

L N G 船 の 技 術 動 向 と 将 来 展 望

Key Technologies of Mitsubishi LNG Carrier—at Present and in Future—

船舶・海洋事業本部 湯 浅 和 昭*¹ 上 床 克 哉*²
長崎造船所 石 丸 純 史 郎*³

世界のエネルギー需要は今後ともますます増加する傾向にあるが、地球温暖化防止のための排出 CO₂削減が将来の大きな課題と認識されている。このような環境の中で、CO₂の排出量の少ない LNG が注目されており、現在、世界で約 90 百万 t の LNG が海上輸送されている。当社は、1970 年代から LNG 船の開発を開始し、信頼性・経済性の向上を図るために各種の技術開発を進めてきた。この間、低 BOR (Boil off rate) 技術、高度自動化システム等の技術開発を行い、建造船で実用化してきた。今日では、球形タンク方式とメンブレン方式の 2 つの主要タンク方式で最新の LNG 船を建造中であり、また、世界第一位の建造実績を有している。30 年以上にわたる LNG 船の安全な運航実績を踏まえて、LNG チェーンコストの低減が今後の技術課題として特に近年注目を集めている。LNG 船に関しては、大型標準船の開発、各種推進プラントの実用化等に関して次世代技術の開発を行っている。

CO₂ emission control is recognized as the essential issue related to the greenhouse effect, especially since demand for energy increasing. Use of Liquefied Natural Gas (LNG) must be expanded because it produces less CO₂ emission than any other fossil fuel. Worldwide, approximately 90 million tons of LNG are transported by sea in 1999. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) has developed LNG Carriers (LNGCs) since the early 1970s, and has been introducing many technical innovations, such as an insulation system with lower boil-off-rate (BOR), and a sophisticated automation system, in order to enhance their reliability and economy. MHI is building its latest LNGCs with both major containment systems, namely, the spherical tank type and the membrane tank type, and MHI is the No. 1 shipbuilder of LNGCs in the World. Given the safe and reliable operation of LNGCs over the past thirty (30) years, the economy of LNG transportation has become a topic of increasing attention for the LNG supply chain. MHI will continue to lead the way by building future LNGCs that incorporate new technical advancements such as greater size, standardization and alternative propulsion plants.

1. 緒 言

LNG (液化天然ガス) の世界初の商業海上輸送は、1964 年にアルジェリアからイギリスに向けて開始された。以来、その輸送量は年々増加の一途をたどっており、1999 年には全世界で約 90 百万 t に達し、日本向けは約 52 百万 t と、全世界の海上輸送量の約 60 % を占めている。

1997 年 12 月の地域温暖化防止京都会議 (COP 3) において、排ガスについての新たな環境目標が設定された。これを受けて、クリーンエネルギーとしての天然ガスはますます注目を集めている。

天然ガスの主成分はメタンであり、沸点の約 -160°C まで冷却することにより、約 600 分の 1 に凝縮して LNG となる。

海上輸送貨物としての LNG の特徴は、約 -160°C の超低温と、低比重 (0.43~0.50)、可燃性の 3 点である。現在まで、これらの特徴に適合した各種の貨物タンク方式が実用化されており、約 110 隻の LNG 船が世界で運航されている。

本報では、LNG 船の技術動向と将来展望に関して、当社の技術開発の歴史、建造船への適用、将来に向けた技術課題等について解説する。当社建造の最新の LNG 船の全景を図 1 に示す。

2. LNG 船のタンク方式

貨物タンクとして、LNG の特徴に適した形状・材料・構造を持つ各種の方式が提案され実用化されてきたが、現在では、経済性・信頼性の面から、球形独立タンク方式とメンブレンタンク方式が主流を占めている。各タンク方式の主要比較を表 1 に示す。

2.1 独立タンク方式

独立タンクとは、船体とタンクが各々独立の構造で、船体の中に自立タンクが配置されている。したがって、タンクの熱伸縮による変形は直接船体には伝わらない構造となっている。タンクの液荷重は自立タンクに作用するので防熱材には直接荷重が掛からないが、タンク支持部分にはすべての荷重

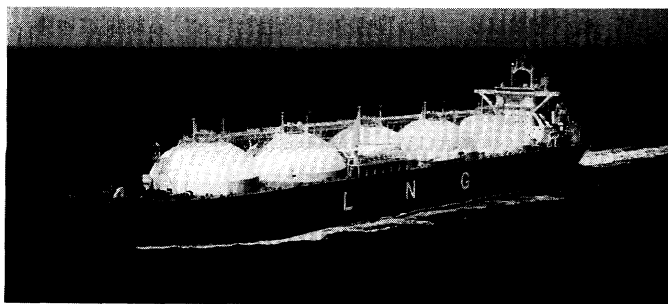


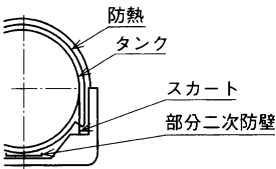
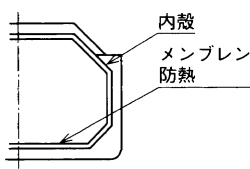
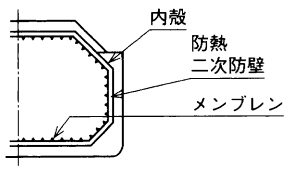
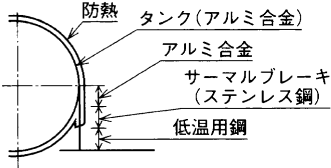
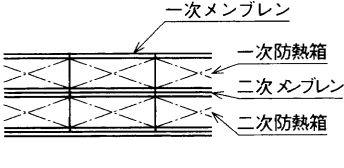
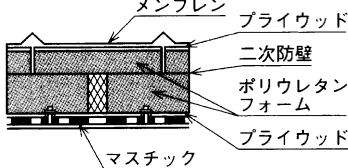
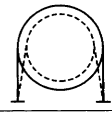
図 1 当社建造の最新 LNG 船 当社建造の最新 LNG 船の全景を示す。
Latest Mitsubishi LNG carrier

*¹ 船舶技術部商船計画グループ長

*² 船舶技術部商船計画グループ

*³ 造船設計部主幹

表1 LNG 船の主要タンク方式比較
Comparison of LNG cargo containment systems

	球形タンク方式	メンブレン方式	
		ガストランスポート方式	テクニガス方式
タンク断面図			
防熱構造			
タンク材料	アルミ合金又は 9%ニッケル鋼	36%ニッケル鋼(インバー)	ステンレス鋼
熱伸縮対策	タンクとスカートの伸縮による 	(メンブレンの線膨張係数が非常に低く対策不要) 	メンブレンの伸縮による 
防熱材料	プラスチックフォーム	パーライトを充てんした防熱箱	プラスチックフォーム
BOR (防熱厚さ)	0.15%/d (220mm 程度)	0.15%/d (530mm 程度)	0.15%/d (250mm 程度)
二次防壁	ドリップパン(部分二次防壁)	一次防壁と同一	トリプレックス

が作用する。このため、支持構造には十分な強度と断熱性能が要求される。また、万一のLNG 漏れに対し、船体保護の観点から二次防壁を備える必要がある。

現在では、世界のLNG 船の約半数がこの球形独立タンク方式となっている。当社ではモスローゼンベルグ社（現モスマリタイム社）で開発された球形独立タンク方式を改良して、これまでに21隻のLNG 船を建造・引渡している。

球形タンク方式は、球形シェル構造のタンクですべての液荷重をタンク板材の膜応力で受持つので、応力集中が避けられる。また、球形シェルは円筒形の支持構造（スカート）により船体に据付けられており、球形タンクの熱伸縮変形は、このスカートのたわみによって無理なく吸収されることが特徴である。

球形タンク及び円筒形スカートという軸対称の単純な形状・構造であるために、高精度の応力解析が可能であるので、“LNG は漏れない。また、仮にクラックが発生しても進展時間は極めて遅く、漏れいLNG は少量にとどまる。”ことを実験的・解析的に証明して、部分二次防壁が認められている。球形タンク方式はIGCコード（国際液化ガス運搬船規則）のタンクタイプBとして、最も安全性の高いタンク方式と認知されている。

2.2 メンブレンタンク方式

メンブレンタンク方式は、船体内部に防熱材を取付けて、その内面をメンブレン（金属の薄膜）で覆った構造となっており、そのねらいは低温用金属材料の削減にある。メンブレンは貨物漏れ防止の液密を保持することが目的で、貨物タンクとしての強度は受持たない。貨物液の荷重は防熱材から船

体に直接作用するので、防熱構造は断熱性能のみならず、強度面での配慮が必要となる。表1を参照しながら、メンブレン方式の主流であるガストランスポート方式とテクニガス方式の特徴を説明する。

ガストランスポート方式は、メンブレンとしてインバー（36%ニッケル鋼）と呼ばれる線膨張係数が極めて小さい特殊材料を使用しているので、熱伸縮対策が実質的に不要である。また防熱構造は、パーライトを充てんした防熱箱をれんが状に積重ねた構造となっている。二次防壁には一次防壁と同一材料のインバーを使用していることも本方式の特徴である。当社はこの方式で2隻のLNG 船を建造中である。

テクニガス方式は、メンブレンとしてしわ付きのステンレス鋼を採用している。縦横の波形のしわを成形して、このしわで熱伸縮を吸収する構造となっている。防熱構造については、初期のマークIではバルサ材を使用していたが、低BORの要請を受けて、マークIIIを開発した。マークIIIでは、防熱材に強化プラスチックフォームを採用し、二次防壁にはトリプレックス（アルミ фольシートをグラスクロスで補強した材料）を使用しているのが特徴である。当社ではマークIで1隻の小型船の建造経験がある。

ガストランスポート方式とテクニガス方式は、元々別の会社で開発された方式であったが、現在はGTT社（ガストランスポート・アンド・テクニガス社）として統合されている。現在、両方式の長所を結合した新しい方式を開発中で、その基本的な考え型は、メンブレンにはインバー、防熱には強化プラスチックフォームを使い、二次防壁はできる限り簡素化を図る方向で検討を行っている。将来の方式として注目され

ている。

3. 当社の技術開発と建造船の特徴

3.1 技術開発

当社は、液化ガス船のパイオニアとして1962年世界初的大型低温式LPG船を建造し、以来、数多くのLPG船、LNG船を建造している。現在、いずれの大型液化ガス船とも世界第1位の建造実績を誇っている。

LNG船に関しては、1969年テクニガス・メンブレン方式、1971年モス球形タンク方式、1973年ガストランスポート・メンブレン方式の技術導入を順次行い、これらの各方式について各種改良技術の開発を行っている。

船型開発については、従来から模型試験を主体とした最適船型の開発を行ってきたが、1990年代に入りCFD (Computational fluid dynamics: 数値流体力学) 技術を確立してこれを実用化している。現在では短期間で推進性能の良好なLNG船を開発できるようになった。

構造設計については、スロッシング荷重の推定技術の確立、構造強度解析・疲労解析等の高度解析技術の開発を行い、当社独自の波浪中疲労解析手法DISAM (Discrete analysis method: 高度構造解析手法) も実用化している。これらの解析技術で信頼性の高い構造設計が可能となっている。

LNG船の各タンク方式に関しては、各方式の特徴を最大限に発揮できる改良技術の開発に取り組んでいる。特に、1980年代後半、当社が業界のリーダーシップをとって運航経済性の高い大型球形タンク方式LNG船、いわゆる第2世代のLNG船を開発した。本船は西豪州プロジェクト向け125 000 m³LNG船として1989年にしゅん工し、今日まで順調に運航されている。

3.2 建造船の特徴

最新のLNG船の特徴を第1世代のLNG船と比較して説明する。

- (1) タンク容積は、125 000 m³から135 000 m³に大型化することにより、輸送コストの低減を達成できた。将来は更に大型化の傾向にある。
- (2) 球形タンク船については、タンクスカート部のサーマルブレーキの開発により低BORが可能となった。技術的には0.1 %/dの超低BORも可能であるが、現時点では0.15 %/dが実用上最も経済的との判断で、ほぼすべての大型LNG船で0.15 %/dが採用されている。また、ガストランスポート船についても、無理のない範囲での防熱増厚・防熱構造の簡素化で、0.15 %/dのBORを達成している。
- (3) 船型・プロペラの最適設計、熱効率の改良技術開発により、高速化と主機出力・燃費低減を同時に達成している。
- (4) 低BORと強制貨物蒸発装置の組合せにより、低速域から高速域までBOG (Boil off gas) を有効に活用することで、運航経済性を高めることができた。また、NO_x、SO_xの低減により、環境に優しい船を実現している。
- (5) 長期メンテナンスを考慮して、構造配置、材料選定、塗装仕様等に細心の注意を払って設計展開している。特に、構造設計に関しては、DISAMを駆使して、疲労強度設計を

行っている。

- (6) 自動化システムを随所に織込んで、運航の簡素化と安全性の向上を図っている。

さらに、環境に配慮して、バラスト水置換の自動化、フロン冷媒対策等の新しい技術を導入したLNG船も開発済みであり部分的に実用化しつつある。

4. LNG船の将来展望

近年、国際LNG会議、GASTECH (ガステック) 等の国際会議では、LNG輸送コストの削減が大きな話題として取り上げられている。特に、LNGチェーンコストの低減に向けた各種の提案が議論されている。コスト低減の議論の背景としては、安全性・信頼性は既の実証済みであり、これからは経済性が最重要との認識が強まったことによる。

したがって、LNG船について、経済性に着目して将来展望を説明する。

4.1 大型化

LNG船の大型化による経済性のメリットは、一般商船と同様に単位輸送コストの低減にある。特に、LNGプロジェクトでは、輸送量がほぼ一定であるので、大型化によりLNG船の必要隻数が削減できる。隻数の削減は、資本費・運航費の低減に直結している。

大型化した場合の課題は、既存のLNG基地、特に受入側の基地との船陸整合である。これまでの検討結果では、主寸法・係船配置・タンク容量等は物理的には大型化は可能だが、バース強度・揚荷レート等に関しては、船型によっては受入設備の改造が必要と考えられている⁽¹⁾。

4.2 標準化

LNGプロジェクトは、多大の初期投資が必要であるために、生産側と消費側との長期契約に基づいて開発されてきた。そのため、LNG船は、そのプロジェクト特定の専用船として最適化が図られて、船型・船速等の基本要件が決定されていた。

一方、LNGも一般の海上貨物同様に、不特定多数の生産者と消費者が契約を取交わす可能性が出てきている。具体的には、スポットでの貨物の引受けも行われつつあるので、将来ははん用性の高い標準船での取り引きが一般的となるとの見方もある。

このような背景から、大型化とは別の視点から、標準化の方向も考えられる。

現在の標準船型は、125 000 m³から、135 000 m³へと徐々に大型化されてきたが、前記のとおり、大型化した場合には入港困難なLNG基地も出てくるので、標準船を計画する場合には、はん用性を高めることが最重要となろう。船型と船速の関係は、145 000 m³で18 knと135 000 m³で19.5 knとで、ほぼ同一の輸送量となる。

4.3 推進プラント

LNG船では、BOGが大気よりも軽い可燃性のガスであるので、機関室内で燃料として使用することが許されており、従来から蒸気タービン機関の主ボイラ用燃料として活用されてきた。一方、BOGも貨物の一部であるので、有効活用をね

表2 LNG船の推進プラント比較
Comparison of propulsion plants for LNG carrier

推進プラント	蒸気タービン機関	ガスだきディーゼル機関	再液化装置付きディーゼル機関	ガスコンバインドサイクル
プラント構成				
長 所	・現在採用されており信頼性大 ・通常航海中BOG 100%燃焼可能	・燃費率が良い ・BOGを燃料に使用できる	・主機自体の燃費率は良い ・貨物部と機関部が分離できる	・蒸気タービン機関に比べ燃費良
短 所	・燃費率が悪い	・BOG専焼はできない ・低出力でBOGの燃焼はできない	・重油消費量大 ・再液化装置駆動用電力が必要	・高品質の燃料油が必要 ・BOGとの混焼はできない
経済性 初期投資 燃費率(燃料)	100 100(BOG+HFO)	105 67(BOG+HFO)	105 65(HFO)	104 79(BOG or Gas Oil)
排出ガス CO ₂ NO _x SO _x	100(87) 4 (3) 67(0) ()はBOGのみの場合	66 100 43	77 99 100	73 10 0

らって、各種のプラントが検討されている。

ここでは“蒸気タービン機関”、“ガスだきディーゼル機関”、“再液化装置付きディーゼル機関”、“ガスコンバインドサイクル（ガスタービン機関+蒸気タービン機関）”の比較検討結果について説明する。各々のプラント構成・特徴・経済性等を一覧表として表2に示す。比較表からも分かるとおり、信頼性・安全性の面からはいずれも実用可能である。

蒸気タービン機関は、ほとんどすべてのLNG船に採用されており、信頼性は高い。主ボイラの燃料としては、BOGと重油のいずれの燃焼も可能であり、混焼もできる等の長所がある。特に、BOG専焼時の排出ガスは最もクリーンである。一方、燃料効率が悪く、燃費が劣る点が短所である。

ガスだきディーゼル機関は、BOGと重油の混焼が可能で、燃料効率も良いが、BOG燃焼のためにガス圧力を高める必要がある。また、パイロット用燃料が必要で、BOG専焼ができない等の短所があり、フレキシビリティが劣る。さらに、ディーゼル機関は燃焼温度が高いために、窒素酸化物の排出が多くなる。

再液化装置付きディーゼル機関は、BOGは再液化してタンクに直接戻すことができるので、推進機関とBOG処理が完全に分離できる。主機関は、一般商船で使われている通常のディーゼル機関で燃料効率も良い。ただし、再液化のための設備投資と追加の駆動電力が必要となるので、重油の消費量は増える。また重油だきのディーゼル機関であるので、窒素酸化物、硫酸酸化物の排出は他のプラントよりも多い⁽²⁾。

ガスコンバインドサイクルは、BOGをガスタービンで燃焼するとともに、排ガスエネルギーで蒸気を発生させて、蒸気タービンを駆動する。陸上のコンバインドサイクルシステムと類似のプラントで、通常の蒸気タービンと比較して燃料効率が良い。

また、排気ガスは蒸気タービンと同様に比較的クリーンで

あるが、高品質の石油燃料が必要なこと、BOGとの混焼ができないこと等の短所がある。将来は、電気推進プラントとの結合も考えられる。

5. 結 言

当社は、液化ガス船のパイオニアとして、1962年世界初の大形低温式LPG船の建造を通じて液化ガス船の技術確立した。また、1969年から1973年の間に、球形タンク方式及びメンプレン方式のLNG船の基本技術を導入し、その後、安全性・信頼性・経済性向上のため、低BOR、強制蒸発装置、自動化システム等の各種技術を開発して実船に適用してきた。現在当社は、LPG船、LNG船共世界第1位の建造実績を誇り、客先の要望に適した最新の液化ガス船を提供している。

さらに近年では、LNGの海上輸送の安全性・信頼性は実証済みとの共通認識の上で、更なる経済性向上が大きな話題として取上げられている。当社は、大型化、標準化、各種推進プラントの技術開発、タンクの改良提案等を行って、客先の将来ニーズに沿った経済船を開発している。

これらの技術開発には、荷主、客先、ライセンサ、船級協会、社内関係部門等の関係先の協力が不可欠である。これまでの各位の協力に感謝するとともに、安全性・信頼性・経済性の高い次世代LNG船を実現するために、今後ともご協力をお願いしたい。

参 考 文 献

- (1) Ishimaru, J. et al., Designing LNG Carriers for 21st Century with Emphasis on Economical and Safe Operations, Gastech 94 (1994)
- (2) 湯浅和昭ほか、LNG船の経済性と新技術、日本エネルギー学会講演論文集 (1999)