

# 温度差発電の実用化

浦家 淳博\*

## Utility of Power Generation by Temperature Difference

Atsuhiko URAIE\*

**Abstract** - Power generation by temperature difference is one of generation utilizing environmental energy. In this paper, utility of power generation by the temperature difference is reported in relation to experimental operations in Mongolia. It is suggested that alumite pipes within fins are best used for this type of generation unit.

**Key words** : Power Generation by Temperature Difference, Thermoelectric Conversion

### 1. はじめに

環境エネルギーを利用した発電の例として、太陽光発電や風力発電、温度差発電などがあげられる。温度差発電とは、ゼーベック効果という熱電変換現象を利用したものであり、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きている。

温度差発電では、温度差を確保することが重要な課題である。そのために利用できる天然の熱源としては、太陽熱、地熱(温泉熱)などが、冷媒としては、雪氷、水、外気などが考えられる。

本研究は1997年から、環境に存在する温度差を利用した温度差発電システムの実用化を目指している。本稿では特に、温泉水と河川水によって発電する100W級の温度差発電装置について検討してきた結果を、モンゴルにおける実地運転実績と併記して報告する。

### 2. 発電ユニット

温度差発電に用いる熱電材料の熱電変換効率は、性能指数  $Z = \frac{S^2}{\rho r}$  (1/K) という量が目安となる。ここで、 $S$  はゼーベック係数 (= 単位温度差当たりの熱起電力) (V/K)、 $\rho$  は電気抵抗率(  $\Omega \cdot m$  )、 $r$  は熱伝導率 (W/mK) である。本稿で紹介する温泉水と河川水による発電では、室温領域で  $2.5 \times 10^3$  (1/K) という高い性能指数を持つ  $Bi_2Te_3$  をモジュール化したものを用いた。

\* 釧路高専電気工学科

本研究で開発した温度差発電装置は、図1のような薄い正方形のモジュールを、W60mm × H30mm × L1000mm のアルミニウム角管2本の間にはさんだものを1発電ユニットとしている<sup>1)</sup>。

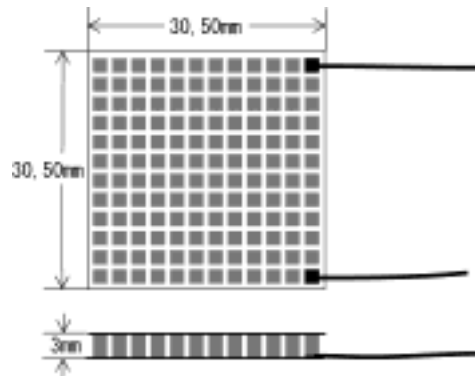


図1 熱電変換モジュール概念図

(灰色部分が  $Bi_2Te_3$  チップ、各チップは結線されている)

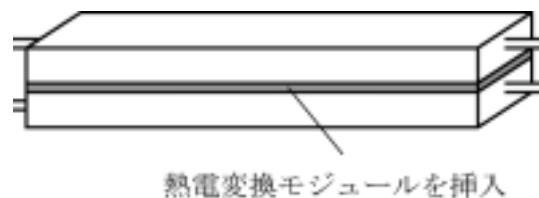


図2 温度差発電ユニット概念図

このユニットの2本のアルミニウム管に、それぞれ

温泉水と河川水を流し、モジュールの表裏面に温度差を与えることによって発電を行う。すなわち、この温度差発電装置は隔板式熱交換器をベースにしている。

96 の温泉水と 7 の河川水をともに 4.2 $\lambda$ /min で流すと 18W の安定した電力が得られた。このとき、熱から電気へのエネルギー変換効率は 1.5%であった<sup>2)</sup>。この値は、モジュールによる熱交換以外にユニットからの熱の散逸を減らすことで多少改善されるが、モジュール材料の性能指数を向上させることが本質的な課題である。

一方、発電にはモジュールの改善だけでなく、熱交換器としての性能についても検討しなければならない点がある。そこで次の 2 点についての検討を進めた。

- (1) 熱交換器としての熱交換効率を上げて、モジュールに与える温度差を大きくすること
- (2) 耐腐食性など経時変化を少なくすること

### 3. 熱交換効率についての検討

#### 3-1. 流体を流す向き

図 2 のようなユニットでは、2 流体の流れる向きを同じにする方法（並流形）と、流れる向きを逆向きにする方法（向流形）とで用いることができる。（2. の測定は並流形で行ったものである）そこで、発電ユニットに流す河川水の向きを変えて、並流形と向流形とで発電比較した。

96 の湯と 13 の水をとともに 4.2 $\lambda$ /min で流した結果、並流形と向流形ともに排湯温度 95，排水温度 17 であったが、発電電力は、向流形の方が 15%高かった。

並流形では、2 流体の温度差が長さ方向で変化するため、ユニット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、ユニットの長さ方向の温度差分布が均一であるため、均一な発電となるためである<sup>3)</sup>。

#### 3-2. 管内フィン

ユニットのアルミニウム管内壁に図 3 のようなフィンをつけ、その発電に及ぼす効果を検討した。

結果は、フィンの有無によって発電出力が 20%程度向上に効果があることが認められた。また、図 4(C) のような構成にし、上部に冷水、下部に温水を流したときの発電量が最も大きいという結果を得た。これは、流体の粘性率の温度依存性に起因する水の場合 20 と 100 とでは 3 倍以上の差があるのである。そのため、冷水に比べて温水の粘性率が小さくなる分、フィ

ン側の管壁付近もスムーズに流れ、熱交換性が高くなるということである<sup>3)</sup>。

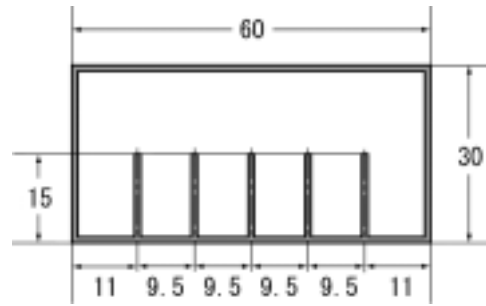


図3 温度差発電ユニット角管断面図

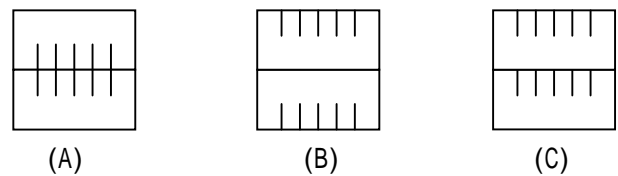


図4 フィン付き管の接触方法

このことから、管内のフィンは湯側と水側とで異なる構造であるべきことが示唆される。フィンの最適化は今後の課題である。

### 4. モンゴル温泉における発電試験報告

モンゴル国のほぼ中央に位置するアルハンガイ県の、ツェンケル村郊外にあるツェンケル・ジゲール温泉という温泉施設で、1997 年から、温度差発電装置の実地試験運転を行っている。

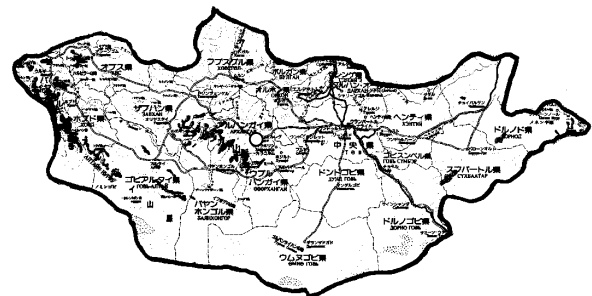


図5 モンゴル国地図（○ がツェンケル・ジゲール温泉）

温泉水と河川水は、配管によって発電装置の直前まで引き込み、管を 5 分岐させて 1 分岐毎に発電ユニットを 2 本直列に接続した。発電電力は、12V 鉛蓄電池

を經由して、インバータによって、AC230V に変換してから送電する。鉛蓄電池に対しては過充・放電防止回路も組み込んである。



図6 湯取り込み口



図7 温度差発電装置全貌



図8 制御室（中央左がインバータ，中央右が過充・放電防止回路，それらの下にバッテリーが見える）

表1 にその温度差発電の推移を示す。

1997年と1998年の出力増加は、フィン付きのパイプへの交換や、配線や水路の改善による。

2000年以降は、ユニットの長さを70cmから1mに伸

ばし(当初は輸送の都合上30cm切断せざるを得なかった),モジュールサイズも30mm×30mmから50mm×50mmに変更した。これはモジュールの価格比が面積比25/9よりも割安であったことと幅60mmの熱交換面に30mm×30mmのモジュールを2列に並べると、過密なためにモジュール1個当たりの発電効率が低くなっているためである。

1997年(3.7W):70cmユニット10本を並流形で設置。

30mm×30mmモジュールを420枚使用。

1998年(34W):フィン付き70cmユニット10本を向流形で設置。

モジュール数変更なし。

1999年(50W):発電ユニットに変更なし。

水を下管,湯を上管に変更(泥の混入を憂慮)

2000年(50W):フィン付き1mユニット10本に変更。

50mm×50mmモジュールを190枚に変更。

2001年(36W):発電ユニットに変更なし。

2002年(24W):発電ユニットに変更なし。

表1 ツェンケル・ジグール温泉施設での温度差発電推移

2000年から2002年までは、装置自体は同じものを設置しているため経年変化を見ることができる。発電量だけでなく、装置全体の内部抵抗が、2001年で3.4だったものが2002年では5.2に変化していた。

この変化の原因は、モジュールに対する防水処理が不完全だったためである。加えて、この温泉施設の経営が夏季限定であることによる。冬季は発電装置を倉庫に格納しているのだが、厳寒期には倉庫内であっても、着脱時にモジュールの間隙に浸入してしまう水分が凍結し、モジュールにダメージを与えたと考えている。

## 5. ユニット材質と発電効率

開発した温度差発電ユニットはアルミニウム製であるが、発電ユニットの実用化にあたっては、ユニットの耐久性が高いことが必要である。そこで、銅製、アルミニウム製、アルマイト被覆アルミニウム製、ステンレス(SUS403)製のユニットによる発電効率を比較し、温泉水による劣化を検討する上での基礎的な調査を行うことにした。アルマイト被覆アルミニウム製とステンレス製は、ユニットの耐腐食性向上のための候補として考えられるものである。また銅はもともと耐酸性に優れているので、アルミニウム製との効率比較を行っておく。

肉厚 2mm、W60mm × H30mm × L500mm の角管 2 本の中に、50mm × 50mm のモジュールを 7 枚挿入したユニットを、上記の 4 種類の材質について用意した。そして、図 9 のような結果を得た。

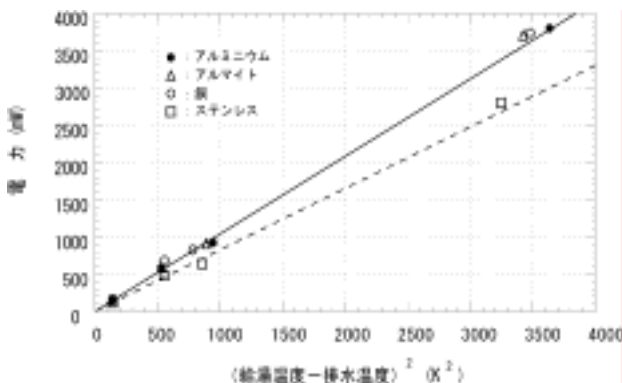


図9 ユニット角管材料の違いによる出力電力比較

銅製とアルミニウム製とアルマイト被覆アルミニウム製のユニットでは、どれも 1.1(mW/K<sup>2</sup>)であったが、ステンレス製だけは、0.83(mW/K<sup>2</sup>)であった。この結果は、熱交換面に垂直な方向への熱コンダクタンス比によって説明できる。

熱交換面の材質厚は 2mm、モジュールのアルミ基板厚は 1mm、アルマイト皮膜厚は 10 μm とすると、厚さ比は 2:1:0.01 である。すると、面に垂直な方向への熱コンダクタンス比は、金属壁とアルミ基板の合成熱コンダクタンス比であるから、熱伝導率が銅 403(W/mK)、アルミニウム 236(W/mK)、アルミナ 21(W/mK)、ステンレス 25(W/mK) という値を用いて、銅製では  $(\frac{2}{403} + \frac{1}{21})^{-1} = 19$ 、同様にしてアルミニウム製 18、ステンレス製 7.8。また、アルマイト被覆製では  $(\frac{2}{236} + \frac{0.01}{21} + \frac{1}{21})^{-1} = 18$  となる。すなわち、ステンレス製だけが他の 1/2 にも満たない比率となる。このため、銅製、アルミニウム製、アルマイト被覆アルミニウム製のユニットでは、ほとんど発電効率が変わらず、ステンレス製だけが低くなるのである。

	アルミニウム	アルマイト被覆	銅	ステンレス
発電効率(W/K <sup>2</sup> ) ...	1.1	1.1	1.1	0.83
総重量(kg) ...	1.8	1.8	4.5	3.9
角管コスト比 ...	1.0	1.1	1.1	1.2

表2 角管材質による比較

また、4 種類の材質によるユニットの総重量を比較すると、アルミニウム製とアルマイト被覆アルミニウム製に対して、銅製、ステンレス製は、ともに 2 倍以上の重量を持つ。また、ステンレスはやや製作コストがかかる。

## 6. むすび

温泉水と河川水によって発電する 100W 級の温度差発電装置についての報告を行ってきた。

発電ユニットがアルミニウム製 1m ユニットであることは、効率、コスト、重量（設置性・運搬性）において最も理想的である。温泉水に対する耐腐食性は、設置する温泉毎に、アルマイト被覆によって高めることを第一に検討すべきである。それでは効果が期待できなければ、ステンレスやその他の方法にせざるを得ない。

使用するモジュールの性能の経年変化は、水その他の物質を仲介とした Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> チップの化学的および物理的变化が原因である。モジュールへの水などの浸入を防止できれば、解消できる。この際モジュールから電力を外部に取り出すリード線部分の防水が最大の問題である。

また、モジュールにヒートサイクルが与えられると、その熱応力によって Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> チップが劣化することも考えられるが、モンゴルでのように季節限定で運転するのではなく、安定した温度差で年中運転し続けるならば、そのような劣化は起こらない。

すなわち、温度差発電ユニットは以上の点を解決することで実用化に十分耐えうるものとなる。

また今後、モジュールを 2 管の間に挿入するのではなく、熱電変換材料と管とを一体化して製作すれば、モジュールのアルミ基板の熱伝導をカットできるし、管内壁の構造を最適化することで、効率はさらに向上すると考えている。

なお、発電ユニット材質の違いによる発電比較の実験については、(株)日伸テクノとの共同研究によって行われた。

## 参考文献

- 1) 東藤勇, 浦家淳博, 坂口直志, 横山安弘, : 特許第 3163290 号「熱電変換素子を用いた温度差発電装置および方法」, 2001.2.23.
- 2) 浦家淳博, 坂口直志, 横山安弘, 東藤勇: 「羅臼温泉を利用した温度差発電」, 釧路高専紀要, 第 31

号 (1997), pp97-101

- 3) 浦家淳博, 坂口直志, 横山安弘, 東藤勇: 「熱電変換素子を用いた温泉と河川の温度差利用による発電特性, 太陽エネルギー, Vol.25, No.6 (1999), pp49-54.