

熱発電熱交換器による排熱の再生利用



企業レポート

高橋 宏平*

Waste heat recovery via thermoelectric heat exchanger

Key Words : thermoelectric, energy harvesting, seebeck effect

1. はじめに

近年、エネルギーの消費量は世界規模で増加し続け、それに伴い地球温暖化などの環境問題が深刻化している。そのような中、太陽光、風力、地熱などの自然エネルギーを資源として活用する動きが活発になってきている。その中でも、熱エネルギーは我々にとって非常に身近な存在であり、有望なエネルギー資源であると考えられる。我々の周りを見渡すと、工場、ごみ焼却場、自動車、さらには人体からさえも熱が発生している。しかしながらこのようにして発生した熱は、ほとんどの場合、有効利用されないまま周囲の環境に放散されている。将来的に持続可能な社会を実現するためには、このような未利用熱を回収し、電力などの新たなエネルギー源として再生する道を築くことが重要となる。

そこで我々は、排熱を有効利用する手段として、熱電変換と呼ばれる物理現象に着目している。ゼーベック効果に代表される熱電効果は、温度差を電気信号に直接変換させることが出来るため、排熱から電気エネルギーを生み出すことが可能である。熱電発電素子には、わずかな温度差でも発電が可能、温室効果ガスの排出が無い、可動部が無いといった特徴があり、排熱の再生利用において非常に有効な手段となり得る。一方、熱の発生、大気中への排出が確認される多くの現場では、発生した熱は熱交換器

などによって強制的に適温まで冷却されている。この冷却過程では、膨大な量の熱エネルギーが失われているものの、この熱源を冷却する行為そのものは、安全面、環境面、機器の性能維持など様々な理由から必要不可欠である。それに対して、現在一般的に普及している熱電素子は、発電効率を上げるために断熱的な設計が施されており、熱源と冷却源との間に挿入した場合、本来の冷却機能を大きく阻害することになる。このように、排熱発電を実用的な形で実現するには、発電と冷却の二つの機能を両立させることが重要となる。

我々が開発を進めるチューブ型熱電素子は、発電素子だけではなく、熱交換器としても機能する。それゆえ、発電と冷却の両方の機能を備える。本稿では、我々のチューブ型熱電素子の特徴的な構造と発電方法を説明し、その開発状況について紹介する。

2. チューブ型熱電素子

現在捨てられている熱エネルギーの約7割は、200℃以下の熱源からなるいわゆる低温排熱と呼ばれるものに分類され、通常は蒸気や液体など流体の形で排出されている。一方、一般的にペルチェ素子としても知られている熱電素子は、通常平板型の構造を持つため、流体を用いた発電には別途角型の配管が必要となる。これでは熱源から効率よく熱エネルギーを取り込むことが困難になり、発電量が抑制されるだけでなく、熱源との熱交換、冷却も困難になる。それに対して、我々が開発している熱電素子は、チューブ状の構造を持つ。素子をチューブ形状に成形することで、素子そのものが流体を流す配管部材となり、なおかつ発電素子としても機能する。流体熱源と素子が直接接触することで、熱源から効率よく熱が伝達され、高い発電量が得られると共に、熱源の冷却も促進される。すなわち、新規の熱発電



* Kouhei TAKAHASHI

1979年12月生

大阪大学大学院工学研究科 博士後期課程修了(2007年)

現在、パナソニック株式会社 先端研究本部 材料研究室 環境材料研究部 環境化学材料研究課 主任研究員
博士(工学) 固体物理

TEL : 0774-98-2566

E-mail : takahashi.kohei@jp.panasonic.com

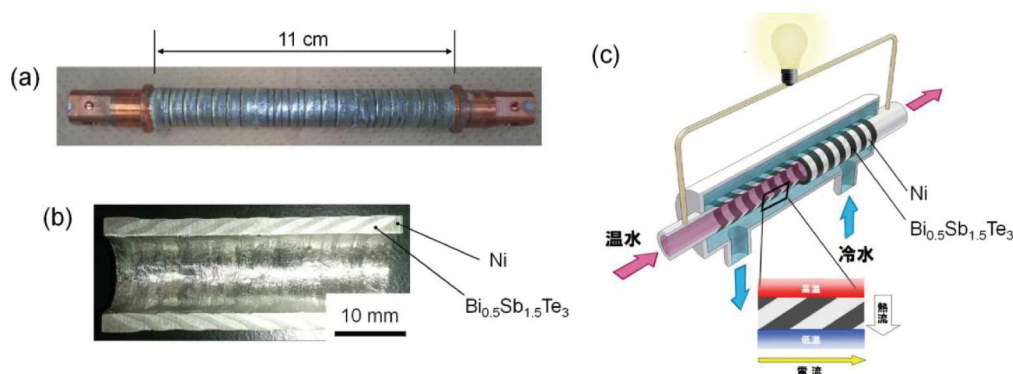


図1: $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3/\text{Ni}$ チューブ型熱電素子の (a) 全体図および (b) 断面図。
(c) チューブ型熱電素子を用いた発電方法の模式図。
チューブの内部と外部に温度差をつけることで、チューブ軸方向に熱起電圧を発生させることが出来る。この構造は一般的なシェル&チューブ型の熱交換器と同様の構造を示す。

熱交換器として機能する。

図1(a) および1(b) にそれぞれ、我々が開発を進めるチューブ型熱電素子の全体図および断面図を示す。断面図を見ると、2種類の材料が交互に傾斜して積層された構造になっていることがわかる。この層の構成部材はそれぞれ p 型熱電材料である $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ と一般的な金属である Ni 層である。このような異種材料による傾斜積層構造を形成することで、熱流が流れる方向とは直交する方向に熱起電力を発生させることが可能となる。すなわち、我々の素子においては、チューブ内部と外部の間に温度差をつけることで、チューブ軸方向に電流を発生させることができる。具体的には、図1(c) に示すように、チューブ素子の内部に温かい（冷たい）流体を導入し、チューブ素子の外部を冷たい（温かい）流体で冷却することで、チューブ素子の両端から電力が取り出せる。なお原理や製造方法の詳細については、文献 [1]-[4] を参照されたい。ここで注目すべきは、図1(c) の発電するための構造が、一般的なシェル&チューブ型の熱交換器と同様の構造を有することである。したがって、このようなチューブ型熱電素子を用いることで、発電する機能を持った熱交換器、すなわち熱発電熱交換器が実現できることが考えられる。

図2は、シェル&チューブ型熱交換器を模した $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3/\text{Ni}$ チューブ型熱電素子の評価システムである。チューブ素子の寸法は、長さ 110mm、外径 14mm、内径 10mm である。このような系において、チューブ素子の内側に 95℃の温水を導入し、

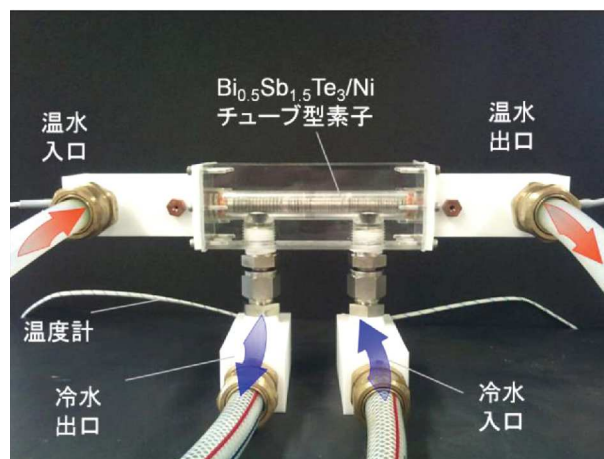


図2: シェル&チューブ型熱交換器を模した熱発電評価システム。

外側を覆うジャケット部に 10℃の冷水を導入することで、現状で 7W 程度の電力が得られる。前記条件化で動作させた場合、dc-dc コンバータによる昇圧を必要とするものの、チューブ素子一本で、LED 電球、ポータブルテレビ、ラジオなど様々な小型電子機器を動作させることができる。また熱交換性能においても、同一寸法のもので、一般的に熱交換器の部材として用いられている銅や SUS のチューブで置換した場合に比べても、同等から約 2 倍程度の性能を示す。これはすなわち、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3/\text{Ni}$ チューブ素子が、発電する機能を持った熱交換器として機能することを表している。

現在我々は、より実用的な形を目指して、京都市東北部クリーンセンターにおいて、ごみの焼却熱を利用したチューブ型熱電素子の発電検証実験を行っ

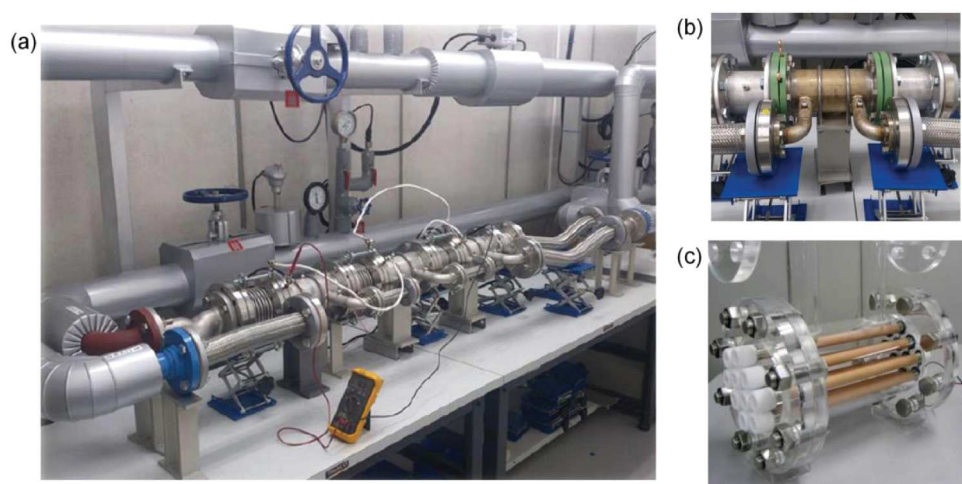


図3：京都市東北部クリーンセンターにおいて設置されている熱発電システムの
(a) 全体図、(b) ユニット拡大図、および (c) アクリル模型。
シェル内部には $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3/\text{Ni}$ 熱電チューブ（長さ 220mm、外径 14mm、
内径 10mm）が 10 本が組み込まれている。

ている。図3(a)に京都市東北部クリーンセンターに実際設置されている熱発電ユニットの全体像を示す。図3(b)の拡大像に示すステンレス製のシェル構造の中には、長さ 220mm、外径 14mm、内径 10mm の熱発電チューブが 10 本組み込まれている [図3(c)のアクリル模型参照]。ここではごみの焼却熱を通じて生成した 95℃ の温水、および施設内で供給される 10℃ の冷水をそれぞれ熱発電ユニットに導入することで、熱発電ユニット 1 基あたり約 60W の電力を発生させることを確認している。このときの熱交換量は約 20kW であり、ここで紹介する熱発電ユニットが実際に熱交換器としても機能していることがわかる。熱発電ユニットを通過後の温水、冷水の温度変化は 1℃ 程度のため、熱発電ユニットを多段に接続することによって、より大きな電力が生成できることが考えられる。

工場やごみ焼却場には様々な設備・機器を冷却するための熱交換器が数多く設置されている。このような熱交換器を我々が開発する熱発電熱交換器で置

き換えることで、従来までの冷却機能を保ったまま排熱を電力として有効に再生することが可能になる。耐久性など未だ検討しなければならない課題はあるものの、本稿で紹介するチューブ型熱電素子は、様々な産業の現場において実用的な排熱回収を実現する大きな可能性を秘めている。

参考文献

- [1] T. Kanno, A. Sakai, K. Takahashi, A. Omote, H. Adachi, and Y. Yamada, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 011906 (2012).
- [2] K. Takahashi, T. Kanno, A. Sakai, H. Tamaki, H. Kusada, and Y. Yamada, *Sci. Rep.* **3**, 1501 (2013).
- [3] A. Sakai, T. Kanno, K. Takahashi, H. Tamaki, H. Adachi, and Y. Yamada, *J. Electron Mater.* **42**, 1612 (2013).
- [4] T. Kanno, K. Takahashi, A. Sakai, H. Tamaki, H. Kusada, and Y. Yamada, *J. Electron Mater.* **43**, 2072 (2014).