熱電発電への蓄熱器の導入効果

正員 津吉 彰 (神戸市立工業高等専門学校)
正員 松浦 虔士 (大阪大学)

Effect of Introduction of a Heat Accumulator on Performance of Thermoelectric Generation

Akira Tsuyoshi, Member (Kobe City College of Technology)

Kenji Matsuura, Life Member (Osaka University)

When the thermoelectric generator is applied to the intermittently generated waste heat for the waste heat recovery, a heat accumulator enables a thermoelectric generator to reduce a generating cost. Because a heat accumulator stores a part of waste heat generated intermittently so that a thermoelectric generator can operate using the stored heat even while no waste heat is generated. On the other hand, when a thermoelectric generator is operated with heat stored in a heat accumulator, the temperature of heat source drops and causes decrease of generated power and conversion efficiency. So it is necessary to track the maximum point of net power, which is subtracted power required for circulation from gross power generation. In this paper flow rate control for maximum net power tracking of the thermoelectric generation with a heat accumulator is experimentally investigated with a commercially available thermoelectric generator. On the basis of the experimental result we evaluated the effect of introduction of a heat accumulator on performance of thermoelectric generation by use of intermittently generated waste heat on the view point of the rate of operation and generating cost.

キーワード：熱電発電、蓄熱器、サーマルリサイクル、発電コスト

Keywords: thermoelectric generation, heat accumulator, thermal recycle, generating cost

1. まえがき

近年、未利用熱の有効利用、サーマルリサイクルという観点から、熱電発電器を中小規模焼却炉における廃棄物発電に適用しようという試みがなされている⁽¹⁾⁽²⁾。日本のゴミ処理施設を見るかぎりでは処理量200[トン/日]以上の大規模な施設ではすでにスチームタービン発電による廃熱回収が行なわれている。しかし、それ以下の中小規模焼却炉では大半がバッチ処理と呼ばれる一日毎に運転停止を繰り返す業務形態となっており、スチーム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⁽³⁾。そのような施設においても、熱源の温度変動に対し柔軟な適応性を有する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の可能性がある。しかし、熱電発電器の導入にあたっては、その熱電変換効率が高々8% ($ZT=1$ 、 $\Delta T=200K$ の理論値)⁽⁴⁾と低い事に加え、システム構築に多量に必要な熱電発電モジュールが今のところ高価格である事が問題である。そこで、本研究では熱電発電器の設置費用を低減するため、熱電発電器とともに蓄熱器を併用するシステムの提案を行った。本システムでは焼却熱の発生する焼却炉稼働時間だけでなく、蓄熱器に備蓄された熱を利用する事により、24時間連続で熱電発電器を稼働するため、熱電発電器による発電コストが低減される可能性が

ある。本報では蓄熱器を併用した熱電発電器の発電実験を行い、そのシステムにおいて最適な運転方法を実施し、蓄熱熱電発電の評価を行った。さらに、その実験データをもとにシミュレーションにより大規模廃熱回収用熱電発電システムへの蓄熱器導入による発電コスト低減の可能性について検証した。

2. 蓄熱器を熱源とした熱電発電実験の概要

<2.1>実験装置の概要 図1に今回の実験に使用したシステムの概要を示す。今回使用した熱電発電器はウクライ

図1 熱電発電器試験装置

Fig.1 System configuration of testing facilities of a thermoelectric generator employing an accumulator

ナInstitute of Thermoelectricity社製、ALTEC1006Aで、ピスマステル系半導体を使用した熱媒体油加熱、水冷却式のものである。この発電器の特性の概要についてはすでに報告されている⁽⁵⁾。また熱媒体油として(株)松村石油の合成系熱媒体油パーレルサーム400を使用した。その特性の概略は付録に示した。熱媒体油加熱装置ならびに配管等の熱媒体油温度100[℃]から220[℃]の温度差120[K]による顕熱蓄熱容量をヒーターの消費電力から推算すると約22.4[MJ]となった。そこで、熱媒体油の温度が220[℃]で定常状態に至った後、装置内部の電気ヒーターの通電を停止すると、熱媒体油加熱装置は22.4[MJ]の蓄熱量を有する蓄熱器とみなせる。したがって本構成により、蓄熱器を熱源とした熱電発電器の動作が解析可能である。

図2 蓄熱器利用熱電発電の特性

Fig.2. Properties of thermoelectric generation operated with a heat accumulator

図3 蓄熱発電の正味出力、効率

Fig.3. Net power and efficiency of thermoelectric generation with a haet accumulator

<2.2>蓄熱発電の実験結果 まず図1の実験装置において冷却水、熱媒体油を循環させ、熱電発電器に接続された電子負荷装置によって熱媒体油の入口温度が220[℃]の条件で最大出力となる様負荷を調整し、定常運転に到達後、電気ヒーターの通電を停止した。その後、蓄熱器を使用した熱電発電が開始したもののみなし、電気出力と熱媒体油の発電器入口温度等を測定した。結果を図2に示す。発電特性は主に熱媒体油の流量に依存するので、図2では熱媒体油流量が9.0、11.0[リットル/分]の2例の結果を示した。ただし、冷却水の流量は本報告の全ての実験において6.0[リットル/分]とした。また、これらの実験で得られた発電器流体系の圧損に加え、冷却水系では温排水の備蓄利用のために必要な水頭として10[m]を仮定し、冷却水のポンプ効率を80%、熱媒体油のポンプ効率を60%として、冷却水と熱媒体油の循環に必要なポンプ動力を計算し、熱電発電器出力からポンプ動力を減じることにより正味出力を求めた。さらに、熱媒体油の発電器出入口の温度差ならびに流量から熱媒体油から発電器への流入熱流を求め、発電器の効率を計算した。計算した正味出力、効率について、その時間変化を図3に示した。

<2.3>熱媒体油流量を制御した運転 熱電発電器の流量を制御することによって、流量制御しない場合に比べ熱電発電器の正味出力を大きくすることが可能である。その場合、正味出力を最大にする流量は主に熱源となる熱媒体油の入口温度に左右されると思われるので、熱媒体油の入口温度に対し正味出力が最大となる熱媒体油の流量を実験により求めた。結果を図4に示す。熱媒体油の流量を減らすと熱媒体油から熱電発電器への熱伝達率が低下し、熱電モジュールに加わる温度差が小さくなるため発電器の出力が低下する。しかし、熱媒体油の入口温度が低い場合、必要

図4 最適流量、正味出力と熱媒体油入口温度の関係

Fig.4. Optimum flow rate and net power vs temperature of heat transfer medium oil

なポンプ動力が相対的に大きくなるので、発電器の出力低下より、流量を減らすことによって低減されるポンプ動力の方が大きい。そのため、図4に示すように熱媒体油の入口温度の低下とともに最適な流量値が減少している。ただし、図4では熱媒体油入口温度が200[°C]以上の場合に11.0[リットル/分]一定になっているのは使用した発電器の耐圧の問題からの制限によるものであり、120[°C]以下の場合に6.0[リットル/分]一定となっているのは本実験装置の流量調整の下限によるためである。これらは発電器の流量と出力の特性によるものではない。このデータを基に熱媒体油の入口温度に応じて流量を制御すると正味出力の最大点を追跡することが可能になる。そこで、前節と同条件で熱媒体油の入口温度を観測しながら3分ごとに流量を図4に示される最適流量に制御しながら、蓄熱発電を行った。その場合の熱媒体油の入口温度と発電器出力の時間変化を図5に、発

図5 熱媒体油入口温度と発電器出力

Fig.5 Temperature at the inlet and power output of the thermoelectric generator

図6 ポンプ動力、正味出力と正味効率

Fig.6 Power required for circulation, net power output and net efficiency

電器の圧損に基づき計算したポンプの所要動力、発電器の正味出力、ならびに正味の発電効率の時間変化を図6に示した。

<2.4>蓄熱発電の実験のまとめ 本章では熱媒体油加熱装置を顕熱蓄熱器とみなし、熱電発電器により蓄熱器に蓄熱された廃熱を電力に変換する実験について示した。蓄熱器に蓄えられた熱媒体油の温度は時間の経過とともに低下するが、その温度に応じ熱媒体油の流量を制御する事により正味出力を最大にする運転が可能であることがわかった。流量を制御せず、9、11[リットル/分]一定とした場合と流量制御を行った場合について測定電力を時間積分して得られた電力回収量と、熱媒体油の入口温度の時間変化を図7に示した。流量を11[リットル/分]とした場合、熱媒体油からの熱伝達が良好であるため初期の出力は大きいですが、同時に熱媒体油の温度低下が早くなるため、図3に示されるように蓄熱発電開始10分程度で9[リットル/分]の場合より正味出力が小さくなる。結果的に図7に示すように電力回収量も蓄熱発電開始20分程度で9[リットル/分]と逆転している。流量制御した場合、蓄熱発電開始時には大流量で高出力を得ているが、その後徐々に流量を減らすことにより熱媒体油の温度低下に伴う正味出力の急速な低下を抑制し、より長時間にわたる発電が可能となり、正味出力の積分値となる電力回収量が増加している。表1では廃熱回収時間な

図7 電力回収量と熱媒体油入口温度の時間変化

Fig.7 Electricity recovered and temperature at the inlet

表1 流量制御の評価

Table 1 Evaluation of flow rate control

	流量制御あり	流量一定の場合	
		9 [リットル/分]	11 [リットル/分]
廃熱回収に要した時間 [分]	60	55	45
電力への変換効率 [%]	2.29	2.13	1.93

らびに回収電力量から計算した廃熱から電力への変換効率を比較した。流量制御を行うと、流量を11[リットル/分]一定とした場合に比べ、廃熱の回収に必要な時間は30%程度増加するが、廃熱から電力に変換する効率が20%程度高くなる事がわかった。

3. 廃熱回収熱発電電への蓄熱器の適用

<3.1>蓄熱器の導入 廃熱発生源からの熱の流れは蓄熱器が無い場合、図8(a)のようになる。この場合、バッチ式のごみ焼却炉の様に間欠的に発生する廃熱を対象とすれば、廃熱が発生しない間は熱電発電器は休止していることにな

図8 熱電発電器へのエネルギーフロー

Fig.8 Various energy flow models in the thermoelectric generating systems

る。一方、蓄熱器を有したシステムの場合、廃熱が発生している期間は図8(b)の様に一部の熱が熱電発電器の運転に利用され、残りの熱は蓄熱器に蓄熱される。廃熱発生源が休止している期間は図8(c)の様に蓄熱器に蓄られた熱によって熱電発電器が動作する。

<3.2>蓄熱器の導入効果 蓄熱器の導入によって廃熱発生量が熱電発電器と蓄熱器に分配されるので、熱電発電器の設備容量が低減される。熱出力 P [W]の廃熱が T_0 [sec]の間発生し、 T_1 [sec]の間休止するという周期で運転される廃熱発生源に図8(b)の様に蓄熱容量 C_a [J]の蓄熱器と定格出力 P_{teg} [W] (本稿でいう定格とは220℃の熱媒体油を11[リットル/分]、30℃の冷却水を6[リットル/分]供給した場合の最大出

力時を指す)の熱電発電器を併設する場合、蓄熱器に一定の割合($C_a/T_1[W]$)で蓄熱されると仮定するとエネルギーフローの関係から次の式が得られる。

$$P_{teg} = (P - \frac{C_a}{T_0}) \cdot \eta_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η_1 は熱電発電器の定格運転時における正味効率である。一方、蓄熱発電時の正味効率を η_a とすると蓄熱発電による電力回収量は

$$W_a = C_a \cdot \eta_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。したがって、廃熱発生時間 T_0 と休止時間 T_s を通じた1周期の電力回収量 W [J]は

$$W = P_{teg} \cdot T_0 + W_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

図9 蓄熱器容量と熱電発電器設備容量、電力回収効率の関係

Fig.9 Capacity of the thermoelectric generator and efficiency of electricity generation as a function of the capacity of a heat accumulator

となり、熱電発電器による電力回収効率 η は(1)、(3)式より次式で表される。

$$\eta = \frac{W}{P \cdot T_0} = \eta_1 - \frac{C_a}{P \cdot T_0} \cdot (\eta_1 - \eta_a) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここでは熱出力1[MW]の廃熱発生源が8時間稼働、16時間休止の周期で間欠運転するものとし、<2.3>節で示した蓄熱器を有する熱電発電器において流量制御を行いながら蓄熱発電を行った運転データから $\eta_1=3.5$ [%]、 $\eta_a=2.29$ [%]として廃熱から電力への回収効率の算定を行った。すなわち蓄熱器導入量と、熱電発電器の設備容量ならびに廃熱から電力への回収効率の関係をそれぞれ式(1)、(4)より求めた。結果

図10 蓄熱器容量と発電コスト、稼働率の関係

Fig.10 Electricity generation cost and the rate of operation as a function of the capacity of a heat accumulator

を図9に示す。図で示されるとおり、蓄熱器の導入量の増加に伴い、廃熱から電力への回収効率が直線的に低下する。しかし、蓄熱器導入により、廃熱の一部が蓄熱器に蓄熱されるため、廃熱源より熱回収するために必要な熱電発電器の設備容量が低減されるとともに、廃熱源が停止し、熱供給が受けられない期間も蓄熱器に蓄熱された熱を利用して発電することにより熱電発電器の稼働率が向上する事が可能となる。ここでいう熱電発電器の稼働率とは熱電発電器の総発電電力量を(発電器の定格電力)×(経過時間)で除した値である。本研究で対象とする熱源の場合、蓄熱器を利用しなければ、24時間中8時間しか運転されないので稼働率は33.3%となる。蓄熱器導入により熱電発電器の稼働率が向上し、発電コスト低減につながることは予想可能であるが、その効果を試算するために熱電発電器の価格ならびに蓄熱器の導入容量をパラメータとして熱電発電器の稼働率ならびに発電コストを試算した。その結果を図10に示す。ここで、蓄熱器の導入容量については、廃熱出力を1[MW]としてその導入量を示している。参考のため小規模なごみ焼却場(1日当たりゴミ処理量100トン)での廃熱出力を示すと、ごみの発熱量を2000[kcal/kg]⁽³⁾とすると、1日8時間のバッチ処理を行う場合、平均値として29[MW]となる。計算条件については付録に示した。間欠的に発生する廃熱を熱源とした場合、図10に示されるように蓄熱器の導入により熱電発電器の稼働率が向上していることが確認された。同時にコスト面では本試算によれば熱電発電器の価格が1[kW]あたり60万円以上の場合、蓄熱器導入によって発電コストが低減される事が確認された。

4.まとめ

本研究では変動性のある廃熱源を利用する熱電発電器に蓄熱器を導入する効果を評価するため、実験による検討ならびにコスト試算を行った。その検討を通じ、次のような知見を得た。

- (1)蓄熱器を利用して熱電発電器を運転する場合、熱媒体油の流量制御を行うことにより、回収可能な電力量が増加する。
- (2)熱電発電器を用い、間欠的に発生する廃熱から電力を回収する場合、蓄熱器を併用することにより必要となる熱電発電器容量が低減され、発電コストも低減される可能性がある。

最後に本研究で使用した実験装置の準備にご協力いただいた香川修三氏はじめ(株)クボタ技術開発研究所の関係者各位に謝意を表します。

(平成12年2月25日受付,平成12年6月01日再受付)

文 献

- (1) M. Niino, T. Oshima, K. Matsubara: "Research Project on the Effective Use of Untapped Thermal Energy from Garbage Incineration etc", Proc. of the 16th International Conference on Thermoelectrics, pp.539-546 (1997)
- (2) T. Kajikawa, M. Ito, E. Shibuya, N. Hirayama: "Conceptual Design of Thermoelectric Power Generation System Utilizing Heat of Combustible Solid Waste", Proc. on 12th International Conference on Thermoelectrics, pp.491-496(1993)
- (3) たとえば 矢島 敬雅:NTS編「ごみ発電の技術開発動向と実用化」, pp.15(1994)
- (4) たとえば 上村 欣一、西田 勲夫:日刊工業社編「熱電半導体とその応用」, pp.34(1988)
- (5) A.Tsuyoshi et al: "A Study of Commercial Thermoelectric Generation in a Processing Plant of Combustible Solid Waste", Proc. of the 16th International Conference on Thermoelectrics, pp.555-558(1997)
- (6) 日本工業新聞,1998年7月30日記事(1998)
- (7) (社)日本伝熱学会編:「環境と省エネルギーのためのエネルギー新技術大系」, pp.795(1996)
- (8) M.Becker編:Solar Thermal Central Receiver Systems, vol.1, Springer-Verlag, 119 (1986)
- (9) (株)松村石油,バーレルサーム400技術資料(1987)

付録

付1.使用した熱媒体油の諸特性⁽⁹⁾

ここでは本研究で使用した熱媒体油((株)松村石油製バーレルサーム400)の諸特性の概要を示す。主成分は合成系芳香族炭化水素であり、常圧下、液相専用での使用が推奨されている。最低使用温度-10[℃]、最高使用温度370[℃]、引火点210[℃]、沸点390[℃]で、膨張係数は 8.6×10^{-4} である。定圧比熱、熱伝導率の温度特性を図付1に、密度、動粘度の温度特性を図付2に示す。

付2.蓄熱器を併用した熱電発電における発電コスト試算の計算条件

ここでは蓄熱器を併用した熱電発電において発電コスト

図付1 パーレルサーム400の比熱と熱伝導率

Fig.A1. Specific heat and thermal conductivity of Barrel Therm400

図付2 パーレルサーム400の密度と動粘度

Fig.A2. Density and kinetic viscosity of Barrel Therm400

を試算するための計算条件について示す。蓄熱器導入効果について概算することが目的であるので、簡単のため発電コストは熱電発電器、蓄熱器のコストを設備寿命20年間で発電する全電力量で除した値として、廃熱の利用コスト、その他のコストは検討対象外とした。廃熱は1日当たり8時間一定値で発生し、その後16時間廃熱の発生は無いものとし、その周期で20年間運転するものとした。試算に用いた熱電発電器、蓄熱器の単価ならびに特性については以下に示す。

1. 熱電発電器単価 本研究で対象とするような200[°C]前後の廃熱を利用する熱電発電器は現在も国内外で数社が研究開発中である。その中で開発目標値を示した例⁽⁶⁾があるのでそれを参考に50[万円/kW]を基準に50,60,70,80[万円/kW]の価格に設定した。ただし、単価は単位正味出力あたりの価格で表している。

2. 蓄熱器単価 蓄熱器には潜熱蓄熱、顕熱蓄熱やそれらを併用したものがあるが、今回実験に使用した作動媒体である熱媒体油を顕熱蓄熱材として使用すれば蓄熱材との熱

交換を要しないので理想的である。しかしながら、熱媒体油の価格は比較的高価であるので、試算では安価な固体蓄熱材を併用する方式を採用した。安価な固体蓄熱材としてコンクリートやレンガなどを採用⁽⁷⁾する事も考えられるが、200°Cを越える温度域で試験実績のある碎石⁽⁸⁾を利用することにした。この場合、蓄熱器は蓄熱容器ならびに固体蓄熱材となる碎石、熱媒体油、配管からなり、いずれもその価格は蓄熱器容量に関係すると考えられる。それぞれの価格を下記のように設定した。

蓄熱容器：20,000[円/m³]

碎石：40,000[円/m³]=16,700[円/ton]

熱媒体油：300,000[円/m³]

配管：10[m³]毎に60,000[円/m³]

3. 熱電発電器の特性 実験結果に基づき、熱媒体油入口温度220[°C]の際の正味の発電効率 η_1 を3.50 [%]とし、蓄熱発電時の平均発電効率 η_a を2.29[%]とした。

4. 蓄熱器の特性 蓄熱器の内部を体積比で碎石：熱媒体油=4：1で構成すると仮定し、それぞれの比熱、密度に基づき蓄熱密度は236[MJ/m³]とした。

津 吉 彰

(正員)1961年9月30日生。1986年3月大阪大学大学院修士課程修了。同年4月神戸市立工業高等専門学校講師、1992年同助教授となり現在に至る。熱電発電などエネルギー変換や風力発電、太陽電池、燃料電池といった分散電源の制御に関する研究に従事。IEEE会員。

松 浦 虔 士

(正員)1938年1月1日生。1962年3月大阪大学大学院修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。1977年1月大阪大学工学部助教授、1988年3月同教授。1998年4月同学大学院工学研究科教授。工学博士。電気エネルギーの発生、伝送、変換、制御に関する研究に従事。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

—A 15 分散電源—

質 疑

座長 斎藤 浩海

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

Q：蓄熱器の代わりに二次電池などで電力貯蔵を行えば、提案するシステムと同様の機能を実現できるのではないか？

A：電力貯蔵装置を用いる場合、熱電発電機の規模を大きくする必要がある。ただし、現状では熱電発電モジュールが高価であるため、熱電発電機の規模を大きくすることは経済的に得策ではないので、蓄熱器を併用する提案システムのほうがよい。

2. 著者に照会したい座長コメント

蓄熱発電時の正味出力は、図3の実験結果に示されているとおり、時間とともに減少しております。蓄熱発電の利用形態に依存すると思いますが、この正味出力を一定化あるいは可制御にする必要はないのでしょうか。電力を安定に供給できることが電源に要求される重要な能力と考えますので、蓄電発電時の正味出力も調整可能であることが望まれると思います。

応 答

津吉 彰（神戸市立工専）

松浦 虔士（大 阪 大）

「著者に照会したい座長コメント」への回答

ご指摘のとおり、蓄熱発電より回収した電力の品質は重要な問題です。大規模な蓄熱発電の場合、蓄熱槽にパーティションを設け、各槽の蓄熱容量を適宜監視しながら、需要電力に見合う発電を行うことや、潜熱蓄熱器を用いて正味出力の一定化を図ることも技術的には可能です。本論文では、小規模な蓄熱器による実験結果をベースに評価を行ったため、蓄熱発電時の電力の制御性にまでふみこんだ検討には至っておりません。この点は、蓄熱器の熱利用手法とからみ、複雑な問題ですが、今後取り組むべき課題と考えられます。