

(解説)

100barG 高压油冷式スクリュウ圧縮機

High Pressure 100barG Oil-flooded Screw Compressor



天野靖士*
Yasushi AMANO

Kobe Steel has developed a high pressure oil flooded screw compressor. A discharge pressure up to 100barG is achieved by using original rotor technology, larger bearings, and special mechanical seal. The compressor, with its high performance and reliability, is suitable for fuel gas boosting, in particular, for highly efficient gas turbines. The compressor is expanding its applications and is practically used for desulfurization of fuel. The compressor's application is expected to grow further.

まえがき＝スクリュウ圧縮機は、容積式でありながら回転式の特性を合せもち、高効率、省スペース、長時間運転性などの特長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、圧縮機の高圧化、大風量化と潤滑油技術・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。

当社は高压油冷式スクリュウ圧縮機「EHシリーズ」の適用吐出圧力を100barGまで対応可能とした。従来シリーズを含めた当社油冷式スクリュウ圧縮機のレンジチャートを図1に、また圧縮機の仕様を表1に示す。

本稿では、100barG 吐出油冷式スクリュウ圧縮機の構造を解説するとともに、適用事例の紹介と今後期待される適用用途について述べる^{1)~3)}。

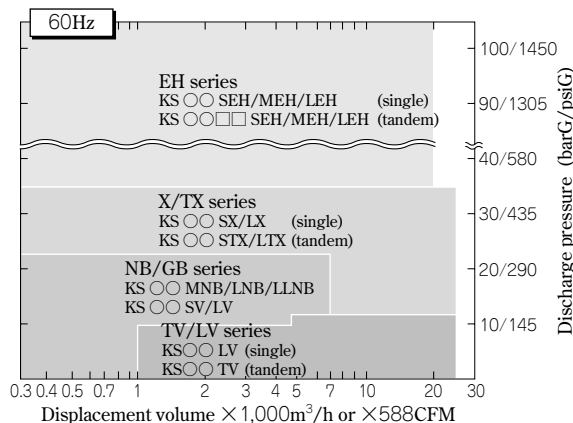


図1 スクリュ圧縮機レンジチャート
Fig. 1 Range chart of KOBELCO EH series

表1 100barG 油冷式スクリュウ圧縮機諸元

Table 1 Basic specification of 100barG oil flooded screw compressor

Max. working discharge pressure (barG)	100
Max. working suction pressure (barG)	100
Casing design pressure (barG)	115
Capacity range (m³/h)	200 ~ 20,000
Rotor material	Forged steel
Casing material	Cast steel
Mechanical seal	SiC + SiC
Bearings : Radial	Babbittes sleeve type
Thrust	Tilting pad type
Capacity Control	Step less 100 ~ 15%

1. 100barG 油冷式スクリュウ圧縮機の構造と特徴

100barG 吐出油冷式スクリュウ圧縮機の構造を図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雄・雌ロータで圧縮された後、吐出ノズルより吐出される。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それぞれに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、取扱いガスが機外に漏出するのを防止している。

1.1 ロータ歯形

当社スクリュウ圧縮機を特徴づけるものとして、各用途に合わせて最適な歯形を開発・採用していることがあげられる。容積効率の向上を図るためには、単位行程体積あたりのロータ間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、および圧縮歯溝間の圧力比を抑えるロータ巻角の検討が必要である。しかしながら、これらをすべて最小化・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設計用シミュレーションプログラムを開発し、用途に合わせた最適な歯形を採用している。

*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

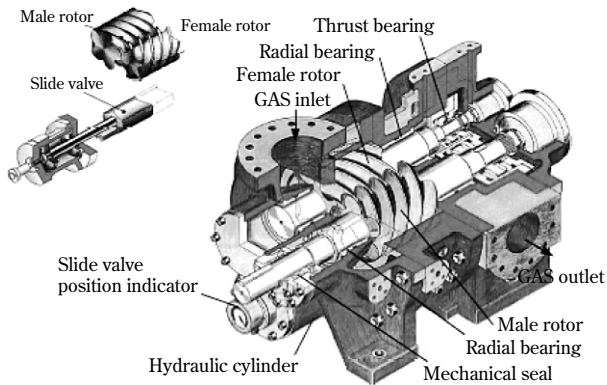


図2 100barG吐出油冷式スクリュウ圧縮機の構造
Fig. 2 Construction of 100barG oil flooded screw compressor

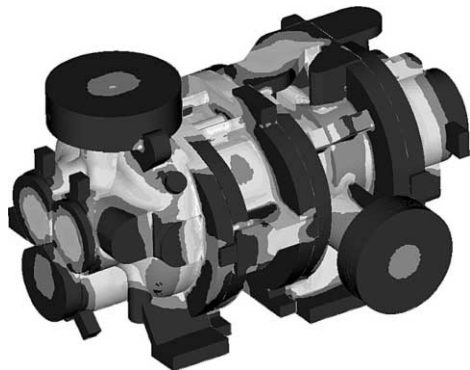


図3 ケーシング応力解析結果
Fig. 3 FEM analysis of casing stresses

100barG 油冷式スクリュウ圧縮機の歯形はこのプログラムを用いて設計した。また、ロータ歯数の組合せ、および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や性能シミュレーションを行い、高荷重となる高圧用途に最適なロータ歯数組合せを雄ロータ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である。高吐出圧力に対応できるよう大形化して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歯形の採用によって負荷面積の増大が可能となった。軸受の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選定可能である。

1.3 メカニカルシール

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

メカニカルシールのシールボックス内圧力は、油冷式スクリュウ圧縮機の構造上、運転時は吸込圧力程度となる。このため、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。

シール材の組合せはSiC+SiCとし、高吸込圧力に対応すると同時に長寿命化をも図ったものとしている。

1.4 ケーシング

高吐出圧力化に伴い、ケーシングのFEM応力解析を行うことによって肉厚やリブ形状の見直しなどを行った。ケーシングの応力解析結果を図3に示す。

社内に試運転設備を製作し、吐出圧力100barGにおける圧縮機の運転試験を行って機械的強度に問題のないことを確認のうえ、性能測定を実施した。また、吐出圧力100barGにおける吐出ガスの油分測定を行い、油分離性能が良好であることを確認した。

2. 100barG 吐出油冷式スクリュウ圧縮機の適用用途

一般的な油冷式スクリュウ圧縮機の系統図を図4に示す。吸込ガスをろ過器・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、分離された油は油冷却器を経て再び圧縮機へ給油される。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。

吐出圧力100barGへ対応できる油冷式スクリュウ圧縮機の特長を生かした適用用途として以下のようなものが挙げられる。

<石油精製分野>

- ・脱硫用圧縮機
- ・ネットガスブースタ用圧縮機
- ・オフガス圧縮機

<石油化学分野>

- ・水素圧縮機
- ・炭酸ガス圧縮機

<エネルギー分野>

- ・ガスタービン燃料用ガス圧縮機

<Oil & Gas 分野>

- ・Off Shore 向けガスリフト用圧縮機
- ・天然ガスパイプライン用ブースタ圧縮機

これらの用途では、これまで主にレシプロ式や遠心式圧縮機が用いられていたが、取扱いガスの影響をほとんど受けない容積式かつ信頼性の高い油冷式スクリュウ圧縮機が従来レンジ（60barGまで）ですでに適用されている。本章では、代表的な用途における高圧油冷式スクリュウ圧縮機を用いた事例を紹介する。

2.1 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

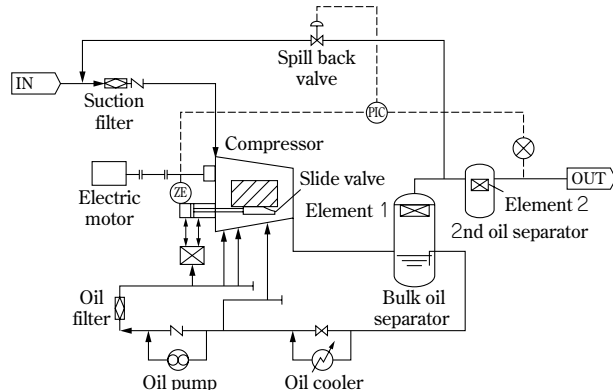


図4 油冷式スクリュウ圧縮機の系統図
Fig. 4 Schematic diagram of oil flooded screw compressor

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たことを受け、各石油会社において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必要となる。ガス成分は水素を主成分としながらも腐食作用の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メタンやプロパン、ブタンなどの重炭化水素を含む場合もある。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、高い信頼性が求められることに加え、長期連続運転の要求もある。

先にも述べたように、油冷式スクリュ圧縮機は潤滑油を圧縮機内部に給油しているが、重炭化水素を多く含むプロセスの場合、ガスが溶解して潤滑油の粘度を低下させ、軸受・メカニカルシールの油膜切れを起こして摩耗を早める懸念がある。このため、これまでは適用範囲が限られていたが、近年の潤滑油の技術革新は著しく、重炭化水素が溶解しにくい合成油（PAG:poly alkyl glycol）を採用することによってこれらのガスへの対応が可能となってきている。

典型的な脱硫圧縮機ユニットの外観を図5に示す。より高い信頼性が要求される脱硫プロセスの主要機器の一つであるネットガスブースタへの適用も始まっており、今後は吐出圧力100barGレベルが要求されるディーゼル脱硫用圧縮機への適用も検討されている。

2.2 水素圧縮機

水素は石油精製分野や石油化学分野で広く使われており、その精製方法もPSA（Pressure Swing Adsorption：圧力変動吸着）や膜分離、電解などさまざまである。水素ガスは、その生成方法から圧縮機の吸込圧力としては低圧（大気圧力程度）のものが多く、低圧から用途に応じた圧力に昇圧するには一般に高圧力比の圧縮機が必要となる。分子量が小さい水素ガスは漏れやすく、高い圧力比の昇圧を行うことが難しいことから、通常、複数段の圧縮システムとなる場合が多い。水素ガス圧縮機の外観を図6に示す。

油冷式スクリュ圧縮機は、圧縮中のロータ室内に潤滑油を給油することによってロータ間でのガス漏れを少なくすると同時に温度上昇も抑えることができる。このため、1段で高い圧縮比を達成することができる。さらに、当社独自のタンデム型配置（1ケーシング内に2段のロータを装備）により、2段圧縮であっても連絡配管や中間段のガス冷却器を省略することができる。システム構成がシンプルになって信頼性が高まり、予備機が不要となって省スペースを実現している。

また、圧縮機下流のプロセスに影響を及ぼさないようコアレスサフィルタによる油分離技術も確立されており、必要に応じて活性炭吸着による50ppbレベルまでの油分離も可能としている。

2.3 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生かした適用例の一つ

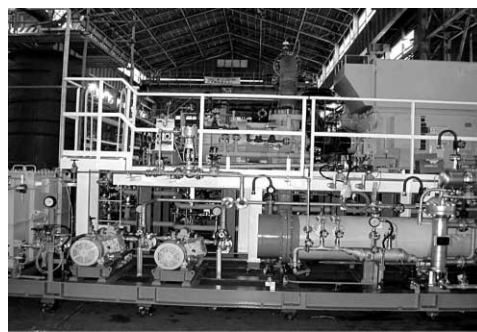


図5 脱硫圧縮機ユニットの外観

Fig. 5 Screw compressor for desulfurization process



図6 水素ガス圧縮機ユニットの外観

Fig. 6 Screw compressor for hydrogen process



図7 ガスタービン燃料用ガス圧縮機ユニットの外観

Fig. 7 Screw compressor for gas turbine fuel gas

にガスタービン燃料用ガスの圧縮がある。近年、ガスタービンの高効率化に伴い、燃料用ガス圧縮機にも高吐出圧力が要求されてきているが、当社の油冷式スクリュ圧縮機のシリーズでは、100barG吐出に対応させることによって最新型を含むほぼすべてのガスタービンに求められる風量・圧力への対応が可能となっている。燃料ガス圧縮機ユニットの外観を図7に示す。

ガスタービン燃料用ガス圧縮機では、ガスタービンの負荷変動および供給圧力（吸込圧力）変動を受けるなかで、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させている。

このガスタービン燃料用ガス圧縮の用途においては油冷式スクリュ圧縮機の適用事例が増加している。

3. 油冷式スクリュ圧縮機の可能性

3.1 圧力変動・容量変動

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8に示す。油冷式スクリュ圧縮機は、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。圧縮機型式の選定にあたっては通常、吸込圧力が最低の条件を設計条件とするが、実際には、多くのケースで設計条件より高い吸込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。

当社の油冷式スクリュ圧縮機では、スライド弁による容量制御を行うことによって実際の運転条件で省エネ運転が実現可能となっている。

3.2 省エネシステム構成

ガスパイプラインの元圧の変動など、圧縮機の吸込圧力が大きく変動する条件では、実際の運転において吸込圧力が設計点より高くなり、吸込圧力が高い低圧力比の運転条件となる場合が多い。さらに、元圧の変動が大きく、変動の上限が圧縮機の吐出圧力を超えるような場合もある。油冷式スクリュ圧縮機は、このような圧力条件が大きく変動する条件で消費動力の低減が期待できる。

複数台の圧縮機を用いたシステム構成例を図9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構成となっている。圧縮機をバイパスさせるラインを設け、パイプラインの元圧が高いときは圧縮機を運転することなく燃料ガスを供給できるようにした。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によって省スペース化を

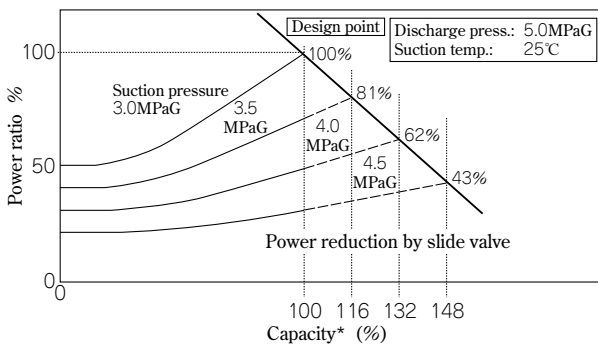


図8 油冷式スクリュ圧縮機の動力特性

Fig. 8 Typical load characteristics of oil-flooded compressor

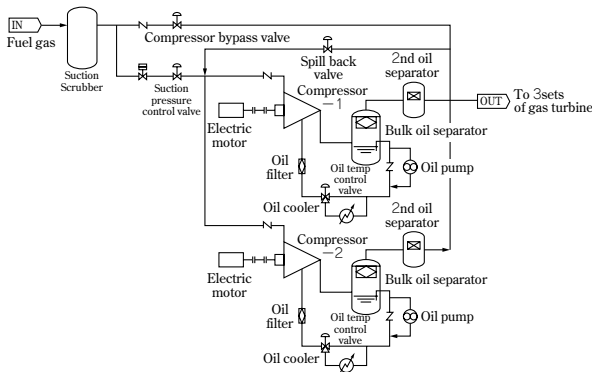


図9 油冷式スクリュ圧縮機システム構成例(その1)

Fig. 9 Oil flooded screw compressor system (case 1)

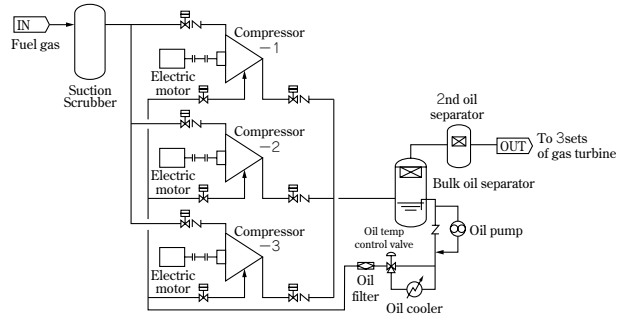


図10 油冷式スクリュ圧縮機システム構成例(その2)

Fig.10 Oil flooded screw compressor system (case 2)

図るとともに、複数台の圧縮機で昇圧された燃料ガスを1本の連絡配管で3台のガスタービンに供給することにより現地工事の簡略化にも貢献した。

3.3 低コストシステム構成

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10に示す。ガスタービンの1台が予備機であることから、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エレメント、潤滑油ポンプなどを共用化している。省スペース化を図るとともに低価格でのシステムを実現した例である。

3.4 圧縮ガスに付加価値をつける

コークス生産時の副生ガスであるCOG(Coke Oven Gas)は、水素PSAやガス切断機、燃料ガスに使われている。COGは不純物が多く、利用に際しては前処理としてタール、ナフタリン、BTX(ベンゼン、トルエン、キシレン)、硫化水素などを除去する必要がある。このCOG圧縮機として当社油冷式スクリュ圧縮機が適用されており、世界的にも珍しい例として注目されている。

油冷式スクリュ圧縮機は、COG圧縮機用途において、ロータ室に給油する潤滑油によって飛散するタールやダストなどを洗浄する役割も果たしている。圧縮機吐出側に配置される油分離器や潤滑油のフィルタを切換式とすることでガス中のダストを取除き、クリーンなガスを後流に送り出している。

油冷式スクリュ圧縮機の特長である圧縮ガス中に「潤滑油を入れる」ことにより、ガスを冷却するだけでなくガスを洗浄するという付加価値を高めることができた例であり、今後の油冷式スクリュ圧縮機の方角性を示すものと考えている。

むすび=当社は、油冷式スクリュ圧縮機が本来もつ優れた特性に加えて高吐出圧力への適用性をさらに高めることによって用途を大きく広げていきたいと考えている。また、その特徴を生かした新しい用途を開拓し、産業界に大いに貢献していきたい。

参考文献

- 1) 大濱敬織ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.1 (1999), p.32.
- 2) 大濱敬織ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3 (2000), p.99.
- 3) 天野靖士：R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.2 (2005), p.109.