

# 船用ディーゼル主機関の超省エネ排熱回収装置

Development of Super Waste Heat Recovery System for Marine Diesel Engine



市来 芳弘\*<sup>1</sup>  
Yoshihiro Iehiki

白石 啓一\*<sup>2</sup>  
Keiichi Shiraishi

金星 隆之\*<sup>3</sup>  
Takayuki Kanaboshi

小野 嘉久\*<sup>3</sup>  
Yoshihisa Ono

太田 裕二\*<sup>4</sup>  
Yuji Ohta

船舶の環境規制強化や燃費向上の市場ニーズ増大へのソリューションとして、船用ディーゼル主機関の超省エネ排熱回収装置を開発した。従来型の排熱回収システムである、ディーゼル主機関排ガスを利用した排ガスエコマイザ+蒸気タービン発電システムでは、過給機の駆動にエンジンからの排ガスすべてを使っていた。新システムは従来型システムに加え、一部の排ガスを抽気して駆動するパワータービン(ガスタービン)を備え、自動嵌脱クラッチで連結された蒸気タービンとともに発電機を駆動する複合型の我が国初の船用エネルギー回収システムである。さらに、蒸気タービンとパワータービンは、エネルギー効率が最適となるように、船内必要電力に応じて各々負荷分担ができるような制御装置を有している。これにより従来型回収システムと比較して発電量が約2~3倍へ大きく増加し、船舶機関プラント効率を大きく向上(相対値8~10%)させる事ができ、船舶のCO<sub>2</sub>削減に寄与できる。このシステムは、欧州某船主向けコンテナ船38隻(韓国造船所建造)への搭載が決まっており、初号機は2010年11月本船に搭載され海上試運転を経て2011年3月船主へ引き渡される予定である。

## 1. はじめに

ディーゼル主機関の排熱回収装置として排ガスエコマイザを介して蒸気タービン駆動発電機で船内電力を賄うことは従来のシステムとして船舶では既に適用されてきた技術であった。新型超省エネ排熱回収装置は、既存の排ガスエコマイザを介して駆動する蒸気タービン発電機に加えて、ディーゼル主機関からの高温排ガスの一部を過給機上流より抽気してパワータービン(ガスタービン)を駆動するもので、パワータービンは自動嵌脱クラッチを介して蒸気タービンに連結され発電機を駆動する複合型発電装置である。

本装置の機器構成として、パワータービンは蒸気タービンと自動嵌脱クラッチで連結されている。まず蒸気タービンにて負荷を取った後、パワータービンを起動、パワータービンの回転数が蒸気タービン回転数に到達した際、自動嵌脱クラッチにより自動的に蒸気タービンに嵌合され、パワータービンの回転トルクは蒸気タービンを通じて発電機を駆動する。このような蒸気タービン及びパワータービンの並列運転状況下において、船内電力需要が排熱回収発電装置のフル発電出力を下回った場合、排ガス熱から得られる蒸気を優先的に使用して蒸気タービンで発電し、不足電力分をパワータービンにて補う複合型発電システムである。このシステム制御は世界初であり既に世界主要国に対して特許申請済み又は申請中である。

\*1 長崎造船所船用機械設計部 主席技師

\*2 長崎造船所船用機械設計部 課長

\*3 長崎造船所船用機械設計部

\*4 長崎研究所 主席研究員

## 2. 超省エネ排熱回収発電装置の概要

### 2.1 主要目

表1に 7450 個積みコンテナ船に搭載されるディーゼル主機関及び超省エネ排熱回収装置の主要目を示す。なお、超省エネ排熱回収装置は ISO90%条件での運航を最高効率点とし設計されている。

表1 ディーゼル機関及び超省エネ排熱回収装置の主要目

主機出力&回転数	MCR 45740kW x 78 rpm
蒸気タービン型式	三菱 ATD52CLM
蒸気タービン最大出力	2500kW
蒸気タービン回転数	8685rpm
入口蒸気圧力&温度	0.588MPa(G), 267°C
復水器真空	6.0kPa
パワータービン型式	三菱 MPT42
パワータービン最大出力	1700kW
パワータービン回転数	19414rpm
発電機最大出力&回転数	4000kW, 1800rpm

### 2.2 蒸気タービン&パワータービンコンバインドトレインの構造

図1に蒸気タービン及びパワータービンコンバインドトレインの構成図を示す。

パワータービンは、蒸気タービン軸端(反発電機側)に自動嵌脱クラッチを介して連結される。パワータービン回転数は約 20000rpm と高速であり、蒸気タービン回転数の約 8700rpm まで1段減速機にて減速される。パワータービンと減速機小歯車間はフレキシブルカップリングで連結され、大歯車軸端と蒸気タービン間には自動嵌脱クラッチが装備され、フレキシブルカップリングを介して蒸気タービン軸と連結される。蒸気タービンは既に船舶用として数多くの納入実績をもつ従来機種を基に新たに開発した高効率・衝動式復水型軸流タービンが採用され、また、パワータービンについても、数多くの納入実績がある三菱 MET 過給機のガスタービン技術を取り入れたものとなっている。

図2に初号機の蒸気タービン及びパワータービンのコンバインド状態での工場試運転外観を示す。工場設備の都合からパワータービンは排ガスの代わりに蒸気を用いコンバインド状態での負荷試験を実施した。試験はパワータービンの自動嵌脱状態、各部の振動計測などの特殊計測及びパワータービンガス弁と蒸気タービン調速弁との協調性の確認などを船主及び造船所技師立会いの下実施し、機械的及び性能的に計画どおりであることを確認した。

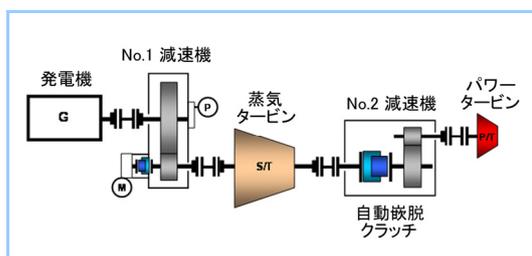


図1 蒸気タービン&パワータービン構成図

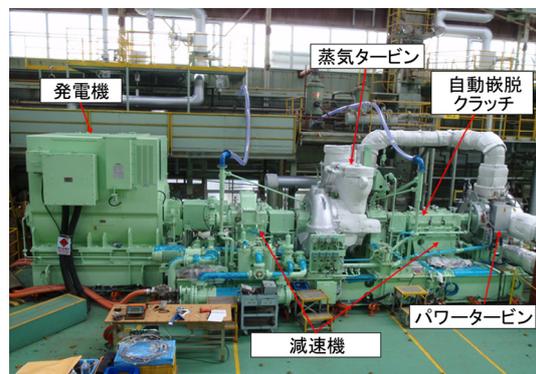


図2 コンバインド運転による工場試運転

## 3. 超省エネ排熱回収装置のプラント図

図3にプラントダイアグラムを示す

排ガスエコマイザは2段圧力式が採用され、給水温度は 38°Cの復水からディーゼル主機関ジャケット熱水により約 75°Cに、さらに過給機コンプレッサ出口空気により過熱され排ガスエコマイザ汽水分離器へ約 135°Cで供給される。一方、ディーゼル主機関の排ガスマニホールドから最

大 13%抽ガスしパワータービンを駆動する。また、ディーゼル主機関の高負荷運転時、パワータービントリップなどにより急激に掃気圧力が上昇しないよう抽ガスラインにバイパス弁を設けている。

本装置の運転方法として、ディーゼル主機関負荷 30%までは、排ガスは排ガスエコノマイザをバイパスし煙突より大気へ放出される。これはディーゼル主機関排ガスエネルギーが小さいこと及びディーゼル主機関排ガス状態が悪いため排ガスエコノマイザチューブへのスツツ付着を回避するためである。ディーゼル主機関負荷の 35%より蒸気タービンは運転開始可能で、同主機負荷が 45%に達したならばパワータービンが運転開始される。また、船内必要電力が本装置の発生電力を下回った場合は、すべてのディーゼル発電機は停止され、エネルギー効率が最適となるような蒸気タービン及びパワータービンの最適負荷制御により単独運転にて船内に電力を供給するものである。

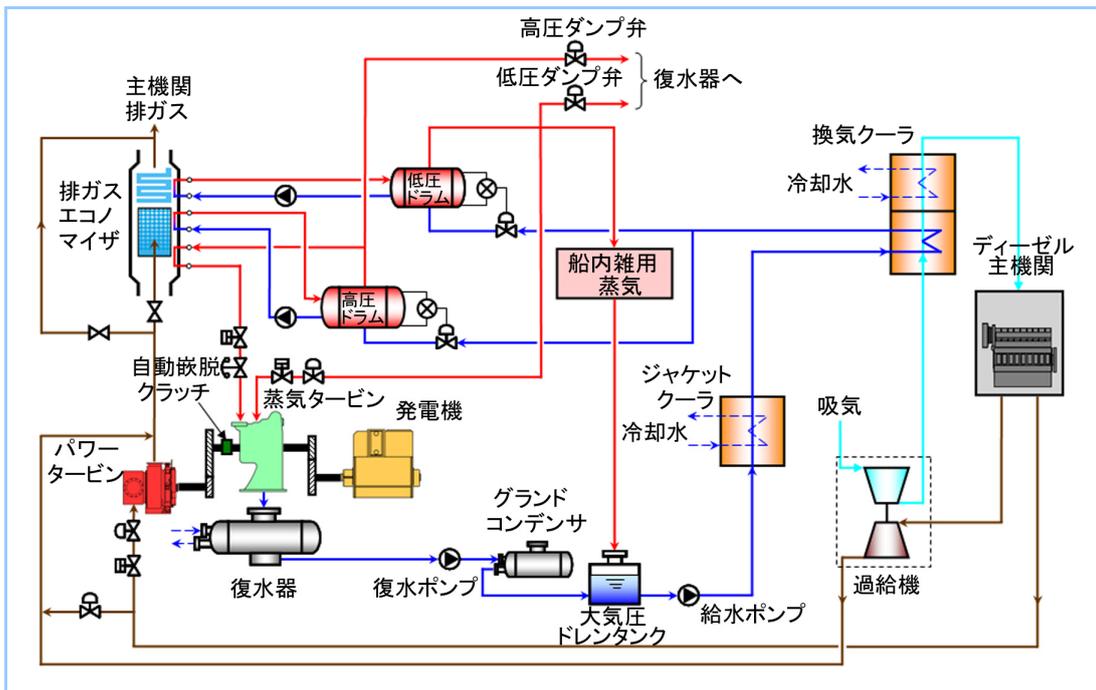


図3 プラントダイヤグラム

#### 4. 超省エネ排熱回収装置の性能及び特徴

図4にディーゼル主機関各負荷に対する本装置による発電量を示す。(ISO 条件にて)

本船はコンテナ船であり冷凍コンテナ積載数が多い場合は、本装置とディーゼル発電機との並列運転となるが、冷凍コンテナ積載数が少ない場合は、本装置単独での船内電力供給となる。

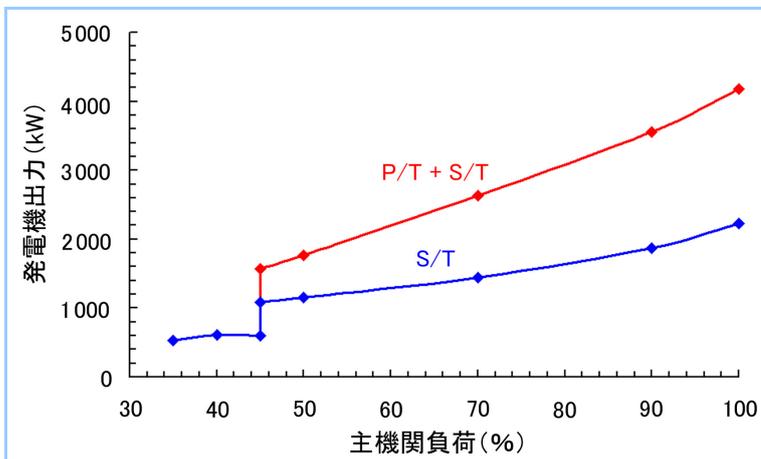


図4 ディーゼル主機関各負荷に対する発電量

排熱回収装置による発生電力は船内の需要を上回る場合がある。軸発電機が主機関プロペラ軸に装備されていれば余剰電力は軸発電機の電動機能によって主軸を加勢し、主機関の燃料消費を抑えることができるが、今回受注した排熱回収装置を搭載する船はこれが装備されない。

したがって、船内の電力需要に応じて蒸気タービンとパワータービンの負荷制御を行う必要がある。以下に負荷制御を含めた本装置の特徴を示す。

- (1) 蒸気タービンとパワータービンは一つの発電機に対してタンデムに繋がっており蒸気タービン及びパワータービン各々の負荷分担を可能な制御とした。
- (2) 蒸気タービンの駆動源となるのは本来船外に捨てられる排熱であるが、そのエネルギーによる発生蒸気が余剰とならないよう、蒸気タービンで最大限に電力回収する。
- (3) 船内必要電力に対し(2)で優先的に負荷を取り不足電力をパワータービンにて賄う。
- (4) 上述によりパワータービンへの抽ガス量を減らすことによりディーゼル主機関の燃費を改善する。
- (5) パワータービンは自動嵌脱クラッチで蒸気タービンと連結されておりパワータービンへの抽ガス弁を閉じることにより自動的に蒸気タービン単独運転が可能である。

## 5. シミュレーション試験及びモニタリング装置

### 5.1 シミュレーション試験概要

超省エネ排熱回収装置はディーゼル主機関からの排熱を利用した複合発電システムであり、その動的検証を行うためには、従来ならば海上試運転にて確認する方法しかなかった。今回、当社長崎研究所及び船舶・海洋技術部のサポートにより超省エネ排熱回収装置のシミュレーション機を開発した。このシミュレーション機は、ディーゼル主機関の運転状況に応じて超省エネ排熱回収発電装置の動的挙動を検証するもので、ディーゼル主機関燃焼、排ガスエコマイザ等の熱交換器及び配管抵抗などが、実船に等しい状況で検証できるようになっている。例えば本船常用航海中、船内の必要電力はこの超省エネ排熱回収装置のみで賄っており、ディーゼル主機関がクラッシュアスターン(前進から急に後進に舵をとること)となった場合、ディーゼル発電機がバックアップしなければならない。このような状況下においては、ディーゼル発電機起動指令が発令されて船内に電力を供給できるまで約 40 秒を必要としているが、超省エネ排熱回収装置はこの間、船内に必要最低電力を供給しなければならない。今回、このような運航状況を本シミュレーション試験にて検証でき、また、実船で想定できる様々な運航モードでの動的シミュレーションが可能となった。これは船主及び建造造船所にとってリスク回避の観点から非常に有効な検証試験となった(図5、図6)。



図5 シミュレーション結果に対する打合せ



図6 シミュレーション設備

### 5.2 シミュレーション試験結果

シミュレーション試験の一例を述べる。図7は、ディーゼル主機関が 90%負荷にて航行中、船内電力はすべてこの超省エネ排熱回収装置で賄われている状況下、突然、ディーゼル主機関がトリップした場合、ブラックアウトを回避できるかのシミュレーション結果である。

この試験結果から、本装置の単独運転時、ディーゼル主機関が緊急トリップしてもブラックアウトは回避できることがわかる。(ISO条件下でのシミュレーション)

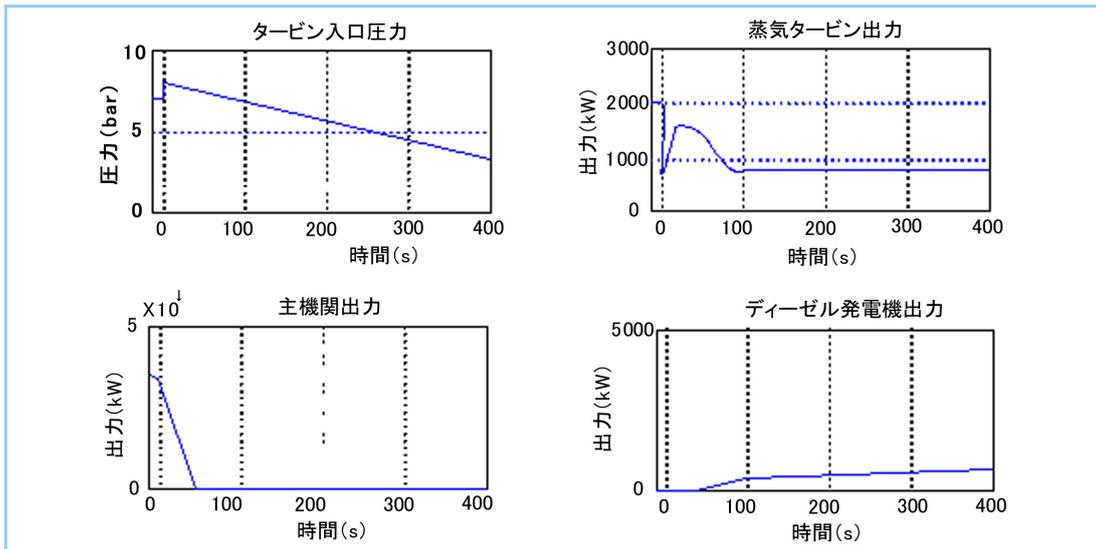


図7 ディーゼル主機関トリップ時における電力、蒸気圧力の変化

### 5.3 モニタリングシステム

図8, 9に制御盤及びモニタリングの一例を示す. 蒸気タービン及びパワータービンの運転操作はすべて本制御盤にて行われる. 基本的には, 全自動となっており, また, 必要に応じて手動操作も可能で, 起動から停止までの運転は機関室からの遠隔操作も可能となっている. また, プラント全体及び各機器の運転状況をすべて監視できるモニタリング装置を装備している.



図8 制御盤外観

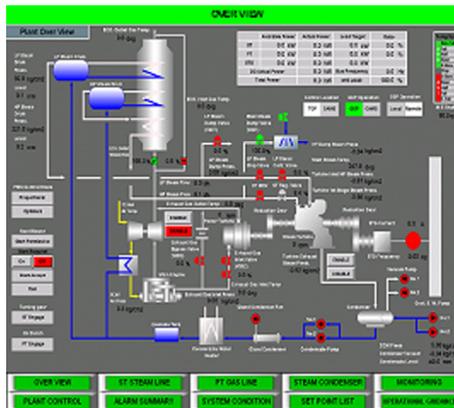


図9 プラントモニタリング監視

## 6. まとめ

本超省エネ排熱回収装置は, 既に欧州某船主(韓国造船所建造)向けコンテナ船全 38 隻への採用が決まっている. 第1船目への納入機については, 平成 22 年3月 30 日, 船主・造船所及びマスコミ関係者お立会いの下, 三菱重工長崎造船所にて蒸気タービン&パワータービンコンバインド試験デモンストレーションが行われ, 装置の性能及び安定性が確認された.

初号機は, 2010 年 11 月本船へ搭載され海上試運転を経て 2011 年3月, 船主に引き渡される予定である.

昨今, 二酸化炭素の削減は, 全世界的に COP15 などを通じて義務付けられており, 特に船舶から排出される二酸化炭素量は地球環境に及ぼす影響として大きなものである.

本装置の開発により従来比較で約 10%の二酸化炭素量を低減可能としており, 省エネの観点から, また環境問題の一ソリューションとして採用ニーズが高まることが期待される.

謝辞

最後に本装置の開発に当たり, 貴重なご意見と技術指導を提供していただいた欧州某船主, 韓国建造造船所の各社に謝意を表します.