

永久磁石搭載大電力定常作動型完全輻射冷却式 MPD スラスタの熱設計

Thermal Design of High-Power Steady-State Fully Radiation-Cooled MPD Thrusters with Permanent Magnets

○谷 和真・斉藤 将太・瀬川 秋桜子・知野 健吾・田原 弘一・高田 恭子 (大阪工業大学)

○Kazuma Tani・Shota Saito・Akiko Segawa・Kengo Chino・Hirokazu Tahara・Kyoko Takada
(Osaka Institute of Technology)

Abstract (概要)

Water-Cooled Magneto-Plasma-Dynamic thrusters with permanent magnets have been developed at Osaka Institute of Technology. Samarium-Cobalt (SmCo) magnet was selected as a permanent magnet because it has high values of a maximum energy product and thermal coefficient. It is considered that a Fully Radiation-Cooled (FRC) MPD thruster with SmCo magnet is practical thruster compared to a water-cooled one. However, The coolability of FRC is lower than the water-cooling. The MPD thruster gets high temperature during operation, so that the temperature of SmCo magnets also get higher. When the magnet temperature exceed 620 K which is the irreversible demagnetization temperature of SmCo magnet, the magnetic force decrease. In this study, the maximum temperature of the SmCo magnets was investigated by thermal analysis. The analysis result of the temperature was 1033 K which is much higher than SmCo irreversible demagnetization temperature. Then, it was investigated to decrease the magnet temperature by changing structure and material of insulators. In addition, the emissivity was changed by coating the thruster using black and white paint. As a result, it was success to decrease temperature of the SmCo magnets at 469.8 K. From this result, It was shown feasibility of the FRC-MPD thruster.

1. 緒 言

近年の宇宙開発では、有人火星探査や深宇宙探査、月面基地建設のための物資輸送といった長距離航行で高い推力を必要とするミッションが想定されている。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、数ある電気推進機の中でも高推力、高比推力という特徴を持っており、上述のミッションに適していることから研究が進められている。一般的な MPD スラスタは磁場の印加に水冷コイルを採用している。しかし、冷却水を循環させるための装置や、冷却水の凍結を防止する装置などが必要で、システムが複雑になる。本学の MPD スラスタでは、実用的な MPD スラスタの開発を目標に、水冷コイルの代わりとして永久磁石を採用した。これにより、冷却水が不要となり、それに付随する装置も不要となるため、システムの簡素化に成功した。しかし、永久磁石はある温度を超えると元の磁力に戻らなくなる不可逆減磁特性があることから、実験モデルである本学の MPD スラスタは水冷を行っている。MPD スラスタの実用化には、水冷を用いない完全輻射冷却式の MPD スラスタとすることが望ましいが、水冷に比べて冷却能力が低い輻射冷却では、スラスタ作動時の熱により永久磁石が高温となり熱減磁を起こす恐れがある。そこで、本研究では水冷を用い

ない完全輻射冷却式 MPD スラスタを設計し、熱解析によって永久磁石の定常最高温度を調査した。また、解析結果をもとにスラスタの構造や放射率の変更を行い、永久磁石の温度上昇の抑制が可能な構造を検討した。本研究の目標は、永久磁石が不可逆減磁温度を超えないスラスタ構造を考案することである。

2. 磁石の選定

本学の MPD スラスタに永久磁石を搭載するにあたり、最適な永久磁石の選定を行った。選定条件は、最大エネルギー積と熱減磁係数の2つである。また、比較する永久磁石は、ネオジウム(Nd)磁石、サマリウムコバルト(SmCo)磁石、フェライト(Ferrite)磁石、アルニコ(Al-Ni-Co)磁石とした。

2.1 最大エネルギー積 MPD スラスタを高効率で作動させるためには、強い磁場を印加する必要がある。したがって、強い磁場を印加できる永久磁石を選ばなければならない。永久磁石の磁力の強さを表す値は、最大エネルギー積である。最大エネルギー積とは、磁束密度と磁場の強さの積で表される値で、単位体積当たりの磁石から取り出せる最大磁束量の目安を示す。すなわち、この値が大きい磁石ほど強い磁場を印加できる。

図1にそれぞれの永久磁石の最大エネルギー積を示す。図より、最大エネルギー積が最も大きいのは Nd 磁石で、

次いで SmCo 磁石が大きいことが分かる。

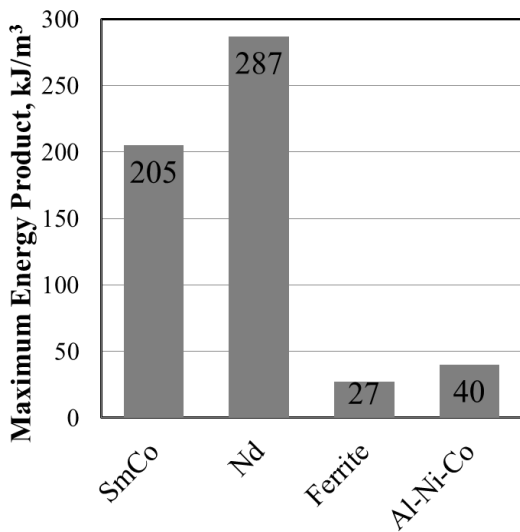


図1 各永久磁石の最大エネルギー積

2.2 熱減磁係数 永久磁石は温度の上昇とともに磁力が低下する特性を持つ。熱減磁係数は、温度に対して磁力が低下する割合を表しており、この値が大きいほど少しの温度上昇で磁力が大きく低下することを示す。MPD スラスタは作動時に高温になり、それに伴って永久磁石も高温になることが予想される。したがって、高温下でも強い磁場を印加できるように熱減磁係数の小さい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を示した。図より、熱減磁係数が最も小さいのは Al-Ni-Co 磁石で、次いで SmCo 磁石となっている。また、最大エネルギー積が最も大きかった Nd 磁石の熱減磁係数は SmCo 磁石のおよそ3倍となっており、熱に弱いことがわかる。

以上の2点より、要求される条件のバランスが最も良い SmCo 磁石を採用することに決定した。

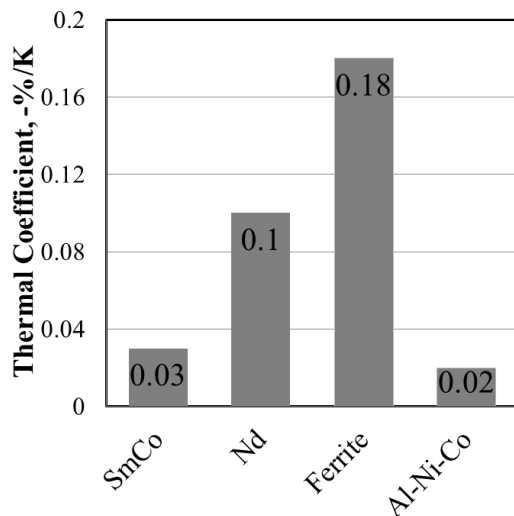


図2 各永久磁石の熱減磁係数

3. MPD スラスタ

3.1 水冷式 MPD スラスタ 本学で開発した水冷式 MPD スラスタを図3に、断面図を図4に示す。前述した SmCo 磁石を A2017 製磁石ホルダに取り付け、SS400 製のヨークで挟み込むことで磁気回路を形成している。磁気回路の磁石は0-16個の間で自由に着脱でき、磁束密度を変更して実験を行うことが可能となっている。アノードとカソードホルダは水冷されている。

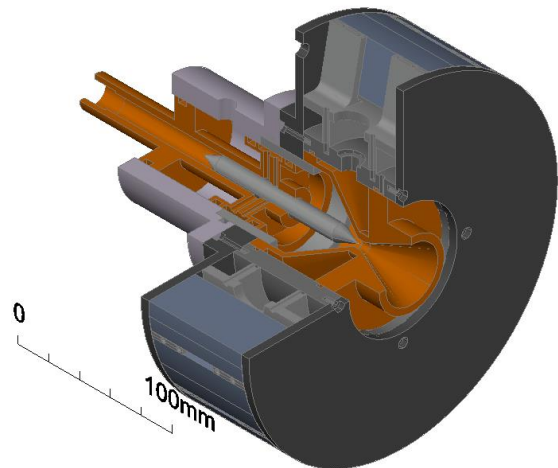


図3 水冷式 MPD スラスタ

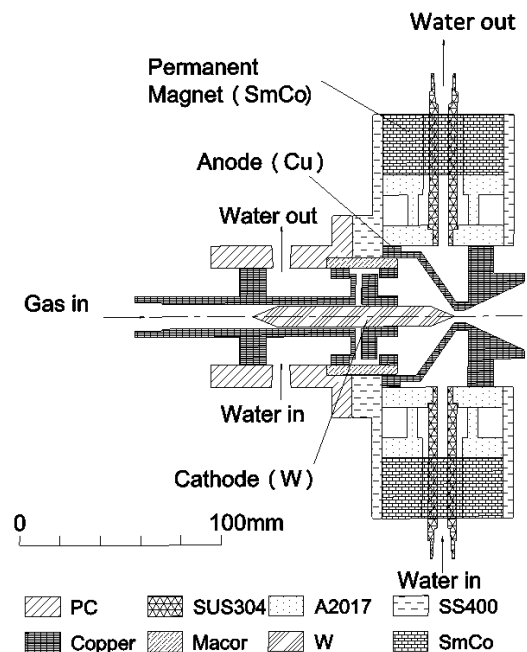


図4 水冷式 MPD スラスタの断面図

3.2 完全輻射冷却式 MPD スラスタ 上述の水冷式 MPD スラスタの構造をもとにして、完全輻射冷却式 MPD スラスタの構造を考案した。先行研究において考案された構造(以降、構造1と呼称する)を図5に、その断面図を図6に示す。輻射冷却のため、水冷式に比べて部品の温度が高くなると考えられる。したがって、ほとんどの部品に高融点

材料である純タングステン(W)やチタンジルコニウムモリブデン(TZM)を採用している。

構造 1 の特徴として、スラスタ下流側に取り付けられた輻射プレートが挙げられる。熱源と磁気回路の間に断熱材を配置し、その内側には金属部品を配置することで、径方向への熱の伝わりを抑制し、軸方向へ熱を移動させる構造とした。スラスタ下流側へ運ばれた熱を輻射パネルにより放出させる仕組みとなっている²⁻⁵⁾。

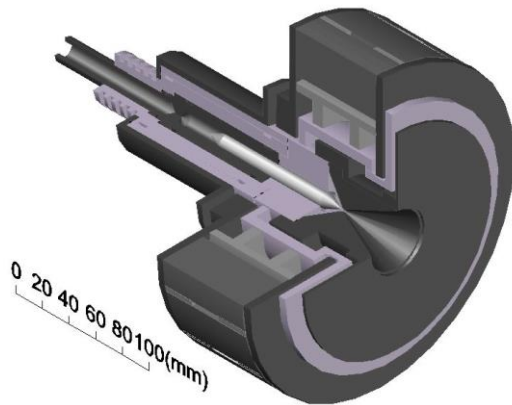


図 5 構造 1 の 3D モデル

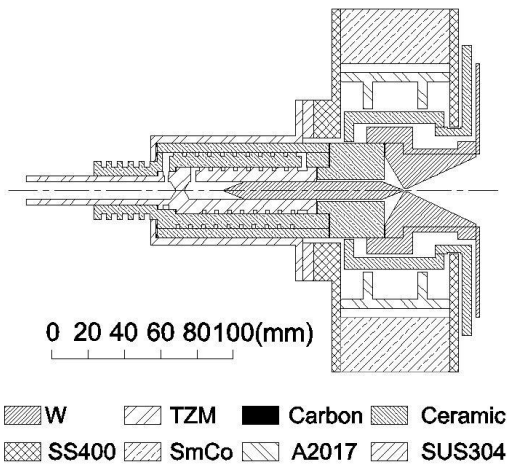


図 6 構造 1 の断面図

4. 熱解析

4.1 解析条件 前節で述べた完全輻射冷却式 MPD スラスタの解析結果をもとに、構造、使用材料、放射率の変更を行い、永久磁石の最高温度低下を目指す。ただし、構造変更の際、スラスタの推進性能に直接かかわってくるアノードのノズル形状、カソード形状、磁石形状の変更は行わないものとする。

前述のとおり、永久磁石には不可逆減磁温度が存在し、SmCo 磁石の場合は 620 K である。したがって、熱解析において SmCo 磁石の定常最高温度が 620 K 以下となる構造を最適構造と定義し、調査を行った。熱解析に使用したソフトは Thermal Desktop(C&R Technologies, Inc.)である。本

研究では磁石の定常最高温度を調査する必要があるため、解析時間はスラスタの温度が定常となるまでとしている。また、熱源はカソードおよびアノードに与えた。投入熱量は、アノードに 4770 W、カソードに 300 W とした。この値は、本学の水冷式 MPD スラスタに注入した冷却水の流量と温度上昇から推測したものである。これらの解析条件を表 1 にまとめた⁹⁾。この解析条件は後述するすべての解析において適用される。

表 1 解析条件

Software	Thermal Desktop
Analysis Time	Steady-State
Applied Heat to the Anode, W	4770
Applied Heat to the Cathode, W	300

4.2 先行研究の熱解析 先行研究において、構造 1 の熱解析が行われた。その解析結果として、図 7 に構造 1 の永久磁石の定常温度分布を示す。また、その最高温度と最低温度を表 2 に示す。これらより、永久磁石の最高温度が SmCo 磁石の不可逆減磁温度を大きく超える結果となった。これは、設計時に意図した通りに熱が移動しなかったためと考えられる。そのため、構造の変更を行うことによって永久磁石への熱の伝わりを抑制することを考えた。

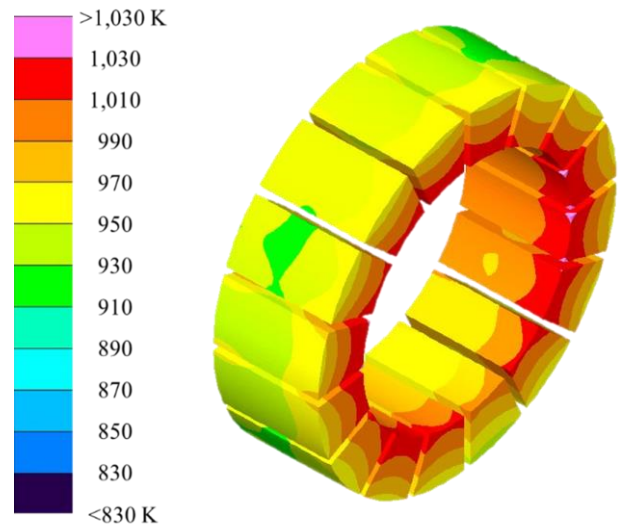


図 7 構造 1 における永久磁石の温度分布

表 2 構造 1 における永久磁石の最高温度と最低温度

Maximum Temperature, K	1033
Minimum Temperature, K	908.1

4.3 断熱材構造変更による熱解析

4.3.1 解析構造 構造 1 の熱解析の結果、永久磁石の最高温度が不可逆減磁温度を大きく上回ったため、断熱材の形状を変更することで温度上昇の抑制を行った。解析構造は図 8-10 に示す 3 つである。図 8 に示した構造 2 は、構造 1 から輻射プレートをなくし、アノードと磁気回路の間にマコール製の断熱材を 1 枚挿入したものとなる。図 9 に

示した構造3は、構造2の断熱材を3層に分割したものである。部品点数を増やすことにより、部品間で起こる放熱の量を増やし、磁石へ伝わる熱を抑制する。最後に、図10に示す構造4は、構造3の断熱材第2層に使用する材料をマコールからタングステンに変更したものである。放射率の大きいタングステンを放射率の小さいマコールで挟む構造にすることで、軸方向への熱の移動経路を設けた。

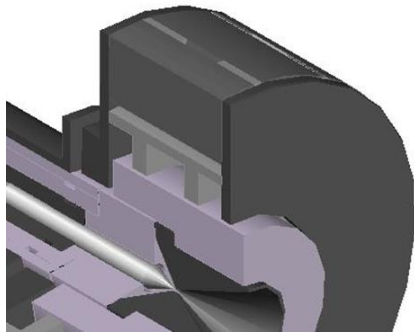


図8 構造2の3Dモデル

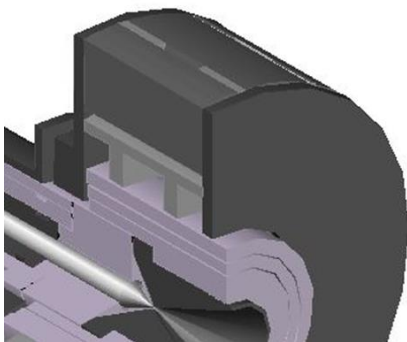


図9 構造3の3Dモデル

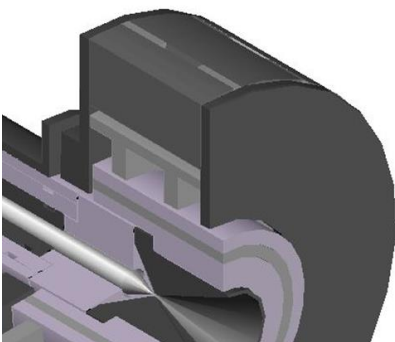


図10 構造4の3Dモデル

4.3.2 解析結果 構造2-4の解析結果を図11-13に示す。また、構造1-4における永久磁石の最高・最低温度を表3にまとめた。図、表より、構造を変更していくことによって最高温度が低下しているのが確認できるが、何れの構造においても不可逆減磁温度より高い温度を示している。構造2から構造3へは、断熱材の層を増やすことで径方向へ伝わる熱量が小さくなり、温度が低下したと考えられる。

構造3から構造4へは材料を変更したことによる温度低下と考えられるが、その差はごくわずかであった。ここまでの解析で最も温度が低くなったのは構造4で、構造1からおおよそ110 Kの温度低下となっている⁵⁾。

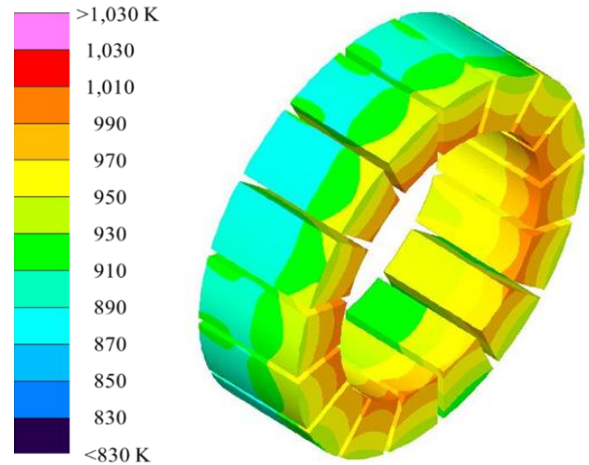


図11 構造2における永久磁石の温度分布

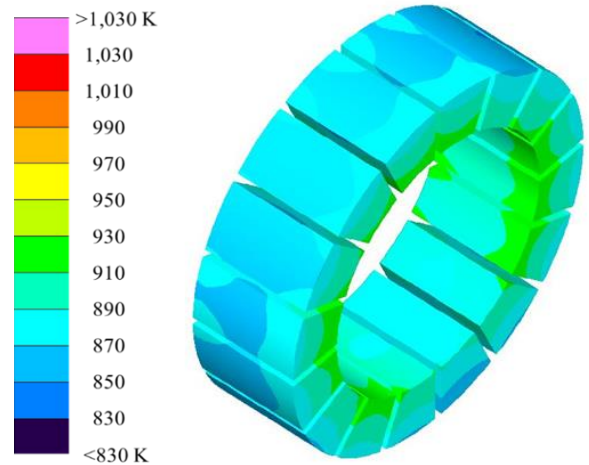


図12 構造3における永久磁石の温度分布

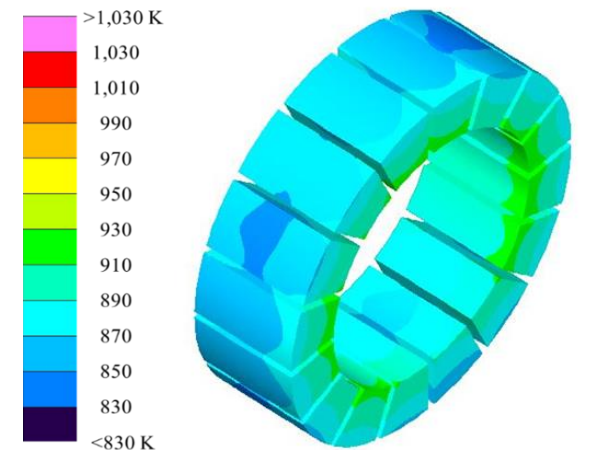


図13 構造4における永久磁石の温度分布

表3 各構造における永久磁石の最高温度と最低温度

Structure	Maximum Temperature, K	Minimum Temperature, K
1	1033	908.1
2	1007	877.4
3	927.1	834.8
4	923.1	831.1

4.4 断熱材材料変更による熱解析

4.4.1 解析概要 解析構造4において、断熱材第2層の材料をタングステン以外にした場合の永久磁石の温度を調査した。調査に用いた材料は、モリブデン(Mo)、アルミニウム(Al)、ボロンナイトライド(BN)、炭素(C)、銅(Cu)、マコール(Macor)、ステンレス鋼(SUS304)、チタンジルコニウムモリブデン(TZM)、純タングステン(W)である。解析構造には構造4を使用した。

4.4.2 解析結果 それぞれの材料を使用した場合の永久磁石の最高温度と最低温度を表4にまとめた。表より、銅を用いた際の永久磁石の最高温度が909.9 Kで最も低くなった。一方、これまでの解析で使用したマコールでは最高温度が927.2 Kで、選択した材料の中では最も高い結果となった。磁石の最高温度が低い順に材料を並べると、銅、アルミニウム、チタンジルコニウムモリブデン、モリブデンとなったことから、断熱材の材料として銅が最も効果的であると言える。しかし、断熱材は熱源から近い位置に配置されていることから、高温になることが予想される。解析結果において、断熱材の定常温度は1770-2000 Kであったため、融点が2000 K以下の銅やアルミニウムは使用できない。したがって、その次に永久磁石の最高温度を低くでき、高融点材料でもあるモリブデンとチタンジルコニウムモリブデンを断熱材として採用した。

表4 各材料における永久磁石の最高温度と最低温度

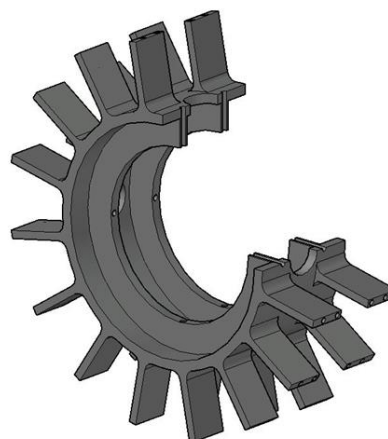
Materials	Maximum Temperature, K	Minimum Temperature, K
Mo	911.9	822.5
Al	910.2	819.7
BN	916.0	827.5
C	913.1	824.3
Cu	909.9	818.9
Macor	927.2	834.9
SUS304	918.0	829.0
TZM	911.2	821.4
W	927.1	934.8

4.5 磁石ホルダの構造変更による熱解析

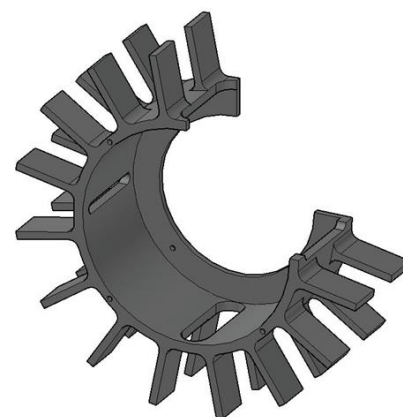
4.5.1 解析構造 4.3節の解析において、断熱材構造変更による永久磁石の温度低下を実現した。次に、磁石ホルダの構造を変更することによって永久磁石への熱の伝わりを抑えられるか検討した。これまでの磁石ホルダは脚が2本で断熱材側からの熱流入経路が2か所となっている。そこで、磁石ホルダの脚を1本にすることで、熱の流入経路を減らし、永久磁石へ伝わる熱の量を減らせると考えた。

また、脚を1本にしたことで、断熱材と磁石ホルダの間に大きな空間を設けることができ、輻射伝熱を効かせることでさらに熱を伝えにくくできると考えた。構造のベースにはこれまでの解析で最も温度が低くなった構造4を使用した。図14(a)にこれまでの解析で用いた磁石ホルダを、図14(b)に今回の解析で用いた磁石ホルダを示す。また、図15に解析構造である構造5の3Dモデルを示す。

さらに、空間を断熱材で埋めることで永久磁石への熱の伝わりの変化を調査した。その構造を構造6とし、図16にその3Dモデルを示す。



(a) 従来の磁石ホルダ



(b) 形状変更した磁石ホルダ

図14 磁石ホルダの形状変更

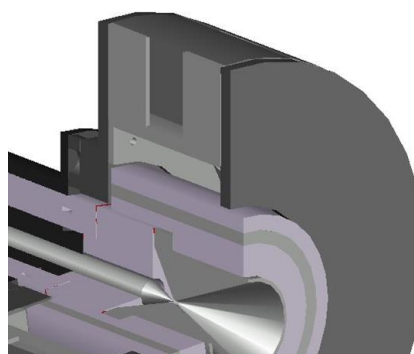


図15 構造5の3Dモデル

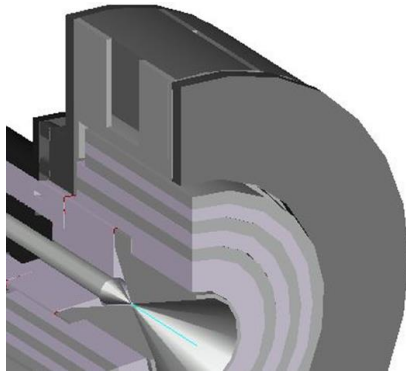


図 16 構造 6 の 3D モデル

4.5.2 解析結果 構造 5, 6 における永久磁石の温度分布をそれぞれ図 17, 18 に示す. また, 構造を変更したことによる断熱効果を見るため, 構造 4-6 の永久磁石の最高温度と最低温度を表 5 にまとめた. 構造 4 から構造 5 へは永久磁石の温度が上昇した結果となった. その要因として, 下流側ヨークによって断熱材と磁石ホルダの間の空間が閉じていることが挙げられる. 通常熱の伝わりは, 接触した部品間の伝導伝熱よりも空間を介して伝わる輻射伝熱のほうが小さい. しかしながら, 下流側ヨークによって閉じた空間としてしまったために, 空間内に熱がこもり, 結果として永久磁石の温度上昇を招いたと考えられる.

一方, 構造 5 の空間を断熱材で埋めた構造 6 では, 永久磁石の温度は低下した. これは, 断熱材の層が増えたことにより, 空間の輻射伝熱よりも層と層の間での伝導伝熱による熱のロスが大きくなったためと考えられる.

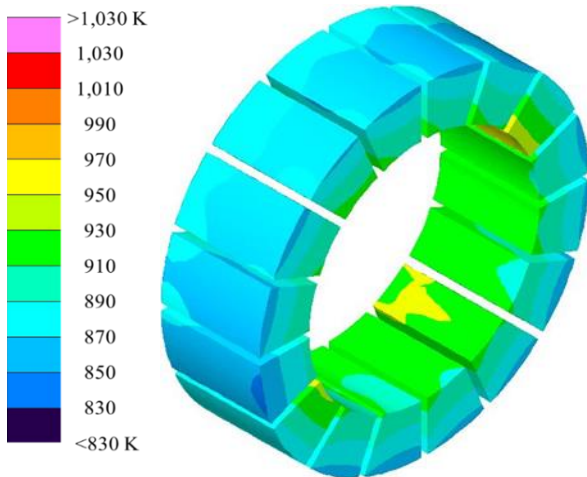


図 17 構造 5 における永久磁石の温度分布

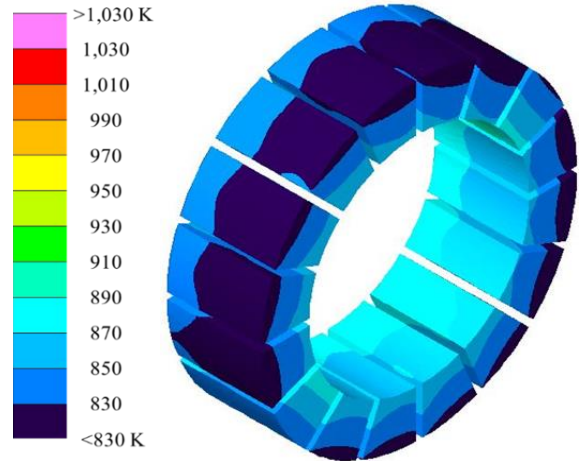


図 18 構造 6 における永久磁石の温度分布

表 5 各構造における永久磁石の最高温度と最低温度

Structure	Maximum Temperature, K	Minimum Temperature, K
4	923.1	831.1
5	973.3	848.0
6	906.1	811.5

4.6 開空間設置による温度分布の調査

4.6.1 解析構造 構造 5 の解析において, 輻射伝熱による温度低減を考え空間を設けた. しかしながら, 閉じた空間であったために永久磁石の温度上昇を招く結果となった. そこで, 下流側のヨーク内径を大きくすることで, 開いた空間を設け, 永久磁石への熱の伝わりを抑えられると考えた. このほか, これまでの解析構造ではアノードまでの電力供給経路が設けられていなかったため, 電力供給経路の設置を行った. アノードと断熱材第 1 層の間に, 金属の層を設け, アノードまでの電力供給経路とした. 材料には高融点材料で断熱効果も高いモリブデン(Mo)とチタンジルコニウムモリブデン(TZM)の 2 種類を用いて解析を行った. この解析構造を構造 7 とし, 構造 7 の 3D モデルを図 19 に示す.

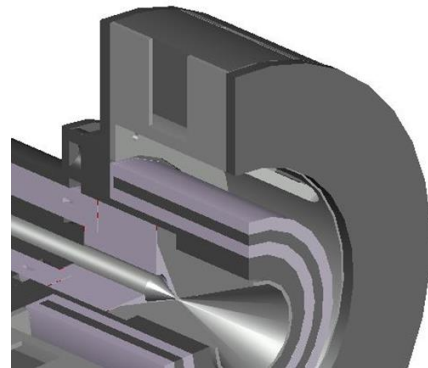
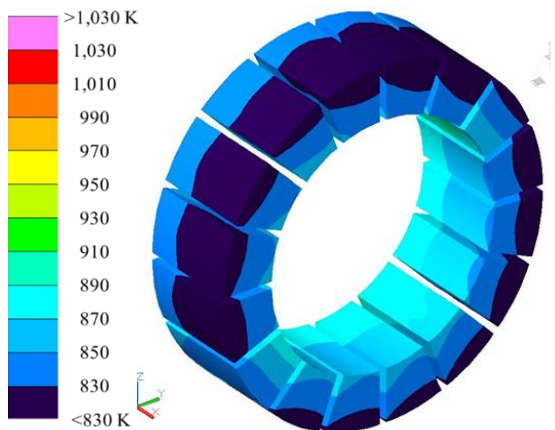


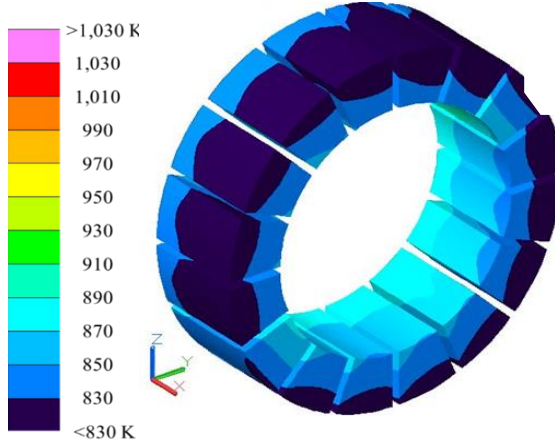
図 19 構造 7 の 3D モデル

4.6.2 解析結果 図 20 に構造 7 の永久磁石の温度分布を示す. 図 20(a)は断熱材第 2 層にモリブデン(Mo)を, 図

20(b)は断熱材第2層にチタンジルコニウムモリブデン(TZM)を用いたときの解析結果である。また、表6に構造5と構造7それぞれの永久磁石の最高温度と最低温度をまとめた。表より、構造5より構造7のほうが温度が下がったことが確認された。このことより、ヨーク内径を大きくし開いた空間を設けたことで輻射伝熱による熱の放出が行われ、永久磁石へ伝わる熱が減少したと考えられる。また、断熱材第2層の材料の違いによる温度の影響は少ないことが分かる。永久磁石の温度はMoに比べてTZMを採用したときのほうがわずかであるが小さかった。これは3.4.2節の結果とも同様の傾向であるため、Moに比べてTZMの断熱効果は高いと言える。



(a) 断熱材第2層にMo採用時



(b) 断熱材第2層にTZM採用時

図20 構造7における永久磁石の温度分布

表6 各構造における永久磁石の最高温度と最低温度

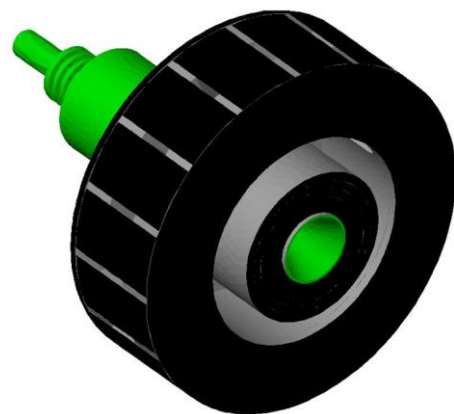
Structure	Maximum Temperature, K	Minimum Temperature, K
5	973.3	848.0
7(Mo)	910.3	803.9
7(TZM)	905.1	800.4

4.7 放射率変更による熱解析

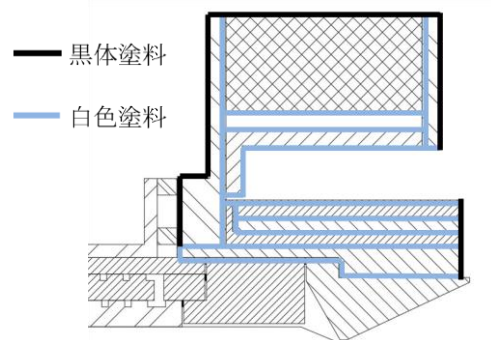
4.7.1 解析構造

これまでの解析では、構造の変更及

び使用材料の変更により永久磁石の温度低下を行った。その結果、125 K以上の温度低下を実現した。しかし、最も低かった最高温度で905.1 Kと、SmCo磁石の不可逆減磁温度から300 K近く高い温度になっている。そこで、更なる温度低下を実現するために、スラスタ表面の放射率変更を行った。放射率の変更には黒体塗料と白色塗料を使用した。黒体塗料は放射率が高く、熱を吸収しやすく放出しやすい特性を持っている。また、白色塗料はその逆の性質を持つ。これらの特性を活かし、スラスタ表面および内部の面に塗料を塗布することで永久磁石への熱の伝わりを抑制できると考えた。図21(a)に塗料を塗ったスラスタの外観図を、図21(b)に塗料を塗布した箇所を示す。スラスタ外面や永久磁石露出面には熱を放出しやすくするために黒体塗料を塗布した。また、熱源となるアノードやそれと接する断熱材、磁石ホルダには、永久磁石まで熱を伝えにくくするために放射率の低い白色塗料を塗布した。この構造で解析を行い、永久磁石の温度を調査した。なお、この解析モデルを構造8とし、スラスタの構造にはこれまでの解析で永久磁石の温度が最も低かった構造7を用いた。



(a) スラスタ外観図

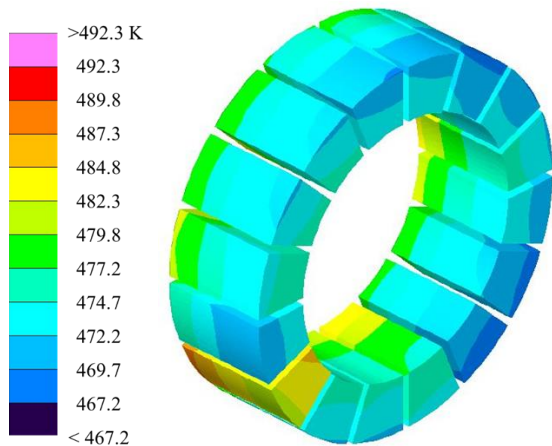


(b) 塗料塗布箇所

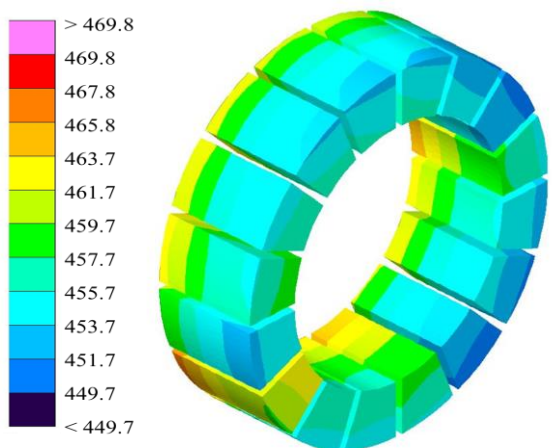
図21 構造8の概要

4.7.2 解析結果 構造8の永久磁石の温度分布を図22に示す。図22(a)は断熱材第2層にモリブデン(Mo)を、図22(b)はチタンジルコニウムモリブデン(TZM)を用いたものである。これらの結果の磁石最高温度と最低温度を表7にまとめた。図および表より、永久磁石の最高温度がSmCo

磁石の不可逆減磁温度 620 K を下回った結果となった。このことから、スラスタ表面の放射率を変更することは永久磁石への熱の伝わりを抑制するのに効果的であると言える。しかし、これまでの構造変更や使用材料変更による温度低下よりも著しい温度低下が見られることから、結果の信頼性を調査していく必要がある。



(a) 断熱材第2層に Mo 採用時



(b) 断熱材第2層に TZM 採用時

図 22 構造 8 における永久磁石の温度分布

表 7 構造 8 における永久磁石の最高温度と最低温度

Material	Maximum Temperature, K	Minimum Temperature, K
Mo	492.3	467.2
TZM	469.8	449.7

5. 結 言

実用的な MPD スラスタの開発を目指し、完全輻射冷却式 MPD スラスタの設計と熱解析を行った。

- (1) 断熱材の構造を 1 層から 3 層に分割することで永久磁石の温度低下が見られた。また、断熱材第 2 層には Mo と TZM が適していることが分かった。
- (2) 磁石ホルダとヨークの形状を変更することで開いた空

間を設け、熱が伝わりにくい構造にし、磁石の温度を低下させることに成功した。

- (3) 更なる温度低下を実現させるために、黒体塗料と白色塗料を用いてスラスタ表面の放射率変更を行った。その結果、永久磁石の最高温度が SmCo 磁石の不可逆減磁温度を下回った。放射率の変更は熱の伝わりを抑制するのに有効な手段であると言える。

6. 今後の展望

塗料の物性値を一つずつ変更することでどの物性値が温度低下に最も寄与しているかを調べ、構造 8 の結果の信頼性を評価する。その他、塗料の塗布パターンを変えることによる永久磁石の最高温度への影響や、更なる構造変更による永久磁石の温度低下を目指す。

参考文献

- 1) 鈴木智也, 杉山義和, 知野健吾, 門畑浩平, 田原弘一, 高田恭子 「永久磁石と中空陰極を用いた外部磁場印加型定常作動大電力 MPD スラスタの性能特性」 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2C13, 2015 年 10 月, かごしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市)。
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 知野健吾, 杉山義和, 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 スラスタの熱計算」平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2016-050, 2017 年 1 月, JAXA 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)。
- 5) 知野健吾, 齊藤将太, Nils Ostermann, 谷和真, 瀬川秋桜子, 田原弘一, 高田恭子 「有人火星探査用定常作動型完全輻射冷却式 MPD スラスタの熱設計」 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2E11, 2017 年 10 月, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)。
- 6) 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)。