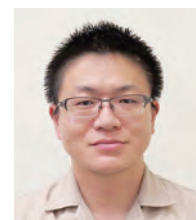


株式会社名村造船所

250 型 VL0C 排熱回収システムの性能評価

原田 英光*

Hidemitsu Harada



船舶の燃費低減競争が激しくなる中、株式会社商船三井殿の「船舶維新」プロジェクトの一環として、弊社の 25 万トン型鉱石運搬船(250 型 VL0C)に排熱回収システムを搭載することが決定し、共同開発することになった。この排熱回収システムは、主機関の排ガスのエネルギーを利用して、三菱重工船舶用機械エンジン株式会社製の蒸気タービンとパワータービン(排ガスタービン)を合わせた複合型の排熱回収装置で発電を行い、船内需要電力を全て賄うとともに余った電力を軸加勢モータに送ることにより、主機関をアシストして燃費改善を図るシステムである。本システムの搭載により従来の同型船と比較して、航海中の燃料消費量の約 7%削減出来る計画であった。

本報では、排熱回収システム搭載船の海上公試および就航後において、本システムの性能評価を行い、計画値以上の燃料消費量の削減を確認したことを報告する。

1. 緒言

近年、大気汚染などの環境問題、燃料の高騰および EEDI の発効などから、各船主、造船所およびメーカーは、あらゆる手法で省エネ技術の開発を行い、燃費低減競争が激化している。

このような状況の中、株式会社商船三井殿は「実現可能な環境負荷低減技術」を用いて、船舶からの CO₂ 排出量削減を図る「船舶維新」プロジェクトを 2009 年にスタートさせた。¹⁾ その中の高効率排熱エネルギー回収システムを搭載した大型鉱石船用船 (ISHIN-III) が、弊社の 250 型 VL0C に搭載されることが決定した。また、本船の主要機器として、三菱重工船舶用機械エンジン株式会社殿が開発した蒸気タービンとパワータービンを合わせた複合型の排熱回収装置²⁾を搭載することとした。そこで、株式会社商船三井殿、三菱重工船舶用機械エンジン株式会社殿および弊社の 3 社で本排熱回収システム搭載船を共同開発することになった。

本排熱回収システム搭載船については、すでに多方面で紹介されている^{3), 4), 5), 6)}。一方、これらは排熱回収装置の紹介や削減効果に多少触れているだけで、燃料消費量の削減

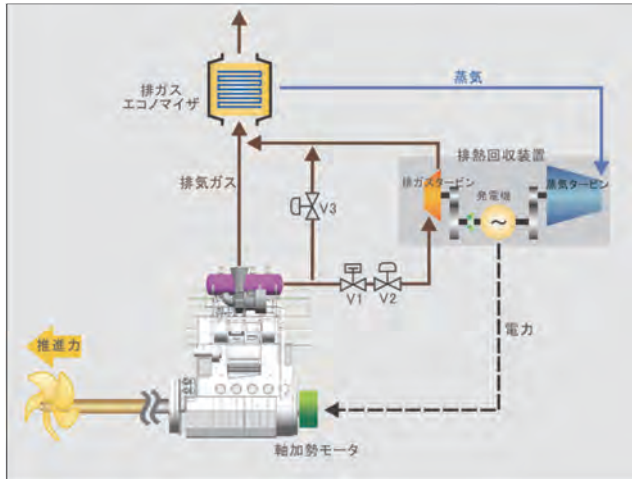
量などの具体的な数値などは公表されていない。

本報では、計画段階での削減量の試算、海上公試結果および就航後の性能評価結果などを報告する。

2. 排熱回収システムの概要

第 1 図に排熱回収システムの構成を示す。従来の排熱回収システムといえば、排ガスエコノマイザで主機関の排ガス熱エネルギーを利用して蒸気を発生させ、蒸気タービンで発電を行い、船内需要電力を賄う程度だった。一方、本排熱回収システムに搭載している排熱回収装置は、従来の蒸気タービンに加えて、主機関の過給機前の排ガスを一部抽ガスし、その排ガスで駆動するパワータービンを装備している。これにより、主機関の排ガスエネルギーを効率よく、船内需要電力以上の電力を発電することが出来る。

さらに、余った電力を主機関の船首側に装備した軸加勢モータに送ることにより、主機関の推進加勢を行い船全体の燃料消費量を削減する、次世代型ハイブリットシステムとなっている。



第1図 排熱回収システムの構成

3. 各構成機器

3. 1 主機関

第1表に、本船の主機関の要目を示す。製造者、型式および出力は、弊社標準の250型VLOCと同様としている。

弊社標準の250型VLOCに搭載されている主機関と本主機関との違いは、排ガスバイパスバルブ（第1図のV3）を装備しているところにある。これは、過給機の効率を最大限に上げることで、低負荷では主機関が最低必要な掃気圧を十分に満足しており、過給機に送る排ガスを一部バイパスすることが出来、高負荷では掃気圧が高くなり筒内圧が高くなり過ぎるため、過給機に送る排ガスを一部バイパスする必要があるため装備している。

この排ガスバイパスバルブと並列にパワータービンを設置し、排ガスバイパスバルブを開ける代わりにパワータービン停止弁および制御弁（第1図のV1およびV2）を開けて、パワータービンを回すことで、排ガスエネルギーを効率よく回収出来るシステムになっている。

第1表 主機関の要目

製造者	三井造船(株)
型式	MAN B&W 7S80MC-C Mark7
M. C. O.	21,910 kW at 74.5 rpm
N. C. O.	18,620 kW at 70.6 rpm
過給機	MET60MA x 2 sets
NOx 規制	Tier I

3. 2 排熱回収装置

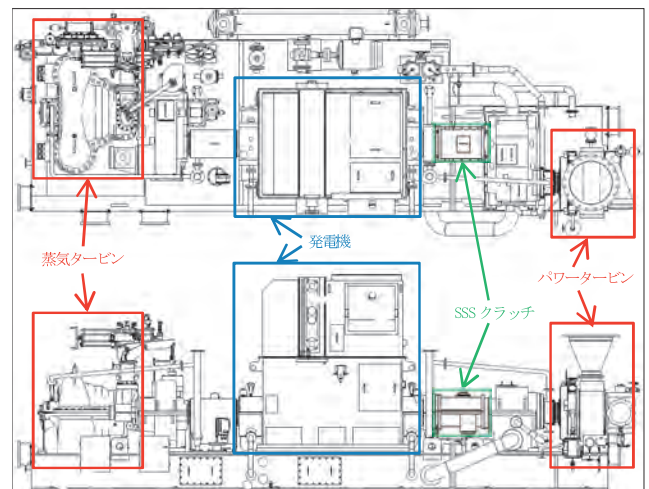
第2表に、本船の排熱回収装置の要目を示す。本排熱回収装置は、三菱重工業船用機械エンジン株式会社製

「MERS(Mitsubishi Energy Recovery System)」をベースにしている。

第2表 排熱回収装置の要目

製造者	三菱重工船用機械エンジン(株)	
蒸気タービン	型式	AT42CLN2
	最大出力	1,200 kW
	回転数	11,700 rpm
パワータービン	型式	MPT33A-R
	最大出力	1,400 kW
	回転数	24,000 rpm
発電機	定格出力	1,700 kW
	回転数	1,800 rpm

第2図に、本船の排熱回収装置の外形図を示す。発電機は両軸カップリングとなり、蒸気タービンとパワータービンは発電機を挟んで配置している。パワータービンの回転数は約24,000rpmと高速であるため、発電機回転数の1,800rpmまで二段減速しワンウェイクラッチ（SSSクラッチ）を介して発電機に連結している。



第2図 排熱回収装置の外形図

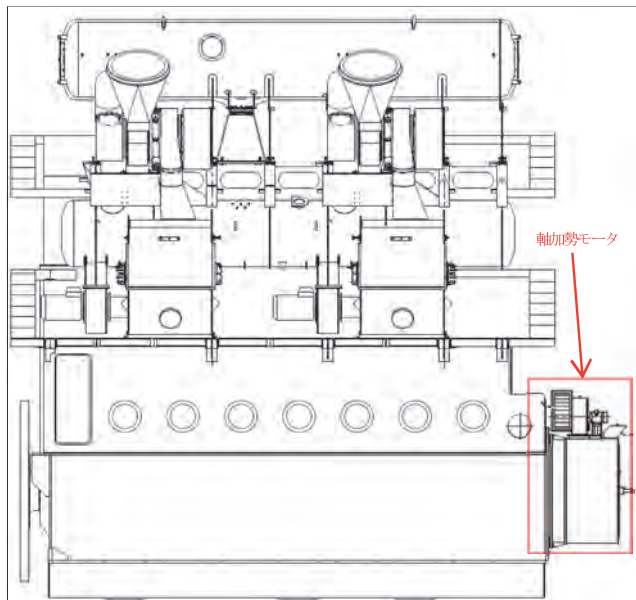
3. 3 軸加勢モータ

第3表に、本船の軸加勢モータの要目を示す。本船の軸加勢モータは、軸加勢する電動モード以外に軸発電機として機能する発電モードも装備している。発電モードは、排熱回収装置の発電量を船内需要電力が上回った時などにバックアップとして用いる程度と考えているため、電動モードに比べ小さな出力としている。

第3表 軸加勢モータの要目

製造者	大洋電機(株)
型式	SHG 105BS-20
発電モード出力	250 kW at 53.0～79.0 rpm
電動モード出力	720 kW at 70.6～79.0 rpm

第3図に、軸加勢モータ付の主機関の外形図を示す。軸加勢モータは、通常は主機関とプロペラ軸との間の中間軸に装備することが多いが、船尾側がシャープな船型となっているため、中間軸に装備出来ず主機関の船首側に配置している。軸加勢モータの回転子は、主機関のクランク軸と直結しており、主機関内部の潤滑油がモータ側に侵入してこない構造とした。



第3図 主機関の外形図

4. 制御システム

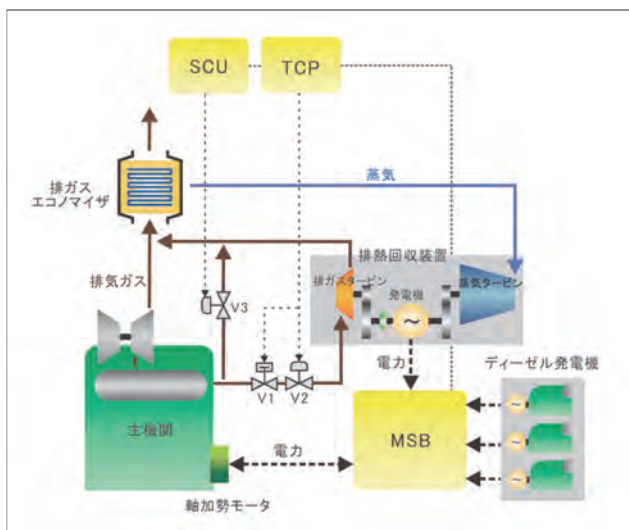
第4図に、制御システムの構成を示す。本制御システムは主に、SCU(Scavenging Control Unit)、TCP(Turbine Control Panel)およびMSB(Main Switch Board)から構成されている。

SCUは、排ガスのバイパス量の制御を行う。主機関には適切な掃気圧力レンジが存在し、排ガスのバイパス量が多いと掃気圧が低くなり最適な燃焼が得られず、逆にバイパス量が少ないと掃気圧が上限を超える危険がある。そこで、あらかじめ主機関負荷に応じた掃気圧範囲とパワータービン制御弁(第4図のV2)開度および排ガスバイパスバルブ(第4図のV3)開度の和の制限を設定している。SCUは、そ

の設定内になるように、主機関負荷をもとに、V2の開度制限値をTCPに伝達し、V2の開度によりV3の開度を決定し、排ガスのバイパス量を制御している。

TCPは排熱回収装置の蒸気タービンとパワータービンの負荷分担の制御を行う。主機関負荷とともに変化するプラント条件下で、排熱回収装置が発生しうる最大出力(Available Power)を絶えず計算しMSBに伝達している。また、MSBから受けた負荷指令に見合う電力を出力すべく、蒸気タービンのガバナとパワータービンのV2の開度を調整し負荷分担を制御する。

MSBは、船内発電機(排熱回収装置、ディーゼル発電機×3台)および軸加勢モータの負荷制御を行う。TCPで計算されたAvailable Powerと船内需要電力をもとに、TCPに出力制御指令を出すとともに、軸加勢モータの推進加勢量を決定している。(寺崎電気産業株式会社殿と共同で特許出願中)

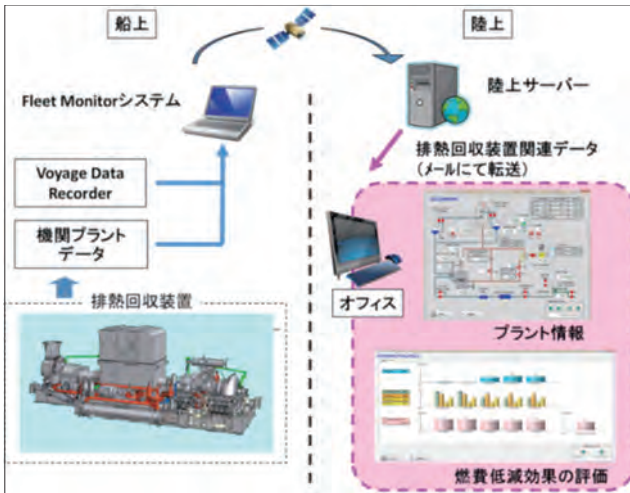


第4図 制御システムの構成

5. モニタリング装置

就航後の燃費削減効果を検証するため、本船の運行状況をオフィスにしながら確認・評価出来るようにモニタリング装置を装備している。

第5図にモニタリング装置の概要を示す。船陸間のデータ通信には、三井造船株式会社製の「Fleet Monitor」システムを使用している。本システムは、1時間毎の船の運航データと機関プラントの自動計測データを本船のメールシステムを利用して自動的に陸上サーバーに転送している。また、本船には10秒毎の自動計測データも保存されており、それを送ってもらうことで、さらに詳細な情報も分かるようになっている。



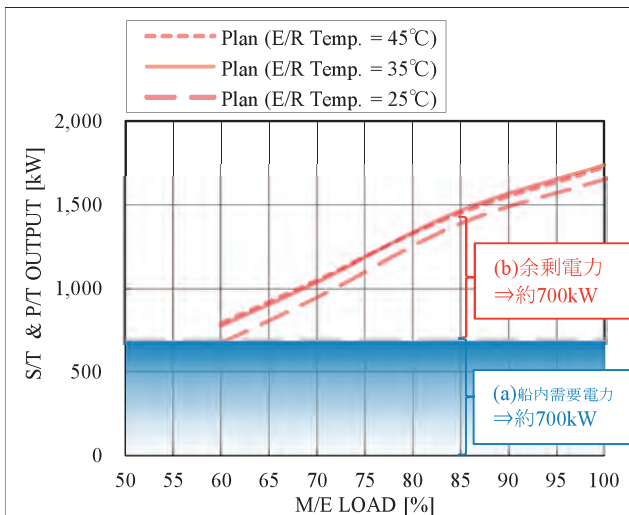
第5図 モニタリング装置の概要

6. 性能評価結果

6. 1 計画段階の予想

第6図に、計画段階での排熱回収装置の発電量の計画値を示す。横軸に主機関負荷、縦軸に発電量を表している。排熱回収装置の発電量は、機関室温度によって変化するため25℃、35℃、45℃に分けている。

計画では、常用負荷85%において約1,400kWを発電する計算となった。そのうちの約700kW(第6図の(a))を船内の居住や機関プラントを運転するための電力に使い、ディーゼル発電機を停止させる。また、残りの約700kW(第6図の(b))を軸加勢モータに送ることで主機関の加勢を行い、主機関の燃料消費量の低減を図る計画となっている。

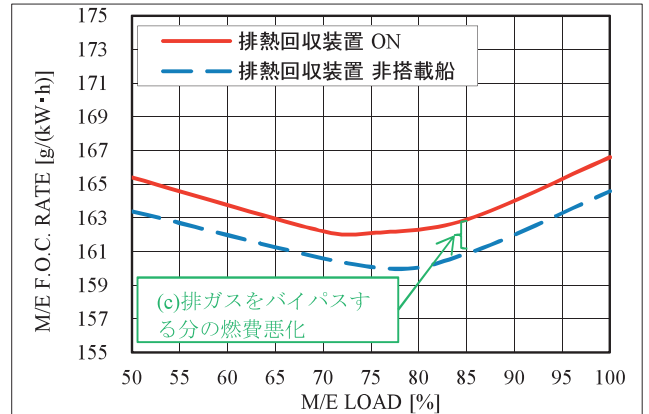


第6図 排熱回収装置の発電量の計画値

第7図に排熱回収装置搭載船と非搭載船の主機関の燃料消費率の計画値を示す。横軸に主機関負荷、縦軸に主機関

の燃料消費率を表している。

排熱回収装置非搭載船の主機関に比べ、排熱回収装置を運転した場合は、主機関自体の燃料消費率は多少悪化(第7図の(c))することがわかる。これは、これまで主機関の過給機に送っていた排ガスの一部をバイパスして、排ガスタービンに供給することで過給機の回転数が落ち、掃気圧力が低下して燃焼効率が悪くなるためである。



第7図 主機関の燃料消費率の計画値

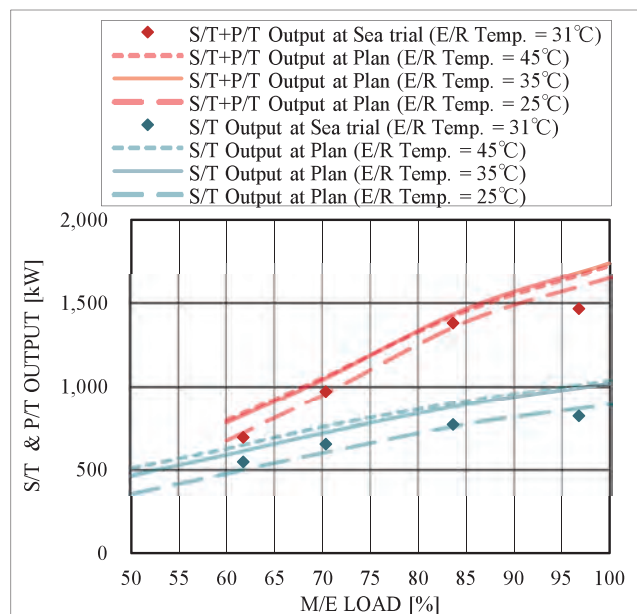
以上より、排熱回収装置の利用による燃料消費量の低減効果は、(a) △ディーゼル発電機の停止による燃料消費量の低減、(b) △余剰電力を利用し推進加勢を行うことによる主機関燃料消費量の低減、(c) ▼主機関過給機に送られる排気ガス量低下による主機関燃料消費率の悪化の3つの要素の合計として表すことが出来る。つまり、本システムでは、主機関単体ではなく、機関プラント全体での効率の向上を目指していることになる。

計画段階では、排熱回収システム非搭載船に比べ、約7%の燃料消費量削減が見込まれた。

6. 2 海上公試結果

第8図に、海上公試における排熱回収装置の発電量を示す。横軸に主機関負荷、縦軸に排熱回収装置の発電量を表している。線が計画値、プロットが海上公試の結果を表している。

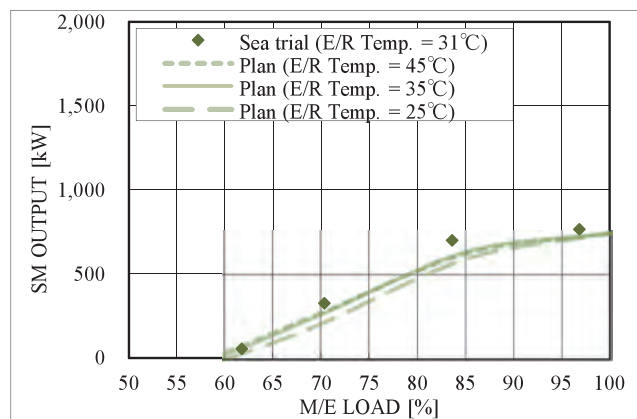
グラフから分かる通り、常用負荷付近では、おおよそ計画値通りの出力を得られていることが分かる。また、高負荷付近では、計画値を下回る結果となった。



第8図 排熱回収装置の発電量

第9図に、海上公試における軸加勢モータの出力を示す。横軸に主機関負荷、縦軸に軸加勢モータの出力を表している。線が計画値、プロットが海上公試の結果を表している。

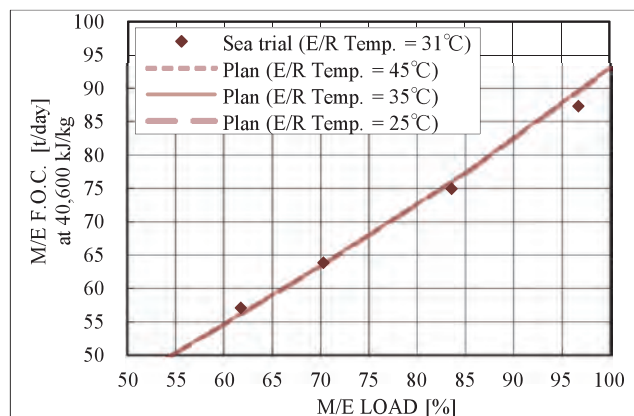
排熱回収装置の発電量が足りないものの、軸加勢モータの出力が計画値よりも高くなっていることが分かる。これは船内需要電力が計画値より低かったためと考えられる。



第9図 軸加勢モータの出力

第10図に、海上公試における主機関の燃料消費量を示す。横軸に主機関負荷、縦軸に燃料消費量を表している。線が計画値、プロットが海上公試の結果を表している。

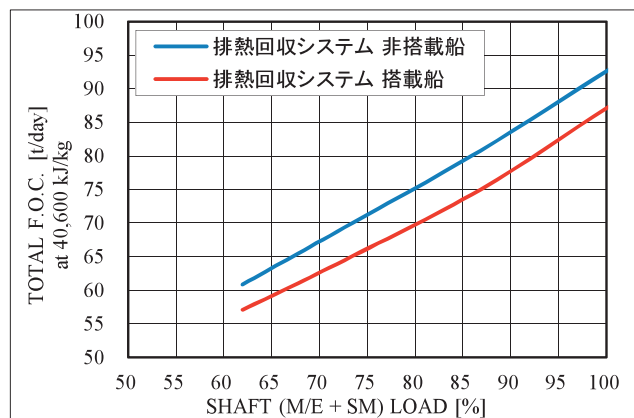
主機関の燃料消費量は、高負荷域で計画値より低くなっていることが分かる。このため排ガスのエネルギーが少なくなり、蒸気タービンとパワータービンの出力が計画値を下回ったと考えられる。



第10図 主機関の燃料消費量

第11図に、排熱回収システムを搭載していない同型船と本船との海上公試における燃料消費量の比較を示す。横軸に軸負荷(主機関出力+軸加勢モータ出力)、縦軸に燃料消費量を表している。

常用負荷付近では、非搭載船と比べ、1日当たり5.8t(C重油換算)の削減となった。これは7.1%の削減率であり、おおよそ計画値通りの値となった。なお、本船の海上公試は冬場実施したが、その前の夏場に予行運転を行っており、その際の削減率は約8%を記録した。



第11図 燃料消費量の比較

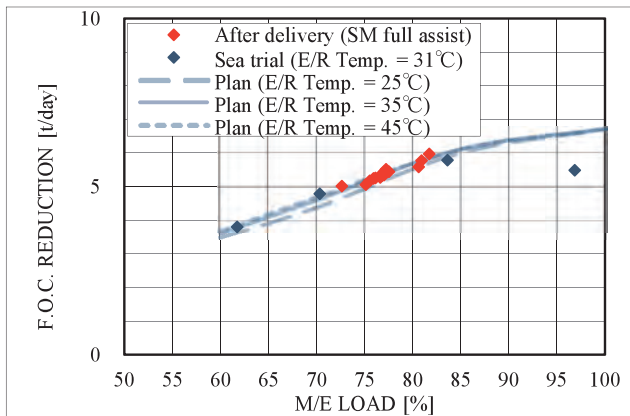
また、海上公試結果に基づき算出される EEDI 値は、リファレンスラインからの削減率が排熱回収システム非搭載船よりも約8%向上していた。Phase 1において要求される削減率は10%以上であり、Phase 2では20%以上、Phase 3では30%以上と段階的に厳しくなっていくことから考えると、約8%の向上は非常に大きいことが分かる。

6. 3 就航後

第12図に、排熱回収システムによる燃料消費量の削減量を示す。横軸に主機関負荷、縦軸に燃料消費削減量を表している。線が計画値、青のプロットが海上公試の結果、赤のプロットが就航後にフリートモニタから送られてきたデータ解析した値を表している。就航後のデータは、設計条件である余剰電力の全てを軸加勢モータに使った場合のみを抽出している。

海上公試では、排熱回収装置の出力が計画値を下回ったため、燃料消費量の削減量も計画値を下回っているが、低負荷から常用負荷付近では、計画値以上となっていることが分かる。

就航後は、データが少ないものの設計条件では、計画値以上の削減量になっていることが分かる。



第12図 燃料消費量の削減量

7. 結言

排熱回収システム搭載船の予行運転、海上公試および就航後のデータ解析を行い、以下の結果を得た。

- ・ 夏場の予行運転において、常用負荷付近では計画値以上の燃料消費量の削減を確認した。
- ・ 冬場の海上公試において、常用負荷付近ではおおそ計画値通りの燃料消費量の削減を確認した。
- ・ フリートモニタの解析を行った結果、就航後において、低負荷から常用負荷付近および設計条件では、計画値以上の燃料消費量の削減を確認した。

今後、さらにフリートモニタのデータを蓄積し、次期排熱回収システムの検討に役に立てたい。

謝辞

本システムを搭載するに当たり、共同開発者として多大なるご協力を頂いた株式会社商船三井殿、三菱重工船舶機

械エンジン株式会社殿及び寺崎電気産業株式会社殿の皆様、並びに本船の主機関の製造およびプロジェクトへの助言をして頂きました三井造船株式会社殿の皆様には、本誌上をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 株式会社商船三井ホームページ
<http://www.mol.co.jp/ishin/>
- 2) 市来芳弘, 白石啓一, 金星隆之, 小野嘉久: 船用ディーゼル主機関の超省エネ排熱回収装置の実用化 三菱重工技報 Vol. 49 No. 1 三菱重工 2012 pp. 30-34
- 3) 江頭伸一郎, 松尾隆宏, 市来芳弘: 船用ディーゼル主機関の排熱回収による推進動力・船内電力ハイブリッドシステム 三菱重工技報 Vol. 50 No. 3 三菱重工 2013 pp. 73-77
- 4) 原田英光: 25 万トン鉱石運搬船への高効率排熱回収装置搭載の紹介 西部支部メールマガジン第 51 号 日本船舶海洋工学会 2013
<https://www.jasnaoe.or.jp/mailnews/west/051/article01.html>
- 5) 川越美一, 米田直史, 堀俊明: 船用ディーゼル主機関の排熱回収による発電・推進アシストシステムの開発, 船舶海洋工学会賞 日本船舶海洋工学会 2014
- 6) 泉史郎: 船用ディーゼル主機関の排熱回収による発電・推進アシストシステムの開発 自動車技術 Vol. 70 No. 5 自動車技術会 2016 pp. 63-68