

温泉利用の温度差発電

Power Generation by Temperature Difference using Hot Spring Water

浦 家 淳 博*¹

Atsuhiko URAIE

坂 口 直 志*²

Tadashi SAKAGUCHI

横 山 安 弘*²

Yasuhiro YOKOYAMA

東 藤 勇*³

Isamu TODO

Abstract

We have made a new type power generator. It generates by temperature difference between hot spring water and cool river water. It is based on a recuperator composed of two rectangular aluminum pipes. Many thermoelectric conversion modules are inserted between two pipes. The efficiency of the generator is due to modules and recuperator. It appears that the performance of recuperator depends not only on the equality of the temperature difference between hot water and cool water in each pipe, but also on the efficiency of the heat exchange between water and modules. The power of the generator with pipes added fins inside is about 25W. A hybrid system, the solar panels and the generators by temperature difference, is being run at Tsenkher-Jiguur Spa in Mongolia.

キーワード ゼーベック効果, 熱電変換モジュール, 温度差発電, 隔板式熱交換器

Key Words : Seebeck effect, Thermoelectric conversion module, Power generation by temperature difference, Recuperator

1. はじめに

現代のエネルギー大量消費時代にあつては、電力開発は最重要課題である。発電施設の大規模なものとしては、火力・水力・原子力発電などが実用化されているが、一方で小規模ではあるが各地域環境が有するクリーンなエネルギー資源を活用する発電も、今後は見逃すことができない。

その代表例としては、太陽光発電や風力発電などがあげられるが、ゼーベック効果という熱電変換現象を利用した温度差発電も期待される。近年、熱電半導体の研究が進み、その熱電変換効率が飛躍的に向上しており、ビスマス・テルル系や鉄・シリコン系材料では、現在の変換効率で十分実用化は可能である。

実際、液体あるいは固体燃料の燃焼による温度差発電が実用化されており、海水の温度差や、ボイラーなどの廃熱を利用した温度差発電なども検討されている。また、燃焼機器に温度差発電装置を組み込み、この電

力によってボイラーや湯船などの湯を強制対流させて熱交換効率を高めるなどのシステムも試作検討されている¹⁾。

しかし、これらは、熱交換のためにポンプなどのエネルギー消費を伴ったり、あるいは人為的な発熱を利用しているものである。本研究室では、現在実用化されている太陽光発電のように、自然環境が有するエネルギーを利用し、一切の人為的なエネルギー消費を伴わないメンテナンスフリーな温度差発電の実現を目指している。

自然環境が有する定常的な温度差の一つとして、温泉水と河川水との組み合わせに注目した。高温水と低温水を熱交換器を通すことによって、熱電素子から電力を得るという単純な方法であるが、温泉水利用の検討は行われていないようである。

そこで本稿では、装置の開発と、その高効率化の検討を行ったので、温泉利用による温度差発電の可能性を報告する。

*1 非会員 釧路工業高等専門学校 一般教科

*2 非会員 釧路工業高等専門学校 電子工学科

*3 会 員 釧路工業高等専門学校 電子工学科

(〒084-0916 釧路市大楽毛西2-32-1)

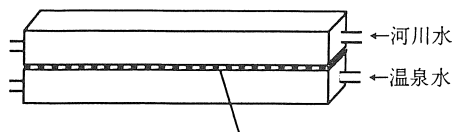
(原稿受付: 平成11年1月23日)

Dept. General Education, Kushiro National College of Technology

Dept. Electronic Engineering, Kushiro National College of Technology

2. 発電装置

本研究が検討している温泉水と河川水とによる温度差発電装置の概略を、図1に示す。長さ1000mm、幅60mm、高さ30mmの金属角パイプ2本から構成される、隔板式（貫流式）熱交換器をベースにしている。



隔板（熱電変換モジュールを挿入）

図1 温度差発電装置

熱交換器というのは、高温流体と低温流体を隔板によって仕切って、2流体が混合することなく隔板を介しての熱通過によって熱交換を行うものである。発電は、この熱交換器の隔板の部分に、熱電変換モジュールを挿入し、モジュールの表裏面に恒常的な温度差を与えることによって行う。モジュールは、30mm×30mmの大きさのものを2列に挿入し、総計60枚使用した。

この発電では、熱交換（熱伝達）が重要であるので、装置は熱伝導率の高い金属である銅によって作製すべきだが、本研究では、発電装置の低コスト化、軽量化を図って、アルミニウム管で作製した。

また、流体が自然の温泉水や河川水を用いているため、フィルターを介しても長時間の運転では装置の管内部に沈殿物などがたまる可能性がある。これを取り除くメンテナンスのために、パイプの給・排水面の一方を取り外し可能にしてある。

隔板に挿入する熱電変換モジュールには、図2に示すような概観を持つサーモボニック社製のBiTe系電子冷却モジュールT-10D254-QD0と、中国ハルビン工科大学からとりよせた、同じくBiTe系電子冷却モジュールTEC1-07105を用いた。

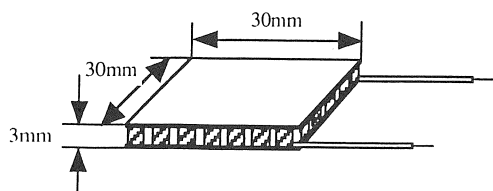


図2 熱電変換モジュール

（サーモボニック社製 T-10D254-QD0）

これら2種類のモジュールに限らず、市販されている熱電変換モジュールは、電子冷却を目的として作られたものであるが、温度差発電は電子冷却と可逆な現象であるから、十分に役目を果たすのである。

TEC1-07105は縦、横の長さはT-10D254-QD0と同じであるが、厚みが4mmである。また、モジュール内に埋め込まれているBiTeの素子数がT-10D254-QD0では254個であるのに対して、TEC1-07105では142個である。この違いのため、T-10D254-QD0では、1枚当たりの単位温度差に対する開放起電力が57 (mV/K)、発電時の内部抵抗が4Ωであったのに対して、TEC1-07105では、1枚当たりの開放起電力が30 (mV/K)、内部抵抗が2Ωであった。

発電には、これらのモジュール自体の特性に負うところも大きいですが、本研究では、これらのモジュールに、いかに安定した大きな温度差を与えられるかという点、すなわち熱交換器と発電性能との関係について検討した。

なお測定は、羅臼温泉（北海道目梨郡羅臼町）の源泉で行った。この源泉は98℃という高温の自噴温泉ということで、一時的に貯水しているタンクからバルブの調節だけで温泉水を取り込んでおり、一切の動力を使用していない。冷水も側近の小川から流れの高低差だけから取り込んでいる。この源泉と川の水の温度差によって発電し、発電出力測定値は、上記のモジュール内部抵抗をふまえて、最適負荷の状態で測定した。

3. 流体を流す向きの検討

隔板式熱交換器は、2流体の流れる向きによって、並流形、向流形、直交流形に分類される。並流形とは2流体が平行に同じ向きに流れるタイプ、向流形とは2流体が平行ではあるが互いに逆向きに流れるタイプ、直交流形とは2流体の流れる向きが直交しているタイプである。

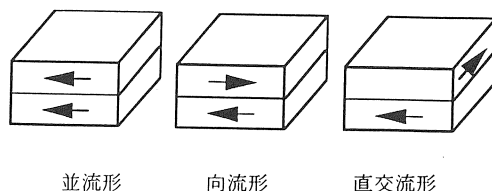


図3 並流形、向流形、直交流形熱交換器の概念図

本研究では、細長い角パイプを用いた装置を作製しているので、並流形と向流形の検討だけを行った。

一般に、並流形と向流形の熱交換器を比較すると、熱交換効率は、向流形の方が優れていることが知られている¹⁾。(直交流形の熱変換効率は並流形と向流形の効率の中間である)このことは、向流形が最も温度差発電に向いていることを示唆する。

そこで、装置の長さ方向における温度分布から発電量を検討してみた。

並流形と向流形における管の長さ(1m)、2流体の熱容量や熱交換器の入口温度(100℃と20℃を仮定)、流量等が等しいと仮定して、各流水管の長さ方向の位置における流体の平均温度を計算すると、図4のようなグラフになる²⁾。なお、パラメータ $Ntuc$ は、伝熱単位数と呼ばれるもので、熱電変換モジュールの総面積の熱貫流率(W/K)を、流体の熱容量流量(W/K)で除した値である。

並流形では、2流体の温度差が長さ方向で変化するため、挿入するモジュールは、流体の入口側では大きく発電するが、出口側では小さいことになり、発電器全体としては非常に不均一な発電をしていることになる。一方、向流形では、装置の長さ方向の温度差分布が均一であるため、モジュールの発電量も均一である。

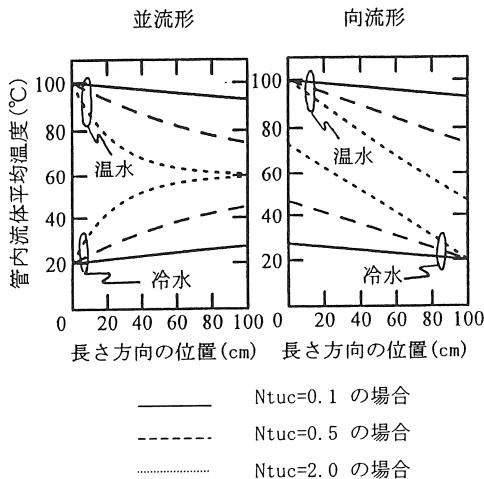


図4 熱交換器の流管長さ方向の温度分布

モジュールの熱起電力は、温度差に比例する³⁾ので、発電電力は、温度差の2乗に比例することになる。そこで、パラメータ $Ntuc$ によって、各部位の温度差の2乗の積分値がどのように変化するかを示したのが、図

5である。グラフは、発電器全体に対して最適になるような外部負荷を仮定して、並流形と向流形との積分値の比を示している。パラメータ $Ntuc$ に関わらず、向流形の方が並流形に比べて常に優れることがわかる。

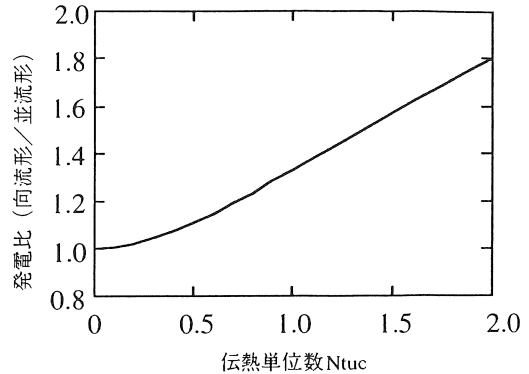


図5 温度差積分値の比の熱伝単位数依存性
(向流形/並流形)

実際に、T-10D254-QD01を挿入した発電ユニット1組を用いて、河川水の流す向きを変えることによって、並流形と向流形の発電の比較を行った。どちらの場合も、流水管入口での水温は、温泉水96℃、河川水13℃で、温泉水も河川水も流量を4.2(l/min)とした。結果、出口温度は、並流形でも向流形でも、それぞれ95℃、17℃となり、温度変化は等しかったが、出力は、並流形で16.1W、向流形で18.5Wとなった。すなわち、出力比1.15で、向流形の方が、発電出力が高いという結果を得た。

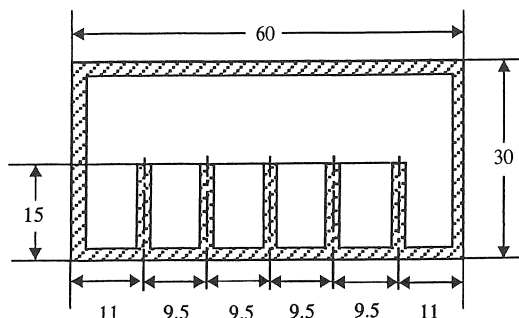
この値で図5を見ると、 $Ntuc$ は0.5程度となる。ところで、出入り口温度の差で図4を見ると、 $Ntuc$ は0.1よりも小さいことになるが、この差は、図4が、流体が均一温度で流れていることを仮定しているために生じる差である。熱交換壁面付近を流れる流体は出入り口付近で大きな温度差となっているのである。

$Ntuc$ はモジュールの熱貫流率が大いほど、流体の流量が小さいほど、大きくなるパラメータである。しかし、流量は大いほど発電には有効であるから、意図的にこれ以上小さくすることはない。しかし、何らかの原因で、流量が変動しても、向流形の方が発電のロスが少なくなる。また、モジュール自体の熱貫流率は高いほど発電には有効であるから、将来的にモジュールの改良があれば、その効果は並流形に対してより

高く発揮されることになる。

4. 流水管内部構造の検討

一般的に、放熱を効率良くするための工夫として、放熱板という多くのフィンをつけることがある。温度差発電装置においても流体からの熱を効率よく伝導させるべきであるから、流水管内壁にフィンをつけ、その効果を検討した。



(数値の単位は mm, またアルミニウムの肉厚は 2mm)

図 6 アルミ角パイプ断面構造

フィンの形状等はいろいろ考えられるが、本研究では、図 6 のような断面構造をもつアルミ角パイプを用意した。そして、T-10D254-QD0 を挿入した、次のような 3 種類のユニットを用意して、向流形で発電出力を比較してみた。

- (a) 温泉水も河川水もフィン無しパイプを用いた装置。
- (b) 温泉水も河川水もフィン付きパイプを用いて、熱交換側内壁にフィン配した装置。
- (c) 温泉水も河川水もフィン付きパイプを用いて、熱交換側の反対側内壁にフィン配した装置。

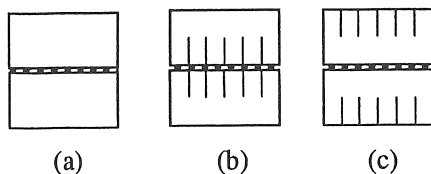


図 7 装置の構造断面図

河川水は給水口と装置と位置の高低差だけで取り込み、流量は 4.2 l/min であった。温泉水はタンクのパル

プを固定して、河川水の流量と等しくしておいた。このときの発電結果は、タイプ(a)で 18.5W, タイプ(b)で 20.0W, タイプ(c)で 23.3W であった。なお、装置を入れ替えても、フィンの有無による流量の変化はほとんどなかった。したがって、フィンの効果は確認できる。ところで、タイプ(b)よりもタイプ(c)の方が、発電出力が高かったが、これは、フィンによって管内の流体の流れが変わり、新鮮な流体は、主に管内のフィンを配していない側を流れるようになるためである。

また、熱交換側内壁にフィンを配した場合は、反対側内壁付近を流れる流体と管壁との間で熱交換が向上し、管外壁を伝導して熱交換側に達するので、フィンが全く無い場合よりも出力が高くなるのである。

また、中国製モジュール TEC1-07105 を用いた以下のような 3 種類のユニットを用意して、フィンの位置と流体の流量と発電出力との関係を調べてみた。

- (A) 温泉水用パイプも河川水用パイプも熱交換側内壁にフィンを配した装置。
- (B) 温泉水用パイプも河川水用パイプも熱交換側の反対側内壁にフィンを配した装置。
- (C) 温泉水用パイプは熱交換側内壁に、河川水用パイプは熱交換側と反対側内壁にフィンを配した装置。

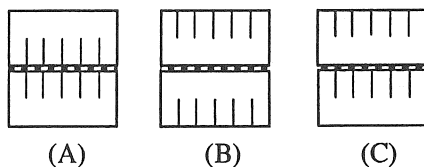


図 8 装置の構造断面図

結果は、次のようになった。

	湯の流量		水の流量		出力電力
タイプ(A)	4.3(l/min)	4.8(l/min)	19.1(W)		
	1.0(l/min)	1.3(l/min)	12.5(W)		
タイプ(B)	4.3(l/min)	4.8(l/min)	23.0(W)		
	1.0(l/min)	1.1(l/min)	12.5(W)		
タイプ(C)	4.3(l/min)	4.8(l/min)	24.9(W)		
	0.8(l/min)	1.1(l/min)	15.5(W)		

2 流体ともにフィンを配さない側を熱交換面としたタイプ(B)が、最も出力が高いものと予想されたが、結

果は高温水側だけフィンを配した側を熱交換面としたタイプ(C)が、最も高かった。しかもこの傾向は、流量が少ないときに、より顕著になっている。

これらの結果の最も大きな原因は、流体の粘性率の温度依存性にあると考えている。一般に流体は、高温ほど粘性率が小さくなる。例えば 20℃の水と 100℃の水とでは 3 倍以上の差がある⁴⁾。したがって低温水に比べて、高温水は粘性率が小さくなる分、フィンとフィン間の流れがスムーズなため、フィン側の管壁付近も流れ、熱交換がよりスムーズに行われるということである。したがって、高温水側だけ熱交換側内壁にフィンをつけたタイプ(C)の出力が、最も高くなっており、タイプ(B)よりもタイプ(A)の出力が低いのは、高温水側のフィンの効果よりも低温水側のフィンの逆効果の方が強く影響しているためであると考えられる。

ところで、(b)と(A)、(c)と(B)の結果を比較すると、僅かながら T-10D254-QD01の方が有効である。これは、モジュールは薄いモジュール内の個々の半導体素子の断面積が小さいので、熱貫流率が小さくなり、温度差を高く維持するのに有効だからであると考えている。

5. モンゴル温泉における発電システム

モンゴル国アルハンガイ県、ツェンケル村郊外にツェンケル・ジグール温泉という温泉がある。これは、源泉で 82℃の温泉が自噴しており、ツェンケル村周辺のみならず、近年では日本を始めとする海外からの利用者也増えつつある温泉である。温泉施設では、これらの利用者の宿泊所や食事を提供しているが、送電線が敷設されていないため、施設では、ディーゼルエンジン発電機による自家発電によって電力を得ている。しかし、発電機の燃料も潤沢ではないので、夜間の一定時間帯に 3 時間だけの発電にとどまっている。

ところで、モンゴル国は全体的に年間を通じて降水量が少なく、日照時間が長い。このことは、太陽光発電に非常に適している。さらにこの温泉地区では、源泉近傍に小川が流れているため、高温の温泉とともに冷水も、適当な水路を設ければ、動力を用いることなく入手することが可能である。このことは、本研究室が考案した温度差発電装置による発電も有効であることを意味する。

そこで、この温泉施設からの要請に応じて、太陽電池パネルと温度差発電装置によるハイブリッドな環境

エネルギー発電システムを組み上げることにした。

温泉施設での消費電力の全てを本システムでまかなえることが望ましいが、とりあえず施設で使用している冷凍庫と冷蔵庫、合計 240W を 24 時間使用できるように、5.76kWh の電力供給システムを組み上げることにした。なお、発電された電力は、過充・放電防止回路を通して、一度鉛蓄電池に充電し、インバーターによって、DC12V の電力を AC230V に変換してから送電することにしている。

日照時間は夏季では平均 10 時間確保できるものとして、最大出力 48W の太陽電池パネルを 12 枚用意した。これで 5.76kWh を確保できることになるが、受光時間帯全体が最大出力を得られることはあり得ない。また、天候不順にも対応できるように、温度差発電によって補充することにした。

温度差発電装置は長さ 700mm のフィン付きのアルミニウム角パイプで構成したユニットを 10 組用意した。使用した熱電変換モジュール総数は 420 枚である。これらのユニットは 2 組毎直列に接続して、向流形で湯と水を流すことにした。

モンゴルでは、大地は国民共有のものであり、川の流れを変えたり、大地に鉄を入れることは、砂漠化につながるとして非常に嫌う国民性を持っている。そのため、川の流れを源泉の近くまでひくことができなかった。そこで、温泉水を配管によって川の近くまで引き込むことになったため、温泉水の温度は 60℃まで低下した。

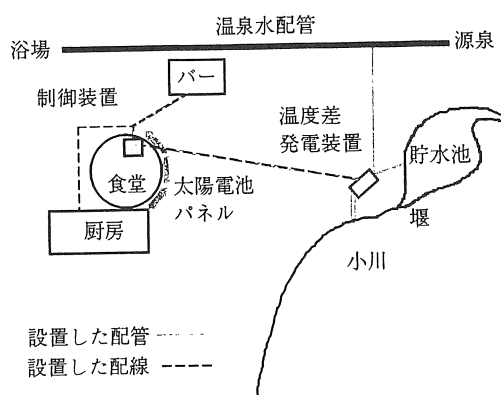


図9 発電システムの設置概略図

また、川には時折家畜が入って水を濁らせてしまう。そのため、発電装置の中に細かな泥を堆積させるので、

この堆積泥が断熱材として働かないように、装置の下管に河川水を流し、上管に温泉水を流すように設置して発電することにした。

このような理由で温度差の低下により、当初予定していた 1/3 程度の温度差発電となってしまったが、電氣的に並列に接続してある 10 組のユニットの平均開放電圧は 24.9V、負荷接続時の端子電圧は 15.1V、総電流は 2.25A となり、34W の供給ができることになった。この発電は 24 時間有効であるから、太陽電池パネル 2 枚分の発電能力に匹敵する。

以上のように、5.76kWh/day の電力供給システムを組み上げ、設置から施設のシーズンオフまでの夏季 2 ヶ月間、安定した運転を実現した。

6. まとめ

温泉水と河川水という自然環境が有する温度差から発電する装置の開発と検討を行った。発電効率を向上させるには、2 流体の温度差と流量を大きくすることが望まれるが、ユニット自体の熱交換効率も問題である。そこで、温度差源である 2 流体を流水管に取り込む向きと、流水管内壁にフィン配する点について検討した。

2 流体を流す向きについては、並流形よりも熱交換効率の高い向流形の方が、発電効率に関しても有効であった。

流水管の内壁にフィン配する効果については、フィンが流体の流れを変えてしまうので、流体の流量だけでなく、発電装置の規模などにも影響を受けることが予想され、その解析は複雑である。したがって、流水管の最適な内壁形状については、更に検討が必要であるが、フィンが、発電効率の向上に有効であることは認められた。

これらの結果をふまえて、内壁にフィン配したアルミ角パイプを用いて、温泉水用パイプはフィン配した側を、河川水用パイプはフィン配さない側を熱交換面として温度差発電ユニット (60mm×60mm×1000mm) を作製した。そして、このユニット 1 組で、24.9W の発電出力を得た。

発電ユニットへの温泉水と河川水の取り込みには、一切の動力を用いていない。またどちらも、供給できる流量には十分のゆとりがある。そこで、ユニットの複数並列運転によって、数 100W 級の発電システムを容

易に実現できると考えている。

現在、この温度差発電装置は、電力供給の乏しいモンゴルの地方の温泉で、太陽電池パネルと併用してハイブリッドな環境エネルギー発電システムとして、試験的に運転している。

温泉水と河川水とを用いた温度差発電は、太陽光発電と異なり、1 日 24 時間の発電が可能である。これで、一般家庭での約 1 ヶ月分の電力量 300kWh をまかなうとすれば、420W 程度の装置を用意すればよいことになる。本稿で報告した約 25W のユニットの製作費は 7.5 万円であったから、試作段階の装置にも関わらず 125 万円程度、すなわち太陽光発電装置よりも半額以下という低コストで実現できる計算となる。

これまでの試験運転では、長くて 2 ヶ月程度の期間であり、発電状況に大きな変化はなかった。これ以上の長期的な運転による、流水管の腐食や沈殿物の堆積などに関する検討などが残されているが、温泉水と河川水が得られる地域では、太陽電池のみならず、温度差発電も用いたハイブリッドシステムの有効性が期待できる。

最後に、実験のために羅臼温泉の源泉を利用することに、快諾していただいた羅臼町役場の方々と、モンゴルのツェンケル温泉で運転している温度差発電装置の保守管理をしていただいている方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、上村欣一、西田勲夫：熱電半導体とその応用、日刊工業新聞社。
- 2) 例えば、相原利雄：伝熱工学、裳華房。
- 3) 浦家淳博、坂口直志、横山安弘、東藤勇：太陽エネルギー Vol. 23, No. 1 (1998), p62.
- 4) 国立天文台編：理科年表 1998 年版、丸善。