

中国電力株式会社新成羽川発電所納 ポンプ水車ならびに水車専用機の運転結果

Some Fruits of Operation of a Water Turbine and Pump-Turbines
for Shin-Narihagawa Power Station, Chugoku Electric Power Co.

飛原利角* 久保真三* 山本景彦**
Toshikado Hibara Shinzō Kubo Kagehiko Yamamoto
高瀬光雄** 今野晴雄**
Mituo Takase Haruo Imano

要 旨

中国電力株式会社 新成羽川発電所は 78,500 kW フランシス水車 1 台および 78,000 kW フランシス形ポンプ水車 3 台を備え、最大 303,000 kW を発電する中国地方最大の揚水発電所で、昭和 43 年 11 月、I 期工事分としてフランシス水車 1 台およびポンプ水車 1 台、引き続き II 期工事分として昭和 44 年 7 月、ポンプ水車 2 台がそれぞれ完成し、以来順調に運転を続けている。

本発電所は工業用水の確保と河川の高度な発電利用を図るとともに水火力の総合効率を図る目的で建設されたもので、その目的からわが国では初めて、水車とポンプ水車の併設を試みた発電所で運用面での成果が期待されている。

本稿は、本発電所の概要とポンプ水車の開発研究および現地における試験結果を取りまとめ報告するものである。

り数次にわたる基本特性試験ならびに特殊試験による運転性能の改善と基礎的研究結果が折り込まれた。

ここに発電所の概要および現地試験ならびに運転結果をまとめて報告する。

1. 緒 言

中国電力株式会社 新成羽川発電所は、最大 303,000 kW を発電する中国地方最大の揚水発電所として計画されたもので、所内には最大出力 78,500 kW フランシス水車 1 台および 78,000 kW フランシスポンプ水車 3 台を備え、I 期工事分として昭和 43 年 11 月、水車およびポンプ水車各 1 台、II 期工事分として昭和 44 年 7 月、残りポンプ水車 2 台がそれぞれ官庁試験を終了し、目下好調に営業運転中である。

本機の設計製作に当たっては中国電力株式会社との共同研究によ

2. 発電所の概要

本発電所は岡山県川上郡備中町に所在し、高梁川水系成羽川中流部を横断して築造された高さ 103m の重力アーチダム直下に設置され、上部に新成羽川貯水池、下部に田原調整池を設けた自流併用の複合式大容量揚水発電所である。

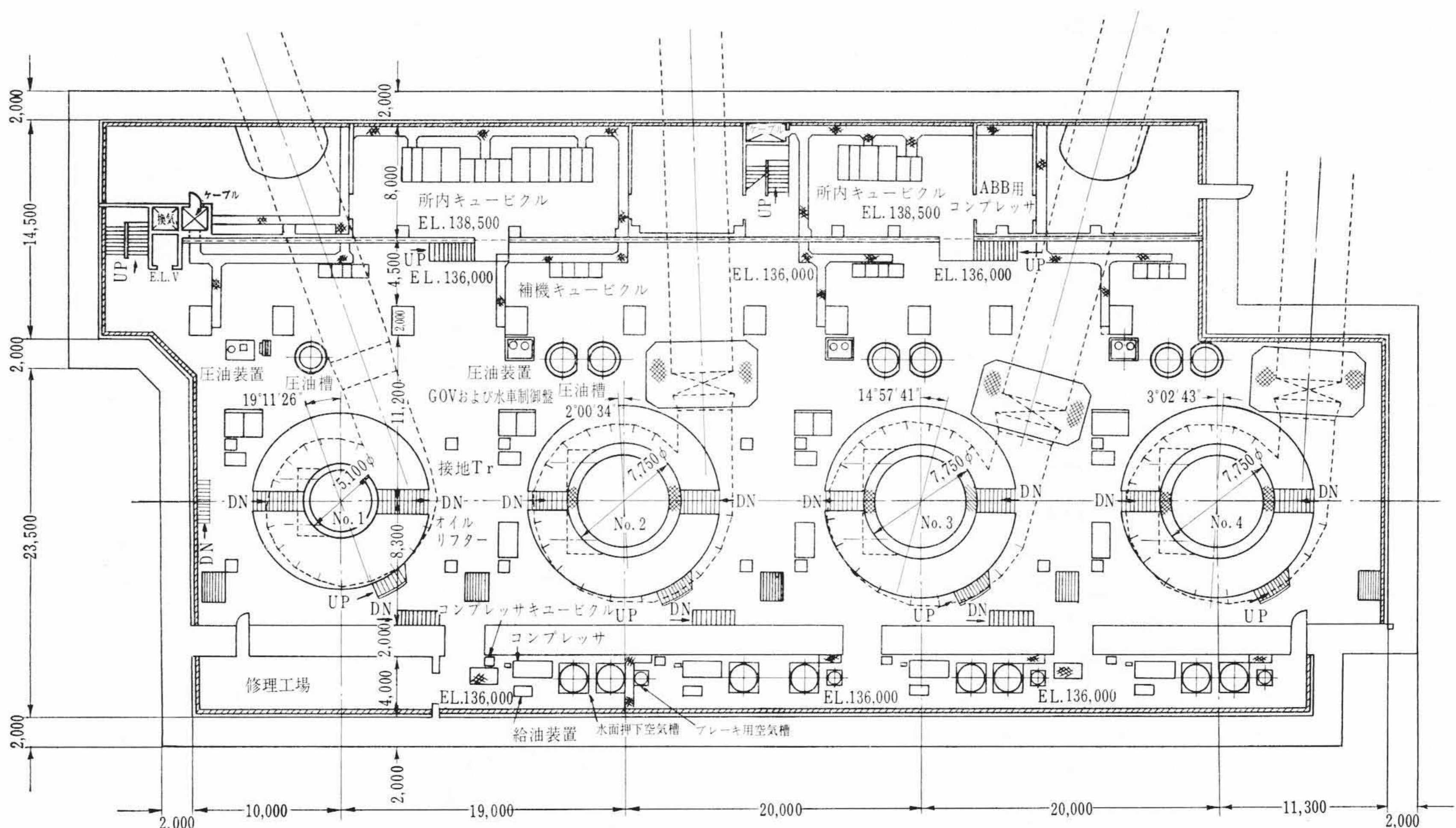


図1 据付平面図

* 中国電力株式会社
** 日立製作所日立工場

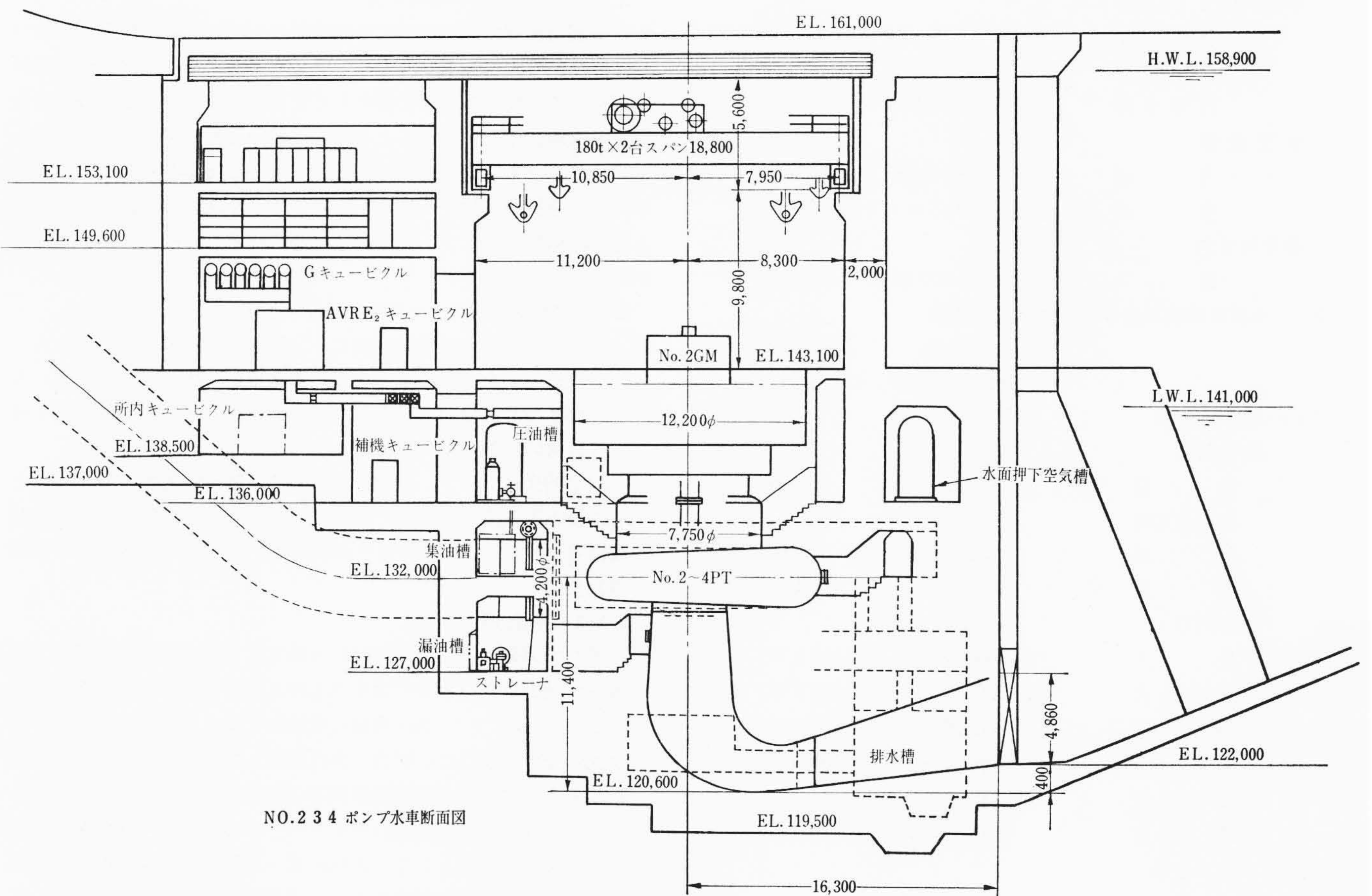
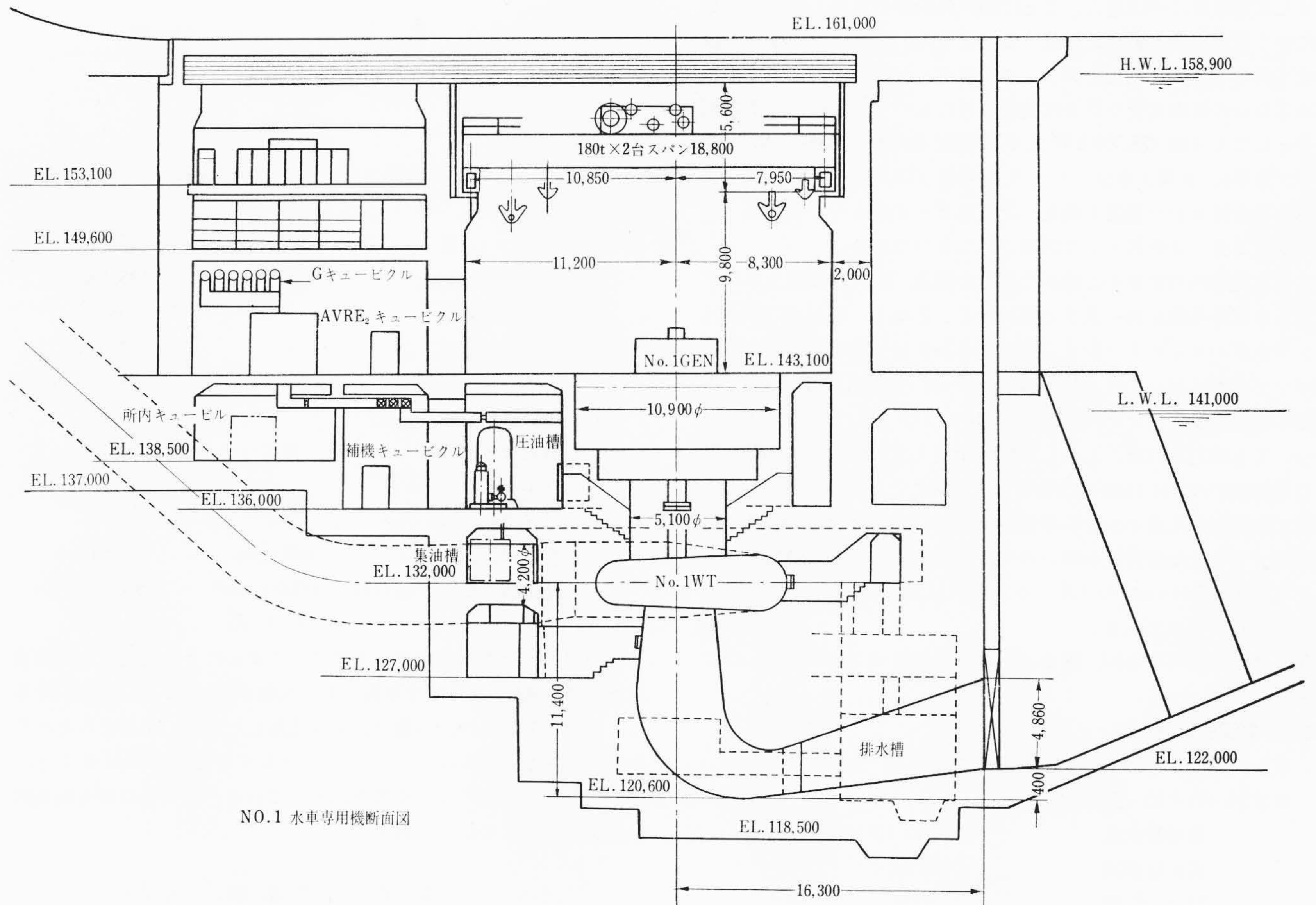


図2 据付断面図

また本発電所は中国地方、ことに瀬戸内沿岸の水島工業地帯の進展に伴う電力需要の動向に対処するとともに、工業用水の確保を合わせて河川の高度な利用を図り、さらに水・火力の総合運用効率を高めるための計画も折り込まれ建設されたもので、所内にはⅠ期工事分として1号機(78,500kW水車専用機)2号機(78,000kW可逆ポンプ水車)、Ⅱ期工事分として3、4号機(78,000kW可逆ポンプ水車)の合計4台の機器を備え、発電はピーク時4台で4時間、揚水は深夜3台で7時間として計画されたものである。

また本発電所の水車中心標高は建屋の構造、据付の関係上ポンプ水車と水車専用機を同一高さに据付けることにし、吸出高(Hs)はポンプ水車のキャビテーション特性より-9mが採用された。なおポンプ水車においては、最高落差94.7m、最低落差47.4mと広範囲に落差変動するため、計画当初144および120rpmの2速度案についても検討された。しかし120rpmとした場合、落差62m以上の場合でのみ144rpmの出力を上まわることが認められたが、低落差での運転ひん度が少ない本発電所では144/120rpmの2速度を採用することは経済性が薄いので、最終的には広い変動範囲に対しても1速度144rpmのフランシス形ポンプ水車を採用することで計画されたものである。

図1は機器据付平面図、図2は機器据付断面図を示したものである。

2.1 発電所計画仕様		
取水河川名	高梁川水系	成羽川
新成羽川貯水池（上部貯水池）		
有効貯水量	80,500×10 ³ m ³	
満水位標高	237 m	
利用水深	30 m	
田原調整池（下部貯水池）		
有効貯水量	5,740×10 ³ m ³	
満水位標高	158.9 m	
利用水深	17.9 m	
水圧鉄管		
内径	4.8～4.2 m	
全長	平均約 94.3 m×4 条	
発電所出力		
最大	303,000 kW	

2.2 水車専用機およびポンプ水車の仕様			
		1号機	2～4号機
		(水車専用機)	(ポンプ水車)
(i) 水車仕様			
有効落差			
最	高	95.0 m	94.7 m
認	可最大時	84.7 m	84.3 m
基	準	81.7 m	81.3 m
最	低	47.6 m	47.4 m
水車出力			
最	大	78,500 kW	78,000 kW
認	可最大	78,500 kW	78,000 kW
基	準	75,700 kW	74,800 kW
使用流量(最大)		106 m ³ /s	106 m ³ /s
回 転 速 度		200 rpm	144 rpm
比 速 度		224.2 m-kW	136.2 m-kW
(ii) ポンプ仕様			
揚 程			
最	高	—	96.4 m
基	準	—	79.7 m

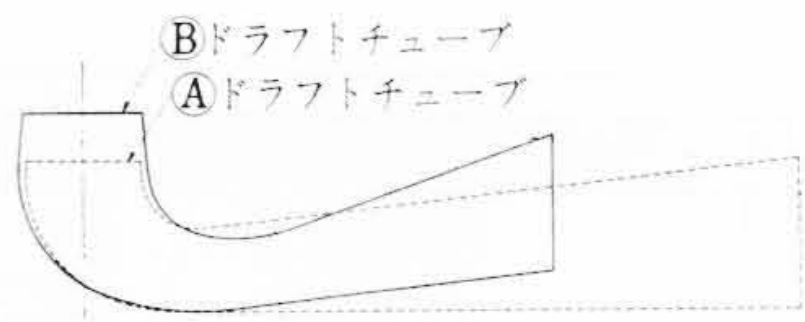


図3 ①②ドラフトチューブ比較

最低	—	57.2 m
揚水量(最大)	—	106.3 m ³ /s
電動機容量	—	73,000 kW
回転速度	—	144 rpm
比速度	—	48.4 m-m ³ /s
(iii) そのほかの仕様		
最大速度変動率	40%	40%
最大水圧値(ケーシング中心において)	132.7 m	143.4 m
最大無拘束速度	400 rpm	230.4 rpm
発電機に要求するGD ²	4,000 t-m ²	7,800 t-m ²
据付方式	単床式	単床式

本発電所の機器の据付は、1号機にさきがけ2号機先行で開始された。昭和43年9月に2号機の有水試験を開始し、引き続き10月に1号機が開始され、各種の試験を実施したのち、11月よりそれぞれ順調に営業運転にはいった。ついで3、4号機は昭和44年7月に運転を開始し好調のうちに現在に至っている。以下そのおもなる試験結果の概要について報告する。

3. ポンプ水車

3.1 ポンプ水車の開発研究

新成羽川発電所のポンプ水車は機種ならびに容量、構造などについてはほかの大容量揚水発電所と著しく異なるものはないが、設計に当たっては効率試験およびキャビテーション試験などの基本特性試験のほか、下記の模型による特殊試験を実施し実機の運転性能を確認するとともに既に運転が開始されているほかの発電所の大容量ポンプ水車製作経験と、運転実績をじゅうぶんに折り込み、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渡って検討が加えられた。

3.1.1 ドラフトチューブ長さ形状試験

ドラフトチューブ設計に当たり、図3に示す形状の異なるA、B2種類のドラフトチューブについて水車およびポンプの効率、吸出管側壁の静圧分布、吸出管およびケーシングの機械的振動を種々の負荷時において比較測定した。

測定結果はポンプ、水車の効率および吸出管側壁の静圧分布ともにほとんど変わりなく、振動のみあらゆる運転状態において②吸出管がすぐれていることが確認され、実機には②吸出管が採用された。

3.1.2 完全特性試験

ポンプ運転中電動機電源がしゃ断された場合、安全な圧力上昇値内で逆流量をできるだけ小さく押えるガイドベーン閉鎖方法を決定するため、また、油圧機構の故障などによりガイドベーンおよび入口弁が閉鎖しない場合、水は逆流し水車の無拘束速度(NR)に至るがこのときの逆流現象および発生する負圧現象を検討するために、入力しゃ断されガイドベーンおよび入口弁が閉鎖せず揚水時を正転正流として、正転正流→正転逆流→逆転逆流の経路をたどり水車の無拘束速度に至る過渡的な全領域の完全特性を使って電子計算機により前記過渡現象の逐次計算を行なった。

その結果特に異常な水圧上昇、降下あるいはサージングなどは

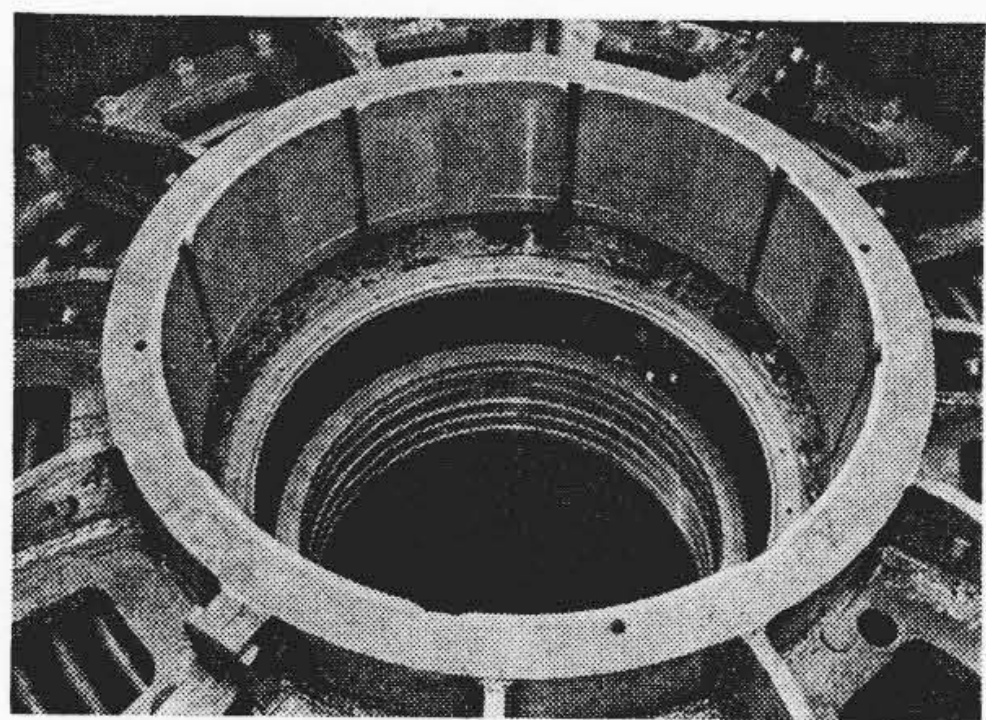


図4 多円弧複合形軸受

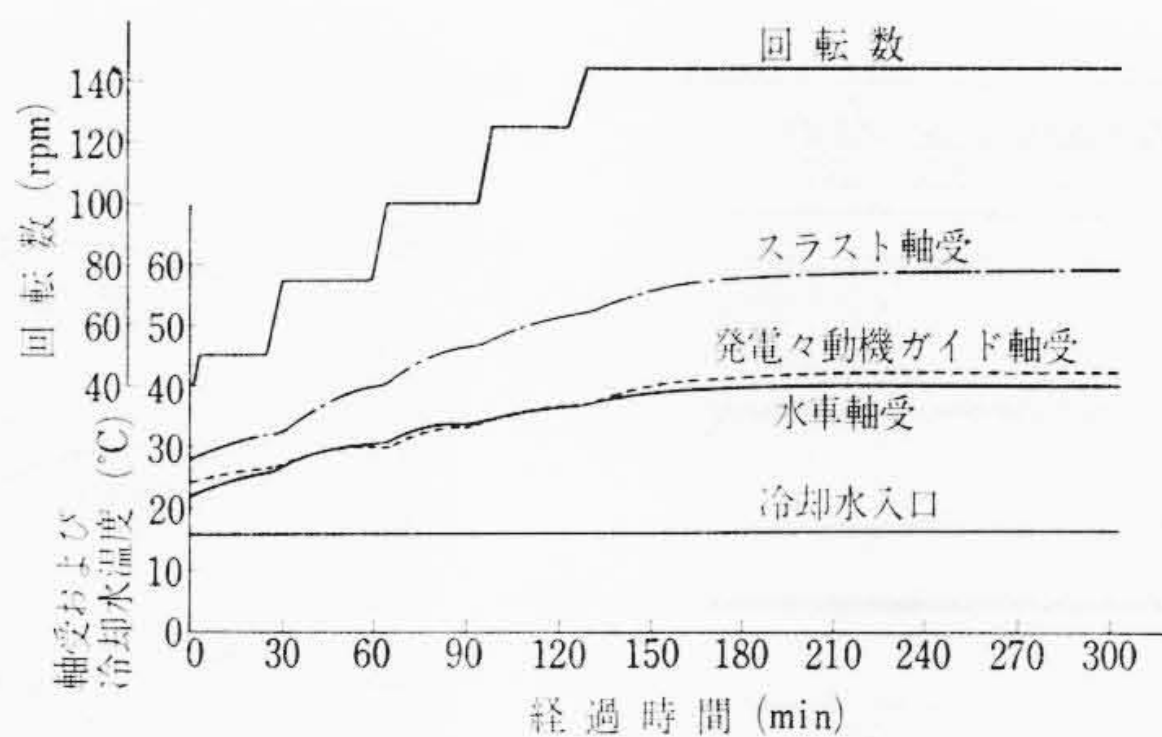


図5 2号機メタルならし運転結果

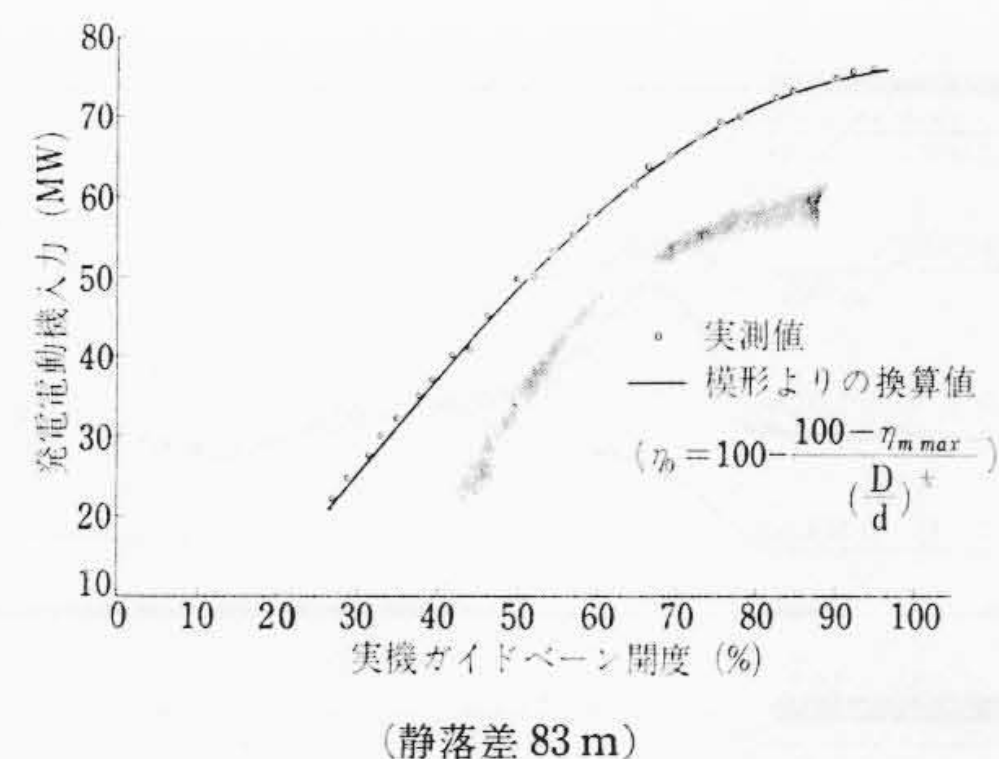


図6 2号機ガイドベーン開度-水車出力曲線 (静落差 83 m)

生じないことが確認された。

3.1.3 単独ガイドベーン振動試験

ポンプ起動時ガイドベーン小開付近において、鉄管の水撃波のサイクルに一致した自励振動が発生することは既に経験され、この原因が主としてガイドベーン頭部長さと尾部長さの比に関連するものであることはほかの発電所の運転結果および模型試験によっても確認されており、最近のポンプ水車においてはガイドベーンのこの長さの比をある値に選定することにより起動時の自励振動を防止し好結果を得ている。しかし、水路条件、操作機構のバネ定数、あるいはガタの程度などの悪条件が重畳した場合にも自励振動が発生し得ることが実機および模型試験により判明したため、本発電所ポンプ水車ガイドベーンの形状決定に当たって、これら2種類のいずれの自励振動をも発生しないガイドベーン形状を開発するため単独ガイドベーン振動試験を実施した。

その結果、外部から衝撃を与えても短時間に停止に至る減衰振動が発生するのみで自励振動が発生するおそれの全くないガイドベーン形状を得ることができた。

3.1.4 吸出管給気試験

水車部分負荷運転時ランナ出口の旋回流によって吸出管に生ずるセンターコアの周期的な成長消滅に起因する振動、騒音を防止するため、従来よりほかの発電所にてドラフトパイプ側壁、または、ランナ中心部より圧縮空気を給気した例があるが本発電所ポンプ水車においても、その必要性和効果について模型によりあらかじめ試験することとし、給気量と水圧振幅および構造振幅について測定した。

認可最大有効落差 84.3 m 相当点でガイドベーン開度 30% における給気試験の結果、給気量の増加は吸出管の水圧振幅をいくぶん減少させるが吸出管の構造振幅は給気量に左右されず、部分負荷運転時の吸出管への吸気は必要ないものと考えられたが、実機においては万一に備え念のため給気できるよう配管は備えておくこととした。

3.1.5 水面押下試験

一般にポンプ水車においてはポンプ起動に先だち起動時の反抗トルクを軽減する目的でランナ回りの水を、圧縮空気により押し下げ、ランナを空中にて回転させる方式がとられているが、この押下げ水面の動揺の観察と、機器が規定回転に達したのち、排気充水を行なう際のランナ背圧の変化を模型により観測した。

表面波の運動は水深が浅くなると波高が大きくなることは一般に知られているが、この試験においてもこれらが明らかとなった。すなわち、押下げ水面をある値以上に深くしランナ下端よりの距離を大きく離そうとすることは水深が浅くなり、吸出管底の影響がはいるため必ずしも波立を小さくすることにはならないことが確認された。したがって実機の押下げ水面は、本模型試験結果と他発電所の実績を勘案し決定された。

3.2 ポンプ水車の現地運転結果

3.2.1 メタルならし運転結果

本発電所の水車軸受構造は、従来のセグメント形、ならびに円筒形軸受と異なり、水車発電機などの大形立軸機を対象とし図4に示すように新しく開発された多円弧複合形軸受 (Multiple Arc Combination) が採用されており、その点実機運転特性が注目されたが、実機メタルならし運転結果は全く異常なく、軸受温度も図5に示すように、予想どおり安定した結果が得られた。

なお、多円弧複合形軸受は、研究結果によれば一般の円筒軸受と比較し、負荷容量は約 15 倍に増大し、軸受調心も改善されて、摩擦損失は、約 50% 減少し、このため実際の軸受温度上昇は、約 40% 低下を示している。

3.2.2 水車負荷試験

基準落差付近における運転状態はきわめて良好であり、静落差 83 m での開度-出力試験結果は、図6に示すように模型試験結果と比較し、高い一致度を示している。

また、本発電所ポンプ水車には、矢木沢、池原の両発電所にて発生した部分負荷運転時ランナ出口の旋回流により吸出管に生ずる真空柱の周期的な成長消滅に起因する異常音ならびに振動を防止するため、あらかじめ吸出管への給気が可能なように配管を設けてあったが、運転結果は部分負荷時の振動、騒音ともに非常に少なく、給気する必要はないものと判断された。

なお、上記部分負荷運転時の異常音防止対策として、池原、矢木沢発電所にて効果のあったランナコーン形状の改良を本機では既に採用しており、今回の結果からも部分負荷時の異常音はランナコーン形状により防止可能であることがさらに確認された。

定常運転時における水車軸振れは 4/100~6/100 mm, ピット内騒音 96 ホーン程度であり、非常に静かな運転状態と考えられる。

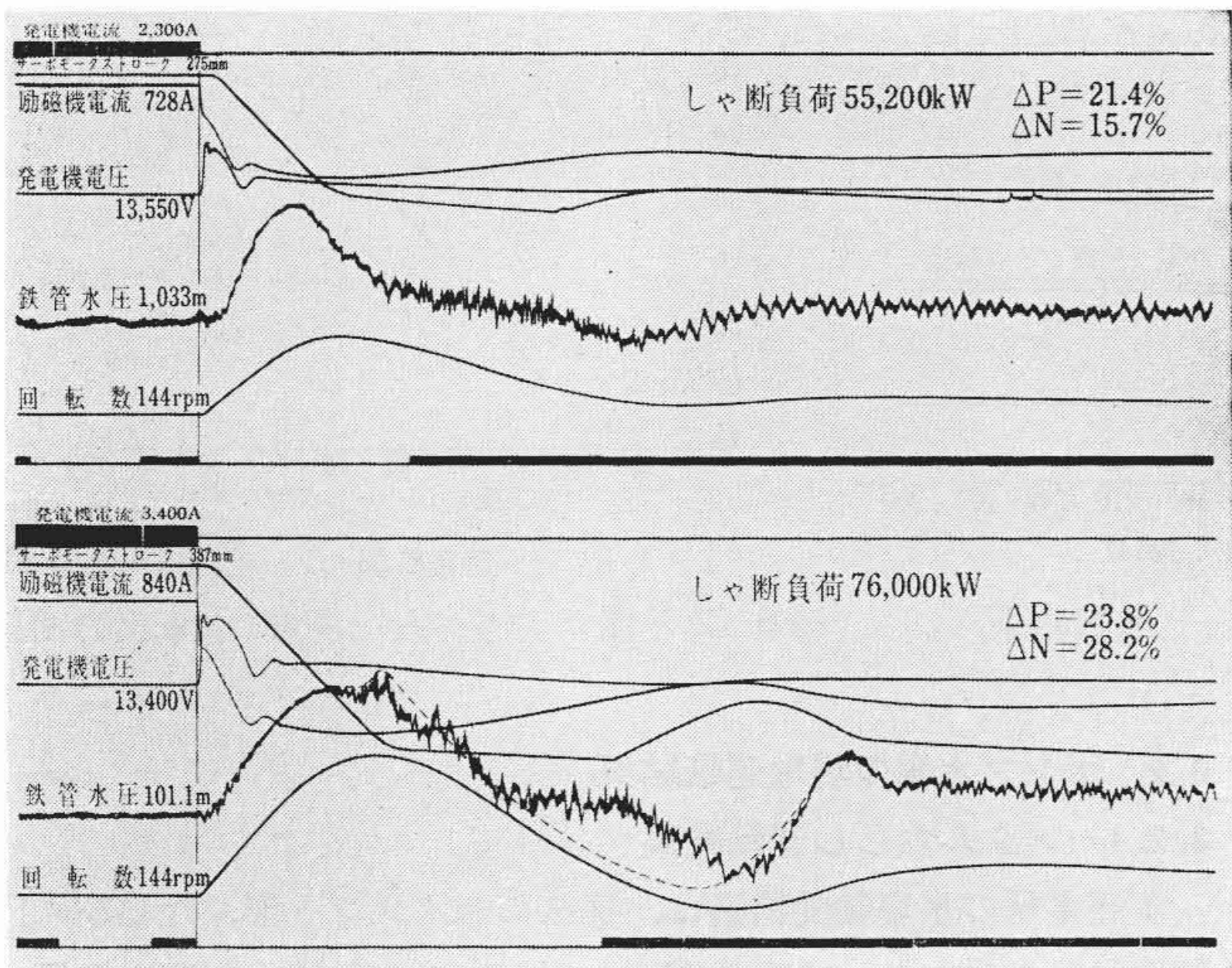
3.2.3 水車負荷しゃ断試験

本発電所ポンプ水車の水圧上昇率決定に当たっては、ダム形式を重力アーチ式ダムとし、その直下に発電所が設けられたので鉄管が短く、このため水圧上昇 (ΔP) による鉄管の費用増加が少ないこと、また、発電電動機の GD^2 を固有とすることによって、経済性を図るなど、鉄管、発電電動機そのほかを総合的に検討し、最も経済的な水圧上昇率 (ΔP) 40%, 速度上昇率 (ΔN) 40%, 発電電動機 $GD^2=7,800 \text{ kg-m}^2$ が採用された。また、水圧上昇 (ΔP) の値についてはあらかじめ模型試験により得られた全般特性を用いて計算を行なった。

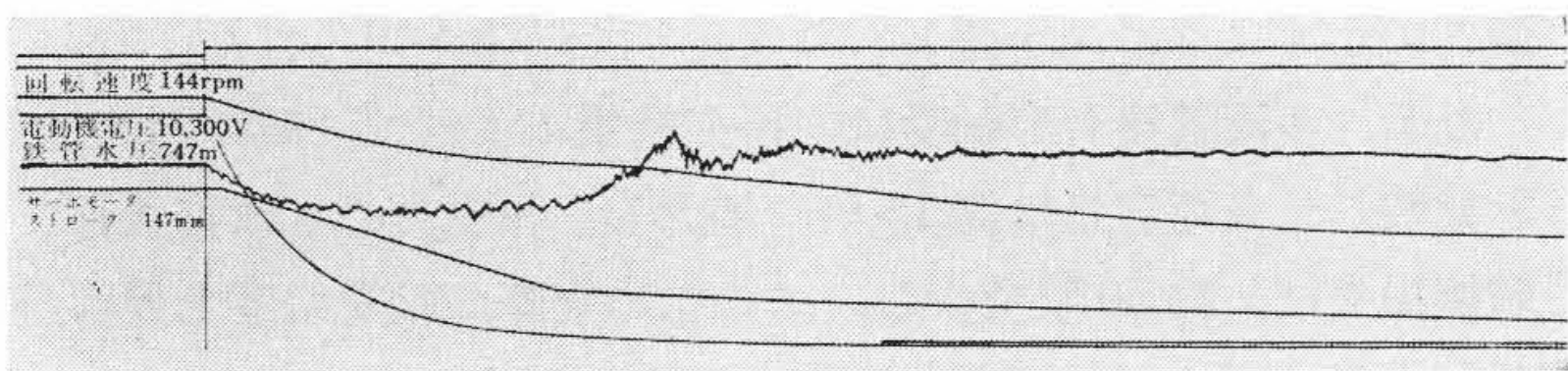
図7は静落差 89.8 m における実機負荷しゃ断時のオシロである。図中の点線は実機負荷しゃ断時条件を電子計算機を使つての計算結果で、実機における負荷しゃ断時の値とほぼ一致した値を示している。

3.2.4 ポンプ起動試験

本発電所ポンプ水車のポンプ起動方式は入口弁およびガイドベーンを閉として、ランナ回りの水を圧縮空気により押し下げ、電



(静落差 89.8 m)
図7 2号機水車負荷しゃ断試験オシログラム



(実揚程 83 m, シャ断入力 68,640 kW)
図8 2号機ポンプ入力しゃ断試験オシログラム

動機を起動し、並列後水面を回復させランナ出口部分の圧力が揚水に必要な圧力（プライミング水圧）に達したことを継電器（63 WR）により検出し、ガイドベーンを小開させ、続いて側弁を開き側弁全開後に入口弁を開きガイドベーンを適正開度まで徐々に開いていく入口弁起動方式と、入口弁をあらかじめ開放しておきガイドベーンを全閉し、入口弁起動同様に電動機を起動してプライミング水圧を検出後ガイドベーンを小開し続いて適正開度まで徐々に開いていくガイドベーン起動方式のいずれの方式でも起動が可能のようにあらかじめ2本立シーケンスとして計画が進められ現地試験においても、入口弁、ガイドベーンの両起動方式について試験を実施した。

結果はいずれの起動方式でも問題ないことが確認され、最終的には起動時間が多少短く運転状態もわずかながら良好なガイドベーン起動方式が採用された。

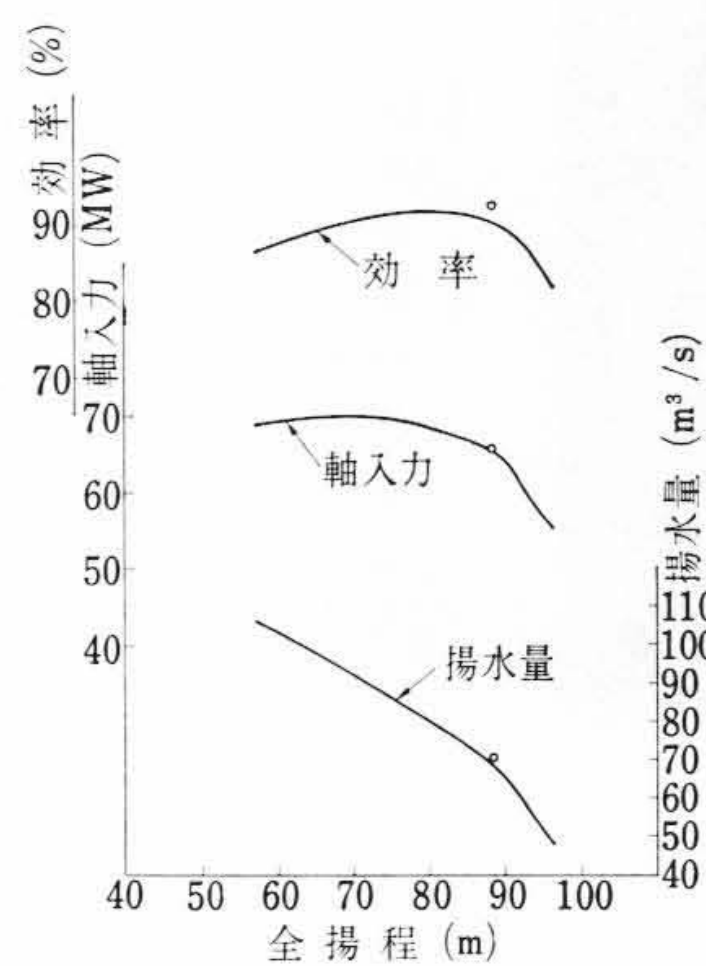
(1) 入口弁起動試験

起動から63 WR 確立までを自動、63 WR 確立後は手動によりガイドベーンを10%まで小開し、側弁次いで入口弁を開としたところ鉄管水圧96 mに対し、ケーシング圧が140 mに上昇した。これはガイドベーン小開時流水部面積が側弁口径に対し大きすぎたことに起因するものと判断されたので、主弁開時ケーシング圧が110 m程度になるよう、ガイドベーン小開開度を調整した結果、起動から適正開度での運転に至るすべての状態に満足する結果が得られた。

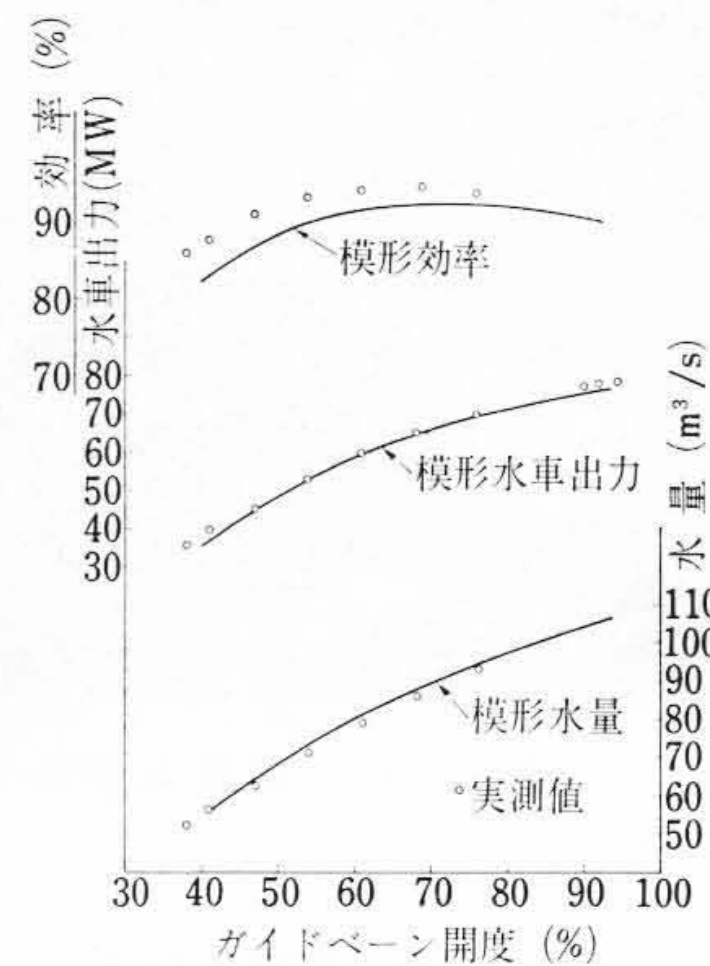
(2) ガイドベーン起動試験

ガイドベーン小開を10%とし、手動による起動停止および自動による起動停止を行なったが、ガイドベーン小開時にも鉄管に異常水圧上昇などは認められず、じゅうぶん満足する結果が得られた。

なお、実揚程82 mにおける適正開度時入力69,500 kWにおいて、水車軸振れ6/100～8/100、ピット内騒音98 ホーンと良好な



(超音波法による)
図9 2号機ポンプ効率試験結果



(超音波法による基準落差 81.3 m に換算)
図10 2号機水車効率試験結果

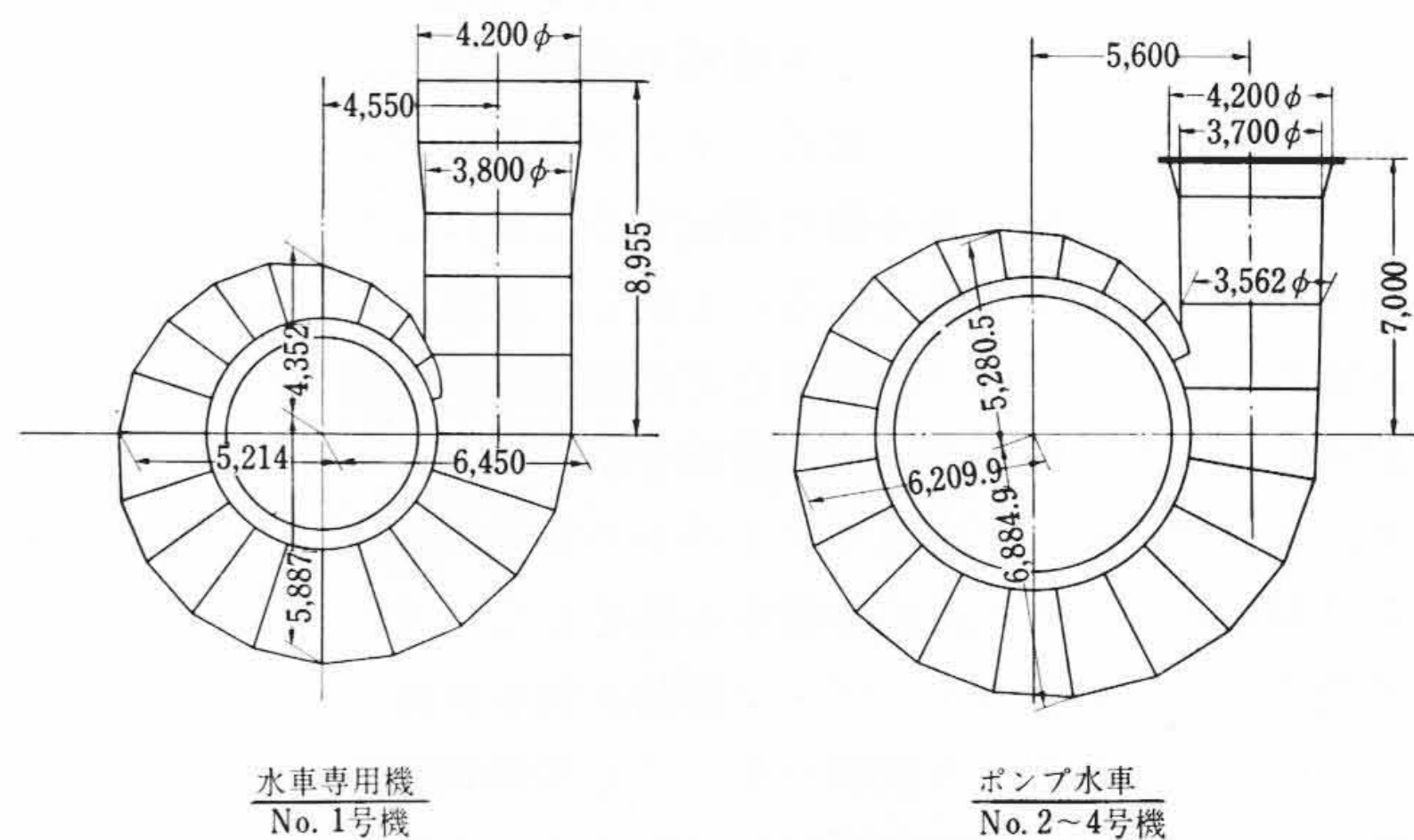


図11 ケーシング概略寸法図

運転結果を得た。

3.2.5 ポンプ入力しゃ断試験

図8は実揚程83 mにおけるポンプ入力しゃ断時のオシロである。試験結果は、水圧、回転速度の変化とともに計算値と近似な値を得たが、水圧下降率は、計算値よりいくぶん低い値を示した。現地での試験に当たっては、模型試験により得たポンプ水車の完全特性を使い、ガイドベーンの閉鎖時間を種々変えた場合の水圧、回転速度の変化を、あらかじめ計算により求めたダイヤグラフを用意して現地においてガイドベーン閉鎖時間を決定したので、試験時閉鎖時間を全く調整することなく試験を完了することができた。

本発電所におけるポンプ水車の過渡特性試験において、負荷しゃ断入力しゃ断試験ともに、計算値とほぼ近似な値を得たことは、模型試験および計算方法が、精度の高いものであることを証明したものである。

3.2.6 水車およびポンプ効率試験

本発電所ポンプ水車の効率試験は、模型による受入試験により、既に合格しているので、今回の試験は参考試験であり、中国電力株式会社側で超音波法により実施されたものである。その結果は、ポンプ運転時、水車運転時ともに、模型換算値および保証値を上回り、じゅうぶん満足する結果が得られた。

図9はポンプ効率試験結果、図10は水車効率試験結果を示したものである。

4. 水車専用機

水車専用機についても、ポンプ水車と同様、容量、構造などほかの大容量機と著しくことなるものはないが、据付中心をポンプ水車

中心と同一とすることにより、キャビテーション係数を大きく選定することが可能であり、中国電力株式会社との共同研究の段階において、一般標準を上まわる高比速度の水車が採用された。このため模型試験では効率特性と振動特性に重点がおかれた。

一方、水車専用機は入口弁を持たないため、ガイドベーンは油圧なしの状態でも全閉付近では無負荷開度以上に開かない特性となるように設計された。

現地試験結果は、出力、効率およびガイドベーン開閉力特性など予想どおりの好結果を得た。また基準落差付近における運転状況は振動、騒音とも少なく良好であった。

5. ケーシング

ケーシングは水車専用機、ポンプ水車ともに現地溶接構造が採用された。材質としては両者とも 60 kg/mm^2 高張力鋼板が使用された。現地溶接作業は、溶接による変形が最小となるよう、上カバー、ウォールリング、4～8本のガイドベーンを組み込み、溶接途中でランナとのしゅう動部、ガイドベーンサイドギャップなど主要個所の寸法を測定し、その変形方向により次の溶接箇所を決めるなど細心の注意がはらわれた。

本ケーシングは溶接完了後も水圧試験を行わないため溶接部の健全性はX線により確認された。

図 11 はケーシングの概略寸法を示したものである。

6. 結 言

以上、新成羽川発電所の概要と、今回相次いで運転を開始した大容量ポンプ水車ならびに水車専用機の現地運転結果について報告した。

これらの機器は現在好調のうちに運転中であり、この運転実績は今後ますます大容量へと発展する揚水発電所建設のために貴重な基礎を確立したものと確信する次第である。

なお本発電所は中国地方最大の揚水発電所であり、これが広範な重工業地帯を背景とした瀬戸内海地方の電力供給面で、ますます揚水発電所としての重要な役割をいかんなく発揮できることを期待してやまない。

終わりに新成羽川発電所機器の設計製作ならびに現地試験に当たり種々の貴重な指針を与えられた関係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518182号(特公昭42-25523号)

南郷忠男・島田要吾

精 密 鋳 造 用 組 立 模 型

流体変速機用羽根車のような複雑な形状で寸法精度の高いものはロウ型精密鋳造法で製作するが、そのロウ型は羽根車および羽根車上・下・側壁の三つの部分を別々に作り、その部分模型の双方の接着面を加熱したコテを使って溶融接着して一体に組み立てている。この場合、特殊なコテを使用しても狭い弯曲部流路のように外部から見ることはできないところは接着作業が困難で、ロウ模型の膚を害するばかりでなく、加熱したコテの影響により模型の変形や部分模型相互のずれなどを生じ、寸法精度が著しくそこなわれる欠点がある。

この発明は上記諸欠点を除去したもので、発泡剤を含有するポリスチレン原粒をあらかじめ一次発泡させ、これを所定の金型の中に充てんしたのちに、その金型を加熱して二次発泡させて作った羽根5およびその上・下・側壁6、7の3種の模型を図1に示すように組み合わせ、その後加熱したコテのくさび部13をタボの切欠11に押しつけてダボ10の先端部を膨張させ、そのダボ10によって前記模型を強固に一体に組み立てることを特長とするものである。

上記組立模型を使用して所要の鋳型を作るには、図2に示すように発泡ポリエチレン製の湯口14、押湯15を取り付けた組立模型を鋳型わく内に納めて砂込めし、溶剤によりポリスチレン模型を鋳型から溶出する。このようにすれば寸法精度の高い精密鋳造用鋳型すなわち流体変速機用羽根車の鋳型が得られる。

この発明の組立模型は従来のロウ模型に比べて変形、収縮がほとんどなく、組立が容易であるばかりでなく、組立精度が非常に高度であるから、立体的に複雑な精密鋳造品の製作に好適である。

(野村)

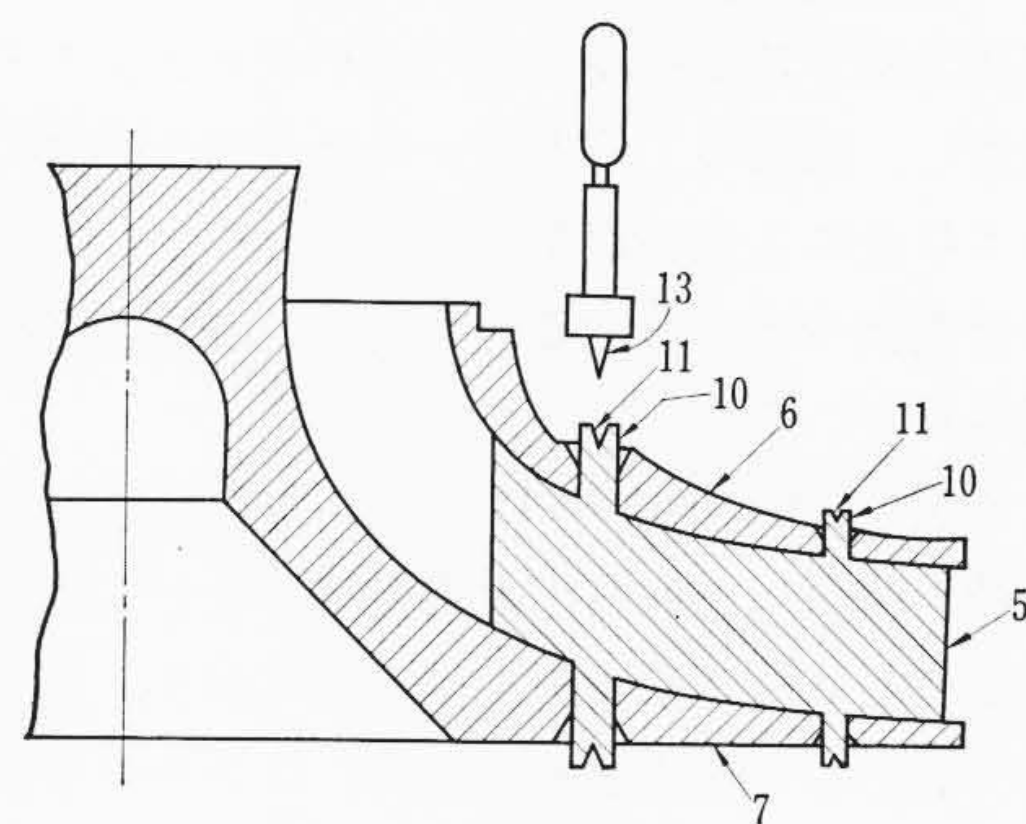


図 1

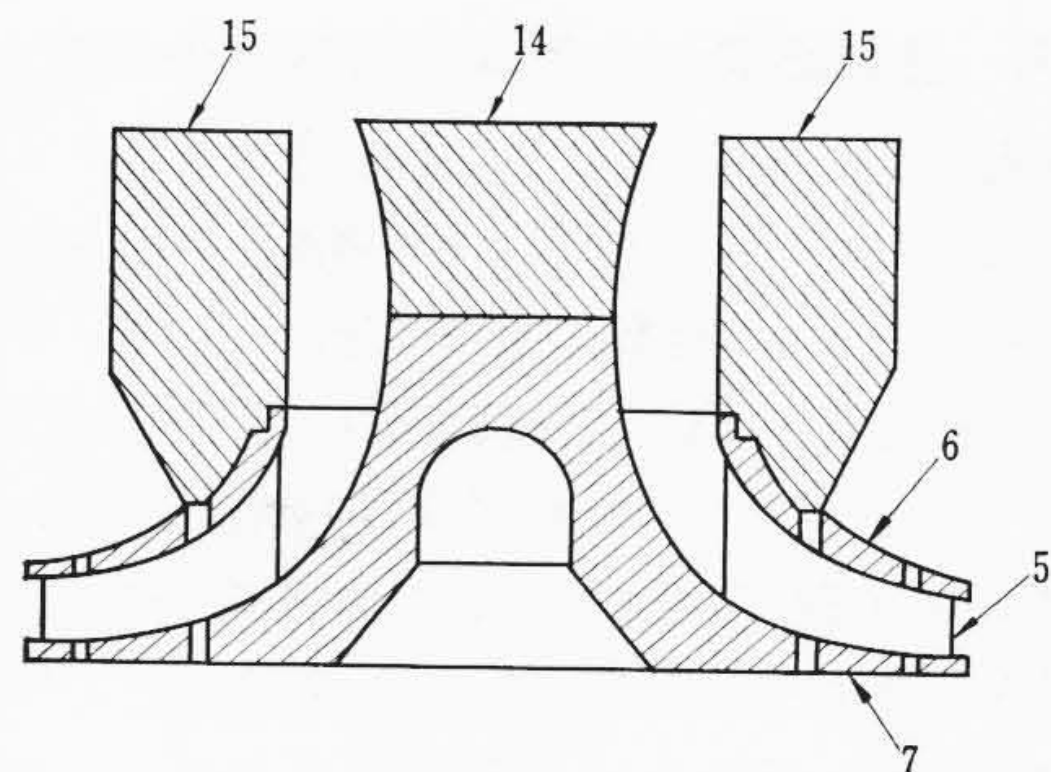


図 2