

熱電変換（発電・冷却）の高効率化の展望

Future Prospects of High Efficiency Thermoelectric Devices

湘南工科大学名誉教授 梶川武信

Shonan Institute of Technology, Prof. Emeritus Takenobu Kajikawa

E-mail: kajikawa.tk@sand.ocn.ne.jp

熱電変換は、発電（ゼーベック効果）と冷却・加熱（ペルチェ効果）が表裏一体となっている。熱電発電および熱電冷却それぞれの性能は、高温・低温および温度差といった温度条件と熱電材料の物性値から構成される性能指数 Z_{av} によって決まる。温度条件は熱源や使用条件で制約される。従って、高効率化には、性能指数 = (ゼーベック係数 S)² (導電率 σ) / (熱伝導率 $\kappa_e + \kappa_{ph}$) を向上させることに尽きると言える。

1990 年代後半から構造の低次元化による高性能化の可能性と PGEC (Phonon Glass Electron Crystal: 平均自由行程の短いフォノンには非晶質のような構造として働き、平均自由行程の長い電子に対しては結晶のように整然とした構造として働く) の概念が材料設計指針として新たに示された結果、熱電材料に関する多くのブレークスルーが芽生え、成長し始めた。この発展の背景には、社会的ニーズもさることながら、第一原理電子構造計算手法などの材料計算機科学およびミクロな材料構造観測・計測技術など科学技術の総合力の進展があることは確かであると思う。

PGEC 材料として、従来の Bi-Te 系や Pb-Te 系に加えて、クラスター系（スクッテルダイト系、クラスレート系など）や新たな多くの材料系がこの視点から見直されることになった。また、無次元性能指数を $(S^2 \sigma T / \kappa_e) / (1 + \kappa_{ph} / \kappa_e)$ と表すことにより、前項を材料の電子構造に関わる因子、後の項は、熱伝導に関わる因子と分けることにより、熱電固有のナノテクノロジーを発展させる高性能化のアプローチを明確にすることができる。前項には 1) 量子閉じ込め効果、2) エネルギーフィルタリング効果、3) キャリア散乱、また後の項には、1) ラトリング効果、2) フォノン、境界散乱効果などがある。図 1 に熱電ナノテクノロジー適用による ZT 向上効果の一例を示した。この手法により、ZT で 2 倍以上の高性能化が達成されている。

現状では、温度差 550K でモジュール効率 12.3% が実証され、25℃ と 1000℃ の間での全セグメント素子化により素子効率 18.1% が見通されている。

熱電ナノテクノロジーは、ほとんどあらゆる材料系について、また低温域から高温域まで幅広い適用が今後とも続けられ、工業的目標である $ZT=2$ 以上を達成する可能性は十分見通せる段階に来ているように思われる。更に、複合ナノ効果や有機化学と無機化学の融合化による熱電材料の材料設計の精緻化から、一層の高効率化が図られていくことが考えられ、更なる進展が期待される。

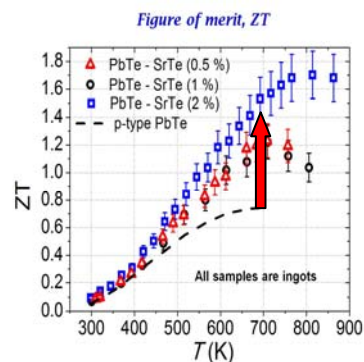


図 1 バルク内ナノドット形成による高性能化の事例