



熱電発電システムの冷却性能向上手法

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): Thermoelectric module, Water cooling, Power saving technology, Drive method 作成者: 中島, 達哉, 石川, 敏嗣, 奥, 将俊, 田島, 大輔, 林, 則行, Nakashima, Tatsuya, Oku, Masatoshi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5556

熱電発電システムの冷却性能向上手法

中島 達哉^{a)}・石川 敏嗣^{b)}・奥 将俊^{c)}・田島 大輔^{d)}・林 則行^{e)}

Improvement Method of Cooling Performance in Thermoelectric Generation System.

Tatsuya NAKASHIMA, Toshitugu ISHIKAWA, Masatoshi OKU,
Daisuke TASHIMA, Noriyuki HAYASHI

Abstract

The problem of energy self-sufficiency rate decreases have occurred because in Japan that rely most of the energy consumed in imports from overseas. So the use of the unused energy to increase the energy self-sufficiency rate is noted now. Heat exhaust that is included in the unused energy is generated in various places of personal belongings such as cars and factories, air-conditioning. There is a thermoelectric generation using the thermoelectric generator that generates power by utilizing a temperature difference in the method for utilization of heat exhaust. In thermoelectric generation system, it is necessary to be circulated by pump a large amount of water to generate temperature difference required for generation. However, circulating by pump consumes a large amount of power. Therefore, in this study, in order to reduce the cooling power and cooling water consumed in the thermoelectric generation system, we subjected two studies on the cooling system method of operation of a thermoelectric generation module to be used for power generation. The first is a "Combined operation" by the combination of the two method "Intermittent operation" and "Adjustment of voltage operation of the cooling system in the thermoelectric generating system. The second is improvement of cooling performance due to the use of tank in cooling system of thermoelectric generation system.

Keywords : Thermoelectric module, Water cooling, Power saving technology, Drive method

1. はじめに

現在、日本において消費されるエネルギーの大半を支えているのが石油資源である。しかし現在、「石油資源の枯渇」や「産油国の情勢不安」「世界的な石油需給バランスの崩壊」などの問題が生じている。日本は1973年の第一次オイルショックを経験し、省エネルギーを推進すると共にエネルギー供給を安定化させるために石油依存度を低下させ、原子力や天然ガスなどを導入した。図1.1に一次エネルギー国内供給の推移を示す。現在の石油依存度は44.3%と第一次オイルショックの頃の77%に比べるとかなり低減している。しかし天然ガス(24.5%)、石炭(23.4%)などの依存度も高くなっており、化石燃料全体の

依存度は依然92.2%と極めて高い水準となっている。^[1] また、日本では石油だけでなく第一次オイルショック後に導入された天然ガスや原子力発電の燃料となるウランにおいてもそのほぼすべてを海外からの輸入で賄っているため、2012年のエネルギー自給率はわずか6%となっており、諸外国と比べても低い数字となっている。^[2]

そこで最近はその解決法として未利用エネルギーの利用が注目されている。未利用エネルギーとは、河川水・下水等の温度差エネルギー（夏は大気よりも冷たく、冬は大気よりも暖かい水）や、工場等の排熱など、今まで利用されていなかったエネルギーの総称である。これらをヒートポンプ技術等の活用、また、地域の特性に応じて、熱の利用を高温域から低温域にわたる各段階において、発電用途も含め、無駄なく組み合わせるエネルギーシステムの整備により、民生用の熱需要に対応させることが近年可能となっている。未利用エネルギーの1つである排熱は工場をはじめ、変電所や車(410°C)、冷暖房設備など様々な場所で発生しており、その多くは利用されることなく捨てられている。しかし排熱には給湯や暖房、スターリン

- a) 電気電子工学専攻 大学院生
- b) 電気電子工学科 学部生
- c) 農学工学総合研究科 大学院生
- d) IR 推進機構 特任助教
- e) 工学教育研究科 教授

グエンジンなど様々な利用法が存在する。また、その中の1つにゼーバック効果を利用して熱電発電モジュールの高温側温度と低温側温度との温度差から電気を作り出す熱電発電がある。熱電発電には一般的なタービンを用いた発電機と比較して以下に示すように多くの利点がある。

- ・回転部分がないため定期的な検査が義務付けられておらず、その運転において資格を必要としない
- ・省スペース
- ・熱電発電素子の研究が進み、高効率化してきている
- ・無騒音、無振動、無排出

しかし、温度差を利用して発電を行うためには高温側温度の熱源となる排熱の他にも高温側温度と低温側温度の温度差を増加させるために低温側の冷却を行う必要がある。一般的にはこの冷却は高い冷却性能を求め、冷却水を用いた水冷式の冷却が用いられている。水冷式は冷却法としては高い冷却性能を持つ反面その運転には多くの電力を消費してしまう。そのため高効率で冷却を行い、発電端効率を増加させるのと同時に送電端効率を低下させることが問題となっている。

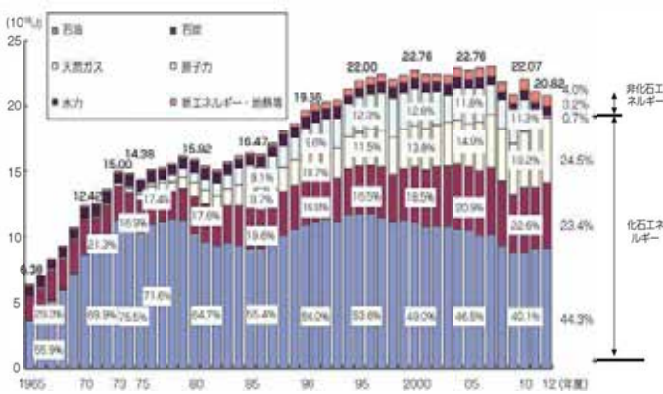


図 1.1 一次エネルギー国内供給の推移 [1]

Fig. 1.1 Passage in domestic primary energy supply

2. 研究目的

著者らは排熱をはじめとする未利用エネルギーと熱電発電モジュールを用いた熱電発電試験を行っている。しかし、現在使用しているシステムでは冷却ポンプの消費電力が熱電発電モジュールの発電電力よりも大きいために冷却ポンプの消費電力を発電電力で賄うことが出来ず、同時に大量の冷却水を使用している。図 1.2 は冷却ポンプが使用している消費電力と熱電発電モジュールが発電する発電電力の関係を示している。図 1.2 より冷却ポンプの消費電力が発電電力を大きく上回っていることが分かる。

そこで本研究では熱電発電システムが消費する冷却用電力を低減し、使用する冷却水の削減を行うために発電に使用する熱電発電モジュールの冷却系の運用方法について2種類の研究を行った。

1つ目は熱電発電システムにおける冷却系の「間歇運転」と「印加電圧変化」の2つの手法を複合した「複合運転」

である。間歇運転とは熱電発電モジュールの冷却に使用するポンプを一定のサイクルで運転・停止を繰り返す間歇運転を行うものである。次に印加電圧変化運転とはポンプに電力供給する際の印加電圧を変化させる手法である。そして複合運転とは前述の間歇運転と印加電圧変化運転の2つの手法を複合させた方法である。そしてこれらの実験結果よりポンプの複合運転によって熱電発電システムで消費される電力と冷却水の流量の削減量を評価した。

2つ目は熱電発電システムにおける冷却系のタンクの設置による冷却性能向上である。この実験ではポンプの間歇運転を行う際にポンプの運転中に熱電発電モジュールの冷却に使用した冷却水を一度タンクに溜めて、ポンプの停止中にタンクの冷却水を用いて熱電発電モジュールの冷却を行う。そして、実験結果より熱電発電システムの冷却系にタンクを設置したことによる熱電発電システムで消費される電力と冷却水の流量の削減量を評価した。

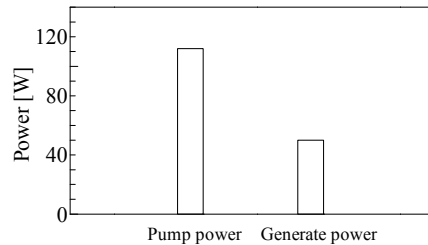


図 1.2 発電電力と冷却水ポンプ消費電力の関係

Fig. 1.2 Relation of generate power and pump power

3. 複合運転による冷却性能向上

3.1 実験装置

実験装置の概略図を図 3.1 に示す。本実験では発電に熱電発電モジュール(高木製作所製 SB-100B)を用い、熱電発電モジュールの冷却にポンプ(寺田製作所製 SL-52S)、熱電発電モジュールの加熱にヒーター(坂口電熱株式会社製 SCR-SQ)、冷却水流量測定に流量計(Savant Electronics Ins 製 DigiFlow6710M)を使用した。また、熱電発電モジュールからの出力電力を調整するために電子負荷(菊水電子工業株式会社製 PLZ664WA)、熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力を測定するためにパワーアナライザー(日置電機株式会社製 3390)、電圧を調整するためにスライダック(株式会社東京理工舎製 RSA-5)を使用した。そして、本実験では図 3.1 のように組み立てた。

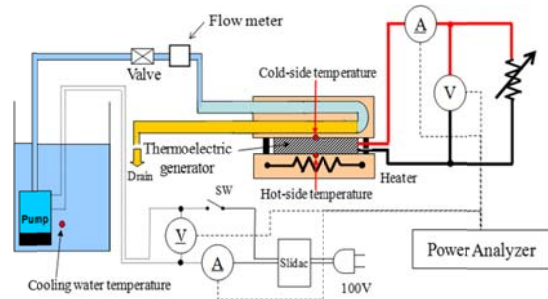


図 3.1 実験装置の構成

Fig. 3.1 Experimental setup

3.2 実験方法と実験条件

本実験は以下の手順で行った。

- ①熱電発電モジュールの下面をヒーターで加熱する
- ②熱電発電モジュールの上面に設置した冷却器にポンプで市水(21.3°C)を循環させて上面を冷却する。
- ③パワーアナライザーを用いてポンプの電流と電圧を測定することでポンプの消費電力・熱電発電モジュールの電流と電圧を測定することで熱電発電モジュールの出力電力を測定する。

図 3.2 にポンプの運転サイクルを示す。ポンプは図 3.2 に示すように 60 秒を 1 サイクルとして、1 サイクルの内 X 秒間 ($X=0\sim 50$) 秒間を停止、残りの $(60-X)$ 秒間を運転するサイクルを 5 回繰り返して行った。また、負荷抵抗を熱電発電モジュールからの出力電力を最大にするためにヒーターを 150°C に設定したときの熱電発電モジュールの内部抵抗と同じ $19.41\ \Omega$ とし、ヒーターの設定温度を熱電発電モジュールの耐熱温度を考慮して 150°C に設定した。そしてポンプの停止時間 X を 0, 10, 20, 30, 40, 50 秒とした。また、それらの停止時間においてポンプの印加電圧を 100, 90, 80, 70, 60V に設定して、それぞれ実験を行った。

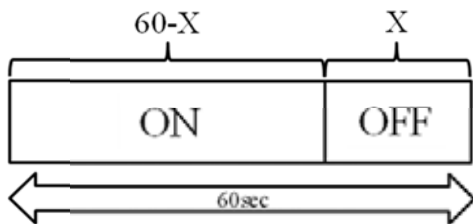


図 3.2 運転サイクル

Fig. 3.2 Cycle of operation

3.3 実験結果

本実験で測定された熱電発電モジュールの高温側温度と低温側温度を図 3.3 に示す。

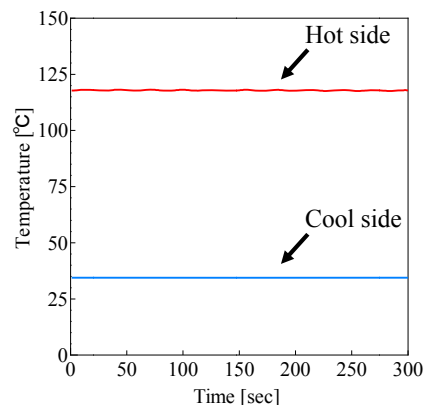
図 3.3 (a) では停止時間が 0 秒、印加電圧 100V。つまりポンプの運転方法を変更していない状態であるため、この実験結果を複合運転実験の温度における基準とする。また、この時ヒーター温度の設定温度 150°C に対し高温側は 117.9°C 低温側は 34.5°C となり、その温度差の平均は 83.4K となった。

まず複合運転を行う場合と行わない場合を比較する。図 3.3 (b) は印加電圧 80V、停止時間 30 秒の複合運転の温度の実験結果である。図 3.3 (b) を複合運転を行わない実験結果である図 3.3 (a) と比較すると高温側温度にあまり大きな違いは見られない。しかし複合運転を行ったことによりポンプの停止中は熱電発電モジュールの低温側の冷却を行わなかったために低温側温度が上昇し続け、 27.5°C 上昇した。そして、この実験条件に置ける高温側と低温側の温度の時間平均の差は 70.9K となった。

次に、複合運転において停止時間の変化に伴う温度の変化の比較を行う。図 3.3 (c) は印加電圧 80V、停止時間

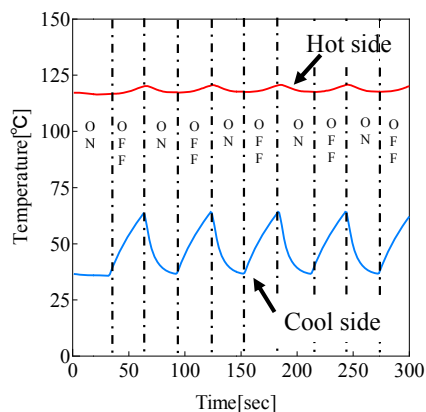
50 秒の複合運転の温度の実験結果である。図 3.3 (c) を印加電圧 80V、停止時間 30 秒の複合運転の実験結果である図 3.3 (b) と比較すると高温側温度に大きな違いは見られない。しかし停止時間を 30 秒から 50 秒に増加させたことによりポンプの停止中の低温側温度が更に上昇し続け、 33.6°C 上昇した。そして、この実験条件に置ける高温側と低温側の温度の時間平均の差は 52.0K となった。これは停止時間を増加させることで熱電発電モジュールの低温側の冷却時間が減少してしまったためであると考えられる。

次に、複合運転において印加電圧の変化による温度の変化を比較する。図 3.3 (d) は印加電圧 60V、停止時間 30 秒の複合運転の温度の実験結果である。図 3.3 (d) を印加電圧 80V、停止時間 30 秒の複合運転の実験結果である図 3.3 (b) と比較すると高温側温度に大きな違いは見られない。また、低温側温度の波形もほぼ同じような形を描いている。しかし印加電圧を 80V から 60V に低下させたことにより、低温側温度は全体的に増加した。なお、今回の実験条件において低温側温度はポンプの停止中に 24.5°C 上昇し、高温側と低温側の温度の時間平均の差は 63.0K となった。この理由としてポンプの印加電圧を減少させたことによりポンプを運転している間に流れる冷却水の流量が恒久的に減少してしまったためであると考えられる。



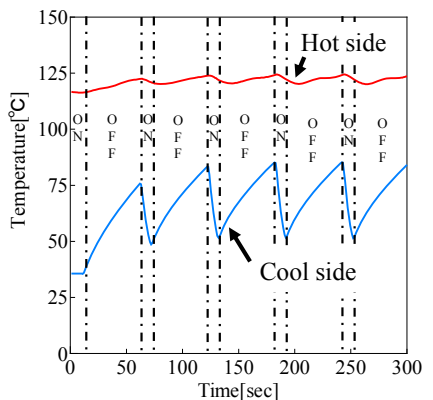
(a) 停止時間 0sec, 印加電圧 100V

(a) Stop time 0sec, voltage 100V

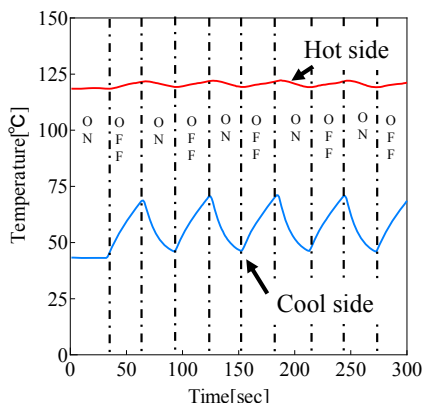


(b) 停止時間 30sec, 印加電圧 80V

(b) Stop time 30sec, voltage 80V



(c) 停止時間 50sec, 印加電圧 80V
(c) Stop time 50sec, voltage 80V



(d) 停止時間 30sec, 印加電圧 60V
(d) Stop time 30sec, voltage 60V

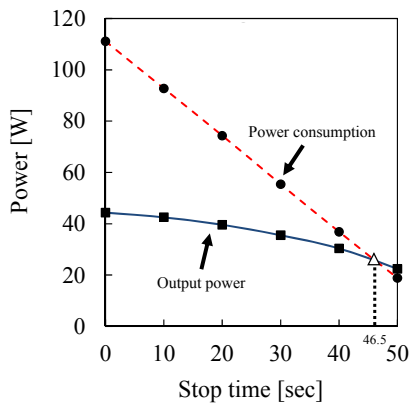
図 3.3 実験結果 (温度)

Fig. 3.3 experimental result (Temperature)

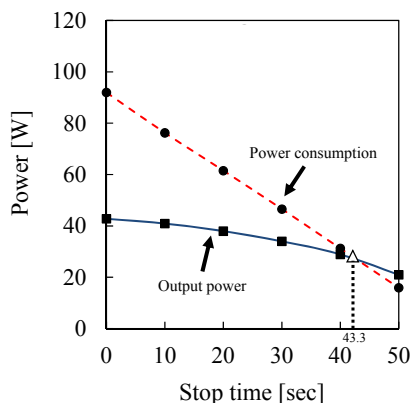
図 3.4 に 熱電発電モジュールからの出力電力, ポンプの消費電力の平均を示す. 図 3.4 (a) によるとポンプの印加電圧が 100V のとき, 停止時間を増加させるにつれて熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力は共に減少したことがわかる. また, このとき消費電力の減少量と比べると出力電力の減少量は緩やかであり, 停止時間の増加に従って消費電力と出力電力の差が減少し, 停止時間が 46.5 秒の時にその大きさが逆転する結果となった.

次に, 図 3.4 (b) によるとポンプの印加電圧が 80V のとき停止時間を増加させるに従って熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力は共に減少することがわかる. また, このとき消費電力の減少量と比べると出力電力の減少量は緩やかであり, 停止時間の増加に従って消費電力と出力電力の差が減少し, 停止時間が 43.3 秒の時にその大きさが逆転する結果となった.

そして図 3.4 (a) と図 3.4 (b) を比較すると, 熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力は共にポンプの印加電圧を減少させると全体的に減少した. これらは熱電発電モジュールの出力電力が高温側温度と低温側温度の温度差に依存しており, 本実験において複合運転を行ったことによりその温度差が減少してしまったためであると考えられる.



(a) 印加電圧 100V
(a) Voltage 100V



(b) 印加電圧 80V
(b) Voltage 80V

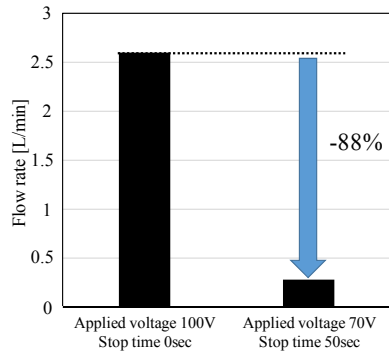
図 3.4 実験結果 (電力)

Fig. 3.4 experimental result (Power)

図 3.5 に複合運転を行う際, ポンプの消費電力に対して得られる熱電発電モジュールの出力電力が最大となる印加電圧 70V, 停止時間 50 秒の場合の冷却水の流量とポンプの消費電力と熱電発電モジュールの出力電力の比較をそれぞれ示す.

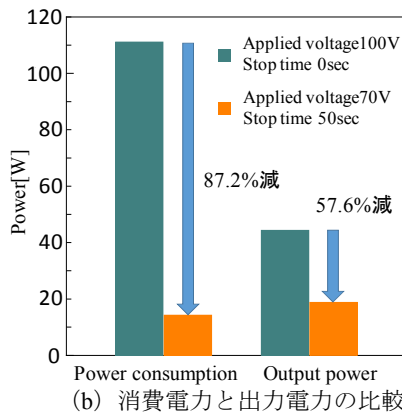
図 3.5 (a) によると, 冷却水の流量は複合運転によって 88%減少することが分かる. これはポンプの印加電圧を減少させたことによってポンプが流すことのできる冷却水の流量が減少したこと, 並びにポンプを停止させたことで冷却水を流す時間が減少したためであると考えられる.

図 3.5 (b) によると複合運転を行うことによってポンプの消費電力は 87%減少することがわかる. これはポンプの印加電圧を減少させたことにより, ポンプの運転中の消費電力が減少し, 尚且つポンプを停止させることによって運転時間そのものを減少させたためであると考えられる. 一方で熱電発電モジュールの出力電力もまた 58%減少した. これは複合運転を行ったことにより冷却水の流量が減少し, 熱電発電モジュールの低温側温度が変動してしまい, 高温側との温度差が減少してしまったためであると考えられる.



(a) 冷却水の流量の比較

(a) Comparison in flow rate of cooling water



(b) 消費電力と出力電力の比較

(b) Comparison in power consumption and output power

図 3.5 実験結果の比較

Fig. 3.5 Comparison in experimental result

4. 冷却系のタンクの設置による冷却性能向上

4.1 実験装置

実験装置の概略図を図 4.1 に示す。本実験では発電に熱電発電モジュールを用い、熱電発電モジュールの冷却にポンプ、熱電発電モジュールの加熱のためにヒーター、冷却水流量測定のために流量計を使用した。また、熱電発電モジュールからの出力電力を調整するために電子負荷、熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力を測定するためにパワーアナライザー、電圧を調整するためにスライダックを使用した。そして、本実験では図 4.1 のように組み立てた。

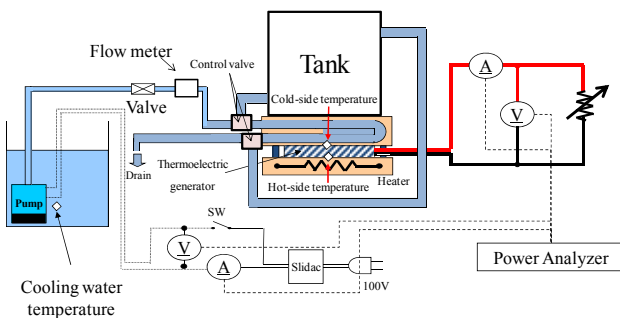


図 4.1 実験装置の構成

Fig. 4.1 Experimental setup

4.2 実験方法

4.2.1 冷却系のタンクの設置による効果

本実験では図 4.1 の実験装置を用いて第 3 節の図 3.2 に示す運転サイクルでポンプの间歇運転を行った。ただし本実験の場合はポンプの運転中に熱電発電モジュールの冷却に 1 度使用した冷却水を排水せずにタンクに溜め、その冷却水をポンプの停止中にもう一度冷却器に通すことで再び熱電発電モジュールの冷却に使用して、その後排水した。そしてその際の熱電発電モジュールの温度を測定した。また、電子負荷とポンプの各電流・電圧をパワーアナライザーで測定することで熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力を測定した。実験条件はポンプの停止時間を 40, 45, 50 秒とし、ヒーターの設定温度を安全性を考慮して 150℃とした。そして出力電力を最大にするために電子負荷の抵抗はヒーター設定温度が 150℃の時の内部抵抗と同じ 19.4Ω に設定した。

4.2.2 停止時間分割法

図 4.2 に本実験における運転サイクルの分割法を示す。本実験では第 4.2.1 節の場合と同様に、図 4.1 の実験装置を用いて同じ実験条件で间歇運転を行った。ただし、本実験の場合はポンプの運転サイクル中の停止時間を図 4.2 に示すように運転時間と停止時間を複数に分割して運転を行った。そしてその際の熱電発電モジュールの低温側温度を測定した。また、電子負荷とポンプの各電流・電圧をパワーアナライザーで測定することで熱電発電モジュールの出力電力とポンプの消費電力を測定した。

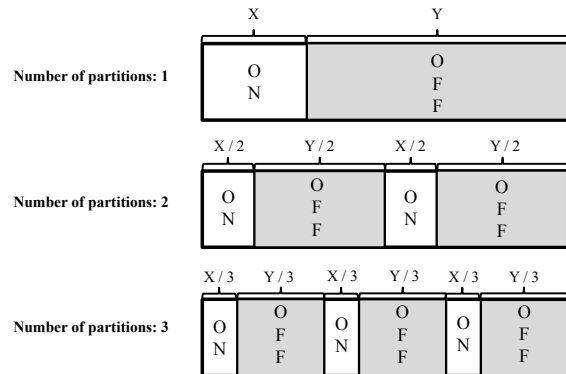


図 4.2 運転サイクル

Fig. 4.2 Cycle of operation

4.3 実験結果

4.3.1 冷却系のタンクの設置による効果

図 4.3 に停止時間 40 秒における熱電発電モジュールの高温側温度及び低温側温度、図 4.4 に停止時間 40 秒における熱電発電モジュールの出力電力を示す。

図 4.3 より、冷却系にタンクを用いた場合、高温側温度にはあまり差が生じていないことが分かる。しかし低温側温度についてタンクを用いる場合と用いない場合を比較すると、タンクを用いる場合の低温側温度の変動が

37K であるのに対してタンクを用いることで 25K に抑制することが出来ている。そして図 4.4 より熱電発電モジュールの出力電力を比較すると、ポンプの停止中にタンクを用いない場合は出力電力が 17.2W まで減少しているのに対してタンクを用いると、25.8W までの減少に抑えていることが分かる。これらは冷却系にタンクを組み込むことによって一度冷却に使用した水をポンプの停止中に再度冷却に使用することが出来るためにポンプの停止中の低温側温度の上昇を抑制することが出来、出力電力の減少の抑制に繋がったと考えられる。

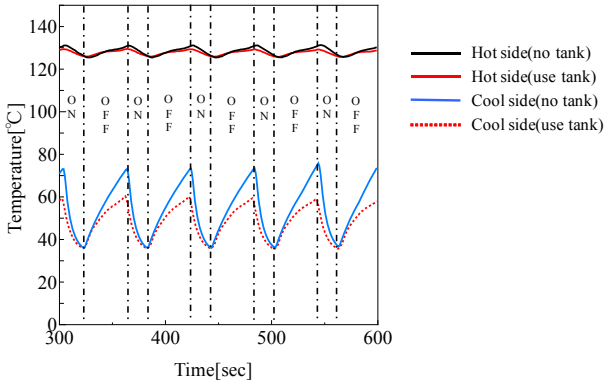


図 4.3 実験結果 (温度)
Fig. 4.3 experimental result (Temperature)

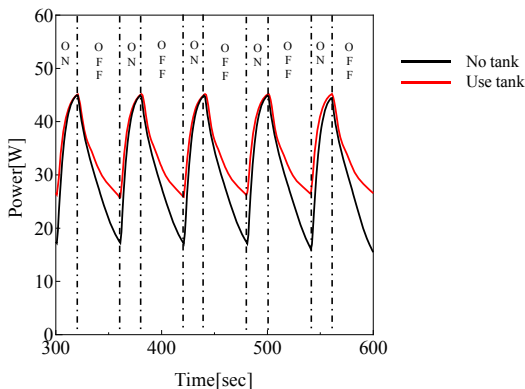


図 4.4 実験結果 (出力電力)
Fig. 4.4 experimental result (Output power)

図 4.5 に各停止時間における 1 秒あたりの熱電発電モジュールの出力電力の平均、図 4.6 に各停止時間における 1 秒あたりのポンプの消費電力の平均、図 4.7 にポンプが流す冷却水のタンクの有無による流量の違いを示す。

図 4.5 より各停止時間においてタンクを用いることによって熱電発電モジュールの出力電力が増加していることが分かる。この理由としてタンクを用いることで熱電発電モジュールの低温側温度の増加が抑制されたことにより高温側温度と低温側温度の温度差の減少を抑制することが出来たからであると考えられる。また、各停止時間における出力電力を比較するとその増加量は停止時間が 40 秒のときが最も大きく、停止時間の増加に伴って出力電力の増加量、増加率は共に減少している。これは停止時間

の増加に伴ってタンクに溜める水の量が減少したために、タンクの設置による効果が減少したからであると考えられる。そして、図 4.6 より各停止時間におけるポンプの消費電力の平均はタンクの有無によって変化しないことが分かる。また一方で、図 4.7 よりタンクを用いない場合と比較してタンクを用いた場合にポンプが流すことのできる冷却水の流量は 4%減少している。これは今回の実験においてポンプを用いた場合の冷却水は一度冷却器を通してタンクまで汲み上げられており、汲み上げるにあたり必要となるエネルギーをポンプの消費電力の増加ではなく、冷却水の流量を減少させることで単位量あたりの冷却水に掛かるエネルギーを増加させることでまかなっているため、ポンプの消費電力に変化が生じず、冷却水の流量が減少したものと考えられる。

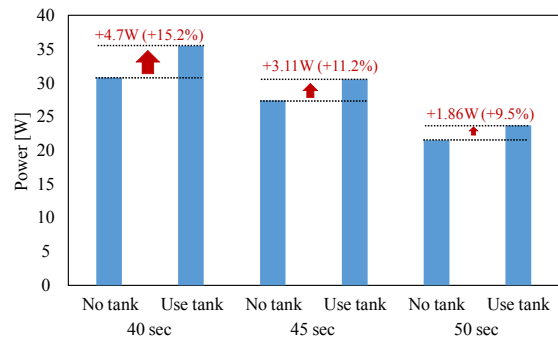


図 4.5 出力電力の平均
Fig. 4.5 Average output power

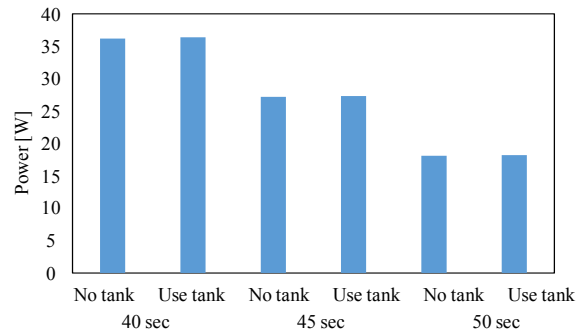


図 4.6 消費電力の平均
Fig. 4.6 Average power consumption

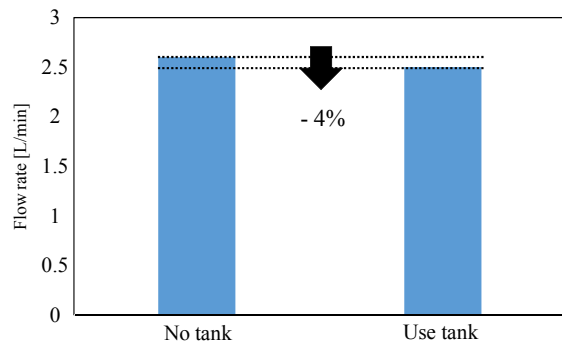


図 4.7 タンクによる流量の違い
Fig. 4.7 Flow rate difference of by tank

4.3.2 停止時間分割法

図 4.8 に停止時間 40 秒における熱電発電モジュールの高温側温度及び低温側温度, 図 4.9 に停止時間 40 秒における熱電発電モジュールの出力電力を示す。

図 4.8 より停止時間の合計が 40 秒でポンプの停止時間の分割数が 1 の場合, 即ち停止時間の分割を行わない場合, 熱電発電モジュールの低温側の温度の変動の幅は 28K となり, 平均温度は 51.35°C となった。また, 分割数が 2 のときは低温側温度の変動の幅は 17K となり, 平均温度は 52.7°C となった。そして分割数が 4 のときは低温側温度の変動の幅は 8K となり, 平均温度は 52.5°C となった。以上のことより分割数を大きくするにつれて低温側温度の変動の幅が減少しているがその平均温度にはあまり差が生じないことが分かった。

図 4.9 よりポンプの停止時間の合計が 40 秒で停止時間の分割数が 1 の場合, 即ち停止時間の分割を行わない場合, 熱電発電モジュールの出力電力の変動の幅は 22W となり, 平均出力電力は 32.9W となることが分かった。また, 分割数が 2 のときは熱電発電モジュールの出力電力の変動の幅は 16W となり, 平均出力電力は 31.6W となった。そして分割数が 4 のときは熱電発電モジュールの出力電力の変動の幅は 8W となり, 平均出力電力は 31.7W となった。以上のことよりポンプの停止時間の分割数を大きくするにつれて熱電発電モジュールの出力電力の変動の幅は減少しているが, その平均出力電力にはあまり差が生じないことが分かった。

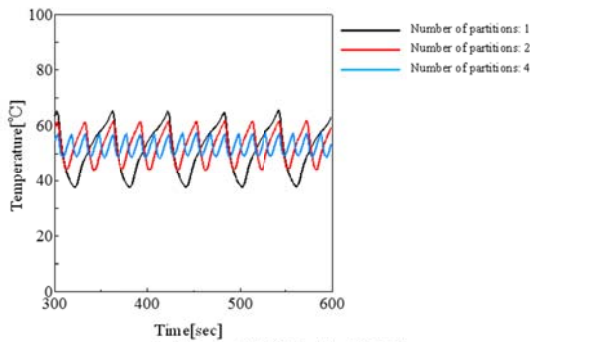


図 4.8 実験結果 (温度)

Fig. 4.8 experimental result (Temperature)

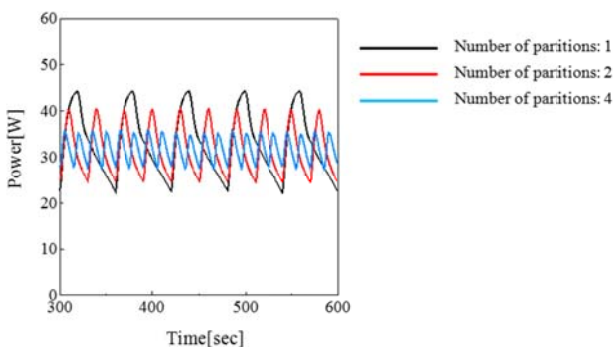


図 4.9 実験結果 (出力電力)

Fig. 4.9 experimental result (Output power)

図 4.10 に各停止時間における分割数と出力電力の関係について示す。図 4.10 によると各停止時間においてポンプの停止時間を分割しても熱電発電モジュールの出力電力はあまり差が生じていないことが分かる。これらの理由として, 停止時間の分割数の増加によって熱電発電モジュールの低温側に温度の大きな変動が起こらず, またその際に平均温度にあまり差が生じなかったために出力電力の変動の幅が減少しており, その際の平均出力電力にもあまり差が生じなかったと考えられる。

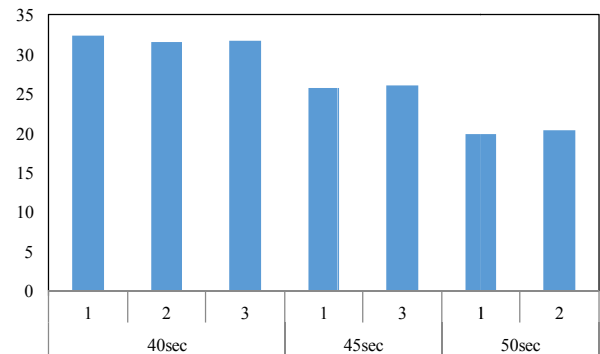


図 4.10 各停止時間における分割数と出力電力の関係

Fig. 4.10 Relationship of the number of divisions and the output power at each stop time

5. 結論

本論分では熱電発電システムが消費する冷却電力を低減し, 使用する冷却水の削減を行うために発電に使用する熱電発電モジュールの冷却系の運用方法について 2 種類の研究を行った。その結果以下のことが分かった

(1) 複合運転を行うことで冷却電力の大幅な低減が可能であり, ポンプの印加電圧の減少や停止時間の増加に応じてその減少量が変化することが分かった。

その一方で熱電発電モジュールの低温側温度が大きく上昇し, 出力電力が大きく減少してしまった。

(2) 冷却系にタンクを組み込むことでポンプの消費電力の削減量を維持した状態で出力電力の減少を抑制することがわかった。しかし低温側温度の変動の抑制については十分な成果を得られなかった。

(3) 冷却系にタンクを組み込み, 加えてポンプの停止時間を分割することで低温側温度の変動を抑制することが分かった。またその際, 分割数を増加しても出力電力の平均値にはあまり差が生じなかった。

参考文献

- [1] 「2014 年 エネルギー白書 第 2 部 エネルギー動向」, 経済産業省, p.143 2014 年 6 月
- [2] 「2014 年 エネルギー白書 第 1 部 エネルギーを巡る動向と主な対策」, 文部科学省 p.40 2014 年 6 月