技術資料

省エネルギー形ディーゼル主機 推進プラントについて*

藤尾博之**・伊藤栄治***・新谷典夫****

Super Economical Diesel Propulsion Plant

By Hiroyuki Fujio, Eiji Ito, Norio Shintani

Development of energy-saving marine propulsion plant is one of the subjects for marine transportation rationalization. KSE plant (Kawasaki Super Economical Propulsion Plant), which Kawasaki developed late in 1976 and the first set of which is successfully in service on MT "ALAMO", is one of the most advanced propulsion plants which meet the present needs. We describe the outline of this plant together with the actual operating experience of MT "ALAMO".

1. はじめに

省エネルギー、省力を目標とした技術開発は陸船をとわず全産業界の課題であるが、特に昭和48年秋のオイルショック以来、その要望が倍加され、各方面で急ピッチで開発が進められてきた。当川崎重工においても例外でなく、特に船用推進プラントに関し船体、機関の関係者が一体となって研究を進めてきた結果、昭和51年秋には省エネルギー、高信頼性、省力形推進プラント(KAWASAKI SUPER ECONOMICAL PROPULSION PLANT - KSE PLANT)の開発を完了した。その後、昭和52年初め、AUDLEY SHIPPING LTD 殿より本KSEプラントの1号機をとう載した65形タンカー-MT "ALAMO"を受注したのをはじめ、現在までに本プラントとう載船数隻の成約をみている。MT "ALAMO"は本年1月末引渡され、現在、順調に航海をつづけているが、ここに本KSEプラントの主として省エネルギーを中心とした概要と共に、MT "ALAMO"の試運転結果も併わせて紹介する。

2. KSEプラントの概要

本プラントの開発に当っては、まず、次の基本方針が立てられた。1) 技術的裏付けがあり即実用化できること。2) システムの複雑化はできるだけ避け、信頼性に留意すること。3) 保守、取扱いの改善により省力化を図ること。4) 総合的見地に立った経済性の追求。この結果、つぎの三項目より成るプラントが計画された。1) 低回転プロペラ採用による推進効率の向上。2) 排ガス、

廃熱エネルギー回収システム。3) 機関の高信頼性を目標とした機関診断システム。これらの項目自体は必ずしも目新しいものではないが、上記方針のもとに個々の詳細計画で工夫がこらされた。また、対象船種はとくに限定しておらず、主機関機種も四サイクル、二サイクルを問わず、1機1軸、2機1軸、あるいはcppの採用等その必要性に応じ選択可能であるが、船としての制約条件を考慮のうえ総合経済性の見地より仕様を決定することになっている。

2.1 低回転プロペラシステム

1) 低回転プロペラ 一般にプロペラ直径を大きくし、プロペラ回転数を下げると推進効率は向上する。したがって、同一船形、同一船速の船では主機所要馬力の低下、ひいては主機燃料消費量の低減が可能となる。プロペラ回転比とプロペラ径比および馬力減少の割合は、船形、船速によって多少異なるが概略図1のごとくである。回転数をさらに下げれば推進効率は上昇するが、プロペラ直径が大きくなるため特殊な船尾形状、たとえば、セミダクト構造などを採用する必要がある。KSEプラントはG TYPE船尾をマリーナー形船尾に変更してプロペラが装備できる範囲の低回転システムを考えている。

2) 軸系および減速装置 低回転軸系では、プロペラ重量が大きく軸長さが比較的短いなど在来の軸系と異なる点があるので、横振動および船尾管軸受性能、軸系のアライメントなどを十分検討する必要があるが、回転比を0.5程度に下げたところでは特に技術的な問題はないことを確かめている。

また、クラッシュアスターン時プロペラ直径が大きい場合、プロペラ遊転力が比較的に大きく、アスターン性能の低下が懸念されるが、あらかじめアスターン性能を計算し、必要に応じ軸ブレーキを採用することも可能であるし、また、ディーゼル主機の場合、主機の

* 原稿受付 昭和53年4月3日

** 正会員 川崎重工業(株)(神戸市生田区東川崎町2-14)

*** 正会員 川崎重工業(株)坂出工場(坂出市川崎町1)

**** 川崎重工業(株)(神戸市生田区東川崎町2-14)

図1 低回転プロペラ採用による馬力減少

(注意) 馬力減少率 $=HP'(\text{低回転})/HP(\text{基準})(\text{同船速にて})$
 プロペラDIA増加率 $=DP'(\text{低回転})/DP(\text{基準})$
 プロペラ回転数減少率 $=N'(\text{低回転})/N(\text{基準})$

DECOMPRESSIONを利用して、アスターン性能の向上を計ることもできる。

3) 減速装置 低回転システムを採用するためには、減速機が不可欠であるが、減速機の選定には減速比、機関室配置、価格などの特性を総合的に検討して選ぶ必要がある。現在適用できる減速機は偏心形、スター形遊星、プラネタリー形遊星歯車がある。一例として減速比との関係で選ぶとすれば図2のごとくである。また、減速歯車の他に当社開発の電磁歯車式減速装置も採用することができる。

図2 減速比と歯車列形式

この方式によれば直結発電機として電力を取出すこと、また、廃熱回収に余力があれば、主軸へのフィードバックも可能となるなどの利点を備えている。

2.2 廃熱回収によるターボ発電システム

1) 従来システムの問題点と解決策 省エネルギー対策として、主機ディーゼル排ガスからの熱回収によるターボ発電システムは15年前より採用されてきたが、排

ガスボイラ(EGB)に付着するすすのためSOOT FIREを起こしたり、煙突からの火の粉飛散、低温域での腐食、または、主機停止時補助ボイラ蒸気との切換時に起こるドレンによるタービンの破損など多くの問題を経験してきた。また、一方主機出力に対する消費電力割合は小出力になるほど大きく、廃熱回収によるターボ発電システムは主機出力15,000 PS以下では困難とされていた。KSEプラントの開発に当たって、これらの状況をふまえて根本から見直しを行なった。すなわち、EGBのすす問題、腐食問題については、付着したすすの洗浄方法、耐食性材料の検討などにより対策をたてることも可能であるが、今回は抜本的にすすの付着の少ない構造を開発することとし、また、腐食域温度まで熱吸収させないですむようにそれだけ電力消費を低減する方向で開発を進めた。

2) サイクル構成並びに蒸気条件の選定 本システムのサイクル構成並びに蒸気条件の選定に当たっては、サイクル効率、所要電力、船内雑用蒸気、および過熱蒸気所要圧力、温度、主機の急停止または減速時の保持時間等総合的な検討を行なった。この結果、サイクル構成として、フロンタービンを用いたシステムを含めて5種類を計画し、蒸気条件として、EGBの過熱器出口で $4.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G} \times 245^\circ \text{C}$ (二サイクル主機)、または 265°C (四サイクル主機)を選んだ。図3に蒸気条件と発電機出力の関係を、また、図4に蒸気およびフロンサイクルについて、それぞれ代表的な一例を示す。なお、フロンタービンシステムの場合系統は多少複雑となるが、水蒸気サイクルに比し発電に利用できるエネルギー回収量が約30%増す。

3) 消費電力の削減 主機出力10,000 PS程度の船においても完全に廃熱回収ターボ発電システムを成立さ

図3 蒸気条件に対する発電機出力

排ガス入口温度: 300°C , 排ガス出口温度: 160°C
 排ガス量: $55,000 \text{ kg/h}$, 雑用蒸気: 800 kg/h

図4 廃熱回収発電システム

せるためには、消費電力の削減が必要であってつぎのような対策があげられる。吸収冷凍機の採用(往復動式フロン冷凍機に比べ約45~60 kW電力減少)。補機の主機直結(主機用LOポンプ、減速機用LOポンプ、主機用海水冷却水ポンプ等)。コンデンサーまたは清水冷却器のスクープ冷却。とくに吸収冷凍機は付属の冷媒ポンプ、吸収液ポンプ、および間欠運転の抽気ポンプ以外可動部分がなく消費電力が少ない事と共に振動や騒音がない等多くの特徴がある。また、80℃~90℃の温水が熱源として活用できるのが最大の利点でもある。すなわち従来あまり利用されていなかった主機の過給空気冷却器での廃熱を利用することができる。この吸収冷凍機は陸上用として多数の実績をもっているが、今回船用として動揺振動対策をほどこし万全を期している。また、温水供給系統には加熱器を装備して、主機ディーゼルの停止ある

いは出力低下によって、十分廃熱が得られない場合にも支障なく温水を供給できるよう考慮している。図5は本吸収冷凍機の原理を示す。

4) 排ガスボイラ 前記の方針のもとに選んだEGBの構造はら旋煙管式ボイラである。ら旋煙管はガスの流れが旋回流のため、熱伝達率がよく、またすすが付着しにくいという特色をもっている。従来の横水管式EGBのすす付着状況を調査すると、流れの渦ができるのが見られる。ら旋煙管にはこのようなすすの堆積する部分がなく、その上ガス流れが旋回流のためすすの付着に対し有利と判断される。また、仮りにすすが付着してSOOT FIREをおこしたとしても常に大量の水が胴内にあるため、大事に至らないと考えられる。一方、煙管式ボイラには、従来の水管式EGBに起こりがちな気水分

図5 吸収冷凍機の原理

図6 すず堆積状況

離ドラムでの水面変動等の問題もなく、大量の保有水のため、保有熱量が大で主機トリップ後もターボ発電機の継続運転可能時間が長い等の利点もある。

5) 発電機タービン 廃熱回収ターボ発電機用の蒸気タービンとして、軸流4段、7段の実用実績は多いが、さらに高効率化をはかって軸流9段タービンを新たに開発した。その結果、前記の電力削減等の対策と共に主機出力約8,000PSまで廃熱回収ターボ発電システムを成立させることができた。なお、機種選定に当っては、主機出力、電力消費量を考慮してきめることになる。

6) ディーゼル主機関の排ガス温度調整 廃熱回収用排ガスボイラの設計には、排ガス温度が一定しているほど経済的設計ができるが、ディーゼル機関の排ガス温度は、周囲条件即ち過給機の吸込空気温度等諸要因で変化するという不都合がある。そこでできるだけ排ガス温度を安定させる手段として、次の方法を採用している。二サイクル機関については、ピストン下部掃気ポンプの作動シリンダ数を吸

入温度に応じて調節し、掃気空気量をコントロールすることで排ガス温度を調整する。四サイクル機関では過給機への排ガスをバイパスすることにより直接排ガス温度を上昇させるとともに、過給空気量をコントロールすることで排ガス温度を上昇させる。また二サイクル機関、四サイクル機関共に過給機用冷却器の出口温度(空気)を調整することでも排ガス温度をコントロールすることができる。

2.3 経済性の比較 以上述べたKSEプラントを具体的に50形プロダクトキャリアに採用した場合について、在来形機関プラントと燃料消費量を比較すれば表1の通りとなる。この場合燃料単価をC重油21,000円/kt, A重油32,000円/kt, 金利10%, 年間か動日数280日と仮定して、初期投資額の償却年数を計算すれば約3.5年となる。

表1 50形タンカー主要目および燃料消費量比較

機 関 形 式	従来形プラント		KSEプラント	
	二サイクル	二サイクル	二サイクル	四サイクル
DWT	50,000	50,000	50,000	50,000
船 速	15.1 Knts	15.1 Knts	15.1 Knts	15.1 Knts
主 機 出 力(MCO)	15,200 PS	13,300 PS	13,300 PS	13,300 PS
" (NOR)	13,600 PS	11,970 PS	11,970 PS	11,970 PS
プロペラ回転数(MCO)	145 rpm	70 rpm	70 rpm	70 rpm
発 電 機 構 成	D/G×2	D/G×2+T/G×1	同 左	同 左
" 出 力	480 kW×2	440 kW×1(T/G) 220 kW×2(D/G)	同 左	同 左
燃 料 消 費 量(主 機)	52.6 T/D	46.0 T/D	43.0 T/D	43.0 T/D
" (発電機)	2.6 T/D	—	—	—

3. MT "ALAMO" の運転結果について

65,000DWt形ディーゼルタンカーMT "ALAMO" は中速ディーゼル主機を用いたKSEプラントを採用しており、その主要目はずぎの通りである。

3.1 主要要目

全 長: 238.00m
 長さ(LPP): 229.00m
 幅 (MLD): 33.20m
 深さ(MLD): 17.00m
 満 載 喫 水: 12.16m
 船 級: NK, NS, MNS, (MO)
 総 ト ン 数: 33,091 t
 載 貨 重 量: 66,728 t
 主 機 関: 川崎M・A・N14V52/55A1基
 連続最大出力 13,300 BHP×430 rpm
 (プロペラ回転数 70 rpm)
 常 用 出 力 11,970 BHP×415 rpm
 (プロペラ回転数 67.5 rpm)
 燃 料 消 費 量 146 gr/PS・h at MCO
 (10,200 kcal/kg, LCV)
 直 結 補 機 主潤滑油ポンプ, 減速機用潤滑油ポンプ
 減 速 装 置: 川崎1 MT形 遊星減速機
 減速比 1:6.143
 プ ロ ペ ラ: 5翼1体形 直径8m
 補 助 ボ イ ラ: 2胴水管式 23 kg/cm²G 飽和
 40 t/h 1基
 排ガスボイラ: 立形煙管式(コンバスター付)
 4.5 kg/cm²G×245℃×4.5 t/h
 ターボ発電機: 軸流7段 410 kW×1800 rpm×1基
 ディーゼル発電機: 410 kW×2基
 吸収冷凍機(空調): 60 USRT(180,000 kcal/h)
 chilled water
 7.5℃×12℃×40 m³/h

3.2 試運転結果

1) 主要性能 本船の海上試運転の結果得られた主要性能は, 表2の通りである. これらの試運転結果をもとに, ニサイクルディーゼル機関とう載の在来船と各項目ごとに比較分析すれば, つぎの通りとなる.

低回転プロペラ採用による馬力削減(満載13%, バラスト11%)約12%, 主機常用出力における燃料消費率の改善(ニサイクル154 g/PS・hをベース)約8.1~8.7%, 廃熱回収ターボ発電システム採用による燃費節約約7%,

表2 海上運転における主要性能

	NORMAL		MCO	
	BALLAST	FULL	BALLAST	FULL
船 速 (Knts)	16,672	15,763	17,066	16,158
主 機 出 力 (BHP)	11,875	12,440	13,275	13,775
プロペラ回転数 (rpm)	71.4	72.0	73.9	74.5
燃料消費率 (g/PS・h) (含む発電機雑用蒸気)	141.5	140.6	142.4	142.9
ターボ発電機出力 (kW)	307	309	310	311
EGB出口蒸気圧力 (kg/cm ² G)	6.4	6.4	6.4	6.4
EGB出口蒸気温度 (℃)	225	260	260	260

減速装置による損失(主機出力比)約1.5%, 合計燃料消費率削減割合約24%となる.

2) 各部性能

a) 排ガスボイラ 本船の排ガスボイラには主機停止または低負荷時のために, 追だき装置(コンバスター)を設けている. この装置は蒸気圧力を検出して自動で追だきを行ない, 主機負荷のいかにかわらず常にターボ発電機が使用できるようにして, 従来起こった補助ボイラ蒸気への切換え時のドレンによるタービンのトラブルを防止すると共に, 主機低負荷時にEGBへのすす付着を防止している. また, 主機排ガス管には切換ダンパーを設け, 主機負荷約40%以下では排ガスはバイパスダクトにより, 大気へ放出されるように配置している. こういった配慮によってEGBのすす付着(主機低負荷時すすが付着しやすい)が一層防止できると考えられる. EGB, 切換ダンパー, バイパスダクト等の配置, およびダンパー開閉シーケンスは図7~8の通りである. 主機排ガスダクト中での追だきについて多くのメリットがある反面, 主機未燃ガスの影響, バックファイアー, 火の吹き消え等の問題を含んでいることも事実である. しかし, これ

図7 EGBおよびダクト配置図

図8 主機負荷と切替ダンパー開閉および燃料消費量

らの問題点をふまえ、十分な対策を検討し万全を期した結果、計画通りの性能と安全性を確認することができた。主機停止、追だき時のボイラ効率も約89%（排ガスをベースに設計しているため）と従来の補助ボイラによるターボ発電機へのバックアップよりも、効率よく運転できる結果となった。また、本船の試運転期間を含め引渡後約1カ月にわたる航海に一度もスートブローをかけることなく運転されているが、特にドラフトロスの増加も認められず、電力、雑用蒸気共（追だきすることなく）十分まかなえていることからして初期の性能は十分発揮されているものと考えられる。試運転において、煙管式EGBの特性の一つとして保有熱量を調べた結果、EGBドラム圧力5 kg/cm²G、追だき装置OFF、ターボ発電機負荷340 kW、雑用蒸気約1 ton、主機常用負荷、の状態から主機を危急停止させ約12分間ターボ発電機の電力を供給することができた（ターボ発電機のHzダウンによるトリップまで）。これは煙管式ボイラの缶水保有量が非常に大で、蓄熱量が大きいことを立証している。もちろん主機トリップ、またはクラッシュアスターン時には、ディーゼル発電機が自動起動すると共にコンバスターを点火するようシーケンスを組んでいるがターボ発電機の保持時間が長いことは、これらのシーケンスによるバックアップと共に、システム全体の信頼性を高めているといえる。

b) 直結潤滑油ポンプ 航海中の電力消費削減対策の一つとして主機潤滑油ポンプ、および減速装置用潤滑油ポンプをそれぞれ直結し、主機回転の70%以上では直結ポンプのみで運転されるように計画している。直結ポンプのほかに各々モータ駆動のスタンバイポンプが設けられ、回転数または圧力により自動発停し常に油圧を一定に保つようなシステムを採用した。本システムは当社において多くの実績があり、この方法による航海中の電力削減は約50 kWになる。

c) 主機排ガス温度調整装置 本船はKSEプラントの1番機をとう載することから次の排ガス温度調整装置を設け確認を行なった。すなわち、過給機の排ガスバイパス装置、および過給機吸込空気用通風ダクトにヒーターを設け吸入温度の上昇を計る方法である。以上二つの排ガス温度上昇対策を設け、寒冷時におけるEGB蒸発量低下をなくした。いいかえれば、経済的EGBの計画ができたことになる。海上運転において上記対策のそれぞれを確認したが、過給機の排ガスバイパスでは主機性能の低下しない範囲で約50℃の排ガス温度上昇が得られることが確認された。また、吸込空気温度をヒーターにより上昇させた時の効果は、空気温度6.5℃上昇させることにより排ガス温度が約10℃上昇することが確認できた。なお、このヒーター加熱用熱源は主機シリンダ冷却水により加熱されるよう配置されている。

d) 居住区およびコントロールルーム空調装置 本船には吸収冷凍機を採用し、居室およびコントロールルームを冷房すると共に、冬期には吸収冷凍機加熱用温水により暖房するようになっている。この温水は主機過給機出口空気冷却器を2段に分け、上流側に清水を通して約10℃上昇（80→90℃）させたものである。温水系統中には主機負荷の変動または空調負荷の変動時にも温水温度を一定に保たしめるため蒸気による加熱器および海水による冷却器を設けており、常に温水を通じて暖房または冷房ができるよう配慮されている。本船の海上運転は寒冷時のため居室の冷房負荷が取れなかったため、仮設ヒーターにより冷房負荷を取り、居室は暖房、コントロールルームは冷房、等いろいろの組合せによる吸収冷凍機負荷テストを実施し、十分その性能を確認すると共に、温水系統が主機負荷、冷凍機負荷の変動においてもスムーズに追従することを確認した。本船引渡し後すでに南方海域を三航海しており、この間冷房能力は十分であり、航海中船の動揺または振動に対しても性能低下は全く認められないとの報告を受けている。

e) 後進性能 低回転大直径プロペラ採用によるデメリットとして、クラッシュアスターン時主機停止前進惰力航行中、プロペラ遊転トルクが大きく後進起動時間、船体停止時間および停止距離がのびることが懸念されたため、テストケースとして本船には軸ブレーキを採用し、その効果を測定した。その結果は表3に示す通りであるが、海流、風速および風向が一定でなかったこと等を考慮すれば表に示す程度の差では軸ブレーキの絶対的必要性は認められなかった。なお、本軸ブレーキはクラッシュアスターンと主機トリップ時に自動的にかかるように

表3 クラッシュアスターン性能

	軸ブレーキなし	軸ブレーキ使用
船体停止時間	800 秒	680 秒
停止距離	3,185 m	2,600 m
後進起動時間	475 秒	350 秒

なっている。今後軸ブレーキはケースバイケースで採否を検討する。

4. あとがき

以上KSEプラントの概要とともに、この1番機をとって載したMT“ALAMO”の運転結果を紹介したが、現在本船は76%の出力にでもなおコンバスタを追だきすることなくEGBのみで電力および雑用蒸気をまかない順

調に航海しているとの報告をうけている。既存技術の組合せとはいえ本船を好成績のうちに完成しえたのは、本プラントの計画、設計、艤装工事、および運転にあたって各々専門技術者が一丸となって細部の検討を行ない万全を期したこと、さらに本船の運航関係者が本プラントをよく理解して、プラントの運転管理をしていただいていることによるところ大である。今後この種プラントとてう載船が海運合理化の一助となることを期して止まない。

国 際 交 流

英国The North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders 会長 Mr. J. B. Caldwell からの書簡

19th April, 1978
Wednesday

To S. Harada, President of The Marine Engineering Society in Japan

On behalf of the Council of the Institution, and with great pleasure, I send our greetings and felicitations to the Officers and Members of your Society, by the hand of Mr. Peter Manson, a Member of our Council and a Member of your Society, with the hope that the strong links that have been forged between the industries and learned societies of our two countries may be maintained and strengthened.

J. B. Caldwell
President

この書簡は本年4月来日されたMr. P. Manson（約10年前まで17年間わが国でロイド船級協会の検査員として船舶の検査に従事し、当学会創立のとき以来の正会員）に託され、4月21日に同氏が当学会を来訪の際もたらされたもので、当学会から次の返書を同氏に託しました。

29th May, 1978

Mr. J.B. Caldwell, President
The North East Coast Institution
of Engineers and Shipbuilders
Bolbec Hall
Newcastle upon Tyne NE1 1TB
England

Dear Mr. Caldwell:

On behalf of all the Officers and Members of our Society, I wish to express our heartest thanks to your kind greetings through Mr. Manson.

It was a great pleasure to have had Mr. Manson, the oldest foreign Member of our Society, as our guest and have exchanged fruitful views in respect of marine engineering on the 21st and 28th April.

As Mr. Manson kindly advised us, exchanging mutually the publication would help the maintenance and strengthening of our friendship and association having been forged between ourselves; therefore, we would like to send you hereafter a copy of "The Bulletin of the Marine Engineering Society in Japan" in English quarterly and any of publications in English on occasion. We would be happy if you would also send us any of your periodicals.

By hoping your good health and the prospective future of your Society, we thank you again for your courtesies.

Very sincerely yours,

S. Harada
President