
揚水発電機器特集

関西電力株式会社喜撰山発電所納

240,000 kW ポンプ水車および発電電動機の運転特性63

中部電力株式会社高根第一発電所納

斜流ポンプ水車および発電電動機の運転特性.....70

電源開発株式会社沼原発電所納

1 段 500 m 高落差ポンプ水車および発電電動機.....76

最近のアメリカ向け大容量ポンプ水車および発電電動機.....82

水車の設計面における電子計算機の応用.....88

関西電力株式会社喜撰山発電所納

240,000 kW ポンプ水車および発電電動機の運転特性

240,000 kW Pump-turbine and Generator-motor for Kisenyama Pumped Power Station

吉本 与之助*
Yonosuke Yoshimoto服部 正美*
Masami Hattori山本 景彦**
Kagehiko Yamamoto西野 一雄**
Kazuo Nishinoiri北野 豊**
Yutaka Kitano永田 一良**
Ichirô Nagata湊 昭***
Akira Minato

要 旨

大阪湾沿岸の大電力需要帯のピーク需要に対応するための、本格的な揚水発電所として建設された、関西電力株式会社喜撰山発電所納め 240,000 kW ポンプ水車および 250,000 kVA/250,000 kW 発電電動機の 2 号機は、昭和 45 年 7 月に運転を開始し、現在、営業運転中である。これらの運転特性および運転制御について記述する。

おもな内容は下記のとおりである。

(1) 発電所の概要 (2) ポンプ水車の運転特性 (3) 発電電動機 (4) 揚水時の速度制御

1. 緒 言

関西電力株式会社喜撰山発電所用ポンプ水車は、現在運転中のポンプ水車のうちでは、世界最大容量機であり、揚程においても 230 m はわが国最高の記録品である。したがって、ポンプ水車および発電電動機の設計、製作にあたっては、種々の模型試験によるポンプ水車性能の開発、高落差(高揚程)における振動、スラスト軸受設計の基礎となる水スラストに対する検討などを行なった。また、フランス形ポンプ水車としてわが国初のスピニングスベア運転制御方式の確立、誘導電動機による、ポンプ始動方式など新技術の開発に努めた。

据付に当たっては、夏のピーク需要に応ずるため、当初の運転開始期を約 3 个月早め、昭和 45 年 4 月下旬に据付および無水調整を終了し、5 月 2 日より発電試験を開始、5 月 15 日より揚水運転試験を開始した。その後各種試験に良好な成績をおさめ、7 月 5 日官庁試験に合格、以来好調な営業運転を続けている。

ここに、本発電所のポンプ水車、発電電動機の運転特性およびこれらの運転制御について報告する。

2. 発電所の概要

喜撰山発電所は、その源を琵琶湖に発し、景勝の地、宇治川上流の既設天ガ瀬ダムを下池とし、喜撰山中腹に築かれた 95 m のロックフィルダムを上池とした本格的な純揚水式発電所である。喜撰山の地は、天ガ瀬ダムから毎秒 220 m³ の水量が得られ、上池の付近からは、ロックフィルダム建設用の良質な材料が豊富に得られること、比較的短い水路(900 m)で 220 m の高落差となることおよび大電力の需要帯である京阪神に近接し、当然連繫しなければならない火力発電所にも近く、送電損失が少ないことなどが、本発電所の立地条件を有利なものとしている。

上池には、有効貯水量 5,280,000 m³ の水が湛水(たんすい)され、下池の天ガ瀬ダムは、アーチ式コンクリートダムであり、有効貯水量は 13,480,000 m³ である。発電所は 260 m の地下に建設され、放水口側の搬入路と発電所事務所を結ぶエレベータとによって外界と接している。図 2 は発電所の鳥瞰(ちょうかん)図、図 3 は発電所据

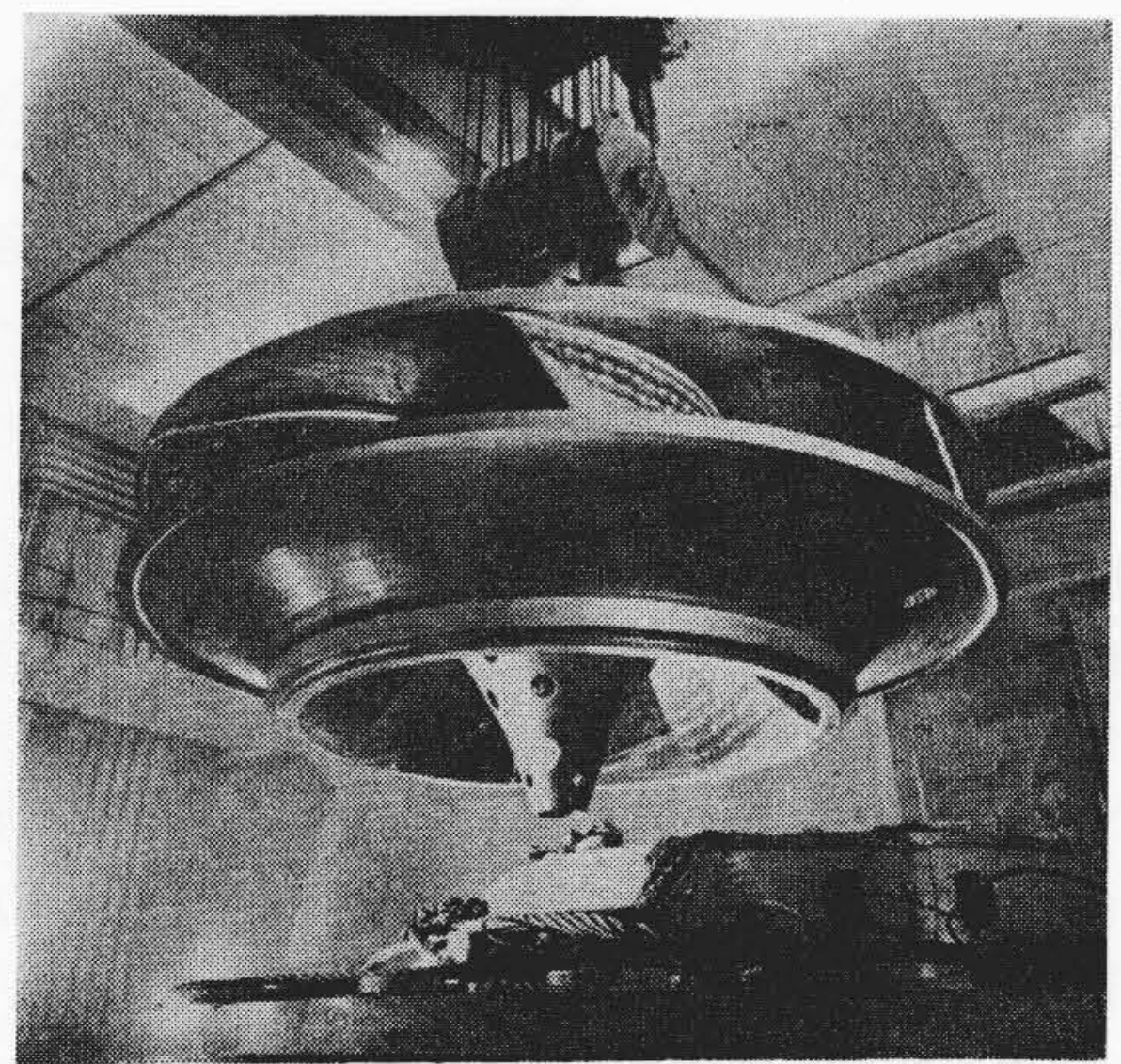


図 1 240,000 kW ポンプ水車ランナ組込作業

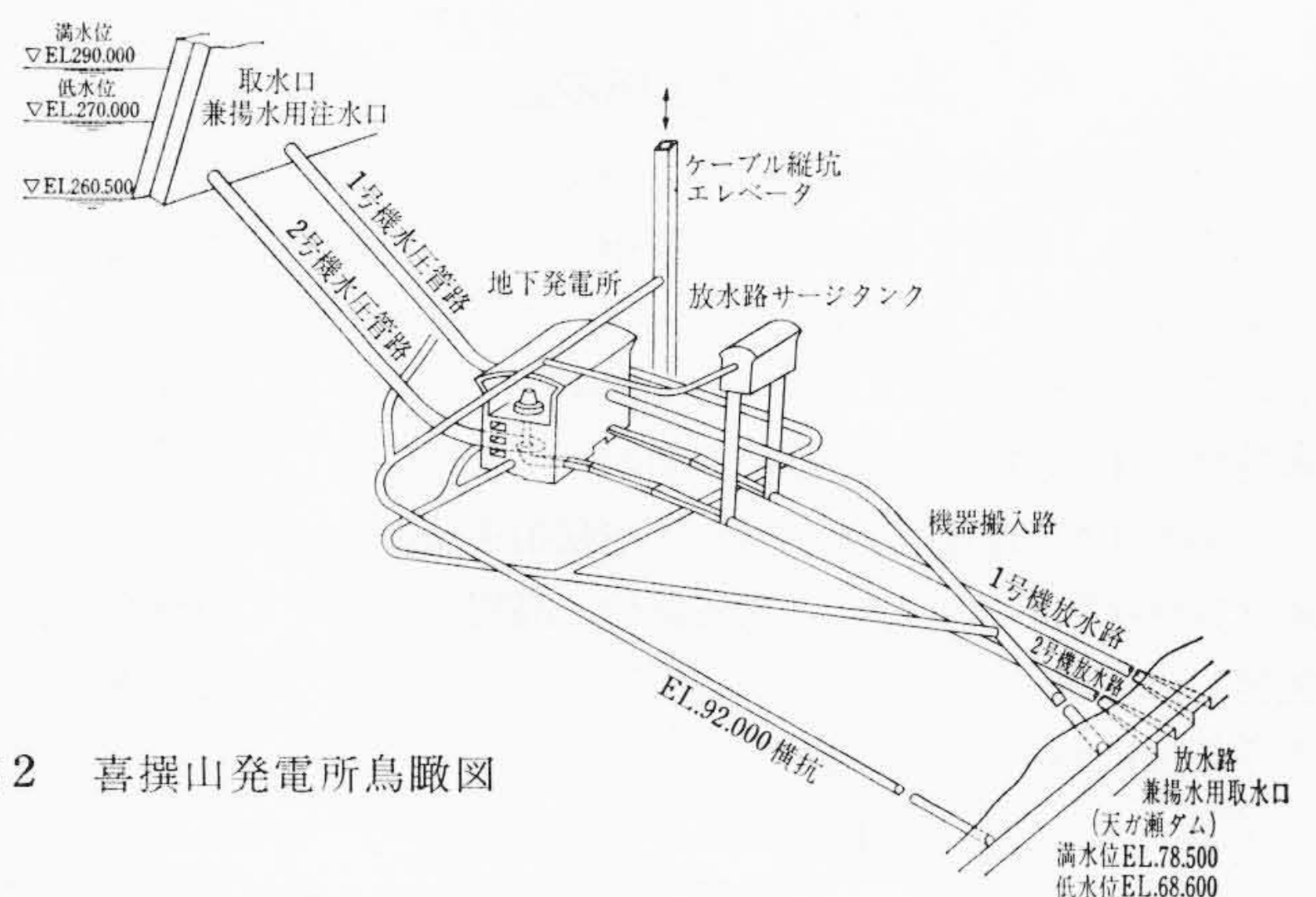


図 2 喜撰山発電所鳥瞰図

付断面図である。

本発電所は、ピーク供給力としての役割のほかに応急運転予備力としての性格が強く、このため起動時間および発電、揚水切換時間を短縮するよう努めた。このほかにスピニングスベア運転方式を採用している。したがって本発電所は下記の方針で運用されている⁽¹⁾⁽²⁾。

- (1) 深夜揚水を行ないピーク時に発電する。負荷分担は経済負荷配分装置によって総合燃料費を最小とするよう分担させる。

* 関西電力株式会社

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所日立研究所

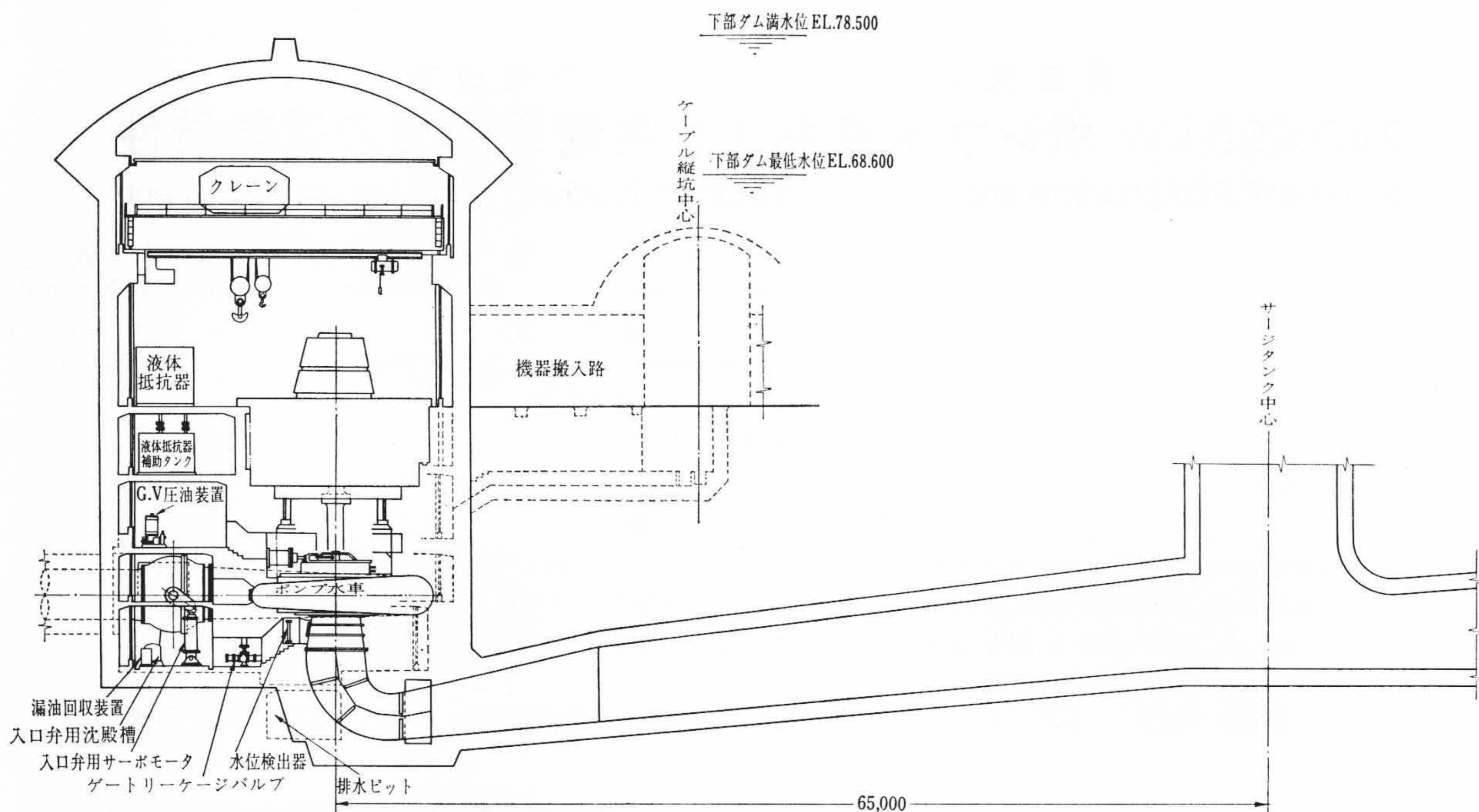


図3 喜撰山発電所据付断面図

- (2) 自動周波数制御 (AFC) 運転を行ない周波数の安定を図る。
- (3) 系統事故時または負荷予想が急変したときの運転予備力として待機させる。
- (4) 系統の無効電力調整

ポンプ起動は、圧縮空気によりランナまわりの水面を押し下げて、発電電動機と直結して設けられた始動用誘導電動機で行なわれている。発電よりスピニングスベア運転に切り換える際には、回転部を水車方向に、規定回転速度で回転させた状態で、ランナ中心部とドラフトパイプ管壁より同時に圧縮空気を給気し、ランナまわりの水面を押し下げて、待機運転を行なう方式を採用している。

最大外径 5.7 m のポンプ水車ランナの材質は 13Cr 鋳鋼で一体製造されている。ケーシング材質は、60 kg/mm² 高抗張力鋼である。入口弁内径は 3.4 m でロータリバルブを採用している。

3. ポンプ水車の運転特性

本発電所のポンプ水車は、従来の実績に比べて高落差、大容量機であるため、設計にあたっては各種設計要項を折り込んだ数組の模型を供試し、ランナ、ガイドペーン、ステーペーン、ケーシングなどの形状開発を行ない、効率およびキャビテーション試験などの基本特性向上を図る一方、最終模型ポンプ水車に対して、ガイドペーン水力不平衡力特性試験、ポンプ空転損失試験、スピニングスベア運転特性試験、水スラスト測定試験、高揚程試験などの特殊試験を実施し、実機のあらゆる運転状態においてすぐれた特性が得られるよう細部にわたって検討が加えられた。

下記はポンプ水車の仕様である。

形 式	立軸単輪単流フランシス形可逆ポンプ水車
最 大 出 力	240,000 kW
有 効 落 差	185~220 m
最 大 流 量	124.4 m ³ /s
最 大 揚 水 量	110 m ³ /s
全 揚 程	197~230 m
回 転 速 度	225 rpm

3.1 メタルならし運転

本ポンプ水車の軸受には、12 セグメントからなるセグメント形メタル⁽³⁾を採用している。メタルならし運転は水車方向およびポンプ

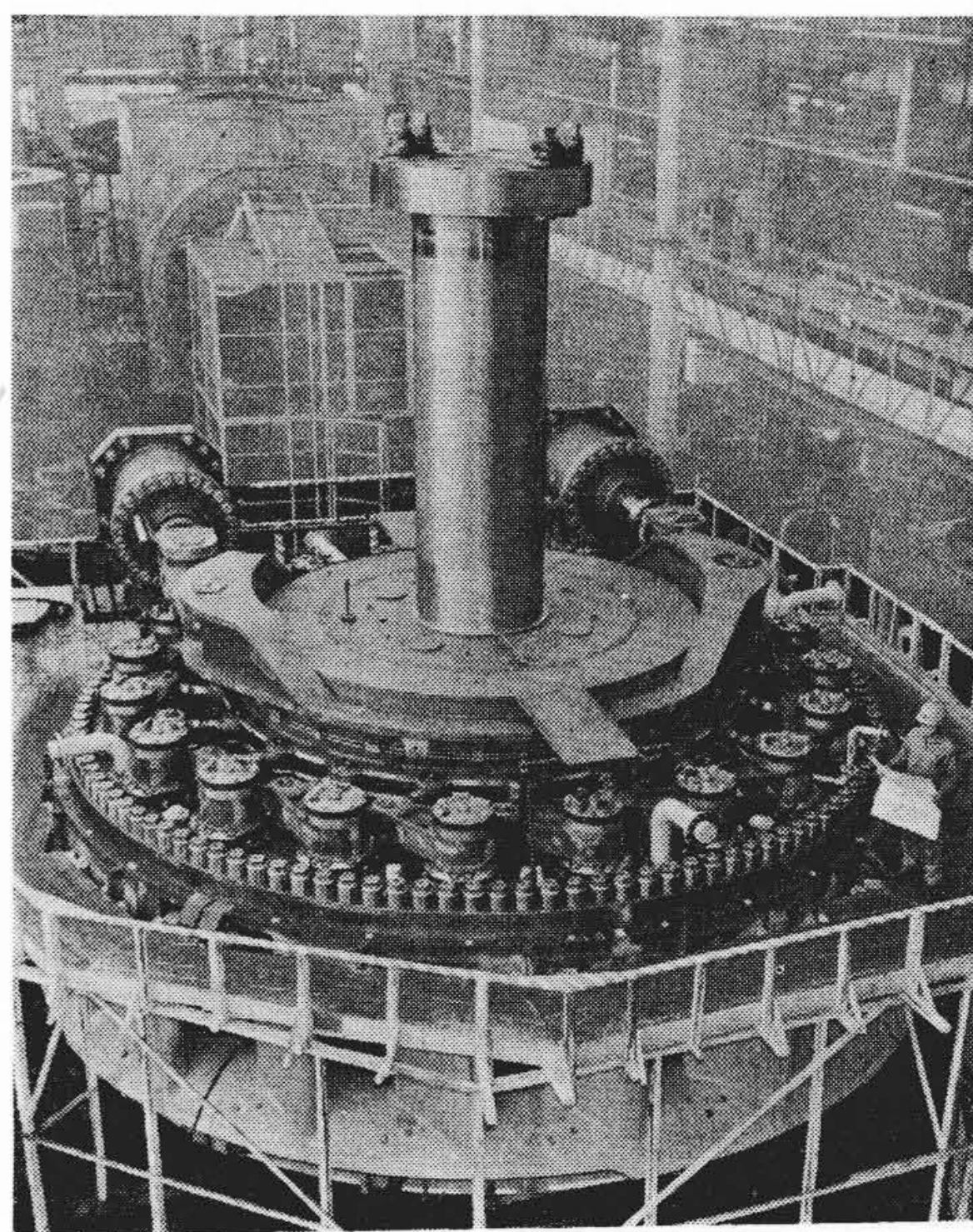


図4 ポンプ水車組立状況

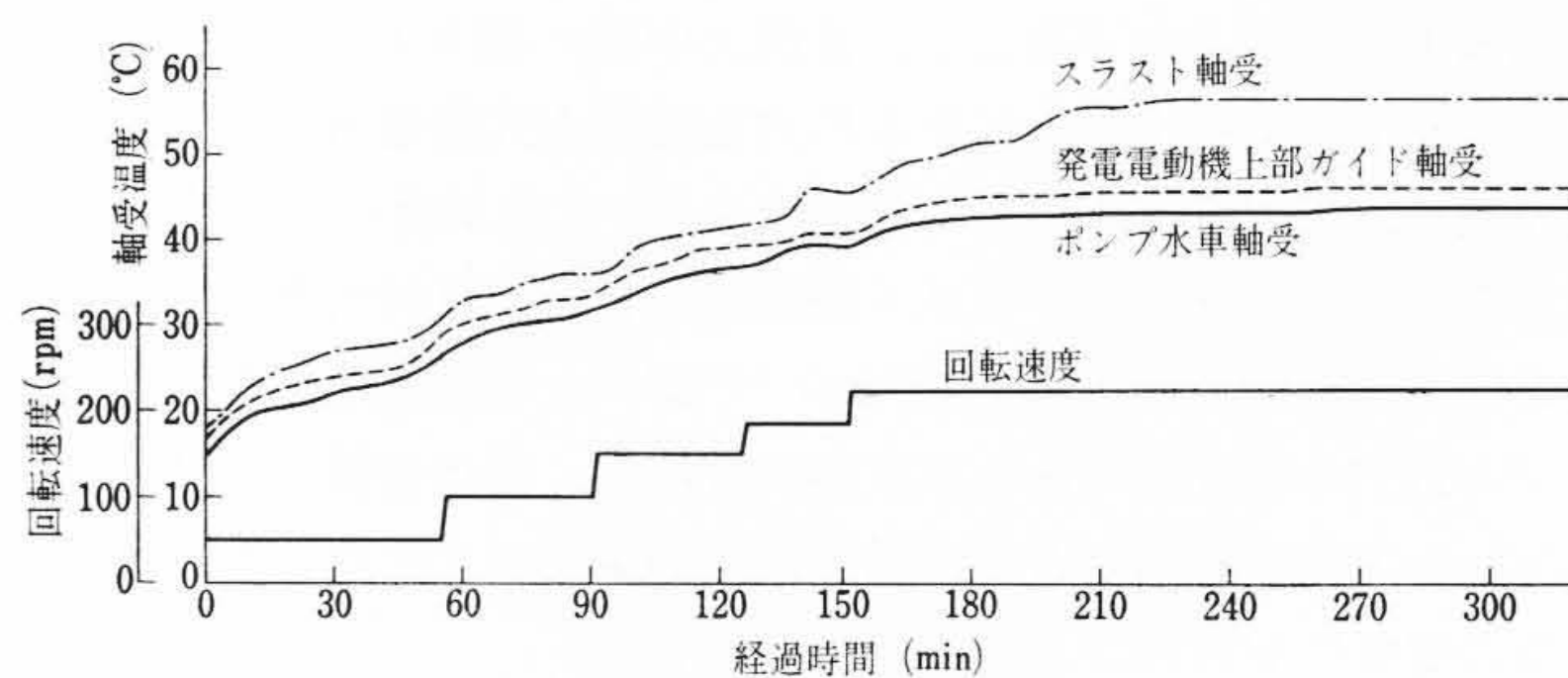


図5 メタルならし運転結果

方向のそれぞれについて行なわれた。運転結果は、全く異常なく、軸受温度も予想どおり安定した結果が得られた。図5は最高落差付近の無負荷において行なわれた、水車方向のメタルならし運転結果を示したものである。

3.2 水車運転特性

最高から最低までの全落差領域における、連続運転を行なった結

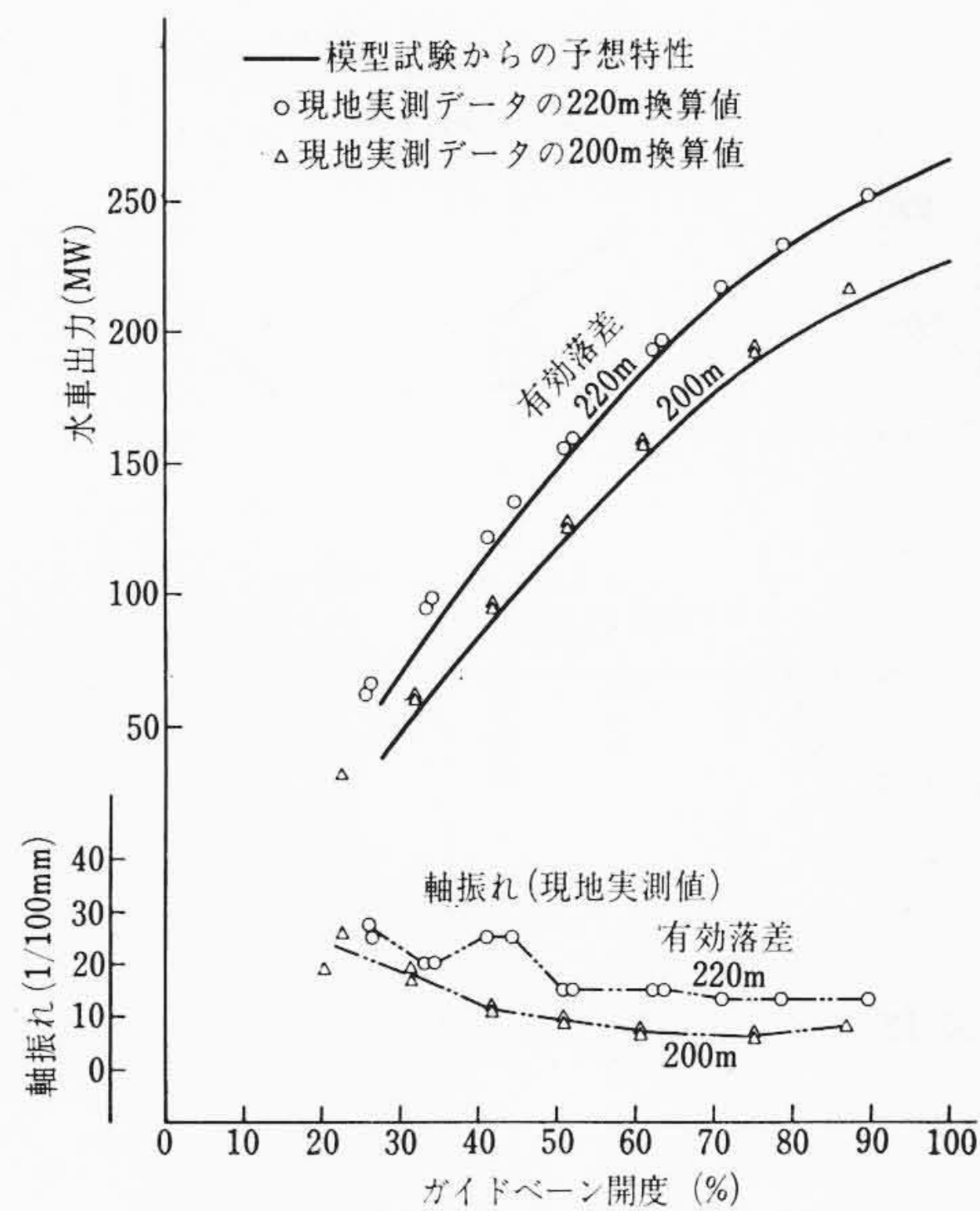


図6 水車運転特性

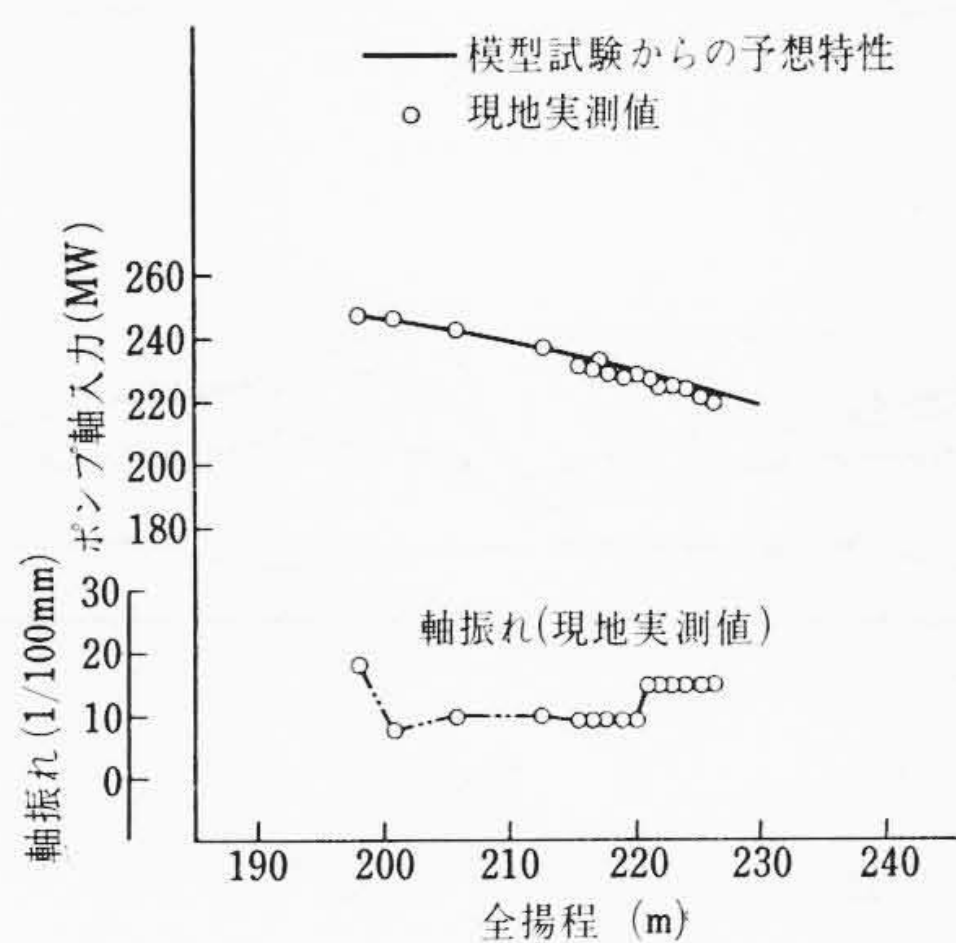


図7 ポンプ運転特性

果、運転状態は良好であった。

出力開度試験の結果は、図6に示す。

3.3 ポンプ起動特性

本発電所のポンプ起動は、入口弁全閉状態を取り入れたガイドベーン起動方式である。ポンプ起動に際しては、ポンプ起動用として、発電電動機と直結して設けられた、誘導電動機により起動する方式を採用している。起動用電動機の容量決定に際しては、起動時の水面を押し下げた状態での、ポンプ水車ランナの空転損失が大きな要素を占めるため、模型ポンプ水車において、空転損失試験を行なった。その結果、空転損失は、実物に換算して約7,000 kW という予想であったので起動電動機の制御設計はこれを目標に行なわれた。実機の実測値は模型試験結果とほぼ一致している。空転損失を増大させる要因としては、ガイドベーンサイドギャップからの漏水があげられる⁽⁵⁾。本発電所のポンプ起動時には、入口弁を全閉し、ケーシング内水圧を約75 mに低下させて、ガイドベーンサイドギャップからの漏水を軽減する方式を採用している。

ポンプ起動準備から適正開度(揚水開始)までの時間は、約9分である。同期並入し入口弁全開後排気は約30秒で終了し、ポンプ起動は異常な振動もなく良好であった。

3.4 ポンプ運転特性

ポンプの運転特性は、図7に示すとおりであり、運転状態は良好であった。

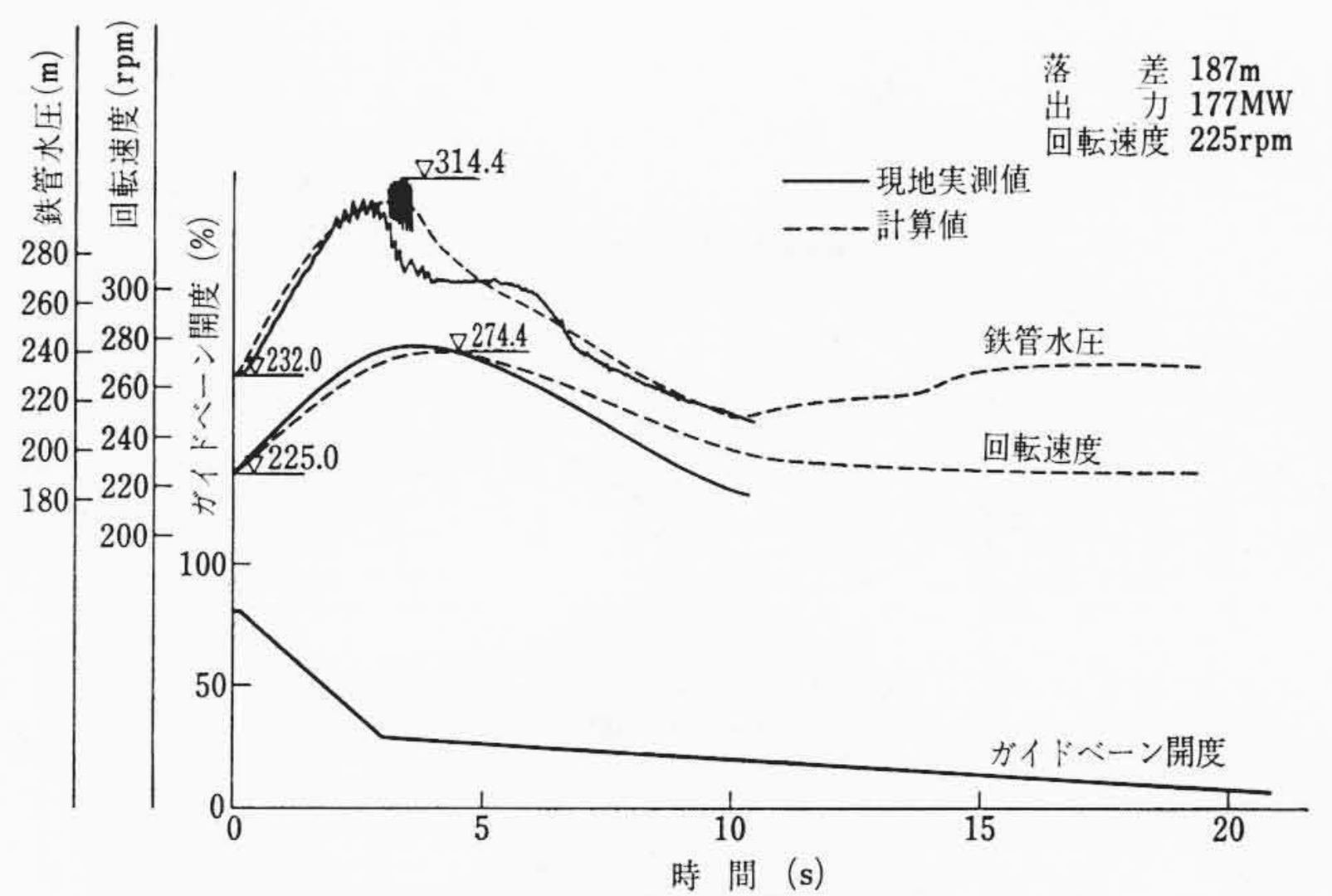


図8 負荷しゃ断試験オシログラム

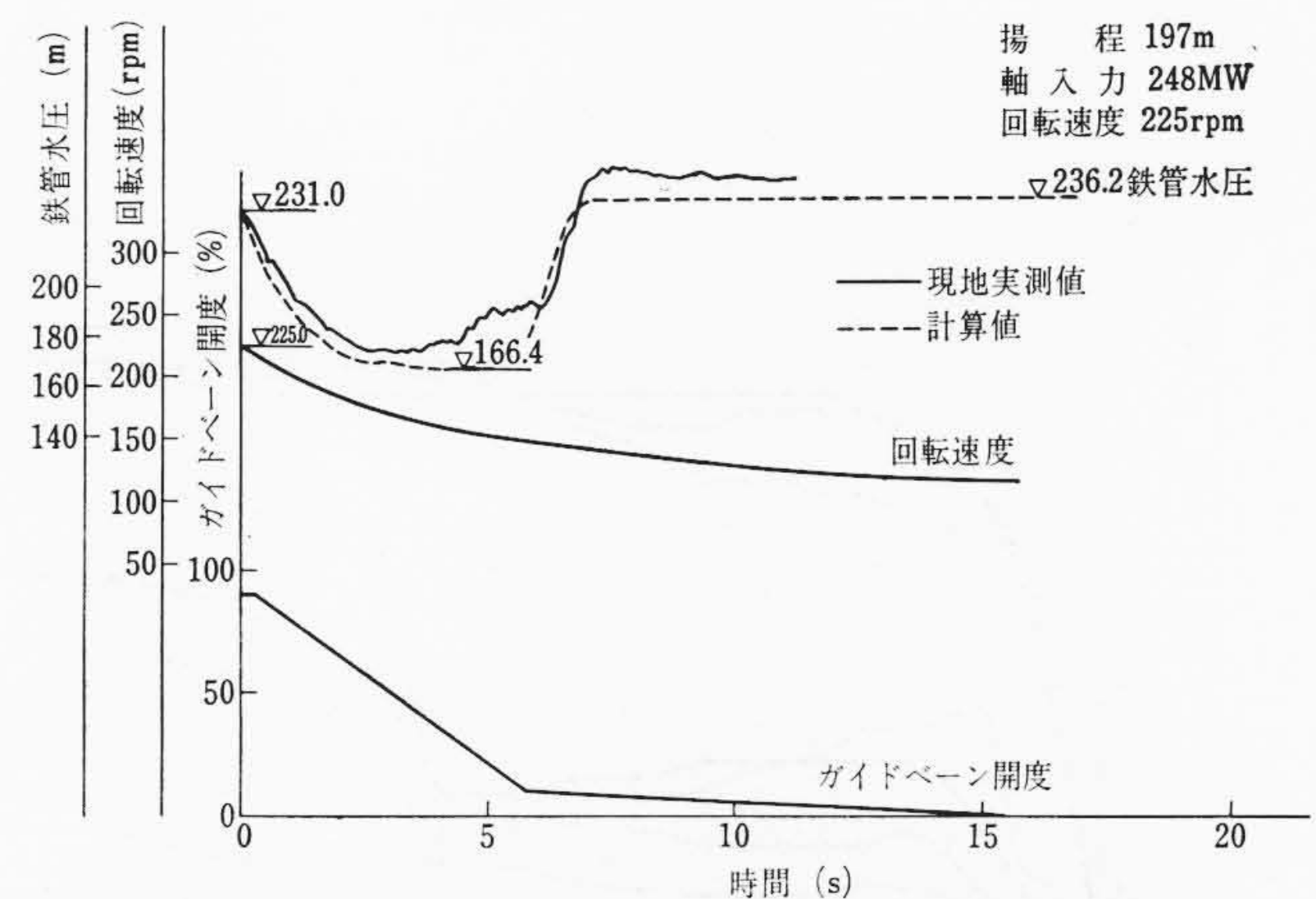


図9 入力しゃ断試験オシログラム

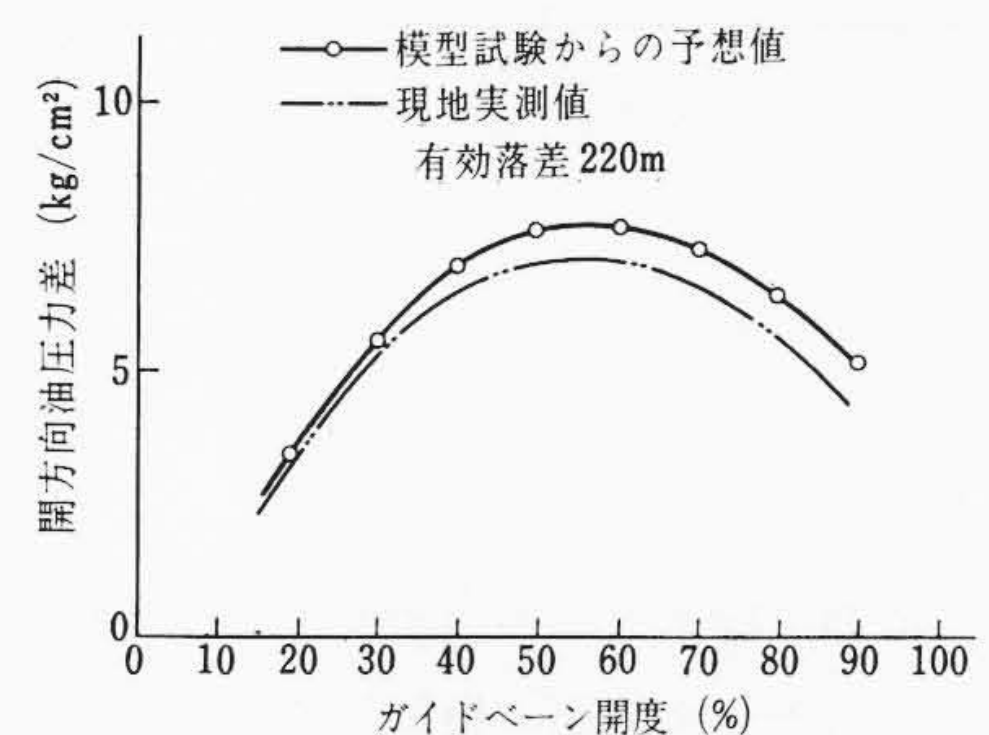


図10 ガイドベーン水力不平衡力測定結果

3.5 水車負荷しゃ断およびポンプ入力しゃ断試験

ポンプ水車の最大水圧値および速度上昇率の決定にあたっては、水路系条件、発電電動機のGD²そのほかを総合的に検討した。また、模型試験により得られた完全特性を用いて電子計算機で計算⁽⁶⁾を行なって、最も経済的な最大水圧値350 m、速度上昇率35%、発電電動機GD²=14,500 t-m²が採用された。

水車負荷しゃ断試験は、最高、基準、最低落差付近の三つの落差において、それぞれの最大出力の1/4 負荷ピッチに実施されたが、いずれについても異常はなかった。図8に電子計算機で計算した結果と実測値を対比して示した。計算による予想値と実測値とがほぼ一致している。

また、図9は最低揚程197 mにおける入力しゃ断時のオシログラムで、これも計算値と実測値がよく一致している。

3.6 ガイドベーン水力不平衡力特性

ガイドベーン水力不平衡力の測定は、最高、基準、最低落差付近の三つの落差について実施された。最高有効落差時の特性は図10に

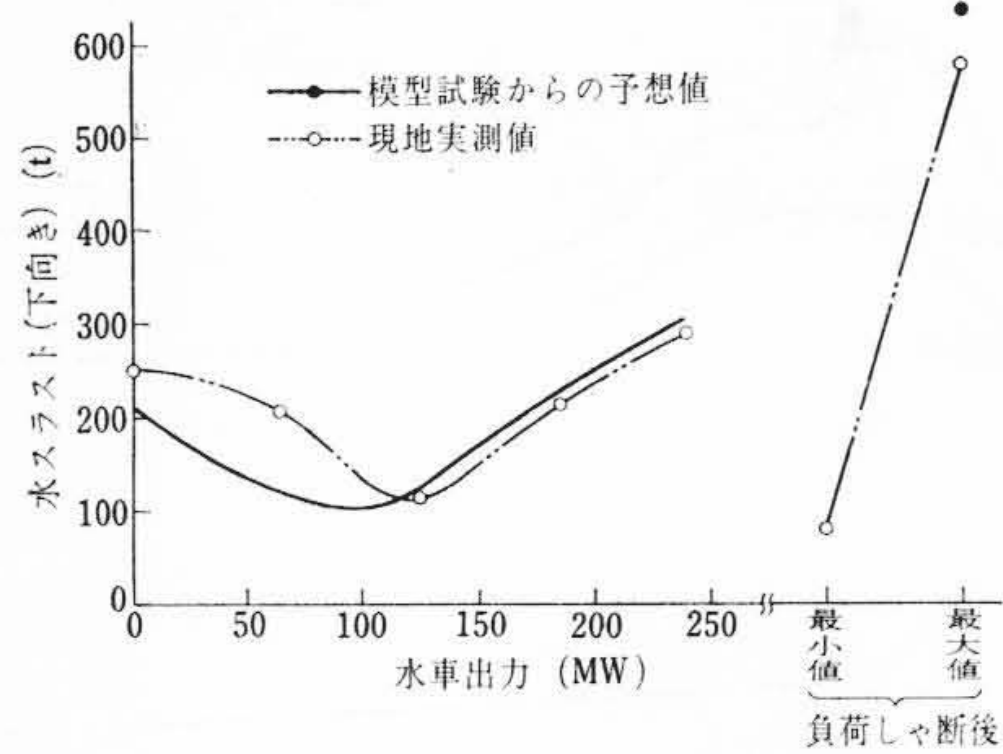


図 11 水車運転時の水スラスト測定結果

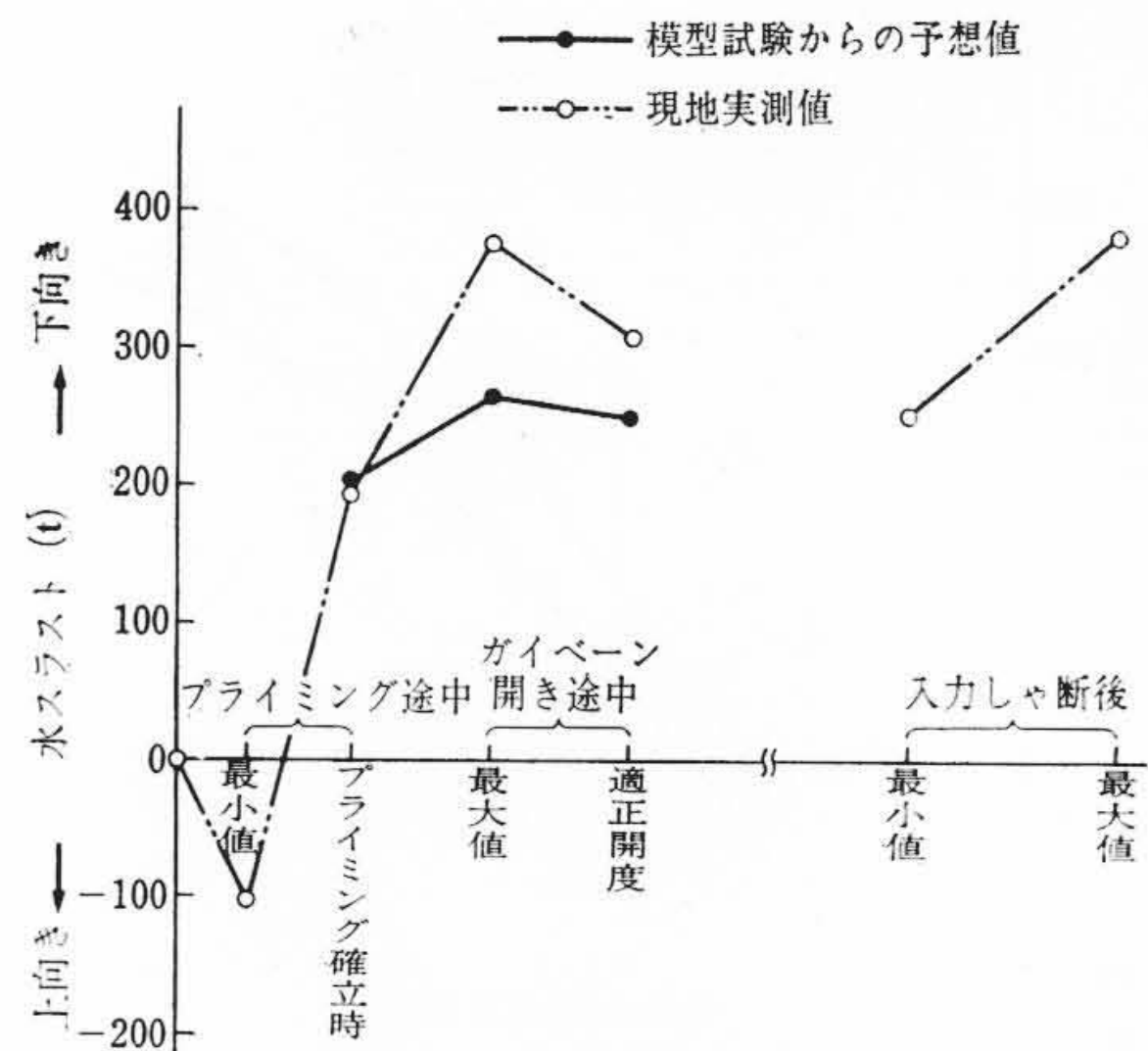


図 12 ポンプ運転時の水スラスト測定結果

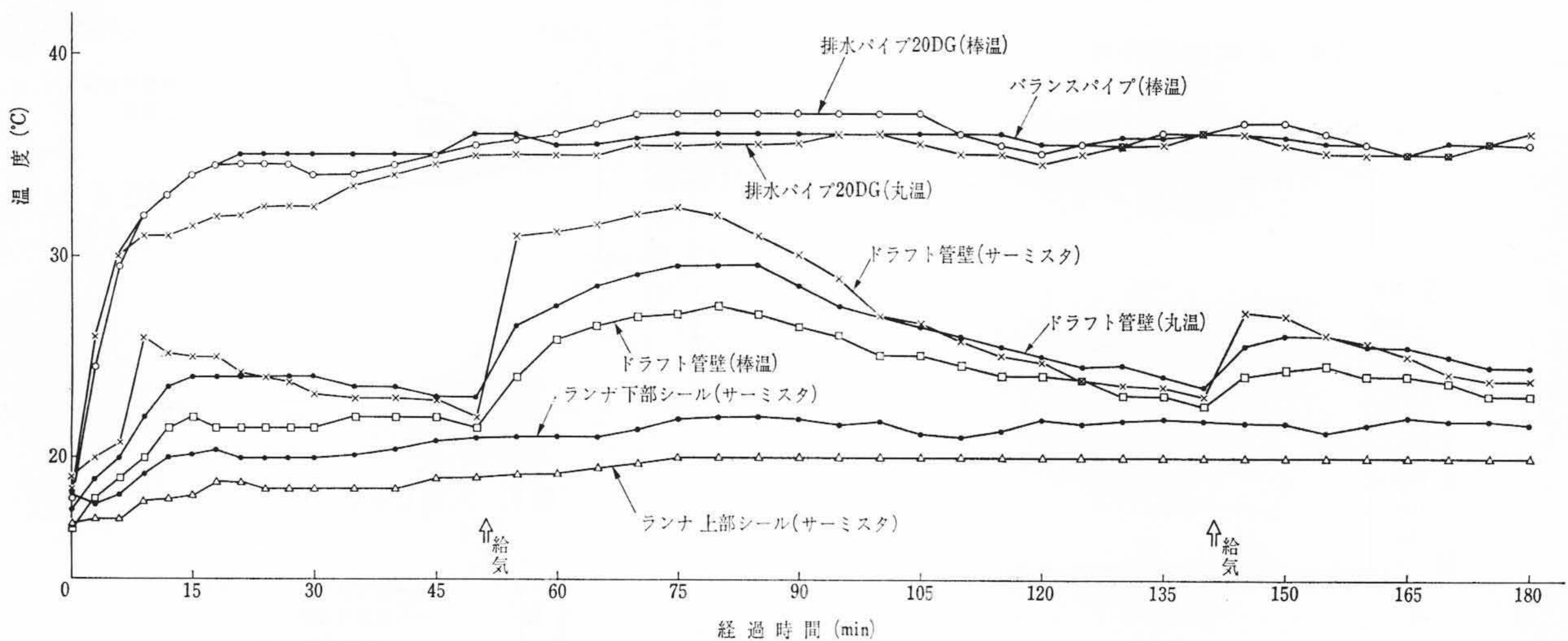


図 13 スピニングスベア運転結果

示すとおりで、模型試験からの予想値とよく一致している。各落差の最大値は、サーボモータ油圧に換算して、しまり勝手方向に 7 kg/cm^2 以下であり、摩擦力は $3 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ であった。

3.7 水スラスト測定試験

水スラストは、発電電動機のスラスト軸受設計の基礎となるもので、その値を正確に予想することは、ますます大容量化する水車およびポンプ水車にとって非常にたいせつである。

本ポンプ水車では、FM 式軸ひずみ測定装置⁽⁴⁾および発電電動機下部エンドブラケットのたわみ測定の 2 方法により水スラストの測定を行なった。その結果は図 11 および図 12 に示すとおりである。その結果、水車負荷しゃ断時、ポンプ起動および入力しゃ断などの過酷な状態を含めたすべての運転状態において、水スラストが、スラスト軸受の設計値を越えていないことが確認された。また、模型試験の予想値ともほぼ一致した傾向を示している。

3.8 スピニングスベア運転

本運転は、ランナおよびドラフトパイプ内の水面を圧縮空気により押し下げ、水車方向の空転状態で待機し、系統の負荷急変時に排気し、ガイドベーンを開いて発電するものである。水面押下げに際しては、規定回転速度の状態でガイドベーンを全閉し、水面押下げをするため、ランナの遠心力により内部圧力が高められていること、

およびガイドベーンサイドギャップからの漏水とともに、ランナ回転に伴う旋回流により、給気した空気が放水路側に持ち去られて、給気場所ならびに給気方法によっては、水面押下げ不能となる可能性があるなど、停止状態での水面押下げに比べて技術的な困難が予想された。しかしこれは、ランナ中心上部とドラフトパイプ管壁より同時に急速給気することにより、約 30 秒で水面を押し下げること成功した。

空転時には、ランナ空転損失により内部温度が高められるため、回転部と固定部のシール面に冷却水を注水し、また、異常温度上昇に備えて保護装置およびこれに関連するシーケンスについても、じゅうぶんな対策と検討を加えた。

本ポンプ水車での試験結果を示したのが図 13 である。また、空転時にはポンプ起動時と同様に、入口弁を全閉してガイドベーンサイドギャップからの漏水を軽減し、空転損失を減少せしめる方式としている。

4. 発電電動機

4.1 仕様

発電電動機関係の仕様は表 1 に示すとおりである。

表1 仕様一覧表

	発電電動機	誘導電動機	励磁機
形式	VTFK3W-RD	VEFB ₀ -DRQ15	VEFB ₀ -SPKK
出力 (kW)	250,000 (kVA/ kW)	14,000	600
電圧 (V)	16,500	6,600	440
電流 (A)	8,750/8,910	1,840	1,360
周波数 (Hz)	60	60	—
回転速度 (rpm)	225	225	225
極数	32	28	12
力率	0.95/1.0	—	—
要求 GD ² (t-m ²)	14,500	—	—
無拘束速度 (%)	145	145	145
時間定格	連続	15 分 定格	連続

4.2 発電電動機の特徴

4.2.1 直結電動機始動

揚水時の始動については後述するが、本揚水発電所には直結電動機始動方式が採用され、始動用誘導電動機が上部案内軸受と発電電動機回転子の間に設置されている。このため励磁機の上部には誘導電動機二次巻線と外部に設けた液体抵抗器を結ぶ高圧スリップリングが接続されている。

4.2.2 上部軸の剛性

上部軸は誘導電動機の設置とあいまって軸長が相当長くなるので、これを途中でフランジで接続する方式とすると、どうしてもフランジ面の狂いによる振れおよび継手による剛性の低下は避けられない。このため本機の上部軸は誘導電動機用スリップリング・励磁機・誘導電動機軸を通して一体溶接構造としてある。

4.2.3 支持部の剛性

高速大容量機になると固定子の高さも高くなり、上部案内軸受部から見た支持点の総合バネ定数が振動の観点から要求される値に対して余裕が少なくなってくる。

支持点の総合バネ定数がある値以下になると、固有振動数は支持部の剛性によって規定され、いくら軸の剛性を増しても所要の振動特性を得られなくなってくる。この傾向は高速機になるほど顕著になるので、振動面からみて安定した高速大容量機を製作するためにはいかにして支持部の剛性を増すかということが一つのかぎとなるであろう。

本機の下部案内軸受部の剛性はじゅうぶん高いが、上部案内軸受部の剛性は従来の構造では要求される値に対して余裕が少ないので、これを補う意味で上部ブラケットアームを半径方向に基礎から突っ張らせている。上部ブラケットは機械の温度上昇によって半径方向に熱伸びを生じ（現地実測結果は約 1 mm の半径方向変位を生ずる）上部ブラケットおよび基礎に力が加わることになるので、この突張りの剛性は振動を抑制するにじゅうぶんな剛性を有するとともに、ブラケットおよび基礎に無理な力を加えないものでなければならない。この要求を満たすために厚さ 20 mm の板ゴムが突張りの中に組み込まれている。

この結果、上部軸の一体化とあいまって軸振れ、運転中の振動ともじゅうぶん小さな値におさまっている。

4.2.4 ロータリム焼ばめ

直径の大きな高速回転のロータリムになると回転中にスパイダとの間に相当な間隙(かんげき)を生ずることになる。一般にはたとえ間隙が生じてスパイダアームの切線方向の剛性によってロータリムを心に保持することができるが、大容量機になるとこれだけでは剛性が不足して励磁による磁気吸引力などが加わることにより、もはや心を保つことが困難となる場合がある。これはロータリムとスパイダの相対変位、スパイダアームの切線方向の剛性、ロータリムの円環としての剛性、回転速度および加えられる

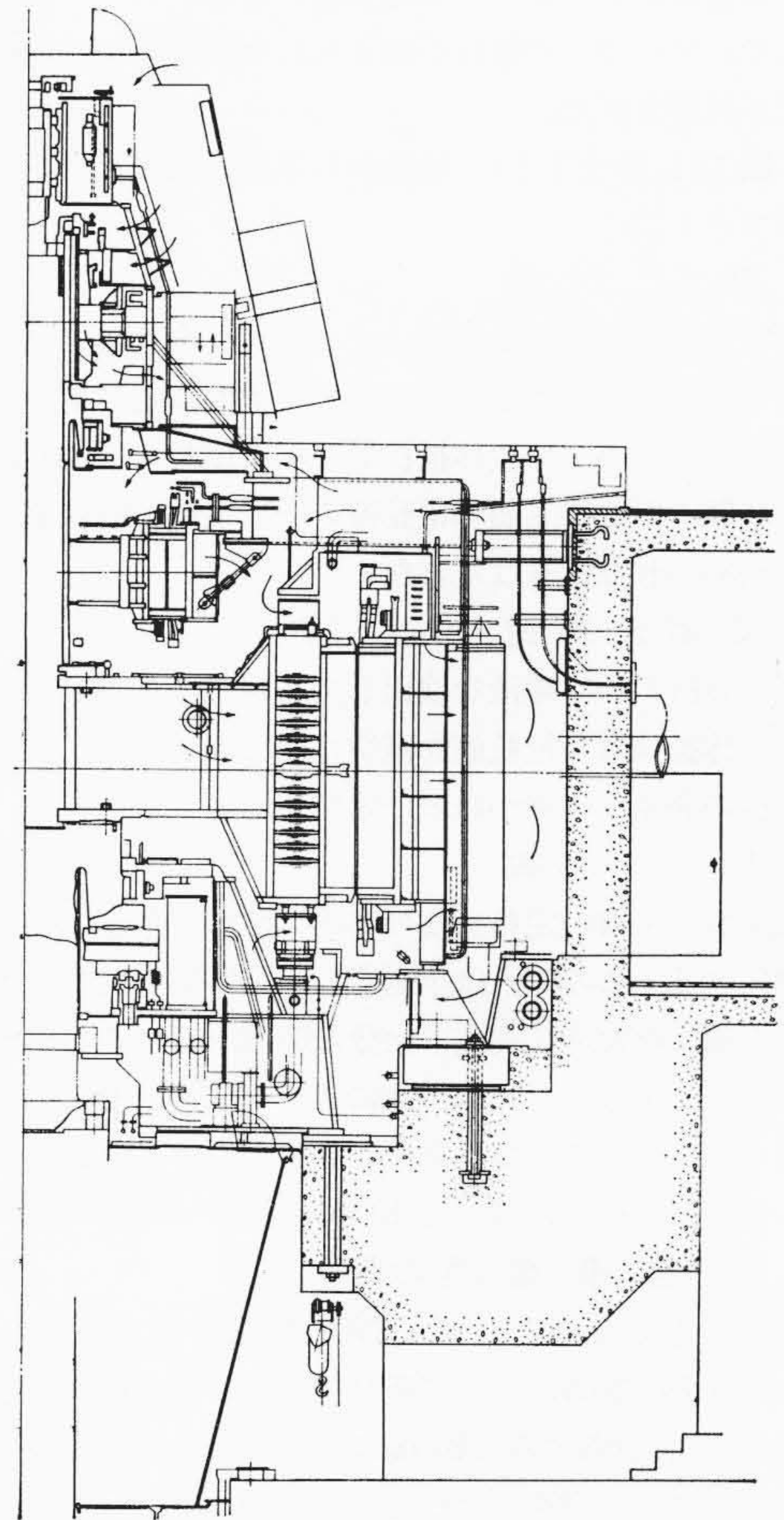


図14 発電電動機構造図

外力の大きさによって決まってくることであるが、これらを検討の結果、本機はロータリムを焼ばめしてロータリムとスパイダの間に回転中間隙が生じないようにしてある。

4.2.5 リングベース

固定子と基礎との間にはリングベースを採用している。リングベースとすることにより短絡時の基礎のせん断応力は 7 kg/cm² 以下に、また面圧は 45 kg/cm² 以下に押えられている。

4.2.6 外観

図14は発電電動機・始動用誘導電動機・励磁機関係の構造図を示したものである。

5. 揚水始動時の速度制御

5.1 速度制御の概要

揚水式発電所における発電電動機の始動方式としては、われわれが多数の経験を有する制動巻線による方法、小水車または同程度水車駆動の発電機による同期始動の方法などがあるが、本喜撰山発電所は単機容量がわが国既設機に比べて約 2 倍にも及ぶ世界的にも最大級の設備であるので、電動駆動の発電機による同期始動方式と直結電動機始動方式が検討された結果、後者の方式、すなわち巻線形誘導電動機を発電電動機の上部に付設し、その二次抵抗器を制御して加速および系統並列を行なうというわが国はじめての方式が採用された。

この方式の成否は系統並入時に誘導電動機を速度をいかにうまく制御するかにかかっているが、電動機に速度に影響を与える因子としては、液体抵抗器の電極の位置・電解液の濃度・電解液の温度・ポンプ水車および発電電動機の機械損・制御方法・操作機構・系統

の電圧・周波数というように多種多様のものがあり、これらの因子の影響について一つ一つ検討が加えられた結果、次に述べるような制御方式が採用された。

制御は図 15 に示すように、始動から系統並入までを 5 段階に分けることができる。

5.1.1 始 動

誘導電動機の二次側にスリップリングを介して接続された液体抵抗器の抵抗値を最大としておき、一次側に定格電圧を印加して始動する。したがって液体抵抗器は抵抗値最大の位置においていかなる状態においても誘導電動機の一次電流が許容値を越えないように決められなければならない。

5.1.2 定電流加速 (① ② の期間)

誘導電動機の一次電流を検出して一定の上下限の幅の中に入れながら液体抵抗器の抵抗値を減少させて加速する。この期間は誘導電動機の発生トルクがほぼ一定である。

5.1.3 励 磁

回転速度が主機の定格速度の 95% 程度に達した点で発電電動機を励磁する。この時点は早過ぎると発電電動機の鉄損および励磁関係の損失のために加速に余分な時間を要するし、遅過ぎると界磁回路の時定数のために、次に述べる揃速 (せんそく) にはいった時点でじゅうぶんなる電圧を発生し得ずに制御上支障をきたす。したがって揃速にはいる 10 秒ほど前の時点が望ましい。

5.1.4 揃 速 準 備 (③ の期間)

定格速度近くに達した点で揃速準備を開始するが、これは 5.1.2 の定電流制御によって流体抵抗器の抵抗値が小さくなっており、このまま放置すると図 16 に示すように回転速度が定格速度を上まわるので、揃速にはいる前の段階で抵抗値をある一定値だけ大きくして揃速にはいるからの操作量を少なくしようとするものである。

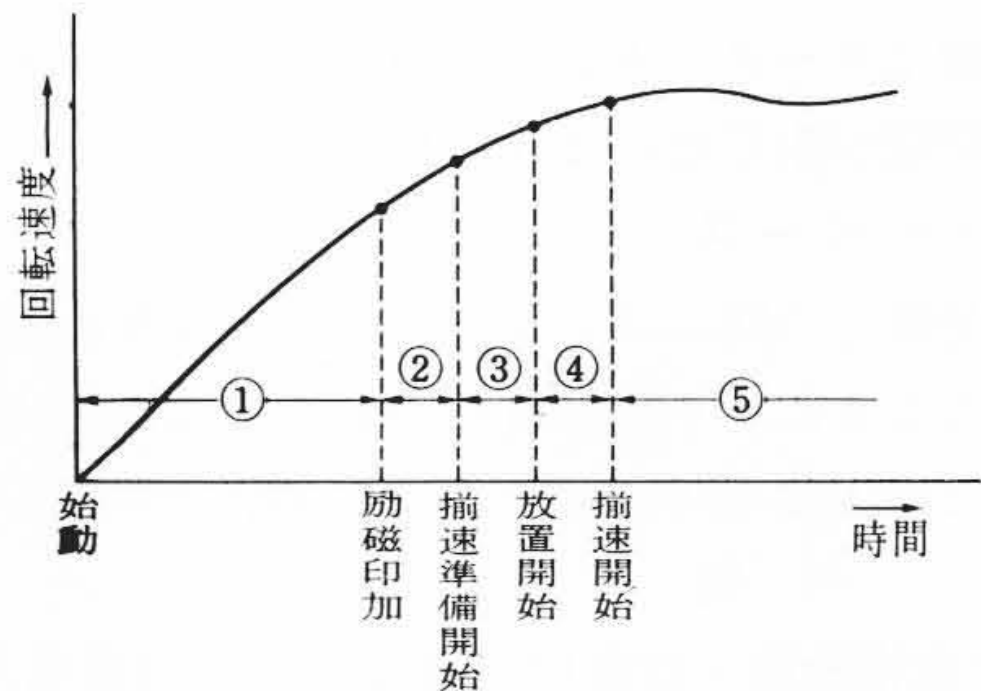


図 15 速度制御の概要

揃速準備における抵抗値の操作量は電極を操作する時間を制御するのが簡単であるが、この時間は定電流加速時の誘導電動機の発生トルク・ポンプ水車および発電電動機の損失トルク・液体抵抗器の電解液温度・電極の操作速度などに影響されることはもちろんである。

5.1.5 放 置 (④ の期間)

揃速準備を終了して揃速にはいる前の無制御の期間であって、揃速準備の段階における状態変化が落ち着くのを待つものである。

5.1.6 揃 速 (⑤ の期間)

発電電動機の発生電圧と系統電圧との周波数差を検出して液体抵抗器の抵抗値を制御し、周波数差が所定の値以下になるようにする。この抵抗値制御は、電極を操作させる信号パルスの時間間隔を周波数差の大きさに逆比例して自動調整させるという方式をとっている。

5.1.7 系 統 並 入

発電電動機の発生電圧が規定値以上になれば自動電圧平衡装置により系統との平衡をとり、また自動同期投入装置により発電電動機と系統の電圧差・周波数差が規定値以内であることを確認して最適位相で系統並入を行なう点はほかの水力発電所における系統並入と同様である。

5.1.8 制御ブロック図

以上述べた揚水始動時の制御方式をブロック図で示すと図 17 のようになる。

5.2 速度制御の計算

誘導電動機駆動期間中における運動方程式は次式で表わされる。

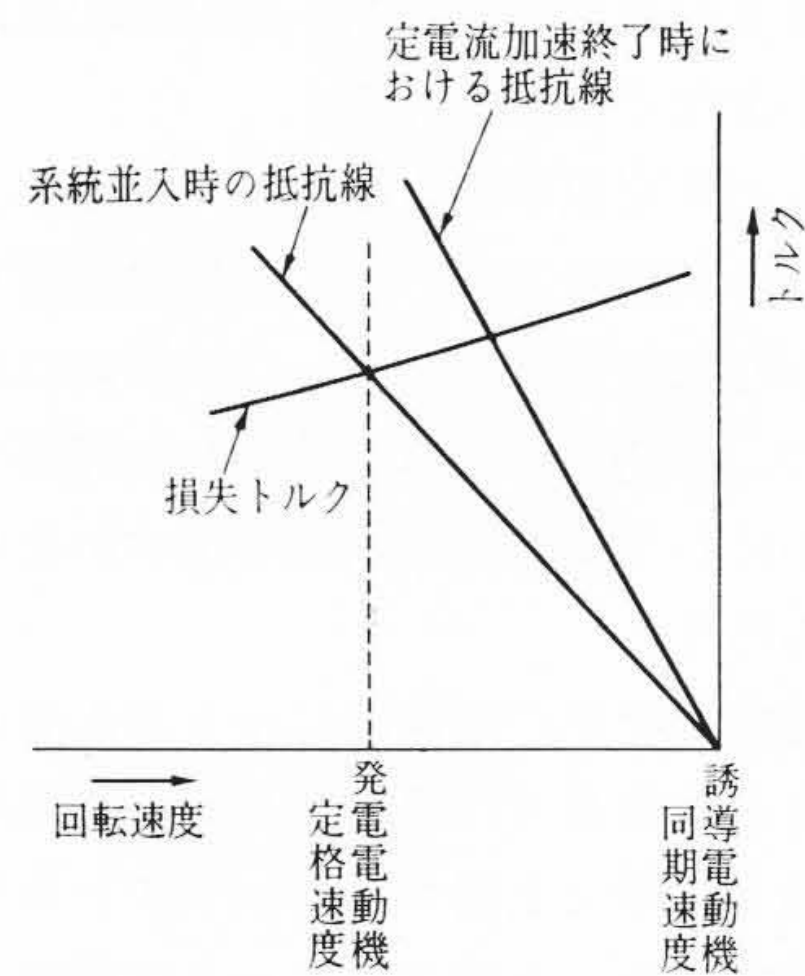


図 16 揃 速 準 備

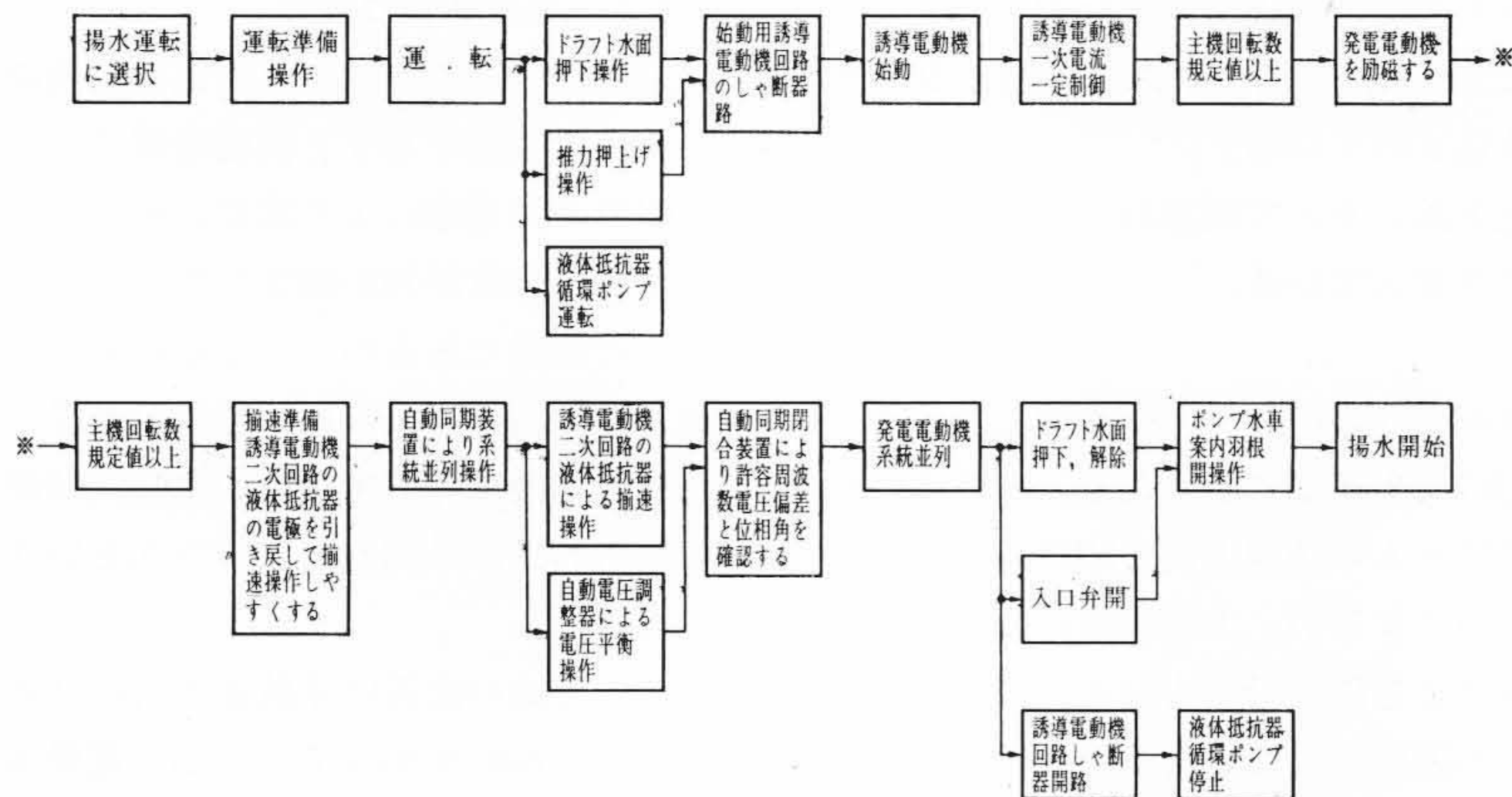


図 17 直結誘導電動機始動方式制御ブロック図

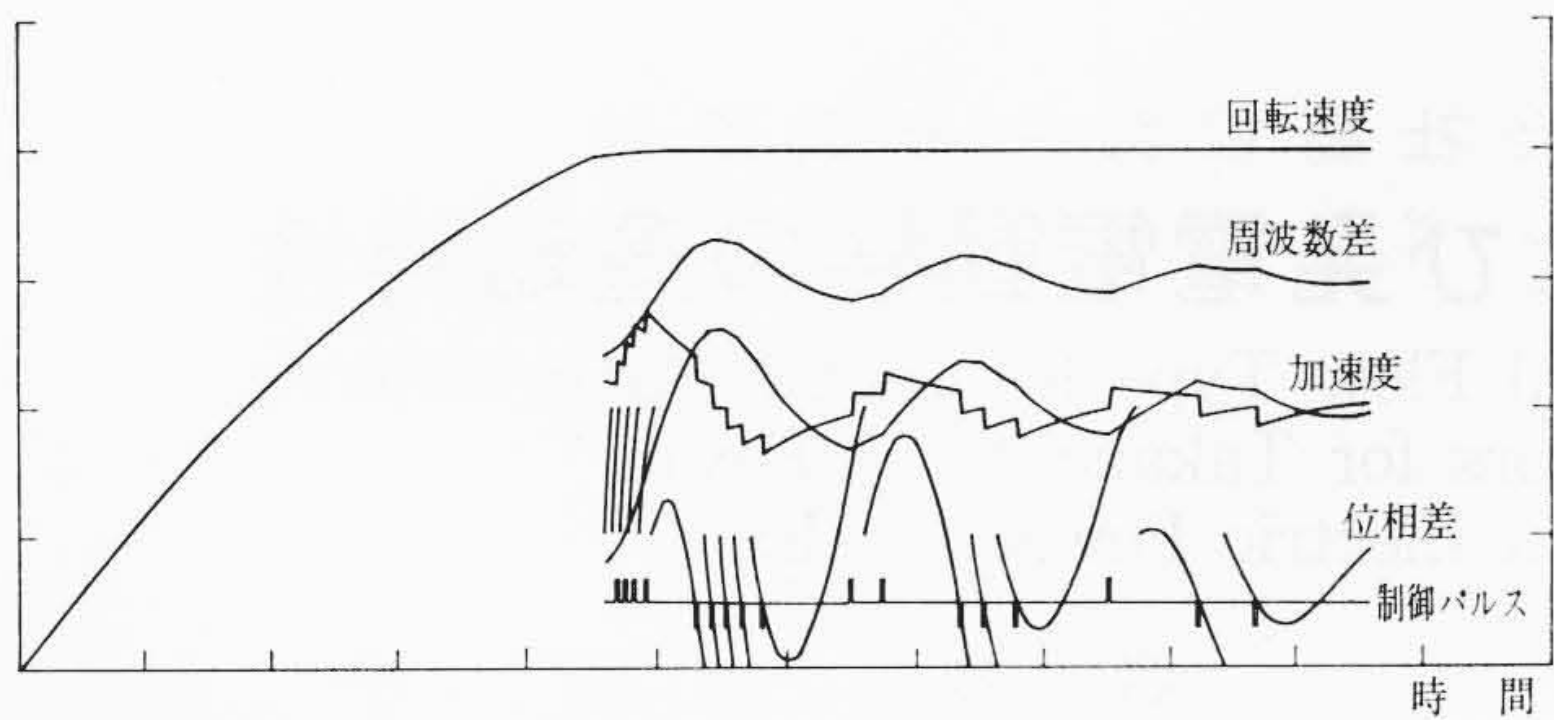


図 18 速度制御計算結果の一例

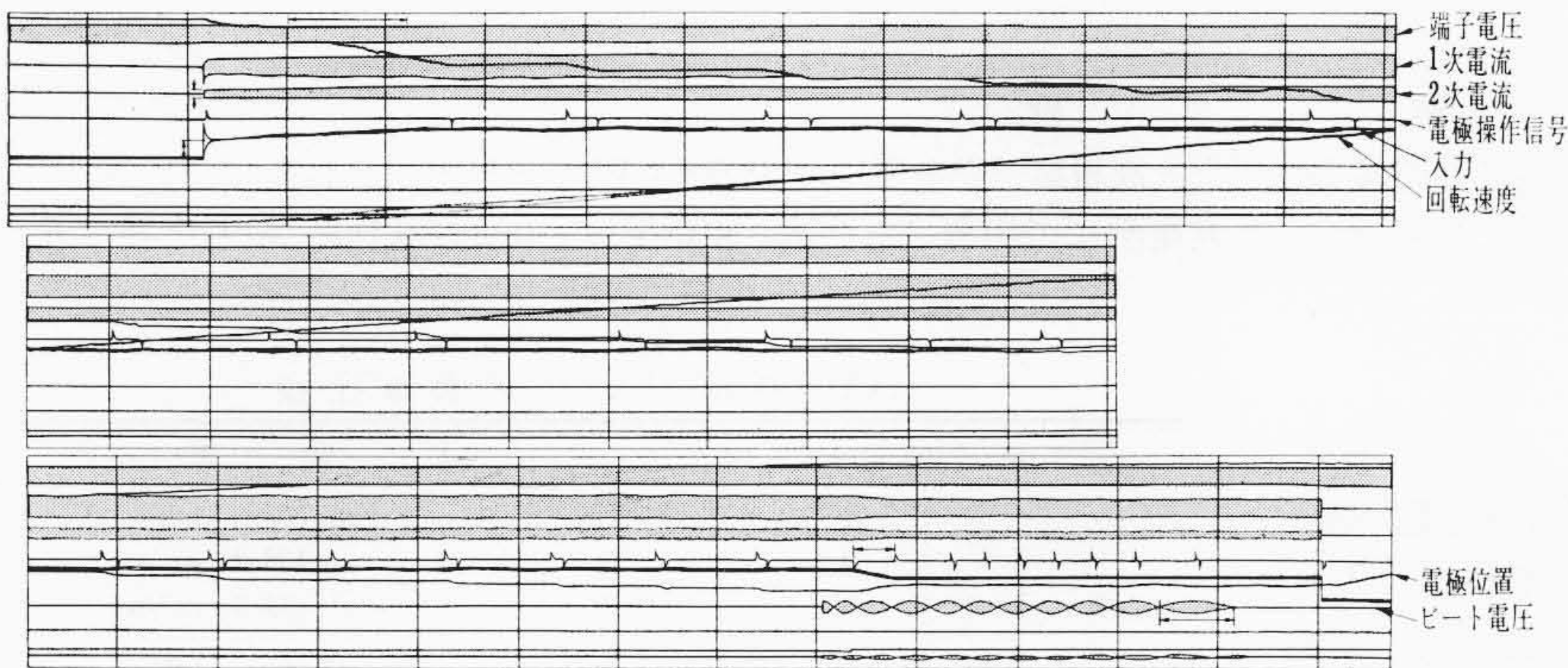


図 19 速度制御現地試験結果の一例

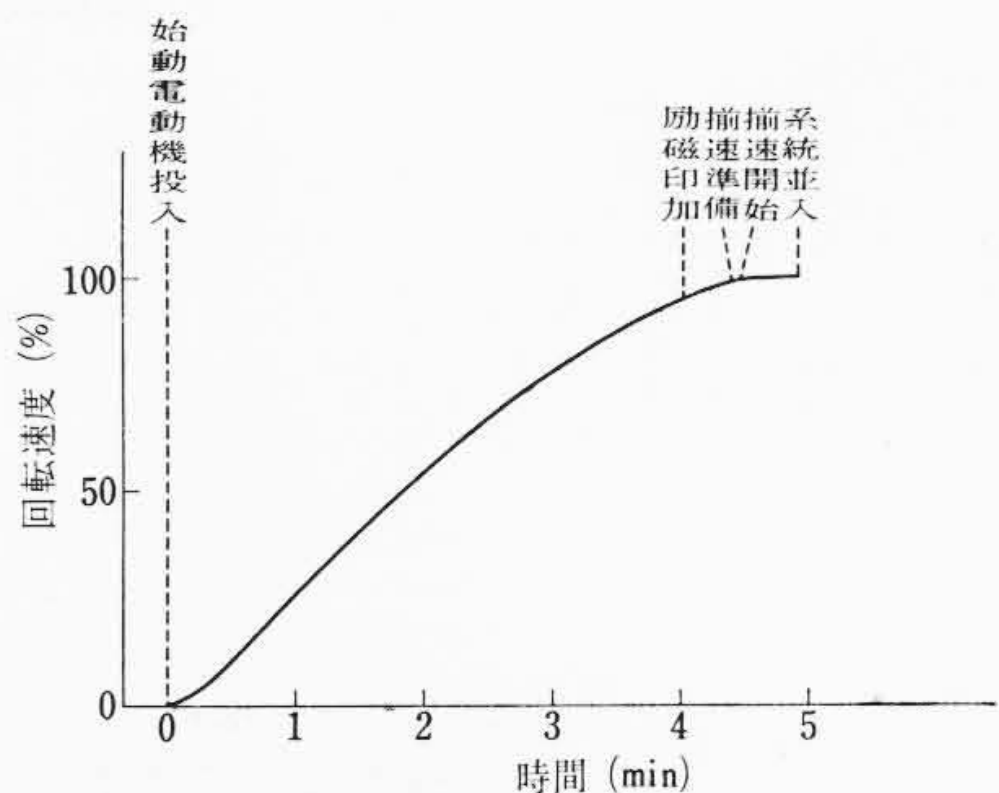


図 20 速度上昇

表 2 現 地 試 験 一 覧

試験番号	ポンプ水車			液体抵抗器液温 (℃)	誘導電動機電流整定値	試験の目的	始動から並入までの時間 (分 秒)	揃速所要時間 (分 秒)	備 考
	20DG	WA36	ケーシング水圧						
23	開	閉	標準	32	標準	予備試験	4.58	0.33	空並入のみ 同期装置整定不具合
24	開	閉	標準	35	標準	標準状態	5.19	1.05	
25	開	閉	標準	37	標準	標準状態	4.52	0.32	
26	開	閉	標準	40	標準	標準状態	4.41	0.24	
27	開	閉	標準	29.5	小	低電圧模擬	5.53	0.38	
28	開	閉	標準	34	大	高電圧模擬	4.07	0.05	} 系統周波数のふらつきにより時間が延びている
29	開	閉	大	32	標準	ケーシング水圧大	4.57	0.33	
30	閉	閉	大	34	標準	損失トルク大の模擬	6.05	1.20	
31	開	閉	小	33	標準	ケーシング水圧小	7.28	3.18	
32	開	開	標準	34	標準	損失トルク小の模擬	6.21	2.10	
33	開	閉	標準	36	標準	標準状態	4.55	0.34	

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2H} (T_{IM} - T_L)$$

ここに、 n : 回転速度 (p.u)
 H : 単位慣性定数 (kW・s/kVA)
 T_{IM} : 誘導電動機の発生トルク (p.u)
 T_L : 損失トルク (p.u)
 t : 時間 (s)

定電流加速中の誘導電動機の発生トルクは一定として扱うことができるが、揃速準備以後は液体抵抗器の電極の位置および電解液温の関数として表わされるので、前に述べた制御の方法に従って時々刻々変化する。

図 18 は計算機の描いた計算結果の一例を示したものである。

5.3 運転試験結果

現地試運転時に種々条件を変えて合計 11 回の試験を行ない、そのなかで誘導電動機電源電圧の変動・損失トルクの変動などの影響を検討したが、いずれも計算結果とよく一致し、じゅうぶん満足できる精度と迅速さをもって系統への並入を完了することが確認された。

試験の内容は表 2 に、また試験番号 25 に対するオシログラムは図 19 に示すとおりである。図 20 は標準状態における始動時の時間

的な関係を示す実測値であって、すみやかに系統へ並入されていることがよくわかる。

6. 結 言

関西電力株式会社喜撰山発電所用ポンプ水車および発電電動機の運転特性ならびに運転制御につき概要を述べた。本ポンプ水車および発電電動機は今後ますます大容量化してゆく揚水発電設備の実績として高く評価されるものである。特にスピニングスベア運転方式を採用したこと、および記録的な高落差における水圧による、水スラストの測定を行なって、発電電動機のスラスト軸受容量の確認がなされたことなど、種々の貴重な資料が、今後のポンプ水車、発電電動機的设计、製作に果たす役割は大きいものと確信する。

参 考 文 献

- (1) 豊島：電気評論 1416 (昭 44-12)
- (2) 豊島：電気評論 771 (昭 45-6)
- (3) 手島ほか：日立評論 46, 1902 (昭 39-11)
- (4) 佐野ほか：OHM 40 年 1 月 p. 32
- (5) 池田ほか：日立評論 52, 679 (昭 45-8)
- (6) 山口：日立評論 46, 1920 (昭 39-11)