

鉄道車両空調用の磁気冷凍機の開発

浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室
副主任研究員 宮崎 佳樹

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。特定フロンは、オゾン層保護の観点からモントリオール議定書により、生産の段階的な廃止が義務付けられている。温室効果ガスである代替フロン等についても京都議定書において排出削減対象ガスに指定され、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⁾。

一方で、昨今の電力事情や環境問題から、省エネルギー等の環境負荷低減に対する要求は一段と厳しくなっており、より環境影響の少ない空調システムの研究・開発が進められている。このような情勢の中、ノンフロンで高効率期待できる磁気冷凍が注目されている。

本研究は、鉄道車両用空調の省エネルギーを目的とし、磁気熱量効果を用いた kW 級磁気冷凍機の開発に取り組んでいる。磁気作業物質には室温領域で実績のあるガドリニウム系材料を用い、磁気冷凍システムの冷凍能力の評価を行った。

2. 磁気熱量効果と磁気冷凍サイクル

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」を利用して冷凍作用を生じさせる冷凍方式である²⁾。蒸気圧縮式冷凍では、断熱圧縮され排熱した作業流体は、断熱膨張過程で寒冷状態を生成する。低温となった作業流体はエントロピーを増加させながら吸熱をし、冷凍能力を発現する。一方、磁気冷凍で断熱圧縮に対応するのは断熱励磁であり、この過程で磁気系の温度は上昇する。断熱膨張に対応するのは断熱消磁であり、この過程で磁気系の温度が降下する。磁気冷凍システムでは、この磁気熱量効果による磁性体自身に生じる温度低下を効率よく外部へ取り出すことで冷凍を行う。

磁気冷凍において、圧縮膨張冷凍サイクルにおける「作動ガス」の役割を担うのは、「磁気作業物質」と呼ばれる磁性体である。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磁気系の温度変化に対し、外部に取り出し冷凍に利用することができる温度変化が小さくなる。従って、実際の冷凍に必要な低温を得るには、より強い磁場を加えることで、磁気熱量効果による磁性体の温度変化を大きくすることが必要である。

この冷凍技術は、気体冷凍では到達できなかった絶対温度 1 K 以下の非常に低い温度を作り出す特殊な技術として知られてきた。磁気冷凍技術のエアコン等への応用は提案されてきたが、室温では 1 回の磁場変化による磁性体の温度変化幅が小さいため、実際に応用することは困難であると考えられていた。

一方、永久磁石を用い、超電導磁石の数分の一という小さな磁場で大きな冷却温度を得るため

に考えられたのが、1981年に Barclay ら³⁾によって提案された、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。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スパンを得るもので、現在室温磁気冷凍を構成するために最も有効な方法とされている。AMR の動作原理を図 1 に示す。図 1(a)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。そのあと、(b)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(c)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(d)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う。AMR サイクルに用いる磁気作業物質充填槽を AMR ダクトと称する。

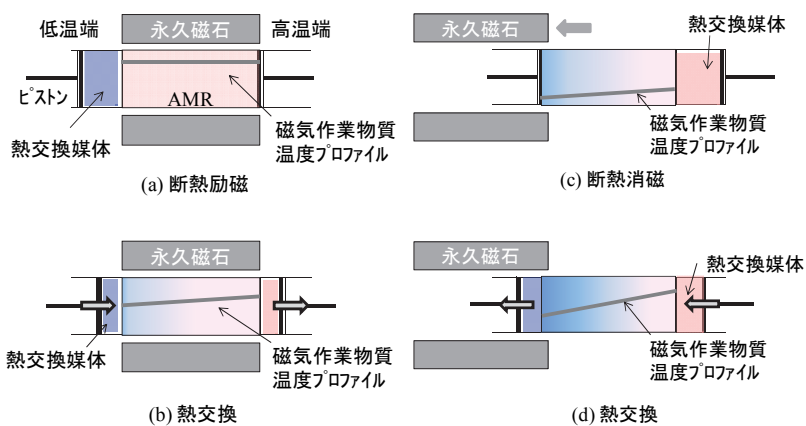


図 1 AMR サイクルの原理

室温磁気冷凍では、磁気作業物質として室温付近まで強磁性を示すガドリニウム (Gd) が用いられることが多い。図 2 に Gd の磁気エントロピー変化の温度依存性を示す。磁気エントロピー変化はキュリー点である 20°C 付近で最大となることがわかる⁴⁾。

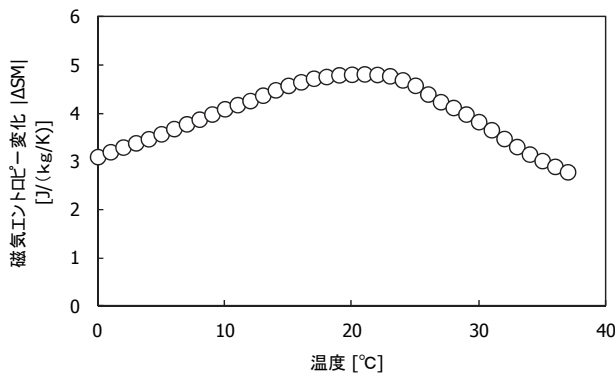


図 2 ガドリニウムの磁気エントロピー変化(0-2 T 印加)

3. 磁気冷凍試験装置

磁気作業物質に Gd を用いた場合の冷凍能力評価試験には、円環状ハルバツハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍試験装置^{5,6)}をベースとして、新たに開発した。ハルバツハ配列は永久磁石の特別な並べ方のことで、これにより磁石の磁場を集中し、強化することができる。磁気作業物質を充填する AMR ダクトは 12 組あり、図 3 に示すように全体でディスク形状を有する構造となっている。

図 4 に円環状ハルバツハ配列磁石を用いた磁気冷凍システムのフローを示す。ハルバツハ配列させた永久磁石は、軸方向に N 極と S 極を配置した主磁極磁石と、この主磁極磁石の周方向に着磁された補助磁石を備え、全体で円筒状をなしている。磁石配列をハルバツハ配列とすることで、特定の方向の磁場(この場合主磁極)を強めることができるため、効率的に磁気作業物質を励消磁することができる。2 つのハルバツハ配列永久磁石は磁気作業物質を充填したディスクを挟むように対向させて配置され、回転しながら特定の AMR ダクトに磁場を印加する。図 3 の励磁および消磁ダクトは、磁石の回転がちょうど図 4 の位置の場合について示している。熱交換媒体となる流体は初期温度 $T = T_{in}$ でポンプから消磁中の AMR ダクトへ移送され、熱交換を行うことで温度が降下する。熱交換により温度が低下した流体は、所定のヒーター熱負荷を与えられ $T = T_{out}$ となった後、励磁中の AMR ダクトへ移送される。そこで磁気作業物質の熱を奪ったあとは、チラーにより初期温度 $T = T_{in}$ に調整され、再びポンプにて消磁中の AMR ダクトへ移送される。各 AMR ダクトで上記の熱交換サイクルが実現できるよう、磁石の回転に合わせてロータリーバルブを切り替える。本磁気冷凍機は、上記のような永久磁石-磁気作業物質充填ダクトの磁気回路を 2 組有している。

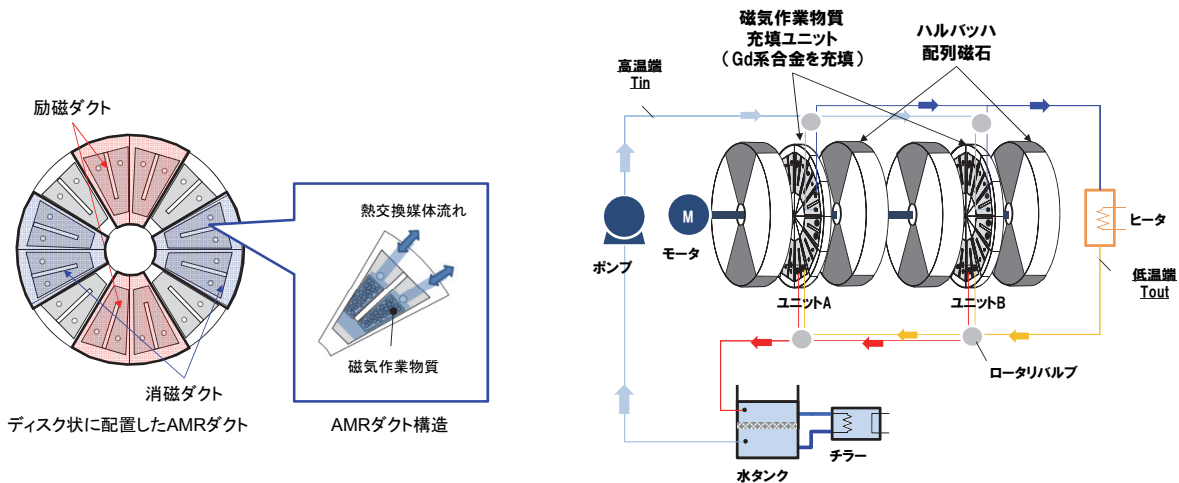


図 3 ディスク形状を有する AMR ダクト 図 4 ハルバツハ磁気回路を用いた磁気冷凍システム

4. 冷凍能力試験結果

開発した磁気冷凍機の冷凍能力を測定した。冷凍能力は図 4 に示すヒーターの出力とし、同図の T_{in} と T_{out} の差を温度スパンとした。図 5 に 2 組のダクトを並列運転した場合の、温度スパンゼロにおける冷凍能力を示す。磁石の回転数は 25 min^{-1} 、合計流量として 32 L/min の水を熱交換さ

せた条件において当初の目標(1 kW)を超える 1.4 kW が得られた。冷凍能力の最大値は、磁気エントロピー変化が最大となるキュリー点近傍となっていることがわかる。

図 6 には、開発した磁気冷凍システムの、磁性体単位質量あたりの冷凍能力を、国内でこれまでに開発された磁気冷凍機と比較して示す。本磁気冷凍機は磁性体単位質量あたりの冷凍能力が大きく、大型装置を想定した場合には装置がコンパクトにできるなどの利点を有する。

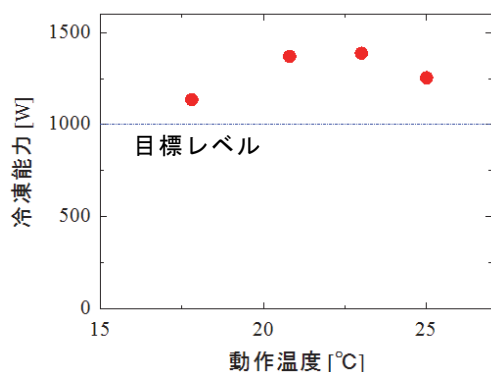


図 5 冷凍能力の高温端温度依存性

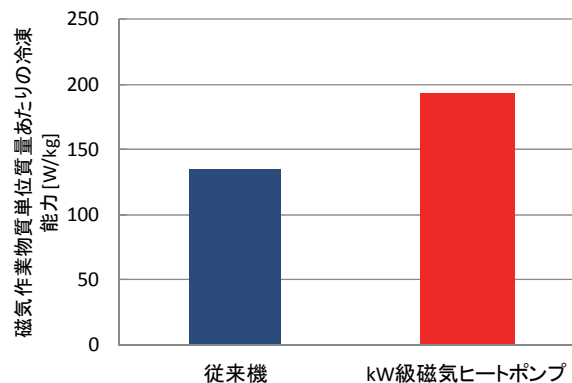


図 6 磁性体単位質量あたりの冷凍能力

5. まとめ

kW 級の冷凍能力を有する磁気冷凍機は、海外でもまだ数例試作されているのみであり、国内において開発事例はない。今回 kW 級の冷凍能力を実証するため、円環状ハルバツハ配列永久磁石を組み込み、磁性体としてガドリニウム合金を搭載した磁気冷凍機を開発した。室温における冷凍能力試験では、当初の目標(1 kW)を超える 1.4 kW を達成した。開発した磁気冷凍システムは、磁性体単位質量あたりの冷凍能力が大きく、装置のコンパクト化に有利である。今回の結果により、磁気熱量効果を用いた磁気冷凍技術の、大型冷凍・冷房装置への適用可能性を示すことができた。今後は、小型化・軽量化を進めるとともに、冷凍性能および効率の向上を目指す。

本研究開発は（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施された。

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, 磁気冷凍, 未踏, 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
- 6) 脇耕一郎, 宮崎佳樹, 荒井有気, 水野克俊, 長嶋賢, 川南剛: 円環状ハルバツハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍機の特長, 鉄道総研報告 Vol.26, No.5, pp.47-52, 2012