

# 永久磁石搭載定常作動型完全輻射冷却式 MPD スラスタの熱計算

## Thermal Calculation of Steady-State Fully Radiation-Cooled MPD Thrusters with Permanent Magnets

○知野 健吾・杉山 義和・斉藤 将太・田原 弘一・高田 恭子(大阪工業大学)

○Kengo Chino・Yoshikazu Sugiyama・Shota Saito・Hirokazu Tahara・Kyoko Takada  
(Osaka Institute of Technology)

### Abstract

The Magneto-Plasma-Dynamic thruster that we developed doesn't have water-cooled coils but permanent magnets. As a permanent magnet to apply a magnetic field in this study, Samarium Cobalt (SmCo) magnet was selected because it has high values of a maximum energy product and good thermal characteristics. A fully radiation-cooled (FRC) MPD thruster with SmCo magnet will develop as a practical MPD thruster. Therefore, thermal analysis of the FRC-MPD thruster was carried out. As the result of a previous FRC-MPD thruster, the maximum temperature of permanent magnets was 1,033 K. It was much higher than irreversible demagnetization temperature of SmCo (620 K). So, FRC-MPD thruster was needed structural change and material change. The new structure (structure 2-7) were designed and analyzed. As the result, the maximum temperature of permanent magnets of structure 4 was lower than previous FRC-MPD thruster by 110 K. And, the maximum temperature of permanent magnets was dropped 19 K by material change from Macor to Mo. In order to dropped temperature more the structure of parts of FRC-MPD thruster were coated by black and white paint. it's was proved that using black and white paint was effective against decrease of the temperature.

## 1. 緒言

近年では、有人火星探査や深宇宙探査、月面基地建造などの多種多様なミッションが想定されている。これらを行うためには、高推力や高比推力、高推進効率といった高い推進性能を持ったスラスタが要求される。大阪工業大学では、これらのミッションを想定した実用型スラスタの研究開発を行っている。数あるスラスタの中でも、電磁加速プラズマスラスタ(Magneto-Plasma-Dynamic Thruster, 以降MPD スラスタと記述する)は、推力と比推力のバランスが良いスラスタであるため、上記のミッションに適している。しかし、MPD スラスタには未だ実用化された例はなく、実用化には多くの課題が残っている。MPD スラスタの実用化を大きく阻んでいるのが、作動時に発生する熱と電極の寿命である。その中でも今回は作動時の熱に焦点を当てる。

従来からMPD スラスタの磁場印加にはソレノイドコイルが使用されているが、ソレノイドコイルは冷却水による水冷が不可欠である。そのため、宇宙空間で用いる際には冷却水以外に、冷却水循環システムやヒーター等の凍結防止システムが必要となりスラスタシステムの複雑化が予想できる。本学では、実用化を目的としているため冷却水を用いずに磁場印加ができる永久磁石を採用している。永久磁石を用いることで外部システムが大幅に削減でき、スラスタシステムの複雑化を防ぐことができる。しかし、焦点を当てている熱に対する課題は残されたままである。永久

磁石はスラスタから発生する熱に対して脆弱である。スラスタから発生した熱が永久磁石に伝わることにより、磁石がもつ不可逆減磁温度を超えてしまうと不可逆減磁を起こし、印加磁場が低下してしまう。推進性能を取得するための実験モデルでは水冷を行っているが、実用化するためには冷却水を必要としない定常作動型完全輻射冷却式MPD スラスタの設計が必要となっている。本研究の目標として、完全輻射冷却式MPD スラスタの熱解析において、永久磁石の定常温度を不可逆減磁温度以下にすること、解析結果から完全輻射冷却式MPD スラスタに適した構造を決定することである。

## 2. 磁石の選定

本学で永久磁石を用いるあたり、サマリウムコバルト(SmCo)磁石、ネオジウム(Nd)磁石、フェライト(Ferrite)磁石、アルニコ(Al-Ni-Co)磁石の4種類を比較することでMPD スラスタに適した磁石を選定した。比較内容としては、最大エネルギー積、熱減磁係数に焦点を当てた。

### 2.1 最大エネルギー積

磁石を用いるにあたり、重要になるのが磁石の強さである。それを比較するために、各永久磁石の最大エネルギー積を用いた。図1に各永久磁石の最大エネルギー積の比較グラフを示す。これより、SmCo 磁石と Nd 磁石の最大エ

エネルギー積が大きいことが確認でき、他の磁石よりも大きい磁場を印加することが可能である。

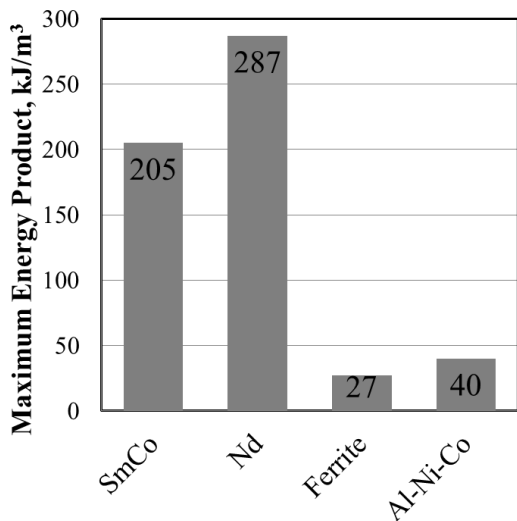


図1 各永久磁石の最大エネルギー積

## 2.2 熱減磁係数

完全輻射冷却式 MPD スラスタは、冷却を行わないため永久磁石がスラスタから伝わる熱により高温にさらされることが予想される。永久磁石は性質上温度が上昇すると磁力は低下していく。そのため、温度による減磁率が低い永久磁石を選定する必要がある。図2に各永久磁石の熱減磁係数の比較グラフを示す。これより、SmCo磁石がNd磁石の熱減磁係数の1/3程度であることが分かる。また、不可逆減磁温度に関してもSmCo磁石620K、Nd磁石465Kと大きな差があり、SmCo磁石がNd磁石より優れていると言える。以上の結果から、本学のMPDスラスタには永久磁石としてSmCo磁石を使用することを決定した。

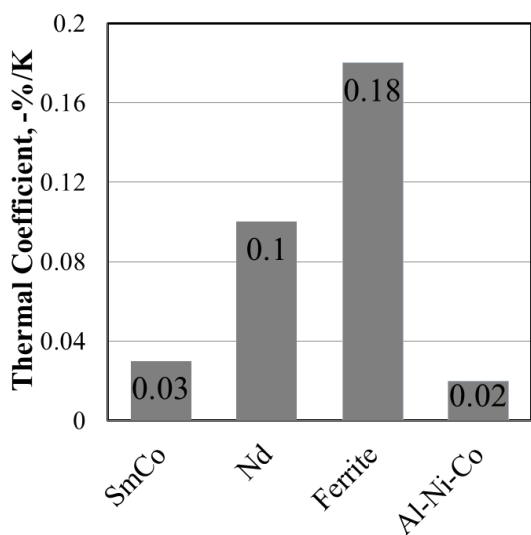


図2 各永久磁石の熱減磁係数

## 3. MPDスラスタ

### 3.1 水冷式 MPD スラスタ

本学の実験モデルとして開発した水冷式 MPD スラスタの3Dモデルを図3に、断面図を図4に示す。磁気回路には前述したSmCo磁石をA2017製磁石ホルダに搭載し、SS400製ヨークで挟み込むように形成されている。この磁気回路を用いて外部磁場印加を行う。また、磁気回路の磁石の個数を変更することでMPDスラスタに印加する磁束密度を変更することができる。磁石は最大16個搭載することができる構造となっている。また、アノードとカソードホルダを水冷している<sup>1)</sup>。

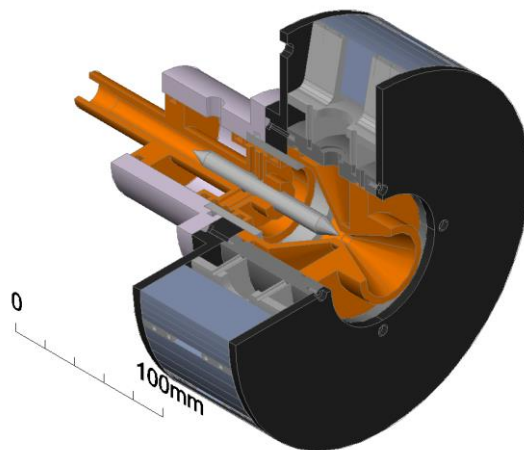


図3 水冷式 MPD スラスタの3Dモデル

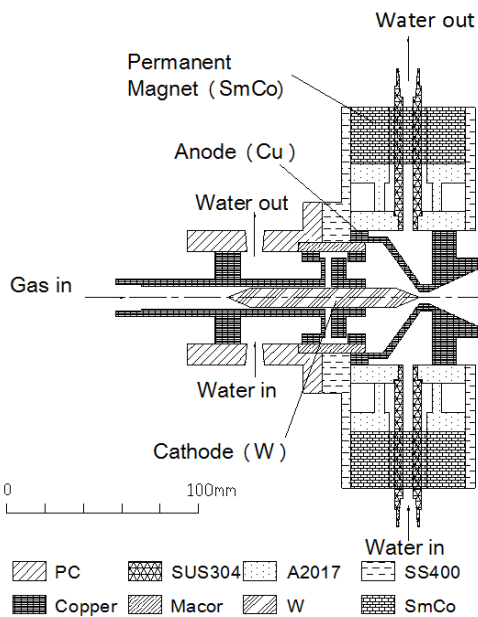


図4 水冷式 MPD スラスタの断面図

### 3.2 完全輻射冷却式 MPD スラスタ

前述した水冷式 MPD スラスタの磁気回路を再利用するというコンセプトのもと、現在完全輻射冷却式 MPD スラスタ

タの設計を行っている。先行研究にて考案された構造(以降、構造1と呼称する)の3Dモデル、断面図を図5、6に示す。冷却水を使用しないため各部品の温度上昇が考えられる。そのため、スラスタ部品の大半が高融点材料である純タングステンやチタンジルコニウムモリブデン(TZM)で構成されている。構造1の設計の特徴として、断熱材を用いることで径方向へ伝わる熱を抑制し、断熱材内側に設置された金属部品によって軸方向へ熱を伝え、スラスタ後方部に熱を逃がし設置した放射プレートを介して宇宙空間へと放熱するというものである<sup>2-6)</sup>。

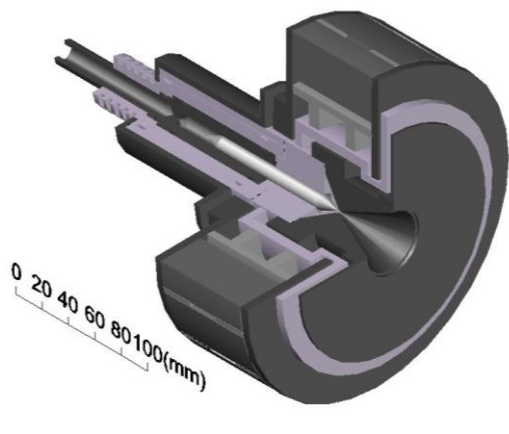
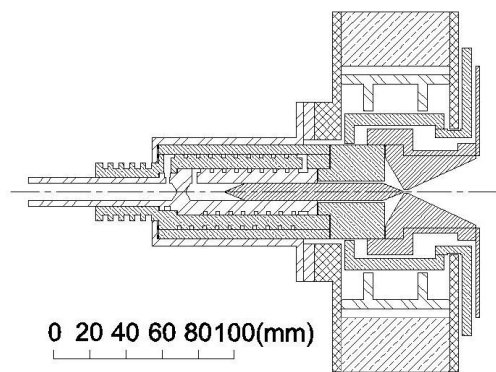


図5 完全輻射冷却式MPDスラスタの3Dモデル



W
  TZM
  Carbon
  Ceramic  
 SS400
  SmCo
  A2017
  SUS304

図6 完全輻射冷却式MPDスラスタの断面図

#### 4. 完全輻射冷却式MPDスラスタの熱解析

##### 4.1 構造変更による熱解析

###### 4.1.1 解析条件

本学では、熱解析ソフト Thermal Desktop(C&R Technologies, Inc.)を用いて、スラスタの温度分布について解析を行った。解析において高温にさらされると予測されるSmCo磁石の定常温度分布の低下を実現するスラスタの構造を検討した。前述したが、永久磁石には不可逆減磁温度が存在する。その温度を超えてしまうと、永久磁石は不

可逆的に減磁し、常温に戻しても磁力が可逆的に戻らない。そのため、熱解析において永久磁石が不可逆減磁温度を超えない構造を最適構造と定義し調査した。

先行研究における構造を基準とし、構造変更を行ったものを3種類考案した。それぞれを構造2、3、4と定義し、解析モデルを図7-9に示す。構造2の特徴は、断熱材内側に設置していた金属部品を取り除き、代わりに厚みのある断熱材を設置し、径方向へ伝わる熱を抑制しようとした。構造3の特徴は、構造2で設置した厚みのある断熱材を3層に分割することで、部品数を増やし熱伝導による伝熱を抑制しようとした。構造4の特徴は、構造3で3層に分けた断熱材の2層目をセラミック製断熱材から純タングステンに材質を変更することで、材質による断熱効果による外側の断熱材に伝熱を抑制し、軸方向への熱経路を設けた。

先行研究における構造を含めた4種類の構造を用いて表1に示した解析条件で解析を行った。解析条件のアノードとカソードの投入熱量については、実験において得られた冷却水の温度上昇値より算出した。用いた実験条件は、投入電力8.0kWのものである。その解析結果を比較することで、永久磁石の定常温度が最も低い構造を放電室周りの最適構造と仮定した。今回の解析において、放電室周りのみの構造変更による永久磁石の温度変化を比較した。

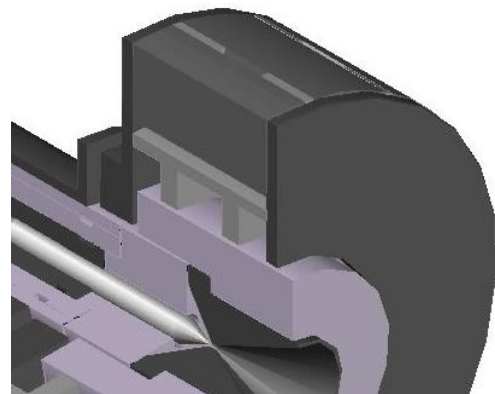


図7 構造2の解析モデル

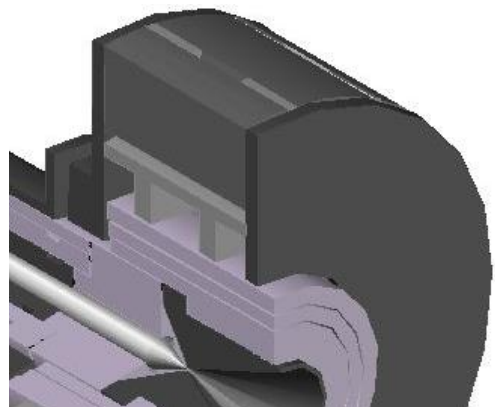


図8 構造3の解析モデル

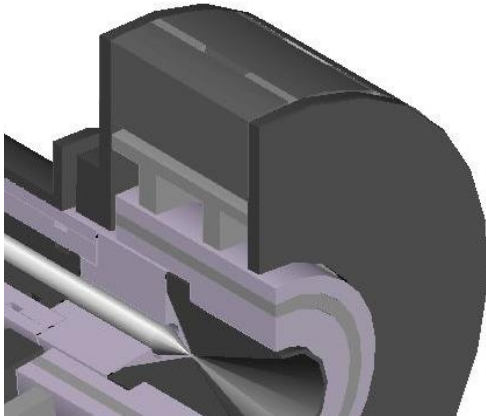


図9 構造4の解析モデル

表1 構造比較における解析条件

Analytic Model	Structure 1-4
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

#### 4.1.2 解析結果

表2に各構造における永久磁石の最大温度と最低温度を示し、図10-13に構造1-4の定常状態における永久磁石の温度分布を示す。図10-13より、構造1(図10)が最も永久磁石の温度が高く、構造4(図13)が最も永久磁石の温度が低いことが分かる。これより、先行研究における構造の特徴である金属部品を用いて熱経路を作り出し、磁石に伝わる前にスラスト後方部から宇宙空間へ排出するという構造は適さないことが分かった。構造1の温度上昇の原因として、セラミック製断熱材の厚み不足により径方向へと伝わる熱を防ぎきれなかったことが考えられる。構造1のセラミック製断熱材の厚みは構造2-4の1/2倍程である<sup>7)</sup>。構造2(図11)と比較すると断熱材の厚さによる断熱効果が顕著に表れている。そのため、熱源の外側に、径方向へ伝わる熱を遮断できるほどの厚みのある断熱材の配置が効果的であると考えられる。

構造2(図11)と構造3(図12)との比較においては、同じ材質、同じ断熱材厚さであっても、部品数が増えることによる断熱効果が表れていることが分かる。これは、熱伝達と熱伝導の違いによるものであると考えられる。断熱材の総合的厚さは同じであっても、部品数が増えることにより同じ距離を進む熱の移動に変化が現れ、径方向への熱が抑制されたと考えられる。つまり、1つの部品間での伝導伝熱(熱伝導)よりも複数の部品での伝熱伝導(熱伝達)の方が径方向の熱を抑制できると言える。

構造3(図12)と構造4(図13)の比較において、3層共同じセラミック製断熱材を設けるよりも、2層目に別の材質である純タングステンを設けることで僅かながら断熱効果が見られた。微小な変化なためメッシュ形状などによる解析誤差ということも考えられるが、解析上は永久磁石の温度

が最も低かったため、構造1-4の中では構造4が最適形状であると仮定できる。

表2 各構造における永久磁石の最低・最高温度

Structure Number	Minimum Temperature, K	Maximum Temperature, K
1	908.1	1,033
2	877.4	1,007
3	834.8	927.1
4	831.1	923.1

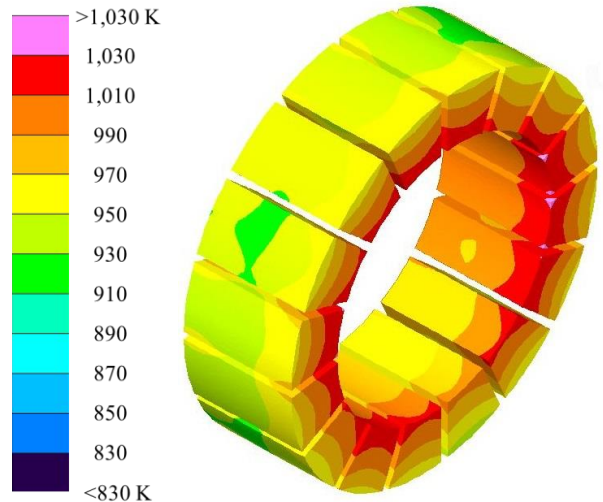


図10 構造1における永久磁石の温度分布

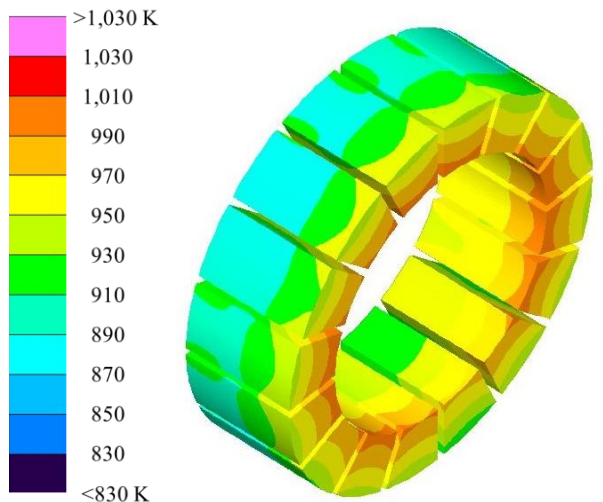


図11 構造2における永久磁石の温度分布

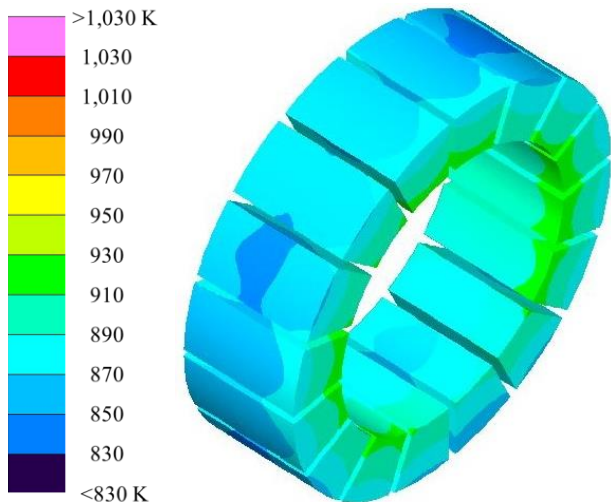


図 12 構造 3 における永久磁石の温度分布

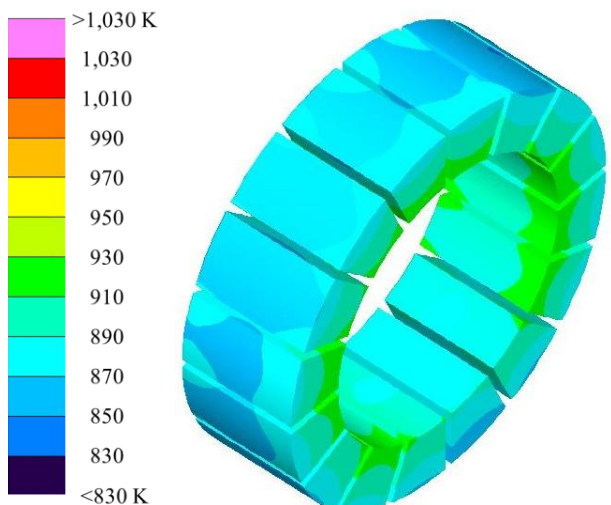


図 13 構造 4 における永久磁石の温度分布

#### 4.2.1 解析条件

4.1 節で述べた構造変更による解析結果で、構造 4 におけるセラミック製断熱材から純タングステン製部品の変更が断熱効果を示した。しかし、メッシュの形状などによる解析誤差の可能性もあるため、純タングステン以外の材質を用いることで材質変更による断熱効果を検証し、温度分布の比較を行った。

この解析では、構造 4 を基準とし材質変更をした構造を 3 種類考案した。それぞれを構造 5、6、7 と定義し、材質には、BN(ボロンナイトライド)、C(炭素)、Mo(モリブデン)を用いた。この 3 種類を用いた理由は、構造 4 の解析において温度範囲が 1,770-2,000 K であった。そのため、この温度範囲に融点の含まれない高融点材料である必要があるからである。その中から、以前に使用したことのある材質を用いて解析を行った。解析条件に関しては 4.1 節の条件と

同様である<sup>8-9)</sup>。

#### 4.2.2 解析結果

表 3 に各構造における永久磁石の最大温度と最低温度を示し、図 14-16 に構造 5-7 の定常状態における永久磁石の温度分布を示す。図 14-16 より構造 7(図 16)が最も永久磁石の温度が低いことが分かる。材質変更により永久磁石の最大温度を約 15 K 下げることができた。このことから、メッシュ形状による解析誤差の可能性は薄くなったと言える。

構造 6(図 15)と 7(図 16)を比較してみると、温度変化にあまり変化が見られなかった。このことから材質変更による永久磁石の温度低下への寄与度は小さいと考えられる。しかし、材質により僅かながら温度変化が見られた結果から、各材質の熱伝導率に着目した。常温での熱伝導率は W で 169-176 W/(m·K)、BN で 30-50 W/(m·K)、C で 23.9 W/(m·K)、Mo で 138 W/(m·K)である。しかし、熱伝導率の違いでは温度変化に説明ができない。そのため、放射率にも着目した。一般的に W の放射率は 0.43、C は 0.8-0.9、Mo は 0.37 とされている。これら二つを考慮すると解析結果には熱伝導率と放射率が大きく関係していると説明できる。また、放射率のほうが温度変化に大きく寄与していると考えられる。

表 3 各構造における永久磁石の最低・最高温度

Structure Number	Minimum Temperature, K	Maximum Temperature, K
5	827.5	916.0
6	824.3	913.1
7	822.5	911.9

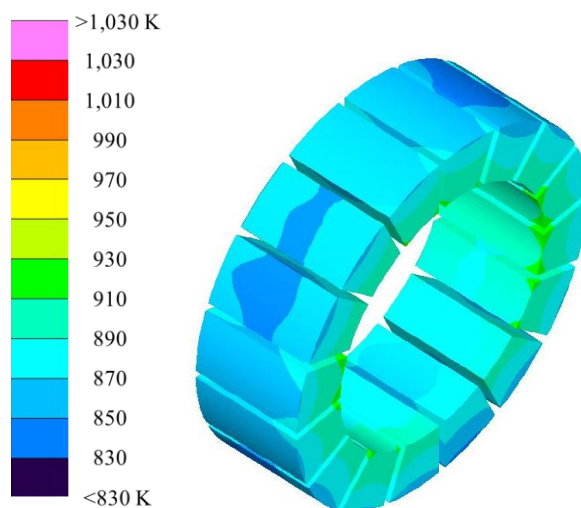


図 14 構造 5(BN)における永久磁石の温度分布

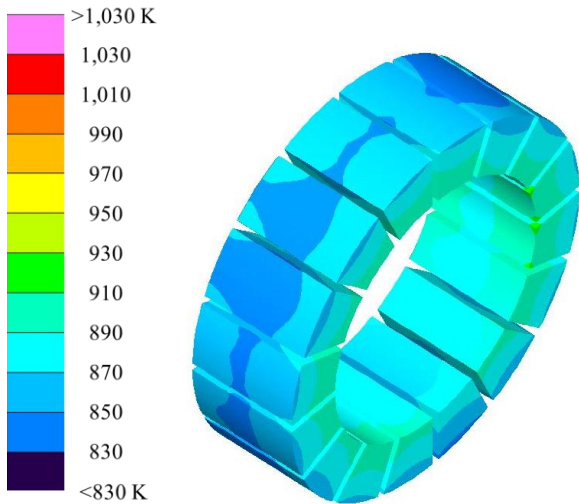


図 15 構造 6(C)における永久磁石の温度分布

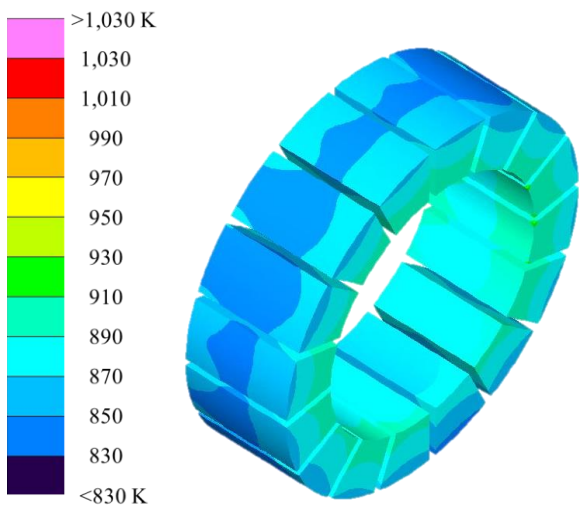


図 16 構造 7(Mo)における永久磁石の温度分布

### 4.3 放射率変更による熱解析

#### 4.3.1 解析条件

4.2節で述べた材質変更による解析結果で構造6と7における温度変化が材質の持つ熱伝導率と熱放射率の違いによるものだと考えた。また、熱放射率が永久磁石の温度低下に大きく寄与していると考えた。このことから、熱の吸収されやすさ、熱の放出されやすさを変更することによって、さらに永久磁石の温度を低くすることができるのではないかと考えた。熱放射率を黒体塗料、白色塗料を磁気回路とその周辺に塗ることで意図的に熱放射率を変更し、ある程度熱経路を固定できるか検討した。熱放射率変更による解析において、解析対象は最も永久磁石の温度が高かった構造1を用いて行い、部品表面の放射率を変更することにより塗料を塗ったと定義した。図17に解析モデルにおける熱放射率変更箇所、図18に磁気回路周辺の断面図による熱放射率変更箇所を示す。図17において、黒い面、白い面、図18において黒い線、白い線がそれぞれ黒体、白色塗料を塗

った箇所である。また、図17において緑色の面、図18において黒い線、白い線が引かれていない箇所の放射率を変更していない。スラスタ中心軸付近にある部品には熱源から伝わる熱を径方向へ伝わらないようにするために、表面に白色塗料を塗布した。また、永久磁石の内面にも白色塗料を塗布することで、永久磁石への熱の移動を抑制できるのではないかと考えた。次に、黒体塗料を塗布している場所は、スラスタの最も外側の場所である。放射率を高めることによって、スラスタにため込まれている熱をスラスタ外部へ放出しやすくする意図を含んでいる。これらの操作により、永久磁石に伝わる熱を抑制し、スラスタ内部の熱を効率よく外部へ放出できると予測した。構造は変更されていないが、放射率に変更された構造を新たに構造8と定義する。

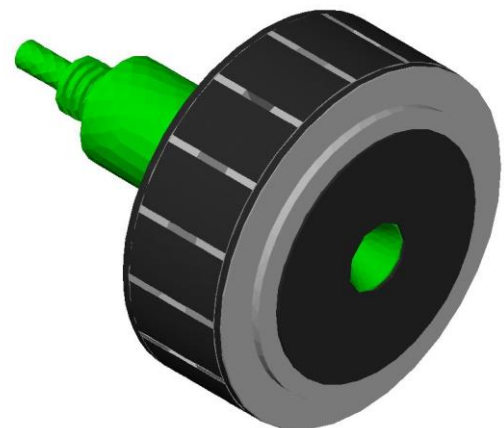


図 17 解析モデルによる熱放射率変更箇所(構造 8)

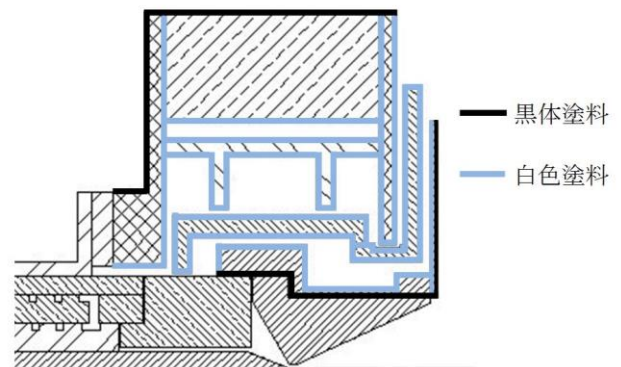


図 18 断面図による熱放射率変更箇所

#### 4.3.2 解析結果

図19に構造8における永久磁石の定常温度分布を示す。また、表4に構造1と構造8の永久磁石の最高温度と最低温度を示す。図19と表4より、熱放射率を変更することにより永久磁石の最高温度が4 K低下していることが分かる。しかし、最低温度に関しては約20 K上昇していた。また、

温度分布に関しても全体的に温度が低下していることが確認できる。最低温度が上昇した理由として、永久磁石外縁部に黒体塗料を塗ったことで永久磁石に伝わった熱がスラスタから逃げたためだと考えられる。これにより、黒体塗料、白色塗料を塗布することは永久磁石の温度を下げるのに非常に有効な手段であると言える。しかし、構造 8 による解析結果では SmCo 磁石の不可逆減磁温度 620 K を大幅に越えてしまっている。放射率変更による効果を他の構造において確認できれば、完全輻射冷却式 MPD スラスタの実現可能性を示すことができると考えられる。

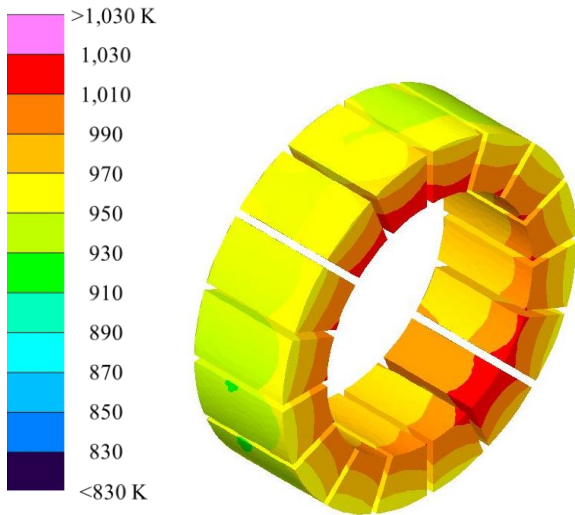


図 19 構造 8 における永久磁石の温度分布

表 4 各構造における永久磁石の最低・最高温度

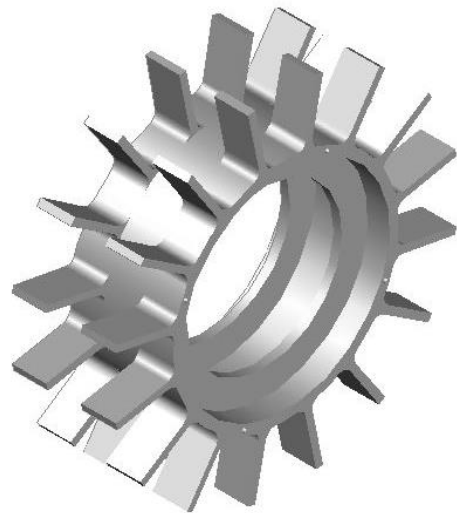
Structure Number	Minimum Temperature, K	Maximum Temperature, K
1	908.1	1,033
8	927.8	1,029

## 5. 結 言

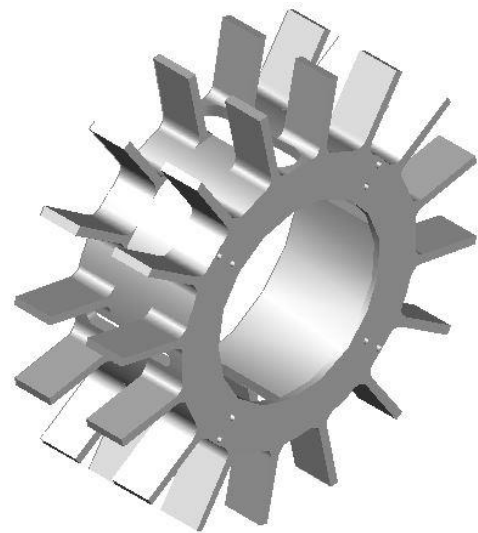
- (1) 完全輻射冷却式 MPD スラスタを設計し、熱解析を行った。熱経路と断熱材を配置する構造では、断熱材の厚み不足から永久磁石の温度があまり下がらなかった。そこで、断熱材の厚みを大きく、断熱材を複数の部品に変更することで、断熱効果を生み、永久磁石の最大温度を最大 110 K 下げることができた。
- (2) 部品の材質に着目し、高融点材料を用いたことで永久磁石の最高温度を最大 15 K 下げることができた。しかし、材質による永久磁石の温度低下への寄与度は小さいことが分かった。
- (3) 部品の放射率に着目し、黒体塗料と白色塗料を用いて、永久磁石の最高温度を最大 4 K 下げることができた。しかし、最低温度は 20 K 上昇してしまいが熱が効率よく外縁部に逃げていると言える。したがって、放射率変更を行うことの有効性が確認できた。

## 6. 今後の展望

- (1) 構造 2-7 を用いて放射率変更による効果を検証し、有効性を再確認するとともに永久磁石の温度低下がどの程度のものかを調べる。
- (2) カズブ磁場用磁石ホルダを用いた完全輻射冷却式 MPD スラスタの構造を検討する。現在使用している磁石ホルダを図 20(a)に、カズブ磁場用磁石ホルダを図 20(b)に示す。図より、カズブ磁場用磁石ホルダを用いることでより厚みのある断熱材を配置することができ、永久磁石の更なる温度低下に繋がると考えられる。



(a) 従来の磁石ホルダ



(b) カズブ磁場用磁石ホルダ  
図 20 磁石ホルダ

- (3) 解析により放射率変更の有効性が確認できた後、実験室モデルである水冷式 MPD スラスタに黒体塗料、白色塗料を塗り、熱伝対を用いて温度計測を行い実証実験に

よる裏づけを行う。

- (4) 解析による永久磁石の最大温度が SmCo 磁石の不可逆減磁温度を下回り、実証実験による裏づけができた後、実機開発を行う。

#### 参考文献

- 1) 知野健吾, 杉山義和, 齊藤将太, 田原弘一, 高田恭子「永久磁石によるカスプ磁場をもつ定常作動型 MPD スラスタの性能特性」第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4I01, 2016 年 9 月, 函館アリーナ (北海道函館市) .
- 2) Koyama, N., Suzuki, T., Kubota, T. & Tahara, H. (2013) 'Performance Characteristics of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for In-Space Propulsion', 33rd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2013-94, Washington, D.C, USA.
- 3) Koyama, N., Inoue, H., Fujita, K. & Tahara, H. (2013) 'Research and Development of Steady-State Magnetoplasmadynamic Arcjet Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes', 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013-o-1-07, Nagoya, Japan.
- 4) Suzuki, T., Kubota, T., Koyama, N. & Tahara, H. (2014) 'Research and Development of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for In-Space Propulsion', AIAA Propulsion and Energy 2014, AIAA-2014-3697, Cleveland, USA.
- 5) Suzuki, T., Koyama, N., Sugiyama, Y., Sakoda, H. & Tahara, H. (2015) 'Performance Characteristics of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for Manned Mars Exploration', 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), IEPC-2015-197/ ISTS-2015-b-197, Kobe, Japan.
- 6) Sugiyama, Y., Koyama, N., Suzuki, T., Sakoda, H. & Tahara, H. (2015) '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), IEPC-2015-198/ ISTS-2015-b-198, Kobe, Japan.
- 7) Sugiyama, Y., Suzuki, T., Chino, K., Kadohata, K., Tahara, H. & Takada, K. (2016) 'Thermal Design of Fully-Radiation-Cooled High-Power Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets for In-Space Propulsion', 8th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJCPP 2016), AJCPP2016-117, Takamatsu, Japan.
- 8) Sugiyama, Y., Chino, K., Saito, S., Tahara, H. and Takada, K. 'Research and Development of High-Power Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Hollow Cathodes for In-Space Propulsion', Space Propulsion 2016, 3124902, Rome, Italy.
- 9) 杉山義和, 知野健吾, 齊藤将太, 田原弘一, 高田恭子「永久磁石搭載定常作動型完全輻射冷却式 MPD スラスタの熱解析」第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4I02, 2016 年 9 月, 函館アリーナ(北海道函館市) .