

(解説)

高圧油冷式スクリュ圧縮機「EHシリーズ」

High Pressure Oil-flooded EH Series Screw Compressors



天野靖士*
Yasushi Amano

Kobe Steel has developed a line of high pressure oil-flooded screw compressors, called the EH Series. A discharge pressure of up to 6.0MPaG is achieved by using original technological developments such as a new rotor profile, larger bearings, and a special mechanical seal. These compressors are characterized by high performance and reliability and are especially suited for use in gas turbine fuel gas boosting. EH Series applications are expanding. In recent years, the demand for desulfurized gasoline and diesel fuel has increased worldwide. New regulations to protect the environment have forced the oil refinery industry to develop desulfurization processes. The EH Series also runs on this new application and demand is increasing.

まえがき = スクリュ圧縮機は、容積式でありながら回転式の特徴をあわせもち、高効率、省スペース、長時間運転性などの特徴により産業界で広く使用されている。とりわけ、圧縮ガス中に油を注入する油冷式スクリュ圧縮機は、1段で高吐出圧力、高圧力比が達成可能であり、圧縮機の適用レンジの拡大と潤滑油技術・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¹⁾。

当社は、吐出圧力 6.0MPaG まで圧縮可能で、かつ油冷式では世界最大級のロータサイズを含む 17 種類のロータサイズからなる油冷式スクリュ圧縮機「EH シリーズ」を開発した。「EH シリーズ」の仕様を表 1 に、また圧縮機レンジチャートを図 1 に示す。

本稿では、「EH シリーズ」の圧縮機構造およびシステムの適用事例について、当社の独自技術を交えて解説するとともに、高圧油冷式スクリュ圧縮機の新分野への適用事例、今後の展望について述べる。

1. 高圧油冷式圧縮機「EH シリーズ」の構造と特徴²⁾

圧縮機構造を図 2 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図 2 に示すような 2 段圧縮（以下、タンデム型と記す）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、単段型と記す）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、各々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。

1.1 ロータ歯形

当社スクリュ圧縮機を特徴づけるものとして、各分

表 1 「EH シリーズ」主要諸元
Table 1 Basic specifications of KOBELCO EH series

Max. working discharge pressure	6.0MPaG
Max. working suction pressure	6.0MPaG
Max. working differential pressure	6.0MPaG
Casing design pressure	7.0 MPaG
Capacity range	220 ~ 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

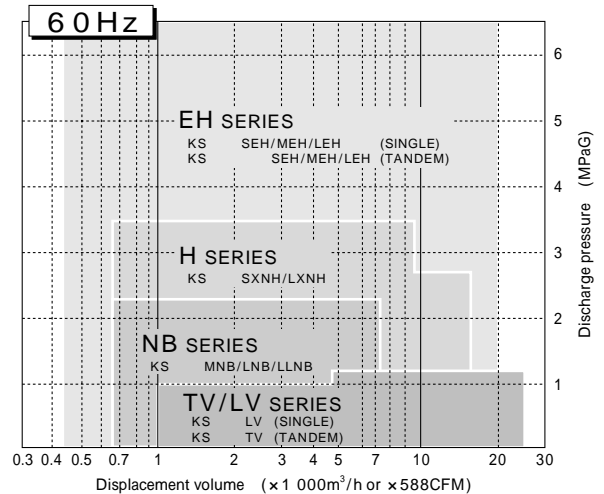


図 1 レンジチャート
Fig. 1 Range chart of KOBELCO EH series

野、用途にあわせて最適な歯形形状を開発・採用していることがあげられる。性能向上をはかるためには、単位行程体積あたりのロータ間のシール線長さの短縮、雄・雌ロータとケーシング間に形成されるブローホールと呼ばれる吹抜け部の縮小化、圧縮歯溝間の圧力比を抑えるロータのねじれ角の検討が必要であるが、これらをすべ

*機械エンジニアリングカンパニー 圧縮機事業部 回転機技術部

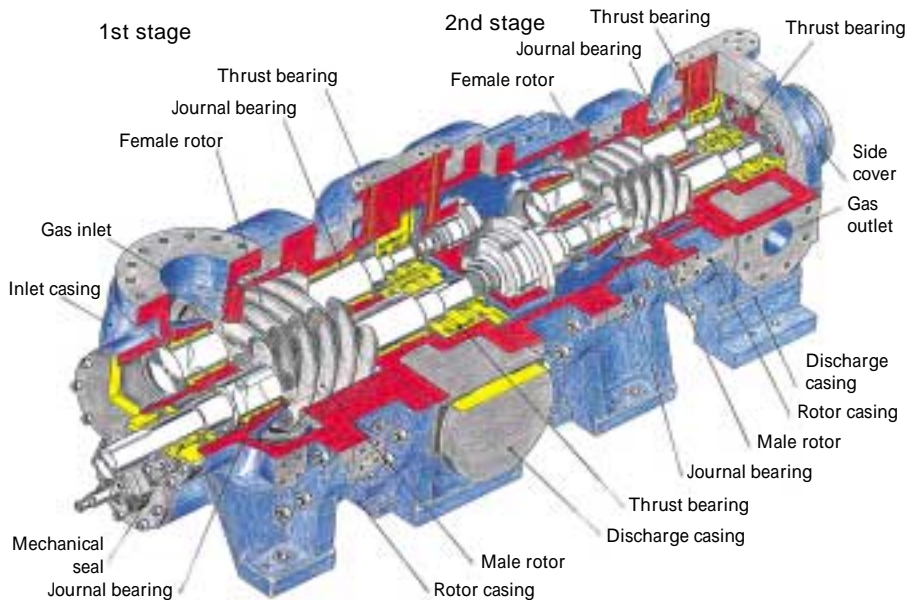


図2 タンデム型圧縮機の構造

Fig. 2 Construction of tandem-type compressor

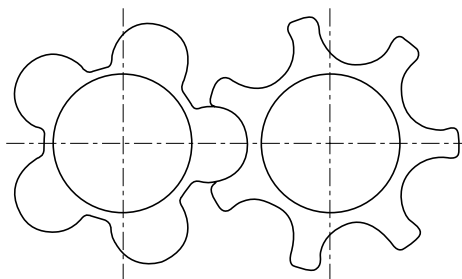


図3 ロータ歯形(雄5 + 雌7 組合せ)

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

て最小化・最適化できるものではない。当社は、独自の歯形理論を展開した歯形開発用シミュレーションプログラム³⁾を開発し、用途に合わせた最適な歯形形状を採用している。

EHシリーズはこのプログラムを用い、ロータ歯数の組合せとロータ長さをパラメータとして、ガス圧による軸受荷重シミュレーションと性能シミュレーションを実施し、高圧用途に最適なロータ歯数組合せを、図3に示すような雄ロータ5枚、雌ロータ7枚(5 + 7 歯形)としている。

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としている。

1.3 メカニカルシール

メカニカルシールはシングル型、ダブル型、タンデム型を選択可能とし、ユーザの要求に対応している。

油冷式スクリュ圧縮機の構造上、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、油冷式スクリュ圧縮機

の運転吸込圧力の上限值を決定する。EHシリーズに採用のメカニカルシールは、シール材を高強度のカーボン材とし、摺動面形状はシールメーカの技術に当社のフィールドでの圧縮機運転で蓄積したノウハウを加えたものとして、高吸込圧力に対応可能となっている。

2. 「EHシリーズ」の圧縮機システム適用例

一般的な油冷式スクリュ圧縮機システムの系統を図4に示す。吸込ガス濾過器・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。

本項では「EHシリーズ」を用いたシステムについて適用事例を解説する。

2.1 ガスタービン燃料用ガス圧縮機

油冷式スクリュ圧縮機の利点を活かした適用分野のひとつとして、ガスタービン用燃料ガス圧縮がある。近

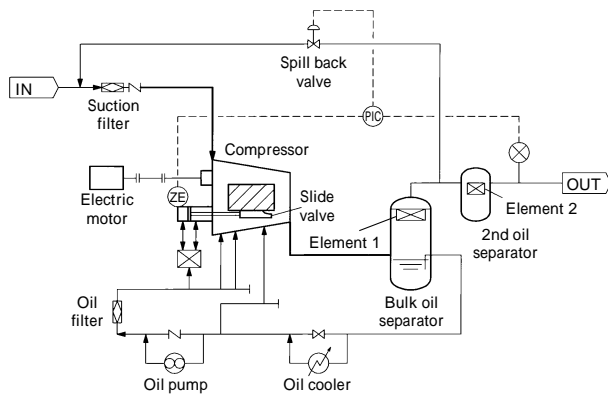


図4 油冷式スクリュ圧縮機の系統

Fig. 4 Schematic diagram of oil flooded screw compressor

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ることで，ほぼすべてのガスタービンメーカーの要求する風量・圧力への対応が可能となっている。

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供給圧力（吸込圧力）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，圧縮機自体の風量をコントロールするスライド弁とスピルバック弁を組合わせた方法で容量と圧力の制御を行い，スピルバック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。

ガスパイプラインの元圧の変動など，圧縮機の吸込圧力条件が大きく変動する条件では，実際の運転において設計点より吸込圧力が高くなり，高吐出圧力でかつ吸込圧力も高い低圧力比の運転条件となる場合が多い。このような条件で油冷式スクリュウ圧縮機は，特に動力削減が達成できる。

吐出圧力が一定で吸込圧力が変化した場合の容量・動力特性の一例を図5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）より少ない条件で運転されている場合が多い。スライド弁による容量制御を行うことにより，実際の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。

2.2 複数台のシステム構成

大型発電設備においては，複数台のガスタービンに対し複数台の燃料ガス圧縮機を組合わせるシステム構成が要求される。さらに天然ガスのパイプラインなどでは元圧の変動が大きく，変動の上限がガスタービンの要求する燃料ガス圧（圧縮機の吐出圧力）を超えるような場合もある。当社はこのような要求に対しても「EHシリーズ」を適用した燃料ガス圧縮機を納入している。

複数台の圧縮機を用いたシステム構成例を図6に示す。このシステムは，2台の圧縮機で3台のガスタービンに燃料ガスを供給する装置の納入例である。圧縮機をバイパスさせるライン（減圧弁ユニット）を設け，パイプラインの元圧が高いときには圧縮機の運転なしでガスタービンへの燃料ガスを供給できるようにし，動力消費を最小限となるようにした。また，圧縮機の吸込圧力コントロール弁やスピルバック弁を共用化することで省スペースを図るとともに，圧縮機で昇圧された燃料ガスを1本の連絡配管で3台のガスタービンへ供給することにより，現地工事の簡素化にも貢献した。

また，3台の圧縮機で3台のガスタービンに燃料ガスを供給するシステムの納入例を図7に，圧縮機ユニットの外観を写真1に示す。1台が予備機であることに着目し，圧縮機および電動機のみを3セットとし，2台分の処理風量に合わせた油回収器や，高次分離器，潤滑油ポンプなどを共用化している。省スペースを図るとともに低

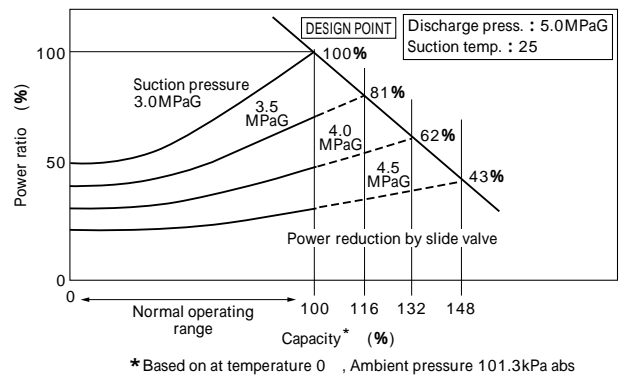


図5 油冷式スクリュウ圧縮機の特長
Fig. 5 Typical load characteristics

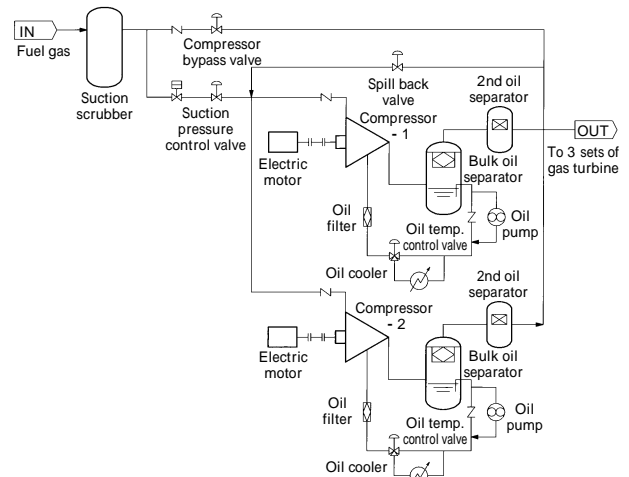


図6 油冷式スクリュウ圧縮機システム構成例 - 1
Fig. 6 Oil flooded screw compressor system-1

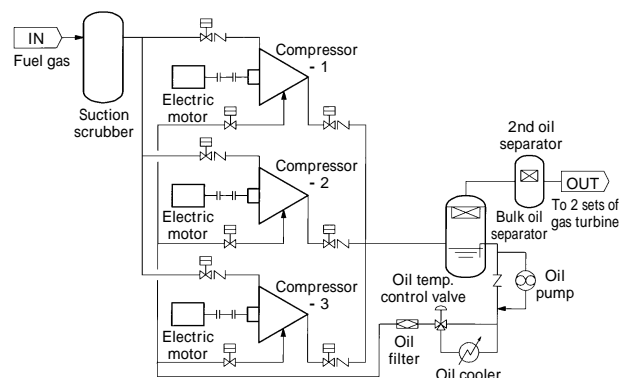


図7 油冷式スクリュウ圧縮機システム構成例 - 2
Fig. 7 Oil flooded screw compressor system-2



写真1 燃料ガス圧縮機の外観

Photo 1 Screw compressor for gas turbine fuel gas

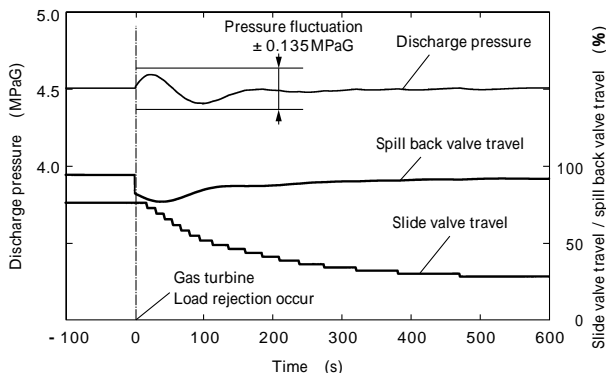


図8 吐出圧力変動シミュレーションの一例
Fig. 8 Simulation for fluctuation of discharge pressure

価格でのシステムを実現した例である。

2.3 制御性

複数台の圧縮機で複数台のガスタービンに燃料ガスを供給したり、圧縮機の吸込圧力コントロール弁や油分離システム、バイパス弁などを共用化することにより、制御面ではより広範囲で複雑なパターンで圧力や温度を制御する必要がある。当社は制御面でも豊富な経験とシミュレーション技術を持っており、これらの要求にも対応している。

圧縮機の起動・停止が頻繁な DSS (Daily Start & Stop) への対応、スタンバイ機の追起動や停止、ガスタービンの負荷変動などのさまざまな運転パターン、さらに圧縮機とガスタービン間の連絡配管の容積などの現地特有の条件までも考慮し制御パラメータを検討することで、複雑なシステムでの安定した制御を実現している。

ガスタービンが負荷遮断(100 30%)した場合の圧縮機の吐出圧力変動をシミュレーションした一例を、図8に示す。ガスタービンへの燃料ガス供給量が急激に変化しても、スπιルバック弁とスライド弁を併用した制御により吐出圧力がコントロールされている様子が分かる。

低価格で省スペースを実現する複数台システムの提案、減圧弁ユニットとの組み合わせ、潤滑油システムやバイパス弁の共用化・簡素化などユーザにとってのメリットを最優先に考える当社のガスタービン燃料用ガス圧縮機は、優れた制御技術による安定した運転実績とあいまってユーザから高い評価をいただいている。

3. 「EH シリーズ」の新分野への適用事例と今後の展望

3.1 極低温エチレン冷凍機

当社タンデム型は、2段圧縮であってもガスは1段階での圧縮後、圧縮機の外部に排出されることなく2段階へ送られるため、1個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、単段型の場合と同じ機器構成で2段圧縮機が実現できる。一般に他の圧縮機では、高圧・高圧力比になると構成機器が増える傾向にあるが、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。

当社はこのタンデム型「EH シリーズ」を用いた極低

表2 エチレン冷凍機主要諸元
Table 2 Specifications of ethylene compressor

Capacity : 1st stage	kg/h	6 500
Side stream	kg/h	3 800
Suction pressure	MPaG	0.22
Suction temperature		- 88.4
Discharge pressure	MPaG	3.0
Shaft power	kW	810

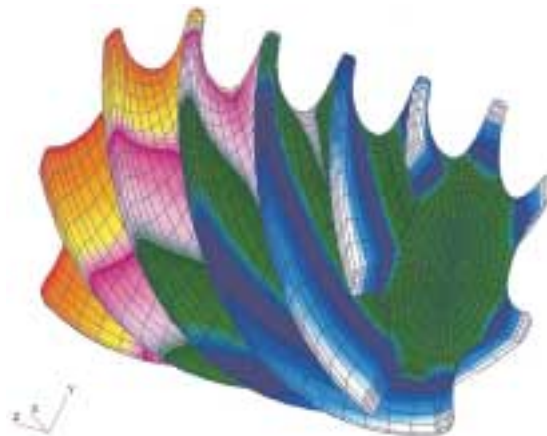


図9 ロータ表面温度シミュレーションの一例
Fig. 9 Simulation for temperature distribution of rotor surface

温エチレン冷凍機を納入した。圧縮機の運転条件を表2に示す。本圧縮機は吸込温度が - 88.4 と低いため、低温に対応できる材料の選定が必要となった。低温に対応するため圧縮機のケーシングをステンレス製とし、ロータ材料の選定にあたっては、ロータの温度をシミュレーションによって評価し低温を考慮した材質選定を行った。ロータ表面温度シミュレーションの結果の一例を図9に示す。世界で初めての - 90 レベルの極低温エチレン冷凍機用スクリュ圧縮機は、当社の高い技術力を示すものである。

3.2 脱硫用圧縮機

近年、環境保全の高まりから自動車用ガソリンとディーゼル燃料に対する低硫黄化要求が世界的に高まってきており、各石油会社で燃料の低硫黄化に対する取組みが盛んに行われている。燃料の低硫黄化には水素を用いた脱硫プロセスが主流であり、リサイクルガス圧縮機と呼ばれる水素圧縮機が要求される。

ガス成分は水素を主成分としながらも腐食成分である硫化水素を微量含んでいる。また潤滑油に溶解し粘度を希釈するプロパンやブタンなどのヘビーハイドロカーボンガスを含む場合もある。脱硫プロセスの状態によって、ガスの物性が大きく変化することやプラント立上げ時には窒素ガスによる運転などもあり、さまざまなガス物性・運転パターンに対応できなくてはならない。さらに高い信頼性が要求され長期連続運転の要求もある。これまで本用途にはレシプロ式や遠心式の圧縮機が用いられていたが、ガス物性の影響をほとんど受けない容積式でかつ信頼性の高い油冷式スクリュ圧縮機の適用が広がっている。

油冷式スクリュ圧縮機は、ロータや軸受・メカニカル

シールの潤滑，圧縮熱の除去のため潤滑油を圧縮機内部に給油している。ヘビー hidrocarbon ガスを多く含むプロセスの場合，ガスが潤滑油に溶解し粘度低下することから，軸受・メカニカルシールが油膜切れを起こし早期摩耗する懸念があり，これまで適用範囲が限られていた。しかし近年，潤滑油の技術革新はいちじるしく，ヘビー hidrocarbon ガスが溶解しにくい合成油（PAG: Poly Alkyl Glycol）を採用することにより対応が可能となってきた。

典型的なガソリン脱硫圧縮機ユニットの外観を写真 2 に示す。低騒音であるため防音カバーを装備しないものが多く，メンテナンス性を考慮した仕様となっている。今後はディーゼル脱硫用圧縮機や，脱硫プロセスの主要機器のひとつであるネットガスブースタへの適用なども検討されている。

3.3 今後の展望

高圧油冷式スクリュウ圧縮機「EH シリーズ」は，エネルギー分野のみならず石油精製，石油化学分野でも多く用いられ，優れたプロセスガス用圧縮機として高い評価をいただいている。今後の新しい用途として，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。さらに，油冷式スクリュウ圧縮機の特徴を活かせる高吐出圧力の用途もでてきている。当社では，吐出圧力 10.0MPaG クラスの油冷式スクリュウ圧縮機の開発をしており，今後ユーザーの要求に応じて対応していく予定である。



写真 2 脱硫圧縮機ユニットの外観

Photo 2 Screw compressor for desulfurization process

むすび=「EH シリーズ」によりプロセスガス用油冷式スクリュウ圧縮機の適用範囲は大幅に広がった。当社は，今後もスクリュウ圧縮機のもつ特徴を活かして，ユーザーの期待にこたえて新しい用途を開拓し，産業界に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 大濱敬織ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.3(2000) p.99.
- 2) 大濱敬織ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.1(1999) p.32.
- 3) 吉村省二：R&D 神戸製鋼技報，Vol.41, No.1(1991) p.12.