

最近の産業用タービン

Recent Trend of Steam Turbines for Industrial Plant

今井 鉄* 森 本 大 三*
Tetsu Imai Daizô Morimoto

要 旨

わが国の自家用火力発電設備は、近年産業の急速な発展と企業の合理化の進展に伴って増加一途の様相を示している。本文は最近の産業用タービンの需要の推移と動向について述べ、あわせて最近日立製作所で製作した高温高压タービンの特長について述べる。

1. 緒 言

日立製作所で最初に製作されたタービンは、昭和8年長崎紡績株式会社青島工場納め2,800kWタービンであり、現在の蒸気条件と比較するときわめて低いものであった。現在の隆盛を誇る日立製作所の蒸気タービンの歴史はこの小さな産業用タービンに端を発したのである。日立製作所が蒸気タービンをつくり始めてから、今日まで37年の間に製作された蒸気タービンは実に総出力で約15,000MW、総台数にして、約240台に達している。そのうち機械駆動用タービンも含めていわゆる産業用タービンといわれるものは出力で約2,600MW、台数で約170台に達しており、現在製作中のものも含めると約3,300MWを越えようとしているのである。火力発電技術の進歩は最近特に著しいものがあり、事業用タービンにおいては単機容量600MWがすでに完成し1,000~1,300MWの時代にはいるようとしている。一方、産業用タービンの単機容量も増加の一途をたどり現在では125MW、175MWとかつての事業用タービンのあとを追っている。また、自家用火力発電設備の特長である熱エネルギーの経済的利用と安価な電力をできるだけ多く供給しようとする企業合理化の要求からその蒸気条件もますます高温高压化する傾向にある。さらに産業用タービンはその制御機構として事業用タービンにはない特長を有しているが、最近の傾向は種々な運転方法に対処することができ、かつ省力、自動化にも容易に結びつけることができ、その性能（応答の速さ、安定性、信頼性）についても従来の機械油圧式制御にまさる電子油圧式制御機構（Electric Hydraulic Governor）が採用されるタービンが増加していることである。

本論は産業用タービンの動向と国内産業用タービンでは記録的な蒸気条件である背圧タービンを例にとりその性能、構造上に関する最近の特長について述べるものである。

2. 産業用タービンの動向

2.1 需要の推移

わが国の自家用火力発電の比率を経年的にみると図1に示すように経済の好、不況の波を受けながらも着実に伸びている。また近年の伸びは著しいものがある。

産業用タービンの需要の動向として年度別のタービン新設台数および新設タービンの合計出力を昭和35~44年度間にみると図2に示す傾向になる。図3は産業種別のタービン新設台数の昭和35~44年度間の累計を示したものである。これによると化学工業およびパルプ、紙の伸びが目だっている。これはわが国の経済発展は欧米先進国に比べて工業の発展への依存度が高いが、その中でも自家発電比率（この場合の自家発電比率とは工場の総使用電力に対する自家発電電力の比率）の高いパルプ、紙製造業、化学工業の発展が大きいことが原因であろう。これらの業種の自家発電比率の高い理由と

* 日立製作所日立工場

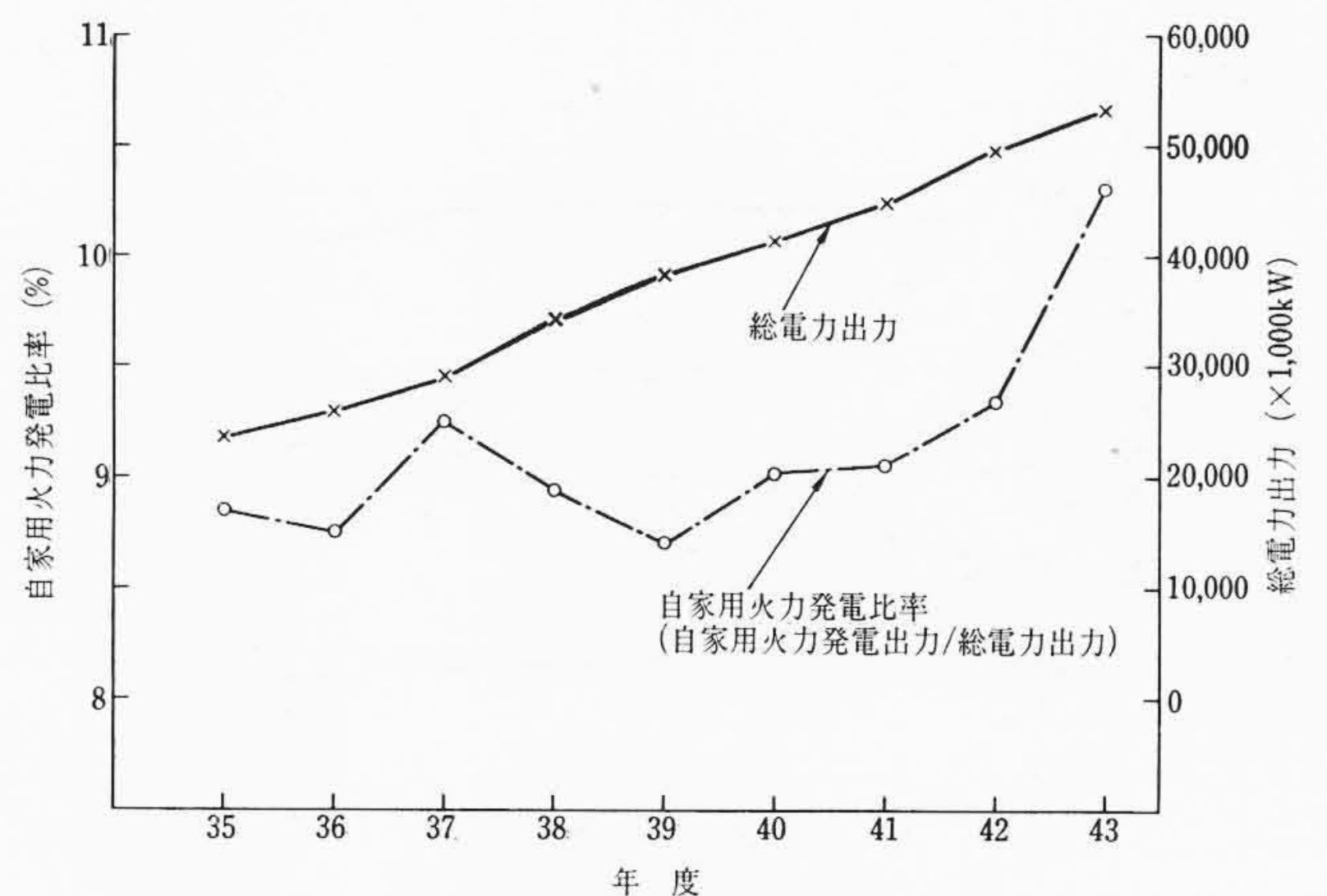


図1 自家用火力発電比率の推移

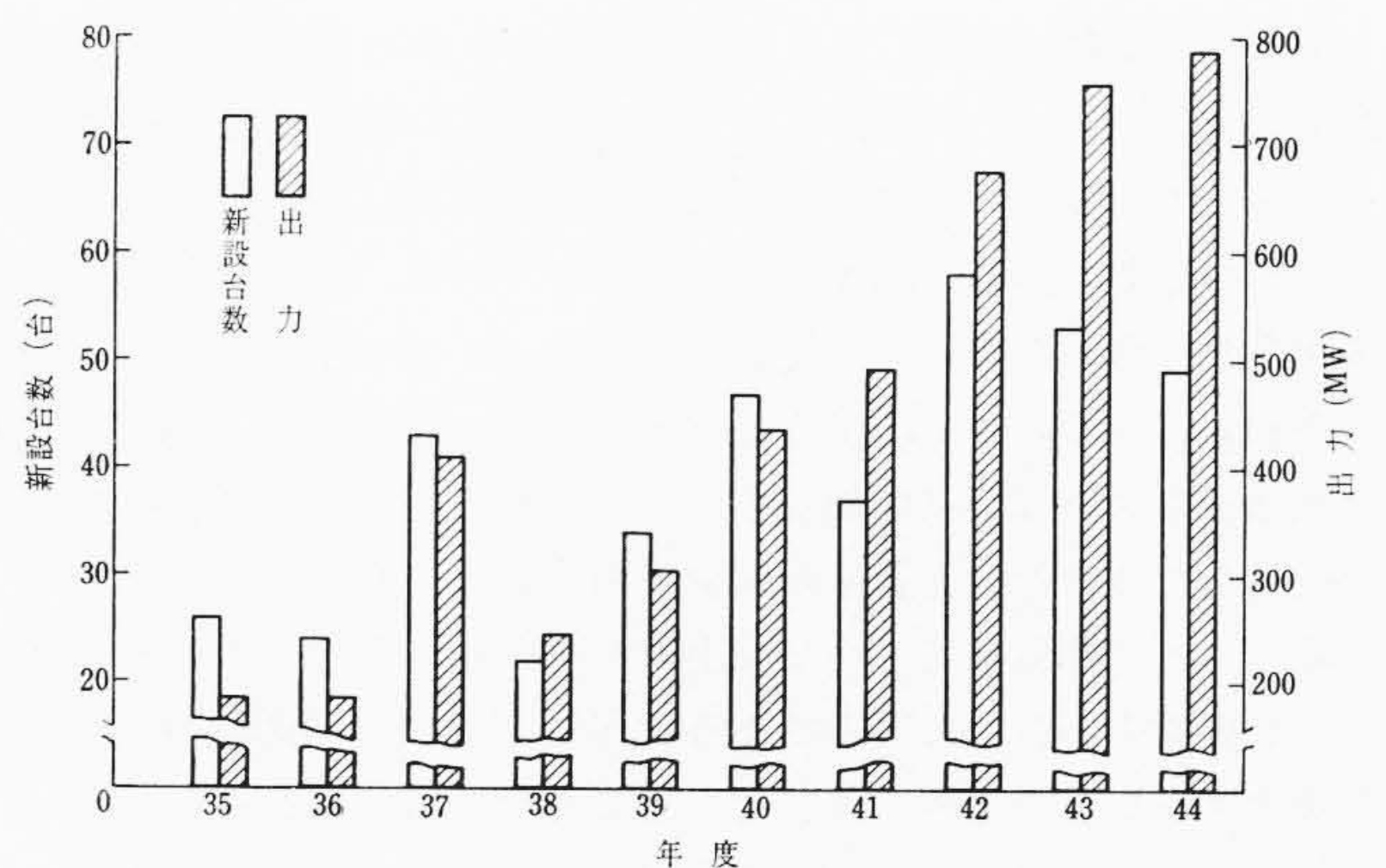


図2 年度別産業用タービン新設実績

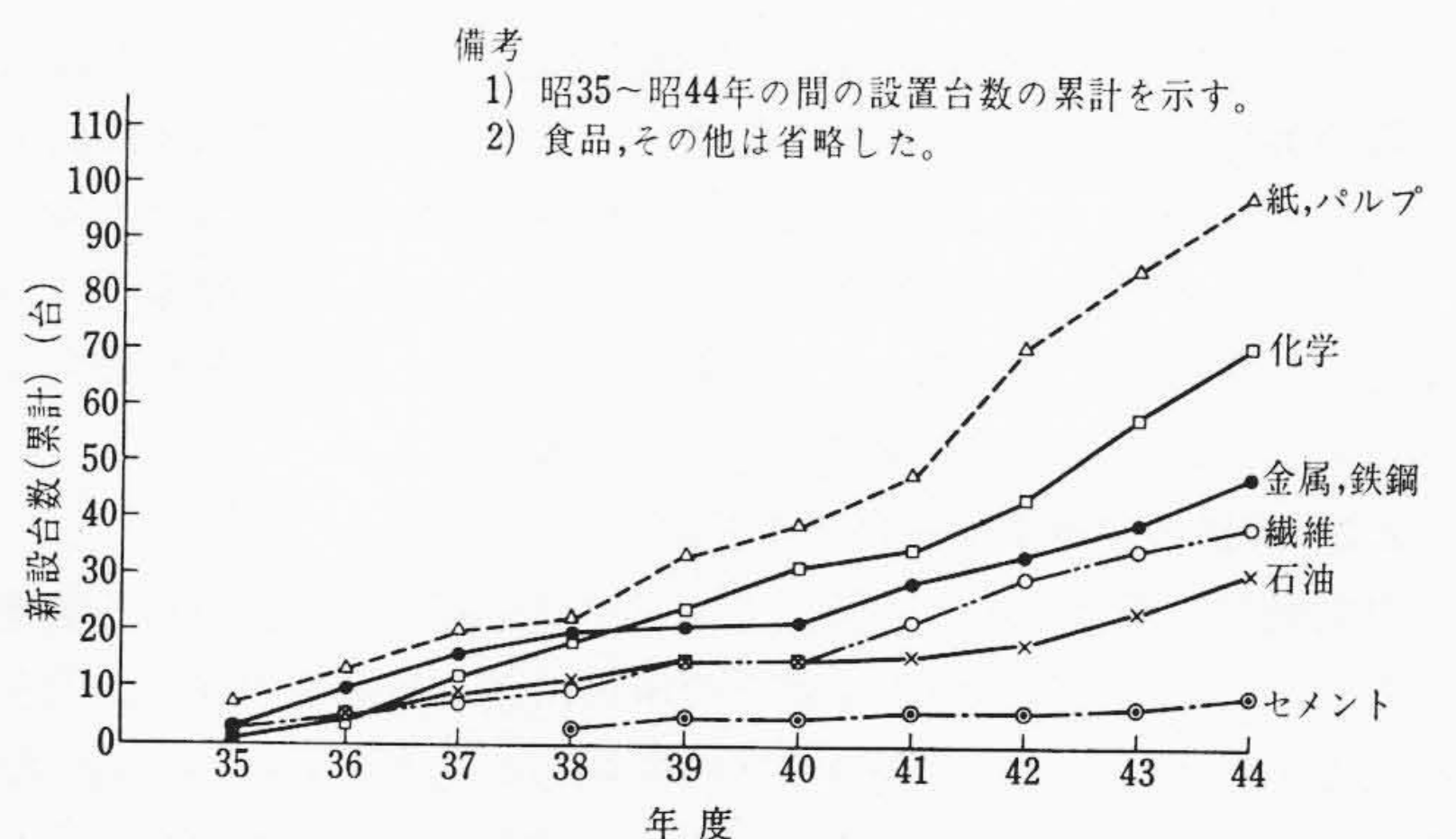


図3 昭和35~44年度業種別産業用タービン設置台数

しては、多量の工場蒸気を使用するいわゆる二重蒸気利用があげられる。またその反面セメント製造業が極端に少ない。かつてはセメン

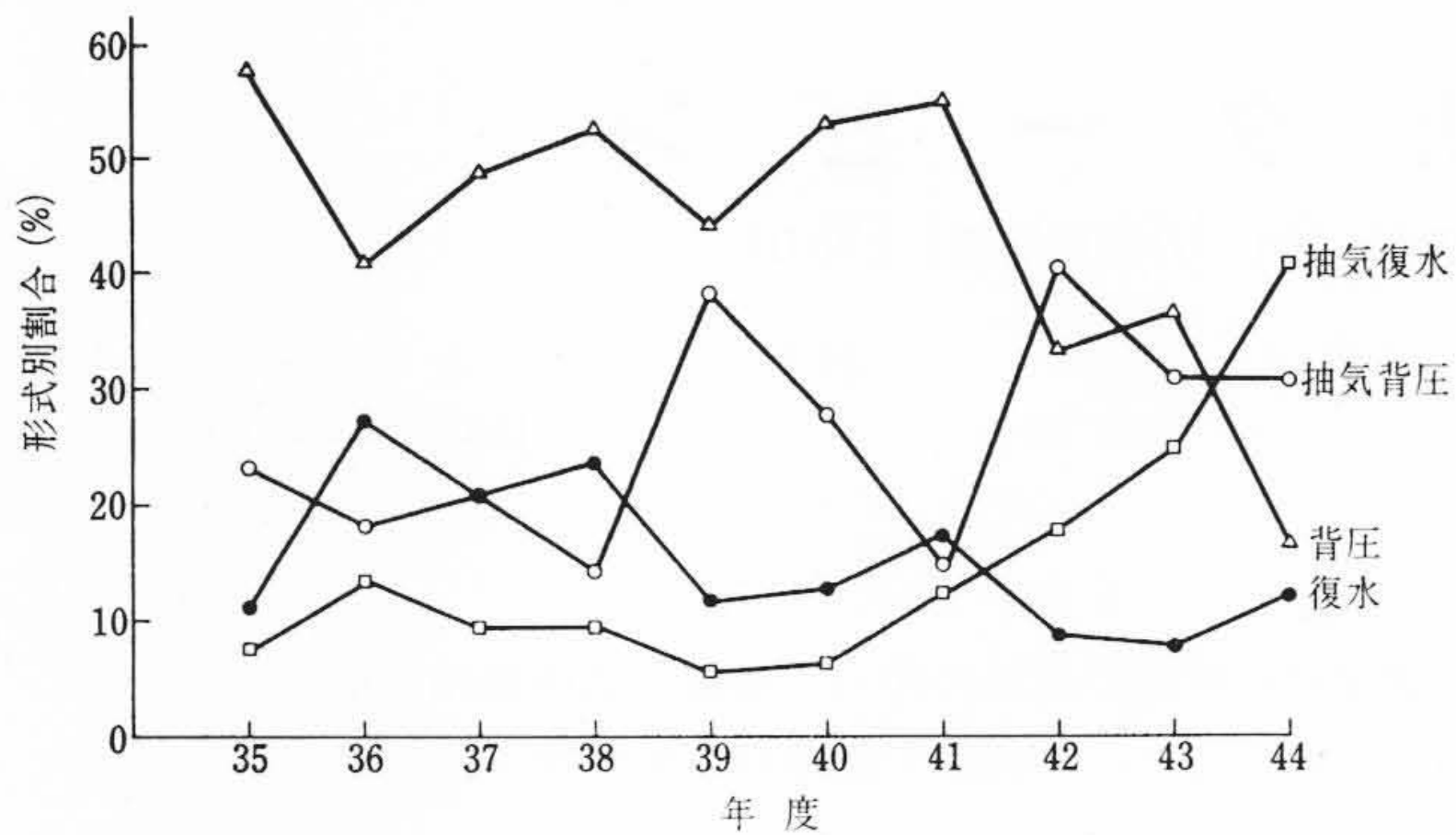


図4 年度別にみる産業用タービン形式の推移

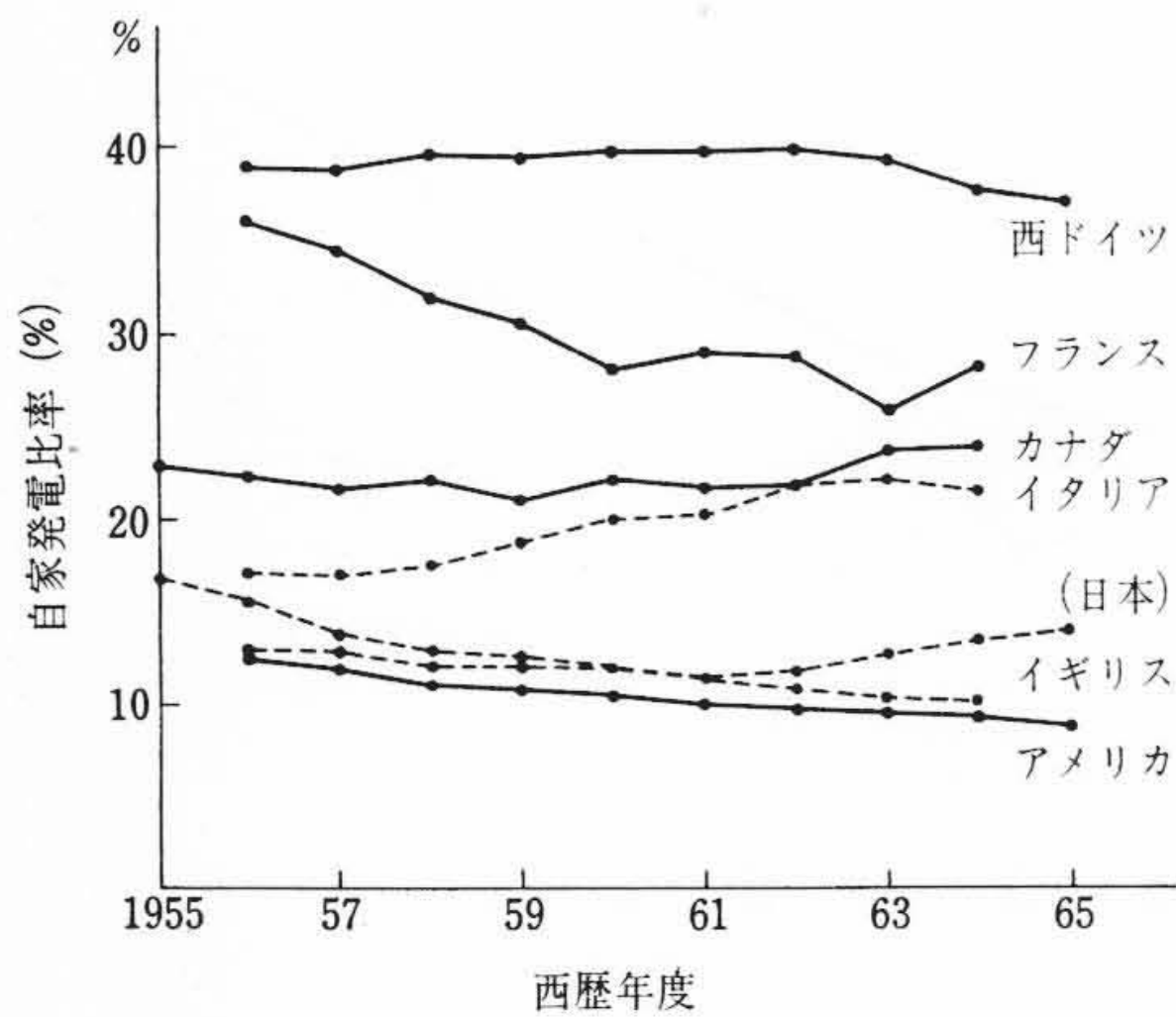


図5 主要国の自家発電比率の推移

トキルの廃熱を利用して自家発電比率のきわめて高い業種であったがロングキルの採用によって廃熱を発電に利用しない場合が多くなったので自家用火力発電設備の設置は低下している。タービン形式別の需要の推移は図4に示すとおりである。これは昭和35～44年度間において年度別に設置されたタービンの形式をパーセントで表わしている。これによると背圧タービンは減少の傾向にあり逆に抽気復水タービンは増加している。これは一般的傾向として生産単位量あたりの蒸気消費量は減少し消費電力が増加しているため、工場プロセス蒸気量でタービン出力が左右される背圧タービンに比べ、必要電力が自由に決定できる(ただし冷却水の問題もあるが)抽気復水タービンの需要が伸びていることを示している。

参考までに欧米主要国の自家発電電力量(水力、火力を含む)と総発電電力量の比率の推移をわが国と対比して示すと図5のようになる。西ドイツの自家発電には電力会社に多量の電力の卸供給を行なっている炭鉱自家発電(いわゆる山元発電)を含んでいるなど自家発電の事情または定義は区々であるが、一般的にいて徐々に低下している。しかしカナダおよびわが国の最近の傾向は増大している。

これはカナダは有利な水力をアルミニウム工業などで開発しているし、わが国は電力供給の主力が水力から火力に急速に移り変わりつつあることと、工業の発展の急伸が原因である。

2.2 最近の産業用タービンの動向

自家発電設備は、かつて保安上絶対停電を避ける必要のある業種を中心にして、自家発電と受電との併用による信頼度の向上が大きな比重を占めてきたが、電気事業の供給力が充実し、かつ供給信頼度も向上した今日では、自家発電設備の建設は主として電力会社からの買電よりも安価な電力が得られる場合、あるいは自家発電と電力会社からの買電とうまく併用することによって買電のみにたよるよりも安い電力が得られるという場合である。したがって自家用火力発電の建設はプロセス用蒸気を多量に消費する産業、工場内で廉

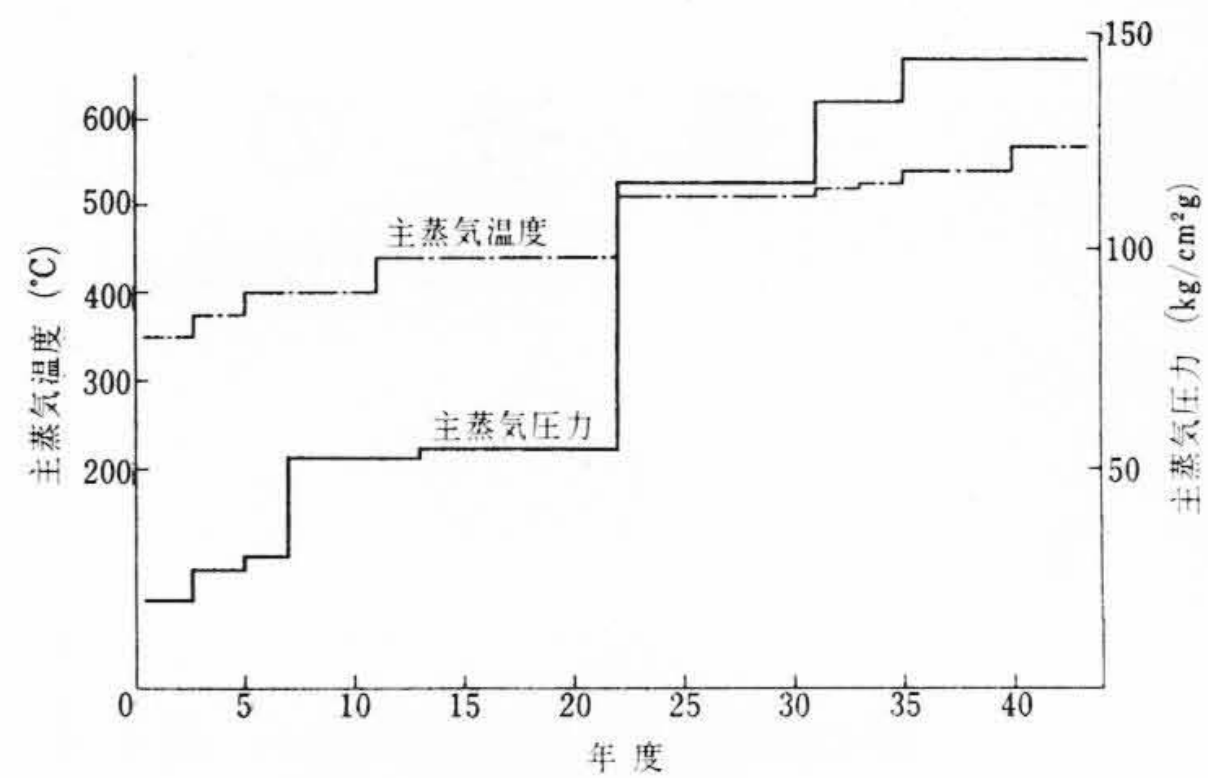


図6 自家用火力発電所の主蒸気圧力、温度の変遷

価な燃料または廃熱が得られる産業、あるいは電力多消費産業を中心に増大している。最近、日立製作所が受注した産業用タービンを産業種別にみると蒸気を多量に消費する業種は化学工業、パルプ、紙製造業があり、前者としては35,000 kW 抽気背圧タービン、後者としては29,000 kW 2段抽気復水タービンがある。また工場内で廉価な燃料または廃熱が得られる業種としては石油、鉄鋼業があり前者向けとしては11,200 kW 背圧タービン、後者用としては12,000 kW 復水タービンなどがある。さらに電力多消費産業としてアルミニウム製造業がありこれには175,000 kW 再熱再生復水タービンがあげられる。

最近の産業用タービンの動向を述べると

- (1) 主蒸気条件の向上
- (2) 自家発電の共同火力化と電力会社との共同化
- (3) 小容量タービンの高速化
- (4) 電子油圧式ガバナの採用

などがあげられる。

2.2.1 主蒸気条件の向上

まず、産業用タービンについてタービンの進歩を示す一つの指標と目される主蒸気条件の変遷を示すと図6のようになる。産業用タービンの主蒸気条件は、プロセスで使用する蒸気の圧力、温度、プロセス蒸気量、所要電力量、タービン形式などから影響を受け最終的には各種の経済比較計算によって決定される。しかし近年は工場規模がしだいに大きくなっていくに伴い単機容量が大きくなっているため、熱効率の向上および限られた蒸気量で最大の出力を得るために主蒸気条件は近年著しく向上した。さらにトップタービン形式が経済的に可能となったことも主蒸気条件の向上した要因の一つである。しかし主蒸気温度が事業用タービン並みに向上したのに対して主蒸気圧力はかなりの開きがある。これは図7のようにある限度以上に圧力を上げては出力はあまり増加せず、むしろ給水ポンプ所要動力が増大するため送電端出力は逆に減少し、さらにタービン内部においても圧力を上げることで内部効率の低下を招き出力を減殺してしまうからである。

2.2.2 自家発電の共同火力化と電力会社との共同化

一工場だけでは使用蒸気と使用電力のバランスがとれない場合、一工場だけでは使用蒸気が少なく自家発電の有利性の少ない場合などに隣接工場が共同して自家発電を大規模化し蒸気と電力を総合して最も有利に発生させることが可能な場合には共同自家発電形式のものが建設される。特に最近石油化学が発展することにより、いわゆる石油コンビナートが形成されてきた。これらの工場群で共同して自家発電と蒸気の供給とを兼ねた動力センターの設立が目だっている。また電力会社との共同化としては鉄鋼業において数年前までは高炉ガスおよびコークス炉ガスを利用した自家発電が主体であったが、近年は高炉ガスと重油との混焼

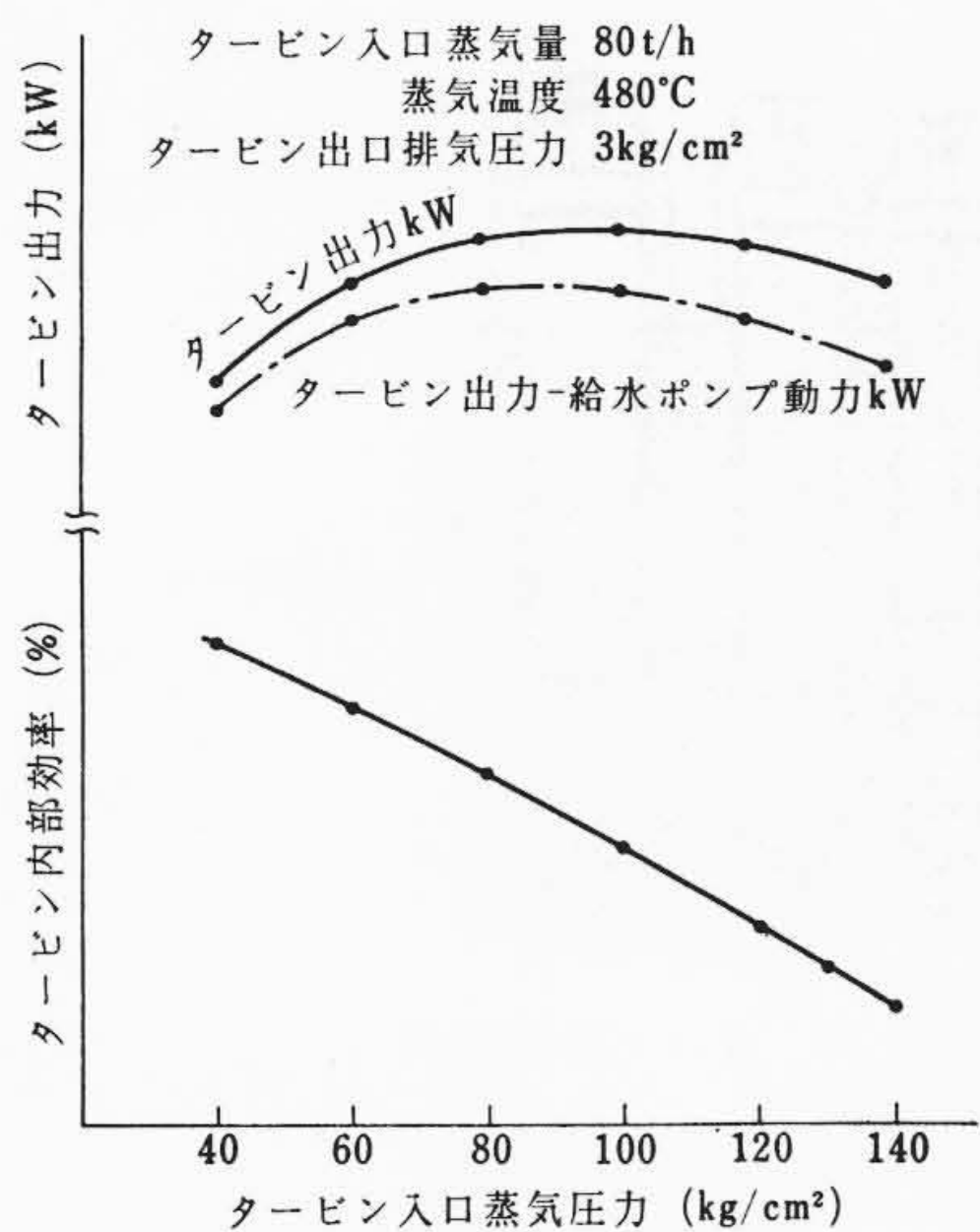


図7 タービン
入口圧力と内
部効率および
出力の関係

によって発電規模を拡大し電力会社と共同して共同発電会社を設立することが多くなってきた。さらにアルミニウム製造業は本来電力多消費産業であって初期は低廉豊富な自家用水力発電が使用されてきたが、経済的な水力開発地点がなくなるにつれて最近では電力会社との共同発電に依存するような傾向にある。

2.2.3 小容量タービンの高速化

産業用タービンの出力が大容量になる傾向は前にも述べたが依然として10,000kWクラスの需要があり、これらのクラスのタービンは高速化の方向に向かっている。すなわちタービンの回転数を強度上可能な限り高速にすることによってタービンの段落数を少なくすることができる。これによりタービンが小形になり価格が低減し、さらに据付面積の減小によって建設費が安くなり、電力コストの低減を図ることができる。

2.2.4 電子油圧式ガバナの採用

近年、工場プロセスの高度化に伴い2段あるいは3段の多段抽気タービンが必要になってきた。またタービンの抽気圧力制御も高精度のものが要求されタービンの制御機構はますます複雑になる傾向にある。一方、プロセス側もなんらかの形で電子計算機の導入を図りつつあり、火力プラントと密接な連携をもつようになってきた。これに対処するため従来の機械油圧式ガバナに代わり電子油圧式ガバナが登場してきた。すでに電子油圧式ガバナはアメリカでは1959年より開発が進められ100台以上の運転実績がある。わが国においても開発段階から実用段階にはいっており将来機械油圧式ガバナに代わり蒸気タービン制御が主流を占めるであろうと予想される。

3. 最近の産業用タービン

最後に最近日立製作所が新日本製鐵株式会社広畑製鐵所納めとして設計製作したタービンを紹介する。本タービンはトップタービン形式であり、そのためベースタービンの主蒸気条件の関係から国内の産業用タービンでは記録的な主蒸気条件となっている。さらにボイラ的使用方法により非常に複雑な制御が要求され、電子油圧式ガバナが採用されている。いわば産業用タービンとしては時代の先端をいくものである。本タービンの仕様は表1に、タービン断面図は

表1 タービン仕様一覧表

形 式	日立衝動式抽気背圧タービン
台 数	2台
定 格 出 力	22,600 kW
回 転 数	3,600 rpm
主 蒸 気 圧 力	99 kg/cm ² g
主 蒸 気 温 度	566℃
抽 気 圧 力	33 kg/cm ² g (調整範囲 31~35 kg/cm ² g)
排 気 圧 力	22.5 kg/cm ² g (調整範囲 21~25 kg/cm ² g)
タービン段落数	高圧 6段 低圧 1段
軸 受 数	3個 (発電機とも)
タービン軸受スパン	3,340 mm

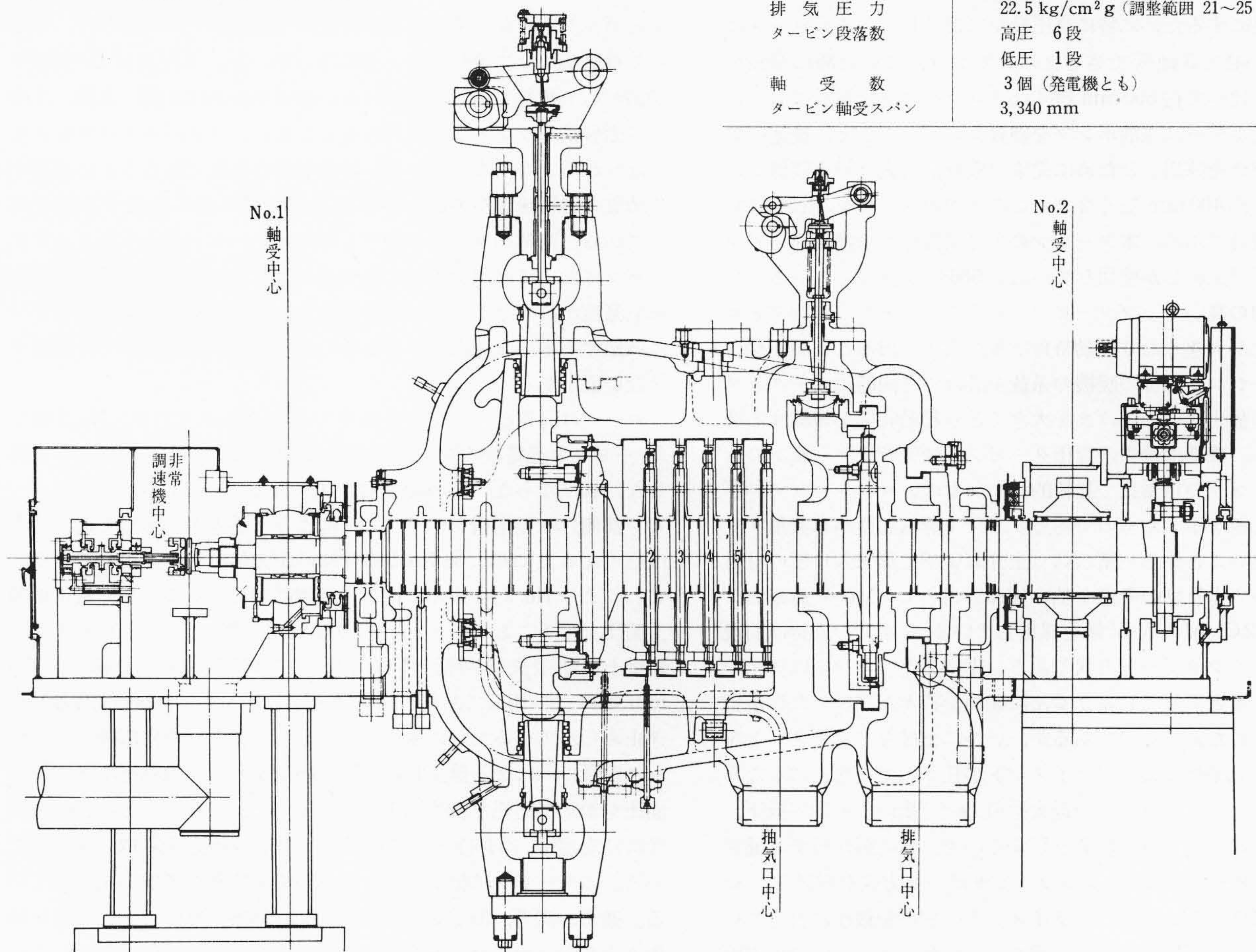


図8 タービン組立断面図

表2 ロータケーシング重量比と
伸び差警報点比較表

タービン種類	重量比	伸び差警報点 (m/m)
A(抽気背圧)	7.52	4.7
B(背圧, トップタービン)	14.62	6.0
C(抽気背圧)	6.00	6.5
本タービン(抽気背圧)	6.71	9.6

備考：重量比＝ケーシング重量/ロータ重量
伸び差警報点：ロータロング伸び差警報点

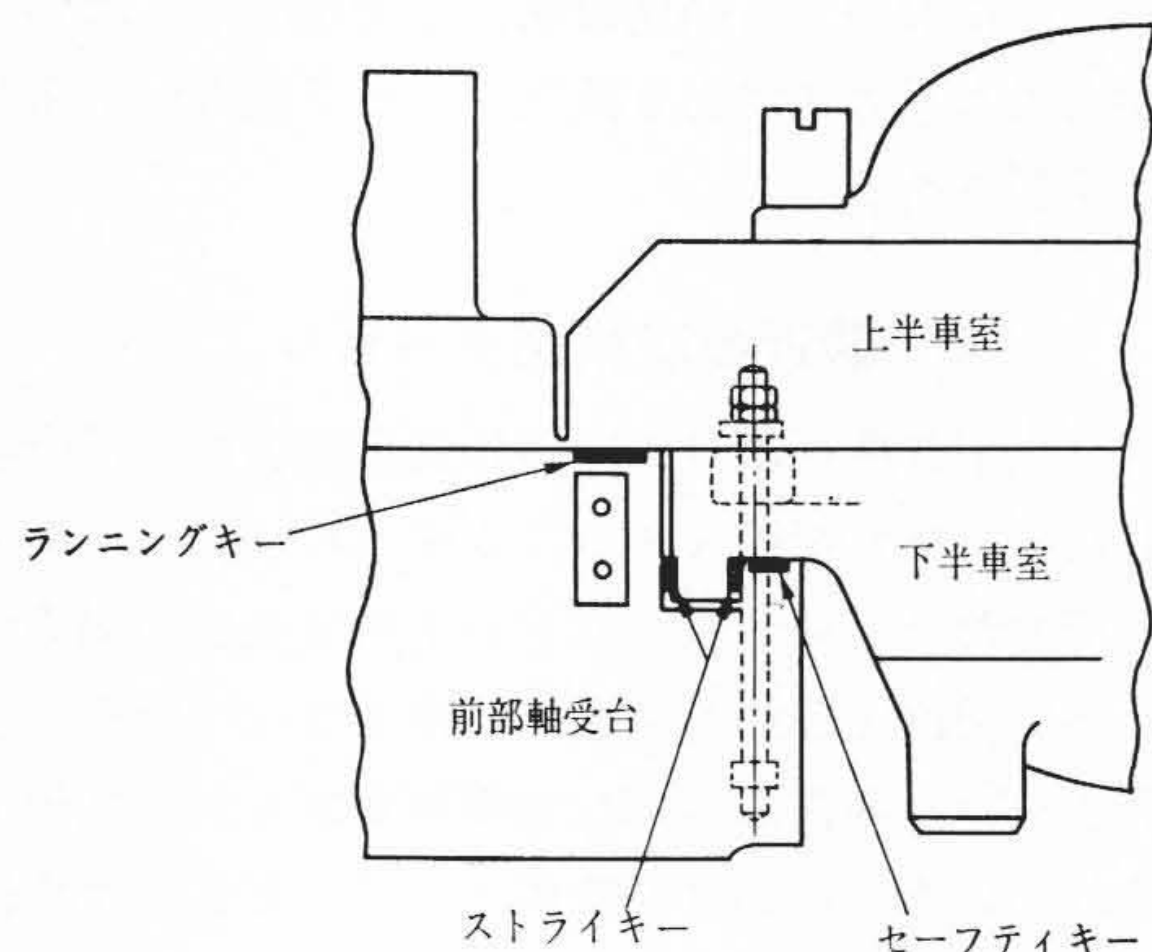


図9 車室センターラインサポート構造図

図8に示すとおりである。

3.1 全体構造

タービン断面図にみられるとおり、高圧部6段、低圧部1段より成りそれぞれ高低圧加減弁を有しているトップタービンである。ケーシングはフランジボルトの応力軽減およびフランジ部を小さくして起動を容易にするために特に高圧段を二重にしている。ロータは発電機と合わせて3軸受でささえられており、このために全長が4軸受形式に比べて約600mm短くなりコンパクトな設計にしている。前側軸受ボデーは主油ポンプを別置きにしたことと、後述の電子油圧式ガバナを採用したために従来の機械油圧式ガバナ装置よりも全長にして約400mm短くなり、この出力のタービンとしてはコンパクトな設計である。本タービンの主蒸気温度が事業用タービンでも156MW以上にしか使用していない566℃を採用していることと、排気圧力の高いトップタービンであることからケーシングとロータの重量比が大きくなり起動時伸び差が大きくなるのが予想されるのでケーシング内部の暖機の系統を設けると同時にロータとダイアフラムの静止部との間げきを大きくとり起動時間を短縮する構造としている。表2は過去の背圧タービン、抽気背圧タービンのロータ、ケーシングの重量比で比較的大きいものとロータロング伸び差警報点の比較を示したものである。また主蒸気温度が事業用タービン並みに高いことから主塞(さい)止弁および主蒸気入口部の材質の選定についても特別の考慮を払い実績のあるCr-Mo-V 鋳鋼および弁棒には12Cr-Mo-W-V 鋼を採用している。車室の支持は前後ともセンターラインサポート方式である。車室アライメントは従来の経験と理論をもとにしてじゅうぶんに経験を積んだ熟練した作業指導者によって行なわれるのであるが、いかに正確なアライメントを施しても、運転条件によりアライメントが狂うのではなんにもならないばかりでなく、パッキンの過大摺(しゅう)損による効率低下、振動発生など好ましくない現象を呈するので、日立製作所では通常530℃以上のタービンにはセンターラインサポート方式を採用し、いかなる運転条件においても、アライメントの狂いを最小に押えている。センターラインサポート方式は図9にみられるように定期検査などの分解組立にあたっては、特別な考慮を払う必要もなくきわめて

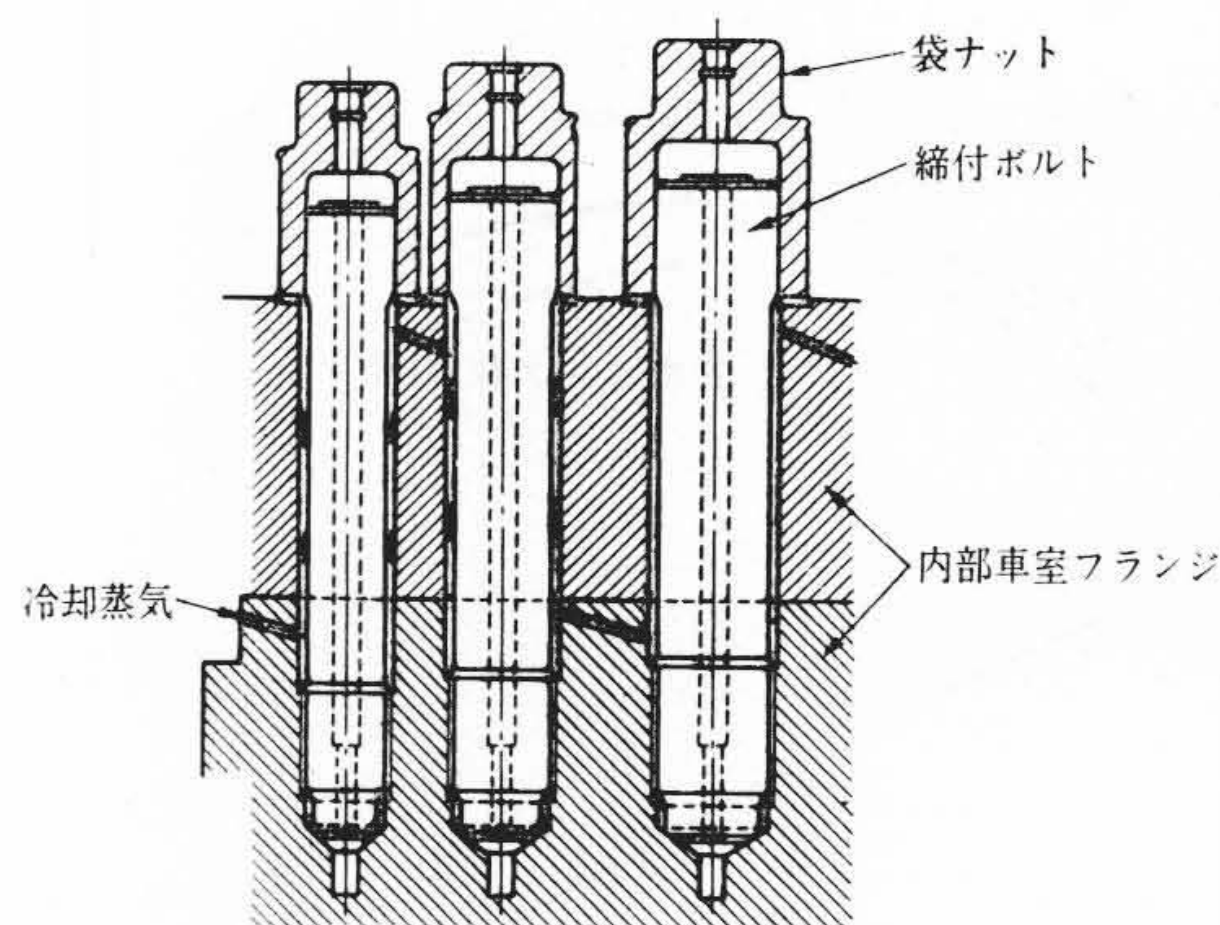


図10 ボルト冷却機構

容易に作業できる構造になっている。上部車室を軸心水平面上でランニングキーによってささえたり軸方向の位置調整および固定はスラストキーによって行なわれている。またセーフティキーは上部車室を分解する際、あやまって下部車室が下がり過ぎないようにするもので、完全組立状態では若干の遊びをもたせてある。このサポート方式の採用により本タービンの場合、長期間の使用に対してパッキン間げきの広がりや上下左右の平均でおよそ0.7mm程度であろうと予想している。高温にさらされている内部ケーシング水平締付ボルトには12Cr-Mo-W-V 鋼を採用しているが、その中で特に高温部のボルト14本については6段落前の低温蒸気による蒸気冷却を施し定常運転時のボルト材のクリープ強度を上げることにより、必要締付応力に対してじゅうぶんな安全率をとっている。冷却蒸気には6段落前から抽気したものをを用い図10のとおりケーシングに直接穴をあけることにより各ボルトに冷却蒸気を導きボルトシャンクとボルト穴の間の環状部を順次流れて内部ケーシングの外、すなわち抽気ラインに流れ込むようになっている。ロータはCr-Mo-V 鍛鋼から一体削り出しで作られるが動バランスは1段、5段、7段の3面修正バランスで行なわれるとともに、フィールドバランスも行なわれるようになっている。特に初段は高温であるうえに通過する蒸気の容積流量が多いため事業用150MW級に匹敵する翼を用いている。産業用タービン中でも特に本タービンのようにトップタービンにおいては出力の割に蒸気量が多くなるのは当然で、また主蒸気温度が高くなるにつれて容積流量は増し、中形事業用タービンに匹敵するものまで出てきているのが現状で、出力だけでは判断できない面がある。

ロータは発電機とともに3軸受でささえられており、No.2軸受(タービンと発電機の間)はタービンと発電機のロータの重量を支持しなければならないため軸受径が太くなる。一方、No.1軸受(タービン前側)は発電機をつなぐことによって浮き上がる形となり荷重は軽くなる。このためNo.1軸受には圧力形軸受を採用している。これによりNo.2軸受径に比べて極端に細くすることなく適正な軸受面圧を得ることができた。圧力形軸受は図11にみられるように軸受上半部中央に回転方向に向かって135度にわたり深さ約0.5mmのみぞが切っており、このみぞにはいつてくる油は出力がせき止められているために油圧分布をもち、軸を下方に押しつけロータ重量のみによる静止時軸受面圧のほか、圧力みぞによる付加面圧を加えて適正な軸受面圧になるよう設計されている。No.2軸受には安定性、冷却性ともに良好な円上射軸受(図12)を用いている。本タービンは軸受油切りにおいても特別な考慮が払われている。通常、潤滑、制御に使われる油は200~300℃で発火するが油切りより漏れた場合、保温材にしみ込み発火する危険があるため油切りについては決して軽視することのできないものであり、図13

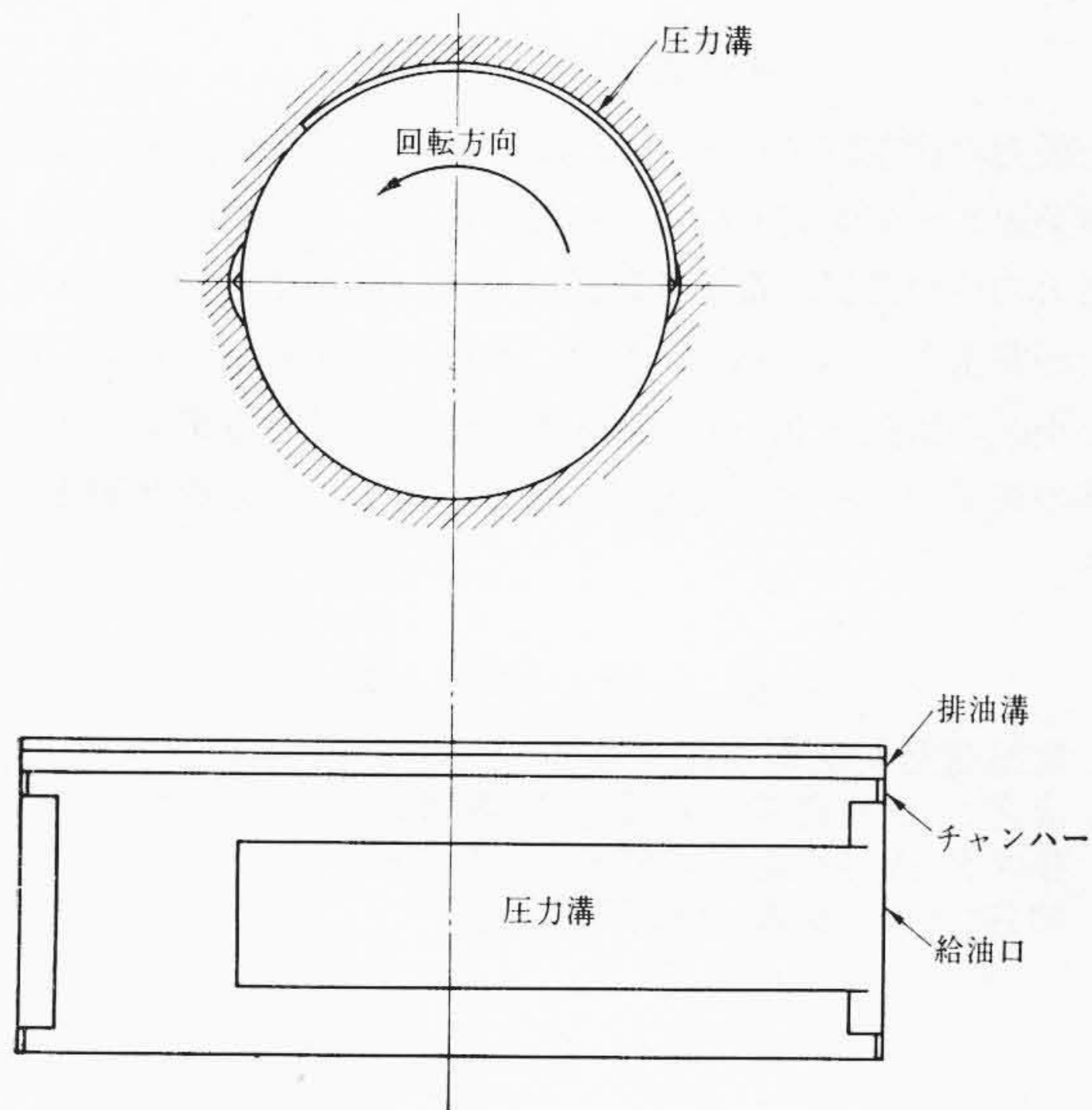


図 11 圧力型軸受および上半展開図

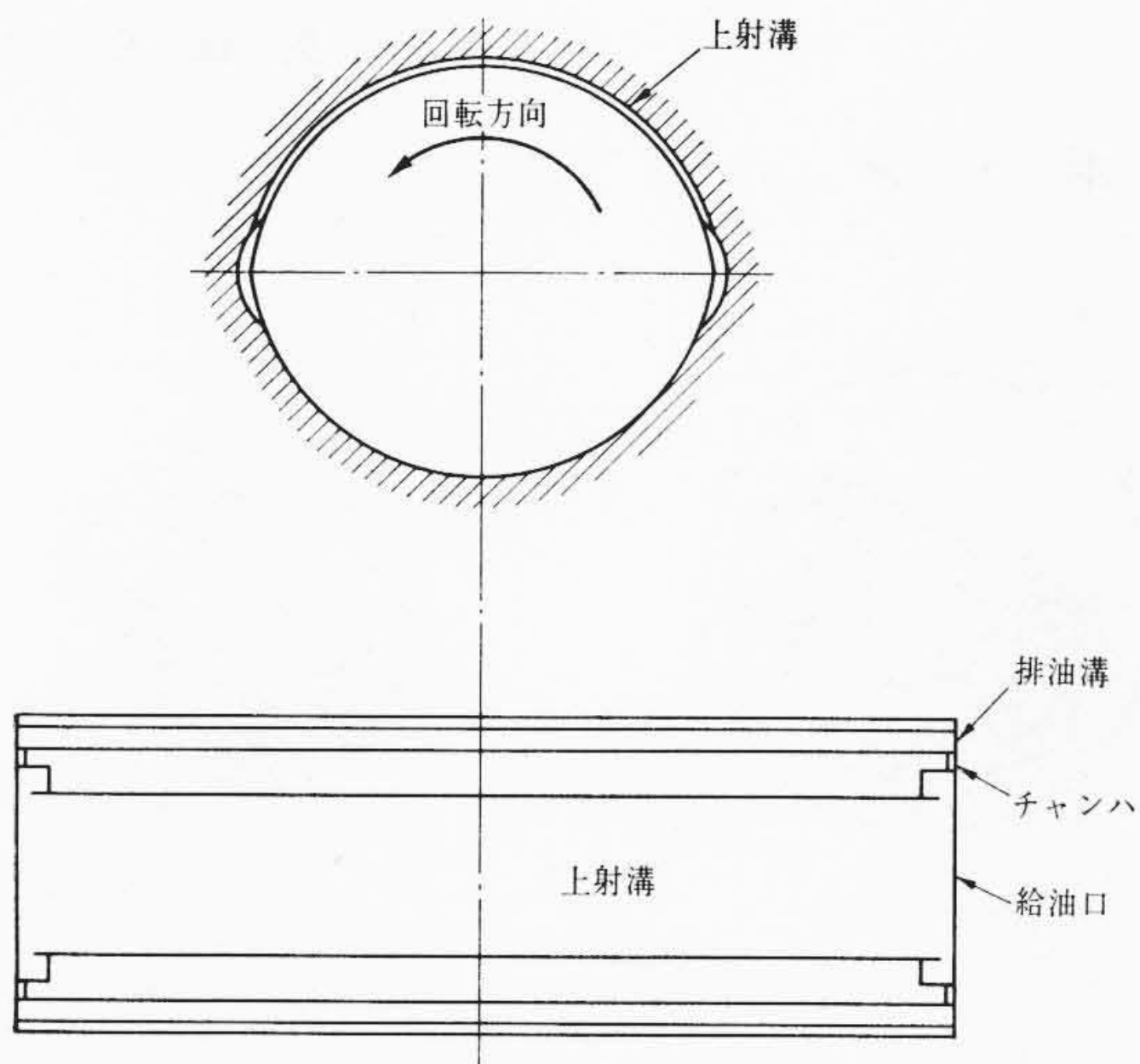


図 12 階円上射軸受および上半展開図

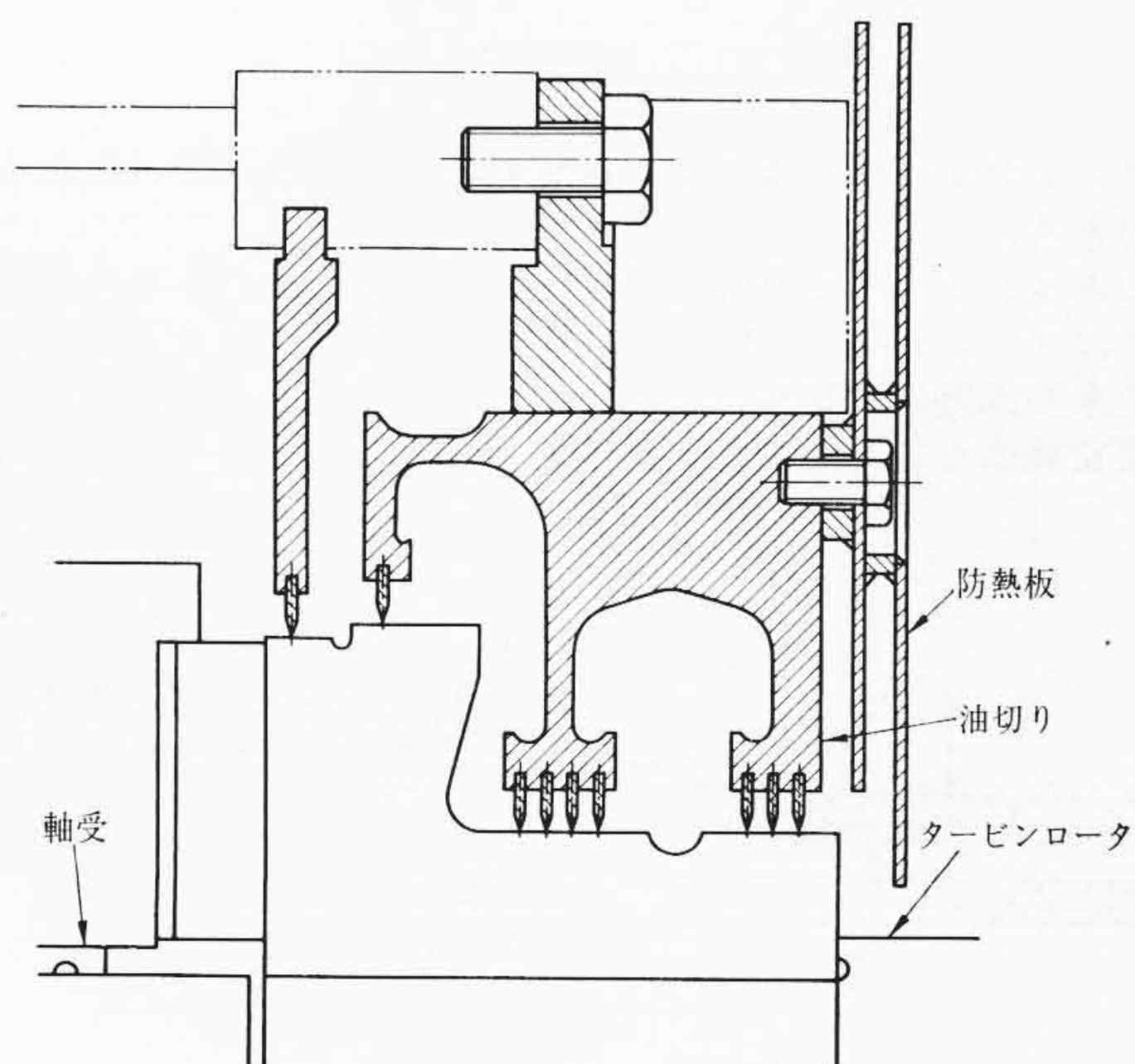


図 13 油切り構造図

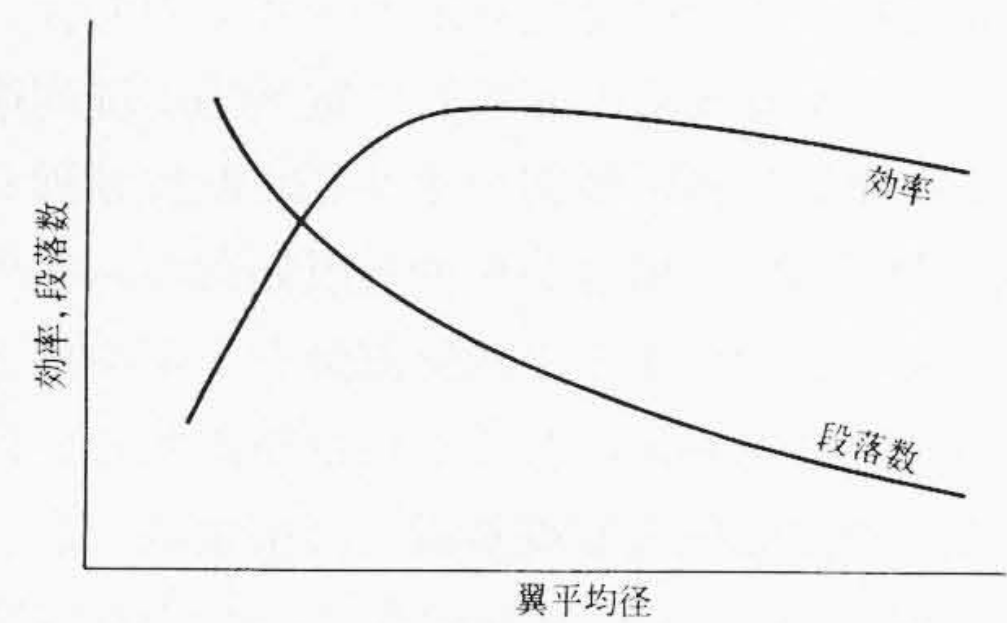


図 14 段落数、段落径と効率の関係図

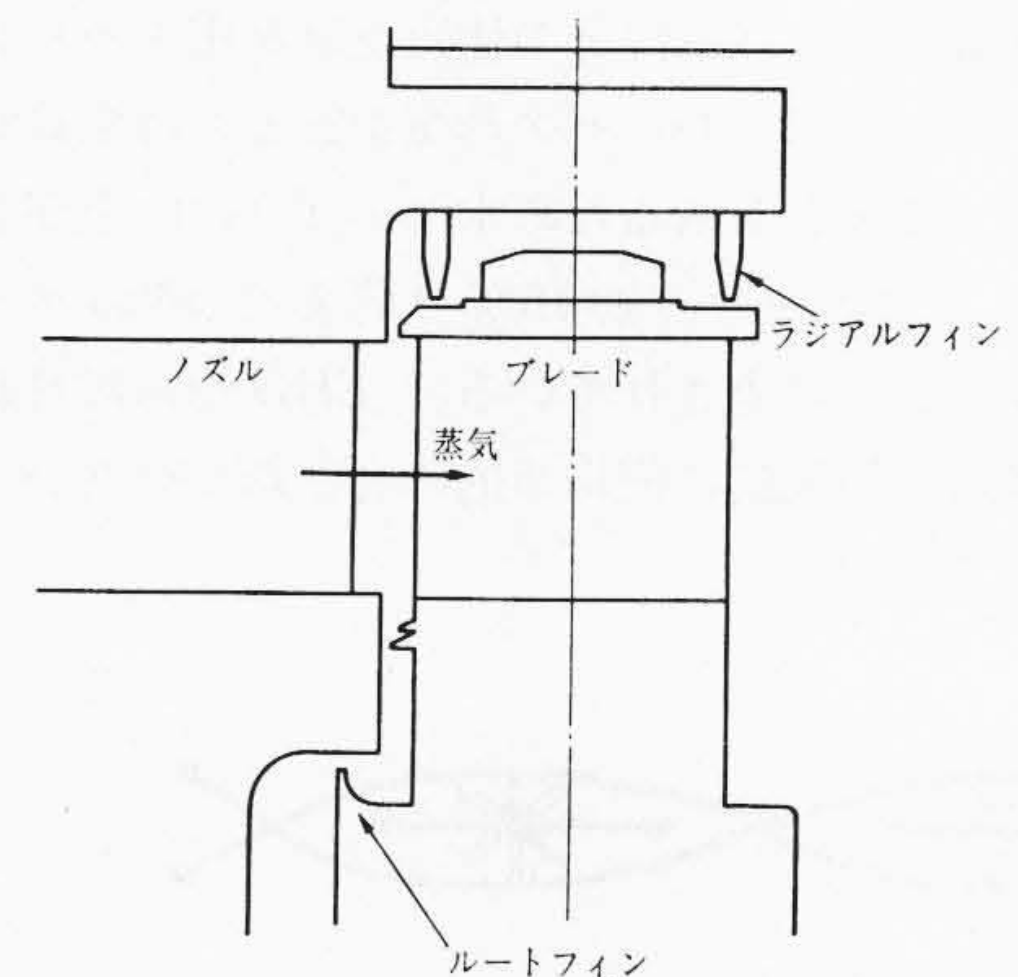


図 15 ノズル、ブレード詳細図

にみるように油漏れに対していくつかの関門を設け万全を期した構造にしている。

3.2 性能

タービン性能に及ぼす因子としては蒸気の容積流量、熱落差がある。容積流量、熱落差が小さいほど効率が悪くなる。性能に及ぼすほかの重要な因子は速度比すなわち段落径および段落数である。同じ熱落差を消化するのに回転数が一定ならば段落径を大きくすると段落数は少なくてすみ逆に段落径を小さくすると段落数は多くなる。しかしながらディスク、ブレードの風損、パッキンの漏えい損失、ブレードの上下からブレードを通らないで漏れてしまう蒸気の漏えい損失などを考慮して段落径、段落数を決定しなければならない。図 14 は電子計算機により算出した段落径、段落数の関係を示すものである。段落数が少ない場合、段落径が大きくなるため風損が大きくなり性能は悪くなる。また段落数が多いと段落径が小さくなる代わりにシャフト径が太くなりパッキンからの漏えい蒸気が増大し性能は低下する。本タービンの段落数、段落径は性能的に最高になる点に設計してある。さらにブレード上下からの漏えい蒸気を少なくするために図 15 のようにブレード根本にダイヤフラムよりルートフィンを設けるとともに、シュラウドリングにはラジアルフィンを 2 列配している。

3.3 制御装置

本タービンの制御装置には従来の機械油圧式制御装置に代わって電子油圧式制御装置（以下 EHG と略す）を採用している。EHG については運転実績その他は種々紹介されているのでここでは省略する。

EHG も初期の開発期を経て実用期にはいり、日立製作所での産業用タービンの大半はこの EHG を採用しているのが現状である。EHG は制御の種類、質、量を容易に変えられるところに特長がある。本タービンの場合高炉ガス、コークス炉ガスおよび重油との混焼であるがこれらのガスの使い方を経済的にするためボイラ蒸発量を一定にする必要がある。このため抽気背圧タービンの特長を生かしながら主蒸気流量を一定に押える運転が生じてくる。

従来、機械油圧式ガバナの抽気背圧タービンの場合

- (1) 抽気圧、背圧を同時に制御して電氣的に併列運転をする。
- (2) 抽気圧を制御し背圧制御を除外し回転数制御を行なう。
- (3) 上記、(1)(2)の場合から抽気圧制御のみ除外する。

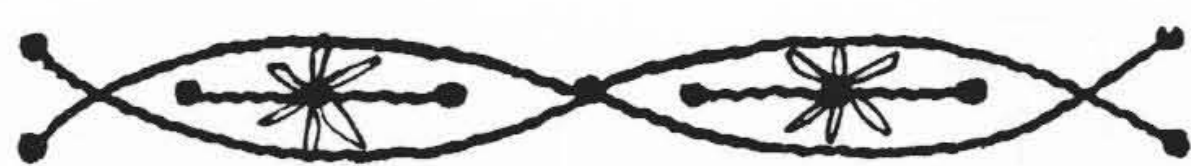
これに対して当初の目的である主蒸気流量を一定に押えながら、すなわち高圧加減弁開度を一定にしながら抽気圧あるいは背圧を制御することは従来の機械油圧式制御装置では根本的に設計変更せねばならずEHGを採用することにより容易にその目的が達成できたのである。さらにボイラの性質上初圧調整回路もEHGに組み込まれており、保安装置としていかなる運転状態においても働くようになっている。産業用タービンはその性質上事業用タービンの1機1罐(かん)のタービンと違いバイパス蒸気をとるため主蒸気温度が定格の状態に起動する場合があるため本タービンには全周噴射起動装置を設けている。これにより約15%負荷までの間はケーシングを均等に加熱できるよう考慮されている。EHGを単に目新しいものということではなく積極的に使用目的に合う新しい使い方を顧客とともに考え出していきたい。

4. 結 言

以上最近の産業用タービンについて述べたが産業用タービンとはいえ事業用タービン並みの蒸気条件、出力になる傾向がある。さらに共同火力への発展、電子油圧式ガバナ、自動化へとますます高度な技術が要求される。われわれはこれに対処するため最新の技術を駆使し不断の研究を進めている。製造者も使用者も常に一体となって今後の産業用タービンの発展に寄与していくことを念願するものである。

参 考 文 献

- (1) 電源開発の概要(昭44)
- (2) 清宮：火力発電 中国支部(昭43-3)
- (3) 藤井：火力発電 関東支部(昭45-3)
- (4) 渋谷：火力発電 68.6(昭43)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第823857号

長 江 弘 允

自 動 車 用 配 電 器 の ポ イ ン ト

この考案は取付け、取りはずし作業の簡単なポイントを提供するもので、ポイントの取付穴1, 2をP矢と平行な口開き長穴にしたことを特徴としている。

この考案によれば、ベース6よりポイント3を取りはずす場合、締付けネジ4, 5をゆるめるだけで穴が口開きになっているためP矢方向に簡単に抜き取ることができる。

取付けの場合にも、すでにゆるめられたネジ部に簡単にそう入でき、きわめて簡単に取替作業ができる。

また、ポイントの取替作業において締付けネジを完全に抜き取る必要がないため、過失による締付けネジの紛失あるいは配電器の中への脱落なども防ぐことができる。

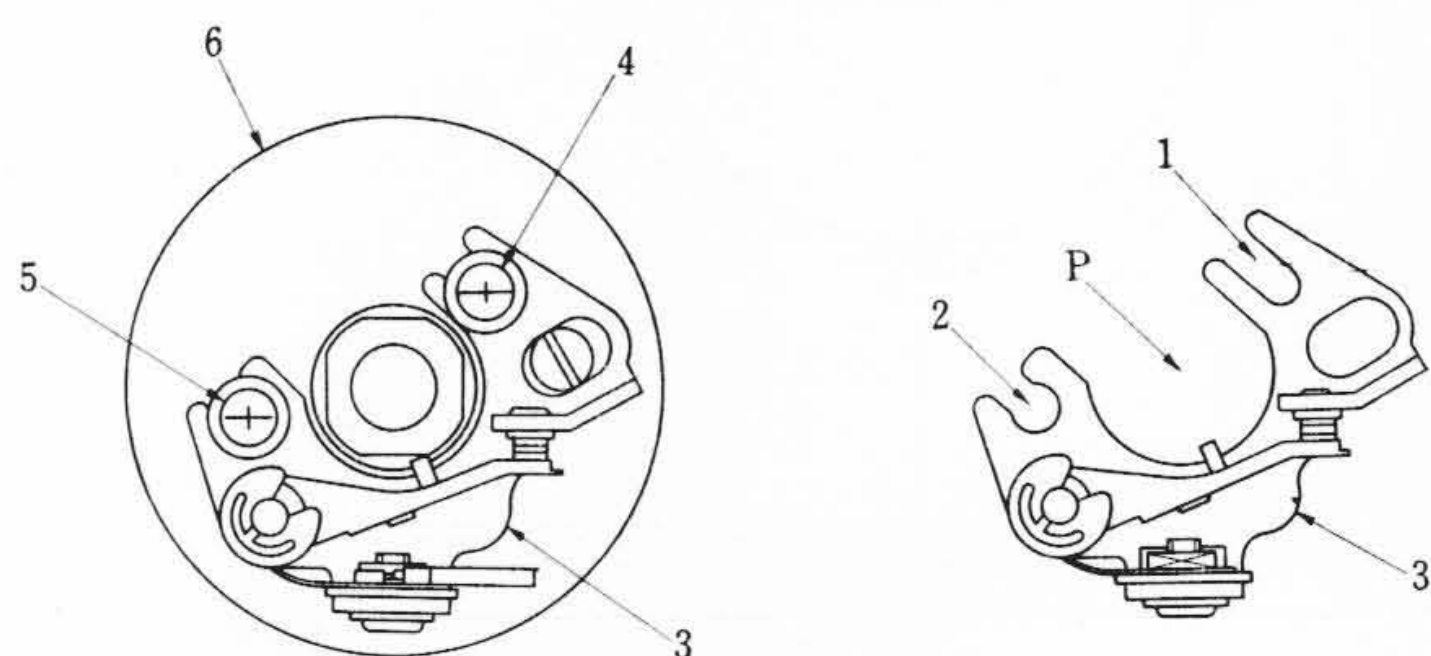


図 1

登録実用新案 第900969号

船 木 喜三郎・牧 野 忠 孜

操 重 車

この考案は橋げたの掛け替えおよび架設作業を行なうための操重車に係るものである。

従来の操重車つり金具を備えたブームを移動体に旋回可能に取り付け、この移動体を軌道を走行する車体上に水平移動できるようにして、ブームを車体からほぼ水平に押し出しあるいは引っ込めることができるように構成しているため、ブーム先端のつり金具の揚程が小さく、荷役範囲が狭い欠点がある。

この考案は上記の欠点を改善するために、図1に示すように旋回装置1によりブーム2を旋回できるように備えた移動体3の前部側面に移動用車輪4を、またその後部に移動用車輪5を設け、この移動体3の前部における移動用車輪4を案内する車体6上面のレール7を車体中間部から先端に向かって上向きに傾斜して設け、また移動体3の後部における移動用車輪5を案内するレール8を車体6の内面に水平または下向きに設けたものである。これによってブーム2が図1に示すように車体6から押し出された際、ブーム先端は所望高さHに上昇し、つり金具9は所定の揚程を得ることができる。

またブーム2を車体6側に引っ込ませれば、車両限界内に収めることができる。

この考案によれば走行時にはブームは車両限界内に収められ、作業時にはブームを建設限界内の高さまで押し出すことができるので、従来の操重車に比べてブーム先端のつり金具の揚程が大きくなり、荷役範囲を広くすることができる。(加藤)

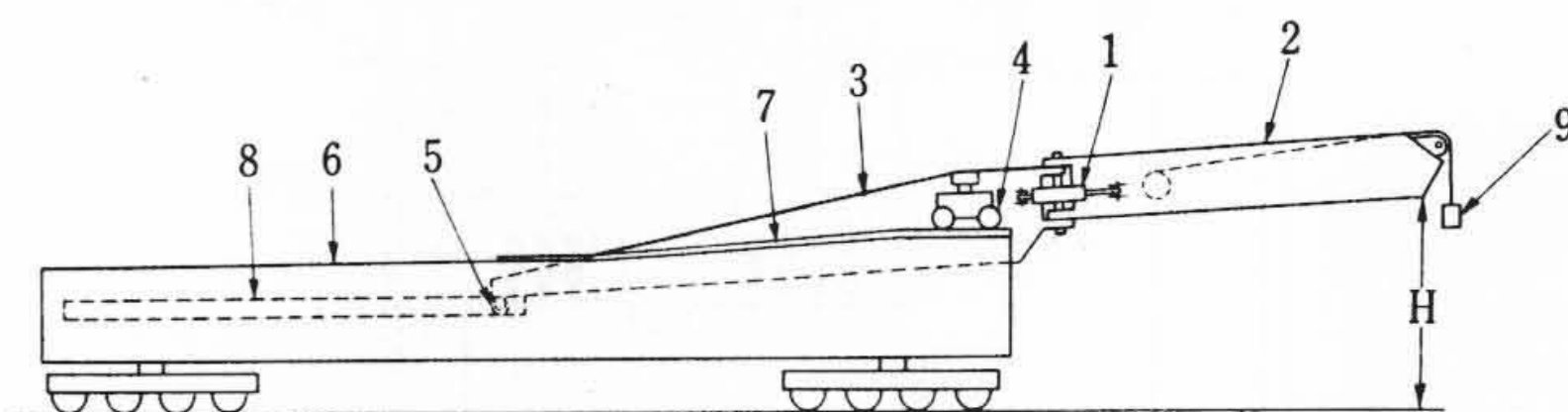


図 1