

250kW級 小型バイナリー発電設備 ーグリーンバイナリータービンー

250kW Turbine Generator based on Organic Rankine Cycle with Effective Use of Low Temperature Heat Source – Green Binary Turbine –



溝口 和彦① Kazuhiko Mizoguchi
 清水 元② Hajime Shimizu
 鈴木 宏和③ Hirokazu Suzuki
 三宅 直樹④ Naoki Miyake
 今野 優子⑤ Yuko Konno
 山下 誠二⑥ Seiji Yamashita
 澤田 正志⑦ Masashi Sawada

従来は利用されずに分散して存在する排熱（80～120℃）の回収を目的として、低沸点である代替フロンを作動媒体に用いた「グリーンバイナリータービン」を開発した。

当社神戸工場内の自家発電所（神戸パワーセンター）でのガスエンジン排温水熱源利用でのデモ運転を経て、地熱利用の九州電力㈱との実証試験への取り組みや、低温蒸気利用のごみ焼却工場などの排熱高度活用プロジェクトへの参画など、多様な熱源に対応する製品展開を進めている。

We have developed a “green binary turbine” that uses low-boiling-point alternative CFCs as the working fluid with the aim of recovering distributed waste heat that exists in unused condition (80-120°C). After a demonstration that used a waste hot water source from a gas engine at the in-house power station of our Kobe Works, we are pushing ahead with the development of products compatible with diversified heat sources by conducting geothermal power generation verification tests jointly with Kyushu Electric Power Corporation and participating in advanced waste heat utilization projects using low-temperature steam such as waste incineration plants.

まえがき

当社では、工場や発電所、ごみ焼却場の排温水など、従来は利用されずに分散して存在する排熱（80～120℃）の回収を目的に、低沸点である代替フロンを作動媒体に用いた単純ランキンサイクルの250kW級小型バイナリー発電設備「グリーンバイナリータービン」を開発した。2010年に、当社神戸工場内の自家発電所「神戸パワーセンター」に設置し、現在まで順調に運転を続けている。当社製「グリーンガスエンジン」と組み合わせ、発電所総合効率50%超と小規模発電所としては類を見ない効率を有している。

本稿で紹介する小型バイナリー発電設備は、当社が1980年代初頭に開発・製作したフロン（CFC-11：現在は規制により製造されていない）を作動媒体とする2～4MW級バイナリー発電設備の知見に基づいたものである。タービン発電機は、最新のパワーエレクトロニクス技術によりタービンと発電機を一体化し、かつ、高速回転させることでコンパクト化を図っている。また、作動媒体を完全に密封し、系外への媒体の漏洩が無いという特長を有する。

1 概要

(1) 主要諸元

神戸パワーセンターに設置したグリーンバイナリータービンと熱交換器の主要諸元を表1に示す。

表1 主要諸元
Table 1 Main specifications

要 目	仕 様	
サイクル	ランキンサイクル	
作動媒体	代替フロン	
発電機端出力 (kW)	250	
タービン型式	横型単段ダブルインベラ式	
発電機型式	永久磁石3相交流高周波同期発電機	
発電機容量 (kVA)	250 (力率1.0)	
回 転 数 (min ⁻¹)	約9,000 (可変速式)	
蒸 発 器	流下液膜式シェル&フィンチューブ式	
(熱源) 循環温水	入口温度 (°C)	98 ^{*1)}
	流量 (t/h)	180 ^{*1)}
凝縮器型式		シェル&フィンチューブ式
(冷却源) 循環冷却水	温度 (°C)	20 ^{*1)}
	流量 (t/h)	480 ^{*1)}
CO ₂ 削減量	約550t-CO ₂ /年 ^{*2)}	

*1) 定格条件：250kWの発電に必要な温水・冷却水条件
 *2) 発電出力パッケージ内補機動力

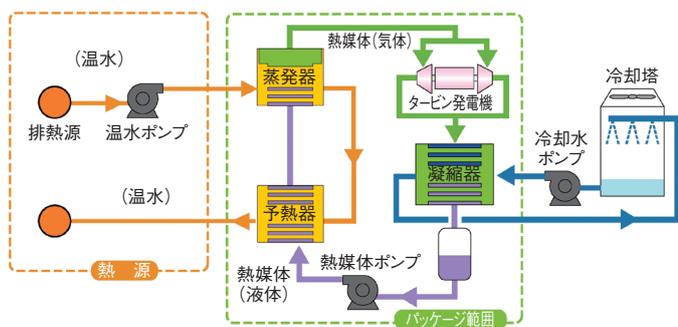


図1 サイクル構成
Fig.1 Cycle composition

(2) サイクル構成

基本的な作動媒体サイクル構成を図1に示す。タービン発電機と蒸発器、凝縮器など媒体系統機器が含まれたパッケージ範囲を基本構成とし、温水系統、冷却水系統はパッケージ範囲外としている。熱源にはさまざまな形態があるので、それに応じてパッケージ範囲外を設計する必要がある。

媒体は、液体の状態です予熱器を通り加温された後、蒸発器において飽和蒸気となる。飽和蒸気はタービン発電機で250kWの動力を発生させた後、凝縮器で凝縮され液体となる。タービン発電機や構成機器からの媒体の漏洩は無く、完全に密閉なサイクルを実現している。

凝縮器に水冷式を採用したので、空冷式凝縮器を採用した場合と比較して、主媒体蒸気とタービン排気の有効熱落差が大きいため、サイクル効率が向上する。

2 特長

(1) タービン発電機

タービン発電機の断面図を図2に示す。タービンと発電機が一体構造であること、さらに発電機ロータとステータの間に薄肉円筒状のキャンを挿入することで媒体の漏洩が無いことが特長である。

発電機ロータの両端にインペラを装着するダブルフロー構造とすることで、シングルフローと比較して小径インペ

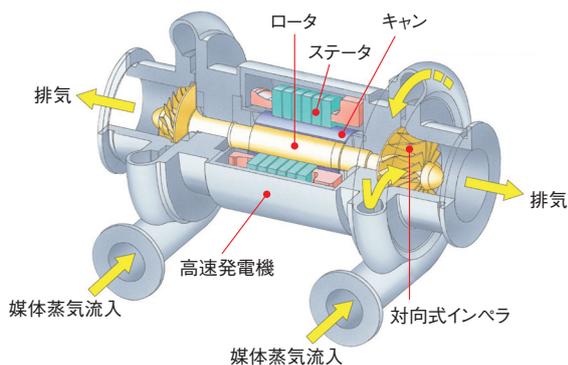


図2 タービン発電機カットモデル
Fig.2 Turbine cut model

ラが採用できるため、高速回転化が可能となり、発電機のコンパクト化を図っている。また、タービンと発電機を軸直結していることから、一般的に採用される減速装置が不要となる。

キャンは媒体との適合性試験、および圧力・熱サイクル試験を実施し、強度や媒体の漏洩に問題が無いことを確認した上で採用している。

発電機ロータ部の冷却は媒体蒸気で行っている。通常は軸にファンを設け、ロータとステータを共に空冷するが、ロータ部はキャン内部構造となるため、空冷式ファン冷却ができない。よって、発電機ステータ部のみを冷却するために、外部に送風ファンを設けている。

インペラの形状および発電機の冷却流路形状は、数値流体力学(CFD)解析により、採用されている媒体の特性に合わせて最適化を図っている。

(2) 熱交換器

蒸発器は流下液膜式とすることで、蒸発器の胴側に管群全体を浸すまで媒体を満たす必要がなく、比較的高価な媒体の保有量を最少化している。なお、流下液膜式蒸発器は当社グループ企業の吸収冷凍機の技術を適用するとともに、蒸発における熱伝達は伝熱特性試験により特性を十分に把握したことで、コンパクトな蒸発器とすることができた。

凝縮器は過去の2～4MW級バイナリー発電設備で実績のある冷却管の配列や構造を採用している。

(3) 媒体

環境性、安全性、熱物性、取り扱いやすさ、入手性、規制などから総合的に評価し、環境特性に優れ(オゾン破壊係数が0、地球温暖化係数は比較的低い)、毒性・腐食性が無く、不燃性で、潜熱/顕熱比が小さく、大気圧力下の常温付近で液体である媒体として代替フロンを選定した。

(4) 電気・制御系統

電気・制御系統の構成を図3に示す。

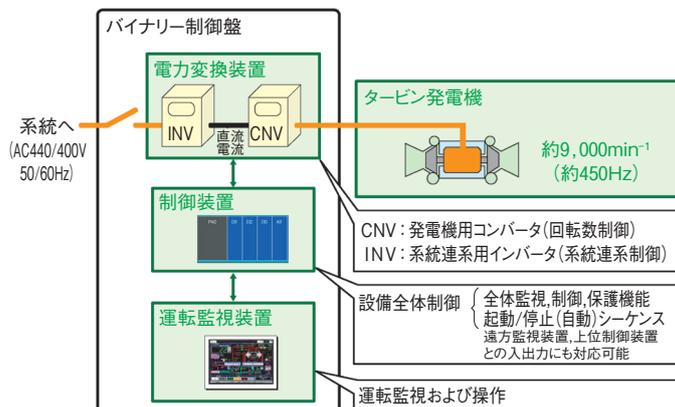


図3 電気・制御系統図
Fig.3 Diagram of electric and control systems

発電機の周波数約450Hzを直流化し、かつ発電機回転数を制御する発電機用コンバータ、直流を系統周波数に一致した交流とする系統連係用インバータ、および設備全体の監視・制御・保護機能を有し、自動起動/停止シーケンスを内蔵した制御装置、さらに運転操作端を一体構造とした盤としている。

また、遠方監視装置、上位計算機との入出力にも対応可能としている。

(5) 部分負荷特性

バイナリー発電設備では、熱源の温度が低く、冷却は大気温度程度であるため、有効利用できる温度差が小さい。夏季のような大気温度が高い場合は、さらに温度差が小さくなり、タービン排気圧力が上昇するため、大きく設計点からずれることになる。このような場合、定格回転数（約9,000min⁻¹）での運転ではタービン効率がかかなり低下する。しかし、電力変換装置によりタービン発電機回転数を系統周波数と独立して制御できるので、約7,000min⁻¹まで下げることによって、部分負荷効率を高く維持しながら運転することが可能である。

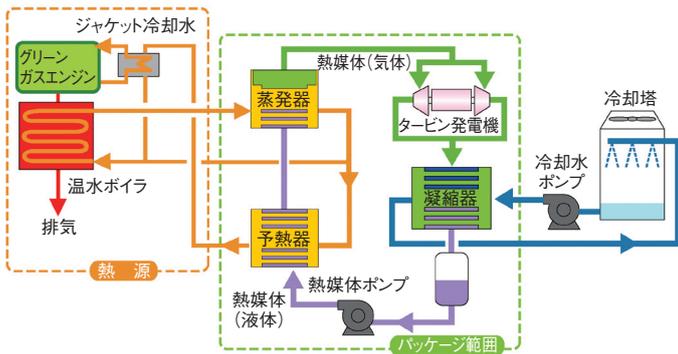


図4 神戸パワーセンターでのサイクル構成
Fig. 4 Composition of binary cycle at Kobe Power Center

3 適用事例

(1) ガスエンジンへの適用

当社神戸パワーセンターでのグリーンガスエンジン「KG-12-V 5000kW」と組み合わせたバイナリーサイクル構成を図4に、機器配置構成例を図5に示す。

蒸発器、予熱器で熱を利用した後の温水出口温度は、ガスエンジンのジャケット冷却水供給温度に合わせている。ガスエンジンのジャケット冷却熱と排ガス熱を用い、温度98℃、流量180t/hの温水を得て、250kW（発電機端）の発電を行っている。

グリーンガスエンジンは、単機で世界最高効率の49%を達成しており、グリーンバイナリータービンと組み合わせることで、発電所総合効率50%超を達成した。

(2) 地熱発電への適用

本装置は、低温熱源を利用する発電設備として開発したが、自然エネルギーを利用した地熱発電への適用性を確認するために、九州電力㈱と共同で地熱利用小規模バイナリー発電設備の実証試験にも取り組んでいる。

本実証試験設備のサイクル構成を図6に示す。従来の蒸気タービンによる発電では、噴出する蒸気と熱水から、蒸気だけを発電に利用し、熱水は地中へ還元している。この実証試験では、地中へ還元する熱水の一部をバイナリー発電に利用する。

本設備は鹿児島県指宿市にある山川発電所内に設置し、地熱流体に対する熱回収技術、スケール対策、腐食対策、設備性能、経済性などについての評価を2013年度末までに行う計画である。

(3) ごみ焼却工場の排熱活用

大阪市環境局のごみ焼却工場では、ごみの焼却熱で蒸気が発生させ、発電や場内の給湯・暖房に有効利用している。大阪ガス㈱、大阪市、大阪府と当社で行う共同実証事業

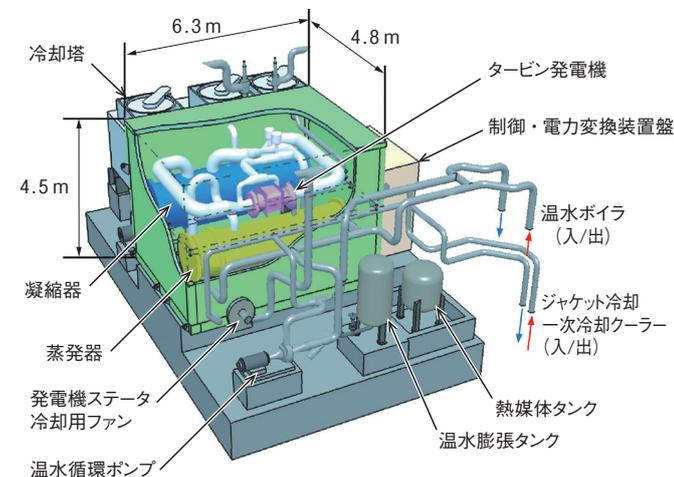


図5 機器配置構成例
Fig. 5 Example of layout and configuration

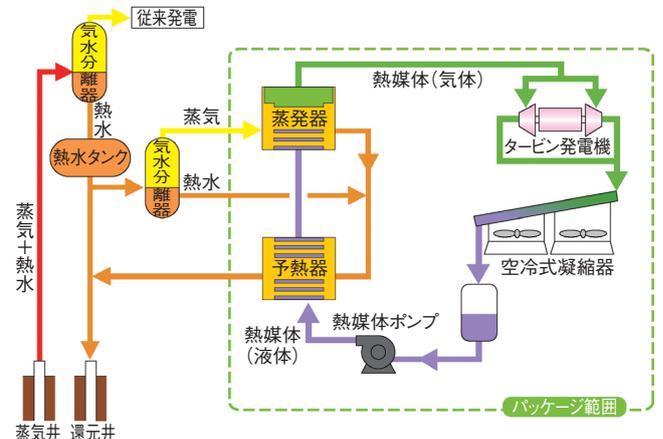


図6 地熱利用小規模バイナリー発電実証試験におけるサイクル構成
Fig. 6 Composition of cycle in demonstration test for small-scale geothermal binary power generation

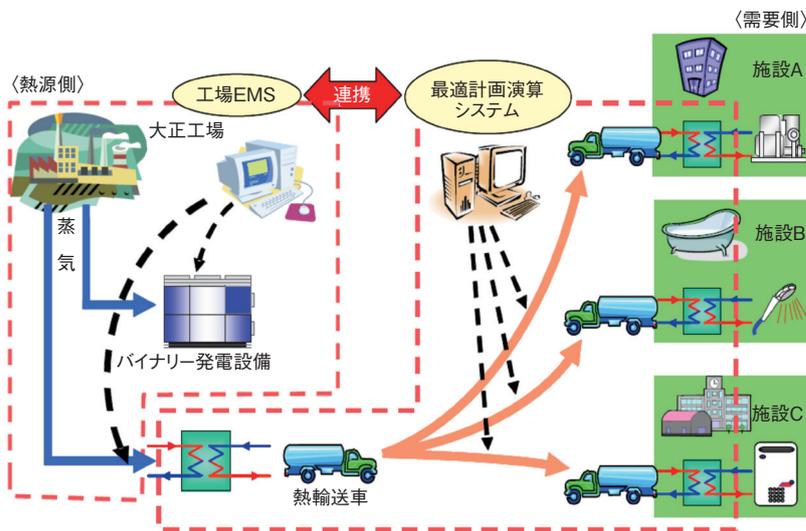


図7 「ごみ焼却工場等の都市排熱高度活用プロジェクト」におけるシステム構成
 Fig.7 System configuration for “Waste Heat Utilization from City Incinerators, Etc.” project

「ごみ焼却工場等の都市排熱高度活用プロジェクト」では、実証試験の実証場所として大正工場を選定し、バイナリー発電設備による発電と、蓄熱輸送システムによる未利用排熱の近隣コミュニティ内での利用と、さらに、それらの最適化により、総合エネルギー効率を25%向上させることを目指している。

プロジェクトの全体システムの構成を図7に示す。

主要設備・システムとして、当社からバイナリー発電設備、工場エネルギーマネジメントシステム（EMS）、および大阪ガス㈱から蓄熱輸送システムが導入される。

① バイナリー発電設備

熱源は、同工場に設置されている蒸気タービンの排気熱である。従来は温度が低く発電に利用できなかったが、低温熱を有効利用できるバイナリー発電設備により発電することが可能である。

② 蓄熱輸送システム

ごみ焼却熱を蓄熱槽に蓄え、コミュニティの複数の需要家に輸送供給することができる。

③ 工場エネルギーマネジメントシステム（EMS）

近隣コミュニティ内の熱利用状況に応じ、焼却熱を電気に変換（発電）するか、熱のまま利用（熱輸送）するかを最適化する。

2012年度中に試運転を経て実証運用を開始し、2013年度末まで技術実証を行う計画である。

あとがき

グリーンバイナリータービンは、排ガス、排蒸気や排温水あるいは地熱温水など、分散して存在する未利用の低温熱源から電力回収する製品として、開発を行ったものである。初号機を設置した神戸パワーセンターには、多数の見学者が訪れ、本製品が省エネ機器として期待されているこ

とを改めて実感している。

しかし、従来の発電設備や他の省エネ機器と比較すると低温熱利用であるが故にコストの壁は依然として高い。

一方で、地熱発電に再生可能エネルギーの電力買取制度（FIT）が適用可能となり経済性が改善すること、また九州電力㈱との共同研究を通じ地熱発電の実績を積みこすことで、地熱発電分野で本製品の展開に弾みが付くと考えている。

今後、さまざまな分散低温排熱源に対して適用を進め、幅広いユーザーのニーズに合った製品に育成していく所存である。

参考文献

- 1) 溝口和彦：“低温廃熱利用小型バイナリー発電設備「グリーンバイナリータービン」”，クリーンエネルギー，pp.24-28，20-1（2011）
- 2) 山下誠二：“自然エネルギー利用バイナリータービン発電システム”，日本ガスタービン学会誌，Vol.39，No.5，pp.20-24（2011）



溝口 和彦 清水 元 鈴木 宏和 三宅 直樹



今野 優子 山下 誠二 澤田 正志