

(技術資料)

## LNG 船用燃料噴射圧縮機

### LNG Boil Off Gas (BOG) Vertical Type Reciprocating Compressor for Fuel Gas Injection



瀬山勝広\*<sup>1</sup>  
Katsuhiko SEYAMA



手塚智志\*<sup>1</sup>  
Satoshi TEZUKA



大久野孝史\*<sup>1</sup>  
Takashi OKUNO



名倉見治\*<sup>1</sup>  
Kenji NAGURA



赤毛直樹\*<sup>1</sup>  
Naoki AKAMO

As the shipbuilding industry is enforcing environmental regulations, low-speed dual-fuel engines, such as ME-GI, are attracting rising attention. Such an engine requires a gas-injection compressor (GIC) to supply LNG boil off gas (BOG), and the demand for GICs is expected to grow. Hence, KOBE Steel has developed a vertical type LNG BOG reciprocating compressor suitable for GIC for ME-GI engines. In developing the compressor, we have utilized proven technologies, such as low temperature suction, high pressure discharge and a high performance oil-separation system. A vertical type suited to the installation space on a ship has been adopted, and ease of maintenance has been ensured. This paper describes its development.

まえがき = 国際海事機構 (IMO) による環境規制強化の影響を受け、重油または天然ガスを燃料とする新型の直接推進方式の低速2元燃料焚(だ)きエンジンが船舶業界で注目されており、LNG 運搬船に採用されはじめています。低速2元燃料焚きの電子制御式ガスインジェクションディーゼルエンジン (以下、ME-GI<sup>1)</sup> という) の場合、燃料を約30MPaの高圧で燃焼室内へ供給する必要があるため、高圧圧縮機 (Gas Injection Compressor, 以下GICという) でガスを昇圧している。

LNG 運搬船は、2017年から2021年の間に150隻以上が新規に建造されるという見通しもあり<sup>2)</sup>、LNG 船用圧縮機の需要も相応の拡大が見込まれる。このため当社においても、圧縮機事業の用途拡大を図るべく船舶用圧縮機の開発を進めてきた。本稿では、ME-GIエンジン用GICの商品開発について述べる。

#### 1. ME-GIエンジンを搭載したLNG運搬船のガス供給システム

図1にME-GIエンジンを搭載したLNG運搬船のガス供給システムを示す。LNGタンクから発生するボイルオフガス (以下、BOGという) 量は、タンクの容量や断熱性能によって異なるが、おおよそ3.0~5.0 t/hである。発生したBOGは、LNG運搬船の推進のために30MPaまで昇圧されてME-GIエンジンへ供給され、一部は約1MPaまで昇圧されて船内補機動力用のDFDE (Dual Fuel Diesel Engine<sup>3)</sup> : 2元燃料ディーゼルエンジン) に供給される。

エンジンの燃料ガス消費量がLNGタンクからのBOG発生量を下回る場合や停船時に、余剰BOGを回収・液化させてタンクに戻す再液化システムを搭載する船もあ

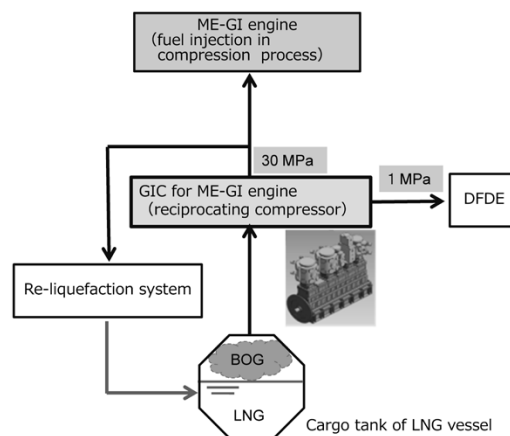


図1 LNG運搬船ME-GIエンジンのガス供給システム  
Fig. 1 Gas supply system for LNG carrier ME-GI

る。再液化システムの効率は供給されるガス圧力が高いほど向上する。ME-GIエンジンと一緒に再液化システムが搭載された場合、約30MPaのBOGが再液化システムに供給される。このため再液化の効率が高くなり、燃費効率が向上して高い経済性を発揮する。

ME-GIエンジンにBOGを供給する圧縮機は、船上の限られたスペースに設置されるためコンパクトであることが望まれる。また、約-160℃のBOGを直接吸い込むことができ、大気圧から30MPaまで昇圧できることが求められる。さらに、途中からガスを抜き出せることのほかに、BOGの発生量やエンジンの負荷によって変化する供給量に効率よく対応できること、再液化システムには油分を適切に除去したガスを供給するための油分離システムなど、さまざまな技術が求められる。

以下に当社が開発したME-GIエンジン用レシプロ圧縮機の特徴を記す。

\*<sup>1</sup> 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機本部 回転機技術部

## 2. ME-GIエンジン用圧縮機

### 2.1 圧縮機仕様 (堅型圧縮機)

当社では、LNG受入基地に高圧LNG BOG圧縮機を多数納入している。GICにはこの用途で培った低温のBOGを高圧まで昇圧する技術を活用すると同時に、堅型の圧縮機を採用した。

このGICは5段型の圧縮機で30MPaまで昇圧するとともに、DFDE用に途中の2段吐出から抽気する。圧縮機ユニットはBOG圧縮機をはじめ、主電動機、ガスクーラ、各段の連絡配管、オイルユニット、および脈動防止用のドラムなどすべてを共通スキッド上に搭載している。処理量5t/hのユニットサイズは7×10×6.5mとなる。同等機能・性能の圧縮機ユニットを堅型および水平対向型で製作した場合のそれぞれのユニットサイズ(メンテナンススペースを含む)の比較を表1に示す。

堅型圧縮機の場合一般的に、ピストンなどの往復動によるアンバランスフォースが水平対向型より大きくなる傾向がある。開発した堅型機はクランクを6スローにし、①#1, #6スロー、②#2, #5スロー、③#3, #4スローの各位相を120°ずつずらすことによってアンバランスフォースを打ち消している。ME-GIエンジン用の5段型機の場合においても、シリンダを取り付けないバランススローを設けて圧縮機としてのバランスを取り、船側の基礎に与えるアンバランスフォースを最小化させた。

堅型圧縮機のもう一つの特長として、ライダリングが挙げられる。ピストンリング式レシプロ圧縮機の場合、ピストンが往復運動する際にピストンとシリンダライナとの接触を防止する目的でライダリングが取り付けられ

表1 堅型と水平対向型コンプレッサのユニットサイズ(メンテナンススペース含む)

Table 1 Unit size of vertical and horizontal type compressor (including maintenance space)

Compressor type	Vertical type	Horizontal type
Width (m)	7	10
Length (m)	10	10
Height (m)	6.5	5
Foot print [W×L] (m <sup>2</sup> )	70	100

る。

堅型圧縮機の場合、水平対向型のようにライダリングがピストンの重量を支える必要がないため、摩耗が少なく済む。このため、ライダリングの交換頻度は水平対向型よりも大幅に低減できる。また、ピストンとシリンダライナの接触による焼付きなどの被害もなくなり、経済的な効果だけでなく信頼性も向上する。

### 2.2 ガス容量制御

圧縮機の吸込ガス温度は、例えばLNGタンク内で発生したBOGを直接吸い込む場合は超低温(約-160℃)となるが、吸込ガスの冷熱を利用して再液化に利用する場合は、常温近くまで上昇する。長時間停止していた圧縮機を起動した直後は常温のガスが吸い込まれ、時間の経過とともに温度が低下していく。

このような吸込ガス温度の大きな変化によって各段のシリンダで処理するガス量に変化し、圧力バランスも変化する。これは、低温圧縮機の特徴的な事象でもある。さらに、前述のとおり、LNGタンクから発生するBOGとエンジン側で消費されるガス量のバランスも刻々と変化しており、圧縮機の運転条件も同じタイミングで変化する。このような環境のなかで安定的な運転を行うためには、制御方法や適切な設計マージンなどのさまざまな工夫が必要である。こうした面に対しては、当社がLNG受入基地で培った低温圧縮機にかかわる豊富な運転実績に裏付けられた技術が生かされている。また、GICには吸込弁アンローダおよびクリアランスポケットによる容量調整装置を取り付けることによって動力削減を図るとともに、各段にスピルバックラインを設置し、エンジンの急激な負荷変動に対応できるようにしている。

### 2.3 油分離システム

図2にME-GIエンジン用GICのフロー図を示す。LNGタンクから発生したBOGは圧縮機で30MPaに昇圧されてエンジンに供給される。圧縮機には、ピストンリングやライダリング、ピストン棒パッキンなどの樹脂製摺動部品がある。それらの耐久性や信頼性を向上させるために高圧段のシリンダ内部に潤滑油を供給し、長期連続運転を可能にしている。

いっぽうME-GIエンジンは、エンジンに供給するガス中の油の混入量を極力少なくする必要がある。このた

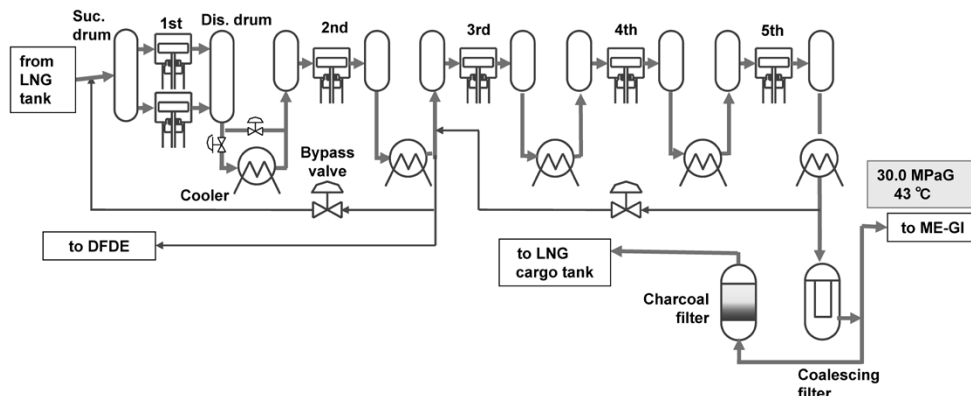


図2 ME-GIエンジン用GICフロー図  
Fig. 2 GIC flow diagram for ME-GI engine

め、圧縮機の出口下流に油分離用の高性能フィルタを設置し、ガスに随伴される潤滑油を除去する。

さらに、再液化システムが設置される場合、高压で供給されたガスを急速に膨張させるため、ガス中に溶け込んでいた油分が液化する。このため、その油分も除去する必要がある。本ユニットでは、上記の高性能フィルタの下流に活性炭フィルタを追加することによって油分除去性能をさらに強化している。

当社は、上述の油を高度に分離するシステムを導入することにより、LNGの受入基地やヘリウム液化装置のようなプロセスへの油の混入を嫌う用途向けに、圧縮過程で多量の油を混入する油冷式スクリュウ圧縮機を多数納入しており、いずれのユニットも問題なく稼働している。

本ME-GIエンジン用のユニットもこれらの技術を活用することによってエンジンや再液化システムへの油分の影響を抑えるとともに、圧縮機の摺動材の耐久性・信頼性を低下させることがないように、最大限配慮したものとなっている。

## 2.4 メンテナンス性 (24時間でのメンテナンス)

図3に水平対向型および堅型のレシプロ圧縮機を示す。水平対向型は、クランクケースやシリンダが基礎に固定されるため振動を抑えやすい。その反面、メンテナンス時にピストンを水平方向に抜き取るためのスペースを含めた大きな設置エリアを確保しなければならないというデメリットがある。

これに対して堅型の場合はクランクケースのみの設置スペースで十分なため、設置エリアは小さくて済む。さらに、メンテナンス時のピストンの抜き取りは垂直方向になるため、圧縮機ユニットのすぐ横に他の設備を設置することができるなど、船上の限られたスペースを有効に活用できるメリットがある。

また、圧縮機のメンテナンスは通常、船がドックに入った際に実施することを想定している。ただ、万一船上

でのメンテナンスが必要になった場合でも、停泊期間に合わせて短時間で圧縮機を復旧できるように、シリンダとピストン一式を一括して交換できる構造を採用した。すなわち、シリンダの中にピストンが挿入されたままの状態ですりリングをクロスガイド部から切り離すことができる構造にした。レシプロ圧縮機的主要な消耗部品であるすりリングをすりリング部から取り外す作業やピストンを引き抜いた後にピストンリングやライダリング、ピストン棒パッキンなどの交換部品を取り出す作業などを個別に行う従来の方法では短期間のメンテナンスは実現できなかった。本開発によって一括して交換できる構造にしたことにより、すりリング全数のメンテナンス作業時間を24時間程度に短縮できるめどを立てた。

## 2.5 試作機による検証

本開発にあたり、強度的な信頼性を確保するためにクランクケースをはじめとする圧縮機的主要部品を組み合わせた3次元解析モデルを作成し、実際の運転中に作用するガスの圧力、および慣性力(ピストンなどの往復運動によって発生する荷重)を加味した運転状態に基づいた解析条件を設定して有限要素法による応力解析を実施した。各主要部品の変形量や強度を確認した<sup>3)</sup>。図4に解析に用いた3次元CADモデルを示す。

また、試作機による荷重試験を行い、各主要部品に生じる応力を確認するとともに十分な剛性が確保されていることを検証した。圧縮機の固有振動数も同様に解析によって確認した。試作機(実機サイズの圧縮機)によっても固有振動数の測定、および回転数を変化させたときの振動現象の確認を行い、圧縮機の固有振動数と回転数成分が一致(共振)しないことを確認した。

## 2.6 船級認証

船舶設備は船級機関によって認証されることで船舶への搭載が認められる。圧縮機も船級機関による図面の承認、要求される検査を合格して船級の認証を受けなければ船舶への搭載が認められない。

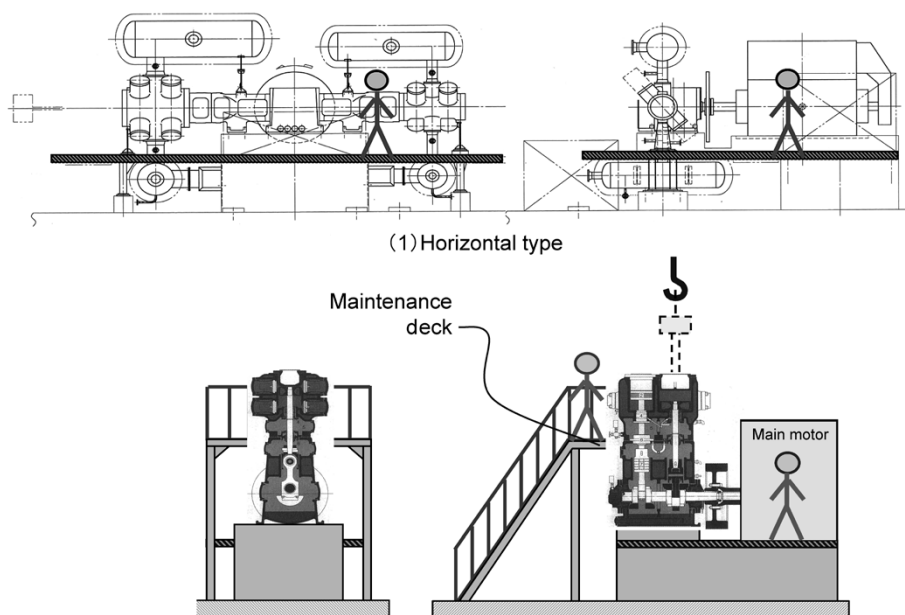


図3 水平対向型および堅型のレシプロ圧縮機  
Fig. 3 Horizontal and vertical type reciprocating compressor

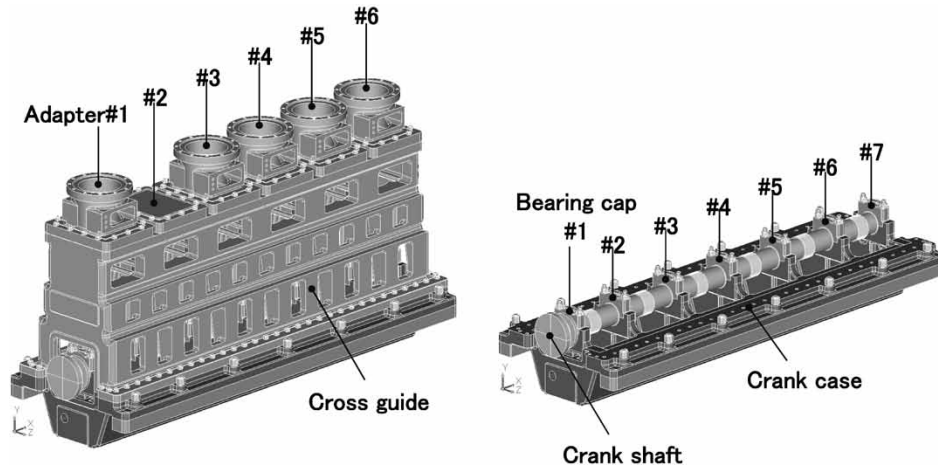


図4 FE解析に用いた3次元CADモデル  
Fig. 4 3D-CAD model for FE analysis

## DNV-GL (Type Approval Certificate)

 <b>DNV-GL</b> Certificate No: <b>TAM000000N</b>	Job Id: <b>262.1-020051-1</b> Certificate No: <b>TAM000000N</b>																
<b>TYPE APPROVAL CERTIFICATE</b>																	
<b>This is to certify:</b> That the Gas Compressor with type designation(s) <b>KRS0V</b> Issued to <b>Kobe Steel Ltd., Takasago Works</b> <b>TAKASAGO HYOGO, Japan</b> is found to comply with <b>DNV GL rules for classification – Ships</b>																	
<b>Application :</b> Product approved by this certificate is accepted for installation on all vessels classed by DNV GL.  This Certificate is valid until <b>2021-06-13</b> . Issued at <b>Havik</b> on <b>2016-06-14</b> DNV GL local station: <b>Kobe</b> Approval Engineer: <b>Anir Dzafari</b>																	
 for DNV GL Designated Authority, Technical Review Center Location: <b>DNV GL Head, Norway</b> Signed On: <b>17.06.2016</b> , on behalf of: <b>Oddvar Deisenhoell</b> Head of Section																	
<b>Product description</b> Reciprocating vertical compressor with five compression stages used for injecting the LNG BOG gas to the ship engine.																	
<b>Application/Limitation</b> The compressor is approved as a full gas compressor. The type approval is valid for compressor only. The approval does not cover driving member, control system, connected instrumentation and other connected components.																	
<table border="1"> <tr><td>Max. shaft power:</td><td>2000 kW</td></tr> <tr><td>Max. rotation speed:</td><td>600 r/min</td></tr> <tr><td>Compression media:</td><td>LNG</td></tr> <tr><td>Max. working capacity:</td><td>5500 kg/h</td></tr> <tr><td>Max. bore size:</td><td>650 mm</td></tr> <tr><td>Cylinder stages:</td><td>1<sup>st</sup> 2<sup>nd</sup> 3<sup>rd</sup> 4<sup>th</sup> 5<sup>th</sup></td></tr> <tr><td>Design pressure (bara):</td><td>Suc. 2 6 15 49 148</td></tr> <tr><td>Disc. 6 15 49 148 339</td><td></td></tr> </table>		Max. shaft power:	2000 kW	Max. rotation speed:	600 r/min	Compression media:	LNG	Max. working capacity:	5500 kg/h	Max. bore size:	650 mm	Cylinder stages:	1 <sup>st</sup> 2 <sup>nd</sup> 3 <sup>rd</sup> 4 <sup>th</sup> 5 <sup>th</sup>	Design pressure (bara):	Suc. 2 6 15 49 148	Disc. 6 15 49 148 339	
Max. shaft power:	2000 kW																
Max. rotation speed:	600 r/min																
Compression media:	LNG																
Max. working capacity:	5500 kg/h																
Max. bore size:	650 mm																
Cylinder stages:	1 <sup>st</sup> 2 <sup>nd</sup> 3 <sup>rd</sup> 4 <sup>th</sup> 5 <sup>th</sup>																
Design pressure (bara):	Suc. 2 6 15 49 148																
Disc. 6 15 49 148 339																	
Note (**): TA certificate is listing the max permissible pressure (relief valve setting) = design pressure. Maker may adjust the individual setting up to the stated max. design pressure.																	
<b>Type Approval documentation</b> According to document list (document No. 22W-09643 Rev. R3, dated 26.05.2016) for type Approval for KRS0V.																	
<b>Marking of product</b> The product to be marked with manufacturer's name or trademark and type number identification.																	
<b>Periodical assessment</b> For retention of the Type Approval, a DNV surveyor shall perform a survey every second year and before the expiry date of this certificate to verify that the conditions of the type approval are complied with.																	
<b>Other conditions</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>For Compressor installed on liquefied gas tanker the piping shall be in accordance to (PL-3 Ch.7 Sec.2)</li> <li>After installation on board, the compressor and the system to which it is connected shall be function tested under working conditions (Pl. 4 Ch.2 Sec.4 (7.13)).</li> </ul>																	
END OF CERTIFICATE																	
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr><td>Maximum Capacity</td><td>5,500 kg/h</td></tr> <tr><td>Maximum shaft power</td><td>2,000 kW</td></tr> <tr><td>Maximum Allowable Pressure</td><td>34 MPaG</td></tr> <tr><td>Maximum Rotating speed</td><td>600 r/min</td></tr> </table>		Maximum Capacity	5,500 kg/h	Maximum shaft power	2,000 kW	Maximum Allowable Pressure	34 MPaG	Maximum Rotating speed	600 r/min								
Maximum Capacity	5,500 kg/h																
Maximum shaft power	2,000 kW																
Maximum Allowable Pressure	34 MPaG																
Maximum Rotating speed	600 r/min																
<small>This Certificate is issued in terms and conditions thereof. Any significant change in design or construction may render this Certificate invalid. The validity date relates to the Type Approval Certificate and not to the approval of equipment/systems installed.</small> <small>Form code: TA_1413 Rev: 2015-05 © DNV GL 2014. DNV GL and the Redfish Graphic are trademarks of DNV GL AS. www.dnvgl.com Page 1 of 2</small>																	

図5 DNV-GLの型式承認  
Fig. 5 Type approval certificate of DNV-GL

今回、船上に設置する圧縮機を開発するにあたり、船級機関の一つであるDNV-GLの型式承認を2016年6月に取得した。図5にその認証書を示す。

### 3. LNG船関係の他の用途への適用

LNG運搬船に採用されている新型直接推進方式の低速2元燃料焼きエンジンのもう一つのタイプとしてX-DF<sup>4)</sup>エンジンがある。圧縮機の仕様から見た場合には、本エンジンに燃料を供給するためのBOGの昇圧圧力が2MPa程度であり、ME-GIエンジンと比べて低いことが大きな特徴で処理量などはほぼ共通である。ただし、BOGを再液化するためには2MPaの圧力では十分でなく、GIC用とは別に再液化用圧縮機のニーズもある。これらの圧縮機に求められるニーズは前述のME-GI

エンジン用の圧縮機と共通するものが多い。図6にX-DFエンジンの燃料供給システムの全体図を示す。このケースでは、GICに当社のスクリュ圧縮機、再液化用にはレシプロ圧縮機を組み合わせたシステムが採用され、2016年には初号機を受注した。

ME-GIエンジンのガス供給システムと同様に、このX-DFエンジンのガス供給システムにも、BOGの発生量やエンジンの負荷によって変化する供給量に対して安定した燃料供給および最適な再液化を実現する圧縮機の制御システムが求められる。スクリュ圧縮機とレシプロ圧縮機をそれぞれ連動して流量制御するシステムは、両方の圧縮機を手掛けている当社ならではの技術やノウハウによって構築できるものと考えている。

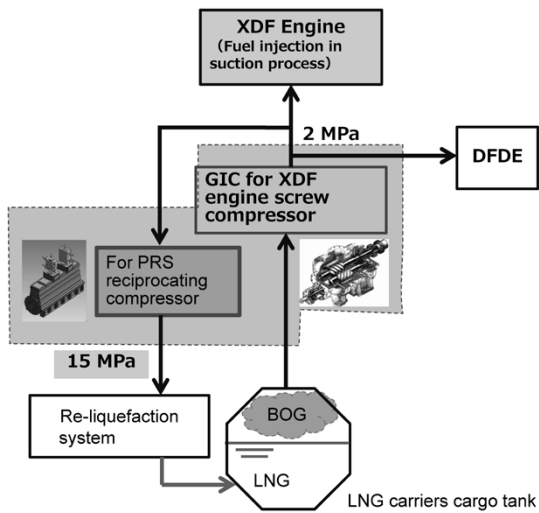


図 6 LNG 運搬船 X-DF エンジンガス供給システム  
Fig. 6 LNGC X-DF gas supply system

むすび = 環境規制の強化を受け、LNG 運搬船には天然ガスを燃料とする新型推進エンジンが採用される動きがある。当社は、この新型推進エンジンの燃料供給システムに使用される堅型レシプロ圧縮機を開発した。本圧縮

機の開発においては、当社保有の低温、高圧、油分離の技術を活用し、さらにメンテナンス性の向上を実現させている。また、燃料供給システムに付随する再液化システム用圧縮機を受注し、GIC用スクロ圧縮機と合わせた制御システムの構築を進めている。

今後さらに圧縮機ユニットとして洗練させるとともに、船舶のさまざまなガス供給システムに対して要求される圧縮機に柔軟に対応できるよう開発を継続し、LNG 船分野に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) MAN Diesel SE. LNG Carrier Power : Total Fuel Flexibility & Maintainability with 51/60DF Electric Propulsion. <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/lng-carrier-power>. (参照 2017-07-07).
- 2) Douglas Westwood. DW Monday : A Sea Change In LNG. 19th September, 2016. <http://www.douglas-westwood.com/dw-monday-a-sea-change-in-lng/>. (参照 2017-07-07).
- 3) 赤毛直樹. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.55.
- 4) Marcel Ott. WinGD, 2015-09-08, X-DF dual-fuel engines - Technology Review/Marcel Ott. [https://www.wingd.com/media/1445/marcelott\\_x-df\\_technology-review.pdf](https://www.wingd.com/media/1445/marcelott_x-df_technology-review.pdf). (参照 2017-07-07).