

四国電力株式会社穴内川発電所納
13,500 kW 可動翼斜流ポンプ水車および
14,500 kVA 交流発電電動機
 13,500 kW Movable Blade Diagonal Flow Reversible Pump-Turbine and
 14,500 kVA A. C. Generator-Motor

井 上 久 男* 高 島 恒 男*
 Hisao Inoue Tsuneo Takashima
 磯 部 昭 二* 山 部 正 博**
 Shōji Isobe Masahiro Yamabe

内 容 梗 概

四国電力株式会社穴内川発電所納 13,500 kW 斜流ポンプ水車および発電電動機は本格的な揚水発電所用として計画されたわが国最初のものである。昭和 35 年以降四国電力株式会社と共同研究を重ね、その成果を総合して完成された。

昭和 39 年 5 月水車運転、同 6 月ポンプ運転が開始され、7 月官庁試験を終了して、営業運転にはいつている。模型試験による性能研究、ポンプ起動方式、揚水量制御方式、斜流ポンプ水車や発電電動機の構造など新製品として多くの特長を有している。本文は穴内川発電所およびその主機の概要を概述したものである。

1. 緒 言

可動翼斜流ポンプ水車はカプラン水車のように、変落差、変揚程、変流量、変揚水量に対して、効率低下の少ない、平坦なすぐれた効率特性を有している。ランナベーン角度とガイドベーン開度とを同時に制御することにより、揚程一定で、効率をあまり低下させずに揚水量を変化できる。

この特長を利用して、その発電所の属する水系を経済的に運用することができる。また、最大揚水量を制限することによって、可逆ポンプ水車でありながら、水車専用機の回転数に近い高い回転数を選定したり、吸出高を小さく選定して、経済的な水力主機の仕様を選定することができる。以上のような長所を有しているため、フランス形ポンプ水車より低い落差領域で、今後ますます採用されることが期待される。

本水車は、本格的な揚水発電所用として計画されたわが国最初の可動翼斜流ポンプ水車である。計画当初において、カプラン水車、フランス形ポンプ水車、および斜流ポンプ水車を採用した場合の穴内川水系の総合的な発生電力量、ポンプ水車、発電電動機の製作費、工事費などを比較検討した結果、斜流ポンプ水車が採用された。

昭和 35 年 8 月以降四国電力株式会社と共同研究を重ね、性能、構造、制御面にわたる総合研究が行なわれ、製品は昭和 38 年 8 月工場組立を完成し、昭和 39 年 5 月運転開始の運びとなった。

ここに、穴内川発電所用可動翼斜流ポンプ水車および発電電動機の概要を紹介する。

2. 発電所計画概要

穴内川発電所は吉野川水系穴内川上流に設けられた穴内川貯水池よりその下流に設けられた繁藤調整池に水を落して発電運転を行ない、余剰電力時に繁藤調整池より穴内川貯水池に揚水運転する。また豊水期に繁藤調整池より穴内川貯水池に揚水して繁藤調整池のあふれを救済する。繁藤調整池の水は、高知市に注ぐ国分川に分水して、新設された新平山発電所 (41,500 kW) および新改第一発電所 (8,700 kW) に利用される。

* 日立製作所日立工場
 ** 日立製作所日立研究所

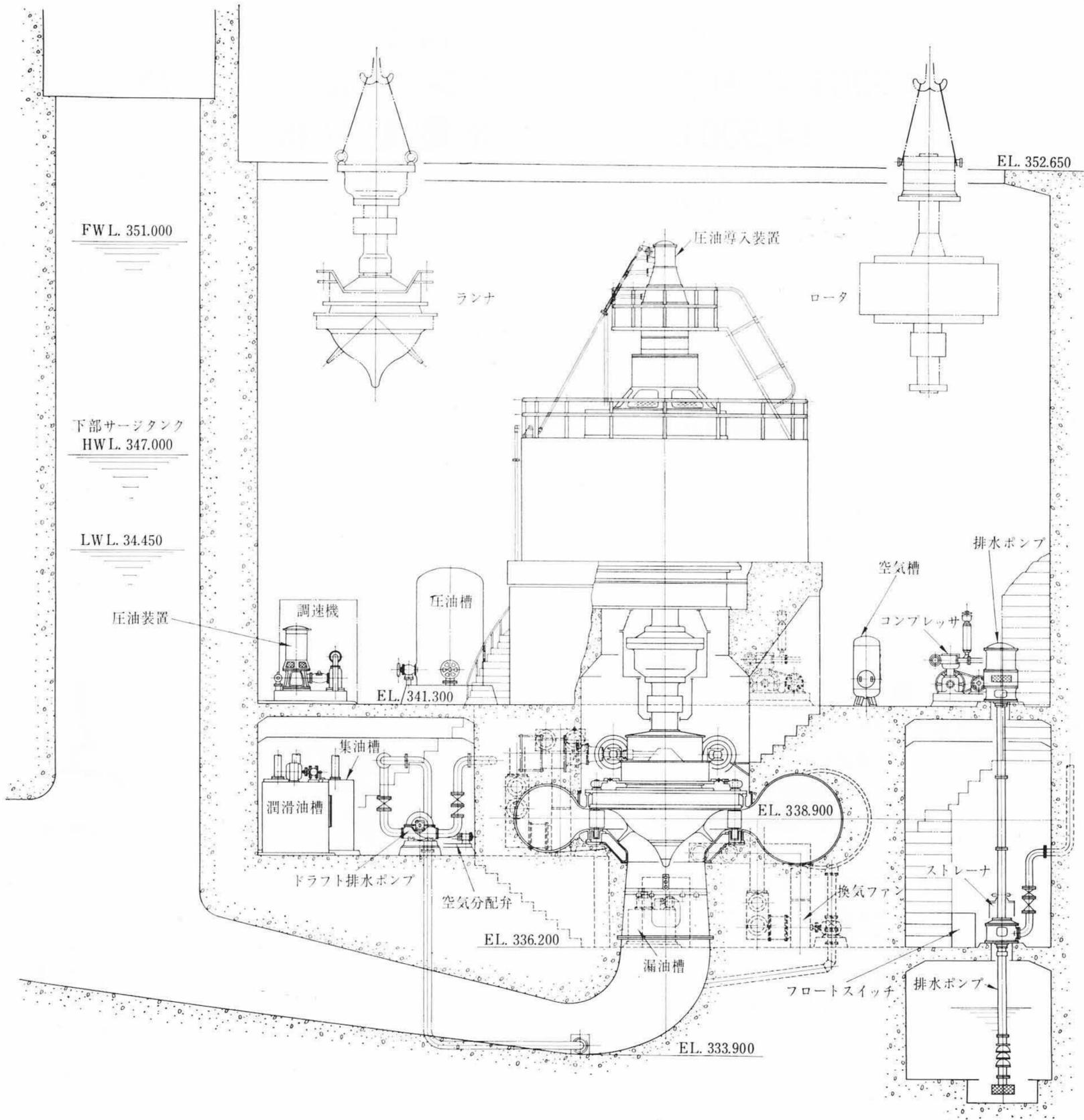


第 1 図 発 電 所 位 置 図

穴内川貯水池のダムは、高さ 70 m の中空式越流形ダムで、その右岸より取水され、長さ 1,175 m の圧力トンネルにより発電所に導水され、水車発電機 1 台によって最大出力 12,500 kW の発電を行なう。またその下流には、高さ 11.7 m の重力式越流形ダムの繁藤調整池が設けられている。

2.1 発電所計画仕様

取水川名	吉野川水系穴内川		
穴内川貯水池 (上部貯水池)	有効貯水量	43.3 × 10 ⁶ m ³	
	満水標高	418 m	
	利用水深	40.0 m	
繁藤調整池 (下部貯水池)	有効貯水量	193 × 10 ³ m ³	
	利用水深	2.0 m	
使用水量	発電 最 大	22.0 m ³ /s	
	常 時	4.35 m ³ /s	
揚水	最 大	14.3 m ³ /s	
	有 効 落 差 発 電 最 高	69.5 m	



第2図 据付断面図

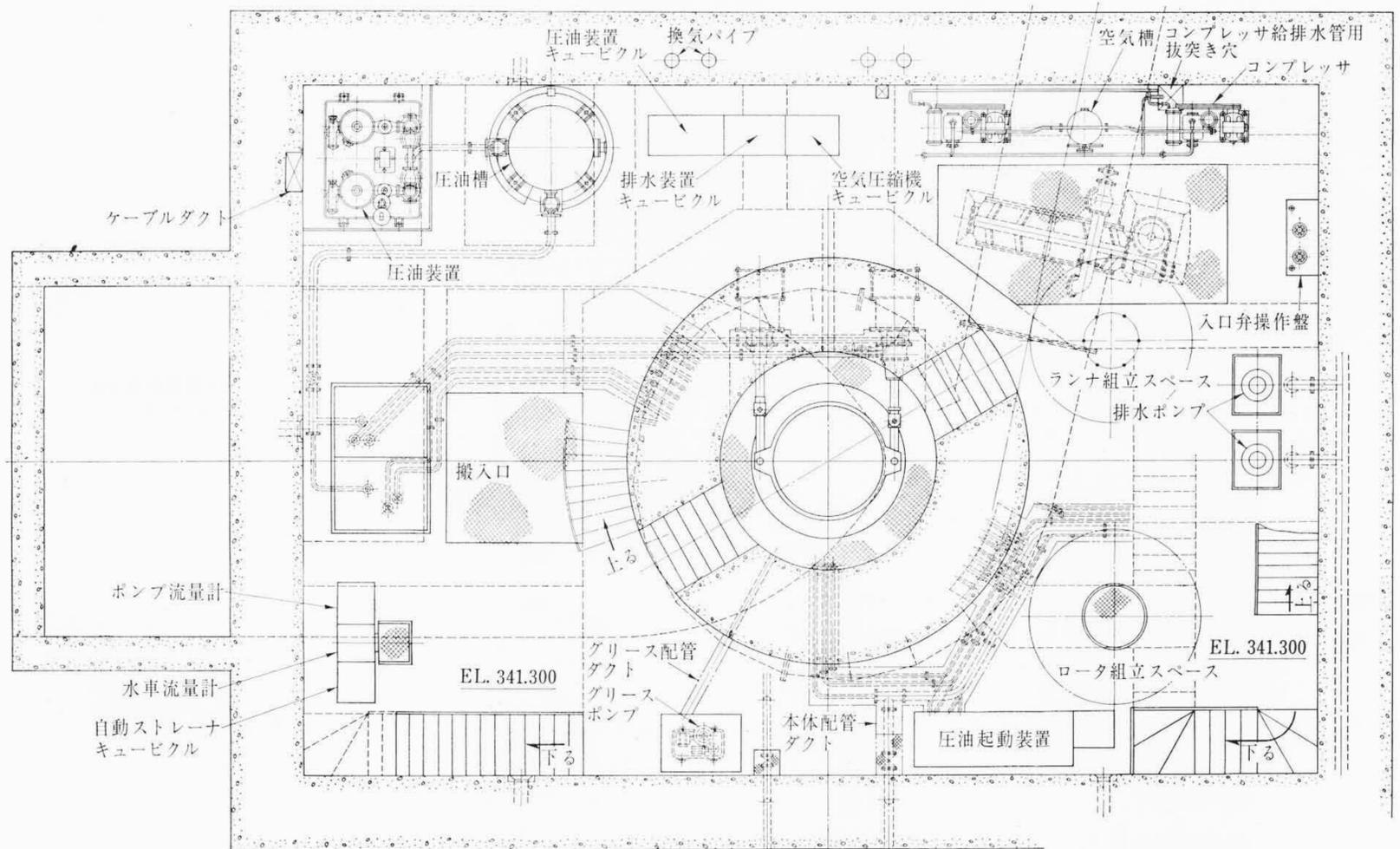
揚水	常時	52.25 m
	最低	29.0 m
	最高	75.0 m
	最低	33.0 m
発電所最大出力	最大	12,500 kW
	常時	1,600 kW
発生電力量	年間	24,677 MWh
ダム	形式	中空重力式ダム
	高さ	65.6 m
	長さ	251.9 m
導水路	形式	円形圧力トンネル
	内径	3.2 m
	全長	1,175 m
調圧水槽	形式	差動調圧水槽
	水槽内径	13 m
	ライザー内径	3.0 m
	高さ	57.8 m

水圧管路	形式	軟鋼板溶接鉄管
	内径	3.2~2.1 m
	全長	86.5 m

2.2 建屋および機器の配置

地表の EL. 352.650 に対して、水車中心は EL. 338.900 に設置された半地下式の発電所となっている。斜流ポンプ水車は温度変化や水圧軸推力変化によって、主軸が変位するとランナベーン外周間げきが大きく変化する。このランナベーン外周間げき変化を極力小さくするように、コンクリートバーレル単床式が採用されている。すなわち主軸の線膨張係数とコンクリートバーレルの線膨張係数はほとんど等しい値であるから、主軸およびコンクリートバーレルの水車室温変化による変位は相殺される。また水圧軸推力を支持するコンクリートバーレルは断面積が大きいため、水圧軸推力の変形は主軸や発電機上部エンドブラケットの変位に比較して無視される程度となる。したがって、二床式に比較して、コンクリートバーレル単床式はランナベーン外周間げき変化が小さくなる。

一般に、ポンプ運転のほうが、水車運転に比較して、キャビテーション



第 3 図 据 付 平 面 図

が発生しやすいので、可逆ポンプ水車についてはポンプキャビテーション性能に基づいて、水車中心、吸出高が決定される。斜流ポンプ水車の場合、ランナペーンとガイドペーンを同時に制御することによって、揚程一定で揚水量を変化させることができる。したがって、回転数が決定されている場合、最大揚水量は吸出高の関数として決定される。吸出高を増すとポンプの運転範囲が広くなり、最大揚水量は増すが、それに伴って掘さく量が増し、建設費が増加する。したがって最大揚水量の増加による穴内川、国分川水系の総合的な年間発生電力量の増加と建設費の増加を比較検討する必要がある。電子計算機による同水系の総合的な経済計算をもとにして、吸出高は回転数、ランナ直径、採用模型ランナなどとの相対関係が検討された。その結果、水車運転時の最大流量 22.0 m³/s に対して、最大揚水量は約 13 m³/s 程度に制限してもよいことがわかった。したがって、水車のケーシング中心を基準とした吸出高は -5m、水車のケーシング中心は EL. 33.900 に決定された。

圧力導水路の全長は 1,175 m と長いので、導水路と水圧鉄管との間に差動調圧水槽が設けられている。その下流の水圧鉄管の水平部の末端が、ポンプ入力遮断時またはポンプトリップ時に最も負圧になりやすいので、電子計算機によって、ポンプ入力遮断時およびポンプトリップ時の水圧変動を計算して、その部に負圧が発生しないようにガイドペーンの閉鎖時間が決定されている。その計算例を第 19 図および第 20 図に示す。水車およびポンプの起動停止時に、ドラフトチューブ内に水圧変動や負圧が発生しないように、放水路側にも調圧水槽が設けられている。

揚水式発電所は流量計、補機操作キュービクルなど多くの補機が設けられているので、水車室は比較的広く、操作しやすいように配置されている。

3. 13,500 kW 可動翼斜流ポンプ水車

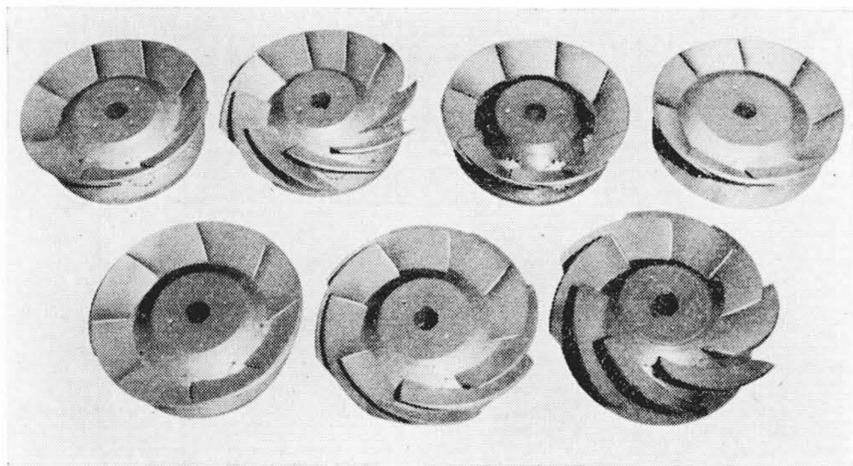
3.1 形式の選定

本揚水発電所の設計においては、上部穴内川貯水池の季節的調整方法を電力系統経費が最小になるよう規則化し穴内川貯水池、繁藤

調整池のあふれ、国分川の最大、最小流量制限などの条件を加味し、水力および火力余剰電力の使用規則などをまとめて計数形電子計算機のプログラムを作成した。過去 10 年間の毎日の流量および将来の電力需要を想定したものをもとにして、毎日を昼間、夜間、ピーク時の三つに分け、純発電、複合揚水（ダムあふれ救済、余剰電力時にのみ揚水する）、日調整揚水（毎日夜間に揚水する）の三つの場合について、運転のシュミレーション計算を行なった。その結果を総合して、全水系の発生電力量、穴内川発電所の落差、揚程、流量、揚水量などの使用条件の分布を算出した。さらにその計算結果を利用して水車およびポンプ効率、吸出高に基づく建設費の変化を総合した別のプログラムを作成し、斜流ポンプ水車、フランシス形ポンプ水車、カプラン水車などに対する経済比較を行なって最終的に斜流ポンプ水車が採用されることになったのである。また、このプログラムを利用して、模型試験結果に基づいて、回転数、ランナ直径、吸出高などが決定された。

3.2 ポンプ水車仕様

水 車			
有効落差	最 高		69.5 m
	基 準		68.0 m
	最 低		29.0 m
水車出力	最高落差時最大		13,500 kW
	基準落差時最大		13,220 kW
	最低落差時最大		3,670 kW
	使用水量	最高落差時最大	22.0 m ³ /s
	基準落差時最大	22.0 m ³ /s	
	最低落差時最大	17.0 m ³ /s	
回 転 数			360 rpm
比 速 度			209.4 (m-kW)
形 式			VDR-1RS
台 数			1 台
回 転 方 向	発電機側より見て時計方向		
最大速度変動率			30 %



(上側左より、#1 ランナ、#2 ランナ、#3 #5 ランナ、#4 ランナ、
下側左より #6 ランナ、#7 ランナ、#8 ランナ)

第4図 模型水車ランナ

ケーシング中心最大水圧	100 m 以下
発電機に要するGD ²	220 t-m ²
高無拘束速度	936 rpm
ポンプ	
総揚程	最高 75 m
	基準 64 m
	最低 33 m
ポンプ入力	最高揚程時最大 10,550 kW
	基準揚程時最大 9,650 kW
	最低揚程時最大 5,430 kW
揚水量	最高揚程時最大 9.8 m ³ /s
	基準揚程時最大 12.5 m ³ /s
	最低揚程時最大 14.0 m ³ /s
回転数	360 rpm
比較度	46.7 (m-m ³ /s)
吸出高	-5 m

本発電所の特長は変落差・変揚程範囲が非常に大きいことである。すなわち、最低落差と最高落差の比、これを変落差割合と呼ぶと、

$$\text{変落差割合} = \frac{29}{69.5} = 42\%$$

また、最低揚程と最高揚程の比、これを変揚程割合と呼ぶと

$$\text{変揚程割合} = \frac{33}{75} = 44\%$$

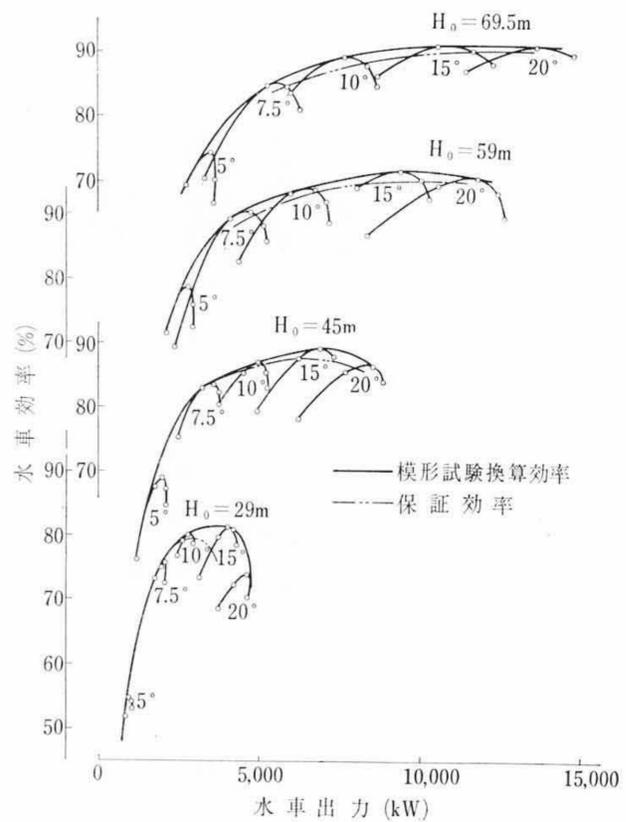
と非常に小さくなっている。

運転面より考えると、全変落差範囲を通じて、水車最大水量は一定であることが好ましいので、有効落差 69.5 m より 45m までの水車最大水量は 22.0 m³/s 一定とし、最低落差 29.0m でも水車最大水量は 17.0 m³/s 流せるように選定されている。

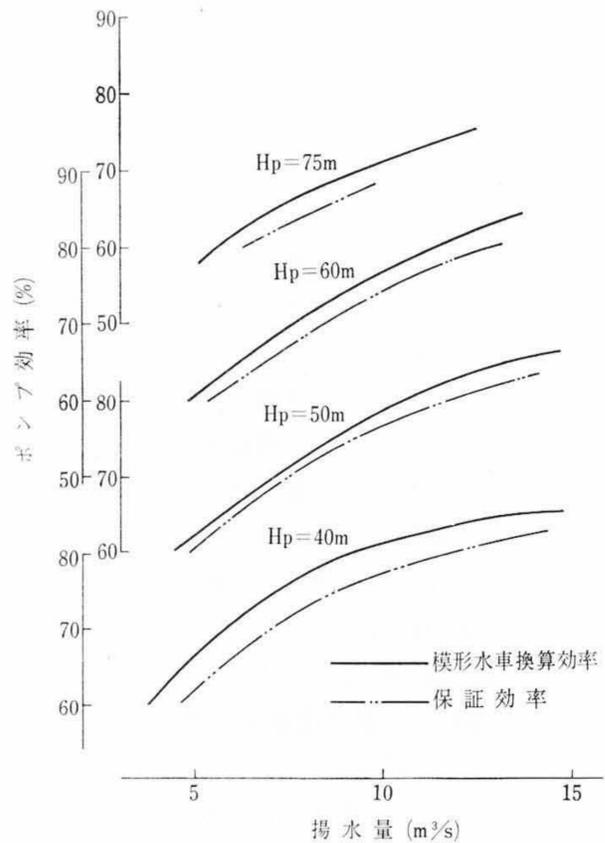
穴内川発電所のように発電に重点がおかれ、水系を経済的に運用するために付随的にポンプ運転を行なう場合には、それぞれの揚程に対する揚水量を制限することにより、吸出高を浅くすることができる。経済計算結果に基づいて、吸出高は -5m と、高落差カプラン水車、斜流水車と同じ程度に選定され、回転数は 360 rpm と水車専用機のものに近い値が採用されている。このためポンプ最大揚水量は 13.1 m³/s と水車最大流量の約半分に制限されている。

3.3 模型試験

水車仕様は、運用面、経済面に斜流ポンプ水車の特長を十分発揮するように選定されているので、水車を設計する面から考えれば、相当過酷な仕様となっている。そのため、これらの仕様さらに最適な模型水車を開発するために、数多くの研究が行なわれた。また、運転制御面では、大森川発電所、畑薙第一発電所、王滝川発電所など多くの運転実績を有するフランシス形ポンプ水車の技術・実績を



第5図 水車効率試験結果

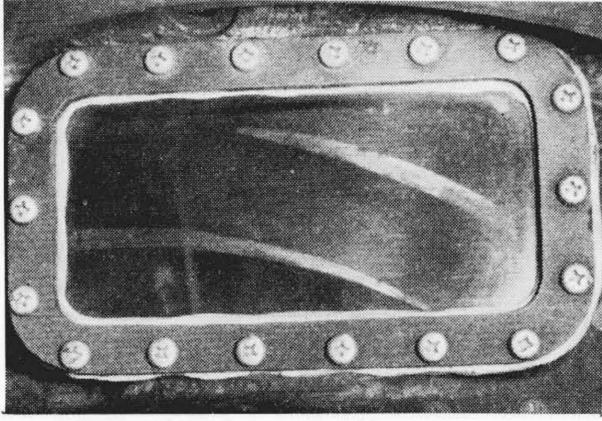


第6図 ポンプ効率試験結果

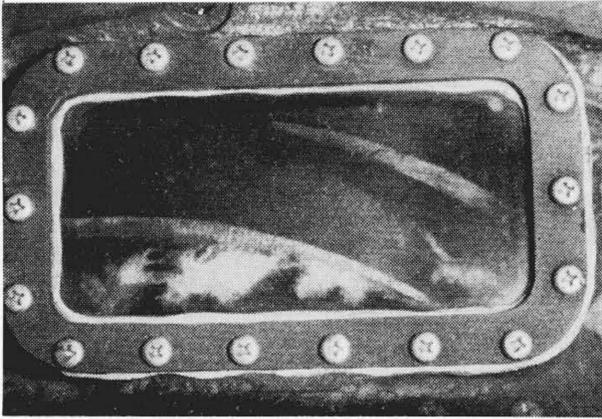
基礎にして、斜流ポンプ水車独自の問題についても、模型水車による測定および電子計算機による計算などを利用して研究された。そのおもなものは、効率試験、キャビテーション試験、実揚程試験、完全特性試験、水圧変動実測、起動トルク測定、水圧変動計算、ランナ外周間げき試験、ガイドベーンおよびランナベーン操作力測定、水圧推力測定、インデックステストなどである。以下その概要について述べる。

(1) 効率試験

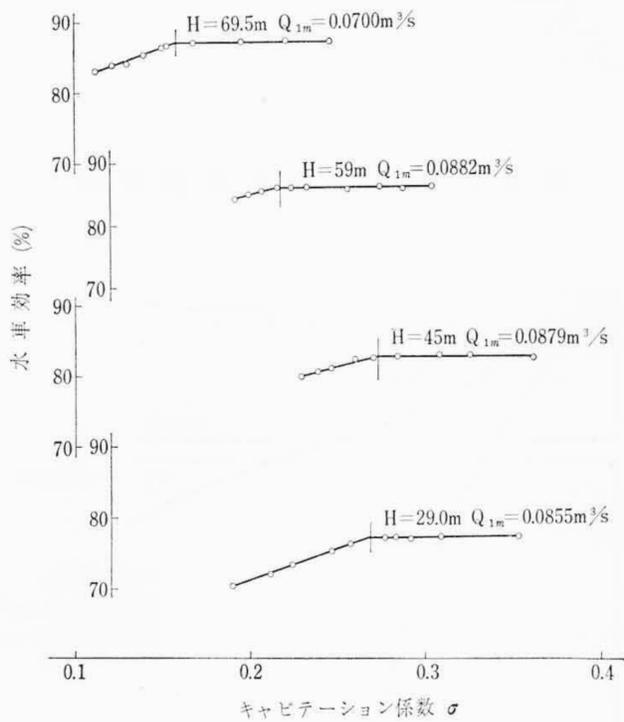
斜流ポンプ水車として最適な水力学的形状を決定するために、ランナ以外の諸元を決定することから研究された。まず、3種類のドラフトチューブを製作、試験し、ポンプおよび水車効率がすぐれ、しかも掘さく量の少ないドラフトチューブが選定された。水車運転時には、ガイドベーンからランナベーンに流入する流れが増速流れとなっているので、その増速割合や流路形状が効率・特性に与える影響は比較的少ないが、ポンプ運転の場合、ランナベ



第7図 水車キャビテーション発生状況

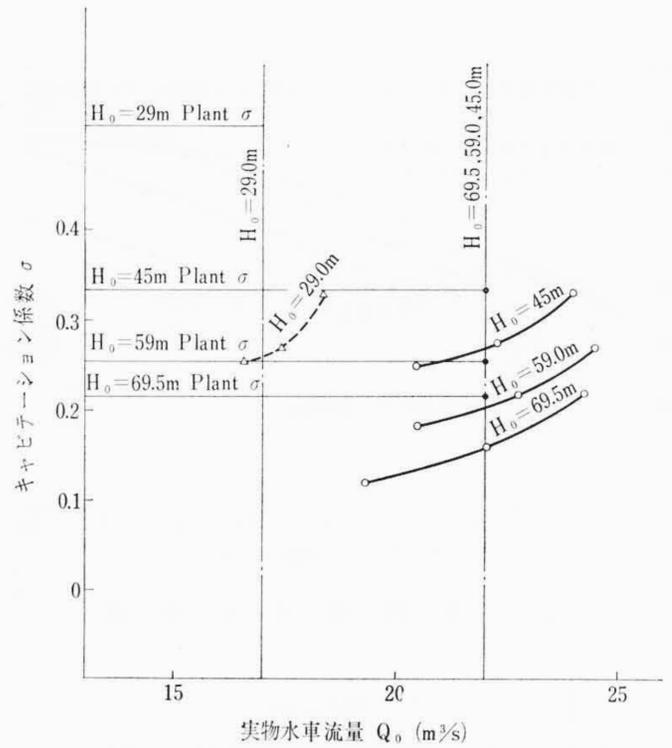


第8図 ポンプキャビテーション発生状況

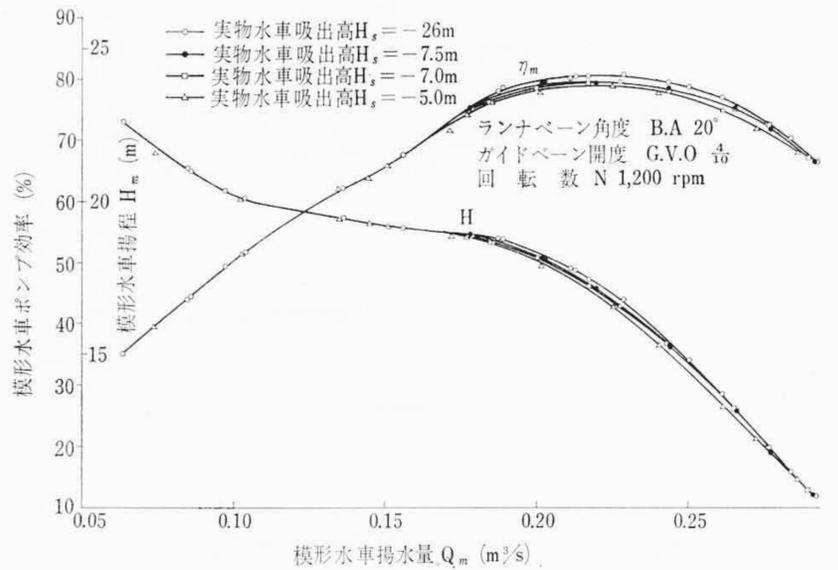


第9図 水車キャビテーション性能

ランナからガイドベーンに流入する流れが減速流れとなるので、ランナベーンや流路内で流れの剥離(はくり)や偏流が生じやすく、特性は減速割合や流路形状に敏感に影響される。流路形状が悪いとポンプ揚水量-揚程曲線に不安定特性が現われたりする。ランナベーン幅に対して3種類のガイドベーン幅の異なるガイドベーンおよびスピードリングを製作し比較試験し、比較的増速割合の少ない組合せが選定された。有効落差 69.5 m より 45m までの水車最大流量は 22.0 m³/s、最低落差の水車最大流量は 17.0 m³/s、最大揚水量 13.1 m³/s と仕様を選定されているため、最高落差 69.5m の最大出力時のガイドベーン開度を 100% とすると、最低落差 29 m の最大出力時のガイドベーン開度は 170% まで過開されることになる。したがってガイドベーンおよびステーパーの相対的な設計が重要となる。ステーパー枚数、形状・位置の異なる3種類の模型を製作して、比較試験の結果、ガイドベーン枚数 20 枚に対してステーパー枚数 10 枚のものが選定された。以



第10図 水車総合キャビテーション性能



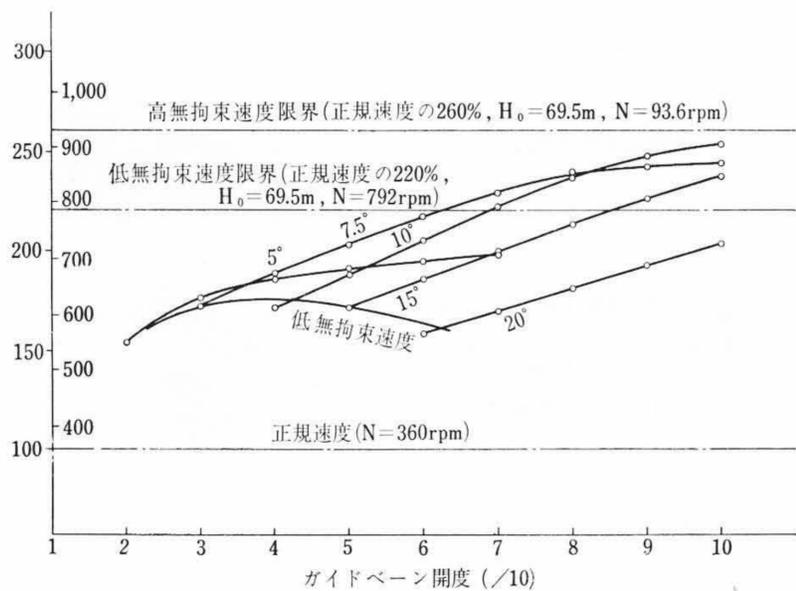
第11図 ポンプキャビテーション試験例

上の最良の組合せにより水力学的形状が決定された。その後、水車効率向上、ポンプ揚水量-揚程曲線よりの不安定領域の除去、ポンプおよび水車領域の重なる改善、ポンプキャビテーション性能改善などを目標にして8個のランナを製作試験し、最良のものが採用された。第5図および第6図には各落差および揚程における実物水車およびポンプの模型換算効率を示す。効率の換算は Moody の 1/5 乗式を最高効率点に適用し、この点の換算値と模型水車の効率の差をほかの点にも一様に加える方式によった。

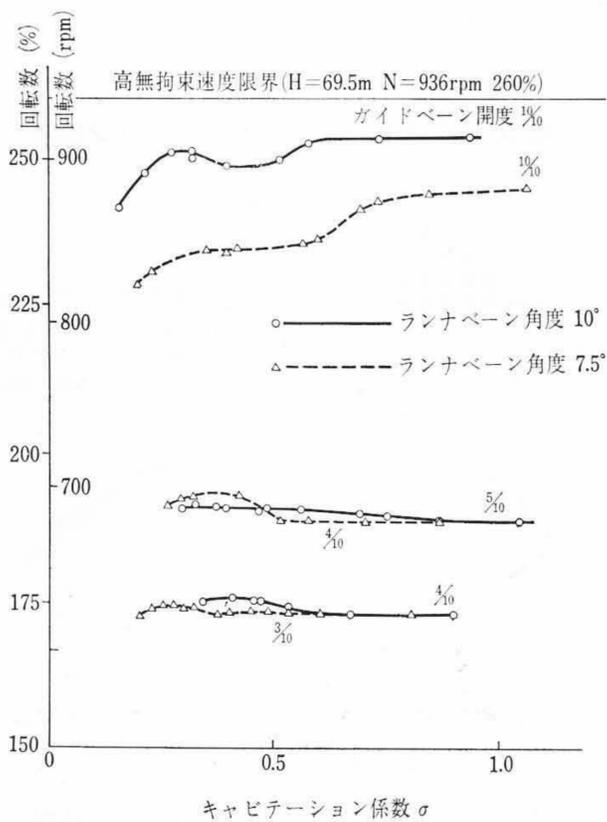
(2) キャビテーション試験

水車キャビテーション試験は採用ランナについてのみ試験された。その結果を第10図に示す。水車中心標高 EL. 338.900 におけるプラントシグマロに対して、全運転落差領域にわたって十分な水車運転のできる事が確認された。

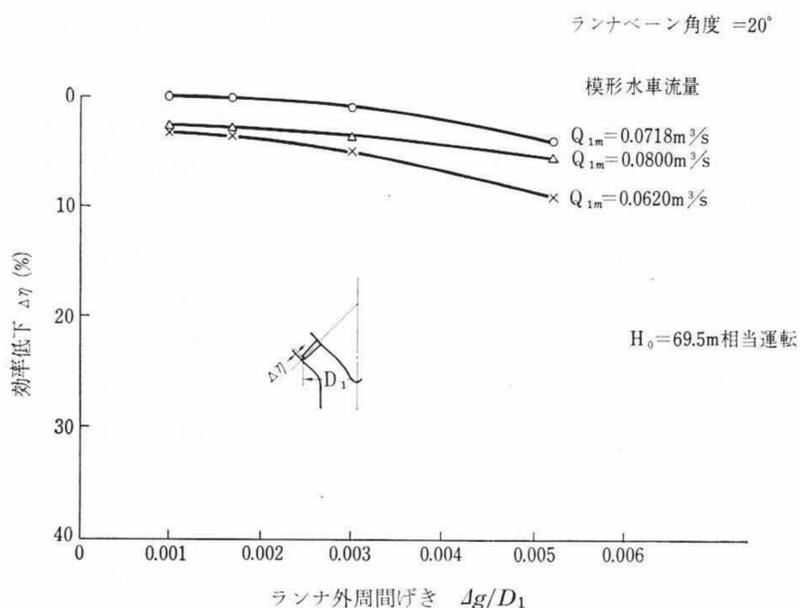
ポンプのキャビテーションとポンプの揚水量-揚程曲線の形状とは密接な関係があり、揚水量-揚程曲線に不安定領域があるランナーでは、その部分からキャビテーションに基づく特性の低下が発生しやすくなる。ランナ出入口部の流速分布測定による流れの逆流・剥離現象のは握、キャビテーション発生状況の観察、翼列理論による翼面上の圧力分布と剥離点の算出などを総合して、揚水量-揚程曲線形状とポンプキャビテーション性能の改良を重ね、採用ランナは両特性のすぐれたものが開発された。第11図に試験結果の一例を示す。フランス形ポンプ水車の特性低下と



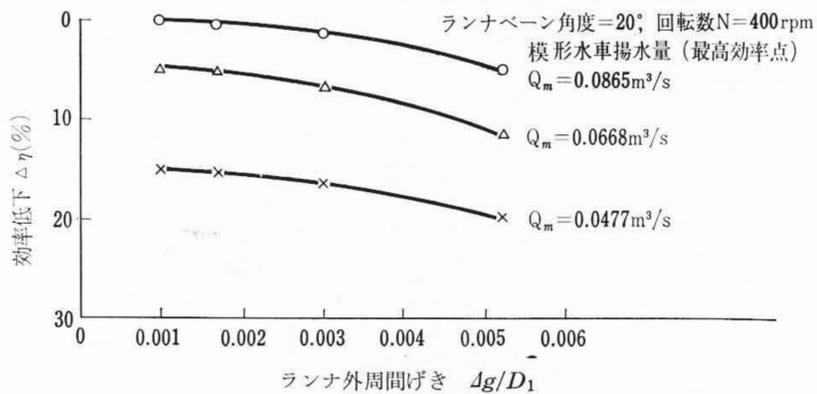
第12図 無拘束速度曲線



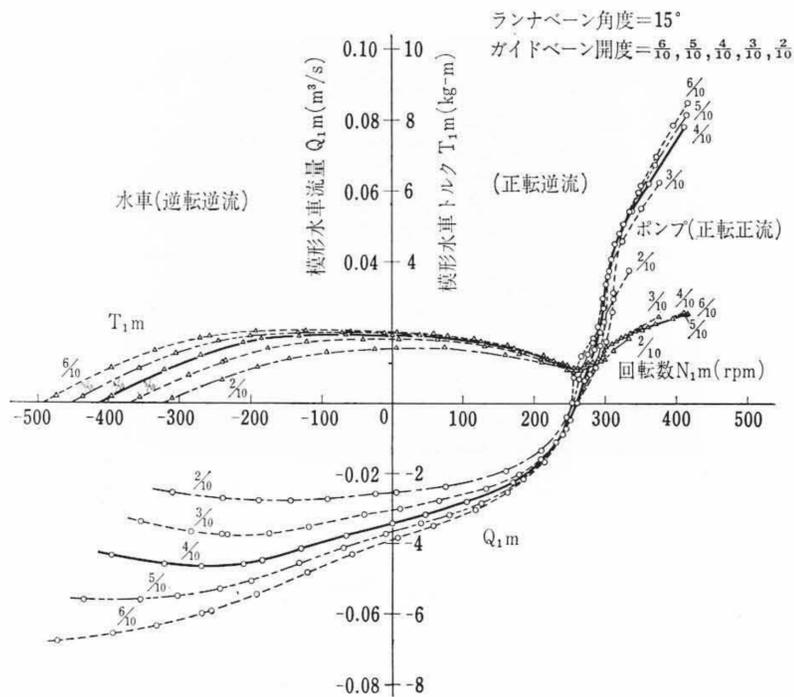
第13図 $N_R-\sigma$ 曲線



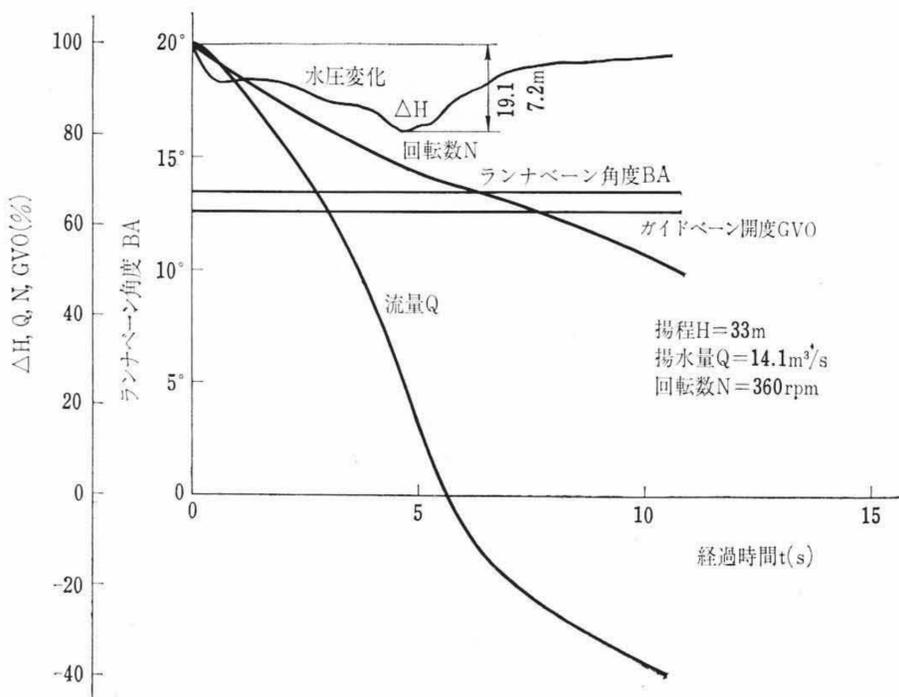
第14図 ランナ外周間げきと水車効率低下



第15図 ランナ外周間げきとポンプ効率低下



第16図 完全特性曲線測定例



第17図 ポンプトリップ時水圧変化計算例

は相当様相が異なり、効率および揚程がゆるやかに特性低下するため、特性低下点を明確に決定できない。模型水車のキャビテーションによる振動の測定およびキャビテーションの発生の観察をもとにして、安全なポンプ運転範囲が決定された。

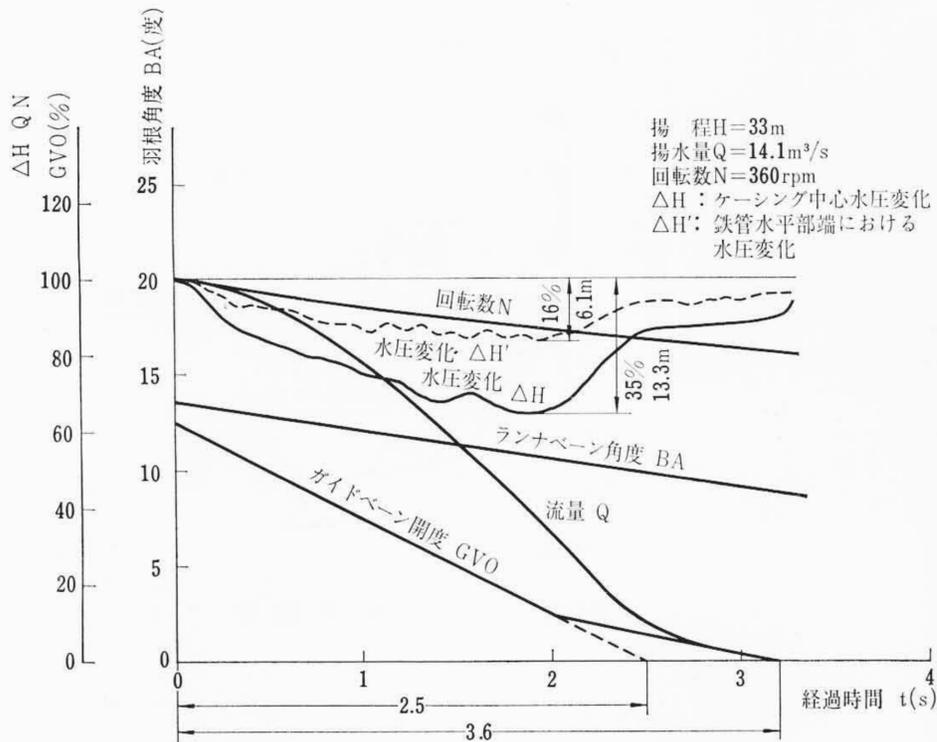
(3) 無拘束速度—キャビテーション係数試験 ($N_R-\sigma$ 試験)

第12図に効率試験時 ($\sigma \approx 2$) に動力計の負荷を零として各開度

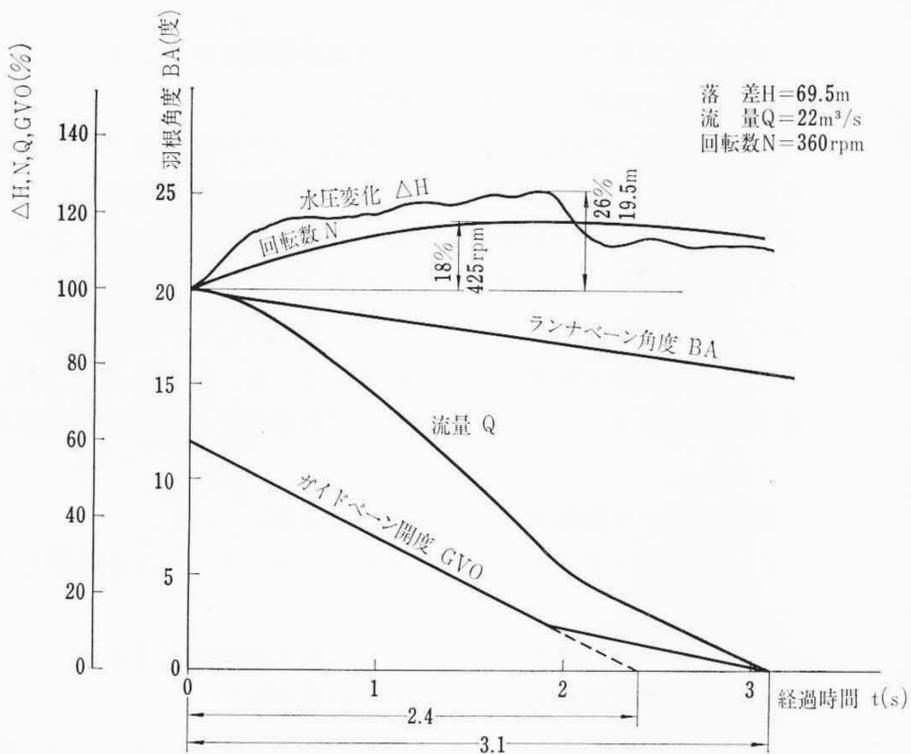
角度についての無拘束速度を求めたものである。第13図はキャビテーション係数を変化させた場合の無拘束速度の特性を示す。斜流ポンプ水車の無拘束速度は、あるキャビテーション係数において最大値を示すが、カプラン水車の場合ほど顕著には現われない。穴内川発電所のシグマプラントにおいては、効率試験時の無拘束速度より低くなることを確認された。

(4) ランナ外周間げき試験

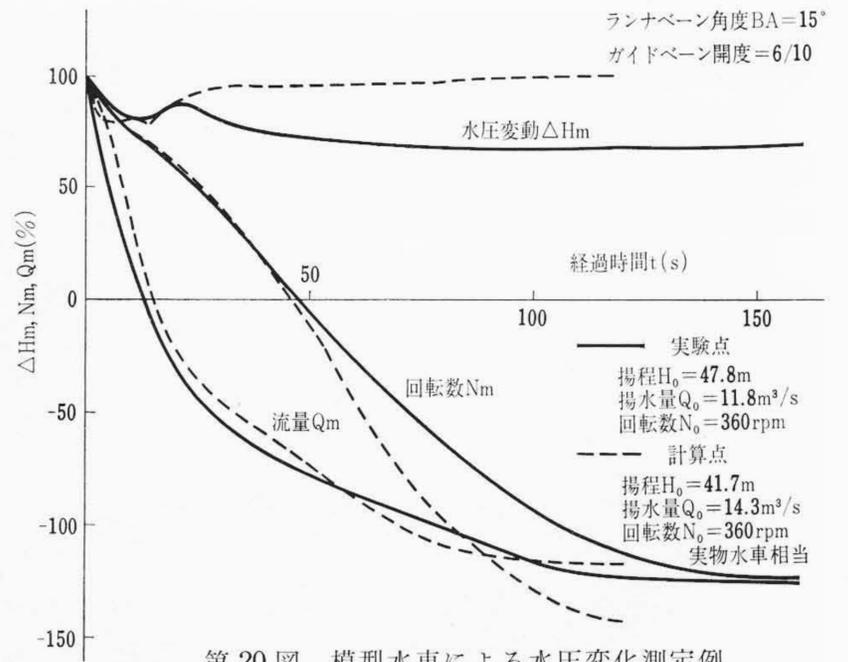
斜流ポンプ水車はランナベーンの軸中心線が斜めになっているために、温度変化や水圧軸推力の変化によって、ランナの上下方向の位置が変化すると、ランナベーン外周間げきが比較的大きく



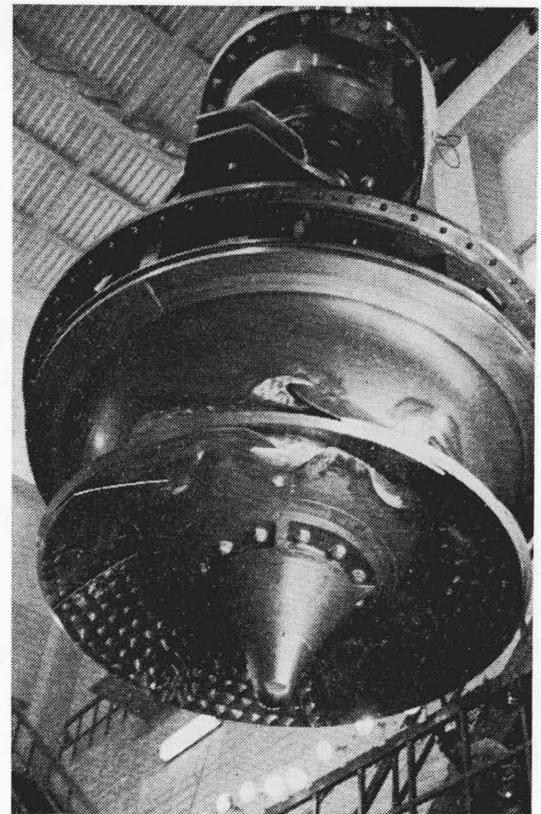
第18図 ポンプ入力遮断時水圧変化計算例



第19図 負荷遮断時水圧変化計算例



第20図 模型水車による水圧変化測定例



第21図 ランナ (現地)

変化する。ランナベーン外周間げき変化とポンプおよび水車効率の変化を測定した。その測定例を第14図および第15図に示す。

(5) 完全特性試験および模型水車による水圧変動の実測

ポンプ水車がポンプ運転を行なっている際に、発電電動機の電源が遮断された場合、もしガイドベーン、ランナベーンおよび吐出弁(入口弁)が開いたままであるとすれば、揚水の状態を正転正流として、正転正流→正転逆流→逆転逆流(すなわち水車運転)の経過をたどり、ついには水車の無拘束速度に達する。この過渡的な全領域の特性を完全特性と呼ぶ。この完全特性は模型水車により、おもなランナベーンおよびガイドベーンの組合せについて測定された。その測定例を第16図に示す。この試験結果を使って、電子計算機により過渡状態における水圧変動が計算された。第17図はポンプトリップ時(発電電動機の入力が遮断して、ランナベーン、ガイドベーンが閉鎖しない場合)、第18図は入力遮断時(発電電動機の入力が遮断して、ランナベーン、ガイドベーンが閉鎖する場合)、第19図は水車負荷遮断時の過渡状態における水圧変動の計算結果を示す。また、計算結果と実際の水圧変動の関係をは握するために、模型水車に実物水車の鉄管とほぼ同じ長さの鉄管を接続して、ポンプトリップの試験を行ない、過渡状態にお

る水圧変動を実測した。第20図は模型水車装置のポンプトリップ時の水圧変動の計算値と実測値の一例である。なお模型水車の上部貯水池に相当するタンクの水位がポンプトリップ時に変化するため、計算値と実測値が多少ずれている。

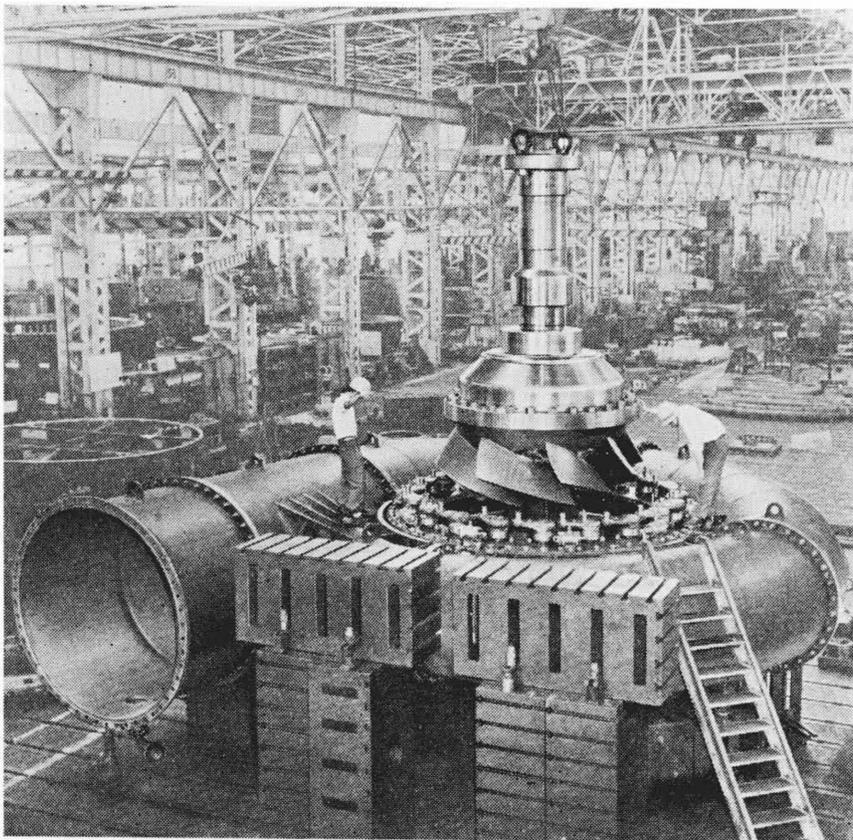
3.4 水車本体

ランナ、主軸受、封水装置、ディスチャージリング、ガイドベーン制動装置、ランナ外周保護装置およびランナ外周間げき測定装置の構造、材質などには特に注意が払われている。

(1) ランナ

ランナベーンシステムの中心線の形成する円錐体の頂角(斜流角とも呼ばれる)は90度で、性能試験に基づいてベーン枚数8枚、ランナ外径2,000mmと決定された。ランナベーン材質は13Cr 鋳鋼で、ティップキャビテーションによる壊食を防止するために、ベーン外周付近には耐食性の優秀な材料が肉盛されている。水車運転およびポンプ運転時にできるだけ水圧不平衡力が小さくなるようにシステムの位置が選定されている。ランナボスにはNi, Cr, Mo, Mn 鋳鋼が使用されている。

ランナ操作機構は第23図に示すように日立製作所で開発した上下動式ランナ操作機構を採用している。本機構は新大倉発電所



第 22 図 ランナ組入作業 (工場)

($H=96.9$ m), 新日向川発電所 ($H=113.4$ m) において優秀な運転実績を残している。

(2) 主軸およびランナサーボモータ

ランナサーボモータはカプラン水車と同様に上下動式で、水車およびポンプ運転に十分な容量をもっている。主軸は鍛鋼製である。ランナサーボの下部には操作ロッドの案内軸受を有しており、この軸受には複合形のシェプロックパッキングを使用して、サーボモータ操作油とランナボス充てん油のおのおのの漏油を別個に取り出す構造となっている。

(3) ケーシング・スピードリング

ケーシングとスピードリングは一体構造、全鋼板溶接製、四分分割フランジ接続方式である。ステーベーン枚数はガイドベーン枚数の半分の 10 枚である。

(4) ディスチャージリング

ディスチャージリングは耐食性の優秀な 13Cr 鋳鋼製であり、ランナベーンと一様な間げきを保持するよう、ならい機械によって正確に加工されている。このランナベーン外周間げきは室温変化、水圧軸推力変化、回転、発電電機内温度分布などの影響を慎重に検討して、現地据付時に調整された。

(5) ガイドベーンおよびガイドベーン制動装置

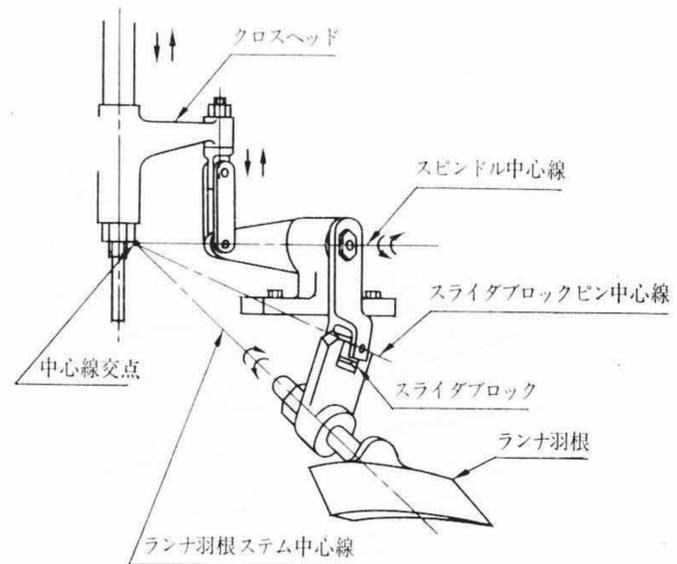
ガイドベーンは従来のカプラン水車、フランシス水車と同様、分解および組立の容易な垂直形円筒状配置となっている。ガイドベーンはポンプ運転時にはステム部に設けられているガイドベーン制動装置にて制動されている。

(6) 主 軸 受

主軸受は油自蔵式のバビットを裏ぼりした円筒形軸受で、正逆両方向の回転に対し安全なように、油みぞが切られている。

(7) ランナ外周保護装置およびランナ外周間げき測定装置 (特許申請中)

ディスチャージリングには新大倉発電所や新日向川発電所で採用されているランナ外周保護装置が設けられ、ランナ外周間げきがある値より減少した場合、配電盤の継電器が動作して水車が停止するようになっている。ディスチャージリングにはこのほかに新たに日立研究所で開発されたランナ外周間げき測定装置が設けられており、運転中に直接ランナ外周間げきが測定され、常時そ



第 23 図 ランナ操作機構

の値が表示されるようになっている。

3.5 運 転 方 式

3.5.1 起 動 停 止

(1) 水車起動停止

カプラン水車や斜流水車と同じ方式が採用されている。

(2) ポンプ起動停止 (特許出願中)

ランナベーンがほぼ全閉できるので、フランシス形ポンプ水車のように水面押しさげを行わない水中起動方式が採用されている。またガイドベーン小開時にガイドベーンへ良好な流入をするようにランナベーンが調節できるので、入口弁を開いたままで、ガイドベーンおよびランナベーンのみを操作して、揚水が開始できるガイドベーン揚水方式が採用されている。したがって、発電、揚水の切換がフランシス形水車ポンプの場合よりも短時間に容易にできる。

概略のポンプ起動順序は次のようになる。

- (a) 側弁・主弁を全開したままで、ランナベーンを全閉とする。
- (b) 発電電動機のスラスト軸受に高圧油を送入する。
- (c) ポンプ水車を半電圧、水中起動する。
- (d) 正規回転数近くまで回転が上昇したとき、スリップを検出して、界磁遮断器および交流遮断器を投入して、全電圧並列する。この時の反抗トルクは模型水車によって測定され、十分安全に並列できる。
- (e) ガイドベーン内水圧がケーシング内水圧より多少高くなるまで、ランナベーンを自動的に開く。
- (f) ランナベーンおよびガイドベーンをポンプ運転時のオンカムの関係に保ちながら、ランナベーンおよびガイドベーンを開いていき、揚水量が設定値になるところに固定して、運転を継続する。

ポンプ停止は、ポンプ運転時のオンカム関係を保ちながら、ランナベーンおよびガイドベーンを徐々にしめていき、ガイドベーン小開状態で遮断器を切り、ガイドベーンを全閉とする普通停止と、ガイドベーンを水車運転の場合とほぼ同じ閉鎖時間で急閉し、ランナベーンがそれより 10~15 秒おくらせて全閉する非常停止とが採用されている。

3.5.2 常時運転方式 (特許出願中)

斜流ポンプ水車はガイドベーンのほかにランナベーンが可動になっているので、その両者の特殊な関係を連続的に変化させることによって、水車・ポンプ効率の良好な運転ができるばかりでなく、揚水量一定運転、最大揚水量運転など、その水系を経済的に運用するのに便利な運転方式が採用されている。

(1) 水車オンカム運転装置 (高能率運転 $f_1 (H_T, GVO)$)

水車の有効落差 H_T を検出し、負荷制限装置または速度調定率によって設定されるガイドベーン開度 GVO との条件によって、水車効率が最高になるようにランナベーン角度 $f_1 (H_T, GVO)$ を自動的に設定する装置である。

(2) ポンプオンカム運転装置 (高能率運転 $f_2 (H_P, GVO)$)

ポンプの総揚程 H_P を検出し、後述の揚水量一定運転装置または最大揚水量運転装置により設定されるガイドベーン開度 GVO との条件によって、ランナベーン角度 $f_2 (H_P, GVO)$ が自動的に設定される装置である。

ポンプ運転時には、水車運転時のようにサイクル変化にตอบสนองする速度調定率や負荷制限装置に相当するものがないので、これに代わって揚水量を設定する揚水量一定運転装置および最大揚水量運転装置が設けられている (フランシス形ポンプ水車はランナベーンが固定であるから、揚程に応じて揚水量が決まるので、このような装置は必要でない)。

(3) 揚水量一定運転装置 ($f_3 (H_P, Q_P=一定)$)

揚水量 $Q_P=一定$ を配電盤で設定すると、検出された総揚程 H_P をパラメータにして、ガイドベーン開度 $f_3 (H_P, Q_P=一定)$ が決定される装置である。すなわち、 $Q_P=一定$ 、たとえば $12\text{m}^3/\text{s}$ と設定しておく、総揚程がたとえば 75m から 50m に変わっても常に自動的に $Q_P=12\text{m}^3/\text{s}=一定$ に保たれる。ダム上流の降雨量、下流発電所の運転状態、下流の最大・最小流量制限、および電力需要などの条件を考慮して、その水系にあふれが生じないように、水系を総合的に経済運営するには、揚水量一定運転を行なうのが最も便利である。

(4) 最大揚水量運転 ($f_4 (H_P, H_S)$)

ポンプキャピテーション限界によって吸出高 H_S が一定の場合、総揚程 H_P に応じて最揚水量は変化し、逆に総揚程 H_P が一定の場合には、吸出高 H_S によって最大揚水量が変化する。総揚程 H_P および吸出高 H_S を検出して、 $f_4 (H_P, H_S)$ の関係で最大揚水量に相当するガイドベーン開度を決定する装置である。

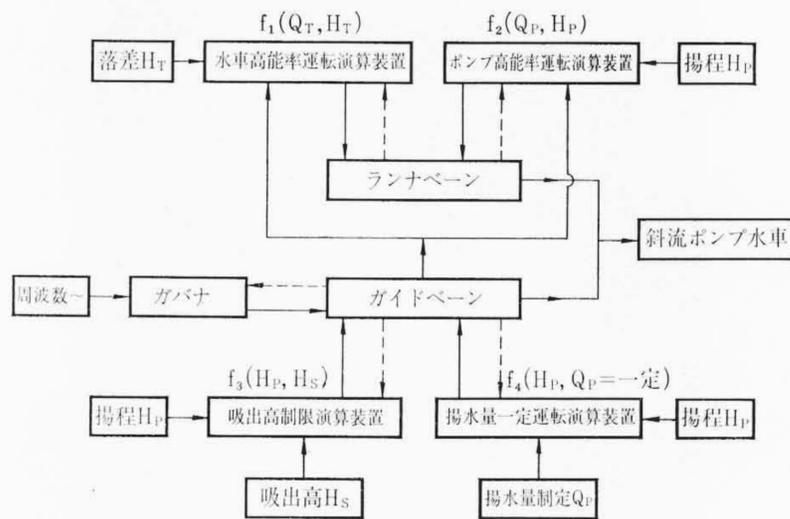
以上(1),(2),(3)および(4)の装置をまとめた運転方式のブロックダイアグラムを第24図に示す。

4. 14,500 kVA/14,000 kW 交流発電電動機

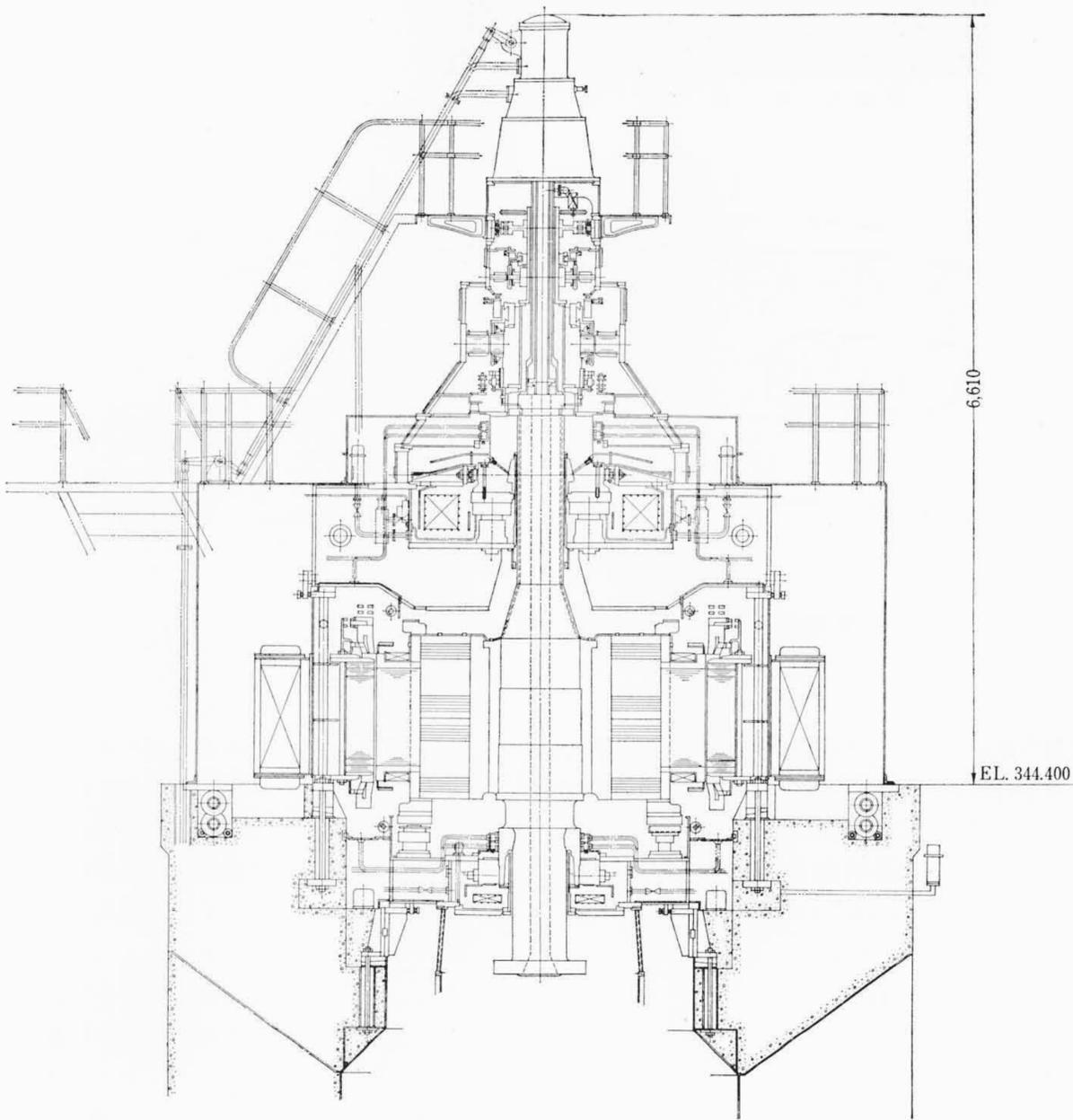
4.1 仕様

本機はわが国最初の斜流ポンプ水車に直結される発電電動機で、大森川発電所、畑薙発電所、三尾発電所などに納入された発電電動機の実績をもとにして設計製作されている。本機の起動は半電圧制動巻線起動、全電圧切換後同期投入するものであり、次に述べるような特長をもっている。

推力軸受メタルシュューは、正逆転可能のように中心支持式で、シュューとランナの間には圧油を送入し、起動を行なうものである。斜流



第24図 運転制御方式ブロックダイアグラム



第25図 斜流ポンプ水車発電機構造図

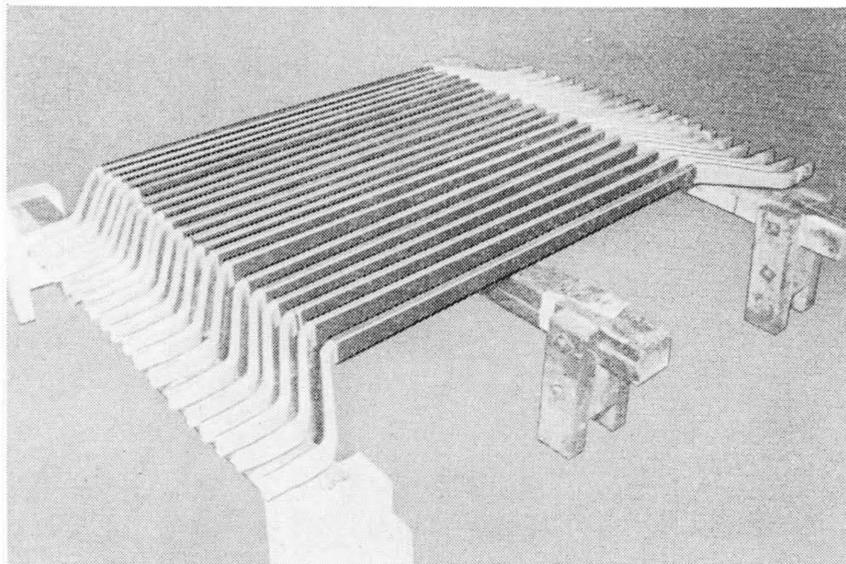
ポンプ水車のランナは、垂直円筒面で相対しているのではなく、円錐面で相対しているため、ランナが垂直方向に大きく変位すると、ランナーとディスチャージリングの間のギャップが大きく変化し、ポンプ水車の特性を悪くし、場合によっては、ランナとディスチャージリングが接触する恐れがあるため、

- ① 上部ブラケットおよび固定子わくの剛性を増し、たわみを小さくした。
- ② 固定子わくの伸び、シャフトの伸び、推力軸受油膜の厚みを考慮に入れて、ランナの変位をある値以下におさめた。
- ③ 万一推力軸受メタルが焼損しても、ランナがディスチャージリングに接触しないように軸受部にストッパが取付けてある。

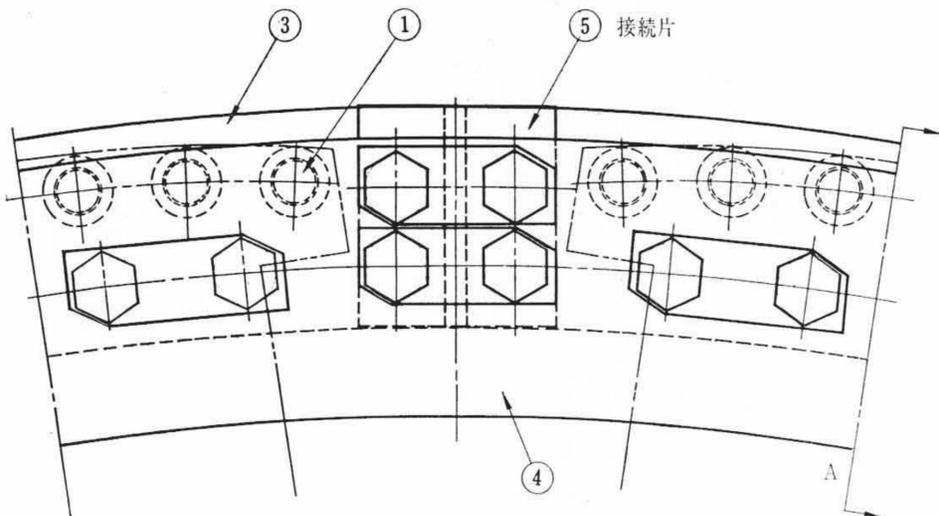
などが考慮された。次に固定子コイル絶縁には、発電用としては日



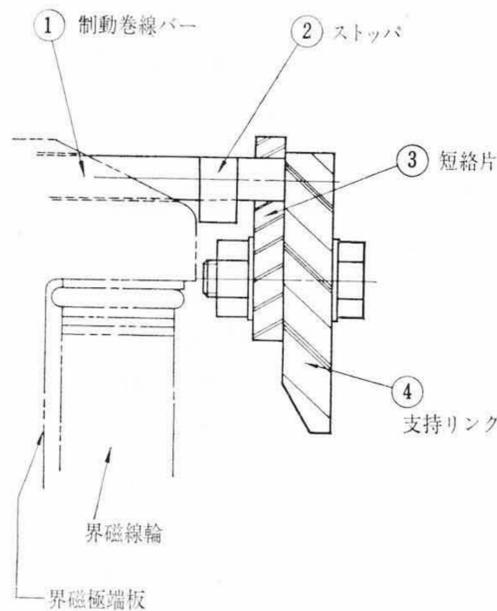
第26図 発電機外観



第27図 コイルの外観



第28図 制動巻線構造図



A-A断面

立製作所初めての、エポキシ絶縁が採用されている。

第26図は工場組立を完了した本機の外観である。

形式 VEFW-RD (立軸閉鎖風道循環, 空気冷却器付, 回転界磁式, 制動巻線付)

定格 14,500 kVA/14,000 kW

回転数 360 rpm

電圧 6,600 V

力率 0.9

周波数 60 c/s

極数 20

起動方法 半電圧制動巻線起動, 全電圧切換後同期投入

4.2 固定子

固定子わくは、鋼板溶接構造で、一般の水車発電機に比較して、剛性を増し、たわみが小さいように設計されている。鉄心は冷間圧延ケイ素鋼板で作られ、その端部の歯押え金具は非磁性で製作されている。固定子巻線は、1回巻単星形結線で、コイル導体は細分化され、スロット内で完全に転位されている。起動時には、大きな突入電流が流れ、これによりコイル端部に衝撃的電磁力が働くため、コイル端部の保持には特に留意してある。

今より約10年前、不飽和ポリエステル樹脂によるSLSワニスで完成し、敦賀セメント株式会社納3,750 kVAタービン発電機の固定子コイル絶縁に採用し、成功をおさめて以来、絶えざる研究の結果、エポキシワニスの真空注入によるコイル絶縁の量産が可能となり、本機の固定子コイル絶縁に採用された。日立製作所では、発電用として、最初のものである。

エポキシワニスの特長は、硬化時収縮率の小さいこと、機械強度の大きいことである。収縮率は、ワニス硬化時の体積縮小率で、これが小さいことは絶縁層内の空けき小さいことを示すものである。収縮率の小さいワニスで処理された絶縁ほど、電気的特性が良くなる傾向にあるといえる。また機械強度が大きいことは、このワニスによって処理されたコイル絶縁が、負荷変動による銅線の膨張収縮の繰返しに耐えることを意味するものであって、特に起動停止の機会が多い揚水用発電電動機には適している。

エポキシワニスにはSLSワニスと同様真空注入ができ、その工程もSLSワニスの場合と同様であり、しかも、絶縁材料もSLSワニスの場合と同一のマイカ絶縁物を使用できる。この点、SLSコイル製作でつちかわれた技術および設備がそのままエポキシコイル製作に役だてられている。

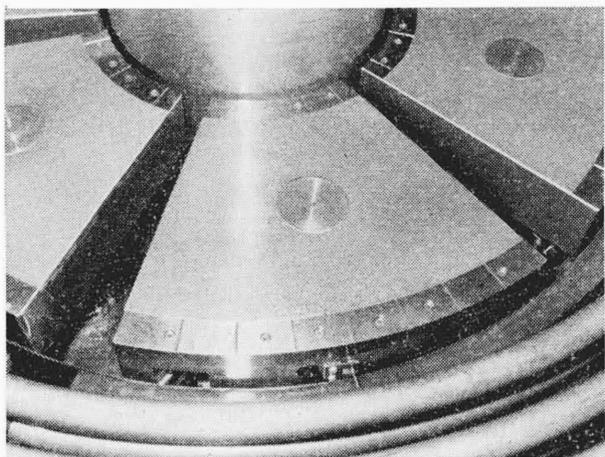
第27図に本機の coils の外観を示す。

4.3 回転子

回転子継鉄は、圧延厚板鋼を積層し、ボルトで締め付けし輻鉄に焼ばめたものである。界磁コイルは、従来のように、銅線を平打巻にし、段間線縁にはアスベスト紙を使用して製作したものである。

ポンプ起動に水面押下げを行わず、水中でランナを回転させるため、比較的回転損失が大きく、かつ起動が制動巻線によって行なわれるため、制動巻線は特に強力に設計・製作された。

第28図は制動巻線の構造図を示す。①は制動巻線バーで、起動トルクを大きくするため特殊銅合金が使用されている。本合金の比抵抗は約 $16 \mu\Omega\text{cm}$ (真鍮は約 $6 \mu\Omega\text{-cm}$)である。起動停止ごとに制動巻線は熱膨張収縮するが、この際バーが移動を防止するため、②



第 29 図 推力軸受シュー (ストップ付)

に示すようなストップが取り付けられている。制動巻線バーの先端は③の短絡片により短絡され、相互の接合部はろう付が完全に行なわれている。本機は無拘束速度が高いため短絡片は、④の高強度の特殊鋼リングにより支持されている。短絡片どうしの接続は、⑤の接続片により行なわれ、ろう付された。

4.4 ブラケットその他

上部ブラケットは固定子わく同様に、斜流ポンプ水車に直結するために、特に剛性を増し、たわみを小さくするように設計されている。温度による固定子わくのび、上部エンドブラケットののび、主軸ののび、回転による推力軸受油膜厚みによる浮上りなどの影響による主軸の変位は、工場において、主軸端面に回転部測定用のインジゲータを取り付けて実測した。両者の結果から、ランナとディスクチャージリングの接触に対し十分安全であることが確認された。

推力軸受はシューの荷重を外部から調整できるキングスベリー形であるが、可逆式であるため、中心支持方式が採用された。起動トルク低減のため、各シューに圧油送入穴を設け、高圧油を送入している。高圧油の送入は、ポンプ起動時ばかりでなく、水車起動時、停止時においても行なわれ、推力軸受ランナとシューとの金属接触

を防いでいる。万一推力軸受シューが焼損してもポンプ水車ランナがディスクチャージリングに接触することのないよう第 29 図のように、推力軸受シューの両側に鉤金製のストップが設けられている。

案内軸受も同様に中心支持式のセグメント形である。

4.5 励磁機その他

発電機上部ブラケットの上には、回転子に電流を流すスリップリング、110 kW 主励磁機、副励磁機、永久磁石発電機、微速度検出装置、圧油導入装置が設けられている。

揚水用発電電動機は起動停止がひん繁に行なわれるゆえ、制動器を使用する機会が多く、制動シューよりの粉のため、機械内部が汚損される傾向にあるので、制動器 1 個ずつに、集じん装置が取り付けられている。また機内の防湿のため除湿器が風道内に設けられている。

5. 現地試験運転

5.1 水 車

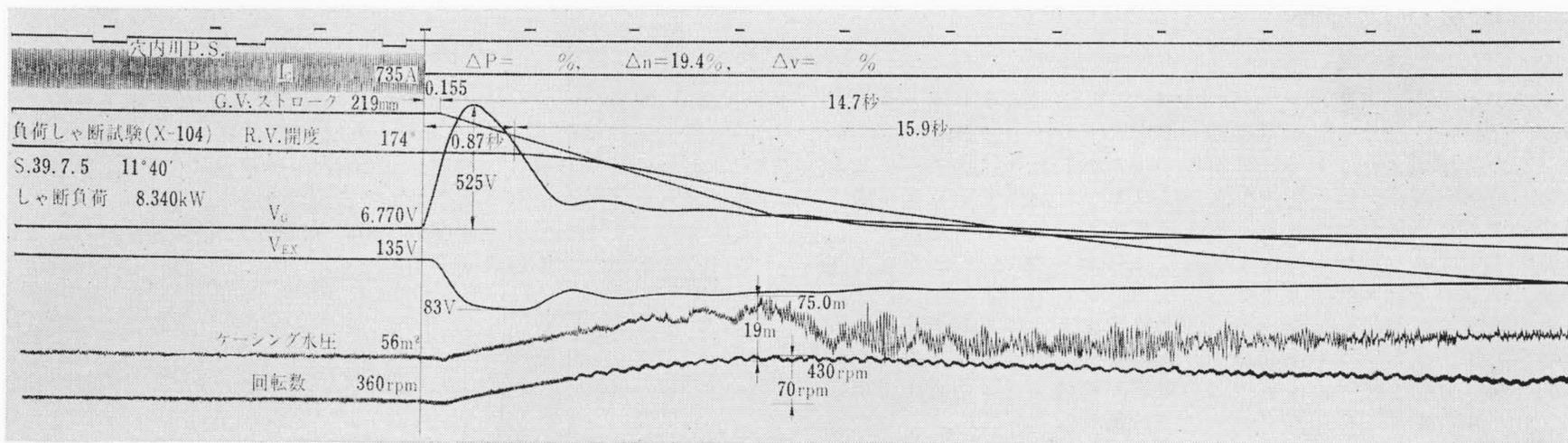
1964 年 5 月 26 日通水、水車試験運転を開始した。東北電力株式会社新大倉発電所、新日向川発電所の斜流水車と同様、振動、騒音、その他良好な運転状態を示した。7 月 18 日落差 51m、出力 10,000 kW の官庁試験を終了して営業運転にはいった。第 30 図は負荷遮断試験の一例を示したものである。

5.2 ポ ン プ

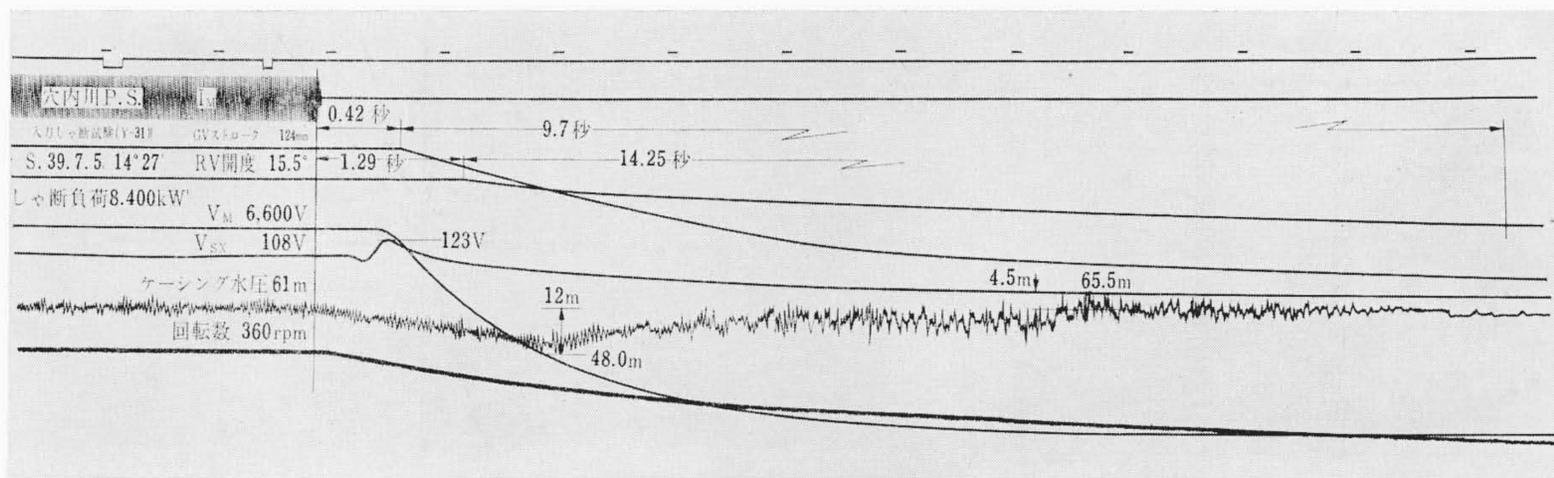
6 月 6 日ポンプ試験運転を開始し、7 月 18 日揚程 56m ポンプ入力 10,000 kW の官庁試験を終了した。

(1) 起 動

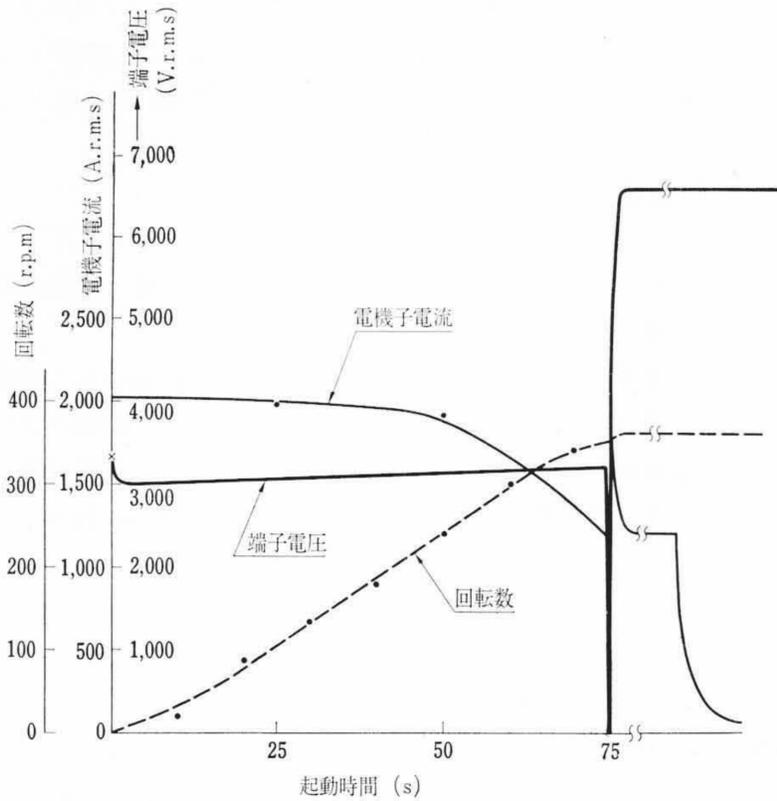
圧縮空気による水面押下げは行なわず、主弁を全開した状態で、ランナベーンを全閉にして、水中で半電圧起動した。速度上昇、全電圧印加並列励磁と順調に動作し、ポンプ起動時間は並列まで約 1.5 分であった。



第 30 図 水 車 負 荷 遮 断 試 験 例



第 31 図 ポ ン プ 入 力 遮 断 試 験 例



第 32 図 発電電動機 起動特性

(2) 揚水開始

ランナベーンを小開してからランナベーンとガイドベーンをオンカムの関係に保持しながらあけていくと、ウォータハンマや振動を起こすことなく静かに揚水開始した。

(3) 常時運転

ポンプ運転状態は水車運転と同じ程度に良好である。模型水車の研究によって不安定領域が除去されたので、その領域を通過するときの運転状況も悪くならないことが確かめられた。

(4) 入力遮断, ポンプトリップ, 停止

それぞれ試験されたが、異常圧力低下はなく、順調な結果を示した。第 31 図はポンプ入力遮断試験の一例を示す。

5.3 発電電動機

(1) 起 動

起動は半電圧で行なわれるが、半電圧最終すべりが約 2.5%, 全電圧切換後はリアクショントルクで並列可能であった。#6 投入後最終すべり到達までは約 75 秒で、設計値とよく一致した。線路側の電圧降下は約 11% であった。また制動巻線の支持リングの温度上昇も小さく、起動渋滞に対して安全側にあることがわかった。第 32 図は起動ならびに並列時の諸特性を示したものである。

(2) 常時運転

固定温度上昇をはじめ、推力軸受、案内軸受の温度なども正常であり、発電機各所の振動も良好であった。

6. 結 言

穴内川発電所用 13,500 kW 可動翼斜流ポンプ水車および 14,500 kVA 発電電動機は昭和 39 年 5 月 26 日運転開始した。

斜流ポンプ水車は中落差ないし低落差の揚水発電を経済的に開発するための新機種として各方面から注目されているので、穴内川発電所の斜流ポンプ水車および発電電動機についてその概要を紹介した。

試験運転の結果、ポンプ起動時間は並列まで約 1.5 分で発電・揚水の切換えが短時間に容易に行なわれることが確認された。この特長を利用すると昼休みに揚水運転を行なうなどというひん繁な発電・揚水の切換えもできるわけで、系統の経済的な運営に寄与する点が大となる。

終わりに本発電所機器の設計・製作に当たり、貴重な指針を与えてくださった四国電力株式会社各位に厚くお礼申し上げる次第である。



特 許 の 紹 介



特許第 404089 号

上 村 民 夫

ミ シ ン 用 電 動 機

ミシンの手もと照明用ランプには 6~8 V の低電圧が使われるために、一般にはクラッチ付電動機の巻線より分圧して取り出している。この方法によれば安価に低電圧を得られる利点はあるが、無負荷時と負荷時では配線の抵抗およびインピーダンスによる電圧降下の変動のために分圧されるランプ用電圧も変動する欠点があり、縫製作業ではクラッチの操作を中断なく行なうのでこのクラッチが作業者に与える悪影響は大きいものであった。

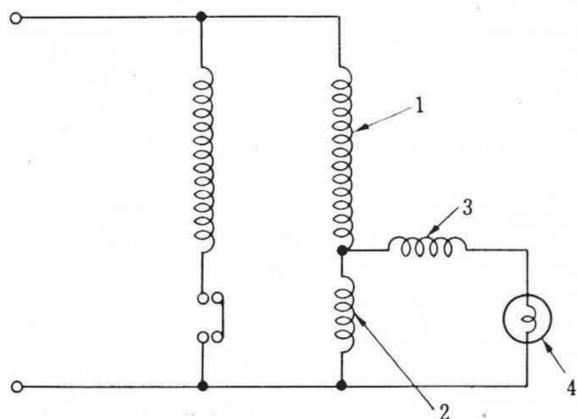
本発明はこの点にかんがみて、図面に示すように主巻線 1, 2 を同極性に巻き、さらにこの主巻線 1, 2 と重畳して相互誘導するように補助巻線 3 を巻き付け、主巻線 2 の電圧と補助巻線 3 の電圧が照明用ランプ 4 に差動的に印加されるように接続した。

したがって運転中に主巻線 1 には V_1 なる電圧が発生し、主巻線 2 には V_2 なる電圧が発生し、照明用ランプ 4 には V_2 と補助巻線 3 に誘起する V_3 なる電圧の差の電圧 V_L が印加される。

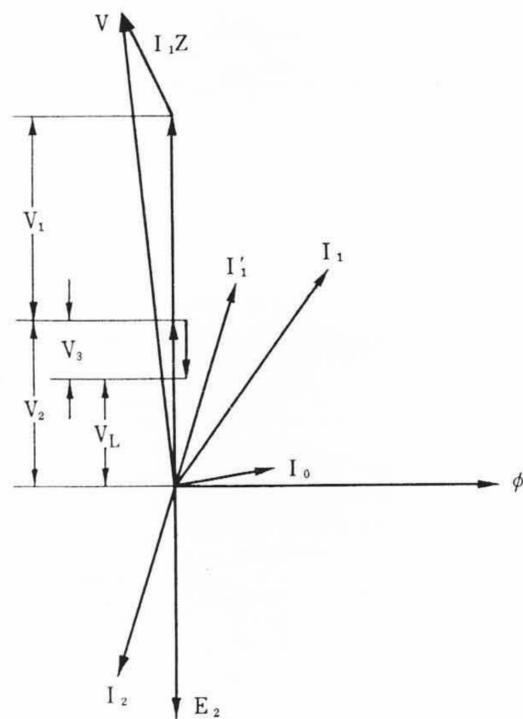
そこでもし電動機の負荷が増加した場合には負荷電流 I_1 が増加す

るために配線のインピーダンスによって $I_1 Z$ なる電圧降下を生じ、主巻線 1, 2 の電圧 V_1, V_2 がそれぞれ低下するが、漏えい磁束が増大するために補償巻線 3 に誘起する電圧 V_3 が相当に低下し、結局照明用ランプ 4 に印加される電圧 V_L の変動は起こらない。

以上のように本発明電動機によれば安定した電圧をきわめて安価に得ることができる特長がある。(仙波)



第 1 図



第 2 図