

## 熱電発電システムの冷却用電力の低減手法

奥 将俊<sup>a)</sup>・中島 達也<sup>b)</sup>・田島 大輔<sup>c)</sup>・林 則行<sup>d)</sup>Lowering Method of Cooling Power  
in Thermoelectric Generation System

Masatoshi OKU, Tatsuya NAKASHIMA, Daisuke TASHIMA, Noriyuki HAYASHI

## Abstract

Faculty of Agriculture in University of Miyazaki, developed the “cow-dung derived low moisture content biomass fuel” made from animal husbandry waste. And, Faculty of Engineering in University of Miyazaki, used low moisture content biomass fuel and thermoelectric module for generate electricpower.

However, thermoelectric generator used many electric power for cooling. Cooling pump of thermoelectric generator use electric power bigger than generated power.

In this study, searched “intermittent drive method” and “low voltage drive method” for decrease the cooling electric power. First, “intermittent drive method” is searched. This method is cooling pump drive to intermittent. Secnd, “low voltage drive method” is searched. This method is cooling pump drive to low supply voltage.

**Keywords :** Thermoelectric module, Water cooling, Power savig technology, Drive method

## 1. はじめに

現在国内では、エネルギー自給率低下が大きな問題となっている。エネルギー自給率とは生活や経済活動に必要な1次エネルギーのうち、自国で確保できる1次エネルギーの比率のことである<sup>[1]</sup>。国際エネルギー機関(IEA)の推算では、1960年代に57%あった日本のエネルギー自給率は年々減少し、2010年は4.8%となっている<sup>[1]</sup>。そのため消費するエネルギーの大半は化石燃料の輸入に頼っている。

しかし 21 世紀を迎えた今日、「石油資源の枯渇」に加え、「産油国の政情不安」「世界的な石油需給バランスの崩壊」といった社会的・政治的な問題が生じている。また、次世代の有力なエネルギー源として注目されていた原子力発電も、安全性や放射性廃棄物の処理問題などから、先進国の間では抑制傾向が出てきている。更に、化石燃料の採掘による環境破壊も生じており、エネルギーの確保が難しくなっている。

そこで、国内のエネルギー自給率の改善や従来の1極集中型で再生不可能なエネルギーに依存し過ぎていた反省から、「新エネルギー」や「未利用エネルギー」と呼ばれるエネルギー源が注目を集めている。未利用エネルギー

は「工場などからの排熱や、河川水・下水などの温度差エネルギーといった、今まで利用されていなかったエネルギー

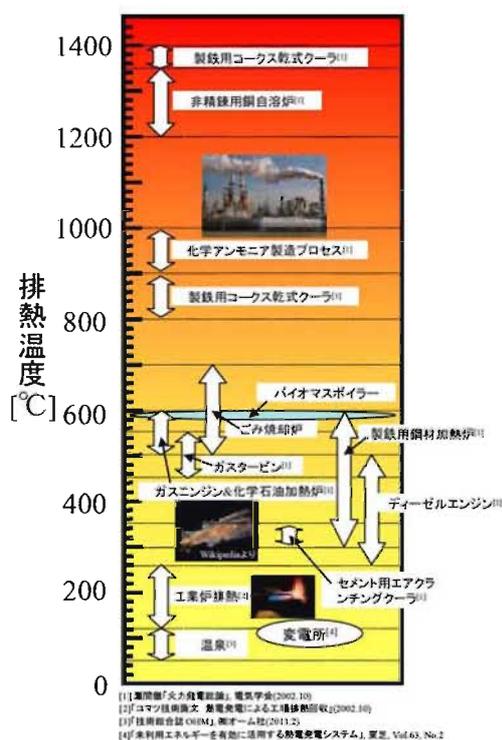


図 1.1 未利用熱エネルギーの例

Fig. 1.1 Explain of unused thermo energy

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

ギーの総称」<sup>[1]</sup>とされている。図 1.1 に未利用エネルギーの例を示す。未利用エネルギーは 50℃程度の温泉等で発生する低温の熱から、1400℃の製鉄用コークス乾式クーラから発生する非常に高温の排熱まで広く発生している。これらの高温の排熱は図 1.2 に示すような温度領域で様々な方法で熱利用・発電されている。

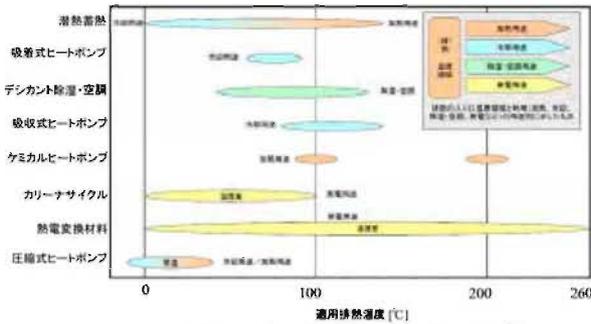


図 1.2 未利用熱エネルギーの応用例<sup>[2]</sup>  
Fig. 1.2 Application of unused exhaust heat

2. 研究目的

著者らは、バイオマス燃料を用いた熱・電力供給システムを構築している<sup>[3]</sup>。このシステムは畜産廃棄物から精製したバイオマス燃料をバイオマス燃料ボイラーへ供給して直接燃焼する。この際に生じた高温の排ガス中に含まれる熱の一部はバイオマス燃料ボイラー内の水へ熱交換するために使用されるが、熱交換後の排ガス温度は依然として非常に高い。そこで著者らは排ガス中の排熱とゼーベックユニットによる発電を行っている。

ゼーベックユニットは温度差を与えると発電する熱電変換ユニットの 1 つである。可動部がなく、メンテナンスフリーで省スペースであるなど利点が多いが、大きな電力を得るためには大きな温度差が必要である。本研究ではバイオマス燃料ボイラーの排熱を利用している。そのため、熱源である排熱の温度上昇が限られ、出力増加には冷却を充分行う必要がある。著者らが使用しているゼーベックユニットは、冷却能力の高い水冷式で冷却を行っている。水冷式冷却装置では冷却媒体(水)を循環する必要があり冷却水ポンプが必要となる。本研究は図 1.3 に示すように自己完結型熱・電力供給システムを構築するために冷却水ポンプ消費電力も発電電力で賄う予定である。

しかし、現在使用しているシステムでは冷却水ポンプの消費電力が発電電力よりも大きく、冷却水ポンプの消費電力を発電電力で賄うことが出来ない。図 1.4 は冷却水ポンプが使用している電力とゼーベックユニットが発電する電力の関係を示している。図 1.4 より冷却水ポンプの消費電力が発電電力が大きく上回っていることが分かる。

そこで、本研究では冷却水ポンプの消費電力を減少させる手法として「間歇運転法」と「供給電圧低下運転法」の 2 つの方法を提案する。「間歇運転法」は太陽電池を冷

却する際に応用されている<sup>[4][5]</sup>。本論文では、それぞれの運転方法について実験を行い、冷却水ポンプの消費電力の減少効果について評価したので報告する。

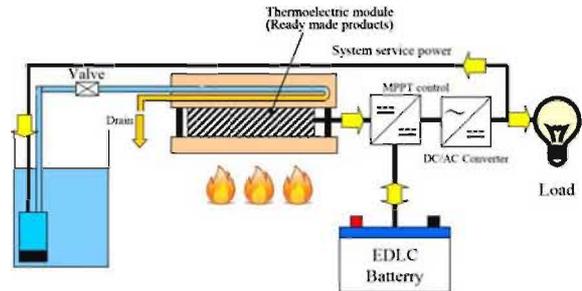


図 1.3 バイオマス直接燃焼システムの概要  
Fig. 1.3 Brief overview of this study

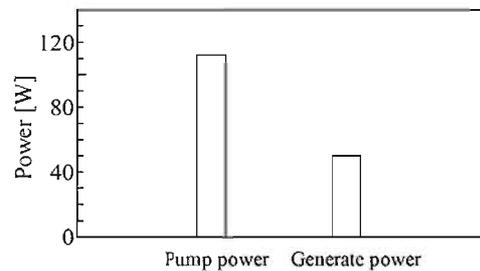


図 1.4 発電電力と冷却水ポンプ消費電力の関係  
Fig. 1.4 Relation of generate power and pump power

3. 実験装置概要

「間歇運転法」と「供給電圧低下運転法」の実験は同じ実験装置・設定で行った。図 2.1 に実験装置を示す。実験装置は冷却水ポンプ(寺田製作所製 SL-52S)とゼーベックユニット(高木製作所製 SB-100B)、摺動式電圧調整器(株式会社東京理工舎製 RSA-5)、パワーアナライザー(日置電機株式会社製 3390)で構成されている。ゼーベックユニットを冷却する媒体は市水を用いた。また、図 2.2 は実験用いたゼーベックユニットである。このゼーベックユニットの高温側と低温側には銅製のプレートが設置されている。このプレート内部には図 2.1 に示す位置に温度計が設置されている。実験ではゼーベックユニットの高温側温度と低温側温度をデータロガー(グラフテック株式会社製 midi LOGGER GL-220)で測定した。

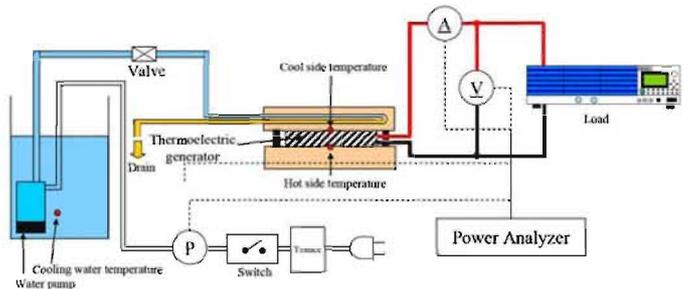


図 2.1 実験回路の構成  
Fig. 2.1 Architectonics of test circuit



図 2.2 ゼーベックユニット(高木製作所製 SB-100B)

Fig. 2.2 Thermoelectro generator

#### 4. 供給電圧低下運転試験

##### 4.1 実験方法と実験条件（供給電圧低下）

実験は、図 2.1 に示す実験回路中の電圧調整器を使用して冷却水ポンプへの供給電圧を 100V, 90V, 80V, 70V, 60V に設定した。そして、設定電圧毎に冷却水ポンプへ供給される有効電力をパワーアナライザーで測定した。尚、供給電圧 55V 以下では冷却水ポンプが動作しなくなるため、実験では 60V を限界とした。また、ゼーベックユニットから出力された電圧、電流はパワーアナライザーで測定・記録した。そして、測定した電圧、電流からゼーベックユニットが発電した電力を算出した。更に、供給電圧低下運転中のゼーベックユニットの高温側温度と低温側温度をデータロガーを用いて 1 秒毎に測定を行った。この実験を 1 つの設定電圧につき 7 分間行い、冷却水ポンプ消費電力・ゼーベックユニットの発電電力・ゼーベックユニットの温度を測定した。また、実験は 1 つ前に行った実験の影響が残らないよう、電力・温度変化の変動が十分に収束した後、に次の実験を行った。

また、ゼーベックユニットを予熱するヒーター温度はゼーベックユニットの上限使用温度(200°C)を十分に考慮して 150°C とした。発電した電力は電子負荷で消費した。電子負荷はゼーベックユニットがヒーター温度 150°C で温められている際に最大電力を出力する抵抗値 (19.5 Ω) に予め設定しておいた。

##### 4.2 実験結果（供給電圧低下）

実験で測定された冷却水ポンプの消費電力、ゼーベックユニットの発電電力の時間変化の例を図 3.1 ゼーベックユニットの高温側温度、ゼーベックユニットの低温側温度、と図 3.2 に示す。図 3.1 は供給電圧 100V (供給電圧低下をしなかった) 場合の結果を示している。また、図 3.2 は供給電圧を 60V に設定した場合の結果を示している。

図 3.1 より、供給電圧低下運転を行わなかった場合、冷

却水ポンプの消費電力は 112W, ゼーベックユニットからの発電電力は 50W で安定していることが分かる。また、ゼーベックユニット高温側平均温度は 127°C, 低温側平均温度は 33°C となった。

次に供給電圧を 60V に設定した結果を図 3.2 に示す。図 3.2 より供給電圧を 60V に設定すると全ての結果において変化が見られた。まず、冷却水ポンプの平均消費電力は 67W に大きく低下した。しかし、同時にゼーベックユニッ

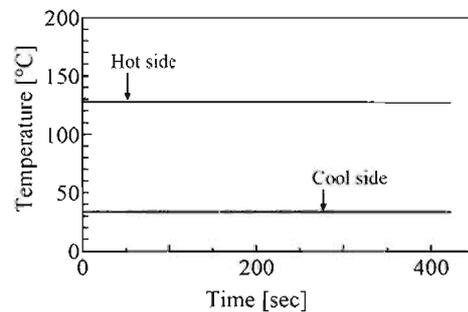
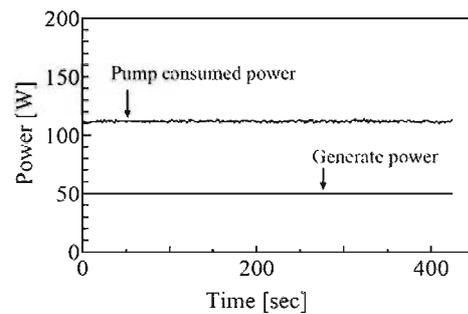


図 3.1 供給電圧低下運転の結果(供給電圧 100V)

Fig. 3.1 Result of low supply voltage drive (Voltage : 100V)

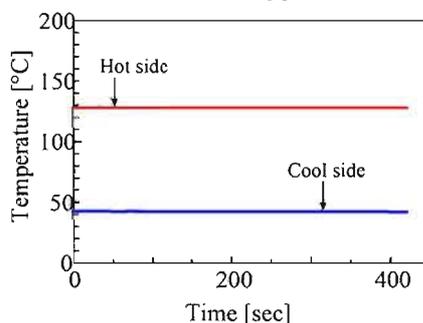
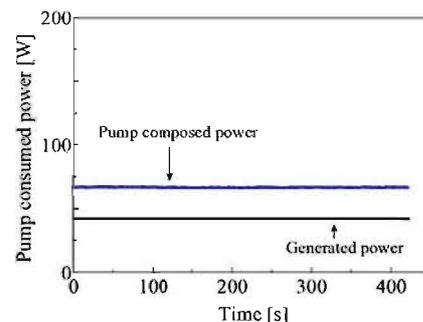


図 3.2 供給電圧低下運転の結果(供給電圧 60V)

Fig. 3.2 Result of low supply voltage drive (Voltage : 60V)

トからの平均発電電力も 42W に低下した。また、ゼーベックユニットの低温側平均温度は 41℃となり、供給電圧 100V の場合と比べて 8℃高くなった。ゼーベックユニットの高温側平均温度は 127℃と変化しなかった。

図 3.3 は冷却水ポンプへの供給電圧毎のゼーベックユニット平均発電電力、冷却水ポンプ平均消費電力を示している。図 3.3 より、冷却水ポンプへの供給電圧を低く設定すると冷却水ポンプの平均消費電力が減少することが分かる。冷却水ポンプへの供給電圧を 100V に設定した場合、冷却水ポンプの平均消費電力は 111W となった。一方、冷却水ポンプへの供給電圧を 60V に設定した場合、冷却水ポンプの平均消費電力は 57W となった。この結果、冷却水ポンプの平均消費電力は冷却水ポンプ供給電圧を 60V に設定した場合、冷却水ポンプ供給電圧を 100V とした場合と比べて 59% になり、冷却水ポンプへの供給電力は小さくなった。

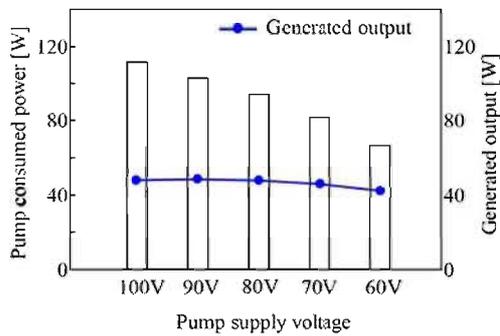


図 3.3 供給電圧と発電電力・冷却水ポンプ消費電力の関係  
Fig. 3.3 Relation of generate power and pump power

また、冷却水ポンプ供給電圧を 100V に設定した場合、ゼーベックユニットの平均発電電力は 48W であった。一方、冷却水ポンプ供給電圧を 60V に設定した場合、ゼーベックユニットの平均発電電力は 42W となった。このことから、ゼーベックユニットの平均発電電力は冷却水ポンプ供給電圧を 60V に設定した場合、冷却水ポンプ供給電圧を 100V とした場合と比べて 88% となり、冷却水ポンプの平均消費電力と共に小さくなった。これは、冷却水ポンプへの供給電力を減少させたためゼーベックユニット低温側の放熱が充分に行われなくなったためだと考えられる。図 3.4 に供給電圧の違いによるゼーベックユニット低温側と高温側の平均温度変化を示す。図 3.4 からゼーベックユニット高温側温度は供給電圧が変化しても一定であるのに対し、低温側温度は供給電圧が低下すると上昇していることが分かる。このことから、ゼーベックユニットの高温側温度と低温側温度の差が小さくなったため、ゼーベックユニットの発電電力が下がったと考えられる。

ゼーベックユニットの低温側は冷却水ポンプが循環する水で冷却されている。今回の実験で冷却水ポンプへの供給電圧が低下し、冷却水の循環量が減少した。そのため、放熱が行き届かず低温側温度が上昇したと考えられる。

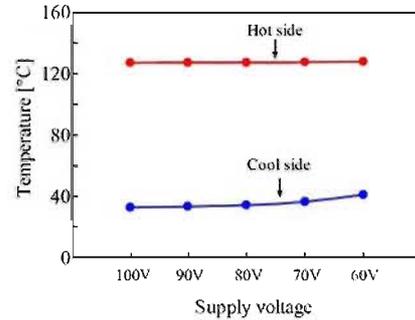


図 3.4 供給電圧と高温側温度・低温側温度の関係  
Fig. 3.4 Relation of hot side temp and cool side temp

### 5. 間歇運転試験

#### 5.1 実験方法（間歇運転）

間歇運転の実験は図 2.1 に示す実験回路で行った。実験は図 2.1 に示す実験回路の電圧調整器を調整して水中冷却水ポンプへの供給電圧を 100V に設定して行った。

実験は、冷却水ポンプへの電力供給を図 2.1 のスイッチを使って図 4.1 に示すサイクルで供給した。1 サイクルは 1 分を 1 周期として行い、この間に冷却水ポンプを A 秒運転して B 秒 (=60-A 秒) 停止した。このサイクルを 7 回繰り返す際に図 2.1 のパワーアナライザーで冷却水ポンプへ供給される有効電力を測定した。同時に、ゼーベックユニットが発電した電圧、電流もパワーアナライザーで測定した。そして、測定した電圧、電流からゼーベックユニットが発電した電力を算出した。また、データロガーで間歇運転した際のゼーベックユニットの高温側温度と低温側温度を 1 秒毎に測定した。

尚、冷却水ポンプの停止時間 B は 0 秒、5 秒、10 秒、15 秒、20 秒、30 秒の 6 種類に設定した。また、ゼーベックユニットを予熱するヒーター温度はゼーベックユニットの上限使用温度(200℃)を充分に考慮して 150℃とした。発電した電力は電子負荷で消費した。電子負荷はゼーベックユニットがヒーター温度 150℃で温められている際に最大電力を出力する抵抗値 (19.5Ω) に予め設定しておいた。

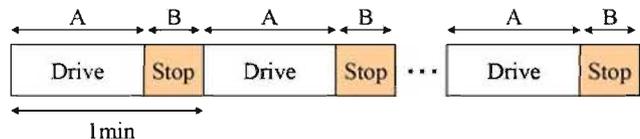


図 4.1 間歇運転実験の運転スケジュール  
Fig. 4.1 Drive plane of intermittent drive

#### 5.1 実験結果（間歇運転）

実験で測定されたゼーベックユニット高温側温度、低温側温度、冷却水ポンプ供給電力、ゼーベックユニットの発電電力の時間変化の例を図 4.2 と図 4.3 に示す。図 4.2

は間歇運転 0 秒 (間歇運転しなかった) 場合, 図 4.3 は間歇運転 30 秒に設定した場合の 3 分間の結果を示している。

図 4.2 より, 間歇運転を行わなかった場合, 冷却水ポンプの消費電力は約 112W, 発電電力は約 50W で安定していることが分かる。また, ゼーベックユニット高温側温度は約 127°C, ゼーベックユニット低温側温度は約 33°C で安定していることが分かる。

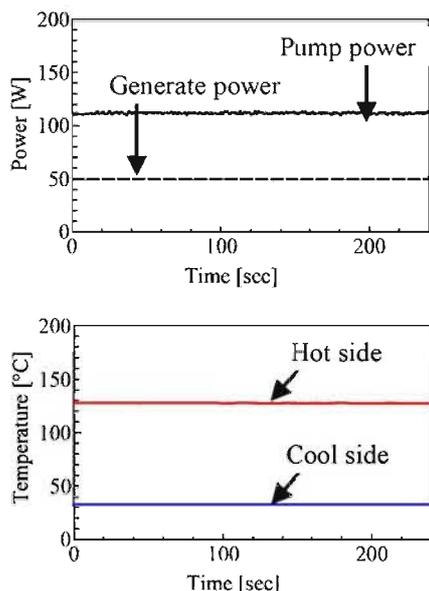


図 4.2 間歇運転の結果(0 秒停止)

Fig. 4.2 Result of intermittent drive cooling (Stop time : 0s)

しかし, 図 4.3 より 30 秒の間歇運転を行った場合は全ての結果において大きな変化が観察された。まず, 冷却水ポンプの消費電力はスイッチを OFF にして電力供給を停止している間は冷却水ポンプの消費電力が 0W になっている。冷却水ポンプへの供給電力が 0W の状態のとき, ゼーベックユニットへの冷却水の送水されなくなる。そのため, ゼーベックユニットの低温側温度は排熱が行われず, 温度上昇が始まり最高で 55°C となった。また, 同時に高温側と低温側で温度差が小さくなったことから, ゼーベックユニットの発電電力が小さくなり, 最小で 31W まで減少した。この後, スイッチを ON して冷却水ポンプへの電力供給が再開されると, ゼーベックユニットの発電電力は 27 秒で元の発電電力と温度に戻った。間歇運転を行った場合, このような温度・電力変化を周期的に繰り返す状態を確認出来た。

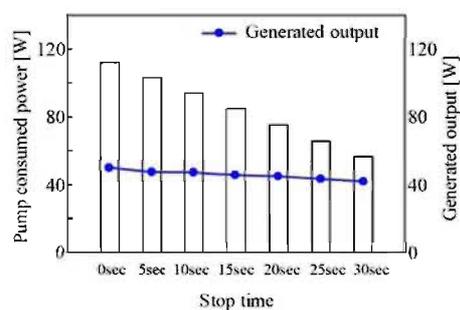


図 4.4 間歇運転による発電・電力消費の関係

Fig. 4.4 Relation of generate power and pump power

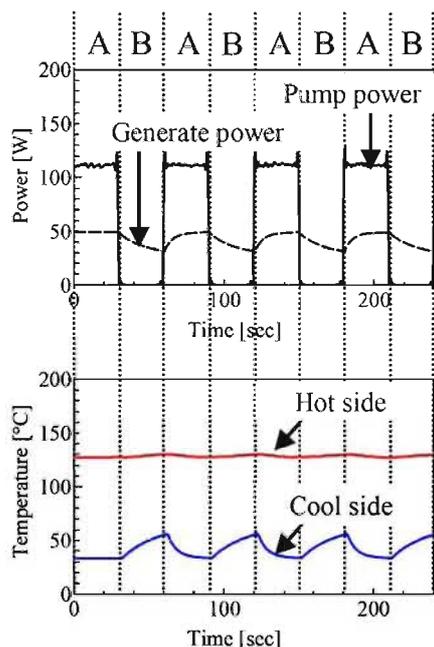


図 4.3 間歇運転の結果(30 秒停止)

Fig. 4.3 Result of intermittent drive cooling (Stop time : 30s)

図 4.4 は冷却水ポンプ停止時間 B の違いによる平均発電電力, 冷却水ポンプ平均消費電力の違いを示している。図 4.4 より, 冷却水ポンプ停止時間 B を長く設定すると冷却水ポンプ平均消費電力が減少することが分かる。冷却水ポンプ停止時間 B を 0 秒に設定した場合, 冷却水ポンプの平均消費電力は 112W となった。一方, 冷却水ポンプ停止時間 B を 30 秒に設定した場合, 冷却水ポンプの平均消費電力は 57W となった。このことから冷却水ポンプ平均消費電力は冷却水ポンプ停止時間 30 秒に設定した場合, 冷却水ポンプ停止時間 0 秒の場合の 51% と小さくなった。

また, 冷却水ポンプ停止時間 B を 0 秒に設定した場合, ゼーベックユニットの発電電力は 50W であった。一方, 冷却水ポンプ停止時間 B を 30 秒に設定した場合, ゼーベックユニットの発電電力は 42W となった。このことから, ゼーベックユニットの平均発電電力は冷却水ポンプ停止時間を 30 秒に設定した場合, 冷却水ポンプ停止時間を 0 秒とした場合と比べて 84% となり, 冷却水ポンプの平均消費電力と共に小さくなることが分かった。これは, 冷却水ポンプを停止したことによりゼーベックユニットの低温側の放熱が充分に行われなくなったことによるものであると考えられる。図 4.5 に冷却水ポンプ停止時間 B の違いによるゼーベックユニットの低温側と高温側の平均温

度変化を示す。図 4.5 からゼーベックユニットの高温側温度は一定であるのに対して、低温側温度が上昇していることが分かる。このことから、ゼーベックユニットの高温側温度と低温側温度の差が小さくなったため、ゼーベックユニットの発電電力が下がったと考えられる。

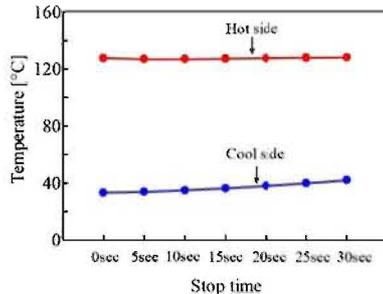


図 4.5 間歇運転の停止時間の違いによる  
ゼーベックユニットの高温側と低温側温度の違い  
Fig. 4.5 Relation of hot side temp and cool side temp

## 6. 総合結果

本研究では、冷却水ポンプ消費電力を低減させるために間歇運転法と冷却水ポンプ供給電圧低下運転法の2つの方法で実験を行った。その結果、2つの方法において冷却水ポンプの消費電力を大きく減少させることが出来た。しかし、2つの手法において冷却水ポンプの消費電力減少と同時にゼーベックユニットからの発電電力も減少する結果となった。図5.1に冷却水ポンプ消費電力に対する発電電力を示す。図5.1より、2つの手法を比較した場合、冷却水ポンプ消費電力を同じ値まで削減しても、同じ程度に発電電力も減少していることが分かる。このことから2つの手法だけでは、ゼーベックユニットの発電電力を維持したまま、冷却水ポンプの消費電力を削減出来ないことが分かる。また、冷却水ポンプ消費電力の減少能力と発電電力減少量は同程度であると言える。

しかし、図5.1より間歇運転法は供給電圧低下法よりも冷却水ポンプ消費電力の削減能力が高いことが分かる。

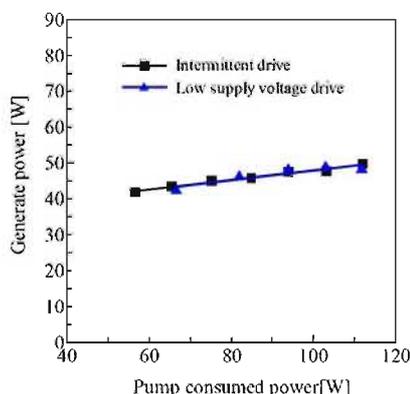


図5.1 冷却水ポンプ消費電力と発電電力の関係  
Fig. 5.1 Relation of pump power and generate power

今回の実験では実験で使用した冷却水ポンプの最低起動電圧が55Vであった。そのため、安全を考慮して供給電圧低下法では60Vを限界とした。その一方で間歇運転法は操作が冷却水ポンプの運転・停止だけであるため、機械的制約を受けない。間歇運転法の冷却水ポンプ停止時間の決定にはゼーベックユニットの低温側温度を考慮する必要があるが、供給電圧低下法よりも更に電力削減できる可能性があると言える。

## 7. 結論

本論文では「間歇運転法」と「供給電圧低下法」の2つの方法で冷却用冷却水ポンプの消費電力を削減する実験を行った。そして、次のことが分かった。

- (1) 供給電圧低下運転を行った結果、冷却水ポンプ供給電圧を 60V に設定すると冷却水ポンプ消費電力を 41%削減できたが、同時に発電電力も 12%減少した。
- (2) 間歇運転を行った結果、冷却水ポンプ運転停止時間を 30 秒に設定すると冷却水ポンプ消費電力を 49%削減できたが、発電電力も 16%減少した。
- (3) 2つの手法の冷却水ポンプ消費電力と発電電力を比較した結果、冷却水ポンプ消費電力・発電電力共に大きな差はなかったが、間歇水冷法は更に電力削減できる可能性があることが分かった。

## 参考文献

- [1] 経済産業省:「第2部 エネルギー動向」, 2012年エネルギー白書, p.97, p.127, 2012年11月
- [2] NEDO:「革新的省エネルギー化学プロセスに関する先導調査」, 平成20年度成果報告書, p.246, 2009年3月
- [3] 奥, 他, 「バイオマス燃料ボイラーの高温排熱を利用した熱電発電システムの基礎特性」, 宮崎大学工学部紀要論文, No.41, p.49, 2012年7月
- [4] 佐藤義久, 他「間歇水冷による太陽電池モジュールの発電効率向上に関する研究」, 太陽エネルギー, 日本太陽エネルギー学会, Vol.34, No.3, 2008年5月
- [5] 佐藤義久, 他「間歇水冷による10kW級太陽電池の出力向上に関する研究」, 太陽エネルギー, 日本太陽エネルギー学会, Vol.38, No.4, 2008年5月