

特 別 賞

未利用熱エネルギーを活用するための
熱発電チューブの開発

パナソニック株式会社 先端技術研究所

菅野 勉 酒井 章裕 高橋 宏平
玉置 洋正 山田 由佳

1. はじめに

エネルギーの大量消費によって支えられてきたこれまでの経済活動は、化石燃料の枯渇への懸念と原子力発電所の事故を受けて大きな変革を迫られることとなった。特に、エネルギー自給率がわずか4%にとどまる日本にとってはさらなる省エネルギーの推進および再生可能エネルギー技術の開発が急務である¹⁾。太陽光や風力、地熱などに代表される再生可能エネルギーは、いずれも天候や地理的条件による供給量の変動や偏りが大きい。このため我が国は、地域の特性に応じて多様なエネルギー源をミックスした、分散型の次世代エネルギーシステムの構築を目指している²⁾。

多様なエネルギー源のうち、熱は工場、車、家庭など至る所で発生する。しかしこうした熱源はあちこちに散在する上、一つ一つが小規模で温度がさほど高くないため有効に活用することが難しい。熱を移動させたり、発電を行ったりする際には周囲環境との温度差が必要で、温度差が小さければ熱をうまく回収できなくなるからである。例えば図1のように原油換算で年間約4億キロリットルにもものぼる国内の消費エネルギーのうち、7割以上が200℃以下の蒸気、温水、排ガスなどの形態で未利用のまま周囲環境に捨てられている。こうした熱を活用できれば大きな省エネとなるが、200℃以下というのは熱としては温度が低く、現状では回収が難しい。また、再生可能エネルギーの一つである地熱も200℃以下が大部分を占めている³⁾(図2)。我が国では国土の火山活動が活発なこともあり、地熱資源の潜在量はグローバルで第3位である⁴⁾。しかし地熱が集中する地域は国立・国定公園や温泉地であることが多く、大規模な掘削を伴う地熱発電所の新設は制約が多く難しい。そこで既に湧出している温泉を活用するなど、コンパクトできめ細やかな地熱利用を展開し、周囲環境への影響を最小限にとどめることが重要となってくる。

小規模かつ低温の熱源を利用できる発電方式として、熱電変換技術が近年注目を浴びている。これは固体材料に与えた温度差から直接発電を行う技術で、どんな小さな温度差からも発電が可能であること、可動部が無いことなどから小型・軽量・長寿命といった長所がある。現在までの研究開発は、より変換効率の高い熱電材料をいかに実現するかという観点で主に

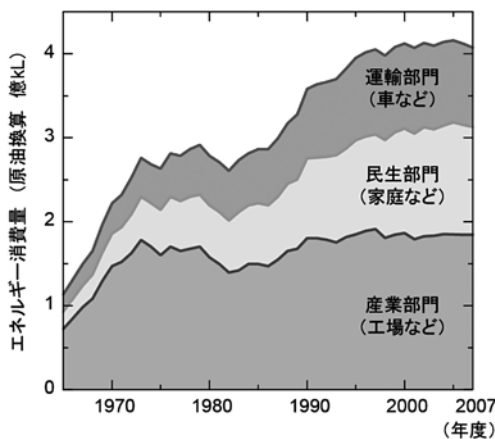


図1 日本国内における1次エネルギー消費量の推移 (文献1のデータより筆者らが作成)

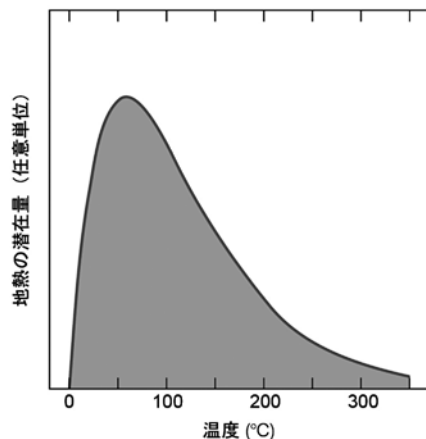


図2 地熱の潜在量の温度分布 (文献3のデータより筆者らが作成)

進められてきた。近年はナノテクノロジーの進展によって熱電材料の性能が向上してきている^{5,6)}。しかしながら、デバイスおよびシステムレベルでは十分な熱量が得られる構造を実現できていないことから未だ発電量が小さく、広く普及するまでには至っていない。我々が回収を目指す未利用熱の大半は蒸気、温水、排ガスなど、総じて流体の性状である。発電の際には、この流体をうまくシステムに導入して効率良く熱を取り入れる必要がある。一方、従来の熱電発電デバイスは図3のような平板形状で、上下面に温度差をつけることによって熱電材料の中の熱の流れを一部電流に変換し発電を行う構成となっている(図4)。温水や蒸気などによってこの平板型のデバイスに温度差をつけ、熱を取り入れるには別途配管やヒートシンクを組み合わせなければならず、全体のシステムが大掛かりとなってしまふ。さらに、両面に存在する絶縁基板や電極接合などが熱の流れを妨げ、大きな熱量が得られない。従来の平板型デバイスは伝熱性能に乏しく、流体からなる未利用熱の回収に不向きなのである。

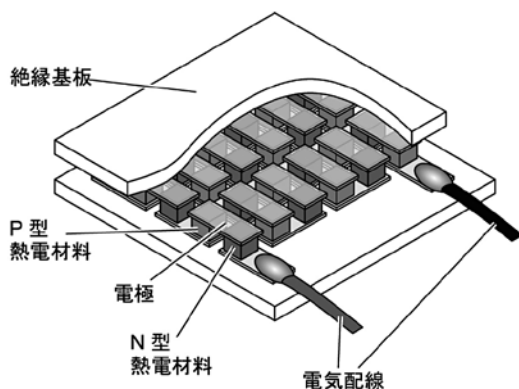


図3 従来型の熱電発電デバイスの模式図。熱電変換材料を電極と絶縁基板で挟んだような平板型の形状となっている。このデバイスの両面に温度差をつけることで発電することができる。

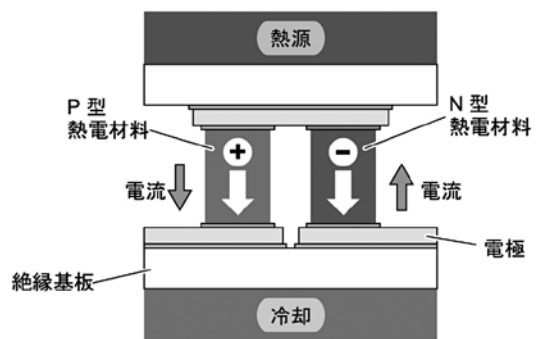


図4 従来の熱電発電デバイスの断面を示した図。熱の流れに伴って熱電材料の中を電荷が流れる。隣り合う材料では電荷がプラス(P型)とマイナス(N型)で異なるので電流が滞り無く流れる。

2. 研究開発のコンセプト

熱電変換による発電量 P は入力される熱量 J_0 に変換効率 η を乗じた $P = \eta J_0$ で表される。したがって発電量を増やすためには変換効率と入力熱量のどちらか、あるいは両方を高める必要がある。しかしその実現は簡単ではない。熱電変換ではシステムの設計によって入力熱量および発電効率が相反して変化するからである(図5)。一般的に熱電材料に生じる温度差が大きければ変換効率は上がる。しかし一方、安易に温度差を大きくするためにシステム全体の熱抵抗を高くして断熱的にすれば、入力熱量は減ってしまう。この結果、発電量の低下という不都合が生じる(図5の右側)。熱源の供給にランニングコストがかかるような場合には変換効率を上げることは確かに重要である。しかし、未利用熱はもともと捨てているもの、と割り切れば如何にコンパクトなシステムで大きな発電量を達成し、熱エネルギーの有効な回収を進めていくかということが最も重要な課題となる。そのためにはシステム熱抵抗を低

減し、入力熱量を高めることによって発電量の向上を目指すのが得策である(図5の左側)。

入力熱量を高めるために、伝熱性能の高い熱交換器の構造を模して熱電発電デバイスを構成すれば良いのではないかと我々は考えた。熱交換器は高温の流体から効率良く熱を取り込み、低温の流体へ熱を移動させる機器で、エアコンやボイラー、飲料の殺菌など様々な用途で使われている。熱交換器での伝熱現象の理解はかなり進んでおり、用途に応じて最適な伝熱設計を行うことも可能となっている。この知見を活かせば、温水など未利用熱からの入力熱量を増大することができる。熱電発電デバイスをチューブ形状にしてボイラーなどと同じような構造にできれば理想的である。しかしこれまでの熱電発電デバイスでは、熱電材料を電極で複雑に繋ぎ合わせる必要があるため現実的には平板型にするほか無く、熱交換器のような構造にすることは不可能であった。チューブ型のデバイス構成を実現するためには、新たな仕掛けが必要となる。

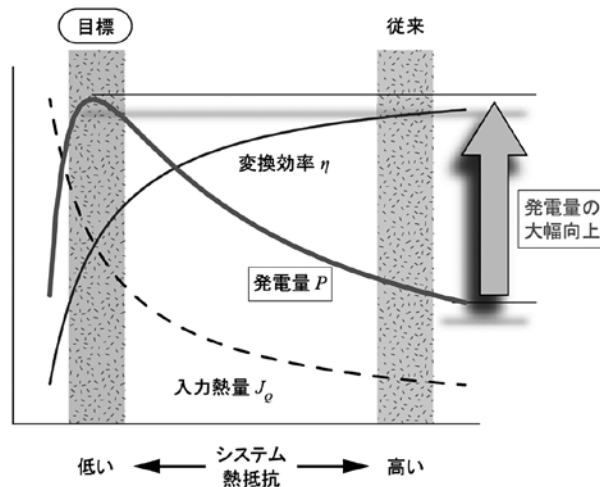


図5 システム全体の熱抵抗を変化させた時の発電電力 P と変換効率 η 、入力熱量 J_0 の関係。システム熱抵抗を高めれば変換効率は上がるが入力熱量が減るので発電量が小さくなる。一方、システム熱抵抗を低減し入力熱量を高めることによって発電量を増大させることができる。

3. 熱と電気の独立制御で実現する「熱発電チューブ」

チューブ型の熱電発電デバイス、熱発電チューブを実現するために、我々は図6のような構造を考案した⁷⁾。熱発電チューブを冷水ジャケットに組み込み、チューブの中に温水を流し、外を冷水で冷やすことによって温度差をつける仕組みになっている(図6(a))。この構成は液体を加熱・冷却する際に用いるシェル・アンド・チューブ型熱交換器と同様のものである。発電で生じた電力は熱発電チューブの両端に電線を接続して簡便に取り出すことができる。熱発電チューブは熱の伝わりにくい熱電材料と熱が伝わりやすい金属が、チューブの軸方向(z 方向)に対して θ だけ傾いて交互に積み重なった積層構造体となっている(図6(b)の断面図)。

熱発電チューブでは、熱はチューブの内側から外側、すなわち動径方向(図6の r 方向)に流れるのに対し、電流はチューブの軸方向(図6の z 方向)を流れる。このように熱流と電流

を直交させることにより、複雑に電極を張り巡らせることなく、簡便にチューブ型の構造を実現することが可能になった。この点で、熱流と電流が常に互いに平行となる従来の平板型熱発電デバイス(図4を参照)とは大きく異なっている。

熱流と電流が直交するという、一見不自然な現象がなぜ可能となるかを明らかにするために、熱発電チューブの発電時のシミュレーション結果を図7に示す。熱発電チューブの中では図7(a)のように積層構造に対応して、不均一で歪んだ温度分布が形成されている。熱電材料と金属とは熱伝導率に100倍近い差があり、より熱の伝わりやすい金属に引き寄せられるように熱流が曲げられているのである。そして熱流から変換されて生じる電流は傾斜した積層体の中をジグザグに進み、熱発電チューブの軸方向(z 方向)に流れていく(図7(b))。ミクロに見れば確かに電流は熱流に沿って流れているのだが、マクロの現象としては熱流と電流は互いに直交するのである。本研究の積層構造体をはじめとする人工的に構成された複合材料は、時にマクロの性質として自然に存在する単一の物質ではありえないような特性を示すことがある^{8,9)}。複合材料の実効的な性質は、構成材料の物理特性と等価回路などを考慮することで導出することができる¹⁰⁾。所望の特性に応じて構成材料を選択したり、組み合わせる比率や配置を適宜調整したりできるので、その設計の自由度は高い。

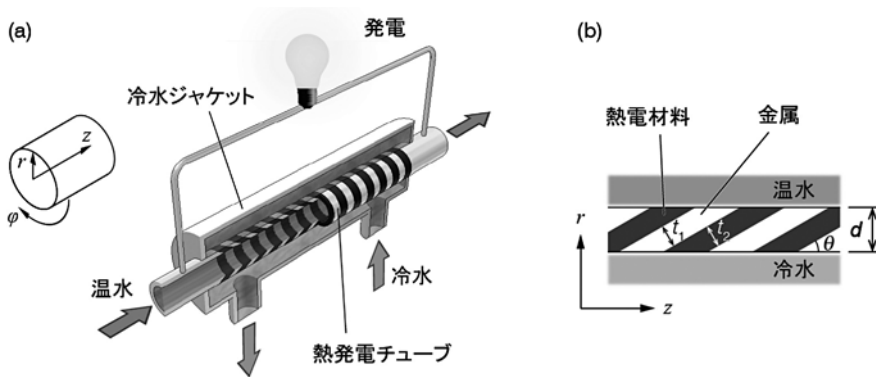


図6 (a)熱発電チューブによる発電の模式図と(b)熱発電チューブの断面図。

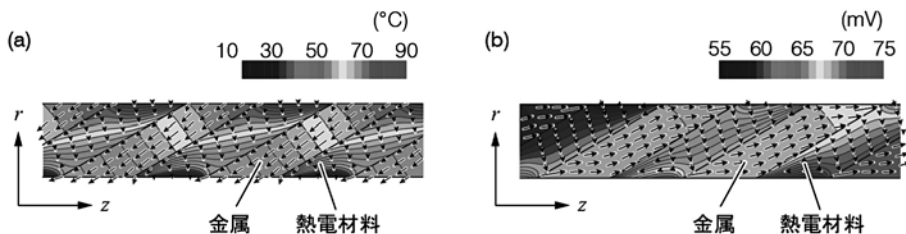


図7 熱電材料($\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$)と金属(Ni)からなる熱発電チューブを発電させた際の(a)熱流(矢印)と温度分布および(b)電流(矢印)と電位分布。

4. 熱発電チューブの作製

温水からの発電を行うための熱発電チューブの作製を行った。熱電材料に $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ を、金属にニッケル (Ni) を選択した。 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ は室温から 100 °C の温度域では最高レベルの性能を持つ材料である。熱発電チューブはリング状の部品を積み重ねたような構造をしている (図 6(a) および図 8(b) の断面構造を参照)。熱電材料の $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ は非常に脆い材料として知られ、ドリルなどで削って成形することができない。そこで $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ とニッケルでできたリング状の部品は casting によって作製し、これらの部品を交互に積層することにした。リング部品同士の接合ははんだペーストを用いて行った。作製した熱発電チューブを図 8(a) に示した。おおよその寸法は積層部分の長さが 100 mm、チューブの外径が 14 mm、内径が 10 mm である。両端には温水配管や電線を接続するためにニッケル製のスパーサーを取り付けた。このようにして、非常にシンプルな熱発電チューブが作製できた。

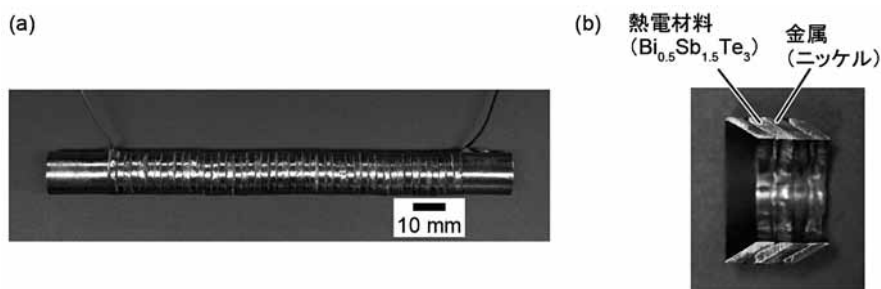


図8 (a) 作製した熱電材料 ($\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$) と金属 (ニッケル) からなる熱発電チューブ。
(b) 断面は傾斜した積層構造を有している。

5. 高いエネルギー密度での発電を実証

作製した熱発電チューブの内部に温水を流し、外部を冷水で冷やすことによって発電試験を行った。まず初期検討として 10 °C の冷水中に配置した熱発電チューブの内部に 70 °C の温水を流したところ、発生した電力によって LED ランプが点灯することを確認した (図 9(a))。さらにコンパクトかつ伝熱性能の高い構造とするために、外径 30 mm、長さ 100 mm の冷水ジャケット中に熱発電チューブを組み込んで試験を行った (図 6(a) を参照)。熱発電チューブ内に 93 °C、毎分 15 リットルの温水を流し、冷水ジャケットに 10 °C、毎分 25 リットルの冷水を流して評価を行ったところ、最大で 1.3 W の電力が得られた。伝熱面積あたりの電力密度に換算すると 1 平方メートル当たり 417 W の電力に相当する。太陽光発電が最大で 1 平方メートル当たり 200 W (効率 20 % の場合) なので、比較すると 2 倍以上の電力密度になる。仮に同様の性能の熱発電チューブを複数組み合わせ、1 m × 1 m × 1 m の発電ユニットを作った場合、約 10 kW の電力が得られる計算となる。これは平均的な家庭の 5 世帯分以上の電力需要をまかなえる大きな数字である。

測定された値の妥当性を検証するために、熱交換器の解析で用いられるような流体の伝熱現象を考慮したシミュレーションを行った。電圧の値は誤差 10 % 程度の範囲内にあり (図 9 (b) の破線)、測定結果をよく再現するものであった。未利用熱は場所に応じて温度や供給量

など熱源の特性が異なっている。こうした精度の高いシミュレーションをうまく設計に利用すれば、未利用熱の特徴に応じて発電性能を最適化することが可能となる。産業や民生用途を問わず広く応用されている熱交換器の成熟した設計技術が、熱発電チューブのシステム設計に活用できるのは大きなメリットである。

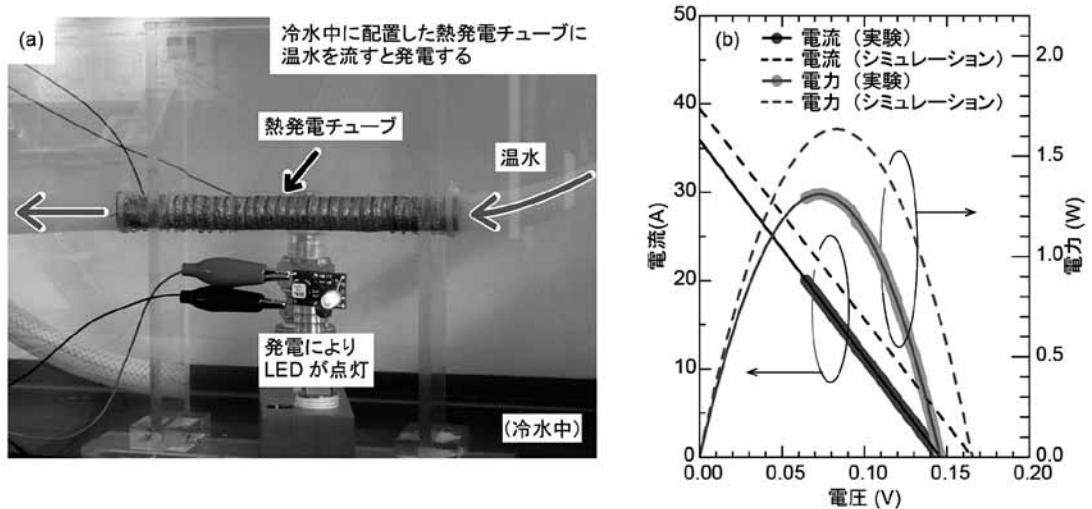


図9 (a)熱発電チューブによる温水からの発電試験の様子。(b)温水温度を93℃、冷水温度を10℃とした時の発電特性。最大で1.3 W(417 W m⁻²)の発電量が得られた。

6. 熱発電チューブの性能向上予測

熱発電システムの本格普及のためには、発電電力当たりのコストを低減させることが何よりも重要となる。使用する材料の量をできるだけ減らしながら、より高い発電性能を実現することが目標となる。そこで流体伝熱を考慮したシミュレーションを行い、熱発電チューブの設計と発電性能、および熱電材料の使用量の関係について検討した。図10は熱発電チューブにおけるニッケルの体積分率またはチューブの内径 d_m を変化させた時の発電特性をシミュレーションした結果である。ニッケルの体積分率を増加させた場合、デバイス全体の内部電気抵抗が小さくなるので、熱電材料であるBi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃の使用量を減らしつつも電力密度を増加させられることがわかった(図10(a))。これにより熱電材料の使用量あたりの発電電力は顕著に増大する(図10(b))。また、チューブの内径 d_m を小さくしていくと、図10(c)のように電力密度の上昇が見られた。熱電材料の使用量あたりの電力はチューブの内径の逆数 d_m^{-1} にほぼ比例して増加する結果となった(図10(d))。温水流量が一定の条件下では、チューブの内径を小さくすると流速が増大して激しい乱流となり、伝熱性能が飛躍的に高まるためと考えられる。以上の結果をまとめると、ニッケルの体積分率を増やし、かつチューブを細くすることによって、発電に必要な熱電材料の量を減らして材料コストを低減することができることがわかった。

熱発電チューブを用いた発電は、コストの面でも他の発電方式に比べて劣らないポテンシャルを秘めている。2012年3月現在のBi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃の原料価格はおよそ10,600円/kg、ニッケルは1,600円/kgである。5.節でおこなった実証結果をもとに算出すると、1 Wの発電に必

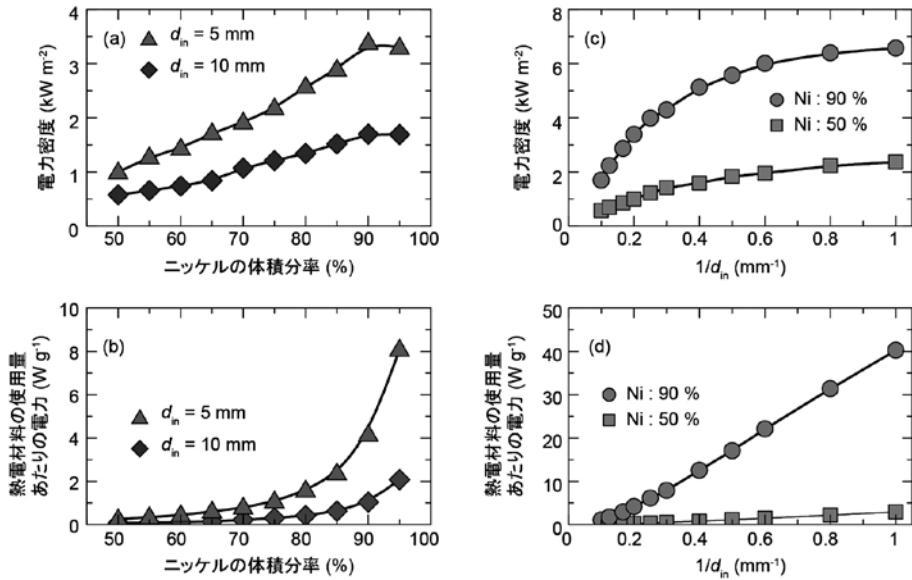


図 10 (a)熱発電チューブにおけるニッケル(Ni)の体積分率を変化させた際の電力密度および(b)熱電材料(Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃)の使用量あたりの発電電力(c)チューブ内径 d_{in} を変化させた際の電力密度および(d)熱電材料の使用量あたりの発電電力。

要な材料の重量は 46 g であった。熱発電チューブを地熱など 24 時間利用可能な熱源に適用することを想定し、かつ耐用年数を 10 年と仮定した場合、1 kWh 当たりの材料価格は 2.9 円に相当する。これを例えば Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ : Ni = 10 : 90 で内径を今の半分の 5 mm にすれば 1 W の発電に要する材料の重量が 3.1 g で 1 kWh 当たり 0.08 円となり、大幅な軽量化とコスト削減が実現する計算となる。現状の多結晶シリコン太陽電池において、使用材料のシリコンにかかるコストは 1 kWh 当たり 1.0 円なので¹¹⁾、材料コストに限って言えば大幅な優位性がある。実用的な発電システムの開発はこれからの検討課題であり、現時点では不確定な要素は多い。しかし冒頭で述べたように、近年はナノテクノロジーの進歩により優れた熱電材料が多数開発されている。そういった材料を用いて熱発電チューブを構成することで、発電技術としての競争力をさらに高めることができる。

7. アプリケーション

熱発電チューブを用いた発電ユニットは、例えば図 11(a)のように、用途に応じて配管を組み合わせ自由に構成することができる。図 11(b)は複数の熱発電チューブを使って実際に製作した発電ユニットである。チューブの中に 80 °C の温水を流し、周りに 10 °C の水を循環することで図 11(c)のように発電することができた。発電ユニットおよびシステム開発をさらに推し進めることで、温度や流量など、場所に応じて様々な特性を持つ未利用熱を有効に活用し、将来のエネルギーネットワークを構成する分散型の発電システムを実現できる。

地域によっては、系統電力から遮断されると支障が生じる信号設備や、系統電力そのものへのアクセスが困難な山間部や僻地などの防災用環境計測器の運用のために利用することが

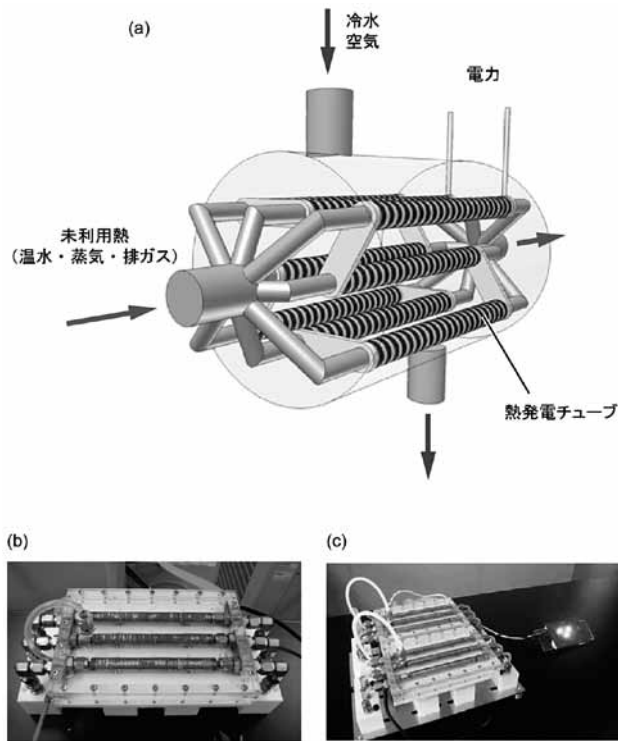


図 11 (a)熱発電チューブを組み合わせた発電ユニットの模式図。(b)熱発電チューブを3本備えた発電ユニット。(c)80℃の温水からの発電によりLEDランプを点灯させている。

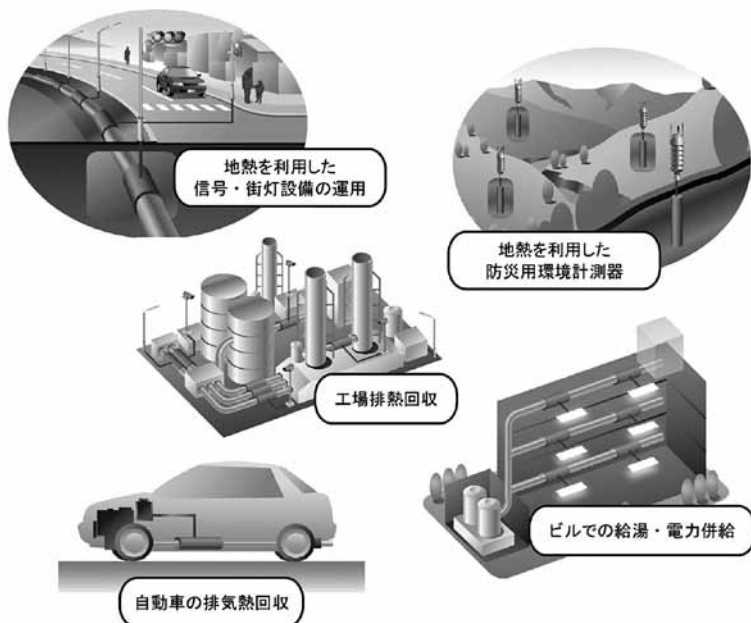


図 12 系統電力から遮断された非常時にも地熱を利用した信号・街灯設備の運用、防災用環境計測器の維持が可能となる。また工場、自動車、ビルの熱を利用した発電ができる。

できる(図 12)。また、工場や自動車で発生する排熱の回収にも当然適用できる。オフィスビルにおいても、既存の給湯ボイラーに組み込んで電力を併給することが可能となる。今後のシステム開発とさらなる性能向上によって、様々な分野での波及効果が期待される。

8. おわりに

化石燃料の消費に伴う排熱や、地熱・温泉熱をはじめとする未利用熱の有効活用は長年の課題であった。未利用熱の大部分は熱としては低温で 200℃以下の蒸気・ガス・温水などの流体である。低い温度の流体から効率良く熱を回収するために、チューブ形状の熱発電デバイス「熱発電チューブ」を考案し、その実証に成功した。今後はエネルギー危機の解決にいち早く貢献すべく実用的な発電システムの開発を推進していく所存である。

なお、本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受け実施したものである。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：「日本のエネルギー 2010」(2010)。
- 2) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会：「新しい『エネルギー基本計画』策定に向けた論点整理」(2011)。
- 3) V. Stefansson, *Proceedings world geothermal congress 2005*, Antalya, Turkey (2005)。
- 4) 村岡洋文他：「地熱エネルギー最新動向」OHM 2009/12 号p.16 (オーム社) (2009)。
- 5) 野澤哲夫：「廃熱や振動からの発電技術が実用期へ」日経エレクトロニクス 2008/12/15 号 p.97 (日経BP 社) (2008)。
- 6) K. Nielsch *et al.*: *Adv. Energy Mater.* **1**, 713–731 (2011)。
- 7) プレスリリース：「世界初、傾斜積層構造を用いた熱発電チューブを開発」(パナソニック) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn110620-2/jn110620-2.html> (2011)。
- 8) D. J. Bergman *et al.*: *J. Appl. Phys.* **85**, 8205 (1999)。
- 9) M. Wang *et al.*: *Mat. Sci. Eng. R* **63**, 1 (2008)。
- 10) T. Kanno *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **94**, 061917 (2009)。
- 11) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：「太陽光発電ロードマップ (PV2030+)」(2009) に記載されているデータなどを参照し、筆者らが試算したもの。