

船舶のカーボンニュートラルを支えるガスハンドリング技術

Gas Handling Technology to Support Carbon Neutrality of Ships



渡辺 祐輔*1
Yusuke Watanabe

佐藤 宏一*2
Koichi Sato

真鍋 宜行*3
Noriyuki Manabe

日向 泰彦*4
Yasuhiko Hinata

西郷 康平*5
Kohei Saigo

2023年7月に開催された国際海事機関(IMO:International Maritime Organization)の海洋環境保護委員会(MEPC:Marine Environment Protection Committee)において、2050年までに国際海運からのGHG総排出量をゼロとする“2023 IMO GHG削減戦略”が採択された。船舶の低炭素化・脱炭素化の手段としては従来使用してきた重油燃料をLNGやアンモニアなどガス燃料に転換するアプローチが有力視されており、ガス燃料を安全、適切に取り扱うハンドリング技術は益々重要性を増している。本報ではガスハンドリング技術の概要とその製品展開について説明する。

1. はじめに

三菱造船株式会社(以下、当社)におけるLPG(Liquefied Petroleum Gas, 液化石油ガス)運搬船建造は1962年の“ブリヂストン丸”に始まる。1989年からは78000m³のタンク容量を有するLPG運搬船の連続建造が開始され、以降更なるタンクの大容量化を進めながら80隻を超えるLPG運搬船を世に送り出してきた。また1970年代に開発を始めたLNG運搬船は、1983年に最初の球形タンク方式船“播州丸”を引き渡して以来、タンクの大容量化や機関が蒸気タービンからディーゼルエンジンに変化する技術革新などを経て延べ50隻以上が就航した。これら船舶の建造では安全性・信頼性の高い液化ガス輸送を実現するため、長年にわたり様々な研究を重ね多くの要素技術を確立してきた。

2. ガスハンドリング技術

2.1 液化ガス輸送技術

LPGの主成分はプロパン、ブタンであり、輸送量の大部分をプロパンが占める。このLPGを輸送する運搬船は売り先、積み地が特定できないトレードに投入されたり、複数港で荷揚げすることも多く、運用面で柔軟性が求められる。また物性の異なる複数の液化ガスの混載・積み分けや再液化も必要になることから、様々な技術課題に対する対策が考案された。近年注目されているアンモニア運搬船及び関連設備の開発に際してはこれらの知見が活用されている。

一方、LNGの主成分はメタンであり、一般的には大気圧下で-162℃まで冷却し液化状態で輸送される。このようにLNG運搬船においてはタンク的设计温度が非常に低いことが最大の特徴

*1 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 環境技術部 部長

*2 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 船舶技術部 次長 博士(工学)

*3 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 船舶技術部 首席技師

*4 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 船舶技術部 首席チーム統括

*5 三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター 船舶技術部

であり、極低温の貨物を運ぶための設計技術やノウハウが蓄積された。近年低炭素技術として一般化してきた LNG バンカリング船及び関連製品はこれらを転用して製品化されている。

2.2 液化ガスタンク設計・解析技術

液化ガス運搬船、液化ガス燃料船において重要な役割を果たすのが液化ガスタンクである。液化ガスタンクの設計には、低温貨物による熱収縮への対応、脆性破壊の防止に加え、船体運動加速度に対する降伏・座屈及び疲労強度の考慮が必要である。タンクの様式は用途に応じて、円筒、球形、方形が採用されるが、いずれも長年にわたる LPG 運搬船、LNG 運搬船の開発と就航実績により信頼性が裏付けられている。ここでは LNG 及びアンモニア燃料タンクなどで採用される円筒タンクと、大容量のアンモニアタンクに有利な方形タンクについて解説する。

円筒タンクは圧力容器の思想を元に設計されており、高い内圧に対する強度を確保することにより船体運動による荷重変動を相対的に抑え、疲労強度を確保する。船舶においては、国際海事機関で液化ガス船の安全規則(IGC コード)が決議されており、圧力型タンクはタイプCに分類され必要な強度要件が規定されている。タイプCタンクは疲労強度に関する上述の設計思想から二次防壁(貨物漏洩に対しタンク外に設置する液化ガスに対する防壁)が免除されているので、配置等の自由度の面で有利である。

一方、アンモニア燃料船で長い航続距離を確保する必要がある場合、円筒タンクよりも方形タンクの方が容積効率等の面で有利である。方形タンクは LPG 運搬船で実績のある形式であり、IGC コードではタイプA及びタイプBのいずれかに相当する。タイプAでは前述の二次防壁でタンク周囲を完全に囲むことが要求されている。タイプBでは高度解析手法を適用することを条件に、二次防壁の範囲を限定することが可能になり、タンクの信頼性と設計自由度の確保を両立させることが可能である。当社は、自社開発の荷重構造一貫解析システムである“直接荷重解析法(Direct Loading Analysis Method, MHI-DILAM)”を用いて信頼性の高いタイプBタンク型 LPG 運搬船を開発した。この技術は大容量燃料タンクを有するアンモニア燃料船に対しても有効である。当社では液化ガス運搬船の建造を通して全てのタンクタイプの設計技術及び構造解析技術を蓄積しており、適用条件に応じて最適なタンクタイプを開発し提供することができる。

2.3 ボイルオフガス(BOG)低減及び活用技術

LNG 運搬船は大気圧下で極低温の液化天然ガスを輸送するため、貨物タンクには高い断熱性能を有する防熱材が施されている。それでも完全な入熱遮断はできないため、入熱によって発生した余剰な BOG を排出し、低温低圧に保つ方法が一般的にとられる。排出された BOG は推進プラントの燃料として消費する事になるが、推進プラントでの消費が少ない場合や停泊又は低速航行をする場合は BOG が余る状況となり、ボイラやガス焼却装置などで廃棄処理、あるいは再液化装置などを予め装備して対処する必要がある。従って効率的運航を志向するには BOG の無駄な廃棄を回避する、あるいは最小化する対策が有効である。

例えば LNG 満載状態であれば侵入熱を顕熱として LNG に蓄熱することが可能と考えられるところ、ガス相と気液平衡関係にある液表層に高温域が形成されると、十分な蓄熱効果が得られないままカーゴタンク圧力が上昇してしまうといった現象が起こる。これを防ぐため、液表層を冷却する、あるいは LNG スプレーノズルを配置する、といった対策が考えられ、当社建造船でも採用されている。このような設計技術やノウハウは代替燃料船の開発支援や造船エンジニアリングサービスなどでも活用されている。

3. ガスハンドリング技術の製品展開

3.1 VLGC

VLGC (Very Large Gas Carrier)とは一般的に 70000m³以上の貨物タンク内に低温で液化させた LPG を収容し輸送する大型船舶を指す。近年当社は VLGC について自社建造から他造船所との協業による建造にシフトした。2023 年 9 月に株式会社名村造船所にてお客様に引き渡さ

れた1隻目の全景を図1に示す。

VLGC を取り巻く環境の変化は激しさを増している。例えば LPG の東アジア圏への輸送について従来は中東からの輸入が多くを占めたが、シェールガス革命以降は北米からの輸入が急増した。2016年には新パナマ運河も開設されたため、VLGCはこの頃を境にして同運河を通峡する仕様に対応することとなり、航続距離も伸びることとなった。2019年頃からはGHG削減を企図して重油からCO₂排出量が少ないLPGへと燃料転換が進展してきた。これに伴いLPG燃料をコストの高いデッキタンクで個別に貯蔵するより、貨物タンク内のLPGを燃料として共用する方が経済的であるという理由から貨物タンクの大型化が進み、現在では87000m³~93000m³型が新造VLGCの主流になっている。

またLPGは液化アンモニアと物性が近く取扱いも類似していることから、VLGCはアンモニアの大量輸送手段としても注目されている。アンモニアは国内の火力発電所での燃料利用が見込まれており、最近のVLGC商談ではLPG輸送だけでなくアンモニア積載への対応を求められることが多くなっている。アンモニアはLPGに比してエネルギー密度が低いことから、貨物を燃料として使用する場合、LPGを燃料とする場合よりも貨物容積を更に大きくする必要があり、輸送能力の向上及び効率化の観点から船舶の更なる大型化も予想される。当社ではVLGCがアンモニアの国際輸送の一翼を担い、着実かつ安全なサプライチェーンを構築することがアンモニア社会実現の一助となると考えており、今後も社会が求める変化に対応すべく、関連技術の研鑽に努めたい。



図1 VLGC

3.2 アンモニア燃料船

当社はアンモニア燃料船のコンセプトデザインから詳細設計まで幅広いエンジニアリングサービスを提供することができる。以下ではアンモニア燃料船エンジニアリングのポイントを紹介する。

アンモニア燃料は燃えにくく、重油燃料と同等の発熱量を得るためには約2.8倍のタンク容量が必要になる。また当該タンクは船体から隔離した独立構造となり、重油燃料タンクに比して一般的に大きな設置空間が必要になるため鋼材重量も増加する。

アンモニア燃料タンク形状は2.2項で説明の通り円筒型と方形型がある。方形型は容積効率は高いが、二次防壁としてタンク周囲に燃料貯蔵ホールスペースが必要という制約がある。従って大容量かつ燃料貯蔵ホールスペースを確保できる場合は方形型を採用し、その他の場合は円筒型で計画するほうが配置が成立しやすいと考える。

燃料タンク配置は船種により考え方が異なる。タンカーは図2に示すように上甲板上の空間を利用できるため、上甲板上に円筒型タンクを配置するのが好ましいと考える。コンテナ船は図3に示すように上甲板にもコンテナを積載し、他船種に比して船速が速く大容量の燃料タンクが必要になるため、貨物ホールドの一部に方形型タンクを配置するのが効果的と考える。バルクキャリアは図4に示すように貨物荷役時の障害にならないように、居住区の後方や横に円筒型タンクを配置することになると考える。

計画船に比して燃料タンクが過大で配置できない場合は、本船航続距離仕様を減じて配置可能なタンク容量に見直すか、当該タンクが搭載できるように計画船の貨物艙や主寸法自体を見直すなどの検討が必要となる。またタンク及び燃料の重量が増加すると最大積載量が減ることになるためこれを許容するか、許容できなければ排水量を増やす必要がある。一方、タンクを上甲板上に配置する場合は復原性に注意が必要であり、船尾端に配置する場合は縦強度許容値を勘案すべきである。

アンモニアの取扱いにおける安全対策としては、エンジンや船用ボイラなど燃料燃焼機器及び関連配管内部から抜き出した残存アンモニアを、人体に影響が無い濃度まで減じて排出する除害装置が必要であり、これについては 3.5 項で説明する。またアンモニアの漏洩リスクを低減するため移送配管を二重化したり、アンモニアガスを大気へ排出するベントマストの設置場所を居住区画から十分に離したりする等の対策も必要となる。

また船舶が小型になるほどベントと居住区の距離を確保することが難しくなり設計の難易度が高まる。

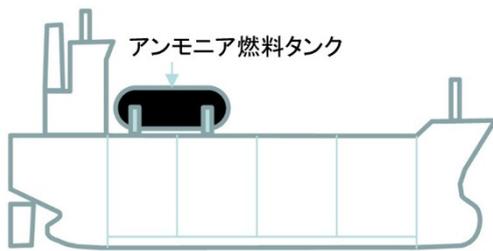


図2 タンカーのタンク配置例(円筒タンク適用)

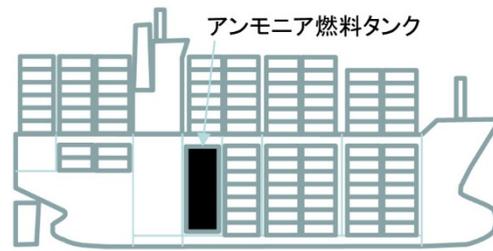


図3 コンテナ船のタンク配置例(方形タンク適用)

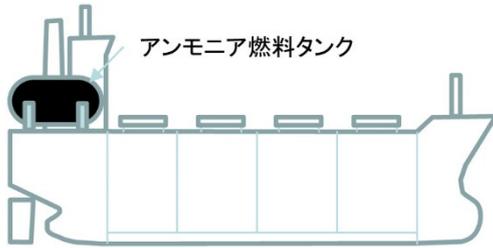


図4 バルクキャリアのタンク配置例(円筒タンク適用)

3.3 LNG バンカリング船

LNG バンカリング船は、LNG 燃料船に LNG 燃料を供給する船舶である。岸壁に係留中もしくは錨地に停泊中の船舶に LNG バンカリング船が接舷して LNG を供給する Ship to Ship バンカリング方式は、大型船舶への LNG 燃料の大量供給に適している。当社は KEYS Bunkering West Japan 株式会社向けに内航 LNG 輸送 兼 バンカリング船“KEYS Azalea”を建造したのでその概要を紹介する。

図5に示す本船は西日本で初めて稼働する LNG バンカリング船であり、以下の特徴を有している。

- 1) 本船の主寸法は全長×型幅×型深さ×強度喫水＝約 82.4 m×18.2 m×7.8 m×4.98 m、総トン数は約 4700 総トンである。
- 2) 貨物タンクは容積約 3500m³のタイプCタンク 1 基である。タンク容積の船長方向中心位置が船舶の浮心の近傍にあるため、バンカリング前後の船体トリムの変化が少なく、最小限のバラスト操作でオペレーションできる設計としている。
- 3) LNG 移送システムは極低温フレキシブルホースシステムをホースハンドリングクレーンを用いて LNG 燃料船のバンカーマニホールドに接続する方式を採用している。バンカーマニホールドとの接続口には極低温対応の Quick Connection を装備し、ホースの接続/切離し作業の迅速化を図っている。また、緊急離脱装置及び船舶間距離検出装置を装備しており、

LNG 燃料船との距離が拡大する場合や火災等の緊急時に迅速にホースを切り離すことができる。

- 4) ホースハンドリングクレーンを 2 基装備した貨物マニホールドをミッドシップ付近と船首部のそれぞれ両舷に配置し、LNG 燃料船のサイズ・船型やバンカーステーション配置に合わせて使用するマニホールドを柔軟に選択可能としている。
- 5) Ship to Ship 係船設備としてフォーム式フェンダー及びフェンダーダビットを合計 4 組装備している。
- 6) サイドスラスターを船首尾に装備しており、港湾内における離着岸を容易にして荷役時間の短縮を図っている。
- 7) LNG バンカリング船としては国内で初めて LNG と MDO (Marine Diesel Oil) の両方を燃料にできるデュアルフューエル電気推進システムを装備しており、本船自体から排出される CO₂, NO_x, SO_x, PM を従来船に比べて大幅に削減している。



図5 KEYS Azalea

3.4 LNG FGSS

近年クリーンで安価な LNG の船用燃料化への環境は整いつつあるが、LNG 利用に際しては燃料タンクや燃料供給設備など専用設備への追加投資を要する上に、その取扱いが極めて難しいという課題がある。また LNG を主燃料とするエンジンは、燃焼サイクルの違いにより燃料供給仕様が異なる。オットーサイクルエンジンへのガス供給圧は 2MPaG 以下と比較的低圧であるが、ディーゼルサイクルエンジンは 30MPaG 程度の高い供給圧が必要になる。

FGSS (Fuel Gas Supply System) とは LNG 燃料タンクから上記エンジンや船用ボイラなど複数の燃料燃焼機器にガス燃料を供給する装置の総称である。当社は LNG 運搬船建造などで培った技術を応用し、低圧及び高圧 FGSS をそれぞれ開発し商品化した。これらは船用二元燃料機関の陸上試験設備向けに納入実績を積み重ねた上で船用に展開しており、信頼性の高いシステムに仕上がっている。

図6に示すように FGSS は、FGSS モジュール(以下、モジュール)、LNG 燃料タンク、制御システム等で構成されている。図7に示すモジュールには LNG 気化器等燃料供給に必要な主要機器が内蔵され、省スペースかつ操作性・保守性に優れたパッケージになっているため、カーゴスペースの最適設計や建造造船所の工程短縮にも寄与している。LNG 燃料タンクに関してはお客様の要望に応じて各種タンク方式を適用した最適なソリューションを提案することが可能である。

図8に当社が納入した LNG 燃料タイプCタンクの全景を示す。制御システムは LNG 運搬船向け IAS (Integrated Automation System, カーゴハンドリング・推進プラント制御装置) のノウハウを活かして開発されており、幅広い運転モードに対する負荷追従性や操作性に優れたプラントオペレーションを実現している。

当社は、FGSS 製品の供給に加えて、LNG 燃料船を建造・運航する国内外の造船所や船主に対し、初期計画・設計・建造・試運転・運航に至るまでの各フェーズで、包括的な支援サービスを提供している。LNG 燃料船の普及に向けてコンセプト設計、配管艤装等の現場支援、ガステスト

及び就航後の LNG バンカリング支援や入出渠前後の特殊オペレーション支援等様々なニーズに応じていく。

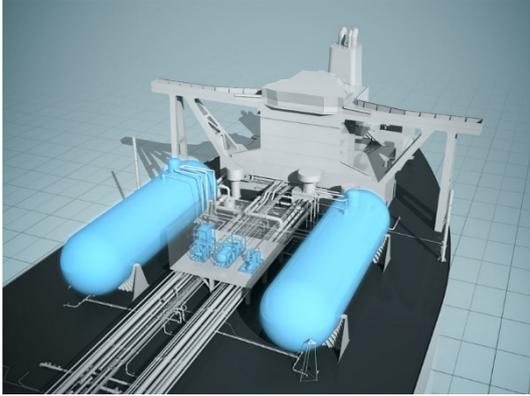


図6 FGSS 船上配置例



図7 FGSS モジュール



図8 LNG 燃料タンク

3.5 AFSS 及び AGAS

AFSS (Ammonia Fuel Supply System) とは、エンジンや船用ボイラなど複数の燃料燃焼機器にアンモニアを燃料として供給する装置の総称である。AFSS はタンクからアンモニア燃料を吸引し、燃料燃焼機器が要求する温度、圧力に調整して当該機器の負荷に応じた量を供給する機能を有している。燃料燃焼機器の仕様によって機器入口の燃料状態が異なるため、液体アンモニアを供給する高圧燃料供給装置 (HP-AFSS) とアンモニアガスを供給する低圧燃料供給装置 (LP-AFSS) が船内に併設されることになる。HP-AFSS は主にディーゼルサイクルエンジン向けのシステムで、LP-AFSS はオットーサイクルエンジン及び船用ボイラ向けのシステムになる。当社では複数のエンジンやボイラで構成される船内プラントに対し、最適な AFSS システムを提案し、要素機器をモジュール化してパッケージで提供することができる。

AGAS (Ammonia Gas Abatement System) とは燃料燃焼機器及び関連配管内部の残存アンモニアを安全に処理する装置の総称である。燃料燃焼機器の燃料切替え時や危急停止時は、当該機器及び関連配管内部に残存するアンモニアを速やかに外部へ排出する必要がある。一方アンモニアを大気へ排出する際には、乗組員や環境への影響に配慮して、一定濃度以下に処理する工程と時間が必要となる。AGAS はこのような二律背反する要請を満足するアンモニアの無害化機能を有している。

AFSS はエンジンを設置する機関室とは別区画となる燃料調整室に配置される。また燃料調整室から機関室内エンジンへアンモニア燃料を供給する配管は、二重化して漏洩リスクを低減する対策が取られる。

2023 年、総合研究所長崎地区に図9に示す実証試験設備が完成した。ここではアンモニア燃料ハンドリングに関する各種試験を繰り返し実施しており、得られた結果をもとに AFSS 及び

AGAS の開発を進めている。



図9 アンモニアハンドリング実証試験設備

4. まとめ

2050年までに国際海運からのGHG総排出量をゼロとする“2023 IMO GHG 削減戦略”が採択された。海事関連業界では戦略目標を達成するための取組みが多数始まっている。具体的な施策としてLNGやアンモニアなどガス燃料に転換するアプローチが有力視されており、これらを取り扱うガスハンドリング技術は益々重要になっている。当社はこれまで培ってきた当該技術をVLGC、アンモニア運搬船、LNGバンカリング船、LNG FGSS、AFSS・AGASなどに展開して、海事業界における低炭素化・脱炭素化を推進し、カーボンニュートラル社会の実現に尽力するとともに、世界規模での環境負荷低減に貢献していく。