

LNG 船の現状と課題

機関科 26 期生 藤原 隆征

1. まえがき

2003 年本誌に“最近の天然ガス海上輸送の動向”の小文を掲載し、この中で LNG の海上輸送の方法と将来展望について述べました。その後、温室効果ガスの排出規制の強化、米国に於けるシェール革命（下注参照）さらに東北大震災での原子力発電所事故などで化石燃料を取り巻く環境が大きく変わりました。その結果、天然ガスの需要が飛躍的に拡大し、LNG 海上輸送を取り巻く環境も変化しています。本稿では最近の LNG 船のタンク方式、運航技術及び新造船情報などについて紹介致します。

（注；米国において、従来は経済的に掘削が困難と考えられた地下 2000 メートルより深くに位置するシェール層の開発が 2006 年以降進められ、シェールガスの生産が本格化していくことに伴い、米国の天然ガス輸入量は減少し、国内価格も低下していきました。これが、いわゆる“シェール革命”であり、エネルギー分野における 21 世紀最大の変革であるとともに、世界のエネルギー事情や関連する政治状況にまで大きなインパクト及ぼしている。）

2. LNG 船の現状

LNG 船は天然ガスを大量に海上輸送するために液体貨物として輸送するために開発された船舶である。LNG の性質は極低温（ -162°C ）であること、比重が軽いこと（0.42 - 0.47）かつ蒸発して空気と混じると危険なガスを作る、この性質が LNG 船の技術の特徴づける。

2.1 LNG 船のタンク構造

LNG 船の歴史は 1950 年代の後半に開始されて、60 年代に最初のアルミ合金の自立角形の中型 LNG 船が就航した。その後、より安い船を提供するという視点からフランスでメンブレン方式が開発され、1969 年にアラスカ産液化天然ガス（LNG）をメンブレン方式の LNG 船が我が国に初めて搬入された。しかしメンブレン方式はスロッシング（タンク内貨液の揺動）でタンクが破損するなどの問題が発生し、信頼性の高いタンクとして実現したのが自立球形方式である。更に我が国において、高度に発達した設計並びに建造技術を背景にして実現したのが、自立角型の SPB(Self-supporting Prismatic-shape IMO type B)である。現在実船に採用されているタンク方式は、図 1 に示す 4 種類である。つまりフランスの技術である 2 種類のメンブレン（GT と TGZ 方式、）と、ノルウェーで開発された

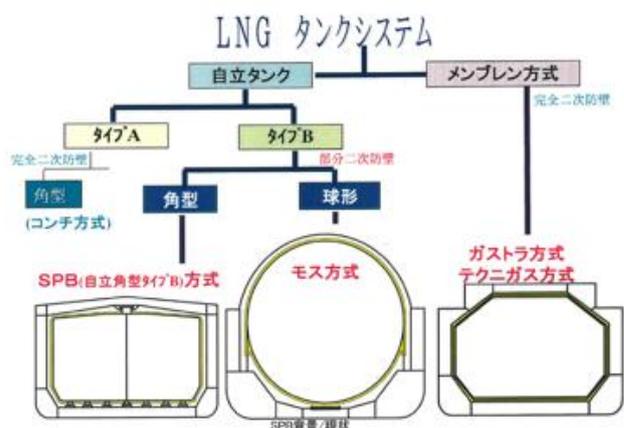


図 1 LNG 船の分類

自立球型方式（モス方式）と、日本の IHI が開発した自立角型方式（SPB 方式）である。これらのタンク方式について簡単に解説する。

(1)GT 方式メンブレン（フランス、GTT 社）

この方式はガストラנסポート社が開発したが、1994年にテクニガス社と合併して新社名を GTT 社とした。開発時のモデル番号は No. 82 であったがその後改造を重ねて現在は GTT No. 96 方式と呼ぶ。タンクは 0.7mm 厚さのインバー鋼材の薄膜（メンブレン）で、温度変形は膨張係数の小さいインバー鋼材自身の内部応力と微小変形で吸収される。保冷はパーライトを詰めた合板箱である。タンクの荷重は合板箱が支え、船体で受ける。船体は二重殻で内殻の内側に二段に取り付けた合板箱それぞれに、インバー鋼材のメンブレンが張られており、内側のメンブレンがタンク、外側のメンブレンが二次バリアーとなっている。隅部のインバー鋼材と船体との取り合い構造など何回か設計変更が行われている。この方式はインバーメンブレンと船体との取り合い構造の開発の歴史と言っても過言でない。開発時の構造はチェア方式と呼ばれ 1965 年から 1982 まで採用され、1983 からインバーチューブ方式と呼ばれる方式が開発され現在に至っている。メンブレン方式はカーゴタンクが負圧に弱いいため、タンクには負圧防止制御（タンクの内外の差圧制御）が装備され、またタンク間にはさまれた船体隔壁の過冷却を防止するための船体加温装置が装備されている。

(2)TGZ 方式メンブレン（フランス、GTT 社）

この方式はテクニガス社が開発、1970-1980 年代マーク I 方式として建造されたが、現在は GTT マーク III 方式が開発された。

タンクは 1.2mm のステンレス鋼 (SUS304) の薄膜でワッフル状に縦横の皺がつけてあり、皺の伸び縮みで温度変形を吸収する。当初は、ステンレス鋼の薄膜が二重に張られる構造だったが、合理化のため、合板とバルサ材で構成される保冷と二次防壁の技術を導入して、ステンレス鋼を一重にすることに成功した。この方式をマーク I と呼称、さらに保冷剤をバルサ材から補強された高密度のポリウレタンフォームに代えて、二次防壁を合板からアルミフォイルを挟んだガラス繊維で補強した強化プラスチックシートの接着構造した。これが GTT マーク III 方式である。

当初、建造ヤードは GT メンブレン方式より建造が難しいと不評であったが、自動溶接の採用、全体の部材数が少ない、防熱厚さが小さい、木材のような天然材料を使はいなどで建造隻数が増えている。

タンクの差圧制御、船体加温装置は GT 方式と同じである。

(3)自立球型タンク方式（ノルウエー、モス社）

IMO タイプ B（下注参照）の承認を受けた方式である。標準船型（150,000m³ 級）のタンクは厚板（平均 40mm-60mm）のアルミ合金製自立球方タンクで、赤道部が支持荷重を受けるため、厚板構造（170mm 位）となっており、ここを円筒状のスカート構造で支持し船体に接続されている。スカートとタンク及び船体の接続は溶接で、スカート部のアルミと鋼材（又はステンレス帯板）とは特殊な接手で接合されている。タンク保冷材と

船体の間には人の通れる保守、点検用の空間がある。タンクの温度収縮はスカートの変形により吸収される。タンク外面にプラスチックフォームの成形された保冷が取り付けられ、保冷表面層がスプレيشールドで、これと底部保冷の下のドリップトレイが部分二次防壁である。球形タンクは内圧には強いが、メンブレンと同様に外圧強度は小さい為、タンクの真空防止制御(タンクの内外差圧制御)が装備されている。

(注:タイプBとはIMO規則の定めるガス船のタンク疲労強度評価の格付けの一つで、船の一生を通じてタンクが漏れないように設計、建造され、厳密な品質管理で設計どおりに制作されていることが確認されたタンクシステムのことである)

(4) 自立角型方式: SPB (日本、IHI)

IMO タイプ B の承認を受けた方式である。タンクは自立角型方式でその外面がウレタンフォーム成形材の保冷で覆われ、船底で支えられ、タンク頂部と底部に移動防止装置が取り付けられている。タンク保冷と船体内殻の間には保守、点検用の人の通れる空間がある。

タンク支持は断熱性強化材のブロックで、タンク底部を支える。移動止めはタンク付きのブロックを、船体付きのガイドでライナーを介して受けるブロックガイド方式が採用される。タンクの移動は止めるが、温度変形は拘束しない。

自立球型方式と同様にタンク付き保冷の表面層がスプレィシールドで、これと保冷下部のドリップシールドが部分二次防壁である。タンク内には、必要に応じてスロッシング防止の制水隔壁が設けられる。

この方式の源流はコンチ方式である。1959年にコンチ社がメタンパイオニア号を実験船として完成させて、米国のレークチャールズから英国キャンベイ島基地に、大西洋を横断して、LNG輸送に成功させた。

その後、英国で大型 LNG 船メタンプリンセス号、メタンプログレス号(1964)が建造されたが保冷と二次バリアの設計不良に加え、規則制定に伴う負担増などで市場から消滅した。IHI は板骨構造の強度分野で船の一生にわたってその強度を保証する手法を設計分野、工作分野、品質管理の各方面から確立することに成功してこの方式で IMO タイプ B の承認をえた。

2.2 標準船型とタンク方式

LNG 船も原油タンカーと同様に大型化の歴史である。1959年にタンク容積 5,000m³ 級が登場、1960年代の 25,000~40,000m³、そのあと 70,000~140,000m³ へと大型化された。この後、カタール国が米国へ輸出向けにカタールフレックス船型、Q-flex(31隻) / カタールマックス船型、Q-max(14隻)が建造された。

Q-flex は全長 315m 幅 50m、タンク容積 210,000m³。韓国造船所で 2007 に竣工した。引き続き Q-max、全長 345m、幅 54m、タンク容積 260,000m³ 建造された、いずれもメンブレン方式である。この船型はスエズ運河通航の最大船型である。この船隊はシェール革命で米国へ配船することはなかった。我が国に Q-flex は特定のバースに配船されている。この巨大な二船型の船隊は世界のほとんどの受け入れ基地で接岸できず、有効に活用されるこ

と無く現在ほとんどの船が係留されている。

現在は、プロジェクトの年間輸送量を考慮して、150,000m³ から 180,000m³ サイズのカーゴ容積の LNG 船が主流となっている。

2016年に開通した新パナマ運河の通過を想定して、新パナマックスとし船幅規定 (B<49m)、170,000m³ 型が建造。

航路によって次の大きさを分類する文献もある。

+東京湾マックス (150,000m³ 級)

+大西洋マックス (165,000m³ 級)

+新パナマックス (177,000m³ 級)

+カタールマックス (266,000m³ 級)

IGU 2017World LNG Report のレポートによると、2016年の世界の LNG 船の船腹数は 439 隻、さらに現在建造予定の船を加えると 2019 年で船腹数は 556 隻と予想される。タンク方式の割合はメンブレン方式 73%、モス方式 27%である。

2016 年のタンク方式の割合はメンブレン方式 70%、モス方式 30%(含む SPB 方式 2 隻)である。

2.3 ボイルオフガスとボイルオフ率

LNG の蒸発 (ボイルオフ) を防ぐのが防熱の本来の目的である。防熱はまた LNG 冷熱により周囲の船体鋼材が過冷却されて脆化することを防ぐ。タンク防熱を施工しても完全に入熱を防ぐことはできず、入熱によりボイルオフガス (BOG) が発生する。この BOG はタンク圧を上昇させるので燃焼又は再液化など処理が必要になる。ボイルオフは LNG 成分の沸点の低い窒素、メタンが他の炭化水素より速く蒸発する。長期間貯蔵すると重い炭化水素が増えて、密度や比重が大きくなる。この現象を濃縮 (weathering) という。

ボイルオフ率 (Boil-Off Rate , BOR) は外気 45°C-海水 32°C の外気条件で、一日に発生する BOG 量をタンク容積の%で示す。1990 年代は各タンク方式とも BOR は 0.15% /日 が採用された。このレートは満船時に適用される、バラスト航海時の少量残液の場合は適用されない。積載量 100,000m³ で ROB・0.15%のタンクから 150m³/日の LNG が発生する。

後述するが、最近では各タンク方式とも ROB の実現可能な最低の数値 0.08 ~0.06%/日と発表している。

2.4 LNG タンクの積み付け制限

メンブレン LNG 船はタンクの間中液位の積み付けを禁止している。これは中間液位でスロッシング (船体運動とタンク内液運動の共振) によるタンク内壁とタンク内艀装品の破損事故を起こしたため液の動きを抑止するために設けられた制限である。球形タンク方式は内部骨材がないのでスロッシングの問題があるが、多少の補強 (板厚の増加) により積み付け制限を回避できると言われている。

IHI-SPB 方式は方形タンクで制水隔壁、内部骨材が取り付けられているのでスロッシングの問題はない。

メンブレン船はこの制限のために積み荷中・揚げ荷中の緊急離棧、積荷量の調整、多港揚げ

などの要請に対応できないので、運航能率のみでなく安全運航にも影響がある。特に最近問題になっている巨大津波発生時、緊急避難が現行国内法では対応できない。

2.5 主機関とガス燃焼

LNG 船の推進プラントは運航開始以来、混焼ボイラーを用いた蒸気タービン推進プラントが採用されてきた。これは安全運航を最優先で、燃費改善のために派生するであろうリスクを恐れたと思われる。2000 年代に入って経済的側面より燃費向上の要請が高まり、二元燃料焚きディーゼル機関、DFD (Dual Fuel Diesel)が開発され 2004 年に DFD 電気推進 (DFDE) の LNG 船が竣工した。これを契機に蒸気タービンに代わってディーゼル機関が主体となった。DFDE 船は低速航海時に余剰 BOG 処理するためのガス燃焼装置、Gas Combustion Unit (GCU) の装備が必要となる。本稿では最近の推進プラントの概要について述べる。

1. DFDE 二元燃料ディーゼル機関電気推進方式

155,000m³ 船の場合、中速ディーゼル発電機 4 基で 2 基の電動モーターに給電して一軸のプロペラ軸を減速機で駆動する。GCU の設置を要す。総合熱効率が 25%~30%従来の蒸気タービンより向上する。

2. TFDE (Tri-Fuel Diesel Electric) 三元燃料ディーゼル機関電機推進

重油、軽油及びガス燃焼が可能なディーゼル機関で発電機を駆動する。電動モーター 2 基でプロペラを駆動する。GCU 設置要す。本方式は今後の新造船の約 30%に採用予定とある。熱効率は DFDE と同じ。

3. DRL or SSD (Slow Speed Diesel)with BOG Re-liquefaction

再液化装置付ディーゼル機関

大型低速ディーゼル重油専焼機関なので、一般商船に採用される主機関である。BOG は再液化されてカーゴタンクに戻す。これは LPG 船と同じ方式である。カタールプロジェクトの Q-max、Q-flex 全船この方式が採用されている。この方式は燃料油燃焼の為環境問題に加えて燃料の自由度がない。再液化に必要な電力が大きいなど問題がある。現在はこの方式の LNG 船の計画はない。

4. ME-GI (M-Type Electronically Controlled, Gas Injection)

低速ディーゼル二元燃料機関 (高圧)

大型低速ディーゼル機関でガス専焼・重油専焼のいずれも選択できる。

ガス燃焼を高圧噴射するため熱効率が高い。直接燃料ガスを噴射するために機関入り口で 30MPa (300 気圧) のガス圧力が必要となる。この高圧ガスを作る方法として、現在、高圧 LNG ポンプを採用する方法と高圧ガス圧縮機を採用する方法の 2 つがある。主流は高圧 LNG ポンプ方式が採用されている。この場合 BOG 処理のため再液化装置または GCU の設置が必要となる。DFDE 方式より 15~20%燃料消費を節約できる。2017 以降の新造船の約 40%がこの方式を採用予定である。

5. X-DF(Dual Fuel Slow speed Diesel)

低速ディーゼル機関二元燃料機関（低圧）

E-GI 方式と同じであるが、ガス燃焼に低圧噴射を採用しているので艤装品の管理が容易である。熱効率は若干低下する。GCU 設置が必要。

6. UST/RST(Ultra Steam Turbine / Reheat Type Steam Turbine)、
AST (Advanced Reheat Steam Turbine)

再熱式蒸気タービン

従来の蒸気タービンの蒸気条件は60気圧、515℃であるが、再熱方式では100気圧、560℃を採用することで熱効率を13%向上できると発表。今後の新造船はこの方式を採用されるよう従来蒸気タービンは姿を実質的に消すことになった。高いスキルを要求されるエンジニア確保の問題もあり評価は高くない。

7. STaGE (UST and DFD Electric Propulsion System

UST と DFD の二つの方式を組み合わせた三菱重工の提案である。

航海状況に応じて二方式のプラントをそれぞれの特徴を生かして運用できるようである。GCU の設置は不要となる。総合熱効率は格段に改善するとある。今のところ建造予定は無い。ハイブリッド自動車の発想。

現在 LNG 船の推進プラントとして採用されているリヒートタービン(AST)、二元燃料燃焼中速ディーゼルを採用した推進方式 (DFDE) と ME-GI 機関との経済性評価を行った結果を図2 (日本マリンエンジニアリング学会誌) に示す。

図3は主推進機別の一日当たりの燃料消費量の比較である。

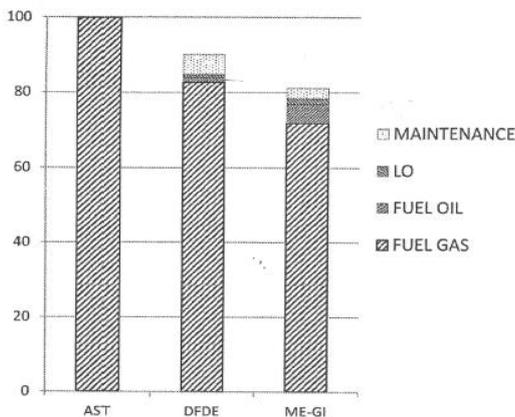


図2 運航費用の比較

Propulsion Type	Fuel Consumption (tonnes/day)	Average vessel capacity	Typical Age
Steam	175	<150,000	>10
DFDE/TFDE	130	150,000-180,000	<10
ME-GI	110	150,000-180,000	<1
Steam Re-heat	140	150,000-180,000	<1

図3 主推進器別燃料消費量の比較

2.6 LNG のガスオペレーション

LNG 船はタンク方式に応じ航海中さまざまなガスオペレーションが行われている。更に、定期的に造船所に入渠し、検査や修理工事を実施するために、ガスフリーの状態にする。これら一連の作業を LNG 船のガスオペレーションと呼んでいる。この基本的な運航サイクルを図 4 に示す。

2.6.1 LNG 船の通常の運航サイクル

1. 積み荷航海 Loaded Voyage

積み荷役の前は定められたチェックリストに従って、タンク圧、温度その他荷役設備の点検調整を行う。タンク温度が高いと BOG が大量に発生して積み荷時間が長くなる。積み荷量は 98.5% が標準である。

航海中は液の気化蒸発 BOG が発生してタンク圧が上昇するので、機関室のボイラー、主機関などで燃焼処理してタンク圧を規定値に維持する。

タンク圧の制御は液温度管理の為にも重要である。

メンブレン船は内殻に発生するコールドスポットの点検をバラスタンク及びコックアダム側より実施する。このコールドスポットは内殻に取り付けられている防熱箱の破損などで鋼材表面にアイスが成長することがある。この点検は最も重要な作業でルール of the 要求でもある。もし放置すると低温脆性で鋼板の亀裂事故に発展する。更にメンブレン船は一次・二次隔室の圧力・温度・ガス濃度など厳重に監視する必要がある。隔壁漏れの早期発見のため。

2. 空荷航海 Ballast Voyage

揚げ荷完了後、各タンクに航海日数及び重油燃料の燃焼計画など考慮して、残液量(ヒール)を決定する。メンブレン船で重要なことは積み付け制限を遵守すること。

BOG の発生量は少ないので、タンク温度の管理も兼ねてスプレイポンプでタンク圧コントロールを実施する。モス方式は赤道部分の温度を一定に維持するために、一定間隔でスプレイポンプで冷却(-110℃) する必要がある。更にタンク内圧とホールドスペース間の厳しい差圧制御が要求される。

他のタンク方式はタンク温度維持のためのヒールは必要ない。積み荷航海と同じようにタンク圧力、温度・隔室のガス濃度の監視は重要。

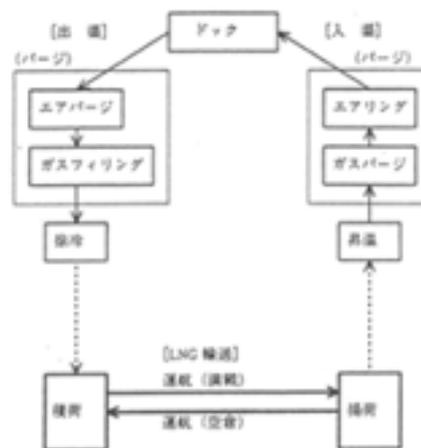


図 4 LNG 船のガスオペレーション

2.6.2 ガスフリー オペレーション

1. ウォーミングアップ オペレーション Warming Up

揚げ荷時に残液量（ヒール）を最少限にするためのヒールアウトオペレーションを実施する。メンブレン方式の 150,000m³ 船型で残液量は平均 50m³～100m³、他の SPB 方式とモス方式は構造的に 20m³ 程度。

ウォームアップは大容量ガスコンプレッサー（HD）で LNG ベーパーを加熱器で温度 80℃まで上げてタンク内で循環する。タンク方式で異なるが、内壁の温度がプラス 5℃まで加熱する。

所要時間はアルミタンクで約 50 時間、メンブレンは約 40 時間である。

2. イナーテイング Inerting

タンク内ベーパーをイナートガスで置換する。イナートガスは比重が重いので、比重差置換方（ピストンフロー）で効率よく置換できる。

タンク内でガス濃度がほぼ 0% で完了。

所要時間は約 15 時間から 20 時間である。

3. エアレイテイング Aerating

タンク内検査ができるようにイナートガスをドライエアーで置換する。

両気体の比重差がほぼ同じなので、拡散置換で実施する。

タンク内の酸素濃度、残存ガス濃度が規定値に達すれば完了。

所要時間はモス方式・メンブレン方式はいずれも 20 時間、SPB 方式は骨構造の為 30 時間要す。

4. イナーテイング Inerting

乾燥空気をガッシングアップする際に、空気・メタンガスが混合して燃焼範囲にならないように、イナートガスで空気を置換する。積地基地向かう海上で行う。両気体の比重がほぼ同じであるので、拡散置換方で行う。

タンク内の酸素濃度が 3% 以下で完了。

5. ガッシングアップ Gassing up

積地ターミナルで陸側からベーパーを受けてイナートガスを置換する。ベーパーの供給ができない場合は、少量の液を受けて本船ベーパーライザーでガス化する。更にヒーターで 20-30℃まで加熱する。イナートガス中の炭酸ガスが約マイナス 80℃で固体化するので、十分に置換する必要がある。

所要時間はモス方式・メンブレン方式は 20 時間、SPB 方式は 15 時間（積み荷パイプの配管の違いによる）

6. イニシャルクールダウン Initial Cool Down

積み込み時に過度の熱応力、大量のボイルオフガスの発生を避けるために、所定の温度までマニュアルに従って徐冷する。

クーリングダウン作業は陸からの液をタンク内のスプレイノズルで噴射させて行う。発生したベーパーは本船のコンプレッサー(H/D)で陸側に戻す。

所要時間はモス方式・SPB方式は約20時間、メンブレンは15時間。

3.0 LNG 船の運航課題

3.1 大型 LNG 船の衝突事故

大型 LNG 船（総トン数 94,446 トン、メンブレン方式）と小型 LPG 船（総トン数 2,997 トン）の衝突事故が 2013 年 1 月 10 日東京湾内で発生した。LNG 船は揚げ荷を終えて水先人 2 名による水先の下、エスコートボート船 2 隻を先導させ中の瀬西方海域に向け航行中、LPG 船は、船長ほか 13 人が乗り込み積地の鶴見航路の水先人乗船地点に向け北進中に両船が衝突した。LNG 船は中央部外板凹損と約 10 メートル長さの亀裂と 2 メートルの開口を受け、LPG 船は船首部外板と球状船首が圧壊を生じたが、両船ともに死傷者はいなかった。運輸安全委員会の調査報告書によると、原因は水先人と両船の船長を含む全員が相手船の進路を見誤った操船ミスに因る。航路管制を行っている東京マーチス（東京湾海上交通センター）について言及されていない。東京湾内での LNG 船の初めての衝突事故となった。

3.2 カーゴタンクのスロッシング事故

アラスカプロジェクトの第一船が最初の空荷航海中、一番タンクに液位 4m 程度ヒールとして残していた液のスロッシングにより、タンク内のケーブルトレー等が破損離脱してタンク内に散乱、メンブレンの損傷に至った。この結果一次メンブレン（Primary Barrier）から漏洩が発生した。損傷は保冷箱の破壊、ポンプのベルマウスの変形、一次メンブレンの全底面と高さ 3 メーター側面の変形破孔など甚大な事故となった。この時点でヒール量が影響していることは理解できていたが、安全なヒール量は把握出来なかった。翌年姉妹船が竣工して、ヒール液位 3m で航海中にほぼ同じ程度の事故が発生した。これが LNG 船の歴史で初めてのスロッシング事故でタンク内に液運動を抑制する構造の無いタンクのスロッシング現象の確認事故となった。両船は US コーストガードと米国船級協会の指示で積み荷制限が設けられた。

(図 5) (a) 垂直方向スロッシングは、横又は縦揺れによって生ずる定立波 (Standing Wave), (b) 水平方向スロッシングは、進行波 (Travelling Wave), (c) 回転状スロッシングは、液体の渦巻き運動 (Swirling) によってそれぞれ生ずるものである。

このスロッシング事故は未だに台風接近時の港長による港外シフト命令、船員の認識・

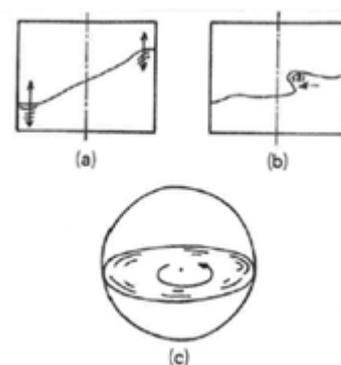


図5 スロッシングを生じる流体運動

経験不足などで未だ事故は止まらない。メンブレン船の大きな運航阻害になっている。

3.3 メンブレンタンクの漏洩

メンブレン方式は液密と保冷を内殻の内側で行っているため、もし液漏れが起こると船体構造部材に接触する。この事象の対策として、バラストタンク、ヒーティング装置等の対策を講じている。液格納装置（カーゴ コンテイメント システム）は構造的に変形に対して弱いため船体の変形量を少なくするため剛性を独立タンク方式のLNG 船より強く建造される。メンブレン方式の課題を以下指摘する。

1. 二次メンブレンの漏れ場所の確認方法が確立されていない。
2. ガス オペレーション中に事故が多発する。詳細は次項。
3. コールドスポット点検をマニュアル通り実行することは、天候、就航路などの制約があり困難。

3.4 ガスオペレーション中の事故

代表的な事故例を以下に示す。

1. ウォームアップ作業中に一次隔室とタンク間の差圧コントロールを間違えてがえて一次メンブレンが剥がれた。原因は遠隔圧力計の誤表示に因る。
2. イナーテイング作業中に冷却海水を含んだイナートガスをタンクに供給した。揚げ荷後、液ラインのストレナー内に大量の氷塊と錆び片が発見された。これは海水の氷結と管系内の腐食によるものであった。原因はイナートガス発生装置の露点計の故障に因る。
3. 二次隔室のページ中に背圧超過となり二次メンブレンを膨らませた。修理は一次・二次メンブレンともに張り替えることになり費用、時間共に大きな損害となった。原因は安全弁の故障であった。
4. ウォームアップ作業中に一次隔室内に漏れた液が残っていて、爆発的な膨張があり、一次メンブレンが捲るように剥がれた。

これらの事故はメンブレン方式の代表的な例で、いずれも最近発生した事例である。

3.5 燃焼用 LNG と重油の選択

2016年10月に開催された国際海事機関(IMO)の海洋環境保護委員会は新しい燃料硫黄分規制を2020年1月1日から発行することを決めた。これにより一般海域においても硫黄分濃度規制値を現在の3.5%から0.5%へ強化される。この代替燃料としてLNGへの転換も検討されている。既に欧州ではLNGを燃料とする船が就航している。ノールウェイの船級協会(NV)によると102隻稼働中で108隻建造予定とのことである。推進システムの効率化に伴い、これまで標準的に採用されてきた0.15%/日では自然蒸発ガスを処理できなくなってきた。自然蒸発ガスと推進システムのガス消費が極力バランスするように、カーゴタンクの防熱性能を見直すことになった。最近の発表によると、各タンク方式ともおおむね0.08%/日を提案している。

推進プラント項で述べた如く LNG 燃焼を選択しない LNG 船も就航しているが、現時点ではこの方式の新造船の計画は無い。

IMO の専門家部会の事前予測では、2020 年の低硫黄重油 (0.5%以下) の価格は 595 ドル/トンで現在の 1.4 倍程度に上昇するとみられる。これは LNG 燃料の方が 10-20% 調達コストが安くなることを意味する。

LNG は化石燃料の中で一番環境に優しいと言われている、LNG 船は燃焼用燃料に最大限使用すべきであろう。

3.5 緊急離棧の対応

東北大震災以降、海上保安庁の要請指導の下で LNG 船の緊急離棧訓練が全てのターミナルで実施されている。訓練は震災時に手配可能な状況を想定して、例えば水先人 (パイロット) 不在、タグボート 1 隻、揚げ荷アームの緊急離脱システム ESD (Emergency Release System) の作動など、各ターミナルで操船シミュレーターによる実証実験が実行されている。

国内のターミナルは伝統的に入船着棧で建造されているので離棧が難しい。

出船着棧に改造すれば緊急離棧の現実的な議論が可能になると思われる。この問題は長い間議論されているが関係者の合意が得られなく現在に至っている。

構造的に緊急離棧が難しいメンブレン方式船も含めて、運用面での法整備が急がれる。

4.0 結び

LNG 船の大量建造時代を迎えて、2000 年代初めガス焚きディーゼル機関の開発、低ボイルオフレート (BOR) の実現などの技術的進歩は時代の要請であった。LNG 船の平均稼働寿命は 40 年前後と言われている、400 隻以上のタービン船を今後 20 年間近く維持管理しなければならない。高いスキルを要求されるエンジニアの確保、製造中止になったタービン機関の保守管理など多くの課題を解決しなければならない。

LNG 船の歴史は長い時間をかけて安全運航指針を確立した、その結果、大きな災害を伴う海難は今日まで発生していない。運航に関わる関係者のご努力に感謝しつつ終わります。

(参考文献)

- 1) よくわかる天然ガス—日本エネルギー学会
- 2) ME-GI 機関を搭載した LNG 船の紹介—日本マリンエンジニアリング学会誌
- 3) IGU 2017 World LNG Report