

ビルマ政府バルーチャン第二発電所納
 29,840 kW (40,000 HP) 横軸ペルトン水車および 31,000 kVA
 交流発電機について

29,840 kW (40,000 HP) Horizontal Pelton Wheel and 31,000 kVA
 Alternator Supplied to Balu-Chaung No. 2 Power Station, Burma

山 本 景 彦* 森 昌 夫*
 Kagehiko Yamamoto Masao Mori

内 容 梗 概

ビルマ政府納，バルーチャン第二発電所用水車および発電機 3 台がこのほど完成し，1 号機はすでに現地向け発送された。

本水車は横軸ペルトン水車としては，日本国内の実績を上回る製品であるばかりでなく，ランナは 13%クローム鋳鋼製一体鋳造であり，構造的には発電機主軸に水車ランナが直結される，いわゆるオーバーハング方式を採用し，据付床面積を大幅に減少することができた。発電機は固定子線輪の絶縁にはすでに定評のある SLS ワニスを使用し，また界磁巻線の冷却のためには，特殊な通風方式を採用するなど，いろいろな点で入念な考慮がはられ，ここに完成をみるにいたった。

1. 緒 言

ビルマ政府バルーチャン第二発電所納 29,840 kW (40,000 HP) 横軸ペルトン水車および直結発電機は，昭和 33 年 10 月その 1 号機が完成発送され，以下引き続いて 2，3 号機も現地向け送られつつある。

日立製作所では，さきに当時の国内における記録品として，四国電力株式会社松尾川第一および第二発電所納 22,100 kW ペルトン水車ならびに同発電機を製作納入したが容量の点でこれを凌駕するとともに，13%クローム鋳鋼製大形バケットランナの一体鋳造の採用，オーバーハング構造などに成功し，高落差領域における大容量水車および発電機の製作に多大の寄与をなしたものである。

その製作にあたっては過去の実績に綿密な検討を加え，すぐれた性能と高い信頼度をうることに万全を期した。

2. 計 画 概 要

2.1 位 置

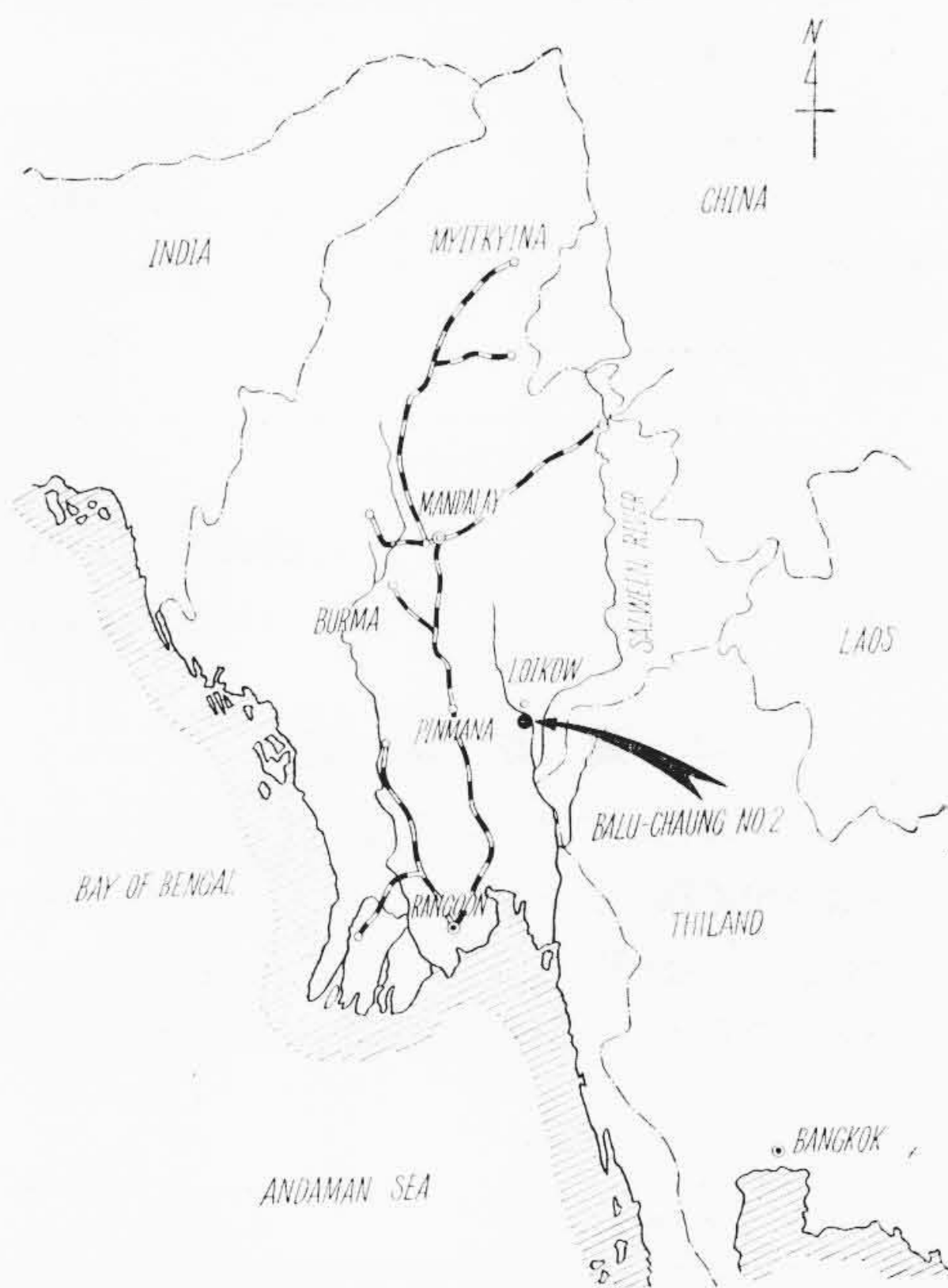
サルウィン河支流域

第 1，2 図は建設位置および計画概要を示す。

2.2 水 車 仕 様

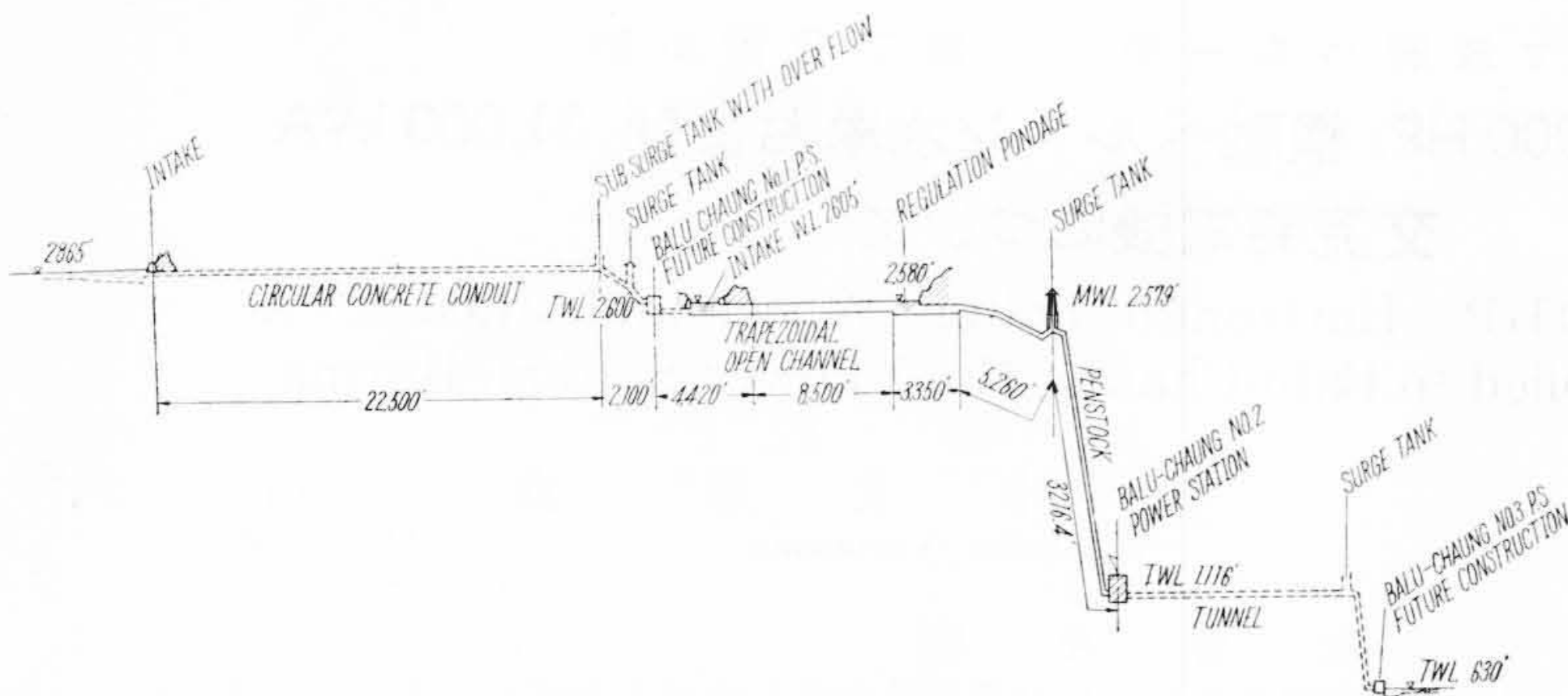
出力.....	29,840 kW (40,000 HP)
落差 最高.....	423.98 m (1,391 ft)
基準.....	423.66 m (1,390 ft)
最低.....	420.51 m (1,382 ft)
水量.....	8.10 m ³ /s (285.9 cfs)
回転数.....	428.5 rpm

* 日立製作所日立工場



第 1 図 発 電 所 位 置

特有速度.....	19.3 m-kW (5.04ft-HP)
形式.....	横軸二輪四射両掛ペルトン水車
台数.....	3 台
回転方向.....	励磁機よりみて時計式
速度変動率.....	15%以下
水圧上昇値.....	最高静落差 441.96 m (1,450 ft) の 12%以下
無拘束速度.....	185% (792 rpm)
運転方式.....	50%負荷以下で片側水車のみ



第2図 発電所計画側面図

を運転して、部分負荷における効率の上昇をはかる高能率運転方式が採用されている。

2.3 発電機仕様

形式 EFBW-RD (横軸閉鎖風道循環形回転界磁式制動巻線付)

容量.....	31,000 kVA
電圧.....	11,000 V
回転数.....	428.5 rpm
周波数.....	50~
力率.....	90%
台数.....	3台
主励磁機.....	200 kW—220 V
副励磁機.....	15 kW—110 V

3. 建屋配置

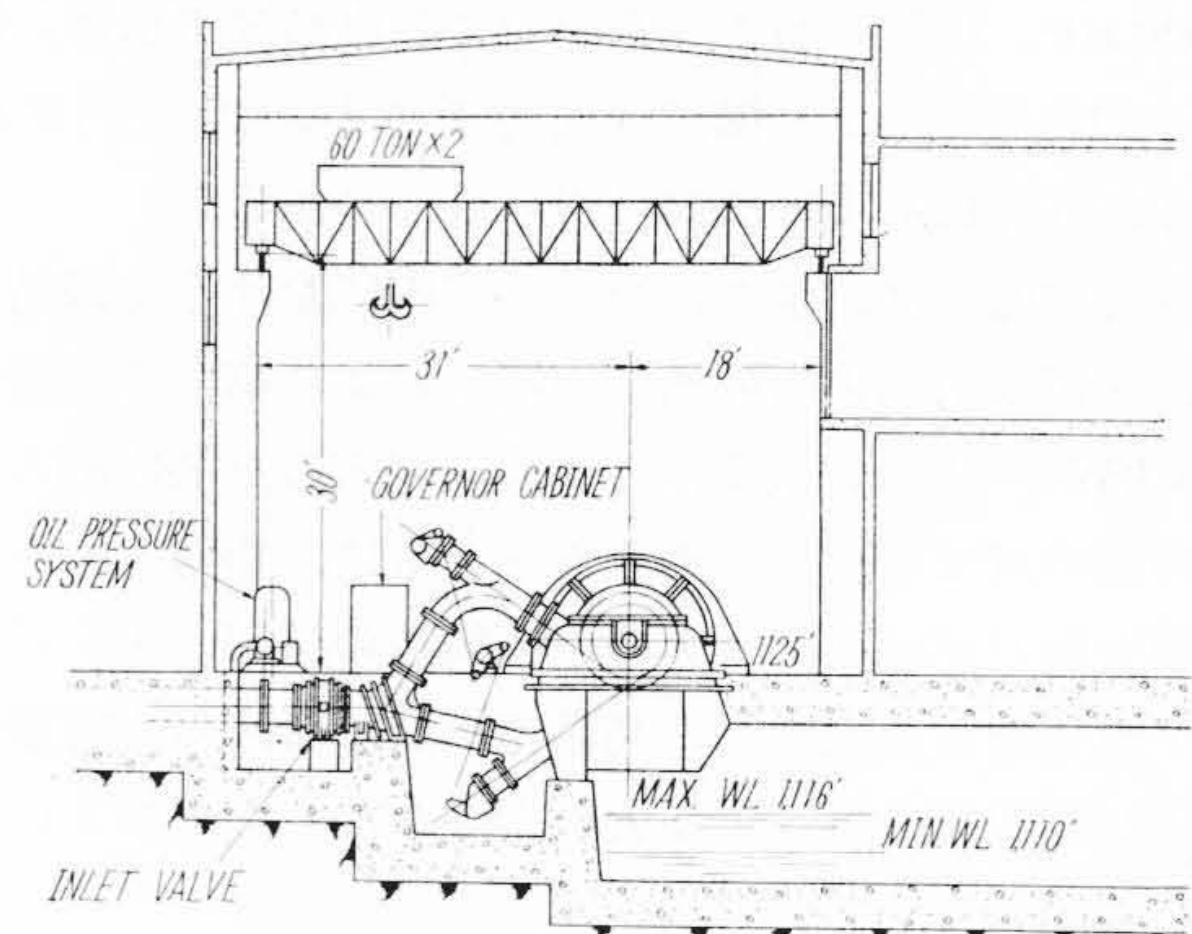
本発電所は将来さらに3台の増設が予定されており、計6台の水車発電機が据え付けられるため、機器寸法を切りつめることが建屋掘さく費を節減する上にきわめて大きな要素となるので、計画にあたっては水車、発電機

および励磁機の各分野にわたって研鑽が重ねられ、その総合的な技術を基盤として、第3図および第4図に示すようなせまい建屋内に機器を設置することに成功した。

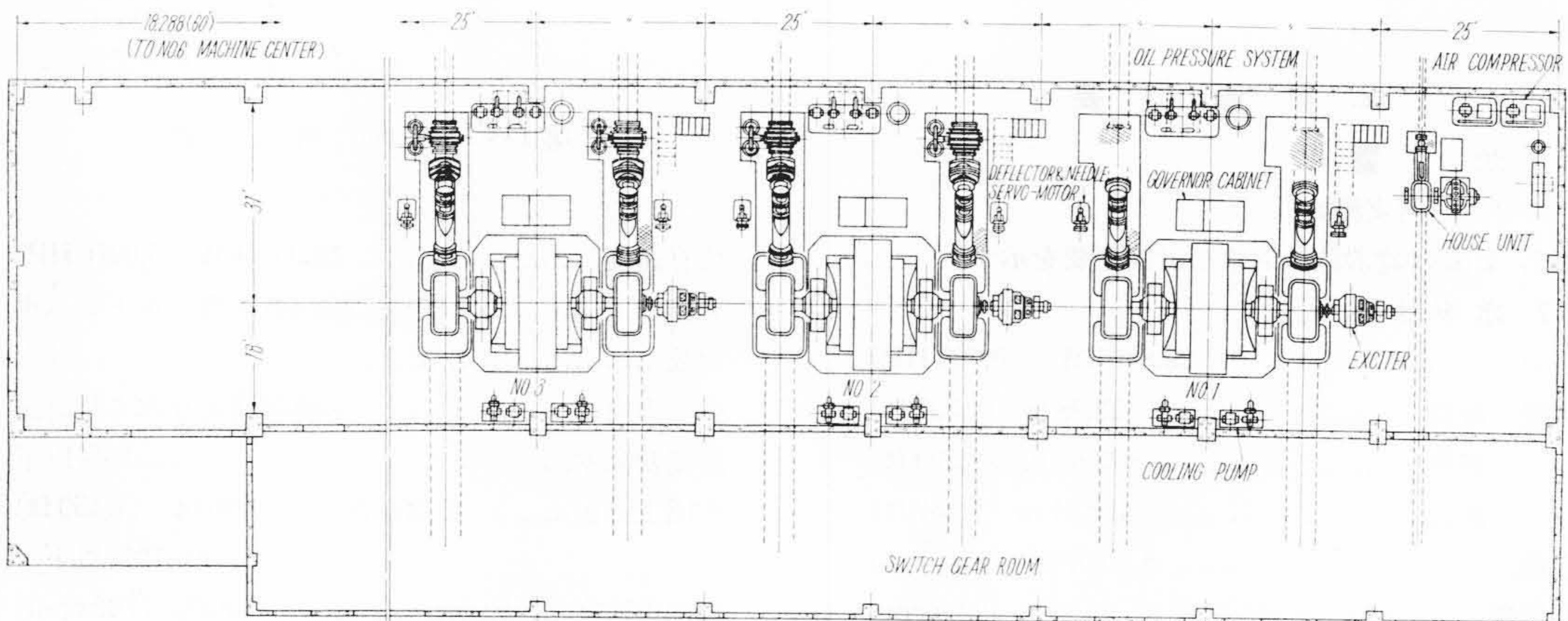
4. 水車

4.1 模型試験

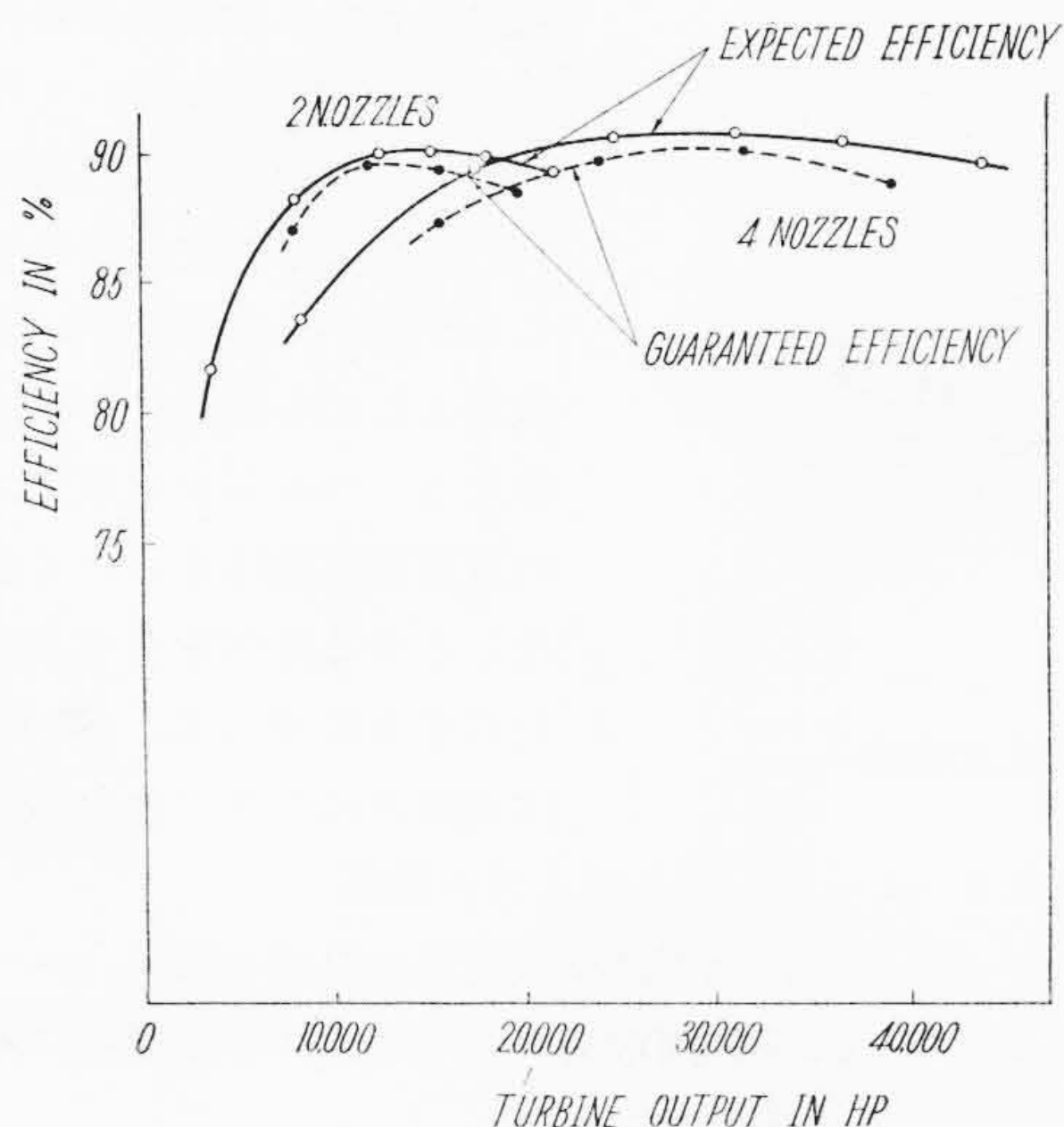
日立製作所は戦後いち早くペルトン水車の模型試験に着手し、逐次バケットの改良を重ねて、多数のランナについての一連の実験を終了している。今回これらの経験を十分に取り入れて設計が進められ、完全相似のランナを使用せる模型水車について立合試験を受け、負荷の全領域にわたって保証効率を満足する結果が得られた。第5図に保証効率および模型試験結果を示す。



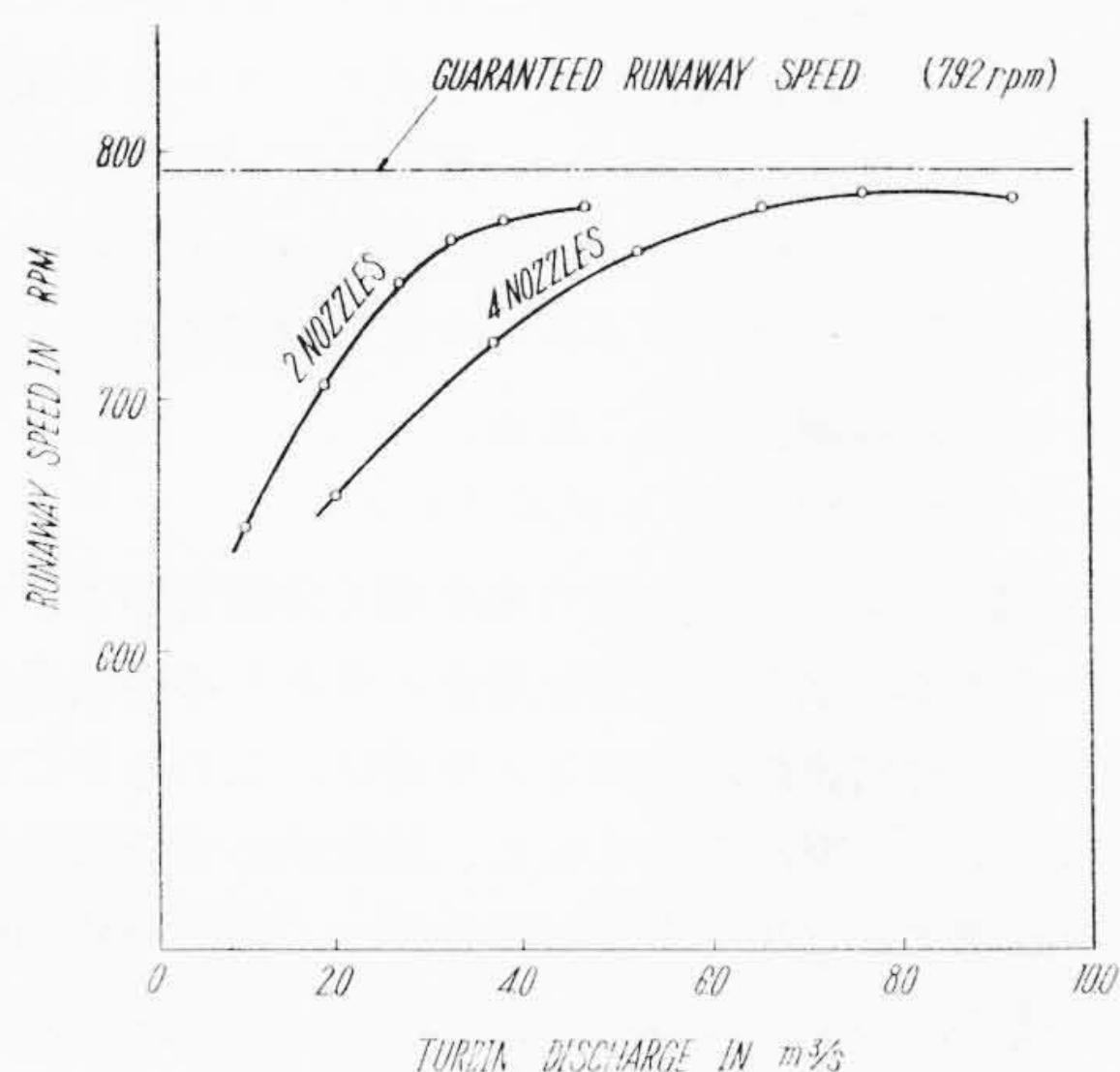
第3図 据付断面図



第4図 据付平面図

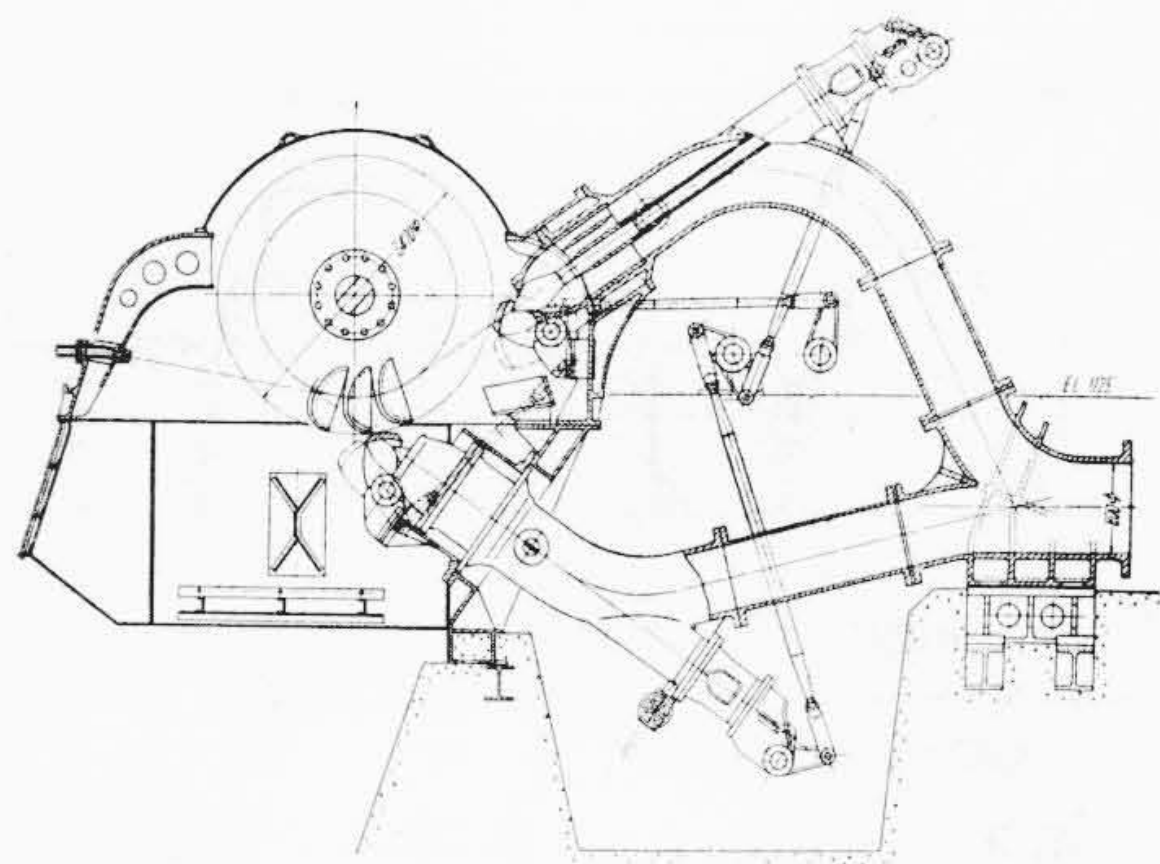


第5図 模型効率試験結果



第6図 無拘束速度試験結果

特にバルーチャン第二発電所は、水圧鉄管長さが 965 m に及び、その管内損失水頭が水車 3 台の全負荷時に 20 m にも達する。したがって、上水槽水位の変動による落差の変化はほとんど考慮する必要がないにもかかわらず、水量の少ない運転状態すなわち水車 1 台運転、特に 2 ノズル運転時に実際の有効落差がかなり大きく上昇する。このため水量が少ない場合の無拘束速度については、鉄管損失の減少に伴う有効落差の上昇を考慮して、綿密な模型試験が繰り返され、第 6 図に示すようにいかなる運転状態においても、保証値を満足することが実証された。



第7図 水車構造図

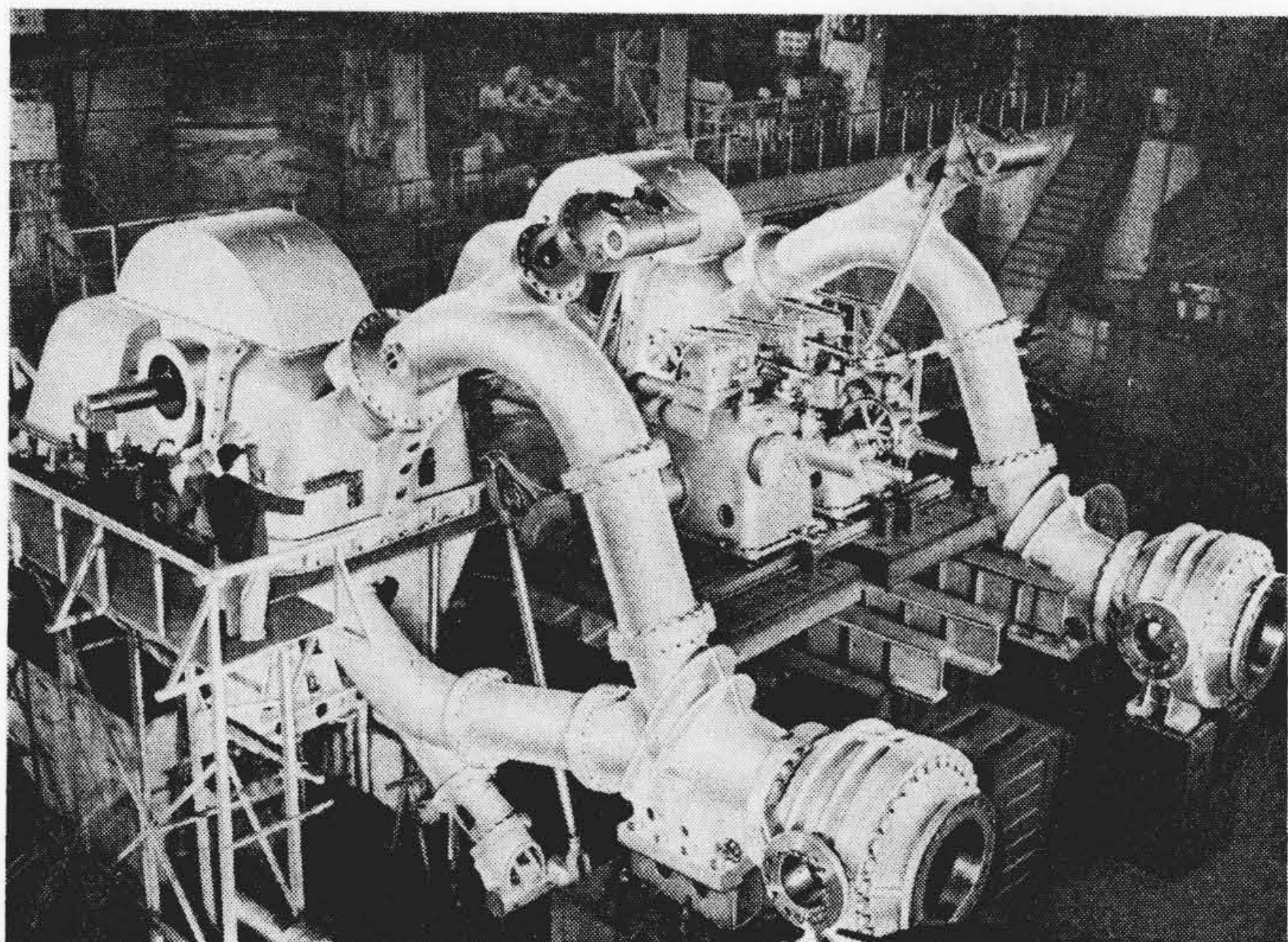
4.2 本体構造

水車本体構造を第 7 図に、組立完了した水車を第 8 図に示すが、さきに述べたように建屋床面積を極力小さくする目的で、水車としては主軸も軸受ももたず、2 個のランナが直接発電機主軸フランジにボルトで締め付けられる、いわゆるオーバーハング方式がとられている。この方式ではランナに作用するジェットの影響力が、水平方向に約 30 t の合力となって直接発電機の主軸受に加わるため、主軸および主軸受の設計に特別の配慮は必要となるが、機器の据付寸法は大幅に減ずることができる。第 9 図は、バルーチャン第二発電所と松尾川第二発電所の機器寸法の比較図であるが、容量が大きく回転数が低いにもかかわらず、全機器寸法としては約 2 m の縮少が可能となっている。

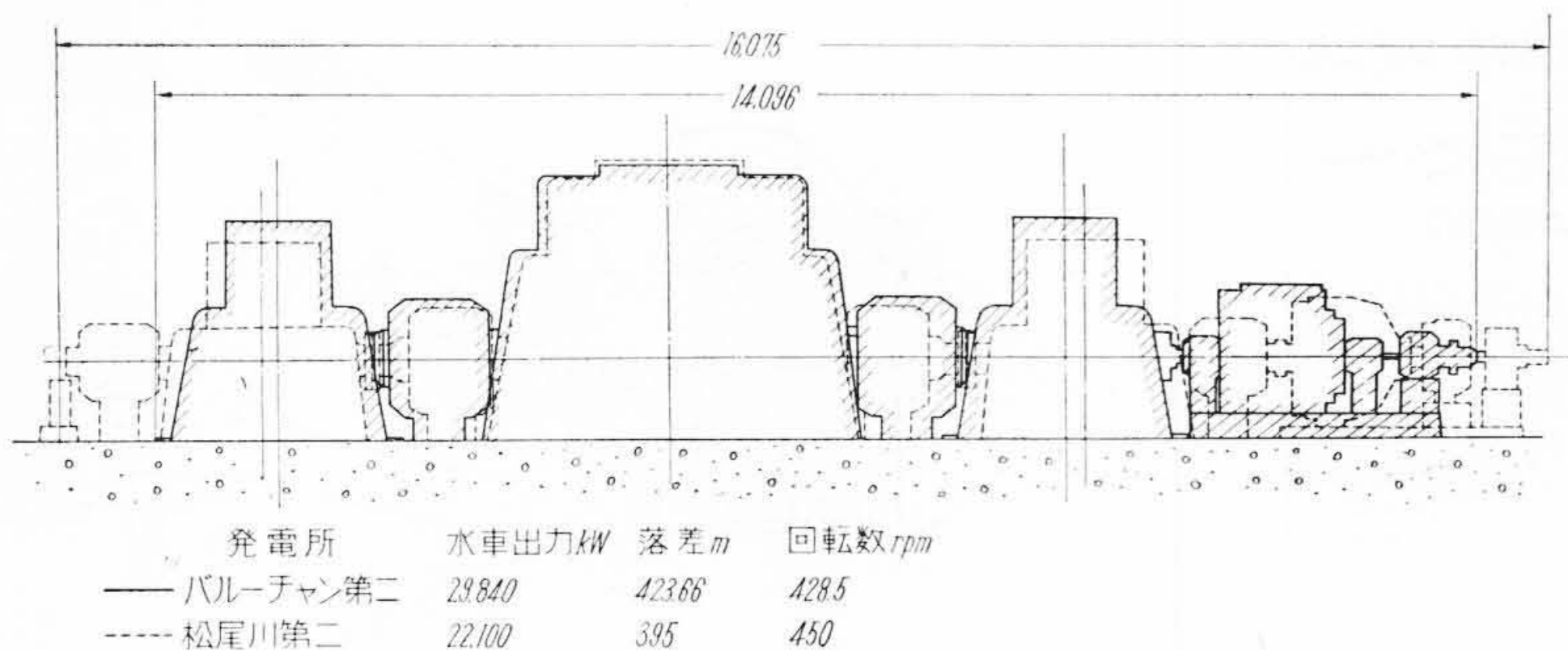
以下各部の概略について述べることにする。

4.2.1 ランナ

本ランナはビルマの河川の水に使用されるため、同国の大陸的気候に左右され、年間約 5 箇月に及ぶ雨期



第8図 水車工場組立



第9図 バルーチャン第二および松尾川第二発電所据付寸法比較図

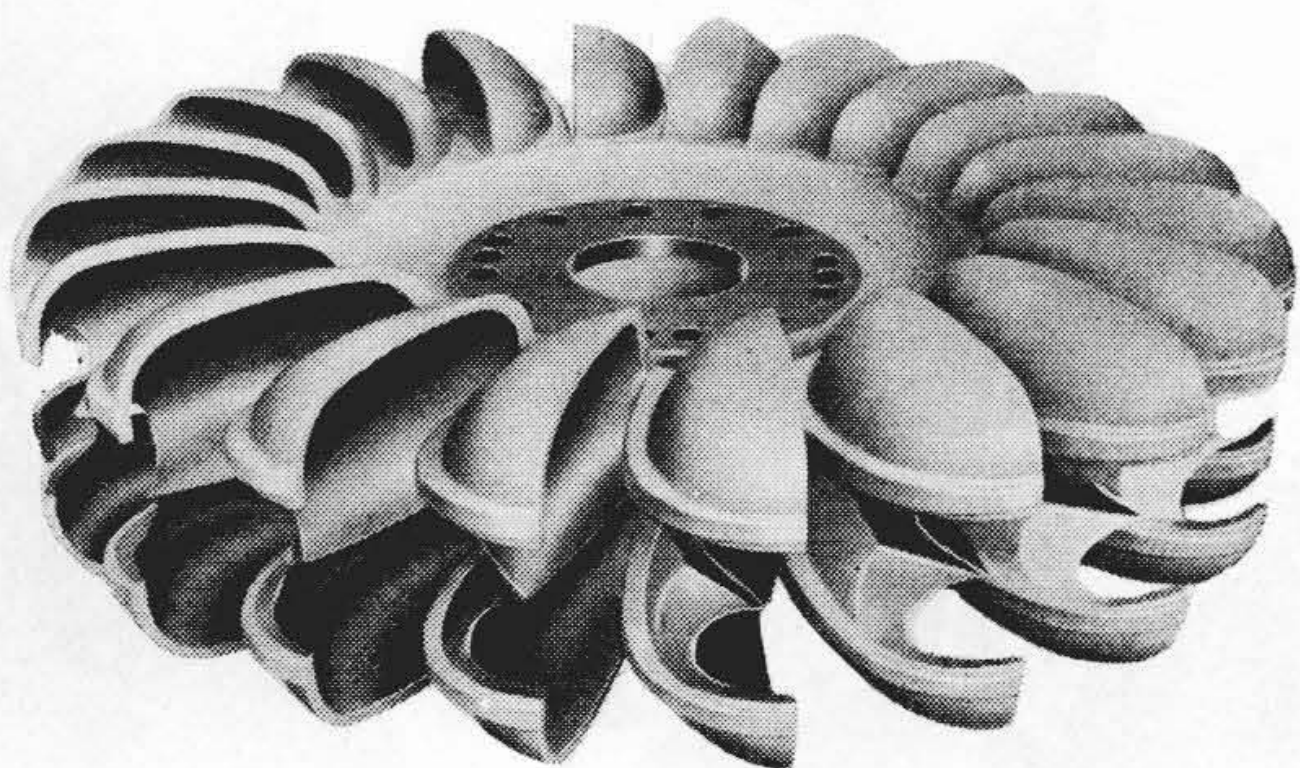
には国内の場合とは比較にならないほど多量の土砂が流れ込む可能性があり、材質的にも種々考慮が払われるとともに、バケットの遠心力およびジェットの影響力に対しても、強度的に十分安全であることを主眼として、耐摩耗性のすぐれた13%クローム鋳鋼製一体鋳造ランナが採用された。

従来の実績としては、アルゼンチン、リオコラリト発電所に納入した外径2,200mmの鋳鋼製一体鋳造ランナがあるが、今回自家工場原料部門の多大の努力によって、鋳込重量9t、外径2,470mmの13%クローム鋳鋼製一体鋳造ランナの製作に成功した。

ランナは水車3台分6個と予備ランナ1個計7個が製作され、おのおの数次にわたってダイマーク試験、磁気探傷試験および超音波探傷試験を実施して欠陥のないことが確認された。

なお、このランナは毎分428.5回転、ノズル数2個で運転されるから、バケット1個について考えれば、1秒間に $\frac{428.5}{60} \times 2 \div 14$ 回の衝撃力を受けることになる。この衝撃回数がバケットの固有振動数に一致すれば、共振を起すことも予想される。経験的にはバケットの固有振動数は、さらに高いものであることが知られているが、確認のため完成したランナについて固有振動数を実測し、起振力14サイクルに対してはるかに高い固有振動数をもつことが実証された。

さらにバケットランナとしては、異例の無拘束速度



第10図 完成せるランナ

試験がビルマ政府代表立合いのもとに工場において行われ、ランナ強度は過速度時においても十分な安全性をもつことが確かめられたが、運転状態としても振動はきわめて少なく、ペルトン水車ランナの過速度試験はまったく必要なしとする確信をますます新たにするに至った。第10図は完成されたランナを示す。

4.2.2 ニードルおよびノズル関係

ノズル出口には不銹鋼鍛造製の口金を設け、ニードルも先端部は不銹鋼鍛造として流水による摩耗に対し十分耐えうる構造を採った。

420mをこえる水圧により、ニードル操作桿に作用する開閉各方向の不均衡力は12tに達する強大なものであり、これを緩和してサーボモータによる操作を容易にする目的で、スプリングおよびバランスピストンが取り付けられている。また秒速80mに達する噴流を遮断するデフレクタチップも、耐摩耗性をもたせるため不銹鋼製としてある。

4.2.3 分岐管およびノズルパイプ

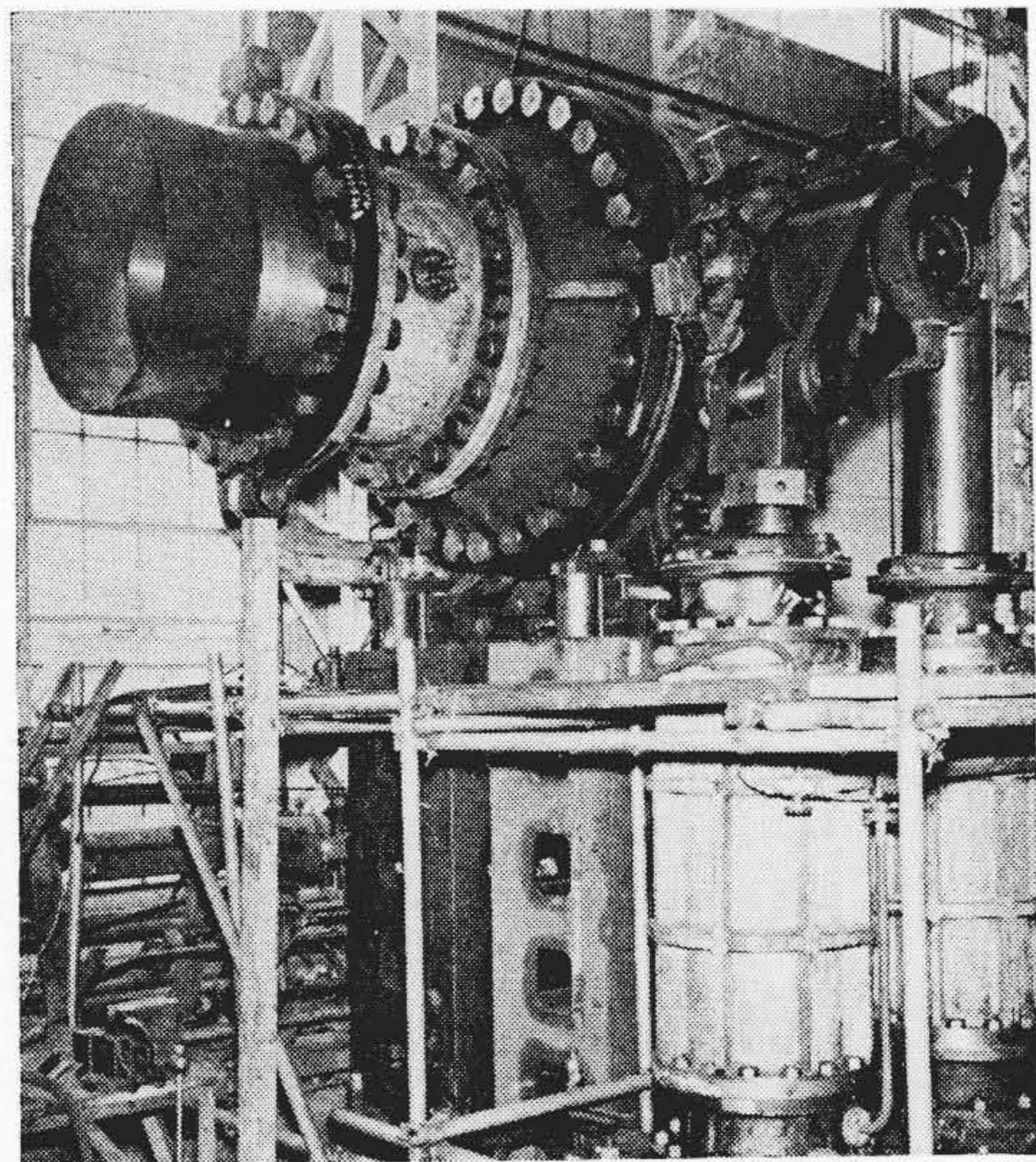
水圧鉄管より高速の圧力水を導く分岐管およびノズルパイプは、水流の損失を最小とするため極力急激な断面積の変化または弯曲などを避け、なめらかに水流を導くように努めるとともに、強度的に安全であることを確認する意味で水圧試験を行い、特に形状の複雑な分岐管については30箇所の応力を抵抗線ひずみ計りによって測定し、設計の妥当性を立証した。

4.2.4 その他

前述のごとくランナは発電機主軸に直結され、水車としての軸受をもたぬ構造である。このためランナは、運転中バケットに当るジェットの衝撃力により、水平方向に0.3mm程度の撓みを生ずるとともに、間歇的なジェットの作用によって微少振動を生ずることはまぬがれない。したがってランナに駆動される励磁機には、この撓みおよび振動が伝わらぬよう特殊な撓み軸継手を採用した。この軸継手については、工場において実際運転中起りうるたわみの2倍に相当する偏心を与えて連続運転を行い、軸受温度、振動数および振幅などを測定して性能を確認した上で納入した。

4.3 入口弁

入口弁は高落差のもとに使用されるため、流水の損失を少なくする目的でロータリ形を採用した。第11図は、工場における組立状況を示す。口径は800mmであり、2個の強力な油圧サーボモータにより油圧21kg/cm²の



第 11 図 ロータリ形入口弁工場組立

もとに操作される。

全閉時水密を保つためには、弁胴と弁体の間で金属面の接触する構造を避け、弁体にゴムホースを設けて全閉後、ゴムホース内に圧力水を注入し、ゴムの弾性変形によって弁胴との間の間隙をなくす日立独特の方法を採用した。使用されるゴムは、耐蝕および耐摩耗性試験の結果、不銹鋼に比べてさらに優秀な結果を示すことが確認されている。

なお圧油ポンプは、常用、予備とも電動機駆動とする M-M 方式が採られているため、運転中不測の電源喪失もまったくないとはいいきれず、この場合に備えて入口弁は流水遮断可能の仕様となっている。閉鎖時間は約 150 秒で、過度の水圧上昇を起さぬよう配慮されている。また入口弁と鉄管との接続は、コンパニオンフランジとし分解の便をはかっている。

4.4 調速機

バルーチャン第二発電所にはキャビネット形調速機が採用された。アクチュエータ部すなわちスピダ、一次、

二次配圧弁および補助サーボモータ各1個は、キャビネット内に納められ、主サーボモータ部は各ランナに対し1組ずつ別個に設けられ、おのこの負荷制限装置をもっている。

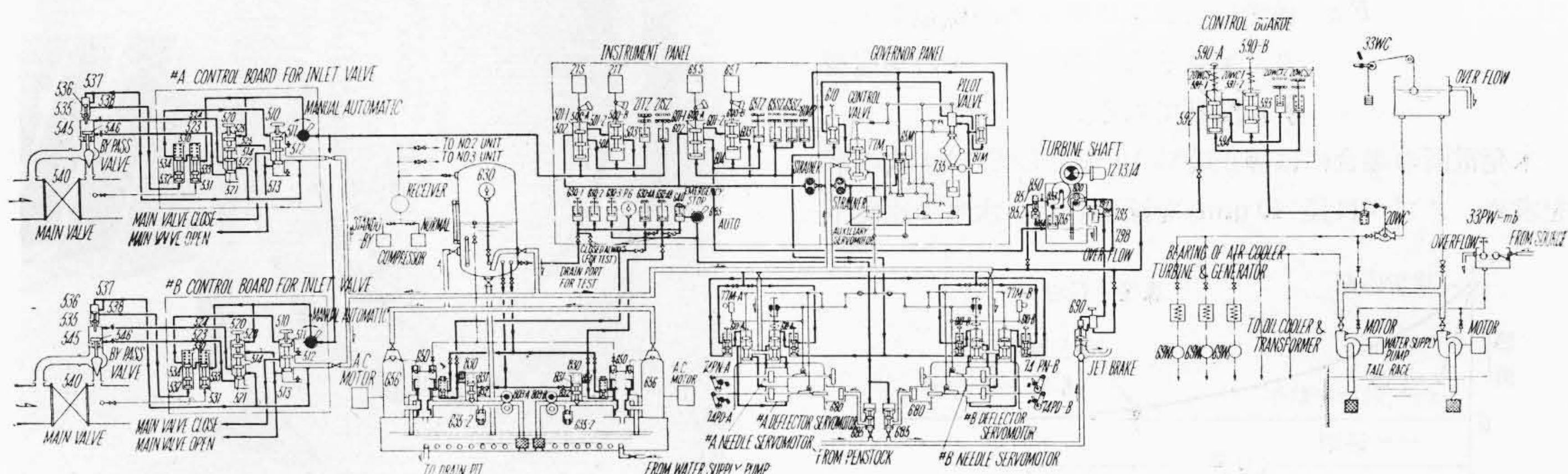
このためいわゆる高能率運転が可能であり、発電機負荷 50% までは A 号水車のみが運転され、A 号水車の全出力以上に負荷を設定すれば、位置開閉器の閉路により B 号水車サーボの負荷制限装置が解かれて、B 号水車のニードルが開かれる。ただしこの場合キャビネット内の補助サーボモータは、100% のストローク位置にあるため、ここでふたたびアクチュエータ部の負荷制限装置または速度調整装置を操作して、所定の負荷を A、B 両号機に均等に負荷させる。負荷が減少していく場合には、40% 負荷で位置開閉器により B 号機の負荷制限装置が働き、ニードルを全閉し A 号機のみで負荷をとることになる。この場合 B 号ニードルの全閉後、アクチュエータの負荷制限装置または速度調整装置の操作により、所期の負荷を A 号に負わせることは増荷の場合とまったく同様である。また A、B 号機いずれを先行機とするかはまったく任意であり、切換スイッチにより簡単に切り換えられる。

なお特筆すべきことは、本発電所はビルマの国情により単独送電を余儀なくされる可能性があり、この場合適度の安定性をもたせるとともに適度の速応性にも富み、周波数変動をできるかぎりおさえることができるよう特別の構造が採り入れられている。

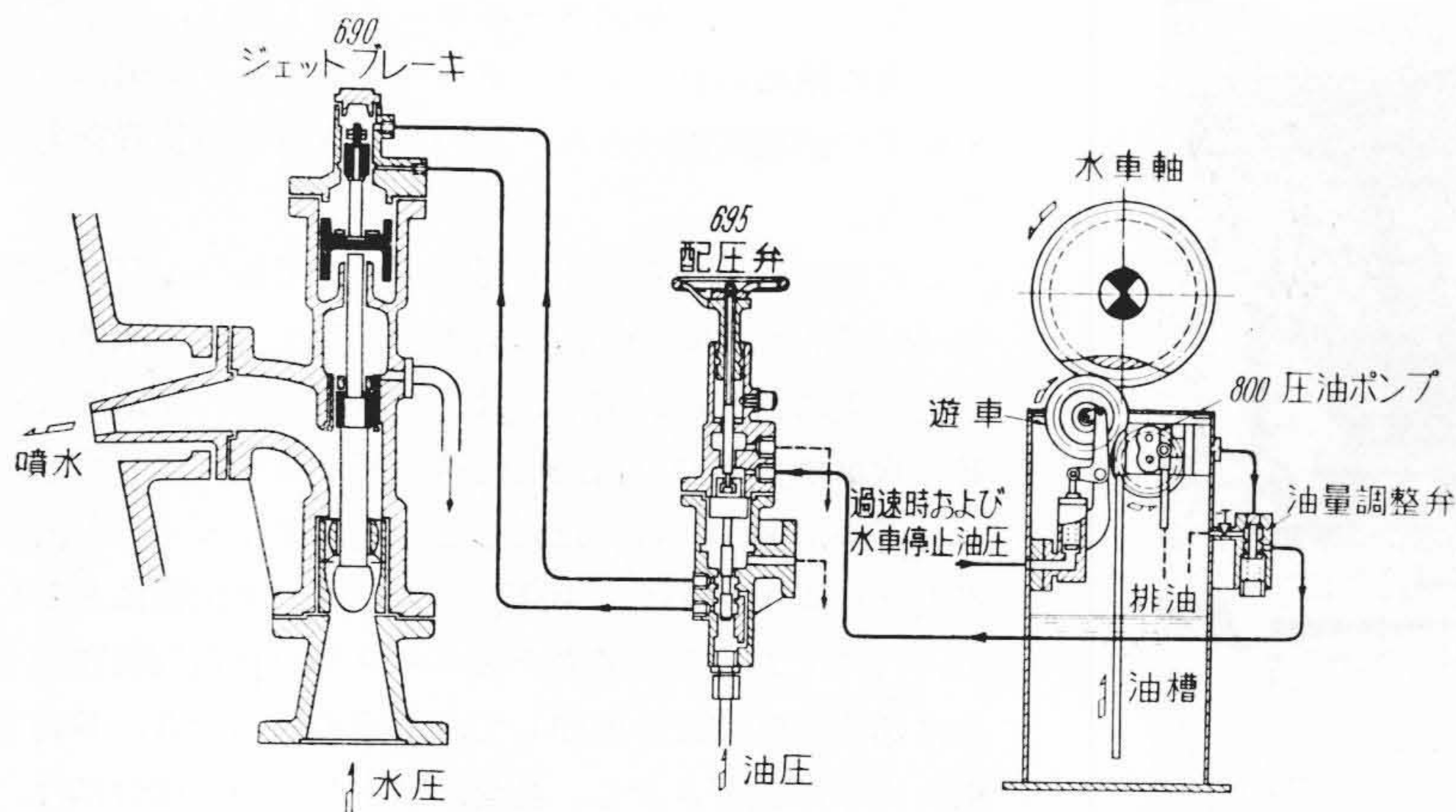
4.5 運転制御装置

一人制御方式が採用されて、起動準備から停止まで一連の操作を順序制御器により容易に行うことができる。その系統図は **第 12 図** のとおりである。

保護装置としては、油圧低下、軸受過熱、冷却水断水、上水槽水位低下の場合の警報装置、スピード駆動装置故障および水車過速度時の急停止のほか、油圧低下時水圧によって、デフレクタを全閉するペルトン水車独特の保護装置を有している。



第12図 自動操作系統図



第13-a図 ジェットブレーキ系統図

また水車を停止せしめる際には、横軸ペルトン水車の一般的な構造としてバケット背面にジェットを噴射せしめるいわゆるジェットブレーキが採用されている。

第13-a図はジェットブレーキの操作系统を示す。ジェットブレーキの口径は主として水車が完全に停止するまでに要する時間を何分程度に選ぶかによって決定される。停止に要する時間は、発電機の GD^2 、水車ランナの周速および軸受の損失などによって左右され一般に下式(1)で表わされる。

$$\frac{GD^2}{4g} \ddot{\theta} = - \frac{\gamma Q(v + r\dot{\theta})r}{g} - F(\dot{\theta}) \dots \dots (1)$$

ここに GD^2 : 発電機および水車の慣性二次モーメント (kg-m²)

v : ランナの周速 (m/s)

r : ジェットブレーキの作用半径(m)

$\dot{\theta}$: ランナの角速度 (°/s)

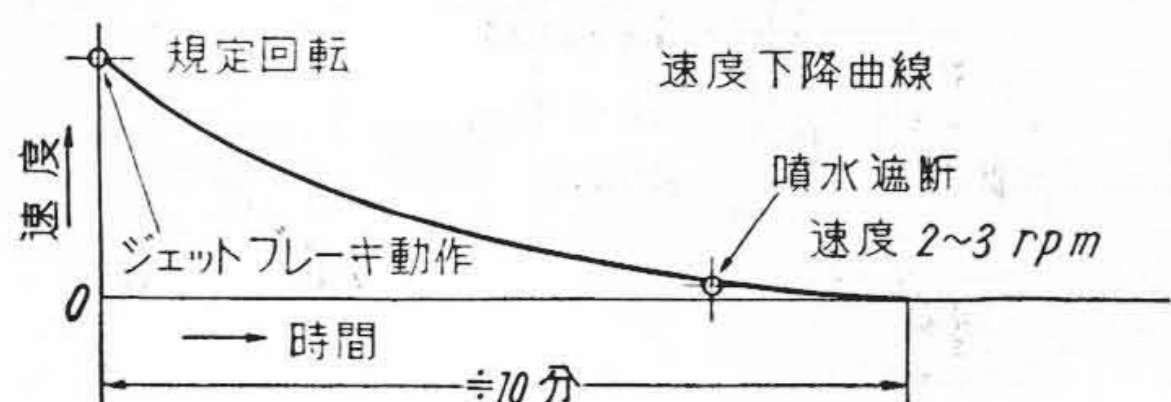
$\ddot{\theta}$: ランナの角加速度 (°/s²)

γ : 水の単位体積あたりの重量 (kg/m³)

Q : ジェットブレーキよりの水量 (m³/s)

F : 軸受損失およびランナの風損をトルクに換算せるものでランナの角速度 $\dot{\theta}$ の関数である。

本発電所の場合には停止時間10分として(1)式の解を求め、ノズル口径40mmを採用した。水車の速度下



第13-b図 速度下降曲線

降曲線は第13-b図のようになる。

5. 発電機

本発電機は日立製作所が製作した横軸水車発電機としては最大容量のものであり、また、わが国からの輸出向水車発電機としても、大容量のものに属する。したがってその設計製作にあたっては、あらゆる面で慎重な検討がなされ、その結果ここに優秀な成績で完成をみるにいたった。

5.1 構造

第14図は固定子の外観図である。固定子は二つ割で、線輪は1ターンコイルとしSLSワニス絶縁を採用した。SLSワニス絶縁についてはすでに詳説されているので省くが⁽¹⁾⁽²⁾

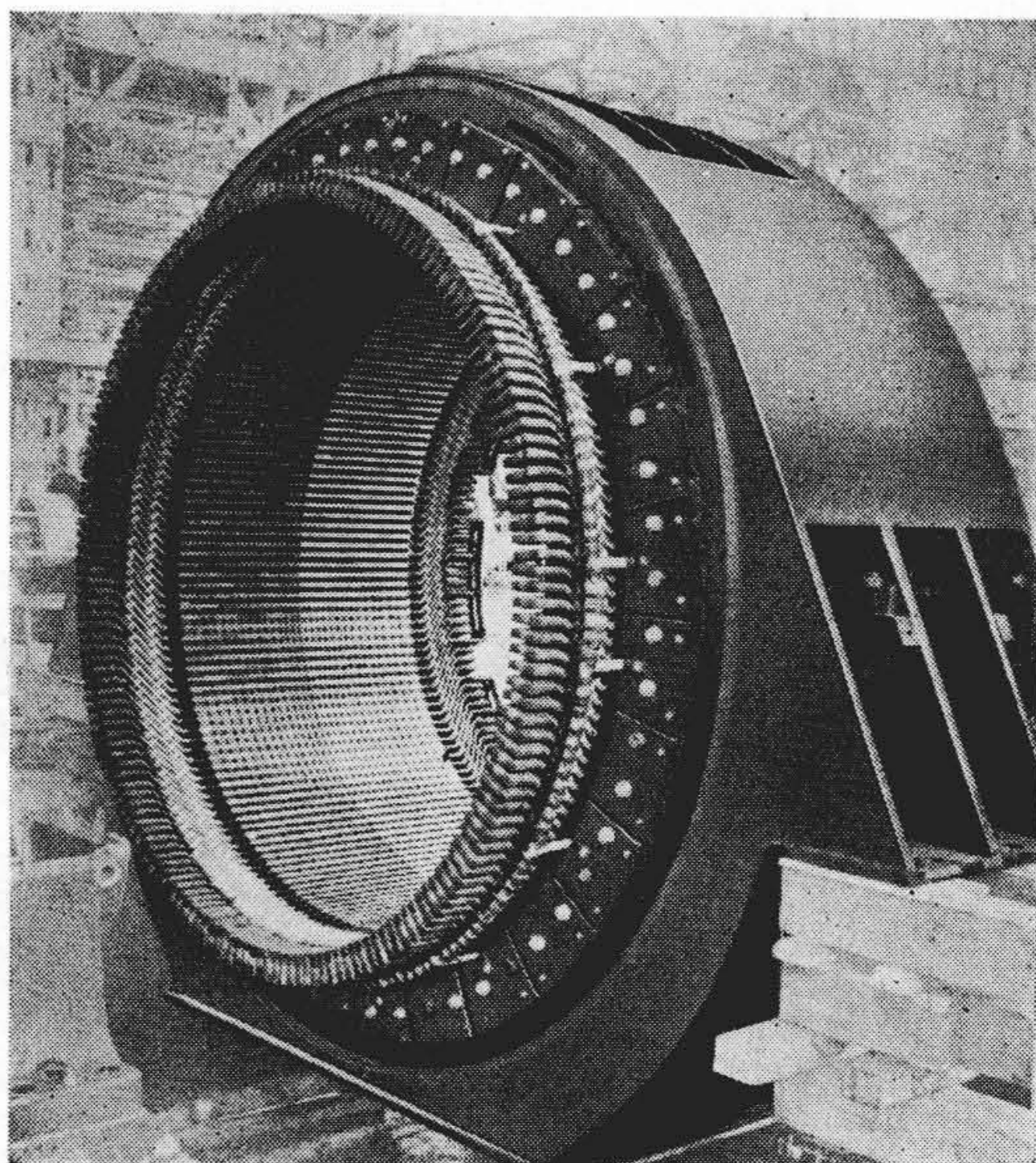
(1) 硬化反応中水分が発生しないので絶縁層内に空隙が生じない。

(2) 作業に熟練を必要とせず簡単に均一な絶縁層が得られる。

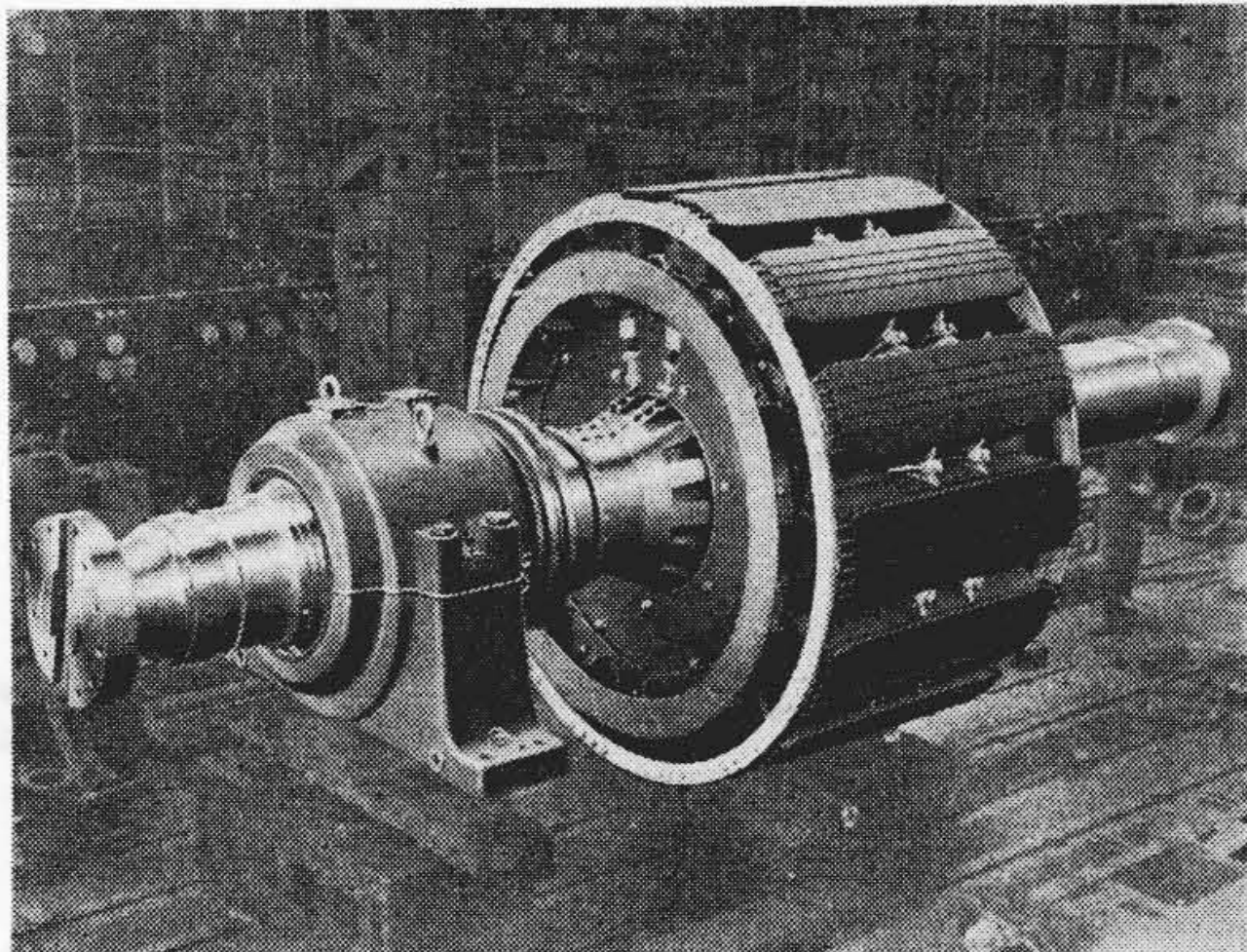
(3) 熱軟化性がないのでコイルがふくれ上らない。

(4) 電気的特性がよい。すなわち $\tan \delta$ が小、コロナ発生電圧大、破壊電圧大である。

(5) 機械的特性がよい。すなわち熱伝導率が大きく導体との間に滑りが起らない。



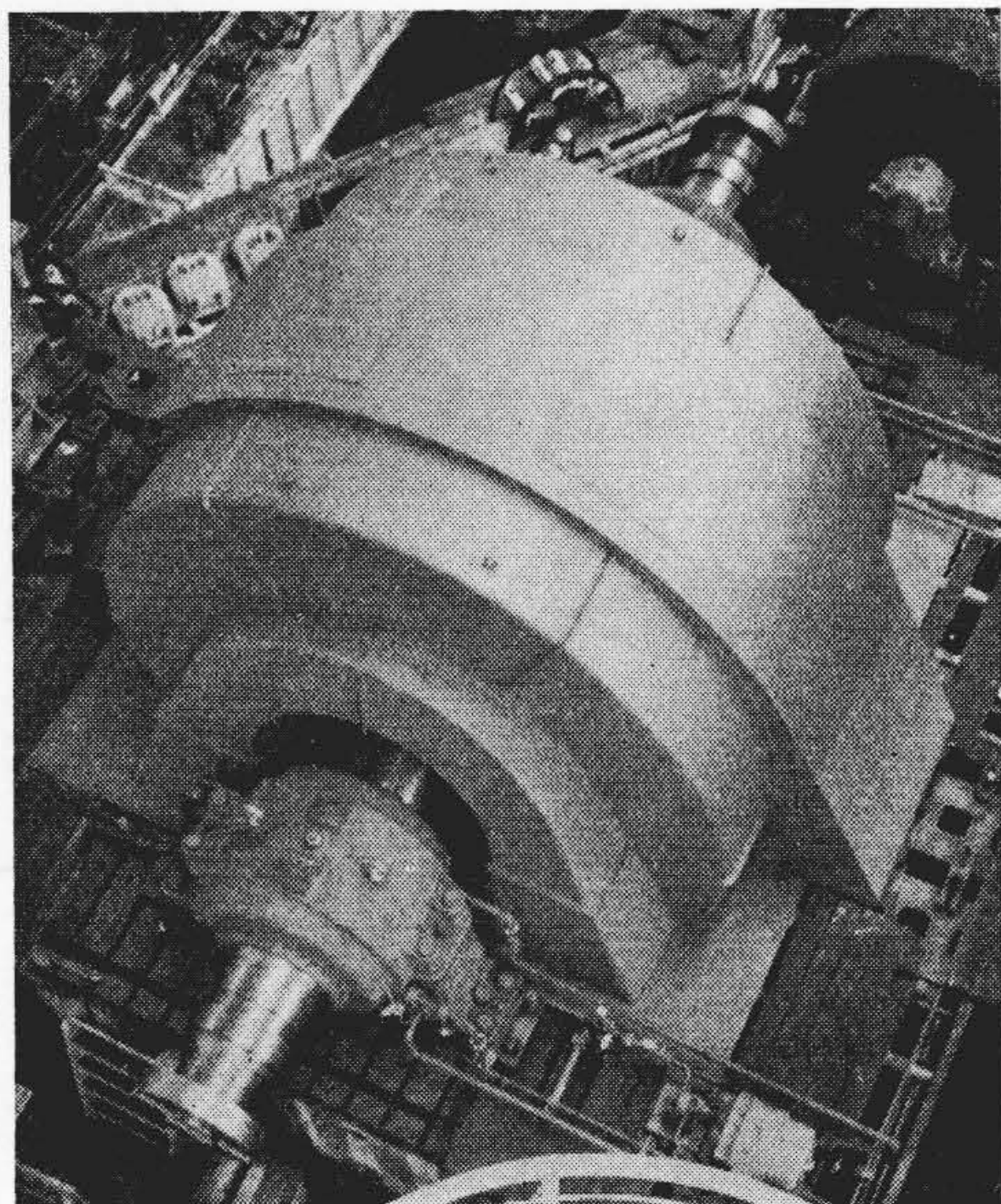
第14図 固定子



第15図 回 転 子

以上のようなすぐれた特長を有する絶縁方式である。表面にはかび防止のための特殊塗料およびコロナ防止の半導体性塗料が塗付されている。また導体は溝外で完全な転位を行い渦流損失を少なくするようになっている。

第15図は回転子および軸受の外観図である。主軸は両端に水車ランナ直結用フランジを有する一体鍛造品である。継鉄の取り付けられる部分は通風のために溝が切られている（いわゆる菊形シャフトである）。継鉄は一体リング状の厚鋼板を積層してボルトで締め付け、主軸に直接焼嵌めする構造となっている。また継鉄は積層の際中央部付近数箇所に特殊構造のディスタントピースを挿入し鋼板と鋼板との間に空隙を作り、主軸に切られている溝とあいまって、この部分の巻線の冷却を効果的にしている。磁極は鳩尾溝によって継鉄に取り付けられている。無拘束速度時に界磁線輪に大きな遠心力が生ずることは当然であるが、特に本機のごとく磁極数の割合少ないものは遠心力の円周方向分力が大きくなり、それによって線輪が周囲方向に変形を生ずるおそれがあるため、図でわかるように界磁線輪ささえを2箇所においてある。磁極頭部には制動巻線がありおのおの巻線は一体鍛造の短絡環により接続され強大な遠心力に耐える構造となっている。軸受は油環給油式油自蔵形で、発電機の回転子重量のみならず、水車回転部重量およびジェットによる荷重さらに据付上の誤差によって生ずるスラスト荷重をも受けられるようになっている。軸受の冷却は、冷却管を軸受金の中に埋め込み、それに水を通して直接冷却する構造となっている。冷却管は継目無銅管を熱間曲げ作業によって蛇行させ、厳密な水圧試験の後軸受金に鑄込まれ、破損水もれなどが絶対に起らぬようになっている。油環は一個の軸受に対し四個設けられ、その大きさ、断面形状、重量などは、給油を満足させるために十分な考慮が払われている。また本機は両側に水車バケットランナが取り付けられるため、ジェットを介し



第16図 31,000 kVA 交流発電機

て電流が流れることをも考慮し、両軸受とも絶縁をほどこし軸電流防止に万全を期した。

固定子の下部には風道を介して空気冷却器が設置されている。空気冷却器は3個のユニットからなりたち、分解組立に便利のように、おのおのユニットに車輪があり、前後左右に移動できる構造になっている。空気冷却器の下部には、発電機停止中巻線に露が付着するのを防止するためのスペースヒータが取り付けられている。また巻線の火災保護のためには炭酸ガス消火装置が装備されている。

5.2 そ の 他

3台の発電機のうち1台は工場組立ての上、無拘束速度試験を含む各種試験が行われ、電気的特性、能率、温度上昇などいずれも優秀な成績をおさめた。無拘束速度試験は水車の理論的無拘束速度の90%速度で行われ、機械的強度はもちろん、振動、軸受温度などになんらの異状も認められなかった。第16図は工場における発電機全体である。

本機は発電所のおかれている場所の特殊事情を考慮しその発送荷造については十分の注意が払われた。すなわち、荷造箱の板、台木などは一般に比べ頑丈なものとし、すべて密閉形としてあり、内部には防湿剤が封入され、長時間の海路陸路さらに降雨に対し万全を期し発送された。

6. 結 言

以上ビルマ政府バルーチャン第二発電所納 29,840 kW (40,000 HP) 横軸ペルトン水車および 31,000 kVA 発電

機の仕様、構造の概要について述べた。本水車は横軸ペルトン水車としては、日立製作所にとっても大容量記録品であり、その設計に当っては数多くの新方式が採用されるとともに、製品ごとに慎重な試験が行われ、その優秀性、安全性が確認されたが、特に大形バケットランナの13%クローム鋳鋼製一体鋳造の成功は、鋳造技術に一

紀元を劃するものとして高く評価すべきものであろう。

またオーバーハング方式の確立は、今後の横軸ペルトン水車の発展に寄与するところ大といわねばならない。

参考文献

- (1) 菊地、磯部：日立評論 37, 1401 (昭30-10)
- (2) 石坂：日本電気協会講演集 192 (昭32)

特許と新案

最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その3)

(28頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	工 場 別	氏 名	登録年月日
実用新案	486911	電力遮断時の逆流圧によるポンプおよびフート弁の保護装置	亀有工場	木暮健三郎	34. 1. 14
"	486912	薄層用炭機	亀有工場	山内章正	"
"	486926	切替弁	亀有工場	青木勝治	34. 1. 14
"	486990	アングルドーザ	亀有工場	青森幸茂	34. 1. 19
"	487007	液圧スルースバルブの2段動作開閉装置	亀有工場	野村健三郎	"
"	487008	吊ビーム	亀有工場	木山章正	34. 1. 19
"	486927	長巻輪転機における紙継装置	川崎工場	石川一松	"
"	486891	継電器の電流整定装置	多賀工場	横沢源純	34. 1. 14
"	486893	気化器レバー装置	多賀工場	小島義男	"
"	486899	ホイスト用メカニカルブレーキ	多賀工場	小藤田義照	"
"	486900	ホイスト用メカニカルブレーキ	多賀工場	大藤満雄	"
"	486901	集電子	多賀工場	古市光之	"
"	486908	電気扇用羽根	多賀工場	古市光之	"
"	486913	着火配電器キャップ	多賀工場	横徳内永直	"
"	486914	電圧波構成装置	多賀工場	四倉輝夫	"
"	486919	ペルトン緊張車	多賀工場	井上利達	"
"	486928	ホイスト走行装置	多賀工場	宮崎倉俊	"
"	486988	記録計のペン保持装置	多賀工場	沼三浦武雄	"
"	486995	ホイスト駆動用電動機	多賀工場	阿部善右衛門	"
"	486997	マグネットブレーキ	多賀工場	鴨井江邦治	"
"	486998	ホイスト用メカニカルブレーキ	多賀工場	横河内村直三	34. 1. 14
"	486999	自動潤滑油ポンプ	多賀工場	河井三陽	34. 1. 19
"	487004	防振装置	多賀工場	横河内村直三	"
"	487005	防振装置	多賀工場	古市光之	"
"	486882	単相三線式配電変圧器焼損防止装置	多賀工場	古市光之	"
"	486892	密閉型電動機の冷却装置	多賀工場	川崎光彦	"
"	486898	熱動型回路遮断器	多賀工場	林田五郎	"
"	486916	液体抵抗器	多賀工場	益子三郎	34. 1. 19
"	486917	液体抵抗器	多賀工場	益子三郎	34. 1. 19
"	486994	碍管の閃絡防止装置	多賀工場	中島敏夫	34. 1. 14

(42頁へ続く)