

九州電力株式会社 納

諸塚揚水発電所用 56,500kW ポンプ

56,500 kW Pump for Morozuka Pumped Storage Power Station,
Kyushu Electric Power Co., Inc.寺 田 進* 田 原 晴 男* 細 田 益 三*
Susumu Terada Haruo Tahara Masuzō Hosoda

内 容 梗 概

宮崎県耳川上流に九州電力株式会社の諸塚揚水発電所が完成した。立軸で、水車とポンプとがそれぞれ独立ケーシングとして作られたものとしては世界最大の容量を誇り、ポンプの吐出量は $18.6\text{m}^3/\text{s}$ 、全揚程は 241.4m、電動機出力は 56,500 kW である。

現地での公式試験の結果は、ポンプ効率保証値90%に合格し、電源急速遮断時の水撃圧力上昇値も保証数値18%の約半分という好成績を収めた。このポンプは、歯形継手による自動連結あるいは切放し、そのほか巨大な施設を隣接発電所からの遠隔無人運転にするなど特筆すべき新しい技術の粋が数多く採用されている。

1. 緒 言

最近あいついで建設される大容量火力発電所の夜間における余剰電力を利用して揚水し、系統出力の増加をはかる揚水発電所は、数年来注目されてきているが、大容量の揚水ポンプの建設は、従来の経験をはるかに上まわるものであるだけに、特にこの発電所の最も重要な問題点である。

諸外国特に欧州各国では、この数年の間にオーストリアのリンベルグ発電所の横形揚水ポンプ (63,500 kW)、リュウネルギー発電所の立形揚水ポンプ (50,000 kW) など、大容量の揚水ポンプをもつ揚水発電所の建設がつぎつぎに実施されるようになってきた。

わが国では、昭和27年に完成した東北電力株式会社沼沢沼発電所の 21,000kW 揚水ポンプ、昭和34年に完成した四国電力株式会社大森川発電所の 15,000 kW ポンプ水車兼用機について、今回完成した九州電力株式会社諸塚発電所の揚水ポンプは第3番目のものである。この揚水ポンプは全揚程からいっても駆動電動機の出力からいってもわが国最高の記録品であって、世界でもリンベルグ発電所につぐ容量をもち、立形では世界最大のものである。

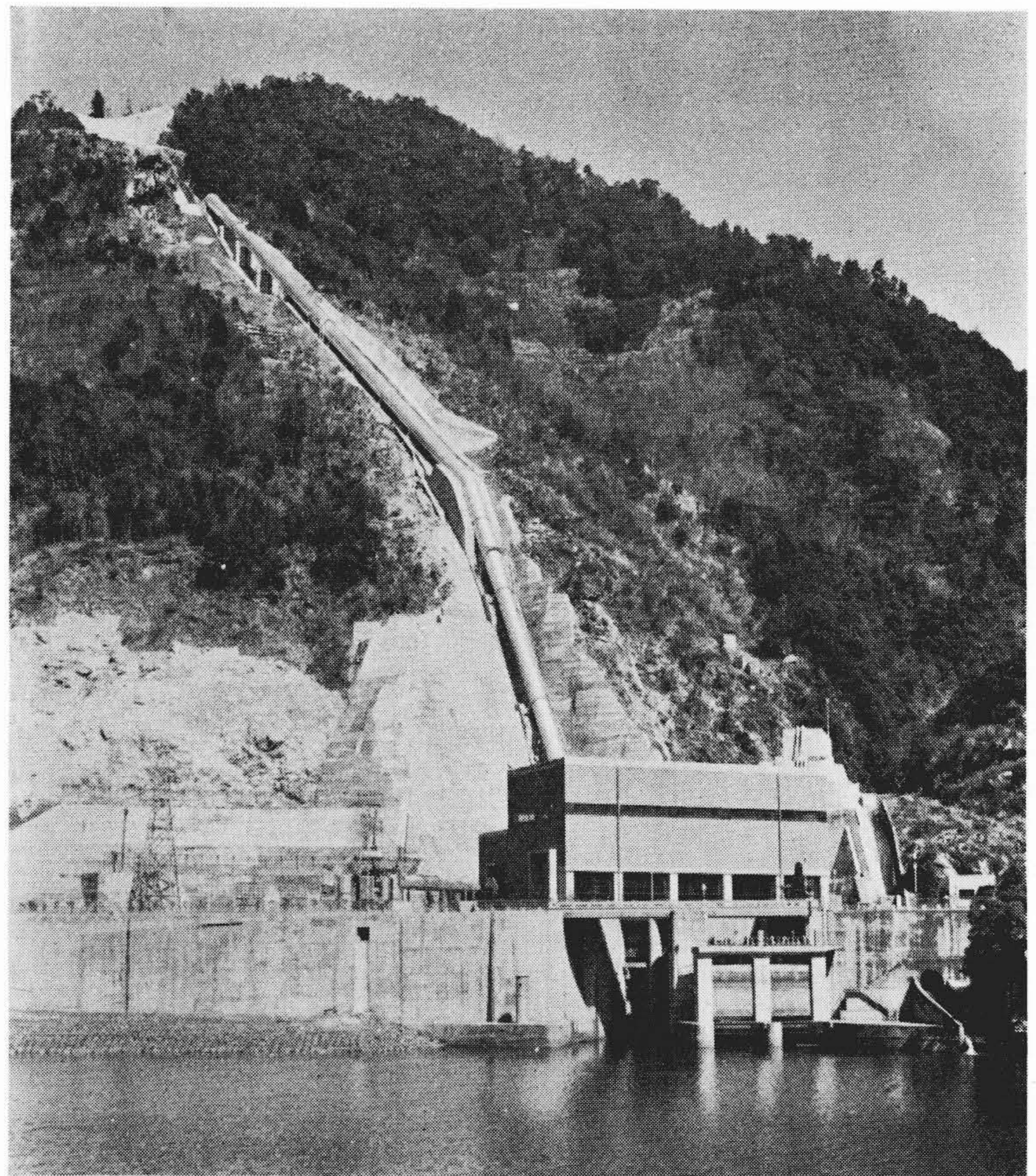
この諸塚発電所のポンプは、大容量揚水ポンプとして今までの記録品であった沼沢沼発電所のポンプの2倍半をこえる容量をもつばかりでなく、機械の配列は立形独立式という、わが国始めてのものであってその完成が待たれていた。このほど現地据付後の試験を好調のうちに終えたので、ここにその概要を報告する。

この揚水ポンプは、大容量であるばかりでなく、長期にわたる高比較回転度のモデル試験にもとづいて最終設計を決定したポンプ本体、新しい構想による大口径ニードル吐出弁、遠方操作で自動的に着脱する歯形継手など多くの新しい点があり、その設計・製作には日立製作所の総合技術が結集されている。

2. ポンプの仕様

この発電所の機器は、上部より電動発電機、水車、ポンプの順の配列とし、たて形でポンプと水車とをおのおの独立の機械とする方式を採った。ポンプの仕様を沼沢沼発電所のものと比較して示すと

* 日立製作所電有工場

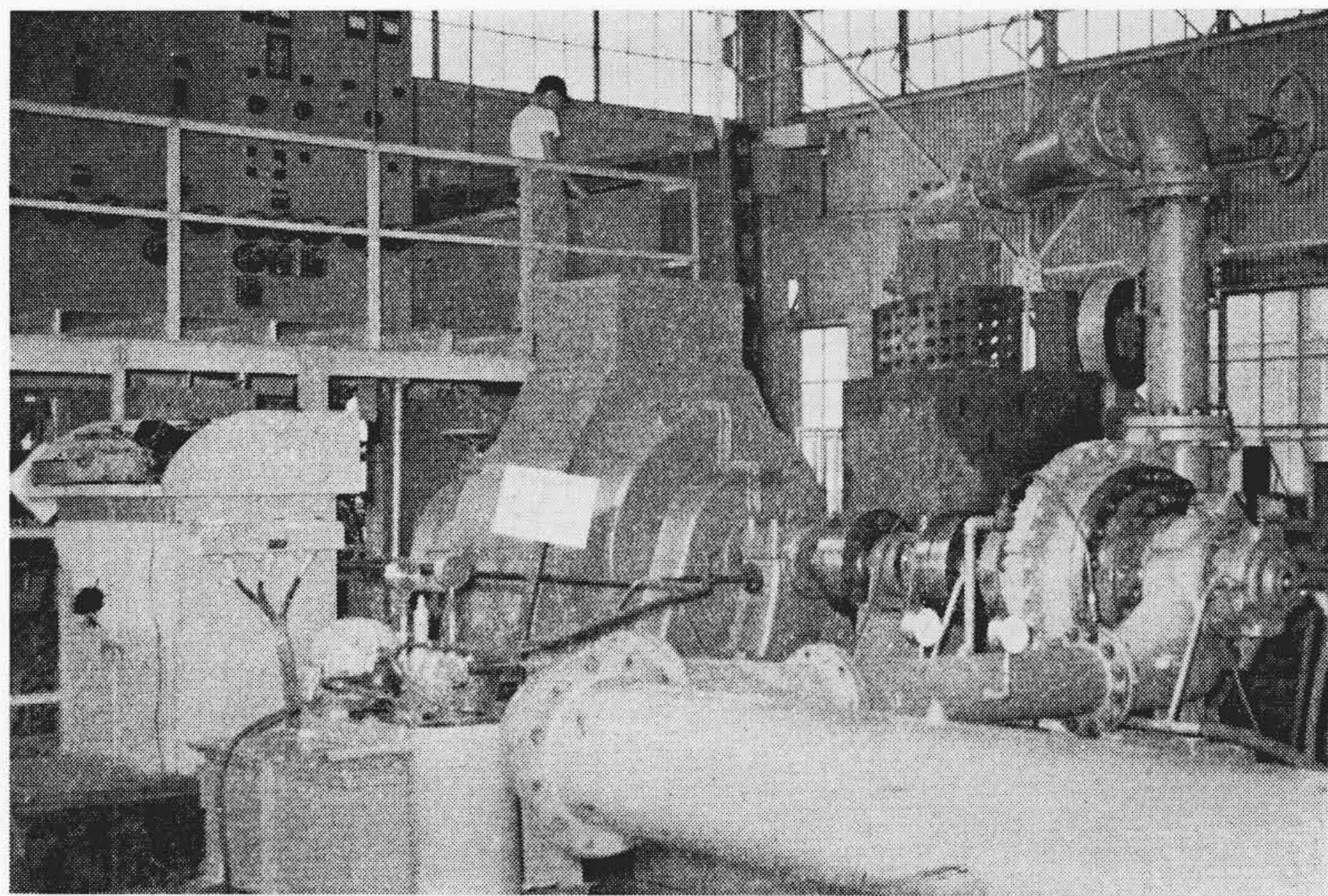


第1図 諸塚揚水式発電所

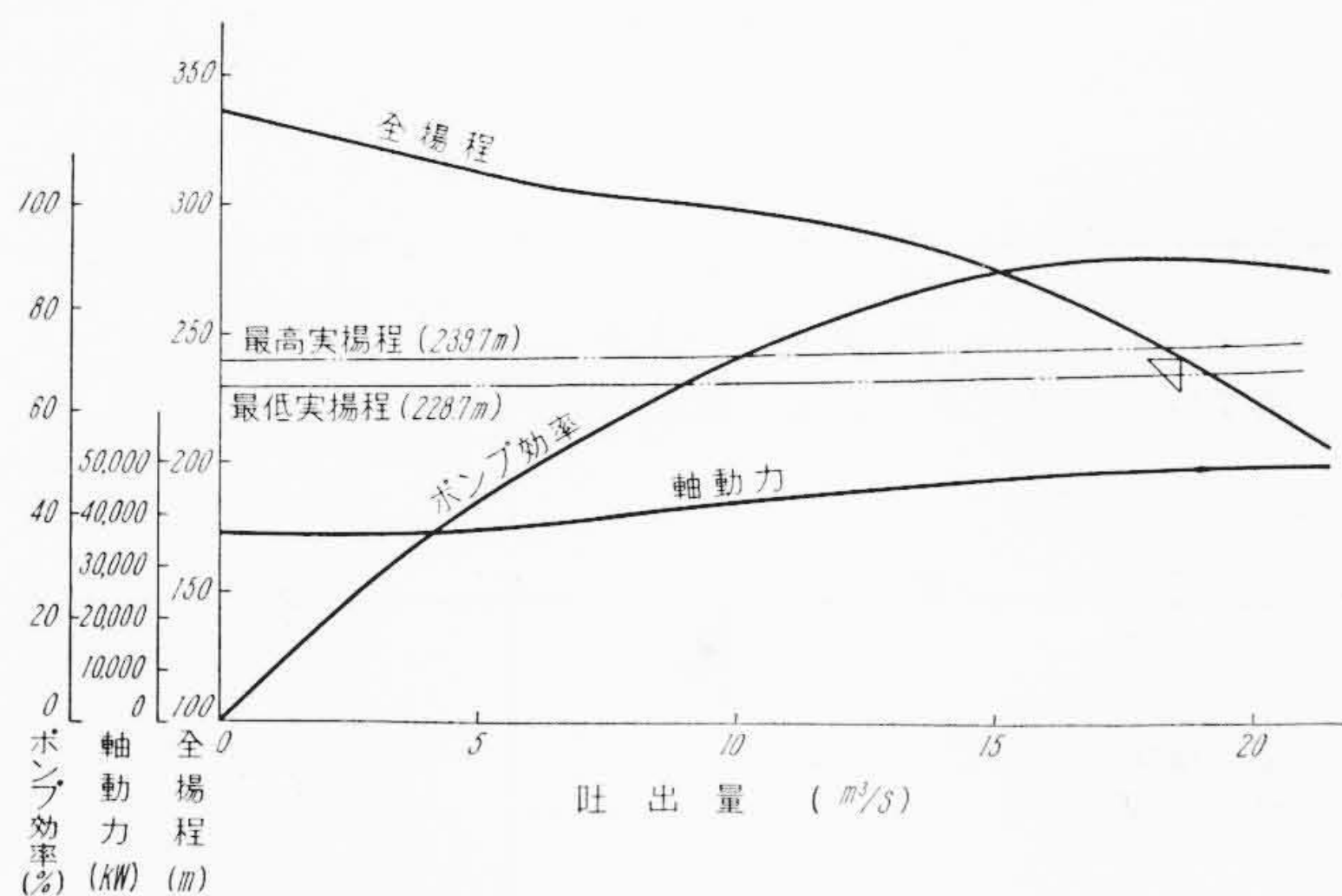
第1表 諸塚発電所と沼沢沼発電所のポンプ仕様の比較

	沼 沢 沼	諸 塚
形 式	横軸両吸込2段タービンポンプ	立軸片吸込2段タービンポンプ
口 径	1,500mm	1,800mm
全 揚 程	211m	241.4m
吐 出 量	$7.9\text{m}^3/\text{s}$	$18.6\text{m}^3/\text{s}$
回 転 数	500 rpm	300 rpm
電動機出力	21,000 kW	56,500 kW
比較回転度	235	275
吐 出 弁	1,500mmニードル弁	1,800mmニードル弁
ポンプ継手	移動ボルト式	油圧操作歯形式
台 数	2	1

第1表のようになる。



第2図 モデル試験装置



第3図 予想特性曲線

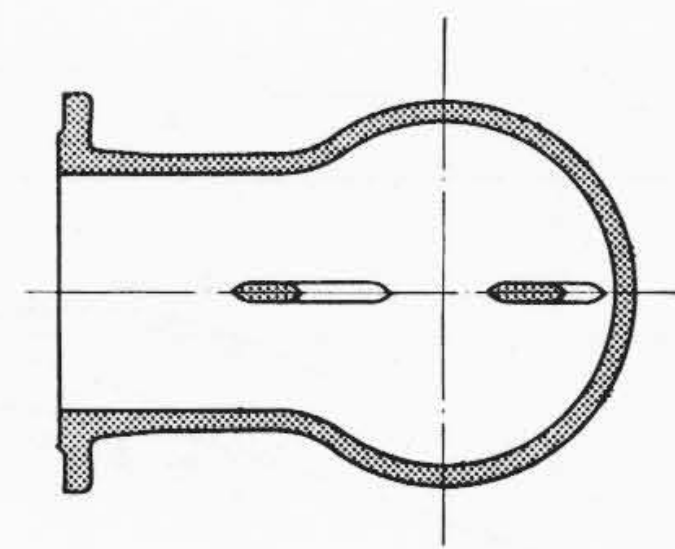
沼沢沼発電所の場合に比較して吐出量で2.35倍、電動機出力で2.7倍という大容量のものである。継手は、油圧によって操作着脱する歯形構造であって、揚水運転中はポンプ軸を水車軸に連結し、発電運転中はポンプ軸を水車軸から切り放しておくようになっている。

3. モデル試験とポンプの性能

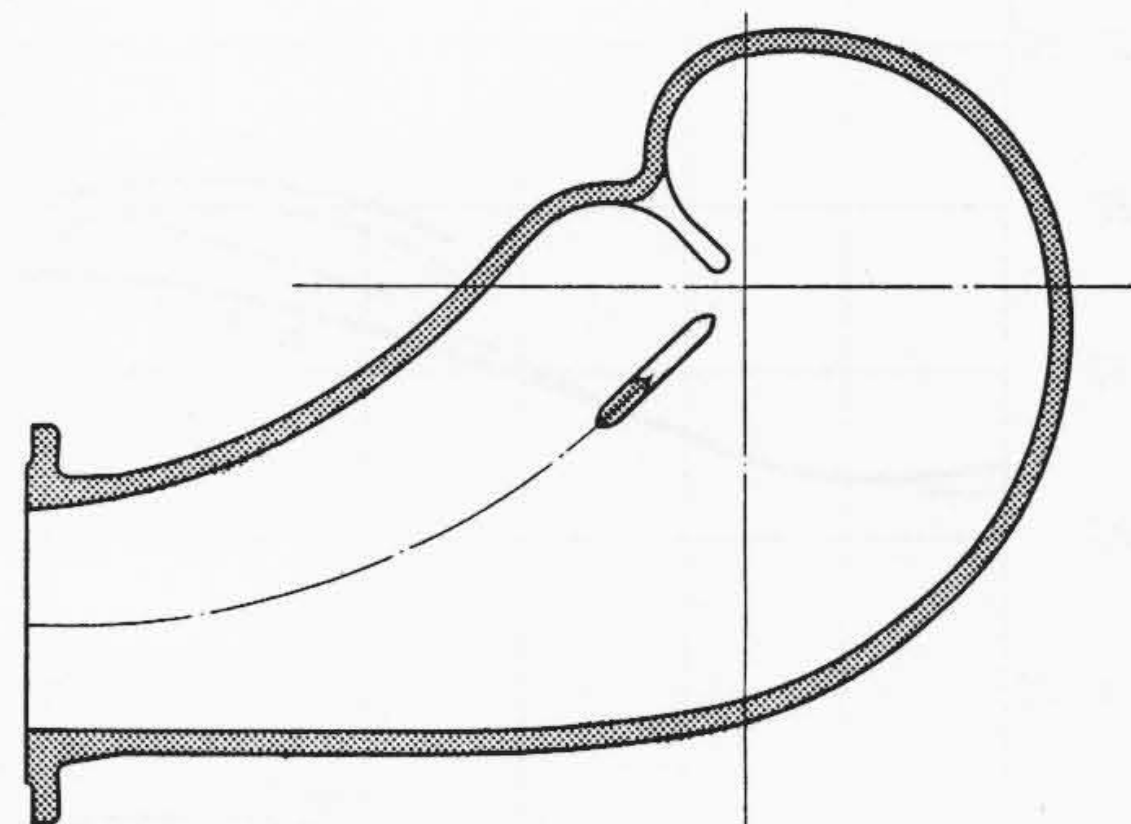
このポンプは、今までの実績をはるかに上まわる大容量のものであること、沼沢沼の実績に比較して、より高い全揚程であるにもかかわらず、かえって、より高い比較回転度を採用したこと、90%という高い効率を目標としたこと、プリローテーション付きの吸込ケーシングを採用した新しい設計であることなどから、実物と水力学的にまったく同一の水通路形状をもつ横軸のモデルポンプを製作して、その性能を詳しく調べた。

モデル試験の目的は、ポンプの特性曲線を確認すること、キャビテーション性能を調べること、電源遮断時の水撃現象の解析をする基礎となるポンプおよび弁の全般特性を求めることなどである。モデルポンプの寸法は実物ポンプの $1/10$ であるので、回転数は実物ポンプの10倍の3,000 rpmとして、実物ポンプと同一の全揚程で実験ができて、実物ポンプと同じ吸込条件でキャビテーション性能を調べることができる。第2図はモデルポンプの試験の状況を示したものである。

モデルポンプの特性試験の結果をムーデーの $1/4$ 乗式によって換算した実物ポンプの特性曲線を第3図に示す。ポンプの最高効率は90%である。キャビテーション性能は新しいプリローテーション付ケーシングによって非常によい結果が得られた。普通形の吸込ケーシングは第4図の(A)のような形をしている。プリローテーション付

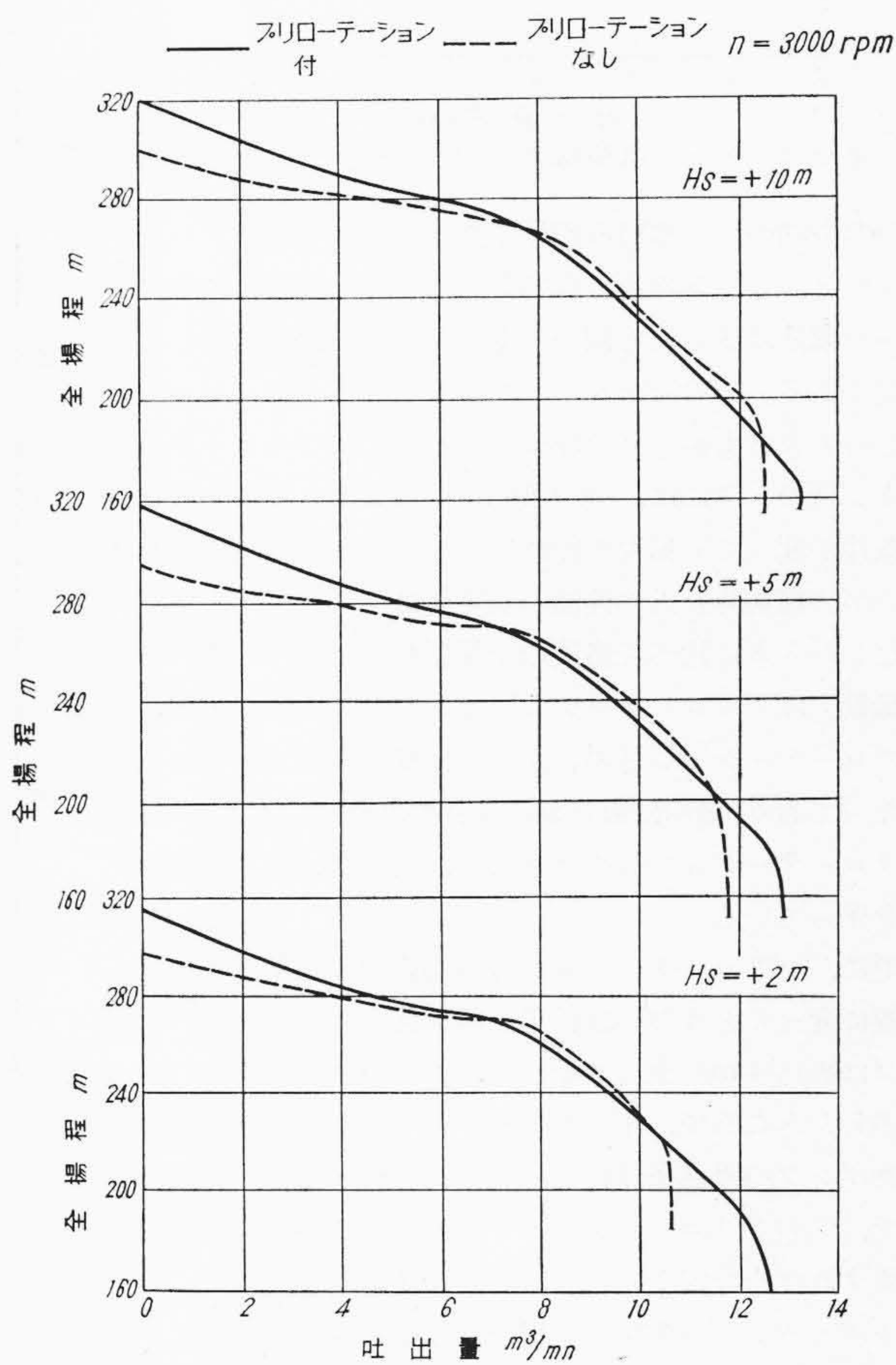


(A) 普通形



(B) プリローテーション形

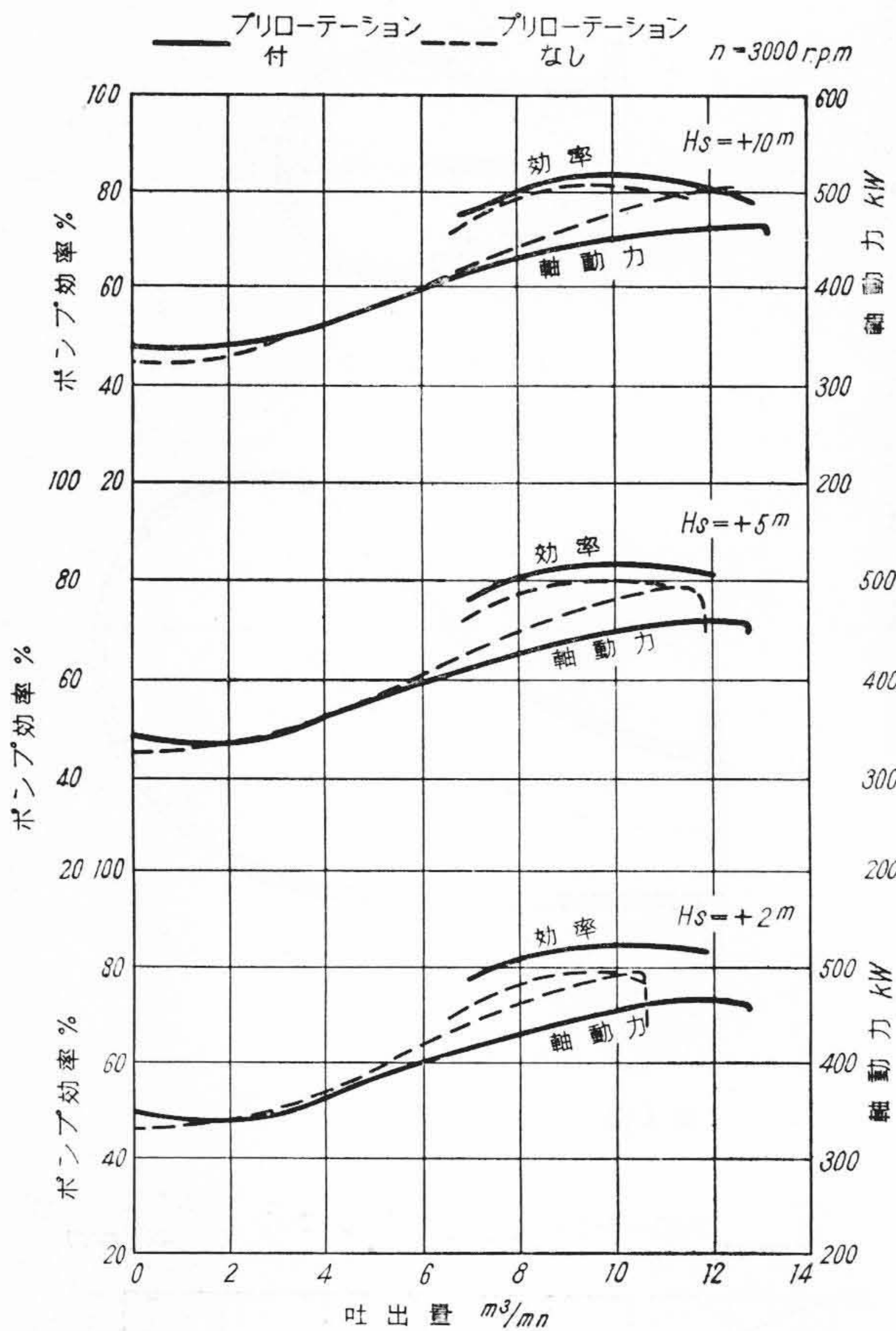
第4図 サクションケーシングの形状



第5図 モデル試験結果—プリローテーションの影響 (1)

ケーシングとは、同図の(B)のように非対称の形をしており、1段目羽根車に入る流れにあらかじめ一定の旋回を与え、流れの方向を整えてキャビテーション性能をよくするとともに、吐出量の少ない領域で水圧の脈動、ケーシングの振動を軽減したものである。

第5、6図は、吸込ケーシングと、第1段目羽根車と第2段目羽根

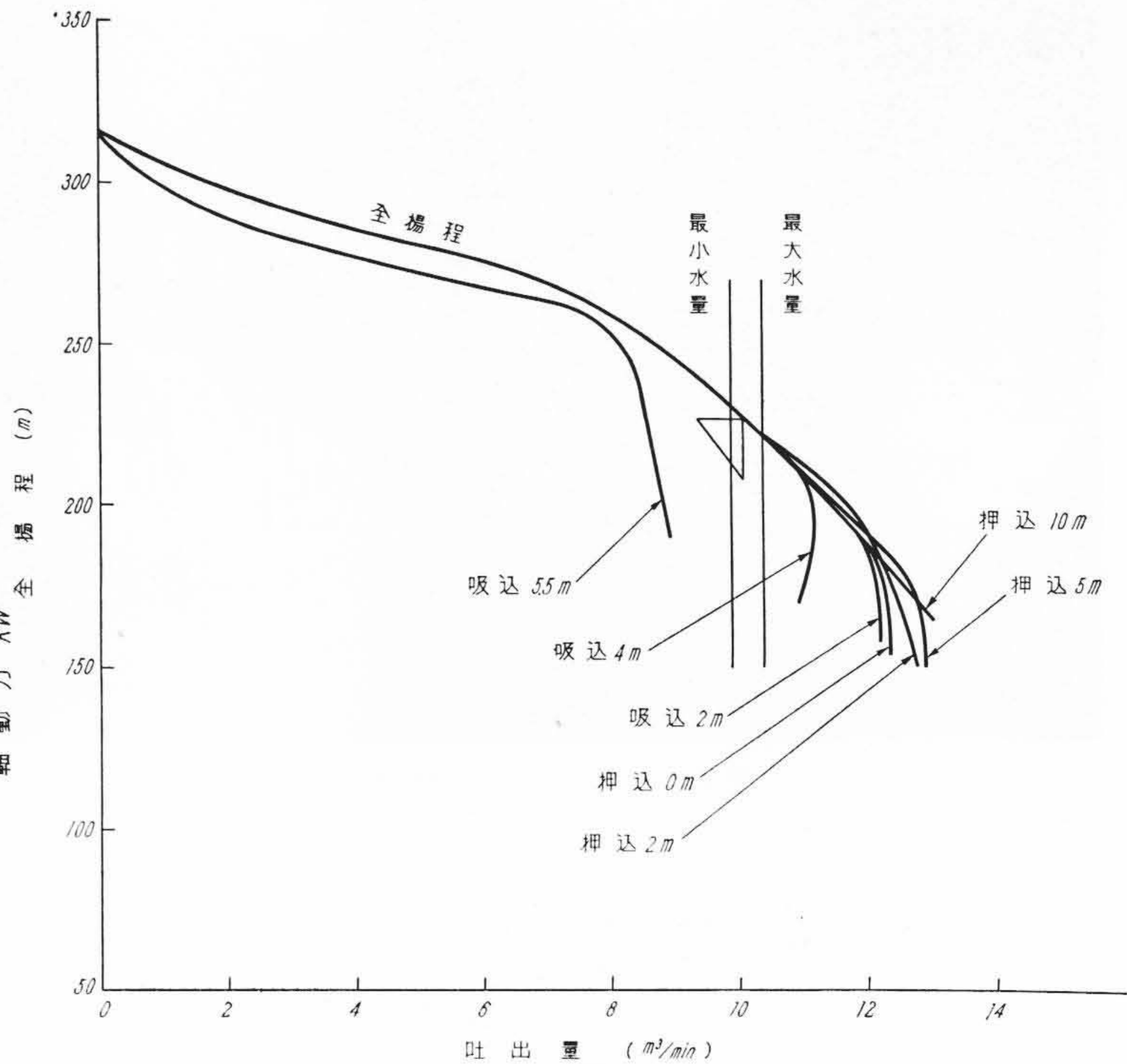


第 6 図 モデル試験結果—プリローテーションの影響 (2)

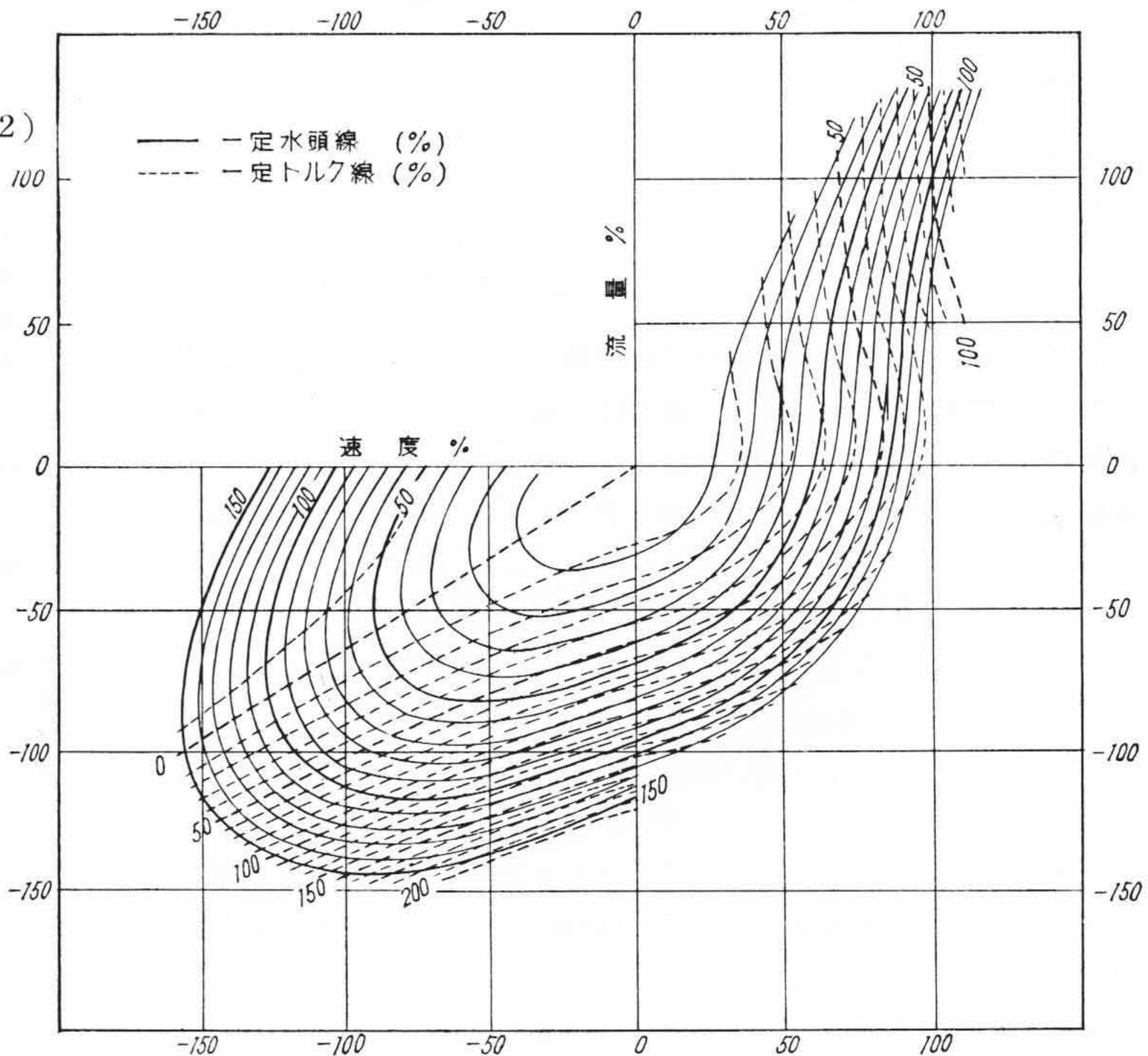
車との中間の戻り水路の部分とだけを、プリローテーション付と、なしとの両方式のものに交互に取替え、そのほかの部分とはまったく同一のものを使って比較試験した結果である。このモデルポンプは、プリローテーションなしのときにもかなりの好成績を示すが、プリローテーション付のときには、押込 10 m から 2 m と幅広く吸込側条件が変わっても揚程性能にほとんど変化が見受けられず、かつ締切時付近の性能の安定度はプリローテーションなしのときに比べて格段の上昇振りを示している。また軸動力はプリローテーションなしのときに比べると、プリローテーション付のときには仕様点付近でかなり低くなっており、効率は吸込側の条件の変化にかかわらず、プリローテーション付のときには、常にほぼ同一の高い値を保っている。

更に、プリローテーション付の場合の吸込条件を一層大幅に変えたときの試験結果を第 7 図に示した。このポンプは吸込 4 m に至って始めて、使用最大水量をかなり超過したところで、キャビテーションを起こし始める。実物ポンプの吸込条件は、最小押込が 14 m となっているので、このプリローテーション付のモデルポンプの設計をそのまま採用すれば十分安全であることがわかった。

モデルポンプの実験は、以上に示した性能のほかに、羽根車の吸込部での流入水の各流線の実際の流速や方向の測定を行って、羽根車の羽根角度が流入水の角度とほとんど一致していることを確認したり、ポンプの流入部での水圧の脈動を測定して、プリローテーション付のものがプリローテーションなしのものに比べてはるかに安静な流れ方をしていることを見出したりする点にも及び、いずれも実物設計に直接に大いに役立つ効果を収めた。モデルポンプの研究結果については、後日詳しく報告するつもりである。



第 7 図 キャビテーション試験 (プリローテーションあり)

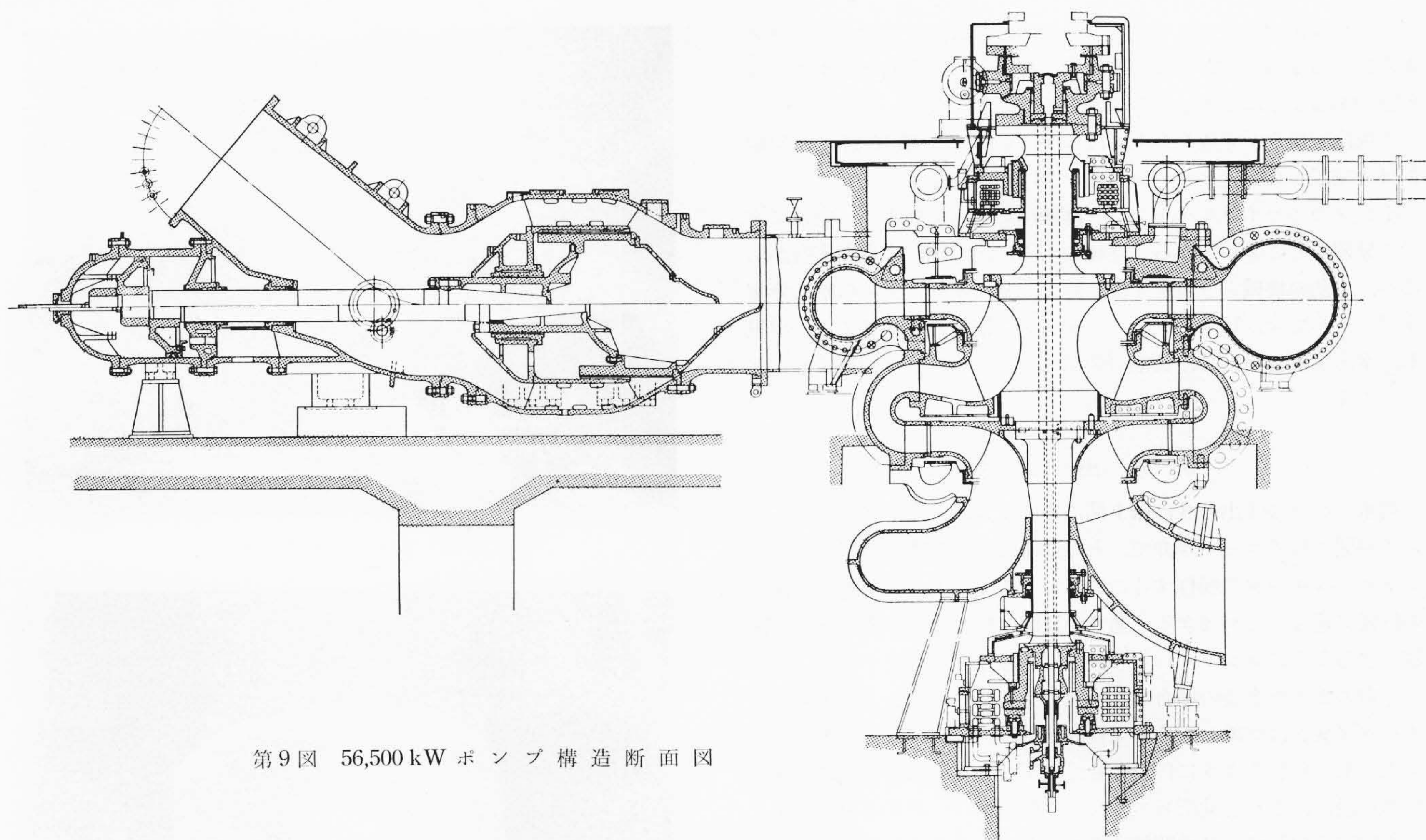


第 8 図 全 般 特 性 曲 線

ポンプの電源を遮断したときに起こる鉄管内の水撃現象を究明するにも、モデルポンプの結果によらなければならない。この解析には正常な運転におけるポンプの特性試験のほかに、正回転時の逆流試験、水車特性などを実施しておいてその結果からポンプの回転数、吐出量の正負あらゆる領域の性能を調べておく必要がある。第 8 図は、モデル試験の結果から求めた全般特性曲線である。

4. ポンプの構造

ポンプは立軸 2 段のタービンポンプで、上部より歯形継手を介して水車軸から動力の伝達をうけている。ポンプの構造を第 9 図に示す。



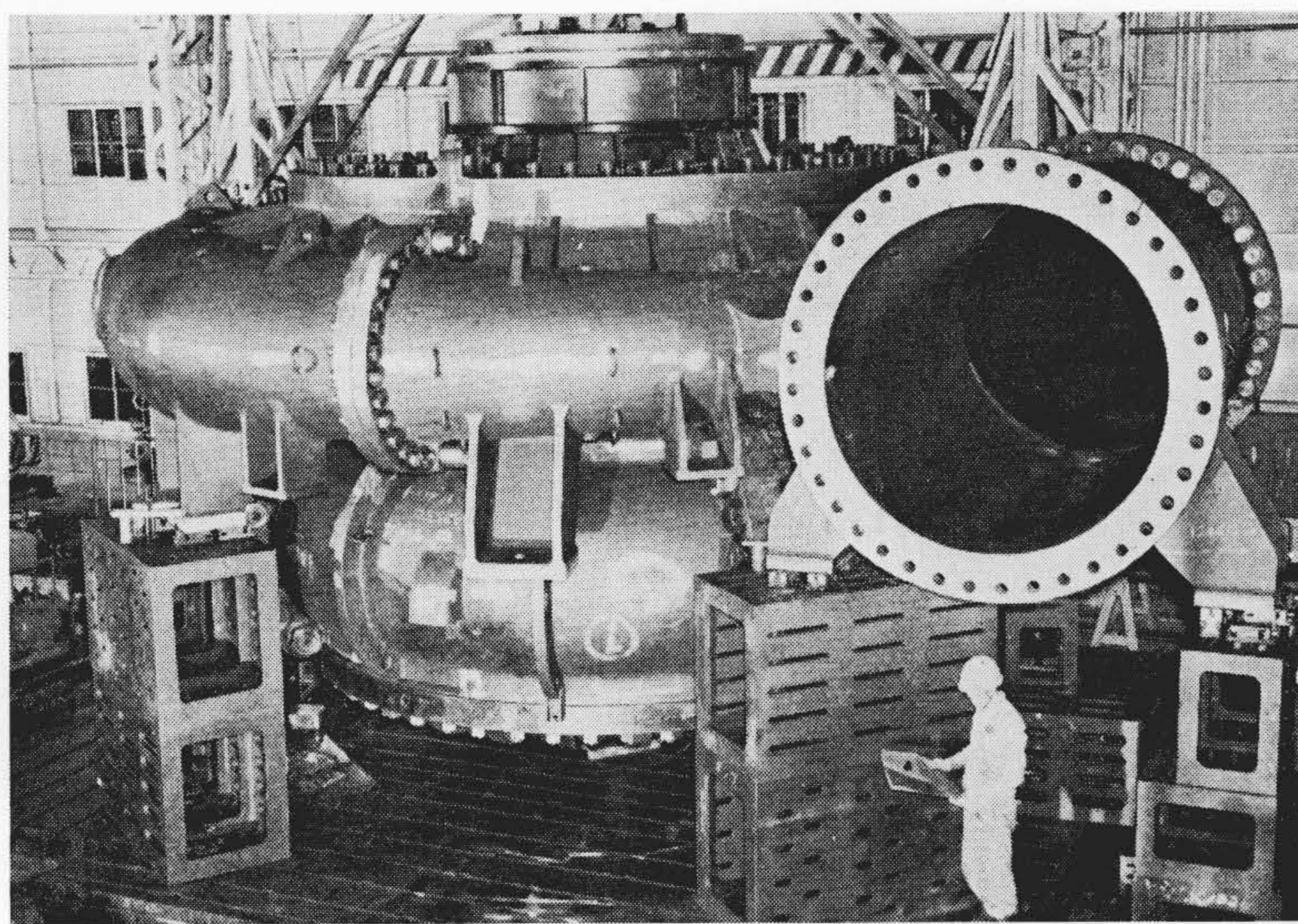
第9図 56,500 kW ポンプ構造断面図

回転部は主軸と羽根車とからなり、主軸はほぼ中央部で上軸と下軸に分割され、2個の羽根車はいずれも上軸に取り付けられている。羽根車の直径は約3,300 mmにもなるが、13%クロームステンレス鋼製の一体铸造とした。回転軸の軸推力について述べれば、2段目羽根車の上部にバランス室をおき、この圧力を吸込側に導いたので、運転中でも圧力による軸推力はほとんど平衡し、下部の推力軸受は回転部の自重のみをうけている。主軸は鍛鋼製であって、上軸と下軸とを別個に鍛造したが、上軸だけでも重量25 tに及んでいる。油圧によって着脱する歯形継手は主軸の上部に、油圧の操作機構は主軸の下部に取り付けられているので、主軸の中空部を通じて操作するよう工夫してある。スパイラルケーシングは鋳鋼製で、輸送の制限から5分割した。2段目羽根車から吐出された水は、このスパイラルケーシングにより集められてポンプの吐出口に達し、吐出弁に続いている。

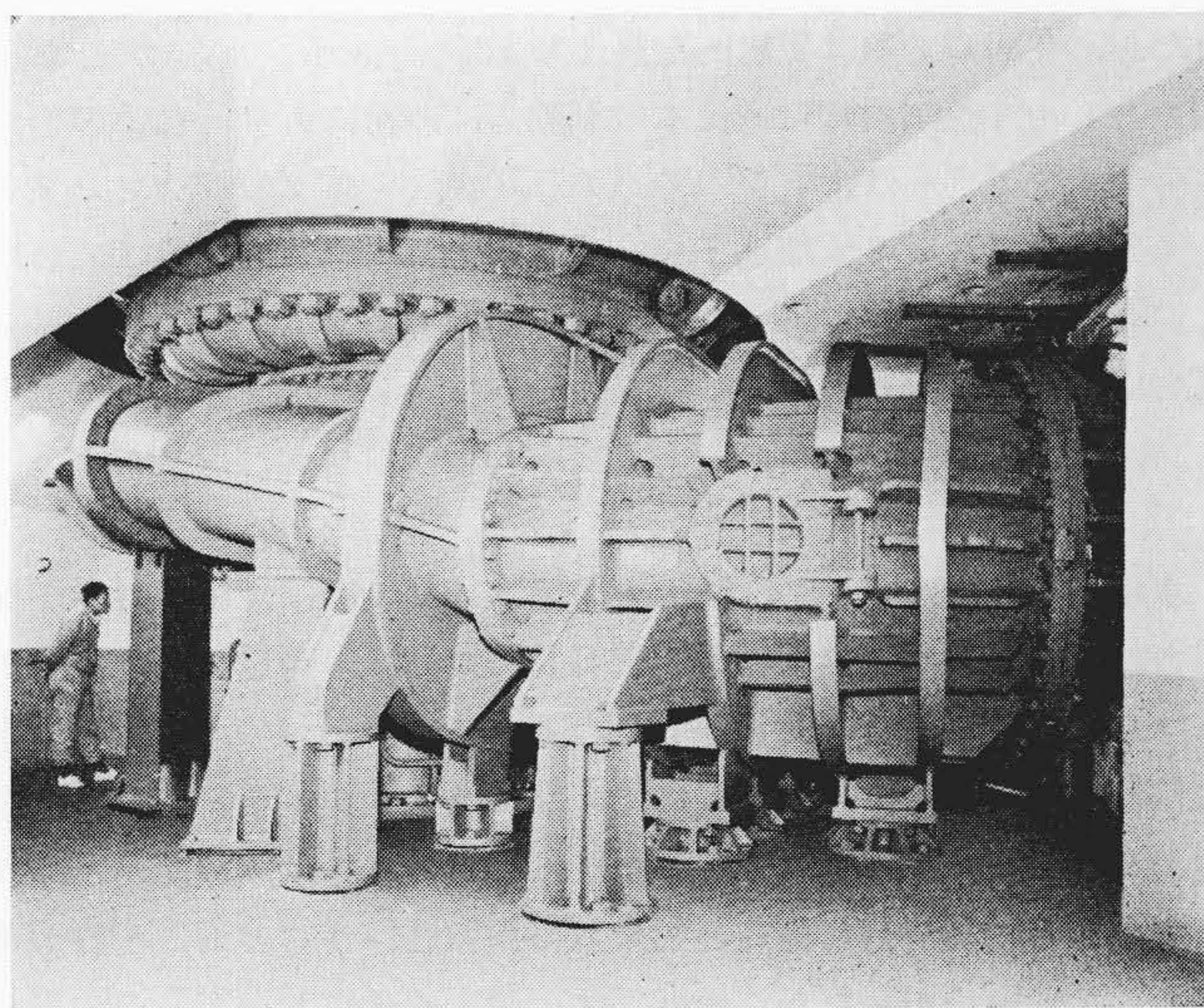
このポンプは、前述の沼沢沼発電所の揚水ポンプを始めとして、従来の例に比べてかなり高い比較回転度が採用されている。回転数の増加は、ポンプを小形にすることができて有利な点もあるが、ポンプの吸込性能の点からいえば条件が悪くなるので、前述のモデル試験の結果にもとづいてプリローテーション付の吸込ケーシングを採用した。1段目羽根車から吐出されて、2段目羽根車に流入する水にも、1段目と同様のプリローテーションが与えられている。

回転部の軸推力は、水車軸と絶縁してポンプ下部の推力軸受でうけている。前述のように、水圧による軸推力は平衡しているので、この推力軸受が受持つ力はほとんど回転部の自重のみであるが、継手をはめ込むときに軸を微動させるので、推力軸受の摩擦力を軽減させるために別置の電動油ポンプによって圧油を送りこみ軸を浮上させている。事故により油がなくなったときには、自動的にこの浮上装置の油圧を復活させるようになっており、始動時の所要トルクを軽減させることができる。

上下の軸封装置には分割形の特種カーボンパッキンを使ったが、



第10図 1, 2 段目ケーシング



第11図 吸込ケーシング

ポンプが停止中でもポンプケーシング内部には、吸込側からの押込水位による圧力がかかっているため、パッキンの交換は充水中でも可能であるように工夫してある。

工場内で組立を完成した 1, 2 段目ケーシングを第 10 図に、現地据付を完了した吸込ケーシング部を第 11 図に示す。

ポンプのスパイラルケーシングは埋込になっているが、内部はすべて分解することができる。立軸のために、上部に水車発電機があるが、上部の機械を分解せずに、特殊工具により、下から順次分解することができ、13%クロームステンレス鋼製の各種ライナ、羽根車、案内羽根盤などは、長期の使用後には随時点検・補修することもできる。

5. 吐 出 し 弁

揚水ポンプの吐出し弁は第 9 図に示すように、油圧ピストンによって開閉されるニードル弁で、その油圧は復原機構付の配圧弁をコントロールモータで操作することにより、ニードル弁の開度を任意の位置に選ぶことができる。通常の開閉は約 3 分間で開放または閉鎖できるようにコントロールモータの回転速度を設定する。

停電のような事故の場合は、配圧弁を非常弁によりコントロールモータ系統とは切離して油圧切換弁とし、油圧ピストンの閉方向に油圧が加えられるように作動させ、油圧ピストンの背圧側には絞り機構を設け、これを油圧ピストンの移動に従い、最初は速く途中より緩閉するいわゆる 2 段閉鎖速度が得られるようにして、ポンプ急停止時の水の逆流を少なくし、また圧力上昇を抑さえ、ポンプはほとんど逆転しないで停止できるようにした。

油圧ピストンの背圧が非常に大きくなることが予想されたので、この絞り機構はマフルドオリフィスを主体とするように設計され、潰食・油温の変化などによる絞り効果に変化が起らないようにした。

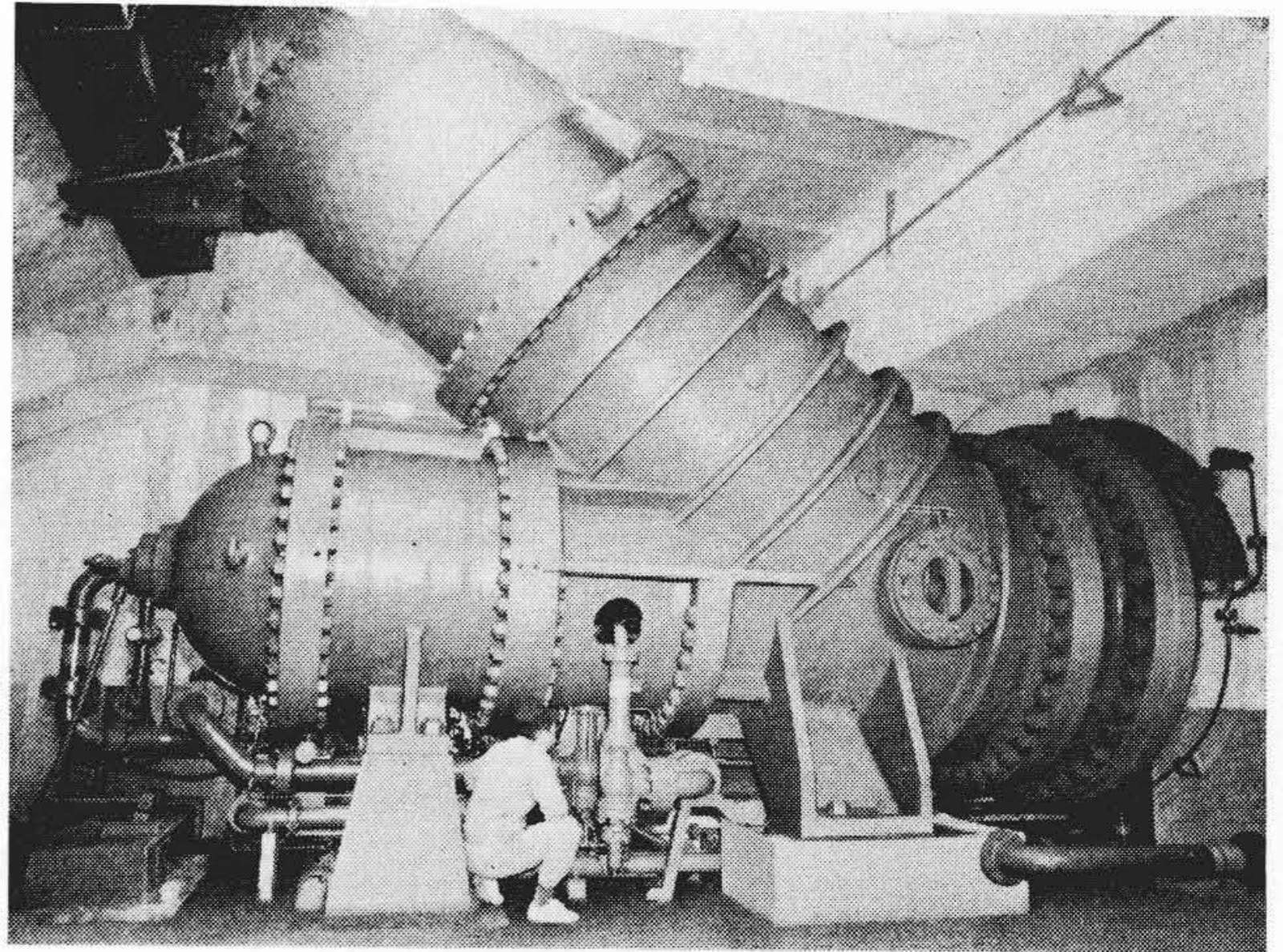
弁しゅう動部は接水している部分を含めて、すべて良質のグリスを施している。このためのグリス潤滑装置は、給油部背圧の不均衡または給油装置の故障などがあっても、ニードル弁内の圧力水が発電所内にあふれるようなことがないように慎重に検討された。また潤滑装置は油の浪費を防ぐ目的で、最小必要量だけが給油されるように、一定時限ずつ自動運転される。

ニードル弁を操作する圧油装置は、この発電所が立形の配置であり、かつ大容量のため機器を小形化する必要から、常用油圧を 40 kg/cm^2 とし、水車用とは別にポンプ専用として設けられ、ポンプの歯形継手およびその微動装置をもあわせて駆動できるように計画されている。水力発電所では、従来 20 kg/cm^2 程度の圧油装置を使っていたが、今回のものは記録的な高压である。

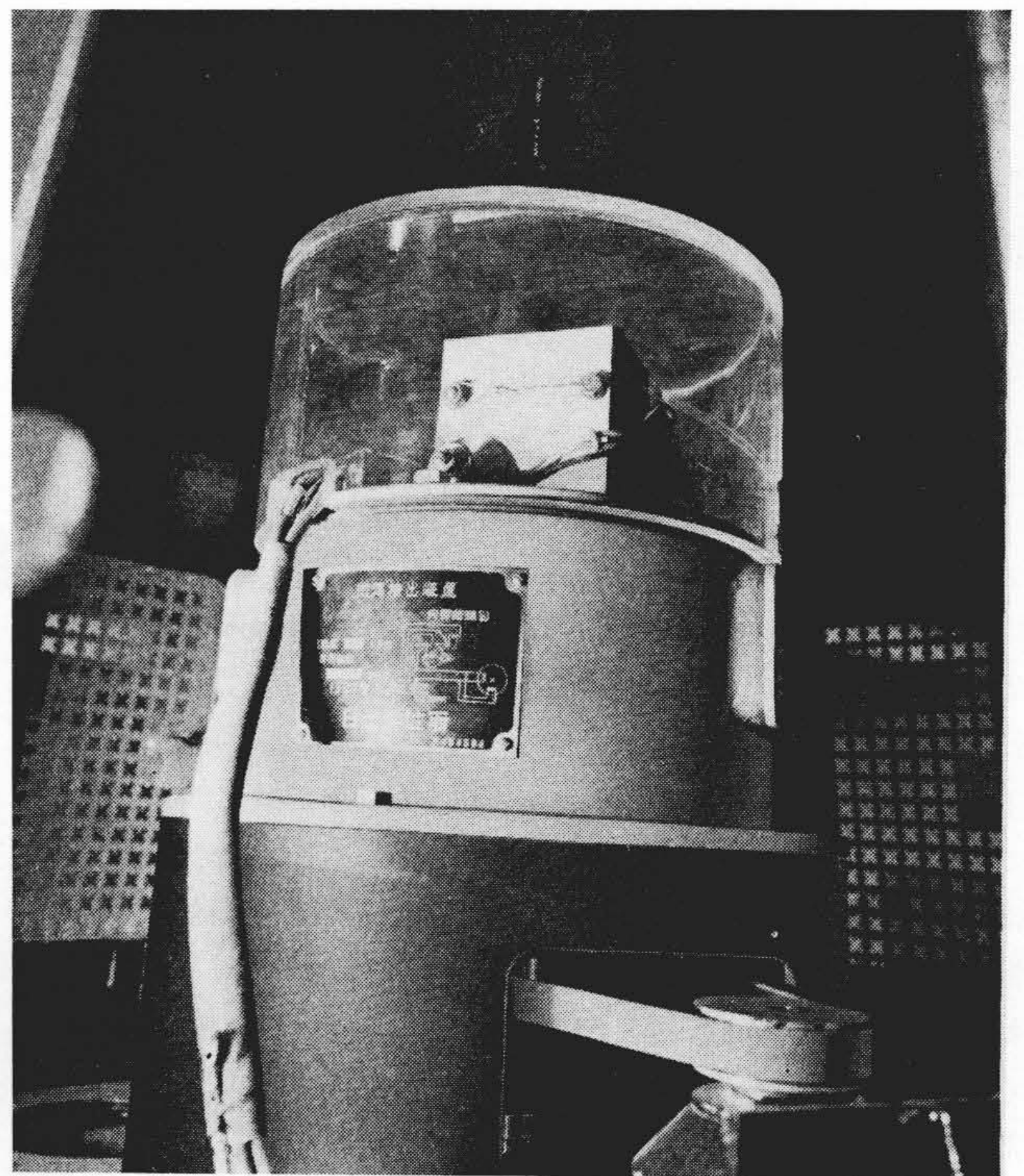
ニードル弁急閉鎖時の逆流水の制動力は非常に大きくなるので、ニードル弁ボデーはポンプのスパイラルケーシングの埋込コンクリートと同じブロックに埋込まれ、前後に分解用の空間を設けて修理時の便宜を図っている。第 12 図にその埋込まれたボデーの後部写真を示す。

6. 歯 形 継 手

水車軸より揚水ポンプに動力を伝達するためには、歯形継手が採用されたが、これは継手の着脱を容易にすれば、発電運転時にはポンプを切離して水車単独で運転できるので効率がよく、発電・揚水の切換が容易でかつ短い瞬間にできれば、揚水発電所としての機動性が高められるからである。またこの形式の継手は、機能がすぐれている割合に経済的な構造と大きさであるということも、それが選定された理由であった。この継手は伝達トルクにおいて、この形式のものでは世界最大の規模を誇るものであるだけに、特にその設計



第 12 図 据付けられた吐出し弁

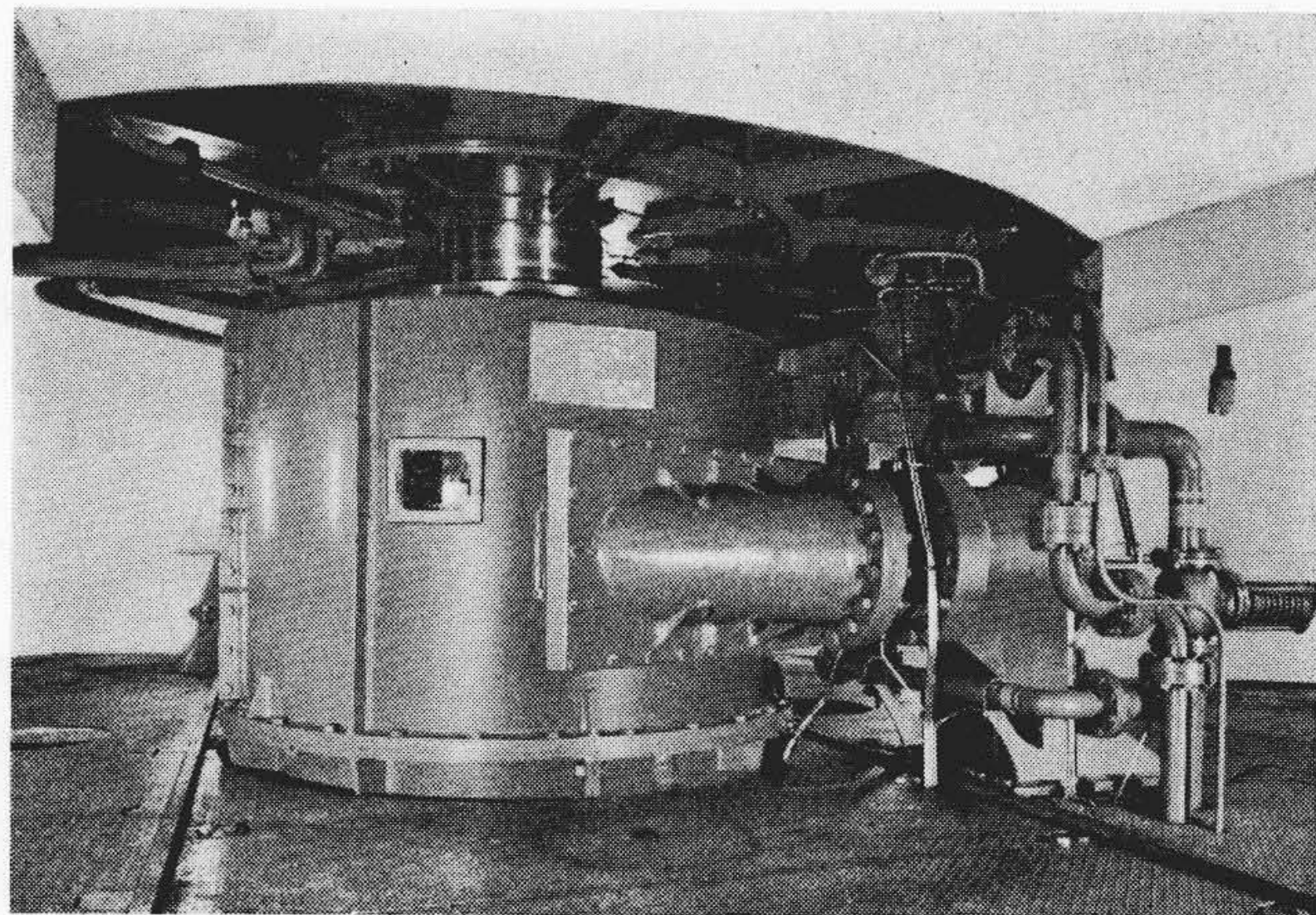


第 13 図 微速検出装置外観

は慎重に検討計画された。

構造は第 9 図に示すように、水車軸、ポンプ軸のそれぞれ軸端に内歯車を設け、ポンプ側の内歯車に常時かみ合っている幅の広い平歯車の半分を、油圧サーボモータの作用によって、水車側の内歯車にもかみ合わせて、トルクを伝達する方式である。この継手を直結するための平歯車のはめ込みは、諸外国の実例をも直接見て検討した結果、最も安全確実な方法として、水車軸の停止中にポンプ軸を微速回転させて歯の位相を合わせながら、最初は小さな力ではめ込みを進め、微少量かん入したところで、ポンプ軸の微動を止めて歯面に荷重がかからないようにすると同時に、平歯車のかん入力を強めて、歯面に損傷なく、速やかにはめ込みを完了させるようにした。

このために、継手の油圧サーボモータは、最初油圧を低くし、歯の位相が合ったところで油圧を上げるように 2 段に切換えられる圧力調整弁により調整された油圧によって駆動されるようになっており、油圧の切換えおよびポンプ軸の微動停止は、継手が微少量かん入したことを検出して行う。また、ポンプ軸の微速回転速度も、継手かん入時の衝撃によって機器が損傷されることのないように選定された。



第14図 ポンプ微動装置

これらは水車の停止を検出する微速検出装置(第13図)のインタロックを始め、そのほかのシーケンスバルブ制限開閉器などによって全部自動的に行われる。第14図に、ポンプ軸を微速回転させるためのポンプ微動装置の外観写真を示す。

継手操作の油圧配管は、ポンプ軸を貫通し、ポンプ軸の推力軸受の下端の第15図に示す圧油送り込み装置で、外部配管に接続される。この圧油送り込み装置の下に、前述の微少かん入検出弁が設けられている。

歯形継手の歯面には、運転中は常に自動的に一定量ずつ給油され、歯面が損傷されるのを防ぐ。

また、水車軸あるいはポンプ軸が熱膨張などにより延びてくるような場合には、すべてこの継手で逃げるので、推力軸受に無理な荷重がかかるようなことはない。

7. 運転方式

この発電所は、無人方式として遠方(約4 km離れた隣接の耳川変電所)より操作されるのが原則であるが、この発電所の主配電盤でも一人制御方式によって操作することも可能となっている。

各機器の操作系統は主配電盤より、ポンプ操作盤に設けられた電磁弁を操作し、この電磁弁によって油圧回路を指令して各補機が作動する方式であり、そのほか電気機器との有機的な関連、各種の保護装置、表示装置などは従来の一人制御方式の水力発電所と大差はない。

ポンプの運転は前述の遠方操作により、おのこのケースを選択してやれば、第16図のようなスケジュールでそれぞれ順序動作を確め、確実に運転される。

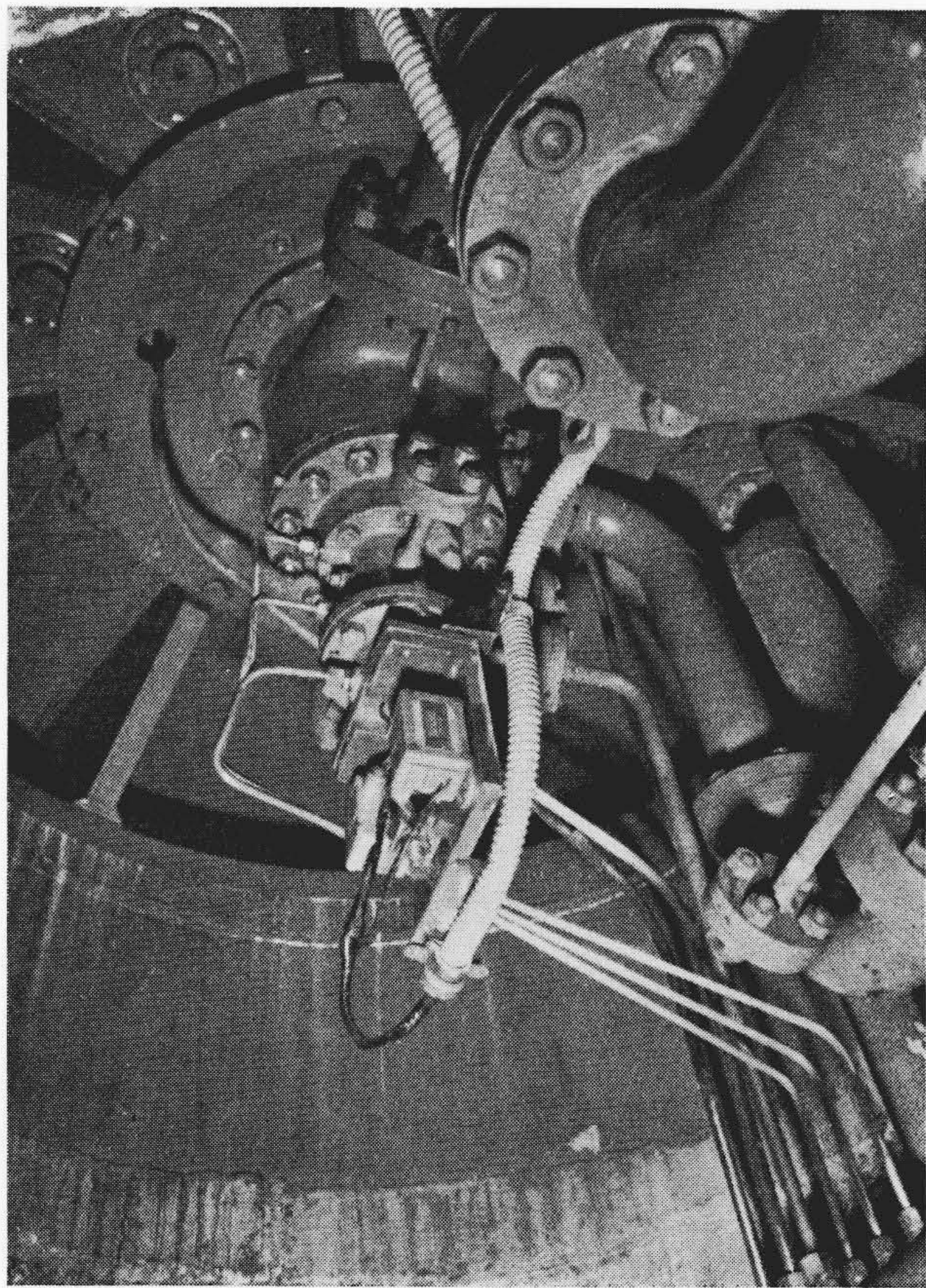
揚水ポンプ用の特異点としては、揚水中は水車は空転し、発電中はポンプ側は切離されて停止していることである。圧油装置をポンプ用として独立設置したために、油ポンプは「発電中」の選択により予備機のみ圧油槽の圧力によって自動運転され、揚水時より一段低い油圧を確保させながら、揚水運転に備えると同時に各機器の停止中における位置をさらに安全側に確守させるようにし、かつ動力の浪費がないように考慮されている。

第17図に示すポンプ操作盤は、ポンプ室最上部階床に設置され、油圧機器、水圧計器と電気系統との連絡に便利である。

8. 現地試験結果

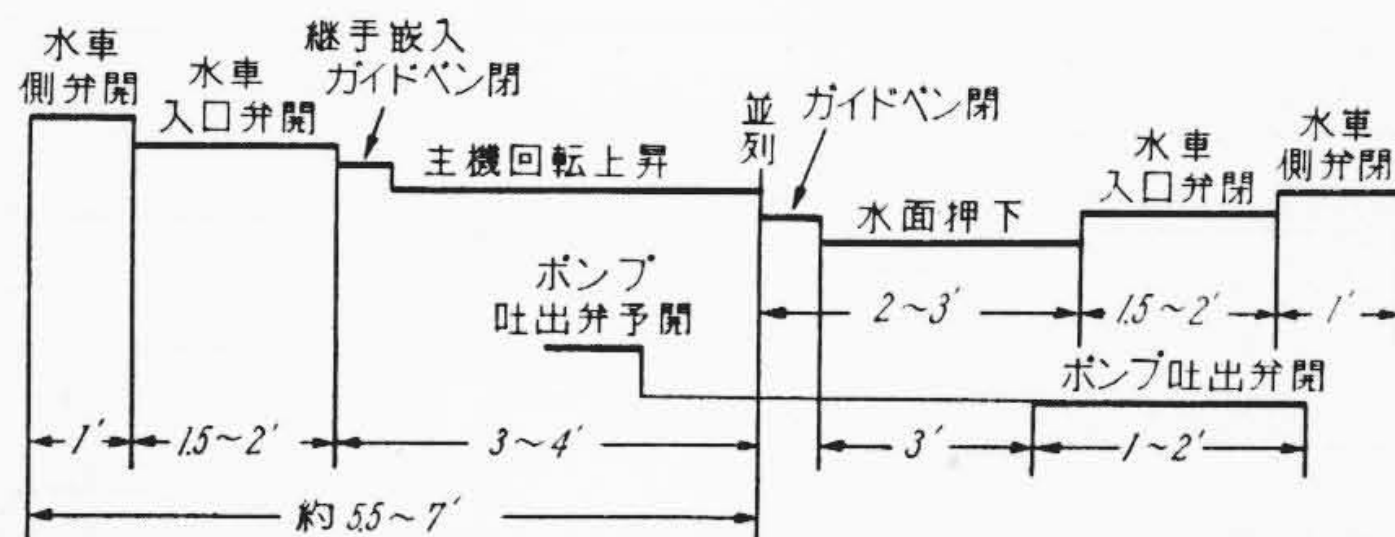
(1) 効率試験

ポンプからサージタンクに至る鉄管において、ピトー管とカレ

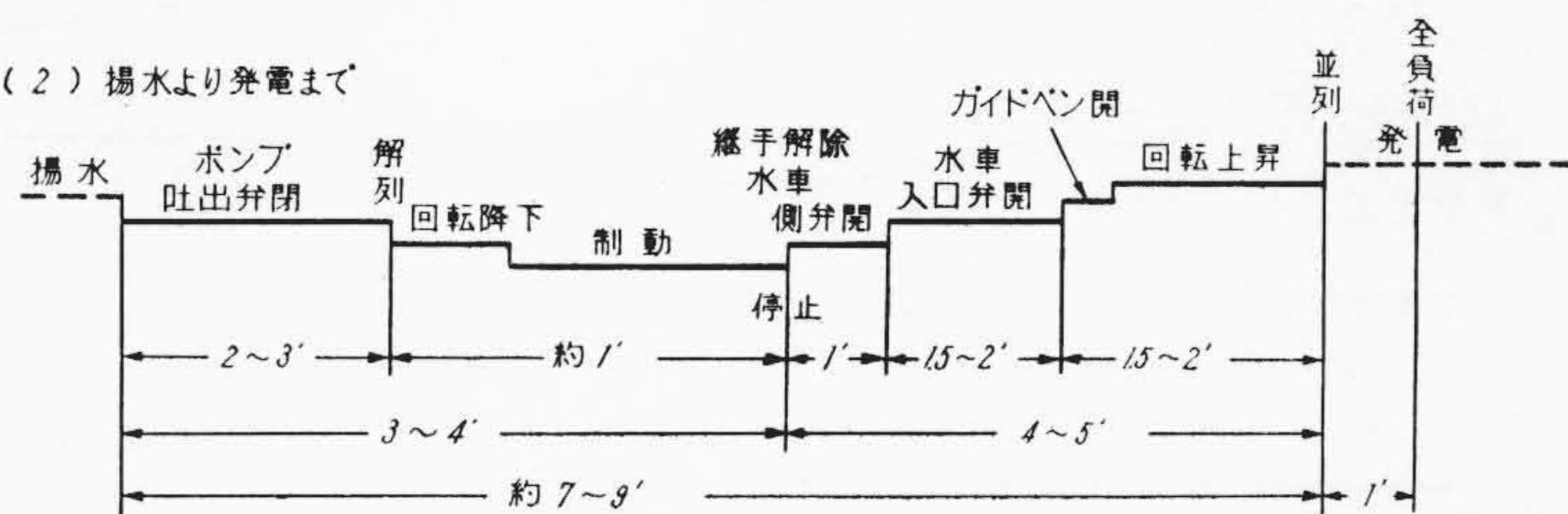


第15図 圧油送込装置

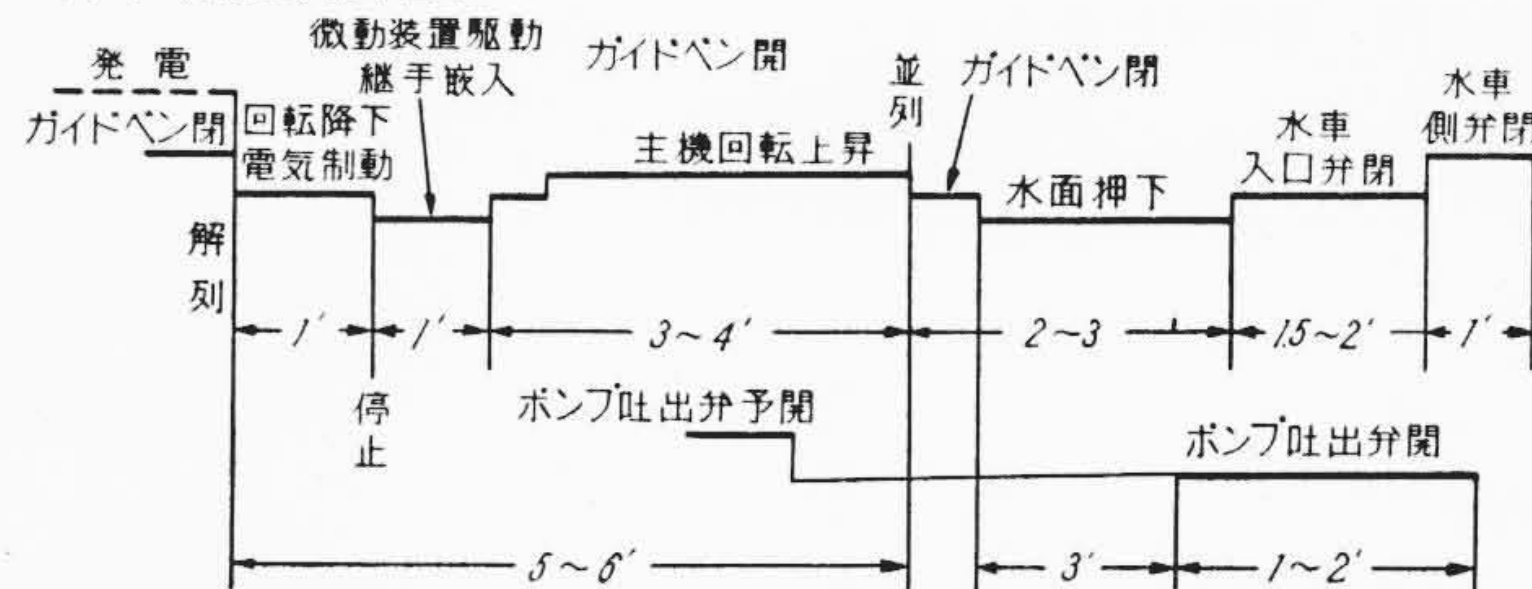
(1) 停止より揚水まで



(2) 揚水より発電まで

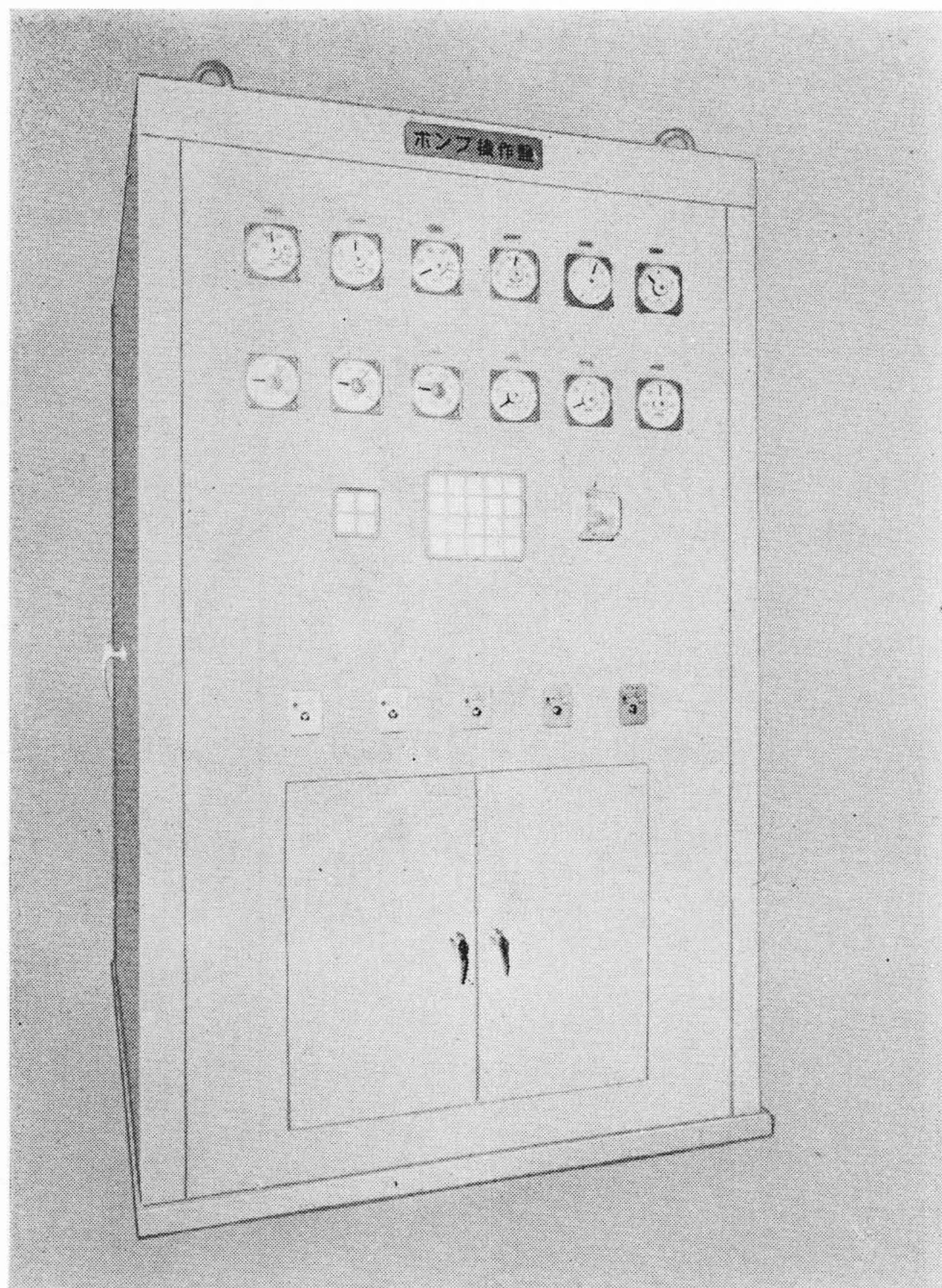


(3) 発電より揚水まで



第16図 起動停止時間関係図

ントメータとの両方式によってポンプの吐出量を、ポンプの吐出口にて吐出圧力を、電動機の入力から電動機損失と水車の空転損失を差引くことによってポンプの入力を測定し、ポンプの特性と効率を求めた。試験の結果は非常によい結果が得られ、第3図の予想仕様を完全に満足するとともに、効率の保証値90%を各点で



第 17 図 ポンプ操作盤

上まわる結果が得られた。

(2) 連続運転試験

最大出力において6時間の連続揚水試験を行い、軸受、継手などでの異常の有無を点検した。試験の結果は良好で、温度の上昇はいずれも規定値以内に収めることができた。ニードル弁の予開起動法がとられ、運転中の振動は軽微である。

(3) 水撃作用の試験

ポンプ試験を安全に行うために、ポンプのなじみ運転について、一番最初に水撃作用の試験が実施された。

電源遮断後の過渡現象を電磁オシログラフで測定した結果を第18図に示す。本図は圧油装置の油圧が規定通りの状態で電源を遮断した場合で、向って左から時間の経過につれてポンプの回転数、鉄管路の圧力、吐出し弁の開き、油圧サーボモータの開側および閉側油圧、ポンプの吐出し圧力、主電動機の電流が変化していく状態を示している。圧油装置の油圧が非常停止油圧 30 kg/cm^2 に低下した場合のオシログラムも同様に安全数値を示している。これは何らかの油圧システムの故障などで圧油槽の油圧が異常に低下した場合に揚水ポンプを非常停止させるときに相当するもので、もちろん人為的に圧油槽の油圧を下げて非常停止させたときの写真である。

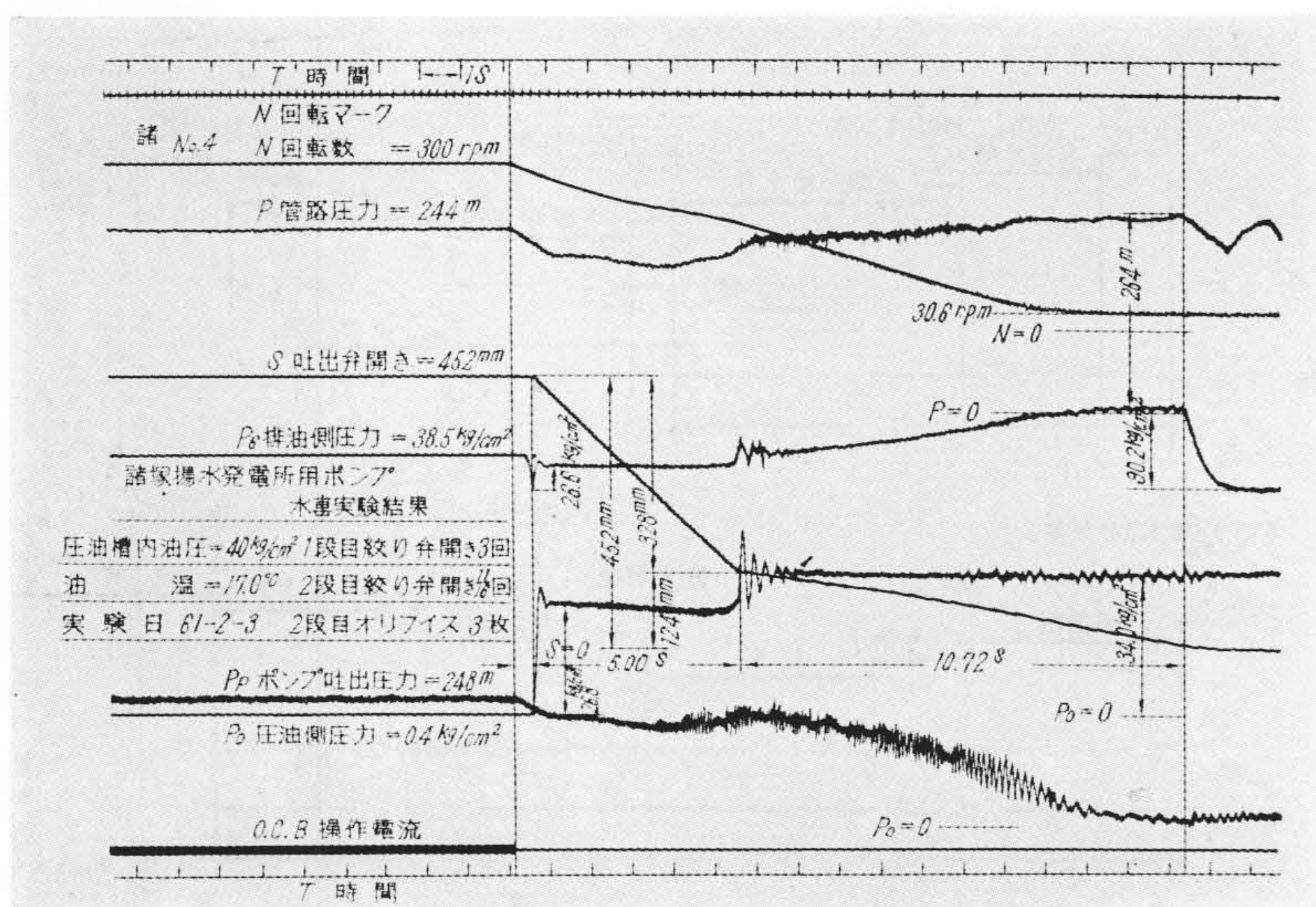
いずれの場合も水撃作用による圧力上昇は保証値（基準全揚程の18%）をはるかに下まわってその約 $1/2$ 程度に収まり、過去の実績を大幅に改善した。これにより揚水ポンプを安心して運転できることが確認されたわけである。

9. 結 言

計画中のものを除けば、発電電動機、水車およびポンプがそれぞれ独立して作られた立軸揚水発電所用ポンプでは、この諸塚発電所のものが世界最大である。全体の高さはポンプだけで10mを越え、他の発電電動機および水車を合わせると全高30mに達する巨大なものであるが、この30mは地表面以下に収められている。

この画期的施設の計画、設計、製作および据付に当たっての九州電力株式会社の幹部並びに担当者各位のなみなみならぬ熱意、好意および努力がなかったら、このような円滑な完成は困難であつたらう。また据付を担当された正興商会の各位が長期間の昼夜をわかつた奮闘、製作に当たった日立製作所内関係者一同の労苦も特筆すべきであらう。以上のお世話になった人々に厚い感謝の念を捧げる。

なお本報告は、あらましの事柄について述べたものであって、設計、製作および現地試験などに関して、深く研究、実験したことも多いが、紙数の都合で省略した。号をあらため、順を追って、それらのうちの特筆すべきものを発表してゆく予定である。



第 18 図 電源遮断時のオシログラム (油圧規定通り)