

(解説)

LNG気化器の紹介

LNG Vaporizers



菅野弘一*
Koichi Sugano

Kobe Steel is a major LNG vaporizer manufacturer for LNG terminals. There are many types of LNG vaporizers, and each has its own special characteristics including application environment, heating source, vaporization capacity, running costs, etc. It is very important to select the most suitable LNG vaporizer to minimize operating and construction costs in LNG terminals. In this article, various types of LNG vaporizers and their special features are introduced.

まえがき = 環境に対する関心の高まりもあり，LNG の需要は伸びつづけている。一般に LNG は産出国で液化され，需要国へは主にタンカによって輸送される。その後，LNG 受入基地では，気化器によりガス化され，需要に供される。

本稿では，LNG 受入基地で用いられる LNG 気化器をはじめ，サテライト基地向けのものを含めて当社製 LNG 気化器の種類と特徴について紹介する。

1. LNG 気化器の種類

現在，LNG 基地で採用されている主な LNG 気化器を表 1 に示す。

各気化器にはそれぞれに構造や熱源などの特徴があり，各基地の運用計画，LNG 気化容量，熱源の条件をもとに，最適な気化器が採用されている。

表 1 気化設備の種類一覧表
Table 1 LNG vaporizer

| Type | Open rack vaporizer (ORV) | Intermediate fluid type vaporizer (IFV) | Submerged combustion vaporizer (SCV) | Air fin type vaporizer (AFV) | Hot water type vaporizer (HWV) |
|-----------------|--|--|---|--|---|
| Typical picture | | | | | |
| Heat source | Seawater, River water, Warm discharged water, etc | Seawater, River water, Warm discharged water, etc | Fuel gas | Atmospheric air | Hot water |
| Usage | Base load | Base load | Peak shaving, Emergency use | Satellite facility | Satellite facility, Emergency use |
| Capacity | Medium ~ Large | Medium ~ Large | Medium ~ Large | Small ~ Medium | Small ~ Medium |
| Feature | <ul style="list-style-type: none"> LNG flows inside of panel, seawater flows on the outside of panel. | <ul style="list-style-type: none"> LNG is vaporized by intermediate fluid, then heated to specified temperature by seawater or hot water. | <ul style="list-style-type: none"> Pressure drop is higher than other type vaporizer. | <ul style="list-style-type: none"> LNG is vaporised by natural convected or forced drafted air. Defog system is available (option) | <ul style="list-style-type: none"> LNG is vaporized by hot water supplied from other system. Easy maintenance |
| Operation | <ul style="list-style-type: none"> LNG flow is controlled by send out demand. Simple operation | <ul style="list-style-type: none"> LNG flow is controlled by send out demand. In case of overhaul maintenance, intermediate fluid has to be removed/filling. | <ul style="list-style-type: none"> LNG flow and fuel gas for burner are controlled by send out demand. | <ul style="list-style-type: none"> LNG flow is controlled by send out demand. Simplest operation Defrost operation is required. | <ul style="list-style-type: none"> Compact size for small capacity vaporizer |
| Maintenance | <ul style="list-style-type: none"> Visual inspection and cleaning for seawater distribution system Inspection for thermal sprayed coating on panel | <ul style="list-style-type: none"> Visual inspection and cleaning for innerside of shell | <ul style="list-style-type: none"> Inspection for blower working Inspection for controll system of fuel | <ul style="list-style-type: none"> Inspection for fan (applied for forced draft type) | <ul style="list-style-type: none"> Inspection and cleaning for heating medium path |
| Cost | <ul style="list-style-type: none"> Construction cost : High Running cost : Low | <ul style="list-style-type: none"> Construction cost : High Running cost : Low | <ul style="list-style-type: none"> Construction cost : Low Running cost : High | <ul style="list-style-type: none"> Construction cost : Low Running cost : Low | <ul style="list-style-type: none"> Construction cost : Low Running cost : High |
| Main material | Aluminum alloy | Austenite stainless steel, Titanium alloy | Austenite stainless steel | Aluminum alloy | Austenite stainless steel |

*機械エンジニアリングカンパニー エネルギー・原子力機器本部 高砂機器工場

2. LNG 受入基地用気化器

LNG 受入基地は、タンクで輸送された LNG を直接受入れるため、すべて臨海部に立地している。従って、ベースロード用気化器としては、豊富な海水を熱源として利用できるオープンラック式気化器 (ORV) や、中間熱媒体式気化器 (IFV) が主に採用されている。

また、ピークシェーピング用気化器としては、比較的建设費の安いサブマージドコンバクション式気化器 (SCV) が一般的に採用されている。

2.1 オープンラック式気化器 (ORV)

2.1.1 概要

図 1 にオープンラック式気化器の概念図を、図 2 に構造図を示す。

オープンラック式気化器は、主に海水を熱源とし、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・入口マニホールド・下部ヘッド管から流入し、伝熱管がカーテン状に並べられた

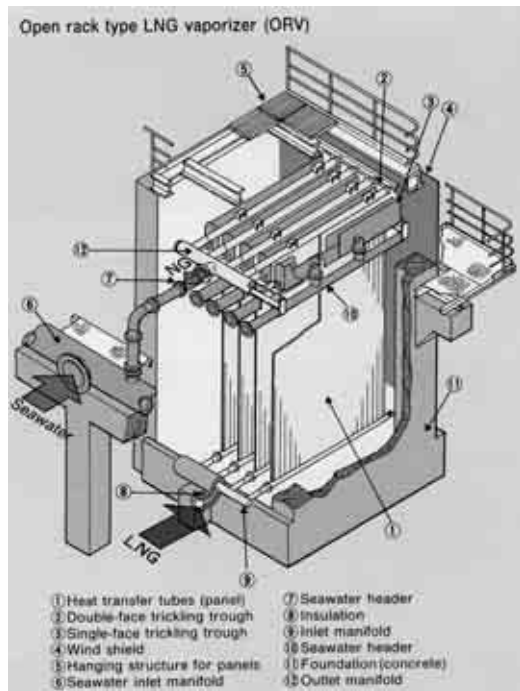


図 1 オープンラック式気化器
Fig. 1 Open rack vaporizer (ORV)

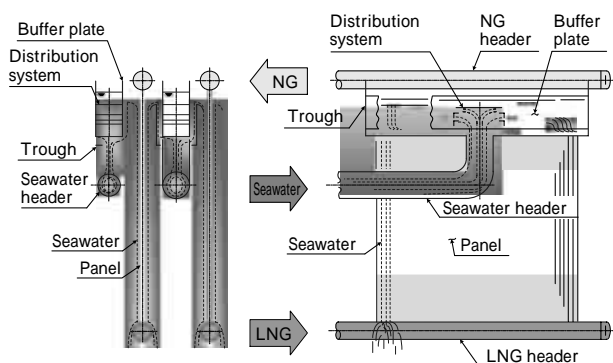


図 2 オープンラック式気化器の構造
Fig. 2 Outline of open rack vaporizer

パネルへ送られる。その後、各伝熱管内を上昇する間に管外を流下する海水と熱交換し、常温のガス体として出口ノズルから排出される。

一方、海水は各海水ヘッド管からパネル上部に設けられたトラフへ供給され、パネル外面をパネルに沿って均等なフィルム状で流下しながら、管内を上昇する LNG と熱交換し、下部の集水溝を経て排水される。

2.1.2 構造

ORV に用いられる伝熱管は、熱伝導性に優れたアルミ合金を採用し、伝熱面積を向上させるためのフィンが設けられている。

伝熱管内部には全長にわたって乱流促進体が固定されており、LNG 通液中に管中心部に生じる LNG の液柱をこの構造により強制的に内壁に衝突させ液柱を破壊させることで、伝熱性能を向上させるとともに、出口配管への LNG ミスト流出を防いでいる。

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を介して接合 (ブロック化) して、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吊下げられる。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。

アルミ合金からなるパネルには、アルミ - 亜鉛合金をパネル表面に溶射することで犠牲陽極効果をもたせ、海水から母材を保護している。

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、管外に着氷するが、この着氷は熱交換上の伝熱抵抗となる。従って、いかにして着氷を抑制するかが性能を向上させるうえでのポイントとなる。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、気化性能を向上させた伝熱管 (SUPERORV) を開発し¹⁾、実機へ適用している。

2.1.3 特徴

オープンラック式気化器の特徴は次のとおりである。

- 1) 加熱源が海水のため、ランニングコストが安い (主にポンプの動力費のみ)
- 2) 加熱源である海水は、落下液膜の原理を利用しており、管外熱伝達率が高い。
- 3) 各パネル間に点検デッキを設けることにより、伝熱管の保守・点検が容易である。
- 4) シンプルな構造のため、運転が容易であり、信頼性が非常に高い。
- 5) パネル枚数を増やすことにより、大容量の LNG 気化器を構成することができる。

2.1.4 運用上留意すべき点とその対策

オープンラック式気化器の運用上留意すべき点とその対策は次のとおりである。

- 1) パネル内の熱応力を避けるため、各トラフからパネル全長にわたって海水が均等に分散されていることが重要である。当社の ORV では、設計海水流量に応じた海水分散構造を開発し、パネルへの均等な海水分散を実現している。
- 2) パネルの疲労寿命を向上させるために、起動直後及

び停止直後において伝熱管端部に発生する熱応力を小さくする必要がある。このために、伝熱管溶接端部を特に滑らかに仕上げている。

2.2 中間熱媒体式気化器 (IFV)

2.2.1 概要

中間熱媒体式気化器は、海水などの加熱源の温度と LNG の温度との間に沸点及び凝縮点を有するプロパンなどの熱媒体を介して熱交換させる LNG 気化器である。

三つ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)、LNG 気化器 (以下、E2)、NG 加温器 (以下、E3)) を組合わせた構造を有している。

なお、熱源として海水の代わりに温水を用いて、海水の取水が困難な立地の中規模基地で採用されることもある。

2.2.2 構造

図 3 に概念図を示す。E2 の伝熱管内へ供給された LNG は、E1 シェル内の熱媒体ガスと熱交換し、ほぼ全量蒸発した後、E3 に移送され、ここで海水と熱交換・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 と熱交換し凝縮された熱媒体は、E1 の下部シェル内に溜まり、チューブ内の海水と熱交換し、再び熱媒体ガスとして蒸発し、E2 管内の LNG を蒸発させる。

低温の LNG 及び中間熱媒体が接触する部分にはオーステナイトステンレス鋼が主に採用される。

2.2.3 特徴

中間熱媒体式気化器の特徴は、次のとおりである。

- 1) 一般に加熱源は海水であり、また水量が比較的少なく済むため、ランニングコストが低い。
- 2) 中間熱媒体の種類と圧力を最適化することで、シェルアンドチューブ式気化器で流路閉塞などの問題と

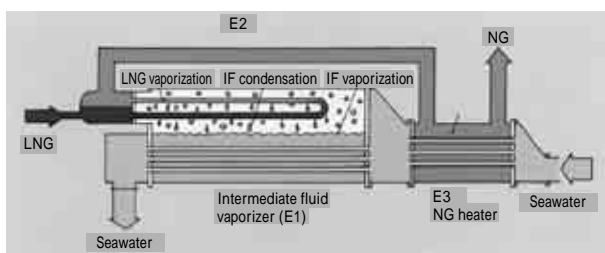


図 3 中間熱媒体式気化器

Fig. 3 Out line of intermediate fluid type vaporizer (IFV)

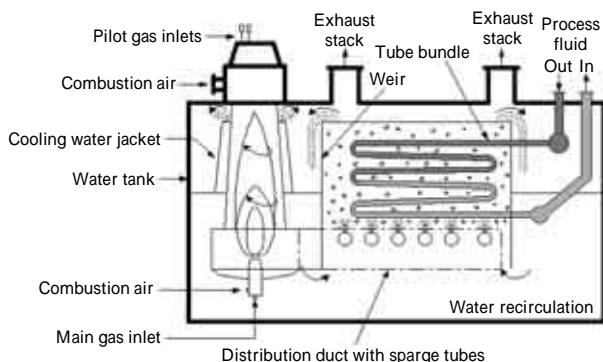


図 4 サブマージドコンバッション式気化器

Fig. 4 Submerged combustion type vaporizer (SCV)

なる加熱源流体、中間熱媒体の凍結を回避できる。

- 3) 三つの熱交換器をコンパクトに組合わせることで、設置面積を削減できる。
- 4) 熱交換後の中間媒体を用いた冷熱発電、循環冷却など、冷熱利用への応用が可能である。

2.2.4 運用上留意すべき点とその対策

加熱源流体が海水の場合、伝熱管材料の防食が必要である。このような場合、チューブ材料としてチタン合金、またシェル材質としてはライニング材が用いられる。

2.3 サブマージドコンバッション式気化器 (SCV)

2.3.1 概要

図 4 に、サブマージドコンバッション式気化器 (SCV) の概念図を示す。

サブマージドコンバッション式気化器は、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、気化器タンク、水中バーナ、チューブバンドル、燃焼空気ファンのほか、燃料供給制御装置などで構成される。

熱交換部である熱交換コイル及び熱供給源の水中バーナは、気化器タンク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タンク内の水温を上昇させるとともに、高温の燃焼ガスが水中に放出されることで、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、この排気ガスは気化器タンク内で微小な気泡を含む二相混合気泡流となって熱交換コイルに作用し、より効率的な熱交換を促進する。

水中バーナへの熱量供給は、LNG 流量に応じて制御される。

2.3.2 構造

サブマージドコンバッション式気化器の熱交換コイルには、低温の LNG にも耐えるオーステナイトステンレス鋼が採用される。水中バーナ、分配機構はともに気化器タンク内に設けられているとともに、排気用煙突を備えている。密閉構造の気化器タンクには取外し可能なデッキ、点検ハッチが設けられている。

2.3.3 特徴

サブマージドコンバッション式気化器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、同容量のほかの気化器に比べ気化器のサイズが小さくなる。また、燃焼ガス中の水蒸気の潜熱も有効利用されるため熱効率が高い。
- 2) 水中バーナで直接 LNG を加熱せず、中間媒体として気化器タンク内の工水を利用するので、安全性が高い。
- 3) 燃料ガスが突然停止しても、気化器タンク内の温水の熱容量により、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。
- 4) 気化量の約 1.5% の燃料ガスを水中バーナで消費するため、ランニングコストが比較的高い

2.3.4 運用上留意すべき点とその対策

使用条件により、チューブバンドルとそのサポート材の隙間に塩化物イオンが濃縮され、塩化物イオンによる隙間腐食が起きることがあるが、サポート材形状を工夫

しチューブバンドルと点接触する構造とすることにより、隙間腐食の起きにくい構造としている。

3. LNG サテライト基地用気化器

LNG 受入基地と異なり、LNG サテライト基地は臨海部以外に設置されることも多く、また規模も小さいことから、空気を熱源とする空温式気化器や温水を熱源とする温水式気化器が用いられる²⁾。

3.1 空温式気化器 (AFV)

3.1.1 概要

アルミ合金製のフィン付伝熱管を組合わせ、伝熱管周囲の空気を熱源として LNG を気化させる最もシンプルな LNG 気化器である。

気化効率の向上のため、ファンを併設し熱源となる空気を強制的に伝熱管へ送入する強制通風型と、通風用ファンを持たない自然通風型に大別される。

3.1.2 構造

図 5、図 6 に自然通風型及び強制通風型の概念図を示

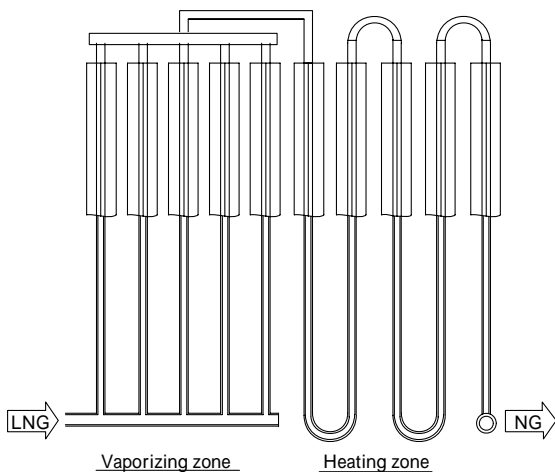


図 5 空温式気化器 (自然通風式)

Fig. 5 Air fin type vaporizer (AFV) (natural convection type)

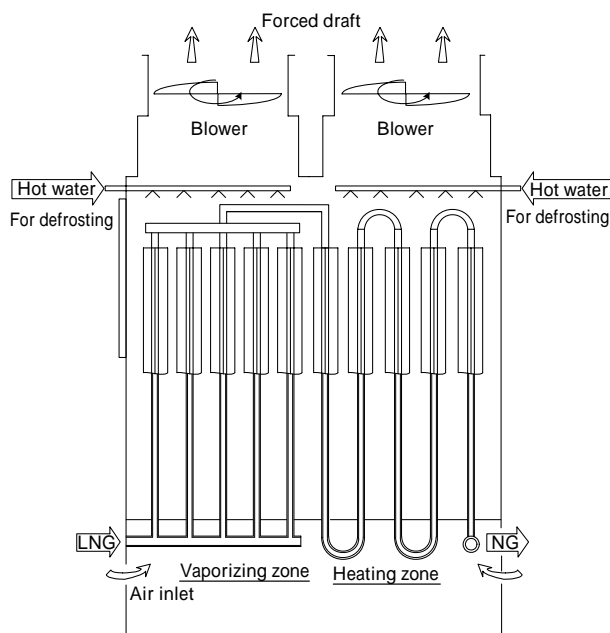


図 6 空温式気化器 (強制通風式)

Fig. 6 Air fin type vaporizer (AFV) (forced convection type)

す。LNG はアルミ製のフィン付伝熱管内を流れるうちに、伝熱管外部の大気と熱交換し、気化され送られる。

一般に空温式気化器では、運転開始後に空気中の水分が伝熱管 (フィン) 表面に着氷し伝熱性能が低下するため、一定時間運転した後に一時的に気化運転を停止し、大気の熱または温水を利用して解氷する必要がある。この運転停止期間中は、並列して設置されたほかの空温式気化器に運転が切替えられる。

なお、この解氷のための起動・停止操作の繰返しにより機器に温度変化が生じるため、サポート部材などは熱応力を軽減されるよう配慮している。また、停止中の系内での LNG の濃縮により、再起動時の出口ガスの熱量が高くなることもあるため、その対策として気化器出口配管にガスホルダまたはミキシングタンクを設けることがある。

3.1.3 特徴

空温式気化器の特徴は次のとおりである。

- 1) 構造が簡単であり比較的付帯設備が少ない。本体の保守点検が容易である。
- 2) 空気を熱源とするため低ランニングコストであるが、1 台の気化容量は小さい。また、解氷操作のため、連続運転時間に制約がある。
- 3) 運転時の気象条件 (気温・湿度) により気化効率の変動 (低下) が起こる可能性がある。
- 4) 自然通風型では運転時に白煙の発生がある。白煙対策としては、自然通風型気化器に白煙を吸込んで拡散させる消霧装置を併設すると効果が高い。
- 5) 強制通風型気化器では、自然通風型気化器に比べ伝熱効率が高く、また白煙の発生もない。連続運転時間を長くできる反面、ファンのメンテナンスが必要である。

3.1.4 運用上留意すべき点とその対策

空温式気化器では、各伝熱管への LNG 流量の変動により、伝熱管とヘッダ管の溶接部に繰返しの熱応力が発生するが、伝熱管の間に適切な剛性のサポートを設けることで発生する応力を低減している。

3.2 温水式気化器 (HWV)

3.2.1 概要

文字どおり温水を熱源とする気化器で、ステンレス製伝熱管コイルを温水が流動する槽内に設置し、温水と直接熱交換させ LNG を気化させる。

加熱源として温水を使用するため、ボイラなどの付帯設備を必要とするが、空温式気化器では十分な性能が得られない寒冷地でも安定した気化運転が可能である。主に温水供給設備を有するサテライト基地に設置される。

温水式気化器には、その伝熱管、また温水槽の形状・配置からいくつかの種類があるが、当社では、図 7 に示すような円筒型温水バス式気化器を開発し、各地のサテライト基地へ納入してきた。この円筒型温水バス式気化器は、その円筒形状の外観のため設置面積が小さく、工事・メンテナンス性ともに優れている。

3.2.2 構造

図 7 に示す円筒型温水バス式気化器は、構造的には横

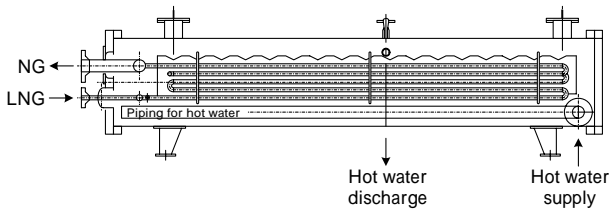


図7 温水式気化器
Fig. 7 Hot water type vaporizer (HWV)

置型のシンプルなシェルアンドチューブ式気化器であるが、内部をLNGが通る伝熱管は、温水側の氷結トラブルが発生しにくいように十分な間隔をもって温水槽内に設置されている。

また、この気化器はシェル内にバフフルを設け熱媒体の流動を均一化させ、LNGと温水の流量バランスを適切に設定することにより、LNGの冷熱を冷水として取出すことも可能である。

3.2.3 特徴

温水式気化器の特徴は次のとおりである。

- 1) 省スペース、低イニシャルコストである。ただし、温水を供給するためランニングコストが高く、主にバックアップ用として採用される。
- 2) 空温式気化器のような解氷操作が不要で、連続運転が可能である。

むすび = 本稿では、LNG気化器として使用される当社製熱交換器について、概要と構造を概説した。

LNG気化器には、各種類ごとに容量や運転コストなどの特徴があるが、本稿がこれら各気化器をご理解いただく上での参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 後藤正宏ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.53, No.2 (2003) p.94.
- 2) 岩崎正英ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.53, No.2 (2003) p.23.