

印度マツラ発電所納

10,000 kW 蒸気タービンに就いて

浦 田 星*

10,000 kW Steam Turbine Supplied to the
Madura Power Station, India

By Hoshi Urata

Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Hitachi's 10,000 kW Steam Turbine shipped lately to India in the limelight of the electric machine maker's circle as being the first exportation of its kind in the postwar period, is now under assembly at the Madura Power Station, Madras. On account of severe climatic and other operating conditions under which the turbine is to be run several new ideas for its design have been incorporated—incorporated so successfully that the machine showed in shop testings such an excellent performance that made it compared favorably with any turbines of American or European make.

〔I〕 緒 言

印度 Madras 州 Madura 発電所 10,000kW 蒸気タービンは終戦後最初の輸出プラントとして内外の注目を浴びていたが、昨年八月工場試運転を終え目下現地に於いて据付中である。このタービンの製作に当つては気候風土の異つた土地に於ける種々苛酷な条件に耐える為に又終戦後最初の輸出タービンとして色々な新しい技術を織り込む為に非常な努力が払われた。これ等の努力の結果本タービンはこれまで製作された同出力程度のタービンに比較して、遙かに優れた製品となつた。今後の日本の進むべき道としてプラントの輸出を盛にしなければならぬ事は云うまでもないが、印度、東南アジア等は英国圏内にあり、而も米英始め各国の競走が最も激しい所でこの中に我々の製品を進出させた事は蒸気タービンとして一つの新しい分野を開拓したと云つても過言ではない。以下本タービンの計画及び構造の概要を述べる。

〔II〕 タービンの計画

本発電所に於ては 4,000 kW の既設発電機があり、ボ

* 日立製作所日立工場

イラは 36,000 lbs/hr 3 基バブコック製、ターボ発電機は英国バーソンス社製である。これに対し今回増設の発電機はボイラは 55,000lbs/hr 2 基独乙のシユタインミユラー社製でターボ発電機は日立製の 10,000 kW である。この両発電機は相互に何等関係なく蒸気状態給水温度共に異つている。増設のタービンは無出汽式で復水器を出た復水は空気ポンプの中間冷却器を通つて一度開放タンクに入れ、それよりボイラに給水する開放式給水系統となつている。タービンの仕様及び性能は第 1 表に示す通りであるが、第 1 表の中でタービンの仕様は註文に於て現地の実状によつて計画されたもので、日本に於ける同程度の出力のタービンとは幾分異つた計画である。即ち蒸気温度が高い割に圧力が低く、殊に真空は近代の発電所としては極めて低い値である。これは熱帯地方である為に大気温度の最高 43.2°C 冷却水温度平均 38°C 湿度 80% という日本内地とは著しく異なる条件にある為と思われるが、このような条件は高性能のタービンを製作するには極めて不利であつてこれを克服して、性能の良いタービンを製作するのに非常な苦心が払われた。

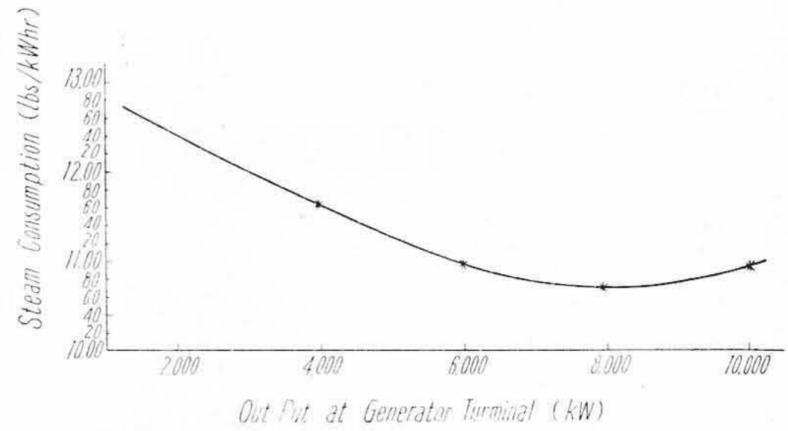
即ち蒸気圧力が低いことと真空が低いことはタービンの熱落差が少くなるので蒸気消費量が増大する。特に真

第 1 表 蒸気タービンの仕様及び性能
Table 1. The Specification of Steam Turbine

項 目	仕 様
仕 様	型 式 日立衝動型単車室復水タービン 最大定格出力 10,000 kW 経 済 出 力 8,000 kW 蒸 気 圧 力 260 psi (18.3 atg) 蒸 気 温 度 720°F (382°C) 回 転 数 3,000 r. p. m. 復 永 器 真 空 27 inHg (685 mmHg) 冷 却 水 温 平均 95°F (38°C) 主蒸気管内径 11.8 in (300mm)
性 能	内 部 効 率 84.8% パーソンス係数 2160 段数及びP. C. D カーチス 1 段 39.4in (1,000 mm) ラトー 4 段 35.5in (900 mm) ラトー 7 段 46.6in~51.2 in (1,300mm~1,430 mm) 蒸 気 消 費 量 10.70 lbs/kWH(4.85kg/kWH) (8,000 kW 時に於て)

空が低いことは性能に決定的な影響を及ぼす。従つてこれを補う為にタービンの内部効率を出来るだけ高くし、漏洩損失機械損失等は出来るだけ小さくして、タービン効率を高めるように努めた結果第 1 図に示すように蒸気消費量は経済出力 8,000kW で 10.70lbs/kWH(4.85kg/kWH) となつた。これは蒸気状態と真空を考慮した場合に極めて高性能である。上記の各仕様の他に注文主により定められた条件は材料、工作、試験、発送、各部分品に到る迄広範囲にわたっているが、その中で特にこれまでの製品と違つているのは製作基準は総べて BSS NO 132“STEAM TURBINE”及び MADRAS 州政府規格 GENERAL MECHANICAL SPECIFICATION No. E-16 に準拠したことである。これ等の規格には材料、工作を始めボルトナット、潤滑、塗装等総ゆる部門に及んで規定されており特に材料は許可されたもの以外は総べて BS 規格又は AS 規格の材料を用いた。

第 2 図はタービンの外観を示す。本タービンは衝動式 2 列カーチス 1 段、ラトー 11 段よりなり、4 軸承式で semi flexible Coupling によつて発電機と連結されている。注文主はロータの蓄勢輪効果に対して次の式による事を要求して



第 1 図 蒸気消費量曲線
Fig. 1. Steam Consumption Curve

いる。即ち Inertia Constant $H=6$ とし

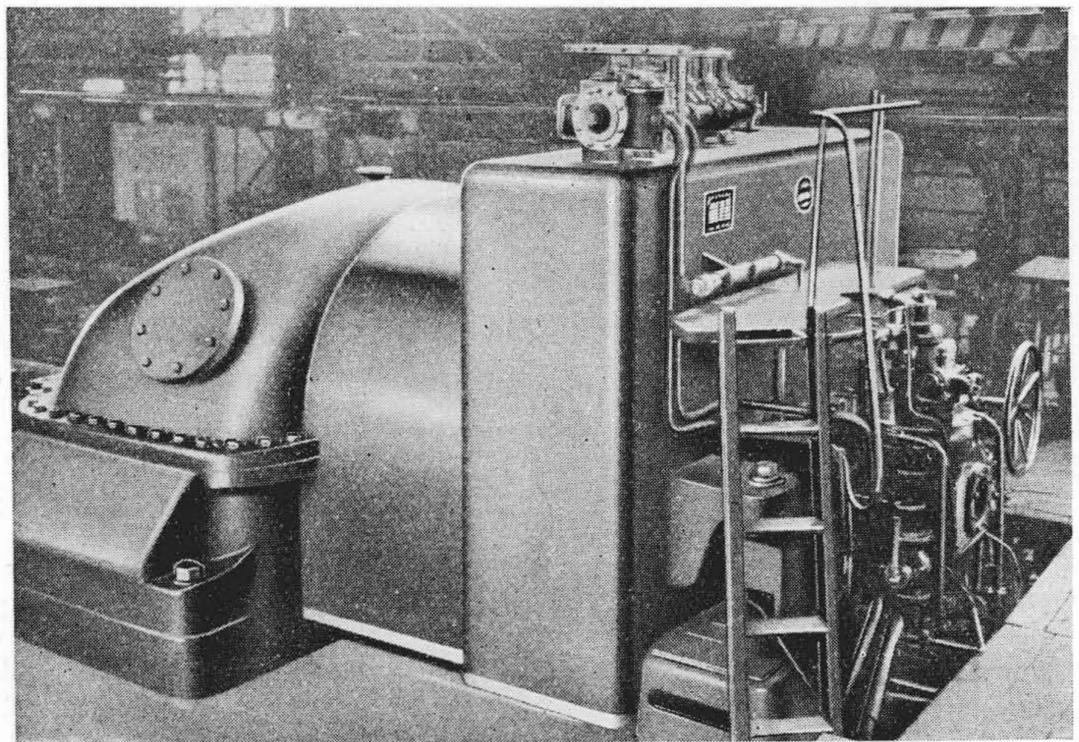
$$H=0.231 \times \frac{GR^2N^2}{kVA} \times 10^{-6}$$

この式より GD^2 を計算すると、

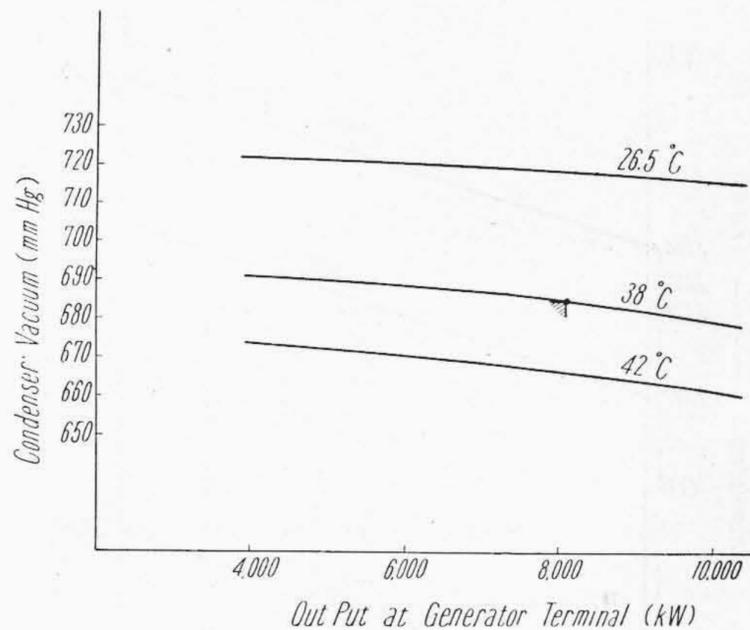
- タービン 2,920 kgm²
- 発電機 3,150 kgm²
- 計 6,070 kgm²

この値は同程度の出力のタービンとしては大き過ぎるが、これは矢張り注文主の事情によつて定められたものであり、輸出品としての特長という事が出来る。この為にロータが大きくなり軸承その他一般に大きく堅牢である事を必要とするが、回転は安定で変動が少い。

復水器は冷却水温 38°C で所定の真空を保つように設計されている。復水器の真空は当然冷却水温及び出力の変動によつて変わるので、第 3 図にその変化を図示した。水温が高いことは復水器の設計にも不利であるので、冷却管の配列に特に考慮を払つて出来るだけ熱貫流率を大きくし、復水器の冷却面積を最小にするよう設計した。冷却水は河水の流量が少ないのでスプレーポンドを設けて



第 2 図 10,000 kW タービン外観
Fig. 2. General View of 10,000kW Turbine



第3図 復水器真空曲線
Fig. 3. Condenser Vacuum Curve

復水器より出た冷却水を冷却せしめる計画とした。既設の 4,000kW も同様スプレーによつて冷却しているが、これに隣設して 10,000 kW 用のスプレーポンドを増設し双方をパイプで連絡してどちらでも切換えて使用出来るようにした。

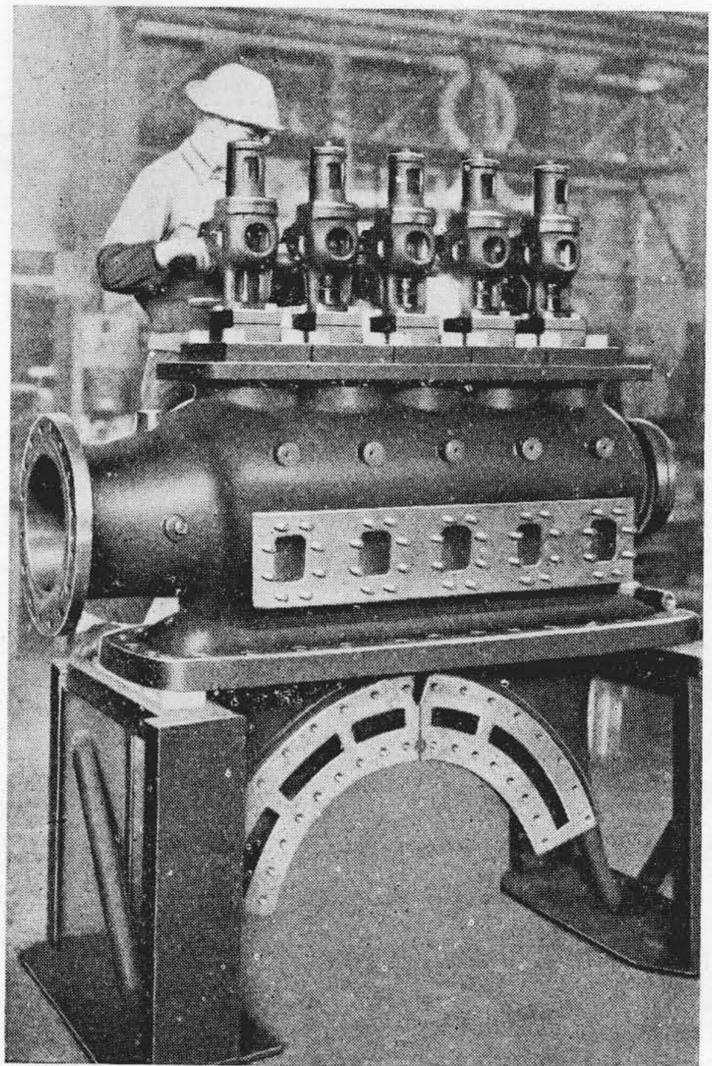
その他各部品共与えられた条件に適い、しかも性能を落さぬよう最大の注意を払つた。以下各部の構造を説明する。

〔Ⅲ〕 車室及び軸承

車室は熱膨脹に対して 400°C 級タービンと同様の考慮を払っている。即ち不均一膨脹を避ける為に車室の厚みを総て同一とし熱膨脹や急激な負荷の変動に対して安全であるように猫足式で軸承台に取付けられ中心性を狂わすことなく自由円滑に伸縮出来るようになつている。上下車室の合せ目のボルトには小孔を穿けてあり締付けの際は小孔を火焰で熱して膨脹させた上で締付ける焼締ボルトである。軸承は前後部共球面座を有する自動調心式でバビットを鑄込んだものである。特に先方の要求もあり、気温の高い印度に於て使用される関係上潤滑油の温度上昇に対して嚴重な制限があるので軸承負荷を軽減し油の温度上昇を少なくする為に四軸承式を採用した。推力軸承はミッチェル式で球面座軸受メタルに抱かれた構造である。

蒸気室は車室に差込み型となつているので主蒸気温度が直接タービン車室に感応しない構造となつている。蒸気室は五つのノズル群に分れており、五箇の加減弁がサーボモータの回転によつて順々に開いて所要の出力を出す。(第4図参照)

第一段噴口は蒸気室に嵌込み式の組立噴口である。ダイヤフラムは二種類あつて、二段及び三段ラトーのダイ



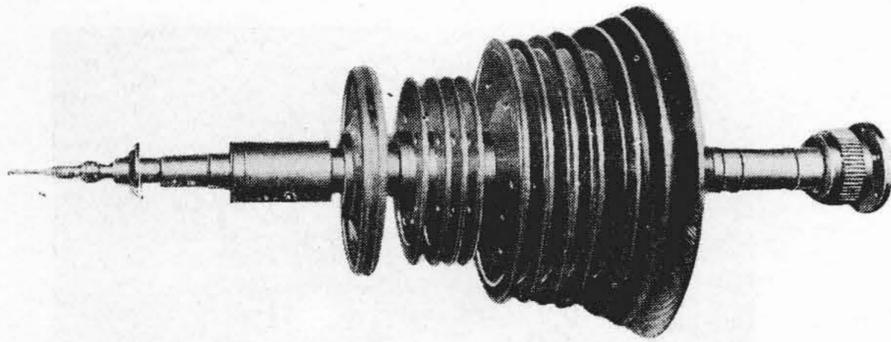
第4図 蒸気室及び加減弁
Fig. 4. Steam Chest and Regulating Valve

ヤフラムは鑄鋼製ダイヤフラムに組立噴口を嵌込んだものであるが、四段ラトー以下は低酸素鋼板を嵌込んで噴口としたものである。何れも出来るだけ蒸気の損失を少くし高い性能を得るよう設計された。

〔Ⅳ〕 ロータ

車軸及び車盤は特に入念に鍛造され、嚴密な試験を行つた材料を使用した。車室と車盤は日立独特の方法で焼燻してある。即ち第五段迄は温度が高いため半径方向にピンを入れたピンブッシュを用い、第六段以下にコニカルブッシュを用いた。日立式ピンブッシュは長年の実績により高温部の車盤に対して絶対安全な固定方法であることが立証されている。車盤は一個一個静的釣合試験を行つた後に車軸に焼燻めされ、最後にロータ全体を動的釣合試験を行い完全に平衡を保たしめてある。第5図に組立てられたロータを示す。ロータの Critical Speed は定格回転数より 25% の範囲以下にある所謂 Under Critical Speed である。従つて Over Critical のロータに比し重量も少くて済み軸承損失及び蒸気漏洩等も少いという利点がある。本タービンは前に述べたように、GD² が比較的大きいのでロータも大きくなり、Critical Speed を一定値以下に保つのに特別の苦心が払われた。

翼はタービンの中で最も重要な部分であるのでその設計には特別の注意が払われている。即ち各翼共遠心応力



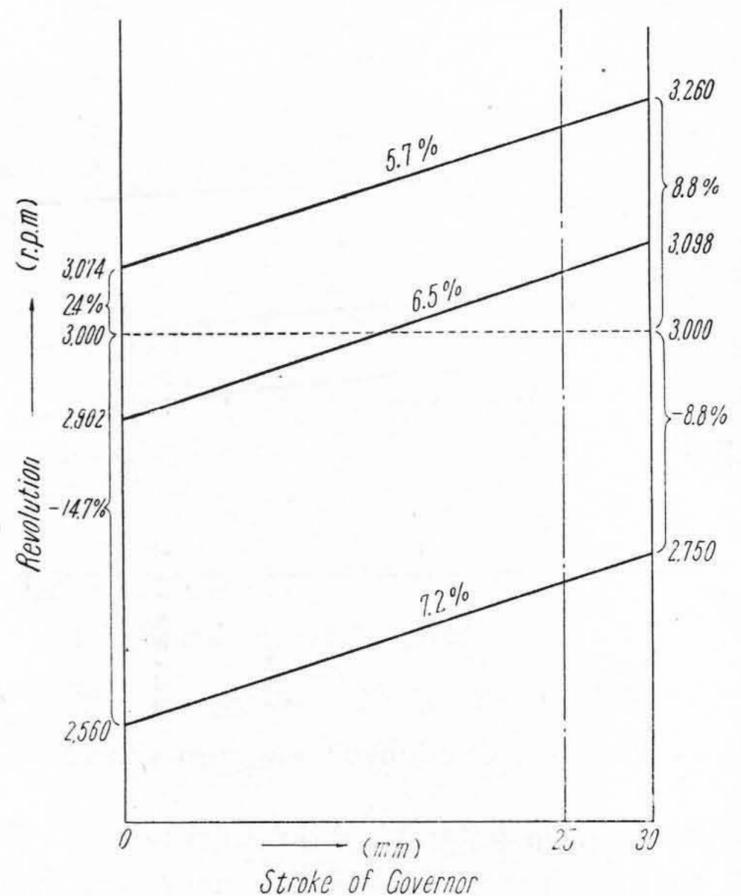
第5図 タービンロータ
Fig. 5. Turbine Rotor

曲げ応力及び振動に対して十分強度を有し、各断面は蒸気の流れが出来るだけ円滑になるような断面を持っている。短い翼は甲字型の根で車盤の溝に嵌り入れ、長い翼に松傘型の根で車盤に植込まれ遠心力に十分耐えるようになってい。長い翼はその長手方向の周速度が異なるので蒸気の流入角を一致させる為に翼が若干振れている。各翼は不銹鋼の Shroud Ring によつて頭を抑えられているが、最終段の翼は普通はこの程度の長さの翼ではバインド線を附して振動振幅を制限する方式をとるのであるが、本タービンではバインド線をつけなくても振動に対して十分強度を有するように設計してある。

〔V〕 調 速 機

本タービンに使用せる調速機は油圧レバー式で、遠心体の動きを油圧で拡大してレバーに伝える。レバーはサーボモータのパイロット弁を動かし、油圧によつてサーボモータを回転して加減弁を開閉する。サーボモータの回転とパイロット弁の間に復元装置があり、パイロット弁は常に一定の位置にあつてサーボモータの開度を適当に保つ。調速機はターボ発電機の生命でその感度は十分鋭敏なものでなければならぬ。この為には調速機の回転質量が小さくしかも調整能力が大でなければならない。油圧レバー式調速機は遠心体の変動を油圧で拡大するので比較的小さな遠心体で大きな調整能力を有する特長を持っている。又レバーの長さ比も大きくとれるので無定位線が直線的であつて負荷の変動に対しても安定度が変化しない。

又本調速機では増力用油筒の排油口に螺旋形の回転子を置いて排油の圧力によつて絶えず回転させて油圧の変動を少くし、油の固着又は摩擦抵抗を最小限に減少してレバーの動きを平滑に保っている。本調速機を使用した場合の調速装置の性能を第6図に示す。瞬間最大速度上昇率 5.25%、永久速度変動率 4% である。尚調速機レバーには併列運転の際の急激なる過負荷を防止する為の負荷制限器及び速度変動率を調整する為の速度変動率調整装置を設けている。

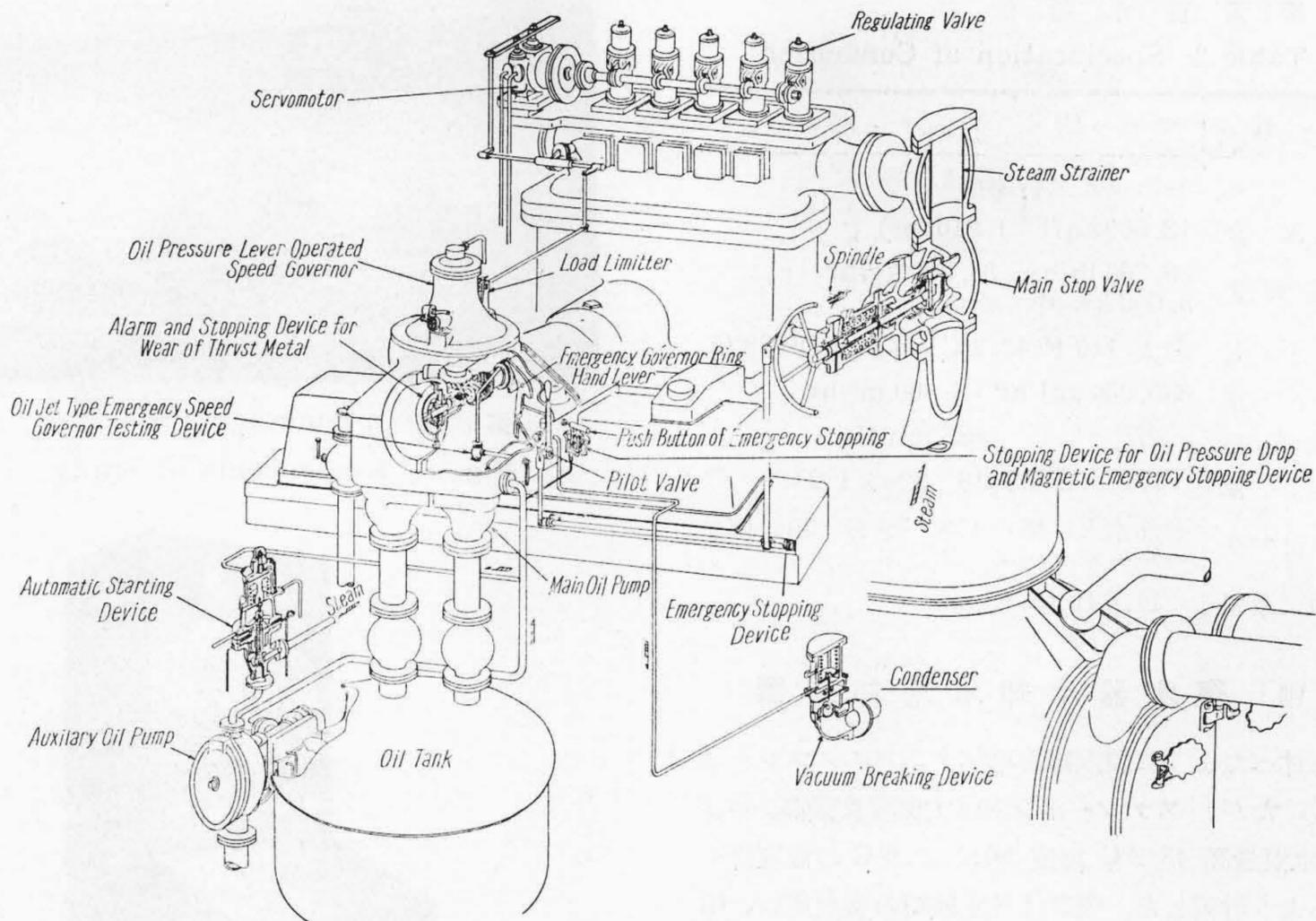


第6図 調 速 機 性 能 曲 線
Fig. 6. Speed Regulation Curve of Governor

〔VI〕 保 安 装 置

本タービンには特に各種の保安装置を設けて安全なる運転を期している。第7図に各種の保安装置を取付けた状況を示す。

- (a) 非常調速機 (Emergency Governor Ring) タービンの回転数が定格の 110% に達すると非常調速機の偏心輪が飛び出して主塞止弁の掛金を外し、弁を閉鎖する。
- (b) 押ボタン停止装置 (Push Button for Emergency Stopping) 手動でタービンを停止せしめる場合にこの押ボタンを押せば主塞止弁の掛金が外れて弁が閉鎖し、タービンは停止する。
- (c) 油圧低下遮断装置 (Stopping Device for Oil Pressure Drop) 油ポンプの油圧が 2kg/cm^2 以下に下つた時に自動的にタービンを停止せしめる。
- (d) 電磁式遮断装置 (Magnetic Emergency Stopping Device) 発電機側に過電流が流れて主回路を遮断すると同時にタービンも停止せしめて危険を防止する装置である。即ち発電機の差動継電機が働くとタービンの遮断用マグネットが作動して主塞止弁の掛金を外しタービンを停止せしめる。
- (e) 危急回路遮断装置 (Emergency Stopping Device) 本装置はタービン側に事故があつてタービンを停止する場合同時に発電機の主回路を遮断して発電機の並列を解く装置である。
- (f) 真空破壊装置 (Vacuum Breaking Device) ター



第7図 保 安 装 置 配 置 図

Fig. 7. Arrangement of Protective Equipments

ピンが停止すると同時に復水器に大気を入れて真空を低下させるとタービンは急速に停止する。この為 Critical Speed の点を速かに通過するので振動の心配がない。本装置は油圧式で主塞止弁の掛金が外れるとパイロットバルブが開いて圧油を本装置に送りその油圧によつて真空破壊弁を開いて復水器に大気を入れる。

(g) **スラスト摩耗警報及び遮断装置 (Alarm and Stopping Device for Wear of Thrust Metal)**
スラスト軸承が或る程度以上摩耗するとタービンローダが車室に接触してロータを破損するので極めて危険である、これを防止する為スラスト軸承が 0.75mm 摩耗すると警報を発し、1.5mm 摩耗すると自動的にタービンを停止する装置を備えている。本装置は電気式でスラスト軸承が摩耗してロータが移動するとカーボンブラッシュが回転銅板に接触してタービンの遮断用マグネットを作動せしめる。

(h) **真空低下警報及び遮断装置 (Vacuum Guard)**
復水器の真空が異常低下するとタービンの効率が低下してタービンへ入る蒸気量が急に増加する為プライミング等を起す危険があるので真空が或る程度低下したら直ちにタービンを停止する事が望ましい。本装置は水銀スイッチ式で真空が 600mmHg になると警報を

発し500mmHgになると電氣的にタービンを停止する。

(i) **油噴射式試験装置 (Oil Jet Type Emergency Speed Testing Device)**

本装置は非常调速機試験用として用いるもので非常调速機の偏心輪中に油を噴射せしめて低回転に於いても作動せしめる事が出来、一々過速して試験する必要がないようにしたものである。

以上のようにこれまでのタービンに比較して完備した保安装置を設けているので不慮の事故に対して安全に保護する事が出来る。

〔VII〕 復 水 装 置

復水器の仕様は第2表に示す通りである。復水器の胴体はタービンの排気口に直結され、下部はバネ支えによつて復水器の重量を支えている。冷却水は二折流で表面折触によつて蒸気を凝縮している。水室は中央より二室に別れて軽負荷の場合に一方のみを使用し他は掃除が出来るようになってい。冷却管はアルブラックを用い片側エキスパンダ、片側はフェルール及びY式パッキンを用いた。冷却管の配列は千鳥型で蒸気は抵抗損失を最も少くして冷却管の各部に滲透し最も効率良く復水出来るようになってい。

第 2 表 復水器仕様
Table 2. Specification of Condenser

項 目	仕 様
型 式	触面復式二折流型
冷 却 面 積	13,000 sqft (1,210 m ²)
冷 却 蒸 気 量	85,700 lb/hr (38,900 kg/hr)・但し 8,000 kw 時に於て
冷 却 水 温	最大 110°F(43.2°C) 平均 95°F(38°C)
冷 却 水 量	835,000 gal/hr (3,800 m ³ /hr)
復水器真空	27" (685 mmHg)・
冷 却 管	7/8" BWG#18 (22φ×1.2)
冷却管取付方法	冷却水入口側エキスパンダ, 出口側フ エルール
冷却水損失水頭	11.6 ft (3.55 m)

〔VIII〕 復水器冷却水冷却装置

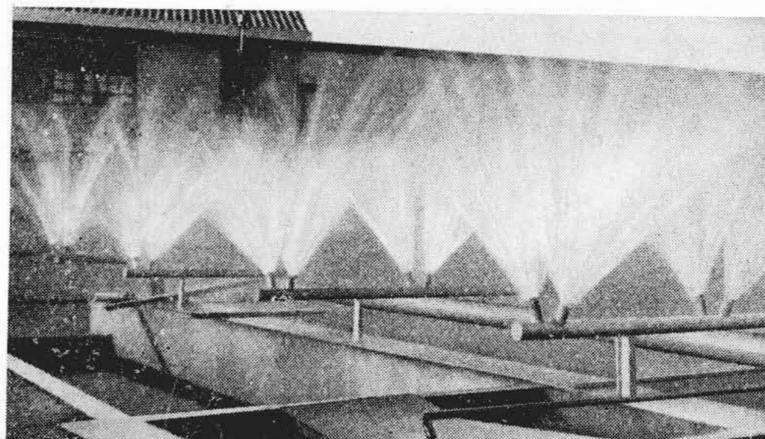
前にも述べたように復水器を冷却する為にスプレーポ
ンドを設けたが、スプレーポンドは大気温度最高 43.2
°C 冷却水温最高 43.2°C 湿度 80% で 6°C の温度降下
を生ずるよう計画した。噴口は日立独特の型を用い、噴
口前後の圧力差約 9 m, スプレーの高さは約 3 m で十分
微粒化することが実験によつて確められている。ポンド
の大きさは、280 ft×250 ft 深さ 5 ft 保有水量 9,700T
である。第 8 図は工場に於いて実験中のスプレーである。

〔IX〕 保 温 及 び 外 装

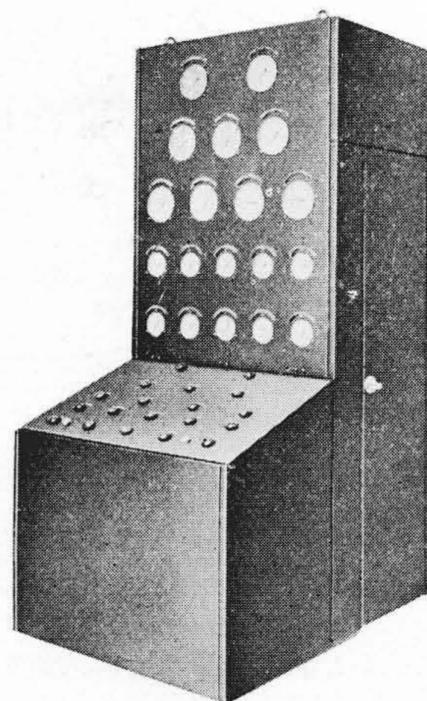
高温部分は高級保温材を用いて十分に保温しその上を
美装鋼板で外装した。出来上りは第 2 図に示す通り極め
てスマートな外観でこれに緑色塗料を施し美しい仕上り
になつている。計器類は全部一つのパネル板中に納めて
運転員の便をはかると共に体裁の良い外観をなしてい
る。第 9 図に計器盤を示す。

〔X〕 性 能

タービンは完成後工場に於いて無負荷試験を行つた
が、振動は極めて少く、軸承温度を低く、调速機及び各
種保安装置の動作も良好で予期以上の成績を納めた。



第 8 図 実験中の冷却装置
Fig. 8. Experiments of Spray



第 9 図 計 器 盤
Fig. 9. Meter Board

〔XI〕 結 言

以上述べた如く本タービンは輸出品として色々異つた
条件の下に設計されたにも拘らず多年の経験と進歩せる
技術によつてこれらの困難を克服して短期間の中に完成
されたもので日立のタービンの優秀性を遺憾なく発揮し
た。同時に今後の輸出品に対して、一層の経験と自信を
もたらした。現在現地に於て据付中であるが、完成後は
優秀な成績を示して印度の文化に貢献すると思う。

