

(技術資料)

# DCHE™ (拡散接合型コンパクト熱交換器) の適用用途拡大

三輪泰健\*・東 正高・野一色公二 (博士(工学))

## Expanding Application of Micro Channel Equipment (Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger; DCHE™)

Yasutake MIWA・Masataka AZUMA・Dr. Koji NOISHIKI

### 要旨

コンパクト熱交換器の一種であるマイクロチャネル熱交換器は、軽量化・コンパクト性が要求される用途や洋上設備用機器として需要の増加が期待されている。その中でも、近年液化天然ガス (LNG) を用いた燃料供給システムやサテライト基地向け小容量LNG気化器としての需要が増加している。本適用用途では耐圧性やコンパクト性が求められるほか、熱媒となる流体の凍結に対する対策も必要になる。拡散接合型コンパクト熱交換器(Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger : DCHE™) では凍結を抑制するコンセプトを熱交換器設計に取り入れ、液体窒素やLNGを用いて試験を実施、気化性能範囲や凍結に対する設計指針を確認した。本稿では、DCHE™のLNG気化器用途に向けた取り組みについて紹介する。

### Abstract

The demand for microchannel heat exchangers, a type of compact heat exchanger, is expected to increase as they are used in applications requiring light weight and compactness and as apparatuses for offshore equipment. Above all, their demand has been increasing in recent years for use in the fuel supply systems of offshore equipment that uses liquefied natural gas (LNG) and small-capacity LNG vaporizers for satellite bases. These applications require, not only pressure tightness and compactness, but also measures to be taken against the freezing of the fluid serving as the heat medium. In the case of diffusion bonded compact heat exchangers (DCHE™s), concepts having to do with the suppression of freezing have been incorporated into their design, and tests were conducted using liquid nitrogen and LNG, to establish the design guidelines for the range of vaporization performance and icing. This report introduces the effort to apply a DCHE™ to LNG vaporizer applications.

### キーワード

マイクロチャネル, DCHE™, 拡散接合, コンパクト, 耐圧性, LNG気化器, 凍結, FGSS, 洋上, 天然ガス

まえがき = マイクロチャネル熱交換器DCHE™<sup>注1)</sup> (Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger, 以下DCHE™という) はコンパクトで耐圧性能が高く、天然ガス処理プラントの圧縮ガスターラ、天然ガス流体の熱交換器、水素ステーション用の水素圧縮ガス冷却器およびプレクーラとして使われている。機器の信頼性向上やコンパクト性の要求もあり、今後、LNG気化器や天然ガス処理プラントにDCHE™を使う検討が具体化しつつある。

本稿では、主にLNG気化器用途でのDCHE™設計面の特徴を紹介する。

## 1. DCHE™の構造および特徴

### 1.1 DCHE™の構造

DCHE™はコンパクト熱交換器の一種であり、ミリサイズの流路を形成させたプレートを積層した構造である。当社はこれまで50年以上の納入実績があるアルミ製ろう付けプレートフィン熱交換器 (Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchanger, 以下ALEX™<sup>注2)</sup>)

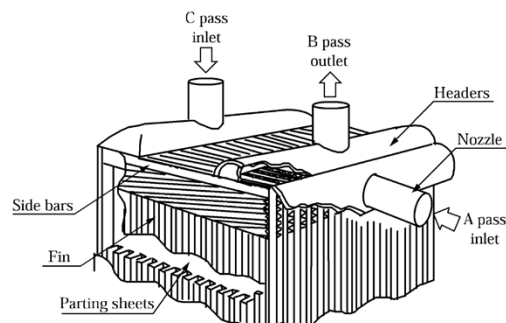


図1 ALEX™構造図  
Fig.1 Structure image of ALEX™

という) の設計・製作技術を有しており、DCHE™にはその技術を活用している。ALEX™は、熱交換を行うろう付けされたコア本体、および流体をコア内に導くためのヘッダやノズルからなる(図1)<sup>1)</sup>。DCHE™はALEX™と同様に積層構造であり、ALEX™で培った製造ノウハウや設計思想をDCHE™へ適用することができる<sup>2)</sup>。製造工程の中で最も大きく異なるのが、流路を形成するエッチング加工とプレート間を一度に接合する拡散接合の工程である。エッチング加工はエッチング液などの薬品による腐食作用を利用して金属を溶解加工す

脚注1) DCHEは当社の登録商標である。

脚注2) ALEXは当社の登録商標である。

\* 機械事業部門 機器本部 技術部

る技術で、この手法をステンレス鋼のプレート材に適用して流体が通る流路を形成している。また、DCHE™は拡散接合を適用しているため、他の熱交換器に比べて高い耐圧性能を有している。

## 1.2 DCHE™の特徴

DCHE™には以下の基本的な特徴がある。

### (1) 高耐圧・高耐熱性能

材質の選定、流路サイズの最適化により100 MPa、900℃まで使用可能である。適用可能な温度範囲は法規で規定されている各材質の許容応力表に従う。

### (2) コンパクト性

伝熱面積が大きいため伝熱性能が高く、多管式（シェル&チューブ式）熱交換器の1/10程度のサイズで済む。

### (3) 優れた耐食性

SUS316Lなどを使用することで冷却水用途などへ適用可能である。

ただしALEX™の方が経済性に優れるため、流体間温度差が小さい50℃以下（単相）、腐食性がない、あるいは耐圧性能要求が13 MPa以下など、ALEX™が使用できる領域についてはALEX™の使用を提案する。

当社はコンパクト熱交換器の一種であるDCHE™とALEX™の両方を取り扱っており、設計および運転条件に応じて最適な熱交換器を提案することが可能である。また、熱交換器や圧力容器など様々な静止機器に対して多数の応力解析の実績を有している。このため、流体間温度差が大きい運転、あるいは運転変動が大きく運転中の損傷が懸念される場合は、熱交換器の期待寿命を有限要素法解析（以下、FEM解析という）を用いて予測することも可能である。

## 1.3 DCHE™の適用用途

上述したようにDCHE™はコンパクトで伝熱性能に優れる熱交換器である。このため、設置面積に制限がある洋上用機器や、水素ステーション向けのクーラなどに使用される。また、冷却水を使用する天然ガスや水素ガスのクーラ、流体間温度差が50℃以上などと大きいLNG気化器用途など、ALEX™が使用できない場合に採用される。

近年では、米国におけるシェールガスの産出増により、陸上の天然ガスプラントのほか、洋上における浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備（Floating Production Storage and Offloading system：FPSO）や天然ガス液化処理設備（Floating LNG）向けでいくつかのプロジェクトが進んでおり<sup>3), 4)</sup>、天然ガス流体の熱交換器や圧縮機のアフタガスクーラ向けに適用されるケースが多い。また、同じく洋上向けの用途として期待されているのがLNG燃料船の燃料供給システム（Fuel Gas Supply System：FGSS）で用いられるLNG気化器がある。

この用途では、近年の国際海事機関（IMO）によるSO<sub>x</sub>成分排出規制<sup>5)</sup>や2025年のCO<sub>2</sub>排出規制<sup>6)</sup>に向けて、二酸化炭素や硫酸化物、窒素酸化物の排出量が石炭や石油に比べて少なく、環境にやさしい燃料として天然ガ

スの使用が増えることが見込まれている。加えて、洋上設備として設置面積に制限がある場合には機器のコンパクト化が必要となりDCHE™の適用が期待されている。

いっぽう陸上向けにおいても、LNGサテライト基地<sup>注1)</sup>を使った天然ガス供給の需要が産業向けにおいて増加傾向になっている<sup>7)</sup>。さらに、日本をはじめ、米国、欧州、アジアにおいては、温暖化対策目標達成の観点から、増加する再生エネルギーを中長期的に大量貯蔵する手段としての水素への期待が高く、燃料電池車（Fuel Cell Vehicle：FCV）の普及に伴う水素ステーションの建設も進んでいる<sup>8)~10)</sup>。DCHE™は、ここで用いられる水素圧縮ガスアフタクーラやディスベンサ用プレクーラなどにおいて適用の実績がある。

近年需要が増加傾向にある、洋上向け燃料供給システムやサテライト基地で用いられる天然ガス気化器用途におけるDCHE™の当社独自の設計思想や取り組みの詳細を次章以降で紹介する。

## 2. 凍結抑制構造

LNG気化器用途では、熱源に用いる温水やグリコール水が熱交換器内流路部においてLNGの冷熱によって凍結するのをいかに防ぎ、連続運転を継続できるかがコンパクト性以外にも重要になってくる。例えば多管式熱交換器など他のタイプの熱交換器では、凍結が生じたときは解氷までLNG気化器の運転を止める必要があることが問題の一つとして認識されている。このため当社では、独自コンセプトを設計に取り入れ、凍結が起こりにくい構造をLNG気化器用途に適用している。本章ではその概要を紹介する。

### 2.1 コンセプト1：積層構造<sup>11)</sup>

LNG気化器用途の場合の従来の考え方では、COLD側流体であるLNGとHOT側流体との2流体熱交であり、COLD：HOT=1：1の積層数で設計する。しかしこの構造では、HOT側流路内流体が凍結することによって閉塞してしまうと、それが自然解凍するまで待つ必要がある。それに対し、図2に示すようなCOLD側一層に対し、HOT1二層、HOT2一層のCOLD：HOT=1：3

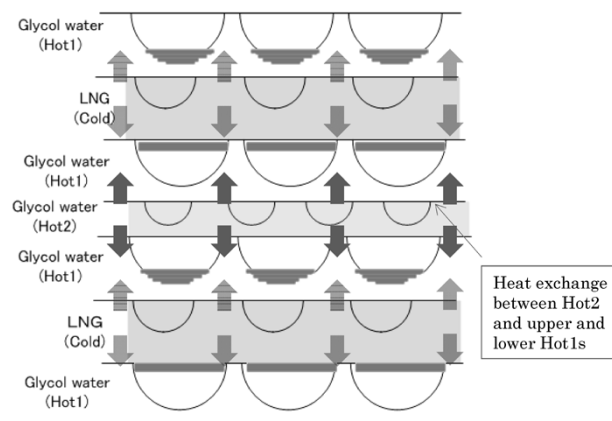


図2 凍結抑制イメージ  
Fig.2 Image of antifreezing

脚注1) ローリーなどで一次受け入れ基地から運ばれるLNGを受け入れて再ガス化する二次受け入れ基地

構造を適用することにより、COLD側に接するHOT1の層で凍結が起こり始めたとしてもHOT2の温熱をHOT1へ供給することが可能となる。このため、従来のCOLD:HOT=1:1の構造に比べて、流路を閉塞させるようなHOT側流体の凍結を抑制することが可能である。以降COLD:HOT=1:1の組み合わせを1:1構造、COLD:HOT=1:3の組み合わせを1:3構造と記載する。

## 2.2 コンセプト2：LNG流路パターン設計

供給されるLNGが低圧の場合、熱交換器の内部でLNG蒸発域が存在する。このため、潜熱やLNG側の伝熱係数の増大により熱交換器のメタル温度（流路の壁面温度）が下がることが予測される。これを緩和するため、LNG蒸発域の伝熱係数が高い部分では、意図的に伝熱性の劣る流路タイプ（ストレート流路）を採用している。また、LNG蒸発域での伝熱面積も小さくするため、LNGの流路ではピッチの大きな流路設計を採用している。

いっぽう熱媒側においては、伝熱係数の高くなる流路タイプ（ウェイビー流路）や、伝熱面積を多く取れるようピッチの小さな流路タイプを採用し、熱交換器のメタル温度を上昇させるように配慮している。

## 3. 液体窒素(LN<sub>2</sub>)およびLNGを用いた性能試験

LNG出口温度やHOT側流体の圧力損失の変化を調べ、機器の性能および流路内流体の凍結条件を確認することによって前章で述べた凍結抑制構造が有効であるかを検討した。本章ではその概要を述べる。

### 3.1 高圧LN<sub>2</sub>試験

#### 3.1.1 気化性能範囲の確認試験

1:1構造と1:3構造のDCHE™を製作し、両構造におけるLN<sub>2</sub>入口温度やLN<sub>2</sub>流量などをパラメータとして運転可能な範囲の確認を行った。試験に用いた熱媒は40 vol%プロピレングリコール水で凍結温度は-22℃である。図3に気化性能範囲の確認試験結果を示す。まず、プロピレングリコール水の入口温度60℃、流量32.5 m<sup>3</sup>/hとし、LN<sub>2</sub>流量を1,500 kg/hにて試験を実施した。その結果、1:1構造および1:3構造ともに凍結が生じずにLNG出口温度が所定の温度を満足することを確認した。

つぎに、LN<sub>2</sub>流量を2,000 kg/h、2,500 kg/h、3,000 kg/h

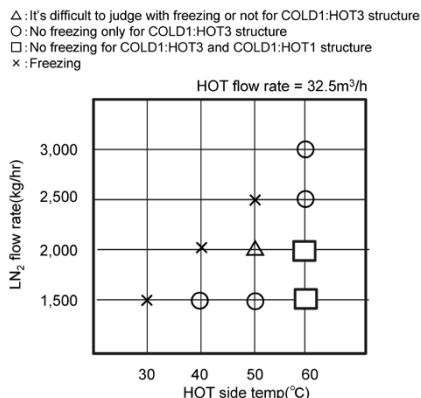


図3 気化性能範囲の確認試験結果

Fig.3 Test results of range for vaporizing performance

へ増加させ、プロピレングリコール水の流量を一定(32.5 m<sup>3</sup>/h)として入口温度を60℃から50℃、40℃、30℃と低下させて凍結が生じる運転範囲を確認した。その結果、従来設計で用いられる1:1構造ではプロピレングリコール水の入口温度60℃、流量2,000 kg/h以上、また、入口温度50℃以下ではすべての条件において凍結と思われる伝熱性能の低下や熱源側の圧力損失増加が見られた。これに対して1:3構造では、丸印(○)で示しているすべての条件において凍結が生じない結果が得られ、1:1構造に比べてより広範囲の運転条件に対応できることを確認した。

#### 3.1.2 凍結からの性能回復確認試験

上記試験後、熱源流体の凍結からの回復運転が可能であることを以下の条件において確認した。試験結果を図4、流量変化のグラフを図5、圧力損失変化のグラフを図6に示す。

まず、LN<sub>2</sub>入口温度60℃、3,000 kg/hの条件にてテス

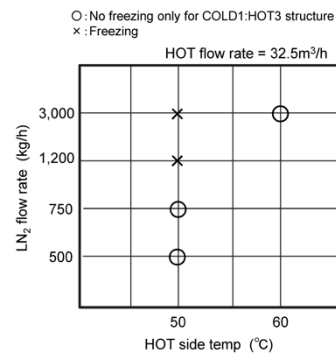


図4 凍結からの性能回復試験結果

Fig.4 Test results of performance recovery from freezing condition

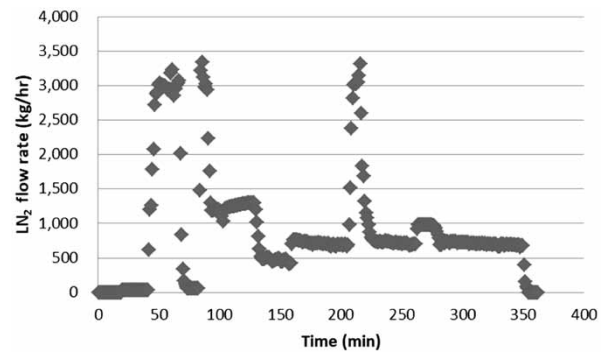


図5 凍結からの性能回復試験(流量変化)

Fig.5 Test results of performance recovery from freezing condition (LN<sub>2</sub> Flow rate)

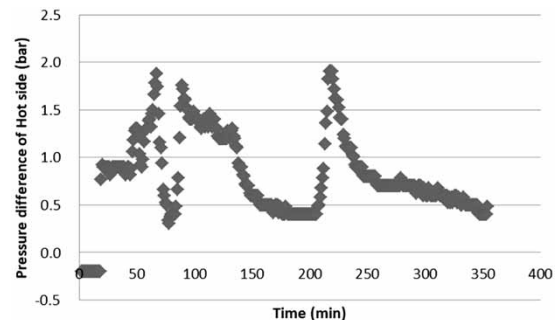


図6 凍結からの性能回復試験:圧力損失変化

Fig.6 Test results of performance recovery from freezing condition (pressure difference of HOT side)

トを行った後、LN<sub>2</sub>入口温度を50℃に変化させHOT側流路内流体で凍結が生じたことをHOT側入口出口の圧力損失変化により確認し、ここから流量を減らすことで凍結が回復するかどうかを確認した。流量はグラフに記載のとおり、1,200 kg/h、750 kg/h、500 kg/hの三種類とした。750 kg/hおよび500 kg/hまで減少させた条件でHOT側入口および出口の圧力損失が凍結前のレベルまで下がったことによって凍結が回復したと判断した。すなわち、1：3構造はHOT側流路内流体が凍結を生じたとしてもCOLD側流量を低下させることが回復に有効であることを確認した。また別の方法として、HOT2を別流体として管理する場合は、HOT2側流体の温度を上昇させるか、あるいは流量を増加させることにより凍結の回復が可能である。

### 3.2 低圧LNGでの試験

#### 3.2.1 熱交換器性能の確認試験

低圧のLNGを用い、機器の内部でLNG蒸発域が生じる条件において試験を実施した。試験条件を表1に示す。2章で述べたコンセプト1に加え、コンセプト2の構造を採用したDCHE™を用いており、これらの凍結に対する有効性を表1に示す試験条件①、②にて確認した。熱交換器の性能評価は、熱交換器の性能を表す総括伝熱係数(U)と伝熱面積(A)の積となる設計UAと実機UAとの比較を行うことで確認した。UAは、熱交換量Qを表す式(1)よりプロセス条件から得られるΔTで割ることで得られる値であり、これは流体の流量および物性が近いとき熱交換器の評価として有効であることが知られている<sup>12)</sup>。

$$Q=UA\Delta T \dots\dots\dots (1)$$

ここに、Q：熱交換量 (kW)

U：総括伝熱係数 (kW/m<sup>2</sup>℃)

A：伝熱面積 (m<sup>2</sup>)

ΔT：対数平均温度差 (℃)

結果は、表2に示すように試験条件①、②ともに設計条件を上回っており、熱交換器の性能に問題のないことを確認した。

#### 3.2.2 凍結に対する設計指針の確立

前項に引き続き、表1に示した試験条件③を実施した。低圧LNGテストにおいて凍結条件を確認するとともに、当社設計計算による熱交換器内壁面温度との比較を行った。その結果、図7のような設計計算壁面温度と凍結範囲との関係を得た。これらの結果から、設計計算壁面温度とHOT側流体の凝固点に差異があることを確認した。この差としては、通常の運転でも発生する流量や温度変化が影響したものと考え、この値から設計余裕度を決めて設計指針とした。

### 4. 熱応力対策の検証

LNG気化器用途においては、LNGとHOT側流体との温度差が大きく、大きな熱応力が発生する。どの程度の熱応力が発生するのか、また設計寿命の評価および熱応力の低減方法について検討した。

表1 熱交換器性能確認試験条件

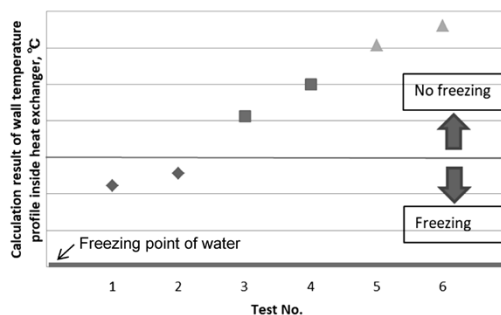
Table 1 Test condition of heat exchanger performance

	LNG side	Hot water side
Pressure	6.5 barg	2.0 barg
Flow rate	123.5 kg/h	9,753 kg/h
Inlet temperature	-125℃	①50℃ (design case) ②40℃ (critical case for freezing) ③30℃ (freezing condition)

表2 熱交換器性能確認試験結果

Table 2 Test results of heat exchanger performance

	Design condition	Test condition ① Inlet temperature: 50℃	Test condition ② Inlet temperature: 40℃
Heat exchanged amount (kW)	26.6	19.53	20.15
Long mean temperature difference (℃)	116.8	48.1	49.7
UA (kW/℃)	0.228	0.406	0.405
Comparison between design condition and test results	100%	178%	178%



Test No.	Hot side in temp (℃)	LNG in temp (℃)
1	30	-129
2	30	-125
3	40	-129
4	40	-125
5	50	-129
6	50	-125

図7 各試験条件での熱交換器内壁面温度計算結果

Fig.7 Calculation results of wall temperature profile inside heat exchanger using each test condition

#### 4.1 熱応力解析による熱応力評価

熱応力の評価は、以下の設計条件において何回起動停止が許容できるのかを確認した。熱応力はFEM解析を用いて算出し、ASME Sec. VIII Div.2に示されているオーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労曲線(図8)を用いて設計寿命を算出した。

#### 4.2 実案件における起動停止回数の評価

表3に示す設計条件において熱応力評価を実施した。その結果の応力コンター図を図9に示す。図9より、最も大きな熱応力が発生しているのはHOT側ヘッダとコア本体との溶接部のLNGヘッダ側、およびLNG側ヘッダとコア本体の溶接部であることがわかった。当該部位での最大熱応力振幅および図8のS-N曲線より、設計寿命は6,900回であることを確認した。この結果から、熱応力を低減するためヘッダ位置を適切に配置すると同時に、温水流路の配置を工夫することによって熱応力を低減できることを確認した。1日に5回以上の起動停止で20年(5回/日×365日/年×20年=36,500回)以上となる設計寿命40,000回へと寿命を改善することに成功し

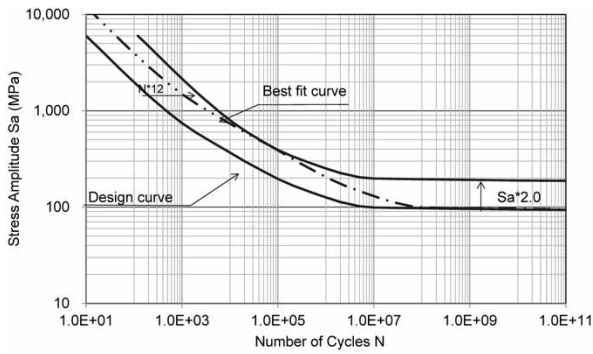


図8 オーステナイト系ステンレス鋼のS-N曲線  
Fig.8 S-N curve for stainless steel

表3 設計条件における熱応力評価  
(三流体：LNG1, LNG2, Heat medium)  
Table 3 Thermal stress evaluation for design condition  
(three streams : LNG1, LNG2, heat medium)

	LNG side	Heat medium side
Pressure	6.0 bar	2.0 bar
Temperature	-163°C	60°C
Flow rate	LNG1:840 kg/h LNG2:680 kg/h	25,300 kg/h

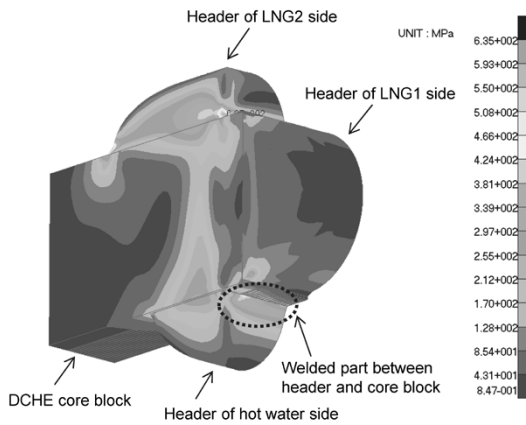


図9 ミーゼス応力カウンター図 (改善前)  
Fig.9 Contour map of Mises stress (before improvement)

表4 基本設計と設計改善後の疲労寿命比較  
Table 4 Fatigue life evaluation for basic design and improved design

	Basic design	Improved design
Fatigue life (design) <sup>(*)</sup>	6,900 times	40,000 times
Fatigue life (average)	75,000 times	1,000,000 times

<sup>(\*)</sup> Design fatigue life is considered safety factor by ASME rule.

た(表4)。

## 5. FGSS用途におけるLNG気化器としてのDCHE™の利点

### 5.1 設計寿命(熱応力)

FGSS用途におけるLNG気化器は、流体間温度差が大きく運転変動も予想されるため、熱応力に配慮した設計寿命を事前に推算することは重要である。

当社では、2012年より水素ステーション向けに200基

以上のDCHE™を納入しており、水素ステーションにおいても同様に事前に熱応力解析を実施し検証を行っている。実機の経験に基づいた適切な寿命評価、設計改善を行えることがDCHE™における利点であると考えられる。

### 5.2 タンク加圧用気化器と主機関用気化器の一体化

低圧用LNG気化器では、タンク加圧用のLNG気化器、および主機関用気化器の二つの熱交換器が必要となるケースがある。この場合、タンク加圧用のLNG気化器を起動させることによってタンク内LNGを送出し、LNGを気化器へ供給することができ、顧客にとってはポンプを使わずに安価なシステムを構成できるメリットがある。いくつかの顧客では上記のシステムを採用している。従来システムの二流体熱交換器二基に代わり、DCHE™ではタンク加圧用のLNG、主機関に供給されるLNG、およびHOT側流体の三流体熱交換器一基での提案が可能である(図10)。これによって熱交換器の基数を低減させることができ、スペースの有効活用ができる。さらに、周辺配管や架台を低減できることもメリットとして挙げられる。二流体のみだけでなく多流体熱交換とできることもDCHE™のFGSS用途におけるメリットと考える。

### 5.3 凍結抑制構造

LNG気化器の安定操業に対しては、熱媒の凍結が顧客における現在の最も大きな懸念事項として挙げられている。DCHE™は、コンセプト1：積層構造(COLD：HOT = 1：3構造)で凍結抑制が可能であり、さらに3.2.2項で述べたとおり、凍結に対する設計指針も確立できている。LNG燃料船のオペレーションは負荷が変動するため、設計ポイントでの凍結リスク評価はもちろん

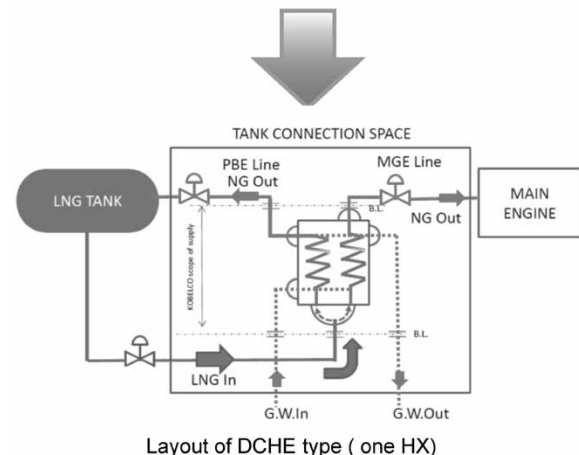
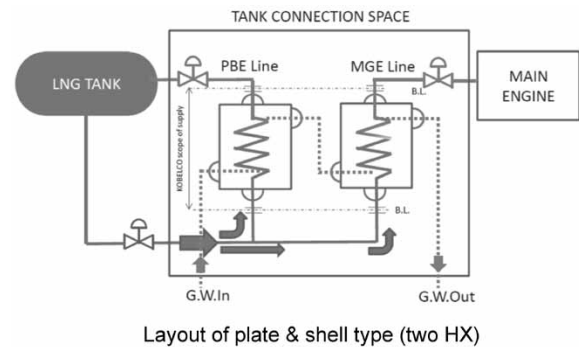


図10 システムフローのイメージ図  
Fig.10 Images of system flow diagrams

のこと、顧客からの条件提示があれば、負荷変動時の凍結リスクを見据えた設計も可能である。

また、万が一凍結が生じて、3.1.2項で述べたとおり、天然ガス流量を減らす必要はあるが、運転を継続しながら凍結から回復する性能も有しており、天然ガス処理プラントの連続運転に寄与できる。

#### 5.4 標準化によるコストダウン

FGSS用途においては、LNG燃料船の主機関の出力ごとに気化量がある程度決まっている。このため、機器を標準化して気化量別の標準品をそろえ、準汎用品として製作していくことによってコストダウンが実現できるものとする。

現状では水素ステーション向けのDCHE<sup>TM</sup>でいくつかの標準品を継続して製作している。この場合、部材の共通化や同時製作により、一基のみ製作する場合に比べてコストダウンを達成している。これらの実績を参考にFGSS用途をはじめとする中・小容量のLNG気化器においても標準化によるコストダウンを進めていく考えである。

**むすび** = 本稿ではLNG用途におけるDCHE<sup>TM</sup>の特徴について設計面を中心に紹介した。環境規制の影響により、今後ますますLNG気化器の用途は増えていくことと思われる。DCHE<sup>TM</sup>ではそのコンパクト性や多流体を一体化できるといったメリットを生かし、引き続き拡販に注力していきたいと考える。また、同じく天然ガスを用いた適用用途として、ガス処理プラントで用いる熱交換器の検討が増えてきている。

当社はDCHE<sup>TM</sup>とALEX<sup>TM</sup>の両方を提案できる製造メーカーという立場から、引き続き増加する天然ガスプラントへの機器供給に貢献していきたい。

#### 参考文献

- 1) 野一色公二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.28-31.
- 2) 三輪泰健ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.23-27.
- 3) 松澤進一. JOGMEC資料 シェールを中心とした米国の石油・天然ガス事情. 2018年11月22日.
- 4) プラント雑誌ENN. 2019.10.25号.
- 5) 国土交通省ホームページ [https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07\\_hh\\_000095.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000095.html). (参照2019-12-06).
- 6) 国土交通省海事局海洋・環境政策課ホームページ. 国際海運からの温室効果ガス削減対策. 平成30年8月, <http://www.mlit.go.jp/common/001250110.pdf>. (参照2019-12-06).
- 7) 吉田龍生ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.37-39.
- 8) NEDOホームページ. 米国における水素・燃料電池技術開発動向. 2019年6月17日, <https://www.nedo.go.jp/content/100895017.pdf>. (参照2019-12-06).
- 9) NEDOホームページ. 武尾伸隆. 欧州における水素関連の研究開発動向. 2019年6月. <https://www.nedo.go.jp/content/100895075.pdf>. (参照2019-12-06).
- 10) 経済産業省ホームページ. 水素・燃料電池戦略ロードマップ. 令和元年6月, <https://www.meti.go.jp/press/2019/09/20190918002/20190918002.html>. (参照2019-12-06).
- 11) 株式会社神戸製鋼所. 野一色公二. 積層型流体加温器および積層型流体加温器による流体の加温方法. 特開2017-166775.
- 12) 化学工学便覧. 丸善出版, 平成23年9月, p.260.



三輪泰健  
機械事業部門  
機器本部 技術部



東 正高  
機械事業部門  
機器本部 技術部



野一色公二  
機械事業部門  
機器本部 技術部