

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03534

研究課題名（和文）水素液化磁気冷凍サイクル実証のための基盤研究

研究課題名（英文）Research for magnetic refrigeration cycle for hydrogen liquefaction

研究代表者

松本 宏一（MATSUMOTO, KOICHI）

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：10219496

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、磁気冷凍法によるエネルギー効率の極めて高い水素の液化や保持技術の実証・確立を目的としている。主な成果は以下の通り。1.水素液化磁気冷凍試験システムを構築し試験を進めた。ソレノイド型マグネットと磁性体の往復動による磁場変化を用い、外部との熱交換は圧縮機駆動のヘリウムガスを利用した。世界で初めて蓄冷型磁気冷凍サイクルで水素の液化が実証された。2.実用磁性体の希土類金属間化合物の磁気熱量効果、磁場中熱伝導率を特性評価した。3.冷凍サイクルの熱解析ではシミュレーションコードを改良し、磁性体の周りに滞留する熱交換ガス、磁性体の熱伝導による損失などを取り込んだ解析を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱炭素社会のエネルギー源として期待される水素エネルギーの貯蔵、輸送に有利な液体水素を製造する高効率の方式である磁気冷凍法による液化が実証された。特に本研究により、蓄冷型磁気冷凍サイクルによる水素液化に世界で初め成功した。さらに磁性体駆動方式という実用に近い形を用いて実現する大きな成果が得られた。今後、日本が水素エネルギー利用で世界をリードする新しい技術の端緒を開いたという意義がある。

研究成果の概要（英文）：Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction was developed with active magnetic regenerator cycle that is expected to improve thermal efficiency compare with gas expansion. Reciprocating AMR bed could produce large temperature span around hydrogen liquefaction temperature and liquefaction was confirmed using liquid hydrogen level meter for the first time. In order to develop magnetic material for practical use, we studied rare-earth intermetallic compounds. Magnetocaloric effect, thermal conductivity and other properties were measured and evaluated as magnetic refrigerants. Magnetic refrigeration cycles were analyzed with new developed simulation code which takes void gas, thermal conductivity loss and so on.

研究分野：低温物理学、低温工学

キーワード：水素エネルギー 磁性 熱機関 冷凍機

## 1. 研究開始当初の背景

水素エネルギーを利用する社会の実現が近づいている。炭酸ガスを排出しない再生可能エネルギー源である水素を利用する社会の実現には、燃料電池や水素エンジンなどの開発に加え、水素燃料の貯蔵・輸送等のインフラ技術の確立が必須である。液体水素の体積、重量あたりのエネルギー密度は他のどの形態よりも高いため、液体水素は輸送・貯蔵形態として高い優位性を持つことは広く知られている。さらに、燃料電池においては高純度に精製された水素が必須であるが、液化水素は100%純粋な水素であるため、最高の品位が得られる。さらに、近年進展の著しい液体水素温度環境で作動する超伝導応用技術において、液体水素はエネルギー源のみならず、高効率な超伝導電力貯蔵や伝送に必須な冷媒としても注目されている。しかしながら、水素は極低温20Kに液化点をもつため、液体としての利用方法が限定されている。極低温発生技術の視点から最も重要な要点は、液体水素の生成効率の飛躍的な向上である。現状で実績のあるジュール・トムソン(J-T)膨張を利用した液化機の効率は40%以下と低く、原理的に高効率な革新的冷凍技術が不可欠である。

磁気冷凍は磁性体に磁場を印加・除去するときに発現する発熱・吸熱効果(磁気熱量効果)を利用し理想カルノー冷凍サイクルを作動できるため原理的に効率が低い。磁気冷凍法は高効率や温暖化ガスを使用しないなどの特徴から極低温から室温まで国際的に盛んに研究が行われている。申請者らは水素ガスの磁性体表面での直接液化が可能である特長を活かし、カルノーサイクルを用いて高い水素液化効率を実現できることを実証してきた。海外では本研究成果に触発され、アメリカエネルギー庁、ピクトリア大学(カナダ)およびKAIST(韓国)で研究が開始されている。また、近年、ヨーロッパ諸国で積極的な取り組みが見受けられるようになり、水素磁気冷凍の応用が注目されつつある。

## 2. 研究の目的

液体水素を生成するには所定のエネルギーの投入が必要となるため、これに見合う高効率な冷凍技術が鍵となる。申請者らはこれまでに水素磁気冷凍というジャンルを日本で確立してきた。要素研究である、磁性体開発・熱力学サイクルの研究から、カルノーサイクルを用いた水素液化の実証に成功してきた。その結果、大きな動作温度範囲が可能となる蓄冷型冷凍サイクルに多くの改良すべき点を明らかにした。本研究は、これまでの研究成果を踏まえ冷凍システムを抜本的改良し、エネルギー効率のきわめて高い水素の液化や保持技術の実証・確立を目的としている。実績のあるカルノー型と複合して高い冷凍効率の実現を目指し、さらには蓄冷型冷凍サイクルのみで水素液化に挑戦することで、新しい磁気冷凍サイクルを検討・提案するとともに、その実証を試みる。

## 3. 研究の方法

水素液化磁気冷凍における主要項目は磁性材料と冷凍サイクルの研究である。これまでの研究成果を踏まえ本研究では水素液化磁気冷凍サイクル実証に注力する。すでに水素液化カルノーサイクルは実用レベルの成果が得られているため、磁気能動的蓄冷サイクル(Active Magnetic Regenerator, AMR)による蓄冷型サイクルの実証を行う。その後、蓄冷型磁気冷凍サイクルによる水素液化の実証について重点的に調べる。研究手法としては、実証冷凍システムを構築し、磁気冷凍サイクルの優位性を明らかにする。また、サイクルシミュレーションを用いた磁気冷凍熱力学の理論的解明を平行に進める。磁気冷凍用の磁性材料として求められる諸物性について実験的に評価し、磁気冷媒を開発する。

本研究は、物質・材料研究機構と金沢大学とが共同で、以下のような項目で実施する。

### 1. 水素液化蓄冷型磁気冷凍サイクル実証試験機の構築と水素液化実証

磁場変化をマグネットの励消磁で行う研究グループもあるが、エネルギー効率から磁性体駆動による磁場変化の発生が実用で必須である。このとき、磁性体駆動で最適な磁場変化となるような磁気回路の設計が必要である。本研究では、最大磁場5T程度で最適磁場分布を持つ小型超伝導磁石を開発する。また、熱交換ガス駆動システムではこれまでの問題点を解決する熱交換流体制御システムを開発する。これらを組み上げ、磁気冷凍サイクル試験機を構築する。

新規に構築した試験システムを用いて蓄冷型磁気冷凍サイクルの広い温度範囲での動作を確認するとともに、蓄冷型冷凍サイクルによる水素液化実証を行う。この研究から、水素液化磁気冷凍機の実用化への課題を明らかにする。

### 2. 冷凍サイクルの熱サイクル解析

磁気熱量効果を調整可能な金属間化合物系の磁性材料や大きなエントロピー変化ピークを持つ一次相転移磁性体など、これまで開発してきた新規磁性材料を試験冷凍機に適用した場合の冷凍性能について、新たなサイクル熱解析法を開発し、性能予想を行う。また、磁性体の積層化野菜来るパラメタの最適化について検討する。これを、冷凍試験にフィードバックすることで、水素磁気冷凍サイクルを実証する。

### 3. 実用磁気冷媒としての磁性体特性評価

磁気冷媒として求められる熱伝導率、電気伝導率、また磁性体の耐久性に関わる磁歪熱膨張などを評価することで実用磁気冷媒としての知見を得る。

### 4. 研究成果

#### 1. 水素液化蓄冷型磁気冷凍サイクル実証試験機の構築と水素液化実証

写真 1 に、本研究で構築した水素液化磁気冷凍試験機を示す。全高 2m 程度のコンパクトな設計になっている。図 1 は内部構造を表しており、その構成を模式的に表したものが図 2 である。磁性体への磁場変化はアクチュエータにより超伝導ソレノイドの磁場空間から出し入れすることで行う機構となっている。この場合ソレノイドの漏れ磁場により磁性体与える磁場変化が減少することが危惧されるが、本装置では磁場補償コイルを設置することで、長さ 100mm の磁性体容器を 200mm 駆動することで 5 T の磁場から 0 T への磁場変化を与えることができる。この超伝導マグネットは GM 冷凍機により伝導冷却され、冷媒フリーを実現している。磁性体の駆動では駆動軸からの真空リークとシャトルヒートトランスファーを抑制するために、多段のペローズシールを開発した。

蓄冷型磁気冷凍サイクルで冷凍機内部に温度勾配を発生させ磁性体と外部との熱交換を行うための熱交換ガス(ヘリウム)の流動は、室温部に設けた圧縮機から供給し、流れ制御は室温部の制御バルブシステムで行った。熱交換ガスは極低温の磁気冷凍機動作温度まで予冷することが必要であるが、本研究では蓄冷型熱交換器を新規開発し小型で高効率の予冷を実現した。磁気冷凍機の排熱は図中にある GM 冷凍機で吸収する構造になっている。



写真 1 : 試験磁気冷凍機

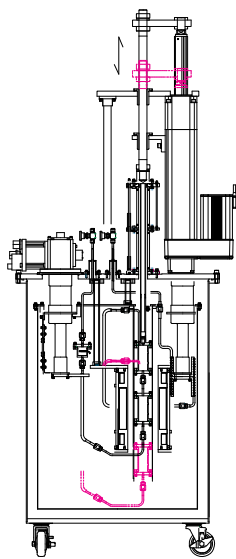


図 1 : 冷凍機構造

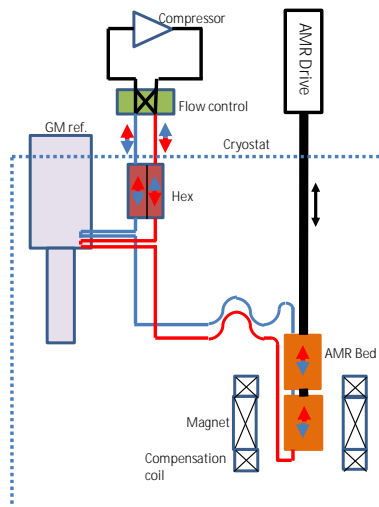


図 2 : 磁気冷凍機の構成

図 3 に開発した磁気冷凍機の動作を模式的に示す。磁性体を充填した容器 (AMR Bed) は 2 個設けられており、一方が消磁過程で低温側から吸熱を行う間に、もう一方は励磁され高温排熱過程を行い、単一の AMR Bed を用いた際の 2 倍の出力が期待される。また、この構造では一方を磁場から引き抜く力をもう一方が磁場に引き込まれる力で相殺することが可能で、投入仕事の低減も期待される。排熱は図 2 にある GM 冷凍機で吸収する構造になっている。図 3 で磁性体が消磁され寒冷が発生

#### Brayton-like cycle, dual regenerator

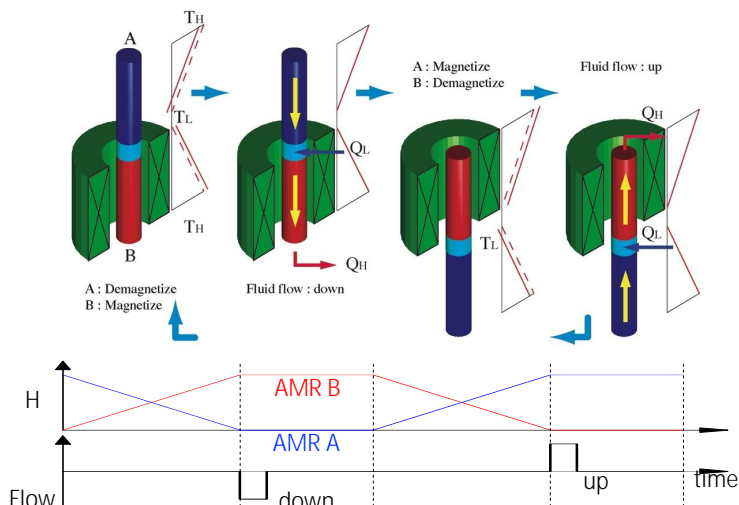


図 3 AMR 冷凍機の動作

した状態が青で示され、励磁され発熱した状態が赤で示されている。この状態に黄色の矢印で示された熱交換ガスの流れと同期させることで 2 個の AMR Bed の接合部が低温になる冷

凍サイクルが実現される。

冷凍機の試験は始めに AMR サイクルの動作確認を行った。超伝導マグネットに 5T の磁場を発生させ、等磁場熱交換過程では熱交換流体を約 1g/s. の流量で 1 秒流し、磁場変化を含めた 1 サイクル周期を 11 秒で動作させた運転例を図 4 に示す。この試験では磁性体に、常磁性・強磁性相転移温度 30K を持つ、 $\text{HoAl}_2$  を用いた。図 4 では AMR Bed の高温端と低温端及び中央部の温度の時間変化を示している。冷凍サイクル開始前には AMR 上端と下端で温度差が発生していないが、サイクル運転の開始によって、各部の磁性体が磁場変化に伴う磁気熱量効果により温度振動を示しながら、AMR に温度差が発生していく様子が示されている。運転開始から約 300 秒で 20K を越える温度差が発生し、最終的には高温端温度 35K、低温端温度は大気圧での水素液化温度 20K よりも十分低温の 15K 程度に到達することが確認できた。この試験により、AMR サイクルによりカルノーサイクルを遙かに上回る冷凍温度幅が得られ、水素液化温度領域での蓄冷型冷凍サイクルの有用性が示された。

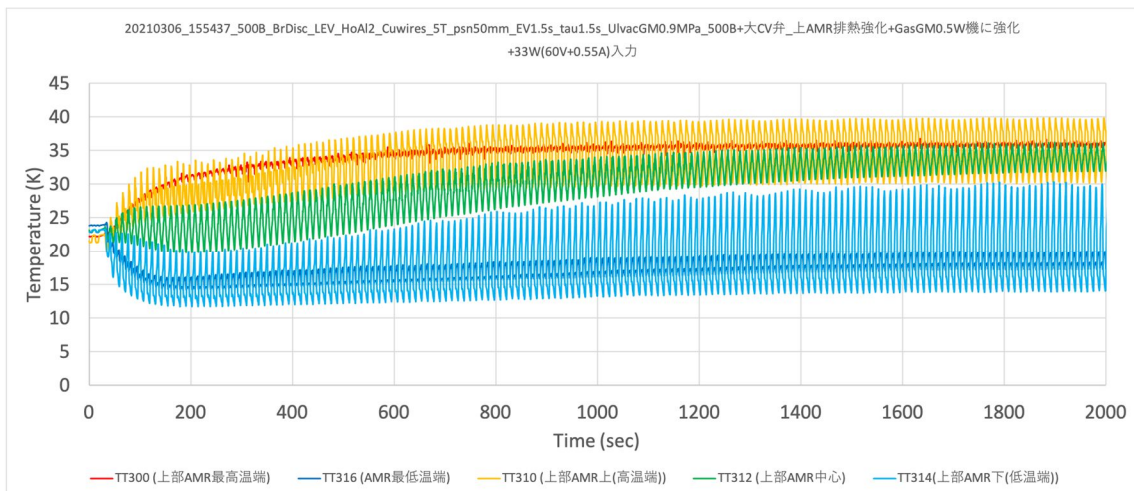


図 4 AMR 冷凍機の運転例

水素液化の実証を行うために、本研究では新たに水素液面計を開発した。水素液面計には  $\text{MgB}_2$  を用いた超伝導式、静電容量式などがあるが、自己発熱させた Si ダイオードセンサーの冷却状態が気相液相で異なることを利用したポイント型界面センサーをシリーズに配置した新しい方式を用いた。この液面計と水素液溜槽の圧力を観測することで、液化温度や液面変化と整合する結果であることも確認した。この液化槽を AMR の低温部に設置し、水素液化試験を行った。その結果、水素ガスの液化を確認できた。この結果により、蓄冷型磁気冷凍機によって、世界で初めて水素液化実証に成功した。液面変化から少なくとも 2W 以上の冷凍出力が見積もられているが、サイクルの運転条件の最適化は現在も引き続き行われているため、さらに大きな冷凍出力を得ることができると予想される。例えば、次の項目で報告する熱サイクル解析では、今回報告した冷凍試験では熱交換ガスの量が不十分であることが予測され、流量を増大することで、現在のシステムでも数倍の冷凍出力が得られると予測された。

## 2. 冷凍サイクルの熱サイクル解析

冷凍試験機と近い条件での熱サイクル解析を行うことで、例えば以下のような結果を得た。

- ・単一の磁性体を AMR に充填する場合には、動作温度範囲と磁性体の磁気相転移温度との関係が性能に大きな影響を与える。例えば、動作温度の範囲の高温側に近い温度に相転移温度を持つ磁性体の方が低温に転移温度を持つ磁性体を用いる場合より、高い冷凍出力と効率が期待される。

- ・現在有望な磁気冷媒と考えられている希土類金属間化合物の場合には、磁性体の熱伝導による低温側への熱流入は、問題となるほど大きな影響は与えない。また、現在想定されている直径 0.5mm 程度の磁性体形状では、磁性体内部から表面への熱伝達に大きな問題はない。

- ・現在想定されている条件では、熱交換ガスの圧力の影響はあまり大きくない。性能は熱交換過程での熱交換ガスの総熱容量と大きな相関がある。

さらに、磁気熱量効果は磁気相転移温度近傍で大きなピークを持つことから AMR サイクルの動作温度範囲の拡大を検討するためには、磁気相転移温度の異なる磁性体の積層化が不可欠である。本研究では、少しずつ相転移温度が異なる磁性体のエントロピー線図を理論計算から求め、様々な転移温度及び積層化比率での冷凍性能を予測するシミュレーションコードを開発した。現在も解析を継続して行っている。

## 3. 実用磁気冷媒としての磁性体特性評価

磁気熱量効果により磁性体内部で生じた熱量変化は表面に熱伝導で伝えられ熱交換され

るので、熱伝導率はサイクル運転や磁性体形状を決定する上で重要な物性値である。特に、磁気冷凍機では磁場中で熱交換が行われるので、磁場中熱伝導率の評価は必須である。

本研究では冷凍試験でも用いられた希土類金属間化合物の  $RT_2$  ( $R$ : 希土類,  $T$ : Ni, Al) について、これまで文献でも報告がなかった磁場中熱伝導率の測定を行った。図5は磁場ゼロでの熱伝導率の温度変化を示している。熱伝導率は温度とともに単調に増加し、磁気転移温度でも大きな異常は見られなかった。熱伝導率の絶対値は金属のステンレス鋼とほぼ同じ程度であり、磁性体の大きさを 1mm 以下にして用いれば、非定常熱伝導による熱伝達に大きな問題がないことが確認された。図6では  $GdNi_2$  の熱伝導率の磁場依存性を幾つかの温度で示した。縦軸はそれぞれの温度で磁場ゼロの熱伝導率からの変化を示している。 $GdNi_2$  の熱伝導率は 5 T の磁場に依って 5% 程度しか影響を受けていない。その他の測定された  $RT_2$  ( $R$ : 希土類,  $T$ : Ni, Al) 系の磁性体では大きくても 10% 程度の変化が観測された。磁気熱量効果の大きな磁性体で磁気冷凍に有望と考えられている磁性体の中には非常に大きな熱伝導率の変化を持つことが報告されているが、今回、研究した材料は熱伝導率の特性からも磁気冷媒として有望であることが示された。

本研究では、熱膨張、磁歪についても評価が行われ、磁歪の大きさもそれほど小さくなく、磁場による磁性体の割れなどが起こらないであろうと予測される結果が得られた。

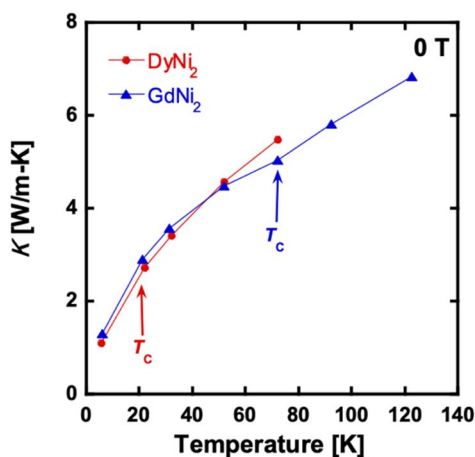


図5  $GdNi_2$ ,  $DyGdNi_2$  の熱伝導率

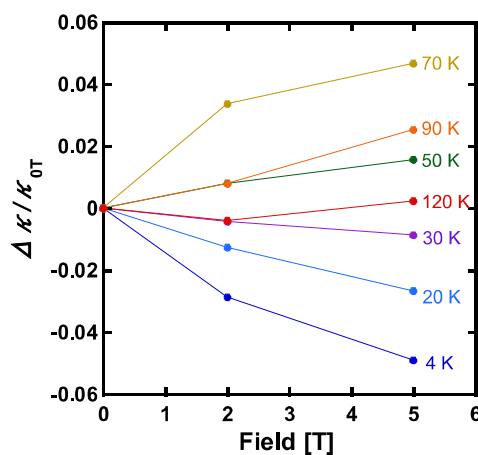


図6  $GdNi_2$  熱伝導率の磁場依存性

以上のように、本研究では、世界で初めて蓄冷型磁気冷凍サイクルでの水素液化を実証するなど大きな成果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Masuyama S, Matsumoto K, Numazawa T	4. 巻 1857
2. 論文標題 Improvement of 4 K cooling power by coaxial pipe regenerator for a Gifford-McMahon cryocooler	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012007 ~ 012007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1857/1/012007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hideki Omote, Shota Watanabe, Koichi Matsumoto, Ildar Gilmutdinov, Airat Kiamov, Dmitrii Tayurskii	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnetocaloric effect in single crystal GdTlO <sub>3</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 58-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cryogenics.2019.05.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shota Watanabe, Shunsuke Komatsu, Kazumi Futatsuka, Naoya Kumazawa, Koichi Matsumoto, Koji Kamiya, Keiji Oyoshi, Hiroyuki Takeya and Takenori Numazawa	4. 巻 1857
2. 論文標題 Thermal expansion and thermal conductivity of RT2 (R: Gd, Dy, Er; T: Al, Ni) intermetallic compounds for magnetic refrigerator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1857/1/012003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K Matsumoto, Y Sekiguchi, O Iwakami, T Ono, S Abe, G Ano, M Akatsu, K Mitsumoto, Y Nemoto, T Goto, N Takeda, and H Kitazawa	4. 巻 969
2. 論文標題 Thermal expansion and magnetostriction of clathrate compound Pr <sub>3</sub> Pd <sub>20</sub> Ge <sub>6</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K Matsumoto, R Okamoto, A Nakajima, S Abe	4. 巻 969
2. 論文標題 Superfluidity of 4He in dense aerogel studied using quartz tuning fork	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daiki Inoue, Hiroyuki Takama, Daisuke Kaidou, Mitsuyuki Minegishi, Keisuke Ueno, Koichi Matsumoto, Satoshi Abe, Shigeyuki Murayama	4. 巻 86
2. 論文標題 Non-Fermi-Liquid Behavior in CeRu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> at Ultralow Temperatures Studied by Thermal Expansion and Magnetostriction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.124712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K Matsumoto, Y Sekiguchi, O Iwakami, T Ono, S Abe, G Ano, M Akatsu, K Mitsumoto, Y Nemoto, T Goto, N Takeda, and H Kitazawa	4. 巻 969
2. 論文標題 Thermal expansion and magnetostriction of clathrate compound Pr <sub>3</sub> Pd <sub>20</sub> Ge <sub>6</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series (accepted)	6. 最初と最後の頁 12120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K Matsumoto, R Okamoto, A Nakajima, S Abe	4. 巻 969
2. 論文標題 Superfluidity of 4He in dense aerogel studied using quartz tuning fork	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series (accepted)	6. 最初と最後の頁 12019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K Matsumoto, T Numazawa, Y Ura, T Ujiyama and S Abe	4. 巻 897
2. 論文標題 Thermal and magnetic properties of regenerator material Gd2O2S	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/897/1/012010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K Matsumoto, D Murayama, M Takeshita, Y Ura, S Abe, T Numazawa, H Takata, Y Matsumoto and T Kuriwa	4. 巻 897
2. 論文標題 Magnetocaloric effect, thermal conductivity, and magnetostriction of epoxy-bonded La(Fe <sub>0.88</sub> Si <sub>0.12</sub> ) <sub>13</sub> hydrides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series 897 (2017) 012011	6. 最初と最後の頁 12011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/897/1/012011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件(うち招待講演 3件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 LOPATINA Anastasia, 二塚 和美, 熊澤 直哉, 小松 俊介, 松本 宏一, 竹屋 浩幸, 齋藤 明子, 沼澤 健則
2. 発表標題 多結晶希土類ラーベス化合物の磁気熱量効果と輸送特性の研究
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 LOPATINA Anastasia, 二塚 和美, 熊澤 直哉, 小松 俊介, 松本 宏一, 大橋政司
2. 発表標題 単結晶RA12 (R = Gd, Er) の磁気熱量効果、熱膨張・磁歪
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 MATSUMOTO Koichi, WATANABE Shota, KOMATSU Shunsuke, KUMAZAWA Naoya, FUTATSUKA Kazumi (Kanazawa U.); KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)
2. 発表標題 Development of active magnetic regenerator refrigerator (AMRR) with reciprocating AMR bed
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 MASUYAMA Shinji (NIT, Oshima College); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa Univ.); NUMAZAWA Takenori (NIMS)
2. 発表標題 Improvement of 4 K cooling power by coaxial pipe regenerator for a Gifford-McMahon cryocooler
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 WATANABE Shota, KOMATSU Shunsuke, FUTATSUKA Kazumi, KUMAZAWA Naoya, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa U.); KAMIYA Koji, OYOSHI Keiji, TAKEYA Hiroyuki, NUMAZAWA Takenori (NIMS)
2. 発表標題 Thermal expansion and thermal conductivity of RT2 (R:Gd,Dy,Er; T:Al,Ni) intermetallic compounds for magnetic refrigerator
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺 祥太, 表 秀樹, 松本 宏一 (金沢大); 平山 貴士, 李 瑞 (住重)
2. 発表標題 磁性蓄冷材HoCu <sub>2</sub> の磁場中比熱、磁化
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平山 貴士, 森江 孝明, 白石 太祐, 許 名堯 (住重); 松本 宏一 (金沢大)
2. 発表標題 磁場中における小型4K冷凍機の冷凍性能の研究
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増山 新二 (大島商船高専); 松本 宏一 (金沢大); 沼澤 健則 (NIMS)
2. 発表標題 高出力4K-GM冷凍機開発への試み
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Matsumoto
2. 発表標題 Magnetic Refrigerator for Hydrogen Liquefaction
3. 学会等名 Muroran-IT Rare Earth Workshop 2018 (国際学会) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Matsumoto
2. 発表標題 Magnetocaloric Materials with Rare-Earth Element for Magnetic Refrigeration at Cryogenic Temperatures
3. 学会等名 Muroran-IT Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K Matsumoto, Y Sekiguchi, O Iwakami, T Ono, S Abe, G Ano, M Akatsu, K Mitsumoto, Y Nemoto, T Goto, N Takeda, and H Kitazawa
2. 発表標題 Thermal expansion and magnetostriction of clathrate compound Pr <sub>3</sub> Pd <sub>20</sub> Ge <sub>6</sub>
3. 学会等名 28th international conference on low temperature physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K Matsumoto, R Okamoto, A Nakajima, S Abe
2. 発表標題 Superfluidity of 4He in dense aerogel studied using quartz tuning fork
3. 学会等名 28th international conference on low temperature physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本 宏一, 裏 雄太郎, 宇治山 崇, 表 秀樹, 木寄 剛志, 野村 隆次郎
2. 発表標題 磁気熱量効果における磁性体の形状・反磁場効果の研究
3. 学会等名 2017年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 表 秀樹, 宇治山 崇, 松本 宏一, GILMUTDINOV I.F., KIIAMOV A.G., TAYURSKII D.A.
2. 発表標題 水素液化磁気冷凍用磁性体GdTiO <sub>3</sub> 単結晶の磁気熱量効果
3. 学会等名 2017年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

[http://www.s.kanazawa-u.ac.jp/phys/physics\\_MC/ult\\_html/index.html](http://www.s.kanazawa-u.ac.jp/phys/physics_MC/ult_html/index.html)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	沼澤 健則  (Numazawa Takenori)  (30354319)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・技術開発・共用部門・NIMS特別研究員   (82108)	
研究分担者	阿部 聡  (Abe Satoshi)  (60251914)	金沢大学・数物科学系・教授   (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	カザン連邦大学			