

(技術資料)

# LNG燃料船用圧縮機

高木 一\*・瀬山勝広・衣川博継・手塚智志・友近貴之

## Compressor for LNG-fuelled Ships

Hitoshi TAKAGI・Katsuhiko SEYAMA・Hirotosugu KINUGAWA・Satoshi TEZUKA・Takayuki TOMOCHIKA

### 要旨

船舶業界の環境規制強化に伴って低速2元燃料エンジンのME-GIとX-DFが注目されており、これらエンジンのガス供給システムに使われる圧縮機の需要拡大が見込まれる。本稿では、両エンジンを概説するとともに、当該用途用のレシプロ圧縮機の特徴を解説した。水平対向型圧縮機に比べてスペースが小さい堅型圧縮機で、かつメンテナンス性の優れた設計とした。採用したピストンリング式ピストンは、ラビリンス式に比べてエネルギー効率に優れ、金属どうしの接触リスクが低い。ガスの発生量の変化や複数先へのガス供給に対応した制御を取り入れ、無給油式シリンダと給油式シリンダの組み合わせによりガスへの油混入問題解決と摺動部品の良好な耐久性・信頼性を両立させた。

### Abstract

With the tightening of environmental regulations at shipping firms, the low-speed dual-fuel engines ME-GI and X-DF are attracting attention, and the demand for the compressors used in the gas supply systems of these engines is expected to increase. This paper outlines these engines and describes the features of a Kobe Steel reciprocating compressor that was designed for the application. The company has adopted a vertical type compressor, which requires a footprint smaller than that of a horizontal type compressor, and is designed to have excellent maintainability. The piston-ring-type piston that was adapted has higher energy efficiency and a lower risk of metal contact than a labyrinth-type piston. The newly developed compressor incorporates a control system corresponding to the changes in the amount of gas generation and gas supply to multiple destinations, and combines oil-free and oil-lubricated cylinders to solve the problem of oil mixing into the gas as well as to achieve excellent durability and reliability in the sliding parts.

### キーワード

環境, 天然ガス, LNG, 船舶, レシプロ圧縮機, 堅型, 再液化

まえがき = 国際海事機関 (IMO) による環境規制強化の影響を受け、船舶業界では重油あるいは天然ガスを燃料とする新型の低速2元燃料(だ)きエンジンが注目されており、LNG運搬船に採用され始めている。同エンジンには、ME-GI方式とX-DF方式があり、ともに圧縮機を必要としている。LNG運搬船の建造数は好調に推移すると予測されており、それに伴って船舶エンジン用圧縮機の需要も拡大が見込まれる。このため当社においても、圧縮機事業の拡大を目指して当該用途の圧縮機を商品化し、実績を積みつつある。本稿では、船舶エンジン用圧縮機について紹介する。

## 1. ME-GIとX-DF

ME-GIとX-DFはともに、重油あるいは天然ガスを燃料とする2元燃料(だ)きエンジンである。海洋汚染防止条約(MARPOL条約)によって燃料油中の硫黄分濃度は世界的に規制されている。その規制値は2020年1月に現行の3.50%以下から0.50%以下に強化された<sup>1)</sup>。本規制への有効な対応手段の一つが硫黄分を全く含まないLNGの燃料利用である<sup>2)</sup>。

本章では、圧縮機に要求される仕様の観点からME-GIおよびX-DFを概説する。

### 1.1 ME-GI

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(BOG)は低温(およそ $-160^{\circ}\text{C}$ )である。またその量は、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、レシプロ圧縮機で30 MPaまで昇圧され、LNG運搬船の推進のためにME-GIエンジンへ供給される。その一部は約1 MPaまで昇圧されて船内補機動力用のエンジン

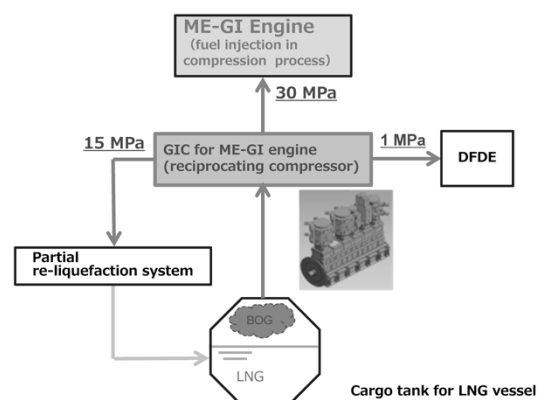


図1 LNG運搬船ME-GIエンジンガス供給システム  
Fig.1 Gas supply system for LNGC ME-GI

\* 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機本部 回転機技術部

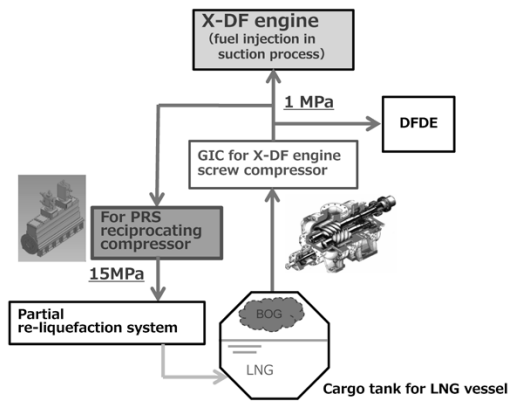


図2 LNG運搬船X-DFエンジンガス供給システム  
Fig.2 Gas supply system for LNGC X-DF

表1 ME-GIとX-DFの比較  
Table 1 Comparison of ME-GI and X-DF

	ME-GI	X-DF
Fuel	Dual fuel (Heavy oil and natural gas)	Same as left
Engine type	2-stroke	Same as left
Fuel gas supply pressure to engine	30 MPa	1 MPa
Combustion method	Diffusion combustion	Premixed combustion
Fuel gas supply timing to engine	Compression process	Suction process
Compressor for fuel gas supply (/1 engine)	Reciprocating comp. 1 unit	Screw comp. 1 unit Reciprocating comp. 1 unit

(DFDE: Dual Fuel Diesel Engine, 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を回収し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る。

## 1.2 X-DF

図2にX-DFエンジンを搭載したLNG運搬船のシステムを示す。LNGタンクから発生したBOGをスクリュウ圧縮機で約1MPaまで昇圧してX-DFエンジンに供給する。また、一部のガスをDFDEに供給する。本スクリュウ圧縮機に関しては当社プレスリリース<sup>3)</sup>を参照されたい。スクリュウ圧縮機の後流に設置される再液化用レシプロ圧縮機は、その余剰ガスを約15MPaまで昇圧して再液化システムに供給する。当社保有技術の一つとして、スクリュウ圧縮機とレシプロ圧縮機とをバランスよく運転できる制御システムを確立していることがある。

ME-GIとX-DFの比較を表1に示す。両者が市場を二分している状況にある。

## 2. 船舶エンジン用レシプロ圧縮機

本章では、当社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機を取り上げる。当社が納入する機器類は、圧縮機本体をはじめ、主電動機、ガスクーラ、各段の連絡配管、弁、オイルユニット、脈動防止用のドラムなど、関連する機器一式である。さらに、運転中に変動するガス量(エンジンでの消費量、タンクからのBOG発生量)に対して最適なバランスをとるための制御システムも納入している。

3Dモデルによるレイアウト設計だけでなく、ユニットの振動解析や制御のシミュレーション解析などを行い、最適な設計を行っている。図3は、ME-GI用レシプロ圧縮機ユニットの3D CAD図である。

ME-GI用およびX-DF用に使用されるレシプロ圧縮機の仕様例を表2に示す。

### 2.1 特長

1996年以来当社は、各国のLNG受け入れ基地に高圧LNG BOG圧縮機を多数納入してきた。そうした信頼性のある技術を基盤とし、これに需要家のニーズと使用条件を満たすべく当社固有のさまざまな技術を融合して開発したのが船舶エンジン用レシプロ圧縮機である。その開発過程においては、実物大スケールの試作機を用いた試運転や各種試験によって設計の検証を行った。

本節では当社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機の特長を概説する。

#### 2.1.1 縦型圧縮機

船舶エンジン用レシプロ圧縮機は船舶内の限られたスペースに設置される。縦型のレシプロ圧縮機は、メンテナンススペースを含めた設置面積が前述のLNG BOG圧縮機に採用されている水平対向型圧縮機と比較して小さくできる。図4にME-GI用レシプロ圧縮機の3D-CAD

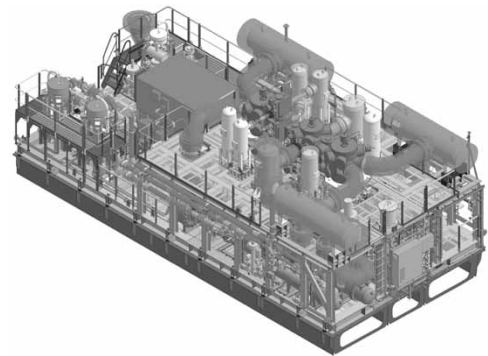


図3 ME-GI用レシプロ圧縮機ユニット  
Fig.3 Reciprocating compressor unit for ME-GI

表2 ME-GI用およびX-DF用レシプロ圧縮機の仕様例  
Table 2 Typical specifications of reciprocating compressor for ME-GI and X-DF

	For ME-GI	For X-DF
Purpose	Gas supply to engine and partial re-liquefaction system	Gas supply to partial re-liquefaction system
Suction pressure	0.0~0.02 MPa	1 MPa
Suction temperature	-140~43°C	0~43°C
Discharge pressure	30 MPa	15 MPa
Number of stages	6	3
Capacity	4700 kg/h	4800 kg/h

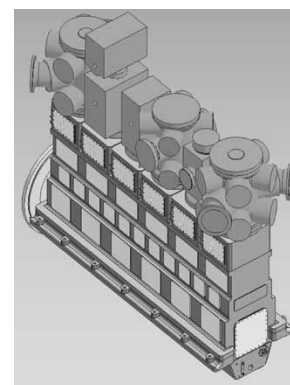


図4 ME-GI用レシプロ圧縮機(縦型)  
Fig.4 Reciprocating compressor for ME-GI (vertical type)

図を示す。メンテナンスのためにピストンを水平方向に引き抜く必要がある水平対向型圧縮機に比べて、同性能の堅型圧縮機ではピストンを鉛直方向に引き抜くことができるため、メンテナンススペースを含めた設置面積をおよそ3割削減できる<sup>4)</sup>。

堅型圧縮機は一般的に、水平対向型圧縮機に比べてピストンなどの往復動によるアンバランスフォースが大きくなる傾向がある。船側基礎へのアンバランスフォースを最小化するため本圧縮機では、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スローを120°ごとに位相をずらすことによってアンバランスフォースを打ち消す設計とした。これにより船側基礎の設計最適化にも貢献でき、運転の低振動化も実現している。

### 2.1.2 メンテナンス性を考慮した設計

圧縮機のメンテナンスは通常、船のドック入りに合わせて実施することを想定している。このため、停泊中の短時間で圧縮機をメンテナンスできるよう、シリンダとピストン一式を一括で交換できる構造(図5)を採用した。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せるようにしたことにより、シリンダ組立品一式を一括で交換することが可能である。

従来、レシプロ圧縮機の主な消耗部品であるシリンダ弁、ピストン(ピストンリング、ライダリング、ロッドパッキン)などを船上でシリンダ部からそれぞれ個別に取り外して組み立てていた。この方法では短期間のメンテナンスは実現できなかった。

いっぽう、図5のような構造とすることにより、取り外したシリンダ部一式を船外に持ち出してメンテナンスすることができ、船上でのメンテナンス時間を大幅に短縮することが可能になった。

### 2.1.3 ピストンリング式ピストン

当社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機では、全段ピストンにピストンリング式を採用している。他社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機とは異なり、低段、低温ピストンにもピストンリング式を採用している特徴がある。と

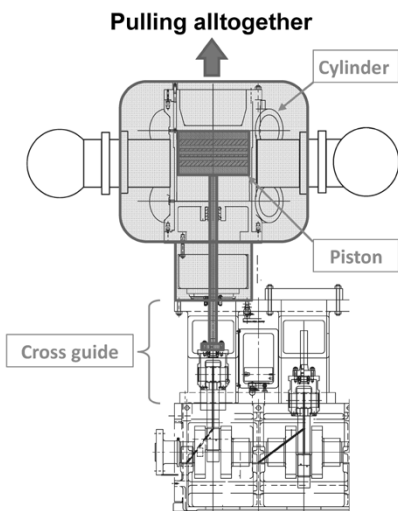


図5 シリンダとピストンの一括吊り上げ  
Fig.5 Pulling up cylinder and piston as one body

くに低温部には、リングが摺動(しゅうどう)する相手材に低温で靱性(じんせい)があるNi含有鋳鉄を採用している。さらに、リングとの相性や低温運転時のひずみなどを考慮した特殊な熱処理を行うことによってリングの信頼性を確保している。こうした取り組みによって当社では、LNG受け入れ基地向け圧縮機の実績を長年にわたって構築してきた。

低温ピストンには一般に、ピストンリング式とラビリンズ式が採用されている(図6)。ラビリンズ式は、シリンダ内径とピストン外径の隙間を小さくし、内部リークを少なくするための特殊な溝をピストンに設けた構造となっている(図6下図)。

いっぽうでピストンリング式の大きな特長は、ガスをシールするための樹脂製のピストンリングを複数本配置した構造となっていることである(図6上図)。この構造により、ラビリンズ式よりも内部リークが少なく、その結果としてエネルギー効率が良いといえる。しかしその反面で、低温に適したリング材料の選定や、リングが摺動するシリンダ内径表面の硬度の確保などが必要になる。

図7左図に示すように、ピストンリング式ではシリンダとの接触防止のための樹脂製のライダリングがピストンに装着されている。このため、シリンダ内の温度変化が短時間で起こる急速な立ち上げ時や、圧縮機が大きい

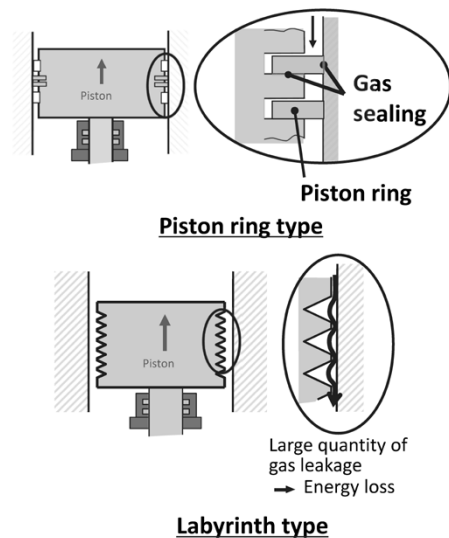


図6 ピストンリング式とラビリンズ式との比較(ガスの内部リーク)  
Fig.6 Comparison between piston ring type and labyrinth type (internal leak of gas)

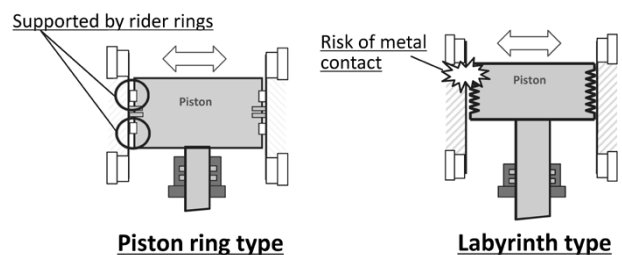


図7 ピストンリング式とラビリンズ式との比較(ピストンとシリンダ内面との接触リスク)  
Fig.7 Comparison of piston ring type and labyrinth type (risk of contact of piston and inner surface of cylinder)



く傾く船舶上の場合など、ピストンとシリンダとの隙間が不安定になりやすい環境でも接触の恐れがないことなどがピストンリング式がラビリンス式より優れる点である。

同じ運転条件の場合、当社の全段ピストンリング式圧縮機は、他社の低压段ラビリンス式・高压段ピストンリング式の圧縮機よりも消費電力が10%程度少ない。

#### 2.1.4 複数の供給先をもつ圧縮機

一般には、圧縮機の入口で吸い込んだガスは一つの出口から吐き出される。しかしME-GI用圧縮機は、ME-GIエンジン向け（最高圧段から）のほかに、再液化システム向け（最高圧段の一つ前段から）、あるいは船内補機動力用のエンジン向け（低压段から）というように、異なった圧力からそれぞれの供給先へガスを送出することにより、不必要な昇圧による動力ロスを削減できる。またガス量は、圧縮機の入口となるタンクのBOG発生量も含めて刻々と変化する。このため、各段に設けられたバイパス弁のコントロールなど、圧力を安定させて運転するための制御技術が要求される。設計時には、これらの弁の挙動が適切に制御できていることをシミュレーションによって確認している。

#### 2.1.5 油分を観点にした適正設計

前述のとおりレシプロ圧縮機には、ガスを圧縮するためのピストンリング、ピストン棒の軸封となるロッドパッキングなどの樹脂製摺動部品がある。一般に、高压になるほど樹脂製リングの長期連続使用は難しくなる。30 MPaの高压吐出圧力を要求されるME-GIエンジン圧縮機においても、使用される樹脂製リングの耐久性や信頼性を向上させる必要がある。その一般的な方法としてシリンダ内部への潤滑油の供給がある。

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。再液化システムが設置される場合は、高压で供給されたガスを冷却して急速に膨張させるため、油分がガス中に混入していると系内に付着した油分が凝固し、再液化システムの効率低下や詰まりを引き起こす。また、大型のLNGタンクの油汚染を引き起こす。

当社は現在、これら相反する問題を解決するために、ME-GI用レシプロ圧縮機に対してさまざまな工夫を行っている。すなわち、エンジンへ供給する最高圧段のシリンダ（吐出圧力 約30 MPa）には給油式シリンダを、また再液化システムへ供給する最高圧段の一つ前段のシリンダ（吐出圧力 約15 MPa）には無給油式シリンダを採用している。

また、最高圧段の下流には油分を高度に分離できる装置を設置している。この油分離装置には、油冷式スクリュ圧縮機で当社が長年蓄積してきた技術を用いている。この油冷式スクリュ圧縮機には、圧縮室へ多量の潤滑油を供給し、潤滑油とガスを混合させながら圧縮し、その

後多量の潤滑油を段階を経て分離するシステムが付属している。このような例は、複数のタイプの圧縮機を設計・製造している当社の特徴の一つでもある。

**むすび** = 環境規制に適合し天然ガスを燃料とするLNG運搬船用の新型推進エンジンの燃料供給システムと、そこに使用される圧縮機を解説した。

今後、LNG運搬船と天然ガスの船舶燃料利用の発展に合わせて、よりスペースの小さなユニットで、多様な運転をよりエネルギー効率よく行えるように当社の圧縮機ユニットも発展させ、エネルギー使用と環境負荷低減を両立させる世界の実現に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省. 報道発表資料, 2020年船舶SOx規制の統一の実施のためのガイドライン策定に着手～国際海事機関 第5回汚染防止・対応小委員会の審議結果について～. [https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07\\_hh\\_000095.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000095.html), (参照2019-11-27).
- 2) 国土交通省. 添付資料, (別紙2) PPR5の審議概要(その他). <https://www.mlit.go.jp/common/001221253.pdf>, (参照2019-11-27).
- 3) 神戸製鋼所. LNG船向け非汎用スクリュ式圧縮機の受注について. [https://www.kobelco.co.jp/releases/1195651\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1195651_15541.html), (参照2019-11-27).
- 4) 瀬山勝広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.77.



高木 一

機械事業部門 圧縮機事業部  
回転機本部 回転機技術部



瀬山勝広

機械事業部門 圧縮機事業部  
回転機本部 回転機技術部



衣川博継

機械事業部門 圧縮機事業部  
回転機本部 回転機技術部



手塚智志

機械事業部門 圧縮機事業部  
回転機本部 回転機技術部



友近貴之

機械事業部門 圧縮機事業部  
回転機本部 回転機技術部