

# LNG燃料船向け高圧LNGポンプ用摺動部材の開発 -ピストンリングとロッドパッキンの性能が向上-

石原 修二\* 大西 博子\* 片山 秀樹\*\*  
古川 将也\*\* 太田 一成\*\*

## Development of Sliding Members in LNG Pump for LNG Fueled Ships

Shuji ISHIHARA, Hiroko OHNISHI, Hideki KATAYAMA,  
Masaya FURUKAWA, Kazushige OHTA

Mitsui E&S Machinery Co., Ltd. (MES-M) has developed sliding members with excellent wear resistance and sealing properties used in high pressure LNG pump that supply pressurized LNG to ME-GI engine. For piston rings, we verified the wear mechanism at cryogenic and determined the resin composite with excellent wear resistance at cryogenic. For rod packings, we achieved a significant improvement in sealing performance by introducing a packing shape suitable for the operating conditions of high pressure LNG pump. In order to confirm the performance of each sliding member, the wear rate of the piston ring and the leakage of the rod packing were measured by conducting element test and actual equipment test. It was demonstrated that the durability of the piston ring was improved and the sealing performance of the rod packing was also improved. This result is expected to make a significant contribution to cost reduction in the life cycle of high-pressure LNG pumps.

株式会社三井E&Sマシナリーは、電子制御式ガスインジェクションディーゼル機関（ME-GI）にLNGを供給する高圧ポンプを開発した。その摺動部材において、ピストンリングでは、極低温環境下における樹脂複合材の摩耗メカニズムの検証を行うことにより、極低温での摩耗特性に優れたピストンリング材料を決定した。またロッドパッキンでは、高圧LNGポンプの運転条件に適した構造とすることで、大幅なシール性能の向上を図った。それぞれの性能を確認するため、単体での要素試験及び実機試験にて、ピストンリングの摩耗速度及びロッドパッキンの漏れ量を計測した。その結果、ピストンリングの耐久性が向上し、ロッドパッキンのシール性も向上することを実証した。これにより、高圧LNGポンプのライフサイクルにおける費用削減に大きな寄与が期待できる。

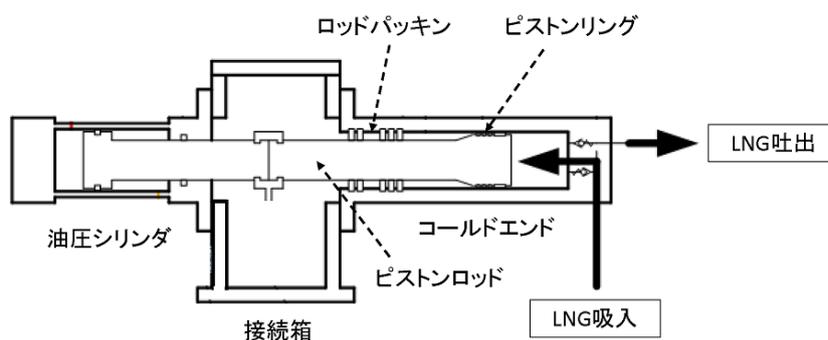


図1 高圧LNGポンプの概略図

Schematic Diagram of High Pressure LNG Pump

\* 三井E&Sマシナリー 技術開発総括部 玉野開発室

\*\* 三井E&Sマシナリー 産業機械事業部 設計部

## 1. はじめに

国際海事機関（IMO）にて採択された海洋汚染防止条約による規制により、船舶から排出される排気ガス中に含まれる温室効果ガス、硫黄酸化物、窒素酸化物等の大気汚染物質の厳しい規制が始まっている<sup>1)</sup>。特に硫黄酸化物に関する規制は、就航中の全ての船舶に適用されるものであり、2020年以降は、規制に適合する燃料油を使用するか、同等の効果のあるLNG（液化天然ガス）等の代替燃料油の使用、又は排気ガス洗浄装置を使用する必要がある。これまで硫黄分を多く含む重油を主な燃料としてきた船用機関にとって、この規制は大きな問題となっている。

就航中の船舶においては、排気ガス中の硫黄酸化物の量は燃料油中に含まれる硫黄分の量に依存するため、駆動機関や発電用機関の仕様に応じて、規制に対応した低硫黄燃料油の使用や排気ガス洗浄装置の設置等による対応が主に行われていると考えられている。一方で、今後建造される船舶においては、LNG等の代替燃料油にも対応した機関が選ばれる機会が増えると予想されている。そこで、当社では、LNGに対応した電子制御式ガスインジェクションディーゼルエンジン

（ME-GI）<sup>2)</sup> への燃料供給機器の開発を進め、LNG運搬船に対応したボイルオフガスを昇圧する高圧ガス圧縮機<sup>3)</sup>をはじめ、環境規制によって今後増加すると考えられるLNG燃料船への対応として、LNGを液体状態で昇圧する高圧ポンプ<sup>4)</sup>をラインナップすることにより、ME-GIエンジンと燃料供給機器をセットで一括供給できる体制を整えた。

当社が開発した高圧LNGポンプの構成を図1に示す。主に油圧シリンダ、接続箱、コールドエンドとよばれるポンプシリンダで構成され、1本のコールドエンドと1本の油圧シリンダを一つのモジュールとしている。任意にモジュールの本数を平行で設置できるため、トラブル発生時の冗長性に対して、柔軟性を持たせた設計とすることができる。

また、予備モジュールの台数設定を決定するに当たり、経年的に劣化する駆動部品の交換周期は重要なパラメータである。高圧LNGポンプにおいては、ピストンリングやロッドパッキンなどの摺動部品がこれに当たる。これらの部品の耐久性において、使用可能な時間を長期化するだけでなく、寿命の予測性を高めることができれば、予備モジュールの設定台数を最小限にできるなど、メンテナンスコストだけでなく、

初期コストの低減も見込める。

本報告では、LNG燃料船向け高圧LNGポンプにおけるピストンリング及びロッドパッキンについて、求められる耐久性及び機能の視点から検討した結果を報告する。

## 2. 耐摩耗性に優れたピストンリングの開発

### 2.1 ピストンリング材料の選定

#### 2.1.1 極低温下における摩擦摩耗試験

図1に示すように、高圧LNGポンプのピストンリングはコールドエンド内部に設置されており、吸入されたLNGと直に接し、 $-160^{\circ}\text{C}$ 前後の極低温にさらされながら往復摺動をしている。この温度域では潤滑油は使用できないため、その摺動特性はLNG及びピストンリング材料に含まれる固体潤滑成分に依存することになる。

潤滑油を使用しない環境における摺動材料には、黒鉛などの炭素系材料のほかに、樹脂系材料が使用される。例えば、無給油で運転されるプロセス用往復動圧縮機のピストンリングには、樹脂複合材が多く採用されている<sup>5)</sup>。特にふっ素樹脂の一つである、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）は固体潤滑作用に優れており多用されている。また、PTFEは、耐熱性や耐薬品性に優れた材料として知られるが、低温域においても十分な衝撃強度を有することから、低温用のガスケット等のシール材にも多く採用されている。しかし、PTFE単体では強度的に十分ではないため、PTFEをマトリクス（母材）に、ガラス繊維や炭素繊維などの短繊維等を充填し補強された複合材として用いるのが一般的である。この充填材の種類や添加量は多岐にわたり、用途や使用条件に応じて適切に選択されなければ、十分な特性を得ることは難しい。極低温下におけるPTFE複合材の摩擦摩耗特性に関する検討は、ロケット用ターボポンプの軸受を対象とした例はあるものの<sup>6)</sup>、ほかに多くはない。そこで、いくつかの組成のPTFE複合材について極低温下での摩擦試験を行い、摩擦摩耗特性を比較し評価した。

本試験は、可燃性のあるLNGと比べて取扱いが容易な液体窒素の浸漬下で、ピンオンディスク試験として実施した。試験装置の概要を図2に示す。浸漬容器は真空層を設けた断熱構造とし、大気からの入熱による液体窒素の気化を低減させた。

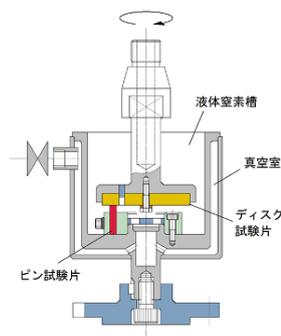


図2 液体窒素を用いたピンオンディスク摩耗試験の概略図

Schematic Diagram of Pin-on-Disk Test in Liquid Nitrogen

摩擦摩耗特性に及ぼす影響はLNGと液体窒素で異なるため、このピンオンディスク試験では、極低温下でのPTFE複合材の摩耗メカニズムの検証を目的に相対評価によるスクリーニングと位置づけ、摩耗速度などの定量的な評価はLNGを使った実機モジュールによる試験で求めることとした。

ピンオンディスク試験の条件を表1に示す。ディスク側にはNi系コーティングを施したオーステナイト系ステンレス鋼を用いた。試験パラメータに対するPTFE複合材の摩耗量を相対比較するとともに、摩擦面の顕微鏡観察により摩耗のメカニズムを考察した。

2.1.2 極低温下での摩擦摩耗特性に及ぼす充填材の影響

ピストンリングとして使用されるPTFE複合材の充填材には、機械的強度を向上させるものとしてガラス繊維や炭素繊維、潤滑特性を向上させるものとして黒鉛や二硫化モリブデンなどが一般的に添加されている。特に極低温で使用される摺動材には、摩擦面の放熱性向上を目的に、熱伝導率が比較的高いブロンズ粉末の充填率の高い材料が採用される場合がある<sup>7)</sup>。そこで評価の一例として、ブロンズ粉末の充填率が摩擦摩耗特性に及ぼす影響を、面圧をパラメータに評価した。ブロンズ粉末の充填率の異なる3種類のPTFE複合材をピンとして試験に供し、試験前後の寸法変化を摩耗量として相

対評価した。面圧20MPaにおけるブロンズ充填量最小の試料の摩耗量を1としたときの相対的な摩耗量の比較を図3に示す。面圧20MPaでは、ブロンズの充填による強度向上により一部で摩耗量が低下したが、全体的には充填率と摩耗量に大きな関連性は見られなかった。一方で面圧を40MPaとすると、ブロンズ充填率の増加とともに摩耗量も大幅に増加した。この原因として、摩擦面の顕微鏡観察から、面圧の上昇とともにブロンズ粉末の脱落が増えることを確認している。ME-GIに適用される高圧LNGポンプの吐出圧は30MPa以上の高圧であり、ピストンリングも高い面圧を受けて往復摺動する。したがって、当社の高圧LNGポンプにおいては、ブロンズの充填率が低い材料の方が、耐摩耗性に優位であると考えられる。

さらに、極低温下での摩耗メカニズムを検討するために、複数の充填成分が添加されたPTFE複合材の摩擦面の状態を摩耗の進行とともに連続的に観察した。なお、観察にはレーザー顕微鏡を用い、表面の凹凸情報も併せて取得した。同じ視野における連続した顕微鏡像を図4に示す。摩耗は(a)→(b)→(c)→(d)の順に推移しており、摩擦試験1時間ごとに表面観察したときの状態である。摩耗の進行性を評価すると、(a)→(b)及び(b)→(c)の間では摩擦面の外観の変化は小さく、計測した摩耗量も微量であるのに対し、(c)→(d)の間では摩擦面の変化が大きく、計測した摩耗量も多かった。

さらに、微視的に評価した結果を示すために、図4中の囲み部を図5に拡大した。図5の視野において下部に見られる近接した三つの白色の充填材に着目すると、(a)→(b)の間で面積が増加している。これは周辺の高さ変化から、マトリクスの摩耗に伴って充填材の露出が増加したものと考えられる。次に、(b)→(c)において同じ充填材に着目すると、充填材とマトリクスとの界面に、(b)では見られなかった空隙が生じており、一部の充填材は脱落していることが分かる。このことから、この複合材の摩耗メカニズムは、

- ①マトリクスの摩耗により摩擦面表面に充填材が露出
- ②充填材は摩擦面の耐摩耗性に寄与
- ③摩擦力によりマトリクスとの界面で充填材の剥離が進行
- ④摩耗の進行とともに充填材が脱落
- ⑤摺動方向にマトリクスを削りながら摩擦面から除去と推定できる。

マトリクスと充填材の界面において、特に温度に着目すると、一般的な用途では、摩擦発熱によって室温よりも高い温度で使用されるのに対し、高圧LNGポンプでは、LNGによる冷却によって室温よりも低い温度で使用される。マトリクスと充填材の線膨張係数の違いは、両者の界面に高温と低温では正反対の力学的作用を及ぼすことから、低温で使用される材料の摩擦摩耗特性は、低温域で評価することが重要である。当社では、複数のPTFE複合材について、実機に相当する面圧及び摺動速度にて液体窒素浸漬下における摩擦試験を行

表1 ピンオンディスク摩耗試験条件  
Test Conditions of Pin-on-Disk Test

ピン	PTFE複合材
ディスク	Ni系コーティング オーステナイト系ステンレス鋼
面圧 (MPa)	20, 40
速度 (m/s)	1.0
試験時間 (h)	2
雰囲気	液体窒素浸漬

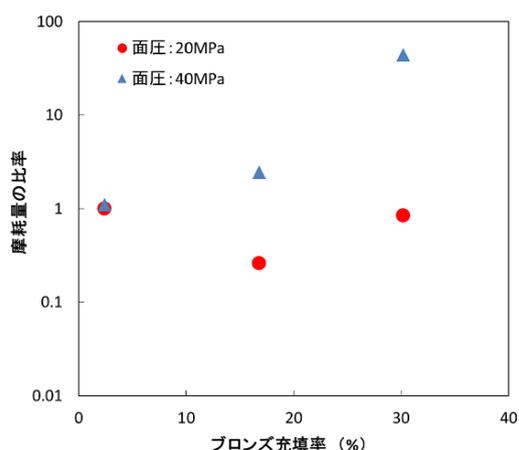


図3 液体窒素中試験におけるPTFE複合材中のブロンズ充填率と摩耗量比率の関係  
Effect of Bronze Filling Rate of PTFE Composites on Wear in Liquid Nitrogen Test

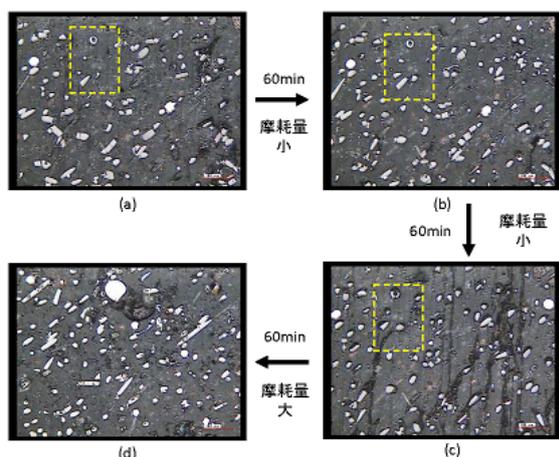


図4 液体窒素中試験時のPTFE複合材摩擦面の外観変化  
Appearance of Frictional Surface of PTFE Composites  
in Liquid Nitrogen Test

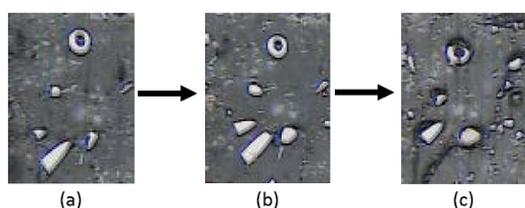


図5 PTFE複合材摩擦面における充填材の外観変化 (図4の  
局所を拡大したもの)  
Appearance of Filler in PTFE Composites on the  
Frictional Surface (Enlargement Figure of Fig.4)

い、摩耗量だけでなく摩耗メカニズムに基づいた摩擦面評価とともに材料をスクリーニングし、高圧LNGポンプのピストンリングに適したPTFE複合材を選定している。

## 2.2 ピストンリングの実機耐久性

ピンオンディスク試験により耐摩耗性が高いと判断したPTFE複合材をピストンリング形状に加工して図1の高圧LNGポンプに導入し<sup>8)</sup>、実際の機関使用条件である吐出圧33MPaで耐久性を評価した。ピストンリングの構造を図6に示す。ピストンリングはライナとの摩擦により外周側から摩耗するが、顕著に摩耗するまでには時間を要するため、予め摩耗を想定し、ピストンリング厚み(半径方向寸法)を初期厚さに対して12.5%減肉及び25%減肉となるよう外周側から削り込んだピストンリングを製作し、試験運転を行った。その結果、25%減肉させたものは吐出圧33MPaでの運転途中で折損したが、12.5%減肉させたものは健全であった。

高圧LNGポンプのピストンリングは図6のように軸方向に2枚のリングを重ねている。低圧側のリング合口部の上を高圧側リングで蓋をしているため、ピストンリングの差圧によって高圧側のリングが低圧側リング合口に押し付けられ曲げ応力がかかる。摩耗が進行すると合口が広がるため、25%

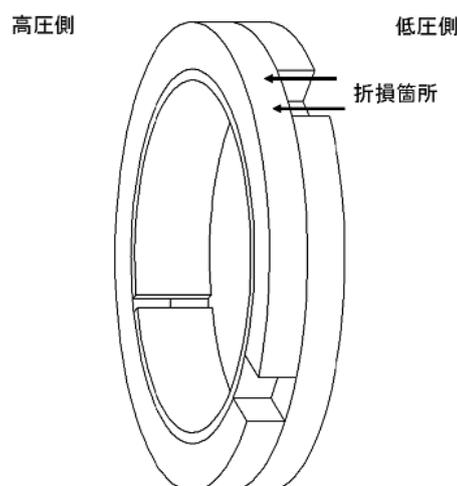


図6 高圧LNGポンプのピストンリング構造  
Structure of Piston Ring for LNG High Pressure Pump

減肉させたものは、高圧側リングにかかる曲げ応力が大きくなって折損したと考えられる。

一方、12.5%減肉のピストンリングは健全であったため、高圧LNGポンプにおけるピストンリングの許容摩耗量は初期厚みの12.5%以上25%未満と見込めるが、摩耗限界を安全側の初期厚みの12.5%で設定した。ピストンリングの摩耗量が初期厚みの12.5%に到達するまでの運転時間を、これまでの実機試験運転での摩耗速度で評価した結果、少数の予備モジュールを備えることで、エンジンのメンテナンス間隔に対応させることが可能との見通しを得た。

## 3. シール性に優れたロッドパッキンの開発

### 3.1 高圧LNGポンプにおけるロッドパッキンの課題

化学プラントなどで使用される一般的な往復動圧縮機と同様に、高圧LNGポンプにもロッドパッキンが装備されており、作動流体をシールする機能を有している。ところが高圧LNGポンプでは、極低温の流体を扱うため、ポンプ全体が着霜するほどの温度低下が生じ、ロッドパッキンにおいても、ポンプ運転中は温度が低下するとともに、運転の状態によって温度も変動する。このため、温度変化による寸法変化が、ロッドパッキンにおけるシール性や耐摩耗の課題であった。ロッド用パッキンとして広く用いられるUパッキン<sup>9)</sup>の場合、リップの開きによって自動的に接触面圧を調整する機能を有している。温度低下の場合は、ロッドとパッキン間の寸法に変化が生じ、顕著なシール性の低下は起こらないと考えられる。しかし、リップで局所的に面圧を受ける構造のため、長期のシール性維持は難しく耐久性に劣ると考えられる。一方、往復動圧縮機で汎用的に使用される図7に示す3分割のタンジェンシャル型ロッドパッキンの場合、室温付近では優れたシール性を示すものの、温度低下時には分割された部品

単位で収縮するため、嵌合部を中心にロッドとの間に空隙が生じ、大きくシール性が低下する。また、シール性に影響を及ぼすパッキン部の温度変動を避けるために、ヒーター加熱により温度を一定に維持する機構が設けられる事例もあるが、エネルギー消費の点では好ましくないと言える。そこで当社では、ロッドパッキン周辺部の温度変化に追従し、シール性に優れた耐久性の高いロッドパッキンを開発した。

### 3.2 開発したロッドパッキンの構造

開発したロッドパッキンの構造を図8に示す。合口を持つリングを内周側に2層、外周側に1層を設け、外周側リングの外周に引張ばねを巻くことでロッドパッキン全体を固定している。

図7に示す分割型のロッドパッキンのシール性が悪化する原因は、ロッドパッキンを構成する部品が低温で収縮する際に、部品とロッド、部品とパッキン箱及び部品同士の接触面が密に合わなくなった結果、シールすべき接触面に隙間が生じるためである。図8に示す開発したロッドパッキンは、低温でパッキン部品が収縮するのは同じだが、パッキン部品の剛性を下げてシール面を沿いやすくしたことに加えて、収縮してもシール性能を損なわない構造を特長としている。具体的には、厚み方向に2分割することで剛性を下げ、収縮に伴う合口の開きに対しては、幅方向に2分割とすることで合口の位置をずらし、漏れとなるパスを長くとっている。なお、二重の内周側リングは互いに回転しないようにピンで固定されており、合口の相対位置が変わることはない。

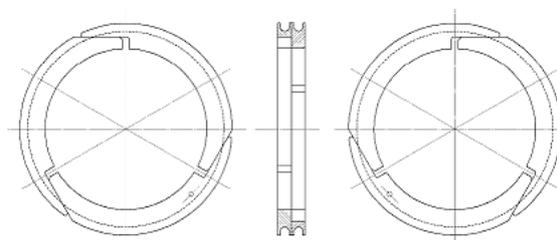


図7 一般的なロッドパッキンの構造  
(タンジェンシャル型)

Structure of General Rod Packing  
(Type Tangential)

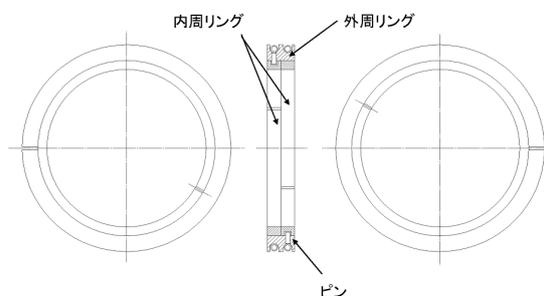


図8 開発したロッドパッキンの構造  
Structure of Developed Rod Packing

これ以外にも、接触部の粗さなどもシール性能に大きな影響を及ぼすため、適切な管理が必要である。また摺動に伴う摩耗対策としては、内周側リングの厚さを十分に確保するとともに、ロッドパッキンの材質には、面圧や温度への依存性の小さいピストンリングと同じ材料を用いており、耐摩耗性への配慮も行っている。

### 3.3 開発したロッドパッキンのシール性

ロッドパッキンのシール性能を評価するために、高圧LNGポンプのパッキン箱を模した試験装置を製作した。外観を写真1に示す。電動アクチュエータによりピストンの往復動動作ができ、静止状態又は摺動状態におけるリーク量の計測とともに、摩擦摩耗特性も評価が可能な構造となっている。

シール性能の評価は、流体に室温の窒素ガスを使用し、静止状態において供給圧力を変化させたときの漏れ量を質量流量計で計測することにより行った。開発したロッドパッキンと汎用的な分割型のロッドパッキンとのシール性を20℃の漏れ量で比較した結果を図9に示す。いずれのパッキンもガスの供給圧力の上昇とともに、漏れ量は線形に増加しているが、20℃では両方式の漏れ量に有意な差はみられなかった。

次に、液体窒素を気化させた低温窒素ガスを供給し、シール性に及ぼす温度の影響を評価した。結果を図10に示す。分割型ロッドパッキンでは、温度の低下とともに漏れ量は増加し、-50℃以下で急激に増加している。これは、ピストンロッドとロッドパッキンの材質の熱膨張差によりピストンロッドとのシール面に空隙が生じたものと考えられる。

一方で当社開発パッキンは、温度の低下とともに漏れ量が微増はあるものの、分割型のように急激な漏れ量の増加は認められず、-100℃程度までは安定したシール性を確保できることを確認した。さらに、写真1の試験装置において、実機と同様にピストンを動作させた際の漏れ量を計測したところ、ピストンの動作に応じて漏れ量に変化は生じるものの、急激な漏れ量の増加は発生しない結果となった。

なお、ロッドパッキンの摩耗特性について、写真1の試験機及び実機で評価した結果、開発したパッキンは内周側全体



写真1 ロッドパッキン試験装置の外観  
Appearance of Rod Packing Test Equipment

への当たりが確認されており局所的な摩耗もなかった。この結果から、長期的なシール性の持続に期待できることを確認した。

#### 4. まとめ

LNG燃料船用高圧LNGポンプ摺動部材の耐久性の向上を検討し、以下の成果を得た。

- ① 極低温における耐摩耗性に優れたピストンリング材料を摩耗のメカニズムをもとに選定し、LNGによる実機試験から、摩耗限度を初期厚みに対して12.5%減肉時として数値化した。

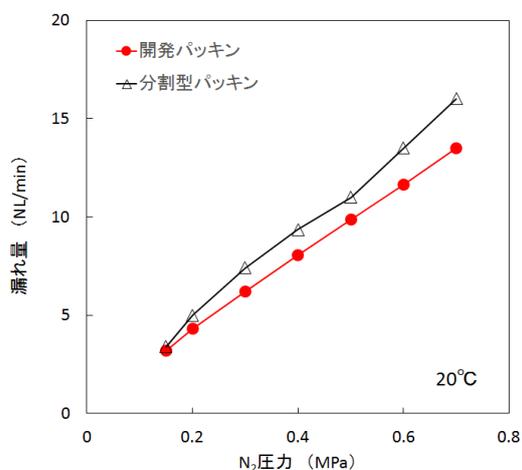


図9 ロッドパッキン漏れ量のガス圧力依存性  
Dependence of Rod Packing Leakage on Gas Pressure

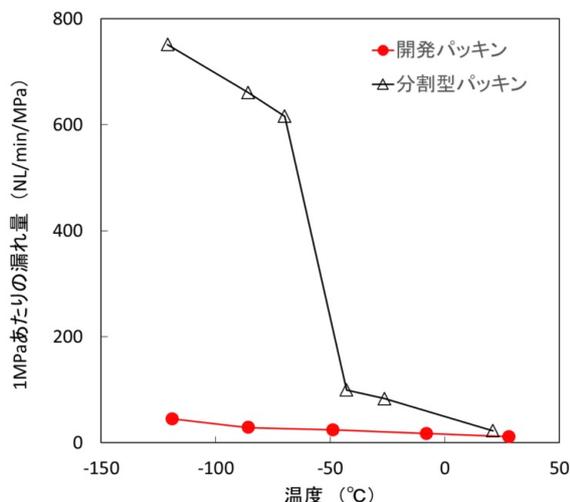


図10 ロッドパッキン漏れ量の温度依存性  
Dependence of Rod Packing Leakage on Temperature

- ② 温度変動に対してもシール性に優れたロッドパッキンを開発した。-100℃までの温度低下に対して、十分なシール性が維持されることを確認した。

ピストンリングやロッドパッキンなど摺動材の交換寿命は、ユーザーにとってメンテナンス計画を決定する上で重要なパラメータである。今回、従来の方式をそのまま踏襲するだけでなく基礎試験からデータを積み上げることにより、耐久性の高い摺動材を開発できた。今後、ME-GIエンジンと高圧LNGポンプを一体で提供できる当社のメリットを生かし、運転データを通じての長期信頼性、消費動力の削減、部品の消耗度のモニタリングによるメンテナンス計画の提供など、今後のLNG燃料船市場の要求に応じていく所存である。

最後に、本検討に当たっては、三井造船株式会社OBである神田聯蔵氏、田中正紀氏、北村誠一氏、高橋元幸氏、大塚敏夫氏に多大な協力を頂いた。ここに謝意を表する。

#### 引用文献

- 1) IMO : Revised MARPOL Annex VI - Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships 2008, (2009)
- 2) 田淵. 外 : ガス焚き低速ディーゼル機関「ME-GI」の紹介, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 51, 2 (2016), p.21
- 3) 和田. 外 : 燃料ガス供給システム用高圧ガス圧縮機の開発, 三井造船技報, 217 (2016-9), p.9
- 4) 片山. 外 : SFSS用油圧駆動LNG高圧ポンプの開発, 三井E&S技報, 1 (2018-10), p.53
- 5) 村井. 外 : 往復動型圧縮機の最近の技術動向, ターボ機械, 22, 6 (1994), p. 349
- 6) 野坂. 外 : ロケット用ターボポンプの極低温トライボロジー, 低温工学, 31, 10 (1996), p.500
- 7) 田沼 : 低温, 共立出版, (1974), p.276
- 8) K.Namba : Development of Hydraulic-Driven High Pressure LNG Pump for Fuel Gas Supply System of ME-GI Engine, CIMAC Congress 2019, Vancouver, (2019) p.85
- 9) 似内 : トライボロジー設計マニュアル, テクノシステム, 2015, p.363

[問い合わせ先]

株式会社三井E&Sマシナリー 技術開発総括部  
TEL 0863-23-2360 石原 修二

本報は、2020年2月28日に以下のホームページに公開しました。

<https://www.mes.co.jp/solution/research/>