

工業炉を利用した熱電発電システムの発電実証試験

Demonstration of Thermoelectric Power Generation System Using an Industrial Furnace

小林 公樹 中村 倫之 箕輪 昌啓 倉田 博司
Hiroki KOBAYASHI Tomoyuki NAKAMURA Masahiro MINOWA Hiroshi KURATA

奥山 進 柴田 均 黒木 高志* 壁矢 和久*
Susumu OKUYAMA Hitoshi SHIBATA Takashi KUROKI Kazuhisa KABEYA

熱電発電システムの実用化を目指し、2回にわたり工業炉における発電実証試験を実施した。設置対象は昭和電線ケーブルシステム(株)三重事業所内に設置されているディップフォーミング式荒引線製造設備であり、運転時の炉内温度は850℃に保たれている。初回の試験は5800時間以上の連続稼動を確認し、最大68 W/m²の出力密度を得た。第二回試験で最大150 W/m²の出力密度を得た。これらの試験により酸化物熱電変換素子を用いたデバイスが大気中800℃以上の環境でも長期使用できることが確認できた。

Aiming to commercialize thermoelectric generation system, demonstration tests were conducted twice in an industrial furnace. Thermoelectric devices were mounted to dip-forming manufacturing facilities in which the furnace temperature during operation had been kept at 850°C. First demonstration test was performed for more than 5800 hours. The maximum power density of the device was 68 W/m². The second demonstration test was started. The maximum power density of the device was improved to 150 W/m². It was confirmed that the long-term durability for the oxide thermoelectric device is good under high temperature environment.

1. はじめに

一次エネルギー源の主流である化石燃料は現在二つの問題を有している。ひとつは資源の枯渇により今後の安定供給が見込めないこと、もうひとつは温室効果ガス(二酸化炭素)の放出源になっていることである。そのため世界的に今後化石燃料への依存度は徐々に減らしていく傾向にあり、様々な方面から使用量削減や代替エネルギー開発が検討されている。このようなエネルギー問題に対して熱電発電はエネルギーの有効利用技術のひとつとして注目されている。

熱電発電では熱起電力を持つ半導体材料(熱電変換材料)に温度差を与えることで、熱を電気に変換する(図1)。これは蒸気タービンなどといった熱機関に比べると非常に単純な構造であるため小型軽量化に対し有利である。これにより、これまで熱機関の適用に向かなかった小規模で広範囲に分散している排熱を電気として回収できる可能性が広がった。

昭和電線ケーブルシステム(株)(以下昭和CS社)はこれまで熱電変換技術の実用化に向けた開発を進めてきた^{1, 2)}。

本報では昭和CS社に設置されている工業炉を対象とした2回の実証試験について報告する。

2. 熱電変換モジュール

熱電変換モジュールは熱電発電デバイスの中心部品である。この熱電変換モジュールは内部に熱電変換材料からなる素子を多数有しており、モジュールの両面に温度差を与えることで発電する。

今回報告する2回の試験で使用した熱電変換モジュールは、酸化物系の熱電変換材料を用いている。この材料は大

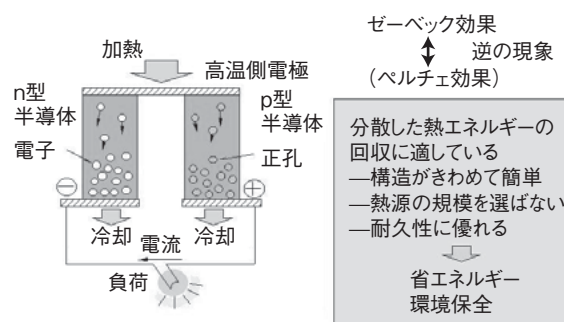


図1 熱電変換の模式図³⁾

* JFE スチール株式会社

気中での安定性に優れており、最高使用温度は 800℃ 付近まで達するため工業炉のような高温環境下での使用に適している。

モジュールの仕様を表 1 に、また、モジュール外観を図 2 に示す。

表 1 熱電変換モジュール仕様

素子	p 型 : $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ $\phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}^1$ n 型 : LaNiO_3 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}^1$
対数	24 対
基板	アルミナ 55×110×1 (mm)
電極	高温側 : 基板上に銀ペーストで回路形成 低温側 : 銀シート電極を銀ペーストで接合

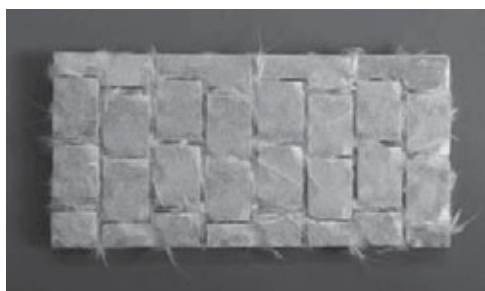


図 2 24 対熱電変換モジュール外観

3. 設置環境

発電実験は昭和 CS 社三重事業所に設置されているディップフォーミング式荒引線製造設備の予熱炉で行った。この予熱炉内の雰囲気は稼働時におよそ 850℃ に保たれている。この予熱炉側面に設けているメンテナンス用ハッチ開口部を利用し、熱電発電デバイスを取り付けた。

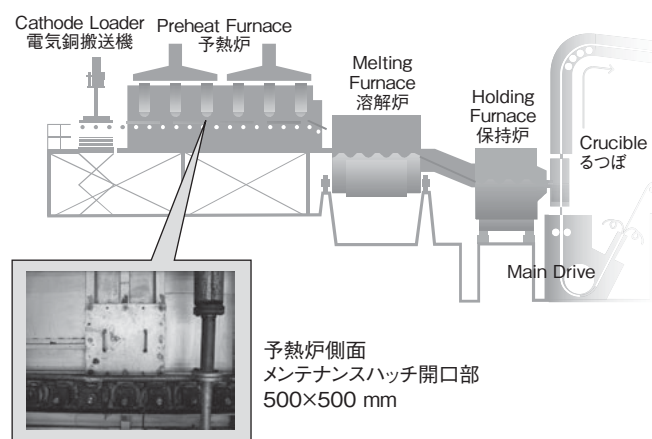


図 3 ディップフォーミング式荒引線製造設備図 (一部)

4. 第一回実証試験

第一回実証試験では、実稼働設備に対し熱電発電システムを取り付けた場合の問題抽出、またシステムの長期安定

動作確認を主目的とした。

4.1 システム構成

熱電発電システムは、発電装置本体である熱電発電デバイス、及びデバイス出力変動を平滑化させるための制御装置、蓄電池で構成されている。

熱電発電デバイスは、受熱板、熱電変換モジュール、水冷板、及びそれらを支える支持部材と押付け部材で構成されており、モジュールは受熱板と水冷板間に挟み込まれ、支持部材と押付け部材により密着するよう配置されている。デバイス稼働時には、炉内雰囲気中で加熱された受熱板と水冷板の温度差により発電する。

熱電発電デバイスのサイズは 500×500 mm であり、内部には 32 枚の熱電変換モジュールを有している。冷却側には銅製の水冷ヒートシンクを用い、冷却水としては工場内で循環している工業用水を使用した。炉内雰囲気さらにされる高温側には酸化物結合型 SiC の板材を取り付けている。これは炉内雰囲気ガスを炉外に逃がさないための遮へい層であると同時に、炉内雰囲気中の熱を効率良く熱電変換モジュールに伝える機能を持つ。

受熱板-熱電変換モジュール-水冷板間の密着を高めるため、水冷板から受熱板に向かってボルトで押し付けを行った。装着時の構造図と外観写真を図 4 に示す。

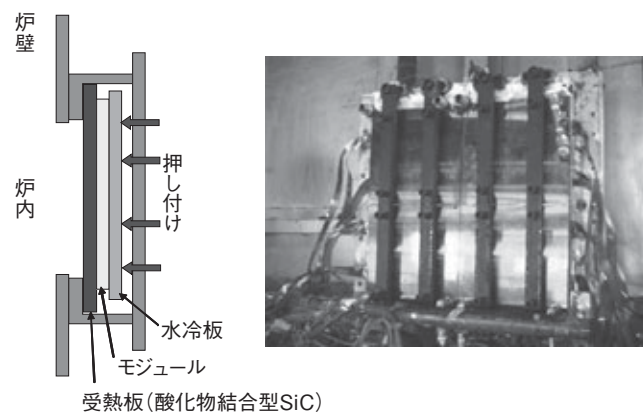


図 4 第一回デバイス構造図及び取り付け写真

熱電発電デバイスの出力は、受熱板に接する炉内雰囲気温度の影響を受ける。本製造設備は数日に一度 500℃ 以下に炉内温度を下げることもあり、また稼働時においてもバーナーの ON/OFF 制御の影響を受け、熱電発電デバイス近傍の雰囲気温度は細かく変動している。

これにより生じるデバイス出力の変動を平滑化するため、デバイスの出力は図 5 に示す制御装置を経由して外部負荷に接続した。このとき外部負荷としては回転表示灯を用いた。制御装置は AC/DC インバータ仕様とし、100 V 電源との連携が取れるようにした。外部負荷に対して電力が余剰の場合には蓄電池に充電を行い、逆に電力が不足しているときには蓄電池から補う回路構成としている。

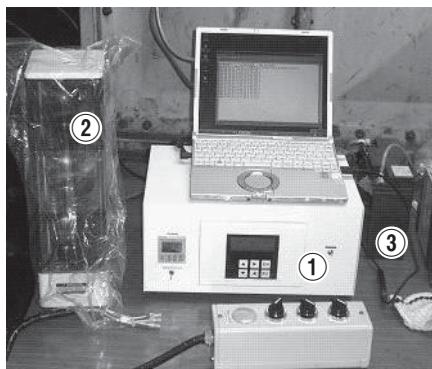


図5 発電制御装置と構成

4.2 試験結果

製造ライン稼動時の出力は12～17 Wであり、出力密度は最大68 W/m²であった。しかしこれは当初予想していた出力の30～53%程度である。この原因として入熱が不十分であったこと、及びデバイス内部での熱抵抗、特に受熱板とモジュール基板の接触界面における熱抵抗が高かったことが考えられた。

第一回試験初期時点でのデバイス全体のパワーカーブを図6に示す。この時の内部抵抗値は6.4 Ωであった。試験期間中の最大開放電圧値は20 Vであり、この開放電圧値と内部抵抗から求めた出力は17 Wであった。

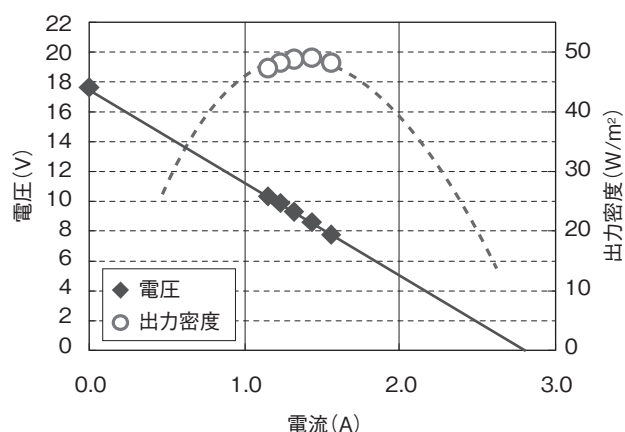


図6 パワーカーブ（第一回試験初期）

得られた電力は、発電制御装置を介して負荷に供給した。外部100 V電源と連携しており、負荷に対し発電が余剰な場合には蓄電し、また発電が不足する場合には逆に放電することで、熱源変動の影響が少ない安定した電源として利用することができた。

デバイスに使用した32枚のモジュールは、4枚1組とした単位構造8組で構成されており、この単位構造を「ユニッ

ト」と呼んでいる。ユニットの起電力（受熱板温度に対する開放電圧）は、初期から5800時間経過後までほぼ同等であった。また各ユニットの内部抵抗値は試験開始時に比べ5800時間経過後もほとんど変化しておらず、モジュールの劣化は生じていないものと考えられた（図7）。これらのことから、長期にわたりシステムが安定動作していることが確認できた。

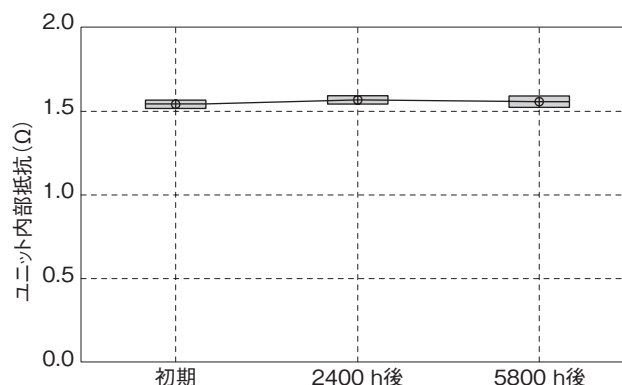


図7 ユニット内部抵抗値の経時変化

以上、この第一回目の実証試験では、実稼動設備（工業炉）に対する熱電発電システムの長期動作確認を行った。

この試験で明らかになった課題のひとつは発電出力の低さである。出力は予測値の30～53%程度であり、熱電発電デバイスの能力を十分に引き出せていない。この点の改善を主目的に、第二回実証試験を行った。

5. 第二回実証試験

第二回実証試験では、デバイスの発電出力改善を主目的とした。

5.1 改善策

第一回実証試験で発電出力が低かった理由としては、①炉内雰囲気熱量が熱電変換モジュールに伝わり難い（入熱効率の低さ）、②受熱板/熱電変換モジュール/水冷板間の熱抵抗の大きさ、の2点が考えられた。これらの問題に対する改善策を表2に示す。

表2 改善策

着目点	第一回試験	第二回試験	備考
受熱板厚さ/熱伝導率 ($\times 10^{-4}$ K \cdot m ² /W)	6.3	2.0	材質、厚さの変更による伝熱性能の向上
受熱板形状	平板状	炉内側にフィン構造を形成	熱交換性能の向上
受熱板-モジュール 基板界面処理	金属貼り付け	固体潤滑剤塗布	界面熱抵抗の減少
モジュール低温側- 水冷板間熱抵抗 ($\times 10^{-3}$ K/W)	50.7	8.1	材質、厚さの変更による伝熱性能の向上

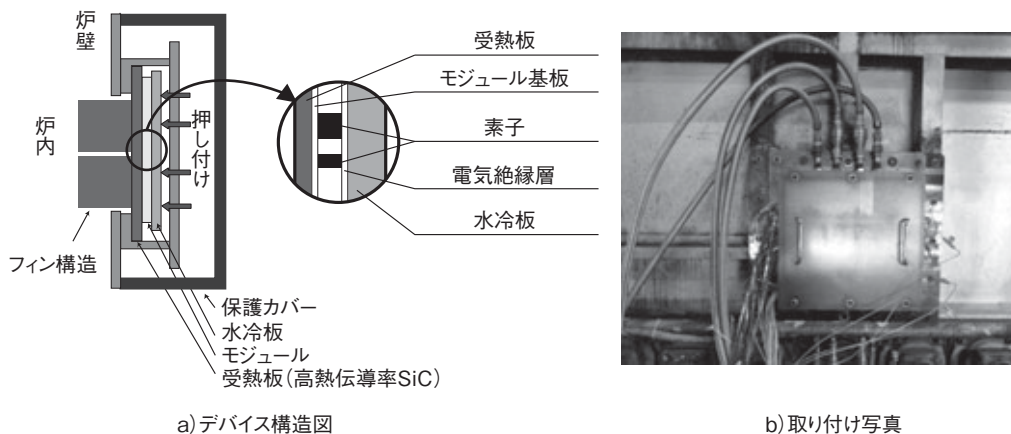


図8 第二回デバイス構造図及び取り付け写真

5.2 システム構成

熱電発電デバイスのサイズは第一回試験の縦横1/2の大きさ(250×250 mm)とした。使用した熱電変換モジュールは8枚である。冷却方式は第一回試験と同様に銅製水冷ヒートシンクを用い、工業用水で冷却を行った。

高温側に用いている受熱板は、第一回試験で使用したものよりも熱伝導率の高い高熱伝導率SiC板である。この材料は見かけ気孔率が低いため、モジュール基板との接触界面において熱抵抗の原因となる空気層の形成を抑えることができる。

受熱板炉内側にはフィン構造を設け、炉内高温空気に対する熱交換性能を向上させた。

受熱板-モジュール基板間の密着を上げ、接触界面の熱抵抗を低減するため、界面には耐熱性固体潤滑剤粉末を塗布した。

熱電変換モジュールの低温側は銀電極が露出しているため、銅製水冷板との接触部には電気絶縁層を設ける必要がある。この電気絶縁層として第一回実証試験では樹脂系フィルムを用いていたが、熱伝導率の高いセラミック材に変更することで熱抵抗を低減した。

安全面を考慮し、熱電発電デバイスには全体を覆う鉄製の保護カバーを設けた。デバイス構造図及び取り付け写真を図8に示す。

5.3 試験結果

熱電変換モジュール内の素子部にかかる温度差は、第一回実証試験で150～190℃程度であったものが、第二回実証試験では350℃程度となり、150℃以上向上した。

第二回試験初期時点でのデバイス全体のパワーカーブを図9に示す。内部抵抗値は2.6Ωであり、製造ライン稼働時の最大出力は9.5Wとなった。

デバイス面積から換算した出力密度は150 W/m²であった。これは第一回実証試験の出力密度の2.2倍に相当する(表3参照)。

この結果から、入熱効率向上及び熱抵抗低減に関する各種対策の効果が確認できた。

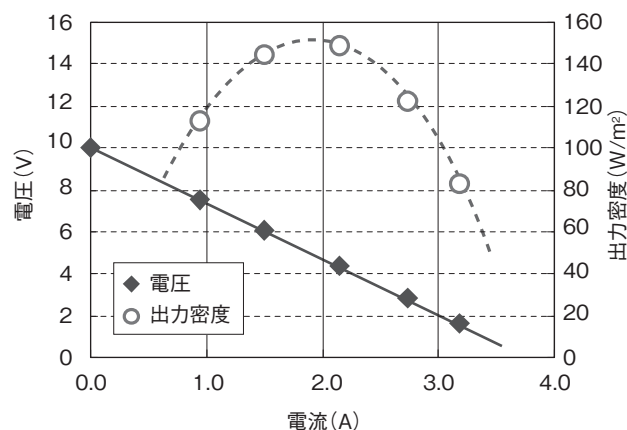


図9 パワーカーブ(第二回試験初期)

表3 試験結果比較

	第一回試験	第二回試験
炉内雰囲気温度	℃	850
開放電圧	V	20.9
デバイス内部抵抗	Ω	2.6
出力	W	9.5
デバイス面積	m ²	0.06
出力密度	W/m ²	150

ただし各熱電変換モジュールの開放電圧を個別に評価すると、最大値と最小値には3倍程度の差が見られた。これは熱の伝わり方の不均一に起因するものと考えられる。この点については今後改善していく予定である。

6. まとめと課題

熱電発電システムの実用化を目指し、昭和CS社所有工業炉を用い2回の実証試験を行った。

第一回試験は、実稼働設備に対し熱電発電システムを取り付けた場合の問題抽出、またシステムの長期安定動作確認を主目的とした。その結果5800時間以上安定してシステムが動作することを確認できた。また、得られた電力は制御装置により外部電源、蓄電池と連携して負荷に供給し、熱源変動の影響が少ない安定した電源として利用できた。

第二回試験は発電効率の向上を目的に行われた。炉内雰囲気を持つ熱量取り込みの改善、及びデバイス内熱抵抗の低減対策を行った結果、第一回試験に比べ2.2倍の出力密度を得ることができた。ただし使用した熱電変換モジュールを個別に評価すると出力にはばらつきがあり、まだ発電効率には改善の余地があることが判った。この点は今後改善していく予定である。

本予熱炉を利用した熱電発電実証試験は2014年現在も継続して行われており、デバイス構造の改善により出力の向上を図ると共に太陽光発電システムにも利用されているMPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御方式を採用し、得られた電力を有効利用可能な発電システムの構築を検討中である。最近行われた実証試験の出力密度は500 W/ m²以上に改善されてきている⁵⁾。これらの結果については次号以降で詳細報告の予定である。

なお、第二回試験は昭和CS社とJFEスチール(株)スチール研究所との共同研究により実施した。

参考文献

- 1) 日下雅文, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 58, No.1, p.9 (2008)
- 2) 中村倫之, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 58, No.1, p.5 (2008)
- 3) (一財) 省エネルギーセンター (ECCJ) ホームページ
http://www.eccj.or.jp/pressrelease/020605_back.html
- 4) 中村倫之, 他: 日本熱電学会学術講演会, TSJ2010 S3-3 (2010)
- 5) K. Hatakeyama et al.: The 32nd International Conference on Thermoelectrics, ICT2013 P363 (2013)

昭和電線ケーブルシステム(株)
小林 公樹 (こばやし ひろき)
技術開発センター 有機材料開発グループ 主査
熱電変換素子と熱電変換モジュールの
研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
中村 倫之 (なかむら ともゆき)
技術開発センター デバイス開発グループ
熱電変換素子と熱電変換モジュールの
研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
箕輪 昌啓 (みのわ まさひろ)
技術開発センター デバイス開発グループ長
熱電変換素子と熱電変換モジュールの
研究・開発に従事

昭和電線ビジネスソリューション(株)
倉田 博司 (くらた ひろし)
生産技術部 生産技術グループ

昭和電線ビジネスソリューション(株)
奥山 進 (おくやま すずむ)
生産技術部 三重製造技術課

昭和電線ケーブルシステム(株)
柴田 均 (しばた ひとし)
電線製造部 三重線材課長

JFEスチール株式会社
黒木 高志 (くろき たかし)
スチール研究所 環境プロセス研究部

JFEスチール株式会社
壁矢 和久 (かべや かずひさ)
経営企画部
(元スチール研究所 環境プロセス研究部)