

工場におけるコンプレッサー設備の省エネ方法 Energy saving way of compressor equipment in a factory

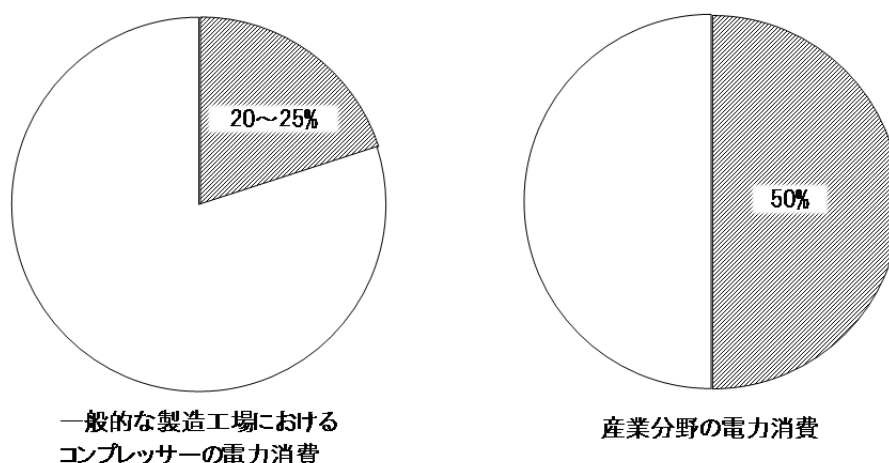
報告者 藤田祐章 (株) I H I 回転機械
HIROAKI FUJITA IHI Compressor and Machinery Co.,Ltd.

キーワード：適正化・下げる・遮断・台数制御・メンテナンス

Key Word : Rationalization・reduce (lowered.)・Shut off・Group control・Maintenance

1. はじめに

産業分野では、利便性の高い動力源として圧縮空気が幅広く使用されています。一般的な製造工場では、電力消費の約 20 ~ 25 % がコンプレッサーの消費電力と言われており、日本の電力使用の約 50 % が産業分野である為、コンプレッサーは日本の電力消費の約 10 % を占めていることとなります。



【図1】コンプレッサーの電力消費割合

エネルギーの使用の合理化等に関する法律（省エネ法）では、中長期的にみて年平均1%以上の「エネルギー消費原単位」または「電気需要平準化評価原単位」の低減目標を事業者に対して定めています。【経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ参照】

年平均1%という目標は、簡単に達成できそうな小さな数値に見えますが、省エネは事業者の経営計画に連動させる必要があり、刻々と変化する生産状況に対応して目標を達成し続けることは、難しい問題です。

したがって【図1】の電力消費割合を見てもコンプレッサー設備の省エネ化が重要な課題であり、より一層の注力が求められています。

本稿では、コンプレッサー設備において「何を改善すれば実際に省エネ効果が生まれるのか？」という漠然とした課題を解決するためのポイントをご紹介します。また提案および省エネ効果事例も幾つかご紹介いたします。

2. 高効率コンプレッサーでの運用および機種構成の適正化

高効率コンプレッサーを導入して運用すれば、省エネになることは当然のことですが、その効果を最大限に引き出すためには、使用空気量、必要圧力、工場側の負荷変動などを知り、適正機種でコンプレッサー設備を構成する必要があります。高効率コンプレッサーを導入したものの運用面で活躍できなければ、省エネ効果は半減してしまいます。

(1) コンプレッサーには様々な制御方法があります。主な制御方法の概要を【図2】に示します。

① インバータ回転数制御

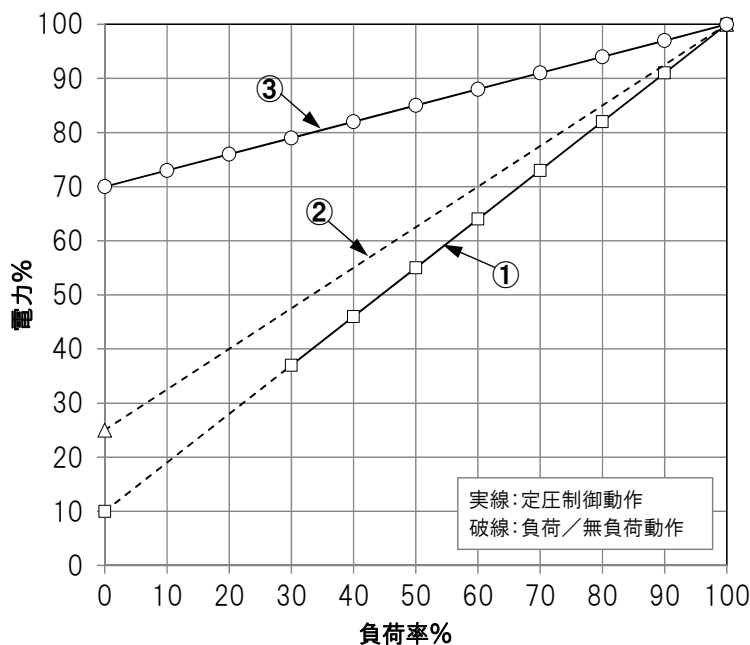
必要空気量に応じて回転数を変化させる制御です。幅広い範囲で一定圧力制御が可能のため「容量調整用」として最適です。回転数を下げた状態で負荷率0%に移行する為、無負荷待機電力の消費も抑えられます。

② 負荷／無負荷制御

負荷率100%での継続運転が最も効率良い為、主に「ベースロード用」として運用されます。容量調整の際には、負荷率0%と100%を交互に繰り返します。

③ 吸入絞り制御

吸入絞り弁を開・閉することで、負荷率0～100%を無段階で一定圧力制御します。ただし【図2】に示す通り負荷率が下がっても電力は殆ど下がりにません。



【図2】主なコンプレッサー制御による電力消費の違い

(2) 複数台のコンプレッサーを運用する場合、それぞれの吐出空気量のバランスが重要です。

【図3】に示すように、「容量調整用」 \geq 「ベースロード用」となる構成が最適です。逆に「ベースロード用」 $>$ 「容量調整用」になると、コンプレッサーの増減台がうまくコントロールできずに余分なエネルギー消費が発生する場合があります。

補足)

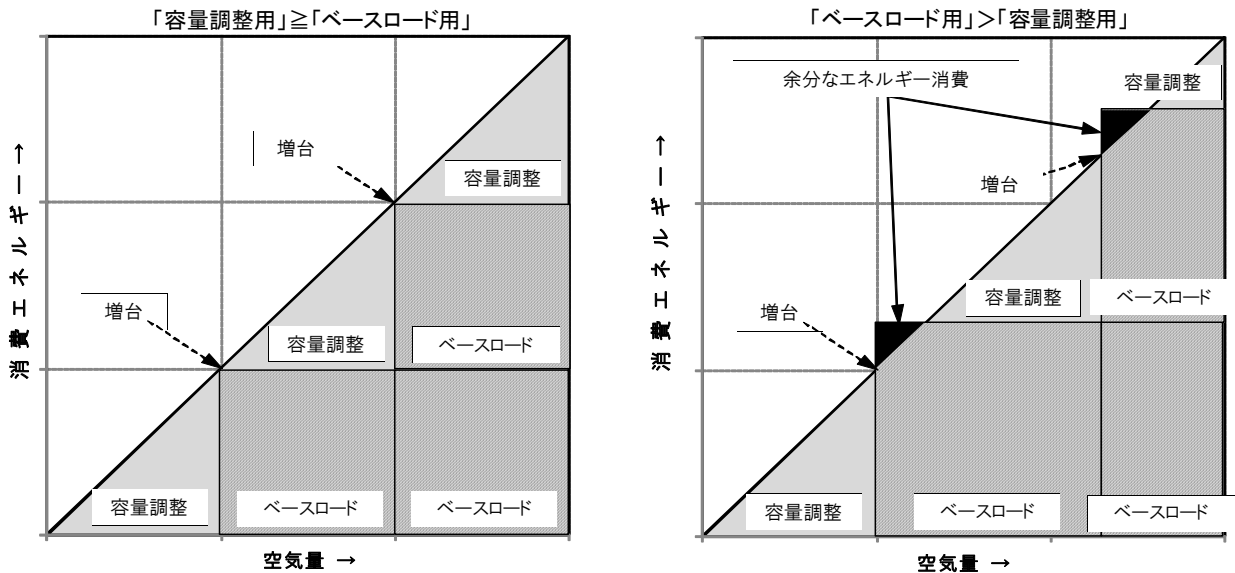
「容量調整用」：工場の使用空気量変動に応じて、コンプレッサー吐出空気量を調整。

「ベースロード用」：常に負荷率 100% で運転。

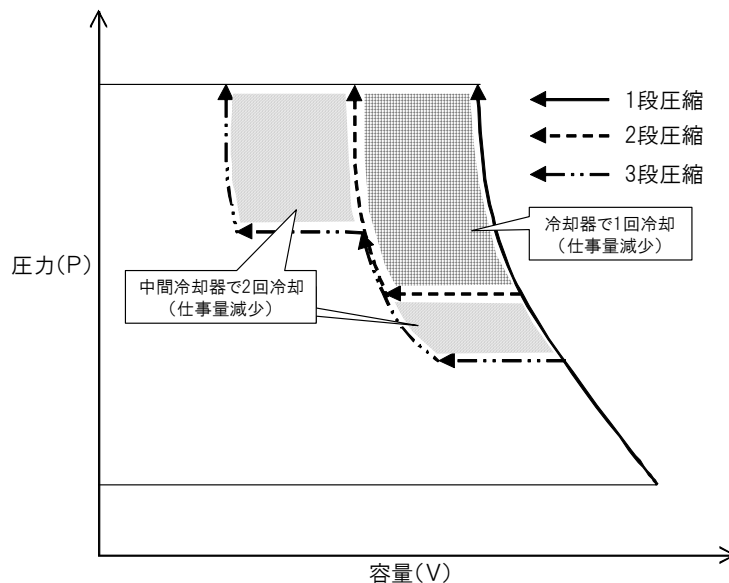
(3) 0.7MPaG クラスの標準的なコンプレッサーは、1段～3段圧縮が使用されています。

【図4】に示す通り、3段圧縮の仕事量（白い部分の面積）が最小で高効率となります。

コンプレッサーが空気を圧縮する時、理想的なのは等温圧縮ですが、現実的には不可能です。実際にはほぼ断熱に近い工程で圧縮されます。そこで、理想的な等温圧縮に近づける為、多段圧縮を採用して、各段に中間冷却器を設けています。



【図3】複数台コンプレッサー運用イメージ



【図4】圧縮工程図(仕事量)

3. コンプレッサー吐出圧力を下げる

コンプレッサーの吐出圧力を下げることが、省エネに最も有効なことは広く知られています。その効果と何故省エネに有効なのかを説明します。

(1) コンプレッサーの電力消費を低減

以下に容積式コンプレッサー理論軸動力（モーター出力）の【式1】を示します。

$$Lad = \left(\frac{i \times \kappa}{\kappa - 1} \right) \times \left(\frac{Ps \times Qs}{0.06} \right) \times \underbrace{\left[\left(\frac{Pd}{Ps} \right)^{\frac{\kappa-1}{i \times \kappa}} - 1 \right]}_{※} \dots \text{【式1】}$$

Lad : 断熱理論動力 kW
 i : 圧縮段数
 κ : 比熱比
 Ps : 吸入圧力 MPa abs
 Pd : 吐出圧力 MPa abs
 Qs : 吸入状態容量 m3/min

吸入圧力と吐出圧力の圧力比（※印）の関係式であることが分かります。仮に吐出圧力を 0.69MPaG → 0.59MPaG と 0.1 MPa 下げた時、理論軸動力の低減率を概算してみます。

（2段圧縮、比熱比 1.4、吸入圧力 0.1013MPaABS とします）

$$\frac{\left(\frac{P_{0.59}}{Ps} \right)^{\frac{\kappa-1}{i \times \kappa}} - 1}{\left(\frac{P_{0.69}}{Ps} \right)^{\frac{\kappa-1}{i \times \kappa}} - 1} = \frac{\left(\frac{0.6913}{0.1013} \right)^{\frac{1.4-1}{2.8}} - 1}{\left(\frac{0.7913}{0.1013} \right)^{\frac{1.4-1}{2.8}} - 1} = \frac{0.316}{0.341} = 0.93$$

吐出圧力を 0.1MPaG 下げると
 約 7% の動力低減になります。
 （実際は諸効率やメカロスの影響で効果は若干小さくなります）

(2) エア漏れ量の低減

コンプレッサーの吐出圧力を下げると、配管等からのエア漏れ量が少なくなります。漏れ量の理論式は幾つか存在しますが、代表的な計算式を【式2】に示します。この式から配管内の圧力が下がると、漏れ量が少なくなることが分かります。また見方を変えると、工場内における圧縮空気使用先（エアガン、ブローなど）で消費される圧縮空気量も少なくなります。

$$Q \doteq 120 \times S \times (P1 + 0.1) \times \left(\frac{293}{273 + t} \right)^{0.5} \dots \text{【式2】}$$

Q : 空気漏れ量 dm3/min(ANR)
 P1 : 配管・機器内の空気圧力 MPaG
 t : 空気温度 °C
 S : 漏れ開口部の有効面積 mm2
 直径dmmの円孔の場合は、S = (π/4) × d² × 0.9
 （流量係数）で概略計算する。

4. コンプレッサー吸込み温度を下げる

コンプレッサーが吸い込む空気の温度を下げると、コンプレッサー原単位（Nm³/kWh）が改善して省エネに有効です。コンプレッサーの機種により効果は異なりますが、概要を【図5】に示します。

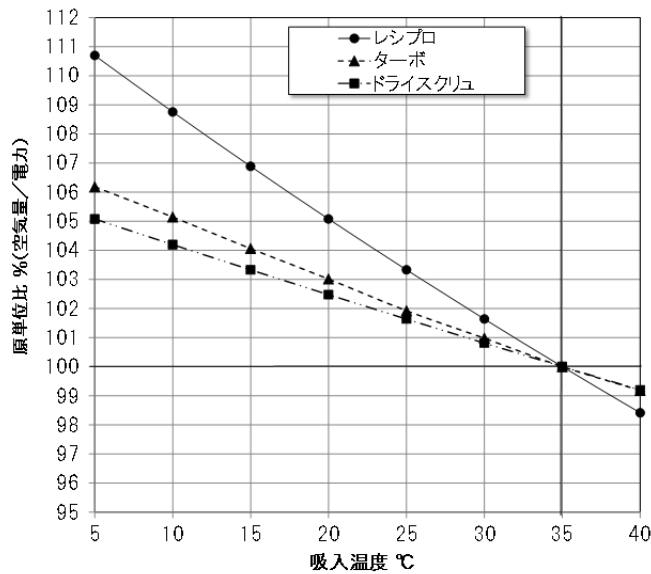
吐出圧力 0.7MPaG クラスで多段圧縮機を想定したのですが、縦軸（原単位比）の数値が大きい程省エネになります。

吸込み温度 35℃（100%）を 25℃に下げた場合、レシプロコンプレッサーは約 3.4%、ターボコンプレッサーは約 2%、ドライ（オイルフリー）スクリュコンプレッサーは約 1.7% の原単位改善になります。

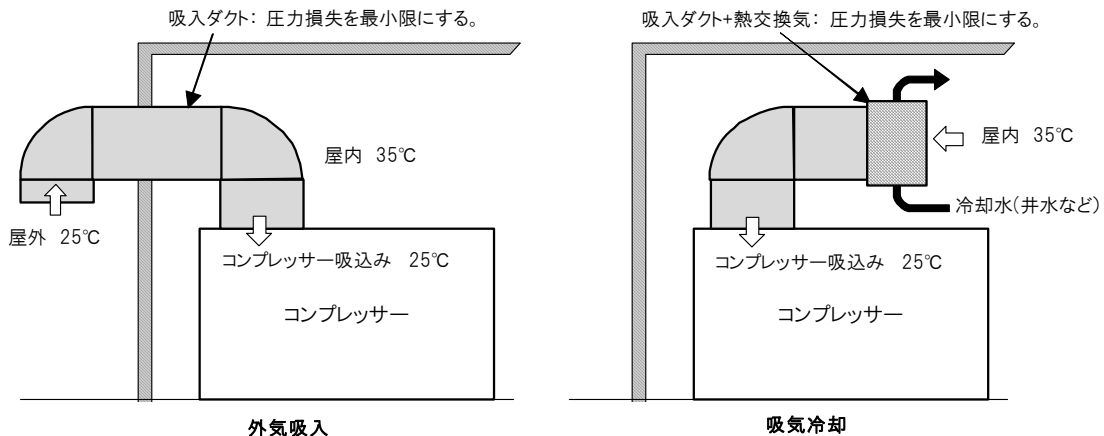
【図6】は、吸込み温度を下げるための例を示したものです。ただし注意点が有ります。

- （1）吸入圧力損失を抑える（小さくする）
- （2）吸気冷却の熱交換器に使用する冷却水にチラー水を使用しない。

コンプレッサーは吸入圧力損失が大きくなると性能が低下します。吸込み温度を下げることで得られた省エネ効果を掻き消してしまいます。また熱交換器にチラー水を利用した場合、チラー装置の電力を加味するとエネルギー収支的に成立しません。



【図5】コンプレッサーの吸込み温度特性



【図6】外気吸入、吸気冷却のイメージ

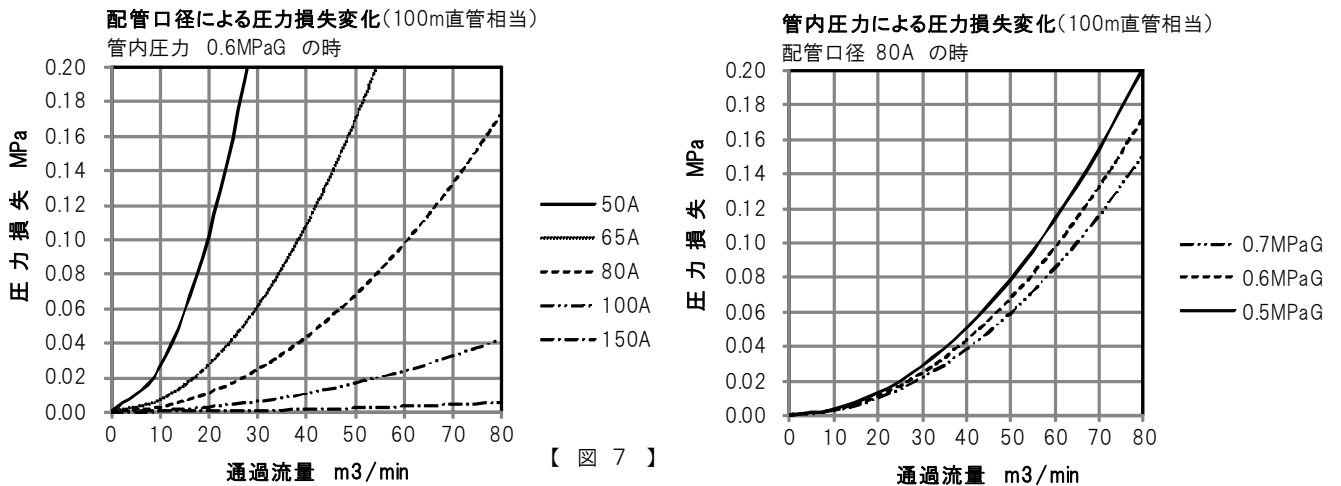
5. 圧縮空気供給配管の改善

コンプレッサーが吐出した圧縮空気を工場の使用先まで効率よく供給するには、配管計画が重要なポイントになります。

(1) 通過流量に対する適正配管口径の選定

現在のコンプレッサー設備は省エネ効果が高いことから低圧化が進んでいます。ここで注意すべきは、既存配管のまま低圧化（供給圧力を下げる）を実施した場合、圧縮空気のボリュームが大きくなり、管内流速および圧力損失を増加させる恐れがあります。

一般的に供給配管の圧力損失は、0.02MPa以下に抑えることを推奨します。参考までに通過流量に対する推定圧力損失を【図7】に示します。



(2) 圧力損失発生要因の排除・見直し

①バルブ類

流量調整の必要が無いバルブについては、ゲート弁、ボール弁（フルボア）を採用する。

また、工場を見渡すと、バルブ開度が中途半端な状態で運用されているところが多く見受けられます。特に支障が無ければバルブは全開とします。

②クリーン化機器類（フィルターなど）

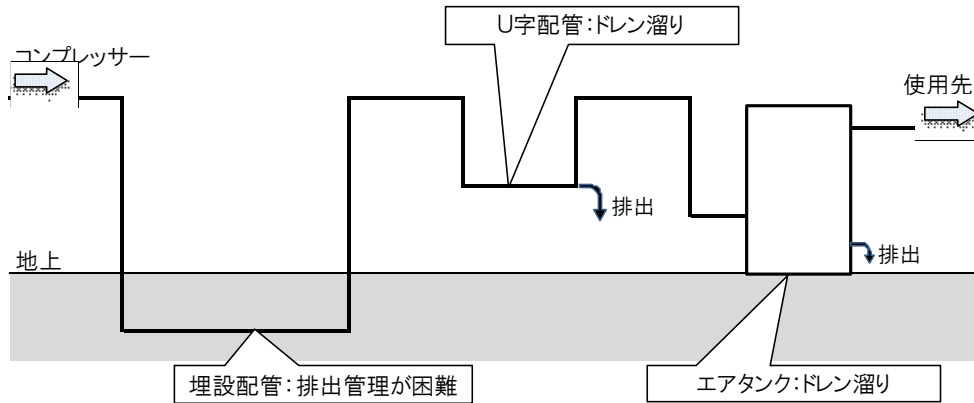
フィルター類は使用年数に応じて必ず圧力損失が増加します。入出口の差圧計での圧力損失管理が必要です。特にメッシュの細かいミストフィルターについては要注意であり、既存のフィルター類に差圧計が無い場合は設置を推奨しています。

③配管・エアタンク類のドレン溜り

コンプレッサーから吐出された圧縮空気は、端末の空圧機器に至る配管内で自然冷却されると、含みきれなくなった水分が水滴となり配管中またはエアタンク類に溜まります（以後ドレン）。

特に配管に溜まったドレンは、圧力損失を増加させる原因となりますので、可能な限りドレン溜りの発生しない配管ルートを計画します。ルートの都合でドレン溜りが発生する配管が必要な場合は、ドレン排出管理を推奨しています。【図8】

カルバート内配管や埋設配管など、排出管理が困難な場合は、上流に除湿機の設置を行い、露点温度管理を行うことで、ドレン溜りを回避できます。



【図8】ドレン溜りと排出イメージ

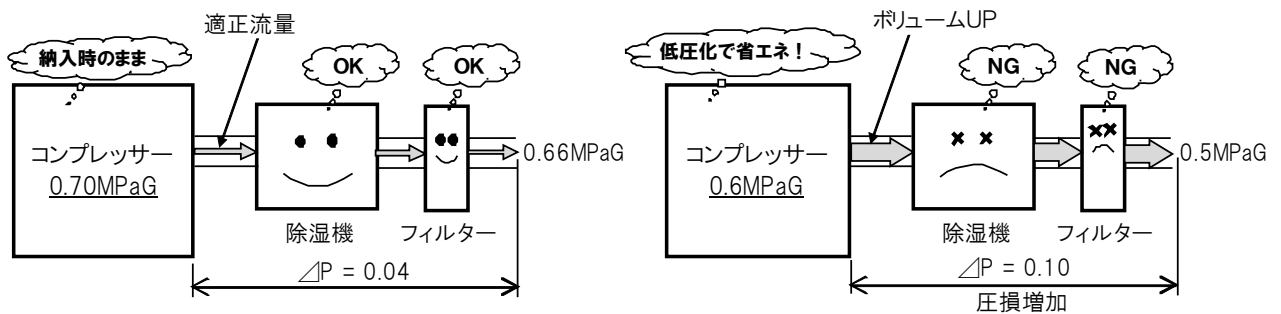
6. 付帯設備の見直し・改善

コンプレッサーの付帯設備には、主に除湿機、フィルター類、冷却水設備、エアタンク、換気設備等があります。既存コンプレッサーの更新や改修、低圧化を進める場合、これら付帯設備の能力確認を行い、省エネ推進の妨げとならないように注意が必要です。以下にポイントを示します。

(1) 除湿機、フィルター類

① 省エネの一環で、既存コンプレッサーの吐出圧力を下げた時【図9】

コンプレッサーの吐出圧力が下がると、処理が必要な圧縮空気のボリュームが大きくなります。したがって既存の除湿機やフィルター類では適正な処理できなくなる場合が有ります。除湿機で露点温度が確保できない他、圧力損失が増加するなどの問題が発生してきます。



【図9】低圧化の注意点

② 低圧仕様のコンプレッサーに更新する場合

例えば、納入当初の既存コンプレッサー必要圧力が 0.7MPaG だったが、現在は 0.5MPaG でも十分賄える為、低圧 0.5MPaG 仕様へ更新して省エネを図ることを考えます。

同じ電動機出力ベースで“仕様圧力 0.7MPaG”と“仕様圧力 0.5MPaG”のコンプレッサーを比較した場合、一般的に仕様圧力 0.5MPaG の方が吐出空気量が大きくなります。したがって既存の除湿機やフィルター類は能力不足になります。

この場合、除湿機やフィルター類を一緒に更新するのか、もしくは同出力ベースでの更新ではなく、同吐出空気量ベースでの更新（更新機は、既存機より電動機出力が小さくなります）するのか判断が必要です。

(2) 冷却水設備

水冷式コンプレッサーにはクーリングタワーや循環ポンプ等の冷却水設備が付帯します。コンプレッサーは一般的に冷却水温度を下げた方が原単位が良くなりますので、設備の更新や改修を行う場合は、冷却水設備能力の確認と見直しを推奨します。機種や出力によって入口／出口温度差が異なります。

(3) エアタンク

工場の製造量の増加によるコンプレッサー設備の増強、生産環境変化による工場側負荷変動の変化が発生した場合は、エアタンク容量の見直しが必要になる場合が有ります。圧力変動を抑えることが省エネに繋がりますので、計画時には考慮すべきポイントの一つです。

(4) 換気設備

前述4．項で記載した通り、コンプレッサーは吸込み温度を下げた方が省エネに有効です。

機種によって異なりますが、室内温度が 35℃以上になる環境ではコンプレッサー性能（原単位）は悪化すると考えてください。

現状でも夏場の室内が高温になる場合、新規でコンプレッサー設備を建設する場合など、室内機器メーカーに換気設備の検討を依頼して、適正な運用環境になるように計画ください。

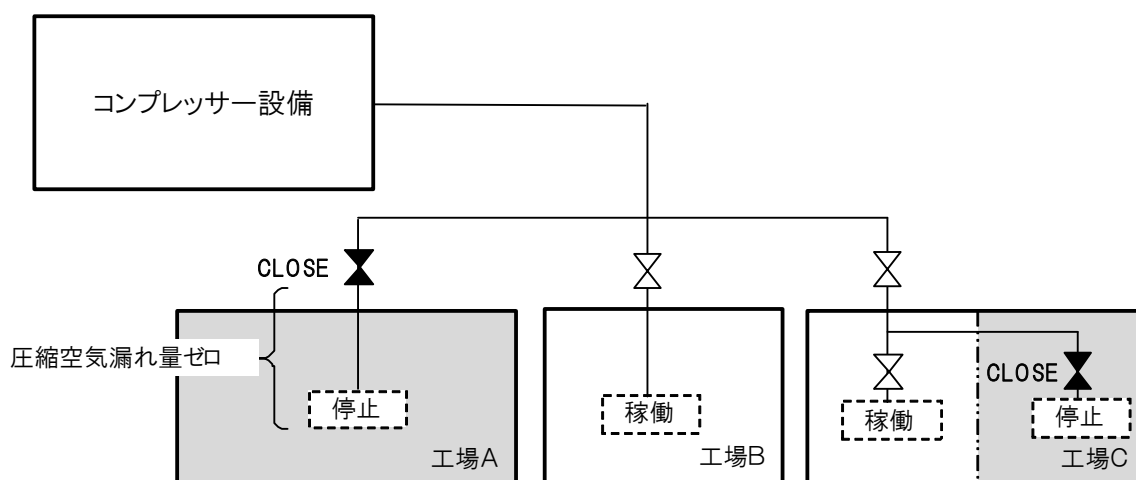
特に空冷式を運用するユーザーは、発熱量が大きいため注意が必要です。

御参考までに、「空冷式」の発熱量はモーター定格出力の 90～100%、「水冷式」の発熱量はモーター定格出力の約10%です。詳しくは各コンプレッサーメーカーにお問い合わせ下さい。

7. 圧縮空気を必要としない工場への供給遮断

休日など稼働していない工場（製造ライン）に対して圧縮空気の自動弁などで供給を遮断します。圧縮空気の漏れ量低減が期待でき、コンプレッサーの負荷率が下がることで省エネになります。

本項を目的として、製造ラインの移設や工程見直しも省エネ推進の一つの手法です。【図10】



【図10】未稼働工場(ライン)への供給遮断イメージ

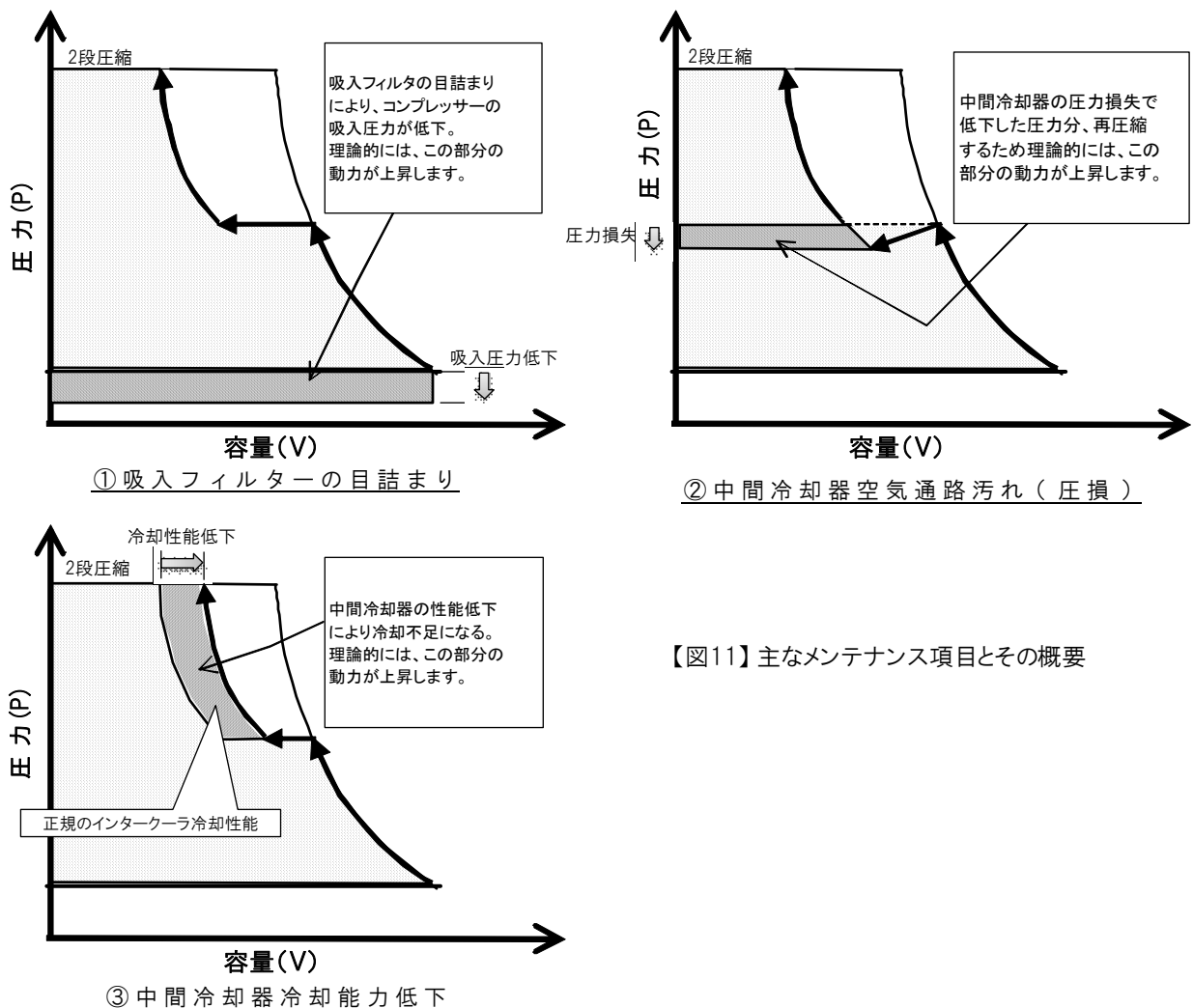
8. 台数制御装置の導入

コンプレッサー設備は、工場の必要空気量に対して必要最小限の台数を運転することが最も有効な省エネ対策になります。無駄な無負荷動力（吐出空気量ゼロなのにモーター定格の約 10 ～ 40% の動力を消費している状態）を削減できるなど、多くの利点があります。台数制御装置導入の主なメリットを幾つか紹介します。

- (1) コンプレッサーの運転台数を必要最小限に自動制御します。また負荷変動に対する追従性向上により最適運転台数での運用になりますので安定した圧縮空気を供給します。（追従遅れによる無駄なコンプレッサーの起動が抑制できます）
- (2) 自動で運転管理を行う為、省人化が図れます。
- (3) 運転状況を統括的かつ継続的に監視するため、そのデータが省エネ推進に役立ちます。
- (4) 複数台のコンプレッサーをバランスよく運転し、運転時間の平準化が可能です。運転時間集中などによる機械トラブルの回避になります。

9. コンプレッサーメンテナンスによる性能維持

コンプレッサーの定期的なメンテナンスは、トラブルを未然に防ぎ、機器寿命を延ばすだけでなく、性能維持も目的としています。性能劣化による増エネルギーを逆に捉えめると、性能維持は一つの省エネ対策になります。主な管理項目とその概要を【図11】に示します。

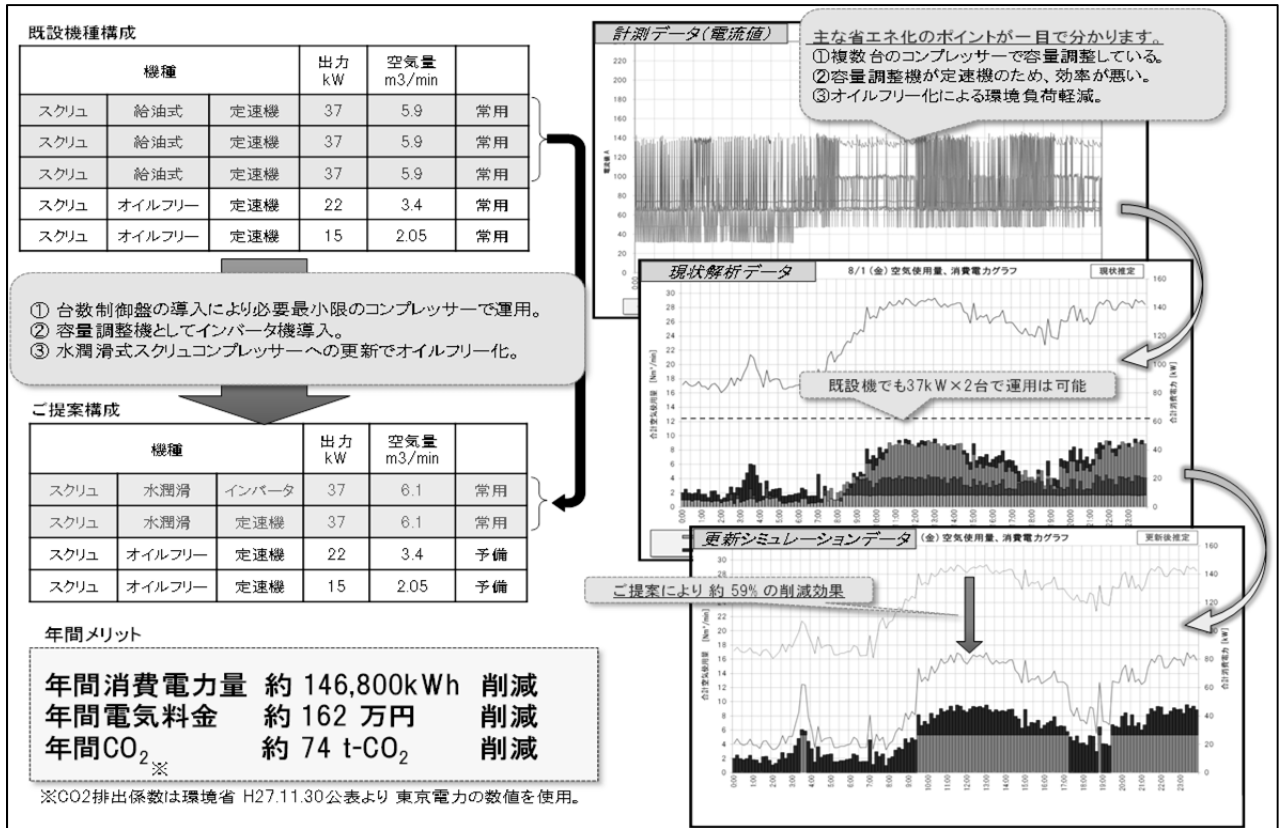


【図11】主なメンテナンス項目とその概要

10. 省エネ提案事例および省エネ効果事例

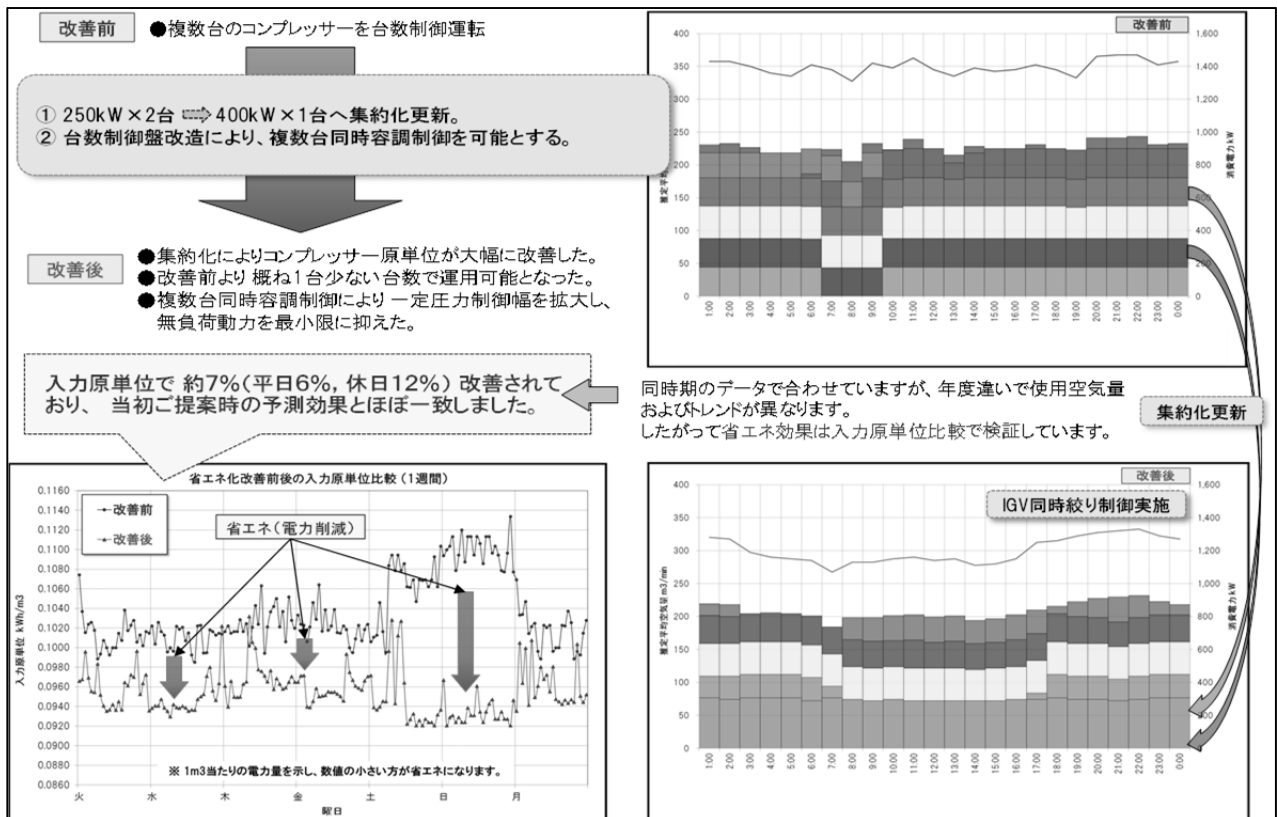
(1) 省エネ提案事例

インバータ回転数制御および台数制御装置の導入、オイルフリー化。



(2) 省エネ効果検証事例

コンプレッサーの集約化、複数台コンプレッサー台数制御運転。



以上