特　集　論　文

最新鋭大型メンブレン方式LNG船の建造

Building of Advanced Large Sized LNG Carrier of Membrane Type

石丸純史郎[*1] Junshiro Ishimaru
川端喜世和[*2] Kiyokazu Kawabata
森田秀敏[*3] Hidetoshi Morita
一海英文[*4] Hidefumi Ikkai
末竹義弘[*5] Yoshihiro Suetake

世界のエネルギー需要の中で，環境に優しいLNGの取引量は益々増加の傾向にあり，顧客のLNG船に対するニーズも多様化してきている．この環境下，当社はモス型LNG船の建造実績を積み重ねる中で，1970年代から開始したメンブレンLNG船関連の技術開発と修理・改造の経験が評価され，国内初大型メンブレン船６隻を1999年に受注，2004年にかけて建造引き渡した．建造にあたっては，最新の設計・建造技術を活用，新技術を織り込んだ結果，最新鋭の世界最大級メンブレン方式LNG船を玉成した．現在も客先ニーズに応えるべく次期LNG船の開発を継続実施している．

1. はじめに

1964年に始まったLNG（液化天然ガス）の商業海上輸送は，年々増加し，2003年には全世界で約1億2 300万トンに達している．LNGの輸送に従事しているLNG船は2003 年で約150 隻である．当社は1983年以来26隻（内メンブレン船３隻）のLNG船を引き渡しており，現在10隻を建造中で，世界一のLNG船建造引き渡し実績を誇っている．

今回のメンブレン船の建造により，LNG船建造ヤードとして世界で初めて，顧客のニーズに合わせモスとメンブレン両方式の大型LNG船を提供できることになった．

本論文では，タンク方式の特徴，当社の取り組みをレビューした上で，国内初の大型メンブレン船の特徴と開発，設計，建造実績につき報告するとともに将来動向についても言及する．

2. LNG船のタンク方式とメンブレン船の特徴

LNGは，ほぼ大気圧で約－160 ℃の超低温と低比重（0.43 ～0.50）である性質を有する．この性質に適した各種の貨物タンク方式が実用化されてきたが，経済性・信頼性の面から，現在では球形独立タンク方式とメンブレンタンク方式が主流となっている．輸送貨物を収納する方式が１方式に統一されず，複数存在するという点において，LNG船は他の貨物運搬専用船とは違ったユニークな船である．

2.1　タンク方式の比較と特徴（モスとメンブレン）

各タンク方式の特徴につき簡単に述べる．詳細については参考文献（1）を参照されたい．

(1) 球形独立タンク方式（モス方式）

球形独立タンク方式は，円筒形の支持構造（スカート）により自立球形タンクを船体に固定した構造となっている．タンクの液荷重は自立タンクに作用する．当社ではこの方式に改良を加えつつ現在まで，23隻を建造引き渡してきた．最近の動向としては，スエズ運河通行料の減少を目的としたスエズ減トン対策，また容積効率の向上を狙ってタンク赤道部に円筒部を挿入する形のストレッチタンクが実用化されつつある．

(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り付けてその表面をメンブレン（金属の薄膜）で覆った構造となっている．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ある．貨物液の荷重は防熱材から船体に直接作用する．本方式にはガストランスポート式とテクニガス方式，更に後述するCS-1（Combined System）と呼ばれる方式がある．メンブレン方式は甲板がフラットでモス方式に比べ相対的にコンパクトな船型となる．最近，メンブレン船の積付液レベル制限とタンク長さ制限の緩和が要望されており，タンクに作用するスロシング荷重推定の精度向上を目指してGTT社（ガストランスポート・アンド・テクニガス社），船級及び造船所が検

[*1] 長崎造船所所長室主幹
[*2] 長崎造船所造船設計部主席
[*3] 長崎造船所造船設計部船装設計課主席
[*4] 長崎造船所香焼工作部機電課長
[*5] 長崎造船所造船設計部主席

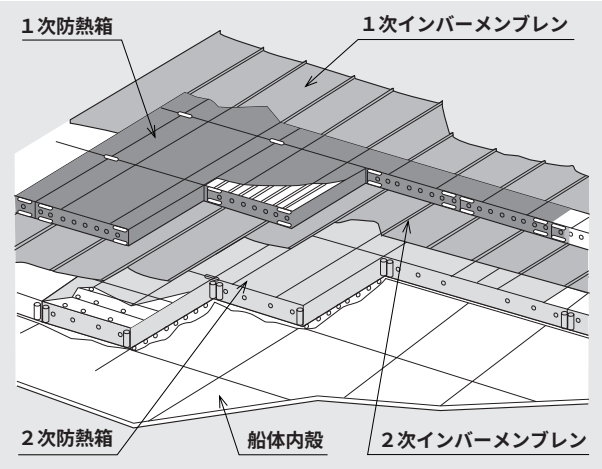

図1　ガストランスポートNO96防熱方式構造図

討を実施し，一部実用化されつつある．

今回当社が設計・建造した大型メンブレン船はガストランスポート方式である．本方式は，**図1**に示す様に，厚み0.7 mmのインバー材（36 %ニッケル鋼）を1次及び2次メンブレンとした二重構造となっている．防熱箱も二層構造となっている．防熱構造のトータル厚みは約530 mmで，BOR（Boil Off Rate）0.15% per dayの断熱性能を有する．

3．メンブレン方式LNG船への当社の取組

当社はその建造実績から，従来モス建造ヤードとして見られてきた．しかしながら，当社のメンブレン方式LNG船への取り組みはモス方式よりも早い．1969年テクニガス方式，1973年ガストランスポート方式の技術導入を順次行いこれらの各方式について現在まで継続的に各種改良技術の開発を行ってきた[(1)(2)]．実現には至らなかったが，1970年代後半のカリンガスプロジェクト及び1980年代前半のノースウェストシェルフプロジェクトではメンブレン方式の開発を実用レベルで行ってきた．修繕船の分野でも，1973年以降，長期メンテナンス契約を順次結び，ガストランスポート及びテクニガス両方式のメンブレン船の修繕工事を継続的に行っている．

4．大型メンブレン船の建造

1999年マレーシア・ティガプロジェクト向けに当社がリードヤードとなり，6隻の大型メンブレン船を受注した．大型船の建造実績は無かったものの，長年のメンブレン船への取り組みと設計・建造技術力が評価されての受注となったものである．国内初の大型メンブレン船の開発・設計・建造にあたっては，当社の研究開発部門，造船設計部門及び建造部門の総力をあげて取り組んだ．新製品を設計・建造する困難さはあったが，最新鋭の世界最大級メンブレン船3隻を高い完成度で引き渡しすることができた．以下にその概要を述べる．

4．1　基本コンセプト

本船の開発・設計に当たって以下を基本コンセプトとした．

① 容積効率，推進性能（燃費）で世界最高水準とし，運行採算性に優れること．
② 貨物格納システムの品質を確保すること．
③ 就航後の客先の使い勝手，メンテナンス性に優れること（具体的には，安全・確実・容易にオペレーション及びメンテナンスができる仕様，配置になっていること）．

4．2　設計(基本計画,性能,構造,艤装)上の特徴

(1) 基本計画

図2に本船の配置，**表1**に主要目を示す．主寸法の選択に当たっては，コンパクト性に優れるメンブ

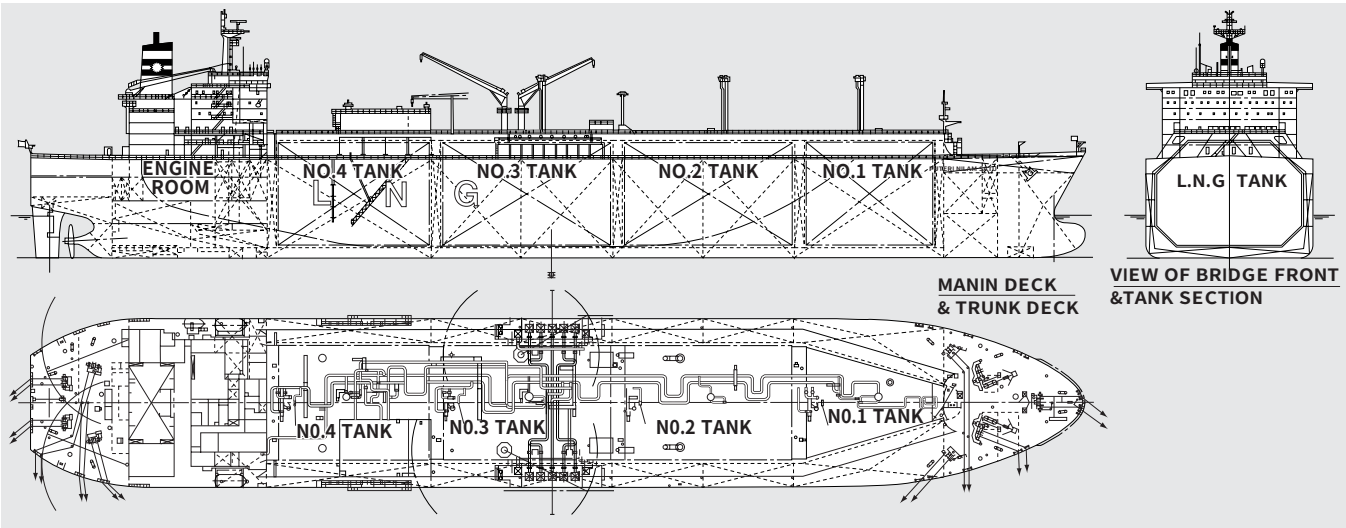

図2　“PUTERI INTAN SATU”概略配置図

表１ “PUTERI INTAN SATU”要目

主寸法	
全　　長　（m）	276.0
型　　幅　（m）	43.40
型 深 さ　（m）	25.50
満載喫水　（m）	12.01
載貨重量及びトン数	
計画喫水における載貨重量　（t）	76 110
総トン数（国際）	93 038
ネットトン数（国際）	27 911
貨物タンク容積	
（100％，−163℃）	137 489 m^3
主機	Mitsubishi Steam Turbine ×1set
最大出力	26 800 kW×89.0 rpm
常用出力	24 120 kW×85.9 rpm
主缶	Mitsubishi Water Tube Boiler×2sets
最大蒸発量	60 000 kg/h per set
発電機	
タービン発電機	2 900 kW×２sets
ディーゼル発電機	2 900 kW×１set
速力及び航続距離	
運行速力　（kt）	約 19.5
航続距離　（s.mile）	約 15 000

レンの特徴を最大に生かしつつ，良好な推進性能を確保することを考慮し決定した．タンク形状は異形防熱箱の数がミニマムとなる形状となる様工夫している．またNo.2, 3, 4タンクの断面形状を同一とし，防熱作業の容易性に配慮している．

(2) 推進性能と燃費

球形タンクとメンブレンの方形タンクとでは，自ずとそれを収納する船体の最適船型は異なる．このため，水槽でのモデルテストに加え，CFD（Computational Fluid Dynamics）を駆使してメンブレン用の最適な船型を開発した．**図３**にCFDによる船型改良例を示す．また高効率でかつ過大な変動圧力が生じ無いようプロペラの最適設計を行った．本船のタービンプラントは客先の要望によりメンテナンスを考慮したシンプルな２段給水システムを採用したが，熱効率の改良技術により燃費低減を達成している．

(3) 構造設計

構造強度の検証は**図４**に示す全船ＦＥＭモデルによって実施され応力及び座屈クライテリアを満足することを確認した．疲労強度についても，防熱層とバラストタンク境界の重要箇所である内殻の構造不連続箇所を中心に詳細部分ＦＥＭモデルによる解析を実施，確認済みである．上記解析に対し，ロイド船級協会（LR）の最新の構造解析ノーテーションである，SDA （Structural Design Assessment：応力・座屈評価），FDA（Fatigue Design Assessment：疲労評価）を取得した．さらに当社独自で開発した波浪中船体応答解析手法であるDISAM（DIScrete Analysis Method）を用いて，本船の当該航路の波データに基づくスペクトル解析を別途実施し，疲労強度を確認している．

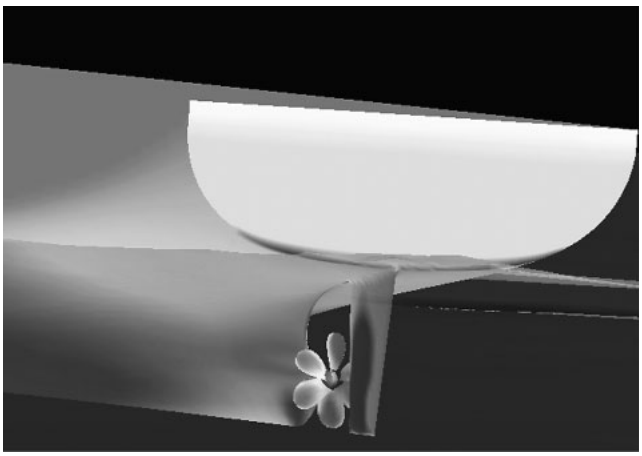

図３　CFDによる船型開発（自航要素の推定例）

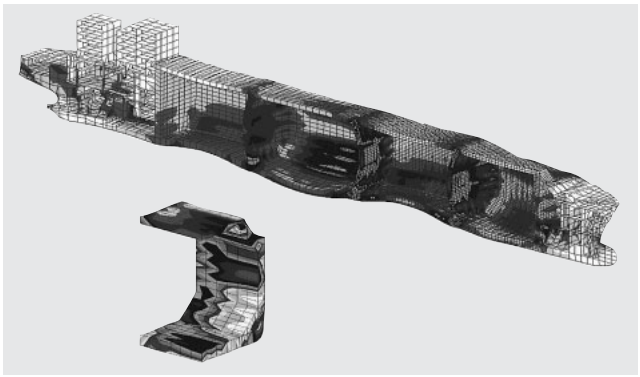

図４　全船FEMモデルによる強度，疲労解析（変形量は誇張して表示）

(4) 艤装設計及び自動化

甲板上，甲板下のパッセージ，機関室等の配置設計に当たっては，交通性，メンテナンスに配慮した．電線，配管は将来のメンテナンスを考慮しできるだけ暴露部配置を避け，材料の選定，塗装仕様にも長期耐用を考慮する等，細心の注意を払って設計した．貨物配管配置設計は，配管応力計算を実施し十分な信頼性確保した．**図５**に本船の甲板上配管配置を示す．

またメンブレン船特有のタンク内構造であるトリポッドマストについては，全ての使用条件にて過大な応力が発生しないことを当社独自で検証した．

自動化システムはモス方式で培ったノウハウをベースにメンブレン方式の要素を織り込んで，貨物オペレーション等の操作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バラスト水置換の自動化システムを装備している．

図５　甲板上の配管艤装

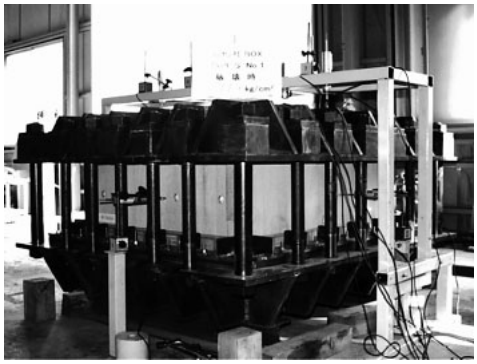

図６　防熱箱強度テスト

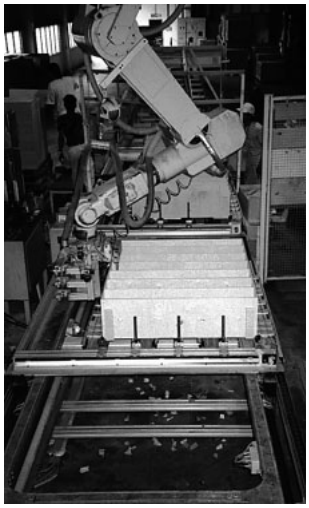

図７　防熱箱製造工場内の側板の取付ロボット

４．３　設計品質の確保

本船の貨物格納設備は構造構成部品が70万点に及ぶ膨大なシステムである．また船殻構造の内殻が貨物格納タンクを構成しているため，船殻内殻構造とその周囲にあるバラストタンクは貨物格納設備を健全に保つ上で充分な品質確保が重要になる．そのため，設計開始約２年前から設計・現場合同のプロジェクトチームを組んで工法／設備の検討を実施した．その過程でFMEAによる被害度分析にて重点検証対象を絞り込み，特に上述の貨物格納タンク内部艤装品，格納設備自体（メンブレン，防熱箱，その他取り付け部品等），その周辺の内殻構造，バラストタンク塗装とバラストタンク内艤装品の品質検証を重点的に推進した．設計開始後も事前検証時の対象項目から約100 件のフォロー対象項目を取り上げ，フォローシステムを組み，実際の設計内容に対応して品質確保に努めた．

４．４　貨物格納設備用資材の製造と調達

ガストランスポート方式LNG船の建造に際しては，１隻52 000個にも及ぶ防熱箱の調達が鍵となる．

(1) マレーシアンコンテントと防熱資材

客先からの要望もあり，マレーシアでの産業の振興・製造技術の育成を目的としてマレーシア製合板を使用した防熱箱をマレーシアで製造する取り組みを行った．マレーシアで産出する樹種の中から数種を選出し，候補となる樹種の合板を数社にて試験製造，各種試験を実施し，最終的にクルイン合板でGTT社承認を取得した．防熱箱はこのマレーシア合板と従来から実績のあるフィンランド合板の組み合わせとした．合板の採用に当たっては，合板単体強度のほか，箱試作による加工性，箱強度試験などを実施した．**図６**に箱の強度試験の様子を示す．

(2) 防熱箱の製造体制

マレーシア工場では，標準箱を主体に全体数の約2/3を製造した．そのため，当社が中心となりマレーシアにおいて現地法人の防熱箱製造会社を設立した．**図７**にマレーシア工場での防熱箱製作風景を示す．一方，日本工場では異形箱を中心とした残り1/3について製造した．

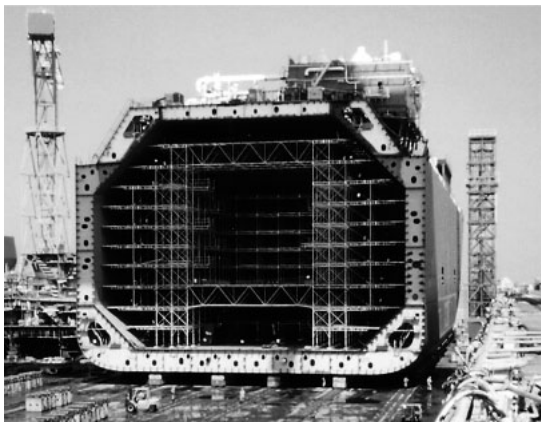

図８　建造中貨物タンク断面　タンク内に設置された防熱施工用足場．

(3) インバー材の調達

インバー材は，従来仏のImphy社の寡占状態であった．プロジェクト第１，２船では，その実績によりImphy社を採用したが，同時に国内２社の製品を部分採用し，加工性，溶接性など施工面のユーザーの視点からの改善に取り組んだ．その結果，プロジェクトの第３船以降は，納期にフレキシビリティがある国内メーカ品を採用した．

以上メンブレン船の要となる貨物格納設備用の資材は従来実績を重視しながらも，顧客のご要望を満足すべく努力した結果，品質・性能を満足する新メーカの資材の開発及び調達を実現することができた．

４．５　工作における物流管理と品質管理

メンブレン方式LNG船のタンク内面の防熱施工作業は船殻構造を固めた後，タンク内に設置された足場の上で施工される（**図８**）．

メンブレン船ではモス型における約40～150 mm

の厚板アルミ溶接の場合とは異なる0.7 mmの薄板溶接技術習熟の問題というだけではなく，

① 70万点を超える大量の防熱資材の物流管理

② 防熱箱・メンブレン取付に対する高度な精度管理

③ 約108 kmに及ぶメンブレン薄板溶接の健全性確認

等の物流・品質管理を確立することが，ポイントになる．以下にそれらについて述べる．

(1) LOGIQ（物流・品質管理システム）

防熱用資材は防熱箱，インバー材，レジンロープ（防熱箱と船体内殻壁との隙間調整用の樹脂材），カプラ（防熱箱取付金物）等，多種類の部品から成りその数は70万点にもなり，全ての部品を確実にコントロールすることが建造の鍵となる．この為，部品の物流と品質管理のために“LOGIQ（LOGIstics and Quality control system）”と呼ばれるシステムを自社開発した．物流システムは，部品を適切なタイミングで適切な場所に送り出すことが要求される．各部品は常に最新の建造スケジュールと照合され，調整・管理されている．品質管理システムで重要なのは，生産から取り付けまでの検査結果等の記録を保持・評価することである．例えば，２次防熱箱は，レジンロープを挟んで船体内殻壁に取り付けられるが，この樹脂の硬化が適正でなければ，後日該当部分の施工やり直しの必要があり，不具合部を特定する為にトレーサビリティが重要となる．このため，LOGIQによりデータと検査結果を保管して，モニターすることにより，トレーサビリティを確実にした．各部品の認識はバーコードで行われ，検査状況は,別モニターで確認できるようになっている．このシステムにより，大量の部品の物流管理と品質管理を効率良く行うことができた（**図９**）．

(2) 高精度の品質管理

カーゴタンク内壁となるメンブレン部に強度上の問題が発生しないよう，その下地をできるだけフラットにし，精度の高いメンブレン溶接を行うことがポイントとなる．そのための品質チェックは，船体内殻壁の平面度チェック，カプラ取付精度，防熱箱高さ精度，メンブレン取付精度，溶接精度など多岐及び大量にわたる．品質管理項目の例を**図10**に示す．

(3) リークテスト

メンブレン溶接長は，全体で約108 kmにおよぶが，溶接部は，目視チェックだけでなく，リークの有無をチェックする必要がある．そのため，メンブレン工事完了後，ヘリウムリーク試験（リーク部分の特定）とグローバルタイトネス試験（タンク全体の気密性の確認）を実施し溶接部の健全性を確認する．ヘリウムリーク試験は**図11**に示すように防熱層に20 %濃度のヘリウムを充填，加圧し，全てのメンブレン溶接部に検知機を走らせ，ヘリウムの漏れを検出する．グローバルタイトネス試験では，防熱層を真空（－800 mbG）状態とし，その圧力を24時間計測して，圧力変化が許容値以内に収まることを確認する．これらは，各タンク・各防熱層毎に実施していく．また，この溶接部の約83 %を占

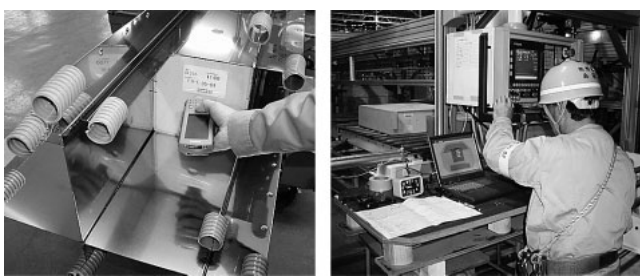

図９　LOGIQ防熱部品質・物流システム　部品バーコード読込とレジンロープ管理.

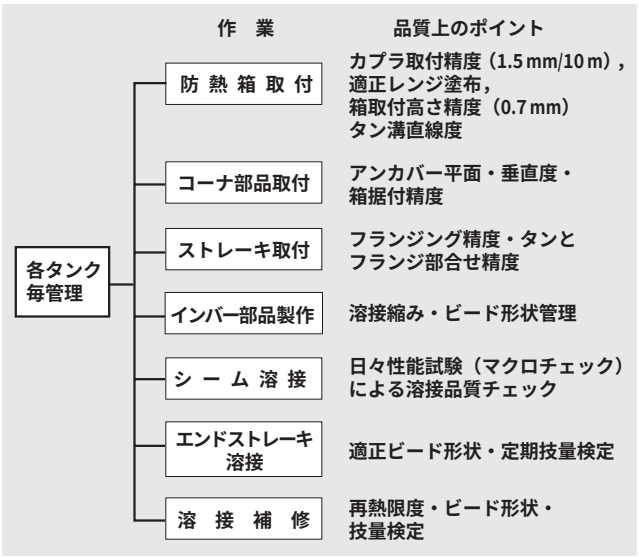

図10　防熱作業における品質管理取組項目

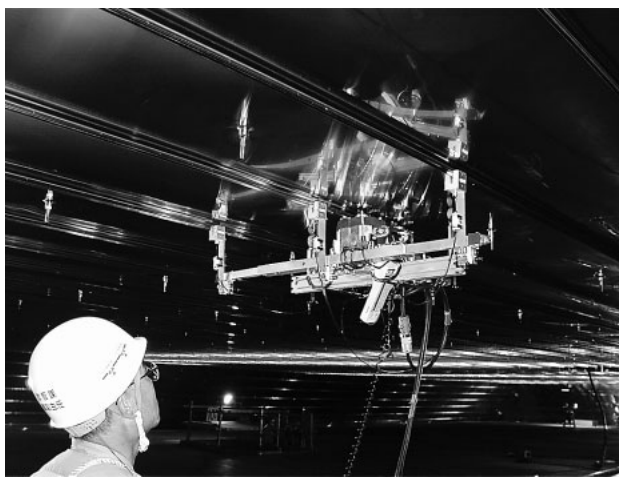

図11　ヘリウムリーク試験検知機

図12　完成した貨物タンク内部

めるシーム溶接部の健全性を事前に確認するため渦流による探傷検査機を自社開発し，事前検査に活用した．**図12**に施工完了したタンク内面を示す．

5．メンブレンLNG船の将来動向

LNG船の将来動向は種々あるが，大型化と新防熱方式につき述べる．

5．1　大　型　化

LNG船の大型化のメリットは，単位輸送コストの低減による経済性の向上にある．現在建造されているLNG船の容積は135 000 m^{3}クラスから145 000 m^3，150 000 m^{3}クラスへと徐々に大きくなっている．更に200 000 m^{3}クラスの商談も進行中である．メンブレン方式は同じタンク容積で比較した場合モス型に比べコンパクトな船型となり，相対的に大型化に適していると言われている．

大型化の課題の一つは既存の基地との船陸整合である．LNGターミナルの制限値を基に一般的に述べると150 000 m^{3}クラスが日本の各ターミナルとの整合も取れ最もフレキシビリティが高い．160 000 m^{3}クラスは数は限定されるが，既存ターミナルとの整合が可能な最大船型となる．それを超えると新設ターミナル用向けとなる．

メンブレン船の大型化のもう一つの課題はスロッシング対策である．現在150 000 ～160 000 m^{3}クラスまでは４タンクで可能であるが，200 000 m^{3}クラスでは５タンクが堅実であるとされている．タンク数の減少を実現させる為には大型化船のスロッシングの評価を今後共継続検討する必要がある．

5．2　新防熱方式CS-1

最近GTT社によりガストランスポートとテクニガス両方式の長所を結合した新しい方式CS-1が開発された．その基本的な構造は，メンブレンにはインバー（ガストランスポート方式），防熱には強化プラスチックフォーム（テクニガス方式），二次防壁にはトリプレックス（アルミシートをガラスクロスで補強した材料：テクニガス方式）を使用している．当社では，GTT社及び船級協会と共同でガストランスポート方式からの変更項目（インバーチューブコーナ構造，コルゲートストリップ，インバー／トリプレックス接着等）を中心にCS-1の技術検証，及びモックアップモデルによる施工検証を実施中で，顧客のニーズに応じてこの方式にて実商談対応可能なレベルにある．

6．ま　と　め

当社は1969年から1973年の間にモスタンク方式及びメンブレン方式のLNG船の基本技術を導入後，安全性，経済性向上の為の各種技術を開発し実船に適用してきた．長年の技術の蓄積を基に今回，国内で初めての大型メンブレン船を建造引き渡した．これにより顧客のニーズに応じて，モス，メンブレン両方式を提供できる体制が整った．今後益々LNG需要の高まる中，LNGを取り巻く環境も変化し，顧客のLNG船に対する要望も多様化してきている．今回の建造経験を活用し顧客に取って魅力的なLNG船を提供できるようチャレンジして行きたい．特に運行経済性というCSの視点で大型化，環境に優しいプラントCS-1に積極的に取り組んで行きたい．なお，本年８月更なる大型メンブレン船（152 300 m^3）５隻の追加受注を果たした．

参　考　文　献

（1）石丸純史郎ほか，LNG船の技術動向と将来展望，三菱重工技報　Vol.37　No.5（2000）

（2）Yuasa, K., et al., Challenges of Mitsubishi GTT Membrane LNG Carrier, Gastech2000（2000）

石丸純史郎

川端喜世和

森田秀敏

一海英文

末竹義弘