

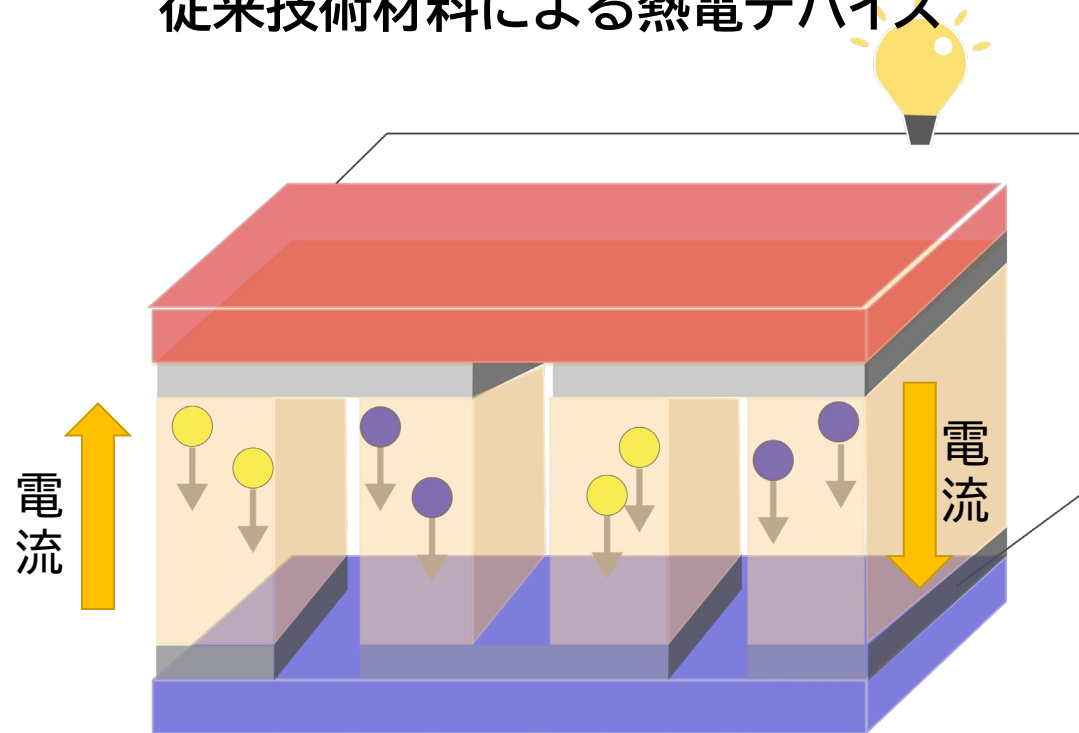
結晶方位でp/n切替し 接合劣化を抑える長寿命熱電材料

電気通信大学 情報理工学域 共通教育部
准教授 臼井 秀知

2026年5月12日

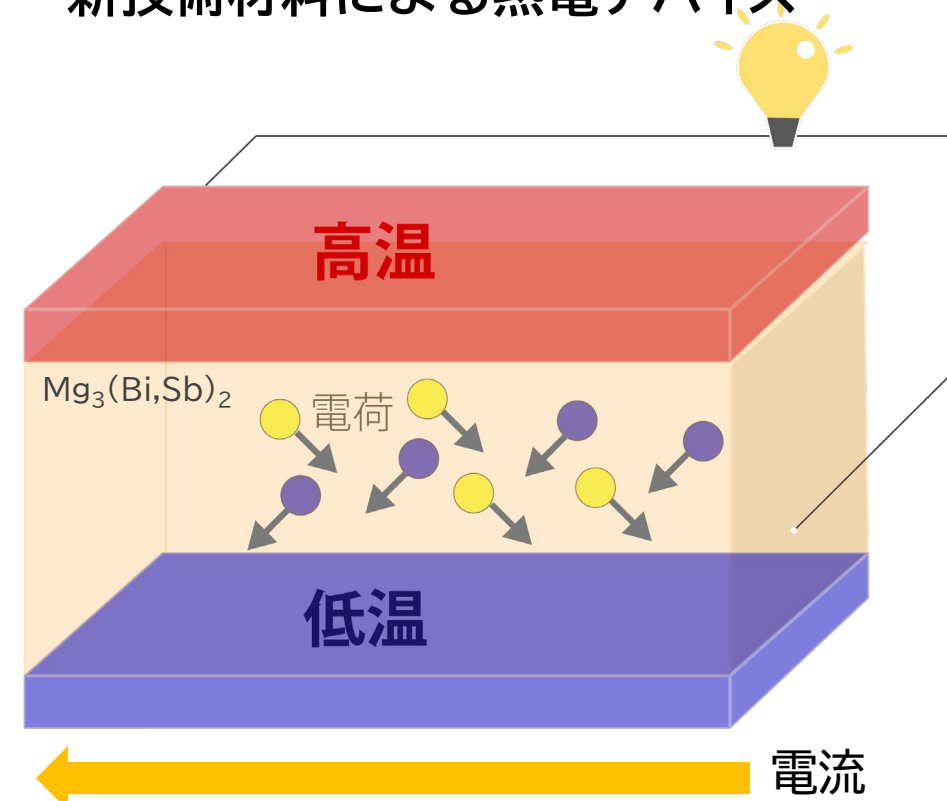
従来技術とその問題点, 新技術の特徴

従来技術材料による熱電デバイス



- ❑ 高温部の電極界面で熱劣化(元素拡散等)
- ❑ 電極数が多く界面抵抗による損失
- ❑ 多数接続による出力増

新技術材料による熱電デバイス

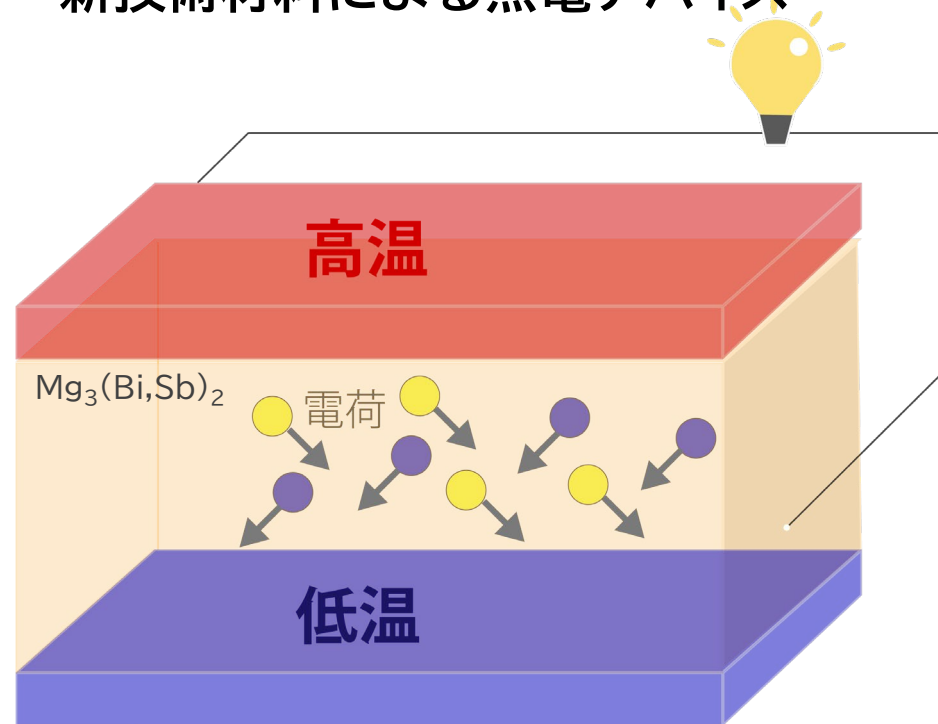


- ❑ 高温部に電極が不要で耐久性向上
- ❑ 電極界面の数が少なく構造が単純
- ❑ 素子形状のアスペクト比調整(薄型化)で出力増

結晶方位でp/n切替する材料を応用し、接合劣化を抑える長寿命熱電材料 $\text{Mg}_3(\text{Bi,Sb})_2$ を開発

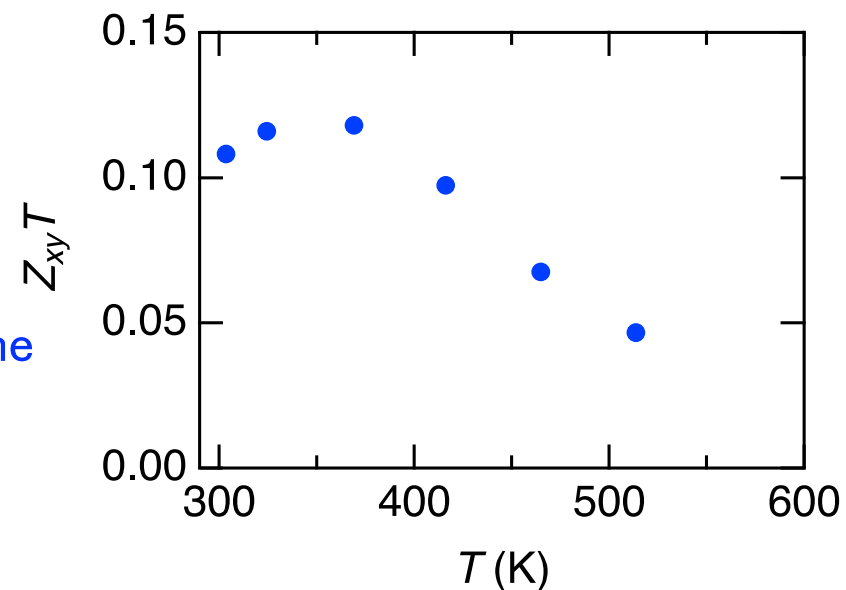
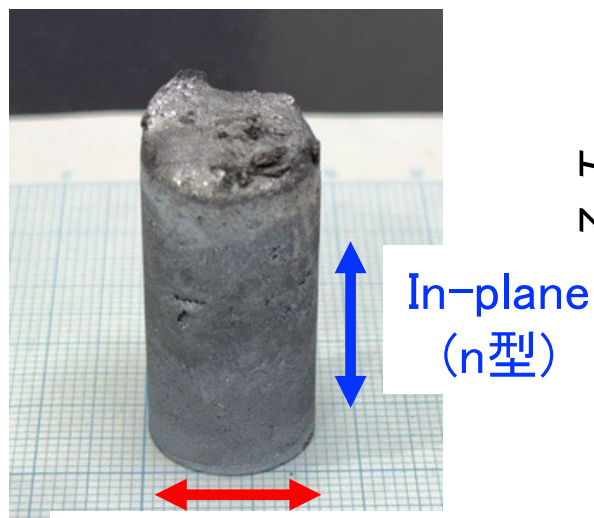
新技術の特徴

新技術材料による熱電デバイス



- 電流
- ❑ 高温部に電極が不要で耐久性向上
 - ❑ 電極界面の数が少なく構造が単純
 - ❑ 素子形状のアスペクト比調整(薄型化)で出力増

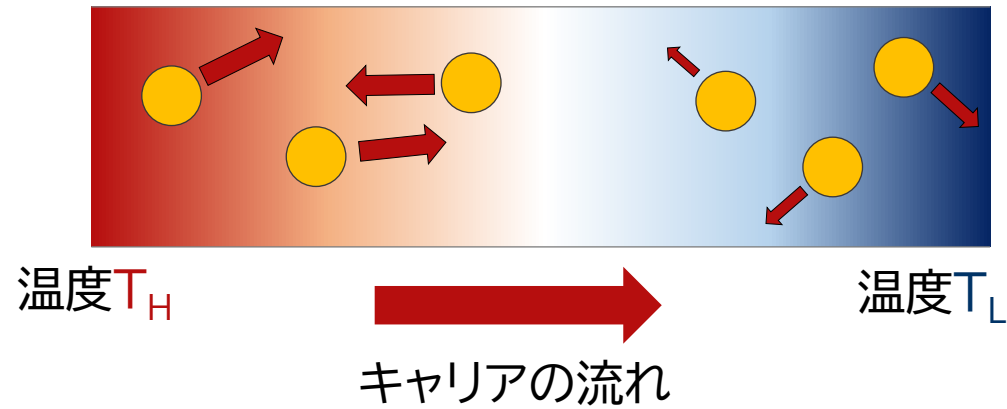
$\text{Mg}_3\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}$
30g, 4cm³



結晶方位でp/n切替する材料を応用し、接合劣化を抑える長寿命熱電材料 $\text{Mg}_3(\text{Bi,Sb})_2$ を開発

熱電効果

ゼーベック効果

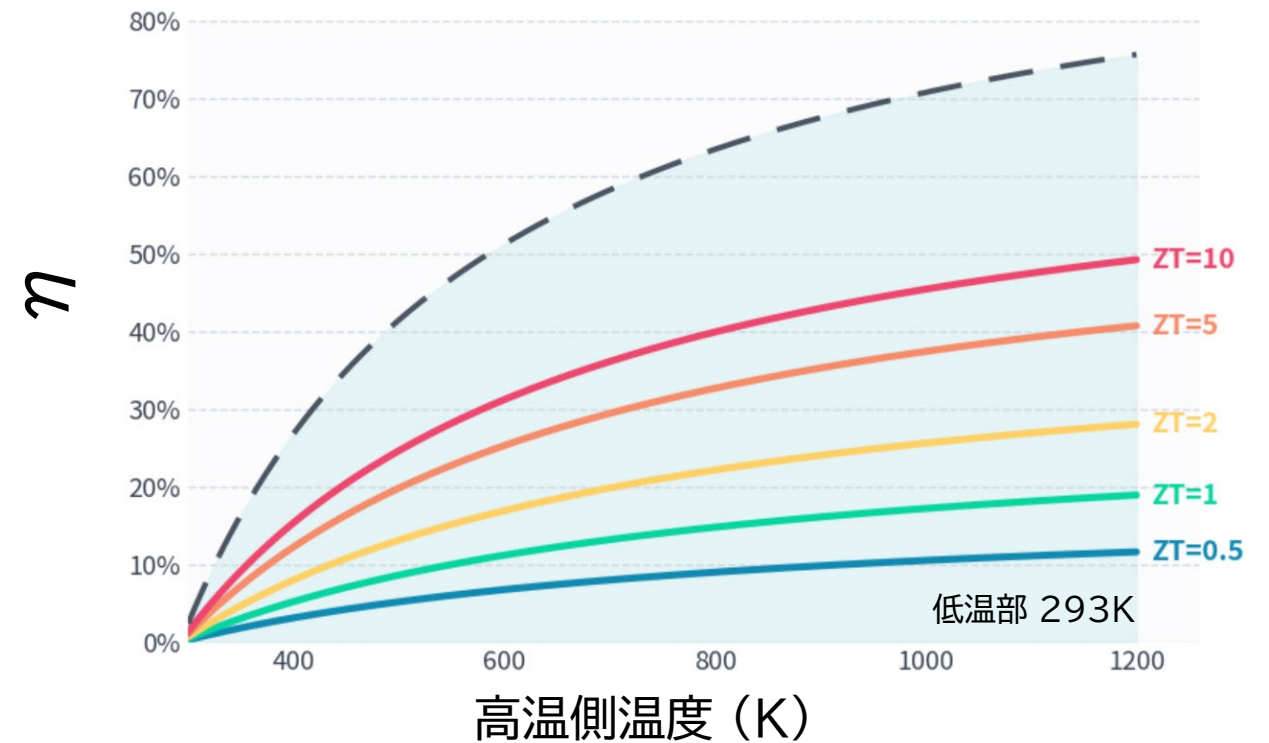


$$V = S\Delta T$$

S : ゼーベック係数
 ΔT : 温度差

高温部から低温部への拡散により起電力 V が生じる

熱電発電効率



$$ZT = \frac{\sigma S^2}{\kappa_{el} + \kappa_{ph}} T$$

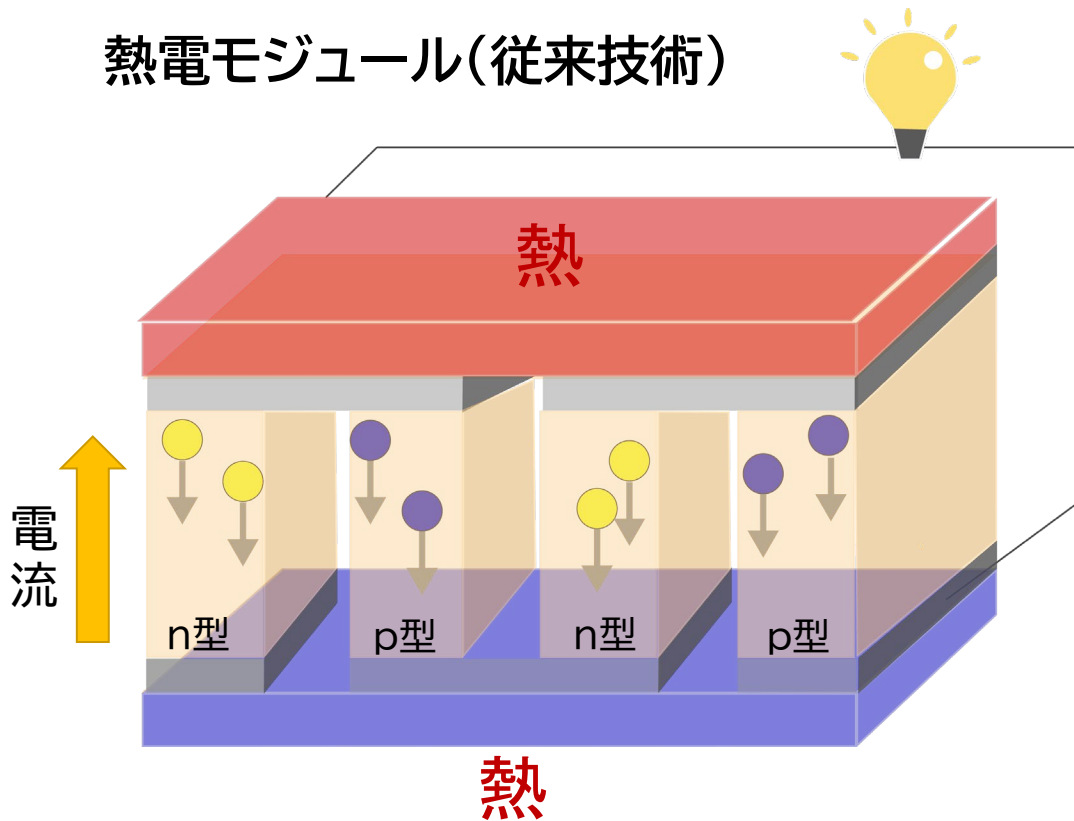
σ : 電気伝導度
 κ : 熱伝導度
 T : 温度

無次元性能指数 ZT が大きいほど高効率で発電可能

熱電モジュールを用いた発電

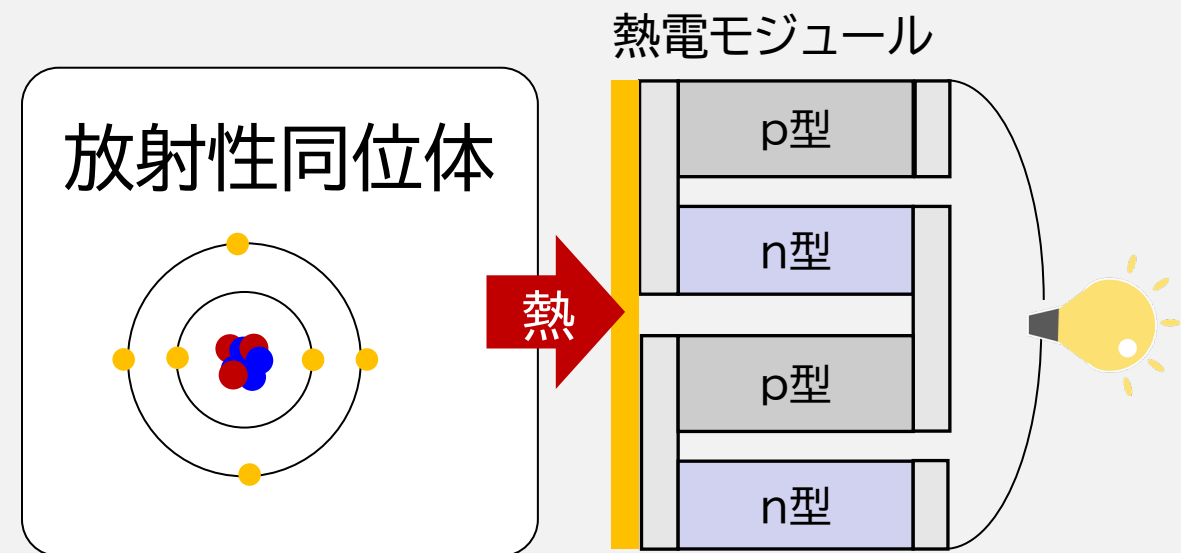
温度差を維持すれば原理的にはメンテナンスフリー

熱電モジュール(従来技術)



実用例:宇宙探査、IoTセンサ、体温発電

放射性同位体熱電気転換器

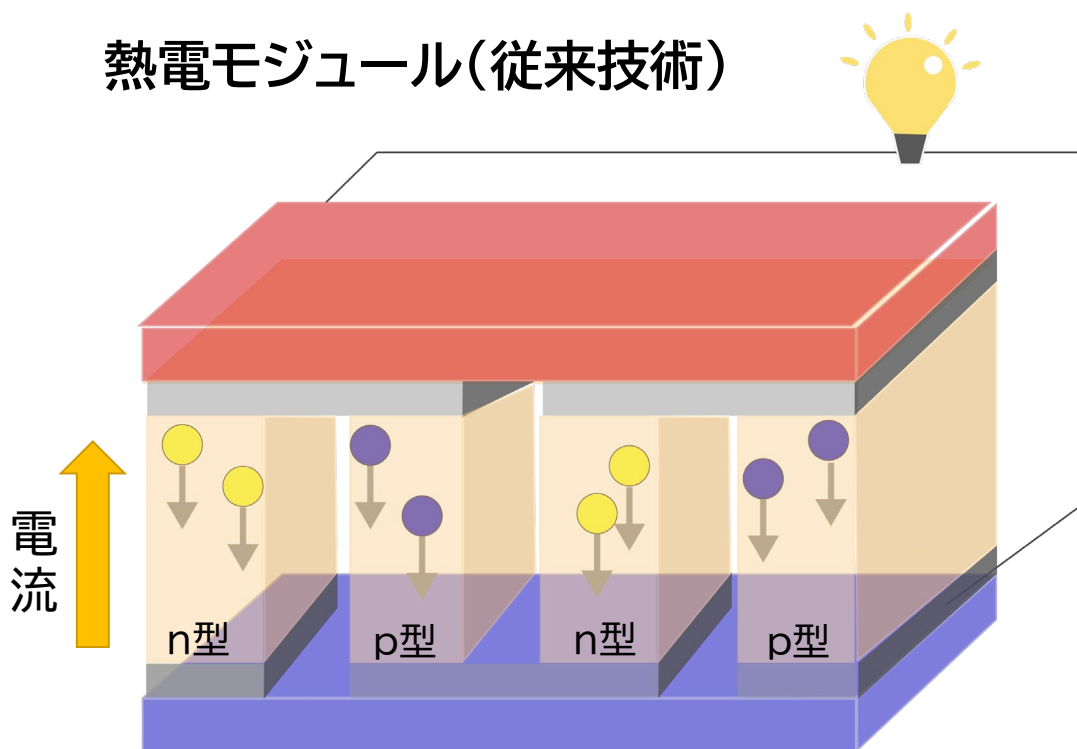


放射性崩壊による熱で発電

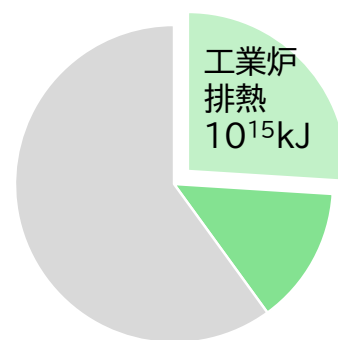
熱電モジュールを用いた発電

温度差を維持すれば原理的にはメンテナンスフリー

熱電モジュール(従来技術)



未利用熱の有効利用



日本全体のエネルギー消費

想定される応用例

工業炉の排熱利用(配管等)

排熱1%を変換効率5%で回収した場合

省エネ効果 $3.75 \times 10^{11}\text{kJ}$

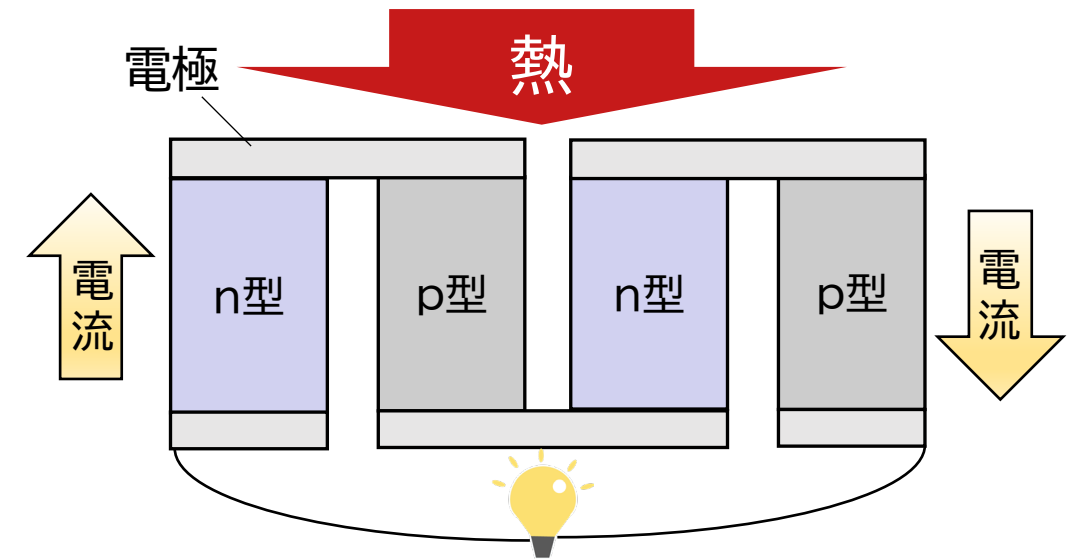
CO2削減量 26万トン

従来技術とその問題点

現状、熱電発電の市場規模は非常に小さい

- 現行材料 BiTe系(50年以上前に開発)
- 近年、新材料開発が相次いでいるにもかかわらず
新材料モジュールは社会実装されていない
- 求められる特性
 - 高い変換効率
 - 低毒性・低コスト
 - **耐久性**

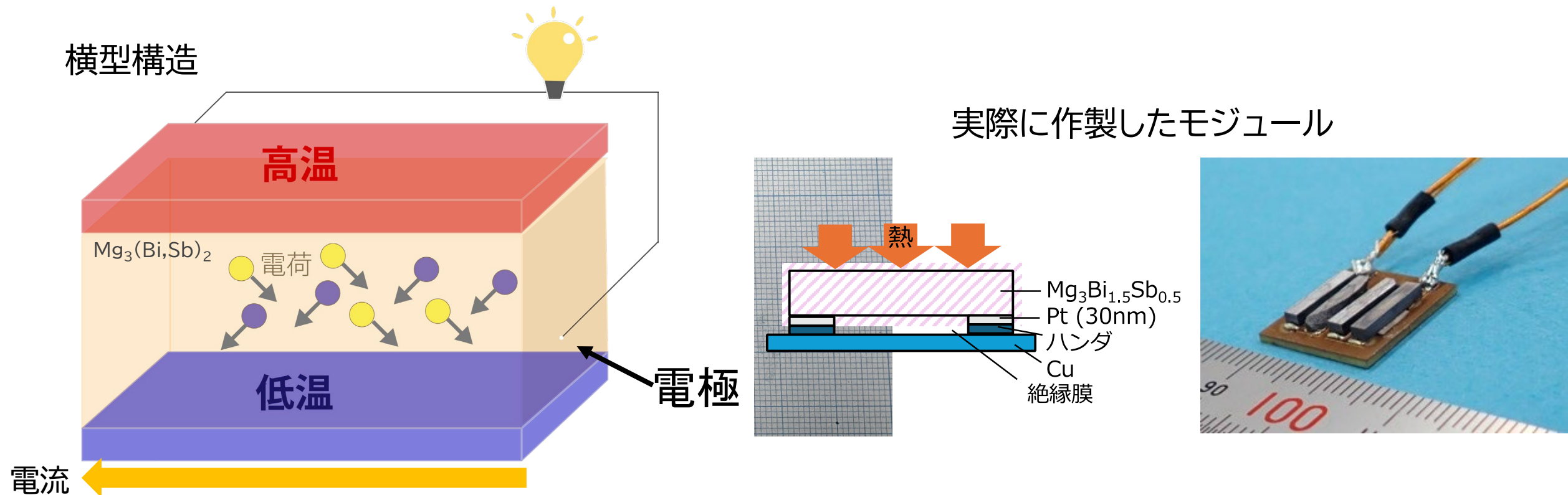
縦型構造(従来型)



- 高温部の電極界面で熱劣化(元素拡散等)
- 電極数が多く界面抵抗による損失
- 多数接続による出力増

新技術の特徴・従来技術との比較

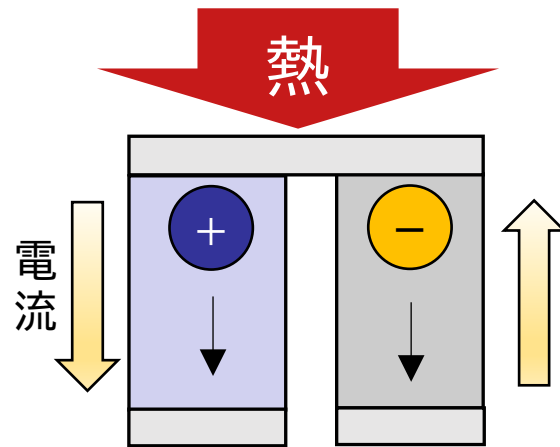
結晶方位でp/n切替する、接合劣化を抑える長寿命熱電材料を開発



- ❑ 高温部に電極が不要で耐久性向上
- ❑ 電極界面の数が少なく構造が単純
- ❑ 素子形状のアスペクト比調整(薄型化)で出力増

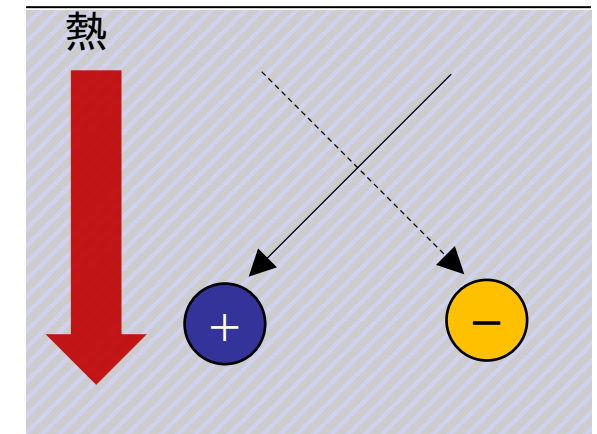
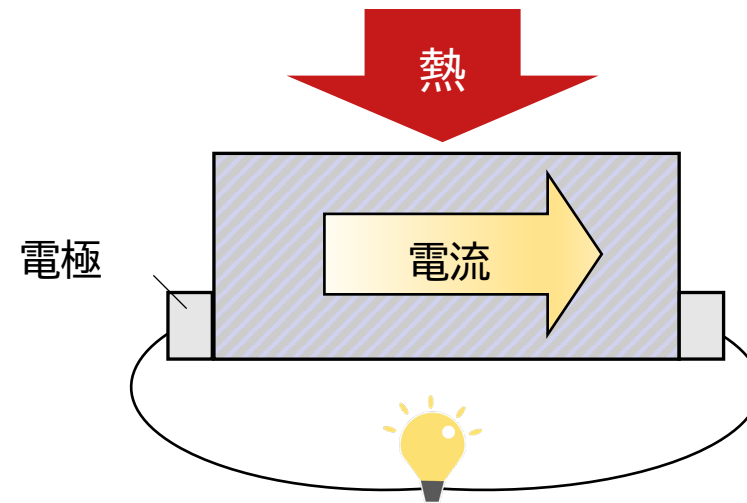
横型熱電デバイス p/n切替材料(ゴニオポーラ材料)

縦型構造(従来型)



- ❑ 温度勾配方向に電子とホールが移動
- ❑ p型素子とn型素子が必要

ゴニオポーラ材料



- ❑ 温度勾配方向に垂直な方向にも電子とホールが移動
- ❑ 高温熱源フリー

ゴニオポーラ材料による 横型熱電デバイスの実現

横型熱電の実現方法

□ ゴニオポーラ材料

方向によってp型・n型が変化

ゴニオ:ギリシャ語で「角度・回転」の意味

横方向ゼーベック係数

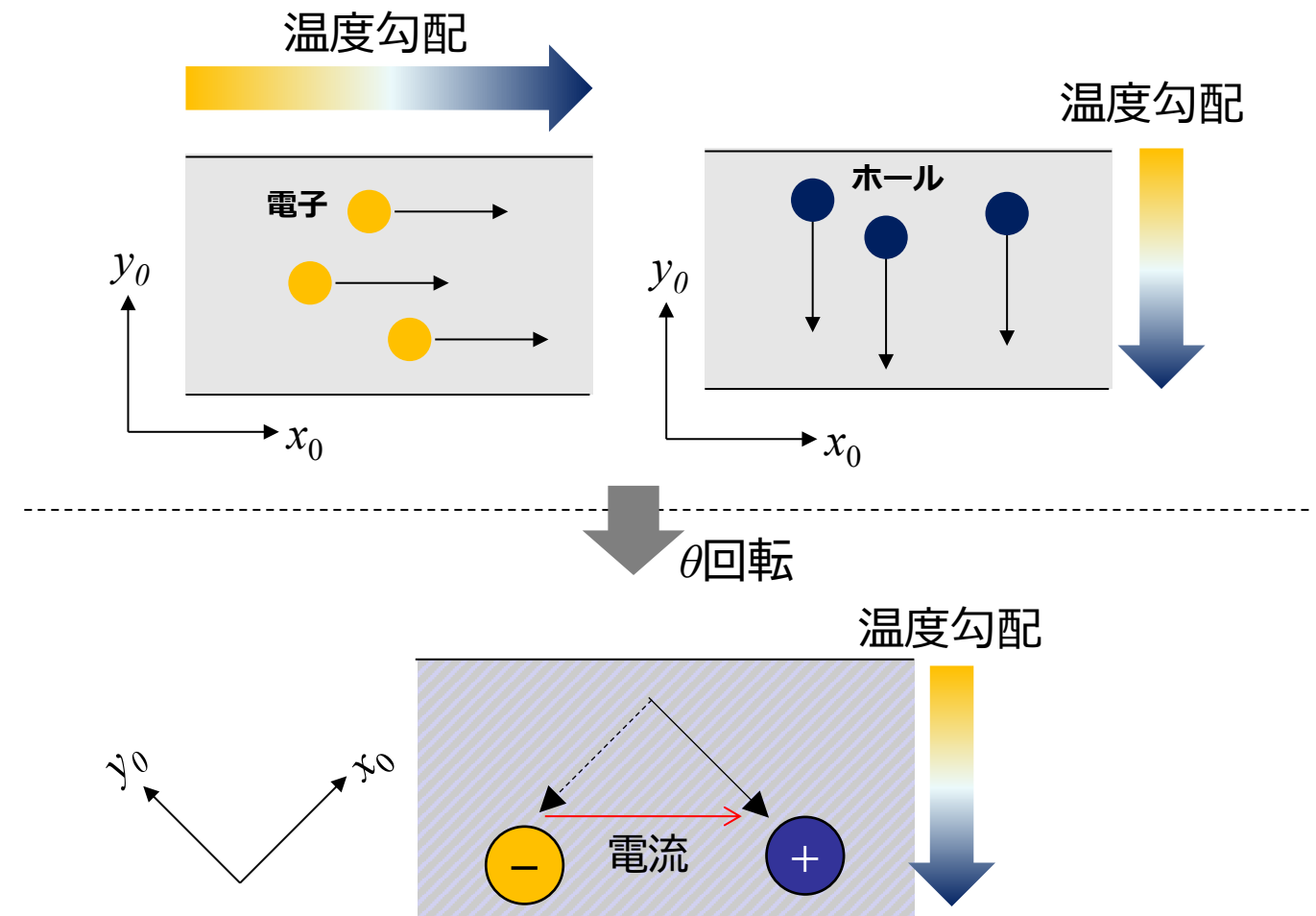
$$S_{xy} = (S_{x_0} - S_{y_0})\sin\theta\cos\theta$$

□ ネルンスト効果

□ スピンゼーベック効果 etc.

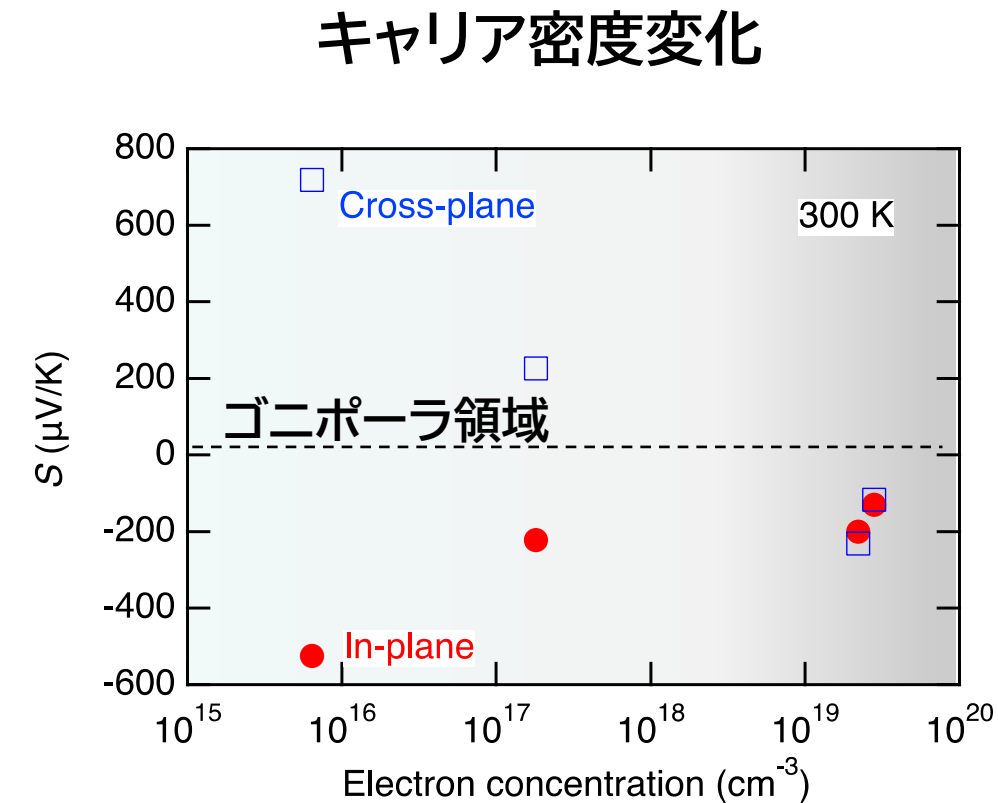
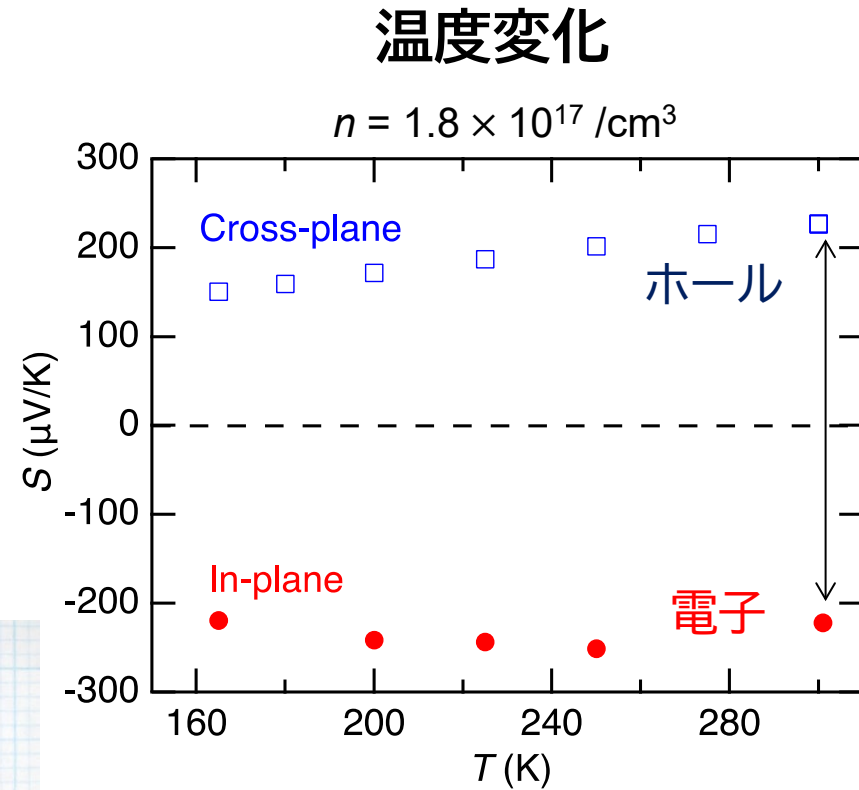
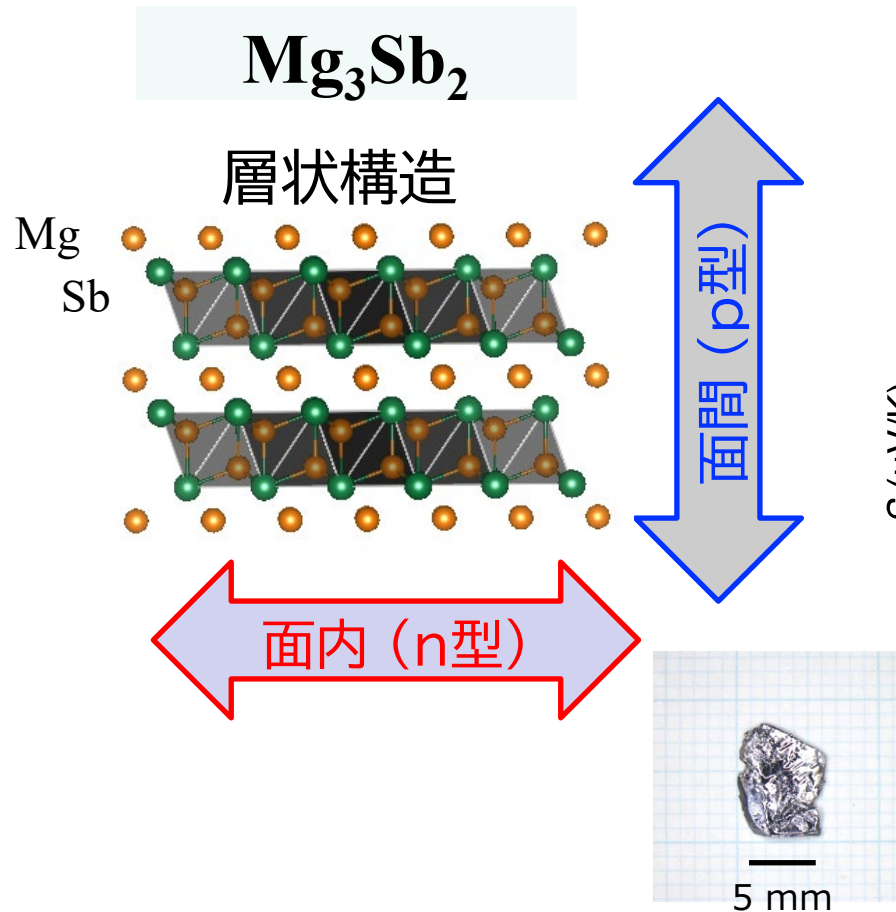
ゴニオポーラ材料は数年前は

10種程度しか知られていなかった

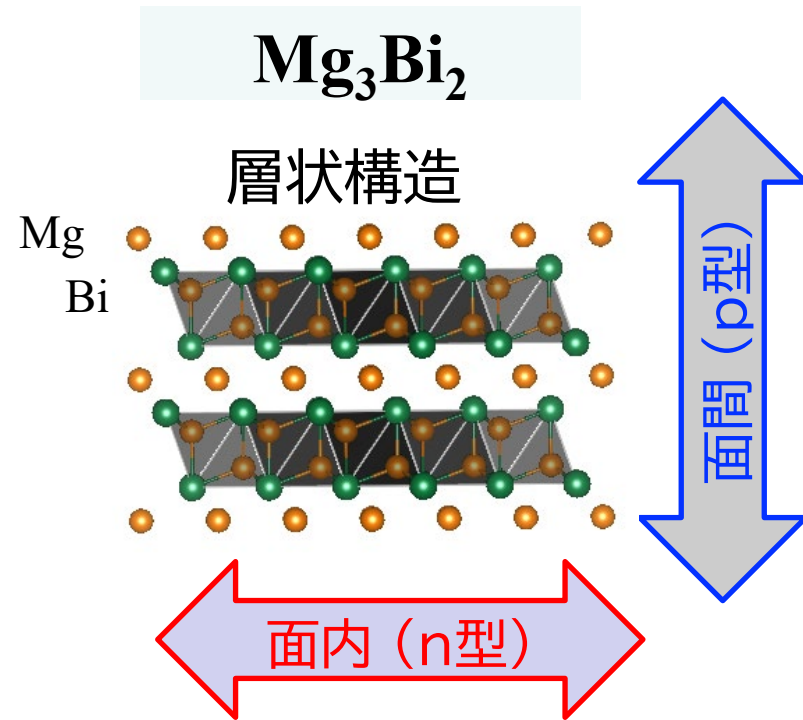


ゴニオポーラ材料 Mg_3Sb_2

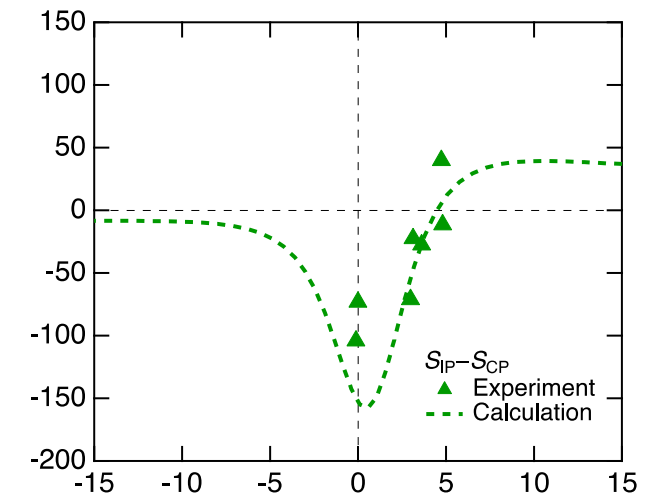
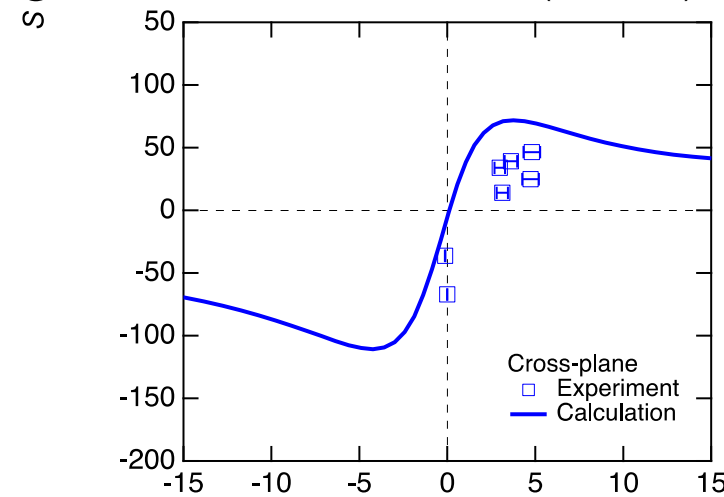
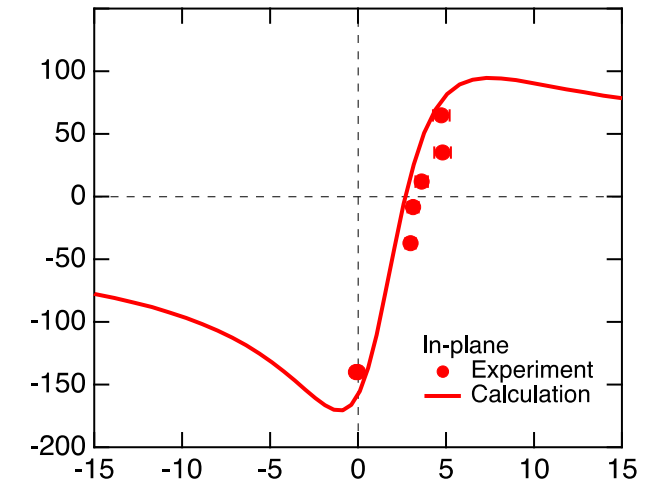
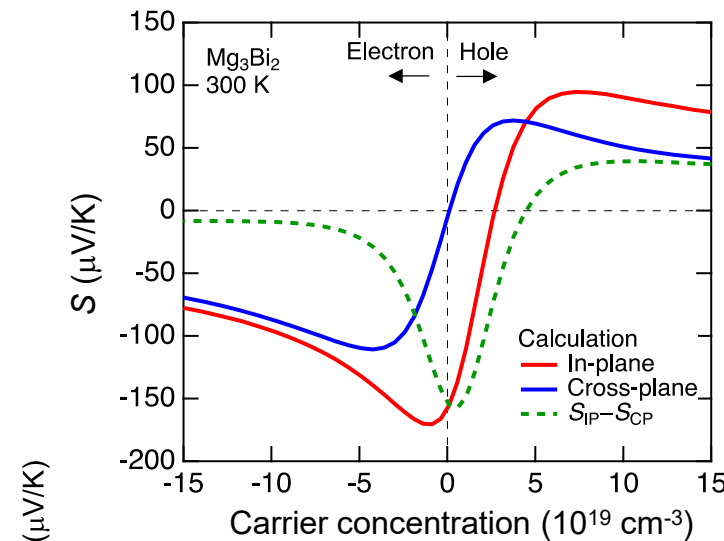
ゴニオポーラ材料：方向によってp型・n型(ゼーベック係数の正負)が変化



ゴニオポーラ材料

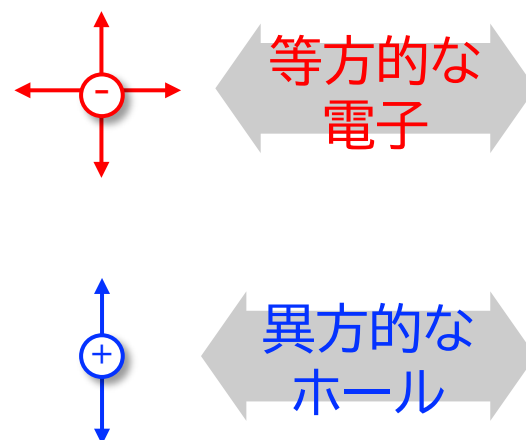
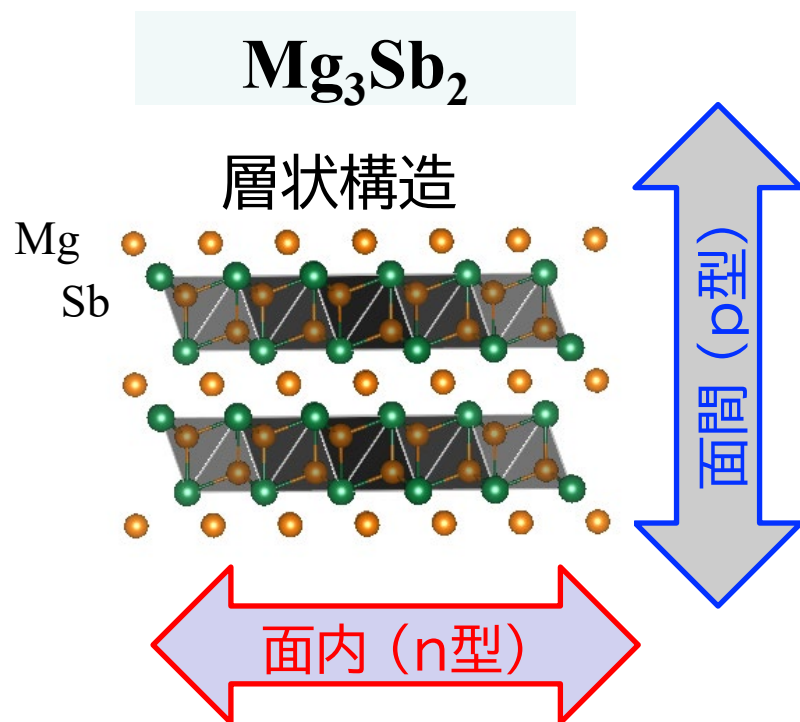


- キャリア密度(フェルミ準位)を精密制御した試料が必要
- 実験と理論はおおむね一致



Carrier concentration (10¹⁹ cm⁻³)

ゴニオポーラの起源

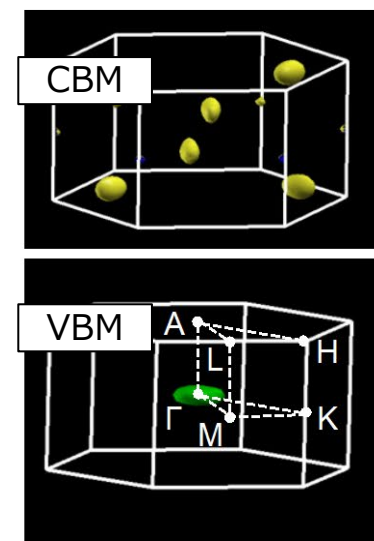
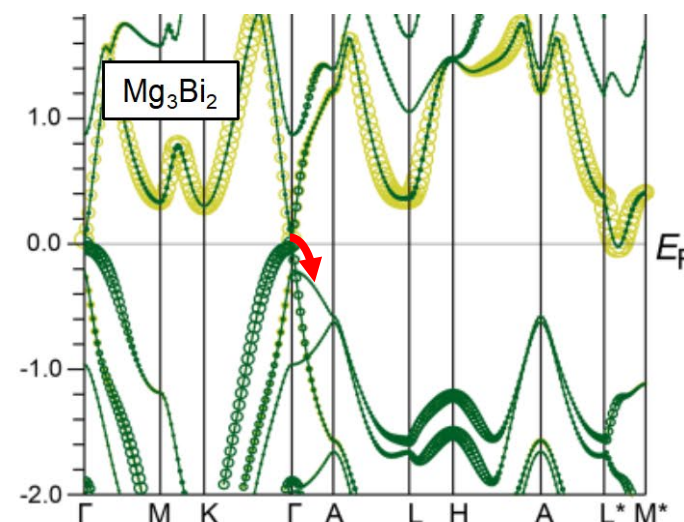
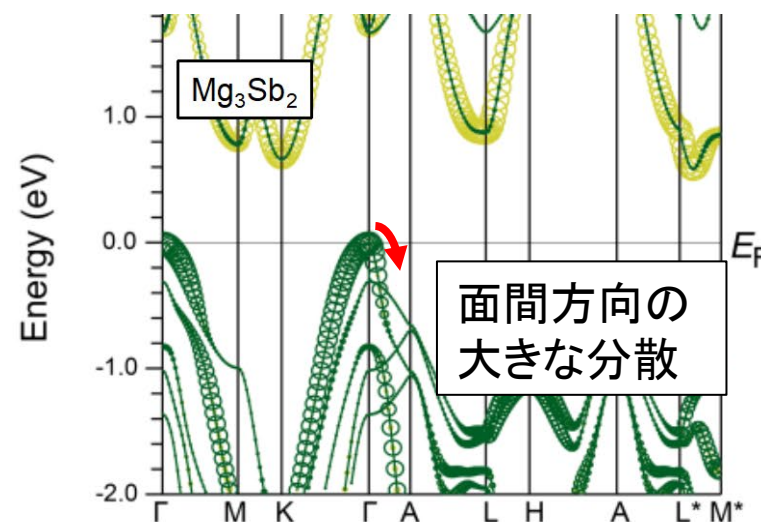


□ 電子バンド (CBM)

Mgのs軌道から構成される等方的な伝導

□ ホールバンド (VBM)

Sb/Biのp_z軌道から構成される面間方向の伝導

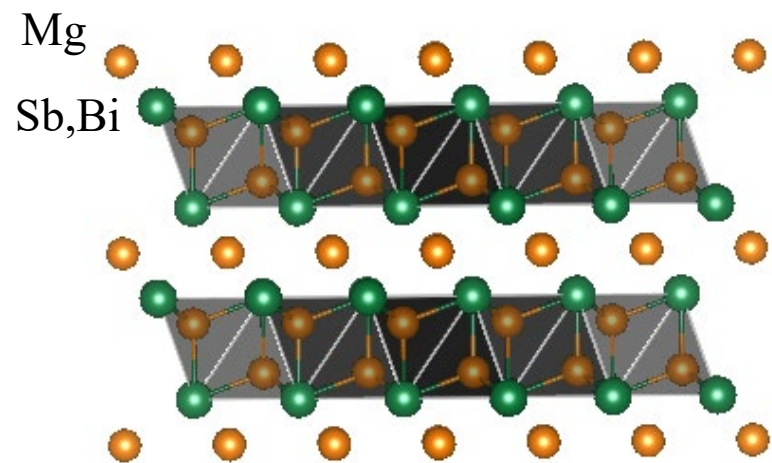


電子・ホール伝導の異方性がゴニオポーラの起源

ゴニオポーラ材料



層状構造



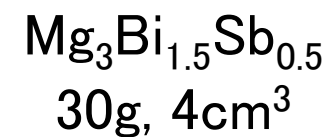
5 mm



単結晶から多結晶へ

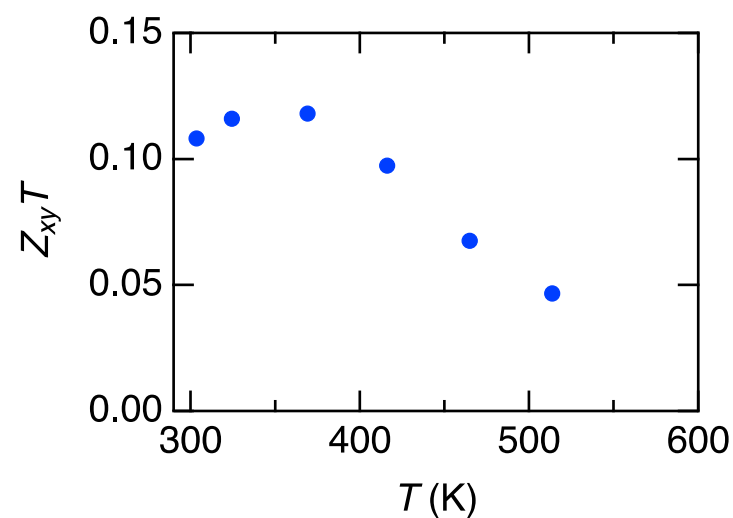
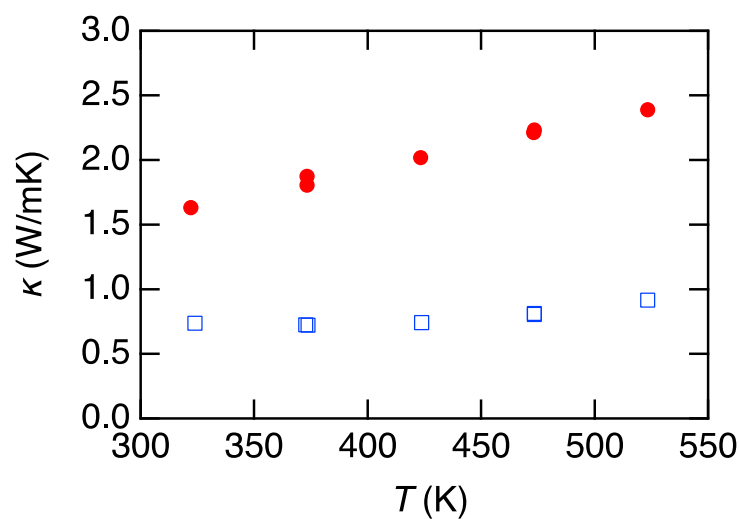
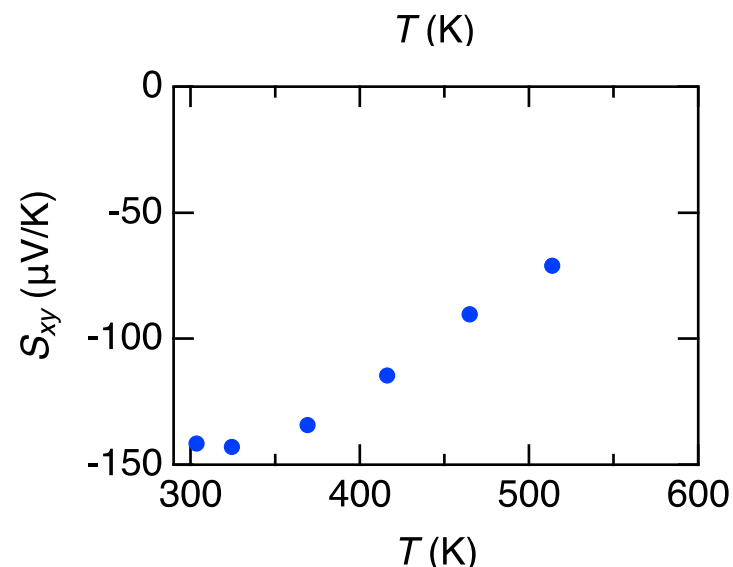
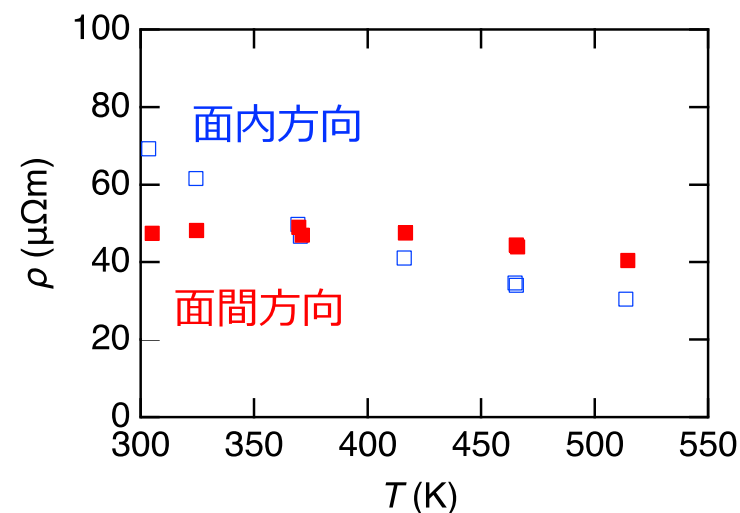


5 mm

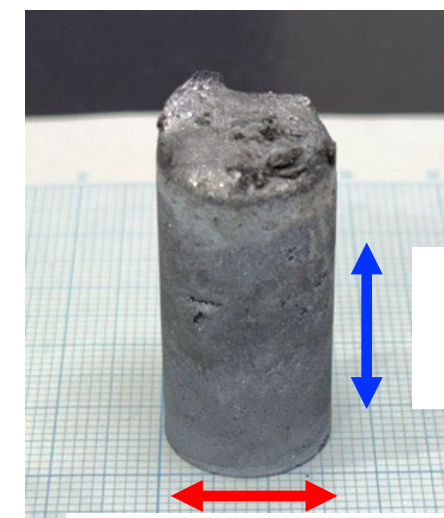


BiとSb量を制御して電子状態をより理想的な状況へ

ゴニオポーラ材料



$\text{Mg}_3\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}$
30g, 4cm³



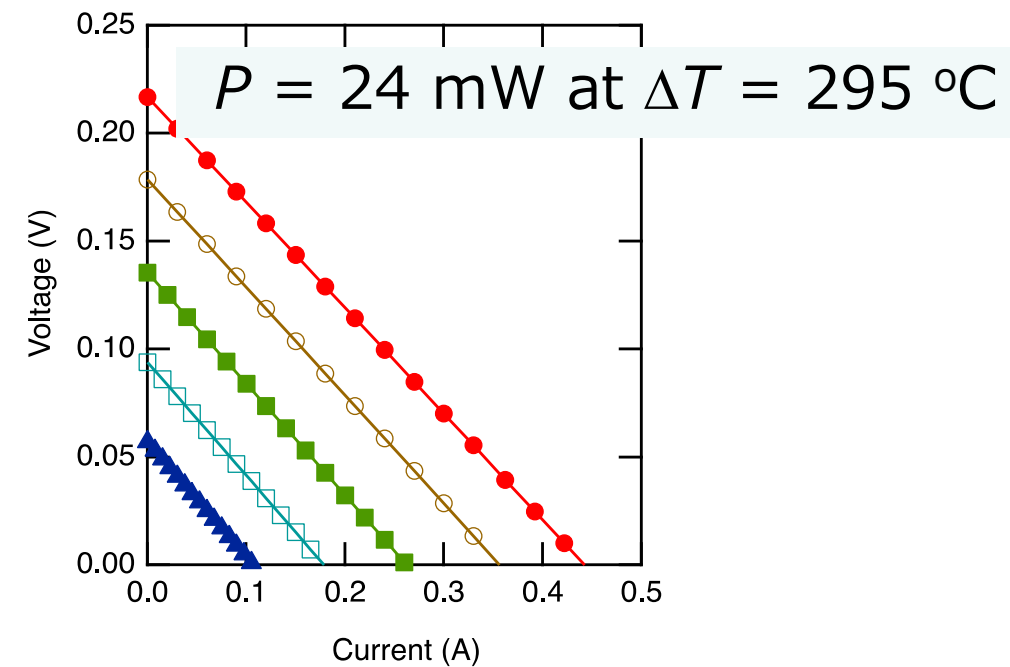
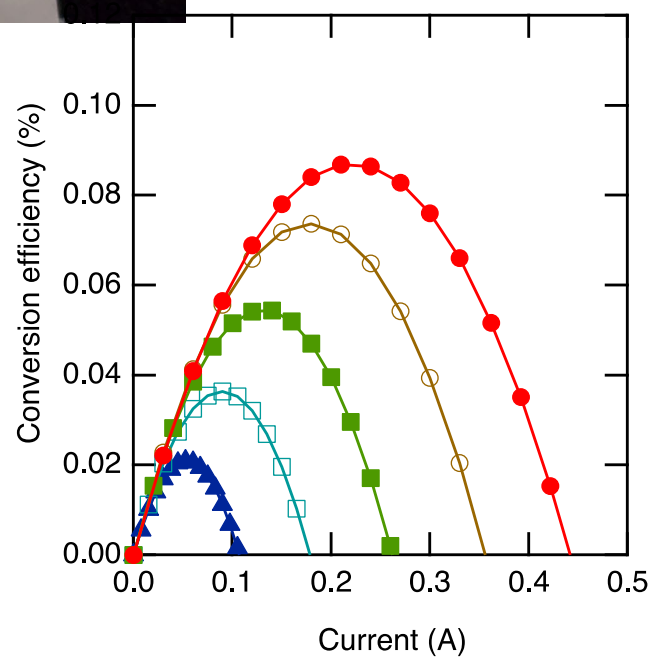
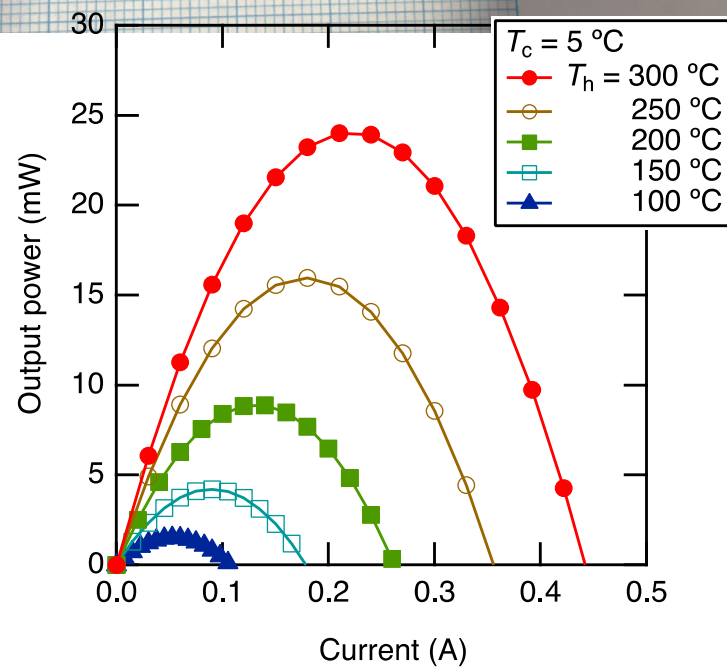
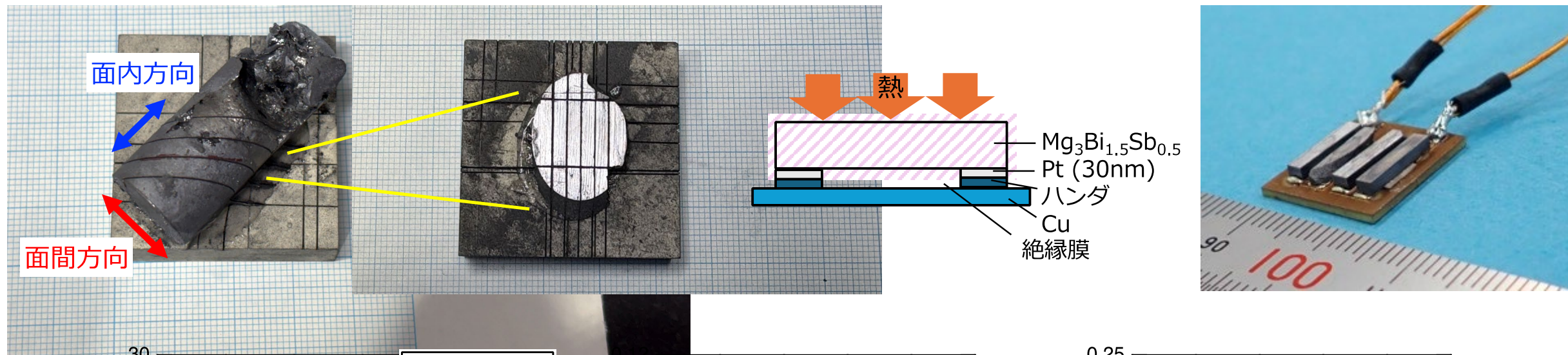
本特許

In-plane
(n型)

Cross-plane
(p型)

- 固溶体の作製成功
- 多結晶でもゴニオポーラ
(大型化が容易)

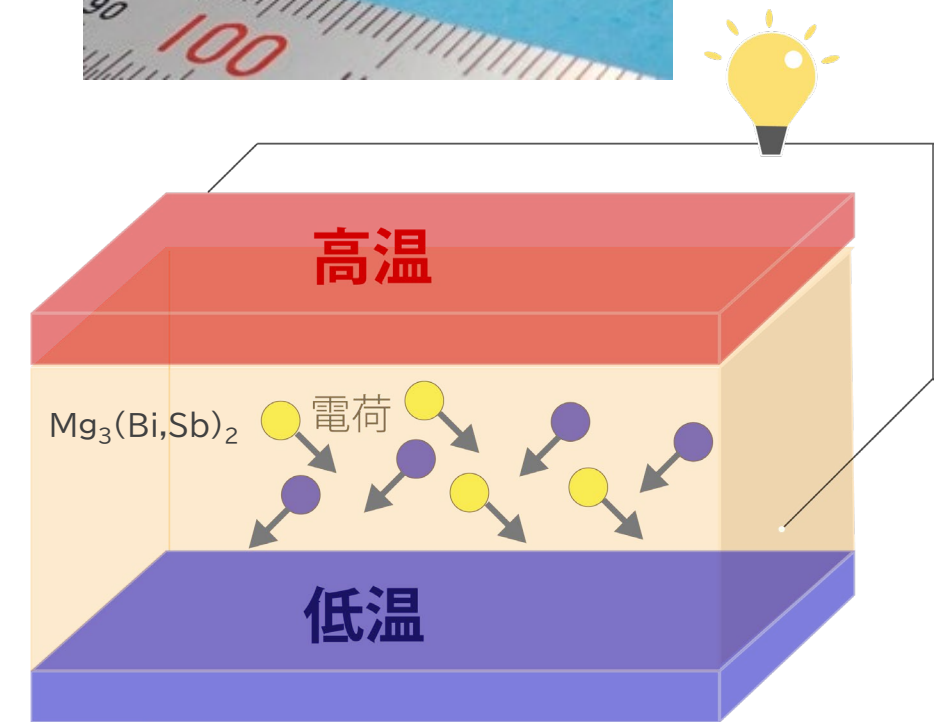
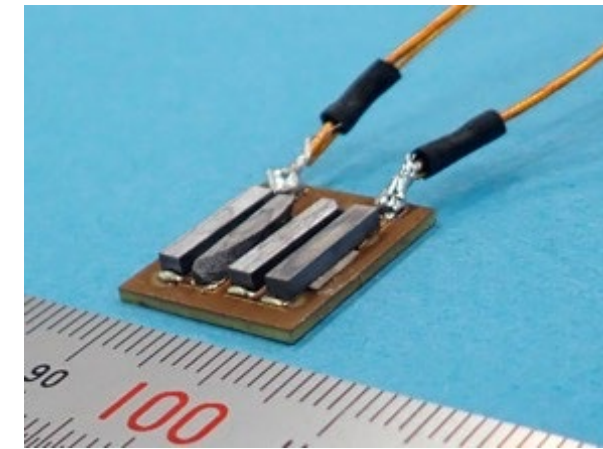
本特許材料による横型熱電モジュール



PRポイント・想定される用途

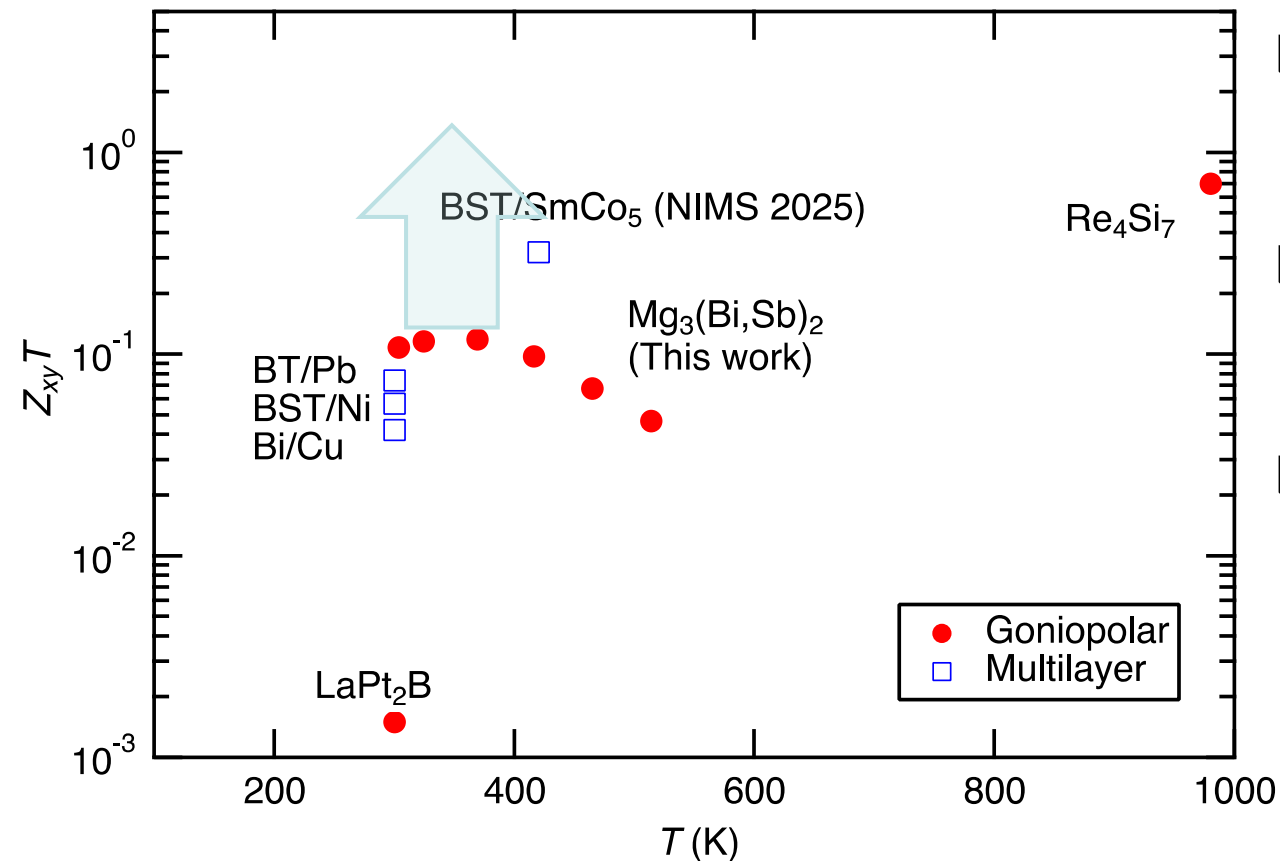
横型熱電デバイスの利点:

- 素子の耐久性向上・低コスト化が期待
 - 接合の無いシンプルな構造を実現
 - 広面積に分散した熱エネルギーの再利用に最適
- 従来技術の熱電デバイスを置き換え可能
(本技術は室温から100℃程度での利用を想定)
 - 薄型化が可能であり、平面配置型熱電検出デバイス
などの利用が想定される



実用化に向けた課題

発電効率の指標である無次元性能指数 $Z_{xy}T$



- 現時点での $Z_{xy}T$ は0.1程度
(通常の熱電素子の性能と比べると劣る)
- 化学組成、結晶育成、フェルミ準位の精密制御を確立し
縦型材料に匹敵・凌駕する高性能な材料開発を目指す
- 新材料探索

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等
基礎研究	• $\text{Mg}_3(\text{Bi,Sb})_2$系における結晶方位依存のp/n切替現象を理論・実験の両面から解明 • 横型熱電変換の動作原理を整理し、材料設計指針を構築
現在	• $\text{Mg}_3(\text{Bi,Sb})_2$多結晶材料でゴニオポーラ特性を確認 • 本特許材料による横型熱電モジュールを試作 • 現時点で $Z_{xy}T \approx 0.1$ 程度を達成
2年後	• 化学組成、作製条件、結晶配向の最適化により、ゴニオポーラ特性の再現性を向上 • モジュール出力と耐久性の基礎データを取得
5年後	• 新材料探索を含め、縦型材料に匹敵する性能を目指して高性能化 • 大型化、薄型化、信頼性向上

企業への期待

- 未解決の性能向上と実用環境での信頼性確保については、成形・配向制御、接合、放熱設計の技術により前進できると考えています。
- 熱電モジュール製造、実装設計、耐久試験、量産プロセスの技術を持つ企業との共同研究を希望します。
- 排熱回収や薄型熱検出デバイスへの応用を検討する企業に有効と思われます。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：熱電材料、横型熱電モジュール、及び熱電材料の製造方法
- 出願番号：特願2024-148233
- 出願人：電気通信大学，産業技術総合研究所
- 発明者：後藤 陽介，李 哲虎，村田 正行，臼井 秀知

お問い合わせ先

国立大学法人 電気通信大学大学
産学官連携センター
産学官連携ワンストップサービス

TEL: 042-443-5725

FAX: 042-443-5937

e-mail: onestop@sangaku.uec.ac.jp