

技術論文

熱電発電による工場排熱回収

Recovery of Plant Waste Heat by a Thermoelectric Generating System

海部 宏昌

Hiromasa Kaibe

梶原 健

Takeshi Kajihara

藤本 慎一

Shinichi Fujimoto

牧野 一也

Kazuya Makino

八馬 弘邦

Hirokuni Hachiuma

2009年10月末より株式会社KELKではコマツ粟津工場浸炭設備を用いて熱電発電システムの実証試験を開始した。[1] この炉では一酸化炭素、水素、窒素を成分とした浸炭ガスを炉内に導入し、浸炭プロセス部を通過した余剰ガスをアフターバーナーで燃焼、除害したのち、炉外に放出している。アフターバーナー部での火炎の低位燃焼熱は20~30KWと見積もられ、この排熱が熱電発電システムによって電力に変換される。熱電発電機はBi-Te熱電材料を用いる16個の熱電発電モジュールから構成されている。熱電発電モジュールは50mm(W)×50mm(D)×4.2mm(h)の大きさであり、高温電極温度280℃、低温電極温度30℃のとき、出力24Wを発電する仕様となっている。16モジュールはさらに4モジュール毎の4グループに分けられている。モジュールの電気的接続は並列、直列に大別されるが、ロバスト性、信頼性に重点を置く場合には並列接続、配線の簡略化、高インピーダンス化の場合には直列接続が採用されることになる。現況(2011年10月)では、4モジュールは直列に接続されて計4ライン構成となっている。

熱電発電モジュールの耐久性、信頼性は熱サイクル、連続発電の両試験および素子レベルの各種高温暴露試験によって確認し、改善を繰り返している。たとえば、熱サイクル試験では低温側を30℃一定とし、高温側温度を250-50℃間のサイクル条件下で、10,000サイクル後、出力低下は数%以下に抑えられている。

火炎の状況が刻々変化しても、最適条件で発電稼働するよう8ビットワンチップマイコンによる簡便な制御回路を用いて、最大出力追尾システム(MPPT)を装備した。16個の熱電発電モジュールの出力は4台の鉛蓄電池に充電され、インバータを通じて粟津工場内のLED照明用電力を供給している。集熱板温度240℃、冷却水温度20℃のとき、240Wの出力が得られている。

From October 2009, KELK started verification tests of a thermoelectric generating system using a carburizing furnace at the Awazu Plant of Komatsu. [1] This furnace introduces a carburizing gas, which comprises carbon monoxide, hydrogen and nitrogen, into the furnace and surplus gas having traversed a carburizing process unit is fed to an afterburner for combustion and decontamination, to be released outside the furnace. The lower combustion heat of flames in the afterburner is estimated to be 20 to 30 kW and this waste heat is converted into electricity by the thermoelectric generating system. The thermoelectric generator consists of sixteen thermoelectric generating modules made of a Bi-Te thermoelectric material. Each thermoelectric generating module is 50mm wide and deep and 4.2mm high. Each module is specified to generate an output of 24 W when the hot-side temperature is 280 and the cold-side temperature is 30 °C. The sixteen modules are categorized into four groups, each of four modules. The electrical connections of the modules are roughly divided into parallel and serial connections. When robustness and reliability are paramount, a parallel connection is used and when the wiring is simple and the impedance is high, a serial connection. At present (as of October 2011), four modules are connected serially in a four-line configuration.

The durability and reliability of the thermoelectric generating modules were verified by a heat cycle, continuous generation tests and various high-temperature exposure tests on a device level. Improvements in durability and reliability are repeated. For example, in heat cycle tests, output degradation is controlled to several percent or lower after 10,000 cycles under constant cycle conditions of 30 °C on the low temperature side and between 250 and 50 °C on the high-temperature side.

A maximum power point tracking (MPPT) system uses a simple control circuit embedded with an 8-bit one-chip microcomputer to generate power under optimum conditions, despite the flame conditions varying from time to time. The output of sixteen thermoelectric generating modules is used to charge four lead storage batteries and supply power to light up LED lamps in the Awazu Plant of Komatsu through an inverter. The modules output 240 W when the temperature of the heat collection plate is 240 °C and the cooling water temperature is 20 °C.

Key Words: 熱電発電, 粟津工場, 浸炭炉, 最大出力追尾

1. 緒言

株式会社KELKは2009年9月よりNEDOプロジェクト「高効率熱電変換システムの開発」(2002 - 2006年)での成果をもとに開発されたBi-Te熱電発電モジュールの受注を開始した。[1] NEDOプロジェクトではコマツ研究本部が参加し、Bi-Teモジュールとシリサイドモジュールのカスケード化により、高温電極温度550℃、低温電極温度30℃において変換効率15%を目標として、熱電発電モジュールの開発を進めた。[2][3] それらを踏まえ、熱電発電システムの工場排熱回収への適用可能性検討と同時に熱電発電システムに対する社会的認知の促進と信頼性及び耐久試験の一環として、コマツ粟津工場浸炭設備に熱電発電機システムを設置した。以下に、その概要を記す。

2. 熱電発電モジュールの発電特性

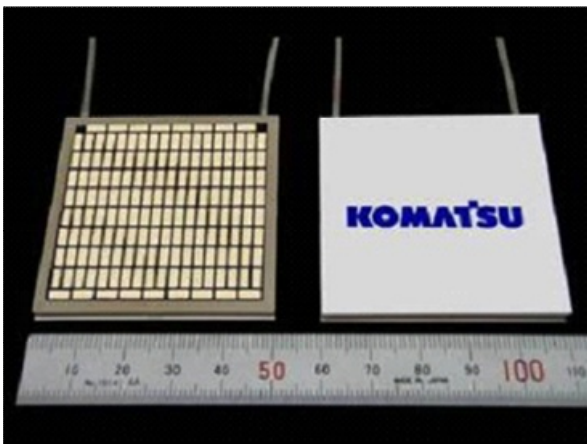


図1 開発したBi-Te熱電発電モジュール

図1はBi-Te熱電発電モジュールの外観写真である。特長と仕様を以下に記す。[1]

[特長]

- 世界最高の変換効率をもち、比較的小さな温度差でも大きな出力が得られる。(動作条件:高温側280℃、低温側30℃)
- 出力密度が約1W/cm²と高く、設備がコンパクトになる。
- 最大出力時、3A-8Vと低電流・高電圧のため、電気回路の取扱いが容易になる。

[商品仕様]

- 寸法: 50mm × 50mm × 4.2mm (リード線含まず)
- 質量: 47g
- 出力: 最大24W(高温側電極280℃、低温側電極30℃のとき)

- 使用可能温度: 高温側 最高280℃・常用250℃以下 / 低温側 最高150℃
- 変換効率: 最大7.2%
- 材料: BiTe系

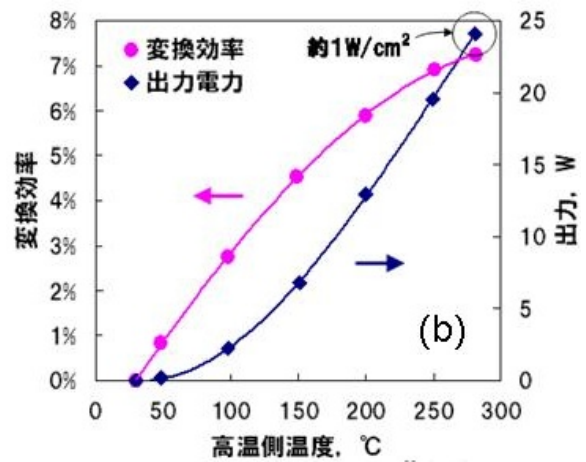
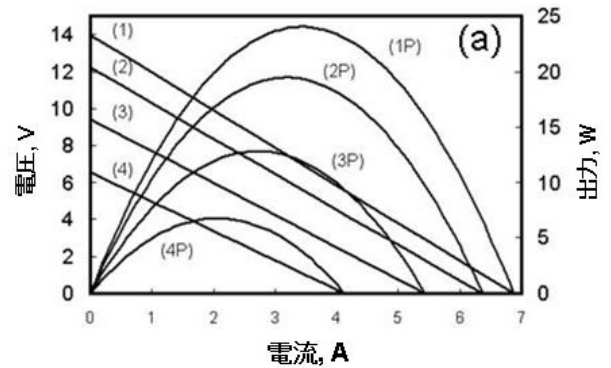


図2 熱電発電モジュールの発電特性(a)

および最大出力、変換効率(b)。 (a)において(1)(1P): $T_h=280^\circ\text{C}$, (2)(2P): $T_h=250^\circ\text{C}$, (3)(3P): $T_h=200^\circ\text{C}$, (4)(4P): $T_h=150^\circ\text{C}$ に対応する。 $T_c=30^\circ\text{C}$ 。

熱電発電モジュールの発電特性と最大出力および変換効率を図2に示す。種々の高温電極温度 T_h に対応して電圧 V と出力 P を熱電発電モジュールに流れる電流 I の関数としてプロットしている。この評価において、低温電極温度 T_c は30℃になるように制御して計測している。 $I=0$ における V 値は開放電圧 V_0 であり、 $T_h=250^\circ\text{C}$ および280℃においてそれぞれ12V、14Vである。太陽電池の I - V 特性と大きく異なり、 V は I とともに線形に減少し、このときの直線の傾きが熱電発電モジュールの内部抵抗値 R_i になる。 R_i は T_h に対して顕著な温度依存性をもたずほぼ一定で約2Ωである。出力 P は熱電発電モジュールに接続した外部負荷 r から取り出すことのできる出力であり、 $P = V \times I$ によって算出することができる。 P は $R_i=r$ となるインピーダンスマッチングのときに最大出力 P_{\max}

が得られ、図 2 (b)の $P_{max} - T_h$ プロットに示すように $T_h = 250$ および 280 のときにそれぞれ $20W$ と $24W$ となる。また、図 2 (b)には熱電発電モジュールの変換効率 $\eta - T_h$ プロットも示している。 η は T_h とともに直線的に増加し、 $T_h = 280^{\circ}C$ のときに $\eta = 7.2\%$ に達する。

3. 熱電発電システム[4-5]

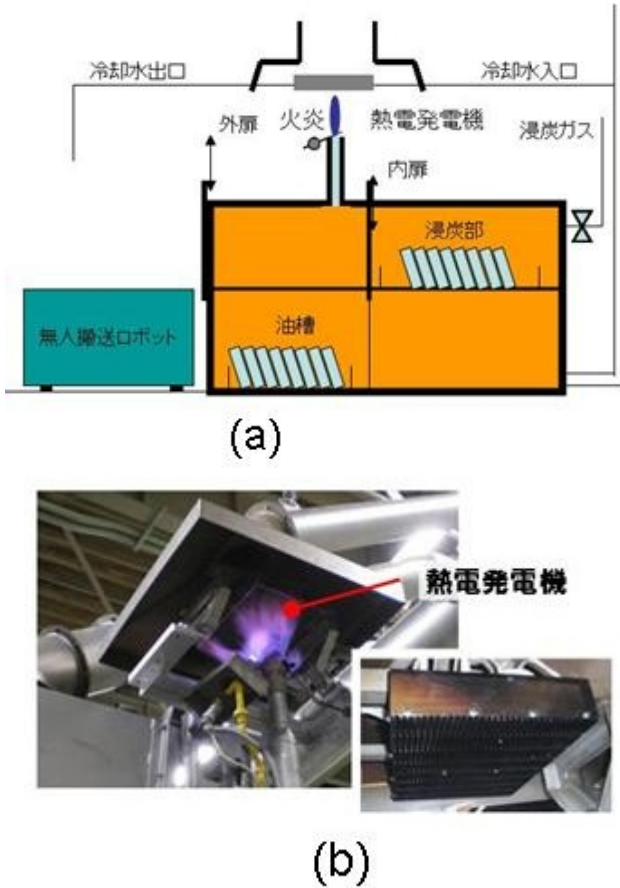


図3 コマツ粟津工場に設置した熱電発電システム(a)と熱電発電機例(b)

図 3 (a)はコマツ粟津工場に設置した熱電発電システムの概略図である。火炎は浸炭ガス (RX ガス) 中の H_2 と CO を除害するためにパイロットバーナーで点火して燃焼させることで発生し、これによって熱電発電機の集熱板を加熱することになる。RX ガス流量が $10m^3/h$ のとき、燃焼熱は約 $20KW$ と見積もられる。図 3 (b)は熱電発電機の一例である。集熱板の大きさは $400mm \times 280mm$ であり、集熱面積増加と集熱効率の向上の目的でフィン構造を設けて表面を黒色化処理している。集熱板の反対側には図 1 に示した熱電発電モジュールを 4 モジュールずつ 4 グループの計 16 モジュールを配置している。熱電発電モジュールの接続方法は適用先により柔軟に対応するべきである。すべてのモジュールを直列に接続する利点は高インピーダンスかできること、高電圧が得られるために太

陽電池用のパワーコンディショナーを DC/DC コンバーターを用いずに使用できること、配線を簡素化できることなどがあるが、接続内の 1 モジュールの破損により発電機全体の出力が停止に至ってしまい、ロバスト性に欠けることがある。バイパスダイオードを導入することでロバスト性は改善できるが配線の簡素化という最大利を生かすことができない。一方で、並列接続では配線が煩雑になること、低インピーダンスにより大電流を扱わなくてはならなくなることといった短所はあるが、モジュールを個別に最大電力追尾 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) できる、またそれにより温度分布が不均一であっても各モジュールを独立して MPPT 化できる、堅牢なロバスト性といった利点がある。現実的には直、並列を適材適所で組み合わせることになることが予想されるが、前述のバイパスダイオードによるフェールセーフは組み込んでおく必要がある。

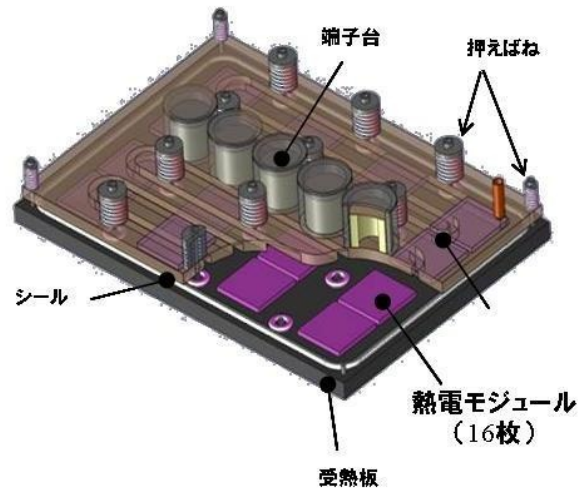


図4 図 3 (b)に示した熱電発電機の部分断面図

これまでに試験をした集熱板のうち、代表例を紹介する。1 つは単純に平板であり、もう 1 例は簡単なフィン構造を設けたもの (図 3 (b)) である。図 4 は図 3 (b)に示した熱電発電機の部分断面図である。各熱電発電モジュールは集熱板と水冷板の間にばね構造によって挟み込まれ、熱電発電モジュールに温度差が与えられてもほぼ一定の加圧力で保持されるようになっている。加圧力は $1MPa$ を目安とした。冷却水量は $10-12 /min$ で、低温電極側は 40 以下に保たれていると推察される。図 4 中の温度センサーから読み込まれる集熱板温度 T_h は浸炭プロセスに依存して 120 から 250 の範囲で変化する。集熱効率は約 20% であり、 $20KW$ の火炎燃焼熱から約 $4 KW$ の熱量しか熱電発電機に導入できていない。フィン構造の最適化、集熱板の材質、熱電発電機の配置位置など総合的な検討が急務である。

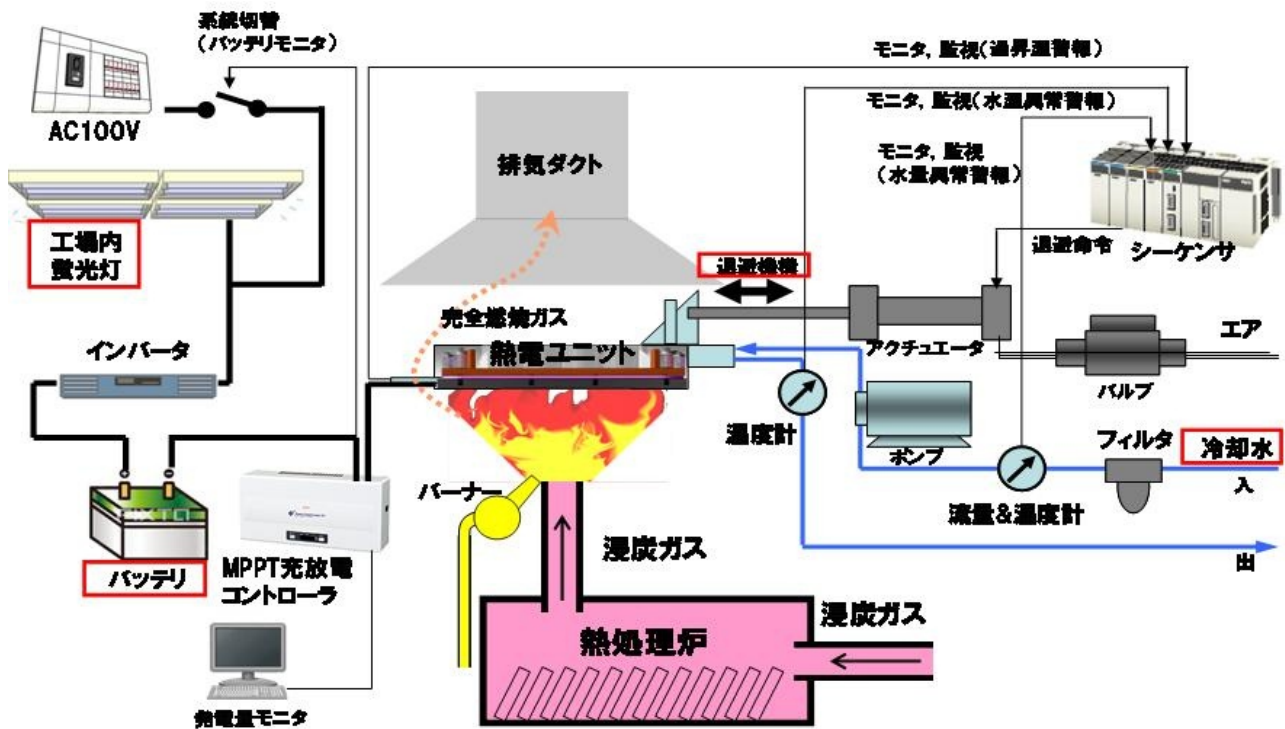


図5 コマツ粟津工場浸炭設備に取り付けた熱電発電システムのシステム系統

図5にコマツ粟津工場浸炭設備に取り付けた熱電発電システムのシステム系統を示す。発電出力はMPPT充放電コントローラを介して、鉛蓄電池に蓄電される。バッテリーからの電力を汎用インバータでAC100Vにして、工場内のLED照明灯電力を供給している。MPPT効率は85%程度である。冷却水量、冷却水温度、集熱板温度は常時監視され、これらからの異常信号の発生により、熱電発電ユニットが火災から退避する機構で安全性を確保している。

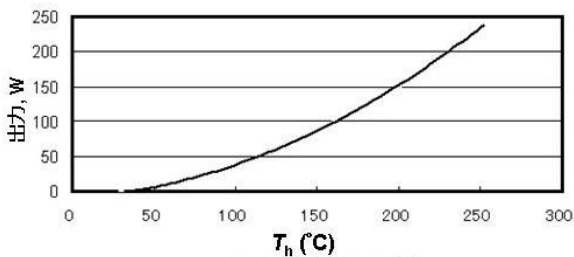


図6 集熱板温度 T_h - 熱電発電機出力 P プロット

集熱板温度 T_h の関数として熱電発電機の出力 P をプロットしたのが図6である。 $T_h=250$ のときに、240Wの出力が得られており、各モジュールが平均で15W出力していることになる。図2に示した各モジュールの発電出力特性によれば、 $T_h=250$ 、 $T_c=30$ のとき、20Wの出力が得られるはずであるが、この差異は熱電発電モジュールの高温および低温電極に与えられる実質の温度差が集熱

板やセラミックス基板、グリース等の介在物によって目減りしていること、16個の熱電発電モジュールが均一に加熱されていないこと、出力を取り出すリード線の抵抗によるロスが考えられる。

結論

コマツ粟津工場浸炭炉の排熱回収を目的として、熱電発電システムを設置した。熱電発電機は株式会社KELKと研究本部にて開発した熱電発電モジュールを16個装備しており、集熱板温度250のとき、240Wの出力が得られている。しかしながら、排熱総量20KWのうち、熱電発電機を貫通する熱量が4~5KWであることから集熱効率は20%程度にとどまっている。発電機の配置や集熱板のフィン構造を工夫することで、集熱効率を40%以上にまで高めることができると考えている。すなわち、1炉あたり2KWの貫通熱量を確保できることになり、1発電機あたり500Wの出力を得ることができると試算される。粟津工場浸炭設備には同規模の炉が10台以上あり、全炉に適用すると10KW程度の発電出力が得られることになる。また、80%程度の稼働率が見込めることから、稼働率12%と言われるソーラー発電システムと比較すると、約6倍の積算電力量が得られることになる。[6]

2009年10月から今日(2011年11月)まで、通算10,000時間以上の稼働実績となっている。また、連続稼働では2,000時間以上でも出力低減は認められていない。平成24年度

には 10KW 級の発電規模にまで拡大し、発電実績を積み上げ市場の立ち上げと用途拡大を図っていきたい。

謝辞

本研究開発は NEDO プロジェクト「高効率熱電変換システムの開発」(2002 - 2006 年)における成果をもとに実施されたものである。本助成に謝意を表す。

[参考文献]

1. <http://www.kelk.co.jp/english/news/090128.html>
2. <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p02022.html>
3. H.T.Kaibe, L.Rauscher, S.Fujimoto, T.Kurosawa, T.Kanda, M.Mukoujima, I.Aoyama, H.Ishimabushi, K.Ishida, S.Sano, "Development of thermoelectric generating cascade modules using silicide and Bi-Te", *Proc 23rd International Conference on Thermoelectrics (ICT2004)*, Adelaide, Australia, June. 2994.
4. H. Kaibe, S.Fujimoto, H.Mizukami, S. Morimoto, "Field Test of Thermoelectric Generating System at Komatsu Plant", *Proc of 2nd Conference Thermoelectric Goes Automotives*, Berlin, Germany, December 2010, p.234.
5. H. Kaibe, S.Fujimoto, T.Kajihara, K.Makino, H.Hachiuma "Thermoelectric Generating System attached to a Carburizing Furnace at Komatsu Ltd., Awazu Plant", *Proc of 9th European Conference on Thermoelectrics*, Thessaloniki, Greece, September 2011, 201E_10_O.
6. 例 え ば , http://staff.aist.go.jp/toshi-tosha/geothermal/gate_day/presentation/MET11-Ito.pdf.

筆者紹介



Hiromasa Kaibe
かいべ ひろまさ 主 幹
株式会社 KELK 素子事業部熱電発電
グループ



Takeshi Kajihara
かじわら たけし 主 査
株式会社 KELK 素子事業部熱電発電
グループ



Shinichi Fujimoto
ふじもと しんいち 主 査
株式会社 KELK 素子事業部熱電発電
グループ



Kazuya Makino
まきの かずや 副 主 事
株式会社 KELK 素子事業部熱電発電
グループ



Hirokuni Hachiuma
はちうま ひろくに 部 長
株式会社 KELK 素子事業部熱電発電
グループ

【筆者から一言】

熱電発電システムの本格的適用例として、パイオニア的使命を担っていると考えております。熱電発電そのものもさることながら、関係各位のご協力をいただき、電力回収技術、耐久性、コスト面から市場開拓に向けて精進して参ります。