

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型  
年次報告書

令和3年度  
研究開発年次報告書

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 招聘研究員]

[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3年4月1日～令和4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 招聘研究員)

### (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

- ・ 探索・創製
- ・ バルク機能評価
- ・ 表界面制御

2. 水素液化システムの開発

- ・ 磁気冷凍システム
- ・ AMR 技術
- ・ 磁場発生技術
- ・ 経済性検討

### (2) 前川製作所グループ

② 主たる共同研究者: 星野昌幸 (前川製作所技術研究所・課長)

③ 研究項目: 磁気冷凍システム

### (3) 日本イットリウムグループ

① 主たる共同研究者: 小林 大作 (日本イットリウム・代表取締役社長)

② 研究項目: AMR 技術

### (4) 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

### (5) 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

### (6) 京都大学グループ

① 主たる共同研究者: 白井 康之 (京都大学工学部電気電子工学科・教授)

② 研究項目: 磁場発生技術

## § 2. 研究開発成果の概要

令和 3 年度は材料および液化システムの開発が進捗し、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、水素液化に必要な温度領域(20 K~77K)で磁気エントロピー変化 $-\Delta S_m^{\max}$  が  $0.1 \text{ J/cm}^3\text{K}(0\sim 5\text{T})$ 、 $0.1 \text{ J/cm}^3\text{K}(0\sim 1\text{T})$ を示す磁気冷凍材料の開発を継続した。既に昨年度開発された 1 次転移を示す ErCo<sub>2</sub> 系材料に関して、Co を Fe や Fe + Ni などの特定の 3d 金属元素で置換することにより、転移温度で巨大な磁気熱量効果を維持しながら、構造変態を回避することでヒステリシスを排除できることを実証した。この材料系を中心とした球状試料開発は、ステージ 2 に引き継がれる予定である。さらに、物質開発に欠かせない XRD パターンから即座に構造モデルを特定できるデータ駆動型物質探索をさらに加速するツール XERUS システムを開発し、公開した。一方、次世代の巨大磁気熱量効果発現機構の第二の候補と考える遍歴メタ磁性転移の典型的な相図を電子論的な観点からの材料探索の指針を得ることができた。当グループで独自に開発されたオペランド水素顕微鏡を用いて、水素環境での利用を想定した構造材料について表面滞在水素を、時間応答性を含めて画像化することで、結晶構造と拡散係数などの水素透過挙動を関係づけることに成功した。今後は、磁気冷凍材料の耐水素化コーティング膜開発に応用展開する予定である。

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、POC2 においては 4 駆動サイクルによる液化水素温度の発生を目標として、研究を実施した。POC1 では、水素液化実証試験機の本格的な運転が行われ、水素の液化実証に成功した。磁気冷凍の実用化には AMR サイクルが必須であり、AMR サイクルでは世界初の水素液化となる。POC2 では永久磁石を用いた 4 駆動型 AMR サイクルの実証に成功し、20K 領域の温度発生を確認した。また、AMR 用磁気冷凍材料製造技術の実用化が進められ、kg オーダーでの製造に成功した。さらに、Bi 系高温超伝導体を用いた超伝導磁石が完成し、各種特性試験が実施された。

### 【代表的な原著論文情報】

- (1) Hiroyuki Yamase, Yoshiharu Sakurai, Masaki Fujita, Shuichi Wakimoto, Kazuyoshi Yamada, “Fermi surface in La-based cuprate superconductors from Compton scattering imaging”, *Nature Communications* **12**, 2223 (2021).

世界的にも大型放射光施設 SPring-8 でしか実施出来ない、高強度の高エネルギー X 線を用いたコンプトン散乱という手法によって、銅酸化物高温超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  におけるフェルミ面の詳細な観測を行った。その結果、35 年間信じられてきた従来の二次元的なフェルミ面の形状ではなく、一次元的な電子の運動が重なり合った状態であることを実験的に示すことに初めて成功した。

- (2) Akiko N. Itakura, Naoya Miyauchi, Yoshiharu Murase, Taro Yakabe, Masahiro Kitajima, Satoka Aoyagi, “Model of local hydrogen permeability in stainless steel with two coexisting structures”, *Scientific Reports* **11**, 8553 (2021).

これまで構造材料として使用される金属材料は組成や構造が不均一であるため、金属材料中の水素拡散挙動全体を把握することは困難であった。本研究では、時間分解された「オペランド水素顕微鏡」を使用して、オーステナイトおよびマルテンサイト構造を持つステンレス鋼の微細構造における水素の局所拡散挙動を界面での水素の移動を考慮したシミュレーションモデルを使用することによって解釈することに成功した。

- (3) Pedro Baptista de Castro, Kensei Terashima, Takafumi D. Yamamoto, Suguru Iwasaki, Akiko T. Saito, Ryo Matsumoto, Shintaro Adachi, Yoshito Saito, Mohammed ElMassalami, Hiroyuki Takeya, Yoshihiko Takano, “Enhancement of giant refrigerant capacity in  $\text{Ho}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_2$  alloys ( $0.1 \leq x \leq 0.4$ )”, *Journal of Alloys and Compounds* **865**, 15881 (2021).

$\text{HoB}_2$  の巨大な磁気熱量特性を最適化するために、 $\text{Ho}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_2$  ( $0.1 \leq x \leq 0.4$ ) 合金の磁気熱量特性を合成して特性評価した。この濃度範囲では、水素液化用磁気冷凍に必要な温度範囲において比較的高い冷凍能力を示すことがわかり、 $\text{Ho}_{1-x}\text{Gd}_x\text{B}_2$  合金は、水素液化用磁気冷凍材料の候補であることが分かった。