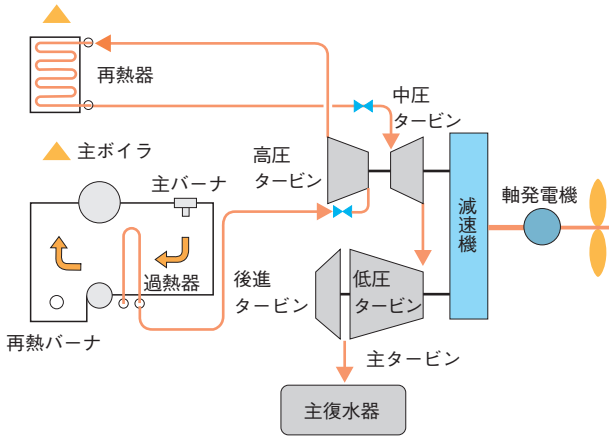


特集論文

船用高效率推進プラント(Ultra Steam Turbine)の開発

Development of High Efficiency Marine Propulsion Plant (Ultra Steam Turbine)

伊藤 誠*¹ 平岡 和芳*²
 Makoto Ito Kazuyoshi Hiraoka
 松本 祥一*³ 津村 健司*³
 Shoichi Matsumoto Kenji Tsumura



近年、LNG 船を取り巻く環境変化の1つとして、原油価格の高騰による推進プラントの省エネ化が一気に加速していることが挙げられる。そのため、従来の蒸気タービンプラント船以外にプラント効率で勝るガス炊き可能な中速ディーゼル機関を搭載した電気推進のDFE船やLNG再液化装置を搭載した2サイクル低速ディーゼル機関を推進機関としたDRL船が登場している。DFE船についてはフランスヤードで建造された一番船が既に就航し、韓国ヤードではDFE船、DRL船共に多数のLNG船が建造中である。その一方で既存の蒸気タービンプラントは実績に裏づけられた運航上の信頼性、保守性、操作性はあるものの、プラント効率がこれら新規プラントに大きく差をつけられており、その向上が急務の課題であった。そこで、当社は従来の船用蒸気タービンプラントが持つ高い信頼性並びに保守作業性、操作性の良さを維持しつつ、従来蒸気タービンプラント比15%のプラント効率改善を計ったUST(Ultra Steam Turbine)プラントを開発した。本論ではこのUSTプラントについて紹介する。

1. はじめに

LNG船の推進プラント選択は、運航採算性、信頼性、操作性、保守性、初期投資額等を総合的に評価した上で、数年前迄は蒸気タービンプラントがほとんど全てのLNG船で採用されてきた。

これは、LNG船では荷役タンクから発生するボイルオフガス(BOG)を安全に処理でき、かつ重油も燃料として使用できることが他のプラントに比べて大きなメリットであった為である。

しかし、①ガス炊き可能なディーゼル機関の登場、②近年の原油価格の高騰による省エネ化、③世界的な天然ガスの需要急増によるLNG船建造ラッシュに起因する蒸気タービンプラント船の船員不足、これらの複合的な要因によりディーゼル機関を用いた新プラント(DFE、DRL)が注目を集め、LNG船の推進プラントの多極化が一気に進んだ。現在のLNG船市場ではDFE船やDRL船が主要となりつつあると言っても過言ではない。

しかしながら、DFEプラントやDRLプラントも新プラントであり、タービン船同様に船員には高い技術レベルが求められる事は容易に想像できる。つまり、

現在のLNG船の推進プラント選択の最重要事項はプラント効率であると言える。そこで、当社は新ディーゼルプラントと互角のプラント効率で従来のタービンプラントのメリットを継承した新タービンプラントであるUST(Ultra Steam Turbine)プラントを開発した。

2. USTプラント

2.1 プラント構成

USTプラントは再熱サイクルをベースとした2段給水再生方式を採用しており効率向上と共に操作性、保守性にも配慮したシンプルなプラント構成となっている。従来プラントとの相違点を表1に示す。

表1 従来プラントとUSTプラントの比較

	CST(従来プラント)	UST
ボイラ蒸気条件	6MPa×515℃	HP: 10MPa×560℃
蒸気の流れ	BLR→HP→LP	BLR→HP→REHTR →IP→LP
フランジ規格	ANSI 900LB	ANSI 2500LB

BLR: ボイラ, HP: 高圧タービン, LP: 低圧タービン
 REHTR: 再熱器, IP: 中圧タービン

*¹ 長崎造船所造船設計部機装設計課
 *² 長崎造船所造船設計部機装設計課主席
 *³ 長崎造船所造船設計部計画課主席

USTプラントの蒸気条件は、自然循環式ボイラの陸上向けでの使用実績と投資対効果及びANSI2500LBフランジが適用できる範囲を考慮し決定した。再熱サイクルを適用することで蒸気の流れは図1の様に再熱器（REHTR）を経由するものとなる。

2. 2 USTプラントの配置

図2の様に主タービン、主ボイラ、再熱器を配置し従来船の機関室長さを変えずにUSTプラントを取める事ができる。

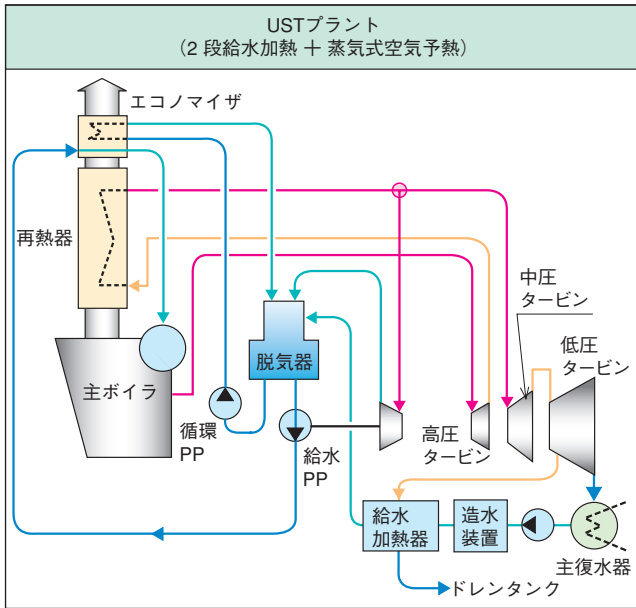


図1 USTプラントの構成

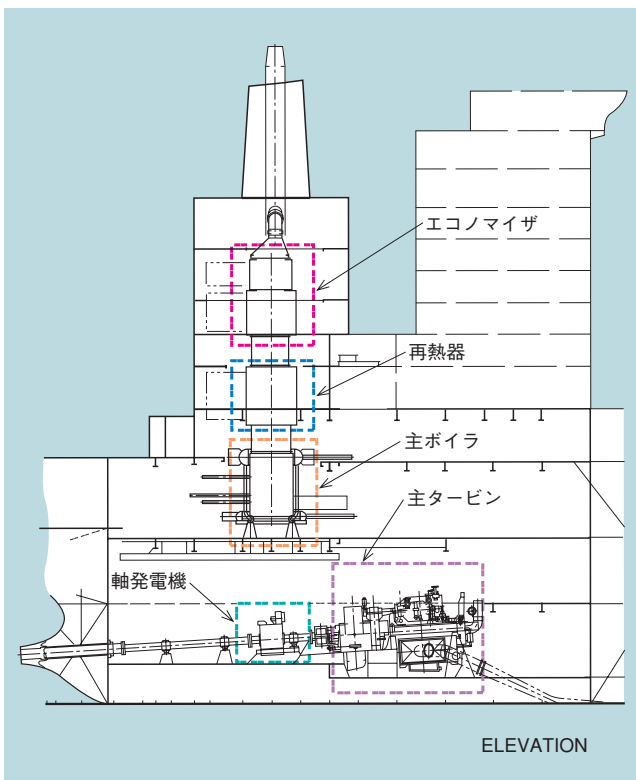


図2 USTプラントの機関室配置

3. USTタービン

3. 1 USTタービンの構成要素

USTタービンは、同一ケーシング・同軸上に配置した高中圧タービン（図3）と低圧タービン、主復水器及び減速装置からなり、当社の陸上用タービンで実績のある最新技術を導入した高性能タービンを採用する。

3. 2 最新技術の採用

3. 2. 1 サーマルシールド

高圧高温蒸気が流入する再熱タービンにおいて、高中圧間車室に過度の軸方向温度勾配が生じる場合、局部的に車室水平継手部に規定面圧が確保されず蒸気漏洩を引き起こす事が懸念される。

本USTタービンでは、この軸方向温度勾配を極力緩やかなものとするため、図4に示すサーマルシールドと呼ばれる構造を採用している。サーマルシールド構造は当社の陸上用再熱タービンでも実用化され、良好な実績を上げている。

3. 2. 2 タービン性能向上技術

タービン性能向上の為にUSTで導入した最新技術

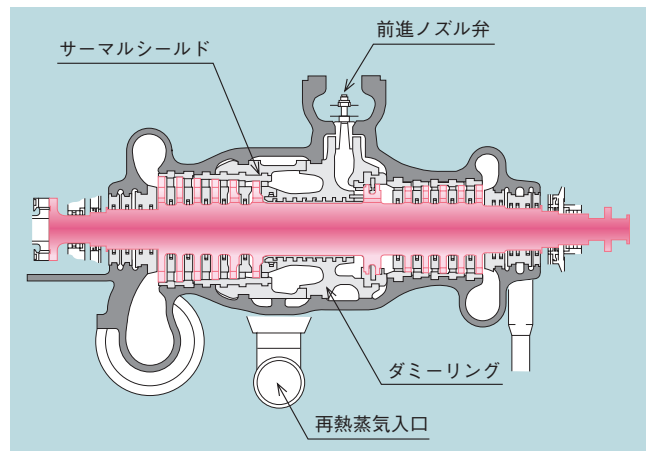


図3 UST 高中圧タービン断面図

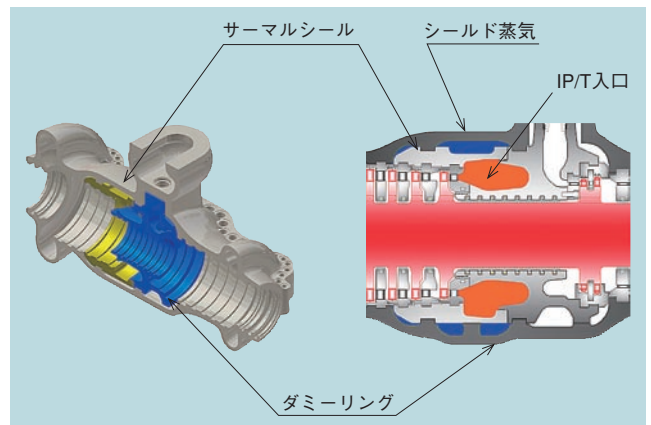


図4 サーマルシールド及びダミーリング

の一例を図5、図6に示す。

4. UST ボイラ

4.1 UST ボイラ

UST ボイラは、図7の様に従来型ボイラの排ガス側に再熱器専用のリヒートバーナを配した再熱炉を設け、排ガス出口に再熱器を配置した構成となっている。再熱器をガス温度が低い排ガス出口に装備する事によ

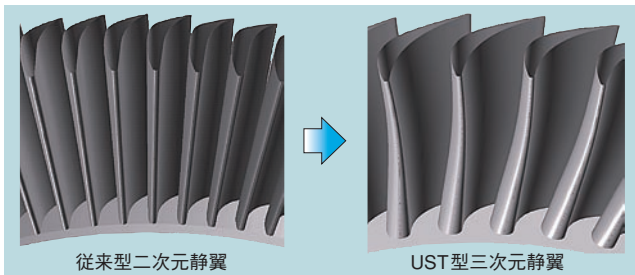


図5 三次元静翼（低压タービン反動段）
三次元で翼形状を最適化することにより、翼性能向上を図った三次元静翼を採用。

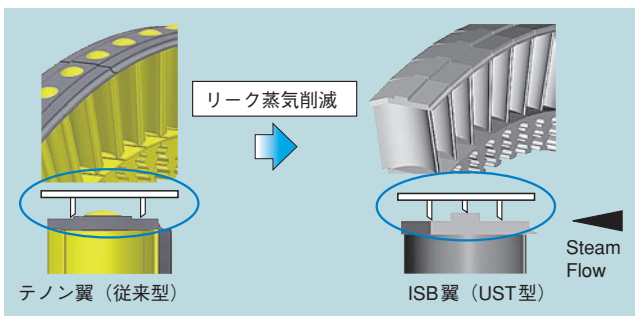


図6 従来型テノン翼及びUST型ISB翼
蒸気シール部分を上図のように改善することにより翼外縁のリーク蒸気を低減するISB翼を採用。

り船舶特有の負荷変動時に再熱チューブ内の蒸気量が減少した場合においても、再熱チューブの焼損という事態を回避できる様に配慮している（後進時には再熱バーナを消すことによりチューブを保護できる）。

また、過熱器は主蒸気条件を確保するため図8の縦型のツインヘッド方式を採用し伝熱面積の確保を計ると共にチューブには高温腐蝕に強い18Crステンレス鋼を採用した。

4.2 ボイラ性能確認試験

4.2.1 ボイラコールドモデル試験

再熱器入口の排ガス温度分布の均一化を目的に、実缶の1/4モデルにより、ガス流動シミュレーション（図9参照）を実施し、計算の妥当性を確認した。計算及びモデル試験の結果、排ガス出口に遮蔽物を設ける事で均一なガスの流れを確保できた。

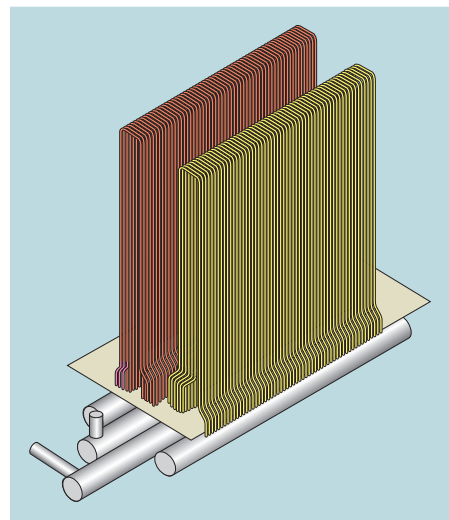


図8 過熱器外形図

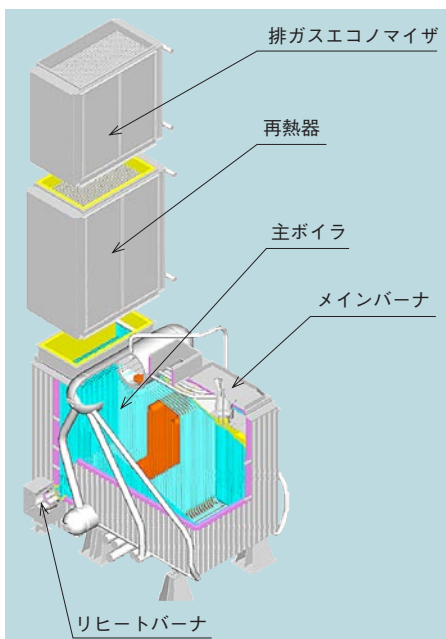


図7 USTボイラ外形図



図9 流動試験モデル

4. 2. 2 再熱バーナ燃焼試験

UST ボイラで新設する再熱バーナは低酸素状態の燃焼ガス流の中で燃焼させるため、ガス流の影響を確認する必要があった。バーナメーカーの試験炉を使用して、低負荷燃焼試験（図 10 参照）及び着火試験を行い低酸素状態の激しいガス流の中でも良好な燃焼状態と着火性能を確認できた。

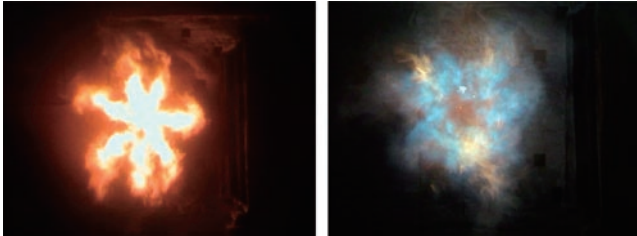


図 10 低負荷時の再熱バーナ燃焼状況

4. 2. 3 プラントシミュレータ

UST プラントの動的挙動を把握する目的で、プラントモデルを構築し、全ての負荷変動に対応できるシミュレータを開発した。

図 11 に示す様にプラント各部の状態変化をトレンドデータとして表示出来る機能を持たせたため、各部の動的挙動を解析する事が可能となり UST の自動化、計装確立に大きな役割を果たした。

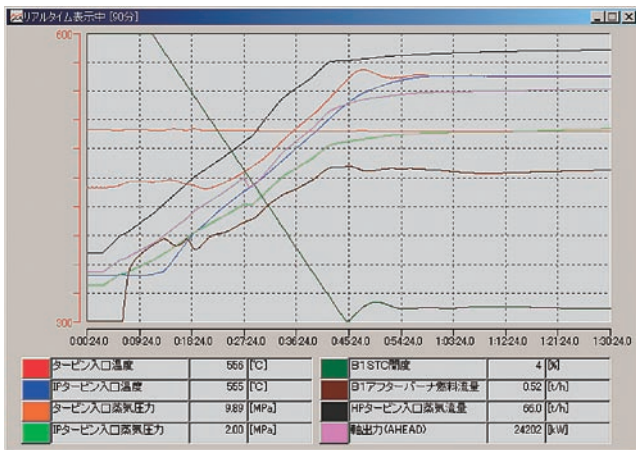


図 11 シミュレータ画面の一例

5. 軸発電装置

プラント効率を上げるため、従来船で採用されているが効率で劣るターボ発電機に変えて中間軸抱き込み式の軸発電機を装備し常用航海中の船内電力を賄うようにした。また、中間軸に装備した軸発電機は給電推進加勢モータとしても使用できるため、UST プラントでは非常時の推進加勢用として利用する事で計画している（図 12）。

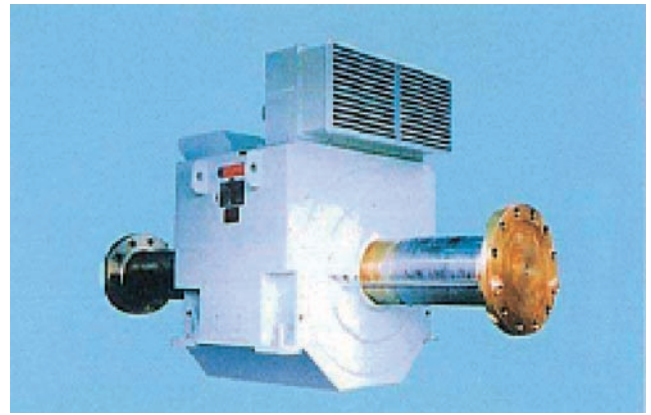


図 12 軸発電機

6. 環境に対する影響

6. 1 航海中の排ガス成分比較（ガス専焼モード）

LNG 船に搭載される各種推進プラントが航海中に排出する排ガスに含有される成分の量を図 13 に示す。

航海中はガス専焼モードなので全てのプラントで SOx は発生しないが、NOx を比較すればタービン船が最も少なく、更に UST は 15 % の省エネに比例して排出量が減少し良好な結果となる。

6. 2 荷役中の排ガス成分比較

荷役中は混焼モードなので全てのプラントから SOx が発生するが、DFE は低負荷のためガスモードの下限域に入りガス焚きから A 重油焚きに切替えるため、NOx を含めて著しく増加する。その点、タービンプラントは荷役中でも良好な結果となる（図 14）。

現在の環境対策における排ガス規制の多くは、欧州

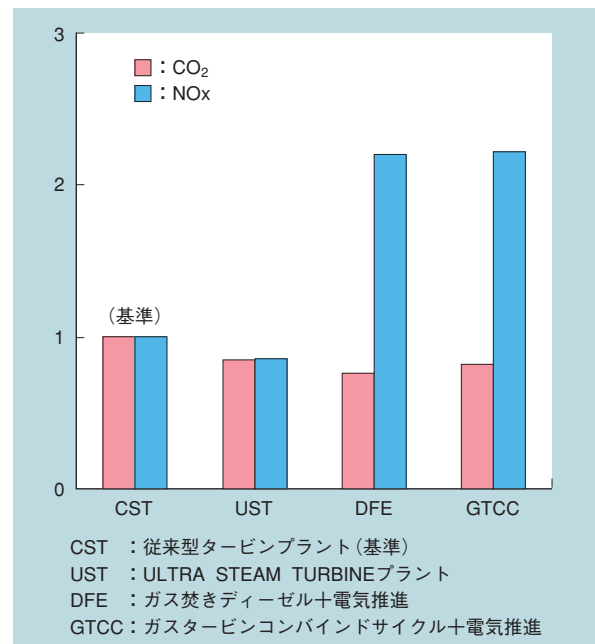


図 13 航海中の排ガス成分比較

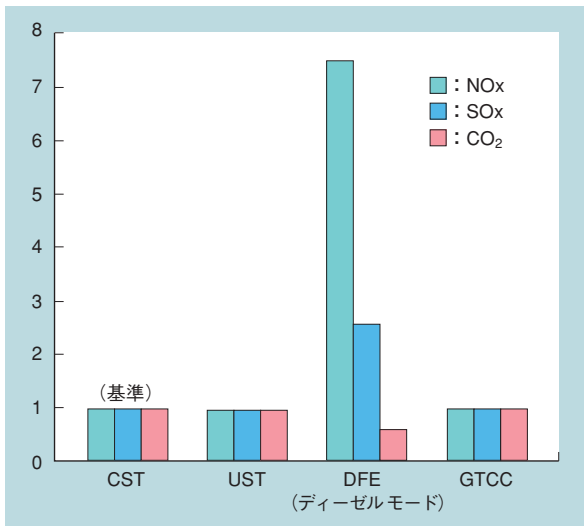


図 14 荷役中の排ガス成分比較

沿岸や米国西海岸海域のように沿海部や港内での規制が重要視されており、特に荷役中の排ガス成分は近い将来厳しい規制が実施される事が予想される。この点で UST プラントは他のプラントと比較しても最も優れたプラントである。

7. おわりに

従来のタービン船の最大の利点である高信頼性を維持しつつ、他のディーゼル推進機関と同程度のプラント効率を達成した UST プラントを紹介したが主な特徴をまとめると次のとおりである。

- 高プラント効率：従来タービンプラント比 15% 向上
- 高い信頼性／安全性：従来タービンプラントと同等
- 低メンテナンス費用：従来タービンプラントと同等
- 環境に優しいプラント：排ガスは低 NO_x, SO_x, CO₂
- 自由な燃料選択：HFO, BOG 及び混焼が可能
- 長寿命プラント：40 年間以上稼動可

当社が全社を挙げて開発した UST プラントが間近に実現することを願うと共に、約 1 年半の開発期間中に詳細な範囲にわたり御指導及び御協力を頂きました顧客を始め関係各位に対し御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 伊藤誠, 三菱高効率船用タービン推進プラントの開発, 日本船舶海洋工学会誌, 第 12 号 (2007) p.43



伊藤誠



平岡和芳



松本祥一



津村健司