

印 旛 排 水 機 場 納 大 形 排 水 ポ ン プ

2,800mm Vertical Type Axial Flow Pumps
For Imbanuma Drainage Pumping Plant

矢 島 光 吉* 森 井 進**
Mitsuyoshi Yajima Susumu Morii
大 音 透** 佐 藤 光 広***
Tōru Ō'oto Mitsuhiro Satō

内 容 梗 概

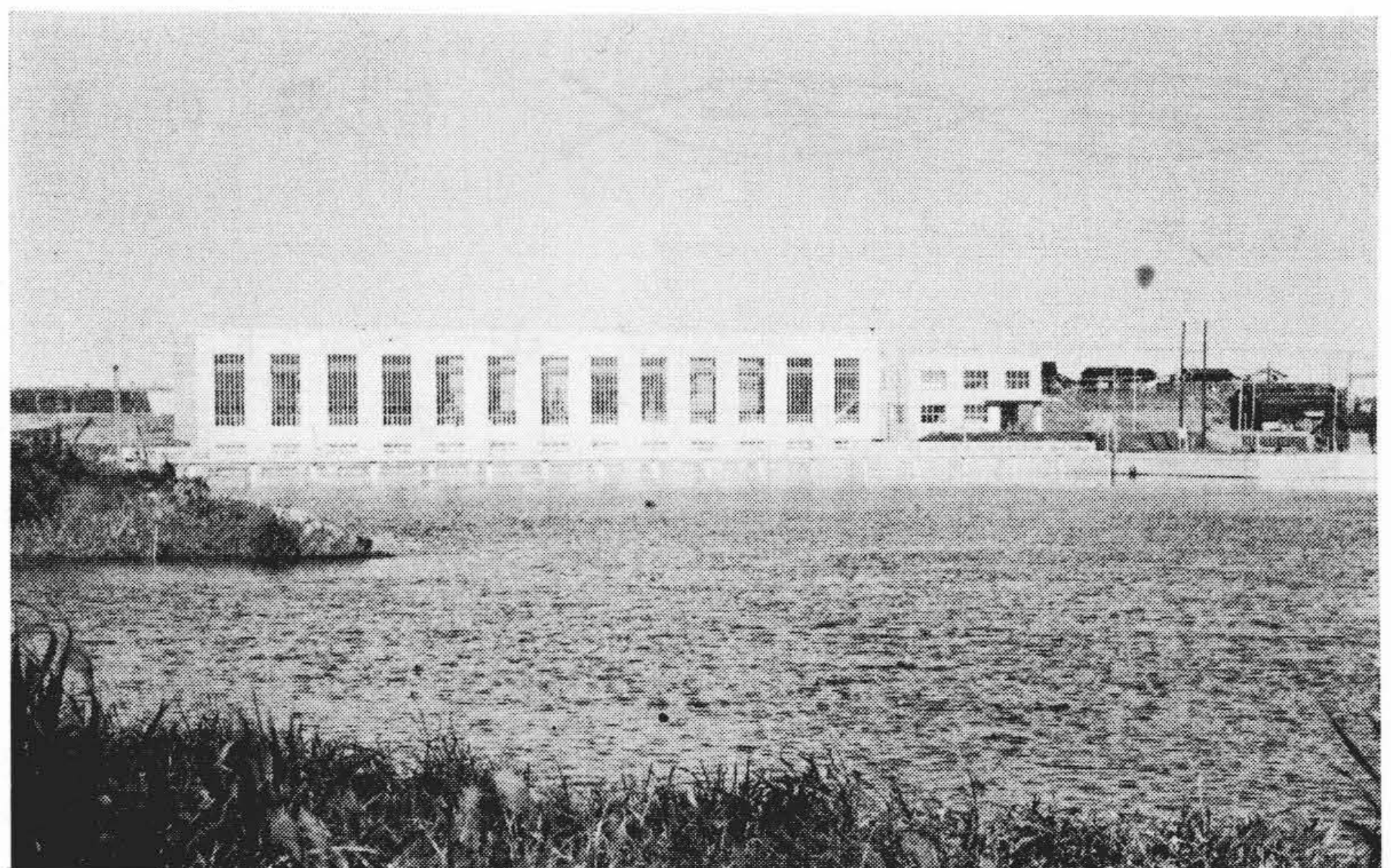
農林省東京農地事務局の印旛沼、手賀沼干拓建設事業所で建設した印旛排水機場の、排水ポンプおよび電気設備が、このほど日立製作所から納入された。このポンプ容量は日本記録であるのみならず、立形ポンプの直並列運転という点でまったく新しい構想のものであり、すでに据付けを終って昭和35年5月より実用運転にはいっている。

1. 緒 言

印旛沼は千葉県北部にあり、大体英字のW形をしていてその面積は 2,600 ヘクタールである。平時は北方を流れる利根川に注いでいるが、降雨などにより利根川が増水すると排水できず、周辺に大きな被害を及ぼしていた。この沼の出口にポンプを置き排水をよくするとともに、沼を干拓して耕地を造成することが印旛沼干拓建設事業の目的である。農林省としては昭和21年からこの事業に着手し、当初は千葉県の検見川まで水路により排水する計画で、その作業は現在でも進行中であるが昭和29年頃より、早急に実効をあげるためポンプを設置して直接利根川に排水する計画が具体化し、昭和30年から正式に発足した。

ポンプ排水においては、まずポンプ容量を決定しなければならない。総排水量は過去の統計から算出できるが、全体を何台で排水するかについては種々問題がある。揚程も統計から推定できるが、利根川の水位変化の幅が大きいのでこれをいかに能率よくポンプ排水するかについては種々議論があった。農林省では先に手賀沼干拓事業において2台のポンプを1組とする直並列切換運転で揚程の問題を解決したので、今回もその例にならうこととした。利根川の水位はYP (東京湾平均潮位) 2.3 m からYP 9.02m まで変化する。これに対し沼側の水位をYP 1.5m からYP 3.0 m に保つことにするから、実揚程は最低0 m、最高6.02mとなる。ポンプの形式としては可動翼軸流ポンプを採用することとし、この揚程範囲を2台のポンプの直並列切換運転で排水するため、1台のポンプの計画実揚程を2.5 m にとり、また全水量を3組6台のポンプで排水することとして1台の計画排水量を 920 m³/min と定めた。各揚程におけるポンプの吐出量と効率、第12図でわかるように最低揚程0 mにおいては約 1,700 m³/min の水量を吐出するが、その場合でもポンプはキャビテーションを起さぬように設計されている。

さてポンプ1台の容量がこのように大きく、ポンプ製作上の技術的理由および土工事を含めた全工費の節減のために立形を採用したので、2台のポンプの直列運転法には新たなくふうを要することになった。われわれは後述のモデル試験によって、据付面積が最小



印 旛 排 水 機 場 全 景

でしかも第1段目のポンプの吐出水の乱れが第2段目のポンプの性能に影響を及ぼさない連絡水路を設計することができた。

主ポンプの仕様は次のとおりである。

公称口径	2,800 mm
形 式	立形可動翼軸流ポンプ
吐 出 量	920 m ³ /min
実 揚 程	2.5 m (ただし単独運転の場合)
回 転 数	105 rpm
原 動 機	570 kW (760 HP) 誘導電動機

本機場では前記6台のポンプを常時用2台と非常時用4台に分けた。仕様は6台共通であるが、前者は同期電動機直結として効率、力率の向上をはかり、後者は誘導電動機から減速歯車を介して駆動することにより機械設備費の低減をはかっている。電気機器はすべて日立製作所製であるが、常時用ポンプ2台は荏原製作所製、非常時用ポンプ4台は日立製作所と西島製作所が2台ずつ製作した。本文では日立製作所が担当したポンプ2台と電気機器6台分について述べる。

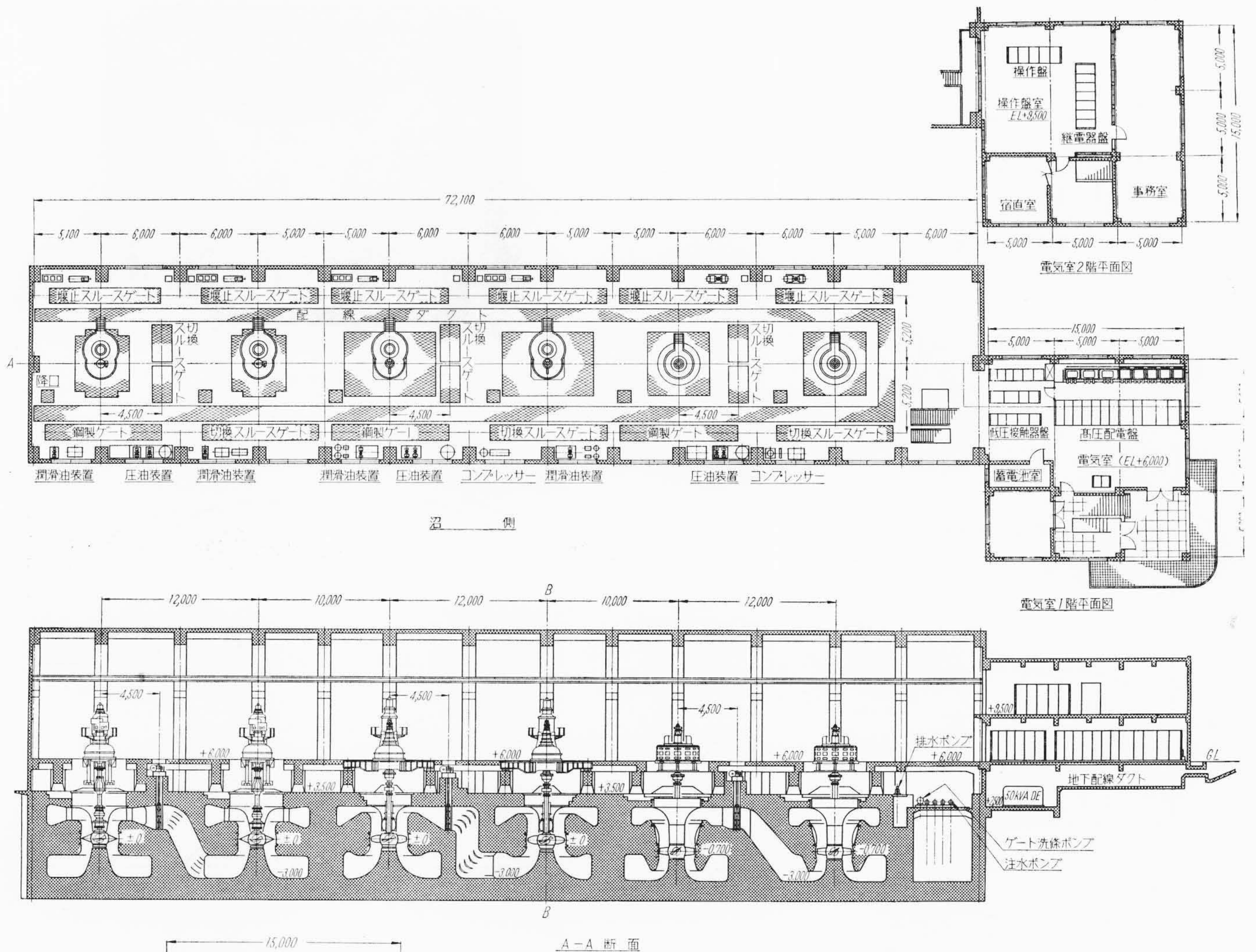
2. モデルポンプによる試験

大形でしかも特殊な形をしているため、実物ポンプの工場試験は不可能であるから性能検査はモデルポンプで行われた。モデル比は1/10として、吸込水路、1段目ポンプ、連絡水路、2段目ポンプおよび吐出水路が作られた。実物ポンプが立形であってもモデルポン

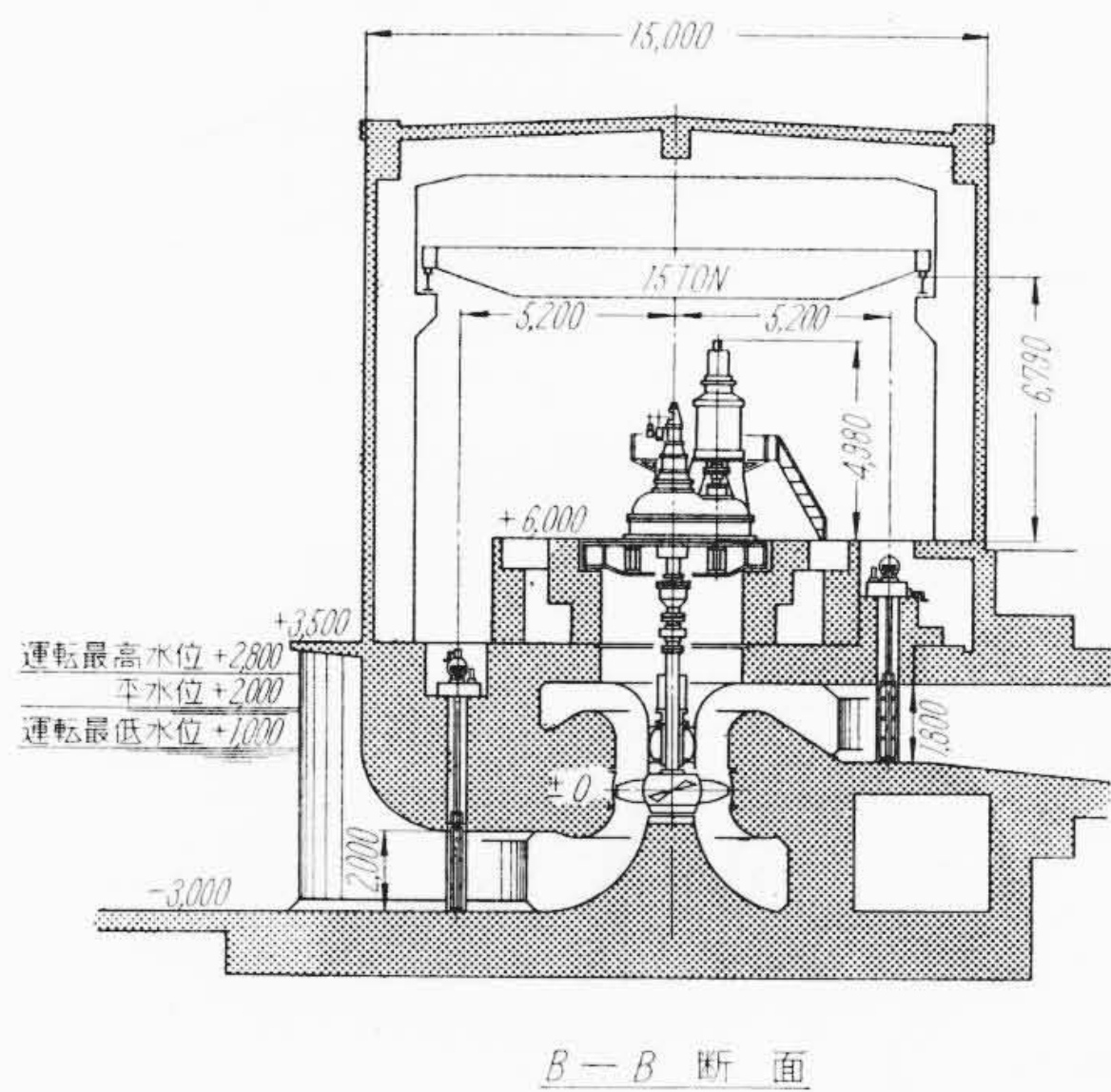
* 日立製作所亀有工場

** 日立製作所国分工場

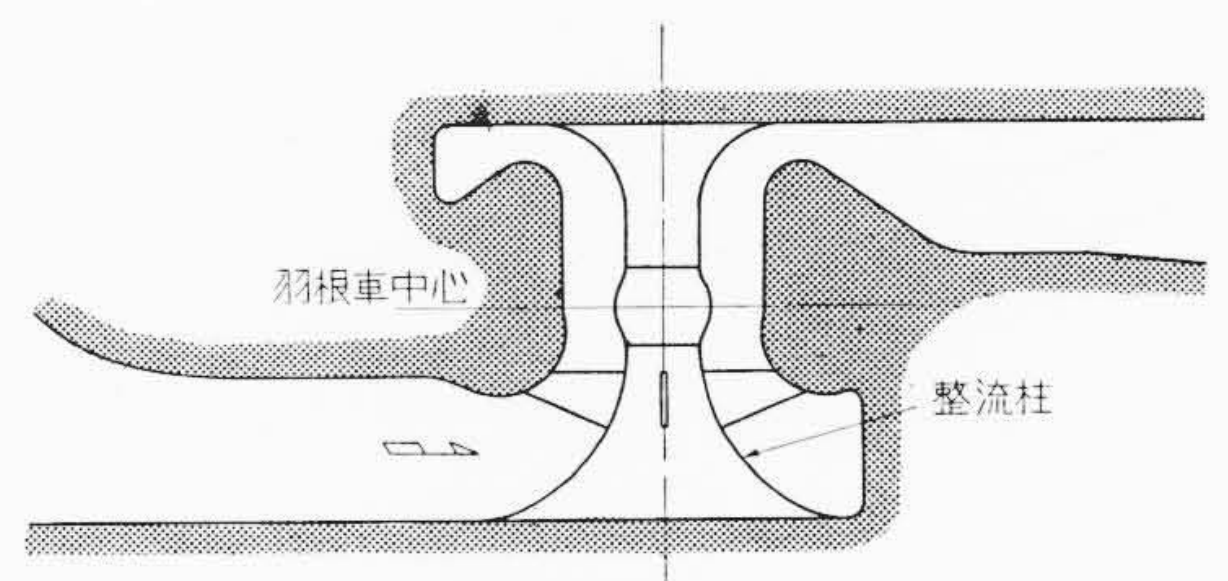
***日立製作所日立工場



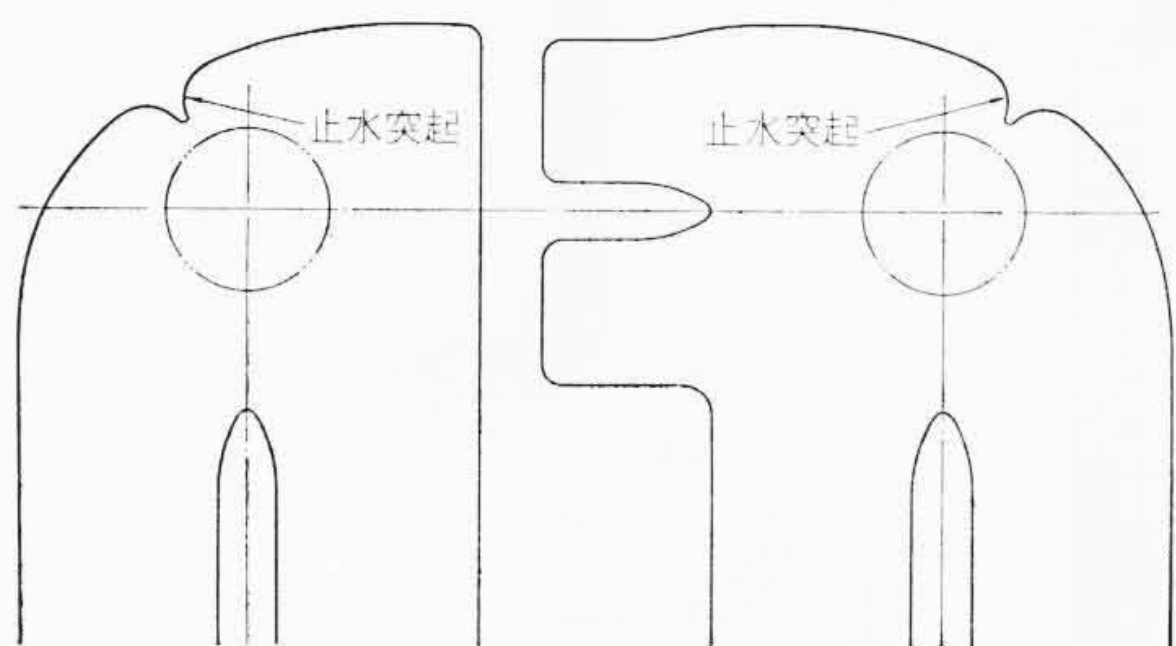
第1図 印 旛 排 水 機 場 据 付 図



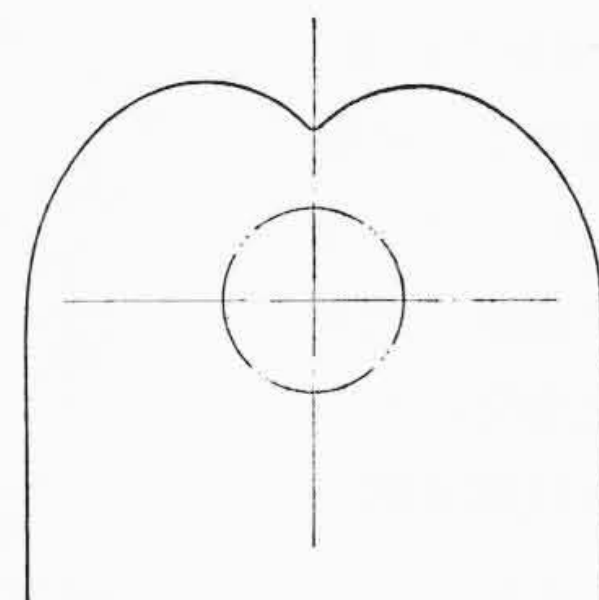
B-B 断面



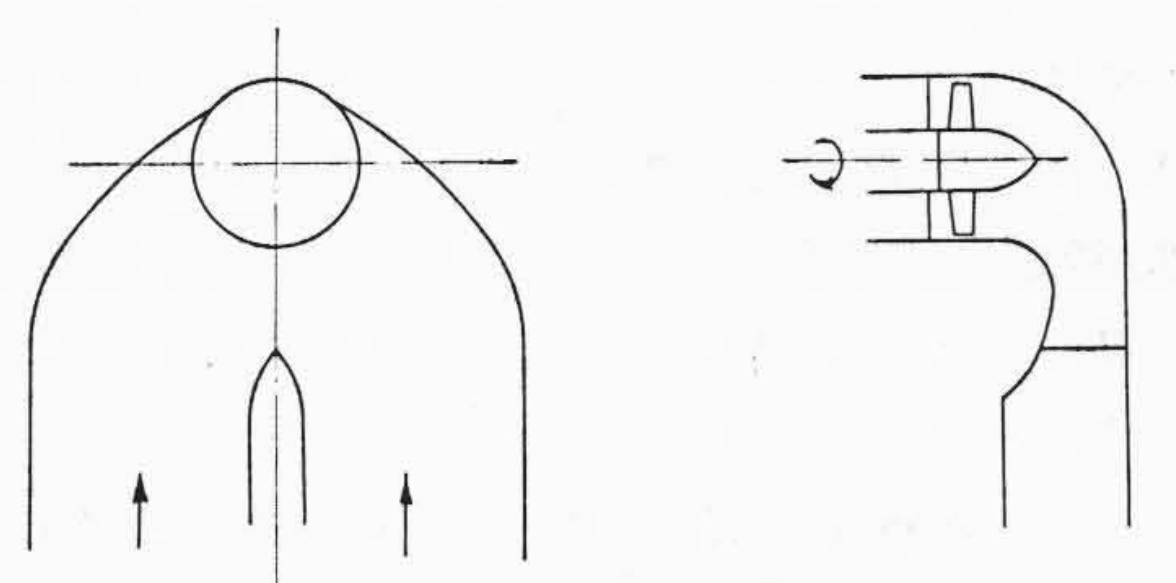
第2図 吸 込 ピ ッ ト 整 流 柱



第3図 吸 込 ピ ッ ト 形 状



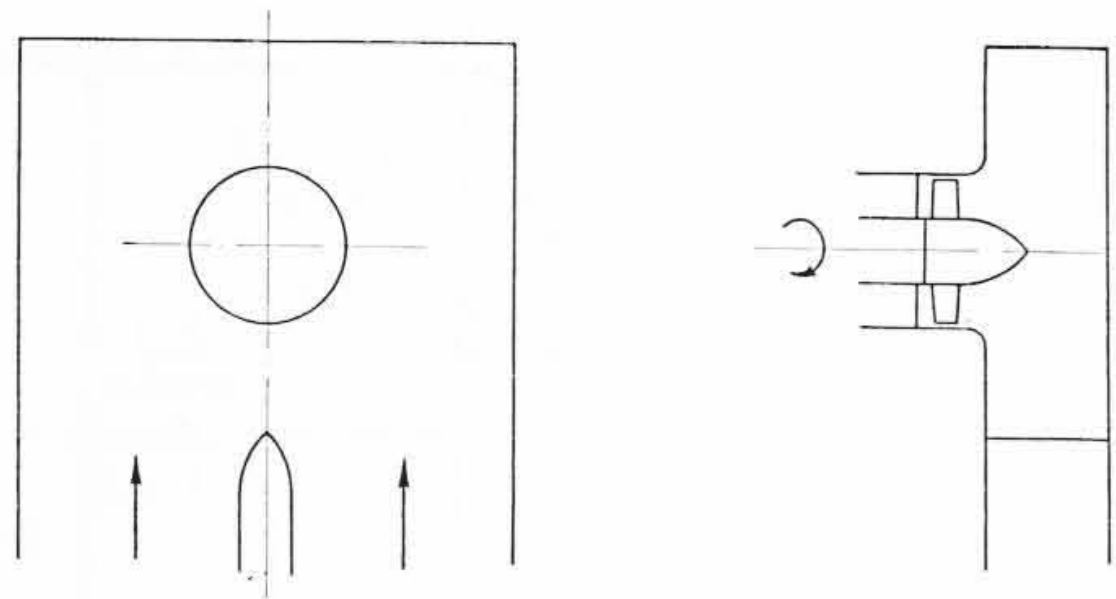
第4図 吸 込 ピ ッ ト 形 状



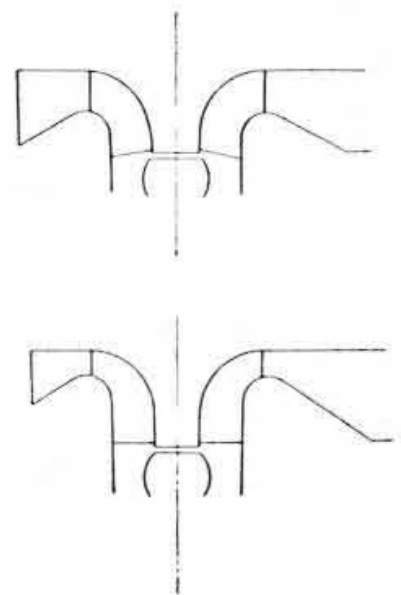
第5図 吸 込 ピ ッ ト 形 状

プは必ずしも同じにする必要はないが、顧客の希望によりモデルも立形とし、研究の重点は水路およびケーシングに置いた。NPSHから見て十分の余裕があるにかかわらず、ケーシングの形によっては

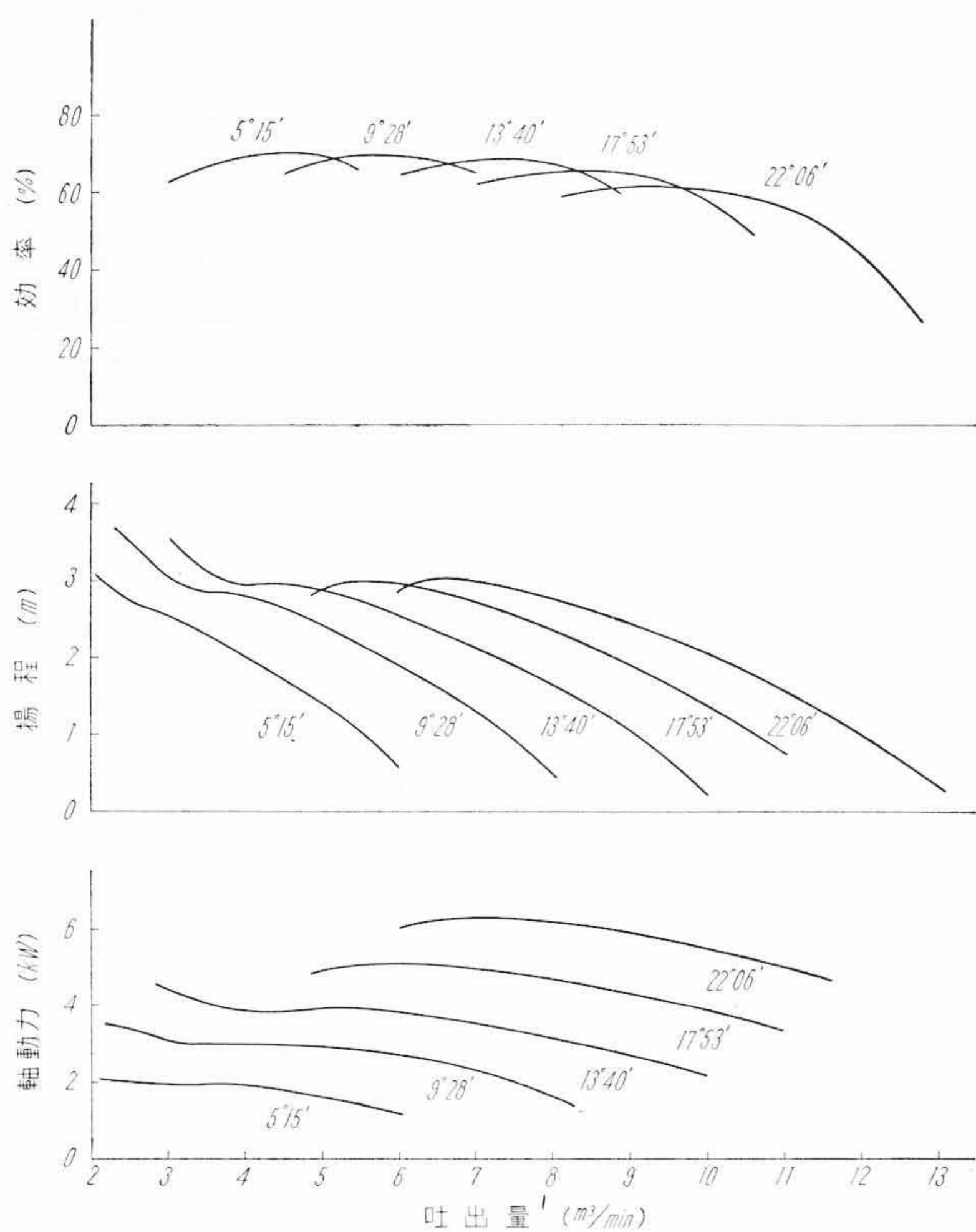
キャビテーションのような音を発することがわかった。これは吸込側のケーシング内で渦による極度の低圧部ができ、そこで生じた気体の柱が羽根車まで達する時に起ることが明らかにされたので、この



第6図 吸込ピット形状

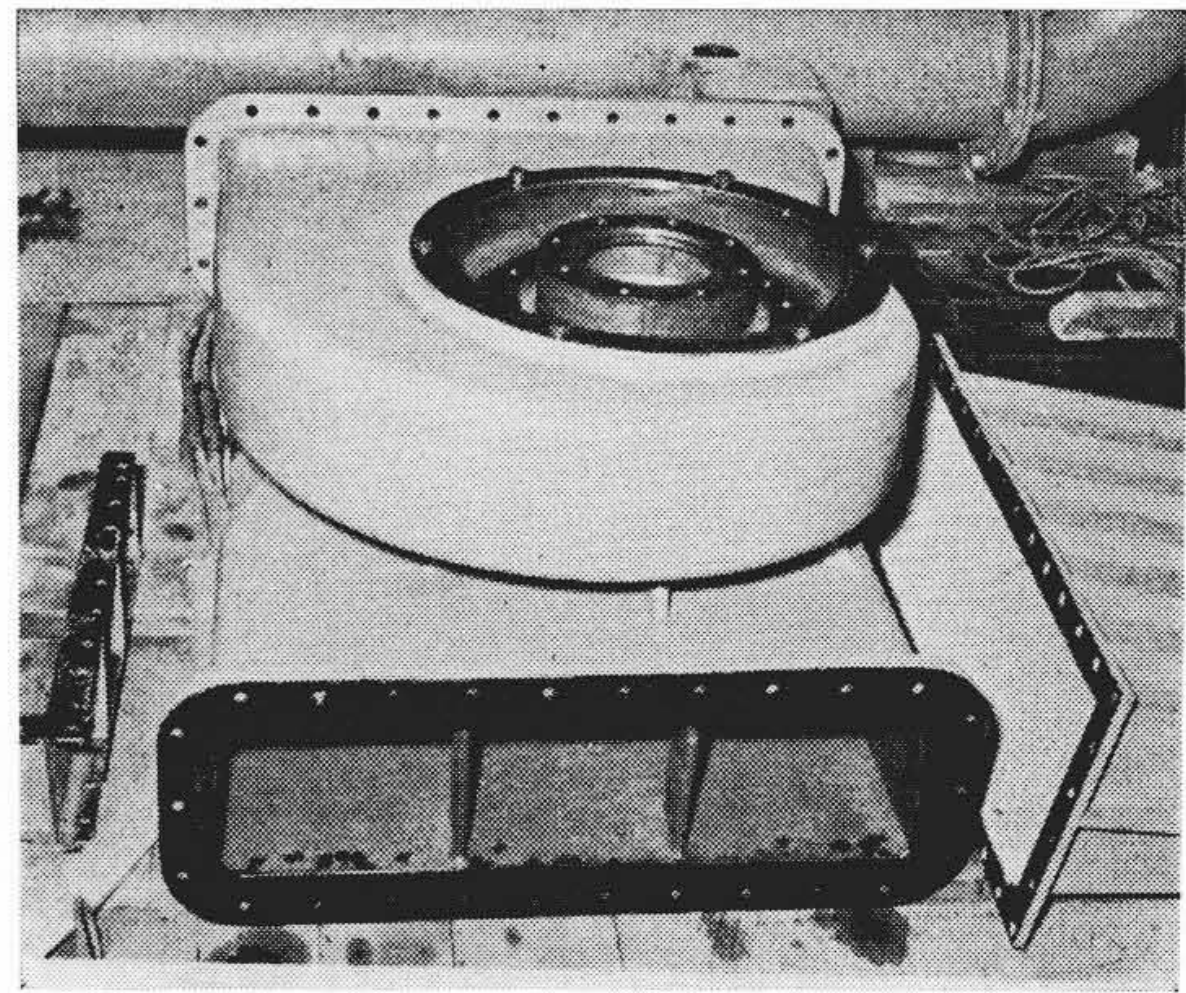


第7図 吐出ケーシング形状

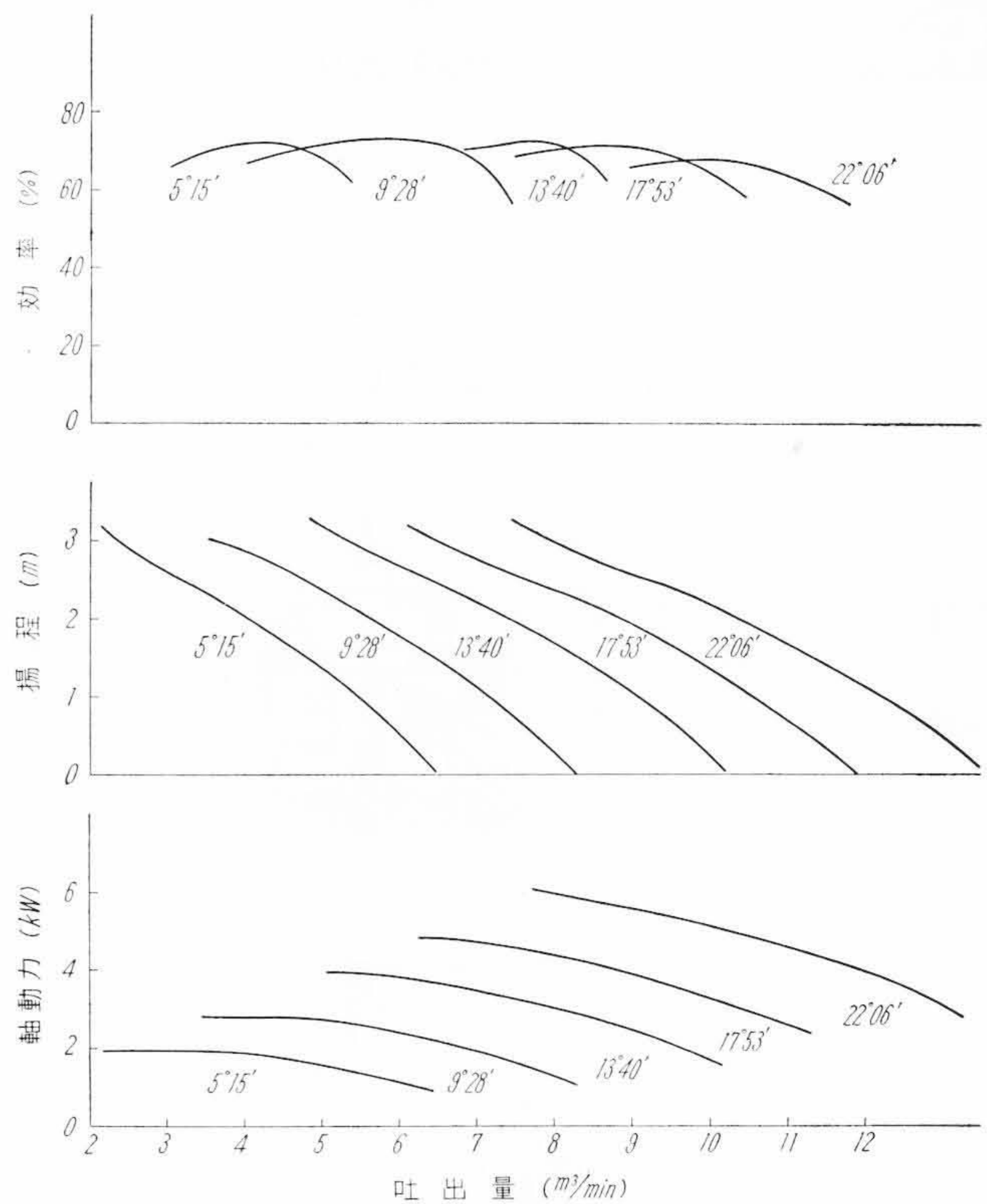


第8図 モデルポンプ性能曲線

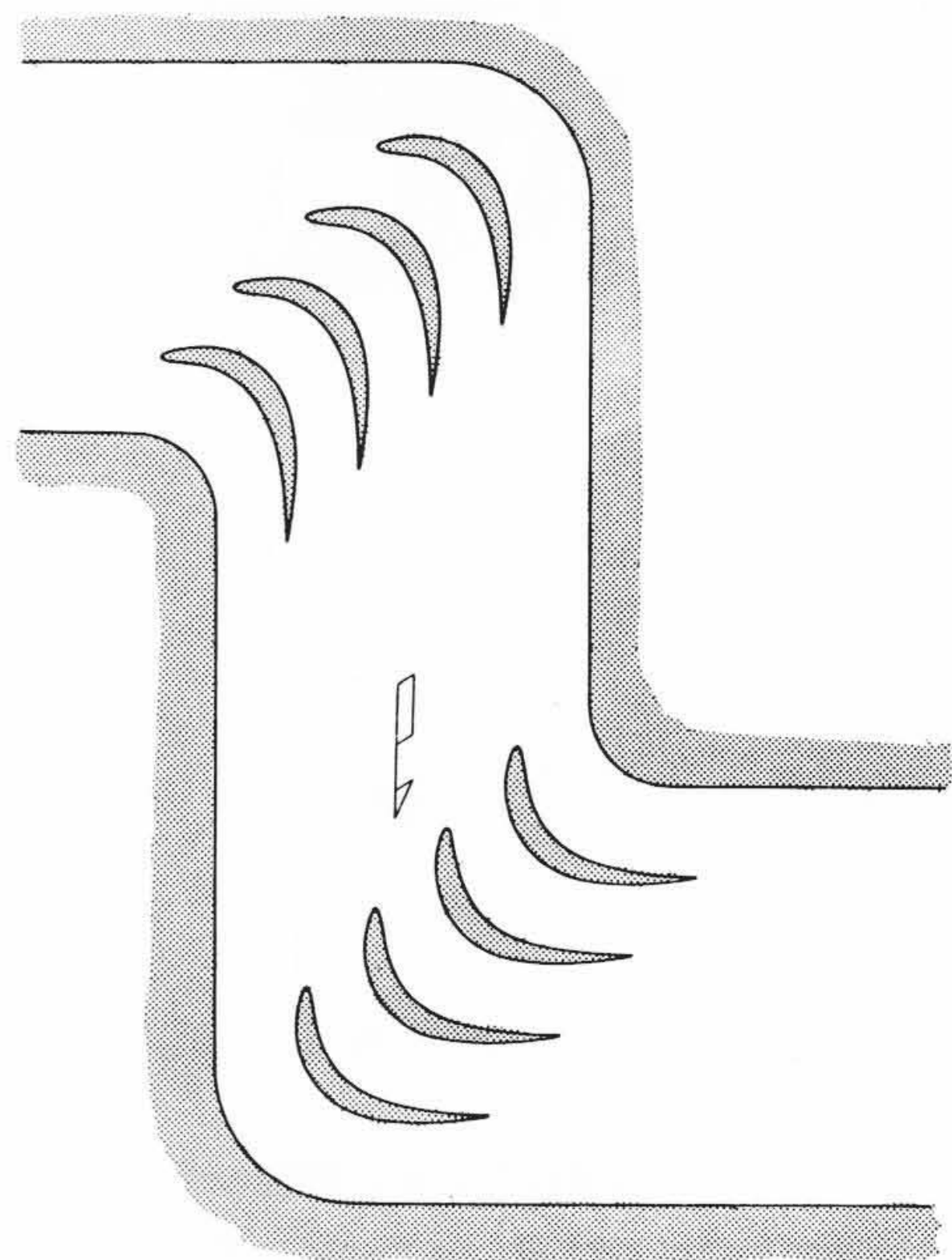
気柱の発生を防ぐため第2図のように吸込ピット中央にコンクリートの整流柱を立てた。これは各種文献にも出ているが、実験の結果、効果は大であることがわかった。この整流柱の効果をもつため吸込ピットの側壁に止水突起を設けた。ただし本機場においては、単独運転と直列運転では水の流入方向が異なるので、種々実験の結果一段目ポンプと2段目ポンプに第3図のように異なる止水突起をつけることとした。以上の結果をうるためには対称形吸込口(第4図)、エルボー形吸込口(第5図)、砲弾形吸込口(第6図)などについても実験を行ない、さらに吐出側についても2種類の吐出ケーシングの形を実験した(第7図)。吐出側ケーシングについては今回は2方向に吐出するという特殊事情のためこのような形を採用したが、ポンプの効率を高めるためには最良の形ではなかった。第8図は上述の最終モデルによる性能曲線である。吐出方向が一定であれば第9



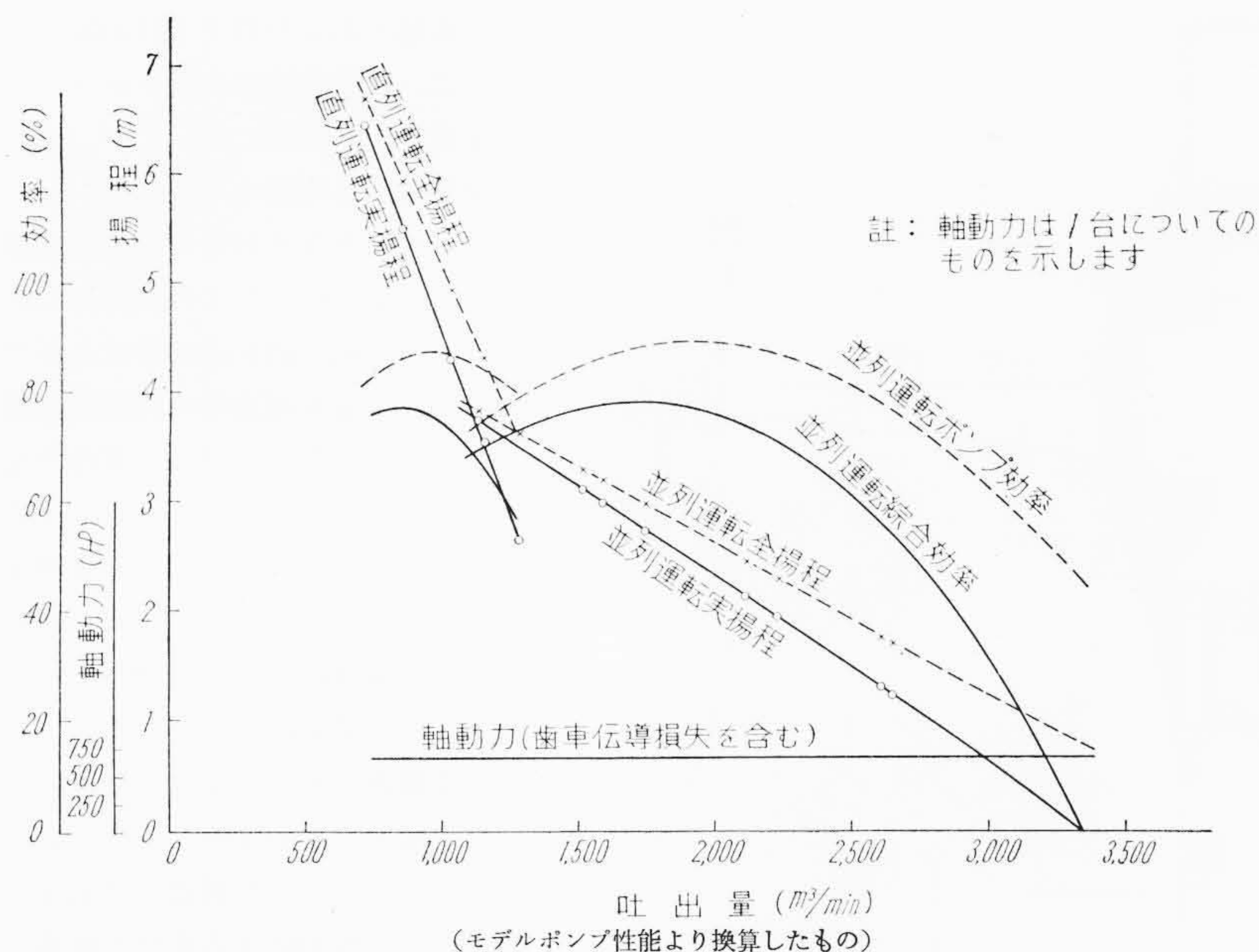
第9図 スパイラル形ケーシング



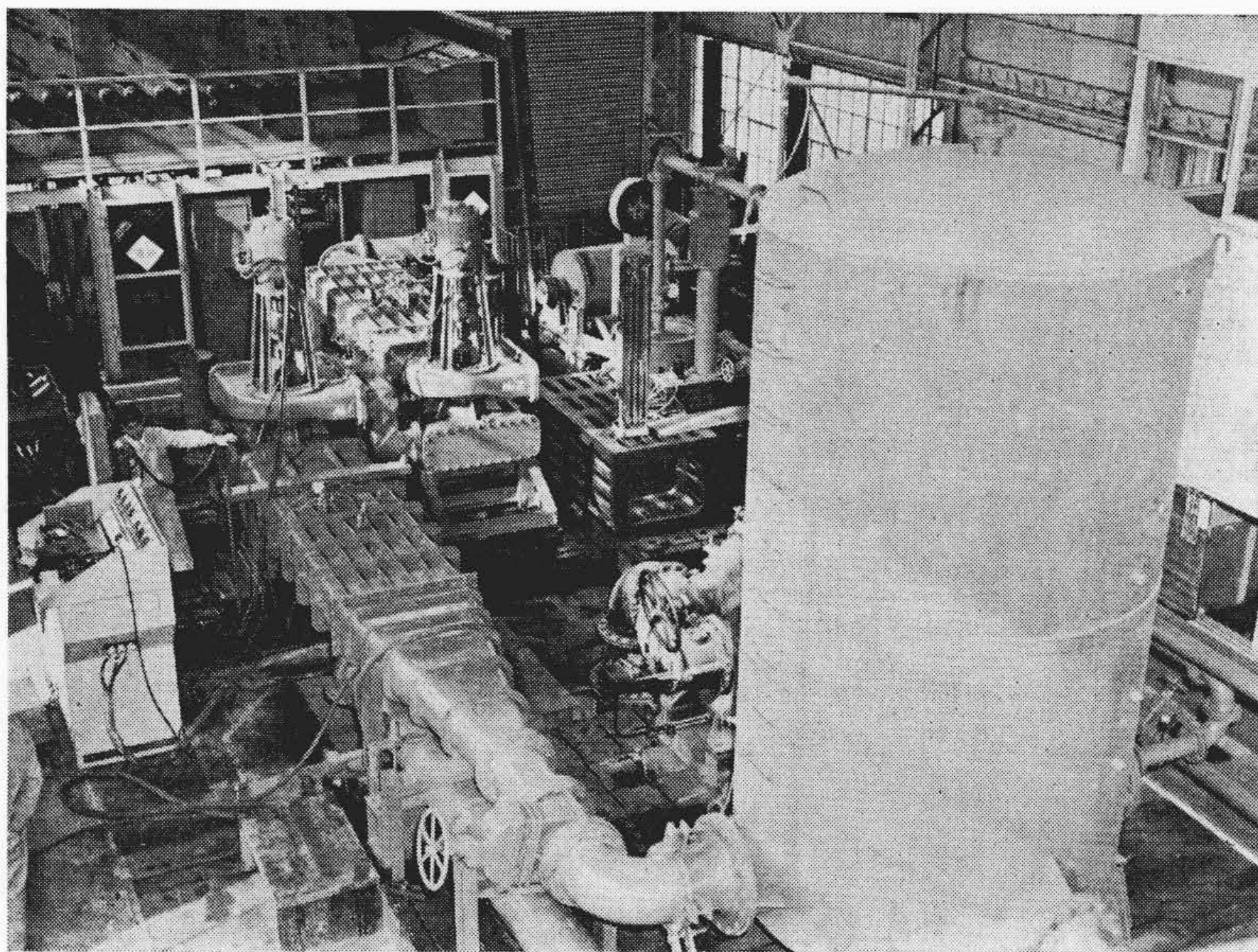
第10図 スパイラル形ポンプ性能曲線



第11図 連絡水路整流格子



第12図 実物ポンプ直並列性能曲線

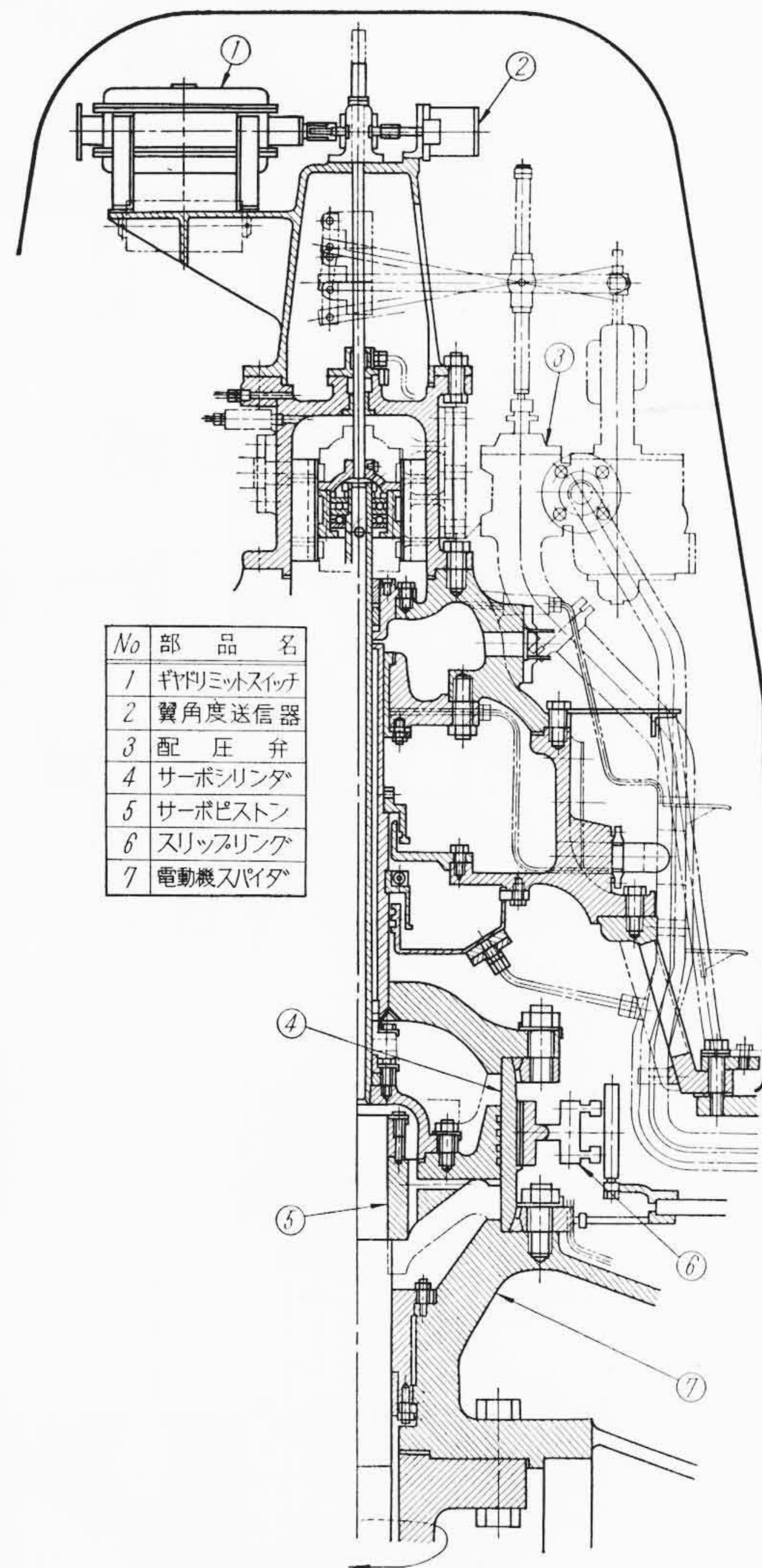


第13図 モデルポンプ直列性能試験

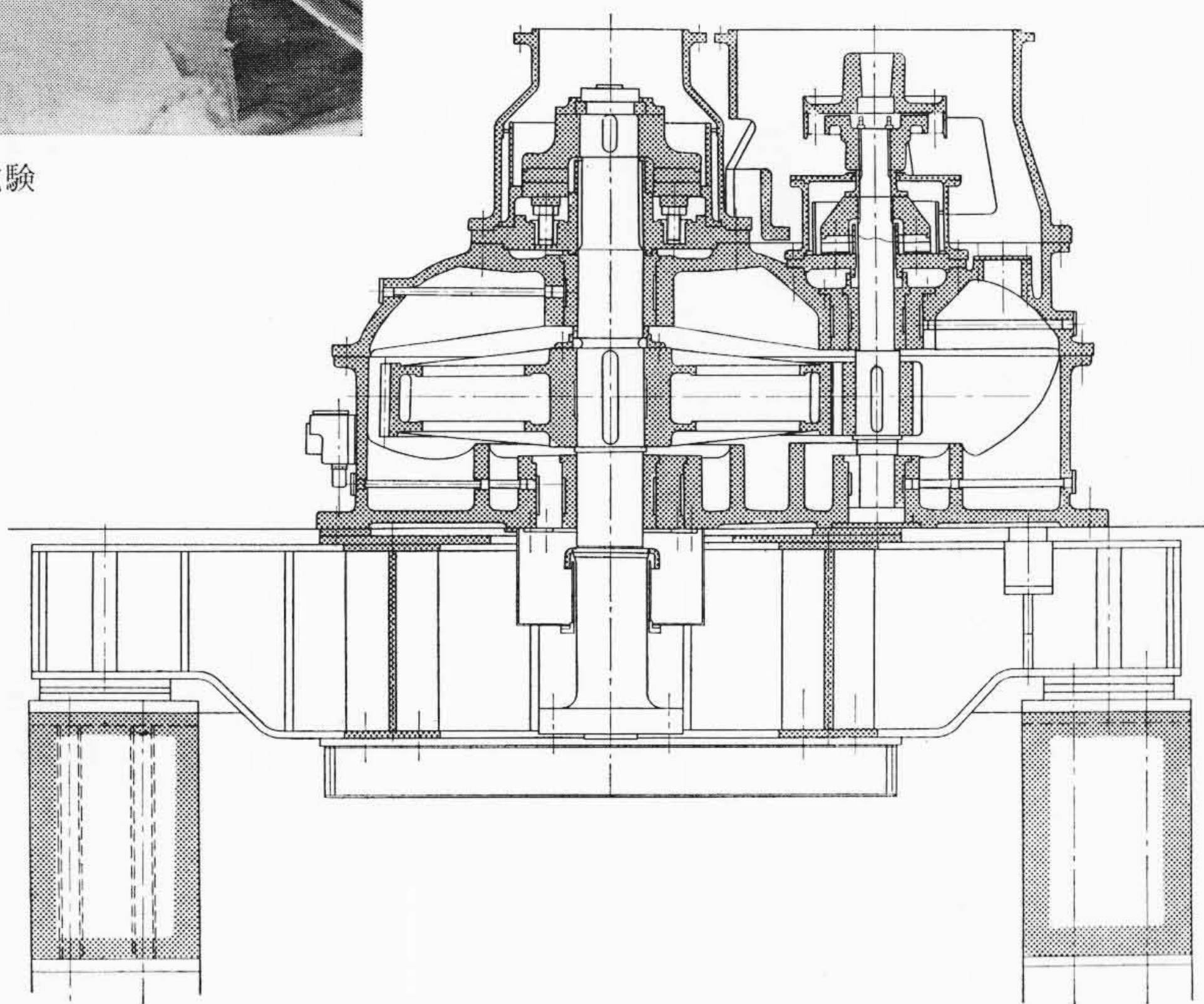
図のように吐出ケーシングをスパイラル形式として吐出水流の円周方向成分を有効に使ったほうが高効率を得られる。第10図はスパイラル形吐出ケーシングの場合の性能曲線である。1段目ポンプと2段目ポンプの連絡水路の形状は寸法的制約をうける上に、もしその形が悪いと2段目ポンプの性能に影響を及ぼす。この水路は短い距離で吐出口の高さから出る水を直角に2回曲げて低い吸入口高さまで導かねばならない。そこで風胴や回流水槽に用いられている整流格子を参考にして第11図のような水路を決定した。格子は2種類のものを作成して、その比較を行った。直列運転の場合には連絡水路はポンプの一部と見なされることになっているので、ポンプ効率は連絡通路の損失分だけ単独の場合より低下する。第12図の左半分は直列運転の場合の性能曲線である。

3. 実物ポンプの作成

実物ポンプは、前述のとおり可動翼の立形ポンプである。前にパ

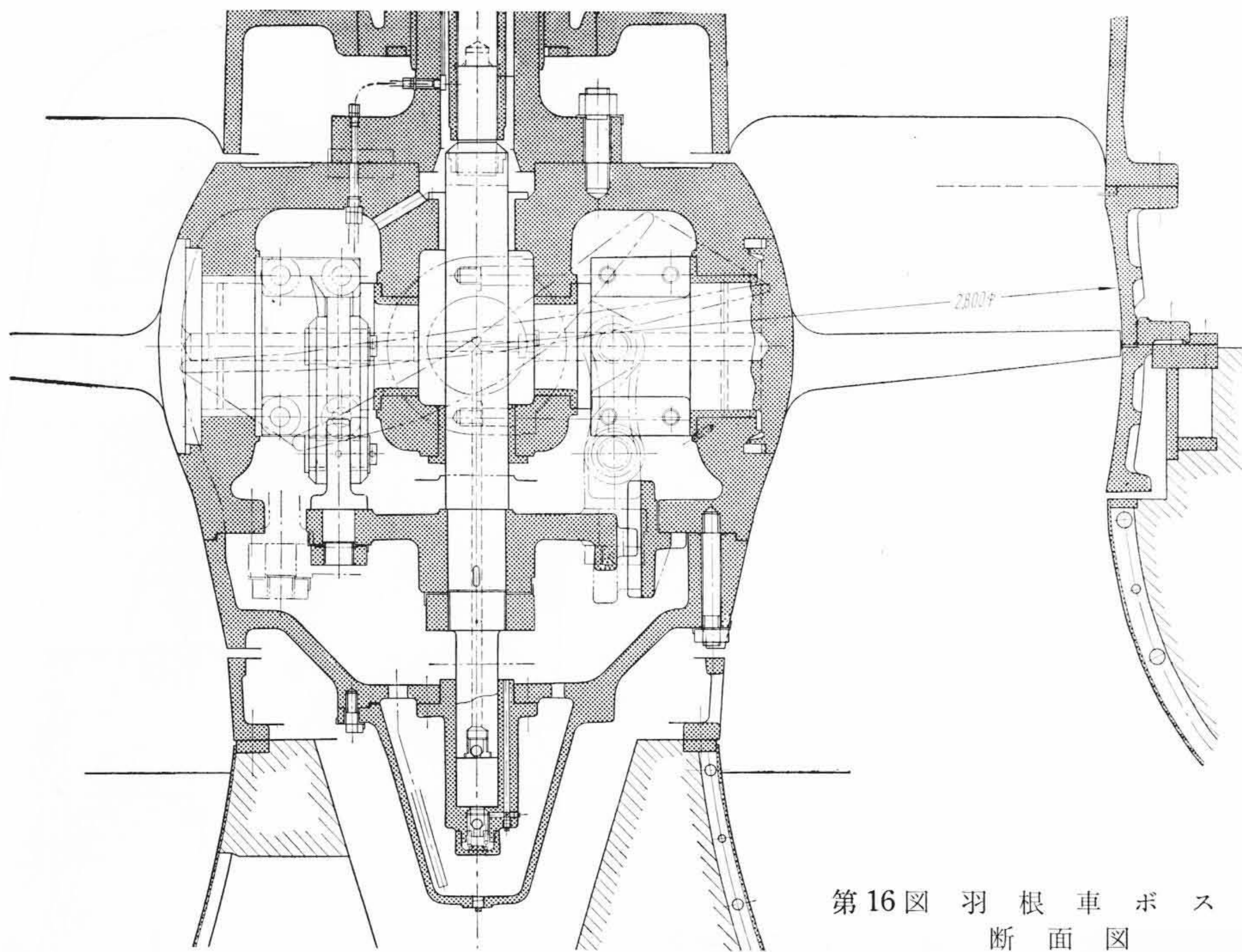


第14図 パキスタン政府納可動翼軸流ポンプサーボモータ部

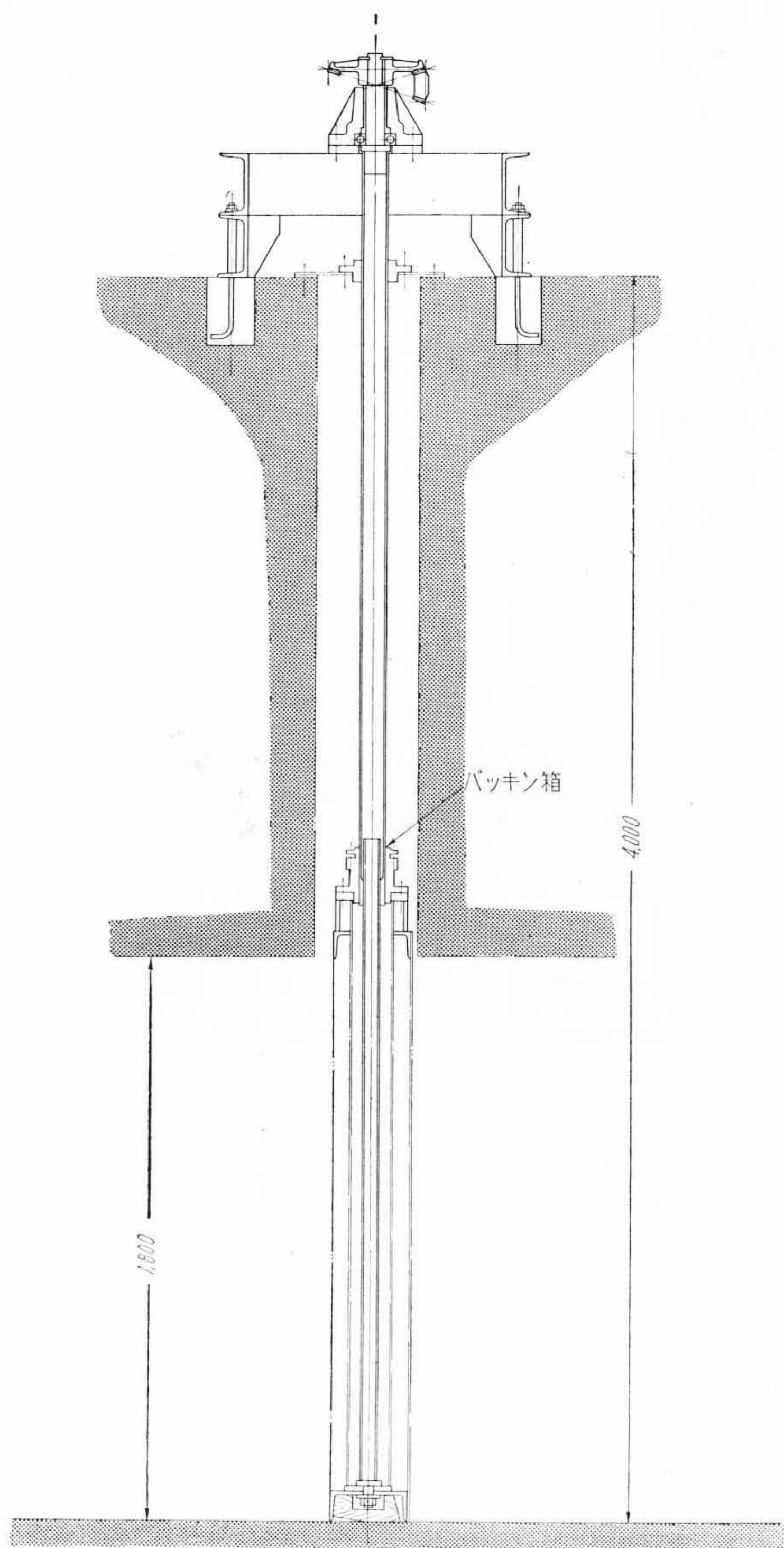


第15図 減速機構造図

キスタン政府に大略同径の同種ポンプを納めたが、今回は減速機を介して誘導電動機で駆動する点が異なっている。前には同期電動機



第16図 羽根車ボス断面図



第17図 ゲートスピンドル構造図

と直結であったので第14図のように、翼角度操作のサーボモータを電動機の上部に置いたが、今回は歯車減速機箱の下部に置いた。

このような大容量の立形減速機は日立製作所としての記録品であるが、運転の結果は非常に良好であった。歯車減速機は同期電動機と異なり、中心に対して対称でなく、ポンプの水力的スラストによって変形を起した場合の影響も大きいのでその剛性には特に注意した。減速機の構造は第15図のように、頂部に大きなスラスト軸受を置き、ポンプを含めた回転体の重量と、水力的スラスト力を受けている。この構造では前述のとおり、推力による変形が歯車のかみ合いに影響を及ぼすことは避けられない。理想的にはポンプのスラストが歯車のかみ合いに影響を及ぼさないことが望ましいが、

機械の大きさおよび取扱いの容易さの点からこの形に決定したものである。

ポンプ本体に関しては吐出側ケーシングを鋼板製とし、水路成形の便をはかったほか、第16図のように羽根車ボスを密閉し、内部に羽根角度変更機構を置き機構の保護をはかった。この部分には常時圧力油が満たされている。

操作油圧送入部は減速機箱の上であり、配圧弁を外部に置いて、保守の便をはかっている。

減速歯車箱は下部ケースが鋳鉄製、上部カバーが鋳鋼製である。潤滑油は強制循環するが循環の検出には眼によるサイトフローと電氣的流油リレーを併用し確実を期した。これは別置のギヤポンプから給油されるが、万一停電してもある程度の惰力回転や水流による逆転には耐えるようにくふうしてある。

直並列切替用のゲートは電動スルースゲートであり、室内に設置されるため内ネジ式としたが、ネジを汚水から保護するため、スピンドルは二重筒の中に油浸にしてある。また長時間休止する特殊性から戸みぞに砂がたまることは避けられないので、別に小形ポンプを持ち、戸みぞの部分を高圧水で洗浄できるようにした。

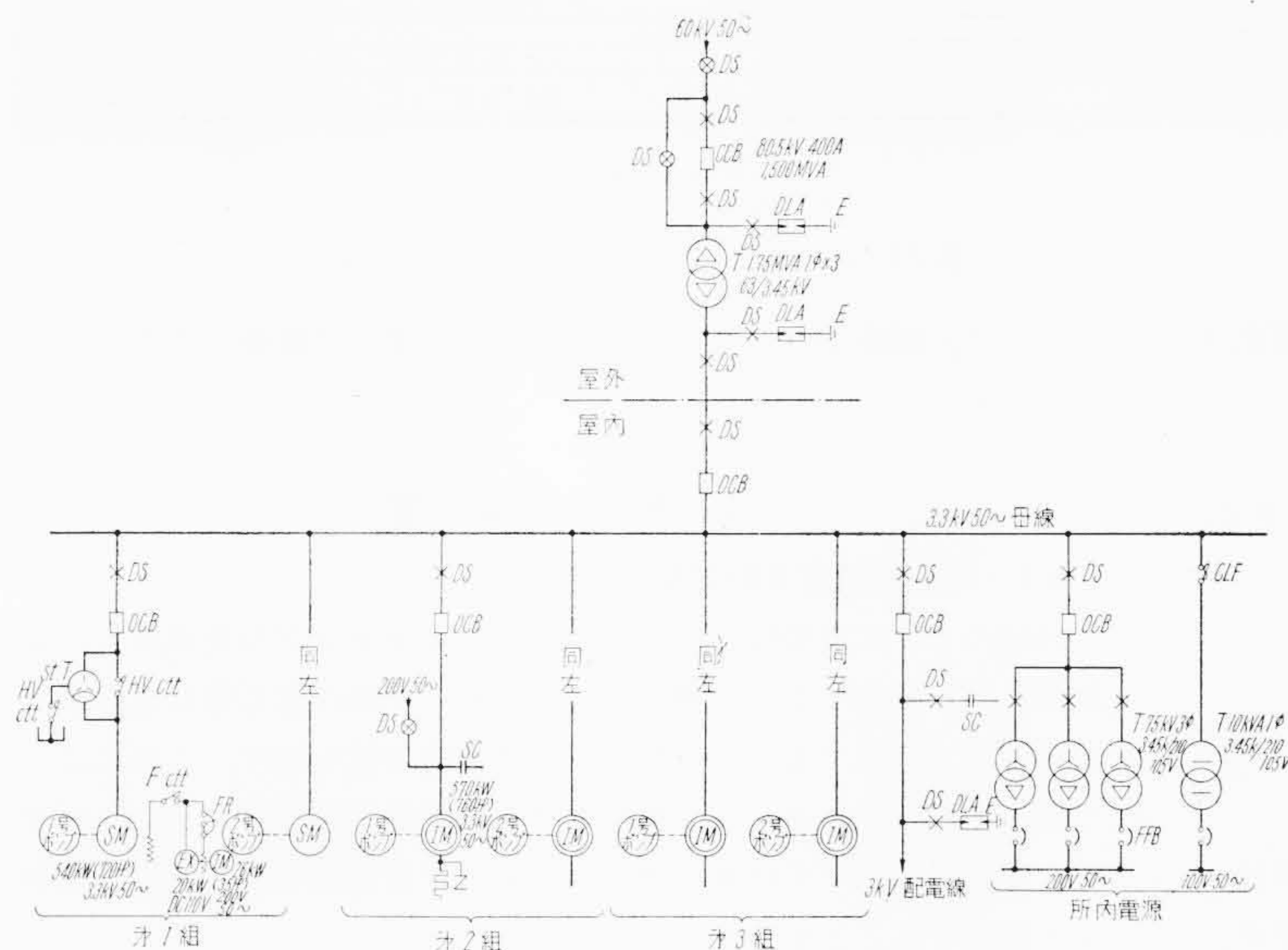
逆流防止弁は2.5 m 角の水路に対し1門4枚の弁板が取付けてある。逆流時のショックを軽減するため1枚の弁板には水圧利用の緩衝装置がつけてあるが、吐出側水路が長いので堤防の下を通り抜けたところに空気抜の管を立てて水路内の負圧発生を防止している。

4. 運転操作の概要

機場が72 m×15 m という大きなものであるから、操作はすべて機場の一端にある操作室から行われる。操作室はポンプ床より一段高く、機場全体を見渡すことができ、階下は高圧電気器具室となっている。操作盤では、補機の運転からゲートの開閉および主機の運転などをすべて行うことができるほか、翼角度の調節も可能である。翼角度は操作盤から遠方操作できるほか、電動機の入力による自動制御および主機側において手動でパイロット弁を操作することにより調節ができる。詳細は次の電気設備の項で述べる。

5. 電 気 設 備

本排水機場の電気設備は60 kV 受変電設備、3 kV 開閉装置、主電動機、制御装置および配電盤からなっている。第18図は本機場の単線結線図で、受電は60 kV、変圧器容量5,250 kVA、主電動機



第18図 印旛排水機場単線接続図

総容量3,360 kW (4,480 HP) となっている。

5.1 受 電 設 備

第19図は60 kV 屋外受電設備の全景を示すもので、受電回路用遮断器にはBOI-150 B形、80.5 kV、400 A、1,500 MVA 制弧遮断器を使用し、主変圧器は全装可搬形密封構造のSORV-C形、1,750 kVA、60/3.45 kV、単相3台を設けた。

3 kV 開閉装置は第20図に示すようにすべてキュービクルに収納しコンパクトにまとめたので、据付面積は小さく、取扱い操作が安全で保守、点検は容易である。

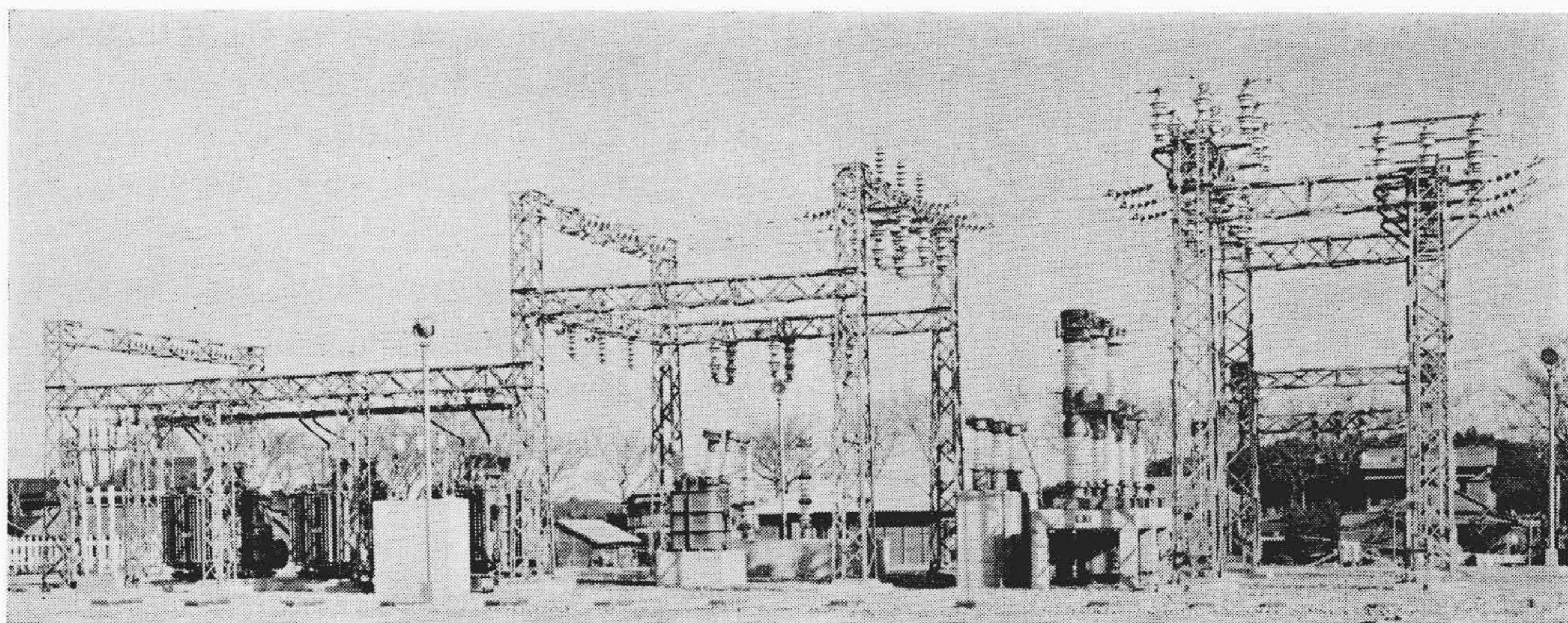
5.2 主 電 動 機

第1組の2台のポンプは常用機で、高力率、高効率で運転するように直結の同期電動機540 kW (720 HP) で駆動される。

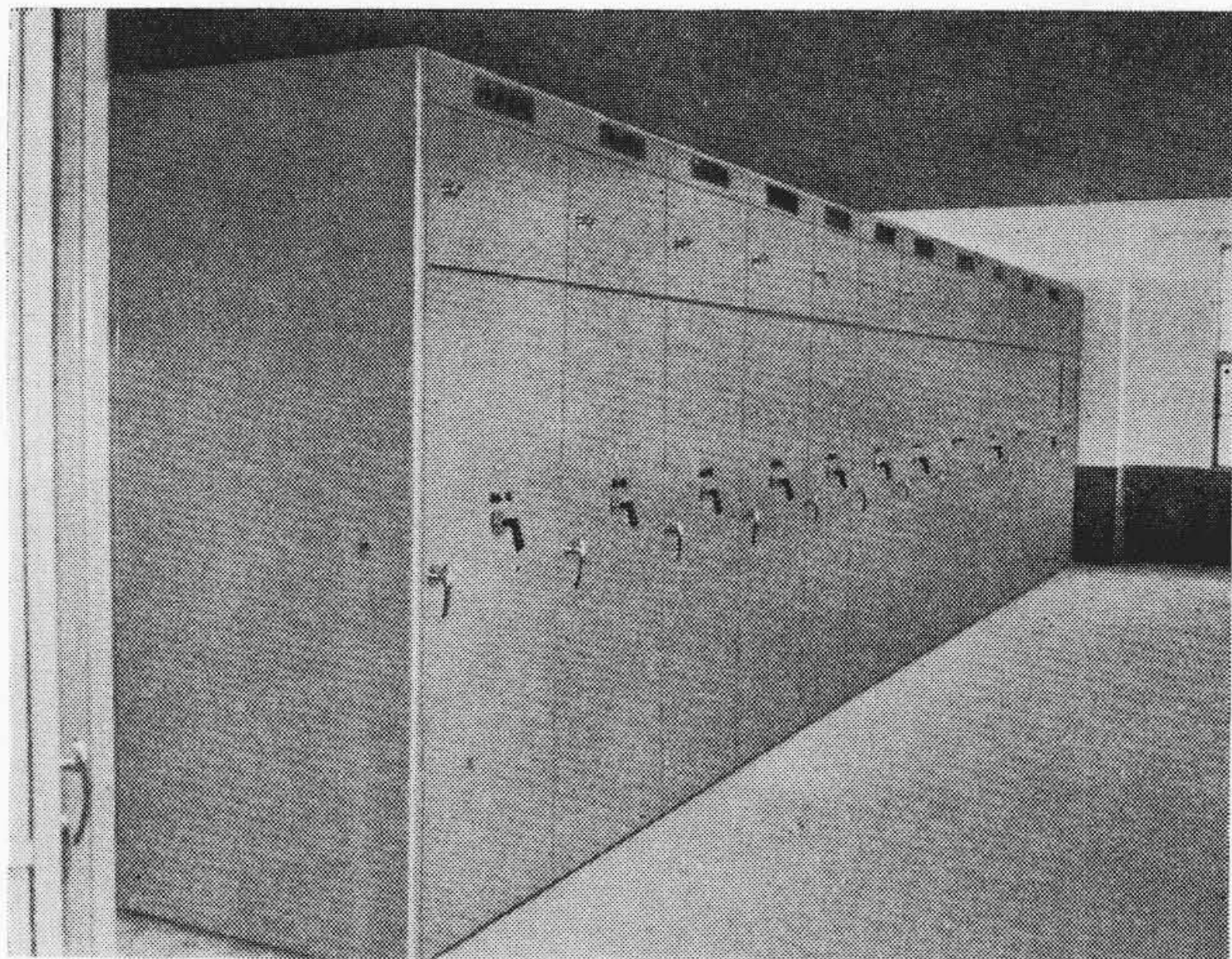
本電動機の仕様

形 式	VSKP-RD (3 相立軸開放かき形, 凸極回転界磁式制動巻線付)
出 力	540 kW (720 HP)
電 圧	3,300 V
周 波 数	50~
極 数	52 P
回 転 数	115.2 rpm
力 率	100%

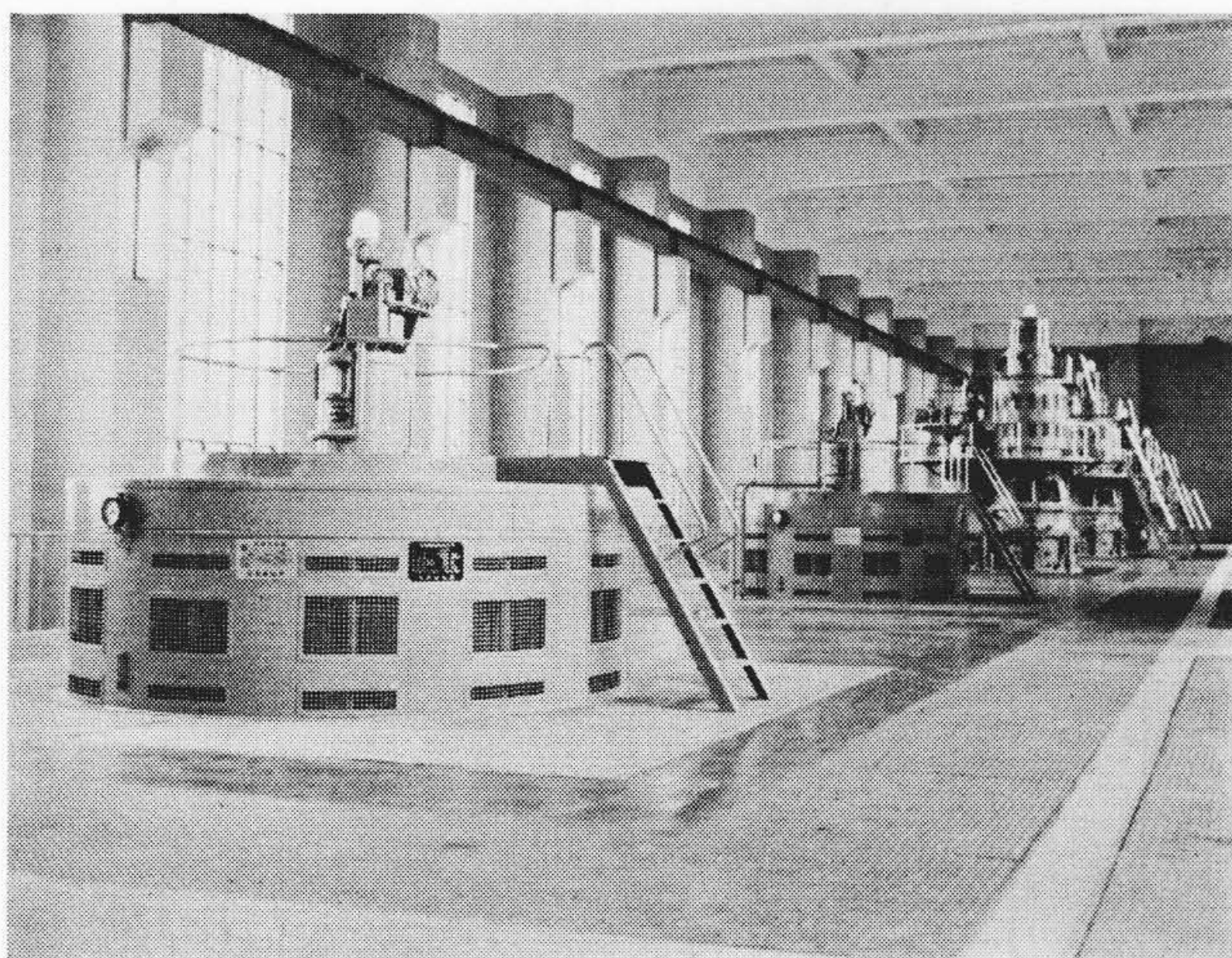
かき形構造を採用しているから、第21図のように床



第19図 60 kV 受 変 電 設 備



第20図 3 kV スイッチキュービクル

第21図 540 kW (720 HP) 同期電動機
(手前の2台が第1組可動軸流ポンプ用)

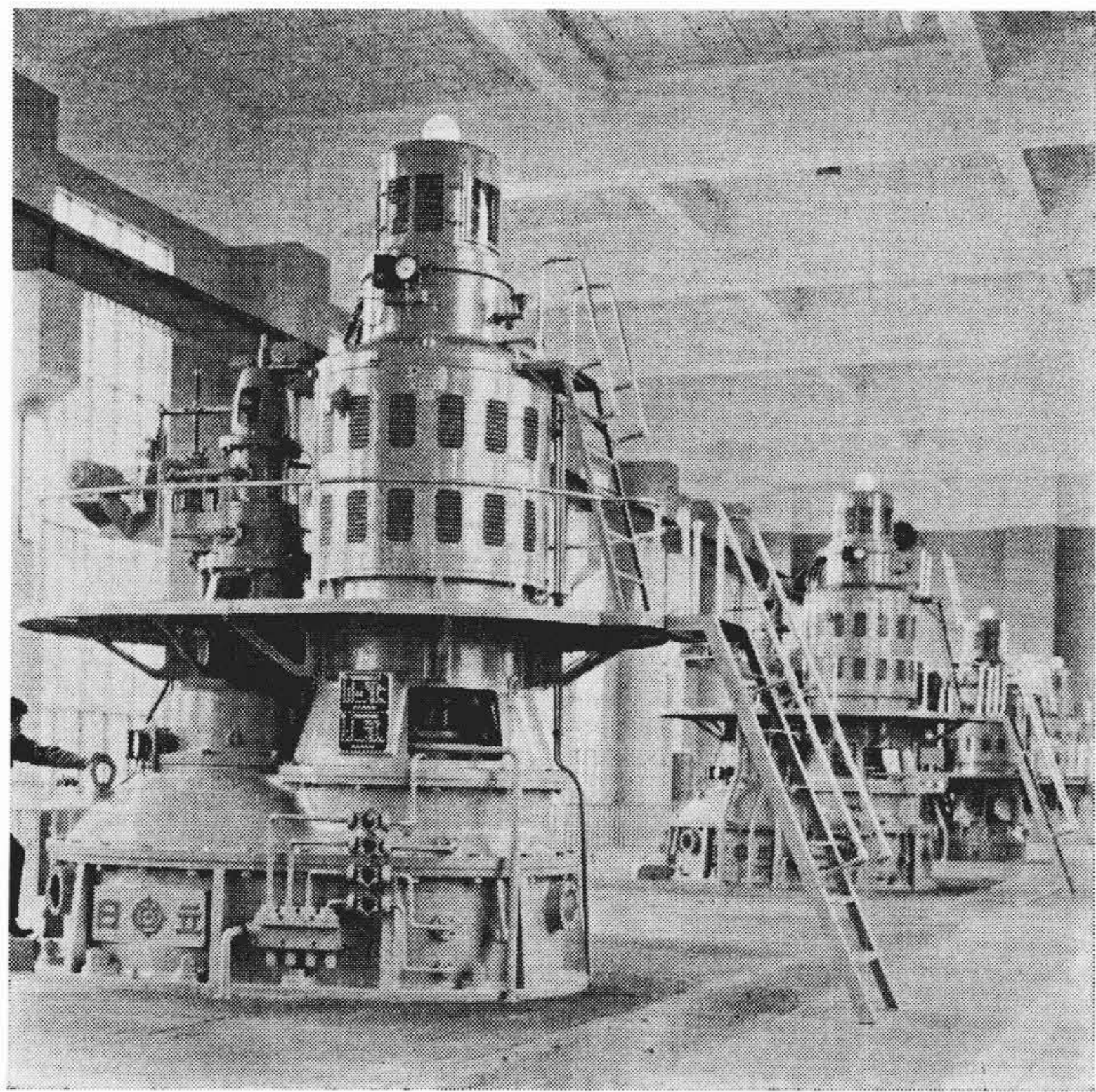
面上の高さが低く、安定である。推力軸受はセグメンタル軸受であるが、停電時、万一逆止弁および吐出側堰止弁の事故が重複して起り、川から沼へ逆流してポンプが逆回転した場合、最高揚程 6.02m においては逆回転数は定格正回転の約 150% となるので、これに十分耐えるよう中心支持式となっている。また潤滑油自蔵、自冷であるため構造は簡単でしかも一度調整すれば、回転子および電動機軸の分解、組立てに際して再調整の必要がなく、据付け、保守は容易である。

第2組および第3組のポンプ計4台は、洪水時の緊急用であるので経済性を考慮して、570 kW (760 HP) 誘導電動機により、減速歯車 (600/105 または 111 rpm) を介して駆動される(第22図)。

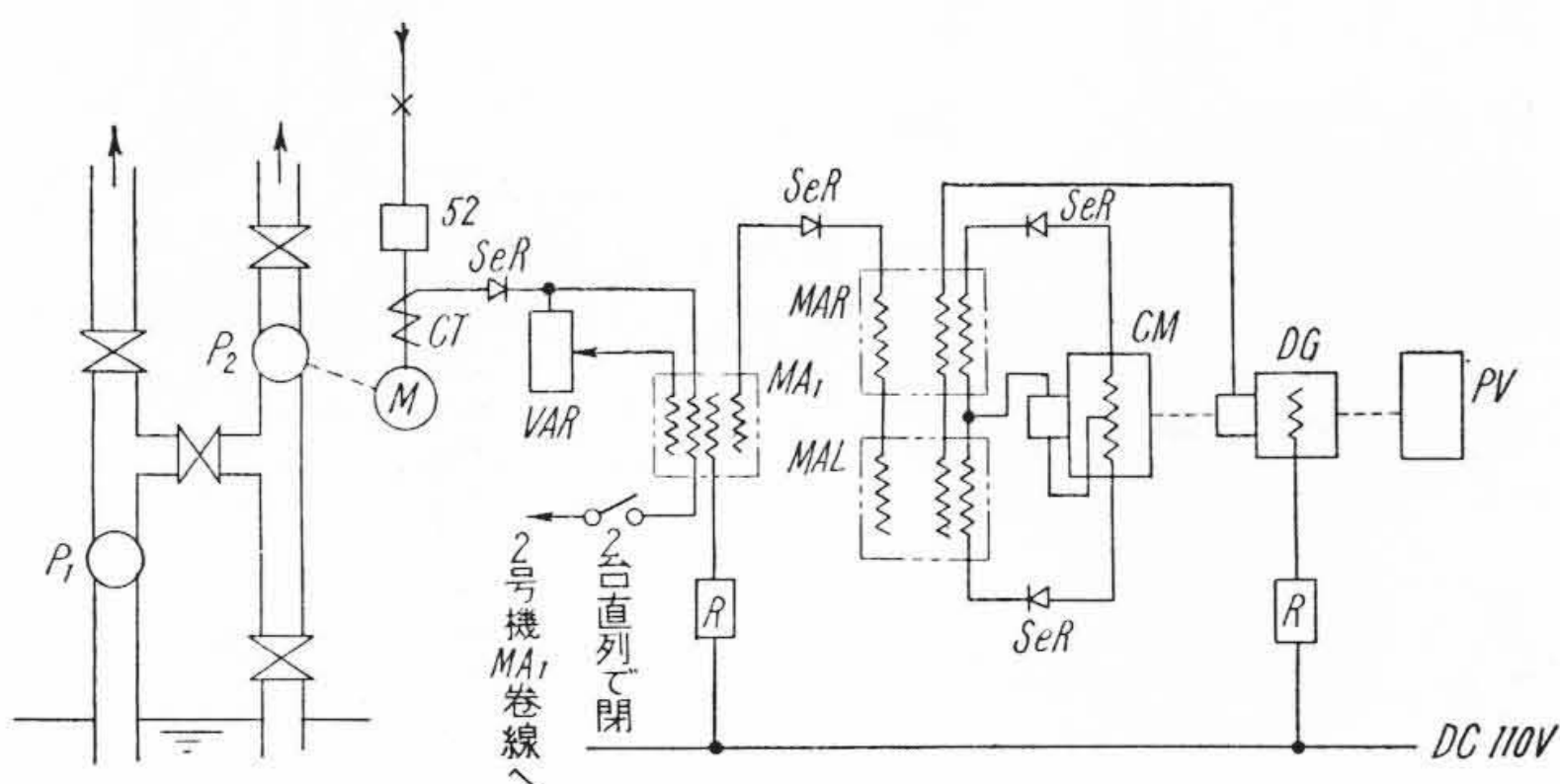
本電動機の仕様

形 式	VSP-DQ (3 相立軸開放巻線形回転子式)
出 力	570 kW (760 HP)
電 圧	3,300 V
周 波 数	50~
極 数	10P
回 転 数	600 rpm

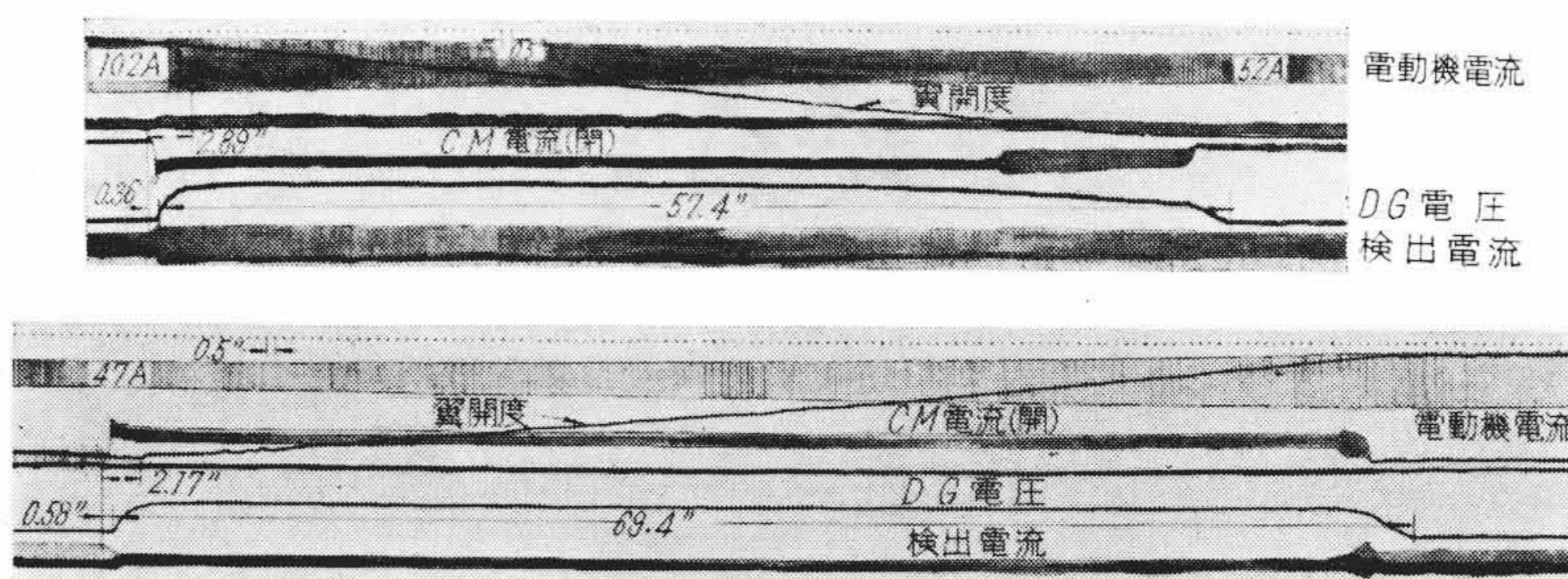
これら同期電動機、誘導電動機とも、固定子コイルの絶縁には、耐湿性および電気的特性がすぐれた SLS ワニスを使用しているが、第2組および第3組ポンプは緊急用で停止期間が長いため、この間誘導電動機の絶縁劣化を防ぐために、インターロック装置付断路器



第22図 570 kW (760 HP) 誘導電動機
(第2, 3組可動翼軸流ポンプ用)



第23図 可動翼軸流ポンプ翼開度自動調整装置



上: VRA 100%→50% 急変
下: VRA 50%→100% 急変

第24図 可動翼開度応動オシログラム

を介して、固定子コイルに交流 200V を通電して乾燥できるようにしている。

6. 制 御 装 置

6.1 可動翼角度自動調整

前述のように実揚程の変化によって、軸流ポンプの効率および電動機負荷が変化するが(第6図)、揚程の変動に応じ常に電動機を定格容量で運転するよう翼開度の自動調整装置を設け、これによって定格揚程以上でポンプを運転しても電動機過負荷のおそれがなく、定格揚程以下では電動機定格容量まで排水量を増大させて効率よく運転することができる。

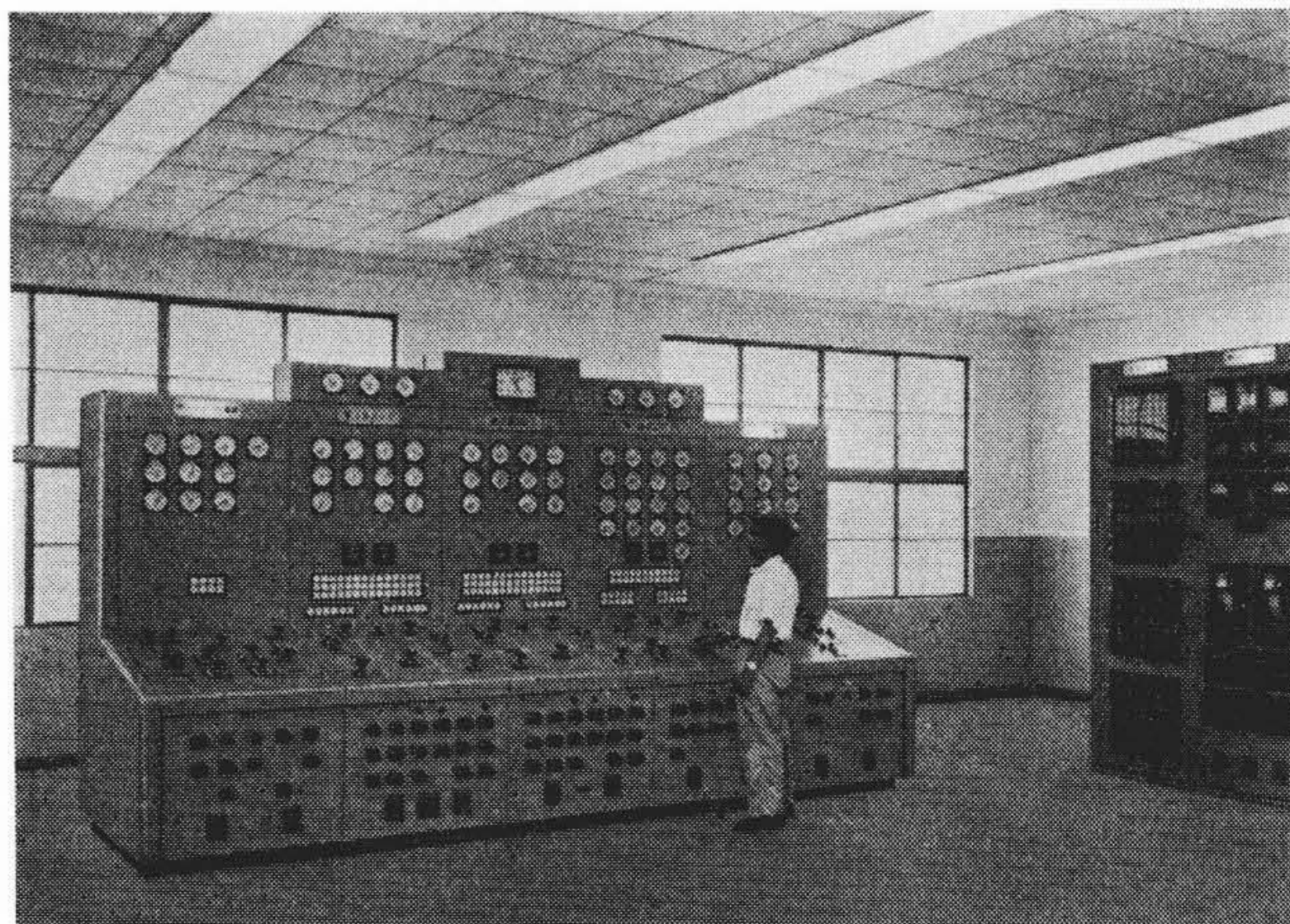
第23図はこの系統図で電動機の負荷電流を変流器 (CT) により検出し、磁気増幅器 MA_1 によって基準値と比較してその差を増幅し、その方向により出力磁気増幅器 MAR 、または MAL が出力を出し、油圧サーボ系のパイロットバルブ操作電動機を正転または逆転して可動翼開度を調整し、電動機負荷電流が一定となるように制御する。また主ポンプ直列運転の場合2台の電動機の負荷電流が平衡して運転するよう、それぞれの負荷電流の差を検出し、翼開度を調整する。

電動機の負荷は第23図中整定抵抗器 VAR を調整して100%から50%までの間で自由に整定できるようになっており、整定抵抗器は集中監視制御盤に取付け、任意に負荷調整ができるようにした。

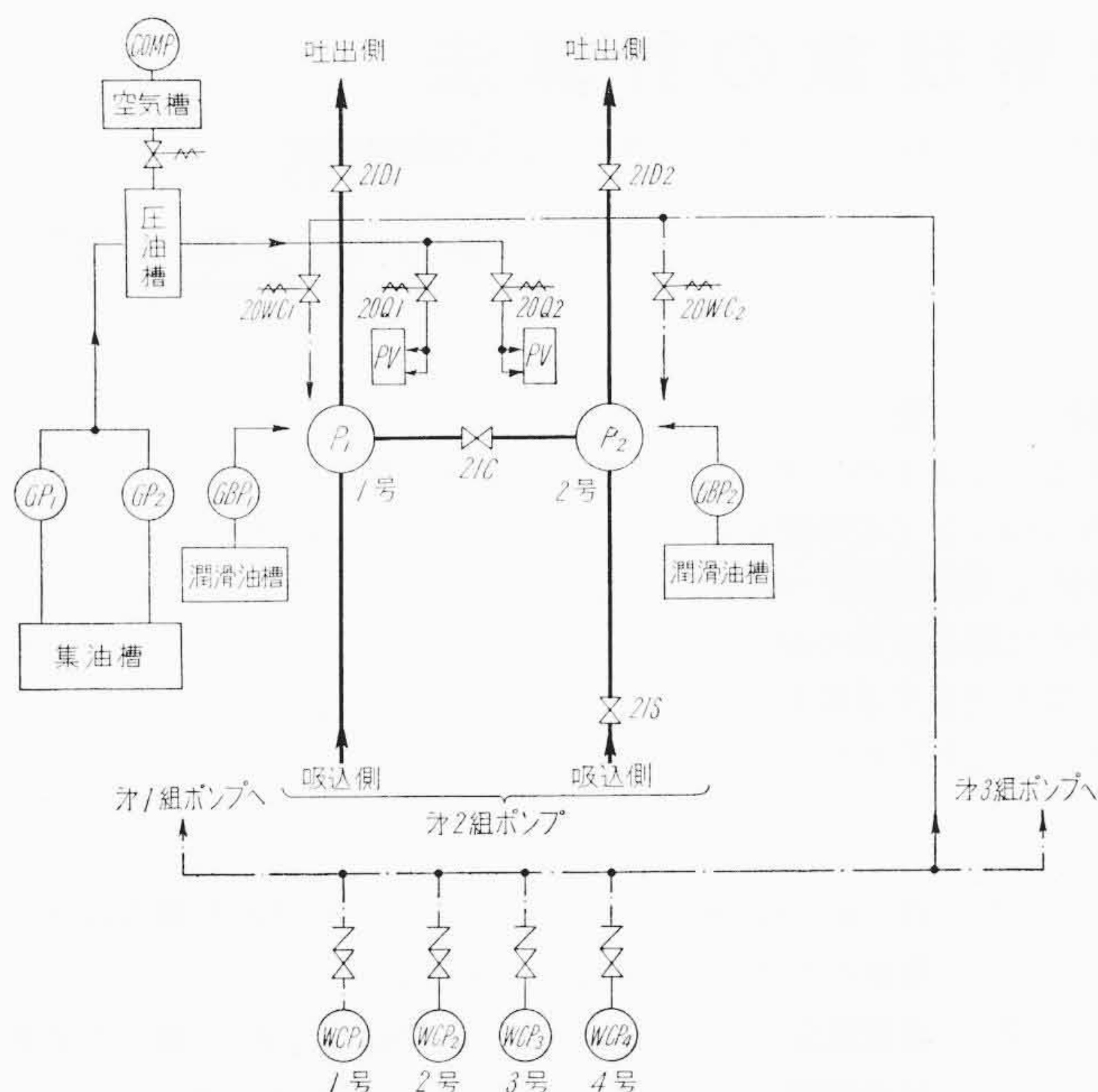
第24図は現地試験の際に、整定抵抗器 VAR を急変したときの本装置の応答状態を示すオシログラムである。負荷電流100%より50%に変化した場合と、逆に50%より100%に変化した場合を示し、いずれの場合も可動翼は約1分で円滑に動作し制御系は安定であることを示している。

6.2 集中監視制御

これらの主ポンプをはじめ 60 kV 受電回路、3 kV 専用配電線および所内電源など本排水機場の監視、制御はすべて縮小形集中監視



第25図 集中監視制御盤



第26図 ポンプ運転系統図

第1表 第2組ポンプの自動起動順序

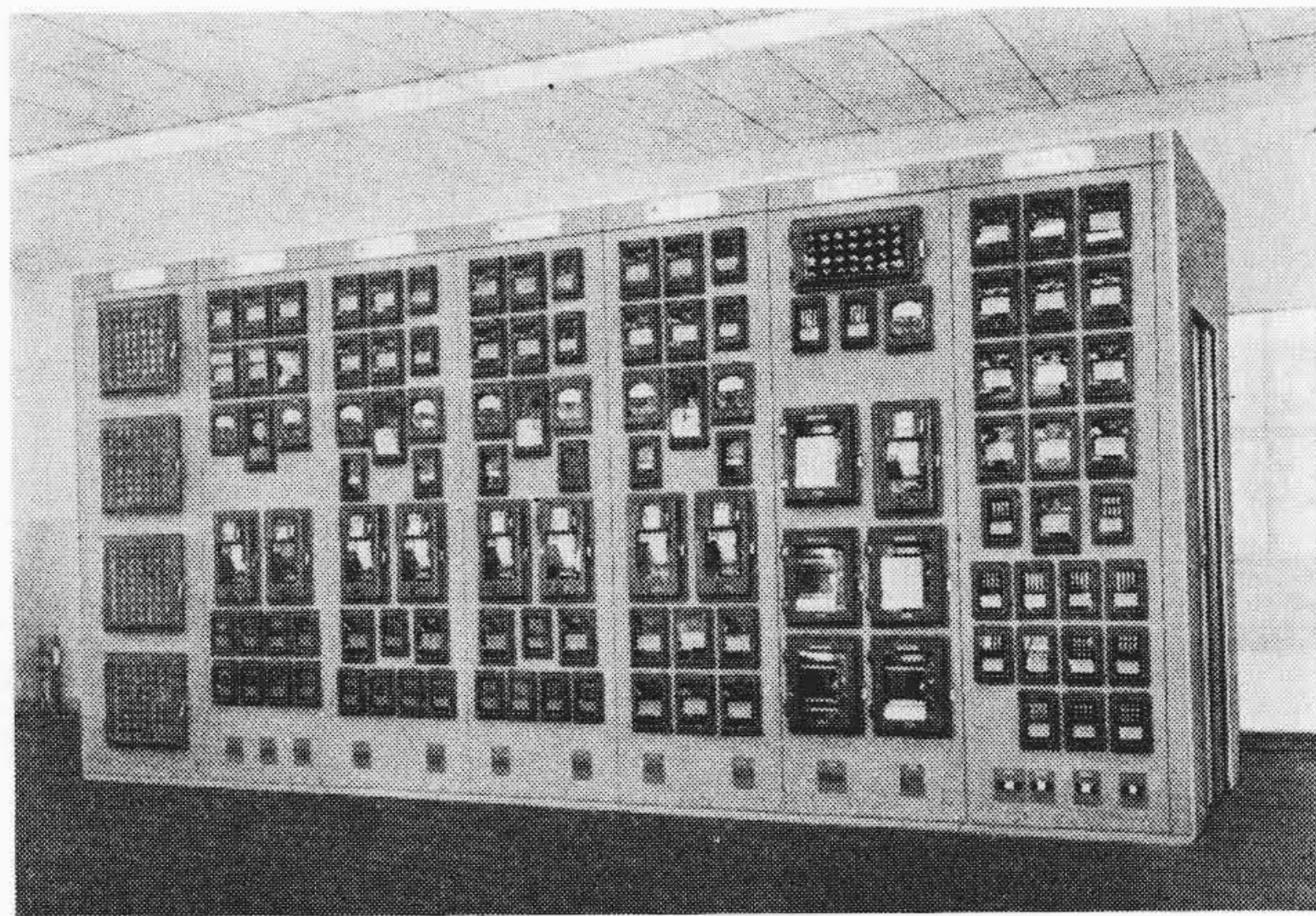
起動 順序	被制御機器	運転方式と操作			
		1号単独	2号単独	1,2号並列	1,2号直列
1	冷却水ポンプ (WCP)	2号または4号起動	2号または4号起動	2号または4号起動	2号または4号起動
	冷却水電磁弁 (20WC)	開	開	開	開
2	潤滑油ポンプ (GBP)	起動	起動	起動	起動
3	圧油電磁弁 (20Q)	開	開	開	開
	翼開度調整装置	最小翼開度にロック	最小翼角度にロック	最小翼角度にロック	最小翼角度にロック
4	1号吐出側せき止弁 (21D1)	閉→開	閉	閉→開	閉
	2号吐出側せき止弁 (21D2)	閉	閉→開	閉→開	閉→開
	切換弁 (21C)	閉	閉	閉	閉→開
	2号吸込側切換弁 (21S)	開→閉	開	開	開→閉
5	主電動機ポンプ	起動	起動	起動	起動
	起動抵抗器	短絡	短絡	短絡	短絡
6	翼開度調整装置	自動調整	自動調整	自動調整	自動調整

順序制御器の一操作によって、本表のように自動制御される。

制御盤(第25図)に集約し、能率よく確実に運転できるようになっている。さらに洪水などの緊急時にも誤りなく即応して主ポンプを制御する必要がある。簡単確実に取扱い容易な二段操作式順序制御器による一人制御方式を採用した。この方式は主ポンプ2台1組に共通の1個の順序制御器を操作することによって、各ポンプの単独運転、並列運転、直列運転、停止などを任意に選択操作することができ、補機類から主電動機に至るまで、すべて順序よく自動的に制御される。この自動起動順序を第2組のポンプについて要約し、第26図および第1表に示した。

また監視制御盤にはこれらの運転順序、状態を表示するランプ表示器およびポンプの照光式模擬系統を設け、運転状況、主バルブの開閉状況などを一目で監視しながら操作、保守ができるようになっている。

一方、沼側水位および川側水位を記録する記録計と、実揚程を指示する水位差計により、常時出水状況を監視できるようにし、ポン



第27図 継電器盤

プを常に高効率で運転するため、排水量あるいは実揚程の変動に即応して、運転中のポンプを他の運転方式(たとえば並列運転から直列運転)に切換えを必要とする場合には、これを警報して保守者に知らせようになっている。

記録計と継電器類はすべてこれらを継電器盤(第27図)にまとめ、監視制御盤の側方に配置している。本盤には保護リレーを一括して取付け、故障発生時の保護に万全を期した。

これらの故障は自動的に処置する重故障と、警報のみで保守者に処置をまかせる軽故障とがあるが、いずれもランプ式集合表示器に明示し、後者に対しては故障回復をフリッカで表示するなど監視を容易にしている。

なお、本排水機場には各種多数の補機が駆使されているが、そのおもなものとしては主ポンプの可動翼操作用圧油装置、水中軸受の潤滑、各部冷却水ポンプおよび減速歯車装置用潤滑油ポンプなどであり、すべて集中制御盤から監視制御される。

圧油装置は主ポンプに先立って運転され、圧油ポンプ2台で1組とし、1台は常用で圧油槽の油圧を常に規定値範囲に保つよう自動運転され、油圧が規定値以下となれば予備機が自動的に起動する。

またアンロードを省略したので、圧油槽空気補給の状況を油面計で監視し、油面が異常上昇または降下した場合はこれを警報表示し、集中制御盤から簡単に空気補給操作ができるようになっている。

冷却水ポンプは全体に対して共通に4台設けられ、内1台を予備とし、各主ポンプの起動操作により、それぞれ所属の冷却水ポンプが自動的に起動される。潤滑油ポンプも主ポンプの運転と関連して同様に運転される。

7. 結 言

本排水機場はわが国最大の規模を有しているのみならず、前述のように各種の特長をもっていて、わが国の代表的農業用排水機場として諸外国にも誇ることができる。特に、超大形立形ポンプの直並列切換運転に成功したことは、水位差の大きな河川に対する排水設備に一つの方式を確立したことになり、今後広く応用されるものと思う。本機場が前述の近代設備によりその真価を十分に発揮するとともに、次々計画される機場に対し参考になることを切望する次第である。

終りに、本機場を計画され、各種機器製作に種々ご指導を賜った農林省本省および東京農地事務局の関係各位に感謝の意を表する。