

高炉用軸流送風機設備

Axial Blower Plants for Furnace Blast

伊地知幸文*
Yukifumi Ijichi

内 容 梗 概

昭和35年9月に富士製鉄株式会社広畑製鉄所に納入された高炉用7,800 kW 軸流圧縮機は、納入後好調に稼働を続けているが、これに引き続いて製作された富士製鉄株式会社室蘭製鉄所高炉送風用9,000 kW 軸流圧縮機も、昭和36年4月から運転を開始した。

本稿では、容量としてはわが国最大級のこれら高炉送風機設備の概要と、広い作動範囲が要求される用途に適した自由渦、後置静翼形軸流圧縮機の特長および試験結果を要約して述べる。なお軸流圧縮機を駆動している蒸気タービン設備はいずれも日立製作所日立工場で作製されたものである。

1. 緒 言

一般産業界の急速な伸長に伴い、特に鉄鋼業界においては生産性向上の有効な手段として設備の大形化が採りあげられ、高炉を根幹としているいろいろな設備が大容量化しつつある。

従来、遠心送風機が使用されていた高炉用送風機にも高炉容量の増大に伴い大風量をコンパクトで、しかも効率よく処理できる軸流圧縮機が必然的に適用されるようになり、過去数年間に計画された高炉には例外なく軸流圧縮機が採用されている。これらは一般産業用としての軸流圧縮機が、流体力学の発達と材料、加工技術の進歩などによって性能的にも機械的にも安定し十分な信頼性をもつことが確認されるに至った結果であり、現在すでに7,000~9,000 kW級の同種送風機が国内の各方面で使用され重要な役割を果たしている。

今後鉄鋼業界の生産設備の拡大に伴いさらに大容量のものが数多く設置されてゆくことであろう。

当社においてもさきに本誌にて紹介した航空技術研究所空気源用3,750 kW 軸流圧縮機⁽¹⁾に引き続き各種用途の軸流圧縮機の製作実績を重ねてきたが、本文では高炉送風用として製作された、7,800 kW および9,000 kW 軸流圧縮機についてその設備概要、特長および試験結果について述べる。

2. 仕 様

富士製鉄株式会社広畑製鉄所納7,800 kW 軸流圧縮機の仕様を第1表に、富士製鉄株式会社室蘭製鉄所用9,000 kW 軸流圧縮機の仕様を第2表に示す。

3. 設 備 概 要

3.1 全体配置

高炉送風機はかなり大幅な回転数制御による容量調整が必要であり、その所要動力も大きい。また自家発電設備との関連もあって本設備の原動機は蒸気タービンを使用している。第1図および第2図に7,800 kW、9,000 kW 軸流圧縮機の外観を示し、また軸流圧縮機断面および機器の配置をそれぞれ第3図と第4図に示す。

空気は吸込塔からコンクリート消音室にはいり空気清浄装置、コンクリートダクトを経て送風機に吸入され所定圧力まで昇圧されて高炉に送風される。

また最近の傾向として騒音がきわめて重視されるが、本設備では送風機本体および配管をすべて吸音材でおおい、吸風系統にはスリット状の吸込消音機、送風系統にはコンクリートダクトの迷路と放

風消音器をつけてそれぞれ吸音効果をあげ、また厚肉配管とコンクリートダクトによる効果的な遮音対策がなされているので、近代化された設備にふさわしいきわめて静粛な運転が実現されている。

次に吸入空気の清浄化については、コンクリート消音室内に、回転油膜式空気清浄装置を設け除じんを行なっているが、集じん効率と密接な関係をもつ前面面積は外気含じん量および最大風量における圧力損失と油蒸気の搬送などの条件を十分考慮して決定されている。

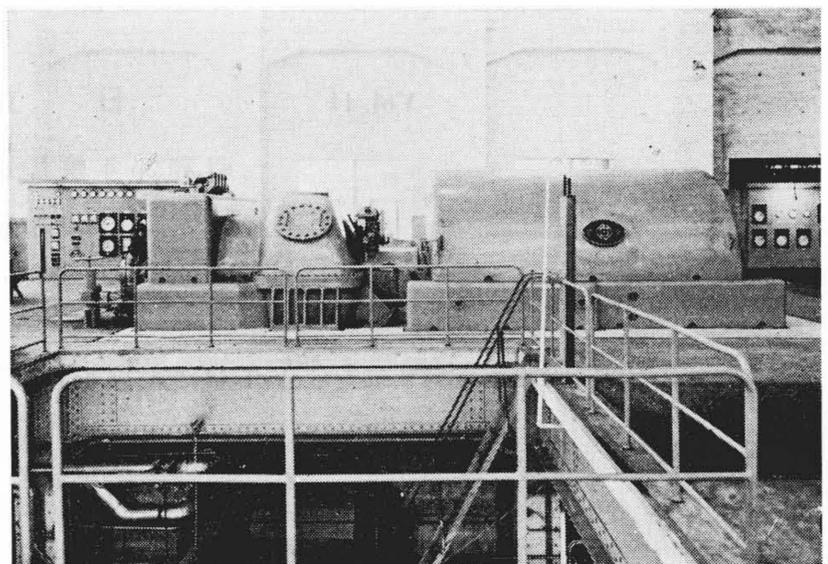
自動制御装置は電子計器の安定と、計測管理技術の長足の発達によってきわめて能率のよい方式が開発されつつあるが、本機には国内最初の電気油圧組合せによる定風圧、定風量制御あるいは1台の送風機で数多くの高炉に送風する共通送風用風圧自動制御装置などが採用されている。これらについての詳細は3.3に述べる。

第1表 高炉送風用 7,800 kW 軸流圧縮機仕様

名 称	要 目	名 称	要 目
形 式	1,400×1,000/900φ 12段 BMP C-CH	吐出静圧	1.0~2.2 kg/cm ² G
吸込風量	1,500~2,500 Nm ³ /minDry	回 転 数	2,815~4,200 rpm
吸込全圧	1.0 kg/cm ² abs	原 動 機	7,800 kW 蒸気タービン

第2表 高炉送風用 9,000 kW 軸流圧縮機仕様

名 称	要 目	
	新設高炉送風用	既設高炉2基共通送風用
形 式	2,000×1,000/1,000φ 12段 BMP C-CH	
吸込風量	2,000~3,000 Nm ³ /min	2,500~3,300 Nm ³ /min
吸込全圧	1.0 kg/cm ² abs	1.0 kg/cm ² abs
吐出静圧	0.9~2.1 kg/cm ² G	0.9~1.7 kg/cm ² G
回 転 数	2,900~4,000 rpm	3,200~4,000 rpm
原 動 機	9,000 kW 蒸気タービン	



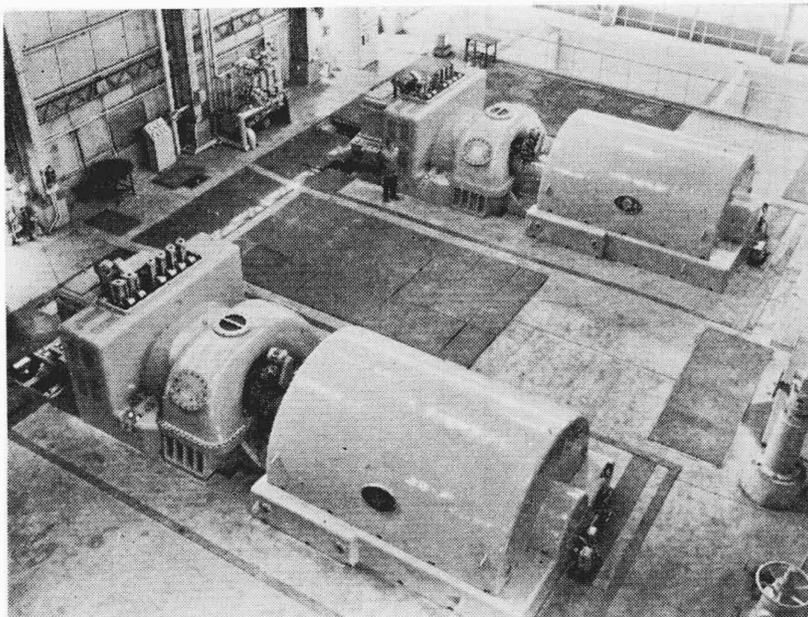
第1図 7,800 kW 軸流圧縮機外観

* 日立製作所川崎工場

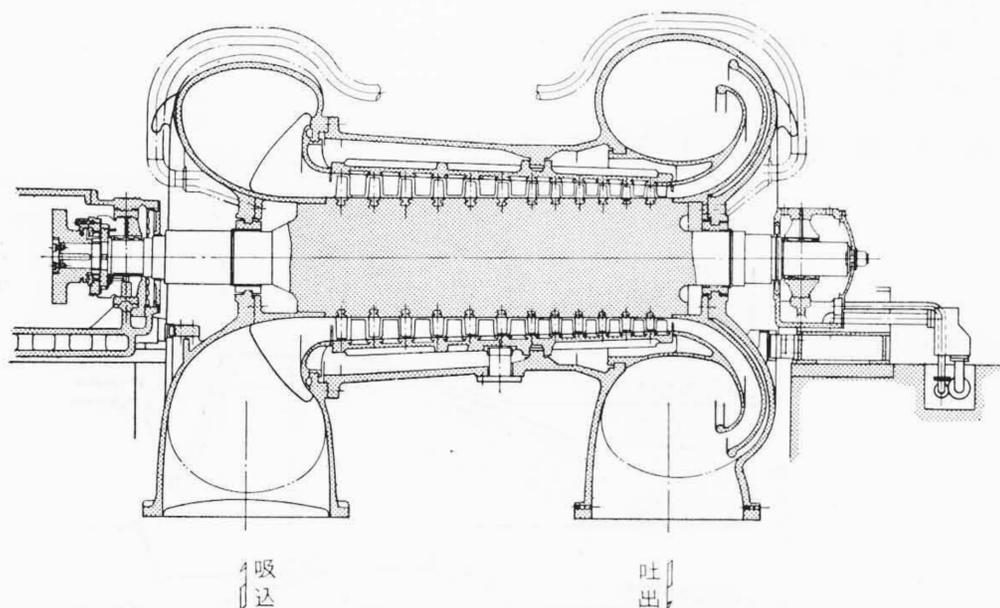
3.2 軸流圧縮機の構造

3.2.1 翼

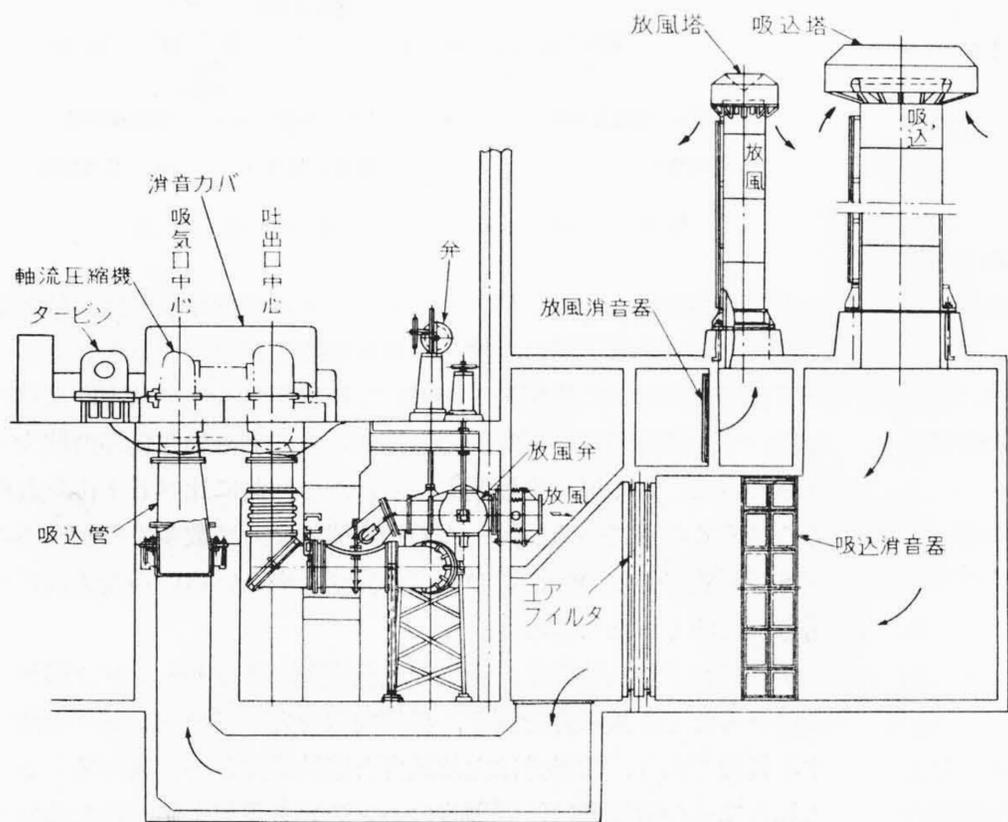
動翼は精選した 13Cr 鋼の精密鍛造品を機械仕上げしたもの



第 2 図 9,000 kW 軸流圧縮機 (手前 5 号機, 前方 6 号機)



第 3 図 7,800 kW 軸流圧縮機断面



第 4 図 高 炉 送 風 機 設 備 配 置 図

で、静翼は 18-8 ステンレス鋼の精密鍛造品である。動翼、静翼とも仕上寸法はもちろんのこと X 線、マグナフラックス、ダイチェックなどにより材質についても入念な検査が行われ、また強度上最も問題となる振動疲労破壊を避けるためすべての段の翼の固有振動数を測定し、使用回転数の全域にわたって共振しないよう計画されている。

3.2.2 ロータ

ロータの構造は最も簡単で信頼性の高いソリッドロータで、材質は優秀な炭素鋼で真空鋳造により製作したインゴットより鍛造したものをうい、円周方向に動翼埋込用のみぞを設け安全確実な方法で動翼を取り付けてある。軸系の危険回転数は使用回転数以下の十分安全な値にとり、また動翼取付後入念な動バランス試験を行なっているのだからいかなる回転数でも全振幅で数ミクロン以下というきわめて安定した軸系となっている。

3.2.3 ケーシング

ケーシングは上下半割れの二重構造で静翼は内筒に取り付けられている。この内筒は軸心を一定に保ちながら自由にいずれの方向にも熱膨張できるように支持され、配管からの外力は外側のケーシングで受ける構造になっている。吸込部のサクシヨンケースは翼列への流入速度の分布が一樣でしかも損失が小さくなるよう多くのモデル実験によって決定された最良な形状となっており、また吐出部のディフューザもモデルにより効率が最高になるような広がり角度と形状を決定し、空気の通路面はなめらかな機械仕上げが行なわれている。

3.2.4 軸受

軸受には優秀なホワイトメタルを使用し、推力軸受はテーパランド形で、また平軸受は軸系が油ふれ回りを起さないよう特殊な形状とし、高速、高荷重に耐えるとともに機械的損失を最小にするよう配慮されている。

3.2.5 たわみ継手

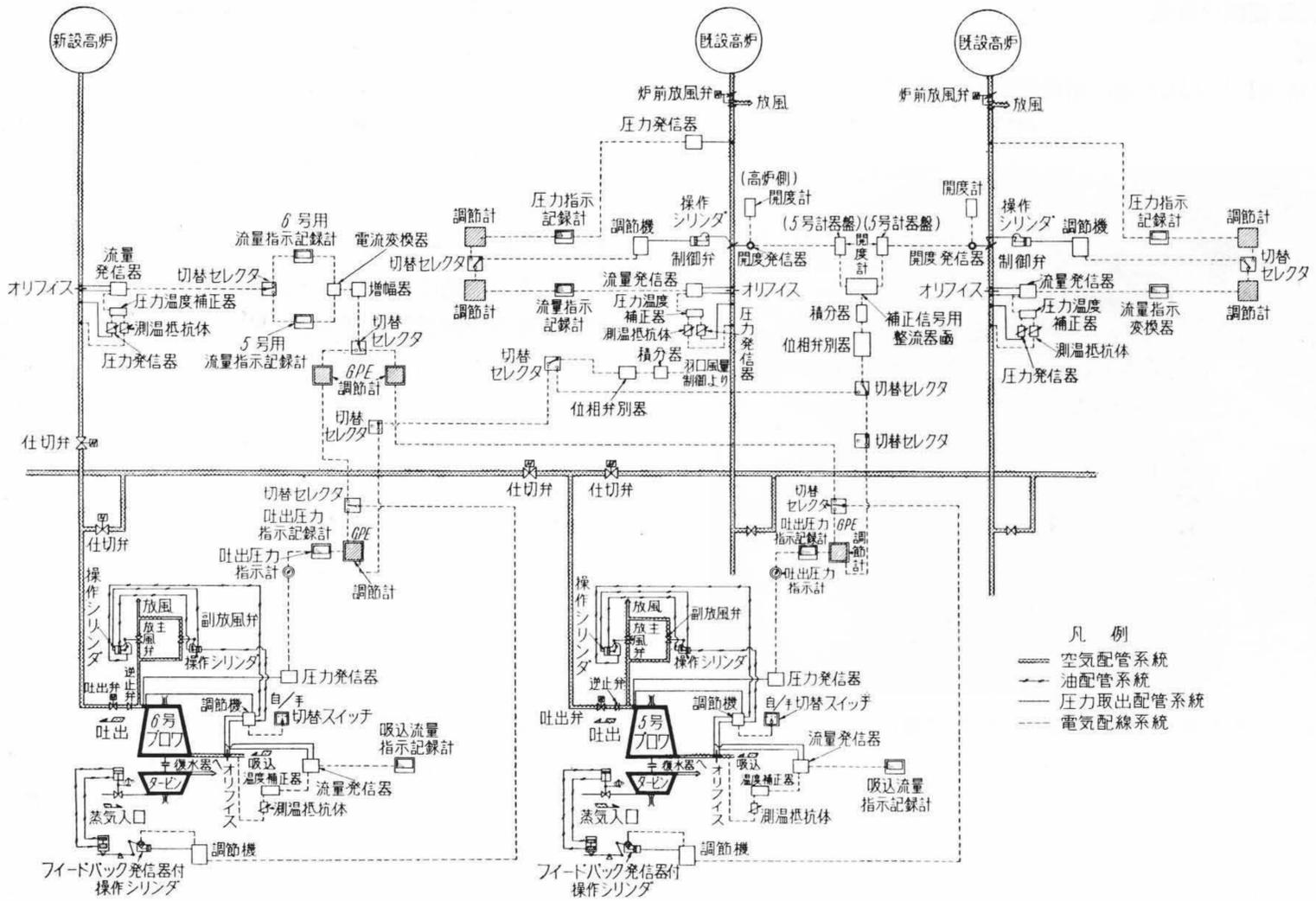
運転中の振動あるいは熱膨張などによる軸心の狂いにたいし、安全運転を期するため動力伝達機構としてタービンと軸流圧縮機の間なたわみ継手を採用している。材質は Ni-Cr-Mo 鋼で歯面を高硬度にし、内歯と外歯に適当なる硬度差をもたせしかもそのかみ合い精度および歯面の仕上がりについては回転と軸方向へのすべりを考慮した特殊ラッピングを行ない、さらに歯当り試験装置により厳重に試験および検査を行なって安全を期している。

3.3 自動制御装置

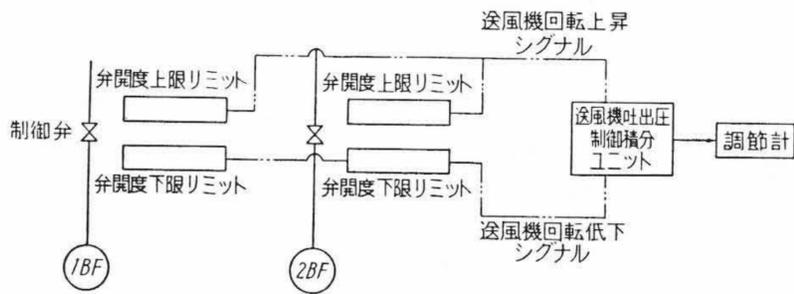
第 5 図は 9,000 kW 軸流圧縮機設備における定風量、定風圧、サージング防止装置および共通送風用風圧自動制御装置の系統図を示す。

定風量自動制御装置はオリフィスにて計測された見かけの風量をオリフィス部圧力、温度で補正して標準状態に換算し、その値と設定風量の偏差によって、送風機の回転数を調整するという制御回路である。したがって分流方式と異なり、分流管内における水蒸気凝結の問題もなく、また検出部に制御動作を必要としないので、精度および感度はきわめて安定している。

共通送風用風圧自動制御装置は 1 台の送風機で 2 基以上の高炉に送風する場合に用いられる制御方式であり、高炉炉前の定風量、定風圧制御装置と、送風機の吐出圧を自動的に選択し制御する風圧自動制御装置の



第5図 9,000 kW 軸流圧縮機自動制御系統図

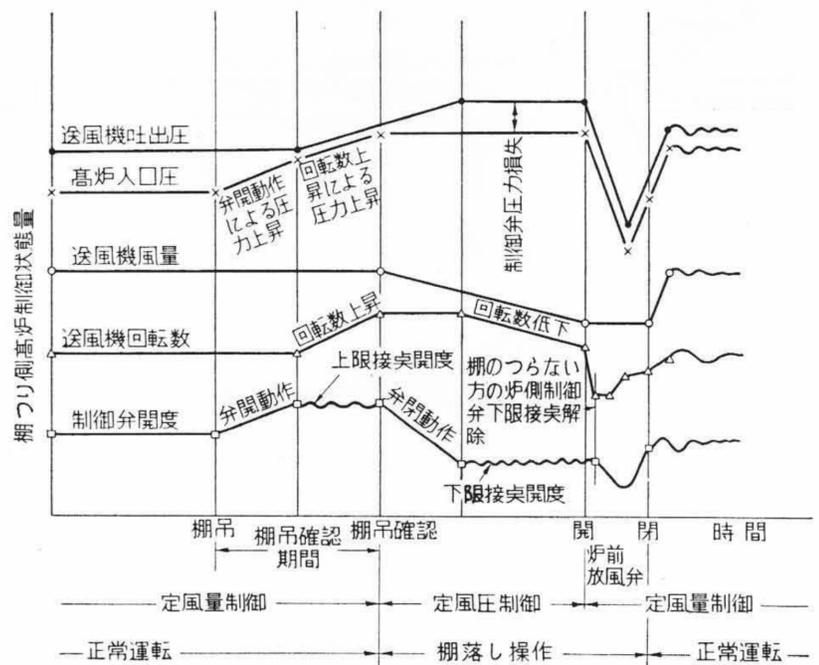


第6図 共通送風制御動作系統図

状態	1	2	3	4	5	6
弁						
V ₁	U	U	U	N	N	L
V ₂	U	N	L	N	L	L
制御弁開度	4または5	4または5	5	4	5	4または5

ただし U: 上限接点 N: 中立状態 L: 下限接点

第7図 制御弁開度の組合せと制御動作の推移



第8図 棚つり時の操作要領図

二つの制御回路によって構成されている。

炉前制御系統は送風機吐出圧一定の状態において炉前に設けられた制御弁の絞りを調整し、高炉の要求する風量、風圧に適合させるよう構成されている。

風圧自動制御装置は、それら制御弁が制御作動範囲を越えたとき、弁の開度から接点信号をとり、自動的に送風機吐出圧の現状設定値を増加減少させる装置である。

制御弁の開度発信器には、リングチェーン式遠隔伝達器を用いて開度に比例した抵抗値に変換し、上下限接点付電子管指示計の入力としている。第6図はこの制御の基本動作を表わしたものであり、制御弁開度の組合せとその推移は、第7図に示すとおりである。

これらの方式によると、各高炉の状態が極端に異なるとき、たとえば棚つり時の操作が問題となるが、その状態における操作要領の一例を第8図に示す。

また弁開度組合せから得られたデジタル量動作信号は、積分器によって、アナログ量に変換し、残留偏差を少なくするとともに、風圧自動調節計には比例帯1,000%でPID動作をもつGPE調節計を用いて、制御回路整定時間の短縮あるいは制御動作範囲の拡大を計っている。この風圧自動制御は、ほかの回路に比べ若干複雑な機器の構成になっているが、一つの送風機によって数多くの設備への送風が可能であるので、この方式の完成を機にいろいろな方面に利用されてゆくことであろう。

サージング防止装置は、高炉の負荷変動によりサージング限界内にはいったとき放風弁を開き、抵抗曲線をさげてサージングを防止する装置であり、放風弁は主放風弁と副放風弁とから成っている。これら二つの放風弁は、制御時のハンチング現象を避けるため直列操作とし、容量の小さい副放風弁から作動するよう計画されている。

が、各弁の開口特性のマッチングについては弁座を特殊な形状にして作動の円滑性を期している。ブローオフラインは送風機の安定領域曲線(3, 4.3参照)を対象として決定されており、この安定曲線が折点をもつ特殊な形状であるため調節機には補正カムが付属されている。上述のとおりいずれの制御回路とも従来用いられていたものに比較してかなり複雑な回路の構成となっているが、各発信器のあとにそれぞれメータリレーを設置して制御回路の故障を検出し、また急激な抵抗変動によって送風機がサージングにはいったとき、タービン先行非常调速機を低い回転数に設定し、速かにサージング領域から脱出させる緊急速度制御装置を付属し、また給油装置には油圧低下による補助ポンプの自動起動のリレーを設けるなど、重点的な保安装置が設けられている。

以上 9,000 kW 軸流圧縮機の制御装置について述べたが、7,800 kW 軸流圧縮機に用いられた電圧搬送方式の制御回路を参考として第9図に示す。

3.4 軸流圧縮機の特長

自由渦後置静翼形の翼列配置を使用した軸流圧縮機の一般的な特長については、航空技術研究所納 3,750 kW 軸流圧縮機⁽¹⁾において紹介してあるのでここでは高炉送風用として重要な二、三の問題点についてふれることにする。

3.4.1 翼形の選定

高炉送風機の特長上最も重要なことは高効率の範囲が広いということである。風圧曲線の傾斜は、自動制御装置の進歩による整定時間の短縮と送風機回転変動時の機械的安定によって現今では高炉操業の難易を示す指標とはならない。したがって高炉用軸流圧縮機の特長は回転数制御を考慮するとき高効率の範囲が広く、かつ風圧曲線の傾斜をゆるやかにしてサージングラインを小风量側にもってこることが望ましいので、これらの観点に立脚した翼列配置と翼形の選定が行なわれねばならない。日立製作所の軸流

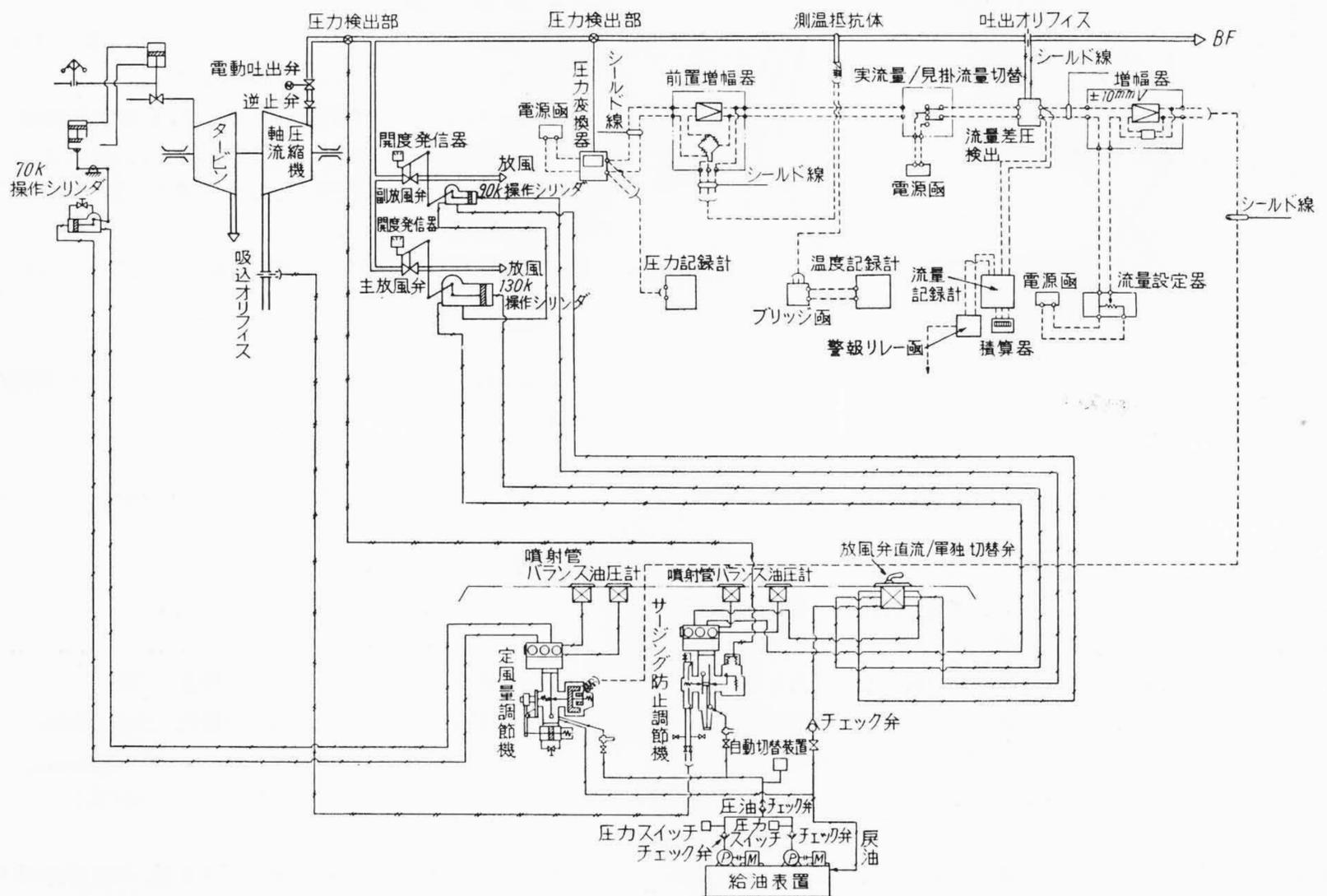
圧縮機が翼列として自由渦後置静翼形を採用しているのは、この翼列の特性が 50% 反動度形よりも風圧曲線の傾斜がゆるやかになり、高効率の範囲に影響を及ぼす半径方向のバランスあるいは拡散係数⁽³⁾などが有利になるからである。また翼形の選定は翼列との関連に考慮をはらい決定されている。すなわち動翼には、反動度が高いことと迎角変化量が少ないことから揚抗力比の高い当社独特の LA4 翼形を採用し、静翼には抗力係数の低い範囲の広さを重視して C4 翼形を選定したが、その結果ゆるやかな曲線が得られ、また広い範囲において 90% 以上の段効率となっている。なお後置静翼形翼列における動、静翼迎角変化量の比較を第10図に示し、LA4, C4, NACA 65 の各翼形特性は第11図に示すとおりである。

3.4.2 翼の汚染

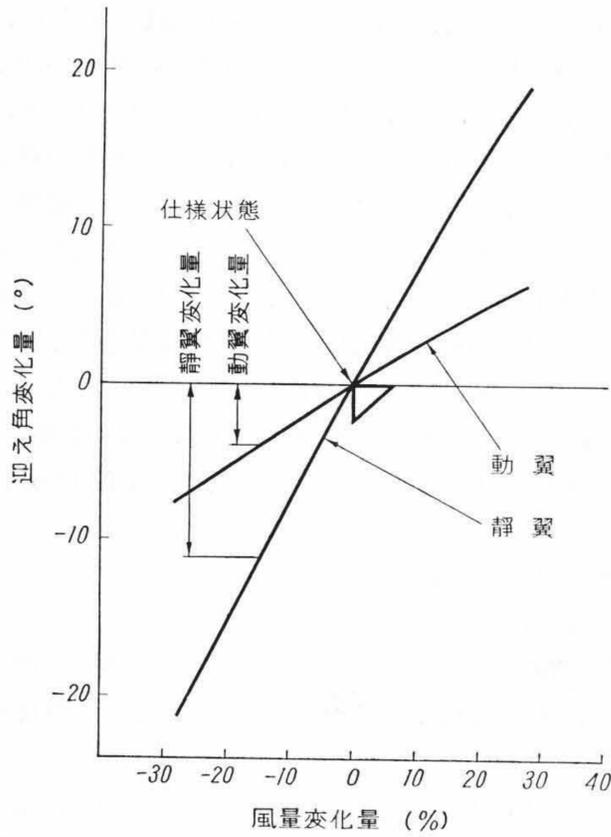
一般に製鉄所における外気条件はきわめて悪く、吸風系統におかれた回転油膜式清浄装置での除じんは完全を期しがたい。したがって長期運転では若干量のダストが翼を汚染し、性能に影響を及ぼすことになる。

翼のダスト付着状態は、翼表面境界層に遠心力の作用がない静翼に多く特に1段から3段目までが著しい。1段目静翼付着量は、動翼に対し約 10 倍程度になると報告されている文献⁽²⁾⁽⁴⁾もあるが、7,800 kW 軸流圧縮機の1年連続運転後、測定した結果では約 3 倍程度となっており、静翼の汚染が著しいことが確認された。

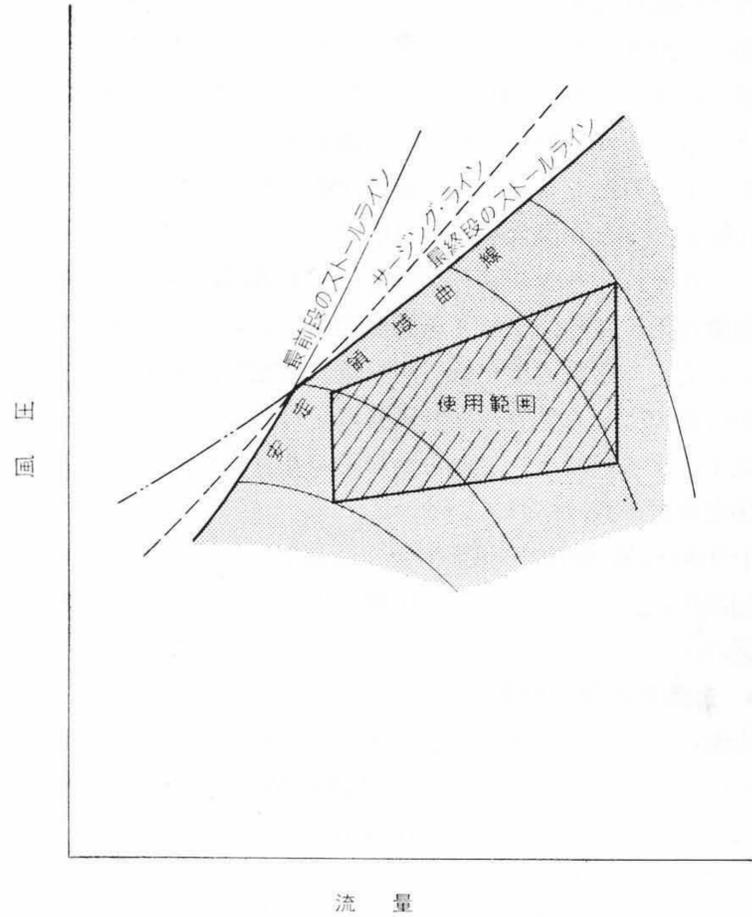
しかし、前段部分の圧力上昇が過大にならないよう翼列と段数を決定された後置静翼形軸流圧縮機では、前段部静翼における圧力上昇の負荷はきわめて少ないので、汚染による性能低下の割合は少なく高炉用送風機として最も適した翼列配置といえることができる。



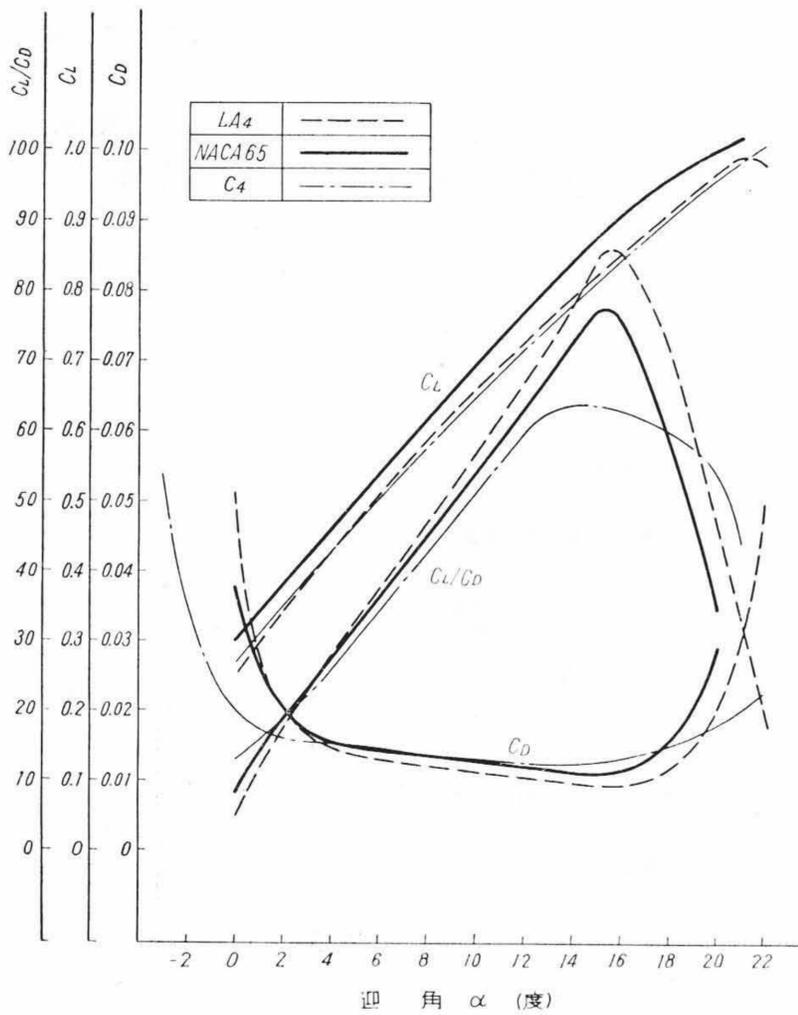
第9図 7,800 kW 軸流圧縮機自動制御系統図



第10図 動, 静翼迎角変化量の比較



第12図 送風機の安定作動領域



第11図 LA4, C4 および NACA 65 翼形特性比較

3.4.3 サージングラインの形状

一般に、多段軸流圧縮機のサージング現象は段落の失速と密接な関係を有しているが、単段の失速とは完全に一致しない。実機にて最初の段落と最終段落に熱線風速計を装備し、それらの位置における圧力の変動を計測した結果、かなりの圧力変動値が検出されているにもかかわらず送風機全体としては、いわゆるサージング状態にはいらぬことが確認されている。

したがって段落失速とサージングラインとの関係は、定性的には第12図のように予想され、送風機の安定領域としては、旋回失速にも関係をもつこの段落失速曲線によって決定される範囲をとるべきであろう。サージング防止装置におけるブローオフライン

も、この安定領域曲線を対象として設定されるべきであり、また高炉操業の安全を期するためには安定領域内に仕様が収まることが望しい。

この安定領域曲線は、翼列部断面変化率の選定によって、折点位置を移動しうるし、また段落失速点をずらすことによって傾斜と位置を変えうるもので、与えられた仕様に最も適合した形状となるように設計計画されるのが普通である。

3.4.4 効率の算定

電動機駆動の場合と異なり、タービンでは出力算定はきわめて困難であり、また算定された値の精度も低い。

したがってあらかじめ電動機駆動である航空技術研究所納3,750 kW 軸流圧縮機において精度を確認した方法によって送風機の実特性、すなわち断熱効率および全効率を計算した。以下その内容について述べる。

圧縮機の内部断熱効率 η_{ad} は第13図から次式のようになる。

$$\eta_{ad} = \frac{\Delta T_{ad}}{\Delta T} = \frac{\Delta T_{ad}}{\Delta T_{ad} + \Delta T_{loss}} \dots\dots\dots (1)$$

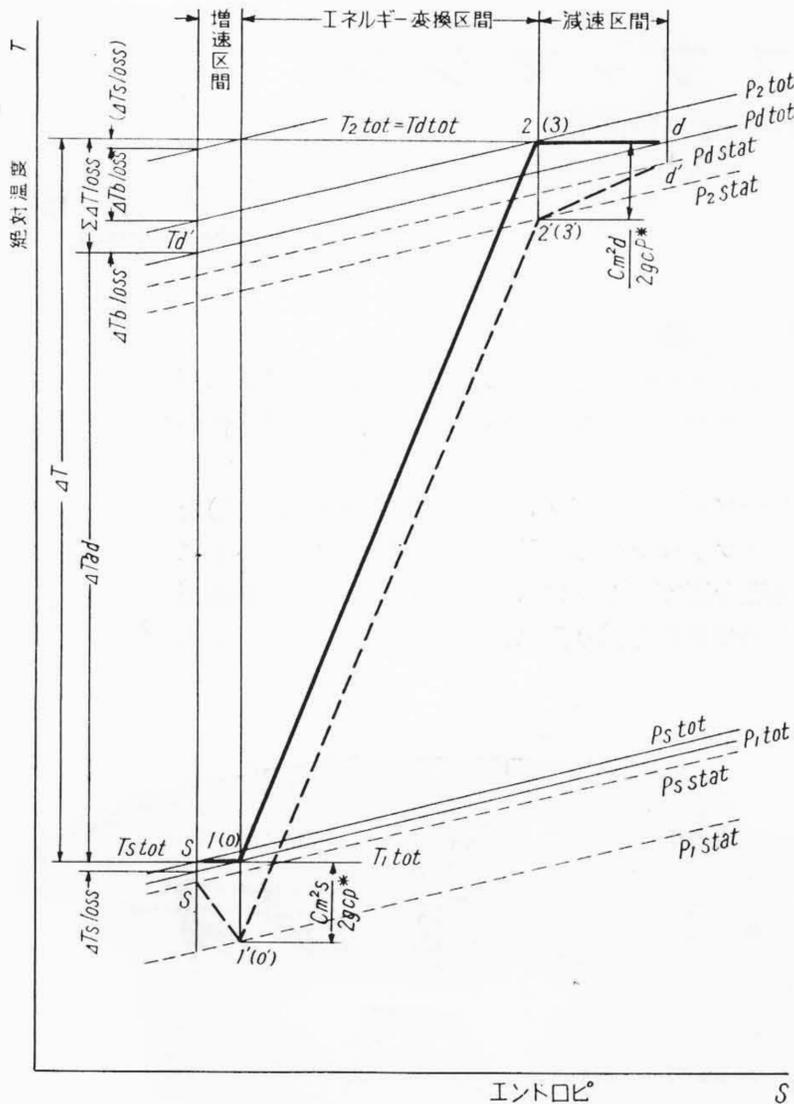
ここに ΔT_{ad} は断熱温度上昇で、 ΔT は損失を含めた実際の温度上昇値であり、それぞれ次式で求まる。

$$\Delta T_{ad} = T_{s \text{ tot}} \left[\left(\frac{P_{d \text{ tot}}}{P_{s \text{ tot}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ [}^\circ\text{C]} \dots\dots\dots (2)$$

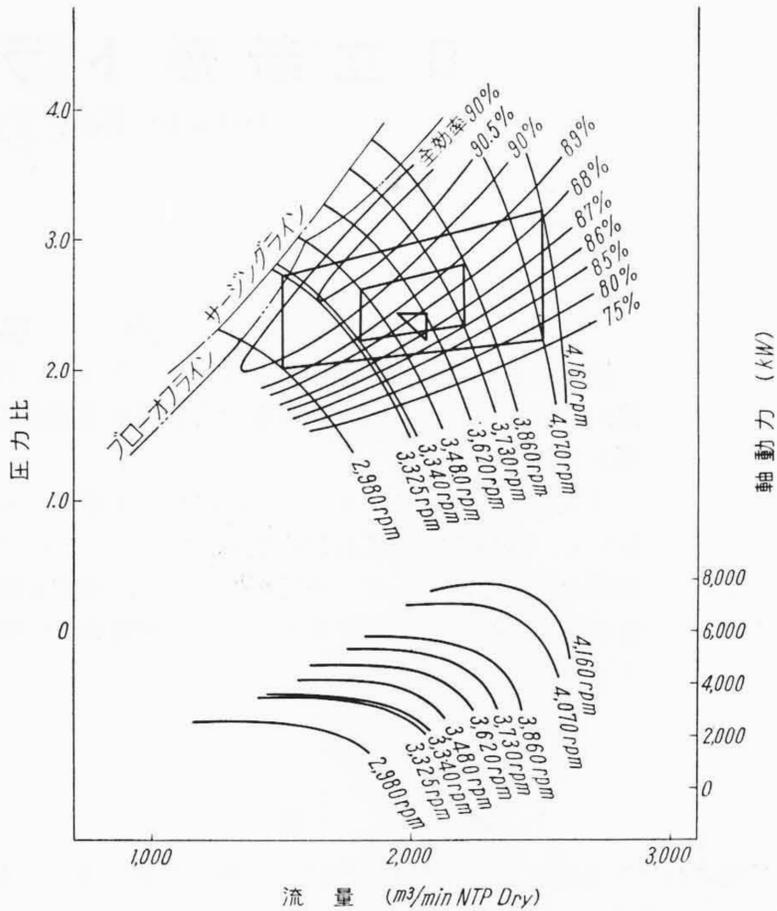
$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{d \text{ tot}} - T_{s \text{ tot}} = T_{2 \text{ tot}} - T_{1 \text{ tot}} \\ &= \Delta T_{ad} + \Delta T_{s \text{ loss}} + T_{0 \text{ loss}} + \Delta T_{b \text{ loss}} \\ &\quad + \Delta T_{3 \text{ loss}} + \Delta T_{d \text{ loss}} \text{ [}^\circ\text{C]} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

- ただし $T_{tot}, T_{s \text{ tot}}$: 全温および静温 [°K]
- $P_{tot}, P_{s \text{ tot}}$: 全圧および静圧 [kg/m²abs]
- ΔT_{loss} : 損失温度 [°C]
- R : ガス定数 [m³/°K]
- k : 比熱の比

また添字 s0123d は、第13図に示す状態、b は普通段の翼列を表わす。なお実際の温度上昇値 ΔT は、翼列各段にそう入されたサーミスタ温度計の読みを主とし、フランジ部の精密水銀温度

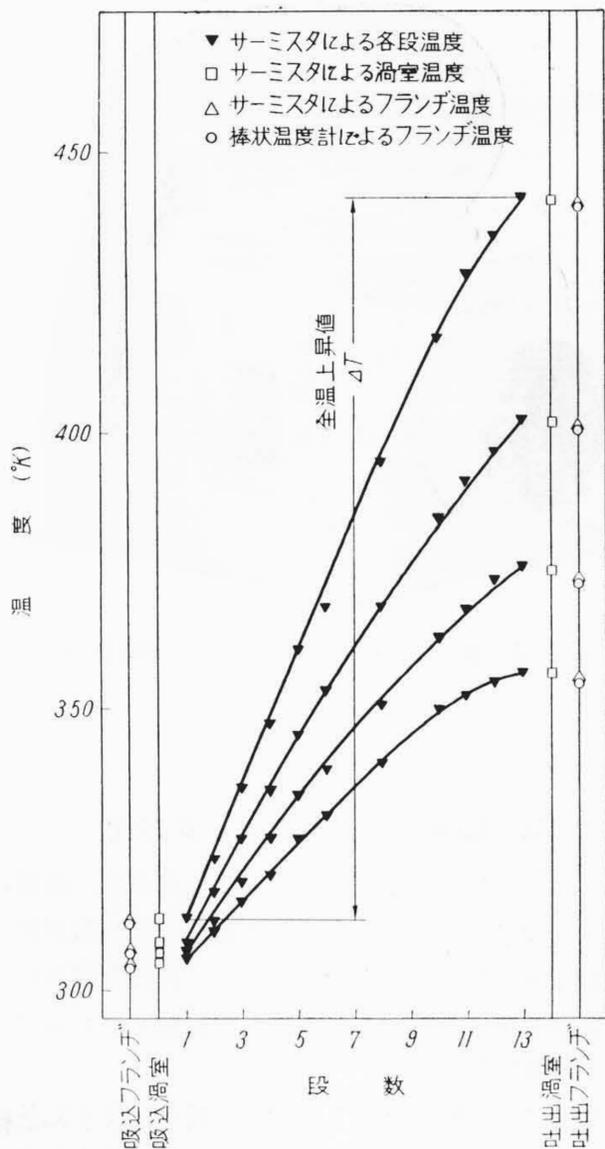


第13図 後置静翼形軸流圧縮機 T-S 線図



第15図 7,800 kW 軸流圧縮機性能曲線

計、およびサーミスタ温度計を副として決定した。その一例を第14図に示す。



第14図 全温上昇状態図

4. 性能試験

7,800 kW 軸流圧縮機の性能試験結果は、第15図に示すとおりであり、風量風圧ともに、標準状態に換算して示してある。効率については、3.4.4において述べた方法により算定した。

これらの性能曲線からわかるように、高効率の範囲はきわめて広く、使用範囲は安定な領域となっており後置静翼形軸流圧縮機が広作動領域を要求する高炉送風に対しきわめて合理的な特性を有していることが実証された。

5. 結 言

以上高炉送風機設備の概要を富士製鉄株式会社広畑製鉄所納7,800 kW および富士製鉄株式会社室蘭製鉄所納9,000 kW 軸流圧縮機を対象として述べ、高炉送風用として、これらが合理的な特性をもつとともに機械的にもきわめて安定した信頼度の高いものであることを示した。

当社においてはこれら高炉用軸流圧縮機に引き続き、空気分離装置用として圧力比約6の軸流圧縮機を完成しその特長を遺憾なく発揮し好評を博しているが、多くの特長をもったこの形式の圧縮機は、一般産業用としてますます利用範囲が広がるものと期待されている。

本軸流圧縮機的设计製作にあたり懇切なご指導をいただいた東京大学岡崎教授および富士製鉄株式会社広畑製鉄所および室蘭製鉄所の関係各位に深じんの謝意を表すものである。

参 考 文 献

- (1) 瀬賀：日立評論 42, 38 (昭35-10)
- (2) 空気工学便覧, 422 (昭31-コロナ社)
- (3) S. Lieblein: NACA RM E 53 L 22
- (4) E. Aguet: Sulzer Technical Review, 3, 1 (No.3-1955)
- (5) 石橋, 逢沢: 日立評論 43, 15 (昭36-2)