

液体水素タンカー技術の開発

石川島播磨重工業株式会社
船舶海洋事業本部
技監 藤谷 堯

1. 緒言

ニューサンシャイン計画のWE-NET (World Energy Network) プロジェクトの中で、21世紀のエネルギーの一つとして、液体水素(-253度C)の利用が検討されている。ここでは水素の製造、液化、貯蔵、輸送から最終利用方法迄を、要素別に個別に検討している。

この中の液体水素海上輸送の手段としての液体水素タンカーの技術開発について紹介する。

この検討メンバーは大学と造船所の造船技術の専門家で構成され、エンジニアリング振興協会がとり纏めている。研究開発の方法は、LNG船(-162度C)の技術を土台にしてその開発に倣い、これを更に低温度にすると言う形で進めている。検討は1993年度から始まりまだ緒に着いたばかりである。

ここでは先ず、LNG船の概要と開発を参考例として紹介し、その上で液体水素タンカー技術の開発の現状を説明する。

2. LNG船

類似技術であるLNG船について紹介する。

2-1 LNG船技術の概要

1) 技術の変遷

大型の液化ガス船は1959年に建造されたLNG船メタンパイオニア号で始まった。以下に技術の変遷を簡単に記す。LNG船技術の最も特徴的なところは、LNGが超低温(-162℃)の可燃性の液化ガスであると言う所である。その中で温度変形するタンクを安全に支えるという点と万一のタンクからのLNGの漏れに対する船体保護の考え方が各種の方式の技術の基本にある。さて、LNG船の歴史は自立角型タンクを使ったコンチの設計で始まり、コンチの特許に触れずに、且つより安い船を提供するという視点からメンブレンの船が出現し、その後薄いメンブレンタンクが故障した為にタンク自体をもっと丈夫にしようという反省から疲労強度でタンクの信頼性を評価して実現したのが自立球型方式である。その後更に発達した設計技術を用いてタンクの信頼性を評価して実現したのが自立角型の新しい設計SPB方式である。以下の項で夫々の技術に関して簡単に述べる。SPB技術に関しては次の節で紹介することとする。

2) 自立角型方式 (コンチ社 米・英)

世界で初めての大型低温液化ガス船の技術である。それを一気にLNGの-162℃で成功させた。その後自立角型タンクを用いた大型のLPG船などが世界中で多く建造された。コンチ社はLNG船に関するこの技術の特許をとって自立角型のLNG船はコンチ社でなければ出来ないという状態を作る事をねらった。自立角型タンク自体は一般の造船技術であるからタンク自体は特許にはならない。コンチは保冷と支持の組合せで特許とした。当時は材料も限られており設計もその

材料で制約されていたから特許で技術をおさえ易かった。この技術でメタンプリ
ンセス号及びメタンプログレス号を完成させた。自立角型方式では1970年頃にE
SSOが独自の異設計でLNG船を4隻建造した。しかし当時の技術は自立角型
タンクの良さを十分に発揮させるものではなかった。1970年代の中頃にコンチの
技術で建造された3隻の大型のLNG船が完成ガストライヤル時に欠陥が発生し
この為LNG船は廃船となりそれが原因でコンチ社も解散した。自立角型タンク
は世界中の大型LPG船で普通に使われ優れた実績を示している技術であったの
でこれが正当な評価もうけずにLNG船の技術から消えてしまうことは、我々独
自でLPG船やエチレン船などを自立角型タンクを用いて設計し建造しその良さ
を知っている者にとっては無念で何かせねばの念に駆られた。

この間にメンブレン方式や自立球型方式のLNG船技術が登場し、タイミング良
く大型LNG輸送プロジェクトで採用されて、これ等がLNG船本来の姿である
というイメージが出来上り、自立角型方式LNG船は忘れられていった。

3) 自立球型方式 (モス社 ノルウェー)

タンクはアルミ合金製自立球型タンクで赤道部が厚板構造となっており、ここを
円筒状のスカート構造で船体から支持している。タンク支持と船体の接続は溶接
で、タンクのアルミと船体の鋼材 (またはステンレス) とは特殊な継手で接合さ
れている。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パネルの保冷が取り付けられ、保冷表面層がスプラ
ッシュバリアで、これと底部保冷の下のドリフトレイが部分二次防壁であるI
MOタイプBのシステムである。球型の異設計にセナー方式やTGZ方式がある
が大型船の実績はない。

4) GT方式メンブレン (GT社 フランス)

タンクは0.7mm厚さのアンバー鋼材の薄板で、温度変形は膨張係数の小さいアン
バー鋼材自体の内部応力で吸収される。保冷はパーライトを詰めめた合板箱であ
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
二段に取りつけた合板箱を介してアンバー鋼材が二重に張られており、内側がタ
ンク、外側が二次バリア。隅部のア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。

5) TGZ方式メンブレン (TGZ社 フランス)

タンクは1.2mmのステンレス鋼の薄板でワッフル状にしわがつけてあり、しわの
変形で温度変形を吸収する。当初は二重にステンレス鋼が張られる構造だったが、
合理化のため合板とバルサ材の保冷と二次防壁を導入してステンレス鋼を一重に
した (マーク1)。さらに保冷材をバルサ材から補強された高密度のポリウレタ
ンフォームに変えて、二次防壁を合板からアルミ фольとガラス繊維の補強し
たシートの接着構造に変更した案 (マーク3) が出された。いずれも非金属の二
次防壁の有効性の実証と、その経年変化と有効性の検査方法等に疑問が残る今後
注目される。

尚、1994年にGT社とTGZ社の船の部門とが合併して同一会社となった。
以上の他に立円筒方式のLNG船も1965年頃一隻建造されたが説明は省略する。

2-2 LNG船の技術開発例（SPB方式）

1) 技術の概要

SPB方式LNG船は日本で開発された唯一のLNG船技術でありIMOタイプBの承認を受けた方式で二重構造の船体の中にSPBのコンテインメントシステムを装備したLNG船である。SPBは自立角型の英文の頭文字に、タイプBのBを付したものである。なおタイプBとはIMO規則（船の国際安全規則）で定められたタンクの信頼性の分類で疲労強度まで評価して、船の一生を通じてタンク漏れのないように設計され、厳密な品質管理で設計どおりに製作されていることが確認されたタンクを意味する。

SPBタンクは船の構造として普通の自立角型方式でその外面が直接保冷で覆われ、船底から支えタンクの頂部と低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人の通れる空間がある。この空間には乾燥空気又は窒素ガスが入っている。

タンクの材料はアルミ合金5083-0材で船のスペースを無駄にせぬよう船の形に合わせて設計され、主に15~35mmの板厚が採用されている。簡単にいえば、強度は内部の骨格構造で受け持ち気密性液密性を外板が受け持つ。保冷は必要なBORに合わせた厚みのパネル構造でタンク外板の外面にスタッドボルトで取り付けられる。パネル間には温度変形を吸収する様に柔軟な継手を入れる。保冷表面は被覆されスプレイシールドの機能を持つ。

タンクの支持は特殊設計の断熱性のある強化材のブロックで、タンク底部の骨格の交差部など強度の強い個所を支える。移動止めはタンク付のブロックを船体付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ており、タンクの移動は止めるが、温度変形は拘束しないように縦横十文字に配置されている。タンク底部の保冷の下にドリフトレイを設けてある。配管電線などはタンクドームを通して外から直接タンクの中へ導かれタンク構造を利用して導設され、ポンプも底部の構造にしっかりと固定される。保冷と船体の間に保守点検用のスペースを設けており、保冷や支持などの状況ならびに船体内殻の状況を直接確認できるようにしてある。

2) 開発経緯

自立角型タンクそのものは船体構造と同じ構造で目新しいものではなく、初期のLNG船（コンチ方式及びESSO方式）はこの方式のタンクを装備しており、類似の船が数隻建造された。しかし当時の技術は、自立角型タンクの優れた特徴を十分に発揮させるものではなかった。その後LNGの技術はメンブレン方式とかまたその弱点を補った自立球型方式が登場しLPG等で優れた実績のある自立角型方式を誰も顧みなかった。

1970年代中頃の石油ショック以来、LNG船もエネルギー節約の視点から、断熱効果の高いBORの少ない設計に進む傾向が現われてきた。こうなると断熱性能をよくしやすい自立角型方式が経済的にも有利になり、競争力を高めるとの判断が生まれて、1980年代に入りこのシステムの合理的な設計SPBの基本構想が提案され開発が始められた。

さて、この着想の背景にある技術の変遷を簡単に振り返る。日本でLNG船の検討が始められたのが1960年頃からで、アルミ製の自立角型タンクとその支持保冷のモデルで液体窒素による冷却テストが行われた。この技術をもとに1965年以降多くの自立角型のLPG船やアンモニア船、自立角型アルミ合金のエチレン船、

更にタイプB適用のLPG船などが建造された。これらの経験や長年の要素技術の実績、主要材料の経年変化の観察などをもとに生まれたのがSPB方式LNG船の構想である。この構想をもとに1981年から研究確立されたのがSPB方式LNG船の技術であり、1985年までに世界の主要船級協会およびUSCGから正式に承認された。その後実験船としてエチレン船を建造LNG温度の冷却試験が行われた。そして1993年の大型LNG船2隻が建造され順調に稼働を続けている。これで開発完了である。さてSPB方式は自立角型の大型液化ガス（LPGなど）船の設計をLNG船用に発展させたこの実績の延長線上の技術である。LNG船のように万一の事故の場合の影響の大きいものの開発には失敗は許されない。長年の積み重ねによる技術の確認がないと、この業界では受け入れられないというのがこの開発の一つの特徴だった。これは液体水素タンカーの技術開発でも同様であろう。

3 液体水素タンカーの技術開発

3-1 タンカー部会第一期研究計画

| 研究項目／年度 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| 現状技術の調査, 検討 | *** | *** | | |
| 液体水素タンカー概念設計 | | *** | | |
| 基本的要素研究 | | | *** | *** |

3-2 調査, 検討

1) 海外の液体水素タンカー研究

水素の海上輸送を目的とした液体水素タンカー計画としてはEQHHPが具体化しつつある。これはカナダ（ケベック）で電力エネルギーを水素に変換し、ドイツに運ぼうというものである。運送形態としては液体水素タンクをバージ上に設置しこのバージを運ぶラッシュ方式である。（総タンク容量15000m³）。またこれと平行して将来の大規模海上輸送として、12万m³クラスの大型液体水素タンカーがドイツで研究されている。そのほかにもSWASH船や小型の液体水素コンテナを多数搭載するコンテナ船等幾つかのアイデアは出されているが、詳細は公表されておらずコンセプトのみが先行しているようである。

2) LNG船技術

前述したが液体水素タンカーについて検討する際、現状の低温液化ガス運搬船の中で最も条件に近いLNG船を土台とするのが適当である。LNGは-163度Cの液体状態で運搬される。LNG船は1960年、アルミ製の自立角型タンク方式の成功によって始まり、その後メンブレン方式（フランス）、自立球型モス方式（ノルウェー）等の技術が日本に導入された。1993年には純国産技術によるSPB方式（自立角型）が開発、建造され、日本はのLNG船の技術開発及び建造技術において世界をリードしている。これらのタンクはともにIMOの厳しい安全性基準をクリアした極めて安全性の高いタンクであるが、液体水素タンカーの研究のベースとして液体水素の性状を考慮してまず自立型タンクを対象に検討を進めることとした。

3) 液体水素とLNGの比較

船の設計にもっとも影響を及ぼす両者の性状の比較を示す。

表2 液体水素の性状

| | LH ₂ | LNG |
|----|-----------------|--------|
| 温度 | -253度C | -162度C |
| 比重 | 0.07 | 0.42 |

すなわち液体水素はLNGよりさらに約90度C温度が低く、比重は約1/6と非常に軽い。このことは、液体水素タンカーの開発が単にLNG船の延長ではなく大きな技術的ブレイクスルーを必要することを意味している。

4) 液体水素タンカーの技術的課題

-253度Cという液体水素温度では、酸素、窒素まで凍ってしまうことからLNG船よりさらに高度な断熱方法、例えば、真空断熱や新しい発想の断熱法の開発が必要になる。またより大きなタンクの熱収縮に追従できる支持構造の開発も鍵となる。

つぎの問題点は超軽量貨物という点である。タンク強度の面からは有利となるが、船の計画上の問題としてプロペラ没水の為の喫水の確保、風圧の増加に抛る操船性、安定性に課題が生じる。喫水確保のため双胴船等の検討も必要となる。

タンク材料としては-253度Cでも脆性破壊しないアルミ合金が候補となるが、波浪変動荷重にさらされるため、極低温下での疲労強度の確認などが不可欠であり他の専門部会の協力が必要である。

さらに蒸発潜熱が小さいことから、航海中のボイルオフ量が大きく、運送効率をあげるためにもタンクの大型化や船の高速化が求められる。ボイルオフ量処理のためにも高出力/高速化が必要になるろう。

このような点を認識しつつ、より具体的な課題を抽出するため、平成6年度に概念設計を実施した。

3-3 概念設計

1) 設計条件

概念設計船の基本仕様として、陸上100万KWの水素燃焼発電所を対象として下記を設定した。

| | |
|------------|-------------------------------|
| タンク容量 | : 20万M ³ (14,000T) |
| 航続距離 | : 6000海里 |
| 船速 | : 25KT (25海里/Hr) |
| 設計ボイルオフレート | : 0.2-0.4%/日 |
| 船型 | : 単胴型/双胴型 |

[コンテインメントシステム]

| | |
|-------|------------------------|
| タンク方式 | : 自立角型 (SPB) / 球型 (モス) |
| 材料 | : アルミ合金 A5083-O |
| 断熱方式 | : 真空断熱/PUFパネル方式/他 |
| 支持方式 | : 方式別 |

本仕様の液体水素輸送タンカー2隻が10日に1回、交互に20万m³の液体水素を運ぶことで100万KW発電所を稼働できる。主機関の開発は当面本研究の対象外とし、ボイルオフガスを燃料とした蒸気タービン主機を採用するものと仮定した。

2) 概念設計

球形タンク方式、角型タンク方式について、一般配置図を示す。船型はタンク方式によって多少異なるが、大きさは船長約290-320m、船幅約48-56mであり、角型のほうが若干小型化が可能である。

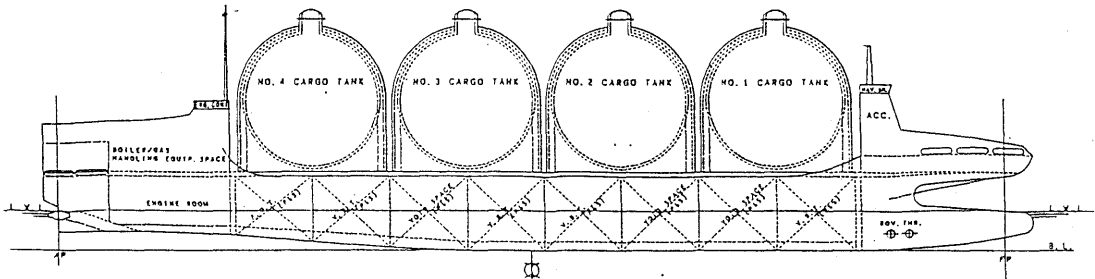


図1 球形タンク方式一般配置図 (双胴船)

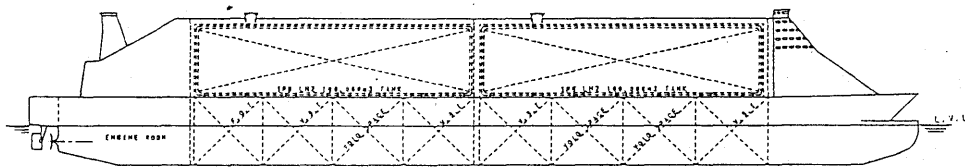


図2 角型タンク方式一般配置図 (双胴船)

3-4 今後の課題

以上、これまで約2年間の研究を通して、船の一般設計要素(船型、推進性能、配置計画、船体構造)については、LNG船など現有技術の延長上の技術を適用できる見通しを得た。一方、タンク断熱法に関しては、LNGタンクの約10倍の性能が必要となることが確認され、パネル断熱+真空層方式、断熱パネル+ガス封入方式等の初期検討を実施した。またタンク支持は基本的にLNG船技術が利用できるものの、侵入熱、熱収縮対策、断熱材貫通部の気密性保持要領など、詳細な検討が必要であることが確認された。タンクに関しては材料の水素との適合性の確認が必要となろう。さらにタンクへの配管等貫通用のタンクドームについて、より具体的な実験研究が必要であることなどが確認できた。これらの要素技術に関しては、平成7、8年度重点的に検討をおこない、さらに他サブタスクの協力を得て、研究を進める予定である。

4 まとめ

これまでの研究によって、大型液体水素輸送タンカーの全体像、および技術的課題がある程度明確となった。実現のためにはさらに多くの研究が必要ではあるが、日本の造船技術をもってすれば、20万m³、30万m³といった超大型液体水素タンカーも十分可能であるという見通しを得る事ができた。今後も他のサブタスクと協力して、WE-NETの実現にむけて努力する所存である。