

潜熱蓄熱器を有する熱電発電器の最適制御に関する研究

津吉 彰* 藤原 隆太郎**

Optimal control of the thermoelectric generator attached with PCM(phase changing material) accumulator

Akira TSUYOSHI Ryutaro FUJIWARA

ABSTRACT

The energy recovery system of unused thermal energy by using the thermoelectric generator was developed and experimentally evaluated. A thermoelectric generator can be applied for waste heat of an incinerator without a damage of thermal stress. Thermoelectric generating system has not been put to practical use yet because their cost, especially generating modules cost, is still high. In this paper a heat accumulator installed thermoelectric generating system for the batch operated incinerator was proposed and experimentally investigated. Heat accumulator has the potential to reduce cost of thermoelectric generating system by reduction of a capacity of employed thermoelectric generating modules. However optimal control of the thermoelectric generator attached with an accumulator has not been developed yet. The MPPT (Maximum Power Point Tracking) control accelerates the drop in the heat medium temperature by Peltier effect so that it cannot supply maximum electricity from heat stored in the accumulator. We proposed alternative optimal control which electricity could be obtained from an accumulator more effectively than MPPT method.

Keywords : thermoelectric generator, cost, incinerator, unused energy, accumulator

1. はじめに

かねてより、焼却炉などの 200[°C]前後の中温度域の未利用熱について熱電発電を適用することが提案されてきた⁽¹⁾。中小規模の焼却炉などは焼却の目的が主に減量であり、バッチ処理による焼却処理を行っており、熱サイクル疲労の問題から小規模の蒸気タービンを適用することは困難である。熱電発電装置はこのような施設にも適用可能である。しかし、熱電発電を構成する半導体熱電モジュールが今の所高価であり、焼却施設への導入の障害となっている。その解決策として筆者らは蓄熱器を導入することにより、発電器への熱入力を平滑化することにより、熱電発電装置に必要な熱電モジュール数を抑え、コスト低減することを提案した⁽²⁾。蓄熱器を利用した熱電発電の運転の場合、これまで太陽光発電などと同様一般的に使用される最大出力制御 (Maximum Power Point Tracking, 以下 MPPT) 法ではペルチェ効果による蓄熱エネルギーの損失増加により無制御に比べても総発電量が少なくなる場合があることが指摘されている⁽³⁾。そこで本研究ではペルチェ効果による損失を低減した最大効率制御とも呼べる制御法を提案し、その有効性を確認した。

2. 蓄熱器を有する熱電発電システムの意義

2.1 熱電発電器による廃熱利用発電 日本のゴミ処理施設では、一日の処理量が数百トン以上の大規模施設では既に蒸気タービン発電を利用して廃熱回収

が行われているが、中小規模の施設ではゴミ処理の効率化を図るため、大半が一日毎に運転停止を繰り返すバッチ処理と呼ばれる事業形態をとっており、蒸気タービン発電が適応せず、廃棄物発電はほとんど実現されていない。そのような施設においても、熱源の温度変動に対して柔軟な適応性をもつ熱電発電器を適用した場合、熱電発電によるサーマル・リサイクルの実現が可能である。

そこで、本研究での対象熱源は、中小ゴミ処理場で発生する焼却熱 (廃熱源) とした。中小ゴミ処理場では焼却作業時のみ、つまり一定時間に限って間欠的に廃熱は発生する。発生熱量すべてを熱電発電器で賄おうとすると、図 1 のように廃熱のピークに見合った熱電発電器の容量を確保する必要があり、インシヤルコストが大きくなる。

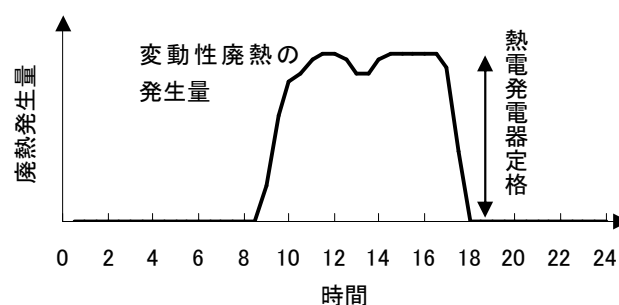


図 1 バッチ処理焼却炉の廃熱発生量の一日の変化と適用する熱電発電システムの定格熱入力

* 電気工学科 教授

** 専攻科 電気電子工学専攻

そこで、蓄熱器を利用することによって図2のように熱電発電機の定格の低減を図る。蓄熱器コストが熱電発電機コスト削減分より安価であればインシヤルコストの低減が可能となる。また、設備全体の稼働率の向上にもつながる。

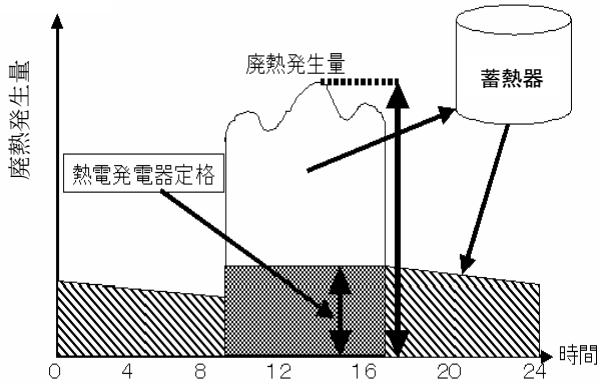


図2 蓄熱器を併用した場合の廃熱発生量の一日の変化と適用する熱電発電システムの定格熱入力

2.2 顕熱蓄熱と潜熱蓄熱 物質に熱が流入すると物質の温度が上昇し、物質から熱を取り出すと物質の温度が低下する。このように物質の温度変化を伴って蓄熱を行うものが顕熱蓄熱である。温度が上昇する過程が蓄熱、低下する過程が放熱である。潜熱蓄熱というのは物質の相変化・相転移に伴う潜熱を利用して蓄熱を行うものである。蓄熱密度が大きい、一定温度付近での蓄・放熱が可能という特長をもっている。顕熱蓄熱と潜熱蓄熱を比較すると、図3に示すように、顕熱蓄

表1 中温度域の潜熱蓄熱材の物性値⁽⁴⁾⁽⁵⁾

材料	組成	融点 (°C)	融解熱 (kJ/kg)
Polyethylene	-	135	209
KOH-NaOH	50-50	170	231
Pentaerythritol	-	188	322
LiOH-NaOH	30-70	210	362
KOH-LiOH	71-29	227	273
NaNO ₂ -NaOH	27-73	239	279
LiNO ₃	-	250	370
NaNO ₃ -NaOH	19-81	258	296
LiCl-LiOH	37-63	262	453
Na ₂ CO ₃ NaOH	7.2-92.8	283	324

熱の場合、熱を引き出すと時間とともに温度が低下する。熱電発電機の出力は熱源の温度差に比例するので、顕熱蓄熱では急激な出力低下が予想される。一方、潜熱蓄熱では相変化が行われている間、一定温度で蓄・放熱を行う。したがって、顕熱に比べ熱源の温度差の低下が小さく、熱電発電機と併用するには潜熱蓄熱器の方が有利であると考えられる。本研究で提案するシステムには潜熱蓄熱器を利用することとした。

蓄熱材選択に当たっては、表1の文献データの中から、相変化・相転移温度として、通常の試験が容易な200[°C]以下のもので、単位体積当たりの潜熱量を考慮した。また経済性を追求するため、試薬ではなく、安価な工業原料が入手しやすい材料を検討した。これらの検討から、融点が170[°C]の水酸化カリウム-水酸化ナトリウム共融塩を選定した。

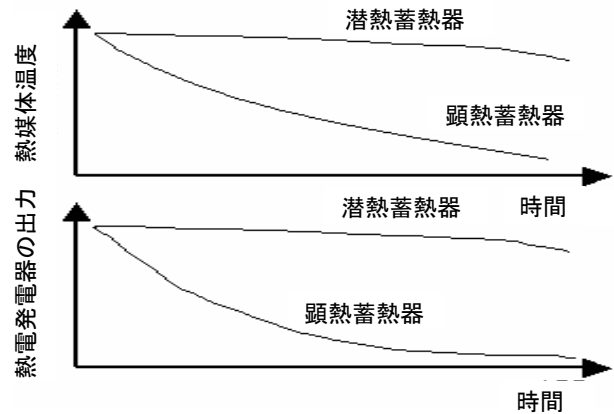


図3 顕熱蓄熱と潜熱蓄熱

3. 熱電発電機の特性的実験的検証

水酸化カリウム-水酸化ナトリウム共融塩を潜熱蓄熱材として製作した蓄熱器を熱電発電機と接続した実験装置の構成を図4に示す。熱媒体加熱装置は電気ヒーターで廃熱を模擬しており、蓄熱材に蓄熱後、ヒーターの電源を切ることにより、蓄熱器に蓄えられた熱エネルギーによる発電という放熱モードで運転が可能となる。ここではまず、放熱モードの実験を行う前に熱電発電機の特性を確認するための実験を行った。図5に結果の一例として、高温側温度250[°C]、低温側入口温度25[°C]の場合を示す。熱電発電機は内部抵抗を有した電源として動作するため、理論的にはV-I特性は右下がりの直線、P-I特性は、上に凸の放物線になるはずであるが、実験で確認した所、V-I特性は途中から傾きがやや緩くなり、P-I特性は若干ピークがブロードなカーブとなった。この原因は熱電発電機が微妙に特性や発電状態の異なる素子が多数直列されているため、マッチング抵抗が1つの値に収束しないためであると推察される。

通常最大出力制御は、太陽電池の出力制御などでも一般的な山登り法により実現される。しかし、本研究で対象とするようなピークが明確でない P-I 特性を有する発電器の最大出力点を探索した場合、瞬時にピークを見つけることができず、広い範囲を探索する傾向が見られた。探索範囲を確認のため各温度条件における、最大出力点探索の範囲を、最大出力制御時に記録した。結果を図 6 に示す。本実験では、探索のパラメータとして、通常用いられる電流、電圧ではなく、抵抗値をパラメータとしている。ここで、抵抗値をパラメータとするのは、電圧、電流は基本的に温度差に比例して増加するため、制御幅となる電圧、電流を一定にすると制御幅の比率が温度低下と共に大きくなり、制御が不安定になる恐れがある。そこで、本実験では適正な制御幅が温度により変化しにくい抵抗値を採用している。下記に示すように放熱運転では、最大出力運転のための抵抗値は熱媒体油の温度低下と共に、減少していく事になるものの、電流値、電圧値の変化より緩やかな変化となっており、制御の安定性は高く、制御パラメータとして適している。

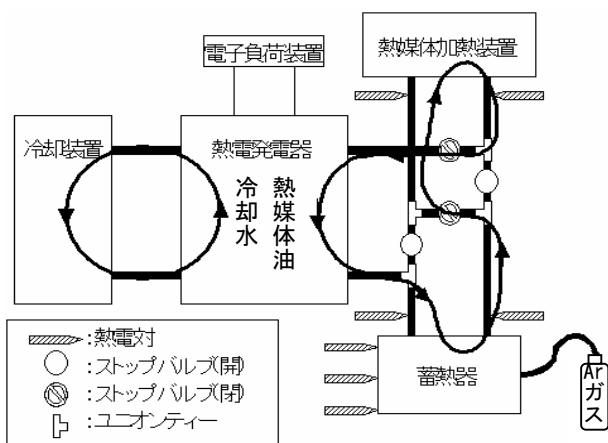


図 4 実験設備の接続図

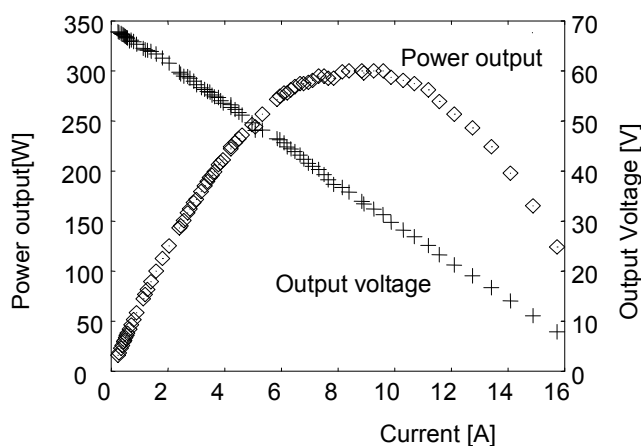


図 5 熱電発電器の V-I, P-I 特性

本発電器で使用しているビスマステル系の熱電半導体の抵抗は、半導体でありながら金属的振る舞いを示し、温度上昇に伴い、抵抗率が增加する。したがって、熱源となる熱媒体油温度の上昇とともに最大出力点探索の抵抗値の中央値も 3.25[Ω]から 4.0[Ω]と増加していることが図 6 より確認された。

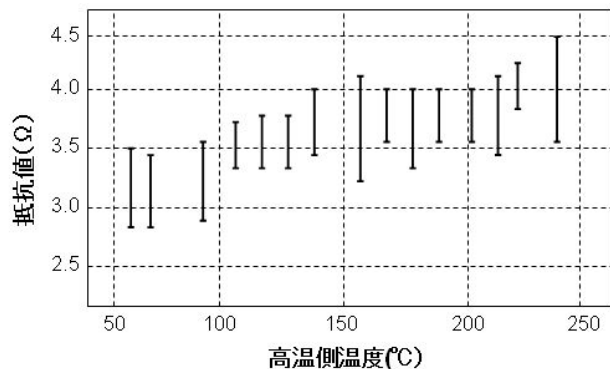


図 6 最大出力制御 (MPPT) 時の最大出力点探索範囲

4. 蓄熱器を有した熱電発電器の最適制御

4.1 最適制御の提案 前章で示したとおり、熱電発電器の定常時の最大出力点を特定するため制御量（ここでは負荷抵抗値）の摂動幅は 20%程度であり、放熱運転モードなど定常時より最大出力点の追跡が困難な場面ではさらに、その範囲は広がると思われる。特に抵抗値が小さくなる方向へ運転点を移行した場合ペルチェ熱の影響により、伝熱量が大きくなるため、限られた蓄熱量からより急速に失われる恐れがあり、最大出力追従制御 (MPPT) 法では最大の電力を取り出すことは出来ないことがわかっている⁽³⁾。

そこで、最大出力制御を改良して、蓄熱器に蓄えられた有限のエネルギーから最も多くの電力を回収することを目標とした最大効率制御を提案する。しかし、最大効率を実現するにも最大効率を示す直接の手法は無いことから、最大効率制御は最大出力制御をベースとして、最大出力点より若干抵抗の高い点で運転を推移させる事を実現した。現時点では抵抗値の加算率は約 10%としているがこの加算率は今後最適化する必要がある。

4.2 実験による検討 ここでは比較のため、最大効率制御、最大出力制御の各制御方法について、放熱運転開始時から負荷抵抗値 R 、発電電力値 W 、熱電発電器の高温部温度 T_h 、低温部温度 T_c の測定を行った。蓄熱設定温度は 220[°C]とし、定常状態に至るまで十分に加熱した後、放熱運転を行った。温度差が 170[°C]となった点を開始点 ($n = 0$) として、式(4.1)を用いて 1 時間の発電電力量 Wh [Wh]を算出した。測定時間刻みを Δt [h]、ある測定点における経過時間を $Time_n$ [h]、発電電力値を W_n [W]とした。 N は温度差が約 170[°C]の測

定点より1時間後の測定点とする。

$$Wh = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{Time_n}^{Time_{n+1}} \frac{W_n + W_{n+1}}{2} \cdot \Delta t dt \quad (4.1)$$

実験は本来同じ条件で実施すべきではあるが、実験装置では冷却水を空冷しており、外気温により冷却水の温度が変動するため、実験条件を統一できていない。熱電発電器に使用する熱電モジュールの発電特性のため、冷却水が低温であるほど発電性能が高い。そのため発電電力の積分値である電力量も当然平均低温部温度 T_{Avec} の影響を受ける。そこでその影響を含めて特性を示すため、平均低温部温度 T_{Avec} と発電電力量 W の関係をもとめ、図7に示した。

現段階で収集したデータでは測定時の温度差条件が異なるため最大効率制御の優位性を全ての温度範囲では明確に示すことはできなかった。しかし、図中で「温度条件共通」と示した低温部温度が近い条件での発電電力量に着目すると、最大効率制御が最大出力制御に比べて高い発電電力量を示す傾向が見られ、最大効率制御の優位性が概ね確認された。

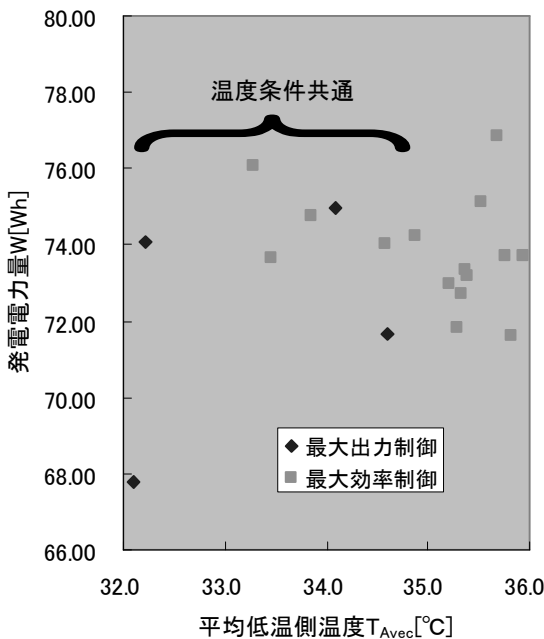


図7 平均低温部温度 T_{Avec} —発電電力量 W

5. 終わりに

エネルギーの有効利用を図るため、未利用となっている廃熱を熱電発電によって電力として回収することを目的として、潜熱蓄熱器を有する熱電発電システムを提案し、システムの評価・考察を行った。

最適な制御方法の検討を目的として、最大効率制御、最大出力制御の各制御方法について、実験により検討した。測定結果より温度差が約 $170[°C]$ となった点を開始点として、開始時の温度差条件を揃えて発電電力量を算出して比較を行った場合、低温部温度に近い

条件での発電電力量に着目すると、最大効率制御が最大出力制御に比べて高い発電電力量を示す傾向が見られ、最大効率制御の有効性が概ね確認された。実験の再現性に不十分な点もあるので引続き、より広い条件での確認は必要である。

蓄熱器を有した熱電発電器はバッチ処理を行う焼却処理施設などへの適用が期待されている。昼間のごみ焼却を行う通常運転時は廃熱の有効利用が目的であるので、最大出力制御を用い、発電すると共に蓄熱器への蓄熱を行う。夜間のゴミ焼却の行われていない時間帯の蓄熱器の放熱運転時には今回提案した最大効率制御を適用することにより回収電力量の増大が期待される。

このような効率の改善によって、熱電発電器の課題となるコストがより一層低減されることにより、潜熱蓄熱器を利用した熱電発電システムの導入が期待される。

参考文献

- (1) T. Kajikawa, et al. "Conceptual design of thermoelectric power generation system using the waste heat of combustible solid waste", 491-496pp, Proc. of 12th ITC(1993)
- (2) 津吉 彰, 松浦 虔士: 「熱電発電への蓄熱器の導入効果」, 電気学 B 部門誌 pp.1699-1705i, 2007.
- (3) 津吉 彰, 道平雅一, 加藤真嗣: 「熱電発電による熱エネルギー回収装置」, 平成 19 年電気学会産業応用部門大会(JIASC07), 1-O7-1, 137-140. pp. 2007.
- (4) 小沢, 神本, その他: 「潜熱蓄熱材料の予備的検討 1」, 電子技術総合研究所彙報, 44 (11,12), 707-724pp, 1980
- (5) 田中, 金成, その他: 「潜熱蓄熱材料の予備的検討 3」, 電子技術総合研究所彙報, 51(7), 469-483pp, 1987