

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型  
年次報告書

平成 30 年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名：西宮 伸幸]

[国立研究開発法人物質・材料研究機構・NIMS 外来研究員]

[研究開発課題名：磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発]

実施期間：令和 4 年 4 月 1 日～令和 5 年 3 月 31 日

## §1. 研究開発実施体制

研究開発代表者: 西宮 伸幸 (国立研究開発法人物質・材料研究機構・NIMS 外来研究員)

### (1) NIMS (物質・材料研究機構) グループ

- ① 主たる共同研究者: 清水 禎 (物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究拠点液体水素材料研究センター・センター長)
- ② 研究項目
  1. 磁気冷凍材料の開発
  2. 水素液化システムの開発

### (2) 前川製作所グループ

- ① 主たる共同研究者: 神村 岳 (前川製作所技術研究所・所長)
- ② 研究項目: ターボ・ブレイトン冷凍機に関する研究開発

### (3) 金沢大グループ

- ① 主たる共同研究者: 松本宏一 (金沢大学理工研究域数物科学系・教授)
- ② 研究項目: バルク機能評価、AMR 技術

### (4) 大島商船高専グループ

- ① 主たる共同研究者: 増山新二 (大島商船高専電子機械工学科・教授)
- ② 研究項目: 磁気冷凍システム

### (5) 核融合研グループ

- ① 主たる共同研究者: 高田卓 (装置工学・応用物理研究系・助教)
- ② 研究項目: 高効率水素液化システムに関する研究開発

### (6) 九州大グループ

- ① 主たる共同研究者: 宮崎寛史 (システム情報科学研究院・教授)
- ② 研究項目: 磁気冷凍機用超伝導マグネットの研究開発

### (7) ミラプログループ

- ① 主たる共同研究者: 矢代昌彦 (次世代事業開発本部・本部長)
- ② 研究項目: 磁気冷凍システムに関する研究開発

### (8) アルバック・クライオグループ

- ① 主たる共同研究者: 村山吉信 (技術部・部長)
- ② 研究項目: 大容量 GM 冷凍機の開発

(9) JX 金属グループ

- ① 主たる共同研究者: 土田克之 (技術開発センター磯原分室院・分室長)
- ② 研究項目: 実用磁気冷凍材料の開発

(10) 京セラグループ

- ① 主たる共同研究者: 中原正博 (ファインセラミック技術開発部・部長)
- ② 研究項目: セラミックス材料の磁気冷凍技術への応用

(11) 住友商事グループ

- ① 主たる共同研究者: 市川善彦 (水素事業部・部長)
- ② 研究項目: 水素磁気冷凍技術の社会実装

## § 2. 研究開発成果の概要

令和4年度は材料および液化システムの開発が進展し、数多くの研究成果が得られた。

磁気冷凍材料グループでは、三元系金属間化合物を中心とした新規磁気冷凍材料開発を進め、磁気エントロピー変化が水素液化温度 20K にて  $0.15\text{J}/\text{cm}^3\text{K}$  を超す示す新規磁気材料開発に成功した。また、既存のデータや未知材料に対して、機械学習を利用することにより磁気冷凍材料探索に有効に活用できる手法を開発し、そのツールを公開した。AMR 用球状試料の特性評価に関しては、透過力の高い中性子線による非破壊検査を利用した評価方法確立に着手し、その有効性を得た。磁気冷凍材料の表界面制御に関しては、ある種の金属メッキ処理によって耐水素化性能が大幅に向上することが判明した。また、オルソ・パラ水素変換触媒において各種酸化物のデータベースを拡充するとともに新たに発見された触媒がこれまで知られている触媒よりも触媒活性が大きいことが判明した。

水素液化システムグループでは、POC1 において水素液化の実証機の高効率化をはかり、冷凍サイクルの最適化に関する多くの課題を解決した。また、大容量化を目指した水素液化機的设计に着手し、熱交換器、超伝導磁石、コールドボックス等の要素機器開発を行った。POC2 では永久磁石を用いた 4 駆動型 AMR サイクルの安定化条件を調べ、磁性材料や永久磁石の改善方法について目処を得た。あわせて回転駆動する超伝導磁石の検討を行い、液化能力の向上について試算した。磁気冷凍材料の実用化では、金属系及び酸化物セラミックス系磁性材料について多数の試作を行うとともに、磁気熱量効果などの熱磁気特性を調べ、高品位材料の実用化を進めた。さらに、社会インフラに関連する企業の参加を得て、社会実装へ向けた取り組みを実施した。

### 【代表的な原著論文情報】

- (1) Koji Kamiya, Koichi Matsumoto, Takenori Numazawa, Shinji Masuyama, Hiroyuki Takeya, Akiko T. Saito, Naoya Kumazawa, Kazumi Futatsuka, Keigo Matsunaga, Tsuyoshi Shirai, “Active magnetic regenerative refrigeration using superconducting solenoid for hydrogen liquefaction”, *Applied Physics Express* **15** 053001 (2022). DOI 10.35848/1882-0786/ac5723.  
本論文は実用的な AMR サイクルを用いた世界で初めての水素液化実証の論文であり、2022 年 APEX の Highlights paper に選出された。

- (2) Noriki Terada, Hiroaki Mamiya, Hiraku Saito, Taro Nakajima, Takafumi D. Yamamoto, Kensei Terashima, Hiroyuki Takeya, Osamu Sakai, Shinichi Itoh, Yoshihiko Takano, Masashi Hase, Hideaki Kitazawa, “Crystal electric field level scheme leading to giant magnetocaloric effect for hydrogen liquefaction”, *Communications Materials*. 4 [1] (2023) 13. DOI 10.1038/s43246-023-00340-z

本プロジェクトで見出された巨大磁気熱量効果を示す  $\text{HoB}_2$  に関する中性子非弾性散乱実験の研究成果を示した。  $\text{HoB}_2$  の大きな磁気熱量効果の原因を解明するとともに、希土類磁性イオンの結晶場準位と磁気相互作用の観点から大きな磁気熱量効果を示す物質開発の指針となる条件を示した。

- (3) Jiawei Lai, A. Bolyachkin, N. Terada, S. Dieb, Xin Tang, T. Ohkubo, H. Sepehri-Amin, K. Hono, “Machine learning assisted development of Fe<sub>2</sub>P-type magnetocaloric compounds for cryogenic applications”, *Acta Materialia* **232** 217601 (2022). DOI 10.1016/j.actamat.2022.117942. 希土類フリーの Fe<sub>2</sub>P 型の磁気冷凍材料開発に機械学習を用いて、水素液化に必要な磁気転移温度と磁気量効果の最適化を図った。