

(解説)

3タイプの液化水素(LH₂)気化器における実証試験の紹介

三輪泰健^{*1}・鈴木朝寛^{*1}・江頭慎二^{*1}・東 正高^{*1}・鶴 慶彦^{*1}・西村拓己^{*1}

Demonstration Tests of Three Types of Liquid Hydrogen (LH₂) Vaporizers

Yasutake MIWA・Tomohiro SUZUKI・Shinji EGASHIRA・Masataka AZUMA・Yoshihiko TSURU・Takumi NISHIMURA

要旨

当社は液化天然ガス(LNG)気化器を利用用途に応じて提案できるよう複数タイプ保有しており、長年培ってきた設計・製作技術を基に液化水素(LH₂)気化器の開発を行っている。

液化水素は-253℃で貯蔵され、LNGより約100℃低い温度で処理する必要があるため、熱交換器としての技術的難易度が高い。そのため、性能計算および熱応力計算の裏付けとして実液での実証試験を行うことで信頼性を確保する必要があると判断し、小型実証機を試作して液化水素を用いた実証試験を遂行中である。

それぞれ特徴の異なる3タイプ(中間媒体式気化器(IFV)、オープンラック式気化器(ORV)、マイクロチャネル熱交換器(DCHE))の実証試験の現況を報告する。

Abstract

Kobe Steel owns multiple types of liquefied natural gas (LNG) vaporizers to suit various applications and is developing liquid hydrogen (LH₂) vaporizers based on the design and manufacturing techniques the company has cultivated over many years. Liquid hydrogen is stored at -253℃ and must be processed at a temperature approximately 100℃ lower than LNG, posing great technical challenges for a heat exchanger. Therefore, reliability should be secured by conducting actual liquid demonstration tests to back up performance and thermal stress calculations. To this end, a small demonstration machine has been prototyped to conduct demonstration tests using liquid hydrogen. This paper describes the current status of demonstration tests of three types of vaporizers with different characteristics: an intermediate-medium vaporizer (IFV), an open rack vaporizer (ORV), and a microchannel heat exchanger (DCHE).

検索用キーワード

液化水素(LH₂)気化器、液化水素(LH₂)冷熱利用、オープンラック式気化器、中間媒体式気化器、マイクロチャネル熱交換器

まえがき＝当社は液化天然ガス(LNG)気化器トップメーカーとして用途別に複数タイプのLNG気化器を国内外に多数納入してきている。そうしたなか近年、2050年までのCO₂排出ゼロに向けた産業界の取り組みとして、液化水素(LH₂)を輸入し活用する計画が持ち上がっている。

LH₂は-253℃で貯蔵され、LNGより約100℃低い温度で処理する必要があるため、熱交換器としての技術的難易度が高い。そのため、LH₂気化器の小型実証機を試作し、LH₂を用いた実証試験を行うことで液化水素気化器の伝熱性能や機械的データを取得し、大型化に向けた基盤開発を行う必要性が生じている。

LH₂気化器のタイプ別(中間媒体式気化器(IFV: Intermediate Fluid Vaporizer)、オープンラック式気化器(ORV: Open Rack Vaporizer)、マイクロチャネル熱交換器(DCHE: Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger))の特徴と想定している用途ならびに実証実験の概況を表1に示す。

本稿では3タイプの実証実験の結果と今後の開発計画を概説する。

1. 冷熱利用可能な大容量液化水素気化器(IFV)の取り組み

1.1 冷熱利用に適した大容量気化器IFV

2030年の水素発電商用化に向け、水素発電用ガスタービンの水素混焼・専焼実証が計画されており、30,000～50,000 Nm³/hr程度のLH₂気化器が必要とされる。また水素の安定供給においてエネルギー効率向上は重要な要素であり、LH₂の冷熱を吸気冷却によるガスタービン効率化などで利用できれば、それに寄与することができる^{1), 2)}。大規模かつ連続して安定した気化の実現、さらに冷熱利用という観点においてLNG気化器で実績のあるIFVが最適であると考えられる。

1.2 IFVの構造と気化プロセス

IFVは、海水などの熱源を利用し、プロパンなどの中間媒体を介して低温の液化ガスを気化させるものである。

図1にIFVの概念図を示す。LH₂気化器(E-2)伝熱管内に供給されたLH₂は、中間媒体気化器(E-1)シェル内上部の中間媒体ガスと熱交換され、ほぼ全量のLH₂が蒸発し、連絡配管を通じてH₂加温器(E-3)シェル側に移送される。ここで伝熱管内を流れる(海)水と熱交

^{*1} 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

換・加温され、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LH₂との熱交換により凝縮した中間媒体は、E-1シェル内下部に落下する。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E-2管内のLH₂を蒸発させる。気化プロセス上熱源が大気開放されるORVと異なり、IFVは熱源を閉ループで循環させることができる。これにより、冷却後の中間媒体や加熱源流体を用いて冷熱を効果的に取り出せる³⁾。

1.3 LH₂用途におけるIFVの課題

IFVでのLH₂気化は競合他社含めて実績がなく、実用上の課題が不明確であった。そこで、冷熱回収型LH₂気化器の小型実証機の試作・試験を行い、その伝熱性能や機械的データを取得し、気化器大型化に向けた基盤開発を行うことにした。

図2に実証用IFVの外観を示す。E-3は省スペース化のため、E-1シェル上部に積載されている。E-1シェル外面には中間媒体の状態視認用にサイトグラスを取り付け、E-2外表面には歪（ひず）みゲージと熱電対を取り付けている。LH₂気化実証にあたり、この実証用IFVの

専用設備を当社高砂製作所内に建設した。本設備の概略フローを図3に示す。加熱源は循環水であり、試験では模擬負荷として電気ヒータで温度調節を行った。本設備完成後の全景写真を図4に示す。

本実証機は伝熱性能が確認可能な最小サイズ0.1 ton/h (1,200 Nm³/h) として性能設計を行った。また高圧ガス保安法特定設備検査規則に則り機械設計を行い、高圧ガス保安協会による所定の検査を経て特定設備検査合格証を受領した。

LH₂気化実証において以下4点を確認した。

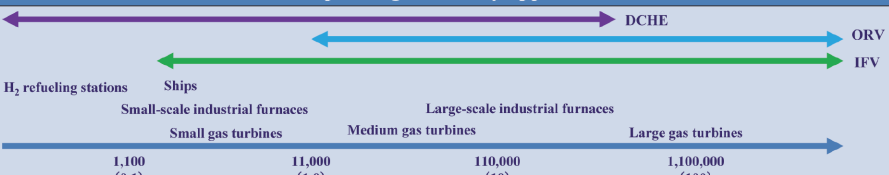
- (1) 連続運転でも出口気化ガス温度が低下せず安定的にLH₂を気化できる。
- (2) LH₂が伝熱管内を流れても、管外の間媒体（プロパン）が凍結しない。
- (3) 冷熱利用に向けて安定した冷熱が取り出せる。
- (4) 実運転における応力歪みを実測し、熱応力解析の結果と比較する。

1.4 IFVによるLH₂気化実証試験の結果

試験は表2に示す条件に基づき実施した。

表1 LH₂気化器の種類と用途別気化量
Table 1 Liquid hydrogen vaporizer product lineup

Liquid hydrogen vaporizer product lineup			
Type	(1) IFV	(2) ORV	(3) DCHE
Appearance			
Features	- Material: Stainless steel, titanium (for seawater) - Eliminates the risk of freezing seawater and industrial water by using propane as an intermediate fluid. Suitable for mid- to large-scale vaporizers. - Enables the use of exhaust heat from nearby facilities. - Enables the use of cold energy through the secondary use of heating medium (wide temp. range)	- Material: Aluminum alloy + thermal spray - Uses seawater as heating medium, making it an economic solution for mid- to large-scale vaporizers. - Seawater is an open system, making it difficult to use cold energy. - Allows for the transition of an LNG power plant to a hydrogen co-firing plant using existing seawater intake/outlet facilities as is.	- Material: Stainless steel - Enables downsizing while maintaining high thermal fatigue strength. - Uses brine as heating medium. - Enables the use of cold energy through the secondary use of heating medium (narrow temp. range)
Demo. schedule	Completed in March 2023	Planned to begin in March 2025	Completed in March 2024

Vaporizing volume by application			
			
H ₂ refueling stations	Ships	Small-scale industrial furnaces	Large-scale industrial furnaces
Small gas turbines	Medium gas turbines	Large gas turbines	
1,100 (0.1)	11,000 (1.0)	110,000 (10)	1,100,000 (100)
Liquid hydrogen vaporizing vol. (Nm ³ /hr) (Liquid hydrogen vaporizing vol. (tons/hr))			

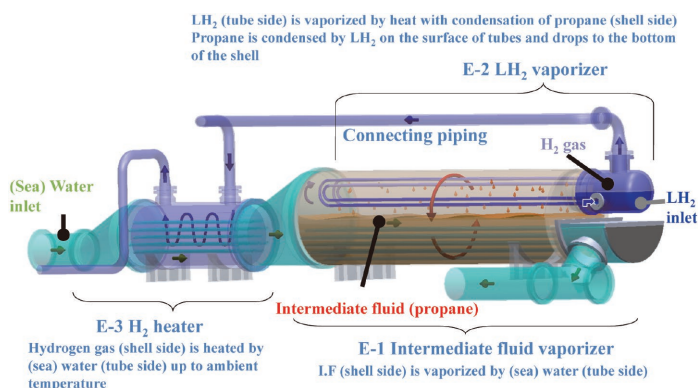


図1 IFV概念図
Fig.1 Schematic of IFV



図2 実証用IFVの外観
Fig.2 Outside view of IFV for LH₂ vaporization demonstration

1.4.1 安定気化の確認結果

図5に実証運転から得られた気化水素温度および水素流量履歴の一例を示す。1時間以上にわたり安定した気化ガス温度が得られ、連続運転でも出口気化ガス温度が低下せず安定的にLH₂を気化できることを実証することができた。

1.4.2 中間媒体の凍結有無確認結果

LH₂温度より凝固温度が高い中間媒体（プロパン）が、LH₂の流れる伝熱管表面上で凍結する可能性を考えていたが、図6に示すサイトグラスからの目視確認結果および運転データから、LH₂が伝熱管内を流れても、管外の間接媒体（プロパン）が凍結しないことを実証することができた。

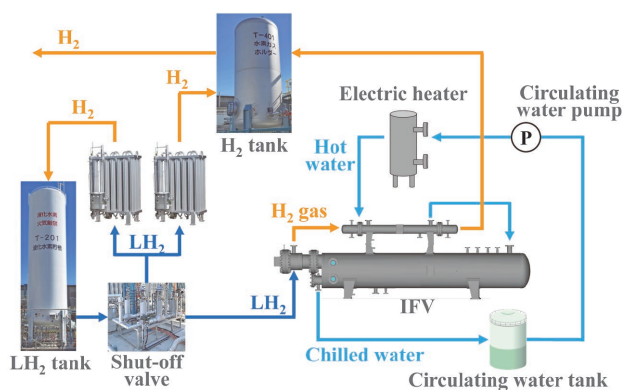


図3 LH₂気化実証設備の概略フロー

Fig.3 Schematic flow of LH₂ vaporization demonstration facility



図4 LH₂気化実証設備の全景

Fig.4 Outside view of LH₂ vaporization demonstration facility

表2 LH₂気化実証試験条件

Table 2 Test conditions of IFV for LH₂ vaporization demonstration

Condition	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
H ₂ flow rate (Nm ³ /h)	1,200	1,200	1,200	1,200	1,300
H ₂ Press. (MPaG)	0.70	0.70	0.70	0.40	0.70
CW flow rate (m ³ /h)	8.0	6.8	4.5	8.0	8.0
CW inlet Temp. (°C)	20	20	30	20	20
CW temp. Difference (°C)	Above 10	Above 15	Above 20	Above 10	Above 10

1.4.3 冷熱安定取り出し確認結果

図7に水素流量を変動させた場合の循環水の入口および出口温度の履歴を示す。水素ガス、中間媒体と熱交換し冷却された循環水は、冷熱の有効利用において被冷却側の負荷変動時においても安定した冷水温度での送出手が望まれる。本実証運転では水素流量変動においても入口水温20℃に対して10℃以上冷却された7℃程度の冷水を安定して送出可能であることが確認され、安定した冷熱が取り出せることを実証することができた。

1.4.4 熱応力解析の結果と実運転における応力歪みの実測および比較

温度差により高応力が生じると予想される E-2 管板部
周辺の応力に着目し、定格運転時の温度および発生応力

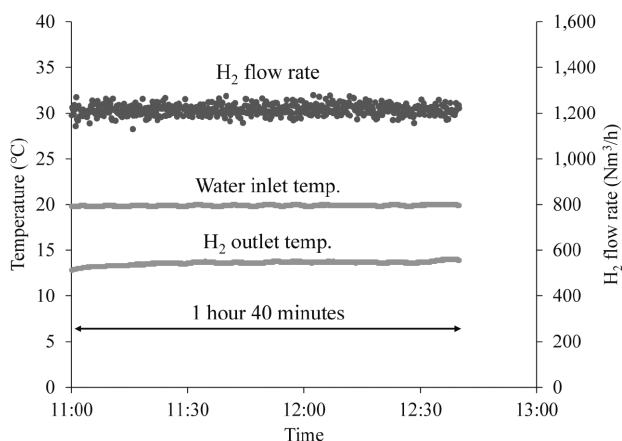
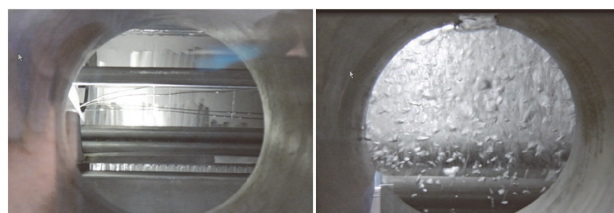


図5 実証試験時の気化水素温度および水素流量履歴の一例

Fig.5 Example of H₂ outlet temp. and H₂ flow rate trend during demonstration test



Propane condensation on E2 heat transfer tube

Propane boiling on
E1 heat transfer tube

図6 サイトグラスから撮影したプロパンの状態

Fig.6 Photo of propane boiling and condensing behavior from sight glass

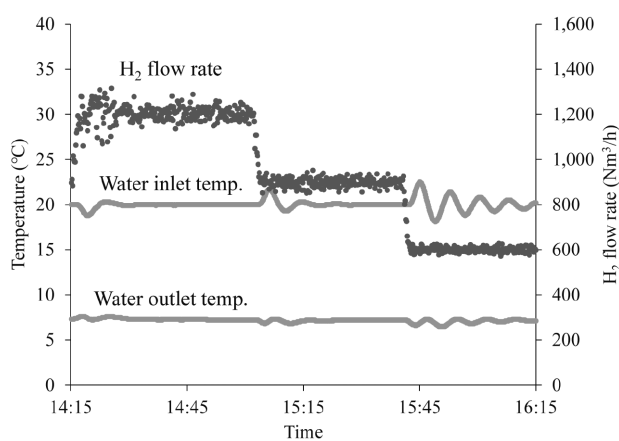


図7 水素流量変動における循環水の入口及び出口温度履歴

Fig.7 Trend of water inlet and outlet temp. during H₂ flow rate fluctuation

とFEM解析結果を比較した。詳細比較は本稿では割愛するが、江頭らの研究⁴⁾に示しているとおり、応力ひずみの実測値と熱応力解析の結果は定性的に一致しており、解析手法の妥当性が確認できた。

1.5 神戸水素コジェネレーションシステム（CGS）でのIFVによる高圧LH₂気化実証計画

1.4項で記載した実証試験では水素臨界圧以下での運転データを取得した。つぎの段階として臨界圧以上におけるIFVの伝熱挙動を確認し、先の実証で得られた臨界圧以下のデータとの比較により、幅広い運転圧力範囲における課題点の抽出・検証を行う。本実証は神戸水素CGS実証設備の「水素燃料供給系」に実機を適用し実証運転を行い、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）助成事業「水素CGSの地域モデルにおける水素燃料供給システムの効率化・高度化に向けた技術開発」として2023年6月に採択された。2025年度の実証運転に向け着々と準備を進めている。

2. 大容量 LH₂気化器（ORV）の取り組み

2.1 LNG気化器として最も普及している大容量気化器ORV

ORVは主に海水を熱源とし、LNGを-160℃から0℃以上のガスに加熱するための熱交換器である。経済性と入手性に優れる海水を用いることができる大流量のLNG気化器として建設コストおよび運転コストに優れ、世界中のLNG受け入れ基地の大容量気化器として広く採用されている。

2.2 ORVの構造と気化プロセス

図8（左）にORVの構造とプロセス概要を示す。

垂直に設置した伝熱管に対して、内部に低温流体（LNG）を流し、外部から加熱流体（海水や工水）を流す対向流式熱交換器であり、シンプルな気化プロセスおよび構造を特徴とする。伝熱管材料は低温脆性および伝熱性能に優れるアルミ合金を採用している。アルミ合金は海水による腐食が懸念されるため、伝熱管表面に犠牲陽極効果のある材料を溶射している。

2.3 LH₂用途におけるORVの課題

大規模かつ連続して安定した運転が期待されるLH₂気化器は多くの需要家においてなじみのあるORVでの問い合わせを受けることが多いため、LNG用ORV構造をベースとして開発することにした。LH₂用ORVを開発するにあたり当社としてORVでのLH₂気化実績はなく、

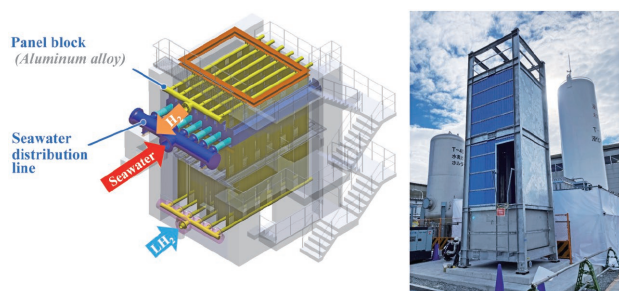


図8 ORV構造と建設中の実証用ORV外観

Fig.8 The structure of ORV and outside view of ORV for LH₂ vaporization demonstration

実用上の課題が不明確であった。そこで、小型実証機の試作・試験を行い、その伝熱性能や機械的データを取得し、気化器大型化に向けた基盤開発を行うことにした。

2.3.1 LH₂での伝熱性能

LNGと比較しLH₂の気化では単位質量当たりの交換熱量が約5倍に増加するため、LNGと同じ質量流量を気化できない。また、管内熱伝達率がLNGと同等であれば運転温度が100℃低下することで着氷増加による性能低下も懸念される。これまでLNGで使用してきた性能シミュレーションをLH₂に適用するためには、LH₂実液の試験による伝熱性能取得とシミュレーションへの反映が必須となる。

2.3.2 LH₂用途での熱応力解析

LNG運転温度が-150℃付近であることに対して、LH₂運転温度は約-250℃とLNGと比較してさらに100℃ほど低温となるため、増加する熱応力への対応が課題となる。この課題に対して極低温の熱応力解析が必須である。当社は長年ORVをはじめとしたLNG気化器の熱応力解析を実施しており、この知見に基づきLH₂用途のORVの開発を進めている。

2.4 ORVによるLH₂気化実証試験の計画

当社はこれまでに「ハイブリッド型水素ガス供給システム」として、LH₂気化器性能評価のために必要な試験設備一式を有しており、臨界圧以下のIFVの実証試験を終えている。2024年度にはLH₂用ORV実証設備を増設した（図8（右）参照）。

2025年3月より液化水素実液を使った実証試験を実施し、ORV設計において課題となる熱応力解析および伝熱性能予測に必要なデータを取得し、LH₂気化器の製品化に取り組む。

本実証機は伝熱性能が確認可能な最小サイズ0.1 ton/h (1,200 Nm³/h) として性能設計を行った。本設備も前述したIFV同様に高圧ガス保安協会による特定設備合格証を受領している。

LH₂気化実証において以下2点を確認する予定である。

- (1) 連続運転でも管外の着氷高さが想定基準値内で安定化し、出口気化ガス温度が低下せず安定的にLH₂を気化できる。
- (2) ORV下部エリアの温度分布結果を用いて熱応力解析を実施し、十分な熱疲労寿命を有する。

3. 小容量 洋上用途などのLH₂気化器（DCHE）の取り組み

3.1 コンパクトで耐圧性能が高い気化器DCHE

DCHEはコンパクトで耐圧性能が高い特徴を有しており、浮体式生産貯蔵積出設備（FPSO/Floating Production, Storage and Offloading system）・浮体式生産設備（FLNG/Floating LNG Production system）など設置スペースに制限がある用途で適用が拡大している。さらに船舶用燃料システムに用いられるLNG気化器に拡大しており、当社はLNGによる熱媒の凍結抑止技術を確認し船舶用途や陸上基地に展開している。

3.2 DCHEの構造と気化プロセス

DCHEはコンパクト熱交換器の一種であり、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技術が用いられている。構造を図9（左）に示す。

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流体が通るミリサイズの流路を形成している。

拡散接合は、加工されたプレートを積層しておき接合面に生じる原子の拡散を利用した接合であり、母材同士が直接接合することから接合部は母材と同等の強度を有する。エッチングプレートはLNGが通るプレートとグリコール水などの熱媒が通るプレートがある割合で積層されており、隣り合う流路間にあるプレートを介して直接熱交換を行う。LNGとグリコール水はノズルからヘッドを通して積層された各プレートに分配されている。

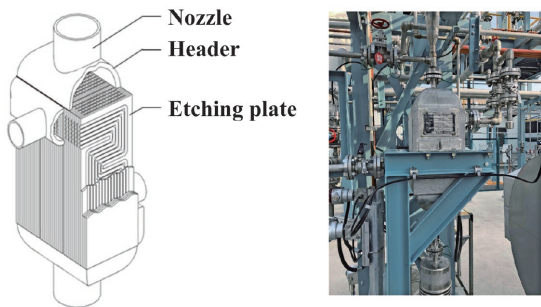


図9 DCHE構造図と実証用DCHEの外観
Fig.9 Schematic structure of DCHE

3.3 LH₂用途におけるDCHEの課題

LH₂は熱源となるグリコール水の凍結温度をはるかに下回る極低温で運転されるため、熱交換器流路内部の凍結防止が課題となる。伝熱設計に関しては、これまで50年以上蓄積されたプレートフィン熱交換器の設計技術により、確立しているが、凍結現象は計算で予測できない。そこで、LNG、液化窒素 (LN₂)、水、グリコール水を用いた実験により、様々な運転状態の凍結条件を確認し、二つの独自の凍結防止技術を確認し特許を取得している。特許の概要について、図10に「1cold : 3hot デザイン」ならびに図11に「2ゾーンデザイン」をそれぞれ示す。

現在、サテライト基地向けLNG気化器、船舶用LNG燃料気化器および高圧LH₂気化器を納入し、当社の設計手法および凍結防止技術の有効性は確認されている。

この確立した技術基準を応用し沸騰現象がある臨界圧以下のLH₂温度（-253℃）にも適用可能であることを確認するため、納入する製品サイズを模擬して試作した試験機を用いて実証試験を行った。

試験は「ハイブリット型水素ガス供給システム」に設置されているIFVと並列設置する形で、LH₂実液で試験を実施した。試験体のデザイン、試験条件および試験体外観を表3、図9（右）に示す。本試験体も同様に特定設備検査合格証を受領している。LH₂気化実証では以下2点を確認した。

- (1) 熱媒凍結挙動がなく気化性能が安定している。
- (2) 伝熱性能が設計値を満足している。

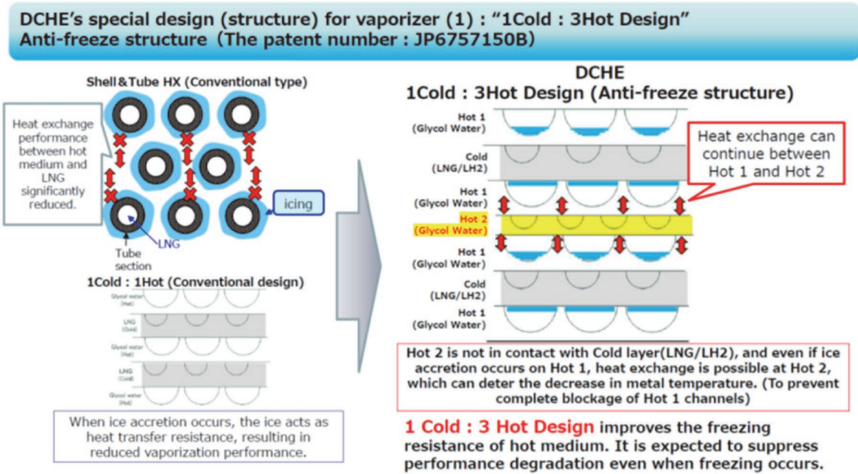


図10 凍結抑止構造（1cold : 3hot デザイン）
Fig.10 Anti-freeze structure (1 cold : 3 hot design)

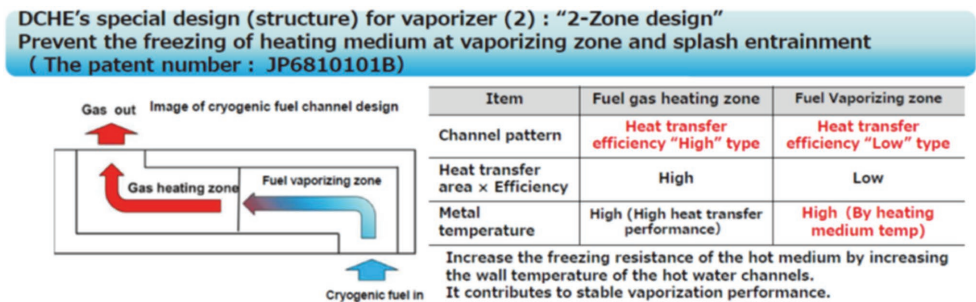


図11 凍結抑止構造（2ゾーンデザイン）
Fig.11 Anti-freeze structure (2-zone design)

表 3 水素気化性能試験用 DCHE 諸元

Table 3 DCHE specifications for hydrogen vaporization performance test

Basic specifications	Vaporization capacity (liquid hydrogen)	18.9 kg/h
	Type	Micro channel heat exchanger
	Material	Stainless steel type 316 L
Design specifications (path A) Fluid: liquid hydrogen	Inlet temp. (°C)	-253
	Outlet temp. (°C)	30
	Operating press. (MPaG)	0.3
Design specifications (path B) Fluid: ethylene glycol water	Inlet temp. (°C)	40
	Outlet temp. (°C)	35

3.4 DCHE による LH₂ 気化実証の結果

3.4.1 熱媒凍結挙動および安定気化性能の確認

熱媒の凍結が発生した場合、熱媒流路が徐々に閉塞していくため、圧力損失が安定せず徐々に増大傾向となる。そのため、設計点 (LH₂ 流量 18.9 kg/h) にて 1 時間連続運転を行い、熱媒の圧力損失の傾向を確認することで熱媒凍結の有無を評価した。

その結果、図 12 から熱媒圧力損失は安定し増大傾向になく、設計点において熱媒の凍結挙動が無いことを確認した。

なお、図 12 は水素流量、熱媒圧損、水素ガス出口温度の経時変化を示しているが、熱媒圧損の軸の値は非表示としている。

また図 12 の 1 時間連続運転結果より、運転中水素出口温度はほぼ一定で安定した気化性能を有することを確認した。

3.4.2 伝熱性能の評価

熱交換器の熱交換量 Q は以下の式で表すことができる。

$$Q = UAAT$$

ここに、

Q : 熱交換量 (kW)

U : 総括伝熱係数 (kW/(m²・°C))

A : 伝熱面積 (m²)

ΔT : 対数平均温度差 (°C)

前述の式において、流体の物性や流量が近い場合、総括伝熱係数 U はほぼ一定となる。また伝熱面積 A は一定であるため、熱交換器の性能は、 UA で評価することができる。性能試験で実測した Q : 熱交換量 (kW)、 ΔT : 対数平均温度差 (°C) から算出した UA を、設計点と比較したものを表 4 に示す。設計点での試験から得られた UA が、設計値の 100% 以上であることから、伝熱性能は設計値を十分満足することを確認した。このことから、LNG 気化器で確立した設計基準、特許技術を応用した LH₂ 気化器の設計が妥当であり、製品化が可能になった。

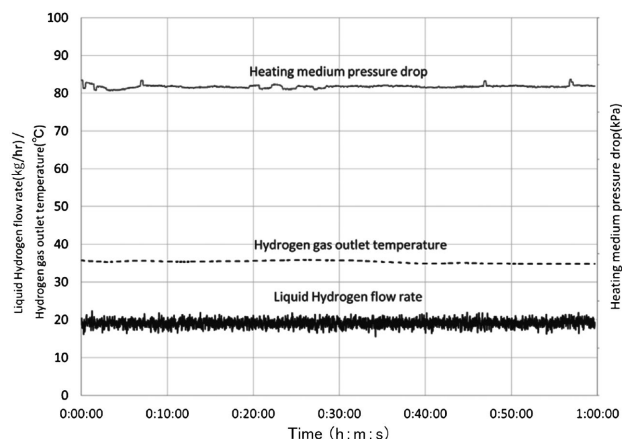


図 12 設計点に於ける実証試験時の気化水素温度、水素流量及び熱媒圧損履歴

Fig.12 H₂ outlet temp., H₂ flow rate and heating medium pressure drop trend during performance test at design point

表 4 設計値と試験実測値から求めた UA 比較

Table 4 Comparison of UA calculated from design value and actual test value

Item	Design	Actual measurements
Heat duty (kW)	23.0	25.3
Logarithmic mean temperature difference (°C)	69.5	40.2
UA (kW/°C)(*)	1	Over 1.5

(*) It is defined 1 as a design point.

むすび＝本稿では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）助成事業において、2023 年 3 月末に完了した「液化水素冷熱の利用を可能とする中間媒体式液化水素気化器の開発」の LH₂ 供給設備を利用して実施した実証試験結果と、これから実施する実証試験を紹介した。本稿で紹介したすべての実証が終了すれば LNG 気化器と同程度のタイプの LH₂ 気化器を製品ラインナップとして揃えることができる。

これらの成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業「水素社会構築技術開発事業」（JPNP14026）により得られた成果であり、NEDO および関わった方々へここに感謝の意を表する。

当社は水素エネルギーの社会実装に向け、陸上での使用から船舶への搭載といったさまざまな使用環境での液化水素利用への対応を気化器の供給を通して目指す。

参考文献

- 1) 小室隆信ほか、三菱重工技報. 2010, Vol.47, No.4, p.49-54.
- 2) 鈴木朝寛ほか、R&D 神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.24-27.
- 3) 江頭慎二、R&D 神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.33-36.
- 4) 江頭慎二ほか、圧力技術. 2024, Vol.62, No.5, p.2-12.