

東京電力株式会社 納

品川発電所用 125,000 kW 再熱タービン

125,000 kW Reheat Turbine Supplied to the Shinagawa Thermal
Power Plant, Tokyo Electric Power Co., Inc.

久保田 富則*

Tominori Kubota

内 容 梗 概

東京電力株式会社、品川発電所用 125,000 kW 再熱タービンが完成し、本年春きわめて好成績にて工場試験を完了した。このタービンはさきに日立製作所で製作された新東京発電所その他の 75,000 kW 再熱タービンよりも、使用蒸気条件はさらに一段高く、圧力 127 kg/cm²g, 温度 538°C, 再熱温度 538°C の再熱タービンである。

ここに本タービンの性能および構造の概要について紹介する。

1. 緒 言

近年、電力の急激な需要に応じてタービン単機容量は次第に大形化しつつあり、わが国においてもすでに 200,000 kW, あるいは 250,000 kW 程度のものが各所で計画されている。このように単機容量が大形化できるようになったのは高温用耐熱諸材料の進歩による初蒸気条件もその一因であるが、一つには再熱サイクルとそれに伴う各種の制御機構の進歩によって、再熱タービンの信頼度が著しく高められたことによるものと考えられる。

本文は以上の観点から、品川発電所用 125,000 kW 再熱タービンの概要を紹介するものである。本機はその構造、性能において最近の日立再熱タービンを代表するものであり、その製作にあたっては大容量高温高圧再熱タービンの設計、製作に関する諸問題を基礎的研究より詳細に検討が進められ、本タービン設計製作の過程においてこれらの問題は完全に解決されている。現在さらに大容量の再熱タービンの設計製作が進められているが、本機の製作経験に負うところがきわめて大きい。

第1図はタービン組立中の状況であり、第2図は工場試験中の本機の外観である。

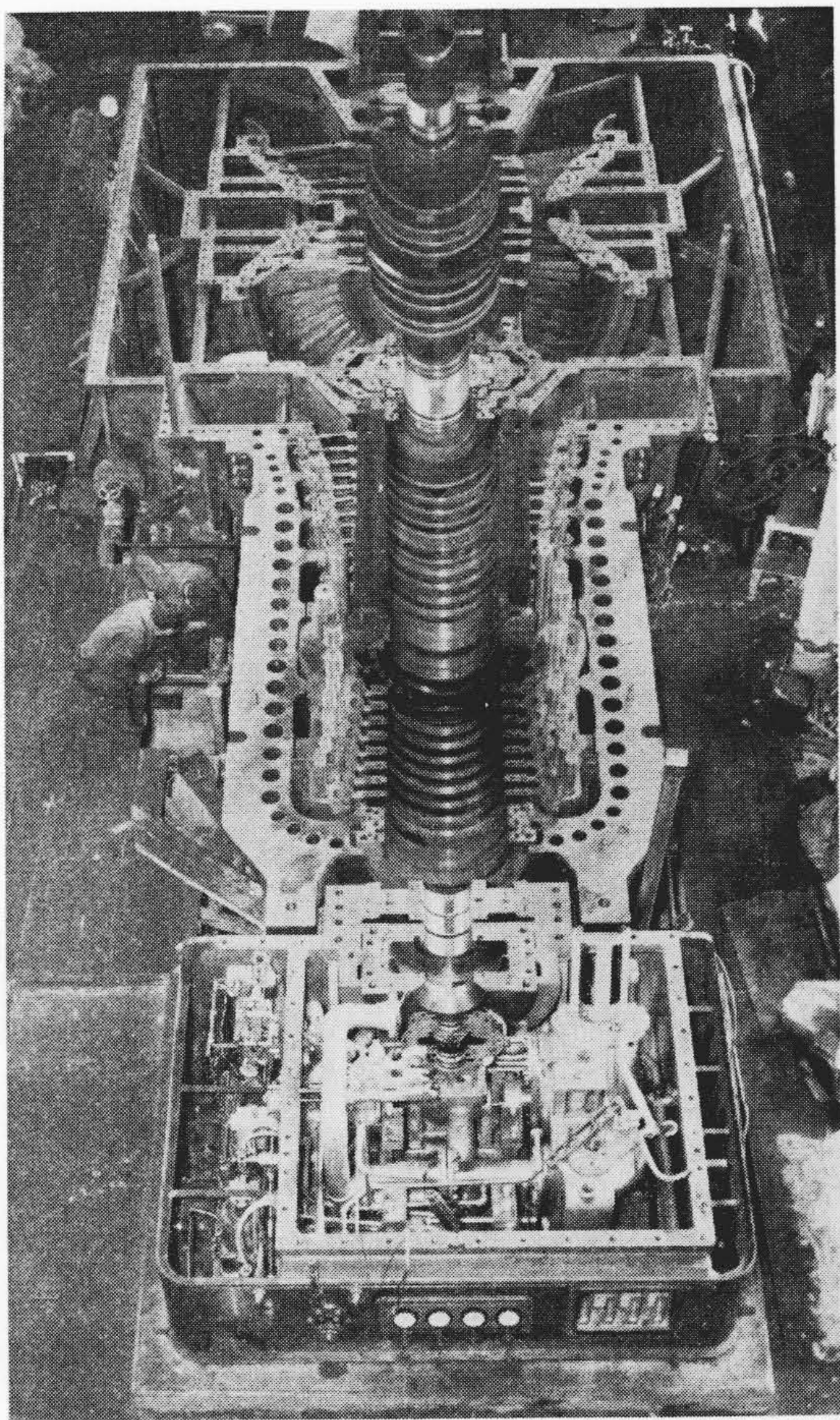
2. タービンの性能

2.1 仕 様

本タービンの仕様は次のとおりである。

形 式	日立衝動再熱タービン 2 汽筒複流排気形
定格出力	125,000 kW
回 転 数	3,000 rpm
蒸気圧力	127 kg/cm ² g
蒸気温度	538°C
再熱温度	538°C

* 日立製作所日立工場

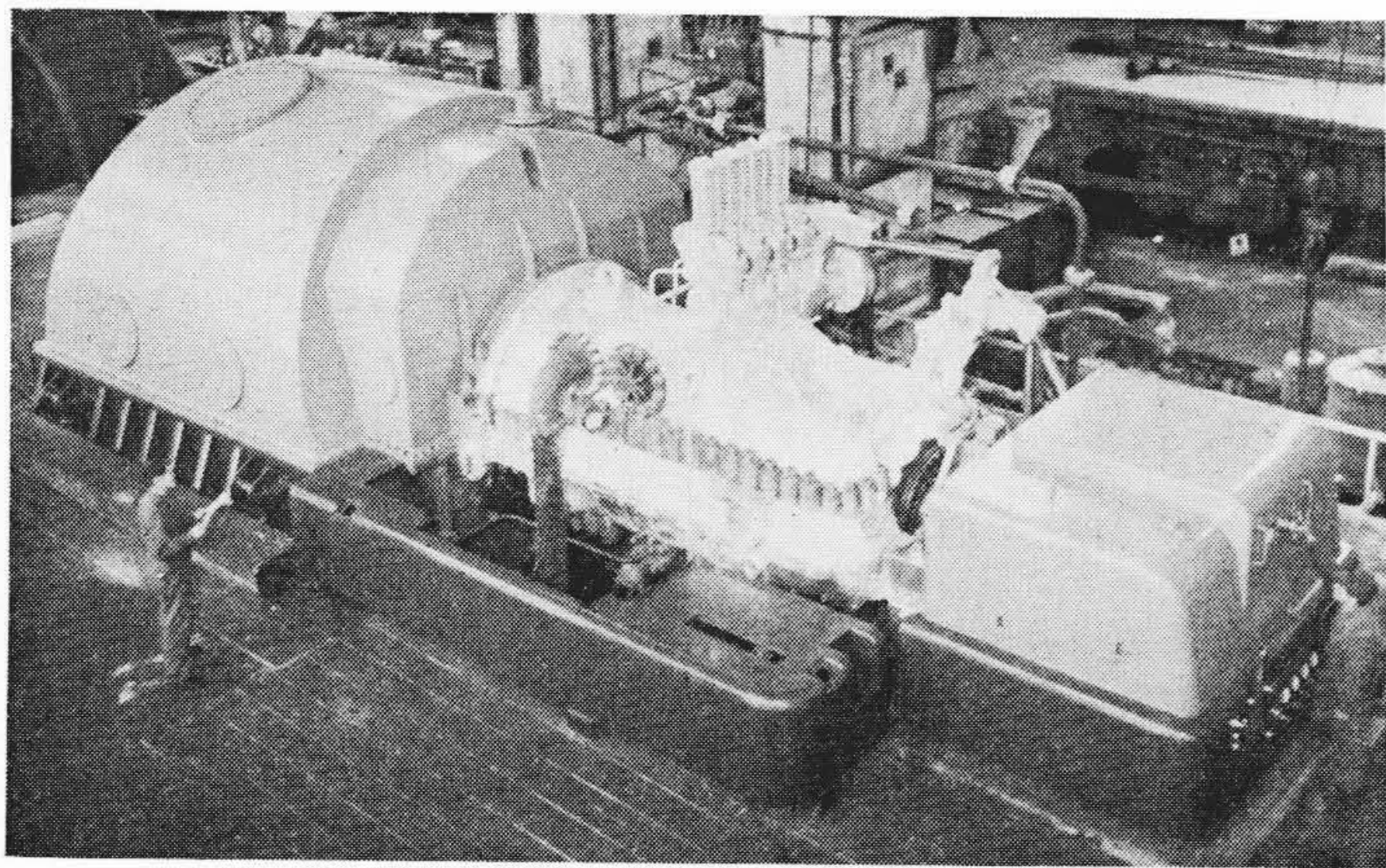


第1図 工場組立中の 125,000 kW タービン

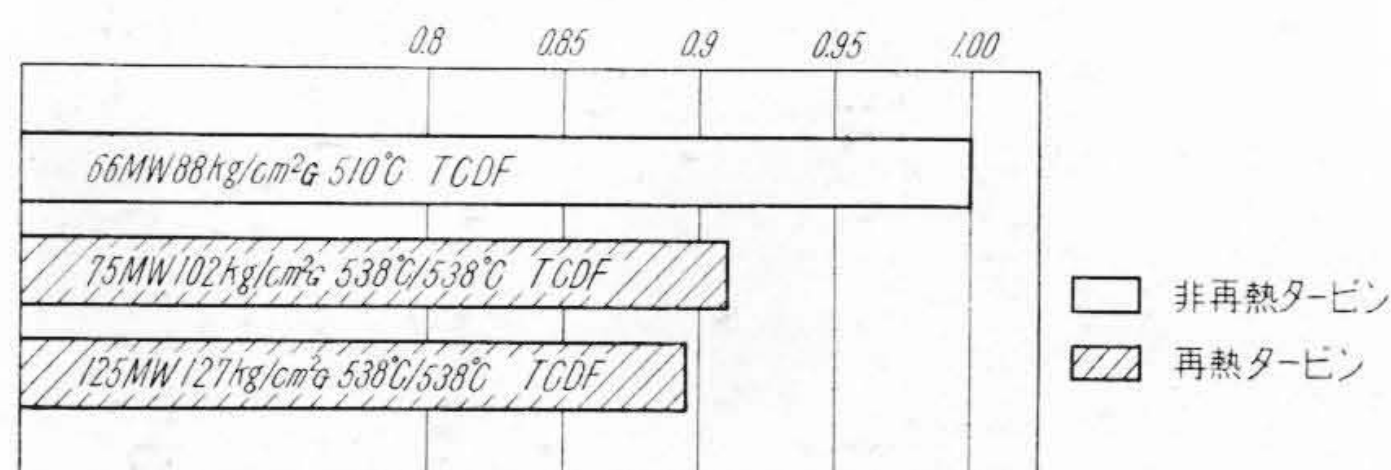
復水器真空	722 mmHg
抽汽段数	6 段

2.2 再熱サイクルとタービン効率

最近の大容量タービン、特に出力 75,000 kW 以上のものはほとんどすべてが再熱サイクルを採用した再熱ター



第2図 工場試験中の125,000 kWタービン



第3図 タービン熱消費量の比較

ビンである。一般に再熱タービンを採用することによるタービン効率の向上は4.5~5%といわれており、さらには再熱を行うことによりタービン低圧段落の蒸気湿度を著しく減じうるので翼の浸食に対しきわめて安全にすることができ、かつ段落効率を改善しうる利点を有している。

第3図に約4年前新東京発電所に納められた66,000 kW 復水タービンおよび約2年前、同じ新東京発電所に納められた75,000 kW 再熱タービンと今回製作された125,000 kW 再熱タービンの熱消費量の減少の状況を示す。本図からわかることはわずかの間に熱消費量を約11%も減少させることができたということである。このことによって、蒸気条件の高温高圧化と再熱サイクルの採用がタービン効率の向上にいかにも有効であるかということがいえる。このように再熱サイクルが理論的に有利であることは以前からわかっていたのであるが、過去長い間、これの実用化をはばんできたものは、一つにはその付加的費用と運転効率の釣り合いであり、一つには運転保守上の信頼度の問題であったが、前者は高温用耐熱諸材料の進歩による、高温高圧と単機容量の増大とによる熱消費量の著しい低減により解決し、後者は先行非常調速機を備えた、特殊の制限装置の採用により運転保守上の不安をまったく解消するに至った。

2.3 タービン内部効率の上昇

タービンの内部効率を向上させるために次のような考慮が払われている。

(a) タービンは高圧部再熱前10段、再熱後12段、低圧部は5段の複流とし、計27段とし、再熱部圧力はサイクル効率を考慮し、特に部分負荷においても効率低下を極力少なくするよう最適の値とした。

(b) 再熱タービンは一般に基底負荷として運転されることが多いので、調整段には効率の高いラトーダを用い、同時に全周噴射に近い設計とし蒸気不通過部の風損を少なくしている。

(c) 再熱前および再熱後の段落を一つの高圧車室内に収め、車室グランドよりの漏洩を減少せしめるとともに、これを有効に利用しうる構造とした。

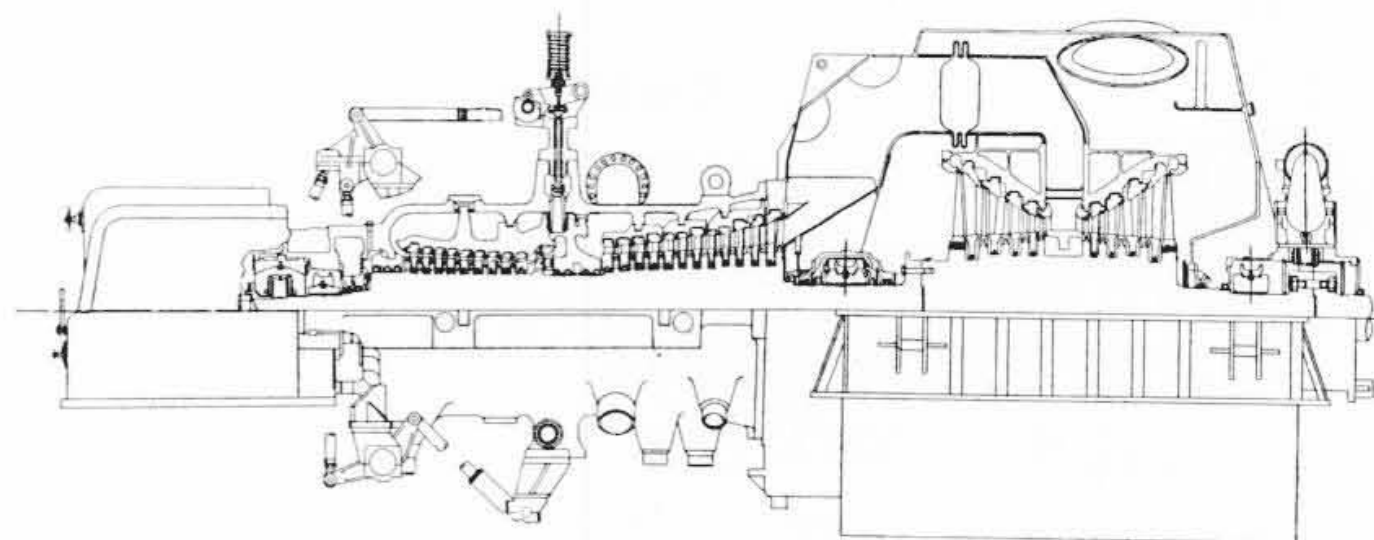
(d) 翼の上部には、車室あるいはダイヤフラムからラジアルフィン設け、シュラウドとの間隙を僅少として蒸気の漏洩を防いでいる。この構造は車室とロータとの伸び差に対してきわめて安全である。

このほか、比較的翼長の長い段落には三次元流を考慮したボルテックス形を取り入れたこと、あるいはタービングランドにはラビリンスパッキンとウォーターシールパッキンとを併用して蒸気の外部漏洩を皆無ならしめていることなど、一般の復水タービンに用いられている最新の技術はすべてとり入れられている。

以上のような設計によって、本タービンの内部効率は再熱前80.8%、再熱後91.1%以上となっている。

3. タービン構造および材料

タービンの構造は第4図に示すように高、低圧の2車室からなり、高、低圧車室の蒸気連絡管は低圧車室内に組込式とし、またロータは高、低圧リジッドに結合された3軸受方式を採用しているため、タービン全長は著しく短縮されている。高圧車室は完全な二重車室構造であり、主蒸気は車室中央部の上下部より流入して、まずタ



第4図 再熱タービン断面図

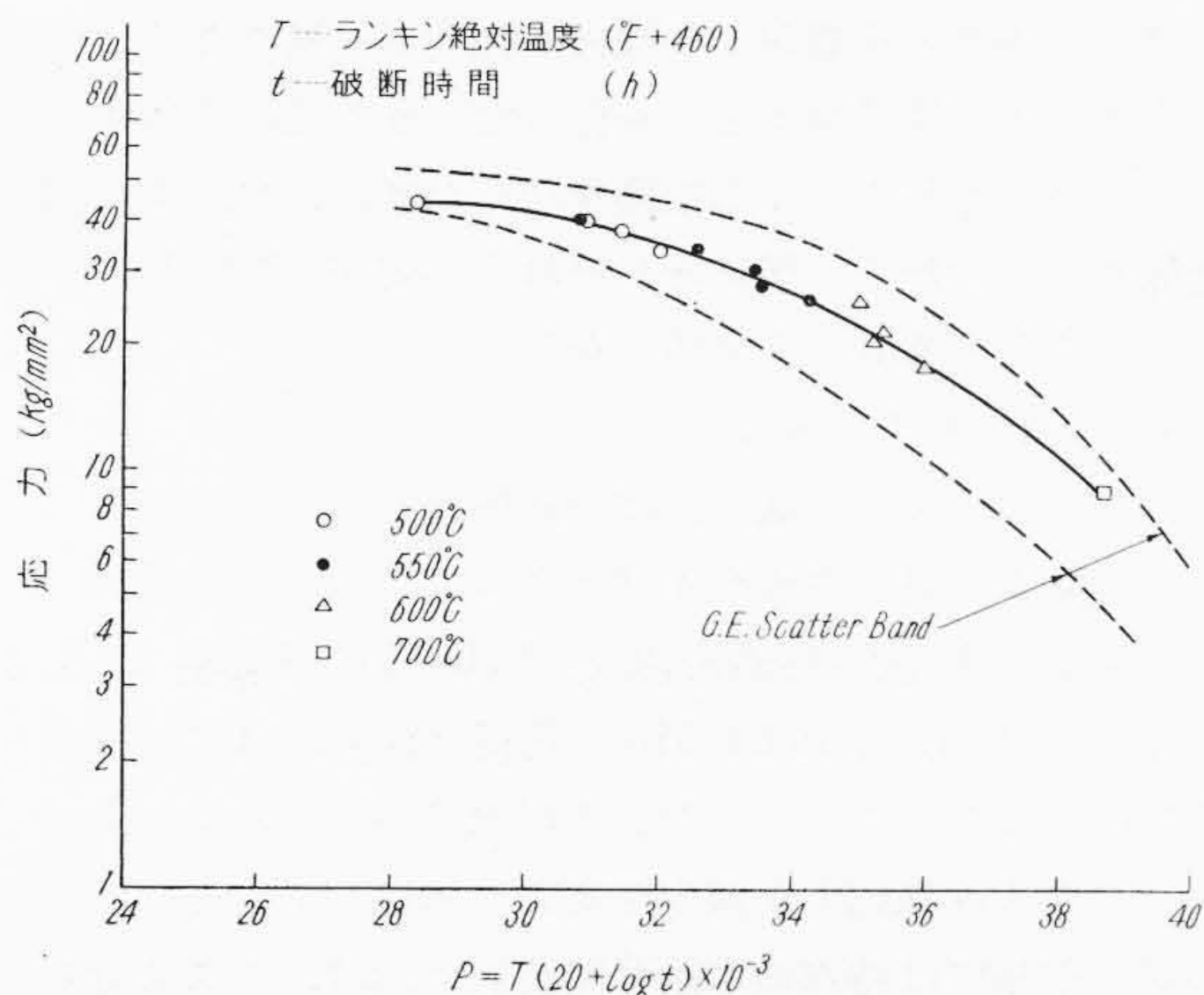
ービンの前側に流れ車室の最前端に設けられた2本のパイプより外部にでて、ボイラの再熱器に導かれる。再熱された蒸気はふたたび車室中央部より流入し、前とは逆に車室後側に向かって流れる。このように高圧タービンに対向流構造を採用したことによりロータに作用する推力を減じうるばかりでなく、高温蒸気にさらされる部分を車室中央部に集めて車室に作用する熱応力を減じ、同時に熱をきらう軸受部および水封パッキン部と高温蒸気部とを遠ざけている。

低圧車室は鋼板溶接構造で、再熱タービンでは特に低負荷において低圧部温度が高くなる特殊性を有しているため組込式連絡管には膨脹接手を設けて車室の熱ひずみを防いでいる。

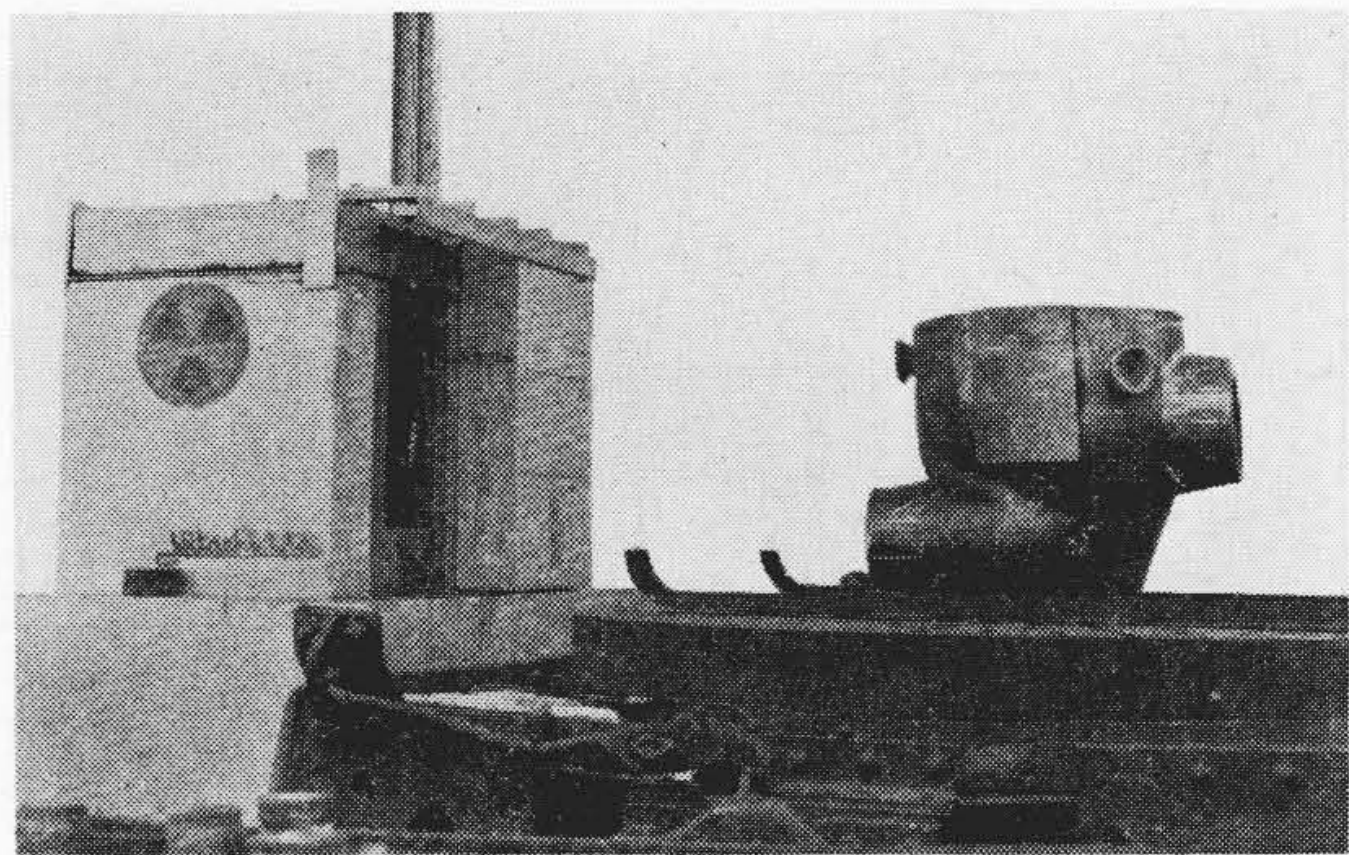
以下、主要部について構造ならびに材料に関して説明する。

3.1 タービン車室

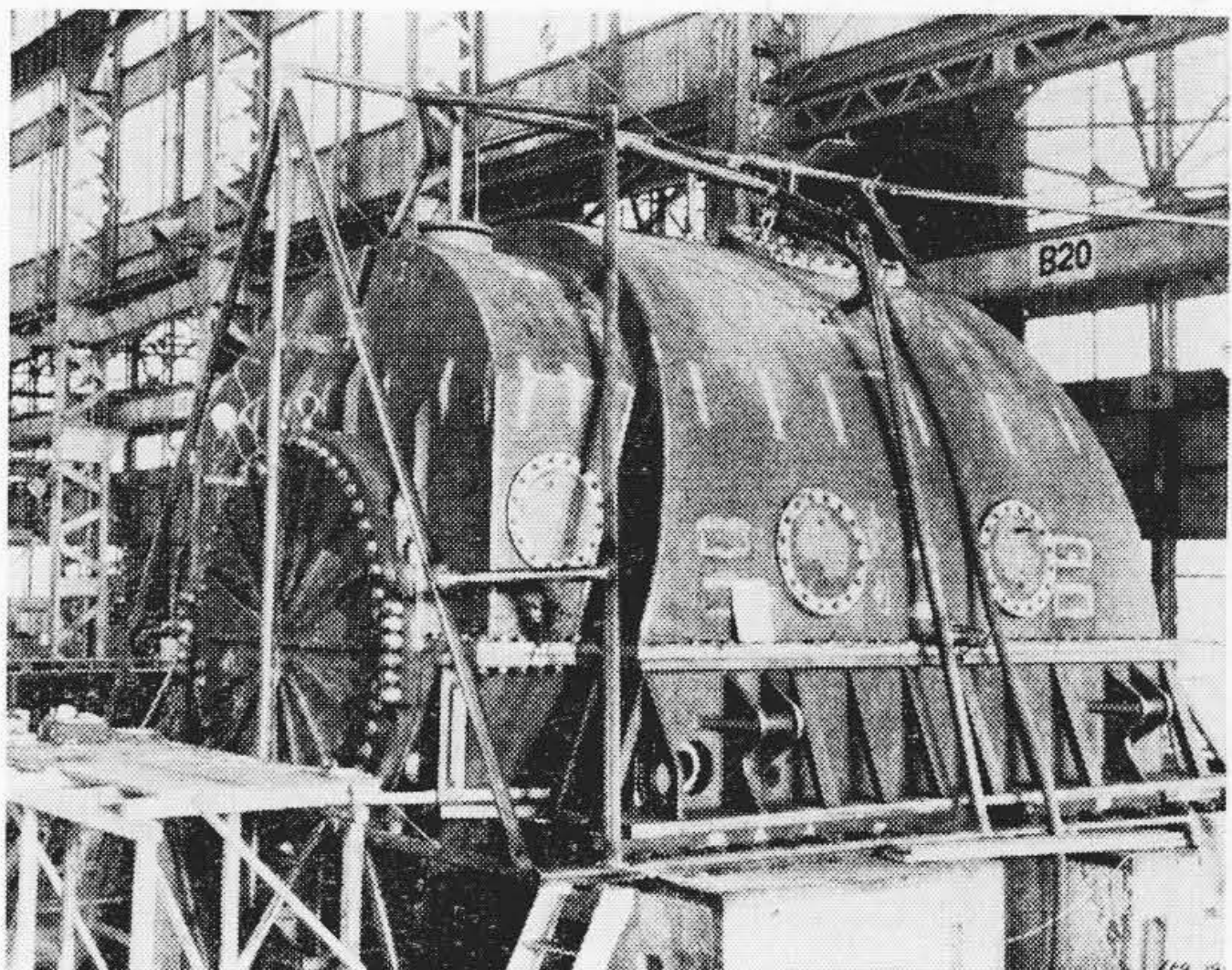
車室は高圧部および低圧部に分れ、高圧車室はさらに外部車室と内部車室とに分れている。高圧外部車室は鋳造を容易にし、かつ、熱応力を減ずるため肉厚均等の円筒形とし、また高圧内部車室の特に圧力の高いところは完全な二重車室とし、いずれも水平フランジを厚くして変形などのないような設計にしてある。なお高圧内部車室の第1段ノズル部水平面には切欠きを設け、熱応力を減少するように考慮している。高圧車室の材料はクリープ破断強度ならびに黒鉛化の点から1Cr1Mo $\frac{1}{4}$ V鋳鋼を採用した。第5図は1Cr1Mo $\frac{1}{4}$ V鋳鋼の500～650℃のクリープ破断強度を示す。このクリープ破断強度はLarson-Millerの方法で整理したいわゆるMaster Rupture Curveであり、従来のKWI法、またはDVM法の短時間試験に対し10,000時間、100,000時間の長時間試験であり、日立製作所では車室、ロータなど主要材料の高温強度はすべてこの方法で試験している。第5図に



第5図 1Cr1Mo $\frac{1}{4}$ V鋳鋼のクリープ破断強度曲線



第6図 主塞止弁 γ 線検査照射中

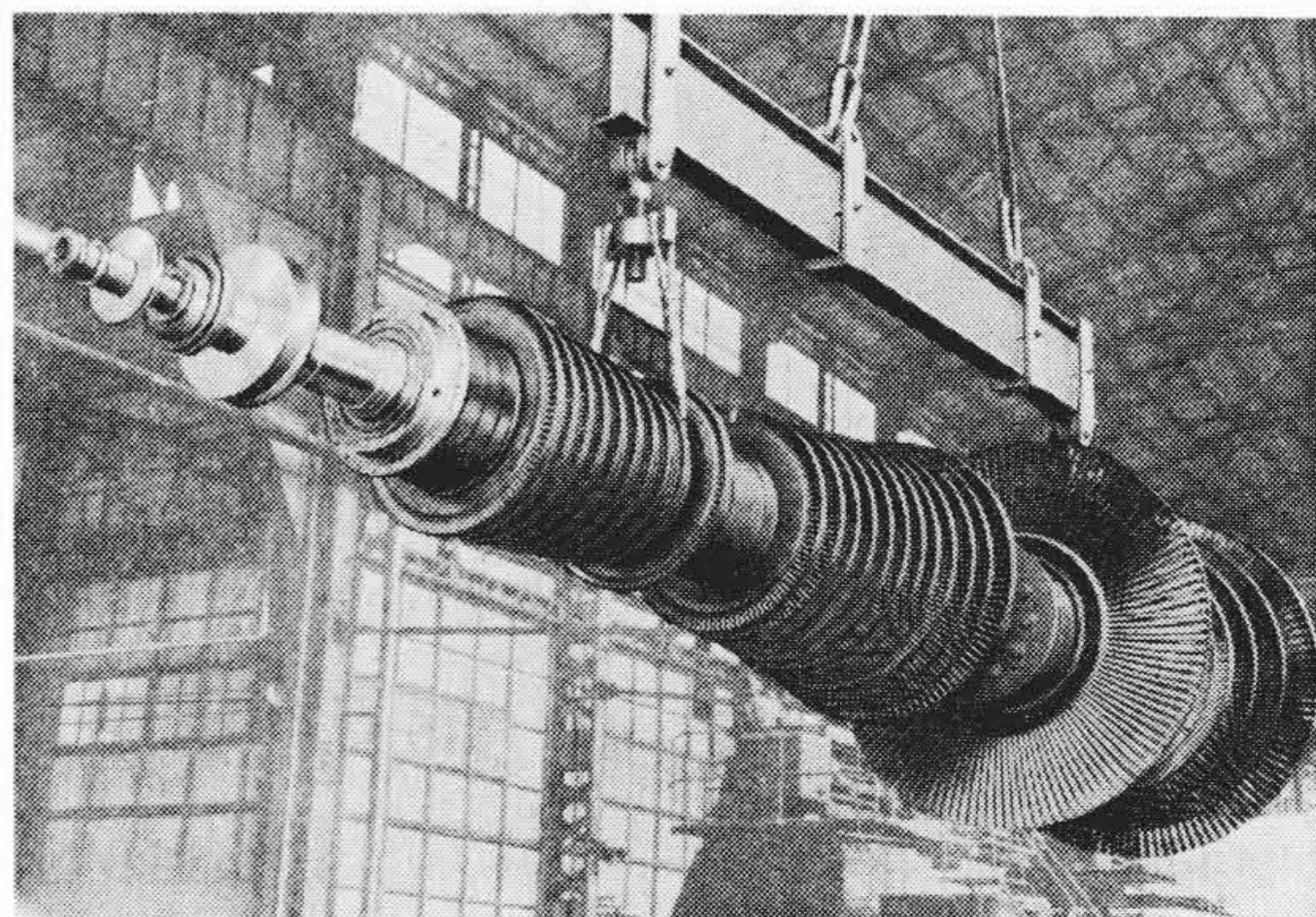
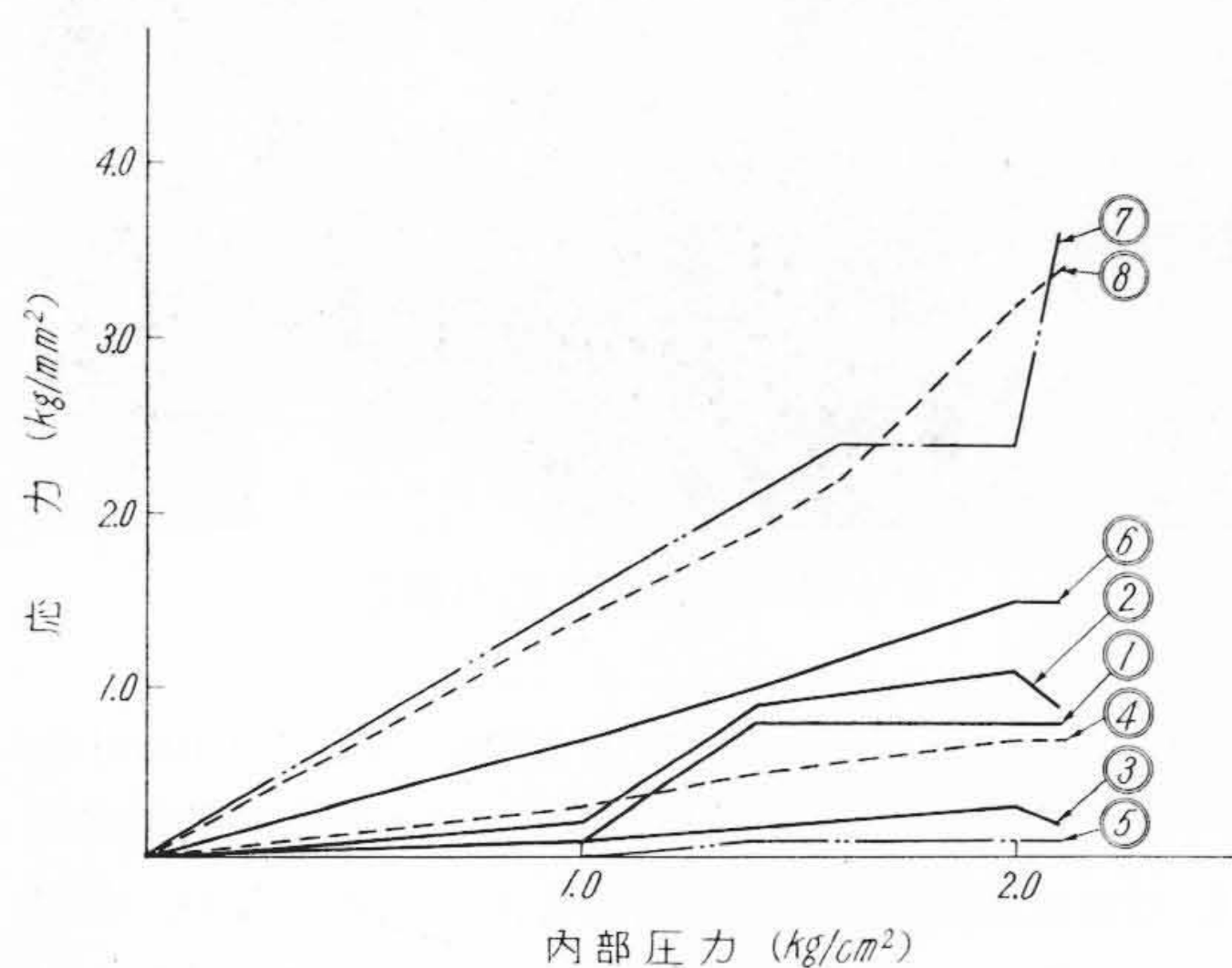
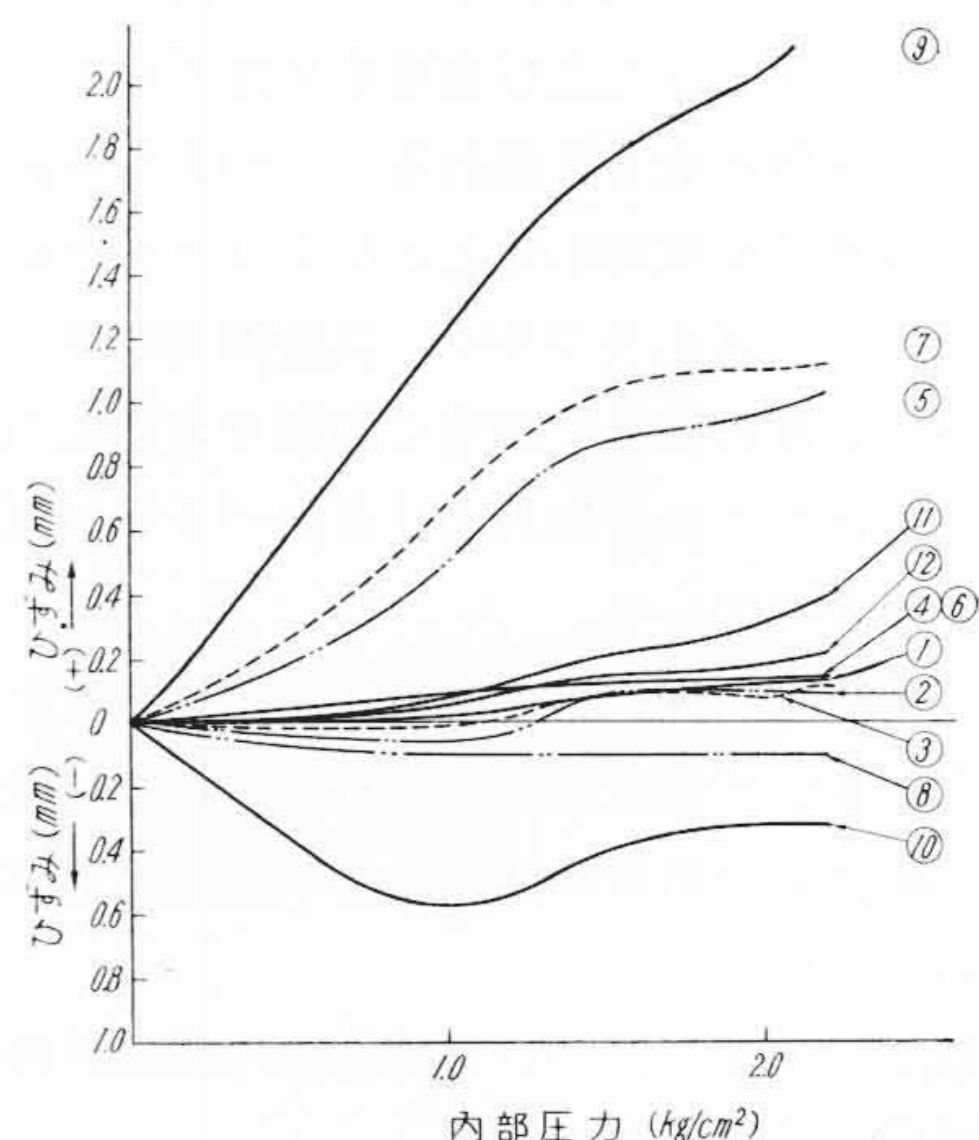
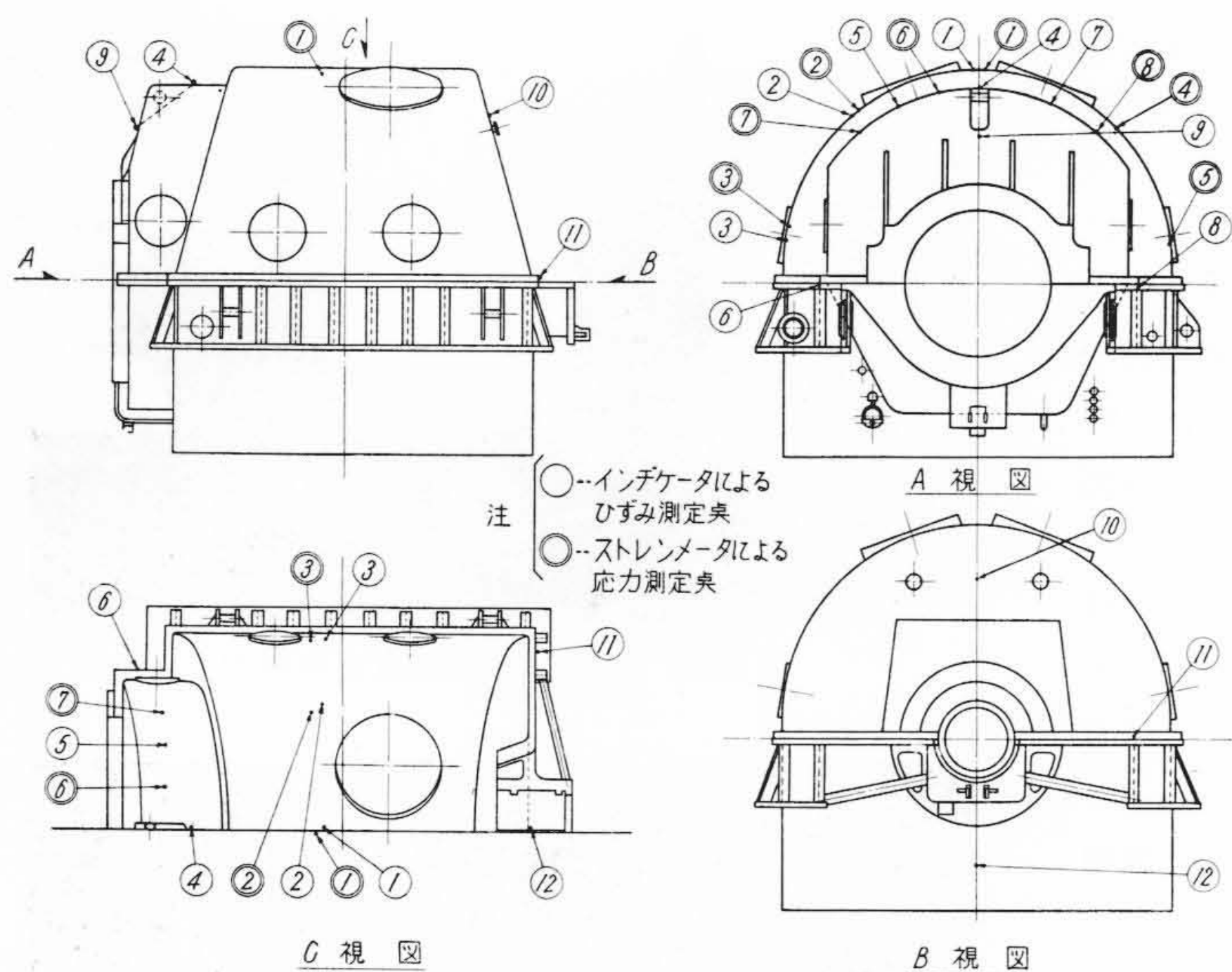


第7図 低圧車室応力測定

参考値としてGE 1Cr1Mo $\frac{1}{4}$ V鋳鋼のScatter Bandをそう入したが日立1Cr1Mo $\frac{1}{4}$ V鋳鋼に対する試験値はGEのほぼ中央を示していることがわかる。なお、溶接時の溶着鋼および接手の強度についても同様の試験を行い、設計強度に対しいずれも安全であることを確認している。

車室は鋳造後X ray, Magna-Flux, ^{60}Co γ 線検査など、各種の非破壊検査を行って内部の欠陥を完全に除去している。第6図は同じ材料で作った主塞止弁の γ 線検査照射中を示す。

低圧車室は複流排汽形で規格鋼板による溶接構造とし、ダイヤフラムそう入部には蒸気中の水滴を分離除去する装置を設け、かつ排汽排失を極力少なくするよう適当な排汽案内を設けている。また、溶接構造の強度については慎重を期し、内圧によるひずみおよび応力測定を行い、十分耐えうるものであることを確認した。第7図は低圧車室応力測定状況を示し、第8～10図はひずみおよび応力の測定結果を示す。この結果から低圧車室の内圧2 kg/cm 2 による応力は最大3.3 kg/mm 2 であることがわかる。前部軸受は鉄板製で、ラッキング・プレートの中に包まれ、全体の外観を一そうコンパクトにしている。推



力軸受はテーパランド形別体構造となし、推力負荷に対する受圧面積および給油量を十分とれるようにした。なお推力軸受の球面仕上については特に慎重に行い、軸方向の移動量を確認して組立てを行った。

3.2 翼およびロータ

タービン翼はすべて流体力学的に最も効率のよいプロファイルを選定しており、特に翼長の長い翼に対しては三次元流れを考慮したボルテックス翼形を採用している。調整段翼は蒸気の衝動力が大きいので特に翼幅を広くしダブルシュラウド構造とした。材質は13Cr不銹鋼を使用している。最終段落には23インチ翼を使用し、翼の背にステライト板を貼付して水滴による浸食を防止している。

第11図はタービンロータの外観である。ロータは高、低圧ともに一体鍛造削り出し形で高圧ロータは高温強度

の高い、Cr Mo V 鋼、低圧ロータはNi Mo 鋼製とし、いずれも内外部の組織および機械的強度が一樣になるように空冷により焼準焼もどしを行った。また高温蒸気中において軸のたわみによる振動を防ぐために、ロータは鍛造後および荒仕上げ後にそれぞれ高温安定試験を行い、運転時におけるロータの曲りを防いでいる。

3.3 噴口および隔板

高圧部は熔接式、低圧部は鋳込構造としプロファイルはすべて効率の良いネガティブノズルとした。噴口翼材は初段および11段（再熱後初段）13Cr-Cb不銹鋼、2, 3, 12および13段は15Cr-Mo不銹鋼でほかは13Cr不銹鋼熔接を使用している。なお1段噴口出口部にヒートグループを設け熱応力を減少するよう考慮している。低圧段落の隔板には特殊の水滴分離装置を設け、ここで分離せられた水滴は直接復水器へ導かれる。高、低圧の隔板

の端面には BTH Rub Plug を設け、解体時に車軸との移動量を検査するように考慮している。

3.4 調速ならびに保安装置

本タービンに使用せられた制御機構は、最も作動確実で、かつ実績を有するもので主調速機のほかに、先行非常調速機が同じロータ軸上に設けられ、主調速機が回転数あるいは負荷に応じて加減弁の開度を制御するように先行非常調速機は定格回転速度よりやや高い回転速度において中間阻止弁の開度、すなわち再熱器よりの蒸気流れを制御するものである。また中間阻止弁が全閉した場合、再熱器内にとじこめられた蒸気がラビリンスを通過して中圧タービンから低圧タービンを膨脹してロータを過速させることを防ぐために、残留蒸気を直接復水器へ導くブローダウン弁が設けられている。

3.5 保 安 装 置

以下主要機器の機能および構造について述べる。

(a) 再熱塞止弁

再熱塞止弁は油圧作動のスイング形弁で中間阻止弁と直列に左、右2個設けられ、全開もしくは全閉の位置をとる。この弁は原理的には主塞止弁と同様で、応急遮断装置の動作により、油圧を介して全閉し、再熱蒸気が中圧タービン以降に流入しないように急速に遮断する。

この弁にはオリフィスをもったバイパスが設けられており、残留蒸気を徐々に低圧部に流して圧力差が 1.80 kg/cm^2 以下にならないとふたたび開きえない構造となっている。弁の出口側はベンチュリー形として圧力損失の軽減を計っており、弁全開中は主塞止弁と同様に弁棒とブッシュの段が密着して、蒸気の外部漏洩を完全に防止しうる構造となっている。

(b) 先行非常調速機および中間阻止弁

先行非常調速機は主調速機と同様回転パイロット弁形で、タービン回転数が 101% に達するまでは不作動状態にあり、したがって中間阻止弁は全開の位置にあるが、101% をこすと、油圧ならびにレバー機構を介して中間阻止弁のパイロット弁を動かし、これをとじ始め 105% に達すると全閉する。先行非常調速機と中間阻止弁の目的は、このように発電機負荷に喪失した場合、再熱蒸気流量を制御することにある。

この動作と、主調速機による加減弁の急速な閉止動作によって、タービン回転数が非常調速機の作動回転数まで上昇することを防いでいる。

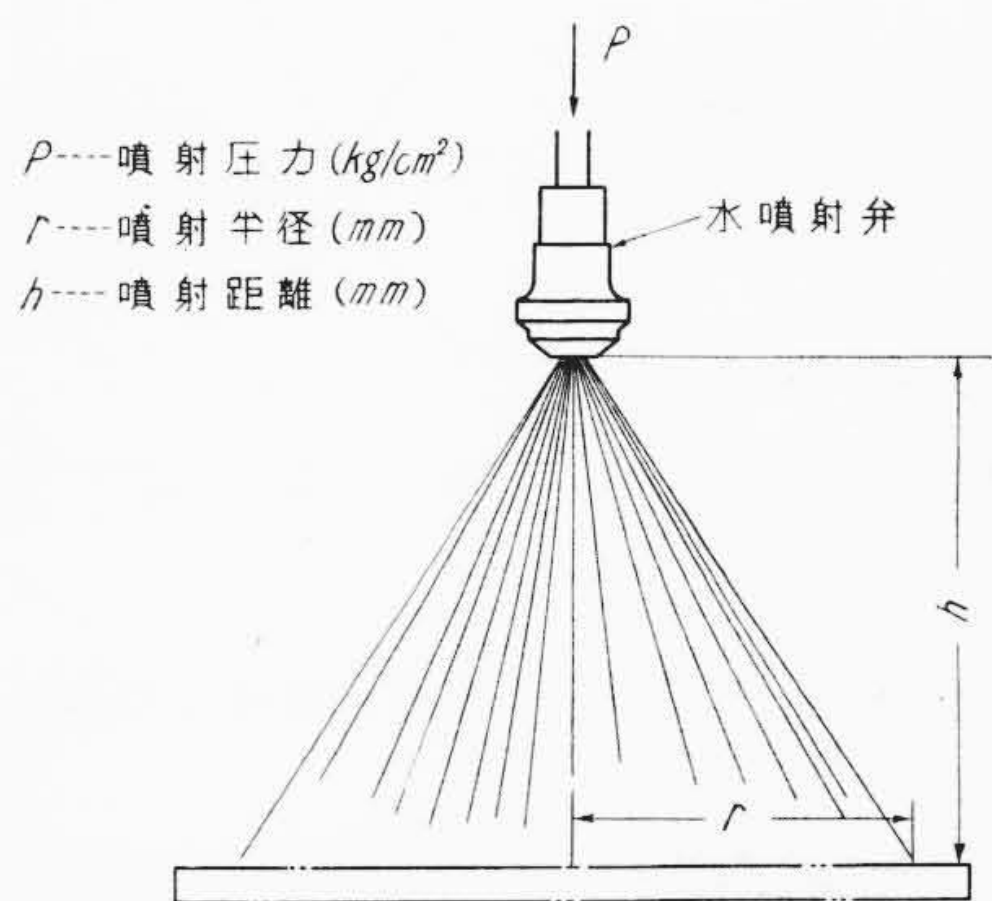
中間阻止弁は中圧車室にできるだけ近く、前記再熱塞止弁の直後に左右2個設けられている。この弁は単弁圧バランス形で、ストレーナが設けられており、再熱器およびその配管中の異物が弁のしゅう動部あるいはタービンに浸入することを防いでいる。

(c) 回転数自動復帰装置

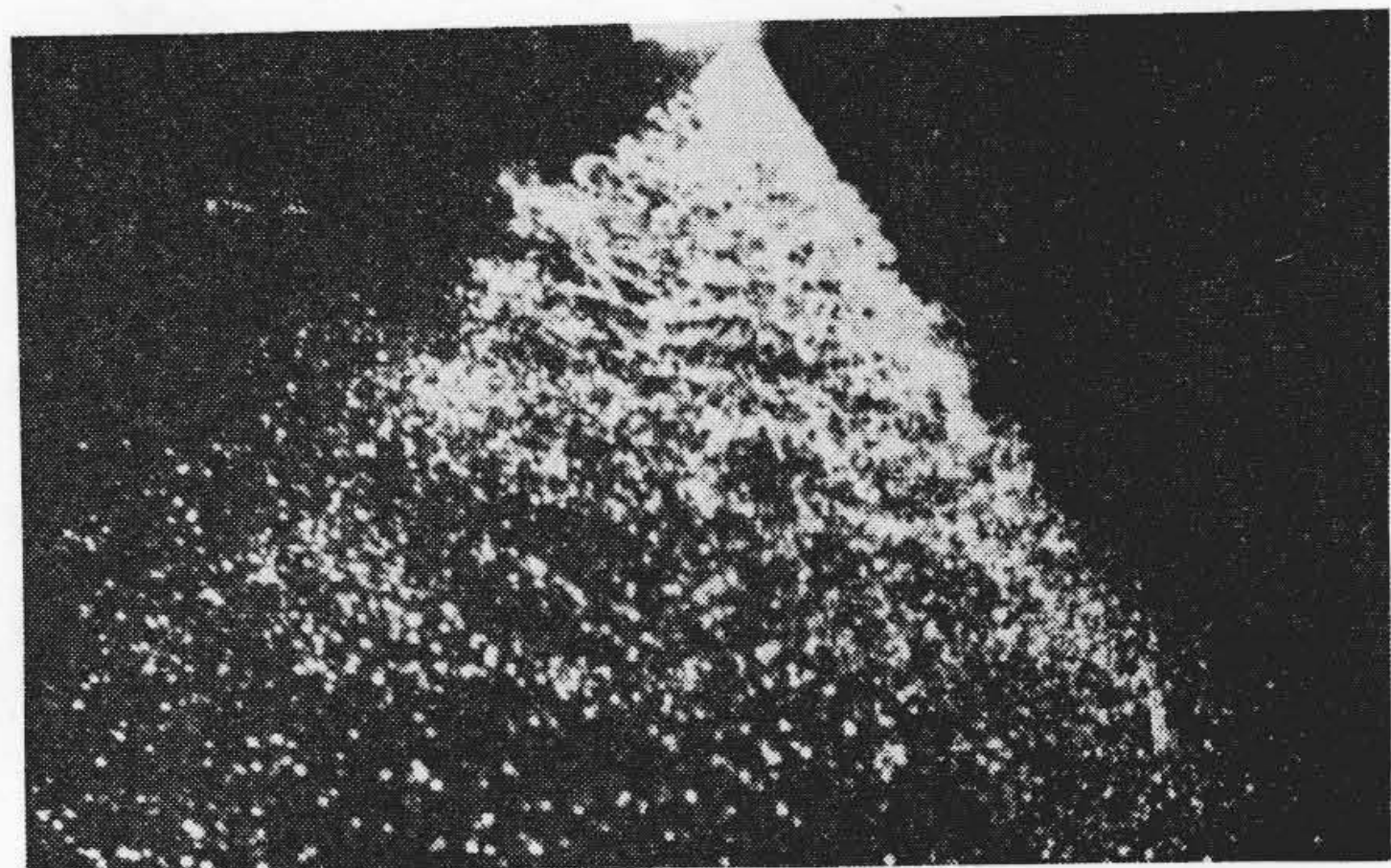
再熱タービンが最大負荷運転中、なんらかの原因で急に負荷を失うと調速機の特長として、その同期装置を作動させない限りタービンは定格速度よりも高い回転数で整定し、その結果中間阻止弁はとじたままになっており、タービンの高圧部を流れた蒸気は再熱器の安全弁を通過して大気に放出される。回転数自動復帰装置はタービン回転数が 103~104% に上昇したときには自動的にその接点をとじ回路に設けられたタイマーの働きにより約 10 秒間で自動的に同期装置を無負荷の位置まで復帰させる装置である。復帰回転数はタイマーの作動時間を調整することにより任意に選定することができる。本装置を設けたために不必要に蒸気を大気に放出することをさけ、同時にタービンの並列再投入を容易ならしめることが可能となった。

(d) 排気室過熱防止用冷却水噴射装置

本装置はタービン起動時、あるいは無負荷運転時において排気室の温度が異常に上昇し、軸心の狂いなど悪影響を与えるのを防ぐものである。本装置はダイヤモンド形冷却水弁、セレクト弁、加減弁および中間阻止弁に取り付けられたそれぞれの三方排気弁および排

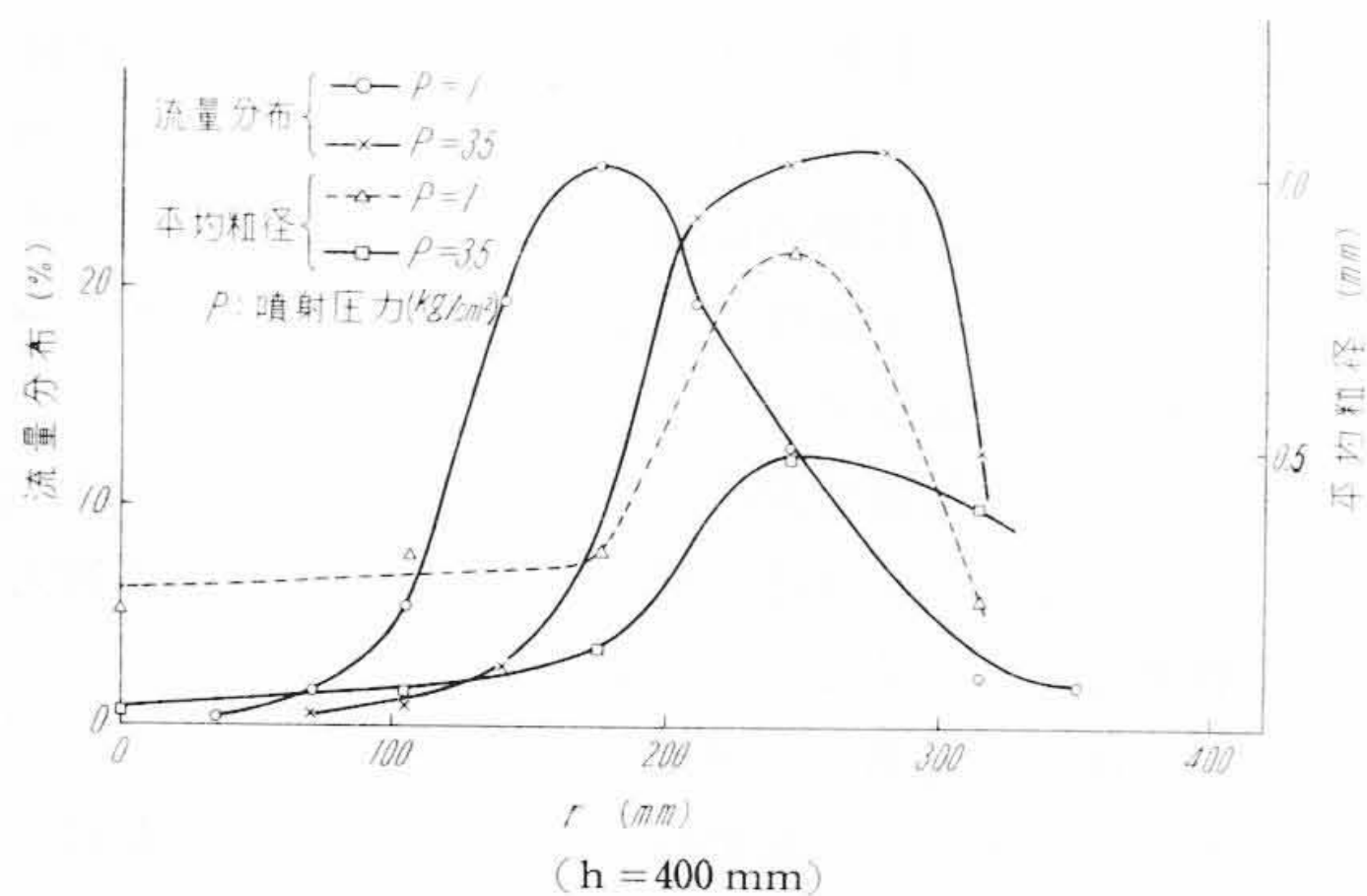


第 12 図 水噴射弁噴射特性試験方法

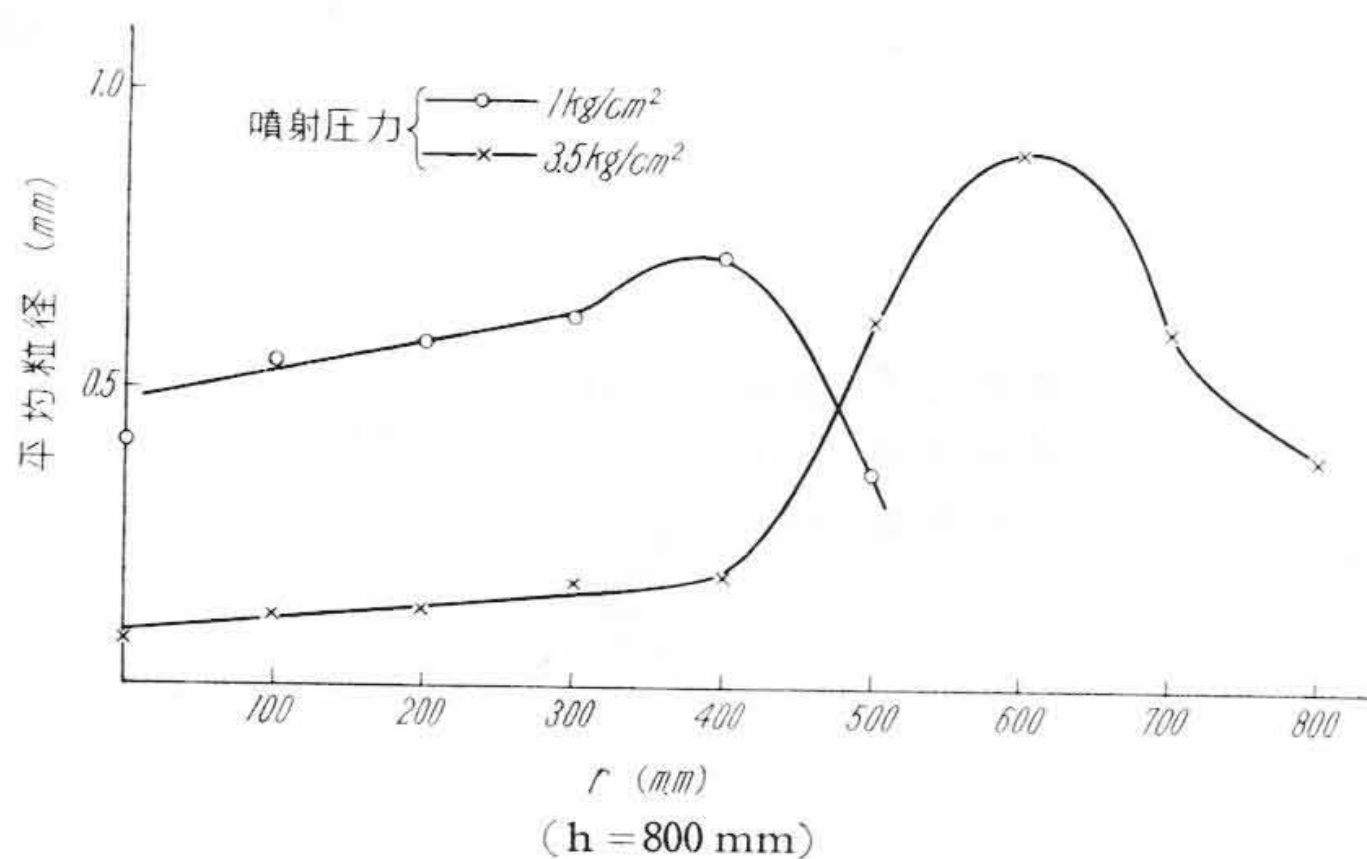


($P=3.5 \text{ kg/cm}^2$)
第 13 図 水噴射弁噴霧状況

気室に設けられた8個のスプレーノズルよりなる。いま加減弁開度が5%負荷以下となり、かつ中間阻止弁が開いている状態にあるときは空気圧の作用により冷却水弁を自動的に開き、排汽室に復水ポンプ出口の復水を噴射せしめて過熱を防止する。なお、セレクト弁により本操作は自動、手動いずれも可能なるようにな



第14図 水噴射弁 γ と流量分布および平均粒径との関係



第15図 水噴射弁 γ と平均粒径との関係

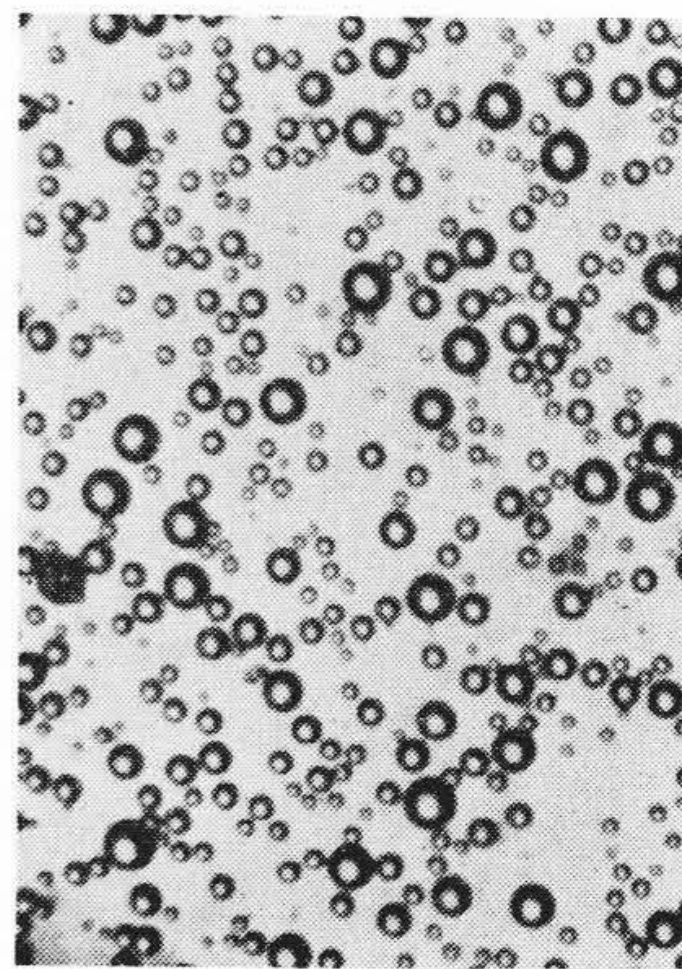
っている。水噴射弁の理想的な条件は噴霧粒子が小さく均一であり、かつ噴霧能力の変化により粒子の大きさと分布が変わらないことが望ましい。この条件を求めるため種々の実験を行い、最も理想的な条件を確保することができた。

第12～20図は噴射特性試験の結果を示す。この結果から噴射圧力が高いほど、噴霧の平均粒径は小さくなり、かつ流量分布率は高くなる。また、同じ噴射圧力でも噴射距離(h)を大きくすれば、噴霧の平均粒径の最大となる噴射半径(r)は大きくなり、その場所より、さらに噴射半径の大きい位置の平均粒径は逆になくなることからわかる。

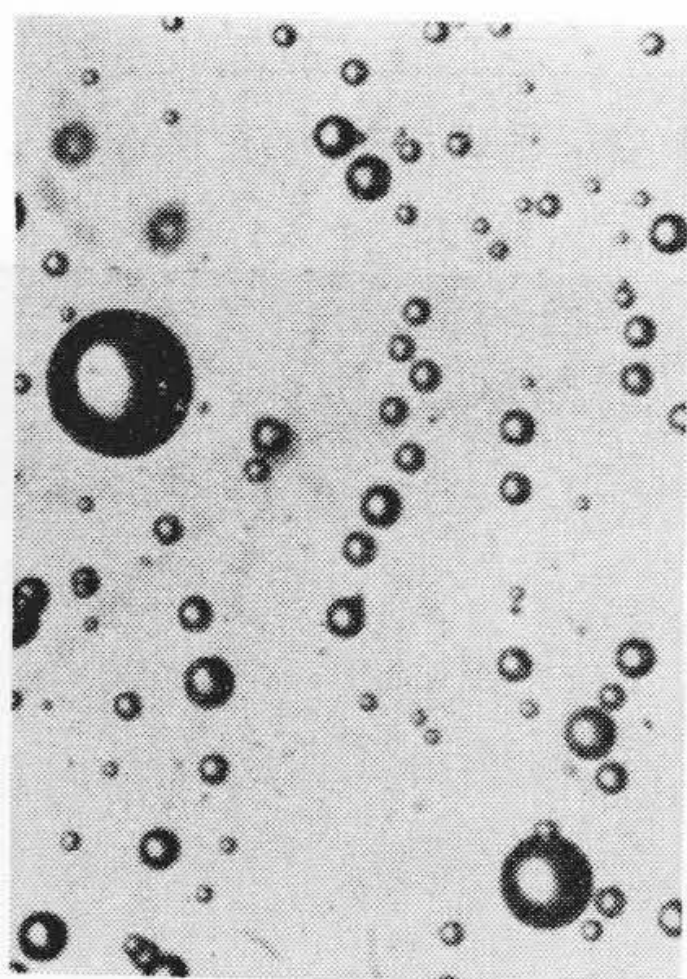
3.6 監視用計器

タービンの運転を最も確実にするため下記の監視用計器を備えている。これら計器の指示および記録は中央制御盤に設置されている。

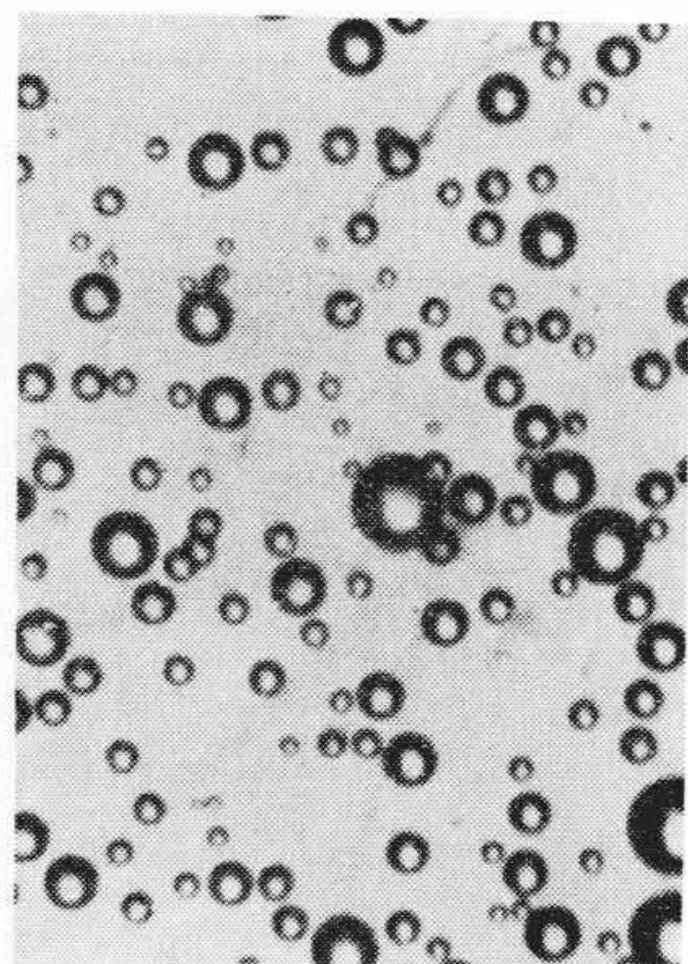
下記に監視用計器の概略を述べる。



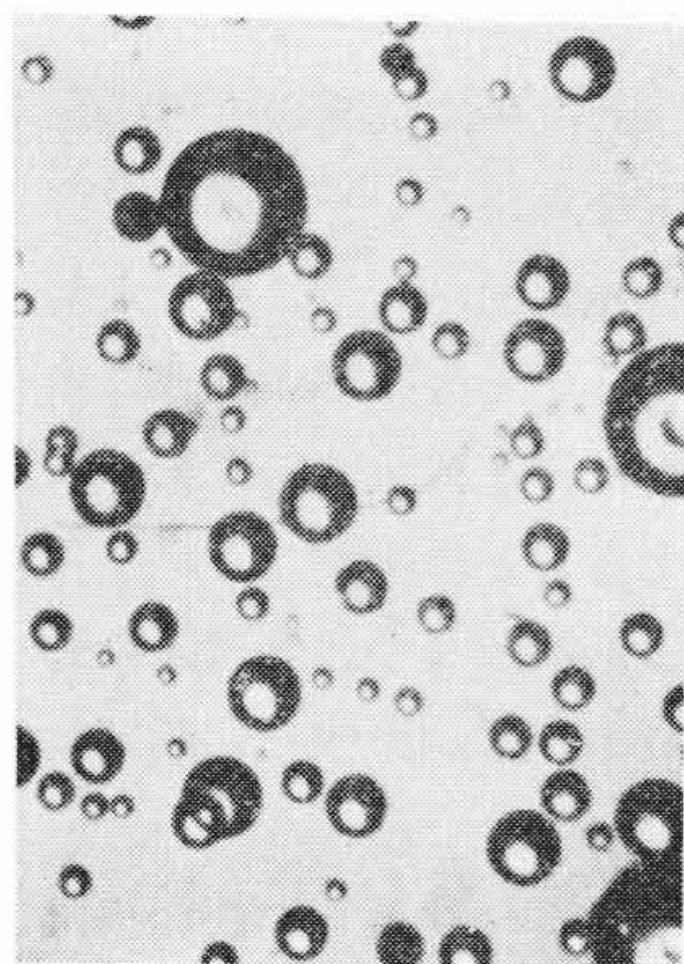
第16図 水噴射弁粒子分布



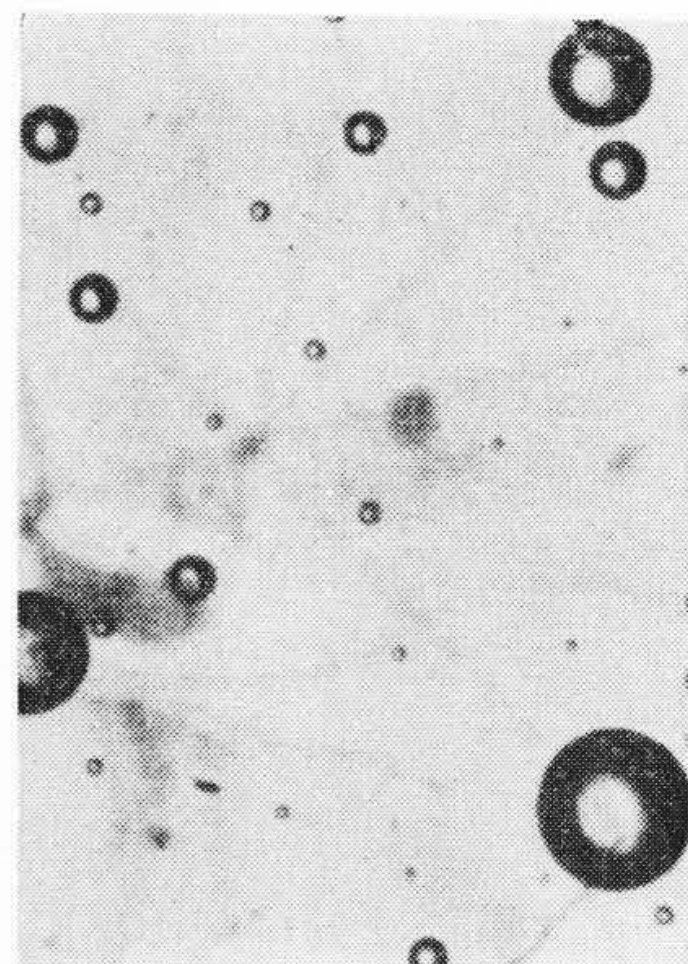
第17図 水噴射弁粒子分布



第18図 水噴射弁粒子分布



第19図 水噴射弁粒子分布



第20図 水噴射弁粒子分布

(a) 速度ならびに調整弁開度指示記録計

速度ならびに調整弁開度指示記録計はタービンの運転に重要な二つの量を測定記録する。すなわち、タービン起動時ならびに負荷遮断して発電機が併列解除された場合には速度を、電力網に投入後はカム軸回転位置を記録する。並列運転時のタービン速度は周波数計測器によって指示されるので本装置はカム軸位置のみ記録するよう自動的に操作される。回転指示計はタービン前面に取り付けられ運転に便利になっている。

(b) ロータ偏心指示記録計

タービン起動および運転中のロータの偏心を電氣的に記録する計器で、ロータに焼きばめされた円板と前部軸受ボデーに取付けた発信器コイルとの間隙を電氣的に検出し、ロータの偏心量をターニング中（低速）および運転中（高速）いずれにも切換え指示記録できる装置である。

(c) 車室伸び指示記録計

車室の膨脹による伸びを前部軸受端に取り付けた発信器により指示記録する装置であり起動時の不同膨脹の有無を正確に知ることができる。

(d) 車室、ロータ伸び差指示記録計

起動および運転中の車室とロータとの伸び差を電氣的に指示、記録する装置で長軸のロータにおいては運転保守に特に重要な計器である。

(e) 振動振幅指示記録計

タービンの振動振幅を軸受メタル近接部で電氣的に指示、記録する装置である。

(f) 車室温度指示記録計

蒸気の温度変化に伴う、車室壁の温度を指示記録する計器で、特に起動停止時の車室壁にかかる熱応力を測定し、車室のきれつ発生を未然に防止するためこの計器の重要性が近時増大してきた。

4. 結 言

以上、日立製作所において製作された東京電力株式会社品川発電所用 125,000 kW 再熱タービンの概要について述べた。本機の工場試験においては、さきに製作した 75,000 kW 再熱タービンよりさらに厳重な試験が慎重に行われたが、いずれも優秀な成績を示し、特に振動、各種制御装置などきわめて安定した特性が得られた。これは、設計、製作にあたって細部にわたる基礎的な研究および慎重な検討の結果であり、本機が電力界に新偉力を発揮しうることは喜びにたえないことである。現在さらに容量の大きい 175,000 kW 再熱タービンを製作中であり、今後それによりさらに大きいタービンの製作の計画もすすめられていくであろう。

最後に本タービンの製作に当り終始懇切なご指導をいただいた東京電力株式会社の寺田重役はじめ、関係者各位に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 加藤：日立評論 39, 1099 (1957)
- (2) 加藤：OHM 11月 (1957)
- (3) Larson, Miller：ASME 74, 765~775 (1952)
- (4) R. E. Brandon：H. C. Bahr ASME Tran. 210 April (1959)
- (5) K. Schultes：B. W. K. Bd. 8 Nr. 12 Dezember (1956)

日立評論別冊 No. 33

「金属特集号 第4集」

昭和34年12月20日発行予定

目 次

◎焼結法によるボールコア
 ◎Mn-Mo 鋳鋼の熔接性
 ◎高温顕微鏡による純鉄の α - γ 変態ならびに結晶粒界移動の観察
 ◎大形鋳鋼ロールの鋳造
 ◎高炭素クロム鋼の炭化物の挙動と焼入性
 ◎真空鋳造法の研究
 ◎耐海水鋳鉄
 ◎可鍛鋳鉄の衝撃遷移曲線に及ぼす熱処理の影響

◎Ni Cr 白鋳鉄の研究
 ◎日立高力マレブルの疲れ強さ
 ◎鋳鉄ロールの熱伝導率について
 ◎ロールウオブラーの強度に関する問題
 ◎黒心可鍛鋳鉄の第二段黒鉛化機構の研究(続)
 ◎新しい耐熱鋼 TAF の諸性質について
 ◎新肌焼鋼 (YGM1, YGM3) に関するもの
 ◎刃物鋼の靱性に及ぼす砂鉄系原料鉄配合率の影響

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振替口座東京 71824 番
 取次店 株式会社オーム社書店 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