

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
年次報告書

令和元年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名:森 孝雄]

[国立研究開発法人物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点・グループリーダー]

[研究開発課題名:磁性を活用した革新的熱電材料・デバイスの開発]

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

(1)「森」グループ(物質・材料研究機構)

① 研究開発代表者: 森 孝雄(物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター、分野長)

② 研究項目

- ・超高性能薄膜の磁性との相関解明
- ・超高性能熱電薄膜の開発(n 型制御、p 型開発、作製条件制御)
- ・磁性半導体熱電薄膜の開発
- ・高性能磁性半導体バルク熱電材料の開発
- ・高性能ナノ構造バルク熱電材料の開発
- ・TD-TR による薄膜熱評価技術の開発
- ・モジュールの作製へ向けた基礎プロセス開発

(2)「パウアー」グループ(ウィーン工科大学)

① 主たる共同研究者: エルンスト パウアー (ウィーン工科大学固体物理研究所、教授)

② 研究項目

- ・超高性能熱電薄膜の開発(n 型制御、p 型開発、作製条件制御)

(3)「小形」グループ(東京大学)

① 主たる共同研究者: 小形 正男 (東京大学大学院・理学系研究科、教授)

② 研究項目

- ・磁性による熱電特性の増強に関する理論的な機構解明、マテリアルデザイン

(4)「野村」グループ(東京大学生産技術研究所)

① 主たる共同研究者: 野村 政宏 (東京大学生産技術研究所、教授)

② 研究項目

- ・フォノンの平均自由行程スペクトル測定および解析法の検討
- ・平面型熱電変換デバイスの構造最適化シミュレーションの作成

(5)「川本」グループ(物質・材料研究機構)

① 研究開発代表者: 川本 直幸 (物質・材料研究機構、主幹研究員)

② 研究項目

- ・熱電薄膜や熱電薄膜実デバイスに活用できる TEM 内熱評価技術の開発

(6)「塩見」グループ(東京大学)

① 研究開発代表者: 塩見 淳一郎 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

② 研究項目

- ・モジュールの冷却側の伝熱制御技術の開発

(7)「宮崎」グループ(九州大学)

① 研究開発代表者:宮崎 康次 (九州大学工学研究院、教授)

② 研究項目

- ・印刷技術の開発
- ・混合材料の評価

(8)「竹内」グループ(豊田工業大学)

① 研究開発代表者:竹内 恒博 (豊田工業大学大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・熱電モジュールの新規デザイン

(9)「李」グループ(産業技術総合研究所)

① 主たる共同研究者:李 哲虎 (産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、首席研究員)

② 研究項目

- ・バルク熱電モジュールの試作
- ・熱電モジュールの評価

(10)「櫻井」グループ(筑波大学)

① 主たる共同研究者:櫻井 岳暁 (筑波大学数理物質系、教授)

② 研究項目

- ・半導体薄膜型熱電材料の欠陥評価とプロセスフィードバック

§ 2. 研究開発成果の概要

本課題では、パラマグネティックドラッグなどの磁性を活用した熱電増強新原理やナノ構造制御および薄膜効果を活用することにより、IoT 動作電源およびカーボンニュートラルに貢献できるような省エネなどの実用化に資する熱電材料の原理実証・材料開発、および、産業プロセスに適したモジュール化やモジュールの要素技術の開発に取り組んでいる。令和 5 年度に関しては、下記のような研究進展が得られた。

ホイスラー Fe_2VAI 系の超高性能薄膜に関しては、バルク材料の最高性能より数倍超高性能の p 型薄膜の開発が進んだ。また、面間にかかる温度差を面内に変換するデザインの薄膜型の熱電発電デバイスの作製に成功し、当該材料の最大発電密度を達成した。また、本プロで開発した、半世紀チャンピオンとして君臨した Bi_2Te_3 系材料の最高性能モジュールに匹敵・凌駕する新規材料をはじめとするオリジナルのバルク材料に関して、更なる高性能化に成功して、単素子デバイスで世界最高の変換効率 $\sim 12\%$ の実証に成功した。一方で、バンド構造および電荷散乱機構の制御により、二元系の金属合金のバルク材料において室温近傍で $34 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$ の超高出力因子を実現した。従来は半導体材料が検討されており、画期的な発見である。プロ開発のスクッテルライト化合物熱電素子から成るフレキシブル熱電モジュールを試作し、従来の Bi_2Te_3 から成るフレキシブルモジュールと同等の起電力を得るに至った。新規モジュールデザインとして 100°C 以下のプロセスで作製可能なチップ型モジュールを開発し、既存素子に迫る性能を示すことを明らかにした。また、要素技術として、パルス化を図った特殊な透過電子顕微鏡により物質内で温度の波を発生させ、独自開発のナノ熱電対による精密温度測定を駆使した新たな時間分解ナノスケール熱輸送観察法の開発に世界に先駆けて成功した。

【代表的な原著論文情報】

1. Longquan Wang, Naoki Sato, Ying Peng, Chetty Raju, Naoyuki Kawamoto, Duy Hieu Nguyen, and Takao Mori, “Realizing high thermoelectric performance in n-type $\text{Mg}_3(\text{Sb}, \text{Bi})_2$ -based materials via synergetic Mo addition and Sb-Bi ratio refining”, *Advanced Energy Materials*, 13, 2301667 (2023).
Selected as Front Cover Article
2. F. Garmroudi, M. Parzer, A. Riss, C. Bourges, S. Khmelevskiy, T. Mori, E. Bauer, A. Pustogow, “High thermoelectric performance in metallic NiAu alloys via interband scattering”, *Science Advances*, 9, eadj1611 (2023).
3. Hieu Duy Nguyen, Isamu Yamada, Toshiyuki Nishimura, Hong Pang, Hyunyoung Cho, Dai-Ming Tang, Jun Kikkawa, Masanori Mitome, Dmitri Golberg, Koji Kimoto, Takao Mori, Naoyuki Kawamoto, “STEM in-situ thermal wave observations for investigating thermal diffusivity in nanoscale materials and devices”, *Science Advances*, 10, eadj3825 (2024).