

大阪市清掃局納

2,700 kW 減速式復水タービン

2,700 kW Condensing Steam Turbines with Reduction Gear Supplied
to Osaka Municipality沢井 洵*
Makoto Sawai

内 容 梗 概

昭和39年2月、日立製作所日立工場で完成、大阪市清掃局に納入され、現在同西淀工場で好調に運転中の2,700 kW 蒸気タービン2台は、本格的な減速式高速復水タービンとして、業界の注目を集めている。

本稿は、その設備の特長およびタービンの設計・製作上留意した点について述べている。

1. 緒 言

昭和39年2月、日立製作所日立工場で完成し、丸紅飯田株式会社を通じ大阪市清掃局に納入され、西淀工場で現在好調に運転を続けている2台の2,700 kW 復水タービンは、本格的な減速式高速復水タービンとして、ゴミ焼却炉の廃熱ボイラから蒸気の供給を受けるユニークな火力発電設備として業界の大きな注目を集めている。

従来、産業用発電用蒸気タービンは発電機との直結式がほとんどであったが、最近、建設費が安い減速式高速タービンが建設される情勢となった。しかしそのほとんどは背圧タービンであり、日立製作所が復水式高速タービンを製作・納入したことは、産業用発電タービンに大きい足跡を残したものといえよう。また、本設備は都市のゴミ処理と発電との一石二鳥をねらったもので、今後同種類の設備は数多く建設されるものと思われる。

以下この火力発電設備の概要を説明する。

2. 設備の概要

発電用蒸気タービンの標準回転数は3,000 rpm または3,600 rpm の直結式であり、産業用発電タービンでもこの方式が多く使われている。最近、産業用蒸気タービンでは減速式高速タービンに注目が集まっているが、実際に建設された例は比較的少なく、昭和38年3月末で全国で30台足らずである。その大半は昭和30年以後に建設されている。このうちで出力は5,300 kW が最大であり、背圧タービンがほとんどで、復水タービンは2,3例を数えるに過ぎない⁽¹⁾。高速回転の蒸気タービンは従来も船用主機タービン、プロワ、ポンプなどの駆動タービン、商船内の発電用タービンなどに相当使用されているが、商船内発電タービンとしては最大出力1,000 kW、10,000 rpm の高速復水タービンが数年前から使われている。

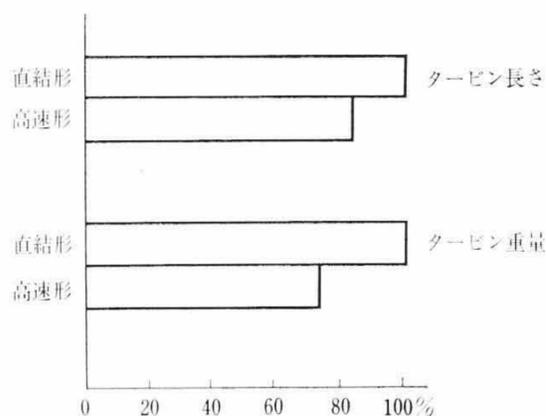
発電用減速式高速タービンは次のような特長を持っている。

- (1) タービン本体の寸法および重量が小さくなる。
- (2) 減速歯車を含めても建設費が直結式より低減できる。
- (3) タービン回転数が被動機に関係なく選べるため、タービンに適した回転数を採ることができる。
- (4) ロータおよびケーシングが小さく、急激な負荷変動または起動停止に対処できる。

現在まで、減速式高速タービンが多用されなかった理由の一つに、減速歯車の騒音および信頼性の問題があげられるが、最近の船用タービン減速歯車の進歩⁽²⁾および日本造船関連工業会による船用減速歯車の継続的な研究⁽³⁾によって減速歯車の信頼性が著しく高まったために減速式タービンの特長が注目されてきたのである。

日立製作所においても、継続的に減速歯車の研究を続けており⁽⁴⁾、

* 日立製作所日立工場



第1図 減速式と直結式のタービン寸法・重量の比較

その成果の一つとして2,700 kW 減速式タービンが完成されたわけである。第1図は同程度の出力の直結式タービンの寸法および重量の比較を示したものであるが、いかに高速タービンがコンパクト化されているかがわかる。発電機には1,200 rpm、凸極構造のものが使われているが、この形式の同期機は数多くの実績を持つ形式で、発電機の面でも建設費の低減に役だっている。

普通の火力発電設備では、燃料として重油または石炭がもっぱら使われており、燃料費が大きな問題となっている。本発電設備は、都市から日々はき出されるゴミを燃料とするため、燃料費がきわめて低減されるばかりでなく、都市の美化に大きな役割を果たしている。

3. タービンの概要

3.1 タービンの概要

本タービンの主要計画要目は次のとおりである。

タービン形式 日立衝動式単気筒一段減速式復水タービン
(無調整抽気口付)

発電機出力

最大連続出力 2,700 kW

定格出力 1,750 kW

過負荷出力 3,000 kW

主蒸気条件

圧力 22 kg/cm²g

温度 345°C

復水器真空 720 mmHg

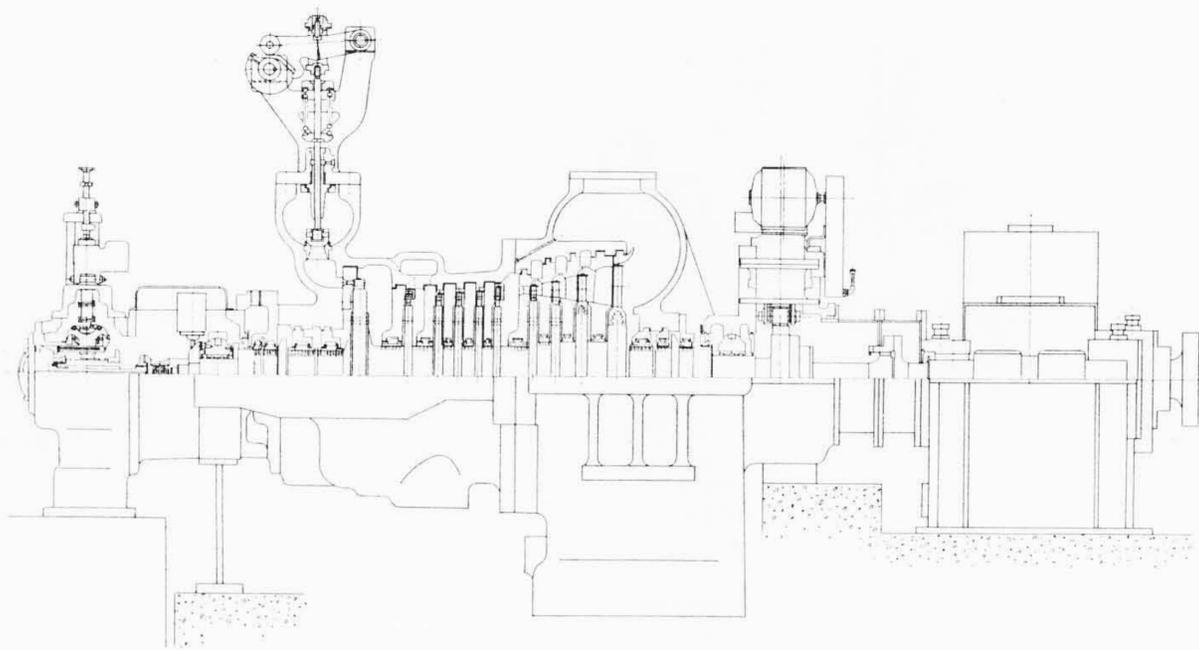
抽気条件

抽気圧力 6 kg/cm²g (定格出力時)

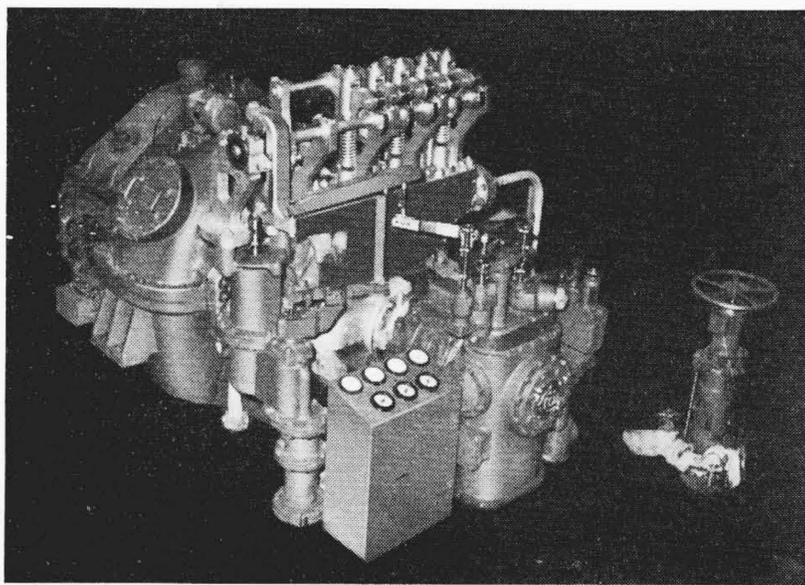
抽気量 4,000 kg/h

回転数

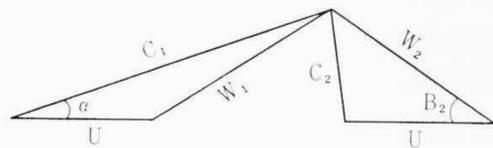
タービン 5,837 rpm



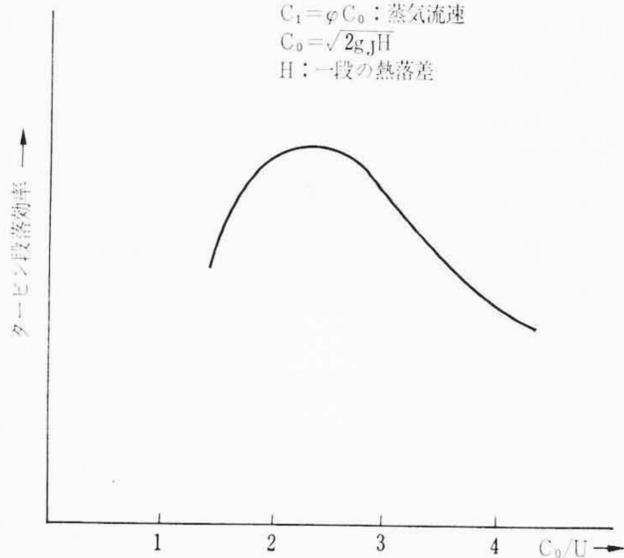
第2図 タービン断面図



第3図 工場組立中の 2,700 kW 復水タービン



U: ブレード周速
 $C_1 = \varphi C_0$: 蒸気流速
 $C_0 = \sqrt{2g_j H}$
 H: 一段の熱落差



第4図 C_0/U と効率の関係

発電機	1,200 rpm
タービン段落数	ラトー 10 段
減速歯車装置	
形式	一段減速ダブルヘリカル歯車
減速比	4.85

発電機

形式 全閉内冷強制給油
 形凸極回転界磁式
 ダンパー付 (TFB₁
 WL-RD)

回転数 1,200 rpm

極数 6 極

周波数 60 サイクル

タービン・発電機結合方式

タービン—減速歯車 ギヤカップ
 リング

減速歯車—発電機 リジッドカ
 ップリング

本タービンは高速回転の復水タービンとして慎重に設計・製作されたもので、復水タービンながら、段落途中から

プロセス用蒸気の抽気ができ、ゴミ処理炉の熱発生量が少なく、十分な蒸気の蒸発量が得られない場合も、タービン入口の蒸気圧力を一定に保つよう初圧調整機を備えている。

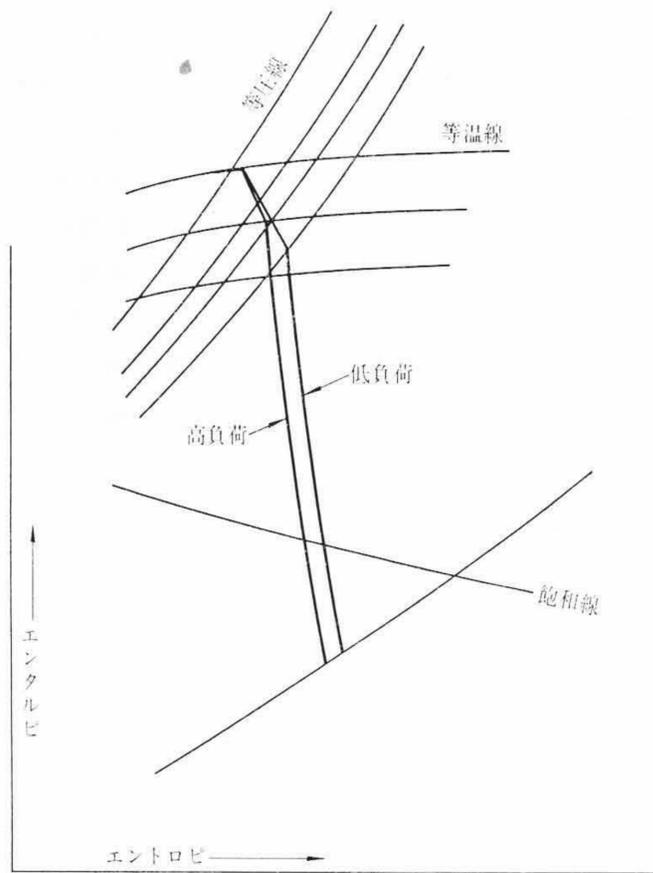
3.2 タービン本体

基本的には、従来の直結式産業用タービンの形式を踏襲しており、ラトー段 10 段によって構成されている。高圧ケーシングの前部上側に、ケーシングと一体鋳造された蒸気室を持ち、蒸気室に設けた 5 個の加減弁で蒸気の締切り調整が行なわれている。低圧タービンからの排気は下方の復水器に導かれる。第2図はタービンの断面図を、第3図は工場試運転中の写真を示している。

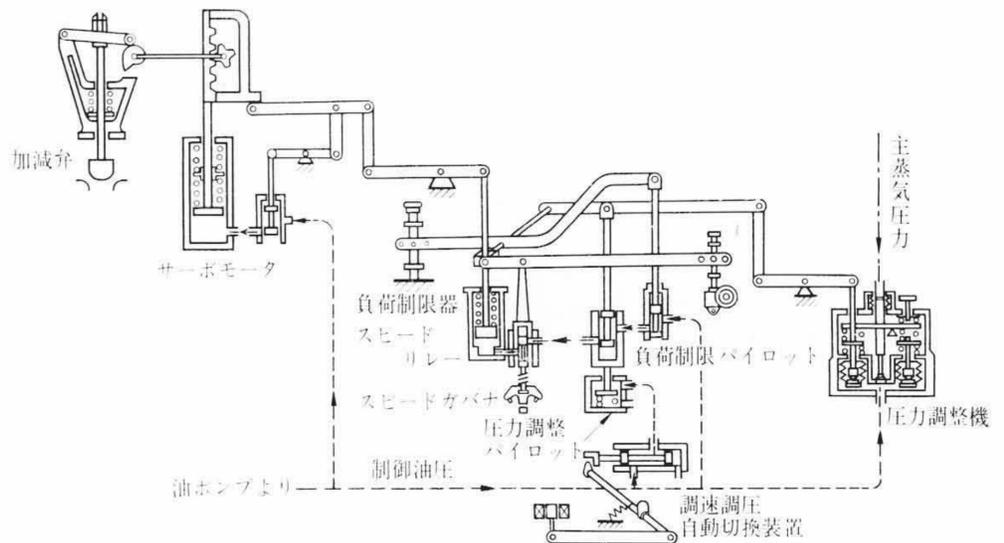
タービンロータは、車軸とディスクを一体に Cr-Mo 鋼鍛造品から削り出したもので、高速回転で生ずる高い応力にも耐え得る構造となっている。ブレードの設計に当たっては、高い効率を得ようプロフィールの選定に十分な注意を払ったが、さらに、ブレードの強度、特に低圧段の遠心力および振動応力に十分な検討を加えた。タービンのブレードは、回転による遠心力のほかに、回転数とノズル枚数の組合せによって決まる周波数の励振力を蒸気から受けるので、各段落ともブレードプロフィールおよび、シュラウドリングによるブレードの綴り合せ数を検討し、どの方向、どの次数の振動に対しても、ブレード群の固有振動数と蒸気の励振周波数との間に十分な差を持たせるようにした。

本タービンは定格出力 1,750 kW、過負荷出力 3,000 kW と通常運転される出力の範囲が非常に広い。この広い運転範囲にわたって高い運転性能を維持するために、特に過負荷弁を設けた。過負荷弁は、蒸気室に通常の加減弁に並べて取り付けられており、タービン発電機が高い負荷をとる場合、この過負荷弁が開き、蒸気を調整段および第二段目をバイパスして第三段目に流入するため、タービンに多量の蒸気を流す構造になっている。通常の弁だけで過負荷時の蒸気を流すように設計すると、部分負荷時には、調整段後の圧力が降下し、調整段のヒートドロップが増加し、蒸気流速とブレード周速の比 C_0/U が増大し、第5図に示すように、調整段およびタービン全体の効率が低下する。また部分負荷では、過負荷に備えて設けたノズルのうち一部分しか使用しないため、調整段での風損が増大しタービン効率をさらに低下させる。本タービンに設けた過負荷弁は、さきに述べた効率低下を防ぎ、広い運転範囲にわたって高い効率を確保することができる。

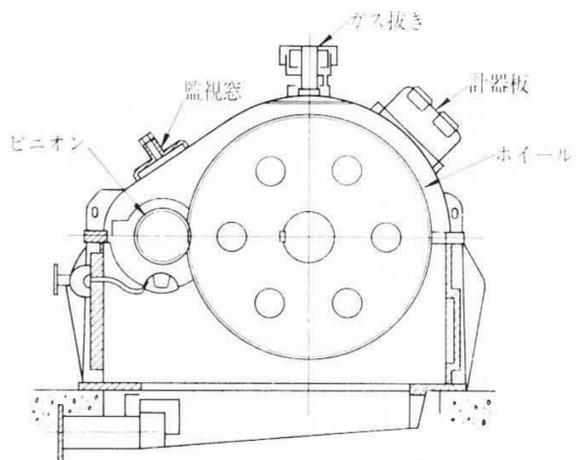
本タービンの第1および第2軸受には軸方向みぞ付形軸受を採用している。高速回転でしかもタービンロータの重量が軽いタービンでは、構造上、軸受面圧は比較的低くなり勝ちである。そこで第6図に示す軸方向みぞ付形軸受は、軸受上側からの給油でタービンロ



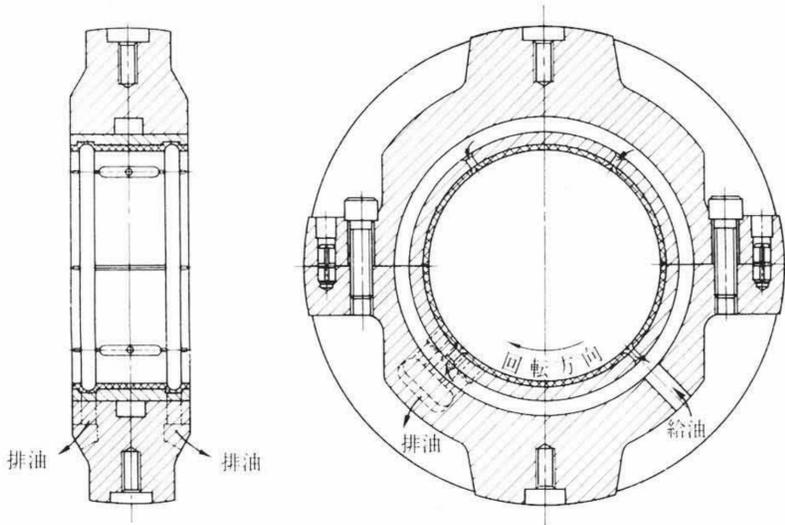
第5図 全負荷と部分負荷のタービン膨張線図



第7図 タービン制御系統図



第8図 減速歯車断面図



第6図 軸方向溝付形軸受

ータを押えつけ、軸方向に切られたみぞで油膜の旋回を切り不安定な軸受の振動を防いでいる。

ガバナおよび主油ポンプは、タービン前側軸受スタンダード内にあり、タービンロータからたわみ継手を介してウォームギヤによって駆動されている。ウォームギヤは潤滑油で強制潤滑されており、一段で減速比約10を得ている。従来の高速タービンでは、タービンロータとウォームギヤの間に一段減速用のジャックシャフトを置いており⁽⁵⁾、タービンの前側軸受スタンダードの構造を複雑にしていた。本タービンでは最新の設計技術によって慎重に設計検討を行なった結果、ジャックシャフトを使わずに、高速回転のタービンロータから直接にガバナおよび主油ポンプを駆動するウォームギヤを使用しているので、前側軸受スタンダードの構造を従来のタービンと同様きわめてコンパクトな構造とすることができた。

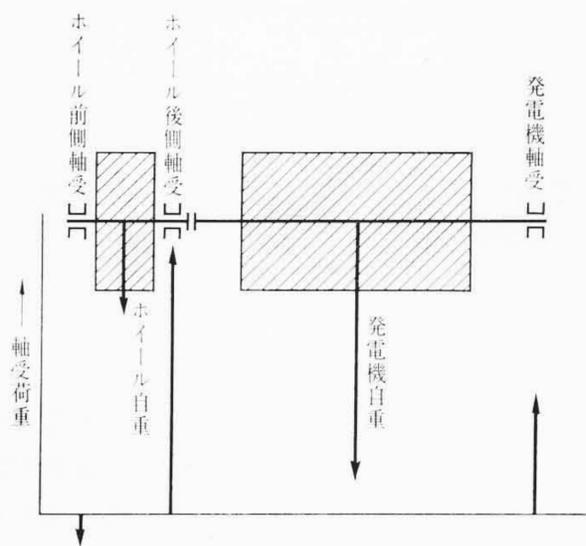
本タービンの蒸気はゴミ焼却炉の廃熱を利用したボイラから供給されるが、ゴミ焼却量によって蒸気の発生量が制限される。蒸気の発生量が少ない場合には、タービンの出力を自動的に制限し、タービン入口の蒸気圧力を一定に保持する目的で圧力調整器が設けられている。タービンの制御系統図を第7図に示す。調圧機は、蒸気圧力を検出するペロー、油圧の力を経て蒸気圧をロッドの変位に変換

するダイヤフラム、ナイフエッジなどから構成されている。ペローで主塞止弁の蒸気圧力の変化を検出すると、フラップ形ダイヤフラムの働きで蒸気圧力の変化を油圧信号に変え、ロッド・レバー機構を介してスピードリレー圧力調整用パイロットバルブに伝え、主塞止弁前の蒸気圧力が一定になるように加減弁の開度を調整する。タービン発電機が電力系統と併列運転を行なう場合には、圧力調整機による調圧運転を、系統から解列された場合には、スピードガバナによる調速運転を行なうが、タービン発電機を併列運転から解列した際、スピードガバナと圧力調整機が重複して働き、タービンの調整機構を不安定にすることを防ぐため、自動的に圧力調整機を作動からはずす圧力調整機自動切換装置を備えている。

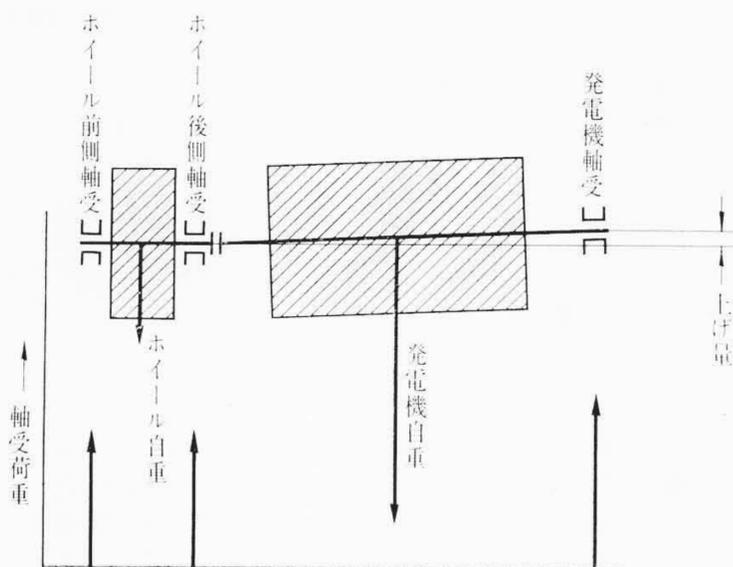
3.3 減速歯車装置

タービンと発電機とは減速歯車装置で連結されている。減速比は約4.85で、一段のダブルヘリカル歯車が使われているため、ほとんど不平衡な軸推力を発生しない。したがって、減速歯車装置の推力軸受は不要で、ホイールの両側に、位置決め程度の小規模のものが設けてある。減速歯車装置のタービン側(ピニオン側)は、たわみ性を持ったギヤカップリングで連結されており、タービンの熱膨張、軸心の上昇、振動などが減速歯車装置に伝わらない。したがってタービンと減速歯車とのアラインメントは非常に容易である。一方、発電機側(ホイール側)は、リジッドカップリングで、発電機の前側軸受は、ホイールの後側軸受で兼用する3軸受式になっている。

減速歯車のピニオンは、高い抗張力を持つ高硬度のNi-Cr-Mo鋼で、ピニオン軸およびカップリングフランジと一体に鍛造されている。一方、ホイールは鍛鋼製で、リムおよびハブ・ヨークを一体に鍛造し、同じく鍛鋼製のホイール軸と焼ばめ方式によって組み立ててある。ピニオンおよびホイールは、恒温室内にある高精度の歯切盤で歯切りされ、その後、恒温室内でシェービングされたきわめて精度の高い歯車である。ケーシングは、鋼板溶接で、剛性が高く、



第9図 減速歯車・発電機荷重図
(3軸受を同一平面に据え付けた場合)



第10図 減速歯車・発電機荷重図
(発電機軸受を高く据え付けた場合)

しかも軽量化された構造となっている。

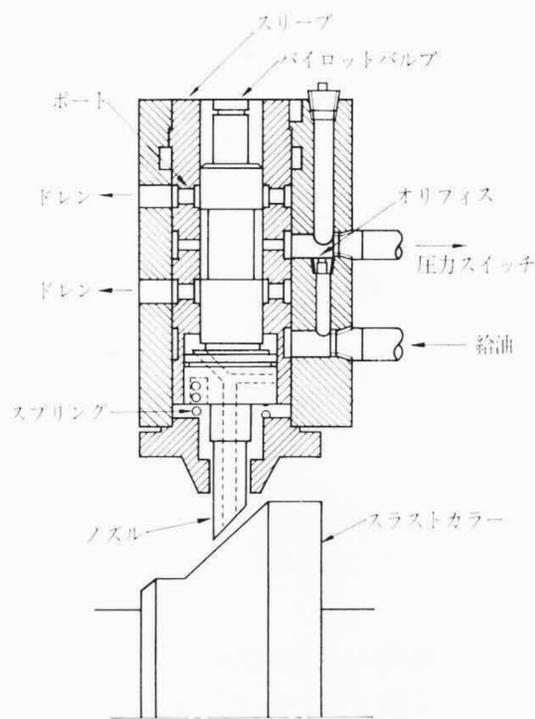
減速歯車装置には高い歯面負荷を採用した。いわゆるK値で表わすと、過負荷出力時(3,000 kW)で95以上と、この材料の組み合わせではきわめて高い値となっている。これは、絶えざる歯車の研究結果によるもので、歯切機械の優秀さもこれに寄与している。

小容量のタービン発電機で、タービンと直結式のものにはタービンの第2軸受で発電機の前側を支持する方式が多く採用されているが、減速歯車の軸受で発電機の前側を支持する方式は、日立工場では初めての製品であり、据付時の発電機とのアラインメントは、十分な注意と慎重な準備のもとで行なわれた。

本タービンの減速歯車ホイール軸受と発電機の軸受を同一平面に置いた場合、第9図に見られるとおりに、ホイールと発電機ロータの自重だけで非常に大きな軸受荷重の不平衡が起こっている。ことに、ホイールの両側の軸受荷重が上向きになっており、この不平衡を修正するために、発電機軸受をホイール両側の軸受よりもいくぶん高く据え付けなければならない。ホイールと発電機の自重だけを考慮したときホイール両側の軸受荷重が等しくなるように発電機後側の軸受は若干高く据え付けられている(第10図)。運転結果では、非常によい歯当たりが得られ、振動も少なく、きわめて好調な運転が続けられている。

3.4 保安装置

最近の自家用火力発電設備は信頼性の高い充実した保安装置を備えており、安全な運転が保証されている。本タービンに設けられたおもなものをあげてみると



第11図 推力軸受摩耗警報および遮断装置油圧リレー

- 非常调速装置
- 排気真空低下遮断装置
- 軸受油圧低下警報および遮断装置
- 推力軸受摩耗警報および遮断装置
- 危急遮断装置
- 调速调压運転自動切換装置
- 軸受排油温度上昇警報装置
- 排気室温度上昇警報装置
- 軸電流防止装置

などがある。これらの保安装置の多くは、従来産業用火力発電設備に使われてきたもので、タービンの安全運転に支障が生じた場合には、制御室の運転員に表示窓およびブザーで知らせるか、あるいは主塞止弁を自動的に瞬間的に閉鎖し、タービンをトリップさせて、タービンばかりでなく発電設備全体の安全をはかる装置である。このうちで、推力軸受摩耗警報および遮断装置は、従来の産業用タービンに使われてきた温度継電器式推力軸受保護装置に代わり、産業用発電タービンには初めて採用された油圧式のものである。本装置は、油圧リレーとその管路に設けた2個の圧力スイッチからできている。第11図は油圧リレーの構造を示したものであるが、油圧リレーはスリーブおよびパイロットバルブと油ノズルとを兼ねたピストンからできており、タービン運転中は、油ノズルとスラストカラーの背面とが常に一定間げきとなるよう、スプリングと油圧による力が釣合っている。スラストカラーの背面と油ノズルの先端とはタービン軸に対して45度の角度に切っており、互いに平行であるため、スラストカラーの軸方向の移動につれて、ピストンが上下に移動する。推力軸受が正常な状態にある場合には、パイロットバルブはスリーブのポートをおおっているが、推力軸受が摩耗した場合、タービンロータの軸方向の移動につれてピストンも下がり、バルブのポートが開くため、油がポートから多量に流れ、管路のオリフィスで生じた圧力降下を圧力スイッチが検出して、タービンをトリップさせる。

この油圧方式の推力軸受保護装置は、従来の温度継電器式以上に動作に確実性があり、しかも、ピストンがタービンロータの動きに瞬間的に追従するため、動作に時間遅れがほとんどない。

4. 高速蒸気タービンの将来

従来は、産業用発電タービンに、減速式高速タービンを使った例

は少なく、そのほとんどが背圧タービンに限られていた。ここに、日立製作所が、本格的な減速式高速復水タービン2台を製作し、好調な運転を続けている事実は、わが国の産業用火力発電設備に一つのエポックを立てたといえる。しかし、商船の船内発電用蒸気タービンでは、最大出力1,000 kW、回転数10,000 rpmの小形復水タービンは相当古くから実用化されており、また、主機タービンでは、すでに十数年以前から、5,000 rpm、最終段ブレード9"、あるいは4,200 rpm、最終段ブレード13.5"のものが数多く製作されている。一方、事業用火力発電設備では、60 c/s用30"、50 c/s用33.5"の長大な最終段ブレードが実用化の段階にきている。これらの技術を、産業用高速復水タービンに応用すれば、6,000 rpmでは17"、8,000 rpmでは13"、10,000 rpmでは10"のブレードが可能となるが、これらのブレードは、それぞれ、20,000 kW級、10,000 kW級、5,000 kW級に対応している。

減速歯車の最大周速度は、現在のところ100 m/s前後であるため、あまり大きい動力の伝達はできないが大動力伝達の研究がすすめられている。発電用以外の分野、たとえば、ボイラ給水ポンプ駆動用、高炉送風機駆動用、ブロワ、コンプレッサ駆動用タービンとしては大容量、高速回転の蒸気タービンが要求されているが、この分野に

も今後は、効率の高い高速復水タービンが進出して行くものと考えられる。

現在、日立製作所日立工場では、最大出力5,000 kW、蒸気条件82 kg/cm²g、382°C、排気圧力20 kg/cm²g、回転数6,000/3,600 rpmの出力および蒸気圧力において日本国内で最大級の減速式高速背圧蒸気タービンの製作が鋭意すすめられている。

5. 結 言

大阪市清掃局納2,700 kW復水式蒸気タービンの特長について述べた。減速式タービンは、現在のところ比較的小出力のものに限られているが、今後の減速歯車の進歩、高速回転用長翼の開発によりさらに大出力のものにまで及ぶと考えられ、減速式高速タービンの将来は明るいといえよう。

参 考 文 献

- (1) 通商産業省公益事業局：火力発電所総括表(昭38-3)
- (2) 会田俊夫：機学誌 66, 760(昭38-6)
- (3) 日本造船関連工業会編：船用減速歯車の設計等に関する調査研究事業報告(第1報～第8報)
- (4) 橋本誠也：機学誌 66, 38(昭38-1)
- (5) 加藤，多治見：日立評論 46, 1611(昭39-11)

第27巻 日 立 第9号

目 次

- ・箱 根
- ・ト イ レ 物 語
- ・工 場 廃 水 の す き な 細 菌
- ・りんかくのきれいな絵を送る
——4ビジコンカラーカメラの話——
- ・透明に、タイトにという包装のトップモード
- ・大 山 ケ ー ブ ル カ ー

- ・新しい照明「病院の照明」
- ・電線百話「ベルダーとコロンブスの卵」
- ・明日への道標「住友金属小倉製鉄所納分塊圧延機」
- ・ハイライト「"旅情" 売りまします」
——カラー絵はがき1枚売自動販売機——
- ・読者の声「いろいろなガス器具の関係」
- ・ニュース

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京71824番

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

振替口座 東京20018番

Vol. 26

日立造船技報

No. 1~2

目 次

論 文

- ・プロペラによってかじが受ける起振力について
- ・二重吸入口つきアングル弁の抵抗測定
- ・冷蔵庫防熱壁の伝熱に関する二、三の考案
- ・進水用コロの強さ(第1報)
- ・球形タンク支持脚付近の局部応用
- ・高張力鋼のカセイソーダ水溶液中における耐食性
- ・原油燃焼の前処理法(第3報)
——各種原油の処理試験——

- ・P S連続合成げたの終局強度に対する基礎実験
- ・タッピング作業における切削トルクとめねじ拡大量
- ・波形マンホールカバーの強さ
- ・3.5% Ni 鋼の熱間加工法
- ・コルモノイ合金の吹付溶接の実地適用のための実験
(第2報完)
- ・ヘリアークスポット溶接施工法
- ・水圧鉄管組立中におけるX線散乱線量率の分布測定
- ・ぎ装工作への接着剤の利用

……本誌に関する照会は下記に願います……

日立造船株式会社技術研究所

大阪市此花区桜島北之町 60