

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]

[物質・材料研究機構エネルギー・環境材料研究センター
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 6 年 4 月 1 日～令和 7 年 3 月 31 日

§1. 研究開発実施体制

(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、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、部長)
- 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、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、CP 水素関連戦略ビジネスユニット、統括部長)
- 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土木技術本部土木技術部、部長)
- 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

(17) 筑波大グループ

- ① 主たる共同研究者: 石田 政義(筑波大学システム情報系、教授)
- ② 研究項目: 高効率水素液化システムに関する研究開発

§2. 研究開発成果の概要

令和 6 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、社会実装のシナリオ作成が進展し、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、セラミックス系実用材料、金属系実用材料、表界面制御および材料基盤技術の3チームで構成され、基礎物性から冷凍機適用までを網羅した研究開発を行った。耐水素性が高いセラミックス材料では、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新材料を発掘(特許出願)した。金属材料では、AMR サイクルで 20 K~77 K の動作温度をカバーする 4 種の球状粒子を各数kg 作製した。金属系粒子に耐水素性を付与する表面処理技術を確立すると共に、30 K で高性能な新規オルソ・パラ水素変換触媒を発掘した。

水素液化システム開発グループは、より高い冷凍能力と効率を持つ冷凍機を実現すべく、高効率低温ポンプと大型超伝導電磁石を備えた磁気冷凍機を製作した。本機の冷却実験を繰り返し、改良を重ね、運転の最適化を進めている。大型化に伴い懸念された、電磁石と磁性材料との間に働く磁気力の増大は、磁性材料の適切な配置によって緩和できることが確認された。また、磁気冷凍機からの排熱を担う大容量 GM 冷凍機の開発とターボ・ブレイトン冷凍機の製作が完了した。一方で小型磁気冷凍機開発においては、極低温でも磁場強度が低下しない永久磁石の開発が成功し、回転型永久磁石を用いた極低温磁気冷凍機の高効率化が期待できる結果となった。

社会実装グループは、磁気冷凍技術に関するコスト評価を行い製造コストにおける優位性を確認した。水素のサプライチェーンについて、エネルギー・産業・輸送の部門毎にセグメント解析を行い、液化水素と磁気冷凍による液化技術が有効に発揮できる分野を調査した。その結果、液化水素と磁気冷凍の組み合わせのメリットは小型分散需要において効果的であることがわかった。これをもとに、グリーン水素小型エネルギープラントや液化水素ステーション等の 5 つの社会実装対象を取り上げ、技術仕様や需要等について検討した。

【代表的な原著論文情報】

[1] Koichi Matsumoto, Hironori Hasegawa, Masaki Horie, Hideaki Kitazawa, Akiko T. Saito, Takenori Numazawa, "Thermal and electrical conductivity of magnetic refrigerant holmium diboride for magnetic refrigerator application", Cryogenics, vol. 146 (2025) 104020. DOI 10.1016/j.cryogenics.2024.104020

HoB₂ の輸送特性として熱伝導率、電気抵抗率を測定し、想定される磁性体サイズで熱輸送が十分に行われる熱伝導特性と磁場変化に伴う渦電流発熱の程度を評価した。その結果、現在の試験より高出力化が可能な運転条件でも、凝縮熱交換器材料として適用可能であることを確認した。

[2] Yusuke Kimura, Yuki Emori, Hiroshi Miyazaki, Kyohei Natsume, Koji Kamiya, and Gen Nishijima, "Electromagnetic Analysis Evaluation of Split NbTi Superconducting Magnet for Scaled up Active Magnetic Regenerative Refrigeration System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity 35 (2025) 4900305. DOI 10.1109/TASC.2024.3512515

水素液化用の磁気冷凍機に用いる NbTi 製超伝導電磁石に磁性材料 HoAl₂ を出し入れした場合に、超伝導電磁石に生じる電圧、磁気力、交流損失などを有限要素法による解析で明らかにした。磁性材料を適切な配置にすることで磁気力を低減することができることを確認した。

[3] S. Masuyama, K. Natsume, K. Kamiya, and T. Numazawa, “Achievement of 120 W at 80 K by Synchronous Operation of Two Single-Stage G-M Cold Heads Driven by a 2 W Class Compressor”, *Cryocooler* 23 (2024) 185-191.

通常は1台の圧縮機で1基のGM冷凍機を稼働するところを、1台の圧縮機で2基のGM冷凍機を同期運転させ、実験を行った。同期運転の方法について比較・検討し、液化水素温度以上の温度域で効率を向上させることに成功した。