

柔軟で高効率な熱電素子水分解システムの開発

田辺 茂* 清水 日彬** 谷口 雄亮***

Flexible and High Efficient Thermoelectric Water Electrolysis System Using Hot Spring Water

Shigeru TANABE, Yoshiaki SHIMIZU, and Yusuke TANIGUCHI

The purpose of this study is to develop flexible and high-efficient thermoelectric water electrolysis system using hot spring water and water of a stream nearby. The system was field tested in 2010 for the first time and several improvements were adopted to the system and field tests were conducted in 2011 and 2012. The consecutive improvements made it possible to produce twice as much hydrogen as before. In addition, we established the method which determines the best connection method of thermoelectric cells under various water temperature combinations.

Key words: Hot Spring, Stream Water, Thermoelectric Generation, Water Electrolysis, Hydrogen Generation

1. 緒 言

熱電素子水分解システム¹⁾は、筆者らが命名したものであるが、地域を科学技術で活性化させる試みの一つであり、また 2011 年に発生した東日本大地震の被害からの復興の一助になることを想定した研究である。

熱電素子を使用した発電²⁾は、利用されずに廃棄されている熱エネルギーを有効利用できる点で、持続可能社会のエネルギーを考える上での有力な技術の一つと考えられる。さらに従来技術では利用しにくい 100℃以下の熱でも、温度差に応じた発電量が得られることも本発電方式の魅力である。

熱電素子による温泉を利用した発電は、これまでに国内では数か所で行われており、例えば鳥取県東郷湖めぐみの湯³⁾や群馬県草津温泉における温泉発電⁴⁾がある。こうしたシステムでは、発電した電力をそのまま利用するか、あるいは蓄電池に一度蓄えたのちに利用することが行われている。

一方、例えば 2010 年 6 月に閣議決定された資源エネルギー庁による「エネルギーの基本計画」⁵⁾においては、低炭素化のための水素エネルギー社会の実現への期待が述べられている。水素は多様な方法で生成することが可能であることから、エネルギー安全保障の観点からも優れたエネルギー

社会を支える水素生成装置の一つになると期待できる。

ここでは、過去 3 年間実施してきた湯原温泉における現地試験結果を検証し、今後の課題を検討する。

2. 熱電素子水分解システムの構成

図 1 に熱電素子水分解システムの簡易化した構成図を示す。高温側には温泉の湯を利用することとした。温泉の場所によっては 80℃程度の湯を利用できる可能性がある。熱電素子に有効に温度差を与えるためには、高温側の面の反対側を冷却することが有効である。温泉地の多くの場所で近く

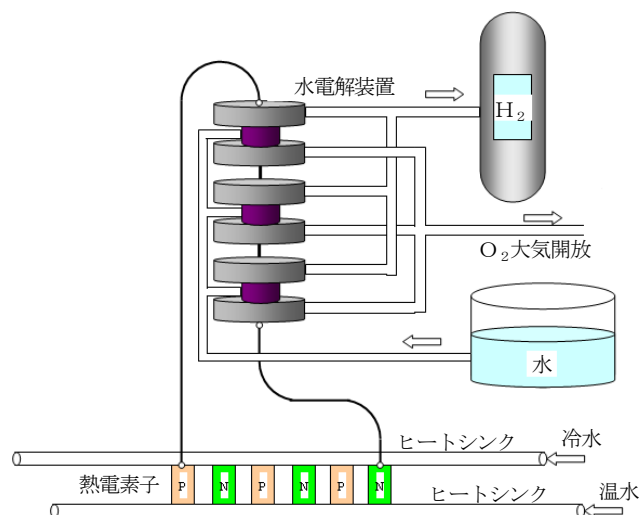


図 1 熱電素子水分解システム構成

原稿受付 平成 25 年 8 月 30 日

*電気電子工学科

**電子情報システム工学専攻 平成 24 年度修了生

***電気電子工学科 平成 24 年度卒業生

に河川が流れていることから、この河川の水を低温側の冷却水として利用することとした。

この温水と冷水をヒートシンクに通水することにより、ヒートシンクに挟み込んだ熱電素子に温度差を与える。市販されている主に電子冷却に使用されている熱電素子（ペルチェ素子と称される）は、図2に示すように平板状であり、その上下面から熱流を通過させる。ヒートシンクは熱電素子に合わせて平板とし、2枚のヒートシンクで熱電素子をはさみ、片方ヒートシンクには温水を、他方には冷水を流すことにより、熱電素子に温度差を与えることができる。

熱電素子の大きさは製造時の制約から1枚の大きさは40mm□程度であり、1枚で得られる電力はわずかである。この電力を多数集めて利用に供するが、その時の熱電素子の接続方法は、負荷に応じて最適なものにする。高電圧が必要であれば直列接続とし、大電流が必要であれば並列接続とする。本研究では、温度変化に応じて常に最適な熱電素子の直・並列接続となるような自動制御をめざしている。

熱電素子の電気出力は、固体高分子形水電解装置に接続する。別途用意した電機分解用の純水を水電解装置に供給し、それを電気分解して水素を生成する。生成した水素は水上置換法により容器に貯蔵している。酸素は大気開放する。実用段階では水素は圧縮してタンクに貯蔵することを検討する必要がある。

3. 技術課題と性能向上策

3年間の研究で明らかになった本システムの技術課題とその対策について以下に述べる。ここでは、真庭市湯原温泉で3回実施した現地実証試験を便宜上、1回目（2010年12月）、2回目（2011年12月）、3回目（2012年12月）と呼ぶ。

3. 1. 熱電素子の圧接

ヒートシンク2枚で熱電素子を挟み圧接することで、熱電素子への給熱と放熱を行っている。従ってヒートシンクと熱電素子の圧接状態が発電特



図2 熱電素子の外観

性に大きく影響することが考えられる。なおヒートシンクの大きさは350mm×190mmで、16枚の熱電素子を取り付けることができる。

熱電素子が許容する荷重は1枚あたり662Nなので、ヒートシンクあたり16枚の熱電素子を取り付けるとすれば、11kNと大きな荷重に耐えられることになる。しかし実際に実装するときには不均等な加圧による熱電素子の破損が発生するための限界があった。

1回目と2回目の現地実験では、ヒートシンクの上に重り（1回目：10kg、2回目：20kg）を乗せることで加圧した。3回目の現地試験では加圧の安定性を増すために図3に示すように8本のボルトで加圧する方式とした。締め付けトルクは150N・mである。この改善により、水素生成量は約20%増加した。

圧接についてのもう一つの技術課題がヒートシンクと熱電素子の接触状態である。以下の3点を検討した。まずヒートシンクの平面度公差は、大形パワー半導体素子を圧接する場合と同一の条件（0.05mm）とした。また表面粗さは、Ra記号で6.3とした。一方、熱電素子の厚みの公差は仕様では±0.1mmであり、この厚みのばらつきをカバーするため、2回目の現地試験以降、1mm厚の熱伝導度の大きなシリコンシートをヒートシンクと熱電素子の間に挟んだ。（2回目：信越化学工業製TC-CAT-20、3回目：同社製TC-(100)TXE）

3. 2. 熱電素子の最適接続

熱電素子の出力電流Iと出力電圧Vの特性（I-V特性）の実測値の例として、図2に外観を示した今回の研究に使用している、（有）日本テクモ製TEC1-12706について図4に示した。高温側温度42℃、与えた温度差は35Kである。この結果から電力を計算して同じく図4に示すが、熱電素子の最大電力は、出力電圧を開放電圧の半分で運転したときに得られることがわかる。

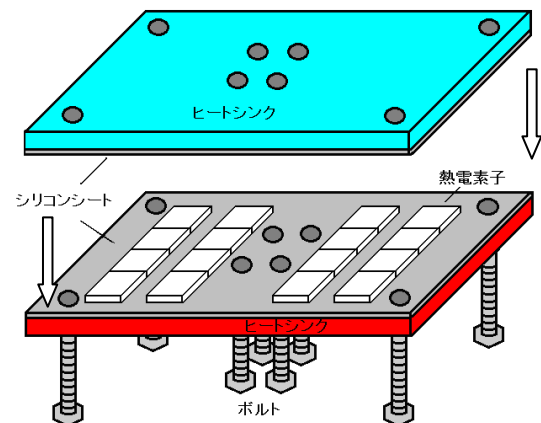


図3 熱電素子の取り付け方法

一方、負荷となる水電解装置の I-V 特性は図 5 のようになる。装置はアスデン(株)製 XL-MODEL、電極が 40mm 口の固体高分子形である。図から、電圧 1.5V から電気分解が始まりその後は電流が直線的に増加していることから、電気分解中は電気分解セルの等価抵抗は、ほぼ一定とみなすことができる。

熱電素子と水電解装置の I-V 特性の交点がシステム動作点となるが、図 4 と図 5 より、実証試験を実施する湯原温泉で得られる温度差 35K では、熱電素子 1 枚で水の電気分解はできないことがわかる。開放電圧の半分で電力最大になることを考慮すると、熱電素子 4 枚を直列接続すればよいと考えられる。システム全体では 64 枚の熱電素子を使用するので、これらの素子を 4 直列-16 並列すれば、最大の水素製造量となることが推察できる。2, 3 回目の実証試験ではこの接続方式とした。なお 1 回目の実証試験では温度差を 30K と想定したため出力電圧の予測が低く、直列接続数を 8 とした。この並列接続数の差は 50% 程度の水素生成速度の差として現れた。

熱電素子の最適接続方法の決定手順を一般化すると以下ようになる。

①熱電素子 1 枚で、各種温度差における I-V 特性を測定し、得られた I-V 特性を数式化する。

$$I = -aV + b$$

ここで、a：短絡電流/開放電圧、b：短絡電流

②熱電素子を n_s 個直列接続し、 n_p 個並列接続したときの熱電素子全体の I-V 特性は次式で表せる。

$$I = -a(n_p/n_s)V + n_p b$$

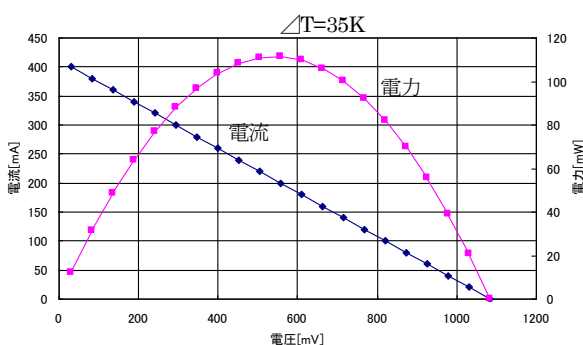


図 4 熱電素子の I-V 特性例

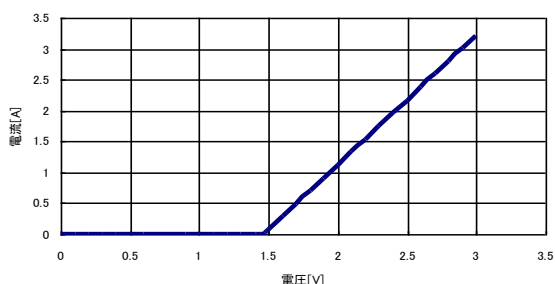


図 5 水電解装置の I-V 特性

③水分解装置の I-V 特性を測定し、得られた I-V 特性を数式化する。

$$I = cV + d$$

ただし、 $V < V_{th}$ で $I=0$ 、 c ：I-V カーブ傾き、 $d/c = -V_{th}$

④所定の温度条件と熱電素子の接続条件で、熱電素子と水電解装置の特性の交点をもとめ、その時の電流を計算する。

⑤電流が最大になる熱電素子の接続条件を求める。

3. 3. 冷却水流量の影響

ヒートシンクに流す冷却水の流量を増加すれば熱電素子の低温側の温度上昇を抑制できるので、発電電力の増加が期待できる。実験室における温度差 35K の条件で 1L/min から 4L/min まで流量を変化させて最大電力を比較したところ、約 4 倍の増加を確認した。この結果を受けて、3 回目の現地実証試験では可能な限りの冷水側流量の増加を図った。

4. 温泉地での実証試験

3 章で述べたように、これまで 3 回の実証試験を湯原温泉にて実施してきた。システムの設置場所の選定にあたって、湯と河川水の両方がポンプなしでヒートシンクに流せる場所を探した結果、田羽根川が旭川に合流する地点が絶好であることを見出した。この地点には 4m 上に足湯があり、湯はそこから高低差を利用して 4L/min 程度の十分な流量を確保できた。一方、水は田羽根川からホースで容易にヒートシンクに引き入れ可能と考えたが、実際には高低差のない川なので十分な流量を確保するのに苦労した。3 回目の試験では特に水の流量増大を意識して取り組み、取水部の形状を大きくすることや川自体の流量が多い場所を最大限利用するなどの工夫により、結果として前年度より 13% の増加となった。

3 年間の結果をまとめて表 1 に示す。どの年も温度差で 35K 程度が得られた。3 章で説明した出力増大策の適用により、3 年目には 1 年目の 2 倍の水素生成速度を得ることができた。

本システムの出力を生成される水素エネルギー(低位発熱量:LHV 基準)と考え、入力として温泉の湯の温度低下から計算できる熱エネルギーを考えると、本システムの効率 η を以下のように定義できる。

$$\eta = \frac{\text{単位時間あたりに生成した水素の LHV}}{\text{湯の温度低下と流量から求めた熱量}} \times 100 \quad (1)$$

(1) 式において単位時間を 1 分とし、水素生成速

表1 3年間の現地実証試験結果のまとめ

	2010年12月	2011年12月	2012年12月
熱電素子接続	8直列-8並列	4直列-16並列	4直列-16並列
ヒートシンク圧接	重り 10kg	重り 20kg	ボルト締め (*2)
熱電素子接触面	処理なし	シリコンシート	シリコンシート
水温 高温/低温(*1)	42.7℃/7.1℃	41.5℃/5.8℃	42.3℃/5.8℃
温度差 (*1)	35.6K	35.7K	36.5K
湯/水 流量 (*1)	4.0/1.7 L/min	4.5/1.6 L/min	3.7/1.8 L/min
水素生成速度 (*1)	0.75 NL/h	1.31NL/h	1.51NL/h
電圧/電流/電力 (*1)	1.73V/1.9A/3.29W	1.81V/3.06A/5.54W	1.97V/3.09A/6.08W

(*1): 代表値, (*2): M10×8, 締め付けトルク 150N・m

度 Q_h [Ncc/min], 水素の LHV[10.8J/cc]⁶⁾ とおけば次式が得られる。

$$\eta = \frac{Q_h \times 10.8}{(\theta_1 - \theta_2) \cdot Q_w \cdot 4.186} \times 100 \quad (2)$$

ここで Q_w : 湯の流量[cc/min], θ_1, θ_2 : ヒートシンクの入口, 出口の湯温

(2)式において, 3 回目の実証試験結果である $Q_h=25.2$ Ncc/min, $Q_w=3700$ cc/min, $\theta_1=42.3^\circ\text{C}$, $\theta_2=41.1^\circ\text{C}$ を代入すると η は 1.5% となる。

一方, 電気出力は 3 回目の実証試験で 6.1W が得られた。これは 1m^2 当たりで換算すると 60W に相当する。水路のゴミの除去などのために設備利用率が 80% と考えると, 平均発電電力は 48W となる。この値を効率 20%, 設備利用率 12% の太陽光発電 ($1000\text{W} \times 0.2 \times 0.12 = 24\text{W}$) と比較すると, 2 倍となる。熱電素子が 24 時間安定して発電可能であることがこの差を生んでいる。

5. ま と め

電子冷却に用いられている安価な熱電素子により構築した熱電素子水分解システムを, 岡山県真庭市湯原温泉で 2010 年から 2012 年にかけて 3 回の実証試験を行ってきた。使用した熱電素子は面積が 16cm^2 のもの 64 枚で, これらを適切に直・並

列接続して, 温泉の湯と河川の水を通水した 2 枚のヒートシンクに挟みこんだ。この温度差で発電した熱電素子の発電電力を水分解装置に供給した。得られた温度差は 36K であったが, 2012 年の実証試験では 1 時間当たり 1.5L の水素を生成することができた。これは 2010 年の結果の 2 倍である。得られたエネルギーは湯からシステムが得た熱エネルギーの 1.5% であった。一方, 本システムで発電した電力を単位面積当たりで換算すると, 太陽光発電の 2 倍の平均電力が得られたことがわかった。

なお本研究の一部は, 科学技術振興機構平成 22 年度研究成果最適展開支援事業の支援を受けておこなわれた。

参 考 文 献

- 1) 田辺茂, 吉鷹朋昭: 熱電素子水分解システムの基礎検討, 電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 215, 2010
- 2) 坂田亮: 熱電発電—基礎と応用, 裳華堂, 2005, 2-21,
- 3) 温泉発電, 石田工業株式会社パンフレット, (2004)
- 4) 新藤尊彦, 中谷祐二郎, 大石高志: 未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム, 東芝レビュー, 63, 2(2008)7-10
- 5) 資源エネルギー庁ホームページ
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004657/energy.html>, 2013-7-18 確認
- 6) 田辺 茂: 燃料電池の基礎マスター, 電気書院, (2009) 130