

(解説)

# LNG受入基地向けLNG気化器

## LNG Vaporizer for LNG Re-gasification Terminal



江頭慎二\*<sup>1</sup>  
Shinji EGASHIRA

Kobe Steel is the leading LNG vaporizer supplier in the world. We design and fabricate the "Open Rack type Vaporizer" (ORV) and "Intermediate Fluid type LNG vaporizer" (IFV) for large scale LNG receiving terminals. In this paper, we introduce the trends of the present LNG receiving terminal, features of the LNG vaporizers and the topic of the development of our vaporizer.

まえがき＝クリーンな燃料として世界的に需要が増加している天然ガスは、産ガス地から遠隔に位置する日本などの消費地では、極低温（約 $-160^{\circ}\text{C}$ ）状態の液化天然ガス（LNG）として受入れ、再度常温までガス化して発電用燃料および都市ガスとして利用している。

当社は、LNG気化器トップメーカーとして、国内外で積極的に営業展開しているが、近年、これまで納入してきた地域とは異なる国での案件や、従来とは異なる環境および熱源による案件が増加しつつある。

LNG受入基地は、大形LNG船にて輸入LNGを受入れる一次受入基地と、ローリーなどで一次受入基地から運ばれるLNGを受入れて再ガス化する二次受入基地（サテライト基地）とに分類される。本稿では、一次受入基地の最新動向、およびその一次受入基地で使用されるLNG気化器について概説する。

### 1. LNG一次受入基地の動向

#### 1.1 地域の多様化

LNGはかつて、日本や韓国、台湾をはじめ、スペインやフランスといったヨーロッパ先進諸国など、一部先進地域のみにおいて受入れられてきた。しかしながら、今世紀に入ってLNG受入国は多様化し、需要量も増大してきている。近年のLNG受入地域の状況としては、以下が挙げられる。

- ・インド、ブラジルといった高経済成長地域におけるLNG受入基地計画の増大、とくに中国における建設や計画の急増
- ・中近東や中南米地域を含めた、従来LNG受入を行っていない国におけるLNG受入基地計画の増加
- ・かつてLNG輸出国であったインドネシアおよびマレーシアにおけるLNG受入基地建設
- ・シェールガス革命に伴う、既存アメリカLNG受入

基地のLNG液化・出荷基地への転換

#### 1.2 LNG受入基地形態の多様化

従来、LNG受入基地は沿岸に建設され、LNGを常温ガスにまで気化・昇温させるための熱源として主に海水を用い、寒冷地域・時期においては燃焼熱を用いてきた。近年、従来とは異なる形態のLNG受入基地が出現し、新規計画も徐々に増加しつつある。この新規基地形態は、以下に示すものである。

- ①浮体式LNG受入・再ガス化基地（Floating Storage Re-gasification Unit, 以下FSRUという）
- ②空気熱源LNG気化システム

##### 1.2.1 FSRU

FSRUは、既存のLNG運搬船を改造し、気化設備などを設置した上で洋上に係留させてLNG受入基地として供する形態である。FSRUの特徴として以下が挙げられる。

- ・既存のLNG運搬船を利用することにより、陸上基地で必要となる土建工事やLNGタンク建設工事が不要となり、建設期間の短縮化が可能となる
- ・移動させることが可能であり、他場所への転用が可能となる
- ・万が一の災害時における近隣一般住民への被害が回避できるため、建設反対運動が比較的起きづらい
- ・船体の揺動対策が必要となる

FSRUはブラジルなどで既に運用が開始されている。FSRUのイメージを図1<sup>1)</sup>に示す。本図の左側船体がLNG運搬船、右側船体がFSRUであり、FSRU船先（へさき）ストラクチャ最上段に搭載されているのが中間媒体式気化器（Intermediate Fluid type Vaporizer, 以下IFVという）である。

##### 1.2.2 空気熱源LNG気化システム

LNGを気化・昇温させるための熱源として、寒冷地

\*<sup>1</sup> 機械事業部門 機器本部 機器工場



図1 FSRU形態図<sup>1)</sup>  
Fig. 1 Image of FSRU in operation<sup>1)</sup>

域以外の一次受入基地では一般的に海水を用いている。海水を使用する場合、取排水設備に多額の設備費を要するとともに、LNGと熱交換した後の冷海水の排出に対する環境規制が必要となる。

この問題を回避するために、グリコール水の顕熱を利用してLNGを気化させ、冷却されたグリコール水をファンによる送風空気を熱源として加温し、再びLNG気化に供する無海水気化システムが考案された。インドDAHEJ基地において現在稼働中であり、インド国内の他基地においても建設・計画されている。

この気化システムは、基本的に大気温度15℃以上での運転を前提としており、大気温度が高い地域においてのみ適用が可能となる。

## 2. 一次受入基地用LNG気化器の構造・特徴

### 2.1 概要

LNG受入基地は現在、日本国内で30基地以上、海外においても多数の基地が運用されている。本章では、これらの基地で一般的に使用されているオープンラック式気化器（Open Rack Vaporizer, 以下ORVという）、IFVおよびサブマージド式気化器（Submerged Combustion Vaporizer, 以下SCVという）の構造・特徴について述べる。

### 2.2 ORV

#### 2.2.1 ORVの構造・気化プロセス概要

図2にORVの概念図を示す。ORVは、伝熱管内部を流れるLNGと伝熱管外部を流れる海水との間で熱交換し、LNGをガス化させる気化器である。LNGは下方の入口ノズルから流入し、入口マニホールドおよびヘッダ管を通じて伝熱管がカーテン状に配列されたパネルへ送られる。伝熱管内を上昇する間に管外をフィルム状に流下する海水とLNGとの間で熱交換が行われ、常温のガス体として出口ヘッダ、マニホールド管を通じて出口ノズルから送出される。パネルは通常、100本近い伝熱管から構成され、数枚（3～8枚）単位でマニホールド管を介して接合（ブロック化）し、据付現場のコンクリート架構に渡した天井架構フレームから釣下げられる。また、ブロック下部にはスライドタイプのサポートを設け、熱伸縮を吸収する構造となっている。アルミニウム合金からなるパネルにはアルミ-亜鉛合金を表面に溶射すること

によって犠牲陽極効果をもたせ、海水腐食から母材を保護している。

ORVに用いられる伝熱管は、低温靱性などの低温特性や熱伝導性、加工性に優れたアルミニウム合金を使用し、伝熱面積を向上させるためのフィンが設けられている。伝熱管内部には、十字状のアルミニウム合金をらせん状にねじった部材が全長にわたって固定されている。この構造によって乱流が促進される結果、伝熱性能を向上させるとともに、出口へのLNGミスト流出を防いでいる。

#### 2.2.2 二重管式伝熱管：SUPERORV<sup>®</sup>注)

ORVの運転中、伝熱管下部の外壁温度は海水の凝固温度を下回るため、管外に着氷が生成する。とくに低海水温度条件では着氷厚み・高さが著しく増加し、大きな伝熱抵抗となる。このため当社では、伝熱管の下部を二重管構造とし、伝熱管外面への着氷を抑制することで伝熱抵抗を低減させ、気化性能を大幅に向上させた伝熱管（SUPERORV）を実機へ適用している。SUPERORV伝熱管構造を図3に示す。

#### 2.2.3 ORVの特徴

ORVは以下の特徴を有しており、一次受入基地では最も一般的に使用されている。

- ①加熱源が海水のため、ランニングコストが安価である（主にポンプの動力費のみ）
- ②システムが単純で運転性が良く、運転中の伝熱管状

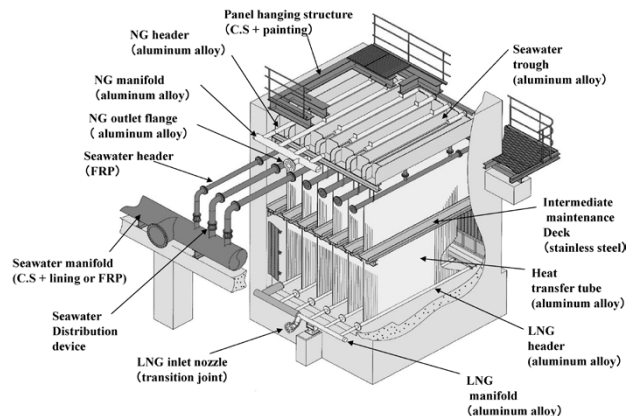


図2 オープンラック式気化器概念図  
Fig. 2 Schematic of Open Rack Vaporizer (ORV)

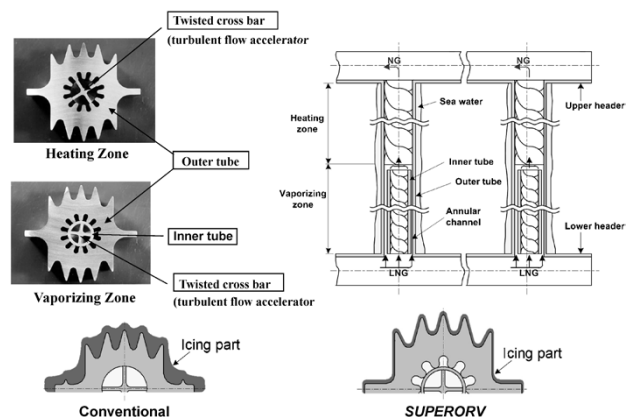


図3 SUPERORV伝熱管構造  
Fig. 3 Configuration of SUPERORV heat transfer tube

脚注) SUPERORVは当社の登録商標である。



況を外部から目視で確認することが可能であり、信頼性が非常に高い

- ③パネル枚数・ブロック数の増減で気化能力に応じた設計が容易であり、300ton/hを超えるような大容量の気化器としても対応が可能である

## 2.3 IFV

### 2.3.1 IFVの構造・気化プロセス概要

IFVは、海水などの加熱源により、プロパンなどの熱媒体を介してLNGを気化させる気化器である。TRI-EXの名称で1970年代に大阪ガス(株)によって開発され、3種類のシェルアンドチューブ式熱交換器(中間熱媒体蒸発器(以下、E1という)、LNG気化器(以下、E2という)、NG加温器(以下、E3という))を組合せた構造を有している。

図4にIFVの概念図を示す。E2の伝熱管内へ供給されたLNGは、E1シェル内上部の中間媒体ガスと熱交換し、ほぼ全量蒸発した後、連絡配管を通じてE3シェル側に移送される。LNGはここで、伝熱管内を流れる海水と熱交換・加温され常温のガスとして送出される。一方、E2の伝熱管外表面でLNGと熱交換して凝縮された中間媒体は、E1シェル内の下部に落下し、伝熱管内を流れる海水と熱交換して再び中間媒体ガスとして蒸発し、E2管内のLNGを蒸発させる。中間媒体は主にプロパンを用いている。

内部を海水が流れる伝熱管(E1およびE3伝熱管)にはチタン合金が用いられ、極めて高い耐海水腐食性を有している。

### 2.3.2 IFVの特徴

IFVの特徴は次のとおりである。

- ①ORVと同様に加熱源が主に海水であるため、ランニングコストが安価である。
- ②LNGと加熱源流体との熱交換を中間媒体を介して行うことにより、流路閉塞(へいそく)などの問題となる加熱源流体の凍結を回避できる。
- ③伝熱管材料としてチタン合金を用いることにより、悪水質海水を加熱源として使用してもエロージョンやコロージョンの問題が回避できる。
- ④熱交換後の中間媒体や冷却された加熱源流体を用いた冷熱利用への応用が可能である。

上記③の特徴を生かした当社の事例として、海水中の浮遊固形成分濃度が10,000ppm(ORVの推奨値である80ppmの125倍)を超えている中国・上海LNG基地に納入したIFVがある。2009年の運転開始以降、良好な状態で運転が継続されている。同様に、海水中の浮遊固形成分濃度が高い中国・寧波LNG基地においてもIFVが採用され、2012年11月より運転が開始されている。

## 2.4 SCV

### 2.4.1 SCVの構造・気化プロセス概要

SCVは、水中バーナによる燃料ガスの燃焼熱によりLNGを気化させる構造であり、水槽、水中バーナ、伝熱管バンドル、燃焼空気ファン、および燃料供給制御装置などから構成される(図5)。

熱交換部である伝熱管バンドルおよび熱供給源の水中

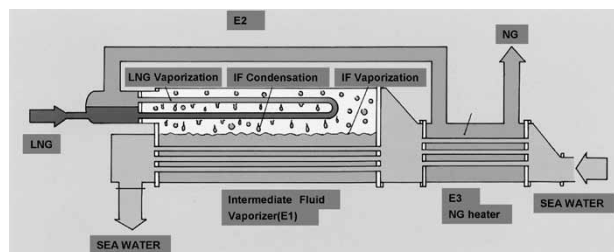


図4 中間媒体式気化器概念図

Fig. 4 Schematic of Intermediate Fluid type Vaporizer (IFV)

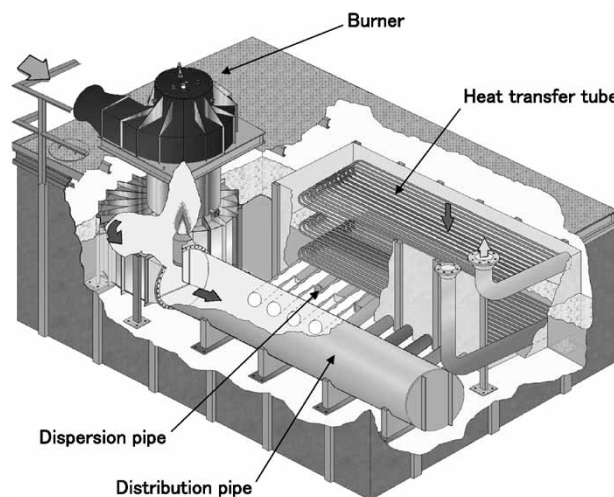


図5 サブマージド式気化器概念図

Fig. 5 Schematic of Submerged Combustion Vaporizer (SCV)

バーナは水槽内に水没して設けられており、水中バーナの燃焼熱により水槽内の水温を上昇させる。また、高温の燃焼ガスを水中に放出することから、燃焼ガスに含まれる水蒸気の潜熱も有効に利用される。なお、この排気ガスは水槽内で微小な気泡を含む二層混合気泡流となって伝熱管バンドルに作用し、より効率的な熱交換を促進する。水中バーナおよび燃焼ガス分配機構はともに水槽内に設けられており、排気用煙突も備えている。

### 2.4.2 SCVの特徴

SCVの特徴は次のとおりである。

- ①燃焼ガスを熱源とするため、同容量の他の気化器に比べて気化器のサイズが小さくなる。
- ②燃料ガスが突然停止した場合でも、水槽内の温水の熱容量によって短時間ながら気化ガス供給を継続することが可能である。
- ③ORVやIFVのような取排水設備が不要であり、建設費が安い。
- ④LNG気化量に対して約1.5%の気化ガスを燃料として消費するため、ランニングコストが非常に高い。
- ⑤燃焼排ガスの環境規制対応が必要とされる。

## 3. LNG受入基地形態多様化への取組

1.2節で述べたように、近年LNG受入基地形態の多様化が進んでいる。本章では、基地形態多様化に対する、当社の取組状況について記述する。

### 3.1 FSRU対応

#### 3.1.1 FSRU用LNG気化器取組実績

1.2.1項で述べたように、FSRUは船体が揺動するた

め、LNG気化器に対しても揺動を考慮する必要がある。1999年に当社は、Mobil社（現ExxonMobil社）からの依頼に基づいて船上受入基地用LNG気化器の検討を行ったところ、中間媒体プロパンのスロッシング（液面の揺動による波打ち現象）対策を講じさえすればIFVが最適であることがわかった。これを受けてスロッシング対策を講じたIFVの特許を出願し、成立した。

Mobil社が計画した案件は最終的に実現には至らなかったが、その後、OLT（Offshore LNG Toscana）社がイタリア・トスカーナ州リボルノ市沖合で運用を行うFSRU用LNG気化器として、気化能力150ton/hを有する3基のIFVをイタリアのSAIPEM S.P.A社から受注し、納入した。OLT FSRUプロジェクトは、IFV納入後に客先事情によって工程が遅延していたが、試運転を経て2013年夏季に運用が開始される予定である。

本案件はイタリア船級（RINA）が適用され、RINAによるIFV各耐圧部材料に対するメカおよび製造プロセス認証、溶接工場認証、溶接施工法・溶接士認証などの各種認証手続き、製作中検査が実施された。さらに、100年に1回の確率で発生が想定される荒天での船体揺動データを用いたサドルや機器接合部を中心とした強度評価解析、中間媒体プロパンのスロッシング解析、および各種危険因子リスクアセスメントなどの図書の承認手続きが必要となった。

OLT FSRUの工事中の写真を図6に示す。

### 3.1.2 FSRU用LNG気化器の今後の課題

FSRUはLNG船の改造によって建設するため、設置スペースが限られ、LNG気化器としても省スペース・重量軽減化が求められる。さらに最近では、気化器単体だけではなく周辺配管や計電装設備、ポンプ類も含めたLNG気化設備としてのパッケージ供給が求められる状況となってきている。

こうした要求に対応するため当社は、IFV高性能化によるコンパクト化、およびLNG気化設備モジュールの検討を進めている。

## 3.2 空気熱源LNG気化システム対応

### 3.2.1 空気熱源IFV（Air-IFV）の開発

1.2.2項で述べたように、海水の代わりに空気を熱源とした一次受入基地用LNG気化器がインドDAHEJ基地



図6 OLT FSRU建設中写真

Fig. 6 Outside view of OLT FSRU (under construction)

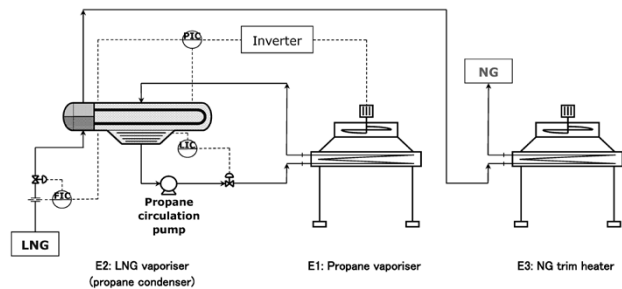


図7 Air-IFV概略フロー

Fig. 7 Schematic process of Air-IFV

において実用化されている。このシステムは、LNGとの熱交換によって冷却されたグリコール水に対してファンによって空気を送風・加温し、再びLNGとの熱交換に供するものである。このときの送風ファンは、LNG総気化量600ton/hに対して100台以上が必要となっている。

当社は、既存のIFV技術をベースとし、海水の代わりに空気を熱源として用い、プロパンを中間媒体としてLNGとの熱交換に供する空気熱源IFV（以下、Air-IFVという）を考案した。上記グリコール水を中間媒体として用いるシステムと比べて、以下の点で優位性がある。

- ①プロパンの蒸発・凝縮潜熱を利用するため、液顕熱を利用するグリコール水と比べて循環量が少なくなり、循環ポンプ動力費低減が図れる。
- ②プロパン加温時は、プロパン蒸発側は高い沸騰伝熱係数が得られるため、グリコール水加温に比べて必要空気量を抑制でき、ファンの台数および動力の低減が図れる。

図7にAir-IFVの概略フローを示す。LNG気化部（E2：プロパン凝縮部）におけるプロパンの圧力が一定となるよう、プロパン循環量および大気温度に応じて空気量のインバータ制御を行うことによって動力を削減する。

### 3.2.2 Air-IFVの今後の展開

現在、Air-IFVの実用化に向けて検討を進めているが、空気熱源によるプロパン蒸発特性を検証し、実機レベルでのプロパン蒸発器の設計手法を確立することが急務である。さらに、制御方法を含めたLNG気化設備としての詳細設計を実施し、上市を図ってゆきたい。

むすび = 本稿では、LNG一次受入基地の最新動向、一次受入基地用LNG気化器の特徴、および当社のLNG気化器への取組状況を概説した。

当社は、既存のORVおよびIFV技術のブラッシュアップを引続き行うと同時に、LNG受入基地形態多様化に応じた最適なLNG気化器システムの開発・提案を行い、LNG気化器の世界トップメーカーとしての地位を堅持してゆく。

### 参考文献

- 1) A. Favi. OLT Livorno FSRU: an innovative solution for the gas industry. Convegni Tematici ATI-2012 Sesto San Giovanni (MI).