

LNG の海上輸送における最適タンクの考察

村上知弘 *， 甲田拓己 **， 池田真吾 *， 佐藤圭司 ***

Study of the Most Suitable Tank for the LNG Carriers

Tomohiro MURAKAMI * ， Takumi KODA ** ， Shingo IKEDA *
And Keiji SATO ***

Abstract

Recently, the energy which demand expanded most is LNG (Liquefied Natural Gas). The transport vessel carrying the LNG has many kinds. As for the LNG carriers, economy, versatility, environmentally friendly are required. In addition, it is required to consider sloshing peculiar to marine transportation. Therefore, many makers constructed a variety of LNG carriers such as MOSS, Membrane and SPB. These tanks of the vessel are made according to the IGC code (International code for the Construction and Equipment of Ship Carrying Liquefied Gases in Bulk) which IMO (International Marine Organization) established, but there is big characteristic in each. We considered the most suitable tank tanks for the LNG carriers.

1. 緒言

近年大きく需要が拡大したエネルギーの一つが LNG (Liquefied Natural GAS)である。LNG 市場は、北米のシェールガス革命による生産増、米国・豪州における大型 LNG プロジェクトの稼働開始が進み、図 1 に示すように世界の LNG 供給は大幅な拡大局面にある。2018 年 1 月から 9 月までに、4 プロジェクト・1640 万トン相当のプロジェクトが稼働を開始し、また最終投資決定を経て建設段階にあるプロジェクトから、2022 年までに 9,010 万トンの稼働が見込まれている¹⁾。日本は石炭や石油・石炭・天然ガス等のエネルギー資源の殆どを船舶により輸入している。日本はエネルギー資源がほぼ皆無でありまた島国であるため、石炭や石油・石炭・天然ガス等のエネルギー資源の殆どを船舶により輸入している状況にあり、LNG の輸入量は世界 1 位である。また世界に目を向けてみても石油石炭に比べ超環境低負荷な点により環境対策として中国をはじめ多くの国で需要が増加しており、転換の動きは活発であ

る。海運界でも今後益々厳しくなる排ガス規制に対応する為 LNG を燃料とする船舶も出現しており今後さらに増加すると思われる。

供給面でもアメリカのシェールガスやロシアのヤマルや中南米で相次いで生産が開始しており、需要供給の大幅な増加により海上輸送量の大幅な増加も見込まれており、今後エネルギー資源の主役にとってかわると予想されている。

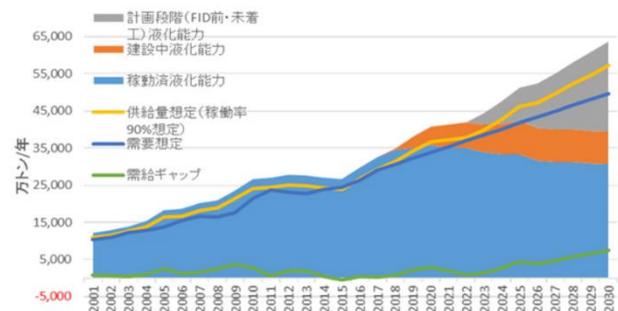


図 1 世界の LNG 需要の見通し¹⁾

LNG は -162°C の冷却により容積を約 1/600 にす

平成 30 年 11 月 30 日受理

* 商船学科

** 日本郵船株式会社 (当時商船学科 5 年)

*** 海技大学校

ることができ、輸送や貯蔵に大きく有利である。この LNG を海上輸送するための LNG 船は当然ながら高い安全性を要求されている。一方、海上輸送の問題点として、大きく気候が異なる地域を横断するため、LNG が気化する BOG (Boil Off Gas) 問題やタンク内の LNG が船体動揺と同調し、激動してタンクを損傷させるスロッシングなどの問題が存在している。これらの問題に対応するため多くの形状のタンクが開発されてきた。今後益々 LNG 需要が高まる中、LNG 船は世界各地で増える LNG 基地との汎用性や輸送効率や環境にも配慮した船舶が求めており、これまでの時代に合う LNG 船の最適タンクを考察した。

2. タンクの種類

これまで多くの形状のタンクが開発され、現在主流である MOSS 型やメンブレン型の他 SPB 型 (Serf-supporting Prismatic tank-IMO type B) が僅かに、円筒形の type C が少数存在している状況である。LNG 船は現状、独立タンク型の MOSS 型やメンブレン型の他 SPB 型など多くの種類が存在している。これらのタンクは IMO (International Maritime Organization) により定められていた IGC コード (International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk) に適合することが求められている。メンブレン型と独立タンク型の違いはタンクと船体の関係にある。メンブレン型は船体に断熱構造を直接施し、その内側に薄い金属膜 (メンブレン) を施した構造である。独立タンクタイプの構造はその逆で、船体とタンクがそれぞれ独立しており、タンクのみで貨物の耐圧・支持が可能な構造である。容積効率の観点ではメンブレン型が圧倒的に有利であるが、安全性は独立タンクタイプの方が確かである。MOSS 型は、1960 年代にノルウェーの MOSS 社が開発を行い、1970 に発表されたタンクである。最大の特徴は球形タンクである。これによって風船の様に LNG 荷重の応力集中が生じずに全体が均一の応力になるため、安全性が高まり、板厚も薄くすることが可能である。タンク容積あたりの表面積が各タンクタイプの中で最小で

あることも大きな特徴である。メンブレン型はフランスで開発され、ガストラנסポート社とテクニガス社が開発した方式が存在したが、現在両社は合併し GTT 社 (ガストラנסポート&テクニガス社) がそれぞれ型式を引き継いで改良された No.96 方式と MarkIII 方式がある⁴⁾。SPB 型は IHI (石川島播磨重工業) によって開発された日本生まれのタンクである。メンブレン型に対する疑問から開発された経緯があり安全性を第一に開発されたタンクである。タンクにはアルミニウム合金を使用しておりタンクと船体との間には強化合板性ブロックを使用している。縦横に多くの隔壁を設置することにより強靱な強度を持っている。その反面重量やコストの増加、内部構造が複雑、温度管理の難しさなどがある。それぞれのタンクに一長一短あり、統一されていないのが現状である。

これは LNG 船の特徴である BOG やスロッシングなど多岐に渡る問題をどう抑え込むかの多くの考え方が存在するためである。

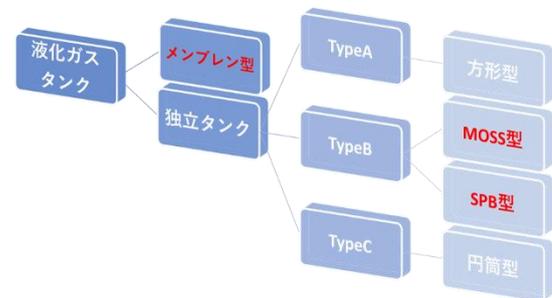


図2 LNG タンクの種別

これらのタンクタイプは IMO により定められた図 3-1 の様に分類されている。IGC コードは、LNG がタンクから液漏れを起こし、船体の構造部材に低温のこれが触れると損傷を起こし、最悪の場合に船体折損等が生じてしまい被害は計り知れない。よって不測の事態によって万が一タンクからの液漏れを起こしても緊急入港等の揚げ荷をおこなうために 15 日間の二次防壁での保管が可能な構造が要求される。しかし技術の進歩に伴う科学解析技術の向上によりクラック発生時に液漏れの

コンテナ輸送における吸水シートが及ぼす 2 次被害対策

影響がどの程度及ぶかを解析することによって二次防壁を必要な部分にのみ設置する部分二次防壁が許可される方式やタンクを圧力容器にし、板厚を大幅に厚くすることによって二次防壁の設置を免除する型式も存在する。

図 3 に示されたメンブレン型と独立タンク型の違いはタンクと船体の関係である。メンブレン型は船体に断熱構造を直接施し、その内側に薄い金属膜（メンブレン）を施した構造である。よってタンクの支持・耐圧を船体が行う構造になっている。この構造にはタンクに亀裂が入った場合や船体への外部影響などに対し安全性に不十分な点が指摘されており、完全二次防壁が要求されている。独立タンクタイプの構造はその逆で、船体とタンクがそれぞれ独立しており、タンクのみで貨物の耐圧・支持が可能な構造である。またタンクの熱伸縮も船体に直接伝わらない構造になっている。容積効率の観点ではメンブレン型が圧倒的に有利であるが、安全性は独立タンクタイプの方が確かであり、更に細分化される Type ごとによって亀裂発生時のクラック進展の解析を行うことで二次防壁の要求がタンク底のみまたは不要となる。

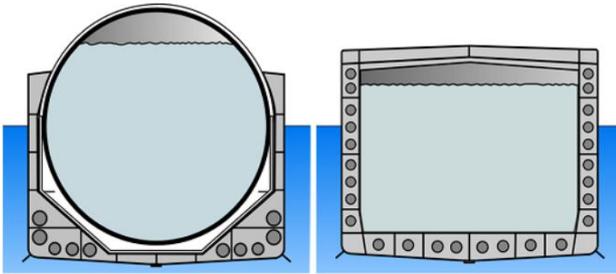


図 3 モス型 (左) とメンブレン型 (右) ²⁾



図 4 SPB 型 ³⁾

図 4 に示すメンブレン型であるが、フランスで開発され、ガストランスポート社の開発したガストランスポート方式とテクニガス社の開発したテクニガス方式とが存在したが、現在両社は合併し GTT 社 (ガストランスポート & テクニガス社) がそれぞれ型式を引き継いで改良された No. 96 方式と Mark III 方式のライセンスを所有している。1994 年にこの 2 方式を組み合わせた CS-1 という新方式が発表されたが、事故が多発し現在は建造されていない。よって 2 方式の詳細を記載する。図 4-3 は 2 方式の構造を比較したものである。2000 年の作成時のデータであるため、BOG が 1 に積載 LNG のどの位の割合で発生するかを表す BOR (Boil Off Rate) が現在より悪い値になっている。またそれぞれの現在使用されている GTT No. 96 と GTT Mark III の名称も旧名称が使用されている。

GTT No.96 (ガストランスポート) 方式は、1990 年代前半に発表された。構造はメンブレン材にインバー (35% ニッケル) を使用することによって LNG を積載するとタンクが伸縮する熱伸縮の対策をしなくてよく、防熱構造はパーライトと呼ばれるガラス質火山岩を焼いたものを詰めた断熱箱をレンガ状に積み重ねた構造で、二次防壁として二次メンブレンを設置し、一次メンブレンと同じインバーを使用している。

GTT Mark III (テクニガス) 方式も、1900 年代に発表された。熱伸縮対策はメンブレンのステンレス鋼に縦横に波形のしわを設けて熱伸縮を吸収する様になっている。防熱材にはプラスチックフォームを使用しており、二次防壁にはトリプレックスと呼ばれるアルミシートをグラスクロスで補強したものが用いられている。これら断熱材と二次防壁によって、軽量・コンパクト化が可能になった。

Type A は、クラック解析を行わない代わりにメンブレン型と同様に完全二次防壁を要求されるタイプである。初期の LNG 船に採用されており、構造が比較的容易であることが利点であるが、特殊鋼材を多用しなければならぬことによる重量やコストの増加などの問題があり、近年は建造されていない。

Type B はクラック進展解析を行い、液漏れを万が一起こしても、15 日間の二次防壁内での保

管が可能な構造の基に部分二次防壁が認められている。現在はタンクの下部にドリップパン（受け皿の様なもの）を設ける部分二次防壁が用いられている。この部分二次防壁が認められた背景には MOSS 型の開発に伴い、規則が開発を阻害してはならないとの考え方があり、特例として Type B が設けられ認められた。MOSS 型や SPB 型はこの Type B にあてはまる。

MOSS 型は、ノルウェーの MOSS 社が開発を行い、1970 年に発表されたタンクタイプである。最大の特徴は球形タンクである。これによって風船の様に LNG 荷重の応力集中が生じずに全体が均一の応力になるため、安全性が高まり、板厚も薄くすることが可能である。更に直線の溶接長が長いので自動化や組み立て時間の削減が可能である。タンク容積あたりの表面積が各タンクタイプの中で最小であることも大きな特徴である。熱伸縮の対策法はタンク及びタンクの支持を行うスカートと呼ばれる部材が伸縮することによって対処されている。

SPB 型は IHI（石川島播磨重工業）によって 1980 年に発表されたタンクタイプで、その後 JMU (Japan Marine United) がライセンスを所有している日本生まれのタンクタイプである。メンブレン型に対する疑問から開発された経緯があり安全性を第一に開発されたタンクである。タンクにはアルミニウム合金を使用しておりタンクと船体との間には強化合板性ブロックを使用している。縦横に多くの隔壁を設置することにより強靱な強度を持っている。その反面大量に鋼材を使用することによる重量やコスト高となっている。内部構造が複雑であること。更には鋼材と LNG とが接する面積が広くなることによる温度管理の難しさなどがある。

Type C はタンクの亀裂や液漏れを絶対に生じさせない様にタンク側面の板厚を増して压力容器にすることで二次防壁の設置を免除したタンクタイプである。貯蔵法は常温で積載 LNG より自然発生する BOG による圧力を飽和させることによる圧力式とこれに温度管理を行う低温圧力式とが存在する。いずれも BOG の処理や圧力制御は必要ないのが特徴である。形状は円筒形であり、他に双胴円筒型のタンクも存在している。BOG の

処理をせずに良い点などの重大な利点を持つが板厚制限によってタンクの大きさ即ち積載量に制限されるため、外地から LNG を輸入して来る様な外航 LNG 船には搭載できない。よって小容量運送用に内航の LNG 船や LPG 船に採用されてだけである。

3 タンクの比較

BOG が 1 日でどの位の%で発生するかを表すのが BOR である。初期の LNG 船では BOR 0.45% の船も存在したが開発・改良競争により BOR 0.15% が現在の運送会社と荷主との契約の基準である。各タイプの BOR を示す。No.96 を除いて似通った数値であることが分かるが、BOR 15% を優に超えていることが分かる。

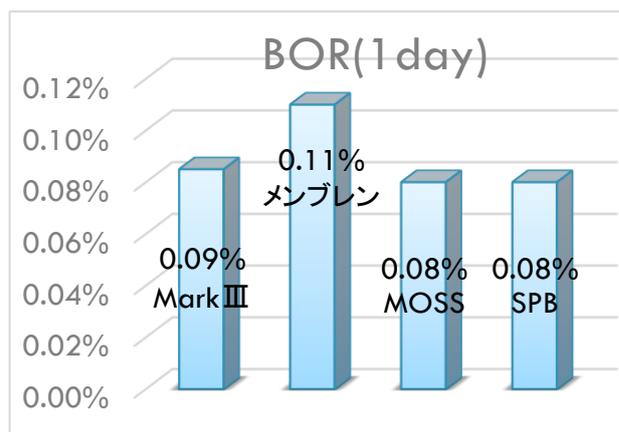


図 4 BOR 発生率

MOSS 型と SPB 型の BOR が低い。近年 BOR 10% での契約や航海中に使用した BOG を運送会社が荷主に支払う契約もある。また BOG の再液化装置を搭載して従来の内燃ディーゼル機関を用いる LNG 船も増えている。現状では燃料タンクを新たに設ける煩わしさや環境低負荷な点から BOG を燃料とする方向が主流であるが、重油の価格が LNG よりも大幅に安価になった場合等に従来の重油が燃料となる可能性も存在する。以上のことから BOG 低減の重要性は変わっていない。

スロッシングに関して、SPB 型は縦横に張り巡らされた隔壁によって同調をさせない構造にな

コンテナ輸送における吸水シートが及ぼす 2 次被害対策

っており、スロッシングは発生しない。MOSS 型も同様に、球形であるため一点に負荷が掛かることは無いため板厚を十分に設ければこちらもスロッシングは生じない。一方、メンブレン型はスロッシングによって大きな負荷がタンクに掛かっていることが分かる。このことからメンブレン型は積載制限が存在し、一般にタンク高さの 70% 以上又は 10% 以下にし、その間の半載を禁止し、70%~95%の間では、横揺れ・縦揺れの角度を減らし周期を変えるために、船の進路・速力の調整が求められる。満載していた場合でも BOG による積載量の減少によってこの様な処置を取る必要性が出てくるため常に細心の注意が必要である。

LNG 船の建造費は一般に 200 億円と言われている。一般的な商船に比べ特殊鋼材や極低温の LNG を荷卸し・保管するために多くの特殊設備を要するためである。建造費に関する詳細なデータは公表されておらず、建造国やレート・セット販売によって大きく左右し、安易に推し量れない側面があるが、一般に安価な順からメンブレン型・MOSS 型・SPB 型とされている。メンブレン型は MOSS 型に比べて鋼材使用量を抑制できるため建造費は安価であるとされる。SPB 型は建造数の少なさと大型の SPB タンクの建造にブランクがあることから建造が確立されておらず、使用鋼材が大量であることや、溶接線長が長いことなどからこの 2 タイプに比べ数割の割高であるとされている。

クールダウンとは積荷役を行う時に、タンクと LNG と温度が乖離している状態で積載すると、タンクをはじめ様々な設備に損傷を与えるため、あらかじめタンクを冷却しておく事前準備のことである。MOSS 型は 1990 年以降に建造された船を一例にとると、タンクとスカートとの接合部であり最も板厚の厚く熱応力が最も大きい赤道部の温度が -110°C 以下でないと積み付けを行うことが出来ず、許容クールダウンレートと言われる一度にクールダウンできる温度も制限されており、このクールダウン作業にバラスト航海中の大半の日数を要する。また気象や航行海域によって外熱の影響が大きく異なり、積み荷の管理を行う船員には大きな負担が掛かってしまう。一方のメンブ

レン型は熱容量が小さいため、積地入港前の極短時間のクールダウンのみで積載可能となる。

安全運航に重要な操縦性であるが、メンブレン型と SPB 型はフラットな形状なのに対し、MOSS 型は球形のタンクのため甲板上に大きく突き出る形状をしており、見通しも悪く一般に船橋の高さを上げる処置がなされている。これにより更に風圧抵抗を増大させる結果となっている。しかしながら推進性能などを表す方形係数は、MOSS 型が水線下に LNG タンクが殆ど存在しないため、水線下の形状に自由度があるため良くなっている。

5. まとめ

近年これらのタンクもそれぞれに進化を続けている。MOSS 型はストレッチタンクを経てリング型タンクが開発された。タンク形状を球形から球殻部・円環部・円筒部という異なる 3 つの素材の組み合わせによって構成されており、容積効率を 15% も改善することが可能であり、連続タンクカバーの開発によって風圧 30 抵抗や船体重量が大幅改善されている。さやえんどう型からさらにサヤリング型と呼ばれる新しい MOSS 型が既に建造されている。メンブレン型も Mark III や No. 96 といった従来のモデルを改良させたモデルを発表しており、BOG の大幅な低減を目指している。SPB 型はシェアを巻き返すかと思われたが、建造トラブル等⁵⁾で後退気味であったが、元来技術力が高く、スロッシングが起きにくく、強固な構造と安全性からこのままシェアが減少していくとは思えない。今後再び需要があると思われる。さらに全体では MOSS 型の大幅な改良が評価されメンブレン型のシェアを分けると思われる。最後に益々 LNG の需要が高まる中、今後の LNG 船は世界各地に増える LNG 基地との汎用性が求められ、船陸整合性が大変重要となってくる。またこれまで以上に輸送効率・燃費性能も優れ、環境にも配慮した船舶が求められ、LNG 船及び LNG 運航船員の重要性が増してくると思われる。

参考文献

- [1] IEA, Natural Gas Information 2018.
- [2] https://www.iru-miru.com/article_detail.php.
- [3] IHI 技報 vol.52 No.3(2012).
- [4] 湯浅和昭,LNG 輸送技術の最新動向, 2008.
- [5] 日本経済新聞, 4 月 23 日, 2018.
- [6] 糸山直之: LNG 船がわかる本(新訂版); 成山堂書店
- [7] 三菱重工技報,Vol.50,No.2(2013)
- [8] 古林義弘:LNG・LH2 のタンクシステム-物理モデルと CFD による熱流体解析-;成山堂書店
- [9] 三菱重工技報,Vol.52,No.1(2015)
- [10] 日本物流学会誌,第 14 号(2006.05)
- [11] 日本郵船 LNG 船運航研究会:LNG 船運行の ABC;成山堂書店