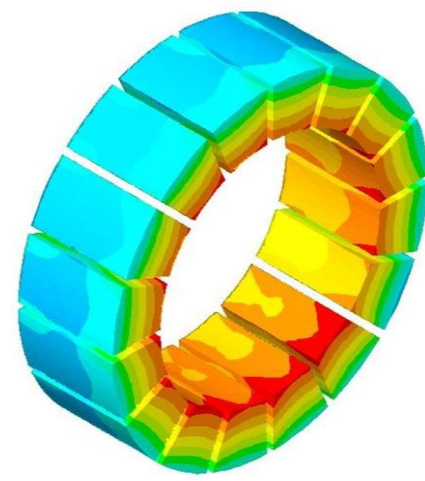


(b) 輻射プレートなし

図 17 解析モデル



(a) 輻射プレートあり



(b) 輻射プレートなし

図 18 輻射プレート有無による永久磁石の解析結果

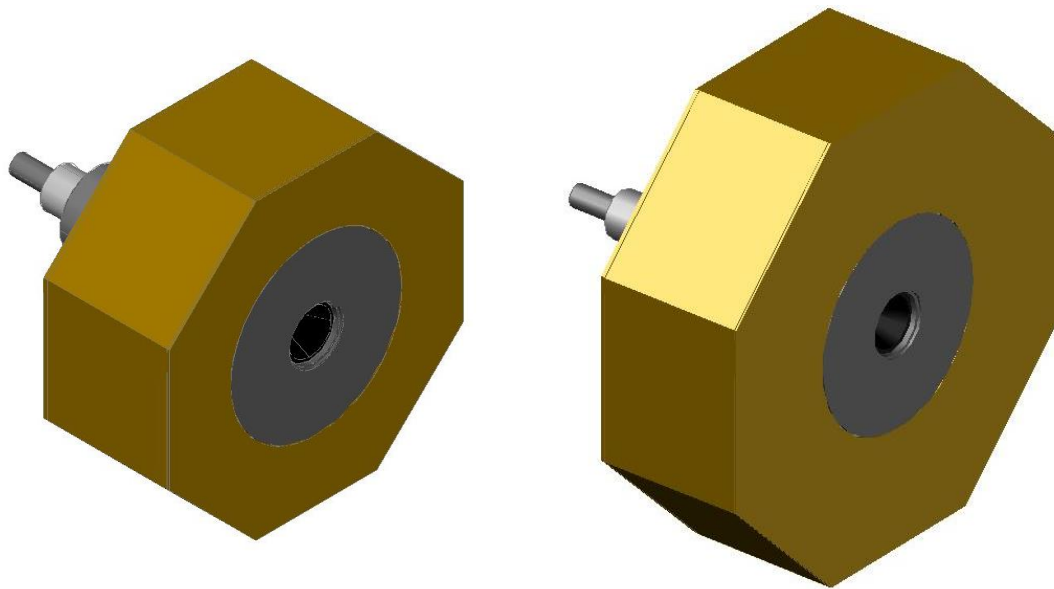
定常状態における永久磁石の解析結果を図 18 に示す。永久磁石の温度はアノード下流部に輻射プレートを取り付けた場合の方が高いという結果となった。表面積が大きくなることで排出される熱量が大きくなると予想していたが、予想とは逆の結果となった。考察は 3.3.4 項にて行う。

3.3.3 熱経路の形状変更による影響 永久磁石の温度を下げる別の方法として、銅製の輻射プレートによる熱経路をより外側にすることによって永久磁石へ伝わる熱を減らすことができるのではないかと考えた。そこで、3.3.2 項でより永久磁石の温度が低くなった構造である、輻射プレートを取り付けない構造において、熱経路を半径方向の 1.5 倍大きくすることによって永久磁石の温度がどのように変わるのかを調べた。解析モデルを図 19 に示す。熱経路の

外径は、それぞれ直径 240mm、300mm の円に内接する正八角形になっている。解析条件は表 6 と同じ条件で行った。

図 20 に定常状態における永久磁石の解析結果を示す。図 20 を見ると明らかだが、熱経路の外径をより大きくする方が永久磁石の温度をより低くすることができた。考察は 3.3.4 項にて行う。

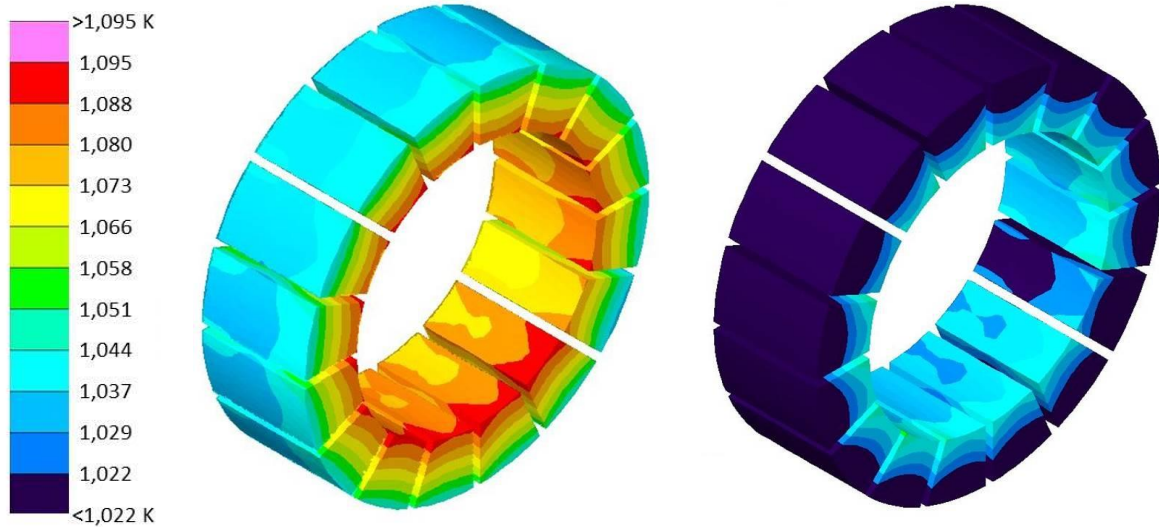
3.3.4 解析結果に対する考察 3.3.2 項における結果から、輻射プレートを取り付けることによって、永久磁石の温度が上昇する傾向があるとわかった。これは、輻射プレートとスラスタとの間に輻射熱が発生し、その熱がスラスタ自体を加熱してしまっているのではないかと考えた。発生した熱を一方向に移動させる経路を検討しなければ、逆効果となる。今後、輻射プレートを多層に取り付ける、ス



(a) 熱経路変更なし

(b) 熱経路拡大

図 19 解析モデル



(a) 熱経路変更なし

(b) 熱経路拡大

図 20 熱経路変更による永久磁石の解析結果

ラスタ下流部と輻射プレートを密着させるなどして構造変更を行い、再度熱解析を繰り返し行うことによって、効率よく熱を排出する構造を検討する。

また、3.3.3 項の解析結果より、スラスタ外周部に取り付けられた熱経路を大きくすることによって、永久磁石の温度を下げる事ができた。この要因として、スラスタ内部に空間を設けることによって、輻射熱による熱伝達を抑え、永久磁石の温度を下げたのではないかと考えた。カソードからボディ側に伝わった熱を逃がすために設置している熱経路だが、スラスタで発生した熱を逃がすためには適切でないと言える。実用機としての構造を考える前に、永久磁石の不可逆減磁温度をこえないような構造を検討しなければならない。

4. 結 言

4.1 結言 以下に本研究の結言を示す。

- 1) アノード輻射冷却スラスタを開発し、作動実験及び温度測定実験を行い、10 分間の安定作動の後、輻射アノードの表面温度 1,100K を取得した。
- 2) アノード輻射冷却スラスタの作動開始 10 分後の温度を解析し 1,106K を取得したことで、熱解析ソフトの整合性が確かめられた。
- 3) 水冷式 MPD スラスタを解析し、定常状態において永久磁石の温度が SmCo 磁石の不可逆減磁温度を超えていないことを確認した。
- 4) 完全輻射冷却 MPD スラスタを開発し、複数の構造を熱解析にかけ、スラスタ下流部に輻射プレートを設けず、スラスタ外周部に取り付けられている熱経路を拡大する構造が最も永久磁石の温度が低くなるという結果を得た。

4.2 今後の展望 今回の研究結果を踏まえ、今後解決していく課題、展望を示す。

- 1) スラスタを構成している部品同士の接触による熱伝達条件を確定し、より正確な熱解析を行う。
- 2) スラスタ内部を流れる冷却水や、推進剤による再生冷却を考慮するために、解析モデル上で流体を流した状態で熱解析を行い、その効果を調べる。

5. 参 考 文 献

- 1) Tahara, H., Kagaya, Y. and Yoshikawa T. : Effects of Applied Magnetic Fields on Performance of a Quasisteady Magnetoplasmadynamic Arcjet, Journal of Propulsion and Power, 1995, Vol. 11, No. 2, pp.337-342.
- 2) Suzuki, T., Kubota, T., Koyama, N. and Tahara, H : Research and Development of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for In-Space Propulsion, AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2014, Cleveland, AIAA-2014-3697.
- 3) Sugiyama, Y., Koyama, N., Suzuki, T., Sakoda H., and Tahara, H. : Thermal Characteristics of Radiation-Cooled Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and

Multi Hollow Cathodes for In-Space Propulsion, Joint Conf.: 30th International Symposium on Space Technology and Science (30th ISTS), 34th International Electric Propulsion Conference (34th IEPC), 6th Nano-Satellite Symposium (6th NSAT), 2015, Kobe, IEPC-2015-198 / ISTS-2015-b-198.