

円環状ハルバッハ配列磁気回路を用いた 室温磁気冷凍機の特性

脇 耕一郎* 宮崎 佳樹* 荒井 有気*
水野 克俊* 長嶋 賢* 川南 剛**

Performance of Room-temperature Magnetic Refrigerator Applying Ring Halbach-array Magnetic Circuit

Koichiro WAKI Yoshiki MIYAZAKI Yuuki ARAI
Katsutoshi MIZUNO Ken NAGASHIMA Tsuyoshi KAWANAMI

Coefficient of performance of railway vehicle's air-conditioners is lower than that of household air-conditioners due to boarding constraints. To save energy of railway vehicle's operation, magnetic refrigeration is being investigated instead of vapor-compression refrigeration for room-temperature control. Magnetic refrigeration is based on magnetocaloric effect that thermal absorption by magnetic material is caused when magnetic field surrounding it is removed. Since strong magnetic field enhances magnetocaloric effect and periodic variation of the magnetic field repeatedly causes the effect, a test machine of magnetic refrigeration was fabricated by applying ring Halbach-array magnet circuit and its rotation in this study.

キーワード：冷房装置，省エネルギー，磁気冷凍，強磁性体，磁気熱量効果，ハルバッハ配列

1. はじめに

鉄道車両用空調装置，特に冷房装置については，日本国内では1936年に特急「つばめ」の食堂車2両に試験的に導入されたのが最初である¹⁾。以来，気体の圧縮と膨張に伴う発熱と吸熱を基本原理とする蒸気圧縮式冷凍が鉄道車両用空調装置の根幹をなしてきた。一方，家庭用空調装置の主流も蒸気圧縮式冷凍方式であるが，家庭用に比べて鉄道車両用空調装置のCOP (Coefficient of Performance (成績係数)：冷房能力を入力仕事で除したものは，車両に搭載する際の制約条件(車両限界など)のために，低いものになっている^{2), 3)}。しかも，運行に伴う鉄道車両の電力消費に占める車両用空調装置の割合は，比較的大きい。そこで，鉄道車両の運行に関わる省エネルギーを図るため，現行の蒸気圧縮式冷凍に代わり得る冷房技術として，室温領域の磁気冷凍に取り組むこととした。

2. 磁気冷凍システムとその研究開発の歴史について

2.1 磁気熱量効果を利用する磁気冷凍システム

一般に普及している蒸気圧縮式冷凍システムは，フロ

ンなどの気体の圧縮・膨張作用に伴う発熱・吸熱を利用するものであるが，取り組むこととした磁気冷凍システムは，強磁性体の励磁(磁場の印加)・消磁(磁場の除去)に伴う発熱・吸熱(磁気熱量効果)を利用するものである(図1)⁴⁾。なお，蒸気圧縮式冷凍システムと同様に，磁気冷凍システムは逆運転によって暖房装置となり得る。

強磁性体は通常，固体であるので，電子スピンによる磁気の性質と共に，結晶格子の性質を併せ持つことになる。そこで，強磁性体が励磁される過程において，電子スピンの向きが揃って磁気のエントロピー(乱雑さ)は減少するが，その励磁が断熱的(外部と熱交換しない)であった場合には，全体のエントロピーが不変となるので，結晶格子のエントロピーは増加，即ち強磁性体の温度が上昇する。その後の過程において，外部と熱交換すれば強磁性体は発熱することになる。次に，強磁性体が

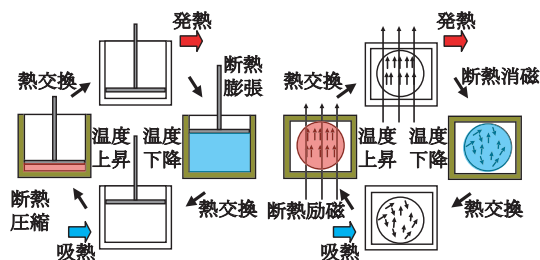


図1 蒸気圧縮式冷凍(左)と磁気冷凍(右)

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

消磁される過程において、電子スピンの向きが散らばって磁気のエントロピーは増加するが、その消磁が断熱的であった場合には、全体のエントロピーが不変となるので、結晶格子のエントロピーは減少、即ち強磁性体の温度が下降する。その後の過程において、外部と熱交換すれば強磁性体は吸熱することになる。なお、磁気冷凍システムに用いる強磁性体は磁気作業物質と呼ばれる。

磁気熱量効果は強い磁場の下で大きくなるが、熱量として相当なものであっても、磁気作業物質の熱容量が大きければ、温度変化は抑えられてしまう。実際、室温領域においては磁気作業物質の熱容量が大きいため、超電導磁石を用いるような強い磁場の下であっても、温度変化は数℃程度に過ぎない。このために従来の利用先は、液体ヘリウム温度以下のような、磁気作業物質の熱容量が十分小さい領域における冷却に限られていた。

2.2 能動的磁気熱量再生器 (AMR) の考案

近年、室温領域において磁気冷凍を利用するため、磁気作業物質を充填したAMR (Active Magnetic Regenerator: 能動的磁気熱量再生器) が考案された⁵⁾。AMRは、磁気作業物質の熱容量が大きいことを逆に、永久磁石のような弱い磁場によっても温度勾配が徐々に形成され、低温端において十分低い冷却温度を得ることができるようにした器具である。現在、AMRは、室温領域において磁気冷凍システムを構築するために最も有効とされている。

磁気作業物質は通常、固体であるので、外部との熱交換を媒体による熱の輸送に伴って果たす。従って、磁気作業物質を充填した箇所は、熱輸送媒体が時機に合わせて往復流動すれば、充填した物質の熱容量が大きいため、発熱・吸熱することができるので、Regenerator (熱量再生器) となる。更に、充填した物質が磁気作業物質であるため、磁気熱量効果によって自ら発熱・吸熱することができるので、能動的 (Active) で磁気に関わる (Magnetic) 熱量再生器 (Regenerator)、即ちAMRとなる。

図2に、AMRが用いられた室温領域における磁気冷凍システムの過程を示す。まず、図2 (A) に示す断熱励磁過程において、磁石の移動に伴う励磁によってAMR中の磁気作業物質の温度が一斉に上昇する。次に、図2 (B) に示す等磁場熱交換過程において、磁気作業物質よりも低い温度の熱輸送媒体が、低温端側から高温端側へAMR中の磁気作業物質から熱を奪いながら流動する。この過程において、磁気作業物質の低温端側の温度は、低温端から流入する熱輸送媒体と同程度にまで下降する。また、磁気作業物質の高温端側の温度は若干下降し、高温端から流出する熱輸送媒体の温度はこれと同程度になる。その次に、図2 (C) に示す断熱消磁過程において、磁石の移動に伴う消磁によってAMR中の磁気作業物質

の温度が一斉に下降する。最後に、図2 (D) に示す等磁場熱交換過程において、図2 (B) の過程のために磁気作業物質よりも高い温度の熱輸送媒体が、高温端側から低温端側へAMR中の磁気作業物質へ熱を与えながら流動する。この過程において、磁気作業物質の高温端側の温度は、高温端から流入する熱輸送媒体と同程度にまで上昇する。また、磁気作業物質の低温端側の温度は若干上昇し、低温端から流出する熱輸送媒体の温度はこれと同程度になる。この結果、AMR中の磁気作業物質に温度勾配が付く。

図2 (A) から図2 (D) までに示す4つの過程を繰り返すと、温度勾配は徐々に大きくなり、これに伴って高温端と低温端の温度差も大きくなる。十分な時間の経過後には、システム外部からの熱侵入との平衡に達するので、温度勾配や高温端と低温端の温度差は一定になる。

図3に、これら4つの過程を1つのサイクルとした、試験結果の例を示す。なお、強磁性・常磁性の転移点であるキュリー温度近傍において、磁気熱量効果は最大となるので、キュリー温度が約20℃である元素番号64番のガドリニウムを磁気作業物質に、また、熱輸送密度を大きくするため、単位体積当たりの熱容量が大きい水を熱輸送媒体に、各々用いている。

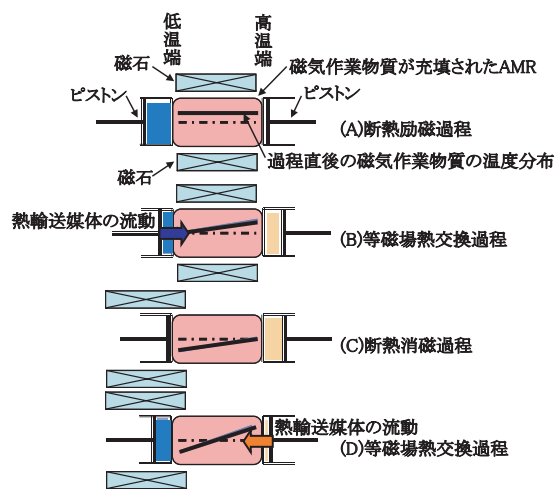


図2 AMRが用いられた室温領域磁気冷凍システムの過程

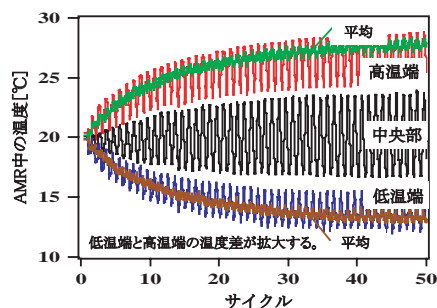


図3 図2の試験結果の例

2.3 回転移動型の考案

図2に示す磁気冷凍システムにおける励磁・消磁は、磁石の往復移動に伴って果たされている。往復移動型の磁気冷凍システムには簡易な構造という長所があるが、往復移動の度に磁気作業物質と磁石の間の吸引力に対して抗しなければならないという短所がある。この短所への対応として、位相差を設けた複数の磁気冷凍システムの連結した運転が考えられるが、その場合は簡易な構造という長所が失われる。そこで、これを解決する、回転移動型の磁気冷凍システムが考案された⁶⁾。その際、磁気作業物質を充填したAMRには流動する熱輸送媒体の配管の接続が必要なのに対し、永久磁石の場合には配線の接続が不要なので、回転移動の対象はAMRでなくて磁石となっている。また、磁場を常時活用するように、励磁過程のAMRと消磁過程のAMRが組となって同時に存在している。更に、磁石に磁極が複数あることへ対応するように、AMRの組が複数用意されている(図4)。

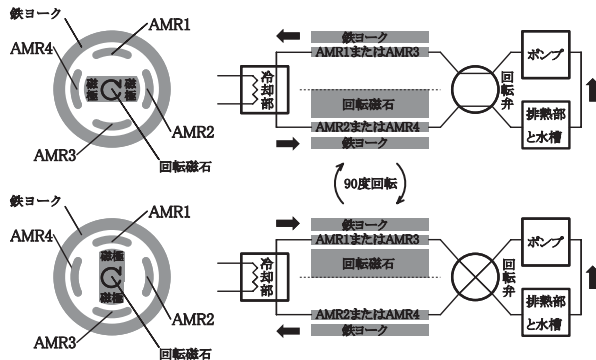


図4 回転移動型磁気冷凍システム

2.4 非往復流動配管方式の考案

図4に示す磁気冷凍システムにおいて、ピストンの代わりにポンプを用い、励磁過程のAMRと消磁過程のAMRの組を配管によって接続し、このAMRの組が弁の切り替えに伴って順番に動作するような構造としたことにより、磁気作業物質が充填されたAMRから冷却部を隔離することはできている。しかし、熱輸送媒体が配管を往復流動する構造でもあったため、配管の長さを運転条件と見合ったものに調整しなければ、低温になった熱輸送媒体が冷却部へ到達しないことは起こり得る。そこで、熱輸送媒体が配管を往復流動しないように、配管を往路用と復路用に各々用意した磁気冷凍システムが考案された⁷⁾。

3. 円環状ハルバツハ配列を用いた磁気冷凍システム

3.1 ハルバツハ配列

2.1節で述べたように、磁気熱量効果は強い磁場の下で大きくなるので、励磁に用いる磁場は可能な限り大き

く、また、消磁は可能な限り完全にした方が良い。ところで、永久磁石でも、粒子線加速器の分野で発展してきたハルバツハ配列を用いれば、1テスラ以上の磁束密度が達成可能である⁸⁾。

図5に、ハルバツハ配列の基本を示す。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、紙面に垂直に磁化した磁石と紙面に平行に磁化した磁石が、配列の前側において曲線(磁束線)のように磁場を強め合い、配列の後側において磁場を打ち消し合う。こうして、紙面に垂直に磁化した磁石が配列の前側において磁極となり、磁石単体の時よりも強い磁場の領域とほぼゼロの磁場の領域が、配列の前側において周期的に出現し、配列の後側においては磁場のほぼゼロの領域だけが出現するようにできる。

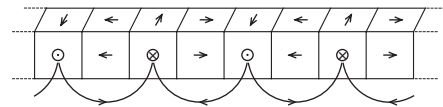


図5 ハルバツハ配列の基本

3.2 円環状ハルバツハ配列の提案

図5に示す配列では端部から磁束が漏れる。漏れた磁束は励磁に役立たないだけでなく、消磁の妨げになる恐れがある。そこで、この漏れを抑えるためにハルバツハ配列を円環状とし、更に紙面に垂直な軸の周りに180°回転したものと対にすることを提案した(図6)⁹⁾。このとき、磁極は向かい合わせている。対にしたことにより、一方の円環の磁極から湧き出た磁束は他方の円環の磁極に吸い込まれ、対に挟まれた空間に磁束の極めて集中した領域と磁束のほぼゼロの領域が、円周に沿って交互に出現するようにできる。この対を共通軸に嵌め込み、2.3節と同様に回転移動させれば、対に挟まれた空間において、比較的大きな磁場による徹底した励磁と消磁を繰り返すことができる。なお、2.4節の、配管を往路用と復路用に各々用意した磁気冷凍システムも、ハルバツハ配列を採用したが、円環状でないで磁束の漏れが懸念されていた。

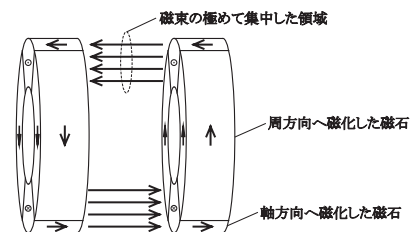


図6 円環状ハルバツハ配列の対

3.3 提案した円環状ハルバツハ配列の磁場解析

最大磁束密度の目標を1テスラ以上として、提案した円環状ハルバツハ配列の対の磁場解析を行った。解析ソフトは、積分要素法のELF/MAGICを用いた¹⁰⁾。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

図6に基づき、図7(左)に示すように、軸方向へ磁化した磁石(赤色)と周方向へ磁化した磁石(黄色)を組み合わせてモデルを作成した。このモデルにより、対の中央の空間磁束密度分布を評価したところ、図7(右)に示すように、軸方向へ磁化した磁石に挟まれた空間に磁束が集中して最大磁束密度0.98テスラ(赤色部分)となり、それ以外の空間はほぼゼロという結果を得た。

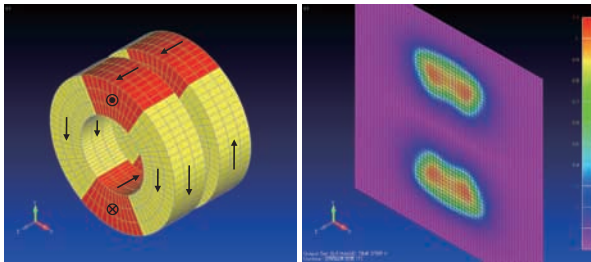


図7 図6のモデル(左)と対中央磁束密度分布(右)

円環状の意義を確認するため、図8(左)に示すように、周方向へ磁化した磁石(黄色)が図7から一部切り欠かれたモデルを作成した。そして、対の中央の空間磁束密度分布を評価したところ、図8(右)に示すように、漏れ磁束の発生により、軸方向へ磁化した磁石に挟まれた空間における磁束の集中が若干弱まり、最大磁束密度は0.92テスラ(橙色部分)に減少するという結果を得た。

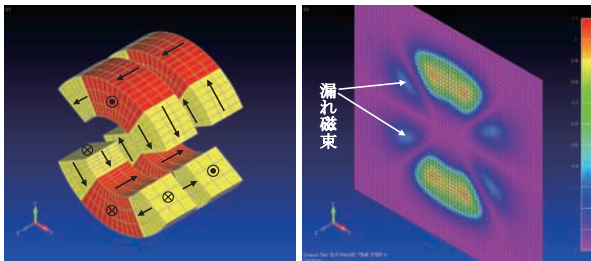


図8 一部切欠モデル(左)と対中央磁束密度分布(右)

そこで、図9(左)に示すように、磁気作業物質を充填したAMRが図7の対の中央に追加されたモデルを作成した。そして、AMRの節点磁束密度分布を評価したところ、図9(右)に示すように、磁気作業物質の透磁率により、軸方向へ磁化した磁石に挟まれた部分における磁束の集中が若干強まり、最大磁束密度は1.04テスラ(赤色部分)に増加するという結果を得た。

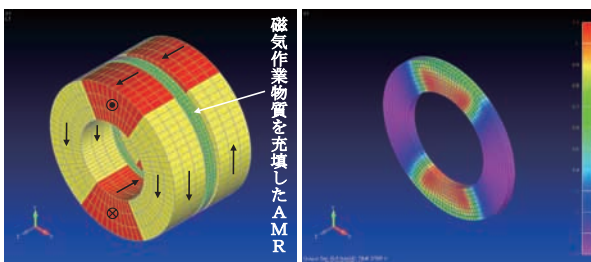


図9 AMR追加モデル(左)とAMR磁束密度分布(右)

なお、磁石の最大エネルギー積を 318kJ/m^3 として解析したが、 382kJ/m^3 のものも入手可能なことが判明した。これを用いれば、 $1.1(=(382/318)^{1/2})$ が、倍率として磁束密度の値に掛かることになるので、1テスラ以上という最大磁束密度の目標は達成可能との見通しが付いた。

3.4 磁気作業物質を充填したAMRの磁気的な設計

図9のような配置のままでは、円環状ハルバツハ配列の対が回転移動しても、AMRに充填した磁気作業物質が発熱と吸熱を繰り返すだけであり、磁気熱量を効率的に外部へ取り出すことができない。そこで、励磁と消磁の時機に合わせて熱輸送媒体が往復流動できるように配管を接続すればよいのであるが、形成される温度勾配を崩さないように、AMRは磁極の開き角度よりも細かく分割しておく必要がある。但し、細かく分割するほど、空間に占めるAMR容器の枠の割合が増えて磁気作業物質の割合が減るので、分割数には上限がある。また、分割したAMRにおいて、容器の枠が磁気的な切れ目となるため、回転移動の際に周方向へ磁気吸引力が発生し、そのトルクに対して抗しなければならない。図9(磁極の開き角度 60°)について、円環状ハルバツハ配列の対が回転移動し、また、AMRが24個に分割された場合の状況を図10に示し、ELF/MAGICを用いた解析として、その磁気吸引トルクの角度依存性を図11に示す。図11より、磁気吸引トルクの振幅は 0.5Nm 以下であることが分かる。なお、磁気作業物質はガドリニウムとしている。

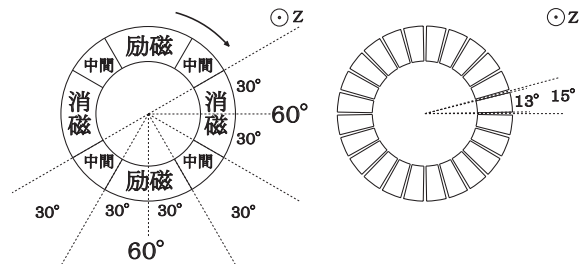


図10 図9の磁場の回転(左)と24個に分割したAMR(右)

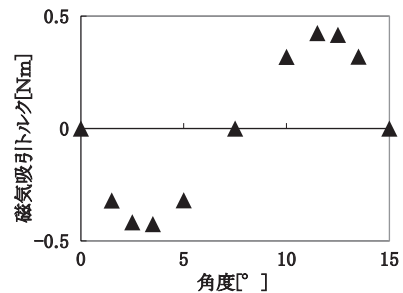


図11 磁気吸引トルクの角度依存性

3.5 室温磁気冷凍機の製作

3.3節および3.4節の結果を基に、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を製作した(図12)。

円環状ハルバツハ配列の対に、最大エネルギー積382kJ/m³の磁石を用いた。磁気作業物質はガドリニウムを用いた。磁気作業物質を充填したAMRは、24個に分割した後、隣接する2個を内径側において接続して1組として12組に集約した。なお、AMRの各組の外径側において、2.4節と同様に、高温端側から低温端側への往路用配管と、低温端側から高温端側への復路用配管を接続した(図13)。円環状ハルバツハ配列の対の回転移動と同期しているロータリー弁の切り替えに伴い、前者は消磁したAMRと供給経路を、後者は励磁したAMRと帰還経路を各々構成し、冷却部における熱輸送媒体の流動の向きを一定にできた(図14)。



図12 製作した室温磁気冷凍機

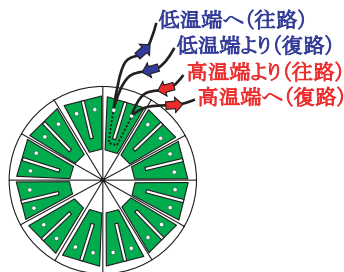


図13 12組に集約したAMRと往路用・復路用配管の接続

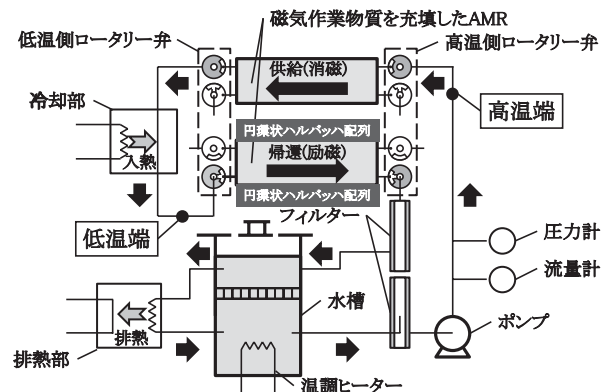


図14 製作した室温磁気冷凍機の経路構成

3.6 製作した室温磁気冷凍機の冷凍能力試験

製作した室温磁気冷凍機の冷凍能力試験を行った。冷

凍能力は、図14において、高温端の温度を20℃とし、低温端との温度差の設定が実現した時の、冷却部のヒーター電力と同定した。試験において、円環状ハルバツハ配列の対を回転させるモーターについて、回転数を制御し、最大静止トルクを計測した。また、熱輸送媒体(水)を流動させるポンプについて、流量を制御し、圧力を計測した。圧力計は大気圧との差圧を計測し、配管の終端は大気圧に曝されているので、圧力計の設置箇所から配管の終端までの圧力損失を計測していることになった。

低温端との温度差を0℃に設定した時、冷凍能力の試験結果は最大値90Wであった。これを磁気作業物質の質量0.75kgで除して得られた、磁気作業物質の単位質量当たりの冷凍能力120W/kgは、東京工業大学の岡村らの試験結果¹¹⁾の9割程度に達している(表1)。

表1 冷凍能力の比較

実施者	冷凍能力 [W]	磁気作業物質の質量 [kg]	磁気作業物質の単位質量当たりの冷凍能力 [W/kg]
鉄道総研他	90	0.75	120
東工大他 ¹¹⁾	540	4	135

1次元モデルを構築して伝熱解析を行い¹²⁾、試験結果を評価した。図15に、低温端との温度差を0℃に設定した時の、試験結果と解析結果を示す。これより、流量の増大した試験を行えば、冷凍能力の増強という結果を得る可能性のあることが分かる。

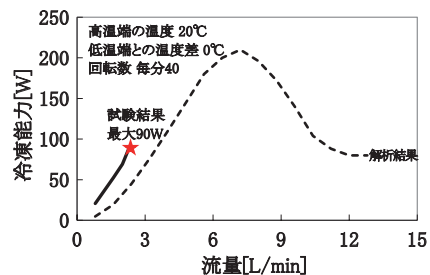


図15 試験結果と解析結果

計測の結果、磁気作業物質を充填したAMRの表面における最大磁束密度は1.1テスラ以上であり、3.3節を満足するものであった。しかし、円環状ハルバツハ配列の対を回転させるモーターの最大静止トルクは2.5Nm以上であり、3.4節を満足するものでなかった。3.4節において、AMR内の温度は一樣と仮定したが、高温端の低温端との温度差が0℃であっても、図14に示すような経路構成ならば、AMR内に温度勾配が存在することは十分考えられる。このことは、磁気作業物質の磁化の温度変化に基づく磁気吸引力が発生することを意味する。これ

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

より、トルクに関して AMR 内の温度分布に注意を払う必要のあることが分った。

4. 結論

磁気作業物質（強磁性体）の励磁（磁場の印加）と消磁（磁場の除去）に伴う発熱と吸熱という磁気熱量効果を大きくするように、最大磁束密度の目標を1テスラ以上として、円環状ハルバツハ配列の対を提案し、その磁場解析を行った上で、室温磁気冷凍機を製作した。

- (1) 試験結果は、磁気作業物質の単位質量当たりの冷凍能力において、先行しているグループの試験結果の9割程度に達することができた。
- (2) 伝熱解析により、流量の増大した試験を行えば、冷凍能力の増強という結果を得る可能性のあることが分かった。
- (3) 最大磁束密度は1.1テスラ以上を達成した。
- (4) トルクに関してAMR内の温度分布に注意を払う必要のあることが分った。

5. おわりに

今後は、流量の増大した試験が行えるように、熱輸送媒体を流動させるポンプの大型化に取り組む予定である。

謝辞

本件の遂行に当たり、蔵王精機株式会社技術顧問の伊藤孝治氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 望月旭：新幹線電車の空調装置の開発経緯（その1）、R & M, Vol.16, No.9, pp.42-46, 2008
- 2) 例えば、日立家電ホームページ：<http://kadenfan.hitachi.co.jp/ra/list/spec/spec06.html>
- 3) 小柳良文：最近の車両用空調装置－2階建て車両用AU729形空調装置の紹介－、三菱電機技報, Vol.78, No.12, pp.59-62, 2004
- 4) 大塚泰一郎, 橋本巍洲：磁気冷凍, 未踏, 1984
- 5) Barclay, J. A., Steyert, W. A., “Active Magnetic Regenerator,” US patent 4, 332, 135., 1981.
- 6) 高橋政彦, 栗山透, 伊藤孝治, 野村俊自, 平野直樹, 長屋重夫：永久磁石を用いた室温磁気冷凍機の開発（2）－回転型磁気冷凍機－, 第68回低温工学・超電導学会講演概要集, p.268, 2003
- 7) Zimm, C., Auringer, J., Boeder, A., Chell, J., Russek, S., and Sternberg, A., “Design and Initial Performance of a Magnetic Refrigerator with a Rotating Permanent Magnet,” presented at the Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, April 11-13, 2007.
- 8) Kumada, M., Fujisawa, T., Hirano, Y., Endo, M., Aoki, M., Kohda, T., Iwashita, Y., Bolshakova, I., and Holyaka, R., “Development of a Model 4 Tesla Dipole Magnet,” presented at the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001.
- 9) 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
- 10) メーカーのホームページ：<http://www.elf.co.jp/product/elfmagic.html>
- 11) Okamura, T., Rachi, R., Hirano, N., and Nagaya, S., “Improvement of 100W Class Room Temperature Magnetic Refrigerator,” presented at the Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, April 11-13, 2007.
- 12) 川南剛, 宮岡優, 脇耕一郎, 長嶋賢, 荒井有気, 水野克俊：連続回転型磁気冷凍システムの構築と性能予測, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.28, No.3, pp.213-223, 2011