

水素用膨脹タービンの開発

Development of Hydrogen Turboexpander

空気分離装置で代表されている深冷ガス分離法¹⁾は、水素を含む混合ガスの分離にも応用されている。この混合ガス分離装置に寒冷を供給する膨脹タービンは、水素を扱うために可燃性ガスに対する安全性の確保、空気、油の侵入によるプロセスガスの汚染防止対策が必要である。今回空気分離装置用膨脹タービンの空気制動方式を油制動方式に改造し、プロセスガスと同じ成分のガスを油のシールに使用し、更に軸受潤滑油圧力、シールガス圧力、油制動回路圧力を常に安定させるように自動制御を行なって、上記要求を満たす水素タービンを開発した。この結果、膨脹タービン内部で可燃性ガスと空気との共存を防ぐことによって防爆安全性を確保し、シールガス圧力の自動制御によって潤滑油によるプロセスガスの汚染を防止することができた。

井原一夫* Kazuo Ihara

山崎正博* Masahiro Yamasaki

1 緒言

空気分離装置で代表される深冷ガス分離法は、酸素、窒素などを工業的に大量に生産するのに最も一般的に採用されている方法である。この深冷ガス分離法は、一般燃料として使用されるメタン、エタン、化学原料となる炭酸ガス、一酸化炭素、クリーンエネルギーとして今後の需要が期待される水素の分離、液化にも積極的に応用され、更に最近では、アルゴン¹⁾などの希ガスの回収にも応用範囲が広まってきている。深冷ガス分離装置では、寒冷発生を行なう機器として膨脹タービンが最も多く用いられている。

日立製作所では、空気分離装置用膨脹タービンの製作から出発して、最近では水素用、ヘリウム用、膨脹^{2),3)}タービンの製作も行なっている。なかでも水素用膨脹タービン(以下、水素タービンと称する。)は、空気、ヘリウムタービンと原理的には同じであるが、ガスの性質の違いから(例えば、可燃性ガスであること)制約を受ける点があり、それらに対応した設計製作が必要となる。ここでは水素を主成分とした混合ガスから一酸化炭素を回収する、いわゆるCO分離装置に適用した水素タービンを例にとって、特徴点、適用結果について述べる。

2 CO分離装置の概要

図1にCO分離装置フローの一例を示す。水素、一酸化炭素から成る原料ガスは外部で昇圧された後、第1熱交換器に入り冷却される。冷却過程で、高い沸点をもつ一酸化炭素は凝縮を始め、気液分離器でガスと液化ガスとに分離される。気液分離器は、ガスが第1熱交換器を通過して得た寒冷で気液分離を行なう工程と、第2熱交換器を通過して得た寒冷とで行なう工程と合わせて二つの気液分離工程から構成されている。

この二つの工程を通過して分離された液化ガスは、再び第1熱交換器に入り、原料ガスを冷却することによって、気化昇温し製品ガス(CO)として回収される。一方、分離されたガスは純度の高い水素となって第2熱交換器に入り、気液分離器に流入するガスを冷却した後、膨脹タービンに入る。膨脹タービンはガスを断熱膨脹させることによって、ガスのエネルギーの一部を外部に取り出し、ガスを冷却させるものである。ここでは膨脹タービンは直列に2基設置されており、高压タービン、低压タービンで発生した寒冷は第1、2熱交換器を通して、気液分離器に流入するガス及び原料ガスに供給される。寒冷を供給したガスは、高純度の水素として回収される。また膨脹タービンの運転を円滑にするために、シールガス及び潤滑油給油装置が併設されている。

3 水素タービンの構造

3.1 水素タービンの特徴

水素タービンは、空気タービンと違って扱うガスの性質が違っている。表1に水素と空気の水素の主な性質の差異を示す。同表から分かるように、主に三つの特徴点が挙げられる。

第1は、水素の沸点が空気に比べて低いことである。空気タービンの場合、 $-110 \sim -170^{\circ}\text{C}$ が運転領域であるのに対して、水素タービンの場合 $-180 \sim -240^{\circ}\text{C}$ である。このため機器、配管に使用する材料、断熱方法に検討が加えられている。

第2は、水素は可燃性ガスである。したがって、機器、配管からの漏れはもちろんあってはならないが、使用する電気計器はすべて防爆対策を講じたものでなければならない。また、タービン軸受に供給されている潤滑油が、タービンプロセスガスラインに浸入し、固化して起こる回転体部の焼損事

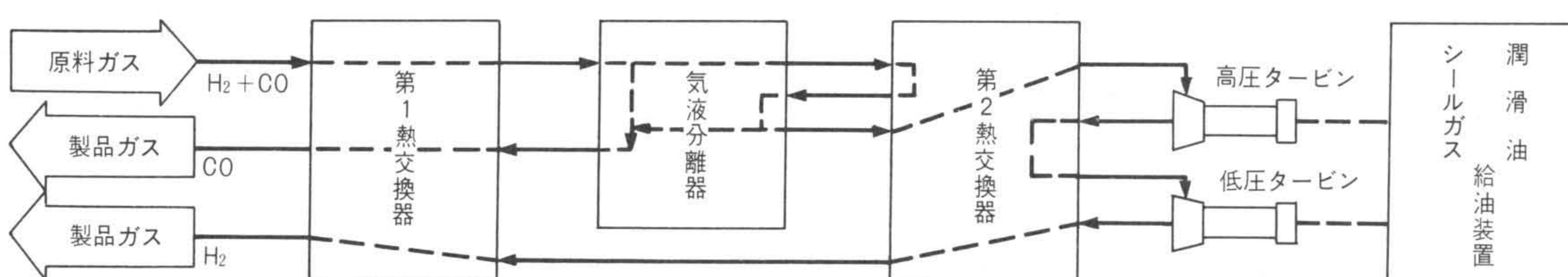


図1 CO分離装置フロー 水素タービンは直列に2台設置され、熱交換器の温端損失、コールドボックスの保冷損失に見合う寒冷を供給している。

* 日立製作所笠戸工場

表1 ガスの性質 水素は可燃性ガスであり、空気と比較して沸点が低く、また定圧比熱が大きいなどの特徴をもっている。

項目	単位	ガス	
		水 素	空 気
分 子 量	—	2.016	28.96
定 圧 比 熱*	kcal/kg℃	3.403	0.24
比 熱 の 比* (定圧比熱/定容比熱)	—	1.41	1.40
沸 点 (1atm)	℃	-252.7	-194
粘 度 ($\frac{0}{1atm}$)	cP	0.0084	0.017
そ の 他	—	可燃性	不燃性

注：*は0℃での値

故も、可燃性ガス中ではあってはならない。このため、水素タービンには、潤滑油がプロセスガスラインに入らないように、シールガス(水素)が供給されている。詳細については後述する。

第3は、断熱熱落差(以下、熱落差と称する。)が大きいということである。膨脹タービンは前述のように断熱膨脹によってガスのエネルギーを速度に変換し、速度エネルギーを回転動力に変えて系外に持ち出すものであり、基本的には断熱変化である。

完全ガスの熱落差は、次式のように示される。

$$\Delta I = C_p (T_1 - T_2) = C_p T_1 \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right\}$$

ここに ΔI : 単位質量当たりの熱落差(kcal/kg)

κ : 比熱の比($\kappa = C_p / C_v$)

C_p : 定圧比熱(kcal/kg・℃)

C_v : 定容比熱(kcal/kg・℃)

T_1, T_2 : タービン入口, 出口温度(℃)

P_1, P_2 : タービン入口, 出口圧力(kgf/cm²abs)

上式から分かるように、熱落差は定圧比熱に比例している。例えば、空気タービンと水素タービンの入口、出口の圧力比を等しくし、入口温度を同じと考えると両者の定圧比熱の割合だけ(この場合、表1より約14倍)水素タービンにかかる熱落差は大きいことになる^{※1)}。熱落差が大きくなるとタービン内でのガスの速度エネルギーも大きくなる。したがって、タービンの効率を向上させるためには、タービン内のガスの速度に見合うだけのタービンの周速を高くしなければならない。このため水素タービンの場合、空気タービンより高い周速となる。しかし、高周速になるとロータの遠心応力が高くなるため、ロータに使用する材料の強度から周速は制約を受ける。したがって、周速を必要以上に上げた設計を行わないように、タービン入口、出口圧力比を小さく抑えたり、タービンの段数を増すなどの対策がとられている。

3.2 水素タービンの構造

3.2.1 制動方式

水素タービンは可燃性ガスを扱うために、タービン内部への空気の混入は絶対に避けなければならない。このため、空気の混入の危険性のある空気制動方式は採用されない。一般

※1) 実際にはタービンは、液化領域近辺で運転されるのが普通である。一般にガスは液化領域近辺では、式に示すような完全ガスの関係はそのままでは適用できない。したがって、熱落差の値も、実際にはもっと小さくなる。

には、大形タービンには発電機駆動形、小形タービンには油による制動方式が採用されている。ここでは油制動方式について述べる。油制動方式には油ポンプ方式と摩擦ブレーキ方式があり、表2に両方式を比較して示す。

油ポンプ方式とは制動インペラをタービン主軸の一端に直接取り付け、タービンで発生した動力を吸収しようとするものである。

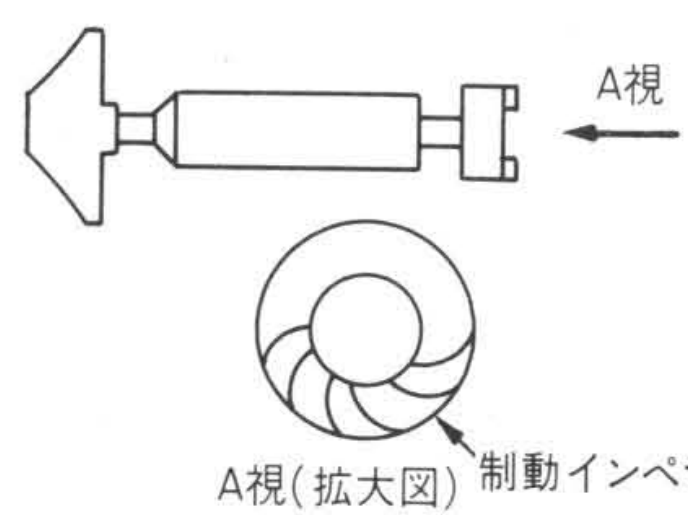
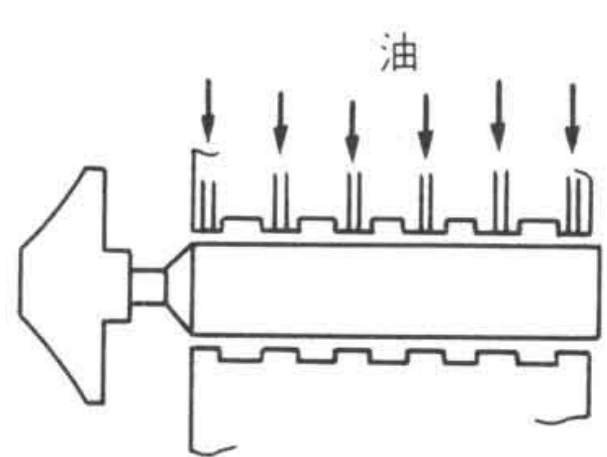
本方式は制動力の調整が容易で、起動時、定常時を通して負荷変動に追従し安定した制動力を得ることが可能であるが、タービンの性能との関連で高速回転となる傾向にある。また制動インペラは、半径流式以外に軸流式も有効である。しかし、油によるエロージョンが起こりやすく、定期点検時には必ずチェックする必要がある。

摩擦ブレーキ方式とは、主軸の外周の小さな隙間に油を圧送して油の摩擦抵抗により制動を行なうものである。構造が簡単であるが、起動時などの負荷変動時に制動力が不均一となり、回転数がふらつき調整が困難である。また、大形になると摩擦面をタービン出力に比例して大きくする必要があり、回転体部が大きくなるとともに制動油量も増加し、経済性に劣る。

3.2.2 水素タービンの構造

上述のように、運転操作性などに優れた特徴をもつ油ポンプ制動方式を採用した水素タービンを今回開発した。図2に油ポンプ制動方式を採用した水素タービンの構造を示す。水素はガス入口から流入し、断熱膨脹によってロータにエネルギーを与え、ガスは冷却されてガス出口から流出する。一方、制動油は制動油入口から流入し制動インペラによって昇圧された後、制動油出口から流出する。軸受油は、二つのジャーナル軸受、一つのスラスト軸受に強制給油された後、排出される。また油がロータ側に流入しないように、ロータ背面にはシールガスを供給している。シールガス圧力は、軸受室内圧力よりも常に高い圧力に調整され、供給されている。図3に水素タービンの回転体を示す。

表2 油制動方式の比較 油ポンプ方式のほうが、タービン運転の安定性が良い。

油制動方式	油ポンプ方式	摩擦ブレーキ方式
構造		
長所	● 制動給油用の油ポンプが小形になる。 ● タービン内部の制動による発熱量小 ● 制動力の調整容易 (運転の安全性大)	● 構造が簡単
短所	● エロージョンが発生しやすい。	● 制動供給用の油ポンプが大形になる。 ● タービン内部で制動による発熱量大 ● 制動力の調整が困難 (運転の安定性劣る。)

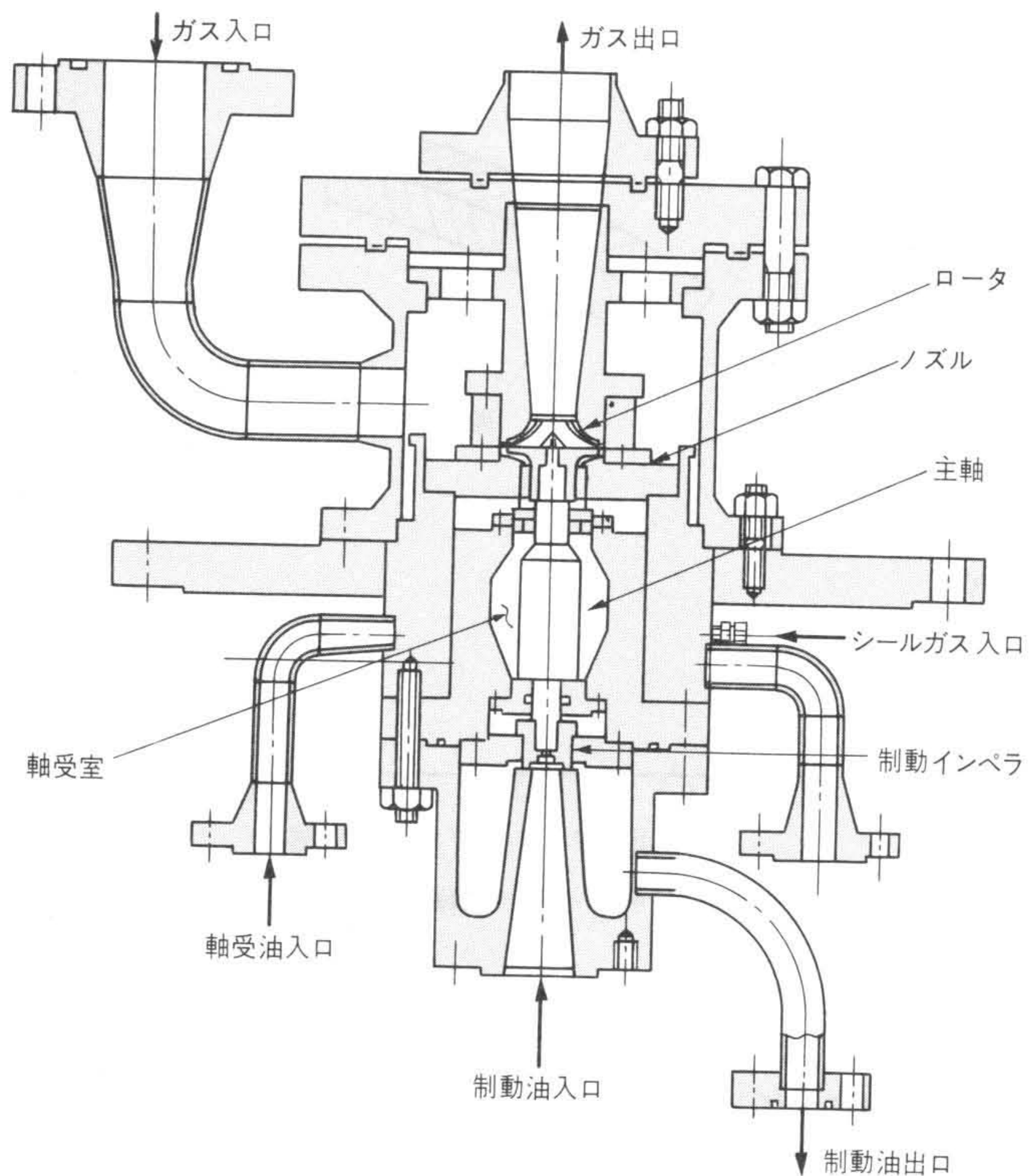


図2 水素タービンの構造 制動方式としては、運転操作性の良い油ポンプ駆動が採用されている。

3.2.3 水素タービン給油装置

図4に水素タービン給油装置フローを示す。軸受給油は、油ポンプ二段で昇圧した後、軸受排油圧力に対して一定の高い圧力を確保して、圧力調整し供給される。制動油は、軸受給油ラインとは分離され、制動給油ポンプで昇圧され制動給油ラインに供給される。制動給油圧力は、制動インペラ部の

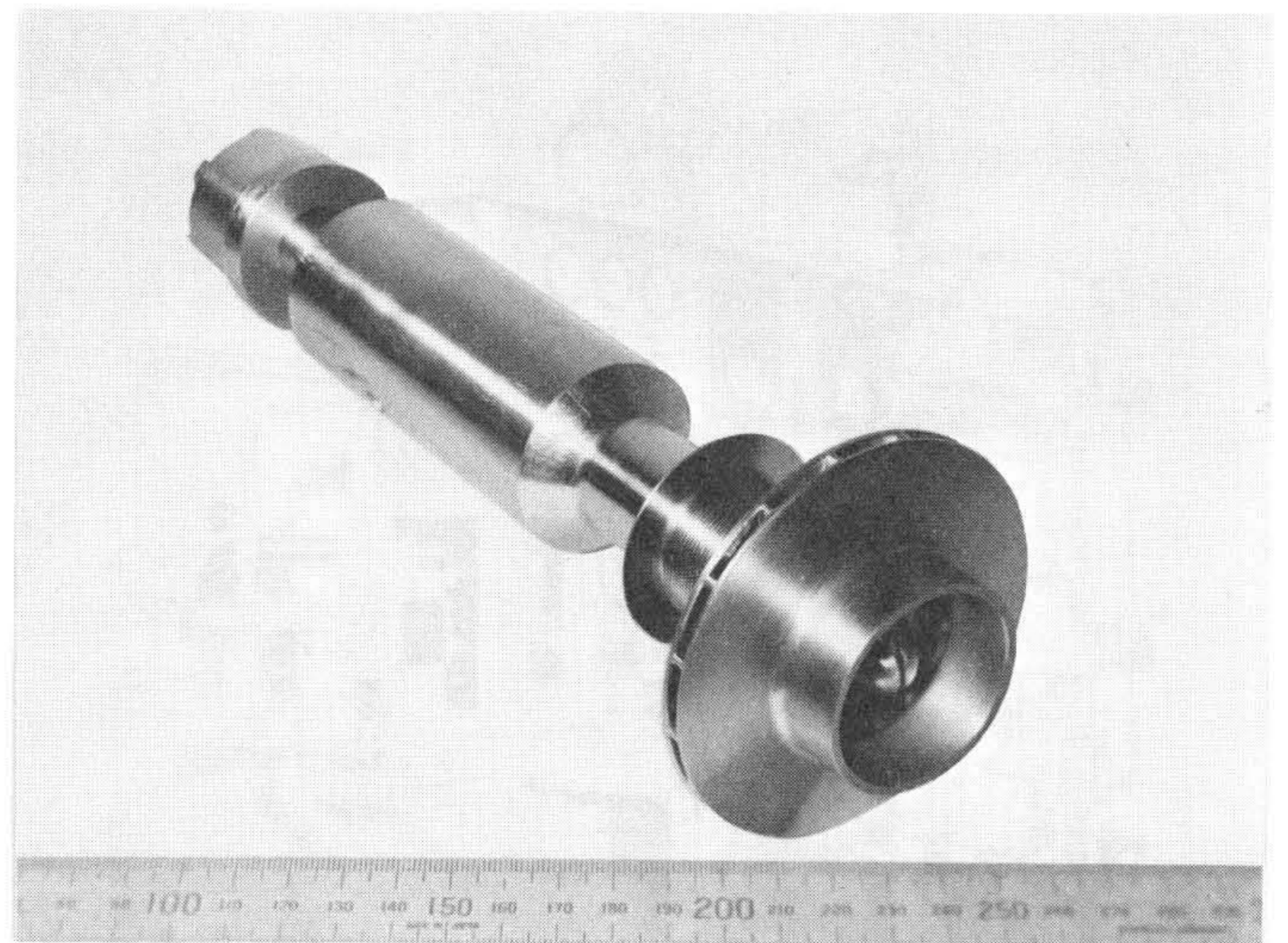


図3 水素タービン回転体 ロータ、主軸、制動インペラから成る水素タービン回転体を示す。

エロージョン防止⁴⁾を考慮して決定される。シールガスは軸受室圧力より常に高い圧力で、調整し供給されている。タービン内部でシールガスは、潤滑油と混じり合って油分離器に入り、ガスは上部から油は下部から所定の場所に回収される。特にタービンが緊急停止したときには、即座に油分離器上部のバイパス弁を全開にし、軸受室内を減圧させ、潤滑油のロータ側への漏れを防止している。このように給油装置は、潤滑油のロータ側への浸入を防止する装置を備えている。図5に給油装置の外観を示す。

4 水素タービンの運転

軸受給油圧力、制動油圧力、シールガス圧力の調整はすべて給油装置に組み込まれている制御器で行なわれる。したが

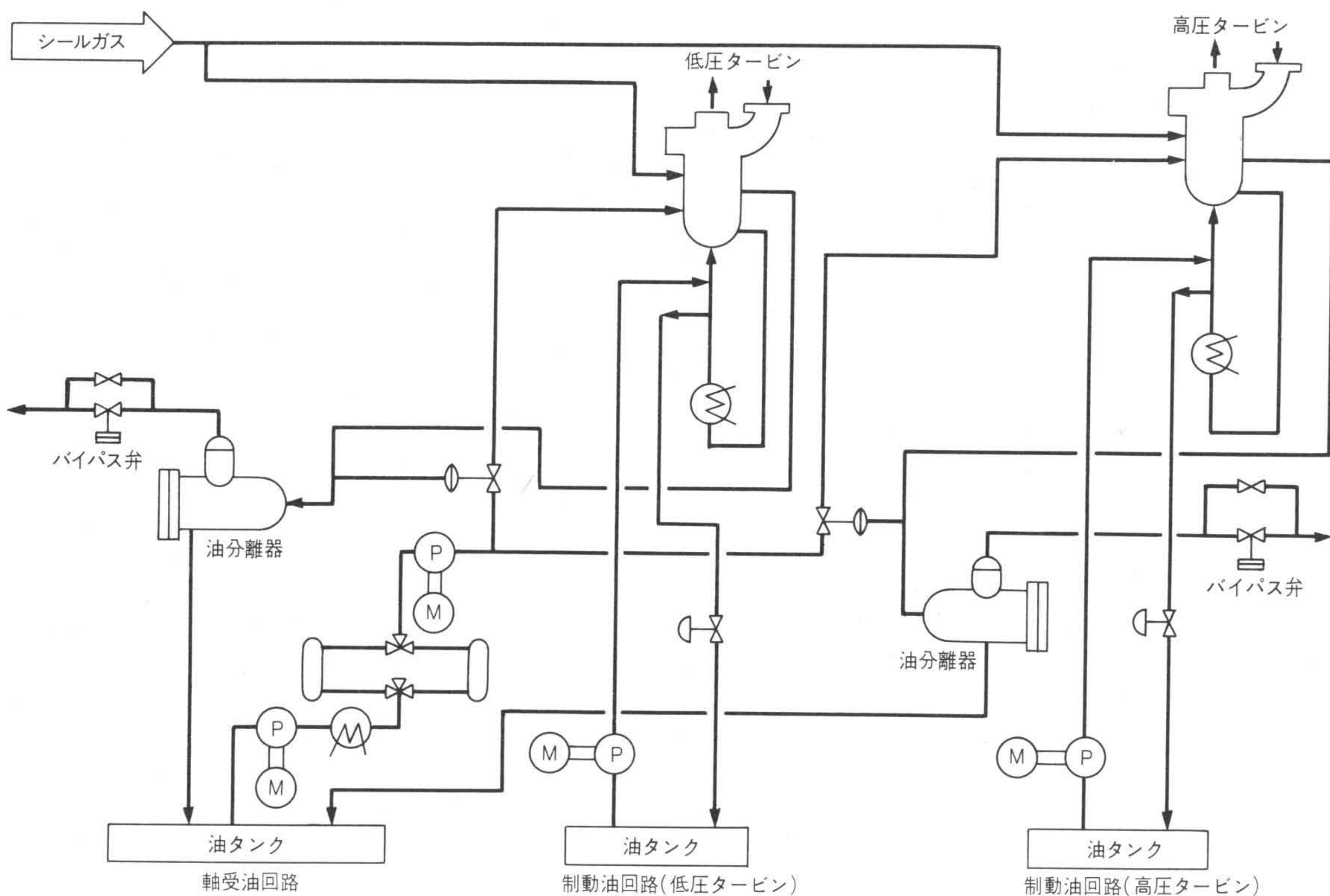


図4 水素タービン給油装置フロー

軸受給油ラインと制動ラインとを分離し、それぞれ別々のオイルポンプで給油を行なっている。この結果、軸受及び制動回路に安定して油を供給することができる。

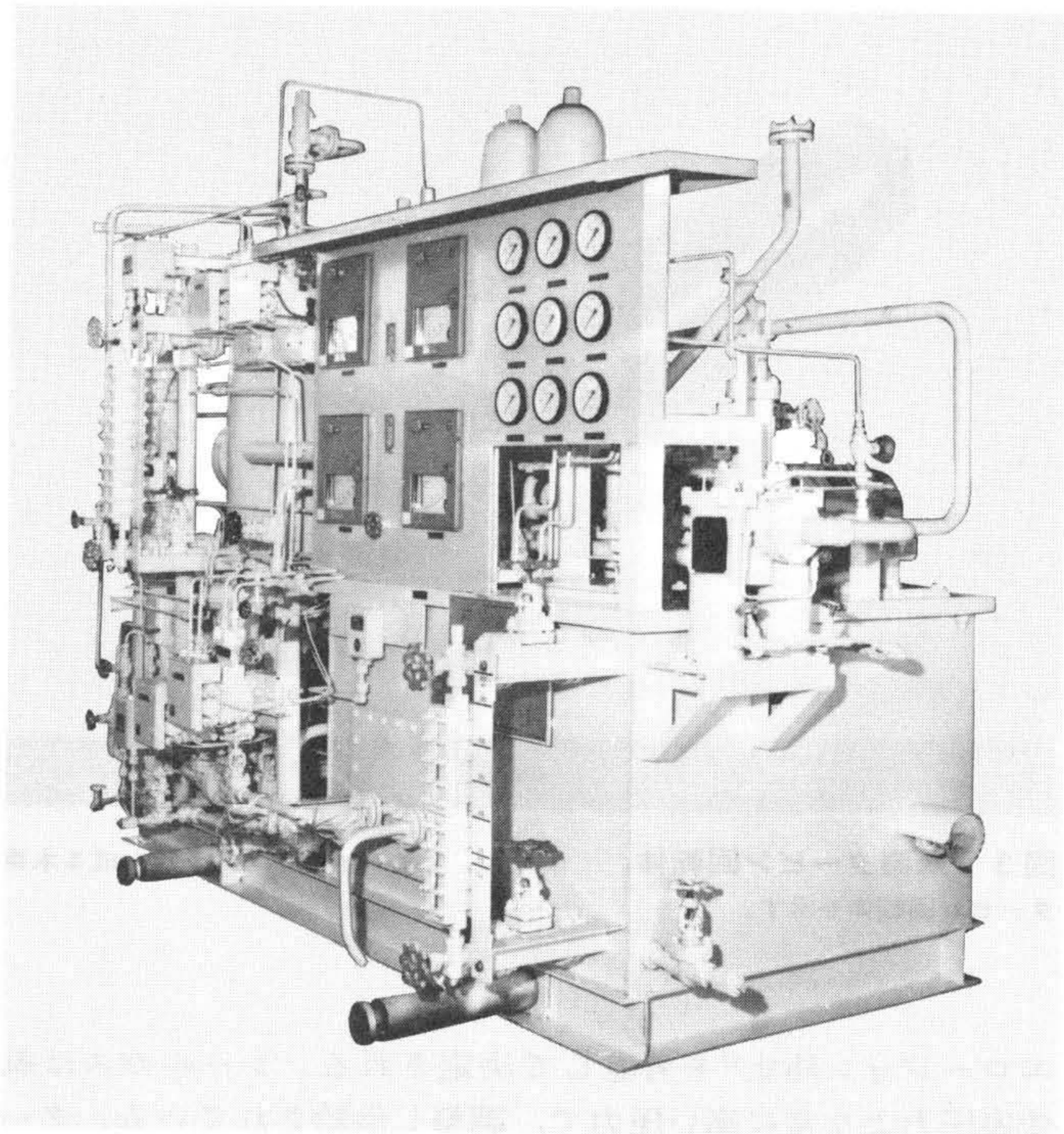


図5 給油装置の外観 軸受給油ライン、制動ライン、シールガスライン及び制御器から成る給油装置を示す。

って、定常運転で操作する項目はない。しかし、製品の供給量に応じて変化するタービン処理ガス量の操作だけは、運転員によって行なわれている。

通常運転管理項目としては、フィルタの詰まりによる差圧の増大、オイルタンク内の潤滑油保有量のチェックなど必要最小限度のものとなっている。以上のようにタービン給油装置内部は、ガスと油が混在したものになっているが、適切な制御設計によって安全かつ合理的な運転が可能となっている。

5 水素タービンの性能

表3及び図6にCO分離装置に適用した水素タービンの仕様と効率の一例を示す。性能はタービン処理ガス量、入口圧力、温度の条件によって異なるが、速度比^{※2)}0.4付近でタービン効率60～70%と良い結果を得ている。更に効率を改善してゆくためには、速度比を大きく(ロータ周速を上げる。)することが考えられるが、前述したように、ロータ使用材料の強度も考慮しながら適切な設計を行なわなければならない。

6 結 言

水素は可燃性ガスであり、単位質量当たりの熱落差が空気に比べて大きいため、水素タービンは高速かつ防爆構造をもつものでなければならない。これらの要求項目に対し、

- (1) 油制動方式の採用
- (2) シールガスの供給による油のプロセスガスラインへの混入防止
- (3) 軸受室側に漏れる水素ガスの安全な場所への排出
- (4) 空気の侵入防止
- (5) 油圧、シールガス圧力の自動制御による安定供給

※2) 速度比とは、ロータ周速とタービン入口状態から出口圧力までの理論膨脹速度との比を言う。

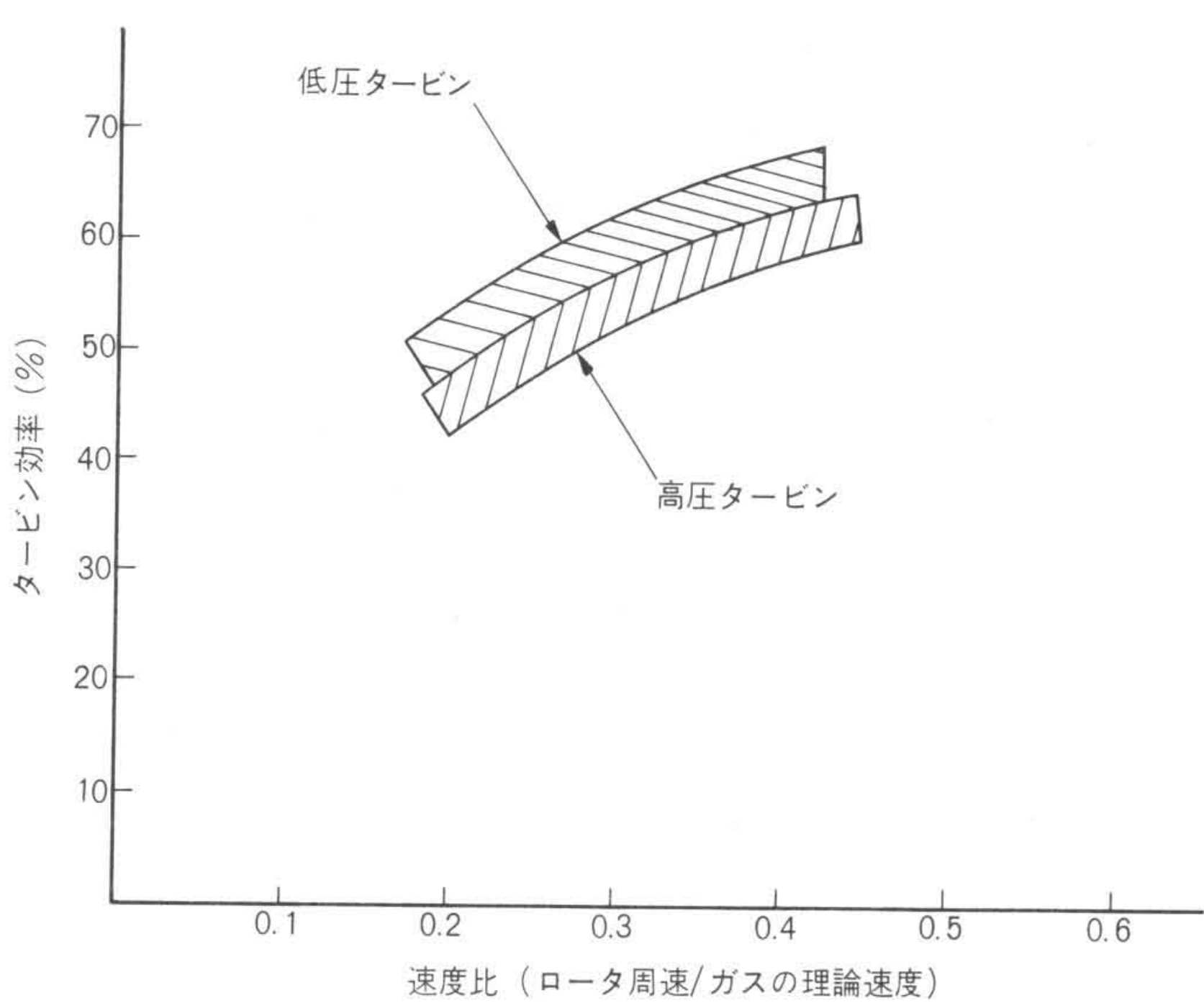


図6 水素タービンの効率 CO分離装置に適用した水素タービンの効率の一例を示す。

表3 水素タービンの仕様 CO分離装置に適用した水素タービンの仕様の一例を示す。

項 目	単 位	高 圧 ター ビ ン	低 圧 ター ビ ン
流 体	—	水素、一酸化炭素、その他	水素、一酸化炭素、その他
分 子 量	—	2.49	2.49
流 量	Nm ³ /H	9,700	9,700
入 口 圧 力	ゲージ圧kgf/cm ²	40	16
出 口 圧 力	ゲージ圧kgf/cm ²	16	7
入 口 温 度	K	82	82
出 口 温 度	K	68	68
回 転 数	rpm	104,800	68,600
発 生 動 力	kW	39	40

以上のような検討を行なって、水素タービンを開発し、CO分離装置に適用した結果、所定の性能、安定した運転を行なうことができた。

水素タービンは、水素液化装置、水素を主成分とする混合ガス中から、一酸化炭素などの化学工業に必要とされる単一成分ガスを回収する深冷分離装置に幅広く使用されている。

特に水素液化装置については、水素がクリーンエネルギーとして見直されている現状でもあり、今後の需要増大が見込まれている。この種の装置で膨脹タービンに要求される項目としては、爆発に対する安全性と運転の自動化である。

このような背景のもとに今回開発した水素タービンは、防爆対策に重点を置き、更に運転の特性に合った自動制御を取り入れ、徹底した省力化をねらったものであり、今後の新しい市場のニーズにこたえてゆきたい。

参考文献

- 1) 山崎，外：アルゴン採取付空気分離装置，日立評論，61，3，203～208(昭54-3)
- 2) 井原，外：He液化冷凍機用膨張タービン，ターボ機械，第11巻，第7号，37～42(1983-7)
- 3) 蜂谷，外：核融合用ヘリウム液化冷凍装置の開発，日立評論，62，5，387～390(昭55-5)
- 4) 松村：ポンプ設計の実際，日本機械学会第416回講習会教材，55(1975-10)