

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・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センター  
液体水素材料研究センター・NIMS 外来研究者]

[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 5 年 4 月 1 日～令和 6 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(物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センター液体水素材料研究センター、NIMS 外来研究者)

### (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・環境材料研究センター液体水素材料研究センター、参事役)
- ② 研究項目: 磁気冷凍材料および水素液化システムに関する研究開発

### (2) 前川製作所グループ

- ① 主たる共同研究者: 神村岳(株式会社前川製作所技術企画本部技術研究所、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(国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校電子機械工学科、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(自然科学研究機構核融合科学研究所ヘリカル研究部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(九州大学大学院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(株式会社ミラプロ技術開発本部、取締役)
- 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(アルバック・クライオ株式会社技術部、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(JX 金属株式会社技術開発センター磯原分室、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(京セラ株式会社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:近藤真史(住友商事株式会社エネルギーイノベーション・イニシアチブ水素事業第一部、部長)

② 研究項目:水素磁気冷凍技術の社会実装

(12) 荏原製作所グループ

① 主たる共同研究者:塚本輝彰(株式会社荏原製作所水素事業戦略室技術開発グループ、CP 水素関連事業プロジェクトマネージャー)

② 研究項目:水素液化磁気冷凍システムの開発

(13) 前田建設グループ

① 主たる共同研究者:安井利彰(前田建設工業株式会社 ICI 総合センターイノベーションプロジェクトセンター、センター長)

② 研究項目:水素磁気冷凍技術の社会実装

(14) 日揮グローバルグループ

① 主たる共同研究者:唐澤俊之(日揮グローバル株式会社プロジェクトソリューションズセンター/トランジション技術探索部、執行役員)

② 研究項目:コスト評価と社会実装モデルの検討

(15) 関西電力グループ

① 主たる共同研究者:中田博之(関西電力株式会社水素事業戦略室技術開発グループ、チーフマネージャー)

② 研究項目:水素インフラ構築の検討

(16) 三菱重工グループ

① 主たる共同研究者:志村康治(三菱重工業株式会社防衛・宇宙セグメント宇宙事業部技術部、部長)

② 研究項目:ゼロボイルオフ液化技術の開発

## § 2. 研究開発成果の概要

令和5年度は企業との連携による実用材料開発や液化システム開発が進展し、多くの研究成果が得られた。

磁気冷凍材料開発グループは、セラミックス系磁気冷凍実用材料、金属系磁気冷凍実用材料、表面制御および材料基盤技術を担当する3チームに再編し、基礎物性から冷凍機実装レベルまでを網羅した研究開発を実施した。実用材料開発では企業との連携により多数の試作を行い、耐水素性が高くカルノーサイクルで高性能が見込まれる、凝縮型熱交換器向けのセラミックス材料を開発した。金属材料では、AMR サイクルの動作温度拡大に向けた材料複層構造を決定し、これらの材料の実用化に向けて量産性の高い粒子作製技術を確立した。これらの金属系材料について、高い耐水素性を付与する表面処理技術を見出した。オルソ・パラ水素変換触媒では、77 K における活物質の多数調査により触媒機能発現指標を抽出し、高性能材開発の指針を得た。さらに、機械学習や多面的バルク機能評価手法を活用した磁気冷凍材料の探索を行い、高性能な新材料の開発指針を得た。

水素液化システム開発グループは、水素液化磁気冷凍機チーム、水素ゼロボイルオフ磁気冷凍機チーム、コスト評価と社会実装チームで構成され、連携して研究開発を進めている。開発した低温ポンプは、極低温環境下にポンプを設置することで、従来の室温ガス循環装置に比べて消費電力を1/1000程度と大きく削減できることがわかった。磁気冷凍機に適用できる高温超伝導磁石開発では、20 K で定格電流 300 A (磁石中心磁場 4.8 T) での運転に成功し、将来の高効率化と大容量化に直接的に資する成果となった。また、極低温でも磁場強度が低下しない永久磁石や、 $MgB_2$  線材を用いた回転超伝導磁石の開発を進めている。コスト評価と社会実装チームでは今後の社会実装モデルとして3つのケースが提案され、それぞれについて必要な仕様や実施に向けた課題の抽出が行われた。

### 【代表的な原著論文情報】

- (1) Hideki Abe, Hiroshi Mizoguchi, Ryuto Eguchi, Hideo Hosono, “Exploration of heterogeneous catalyst for molecular hydrogen ortho-para conversion”, *Exploration* 20230040 (2023).

DOI 10.1002/EXP.20230040.

金属や金属酸化物、ハロゲン化物を含む約 200 種類の固体材料に対し、液体窒素温度 (77 K) におけるオルソ/パラ水素変換触媒活性評価を実施、四酸化三マンガン ( $Mn_3O_4$ ) や一酸化コバルト ( $CoO$ )、二酸化セリウム ( $CeO_2$ ) が、優れた触媒活性を持つことを明らかにした。さらに、材料の触媒活性に影響を与える因子として、触媒表面の局所電場が最も支配的であることを見出した。

- (2) Kensei Terashima, Pedro Baptista de Castro, Akiko Takahashi Saito, Takafumi D Yamamoto, Ryo Matsumoto, Hiroyuki Takeya and Yoshihiko Takano “Experimental exploration of  $ErB_2$  and SHAP analysis on a machine-learned model of magnetocaloric materials for materials design”, *Science and Technology of Advanced Materials: Methods* **3**, 1, 2217474 (2023).

DOI 10.1080/27660400.2023.2217474.

多くのデータを学習して磁気冷凍特性の優れた材料組成を自動的に予測する機械学習モデルを基に、SHAP 解析を融合して発展させた。SHAP 解析は特徴量の貢献度を得ることが可能な手法であり、学習の

結果得られた物質データに対する知見を特徴量と紐づけて可視化できる。これにより、統計的処理を経て作成されたモデルから、優れた磁気冷凍特性を得るための重要因子を抽出することが可能となり、潜在した物質探索指針の顕在化に有用なツールを構築できた。

- (3) G. Nishijima and K. Kamiya, "Test Results of Conduction-Cooled Bi-2223 Magnet With Shield Coils at Both Ends," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2024, Art no. 4602905, doi: 10.1109/TASC.2024.3358254.

開発した Bi-2223 高温超伝導磁石は、設計通り運転温度 20 K において、4.8 T の定格磁場発生に成功した。本磁石を磁気冷凍機に実装すれば、磁気冷凍機が液化した水素を用いて冷却することができるため、磁石冷却用の冷凍機が不要となる可能性を示唆する。