

小温度差熱利用技術の可能性

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻
鹿園直毅

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: shika@feslab.t.u-tokyo.ac.jp

URL: <http://www.feslab.t.u-tokyo.ac.jp/>

1. はじめに

第一次および第二次オイルショック以降, 我が国でも新エネルギーや省エネルギーに関する技術開発が強力に進められてきた. 高温ガスタービンを筆頭に既に目覚ましい成果を上げている例や, 太陽電池や燃料電池のように今世紀になって芽を出しつつある技術も多い. その一方で, 廃熱利用, 太陽熱発電, スターリングエンジンなど, 技術的成果は収めつつも費用対効果の面から限定的な普及にとどまっているものもある. 特に, 1980 年代を通じて石油価格が低位安定に推移したため, エクセルギー率の低い (仕事を取り出そうとしても原理的に取り出せないエネルギーとして価値の低い) 低温の熱に関わる技術は, 技術者の間でも「価格面でペイしない過去の技術」と刷り込まれてしまった感がある. 一方で, 筆者が指摘するまでもないが, エネルギーや素材価格がこの数年間で 2 倍以上にも急騰し, 企業も温暖化ガス排出コストを真剣に考えざるを得なくなってきたように, ここにきて技術を取り巻く境界条件がドラスティックに変化している. 環境が変化すればそこに適応する生物も淘汰されるように, 石油が安く外部環境コストを考慮しなくて良かった 20 世紀の技術から, 高い石油と社会コストを前提とした 21 世紀型技術に移行するのは自然な流れであろう. いかに優先順位をつけて, この技術転換を戦略的に実行するかがあらためて問われている. このような視点に立つと, これまで陽の目を見ることのなかった技術, 古くて新しいエネルギー技術が, 今後数年の間に世に出現してくる可能性は非常に高い. 産業界の方々とお話ししていると, その気配が随所で感じられる. 様々な業種で, まさに長い冬を耐えてこれから芽を出そうとしている技術開発の話が最近とみに多い. 本稿では, 今後のエネルギー利用効率を向上させる上で不可欠な, 小さい温度差での熱利用技術について, 独断と偏見を交えて考えてみたい.

2. 小温度差利用の本質

図 1 に, 少しデータが古くて恐縮だが, 我が国の 1 次エネルギーから最終消費までのエネルギーフローを示す⁽¹⁾. 1 次エネルギーの約 4 割が発電部門へ, 残りの 6 割が石油会社やガス会社等の非発電部門に回り, それぞれ全体の 25%と 6%が熱として損失となる. 最終的に, 産業, 運輸, 民生の各部門で投入量の約 7 割が消費されるが, そのうち動力や製品等の有用な形で使われるのは全体の約 1/3 に過ぎない. 残りはそれまでのプロセスで熱として失われる. 失われたと言っても, そこに温度差があれば熱機関を回して仕事を取り出せるはずである. ところが, 東京大学生産技術研究所の西尾教授の調査によれば, 図 1 中に示されているように排熱の温度は自動車の排気を除いて高温のものはほとんどない. 1 次エネルギーの 80%以上を占める化石燃料のエクセルギー率は 100%に近い (原理的には 100%に近い割合で機械仕事に変換可能) にも関わらず, 国全体では 1/3 程度しかエネルギーを有効利用できておらず, しかも出てくる排熱はもはや仕事を取り出すことのできないほど低温になってしまっているというのは, 一体どういうことであろうか? どこかに本質的な無駄が潜んでいるはずである. 日本は最も省エネが進んだ国と言われるが, 全体で見るとまだまだ改善の余地ありで, あまり自惚れないほうが良さそうである. 無駄の主たる原因は, 不可逆プロセス (燃焼) が多い上に, 熱を高温から使っておらず, しかもプロセス間の温度差が大きいことにある. もっと世俗的に言うと, 高温に耐える装置が高価なことと, 温度

差を小さくしようとするすると伝熱面積（すなわち熱交換器のコスト）が増えるためである．要するにカネがかかるということである．一例として，一般的な家庭用の給湯器を取り上げてみる．24号のガス給湯器のカタログ⁽²⁾によれば，最大ガス消費量 61 kW（追い焚き同時使用時），エネルギー効率 82 % とある．従って，最大給湯能力は約 $Q=50$ kW である．火炎と水との温度差を概算として $\Delta T=1500$ K とすると，熱交換器のコストの目安となる KA 値 ($=Q/\Delta T$) は 33 W/K である（なお，温度差が大きいといっても機器側は水で冷やされているので高温ではない．火炎だけが高温である）．一方，最近話題の CO₂ ヒートポンプ式給湯器（以後，通称のエコキュートと記載させて頂く）は，給湯能力 4.5kW で，水と冷媒の温度差は約 $\Delta T=10$ K のオーダーなので，KA 値 ($=Q/\Delta T$) は 450 W/K である．同程度の技術レベルであれば，KA 値の差はほぼ伝熱面積の差と言い換えることができるので，KA 値が 1 桁も違うということは，それだけコストに差があるということである．ちなみに重量は，ガス給湯器が約 30kg なのに対し，エコキュートは貯湯槽を除いても約 60kg とかなり重い．コストアップが避けられない温度差の小さな機器の導入の困難さが，なんとなくご理解頂けるかと思う．

社会全体のエネルギー利用効率を高めるためには，基本（熱力学）に忠実に，不可逆プロセスをなくすこと，温度差があれば熱機関を回すこと，そして伝熱の温度差を小さくすることが必要である．こんな当たり前のことがこれまで十分に出来ていないのだから，相当に根は深いはずであるが，とにかくその原因を取り除かなければ未来はない．そのためには，何をすべきであろうか．以下，エコキュートを例に新しいエネルギー機器を導入するためのポイントについて考えてみる．また，熱エネルギー機器のコストに直結する熱交換器の材料転換について筆者の取り組みを紹介したい．

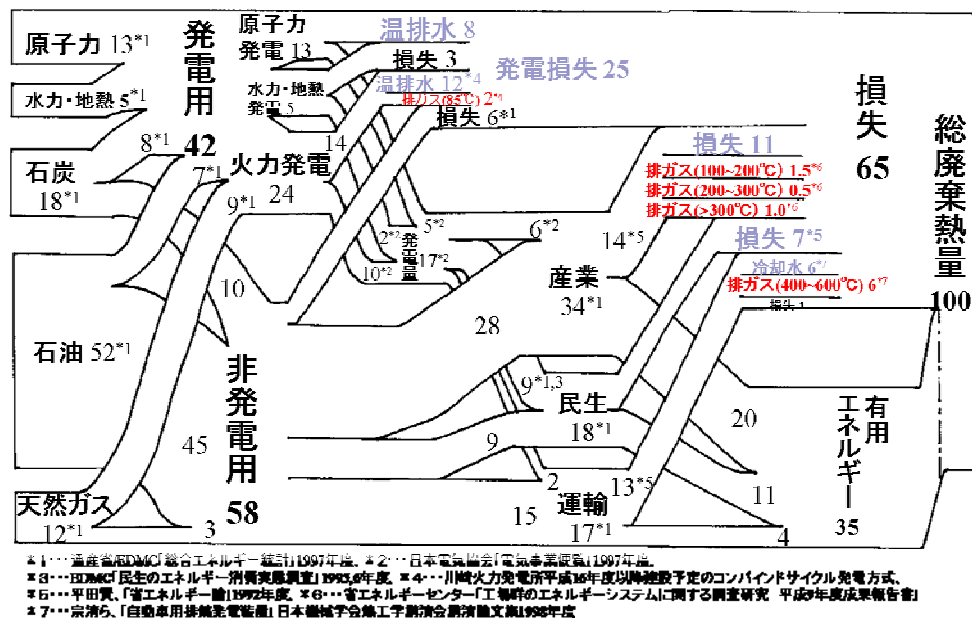


図1 日本のエネルギー利用効率⁽¹⁾

3. エコキュートの教訓

筆者は，2002年までメーカーにて冷凍空調機器の設計開発を携わっていた．今となると自身の先見の明の無さを恥じるばかりであるが，当時エコキュートの開発の話が持ち上がった際，正直なところモノになるとは思えなかった．上述したコストアップに加え，CO₂冷媒を用いることで100気圧以上の超高圧システムになることと（家電品なのに...），製品原価の半分近くを占めると言われる貯湯槽が別途必要になるなど，価格面でとても燃焼式の給湯器と競合できないと思ったからである．その後の顛末はというと，読者各位が御存知のように，エコキュートは驚くほど普及が進んでいる．なぜ，こううまくいったのであろうか？エコキュートの成功は，新しいエ

エネルギー機器の導入を考える際に非常に示唆に富んでいると思われる。超臨界サイクルとすることで熱力学的に熱源との温度差を小さくできるという CO₂ 特有の利点に加えて、筆者はエネルギー機器を導入する際に共通する要因として、以下の三つが重要ではないかと考えている。

先に紹介した 24 号ガス給湯器の定価は約 36 万円であるが、インターネットによれば実売価格は 13 万円程度である。一方、エコキュートの定価は 70~80 万円であるが、実売価格はその約半額と言われており、さらに補助金が 4 万 5 千円つく (2008 年 1 月現在)。なるほどエコキュートは高いな、と単に思われるかもしれないが、エコキュートのこの価格は実は驚異的な低価格である。その鍵はエアコンの量産技術の転用にある。最近のルームエアコンは COP (=冷暖房能力/電気入力) が 5 や 6 はあるので、標準的な冷房能力 2800 W のルームエアコンの場合、電気入力は 500 W 程度である。エアコンの基本サイクルである冷凍サイクルと蒸気発電のランキンサイクルとは、原理はほとんど同じなので、エアコンのサイクルを逆に回す設計をすれば、実は発電することもできる。つまり、わずか数 10°C の温度差で発電する 500W の超小型発電機が、なんとエアコンと同じ価格で買えることになる。これは発電容量あたりの製造原価で言えば 100~150k¥/kW ほどに過ぎず、スケールメリットが働く上に温度差が 1000°C のオーダーの大型の発電所と比較しても、それほど見劣りする数字ではない。太陽電池や燃料電池の価格を想像して頂ければ、いかに安いかがお分かり頂けるかと思う。このように、エコキュートの成功の第一の要因として、低コスト量産技術の恩恵を十分に活かしている点が挙げられる。そう考えていくと、CO₂ ではなくエアコンで現在用いられている R410a という冷媒をそのまま用いた方がもっと安くできて、結果として低所得層も含めて普及も進むのではないだろうかと思われるかもしれない。実はその通りで、理論効率は若干劣るものの、低圧でしかもエアコン部品がほぼそのまま使えるため、CO₂ を用いたエコキュートよりもかなり安く作ることができる。では、なぜそのようなならなかったのだろうか？

良く知られているように、R410a は京都議定書の対象ガスである HFC であり、温暖化係数が CO₂ の 1980 倍もある。オール電化を進めつつ地球温暖化防止に貢献するというイメージを定着させたい電力会社と、京都議定書に向けて成果が欲しい省庁とが強力なタッグを組み、格安な深夜電力料金と補助金をバックに、多少高くても良いものを買う富裕消費者層を掘り起こした、というのが第二の要因である。これほど至れり尽くせりの家電品はこれまでなかった。エアコンの場合は安全性と性能面で HFC に代わる良い代替冷媒がまだ見つかっておらず、きちんと回収することを前提に HFC を使い続けざるを得ない。また、低所得層や発展途上国等への普及を考えると、安いものを広く導入した方が全体としては効果的ではないかとの考え方もある。そのような状況の中で、日本でいち早くこのような高額な商品が受け入れられたことは驚くべきことである。

第三の要因は上述の理由と関連するが、その前に図 2 をご覧頂きたい。図 2 はエコキュートと固体高分子形燃料電池 (PEFC) システムの比較である。いずれも同じ家庭用給湯市場をターゲットとする競合技術である。標準的なエコキュートの熱出力は 4.5kW で、貯湯槽は 300~460 リットルとなっている。それに対し、PEFC の熱出力は 1.35kW、貯湯槽は 200 リットルである。容量が小さいので、お湯切れに備えてバックアップ用のガスボイラーがついている。これは、PEFC の場合は燃料電池の投資費用を回収するために、なるべく容量の小さな燃料電池を、お湯を余らせないように出来るだけ長く運転するという設計になっているためである。湯切れしたら安いボイラーで追い焚きすると割り切っている。「発電もする給湯器」と言われる所以である。一方、エコキュートも本体は決して安いとは言えないので、消費者の財布を考えたら PEFC と同様の設計をしても良さそうなものであるが、熱出力も貯湯槽もかなりオーバースペックである (売価を上げたいメーカーの思惑もあるが...)。給湯需要をこれだけで賄うという思想であり、基本的小お湯切れしないようにお湯を必要な最大量貯められるように設計されている。つまり、これはヒートポンプの蓄エネルギー機能を優先した結果であり、深夜電力需要の掘り起こしを狙ったものと理解できる。「給湯もする蓄エネルギー装置」である。冷凍サイクルや熱機関は、熱源にバッファがあれば蓄エネルギー機能と需給変動調整機能があり、これが電力会社のニーズにフィッ

トしたことがエコキュート成功の第三の要因と考えている。エコキュートは 2007 年 9 月に累積出荷台数が 100 万台を超えたので、電気入力を 1 台約 1kW として、大型の揚水発電所 1 基程度、小型であれば数基程度分の負荷平準化効果を既に担っていることになる（しかも電力会社の負担ではなく、消費者の財布で...）。エネルギーを貯めるという単一機能しかない揚水ダムやバッテリーを高いお金をかけてまで設置することからもわかるように、蓄エネルギーの価値は非常に高いのである。それに加えてお湯を沸かしたり発電もできるとなると、使わない手はない。

このように、エコキュートの成功は、単に空気でお湯を沸かすから地球に優しいというような図式では説明が難しい。各ステークホルダーの思惑、量産効果、蓄エネルギー機能といった、これまで小型のエネルギー機械ではあまり考慮されてこなかったような要因を総合的に捉えることで、第二のエコキュートが出現する可能性は高い。エコキュートから、学ぶべき点は多い。



(a) エコキュート⁽³⁾

(b) PEFC システム⁽⁴⁾

図 2 エコキュートと燃料電池 (PEFC) システムの比較

4. 熱交換器の材料転換

またまたエアコンの例で恐縮だが、我が国のエアコンの省エネは世界的に見ても圧倒的に進んでいる。これは本当に胸を張ってよい。エアコンでやったことを他の製品でも実行すれば、社会全体の省エネも大きく進むはずである。では、エアコンの省エネ技術とは、具体的には何であろうか。もちろん、圧縮機やモーター等の効率向上の貢献もあるが、総合資源エネルギー調査会の報告書⁽⁵⁾にもあるように、実は「熱交換器の大型化による省エネルギー改善が大きな要素」となっている。大型化が最も安く確実な省エネ技術だったのである。図 3 に、素材価格の推移を示す⁽⁶⁾。各社が競ってエアコンの省エネ競争を繰り広げた 1990 年半ばから 2000 年頃は、素材価格も非常に安い時期だったことがわかる。熱伝導率が高く加工性も良い銅は、現在では当時の 4 倍近くまで高騰している。つまり、かつてのエアコンと同じようなアプローチを使ってこれからの省エネを進めることはかなり難しいと言える。先に述べたように、エネルギー効率向上のためには温度差の低減が必要だが、そのためには性能の高い熱交換器が不可欠である。しかも安くなければ意味がない。地味だが大変重要なテーマである。このような観点から、銅やアルミといった熱伝導率も高いが価格も高い素材から、他の素材への代替可能性について検討した例を以下に紹介する。

熱伝導率の高い素材を使う主な理由は、フィン（拡大伝熱面）があるためである。なぜフィンを用いるかという点、熱伝導率の小さい空気のような流体に熱を伝えるには、伝熱面積を増やして熱伝達率の低下をカバーする必要があるためである。ただし、これはチューブ径が太い場合の話で、よくよく考えてみると極めて細いチューブを多数並べれば、それだけでチューブ表面積も増えることになるので、最終的にはフィン無しでも伝熱面積が確保できるようになるはずである。しかも、チューブ自体が細いのでコンパクトにもなる。図4に、扁平管を用いたフィンレス熱交換器と、従来型の熱交換器の同一性能（KA 値）あたりの体積を比較した例を示す。扁平管の厚みを0.5mm以下にすれば、従来熱交換器よりもコンパクト化が可能との結果が得られた。フィンがないので熱伝導率によらず任意の素材を用いることもできる。薄肉化できれば、軽く安くもなる。このような考えで、図5に示すようなSUS製のフィンレス熱交換器の試作品を作ってみた。SUSの熱伝導率は銅の約1/25であるが、それでも高性能でコンパクトになる。いくつかの用途で実際にサンプル評価中であるが、熱機関や燃料電池の排熱や機器冷却などで、可能性があるのではないかと感触を持っている。

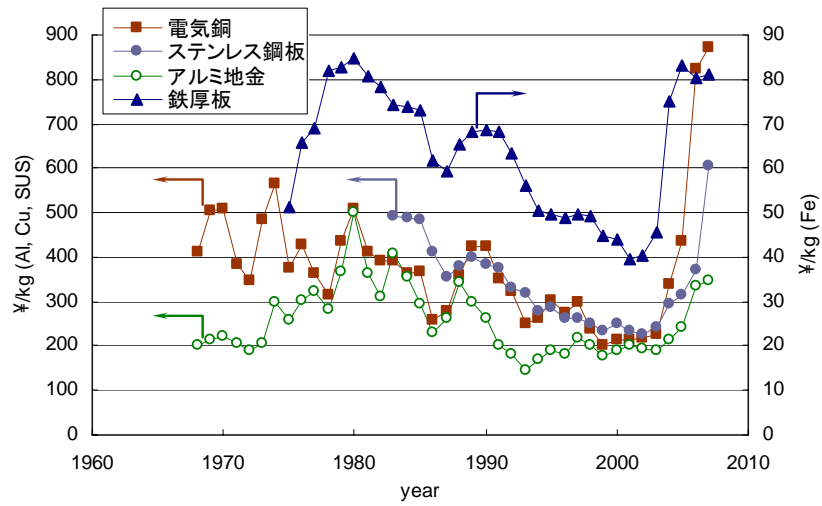


図3 素材価格の推移⁽⁶⁾

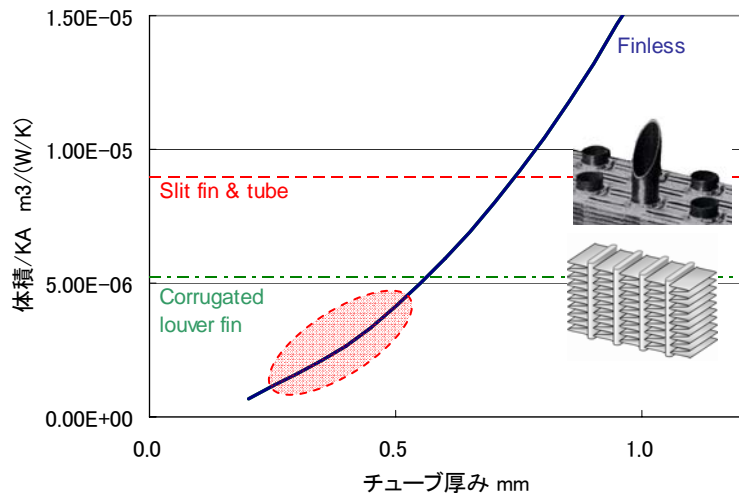


図4 フィンレス熱交換器と従来熱交換器の比較

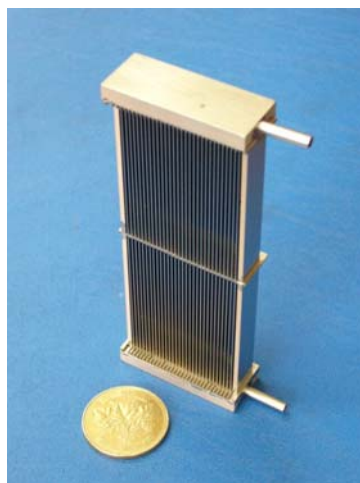


図5 SUS製フィンレス熱交換器

5. おわりに

我が国の省エネは、もはや乾いた雑巾を絞るようだと良く言われる。確かに個々のプロセスではそうなのかもしれないが、社会全体で見ると決して優秀な成績とはいえない。エネルギー利用効率はさらに向上させる必要があるし、その余地もかなりある。従来適用されてこなかった分野に、新しい小温度差の技術を今後大きく普及させるためには、従来の枠組みを超えた戦略的な視点と、小温度差を安価に実現する地道な技術開発が必要である。プロ野球の野村監督ではないが、この分野では「ヒマワリ」だけでなく「月見草」のような技術が特に重要なのである。

参考文献

- (1) 東京大学生産技術研究所西尾茂文教授, 私信, 2005.
- (2) リンナイ株式会社デジタルカタログ, http://rinnai.jp/catalog_download/.
- (3) 株式会社コロナ カタログ, http://www.corona.co.jp/question/index_catalog_dl.html.
- (4) 東京ガス株式会社ホームページ, <http://www.tokyo-gas.co.jp/pefc/index.html>.
- (5) 総合資源エネルギー調査会, 省エネルギー基準部会 エアコンディショナー判断基準小委員会 最終取りまとめ, 2006.
- (6) 日刊鉄鋼新聞, <http://www.japanmetaldaily.com/>より作製.