

100 kW 級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator®」による エンジン排熱の回収

Waste Heat Recovery of an Engine Using the 100 kW ORC “Heat Innovator®”

頼 泰 弘 技術開発本部インキュベーションセンター 博士（工学）
 柴 田 成 康 IHI プラント建設株式会社 プラント統括部設計部 課長
 和 田 大 輔 技術開発本部インキュベーションセンター
 三 好 一 雄 技術開発本部インキュベーションセンター 主査
 秋 吉 亮 技術開発本部インキュベーションセンター 主幹 工学博士

バイナリー発電は低沸点媒体によってタービン発電機などを駆動させ電力を得るシステムで、従来未利用であった工場排熱や地熱を利用した発電が可能である。当社はエンジン排熱を回収し発電するバイナリー発電プラントシステムを構築し、すでに半年以上の実証運転を実施してきた。発電装置は R245fa を媒体とし、磁気軸受の採用によって摺動部がなくメンテナンスフリーで駆動できる。本稿では、100 kW 級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」によるエンジン排熱発電システムの開発および性能評価結果について報告する。

The Organic Rankine Cycle (ORC) can utilize low-temperature waste heat from factories, engine systems and geothermal plants by using a low boiling point medium as the working fluid to drive a Rankine cycle. IHI has developed 100 kW ORC power plant that recovers waste heat from the exhaust gas of an engine. The use of magnetic bearings in the turbo-generator helps to reduce mechanical loss and avoid lubricant contamination. This article presents the results obtained from an evaluation of the installation of the 100 kW ORC “Heat Innovator” in an engine power plant.

1. 緒 言

CO₂削減の国際的な要求が高まるなか、工場の省エネ技術、再生可能エネルギーの導入が求められており、従来未利用であった低温（200℃以下）の排熱を利用できるバイナリー発電に注目が集まっている。なかでも有機ランキンサイクル（Organic Rankine Cycle：ORC）は、水と比べて沸点の低い代替フロンやペンタンなどの有機媒体を作用流体としてランキンサイクルを構成し、熱源からの熱によって蒸発した有機媒体を膨張機に導入し動力を得る手法である。国内においては2014年5月の電気事業法の省令改正など⁽¹⁾によって、第1表に示す全ての条件を満たせば、バイナリー発電設備にボイラー・タービン主任技術者を選任しなくてもよく、工事計画書の届出が不要など、設置に必要な手続きが大幅に簡略化された。そのため小規模な工場や温泉などにバイナリー発電を導入する際の障壁が低くなり、導入が急速に進んでいる。

当社ではこれまで20 kW 級バイナリー発電装置「ヒートリカバリー（HR シリーズ）」を2013年8月から販売開始しており⁽²⁾、すでに温泉や工場での実績を積んでいる。

第1表 バイナリー発電に関する電気事業法規制緩和条件
Table 1 Deregulatory conditions stipulated under the Japanese Electric Utility Law that concern ORC

項 目	規 制 緩 和 条 件
全 般	熱源が熱水・蒸気
	作用媒体が不活性ガス
	一般公衆が窒息しない構造
バイナリー発電	出力が 300 kW 未満
	最高使用圧力が 2 MPa 未満
	最高使用温度が 250℃ 未満
	タービン駆動部が発電機と一体であり、きょう体に収納されていること
	タービン駆動部の破損時に、破片が設備外部に飛散しないこと

また、エンジン排ガスやジャケット冷却水の熱を利用するため、より大容量の装置として100 kW 級のバイナリー発電装置について、Verdicorp社（アメリカ）のタービン発電機と、当社のもつエンジニアリング力を活用し、排熱回収システム、プラントの基本・プロセス設計・施工など、プラント全体のお客さまへの提案から施工までを実施している⁽³⁾。

IHIグループで販売している事業用ガスエンジンは発電効率47.8%（新潟原動機株式会社18V28AGS）、ディーゼルエンジンは46.0%（新潟原動機株式会社18V28AHX）

を達成しており⁽⁴⁾、排ガスおよびジャケット冷却水を熱源としたバイナリー発電装置を導入すれば、総合効率が50%を超えるシステムを構築できる。

本稿では、有機ランキンサイクルを利用した100 kW級中型バイナリー発電装置のディーゼルエンジン排熱への適用、および実証試験結果について述べる。

2. フィールド実証試験

2.1 全体設計

第1図にフィールド実証試験場のフロー概略図、また第2表に100 kW級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」の仕様を示す。熱源はディーゼルエンジン（出力5 MW）の排ガスで、排ガスは脱硝装置、サイレンサ、煙突を経由して大気に放出される。今回、実証試験のために脱硝装置下流側の排ガスラインに排ガス温水ボイラを設置した。また、排ガスラインにはボイラを迂回するバイパスラインおよびそれぞれのラインにダンパを設け、ダンパ開度を調節することでボイラ、バイパスラインへの排ガス流量を調整し高温水温度を制御した。

高温水ラインは水温が100℃を超えるため加圧系（高温水圧力0.8 MPa）とした。ポンプによって高温水はボイラへと導入され、排ガスからの入熱によって加熱されたのち、蒸発器に導入される。蒸発器では高温水と冷媒とが熱交換し、冷媒を蒸発させる。蒸発器を出た高温水は再びポンプ吸入側に供給され、高温水ラインを循環する。

今回の実証試験では排ガスの熱のみを利用しているが、エンジンのジャケット冷却水からの排熱も利用できる。

2.2 ディーゼルエンジン

本実証試験において、熱源は16V32CXディーゼルエンジン（新潟原動機株式会社）の排ガスであり、排ガス温度は360℃である。本エンジンの排ガスからは1500 kW程度の熱が利用可能であり、バイナリー発電装

第2表 100 kW級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」仕様
Table 2 Specifications for the 100 kW ORC “Heat Innovator”

システム方式	有機ランキンサイクル
発電方法	磁気軸受式1段遠心タービン/永久磁石同期発電機
作動媒体	R245fa（不活性ガス）
熱源温度	80～200℃
最大発電出力	113 kW（発電機端）

置1台による回収熱量が約800 kWであることから、本エンジンからは100 kW機約2台分の熱量を確保できる。

2.3 排ガス温水ボイラ

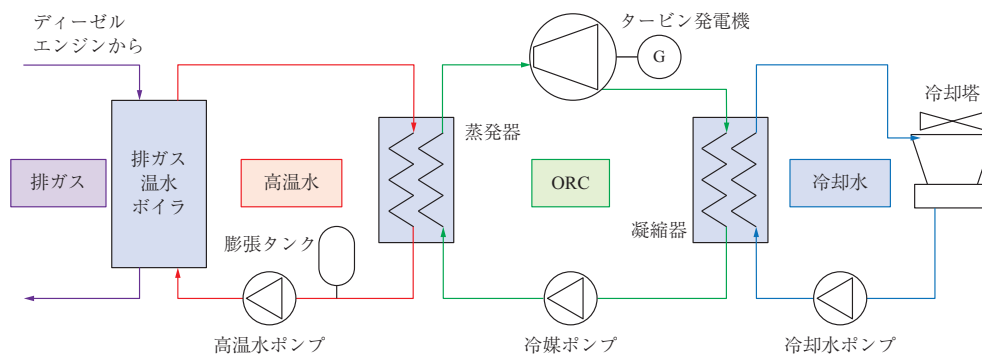
排ガスからの熱回収は排ガス温水ボイラ（株式会社IHI汎用ボイラ）を使用した（第2図）。ボイラは管寄せ、フィンチューブ、ケーシングから成り、高温水は下部管寄せを経て排ガス流内に挿入されているフィンチューブに入り、排ガスとの間で熱交換が行われる。

ボイラの設計では排ガス出口温度を酸露点以上とし、またエンジン背圧の許容値から排ガス側のボイラ圧力損失を1.5 kPa程度とし、フィンチューブの間隔や寸法を定めた。

また、ディーゼルエンジンからの煤や灰がフィンチュー



第2図 排ガス温水ボイラ
Fig. 2 Exhaust gas waste heat recovery boiler



第1図 フロー概略図
Fig. 1 Schematic of the system

ブの伝熱面に付着し伝熱性能が劣化するため、煤吹器（スートブロー）をボイラ内上下に2か所設置した。

2.4 バイナリー発電装置

バイナリー発電装置は、R245fa を冷媒として使用したランキンサイクルを構成しており、①冷媒ポンプ②蒸発器③タービン発電機④凝縮器、などから成る。第3図にバイナリー発電装置の外観を示す。タービン発電機は1段遠心タービンと永久磁石同期発電機が一体で構成されており、軸の支持には磁気軸受を採用したため摺動部がない。このため、タービンおよび発電機部が耐圧ケーシング内に収納されて、シール部はないことから冷媒の漏れがなく、オイルフリーでメンテナンス性に優れている。

タービン発電機を含むバイナリー発電関連機器は第4図に示すようなエンクロージャ内に格納した。このエンクロージャにはほかに動力盤、制御盤、トランスなどを収めた。

2.5 冷却塔

タービン発電機を通して圧力が低下した冷媒ガスは、凝縮器へ送られる。凝縮器には冷却塔から冷却水が供給されてお



第3図 バイナリー発電装置
Fig. 3 ORC power module



第4図 エンクロージャ
Fig. 4 Enclosure for the ORC and control system

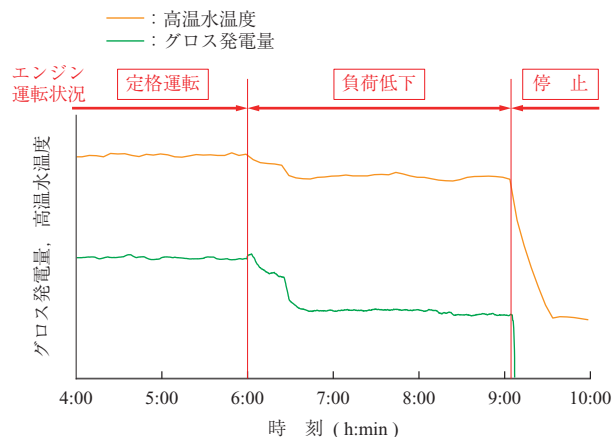
り、冷媒は凝縮したのち冷媒ポンプの吸入側へと送られる。

2.6 制御盤・リモート計測

上述のプラント全体の制御に関しては、ディーゼルエンジンを除き、すべてエンクロージャ内の制御盤から行っている。プラント制御には当社の制御ユニットを使用し、プラントを構成する各機器からの信号を一括管理できるようにした。収集したデータはインターネットを介してサーバにデータを蓄積し、蓄積したデータを Web ブラウザでモニタリング可能とすることで、不具合や異常を遠隔地から検知できるようにした。

また、バイナリー発電機は流入する高温水の温度や流量に応じて最適な冷媒ポンプ回転数、タービン回転数へと自動的に制御を行うため、例えばエンジンの負荷が変動した場合についても排熱から取り出せる最大の発電量を得ることができる。第5図にバイナリー発電装置のエンジン負荷変動による発電量変化を示す。エンジンの負荷が低下するとともに高温水温度が低下し、温水温度に応じて自動的に最適な冷媒循環量、およびタービン回転数に制御し、発電量を低下させる。さらに、エンジンが停止した瞬間、バイナリー発電装置も停止する。

ディーゼルエンジンに関しては独立した制御盤をもっているが、バイナリー発電装置の制御盤には、エンジン遮断器の開閉信号および排ガス温度・圧力などを入力することで、エンジンの稼働状況を常時監視しており、エンジン停止時も即時にバイナリー発電装置を自動停止できるようにした。また、エンジンが始動・復帰した際には自動的にバイナリー発電装置も再始動するよう、自動起動停止シーケンスも搭載した。前述のリモート計測と自動起動停止シーケンスを搭載することで、現場での操作を行うことなくバイナリー発電装置の運転を継続することができる。



第5図 エンジン負荷変動による発電量変化
Fig. 5 Power output variations resulting from changes to the engine load

3. 結果および考察

3.1 定格性能

第3表に今回のフィールド実証試験における代表的な安定性能結果を示す。発電機端でのグロス出力 113 kW であり、そこから冷媒ポンプ動力を差し引くとバイナリー発電装置としては約 100 kW を発電できることを確認した。第6図にグロスおよびネット発電量を示す。この際、排ガス温水ボイラからの入熱に対してグロス発電効率 13.9% となった。同等の温度レベルにおけるカルノー効率が約 25% であることから、本機の到達効率は高い。これは磁気軸受の低損失性能やプラント設計の妥当性によるものである。

発電量は季節変動し冬季の方が外気温が低いいため、凝縮温度を低く抑えることができる。このため、サイクル効率が増加し発電量が増加する。一方、夏季は外気温が上昇するため発電量は減少する。本システムにおいては夏季においてもグロス発電量 95 kW 程度を確保できることが確認できた。

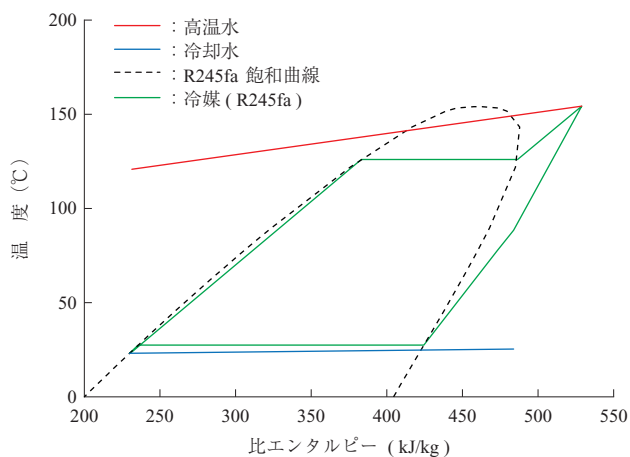
第7図に第3表に示す定格性能達成時の T-h サイクル

第3表 定格性能結果
Table 3 Performance test results

項目	単位	定格性能
排ガス温度	℃	396
高温水温度	℃	154 (入口) / 124 (出口)
冷却水温度	℃	23 (入口) / 26 (出口)
タービン回転数	rpm	36 530
発電機端電力	kW	113



第6図 グロスおよびネット発電量
Fig. 6 Gross and net power output



第7図 T-h サイクル線図
Fig. 7 T-h cycle diagram

線図を示す。今回のバイナリー発電装置ではタービン入口での冷媒の過熱度に余裕をもって運転している。これは運転中の熱源変動によるミスト混入を防止するためであるが、今後の運転においてさらに運転制御の最適化を行い、チューニングする予定である。

3.2 ボイラの経時変化

排ガス温水ボイラについてはストブローを設置し、定期的にフィンチューブ上に堆積する煤や灰を除去している。ボイラの熱通過率はプラント立ち上げ時と比較して15%程度低下しているが、伝熱性能のこれ以上の劣化はみられずストブローの有効性が確認できた。

4. 結 言

本稿では 100 kW 級中型バイナリー発電装置「Heat Innovator」の実証試験について、プラント設計・施工、および性能確認について紹介した。実証試験においては定格性能の確認とプラントの経時的な変化を監視・評価した。特にタービン発電機については磁気軸受を採用しているため、注油などの必要がなくメンテナンスフリーを実現できた。今回の実証試験においては、当社のこれまでのプラントにおける経験から、熱回収のための排ガス温水ボイラの設計・製作、プラント全体のプロセス・配管設計、制御ロジックの製作、メンテナンス体制の構築までを比較的スムーズに実施できた。また、本発電システムはエンジン排ガスだけでなく、エンジンのジャケット冷却水、温泉水、そのほかプラント排熱などにも適用可能であり、今後もさまざまなプラントへの適用を図るため、実証試験で見聞を得る予定である。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：電気事業法施行規則経済産業省告示 第百一十一号 2014 年
- (2) 高橋俊雄：小型バイナリー発電装置『ヒートリカバリー』“HR シリーズ”の概要 公益社団法人日本ガスタービン学会 Vol. 41 No. 6 2013 年 11 月 pp. 467 - 472
- (3) IHI プラント建設株式会社：“廃熱”から新たな電力を生み出す IHI 技報 第 55 巻 第 1 号 2015 年 3 月 pp. 18 - 19
- (4) 新潟原動機株式会社：アドバンスドガスエンジン 28AGS シリーズ カタログ 2012 年