

最近の産業用タービン

Recent Trend of Steam Turbines for Industrial Plant

木田正夫* 今井鉄** 森本大三**
 Masao Kida Tetsu Imai Daizō Morimoto
 伊藤文夫*** 川越勝彦***
 Fumio Itō Katsuhiko Kawagoe

In line with the growing productive activities and the trend toward rationalization, steam turbines for power generation for house use, or for machine driving in chemical plants are growing in unit capacity, and plant processes are in a trend to complication. Under such conditions, determination of steam conditions and turbine types has come to have important concern with the economicality of the whole plant production scheme.

In this article, the recent concept for industrial steam turbines as well as a report on some of Hitachi steam turbines for industrial use are introduced.

1. 緒言

最近の電力需要の伸びは、景気の変動に支配されながらも産業界の設備の拡充とあいまって着実に伸びている。

産業用タービンとしては、自家発電用と機械駆動用に区別されるが、そのなかの自家発電用タービンの傾向としては工場プロセス蒸気条件に適した抽気復水タービン、抽気背圧タービンなど熱エネルギーの経済的利用と安価な電力を供給する発電方式が非常に多い。自家発電用タービンはプロセス蒸気条件により複雑、かつ技術的に高度な制御方式となり運転の自動化、省力化を図りながら運転効率の高いものが増加している。

一方、圧縮機などを駆動する機械駆動用タービンは、石油化学、工業化学プラントの生産の拡大と合理化により巨大化の傾向にあり、ますます大容量、高速化に推移しつつある。

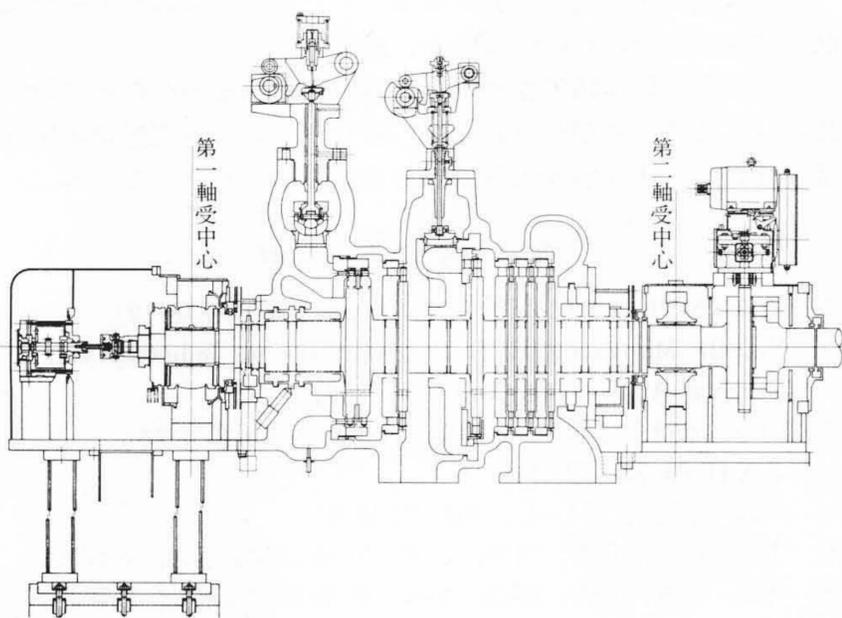
これらの産業用タービンは事業用タービンと異なり、工場生産計画と関連しながら、プロセス蒸気と安定した電力を確保し、さ

らに制御の複雑さや過酷な運転条件に耐えうる信頼度の高いことが大きな主眼である。これらの要求条件を備えた最近において、日立製作所が納入したいくつかの産業用タービンの事例につき述べる。

2. 日立の最近の産業用タービン

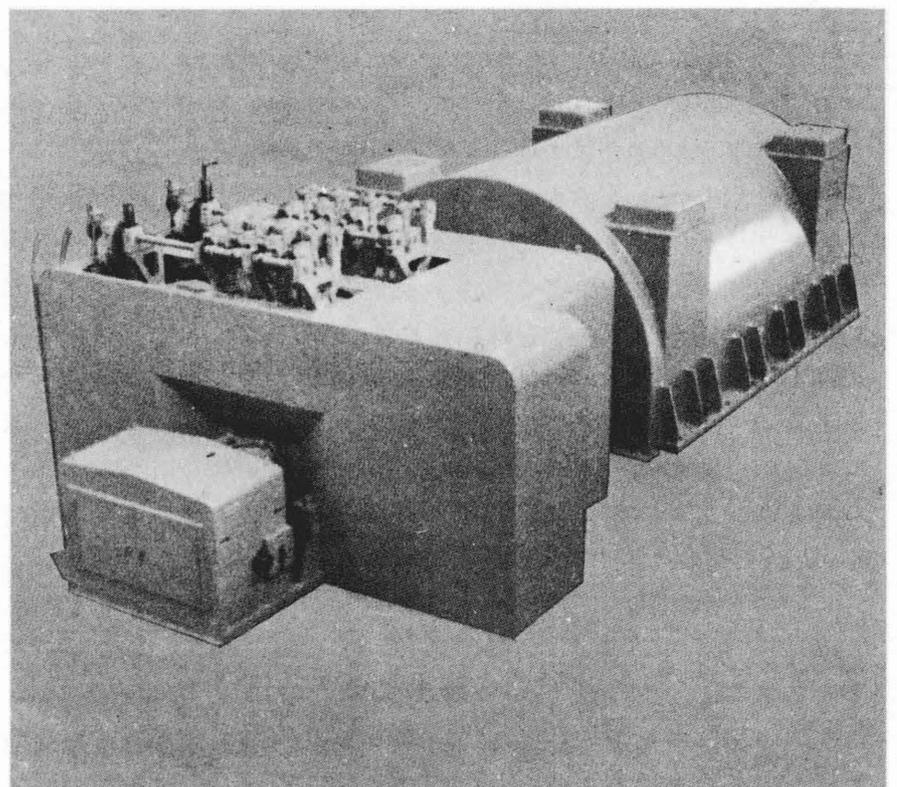
生産性向上のため設備の合理化は急速に進んで、工場生産量に応じて所要電力が増加し、このためますます大容量化している。ボイラの使用法、プロセス蒸気条件の組合せによって抽気背圧タービン、抽気復水タービンなど計画されるが、制御要素が複雑になるので制御性のすぐれた電子油圧式ガバナを産業用タービンに採用するようになってきた。これらの条件をおり込んだ自家発電用タービンを紹介する。

抽気背圧タービンの構造図を示したのが図1および図2である。これらタービンに共通したのものとしては大容量機ではあるが、発電機を結合する軸受に3軸受支持方式を採用したことで軸系はコ



定格出力 35,000kW 蒸気条件 120kg/cm²g, 540°C

図1 抽気背圧タービン断面図



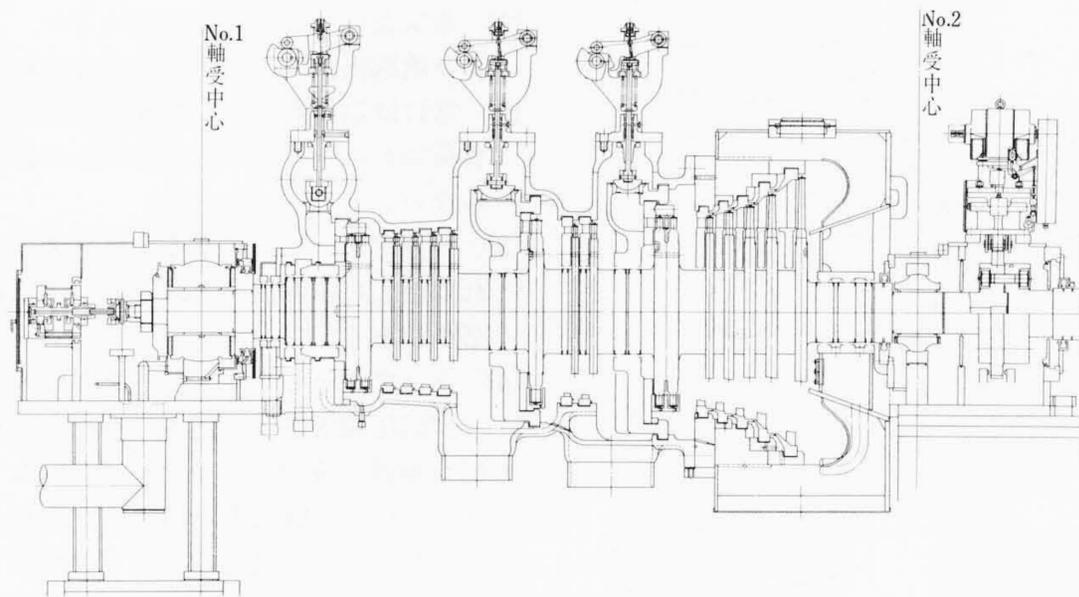
定格出力 23,000kW 蒸気条件 60kg/cm²g, 450°C

図2 抽気背圧タービン発電機

* 日立製作所電力事業本部火力技術本部

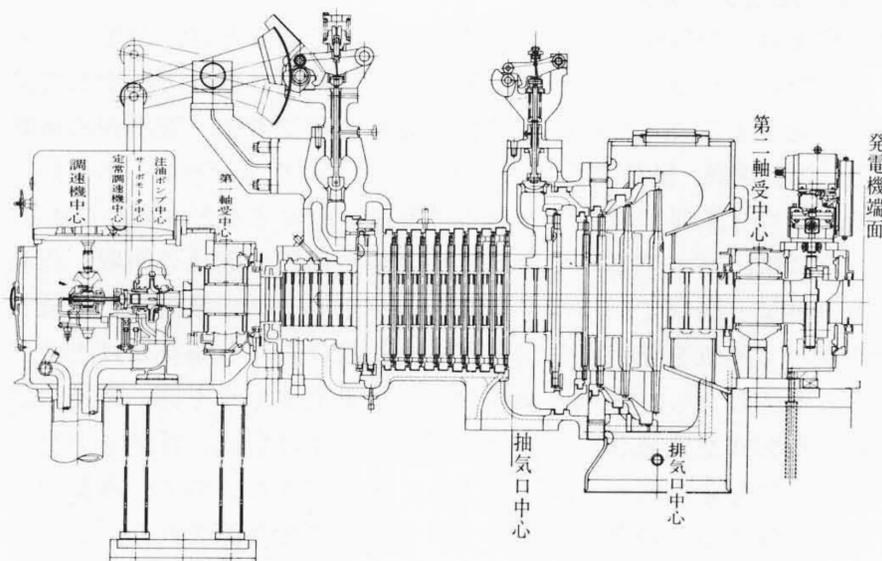
** 日立製作所日立工場

*** 日立機材工業株式会社



定格出力 29,000kW 蒸気条件 75kg/cm²g, 475°C

図3 2段抽気復水タービン



定格出力 20,000kW 蒸気条件 99kg/cm²g, 535°C

図4 抽気復水タービン断面図

ンパクトになっている。タービン効率向上のためブレードの回りにフィンを配列し漏えい蒸気を少なくした。最も大きな特長は制御装置にいずれも電子油圧式ガバナを採用したことで、制御性はもとより運転効率の向上と省力化が図られている。

2段抽気復水タービンで製紙プラントに納入したタービンの構造は図3に示すとおりである。本タービンは製紙プラント特有の回収ボイラと重油専焼ボイラの組合せによるもので、主蒸気圧力の制御とプロセス蒸気圧力の制御の関連から制御方式は複雑になっており、電子油圧式ガバナが採用されている。

段落の組合せは高圧および低圧部の調整段落にカーチスを採用し、高圧部では高圧ケーシングの内圧を下げケーシングの肉厚を減少し、単純な構造にして起動、停止に対し最適な動作をするよう計画した。また低圧部では抽気復水タービンの特質であるプロセス蒸気的大幅な変動による低圧通過蒸気量の変化が大きく、これに対して十分な能力を与えるよう圧力分布を考慮し、カーチスを選んである。

このほかに同様の形式で24,000kW 2段抽気復水タービンを製紙プラントに納入している。

20,000kW抽気復水タービンは石油プラントに納入したもので、基本構造は先に述べた29,000kWタービンに準じたものである。制御装置には機械油圧式ガバナを使用している。本タービンの構造は図4に示すとおりである。振動を従来の1/3以下を目標に、定格負荷、部分負荷の2点蒸気消費量の保証など原料段階から製造、組立に至るまで厳密な計画と品質管理の実施により、工場蒸気試

験をすることなく直接現地試運転し、振動、軸受温度、性能など所期の目的が確認され、現在順調に営業運転を継続中である。

3. サイクル上のタービン形式選定

産業用タービンは、安価な電力を得ることおよび停電を避けるための電力の確保ならびに信頼性を主目的としているが、生産工場の特殊性、プロセス条件、あるいは既設備プラントの合理化などにより、プロセス蒸気と電力を関係づけ、相対的に発電効率の向上と経済性の高いプラントサイクルを望むことは論を待たない。

このような要求からサイクルの面で、タービンの形式について具体的な検討を加える必要がある。この特殊タービンとしてトップタービン、混圧タービン、あるいは低圧タービンなどが再認識されるようになった。

3.1 トップタービン

比較的低い蒸気条件の既設備タービンプラントに高圧部を設置することによって発電量が増加し、また発電所効率が改善されるのでトップタービンが用いられるのは、以前から考えられている方法であって特に新しいものではない。

- トップタービンを設置することが有利と考えられるのは、
- (1) 負荷率が比較的高い発電所で、さらに出力増加が必要なとき。
 - (2) 出力の増加に対し、冷却水の容量に制限があるとき。
 - (3) 既設備の蒸気圧力が比較的低いとき。
 - (4) タービンに比べてボイラの老朽が著しいとき。
 - (5) 発電所の敷地には余裕はないが、さらに出力増加させたいとき。
 - (6) 最も経済的に既設備の能率を向上し、運転コストの低減を図るとき。

などである。このような発電所にトップタービンを設置することにより発電所効率が向上し、同一運転コストでも出力の増加が確保できる。

次にトップタービンの形式選定について検討してみる。まず既設備として3,800kWの背圧タービンがありプロセス蒸気量40t/hを供給していたとする。工場生産の拡大により、

ケース(1) 必要電力を8,500kW、必要プロセス蒸気量を40t/hとする場合

ケース(2) 必要電力および必要プロセス蒸気量を14,500kW、80t/hとする場合

について検討してみる。ケース(1)の場合はプロセス蒸気量の増加はなく電力のみ増加するもので、タービン形式として背圧、または抽気復水タービンが、ケース(2)の場合はプロセス蒸気量、電力とも増加するもので、抽気背圧、または2段抽気復水タービンが

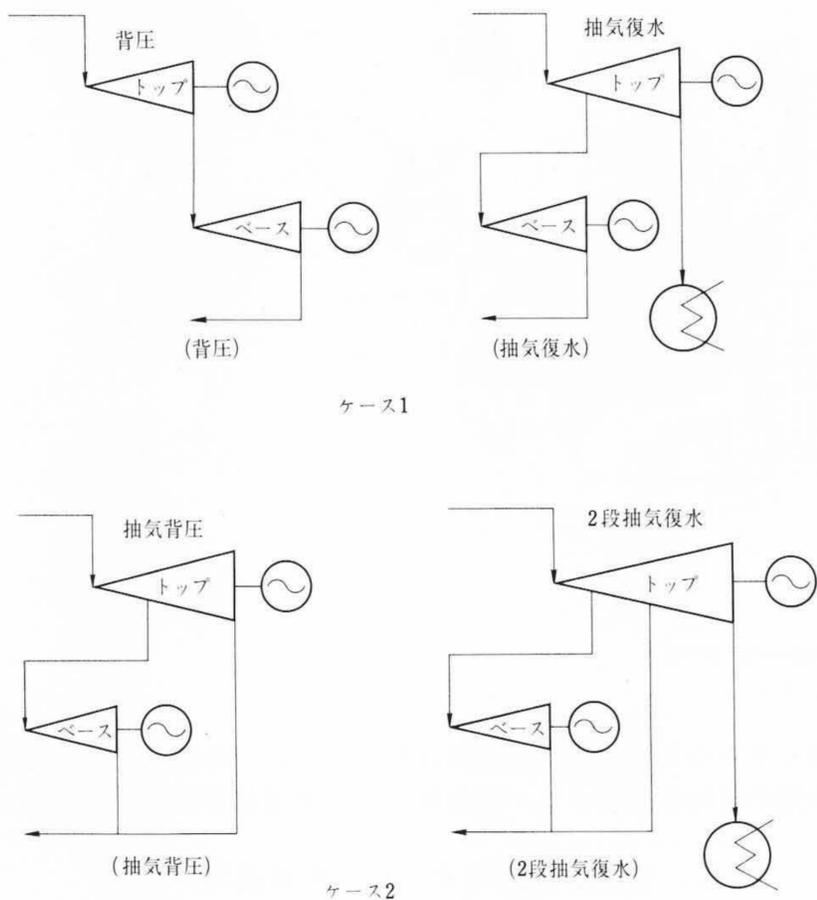
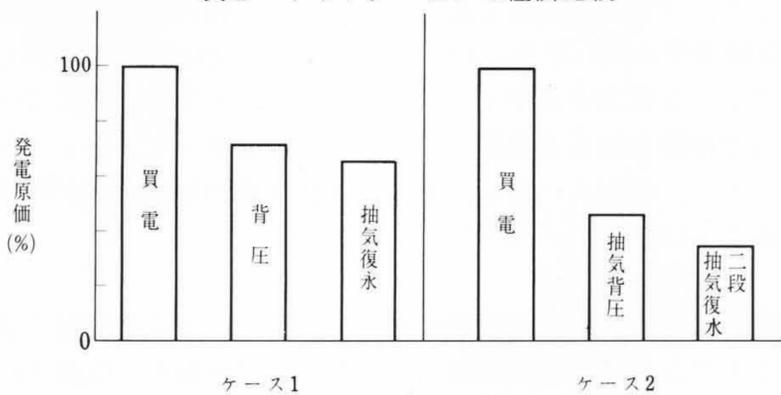


図5 トップタービンの形式

表1 トップタービンの経済比較



	ケース1			ケース2		
	背圧	抽気復水	抽気背圧	抽気背圧	2段抽気復水	
プロセス蒸気増加量	0			40 t/h		
プロセス蒸気量	40 t/h			80 t/h		
必要電力量	8,500kW			14,500kW		
トップタービン形式						
トップタービン出力 (kW)	0	2,000	4,700	0	8,000	10,700
ベース+トップ出力 (kW)	3,800	5,800	8,500	3,800	11,800	14,500
買電量 (kW)	4,700	2,700	0	10,700	2,700	0
* 発電原価 (%)	100	76.0	73.0	100	47.0	36.0

*買電量も含めたベースタービン、トップタービンの発電原価を示す

考えられる。これらの系統をまとめたものが図5である。必要電力の不足分は買電するという条件で、それぞれのタービン形式についての経済比較を行ないその結果を表1に示した。

この表からみるとトップタービン設置の有利性がケース(1), (2)ともに表われている。タービンの形式により発電量の多い抽気復水タービンが抽気背圧タービンより有利となる。

このようにトップタービンのサイクルの組み方、プロセス蒸気量に応じて総発電量が変わってくるので発電原価もそれに見合って効果が異なってくるのがわかる。一般に背圧プラントは復水プラントに比べて復水器冷却損失がなくプロセス蒸気として活用できるため、電力単価が相当低下するが発生電力は限られている。したがって電力不足分を補うため抽気復水タービンにする場合はタービン抽気量と復水量を十分検討して採用する必要がある。

トップタービンプラントを計画するにあたっての問題点を整理すると、

- (1) 蒸気条件をいかにして決めるか、これは既設備の蒸気条件および増設出力により決定されなければならない。
- (2) 常に既設備のタービン入口最高許容温度以下になるよう、各負荷にわたってトップタービンの排気温度を調整しなければならない。
- (3) トップタービンになると蒸気条件が高温高压になるので、これに適した給水温度を設定し給水加熱器などの新設を考慮する必要がある。
- (4) トップタービンがトリップした場合に、タービンバイパスおよび減圧減温装置が迅速に作動する必要がある。この特性は過酷な条件で検討されなければならない。

などについて、既設備の諸条件を詳細に調整し、最も経済的なプラントサイクルに見合うタービン形式を選定する必要がある。トップタービン自体の構造形式は特に変わったものではないが、既設備の機能を有効に調整することにより、さらに経済効果が得られるのであらためて認識されるサイクルと考える。

3.2 混圧タービン

高压および低压の2種類の蒸気を利用できる時、混圧タービンが用いられる。この形式が適している産業は廃熱を利用して蒸気を発生することが可能な場合に最も有利である。廃熱源の種類として、鉄鋼、製鉄業界では高炉ガス、コークス炉ガス、あるいは紙、パルプ業界においてのパルプ廃液、バガスなどがあげられる。

特に紙、パルプ業界では、パルプ製造過程で薬品の回収、黒液中の熱量の回収で、パルプ廃液をエバポレータで濃縮した黒液を燃焼して蒸気を発生する回収ボイラが設けられる場合がほとんどである。しかし、従来は回収ボイラと重油ボイラを同一系統に設置する形式が実施されていた。回収ボイラは形式、性能など特性あるいは寿命の面から高压化することができないので、重油ボイラも回収ボイラの蒸気条件に合わせたもので計画された。この形式ではサイクル的に経済性が悪いので、この改善のため高温高压蒸気を任意に選ぶことができる重油専焼ボイラを設置し、回収ボイラとの2かんとタービンを組み合わせた、混圧タービンが熱経済的にすぐれ、設備投資の効果を図ることができるタービンプラントサイクルである。

回収ボイラは黒液を燃料としている関係上、この蒸気を低压蒸気として利用しタービンの途中の段落に導入し混圧させ、一方、高压蒸気はプロセス蒸気の変動、負荷変動に応じて追従する自動燃焼方式を備えた重油ボイラで発生する蒸気を導入するものである。

このように常に工場プロセス蒸気と負荷、あるいは負荷変動の調整を考慮すると混圧タービンを採用することによって1台のタービンで2種類の蒸気を使用できる。プロセス蒸気が必要な場合にはプロセス条件に合わせて抽気を行なう混圧抽気復水タービンとすると、さらに建設費の低減、運転の省力化などから発電設備の合理化が有効になるのでボイラの仕様条件と合わせてタービンの仕様をサイクルの面から検討しなければならない。

図6は混圧タービンの系統図である。

混圧になる低压蒸気の導入を大別すると、

- (1) 絞り调速
- (2) ノズル调速

の二つになる。

絞り调速の略図は図7に示すとおりである。絞り调速は低压蒸気系統に主さい止弁と加減弁を設けて混入する方法で混入する段落のノズル面積は一定である。したがって混入した段落の圧力は高压蒸気量 (G_1) と低压蒸気量 (G_2) の合流通過量によって圧力が変化するので、たとえば低压蒸気量が減少した場合にはその通過量に応じて混入した段落の圧力が下がり低压蒸気条件と混入段落

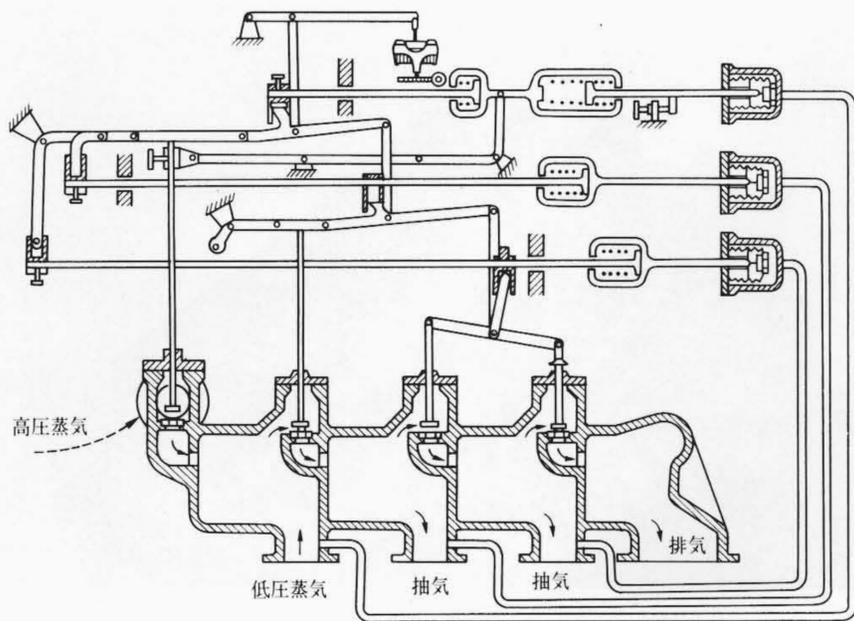


図6 混圧タービン系統図

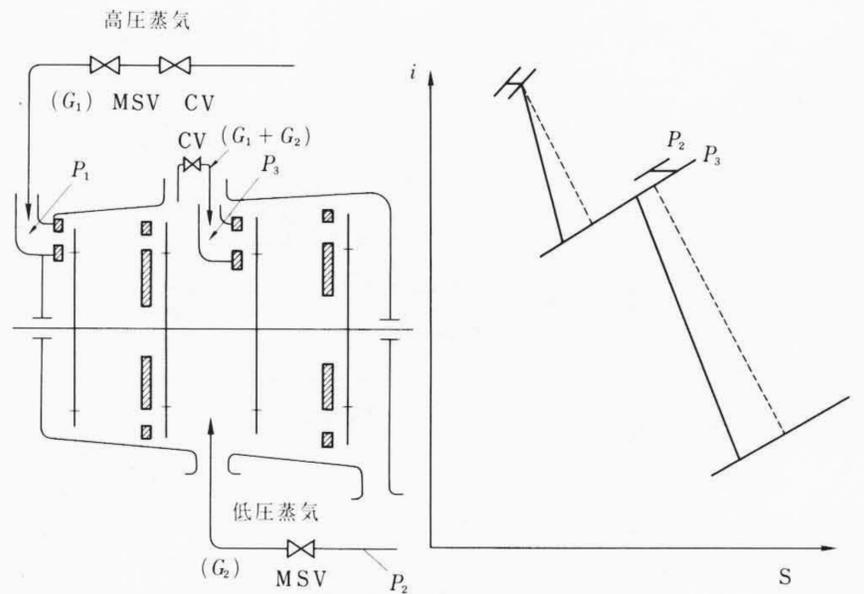


図8 ノズル調速の略図と特性

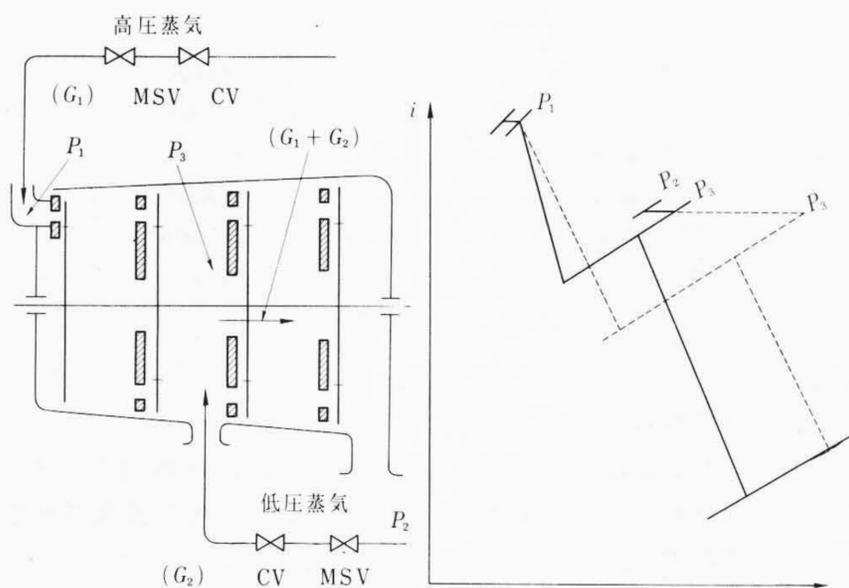


図7 絞り調速の略図と特性

圧力の差が絞りとして生ずることになる。高圧蒸気量が変化しても同じで、この絞り量はそれぞれの蒸気量の変化をあらかじめ予想し十分検討しておかなければならない。絞り量が多いとき熱効率が低下することになる。

一方、ノズル調速は混入する段落に専用の加減弁を設けてあるため、高圧蒸気と低圧蒸気の合流通過量の変化に応じて加減弁が制御するので、圧力を一定に保つことができる（抽気加減弁と同じ動作）。この場合はそれぞれの合流通過量によって加減弁の容量を決めることになる。このノズル調速の略図は図8に示すとおりである。

これらの方法は高圧、低圧蒸気量、さらにプロセス抽気量の変動、あるいは負荷変動によって定格負荷、部分負荷の性能を検討して決定されなければならない。また混圧抽気復水タービンなどは制御の要素が複雑になるのでこの点もあわせて考慮する必要がある。

混圧抽気復水タービンの場合の制御要素は、

- (1) タービンの出力（あるいは回転数）
- (2) 高圧プロセス蒸気圧力
- (3) 低圧プロセス蒸気圧力
- (4) 回収ボイラ蒸気圧力

があり、これらが同時に、また互いに干渉することがないように制御することである。たとえば高圧プロセス蒸気圧力が変動した場合の制御機構の応答は、高圧プロセス量の要求が増加し、プロ

セス圧力が低下する。このときの操作は高圧加減弁が開くと同時に、中、低圧加減弁は同じ流量分だけ閉（し）まることになる。中、低圧加減弁が閉まり高圧加減弁が開くと、高圧セクションの出力が増加するのでその補正のために中、低圧加減弁を閉め、中、低圧セクションの出力を減少させる。これによって低圧プロセス蒸気流量に影響を与えることなく、また出力、低圧蒸気圧力も影響なく高圧プロセス蒸気圧力の制御が可能である。しかし高圧加減弁が開くので、高圧セクションの流量が増大するために、混入する段落の圧力が上昇し混圧加減弁後の圧力も上がり、圧力差が小さくなって混圧蒸気量が少なくなり、回収ボイラの蒸気圧力が上昇する。これを防ぐために、混圧加減弁を開いて回収ボイラの蒸気圧力上昇を防ぐような補正の動作になる。

このように各要素を組み合わせて考えるとき、回収ボイラは燃料制御が困難であることから、回収ボイラの蒸気圧力の制御をタービンが行なうことに大きな特長がある。

制御要素がふえると、それだけ制御性が複雑になるので従来の機械式ガバナよりすぐれた電子油圧式ガバナによって制御することがきわめて有利になってくる（特許出願中）。日立製作所は昭和40年に電子油圧式ガバナを開発し、同43年に製品第1号機を完成して以来、十数台の納入実績を積み重ね、今や本ガバナは実用期にはいっており、制御性の複雑な混圧タービンもこの方式により最適の制御が行なわれるようになった。

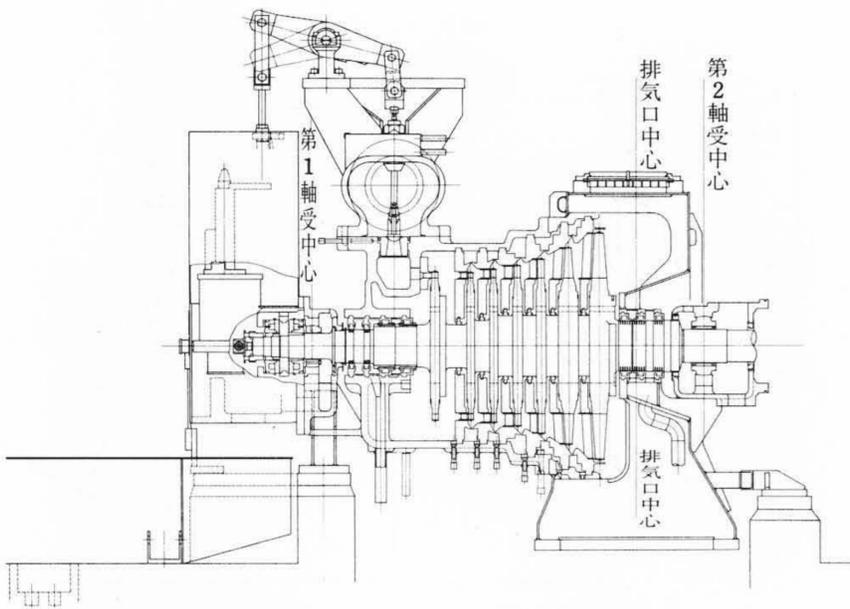
3.3 低圧タービン

プラントの近代化、あるいは生産方式の変更などでサイクル上、低圧の蒸気が余る場合がしばしば見受けられる。この低圧蒸気をさらに自家発電用、または機械駆動用タービンに使用し、経済性をあげるため低圧タービンを利用することが有利である。

低圧タービンは復水タービンの一種であり基本形式は変わらないが、低圧蒸気であるため、比容積が大きく蒸気通路が非常に大きなものになる。また、高温蒸気の対策も考慮する必要がある。すなわち、ブレードにおいてはステライトおよび表面焼入れブレードの採用、ダイヤフラムの汽水分離室の採用、材料においては耐エロージョン材採用が必要である。しかし、これらの問題は、すでに原子力タービンにおいて経験済みであり問題はない。

図9は低圧タービンの断面図を示すものである。

以上、それぞれの特種タービンも基本的には従来のタービン形式と異なるものでないが、既設備の条件、新設備の規模によって、きめ細かに検討を行なうことによって経済性が得られるので、サイクルの構成から特種タービンの採用は今後ますます伸展するものと予想される。



定格出力 8,000kW 蒸気条件 13kg/cm²g 飽和温度

図9 低圧タービン断面図

4. 機械駆動用タービンの特長

化学プラントの圧縮機駆動機として蒸気タービンを採用する場合が最近増大している。蒸気タービンを採用する場合の利点として、

- (1) 回転数が自由に選択でき、被駆動機との直結が可能である。
- (2) 高速回転にすることでタービン、被駆動機とも小形軽量になる。
- (3) 任意の範囲で回転数制御ができる。電動機では回転数制御が複雑になり、かつ高価な設備となる。
- (4) 化学プラントの製造過程において発生する反応蒸気を利用して動力を発生する方式がとれるので、プラントの運転コストが安価となる。
- (5) 駆動機容量が大容量になっても、モータ駆動のように、電源設備関係の設計がむずかしくなったり高価になることはない。
- (6) モータ駆動に比べて所内電力の節約ができる。

などをあげることができる。

圧縮機の需要をプラント別にみると、エチレン、アンモニア、メタノール、尿素、石油精製プラントに大別されるが、圧縮機の容量はプラントの容量によって左右される。エチレン、アンモニアプラントの場合は大容量、超高速タービンで、出力15,000~20,000kW、回転数14,000~16,000rpm程度のタービンが一般的である。

メタノール、石油精製プラントなどでは比較的小容量となり、出力10,000kW以下、回転数は12,000rpm以下になることが多い。

タービン形式はプラントのプロセス起動、あるいは運転条件によって、復水タービン、背圧タービンが決定されるが、自家発電用タービンと大きく異なる点は高速タービンとなること、したがってこの条件をおり込んで、超高速回転のロータ、ブレードの開発が重要なものとなってくることは当然である。

従来のタービンでは、出力、回転数を決める要素として車盤応力特にブレードのみぞ部の引張応力がある。超高速タービンになるとブレードを植え込みする従来の方法ではみぞ部の引張応力が異常に高くなる。この問題解決のため日立製作所ではロータ、ブレードを電解加工法によって一体加工する方法を完成した。これによって従来製品より大幅に高速化、小形コンパクト化し、独自の技術により30,000kW、15,000rpmの超大形高速タービンの製作を可能とした。

この電解加工法による超高速タービンで1,100kW、14,000rpmを納入したのでここに紹介する。仕様は表2に、構造は図10に示

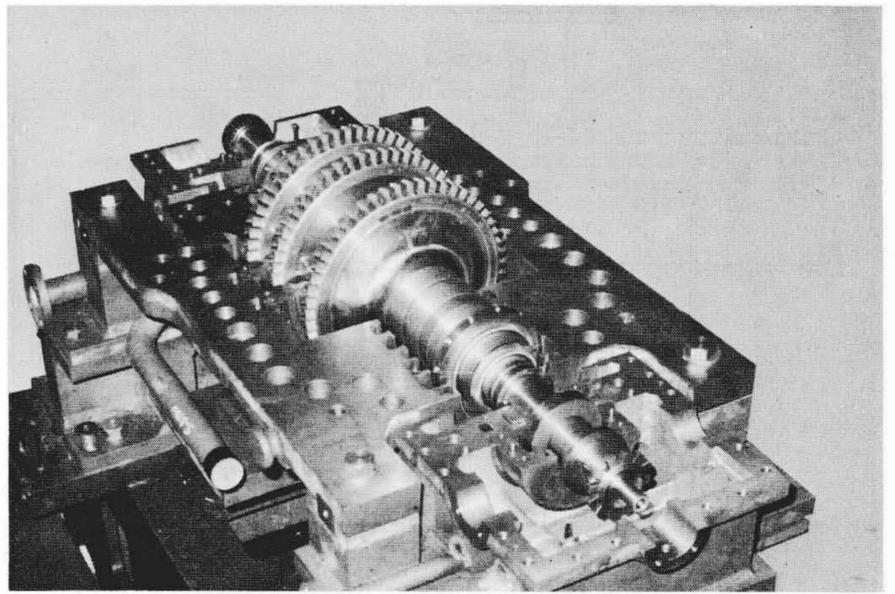


図10 タービン組立

表2 タービン仕様一覧表

形式	日立衝動式背圧タービン
数量	1台
定格出力	1,100kW
定格回転数	14,000rpm
主蒸気圧力	42kg/cm ² g
主蒸気温度	420°C
排気圧力	3.5kg/cm ² g
タービン段落数	3段

すとおりである。

本タービンは段落数3段の背圧タービンで、電解加工のブレードが使用されている。電解加工法の詳細については既報されているので省略する。おもな構造について述べると、ロータ、ブレードは12Cr系特殊鋼から電解加工によって製作されたものである。高速回転となり、タービンロータ重量が軽量化され、軸受にはティルテングパット軸受を採用している。このほか調速装置に新しい小形電子油圧式ガバナを採用し、きわめて良好に運転されている。このガバナは日立がすでに開発した電子油圧式ガバナと異なり、市販されている回路、サーボ弁を組み合わせたもので制御油圧も従来の高压不燃性の必要がなく、JIS 2号低圧油で制御できることが特長である。このためガバナ駆動装置が不要になり、回転部分がコンパクト化され、回転体は一段と信頼性が向上した。

5. 結 言

以上、述べてきたように、最近の産業用タービンはプラントの経済性、特殊性から複雑な制御を要するタービンが多く要求されている。機械駆動用タービンでも大容量、高速化と自家発電用とは異なった条件も加わり、一段と高度な技術が必要となり、この傾向は今後も続くものと予想される。われわれはこのような情勢に対処するために最新の技術を応用し不断の研究を進めつつある。ユーザーとわれわれメーカーは常に一体となりタービン、プラントの機能を十分に検討し、産業用タービンの発展に貢献したいと念願する次第である。

参 考 文 献

- (1) 今井, 森本 : 日立評論 53 111 (昭46-2)
- (2) 有江, 杉森ほか: 日立評論 54 112 (昭47-2)
- (3) 伊藤, 相川 : 火力発電 22 1383 (昭46-12)
- (4) 今井, 佐々木ほか: 日立評論 54 494 (昭47-6)