

圧縮機の最近の動向と展望

小谷重遠

取締役・機械事業部・圧縮機センター長

Recent Trend of Compressors in Kobe Steel

Shigetou Kotani

まえがき = 圧縮機はあらゆる生産活動の基盤となる様々な製造装置やプラントにおいて、そのプロセスを構成する心臓部の機械として使用されている。このため、これらの製造装置、プラントの経済的・技術的な要求に応える形で、技術開発と改良がおこなわれてきた。さらに、近年の地球環境保護の動きの高まりもあり、プラント内のエネルギー消費の大きな部分を占める圧縮機の高効率化、容量調整を含む省エネルギー化、信頼性の向上、高速小型化による省スペース化などの要求が強まり、一層の技術開発がおこなわれ、さらなる圧縮機の進化改善、適用範囲の拡大がおこなわれている。

当社は、1915年に往復圧縮機の製造を開始して以来、スクリュウ圧縮機、遠心圧縮機、大型ロータリローブプロワなどを順次製作し、プロセス用圧縮機から汎用圧縮機にわたる総合圧縮機メーカーとして、ユーザの要求に最適な圧縮機を提供してきた。本稿では、当社圧縮機の最近の技術動向、代表的納入実績の紹介と将来展望について述べる。

1. 往復圧縮機

各種プラントの大型化や低圧化にともなって多くのプロセス用主圧縮機が往復圧縮機からスクリュウ圧縮機や遠心圧縮機に移ったが、往復圧縮機は中小容量の高圧用途や水素など軽量ガスの圧縮用に高効率特性を有することから、これらの分野では依然として主圧縮機としてもちいられている。その用途は石油精製分野に多く、当社でも連続触媒再生式接触改質装置(CCR)、水素化分解装置、脱硫装置などの水素主体のガスの中高圧用途の圧縮機を多数製作している。また、石油化学分野においてもポリエチレンプラント、ポリプロピレンプラント用圧縮機などを製作し、エネルギー産業用途としては、極低温吸込のLNGボイルオフガス圧縮機を製作した。

往復圧縮機は理論および基本構造は確立されているが、ピストンリング、ライダリング、ロッドパッキンといった摺動部品やシリンダ弁などの摩耗消耗部品があるため、スクリュウ圧縮機や遠心圧縮機にくらべてメンテナンス頻度が多く、それらの部品の耐久性、信頼性を向上して長期連続運転を可能にすることが求められている。後述のプラスチック弁の採用や耐摩耗性に優れた摺動材料の開発などでメンテナンスの頻度は少なくなってきたており、最近ではメンテナンスコスト削減、要員不足から、摺動部品の寿命が短い無給油式を除いては2年間隔でのオーバーホールが定着しつつあり、さらに4年間隔のオーバーホールの要求も出てきている。

摩耗消耗部品の中でシリンダ弁は、ガスの汚れ、ガス組成、温度、圧力の変化、潤滑油の影響などにより構成部品である弁板、バネの寿命が大きく左右されるため寿命予測がむずかしく、長期連続運転をもっとも阻害しやすいものである。近年普及してきたプラスチック製弁板を使った弁は、ガスの汚れと潤滑油の影響を受けにくく、当社ではその効果のもっとも大きい油潤滑式圧縮機の弁をすべてプラスチック化し、2年間連続運転を可能としている。さらにプラスチック弁は弁板が軽量であるために大きなリフトを採用できることから、動力損失を小さくできる利点もある。

いっぽう、予防保全の意味で各種センサも普及してきた。ライダリングの摩耗をピストンロッドの位置の変化から測定するピストンロッド・ドロップセンサ、振動の監視のための振動計、個々の吐出弁の温度により弁板やバネに異常の起こった弁を見つける温度センサがその主なものである。

石油精製や石油化学のプロセス用圧縮機では、ユーザが回転数やピストン速度を低い値に制限することが多い(回転数は300~500rpm、ピストン速度は3.0~4.5m/s程度)。これはプロセス用圧縮機がプラントの心臓部にあたるため、故障の少ないことを第一義に考えるためであるが、いっぽう、石油・天然ガスのフィールドでもちいられる圧縮機ではコストを第一義として、従来から高速圧縮機がもちいられている。高速圧縮機の製作は、石油・天然ガスのフィールドでの用途が多いアメリカが主体で、現在では動力4500kW、回転数1200rpm、ピストン速度6.0m/sのものが実用化されている。プロセス用圧縮機の高速化には、往復動部分の軽量化と部品の高速での信頼性向上が必要であり、将来に向けての検討を進めている。

2. スクリュ圧縮機

スクリュウ圧縮機は1950年代からロータ歯切り技術の確立により世界規模で工業的に使用されるようになり、当初の無給油式から油冷式空気圧縮機、油冷式冷凍機、ヒートポンプ用、油冷式ガス圧縮機へと用途開発が活発におこなわれてきた。技術動向としては、小型化、低騒音化、メンテナンスフリー化、油分離技術の改善を含むオイルフリー化、クリーンエア化への大きな流れがあり、さらに特定分野に専用特化した製品開発や技術開発がおこなわれている。

近年大きく進歩した技術にシミュレーション技術がある。1980年代後半より活発になったロータ歯型開発の

一連の流れの中で、油冷式を含む性能シミュレーション、ロータ熱膨張解析、ロータ噛み合い衝突振動解析、ロータ加工シミュレーションを組合わせて、用途ごとに最適な歯型を開発している。最近の実績では、無給油式に低差圧大容量に適した歯型を開発し、理論行程体積が従来機比で40%増である79,000m³/hの圧縮機を製作、シリーズ化した。また、油冷式高圧用歯型を開発し、最高吐出圧力6.0MPaの圧縮機に適用した。さらにロータ加工技術の改善、NC化もあり、性能改善と性能の均一化が着実に進んでいる。騒音については、騒音源である吐出脈動のシミュレーション技術を確立し、実測結果と定量的に一致することを確認し、騒音低減に役立てている。そのほか、油冷式スクリュウ圧縮機の重要な技術の一つである油分離技術についても、油分離シミュレーション技術を開発し、油分離性能の予測、改善に活用している。

空気圧縮機の分野では、量産技術の進展もあり、1.5kWクラスまで実用化され、従来の往復圧縮機からの置き換えが加速している。油冷式空気圧縮機の潤滑油には合成油を使用することにより、耐酸化寿命を従来比5.7倍と飛躍的に向上させ、ドレン抜きも不要としてメンテナンスサイクルを大幅に延長している。これらの技術進歩によりスクリュウ化への動きはさらに高まり、15から150kWまでは、ほぼ100%スクリュウ圧縮機が使用されている。なかでもオイルフリー化への動きが活発であり、これに応えるべく15kWクラスまでオイルフリースクリュウ圧縮機をシリーズ化した。

技術的には、前述のシミュレーション技術の活用により、55kWクラスのオイルフリー圧縮機の性能を当社従来機比較で6%以上改善し、世界最高レベルの性能を達成した。300kWクラス以上の領域では、用途に応じて遠心圧縮機との住み分けが進んでおり、主圧縮機としては遠心圧縮機を使用し、容量調整をスクリュウ圧縮機でおこなうなど、全体の効率を考えた使い分けがなされている。低騒音化については、吐出口の圧力脈動を低減する構造の採用、消音ダクトなどを含めた防音パッケージの高性能化、耳障りな音を消す共鳴型サイレンサの採用などで最高10dBの騒音低減を実現した。

ガス圧縮機の分野では、当社は世界でトップクラスの実績を有しているが、最近の特徴としては認知された特定用途に対して、さらなる改良を実施していることである。スチレンモノマオフガス用途は無給油式スクリュウ圧縮機のもっとも適した用途の一つであるが、プラントの大容量化の要求に応えるべく、圧縮機の容量増を前述の低差圧大容量用歯型の採用とロータ長径比を大きくすることで実現した。油冷式スクリュウ圧縮機のプロセスガスへの適用は、油分離技術の格段の進歩、潤滑油の高品質化、合成油の開発などにより、着実かつ急速に進んでいる。

ヘリウムガス、水素リッチガス、コークス炉ガス(COG)、都市ガス、天然ガス、ガスタービン燃料ガス圧縮用などでは、油冷式スクリュウ圧縮機の特徴である高効率、運転の容易さ、容量調整による省エネルギー、省スペースの点から評価を受け、ほとんどのケースに油冷式が採用され

ている。

ヘリウム冷凍機用では、液化能力で5kWの世界最大クラスのヘリウム用圧縮機(全軸動力2,460kW)を製作した。本機は3段圧縮とし、ヘリウム液化用では世界最高の等温効率(60.1%)を達成している。潤滑油には特殊精製油を使用して、油からの不純物発生を最少とし、系内の清浄度を確保した。

ガスタービン燃料ガス圧縮機は、ガスタービンの高効率化の動きから、高吐出圧力化しており、この要求に応えるべく高圧用ロータ歯型を有する最高吐出圧力6.0MPaの油冷式スクリュウ圧縮機を吸入容量19,000m³/hまでシリーズ化した。ティルティングパッド軸受を採用し振動計を取付け可能とするなど、米国石油協会(API)規格の要求を取入れている。本機は、主として往復圧縮機が使用されている石油精製用などの用途にも使用可能である。

ガスタービン燃料ガス圧縮機の場合、ガスタービンの全負荷遮断時には、燃料制御弁の特性からきわめて短時間に燃料ガスを減少させ、かつ吐出圧力の変動を最小とする必要があるが、油冷式スクリュウ圧縮機は容積型であることから、容易にこの制御をおこなうことができる。また、吸入圧力の変動に対しても問題なく追従できることから、機械的にも、システムの信頼性が高く、省エネルギー、省スペース、運転制御性の点からも最適な機種であることが実証されている。高効率油分離フィルタを使用することにより、油分を0.1volppm以下とすることも可能で、NO_x対策を考えた希薄燃焼ガスタービン用にも使用されている。

スクリュウ冷凍機はフロンガス規制の影響を受けている。スクリュウ冷凍機の冷媒として主にもちいられてきたHCFC22は2020年までに全廃される予定である。すでに全廃されたCFC12の代替冷媒であるHFC134aへの転換は完了しており、さらにHCFC22の代替冷媒としてHFC404A、407C、410Aなどへの転換が促進されている。いずれも、圧縮機の性能、冷凍機油、エラストマとの適合性の確認は完了しており、実機レベルで使用可能となっている。

最近では、地球温暖化防止の観点から、アンモニア、プロパンなどの自然冷媒を使用する動きも活発化している。もともとスクリュウ冷凍機は1960年代前半にアンモニアなどの高圧冷媒用として実用化されたものであり、空調分野を除いて、冷媒をアンモニアとすることには、技術上は何らの問題もない。当時に比較し、安全性は格段に改善されており、温暖化防止の点から普及促進のため法的規制緩和が望まれる。

工業用冷凍機の分野では、蒸発温度-60の世界最大のスクリュウ冷凍機(2,200kW)を製作した。これはモータの両軸に低圧段と高圧段を配置し、高圧段には当社機の特徴である単機2段タンデム型を使用し、全体で3段圧縮としたものである。蒸発温度-60は油冷式スクリュウ圧縮機では限界に近いが、これに対応するために、冷凍機油には粘度、低温流動性を考慮した合成油を使用している。小型冷凍機の分野で始まった圧縮機とモータ

を一体とし、冷媒の圧縮機軸シール部からの外部漏れを0とする半密閉冷凍機においては、単機600kWレベルまでシリーズ化している。さらに、ケーシング構造の見直し、ガス通路の形状最適化、吐出サイレンサの装着などにより、大幅な音質改善と騒音低減を達成している。

ヒートポンプでは、上記の半密閉冷凍機を使用し、さらに油回収器の油分離機構を見直しサイズダウンするなどにより、省スペース、省エネルギー、メンテナンスフリーを実現し、シリーズ化している。エネルギー回収の分野では、高効率熱交換器を使用して、COPを従来比40%増とする研究プロジェクトを推進しており、実用規模の試験で良好な結果をえたので、今後普及を図りたい。

3. 遠心圧縮機

遠心圧縮機は各種プラントの中で、容量、動力が比較的大きいことから、高性能化、高速・小型化が強く要求されている。これらの要求に応えるためには、設計・開発段階での慎重な検討が必要であるが、近年のグラフィックワークステーションの高速・大容量化により、CAE手法が簡単に活用できるようになり、三次元CADによるソリッドモデルの作成と、それにもとづくFEMによる応力振動解析、圧縮機の内部流れの解析、CAMによるNC加工へと続く一連の技術が格段に進歩した。

その結果、性能上最適の形状を精度良く実現することができるようになった。とくに、遠心圧縮機の内部流れの解析については、めざましい進歩をしており、これを利用したインペラやディフューザなどの空力要素の設計は、性能の改善に大きな効果を上げている。当社は、流れ解析にさらに実験での確認による修正を加える手法で、従来機との比較で最大5%の効率改善を実現した三次元高効率インペラを開発した。これはすでに、高効率パッケージ型遠心圧縮機(VGPシリーズ)として上市をしている。加工についても、CAMを5軸マシニングセンタに結び付けることにより、従来比で約3倍の加工の効率化を実現している。さらに、カバー付きインペラに対して、カバーを拡散接合する技術確立し、性能の安定化を実現している。

省エネルギーの要求に応えるべく、各種プラントの中低圧余剰蒸気、廃ガスなどからエネルギー回収をおこなう動力回収ラジアルターピンをシリーズ化している。従来の汎用軸流ターピンと比較して、最高効率で15%以上優れており、より一層の実用化が期待できる。本シリーズには、ラジアルターピン単独のものと、増速機内蔵型遠心圧縮機のピニオン軸端にターピンを取り付け、回収動力により圧縮機用電動機の動力を低減させるものがある。とくに、後者は電気事業法などの法的規制を受けないため、設備費が比較的安価ですむことから短期での投資費用の回収が可能となる。

可燃性、毒性ガスを扱うプロセスガス圧縮機では、軸シール技術は重要な要素技術の一つである。安定した軸シールとして、プッシング油膜シールが使用されてきたが、運転制御性とガスと接触したシール油の処理の問題

などから、ドライガスシールが飛躍的に使用されるようになった。ドライガスシールは、シール面に設けたスパイラル形状の溝に回転による動圧を発生し、生じた動圧によりガスフィルムを形成、シールする非接触タイプのシールである。運転制御性も良く、システムとしても完全に定着しており、ユーザの評価は高い。製造可能なシールメーカーも増えていることから、ドライガスシールの適用は、さらに拡大するものと予想される。

遠心圧縮機には、油潤滑のスリーブ軸受や、ティルティングパッド軸受が使用されているが、最近では高速回転に付随する軸受損失を低減する直接潤滑式の軸受や、ロータの振動安定性を増すデフレクションタイプの軸受が使用されている。また、磁力によりロータを支持する磁気軸受も実機に搭載し、かつ前述のドライガスシールを使用した完全オイルフリー遠心圧縮機を製作した。デジタルシステムの採用によりコントロール性も大幅に改善され、ロータダイナミックスの解析・検証も進み、完全な実用化に向けて問題のないレベルにある。主駆動機に磁気軸受搭載のスチームタービン、あるいは高速電動機を組み合わせることにより、トレインとして完全オイルフリーとなり、メンテナンスフリーが実現できることから、コストダウンが進めば、将来には磁気軸受とドライガスシール搭載の遠心圧縮機が主流となることも予想される。

増速機内蔵型遠心圧縮機は、一般の空気用途や空気分離装置などの一部の用途に限定されていた。しかしながら、近年ロータダイナミックス技術の向上、歯車精度の向上、増速装置の信頼性向上、ドライガスシールなどの要素技術の進歩などから、増速機内蔵型遠心圧縮機の信頼性が高まり、さらに、省エネルギー、省スペース、工事期間の短縮などのユーザ側の要求もあり、可燃性ガス、毒性ガスを含むプロセス用途に増速機内蔵型遠心圧縮機が使用されるようになってきた。当社は、二酸化炭素、塩素、塩素系ガス、酸素、アンモニア、エチレン、プロピレンなどにすでに実績を有しており、増速機内蔵型遠心圧縮機のプロセスガス用途への適用を他社に先がけて進めている。今後はプロパンなどのプロセス用冷凍機などへと使用ガスの範囲がさらに拡大するものと予想される。

むすび= 圧縮機の技術は、解析技術、製造技術を組み合わせながら、省エネルギー化などの社会・ユーザのニーズを実現する形で進歩してきた。今後は、環境保護、人にやさしい(運転操作、メンテナンス・管理が容易など)といった要求も取入れ、圧縮機を通じて社会、産業界に貢献するという基本思想のもと、各界の指導をいただきながら、最適の圧縮機を提供することで、ユーザの要望にこたえていく所存である。本圧縮機特集号にて紹介した当社圧縮機の最近の製品開発、技術開発などの内容が、圧縮機に関係されているかたがたにとって、少しでも役立てば幸いである。