

コンプレッサー設備のエネルギー効率向上手法

Improving energy efficiency of air compressors

株式会社日立産機システム グローバルエアパワー統括本部 グローバル開発統括部 清水開発設計部
Shimizu Development and Design Dept., Global New Product Development Dept.,
Global Air Power Group, Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd.

松坂 岳廣

Takehiro Matsuzaka

キーワード：空気圧縮機(Air compressors)、廃熱回収(Wasted heat recovery)、
ボイラー給水予熱(Boiler pre-heating)、給油式圧縮機(Oil-injected air compressors)、
オイルフリー圧縮機(Oil-free air compressors)

1. 産業界における空気圧縮機の役割

空気圧縮機 (Air compressor) は大気を吸い込み、所定の圧力まで圧縮して圧縮空気として需要先へ供給する機械であり、産業、運輸、娯楽施設などあらゆる分野において様々な用途で利用されている。特に利用の多い工場内における圧縮空気の用途としては、様々な設備機器に使われているエアシリンダーや空気圧式のバルブ、機器組み立てに用いるエアツールなど駆動するための動力源、加工後のワークに付着した切粉や塵埃、または、水滴などを吹き飛ばすエアブローや、熱処理後の加工品の冷却、粉体輸送、圧縮空気中から窒素ガスを抽出するための原料用途など数多くの利用方法があり、圧縮空気を生成する空気圧縮機は産業界において必要不可欠なインフラの一つとなっている。

2. 空気圧縮機の省エネルギー手法

空気圧縮機の消費電力が工場の消費電力の約 20~30%を占める¹⁾場合があり、空気圧縮機単体の性能向上はもちろんのこと、工場の空気圧システム全体としての省エネルギー化を進めることが工場全体の消費エネルギー削減に大きく寄与する。

空気圧システムの代表的な省エネルギー手法としては、(1) より高性能な最新の空気圧縮機の導入、(2) 圧縮機の吐出空気圧力の低減、(3) ブースター圧縮機等による局所増圧化、(4) 複数台の圧縮機の台数制御化、(5) 工場内空気配管のループ化、(6) 低消費空気量の空気圧機器への切替え、(7) 大型空気槽の設置、そして、(8) 空気圧縮機の廃熱利用といった方法が考えられる。

上記 (1) から (7) の手法は、より効率的に圧縮空気をつくり、必要な時に必要な分だけ利用する、ロスを減らす方法といえる。一方、(8) 空気圧縮機の廃熱利用は、圧縮空気を生成する際に生じる廃熱を利用して温水、または、温風をつくり、それらの熱を再利用することで従来温水、温風を生成するために消費していたエネルギーを削減することを目的とした方法であり、前述の省エネ手法とは方向性が異なる。

3. 空気圧縮機の廃熱利用

事実として、空気圧縮機が消費する電力のほとんどは空気を圧縮する過程で熱に変換されるとともに、その熱の大部分は大気中に放出されているのが現状である。昨今のエネルギー調達価格の高騰や、地球温暖化防止のためのカーボンニュートラルの取り組みが加速する情勢において、この未利用熱を回収して再利用する需要が高まってきている。

工場内において熱を利用する用途は業種にもよるが数多く存在しており、特に、熱を利用する形態としては温水の利用方法が最も一般的であると考えられる。図1は、当社((株)日立産機システム)の圧縮機ユーザーへの温水用途・温度帯に関するアンケートを実施した結果を示す。温水用途を大別

すると、①製造ラインに使われる温水と、それ以外のいわゆる②ユーティリティ温水に分けられる。①製造ライン温水保温や加熱、脱脂・洗浄などの用途であり、温度帯としては80℃までで約60%を占める。②ユーティリティ用温水は、ボイラー給水予熱、空調、そして、衛生水（給湯、シャワー、洗濯等）用途が主であり、その温度帯は、80℃までで約73%を占める。

後述の通り、取り出せる温水温度は空気圧縮機の種類により異なり、給油式圧縮機の場合は最高70℃程度、ドライ式オイルフリー圧縮機の場合は最高90℃程度となる。100℃を超える温水用途は利用する業種が限定的であると考えられることから、70℃以下、90℃以下の温水用途であれば、ユーザーが使用している空気圧縮機の種類に応じて、圧縮機の廃熱を温水として回収して再利用することができる。

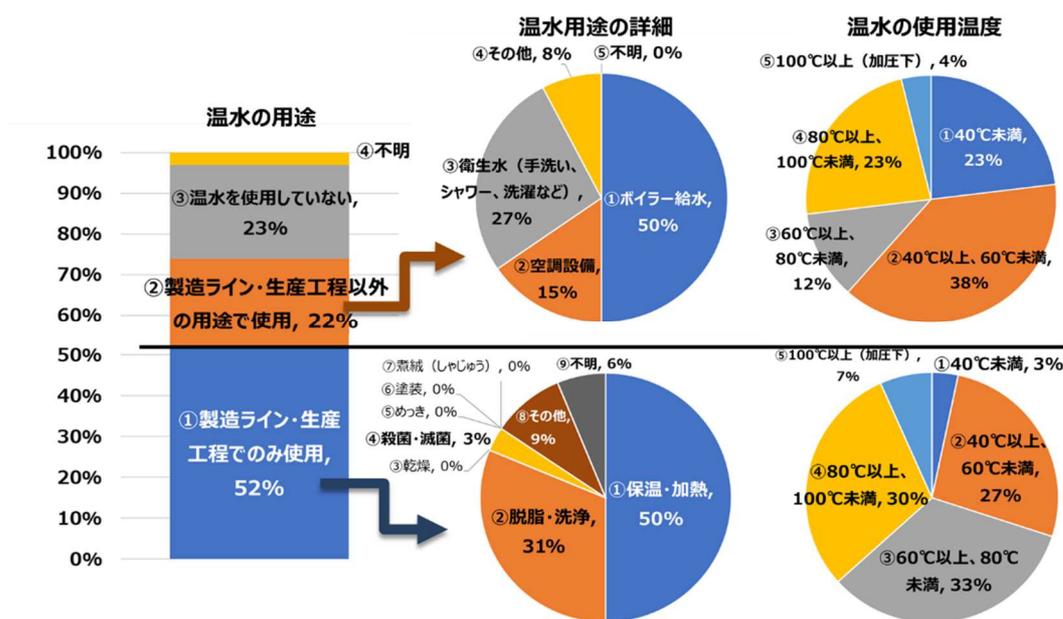


図1 当社製圧縮機ユーザーへの温水用途・温度帯に関するアンケート結果（回答数71件）

4. 空気圧縮機の分類と圧縮のしくみ

図2に代表的な圧縮機の圧縮方式による分類及び圧縮過程の冷却・潤滑方式別の分類を示す。図2の左側は気体の圧縮方式別の分類を示している。図2の右側には、それぞれの小分類の圧縮方式において、圧縮過程の冷却・潤滑方式別に一般的に適用されるものを示している。

圧縮方式を大別すると容積形圧縮機とターボ圧縮機に分かれる。容積形圧縮機は、ケーシング、または、シリンダ内に閉じ込めた気体を吐出し側にその容積を減少して送り出し圧力を高める圧縮機である。容積形圧縮機はさらに往復動式と回転式に分類され、回転式には主に回転体であるロータの形状によってさらに複数の方式に分類される。

一方、ターボ圧縮機は、羽根車を回転させ、羽根の作用により通過気体の速度を圧力に変換して圧力を上昇させる圧縮機であり、そこから、軸流式、遠心式、斜流式に分類される。

次に、圧縮過程の冷却・潤滑方式には、現在日本国内で販売されている各圧縮方式の圧縮機が採用しているものに「○」を付けた。（販売が確認されていないもの、一般的に適用しないものは「-」とした。）

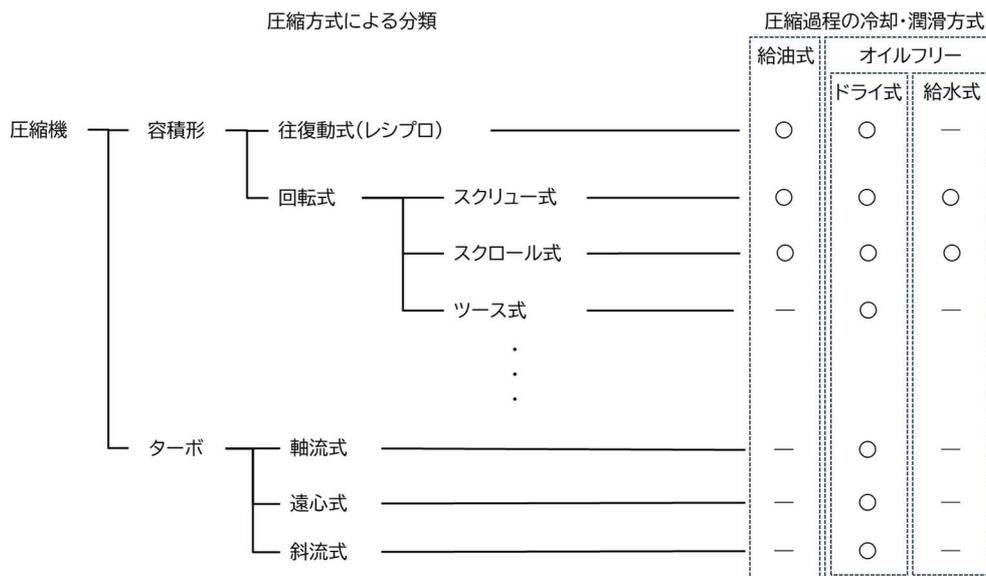


図2 圧縮機の圧縮方式による分類及び圧縮過程の冷却・潤滑方式の適用

圧縮過程に大量の潤滑油を注入し、空気の圧縮熱を冷却し、ケーシングとシリンダまたはロータ間の隙間や、一对のロータ間の隙間からの空気の漏れを抑制するとともに、摺動部の潤滑をする方式は給油式、ないし、油冷式となる。油が圧縮空気をシールすることで、圧縮過程における空気の漏れ、逆流が最小限に抑えられ、効率よく空気を圧縮することができる。しかしながら、圧縮空気には微量の油分が含まれることになる。

一方、圧縮過程に油などの一切の冷却液等を注入しないで空気を圧縮する方式は、ドライ式オイルフリー式圧縮機と呼ばれる。ケーシングやシリンダなどの固定部品と、ピストンやロータなどの回転部品との間、さらに、回転部品同士も非接触、もしくは、自己潤滑性のある摺動材ないしコーティングによって隙間を最小限に抑えられる。高度な技術が必要な冷却・潤滑方式ではあるが、圧縮空気には圧縮過程に由来する油分は含まれないため、清浄等級の高い空気が求められる食品、医薬品、半導体関連の工場で特に必要とされる方式である。近年は、圧縮過程に油の代わりに水を注入する給水式の圧縮機も発売されており、前述のドライ式と合わせてオイルフリー式に分類される。

本稿では、現在一般的に流通しており、かつ、廃熱利用が比較的容易な中型から大型の空気圧縮機として利用されている、容積形圧縮機の回転式の一つであるスクリーュー式について説明する。

スクリーュー式はケーシング内部にねじれた雄、雌の一对のロータをかみあわせ、ねじれた歯溝内の容積をロータの回転により減少させ圧縮する方式である。雄、雌ロータの軸端に同期歯車を設け、ロータ間に一定のすきまを保ち、接触がないようにロータを回転させることで、圧縮過程に油などの一切の冷却・潤滑液を必要としないドライ式と、雄、雌ロータの駆動面の潤滑、圧縮熱の除去、油膜によるシールを目的とし多量の油が注入される給油式がある。給油式では雄、雌ロータが直接かみあいロータを駆動する。連続的に大量の空気を圧縮でき、耐久性が高いことが特長である。

圧縮機からの廃熱の温度及び熱量は、前述の圧縮過程の冷却・潤滑方式で特徴づけられる。

給油式空気圧縮機は、圧縮過程で使用される油によって部品の冷却が行われるため、廃熱の温度が比較的低下する傾向がある。しかし、プレート式熱交換器などの小型で高効率な熱交換器を採用することができるため、システムが簡素化、小型化できるため、廃熱利用が比較的容易である。

一方、ドライ式オイルフリー空気圧縮機では、圧縮過程を油や水を用いて冷却しないことから熱回収に利用する圧縮空気温度が非常に高温になるため、一般的にはシェル&チューブ式熱交換器等の堅牢な熱交換器を採用する必要がある。また、本方式の圧縮機は、一般的には圧縮効率を高めるために

低圧段と高圧段で二段圧縮する方式であり、低圧段、高圧段の両方から廃熱回収する場合、システムが複雑で高価になりやすい。一方、給油式空気圧縮機よりも回収可能な熱量が多く、高温水が取り出しやすいため、より大きな導入効果が期待できる。

5. 空気圧縮機から潜在的に回収可能なエネルギー

空気圧縮機の吐出し空気量 Q_s [m³/min] を供給する場合の、潜在的に回収可能なエネルギー q_r [kJ] は、吸込み空気のエンタルピー H_1 [kJ]、吐出し空気のエンタルピー H_2 [kJ]、及び、主モータ軸動力 L_s [kW] を用いて下記の式(1)で概算できる。^{1) 2)}

$$q_r = H_2 - H_1 + 60L_s \quad \dots \dots (1)$$

ここで、主モータ軸動力 L_s [kW] は、主モータ入力電力 W_m [kW] と、主モータ効率 η_m [%] (図3においては、主モータ及びその周波数変換器であるインバータを含む総合効率に読み替える) を用いて、下記の式(2)で表される。

$$L_s = W_m \cdot \eta_m \quad \dots \dots (2)$$

主モータ軸動力 L_s が、周囲空気を吸込み、圧縮、吐出するために必要なエネルギーとなるが、このエネルギーは、最終的に圧縮機ユニットの外に吐き出される圧縮空気のエネルギーを除いて、大量の熱として外部へ放出されているのが実情である。これが潜在的に回収可能なエネルギー q_r である。簡易的に吸込み空気を 20℃ の乾燥空気 (密度 1.20kg/m³, 比エンタルピー 20.10kJ) として仮定し、代表的なインバータ駆動の主モータ定格出力 75kW の空気圧縮機を用いて 0.7MPa (ゲージ圧力)、35℃ の乾燥圧縮空気 (比エンタルピー 35.17kJ) として吐出する場合の潜在的に回収可能なエネルギー q_r を式(1)、(2)を用いて計算する。主モータ及びインバータ入力電力 W_m を 100%、主モータ及びインバータの総合効率を 91% とした場合、 q_r は約 96% となる (図3)。このように、潜在的に回収可能なエネルギーの一部を温水や温風といった何らかの形で再利用することは、工場等の圧縮機ユーザーにとって、非常に大きな省エネ化の手段のひとつであると言える。

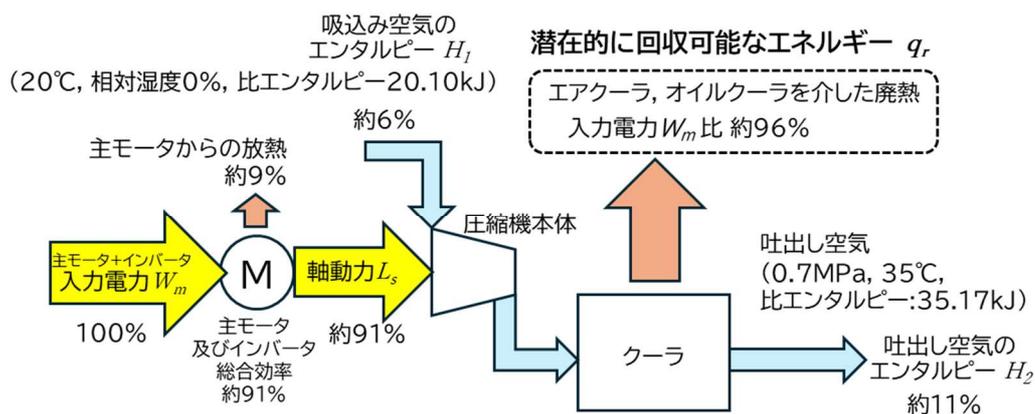


図3 圧縮機からの廃熱の内訳

6. 空気圧縮機の廃熱回収方法

6.1 温水としての廃熱回収

6.1.1 給油式圧縮機の廃熱回収方法

空気圧縮機からの廃熱回収方法として最も利用されている方法は、圧縮機ユニット内の高温流体と低温流体としての水とを熱交換させ、温水を取り出し、それを様々な用途に供給する方法である。給油式圧縮機の場合は、通常は圧縮過程に注入されて高温となった潤滑油と水とを熱交換器で熱交換させて温水を回収することが多い。一方、ドライ式オイルフリー圧縮機は、各圧縮段で断熱圧縮され

た高温の圧縮空気を高温流体とし、低温流体の水とを熱交換器で熱交換して温水を取り出すこととなる。図4に当社製給油式スクリー圧縮機の廃熱回収システム外観を示す。また、図5に当該製品の廃熱回収フローを示す。

標準仕様の給油式圧縮機の場合、圧縮機本体へ注入される潤滑油は油分離器内に貯留されている。圧縮機本体注入後の潤滑油は油分離器内で圧縮空気から1次分離されてタンク内に溜まるが、圧縮空気の圧力によってオイルクーラへ圧送、冷却された後、オイルフィルタでろ過され、再び圧縮機本体内の吸込み過程へ注入され、圧縮空気とともに再び油分離器内に流入する。潤滑油はこの工程を繰り返す、圧縮機ユニット内を循環している。ここで、高温潤滑油から熱回収する場合は、油分離器からオイルクーラへの配管を改造し、オイルクーラの上流で熱回収用熱交換器へ分岐し、こちらに油を流入させるようにする。熱回収用熱交換器には、熱回収用の水を低温流体として流し、ここで高温潤滑油と水とを熱交換させ、温水を取り出すことができる。熱回収用熱交換器で熱交換後の潤滑油は圧縮機標準のオイルクーラへと流入し、最終的に冷却されて再び圧縮機本体へと注入される。

高温流体としての潤滑油の温度は、熱回収用熱交換器入口において圧縮機本体出口の空気温度とほぼ同等である。周囲温度や圧力、圧縮機の負荷率などによっても異なるが、周囲温度20℃においては75℃前後となる。このとき、熱交換器の仕様にもよるが、低温流体の出口温度、すなわち、回収温水温度は最高70℃程度となる。廃熱回収ユニット内の熱交換器で1回だけ新しい水と潤滑油とを熱交換して水を加熱する一過給水加熱方式を採用する場合、比較的低温の水を流すことから潤滑油との



図4 給油式スクリー圧縮機の廃熱回収システム外観（株日立産機システム）

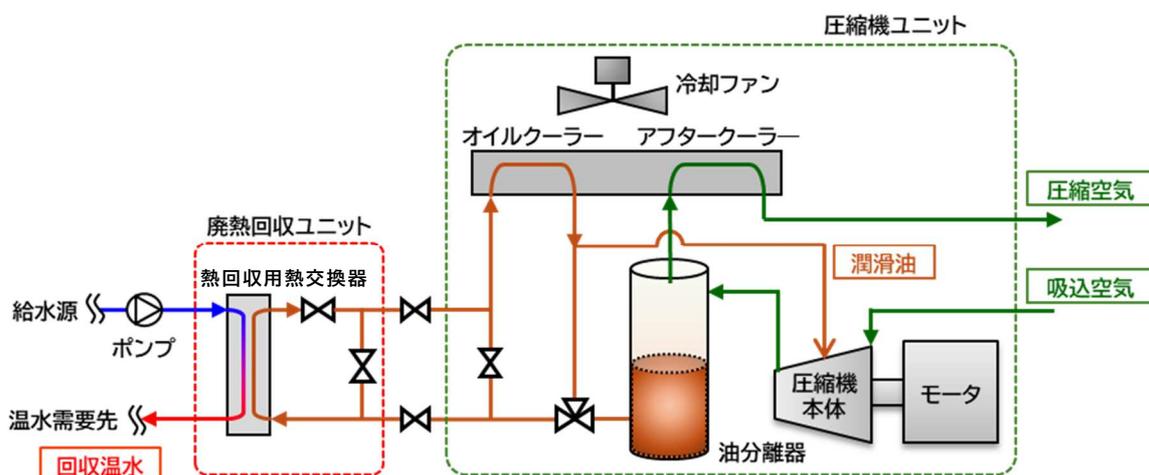


図5 給油式スクリー圧縮機からの廃熱回収フロー（株日立産機システム）

温度差が大きいため回収熱量は大きくなるが、入口水温、通水量によっては70℃に到達できない場合もある。一方、温水タンクと廃熱回収ユニットの熱交換器との間で水を循環させながら加熱していく循環加熱方式のほうが、水温を昇温させやすく、圧縮機の負荷変動などによる水温変動抑制や、温水需要が少ない場合でも温水タンクに熱量を貯留しやすい。さらに、水温を高い温度に保持しやすいといった面で有利である。ただし、温水の使用量が少なく、高温で水温が安定すると水と潤滑油との温度差が小さくなりほとんど熱回収しなくなることに留意すべきである。

6.1.2 ドライ式オイルフリー圧縮機の廃熱回収方法

図6に当社製の水冷式のドライ式オイルフリースクリーン圧縮機の外観を示す。また、図7に当該製品の温水回収システム対応時の廃熱回収フローの一例を示す。ドライ式オイルフリー圧縮機からの廃熱回収の場合、高温流体には低压段、高压段の各圧縮機本体から吐出された高温圧縮空気を用いる。標準仕様の水冷式圧縮機の場合、低压段圧縮機本体から吐出された圧縮空気は、インタークーラにおいて冷却水で冷やされ、発生した凝縮水を除去した後、高压段圧縮機本体へ流入し、ここで所定圧力まで空気が圧縮され、吐出される。吐出された高温圧縮空気はアフタークーラにて冷却されて、凝縮水を除去された後、圧縮空気需要先へと供給される。熱回収をするためには、標準のインタークーラ及びアフタークーラの上流側に熱回収用熱交換器をそれぞれ設置し、それらに熱回収用の水を流



図6 ドライ式オイルフリースクリーン圧縮機（温水回収システム対応可能）の外観
（株）日立産機システム

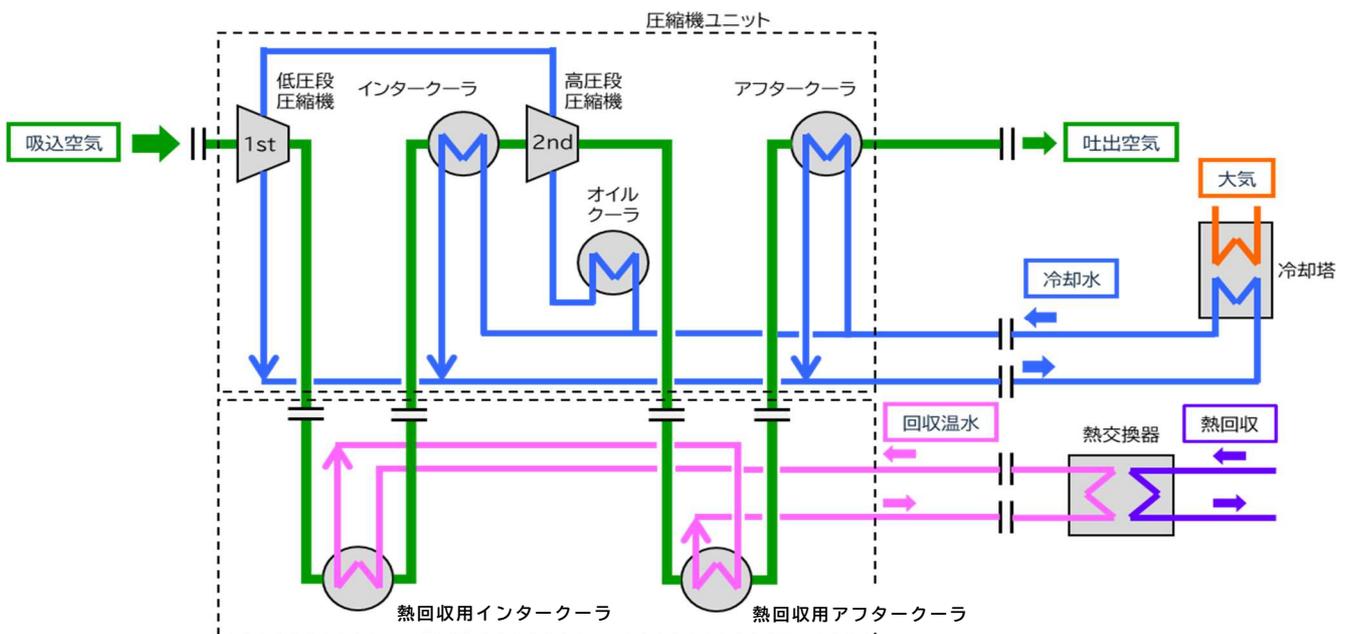


図7 ドライ式オイルフリー圧縮機の圧縮空気経路からの廃熱回収フロー（株）日立産機システム

して、高温圧縮空気と水とを熱交換し、温水として取り出すことができる。熱回収用インタークーラ及び熱回収用アフタークーラを通過した圧縮空気はまだ十分に冷却されていない場合があるため、圧縮機ユニット内の標準のインタークーラ及びアフタークーラで冷却されて、需要先へと供給される。

オイルフリー式空気圧縮機の廃熱回収の特徴としては、回収温水温度が最高 90℃と、給油式圧縮機の廃熱回収で得られる温水温度よりも高いことである。熱回収用インタークーラ及び熱回収用アフタークーラで流入する空気温度は、空気圧縮機のユニット出口圧力が 0.7MPa の場合、それぞれ約 170～190℃と高温になるため、給水量を絞ることで回収温水温度を 90℃まで上げられる。また、流入する高温圧縮空気の温度が水温よりも十分に高いことから、低温流体である水の温度が 85℃という比較的高温の水を通水し、これをさらに加熱して 90℃に昇温する、といった使い方ができる。

図 7 の廃熱回収フローは一例であり、これとは別に顧客の温水用途、要求温水量、要求水温に応じて最適な形態に設計することができる。図 8 に示す廃熱回収フローでは、圧縮機ユニット内のインタークーラ、アフタークーラを熱回収用の熱交換器として用い、その他に、低压段及び高压段圧縮機本体ケーシングの冷却水ジャケットやオイルクーラにも回収温水を通水することで、圧縮機ユニット内のより多くの熱源体から熱を回収することができるため、さらに回収熱量を増やすことも可能である。

少ない通水量で、より大きな温度差の温水を取り出す場合は、回収アフタークーラ通過後の圧縮空気温度は標準仕様よりも高くなる。そのままでは、圧縮空気の利用に支障が生じるため、圧縮機ユニットよりも下流側に後段アフタークーラを追加設置し、ここで圧縮空気を冷却水温度+10℃程度まで冷却して凝縮水を一次除去することにより、通常通り圧縮空気を提供できる。

ここで上げた以外にも廃熱回収フローは、温水用途や要求水温、水量、コストなどの観点から、様々な方法が考えられ、圧縮機メーカーとしては、顧客の要望に基づき、圧縮機の性能や信頼性の確保と投資回収効果を踏まえた上で、可能な範囲において最適な廃熱回収フローの選定や圧縮機の改造に対応することが求められる。

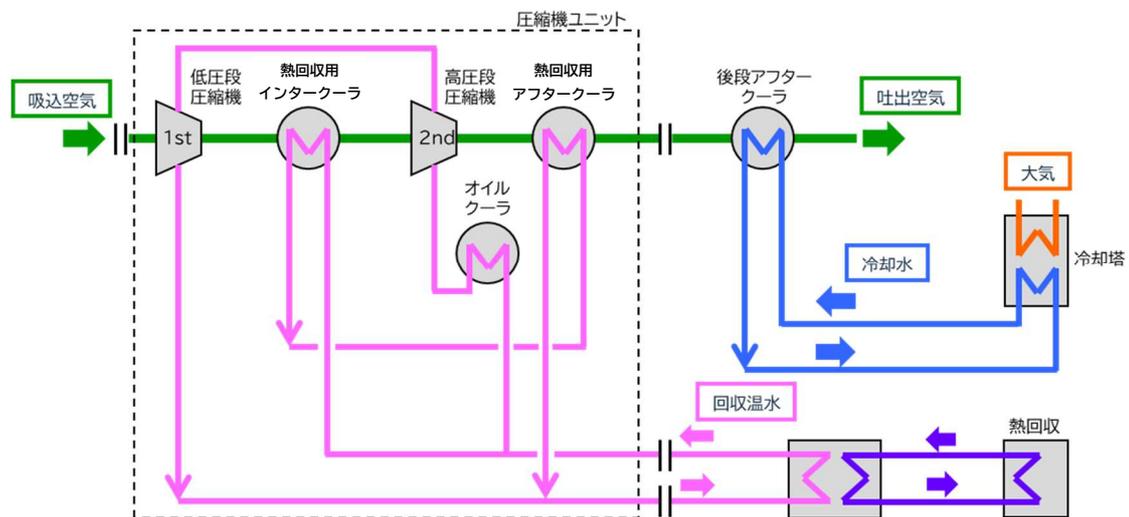


図 8 圧縮空気経路と圧縮機本体及びオイルクーラ含む廃熱回収フロー（株日立産機システム）

6.2 高温排気の利用方法

圧縮機の廃熱を温風として利用する場合、空冷式熱交換器と冷却ファンを圧縮機ユニット内に備え、冷却ファンによって生起された冷却風で高温の圧縮空気や潤滑油を冷却する空冷式の空気圧縮機が対象となる。前節では、給油式圧縮機では高温潤滑油の圧縮機が標準的に備えるオイルクーラの上流側に熱回収用熱交換器を備えていたが、本廃熱回収方法では、そういった熱交換器は設ける必要がなく、標準仕様の圧縮機と同様に、オイルクーラ及びアフタークーラで高温潤滑油や圧縮空気を冷却風で冷却した際に、冷却風はそれらから熱を受け取り、高温排気として圧縮機ユニット外に排出され

る。この高温排気を直接利用するものである。これは空冷式のオイルフリー圧縮機でも同様である。高温排気の利用方法としては、冬季における建屋内暖房の補助が挙げられる。

図9に、Hitachi Global Air Power US, LLC製の空冷圧縮機用廃熱回収システムEES®の外観図を示す。図中の上側にある小型の箱状の部分が当該システムであり、下側は空冷式の給油式スクリー圧縮機である。

従来、排出された高温排気はダクトを介して建屋の外に排出されるため、高温排気の活用に課題があった。高温排気を活用するためには、ダクト内の流路を切り替えて高温排気を需要先へ供給する必要がある。EES®は、設定温度に応じて、需要先へ高温排気を供給するように内部のダンパーを作動させて流路を切り替えることができる。設定温度に到達した場合には、再び内部ダンパーを動作させて、需要先への高温排気の供給を止めて、外気へ排出する動作を自動で行う。



図9 空冷圧縮機用廃熱回収システム EES® Air Compressor Heat Recovery System
(Hitachi Global Air Power US, LLC)

7. 廃熱利用の効果

空気圧縮機から回収した廃熱を利用することで、コスト削減と環境負荷の軽減の二つの効果がある。エネルギーコストの削減については、例えば、工場のユーティリティの一つであるボイラーの給水を空気圧縮機の廃熱で加熱することで、ガスや重油などの燃料消費量を削減する効果がある。また、空調設備へ給水を予熱することで空調機の負荷低減による電気代削減の効果があり、例えば、吸収式冷凍機用の熱源に廃熱回収で得た温水を供給する、といった用途が挙げられる。

製造ラインにおける温水用途としては、食品加工工場等で廃熱を利用して製造プロセスの一部を加熱したり、機械加工部品の洗浄用温水の加熱に利用したりすることで、製造上のエネルギーコストを削減可能である。

環境負荷の軽減とは、エネルギー効率の向上により、温室効果ガスの排出削減にも寄与することを意味する。前述のボイラーの消費燃料を削減することで、二酸化炭素等の温室効果ガス排出量を削減し、環境負荷を軽減することが可能である。表1に当社空気圧縮機の代表機種に対して、廃熱回収を導入した場合の効果試算結果を記す。ただし、本試算結果は温水として回収した熱量を全てガス代または電気代に有効に活用できた場合の理想的条件での得られる参考値である。より正確には、温水を利用する機器、例えば、ボイラー、ヒートポンプ、吸収式冷凍機、電気ヒーターなどに応じて、効果試算の方法が異なることに注意を要する。また、空気圧縮機からの廃熱回収の導入にあたっては、圧

縮空気需要先の操業度によって廃熱回収の効果が大きく異なる場合がある。近年は、空気圧縮機の省エネ化が進み、モータの回転速度をインバータなどの周波数変換器によって変化させて、空気需要に応じて吐出空気量を調整する可変速機の導入割合が増加してきている。低負荷率で長時間運転している圧縮機からは回収熱量が少なくなるため、空気圧縮機からの廃熱回収を検討する場合には、できるだけ高い負荷率で長時間運転する圧縮機に優先的に廃熱回収を適用するように留意すべきである。

表 1 廃熱回収導入効果試算結果（当社空気圧縮機の代表機種、負荷率 100%時）

機種	ユニット出口 空気圧力 MPa	入口水温 ℃	出口水温 ℃	通水量 L/min	回収熱量 MJ/h	電力換算 kW	コスト削減金額 (ガス代換算) 万円/年	コスト削減金額 (電気代換算) 万円/年	CO ₂ 排出削減量 (ガス基準) t-CO ₂ /年	CO ₂ 排出削減量 (他人から供給 された熱の使用) t-CO ₂ /年
75kW給油式スクリーウ圧縮機	0.7	30	40	71.8	179.7	49.9	228	569	63	61
75kW給油式スクリーウ圧縮機	0.7	60	65	59.0	73.8	20.5	94	234	26	25
450kWドライ式オイルフリー圧縮機	0.7	85	90	744.7	931.7	258.8	1182	2950	328	319

効果試算時の各種係数

水密度	998.2	kg/m ³	燃料単価(ガス13A) ^{※1}	82.4	¥/m ³ N
水比熱	4.178	kJ/(kg・K)	電力単価	19	¥/kWh
都市ガス13A低位発熱量	40600	kJ/m ³	CO ₂ 排出係数(ガス13A) ^{※2}	0.00229	t-CO ₂ /m ³ N
ボイラー効率	96	%	CO ₂ 排出係数(他人から供給された熱の使用) ^{※3}	0.057	t-CO ₂ /GJ
年間運転時間	6000	時間			

※1 東京ガス株式会社 2022年度業務用・工業用選択約款-3 その3 冬季(1~4月)及びその他期(5~12月)の基準単位料金の平均値

※2 東京ガス株式会社 都市ガス13A 標準状態(0℃, 1気圧)におけるCO₂排出係数

※3 環境省 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(H18年度実績以降の排出量算定用)

8. 今後の展望

今後、廃熱回収に必要な熱交換器の進歩によって、より効率的でコンパクトな熱交換器の開発、普及することで、廃熱の回収効率が向上することが期待される。日本国内市場においては、より小型な、設置面積の小さい製品が求められることから、圧縮機にこれを予め内蔵する方式の製品が今後増えてくると予想される。

また、廃熱を利用した分散型エネルギー供給システムの構築が進む可能性がある。例えば、空気圧縮機の廃熱を熱源として、ランキンサイクル原動機を駆動して発電を行う発電システムや、建屋の空調システムへの温水供給や、圧縮機の高温排気の利用拡大が想定される。

さらに、空気圧縮機などの産業機器のIoT化が進んでいることから、IoT技術を活用して、廃熱回収システムにおける廃熱回収の最適化やリアルタイムでのエネルギー管理が可能となると予想される。例えば、センサーやデータ解析を活用して、廃熱の発生状況をリアルタイムで監視し、最適な回収方法を自動的に選択する、といったシステムが期待される。

空気圧縮機の廃熱利用技術は、エネルギー効率の向上と環境負荷の軽減を実現するための重要な技術である。今後も技術の進展と共に、その利用範囲が広がり、持続可能な社会の構築に寄与することが期待される。エネルギー資源の効率的な活用と持続可能な社会の実現に向けて、廃熱利用技術の研究開発がますます重要となるであろう。

参考文献

- 1) 松隈正樹：省エネルギー技術実践シリーズ 空気圧縮機，9，155-156，財団法人 省エネルギーセンター（2009）
- 2) 一般社団法人 日本機械学会：機械実用便覧，701，丸善出版（2022）