

大容量高性能DH形遠心圧縮機

Large Capacity and High Efficiency DH Type Centrifugal Compressor

兼 清 喜 雄*
Yoshio Kanekiyo

要 旨

新日本製鉄株式会社君津製鉄所納 15,000 Nm³/h 空気分離装置原料空気圧縮用 7,300 kW DH形遠心圧縮機を完成し、昭和43年10月に1号機が運転を開始して以来、現在3台が順調に稼働している。本遠心圧縮機は二軸4段形、中間冷却器付の等温圧縮機で7,300 kW 電動機により駆動されている。

本稿では本圧縮機設備の仕様、構造、特長、試験結果などについて要約して述べる。

1. 緒 言

近年、各種産業界における酸素の需要はますます増加の一途をたどり、とくに鉄鋼工業においては空気分離装置の大容量化が急速に進んでいる。この空気分離装置用原料空気圧縮機としては昭和30年ころより遠心圧縮機が使用され始め、その容量は年々増大してきた。

昭和43年に日立製作所は新日本製鉄株式会社君津製鉄所納 15,000 Nm³/h 空気分離装置を完成した。本装置に使用されている原料空気圧縮機は7,300 kW DH形遠心圧縮機で同形機の記録品である。

本原料空気圧縮機的设计製作にあたってとくに考慮した点は、高効率化により発生原単位を向上させること、2年間連続運転が行なえること、空気中のダストによる汚れを極力防止して性能の低下を少なくすること、および耐食性の向上を図ることなどである。以下に本機の仕様、機器配置、構造、試験結果などについて述べる。

2. 空気分離装置用遠心圧縮機の推移

7,300 kW DH形遠心圧縮機製作の背景となっている空気分離装置用原料空気圧縮機の推移について簡単に述べる。

昭和30年代にはいって日立製作所が空気分離装置の製作を開始して以来、酸素発生量約1,000 Nm³/h以上の装置の原料空気圧縮機としてはほとんど遠心圧縮機が使用されてきた。図1は昭和30年より現在に至るまでの空気分離装置容量、原料空気圧縮機容量、等温効率、形式などの推移を示したものである。

昭和34年ころまでは圧縮機形式はほとんど一軸多段形で効率も60%程度であった。昭和35年ころよりDH形機の等温効率が66~68%と向上して、6,000 Nm³/h程度までの分離装置に使用された。昭和36年には10,000 Nm³/hの分離装置用として軸流圧縮機が製作されたが、その後DH形の大容量化が進み、昭和39年には10,000 Nm³/h級の分離装置にもDH形が使用された。昭和41年には5,000 kW DH形機の等温効率は72%に達し、昭和43年になって本稿でのべる15,000 Nm³/h分離装置用7,300 kW DH形遠心圧縮機が完成し、等温効率も74%と世界最高水準に達した。

3. 設計仕様

15,000 Nm³/h 空気分離装置用原料空気圧縮機として使用されているDH形遠心圧縮機および駆動用電動機の設計仕様は次に示すとおりである。

3.1 遠心圧縮機仕様

形 式 IDHB-GH
(二軸4段形、増速歯車内蔵、中間冷却器付)

* 日立製作所川崎工場

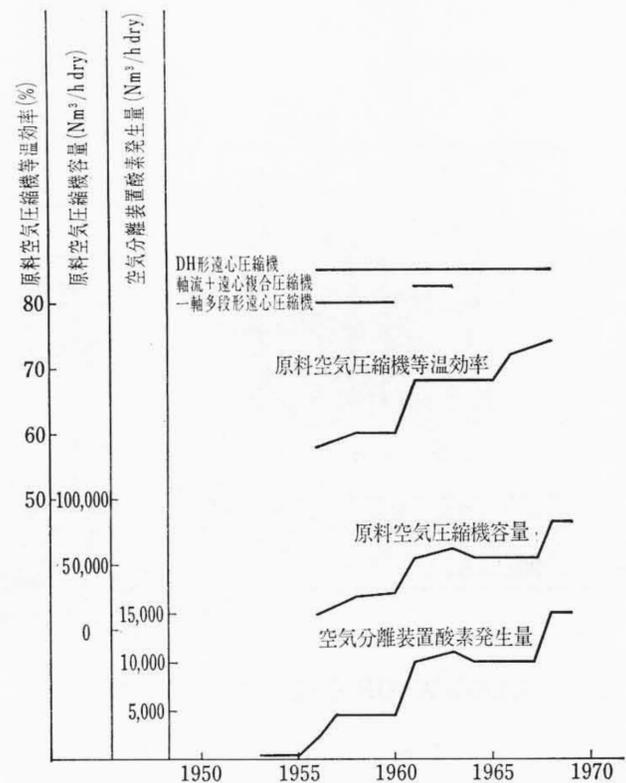


図1 空気分離装置および原料空気圧縮機の推移

口 径	吸込口径: 1,100 mm 吐出口径: 600 mm
段 数	4 段
風 量	81,970 Nm ³ /h dry.
吸 込 圧 力	-300 mmAq
吐 出 圧 力	4.9 kg/cm ²
吸込空気温度	30°C
相 对 湿 度	100%
取 扱 ガ ス	空気
冷 却 水 温 度	32°C
冷 却 水 質	海水
回 転 数	駆動軸 990 rpm 低速軸 5,150 rpm 高速軸 6,250 rpm

3.2 駆動用電動機仕様

形 式	TFZBLW-MCRYI (全閉内冷却形、冷却器付、巻線形回転子式)
出 力	7,300 kW
電 圧	11,000 V
極 数	6 極
周 波 数	50 Hz
回 転 数	990 rpm

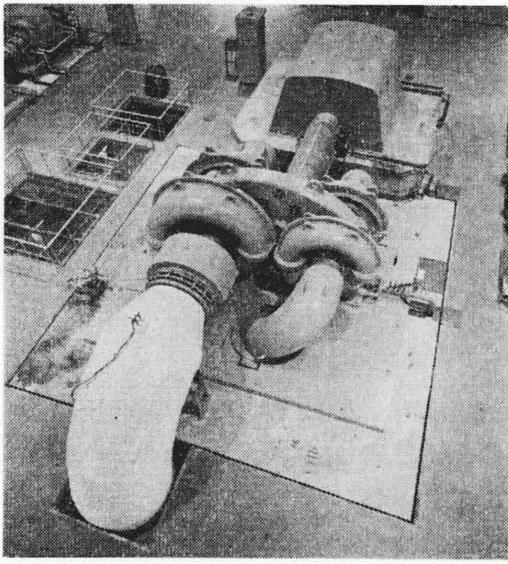


図2 原料空気圧縮用 7,300 kW DH 形遠心圧縮機

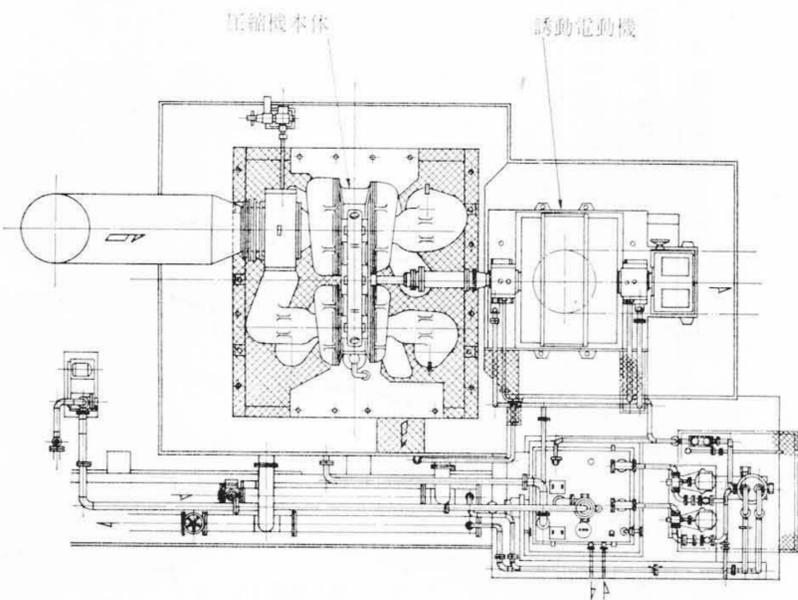


図3 7,300 kW DH 形遠心圧縮機 機器配置図

4. 機器配置

本圧縮機設備の機器配置は下部に3組の中間冷却器を内蔵した圧縮機本体の駆動軸と主電動機をギヤカップリングを介して直結した構造である。図2は本圧縮機設備の外観、図3は機器配置、図4は低速軸側の組立断面図である。

空気は吸込塔よりバグフィルタを経て、圧縮機1段目羽根車に吸い込まれる。圧縮機で所定の圧力に昇圧された空気は吐出配管に送り出され、吐出側消音器、逆止弁および水洗式冷却器を経て分離装置本体に送り込まれる。

5. 圧縮機構造

5.1 DH 形遠心圧縮機の基本構造

一般の遠心圧縮機は一軸多段形で圧縮比6程度では段数5~7段で途中に中間冷却器を1~2基付属するのが普通である。これに対しDH形遠心圧縮機の基本形は図5に示すように、主ギヤの両側にそれぞれ1本ずつ、計2本のピニオン軸を置き、各ピニオン軸の両端にそれぞれ羽根車をオーバハングして取り付けられた構造であり、4個の羽根車はそれぞれ独立している。このように配置された1~4段の羽根車の各段間には空気を冷却するための中間冷却器が合計3個設置されている。これらの中間冷却器は、羽根車と増速歯車装置を取めた本体の下部に設置されており、本体との間はダクトにより接続されている。圧縮比6の場合、羽根車周速は約300 m/sで各段の圧縮比は平均約1.6程度である。このようにDH形遠心圧縮機では

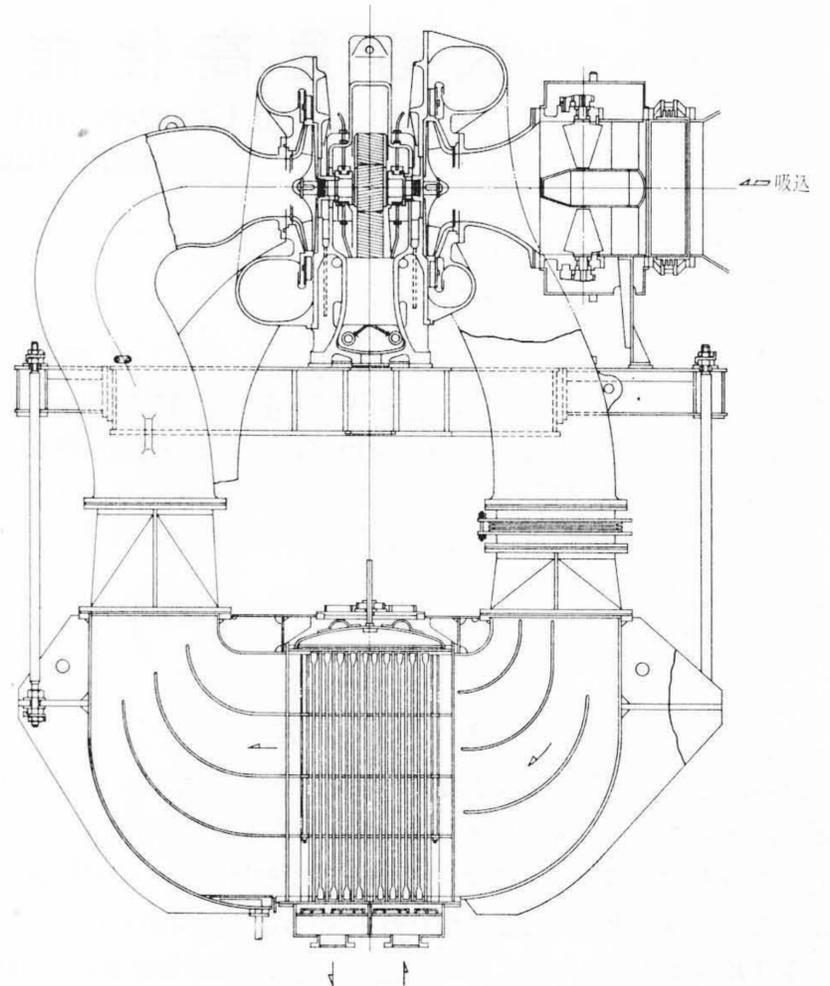


図4 7,300 kW DH 形遠心圧縮機 低速軸側組立断面図

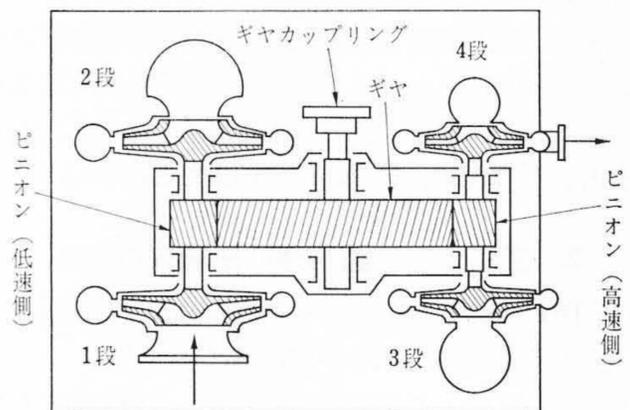


図5 DH 形遠心圧縮機 基本構造

表1 羽根車材質構造

	心板材質	側板材質	羽根材質	構造
1段羽根車	Ni-Cr-Mo 鋼	Ni-Cr-Mo 鋼	Ni-Cr 鋼	溶接
2段羽根車	Ni-Cr-Mo 鋼	Ni-Cr-Mo 鋼	13-Cr 鋼	銲接
3段羽根車	Ni-Cr-Mo 鋼	Ni-Cr-Mo 鋼	13-Cr 鋼	銲接
4段羽根車	Ni-Cr-Mo 鋼	Ni-Cr-Mo 鋼	13-Cr 鋼	銲接

各羽根車間に中間冷却器を設置して等温圧縮に近づけているので高い効率を得ることができる。

5.2 羽根車

本圧縮機の羽根車の構造、材質は表1のとおりである。羽根車形状は1~4段ともバックワード形でシュラウド付きである。各段羽根出口角度は性能のマッチングおよび減量特性を考慮して後段側ほど小さくなっている。

羽根車を単体で完成後、過速度試験を行なって機械的強度を確認したうえ、ピニオンシャフトに焼ばめで取り付け、ピニオンシャフトと一体になった状態で動的釣あい試験を行ない、不釣あい量がなく、機械的に安定なものとしている。

5.3 増速歯車

主軸の回転数は990 rpmで低速、高速、両ピニオン軸の回転数はそれぞれ5,150 rpmおよび6,250 rpmで増速比はそれぞれ約5.2および6.3である。歯車の形式はシングルヘリカルで主ギヤの直径は約2,200 mm、周速は約120 m/sである。寸法上の制約から主ギヤにはCr-Mo鋼の調質材を使用してシェービングにより歯仕上げを行なっている。主ギヤは直径に比較して歯幅が約1/10程度の非常に薄い円板であるため、ひずみが発生しないように材質、構造、熱処理、加工方法に種々の考慮を払っている。

両ピニオン軸にはNi-Cr鋼を使用し調質、浸炭を行なって歯面の硬度を高めるとともに、歯面を主ギヤに合わせて研磨し、安全かつ静粛な運転が保てるようにしてある。

両ピニオン軸にはそれぞれ両端に大きな羽根車をオーバハングしているため、加速あるいは減速の過程において、危険回転数を通過させることは好ましくない。したがって、その一次危険回転数を常用回転数よりじゅうぶん高い値になるように設計し、運転はすべて危険回転数以下で行なわれるようにして、振動によるトラブルの発生を防止している。この結果前述の完全なアンバランス修正と相まって常用運転中の振動は全振幅で10μ以下となった。

5.4 ケーシング

(1) ギヤケース

増速歯車を収納しており、上下二つ割れ構造で鋳鉄製である。ギヤ軸、両ピニオン軸の計3本の軸は平行に精度良く下ギヤケースに取り付けられた軸受により支持されている。下ギヤケースの両側面にはそれぞれスパイラルケースが取り付けられており、下ギヤケースは、圧縮機ケーシングの一部を形成している。

(2) スパイラルケース

各段羽根車を収納しているケースで各段それぞれ独立しており、羽根車より出た空気を効率良く集めて中間冷却器に導く役割を果たしている。本ケースは下ギヤケースにボルト締めで取り付けられている。

スパイラルケースはガイドベーン出口の空気の動圧を効率良く静圧に回収できるよう流体力学的に合理的な形状に設計されている。

5.5 軸 受

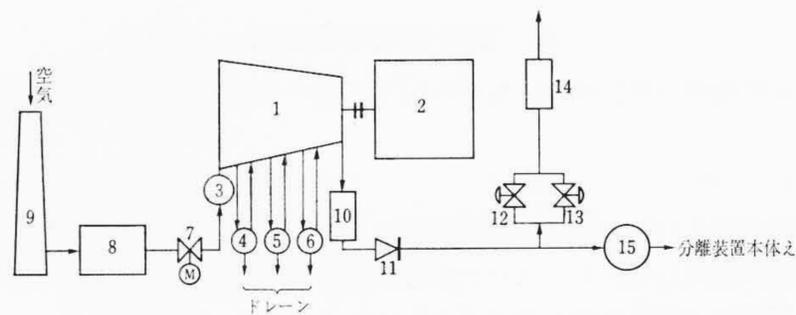
(1) ジャーナル軸受

主軸、両ピニオン軸を支持するため、合計6個のジャーナル軸受がある。主軸を支持している2個のジャーナル軸受には真円すべり軸受を採用した。これは主軸の回転数が低い場合オイルホワールなどの振動の起こる可能性がほとんどないこと、および主軸の位置のずれをできるだけ防止するためである。

これに対しピニオン軸の回転数は大であるから、両ピニオン軸を支持している4個の軸受には、楕(だ)円形すべり軸受を採用してオイルホワールによる異常振動の起こる可能性を防止している。6個の軸受形状は軸の安定性を良くするのみでなく、できるだけ機械損失が少なく、軸受温度上昇の小さい形状として、圧縮機効率の向上、軸受の安定性の向上につとめたので、実機の軸受温度上昇は各軸受とも約10℃あるいはそれ以下であった。

(2) スラスト軸受

1本のピニオン軸には2枚の羽根車が対向しているため、羽根車により発生する推力はほとんど打ち消されてしまう。またシングルヘリカルギヤ、ピニオンのかみ合いによって生ずる推力もこれを打ち消す方向に作用するように設計されているので、ピニオン軸に発生する推力はわずかである。この推力を受けるためにテーパランド形のスラスト軸受が各ジャーナル軸受の片側面に付属している。スラスト軸受にはじゅうぶんに余裕のある大きさのも



- ① DH形遠心圧縮機
- ② 7,300 kW 誘動電動機
- ③ 吸込ベーンコントロール装置
- ④ 1段目中間冷却器
- ⑤ 2段目中間冷却器
- ⑥ 3段目中間冷却器
- ⑦ 吸込側仕切弁
- ⑧ 吸込バグ式フィルター装置
- ⑨ 空気吸込塔
- ⑩ 吐出側消音器
- ⑪ 逆止弁
- ⑫ 放出圧力調節弁
- ⑬ 放出側ON-OFF弁
- ⑭ 放出用消音器
- ⑮ 水洗冷却塔

図6 7,300 kW DH形遠心圧縮機系統図

のを採用しているの、いかなる状態の運転にもじゅうぶん耐えることができる。

5.6 中間冷却器

圧縮機の運転状態をできるだけ等温圧縮に近づけるため、1~4段の各羽根車間に1個ずつ、合計3個の中間冷却器を使用している。

先にも述べたようにこれら3個の中間冷却器はいずれも圧縮機本体下部に設置されており、本体とはダクトにより接続されている。冷却器はシェルアンドチューブ式でチューブには冷却面積の大きいフィン付チューブを採用している。冷却水が東京湾の汚染海水であるため、チューブ材として7~3キュプロニッケルを使用し、このチューブの外面に黄銅製のフィンを巻き付けた構造である。

冷却器では大気中の水分が凝縮してドレインが発生する。このドレインに大気中のSO₂、SO₃などが溶けこんでH₂SO₃、H₂SO₄などが生ずる。このようにしてできるドレインは最悪の場合pH≒3という悪い条件になる。このためドレイン分離器を設置してドレインを分離すると同時に冷却器ケースなどチューブネスト後流側の部品にステンレス鋼を使用している。

5.7 吸込ベーンコントロール装置

圧縮機1段目羽根車入口には効率の良い容量制御のできるベーンコントロール装置が付属している。本ベーンコントロール装置は円筒形のケースの内側に扇形のベーンが10枚、放射状に取り付けられており、ケース外側で駆動軸を動かすことにより、同時に全部のベーンが同一開度に調節されるものである。ベーンの形状は対称形の翼形で、ベーンを絞った場合、羽根車に対してプレホワールを与えて羽根車の減量特性を良くする方向にベーンを傾けるよう考慮されている。

5.8 制御および保守装置

本圧縮機の制御方式は空気分離装置の必要空気量に合わせて吸込ベーンコントロール装置を遠隔手動操作で調節する方式である。その容量制御範囲は約70%までである。本圧縮機吐出側には空気分離装置の抵抗増大時の圧縮機サージング防止用の圧力調節弁および起動、停止用の放風弁を設置してある。本圧縮機の系統図は図6に示すとおりである。

本圧縮機には、軸受温度上昇、給油圧力低下、給油温度上昇、吐出空気温度上昇、発生装置各所異常、電気的な各種異常などの各種の異常事態に対しその状態に応じて警報を発するか、または圧縮機をトリップさせる保安装置があり圧縮機を保護している。

圧縮機の起動、停止方法はワンタッチ操作による自動起動方式である。

6. 技術的な特記事項

本圧縮機を設計するにあたり以下に述べる事項につき、特に留意した。

6.1 効 率

酸素発生のために分離装置全体で消費する動力の約99%を本圧縮機で使用している。このため酸素発生原単位を向上するためには本圧縮機の等温効率を向上させなければならない。

本圧縮機の設計においてはすでに製作実績のある10,000 Nm³/h級空気分離装置用の5,000 kW級DH形遠心圧縮機のデータをもとにして、特に次に述べる各項目の対策を行なって等温効率の向上を図った。

- (1) 各段羽根車に高効率の羽根車を使用し、各段羽根車とも仕様点付近で効率が最高となるよう、羽根出入口角度を選定した。
- (2) 各段とも、羽根車出口側にガイドベーンを設置して動圧を効率良く静圧に回収できるようにした。
- (3) 羽根車から出口ガイドベーンを通過する際に、できるだけ圧力損失を少なくし、さらにガイドベーンに続くスパイラルケースの断面変化の割合をスパイラルケース各部の流速が一樣になるよう設計し圧力損失の軽減につとめた。
- (4) 羽根車マウスブッシュ、バランスブッシュのフィン材として非常にやわらかいAl合金を使用し、ブッシュと回転体とのギャップを小にすることにより、羽根車の効率を向上させた。また径の大きく漏れ量の大きいマウスブッシュについては従来の径方向ブッシュを軸方向ブッシュに変更することによりギャップをさらに小さくしてブッシュからの漏れ空気量を軽減した。
- (5) 各段間に設置した中間冷却器の出口空気温度をできるだけ低い値になるよう設計し、2~4段羽根車の消費動力を軽減した。
- (6) 中間冷却器のチューブネスト後流側にミストセパレータを設置して、冷却器で発生するドレーンを高効率で分離することにより、次段の羽根車に吸い込まれるドレーンを少なくして消費動力を軽減した。
- (7) 各スパイラルケーシング出口より中間冷却器、サクシオンパイプを経て次段の羽根車に吸い込まれるまでの流路を流体力学的になめらかな形状にして圧力損失を小さくした。
- (8) 増速歯車の歯面を高精度に仕上げ、かみ合いをなめらかにし、歯面の潤滑、冷却がじゅうぶん行なわれて、しかも機械的損失が最も小さくなるように給油方式および給油量を選定した。
- (9) ジャーナルおよびスラスト軸受には強度および振動に対して安全でしかも機械的損失の非常に小さい構造を採用した。

前述の各項目の効率向上対策の効果は各項目ごとに完全には分析することはできないが、圧縮機全体の等温効率として最高74%を得た。

6.2 腐 食 対 策

製鉄所の設置されている場所はほとんど大工業地帯である。このため圧縮機の取り扱う空気はSO₂、SO₃などを多量に含んでいる。その含有量は場所、風向などにより異なるが最高1.0 ppmに達する。SO₂、SO₃などは乾燥状態では腐食力が非常に弱い水分と結合するとH₂SO₃、H₂SO₄となり強い腐食性を発揮する。中間冷却器付の遠心圧縮機においては中間冷却器で発生するドレーンを空気中のSO₂、SO₃により、上述のH₂SO₃、H₂SO₄が生成し、このドレーン

は最悪の場合、pH≒3程度となる。このドレーンが中間冷却器、連結ダクト、羽根車なども腐食させる。特に羽根車は腐食されると大幅に性能が低下し、減肉により破損するので危険である。このため本圧縮機においては次に述べる各項目の腐食対策がとられている。

- (1) 中間冷却器より空気を吸い込む2~4段の羽根車には羽根材として13Cr鋼を使用し、心板および側板の主要部にはステンレス肉盛を施行している。
- (2) 2~4段の羽根車出口ガイドベーンには13Cr鋼を使用している。
- (3) 中間冷却器チューブネスト用材料として下記のものを使用した。
チューブ——7-3 キュプロニッケル管+黄銅製フィン
チューブプレート——ネーバルプラス
仕切板——18-8 ステンレス鋼板
ボルト類——13Cr 鋼
- (4) 中間冷却器ケースのチューブネスト後流側の流路面に18-8 ステンレス鋼板を使用した。
- (5) 中間冷却器と羽根車の接続管に不銹鋼および鋳鉄を使用した。
- (6) 中間冷却器チューブネスト後流側にドレーン分離器を設置して、中間冷却器で発生したH₂SO₃、H₂SO₄を含んでいるドレーンを高効率で分離し、機外に取り出した。
- (7) エリミネータ以降の羽根車吸込口までの風速を低下させて空気の運び得るミスト状のドレーン量を減少させた。

以上に述べた各種の腐食対策を実機に実施した結果、1年間の連続運転においても羽根車には機械加工時のバイト目が全部きれいに残っており、各部品とも腐食は全然起こっていない。

6.3 汚 れ 対 策

6.2で述べたように製鉄所の空気は非常に汚れているため、圧縮機がこの汚れた空気を吸い込むと腐食の問題とともに汚れによる性能低下の問題が起こってくる。ダストは一般に乾燥状態では付着しにくい、水分があって湿っている場合には付着しやすくなる。本圧縮機においては次に述べる対策を施してダストの付着を防止している。

- (1) 圧縮機入口に集塵(じん)効率の高いバグ式フィルタを設置して圧縮機に吸い込まれるダスト量を非常に少なくした。
- (2) 6.2(6)、(7)項の対策によりチューブネスト部でドレーン中に混入したダストをドレーンとともに機外に取り出し、羽根車に吸い込まれるダスト量を減少させた。
- (3) 6.2(3)、(4)、(5)、(6)、(7)項の対策により圧縮機内部で発生するスケールを防止した。
- (4) ダストの付着による性能低下の最も激しい羽根車の羽根表面を鏡面仕上げしてダストが付着しにくくした。

以上に述べた各項目の対策を行なった結果、1年間の運転において、ダストの付着はほとんどなく、性能低下量も従来2~3%あるいはそれ以上であったものが0.5%以下ときわめて良好な結果を示している。

7. 試 験 結 果

本圧縮機を現地に据付け運転した結果、機械的にも流体性能的にも優秀な結果が得られた。図7は本圧縮機の性能試験結果を示したものである。等温効率は最高74%というこの種の圧縮機としては世界最高水準の値を示している。機械的な安定度は振動値が全振幅で10 μ以下、軸受温度上昇が10℃以下というきわめて良好な値が得られた。本機は昭和43年10月より順調に稼働を続けている。

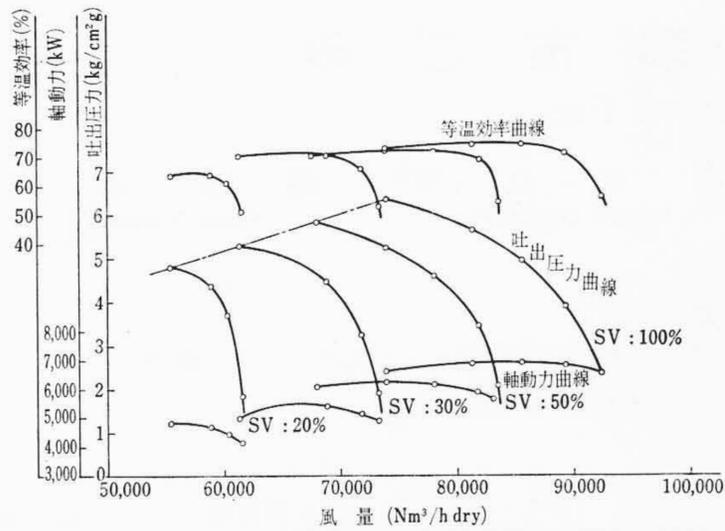


図7 7,300 kW DH形遠心圧縮機性能曲線

8. 結 言

以上に新日本製鉄株式会社君津製鉄所納め 15,000 Nm³/h 空気分離装置原料空気圧縮用 7,300 kW DH 形遠心圧縮機設備の概要について述べた。本設備はわが国有数の大容量機であるとともにその高い等温効率と徹底した腐食および性能低下対策により、今後の空気分離装置の大容量化に寄与するところきわめて大である。日立製作所は本機に引き続き、新日本製鉄株式会社に2台を納入し、現在新日本製鉄株式会社ほか2社納め計5台の同形機を製作中である。

最後に本圧縮機的设计製作にあたり懇切な指導をいただいた新日本製鉄株式会社建設本部、君津製鉄所および日立製作所の関係者各位に対し、ここに謹んで感謝の意を表する。



新案の紹介



登録実用新案 第884945号

大野 宏

トング開閉装置

本考案はソーキングビットクレーンにおけるトング全体の幅を変えないで、インゴットのつかみ力を増大させようとするトング開閉装置に係わるものである。

従来のトング開閉装置は図1および図2に示すようにネジまたは油圧により上下動し、かつトング1のレバー部2と掛合するラム3の下端にラム3と一体のつち形引掛部4を取り付けたものであり、ラム3に加えられる引張力を N 、トング1のレバー比を B/A 、インゴットのつかみ力を F とすると、

$$F = N \times \frac{B}{2A}$$

という関係がある。

したがって、つかみ力を増大させるためには、(1) 引張力 N を大きくする。(2) トングのレバー部の長さ B を大きくする。(3) トングの長さ A を小さくする。などの方法があるが、引張力 N を大きくするとつかみ装置自体の値段が高くなる。またトングのレバー部の長さ B を大きくすると、トング全体の幅 W が大きくなるため、インゴットを均熱炉に入れる際の炉内の有効面積が減少する。さらにトングの長さ A を小さくすると、トングの開き範囲が小さくなる。

本考案は図3および図4に示すように、ネジまたは油圧により上下動し、かつトング1'のレバー部2'と掛合するラム3'の下端中心にラム3'と一体に形成したかぎ形引掛部4'の中心を食い違わせて取り付けようにしたものである。

本考案によればトングの全幅 W を変えないで、レバー部の長さ B を大幅に増大させたことになるので、従来のものより大きなつかみ力を得ることができる。

また本考案のトング開閉装置を既存のクレーンのラムおよびトング

と取り替えれば、既存のクレーンの容量を増大させることができる。(鈴木)

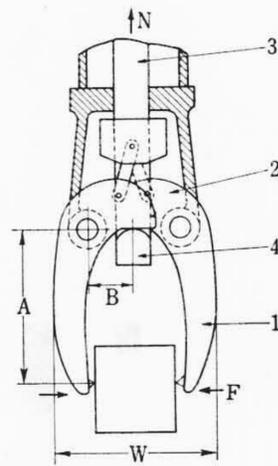


図 1

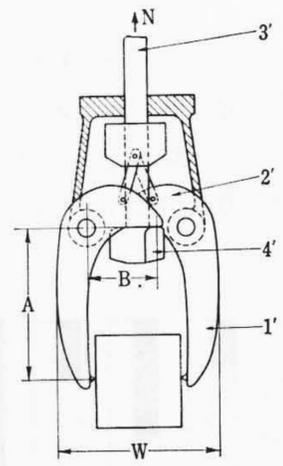


図 3

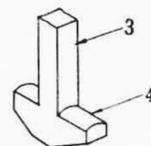


図 2

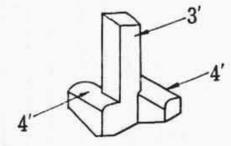


図 4