

# 新DH形遠心圧縮機

## New DH Type Centrifugal Compressor

大容量酸素発生装置や作業空気源に使用される空気圧縮機及び窒素圧縮機では、その消費動力の大小が直接プラントの動力原単位に大きく影響するため、高性能が強く要求されてきている。日立製作所ではこれに応ずるために、種々の新技術を開発し、それらを集約して新DH形遠心圧縮機を完成した。

この新DH形遠心圧縮機は3次元羽根車、プレートフィン熱交換器などの新技術を採用し、大幅な高効率化、小形軽量化及び高信頼性を図っている。また、容量範囲も遠心形では最大の $330,000\text{m}^3/\text{h}$ まで可能となった。昭和51年9月に $7,900\text{kW}$ 遠心圧縮機を完成したが、本機では全等温効率で75%というこの容量の遠心圧縮機としては国際的にみて最高値を達成した。

刑部一郎\* *Gyōbu Ichirō*  
 三階春夫\*\* *Mishina Haruo*  
 湊 昭\*\*\* *Minato Akira*  
 石井 滋\*\*\*\* *Ishii Shigeru*

### 1 緒 言

近年、各種産業界における酸素の需要は増加の傾向にあり、特に鉄鋼産業では空気分離装置の大容量化が急速に進んだ。この空気分離装置用原料空気圧縮機としては、運転保守の容易さから遠心圧縮機が広く採用されてきた。

日立製作所では昭和46年に酸素発生量 $30,000\text{Nm}^3/\text{h}$ 空気分離装置用 $16,000\text{kW}$  DH形遠心圧縮機を完成したが、その後、更にそれを上回る大容量プラントの計画が出てきたため、圧縮機においても大容量化を迫られた。

また、エネルギー価格の高騰によりプラントの動力原単位向上が強く要求されるようになってきたが、この空気分離装置では原料空気圧縮機が消費動力のほとんどを占めるため、圧縮機の高効率化が強く要求されていた。これらの要求に対し、既存の技術だけでは種々の技術的問題が生ずることが予想された。そのためすべての圧縮機構成要素、例えば羽根車、冷却器、増速歯車、軸継手などについて新技術を開発し、それらを集約して新DH形遠心圧縮機を製品化した。既に現在までに5台を完成し、引き続き目下世界各国より数多くの引合いを受け、受注に成功している。

以下、この新DH形遠心圧縮機の概要について述べる。

### 2 新DH形遠心圧縮機の全体構成と特長

新DH形遠心圧縮機の構成は、図1に示すように増速歯車装置と一体になった圧縮機本体、中間冷却器及び給油装置の3部分に分けられる。

圧縮機本体は、図2に示すように電動機よりギヤカップリングを介して駆動されるブルギヤの両側に2本のピニオン軸を配置し、各々のピニオン軸の両端にそれぞれ羽根車を取り付けた2軸4段形である。各段の間には空気を冷却するため中間冷却器が3個設置され、また中間冷却器と圧縮機本体との間は配管により接続されている。

新DH形遠心圧縮機は従来形機に比べて、小形高性能、高信頼性を追求した遠心圧縮機である。次にその主な特長を列記する。

- (1) 全等温効率が約4%向上している。
- (2) 3次元羽根車、プレートフィン熱交換器の採用により機

械全体としても同一容量で約80%(重量比)まで小形化されている。

- (3) キーレス軸継手、滲炭歯車の採用により、信頼性が向上している。

- (4) 小容量機は中間冷却器上に圧縮機本体を設置したセミパッケージタイプを採用し、据付けが容易になるとともに据付面積が低減している。

以上のような特長を備える新DH形遠心圧縮機は、図3に示すように $15,000\text{m}^3/\text{h}$ から $330,000\text{m}^3/\text{h}$ までの容量範囲を8機種でシリーズ化している。

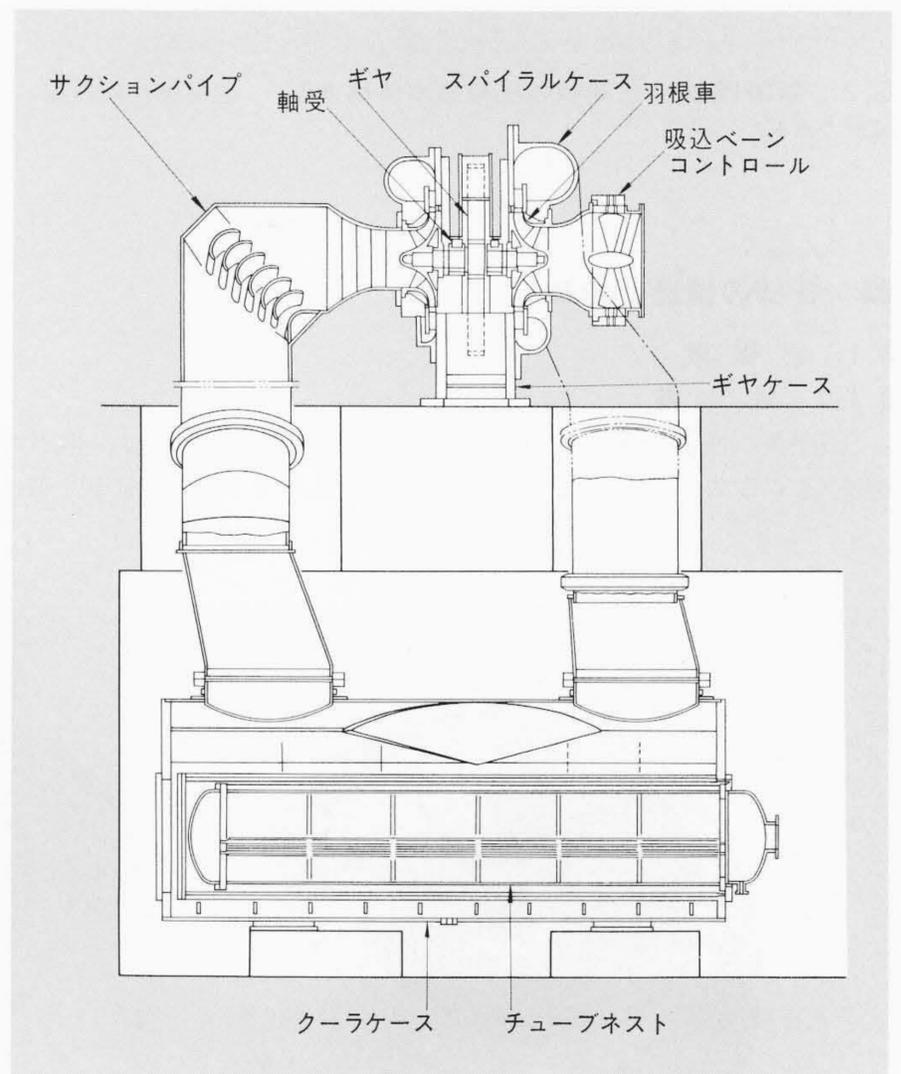


図1 新DH形遠心圧縮機の全体構造図 圧縮機全体は、増速歯車装置と一体になった圧縮機本体、中間冷却器及び給油装置より構成される。

\* 日立製作所土浦工場 \*\* 日立製作所機械研究所 \*\*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\*\* 日立製作所勝田工場

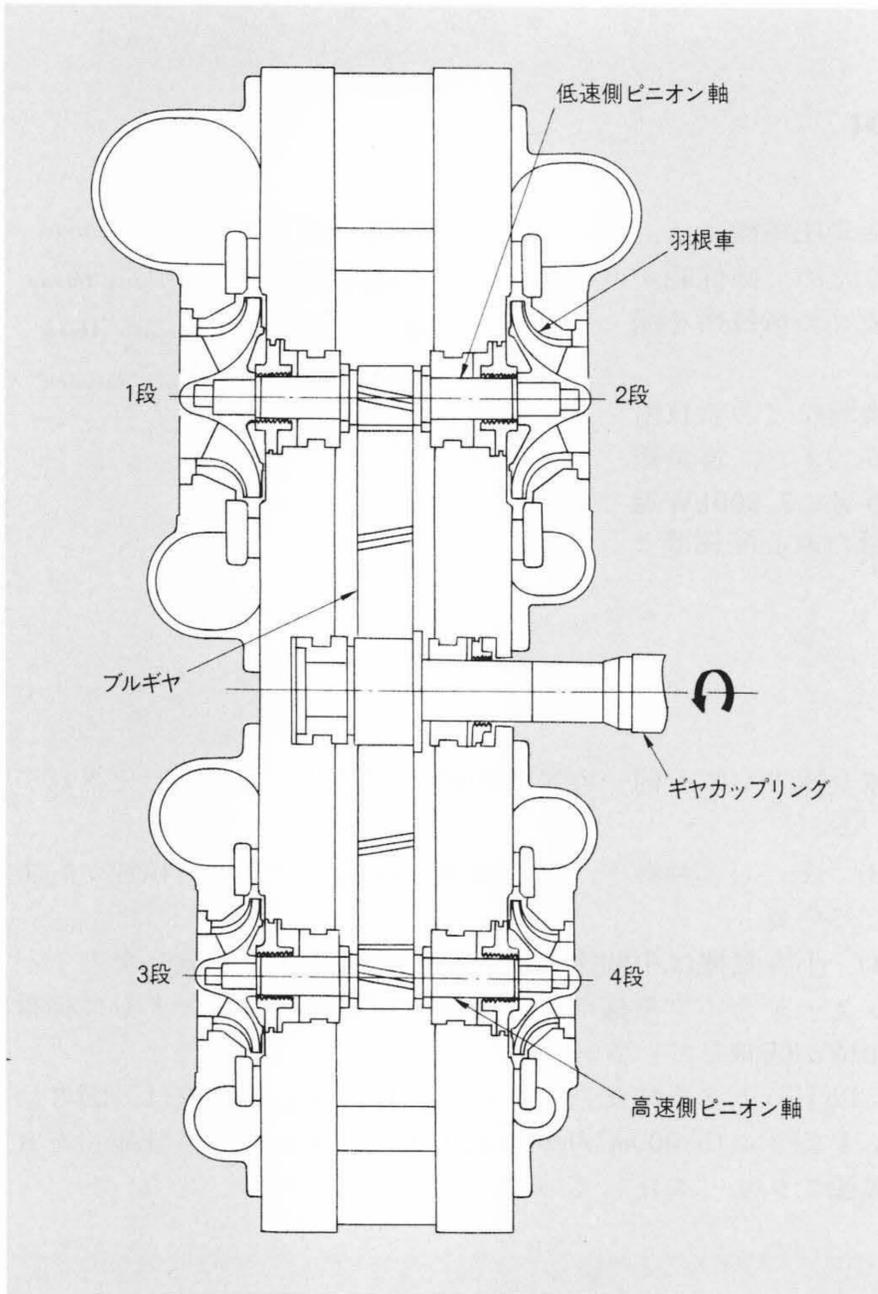


図2 新DH形遠心圧縮機の圧縮機本体構造図 圧縮機本体は2軸4段形である。

### 3 各部の構造と特長

#### 3.1 羽根車

##### 3.1.1 性能

圧縮機の性能を低下させることなく小形化するには、高比速度化することが行なわれている。従来の2次元羽根車を高

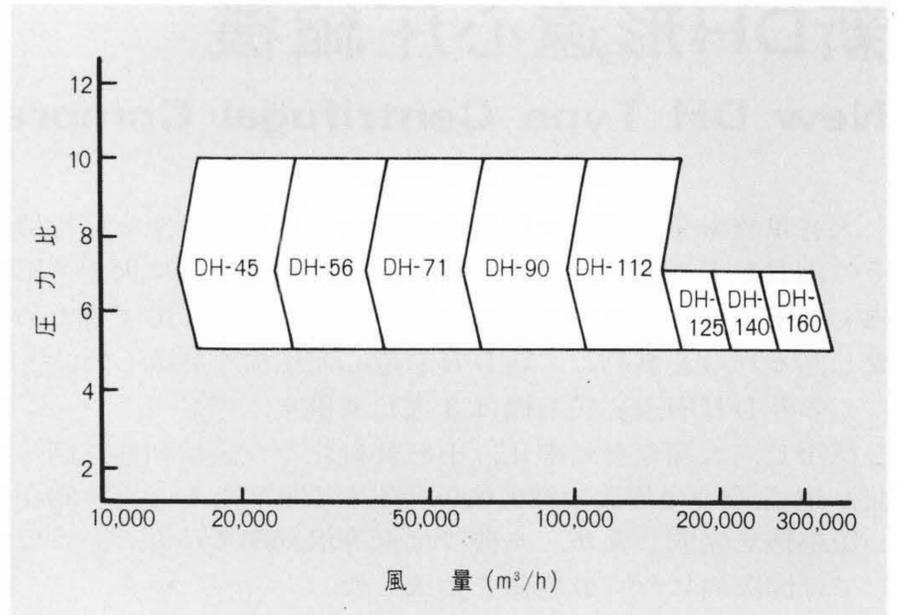


図3 新DH形遠心圧縮機の容量範囲 遠心圧縮機としては、世界最大容量の330,000m<sup>3</sup>/hまで製作可能となった。

比速度にすると、羽根車出入口幅が相対的に大きくなり、羽根入口部の流れ角度と羽根角度が部分的に大幅に異なったり、羽根のない入口流路で速度が大幅に減速して流れがはく離して性能が低下する。そこで従来の2次元羽根車に代わり、新形機では流路はすべて羽根をもち、しかも流れに合った羽根形状をもつ3次元羽根車を採用した。図4に3次元羽根車及び2次元羽根車を、図5に2次元羽根車と3次元羽根車との性能比較を示す。3次元羽根車は2次元羽根車に比べて、圧力係数、断熱効率、作動範囲ともに著しく優れている。3次元羽根車は形状が非常に複雑であるが、その採用に当たってはモデル羽根車による基礎実験を行なうと同時に、大形電子計算機を駆使して羽根車内の内部流れを解析し、同時にフローパターンに応じた損失分析による性能予測を行ない、羽根車諸元を最適化する設計方法を確立した。例えば、羽根車最適化諸元の一つである相対速度分布と性能との関係の一例を図6に示す。同図は計算により得られた羽根車のシュラウド上の相対速度分布と、その性能の比較を示している。相対速度分布の相違によって、性能がかなり異なることが分かる。この3次元羽根車の採用により、従来に比べ同一容量に対し、羽根車外径は約20~30%減少し、各段の断熱効率は約3~4%向上した。

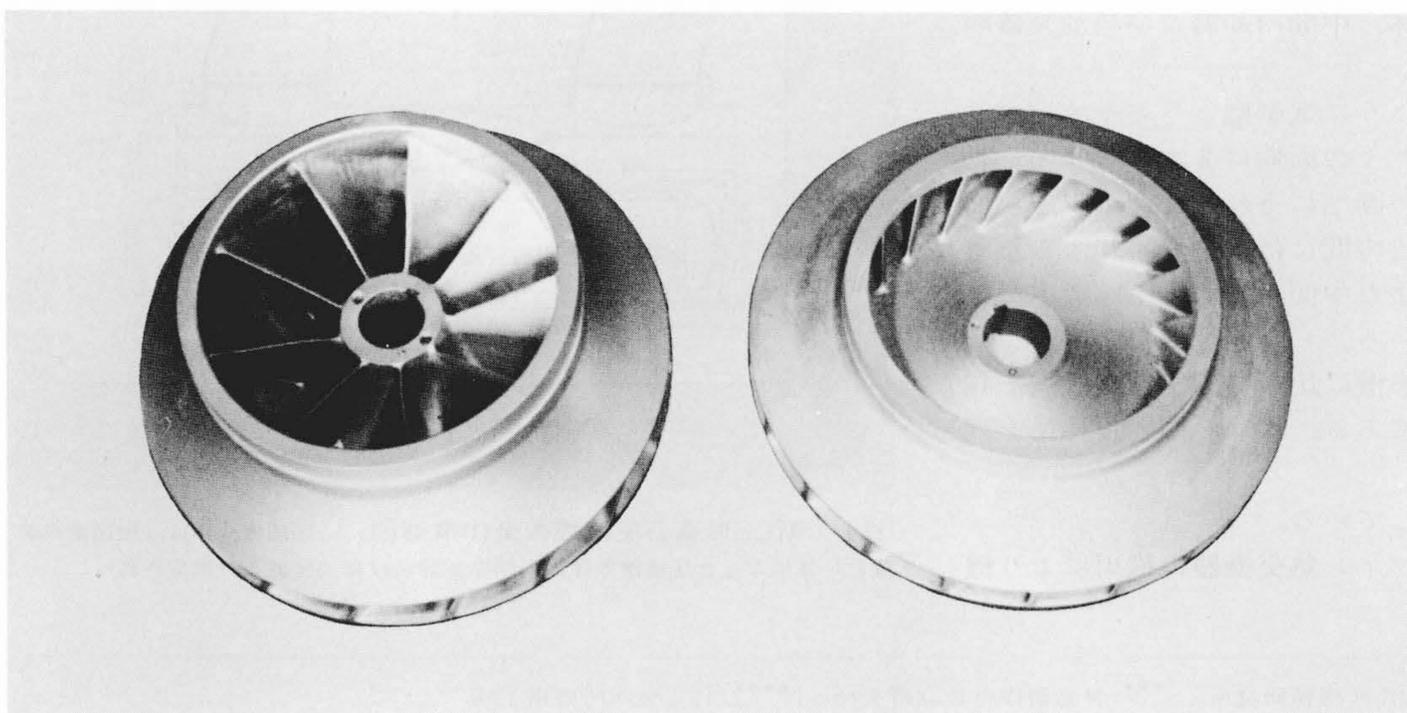


図4 3次元羽根車と2次元羽根車 左に直径480mmの3次元羽根車を、右に2次元羽根車を示す。

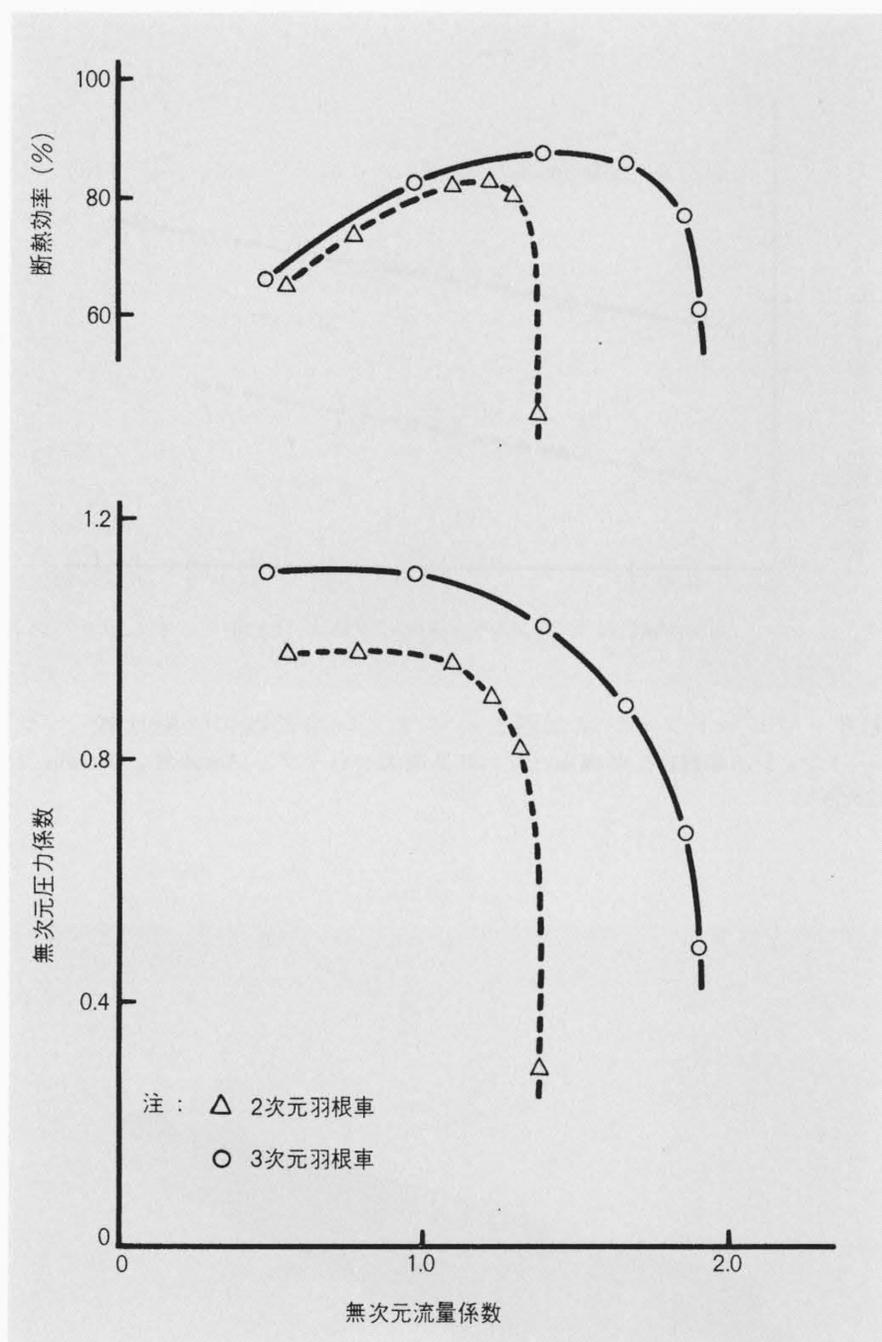


図5 2次元羽根車と3次元羽根車の性能比較 3次元羽根車は2次元羽根車に比べて、圧力係数、断熱効率、作動範囲ともに著しく優れている。

表1 羽根車の実体強さ HUS100羽根車及び精密鋳造羽根車の各部から採取した実体試験片の機械的性質を示す。

羽根車の種類		降伏強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	衝撃値 (kg-m/cm <sup>2</sup> )
HUS100 羽根車	心板	101.9	110.8	19.8	61.7	22.36
	側板	102.6	109.2	20.2	65.9	23.55
精密鋳造 羽根車	心板	92.3	98.6	23.6	57.6	12.05
	側板	93.7	100.1	21.7	58.8	12.83

注：調質状態

引張試験片は、平行部6mmφ、22.5mm長さ

衝撃試験は、2mmUノッチ、20°C

### 3.1.2 材 料

大径の羽根車は溶接構造でその材料はNi-Cr-Mo鋼が普通使用される。中間冷却器をもつ空気圧縮機では、中間冷却器で発生するドレーンと吸い込んだ空気中のSO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>により、H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>が生成され、このドレーンは最悪の場合、pH≒3程度となり羽根車を腐食させることがある。このような強い腐食環境にあっても適合する新材料として、高強度高靱性耐食鋼(HUS100)を開発した。HUS100は降伏点が100kg/mm<sup>2</sup>

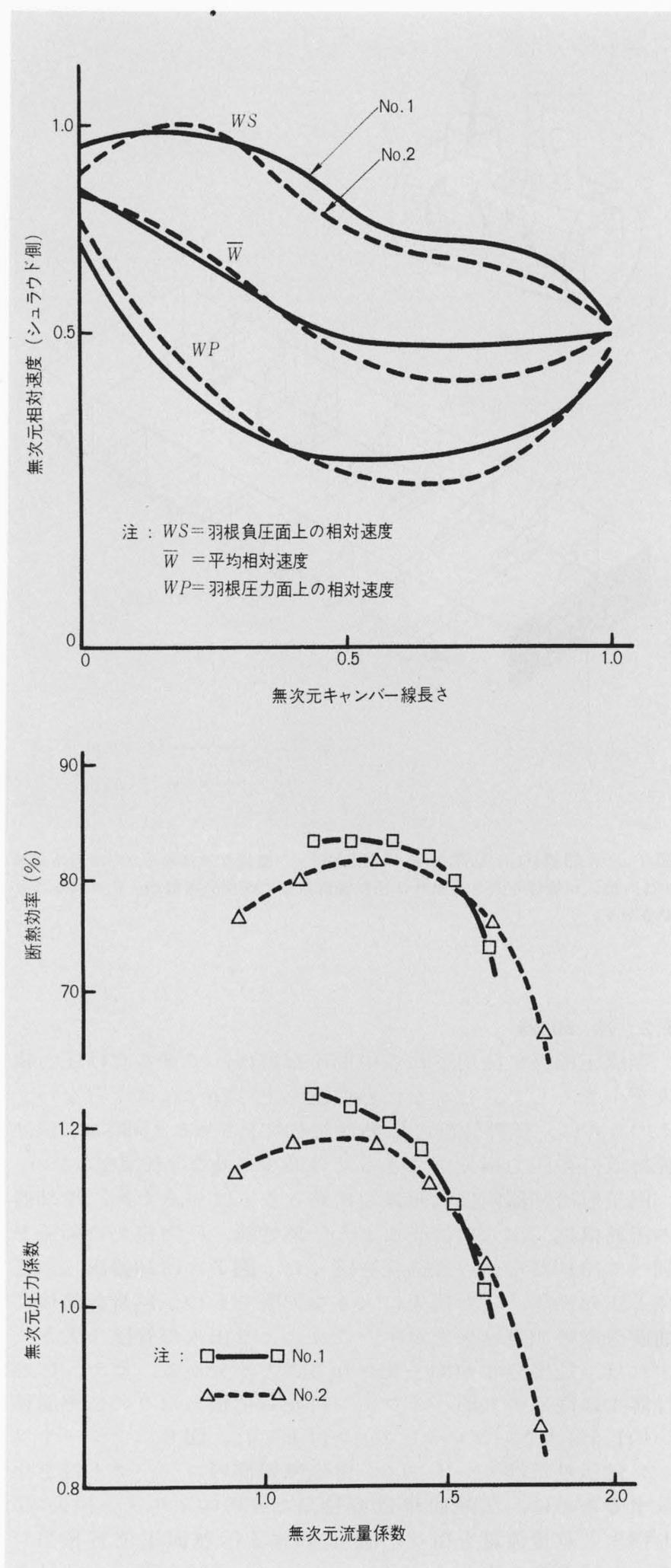


図6 羽根車の相対速度分布と性能との関係 相対速度分布の相違によって性能がかなり異なり、最適分布が存在することを示す。

mm<sup>2</sup>以上をもつ特殊13Cr鋼で、強度・耐食性・溶接性ともに非常に優れている。

小径の3次元羽根車では溶接による製作が困難であるため、新たに精密鋳造羽根車を開発し採用した。精密鋳造羽根車の材料については、強度・耐食性・鋳造性を考慮して特殊13Cr鋼を採用した。表1にHUS100及び精密鋳造材を使用した実体強度試験結果の一例を示す。

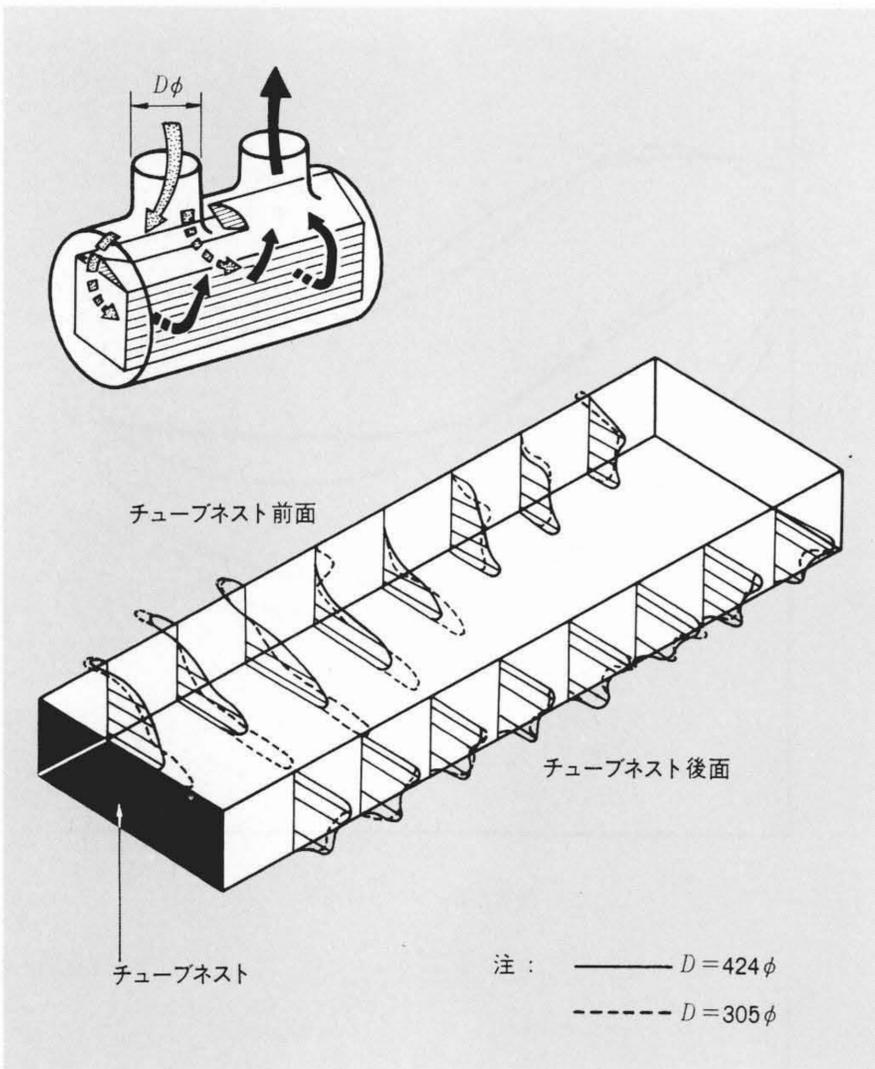


図7 冷却器内の風速分布の測定例 複雑な流路をもつ円筒形冷却器では、出入口管径を大きくすれば伝熱管群前後の速度分布は均一化されることが分かる。

### 3.2 冷却器

等温圧縮機に使用される中間冷却器は、できるだけ圧力損失を小さくして、しかも伝熱性能を上げなければならない。そのために、伝熱管群の伝熱性能を向上させると同時に、伝熱管群以外の圧力損失をできるだけ減少させなければならない。

円筒形冷却器内部は複雑な流路となっているため、冷却器の流路構造、出入口管径などと伝熱性能、圧力損失の関係を調べて冷却器全体の最適化を図った。図7に冷却器出入口管径と伝熱性能、圧力損失に大きな影響をもつ伝熱管群前後の速度分布の測定結果を示す。これにより出入口管径を大きくすれば、速度分布が均一化されることが分かる。また、伝熱管群では従来の丸形ハイフィン付から体積当たりの伝熱面積が約1.5倍大きいプレートフィン付とした。図8にプレートフィン付伝熱管群とハイフィン付伝熱管群のコンパクト性を比較するために、伝熱面単位容積当たりのエネルギー損失(圧力損失と重量流量を掛けた値)に対する伝熱面単位容積当たりの熱通過率を表わす。プレートフィン付冷却器は、体積当たりの熱通過率は従来のものよりも約1.7倍大きいことが分かる。またこのプレートフィン付冷却器の設計製作においても日立製作所独自の標準プレートフィンブロック方式を採用して、生産の合理化を行なっている。図9にプレートフィンブロックを示す。このようにして、プレートフィン付冷却器は従来に比べ、冷却器全体の体積が約30%小形化しながらも、空気側の圧力損失は約20%減少し、圧縮機の効率向上に寄与した。また冷却水量も約40%減少させることができた。

### 3.3 増速歯車

新DH形遠心圧縮機用増速歯車は伝達動力は25,000kW、増速比は15、周速は160m/sまで使用される高周速高負荷歯車

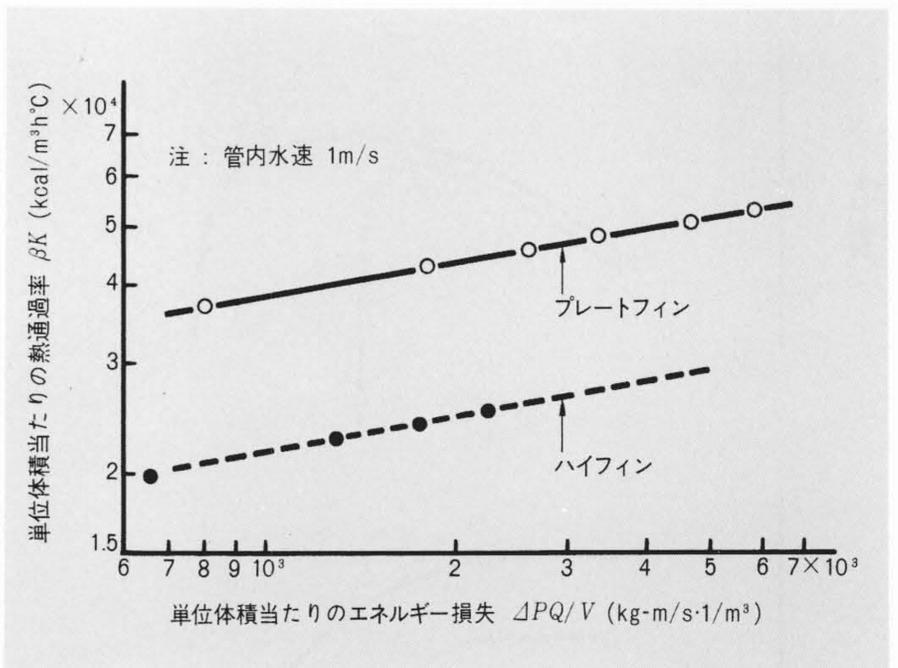


図8 プレートフィン冷却器とハイフィン冷却器の性能比較 プレートフィン冷却器は、体積当たりの熱通過率がハイフィン冷却器よりも約1.7倍大きい。

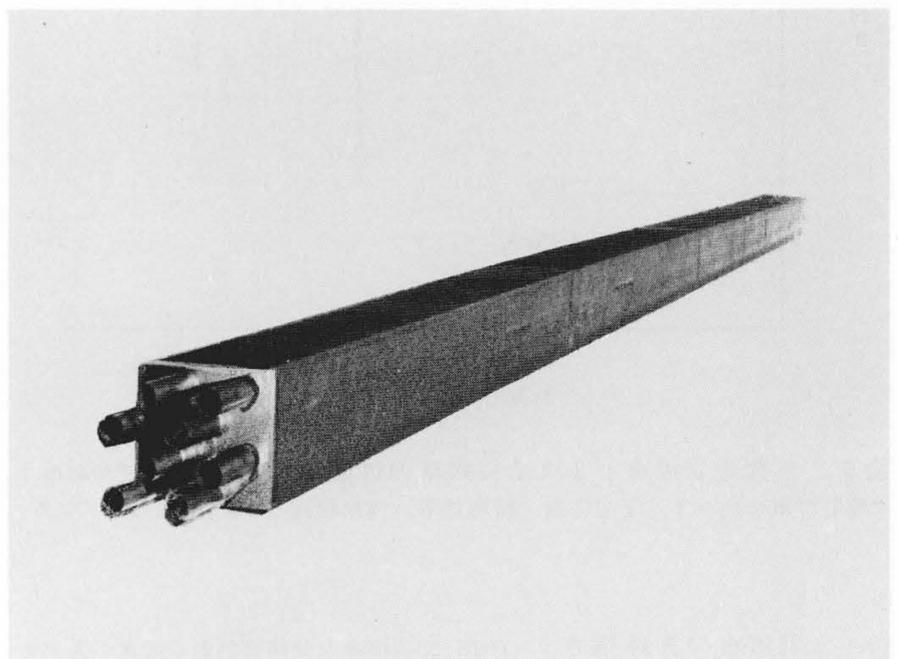


図9 プレートフィンブロック 独自の標準プレートフィンブロック方式を採用して生産の合理化を行なっている。

であるため、歯面のピッチングやスコアリングに十分注意する必要がある。したがって、ブルギヤには従来の調質研削焼ばめ構造から滲炭研削一体構造を採用し、歯面の硬度を上げ、歯面の耐ピッチング性や耐スコアリング性を向上させている。

### 3.4 軸継手

これまでの軸継手は、トルク伝達のためのキーと遠心応力によるディスクの変形に対処するための締めりばめを併用していた。図10はキー溝のある軸に羽根車を焼きばめしたときの羽根車内径近傍の円周方向ひずみ分布を測定した例を示すもので、キー溝の影響により面圧分布が円周方向に不均一になり、締めりばめの効果が減少していることを示し、キーレス軸継手が望ましいことが分かる。キーレス軸継手にはテーパばめとストレートばめがある。

テーパばめに比較して、ストレートばめのはめ合い作業は比較的困難であるが、締めしろが正確に管理でき、継手としての信頼性が高い。また、はめ合い法は油圧はめ法と焼きはめ法があるが、焼きはめ時の温度制限や抜き出すことの困難さなどの問題から、油圧はめ法を開発した。また継手部の

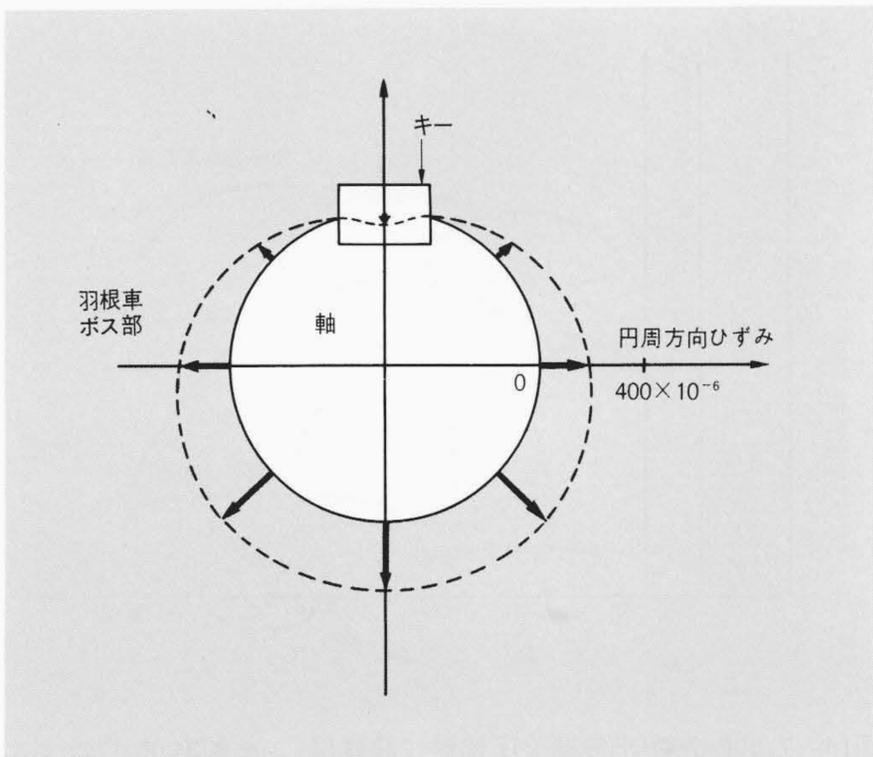


図10 キー溝をもつ羽根車ボス部のひずみ分布 キー溝のある羽根車を、軸に焼きばめした場合の羽根車内径近傍の円周方向ひずみ分布の測定例である。

め合い面の面圧計算及び伝達トルク計算には、図11に示すような有限要素法による計算法を開発して厳密計算を行ない、この計算値と実験との実証を行なった。これらにより新DH形遠心圧縮機ではストレート油圧ばめによるキーレス軸継手を採用した。またキー道による応力集中がなくなり、強度の

安全率が向上すると同時に、締めしろが確実につくことによりボス内径の耐フレッチング性が向上した。またキーによるアンバランス発生もなくなり、振動値減少にも寄与している。

### 3.5 ギヤケース

ギヤケースは高周速高負荷の増速歯車を収納していると同時に、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。このため、下ギヤケースは運転中には流体の圧力により荷重を受けると同時に、温度上昇による熱膨張を生じて変形する。下ギヤケースの変形は増速歯車の歯当たりなどに非常に影響を与えるため、下ギヤケースの剛性を上げ、変形量を最小に抑えることが重要である。新DH形遠心圧縮機は、従来の薄板溶接構造に代わり厚板溶接構造に変更し、詳細なひずみ解析を行ないケースの剛性を増大し、運転中の軸心の維持を図っている。

### 3.6 サクションパイプ

新DH形遠心圧縮機は、従来のエビ継ぎ溶接構造に代わりコーナベーン付溶接構造を採用して、配管圧力損失を約20%減少させた。

### 3.7 全体構造

新DH形遠心圧縮機では、貨車やトレーラで運搬できる範囲内の小容量機(DH-45)に関しては、据付面積の低減と据付けの容易さなどの理由からセミパッケージ化を行なった。従来形機では圧縮機本体は基礎コンクリート上に設置されていたのに対し、新DH形遠心圧縮機では小容量機に限り圧縮機本体がチャンネルを介して中間冷却器上に設置されている。全体の構造設計に当たり、据付時及び運転時の変形、冷却器の

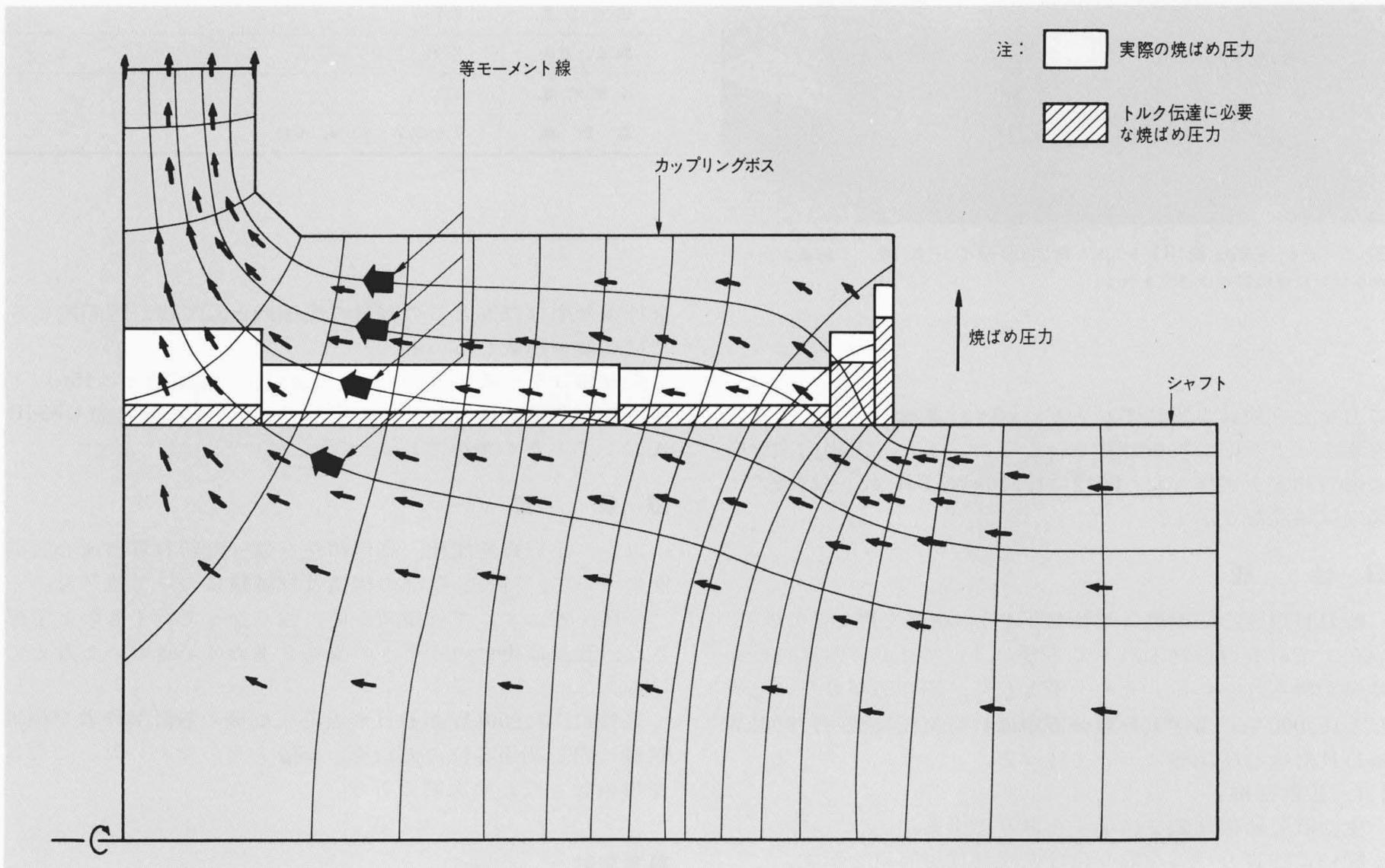


図11 キーレス軸継手の有限要素法によるトルク伝達計算例 キーレス軸継手部のトルクフローを有限要素法により計算した例を示す。

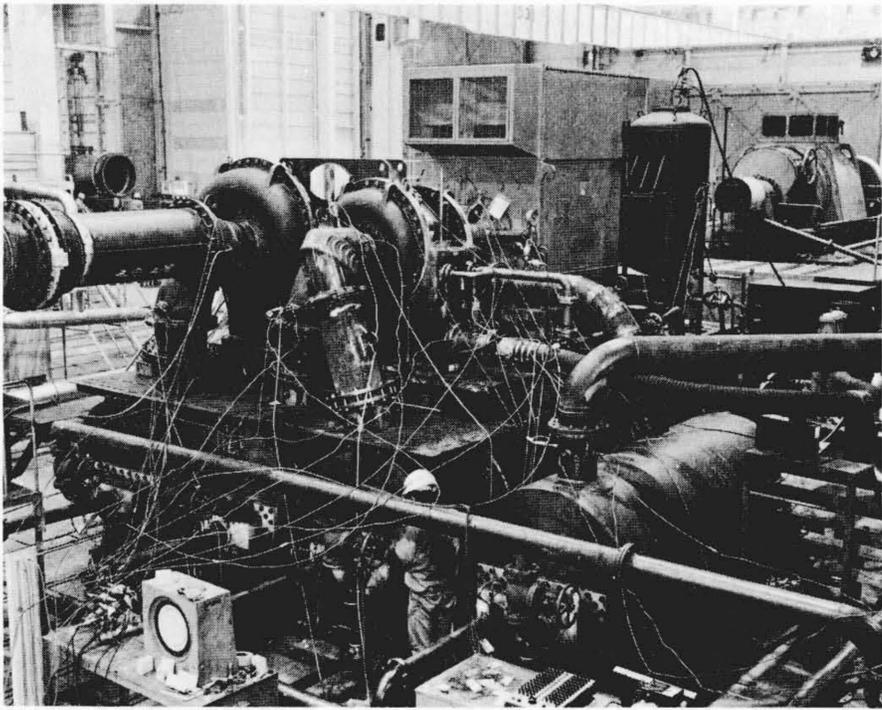


図12 1,500kW新DH形遠心圧縮機 DH-45圧縮機の工場試験状況を示す。

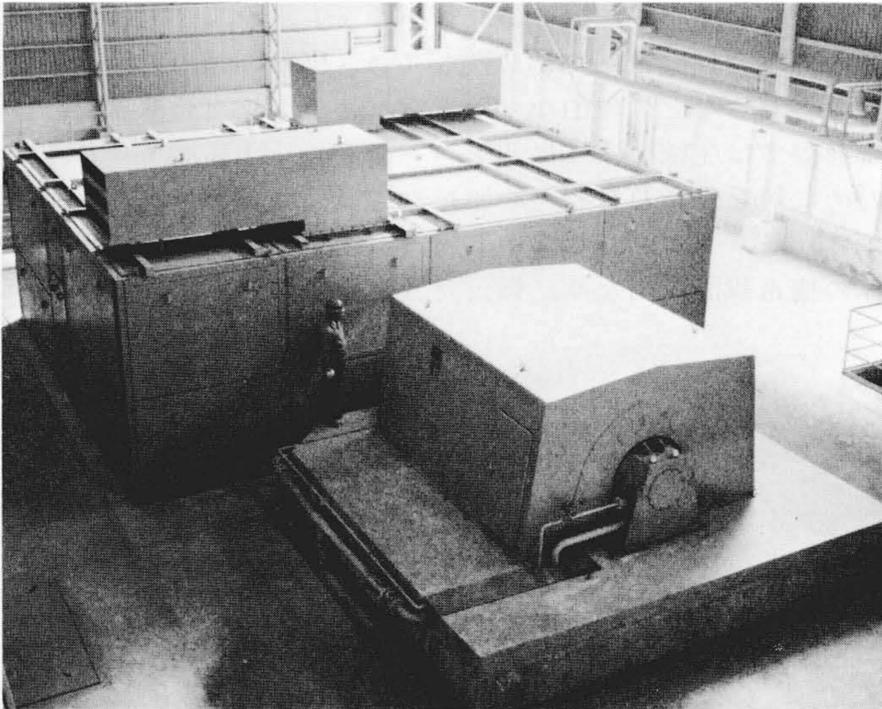


図13 原料空気圧縮用7,900kW新DH形遠心圧縮機 防音カバーを取り付けた現地据付け状況を示す。

応力などを検討する必要があり、電子計算機を使用して有限要素法による応力解析計算を行なった。また、工場内試験時に応力測定を実施した。図12に1,500kW(DH-45)圧縮機の工場内試験状況を示す。

#### 4 性能

新DH形遠心圧縮機は昭和49年4月に販売を開始して以来、現在までに5台を納入済みであるが、いずれも非常に良好な結果が得られている。その一例として、昭和51年9月に完成した15,000Nm<sup>3</sup>/h空気分離装置用原料空気圧縮機用7,900kW新DH形遠心圧縮機について述べる。

##### 4.1 設計仕様

主な設計仕様は表2に示すとおりである。

図13に防音カバーを取り付けた現地据付写真を示す。

##### 4.2 現地試験結果

図14は本圧縮機の現地性能試験結果を示したものである。

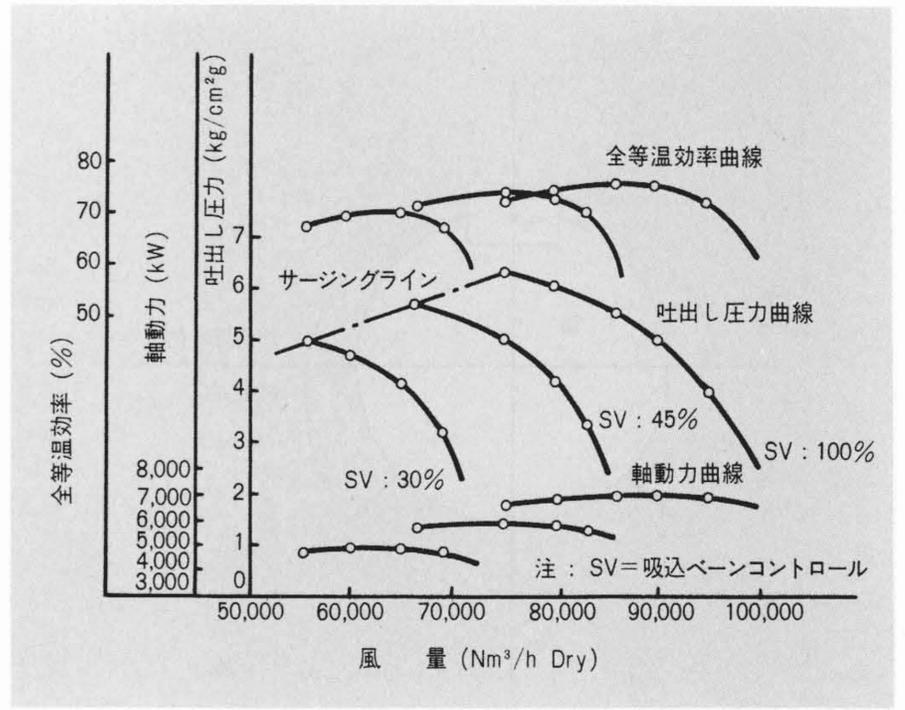


図14 7,900kW新DH形遠心圧縮機性能曲線 全等温効率は75%とこの容量の圧縮機としては世界最高値を達成した。

表2 7,900kW新DH形遠心圧縮機設計仕様 15,000Nm<sup>3</sup>/h空気分離装置用原料空気圧縮機的设计仕様を示す。

項目	仕様
型式	DH-90
風量	86,100Nm <sup>3</sup> /h Dry
吸込圧力	-200mmAq
吐出し圧力	4.85kg/cm <sup>2</sup> g
吸込温度	30°C
相対湿度	80%
取扱いガス	空気
冷却水温	33°C
電動機	7,900kW, 60Hz, 6P

全等温効率は75%とこの容量の圧縮機としては、国際的にみて最高値を達成している。

振動値はケース上で全振幅で5μ以下、軸振動では15μ以下であり、機械的にも非常に安定している。また騒音値も85dB(A)以下で小さく静かである。

#### 5 結 言

以上、小形高性能化、高信頼性を図った新DH形遠心圧縮機について、特長、各部の構造及び試験について述べた。

今後、省エネルギー指向が更に強くなって行くものと予想され、我々は更にいっそうの改善を進めていきたいと考えている。

最後に、7,900kW新DH形遠心圧縮機の設計製作及び現地試験に際し関係各位の御指導、御協力をいただいた。ここに深謝の意を表わす次第である。

#### 参考文献

- 1) 三階, 森本, 河合ほか1名: 遠心圧縮機の高速度小形化 日立評論, 58, 553 (昭51-7)