T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	冷却を行いつつ発電する「フロー熱電発電」の創出 ～強制対流冷却の場面からの電気エネルギー回収技術～
著者	村上陽一
出典	電気評論, Vol. 103, No. 12, pp. 66-69
発行日	2018, 12

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

冷却を行いつつ発電する「フロー熱電発電」の創出

～強制対流冷却の場面からの電気エネルギー回収技術～

東京工業大学　村　上　陽　一*

1. はじめに

熱エネルギーを電気エネルギーに変換する「熱電発電技術」が存在する。これまで，この研究開発のほぼすべては，固体材料を用いて行われてきている。一方，広く社会と産業において，機器の運転に使う燃料や電力を消費した結果として，熱が出ている。これらの二つのことは，どのように結びつくのであろうか？すなわち，「機器から熱が出るから，それをもったいないとして，機器の熱発生面に固体の熱電材料を貼り付ければよい」というシンプルな考えは正しいのだろうか？この問は，理学的な問ではなく，システムとして考えたときの工学的な問である。

この問に答えるためには，熱の種類を状況によって分類し，その「工学的な性質」を見極める必要がある。本稿ではまず，このような発生熱が工学的にはどのように見なされるべきかを述べた後，上のようなシンプルな結びつけが必ずしも工学的には妥当でないことを示し，最後に，その問題に対するシステム的な考察から筆者が着想・創出した本稿表題の「フロー熱電発電」の概略を説明する。

本稿は一般向けの解説論文であり，また本成果が現在投稿準備中であることから，測定データ等の詳細なデータ提示は行わない。データの一部は，最新ではないものの，既に学会の予稿論文[1]として発表を行っているので，そちらを参照頂きたい。なお，本稿は公益財団法人 東電記念財団の財団ニュース（No. 51，2018年８月発行）に筆者が執筆した記事にもとづくものであり，当財団の承諾の上，その一部を本稿に用いていることをお断りしておく。

2. 発生熱の工学的な分類

固体の熱電変換材料の研究者や研究領域において，しばしば発生熱を，状況によらず「使わないともったいない，ありがたいもの」と前提的に捉える論旨が見られる。この視点ではしばしば「廃熱」の語が使われ，この語は，図１(a) のイメージで描かれるような「随意に使える，使わないともったいない資源」という印象を与える。確かに，火力発電所やごみ焼却所から最終段の冷却水として出た温水を地域の集合暖房等に使う場合などは，その通りである。これは「環境に放出された後の熱エネルギー」であるため，特に制約なく随意に使えるからである。

しかし，タービン・エンジン・データセンターのCPU 群などの機器から発生する熱のほとんどは「排熱」であり，この熱は上の「廃熱」とは工学的に区別されるべき熱であることに注意を要する。すなわち，機器から出る「排熱」は，図１(b) のイメージで描かれるような，積極的除去（機器温度抑制）の義務が課された「やっかいな熱」なのである。その理由を以下に説明する。熱機関（熱を仕事や電力に変換する機械・機器の総称）では，高い効率を追求し維持するために，熱力学の第二法則の要請により，機器における熱を捨てる側の温度（排熱面温度）を努力して下げる必要がある[2]。そのため，すべての熱機関は，熱力学の原理的要請によって，積極的な冷却が本質的に必要となっている。一方，CPU やパワー素子などの電子機器では，アレニウスの速度論の式(指数関数型の式)によって，温度が上がると急激に故障や誤動作の発生率が増大するため，これらの機器も積極的冷却が本質的に必要となっている。

このような「やっかいな熱」の除去は，実際の多くの場合，強制対流冷却[3] によって行われている。自動車やタービンには様々な強制対流冷却機構が搭載され，多くの電子機器にも空冷や液冷の機構が搭載されている。このように，熱を発生する多くの機器は，排熱面温度を可能な限り下げるべく，「どんどん発生してしまう熱（図１(b)）」と戦っているのである。従って，このような熱までを，特段の義務

＊むらかみ　よういち　工学院　准教授　JST さきがけ兼務

なく使える資源であるかのような印象を与える「廃」熱と呼ぶのは不適切となる。現在，様々な研究領域において，これらの区別されるべき二種類の熱が，しばしば用語的にも概念的にも混同されている。

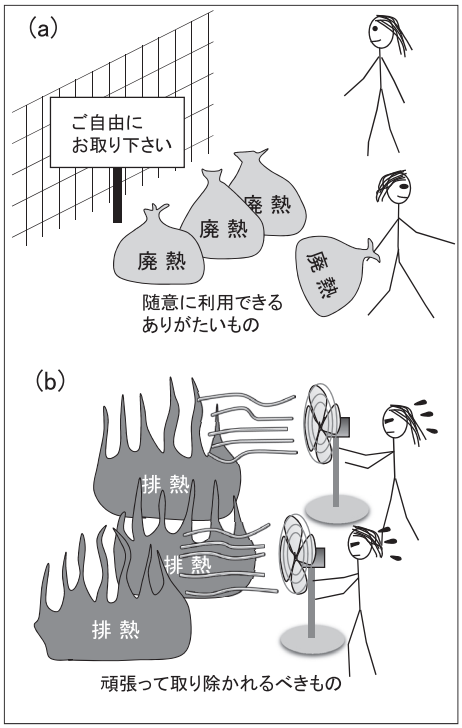


図１　工学的に性質が異なる二種類の熱の模式図
(a) 随意に利用可能な熱，
(b) 努力して除去する義務が課せられた熱

3. 従来研究の期待成果のシステム的考察

上述のように，熱機関や電子機器は，運転に伴い熱を発生する。これまで，多くの熱電材料研究が，このような機器から出る熱エネルギーを電力として回収することを期待成果に掲げ，行われてきている。これは，固体熱電材料（以下，素子）の両端につけた温度差 ΔT にほぼ比例した電位差が素子両端間に生じ（ゼーベック効果），その間に導線をつなぐと電力が取り出せるというものである。本節では，このような期待成果が妥当なものかどうか，システムの観点から考察してゆく。

システムには，必ず図２(a) のような「固体－流体（液体または気体）の界面」が存在する。熱電材料の研究では，しばしば適用先に熱機関や電子機器などの排熱面が想定される。そこでしばしば明示的または暗黙に仮設される前提は，「排熱面温度が $T_{排熱面}$，そこに到来する流体の温度が $T_{流体}$ なら，排熱面に設置された熱電素子の両面間には $T_{排熱面} - T_{流体}$ 程度の温度差 ΔT がつく」というものである。

この前提に対して，正しい理解の鍵を与えるのは図２(b) の「熱抵抗」の考え方である。固体では，熱抵抗 R は熱伝導率に反比例し，材料の厚さに比例する。また，熱流 Q の移動方向の温度降下は R に比例する。すなわち，熱抵抗の考えは，電気におけるオームの法則のアナロジーである（図２(b)）。重要なのは，通常は，図２(a) のように，固体面近傍の流体中に形成される「温度境界層」の熱抵抗が支配的になるという点である（専門的には，Biot 数[3] は通常１より十分小さい，と言う）。このため，通常の対流冷却の状況では，全体の温度降下（熱源→環境の温度降下）に占める固体内での温度降下の割合は小さいものとなる。従って，通常の状況では，排熱面と流体との間に固体の熱電素子板を挿入したとしても，定常状態ではその素子の両面間に有意な大きさの ΔT はつかず（図２(c)），上の前提にもとづいて期待される発電量は得られないことになる。（注：ステップ状に排熱面温度を上げた直後の過渡的状態の間は一時的に大きな ΔT が得られるが，これは実際の使用を模すものではない。）このことは，熱電素子板を二流体間熱交換器の隔壁に使う場合にも同様である。

熱電素子がそれに期待される発電を行うには，定常状態でつく素子両面間の温度差 ΔT が有意に大きい必要がある。そのため，現在，熱電材料分野では材料パラメーター（ZT 値）の増大が追求されている。そして，そのために，しばしば「材料の熱伝導率を下げる（＝熱抵抗を上げる）」ことを目的とした研究が行われている。

このような目的追求を，適用される機器の排熱面まで含めて考えると，以下のようになる。すなわち，熱電発電の量的増大を望み，図２(d) のように熱抵抗が高い（＝熱伝導の悪い）固体素子で排熱面を覆うと，熱電素子には望みに近い ΔT がつくのかもしれないが，環境の温度（図では $T_{流体}$）は一定なので，この ΔT は母機器に引き起こされる温度上昇になる（図２(d)）。前節で述べたように，機器からの発生熱は「随意に使えるありがたい熱（図１(a)）」ではなく，「積極除去の義務が課せられたやっかいな熱（図１(b)）」である。すなわち，熱電素子を有意化するために，機器と環境との間に有意な大きさの熱抵抗を挿入し，親機器に温度上昇を招くことは，通

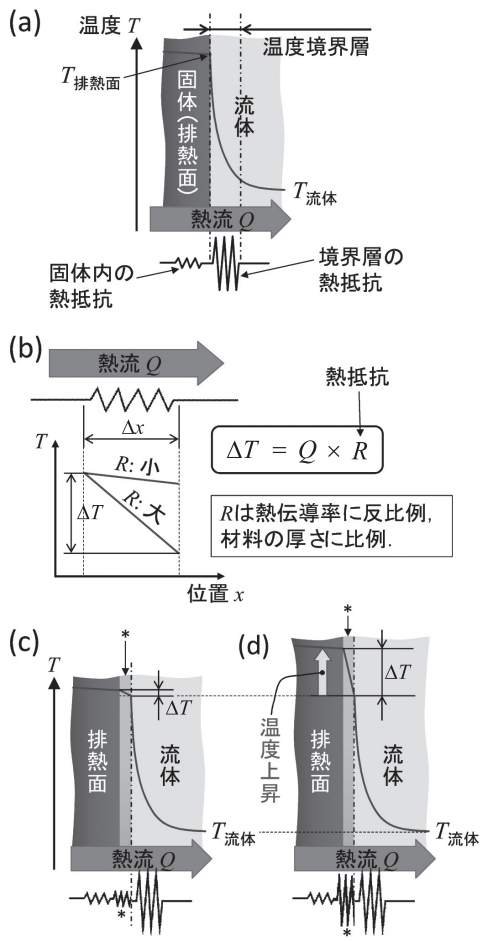


図２　(a) 固体－流体界面の断面模式図，
(b) 熱抵抗 R の説明，
(c)(d) 固体素子板（＊印）の挿入による温度分布の変化

常，工学的には許容されないことである。

一方，排熱面を「覆う」ことを嫌い，排熱面の一部のみに熱電素子を設置するなら，熱流は（電流と同様に）ほとんどこの素子を通過しては流れないので素子両端には有意な ΔT はつかず，熱電素子を設置すること自体の意味が薄れる。二流体間熱交換器の隔壁に熱電素子板を用いる場合にも同じ議論が成り立つ。すなわち，このような従来研究では，材料パラメータ増大の追求は行われていても，システムとしての妥当性や工学的な成立可能性についてはほとんどと言ってよいほど検証されてこなかった。

4. フロー熱電発電の着想と概説

このような問題認識から，筆者はシステムの観点に立った新しい熱電発電技術を創出する必要を認識し，その過程で「流体側で熱電発電ができれば有利な点が多い」ことに気づいたのが，表題の研究の着手のきっかけとなった。少し学術的に書くと，機器の積極的冷却の場面（図１(b) の状況）における「もったいない」の本質は，積極的な冷却行為自体にあるのである。すなわち，非平衡熱力学の表現[4] を用いれば，自由エネルギーの散逸レートが，流束（今の場合は熱流）×駆動力（今の場合は温度の対数の勾配）に比例するということである。言い換えると，強制対流冷却の場面における「もったいない」は，除かれる熱の量そのものにあるのではなく，急峻な温度差を用いて多量の熱を移動させている強制対流冷却行為にあるのである。（このことは，恐らく一般にはよく認識されていないと思われる。）

具体的に，上述の着想の実現方法として，熱電発電能をもつ液体を冷却の作動流体として機器の排熱面に対流させることで，「冷却を行ないつつ発電する」というのが，筆者の着想である。前述のように，通常の機器の多くには既に強制対流冷却が存在しており，そこには固体－流体界面，すなわち温度境界層があるので，そこには大きな ΔT がついている。そして，そここそが「もったいない」の発生の場所である。この技術では，固体熱電材料のように大きな ΔT を得るために苦労する必要がなく，かつ，流体側の温度境界層につく ΔT を用いるので前述のシステム上のジレンマを引き起こさない。また，流れをデザインすることによる設計自由度も得られる。

筆者は，この着想の具体化において，（現在油冷で主に行われている）200℃程度までの機器排熱面の冷却に適用できるように「イオン液体（難揮発・不燃な常温溶融塩）[5]」に酸化還元対を溶解させたものを作動流体とし，その実証セルの開発と特性解明を行ってきた[1),6)]。これまでの研究から，本着想によって模擬排熱源に対する強制対流冷却から発電を行えることを実証し，さらに発電セルに作動流体を通過させる必要ポンプ仕事を上回る発電量が得られることを見出すなど，当初の期待を上回る有望な結果が得られている[1),6)]。

5. ま と め

本稿で紹介したフロー熱電発電は，本質的に必要な強制対流冷却に，液体側での熱電発電を組み込んだ，システムの観点から成立可能な新技術である。本発電技術は，適用が主に想定されるタービンやエ

ンジン等の熱機関・電子機器への適用に加え，ゆく先には，宇宙空間や月面等において自律的な冷却と温度制御を行う電力発生システムの創出につながることが期待される。イオン液体は，液体である温度域が広く蒸気圧は無視できるほど低い[5]ため，真空中で配管が破損しても沸騰も蒸発もせず，また，火炎を近づけても着火しない不燃性も有している[5]ため，幅広い環境で高い安全性が得られる長所がある。また，イオン液体に限らず，他の液体を本技術に使用することも可能である。以上のような従来技術とは根本的に異なるユニークな特長によって，様々な産業場面と宇宙などの極限的な環境において，本技術，すなわち「冷却を行いつつ発電する技術」が適用できる場面は，数多く存在すると考えている。

謝　　辞

本研究は，公益財団法人 東電記念財団の研究助成（基礎研究，2015年４月～2018年３月）の支援により着手・実施することができた。本研究提案を採択して頂いた東電記念財団，および，３年間にわたり数々の有益な助言を賜った当助成の審査員の先生方に深く感謝申し上げる。

参考文献

1）池田，福井，村上，第54回日本伝熱シンポジウム講演論文，2017.
2）JSME テキストシリーズ，熱力学，日本機械学会，2002.
3）F. P. Incropera and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Ed., Wiley, 1996.
4）K. S. Førland et al., Irreversible Thermodynamics: Theory and Applications, Wiley, 1988.
5）N. V. Plechkova and K. R. Seddon,“Applications of ionic liquids in the chemical industry,”Chem. Soc. Rev., vol. 37, pp. 123-150, 2008.
6）Y. Ikeda, Y. Murakami et al., to be submitted.