

(技術資料)

# 未利用低温排熱を活用するバイナリー発電システム

藤澤 亮\* (博士(工学))・高橋和雄・前田基秀・川口泰平

## Binary Cycle Power Generation System for Hot Water Utilizing Unused Low-Temperature Waste Heat

Dr. Ryo FUJISAWA・Kazuo TAKAHASHI・Norihide MAEDA・Taihei KAWAGUCHI

### 要旨

未利用の低温排熱から電力を得られるバイナリー発電装置は、今後の低炭素社会の中で再生可能エネルギーを活用するための有用な一手段となりうる。本研究では、環境性および80℃以下の低温度域での出力向上を目的とし、低GWP冷媒の選定と既存装置へのドロップインにより性能特性試験を実施した。その結果、80℃以下の熱源温度では既存装置を上回る発電性能を示すことが確認された。また、得られた結果から空冷システム化された場合の年間累積発電量を試算し、年間平均発電出力のさらなる向上には中間期での性能向上が必要であることを示した。

### Abstract

Binary cycle power generation systems, capable of obtaining power from unused low temperature waste heat, can be a useful means to utilize renewable energy in the future low-carbon society. In this study, performance characteristics tests were conducted by selecting a low GWP (Global Warming Potential) refrigerant and by performing a drop-in test on existing equipment in order to improve environmental performance and to increase the output in the low temperature range below 80°C. As a result, it was confirmed that the power generation performance exceeded that of the existing equipment at a heat source temperature of 80°C or below. The annual cumulative amount of power generation for an air-cooled system was estimated from the results obtained, and it was shown that a performance improvement in the interim period was necessary to further improve the annual average power generation output.

### キーワード

低温排熱, バイナリー発電装置, 再生可能エネルギー, 低GWP冷媒, ドロップイン性能特性試験

まえばき = 地球温暖化防止の観点から、地熱やバイオマスなどの再生可能エネルギー分野およびエネルギー多消費産業分野では未利用低位エネルギーのさらなる利活用が進められている。そのなかで、80℃以下の低温排熱は利用価値が低いうえに、利用場所との距離や時間のギャップによる損失があることから、未利用のまま排出されていることが多い。

バイナリー発電システムは熱エネルギー落差を利用することによって発電可能なシステムであり、100℃以下の低温未利用排熱からでも電力を得られる。また、産業排熱や地熱利用によるCO<sub>2</sub>削減が期待されており、当社においても95℃の温水を熱源とするバイナリー発電システムの開発・商品化が行われてきた<sup>1)</sup>。

表1に当社温水バイナリー発電システムMB-70Hの主

な仕様を、図1にその外観を示す。本システムは冷媒としてHFC245faを使用していたが、本冷媒はモントリオール議定書のキガリ改正で新たな規制対象と定められた<sup>2)</sup>。このため、本システムを継続して販売するためには次世代の低GWP (Global Warming Potential: 地球温暖化係数) 冷媒への転換が必須である。また本システムは、熱源温度90℃をターゲットとして開発されたため、熱源温度80℃以下での飽和蒸気圧が下がる冷媒特性により性能低下も大きい。

従来の温水バイナリー発電システムでは放熱に開放式冷却塔を想定している。開放式冷却塔は外気と直接接触して冷却されることによって性能向上が図れる一方、冷

表1 温水バイナリー発電システムMB-70Hの仕様

Table 1 Specifications of binary cycle power generation system MB-70H for hot water

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



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

\* 技術開発本部 機械研究所

却水の汚れによる熱交換器閉塞など水質に起因するトラブルが多い。こうしたトラブルを防止し、バイナリー発電システムの年間稼働率を向上させることが課題となっている。また、開放式冷却塔は放熱量のおよそ80%が蒸発潜熱によるため水消費量が多く、水使用料金による発電メリットの低下を軽減させることも課題である。

以上の観点から、本開発ではGWPが100以下の次世代低GWP冷媒を使用し、熱源温度80℃以下の条件においても現行製品の発電性能を上回ることを目標とした。発電性能試験は、既存の機器に変更を加えずに新たな冷媒を封入するドロップイン試験とした。また、年間稼働率向上および水消費量の削減を目的に、空冷ドライクーラを組み合わせたシステム試験を実施し、外気温度変化による性能の実測と、得られた結果から年間累積発電量を試算した。なお、地熱FIT<sup>注1)</sup>による買取価格を40円/kWhとした場合、メンテナンス費も含めた設備投資回収年数7年未満を目標とした。この目標は年間累積発電量185 MWh/年、平均発電量30 kWである。

## 1. 冷媒および潤滑油の選定

### 1.1 サイクル計算による冷媒の選定

本開発では、上で述べた温水バイナリーユニットで用いるスクリュタービンを発電機として使用する。本タービンは従来、冷媒であるHFC245faに対して設計されているため、開発機向けに選定する冷媒物性はHFC245faに近いものが望ましい。HFC245fa代替とされる冷媒<sup>3)</sup>の中から冷媒物性および入手性を考慮し、HFO1336mzz(E)およびHFO1336mzz(Z)を候補として検討した。

冷媒の選定はサイクル線図によって行った。サイクルは基本的なランキンサイクルを想定し、外部熱源条件や各機器性能（タービン効率や熱交換器ピンチ温度差）を同一として冷媒物性による発電量の変化を計算した。各冷媒の熱力学的物性データにはNIST Refprop ver9.0<sup>4)</sup>を用いた。発電量の計算では、蒸発器および凝縮器の圧力を固定し、熱源水の条件から所定のピンチ温度差になるまで収束計算を行った。詳細は既報<sup>1)</sup>を参照されたい。発電量を算出する際の計算条件は、温水：80℃、75 t/h、冷却水：25℃、60 t/h、各熱交換器ピンチ温度差を3.0℃、蒸発器過熱度および凝縮器過冷却度を5.0℃、膨張機吸込体積流量400 m<sup>3</sup>/h、膨張機断熱効率75%、冷媒ポンプ効率50%とした。

結果を表2に示す。発電機での出力を発電端出力、発電端出力からシステム内部消費となる冷媒ポンプ動力を減じたものを送電端出力とした。発電端出力で比較すると

表2 各冷媒のサイクル性能比較

Table 2 Comparison of cycle performances of each refrigerant

	HFC245fa	HFO1336mzz(E)	HFO1336mzz(Z)
GWP	858	18	2
Heat input	797.3	919.0	508.3
Expansion ratio	2.63	2.34	3.43
Density of Expander inlet	33.0	49.7	22.2
Generating-end output	45.1	48.0	33.1
Refrigerant pump power	2.1	3.1	0.9
Sending-end output	43.0	44.9	32.2

脚注1) 固定価格買取制度 (Feed-in-tariff)。

HFO1336mzz(E)は48.0 kWであり、HFC245faの45.1 kWに対して6.4%高い。これは、膨張機体積流量一定では、吸込ガス密度の高いHFO1336mzz(E)がHFC245faよりも多くの熱量を取り込むことが可能であることを示している。いっぽう冷媒ポンプ動力は、循環冷媒量が多くなることで48%増加し、送電端としては4.4%の向上にとどまる。

もう一つの冷媒候補であるHFO1336mzz(Z)は、吸込密度が低く入熱量が低下するため、送電端でHFC245faの75%出力と低下した。

### 1.2 安定性評価および冷媒溶解度による油適合性の検討

HFO系およびHFC系冷媒では一般に、適合油として冷媒に対して高い安定性を示すPOE (ポリ・オール・エステル) 合成油が使用される。いっぽうで当社バイナリー発電システムでは、PAG (ポリ・アルキレン・グリコール) 合成油を使用している。そこで、PAG2種、POE1種を候補として安定性評価を実施した。安定性評価試験にはオートクレーブ試験 (JIS K 2211) を用いた。冷媒と油を1対1で混合し、基準となる熱源温度80℃に対して余裕度を50℃とした130℃で14日間の浸漬試験を行い、劣化特性を評価した。結果を表3に示す。

温度などの影響で冷媒が分解するとふっ酸が発生し、同時に油の分解も起こって酸価が上昇する。当社では酸価0.1未満を基準値としている。酸価は、HFO1336mzz(Z)とPAG合成油Aの組み合わせのみ0.1を超えたが、他の組み合わせでは0.1未満の良好な値を示している。また試験後の油の外観に関しても、劣化時特有の鉄さび由来の褐色化も一切確認されず、130℃未満においてはいずれの組み合わせも十分な安定性を有すると結論づけた。

潤滑油は冷媒と同時にシステム内を循環するため、冷媒への溶解度が低いとバイナリー発電システム内の意図しない配管部分で冷媒と油が比重差により二相に分離することが懸念される。分離した場合、液相の均一性が失われて軸受け部が油不足になり、焼き付きが発生することも考えられる。いっぽうで冷媒溶解度が高すぎると油相が適切な粘度を保持できなくなり、同様に軸受け焼き付きの原因となる。したがって潤滑油選定にあたり、適切な冷媒溶解度・粘度を有する油を選定することが肝要である。

HFO1336mzz(E)に対する各油の冷媒溶解度の測定結果を図2に示す。図の縦軸は温度を、横軸は全重量に対する合成油の割合を重量比率で整理した。図の実線は冷媒ガス相に対する合成油の溶解度を、点線は冷媒液相に対する溶解度を示している。PAG合成油AおよびB

表3 各合成油の安定性評価試験の結果

Table 3 Results of stability evaluation test for each synthetic oil

	HFO1336mzz(E)		
	PAG synthetic oil A	PAG synthetic oil B	POE synthetic oil
Color	L 0.5	L 0.5	L 0.5
Acid value	0.01	0.08	0.01
	HFO1336mzz(Z)		
	PAG synthetic oil A	PAG synthetic oil B	POE synthetic oil
Color	L 0.5	L 0.5	L 0.5
Acid value	0.11	0.00	0.01

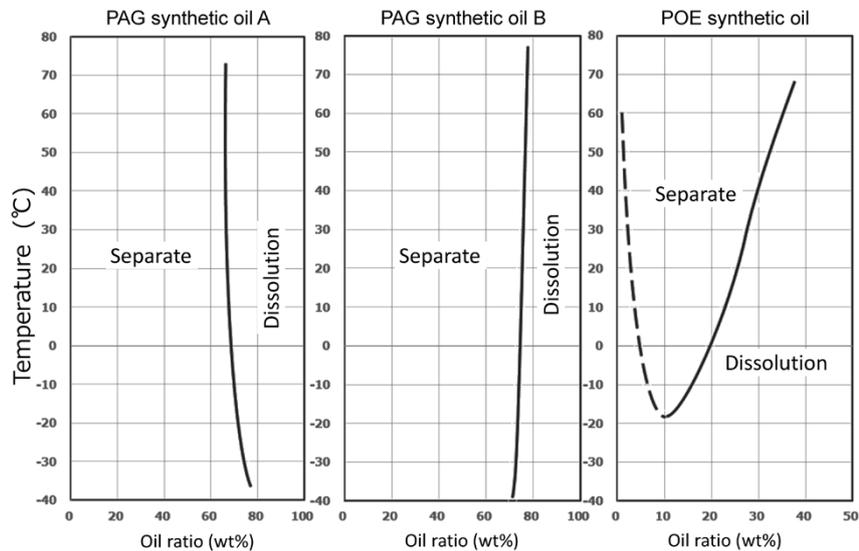


図2 R1336mzz (E) に対する各油の冷媒溶解度  
Fig.2 Refrigerant solubility of each oil in R1336mzz (E)

は二相分離域が広いうえに、点線の冷媒液相に対する溶解度が存在せず、冷媒液相が油を溶解しないことを示している。すなわち、PAG合成油はシステム内配管の意図しない場所で相分離し軸受けの油不足を引き起こす可能性が高いといえる。例えば凝縮器後に冷媒液が20~40℃となるが、PAG合成油は二相分離する可能性が高い。いっぽうでPOE合成油は、冷媒相が油を一定量溶解するため均一層で安定的に送液可能であり、システムへの適合性が高いことが分かった。

以上の安定性評価および溶解度適合性評価の結果から、本システムでは冷媒にHFO1366mzz(E)とPOE合成油を選定した。

## 2. 空冷ドライクーラによる冷却の検討

空冷ドライクーラは、冬季の最大出力時における約1MWの放熱量を考慮し、アルファ・ラバル社製の空冷ドライクーラを採用した。その概略図を図3に、主な仕様を表4に示す。バイナリー発電システムは、とくに地熱利用において腐食ガス環境に設置されることも想定し、耐環境性を考慮した材料選定を行った。すなわち、伝熱性能的に不利ではあるが、伝熱管にSUS304、フィンにはエポキシコーティングを採用した。空冷ドライクーラはファンによる送風で冷却を行う。このため、風量増加によって冷却性能は向上し、発電端出力は向上す

表4 空冷ドライクーラの主な仕様

Table 4 Main specifications of air-cooled dry cooler

<Approximate dimension>			
Width	7,200 mm	Depth	2,280 mm
Height	2,500 mm	Dry weight	2,850 kg
<Design point data>			
Inlet air temp.	6.2℃	Inlet water temp.	36.4℃
Outlet air temp.	30.4℃	Outlet water temp.	28.0℃
Cooling capacity	915 kW	Flow rate	100 m <sup>3</sup> /h
		Pressure drop	80 kPa
<Fan specifications>			
Flow rate	120,000 m <sup>3</sup> /h	number of fans	10
<Heat transfer coil specifications>			
Heat transfer area	2,954 m <sup>2</sup>	Material of tube	SUS 304
Material of fin	Aluminum with epoxy coating		

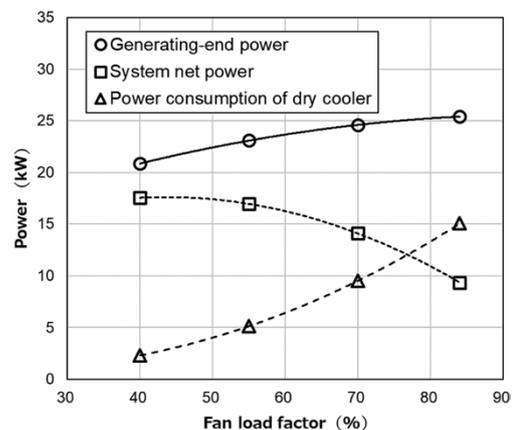


図4 システム正味出力とドライクーラ消費電力の関係  
Fig.4 Relationship between system net power and power consumption of dry cooler

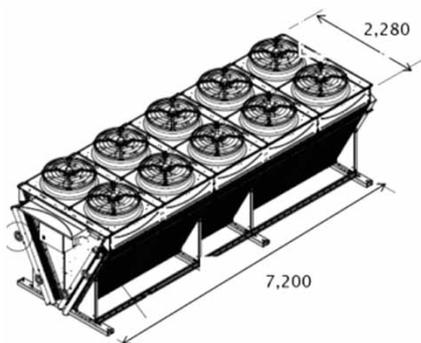


図3 空冷ドライクーラの概略図  
Fig.3 Schematic diagram of air-cooled dry cooler

る。しかしながらその反面、ファンの消費動力が増加することからシステムの正味発電出力は減少する。

そこでファン動力の最適点を探るため、バイナリー発電システムとの組み合わせによるシステム性能の検討を進めた。検討にあたっては、当社内製のMB-70H性能計算シミュレータと、任意の外気温度・ファン回転数条件下で空冷ドライクーラ性能を計算する性能モデルとを組み合わせ、システム全体の正味発電電力を試算した。その結果を図4に示す。図の横軸はファンの最大回転数

に対する負荷率であり、縦軸は送電端出力、ドライクーラ消費電力、および発電端出力からドライクーラの消費電力を差し引いたシステム全体の正味出力である。ファン出力を上げることによってバイナリー発電システムの発電端出力は緩やかに向上するが、ドライクーラ消費電力の上昇が勝り、システム正味出力は減少する。本システムにおいてはファン出力を極力抑えることがシステム効率上有効と示唆された。なお、本検討結果は既存のMB-70Hに対する検討結果であり、後述する低GWP冷媒を用いたドロップイン試験において最適な負荷率を確認する。

### 3. 新冷媒を適用するバイナリー発電システムの発電性能

前章までの検討より決定した冷媒および油を試験システムに充填し、発電性能確認試験を実施した。温水熱源の温度と送電端出力との関係を図5に示す。比較のため、HFC245faを冷媒とする現行機種MB-70Hの場合を図中の破線で示す。図より新冷媒による発電結果では70~80℃の範囲で現行機種より発電出力が増加しており、70℃では約4.5 kWの増加が確認された。温水熱源温度の上昇に伴ってその差は縮まり、85℃ではほぼ同等、90℃では逆に約2 kW低下する結果となった。温水熱源温度が低い範囲では、前述の冷媒特性により狙い通りの性能向上を達成したと考える。しかし、高温になるに伴って冷媒循環量が増加し、各部圧力損失の増加による膨張比の低下、またそれに伴う冷媒ポンプ動力の増加が大きく影響したと考えられる。

温水熱源温度を80℃に固定し、冷却水温度を変化させた送電端出力の結果を図6に示す。図5と同様、破線は現行機種の出力を示す。図より20~33℃の範囲で現行機種に対して発電出力は増加しており、冷却水温度の低下に伴って現行機種との出力差は小さくなっている。

以上より、新冷媒による発電性能は冷媒循環量の少ない低負荷時に性能向上するものの、高負荷時に同等、あるいは現行機種を下回ることが分かった。配管サイズアップによる圧力損失低減や適切な冷媒ポンプの再選定によりさらなる性能向上が期待できる。

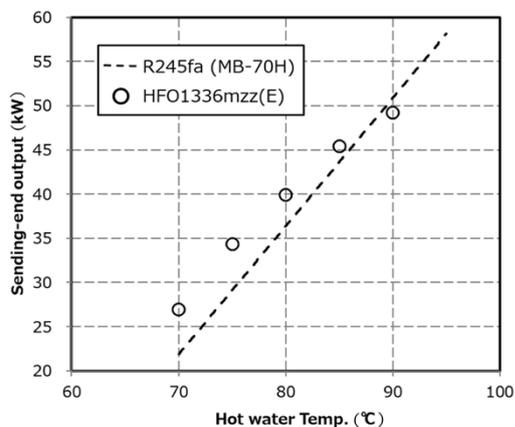


図5 温水温度と送電端出力との関係

Fig.5 Relationship between hot water temperature and sending-end output

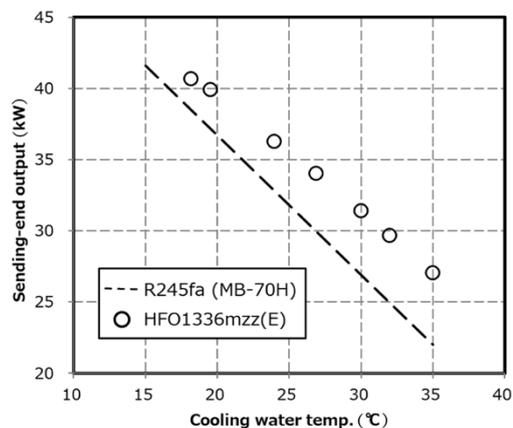


図6 冷却水温度と送電端出力との関係

Fig.6 Relationship between hot water temperature and sending-end output

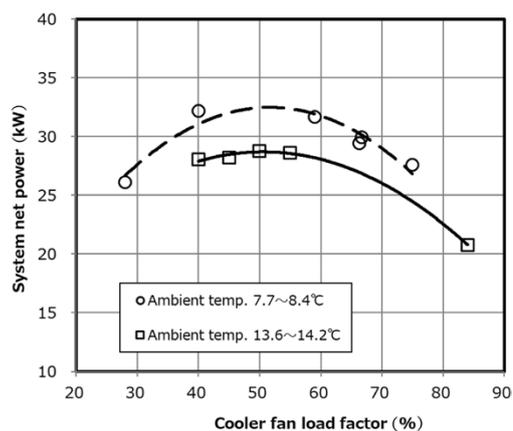


図7 クーラファン回転数とシステム正味出力との関係

Fig.7 Relationship between cooler fan load and system net power

空冷ドライクーラを冷却源とした際のシステム性能を実測により確認した結果を図7に示す。横軸はファン負荷率を、縦軸はシステムの正味出力であり、外気温度が約8℃前後および14℃前後の結果を示した。いずれの外気温度においてもファン出力が50%付近で極大となっており、2章での検討どおりファン出力を抑える運転が最適になることが確認できた。なお、事前検討時には40%前後であった最適点が50%付近にずれた理由は、冷媒変更によって膨張機吸込ガス密度が上がり、バイナリー発電システムの発電端出力が向上したことによる。

### 4. 年間累積発電量の推算

冷媒としてHFO1336mzz(E)を採用した空冷冷却バイナリー発電システムの試験結果から、年間の外気温変化による年間累積発電電力量を試算した。外気温には神戸市の年間気温データを使用した。なお、外気温が高くて発電出力が低下する7~9月の3箇月はメンテナンス期間として運転を休止した。

試算結果を図8に示す。累積発電電力量は190.2 MWh/年と試算され、平均発電電力は目標の30 kWをわずかに下回り約29 kWとなった。平均発電電力の向上には、外気温が15~20℃となる中間期(4~6, 9~11月)における発電出力の改善が必要であり、前述した圧力損失改善などによって達成可能と考える。

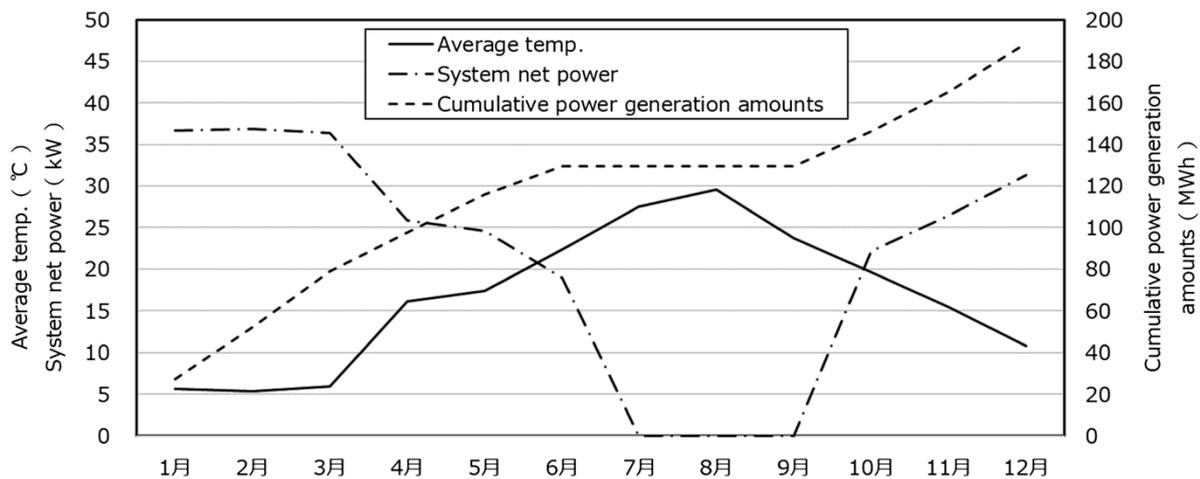


図8 神戸市の年間気温を例としたシステム正味出力および年間累積発電量の予測

Fig.8 Prediction of system net power and amount of cumulative power generation using annual ambient temperature of Kobe city

むすび = 低GWP冷媒への対応や年間稼働率の向上を目的に、現行機種へのドロップイン試験および空冷化試験を実施し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 低GWP冷媒であるHFO1336mzz(E)とPOE合成油との組み合わせで発電性能試験を実施した。その結果、80℃以下の温水温度では現行機種を上回る性能が得られた。冷却水温度変化による試験結果からも、広い範囲で現行機種を上回る発電性能が確認された。
- (2) 上記の発電性能向上は温水温度が高くなるにつれて現行機種との差が縮まり、90℃では下回ることが確認された。この結果は冷媒圧損によるものが支配的と考えられ、配管サイズの最適化によりさらなる性能向上が期待される。
- (3) 空冷化によるシステム性能を試験し、選定したドライクーラのファン負荷率は50%程度で最適点になることを確認した。なお、最適点はドライクーラの容量によって変わる。
- (4) 神戸市を例とした年間累積発電量を試算した結果、累積発電電力量は190 MWh/年、平均発電電力は約29 kWとなった。平均発電電力の向上には、外気温が15~20℃の中間期での発電性能を向上させることが必要である。

本開発は、平成28~30年度の環境省委託事業「低温熱源活用発電技術実用化推進事業」により遂行された。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 高橋和雄ほか, R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.2.
- 2) 環境省ホームページ. キガリ改正を踏まえた新たな代替フロン規制の基本的事項等について. 平成29年, <https://www.env.go.jp/press/y0615-05/mat02.pdf>. (参照 2020-01-14).
- 3) Jason R. Juhaz. 12th IEA Heat Pump Conference. 2017. Rotterdam. O.3.3.4.
- 4) National Institute of Standards and Technology (NIST). REFPROP Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database. <https://www.nist.gov/srd/refprop>. (参照 2010-01-14).



藤澤 亮

技術開発本部 機械研究所



高橋和雄

技術開発本部 機械研究所



前田基秀

技術開発本部 機械研究所



川口泰平

技術開発本部 機械研究所