

(解説)

中間媒体式LNG気化器 (IFV) を用いたLNG受け入れ基地における冷熱利用

鈴木朝寛*・江頭慎二・澄田祐二

Utilization of Cold Energy in LNG Receiving Terminal based on LNG Vaporizer Using Intermediate Fluid

Tomohiro SUZUKI・Shinji EGASHIRA・Yuji SUMIDA

要旨

LNG気化器の一つである中間媒体式気化器 (IFV) は従来、冷熱発電などのLNGの冷熱利用が可能な気化器として用いられている。しかしながら近年、ガスタービン吸気冷却などにIFVからの冷水を利用する冷熱利用案件が増加している。

本稿では、洋上受入基地を含めたLNG受入基地の最新動向のほか、冷熱利用するうえでのIFVのLNG気化器としての特徴、およびIFVを用いたガスタービン吸気冷却をはじめとする冷熱利用事例を紹介した。

Abstract

Intermediate fluid-type vaporizers (IFVs), which are a type of LNG vaporizer, have been used to take advantage of the cold energy of LNG, for example, in cold power generation. Recently, there is an increasing number of cold-energy utilization projects using cold water from an IFV for, e.g., the intake air cooling of gas turbines. This paper introduces the latest trends in LNG receiving terminals, including offshore receiving terminals, the features of IFVs as LNG vaporizers for cold energy utilization, and examples of cold energy utilization using IFV, including gas-turbine-intake air cooling.

キーワード

LNG気化器, LNG冷熱利用, ガスタービン吸気冷却, LNG冷熱発電, 中間媒体式LNG気化器

まえがき=天然ガスはクリーンな燃料として世界的に需要が増加している。我が国をはじめとする多くの天然ガス消費地は産ガス地から遠隔に位置するため、天然ガスはいったん極低温(約-160℃)状態の液化天然ガス(以下、LNGという)として輸送される。消費地においてLNGは再度常温まで戻してガス化し、発電用燃料や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に多数納入してきている。そうしたなか近年、これまで納入してきた地域とは異なる国からの引き合いや、LNGの冷熱有効利用を目指した案件の引き合いが増加しつつある。

LNGは、大型LNG運搬船によって産ガス地から海上輸送され、消費地においてLNG受入基地から陸揚げされる。このLNG受入基地は一次受入基地と二次受入基地(サテライト基地)とに分類される。一次受入基地は海上輸送されてきたLNGを最初に受け入れる施設である。このLNGをローリーなどで陸送して再ガス化する施設が二次受入基地である。

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取り入れられている中間媒体式気化器(Intermediate Fluid type Vaporizer, 以下IFVという)を用いたLNG冷熱有効利用について概説する。

1. LNG一次受入基地の動向

1.1 地域の多様化

LNGはかつて、我が国をはじめとして韓国や台湾、旧西ヨーロッパ諸国及び中国において、陸上のLNG受入基地で受け入れられてきた。しかしながら、近年の米国におけるシェールガス革命や、地球温暖化防止のためのCO₂削減に向けた世界的な取り組みによるガス火力発電の増加に伴い、LNG受け入れ国は多様化し、需要量も増大してきている。近年のLNG受け入れ地域には以下のような特徴がある。

- ・中近東や中南米地域を含めた、これまでLNGの受け入れを行っていなかった国におけるLNG受入基地建設の増加
- ・かつて自国で天然ガスを産出し消費していたフィリピンやミャンマーなどの東南アジア諸国におけるLNG受入基地建設計画の増加

1.2 LNG受入基地形態の多様化

従来、LNG受入基地は陸上の沿岸部に建設され、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が用いられてきた。また、海水温が低い寒冷地域・時期においては燃焼熱が用いられてきた。いっぽう、我が国や韓国、台湾などの伝統的なLNG輸入国以外の

* 機械事業部門 産業機械事業部 機器本部 技術部

国々においては、近年LNG受入基地の早急な導入、および建設コスト削減を目的に従来の陸上の受入基地に代わる洋上の受入基地が新設され始めている。また、新たにLNGを受け入れ始めた国々においても洋上の基地数が徐々に増加しつつある。

この洋上LNG受入基地には、以下に示す二つの形態がある。

- 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浮体式LNG受入・固定再ガス化基地 (Floating Storage Unit + Re-gasification Unit, 以下FSU + Re-gasという)

上記形態のLNG受入基地は発展途上国での導入が多く、2019年時点ですでに27基地のFSRUが稼働している。このことは、陸上LNG受入基地と合わせたガス気化能力のうちの約1割をFSRUが占めていることを示している。また、FSU + Re-gasは3基地が稼働しており、1基地が稼働間近である¹⁾。

1.2.1 FSRU

FSRUは、気化設備などを設置したLNG運搬船を洋上に係留してLNG受入基地として供する形態である。LNG気化器としてIFVが採用された基地として、OLT (Offshore LNG Toscana) 社がイタリアのトスカーナ州リボルノ市沖合で運用するFSRUがある。そのFSRUの外観とLNG気化器として搭載されたIFV3基の外観を図1に示す。FSRUの特徴として以下の3点が挙げられる。

- ・陸上基地で必要となる土工事が不要であることに加えて、LNGタンクを備える運搬船を造船所で建造することから陸上でのLNGタンク建設工事が不要である。このため、建設期間の短縮化と建設コストの低減が可能となる。
- ・基地自体が船舶であるため海上を移動させることができ、将来においてほかの場所での活用が可能となる。
- ・洋上基地のためLNG冷熱利用は同じ船上に限られる。しかしながらこれまでは船上での利用用途がなく、LNG冷熱が有効利用された実績がない。

現在のFSRUでの主要なLNG気化プロセスはシェルアンドチューブ式である。海水の熱で温められたエチレングリコール水を用いてLNGと熱交換する方式であり、この方式のLNG気化器が採用されている基地が多い。

1.2.2 FSU + Re-gas

FSU + Re-gasは、FSRUにおける再ガス化の設備を陸上または固定プラットフォーム上に建造し、LNG受入基地として供する形態である。IFVがLNG気化器として採用されたFSU + Re-gas形態の基地として、EGM (ElectroGas Malta) 社がマルタ共和国で運用するガスタービン複合発電プラント (以下、GTCCという) がある。図2にFSU + Re-gasとGTCCの外観を示す。FSU + Re-gasの特徴として以下の4点が挙げられる。

- ・FSRUと同様、陸上基地での工期やコストの大半を占めるLNGタンクの建設工事が不要となり、建設

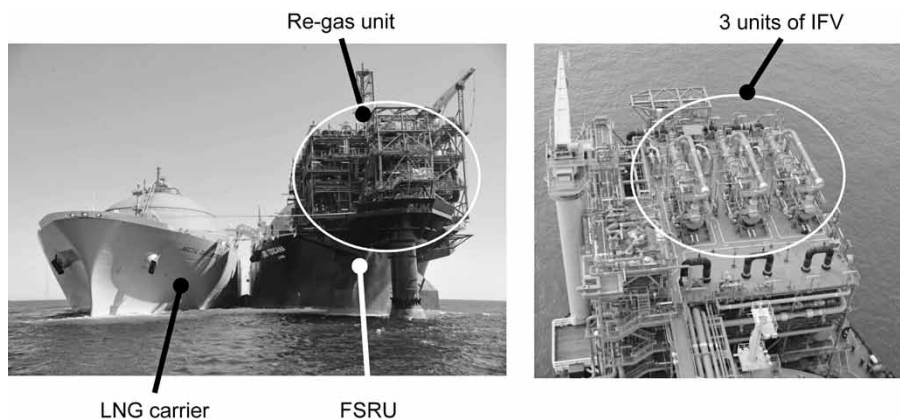


図1 イタリアOLT社のFSRUとLNG運搬船 (左) およびFSRU上のIFV (右) (写真提供: OLT社)
Fig.1 FSRU and LNG carrier (left), and IFVs on FSRU (right) by OLT of Italy (photo courtesy of Offshore LNG Toscana)

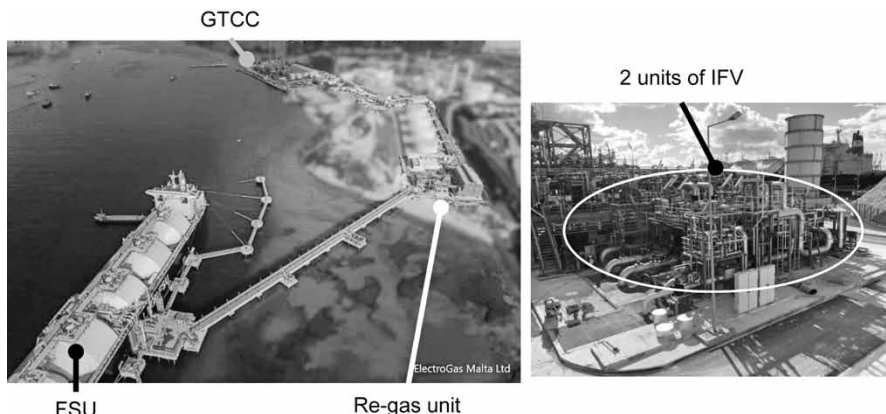


図2 マルタEGM社のFSUと発電所 (左) およびRe-gasユニットのIFV (右) (写真提供: マルタEGM社)
Fig.2 FSU and power plant (left), and IFVs on re-gas unit (right) by EGM of Malta (photo courtesy of ElectroGas Malta Ltd.)

期間の短縮化が可能となる。

- ・再ガス化設備は船上ではなく陸上に建造することから、FSUとしては通常の中古LNG運搬船を使用することができる。このため、FSRUよりも発注できる船会社の選択肢の幅が広がる。
- ・期間リース契約が多いFSRUと異なり、再ガス化設備をオーナーまたは地方政府がインフラとして保有することができる。
- ・再ガス化設備を陸上に建造することから、陸上の一次受入基地と同様にLNGの冷熱の有効利用が容易になる。

2. 一次受入基地用LNG気化器の構造と特徴

2.1 LNG気化器の概要

陸上のLNG受入基地で一般的に使用されているLNG気化器はオープンラック式気化器（Open Rack Vaporizer, 以下ORVという）やIFV, サブマージド式気化器（Submerged Combustion Vaporizer, 以下SCVという）がある。ORVとIFVは海水を熱源とするLNG気化器である。SCVは海水温が低くて熱源として使用できない状況・時期にのみ使用されるバックアップ用途の気化器である。水中バーナによる燃料の燃焼熱によってLNGを気化させる構造であり、燃焼排ガスの環境規制などへの配慮が必要である²⁾。

これらのLNG気化器のうち、LNG冷熱利用の導入実績が多いのがIFVである。

2.2 IFV

2.2.1 IFVの構造と気化プロセスの概要

IFVは、海水などの熱源を利用し、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種のシェルアンドチューブ式熱交換器（中間媒体蒸発器（以下、E-1という）、LNG気化器（以下、E-2という）、LNG加温器（以下、E-3という））を組み合わせた構造を有している。

図3にIFVの概念図を示す。E-2の伝熱管内に供給されたLNGは、E-1シェル内上部の中間媒体ガスと熱交換される。ほぼ全量のLNGが蒸発した後、連絡配管を通

じてE-3シェル側に移送される。E-3においてLNGは、伝熱管内を流れる海水との熱交換によって加温されて常温のガスとして送出される。いっぽう、E-2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、E-1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てE-2管内のLNGを蒸発させる。

中間媒体には主にプロパンを用いている。FSRUなどの限られた場所において可燃性ガスであるプロパンを中間媒体として使用することに懸念を示す顧客に対しては、オプションとして非可燃性のプロパン代替熱媒を中間媒体として使用する提案を実施している³⁾。

内部を海水が流れる伝熱管（E-1およびE-3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。

2.2.2 IFVの特徴

LNG気化器としてのIFVの特徴は次のとおりである。

- ①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。
- ②凝固点の低い中間媒体を介してLNGと加熱源流体との熱交換を行うことにより、加熱源流体の凍結による流路閉そくなどの問題を回避できる。
- ③伝熱管材料としてチタン合金を用いることにより、劣悪な水質の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発生を回避できる。
- ④熱交換後の中間媒体および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④の冷熱利用への応用例としては、中間媒体であるプロパンを利用したLNG冷熱発電システムがある。LNG受入基地の省エネルギー化を目的に開発され、1970年代より日本各地のLNG受入基地においてガス会社を中心に盛んに導入されてきた。冷熱発電プラントの外観およびプロセス概略をそれぞれ図4および図5に示す。この冷熱発電プラントは、大阪ガス（株）をはじめ現在も継続して運転中である。

2010年代後半に入り、国内基地での更新案件や中国の上海LNG基地において、当社のIFVが採用された冷熱発電システムの導入が決定されている。

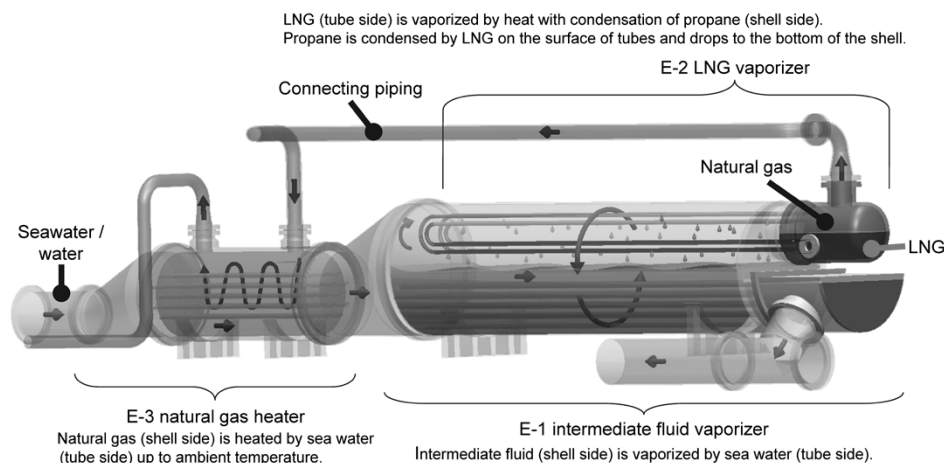


図3 中間媒体式気化器概念図
Fig.3 Schematic of intermediate fluid vaporizer (IFV)



図4 大阪ガス株式会社のLNG冷熱発電プラント外観

Fig.4 Appearance of LNG cryogenic power generation plant in Osaka Gas Co., Ltd.

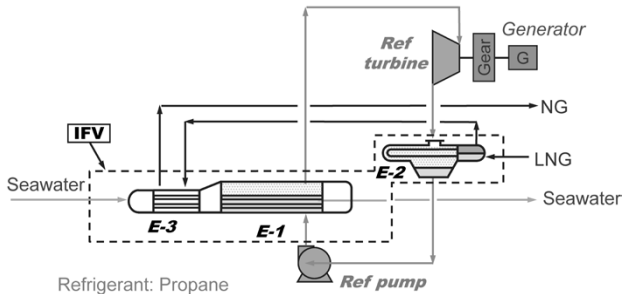


図5 LNG冷熱発電システムのプロセスフロー（ランキンサイクル）概略

Fig.5 Schematic of process flow for LNG cryogenic power generation system (Rankine cycle)

3. IFVを用いたLNG冷熱利用

2.2節で述べたように、LNGの冷熱を利用するLNG気化器としてIFVが検討されている案件が増加している。本章では、すでにLNG受入基地で運用されているIFVを用いたLNG冷熱利用について解説する。

3.1 LNG冷熱利用の概要

LNGは -160°C 程度の極低温流体であり、その冷熱は通常は有効利用されずに、熱交換後の海中などに捨てられている。そこでLNG受入基地のオーナーは、基地運営の経済的観点やCO₂削減の観点からLNG冷熱の有効利用に取り組んできた。

LNG受入基地におけるLNGの冷熱利用に対しては以下のような用途が考えられている。

- ① LNG冷熱発電システム
- ② ドライアイスの製造、冷凍倉庫などへの利用
- ③ ガスタービン吸気冷却システム
- ④ 植物工場やデータセンタなどにおいて使用される冷房機器への冷熱供給

上記①および②の用途は日本のLNG受入基地において古くからガス会社を中心に取り入れられてきた。以下の節では、近年増加している東南アジアなど亜熱帯地域でのLNG受入基地において多く導入が検討されている③および④を概説する。

3.2 ガスタービン吸気冷却に用いられるLNG冷熱利用

IFVでは海水などの熱源が配管内を流れている。このためLNG気化器と冷熱利用先に対して、1台の熱源ポンプで熱源を往復循環させることができる。これに対してORVは、熱交換器本体の上部から大気開放された伝

熱管の外表面に海水を流下させて熱交換を行う。このため、ORVへの供給用および冷熱利用先への送出用に2台の熱源ポンプが必要になる。また、伝熱管を流下中に大気に触れるため異物や水質の管理が必要になる。したがって、熱源循環型の冷熱利用ではIFVの方が効果的であるといえる。

3.2.1 ガスタービン吸気冷却

ガスタービンは、吸入圧縮した空気を燃焼器内で燃料と混合して燃焼させ、その燃焼ガスの圧力を利用して発電機を回転させて発電を行う。圧縮機が吸入する大気温度はISO規格によって 15°C と規定されており、定格出力も大気温度 15°C で設計されている。

高温多湿の亜熱帯地域では年間を通して 15°C 以上となる地域が多い。こうした地域においては、空気密度が小さくなるためガスタービンの燃焼器へ送られる空気の質量が低下する。そのため、ガスタービンの発生動力が低下して発電量が減少する。たとえば 35°C の空気を 15°C に冷やすと空気の密度は10%増え、発電量も10%増大する。こうした理由により、高温多湿の亜熱帯地域においてガスタービンの吸気冷却に取り組む経済的メリットは大きい。

吸気冷却にはいくつかの方式が採用されている。そのなかで最も効率が良い方式は、冷水によって吸気を直接冷却する方法である。すなわち、吸気フィルタ室に組込まれた吸気冷却コイルに冷水を供給し、吸気との間で直接熱交換を行って吸気温度を 15°C 以下に下げる方式である。IFVを用いたガスタービン吸気冷却プロセスフロー概略図を図6に示す。ガスタービン吸気冷却の実施例の一つが東南アジアなどのGTCCにある。この発電所では、電力を用いたターボ冷凍機から冷水の供給を受けてガスタービンの吸気冷却を行い、発電効率を上げている⁴⁾。

東南アジアなどで近年建設されるLNG受入基地では、ガス・ツー・パワーと呼ばれるLNG受入基地とGTCCとが一体で建設される案件が増加してきている。これらの案件は以下の理由からLNG冷熱を利用したガスタービンの吸気冷却に適している。

- ・年間を通して気温が 15°C を超える高温地域であることが多い。
- ・LNG受入基地とGTCCとの距離が近いため、熱媒体の移送が容易である。
- ・LNG受入基地の事業者とガス火力発電所の事業者とが同じ事業者である場合が多いため、冷熱利用の運用面や経済メリットの利害が対立することがなく、投資判断を行いやすい。

3.2.2 吸気冷却システムへのIFVの利点

LNG冷熱を用いたガスタービン吸気冷却システムにおいて実績があるLNG気化器は、エチレングリコールを循環熱源として用いるシェルアンドチューブ式LNG気化器 (Shell and tube LNG Vaporizer, 以下STVという)⁵⁾と工業用水を循環熱源として用いるIFVがある²⁾。STVはカリブ海諸国でシステム導入実績があり、IFVは我が国のほか、マルタ共和国およびタイ王国での

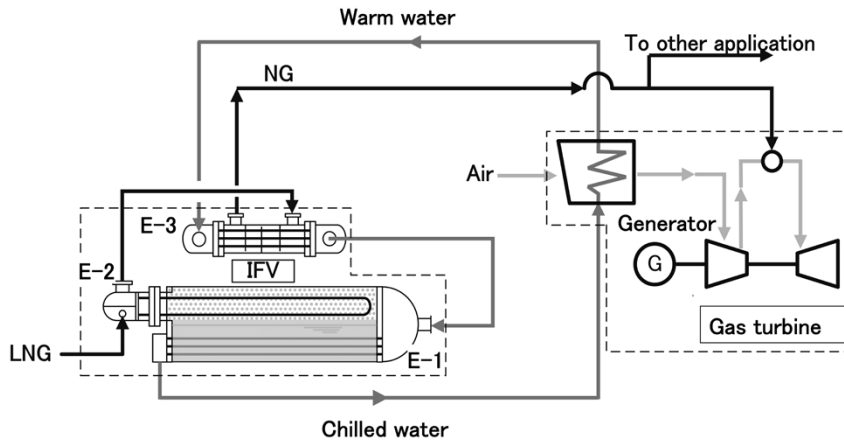


図6 IFVを用いたガスタービン吸気冷却プロセスフロー概略
Fig.6 Schematic of process flow for cooling intake air of gas turbine using IFV

システム導入実績がある。IFVを用いたシステムの特長は次のとおりである。

- ・吸気冷却システムに必要とされる熱源の温度は約5℃であり、IFVが循環熱源として用いる工業用水でも凍結しない温度域である。このためシステムの運用が可能である。
- ・STVではLNGと循環熱源とを直接熱交換する。このため、5℃の工業用水では凍結の可能性が高く採用できない。しかしながらIFVは、LNG気化プロセスに中間媒体を用いているため循環熱源として5℃の工業用水を用いても凍結の懸念なく運転することが可能である。
- ・IFVは循環熱源に工業用水を用いることが可能なため、グリコール水に比べて安価に準備できる。いっぽう循環熱源は、ガスタービン吸気冷却用途以外にも同時に他の用途に利用されることが多い。こうした用途において、温度調整のための貯槽タンクが必要な場合、水とグリコール水とでは循環熱源の充填コスト差はさらに大きくなる。
- ・グリコール水は配管に対する腐食性があるため水質管理が必要であるが、工業用水は基本的に水質管理の必要がない。

上記のようなIFVの利点から、近年のLNG気化器の案件では循環熱源として工業用水を用いるIFVが選定される件数が増えてきている。

省エネルギーの観点においては、IFVを用いた吸気冷却に対して以下のような効果が期待できる。

- ・IFVがLNG流量100 t/hの能力である場合、約20,000 kWの冷却能力を有しており、IFVでの冷熱供給に必要な消費エネルギーは約700 kW（水循環ポンプ動力）である。いっぽう、同じ冷却能力のターボ冷凍装置では約4,200 kW（冷凍機動力、冷却塔ファン動力および水循環ポンプ動力）の消費エネルギーが必要であり、IFVを用いたLNG冷熱利用の経済効果は大きい。

図2に示したマルタ共和国の基地における発電量は合計150 MWである。これに対して夏季のガスタービンの出力回復効果は6%であり、LNGの冷熱利用で9 MWの効果が得られることが確認できている。この基地におい

てはガスタービン吸気冷却以外にもボイルオフガス用圧縮機への冷却水がIFVから供給されている⁶⁾。

ガス・ツー・パワーの基地では通常、LNG気化器から送出されるガスタービン消費用のガス（LNGを気化させた天然ガス）の量に対し、そのガスタービンの吸気冷却に必要な冷水を発生させるためのLNG量は3倍程度である（入口大気温度35℃、出口温度15℃程度の場合）。すなわち、LNG気化器で気化したガスの全量をガスタービンで消費する運用では吸気冷却による出力回復が十分ではない場合がある。したがって、ガス送出先はガスタービン以外にガス導管などに送出されるケースが多い。

上記の利用環境が整ってLNGの冷熱をこのガスタービンの吸気冷却に利用した場合、LNG 1 トンから得られるエネルギー量は最大で180 kWhとなる。2.2節で紹介した冷熱発電システム（プロパンランキンサイクル方式）の23 kWh/tonより利用効率面で大幅に優位である。

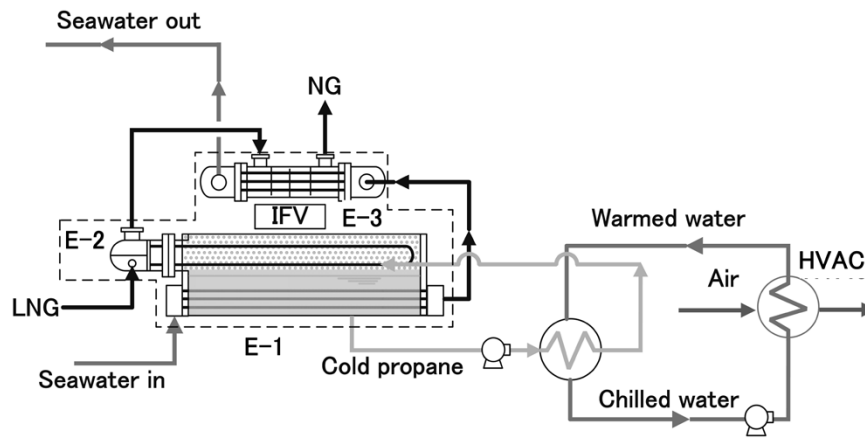
3.3 その他のIFVを用いたLNG冷熱利用

ガスタービン吸気冷却システム以外でIFVの利用実績があるのは植物工場内などの大型冷房システムへの冷水供給がある。IFVからの冷水供給方法としては以下の実績がある。

- (1) ガスタービン吸気冷却と同じく循環熱源としての冷水を利用先に直接供給するケース
タイ王国でのLNG受入基地においては、LNG受入基地内に設置されたガスタービンの吸気冷却用途と合わせて、チューリップなどの植物栽培工場内の冷房用途にIFVから直接供給された冷水が利用されている。
- (2) IFVのE-1内においてLNGの冷熱で冷却されたプロパン（液体）を循環ポンプで抜き出し、プロパン液と循環水との間で熱交換させて間接的に冷熱利用先に供給するケース

このケースでは海水を気化熱源として利用しつつ、プロパンを循環させているのが通常運転である。このため、冷熱利用先の稼働状況に影響を受けずにガスを導管に送り出せる利点がある。

このケースでのシステム概要、およびIFVの外観をそれぞれ図7、図8に示す。図8に示した基地では、中間媒体を3℃の液状態でIFVから取り



*Heating, Ventilation, and Air Conditioning

図7 空調設備へ冷熱を供給するIFVのプロセスフロー

Fig.7 Schematic of process flow of IFV for supplying cold energy to air conditioning apparatus



図8 空調設備へ冷熱を供給するIFVの外観（日本ガス株式会社鹿児島受入基地）

Fig.8 Appearance of IFV for supplying cold energy to air conditioning apparatus in Kagoshima Terminal of NIPPON GAS Co., Ltd.

出し、熱交換器によって循環水を8℃の冷却水とする。冷却水は完全人工光型植物工場内のファンコイルユニット（FCU）へ循環して冷房空調に利用される。植物工場内の温度は18～25℃に保たれる⁷⁾。完全人工光型植物工場は光熱費などの運営経費がかさむが、LNG冷熱の利用によって4割程度低減できると報告されている。

むすび=本稿では、LNG一次受入基地の最新動向、IFVの特徴、およびIFVを用いたLNG冷熱利用を概説した。

当社は、LNG受入基地形態の多様化に応じたLNG気化器の開発、およびLNG受入基地での冷熱利用の効率向上に向けて最適なLNG気化器システムの開発・提案を行ってきた。今後とも引き続き技術開発を進め、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行きたいと考えている。

参考文献

- 1) IGU 2019 WORLD LNG REPORT
- 2) 江頭慎二. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.33-36.
- 3) Kosuke HIGASHI et al. ICE2019-25th IIR International Congress of Refrigeration. Montreal, 2019, p.437-444.
- 4) 小室隆信ほか. 三菱重工技報. 2010, Vol.47, No.4, p.49-54.
- 5) Augusto Bulte. Integration of CCGT Plant and LNG Terminal. 2008, 19th WORLD PETROLIUM CNGRESS, Madrid.
- 6) Jesus Losada Maseda et al. LNG to power in islands. Malta case with the FSU terminal of Delimala. <https://www.gti.energy/wp-content/uploads/2019/10/94-LNG19-03April2019-Losada-Maseda-Jes%C3%BAs-poster.pdf>. (参照 2019-12-06).
- 7) 檜物 健. LNG冷熱の植物工場空調への活用(制御法). ガスエネルギー新聞, 2017年12月18日.



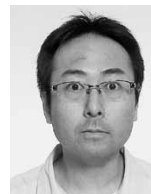
鈴木朝寛

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部



江頭慎二

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部



澄田祐二

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部
(現 機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 機器工場)