

TED Plaza

北海道における磁気冷凍技術に関する研究



平野 繁樹

北海道立総合研究機構 工業試験場  
 環境エネルギー部 エネルギー技術グループ 研究主査  
 hirano-shigeki@hro.or.jp

1. はじめに

磁場のエネルギーを温度差に変換する磁気冷凍技術は、温室効果ガスを使用しないことや、理論的に高い効率が得られることなどから、熱デバイスへの応用が可能な冷凍サイクルとして近年注目を集めている。北海道立総合研究機構・工業試験場では、前身の北海道立工業試験場時代の2008年頃から、磁気冷凍技術を用いたデバイスの研究開発に取り組んできた。これまで当場では、主に室温域において作動する機器の研究開発を行ってきたが、それらのうち実験的に検討を行った事例を中心に紹介する。

2. 磁気冷凍の原理と AMR

磁気冷凍は、物理現象である磁性体の磁気熱量効果を利用して冷凍サイクルを形成する冷凍方式である。磁性体の多くは磁場の変化により、エントロピー変化を生じる。これらのうち特にエントロピー変化により物質の温度変化が比較的大きく現れる物質を磁気作業物質と呼んでいる。このような磁場変化(励磁と消磁)による温度変化を、磁気熱量効果(Magneto Caloric Effect: MCE)といい、1917年に Weiss と Piccard により発見された(Anders, 2013)。この現象は、極低温の分野においては、現在でも超低温を得る方法として有効な手段となっている。定温環境下における励磁によるエントロピー変化(温度上昇)と、断熱状態における消磁による断熱温度変化(温度低下)の繰り返しサイクルにより、蒸気圧縮サイクルと類似の熱サイクルが構成される(図1)。

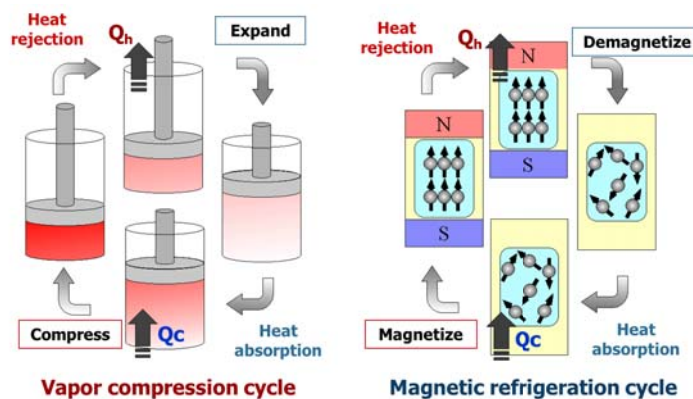


Fig. 1 Analogy of vapor compression cycle and magnetic refrigeration cycle

この磁気熱量効果を室温域で利用する場合、金属材料の格子振動によるエントロピーが妨げとなり、励磁によるエントロピー変化（温度上昇）と、消磁による温度変化（温度低下）はそれほど大きくは取れない。そこで、磁気熱量効果により発生した温度差を効果的に拡大する蓄熱再生サイクルが Barclay と Steyert によって考案された (Barclay and Steyert, 1982)。この蓄熱再生機構は Active Magnetic Regenerator (AMR) 方式と呼ばれ、磁気作業物質充填層と熱交換器を兼ねた AMR bed、磁石、ディスプレイサおよび熱移動媒体（水、空気など）により構成されている。AMR サイクルは図 2 に示す 4 つの行程により構成される。なお図中黒破線は行程動作前の温度分布、赤実線は行程動作後の温度分布を示す。(1) 励磁：磁気作業物質に励磁され、AMR bed 全体の温度が上昇する。(2) 流体駆動 (Cold blow)：ディスプレイサにより熱移動媒体を高温側へ移動させる。AMR bed 内にあった高温の熱移動媒体は高温側へと移送される一方、低温側からの熱移動媒体の流入により AMR bed 内の温度分布が変化する。(3) 消磁：磁気熱量効果により AMR bed 内の温度が低下する。AMR bed 内の温度分布を有した状態で全体的に温度が低下する。(4) 流体駆動 (Hot blow)：ディスプレイサにより熱移動媒体を低温側へ移動させる。AMR bed 内の低温の熱移動媒体は低温側へと移送される一方、高温側からの熱移動媒体の流入により AMR bed 内の温度分布が変化する。

この一連の 4 行程を 1 サイクルとすると、1 サイクル後には、AMR bed 内の温度分布は、低温側はサイクル開始時よりもやや低温となり、高温側はサイクル開始時よりもやや高温となる (図 2 中、4. Fluid flow (Hot end to cold end) の赤色実線)。この蓄熱再生サイクルを繰り返すことで温度差が拡大し、やがて AMR bed 内の温度分布はほぼ一定の状態となる。この AMR bed 内の温度分布は AMR bed を構成する材料の特性によって決まる。

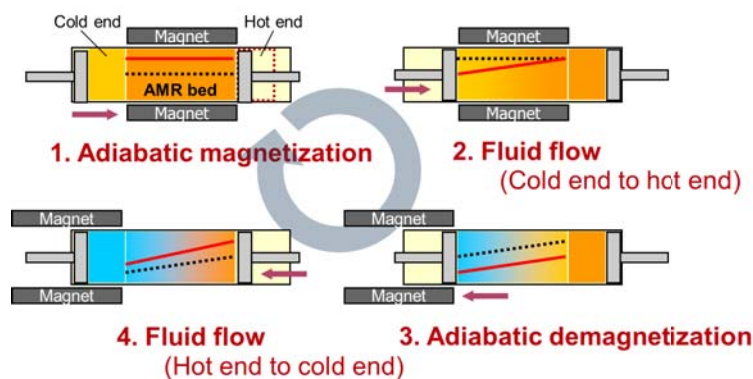


Fig. 2 Schematics of Active Magnetic Regeneration (AMR) system

### 3. 往復型磁気冷凍システム

2008 年頃より著者らは北海道大学との共同研究にて北海道立工業試験場（当時）による磁気冷凍の研究に着手した。先進的に室温域での磁気冷凍関連研究を行い、磁気冷凍に関する実験・解析により多くの知見を得られていた北海道大学工学研究科の川南剛助手（当時：現 神戸大学大学院 准教授 2017 年 1 月現在）の指導の下、室温域において空気を熱移動媒体とする往復型の実験装置を当场に構築・設置し実験的に検討を行った。当時、工業試験場には強力な永久磁石や制御システムなどは無く、空気配管とコンプレッサ以外は川南助手（当時）により北海道大学の装置を利用させて頂いた。熱移動媒体を空気とした実験は当场で行い、熱移動媒体を水とした実験ならびに解析は北海道大学にて行った。図 3 および 4 に使用した永久磁石とシステム概要図を示す (Kawanami et al., 2011)。これらの実験結果より流体の流動条件と励磁消磁の同期解析に関するデータが得られた。これらの結果は、北海道大学大学院工学研究科の修士論文、卒業論文となるとともに、国際学会等における研究発表などの成果へとつながった。その後、著者は、北海道大学から神戸大学へと移られた川南准教授（2017 年 1 月現在）の下、神戸大学において 3 ヶ月間、磁気冷凍に関する技術研修生として、引き続き磁気冷凍技術に関するご指導をいただきながら、新たな開発や研究を行った。

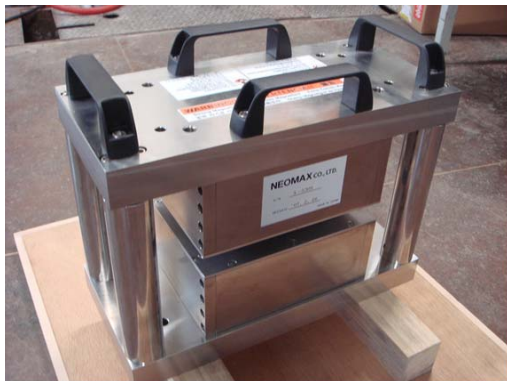


Fig. 3 Permanent magnetic circuit (2.0T)

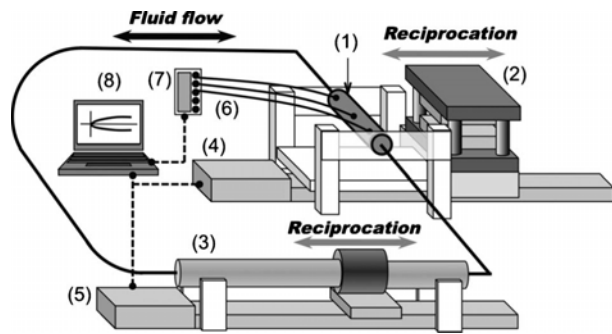


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus

#### 4. 回転型磁気ヒートポンプシステム

2009年にJSTシーズ発掘試験に採択され、著者らは回転型磁気ヒートポンプの研究開発を行った。回転型システムは往復型に比べ、励磁消磁のサイクルが簡便な機構で実現できるため、実機に近いシステムである。固定された永久磁石と、回転する磁気作業物質ディスクにより磁気熱量効果によって作動するヒートポンプとなっている。外観を図5に、システム概要を図6に示す。回転する磁気作業物質ディスクがロータリバルブとなっており、簡便な機構でAMRサイクルを実現するシステムとなっている。図7に装置の運転機序を示す(Hirano et al., 2015)。

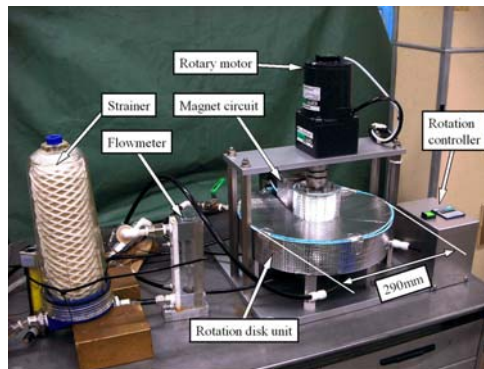


Fig. 5 Appearance of the rotary type magnetic heat pump system

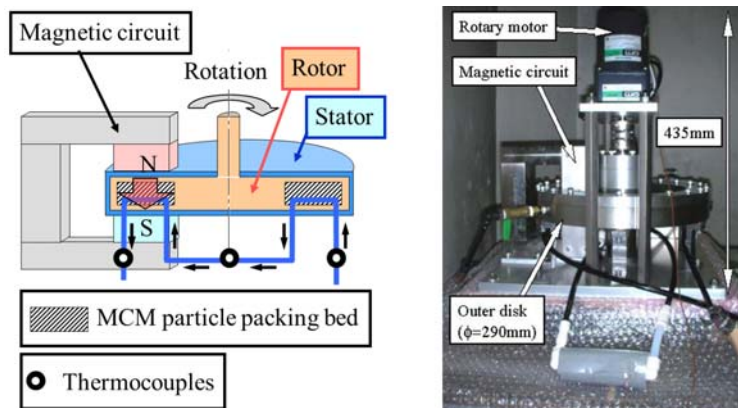


Fig. 6 Schematic and appearance of the rotary type magnetic heat pump system





Fig. 7 A general schedule of heat exchange in a rotation disk of apparatus

### 5. 寒冷地向けEV車載用磁気ヒートポンプ

2016年1月22日～24日に札幌モーターショーが札幌ドームにて開催され、北海道内企業等により寒冷地向けEV（電気自動車）が製作・展示された。この寒冷地EV向け次世代型空調システムとして磁気冷凍サイクルを用いたヒートポンプ（磁気ヒートポンプ）が併せて展示された（図8）。EVに限らず、車などの移動体にとって車内の空調は重要であるが、寒冷地向けEVにおいては、特に暖房が重要である。また、北海道など広域移動が多く充電ステーション間距離が長くなるであろう地域では、暖房の効率が充電池消費量に影響を与え、航続距離に差を生じることになる。モータに加えて補助的に小型の高効率エンジンを搭載し冷暖房や充電を行うレンジエクステンダー形式のEVもあるが、エネルギー源や経路が分散することや、純粋なZEV（排ガスゼロ車）とならないこと、部品点数が多くなることなどから、この小型EV車両に対しては磁気冷凍技術が採用された。この展示においては、プロトタイプということもありEV搭載型としたが、今後は強力な磁石を有する駆動モータなどと磁気冷凍技術を組み合わせた設計による組込式についても検討を行っていきたいと考えている。



Fig. 8 A prototype electric vehicle for cold region (left) and magnetic heat pump system on board (right)

## 6. 階層構造を有する磁気ヒートポンプの開発

2014年には神戸大学大学院 川南准教授が申請した「階層構造磁気蓄熱再生器を持つ磁気ヒートポンプの開発」が、科学技術振興機構（JST）による先端的低炭素化技術開発（ALCA）に採択され、著者が所属する北海道立総合研究機構は当該課題を担うグループの一つとして参画している。動作する温度帯を変えた磁気作業物質を選択的に配置することにより、励磁・消磁により効率的に温度差を発生させる階層構造を有するAMR機構を開発中である(図9)。キュリー温度( $T_c$ )は、強磁性体が常磁性を示す温度であり、最大の磁気熱量効果(MCE)を生じる温度とほぼ一致する。図9上側に示す従来の往復型AMRでは大きなMCEを示す温度帯(図中では $\Delta T_{ad}$ : 磁場変化前後の断熱温度変化)が1点( $T_{c0}$ )であり、AMR内の磁気作業物質(MCM)充填層に温度勾配が生じると性能が低下する。一方、図9下側に示す階層構造を持ったAMRでは、複数の温度帯( $T_{c1} \sim T_{c4}$ )において大きなMCEを示すため、MCM充填層に温度勾配が生じても性能低下が生じにくい。このような材料をAMR内に適切に設置し効率よく熱移動を行うための多孔質体の開発を、レーザ焼結金属粉末積層造形装置、いわゆる金属用3Dプリンタを用いて行っている。図10に装置および試作品の一例を示す。

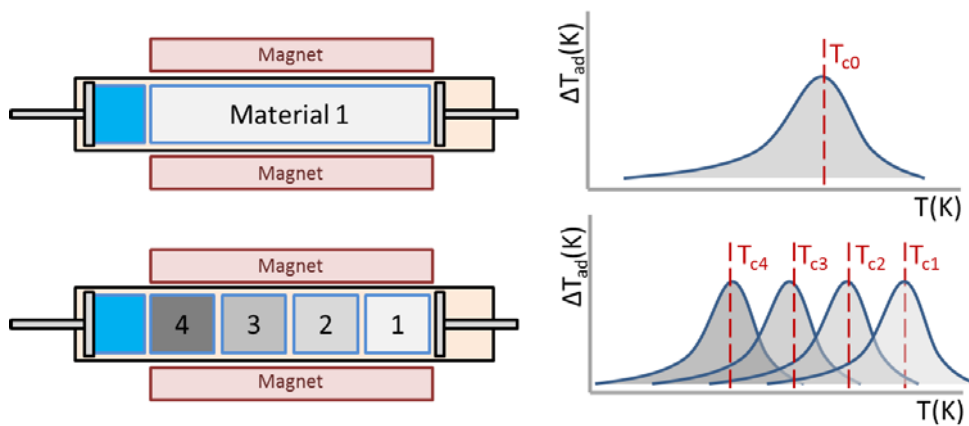


Fig. 9 A difference of MCM bed arrangement between conventional type (above) and cascaded type (below) in AMR



Fig. 10 A metal powder layering selective laser sintering machine (left:Lumex Avance-25 by Matsuura Machinery Corp.) and its product model of porous structure for AMR (right)

## 7. おわりに

磁場のエネルギーを温度差に変換する磁気冷凍技術を用いた研究開発について、北海道立総合研究機構工業試験場およびその前身の北海道立工業試験場における研究について実験的に検討を行ったものを中心に紹介した。磁気冷凍サイクルの基本動作を行う往復型による基礎的検討、発展型となる回転型デバイスの開発を経て、現行の階層構造を有する磁気ヒートポンプの開発へ至る。今後は、現在行っている階層構造を有するシステムに向けた、新たな粉体磁性材料を用いた積層造形手法を確立していくとともに、寒冷地向けのデバイス開発や小型化に向けた開発についても、あわせて進めていきたいと考えている。

## 謝 辞

磁気冷凍関連に関する研究においては、神戸大学大学院工学研究科、川南剛准教授（2017年1月現在）、ならびに北海道立総合研究機構工業試験場、製品技術部、戸羽篤也主査、鈴木逸人研究員（いずれも2017年1月現在）に多大なご協力を頂いた。また、本研究の一部は2014年からのJSTの先端的低炭素化技術開発（ALCA）による研究支援により、継続して行われている。これらのことに改めて深く感謝申し上げる。

## References

- (1) Anders, S., Who discovered the magnetocaloric effect?, *The European Physical Journal H*, 38 (4) (2013), pp. 507–517.
- (2) Barclay, J. A. and Steyert, W. A., Active Magnetic Regenerator, (1982), US patent 4, 332, 135.
- (3) Kawanami, T., Hirano, S., Ikegawa, M. and Fumoto, K., Cooling Characteristics of Regenerative Magnetic Refrigeration With Particle Packed Bed, *Journal of Heat Transfer*, 133(6), (2011), 060903.
- (4) Hirano, S., Kawanami, T., Toba, A. and Fumoto, K., Experimental Study on Thermal Characteristics of Rotational Type Magnetocaloric Device with Different Material Particle Bed Arrangements, *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration, Improving Quality of Life, Preserving the Earth, ICR2015*, (2015).