

(技術資料)

高圧無給油式スクリュ圧縮機

High-pressure Oil-free Screw Compressor



高木秀剛*1
Shugo TAKAKI

Kobe Steel's screw compressors for process gas are widely used in the fields of petrochemistry, general chemistry, oil refining, gas businesses, etc. and, more recently, are used not only in on-land manufactories, but also in oceanic platforms and offshore applications such as FPSO. In recent applications that require relatively high discharge pressure, such as flare gas recovery and off-shore VRU, for which small compressors have conventionally been used, medium-sized compressors are being required to respond to users' request for increased gas volume. Now, Kobe Steel has lined-up medium-sized, high-pressure oil-free screw compressors, whose advantages and concepts are introduced in this paper.

まえがき = 当社のプロセスガス用無給油式スクリュ圧縮機は、石油化学や一般化学、石油精製、ガス事業などの分野で幅広く使用されており¹⁾、近年では陸上のプラントのみならずオフショアプラットフォームや浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備（FPSO：Floating Production, Storage and Offloading）などの洋上プラントにおけるアプリケーションにおいても使用されている。

そのなかでも、フレアガスリカバリーやオフショアVRU（Vapor Recovery Unit、以下VRUという）といった比較的高い吐出圧力が要求されるような用途においては、中型サイズの圧縮機が必要となるケースも増えてきた。これは、従来は小型サイズの圧縮機によって対応していたものの、近年、顧客からの要求風量が増加してきたからである。このような市場ニーズに対して当社は、中型サイズの高圧仕様無給油式スクリュ圧縮機をラインアップした。本稿ではその特長やコンセプトなどを紹介する。

1. 高圧無給油式スクリュ圧縮機の用途と適用レンジ

当社圧縮機のレンジチャートを図1に示す。無給油式スクリュ圧縮機が使用される用途において、比較的高い吐出圧力が要求されるケースでは2段あるいは3段配列の多段型圧縮機によって対応することが多い。その場合の高圧段側には高圧仕様の圧縮機が必要となる。このように、フレアガスリカバリーやオフショアVRUなどにおいては、高圧かつ処理風量が比較的多い中型サイズの圧縮機が必要となる場合がある。そこで当社は、吐出圧力が20 barG程度であった従来機に対し、最高吐出圧力が40 barGまで対応可能な中型サイズの無給油式スクリュ圧縮機を開発した。

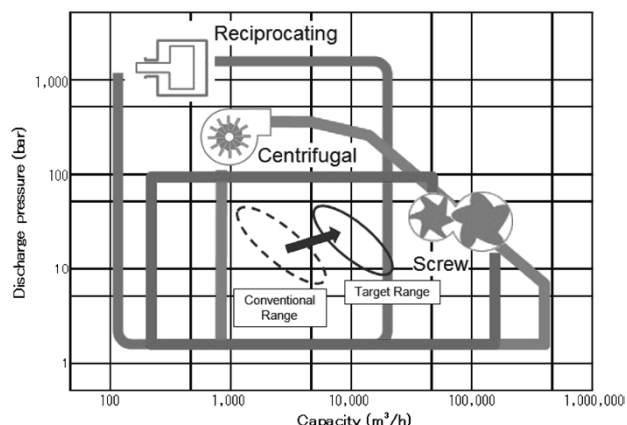


図1 圧縮機レンジチャート
Fig. 1 Range chart of compressors

2. 圧縮機の構造

当社無給油式スクリュ圧縮機の代表的な構造を図2に、全体システムを図3に示す。無給油式スクリュ圧縮機は、スクリュロータ、ケーシング、軸封、軸受および同期歯車などの主要部品によって構成される。高圧条件においてはガスの圧縮により生じる荷重が大きくなるため、ロータ、ケーシングおよび軸受などの主要部品の仕様を見直している。また、高圧化に伴って増加する音響エネルギーを低減するため、圧縮機本体のみならず高性能なサイレンサの開発も行った。各部の特徴および高圧化への取り組みについては以下に述べる。

2.1 圧縮機ケーシング

当社の無給油式スクリュ圧縮機のケーシングには、水平分割構造と筒型構造の2種類があり、それぞれ圧縮機のサイズに応じて採用している。すなわち、比較的低圧の用途で使用される大型サイズの圧縮機に対しては、メ

*1 機械事業部門 圧縮機事業部 圧縮機本部 回転機技術部

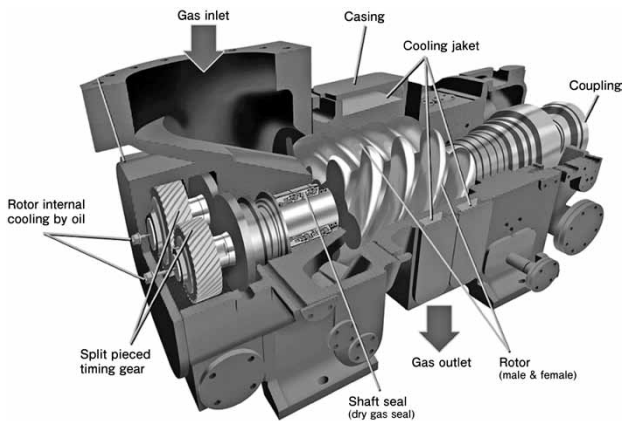


図2 無給油式スクリュウ圧縮機の構造図
Fig. 2 Structure of oil-free screw compressor

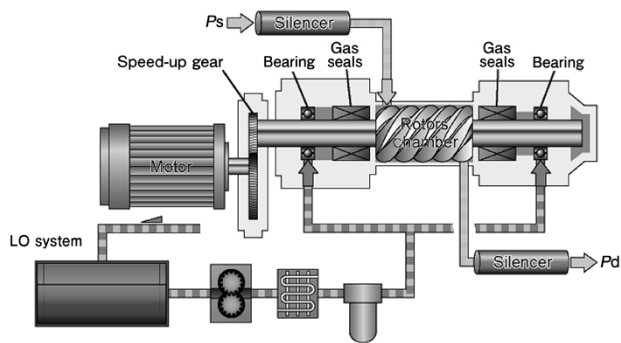


図3 無給油式スクリュウ圧縮機の代表的なシステム
Fig. 3 Typical system of oil-free screw compressor

メンテナンス性を重視した水平分割構造を採用している。いっぽうで、高圧条件で使用する事が多い小型から中型サイズの圧縮機に対しては、耐圧の観点から筒型構造を標準的に採用している。また、高圧仕様においては、従来のケーシングの肉厚やフランジレーティングなどを見直した。

ケーシングの材質は炭素鋼鍛鋼材を標準としている。内部注水を行う場合は、耐エロージョン性を向上させるためオプションとして水平分割ケーシングのロータ室内面に数mm厚のオーステナイト系ステンレスの肉盛溶接を施すことも可能である。この肉盛溶接は当社の長年にわたる試行錯誤の上に確立された技術である。とくにステンモノマ用途の大型スクリュウ圧縮機では多くの採用実績があり、高い耐エロージョン効果が確認されている。

また近年では、ステンレス鍛鋼のケーシングを顧客から要求されるケースもあり、そのような場合にはステンレス鍛鋼で製作することもある。

2.2 スクリューロータ

スクリュウロータの歯形はスクリュウ圧縮機の性能に直接関わる重要な要素である。このため当社では、顧客の要求仕様に最適な歯形を独自開発の歯形を含む数種類の歯形の中から選定している²⁾。ロータの材質は、用途あるいは顧客からの要求に基づいて、主に炭素鋼鍛造材またはステンレス鋼鍛造材を選定している。

当社スクリュウ圧縮機のロータ長さは、仕様風量に基づいてショート型またはロング型から選択し、最適風量の

設計を可能としている。高圧仕様においてはロータ軸部の剛性を確保するため、従来仕様よりも外径が太い軸を採用している。

2.3 軸封システム

プロセスガス用圧縮機における重要技術の一つとして軸封システムが挙げられる。当社の無給油式スクリュウ圧縮機では、仕様、用途あるいは顧客からの要求に応じて数種類の軸封方式の中から最適なものを選定することが可能である。以下に当社無給油式スクリュウ圧縮機で採用している代表的な軸封形式を示す。

- 1) 動圧型ドライガスシール(タンデムまたはダブル)
- 2) 静圧型ドライガスシール(シングルまたはタンデム)
- 3) メカニカルシール
- 4) カーボンリングシール
- 5) 軸受油膜シール

高圧仕様の圧縮機に対しては、動圧型ドライガスシールあるいはメカニカルシールが適用可能となっている。

2.4 軸受(ジャーナル軸受, スラスト軸受)

当社無給油式スクリュウ圧縮機に使用する軸受は主にすべり軸受を採用している。しかし近年では、ころがり軸受を使用したAdvancedシリーズもラインアップしている。

ジャーナル軸受は主に円筒形の真円軸受を標準としており、潤滑条件や運転条件に合わせて給油溝の位置、形状および軸受隙間などを最適に設計している。また近年では、軸振動の安定化を図るため、回転数が高い仕様では制振効果の高いティルティングパッドジャーナル軸受を採用することもある。しかしながら、高圧仕様の圧縮機においては比較的大きな軸受荷重を支える必要があるため、従来と同様に円筒形の軸受としている。

スラスト軸受は、主荷重側には信頼性の高いティルティングパッド軸受を標準的に採用している(図4)。スラストパッドの潤滑方式は、高速域でのメカニカルロス低減に効果のある直接潤滑式としている。また、高圧仕様で回転数が比較的高い場合は軸受負荷が高くなるため、セルフレベリング機構を備えたスラスト軸受を採用することもある。

2.5 バランスピストン

当社油冷式スクリュウ圧縮機では、スラスト方向のガス荷重を低減させる目的でバランスピストンを標準的に採

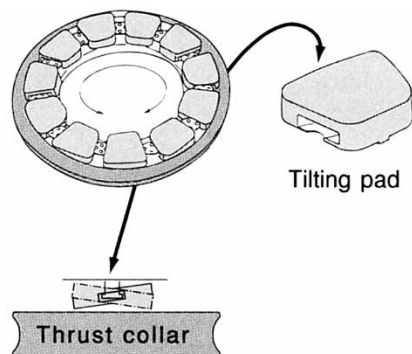


図4 ティルティングパッドスラスト軸受
Fig. 4 Tilting pad thrust bearing

用している。いっぽう、無給油式スクリュウ圧縮機ではスラスト荷重が比較的小さいこと、および高速運転によるバランスピストン作動油が発熱する問題がある。このため、従来はバランスピストンを採用していなかった。しかしながら高圧用途においては、無給油式スクリュウ圧縮機においてもスラスト荷重が軸受の許容値を超えるような運転条件があり、スラスト荷重の低減が必要となるケースがある。スラスト荷重低減機構としては、一般にバランスピストンのほかに、シングルヘリカル歯車の嚙（か）み合い反力を利用するものなどもあるが、当社では独自に開発した高速対応のバランスピストンが適用可能となっている³⁾。

2.6 同期歯車

当社の無給油式スクリュウ圧縮機の同期歯車は、図5に示すように分割構造を標準的に採用しており、調整歯車により歯車のバックラッシュを調整することが可能である。歯車のバックラッシュをロータのバックラッシュよりも小さく調整することにより、圧縮機の緊急停止時などにおいてもロータ同士の接触を回避でき、圧縮機の信頼性向上に寄与している。

同期歯車は、高強度の材料を選定することにより、歯車の必要強度を確保しつつ軸方向寸法が過大にならないよう設計している。これによって歯車の重量増を抑えることができ、運転時のロータの安定性向上にも寄与している。また、近年では歯車の加工精度が向上していることから、とくに高強度が要求されるような条件においては、調整歯車をなくし、代わりに精密歯車を採用することもある。

2.7 注水／注液システム

当社無給油式スクリュウ圧縮機では、用途や仕様に応じてケーシング内部へ注水あるいは注液を行うことがある。注水を行う場合、水が気化しやすい噴霧状態となるように注水ノズルの設計を行っている。また、噴射した水がプロセスガス中に均一に拡散するようにガスの流れに対向する形で注水している。こうした注水方法により、ケーシングやロータへのエロージョンの影響を低減することができる。

2.8 サイレンサ

当社の無給油式スクリュウ圧縮機は、プロセスガス配管内の音響エネルギーを低減させるため、圧縮機の吐出側



図6 開発したサイレンサの外観
Fig. 6 Appearance of developed silencer

ノズル、あるいは吸込側と吐出側の両方のノズルにサイレンサを取り付けている。スクリュウ圧縮機では吐出脈動の影響によって吐出側の音響エネルギーが大きく、とくに低周波の脈動成分を低減させることが設計上の重要なポイントとなる。当社は、ガスの種類や必要な音響特性に合わせて最適なサイレンサを設計する技術を持っており、用途あるいは仕様に応じてサイレンサの配置や最適設計を行っている。

いっぽう、高圧無給油式スクリュウ圧縮機の適用用途の一つであるフレアガスリカバリー用途では、スクリュウ圧縮機の脈動特性が変化することがある。これは、フレアガスつまり原油採掘時に随伴するガスが埋蔵状態によっては成分や割合が経年変化する場合があるためである。このような場合はサイレンサの消音性能に影響を及ぼすことがある。

そこで、高圧無給油式スクリュウ圧縮機の開発において、フレアガスリカバリーなどの用途に対応可能なサイレンサの開発にも取り組んだ（図6）。

新開発のサイレンサは広い周波数帯域で消音効果を有しており、上記のような脈動の周波数特性が変化する場合でも消音効果を発揮する。サイレンサの開発に際しては、音響解析によるケーススタディを行い、試作サイレンサを用いてスピーカ試験による性能検証を実施した。また、後述する高圧無給油式スクリュウ圧縮機の実機試験においても試作サイレンサを取り付け、管内脈動計測によってサイレンサの消音性能を検証した。

3. 実機運転による確認

高圧無給油式スクリュウ圧縮機の開発においては、当社の20MW試運転ベンチにてループ運転を行った（表1および図7、図8）。最高吐出圧力40barGまで昇圧し、高圧条件下における圧縮機の機械的安定性および下記項目を確認した。

- 1) 分子量の異なるガスを用いて運転を行うことにより圧縮機の性能を確認した。
- 2) 最高負荷運転における軸受温度、軸振動値などが当社の設計基準やAPI規格で定められた許容値内であることを確認した。
- 3) スラスト軸受パッドにロードセルを埋め込み、スラスト軸受に作用する荷重を確認した。（図9）

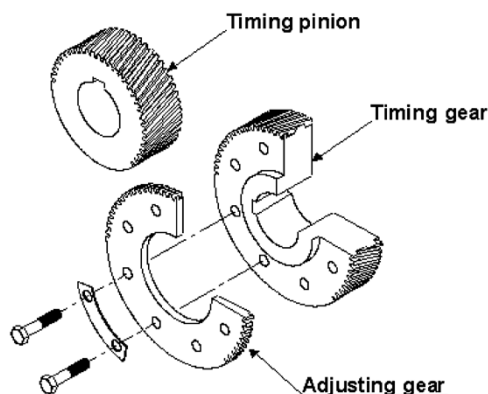


図5 同期歯車の分解組立図
Fig. 5 Exploded view of timing gear

表 1 開発機の諸元および試験条件

Table 1 Specification and test condition of developed compressor

Model	KS40SNZ
Test gas media	N ₂ , CO ₂
Discharge pressure (barG)	Max. 40
Rotational speed (rpm)	Max. 4,700
Suction volume (m ³ /h)	Max. 10,000

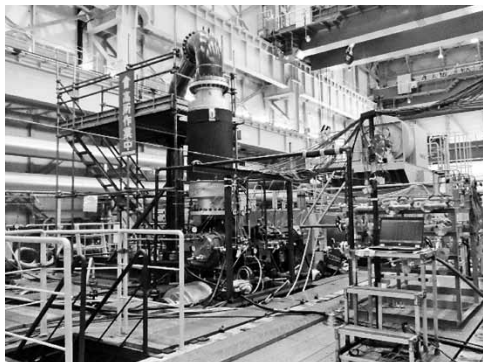


図 7 テストベンチの様子
Fig. 7 View of test bench

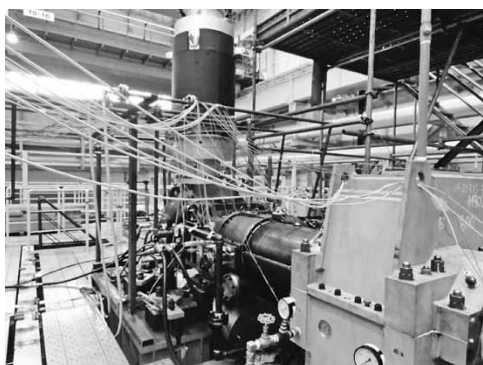


図 8 開発した高圧スクリュウ圧縮機の試作機

Fig. 8 Experimental model of developed high-pressure screw compressor

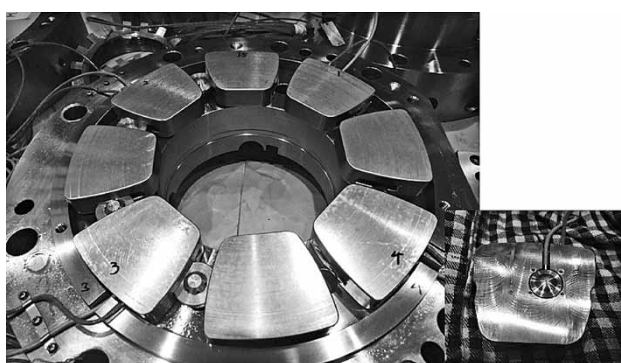


図 9 ロードセルを埋め込んだスラスト軸受
Fig. 9 Thrust bearing and buried load cell

4) スラスト軸受パッドに埋め込んだロードセルにより、バランスピストン使用時におけるスラスト荷重の変化量を確認し、バランスピストンが正常に機能することを確認した。

- 5) サイレンサの内部音圧を測定し、サイレンサ内の音響エネルギーが低減されていることを確認した。
- 6) 試運転後の分解点検において圧縮機の内部部品に異常がないことを確認した。

4. 今後の展望

当社では、本稿で紹介した高圧仕様の無給油式スクリュウ圧縮機に限らず、高速仕様あるいは高温・低温に対応したスクリュウ圧縮機の設計も可能である。今後とも市場ニーズに応じた最先端のスクリュウ圧縮機を供給していきたいと考える。

また、スクリュウ圧縮機本体だけでなく図10に示すような圧縮機ユニットとして顧客に供給している。本稿でも紹介したサイレンサに加え、その他の付帯機器についても市場ニーズに応じたものを開発、供給していきたいと考える。

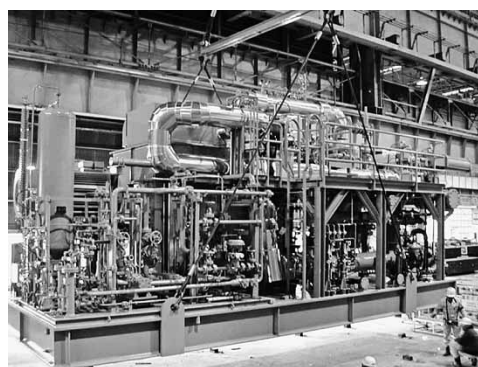


図10 無給油式スクリュウ圧縮機ユニット
Fig.10 Oil-free compressor unit

むすび= 当社は60年以上にわたって無給油式スクリュウ圧縮機的设计・製作を行い、多くの納入実績を残している。これまでに当社が得た経験を活かし、今後も市場ニーズに適応した新技术・新機種の開発や既存機種の改良を行うことによって無給油式スクリュウ圧縮機の適用範囲の拡大を図っていきたいと考える。さらに、新分野・新用途の開拓にも注力し、無給油式スクリュウ圧縮機を通じて産業界の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 高木秀剛ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.21.
- 2) 藤田栄治ほか. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.1, p.36.
- 3) 株式会社神戸製鋼所. 圧縮機. 特許第6019003号. 2016-11-2.