

国策パルプ工業株式会社旭川工場納  
**17,000 kW 背圧タービンおよび発電機設備**  
 17,000 kW Non-Condensing Turbine and Generator for Asahikawa Works,  
 Kokusaku Pulp Industry Co., Ltd.

飯 土 井 博\* 齋 藤 清\*  
 Hiroshi Idoi Kiyoshi Saitō

### 内 容 梗 概

国策パルプ工業株式会社旭川工場納 17,000 kW 背圧タービンおよび発電機が、昨年きわめて好成績のうちに工場試験を完了した。このタービンおよび発電機（以下T-Gと記す）は、既設の総出力 10,500 kW 発電設備の増設用として造られたもので、主蒸気条件は圧力 97 kg/cm<sup>2</sup>g、温度 537°Cで事業用新鋭火力設備に匹敵する記録的なタービンである。ここに本T-Gの構造の概要について紹介する。

### 1. 緒 言

近年、産業界の企業合理化と自家消費電力の増大に伴い、熱エネルギーの経済的利用と安価な電力を自給することが真剣に討議されている。プラント効率を左右する基本的要素のうち、最も大きく影響するものは主蒸気圧力ならびに温度である。一般に背圧一定のタービンで、流入蒸気量および効率を一定とした場合、圧力を高めれば発生電力は増大するが、反面蒸気の比容積が減少するので、小容量の高圧タービンでは蒸気通路部の摩擦損失および漏えい損失が相対的に増加するためおのずから限度がある。一方温度を上げることにより内部効率は高まり、蒸気消費率は減少するが、排気温度が上昇するため減温せねばならなくなり出力の増加分の一部は打ち消される結果となるので、工場用蒸気圧力および温度が決められるとおのずから主蒸気圧力に対応する温度が決められる。以上の熱効率の面と構造ならびに材料の経済性について総合的な見地から計画がなされた。日立製作所においては、数多く製作せられた 100 気圧級以上の大形タービンの運転実績と材料の基礎研究から得た経験と資料に基づいて設計製作を行っている。さらに各種の制御および保安装置は、高温高圧化に伴いっそうそのむずかしさを増すが、機構の進歩によって確実にしかも信頼度の大きい装置が確立されたことは、今後の産業用タービンの発達に寄与するところ大と考える。

以下、本 T-G の主要部構造および保安管理に必要な監視装置の概要について述べる。第 1 図は工場試験中の本機の外観である。

### 2. タービンの仕様および構造

#### 2.1 タービンの仕様

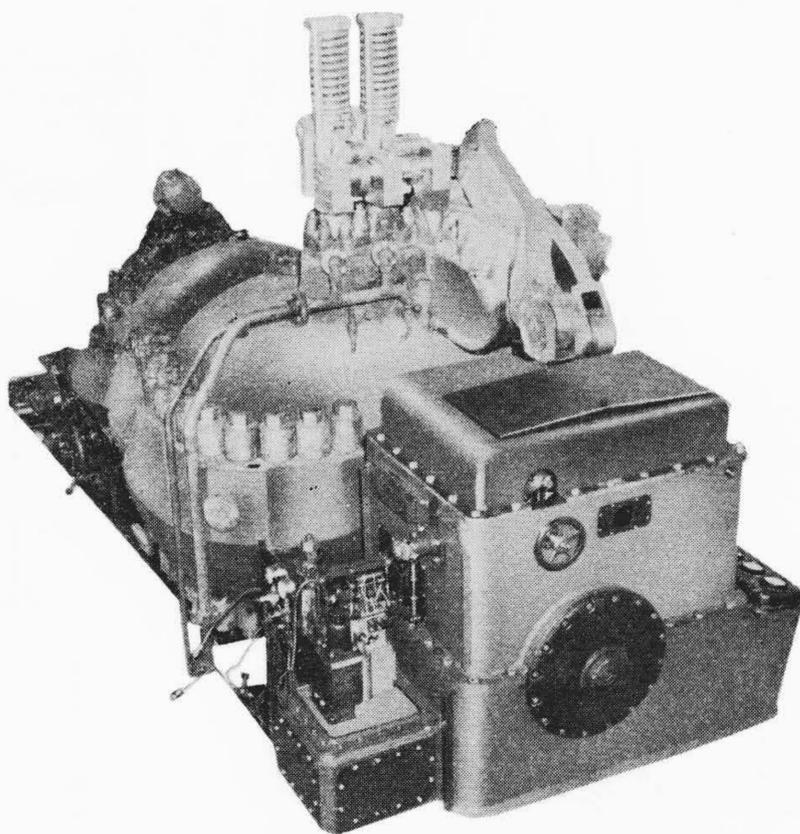
本タービンの仕様は次のとおりである。

形 式	日立衝動式背圧タービン
最大連続出力	17,000 kW
回 転 数	3,000 rpm
蒸 気 圧 力	97 kg/cm <sup>2</sup> g
蒸 気 温 度	537°C
排 気 圧 力	3 kg/cm <sup>2</sup> g
タービン段落数	高圧 7 段, 低圧 7 段 計 14 段

#### 2.2 タービンの構造および材料

タービンの構造は第 2 図に示すように高圧部は二重車室構造で、主蒸気は高圧車室の上下より均一に流入する。タービンロータは発電機軸と直結され、全体は 4 軸受で支持される。前側軸受部は主蒸気流入部の輻射熱を第 7 段落後の比較的低温の蒸気によってしや閉し軸受部の過熱を防止している。また軸端シール部を自動式蒸気シ

\* 日立製作所日立工場

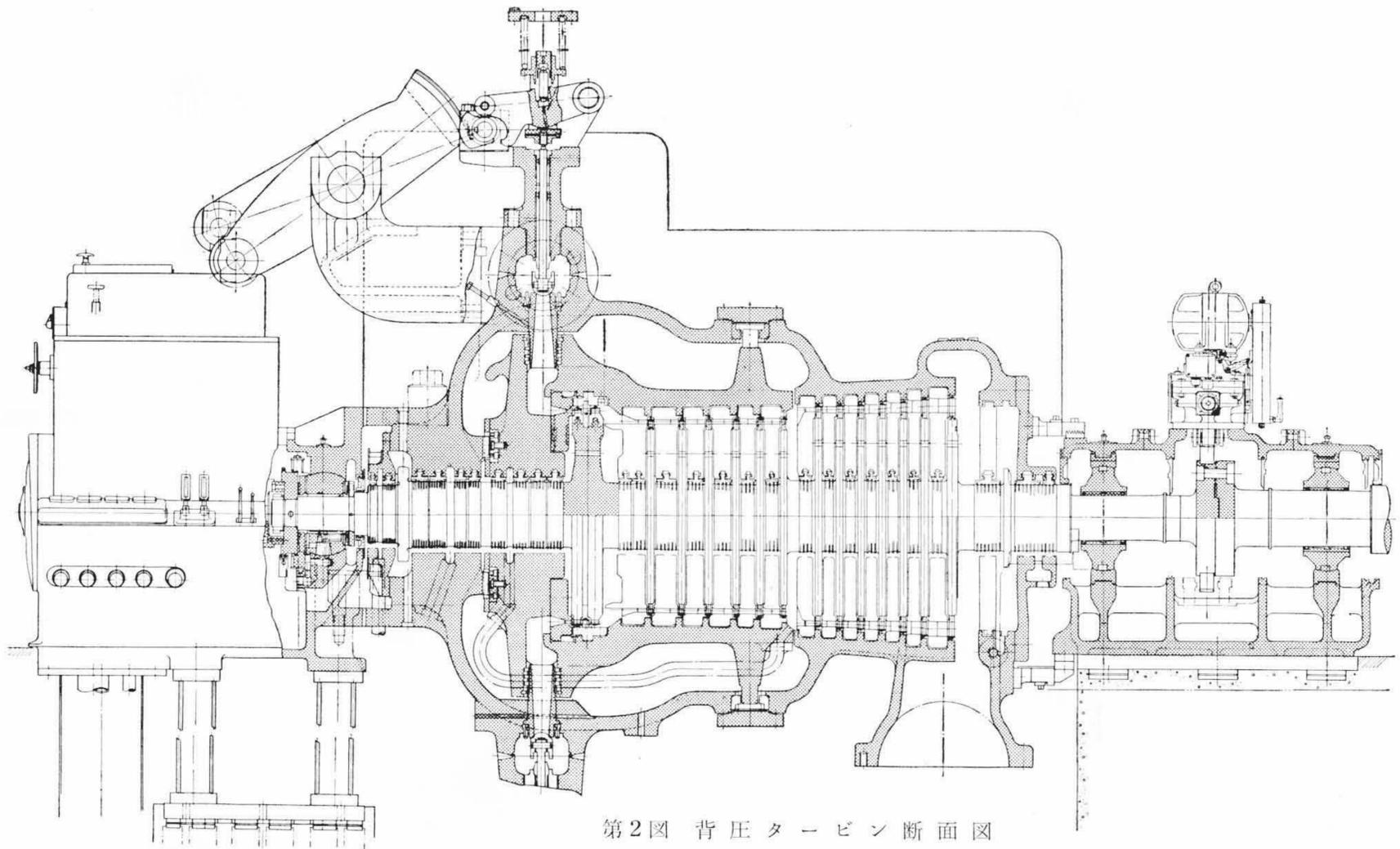


第 1 図 工場試験中の 17,000 kW タービン

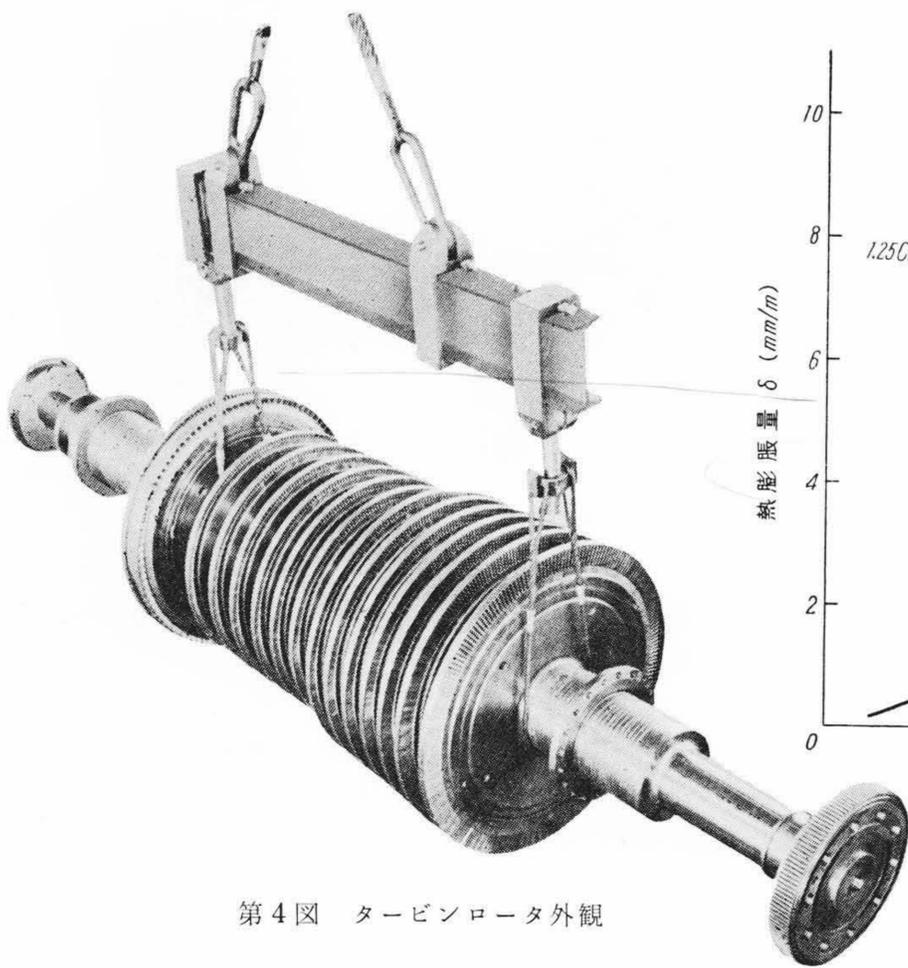
ール構造とし運転操作を容易にした。以下、主要部の構造ならびに材料について説明する。

#### 2.2.1 タービン車室

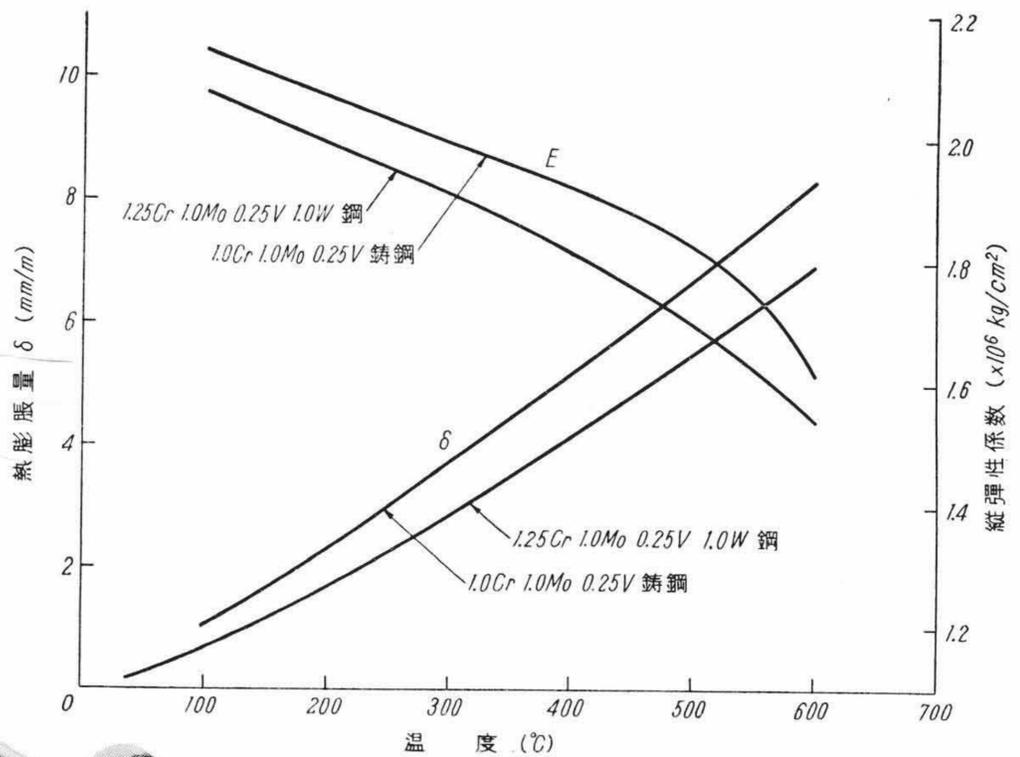
高温蒸気を伴い複雑な形状となる車室は、熱膨脹について十分考慮せねばならない。特に工場用蒸気の変動が激しい場合には異常変形を起しやすいため、特に高圧部の外部および内部の上半、および下半車室は対称形とし、内部応力を極力少なくするように留意している。タービンの基礎に対する固定点を後側軸受部に設け、車室の軸方向の熱膨脹は自由に前側に逃がすことのできるよう前側軸受箱を I 字形の支持台で支持している。この支持台は熱膨脹に対しロータ軸心の高さが狂わないよう考慮されている。また内部車室の縦軸心の支持は組立式の特殊キーによって 4 点で支持され、軸方向の熱膨脹に対し自由に逃げられる構造とした。内部車室フランジの締付ボルトは植込ボルトとし、下半車室から熱が伝わりやすく起動時フランジとの温度差をできるだけ少なくして過度の熱応力発生を防いでいる。車室材はクリープ強度ならびに黒鉛化に対処するため Cr-Mo-V 鋳鋼を採用し、またボルト材には高温強度の高い Cr-Mo-V-W 鋼を使用した。第 3 図はこれら材料の物理的性質を示す。車室の検査は鋳造後、放射線、超音波探傷、磁気探傷、浸透探傷検査など各種の非破壊検査を行い、



第2図 背圧タービン断面図



第4図 タービンロータ外観



第3図 特殊耐熱材の各温度に対する熱膨脹量と縦弾性係数の関係

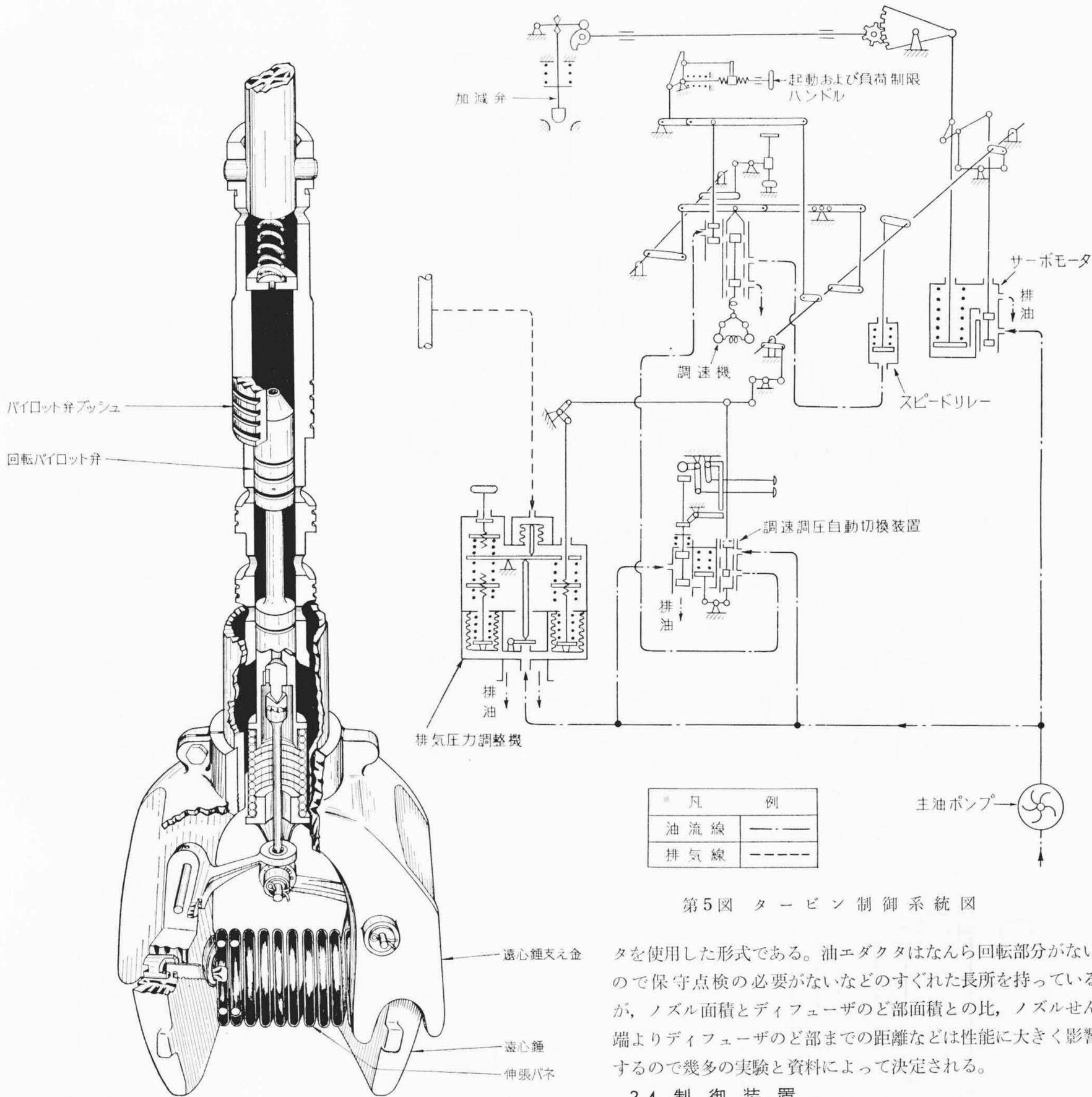
内外部の欠陥を完全に除去している。

### 2.2.2 翼およびロータ

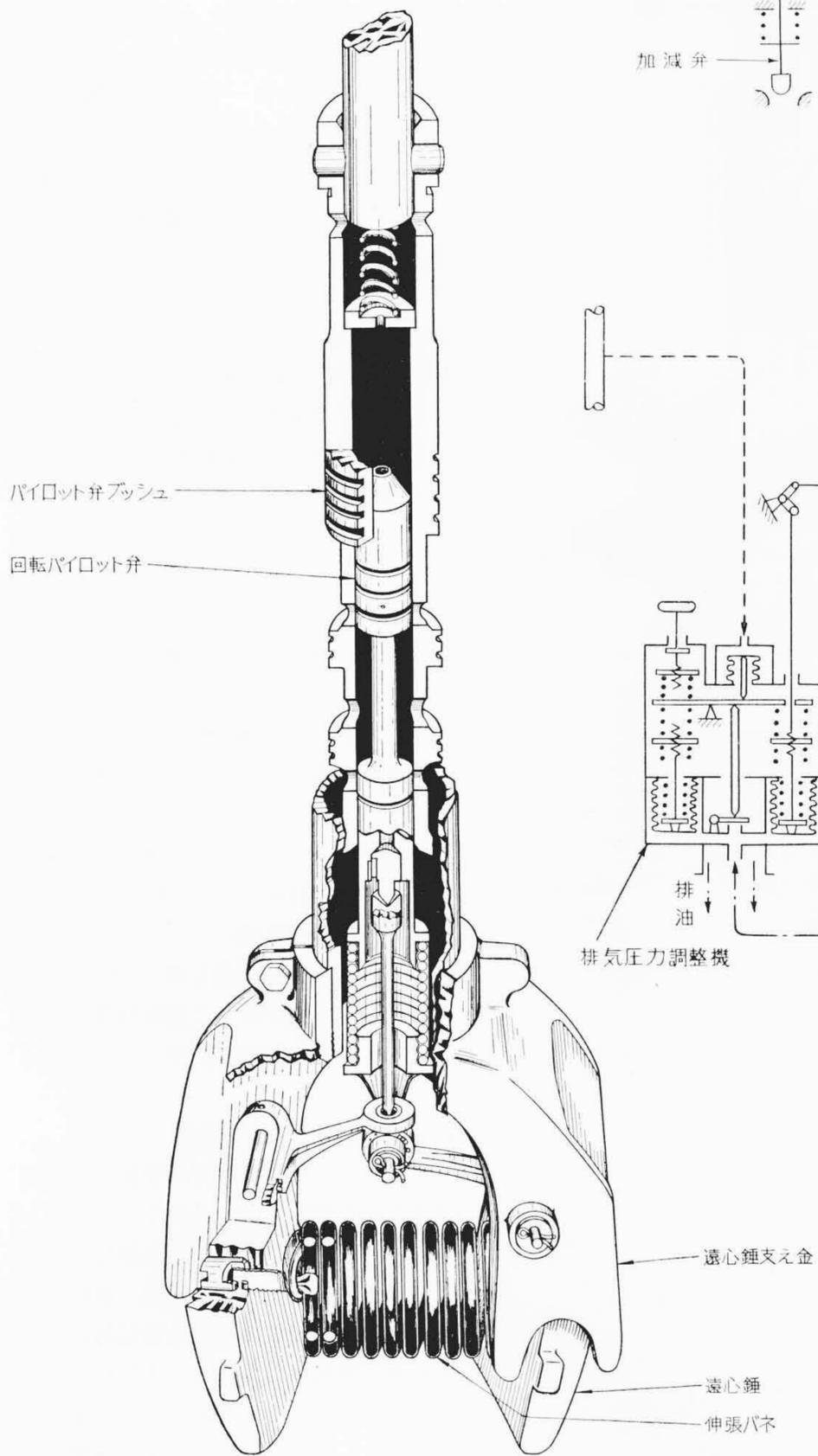
翼は流体力学的考慮と実験により、高効率の形状を決定している。タービンの心臓部ともいべき動翼の強度と振動に対する考慮として、第1段落翼は蒸気のもつ衝撃エネルギーが非常に大きいため、二重縁押えを使用し、翼材には振動エネルギーを吸収し振幅を小さく保つ減衰係数の大きいフェライト系鋼を採用した。第4図はロータの外観である。ロータは一体鍛造の削り出し形で、内外部の組織、強度を均一にするため空冷により焼準、焼戻を行い、さらに加熱によるロータの曲りを防ぐため鍛造および荒仕上げ後それぞれ熱安定試験を行い安全運転を期している。

### 2.2.3 噴口および隔板

噴口面積の誤差は効率に大きく影響するので、特に高圧部は正確な面積をうるため機械仕上げを施した溶接式、低圧部は鑄込み式の構造とし、噴口のプロフィールとしてはすべて効率の良いネガティブノズルを使用した。噴口翼材は第1段Cr-V-W合金鋼、高温部は15Cr-Moステンレス鋼、低温部は13Crステンレス鋼とした。隔板の支持は水平継手付近の両側で特殊キーによって車室に装備されるので、隔板と車室に熱膨脹の差が生じても隔板の心を狂わすことなく自由に膨脹できる。心出し調整は特殊キー部のライナによって容易に行われる。



第5図 タービン制御系統図



第6図 調 速 機

2.2.4 軸 受

回転体の振動は軸受のオイルホワリング現象に密接な関係をもつ。これは定位置で回転する軸中心がなんらかのかく乱で軸がたわみ、軸中心が移動すると新たな油膜の圧力分布による全体の復元力の方向はさきの変位の方向と一致せず、その結果軸心は軸の回転方向と同方向にふれ回り運動を始め、この不安定なふれ回り運動は回転角速度が危険速度の約2倍以上のとき起ることは周知のとおりである。本 T-G はこのオイルホワリングを抑制する軸方向油みぞ付形および圧力形軸受を採用している。軸受の調心は軸受リングに組み込まれたシムの厚みによって行われる。

2.3 潤 滑 装 置

本装置はタービン軸に直結された遠心式主油ポンプによって、タービンが正規回転数で運転中必要な制御および潤滑用の油を供給し、その吐出油の一部を利用してノズルより噴射し、この噴流作用で油タンクから油を吸い上げて主油ポンプ入口に送油する油エダク

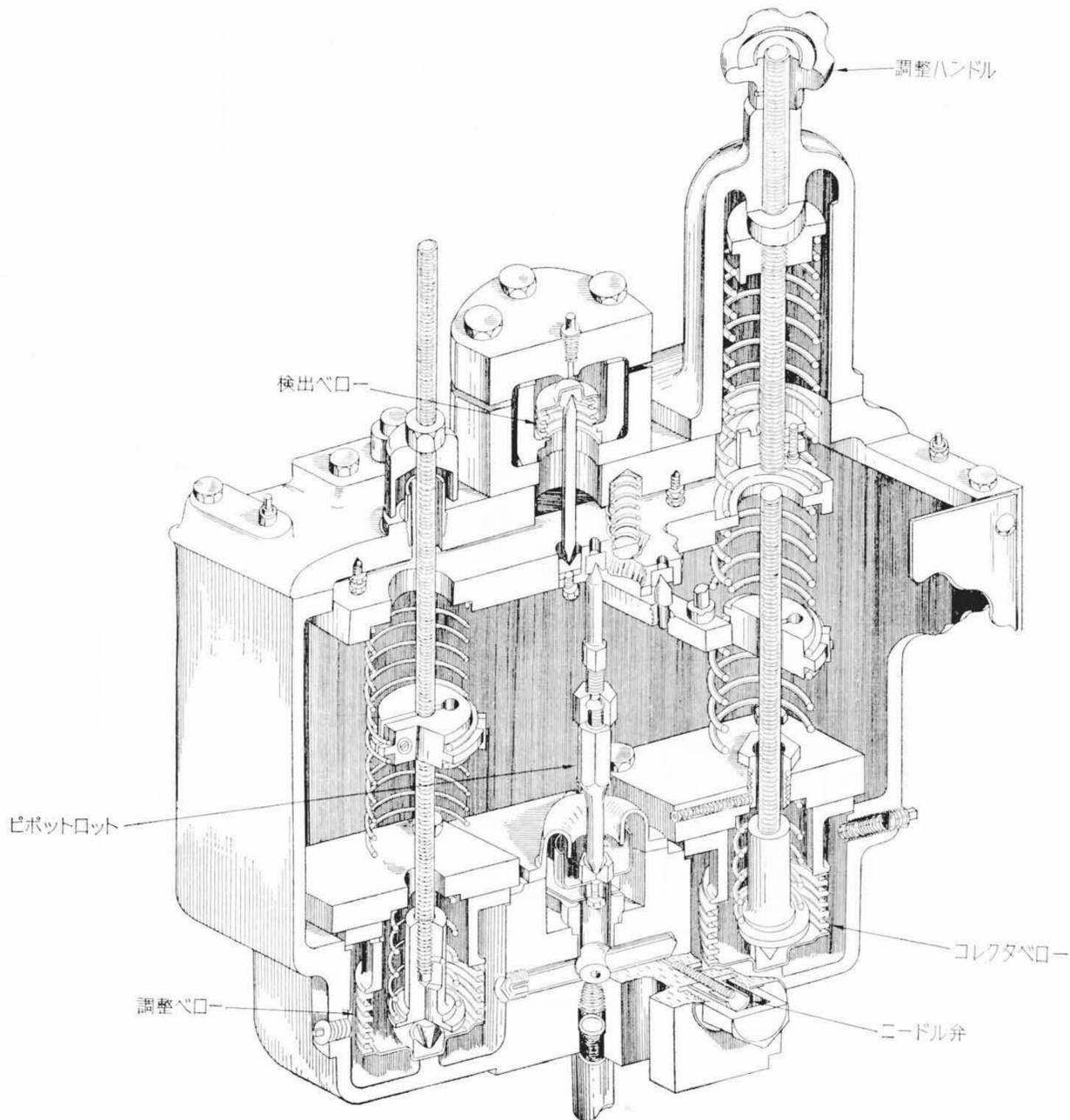
タを使用した形式である。油エダクタはなんら回転部分がないので保守点検の必要がないなどのすぐれた長所を持っているが、ノズル面積とディフューザのど部面積との比、ノズルせん端よりディフューザのど部までの距離などは性能に大きく影響するので幾多の実験と資料によって決定される。

2.4 制 御 装 置

本タービンの制御系統を第5図に示す。装置は大部分前側軸受箱内に収め、後側軸受箱上にターニング装置を設けた。调速装置は调速機、同期装置、排気調圧機、速度リレーおよび加減弁などの油圧機構とレバー機構の組合せよりなる。背圧タービンの制御は调速機と調圧機を同時に働かせることはできない。すなわち単独運転時には调速機により速度制御のみ行い、工場蒸気の調整はバイパス系統などの併用によって行う。一方並列運転時には調圧機により排気圧力を制御し、タービンの回転数は外部電源の周波数によって規制される。これらの運転は自動切替装置によって自由に切替える。

2.4.1 调速機および同期装置

调速機は第6図に示すように回転パイロット式の構造で、パイロット弁は遠心錘とともに回転する摩擦のないすぐれた感度を有し、遠心錘の開度により上下に作動し油路を切り替えてスピードリレーを介し加減弁を円滑に調整する。同期装置は调速機の回転パイロット弁ブッシュの設定を変え速度を95~105%の間で調節する発電機並列前の速度調節と併入後の負荷調節に使用される。



第 7 図 排 気 調 圧 機

2.4.2 排気調圧機

本機は並列運転時、排圧が変動するとこれに反応し加減弁を一定の割合で開閉し、蒸気量を加減して排圧を一定にする役目を果すもので、その構造は第7図に示す。本機の特徴は圧力検出部ベロの微小な動きに対し制御油圧を大きく変化させることができ、調整は敏速に行われ応答速度もニードル弁により自由に設定できる。またハンドルにより圧力調整の範囲を広く選ぶことができる。

2.5 保安装置

タービンの制御装置と保安装置とは連動的な関係にあり、保安装置は異常時の警報、負荷の加減ならびに危急時の非常停止を行わせるものである。装置には機械式と電気式とがあり、T-Gを非常停止する種類はその形式によって選ばれ、本T-Gの種類および系統は第1表および第8図のとおりである。

2.5.1 非常調速機

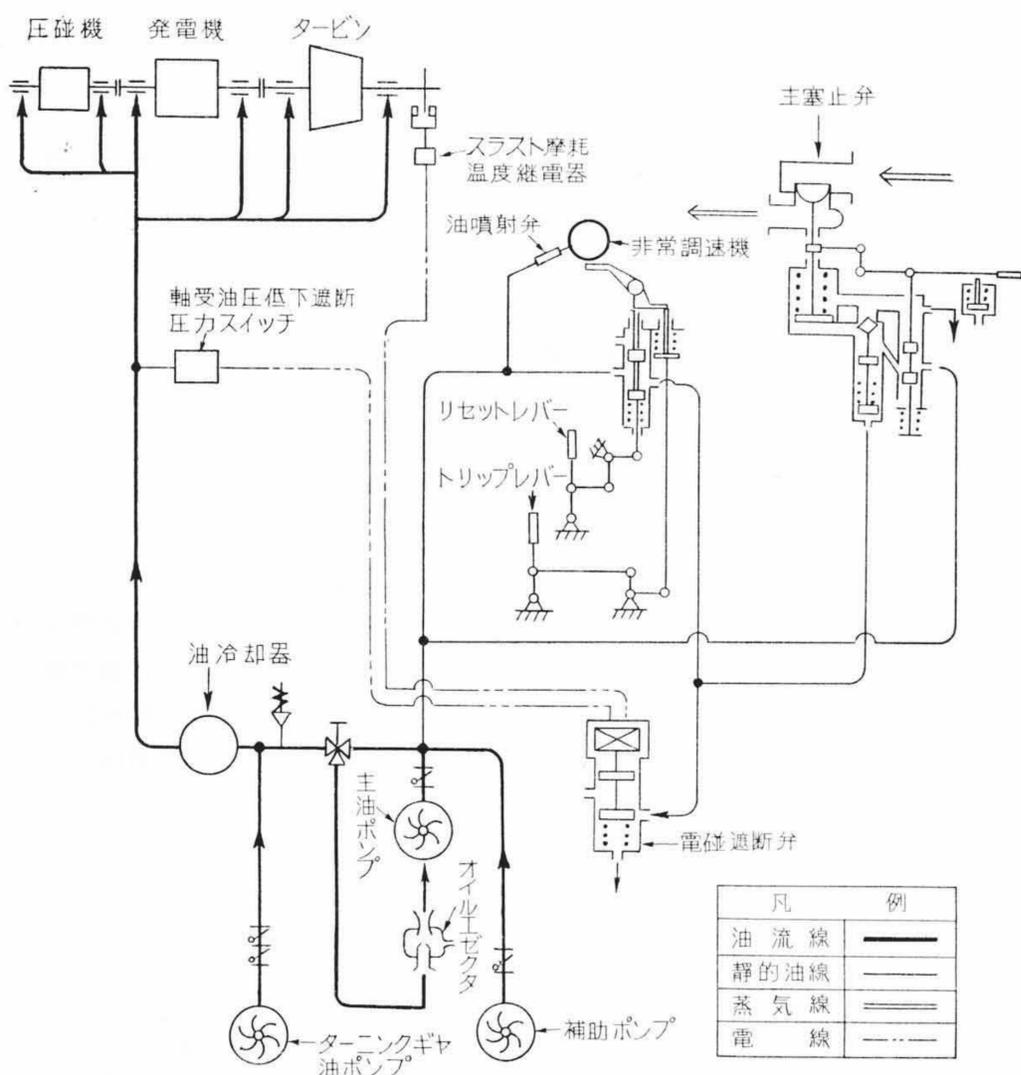
非常調速機は第9図に示す構造で、110%±1%に達すると遠心力がバネに打ち勝ってプランジャを外方へ飛び出させ油圧遮断装置を作動してT-Gを非常停止せしめる。特に本機はプランジャの一部に油を噴射し偏心重量を増大せしめて圧縮バネとの平衡を破って遮断装置を作動させることのできる油噴射形の構造となっている。

2.5.2 他機間の保護連動

タービンは発電機と互に密接な関連を保ちながら運転しているので、タービンの保安装置が作動すれば当然発電機になんらかの影響を及ぼす。また、逆の作動もありうるのでT-G間に電気的のインターロックが装備される。すなわち、前述の第1表で述べた原因によって保安装置が動作した場合、主塞止弁が全閉すると直ちにタービンのモータリングを防止するため、主変圧器遮断器を開路せねばならない。また、発電機側が故障の場合、主塞止弁を全閉しないとT-Gは過速されるのでインターロックが是非必要となる。第10図は本T-Gのインターロック線図を示す。

2.6 タービン監視装置

タービンの起動、運転、停止を安全かつ合理的に行うには監視装置が必要である。装置には規定値を越えた場合直ちに警報表示を行う装置とタービン内部の刻々変化している機械的量を直接測定し、運転の目安を与える監視計器とがある。以下、その概要について述べ、構造および動作原理は割愛する。



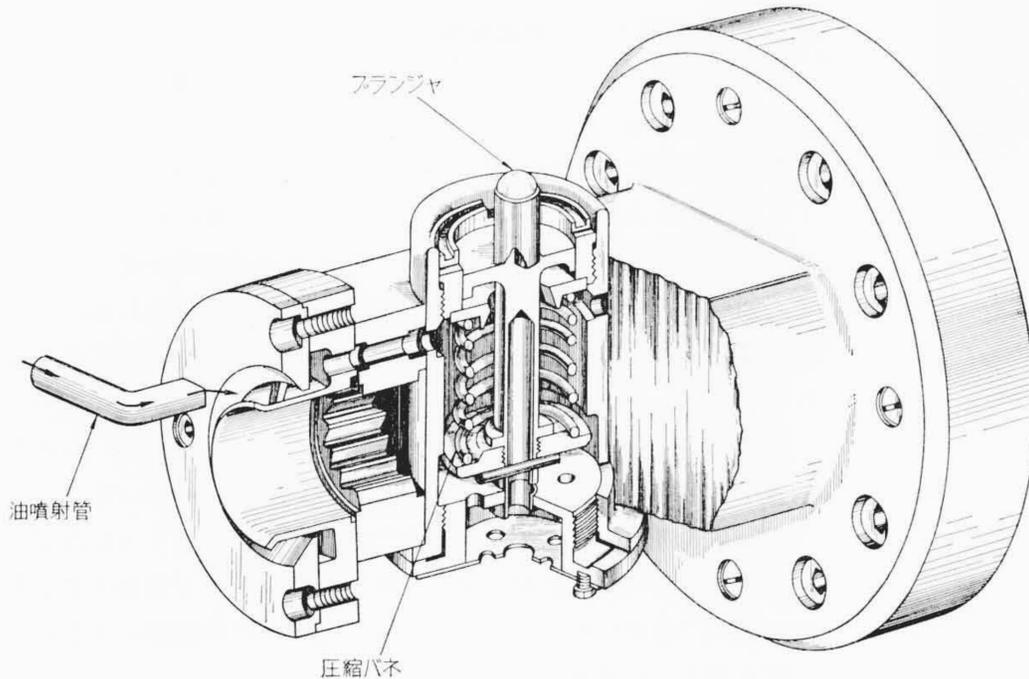
第 8 図 タービン 危急停止系統図

第1表 タービン危急停止項目一覧表

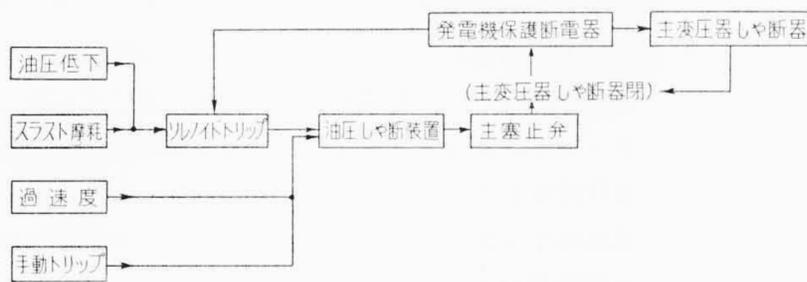
番号	項 目	動 作	形 式
1	手動トリップ	トリップレバーを手で動かすことにより油圧トリップ	機 械 式
2	過 速 度	正規速度の109~111%で油圧トリップ	機 械 式
3	軸受油圧低下	油圧0.4 kg/cm <sup>2</sup> gでソレノイドトリップ	電 気 式
4	スラスト摩耗	スラストメタル約0.8mm摩耗してソレノイドトリップ	機 械 電 気 式
5	発電機事故	保護継電器動作しソレノイドトリップ	電 気 式

第2表 タービン警報項目一覧表

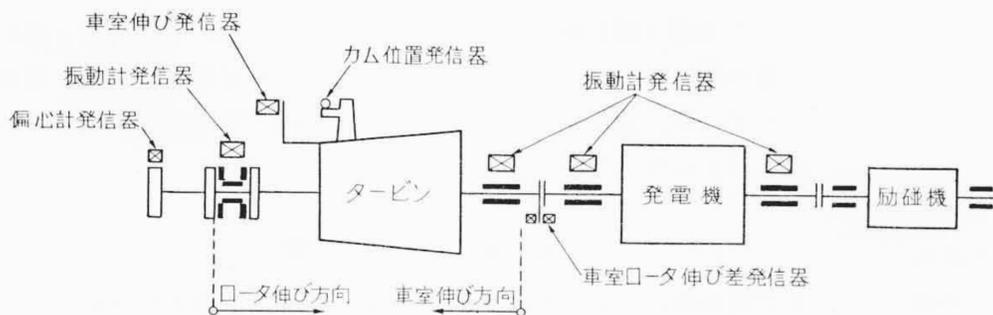
番号	項 目	検 出	差 動 値	備 考
1	軸受油圧低下	圧力スイッチ	0.55kg/cm <sup>2</sup> g	
2	軸受排油高温	サーモコイル	75°C	
3	油タンク油面高低	水銀スイッチ	±50mm	
4	車室壁温度差大	サーモカップル	83°C	
5	偏心大	偏心計		目盛0~0.4mm
6	振動大	振動計		(片振幅) 目盛-0~0.15mm
7	車室ロータ伸び差大	伸び差計	ロータ伸び大 +6.5mm ロータ伸び小 -1.5mm	目盛-7.5~0~ +7.5 mm
8	ターニングギヤ油ポンプ過負荷	モータリレー		



第9図 油噴射形非常调速機



第10図 タービン発電機インターロック線図



第11図 監視計器配置図

2.6.1 警報表示装置

事故発生と同時に T-G を危急停止する重故障の保安装置は前述のとおりであるが、本装置は保安装置が働くまえに故障表示器に表示しブザー警報を行って早期に適切な処置をとるための軽故障装置である。反面あまり表示点が多数であっても判断に迷うばかりで意味がないので、機械の形式、運転方式によって適宜選択される。第2表はその種類を示す。

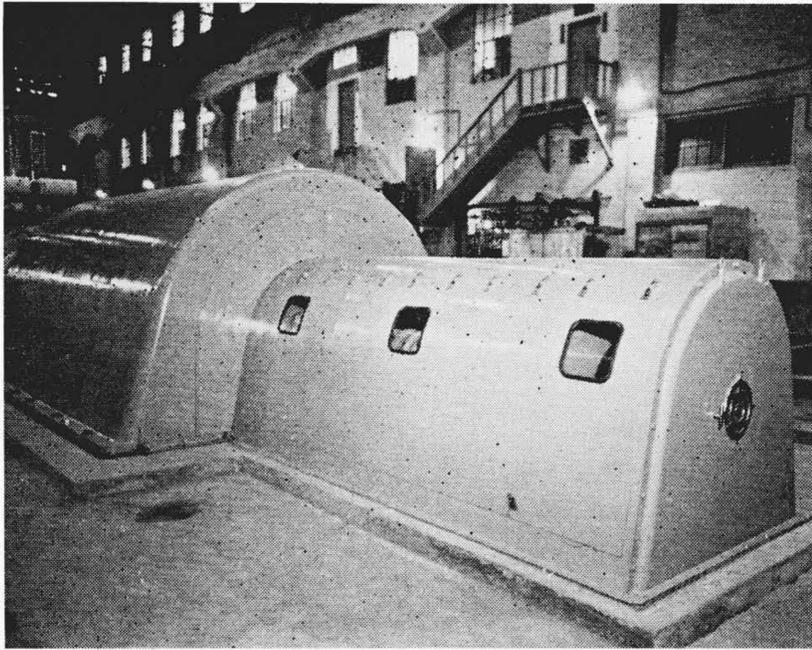
2.6.2 監視計器

従来運転員の感に頼っていた T-G の運転状態を数値的に指示、記録し、以後にとるべき運転方法を決定するうえに重要な指針を与えるものが監視計器で、その種類には伸びおよび伸び差計、偏

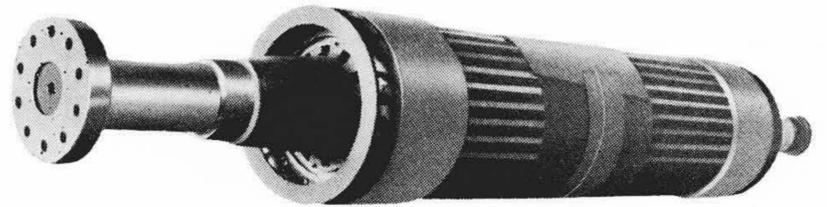
心計、振動計、回転数-カム軸位置計などがある。特に比較的危険の多い起動、停止時や負荷変動時にはその役割は大きく、測定値の集録は後日の解析資料として重要なものとなる。第11図はその配置図を示す。タービンが静止状態から全負荷までの間に、車室は熱膨脹によって前方に伸びるので、この伸び量が正常であるかどうかを監視するため、伸び計発信器を伸び量が最大に達する前側軸受部に置かれる。回転部と静止部の伸び差の問題はタービン設計上最も考慮すべき点の一つである。ロータは車室より比較的軽いので早く膨脹、収縮し、また、ロータは推力軸受によって位置決めされているため、推力軸受から離れた距離では両部の間げきは大きく変化する。特に起動時または負荷変動の大きいとき十分注意せねばならない。この相対的な伸び差を指示、記録するものが伸び差計で、設置箇所は推力軸受より遠い点を選ばれ前述の伸びと伸び差は交互に打点記録され両者の関係が直観できる。タービンロータの曲り程度は周囲の温度こう配と停止期間に関係する。静止時の曲りは車室の熱的不平衡のため停止直後が最も大きいので、短時間停止後の起動には注意せねばならない。したがって、タービン停止後はターニング運転を行って不均一な冷却を避けることが重要である。わずかな心の狂いも高速回転時には大きな不平衡力を生じ運転不可能となるので、この偏心量を指示、記録するため前側軸端に偏心計発信器が設置され、その記録はまたタービンの起動、停止時間の短縮を計る重要な目安となる。T-Gの振動はごくわずかで、振動が徐々に増してゆくようなときに運転者がその増加を感知することは困難で、タービンの運転にとって危険である。これがため振動計発信器は各軸受部に置かれ数値的に指示、記録する。タービンが同期速度に至るまでの昇速期間および過速遮断時前の速度の記録をとり、また、タービンが同期にはいって負荷の変動に対し加減弁位置が変動する場合その位置を記録することが必要である。これらの目的をかなえるため同一紙上に記録される回転数-カム軸位置計を設置し T-G の安全運転を期している。

3. 発電機の仕様および構造

タービンと直結される発電機は、最新式産業用タービンに対応した最新の標準設計によるもので、構造簡単にして堅ろう、高性能で保守運転の容易な優秀機である。200 MVA をこえる事業用大容量タービン発電機が多数製造される今日において、容量的には特筆すべきものではないが、合理化された産業用火力発電の一断面を示すも



第12図 17,000 kW タービン発電機



第13図 回転子

のとしてここに簡単に述べる。

### 3.1 発電機および励磁機の仕様

#### 発電機

形式	閉鎖通風形円筒回転界磁式, 空気冷却器付
出力	21,250 kVA
電圧	3,300 V
力率	80% (遅れ)
周波数	50~
回転数	3,000 rpm
励磁電圧	220 V
接続	三相星形結線 6 本口出し

#### 主励磁機

形式	閉鎖通風形他励磁巻線式
出力	95 kW
電圧	220 V
回転数	3,000 rpm

#### 副励磁機

形式	閉鎖通風形複巻式
出力	2 kW
電圧	110 V
回転数	3,000 rpm

### 3.2 発電機の構造

#### 3.2.1 固定子わく

固定子わくは熔接鋼板製で運転中の振動や不平衡磁気吸引力に対しても十分強固に設計されている。わくは固定子鉄心の支持とともに、冷却風の通路となっている。鉄心背部とわく側板との間の空間は仕切板によって軸方向に三つの空間に分割されており、鉄心中央部の空間が入気室、その両側がそれぞれ排気室になっている。通風翼によって送りこまれる風は排気室を貫く通風パイプを通して中央部の入気室に直接はいるので、最も温度上昇が高くなると推定される発電機中央部が十分冷却される。

#### 3.2.2 固定子鉄心および線輪

固定子鉄心には高級ケイ素鋼板を使用した。これは1枚ごとにワニスを一様に塗布して焼付けたものである。

固定子線輪は重ね巻き1回巻きのハーフコイルで両端で接続され、素線はスロット内直線部において完全に転位されている。SLS絶縁が採用されているが、これはマイカを主体とした絶縁でSLSワニスを真空注入して製作されたもので、従来のコンパウン

ド絶縁に比して熱膨脹収縮に対してはるかに強く、また内部コロナ発生が少ない。産業用でしかも本機のように背圧タービン直結の発電機は負荷変動が著しいので、このような場合特にSLS絶縁のすぐれた熱特性が威力を発揮する。

#### 3.2.3 回転子および界磁線輪

回転子軸材にはニッケルモリブデンバナジウム鋼の単一鋼塊を使用した。回転子は全面にわたり超音波探傷を行い、また各部から多数の試験片を採取し厳格な試験に合格したものである。回転子には線輪を入れるみぞのほかに、歯部にも全長にわたって通風みぞが切っており、胴部両端からこのみぞに冷却風が送りこまれて、通風みぞのくさび間に通風孔から空けきけに放出される。界磁線輪端部に加わる強大な遠心力は特殊鋼の保持環によってささえられている。

通風翼には強力かつ高性能のラジアルファンを採用し、これを釣合環に取り付け、十分な冷却風を機内に循環させている。

界磁線輪はあらかじめ成形された銅帯をみぞにそう入しながら組み立てたもので、絶縁は強く圧縮されたマイカを主体とするB種絶縁で、高速回転による強大な遠心力および熱膨脹による応力に耐えるように考慮が払われている。

#### 3.2.4 その他

回転子の振動調整は、釣合環に取付けられたバランスポケットに重量を加減することによって行われる。実際運転時とほとんど同一温度上昇にして振動調整されたのち、組立てられる。

スリップリングは保守取扱に便なるように励磁機側軸受台の外側に取付けられている。リングの表面にはらせん状にみぞを切り、刷子電流の不均衡を除くようにし、またリング側面に突出部を設けて冷却効果の改善を計っている。

主励磁機はたわみ継手によって直結され、副励磁機は主励磁機にオーバーハングされている。励磁機は発電機スリップリングを含めて美しい鋼板製のカバーによっておおわれ、主励磁機と副励磁機の間に取り付けられた通風翼によって主発電機とは別個に通風されている。通風路には特に考慮を払い刷子粉が機内に蓄積されないようになっている。

## 4. 結 言

日立製作所において製作された国策パルプ工業株式会社旭川工場納17,000 kW 背圧タービン発電機の概要について述べた。

本機は厳重な試験が行われ、期待どおりの優秀な成績を収めた。これはさきにA社(石油精製)に納入した3,800 kW タービンに引続き製作された同形式のもので、主蒸気条件は国産の産業用プラントの最高記録をゆく、高温高圧タービンの開拓者の役割を果し、今後の産業用タービンの発展に寄与するところ大であると考えられる。最後に、本機の製作にあたり終始ご懇切なご指導をいただいた国策パルプ工業株式会社の関係者各位に深甚な謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- (1) 加藤, 北川: 日立評論 37, 39~44 (昭35-7)
- (2) 平賀, 井沢: 日立評論 23, 59~62 (昭33-6)