技術資料

IHI SSGマークIIシステムの性能向上 及び就航実績*

稗田辛一郎**・宇都宮正時***

Design and Improvement of IHI SSG Mark-II System and Its Operation Results

By Shinichiro Hieda, Masatoki Utsunomiya

The energy-saving design of the propulsion plant is very important for the improvement of ship's overall performance. IHI developed a diesel engine and steam turbine combined propulsion plant, the Super Economical Shaft Generator system (SSG system), and delivered in April 1981 a ship equipped with the first SSG system having many energy-saving features. Following this, IHI developed the SSG Mark-II system, an improved version of its precedent. The ship mounted with the first SSG Mark-II system put into service satisfactorily. The SSG Mark-II system ingeniously recovers low-temperature waste heat which has been so far lost, increasing the waste heat recovery rate by 30% to 40% compared with the conventional system. As a result, the recovered turbine output from the waste heat reached about 10% of main engine output at NOR.

1. ま え が き

本稿では IHI SSGシステムの基本設計及び就航実績について述べる。船舶の全運航経費の50~60%を占めると言われる燃料代を削減するための省エネに対する強い要求に応えるため、当社は経済性に優れたディーゼル主機関と蒸気タービンの複合推進プラントである「高経済型直結発電(SSG)システム」の開発を行った。SSGマークIシステム搭載の第1番船である8万トン形タンカが昭和46年4月に就航した。その後、改良型としてSSGマークIIシステムが開発され、そのシステムを搭載した第1番船である6万トン形バルクキャリアが昭和58年2月に就航した。これらの就航船は計画どおりの性能を示している。本年3月時点では、SSGシステムを装備した船の3隻が就航中であり、4隻が建造中である。

2. SSGシステム^{1,2)}

SSGシステムは、次の目的を実現するために開発されたもので、その基本構成を中速ディーゼル機関に適用した場合を例に図1に示す。

(1) 回収動力を主機関に還元して推進に加勢すること

図1 中速主機プラントに対するSSGシステム

によりC重油消費量を節減する。

(2) 航海中のディーゼル発電機の使用を最少にすることにより、A重油消費量の節減を図るとともに、発電機用ディーゼルの保守作業を削減する。

(3) タンカの場合、航海中のボイラ用C重油消費量を節減する。

本システムにおいては、排ガスエコノマイザの蒸気で駆動されるタービン、発電機及び主機関が自動変速クラッチ機構を経て機械的に連結されている。SSGシステムの最も特徴的な機能は、主機関とターボ発電機の間で動力が下記の様に相互に伝達されることである。

(1) タービン出力が船内電力を賄う以上に得られる時

* 原稿受付 昭和59年1月5日

ISME TOKYO '83講演(昭和58年10月5日)

** 正会員 石川島播磨重工業(株)(東京都千代田区丸の内1-6-2)

*** 石川島播磨重工業(株)(東京都千代田区丸の内1-6-2)

は、その余剰動力は推進に利用される。

- (2) タービン出力が船内電力に対して不足する場合は、その分を主機関が加勢する。

従来のターボ発電システム(以下T/Gと呼ぶ)では、船内電力を賄う以上の蒸気が存在しても、それを利用する手段がなかった。しかし、本システムでは推進系と連結されているため回収された蒸気は全て有効に利用できる。システム設計に当っては、下記の特徴が折り込まれている。

- (1) 主機関とターボ発電機間の動力の相互伝達
- (2) 機械式連結による高い動力伝達効率
- (3) ターボ発電機と軸発電機の両者の利点
- (4) 広い主機出力範囲で使用可能
- (5) タンカのイナータガス・トッピングアップ時のボイラ蒸気の利用
- (6) 蒸気や電力の節約分を直接推進加勢動力に転換
- (7) シンプルでコンパクトな設計
- (8) 容易な操作と高い信頼性

3. SSG マークⅡシステムの改良点

3.1 一般 省エネルギー性能の向上を図る上で、SSGシステムの有する動力の相互伝達機能は非常に有効である。即ち、より多くの廃熱回収によるタービン出力の増大や各種の対策による船内電力の節約は、全て推進加勢動力の増大につながり、その分主機関の燃費の節約となる。例えば、通常のT/Gシステムでは、電力節約を行っても、より低い主機出力までT/Gの単独運転は可能になるが、直接燃料の節約とはならない。上記の目的を達成するために開発されたのがSSGマークⅡシステムである。その最大の特徴は従来回収されることのなかった低温度の廃熱源から熱回収利用することである。基本構成を中速ディーゼル主機に適用した場合を例に図2に示す。この低温度廃熱の回収は図2に示す3段蒸発式排ガスエコノマイザ、過給空気エコノマイザ及び混圧タービンの開発によって実現された。排ガスの低温部及

表1 SSGマークⅡ装備パナマックスバルクキャリア機関部主要目

Main engine	: IHI-S.E.M.T Pielstick 6PC4-2L x 1 MCR 9,540 ps {7020 kW} x 400/77.9 rpm NOR 8,585 ps {6310 kW} x 386/75.2 rpm
Propeller	: 5 bladed-fixed pitch propeller
Auxiliary boiler	: Oil fired package type x 1
Evaporation	: 6.7 t/h x 9 kg/cm ² {0.88 MPa}
Exhaust gas economizer	: Triple stage forced circulation type x 1
Evaporation	: Total 4.6 t/h at M/E normal output
Charging air economizer	: Natural circulation type x 1
Evaporation	: 0.48 t/h at M/E normal output
Shaft-turbo-generator	: 660 kW x 450 Vac x 1
Generator turbine (SSG turbine)	: Mixed pressure geared condensing type x 1 850 kW x 1,800 rpm
Diesel generator	: 560 kW x 450 Vac x 2

び過給空気において0.3 kgf/cm² {29.4 kPa}の蒸気を発生させ、この蒸気は混圧タービンの低圧ポートに供給される。

表1にSSGマークⅡシステムを採用したパナマックス型バルクキャリアの推進プラントの主要目を示す。

3.2 低温廃熱回収 表1に示した推進プラントを例に各低温廃熱回収について詳細を述べる。

(1) 主機排ガス 従来の単圧タービンの場合は、タービン蒸気圧力の飽和温度の制約によって排ガスのエコノマイザ出口温度は160~180℃で設計されていた。3段蒸発式排ガスエコノマイザでは低圧蒸発部圧力を0.3 kgf/cm² {29.4 kPa}としたことで126℃まで下げることが可能となった。高圧蒸気は過熱器を経てタービンに供給され、その圧力は低圧蒸気を含めたサイクル効率が最適になる様に設定されており、通常のタービン蒸気圧力より若干高い。中圧蒸気は加熱・雑用に供給されるが、居住区のジャケット暖房等の採用により、できるだけ必要量を少なくして蒸気発生が可能な排ガスのエネルギーは最大限タービンに供給される様に設計されている。各蒸発部の間には各種の使用状態においても有効にタービン蒸気が供給される様に自動のメイクアップ/スπιル制御弁が設けられている。主機排ガスでは、低温まで熱回収する場合排ガスエコノマイザチューブの硫酸腐食の問題がある。低圧蒸発部の排ガス温度は、燃料の硫黄含有率によって変わるが、部分的に硫酸露点以下となる。対策として、低圧蒸発部のチューブ及び構造の一部には耐食鋼を採用し、配置及び構造についても保守が容易な様な配慮がなされている。

(2) 過給空気 主機過給機の空気出口温度は通常

図2 中速主機プラントに対するSSG MK-IIシステム

150~170℃であるが、この熱は全量空気冷却器を経て海水に捨てられている。しかし、SSGマークⅡシステムではこの熱を給水加熱と低圧蒸気発生に利用している。この過給空気エコノマイザでも排ガスエコノマイザの低圧蒸気発生部と同じく出口空気温度 126℃まで熱回収する様に計画されている。電力節約と主機関の低負荷時にボイラ水が逆に冷却されるのを防止するために自然循環方式が適用されている。過給空気エコノマイザ出口には2段給水加熱器が設けられており、ジャケット冷却水を熱源とした1段給水加熱器で加熱された給水は、ここで更に 115℃まで加熱される。

(3) ジャケット冷却水 ジャケット冷却による廃熱は、造水装置、給水加熱及び居住区暖房に利用される。居住区暖房には、一般に蒸気が用いられるが、比較的湿度が低いジャケット冷却清水でも可能であり、これによって蒸気はタービンに供給されてタービン出力の増大に貢献している。

(4) 混圧タービン 低温廃熱から得られた低圧蒸気を従来のタービン用高圧蒸気と同時に供給できる様に開発されたのが混圧タービンである。組立断面を図3に示す。この混圧タービンは低圧蒸気が高圧蒸気の流れに合流する部分での損失を少なくする様に、タービン車室の構造に特別な工夫がなされている。高圧ポートに設けられたガバナは、単独のターボ発電機(TGモード)として運転する場合の調速機能に加え、主機関と連結されて運転する場合(SSGモード)には、常に高い効率を得られる様にタービン入口前の蒸気圧力を一定に保つ調圧機能を有している。低圧ポートにはガバナは設けられていないが、別途低圧ドラム圧力を一定に保つ調圧弁が設けられている。

(5) 廃熱回収量の比較 SSGマークⅡにおける廃熱回収量の増加を低温廃熱を行わないSSGマークⅠとの比較として図4に示す。面積が単位時間当りの回収熱量を示しており、約30%廃熱回収量が增大していること

図3 混圧タービン組立断面図

図4 SSG MK-I, MK-IIにおける熱回収比較の例

が分る。主機排ガス温度の低い低速ディーゼル主機関では40%程度の増大となる。これらの結果、回収タービン出力は主機出力の約10%に達している。

3.3 自動変速クラッチ機構 SSGシステムでは発電機と主機関を機械的に連絡するため、固定ピッチプロペラの場合は主機回転数の変化に応じて発電機の周波数が変化する。従来の軸発電機ではこの周波数上の制限によって使用範囲が比較的狭いと言う問題があったが、図2における発電機と減速機の間に設けられた自動変速機構の開発により、図5に示す様に主機関の50~90%MCRと広い範囲で使用できる様になった。図6に本装置を組み込んだ場合の中速ディーゼル主機用の減速装置のギアトレインを示す。主ホイールと発電機駆動軸の間

図5 SSGシステム使用範囲

図 6 自動変速クラッチ機構ギアトレイン

表 2 パナマックスバルクキャリアの省エネ比較

System		SSG MK-II system	D/G system (built in 1976)
Item	Type		
Main engine	Type	IHI-S.E.M.T.-Pielstick 6PC4-2L type diesel engine	IHI-SULZER 6RND90 type diesel engine
	Maximum continuous output (PS){kW} × rpm {s ⁻¹ }	9,540 {7,017} × 400/77.9 {6.67/1.30}	17,400 {12,800} × 122 {2.03}
	Dead weight (MT)	61,200	61,200
	Ship speed (kt)	13.6	15.4
Fuel consumption	Main engine (t/d)	29.2	58.7
	Diesel generator (t/d)	—	2.9
	Total (t/d)	29.2	64.5*
Fuel consumption per volume of cargo** (kg/MT · nautical mile)		1.46×10^{-3} (51)	2.85×10^{-3} (100)

(Note) * Corrected by price index. ** Fuel consumption per hour
Dead weight × ship speed

図 7 パナマックスバルクキャリア機関室

に油圧クラッチを2箇装備し、いずれかのクラッチを嵌合することにより変速比を変え、主機回転数が変化しても発電機周波数が一定範囲内になる様に設計されている。上記クラッチの切り換えは油圧回路によって自動的に行われ、しかも電力を供給しながら行われると言う優れた特長を有している。

3.4 適用例 パナマックス形バルクキャリアにおけるSSGマークⅡシステムとディーゼル発電機システムの燃料消費量の比較を表2に示す。単位荷物・単位距離当りの消費量が半減されていることが分る。図7にSSGマークⅡを採用した上記船の機関室の写真を示す。

4. 使用実績

4.1 自動変速クラッチ機構 この装置は3.3でノン・ブラックアウトで自動的に切り換えが行われることを述べたが、これは油圧制御回路の特殊な設計で切り換え時に非常に短時間両クラッチを同時に嵌合させることによって達成される。そのオーバーラップ時間を実機で計測した結果を図8に示す。海上での切り換え時の周波数計測結果を図9に示す。これは主機回転数をHiレンジからLoレンジに切り換えた例である。

図8 クラッチ機構オーバーラップ時間の計測結果

図9 Hi-Lo切り換え時の周波数計測結果

ジからLoレンジに切り換えた例である。

4.2. SSGシステムのモード切り換え

(1) 使用モード 本システムでは、ターボ発電機が独立に運転されるTGモードと主機関と連結されるSSGモードが設定されている。このモード切り換えに関連するクラッチ、タービンガバナ及びボイラ等は、自動的にシーケンシャルに制御される。更に、タンカではイナータガス・トッピングアップ時に使用されるSSG+IGSモード及びタンク・ヒーティング時等に使用されるSGモードが設定されている³⁾。バルクキャリアの場合について更に説明する。今、船がSSGモードで運転中であるとして、主機関が急速に停止された場合、自動的にSSGモードからTGモードに移行される。タービンの蒸気源としては、ボイラが自動的に着火しバックアップする。この着火が失敗した場合は、ディーゼル発電機に負荷移行され、電力供給が確保される。

(2) タービンの持続性 本システムのモード制御設計において重要な点の一つは、上記の場合の様に主機関が急速に停止した場合である。この時はボイラが燃焼を始めるまで排ガスエコマイザの保有蒸気でT/Gが必要電力を供給し続ける必要がある。この点については、設計段階でシミュレーションを行ってチェックしている。このタービンの持続性についての実船計測例を図10に示す。この計測では主機関を急速に停止させ、ボイラの自動着火を強制的に止めて行われている。電力負荷が大きい夏場条件において、タービンのガバナリフトが90%に達してディーゼル発電機への起動信号が出るまでに3分40秒を経過しており、ボイラの燃焼開始までの時間より十分長く、確実にT/Gが電力を供給し続け得ること

図10 SSGタービン持続性の試験結果

が分る。

4.3 就航結果

(1) 80,000MTDWタンカ 1981年6月12日から8月31日までの通常航海38日間において、主機出力、タービン出力及び発電機負荷を計測した記録を図11に示す。第1のトリップでは、タービンの余剰動力が主機関を加勢している状態を示している。第3のトリップでは、タービン出力と発電機負荷がほぼ等しく、通常のT/Gシステムではターボ発電機とディーゼル発電機の並列運転を要するが、本システムではディーゼル発電機を使用しなくて済むことを示している。これらのデータを基に本船のSSGマークⅠシステムの燃料節約量を通常のT/Gシステムと比較したものを表3に示す。主機関常用出力(90% MCR)では年間590トン(C重油換算)になり、これは主機燃料消費量の4%に相当し、燃費率で言えば5.6 gr/PS・hになる。また、50% MCR時には年間790トン(同上)の節約になり、主機燃料消費量の10%に相当する。

(2) パナマックスバルクキャリア 1983年1月28日に引渡してから、タスマニアのポート・ラッタまでの処女航におけるSSGマークⅡシステムの使用実績を図12に示す。図に示すデータは毎日16:00に記録したものである。本トリップ中、発電機負荷が大きく変っているのはエア・コンディションの使用状況の差によっている。即ち、日本近くでは暖房を使用し、その後赤道に近づくにつれエア・コンディショナを1台更に2台使用している。本船は電力節減対策の一つとして、2速式冷却海水ポンプを採用しているが、本トリップでは全て低速で使用しており省エネに役立っている。なお、海水温度

図12 パナマックスバルクキャリアSSGマークⅡの使用実績(1)

図13 パナマックスバルクキャリアSSGマークⅡの使用実績(2)

図11 80,000MTDWタンカSSGマークⅠの使用実績

表3 SSGシステム各種モードにおけるT/Gシステムに対する省エネ

Main engine load	SSG	SSG + IGS	S/G	Average
90% mcr	1.1 ton/day	2.4 ton/day	5.5 ton/day	580 ton/year**
50% mcr	2.2 ton/day	2.5 ton/day	4.8 ton/day	790 ton/year**

* Fuel oil for diesel generator to be corrected by price index

** 300 days/year.

は19～29℃であった。その後の就航データを更に詳細に解析してタービン出力及び発電機負荷の平均値を図13に示す。この結果に基づき燃料節約量を計算した結果を次に示す。なお、本船クラスの主機出力に対しては通常ディーゼル発電機プラントが採用されているので、それを比較のベースとする。主機出力90% MCRにおいて、一日の燃料消費量は本船の場合29.3トン/日(C重油換算)であり、一方通常のディーゼル発電プラント装備船では34.6トン/日(同上)となる。節約量は5.3トン/日であり、これは本船の主機燃費の18%に相当する。なお、発電機用A重油の消費量は価格指数で補正した。

5. あとがき

本稿ではディーゼル主機推進プラントの熱効率を総合的に高めることを実現した複合システムであるSSGシステムの概要、改良点及び運転実績について述べた。SSGマークⅡシステムに適用された改良点の主なものは、低温廃熱回収、広い使用レンジ及び高効率タービン制御である。これらを達成するための各種の新設計は海上運転と就航データのあらゆる角度からの解析によって満足なものであることが確認された。本稿では中速ディーゼル主機関を搭載したパナマックスバルクキャリアとの例を中心に述べたが、本システムは各種のディーゼル主機推進プラントに適用可能である。現在、本システムを適用した低速2機1軸のVLBCや低速1機1軸のコンテナ船が建造中である。今後共船舶の省エネに対する期待は強く、更に改善に努力する所存である。

文 献

- 1) "Development of Super Economical Shaft Generator (SSG) System" IHI Engineering Review, Vol. 15, No. 1 (1982) p. 46
- 2) 福留・ほか4名, 船機誌17-10(昭57-10), 863
- 3) Motozuna, K. and Hieda, S. "Basic Design of an Energy-Saving Ship", presented to A Combined Symposium on Ship Costs and Energy of SNAME, September 30 - October 1, 1982

〔質 疑 応 答〕

質問者 大協タンカー(株) 井上博昭

〔質問〕 本システムにおいては、発電機と主機関は自動変速クラッチ機構を経て連絡されており、主機回転数が変化した場合は図5に示されている様に発電機周波数が一定範囲内で変化する。この場合、補機要目の決定及び電気機器等の設計について説明下さい。

ディーゼル主機関に出力軸(P.T.O.)を設けた場合のねじり振動に対する検討を行っていると思いますが、SSGシステムを採用した場合に、ねじり振動の問題例及び対策を説明下さい。

〔回答〕 (1) 本システムでは主機回転数の低下に伴

い発電機周波数が低下し、ポンプやファン等のモータ駆動補機の回転数も低下し、結果として容量も低下します。しかし、主機出力も低下しているので、この減少した容量でも目的を満足できます。実際には、使用範囲における関係システムの容量及び圧力バランス等をチェックしています。電気機器に対する配慮も必要ですが、一般には通常の標準からの変更は余り要しません。

(2) 使用範囲が広いのでねじり振動解析は重要です。まず、メジャー・バイブレイションをSSG使用範囲から外すことが大切です。次の点は、伝達動力が小さい時のP.T.O.ギアにおけるチャタリングです。ある使用状態では、このチャタリングは不可避ですが、エネルギー法で予測されたとおり問題がないことが確認されています。質問者 ジャパンライン(株) 甲斐輝光

〔質問〕 SSGシステムと固定ピッチプロペラの組み合わせについて説明がありましたが、操船上の理由から可変ピッチプロペラが採用されることもあります。SSGシステムと可変ピッチプロペラの組み合わせに対する筆者の意見を聞かせて下さい。

最近の超ロング・ストローク・ディーゼル機関は燃料効率の向上に伴い、排ガスの熱量が減少し排ガス温度も低下しています。このため排エコ・ターボ発電機の成立がかなり難しくなっています。これらのケースに対するSSGシステムの実用性について、モード切り換えを含めて説明して下さい。

〔回答〕 第一の質問については、SSGと可変ピッチプロペラの組み合わせは固定ピッチプロペラとの組み合わせにはない使用上の利点があります。2機1軸推進プラントのVLCCに適用した経験があります。プロペラ効率の点からは、可変ピッチプロペラをナビゲーション範囲では固定ピッチプロペラとして制御する方が良いと考えています。この場合は、SSGの使用範囲の下限に主機回転数を保持することによって、通常使用範囲外となるマニユーバリング及び後進時にもSSGを連結したまま使用可能となります。

第2の質問については、ご指摘の様に今日では、混圧タービンを採用しても、従来のターボ発電機の成立は非常に困難になっています。この様にタービン出力が船内電力に対して不足する場合も、SSGシステムは廃熱を利用し、しかもディーゼル発電機の使用を不要とする意味で適しています。本システムにおいては、ドラム圧を一定に保つ調圧システムを開発したので、主機トリップの様な非常時にも、ボイラがバックアップするかディーゼル発電機に負荷移行するまで、ターボ発電機は必要な電力の供給を維持できます。

質問者 川崎重工業(株) 洲崎 薫

〔質問〕 理解を深めるために、下記の点について説明下さい。

(1) 本システムでは、機械的連結による主機関と蒸気タービンの間の高い伝達効率、最も優れた点の一つで

あると思われます。その様に考えた場合、自動変速機構は重要な役割を果たしています。

メカニズム及びクラッチ制御(変速、嵌脱)及び安全装置についての詳細を説明下さい。

TGからSSGモードの切り換えは自動的にブラック・アウトなしに行われるのですか？

図9に示されているごとく周波数範囲が通常のシステムに比べて広いが、監視・警報システムの設計に特別な配慮がなされていますか？

図10に関して、なぜタービン入口弁リフトの変化は夏場と冬場で異なるのですか？ 又、どの時点でタービンは主機関から切り離されていますか？

(2) 主機排ガスを126℃まで熱回収する廃熱回収の拡大と低圧蒸気をタービンに利用することは、SSGシステムをより有効にするのに役立っています。

特殊鋼の耐食性能について、腐食速度あるいはチューブの寿命をどのように評価していますか？

タービンのドレン・アタックについてどのように考えていますか？ 又、低圧蒸気系統にドレン・セパレータを設けていますか？

イージー・メインテナンスの観点からエコノマイザの構造について説明下さい。

〔回答〕 第1の質問は自動変速クラッチ構造についてです。この機構は二つの油圧多板クラッチを有しており、両クラッチのケーシング外側歯車と出力軸歯車が動力の入力と出力歯車の間で噛み合っています。片方が嵌合している時には他はアイドルギアとして作動します。二つのクラッチは異なったギア比を有しているため、どちらかを嵌合させることにより変速比を変えることができます。嵌脱の制御はモード切り換えのシーケンス制御に含まれており、Hi-Lo切り換えは主機回転数を検出して独立に行われます。制御油圧系統はフェイルセーフ設計になっており、嵌合しているクラッチの油圧は後から嵌合しようとする方の油圧の上昇によってリリースされます。更に、制御油圧を監視しており、異常時にはクラッチは自動的に切り離されます。

第2の質問については、TGからSSGまたはその逆のモード切り換えはブラックアウトなしに自動的に行われます。

第3の質問に関しては、通常のシステムの監視装置とは別にSSGモード時の周波数監視が考慮されています。

タービンの持続性に関する第4の質問ですが、クラッチは主機停止時に切り離されており、その後はターボ発電機は保有蒸気で駆動されています。タービンリフトは入口蒸気条件及び電力負荷に対応します。夏場と冬場の電力の差によって蒸気圧力の変化は異なり、したがって、タービンリフトの変化も異なっています。

低圧蒸気系統についての第5の質問ですが、低圧蒸発部のチューブの腐食速度は、今回採用した耐食鋼の場合に0.5mm/年と推定しました。低圧蒸気入口にはドレンセパレータを設け、低圧蒸気管の自動暖管を含みドレン対策には特別な配慮をしました。低圧部のエコノマイザの構造については、チューブネストが容易に引き出せる様な設計を行い、そのために、分解部分を最少とし、また内部にレールを設けました。

質問者 神戸商船大学 武田幸男

〔質問〕 1) 表1には、発電機とタービンが660kW及び850kWと定格表示されていますが、この差の意味は何ですか？

2) 図9によれば、HiレンジからLoレンジに切り換えた時周波数が急変しています。この様な状況に対して、特に機械的衝撃についてどの様な対策が取られていますか。

〔回答〕 第1の質問については、発電機容量は電力需要をベースに決定しますが、タービンの容量は回収熱量をベースに決定されます。通常SSGシステムでは、推進加勢動力がありますので、タービン容量の方が発電機容量より大きくなります。

第2の質問に関しては、ご指摘の様にHi-Lo切り換え時に機械的衝撃が発生します。これに対しては、クラッチ嵌合時のクリップ時間を適切に設計することによって、この衝撃を許容値以下にしています。