

高压油冷式スクリュウ圧縮機「EHシリーズ」

大浜敬織*・天野靖士*・川口則男**

*機械事業部・回転機技術部 **神鋼テクノ株

High-pressure Oil-flooded Screw Compressors 「EH Series」

Takao Ohama・Yasushi Amano・Norio Kawaguchi

Kobe Steel has developed high-pressure oil-flooded screw compressors EH series. A discharge pressure of up to 6.0 MPaG was achieved by using original technology such as a new rotor profile, larger bearings, and special mechanical seals. High performance and reliability allow for excellent fuel gas boosting, especially in highly effective gas turbines. The EH series can also be used for other applications such as oil refineries, oil and gas fields, and chemical plants. KOBELCO tandem-type screw compressor, showing better efficiency in a high pressure ratio too, can save installation area and auxiliaries .

まえがき = スクリュ圧縮機は、往復動圧縮機と遠心圧縮機の双方の特性をもち、両者の適用範囲の中間的領域で使用されてきたが、メンテナンス上の利点、応用範囲が広いなどの特徴があり、近年その適用範囲は拡大しつつある。とりわけ、圧縮ガス中に油を注入する油冷式スクリュウ圧縮機は1段で高吐出圧力、高圧力比が達成可能であり潤滑油技術・油分離技術の向上とともにその適用範囲を大幅に広げている。

当社はこれまで、吐出圧力3.0MPaGクラスの油冷式スクリュウ圧縮機をシリーズ化し、さまざまな用途へ適用してきたが、近年ガスタービン燃料ガス圧縮用途などにより高压化、大容量化のニーズが高まってきている。これに対応する機種としてこのほど吐出圧力6.0MPaGまで圧縮可能で、かつ世界最大級のロータサイズを含む12種類のロータサイズをもつ油冷式スクリュウ圧縮機「EHシリーズ」を開発した。「EHシリーズ」の主要諸元を第1表に、また圧縮機レンジチャートを第1図に示す。

本稿では、「EHシリーズ」の圧縮機本体の構造および開発内容と圧縮機システムの概要について説明するとともに、高压油冷式スクリュウ圧縮機の今後の展開について述べる。

1. 高压油冷式圧縮機「EHシリーズ」本体の構造と特徴

圧縮機構造を第2図に圧縮機外観を写真1に示す。ガスは吸込ノズルより吸込まれ、互いにかみ合うように配置された1段雄雌ロータで圧縮された後、中間ケーシングを経て、2段雄雌ロータによりさらに圧縮され吐出ノズルより吐出される。圧力比が高い場合には第2図に示すような2段圧縮（以下、タンデム型と略す）を適用し、また、一般に圧力比が7以下の場合には2段側をもたない1段圧縮（以下、単段型と略す）が適用される。

各ロータの両側には、ラジアル軸受が配置され、吐出側ラジアル軸受の反ロータ側には、おのおのスラスト軸受が配置されている。また、雄ロータのケーシング貫通部にメカニカルシールを配し、取扱いガスの機外への洩れを防止している。以下にEHシリーズの特徴と、開発

した技術について述べる。

1.1 高吐出圧力

高吐出圧力化にともない雄ロータが雌ロータを駆動するトルク（伝達トルク）およびガス荷重が大きくなりロータの強度と軸受負荷容量が問題となる。そのため、ロータ歯数の最適化および駆動面形状の最適化をおこなった。

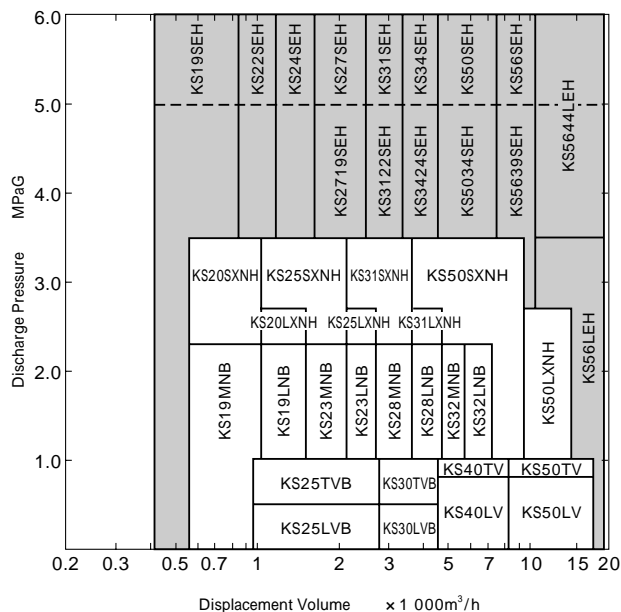
1.1.1 ロータ歯形

ロータ歯数の組合せ、ロータ長さをパラメータとして

第1表 「EHシリーズ」主要諸元

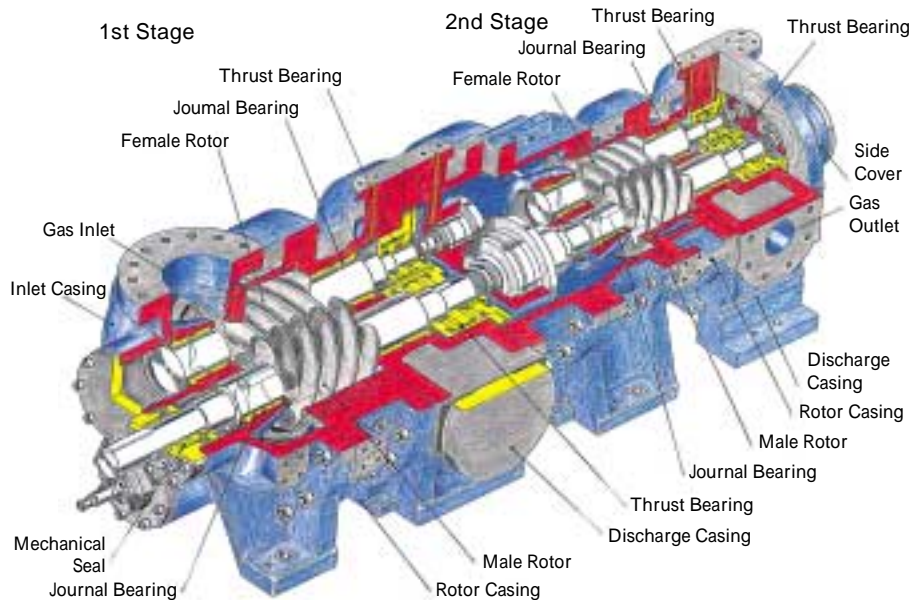
Table 1 Basic specifications of KOBELCO EH series

max. Working Discharge Pressure	6.0 MPaG
max. Working Suction Pressure	6.0 MPaG
max. Working Differential Pressure	6.0 MPaG
Casing Design Pressure	7.0 MPaG
Capacity Range	375 ~ 19 000m ³ /h
Capacity Control Range	approx. 15 ~ 100%
Casing	Cast Steel
Rotors	Forged Steel
Mechanical Seal	SiC + Carbon
Bearings Thrust	Tilting Pad Type
Journal	Babbittes Sleeve Type



第1図 レンジチャート (60Hz)

Fig. 1 Range chart (60Hz)



第2図 タンデム型スクリュウ圧縮機の構造

Fig. 2 Construction of tandem-type screw compressor

ガス圧による軸受荷重シミュレーション¹⁾を実施し、高荷重を支える最適なロータ歯数組合せを第3図に示すような雄ロータ5枚、雌ロータ7枚(5+7歯形)とした。

歯面の伝達トルクは、歯形形状により増減の調整が可能であるが、大きすぎると歯面が損傷し、逆に小さすぎると雌ロータの回転が不安定になる現象が起こり振動・騒音が増加する。そのため、ロータ材料に応じた最適な伝達トルクとなるよう歯形形状を設計するとともに歯面損傷を防ぎ、かつ低負荷時においても雄ロータが雌ロータを確実に駆動できるように伝達トルクを配分した。また小型の歯面強度試験装置をもちい、歯面強度を十分検証したうえで最終歯形形状を決定した。このようにして新しく設計された歯形形状により、歯形隙間の低減化も実現でき、容積効率向上も図っている。

1.1.2 軸受

ラジアル軸受はスリーブタイプ、スラスト軸受はティルティングパッド型軸受である。高吐出圧力に対応できるようにいずれも従来機にくらべて軸受を大型化し、軸受の負荷容量を増大させた。とりわけ、ラジアル軸受は5+7歯形の採用により負荷面積の増大が可能となった。軸受材質はホワイトメタルを標準とし、腐食性ガスが含まれる用途に対しては、オプションとしてアルミ軸受も使用可能である。

1.2 高効率

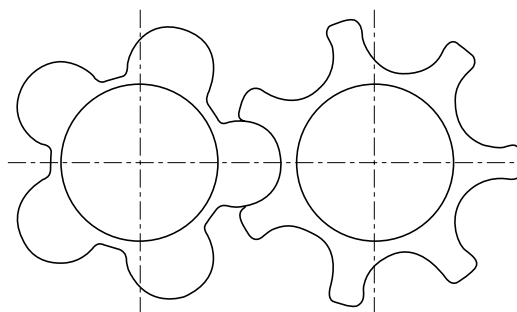
高効率を達成するための重要な技術としては、高圧力比・高圧力差条件におけるタンデム型による2段圧縮がある。油冷式スクリュウ圧縮機は、1段で高圧力比が達成可能であるが、吐出圧力6.0MPaG域では、圧縮歯溝間の圧縮ガスの洩れが多くなることから効率が低下する。高圧力比・高圧力差条件下では、タンデム型の適用により、各段ごとの歯溝間洩れを減らし容積効率の改善をはかるとともに、1-2段の中間部は、高温のガスと低温の潤滑油の接触時間を長くし、中間クーラとしての機能をもたせて動力の改善を実現している。タンデム型による効率と動力の改善の実測値を第4図に示す。

高圧域では、軸動力が非常に大きいことから、数%の



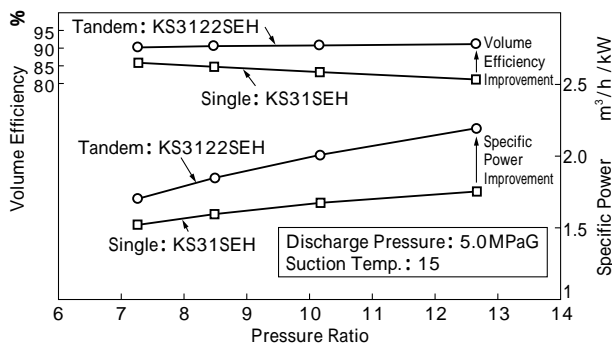
写真1 単段型 (KS31SEH) の外観

Photo 1 Outside view of single-type screw compressor Model KS31SEH



第3図 ロータ歯形 (雄5+雌7組合せ)

Fig. 3 Rotor profile (5+7 lobe numbers)



第4図 圧縮機実性能比較

Fig. 4 Performance comparison between Single-stage and Tandem-stage

動力差であってもそれが大きくランニングコストに影響を及ぼすが、タンデム型・単段型を使いわけることによりバランスのよい動力特性を達成できる。

当社タンデム型レイアウトは2段圧縮であってもガスは1段での圧縮後、圧縮機外部に排出されることなく2段側へ吸込まれるため振動・騒音が少ない。また1-2段の組合せは、圧力条件にあわせて最適に組合せが可能である。また、省エネルギーを実現するスライド弁を1-2段にそれぞれ配し連続的で良好な部分負荷特性も実現している。タンデム型の代表的な使用条件における部分負荷特性の測定結果を第5図に示す。

1.3 高吸込圧力

高吸込圧力を達成するための重要な技術としては、メカニカルシールがある。油冷式スクリュウ圧縮機の構造上メカニカルシールのシールボックス内の圧力は、吸込圧力程度となることから、メカニカルシールの性能が、油冷式スクリュウ圧縮機の運転吸込圧力の上限值を決定する。

本機に採用したメカニカルシールは、シールメーカーと共同で開発をおこなった。シール材には、高強度のカーボン材を採用し、摺動面形状は、シールメーカーの技術に当社の圧縮機運転で蓄積したノウハウを加えたものとした。さらに、有限要素法をもちいた強度、温度シミュレーションの評価とそれを検証する単体要素試験・耐久試験をおこなった。また、実機への組込み運転もおこない信頼性も確認した。本メカニカルシールにより「EHシリーズ」は、吸込圧力6.0MPaGを達成し、大幅な吸込圧力の変動にも十分に対応可能である。

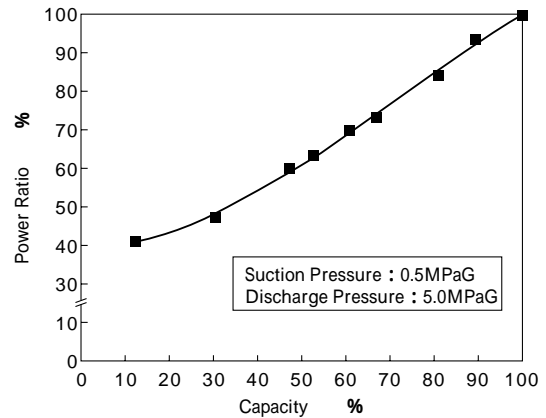
1.4 高信頼性

消耗品が少ないという油冷式スクリュウ圧縮機本来の特徴に加え、石油化学プラント用では、一般的に適用される米国石油協会規格 (API619) に適合する高い信頼性を有する設計思想とした。

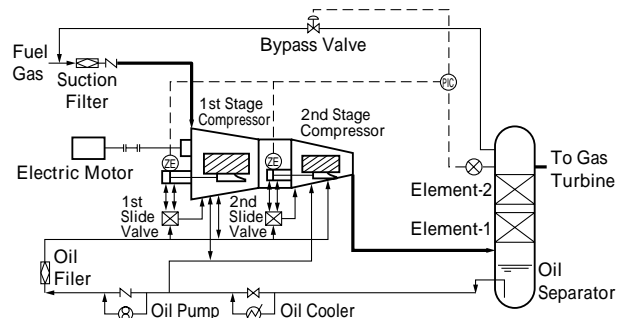
ケーシング材質は、鋳鉄より強度の高い炭素鋼鋳鋼製を標準とし、またガスノズルはもとより圧縮機本体への小径への給油ノズルも含めてすべて JPI クラス 600 フランジを採用し接続を確実なものとしている。メカニカルシールのシール方法には、シングル型、ダブル型、タンデム型を選択可能とした。

2. 圧縮機システムの概要と特徴

油冷式スクリュウ圧縮機の利点を活かした適用分野の一つとして、ガスタービン用燃料ガス圧縮がある。ガスタービン・コジェネレーション装置は、ガスタービンを原動機として発電すると同時に、その排熱も利用する省エネルギー装置の一つである。クリーンな天然ガスを燃料とするコジェネレーション装置は、地球環境保全の面からも設置が増加している。とりわけ、電気事業法改正 (1996年) の規制緩和により独立発電事業者 (IPP) 分野での需要が拡大している。近年、ガスタービンの高効率化にともない燃料ガス圧縮機にも高吐出圧力が要求されてきているが、本「EHシリーズ」のラインナップにより、これまでの当社シリーズと合わせ、ほぼすべてのガスタービンの要求する風量・圧力への対応が可能である。本



第5図 部分負荷特性測定結果 (タンデム型: KS3122SEH)
Fig. 5 Test result of partial load characteristics (Tandem: KS3122SEH)



第6図 燃料ガスの系統
Fig. 6 Schematic diagram of fuel gas line

項では「EHシリーズ」の主用途の一つである燃料ガス圧縮機システムを例にシステムの概要と特徴を紹介する。

2.1 基本系統

一般的なガスタービン燃料圧縮機システムの系統を第6図に示す。吸込ガス濾過機・逆止弁を通過したガスは圧縮機で昇圧される。油冷式スクリュウ圧縮機は、ロータや軸受の潤滑、圧縮熱の除去などを目的に多量の油をガス中に給油しているため、この油をガスタービンの許容油分量まで分離・除去する。油は油回収器内で一次分離され、その後、高次分離エレメントで油分をさらに分離・除去する。高次分離エレメントには特殊微細繊維フィルタを採用している。分離された油は、油冷却器を経てふたたび圧縮機へ給油される。

2.2 制御系統

ガスタービン燃料ガス圧縮機では、ガスタービンの負荷変動および吸込ガス圧力変動のもとで、吐出圧力を一定に制御する必要がある。当社では、スライド弁とバイパス弁を組合わせた方法で容量と圧力の制御をおこない、バイパス弁の長所である安定性・追従性とスライド弁の長所である部分負荷時の動力軽減を両立している。また、起動・停止の頻繁な DSS (Daily Start & Stop)、ガスタービン負荷投入前の全量バイパス待機運転などガスタービン側のあらゆる負荷変動に対し、迅速かつ安定した制御を可能としている。

2.3 システムの特徴

燃料ガス圧縮機システム外観を写真2に示す。現地工事を最小限にとどめるよう、特殊な大型機を除き基本



写真2 圧縮機システム (KS34SEH) の外観
Photo 2 Screw compressor for gas turbine fuel gas Model KS34SEH

的には1ユニット内にすべてがパッケージされる。また、油冷式スクリュウ圧縮機の信頼性の高さから一般的に予備機は不要である。コンパクトで軽量、振動も小さいことから基礎工事は簡単・安価なもので対応が可能となっている。

吐出圧力6.0MPaGまで昇圧でき、かつ、吸込圧力6.0MPaGまで対応可能、さらに、処理風量も大きく拡大した「EHシリーズ」は、これまでの油冷式スクリュウ圧縮機では対応できなかった適用範囲に対して、イニシャル、ランニング、現地工事を含めて総合的にポテンシャルの高いものとなっている。以下にその主な特徴を述べる。

2.3.1 高圧・高圧力比アプリケーション

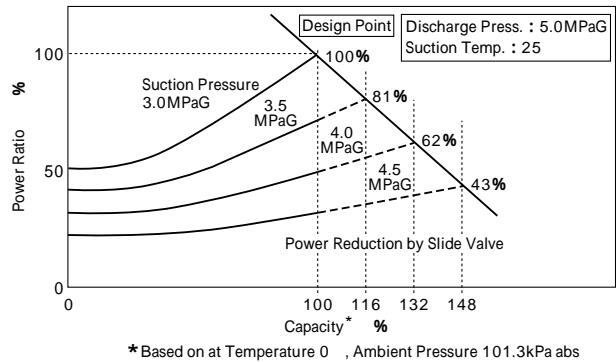
高圧・高圧力比の条件ではタンデム型を適用する。当社タンデム型は、2段圧縮であってもガスは1段での圧縮後、圧縮機外部に排出されることなく2段側へ送られるため、一つの圧縮機つまり単段型のごとく取扱うことができる。したがって、圧縮機本体、電動機、油回収器、高次分離器がすべて1台分で済み、1段圧縮の場合と同じ機器構成で高効率な2段圧縮を可能としている。一般に他の圧縮機では、高圧・高圧力比になると多段型となりシステムが大型になるが、タンデム型の適用により省スペースで高効率な2段圧縮ユニットが実現できる。

そのほか、さらに省スペース化をはかる方法として、高次油分離フィルタの油回収器内への一体化による容器数削減、ロータ室給油を油濾過器を通さず直接給油する方式とした油濾過器サイズの小型化、高吐出圧力を利用した給油方法で、起動・停止時以外はポンプを停止させるポンプレスシステムの採用、など新たな技術も取りいれている。

2.3.2 高圧・低圧力比アプリケーション

ガスパイプラインの元圧の変動や、廃ガスなど圧力の異なる複数のガスの混合による元圧の変動など、吸込圧力条件が大きく変動する条件では、場合によっては、高吐出圧力であるが吸込圧力も高い低圧力比の運転条件となる。このような条件においても「EHシリーズ」は対応可能である。

吐出圧力が一定で吸込圧力が変化した場合の容量・動力特性の一例を第7図に示す。油冷式スクリュウ圧縮機は、低圧力比の運転条件では吸込圧力が上がると動力は減少し、処理風量が増加する。圧縮機型式の選定は通常、吸込圧力が最低の条件を設計条件とするが、実際の運転



第7図 油冷式スクリュウ圧縮機の特長
Fig. 7 Typical load characteristics

では、多くのケースで吸込圧力が設計条件となることはなく、設計条件より高い圧力でかつ設計容量(100%容量)で運転されている場合が多い。この場合も、スライド弁による容量制御をおこなうことにより実運転条件で大幅な省エネルギーが実現可能となっている。

3. 高圧油冷式スクリュウ圧縮機の今後の展開

3.1 高圧化

高圧油冷式スクリュウ圧縮機は、石油精製、石油化学をはじめ、天然ガス収集とそのパイプラインへの圧入用(Oil & Gas分野)といった分野へも適用が十分可能である。これらの用途では、より高吐出圧力の要求もでてきている。当社では、すでに吐出圧力10.0MPaGクラスへの対応は十分可能となっており、要求仕様・性能・コストを検討したうえで市場ニーズにマッチした圧縮機を提供したいと考えている。

3.2 大容量化

腐食性成分やタールなどの不純物を含むコークオーブンガス(COG)、炉ガスは油冷式スクリュウ圧縮機が優れた特性を発揮できるアプリケーションの一つであるが、低カロリーであるためより大容量機が必要なケースが多い。当社は、大型機に対しても技術・ノウハウを有しており、今後圧縮機の大型化、高速化を進めていきたい。

また、COG、炉ガスなどのガスを燃料とするガスタービン燃料ガス圧縮機では、油冷式スクリュウ圧縮機の範囲をこえる、さらに大容量を扱う場合がある。この場合は、これらの腐食性ガスにも対応でき低吐出圧力で大容量を得意とする無給油式スクリュウ圧縮機と、高吐出圧力を得意とする油冷式スクリュウ圧縮機とを組み合わせる(Dry & Wet)ことにより最大容量70,000m³/h、最高吐出圧力6.0MPaGまでの対応が可能である。これらシステムもユーザの要求に応じて適用していきたいと考えている。

むすび=高吐出圧力・高吸込圧力・大容量を達成したことにより、油冷式スクリュウ圧縮機の適用範囲は大幅に広がった。今後も油冷式スクリュウ圧縮機のもつ特徴を活かしてユーザの期待にこたえて新しい用途を開拓し、いっそうの発展に寄与していく所存である。

参考文献

- 1) 吉村省二: R&D 神戸製鋼技報, Vol.41, No.1 (1991), p.12.