

関西電力株式会社 三尾発電所納
36,000 kW ポンプ水車および 37,000 kVA 発電電動機
36,000 kW Reversible Pump-Turbine and 37,000 kVA Generator-Motor
for the Mio Power Station, Kansai Electric Power Co., Inc.

長 沼 進* 紛 沢 秀 夫** 谷 越 敏 彦*
Susumu Naganuma Hideo Ebisawa Toshihiko Tanikoshi

内 容 梗 概

関西電力株式会社三尾発電所(旧王滝川発電所)は、従来ほとんど調整能力をもたなかった木曽川水系の再開
発に重要な役割をになうもので、愛知用水公団の牧尾貯水池より取水して発電し、現在建設計画進行中の下部
貯水池から牧尾貯水池に揚水する揚水発電所である。ポンプ水車は、最高揚程 143 m という国内における記録
的な高落差高揚程の可逆ポンプ水車である。一方発電電動機は、応答速度を早めるために自励式励磁装置を採
用したもので、揚水用機器としては最初の試みである。ここでは三尾発電所の概要と、ポンプ水車、発電電動
機の特徴や構造などについて大要をのべる。

1. 緒 言

三尾発電所は、国内において三番目に運転にはいった、可逆ポン
プ水車を用いる揚水発電所である。その特徴とするところは次のと
おりである。

- (1) 最高揚程は 143 m で可逆機としては記録的なものである。
- (2) 鉄管側ならびに放水路側にサージタンクを有する。
- (3) 比較的高落差、高揚程に重点がおかれている。
- (4) 揚水機として初めて自励式励磁装置を採用した。

本発電所は、従来ほとんど調整能力をもたなかった木曽川水系の
再開発に重要な役割をになうもので、愛知用水公団の牧尾貯水池よ
り取水して発電し、豊水期や深夜の余剰電力を利用して下部貯水池
より牧尾貯水池に揚水し、渇水期やピーク時の送電をおこなう揚水
発電所である。なお大きな特色の一つとして鉄管側ならびに放水路
側にサージタンクを有し、特に下部サージタンクの容量決定のため
に電子計算機による解析を行なった。本機器は、昭和 38 年 1 月に据
付けを完了し、2 月初め通水、発電、揚水いずれも官庁試験を終了
し現在好調に運転されている。ここに三尾発電所用可逆ポンプ水車
および発電電動機について概要を紹介する。

2. 発電所計画概要

三尾発電所は、長野県西筑摩郡三岳村字沢渡に建設され、木曽川
の上流に、愛知用水公団が築造した牧尾橋ダムを上部貯水池とし、
現在計画中の木曽発電所 (116,000 kW) の調整池を下部貯水池とし
て揚水、発電をおこなう揚水発電所である。上部貯水池は有効貯水
量 $68,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、利用水深 48 m で、下部貯水池は有効貯水量 $670 \times 10^3 \text{ m}^3$ (計画)、
利用水深 1.5 m (計画) である。本ダムは多目的ダム
で農業用水、上水道および工業用水放流との関連のために貯水池運
営にかなりの制約をうけるものと考えられる。豊水期および深夜は
揚水を行なうものとし、発電時はせん頭負荷運転を行なう。計画で
は年間の平均運転時間は、発電対揚水で約 3:1 程度の比率が予定さ
れている。

2.1 発電所計画概要

取 水 川 名	木 曽 川 水 系	王 滝 川
貯 水 池 (上 部)	有 効 貯 水 量	$68,000 \times 10^3 \text{ m}^3$
	満 水 位 標 高	880 m
	利 用 水 深	48 m

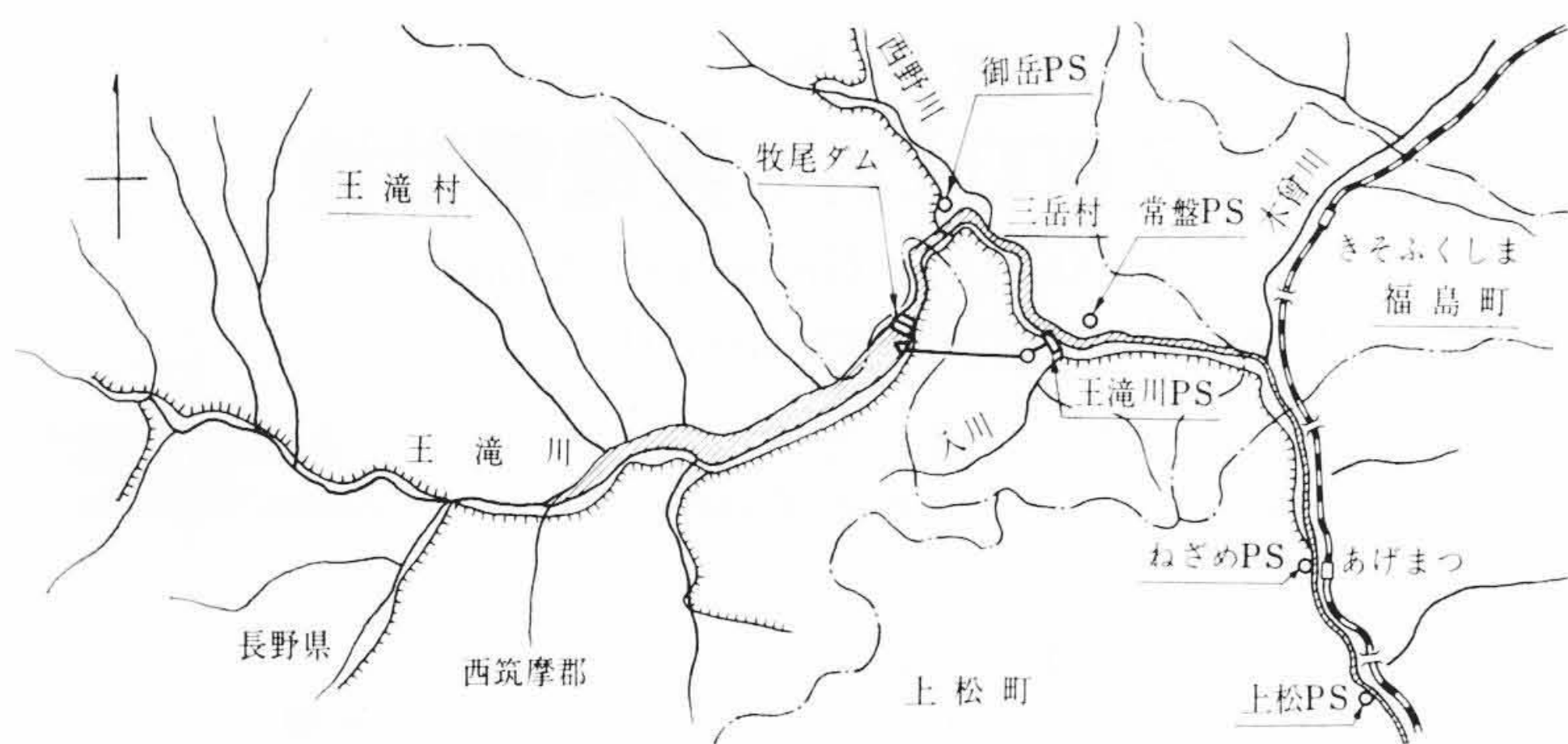
貯 水 池 (下 部)	有 効 貯 水 量	$670 \times 10^3 \text{ m}^3$ (計画)
	満 水 位 標 高	739 m
	利 用 水 深	1.5 m (計画)
使 用 水 量	最 高 落 差 時	$30.16 \text{ m}^3/\text{s}$
	最 低 落 差 時	$27.3 \text{ m}^3/\text{s}$
揚 水 量	最 高 揚 程 時	$13.9 \text{ m}^3/\text{s}$
	最 低 揚 程 時	$28.3 \text{ m}^3/\text{s}$
有 効 落 差	最 高 落 差	137 m
	最 低 落 差	88 m
全 揚 程	最 高 揚 程	143 m
	最 低 揚 程	114 m
発 電 所 出 力		34,000 kW
ダ ム 形 式		ロックフィル
	高 さ	81 m
	堤 体 長	264 m
取 水 口 形 式		取水塔式
	流 入 有 効 幅	6 m
	流 入 水 深	54 m
	制 水 門	幅 3.5 m、高さ 5 m 1 門
導 水 路 種 類		円形圧力トンネル
	直 径	4.0 m
	延 長	2.777 m
水 槽 形 式		差動調圧式
内 径		11 m
高 さ		72 m
	ライザー内径	3.2 m
	ポ ー ト 内 径	1.8 m
	ライザー高さ	67.4 m
水 圧 鉄 管 内 径		4.0~2.4 m
	全 長	294.3 m

第 1 図は三尾発電所位置図、第 2 図は水路概略図を示す。

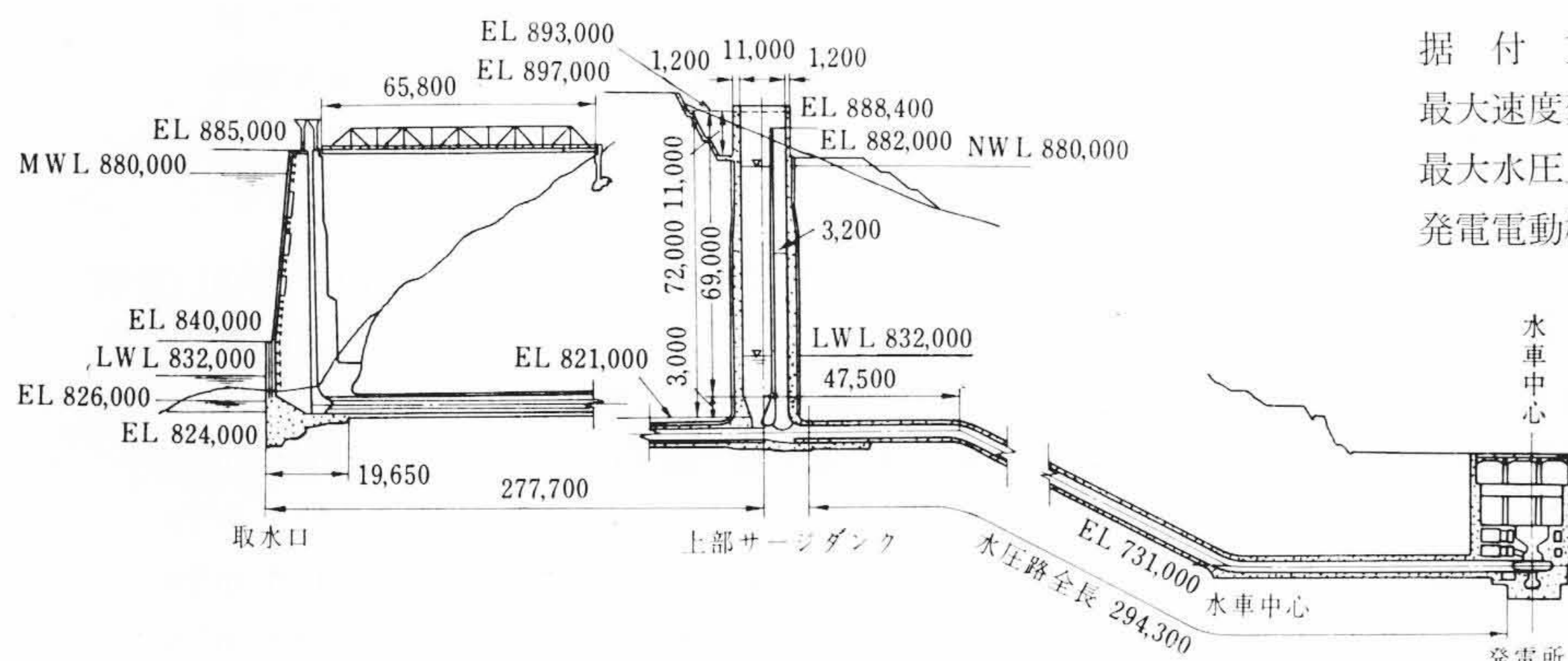
2.2 建屋および機器配置

建屋は地表 1 階地下 8 階の半地下方式が採用され、機器据付方式
は単床式で、発電電動機の風道はコンクリート風道が採用されてい
る。放水路側には吸出管の水平長さ約 14 m の所に下部サージタン
クを有し、第 2 期工事の最終においては、放水路の長さは 1,200m に
達するものとなる。第 3 図は発電所縦断面図、第 4 図は据付平面図
である。

* 日立製作所日立工場
** 日立エンジニアリング株式会社



第1図 発電所位置図



第2図 水路概略図

3. 36,000 kW ポンプ水車

三尾発電所は、落差137 mから88 m、揚程143 mから115 mまで変化するが、水車、ポンプとも高落差、高揚程側に荷重の重点があり、それぞれ自流発電量、揚水分発電量および揚水電力量について建設費に換算したつぎのような式において K が最も大きくなるよう計画されている。

$$K = K_1 - K_2 + K_3$$

$$K_1 = 1460 \eta_{G130} + 600 \eta_{G120} + 670 \eta_{G110} + 170 \eta_{G100} + 210 \eta_{G90}$$

$$K_2 = 2 \frac{Q_{P115}}{\eta_{P115}} + 5 \frac{Q_{P120}}{\eta_{P120}} + 6 \frac{Q_{P125}}{\eta_{P125}} + 6 \frac{Q_{P130}}{\eta_{P130}} + 10 \frac{Q_{P135}}{\eta_{P135}} + 14 \frac{Q_{P140}}{\eta_{P140}}$$

$$K_3 = 3Q_{P115} + 12Q_{P120} + 14Q_{P125} + 13Q_{P130} + 19Q_{P135} + 16Q_{P140}$$

ここに K_1 は発電効果、 K_2 は揚水電力量、 K_3 は下流増の効果を示すもので、いずれも建設費に換算した係数を示している。下流増の効果は、揚水量 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ に対して下流増加電力は5,532 kWとして算出されている。またいずれも係数1は1,000,000円に相当するものである。第5図は揚水、発電の年間平均運転時間の関係を示したものである。

3.1 ポンプ水車仕様

3.1.1 水車仕様

有効落差	最高	137 m
	基準	115 m
	最低	88 m
水車出力	最大	36,000 kW (33,800 kW)
使用流量	最大	$31 \text{ m}^3/\text{s}$
回転数		277 rpm (231 rpm)
比速度		116.2 m-kW
形式		VFR-IRS
運転周波数		60 c/s (50 c/s)

3.1.2 ポンプ仕様

揚程	最高	143 m
	基準	125 m
	最低	114 m
揚水量	最大	$28.3 \text{ m}^3/\text{s}$
電動機容量		39,000 kW
回転数		277 rpm
比速度		$42 \text{ m-m}^3/\text{s}$
		(最大揚水量時)
運転周波数		60 c/s

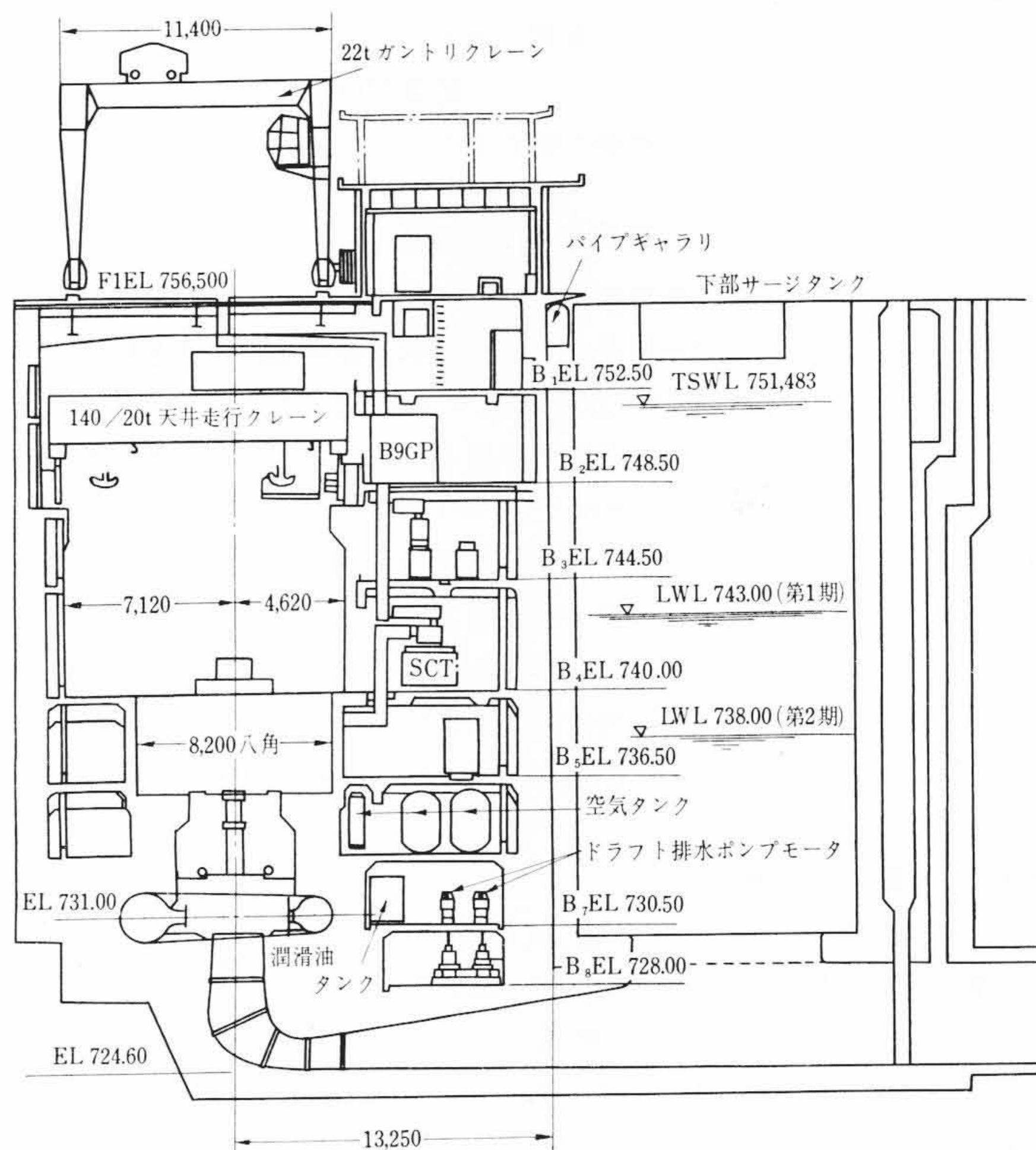
3.1.3 その他の仕様

ケーシング渦巻方向	発電電動機側よりみて時計方向
据付方式	単床式
最大速度変動率	35% (44.5%)
最大水压上昇値	192 m
発電電動機に要する GD^2	$1,080 \text{ t-m}^2$
無拘束速度	402 rpm
押込揚程	5.5 m
仕様関係において () 内の数値	は50 c/s運転時のものである。なおこれらの仕様は第2期(最終)の値を示したものである。

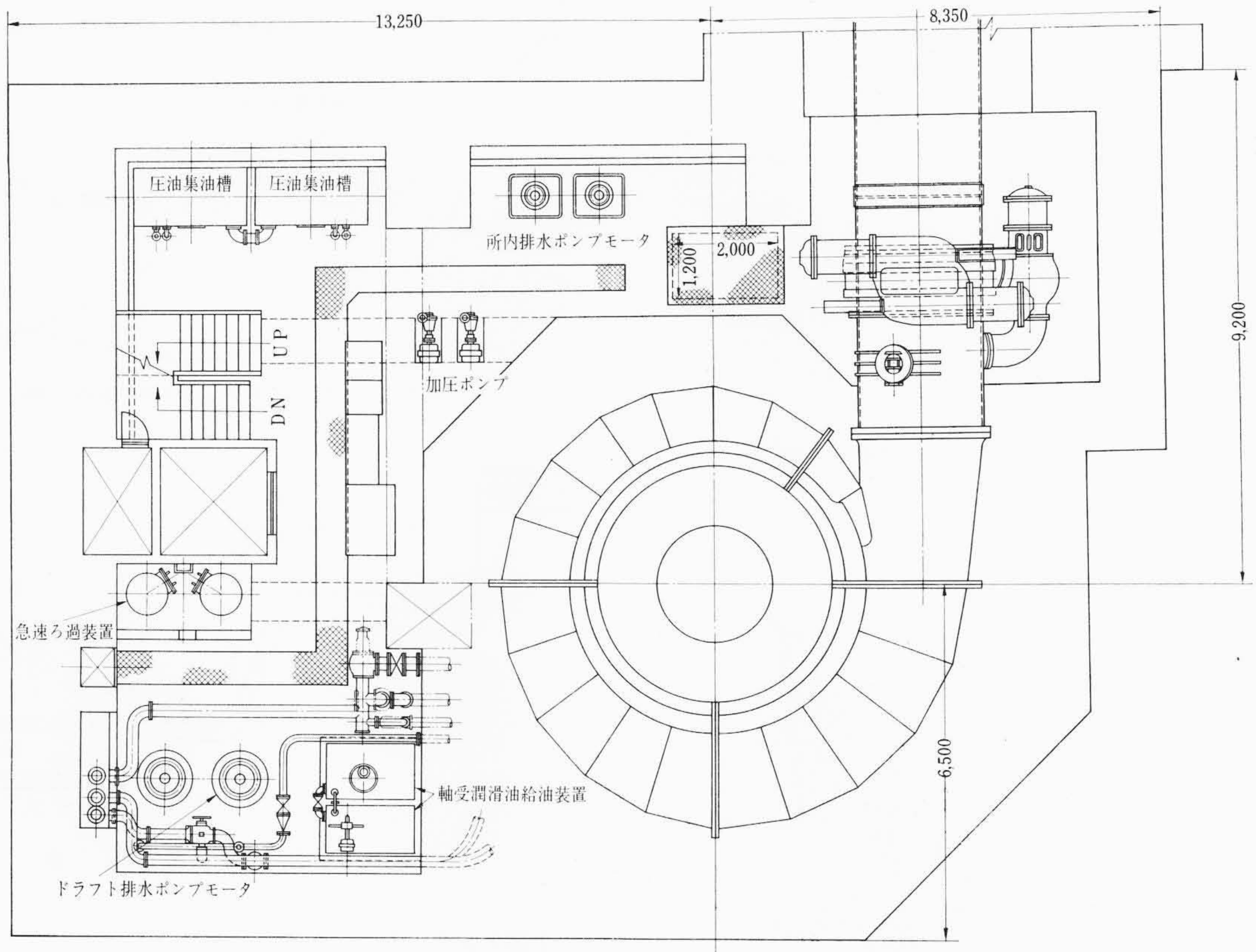
3.2 模型試験

模型試験においては与えられた発電電力量が最も大きくなるような特性を得る必要があります。

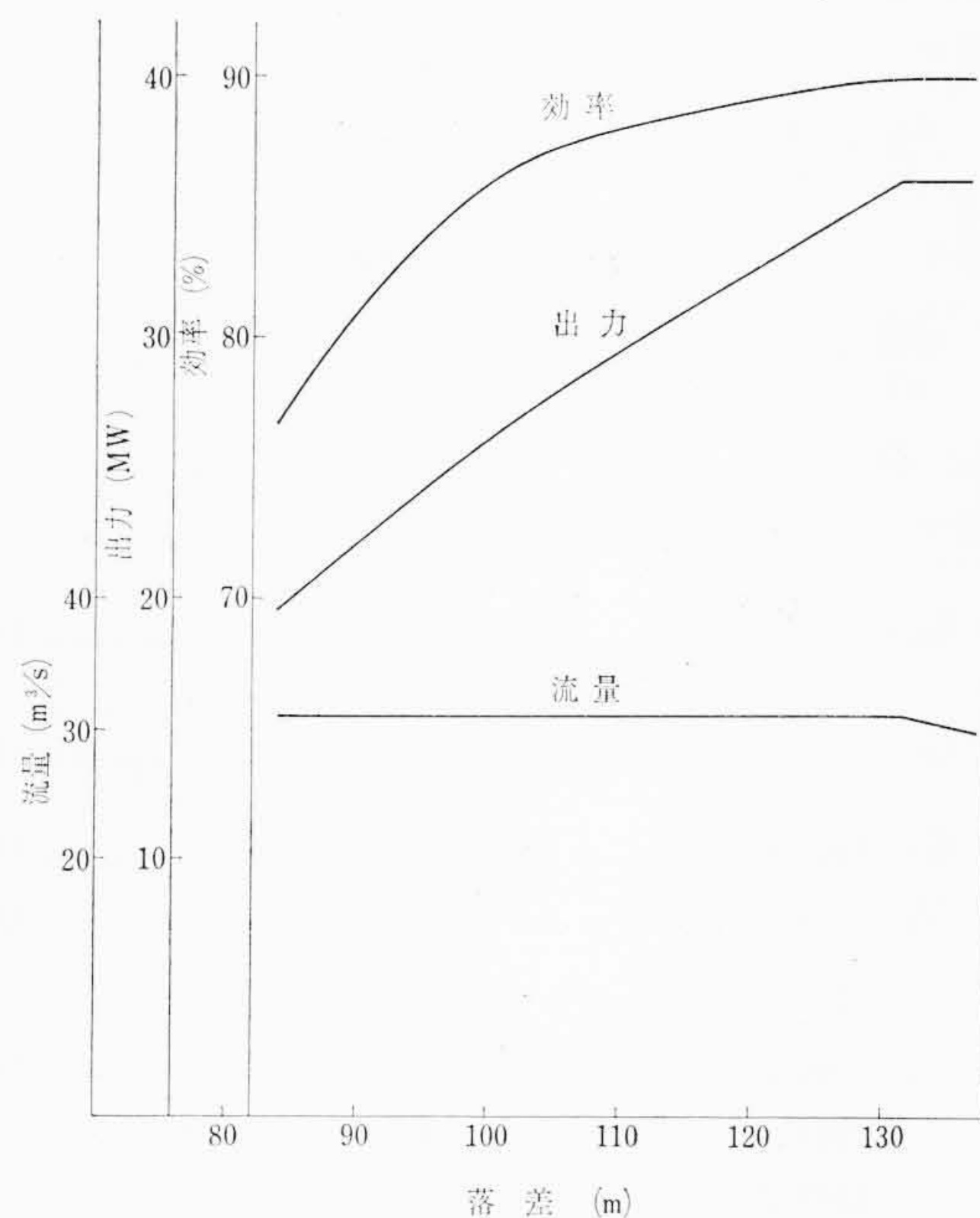
それは揚水発電所の経済的建設に最も重要なことである。模型試験においては、基本特性と過渡特性の二つに分けて行なわれるが、建設の経済性については、効率の向上と最適な容量を決める必要があります。またキャビテーション性能の向上をはかってポンプ水車の据付位置をできるだけ浅くするようにしてはならない。これらの条件について最適なポンプ水車を得るために3



第3図 発電所縦断面図



第 4 図 据 付 平 面 図

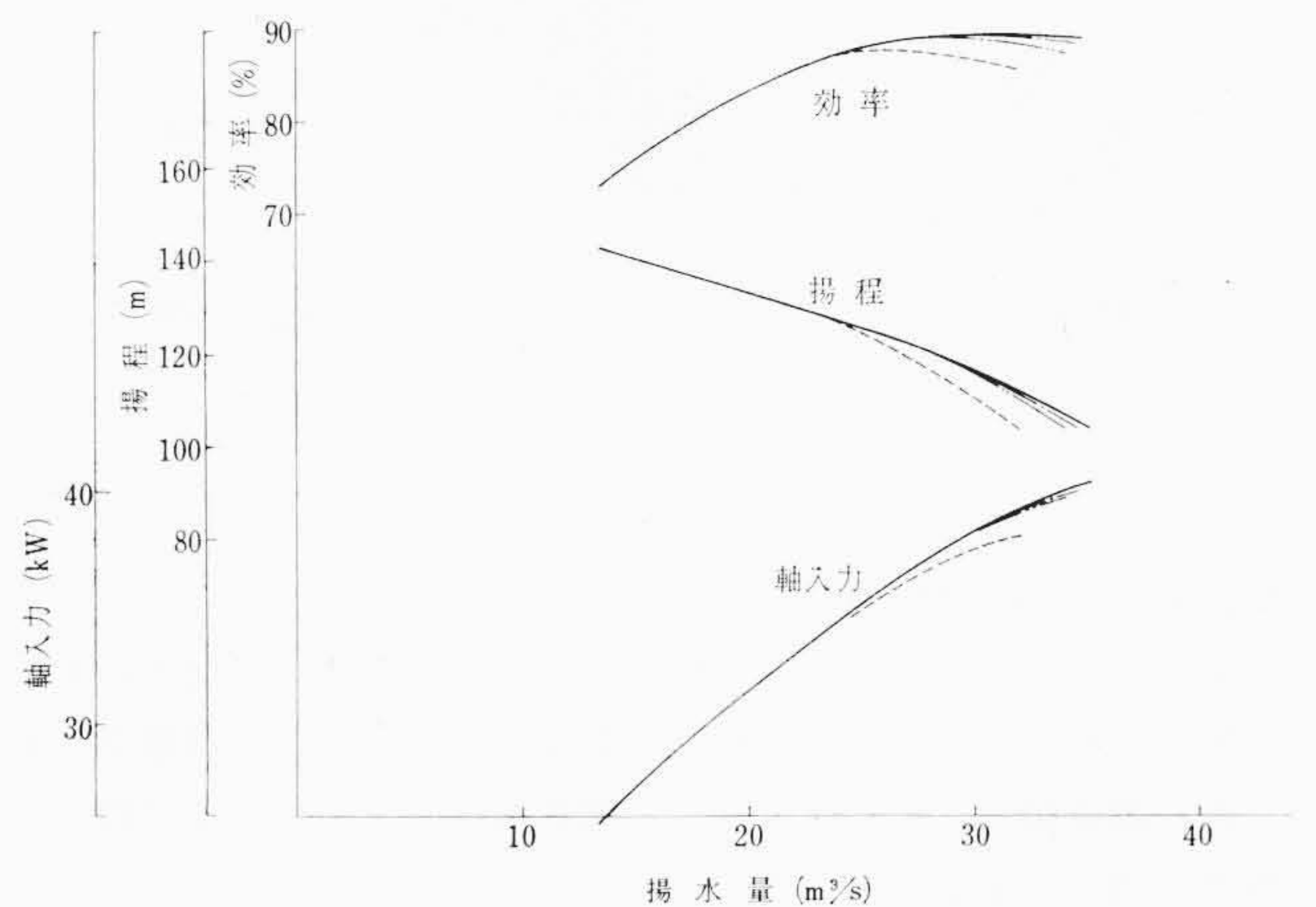


第 5 図 水 車 予 想 特 性

種類のモデルランナを製作して比較検討し、ポンプ水車の荷重係数 K の値が十分満足するものであり、キャビテーション性能も現地運転押込揚程に対し十分満足する性能のものであることを確認した。

3.2.1 効 率 試 験

ポンプ、水車試験とも同一ランナ同一試験装置によって試験され、ランナは外径約 280 mm、羽根枚数 7 枚である。案内羽根は 18 枚である。本発電所用ポンプ水車は比較的高落差高揚程側に重点があるが、水車としての低落差の効率上昇およびポンプとして

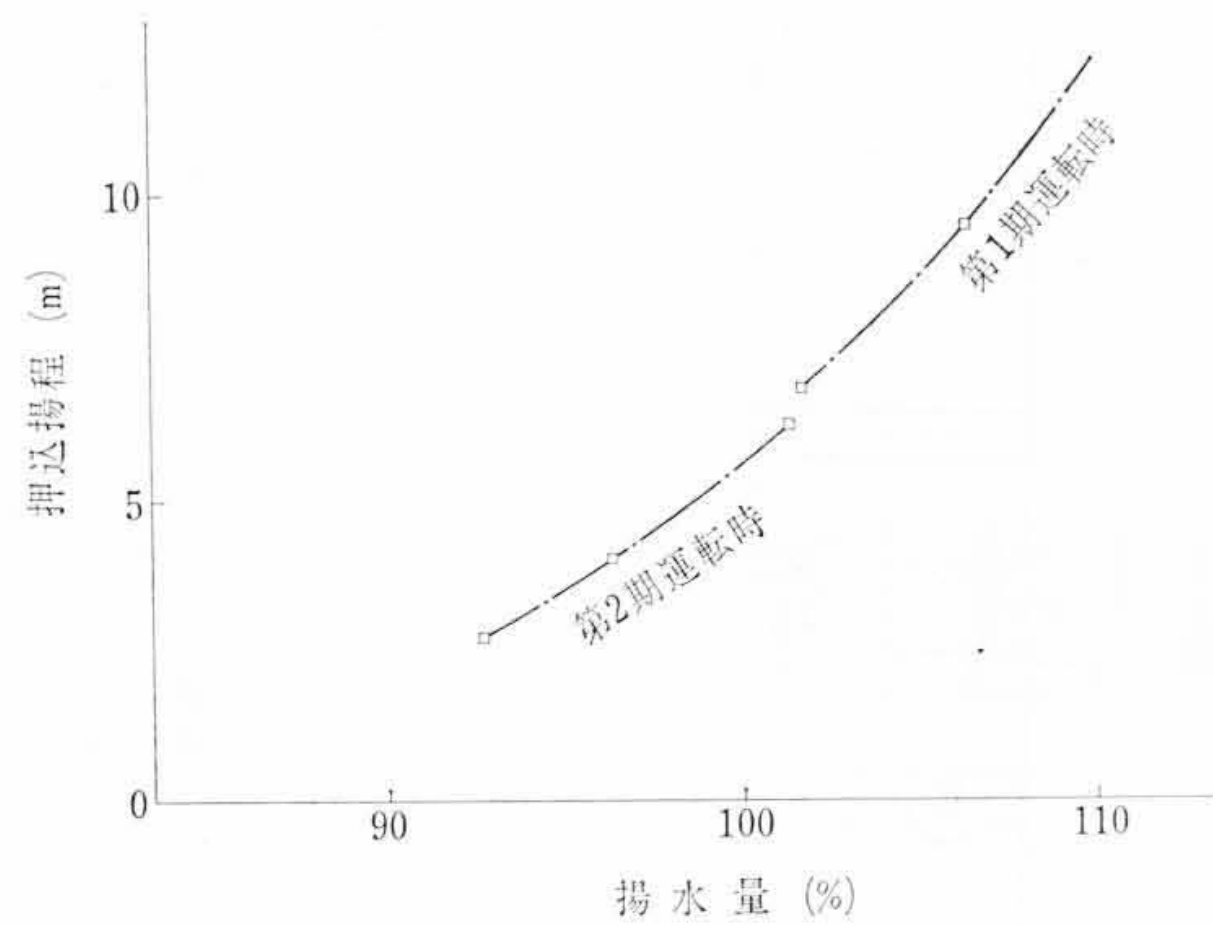


第 6 図 ポ ン プ の 予 想 特 性

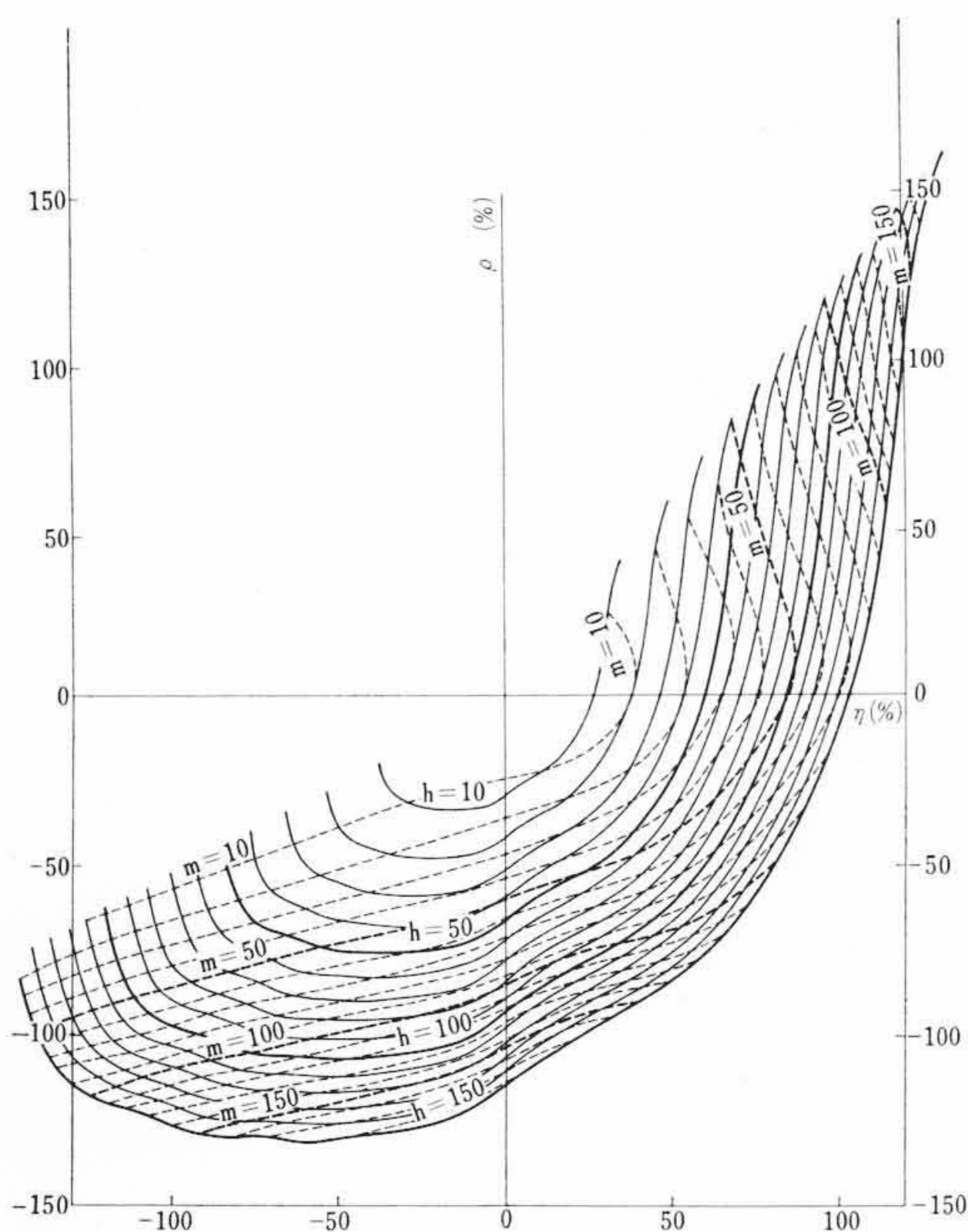
の低揚程側の効率を向上して電動機容量を経済的に決めるようにして、実物水車の大きさを決定した。第 5 図は実物水車予想性能を、第 6 図は実物ポンプ予想効率を示す。

3.2.2 ポンプキャビテーション試験

効率試験に用いられたと同一のランナによって試験を実施した。ポンプ水車のキャビテーションはポンプ運転時のほうが過酷であるため押込揚程はポンプ特性のほうより決定される。ポンプ運転では低揚程側で揚水量が増し、キャビテーションは揚程の減少につれて発生しやすくなる。キャビテーション試験方法には種々あるが、本模型試験では押込水位を変化せしめて揚水量、揚程の急激におちはじめの点の値を確認した。なお試験回転数は 3,000 rpm の試験を実施しほぼ実揚程に近い状態で試験を行なった。試験結果では当初に予定していた性能よりもよい結果を得ることができた。第 7 図は揚水量と押込揚程の関係を示したものである。



第 7 図 揚水量と押込揚程の関係



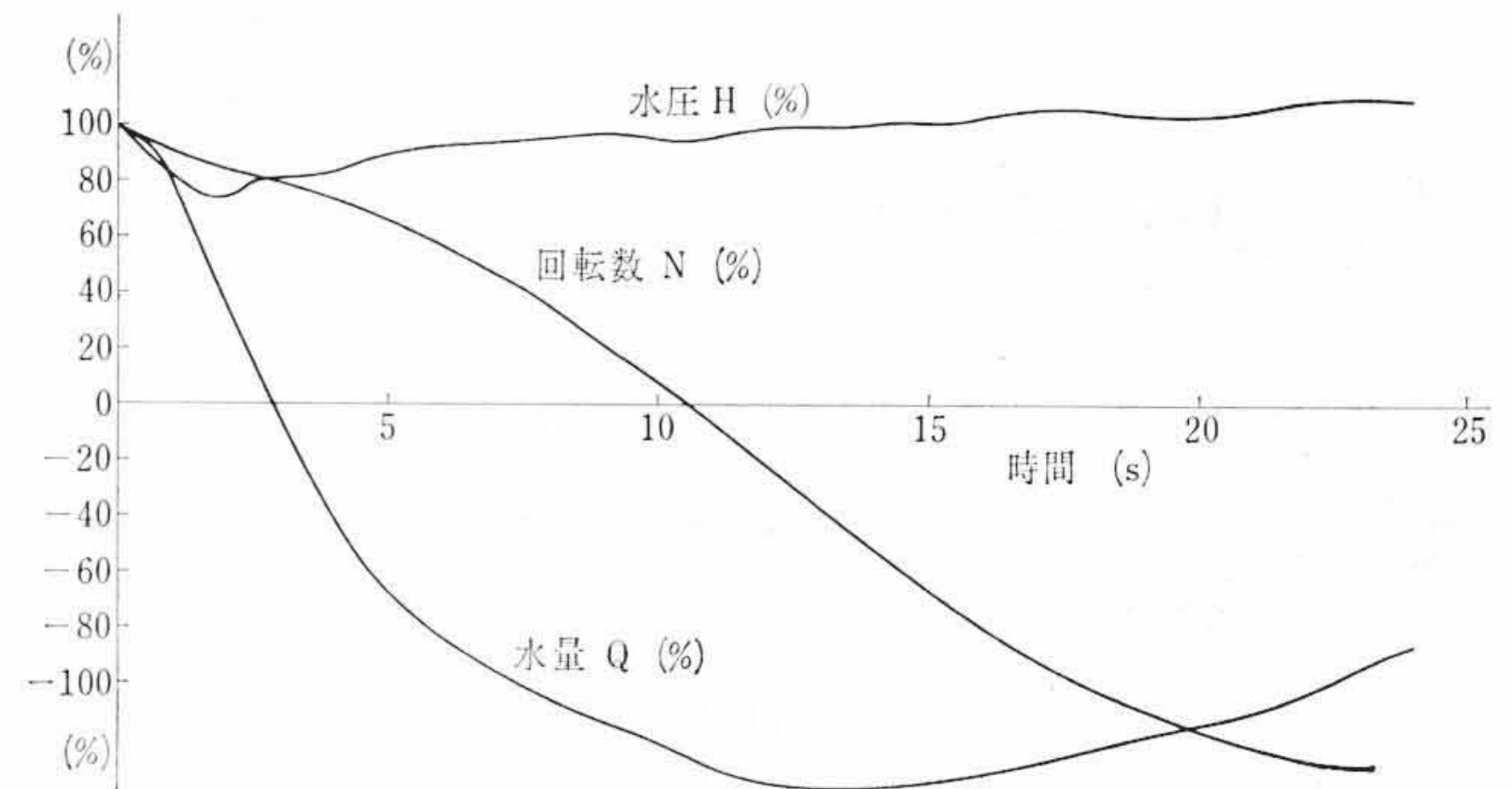
第 8 図 ポンプ完全特性の一例

3.2.3 完全特性

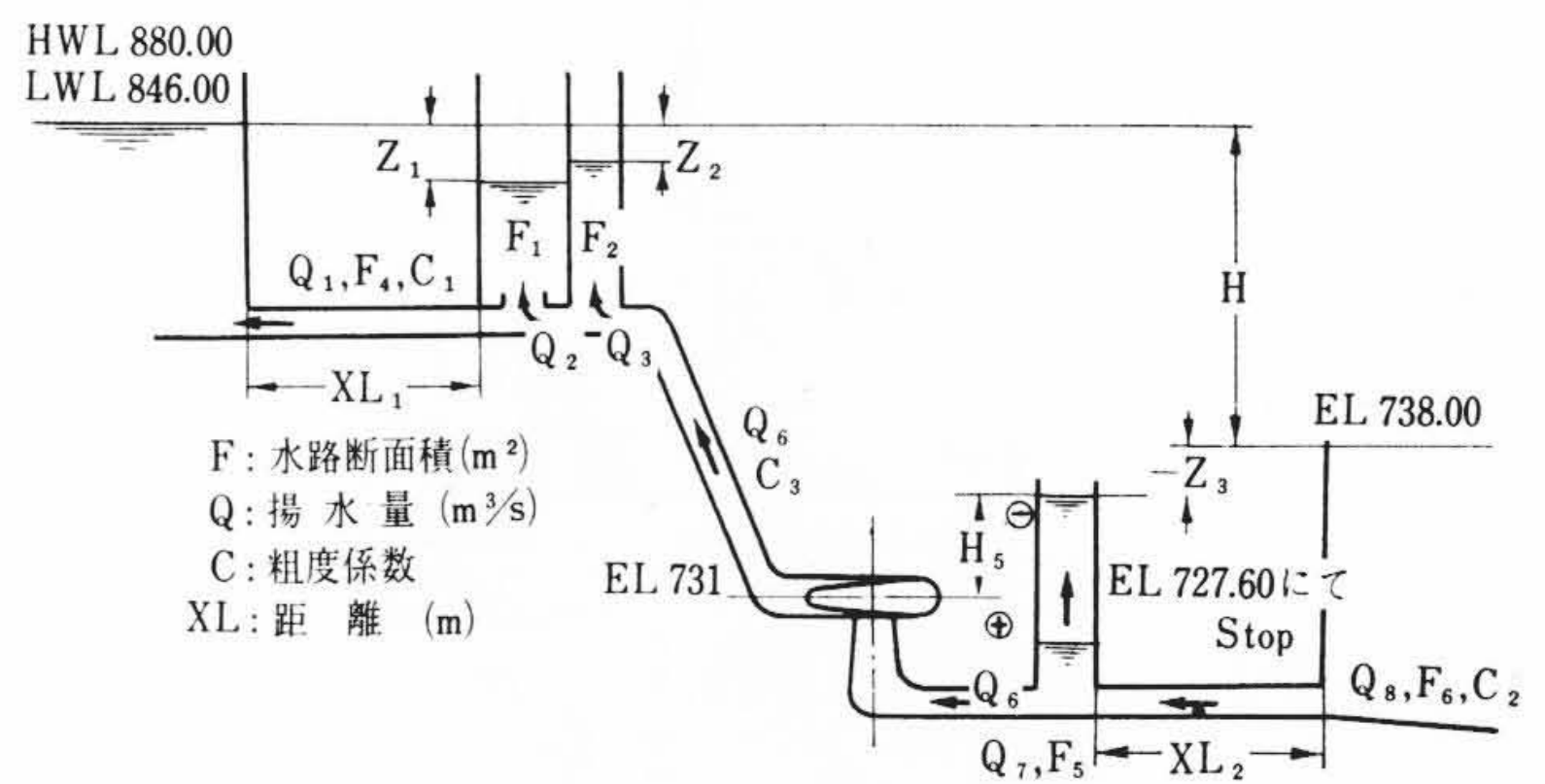
完全特性からポンプ入力遮断およびポンプトリップなどにおける圧力上昇や圧力降下を解析し、上部サージタンクの容量を決定した。第 8 図は完全特性を示し、第 9 図はポンプトリップ時の特性の一例を示すものである。

3.2.4 そのほか

本発電所は前述せるように放水路が非常に長くなるので下部サージタンクを設置した。下部サージタンクの容量の決定については、なかなか困難な問題も含んでいるが、特にポンプ起動時における起動時間と上部および下部サージタンクの水位上昇および下降を安全な範囲におさめるため、案内羽根の開度を直線的に変化させる場合と、2段階に変化させる場合とについて下部サージタンクの断面積を仮定し計算をおこなった。直線的に開度を増加させるか、あるいは2段階開方法にすれば、水位下降は押えられる。ここで水位降下をどこまで許容するかについては、ポンプのキャビテーションとも関連するので、これらの検討結果から水車中心より上に 2m という限度を設け、下部サージタンク断面積としては 100 m² と決定されたものである。この計算はデジタル計算機 (IBM 650) を用いて行なったもので第 10 図に示すような水路系定数としては関西電力株式会社より与えられたものを用い、下部サージタンク、ガイドベーン開方法を変化させた。計算式はそれぞれ次のとおりである。



第 9 図 ポンプトリップ時特性の一例



第 10 図 水路系定数

下部トンネルにおける運動方程式

$$\frac{dQ_8}{dt} = -\frac{F_6 \cdot g}{XL_2} (z_3 \pm C_2 Q_8^2) \quad (1)$$

ただし、符号は、 $Q_8 \geq 0 \dots \dots +$ $Q_8 < 0 \dots \dots -$

下部サージタンクにおける連続式

$$\frac{dz_3}{dt} = \frac{1}{F_5} (Q_8 - Q_6) \quad (2)$$

上部サージタンクにおける運動方程式

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{F_4 \cdot g}{XL_1} (z_2 \pm C_1 Q_1^2) \quad (3)$$

ただし、符号は、 $Q_1 \geq 0 \dots \dots +$ $Q_1 < 0 \dots \dots -$ 、

上部サージタンクにおける連続式は

$$Q_3 = F_2 \frac{dz_2}{dt} \quad (4-1)$$

$$Q_2 = F_1 \frac{dz_1}{dt} \quad (4-2)$$

$$Q_6 = Q_3 + Q_2 + Q_1 \quad (4-3)$$

$$Q_2 = \pm \sqrt{z_2 - z_1} \quad (4-4)$$

ただし符号は、 $z_2 \geq z_1 \dots \dots +$ $z_2 < z_1 \dots \dots -$

$$Q_3 = (Q_6 Q_1 \pm C_4 \sqrt{z_2 - z_1}) \quad (4-5)$$

ただし、符号は、 $z_2 \geq z_1 \dots \dots -$ $z_2 > z_1 \dots \dots +$

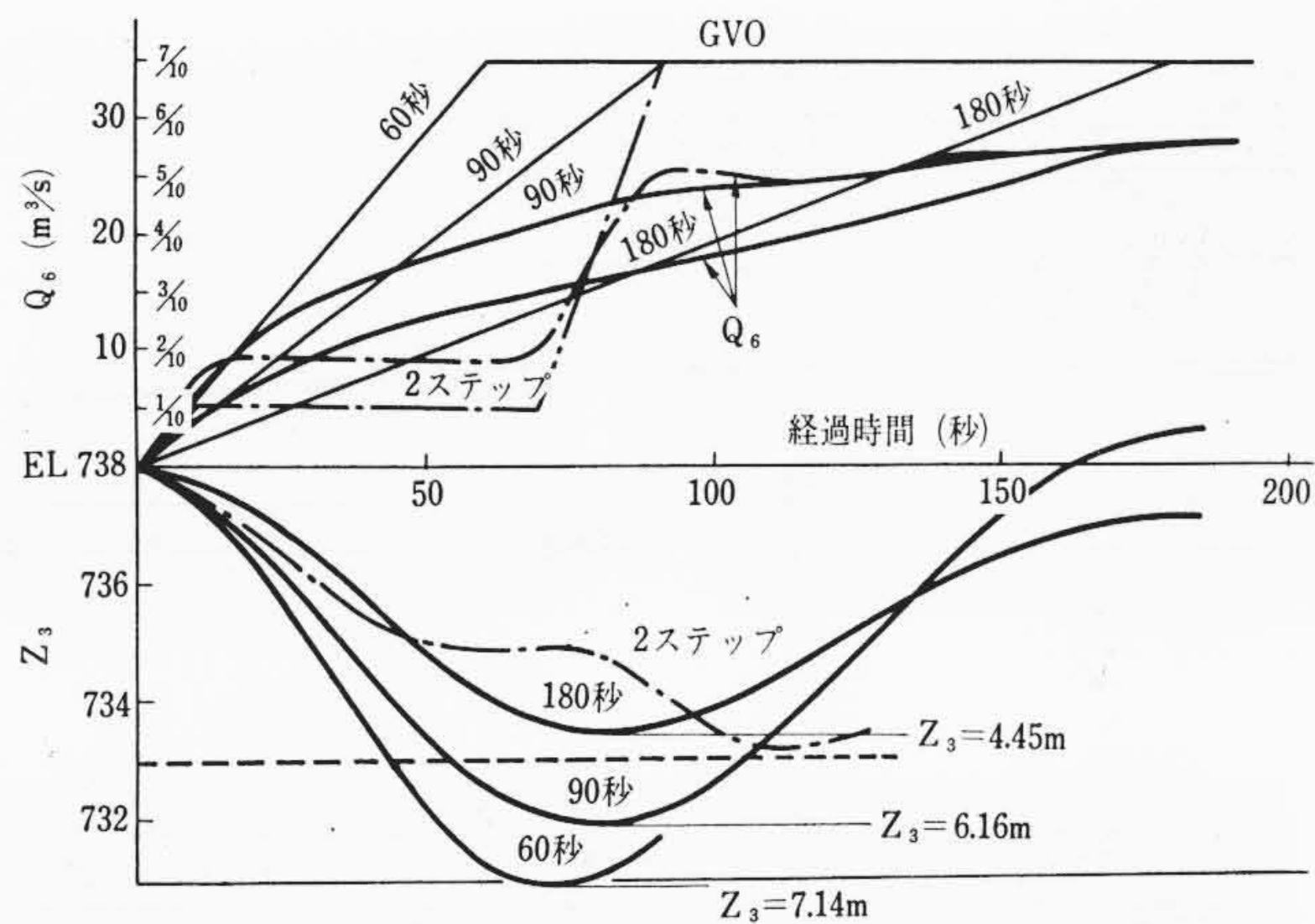
ポンプの特性式

$$Q_6 = f_{CV0} (H_0 + (z_2 - z_3) + C_3 Q_6^2, H_5) \quad (5)$$

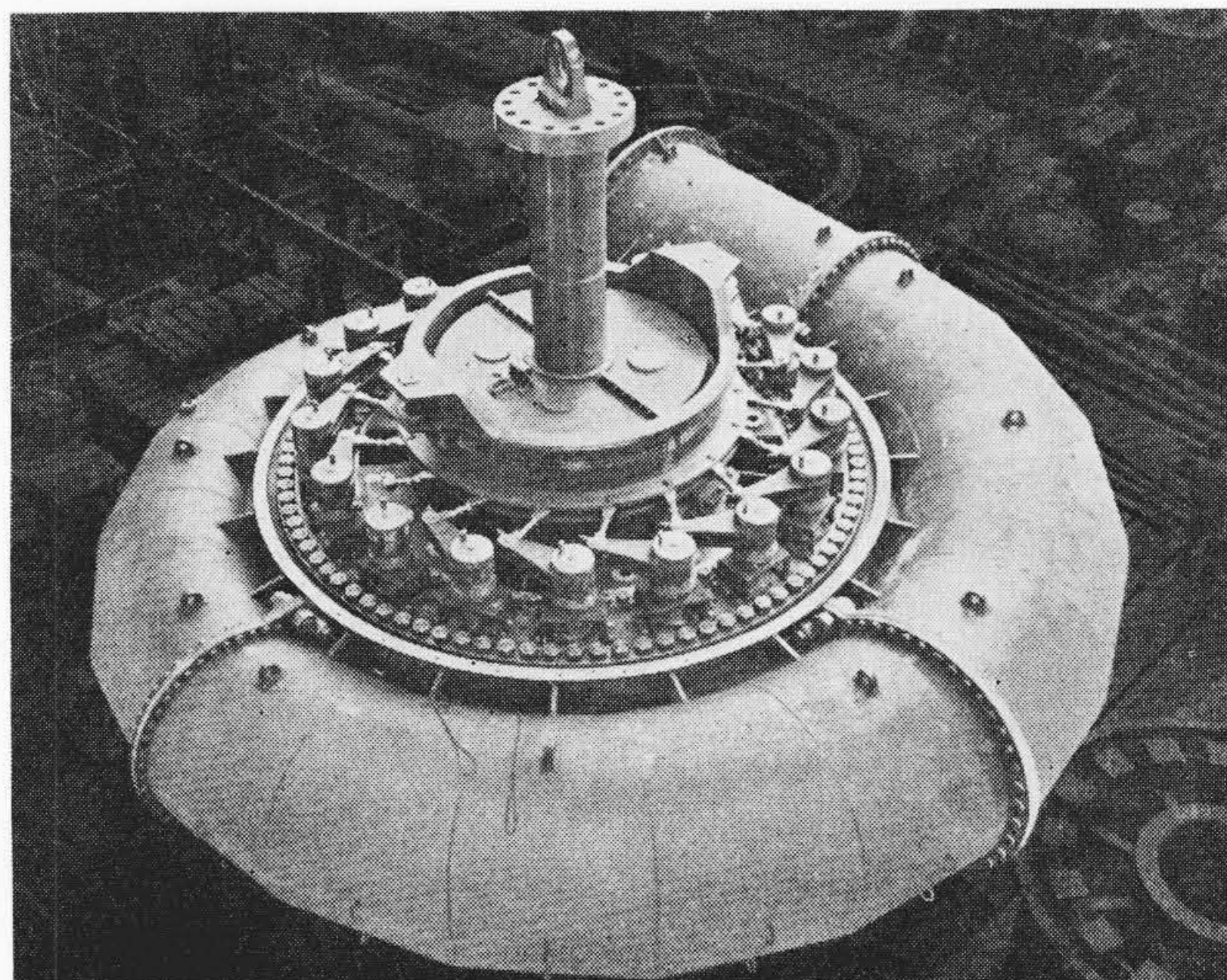
これらの運動方程式および連続の式を与えて、 z_1, z_2, z_3 の時間的変化を求めたもので、第 11 図に示すように、ガイドベーンを 180 秒で直線的に開いた場合と、2 ステップで開いた場合はほぼ同じような水位下降値を示し、現地調整の結果 2 ステップ方式でシーケンスを決めた。

3.3 ポンプ水車の構造

本発電所用可逆ポンプ水車は、最高揚程 143 m という国内における高落差高揚程の記録的製品である。構造上の特徴としては、ケーシングとスピードリングに一体溶接構造を採用し、4 分割フランジ接続方式としたことである。ランナは一体で 13% クロームステン



第 11 図 ポンプ起動時の下部サージタンク水位変動



第 12 図 工場完成されたポンプ水車

レス鋼製，主軸を貫通するグランド部分には日立標準方式のシーリングボックスを採用した。主軸受にはセグメントメタルで，正逆両回転のため中心支持方式を採用した。このほかポンプ水車特有のものとして，吸入管内水面押下装置が設けられ，気蓄槽は連続 2 回の水面押下げ可能な容量としてある。なお主弁には蝶形弁を，側路弁にはニードルバルブを使用している。第 12 図は工場組立完成のポンプ水車を，第 13 図はポンプ水車および発電電動機の断面図を示すものである。

3.3.1 ランナ

ランナ(第 14 図)は 13% クロームステンレス鋼製で，最大外径約 3,600mm，羽根枚数 7 枚の一体製ランナである。本発電所用のランナに対しては前述のように，各種の模型試験により性能のうら付けが行なわれ，高性能ですぐれた耐久度を有するよう考慮されている。外径側と内側封水部には 13% クロームステンレス鋼の取替えできるランナライナを有している。

3.3.2 渦巻ケーシング

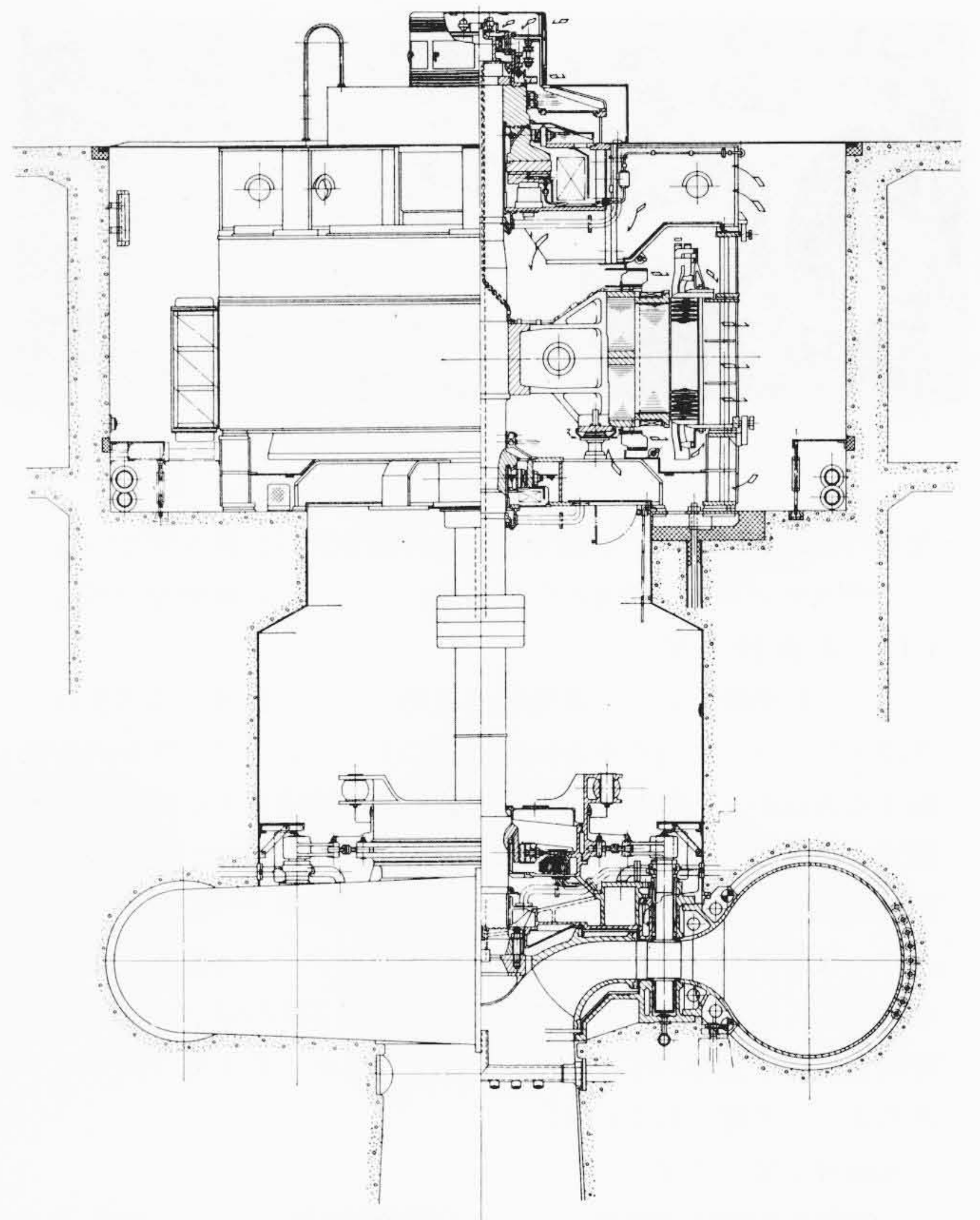
本ケーシング(第 15 図)は入口径 2,400 mm で四分割フランジ接続方式である。最高水圧上昇値は 192 m で，水圧試験は 28.5 kg/cm² で実施されたものである。

3.3.3 主軸

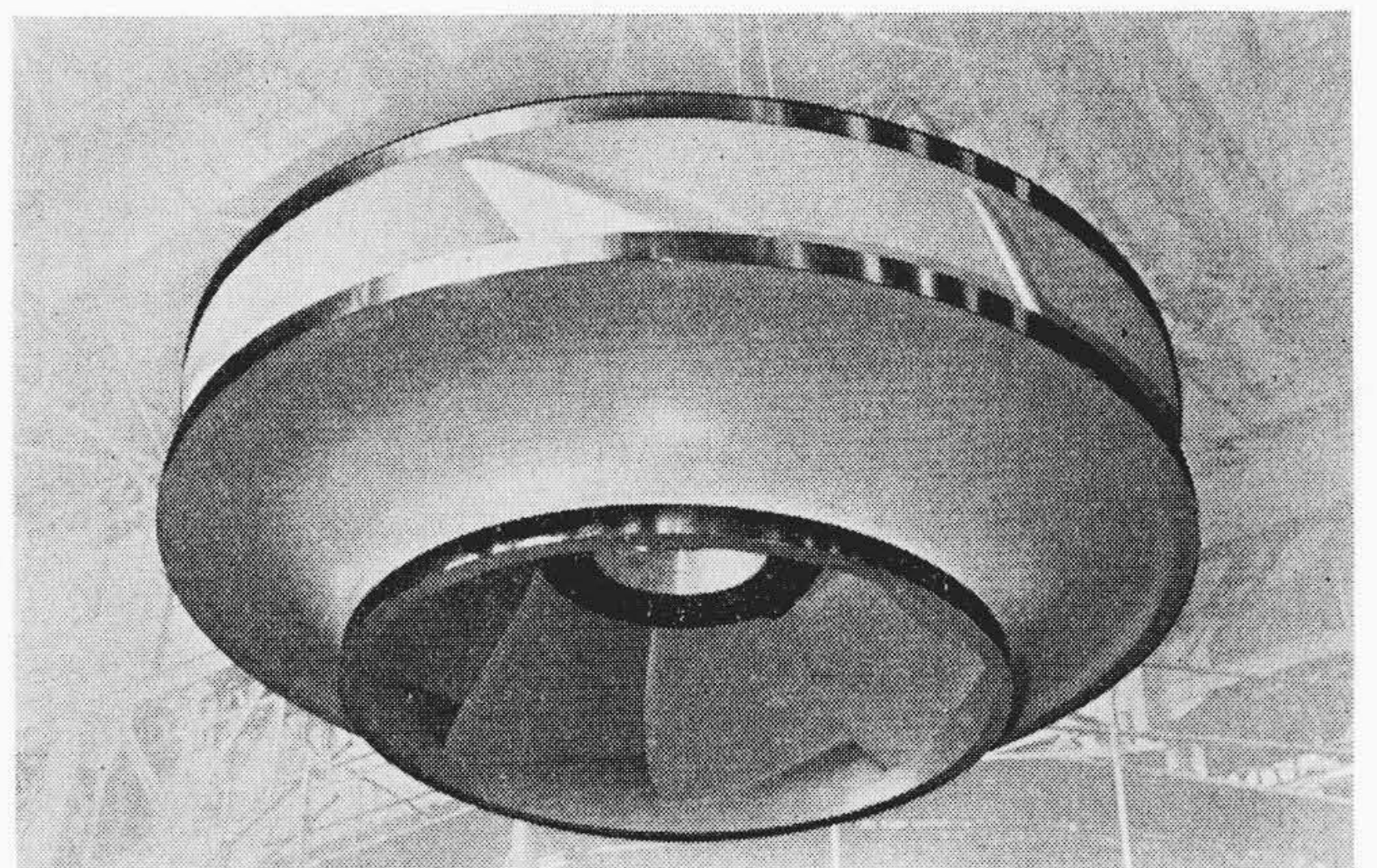
主軸は軸端径 580mm，軸長 3,700 mm 重量約 10 t の鍛鋼品である。主軸の下端はキーおよびボルトランナに連結する日立標準方式を採用してある。

3.3.4 案内羽根および開閉機構

案内羽根は 18 枚で，普通鋳鋼一体構造であり，上下には 18-8



第 13 図 関西電力株式会社三尾発電所納 37,000 kVA 発電電動機および 36,000 kW ポンプ水車の構造図



第 14 図 完成されたランナ

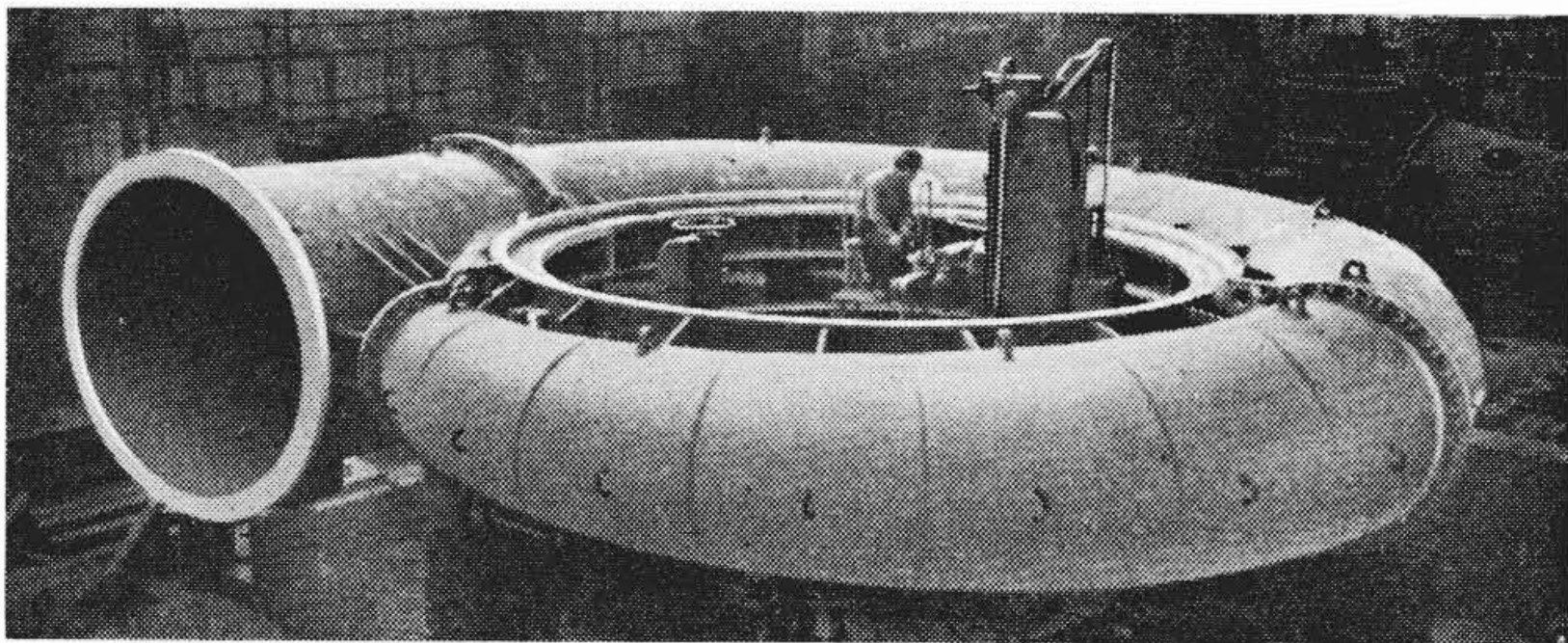
Cr-Ni の肉盛りを施してある。上下カバー側には 13 Cr 鋼板のシートライナが設けてあり，流水による摩耗を少なくするよう考慮されている。また案内羽根全閉時の接触面には特殊なパッキンが設置され，この部の漏水を防止する構造が採用されている。案内羽根の開閉はサーボモータに連結したゲートリングから，リンク，レバーを通じて行なわれる方式である。ランナ分解時には上側内カバーを分解する構造であるが，案内羽根は分解しない。

3.3.5 主軸受

ポンプ水車主軸受は油自蔵式で日立標準方式のセグメント軸受を採用した。軸受の支持は，可逆回転であるため中心支持方式である。潤滑油の冷却はオイルタンクに設けた冷却用蛇管で行なわれる。主軸受には保護装置として温度継電器，温度計などを備えている。

3.3.6 おもな付属装置

付属装置としては，給排水装置，グリース給油装置など一般的



第15図 ケーシング

なもののほかに、ポンプ水車特有の付属装置が設置されている。ここではポンプ水車特有の付属装置についてその概要をのべる。

(1) 水面押下装置

ポンプ起動時における電動機の起動トルクを軽減する方法の一手段としてランナ内の水を圧縮空気によって押下げ、ランナを空転する方法がとられている。この装置の構成は主として空気圧縮機および気蓄槽よりなり、これらの容量については、定常時の下部貯水池水位の最高水位において2回の水面押下げを可能な容量とし、なお洪水位においても1回の水面押下げが可能であることを基として決定されたものである。水面押下時間は、ポンプ起動時間を短縮するために短時間を必要とするが、約1分で押下げできるように考慮されている。

水面押下装置仕様

空気圧縮機吐出容量	4.61 m ³ /min
吐出圧力	27 kg/cm ²
電動機容量	35 kW
気蓄槽容量	4.2 m ³ ×2

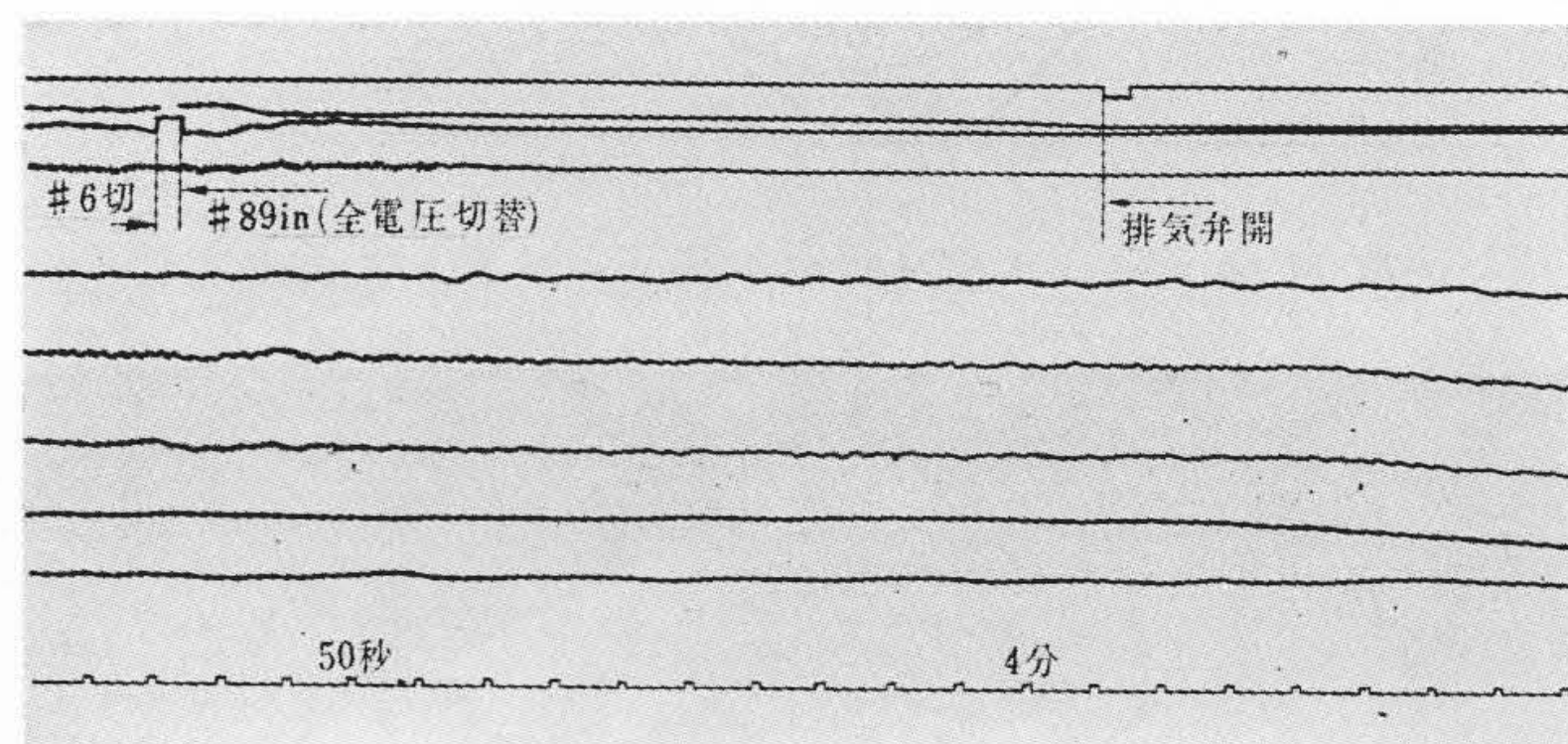
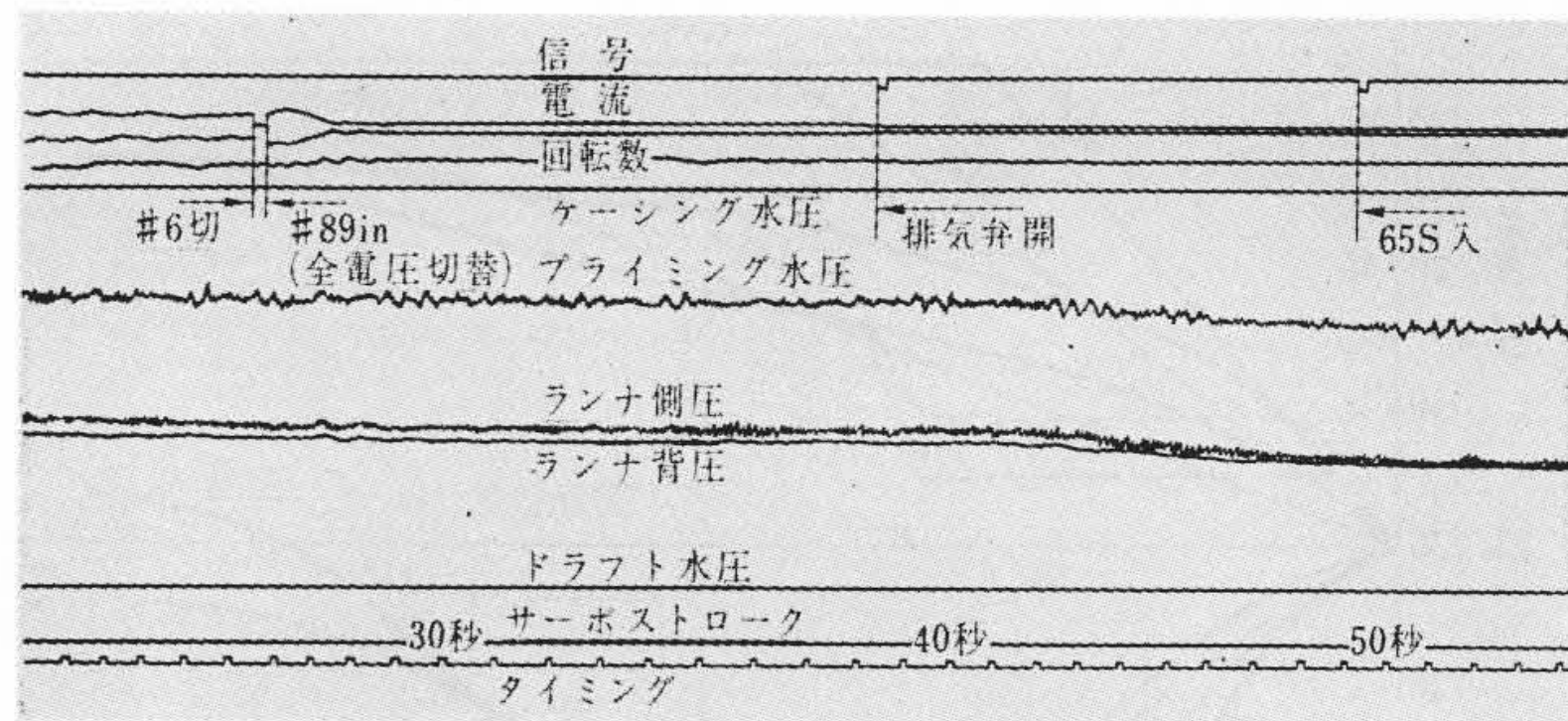
(2) ガイドベーン開度自動調整装置

可動ガイドベーンを有するポンプ水車におけるポンプ運転は、高能率運転の見地あるいは振動特性などの面から各開度の包絡性能をもって運転されることが望ましい。この操作をおこなわせるために本装置は上下貯水池の水位差とガイドベーン開度との関係を最適開度となるようきめておき自動的にガイドベーン開度を整定するものである。また一方ポンプ水車の水車運転時無負荷開度は水位差によりかなり大幅に変化するのでこの整定も本装置が利用される。すなわちポンプ運転時には、揚水開始条件が満足されるとガイドベーンは、ただちに小開位置に開かれ次に本装置により最適ガイドベーン開度に整定されて本装置が除外され一定開度にて揚水運転が行なわれる。

発電運転時には、起動操作により起動開度まで開かれ、起動確認継電器によって確認され、水位差に応じた無負荷開度に整定され、主極起動時の過速度が防止される。第16図はガイドベーン開度調整曲線を示す。

(3) ガイドベーン緩閉鎖時間調整装置

ポンプ水車は普通形のフランシス水車に比べて翼長が大きく、したがって無拘束速度が低い。負荷遮断時にガイドベーン閉鎖とともに対応する無拘束速度も低くなるが、発電機の回転数は無負荷開度付近で最大となるため水車はブレーキ領域に置かれる。ブレーキ領域では回転数の変化による流量の変化が大きく水圧の異常変動の原因となるので避けなければならない。このため無負荷開度付近からガイドベーンの閉鎖速度を遅くし全閉まで15～30秒におさえるようにガイドベーン緩閉鎖時間調整装置が設けられている。落差の変動が大きいため水位調整機を組み合わせ、常に無負荷開度付近から腰折れが得られる構造としてある。この結果、水圧の異常変動はまったくなく、安全な運転が確保された。



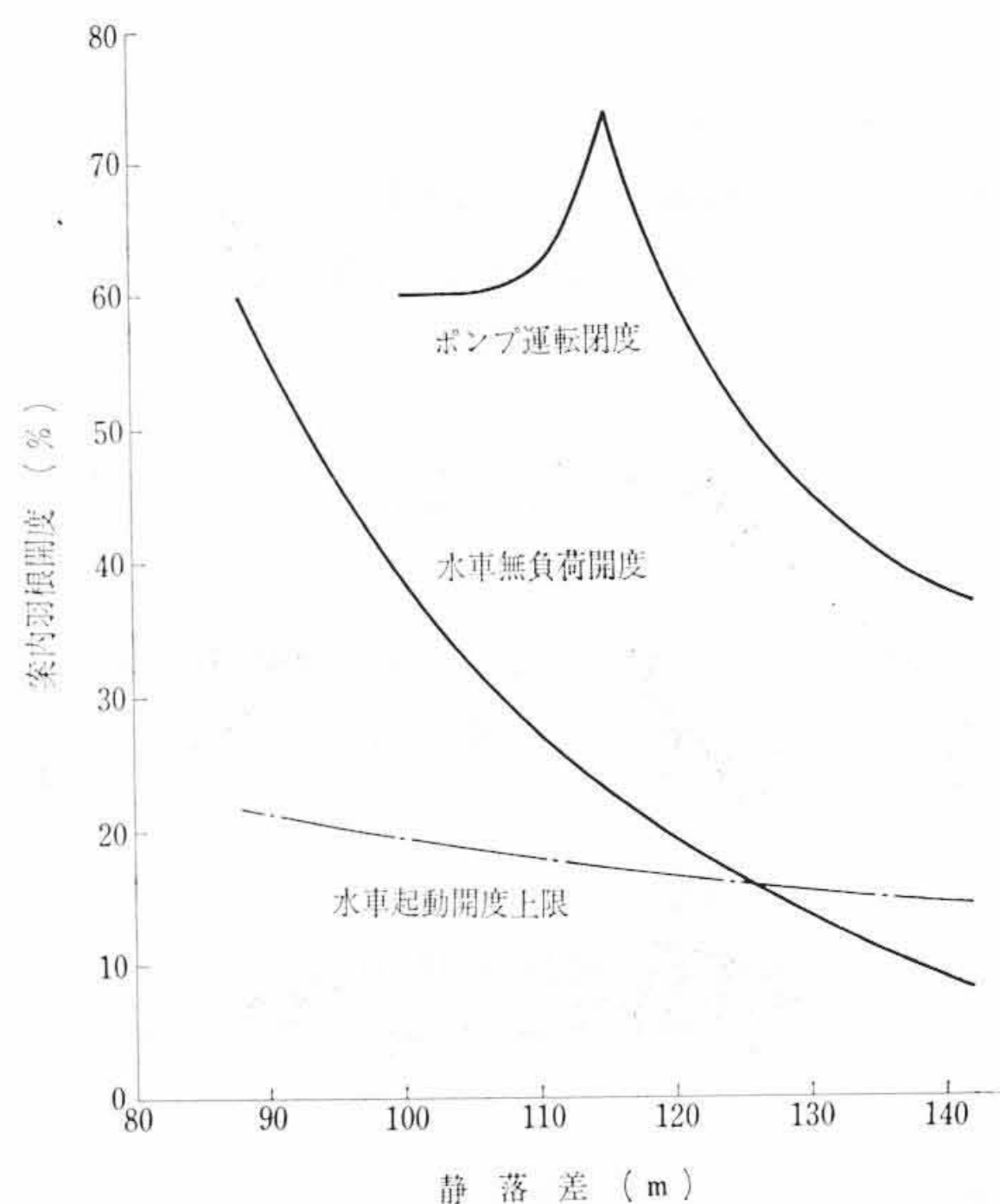
3.3.7 ガイドベーン揚水

ポンプ運転時の起動方法として水面押下げ、半電圧起動、引入、全電圧並列後、あらかじめ主弁を全開しておき、ガイドベーンを徐々に開いていくガイドベーン揚水と、主弁を全閉の状態から、ガイドベーンとともに徐々に開いていく主弁揚水との2種類がある。前者は後者に比べ起動時間がいくぶん短くできるほかシーケンスが簡単になる利点はあるが、本発電所ではガイドベーン揚水を採用し、現地試験により良好な結果が得られた。第17図はガイドベーン揚水時のオシログラムである。

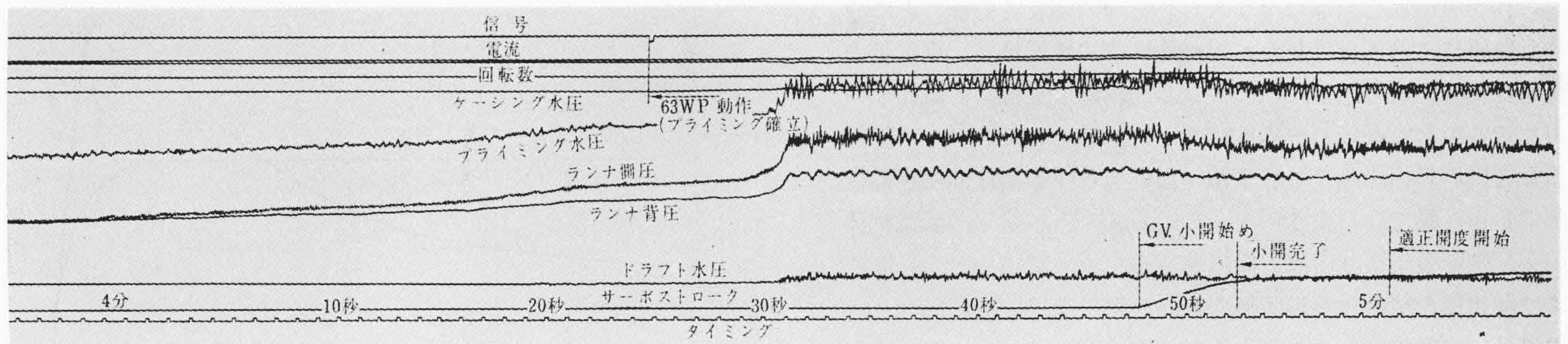
比較のために主弁揚水を実施し、ガイドベーン揚水が主弁揚水と比べてプライミング水圧などの水圧脈動の点で問題のないことを確認した。第18図は主弁揚水時のオシログラムを示す。

4. 発電電動機

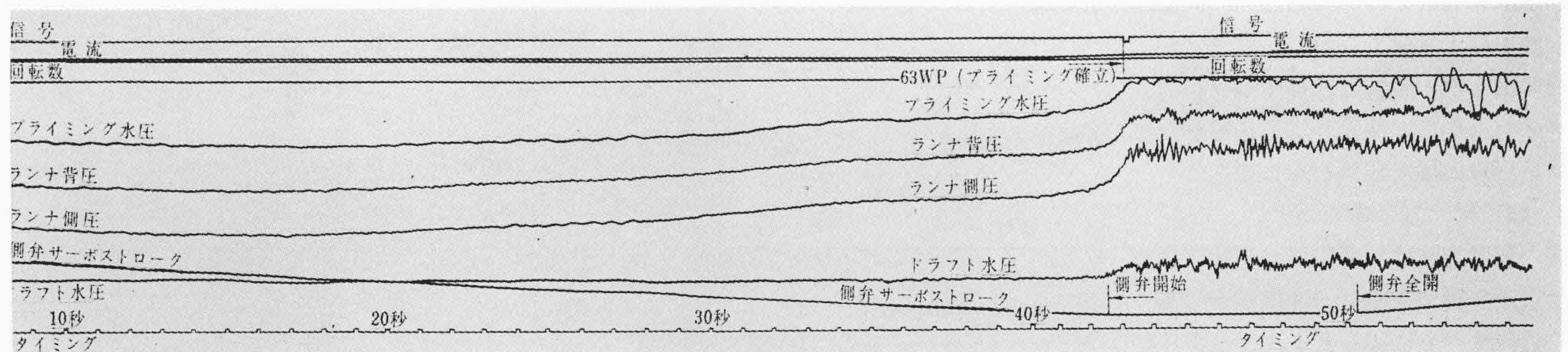
本機の特長は、自己起動形発電電動機に、自励式を採用した点である。発電電動機に自励式を用いると、電動機運転時わけでも、ポンプ水車充水時の負荷急変に対する安定度の増加が期待できる。一



第16図 ガイドベーン開度調整曲線



第 17 図 ポンプガイドベーン起動時オシログラムの一例



第 18 図 ポンプ入口弁起動時オシログラムの一例

方、起動時界磁巻線に交番電圧が誘起されるので、励磁装置に逆電圧がかからないよう保護する必要があるが、本機はこのような点を解決し、現在良好に運転中である。以下本機の概要と、起動方式の概要につき、試験結果を含めて報告する。

4.1 仕様

本機はその設置位置の関係より、発電時のみ 60 c/s と 50 c/s の両サイクル用として計画され、60 c/s を主とし、50 c/s を従とする。揚水時は 60 c/s 系統より給電され、50 c/s 運転は行なわない。本機の仕様は次のとおりである。

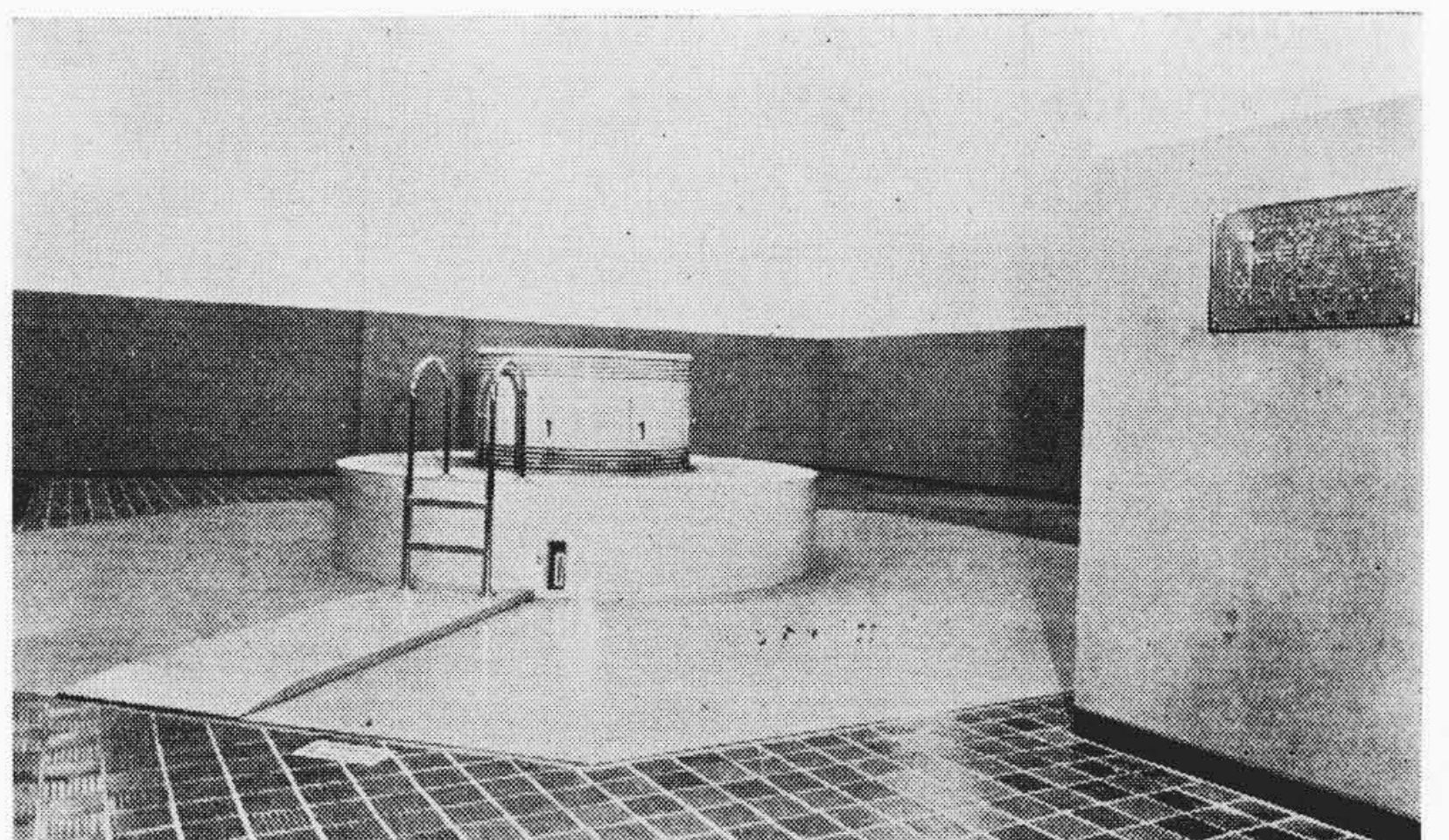
発 電 電 動 機 仕 様				
発 電 機			電 動 機	
出 力	37,000 kVA	33,000 kVA	37,000 kW	
電 圧	11,000 V	10,000 V	10,500 V	
電 流	1,940 A	1,905 A	2,085 A	
周 波 数	60 c/s	50 c/s	60 c/s	
力 率	90%	95%	100%	
回 転 速 度	277 rpm	231 rpm	277 rpm	
蓄勢輪効果	1,080 F-M ²			
形 式	立軸閉鎖風道循環形、空気冷却器は凸極回転界磁式制動巻線付			

励磁方式 自励式

この仕様より明らかのように、電動機運転時の電機子電流が発電機運転時よりも大きいため発電電動機の電気装荷は、電動機により制限される。また磁気装荷は発電機により制限されている。発電電動機の端子電圧は、発電機運転時 11 kV、電動機運転時 10.5 kV とし、主変圧器は無負荷 3 段階切換タップを設け、変圧器タップを切換えることによって発電機、電動機とも運転に支障ないよう考慮された。

4.2 構造

本機は、フランシス形ポンプ水車に直結され、発電時は、時計方向に、揚水時は反時計方向に回転するいわゆる可逆回転機であるため、軸受、ファン、ブラシ配置はこれまでの発電電動機と同様可逆転に対する考慮が払われている。第 13 図は本機の組立断面図で、推力軸受を上部ブラケットに、案内軸受を上部ブラケット、および下部ブラケットに備えた普通形構造である。本機は自励式なるた



第 19 図 発電電動機

発電電動機は、写真でみえている床の下にあり、集電環部と推力軸受の一部が本写真にあらわれている。

め、推力軸受のすぐ上に、集電環が配置されており、直結励磁機付の発電電動機と比較したとき、その構造の簡単な点が、最も印象的である。本機のいちばん上部には制御用電源としての永久磁石発電機と起動、停止確認用としての微速検出發電機が取り付けられている。

第 19 図は本機の上部外観を示す。

固定子わくは、鋼板溶接構造で輸送上から四分割となっている。固定子巻線は、1 ターンコイルで、SLS ワニスを真空注入して製作され、素線は直線部で転位が行なわれ、渦流損の低減と温度上昇の低下に寄与している。揚水発電所用主機は起動、停止がひん繁であるため、固定子巻線の絶縁には膨張収縮に対して強じんて、劣化しにくいものが要求される。SLS ワニスを用いた上述固定子巻線の絶縁は、日立製作所における実験の結果も良好であり、納入後の運転実績がこれを証明している。

主軸は一体鍛造品で、これに円環状厚鋼板よりなる継鉄が焼ばめされている。磁極鉄心には 1.6 mm 厚みの磁気特性の良好な薄鋼板を積層し、その両端に鍛造製端板をあて、リベットにより強固に締付けてある。界磁巻線は平打巻きで、層間はアスベスト、対地間はマイカを主体とした絶縁を施してある。

制動巻線は電動機起動時に大きな熱エネルギーを吸収しなければならず、またポンプ水車の無拘束速度時には大きな遠心力を受けるため、その構造には特に留意してある。パーには高抵抗の銅合金を

用い、これを磁極鉄心頭部にそう入し、その両端を各磁極ごとに分割された短絡片にろう付けした。短絡片には特殊低抵抗、高抗張力銅合金を採用し、磁極端板頭部に設けた凹部にて支持し、短絡片の遠心力をここでもたせ、バーにもたせない構造とした。バーの膨張による軸方向の自由な動きをさまたげないよう、短絡片は磁極端板の凹部でしゅう動できるようになっている。一方短絡片は低抵抗体とはいえ、熱膨張により円周方向に伸びるため、短絡片どうし間の接続には薄銅板を積層した半円形のたわみ継手を用いた。

推力軸受は可逆式であるため中心支持方式としてある。起動時の摩擦トルクを低減し起動を容易かつ確実にするために、各シューとも圧油送入孔を有し、かつシューに直接逆止弁を取り付けて油系統の安全性を向上させている。

案内軸受も推力軸受と同様中心支持方式のセグメント形で、油膜の成形が容易なよう入口、出口の縁を角落しをしてある。

4.3 起 動 方 式

本機の起動方法は主変圧器の内接三角点より半電圧を得て起動し、速度が十分高くなり、最終すべりに達したとき、全電圧に切換え、しかるのち励磁印加する方式をとっている。これはポンプ水車の空転損失が約 3,500 kW と予想されたため、半電圧のまま同期引入れすることが困難と考えたためである。本機は自励式であるため、起動中、発電電動機の界磁巻線は放電抵抗にて短絡され、励磁系は界磁開閉器にて開路されているので、界磁巻線に誘起される交番電圧が励磁系に印加されることはないが全電圧に切換え後、励磁を生かす時間によっては、逆電圧が励磁系に印加される危険性がある。このため励磁印加と同時に放電抵抗を開路することなく、同期引入完了するまで放電抵抗を接続しておく方式をとった。

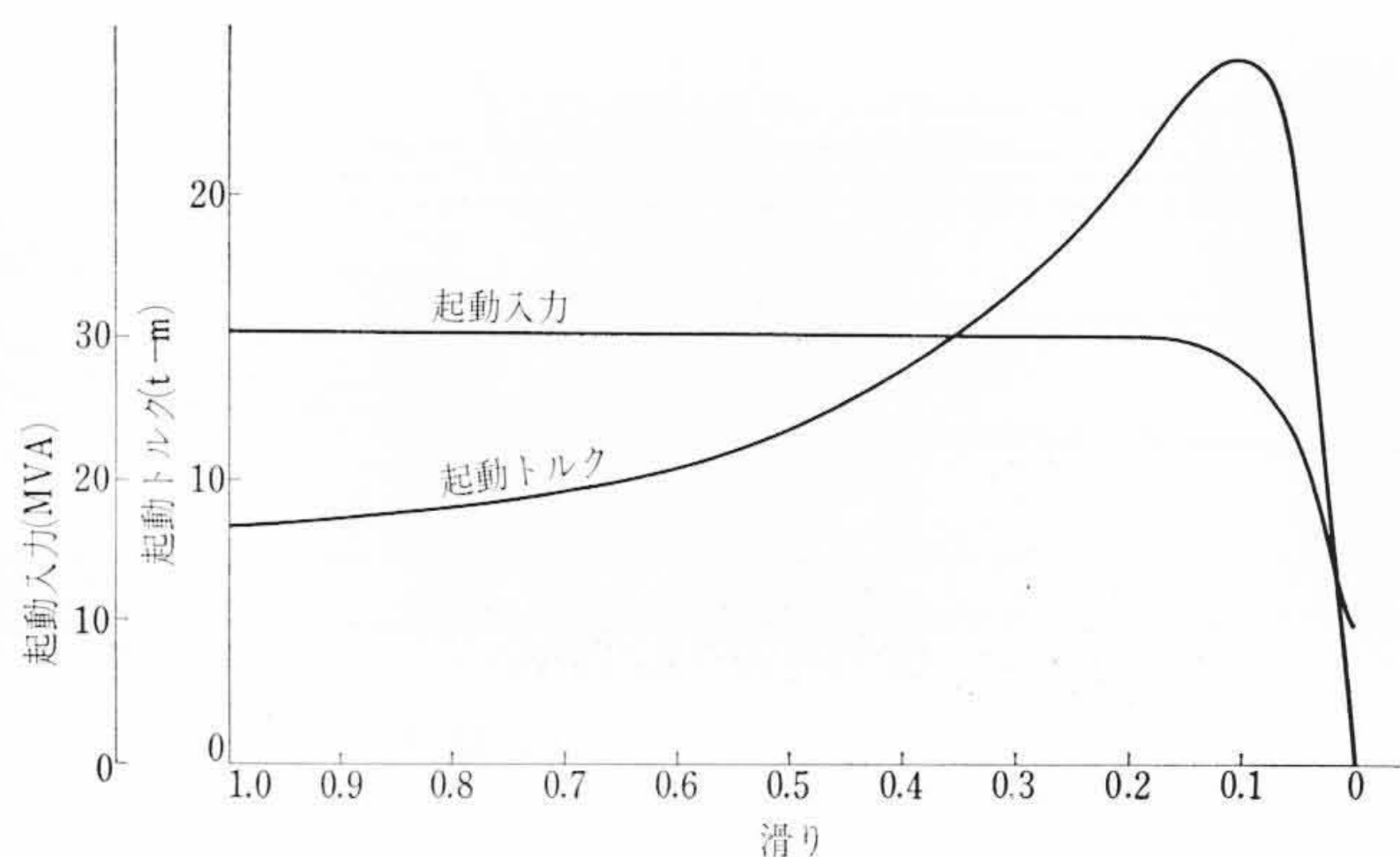
4.4 特 性

本機は工場で発電機特性と電動機特性の試験を実施した。

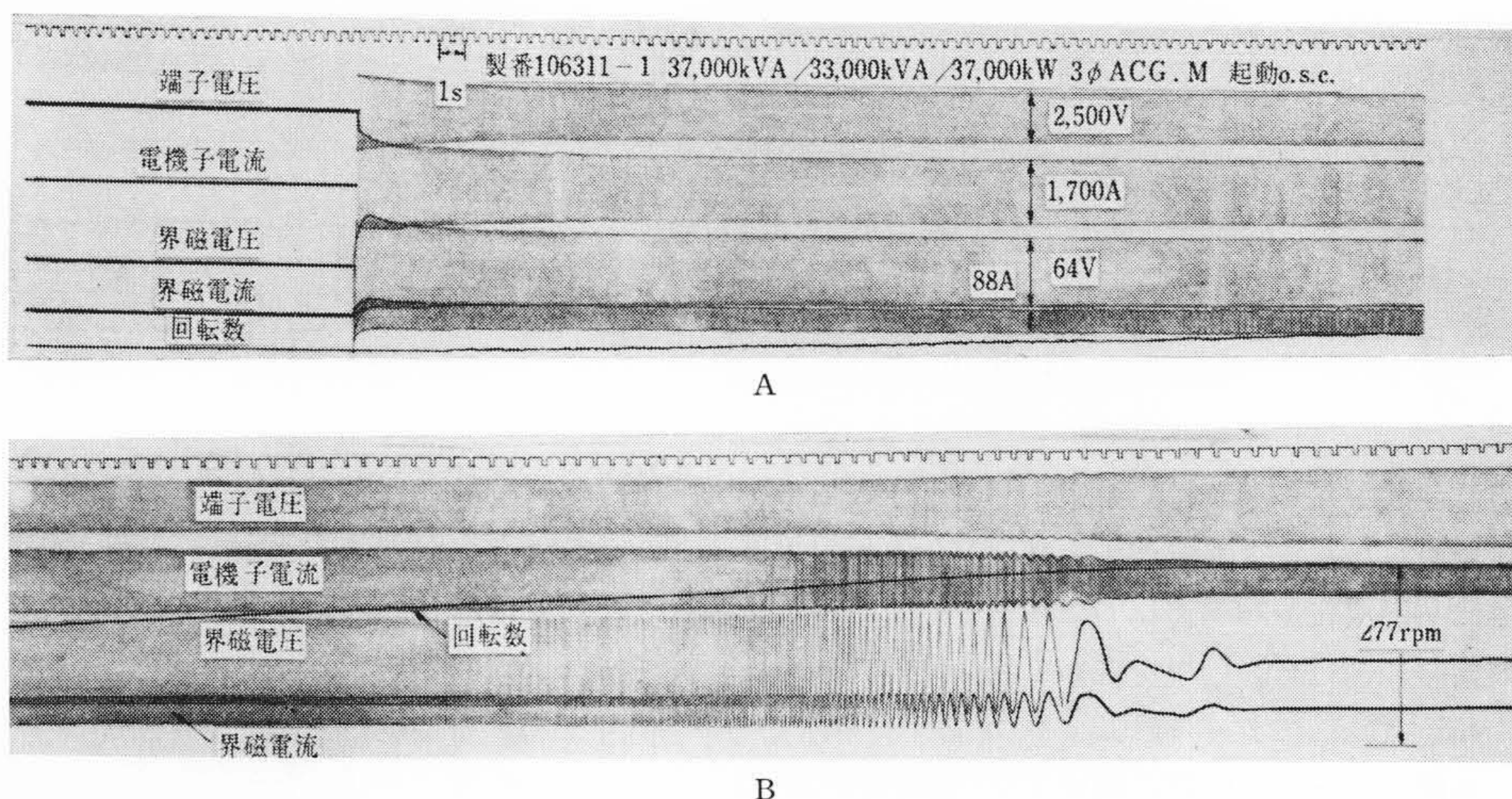
起動特性を求めるには 50,000 kVA 発電機を用いた。これにより自己起動させたときの速度上昇曲線より起動トルク特性を、入力電流電圧より入力とすべりの関係を求めたのである。第 20 図は起動特性を、第 21 図は起動時のオシログラムを示したものである。起動時の摩擦トルクを低減するために推力軸受に高圧油を送入する方法を採用しているが、この高圧油の圧力と摩擦トルクの関係も試験した。この結果、いったん推力軸受のランナとベアリングのしゅう動面に 0.1~0.07 mm の油膜が形成されると摩擦トルクは、約 150 kg-m で発電電動機の定格トルクの約 0.1% に相当する。このように摩擦トルクが十分小さいため、発電電動機の印加電圧が約 1,000 V あれば摩擦トルクに打ち勝って回転子を回転させることができる。このほか制動巻線温度上昇、同期引入特性、起動時の界磁巻線誘起電圧など測定したが、いずれも設計値と大差なく、ポンプ水車と組み合わせられたときにも満足な運転成績を示すことが確認された。

4.5 現 地 試 験

本機の起動現象を中心に以下現地試験の結果について概略を述べる。本機の起動方式は半電圧起動、全電圧同期引入方式であり、起動瞬時の反抗トルク（おもに推力軸受部の摩擦トルクに起因するもの）低減方法として高圧油送入方式を、また起動中、わけても同



第 20 図 起 動 特 性



第 21 図 起 動 試 験 オ シ ロ グ ラ ム (工場)

期引入点付近の反抗トルク（おもにポンプ水車の回転損失にもとづくもの）低減方法として、起動中はポンプ水車ケーシング内の水を押し下げ、ランナが空転するようにしてある。

起動瞬時の電動機端子電圧降下は約 15% であり、当初の予定値 19% より若干小さめにでた。これは系統条件の変化によるものである。このため起動時間も予定値 190 秒より若干早く 170 秒であった。同期引入れは、半電圧で最終すべり約 0.4% に達したならば、すべり検出器が動作し半電圧回路を開路し、全電圧に切替わる、この後約 0.2 秒で界磁開閉器を投入し、同期引入完了したとき放電抵抗を開路する。漏水トルクを人為的にふやしたときの起動試験も実施したが、問題となるような点はなかった。

5. 結 言

三尾発電所用可逆ポンプ水車は以上述べたように、あらゆる角度から検討され現地試験の結果も良好で、すでに営業運転にはいっている。ポンプ水車は高揚程、高落差側に荷重の重点をおくことを目標とし数種類のモデルランナを使用して基本特性、過渡特性の比較試験を行ない、その結果を慎重に検討して設計されたものである。発電電動機は励磁方式として自励式を採用した点に特長があり、起動時の諸問題を試作試験と理論より解明し、発電機特性、電動機特性とも良好な結果が得られた。特に起動特性は、現地試験を実施してみないと確認できない事柄があり、これらについては関西電力株式会社の絶大なご支援により、詳細な試験が実施された。ここに本稿をかりて、関西電力株式会社関係各位に謝意を表する。