

(論文)

# 温水仕様バイナリー発電システム

## Binary Cycle Power Generation System for Hot Water



高橋和雄\*1  
Kazuo TAKAHASHI



松田治幸\*1  
Haruyuki MATSUDA



藤澤 亮\*1 (工博)  
Dr. Ryo FUJISAWA



松村昌義\*2  
Masayoshi MATSUMURA



成川 裕\*3  
Yutaka NARUKAWA



足立成人\*3  
Shigeto ADACHI

The small-scale binary cycle power generation system is needed for the practical use of renewable energy (heat of the earth and biomass) or waste thermal energy (the unused thermal energy of a factory). Microbinary MB-70H has been developed at Kobe Steel as a small-scale binary-cycle power generation system (in the 60kW class of sending end output). The semi-hermetic screw power generator has been adopted in this system. This paper reports the test results for the system.

まえがき = 地球温暖化対策や東日本大震災後の電力需給問題から、再生可能エネルギーや未利用低位エネルギーの活用による省エネルギーや発電のニーズが高まっている。一方、地熱(温泉)やバイオマス、産業分野では200℃以下の低温排熱があり、地熱分野ではバイナリー発電技術の開発、導入が進められてきた<sup>1), 2)</sup>。バイナリー発電は、加熱源により低沸点の作動媒体を加熱・蒸発させて膨張機を回転させ、発電するシステムである。地熱や産業分野の排熱は分散かつ小規模であり、対応できる小型バイナリー発電システムが必要とされていた。

当社はこれまで、小型スクリュ蒸気発電機<sup>3)</sup>によって、小型の膨張機としてのスクリュ方式の有効性を実証している経験から、小規模の排熱の有効利用に対応できる小型バイナリー発電システムの開発を行った。独自に開発した半密閉スクリュ発電機を使用して送電端出力60kW級のMicrobinary MB-70H(図1)の開発を行い、2011年10月から受注拡販活動を展開している。



図1 温水仕様バイナリー発電システム Microbinary MB-70H  
Fig. 1 Binary cycle power generation system MB-70H for hot water

本稿では、今回開発した温水熱源用のバイナリー発電システムの技術的特徴を示し、発電試験の結果から、温水、冷水の条件(温度、流量)と回収できる電力、温水の温度エネルギーの電力への変換状況などについて報告する。

### 1. 温水仕様バイナリー発電システムの特徴

当社の温水仕様バイナリー発電システムは、図2のフロー図に示される機器によって構成される。以下に本システムで用いた各機器の機能と特徴について説明する。  
<作動媒体ポンプ>

低温で液体の作動媒体を加圧する。作動媒体の漏洩(ろうえい)を防ぐために密閉構造となっている。

<蒸発器、過熱器>

作動媒体ポンプで加圧された作動媒体を温水との間接熱交換によって加熱、蒸発させ、高圧の作動媒体の飽和蒸気を発生させる。この作動媒体蒸気を温水によってさらに加熱し、過熱蒸気を発生させる。

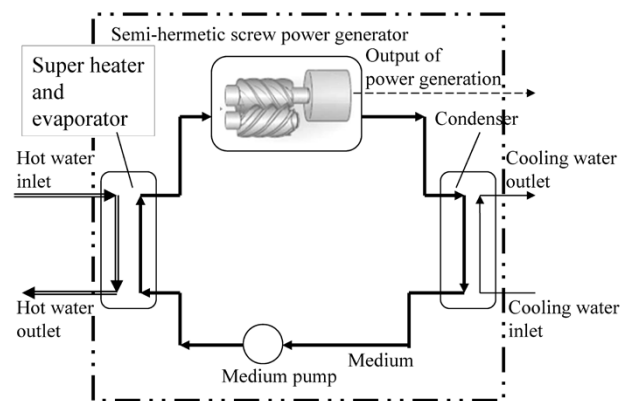


図2 温水仕様バイナリー発電システムフロー図  
Fig. 2 Flow diagram of binary cycle power generation system for hot water

\*1 技術開発本部 機械研究所 \*2 機械事業部門 開発センター \*3 機械事業部門 開発センター 商品開発部

<半密閉スクリュ発電機>

上記高圧作動媒体の過熱蒸気をスクリュ発電機に導き、スクリュ膨張機で膨張させることによって動力を回収する。スクリュ膨張機のロータ軸上には発電機が設置されており、回収された回転動力は電力に変換される。

なお、ここで用いた発電機は当社で開発した半密閉スクリュ発電機(図3)である。膨張機および発電機が同一の容器内に格納されて軸封が不要なため、作動媒体ガスの漏洩が起らない構造となっている。

<凝縮器>

スクリュ発電機からの低圧、過熱の作動媒体ガスは凝縮器に導かれ、冷却水と間接熱交換を行うことで凝縮され、過冷却された液体の作動媒体として作動媒体ポンプに供給される。

本システムでは、これらの構成によって温水と冷却水の温度差を電力に変換している。また、作動媒体の漏洩を防ぐため密閉構造の機器を選定している。

使用する作動媒体にはHFC245faを採用した(表1)。この媒体は、大気圧下での沸点が14.9℃の低沸点媒体であり、100℃以下の温水熱源でも圧力の高い蒸気を発生させることができる。

本システムの熱サイクルの高温側圧力と低温側圧力は蒸発器と凝縮器それぞれの作動媒体の飽和圧力によって決まる。図4には、横軸を交換熱量 $Q_e$ 、 $Q_c$ 、縦軸を水側および作動媒体の温度とし、蒸発器、過熱器、凝縮器の熱交換器内での交換熱量と温度変化の関係を示す。蒸発器、過熱器では、低温の作動媒体が温水との間接熱交換で顕熱を受取って飽和温度まで上昇した後、飽和温度で一定の温度を保って蒸発し、蒸発潜熱として受取る。蒸発終了後、再び作動媒体蒸気が顕熱を受取って温度上昇し、過熱蒸気を生成する。この蒸発過程において、温水の温度と蒸発する作動媒体のピンチ温度によって作動媒体の飽和温度 $T_{ms1}$ 、および飽和圧力 $P_{ms1}$ が決まり、作動媒体の高温側圧力の上限值 $P_{ms1}$ が決まる。

一方、凝縮器では、スクリュ発電機で膨張した後の低圧で過熱の作動媒体蒸気を受入れ、冷却水との間接熱交換で飽和温度まで温度低下した後、飽和温度で潜熱を放出させながら凝縮させる。凝縮終了後、さらに作動媒体を冷却し、過冷却液として凝縮器から作動媒体ポンプに供給される。凝縮過程において、冷却水の温度と凝縮する作動媒体のピンチ温度によって、作動媒体の飽和温度 $T_{ms2}$ 、飽和圧力 $P_{ms2}$ が決まり、作動媒体の低温側の下限圧力 $P_{ms2}$ が決まる。

上記の圧力の範囲( $P_{ms1} \sim P_{ms2}$ )により、本サイクルによるP-h線図は図5のようになる。本システムでは、P-h線図上を矢印の方向に動作を行い、2から3の蒸発、過熱過程で回収した熱を3から4へ移動する膨張過程で動力として取出す。受入れる温水温度の上昇および冷却水温度の低下は(温度の拡大)、図4の蒸発器での作動媒体の飽和温度および飽和圧力の上昇、そして凝縮器での作動媒体の飽和温度および飽和圧力の低下をもたらすことから、回収できる動力が増加する。

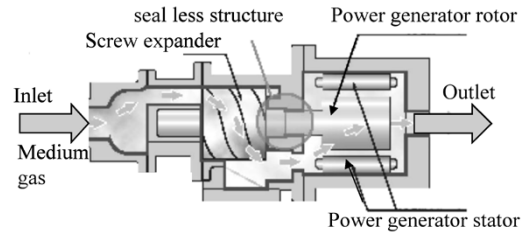
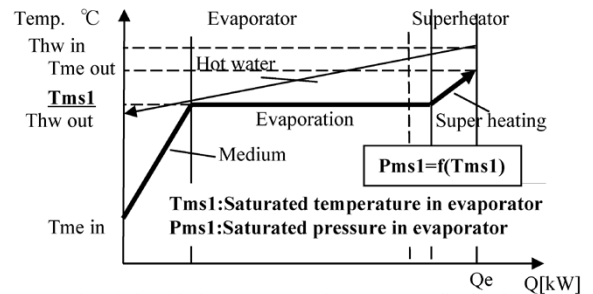


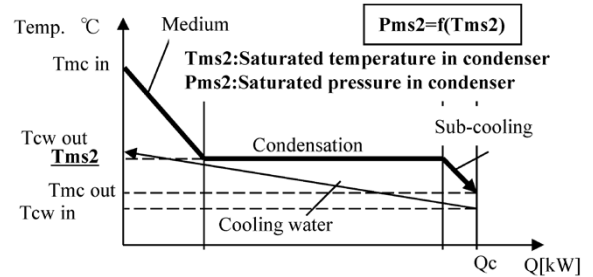
図3 半密閉スクリュ発電機の特徴  
Fig. 3 Feature of semi-hermetic screw power generator

表1 作動媒体HFC245faの物性  
Table 1 Properties of HFC245fa

		HFC-245fa
Chemical formula		$CF_3CH_2CHF_2$
Molecular weight	kg/kmol	134
Boiling point temperature[101.325kPa]	°C	14.9
Boiling point pressure[25°C]	kPa	149
Density(25°C, Saturated liquid)	kg/m <sup>3</sup>	1339
Density(25°C, Saturated gas)	kg/m <sup>3</sup>	8.55
Latent heat of vaporization	kJ/kg	190.9
Ozone depletion potential(ODP)(CFC-11=1)	-	0
Global warming potential(GWP)(CO <sub>2</sub> =1)	-	950



a) Relationship between  $Q_e$  and temperature distribution in evaporator and superheater



b) Relationship between  $Q_c$  and temperature distribution in condenser

図4 熱交換器内の交換熱量 $Q_e$ 、 $Q_c$ と温度分布  
Fig. 4 Relationship between  $Q$  and temperature distribution in heat exchanger

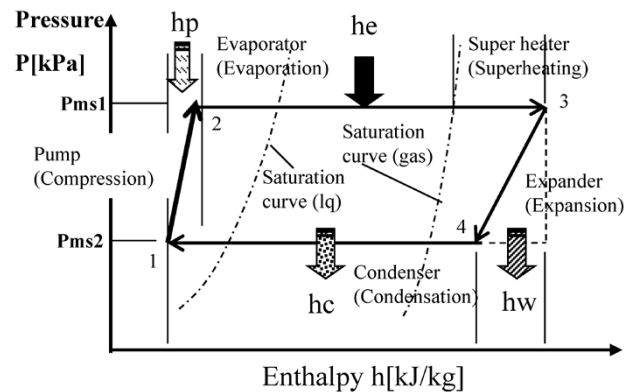


図5 本システムの作動媒体のP-h線図  
Fig. 5 P-h diagram of medium for this system

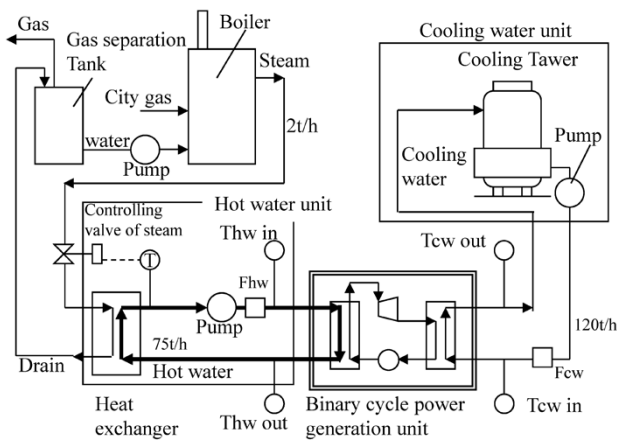


図6 バイナリー発電システム試作機の試験設備  
Fig. 6 Test equipment of binary cycle power generation system

## 2. 温水仕様バイナリー発電システムの試験設備

温水仕様バイナリー発電システムの運転確認を行うために図6に示す試験設備を製作し、温水、冷却水の各種条件について性能確認を行った。入熱側としては、ボイラ蒸気を熱源として蒸気—温水熱交換器で温水を製造し、温水ポンプによって本体の蒸発器に供給し、熱交換後の温水は再び熱交換器で加熱される。蒸気配管に設置された流量調整弁を温水温度により制御することで一定温度の温水を供給する。蒸発器、過熱器の入熱は、温水配管に設置された入口温度計、出口温度計、温水流量計の計測結果（それぞれ、 $Thw_{in}$ ,  $Thw_{out}$ ,  $F_{hw}$ とする）から求める。冷却水は、屋外の冷却塔と本体凝縮器の間で循環し、必要な温度の冷水を凝縮器に供給する。凝縮器の放熱は、冷却水配管に設置された入口温度計、出口温度計、冷却水流量計の計測結果（それぞれ、 $T_{cw_{in}}$ ,  $T_{cw_{out}}$ ,  $F_{cw}$ とする）から求める。

## 3. 温水仕様バイナリー発電システムの試験結果

試験設備による運転を通じ、半密閉式スクリュ発電機の運転は安定しており、バイナリー発電システムの発電機としての有効性が確認された。運転結果の事例として、温水：温度 $94.8^{\circ}\text{C}$ 、 $75\text{t/h}$ 、および冷却水：温度 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{t/h}$ という条件で運転した場合のエネルギーバランスを図7に示す。

温水による入熱 $Q_e = 1.062\text{kW}$ に対して、発電端出力 $W_e = 71.0\text{kW}$ が回収され、冷却水による放熱 $Q_c = 1.004\text{kW}$ が排出される。システム外部へ供給できる電力である送電端出力 $W_e'$ は $58.4\text{kW}$ であり、システム内部での消費電力 $W_1 (= W_e - W_e')$ は $12.6\text{kW}$ となる。また、ここでは、本システムによって温水の入熱 $Q_e$ から変換される送電端出力 $W_e'$ の割合を示すパラメータとして、電力変換率 $\eta_{eh} [\%] = W_e' / Q_e \times 100$ を導入する。図7の運転では、電力変換率 $\eta_{eh}$ は $5.4\%$ であった。

装置の性能を確認するために温水流量、温度、冷却水温度を変化させ、各条件で発電出力が最大になる運転を行って送電端出力 $W_e'$ を確認した。温水流量を $75\text{t/h}$ 、冷却水流量を $120\text{t/h}$ で固定し、温水温度 $Thw_{in}$ を $70 \sim 95^{\circ}\text{C}$ 、冷却水温度 $T_{cw_{in}}$ を $20 \sim 35^{\circ}\text{C}$ まで変化させ、適

用温度範囲での送電端出力の確認を行った。横軸を冷却水温度 $T_{cw_{in}}$ 、縦軸を送電端出力 $W_e'$ としてデータを整理すると、本運転範囲における送電端出力 $W_e'$ の範囲は $10 \sim 60\text{kW}$ となることが分かった（図8）。また、図5のP-h線図での検討が示すとおり、送電端出力 $W_e'$ は、温水温度の上昇と冷却水温度の低下に伴って上昇して行く傾向が現れた。

さらに、上記の試験結果に基づいて本システムの各機器の特性を定式化し、熱サイクル計算と組合せた性能予測プログラムを作成した。試験結果と性能予測プログラムの計算結果を図8で比較する。計算結果は各温度条件での送電端出力の試験結果を再現しており、有効性が確認された。この性能予測プログラムから $95^{\circ}\text{C}$ 、 $75\text{t/h}$ の温水、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{t/h}$ の冷却水の条件で性能計算すると、発電端出力 $W_e$ は $72\text{kW}$ 、送電端出力 $W_e'$ は $60\text{kW}$ という性能が予測された。

また、試験結果から冷却水温度を $27 \sim 29^{\circ}\text{C}$ で固定し、温水温度 $Thw_{in}$ を変化させたときの送電端出力 $W_e'$ 、および図7で導入した電力変換率 $\eta_{eh}$ の変化を図9に示す。温水温度 $Thw_{in}$ が低下するのに従い送電端出力 $W_e'$ と電力変換率 $\eta_{eh}$ は低下してゆくが、電力変換率 $\eta_{eh}$ は定格条

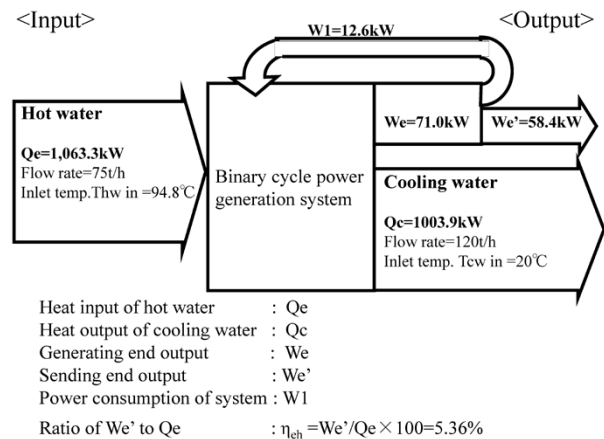


図7 エネルギーバランス  
Fig. 7 Energy balance

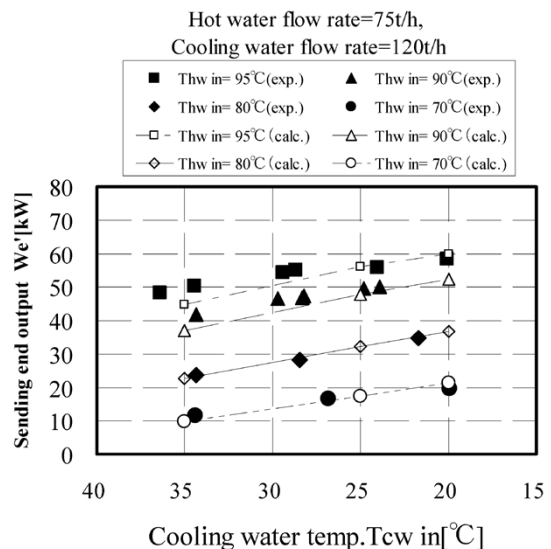


図8 温水温度 $Thw_{in}$ 、冷却水温度 $T_{cw_{in}}$ と送電端出力 $W_e'$ の関係  
Fig. 8 Relationship between water temp. ( $Thw_{in}$ ,  $T_{cw_{in}}$ ) and sending end output  $W_e'$

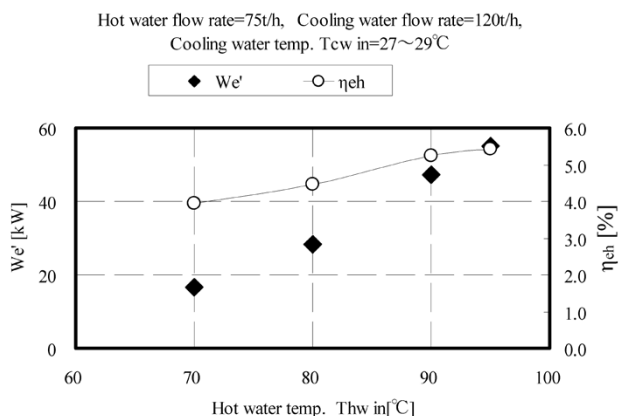


図9 温水温度と送電端出力We', 電力変換率 $\eta_{eh}$   
Fig. 9 Relationship between Hot water temp., Thw in, and We' and  $\eta_{eh}$

件付近で5.4%を示しており、発電端出力が30%に低下しても、電力変換率 $\eta_{eh}$ は4%で定格条件の72%の能力を維持できることが示された。よって、低負荷出力運転に対しても、入熱に対して効率の良い電力変換が可能であることが確認された。産業分野の小規模の温水排熱では、設備の負荷変化によって温度や流量の変化も考えられるが、本システムは温度低下の起こる温水熱源に対しても効率的な電力回収が可能である。

#### 4. システムの仕様と連続運転結果

今回開発したMicrobinary MB-70Hの仕様を表2に示

表2 マイクロバイナリー MB-70Hの仕様  
Table 2 Specification of Microbinary MB-70H

Microbinary MB-70H	
Maximum generating end output	72kW
Maximum sending end output	60kW
Power generator	IPM synchronous generator
Standard screw rotor speed	5,500rpm
Power voltage	200V/400V
Medium	HFC245fa
Design pressure	0.97MPaG
Heat source	70~95°C Hot water
Expander	Screw expander
Medium pump	Canned motor pump

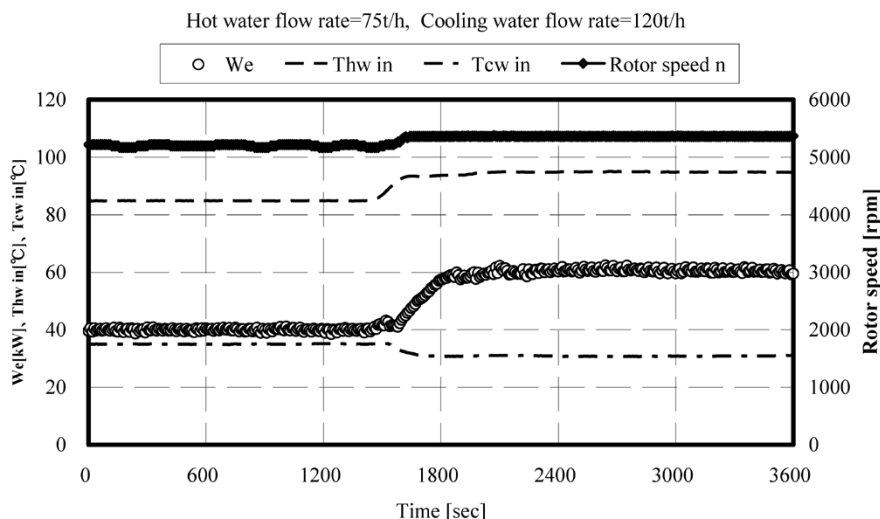


図10 Microbinary MB-70Hの連続運転  
Fig.10 Continuous running of Microbinary MB-70H

す。また、連続運転の事例として温水温度Thw inを85°Cから95°Cに変化させ、同時に冷却水温度を35°Cから30°Cに変化させた場合の発電端出力We, 膨張機回転数nの時間変化を図10に示す。本装置では、温水の温度や流量、あるいは冷却水の温度、流量に変化が起ころても発電出力が最大となるように自動制御機能によって制御されており、温水および冷却水の温度条件の変化に伴って発電端出力は40kWから60kWに増加して行き、温水および冷却水の温度の安定とともに膨張機回転数nおよび発電端出力Weが安定して行く過程が確認された。

むすび = 温水仕様バイナリー発電システムMicrobinary MB-70Hの開発を通じ以下の特性を確認した。

- 1) バイナリー発電システムの試験を通じて、当社で開発した半密閉スクルー発電機が、バイナリー発電システムに対して安定に運転しており、発電機として有効であることを確認した。
- 2) 本システム試験および性能予測計算から、95°C, 75t/hの温水と20°C, 120t/hの冷却水の条件で送電端出力60kWの目処を得た。
- 3) 本システムにおいて、温水入熱と送電端出力を基準とした電力変換率 $\eta_{eh}$  (= We'/Qe) は定格条件付近で5.4%を示しており、温水温度の低下に伴い送電端出力が30%に低下した運転でも、電力変換率 $\eta_{eh}$ は4% (定格条件の72%) を維持できることを確認した。
- 4) Microbinary MB-70Hの自動制御による連続運転より、膨張機回転数と発電端出力の安定性、温水および冷却水の温度変化に対する追従性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 秋田涼子. 日経研月報2013.1.
- 2) 小長谷瑞木. 季報 政策・経営研究. 2007, Vol.4, p.1.
- 3) 桑原英明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.24.