

製鉄所向けターボ機械の最近の技術動向

Recent Technology Trend in Turbomachinery for Steel Industry

(株) 神戸製鋼所 機械事業部門 田中宏明
圧縮機事業部 回転機技術部 Hiroaki Tanaka
ターボ室 室長

(株) 日立プラントテクノロジー 坂本正良
社会・産業システム事業本部 Masayoshi Sakamoto
ポンプ・送風機技術本部 主管技師

1 はじめに

鉄鋼製造プロセスは大別すると、i) 天然資源である鉄鉱石から鉄鉄をつくる「製鉄」、ii) 溶鉄等から鋼を製造する「製鋼」、iii) 鋼片から最終製品をつくる「圧延」のプロセスから成る。製鉄プロセスにおいて、粉鉱石から高炉原料となる焼結鉱を製造する焼結設備には多くのファンやブロワが使用されている。また各製造プロセスに用いられる酸素、窒素およびアルゴン等を製造する空気分離装置においてはガスの昇圧、循環および圧送用に遠心型ターボ圧縮機が多く用いられている。これらのターボ機械は装置の大型化に伴い、大型機が採用され、かつ高効率化や厳しい使用条件が課せられている。本稿では鉄鋼プロセスの付帯設備であるこれらターボ機械の最近の技術動向について解説する。

2 焼結設備とターボ機械

2.1 焼結設備におけるターボ機械

焼結設備の基本は「焼結機」と「焼結鉱クーラー（冷却機）」から構成される^{1,2)} (図1参照)。この設備の主要ターボ機械としては、i) 焼結機からの排気ガスを排気筒へ排出するための主排ブロワ①、ii) 赤熱焼結鉱をクーラーで冷やすためのクーラーファン②がある。この他にも、iii) 環境改善のための排ガス脱硫装置用脱硫ファン③、iv) 焼結設備から排出される顕熱回収のための各種排熱回収ファン④～⑥が設置される例が多い。焼結機面積が概略400m²を超えるような大規模焼結設備では、主排ブロワ用電動機が10000～14000kw/台に達し、クーラーファン、脱硫ファンおよび排熱回収各種ファンを含めると、これらの動力の総合計は30000～50000kwとなる大型設備も稼動している。ここでは主排ブロワ、排熱回収各種ファンについて述べる。

2.2 焼結設備用ターボ機械の特徴

2.2.1 主排ブロワ (図1、①)

本ブロワは吸込温度が120～150℃（耐熱～250℃）で0.1～0.3gr/Nm³の焼結鉱粉ダストを含む排ガスを取り扱うが、単機最大風量は30000m³/min程度、最大吸込風圧は－19.6kPa（ヘッド～max約2600m）程度で、摩耗を考慮して遠心形が採用されている。ブロワインペラの最大径は4.5～5.0mにも及び、インペラ先端周速は最大230m/sとなるものも出現している。

2.2.2 排熱回収各種ファン (図1、④～⑥)

排熱回収ファンの代表例としては排鉱部排熱回収用 (A)、クーラー排熱回収用 (B)、(C) がある。いずれのファンもその上流にプレダスタ（集塵機）が設置されることが多いが、それでも特に排鉱部排熱回収用④、クーラー排熱回収用ファン⑤ではガス中の焼結鉱ダスト量が0.5～1.5gr/Nm³と主排ブロワに比べて格段に多く、摩耗対策が必須課題である。また、これらファンには回転数制御方式を採用する場合があります、インバータによる電動機の可変速運転が実施されることもある。

2.3 主排ブロワ、排熱回収各種ファンの動向^{3,4)}

日本国内の焼結設備、高炉設備とも世界の最先端に行く仕様のものが多い。このため焼結機、およびクーラーに必要な処理ガス量、昇圧力は主排ブロワ、排熱回収各種ファンとしての容量限界に近く、今後大幅に容量がアップする傾向は見られない。このような背景下、操業条件の変化に伴い主排ブロワ、排熱回収各種ファンのロータ更新が行われることが多いが、この際に新しい技術の導入が行われている。以下にその概要を述べる。

2.3.1 高強度鋼材の採用

主排ブロワでは、インペラ周速が230m/sに達するものも出

現しており、これに対する材料として従来の590MPa級高張力鋼材から780MPa級材とした溶接構造機が実現している。焼結排ガス中にはmax500ppm程度のSOxが含まれるため、i) 低温腐食、ii) 硫化物応力腐食割れ (SSCC ; Sulfide Stress Corrosion Cracking) に対する健全性の検証が必要である。

- i) 低温腐食については通常の運転環境下では590MPa級高張力鋼においても十分な実績を有することから問題とはならない。
- ii) SSCCは、運転時の最大応力レベルを十分降伏点以下とする強度設計とし、また溶接部の硬度については耐H₂S対策を規定したNACE/MR0175⁵⁾によるMild Sour環境条件を満足させている。実際の主排ガスの「SSCC」環境に対し、より苛酷な条件を設定したSSCC試験を実施した材料を採用することで十分な配慮を行っている。780MPa級高張力鋼を採用したブロワロータの外観写真を図2に示す。

2.3.2 主排ロータの起動時過渡振動の検討

主排ブロワのインペラハブは主軸（中空軸）と締代で結合される。起動時には高温ガスによりインペラハブ側が主軸側よりも先に熱影響を受ける。このため、昇温の途中で締代の減少が起こりうる。またインペラハブは遠心力による弾性変形により締結部の締代がさらに減ることが想定される。このような昇温途中の締結部の緩みにより振動が起きることを避けるためにFEMによる過渡伝熱解析、およびインペラハブ／主軸の運転時の弾性変形解析を事前に実施し、試運転時に問題のないことを検証している。(図3参照；それぞれ解析ロータ模式図(図3.1)、過渡伝熱解析モデル(図3.2)、起動過渡時の熱伸び計算結果(図3.3)、起動過渡時の嵌合部の締代変化の解析結果(図3.4)、ガス温度変化と主排ブロワ軸受部の振動測定結果(図3.5)を示す。)

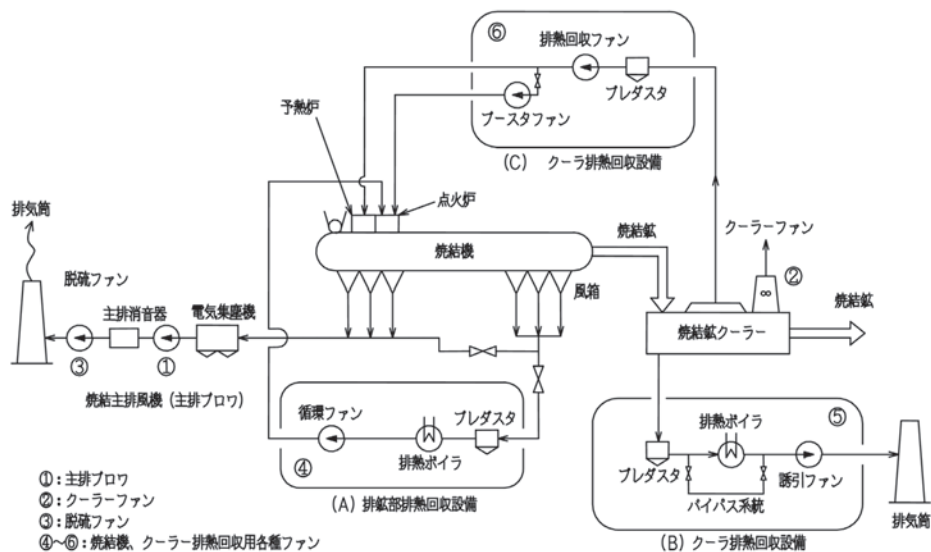


図1 焼結機まわり設備系統図

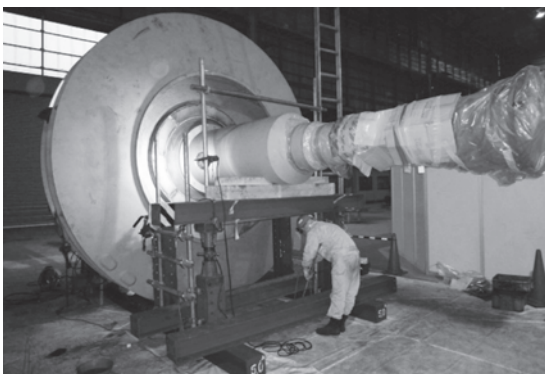


図2 主排ブロワロータ外観

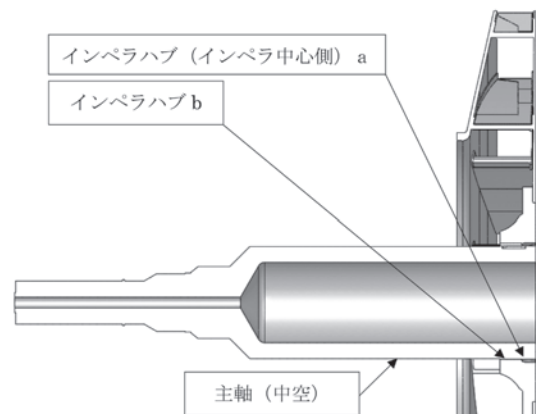


図3.1 解析ロータ模式図

2.3.3 吸込風量減少時の不安定現象

主排ブロワは操業上の都合で減量運転をすることがあるが、このような場合に低周波騒音が発生する事例が生じることがある。従来はこのような低周波音はサージが発生しこれによるものと言われていたが、近年の研究によると、旋回失速が発生し⁶⁾、この結果低周波騒音が生じたと考えられている。このような小風量時のターボ機械の不安定現象は図4のように説明されている。

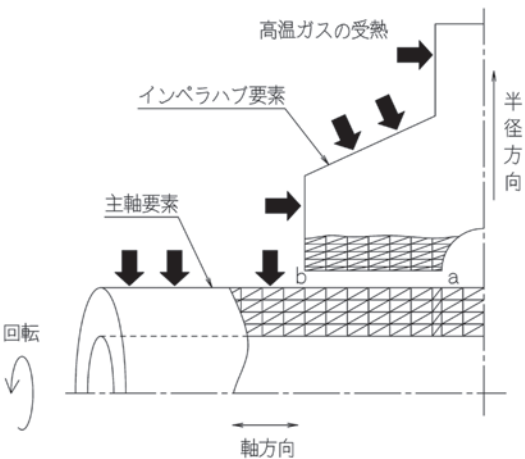


図3.2 過渡伝熱解析モデル

旋回失速の周波数 f_{rs} は実測によると、

$$f_{rs} \doteq (0.72 \sim 0.74) \times i \times f \text{ (Hz)}$$

i = 失速セル数、 f = 回転周波数 (Hz)

で、主排ブロワの事例では $i=1$ が多く以下となる。

$$f_{rs} \doteq (0.72 \sim 0.74) \times f = \frac{V_p}{U_t} \times f \text{ (Hz)}$$

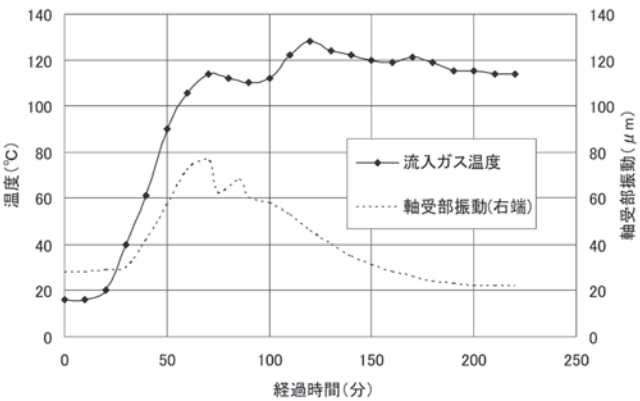


図3.5 ガス温度変化と主排ブロワ軸受部の振動測定結果

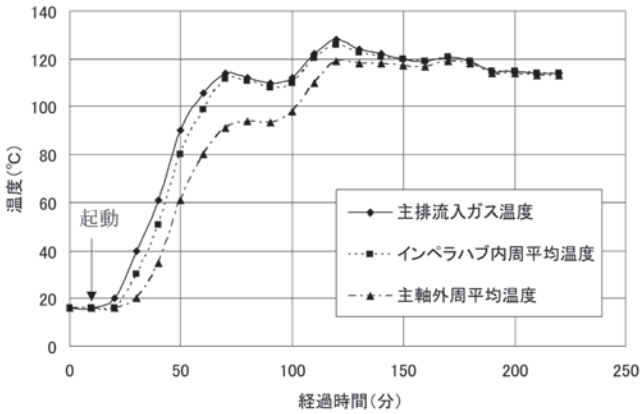


図3.3 起動過渡時の熱伸び計算結果

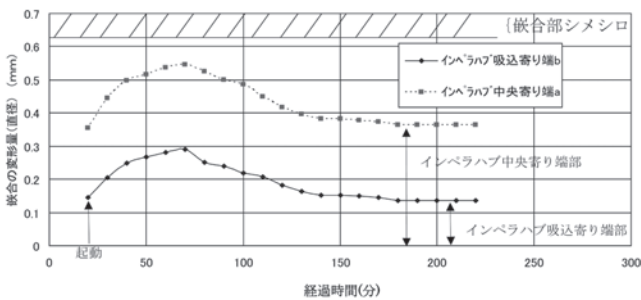
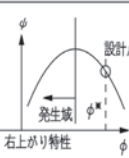


図3.4 起動過渡時の嵌合部締代変化の解析結果

発生流量域	一次元的管路系不安定	二次元的、局所的不安定
	サージ	旋回失速
発生条件	$\frac{\partial \phi}{\partial \phi} > \frac{1}{B^2 \phi R} \left(\frac{\ell}{L} \right)$	$\frac{\partial \phi}{\partial \phi} > 0$
周波数	$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{\rho C L}} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{\cos \beta^*} \left(\frac{\ell}{L} \right)}{1 + \frac{1}{\cos \beta^*} \left(\frac{\ell}{L} \right)}}$	$\frac{V_p}{U_t} = 1 - \frac{2 \xi_s \left(1 - \frac{\phi}{\phi^*} \right)}{1 + \frac{2\pi}{\cos \beta^*} \frac{\ell}{s}} < 1$

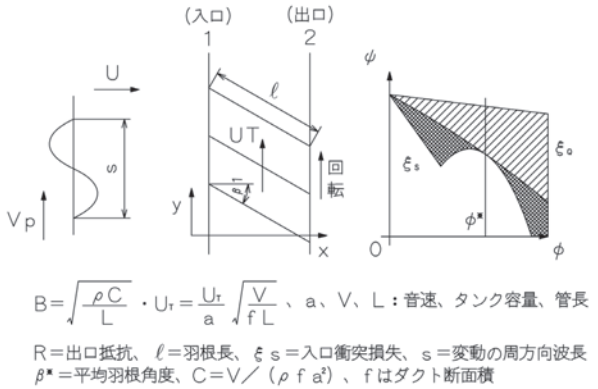


図4 小風量域の不安定現象

低周波音は遠地点まで伝播するため主排ブロワの計画時点で操業下限風量を正しく定めておくことが必要である。

2.3.4 インペラの「重摩耗」対策

排熱回収ファンは主排ブロワに比べてインペラに流入する焼結鉱ダスト量が5～10倍も多く、重摩耗に対する対策が必要となる。

このような場合インペラの摩耗が生じ易い部分には、高Cr 鋳鉄系硬化肉盛材 (JIS Z 3251 DFCrA相当) を約3mm溶接施工し (硬度～約Hv800)、さらにタンゲステン炭化物系肉盛材 (W_2C , WC: 合計約70%) を厚さ1mm程度溶接施工 (硬度～約Hv950) し、エロージョン対策としている。

耐摩耗材の溶接施工の他に、要部にセラミックスを取り付ける事例 (図5参照) もあるが、この場合には、運転時のセラミックス取付部の当該インペラ部分の弾性変形量を事前に精度良く算出しこれを考慮した最適隙間を設ける必要がある (図6)。硬化材溶接施工、セラミックス設置の他に金属溶射



図5 インペラ前縁部セラミックス設置例

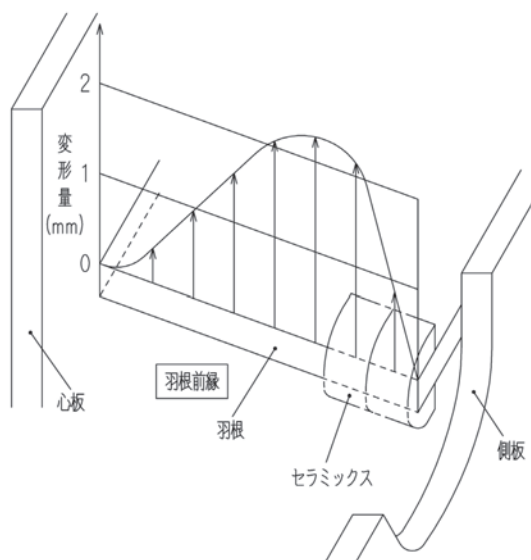


図6 セラミックス取付部の運転時弾性変形計算例

(HVOF) を実施した例も見られるが、耐衝撃性、硬化層厚み確保等の課題があり、実施数としては多くない。

2.3.5 可変速装置による回転数制御運転上の注意

排熱回収各種ファンは操業仕様に応じた運転のため、可変速装置 (インバータ) による回転数制御を実施する例がある。従来でもインバータ駆動の場合においては、その出力周波数と「ファン～電動機」の振り系の固有振動数とが一致して共振を起こす周波数についてはインバータのジャンプ機能で共振回避をしているが、最近はこの他に「ファン (機械系)～(電気系) の連成振り自励振動」発生事例が散見⁷⁾ される。以下にその概要を述べる。

「ファン～電動機」の振り振動系は以下となる (図7)。

ファン、電動機は添字B、M、機械系項には添字mを付けて、

$$J_B \cdot \ddot{\theta}_B + C_m (\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_M) + K_m (\theta_B - \theta_M) = 0$$

$$J_M \cdot \ddot{\theta}_M + C_m (\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_B) + K_m (\theta_M - \theta_B) = \Delta Te$$

この2つの式を結合し、 ΔTe は電動機ロータの角変動すなわちスリップに対する反力と考えこれを電氣的減衰 De と電氣的剛さ Ke として、正負を変えて表示すると、

$$J \cdot \Delta \ddot{\theta} + (C_m + De) \Delta \dot{\theta} + (K_m + Ke) \Delta \theta = 0$$

$$(J = J_B \cdot J_M / (J_B + J_M))$$

上記の式で減衰項 ($C_m + De$) のうち、機械的減衰 C_m は $C_m > 0$ となるが ($C_m + De$) 全体として負の値となった場合には、「系が負の減衰状態」となり、「振り固有振動数のトルク変動が自励振動として発生」する。機械側だけで検討するにしても、電気側特性 De 、 Ke の入手が現実問題としては困難であ

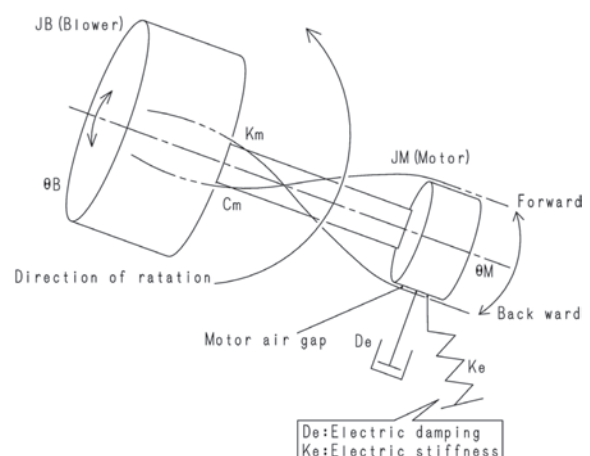


図7 「1次振りモードとエアギャップトルク」模式図

る。本現象は電気側部門と機械側部門が協調した対応をとることによって始めて解決できるインバータ駆動に関連した新たな課題であるが、事前の問題解決が極めてむずかしいのが現状である。

3 空気分離装置基本プロセス

酸素製鋼に用いられる酸素を製造するプロセスでは、高压の酸素を製造する方法の違いから、外部昇圧式と内部昇圧式の2つのプロセスがある。そこに用いられている圧縮機を含めて、図8に外部昇圧式プロセス、図9に内部昇圧式プロセスの典型的なフローを示す。

国内では、分離装置で発生した大気圧レベルの酸素を圧縮機を用いて高压まで昇圧し、製鋼プロセスへ供給する外部昇圧式が多く使用されている。一方、海外では酸素圧縮機を用

いず、液酸ポンプにより昇圧を行うとともに、主熱交換器において昇圧圧縮機により高压の酸素ガスを製造する内部昇圧式が多く使用されている。

3.1 ターボ圧縮機の種類と構造

上記の空気分離装置にて用いられる遠心圧縮機の構造には、大きく分けて二つの種類がある。ひとつは一軸型と呼ばれるもので、1本の軸に1枚または複数枚のインペラ（羽根車）を取り付けたものであり、図10にその代表的な例を示す。駆動機として低速の電動機が用いられる場合には、軸継手を用いて増速機を介して圧縮機と駆動機を結合することになる。空気分離装置に使用される原料空気圧縮機および酸素圧縮機においても、従来からこの型（水平分割ケーシング）が採用されることが多く、また現在においても引き続き使用されている。もう一方は増速機内蔵型であり、歯車式増速装

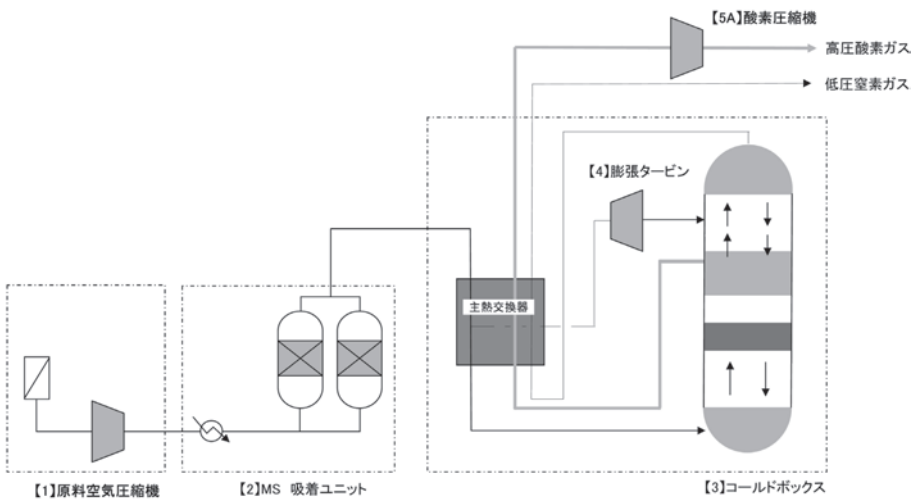


図8 空気分離装置 外部昇圧式プロセス概念図

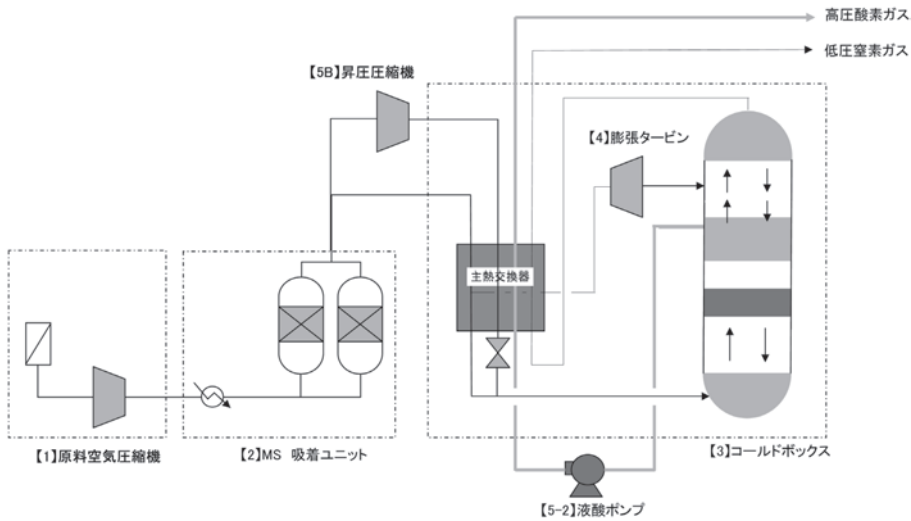


図9 空気分離装置 内部昇圧式プロセス概念図

置のピニオン軸の一端あるいは両端にオーバハングしてインペラを取り付けたもので、各インペラのまわりのケーシングは増速機のケーシングに直接取り付ける。図11にその構造例を、また断面図を図12に示す。ひとつの増速機にピニオンは複数収納できるため、仕様に応じて段数を調整することが可能である。この形式の遠心圧縮機は20世紀半ばにドイツで空

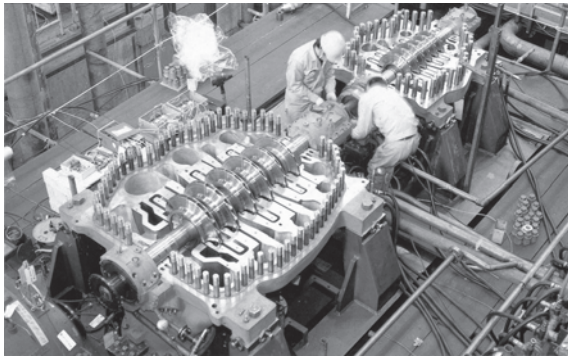


図10 一軸型ターボ圧縮機の例

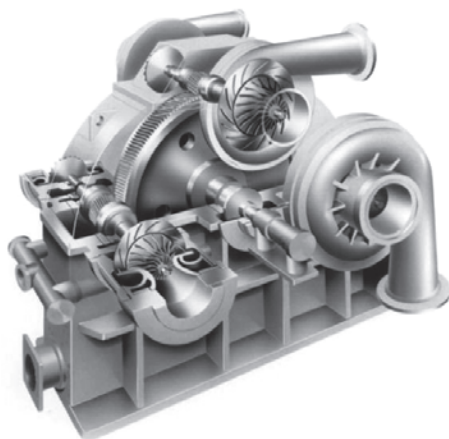


図11 増速機内蔵型ターボ圧縮機の構造

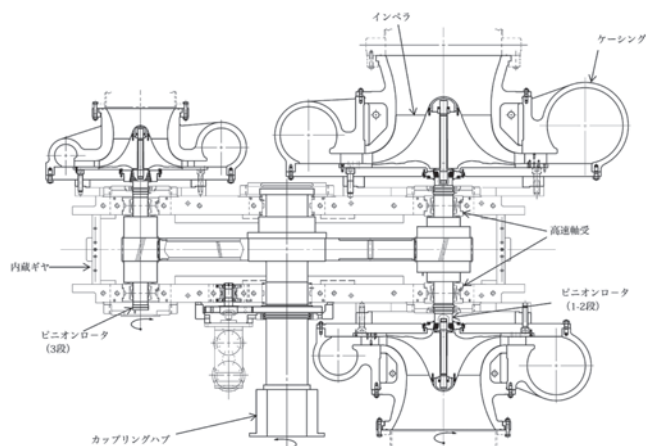


図12 増速機内蔵型ターボ圧縮機の断面図

気用のものが製作されてから⁸⁾、1.5MPa程度までの低圧の空気および窒素用として広く使用されてきたが、大型化並びに高圧用途への需要の高まりとともに適用範囲が広げられてきている。

3.2 原料空気圧縮機

従来、特に大型の装置においては、一軸型等温遠心圧縮機が用いられることが多かったが、プラントの大型化への需要の高まりとともに、増速機内蔵型の大きな特徴のひとつである高効率並びにメンテナンスの容易さから、多くの分離装置では増速機内蔵型遠心圧縮機が本用途に用いられてきている。空気分離装置における消費動力の大半はこの原料空気圧縮機が占めることから、高効率化の要求は高く、また、装置の小型化の要求に伴い、圧縮機そのものをコンパクトにする必要があり、圧縮機各社は、同じインペラ径で大容量が処理可能となる高比速度インペラの開発を行い、圧縮機の小型化とともに高効率化を実現してきている。空気圧縮機に使用されるインペラの例をその比速度とともに図13および図14に示す。

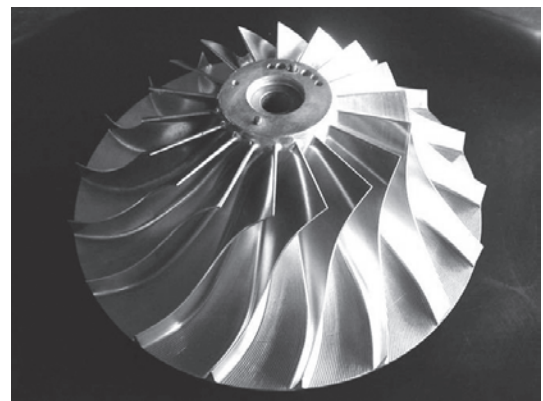


図13 インペラ例 比速度 N_s 280 比速度 $N_s = N \times Q^{1/2} \div H^{3/4}$
ここで、 N (回転数) rpm、 Q (流量) m^3/min 、 H (ヘッド) m



図14 インペラ例 (高比速度タイプ) 比速度 N_s 400

3.3 昇圧圧縮機

空気分離装置プロセスのひとつである内部昇圧プロセスでは、0.5MPa（ゲージ圧）程度から最大6.0MPa（ゲージ圧）程度まで空気を圧縮する必要がある、この用途にも増速機内蔵型圧縮機が使用されている。

この圧縮機においては、高圧化に伴って増大する流体からの不安定化力にたいして、十分な機械的安定性を確保したロータを設計することが、もっとも重要な課題となる。そこで、ロータ剛性を大きくするために、①インペラのオーバーハング長さを必要最小限に抑える、②インペラを含む付加重量の低減などの設計上の改善が行われるとともに、ロータ安定性に大きく影響を与える軸受については、十分な検討の上、その選定がなされている。また、更に厳しい仕様においては、ロータの安定性改善のために高減衰特性をもつ軸受（SFD（Squeeze Film Damper）付ティルティングパッド軸受）の適用が検討されてきている。図15に圧縮機ロータ図の例を、また、図16にティルティングパッド軸受の例を示す。

ロータの安定性については、世界的に最も広く認知・適用されているAPI（American Petroleum Institute）規格⁹⁾に基づく安定性の評価が行われることが多く、神戸製鋼所で製作している高圧用増速機内型圧縮機においても、API規格に基づいて安定性の評価を行っており、高圧仕様試作機（吐出圧力8.0MPa仕様）での実圧運転において、その安定性評価の妥当性とともな圧縮機の高圧下での機械的安定性が確認されている¹⁰⁾。

更に、本圧縮機は高圧であることから、通常空気および窒素用途に用いられるラビリンスシールでは、相対的にガスの漏れ量が多くなり、その漏れによる動力損失が増大する。この損失を低減するために、主にガス圧縮機用途として開発さ

れ、また増速機内蔵型ガス圧縮機にも使用されてきているドライガスシールを適用するケースが増えてきている。これにより、初期投資は増大するものの、漏れ損失を大きく低減させ、ランニングコストを減らすことが可能となる。

ドライガスシールが増速機内蔵型に用いられている例を図17に示す。このシールは、一軸型ケーシングで使用されているシールが油膜を用いたウェットであるのに対して、油を使用しないシールであることからドライガスシールと呼ばれており、回転側の溝にガスを巻き込み昇圧することにより数ミクロンの隙間を保持し、非常に漏れの少ない状態でシールをするものである。高周速領域までシール性能が安定しているとともに、軸方向長さが短くロータ安定性上も有利に働くため増速機内蔵型圧縮機にも用いられるようになったものである。ドライガスシールの断面図を図18¹¹⁾に示す。

このシールは、隙間が小さくなろうとすれば急激に面を開

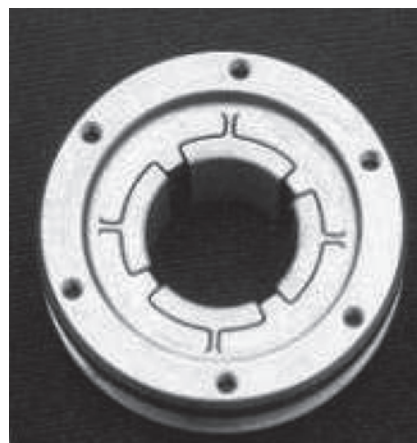


図16 ティルティングパッド軸受の例

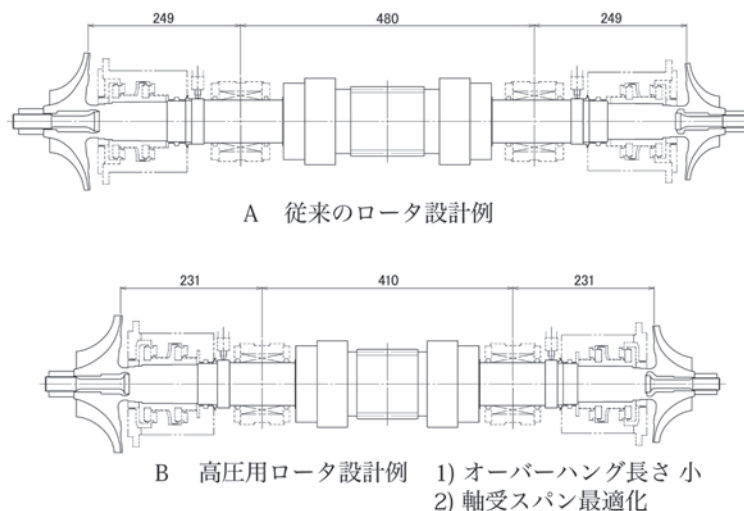


図15 増速機内蔵型ターボ圧縮機のロータ

こうとする力が大きくなり、逆に隙間が広がろうとすれば狭くろうとする力が大きくなり、変動しながら基本的にバランスする機能を持っている。また、漏れ量は、通常のラビリンスの数百分の1以下で非常に小さい。

3.4 酸素圧縮機

これまで酸素圧縮機としては、一軸多段型圧縮機が用いられてきたが、その効率の高さと減量範囲の広さから、国内においても、ドイツにて最初に適用が行われた増速機内蔵型酸素圧縮機が用いられるようになってきている。圧縮機の基本的な構造は、原料空気圧縮機、循環窒素圧縮機、並びに昇圧圧縮機と同じであるが、酸素ガスの特性から発火を防ぐための十分な対応を行う必要があり、使用する材料、接触の危険

がある部位の構造設計、軸封のシステム等に様々な工夫がなされている。

3.5 その他

空気分離装置プロセスで使用される、異なる用途の圧縮機（たとえば、①窒素圧縮機および循環窒素圧縮機や②原料空気圧縮機および空気昇圧圧縮機）を結合した製品が、初期投資を低減する目的で使用されているケースが増えてきており、これは増速機内蔵型の特徴をうまく利用した例である。

また、夜間電力を有効に利用する目的で、窒素発生装置においてDSS (Daily Start Stop) 仕様が要求される例も増えてきており、起動発停頻度に応じて疲労強度設計を行った圧縮機が設計納入されている。

4 おわりに

製鉄プロセスの付帯設備であるターボ機械の最近の技術動向について概説した。いずれの機械も大きな所要動力を要し、各プロセスにおいて、大きな比重を占める重要な機械である。それゆえに厳しい運転環境や条件が要求されるが、製作者としてこれらの声に答えるべく更なる努力を継続していきたい。

参考文献

- 1) 須藤雄二, 上田和人: 新日鉄エンジニアリング技報, 1 (2010), 47.
- 2) 山岡洋二郎, 黒沢信一, 野沢光男, 中島龍一, 服部道紀, 小松修: 日本鋼管技報, (1986) 115, 26.
- 3) 佐藤義政, 佃利夫, 山田茂: 住友重機械技報, 32 (1984), 44.
- 4) 中村博史, 倉重宗寿, 山本邦彦, 田尻勝也, 森下茂: 住友金属, 46, (1994) 2, 113.
- 5) NACE STANDARD, MR0175-2003, Metals for Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking Resistance in Sour Oil field Environments
- 6) 辻本良信: ターボ機械, 27 (1999-5) 5, 34.
- 7) 坂口順一: ターボ機械, 37 (2009-3) 3, 2.
- 8) 安井信雄: ターボ機械, 24 (1992) 1, 47.
- 9) API STANDARD 617 SEVENTH EDITION 2002
- 10) 佐伯圭一他: 神戸製鋼技報, 59 (2009) 3, 51.
- 11) ドライガスシールカタログ, イーグル工業株式会社

(2012年5月9日受付)

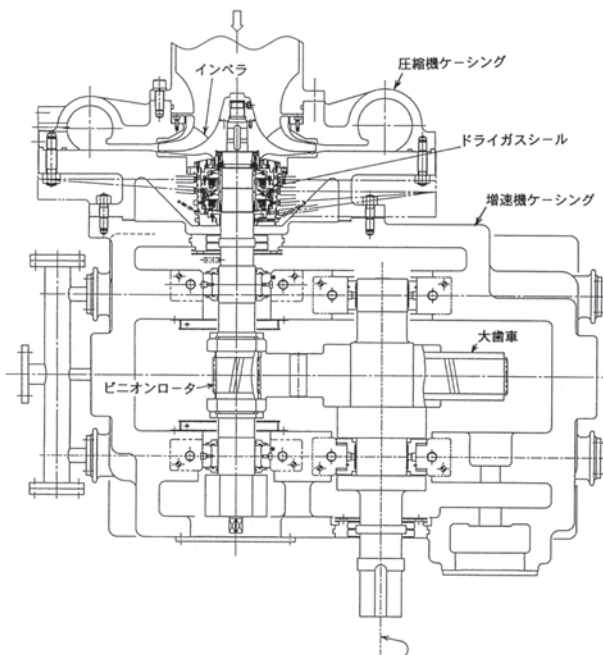


図17 ドライガスシールを適用したターボ圧縮機断面図

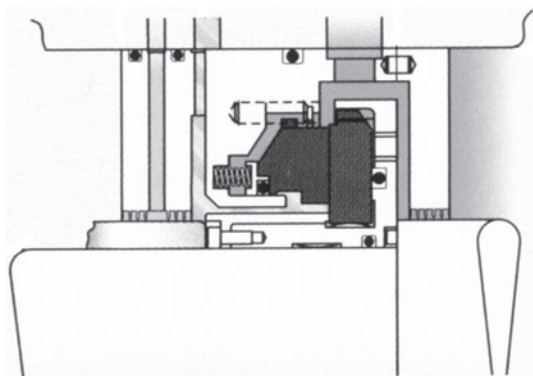


図18 ドライガスシール断面図