

(解説)

市場で高まるターボ圧縮機大型化のニーズに対する当社の取り組み

今藤雄一^{*1}・志賀 司^{*1}・豊田祥寛^{*1}

Kobe Steel's Efforts to Meet the Growing Market Need for Larger Turbo Compressors

Yuichi KONDO・Tsukasa SHIGA・Yoshihiro TOYODA

要旨

近年、各種プラントの大型化が図られる中で、圧縮機をはじめとする基幹設備に対しても大型化が求められている。当社は、EO/EG（エチレンオキシド/エチレングリコール）およびPDH（プロパン脱水素）などの石油・石油化学プラントの分野や、従来からターボ圧縮機の主要用途である空気分離の分野において、圧縮機の大型化や高効率化を求めるお客様の声に寄り添い、そのニーズに応えるべく取り組みを行っている。本稿では、それらの内容について解説する。

Abstract

In recent years, as various plants have grown in size, there has also been a demand for larger compressors and other key equipment. Kobe Steel has been working to meet the needs of customers who are looking for more extensive and more efficient compressors in oil and petrochemical plants, such as EO/EG (ethylene oxide/ethylene glycol) and PDH (propane dehydrogenation), as well as air separation, which has traditionally been the main application of turbo compressors. This paper discusses the details of these efforts.

検索用キーワード

ターボ圧縮機、大型化、効率化、EO/EG、PDH、エチレンオキシド、エチレングリコール、プロパン脱水素、空気分離

まえがき = 世界の人口の増加、新興国や開発途上国における経済成長と生活水準の向上に伴い、人々の日常生活や産業活動に欠かせない石油化学製品や酸素、窒素、アルゴンなどの産業ガスの需要は増加し続けている。この需要に応えるため、これらを製造するプラントは、生産効率の向上と生産コストの削減を目指して大型化する傾向にあり、その心臓部として用いられる圧縮機に対しても大型化が求められている。本稿では、主に当社が提供するターボ圧縮機（DHシリーズ、VGシリーズ）のエチレングリコール用途、プロピレン用途、および空気分離装置用途での大型化に対する取り組みについて報告する。

1. エチレングリコールおよびプロピレンの製造プロセス用途への取り組み

1.1 本用途における当社圧縮機の役割

EO/EGとは、自動車の冷却システムなどで使用される不凍液、衣料品用の繊維、ペットボトルなどに使われるエチレングリコール（Ethylene glycol：EG）の原料となるエチレンオキシド（Ethylene oxide：EO）を製造するプロセスであり、現在は、Scientific Design LLC、The Dow Chemical Company、Shell plcの3社の技術によるものが主流となっている。EGの原料となる

EOはエチレンと酸素を触媒反応塔で反応させることで生成される。このEO生成過程における反応効率アップの目的で、未反応ガスを反応塔へ戻すために必要となる循環圧縮機に単段オーバーハング遠心圧縮機が必要であり、当社のDHシリーズが適用されている。

いっぽう、プラスチック・繊維・溶剤・医薬品の製造で利用されるプロピレンを製造するプロセスであるPDH（Propane dehydrogenation、プロパン脱水素）は、多くのエンジニアリングメーカが技術をライセンスしており、Oleflex法、CATOFIN法、STAR法などが主流となっている。これらの一部でヒートポンプ用圧縮機が必要なプロセスがあり、EO/EG用途と同様に当社のDHシリーズが適用可能で、スプリッタやセパレータからオーバーフローしたプロピレンを圧縮し昇温する用途で使用されている。圧縮されたプロピレンの熱は、プロパンの再沸に利用され、プロセス全体のエネルギー効率を向上させている。世界的な脱炭素の流れにもつながる圧縮機であり、今後の需要拡大が見込まれている。

1.2 圧縮機仕様

EO/EG用途での典型的な圧縮機の仕様は、吸込圧力は2 MPaA弱、吸込温度は大気温度、必要となる圧力比（圧縮機の吸込と吐出の絶対圧力の比）は1.2程度である。流量は大型プラントの場合は15万m³/h以上にな

^{*1} 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

り、圧縮機のインペラ外径は1 mを超え、軸動力も1万 kW 以上という大型の圧縮機となる。

PDH用途での典型的な圧縮機の仕様は、吸込圧力は1.5 MPaA 弱、吸込温度はプロピレンの飽和温度付近、必要となる圧力比は1.8程度である。流量は大型プラントの場合、10万 m³/h 程度となり、圧縮機のインペラ外径は1 mを超え、軸動力としても2万 kW 以上の大型圧縮機となる。

1.3 圧縮機構造

当社のDHシリーズは、低圧力比で大流量の条件に適した単段のターボ圧縮機である。図1はDHシリーズの対応レンジを示し、図中の太枠で示す大流量の部分がEO/EGおよびPDH用途で要求されるレンジとなる。また、図2に断面図を示す。プロセスガスの漏れを防止する軸封には、タンデムタイプのドライガスシールを適用し、インペラの背面側に組み込まれる。この軸封を基点にインペラ側がプロセスガスの接する領域、ジャーナル軸受側が大気領域となっている。インペラと軸から成るロータを支えるための二つのジャーナル軸受があり、その間に、前述のプロセスガス側の圧力と大気圧の圧力差によって軸方向に発生するスラスト力を支えるためのスラスト軸受が設置される。また、インペラは二つのジャーナル軸受の外側にオーバーハングして配置される構造となっている。

PDH用途についてはターンダウン運転の要求もあるため、流量制御装置であるインレットガイドベーン(IGV)を有している。また、PDH用途で要求される圧力比が従来からのDHシリーズの主要な用途であるポリエチレン/プロピレンプロセスよりも高いため、より高ヘッドタイプのインペラを適用している。

1.4 大型化による主要な課題と対策

両用途ともに、市場の大型化ニーズに合わせて設計流量を大きくするとガスの流路も拡大する必要があるため、ケーシングのサイズも大型になる。いっぽう、従来の設計手法では性能面での最適化を優先しているため、当社圧縮機の優位性は確保できるものの、より大流量の圧縮機に対して従来手法でそのまま相似形の設計を適用した場合にケーシングサイズが大きくなり、コスト面に加えて鋳物の製造上の制約についても課題となるケースも見られた。そこで、インペラ径(D2)とディフューザ出口径(D5)からなるディフューザ比(D5/D2)を従来よりも小さく設定することで、ケーシングのサイズアップを抑える取り組みを実施した。小型化によるケーシング流路内のガスの流れの変化は、性能低下につながることを予想され、これを市場の要求範囲内に抑えることが課題であった。そこで、EO/EGとPDHの両方において、流体解析(Computational Fluid Dynamics: CFD)により数パターンのディフューザ比の条件で性

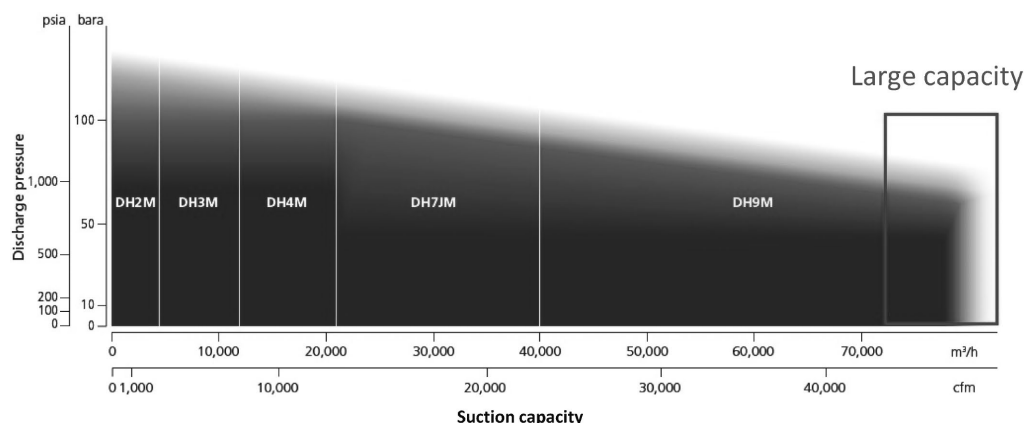


図1 DHシリーズ標準レンジチャート
Fig.1 Standard range chart for DH series

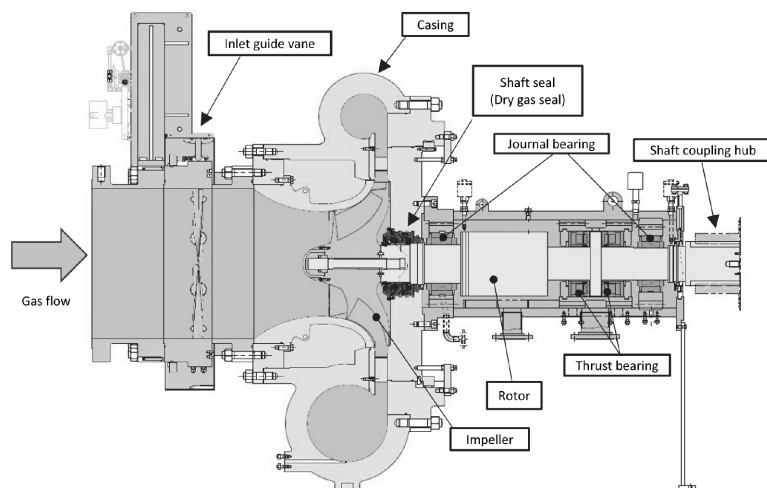


図2 DHシリーズ断面図
Fig.2 Typical sectional drawing of DH series

能への影響を予測した。さらに、それぞれの縮小モデルの実機を製作して性能測定を行った。試験設備および縮小モデルのケーシング外観を図3に示す。これらの結果より、小型化による性能への影響がいずれのパターンにおいても想定範囲内であることを確認できたことから、より小型化したパターンを採用することとした。さらに、実測値とCFDでの計算値の誤差として、効率で ± 1 ポイント以下と良好な精度が得られたことも確認した。

これにより、市場で必要とされる性能を保ちながら、ケーシングの重量アップを従来設計のベースよりも30%程度抑えることに成功し、お客様のプラントサイズの大規模化の要望に応えることができた。図4に従来手法と小型化したモデルのケーシングサイズの比較を示す。

ケーシングのほかにも、流量増加に伴う大動力化に対して、増加するトルクを伝達するための軸とインペラの間の締結部分の強度、サイズアップするインペラ径や軸径の材料強度など、要素ごとに確認を行い、要求される条件を満足するよう設計を行った。また、軸径が大き

なることでドライガスシールの径も大きくなり、プロセスガスから圧縮機ロータが受けるスラスト力が大きくなる。とくに、お客様から、有圧状態からの圧縮機の起動を求められる場合は、起動時のガススラスト力による影響を起動トルクに考慮して、駆動機の選定を行っている。

また、大型機のメンテナンスには作業時間を要するため、DHシリーズは、とくにメンテナンス頻度の高い軸封や軸受部分を含む圧縮機ロータ組立品を圧縮機のカップリング側から一体での取り外しが可能な構造としている。本用途の小型化ケーシングを適用した圧縮機についても同様の構造を採用しており、圧縮機ケーシングに接続される40インチ以上にもなる大口径の吸込・吐出配管を取り外すことなく、圧縮機主要部のメンテナンスを可能としている。

くわえて、インペラサイズが大きくなり重量が増加すると、ロータ組立品の重心が相対的にインペラ側に寄ることになるが、メンテナンスなどでロータを単独で保持する際に転倒することがないようにロータ形状を調整し、軸受間に重心位置がくるように設計している。

とくに、PDH用途では大流量かつガスの比重も大きい条件のため、IGVの動作に必要な操作力やガイドベーン自身にかかる応力が大きくなる。IGVは空圧式のアクチュエータで操作するが、その動力源として、お客様で準備される計装空気の最低圧力の条件において、運転に必要な操作力を発揮できるアクチュエータを選定している。

図5、図6に本用途で納入した圧縮機の外観写真を示す。

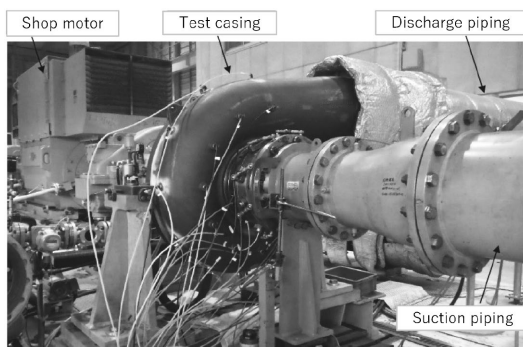


図3 試験設備および縮小モデルケーシング外観
Fig.3 Overview of test facility and scaled down casing

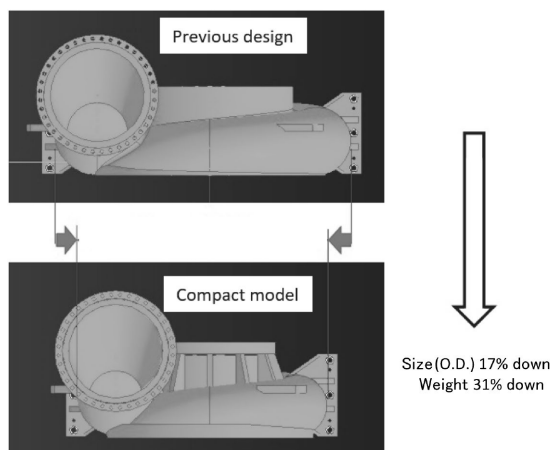


図4 ケーシングサイズの比較
Fig.4 Comparison of compressor casing size



図5 EO/EG用ターボ圧縮機
Fig.5 Centrifugal compressor for EO/EG application



図6 PDH用ターボ圧縮機
Fig.6 Centrifugal compressor for PDH application

2. 空気分離用途への取り組み

2.1 本用途における当社圧縮機の役割

空気分離は、空気を主に構成する酸素、窒素、アルゴン分離して取り出す技術である。その中で、深冷分離法は、空気を極低温まで冷却し、液化させてから蒸留によって分離する技術であり、最初のステップとして空気を圧縮するために、Main Air Compressor (MAC) が必要になる。当社では、本用途に増速機内蔵型ターボ圧縮機のVGシリーズを適用している。以前にも大型化の開発を実施¹⁾していたが、競争の激しい市場であることから、価格面および効率面のさらなる競争力アップのため、ケーシングとインペラの小型・高効率化に取り組んだ。

2.2 圧縮機仕様

典型的なMACの仕様として、大気圧から0.5 MPaGまでの大気（空気）の昇圧が要求される。流量は空気分離装置のサイズによって異なるが、図7に示すVGシリーズの対応レンジのうち、とくに吸込流量が太枠で示す30万Nm³/hから40万Nm³/hとなる大型機で、ケーシングとインペラの小型・高効率化の効果が発揮される。図8に示す同用途での当社が納入した圧縮機の流量の推移にも現れているように、近年はこのレンジの大型機のニーズが高まっている。

2.3 圧縮機の構造

従来から省エネルギーや省スペースのメリットが評価されており、増速機内蔵型の遠心圧縮機が適用されている。図9に本機の断面図を示す。ドライバと直結して低速回転しているブルギアの周囲に、両端もしくは一端にインペラを保持して高速回転するピニオン軸を配置することで、各インペラの最適な回転数を選定できる。また、インペラごとにケーシングが分かれているため、各ケーシングの吐出部にガス冷却器を設置して中間冷却をできることが高効率の理由の一つである。一軸多段型遠心圧縮機は、一般的に増速機を別置きとするが、本機では増速機と一体化した内蔵構造とすることにより、省スペースを実現しているのも特徴の一つである。

2.4 大型化による主要な課題と対策

前述したEO/EGやPDHと同様に、ケーシングの大型化は製造面およびコスト面が課題となる。内蔵増速機の軸中心間距離は、増速機に直接取りつく複数の圧縮機のケーシング同士が干渉しないように考慮して決定するため、ケーシングの外径を小型化することができれば、増速機の小型化にも寄与することが可能である。また、空気分離装置においては、MACの消費電力がプラント全体の電力消費に大きな影響を与えるため、MACの効率はお客様がMACを選定する際の重要な評価点の一つとなっている。さらに、大型化することで電力消費量の絶対値が増加し、効率の重要性が一層高まっている。このような背景から、当社では従来のインペラに改良を加え、大型化するプラントにおいて、より競争力を発揮するための取り組みを行った。図10に改良型インペラの外観写真を示す。結果として、図11に示すとおり、同じ流量・ヘッド条件で設計した従来のインペラ¹⁾に比べて、実際の運転で使用されることが多い小流量側の領域において最大3ポイントの効率向上を達成するとともに、インペラサイズを10%縮小することに成功した。図12に改良型インペラを採用して製作した圧縮機の写真を示す。

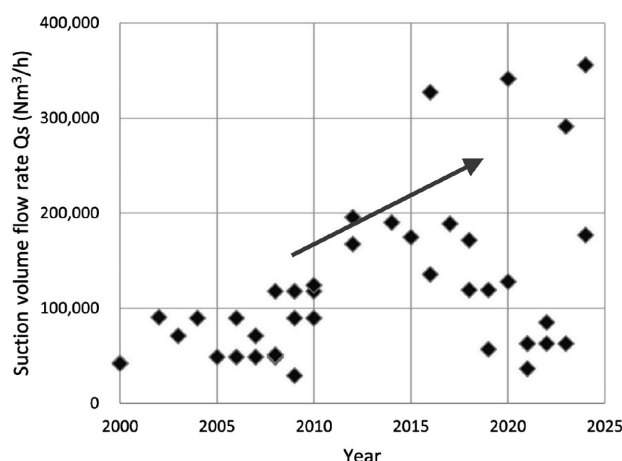


図8 当社が納入した空気分離（ASU）用途向けVGシリーズの流量の推移

Fig. 8 Trend of flow rate of VG series for ASU application

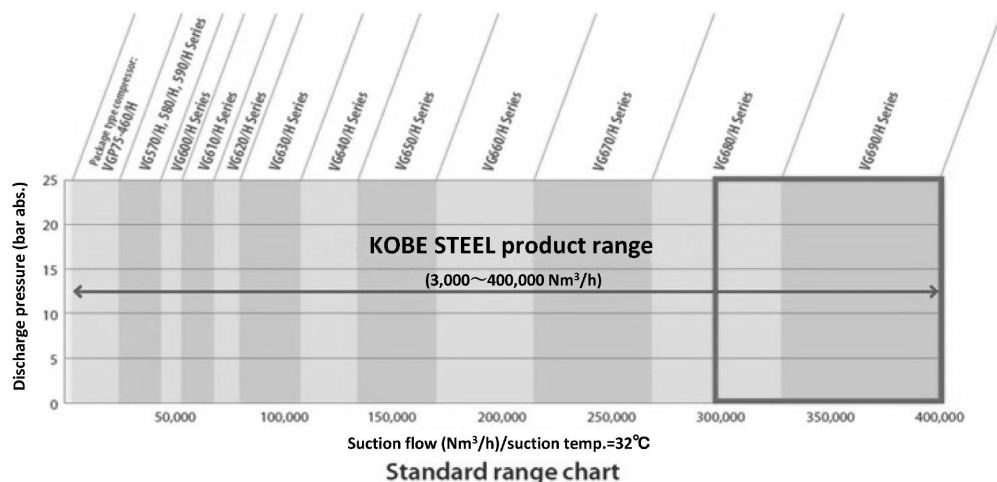


図7 VGシリーズ標準レンジチャート

Fig. 7 Standard range chart for VG series

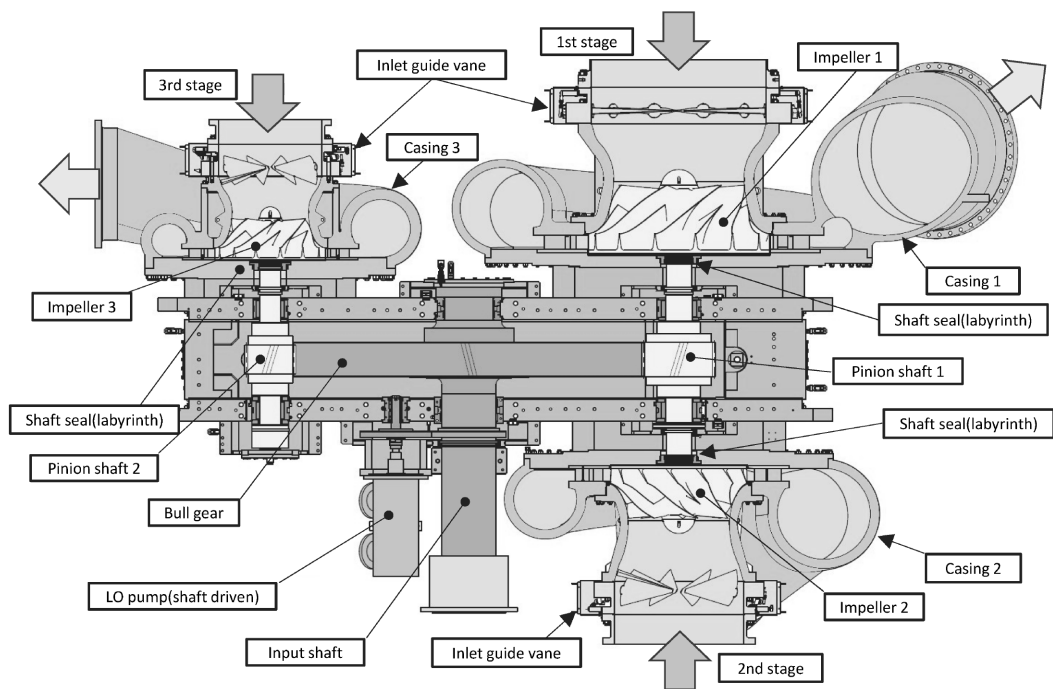


図9 VGシリーズ断面図

Fig.9 Sectional drawing of VG series



図10 改良型インペラ

Fig.10 Improved impeller

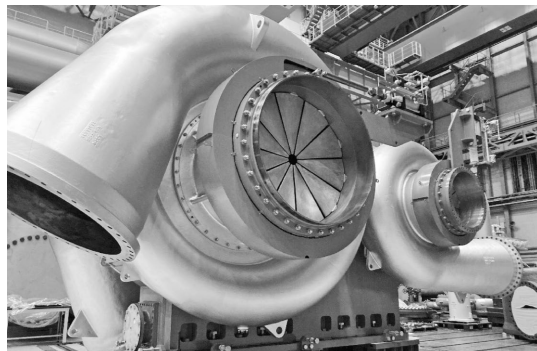


図12 改良型インペラ採用のVGシリーズ

Fig.12 VG series with improved impeller

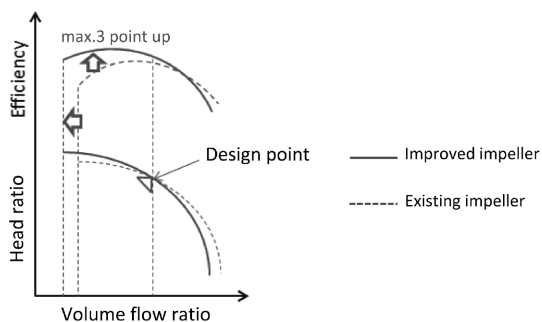


図11 従来インペラと改良型インペラの性能比較

Fig.11 Comparison of efficiency/head between existing and improved impeller

いっぽう、圧縮機の大型化に伴って、内蔵増速機やガス冷却器、潤滑油ユニットなどの付帯機器についても大型化とコストダウンが求められる。それぞれ圧縮機システムにとって必要不可欠なアイテムであり、品質・納期・コスト面でお客様および当社の要求を満足して安定的に供給できるサプライヤの確保は重要なポイントとなる。このため、当社では付帯機器製作の対応が可能な海外サプライヤを新規開拓・採用し、設計・製造・品質管理面

の教育も行うことで、サプライヤの能力向上にも努めている。

2.5 大型増速機内蔵機他用途への適用拡大

製鉄所での省エネルギー、二酸化炭素排出量低減を実現するため、製鉄過程で発生する高炉ガス (Blast Furnace Gas : BFG) やコークス炉ガス (Coke Oven Gas : COG) などの比較的発熱量の低い副生ガスと都市ガスを燃料とするガスタービン (GT) を利用したコンバインドサイクル発電設備の設置が鉄鋼各社で計画・実行されている。従来、GTへ副生ガスを供給するための副生ガス圧縮機には一軸型のターボ圧縮機が用いられてきたが、当社ではほかのガス用途での経験も活かし、2.3で述べたインペラ回転数の最適化と段間へのガス冷却器設置による高効率化が実現可能である特徴をもつ大型増速機内蔵機の適用に取り組んできた。

本用途での典型的な圧縮機の仕様は、吸込圧力は大気圧、吸込温度は大気温度付近、必要な圧力比は25程度である。流量はGT側の要求によるが、15万Nm³/h程度となり、圧縮機としては中間冷却を含んだ六段、一段インペラ外径は1mを超え、軸動力としても2万kW以上

の大型圧縮機となる。

副生ガスには、可燃性ガスに加え、腐食性成分も含まれることから、圧縮機ケーシングには、ステンレス鋳鋼、もしくは内面に耐腐食性のコーティングを施工した炭素鋼を使用し、インペラを含む回転体にも同様のコーティングを施工するなどの対応を行っている。また、軸封には、ドライガスシールもしくはカーボンシールを採用し、圧縮機ケーシングから外部へのプロセスガス漏れを防止している。本用途では、GTや発電機側の運転条件によって、圧縮機吐出圧力の変動幅の制約や緊急停止時の挙動などにプロセス側の要求があるため、圧縮機を含むシステムの動的シミュレーションを行い、各制御弁の仕様などを選定することで、動作設定の妥当性を評価し、最適化を行っている。²⁾

図13に本用途で納入した圧縮機の写真を示す。

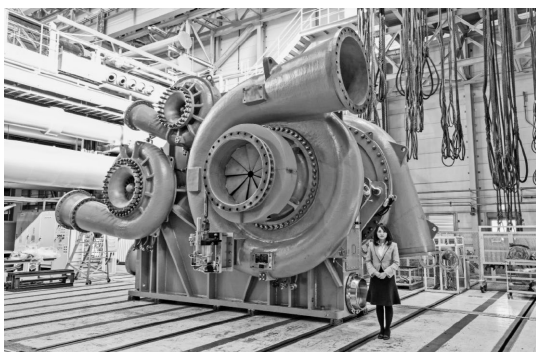


図13 副生ガス圧縮機

Fig.13 Compressor for blast furnace gas application

むすび=EO/EG, PDHおよび空気分離, さらに高炉副生ガスの用途において, 近年の大型プラントの需要に応えるべく, 当社は圧縮機の大型化・高効率化の課題解決に向けて, 積極的に取り組んできた。これらの分野における技術革新と効率向上を目指し, 当社は最先端の圧縮機を開発し続けている。

市場のニーズを的確に把握し, お客様のご要望に寄り添って適切な圧縮機を提供し続けることは, 当社の最も重要な使命の一つである。今後も, お客様の信頼と満足を第一に考え, 常に革新と進化を追求する姿勢を持ち続けることが, お客様に寄り添う鍵であると確信している。

参考文献

- 1) 佐伯圭一ほか, R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.67, No.2, p.68-71.
- 2) 北山伸二ほか, R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.67, No.2, p.101-105.