

車両空調向け磁気ヒートポンプシステムの 冷凍能力向上

宮崎 佳樹* 脇 耕一郎* 水野 克俊* 池田 和也*

Cooling Capacity Improvement of Magnetic Heat Pump for Railway Air Conditioner

Yoshiki MIYAZAKI Koichiro WAKI
Katsutoshi MIZUNO Kazuya IKEDA

Present air conditioner systems are based on traditional vapor compression technology with HCFC (Hydro Chloro Fluoro Carbon). The Kyoto Protocol has designated HCFC as one of the gases whose emissions are to be reduced. This requires the development of HCFC free systems or the usage of substances which have little greenhouse effect. Under those situations, magnetic refrigeration technology which has the potential for high efficiency without Freon gases is the focus of attention. The aim of this study is to develop a large-scale magnetic refrigerator which has a maximum kilowatt-class cooling power for air-conditioners mountable on railway vehicles so as to be free from Freon gases.

キーワード：車両空調，省エネルギー，ノンフロン，磁気ヒートポンプ，ハルバツハ

1. はじめに

現在の冷房システムの主流は代替フロン等を用いた蒸気圧縮式冷凍である。しかし、温室効果ガスである代替フロン等は京都議定書において排出削減対象ガスに指定されており、代替フロンを使わない製品の開発や温室効果の低い物質への転換が求められている¹⁾。

このような情勢の中、ノンフロンで高冷凍効率が期待できる磁気冷凍技術が注目されている。磁気冷凍は極低温で発展した技術のため、「冷凍」と呼ばれるが、室温領域では暖房へも応用可能なことから、本稿では「磁気ヒートポンプ」と称する。

磁気ヒートポンプ技術の、大型冷凍・冷房装置への適用可能性を検証するため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：「省エネルギー革新技術開発事業／磁気ヒートポンプ技術の研究開発」委託事業において、中部電力、サンデン、三徳、東工大、神戸大、九州大とともに、kW級磁気ヒートポンプシステムの開発に取り組んだ。本稿では開発したシステムの冷凍能力ならびに冷却特性について紹介する。本稿のデータは各者協力のもと取得した。

2. 磁気冷凍の原理

2.1 磁気熱量効果

磁気冷凍とは、ある種の磁性体に磁場変化を与えた場合に、磁性体内部でエントロピー変化が生じる「磁気熱

量効果」を利用した冷凍方式である²⁾。

図1に磁気熱量効果の概念を示す。周囲との熱のやり取りを絶って、すなわち断熱状態で磁性体に磁場を近づける（励磁する）と、磁性体は発熱し、磁性体の温度が上昇する。磁性体を構成する原子は、電子スピンの由来する磁気モーメントの持つ磁気エントロピーと、結晶格子が持つ格子エントロピーを有している。励磁の際には、磁気モーメントが磁場によって配向する際に磁気エントロピーが低下する。しかし系全体のエントロピー変化はないため、結晶格子のエントロピーが増加し、温度が上昇する。逆に、磁性体から断熱的に磁場を取り除く（消磁する）と、磁性体は吸熱作用を生じ、磁性体の温度が下降する。磁場により配向していた磁気モーメントがバラバラになる際に、磁気エントロピーが増加するが、系全体のエントロピー変化はないため、結晶格子のエントロピーが低下し、温度が低下する。気体冷凍では冷媒となるガスを作業物質、作業流体などと呼ぶが、磁気熱量効果の顕著な磁性体は、磁気的な作業物質ということで、「磁気作業物質」と呼ばれる。

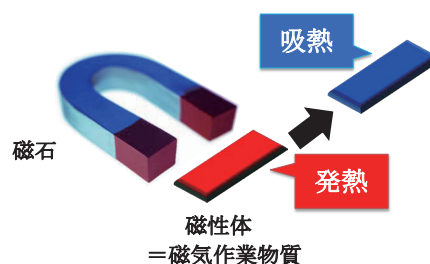


図1 磁気熱量効果

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

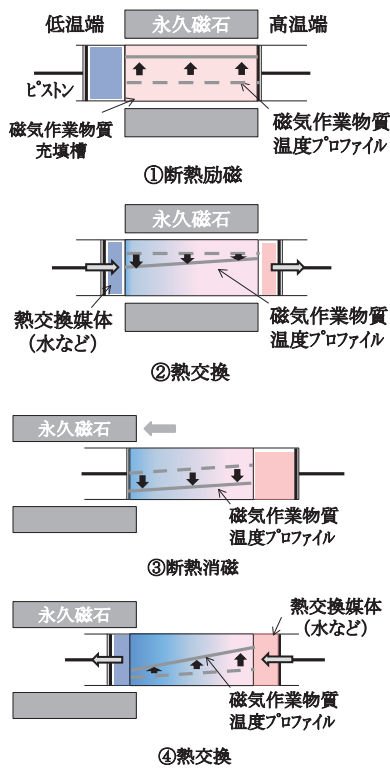


図2 AMRの原理

2.2 磁気ヒートポンプサイクル

室温域においては、磁気作業物質の熱容量が大きくなるため、磁気熱量効果によって生じる温度変化が小さくなる。比較的小さな磁場でも大きな冷却温度を得るために考えられたのが、蓄熱および再生サイクルを用いたAMR (Active Magnetic Regenerator) と呼ばれる冷凍方式である³⁾。

AMRでは磁気作業物質である磁性体を蓄熱器および再生器として用い、磁気熱量効果による磁気作業物質の温度変化を蓄積させ大きな冷却温度差を得るもので、現在室温磁気ヒートポンプを構成するために最も有効な方法とされており、本研究においてもAMRを用いた冷凍サイクルを採用している。

AMRの動作原理を図2に示す。図中の磁気作業物質充填槽には、磁気作業物質の空間的な温度プロファイルが示してある。図2①において、磁気作業物質は断熱的に励磁され、温度が上昇する。温度プロファイルは点線が励磁前、実線が励磁後を示す。そのあと、②の過程で低温の熱交換媒体（たとえば水）と熱交換することにより、温度勾配が生じる。この状態で③のように断熱消磁を行うと、磁気作業物質の温度は勾配を保ったまま全体的に低下する。最後に④の過程で高温側の熱交換媒体と熱交換することにより、さらに温度勾配が拡大する。

AMRシステムでは、磁気熱量効果により生じる温度変化を磁性体自身に蓄熱し、熱交換媒体により効率よく外部へ取り出すことで冷凍を行なう。AMRサイクルに

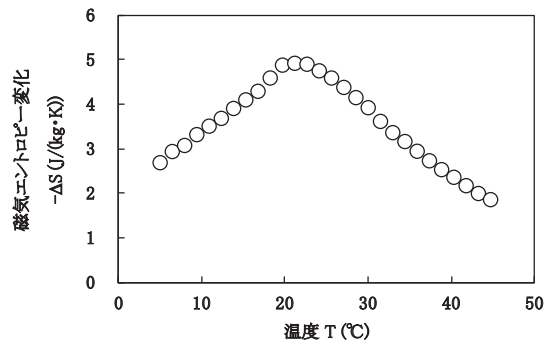


図3 Gdの磁気エントロピー変化 (2 T印加時)

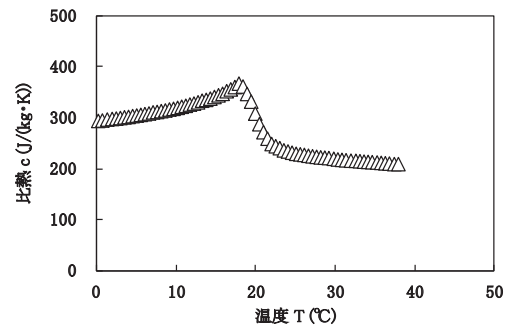


図4 Gdの比熱の温度依存性⁴⁾

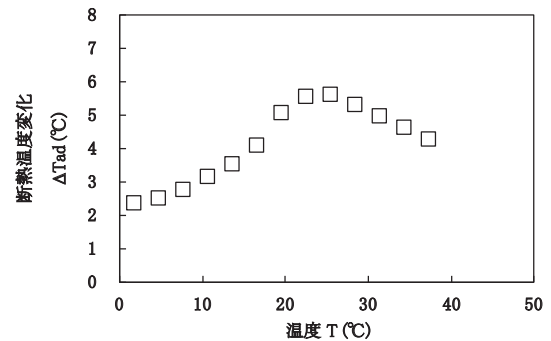


図5 Gdの断熱温度変化 (2 T印加時)

用いる磁気作業物質充填槽をAMRダクトと称する。

3. kW級磁気ヒートポンプ試験装置

3.1 磁気作業物質

ガドリニウム (Gd) は、21°Cに磁気的な相転移点であるキュリー点 (T_c) を持つ2次相転移材料である。磁気作業物質として重要な物性は、磁気エントロピー変化 (ΔS)、比熱 (c) および断熱温度変化 (ΔT_{ad}) である。それぞれの温度依存性を図3～5に示す。

図3より、Gdの磁気エントロピー変化はキュリー点である21°C付近にピークを持つことが分かる。断熱条件のもとで磁気作業物質に磁場を印加した際の、磁気作業物質の温度変化を断熱温度変化 ΔT_{ad} と呼ぶ。磁気エントロピー変化と比熱から、材料のエントロピー変化がどれくらいの温度変化に対応するのか知ることができ

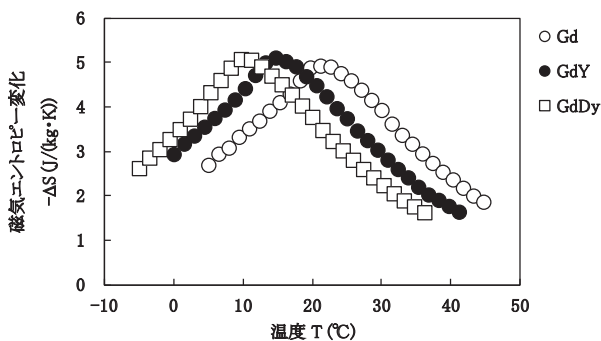


図6 Gd合金の磁気エントロピー変化

る。 ΔT_{ad} は以下の近似式を用いて算出した。

$$\Delta T_{ad} = -\frac{\Delta ST}{c} \quad (1)$$

c : 比熱, T : 測定温度

図3～5から、1回の断熱温度変化は、2 T印加時においても高々5°C程度であること、動作温度がピークから外れるにつれ、磁気エントロピー変化や断熱温度変化は小さくなるのがわかる。2.2章で説明したAMRサイクルを用いれば、断熱温度変化以上の冷却温度幅が得られるが、1つの材料で得られる冷却温度幅には限界があることが示唆される。

さらに大きな冷却温度幅を得るためには、複数の磁気作業物質を組み合わせるカスケードという手法が考えられる。今回カスケードに用いた磁気作業物質について、印加磁場2 Tにおける磁気エントロピー変化の温度依存性を図6に示す。キュリー点はそれぞれ、Gd: $T_c=21^\circ\text{C}$, Gd-Y (イットリウム) 合金: $T_c=15^\circ\text{C}$, Gd-Dy (ディスプロシウム) 合金: $T_c=10^\circ\text{C}$ である。カスケードは、これらの磁気作業物質を、 T_c の順に配置することで、Gd単体よりも広い冷却温度幅を得ようとするものである。

3.2 円環状ハルバツハ配列永久磁石

Gdの磁気エントロピー変化はキュリー点である21°C付近で最大となり、印加する磁場が大きいほど、大きな磁気エントロピー変化が得られる。そこで、大きな磁場を印加できるハルバツハ配列を用いた磁気回路について検討した。

図7(a)にハルバツハ配列の基本配列を示す。白抜き矢印の向きに磁化した磁石を90°回転させながら配列すると、磁石③とその両側の磁石(②, ④)が配列の表面において磁場を強めあうため、単一磁石よりも強磁場が得られ、磁極裏面への漏れ磁場が小さいという特徴を持つ。

本磁気ヒートポンプシステムに用いるハルバツハ配列永久磁石は、円環状とし、更に180°回転したものとの対することで漏れ磁場を低減している⁵⁾。

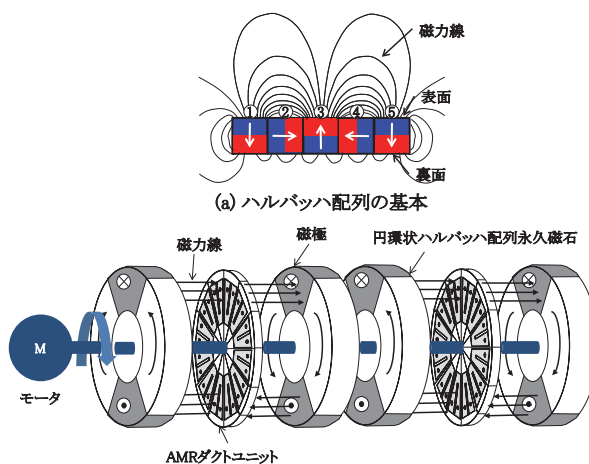


図7 ハルバツハ配列の基本と円環状ハルバツハ配列

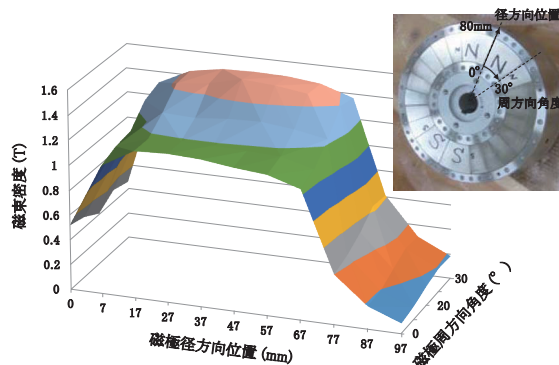


図8 磁極表面の磁束密度分布

磁気ヒートポンプシステムに用いられた円環状ハルバツハ配列永久磁石の概略を図7(b)に示す。本機はAMRダクトを円環状に12個配置したダクトユニットと、それを挟み込む円環状ハルバツハ配列永久磁石対からなる磁気回路を2組有している。永久磁石は1つのモーターにより回転され、AMRダクトを励消磁する。開発した円環状ハルバツハ配列永久磁石は、磁極表面で1.5 Tを超える磁束密度を得ることができた(図8)。

3.3 磁気ヒートポンプ試験装置

円環状ハルバツハ配列永久磁石を搭載した磁気ヒートポンプの写真を図9に示す。AMRダクトの形状は、ダクトの流路長さを確保するために、図10のようにV字型とした。

AMRダクトは図11のように円環状に12個配置されてユニット化されている。2組のダクトユニットをそれぞれユニットA、ユニットBと称する。図11は円環状ハルバツハ配列永久磁石の磁極が、12, 1ならびに6, 7ダクトの位置に正対している場合を示している。この場合、磁極に正対した12, 1, 6, 7ダクトが励磁ダクト、磁極から90度回転した位置にある3, 4, 9, 10ダクトが消磁ダクトとなる。熱交換媒体には水を用いた。ポンプから送られた熱交換媒体は、動作温度 T_{hi} でロータリバル

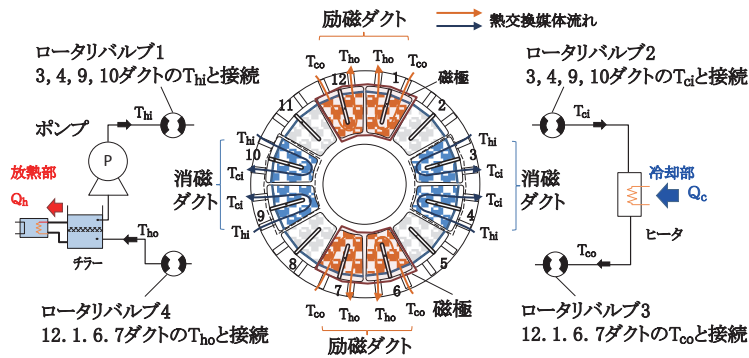


図 11 磁気ヒートポンプの冷却フロー

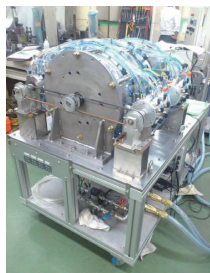


図 9 開発した磁気ヒートポンプ

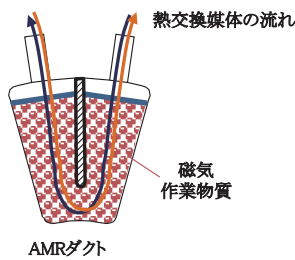


図 10 AMR ダクト

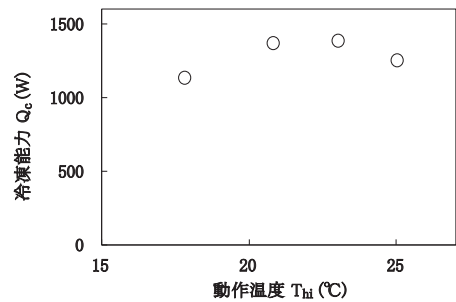


図 12 冷凍能力の動作温度依存性

ブ 1 に入り、消磁中の 3, 4, 9, 10 ダクトへ移送される。消磁ダクトで磁気作業物質と熱交換を行い、温度が T_{ci} まで低下した熱交換媒体は、ロータリバルブ 2 に集約され、冷却部に導かれる。冷却部でヒータより熱負荷 Q_c を与えられ、温度 T_{co} となったのちに、ロータリバルブ 3 で、今度は励磁中の 12, 1, 6, 7 ダクトへ移送される。励磁ダクトで磁気作業物質と熱交換を行い、温度が上昇し T_{ho} となった熱交換媒体は、ロータリバルブ 4 に集約されて放熱部に導かれ、 Q_h の放熱ののち、再び T_{hi} の温度に調整されて循環する。磁石の回転とロータリバルブの切り替えは同期しており、1, 2, 7, 8 ダクトが励磁、4, 5, 10, 11 ダクトが消磁となる位置に磁極がくれば、ロータリバルブはこれらのダクトへ流路を切り替える。

本磁気ヒートポンプの運転モードは、ユニット A、ユニット B に熱交換媒体を並列に移送する「パラレルモード」と、ユニット A を高温側、ユニット B を低温側として流路を接続する「シリーズモード」がある。冷凍能力は図 11 に示すヒータの出力とし、同図の T_{hi} と T_{ci} の差を温度差 ΔT とした。

4. 冷却性能試験結果

4.1 冷凍能力

開発した磁気ヒートポンプシステムの最大冷凍能力を評価するため、ユニット A に Gd、ユニット B に Gd-GdY-GdDy を充填し、パラレルモードにて冷凍能力を測定した。磁気作業物質の磁気エントロピー変化には温

度依存性があるため、冷凍能力も温度依存性を持つ。図 12 は、供給する熱交換媒体の温度を変化させて、冷凍能力の温度依存性を測定した結果である。図からわかるように、供給する熱交換媒体の温度が 23°C 付近で、冷凍能力は最大で 1.4 kW 程度が得られた。これはユニット A、ユニット B に充填されている磁気作業物質の約 7 割が $T_c = 21^\circ\text{C}$ の Gd であることから、Gd の磁気エントロピー変化の温度依存性が、システムの冷凍能力の特性を支配しているものと考えられる。

4.2 温度差

表 1 に示す Case 1 ~ Case 3 のように、ユニットに充填する磁気作業物質を変えて、温度差評価試験を行った。表中の () 内は、それぞれの材料のキュリー点を示す。Case 1 はユニット A のみを用いて Gd 単体の評価を実施した場合、Case 2 はユニット B のみを用いて、3 種類の磁気作業物質をダクトに充填した場合、Case 3 はユニット A に Gd、ユニット B に GdDy を充填した場合である。なお、Case 3 については、シリーズモードで評価を行った。

表 1 磁気作業物質充填パターン

	ユニット A	ユニット B
Case 1	Gd (Tc21)	※使用せず
Case 2	※使用せず	Gd-GdY-GdDy (Tc21-15-10)
Case 3	Gd (Tc21)	GdDy (Tc10)

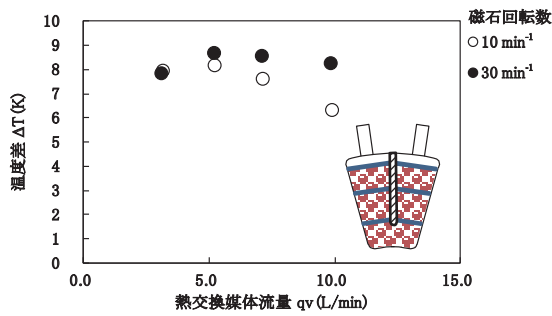


図 13 Case 1 の温度差試験結果

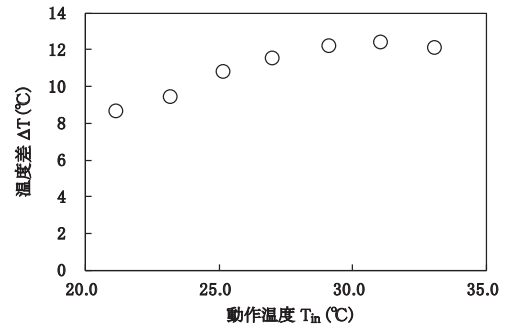


図 15 温度差の動作温度依存性 (Gd)

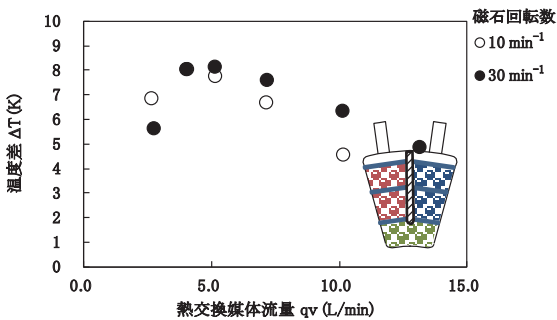


図 14 Case 2 の温度差試験結果

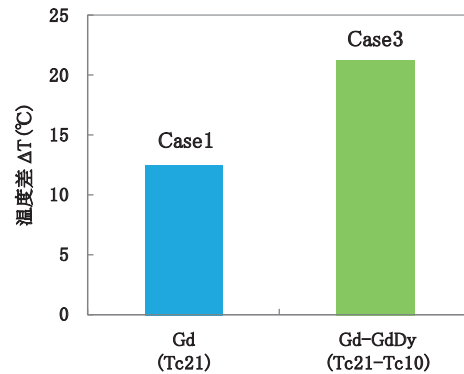


図 16 カスケードによる温度差の拡大

4.2.1 Case 1 と Case 2 の比較

温度差 (ΔT) の熱交換媒体流量 (q_v) 依存性について、磁気作業物質の充填を Case 1 とした場合を図 13 に、Case 2 とした場合を図 14 に示す。ポンプより供給する熱交換媒体温度 T_{hi} は 20°C とした。図中の 2 つのプロットは、磁石の回転数を 10 min^{-1} 、 30 min^{-1} とした場合について示している。いずれの Case でも、熱交換媒体の流量が 5 L/min 程度までは ΔT が増加傾向にあるが、それ以降では ΔT は減少傾向を示すことがわかる。また、磁石の回転数が 30 min^{-1} のほうが、 10 min^{-1} に比べてピークの ΔT が大きく、 5 L/min 以降の流量増加に対する ΔT の減少も小さいことがわかる。最大温度差は Case 1 で 8.7°C 、Case 2 で 8.2°C 程度である。Case 2 では異なる T_c を持つ磁気作業物質を 3 種類充填して温度差の拡大を目指したが、カスケードの効果が出ていないという結果になった。

図 5～7 のように、Gd の磁気エントロピー変化はキュリー点近傍で最大となるが、比熱はキュリー点よりも高温側で小さくなる。そのため断熱温度変化のピークはキュリー点よりも高温側となる。そこで、ユニット A の供給温度を変化させて、図 15 に示すように、最大温度差の動作温度依存性を測定した。その結果、最大温度差はキュリー点よりも高温側で最大温度差 12.5°C が得られ、本磁気ヒートポンプシステムでは動作温度 30°C 程度において、最大温度差が得られることがわかった。以降の試験においては、動作温度を 30°C 付近として測定を行った。

4.2.2 Case 1 と Case 3 の比較

カスケード構成を Case 3 のようにして、シリーズモードにて温度差を評価した結果、図 16 に示すように、 $T_{hi}=28^\circ\text{C}$ において、最大温度差 21.3°C を得ることができた。これは $T_{hi}=30^\circ\text{C}$ における Gd 単体の最大温度差 12.5°C と比較しても大幅に改善されており、カスケードが機能していることがわかる。

4.3 ダクト改良

最大冷凍能力については、kW 級となる 1.4 kW を得ることができたが、3 種類の磁気作業物質を充填した場合 (Case 2) に、カスケードの効果が出ていないこと、ユニット間でカスケードを構成した場合 (Case 3) には温度差が拡大したことから、V 字型ダクトでは、磁気作業物質の磁気熱量効果が十分に引き出せていない可能性が示唆された。

V 字型ダクト内では流速が一定でなく、そのため熱伝達が不十分な箇所が存在する可能性が考えられる。そこで、磁気作業物質充填ダクトを V 字形から直線形状とするダクト形状の見直しを行った。

改良の際には、ダクト材料についても見直した。V 字型ダクトでは材料にステンレスを用いていたが、ダクトの熱容量と、充填した磁気作業物質の熱容量がおおよそ 1:1 となっており、ダクトの熱容量が大きな冷却負荷になっている可能性がある。そこで、熱容量ならびに熱伝

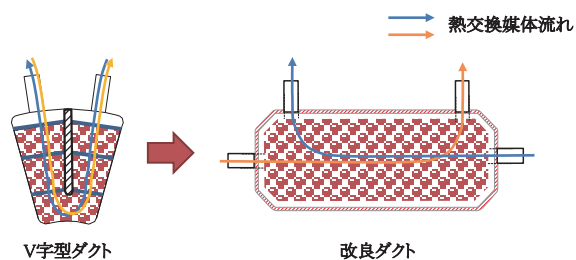


図 17 ダクトの改良

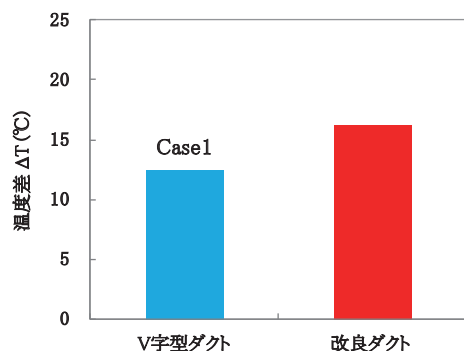


図 18 ダクト改良による温度差の改善

導率を低減するようなダクト材料としてMCナイロンを選定した。また、ダクト内に磁気作業物質が充填されていない部分（無効容積）をなくすことで、無効容積部で熱交換媒体が攪拌され、温度勾配が乱されるロスを出来る限り抑えるようにした。

改良ダクトの構成を図 17 に示す。改良ダクトに Gd のみを充填した場合を、Case 1 と比較した（図 18）。改良ダクトを用いた場合の最大温度差は 16.2°C であり、V 字ダクトを用いた場合よりも拡大し、改善傾向を確認することができた。ダクト形状を直線形状にしたこと、ダクトの熱容量ならびに熱伝導率を低減したことによる効果であると考えられる。

5. まとめ

磁気ヒートポンプ技術の、大型冷凍・冷房装置への適用可能性を検証するため、磁極表面の磁束密度が 1.5 T となる円環状ハルバツハ配列永久磁石を組み込み、磁気作業物質として Gd 系合金を搭載した磁気ヒートポンプを開発した。

開発した磁気ヒートポンプの最大冷凍能力は、国内最大となる 1.4kW を達成した。最大温度差は 21°C が得られ、磁気ヒートポンプ技術の大型冷凍・冷房装置への

適用可能性を示した。

冷凍能力の最大値は、動作温度が 23°C 程度で得られており、Gd のキュリー一点付近で冷凍能力が最大となることがわかった。

一方、ユニット A、ユニット B のダクトに 1 種類ずつの磁気作業物質を充填した Case 3 の温度差が、1 つのダクトに 3 種類の磁気作業物質を充填した場合（Case 2）よりも大きいことから、V 字型ダクトでは、磁気作業物質の磁気熱量効果が十分に引き出せていない可能性が示唆された。そこで、ダクトを V 字形状から直線形状とするダクト形状の見直しを行った。改良ダクトでは、最大温度差が 12.5°C \Rightarrow 16.2°C と改善され、ダクト形状や材質を見直した効果が認められた。

以上の結果をもとに、今後はシステムの小型、軽量化に向けた高サイクルシステムの開発に取り組む予定である。

本成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものである。

謝 辞

本研究は、中部電力株式会社 平野氏、サンデン株式会社 蓑氏、株式会社三徳 高田氏、東京工業大学 岡村先生、野口氏、神戸大学 川南先生、九州大学 和田先生にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) たとえば経済産業省ホームページ
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/ozone/law_furon_outline.html
- 2) 大塚泰一郎, 橋本巍洲: 磁気ヒートポンプ, 未踏加工技術協会, pp.63-65, 1984
- 3) Barclay, J. A., Steyert, W. A., "Active Magnetic Regenerator," US patent, 4,332,135, 1981.
- 4) S. Yu, Dan' kov, A. M. Tishin et al, "Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium," *PHYSICAL REVIEW B*, Vol.57 No.6 pp.3478-3490, 1998.
- 5) 脇耕一郎, 長嶋賢, 荒井有気, 水野克俊, 伊藤孝治, 秋山慎一, 池田雅史, 村上雅人: 磁気冷凍装置, 特開 2011-226735, 2011