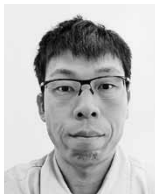


(技術資料)

船用バイナリー発電システム

Marine Binary Power Generation System



西村和真*1
Kazuma NISHIMURA



足立成人*1
Shigeto ADACHI



成川 裕*1
Yutaka NARUKAWA



高橋和雄*2
Kazuo TAKAHASHI



松田治幸*2
Haruyuki MATSUDA



荒平一也*3
Kazuya ARAHIRA

Environmental regulations for the reduction of CO₂ emissions, etc. are becoming increasingly stringent, and the shipping industry regards the utilization of waste heat as one of the effective countermeasures and focuses on binary power generation. We have developed a marine binary power generator (MB-125M), which recovers the compression heat of turbocharger air supplied to an engine with a semi-hermetic screw expander. Various tests performed on land and on ships have confirmed that the transmission-end power output can reach 110 kW for the target of 90 kW and that the power can be generated even when the inclination of the ship is ±30°. On the basis of these results, Nippon Kaiji Kyokai (Class NK) has certified the system on their environmental guidelines for waste-heat recovery for the first time.

ま え が き = 世界の商船船腹数において、エンジン出力が5,000kW以上の船は4万隻を超え、現在の物流の要となっている。また、2007年における国際海運のCO₂排出量は、ドイツ一国分に相当する8.7億トンとなっている¹⁾。このため、国際海運に対するCO₂排出量削減規制が国際海事協会(IMO)によって実施されており、2025年には新造船に対して30%削減(1990年から2008年のCO₂排出量の平均が基準)が義務付けられるなど、環境に対する規制が進んでいる。

船舶のディーゼルエンジンには多くの省エネ技術が取り入れられており、熱効率は45~50%と高い(図1)。しかしながら、それでも50%近くの熱エネルギーは利用されず捨てられているのが実情である。

当社はこれまで、排蒸気を利用した小型スクリュ蒸気発電機、および温水や排蒸気を熱源として発電するバイナリー発電装置を開発・販売してきた。そうしたなか、

旭海運株式会社、三浦工業株式会社、および当社の3社は、国土交通省「次世代海洋環境関連技術開発支援事業」の採択を受け、一般財団法人日本海事協会との共同研究によって、船舶の排熱を有効利用できるバイナリー発電装置の開発を2014年度から実施してきた。

エネルギー回収の対象は、排熱の大きな割合を占めるエアクーラで捨てられていたエンジン掃気用過給空気の圧縮熱である。今回、この熱源に対応したバイナリー発電装置の開発を行った。

本稿では、今回開発した船用バイナリー発電装置の技術的特徴を示すとともに、陸上での発電試験、および旭海運株式会社所有のバルク船「旭丸」(図2)船上での発電試験の結果から、熱源の条件(温度、流量)と回収できる電力、熱源温度によるエネルギーの電力への変換状況などについて報告する。

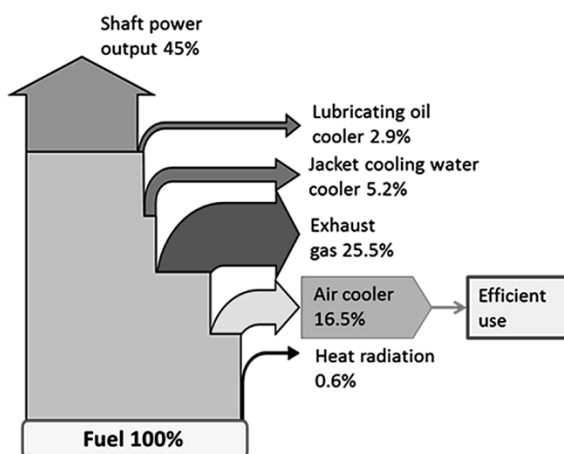


図1 船用のエンジンの熱収支
Fig. 1 Heat balance of marine engine



図2 船用バイナリー発電装置搭載船
Fig. 2 Vessel equipped with marine binary power generator

*1 機械事業部門 開発センター 技術開発部 *2 技術開発本部 機械研究所 *3 機械事業部門 汎用圧縮機本部 冷熱・エネルギー部 (現 旭海運株式会社)

1. 船用バイナリー発電装置の特徴

船用バイナリー発電装置は、図3に示した機器によって構成される。以下に本装置で用いた各機器の機能と特徴を説明する。

(1) 冷媒ポンプ (Refrigerant pump)

冷媒ポンプは冷媒 (液体) を圧送する。冷媒の外部漏洩 (ろうえい) を防ぐため、マグネットドライブ方式を採用した密閉構造となっている。

(2) 蒸発器 (Evaporator)

蒸発器では、冷媒ポンプから圧送されてきた冷媒液を、過給機で圧縮された高温空気との熱交換によって加熱し、高圧の過熱冷媒蒸気を発生させる。エアクーラと同様にフィンチューブ熱交換器を採用しており、過給機とエアクーラとの間に配置する。

(3) 半密閉スクリュ膨張機 (Semi-hermetic screw expander)

上記の高圧冷媒蒸気を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と発電機の回転子軸が一体となっており、回収された動力は電力に変換される。

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いるため軸封が不要であり、冷媒蒸気の漏洩が起りにくい構造となっている。半密閉スクリュ発電機はターボ発電機と比べて熱源の変動に強く、広範囲の熱源熱量で高効率な発電性能を発揮する。当社陸上用バイナリー発電装置で実績がある。

(4) 凝縮器 (Condenser)

スクリュ膨張機から排出された低圧の過熱冷媒蒸気は凝縮器に導かれる。冷媒蒸気は凝縮器において冷却用の海水との間で熱交換が行われて凝縮・過冷却され、液体となって冷媒ポンプに供給される。熱交換部にはTiプレートを採用することによって海水に対応している。

本装置では、これらの機器構成によって熱源と海水の温度差を利用し、電力に変換している。また、冷媒の漏洩を防ぐため、密閉構造の機器を選定している。

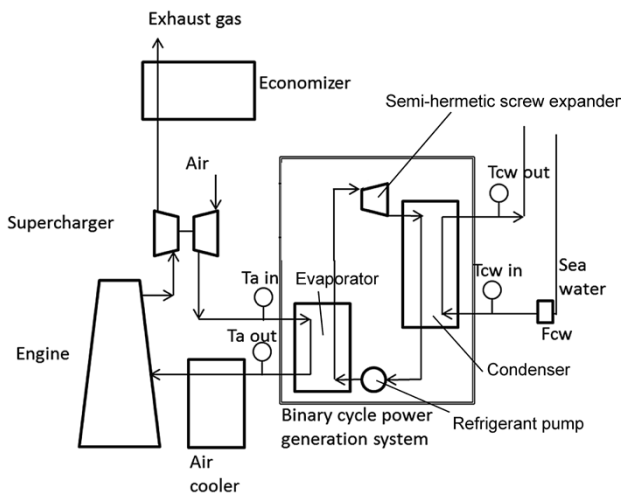


図3 船用バイナリー発電装置の冷媒系統図

Fig. 3 System diagram of refrigerant for marine binary power generator

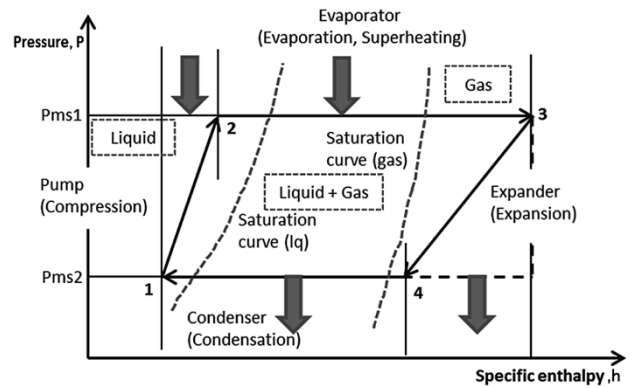


図4 本システムの作動媒体のP-h線図

Fig. 4 P-h diagram of working medium for this system

冷媒にはR245faを採用している。この冷媒は、大気圧下での沸点が14.9℃の低沸点媒体であり、200℃以下の熱源でも圧力の高い蒸気を発生させることができる。

本装置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の作動媒体の飽和蒸気圧力によって決まる。本装置の熱サイクルは図4のようなP-h線図として表現される。ランキンサイクルをベースとし、作動媒体の状態はP-h線図上を矢印 (番号付きの細い矢印) の方向に変化する。作動媒体は、蒸発器内において2から3の蒸発・過熱過程で状態変化をすることで熱源から熱を回収し、膨張過程で3から4へ等エントロピー的に状態変化することで動力を生み出す。受け入れる熱源温度の上昇や、凝縮器での作動媒体の飽和温度、飽和圧力の低下によって膨張過程の圧力差とエンタルピー差が拡大し、生み出す動力が増加する。

2. 船用バイナリー発電装置の陸上試験

2.1 陸上試験装置

船用バイナリー発電装置の開発にあたり、装置の主要機器の性能や、制御の有効性を確認した。当社神戸総合技術研究所内に図5、図6に示す試験装置を製作し、熱源と冷却水の各種条件について発電性能を確認した。

入熱側は試験用の蒸発器を準備し、各エンジン負荷での過給機エア熱量をボイラ蒸気で模擬した。蒸気配管に設置された減圧弁と流量調整弁により、蒸発器に供給する蒸気を制御した。蒸発器への入熱は、蒸気配管に設置された入口温度計、出口温度計、および蒸気流量計の計測結果から求めた。

冷却水は屋外の冷却塔と本体凝縮器の間で循環させ、所要温度の冷水を凝縮器に供給した。凝縮器からの放熱は、冷却水配管に設置した入口温度計、出口温度計、および冷却水流量計の計測結果から求めた。

2.2 陸上試験の結果

試験目標として、主機エンジン負荷50%に相当する熱量の供給で送電端出力40kW、主機エンジン負荷90%に相当する熱量の供給で送電端出力90kWの実現を目指した。

試験では安定した発電運転ができ、主機エンジン負荷50%相当で送電端出力44kW、主機エンジン負荷90%相当で送電端出力99~107kWの発電性能が得られること

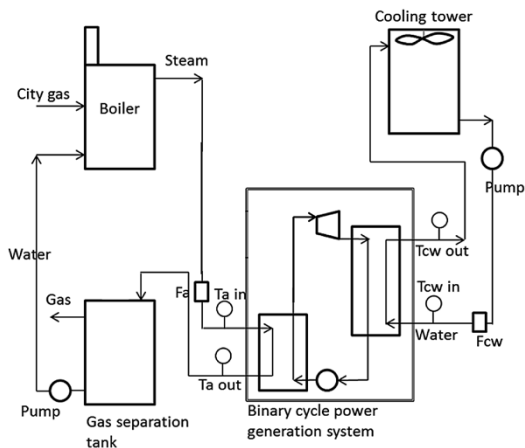


図5 陸上試験における船用バイナリー発電装置系統図

Fig. 5 System diagram of marine binary power generator in land-based test

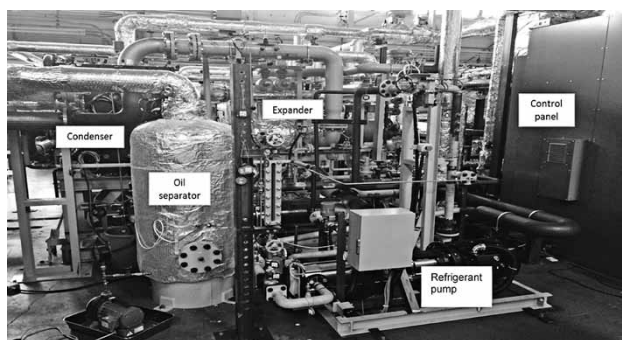


図6 陸上試験装置の外観

Fig. 6 Appearance of land-based test equipment

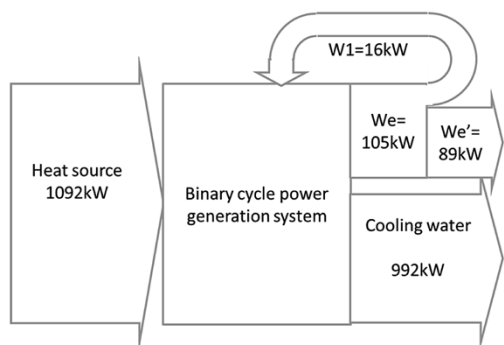


図7 エネルギーバランス

Fig. 7 Energy balance

を確認した。

この試験結果を受け、一般財団法人日本海事協会の立ち会いの下であらためて試験を行った。その結果、船用のバイナリー発電機としての有効性と性能が評価されると同時に承認いただくことができた。

一例として、送電端電力89kW発電時の運転結果を示すと次のようになる。すなわち図7に示したように、入熱は $Q_e = 1,092\text{kW}$ であるのに対して、発電端出力 $W_e = 105\text{kW}$ が回収され、冷却水による放熱 $Q_c = 992\text{kW}$ がある。装置外部へ供給できる送電端電力 W_e' は89kWで、装置内部での消費電力 $W_1 = (W_e - W_e') = 16\text{kW}$ を差し引いた分になる。

3. 船用バイナリー発電装置の船上試験

3.1 船上試験設備

陸上での試験後、船上での性能や安定性を検証するため、陸上試験で性能を確認した各機器を船舶に据付けた。

バイナリー発電装置を搭載した船は、当社加古川製鉄所への石炭搬入を行っている旭海運株式会社所有のバルク船「旭丸」(重量トン73,914MT)である。装置は分割して機関室の空きスペースに設置し(図8)、各機器は作動媒体を循環させる配管によって接続した。

図9に蒸発器の搭載状況を示す。蒸発器は、従来使用していたエアクーラの過給空気側のの上流部に配置した。過給空気の高温度部の熱を蒸発器で回収した後、主機エンジンに供給するために必要な温度までエアクーラで空気の冷却をする構造にした。

蒸発器の入熱は、入口温度計、出口温度計と、エンジンの各データから算出した空気流量の計測結果から求めた。冷却水は、エアクーラの海水を分岐して一部を引き入れ、凝縮器に供給する。凝縮器の放熱は、海水配管に設置された入口温度計、出口温度計、および海水流量計

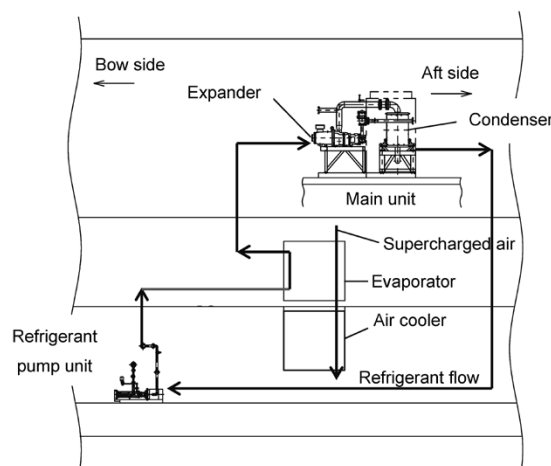


図8 船用バイナリー発電装置の船内配置

Fig. 8 Inboard arrangement of marine binary power generator

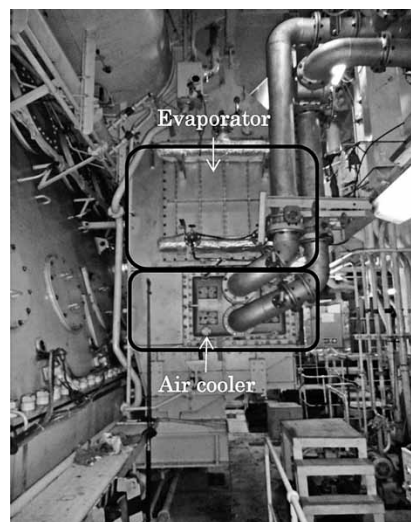


図9 蒸発器の船内搭載状況

Fig. 9 Evaporator mounted in vessel

の計測結果から求めた。

3.2 船上試験の結果

船上試験は外洋航行中の主機エンジン運転時に実施してデータを採取した。主機エンジン負荷の上昇に伴って過給空気の温度と流量が増加するため、送電端出力は40kWから110kWに増加し、陸上試験結果と同等の性能を確認した。また、熱源の変動に追従した安定した発電運転を確認した。波やうねりが8m以上の大時化（おおしけ）において船が右舷～左舷方向に±30°激しく傾く航行中でもバイナリー発電装置は運転を継続できた。

本装置によって、過給空気の熱源から変換される送電端出力 We' の割合を示すパラメータをシステム効率 η (%) = $We'/Qe \times 100$ としており、船用バイナリー発電装置のシステム効率は、蒸気バイナリー発電装置と同じ10%前後であった（図10）。システム効率が6%前後である温水バイナリー発電装置（熱源温水温度：70～95℃）より効率は高く、想定どおりの結果となった。

図11に各エンジン出力における発電端出力を示す。船上試験の条件で計画していた発電端出力より高い出力を得た。本装置は、熱源の温度や流量、また冷却水の温度や流量に変化が起こっても発電端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いる。熱源の温度条件の変化に伴って発電端出力は変化し、主機負荷率50～80%の条件で発電端出力は40～120kW（一部蒸気を使用したデータも含む。瞬時値としては最大発電端出力125kWも確認）であった。

主機負荷に対する過給空気温度が想定より高いことも優位に働き、事前に計画していた性能をおおむねクリア

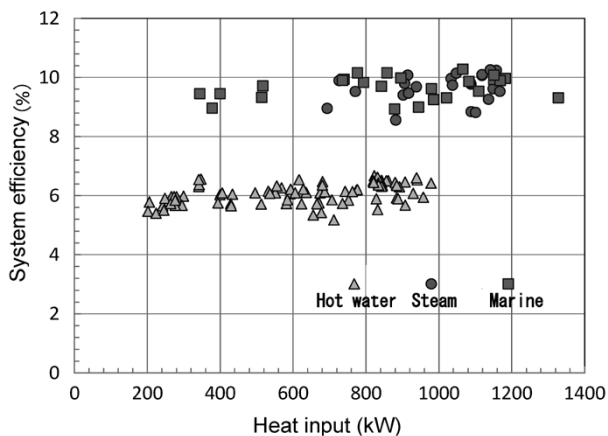


図10 システム効率の比較

Fig.10 Comparison of system efficiency

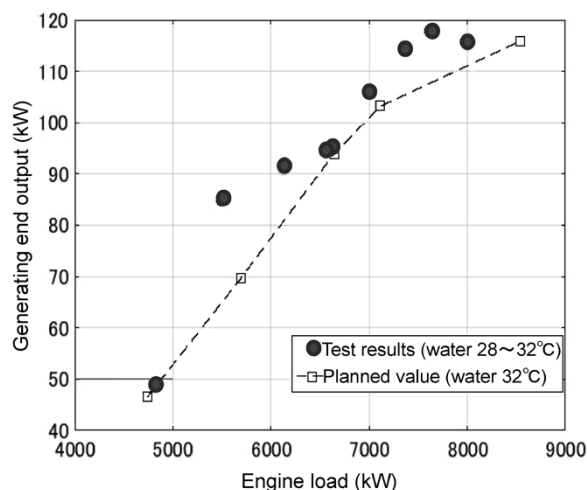


図11 発電機の出力

Fig.11 Output of power generator

した。

発電端出力に対する送電端出力の割合は約88～89%で、ほぼ想定値と一致している。

むすび = 船用バイナリー発電装置の開発を通じて以下の特性を確認した。

- 1) 船上試験で、船用バイナリー発電装置の自動制御による立ち上げから停止までの運転により、膨張機の回転数と発電端出力の安定性、過給エア、および冷却水の温度変化に対する追従性を確認した。
- 2) 陸上試験により、性能、安定性を評価し、日本海事協会から船用装置として承認を得た。また、船上試験でも性能、安定性を評価いただき、日本海事協会の環境ガイドライン排熱回収第一号として登録された。

2019年度販売開始に向け、2018年度下期から量産仕様での船用バイナリー発電装置の最終実証試験を行う。

本開発の一部は、国土交通省、日本海事協会の補助金（次世代海洋環境関連技術研究開発費補助金、次世代海洋環境関連技術開発支援事業）による。また、旭海運株式会社および三浦工業株式会社には共同開発者として協力いただいたのでここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省. 国際海運における世界初のCO₂排出削減規制の導入について. <http://www.mlit.go.jp/common/000160608.pdf>. (参照2017-06-14)