

LNG 燃料船用 IHI-SPB タンク

IHI-SPB Tank for LNG Fueled Ship

永田良典	株式会社アイ・エイチ・アイ	マリンユナイテッド	基本設計部	主査
田ノ上 聖	株式会社アイ・エイチ・アイ	マリンユナイテッド	基本設計部	
木田隆之	株式会社アイ・エイチ・アイ	マリンユナイテッド	船舶海洋設計部	グループ長
川合 崇	株式会社アイ・エイチ・アイ	マリンユナイテッド	基本設計部	

船舶から排出される NO_x , SO_x の 3 次規制が 2015 年から順次始まり, ECA (Emission Control Area) では現行の 2 次規制から NO_x の排出量を 80%削減, また, 燃料中に含まれる硫黄分を 0.1%以下に抑えることが義務付けられる. これに対応するため, 現在最も注目されているのが船舶への LNG 燃料の適用である. 一方, IHIMU 独自技術として IHI-SPB LNG タンクがあり LNG 船への適用実績もある. IHIMU では IHI-SPB タンクを用いた LNG 燃料供給システムの開発, 試設計を行っており, 本稿ではその特長, 優位性などについて述べる.

Much attention is being paid to LNG fueled vessels as a way of satisfying the IMO's emission control requirements. IHI Marine United Inc. (IHIMU) has developed an LNG fuel gas system employing IHI-SPB gas fuel tank. A case study on an LNG fueled container vessel fitted with this system is being carried out. IHIMU has converted IHI-SPB cargo containment technology into a fuel gas tank, allowing confirmation under harsh sea conditions, such as those found in the Japan-Alaska sea route, of the high reliability this system offers thanks to IHIMU's experience in LNG. IHI-SPB fuel tanks can flexibly accommodate shape restrictions, providing the highest volume efficiency for the available space. This case study on a large LNG fueled container vessel employing an IHI-SPB gas fuel system demonstrates that a minimal loss of container cargo capacity compared with the original design can be achieved.

1. 緒 言

大気汚染などの地球環境問題から, 国際海事機関 (IMO) による船舶から排出される窒素酸化物 (NO_x), 硫黄酸化物 (SO_x) の 3 次規制が 2015 年から順次始まり排出規制海域 (ECA : Emission Control Area) では現行の 2 次規制から NO_x の排出量を 80%削減, また, 燃料中に含まれる硫黄分を 0.1%以下に抑えることが義務付けられるようになる. この規制に対応するため, 現在最も注目されているのが船舶への液化天然ガス (LNG) の燃料としての適用であり, すでに北欧, とくにノルウェー沿岸部では多くの LNG 燃料船が就航しており, また, さらに LNG 燃料船の建造が計画されている.

一方, 船舶用の LNG タンクとして IHI-SPB タンク (Self-supporting Prismatic shape IMO type B) を株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド (IHIMU) では独自開発しており, ① LNG 船 ② LPG 船 ③ LPG FSO/ FPSO, への適用実績⁽¹⁾がある. この IHI-SPB タンクは, LNG 船に用いられているタンクのなかでもタンク形状の柔軟性, 強固で高い信頼性, 任意の液位でスロッシン

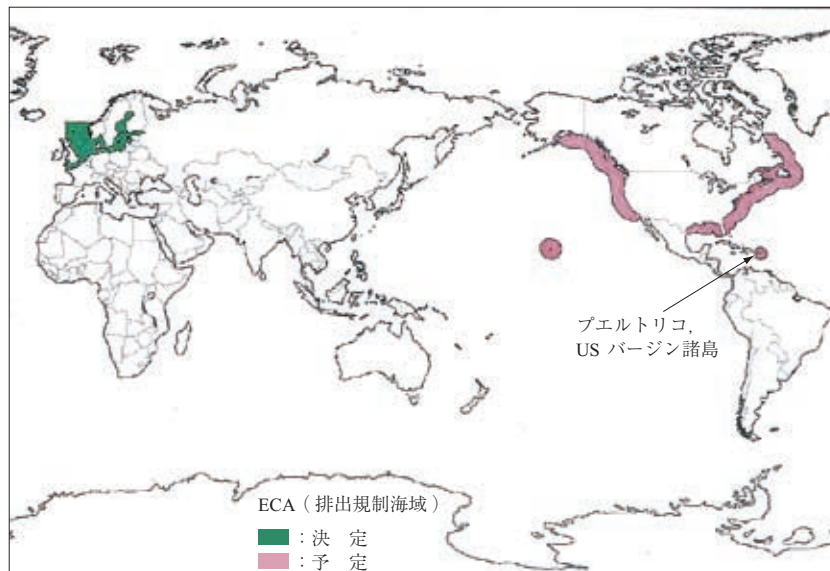
グ現象が発生しないなど, その特長から燃料タンクとしての適性に優れているため, IHIMU では IHI-SPB タンクを用いた船舶への LNG 燃料供給システムの開発, 試設計を行っている^{(2), (3)}.

2. 排ガス規制動向と LNG 燃料

2.1 排ガス規制動向

船用ディーゼル機関からの排出物の削減に関する要求を織り込んだ, 「1973 年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する 1978 年の議定書」(以下, 海洋汚染防止条約) の付属書 VI の改定版が 2008 年 10 月に発効となった. これによって, 排気ガス中の NO_x および燃料油中に含まれる硫黄分濃度の上限値が厳しくなり, また, IMO によって最も厳しい規制が適用される ECA が設定された. 第 1 図に ECA と規制スケジュールを示す.

この ECA には現在, バルト海, 北海および英仏海峡が含まれている. SO_x 規制に対しては燃料油中の硫黄分濃度が規制対象となっており, 2011 年 7 月 1 日以降, ECA を航行する船舶は燃料油中の硫黄分濃度を 1%以下とし, 2015 年 1 月以降は 0.1%以下とすることが義務付



西 暦 (y)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
NO _x	2次規制					3次規制 (ECA 内のみ)					
SO _x	一般海域	4.5%					3.5%				0.5% *1
	ECA	1.0%				0.1%					
ECA (排出規制海域)						USA / カナダの沿岸 200 n mile					
	バルト海, 北海				プエルトリコ, US バージン諸島沿岸 20 ~ 40 n mile (カリブ海)						

(注) *1: 2018 年に見直す。

第 1 図 ECA と規制スケジュール
Fig. 1 Emission control area and schedule

けられている。

2.2 従来技術での規制対応と LNG 燃料の特長

IMO による 3 次規制に従い、ECA を既存の技術で航行する場合、① NO_x を最大 80% 低減する選択還元式触媒 (SCR) などの排気ガスの後処理装置 ② 低硫黄燃料 (軽油など) の使用 ③ SO_x 低減のための排気ガス浄化装置の装備、などが必要となる。これらの対処法は SCR を装備するための区画や、装置を稼働させるための追加電力が必要となるため、燃料使用量の増加を招き、その結果 CO₂ 排出量の増加や運航コストの増加を招く。一方で国際海運は全世界の CO₂ 排出量の 3% を占める一大炭素排出源であると認識されており、2008 年 12 月の気候変動枠組条約第 14 回締約国会議 (COP14) において、IMO は船舶からの温室効果ガス排出量の低減に対する技術的で実現可能な解決法の開発を求められた。

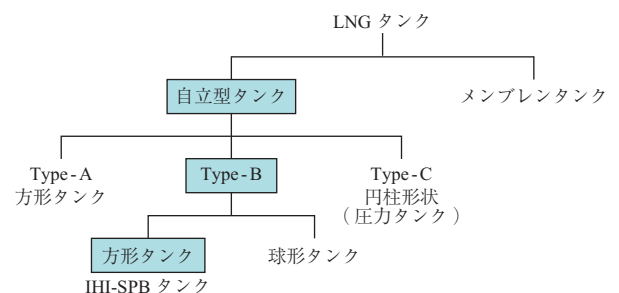
石油から天然ガスへの燃料の転換は、排ガス中の NO_x 量を低減できるだけでなく、SO_x および CO₂ 排出量も低減できるという点で優れている。天然ガスを用いることで、NO_x を 80 ~ 90% 低減でき、これによって IMO 3 次規制の要求を満足できる。また、天然ガスには通常硫黄分が含まれていないため SO_x は排出されず、CO₂ 排出量も 20 ~ 25% 低減することができる。さらに、天然ガスを用

いることで、ばい煙や微粒子排出物などの低減といった効果も得ることができる。そのうえ、近年原油価格の高騰が続いており、天然ガスを燃料とした場合、燃料コストを低減できることも利点として挙げられる。ただし、天然ガスは重油に比べ比重が軽いため、同じ熱量を得るためには重油の約 2 倍のタンク容量が必要となる。

3. LNG 燃料タンクとしての IHI-SPB タンク

3.1 LNG タンクの分類

IMO による LNG タンクの型式としては、大きく自立型タンクとメンブレンタンクに分けられる。さらに自立型タンクは、Type-A, B, C の三つに分けられ、IHI-SPB タンクは Type-B タンクとなる。第 2 図に LNG タンクの型式を示す。



第 2 図 LNG タンクの型式
Fig. 2 Type of LNG tank

メンブレンタンクは LNG を保持する 1 次防壁が薄く、それ自身では液荷重を受け持つことができない。自立型タンクでは 1 次防壁での液保持が可能であるが、Type-A タンクは、船級規則に基づいた強度計算式でタンク構造設計が行われ、疲労強度までは考慮されない。したがって、これらのタンクには完全 2 次防壁の設置が義務付けられている。

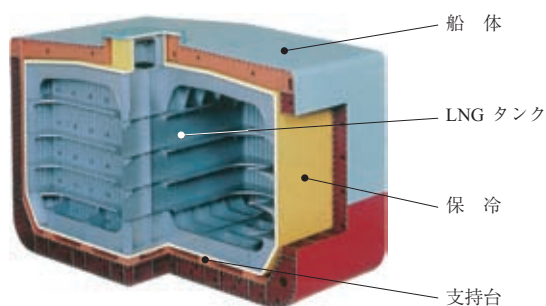
一方、Type-B タンクでは、疲労強度や品質管理を考慮に入れた詳細な強度検討が行われているため、タンクの構造強度の信頼性が高く疲労亀裂は生じない。このため部分 2 次防壁のみの設置でよい。また Type-C タンクは圧力タンクとして設計されており、タンクの板厚が厚く 2 次防壁の設置は義務付けられていない。

3.2 LNG 燃料タンクとしての IHI-SPB タンクの特長

第 3 図に IHI-SPB タンクの概略（構造）を示す。IHI-SPB タンクの特長としては、一般的に以下があげられる。

(1) 強固で信頼性の高いタンク構造である

IHIMU で建造した IHI-SPB タンク搭載の船、海洋構造物としては第 4 図に示す実績があるが、就航



第 3 図 IHI-SPB タンク
Fig. 3 IHI-SPB tank

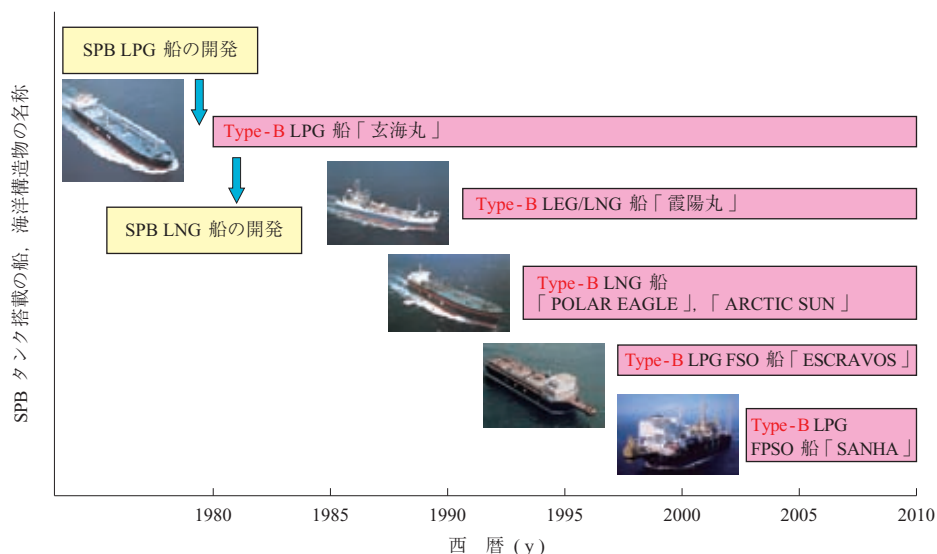
後これらのタンクはすべて健全であり、損傷・クラックは一切発生していない。LNG 燃料タンクとしては、タンクが損傷すると船の航行ができなくなる、あるいは損傷や老朽化によって LNG が漏えいすると、火災、爆発などの大災害につながるため、タンク構造が強固でクラックなどの損傷が発生しない信頼性の高いタンクが求められる。特に LNG 燃料船の場合は、LNG 船ではないため、LNG 区画とそのほかの安全区画に船体を大きく区分することができない。

(2) 任意液位でスロッシングが発生しない

燃料の消費に伴ってタンク内の LNG 量はつねに変化することから、任意の LNG 液位に対してスロッシングが発生しないことも LNG 燃料タンクに求められる重要な要件である。IHI-SPB タンクではタンク内の構造部材配置によって、タンク内 LNG の揺れと船体動揺の固有周期をずらすことが可能で、スロッシングの発生を回避することが可能である。

(3) 任意形状のタンクが製作可能である

LNG を燃料として使用するためには、新たに LNG 専用タンクを本船上に設置しなければならない。しかし前述のように、LNG 燃料の場合には、重油に比べると必要となるタンク容量が約 2 倍と大きくなり、本船上でタンクに要するスペースが大きくなるため、船体内部のスペースの有効活用、タンク形状や配置、タンクサイズの制約をなくす手段が必要となる。したがって、このデメリットを極力抑えるためには、船体内部スペースの有効利用、タンク形状や配置、



第 4 図 IHI-SPB タンクの実績
Fig. 4 Construction record for IHI-SPB tanks

タンクサイズの制約を可能な限り少なくすることが必要となる。この点、IHI-SPB タンクは任意形状のタンクを製作でき、船体内部のスペースを可能な限り有効に利用し、少ないスペースで最大限のタンク容量を確保することが可能である。

第5図に任意形状の IHI-SPB タンクを示す。第5図-(a)は、IHI-SPB タンクを適用した LEG/LNG 船「霞陽丸」⁽⁴⁾ のタンク（1 タンクの容量 750 m³）で、タンク形状は凸型をしている。また第5図-(b)は LNG 船のタンク（1 タンクの容量 22 250 m³）で、船首側タンクは単純な直方体ではなく、多くの屈折部をもつ多面形状をしている。これらから分かるように、IHI-SPB タンクでは船体の形状に合わせてタンクを任意形状にすることで船体内部のスペースを有効に利用でき、タンク設置によるカーゴロスが極力抑えることができる。

(a) LEG/LNG 船のタンク形状



(b) LNG 船のタンク形状



第5図 任意形状の IHI-SPB タンク
Fig. 5 IHI-SPB tanks of various shapes

3.3 IHI-SPB と Type-C タンクとの比較

現在北欧で就航している LNG 燃料船の燃料タンクは、第2図に示した Type-C タンクが用いられている。第1表に IHI-SPB タンクと Type-C タンクとの比較を示す。Type-C タンクと比較した場合の IHI-SPB タンクの大きな利点として、タンク形状の柔軟性とタンクが軽量であることが挙げられる。

Type-C タンクは圧力タンクであり、円柱形状をしている。これに対し船体断面形状は角型形状であり、ここに円柱形状のタンクを設置することは、角型形状の IHI-SPB タンクを設置した場合に比べ船体内部のスペース効率が悪くなることは容易に推定できる。

また、Type-C タンクでは IHI-SPB タンクに比べ設計圧力を高く設定できるが、反面、タンクの板厚が厚くなりタンクが重くなる。さらに、現在 LNG 燃料タンクとして用いられている Type-C タンクは真空保冷式のタンクであり、タンクは厚い 2 重壁（内壁：ステンレス鋼製、外壁：鋼製）で覆われているため非常に重い。仮に、2 000 m³ 程度の LNG 燃料タンクを想定した場合、アルミニウム IHI-SPB タンクは Type-C タンクの 1/5 ~ 1/6 程度の重さとなる。タンク容量がさらに大きくなればさらに差が開くことになる。IHI-SPB タンクは、アルミニウムだけでなくステンレス鋼、9%ニッケル鋼での製作も可能であるが、ステンレス鋼製、9%ニッケル鋼製の場合でも、その重さは、Type-C タンクに比べ 1/3 程度となる。船に積載できる重さには限りがあるため、タンクが重くなるとその分船に積載できる貨物の量が減少することになる。

また重さの増加は、船の喫水の増加、船の燃費にも悪影響を与えることになる。また、タンクが重くなると高い位置にタンクを設置した場合には船体の安定性にも悪影響を及ぼす可能性がある。この点 IHI-SPB タンクは Type-C タンクに比べ軽量であり大きな利点となる。

第1表 IHI-SPB タンクと Type-C タンクの比較
Table 1 Comparison between IHI-SPB and Type-C tanks

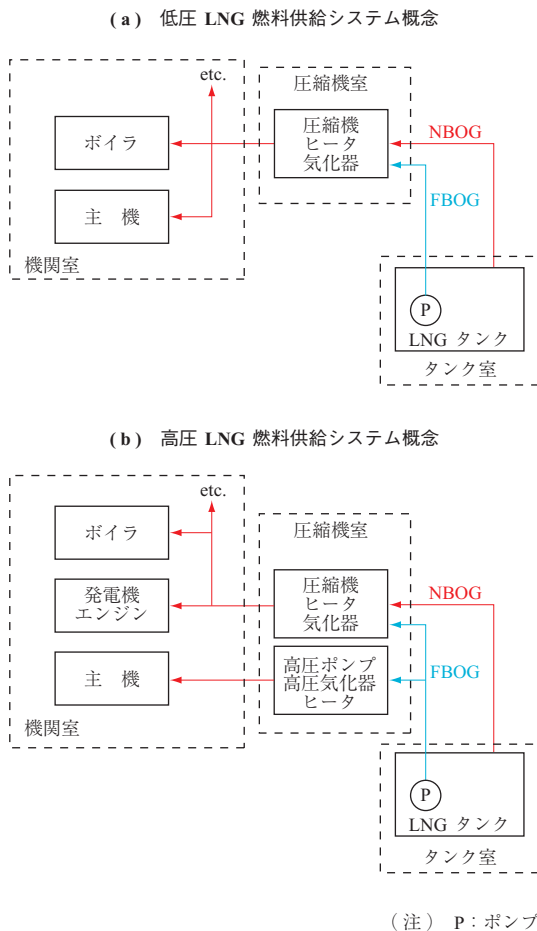
項目	IHI-SPB タンク	Type-C タンク
タンク形状	方形形状 (任意形状)	円柱形状
タンク設計圧	< 0.7 bar { 0.07 MPa }	< 10 bar { 1 MPa }
タンク材質	アルミニウム合金 (ステンレス鋼, 9%ニッケル鋼)	ステンレス鋼 (9%ニッケル鋼)
タンク重さ	軽い	重い
保冷材	発泡フォーム	真空保冷 発砲フォーム
スペース効率	良い	悪い
タンク容量	制限なし	制限あり

3.4 船級承認

これまでの IHI-SPB タンクの実績は① LNG 船② LPG 船③ LPG FSO/FPSO, である。容量の大小はあれ基本的に LNG 船のカーゴタンクとしての IHI-SPB タンクと LNG 燃料タンクとしての IHI-SPB タンクは同じ設計思想, 製作方法である。IHI-SPB タンクは, 2011 年, 2012 年にそれぞれアメリカ船級協会および日本海事協会から燃料タンクとしてもタンクの基本承認を取得した。

4. IHI-SPB タンクを用いた LNG 燃料供給システム

IHI-SPB タンクを用いた LNG 燃料供給システムの一例を第 6 図に示す。ガス圧縮機, LNG ポンプ, 気化器およびヒータから構成される。タンク内で自然蒸発したガス (NBOG) は, ガス圧縮機によって昇圧されて主機, エンジン発電機, ボイラなどに送気される。自然蒸発ガスの量が, 主機やエンジン発電機の必要量に対して不足する場合は, タンク内に設置された LNG ポンプから LNG を供給し, 気化器で強制的にガス化されたガス (FBOG) を供給する。



第 6 図 IHI-SPB タンク用 LNG 燃料供給システム概念
Fig. 6 Concept for gas supply system with IHI-SPB tank

現在, LNG 燃料用の主機としては, 圧力 6 bar {0.6 MPa} 程度の低圧システムと 200 ~ 300 bar {20 ~ 30 MPa} の高圧システムが提案されているが, 第 6 図に示すように, 低圧 LNG 燃料供給システム (- (a)), 高圧 LNG 燃料供給システム (- (b)) のどちらのシステムに対しても IHI-SPB タンクを用いた燃料供給システムは対応可能である。

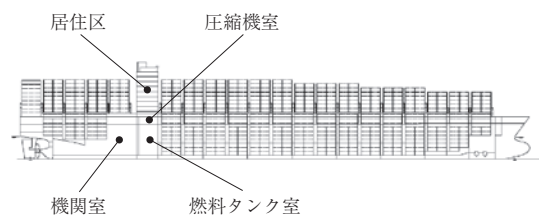
5. LNG 燃料船の試設計

IHI-SPB タンクを用いた LNG 燃料システムを適用した 10 000 TEU コンテナ船の試設計を実施した。コンテナ船の主要目および試設計仕様を以下に示す。

全長	約 330.0 m
全幅	約 48.0 m
深さ	約 27.0 m
コンテナ積載個数	10 000 TEU
航路	極東 ~ 欧州
航続距離	約 20 000 mile
タンク容量	
LNG	約 2 000 m ³ (ECA 内用)
C 重油	約 10 000 m ³ (ECA 外用)
LNG タンク配置	居住区下
圧縮機室配置	居住区下

LNG 燃料化による積載コンテナの減少を最小限にするため, LNG 燃料は ECA 内のみでの使用とし, ECA 以外の地域では C 重油を用いる。ECA 以外の海域を航行している場合, LNG タンク内で発生する NBOG を主機では消費しないため, ガスが余剰となることが懸念される。このため, この NBOG は発電機エンジンに供給し, 船内電力用に使用する。

本船の一般配置を第 7 図に示す。LNG タンクおよび圧縮機室を居住区下に配置し, LNG タンク設置によるコンテナエリアへの影響を最小限にしている。この結果 LNG 燃料化による積載コンテナの減少を 200 TEU 以下に抑えることが可能になった。IHI-SPB タンク燃料供給システムを採用した本船の概念を第 8 図に示す。



第 7 図 一般配置
Fig. 7 General arrangement



第 8 図 LNG 燃料コンテナ船概念
Fig. 8 LNG fueled 10 000 TEU container

6. 結 言

LNG 燃料船は現在北欧を中心に就航しているが、今後 IMO による 3 次規制とともにさらに増加していくことが予想される。LNG 燃料船のさらなる普及のためには、船舶への LNG の供給インフラの整備などが課題として挙げられているが、国内外でこのインフラ整備に対する取り組みもみられる。

IHI-SPB タンクはその特長から、LNG 燃料タンクとしての適性に優れており、IHI-SPB タンクのメリットを最

大限に生かすことができる。すでに LNG 燃料タンクとしての IHI-SPB タンクへの問い合わせも多く寄せられており、世間の関心の高さがうかがえる。今後 LNG 燃料タンクとしての IHI-SPB タンクの利用が大いに期待される。

参 考 文 献

- (1) たとえば、奥村好問, 安東明俊, 後川 理: SPB LNG 船技術の概要と特長 石川島播磨技報 第 34 巻第 4 号 1994 年 7 月 pp. 235 - 240
- (2) 木田隆之: 環境負荷を大幅に低減する船用 LNG 燃料システム - IHI SPB タンクを用いた大型 LNG 燃料コンテナ船の開発, 天然 LNG 燃料船の早期実用化に向けて 日本船舶海洋工学会東部支部ワークショップ 2012 年 2 月 pp. 26 - 33
- (3) A. Tanoue, H. Shuto, K. Sakaguchi and Y. Nagata : Fuel Gas System with IHI SPB Tank -Development and Its Application to the large Container Vessel Gas fuelled ships (2011) pp. 142 - 148
- (4) 藤谷 堯, 奥村好問, 安東明俊, 青木栄治: SPB 方式液化ガス船「霞陽丸」 石川島播磨技報 第 28 巻第 6 号 1988 年 11 月 pp. 380 - 386