

船舶・洋上 LNG 設備 (GEMS) の開発

Development of LNG Equipment for Marine Application (MHI-GEMS)



岡 勝^{*1}
Masaru Oka

財津 融^{*2}
Akira Zaitso

中道 憲治^{*3}
Kenji Nakamichi

新たな大規模天然ガス源の開発、クリーン燃料の需要増に伴い、LNG (液化天然ガス) に再び注目が集まっている。天然ガス燃料の分配形態の一つである LNG は、他の形態に比べて技術、産業、サプライチェーンが整っており、輸送効率も高く、地政学的リスクに影響されにくいのが特徴である。近年では LNG 製造、再気化機能を浮体や船上に持ち、初期投資を抑え短期間にサプライチェーン拡張ができるようになり、船舶及び洋上浮体による LNG 利用環境の選択肢も充実してきた。船舶燃料分野でも、安価でクリーンな LNG を燃料油の代替として、輸送コスト低減、環境への負荷物質低減を目指す検討が活発になされている。当社は LNG 利用拡大に寄与する方針のもと、船舶・浮体設備の LNG 関連プラントモジュールを製品化し、造船市場に供給する事業を開始した。

1. はじめに

現在、天然ガスを推進燃料に用いる大型船舶は LNG 船だけである。LNG 船は、大気圧下の極低温の液状である LNG を輸送するので貨物タンクに高断熱性能の防熱材が施されている。それでも完全な入熱遮断はできないので、ボイルオフガスを抜き出して液温を下げ、低温低压に保つ方法が一般的である。抜き出したガスはそのまま環境に放出できないので酸化(燃焼)処理することになるが、経済性を考えると燃焼熱を推進に利用するのが良く、長らく天然ガスを燃料とする推進装置が採用されてきた。一方、LNG 船以外の商船は重油を燃料としている。重油は原油精製の残渣物として原油より製造され、安価で入手が容易な燃料であるが、最近では残留硫黄分による環境負荷が問題視され、脱硫コスト増や入手性の悪化が予想されている。また、発熱量単価では LNG の方が安価になる場合もあり、欧州や北米のエミッション制限海域の出現に伴い、この LNG 有利の傾向には拍車がかかると思われる。

このようにクリーンで安価な LNG の船用燃料化への環境は整いつつあるが、LNG 利用には貯蔵タンクや燃料供給設備などの専用設備への追加投資を要する上に、極低温の沸騰液を扱うので保存、取扱が特殊であり、一方、一般の船社・造船所は重油以外の燃料には馴染みが薄い。また、国際航路の LNG サプライチェーンはいまだ不在で、ルール整備も発展途上であり、業界の基盤整備が始まったばかりである。

*1 船舶・海洋事業本部長崎船海技術部 主席技師
*3 技術統括本部長崎研究所 主席研究員 工学博士

*2 船舶・海洋事業本部エンジニアリング事業推進室 室長

2. エンジニアリング事業

2.1 背景

当社の長崎造船所・横浜製作所では、長年にわたりLNG船、LPG船の新造船、修繕事業を継続し、これを通して液化ガスの深冷保存、再液化、再ガス化、ガス燃焼、動力利用等の技術を培ってきた。船舶・海洋事業本部では、これまでの造船事業の延長線として、2012年7月より、船舶エンジニアリング事業推進室を立ち上げ、新興国向の造船技術サポート、国内造船所とのパートナーシップ事業、及び新型船用設備の販売等の新事業を展開中である。

造船所で培ったこれら液化ガス技術のもと、このエンジニアリング事業を通してLNG分野での造船業界の基盤整備への寄与について以下のように展開したいと考えている。

- (1) 関連技術イノベーションへの関与、及び法整備に係る試験請負
- (2) LNG関連設備を中心とした設計請負
- (3) LNG設備モジュール製品の提供

2.2 検証設備

成長期にある同分野では技術革新への期待も大きい。当社のLNG設備開発にあたっては、実証・検証試験を実施するため当社長崎研究所内にLNG試験設備を新設した。2010年より運用を開始し、高圧ガス燃料供給装置の実証試験のほか、大型浮体設備の検証試験を行ってきた(タイトル写真)。また、2013年3月現在ではガス噴射エンジン用安全設備の検証試験請負も実施中である(図1)。

2.3 安全評価手法

新技術の適用には安全評価手法が欠かせない。先駆的な技術の応用では、安全設計やルールの整備がなされてない場合がほとんどであるので、HAZID/HAZOP (Hazards Identification/Hazard & Operability Study) 等の安全評価手法により、安全や信頼性を担保する必要がある。これには専門知識で訓練された要員により対応する。当社はLNG燃料船や、LNGFSRU(洋上貯蔵・再ガス化設備)/FPSO(洋上貯蔵生産設備)の計画(図2)において、LNG設備についての基本設計や安全評価手法に従事し、経験を培ってきた。



図1 高圧ガス安全設備の検証(高圧ガス製造部のみ)

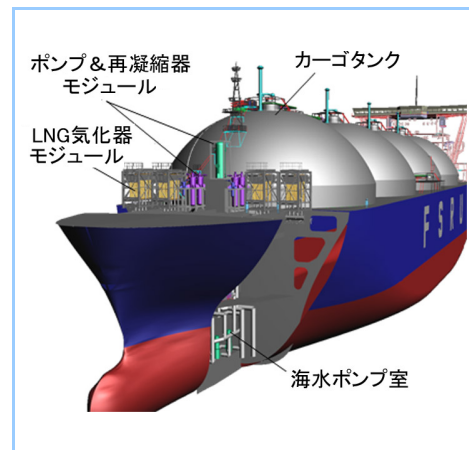


図2 MORVを搭載しLNG船を改修したFSRU設計例

MORV: Marine Open Rack Vaporizing System

2.4 設備の製品化 = GEMS

当社が扱う、船舶や浮体にLNGなどの液化ガスを取り扱う機能を提供する設備とサービスを“GEMS”と称する。GEMSとはGas ship Equipment Module and Systemの略号で、その名が示すとおり、液化ガス運搬船や液化ガス貯蔵浮体上に様々な機能を備えるための専用設備を指す。図3はGEMSが提供する機能のラインナップである。液化ガスの保存・液化・ガス化・燃焼をカバーしているが、市場からの要望にあわせて開発活動を行っており、随時拡大充実していく所存である。

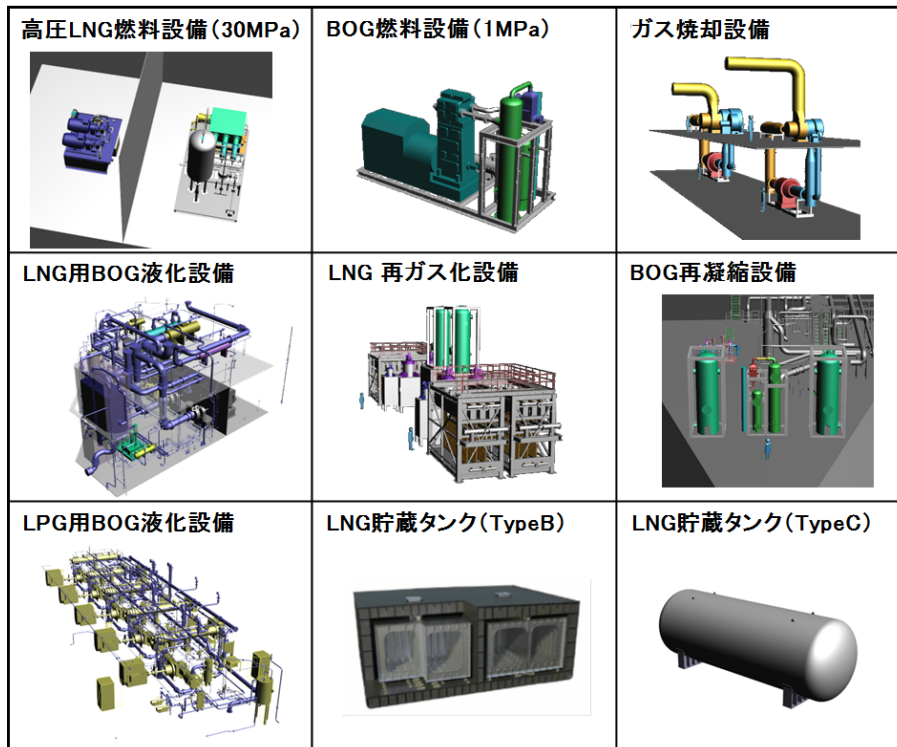


図3 MHI-GEMS ラインナップ

3. LNG の船用燃料化

3.1 ディーゼル機関のガス燃料化

現在、標準的な商船の推進機関(主機)は、プロペラシャフトに直結した重油焚2サイクルディーゼル主機である。同機関は単機大出力、燃料に重油が使える、熱効率も 50% (LHV) 超とあって、オイルショック時に大型蒸気タービン主機の代替として現れるや否や、大型商船の標準主機となった。同機関は高圧の燃料油をシリンダ内に噴射して点火、爆発的燃焼をピストン運動として回収し、クランク機構で主軸の回転運動に変換、プロペラに直結してこれを回す。船用大型機関としては MAN 社ライセンス ME/MC 機関が有名であるが、燃料油の大部分を高圧の天然ガスに換えて噴射する機関(ME-GI)のライセンス供与準備も整い、世界中にあるエンジンメーカーがライセンス生産の準備を始めている。当社船用ディーゼル部門も、油焚機関 UEC をベースにガス噴射方式の製品化を計画しており、船用エンジン市場には選択肢が出そろいつつある。

他方、同様な内燃機関としては4サイクルのガス・油混焼機関も候補にある。

LNG 船では 2004 年頃から推進用電動機用の発電機関として採用されている。電気推進とする理由は、単機では出力が2サイクル程の大型がない、出力軸がプロペラ速度より高速である、ディーゼルサイクルに比べ速度変動に劣るオットーサイクルで作動する、などである。

現時点では2サイクル、4サイクルのいずれの方式が有望であるかの判断は難しいが、大型船において4サイクルの採用が進むためには、船用電気推進セットが商船で一般化できるかによるところが大きい。大型船では2サイクル有利、小型船では4サイクル、という状況に変わりはないと考える。

3.2 高圧ガス燃料製造設備

ほとんどの4サイクル機関はガス燃料にはオットーサイクルを採用しているので、ガス供給圧は 1.0MPaG 以下と比較的低圧であり、BOG を加圧して燃料ガスとする技術は確立されている。

一方、2サイクル機関のディーゼルサイクルでは、15~30MPaG のガス噴射元圧が必要である。これは従来の油噴射圧に比べれば低圧であるが、天然ガス圧としては異例の高圧であり、船用陸用ともにガス高圧化設備で実用的なものはなかった。当社は LNG を高圧・昇温して高圧ガスを製造する船用設備を開発、当社長崎研究所内に設置した実証設備で試験運用を行い、その後 2011 年より現在までデモ運転をしている。

同設備は、ピストン・シリンダでLNGを高圧化し、高圧熱交換器で常温まで加熱、エンジンに供給する。LNG設備から出るオフガスはベントすることなく、燃焼処理してLNG加熱に必要な熱源とする機能も装備しており、舶用と同じく安全性や環境に配慮した設備である。LNG 船用主機(ボア径 700mm クラス、6~7筒)の全負荷領域をカバーできる高圧ガス製能力を有し、LNG 換算で毎時 125 L/h(単機当たり)相当のガスを製造できる。深冷高圧部には樹脂系素材のシールを開発、舶用に求められる連続運用下での長寿命化に対応する。高圧化のピストンポンプはガス危険区画への配置に好都合な本質安全型油圧モータで駆動する。電動の油圧供給システムは安全区画に配置する。高圧化ポンプの可変スピード制御とガスバフファ制御機構によりエンジンからのガス圧、ガス量需要の変動に対応する。また、この設備では LNG の加熱源を冷媒窒素とし、タンク冷却の冷熱として回収する熱交換器の試験も行い、良好な成果を得た。

一部の特殊装備を除き、同型の設備は、ME-GI ライセンス生産社である三井造船(株)玉野事業所エンジン製造工場のガス試運転設備として採用された。近日、ガス噴射エンジンの試運転が予定されている(図4, 図5)。

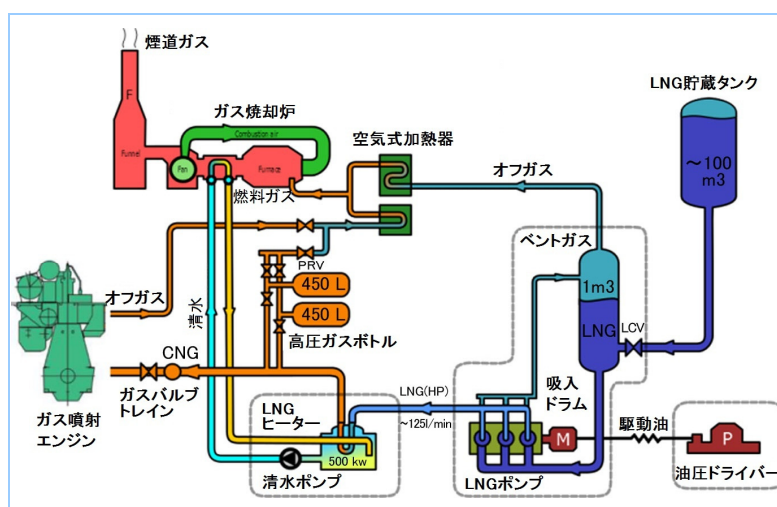


図4 三井造船(株)玉野事業所向 設備系統図



図5 同左設備全景

3.3 船上 LNG タンク設備

LNGを舶用燃料とする際、船上に貯蔵タンク設備を備えなければならない。LNG 船の貨物タンクでは主にIMO(国際海事機関)が定める Type B 方式(球型タンク他)や、メンブレンタンク(GTT社ライセンス方式)が採用されてきたが、LNG 燃料船の検討ではこれに加えて Type A, Type C(圧力容器方式)などいくつかの種類の中からそれぞれの特徴を生かして選択されている。

LNGは大気圧下では約-160℃であり、加圧状態でも他の液化ガスに比べても極めて低温なので、防熱材を通して侵入する熱による過圧、温度上昇、容積膨張への対処が不可欠である。LNG 船ではガスを抜き去ったり、液化して再びタンクに戻していることはすでに述べた。ちなみに世界で初めてボイルオフガスを液化する設備を装備した船は、当社の建造で 2000 年 10 月に就航した LNG 船、S/S LNG Jamal⁽¹⁾である(図6, 図7)。



図6 当社建造 LNG 船 S/S LNG Jamal (OGIT/NYK 向 MHI2157 番船)

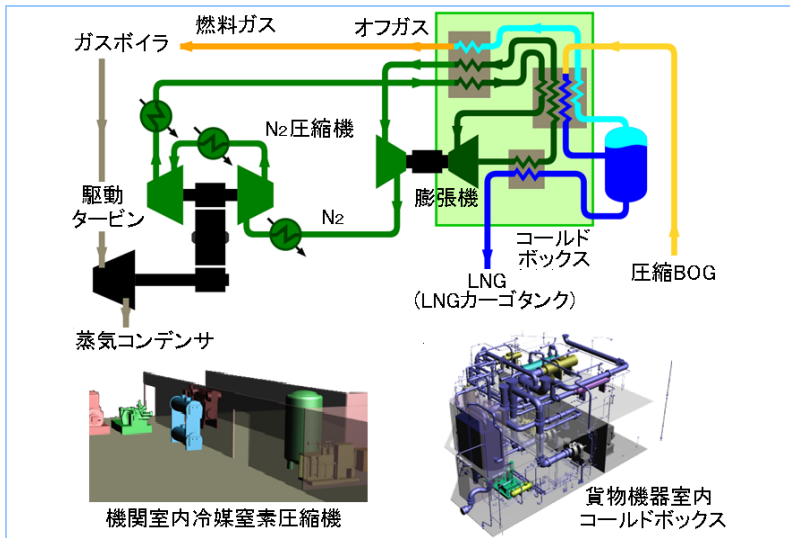


図7 世界初のBOG再液化システム

本船はスチームタービン主機でボイルオフガスを燃料とすることができるが、同時に毎時約3トンのボイルオフガスを冷却・液化してタンクに戻すことができる。戻った液はタンク内部を冷却して侵入熱と相殺し、内圧の上昇を抑制する。ガスの冷却には窒素を冷媒とした冷凍サイクルを採用したが、後続の再液化装置搭載船も基本的には同じサイクルが踏襲されている。

この船は、ボイルオフガスを燃料とせず、重油を燃料とした2サイクルディーゼル主機のLNG船が多数出現する契機となった。

LNG燃料船では、LNGタンク容積はかなり小さくて良いのでタンク圧上昇を加圧タンク設計でのぐ方法もある。ただしLNGはプロパンと違い、圧力上昇の上限が事実上ないので運用面では煩わしい制約がある。ガス抽出や再液化装置によるタンク冷却機能はこの制約を緩和する。またLNGバンカー船のようにLNG温度を調整したい場合や、大容量の低圧設計タンクを採用する場合にはより有効である。

図8は、当社長崎研究所内に構築したLNG設備で検証し実用化したGCU(Gas Combustion Unit)、冷熱回収装置と、再液化装置の冷凍サイクル技術等、GEMS製品を組み合わせ、提案する総合設備案である。タンク内圧はガス抽出及び冷凍サイクルによる冷却の両方で抑制し、外部からの燃料や動力の供給は不要で自律的に作動することが特徴である。またLNGの冷熱の有効利用により、燃料ガスの減耗を最小化することも容易である。

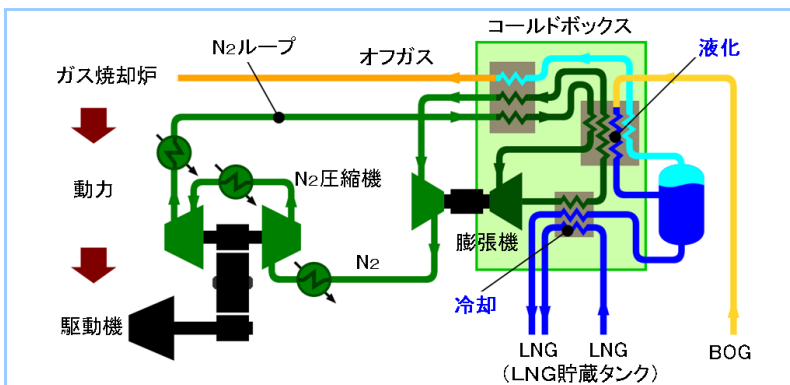


図8 LNG貯蔵タンク圧制御装置案

4. LNG サプライチェーン - LNG 気化設備の開発

2000年以降、米国のLNG需要増を見込んで新造LNG船が大量に発注建造されたが、シェールガスの実用化でその見込みが外れ、船の需給バランスが崩れてLNG船の輸送休止が目立つようになり、古いLNG船を中心に洋上LNGガス化浮体に換装するFSRU(Floating Storage & Regasification Unit)案件が多数検討された。FSRUはLNG船に大規模な気化設備を追加装備

し、高圧ガスの状態で陸に引き渡す洋上設備であり、いわば、現 LNG 受入基地の機能を洋上に移植したものである。2011 年、東日本大震災以降の LNG 需要増で LNG 船の稼働率は回復したが、一旦離陸した FSRU の需要は伸びており、現在は新造案件も多い。

FSRU は陸上の受入基地に比べて、準備期間が短く、かつ安価に構築できるとされている。

当社は、陸用の気化設備を船舶環境に適化させることで、特殊化していた FSRU 用 LNG 気化装置をシンプルかつ低コスト化した MORV を開発することに成功した。MORV とは Marine Open Rack Vaporizing system の略称で LNG 再ガス化システムを意味し、高圧ポンプ、気化熱交換器、熱媒循環ポンプ、及びガスハンドリング装置により構成される。図9は MORV の検証試験風景、図2は LNG 船改造の FSRU に MORV システム搭載のイメージである。

中核となる気化熱交換器には、現 LNG 受入基地の主力蒸発器である ORV (Open Rack Vaporizer) を船舶の狭いスペースに配置できるようにコンパクト化し、浮体上の傾斜/動揺環境下、 10° 傾斜しても性能悪化なしに利用できるように改良した。現在、100bar までの払出圧に対応し、100 MM SCFD (約 120000 Nm³/h) トレインを単位にモジュール化して提供する。

また、FSRU では海洋環境保全の観点から、冷却・加熱用の海水を取水することに制限が設けられる場合があるが、MORV 方式では海水系を閉ループ化した構成も可能で、パワー・プラントとの複合化による効率改善も合わせて、お客様の要望に則した提案をしてきた。⁽²⁾

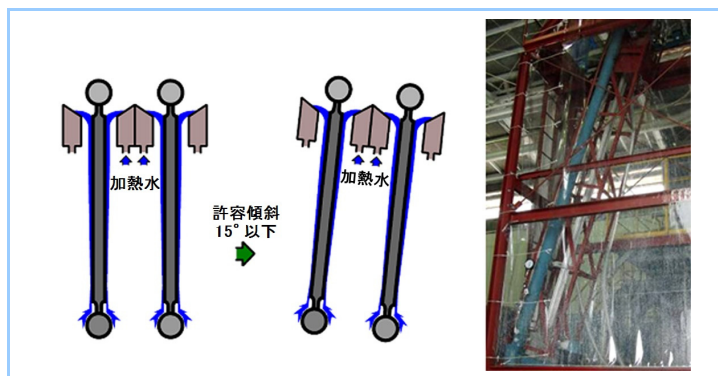


図9 MORV の傾斜性能試験風景

5. まとめ

当社船舶エンジニアリング推進事業では船舶のクリーンエネルギー化、及び LNG サプライチェーン拡充に貢献するため、開発からプラントモジュール販売、及びエンジニアリング請負をコンテンツとして事業を展開している。今回は特に LNG の高圧ガス製造設備、及び洋上再ガス化の設備の開発例の一部を紹介したが、ガス噴射エンジン用の高圧ガス供給設備はすでに船用エンジン工場が備えるべき試験運転設備として実用レベルにあり、船舶への実搭載にも問題はない。

この他、LNG 貯蔵タンク設備に関する技術をあわせて総合的に市場形成に関与し、LNG の船用燃料化に寄与していきたい。

FSRU では陸用の長期実績がある ORV をベースに船用に改良し、LNG 気化トレインをモジュール化して市場に提供する体制を整えた。従来、船用 LNG 再ガス化装置ではプロパンカスケード方式等、特殊化・高コスト化の傾向にあったが、MORV は一般化、低コスト化を促進できるものと期待する。また今後は逐次、洋上での LNG 製造分野や洋上発電設備の要望にも対応していく計画である。

参考文献

- (1) N. Hatanaka et al, Osaka Gas Co., Ltd, A Challenge to Advanced LNG Transport for the 21st Century-LNG Jamal: New LNG Carrier with Re-liquefaction plant, LNG13 (2001)
- (2) 津村健司 他、省エネで環境にやさしい船上再ガス化 LNG 船の開発 三菱重工技報 Vol.47 No.3 (2010)