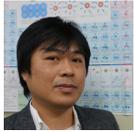


ナノ構造制御によって創製された超高効率（11%）熱電変換モジュール

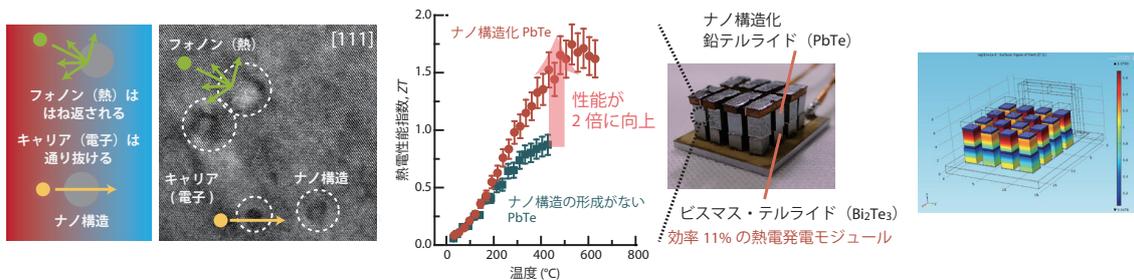


太田 道広

省エネルギー研究部門 熱電変換グループ
主任研究員 博士（情報工学）

ohta.michihiro@aist.go.jp, <http://staff.aist.go.jp/ohta.michihiro/>

PbTe バルク焼結体にナノ構造を形成することで、従来材料の2倍に達する非常に高い熱電性能指数 $ZT = 1.8$ を達成した。さらに、このナノ構造化 PbTe を用いて熱電変換モジュールを作製することで、既存技術を凌駕する変換効率 11% を達成した。この成果により、一次エネルギーの 60% 以上にもよる未利用熱エネルギーを、有益な電力へと変換して活用する道が開けると期待される。



MgTe ナノ構造の埋め込みによる PbTe バルク焼結体の熱電性能指数 ZT の大幅向上と開発した二段型熱電変換モジュール、そして発電シミュレーション

社会的背景

日本では、一次エネルギーの大半を輸入に頼っているが、この中で有効利用できているのはわずか 30% 程度であり、残りは未利用のまま熱として棄てられている。エネルギーの安定供給を達成して持続可能な社会を実現するためには、この未利用熱エネルギーの活用を促進する必要がある。その鍵を握る技術が熱電発電であり、この技術を用いることで、棄てられるだけのもったいない未利用熱エネルギーを利用価値の高い電気エネルギーとして回収できる。

熱電発電において、熱から電気への変換は半導体材料（熱電材料）が担う。熱電材料の性能は無次元の熱電性能指数 $ZT = S^2 T / (\rho \kappa)$ で表される。ここで、 S はゼーベック係数、 T は絶対温度、 ρ は電気抵抗率、 κ は熱伝導率である。既存の熱電材料の ZT は 0.8 ~ 1.0 程度であり、それを用いた熱電変換モジュールの変換効率は 7% 程度である。熱電発電の幅広い実用化を達成するためには、 ZT と変換効率の向上が必要である。

ナノテクにより実現した薄膜熱電材料での高い ZT

ナノテクノロジーの発展によって、薄膜の熱電材料において $ZT = 1.0$ の壁を本格的に超えることができたのは、つい 10 年ほど前のことである。例えば、2001 年、 Bi_2Te_3 と Sb_2Te_3 をナノオーダーで積層した超格子薄膜において、室温の ZT が 2.4 に達するという報告がなされた。¹⁾ しかしながら、薄膜に温度差をつけることは困難であり、実用化を考えると、バルク体の熱電材料で高い ZT を実現することが不可欠である。そこで、私たちを含めいくつかの研究グループで、バルク体熱電材料にナノテクを応用する研究が始まり、最近、 ZT の大幅向上に成功している。

1) Venkatasubramanian R. et al., *Nature*, 413, 597 (2001).

ナノ構造を形成した超高効率バルク体熱電材料

本研究では、宇宙開発などで実用実績がある熱電材料 PbTe に注目した。PbTe は、優れた電気的特性（高い出力因子 S^2/ρ ）を示すが、熱伝導率が高いため、 ZT は 1.0 程度に留まっている。我々は、PbTe バルク体の中にナノサイズの MgTe を埋め込み形成することに成功し、熱伝導率 κ のみを選択的に減少させ、 ZT の大幅向上を実現した。

PbTe バルク焼結体の中に形成した MgTe ナノ構造の重要な特徴は、熱を運ぶフォノンを効果的に散乱して、熱伝導率 κ を劇

的に減少させる一方で、電荷を運ぶキャリアの輸送には影響を与えないで、PbTe 本来の高い電気特性（出力因子： S^2/ρ ）は維持できることである。その結果として、600°C 付近の ZT は 0.9 から 1.8 まで大幅に向上する。

効率 11% の熱電変換モジュール

次に、産総研に蓄積した熱電変換技術を基盤に、ナノ構造化 PbTe 焼結体を用いて熱電変換モジュールを開発した。ナノ構造化 PbTe 焼結体に適した電極材料の開発に成功したことで、高温側を 600°C、低温側を 30°C としたときに、一段型熱電変換モジュールの最大変換効率は 8.8% に達した。

ナノ構造化 PbTe 焼結体は、500°C 前後で高い ZT を示すが、一方で 300°C 以下の ZT は低くなる。そこで、100°C 程度の温度で高い ZT (1.0 程度) を示す一般的な Bi_2Te_3 を低温側の素子として用いて、二段型（セグメント型）熱電変換モジュールを開発した。低温側の効率が改善されたことで、高温側を 600°C、低温側を 10°C としたときに、最大変換効率は 11% に達した。

まとめと今後の展開

10 年前には、夢でしかなかった変換効率 10% の壁を、ナノテクを用いて突破した。バルク体熱電材料を用いて達成した 11% という効率は、間違いなく熱電発電の実用化に大きな前進をもたらす。今後、産業界の助けを得ながら実証実験などを実施して、実用化を目指す。

関連業績

原著論文：Ohta M. et al., *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9, 517.

Ohta M. et al., *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3, 10401.

Ohta M. et al., *Adv. Energy Mater.*, 2012, 2, 1117.

日本語解説：太田 道広, 金属（アグネ技術センター）, 86, 213 (2016).

特許：特願 2015-214934 (2015 年 10 月 30 日出願).

プレス記事：変換効率 11% の熱電変換モジュールを開発 (2015 年 11 月 26 日).

謝辞

ここで紹介した成果の一部は、ノースウェスタン大・アルゴン国立研の KANATZIDIS, Mercouri G. 教授と産総研熱電変換グループとの共同研究で成し遂げられた。また本研究の一部は、日米クリーン・エネルギー技術協力（経産省）、科研費 25420699 (JSPS)、未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発 (NEDO)、からの支援を受けて実施した。