

テーマ解説

能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMRR) による水素液化

神谷 宏治^{*1, †}, 沼澤 健則^{*1}, 松本 宏一^{*2}, 増山 新二^{*3}, 齋藤 明子^{*1},
竹屋 浩幸^{*1}, 夏目 恭平^{*1}, 白井 毅^{*1}, 内田 公^{*1}

Hydrogen Liquefaction by Active Magnetic Regenerative Refrigeration

Koji KAMIYA^{*1, †}, Takenori NUMAZAWA^{*1}, Koichi MATSUMOTO^{*2}, Shinji MASUYAMA^{*3}, Akiko T. SAITO^{*1},
Hiroyuki TAKEYA^{*1}, Kyohei NATSUME^{*1}, Tsuyoshi SHIRAI^{*1} and Akira UCHIDA^{*1}

Synopsis: The article summarizes the research and development of magnetic refrigeration for hydrogen liquefaction, and the Active Magnetic Regenerative Refrigeration (AMRR) developed by National Institute for Materials Science (NIMS). The NIMS-AMR consists of optimized AMR beds, a superconducting solenoid with correction coils, and a dedicated liquid hydrogen vessel with a liquid level sensor. This article also reports the first successful demonstration of hydrogen liquefaction with the AMRR.

Keywords: Active Magnetic Regenerative Refrigeration, hydrogen liquefaction, magnetic refrigeration, superconducting solenoid

1. はじめに

断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigerator: ADP) として 1 K 以下の超低温の発生に利用されてきた磁気冷凍は¹⁻³⁾, カルノーサイクルに基づくため, ヘリウムなどの極低温ガスの高効率液化という応用に期待が高まっている。また能動的蓄冷式磁気冷凍 (Active Magnetic Regenerative Refrigeration: AMRR。以降 AMR と呼ぶ) サイクルの登場により, 磁気冷凍は室温など高い温度域にも適用可能になってきた。本テーマ解説ではカルノー式や AMR など, これまでの磁気冷凍による水素液化の研究を紹介したのち, NIMS で開発された水素液化用 AMR 装置とそれを用いた水素液化実験の結果を紹介する。

2. 水素液化

2.1 気体式冷凍機による水素液化

現在水素は主に気体式冷凍機によって液化されている⁴⁾。気体式冷凍機は Fig. 1 に示すように圧縮機, 膨張タービン, そして JT 弁で構成されたクロードサイクルが多く用いられるが, 5 ton/day クラスの液化機の液化効率 (最小液化エネルギー / 実際の投入エネルギー) で 25 % 程度が上限といわれている⁵⁾。IDEALHY など液化効率を大きく向上する野心的なアイデアも存在するが, プロセスが極めて複雑になるなどから, 現時点では概念設計の段階である^{6,7)}。

2.2 磁気冷凍

液化効率を大きく向上させる手段の一つとして磁気熱量効果を利用した磁気冷凍がある。磁気冷凍の原理を Fig. 2

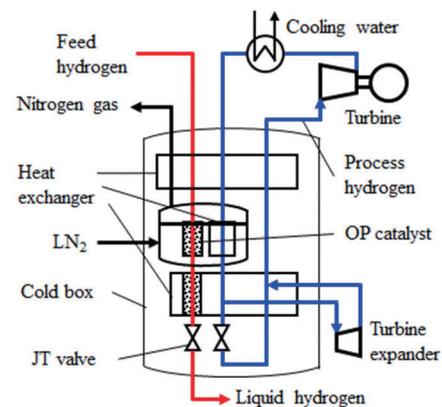


Fig. 1 Hydrogen liquefaction process by Claude cycle⁵⁾.

Received October 30, 2022

^{*1} 物質・材料研究機構

〒 305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

NIMS, 3-13 Sakura, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0003, Japan

^{*2} 金沢大学理工研究域数物科学系

〒 920-1192 石川県金沢市角間町

Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan

^{*3} 大島商船高等専門学校

〒 742-2193 山口県大島郡周防大島町大字小松 1091-1

NIT, Oshima College, 1091-1 Komatsu, Suo-Oshima-cho, Oshimagun, Yamaguchi 742-2193, Japan

[†] E-mail: kamiya.koji@nims.go.jp

DOI: 10.2221/jcsj.58.63

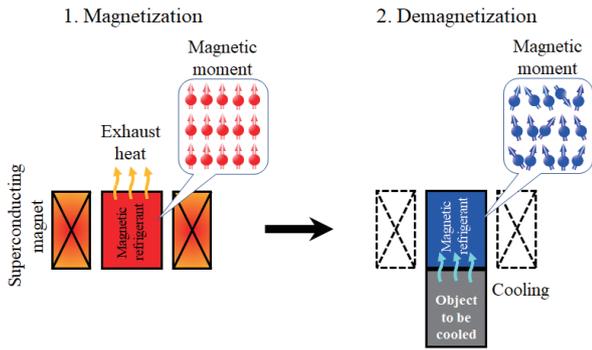


Fig. 2 Principal of magnetic refrigeration.

に示す。磁気熱量効果を呈する磁気作業物質に磁場を印加（励磁）すると原子の磁気モーメントが整列し発熱する。逆に磁気作業物質に印加した磁場を取り除く（消磁）と磁気モーメントが乱雑化し吸熱、つまり冷却する。このとき磁気作業物質に接触している被冷却物が伝熱で冷却する。

磁気冷凍における励磁は気体冷凍機でいえば圧縮に相当し、消磁は膨張に相当する。気体冷凍機の冷凍能力は、主に気体の圧縮比で決まるが、磁気冷凍では励磁によるエントロピー変化量が圧縮比に相当する。磁気冷凍機の冷凍能力の向上は、できる限り大きなエントロピー変化を示す磁気作業物質を使用すること、もしくはできる限り強力なマグネットを使用して大きな磁場変化を利用することで達成される。物質によりエントロピー変化が最大になる温度が異なることから、冷凍機的设计温度に合わせて磁気作業物質を選択する⁸⁻¹⁴⁾。水素液化温度付近でも HoAl_2 , ErCo_2 , $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$, $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ などいくつかの磁気作業物質が存在する。

3. 水素液化磁気冷凍

3.1 磁気冷凍の分類

Fig. 3 に示すように磁気冷凍は主に断熱消磁冷凍 (ADR), カルノー式磁気冷凍 (CMR), そして能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMR) の3種類に分類され、冷却対象によって方式が異なる。ADR は一般に 1 K 以下の超低温が発生可能で、センサー冷却等に用いられる。CMR は次章で紹介するように、ADR のもつ高効率性を最大限利用してヘリウムや水素ガスの冷却液化に利用されてきた。3 番目の AMR は本稿でも後

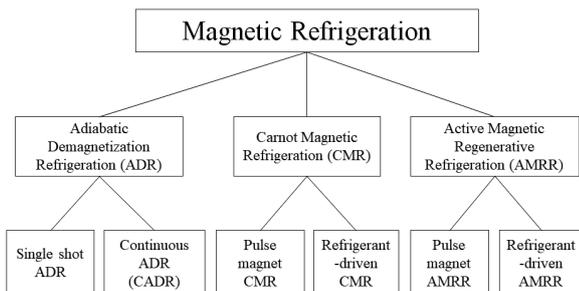


Fig. 3 Classification of magnetic refrigeration.

述するように実用性の高い磁気冷凍方式である。

3.2 CMR による水素液化

水素をはじめとする極低温ガスの液化は 1984 年沼澤らの CMR によるヘリウムの液化に始まる^{15,16)}。沼澤らは固定した超電導磁石の電流変化により磁場変動を発生させるパルスマグネット式 CMR によりヘリウムの液化に成功している。また 2000 年には大平らが同じパルスマグネット式 CMR で水素の液化に成功している¹⁷⁾。

一方、パルスマグネット式では、超電導磁石の交流損失による発熱が課題となっていた。これを回避する方法として、超電導磁石の電流ではなく、磁気作業物質を移動することで磁場変動を発生する磁性体駆動式 CMR が 2007 年、神谷と沼澤らによって開発された^{18,19)}。Fig. 4 は磁性体駆動式 CMR の概略図である。磁性体駆動式 CMR は 6 T の超電導磁石と磁気作業物質、熱スイッチで構成される。水素ガスは磁気作業物質と同じ容器に封入されており、サーモサイフォン方式で液化サイクルを実現する。磁気作業物質には、水素脆化に強い酸化物系の磁気作業物質 Dysprosium Gadolinium Aluminum Garnet (DGAG) を開発した。磁性体駆動式 CMR はパルスマグネット式とは異なり、排熱用の熱スイッチは機械式ではなく、ガスギャップ式を採用し磁気作業物質がマグネット中心位置に達したときに熱スイッチが ON となる位置に設置した。液化効率を向上するため、Fig. 4 のように複数の DGAG プレートを一時間隔で配置した。Fig. 5 に実験結果を示す。消磁過程において水素ガスが液化し、DGAG の温度変化の傾きに不連続点がみられる。実験の結果消磁過程での液化効率は最大 60 %、同装置による熱サイクル効率として 39 % が報告されている。

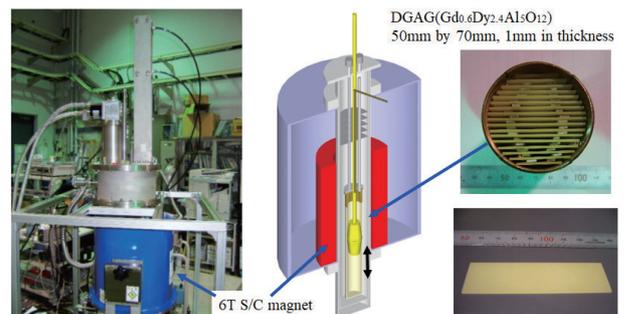


Fig. 4 Picture (left) and cross section view (middle) of CMR.

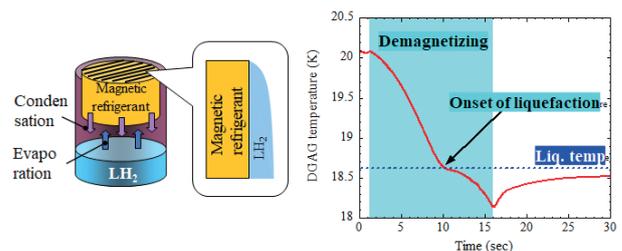


Fig. 5 Liquefaction principal and the experimental result of hydrogen liquefaction by CMR.

3.3 AMR サイクル

カルノー式磁気冷凍の理論効率は高いが、動作温度範囲が5 K程度と狭いことから用途が限定される。水素をより高温から冷却し液化するには、動作温度の拡大が必要である。これを解決するため Barclay らは、磁気作業物質がもつ磁気熱量効果に加え、磁気作業物質自体の蓄冷・蓄熱する機能を利用し、動作温度範囲を広げる能動的蓄冷式磁気冷凍 (AMRR) を提唱した²⁰⁾。Fig. 6 に水素液化用 AMR の冷凍サイクルを示す。

3.4 パルスマグネット式 AMR

CMR 同様 AMR にもパルスマグネット式と磁性体駆動式の2種類が存在する。水素液化を目的としたパルスマグネット式 AMR は韓国の Kim らによって開発された^{21,22)}。キムらの AMR に用いる超電導磁石は4.2 Kの液体ヘリウムにより浸漬冷却され、AC 運転によって磁場を励消磁する。また熱交換ガスはディスプレイサーで往復流を発生することが理想だが、Kim らの AMR では簡単のため、1つの AMR のみを使用して流量は1方向から高压で供給する設計を採用している。熱交換ガスは液体窒素で予冷されたのち AMR に供給され、AMR の二次側に設けられたガスのバッファ空間とさらにその下流のオリフィスバルブにより流量を調整する。実験の結果、77 K から 24 K までの冷却に成功した。

3.5 磁性体駆動式 AMR

2008 年松本、沼澤らは、パルスマグネット式 CMR の改良により磁性体駆動式 AMR を開発した²³⁾。松本らは Fig. 5 の磁性体駆動式 CMR 装置の設計を最大限生かし、簡易的な AMR サイクルの実現に成功した (Fig. 7)。CMR と最も大きく異なるのは、AMR サイクルは蓄冷効果による温度勾配を獲得するためプレートではなく球状粒子に成形した磁気作業物質を用いることである。DGAG を0.4 mmの球状粒子に成形して行った実験の結果、簡易 AMR にもかかわらず20 K付近において DGAG の断熱消磁のみで得られる

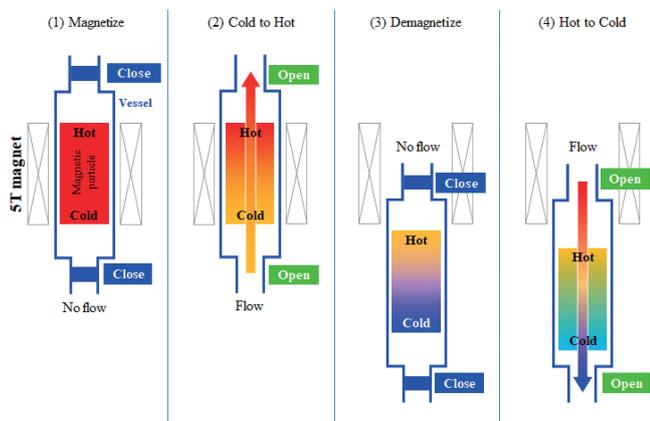


Fig. 6 AMR cycle consisted of the following four processes: (1) Demagnetization, (2) Gas flow from the hot temperature end to the cold temperature end, (3) Magnetization, and (4) Gas flow from the cold end to the hot end.

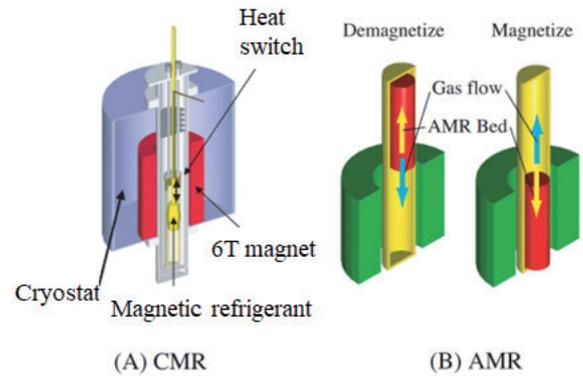


Fig. 7 Cross sectional view of CMR and AMR.

温度変化の2倍の温度変化を得ることに成功した。

2015年には米国 Pacific Northwest 国立研究所の Holladay と Barclay らにより、磁性体駆動式 AMR により室温から水素液化温度まで冷却するプロジェクトが開始した²⁴⁻²⁶⁾。Holladay らの AMR は2つのステージで構成され、ステージ1では280 K から 120 K までを、ステージ2では120 K から液体水素温度までを冷却する設計で、現時点でメタンの液化に成功している。

また2021年、NIMS で磁性体駆動式 AMR が開発され、同方式で初めて水素液化に成功し、現在でも開発が継続している。以下詳細を述べる。

4. 磁性体駆動式 AMR による水素液化

2018年 NIMS において JST 未来社会創造事業大規模プロジェクト型「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」がスタートした。本プロジェクトでは磁性体駆動式の AMR による水素液化用磁気冷凍機の開発が進んでいる²⁷⁾。本プロジェクトの AMR は、磁気作業物質を充填する AMR ベッド、超電導ソレノイド、水素液化容器などの主要部品から構成される。

4.1 超電導磁石

AMR の冷凍能力は磁気作業物質のエントロピー差に依存するため、超電導磁石による強磁場を利用する。本研究では、NbTi 線材 (54 フィラメント NbTi, Cu:NbTi 比 1.3:1, 素線径 0.5 mm) からなる超電導ソレノイドを作製した。本システムは、磁気作業物質の往復駆動により磁場変化を得る。磁性流体の往復距離はアクチュエータの制約により 200 mm 以下に制限されるため、ソレノイドの中心から 200 mm の位置で磁界が十分にゼロに近づく必要がある。そのためソレノイドの両端に逆位相の補償コイルを追加し、ソレノイドの中心から 200 mm の位置の磁界をほぼ 0 にまで低減させた。本ソレノイド磁石は Fig. 8 の表に従って製作すると同図下の磁場分布となる。

4.2 AMR 実験装置

Fig. 9 は、AMR システムの外観写真と実験装置の断面図である。AMR システムは、2つの AMR ベッド、NbTi 超電

NbTi wire specification		Main solenoid design parameter		Sub solenoid design parameter	
Manufacturer and model	SuperCon 54S43	Inner diameter	130 mm	Inner diameter	146 mm
Bare diameter	0.5 mm	Outer diameter	184 mm	Outer diameter	181 mm
Insulated dia.	0.54 mm	Length	162 mm	Length	41 mm
Cu: NbTi ratio	1.3:1	Inductance	25.4 H	Inductance	2.9 H

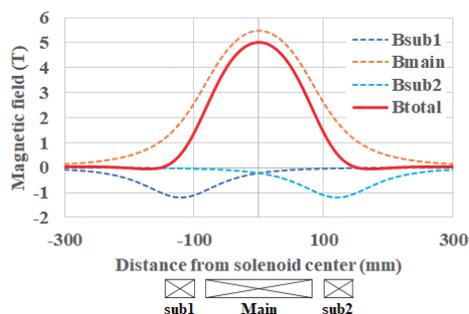


Fig. 8 Specification of NbTi superconducting wire and design parameters of the magnet for the AMR, and the calculated spatial distribution of magnetic field.

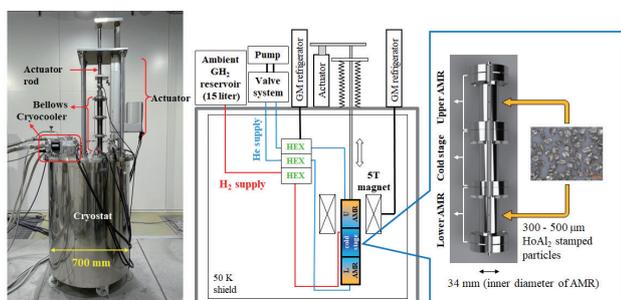


Fig. 9 A picture of the AMR system is shown (left). Cross sectional view of the AMR system and an enlarged view of two AMR beds in which HoAl₂ stamped particles are filled, and the cold stage are shown in the middle and on the right. HEX is a heat exchanger.

導ソレノイド, AMR ベッド駆動用電動アクチュエータ (Intelligent Actuator, Inc., RCS2-RA13R), そして約 2 MPa, 1 g/s のヘリウムガスを AMR ベッド内に駆動するガス循環システムで構成されている。ただし流量は, バルブの流量係数 CV とバルブの上流側および下流側の圧力から算出した。このシステムでは, アクチュエータが下向きに動くとき上側の AMR が励磁, 下側の AMR は消磁され, 上向きに動くときその逆となる。冷凍サイクルを調整することによって, 上下 2 つの AMR ベッドの間を最低温度領域にすることができる。また AMR 高温端からの排熱は, GM 冷凍機 (住友重機械工業 (株) 製, RDK-500B 型) で除去する。本 AMR に用いた磁気作業物質は, 20 K 付近のエントロピー変化が 0.1 J/cm³K より大きく, 磁気転移温度が本システムの排熱温度に近いという理由で HoAl₂ を選択した。各 AMR ベッドには粒径 300~500 μm の HoAl₂ スタンプ粒子を 250 g ずつ充填した。

4.3 水素液化容器と水素液面計

液体水素の液化容器は上下の AMR の冷端間に設置され,

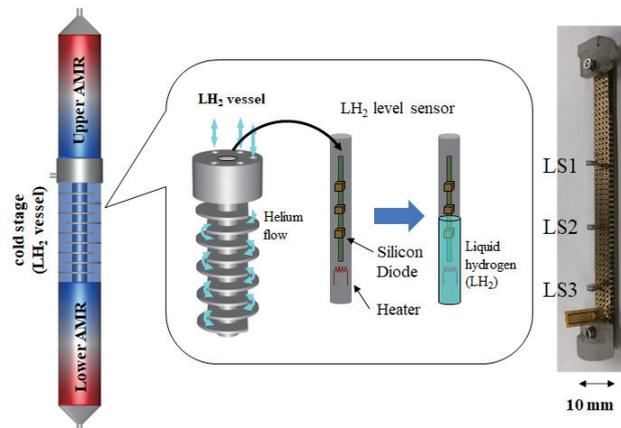


Fig. 10 A schematic of the AMR beds and the H₂ liquefaction vessel in the cold stage. The enlargement of the liquefaction vessel is shown in the balloon. The liquefaction vessel has alternating notched fins to increase thermal contact of helium. Three level sensors are vertically installed in the vessel to detect the liquid in sequence. Right is a picture of the level sensors.

液体水素は本研究で開発した小型水素液面計で検知する。**Fig. 10** は, Cold stage の水素液化容器の模式図である。AMR サイクルがスタートすると, 2 つの AMR ベッド間の Cold stage の温度が最も低い領域となり, AMR ベッドの高温端が排熱領域となる。Cold stage 内の水素液化容器に水素ガスが導入されることで冷却し最終的に液化する。AMR 水素液化の原理は凝縮冷却であり, 本 AMR は Cold stage に水素ガスが直接固体壁に接触する凝縮冷却であるため固体壁を通じた冷却能力が重要である。本装置では伝熱効率を上げるため文献 28 を参考にして, システムに適合するノッチ付きフィンを持つ液化容器を設計・製作した。

液面の検知には液面計を用いるが, 水素液化容器が極めて小さな円筒であるため, その中に設置できる液面計は市販されていない。そこで本研究では, シリコンダイオード温度計を液面計として使用した事例 (P. J. Dempsey et al., NASA Technical Memorandum 105541) を基に, 水素液化槽内に入る小型液面計を開発した。液面計 (センサー) は 1 mA の電流で駆動し, 液体と気体の熱伝達率の違いから液面を検知する。シリコンダイオードは垂直に 3 個配置し (上から LS, LS2, LS3), 検知の時間差から液面の上昇速度を把握することができるようにした。

4.4 実験結果

Fig. 11 は, AMR を初期中心温度 26 K から周期 12 秒で運転開始し, 圧力約 0.11 MPa, 周期 12 秒で液化させた実験の一例である。AMR サイクルを開始した後 AMR の高温端と低温端に温度差が形成される。その後冷端温度は水素の液化温度より低くなる。このとき, シリコンダイオードの出力は, 水素液化装置の周期的な磁場変化により, 周期的な磁界の変化に応じて振動する。試験初期 (約 65 秒まで) は, 容器内には水素ガスしか存在せず, 容器内の均質な冷

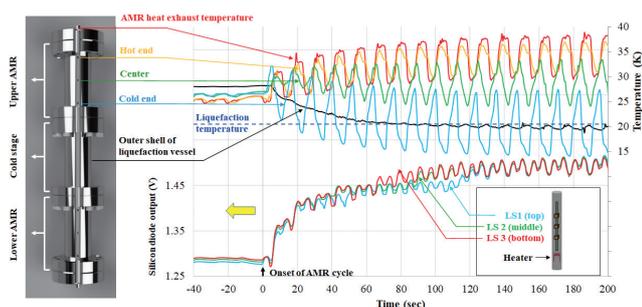


Fig. 11 An example of hydrogen liquefaction experiment. It is seen that output voltage of silicon diode level sensors rise in sequence from the bottom in response to increase of liquid level.

却により3つの液面センサー (LS1~LS3) の電圧 (温度) は同時に上昇 (下降) するが、液化と貯液が始まるとこの同時性が失われる。液面がLS3 (下) に到達すると、他の2つの出力は変わらないのに、LS3のみで追加の電圧上昇 (温度低下) が観測された。続いてLS2 (中央)、LS1 (上) の順に時間差で電圧が上昇しており、水素の液面が上昇していることを示している。液面を一定に保つように液体水素にヒーター入力したところ、本ケースでの冷凍能力は約3Wであった。

5. まとめ

本解説では、これまでの磁気冷凍が大きく6種類に分類できること、その中のCMRおよびAMRによって水素液化磁気冷凍機の開発が実施されていることを紹介した。特に磁性体駆動式AMRによる水素液化機は実用化に向けて大きく舵が切られた。2018年NIMSで開始したJST未来社会創造プロジェクトがそれを印象付けた出来事である。実際に2022年にはAMR方式により、世界で初めて水素の液化に成功するなど、確実に進歩を遂げている。今後は、磁性体移動速度の高速化による液化量の増大や、超電導磁石の大型化などを進め、冷凍能力のさらなる向上を目指す。

本研究の一部はJST未来社会創造事業JPMJMI18A3の支援を受け実施されました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) P. Debye, "Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur", *Annalen der Physik*, Volume 386, 1154 (1926)
- 2) W. F. Giauque, "A THERMODYNAMIC TREATMENT OF CERTAIN MAGNETIC EFFECTS. A PROPOSED METHOD OF PRODUCING TEMPERATURES CONSIDERABLY BELOW 1° ABSOLUTE", *Journal of American Chemical Society* 49, 1870 (1927)
- 3) W. F. Giauque and D. P. MacDougall, "Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ ", *Physical Review* 43, 768 (1933)
- 4) Alekseev, A. "Hydrogen Liquefaction." *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology* (2016) : 733-762
- 5) Seiji Yamashita, Masashi Shingo, Shuntaro Unno, Tatsuya Imai, Seiichi Sugawa, "Development of Hydrogen Liquefaction and Storage System", *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, Vol. 37, No.4, 1-8 (2016) [in Japanese]
- 6) U Cardella, L Decker and H Klein, "Economically viable large-scale hydrogen liquefaction", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 171 012013 (2017)
- 7) K. Ohlig and L. Decker, "The Latest Developments and Outlook for Hydrogen Liquefaction Technology", *AIP Conference Proceedings* 1573, 1311 (2014)
- 8) T. Hashimoto, *Jikireitouto to Jiseizairyō no Ouyō* (Application of Magnetic Refrigeration and Magnetic Materials) (Kougyou Chosakai, 1987) p.220-222 [in Japanese]
- 9) Pecharsky, V.K. and Gschneider Jr., K.A., "Tunable Magnetic Regenerator Alloys with a Giant Magnetocaloric Effect for Magnetic Refrigeration from 20K to 290K", *Applied Physics Letter* 70 [24] 16 (1997)
- 10) H. Wada, S. Tomekawa, M. Shiga, "Magnetocaloric properties of a first-order magnetic transition system $ErCo_2$ ", *Cryogenics* 39 [11], 915 (1999)
- 11) A. Giguere, M. Foldeaki, W. Schnelle and E. Gmelin, "Metamagnetic transition and magnetocaloric effect in $ErCo_2$ ", *Journal of Physics: Condensed Matter* 11 [36], 6969 (1999)
- 12) Yamamoto, T.A., Nakagawa, T., Sako, K., Arakawa, T. and Nitani, H., "Magnetocaloric effect of rare earth mono-nitrides, TbN and HoN ", *Journal of Alloys and Compound* 376, 17 (2004)
- 13) S. Fujieda, A. Fujita, N. Kawamoto, and K. Fukamichi, "Strong magnetocaloric effects in $La_{1-x}Ce_x(Fe_{x-y}Mn_ySi_{1-x})_{13}$ at low temperatures", *Applied Physics Letter* 89, 062504 (2006)
- 14) P. B. Castro, K. Terashima, T. Yamamoto, Z. Hou, S. Iwasaki, R. Matsumoto, S. Adachi, Y. Saito, P. Song, H. Takeya and Y. Takano, *NPG Asia Materials*, *NPG Asia Mater* 12:35 (2020)
- 15) H. Nakagome, N. Tanji, O. Horigami, H. Ogiwara, T. Numazawa, Y. Watanabe, T. Hashimoto, "The helium magnetic refrigerator. I -Development and experimental results", *Advances in Cryogenic Engineering* 29 581-587 (1984)
- 16) T. Numazawa, T. Hashimoto, H. Nakagome, N. Tanji, O. Horigome, "The helium magnetic refrigerator. II -Liquefaction process and efficiency" *Advances in Cryogenic Engineering* 29 589-596 (1984)
- 17) Ohhira K. et al., "Experimental study on magnetic refrigeration for liquefaction of hydrogen" *Advances in Cryogenic Engineering* 45 1747-54 (2000)
- 18) K. Kamiya, H. Takahashi, T. Numazawa, H. Nozawa, and T. Yanagitani, "Hydrogen Liquefaction by Magnetic Refrigeration" *Cryocoolers* 14 637 (2007)
- 19) T. Numazawa, K. Kamiya, S. Yoshioka, H. Nakagome and K. Matsumoto, "Development of a magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction" *AIP Conference Proceedings* 985, 1183 (2008)
- 20) J.A. Barclay and W.A. Steyert, "Active magnetic regenerator", U.S. Patent 4,332,135 (1982)
- 21) Y. Kim, I. Park, S. Jeong, "Experimental investigation of two-stage active magnetic regenerative refrigerator operating between 77K and 20K", *Cryogenics* 57 (2013) 113-121
- 22) I. Park and S. Jeong, "Experimental investigation of 20K two-stage layered active magnetic regenerative refrigerator", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 101 (2015) 012106
- 23) K Matsumoto, T Kondo, S Yoshioka, K Kamiya and T Numazawa, "Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction" *Journal of Physics:*

Conference Series 150 12028 (2009)

- 24) J.D. Holladay, R.P. Teyber, K.D. Meinhardt, E. Polikarpov, E.C. Thomsen, et al. "Investigation of Bypass Fluid Flow in an Active Magnetic Regenerative Liquefier." *Cryogenics* 93 (2018)
- 25) R.P. Teyber, K.D. Meinhardt, E.C. Thomsen, E. Polikarpov, J. Cui, A. Rowe, J.D. Holladay, et al. "Passive Force Balancing of an Active Magnetic Regenerative Liquefier." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 451 (2018)
- 26) R.P. Teyber, J.D. Holladay, K.D. Meinhardt, E. Polikarpov, E.C. Thomsen, J. Cui, et al. "Performance investigation of a high-field active magnetic regenerator." *Applied Energy* 236 (2019) 426-436
- 27) Koji Kamiya, Koichi Matsumoto, Takenori Numazawa, Shinji Masuyama, Hiroyuki Takeya, Akiko T. Saito, Naoya Kumazawa, Kazumi Futatsuka, Keigo Matsunaga, Tsuyoshi Shirai, Suguru Takada, and Teruhito Iida, "Active magnetic regenerative refrigeration using superconducting solenoid for hydrogen liquefaction", *Applied Physics Express*, Volume 15, Number 5 053001 (2022)
- 28) Enrico Rizzo, "Simulations for the optimization of High Temperature Superconductor current leads for nuclear fusion applications", Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) (2013)

神谷 宏治



1999年筑波大学大学院工学研究科博士課程(構造エネルギー工学専攻)修了。日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所副主幹研究員を経て、2018年物質・材料研究機構磁気冷凍システムグループ主席研究員。主に磁気冷凍機に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。博士(工学)。

沼澤 健則

1985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。1986年科学技術庁金属材料研究所研究官。2001年物質材料研究機構強磁場ステーション主幹研究員、エネルギー・環境材料部門主席研究員を経て、現在特別研究員。主に磁気冷凍機に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。

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年同大学理工学域教授。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。

増山 新二

1996年日本大学大学院理工学研究科博士後期課程(電子工学専攻)修了。1996年日本大学理工学部助手。1997年大島商船高等専門学校助手。2014年教授、2016年大阪大学招へい教授(兼任)、現在に至る。2003年韓国機械研究院(KIMM)在外研究員。主に小型冷凍機に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。博士(工学)。

齋藤 明子

1988年北海道大学理学部物理学科卒業。1990年同大学院理学研究科博士前期課程(物理学専攻)修了。株式会社東芝、産業技術総合研究所を経て、2019年物質・材料研究機構主席研究員。磁性蓄冷材、磁気冷凍技術の研究に従事。低温工学・超電導学会、日本物理学会、日本金属学会、日本磁気学会、日本セラミックス協会、応用物理学会会員。工学博士。

竹屋 浩幸

1986年東北大学大学院理学研究科博士前期課程修了。1987年東京大学物性研究所物質開発室助手、2004年物質・材料研究機構主席研究員を経て、現在NIMS特別研究員。超電導材料・磁気冷凍材料に関する研究に従事。理学博士。

夏目 恭平

2012年総合研究大学院大学修了。2009年自然科学研究機構核融合研究所准研究員、2014年日本原子力研究開発機構中核融合研究所を経て、2022年物質・材料研究機構磁気冷凍システムグループ主幹研究員。主に磁気冷凍機に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。博士(工学)。

白井 毅

2021年関西大学システム理工学部機械工学科卒業。同年4月に株式会社メイトックに入社。物質・材料研究機構に出向。磁気冷凍機に関する研究に従事。

内田 公

1992年山形大学工学部情報工学科卒業。1998年同大学院工学研究科博士後期課程(システム情報工学専攻)修了。1997年通産省工業技術院生命工学工業技術研究所特別技術補助員を経て、現在(株)フジヒラ技術顧問。低温、超電導応用機器開発に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。