船用熱水フラッシュ発電プラント*

石谷憲一郎**・本多賢士***・高田重熙***
岩永洋一***・下田文男***

Hot-Water Flash Power Generating Plant for Diesel Ships

By Kenichiro Ishitani, Masahito Honda, Shigehiro Takada,
Yoichi Iwanaga, Fumio Shimoda

The hot-water flash power generating plant recently developed by Mitsubishi Heavy Industries for diesel ship application far exceeds the conventional economizer-steam power generating plant in terms of waste heat recovery rate, and hence can adequately do its job even with the limited waste heat energy available from the lean exhaust of the increasingly fuel-efficient marine diesel engines which are also smaller for the ship size than hitherto and which are frequently run at part loads for slow steaming. Thus, it is believed that the hot-water flash power generating plant will prove especially worthwhile for ships powered by diesel engines 12,000 PS and above in output, all these ships now finding it almost practically impossible to employ the conventional economizer-steam power plant.

Mitsubishi's hot-water flash power generating plant comes in two types; MARK-N1 and MARK-N2. The former recovers the engine exhaust gas energy all with pressurized water in the exhaust-gas economizer and produces steam by flashing pressurized hot water to drive its generator turbine. The latter, though also equipped with the economizer, recovers high-temperature engine exhaust gas energy as steam and heat of low-temperature exhaust gas and scavenging air with pressurized water to drive the generator turbine with both superheated steam and flash steam.

1. ま え が き

近年のディーゼル主機の燃費率向上とそれに伴う排気ガス温度の低下、船型の改良などによる省エネ化、それを背景とした低出力化あるいは減速運転等に伴い、排ガスエネルギーを利用するターボ発電システムの成立範囲が狭まっており、そのみでは常用航海時の船内電力を賄うことが困難になってきた。

一方、船舶の運航コストに占める燃料費の割合が依然として大きい状態では、たとえ排ガスエネルギーの回収量が少なくても、排ガス利用のターボ発電機とディーゼル発電機あるいは軸発電機と並列運転することで船内電力を賄うシステムを採用する場合があるが、この場合でも一定以上の廃熱回収による発電量が得られなければ、廃熱回収プラントに投資しても、その投資の回収が困難となる。

このような事態を打開して何とか廃熱回収によるター

ボ発電システムを成立させるためには、従来以上に廃熱を有効に利用するシステムを開発する必要がある。当社はこのようなニーズにこたえて、従来廃熱回収が困難であった主機排気ガスの低温部分や、主機掃気、さらには主機ジャケット水の廃熱等、広範囲な温度レベルの廃熱を回収するシステム、(蒸気)熱水フラッシュ発電プラントを開発した。

本稿では、廃熱をすべて水の顕熱で回収するシステムと、主機排気ガスの高温部分は蒸気で回収し、主機排気ガスの低温部分や掃気等の低温熱源からは水の顕熱で回収するシステムについて、従来システムと比較し解説する。

一般的に発電量の増加を図るためには、高効率サイクルや高性能各種機器の採用、あるいは多種熱源からの熱回収の量を増すことが考えられる。前者の場合仮にできたとしても相当のコストアップは免れないだろうし、また後者の場合も熱交換器の拡大やシステムの複雑さを招く恐れが大きい。今回当社が開発したシステムは、いずれの問題点も考慮された船用省エネルギープラントである。

* 原稿受付 昭和58年7月14日

** 正会員 三菱重工業(株)(東京都千代田区丸の内2-5-1)

*** 正会員 三菱重工業(株)長崎造船所(長崎市飽ノ浦町1-1)

2. 廃熱回収の拡大と高効率化

ディーゼル主機の廃熱のうち、熱量、温度レベルから最も廃熱回収しやすいものは排気ガスであり、次に主機掃気、続いて機関の冷却水となる。したがって排ガスエコノマイザ出口ガス温度を可能な限り下げ、廃熱回収率を上げることが効率的であるが、従来の単圧式、二段圧力式の排ガスエコノマイザでは、出口ガス温度はその蒸発圧力によりほぼ決定され、たとえば蒸気圧力が $5 \text{ kg/cm}^2 \text{g}$ の場合 $160 \sim 170^\circ\text{C}$ 、 $3 \text{ kg/cm}^2 \text{g}$ の場合 $140 \sim 150^\circ\text{C}$ となる。すなわち、さらに出口ガス温度を下げるためには、低圧蒸発部を付加するか(たとえば、三段圧力式)、あるいは多量の圧縮水にて熱回収を図らねばならない。かくして、排ガスエコノマイザは多段圧力化すると複雑になる一方であるが、圧縮水で回収する場合は構造が極めて簡単となる。また、さらに熱回収量の一層の増加を図るために主機掃気や、ジャケット冷却水等の多種分散熱源から廃熱を回収することも容易である。

一方、ディーゼル主機の排気ガスから熱回収を行うシステムにおいて、排気ガス温度を低下させた場合の障害として、低温腐食の問題が避けられない。この件に関しては、低温耐食鋼の採用、チューブの溶接法の改善、及び排エコ構造の工夫等により、給水温度 90°C で、排エコ出口ガス温度を 120°C まで下げることが可能となった。

サイクル効率は廃熱源の最高温度によってほぼ決定されるため、従来のシステムより大幅に向上させることは困難であるが、高性能タービンと高効率の多段フラッシュを採用することで改善した。

3. 熱水フラッシュ発電プラント (MARK-N1)

本プラントは、廃熱をすべて熱水(圧縮水)にて回収するシステムで、図1に示すように、蒸発部を有しないため、ガスと水の顕熱どうしの熱交換となり、排ガス側と水側のターミナル温度差を一定に保つことが容易であり、このため主機排気ガスの低温域まで熱回収が可能である。

排ガスエコノマイザ(熱水発生器)にて主機排気ガスの廃熱を回収した熱水は、一旦アキュムレータに蓄熱された後、多段フラッシュにてフラッシュ蒸気と熱水に分離され、フラッシュ蒸気は多段フラッシュ蒸気タービンに導かれ電力に変換される。一方、船内のヒーティングサービス等に必要な蒸気または温水は、適当な圧力を有するフラッシュから分岐し供給する。最下段フラッシュのドレンは、ブースタポンプにより給水ラインに戻され、給水加熱に利用される。給水はさらに主機掃気の廃熱を利用して 90°C 以上に加熱された後、排ガスエコノマイザへ供給される。図2にシステム図を示す。

本システムでは、従来の復水を大気圧ドレンタンクへ戻す方式ではなく、復水ポンプから給水ポンプ入口へ直接導く閉ループ・プラントを構成することにより、給水

図1 排ガスエコノマイザにおける温度-熱量線図

図2 熱水フラッシュ発電システム (MARK-N1)

中への酸素の溶存を防止し、排ガスエコノマイザチューブ内面の酸素腐食を防止している。なお、ヒーティングサービス等に使用された蒸気ドレンは、大気圧ドレンタンクに集められた後多段フラッシュの最下段(低真空圧力)へ、補給水は復水器へ投入し真空脱気を行っている。

また、本システムは廃熱回収の過程において相変化を

図5 二段圧力式排エコ・ターボ発電システム

図7 三段圧力式排エコ・混圧タービン発電システム

図6 二段圧力式排エコ・混圧タービン発電システム

最適圧力に保持し（ $6\sim 8\text{ kg/cm}^2\text{g}$ ）、船内サービス蒸気圧力は可能な限り低下させ（ $3\sim 4\text{ kg/cm}^2\text{g}$ ）、熱回収量の増加をはかったのが二段圧力式である。

しかしながら、二段圧力式の場合でも排ガスエコノマイザ出口ガス温度は、船内サービス蒸気となる低圧蒸気圧力によってはほぼ決定され、約 140°C までしか下げることができない。そこで、発電機タービンへの混圧蒸気として使用するために、さらに極低圧（ $0.3\sim 1\text{ kg/cm}^2\text{g}$ ）の蒸発部を設けて熱回収量の増加を図ったのが三段圧力式であり、この場合排ガスエコノマイザ出口ガス温度は $125\sim 130^\circ\text{C}$ まで下げることができる。

排ガスエコノマイザでの熱回収量を増加させるために、排ガスエコノマイザを多段圧力化することは有効な手段の一つであるが、システムが複雑化することは避けられないし、補機も多くなる。例えば三段圧力式の場合、気水分離器を補助ボイラのほかに2台、ボイラ水循環ポンプも3台設置する必要がある。

そこで、こういった不利を避け、排ガスエコノマイザを二段圧力以上に多段圧力化することなく、熱回収量の増加並びにターボ発電機の出力増加を図ったのが前出の（蒸気）熱水フラッシュ発電プラントである。

5.2 発生電力の比較 前述の各種排エコターボ発電システムの発生電力の比較を、表1及び図8に示す。単段圧力式よりも二段圧力式というように、排ガスエコノマイザを多段圧力化するほど発生電力は増加するが、

表1 発生電力の比較

システム	単段圧力式	二段圧力式	二段圧力式 + 混圧タービン	三段圧力式 + 混圧タービン	MARK-N1	MARK-N2
発生電力比 (%)	100	115	126	141	144	154

図8 発生電力の比較

今回当社が開発した熱水フラッシュ発電システムは、MARK-N1及びMARK-N2とも従来のいずれのシステムよりも発生電力が大きい。特にMARK-N2について言えば、単段圧力式に比し50%以上の、二段圧力式に比し30~40%の、さらに三段圧力式と比較しても10%以上の大幅な発生電力増となっている。

本熱水フラッシュ発電プラントの採用により、排エコターボ発電システムの成立範囲が大幅に拡大し、従来成立困難とされていた常用出力12000 PS程度の低速主機を搭載した船舶への適用も可能となる。また、減速運転においても補助ボイラを追焚き、あるいはディーゼル発電機を並列運転することなく、排エコターボ発電システムのみにて船内電力を賄うことが可能な主機負荷範囲が拡大する。その結果、電力不足分を補うための軸発電機を設置する必要がなくなる場合もある。

6. 熱水フラッシュ発電プラント構成機器

6.1 排ガスエコノマイザ

排ガスエコノマイザは、ディーゼル主機排ガスの保有熱を可能な限り回収するため、その伝熱面積は必然的に大きなものとなるが、

できるだけコンパクトにするため単位長さ当りの伝熱面積が大きいスパイラルフィンチューブを主に採用した伝熱管群とヘッダ及びケーシングから成り、これに除煤装置及び水洗装置を装備したものとなる。

MARK-N1システムでは、排ガスエコノマイザでは全て圧縮水(熱水)にて熱回収を行うため、伝熱管は全てスパイラルフィンチューブで構成され構造は簡単となる。しかしながら、低温部は酸露点以下の低温腐食雰囲気下に配されるため、チューブ及びフィンとも低温耐食鋼を採用し延命化を図るとともに、低温部は別ブロック化しチューブ換装の容易な構造としている。低温腐食対策の詳細については後述する。

また、低温部のスパイラルフィンチューブは、低温部における煤付着を軽減させるため、高温部のフィン高さが19 mmであるのに対し、低温部のそれは12.7 mmと高さの低いフィンを採用している。

さらに、本システムでは、給水流量(熱水量)は排ガスエコノマイザ出口の熱水温度を一定に保つように制御されるため、主機低負荷時に給水流量が減少しても管内流動の不安定によるウオータハンマ現象が発生しないように、高温側の水の流れは上昇流を採用している。

MARK-N2システムは、排ガスの高温域は蒸気の形態で、低温域は圧縮水の形態で熱回収を行うため、蒸気発生部には二段圧力式を採用し、排ガスエコノマイザは、排ガス高温側より過熱部、高圧蒸発部、低圧蒸発部、予熱部(熱水発生部)の四つのセクションで構成される。

本システムでも、予熱部の低温部は低温腐食雰囲気下に配されるため、予熱部は低温部分と高温部分に分割し、低温部にはMARK-N1システムと同様の低温腐食対策が講じられている。

図9及び図10にMARK-N1及びMARK-N2システムの排ガスエコノマイザの組立断面図を示す。

6.2 アクムレータ

MARK-N1システムでは、アクムレータを設置し、排ガスエコノマイザにて発生した熱水は、一旦このアクムレータに蓄熱された後、水位制御弁を介してフラッシュへ供給される。

6.3 フラッシュ

フラッシュは、蒸気と熱水の分離性能、船体の動揺に対する安定性、設置スペース、保守の容易さを考慮した多段フラッシュとしている。各ステージの熱水は水位制御をされたのち順次フラッシュし蒸気はタービンに混入される。最下段のフラッシュはヒーティングサービス用の蒸気ドレン又は温水の戻りがあため、低真空域のタービン段落と組み合わせられている。

図9 MARK-N1 排ガスエコノマイザ組立断面図

図10 MARK-N2 排ガスエコノマイザ組立断面図

保護装置としてはフラッシュ内部が満水した場合にタービンへのキャリオーバーを防ぐための二重プロテクションが設けられている。

6.4 蒸気タービン タービンは、多段落より構成され、減速機を介して発電機と結合される。タービン車室には混圧蒸気口を配し、フラッシュ蒸気、及び、低圧汽水分離器よりの蒸気を車室内に導く。

タービンの制御は、主蒸気圧力と、混圧蒸気圧力を適当に選定することで、広い負荷範囲において主蒸気加減弁による混圧運転が可能である。混圧運転中、タービン負荷が小さく主蒸気加減弁による調速が困難になるとフラッシュ蒸気遮断弁、または、混圧蒸気遮断弁は低圧側より順次閉となる。さらに、フラッシュ蒸気遮断弁を閉じると、フラッシュ内の圧力及び温度が高くなるのでこの特性を利用して、給水ラインに戻るドレンの温度を制御し給水温度を計画値に保つようにする。図11にタービンの断面図を示す。

図11 フラッシュ蒸気タービン

7. 機器の信頼性

7.1 低温腐食対策 排ガスエコノマイザ出口ガス温度を低下させる程熱回収量は増加するが、同時に低温腐食の問題が発生する。ディーゼル排ガスの酸露点温度は約130～140℃であり、それ以下の温度では硫酸を凝縮させ、硫酸腐食(低温腐食)を発生させることになる。低温腐食を論じるにあたってはメタル温度が問題となるが、チューブのメタル温度は排ガス温度よりもチューブ内水側温度に支配されるため、給水温度が目安となる。

本システムでは、熱回収量を増加させるため、排ガス温度を120℃まで低下させるが、MARK-N1及びMARK-N2システムとも給水温度は実績のある90℃とし、酸露点以下のメタル温度領域には低温耐食鋼製のチューブ及びフィンを採用し、延命を図っている。従来の実績では、メタル温度が90℃であっても低温耐食鋼の腐食量は0.1～0.2mm/年程度であり、かなりの寿命を有している。しかしながら、チューブに溶接部がある場合は、チ

ューブ母材と溶着金属との電位差により, 卑(負)となる溶接部が選択的に速く腐食することがあるが, これを防止するためにチューブ突合せ溶接部はガス流路外へ配置している。

また, 低温腐食に対して延命は図れても完全に防止することはできないので, 排ガスエコノマイザの低温部は別ブロック化し, 換装容易な構造としている。

7.2 フラッシュの安定性 熱水は気水分離器内で蒸気とドレンに分離され, ドレンは集水タンクに蓄えられる。水位が安定した集水タンク内のドレンは, 水位制御弁を介して次段へ移送される。気水分離器内で分離された熱水は, ほとんど気水分離器内で滞留することがないため, タービン車室へのキャリーオーバーの可能性は少ない。

タービン負荷が小さい場合, または, 熱水温度が低い場合は, フラッシュ間の差圧が小さく, 水位制御弁の容量を超えることがある。このようなときは, フラッシュ蒸気ラインのチェック弁, 及び, フラッシュ蒸気遮断弁が閉となり, タービン車室へのドレンのキャリーオーバーを防ぐ。

8. 総合評価

船舶に搭載するシステムを評価する場合

- 1) システムの信頼性
(容易な運転操作, プラントの安定性, 保守整備性)
- 2) システムの経済性
(投資コストと省エネルギー効果のバランス等)

に就いて検討を行い, 総合的に評価する必要がある。以下, 船用廃熱回収システムとして, 初めて“熱水フラッシュ”という考えを導入したプラントの, 船用プラントとしての適応性について評価を述べる。

8.1 システムの信頼性 廃熱回収率が極めて高いシステムとなっているため, 排ガスエコノマイザチューブの低温腐食, 煤の堆積等が懸念されるが, これらに対しては, 前述したような設計的配慮, 並びに, 主機の負荷条件に応じて自動的に排ガスエコノマイザ入口給水温度の制御を行うシステムの採用により万全を期している。これらは, また, 燃料油の粗悪化動向という将来事情も考慮に入れた対策でもある。

船用プラントにおいては, 陸上の発電プラントに比べ大きな負荷変動が通常の運転モードの一部として発生するが, こういった負荷変動に対しても安定な運転ができるシステムである事が, 船用プラントにおける重要な要件である。これに対しては, 種々の外乱状態を想定し, その状態でのプラントの動特性をシュミレートし検証を行った。その結果, 本プラントは, その嵌脱を含め, 運転操作上は従来の二段蒸気圧力式排エコ T/G プラントとほとんど同じであり, また, プラントの挙動も変わらない事を確認した。これは, 他の三段圧力式や LPSG 付複圧式の廃熱回収方法に比べ, 本プラントの構成が極めて

シンプルになっている事に加えて, 廃熱源である主機関の負荷変動やターボ発電機の外乱負荷に対して, アキュムレータやフラッシュが, 適当なクッションチャンバーとして, その外乱の吸収に有効に働くためである。その結果, 負荷制御は主蒸気加減弁のみで実施可能であり, この意味でも船用プラントに要求される機能を充分満足しているといえる。

8.2 システムの経済性 一般に, 船舶に搭載される省エネルギーを目的とするプラント, あるいは, 機器は投資コストを 5~7 年で回収できる事をもって, 評価の目安とされる。

船用プラントでは, その構成機器への直接投資と共に配置上, 機関室長さを長くする事がないよう, スペースの問題についても充分考慮しなければならない。一般に, 廃熱回収率が大きくなるに従い, 熱交換部である排ガスエコノマイザ本体の寸法は大きくなり, それはまた, 配管システムの設計にも大きな影響を及ぼす。蒸気に比べ比容積が小さい熱水を, エネルギー伝達媒体として用いる熱水フラッシュシステムでは, 管口径を小さくする事ができるため, システム全体がコンパクトにまとまり, アキュムレータやフラッシュといった新たな装置も加わり, 従来システムより廃熱回収量が大幅に増えているにもかかわらず, 設置スペースの増加は余りなく, したがって, 投資コストの中で, スペースについてのコストは従来システムとほぼ同一として評価する事ができる。

呼称燃費率 130 g/PS・h クラスの主機関の単体熱効率は, 略 47.5% であり, これに高効率の二段圧力式排エコ T/G プラントを加えた場合の総合熱効率は略 50% である。これまでは, この投資コストが, 5~7 年を目安に回収されることで評価されていたが, 高性能ロングストローク型の呼称燃費率 120 g/PS・h (単体熱効率 51.7%) クラスの主機関が出現するに及んで, 排エコ T/G プラント単独で船内電力を賄う事は, ほとんど不可能となり, 排エコ T/G プラントを採用した場合でも, ディーゼル発電機との並列運転, 補助ボイラの追焚による T/G 運転, あるいは, 軸発装置を追設したうえで T/G プラントと並列運転する事態を余儀無くされて来た。しかしながら, 熱水フラッシュタービンプラントでは, こういった高性能主機関に対しても, その廃熱回収による排エコ T/G プラント単独で, 充分船内電力を賄う事ができるため, 総合熱効率は略 54% の高率に達する事になる。これを投資コストと省エネルギー効果のバランスで考えると, 熱水フラッシュ方式採用によるコスト上昇は, 充分この条件を満足させるものである。

さらに, 一層の廃熱回収を目指すとするれば, 残された手段は低沸点媒体を使用したサイクルで, 理論的に低温の廃熱回収に極めて高い効率を示すことが知られており, 陸上プラントでは, 一部採用が試みられている。しかし, 設置スペースが大きくなる事, 安全面から運転操作に神経を使う事, したがって制御も勢い複雑になる事, 加え

て、低沸点媒体は水に比べ相当高価であるため、運転コストの上昇を招く事等、船用プラントとしての適用については、相当の工夫と研究が必要であり、早急な製品化は困難と見ねばならない。その観点からも、熱水フラッシュ方式は評価に値するものといえる。

9. あとがき

排エコターボ発電システムにて、従来以上に廃熱回収率の向上を図ろうとすれば、排気ガスといえどもすでに低温レベルの廃熱であり、残された他の熱源はさらに低温であり、そのため、廃熱回収用の熱交換器の大形化、また、低温熱源からの熱回収効率の低さは、ある程度避けられない。

このような環境の中で、いかに複雑さを避け、合理的な廃熱回収を行うかが課題である。本稿に紹介した(蒸気)熱水フラッシュ発電プラントは、低温熱源の回収効率の良さと、熱交換器の簡素さを特徴としたものであり、個々の機器は、すでに陸上プラントで十分実証されたものである。

本プラントは、幸いにも関係者のご協力により、実船への搭載が予定されており、さらにシステムの信頼性を高めるべく努力を重ねていく所存である。

なお、本プラントは特許申請済みである。

最後に、本プラントを取りまとめるにあたって、ご協力を頂いた関係各位に謝意を表する。

研究委員会報告要旨

電気推進装置

電気研究委員会

昭和54年から4年半に亘る委員会活動による研究成果をとりまとめたもので、電気推進の歴史、サイリスタまで新技術を含めた最近の動向及び一般的な設計上・艦装上の問題点をまとめたものである。

報告書のかなりの部分を船用機関学会誌59年2月号に「電気推進特集号」として発表する予定である。

(会告参照)

船用電動機の騒音とその対策

電気研究委員会

本報告書は、船用電動機の騒音の実情についての調査を行い、各国規則が規制する船内各区画の騒音値との比較を行ったものである。

第1章 まえがき。第2章では、各国規則の騒音規制

値と電動機騒音の実情調査。第3章では、電動機の騒音の原因。第4章では、電動機騒音の低減対策について述べ、艦装計画者の指針となるよう取りまとめた。

(会告参照)