

尿素合成用遠心二酸化炭素ガス圧縮機

Centrifugal Carbon Dioxide Compressors for Urea Synthesis Process

金木 忠* Kaneki Tadashi

尿素合成プラント用二酸化炭素ガス圧縮機は、従来遠心式と往復式の組合せで用いられてきたが、系の信頼性、安定性の向上、コスト低減、メンテナンスフリーなどの立場から、全段遠心式とする要求が高まり、高精度狭出口幅放電加工羽根車の試作及び二酸化炭素を用いた性能試験を行なうことを中心として、技術的問題点の解決に努めてきた。

実機の開発としては、昭和51年から260気圧合成用1,500t/d尿素合成用全段遠心二酸化炭素ガス圧縮機の設計・製作を進め、このたび閉回路による実ガス、実圧力下での性能試験及び駆動タービン、増速機などすべて実機を用いたストリングテストによる機械的確認が進行中である。本機の圧力比約260は、遠心圧縮機として世界最高である。

1 緒言

近年、石油精製、石油化学、合成化学などの分野でのプラントのトータル効率の向上と、限りない信頼性の追求に伴い、それに用いられる遠心圧縮機の技術の進歩には目覚ましいものがある。

肥料として用いられる尿素を合成するプラントは、アンモニアと二酸化炭素とを反応させて尿素を製造するものであり、反応圧力は約150ないし250気圧の高压である。尿素合成用の二酸化炭素ガス圧縮機は、大気圧から反応圧力である150ないし250気圧まで昇圧するために用いられるが、従来は図1に示すように、大気圧から約25ないし30気圧までを遠心式、25ないし30気圧から150ないし250気圧までを往復式圧縮機で昇圧するのが普通とされていた。

これに対して、数年前から系の信頼性、安定性の向上、コストの低減、メンテナンスフリー、据付面積の縮小などの立場から、現在の遠心式と往復式の組合せに代えて、全段遠心式で昇圧することへの要求が高まってきた。そして、一方では放電加工法による小径、狭出口幅羽根車の普及、遠心圧縮機の性能予測技術の進歩などを背景として、全段遠心式と

するためのケーススタディが進められてきていた。

日立製作所でも、尿素合成用全段遠心圧縮機についての試作を含む開発を進めていたが、昭和51年、東洋エンジニアリング株式会社から260気圧合成用1,500t/d尿素合成用全段遠心二酸化炭素ガス圧縮機を受注し、鋭意製作が進められ、このたび場内での実ガス、実圧力での性能試験が終了し、ストリングテスト、顧客立会性能試験などの準備中である。この遠心圧縮機の吸込と吐出しの圧力比は約260であり、これは圧力比としても世界最高である。

以下、尿素合成用全段遠心圧縮機の概要、技術的問題点、試作試験、実機の設計及び工場試験結果の順に報告する。

2 尿素合成用遠心圧縮機の概要

260気圧1,500t/d尿素合成用全段遠心圧縮機の構成の一例を図2に示す。

遠心圧縮機は、三つのケーシングによって構成されている。低压ケーシングは、背中合せの二つの圧縮グループから成っており、第1グループで約5気圧に昇圧された二酸化炭素が

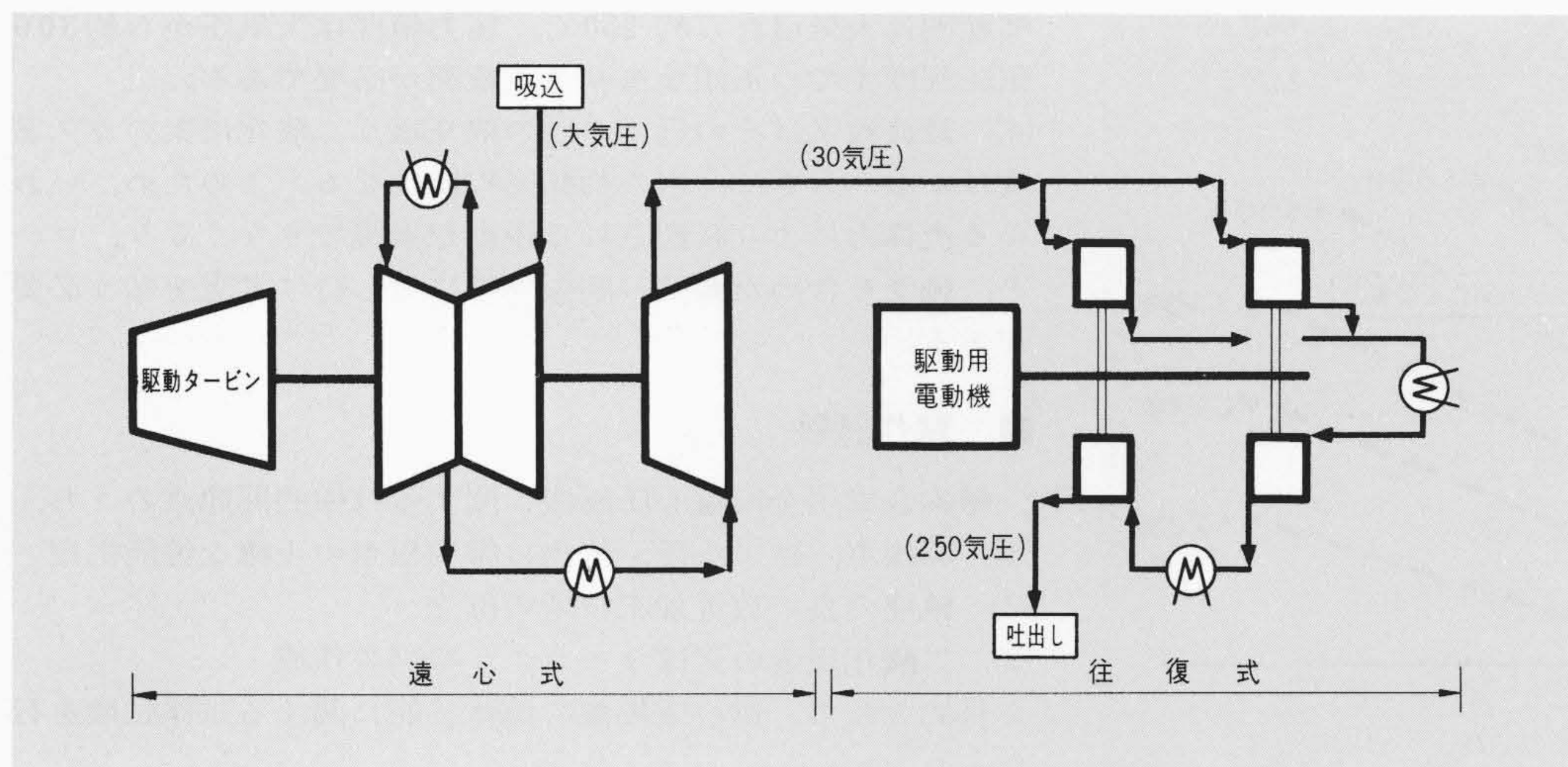


図1 遠心式と往復式の組合せの一例 大気圧から約30気圧までを遠心式、30気圧から250気圧までを往復式が受け持っている。

* 日立製作所土浦工場

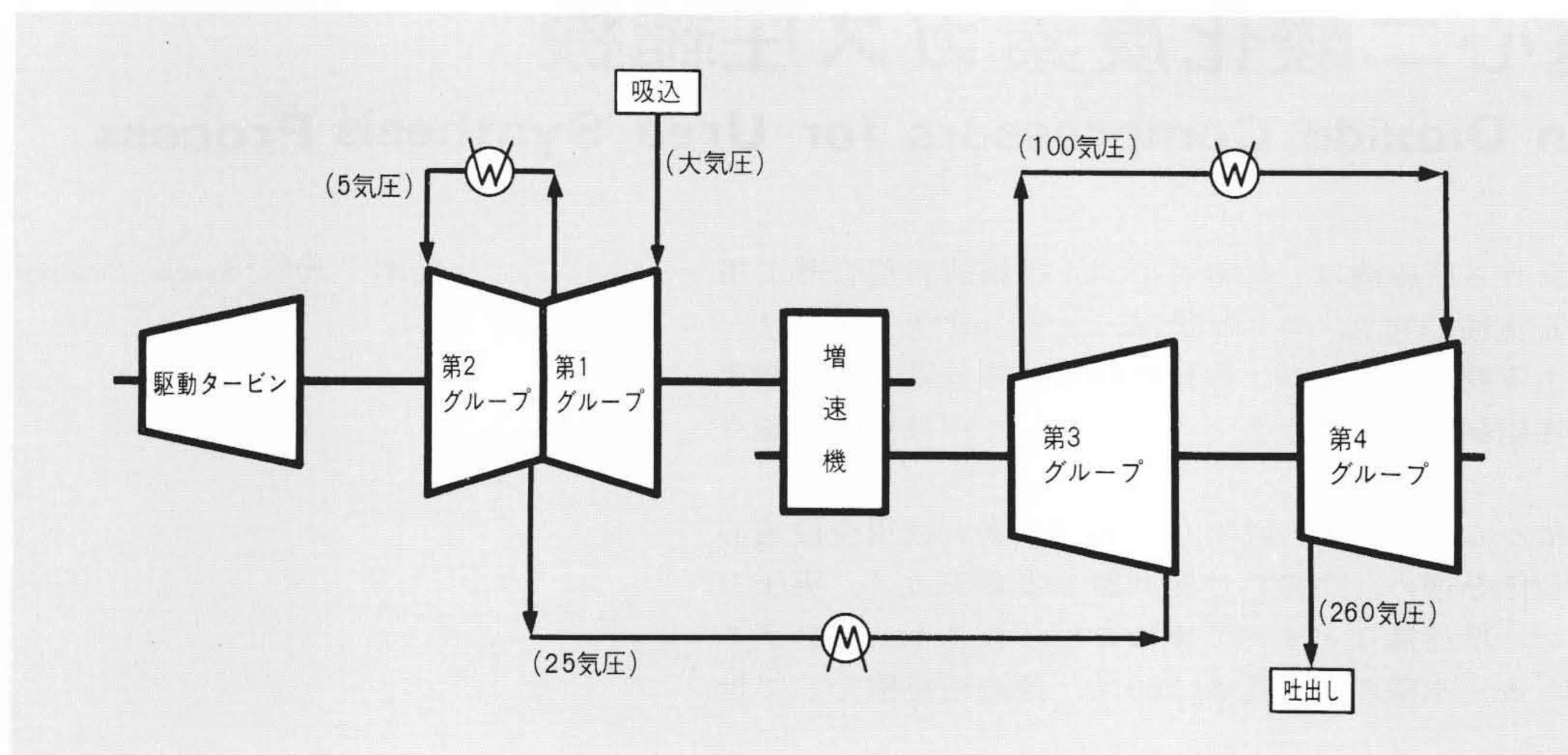


図2 全段遠心式の例

四つの圧縮グループが三つのケーシングに収められ、遠心式だけの組合せで吐出し圧力260気圧を得る。

スは、第1インタークーラで冷却後、第2グループで約25気圧まで圧縮される。第3、第4グループは、それぞれ第2、第3ケーシングにあり、第1ケーシングとの間には増速ギヤがある。第3グループは、二酸化炭素ガスを約100気圧まで昇圧し、最後の第4グループで最終吐出し圧力260気圧を得る。

全体としての圧力比約260を実現するためには、ガス密度の増大に伴ってしだいに取扱い風量が小さくなることを勘案して、後段にゆくに従い、羽根車径、出口幅を小さくしてゆかねばならない。小径、狭出口幅羽根車を実現するためには、放電加工による精度の良い羽根の成形が不可欠であり、放電加工の限界が遠心圧縮機を取扱い風量の限界を決めるといえる。

全段遠心式尿素合成圧縮機の製作可能範囲を図3に示す。150気圧合成の場合、約450t/d以上、250気圧合成で800t/d以上が遠心式として有利な領域であることを示している。

取扱いガスである二酸化炭素は、腐食性が著しく、約20気圧以上の圧力で、湿った状態にある場合、特に腐食性が強い。ため、第2、第3ケーシングの吸込側にはステンレス鋼を使用する必要がある。

軸封方式としては、ラビリンスシール、オイルフィルムシールの二つの方式が考えられる。オイルフィルムシール方式

のほうがガスの漏洩損失が少ない利点がある反面、シールオイルシステムが付加されることによりイニシャルコストが増大するという不利がある。二酸化炭素ガスは非可燃性であり、高価なガスではないので一般にはラビリンスシールで十分であろう。

3 技術的問題点

(1) 尿素合成用全段遠心圧縮機の第一の技術的問題点として、性能の問題がある。二酸化炭素は分子量が約44と大きく、一段当たりの圧力上昇及び比容積の減少が著しいので、多段圧縮機の場合、各段の羽根車性能を正確に把握しておかないと、いわゆるマッチングのずれが大きくなり、全体としての作動範囲が狭くなる恐れがある。

(2) 次に全段遠心式とした場合、最終段羽根車の取扱い風量は、ガス密度の増大に伴い初段羽根車の取扱い風量の約 $\frac{1}{10}$ から $\frac{1}{20}$ 程度となるので、小径、狭出口幅羽根車の製作技術上の問題点として今までにも増して精度の良い放電加工による羽根車製作技術が不可欠となる。

(3) 遠心式の場合、各段の圧力上昇、温度上昇などのガスの状態変化の予測のために、羽根車性能の正確な把握に加えて、ガスの圧縮性係数、比熱比などの物性値の正確な把握が必要である。このためには、なんらかの実証に裏付けられた、温度範囲は大気温から約250℃、圧力範囲は大気圧から約300気圧程度までの正確なモリエル線図が必要である。

(4) 最終段又はその近くの段の取り扱う二酸化炭素のガス密度はかなり大きく、水の約40%程度になる。このため、いわゆる流体力により誘起される振動が無視できなくなり、ロータ、軸受を含めた軸系の制振効果に対し特に考慮を払う必要がある。

4 試作試験

尿素合成用全段遠心圧縮機に関する技術的問題点のうち、

- (1) 羽根車、特に小径、狭出口幅羽根車の正確な性能把握
- (2) 精度の良い放電加工技術の確立
- (3) 二酸化炭素の正確なモリエル線図の作成

を目的として、遠心圧縮機の流体性能に関する試作試験を行った。

供試圧縮機は、図4に示すような設計圧力350気圧の単段圧縮機とし、羽根車、ディフューザなどの流体性能に関する部分を取替え可能な構造とした。尿素合成用としてのあらゆ

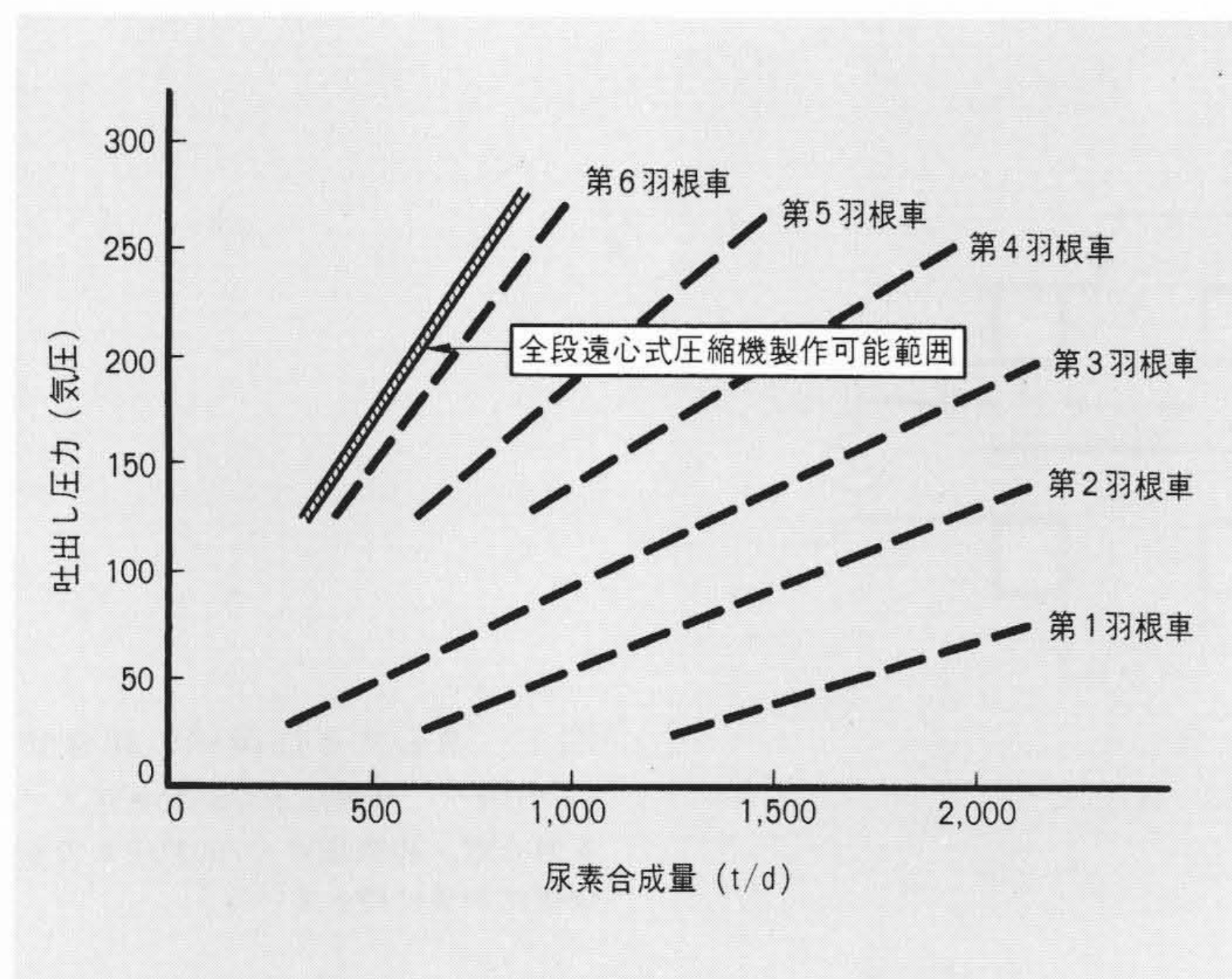


図3 全段遠心圧縮機の製作可能範囲

試作した供試羽根車の代表的な適用域を破線で示す。

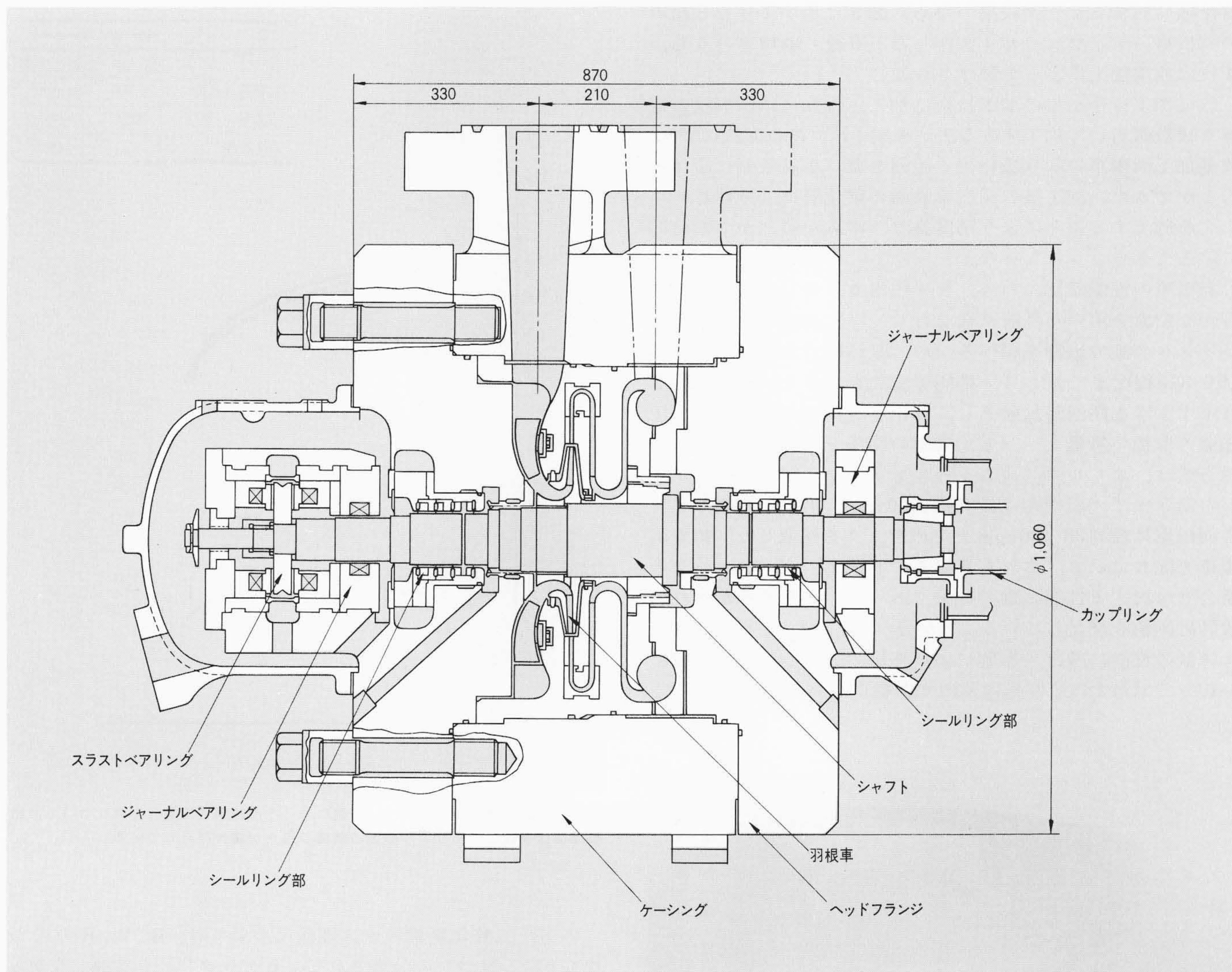


図4 供試単段圧縮機断面図 供試圧縮機の設計圧力は、350気圧である。

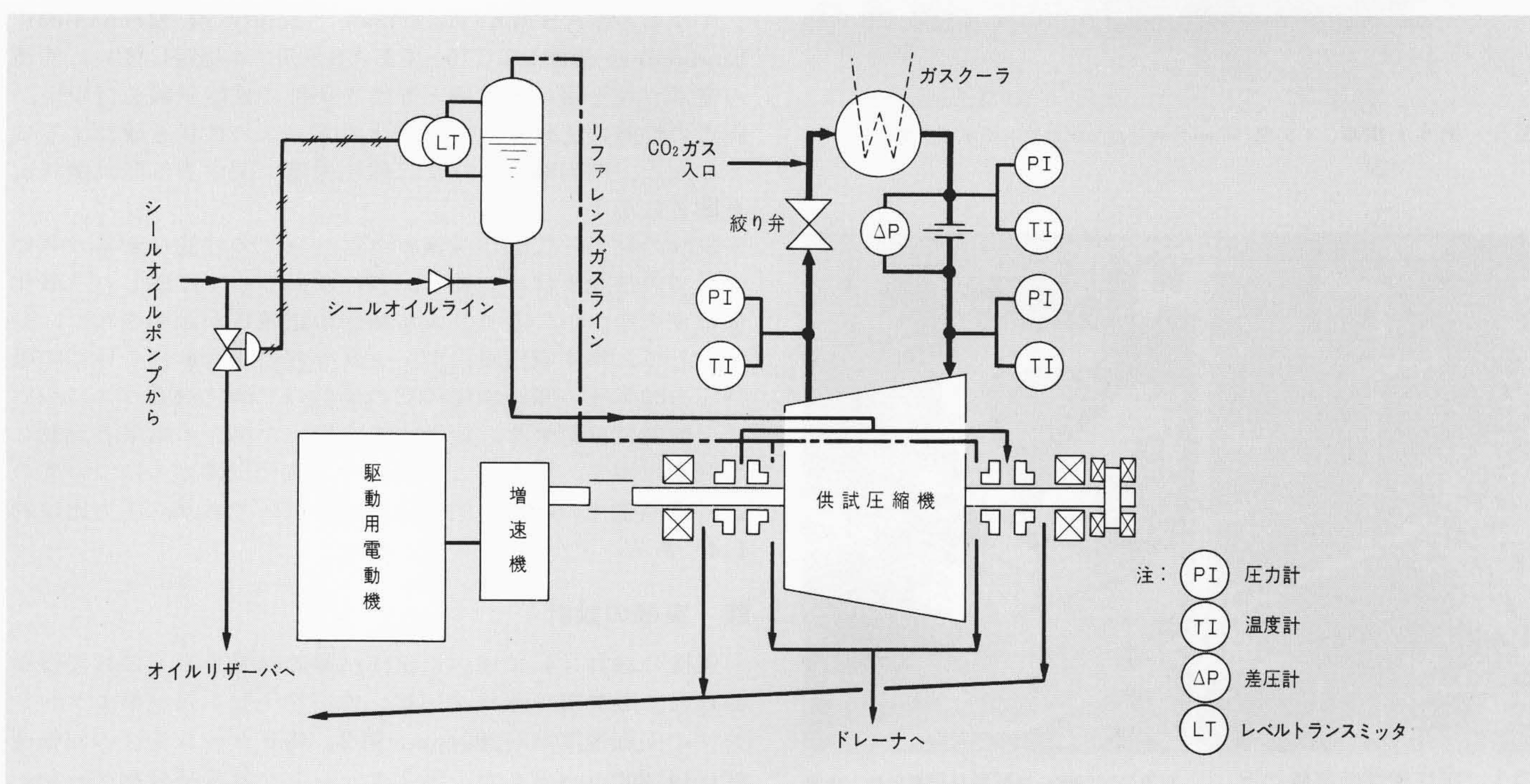


図5 閉回路試験ループ オイルフィルムシールを用いて、最高回転速度34,000rpmまで試験を行なった。

る仕様に対するデータ収集のため、図3に示すような6組みの羽根車、ディフューザを製作した。6枚の羽根車のうち、4枚は放電加工によって製作された。

放電加工は今までの加工技術に加え、新たに特殊形状の電極を複数個用いて加工する方法が考案され、この方法により、放電加工羽根車の取り扱い得る範囲を更に小風量側に広げることができた。加工後の羽根車表面の硬化層は、特殊ホーニングを施工することにより精度良く、滑らかに、かつ短時間に除去できるようになった。

羽根車の性能確認のため、まず代用ガスとして物性値の明らかな窒素を用いた性能試験を行なった。性能に及ぼす機械レイノルズ数の影響を調べるため、吸込圧力を大気圧から約100気圧程度まで変えて、性能の変化を調べた。試験は図5に示すような閉回路試験とし、吐出しバルブの操作により圧縮機の取扱い風量とヘッド、効率の関係を把握した。なお軸封方式は、オイルフィルムシールを用いた。回転速度は第1から第3までの羽根車は最高24,000rpm、第4から第6までの羽根車は最高36,000rpmまでのデータを採取した。第6羽根車を図6に示す。これら6組みの羽根車、ディフューザの組合せに対する性能試験の結果、ヘッド、効率共それぞれの設計計画値を満足していることが分かった。また、機械レイノルズ数の性能に及ぼす影響については、試験した範囲(約 $10^6 \sim 10^7$)ではほとんど性能に及ぼす影響がないことが分かった。

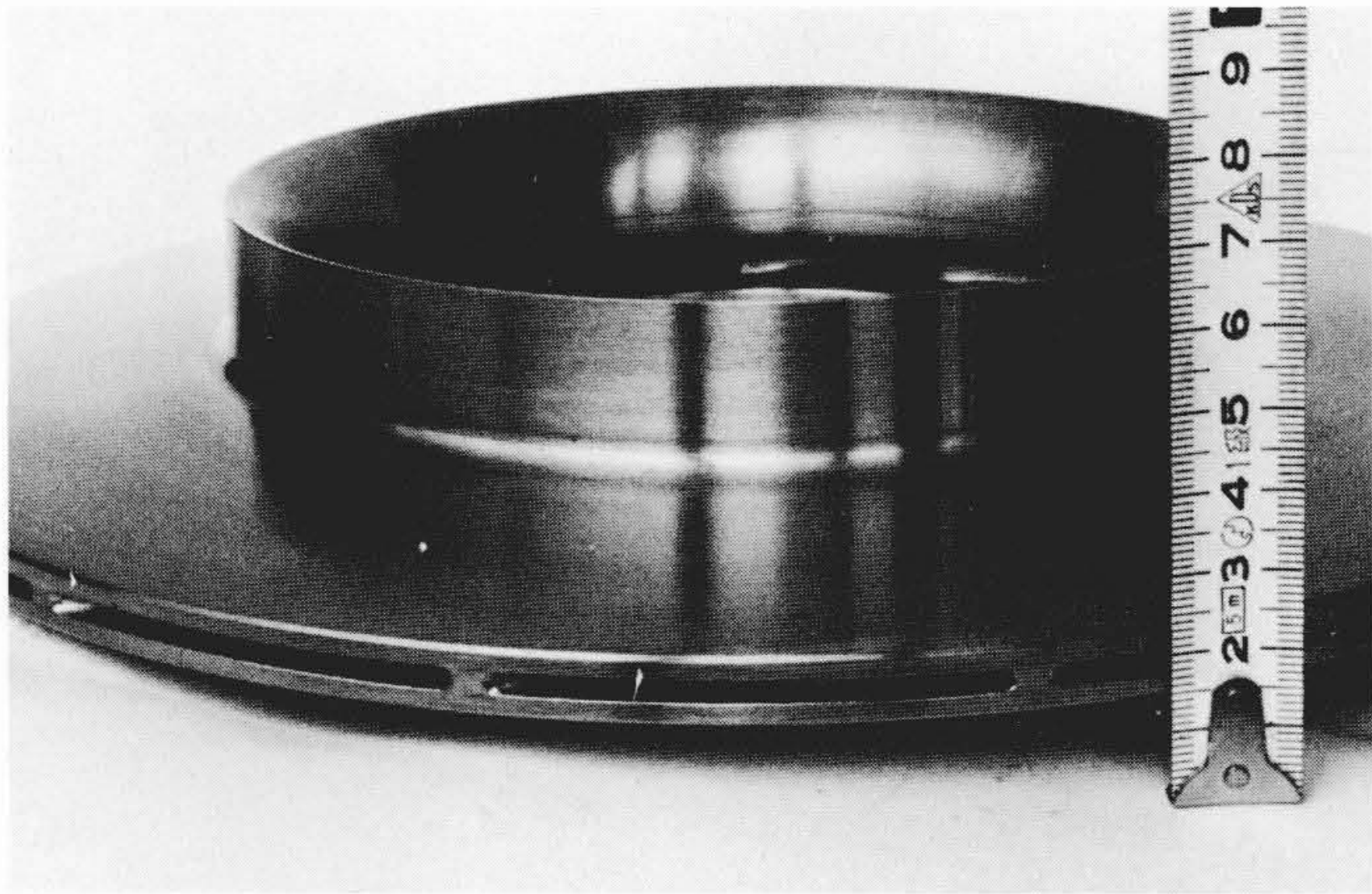


図6 第6羽根車 外径150mmの高精度放電加工羽根車を示す。

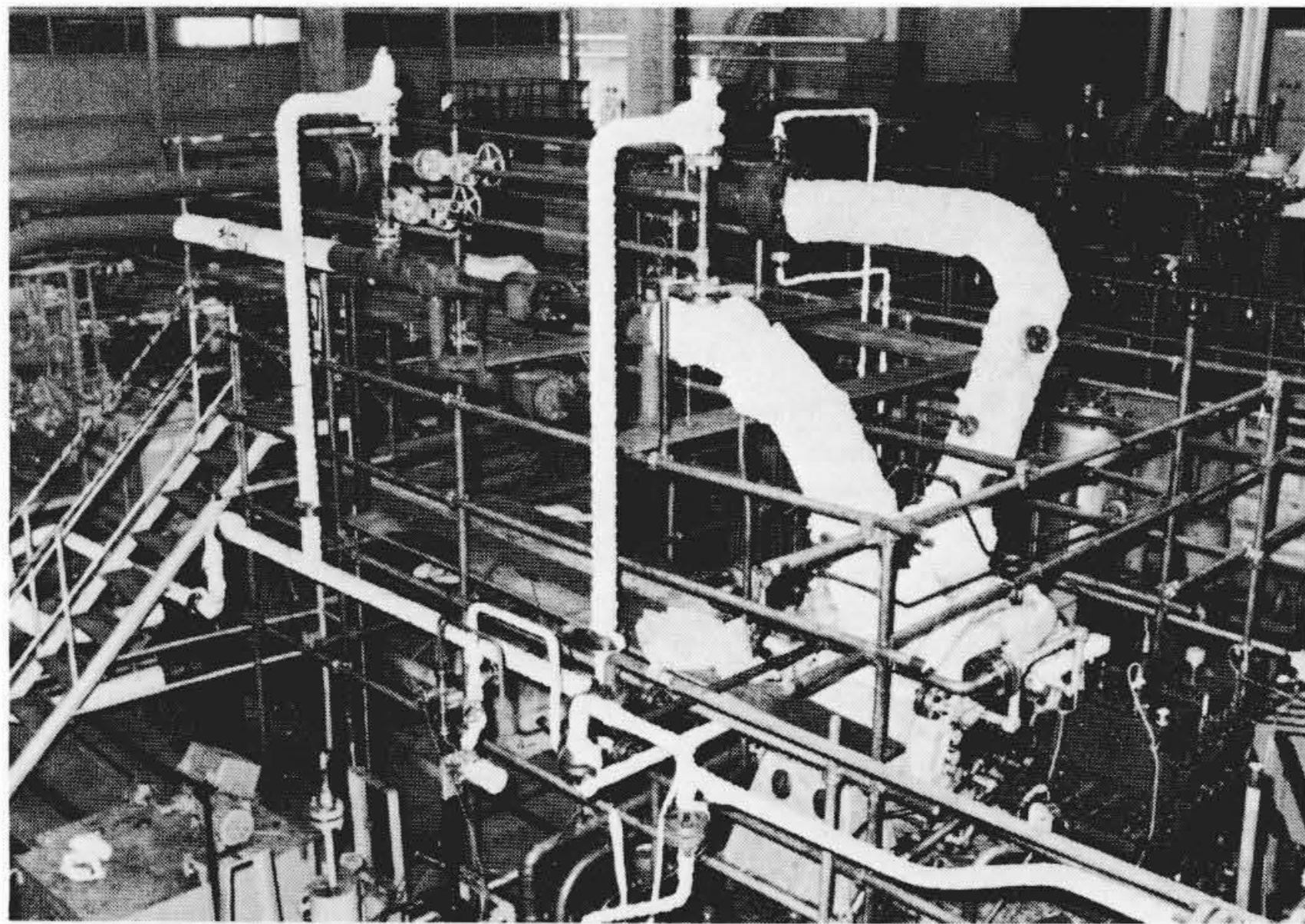


図7 試作機性能試験状況 右下の試作機には断熱材が巻かれ、中央の絞り弁を介して左方のガスクーラと接続されている。

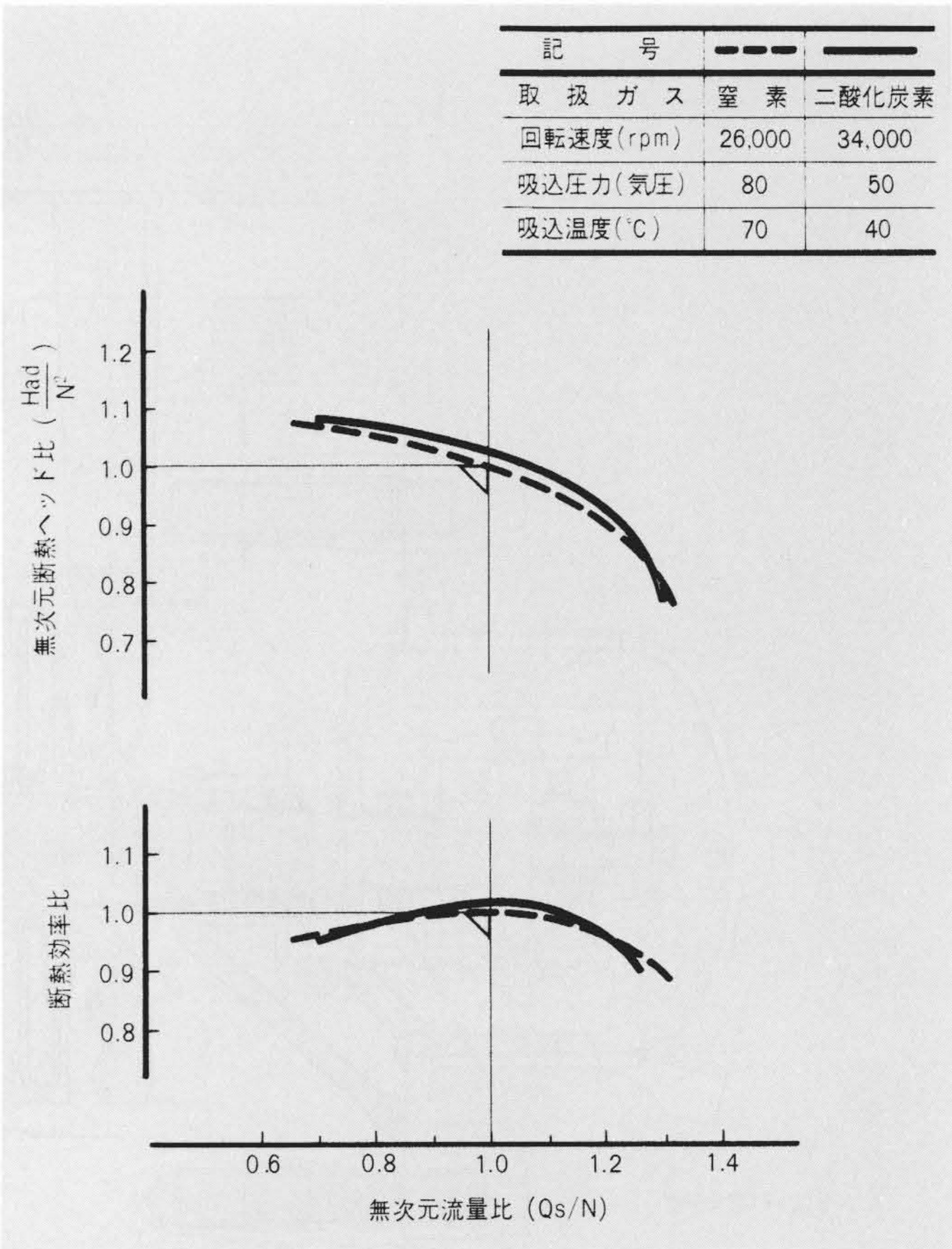


図8 性能試験結果例 窒素についての結果と二酸化炭素についての結果はほぼ一致し、モリエル線図の精度の良さが裏付けられている。

一方、二酸化炭素のガス性状については、B. W. Rの式¹⁾をもとに、幾つかの公表されているデータ^{2), 3)}を参照しながら圧縮性係数、エンタルピー、エントロピーなどの物性値を求める式を前もって作り、この式の妥当性を性能試験によって確認する方法をとった。

すなわち、ASME (American Society of Mechanical Engineers) 基準PTC10, CLASS III⁴⁾の規定に従い、前述の窒素ガスを用いた試験と等価な条件で性能試験を行ない、両者の性能の比較から、二酸化炭素ガスの性状を確認することにした。閉回路を用いた二酸化炭素に関する性能試験状況を図7に示す。

試験の結果、二酸化炭素ガスについての性能は窒素ガスについての性能とほぼ一致し、我々が前もって作成した二酸化炭素ガスについてのモリエル線図の正確さが証明された。一例として、第4羽根車、ディフューザの組合せについての吸込圧力80気圧、吸込温度70℃の場合の二酸化炭素ガスについての性能試験結果を、窒素ガスを用いた場合の結果と比較して図8に示す。なお、この場合の二酸化炭素ガスについての設計点風量での吐出し圧力は約115気圧であり、圧力比は約1.4である。

5 実機的设计

実機的设计は4.で述べた試作試験の結果をもとにして行われた。駆動機は蒸気タービンで、タービン及び第1ケーシングの回転速度は7,200rpm、第2、第3ケーシングの回転速度は14,200rpmとした。第1ケーシングは水平分割ケーシングであり、第2、第3ケーシングは垂直分割ケーシングである。

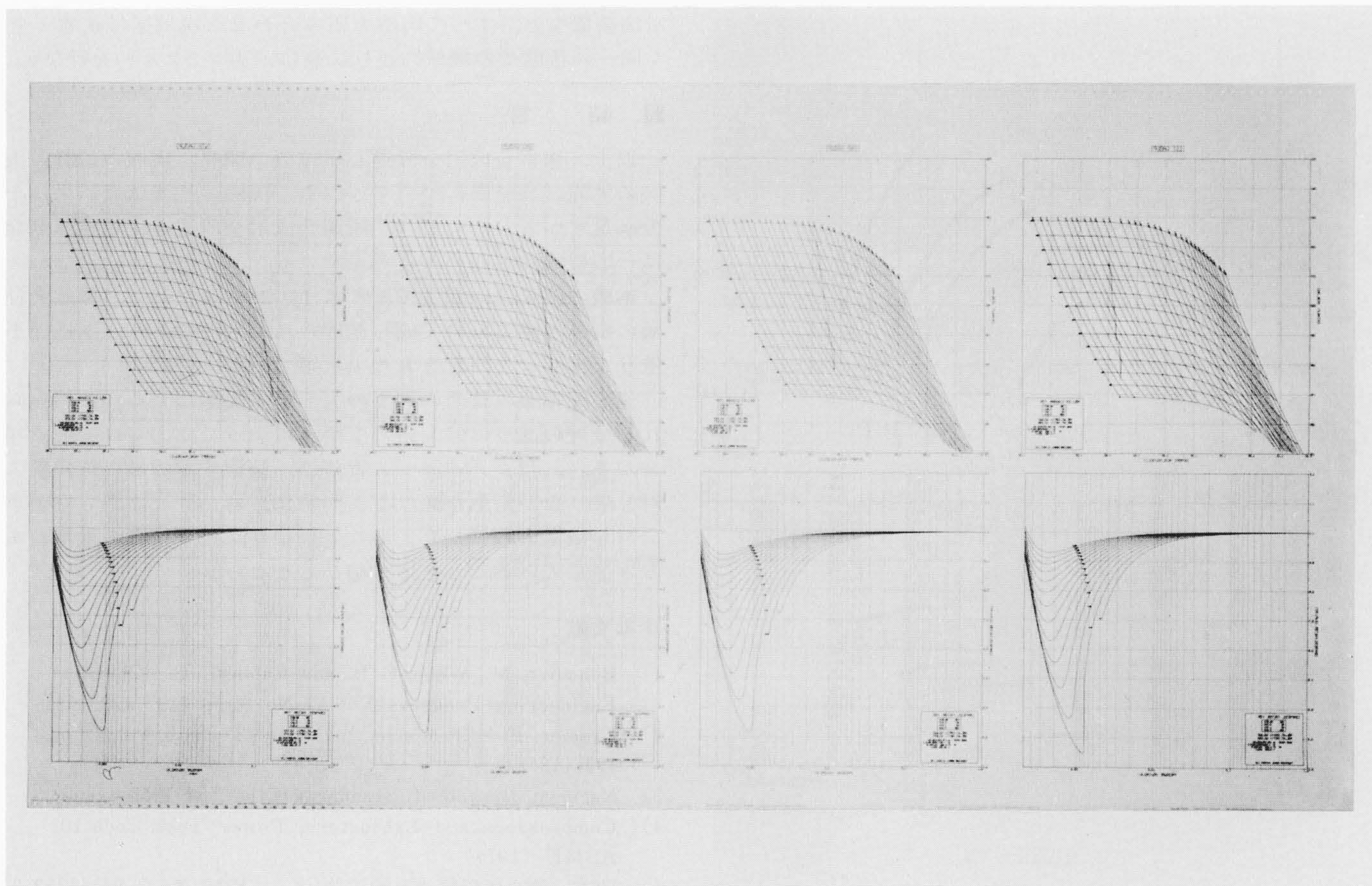


図9 尿素合成用遠心圧縮機の性能計算の一例 四つの圧縮グループそれぞれについてのモリエル線図と圧縮過程が、X-Yプロッタにより自動作画されている。

軸封方式はラビリンスシールとし、内側のラビリンスから漏洩したガスは順番にその前段のグループに戻され、内部バイパスにより外部へのガスの漏洩を最小にするよう設計されている。

マッチングのずれによる性能不良を防ぐためには、二酸化炭素ガスの性状の正確な把握、羽根車性能の正確な把握に加えて、精度の良い性能計算方法がぜひ必要である。更に実機の取扱いガス組成は、二酸化炭素を主成分とし、少量の窒素、水素、及び水分を含んでおり、水分はインタークーラで徐々に落とされていくため、ガス性状は少しずつ変化する。このため、性能計算は大形電子計算機を使用し、ラビリンス漏洩量、ガスの性状計算などがすべて含まれた繰返し近似による自動設計システムを用いて設計された⁵⁾。X-Yプロッタで自動作画された性能計算結果を図9に示す。

各圧縮機の軸系は、流体力に対し十分な制振効果をもつように、ロータ、軸受を含め、剛性、ダンピング効果に万全の配慮が払われた⁶⁾。

ロータは特殊材質のステンレス鋼、第2、第3ケーシングの接ガス部はステンレス鋼及び特殊材質のステンレス鋼が用いられ、ガスの腐食性に対しても、十分な配慮がなされている。

6 工場試験結果

実機の性能試験としては、二酸化炭素ガスを用いて仕様回転速度、実際の仕様圧力及び温度状態で閉回路による性能試験が行なわれた。性能試験時の軸封方式としては、ラビリンスシールの代わりに試験用シールリングを装着し、オイルフィルムシールとした。第3ケーシングについての性能試験状

況を図10に示す。

四つの圧縮グループから成る全体性能は、軸封方式の違い、ガス組成の違いなどを換算して判定するため、大形電算機プログラムを用いて計算された。工場試験の全体性能結果を図11に示す。回転速度は約98%で仕様を満足し、軸動力は保証値の約99%であり、保証を十分満足していることが確認された。

機械的信頼性の確認のため、工場のボイラ設備の蒸気をエネルギー源として三つの圧縮機、蒸気タービン、増速機、潤

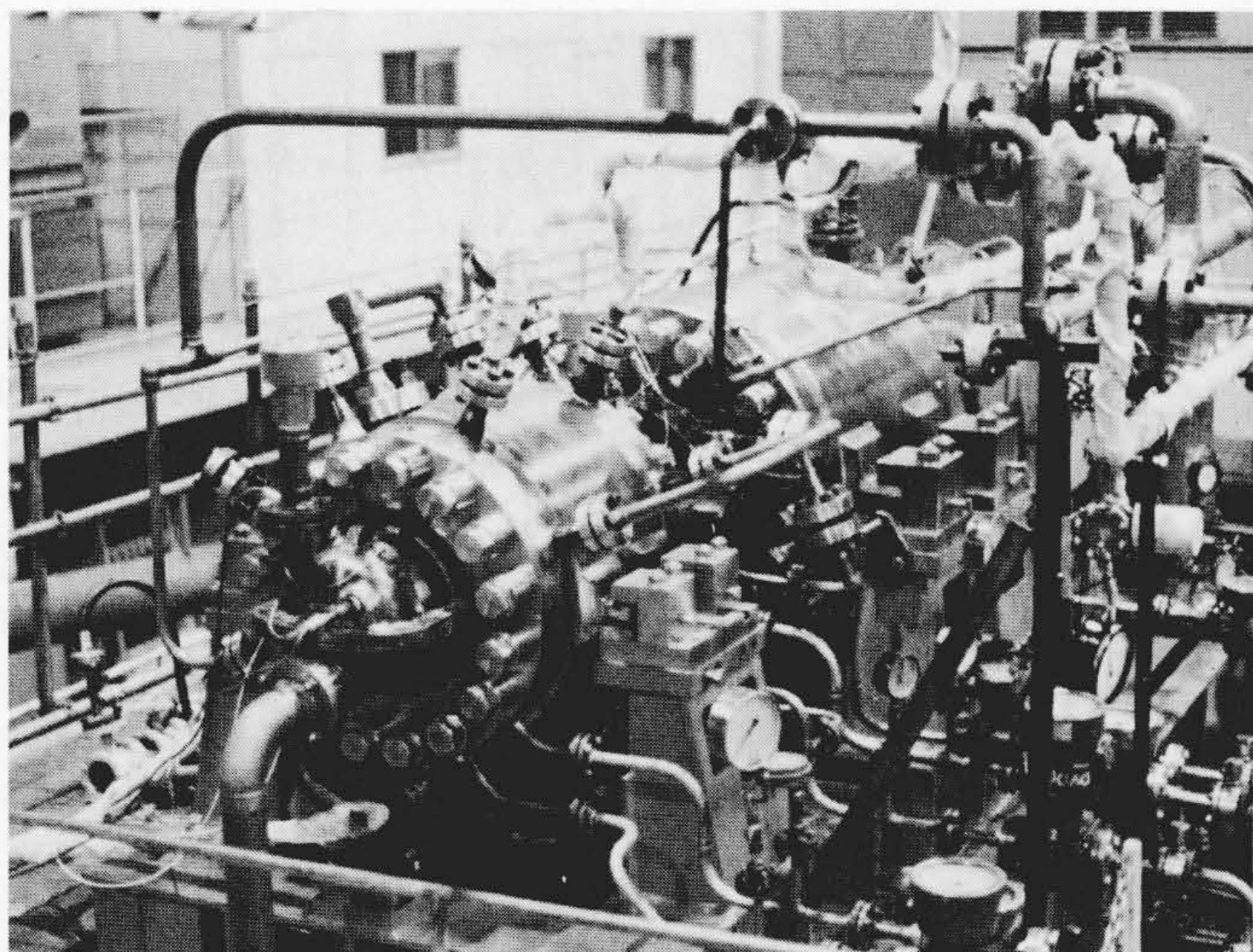


図10 第3ケーシングについての性能試験状況 二酸化炭素ガスを用い、吸込圧力約100気圧の状態で行なわれた。

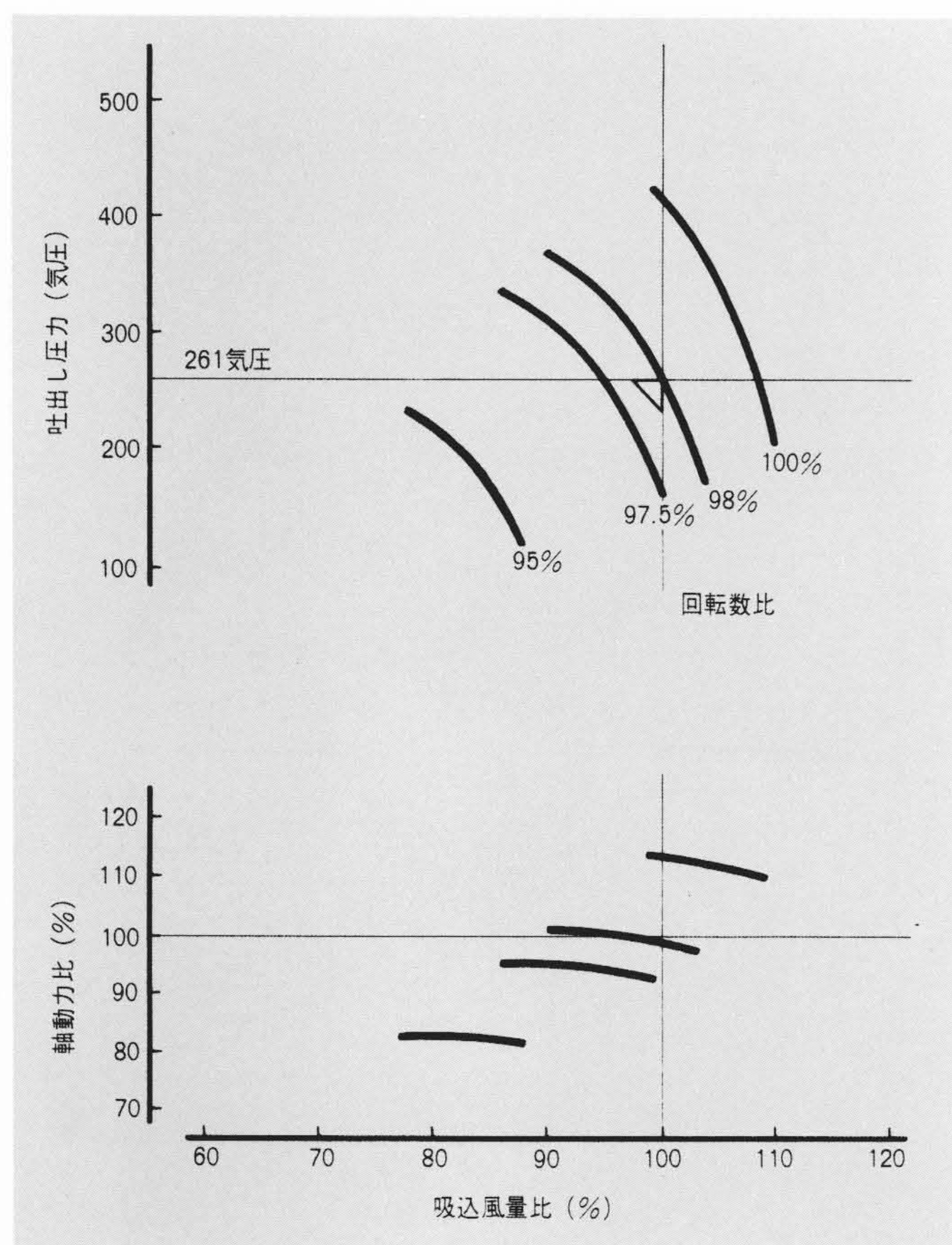


図11 実機の全体性能試験結果 回転速度98%，軸動力99%で仕様点を満足していることがわかる。

滑油装置など、すべて実機を組み合わせた現地据付状態と全く同一の状態での機械的運転試験(ストリングテスト)を行なう。

7 結 言

以上、尿素合成用全段遠心圧縮機の開発、実機的设计、実機の性能試験結果について述べた。実機の性能試験結果は十分満足すべきものであり、尿素合成用全段遠心圧縮機の開発は一応の成功を収めたと考えている。

本機の開発は、顧客である東洋エンジニアリング株式会社殿の指導と協力を得て成し遂げられたものであり、本紙面を借りて衷心より謝意を表わす次第である。

遠心圧縮機の技術の進歩の大部分の要素は、それが用いられる分野の進歩に伴う新たな要求によって支えられている場合が多い。我々メーカーの責務は、製作する機械の信頼性に対し限りない情熱を傾けると同時に、ユーザーの新しい要求に対し積極果敢にこたえることにより、我々自身の進歩があると信じていることを述べ結びとしたい。

参考文献

- 1) Benedict, M., Webb, G. B., and Rubin, L. C. : Chemical Engineering Progress, Vol. 47, No. 8., pp. 419~422(1951)
- 2) Cramer, F. : Chemische Ingenieur Technik, Vol. 27, pp. 493 (1955)
- 3) National Bureau of Standards-Circ 564-1955 issue
- 4) Compressors and Exhausters, Power Test Code 10, ASME (1974)
- 5) 金木：遠心圧縮機の自動設計，ターボ機械，第5巻，9号(昭52-9)
- 6) 横山：遠心圧縮機の技術的動向，ターボ機械，第6巻，1号(昭53-1)

論文抄録

ミッシュメタル - ニッケル系合金の水素吸・脱蔵特性

日立製作所 北田正弘

日本金属学会誌 41-4, 420 (昭52-4)

希土類金属RとNiより成る金属間化合物 RNi_5 ，例えば $LaNi_5$ などは室温近傍で大量の水素を吸蔵するので，来るべき水素エネルギーシステムの中で重要な役割を果たすものと考えられている。 RNi_5 の水素吸・脱蔵特性は非常に優れているが，Laなどの希土類純金属は非常に高価であり，一般的な用途に広く適用できるかどうか疑問視されている。

これに対して，希土類金属を分離精製する前のミッシュメタルはTiと同程度の価格であり，ミッシュメタル-ニッケル系(Mm-Ni)で $LaNi_5$ などの特性に準ずるような特性を持たせることができれば，希土類系水素貯蔵材料の汎用化は可能である。しかし，Mm-Ni系合金の水素貯蔵特性についてはほとんど知られておらず，詳細は不明である。また，Mmの組成，不純物含有量などは産地によって異なるので，合金組成に敏感な水素貯蔵特性にも差があると思われ，実験

によって詳細な特性を確かめることが必要である。

本研究の目的は，希土類系水素貯蔵材料の中で，実用化の可能性のあるMm-Ni系合金の水素貯蔵特性に及ぼすMm-Ni系合金組成の影響を調べて最適なMm-Ni組成比を求めMm-Ni系合金の実用化の見通しを得るとともに，Mm-Ni系合金の水素吸・脱蔵機構に関する基礎的知見を得ることにある。

MmはLaが32.9%(wt.)，Ceが47.1%でこれにNd13.9%，Pr4.3%，Sm及びGd0.5%と不純物を含むものである。Niは99.95%で，合金はプラズマフレーム炉で作製し， $1,000^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$ 均質化処理した。これを空冷したのち，乳鉢で $30\mu\text{m}$ 以下の粉末とした。用いた水素の純度は99.99999 vol.%で酸素含有量は0.05ppmである。水素吸・脱蔵特性の測定にはステンレス鋼製の反応炉を用いた。

得られた結果をまとめると，Niを65~67

%含むMm-Ni合金の水素吸蔵量が最も大きく，吸・脱蔵平衡圧，吸・脱蔵速度の温度依存性なども優れており，安価なMmを用いても十分に実用化が可能であることを明らかにした。最も水素吸蔵量の多いMm-67%Ni合金は， 20°C で $\text{MmNi}_{4.95}\text{H}_{6.95}$ を形成し，水素吸蔵平衡圧は約20 atm，水素脱蔵平衡圧は約10 atmである。水素化物解離，形成のエンタルピー変化は，それぞれ4.1及び-5.0 kcal/mol，水素吸・脱蔵に関する見掛けの活性化エネルギーはそれぞれ6.1及び8.6 kcal/molであった。Mm-Ni合金は水素圧力が10 atmの場合，約 65°C で活性化し水素吸蔵を起こす。活性化温度はNi含有量の増加とともに低下する。活性化は表面に吸着しているガスや酸化物の還元によるものである。また，水素吸蔵と同時にMm-Ni合金は水素割れを起こし，平均粒径 $5\mu\text{m}$ の粒子となる。