

東京都水道局朝霞浄水場納 6,200 kW 原水連絡ポンプ設備 6,200 kW Raw-water Pumping Equipments in Asaka Purification Plant, Tokyo Metropolitan Water Works Bureau

本 多 孝 一* 黒 田 昭 彦*
Kôichi Honda Akihiko Kuroda

内 容 梗 概

東京都水道局朝霞浄水場に設置された原水連絡ポンプは揚程 120 m, 電動機出力 6,200 kW の片吸込単段立形ボリュートポンプで水道用として記録的容量をもっている。モデル試験の結果実物において約 90% の効率が得られる見込みである。ポンプの運転は一人制御の自動操作により、流量指令に合わせて速度の自動制御が行なわれる。電動機はクレーマ方式により速度調節の際の運転効率を高めている。

吐出管は延長約 16.8 km に及ぶ長管路で、停電の際の負圧を防止するため 5 個のワンウェイサージタンクを有している。

多くの新機軸を含むこの設備の試験結果は、すべてがきわめて好調であったが、世界でも初めての長管路に設けられた複数のワンウェイサージタンクが予測計算どおりに好結果を納めたことは貴重な実績といえよう。

1. 緒 言

東京都水道局朝霞浄水場に設けられた原水連絡ポンプ設備は、東京都水道利根川系拡張事業の一つであり、東京都の水不足対策の一環として利根川の原水を東村山浄水場へ揚水し、ここで浄化して都内に給水しようとするものである。ポンプは合計 3 台で完成後は 1 日 120 万立方メートルの原水を供給することができる。

出力はポンプ 1 台に対し 6,200 kW で水道用ポンプとして記録的大容量であるのみならず、駆動用誘導電動機はクレーマ方式により回転数調節の際の運転効率の大幅な改善を図っている。延長 16.8 km に及ぶ長大な吐出管路には 5 個のワンウェイサージタンクを備えて停電時の水撃制御を行っており、全設備にわたり多くの新機軸がとり入れられている。

昭和 39 年 8 月 25 日、おりからの東京都の異常渇水に対し都民の渴望にこたえて、緊迫した空気の中で首尾よく運転を開始したことは歴史的な成果といえよう。

2. 設 備 の 概 要

このポンプ場には東村山へ送水する「原水連絡ポンプ」と将来の朝霞浄水場の沈でん池へ送水する「導水ポンプ」との両者を一緒にして納めるよう計画されており、原水連絡ポンプが先行して設置される。

原水連絡ポンプの仕様は次のとおりである。

1,400×1,000 mm 立軸片吸込単段ボリュートポンプ	3 台
吐 出 量	250 m ³ /min
揚 程	120 m
回 転 数	326~407 rpm
電 動 機 出 力	6,200 kW

常用 2 台の計画であるが需要量にしたがい 1~3 台が運転される。ポンプの操作は浄水場の中央管理室および原水ポンプ場内の監視室から 1 人制御方式で行なわれ、かつ設定流量に対し回転数の自動制御が行なわれる。回転数の調節は誘導電動機にクレーマ装置を取り付けて 100~80% の間を効率よく行なうよう計画されている。

吐出管は約 16.8 km を一気に東村山へ達するもので、このように長大な連絡管路で揚水するものは世界にもその例がなく、ワンウェイサージタンクを 5 個設置して停電時の水撃を緩和している。

* 日立製作所亀有工場

ポンプ場内の主配管は溶接鋼板製で、場合により東村山浄水場から逆送して朝霞浄水場へ水を落とせるような逆送管をもっている。ポンプの吐出主弁には油圧操作のコーン弁を、逆送管の流量調節弁には油圧操作の蝶形弁を使用している。

なお東京都では本施設に先だち、緊急事態に対処するためポンプ 1 台だけを収容し最短期間で揚水を開始するため仮設ポンプ場を建設し昭和 39 年 8 月 25 日より通水を開始した。

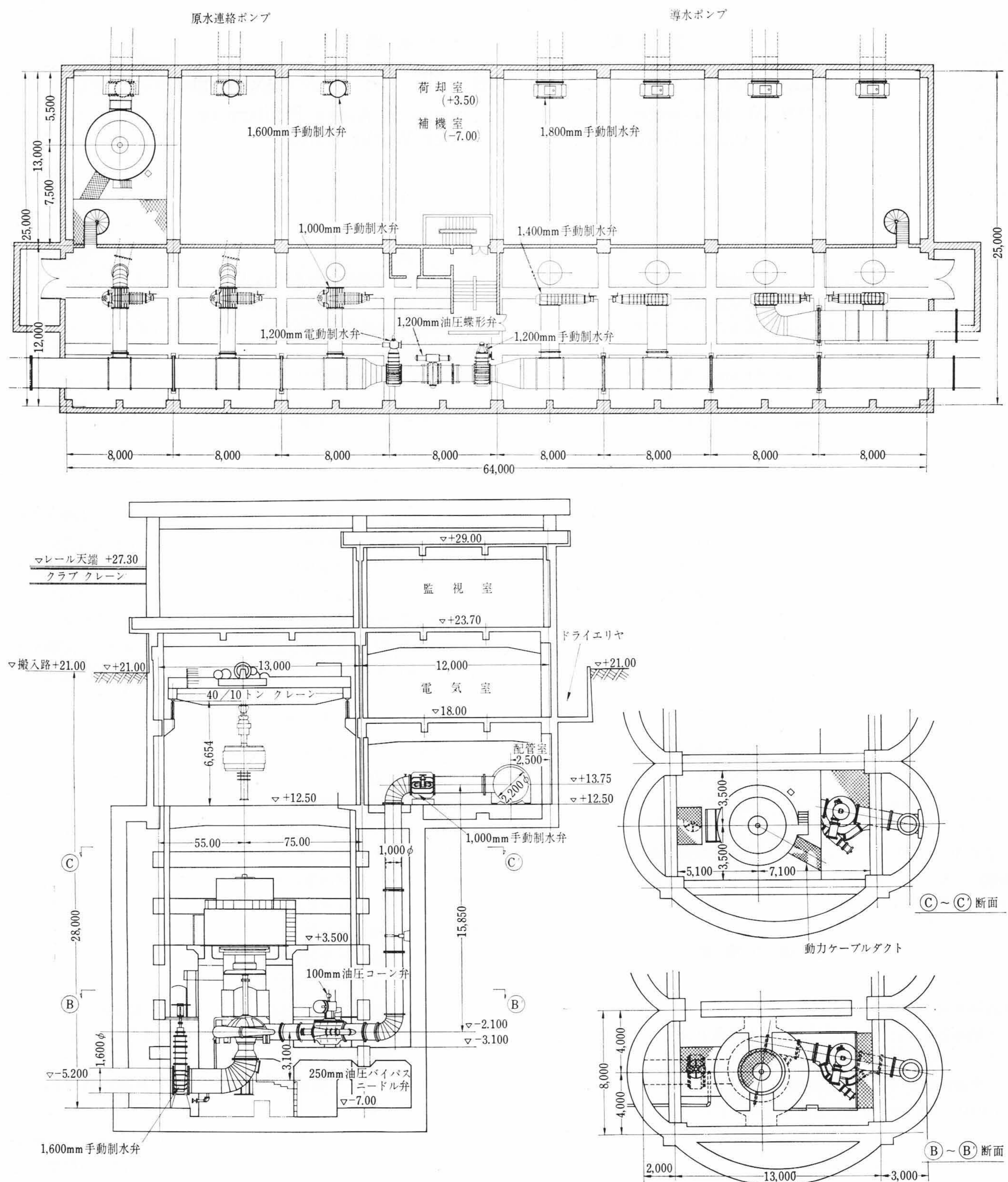
3. ポンプ 本 体

吸込水路に荒川から約 3.6 km の間の自然流下の落差をとるため、ポンプ室が深くなることからポンプの形式としては立形が決定的となる。立形の場合その仕様およびポンプ場内の配置の都合から当然片吸込のうず巻ポンプとなる。このような形式のポンプでは通常ケーシングカバーの上部にポンプ軸受が設置される。大形の高圧ポンプの場合、ケーシング内部の水圧および据付時のコンクリート埋込みに際し、ケーシングにひずみが起こるとこれによってその上部に設置された軸受の心が狂うことになる。そこでこのポンプではこのような影響を最小にするために、うず巻ケーシングに多数の案内羽根をかねたスティベーンが設けられている。ポンプの吸込側の曲管は鋼板溶接製で、アメリカ開拓局の標準による縮流短半径形エルボを用い、比較的急な屈曲に対して羽根車入口部の流速分布がなるべく均一になるように考慮されている。

羽根車は 13 クローム鋳鋼製で、吸込口および背面に 17-4 PH 鋼製のウェアリングリングがはめ込んである。

吸込カバーおよびうず巻ケーシングは鋳鋼製、吐出カバーは鋼板溶接製であり、水流により特に壊食を受けやすい所はその程度により 13 クローム鋼または軟鋼のライナを取りつけて保護している。また吐出カバーの要所にはウェアリングリングの間げきをチェックできるように点検用カバーを設けてある。吐出カバーにはバランス管を設けて羽根車の背圧を吸込側へ連結して軸推力を減じ、軸封装置に高圧がかからぬよう保護している。

パッキン箱は羽根車のオーバハングをなるべく少なくすること、ひん繁な調整や取換えを必要としないこと、場合により避けられない濁水の浸入に対してもできるだけ強いことなどの条件を考慮に入れて、布入フラン樹脂およびカーボンの組み合わせによる特殊なセグメント形リングパッキンを用いて外部から清水を封入してリングを保護している。スリーブは 13 クローム鋼の焼入れしたもので二



第1図 朝霞浄水場原水連絡ポンプ設備配置図

つ割となっておりシャフトにネジ止めされている。

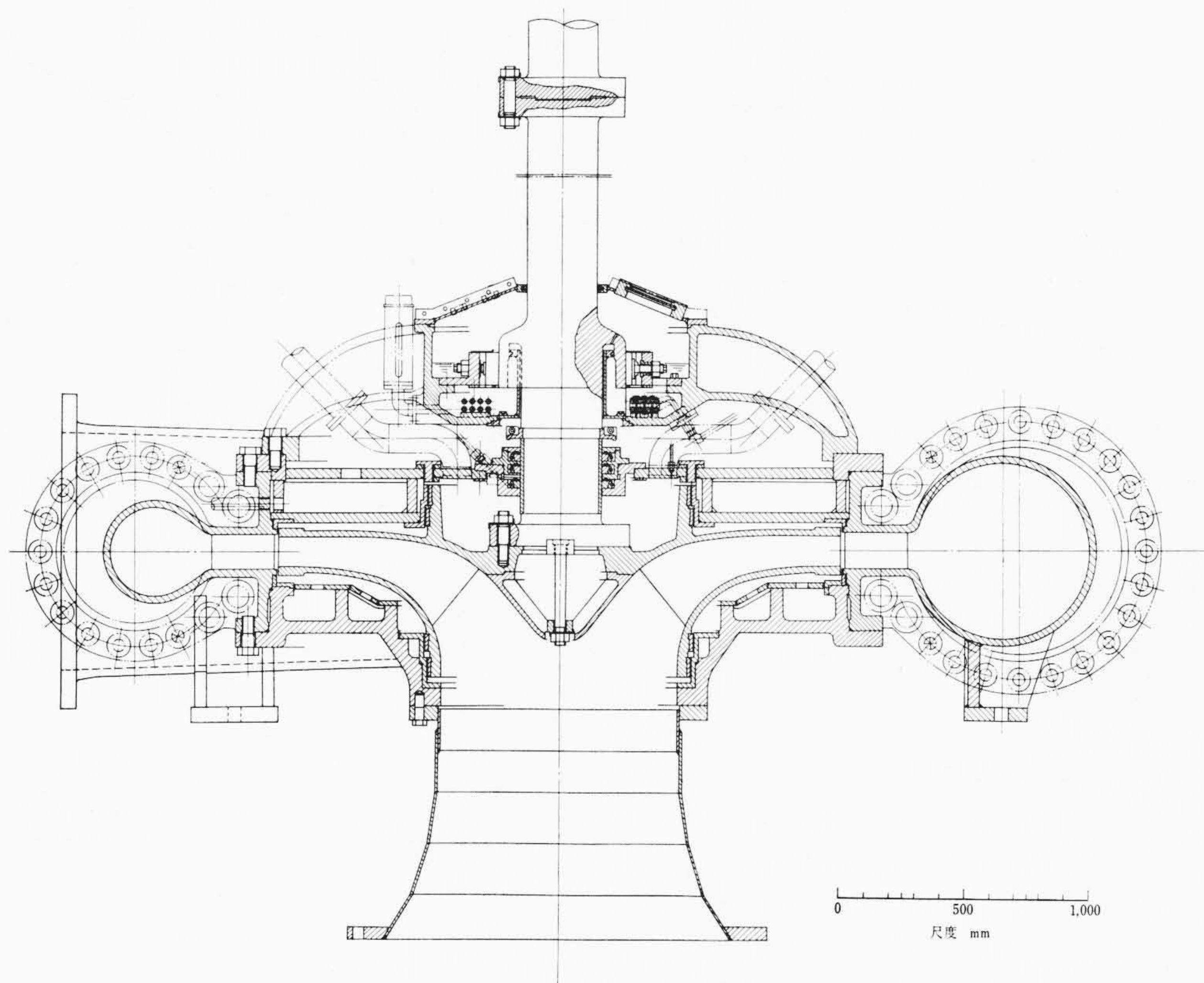
軸受は油だめ式で軸受メタルはセグメント形になっている。軸受支持用ブラケットは、特に脚を大きく外に張り出してケーシングのスティベーン直上のフランジ部で支持され、ケーシングのたわみの影響が軸心を狂わさないように考慮されている。

4. モデルポンプ

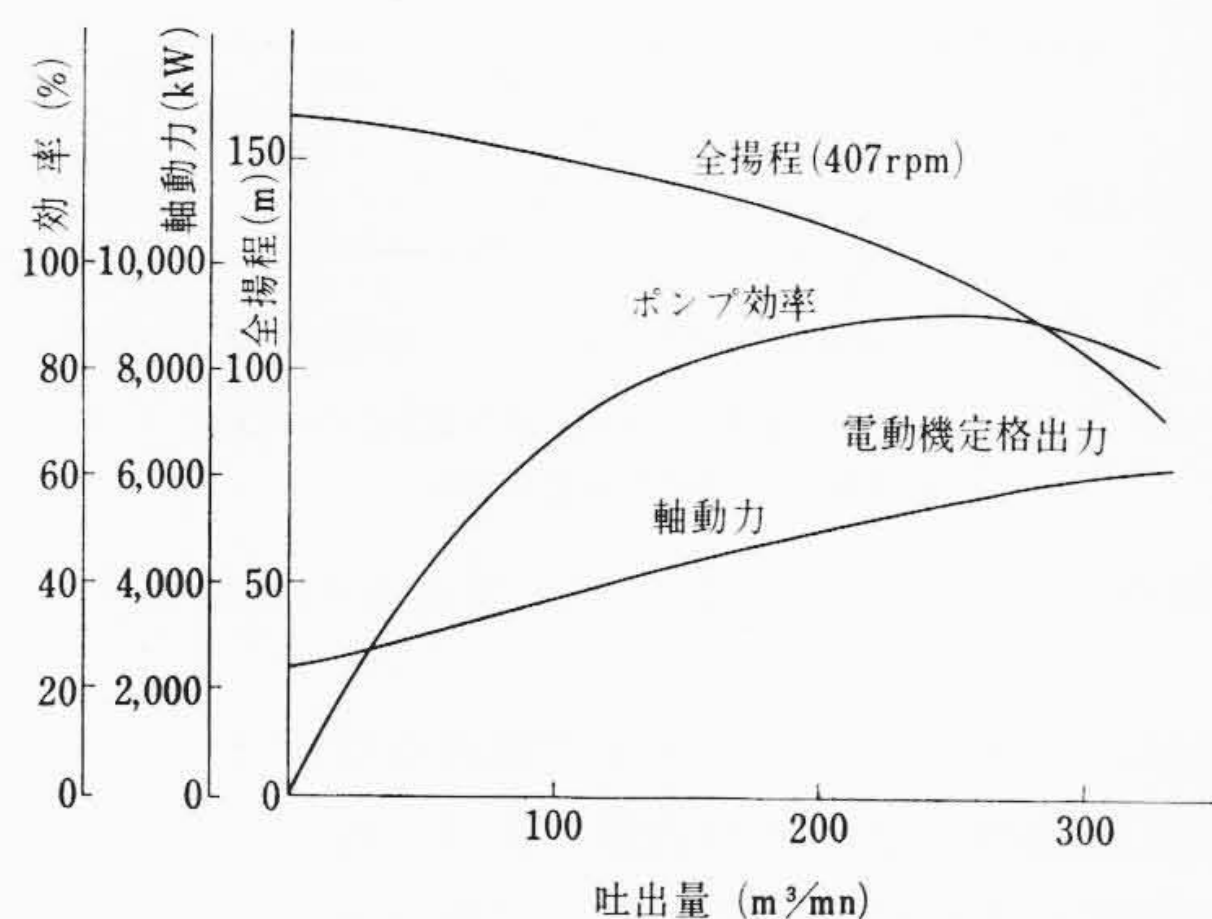
実物の製作に先だち、水道局との契約条件に基づいて、その性能

の予測を確実にするためモデルポンプを製作した。前述のとおりこのポンプは20%の速度調整を行なうので、その特性曲線は傾斜の急なものが望ましく、またケーシングの水圧変形を最小に止め、かつ水力性能のよいスティベーンの形状を決定し、また連続運転の大容量水道用ポンプとして88%以上の高効率を確実に得るため、数種のモデルポンプを製作し、その中から最良のものを選んで実機的设计に応用した。

モデルポンプは実機と水力学的にまったく相似形に造られ、試験



第2図 原水連絡ポンプ構造図



第3図 モデルの性能から推定した実物の性能曲線

装置の容量のゆるす範囲で、実物になるべく近い揚程をもつように仕様を定めた。

215×154 mm 単段片吸込ポリュートポンプ

5.39 m³/min×97 m×2,360 rpm

定格点の N_s 約 180

実物に対する縮尺比 約 1/6.5

モデルポンプは N_s が約 180 において最高効率 85% を得ることができた。その特性から下記の式を用いて換算した実機の推定性能は第3図に示すとおりで、最高効率は 90% を越す見込みであり、縮切点に向って十分上昇する揚程曲線をもっている。下記の式の根拠は効率の換算式はムーディの 1/4 乗公式であり、軸動力はモデルと実物との間で相似方則がそのまま適用され、吐出量と揚程については、実物の効率がモデルのそれよりも上昇する分に対し、 N_s が等しいような関係を保って吐出量と揚程がそれぞれ相似方則の示す値よりも変化するという考え方によるものである。

効率の換算式

$$\eta_{\max} = 1 - (1 - \eta_{m.\max}) \left(\frac{D_m}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{H_m}{H} \right)^{\frac{1}{10}}$$

吐出量の換算式

$$Q = \left(\frac{\eta}{\eta_m} \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{N}{N_m} \right) \left(\frac{D}{D_m} \right)^3 Q_m$$

揚程の換算式

$$H = \left(\frac{\eta}{\eta_m} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{N}{N_m} \right)^2 \left(\frac{D}{D_m} \right)^2 H_m$$

軸動力の換算式

$$P = \left(\frac{N}{N_m} \right)^3 \left(\frac{D}{D_m} \right)^5 P_m$$

これらの式において

$\eta_{\max}$: 最高効率

D : 羽根車外径

η : 効率 ($\eta/\eta_m = \eta_{\max}/\eta_{m.\max}$ とする)

N : 回転数

Q : 吐出量

H : 全揚程

P : 軸動力

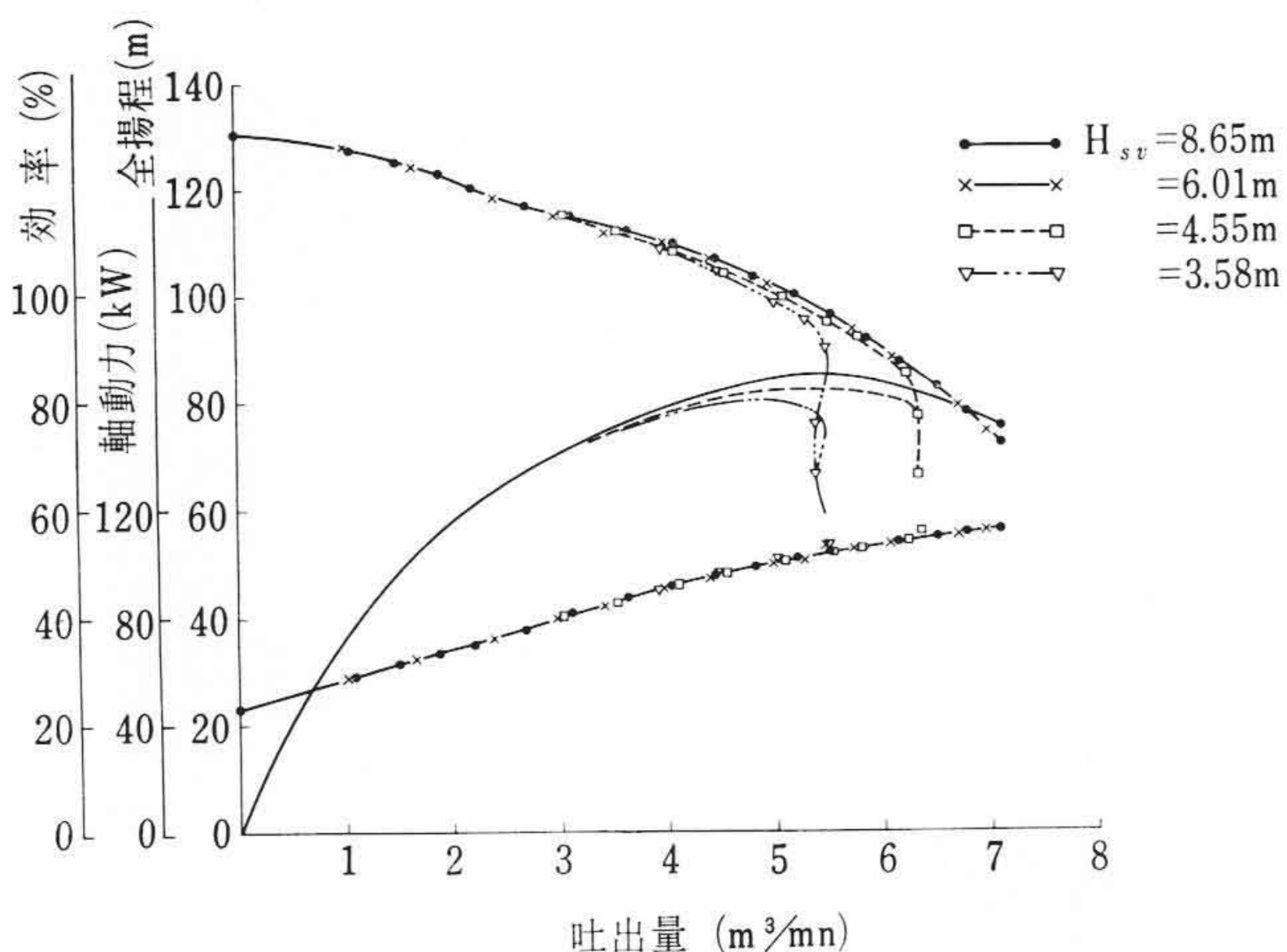
添字 m はモデルを示し、添字なしは実物を表わす。

モデルポンプについては、さらにキャビテーション試験を行なった。

実物の吸込状態に関して与えられた条件は、全揚程 120m に対し H_{sv} が 11.08 m になる (20°C において)。これに相当するモデルの条件は全揚程 97 m に対し H_{sv} が 8.95 m となる。 H_{sv} が 8.95 m 以下の条件で数種のキャビテーション性能を測定した結果を第4図に示す。

規定状態でキャビテーションによる性能低下はまったく起こっていないし、実物で起こり得る最大水量 125% においても十分余裕を持っていることが知られる。

モデルポンプについては、このほかに振動の原因となる水圧脈動の調査および走放試験を行なった。前者については羽根数×回転数相当の基本周波数の 2 倍の脈動が認められたので、実機においても各種構造物の固有振動数が十分この値から離れていることを確認



第4図 モデルポンプのキャピテーション性能曲線

し、後者については、万一の場合起こり得る走放状態に対し電動機が十分安全であることを確かめてある。

5. ポンプの運転操作と制御

このポンプは、原水ポンプ場内監視室に設置される主監視制御盤において全自動または半自動運転が行なわれる。全自動の場合は、操作開閉器の操作で主ポンプの起動停止、吐出弁の開閉、回転速度の調整までが連動して行なわれ、半自動の場合は吐出弁の開閉までが連動して進められる。回転数は中央管理室から発せられる吐出量指令信号にもとづき設定吐出量を保つように自動的に制御される。主監視制御盤からは手動でも回転速度および吐出弁の開度調整を行なうことができ、現場操作盤では各機器の単独操作が可能である。

吐出弁を開き始めるときのポンプの回転数は、そのときの運転状態に対し、逆流を起こさない限度で小さい値に保つことにより締切状態における振動を軽減し、かつ吐出弁の開きにより急激な吐出量の増加を伴わないようにしてある。すなわち最初の1台目を起動するときは80%速度において吐出弁を開きはじめ、1台運転中2台目を追加起動するとき吐出弁を開く速度は82%、2台運転中3台目を起動するときは同じく90%に保たれる(特許出願中)。2台目または3台目のポンプが起動し吐出弁が全開すると、全吐出量が流量指令に一致し、かつ各ポンプの回転数が同一になるよう双方から歩みよって所要の速度にそろえられる。

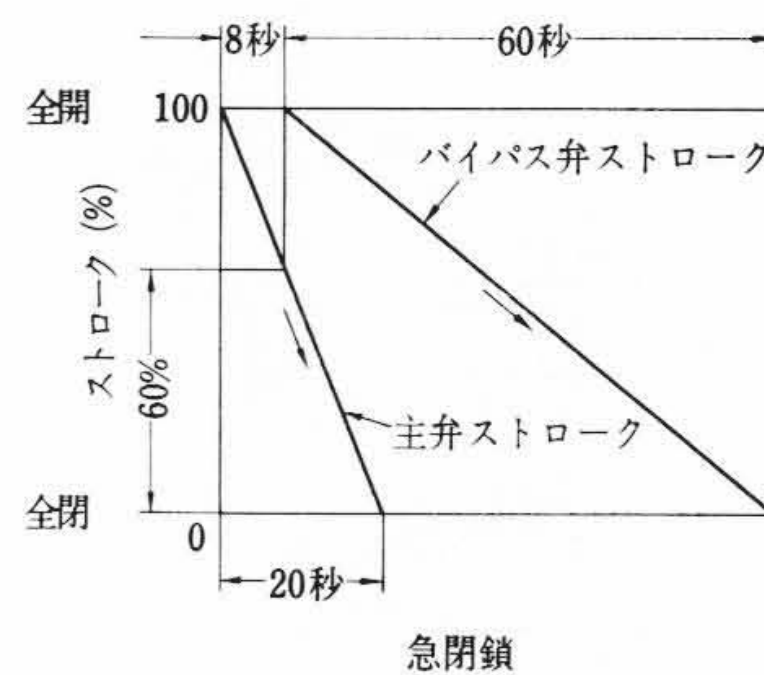
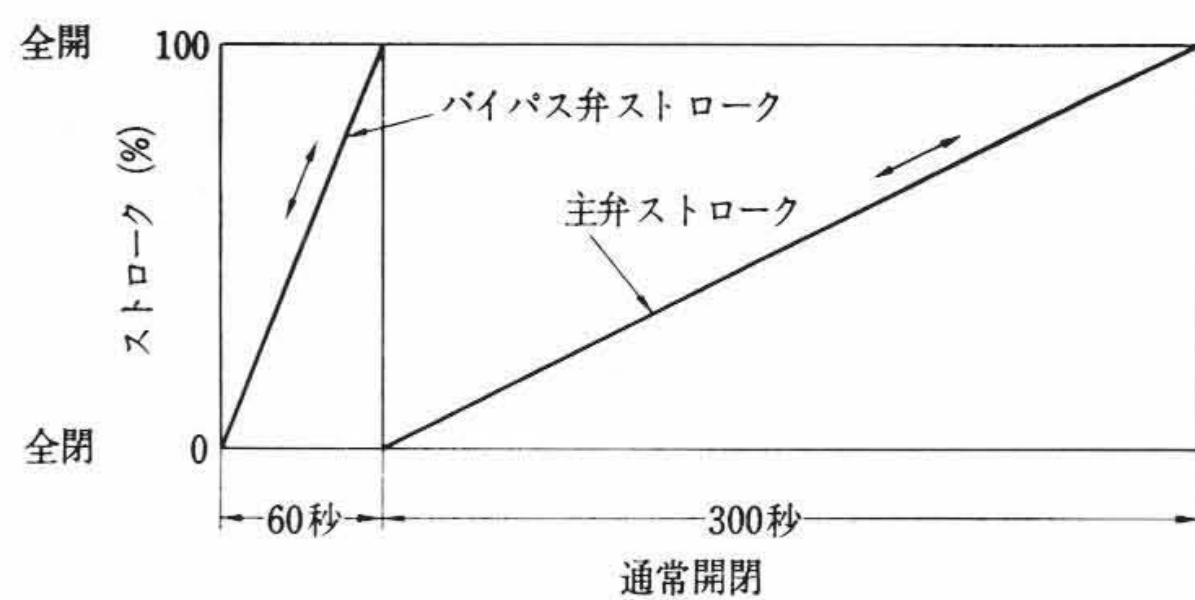
ポンプを停止するときはこの逆である。

重故障または非常停止用開閉器の操作により、または停電により主電動機は直ちに電流が断たれ、吐出弁は所定の急閉鎖を行なう。

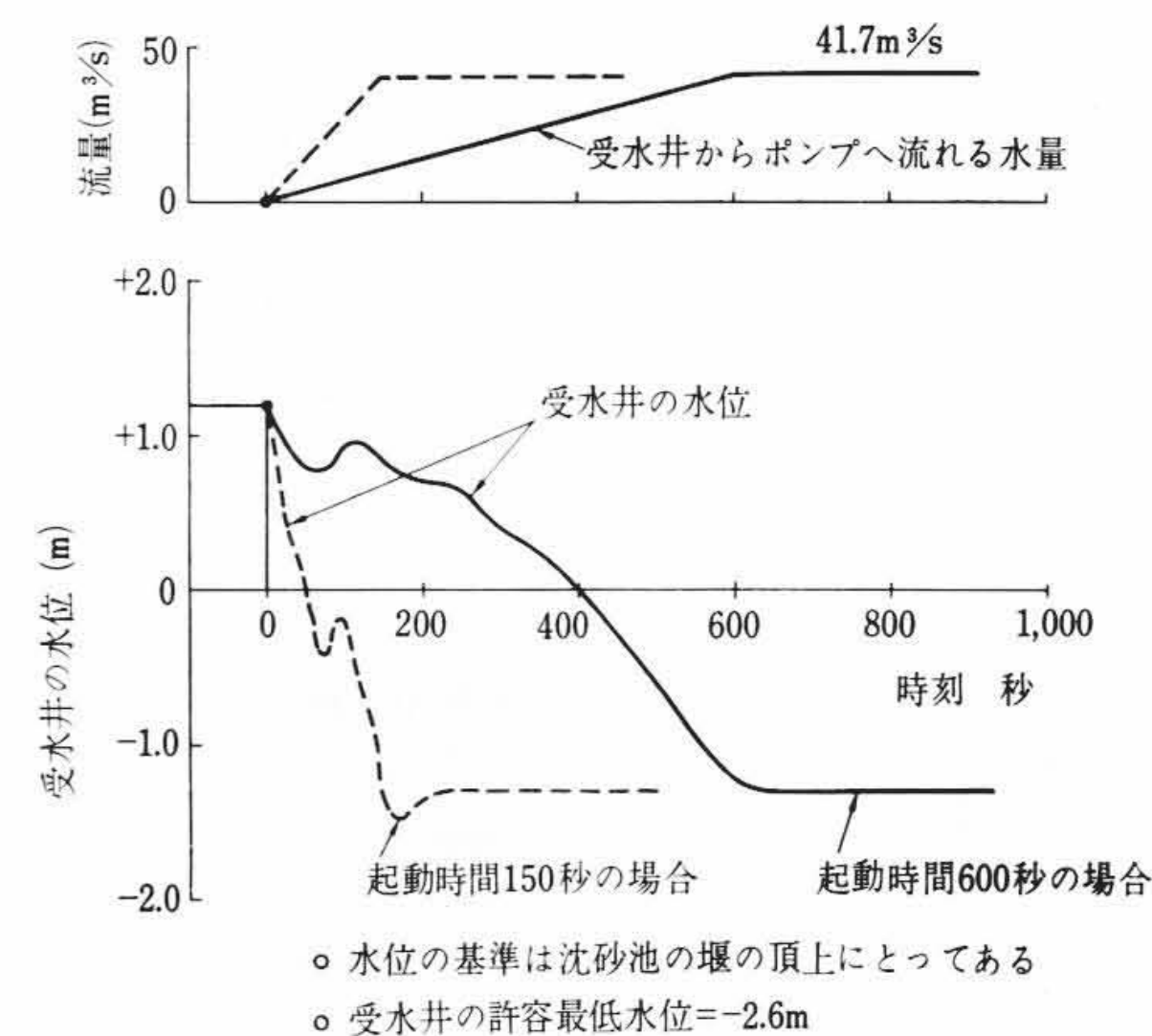
吸込水槽の低水位保護の方法としては、吸込側水路が長く慣性が大きいので急激な変化を与えないよう保護水位を3段階に定め、第1と第2の間の水位ではポンプの速度制御を中止してそのまま様子をみることとし、第2と第3の間の水位ではポンプの回転数を減少せしめ、第3の水位にいたってポンプを停止するという方法をとっている。水位が回復する場合は第2の水位で回転数がそのまま保たれ、第1の水位で回転数を上昇させることができる。

6. 吐出弁とその制御

このポンプの吐出主弁としては油圧操作のコーン弁が採用されている。主弁を保護し、かつその制御を簡単にする目的で油圧操作のニードル弁をもったバイパスを付属させて、バイパス弁を主弁と連動するようにしてあるが、その役目は次のとおりである。運転の始めに空の長い吐出管を満水する際、主ポンプの低揚程運転を避けるために弁を絞って運転を継続する可能性がある。これを主弁で行なうと強い絞り状態が永く継続することになる。このときバイパス弁



第5図 弁の開閉時間線図



第6図 ポンプの起動に伴う受水井の水位変化

を使用すれば、主弁は全閉したままで無理を受けない。また停電時の水撃制御に際し弁の閉鎖方法は、始めは早く終わりを遅くする二段速度方式が採られており、二段目をバイパス弁に受持たせることにより、主弁は単に直線的な開閉を行なうのみでよく、閉鎖の後段に微妙な開度調節を与える必要なく主弁の制御が簡単になる。

起動時吸込水路に起こるダウンサージおよび停電時吐出管に起こるアップサージを適当な値に保つため、これら主弁とバイパス弁の相関的開閉時間は通常の起動停止に伴う開閉、非常停止の際の急閉鎖の別により、それぞれ第5図に示すように計画されている。

7. 長大な管路とそのサージ制御

本ポンプ施設は、地勢上の制約から吸込側、吐出側とも他に例のない長大水路または管路をもっている。このように非常に大きい慣性をもつ水系に対しては、起動および停止に伴う正または負のサージに対し十分の考慮を払う必要がある。

吸込側については、当初条件が確定していなかったもので、最悪の条件として荒川の取入口よりポンプ場まで3.6 kmが連続した密閉水路となった場合にも、ポンプ起動時の吸込水槽のダウンサージが許容範囲にはいるように、ポンプ吐出弁の開速度およびポンプの速度上昇割合を定めた。最終的にはポンプ場から約500 mの地点に大きい沈砂池が設けられ、それ以降さらに5個の調整池相当の水槽を有する系に変わったので吸込側の条件は著しく好転した。

本ポンプ場の最終の姿として原水連絡ポンプ3台、導水ポンプ4

台が設置され、これらのポンプが同時に起動した場合を想定して、受水井(ポンプ吸込水槽)の水位変化を計算したのが第6図である。起動時間を600秒、または150秒とした場合、いずれにおいても有害なサージは認められない。最終の水位 -1.3m は $41.7\text{m}^3/\text{s}$ の流量が定常的に流れた場合の動水こう配による低下水位を示している。

上記全台数のポンプが停電により、一時に停止した場合の受水井のサージは $+3.4\text{m}$ 水位まで上昇することになるが、受水井の許容最高水位は $+10.4\text{m}$ に計画されてあるので十分安全である。

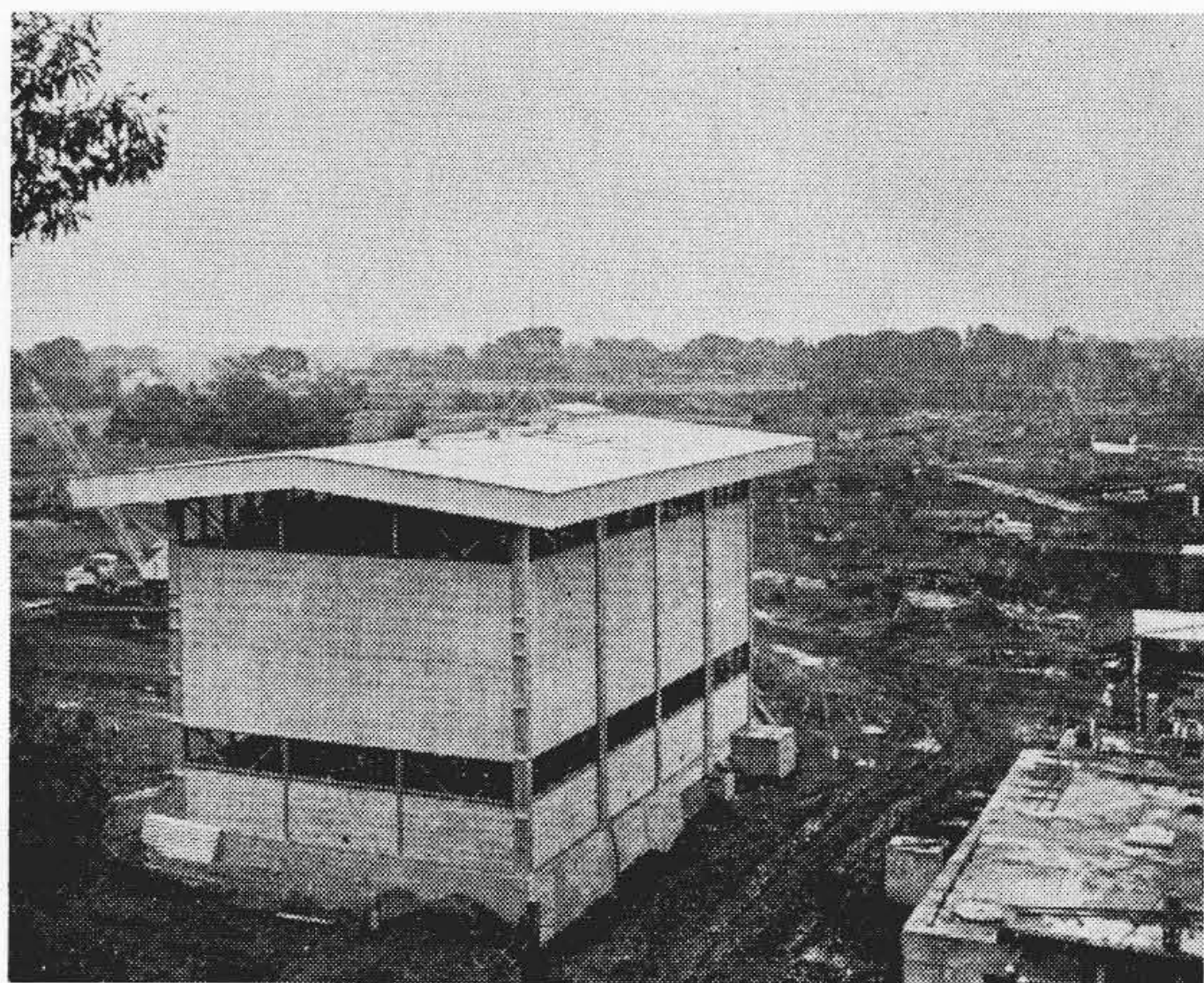
吐出側については 16.8km に及ぶ長距離の緩傾斜管路なので、ポンプ停電時の負圧防止対策として、複数個のワンウェイサージタンクを置くことになったが、このような場合につき詳細な計算を行なった例はいまだないようであるが、その計算方法を確立し東京都の計画に協力した。

最終のタンクの数5個となり、その配置ならびに管路のプロファイルは第7図に示すとおりである。ポンプ3台を運転したときの状態で電源の遮断が行なわれ、そのときのポンプ、吐出管、各サージタンクにおける水流の挙動を計算した結果が第8図である。

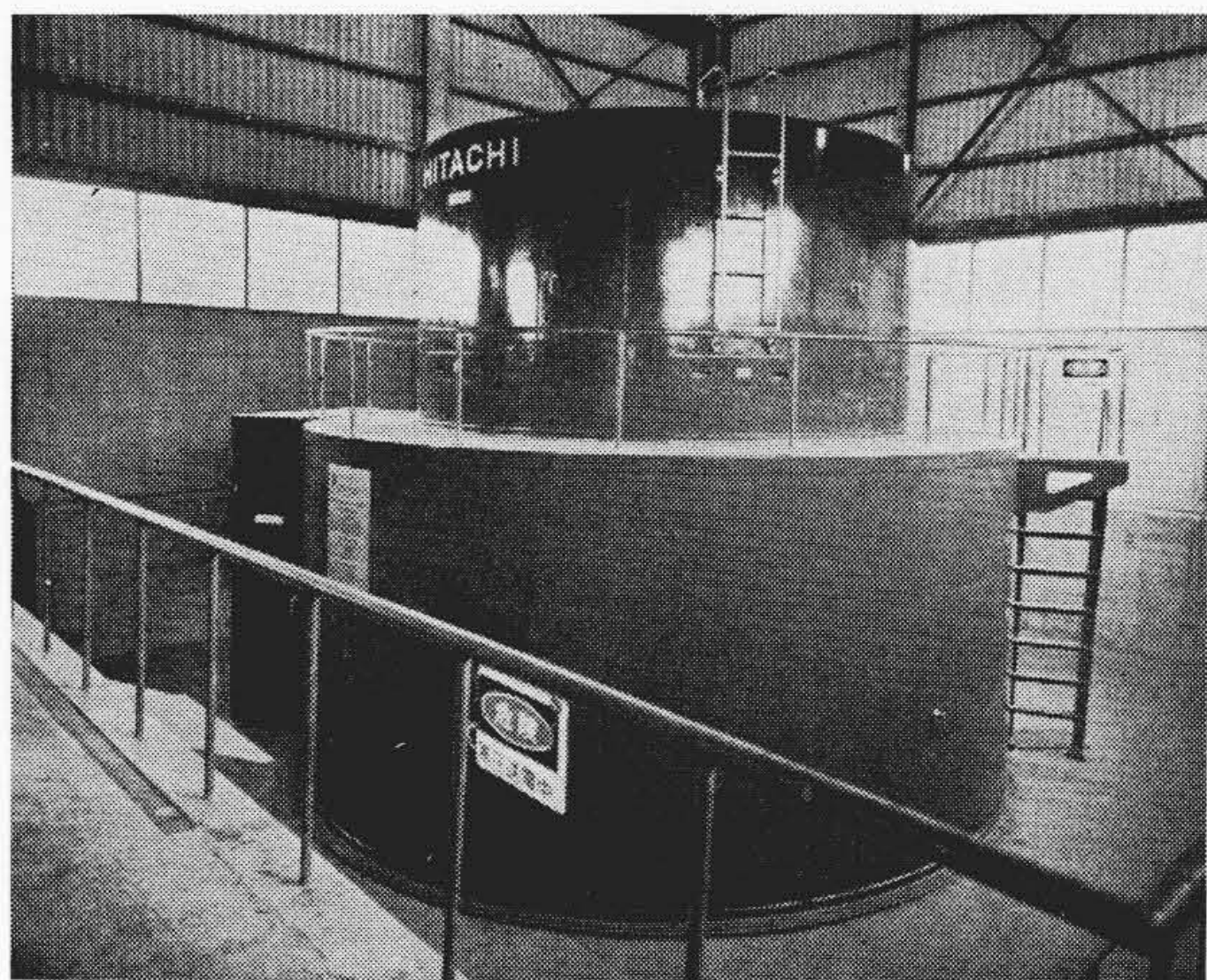
8. 仮設ポンプ場

本施設が種々の理由により完成が遅れる見通しがついたため、東京都は別に仮設ポンプ場を早急に造り、ここにポンプ1台を据え付けて緊急送水を行なう計画をたてた。この施設は本施設完成後移設する計画なので、ポンプは取りはずしに便利のように埋め込みとせず、また電動機は別に設けられる鋼板溶接製の架台上に据え付けられることになった。仮設ポンプ場および電動機、ポンプを第9～11図に示す。

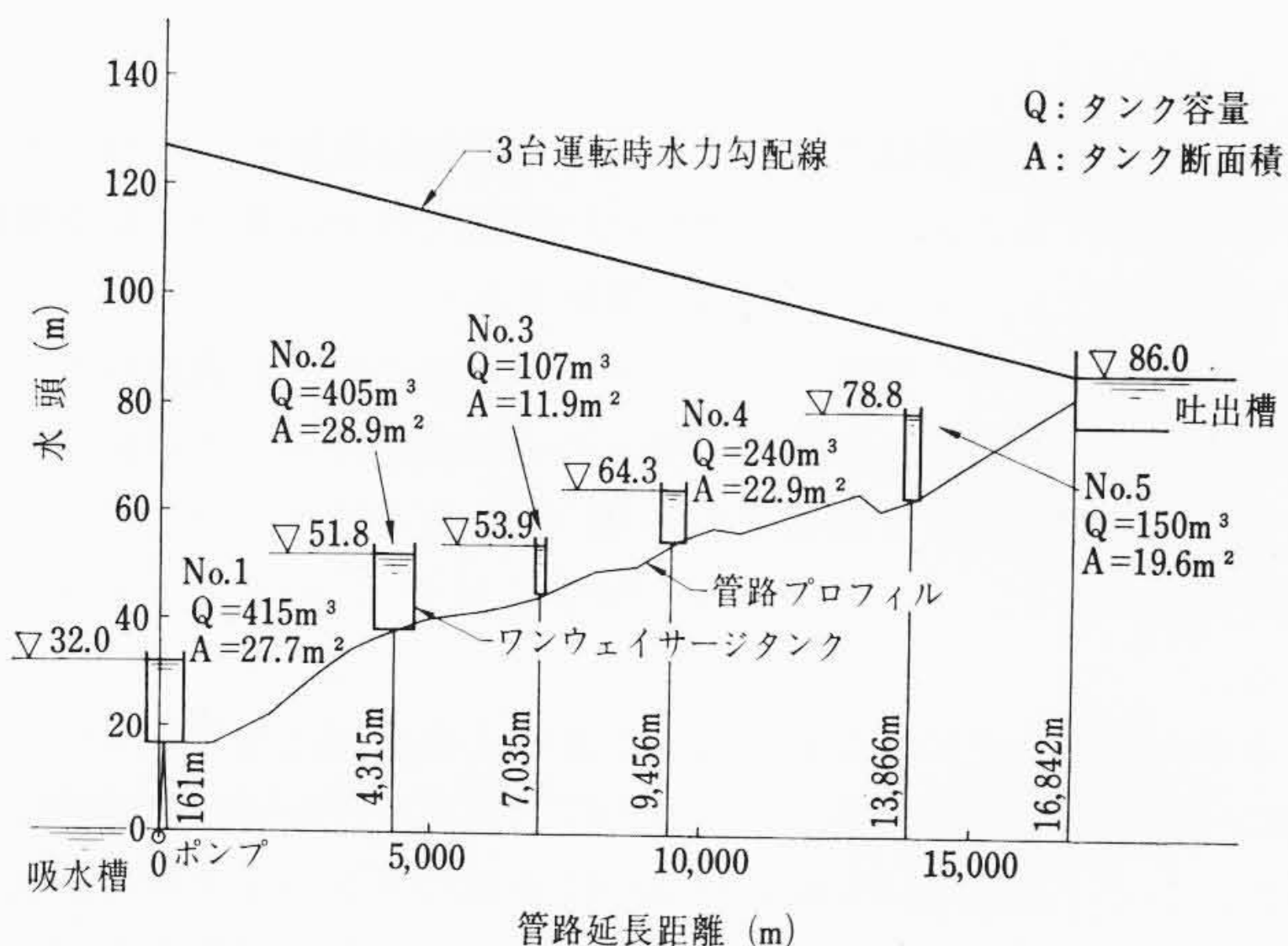
柔らかい鋼板製構造物の上へ高揚程、大容量のポンプを支持する



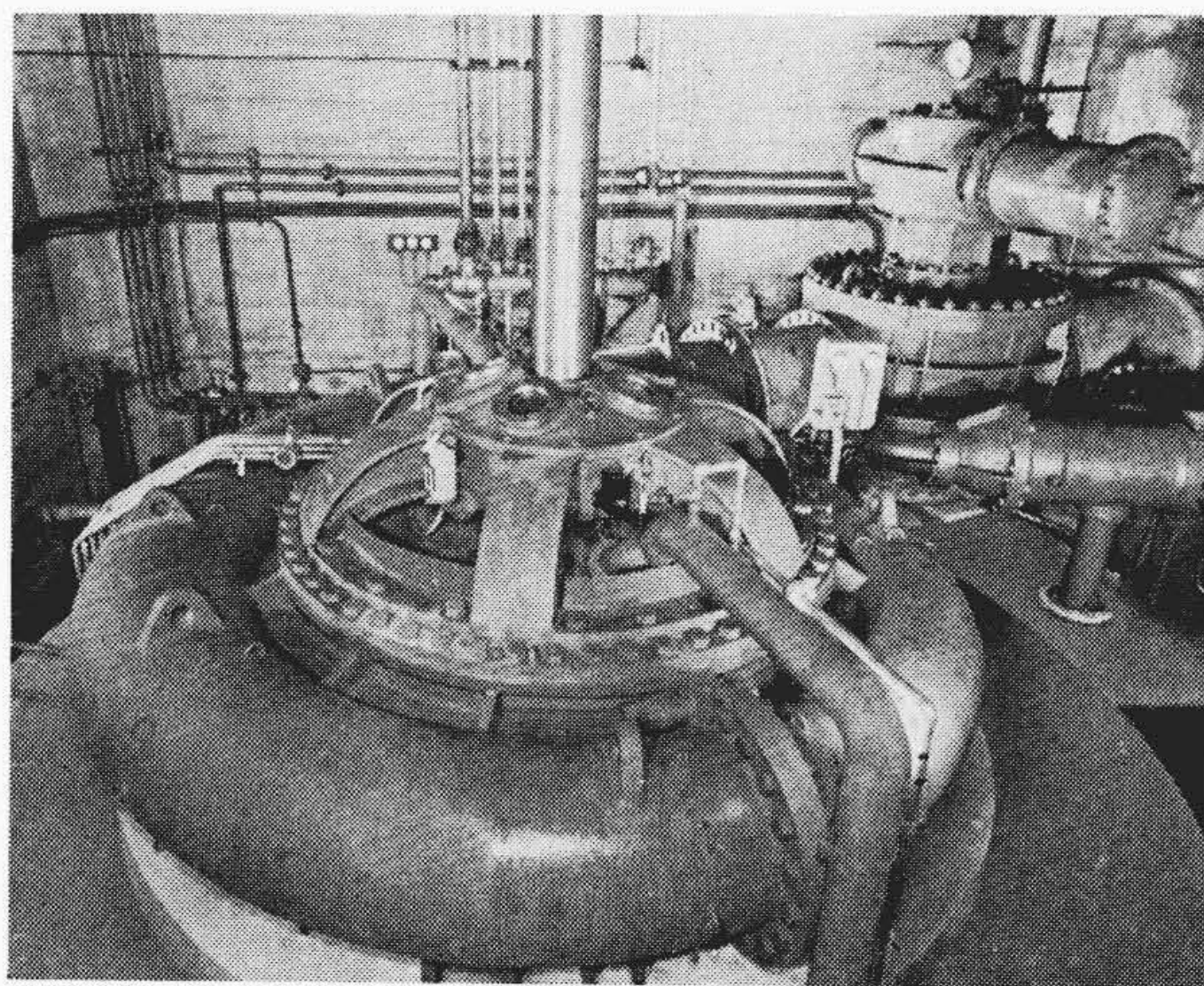
第9図 原水連絡仮設ポンプ場



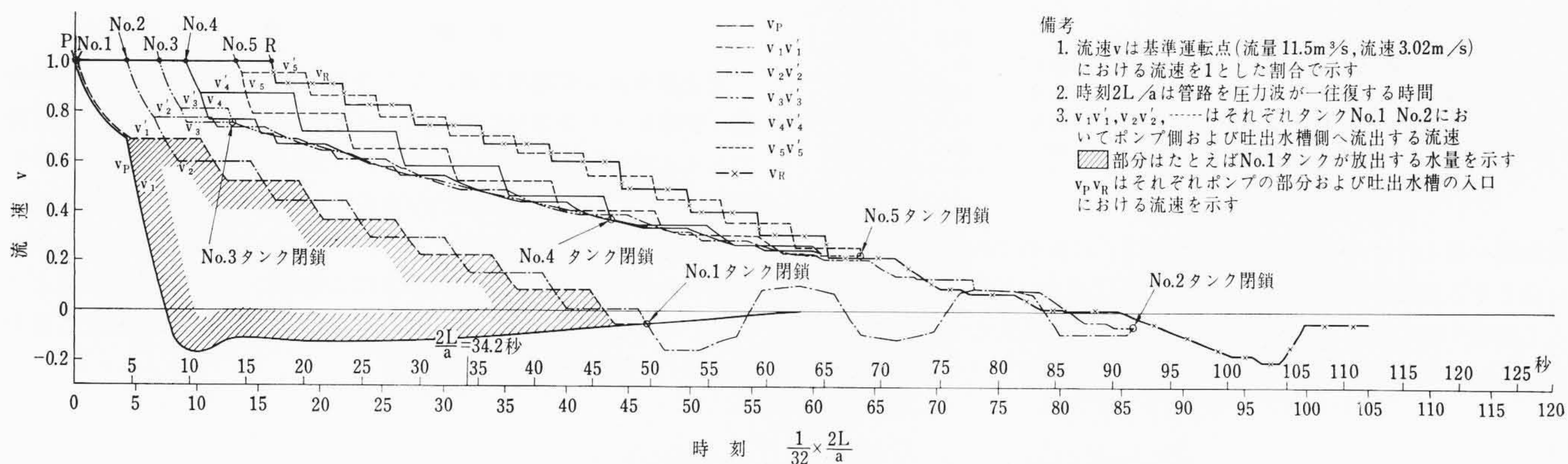
第10図 仮設ポンプ場における電動機



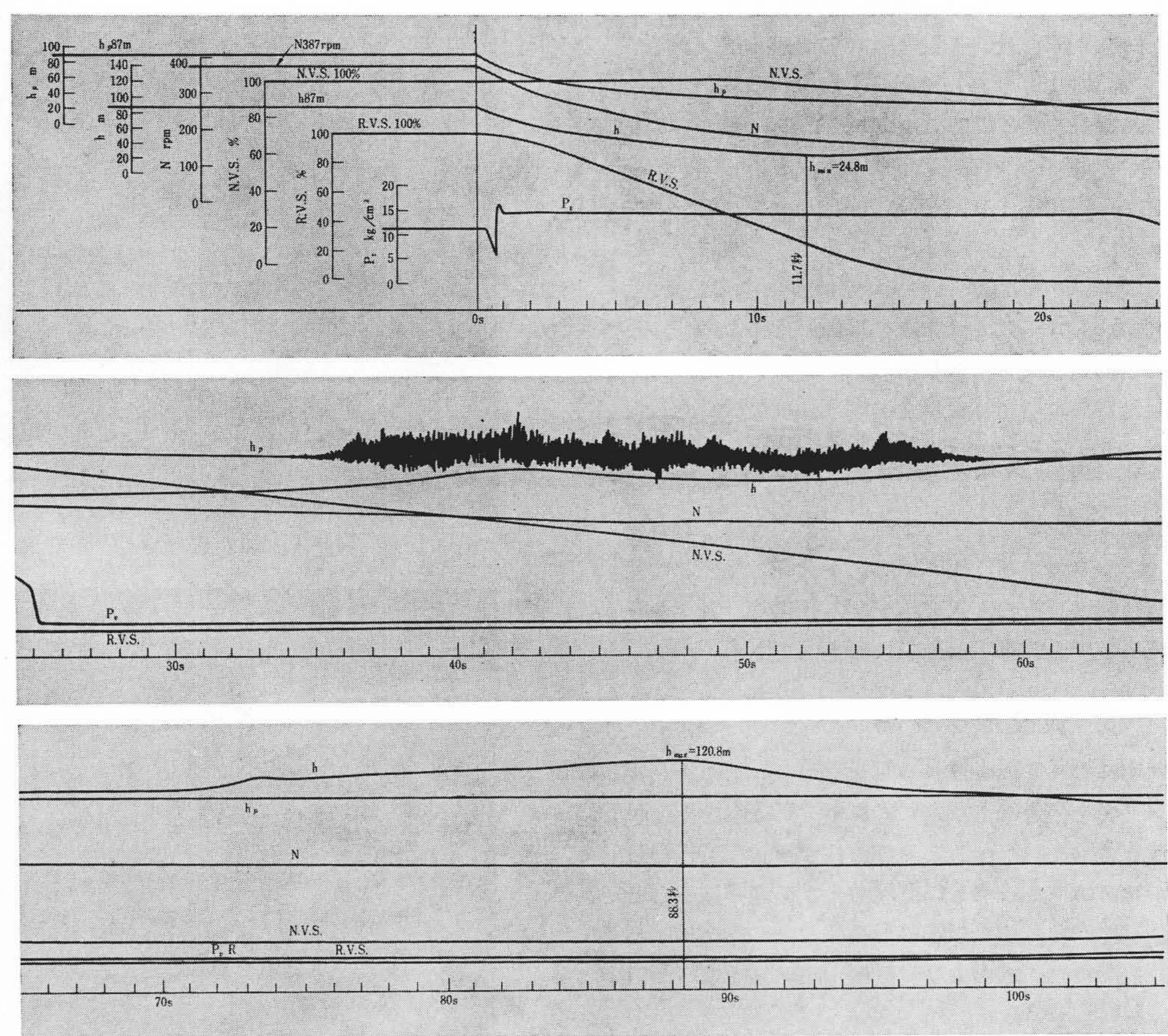
第7図 吐出管路プロフィールとワンウェイサージタンク



第11図 仮設ポンプ場におけるポンプ



第8図 ポンプ台運転における停電時吐出管内流速の変化



h_p : ポンプ揚程 h : 吐出管水頭 N : ポンプ回転数
N.V.S. : バイパス弁開度 R.V.S. : 主弁開度 P_v : 主弁シリンダ油圧

第12図 遮断試験オシログラム

第1表 ポンプの部分における入力遮断試験記録

試験 No.		第1回	第2回	第3回	第4回
種	目				
遮断前	遮断時刻	13時50分	15時33分	17時00分	18時40分
	回転数 rpm	330	387	330	387
	バイパス弁開度 %	100	100	100	100
	主弁開度 %	0	25	100	100
	電圧 V	6,300	6,300	6,348	6,300
	電流 A	350	570	425	665
	入力力 kW	1,550	4,200	2,600	5,150
	吐出圧力 m	96.5	116	85	88
	吸込圧力 m	0.5	2.0	2.5	2.3
	吐出管圧力 m	83	84	85	87
	吸込側水位 m	+ 0.25	+ 1.75	+ 1.75	+ 1.15
	吐出側水位 m	+ 84.9	+ 84.9	+ 84.9	+ 84.9
遮断後	圧油槽油圧 kg/cm ²	13.9	14.5	14.8	14.7
	実揚程 m	84.7	83.2	83.2	84.0
	吐出管圧力最大 m	124	114.8	127.5	120.8
	吐出管圧力最小 m	55.5	35.4	35.5	24.8
遮断後	基準揚程に対する吐出管最大圧力比 %	103.2	95.7	106.2	100.6
	バイパス弁閉鎖速度 s	56.4	54.5	53	56
	主弁閉鎖速度 s	—	6.0	15.5	15.1
	圧油槽油圧 kg/cm ²	13.7	14.5	14.8	14.7
遮断後	弁完全閉鎖時の N rpm	110	100	75	60

電動機を据え付けたとき最も懸念されるのは振動である。ポンプから発生する基本的な起振力のサイクルは、主として機械的原因による1回転1回の振動と、羽根車の羽根から誘起される1回転につき羽根数だけの水力的脈動である（今回のモデルポンプではこの2倍

の振動数の脈動が検知された）。架台の固有振動数を、このいずれからも遠ざけることにより、運転時の振動は最大の場合でも全振幅10μ以下となり、きわめて好調に運転された。

停電時にポンプ、管路、サージタンクなどに起こる過渡現象を確認するための入力遮断試験は、種々の運転状態に対して前後4回行なわれた。第1表は試験結果を、第12図は4回目の全負荷状態の遮断試験のとき、ポンプの部分で測定したオシログラムを示している。

各サージタンクの水位低下量の計算値と実測値は実用上十分な程度に一致し、管路の延長上どの点の圧力変化も十分安全範囲内にあった。かくて延長16.8kmの間途中に5個のワンウェイサージタンクを有する世界でも初めての長管路のポンプの遮断試験もみごとに成功した。

9. 結 言

東京都水道局朝霞浄水場の原水連絡ポンプ設備はポンプ、電動機、管路などの各部分に多くの新技術を採用入れた注目すべき施設であると同時に、東京都の異常渇水の急を救うため全市民待望の中に昭和39年8月25日歴史的な通水式を終えた技術的にも社会的にも大きな意義をもった施設である。このような新技術開発の機会を与えられた東京都水道局関係各位のご英断に深く敬意を表するとともに、この事業を成功に導く原動力となった各位のご指導とご協力に心から感謝を捧げるものである。