

工業炉を利用した熱電発電システムの発電実証試験 (第2報)

Demonstration Test on the Thermoelectric Generating System for High Temperature Industrial Furnaces - Part 2 -

箕輪昌啓 中村倫之 畠山和也 藤沢登美雄
Masahiro MINOWA Tomoyuki NAKAMURA Kazuyuki HATAKEYAMA Tomio FUJISAWA

倉田博司 奥山進 柴田均
Hiroshi KURATA Susumu OKUYAMA Hitoshi SHIBATA

産業用の製造機器や輸送機器、また、民間の生活環境で消費されるエネルギーの多くは石油をはじめとした化石燃料が主たるエネルギー源となっているが、有効利用されているのは約3割程度であり残りの7割は排熱として捨てられているのが現状である。これらの排熱を何らかの手法により再利用できれば、一次供給エネルギーの利用効率が高くなり、結果として化石燃料のエネルギー消費量を削減できる。熱電発電はゼーベック効果を有する素子を利用して熱を直接電力に変換する技術であり、排熱の再利用が可能な技術として知られている。当社では自社所有の工業炉を利用して熱電変換による発電実証試験を2009年より試みてきた。本報では主に2014年度に実施した熱電発電システムの実証試験について報告する。

Conventionally a lot of energy consumption is dependent on fossil fuels, and, about 70% of which are thrown away as waste heat. If we reuse this waste heat, it can improve the utilization efficiency of energy. It is known that thermoelectric generation is a technique for directly converting heat into electricity.

Using own industrial furnaces, we have conducted power generation demonstration tests by the thermoelectric conversion since 2009. In this paper, mainly we will report the results of the 2014 FY.

1. はじめに

産業用の製造機器や輸送機器、また、民間の生活環境で消費されるエネルギーの多くは石油をはじめとした化石燃料が主たるエネルギー源となっているが、有効利用されているのは約3割程度であり残りの7割は排熱として捨てられているのが現状である。特に製鉄プロセスやガラス製造プロセス、セメント製造プロセス、窯業、廃棄物処理場などではエネルギーの使用量が多く、それだけ多くの排熱が集中して生じている。これらの排熱を何らかの手法により再利用できれば、一次供給エネルギーの利用効率が高くなり、結果として化石燃料のエネルギー消費量を削減できる。

工業プロセスや廃棄物処理場において、排熱を再利用する試みは古くから行われており、例えば冷却系の蒸気配管を利用してタービンを回し発電するシステムはその効率も高く、多くの場所で実用化されている。そのほかにも断熱材を用いて系から放散する熱を抑制する工夫や排熱をヒートパイプにより輸送し、蓄熱して再利用するなどの手法も開発されている。また、最近ではスターリングエンジンな

どにより、排熱を直接機械的エネルギーに変換して再利用する技術も検討されている。

熱電発電はゼーベック効果を有する素子を利用して熱を直接電力に変換する技術であり、首記の手法と共に排熱の再利用が可能な技術として知られている。熱電発電はその原理上、可動部がなく素子の両端に生じた温度差に応じた起電力が得られることから、メンテナンスが容易で小規模な排熱から大規模な排熱まで一定の効率で運転可能という優れた特徴がある。反面、変換効率がタービンによる発電やスターリングエンジンよりも低く、また、現状では発電モジュールのコストも高いことから、導入検討の事例はまだまだ少ない。また、既存のプロセスに熱電発電デバイスを組み込もうとしても、既に、その他の排熱利用機構が組み込まれていて熱電発電デバイスの適用箇所が実際にはなかなか見出しにくいことも、熱電発電の導入が増えてこない原因のひとつであると思われる。つまり、熱電発電を実用化していくためには、まずは適用しようとするプロセスが他の排熱再利用技術と比較して本当に技術的、経済的に

優位なサイトであるのかということを見極めることが必要である。

熱電発電の実用化が進まないもうひとつの要因は、用途に応じた発電デバイスの開発例に乏しいことが挙げられる。大学等の研究機関による熱電変換素子の開発は活発であるが、素子を集積して、実際に発電可能なデバイスに組上げる技術についてはその例も決して多いとは言えず発展途上の状況である。排熱に適用可能な熱電発電デバイスの開発は基本的にこれをビジネスとして成立させる企業の役割と考えられるが、ビジネスを成立させるための具体的な市場が明確になっていないことが、デバイス開発に対する投資を妨げているように思われる。

このような背景の中、当社では自社所有の工業炉を利用して熱電変換による発電実証試験を2009年より試みてきた¹⁾。そして、発電デバイスの改良、刷新を重ねつつ2015年現在においても試験を継続している。これには熱電変換技術を応用した発電デバイスの出力や耐久性を検証し、また、発電した電力の利用方法を具体的に提示することにより、数多くある排熱利用技術のひとつとしてのメリットを明確に示すという目的がある。本報では主に2014年度に自社工場内にて実施した実証試験について報告する。

2. 熱電発電の原理

ある種の材料の両端に温度差をつけると温度差に応じた大きさの電位差がその材料の両端に生じる。この現象はゼーベック効果と呼ばれている。ゼーベック効果の大きさは材料の種類により大きく異なるが、ビスマス・テルル系に代表される金属系の材料が代表的な物質として知られている。熱電発電とはこのようなゼーベック効果を有する材料（熱電変換材料）に温度差を付与し、材料そのものに生じる電位差から電力を得る発電方法である。

熱電変換材料は温度差が生じたときの電位差の向きにより、n型とp型の2種類に分類される。n型の熱電変換材料の片端に熱を加えると、温度が高い部分で伝導電子のエネルギーが高くなり、温度が低い部分に伝導電子が移動し材料内で電位差が生じて、熱起電力が発生する。一方、p型の熱電変換材料は正電荷を帯びた正孔が温度の高い部分から低い部分に移動することで熱起電力が発生する。よって、**図1**に示すようにn型の熱電変換材料とp型の熱電変換材料を直列に接続することにより電流が流れ、これを外部に取り出すことで発電機の働きを発現する。

実証試験ではこれらの熱電変換材料を数mm角の素子状に加工した熱電変換素子を絶縁基板上に緻密に配列し、これらを交互に電極材で接合した熱電変換モジュールを発電の基本装置として利用した。

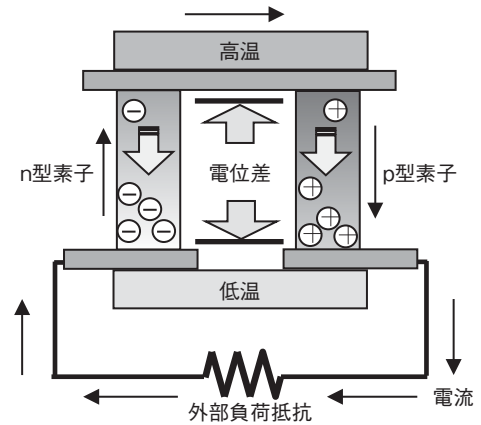


図1 熱電発電の原理

3. 熱電発電デバイス

本実証試験に利用した熱電発電デバイスは、熱源からの熱を受ける受熱板とその背面に設置される熱電変換モジュール、及び、熱電変換モジュールの対向面を冷却する水冷板より構成され、これらを熱源に装着可能な取り合いを有するフレームにより一体化された基本構造となっている。基本構造はこれまでの実証試験に使用したデバイスと同様であるが、界面の熱抵抗低減のために新しいフレーム構造を採用した²⁾。熱電発電デバイスの外観を**図2**に示す。

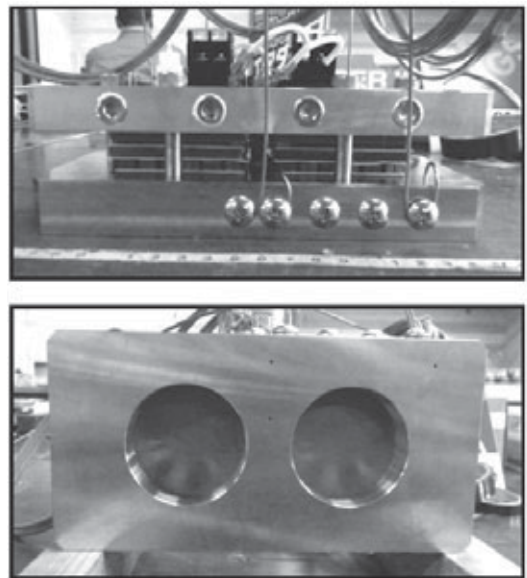


図2 熱電発電デバイスの外観

3.1 熱電変換モジュール

今回の実証試験では受熱面の温度が600℃以上になることが想定されたことから、耐熱性に優れた酸化物系の熱電変換素子を利用した熱電変換モジュール（酸化物モジュール）を受熱板に近接させて使用した。更に設置面積あたりの出力を改善するために、酸化物モジュールの低温側に耐熱性は劣るものの出力性能に優れたビスマス・テルル系の

熱電変換モジュール（BiTe モジュール）を積層したカスケードタイプの熱電変換モジュール（カスケードモジュール）を構成することで、耐熱性と出力性能の両立を図った。本カスケードモジュールの仕様を表1に示す。

表1 カスケードモジュールの仕様

寸法	60 mm×60 mm
素子種類	
酸化物モジュール	n 型：CaMnO ₃ , p 型：Ca ₃ Co ₂ O ₇
BiTe モジュール	n 型, p 型：Bi ₂ Te ₃
出力	
@ 500°C	8.4 W
@ 600°C	11.8 W
@ 700°C	15.7 W

3.2 熱電発電デバイス構成部材

熱電発電デバイスの高温側と低温側に配置される受熱板と水冷板は、より大きな温度差をカスケードモジュールに生じさせるために出来るだけ熱抵抗の小さな部材で構成されることが望ましい。また、これらの部材の接触界面におけるわずかなすき間が界面熱抵抗として熱電発電デバイス内部の熱流を妨げることから、可能な限り密着させることがカスケードモジュールの性能を発揮させるために重要である。

そこで、受熱板には前回の実証試験¹⁾で実績のある高熱伝導率のSiC板を利用した。水冷板には内部に水路を加工したアルミの板材を利用した。受熱板、カスケードモジュール、水冷板それぞれの界面には各部材間の密着性を確保するために銅製の板材を配置した。そして、ステンレス製のフレームを用いてこれらを一体化し、適用する熱源に装着可能な構造とした。各部材の寸法を表2に示す²⁾。また、熱電発電デバイスの仕様を表3に示す。

表2 熱電発電デバイス構成部材の寸法

部材	幅 (mm) × 長さ (mm)	厚さ (mm)
水冷板	200×100	19.0
銅板	60×60	5.0
BiTe モジュール	60×60	2.3
銅板	60×60	7.0
酸化物モジュール	60×60	4.0
SiC 板	62×62	4.0
ステンレスフレーム	200×100	25.0

表3 熱電発電デバイスの仕様

デバイス形式	壁面タイプ
外寸	200 mm×100 mm
装着モジュール	カスケードモジュール ×2 set
出力特性	
@ 500°C	17 W
@ 600°C	24 W
@ 700°C	31 W

4. 熱電発電システム

熱電発電デバイスからはデバイス内に発生した温度差に応じた直流の電力が得られる。この電力を負荷に給電する

ためには太陽光発電などの他の再生可能エネルギーと同様なPCS (Power Conditioning System) を介して負荷に接続する必要がある。今回、構築した熱電発電システムの構成と電力の利用方法について以下に示す。

4.1 熱電発電システムの構成

今回の実証試験では合計13体の熱電発電デバイスを使用した。これら熱電発電デバイスにより得られた電力はDC/ACコンバータを介しAC100Vの負荷に接続可能な発電システムとして運用を図ることとした。また、余剰の電力は蓄電池に充電し、負荷に対して電力が不足する場合には蓄電池より給電可能な構成とした。熱電発電システムの電気系統に関するブロック図を図3に示す。

MPPT (Maximum Power Point Tracking) 方式の制御装置は太陽光発電向けに市販されている汎用の装置を流用し、蓄電池には12V、108Ahの鉛蓄電池を2台接続した。

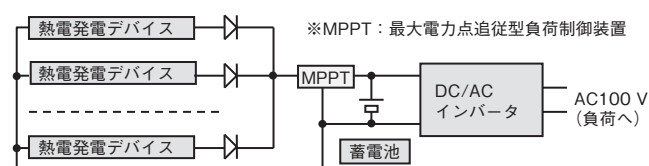


図3 電気系統のブロック図

4.2 電力の利用方法

発電した電力は工場内の照明や本実証試験の説明のために来客用展示コーナーに設置した液晶モニタ等複数の負荷に給電した。それぞれの負荷の運転に必要な電力と稼働時間について、表4にまとめた。

表4 発電システムに接続した負荷

供給場所	負荷種類	出力	稼働時間
事務棟出入り口	照明	70 W	必要なときのみ
事務棟展示コーナー	実証試験用液晶モニタ	50 W	8:15~17:00
事務棟展示コーナー	熱電紹介パネルの照明	55 W	必要なときのみ
食堂前掲示板付近	照明	40 W	夜間のみ

5. 実証試験

実証試験は前回¹⁾同様、当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°Cに保たれている。

この予熱炉側面に設けられ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。熱電発電デバイスに供給する冷却水は周囲で使用中の工業用水配管を分岐させて利用した。装着状況を図4に示す。

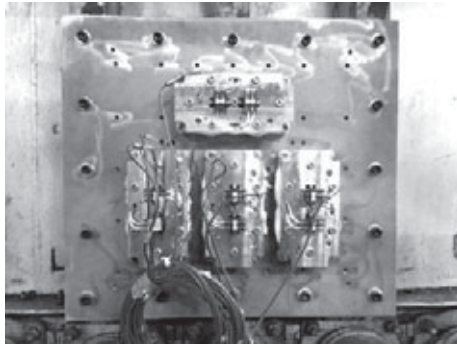


図4 熱電発電デバイスの装着状況

5.1 熱電発電システムの試験結果

熱電発電システムの代表的な運転パターンとして、2015年2月3日から2月10日までの発電出力と負荷の利用電力を合わせて図5に示す。この期間における熱電発電デバイスの最大出力は100 Wで15.2 kWhの電力量を得ることができた。また、同期間に消費した負荷の最大消費電力は90 Wで電力量は9.1 kWhであった。更に本期間における蓄電池への充電電力と蓄電池の電圧を図6に示す。消費電力に対して発電出力が大きかったことから、蓄電池への充電が行われ、蓄電池の充電量の指標となる蓄電池電圧が上昇していることが確認できた。また、発電システムの充電機能が適切に動作していることを確認できた。

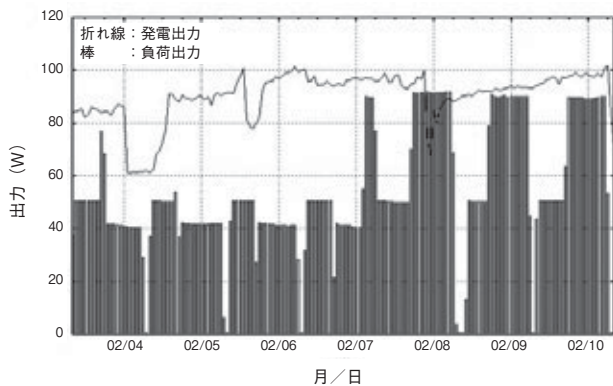


図5 熱電発電システムの運用状況

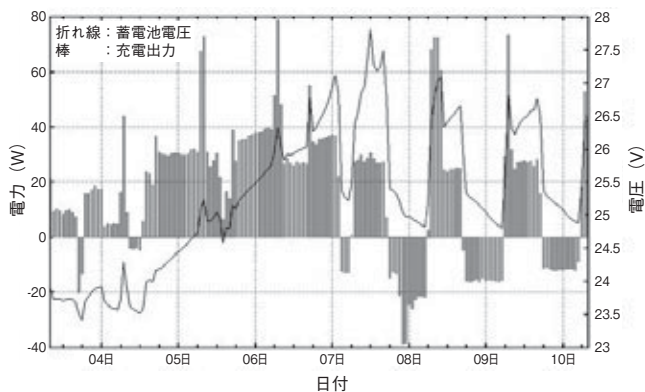


図6 蓄電池の運用状況

本期間に限らず、定常運転中では消費電力量よりも発電電力量のほうが大きく、本発電システムをより大きな負荷に接続できることが確認できた。熱電発電システムで得られた電力をより有効に活用していく上の課題となった。

6. まとめ

前報に引き続き、自社内工業炉を利用して熱電変換による発電システムの第3回実証試験を実施した。新構造の熱電発電デバイスを採用し、蓄電機能付きの熱電発電システムを運転した結果、負荷への電力供給や蓄電池への充電が適切に行われたことを確認した。今後は熱電発電デバイスの長期発電性能を評価するとともに、接続する負荷の量を増やし、発電した電力を無駄なく利用可能な発電システムを構築し、熱電発電の実用化に向けて、本技術の経済性をより向上させていきたい。

参考文献

- 1) 小林, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 60, p.15 (2014)
- 2) Hatakeyama et al: "Demonstration test on the thermoelectric generator for high temperature industrial furnaces", the 32nd international conference on thermoelectrics (2013)

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 新製品開発グループ 主査
熱電変換の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
畠山 和也（はたけやま かずや）
技術開発センター 新製品開発グループ 主査
熱電変換の研究・開発に従事

昭和電線ビジネスソリューション(株)
藤沢 登美雄（ふじさわ とみお）
生産技術部 主査

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・線材ユニット 電線製造部 三重線材課長