

# クリーンエネルギー輸送～LNG船の昨日・今日・あした

Transportation of Clean Energy at Sea~Mitsubishi LNG Carrier, at Present and in the Future

難波直愛 珠久正憲  
湯浅和昭 石丸純史郎



## 1. はじめに

当社の船舶・海洋部門では、各種船舶の建造で一世紀以上にわたって培ってきた豊富な造船技術をいかして、豪華客船、液化ガス船、フェリー、コンテナ船、タンカー、石油・ガス洋上設備、地球深部探査船等各種の船舶を開発・設計・建造している。その一例を冒頭に示す。

液化ガス船の分野では、1962年世界初の低温式LPG船を建造、以来、2002年末までに大型LPG船40隻、大型LNG船22隻を建造、LPG船、LNG船はいずれも世界第一位の建造実績を誇っている。

LNG船では、1983年に当社初の125,000 m<sup>3</sup>型LNG船をしゅん工した後、20世紀最後のプロジェクトといわれたオーストラリア・ノース・ウエスト・プロジェクトで、いわゆる第2世代のLNG船を開発・建造した。この第2世代船の特徴は、低ボイルオフレート（BOR）と強制蒸発装置の組み合わせによって、燃料選択の自由度を増した点であり、LNG船の経済性は大幅に向上できた。現在でも、この設計思想がLNG船の標準となっている。

近年では、世界初のLNG船用再液化装置の実用化、環境に優しいLNG船の建造、145,000 m<sup>3</sup>型の最大級LNG船の開発と、常に時代をリードした新製品を投入している。

LNG船は、安全性・信頼性ととも、経済性が益々重要になっている。当社では、豊富な経験と各種技術開発を通じて、お客様のニーズにあった最適なLNG船を提供すべく日夜取り組んでいる。

それでは以下に、クリーンエネルギー輸送に従事する当社のLNG船について紹介する。

## 2. LNG船の昨日

LNG（液化天然ガス）は、クリーンエネルギーとして1969年から日本に導入された。以来、輸入量は増加の一途をたどり、現在では約55百万トン（全世界のLNGの約60%）のLNGが日本に輸入されている。LNGは天然ガスを液化して、体積を約600分の1に凝縮した極低温（約-

160℃）の液体で、輸送のためには特殊なタンクが必要となる。LNG船の特殊タンクは1950年代から各種開発がなされたが、現在では、信頼性・安全性・経済性の点から、球形タンク方式とメンブレン方式（金属の薄膜を利用した方式）の2つの方式が主流となっている。

当社では1970年代から、球形タンクとメンブレンの両方式の技術を導入し、LNG船の実用化開発を行ってきた。

1980年には、当社初の125,000 m<sup>3</sup>型球形タンクLNG船を受注し、1983年に建造引渡しを行った。ここで当社独自の設計・建造技術を確立することができた。その後更に設計改良を加え、いわゆる第2世代LNG船を開発・実用化して、大型LNG船分野でのリードヤードとして建造を重ねてきた。第2世代LNG船の特徴は、

- (1) サーマル・ブレイキ（侵入熱を抑える特殊構造）の開発により、低BORを実現した。
  - (2) 低BORと強制貨物蒸発装置の組合せにより、運航中の燃料選定の柔軟性を大幅に向上させた。
  - (3) 球形タンクカバー、フランジタイプのパイプタワー構造等の開発により、構造信頼性の向上と建造コストの低減を同時に達成できた。
  - (4) 世界初の大型4タンク船を開発、性能の良い浅喫水幅広船型のコンセプトを実現した。
- ことである。

また、メンブレンLNG船についても1970年代以降開発を継続してきた。メンブレンLNG船では、信頼性の確保が重要課題との認識で、船体構造の健全性の検証、防熱構造、建造手法等のキー技術の開発、実用化を行った。

## 3. 今日

現在、135,000 m<sup>3</sup>型の球形タンクLNG船、及び、メンブレンLNG船を連続建造中である。図1に、香焼工場で連続建造中のLNG船を示す。

球形タンク方式では、アルミニウム厚板の溶接技術、異材継ぎ手の製作手法、防熱施工技術等で改良を加えている。

また、世界で初めてLNG船用再液化装置を実用化し、球



図1 建造中のLNG船（球形タンク方式とメンブレン方式）

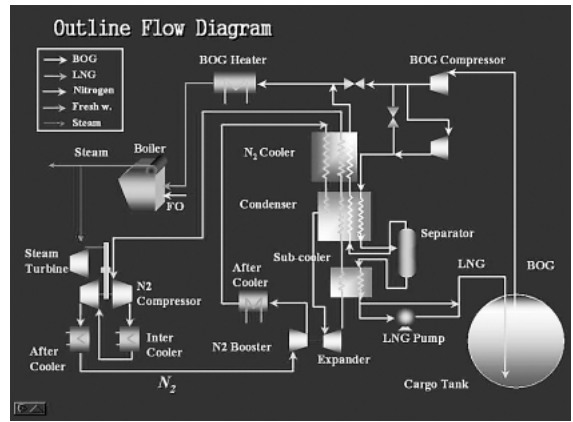


図2 再液化装置の概要

表1 受注・建造LNG船

| しゅん工船 |                       | 2002年11月時点      |                         |       |      |
|-------|-----------------------|-----------------|-------------------------|-------|------|
| 船番    | 船名                    | プロジェクト名         | タンク容積 (m <sup>3</sup> ) | タンク形式 | しゅん工 |
| 1870  | Banshu Maru           | インドネシア・パダクIII   | 125542                  | 球形タンク | 1983 |
| 1889  | Echigo Maru           | インドネシア・アルン      | 125568                  | 球形タンク | 1983 |
| 1890  | Dewa Maru             | インドネシア・アルン      | 125631                  | 球形タンク | 1984 |
| 1996  | Northwest Sanderling  | 西豪州 (NWS)       | 127362                  | 球形タンク | 1989 |
| 2000  | Northwest Swift       | 西豪州 (NWS)       | 127427                  | 球形タンク | 1989 |
| 2011  | Ekaputra              | インドネシア・台湾       | 137012                  | 球形タンク | 1990 |
| 2042  | Northwest Seaeagle    | 西豪州 (NWS)       | 127452                  | 球形タンク | 1992 |
| 2062  | Dwiputra              | インドネシア・パダクFトレイン | 127386                  | 球形タンク | 1994 |
| 2061  | LNG Vesta             | インドネシア・パダクFトレイン | 127386                  | 球形タンク | 1994 |
| 2074  | Northwest Stormpetrel | 西豪州 (NWS)       | 127443                  | 球形タンク | 1994 |
| 2067  | ISH                   | アブダビ            | 137304                  | 球形タンク | 1995 |
| 2089  | Al Khor               | カタール            | 137354                  | 球形タンク | 1997 |
| 2090  | Al Wajbah             | カタール            | 137309                  | 球形タンク | 1997 |
| 2091  | Doha                  | カタール            | 137252                  | 球形タンク | 1999 |
| 2148  | Golar Mazo            | インドネシア・台湾       | 136867                  | 球形タンク | 2000 |
| 2117  | Al Jasra              | カタール            | 137227                  | 球形タンク | 2000 |
| 2157  | LNG Jamal             | オマーン            | 136977                  | 球形タンク | 2000 |
| 2162  | Lakshmi               | オマーン            | 137248                  | 球形タンク | 2001 |
| 2163  | ABADI                 | ブルネイ            | 136912                  | 球形タンク | 2002 |
| 2165  | Puteri Intan Satu     | マレーシア・ティガ       | 137100                  | メンブレン | 2002 |
| 2172  | Galea                 | シエル             | 136600                  | 球形タンク | 2002 |
| 2173  | Gallina               | シエル             | 136600                  | 球形タンク | 2002 |

| 建造中  |    |           |                         |       |           |
|------|----|-----------|-------------------------|-------|-----------|
| 船番   | 船名 | プロジェクト名   | タンク容積 (m <sup>3</sup> ) | タンク形式 | しゅん工 (予定) |
| 2169 | 未定 | マレーシア・ティガ | 137100                  | メンブレン | 2003      |
| 2176 | 未定 | 東京電力      | 136600                  | 球形タンク | 2003      |
| 2177 | 未定 | マレーシア・ティガ | 137100                  | メンブレン | 2004      |
| 2183 | 未定 | シエル       | 136600                  | 球形タンク | 2004      |
| 2184 | 未定 | スノービット    | 147200                  | 球形タンク | 2005      |
| 2185 | 未定 | スノービット    | 147200                  | 球形タンク | 2006      |
| 2187 | 未定 | 東京電力      | 136600                  | 球形タンク | 2006      |

表2 最新LNG船の主要目

| プロジェクト名                 | マレーシア・ティガ       | 東京電力    | スノービット  |
|-------------------------|-----------------|---------|---------|
| タンク容積 (m <sup>3</sup> ) | 135000          | 135000  | 145000  |
| タンク方式                   | メンブレン方式 (GT 96) | 球形タンク方式 | 球形タンク方式 |
| タンク数                    | 4タンク            | 5タンク    | 4タンク    |
| BOR (%/d)               | 0.15            | 0.15    | 0.15    |
| 主寸法                     |                 |         |         |
| 全長 Loa (m)              | 276.0           | 290.0   | 288.0   |
| 船幅 B (m)                | 43.4            | 46.0    | 49.0    |
| 型深 D (m)                | 25.5            | 25.5    | 26.8    |
| 喫水 d (m)                | 11.0            | 11.0    | 11.5    |
| 載荷重量 DW (t)             | 66700           | 67900   | 74400   |
| 船速 Vs (Kn)              | 19.5            | 19.2    | 19.5    |

球形タンクLNG船に搭載、現在順調に稼動中である。再液化装置の概要を図2に示す。窒素を冷媒とした効率の高い船用システムを共同開発した。

メンブレンLNG船では、自動溶接機の開発を行い溶接の信頼性を高めるとともに、約70万点の防熱・メンブレン構造の部材を効率良く管理する目的で、工程・品質管理システム“LOGIQ”を開発し実用化した。2002年8月には、135000m<sup>3</sup>型メンブレンLNG船第一船を引渡し、後続船も建造中である。

当社は球形タンク・メンブレン両方式のLNG船を設計・建造した世界初の造船所である。

当社の受注・建造LNG船の一覧を表1に示す。

さらに、他社建造のLNG船も含めた修繕工事でも圧倒的

な実績を誇っており、延命改造工事にも取り組んでいる。

現在建造中の球形タンクLNG船とメンブレンLNG船の主要目比較を表2に示す。最新船の特徴は、

- (1) タンク容積は、135000m<sup>3</sup>型が主流になっているが、更に大型化は進み、世界最大級の145000m<sup>3</sup>型のLNG船も建造中である。
- (2) 球形タンクLNG船については、0.1%/日以下の超低BORも可能で、当社建造船で既に実船に適用している。ただし、現時点では0.15%/日が最も経済的であるとの判断で、0.15%/日が主流となっている。メンブレンLNG船についても、防熱増厚・防熱構造の簡素化で0.15%/日のBORとなっている。
- (3) 船型開発については、CFD(コンピュータシミュ

ル・フルード・ダイナミクス：数値流体力学) 技術を確立してこれを実用化している。CFDを活用した船型・プロペラの最適設計により、短期間で推進性能の高いLNG船を実現できるようになった。高速化と主機出力・燃費低減を同時に達成することが可能となった。

- (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(ボイル・オフ・ガス)を有効に活用することで、運航経済性を高めている。
- (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、詳細な構造・仕様を決定している。特に、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(ディスクリート・アナリシス・メソッド：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疲労構造設計が可能となり、最新船では40年の疲労設計も行われている。
- (6) IAS(インテグレートッド・オートメーション・システム),SMS(シップボード・マネージメント・システム),IBS(インテグレートッド・ブリッジ・システム)等の自動化システムを随所に折り込んで、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船も実用化して、最新の建造船では、ロイド船級協会の環境対策適合証書(EP証書)をLNG船として世界で初めて取得した。

#### 4.あ し た

LNG船では、安全性・信頼性の確保と経済性の向上を両立させることが最大の課題である。長年にわたる安全運航実績から、LNG船の安全性・信頼性は検証済みとの認識で、近年ではLNGチェーンコストの削減が大きな話題として取り上げられている。

液化プラント基地・LNG船・陸上タンクの大型化は勿論として、次世代推進プラントの実用化に向けた開発、さらに、新形式ガス輸送船も提案されつつある。

##### 4.1 大型LNG船

LNG船の大型化による経済性のメリットは、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可能で、大幅に経済性の向上を図ることができる。

例えば、日本・中東間で年間5百万トンのLNG輸送プロジェクトで、船型と隻数の関係は、135000m<sup>3</sup>型で7隻、160000m<sup>3</sup>型で6隻、200000m<sup>3</sup>型で5隻となる。

135000m<sup>3</sup>型を100%として運航コストを比較すると、160000m<sup>3</sup>型で94%と6%改善、200000m<sup>3</sup>型で86%と14%改善を各々図ることができる。

200000m<sup>3</sup>型の試設計例を図3に示す。

大型化した場合の課題は、既存のLNG基地、特に受入れ側の基地との船陸整合である。大型化により、船自体の運航経済性の向上は明確だが、受入れ基地の建設・改造費用も含

|                     |   |            |
|---------------------|---|------------|
| LENGTH (O.A.)       | = | ABT. 330 m |
| LENGTH (B.P.)       | = | 316.0 m    |
| BREADTH (MLD)       | = | 51.0 m     |
| DEPTH (MLD)         | = | 28.7 m     |
| DRAUGHT(MLD DESIGN) | = | 12.0 m     |

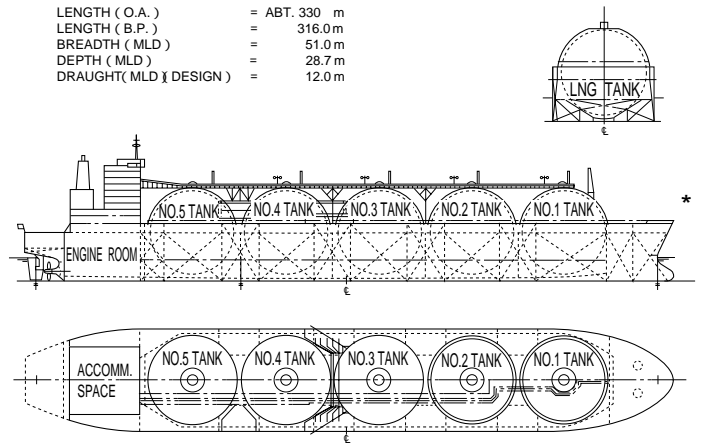


図3 200 000 m<sup>3</sup> LNG 船

めたLNGチェーン全体の経済性を確認する必要がある。現時点では145000m<sup>3</sup>が最大船型と考えられており、当社でも2隻の145000m<sup>3</sup>LNG船を受注し建造中である。

##### 4.2 次期推進プラント

LNG船では、貨物と外気の温度差による侵入熱と、船体運動による運動エネルギーによって、貨物の一部が蒸発ガス(BOG)を発生する。このBOGは蒸気タービン用燃料として利用されている。一方、貨物の一部との見方から、BOGの有効活用をねらった各種プラントが検討されている。

次世代プラントとしては、“ガスだきディーゼル機関”、“コガス(ガスタービン機関+蒸気タービン機関)”、“再液化装置付きディーゼル機関”が検討されている。

“ガスだきディーゼル機関”は、BOGと重油の混焼が可能で、燃料効率も向上するが、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。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点が短所と考えられる。

“コガス(ガスタービン機関+蒸気タービン機関)”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。陸上のコージェネ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向上する。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。

“再液化装置付きディーゼル機関”は、BOGを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処理が分離できる点が長所と考えられる。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、燃料効率も大幅に改善できる。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が、ディーゼル機関の排ガスエネルギーを有効活用することにより、追加燃料を軽減することも可能である。

燃料経済性は燃料油とBOGの価格に大きく左右される。BOGが燃料油に比べて安い場合には、“蒸気タービン機関”が最も経済的であるが、燃料油が高くなるとともに、“ガスだきディーゼル機関”の経済性が高まる場合もある。環境問

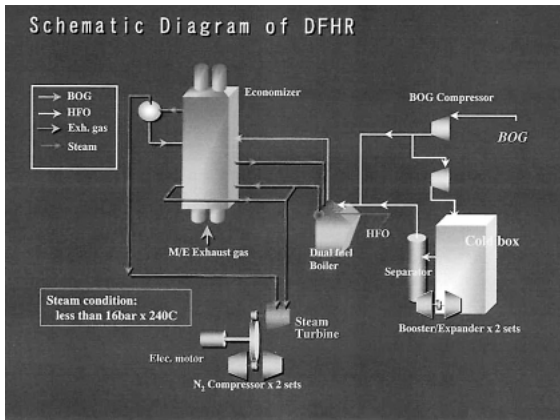


図4 再液化装置付き次世代推進プラント

題を重視すれば、将来“コガス（ガスタービン機関+蒸気タービン機関）”も脚光を浴びる可能性もある。また、BOGが相対的に高く評価される場合には、“再液化装置付きディーゼル機関”の優位性が高まる。

当社では、上記のいずれのプラントに関しても実用化に向けた開発を継続している。蒸気タービン、ディーゼル機関は当社ブランド製品がある。また、ガスタービンについては、艦艇、客船等での実績を持っている。

船用再液化装置については、当社は世界で唯一実績のある装置を開発・実用化しており、次世代推進プラントとして最も注目されている“再液化装置付きディーゼル機関”の最適プラントを提供可能である。その設計例を図4に示す。

#### 4.3 新形式ガス船

将来、天然ガスの輸送形態が変わる可能性がある。新たな貨物として、圧縮天然ガス（CNG）、メタンハイドレート、ジメチル・エーテル（DME）が注目されている。貨物の性状を変えることで、製造・貯蔵・輸送・再ガス化のチェーンコスト低減をねらっている。

各々の貨物の特徴は表3に示すとおりである。

CNGは、高圧で貨物の比重が小さい点が短所であるが、製造・再ガス化コストを大幅に低減できることが特徴である。既存のガスインフラが整備されている地域で、短距離の輸送の場合に経済性の向上が図れるといわれている。

メタンハイドレートは、メタンを氷の結晶で閉じ込めた構造で、LNGよりも取扱いが容易であると言われている。重量当たりの発熱量が小さいことが短所と考えられる。

DMEは、LPG代替燃料として注目されている。LPGよりも比重が大きく、沸点が高いことが特徴で、LPGと類似の設備で取扱い可能といわれている。

当社では、上記の各々の貨物輸送に関する基礎研究を開始している。タンクの構造、材料との適合性、安全性評価等の研究を行い、経済的な専用船を開発する予定である。

## 5. おわりに

1964年にLNGの商業海上輸送が開始されてから、LNGの輸送量は年々増加の一途をたどり、2002年末時点で約130隻のLNG船が運航されている。

表3 天然ガスを利用した新たな貨物

| (単位)                     | LNG   | CNG   | メタン<br>ハイドレート | DME   | LPG   |
|--------------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| 状態                       | 液体    | 気体    | 固体            | 液体    | 液体    |
| 温度 ( )                   | -162  | 10    | -15           | -25   | -42   |
| 比重 (t/m <sup>3</sup> )   | 0.43  | 0.23  | 0.85~0.95     | 0.74  | 0.58  |
| 圧力 (kg/cm <sup>2</sup> ) | ほぼ大気圧 | 210   | ほぼ大気圧         | ほぼ大気圧 | ほぼ大気圧 |
| 低位発熱量 (kcal/kg)          | 12000 | 12000 | 1000~2000     | 6900  | 11100 |

当社は、1962年世界初の低温式LPG船の建造を通じて液化ガス船の技術を確立した。また、1970年代から、球形タンク方式及びメンブレン方式のLNG船技術を導入して、安全性・信頼性・経済性向上のため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船とも世界第1位の建造実績を誇り、お客様の要望に適した最新の液化ガス船を提供しているものと自負している。

さらに近年では、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。当社は、大型化、次世代推進プラント、タンクの改良提案等を行って、お客様の将来ニーズに添った経済船を開発することとしている。

これらの技術開発には、関係先の協力が不可欠である。これまでの関係先のご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) Itoyama, N. et al., A New Generation of Spherical Tank LNG Carrier, LNG9 (1989)
- (2) Ishimaru, J. et al., Study on Propulsion Plants for Future LNG Carriers, LNG 11 (1995)
- (3) Suetake, Y. et al., Proposal of Technical Improvement for Future LNG Carriers, Gastech 96 (1996)
- (4) 湯浅和昭ほか、LNG船の技術動向と将来展望、三菱重工技報、Vol.37, No.5 (2000)
- (5) Yuasa, K., et al., Challenges of Mitsubishi GTT Membrane LNG Carrier, Gastech 2000 (2000)
- (6) Hatanaka, N., et al., A Challenge to Advanced LNG Transportation for the 21st Century - LNG Jamal: New Generation LNG Carrier with Reliquefaction Plant, LNG 13 (2001)
- (7) Ohira, H., et al., Proposals for LNGC Propulsion System with Re-Liquefaction Plant, Gastech 2002 (2002)



難波直愛  
取締役副社長  
船舶・海洋事業本部  
長



珠久正憲  
船舶・海洋事業本部  
船舶技術部長



湯浅和昭  
船舶・海洋事業本部  
船舶技術部  
商船計画グループ長



石丸純史郎  
長崎造船所  
主幹