

アンモニア合成プラント用遠心圧縮機

Centrifugal Compressors for Ammonia Synthesis Plants

横山英二* Yokoyama Eiji

主として化成肥料の原料となるアンモニアを生産するアンモニア合成プラントは、近年その需要の増大とともに大容量化、合理化され、生産量600t/d以上の規模のプラントでは、合成ガス圧縮機を含むすべての圧縮機に遠心式が採用されるようになった。その主な理由は、従来の往復圧縮機に比べて信頼性ははるかに高く、蒸気タービンで駆動されるためにプラント全体の熱バランスが取りやすいことなど、本来遠心圧縮機がもっている特長に加えて、遠心圧縮機の高圧化に対する技術の急速な進歩である。この論文はアンモニア合成プラントに用いられる各種遠心圧縮機のプラントでの役割及び技術的特徴について要約して述べる。

1 緒 言

アンモニア合成用の高圧圧縮機として、遠心圧縮機が世界で初めて採用されて15年になるが、その間に食糧増産用としての化成肥料の需要が世界的に伸び、アンモニアプラントの合理化、大容量化により600t/d程度以上の生産規模のプラントでは、合成ガス圧縮機として遠心圧縮機が従来の往復圧縮機に代わり採用されてきた。その理由は、技術的には高圧でしかも小流量の遠心圧縮機的设计製作が可能になったことは言うまでもないが、一方、プラント側から見ると、(1)往復圧縮機のように予備機を必要とせず、据付面積は小さくて済みまた駆動機としては蒸気タービンが採用できるので、18~24

極の電動機駆動の往復圧縮機に比べて設備費が大幅に低減される。(2)往復圧縮機のように往復質量がなく、またシリンダ弁もなく信頼性ははるかに勝っており、運転及び保守の費用が大幅に節減できる。(3)プラントの熱バランスから、プラントで発生する蒸気を圧縮機駆動用に使えるため、プラントの発生源単位が良くなるなど、多くの利点をもっていることにある。

アンモニアプラントでは、この合成ガス圧縮機のほかに、図1及び表1に示す各種の遠心圧縮機が用いられている。すなわち、アンモニアの原料としての水素と窒素を得るための

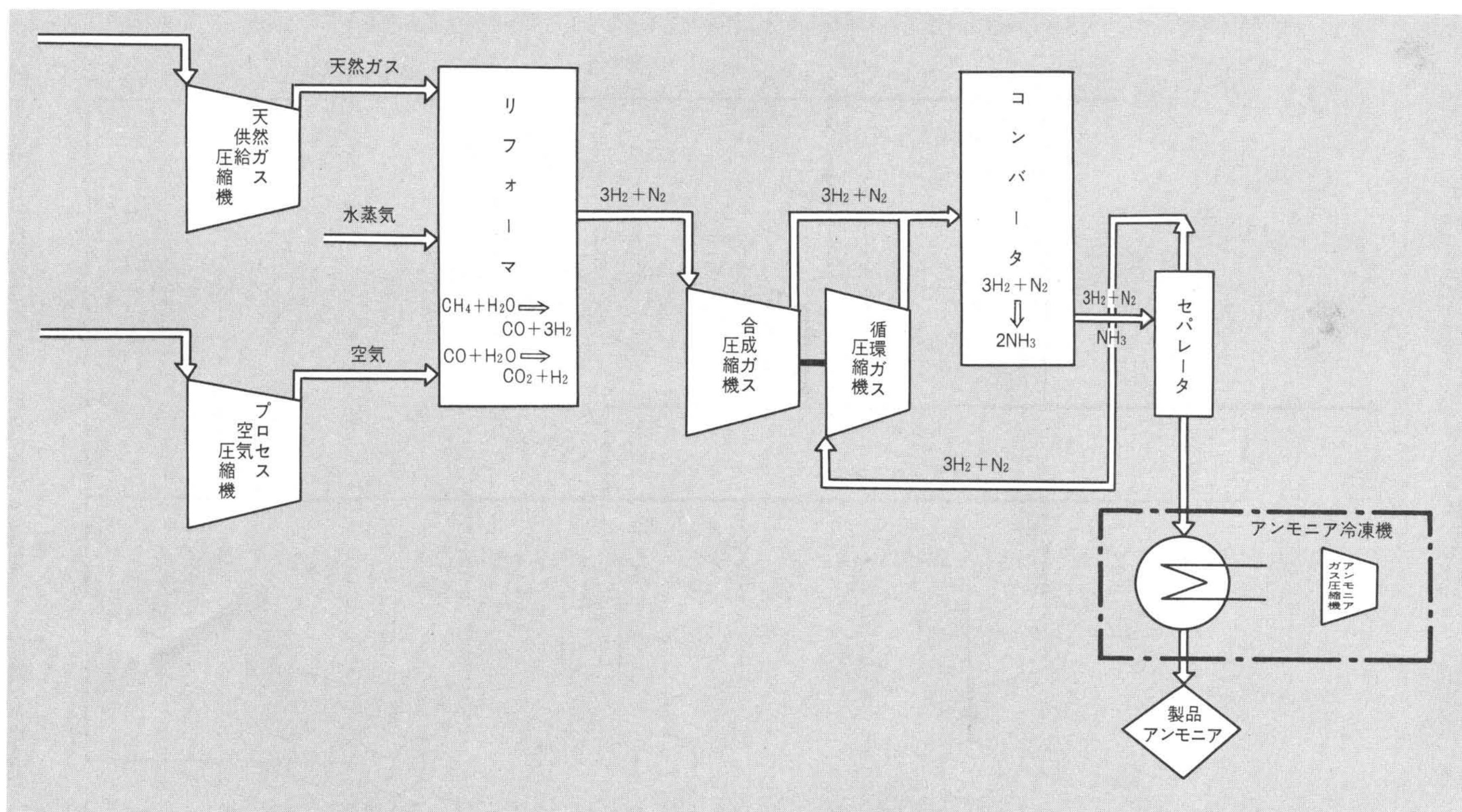


図1 アンモニア合成プラントにおける圧縮機の役割 アンモニア合成プラントでは、天然ガス供給圧縮機、プロセス空気圧縮機、合成ガス圧縮機、循環ガス圧縮機及びアンモニア冷凍用圧縮機が図示のように採用されている。

* 日立製作所土浦工場

表1 アンモニア合成プラント用各種圧縮機 アンモニア合成プラントに用いられる各種の圧縮機の特徴を示す。

圧 縮 機 用 途	取 扱 い ガ ス 主 成 分	吐 出 し 圧 力 (kgf/cm ²)	主 な 特 徴
天 然 ガ ス 供 給 圧 縮 機	天 然 ガ ス	40～45	低圧段：水平分割，高圧段：垂直分割 オイルフィルムシール
プ ロ セ ス 空 気 圧 縮 機	空 気	35～40	水平分割 2 ケーシング ラビリンスシール
合 成 ガ ス 圧 縮 機	水 素 + 窒 素	150～350	垂直分割，高圧小流量 オイルフィルムシール
循 環 ガ ス 圧 縮 機	水 素 + 窒 素	150～350	合成ガス圧縮機の最終ケーシングに内蔵される。
アンモニア冷凍用圧縮機	ア ン モ ニ ア	15～25	水平分割 吸込温度：－32℃ オイルフィルムシール

リフォーマに空気を送り込むためのプロセス空気圧縮機，水素を天然ガスから得る場合は天然ガス供給圧縮機，合成されたアンモニアガスを冷却液化して系から採り出すためのアンモニア冷凍用圧縮機及び未反応ガスをコンバータに循環するための循環ガス圧縮機がある。この中で，循環ガス圧縮機は，合成ガス圧縮機と同一ケーシング内に組み込まれているのが普通である。生産高約600t/d以上のプラントでは，これらの圧縮機はすべて遠心式で蒸気タービンで駆動される。アンモニアプラントでのこれらの圧縮機を駆動するタービンの蒸気系統の一例を図2に示す。プラントの生産規模に対して採用された各種圧縮機の所要動力を，実績表からプロットすると図3に示すような傾向となる。採用されたプロセスの設計の相違により合成圧力は異なり，また供給される天然ガスの元圧

に大きな差があることなどから，所要動力はかなりの幅で分布している。しかし，合成ガス圧縮機が最も多くの動力を要することは明らかであり，また圧縮機としては，後述するように流体力学的設計上12,000～14,000rpmと高い回転数となり，駆動用タービンも高速となるため，高圧の蒸気がまず合成ガス圧縮機用タービンに使われ，その抽気又は排気でその他の圧縮機が駆動されるのが普通である。

次にこれらの各種遠心圧縮機の特徴について述べる。

2 アンモニアプラント用各種圧縮機

2.1 天然ガス供給用圧縮機

アンモニア合成に必要な水素を，天然ガスから得るプラントでは，プラントに送られてきた天然ガスをリフォーミング

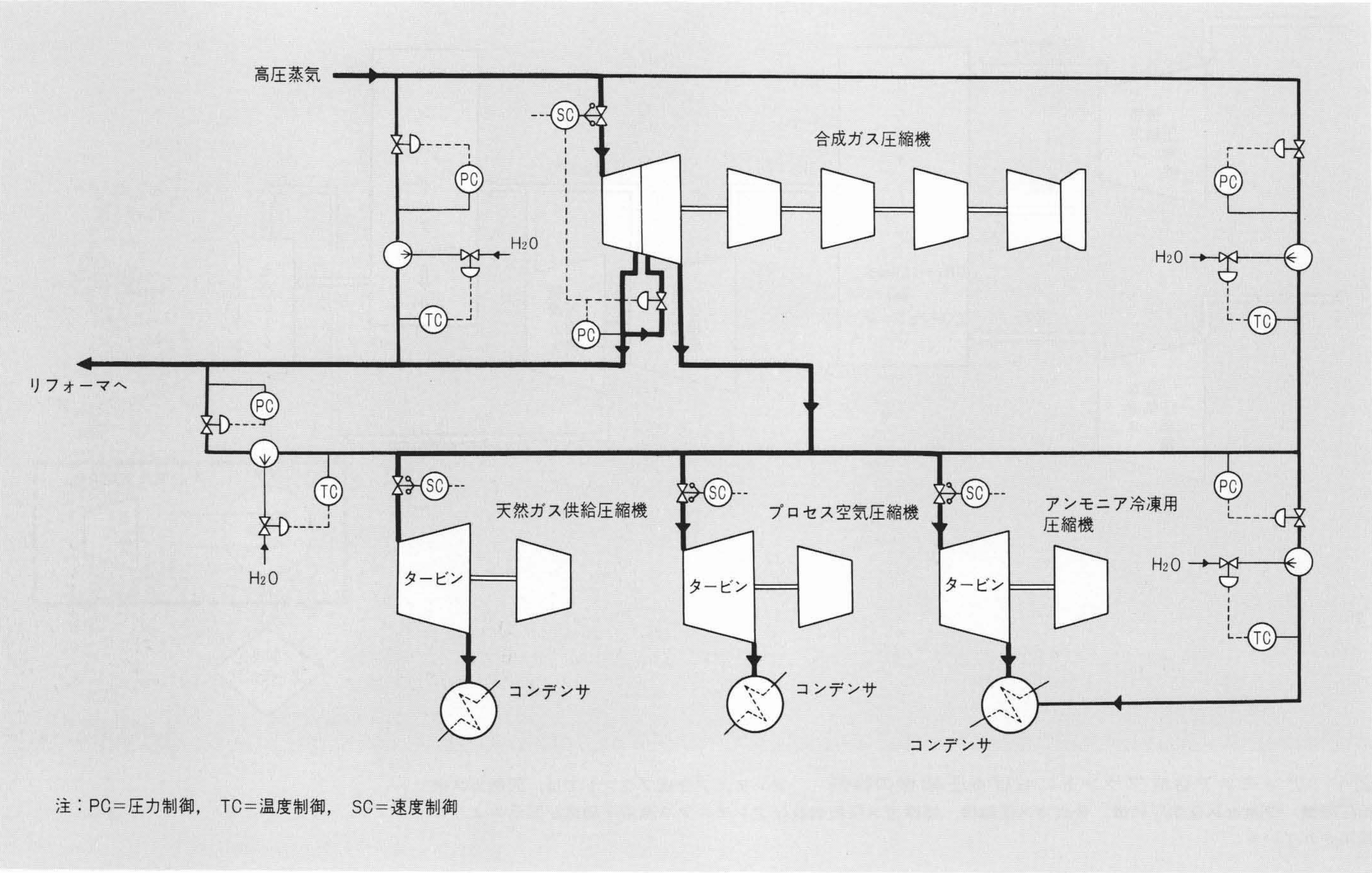


図2 アンモニアプラントでの蒸気系統の一例 アンモニア合成プラントに用いられる各種の圧縮機を駆動するタービンの蒸気系統の一例を示す。

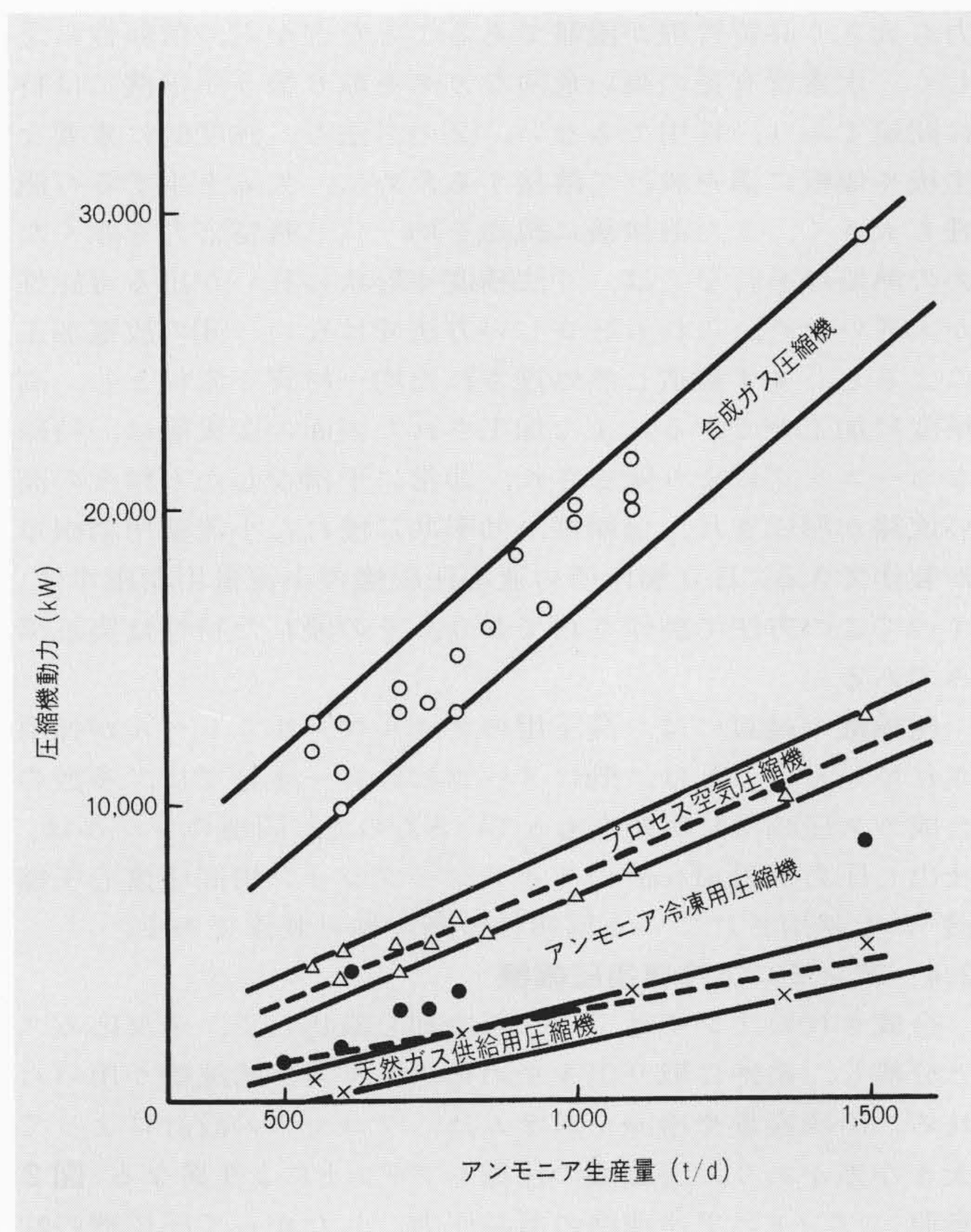


図3 アンモニアプラント用圧縮機の所要動力 アンモニア合成プラントに用いられる各種の遠心圧縮機の所要動力は、プラントの容量だけでなく採用されるプロセスにより異なるため、かなりの幅に分布している。

に必要な圧力まで昇圧し、リフォーマに送り込むのに遠心圧縮機が使用される。リフォーマに必要な圧力は、約 $40\sim45\text{kgf/cm}^2$ であるが、吸込圧力は、送られてきた天然ガスのもっている元圧によって大幅に異なる。したがって、圧縮機の構成も1～3ケーシングとプラントにより異なり、図3に示す所要動力

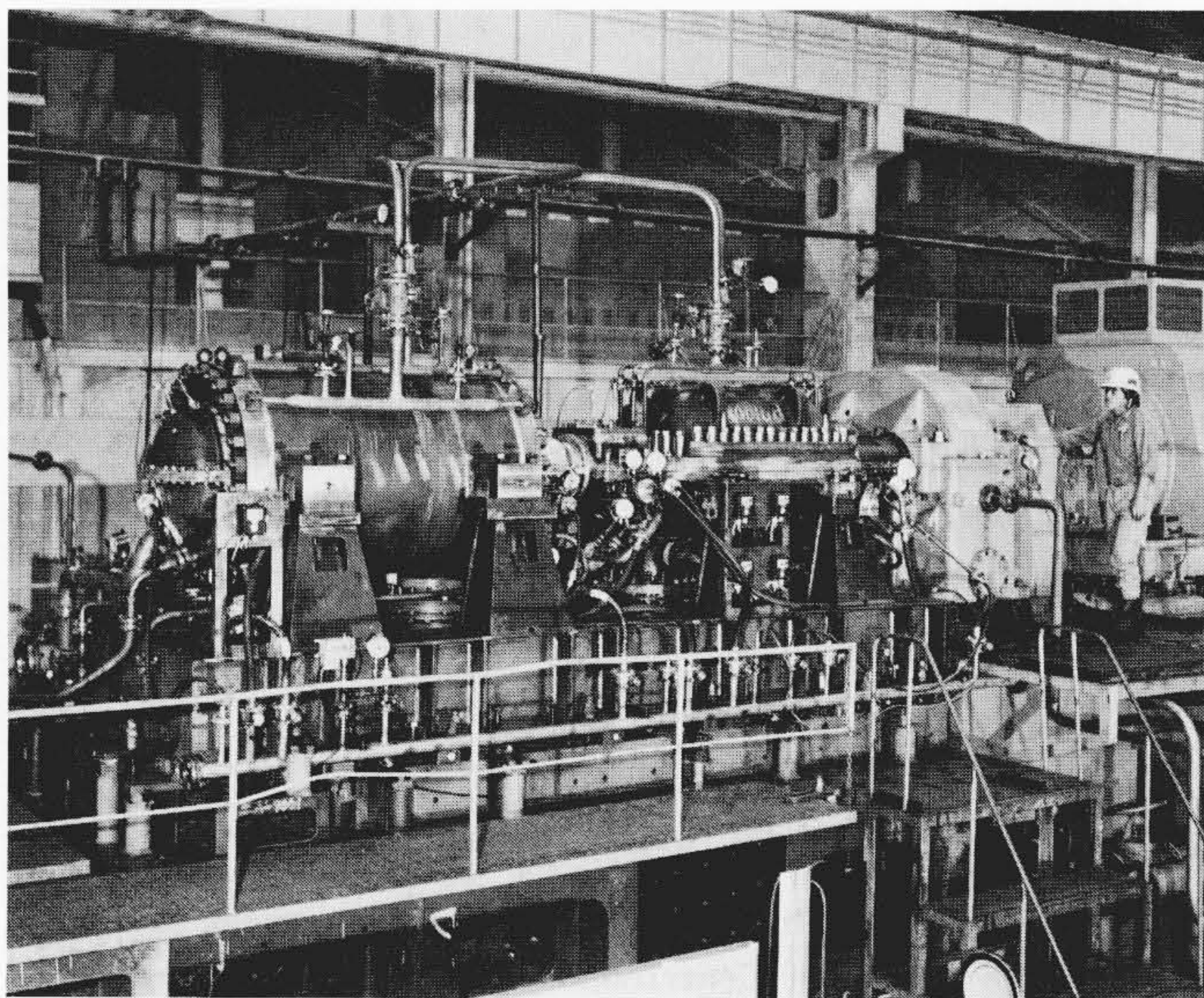


図4 天然ガス供給用圧縮機 1,360t/dアンモニアプラント用天然ガス圧縮機(9,850rpm, 3,820kW吐出し圧力 $45\text{kgf/cm}^2\text{a}$)を示すもので、水平分割形の低圧段と垂直分割形の高圧段の2ケーシングにより圧縮される。

も広範囲にばらついている。

取り扱う天然ガスはメタンが主成分であるため、分子量は約20程度であるが、ガスの組成は長期的に見ると変化するので、圧縮機の設計に当たっては、一般の減量運転を考慮に入れた設計に更にガス組成の変化、すなわち分子量の変化をも考慮に入れて、作動範囲の広い特性をもたせるよう設計されている。

図4に、工場試験時の、1,360t/dプラント用の天然ガス供給用圧縮機を示す。低圧、高圧の2ケーシングから成り、低圧側は水平分割ケーシング、高圧側は垂直分割ケーシングを採用している。羽根車など応力が高く、しかもガスに接する部分は、ガスに含まれる硫化水素による水素ぜい性割れを防止するために、材料の降伏点を 65kgf/mm^2 以下に抑えるような熱処理が施されている。ケーシングの軸封には、オイルフィルムシールが採用されている。

2.2 プロセス空気圧縮機

アンモニア合成の原料としての窒素を得るための空気を、リフォーマの要求する圧力約 $35\sim40\text{kgf/cm}^2$ まで昇圧するために遠心圧縮機が採用されている。リフォーマに送られる空気は、温度が高いほど良いわけであるが、圧縮機の強度上の制約及び動力節減の目的で、圧縮機には何基かの中間冷却器が設けられる。図5に1,360t/dプラント用プロセス空気圧縮機の工場組立試験の状態を示す。ケーシングはいずれも水平分割で、軸封にはラビリンスシールが採用される。この例では、それぞれの圧縮機は二つの圧縮グループに分かれ、その各グループ間で中間冷却が行なわれる。圧縮機全体で必要な圧力比は $35\sim40$ で、遠心圧縮機としては、尿素合成用のものを除けば高い部類に属する。大気状態で吸い込まれた空気の体積流量に対し、圧縮機出口での体積流量は約 $\frac{1}{35}\sim\frac{1}{40}$ となり、流路の断面積は入口に比べて出口は非常に小さくなる。したがって、高い効率を得るためと全段数を少なくするためには、低圧段に対して高圧段の回転数を高くする必要があり、図5の例では低圧段と高圧段のケーシング間に増速歯車を設けられている。羽根車には他の一般の圧縮機と同様に、クロームモリブデン鋼の溶接構造が採用されている。

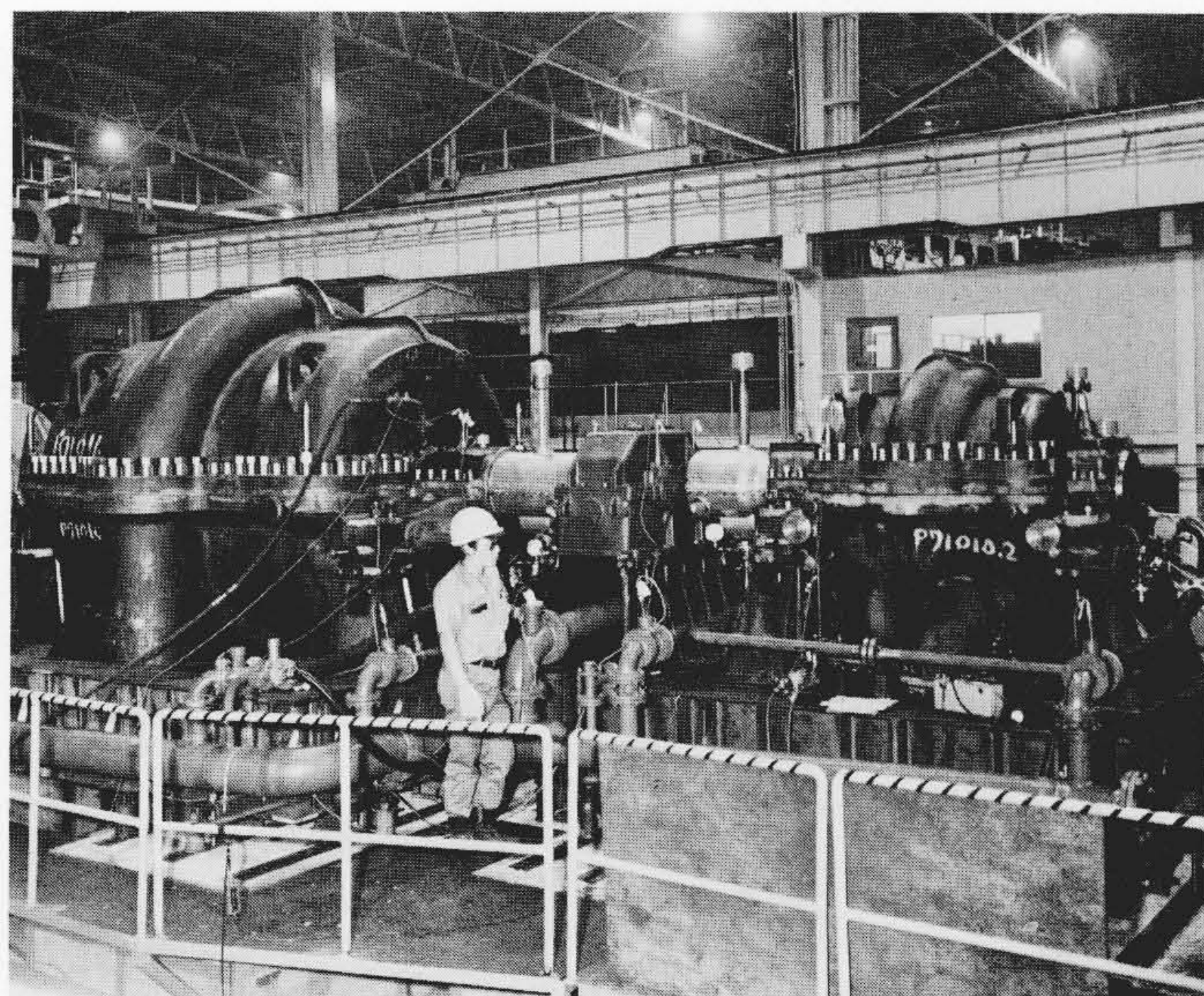


図5 プロセス空気圧縮機 1,360t/dアンモニアプラント用プロセス空気圧縮機(11,300kW, 吐出し圧力 $36.6\text{kgf/cm}^2\text{a}$)を示すもので、低圧段と高圧段の二つの圧縮機の上に増速歯車を設け、それぞれ回転数5,250rpm及び10,700rpmで運転される。

2.3 合成ガス圧縮機及び循環ガス圧縮機

リフォーマで分離して得られた水素と窒素を主成分とするガスから、一酸化炭素、二酸化炭素、及びその他の不必要なガスを除去した後の水素3と窒素1の割合の混合ガスが、合成に必要な圧力まで合成ガス圧縮機で昇圧される。コンバータの中では、 $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ なる反応が進み、未反応ガスは循環ガス圧縮機で系内を再循環する。合成ガス圧縮機の吐出し圧力は、プロセスにより異なるので、圧縮機の段数やケーシングの数は、プロセスの要求により異なる。一般に吸込圧力は $24 \sim 27\text{kgf/cm}^2$ 程度であるが、吐出し圧力は $150 \sim 350\text{kgf/cm}^2$ の範囲で、圧力比は6～14程度となる。したがって、圧縮機のケーシングの数は全体の圧力比に応じて2～4となる。循環ガス圧縮機は取り扱うガス量が大きく、必要な圧力比は小さいため、羽根車は一段で十分であり、合成ガス圧縮機の最終段のケーシングに組み込まれる。図6に、700t/dプラント用の合成ガス及び循環ガス圧縮機の例を示す。

合成ガス圧縮機の容量調整は、駆動タービンの速度制御により行なわれるが、合成ガス圧縮機と循環ガス圧縮機との特性とは、常にプラントの要求する割合で変化するわけではないので、これらのマッチングを調整するために、循環ガス圧縮機の入口には、インレットベーンコントロールが設けられている。

合成ガス圧縮機の吐出し圧力は、前述したように非常に高く、ガスの密度が高いために取り扱うガスの体積流量は、一般の圧縮機に比べて著しく小さい。したがって、合成ガス圧縮機では、小流量用の効率が良く、かつ信頼性の高い羽根車をいかに精度良く製作できるか否かが、一つの大きい技術的ポイントとなる。小流量用の出口幅の狭い羽根車では、流路表面の粗さが効率に大きい影響を及ぼし、また出口幅の寸法精度も出口幅に比例して上げないと、性能、特にサージ特性に及ぼす影響が大きい。出口幅の狭い羽根車を製作する方法としては、(1)リベットによる主板、羽根、側板の接合、(2)主板又は側板に溝を設け、外側から溝の部分の羽根端面を溶接する方法、(3)放電加工により流路を形成する方法などがある。(1)の方法では、流路表面の仕上げや寸法精度は期待できるが、強度的には、主板や側板にリベットの穴があり応力集中により局部応力が高くなること、リベットそのものの応

力も大きく品質管理が困難であることなどから、信頼性に乏しく、水素含有量の高い危険なガスを取り扱う圧縮機には特に問題であり、採用できない。(2)の方法も、強度的に重要な主板や側板に溝を設けて溶接するために、欠陥を生ずる可能性も大きく、また溶接後に組織を均一化し残留応力を除くための熱処理を行なえば、寸法精度や形状に狂いが出る可能性が大きい。これも好ましい方法ではない。(3)の放電加工によると、まず鍛造し熱処理された均一材質を素材とし、高精度に加工ができる。また加工された表面の変質層は、特殊なホーニングにより除去され、非常に平滑なしかも精度の高い流路が形成され、信頼性、効率共に優れた小流量用羽根車が製作できる。日立製作所の遠心圧縮機の小流量用羽根車は、すべてこの方法で製作されており、その優れた特性は実証済みである。

圧縮機の軸封には、高圧用のオイルフィルムシールが採用されている。これは、既にヌーボピニョーネ社では、多数の合成ガス圧縮機に実績をもっているもので、同種のシールは、吐出し圧力 650kgf/cm^2 のリインジェクション用高圧遠心圧縮機¹⁾にも採用されている信頼性の高い軸封装置である。

2.4 アンモニア冷凍用圧縮機

合成されたアンモニアガスを冷却し液化して、未反応ガスと分離し、系外に取り出すためにアンモニア冷凍機が用いられる。冷凍容量や冷凍システムは、プロセスの設計によって大きな差があり、圧縮機の仕様もプラントにより異なる(図2参照)。アンモニア冷凍機の凝縮圧力、したがって圧縮機の吐出し圧力は、冷却水あるいは冷却用空気の温度によって異なるが、ほぼ $15 \sim 25\text{kgf/cm}^2$ の範囲にあり、圧縮機としては水平分割のものが一般に用いられる。圧縮機としては吸込温度が -32°C と低いが、この程度のものには、羽根車はクロームモリブデン系を、ケーシングには低温高圧用鋳鋼品を採用している。

軸封は、他の一般のガス用圧縮機と同様に、オイルフィルムシールが用いられている。

3 結 言

肥料の需要の増加とともに、世界的に伸びを示したアンモニア合成プラントで、その主要機器として活躍する各種の遠心圧縮機について概要を述べた。これらの圧縮機に対する共通の技術的条件の第一は信頼性である。圧縮機の事故は、機器の損傷、プラントの運転休止による減産の損害だけにとどまらず、公害や人身事故につながる危険性をも含まれている。したがって、高度の設計技術と厳格な品質管理により、信頼性の高い機械を生産することがメーカーに課せられた任務と考え、日立製作所では製作に際し設計を自動化し^{2), 3)}、NC加工により重要部品の加工精度を向上し、更に検査試験を合理化してより厳格な品質管理が行なえる体制においた上で、これらの遠心圧縮機の生産を行なっている。以上の技術は、アンモニア合成プラント用遠心圧縮機だけにとどまらず他のあらゆる分野のプロセス用圧縮機にも適用し、多くの優れた実績を積み重ねている。

参考文献

- 1) P.L.Ferrara, M.Giovannini: Recent Development in Design of High Pressure Centrifugal Compressors, Quaderni Pignone 21(DEC-1975)
- 2) 金木忠: 遠心圧縮機の自動設計, ターボ機械, 5, 9(1977-9)
- 3) James B.Pond: On the road to CAD/CAM IRON AGE March/1977

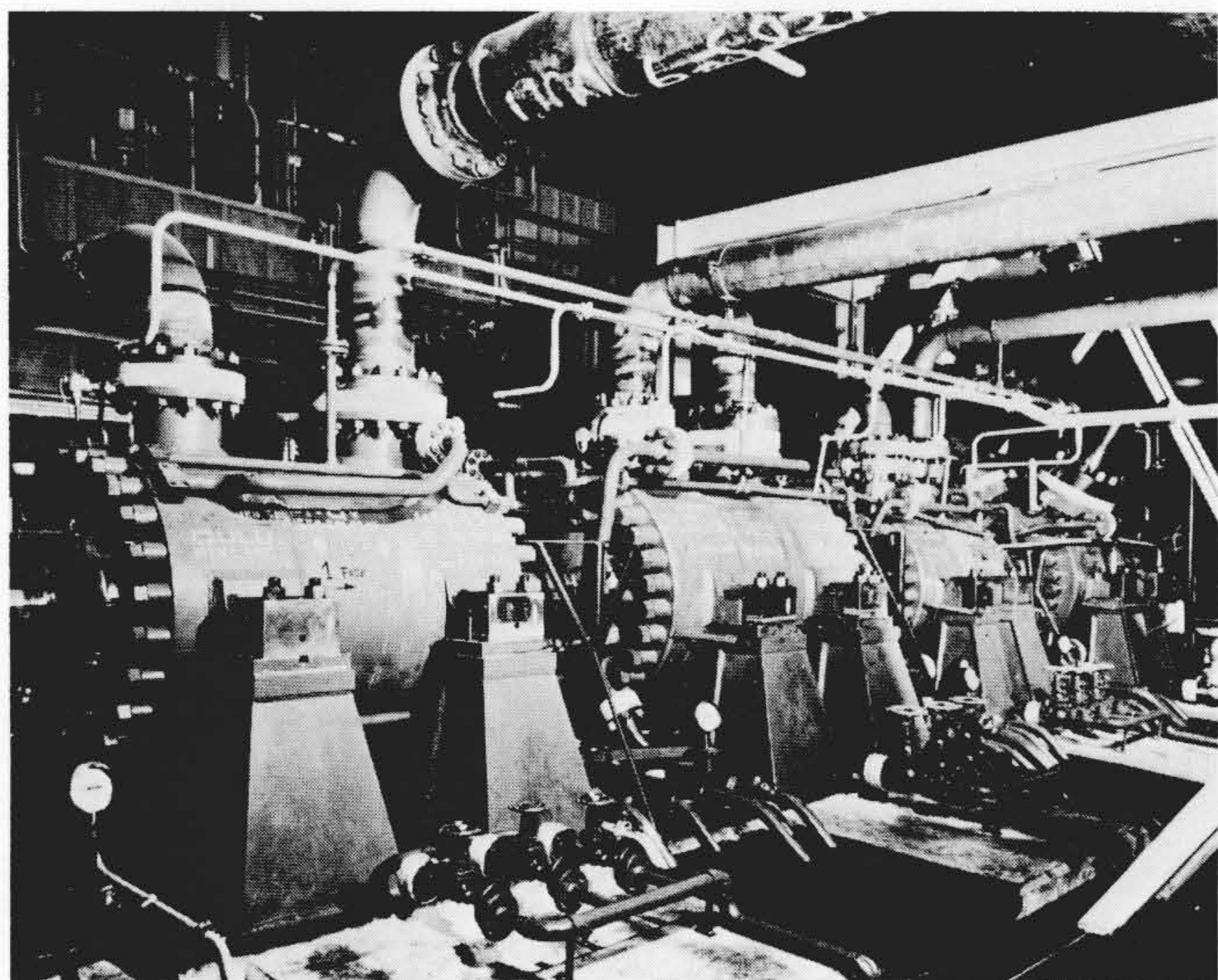


図6 700t/dアンモニアプラント用合成ガス圧縮機 13,690kW, 14,200rpm, 吐出し圧力294気圧の合成ガス圧縮機を示す。