

新材料「熱電永久磁石」に基づく 次世代発電・冷却技術

物質・材料研究機構 (NIMS)

磁性・スピントロニクス材料研究センター
スピンエネルギーグループ 上席グループリーダー

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
物質系専攻 教授

内田 健一

2024年12月6日

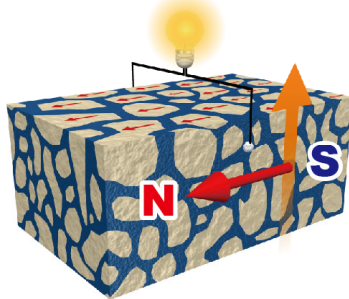
新技術の概要

- 永久磁石でありながら、**熱から発電**したり、**電流を流すことで冷却**したりできる新しい機能性材料「**熱電永久磁石**」を開発
- 磁石という身近な材料で**環境発電**や**熱マネジメント**を行う新たな手段を提供
- 熱電永久磁石の発電出力密度は、すでに**市販品の熱電モジュールに匹敵する水準に到達**
- シンプルな素子構造により堅牢性を向上
- 放熱機構を素子内に組み込みエネルギーハーベスティング性能を向上可能

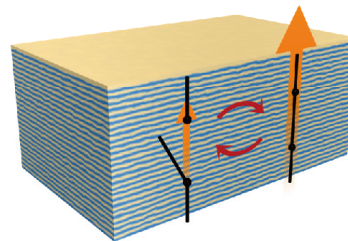
JST ERATO 内田磁性熱動体プロジェクトの目的と概要

身の回りにありふれている磁石を使って、**熱を電気に直接変換**したり、**電流や磁場を印加することで冷却**したり、**能動的に熱の流れを制御**できたりしたら、**革新的な省エネ・創エネ技術に繋がるのではないかな？**

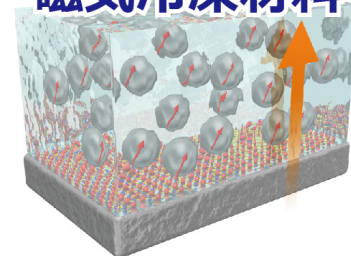
【熱変換】
熱電永久磁石



【熱制御】
磁性複合
熱スイッチ材料



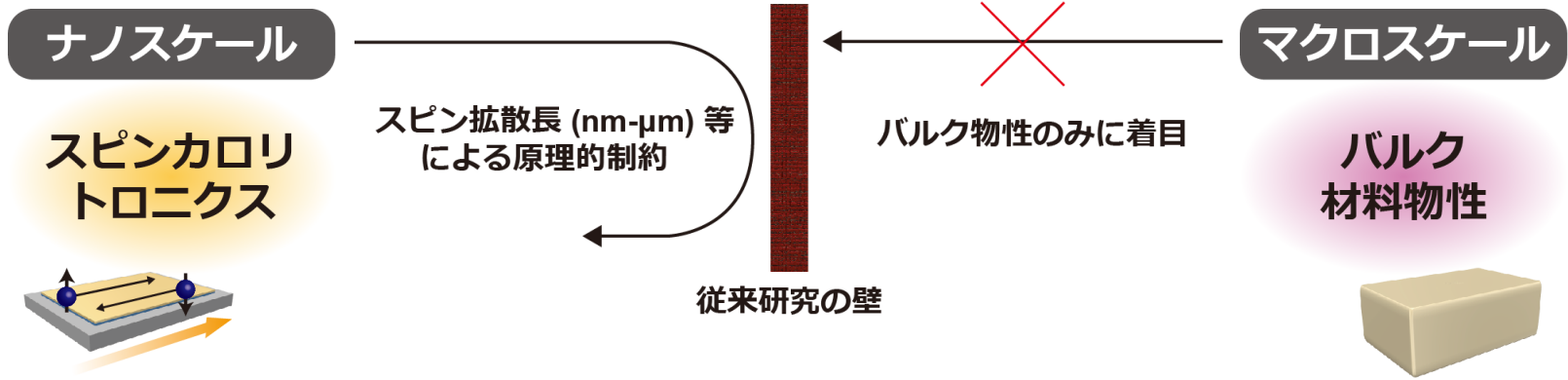
【熱移送】
相界面制御
磁気冷凍材料



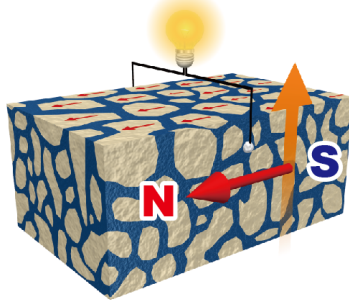
革新的エネルギー材料群「磁性熱動体」の創製と応用技術開発

- スピントロニクス・熱電変換・熱輸送物性の融合分野「スピнкаロリトロニクス」の応用展開に向けた物質・材料科学を推進
- 日本が育み、世界をリードしてきた基礎研究分野を実応用技術に結実
- 磁性熱動体の創製により実現される新原理エネルギーハーベスティング・熱マネジメント技術により持続可能社会の実現に貢献

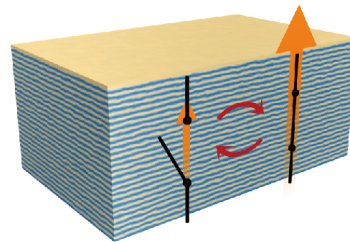
JST ERATO 内田磁性熱動体プロジェクトの目的と概要



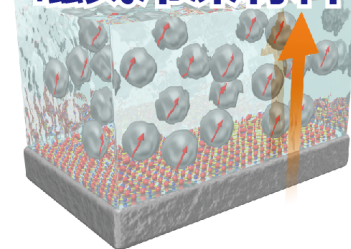
【熱変換】
熱電永久磁石



【熱制御】
磁性複合熱スイッチ材料

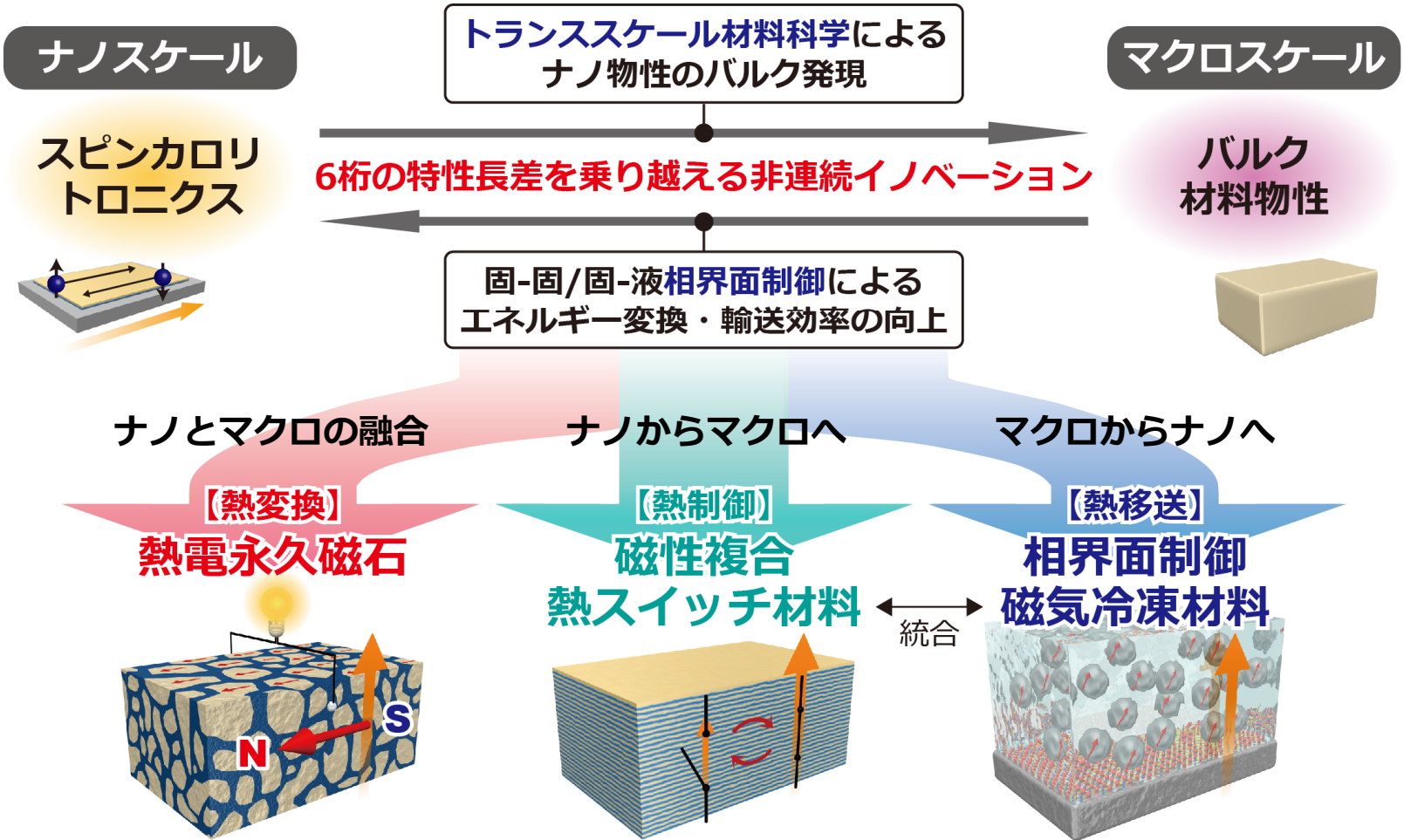


【熱移送】
相界面制御磁気冷凍材料



革新的エネルギー材料群「磁性熱動体」の創製と応用技術開発

JST ERATO 内田磁性熱動体プロジェクトの目的と概要

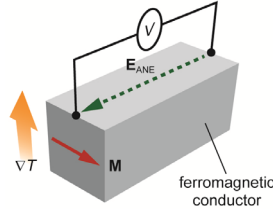


革新的エネルギー材料群「磁性熱動体」の創製と応用技術開発

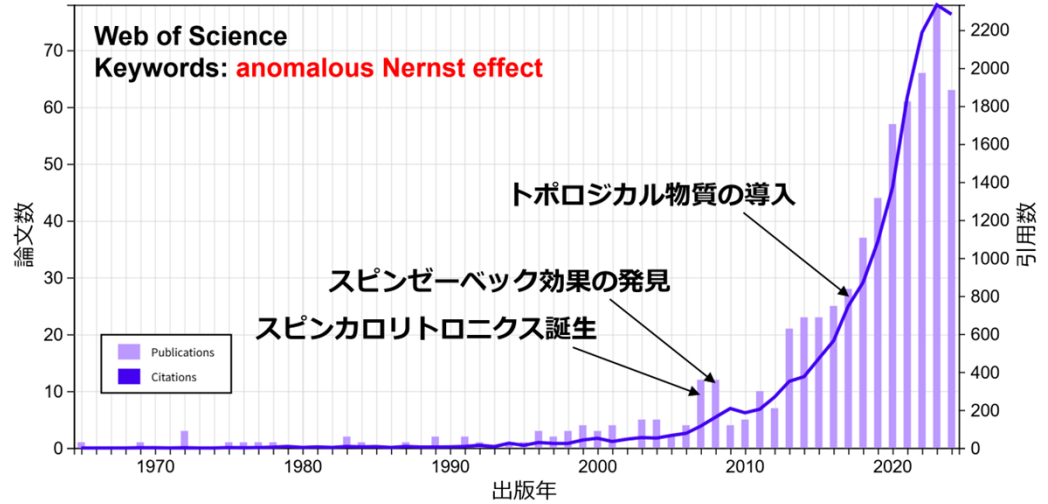
縦型熱電変換から横型熱電変換へ

異常ネルンスト効果

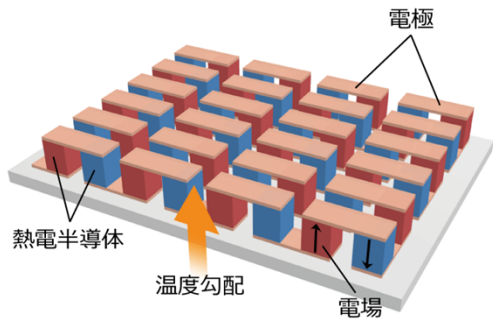
磁性体において磁化と温度勾配の外積方向に熱起電力が発生



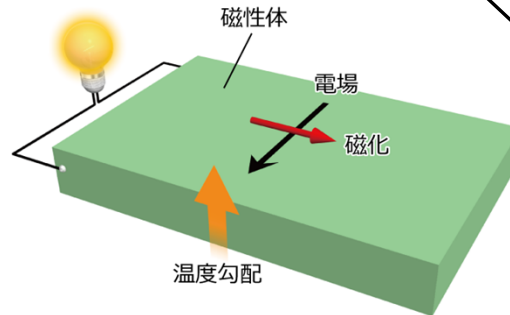
- スピンゼーベック効果の発展に伴い異常ネルンスト効果に関する研究も世界的に活性化
- 熱電能の大幅改善が必須
- 従来物質では外部磁場印加が必要



縦型熱電変換素子 (従来技術)



横型熱電変換素子



様々な横型熱電変換原理：

- スピンゼーベック効果
- 正常/異常ネルンスト効果
- ゼーベック駆動ホール効果
- 非対角ゼーベック効果
- etc...

横型熱電効果を用いることで複雑な3次元構造が不要に → 高汎用性・低コスト
接合が不要であるため接触電気・熱抵抗が大幅に低減 → 高耐久性・高効率化

横型熱電変換の性能指数

横熱電能 (単位温度勾配当たりの出力電場)

↓

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{K} T$$

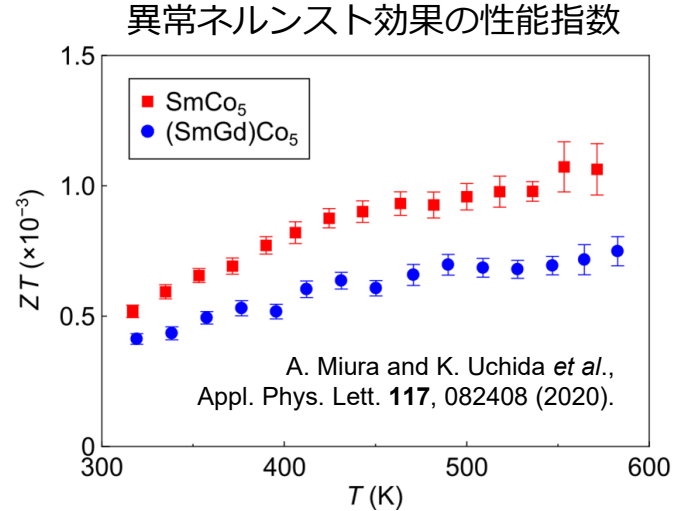
← 電気伝導率 (電場方向)

← 絶対温度

↑

熱伝導率 (温度勾配方向)

〔等温熱的境界条件下において
性能指数 $\rightarrow \infty$ で素子効率が
カルノー効率に漸近〕



$ZT \sim 1 \times 10^{-3}$ for SmCo₅ (>450 K)
 $\sim 3 \times 10^{-3}$ for YbMnBi₂ (~170 K)
 Y. Pan *et al.*, Nature Mater. **21**, 203 (2022).

性能指数改善に向けた一般則

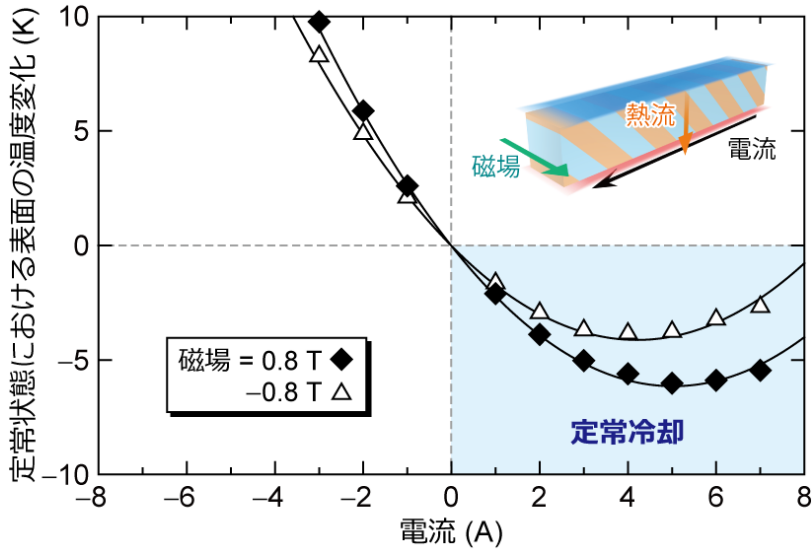
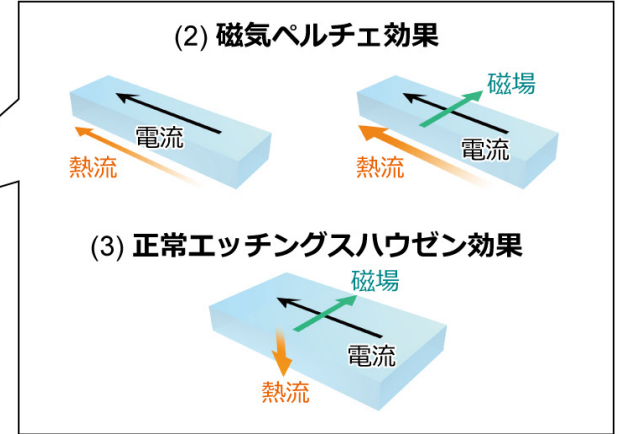
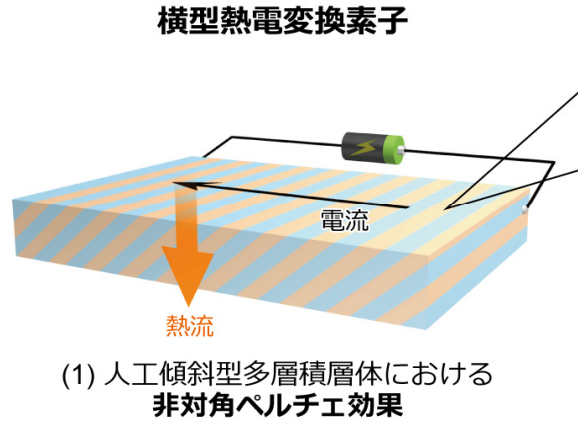
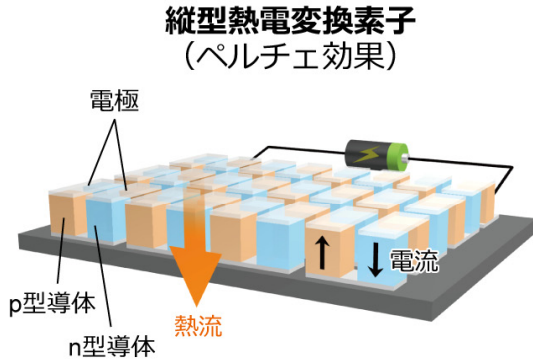
高い横熱電能 + **高い電気伝導率** + **低い熱伝導率**

横熱電能の改善が最重要
**多階層構造の導入により
 1桁以上改善へ!**

金属ベースである
 ためすでに従来熱
 電素子よりも高い

- ナノ構造化技術
- フォノンエンジニアリング
- 異方性導入 (σ とのトレードオフ回避)

ハイブリッド横型磁気熱電変換



単一の複合材料中で複数現象を発現させ、
横型熱電変換特性を大幅に高性能化

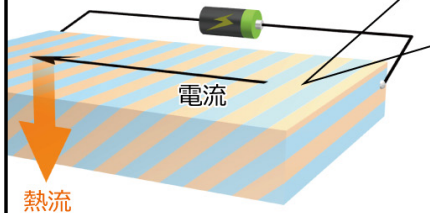
- ✓ **Bi₈₈Sb₁₂/Bi_{0.2}Sb_{1.8}Te₃複合材料を用いて
本コンセプトの有効性を実証**
- ✓ **正磁場印加により熱電冷却能を増強
(5 A印加で6 K定常冷却)**

K. Uchida, T. Hirai, F. Ando, and H. Sepelari-Amin,
Advanced Energy Materials **4**, 2302375 (2024).
2023年11月30日 NIMS&JST共同プレスリリース

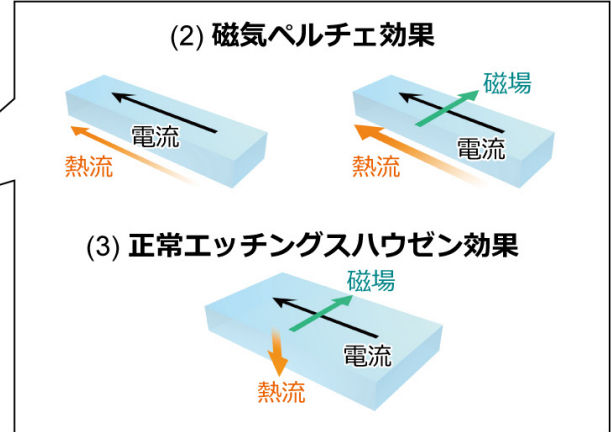
ハイブリッド横型磁気熱電変換



横型熱電変換素子



傾斜型多層積層体における非対角ペルチェ効果



単一の複合材料中で複数現象を発現させ、横型熱電変換特性を大幅に高性能化

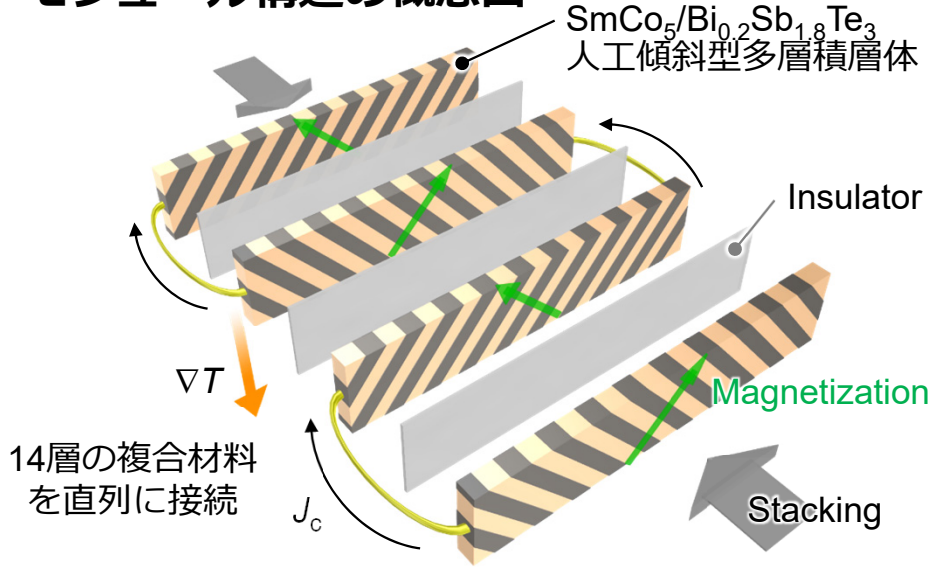
- ✓ **Bi₈₈Sb₁₂/Bi_{0.2}Sb_{1.8}Te₃複合材料を用いて本コンセプトの有効性を実証**
- ✓ **正磁場印加により熱電冷却能を増強 (5 A印加で6 K定常冷却)**

K. Uchida, T. Hirai, F. Ando, and H. Sepehri-Amin, *Advanced Energy Materials* **4**, 2302375 (2024).
2023年11月30日 NIMS&JST共同プレスリリース

※ 講演中に使用したスライドに記載の材料組成に一部誤植があり修正致しました。

永久磁石として機能する 高出力“横型”熱電変換モジュール

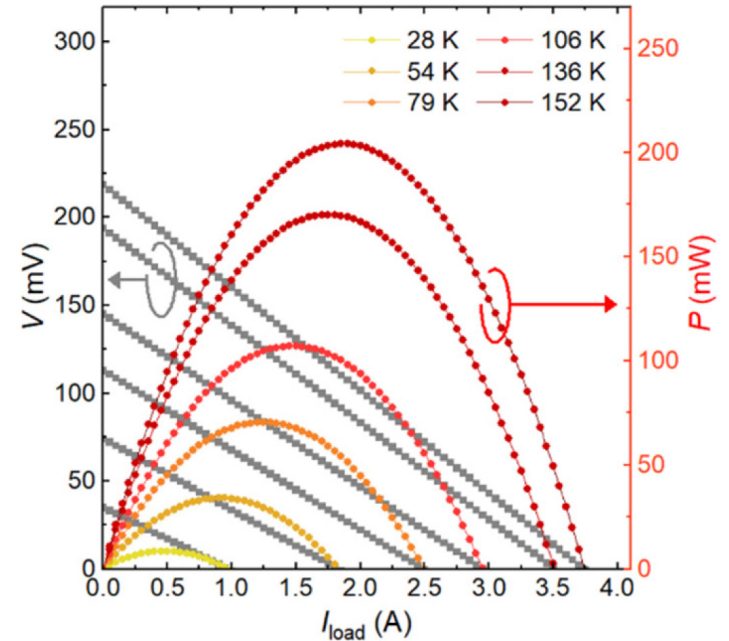
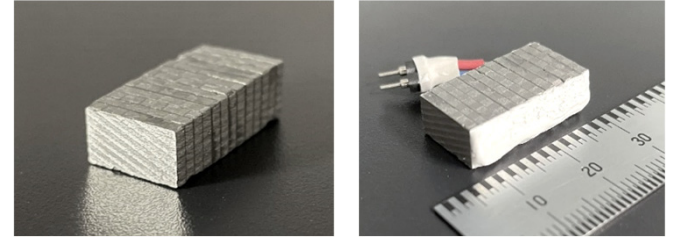
モジュール構造の概念図



- ✓ **市販の熱電モジュールに迫る発電出力密度**：
横型デバイスとして世界最高性能（異常ネルンスト効果の性能指数より2桁以上高い $zT \sim 0.2@室温$ ）
- ✓ **磁力で熱源に密着固定可能**
- ✓ **堅牢な素子構造**（材料充填率>90%）
- ✓ **次世代エネルギーハーベスティング技術・電子冷却技術の実現へ**

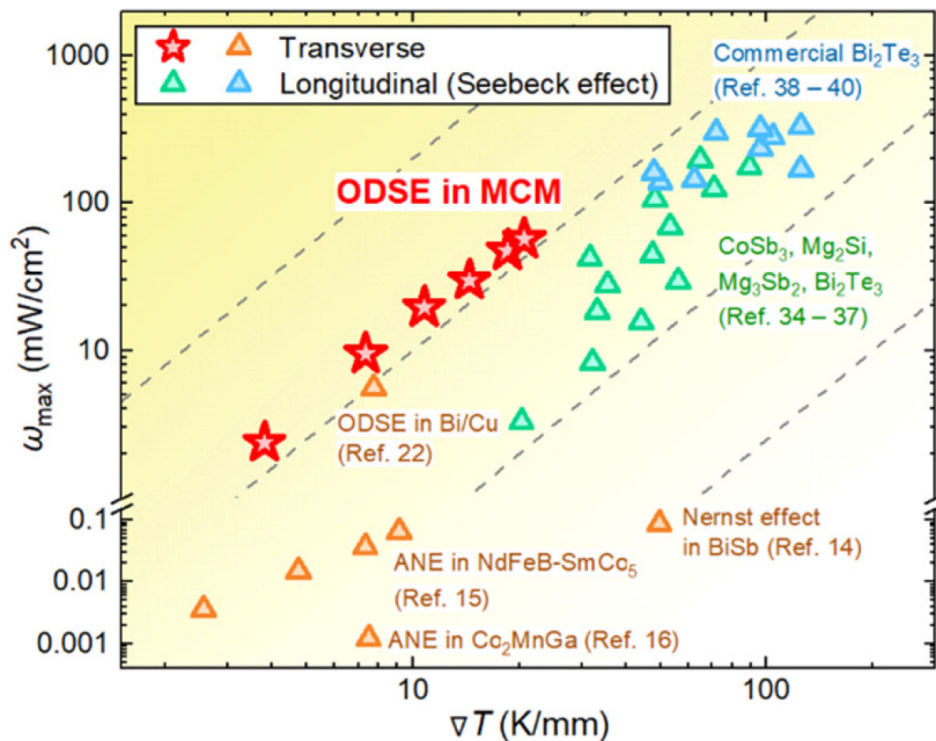
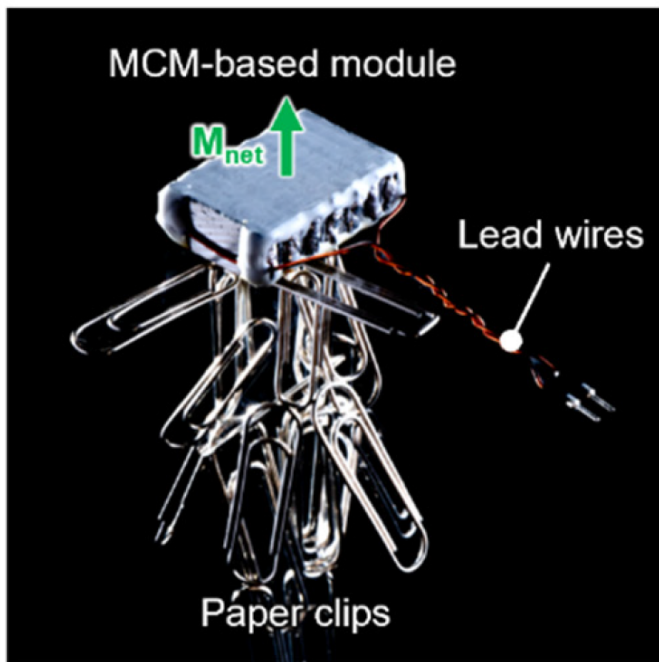
※ 講演中に使用したスライドに記載の材料組成・パラメータに一部誤植があり修正致しました。

熱電発電特性の評価



PCT/JP2024/029872 安藤冬希、追川康之、内田健一
F. Ando et al., arXiv:2402.18019

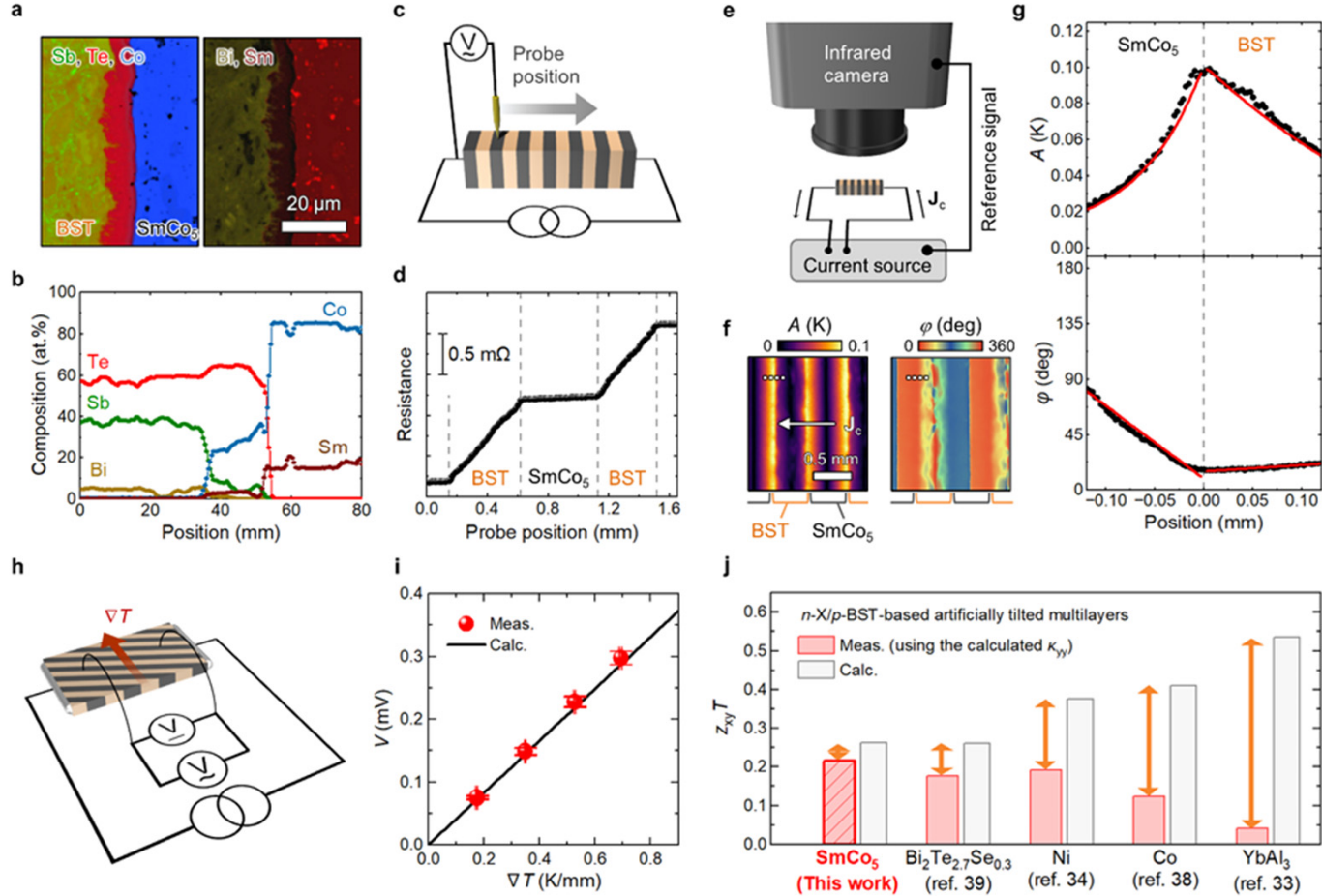
永久磁石として機能する 高出力“横型”熱電変換モジュール



横型熱電変換素子として世界最高値であり、市販の縦型（ゼーベック効果駆動型）熱電変換素子と同等以上の発電出力密度 **56.7 mW/cm²** を観測

現時点では性能指数・発電効率はやゼーベック素子に劣るため、
更なる性能向上を目指した材料研究が進行中

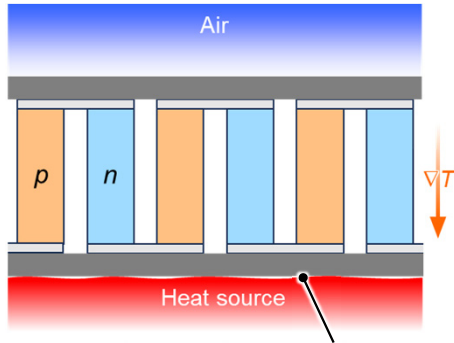
永久磁石として機能する 高出力“横型”熱電変換モジュール



理論値に匹敵する実験値を観測：優れた横型熱電変換性能は
界面電気・熱抵抗を検出限界以下にまで低減したことに由来

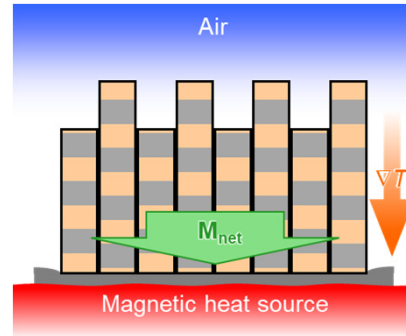
熱電永久磁石がもたらす新たな機能性

従来の縦型熱電モジュール
(断面図)



Imperfect attachment
with heat source

熱電永久磁石で構成した横型熱電モジュール
+
ビルトインヒートシンク構造

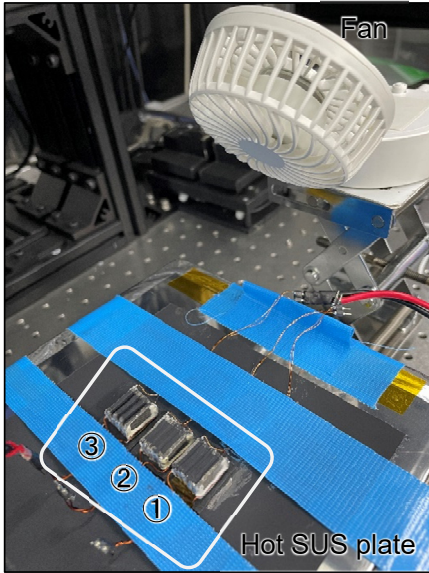


- 磁気吸着により熱源と熱電モジュールの接触熱抵抗を低減
- ビルトインヒートシンク構造により大気への放熱を促進

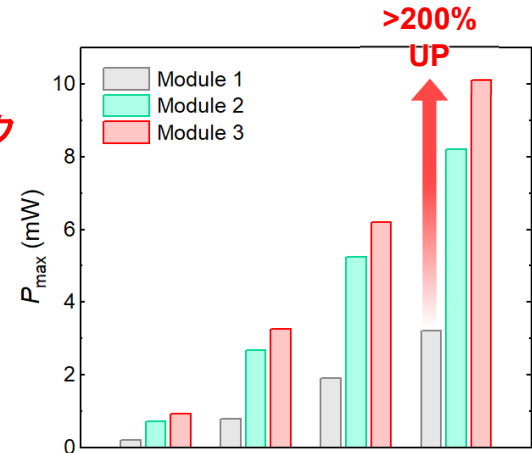
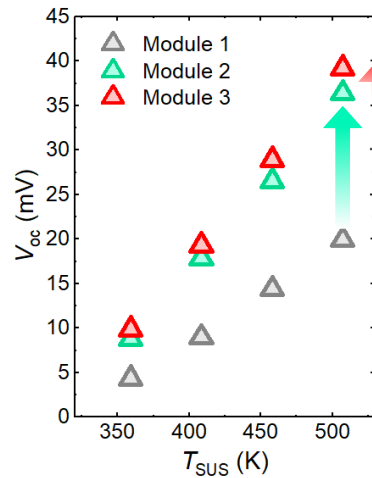
F. Ando *et al.*,
arXiv:2402.18019

熱源から効率的に温度勾配を生み出すことが可能に

熱電永久磁石がもたらす新たな機能性



開放端電圧 V_{oc} ($\propto \nabla T$) と最大出力電力 P_{max} ($\propto \nabla T^2$) の比較



- ①消磁した素子、②着磁した素子、③着磁&ビルトインヒートシンク構造を有する素子 の3種を熱源に置いた際の発電特性を比較
- 磁気吸着・ビルトインヒートシンク構造の双方が効率的な熱伝達および熱電発電に寄与

新技術の特徴・想定される用途

- 従来の横型熱電変換の問題点であった**出力電力・冷却性能の低さを克服**
- **標準的な焼結プロセス、配線・接着技術のみでモジュールを作製可能**
- 多数の異物質接合から構成される縦型熱電素子が抱えていた**材料-デバイス間の性能の乖離、低い材料充填率・機械的強度などの問題を解決**
- 永久磁石が使用されているあらゆる場所に**熱電発電・電子冷却機能を付与**
- IoT機器の**オフグリッド電源等として活用可能**



実用化に向けた課題・企業への期待

- 出力は素子面積に比例：**大面積化技術、モジュール技術**（自動配線等）の導入により手作業ベースでは不可能な高出力素子を開発
- **さらなる横型熱電変換性能の向上のための新材料開発**：磁性材料や熱電半導体材料の合成技術、異物質の接合技術を有する企業との共同研究を希望
- 熱電永久磁石の特徴・特性を生かした**新規アプリケーション**の探索・創出
- 2025年1月29-31日にENEX2025およびnano tech 2025 @東京ビッグサイトにて**熱電永久磁石による発電デモ装置を展示**

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ハイブリッド横型熱電発電素子およびこれを用いた発電方法
- PCT出願番号 : PCT/JP2024/018449
- 出願人 : 物質・材料研究機構
- 発明者 : 内田健一、平井孝昌、セペリ アミン ホセイン、追川康之

- 発明の名称 : ハイブリッド横型熱電温度変調素子およびこれを用いた温度変調方法
- PCT出願番号 : PCT/JP2024/018450
- 出願人 : 物質・材料研究機構
- 発明者 : 内田健一、平井孝昌、セペリ アミン ホセイン、追川康之

- 発明の名称 : 熱電装置
- PCT出願番号 : PCT/JP2024/029872
- 出願人 : 物質・材料研究機構
- 発明者 : 安藤冬希、追川康之、内田健一

- 発明の名称 : 熱電積層体及び熱電装置
- PCT出願番号 : PCT/JP2024/029879
- 出願人 : 物質・材料研究機構
- 発明者 : 安藤冬希、追川康之、内田健一

**ハイブリッド横型磁気
熱電変換に関する発明**

**横型熱電モジュール
に関する発明**

お問い合わせ先

**国立研究開発法人物質・材料研究機構
外部連携部門 企業連携室**

企業様向け総合窓口HP (スマホ対応)

<https://technology-transfer.nims.go.jp/>

