

## 水素液化磁気冷凍機の研究

松本 宏一<sup>\*1,†</sup>, 沼澤 健則<sup>\*2</sup>

## Magnetic Refrigerator for Hydrogen Liquefaction

Koichi MATSUMOTO<sup>\*1,†</sup> and Takenori NUMAZAWA<sup>\*2</sup>

**Synopsis:** Hydrogen promises to be one of the most important energy sources in the near future. Liquid hydrogen can be utilized for infrastructure construction consisting of storage and transportation. The figure of merit (FOM) must be larger than 0.57 for a hydrogen liquefier when comparing the consuming energy of hydrogen liquefaction with high-pressure (70 MPa) hydrogen gas. Magnetic refrigeration using the magneto-caloric effect has the potential to realize not only a higher liquefaction efficiency >50%, but also to be environmentally friendly and cost effective. Our hydrogen magnetic refrigeration system consists of a Carnot cycle for the liquefaction stage and active magnetic regenerators (AMR) for the precooling stages. Various magnetic materials were studied for candidate refrigerants. We developed a highly efficient liquefaction stage with >80% liquefaction efficiency and confirmed the AMR effect for the precooling stage.

**Keywords:** magnetic refrigerator, liquid hydrogen, magneto-caloric effect

## 1. はじめに

化石燃料に代わる新しいクリーンエネルギー源として水素は近年注目を集めている。水素社会の実現の柱は水素エネルギーを有効なエネルギーに変換するデバイスとエネルギー媒体である水素自身の製造・輸送・貯蔵といったインフラ整備である。2014年において燃料電池車の発売が大手自動車会社から発表されるなど、水素エネルギー利用の進歩は著しい。もう一つの柱である水素の輸送・貯蔵の観点からは、液化天然ガス同様に液化水素の利用が有効な輸送・貯蔵方法の一つであると考えられる。また、ヘリウムという限られた資源を用いない 20 K 以上の超伝導技術における寒剤という観点からも液体水素製造技術は重要である。

水素液化に要する仕事が、例えば水素自動車での利用が考えられている 70 MPa の圧縮水素ガスを製造する場合に必要なエネルギーと同じになるためには、液化機の成績係数 (FOM) は 0.57 以上が必要になる<sup>1)</sup>。これに対し、

現在運転されている水素液化プラントは効率の良いプラントにおいても FOM は 0.4 程度である。

磁気冷凍機は磁性体に磁場変化を与えたときに吸熱・放熱するという磁気熱量効果を用いた冷凍方式であり、原理的には可逆サイクルが可能のため、高効率の実現が期待される。また、気体より 2 桁も高いエントロピー密度を持つ固体を冷媒とするために小型化が可能である、などの特徴を持つ。磁気冷凍水素液化システムの特長は次節で述べるが、例えば高压水素を扱うことがないため安全性が高い。

磁気冷凍サイクルとしては室温領域でよく使われる Active Magnetic Regenerator (AMR) を応用する研究が進められている<sup>2)</sup>。我々は、水素液化段にカルノーサイクル、予冷段に AMR サイクルを用いた磁気冷凍水素液化システムの研究を進めてきた。本稿では、各段における磁性体と冷凍システムの研究についてそれぞれ報告する。

## 2. 磁気冷凍水素液化システムの概要

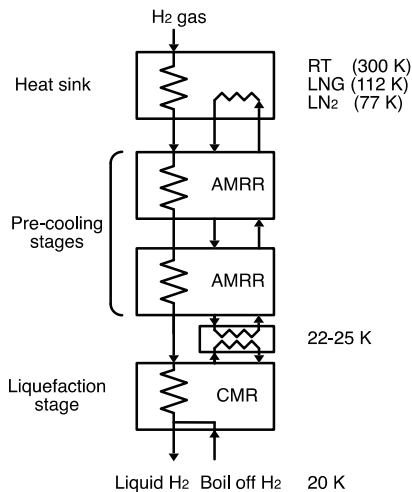
磁気冷凍水素液化システムの特長には以下のようなことが考えられる。J-T 膨張を用いないため高压の水素ガスを必要としないため安全性が高く、原料水素中の不純物にも強い。磁性体の高いエントロピー密度から小型化が期待される。また、本稿で解説するカルノーサイクル液化段冷凍機では水素ガスを磁性体表面で直接液化できるために、液化段のみを貯槽の蒸発水素の再凝縮機として利用することも容易である。また、液体水素を用いた超伝導マグネット

Received December 1, 2014

<sup>\*1</sup> 金沢大学 理工研究域  
〒920-1192 石川県金沢市角間町  
Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa  
920-1192, Japan

<sup>\*2</sup> 物質・材料研究機構  
〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13  
National Institute for Materials Science, 3-13 Sakura, Tsukuba,  
Ibaraki 305-0003, Japan

<sup>†</sup> E-mail: k.matsu@staff.kanazawa-u.ac.jp  
DOI: 10.2221/jcsj.50.66

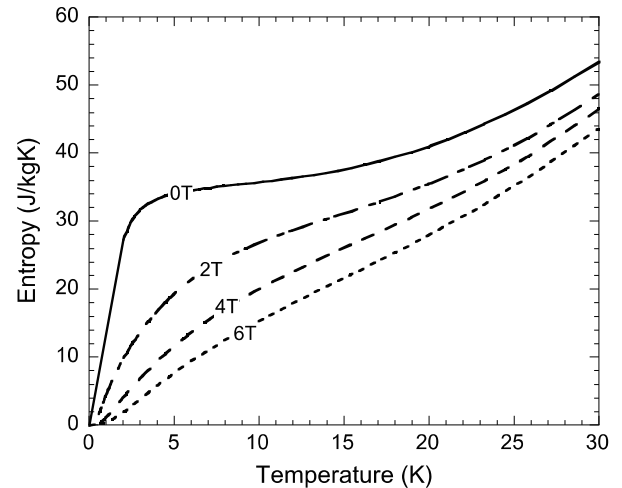


**Fig. 1** Hydrogen gas flow circuit of the hydrogen liquefaction cycle of magnetic refrigeration using a CMR and AMRRs.

が実現すれば、超伝導マグネットの強力な磁場も利用できるなどがある。

室温の水素ガスの液化を一段の磁気冷凍機で実現することは困難であり、いつかの磁気冷凍機をカスケード接続する必要がある。我々は開発の初段階として、磁気冷凍機の高温排熱温度を液体窒素温度 (77 K) あるいは液化天然ガス温度 (112 K) と設定した。液化天然ガスの寒冷の利用は日本において多くの液化天然ガスプラントが稼働している状況から現実的である。我々の熱解析によれば、液化天然ガスの寒冷利用により磁気冷凍システムの総合効率を大きく向上することができる<sup>3)</sup>。

開発を進めている冷凍システムの概要を **Fig. 1** に示す。冷凍システムはカルノーサイクル磁気冷凍機 (CMR=Carnot Magnetic Refrigerator) と蓄冷型冷凍サイクル冷凍機 (AMRR=Active Magnetic Regenerator Refrigerator) から構成される。原料ガスは、AMRR によって液化温度近くまで予冷された後、CMR によって液化される。水素液化では潜熱を除くために大きな冷凍能力が必要となること、これまでヘリウム液化磁気冷凍を開発した際に、磁性体表面で直接凝縮・液化させる方法で効率よく液化できることが分かったことなどから、液化段として数 K の温度差で動作する CMR を採用することにした。また、予冷段には大きな温度差で冷凍が可能になる AMR サイクルを採用することにした。サイクル解析から **Fig. 1** にある予冷段には実際には数段の冷凍機が必要になると考えられる<sup>4,6)</sup>。現在までのところ、CMR, AMR のそれぞれについて試験が行われ、両者として結合したシステムの試験は行われていない。本稿では各冷凍ステージについて以下に解説する。



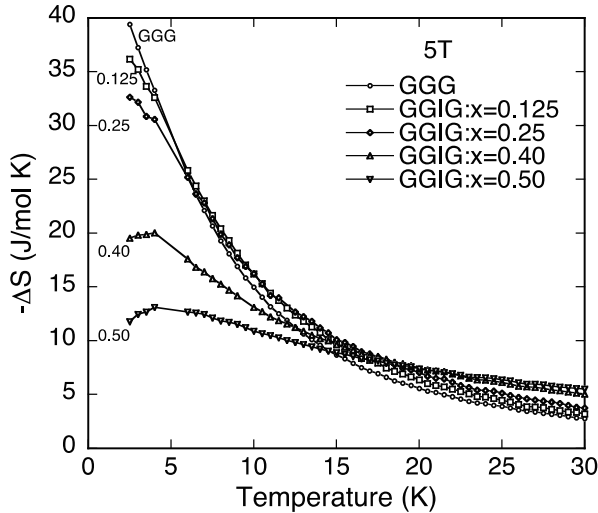
**Fig. 2** Entropy diagram of a 20% gadolinium (Gd) DGAG ( $\text{Dy}_{2.4}\text{Gd}_{0.6}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) polycrystal in 0, 2, 4 and 6 T magnetic fields.

### 3. 磁気作業物質

#### 3.1 ガーネット系磁性材料

水素を直接磁性体表面で凝縮・液化させる方法では磁性体は水素と反応しないことが必要である。このため、ガーネット系の磁性材料を開発した。15 K 以下の磁気冷凍ではガドリニウム・ガリウム・ガーネット (GGG= $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ) がよく使われる<sup>7)</sup>。希土類原子の磁気モーメントは希土類原子の種類で決まる Lande の g 因子 (g)、全角運動量子数 (J) とボーア磁子 ( $\mu_B$ ) の積で表される。ディスプロシウム・アルミニウム・ガーネット (DAG= $\text{Dy}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) では、ガーネット結晶の磁化容易軸方向の g 因子が Dy の場合 10.5 と Gd の g 因子 2 に対して大きくなるために、高温側でエントロピー変化を稼ぐことができる。その一方、磁性原子のエネルギー準位は結晶場の効果で縮退が解け、Dy の場合は基底状態がクラーマース二重項の二重縮退となるため、エントロピー変化の絶対値は大きくなる。そこで、Gd の全角運動量子数が  $J = 7/2$  と大きいことを利用して、磁場ゼロでのエントロピーを増大させ、20 K 領域でもエントロピー変化を大きくできるように Gd を加えた。Dy の 20% を Gd に置換した DGAG ( $\text{Dy}_{2.4}\text{Gd}_{0.6}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) のエントロピー線図を **Fig. 2** に示す<sup>8)</sup>。

ガーネット系の磁性材料の水素液化温度近傍での性能向上のもう一つの方法として、ガドリニウム鉄ガーネット (GGIG= $\text{Gd}_3(\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x)_5\text{O}_{12}$ ) の開発を行った<sup>9)</sup>。この系では鉄により相互作用が強くなり、高温側でのエントロピー変化が GGG より大きくなる (**Fig. 3**)。また、GGIG では磁場ゼロでのエントロピーが 20 K 領域で温度と共に比較的大きく増加するので、カルノーサイクルよりも AMR サイクルに向けた材料である。



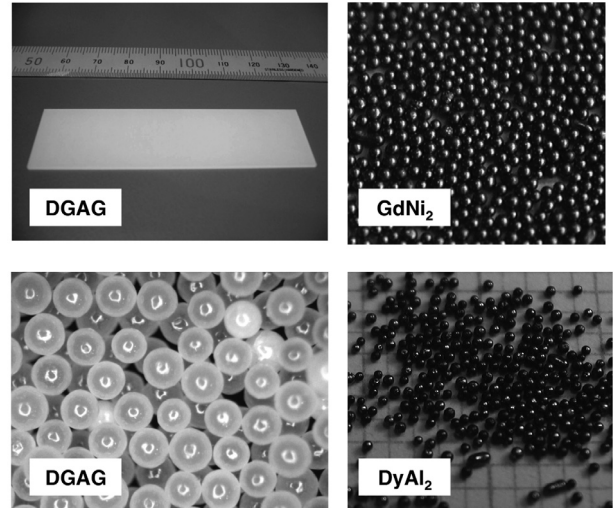
**Fig. 3** Magnetic entropy change  $\Delta S$  of GGG and GGIG ( $\text{Gd}_3(\text{Ga}_{1-x}\text{Fe}_x)_5\text{O}_{12}$ ) with  $x = 0.125, 0.25, 0.4$  and  $0.5$  induced by an external field of 5 T.  $\Delta S$  was calculated from magnetization data.

磁性体を磁気冷凍機に用いる実用材料とするために、板状や球状磁性体の開発を行った<sup>7-11)</sup>。液化段において磁性体表面で液化した水素が速やかに重力で液溜に落下するために厚み 1 mm の多結晶の板状磁性体を作成し、後で述べる冷凍試験に用いた。また、AMR サイクルで用いる場合の熱交換効率向上やサイクル運転中の磁性体の摩擦による粉体化を防止するために多結晶の球状化磁性体の作成も進めた。**Fig. 4** 左図にこれらの実用磁性体の写真を示す。

### 3.2 合金系磁性材料

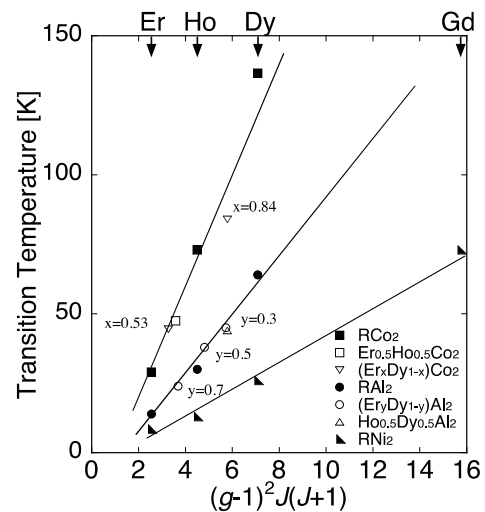
高温においては熱フォノンの効果がゼーマン相互作用に対して大きくなっていくので、強磁性体を用いることが必要になる。また、蓄冷型のサイクルにおいては広い温度範囲をカバーするために転移温度の異なる磁性体を揃える必要がある。これまでも数多くの磁性体がこの温度領域の冷媒として研究されてきた。

我々は  $\text{RT}_2$  系 ( $\text{R}=\text{重希土類}, \text{T}=\text{Al, Ni, Co}$ ) に着目して研究を進めた<sup>12,13)</sup>。この系で我々が作成した磁性体の相転移温度を **Fig. 5** に示す。RKKY (Ruderman, Kittel, Kasuya, Yoshida) 相互作用する希土類原子を起源とする磁気転移温度は  $g$  と  $J$  で表される de Gennes 因子 ( $(g-1)^2 J(J+1)$ ) でスケールされることが多い。 $\text{RT}_2$  の各 T 系列においても磁気転移温度は希土類元素の de Gennes 因子に対して線形に変化していることが分かる。さらに、希土類元素を混ぜることで純粋な希土類元素の転移温度の中間の磁気転移温度に制御することも可能であることが分かる。磁気測定から得られた  $\text{RT}_2$  系磁性体の磁気エントロピー変化を **Fig. 6** に示す。この図にあるように、 $\text{RAl}_2$  系列と  $\text{RNi}_2$  系列においては、エントロピー変化は転移温度でピークを持つ裾を引いた山型の温度依存性を示す。また、エントロピー変化のピーク値は磁場と共に増加する。これは磁気相転移が二次

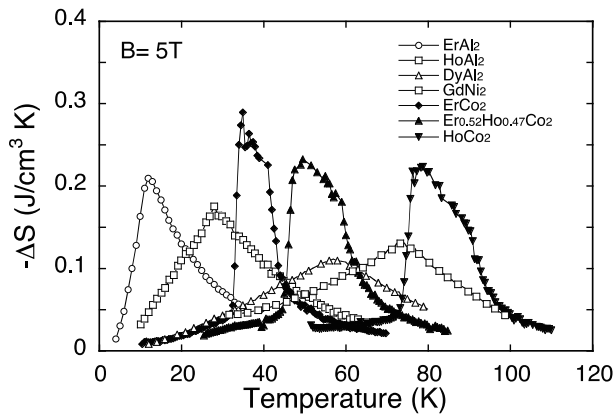


**Fig. 4** Photographs of a rectangular solid and spherical particles of GDAG (left panel). The thickness of the plate is 1 mm. The diameter of the DGAG particle is 0.4 mm. Spherical particles of  $\text{GdNi}_2$  and  $\text{DyAl}_2$  are also shown (right panel). These alloys have diameters between 0.35 and 0.5 mm.

転移である磁性体の典型的なエントロピー変化である。一方、 $\text{RCO}_2$  ( $\text{R}=\text{Dy, Ho, Er}$ ) では、Co の 3d 遍歴電子と希土類の局在した 4f 電子間の相互作用によって常磁性からフェリ磁性へ一次相転移する。**Fig. 6** に示されているように  $\text{RCO}_2$  系列のエントロピー変化は台形状の温度依存性を示している。印加する磁場の増加に対して、エントロピー変化は 3 T 程度で飽和するが、エントロピー変化の大きい温度範囲が高温側へ拡大する特徴がある。このようなエントロピー変化は一次相転移する磁性体でしばしば見られる。我々は希土類を混合した  $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{Co}_2$ ,  $\text{Er}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Co}_2$  において、一次相転移の特徴を保ったまま転移温度を制御できる



**Fig. 5** Magnetic phase transition temperatures for various  $\text{RT}_2$  ( $\text{T} = \text{Ni, Al, Co}$ ) compounds as a function of the de Gennes factor.



**Fig. 6** Entropy changes  $\Delta S$  of various  $RT_2$  materials in an external field of 5 T.  $\Delta S$  was obtained from magnetization measurements.

ことを明らかにした<sup>13)</sup>。

AMR サイクルで用いる金属系磁性体においても多結晶球状化磁性体は磁気冷凍の実用材料として重要である。Fig. 4 右図の写真に示すような  $RT_2$  系磁性体の球状化を行い、バルク体と同様なエントロピー特性を示すことを確認した<sup>10)</sup>。

#### 4. 磁気冷凍試験機

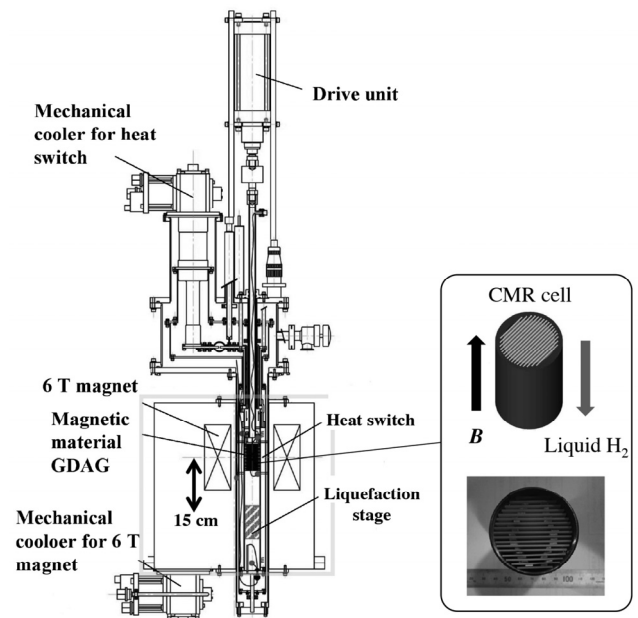
##### 4.1 液化段：カルノー磁気冷凍機 (CMR)

カルノーサイクルの動作はマグネットの励消磁とヒートスイッチを同期させた静止型磁気冷凍機や定常磁場を発生するマグネットから磁性体を出し入れすることで磁場変化を与える磁性体駆動型磁気冷凍機が考えられる。我々は実用に近い磁気冷凍機を考え、Fig. 7 に示すように GM 冷凍機で伝導冷却された最大磁場 6 T の超伝導マグネット（住友重機械工業製 HF6-100-VHT）によって定常磁場を発生し、アクチュエーターを用いた駆動によって磁性体に磁場変化を与えることでカルノー磁気冷凍機を構成した<sup>8,11,14)</sup>。ここで報告する冷凍試験は Fig. 1 のカルノー液化段のみの試験であり、CMR の排熱は GM 冷凍機によって吸熱された。

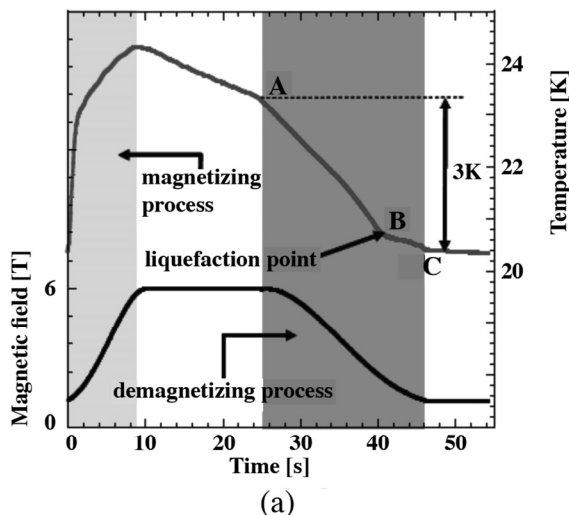
カルノーサイクルを運転する液化段の動作原理は、ヒートパイプを利用している。板状に加工された DGAG は Fig. 7 右側に示すように間隔 1 mm おきに鉛直に配置された。DGAG の質量は 0.28~0.36 kg であり、磁性体ホルダー中の磁性体充填率は 0.34 であった。消磁・液化過程では、磁性体は高磁場空間から低磁場空間へ駆動される。このとき、排熱機構と接触しなくなることで高温側ヒートスイッチがオフになり、低温領域に移動することで低温側ヒートスイッチがオンになる。DGAG は断熱消磁によって温度が低下し、水素液化温度以下に達すると磁性体表面で水素ガスが凝縮液化する。生成された液化水素は重力により液溜に

落下する。これは重力を利用した熱サイフォンと等価である。励磁・排熱過程は磁性体が高磁場空間へ駆動されることで高温側ヒートスイッチがオン状態になる。Fig. 7 の左上に示されている CMR の排熱を吸熱する GM 冷凍機の低温端から銅の熱リンクが超伝導マグネットの高磁場ボア空間にある排熱機構へ接続されている。DGAG の磁化熱は磁性体ホルダーと排熱機構の間にある水素ガスの熱伝導によって排熱された。今回の試験で用いられた超伝導マグネットはソレノイド型であるため磁場補償コイルは設置されておらず漏れ磁場が大きく、磁場中心から 15 cm の磁性体駆動によっても得られる最小磁場は 1 T であった。水素は常温ではオルト・パラ水素の比が 3:1 であるが、低温ではパラ水素となる。オルト・パラ変換を促進するために、我々は水酸化第二鉄を触媒として用いた。

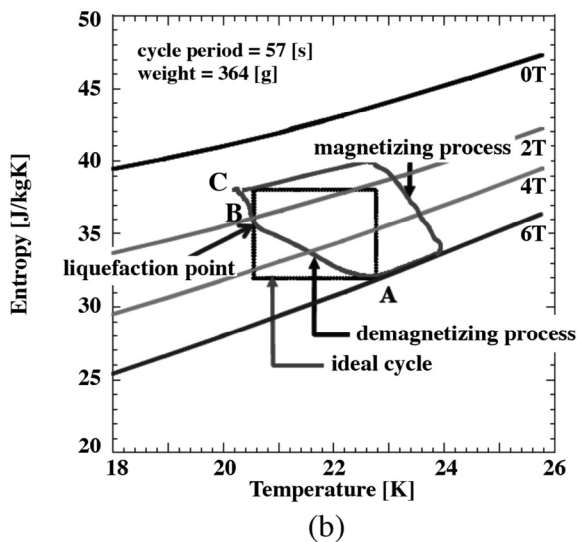
我々は今回の冷凍試験によって、磁性体駆動型の磁気冷凍機で初めて水素の液化に成功した。液化段カルノー磁気冷凍機の動作の一例を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) は磁性体の温度と磁場の時間変化を示している。励磁され温度の上昇した DGAG は排熱機構により 23.3 K 程度まで温度が低下した後、A 点から消磁過程を開始している。消磁により磁性体の温度が水素液化温度である B 点まで温度が下がると、磁性体表面では水素ガスの凝縮が開始し、さらに C 点の磁場まで消磁された。このようなサイクル運転の様子を DGAG のエントロピー線図上の軌跡として表したものを Fig. 8(b) に示す。現実のサイクルは長方形で示された理想カルノーサイクルとはなっていないことが分かる。



**Fig. 7** CMR test apparatus consisting of magnetic material, superconducting magnet, heat switches and drive unit. The structure of the CMR cell and flow of liquid hydrogen are shown.



(a)



(b)

**Fig. 8** Example of CMR operation. (a) Time variation of magnetic refrigerant (DGAG) temperature and magnetic field. Thinly and deeply hatched areas show magnetization (C-A) and demagnetization process (A-B-C), respectively. Liquefaction of hydrogen begins at point B. (b) Trace of the DGAG on the entropy temperature diagram.

以下、サイクルについて考察する。液化が行われている B 点から C 点までの変化を見ると、凝縮・液化過程において過冷却は小さいことが分かる。B 点から理想的に等温変化で液化が行われた場合に対して、B-C 点間の液化過程での吸熱量の割合は 90%以上である。他の条件での試験においても、凝縮過程においては理想過程の 90%程度の効率が得られ、磁性体表面での凝縮熱伝達が効率よく行われている。A 点から B 点までの消磁過程全体を見ると、液化温度に到達するまでの断熱過程において熱侵入が見られる。磁性体駆動力が小さいために磁場空間から磁性体を押し出す消磁過程に時間がかかっていることが熱侵入の一つである。それでも、いくつかの運転条件で得られた消磁過程全

体の吸熱量はカルノーサイクルでの吸熱量の 50~60%であった。励磁過程においては、磁性体には高磁場領域への引き込みの力が働くため、励磁時間は消磁より短くなっている。エントロピー・温度線図上の軌跡を見ると、励磁・排熱過程において DGAG の温度が大きく上昇しており、カルノーサイクルと大きく異なっていることが分かる。このため、この運転例では全体サイクルでの効率はカルノーサイクルの 10%に満たない。また、排熱に時間がかかっていることから冷凍出力も 1 W を切る程度となっている。この試験でも消磁過程の結果から解析すると 2.5 W 程度の冷凍出力は得られることが見積もられたので、今回の冷凍試験では消磁過程を高速化するための駆動力の向上や、排熱側ヒートスイッチのオン状態での熱伝達の向上が最重要であり、特に排熱機構に改良の余地があることが分かった。

#### 4.2 予冷段：AMR 冷凍機

Fig. 1 にある水素液化システムのうち予冷段を担う AMR サイクルを実現するためには、磁性体の磁場変化と熱交換流体の流れを独立に与える機構が必要である。我々は AMR サイクルを運転する磁気冷凍機の構築と試験をおこなった。磁性体駆動機構と熱交換流体を流す機構を両立させるためにカルノーサイクル磁気冷凍機より大きな磁場空間を持つ伝導冷却超伝導マグネット (JASTEC 製 JMTD-5T300HSP) を利用した AMR サイクル試験冷凍機を構築した<sup>11,14)</sup>。

我々は磁性体に  $\text{DyAl}_2$ ,  $\text{HoAl}_2$ , GGIG (Fe=50%) , DGAG の球状化磁性体や粉砕体を用いて 20 K 近傍から 60 K 程度の様々な温度領域条件で AMR サイクル試験を行った。熱交換流体にはヘリウムガス (圧力 0.25 MPa 程度) を用いた。その結果、冷凍出力ゼロの場合において蓄冷器両端に断熱消磁温度変化の数倍の温度差を発生させることができ、蓄冷型サイクルの効果を確認することができた。DGAG の球状試料を用いた試験においては、熱交換用ヘリウムガスの駆動に特別のディスプレイサーを用いることなく、AMR の磁性体容器が移動することによる受動的なガスの流動を用いた簡易的な試験であったが、それでも断熱消磁温度変化の 3 倍程度の温度差を AMR 両端に発生させた<sup>14)</sup>。また、熱交換ガス駆動のディスプレイサーを使用して  $\text{HoAl}_2$  を磁性体として用いた試験で得られた温度差は 13 K 程度で、断熱消磁温度変化の 7 倍程度の温度差を発生した<sup>11)</sup>。しかしながら、作製した AMR サイクル試験冷凍機の更なる性能向上には以下で述べる問題点があった。

今回試験した冷凍機には大きな二つの問題点があった。一つは使用した超伝導マグネットがソレノイド型であり、補償コイルを設置することができなかつたため、消磁過程での残留磁場が大きいという問題である。特に室温で 30 cm という大きな磁場空間を持つマグネットであったために、カルノー磁気冷凍機よりこの問題は重要で、マグネット中心の最大発生磁場 3 T から 20 cm の磁性体駆動によつ

て得られる最小磁場は 1.2 T であった。このため、磁性体自身の断熱消磁による温度変化は 1~2 K と小さくなった。もう一つの問題点は、効率的な熱交換流体の駆動であった。我々は熱交換流体にヘリウムガス（圧力 0.25 MPa 程度）を用いが、ガス駆動には温度の安定度を重視したため低温ディスプレイサーを用いた。冷凍試験では、この低温ディスプレイサーにトラブルがあり、ガス駆動能力が十分ではなかった。このためサイクルシミュレーション<sup>4,5,6</sup>によって予想された冷凍能力を発生させるために必要なガス流量を得られなかった。これ等を改善することにより予冷段磁気冷凍機を実現できると考えている。

## 5. まとめ

カルノー磁気冷凍機による液化段と AMR 磁気冷凍機による予冷段からなる水素液化磁気冷凍機の研究を進めた。磁性体表面での水素の凝縮液化に適したガーネット系の板状・球状の実用磁性材料を開発した。予冷段用に必要な磁気転移温度が制御可能な磁性体シリーズを研究し、そのエントロピー特性を明らかにすると共に、球状化磁性材料の開発も行った。液化段のカルノーサイクル磁気冷凍機と予冷段の AMR 磁気冷凍試験機をそれぞれ構築し、試験を行った。その結果、磁性体駆動型カルノー磁気冷凍機により水素液化に成功した。また、AMR 冷凍試験機については、20~60 K の温度領域で蓄冷サイクルの動作を確認した。

## 参 考 文 献

- 1) Required energy to compress the hydrogen gas at 70 MPa is about 15% of HHV, 21 MJ/kg. Minimum work for hydrogen liquefaction is 12 MJ/kg.
- 2) For example, S. Jeong: "AMR (Active Magnetic Regenerative) refrigeration for low temperature," *Cryogenics* **62** (2014) 193–201  
A. Rowe and A. Tura: "Cryogenic testing of an active magnetic regenerative refrigerator," *AIP Conf Proc.* **985** (2008) 292–298
- 3) T. Utaki, T. Nakagawa, T. Yamamoto, K. Kamiya and T. Numazawa: "Research of magnetic refrigeration cycle for hydrogen liquefaction," *Cryocooler* **14** (2007) 645
- 4) K. Matsumoto, T. Kondo, M. Ikeda and T. Numazawa: "Numerical analysis of active magnetic regenerators for hydrogen magnetic refrigeration between 20 and 77 K," *Cryogenics* **51** (2011) 353–357
- 5) Y. Zhu, J. Li, H. Hattori, K. Matsumoto, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and T. Numazawa: "Numerical simulation for hydrogen magnetic refrigeration," *AIP Conf. Proc.* **1434** (2012) 335–342
- 6) K. Matsumoto and T. Hashimoto: "Thermodynamic analysis of magnetically active regenerator from 30 to 70 K with a Brayton-like cycle," *Cryogenics* **30** (1990) 840–845

- 7) P. Wikus, E. Canavan, S. Trowbridge Heine, K. Matsumoto and T. Numazawa: "Magnetocaloric materials and the optimization of cooling power density," *Cryogenics* **62** (2014) 150–162
- 8) T. Numazawa, K. Kamiya, S. Yoshioka, H. Nakagome and K. Matsumoto: "Development of a magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction," *AIP Conf. Proc.* **985** (2008) 1183–1189
- 9) K. Matsumoto, A. Matsuzaki, K. Kamiya and T. Numazawa: "Magnetocaloric effect, specific heat and entropy of iron-substituted gadolinium gallium garnets  $Gd_3(Ga_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$ ," *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**(11) (2009) 113002-1
- 10) K. Matsumoto, K. Asamoto, Y. Nishimura, Y. Zhu, S. Abe and T. Numazawa: "Magnetocaloric effect of  $RM_2$  (R=rare earth, M=Ni, Al) intermetallic compounds made by centrifugal atomization process for magnetic refrigerator," *J. Phys. Conf. Series* **400** (2012) 052020
- 11) T. Numazawa, K. Kamiya, T. Utaki and K. Matsumoto: "Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction" *Cryogenics* **62** (2014) 185–192
- 12) T. Hashimoto, K. Matsumoto, T. Kurihara, T. Numazawa, A. Tomokiyo, H. Yayama, T. Goto, S. Todo and M. Sahashi: "Investigation on the possibility of the  $RA_2$  system as a refrigerant in an Ericsson type magnetic refrigerator," *Adv. Cryog. Eng. Mater.* **32** (1986) 279–286
- 13) Y. Zhu, K. Asamoto, Y. Nishimura, T. Kouen, S. Abe, K. Matsumoto and T. Numazawa: "Magnetocaloric Effect of  $(Er_xR_{1-x})Co_2$  (R = Ho, Dy) for Magnetic Refrigeration between 20 and 80 K," *Cryogenics* **51** (2011) 494–498
- 14) K. Matsumoto, T. Kondo, S. Yoshioka, K. Kamiya and T. Numazawa: "Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction," *J. Phys. Conf. Series* **150** (2009) 0120280

松本 宏一 1988 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程（エネルギー科学専攻）修了。1989 年東京工業大学理学部助手。1999 年金沢大学理学部助教授。2009 年同大学理工研究域教授。低温物理学、低温工学の研究に従事。低温工学・超電導学会、日本物理学会会員。工学博士。



沼澤 健則 1985 年東京工業大学大学院総合理工学研究科（エネルギー科学専攻）博士課程修了。1986 年科学技術庁金属材料技術研究所研究官。2001 年物質・材料研究機構強磁場ステーション主幹研究員、現在 環境・エネルギー材料部門主席研究員。低温工学、磁気冷凍に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。