

# 省エネで環境にやさしい 船上再ガス化 LNG 船の開発

## Development of Efficient, Environmental-Friendly and Flexible Shipboard Regasification Vessel



津村 健司<sup>\*1</sup>  
Kenji Tsumura

岡 勝<sup>\*2</sup>  
Masaru Oka

小形 俊夫<sup>\*3</sup>  
Toshio Ogata

田平 誠<sup>\*3</sup>  
Makoto Tabira

近年のガス化設備を持った LNG 船や LNG 貯蔵浮体のニーズの高まりに対応して、当社では、数多くの LNG 船を設計・建造したノウハウを集結し、当社独自の省エネで環境にやさしい船上再ガス化船を開発した。本船の特徴は、燃費の良さ、低環境負荷、適用海域の要件に応じて最適な運用ができる柔軟性に加え、球形タンク方式の特徴を生かした総合的に信頼性のあるシステム構成にある。本論文では、本船の概要及び技術トピックスについて説明する。

## 1. はじめに

近年、LNG トレードは多様化し、陸上ガス化基地を必要としない LNG 輸送方式として、洋上ガス化設備を持つ LNG 船(以下、RV:Regasification Vessel)や、LNG を受け取り、貯蔵し、ガス化する洋上浮体(以下、FSRU:Floating Storage and Regasification Unit と略称)を使ったプロジェクトが多数計画され、その幾つかは実現しだしている。RV 及び FSRU は、陸上のガス化基地に比べ、建設敷地が不要、リードタイムが短い、低コスト、そして、設置場所の移動が可能という優位な特徴があり、環境への配慮から陸上基地の設置が難しい先進国沿岸部や、短期的なガス輸入の需要があり短期間でプラントを立ち上げたい新興国などでニーズがある。

今回開発した船上再ガス化船は、30 年以上の実績から高い信頼性が証明されている球形タンク方式 LNG 船をベースに、海水加熱式 LNG 再ガス化システムを搭載し、パワープラントとして推進用蒸気タービンプラントを採用したものである。この当社が開発した Controllable Emission Regasification Vessel (以下、CERV)は、省エネで環境にやさしく、かつ、低温海域、外洋の海水を利用できない海域にも対応可能で、適用海域の要件に合わせて最適な運航が可能な設計となっている。

## 2. 三菱船上再ガス化船の概要

### 2.1 主要目

貨物タンク容積 80km<sup>3</sup> クラスから 200km<sup>3</sup> クラスまで、顧客のニーズに合わせたデザインが可能である。代表として、177km<sup>3</sup> 型 FSRU の主要目を紹介する(表1)。

本船は、177km<sup>3</sup> 型 LNG 船をベースに CERV 仕様としたもので、デッキスペースを有効利用することで、主要目は通常 LNG 船から変更していない。

\*1 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部主席チーム統括  
\*3 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部

\*2 船舶・海洋事業本部船舶・海洋技術部首席技師

表1 177km<sup>3</sup>型 FSRU 主要目

|         |                                                                                    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 船級      | Det Norske Veritas (DNV)                                                           |
|         | +1A1, Tanker for liquefied gas, ship type 2G NAUTICUS (Newbuilding) PLUS, CSA-FLS, |
|         | CLEAN, E0, F-AMC, TMON, BIS, REGAS-2,DYNPOS-AUT                                    |
| 全長      | 300.00m                                                                            |
| 幅       | 53.00m                                                                             |
| 深さ      | 28.50m                                                                             |
| 計画喫水    | 11.50m                                                                             |
| 貨物タンク容積 | 177 000m <sup>3</sup> (100% at -163℃)                                              |
| 再ガス化能力  | 最大 750mmscf/d                                                                      |
| 主機      | 蒸気タービン×1set                                                                        |
| ボイラ     | 混焼主ボイラ×2sets                                                                       |
|         | ガス焚ボイラ×2sets                                                                       |
| 発電機     | 蒸気タービン発電機×3sets                                                                    |
|         | ガスエンジン発電機×2sets                                                                    |
|         | 補助ディーゼル発電機×1set                                                                    |
|         | 非常用発電機×1set                                                                        |

## 2.2 タンク方式

通常の LNG 船では半載状態での運用はまれであるが、船上再ガス化船では、ガス化している期間は半載状態となり、また、FSRU においては、自ら移動せず、シャトル船から LNG を受入れながら連続的にガス化を続けるため、ほとんどが半載状態での運用となる。よって、LNG タンクは、半載状態での高い信頼性が要求される。本船は、スロッシングに強い球形タンク方式を採用し、あらゆるカーゴタンクの組合せ及び液位での運用が可能で、高い信頼性と運用の柔軟性を持ち合わせている。

## 2.3 配置

本船の一般配置図を図1に示す。本船の特徴的な配置は以下の通り。

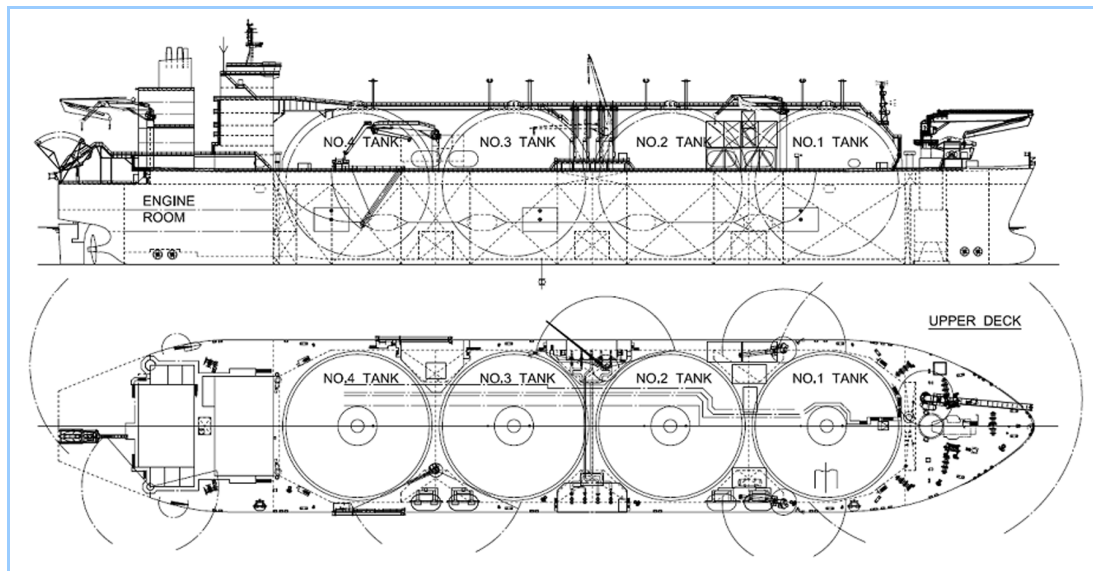


図1 一般配置図

### (1) 再ガス化装置

- ・ LNG 加熱方式に、海水を熱源とするカスケード加熱方式を採用。(詳細は3章に示す)タンクカバー間のデッキエリアを有効利用し、中間冷媒のプロパンタンクを含め、NO.1 & NO.2 タンク間に配置。
- ・ 海水供給システムは当社独自の CERV コンセプト採用。海水ポンプを機関室に配置し、バラストタンク内を貫通する専用海水配管で再ガス化装置に結合している。再ガス化装置から排出される冷やされた海水は、ベントタンクを経由し、再循環させる(図2)。

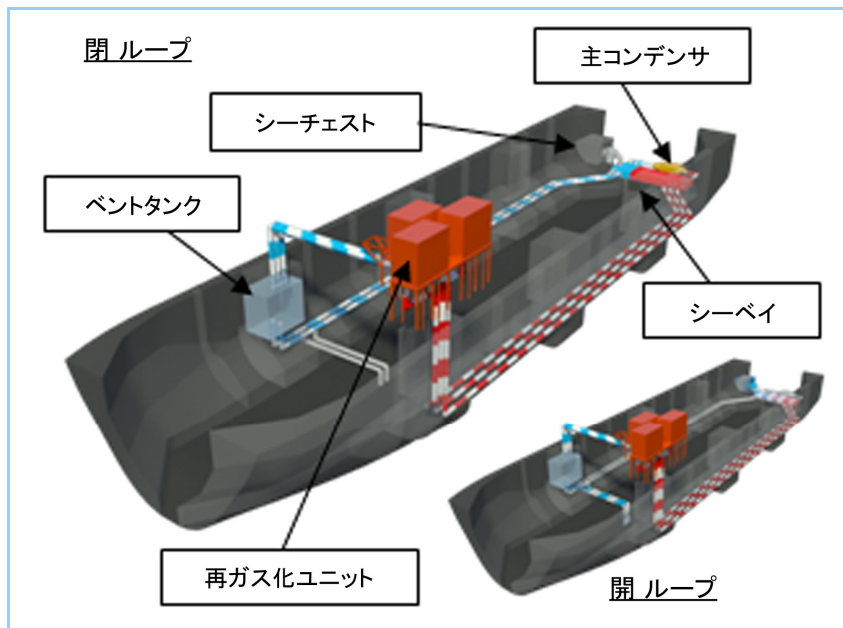


図2 海水供給システム<sup>(1)</sup>

(2) ターレット

本船はターレットによる係留・ガス払出しを行うため、船首部にターレット区画を配置。

(3) タンク配置

- ・再ガス化装置から排出される海水へのガス混入を検知するために、再ガス化装置近傍のバラストタンク区画の一部を利用してベントタンクを配置。
- ・油の混入の可能性がある離着時に、ターレット区画に浸水する海水を一時保管するスロップタンクを船首部に配置。
- ・環境対策としてデッキドレインタンク/ シーウェイジホールディングタンク/ グレイウォータータンクを配置。

(4) NO<sub>x</sub> 除去装置 (以下, SCR: Selective Catalytic Remover)

本船はタービンプラントを採用しており、排気ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度はディーゼル機関に比べて極めて低く(詳細は3章に示す), SCR の装備が要求されるのはまれであるが, 設置海域の特別要件によっては, ガスエンジンやボイラの排気ラインに装備する場合もある。

(5) スラスト

係留時及びブイ接続時の船首方位制御及び定点保持のため、船首及び船尾部にスラストを装備。

(6) バラスト処理装置

IMO で装備要求が予想されるバラスト水処理装置は機関室内、及びホールドスペースに分散配置。

(7) オフショアクレーン

海上での予備品、食料品、人員移送などを安全に行うためにオフショアクレーンを配置。

## 2.4 LNG 受入れ

本船は、シャトル船から横付け状態にて LNG を受入れるため、以下の設備を有している。

- ・ NO.2 & 3 タンク間右舷にローディングアームを設置。左舷側は、自航して液化基地で LNG を受入れることができるように通常マニフォールドを有している。
- ・ 係船設備は、緊急時の離脱が容易に行えるようにクイックリリースフックを採用。フェンダーは、シャトル船との干渉を考慮してプライマリー、セカンダリーフェンダー方式を採用。
- ・ 安全な係船・荷役及び稼働率を高めるために、スラストを利用して波、風、潮流を考慮した最適な船首方位に制御。

### 3. CERV コンセプト概要

#### 3.1 プラント構成

LNG の再ガス化には、海水を熱源としたカスケード方式を採用した。

カスケード方式とは、低温側、高温側の2段階で加熱する方式で、ブースターポンプで所要吐出圧(例えば100bar)以上に加圧された LNG は、まず1段目のプロパンを中間熱媒とする間接加熱熱交換器へ送られ、2段目には海水で直接加熱する熱交換器により所要の温度条件まで昇温されたのちにターレットより荷卸する。一方、加熱用の海水はまず高温側熱交換器に送り、その出口は低温側の熱交換器につながる。低温側熱交換器を出た海水は供給水に比べて低温となるが、この排水の運用により、“開ループ”と“閉ループ”の2通りのパターンがあり、本船はその両方を切り替えて運用することができるのが特徴である(図3)。

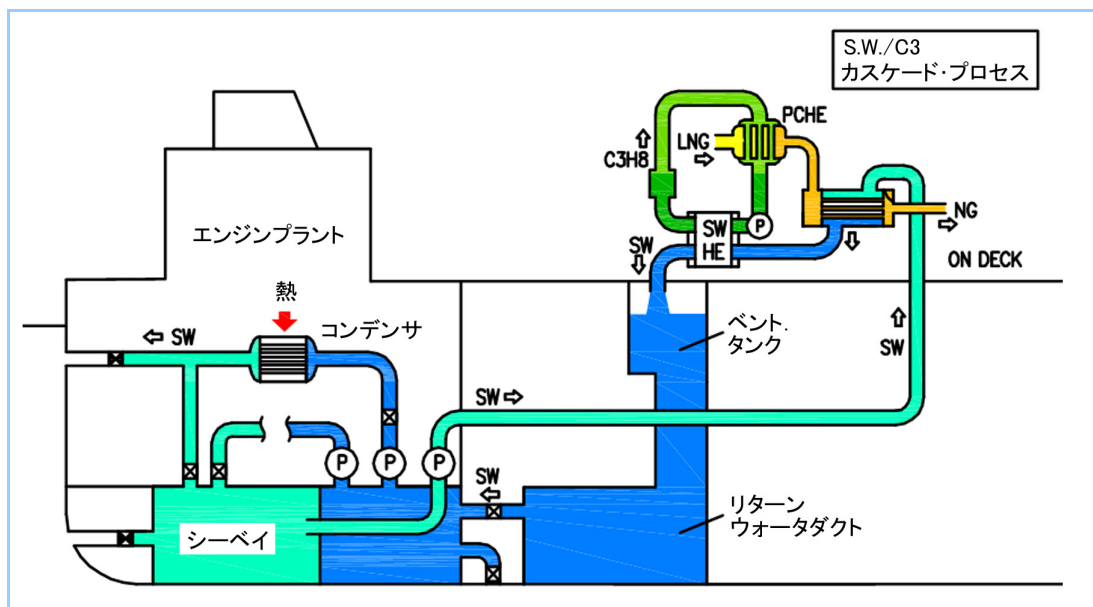


図3 海水供給システム<sup>(2)</sup>

#### 3.2 特徴

“開ループ”では、加熱媒体の海水を船外から取水し、冷水を船外に放出する。ガス化に必要な熱は周辺環境から賄い、加熱源としての燃料は不要なので最も経済的な方法であるが、対象となる沿岸域によっては環境への負荷とみなし、海水取水を禁止されるケースがある。

一方、“閉ループ”では、海水は船内を再循環するので、この要求に対応することができる。

しかし、加熱に要する熱源を燃料から確保しなければならないので、燃費として劣る。

本船はこれらを切り替えて運用することにより、適用先に合わせた最適化する手段を提供する。適用海域の要件により切り替えることができるので、特定海域に専用の RV、FSRU ではなく、汎用化できるのが CERV のコンセプトである。

#### 3.3 燃費・環境負荷

通常、船上再ガス化船は貨物の LNG の一部、及びボイルオフガスを燃料とし、重油などの燃料油は極力使用しない方が、コスト的にも環境要件上も良い。

“開ループ”では、ポンプ動力(LNG 及び海水等)や船体の位置維持(スラスト)に、合計 10～20MW の電力を要するので、この分の LNG が消費される。“閉ループ”では加熱用の燃料も必要なので、比較的多くの LNG 消費を要する。

LNG 船の推進システムとして長年利用され、高信頼性を誇ってきた“蒸気タービンプラント”は LNG だけを燃料として運用できる唯一の方式であるが、CERV では、所要電力と加熱源を供給するパワープラントとなる。発電用蒸気タービンの排熱は海水に投棄されるが、この排熱は海水を媒介して、再ガス化に必要な熱源となる。

最近のLNG船では、推進方式に効率の良いディーゼル機関を採用する例(プロペラ軸に直結された低速機関、又は電気推進機の発電機として)が多数出てきているが、いずれもガスだけを燃料とすることはできず、比率では少量ながらパイロット油としてディーゼル油/重油を要する。また、内燃機関は発電効率が良くても、排熱の大部分は空気中に放出されるので、再ガス化の熱源としては利用しにくい(図4)。

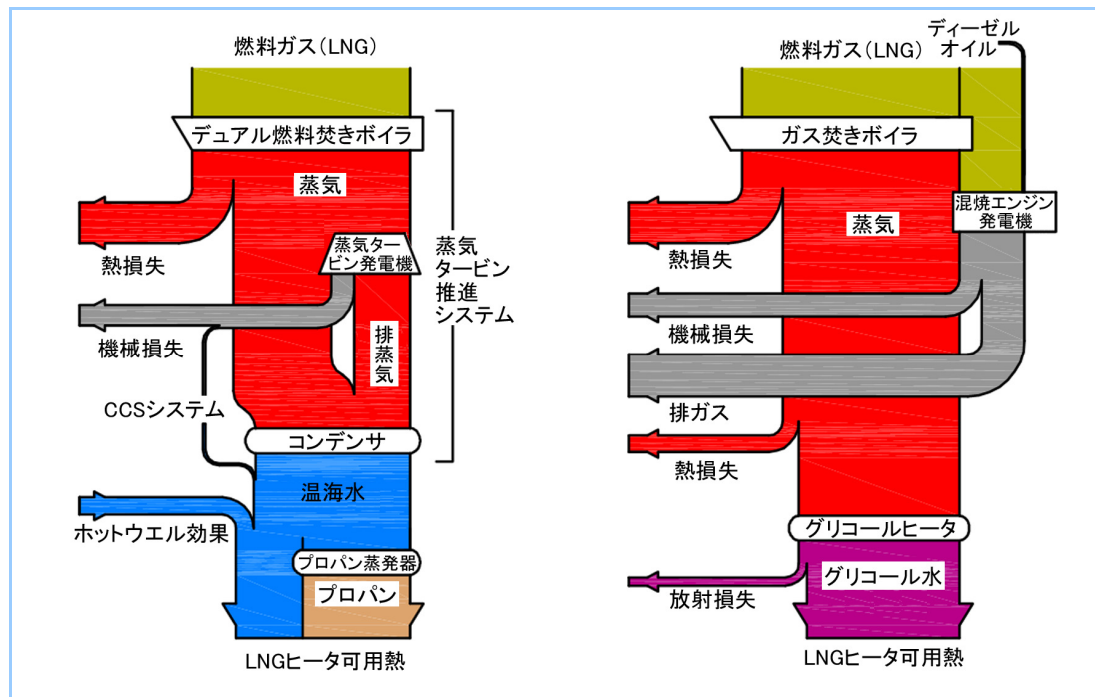


図4 熱フローについて

燃費などの所要性能について、CERV をベースに、他の開ループ方式船、及び“閉ループ”方式船間で比較したものを表2に示す。CERV は、他方式と比べて、燃費・環境に良いことが分かる。

表2 プラント別比較表

|                    | CERV                                      |      | 閉ループ方式船                                   | 開ループ方式船                                   |
|--------------------|-------------------------------------------|------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| LNG 再ガス化方式         | カスケード式海水過熱方式                              |      | 温グリコール水加熱方式                               | カスケード式海水加熱方式                              |
| 推進機<br>(シャトル機能用主機) | 2×3MW class 電動スラスト<br>(27MW class 蒸気タービン) |      | 2×3MW class 電動スラスト<br>(27MW class 電気推進主機) | 2×3MW class 電動スラスト<br>(27MW class 蒸気タービン) |
| 常用発電機 *1           | 2×3MW class ST<br>2×5MW class GE          |      | 3×11MW class DFE<br>1×6MW class DFE       | 2×3MW class ST<br>2×5MW class ST          |
| ボイラ                | 2×60T/H class<br>メインボイラ                   |      | 2×100T/H class<br>ガスボイラ                   | 2×60T/H class<br>メインボイラ                   |
| 再ガスループ             | 閉ループ                                      | 開ループ | 閉ループ                                      | 開ループ                                      |
| LNG 燃料消費量          | 100<br>(基準)                               | 25   | 130                                       | 42                                        |
| 補助燃料油              | 不要 (ガス専焼)                                 |      | Marine Diesel Oil                         | 不要 (ガス専焼)                                 |
| 環境排出ガス<br>特性       | SOx                                       | 無し   |                                           | 無し                                        |
|                    | NOx *3                                    | 1    | 1.5                                       | 3                                         |
|                    | メタン<br>スリップ                               | 無し   | 総燃料の～2%                                   | 総燃料の 2～3%                                 |

\*1 暗号の意味:ST…蒸気タービン発電機, DFE…混焼エンジン発電機, GE…ガスエンジン発電機, MDO…ディーゼルオイル

\*2 SO<sub>x</sub>量は油量中のS分×2kg-SO<sub>x</sub>/kg-S

\*3 SCR等, NO<sub>x</sub>除去装置を装備しない場合。

## 4. BOG 処理装置概要

### 4.1 蓄圧

LNG 船の貨物タンクは、外部からの侵入熱により LNG が気化し、内圧が上昇するので、これを抑制するためにガスを抜き出して処理しなければならない。このタンクから抜かれたガスをボイルオフガス(以下 BOG と略称)と呼ぶ。設計蒸気圧(タンク安全弁の設定圧力)は、通常 0.25 barG に設定され、およそ 0.05~0.15 barG の範囲で運用されているが、その圧力維持のために BOG が発生している。BOG は通常、推進や船内動力として利用するためにボイラ燃料とするが、所要ガス量に満たない場合には LNG を加熱し強制蒸発し、ガス量が多く余る場合には無駄に燃焼廃棄される。船上再ガス化船の場合、所要ガス量は、リガス負荷、開・閉ループ、及びスラストの負荷にあわせて変動する。

本船では、タンクの常用圧力を上げてタンク内 LNG の沸点を意図的に上昇させ、侵入熱を LNG 液温の上昇として吸収することで、タンクで発生する BOG 量を抑制することとした。この現象を利用することで、消費ガス量が低下した場合にも、ガスの発生と消費のバランスを保つことが可能となり BOG の利用効率の向上と安全性の確保が可能となる。また、消費ガス量が増加した場合は、タンク圧を減圧することで BOG を増やすことができ、強制蒸発による燃料ロスを軽減することができる。本効果を得るためには、タンクの設計蒸気圧を従来の 0.25 barG よりも高く設定し、高い常用圧力を確保することが必要であり、球型タンク方式では、設計蒸気圧制限がなく(メンブレン方式や方形タンク方式では IGC コードにより 0.7 barG 未満に制限されている。)、高い圧力を設定することができるため、特に有効である。

### 4.2 異種 LNG 層状化対策

密度の違う LNG を同時に積載すると高重質 LNG が底部へ、軽質 LNG が上部へ層状化する場合がある。上部の軽質 LNG はタンクへの侵入熱により温められ、これと熱的にバランスさせるために BOG を発生させ、高密度化する一方、底部の重質 LNG は、自然蒸発による冷却が期待できず、時間の経過とともに昇温し、密度が下がり、上下で密度差が小さくなっていく。層を形成するだけの密度差がなくなった時点で急激な混合(ロールオーバー)が起こり、短時間に多量のボイルオフガスが発生して急激なタンク内圧力の上昇を招く危険性があり、陸上タンクでは種々の対策が施されている。

一方、従来の LNG 船では特定プロジェクトに長期に投入されたため、タンク内に産地の異なる LNG を積み増す機会はなく、層状化の懸念は低かったが、船上再ガス化船の中でも特に洋上ブイに係留された状態で再ガス化を常時行っている FSRU の場合は、陸上タンクと同様に、シャトル船から産地の違う LNG の受入れを想定する必要がある。FSRU は LNG をシャトル船から定期的に受入れるのであるが、延着や天候の悪化などにより LNG 受入れが制限されることを考慮し、タンク内に余裕分の LNG を保持した状態で LNG 受入れのオペレーションが開始されることになり、異種 LNG の積み増しによる層状化の危険性がある。

本船では、層状化対策として、積込液と残存液の密度差を利用し自然混合することとした。すなわち、残存液に対して積込液が軽い場合にはタンク底部から積込液を導入し、逆に残存液に対して積込液が重い場合にはタンク頂部から積込液を導入することでタンク内 LNG を均一化する。

## 5. まとめ

当社は数多くの LNG 船を設計・建造したノウハウを集結し、省エネで環境にやさしい船上再ガス化船である三菱 CERV を開発した。また、この新システムは、オペレータ、船級協会などの外部の専門企業・機関との協業により、最新のリスク評価手法を駆使して評価し、安全性は検証されている。

このような新しい船舶が LNG バリューチェーンを多様化し、安価で環境にやさしい燃料である LNG の世界的な利用促進に貢献することを期待する。