

電源開発株式会社沼原発電所用

高落差ポンプ水車現地試験結果の解析

Field Test Results of High Head Pump Turbines for Numappara Power Station

Hitachi recently completed and delivered three units of 230,000 kW pump turbines to the Numappara Power Station, Electric Power Development Corporation, a full scale pumped storage power station aimed at meeting the peak load power demand of the day. Among them No. 1 unit was put in commercial operation on July 1st this year followed by No. 2 unit which started its operation on July 31st.

This article describes the operational characteristics and load- and input-rejection characteristics of these unusual pumps which broke through the limit of 'single stage 500-meter head' for the first time in the world. The article also covers the following:

- 1) Outline of the power station.
- 2) Development of performance for these pump turbines.
- 3) Their structural characteristics and strength.

田高稔康* *Toshiyasu Takô*
 山本景彦** *Kagehiko Yamamoto*
 蜂谷武雄** *Takeo Hachiya*
 山部正博*** *Masahiro Yamabe*

1 緒言

水力開発地点の拡大と自然の地形を利用した土木量の低減および経済的運用上の面より、近年ポンプ水車はますます高落差、大容量化する傾向にある。高落差ポンプ水車の揚程推移は図1に示すとおりであり、電源開発株式会社沼原(ぬまっばら)発電所(以下、沼原発電所と略す)用ポンプ水車は有効落差500m(全揚程528m)、出力230,000kWの世界最高落差を有する記録的高落差大容量機である。このため設計、製作にあたっては、種々の模型試験によるポンプ水車の性能開発、高落差(高揚程)における振動、長放水路であるための水柱分離、水撃作用、それに伴う振動などの検討⁽²⁾を行なった。特に性能面においては実揚程模型試験を実施し、実機性能の確認を行ない、単段高落差、高揚程ポンプ水車の性能開発に努めた。

本発電所は、昭和48年3月末に据付および無水調整を終了し、下池の湛(たん)水をまって、4月14日夜に初揚水し揚水運転試験を開始した。その後、発電方向・揚水方向、各種試験を行ない、1号機は6月末、2号機は7月末の官庁試験を終え、以来営業運転を続けている。ここに本発電所のポンプ水車の運転特性およびしゃ断特性について報告する。

2 発電所の概要

沼原発電所は栃木県黒磯市の茶臼岳のふもと那珂川の最上流部に建設されたもので、農林省が那須野原開拓建設事業の一環として昭和43年度より那珂川の最上流部に建設中の深山(みやま)貯水池を下池とし、その至近距離にある那須岳西麓(ろく)の沼原地区に建設した沼原調整池を上池とする本格的純揚水式発電所である。本発電所から発電する電力は、大容量の火力、原子力発電所の電力が日々の電力負荷の基底部を

受け持つのに対して、電気の使用量が増大する時間帯の尖(せん)頭負荷を受け持つことになり、大需要地である東京に近いので電力の供給に大きく寄与することになる。また深山

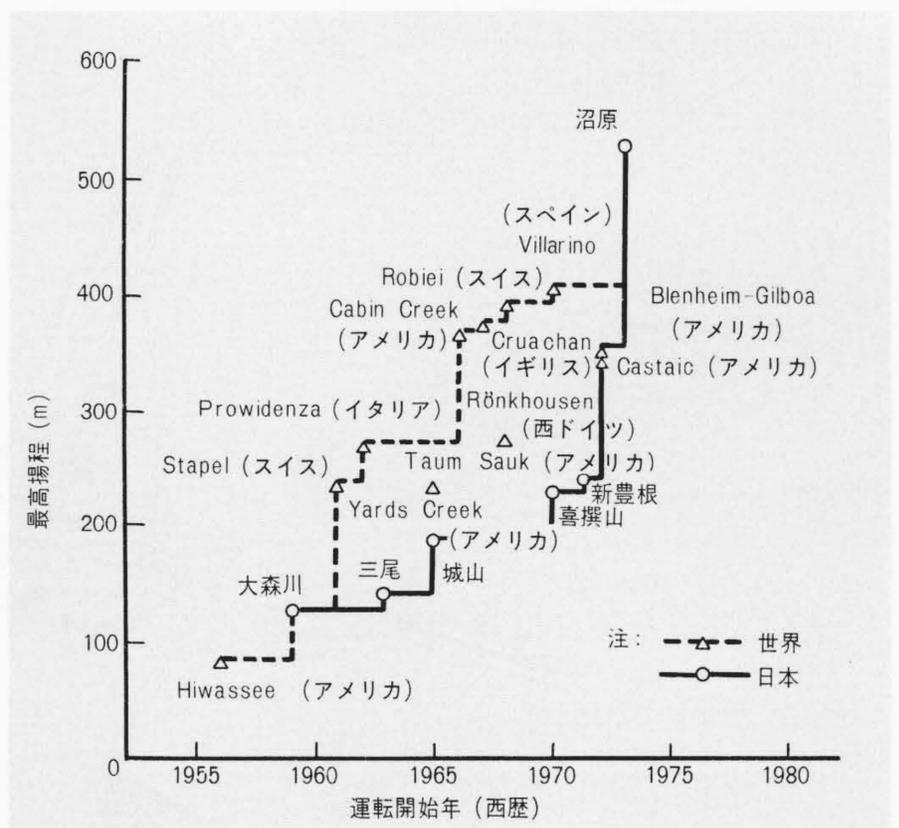


図1 高落差ポンプ水車揚程推移(単段フランシス形ポンプ水車) 運転開始されているポンプ水車ではいっきよに500mの壁を破り世界最高揚程を誇る水車である。

Fig. 1 Changes in Pump Turbine Total Head of Single Stage Reversible Pump Turbine

* 電源開発株式会社 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所



図2 230,000kWポンプ水車ランナ組込作業 高落差ポンプ水車のため、のみ口幅の狭い扁平ランナとなっている。

Fig. 2 Impeller-runner under Assembly in 230,000kW Pump Turbine

貯水池の利用によって那須野原地域の総合開発に効果を高めることにもなる。発電所の建設地域は日光国立公園内にあるので、工作物の位置、形状などについては自然景観維持のため慎重な配慮がなされている。

図3は発電所の鳥瞰(かん)図を、図4は発電所据付断面図を、図5はポンプ水車工場組立状況を示すものである。

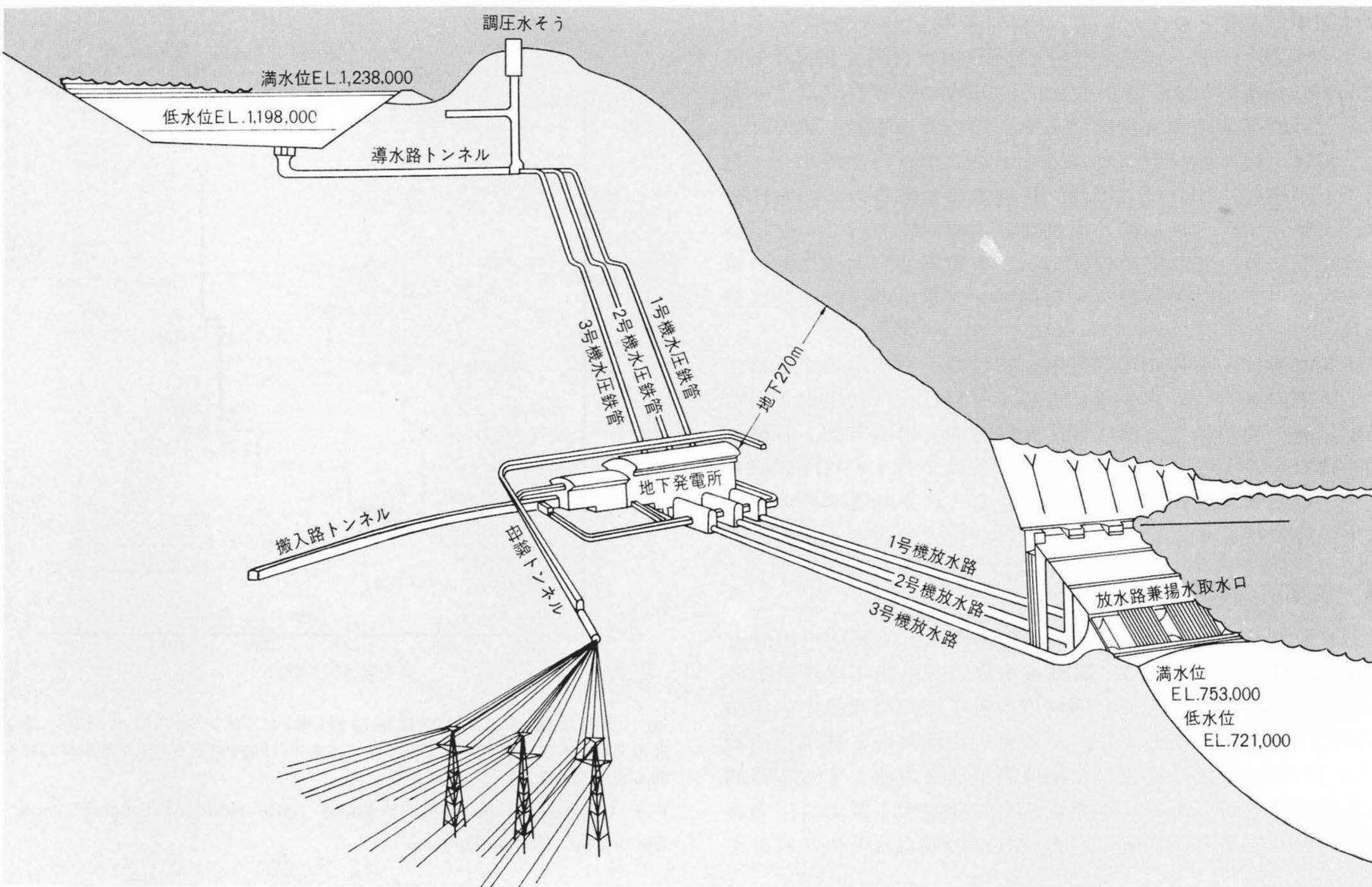


図3 沼原発電所鳥瞰図 「奥那須国民の森」地域に入るのので、自然を破壊しないように地下式となっている。

Fig. 3 Perspective View of Numappara Power Station

3 ポンプ水車の性能開発

3.1 模型試験

沼原発電所用の高落差高速ポンプ水車の性能開発にあたっては各種ポンプ水車の模型性能試験が行なわれ、効率、流量特性の改善が進められた。

実機ポンプ水車には図6に示すように、総体的に最も性能のすぐれたNo. 4 模型が採用された。なお、吸出し管形状と性能に関する研究も合わせて行なわれ、最終的に従来形吸出し管に比べて性能上なんらそん色なく、土木掘削量の少ない経済的な小幅吸出し管が採用された。

3.2 キャビテーション特性

ポンプ運転時のキャビテーション特性は、一般にポンプ揚水量、効率の低下(限界吸込高さ)によって判定されている。しかし実際に、実機ランナのキャビテーション壊食あるいはキャビテーションによる振動は限界吸込高さに達しなくても生じており、これは羽根ポンプ入口側に発生するキャビテーション気泡(ほう)が原因と考えられる。このため、ランナのキャビテーション発生ができる限り少なくなるよう、模型キャビテーション試験で観察実験、圧力脈動測定実験が行なわれ、羽根先端の形状の改良によってこのキャビテーション特性が改善された。

3.3 振動特性

実機ポンプ水車が現地で運転される場合の振動、特に水車軽負荷時およびポンプ高揚程時における水圧振動およびそれに起因する軸振れその他の構造振動をできるだけ軽減するため、模型試験による振動特性の改善にも力が注がれた。

水車軽負荷時の振動特性の改善は、すでに池原⁽⁶⁾、長野⁽⁷⁾、水殿⁽¹⁾など各発電所用ポンプ水車においてその研究結果が立証されているランナコーン形状の改善が適用された。

3.4 実揚程ポンプ試験

約 $\frac{1}{20}$ の模型を製作して実揚程試験を行ない、各部の水圧脈動を測定して実機運転の信頼性を予測確認した⁽¹⁾。

4 構造および強度上の特徴

おもなる特徴は下記のとおりである。

(1) ランナ

直径約5mのポンプ水車ランナののみ口幅が約300mmと扁平のため、ランナ材質には補修溶接容易でしかも铸造性ならびに強度的にすぐれている高Ni 13Cr 铸鋼を開発⁽³⁾一体構造としている。

(2) ケーシング

最大板厚60mmの60kg/mm²高抗張力鋼を使用した現地溶接構造である。水圧試験は厳寒期で水温が4℃前後となったので、脆(ぜい)性破壊防止のため15℃以上に昇温した温水で実施した。

スピードリング主板とケーシング胴板の接続部には、板厚の違い、曲率の変化、目ちがいなどにより局部応力が発生するが、応力測定結果ほぼ設計値に近い値が得られ強度の安全を確認している(図7)。

(3) ランナ実動応力測定試験

ポンプ水車の重要部品であるランナは回転に伴う遠心力と水圧力を受ける。これらの外力に対しては、有限要素法などの各種計算手法によって設計を行なって十分なる強度を有し

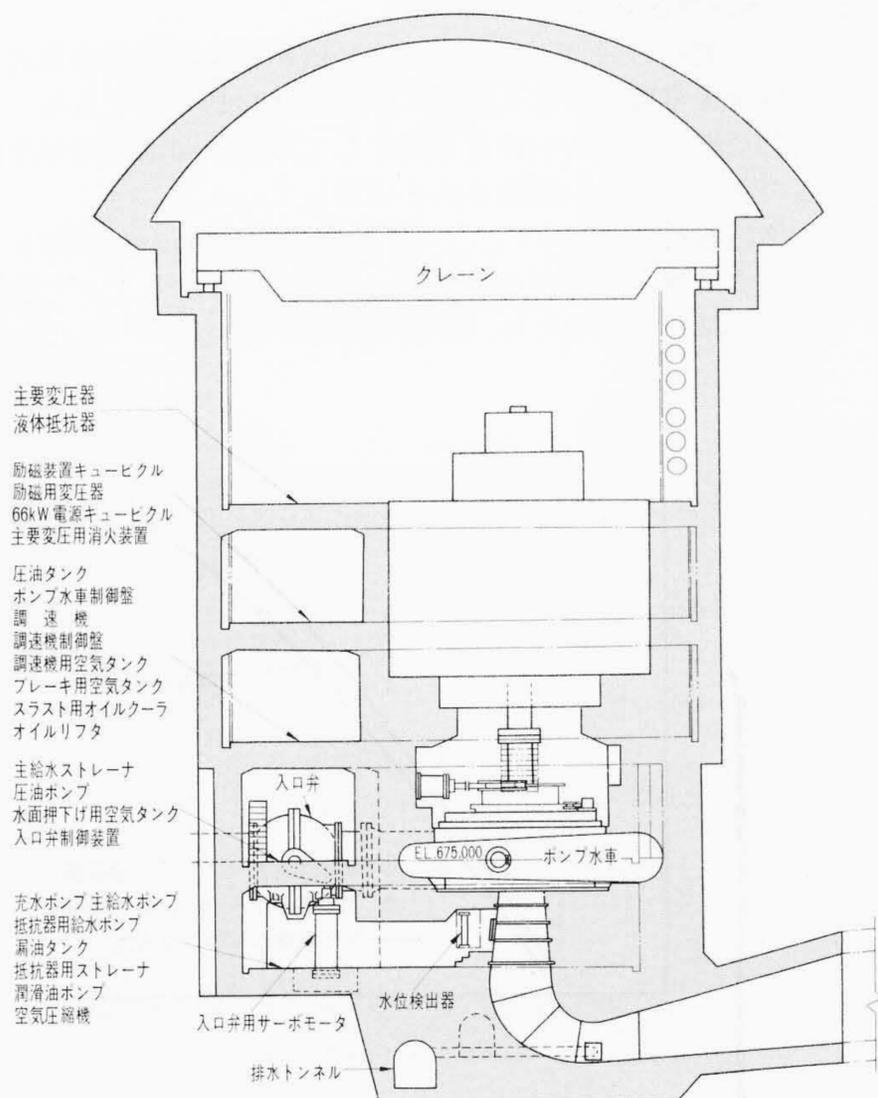


図4 沼原発電所据付断面図 建屋中央に排水トンネルを設け、所内排水を効果的に行なうよう配慮されている。

Fig. 4 Cross Section of Power Plant

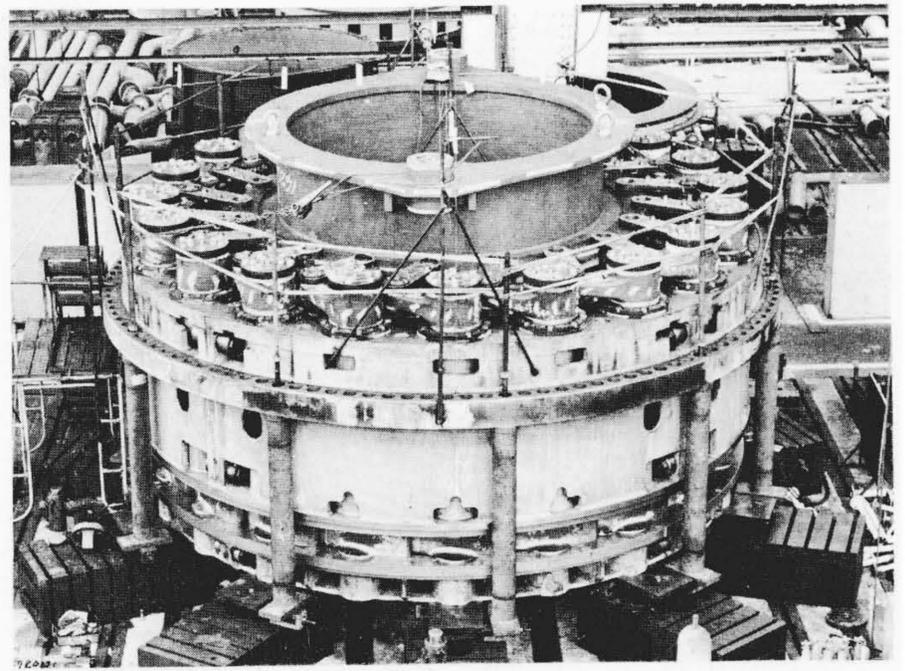


図5 ポンプ水車組立状況 高落差のため、ガイドベーンに比べて、上カバーのの高さが高い構造となっている。

Fig. 5 Shop Assembly of Pump Turbine

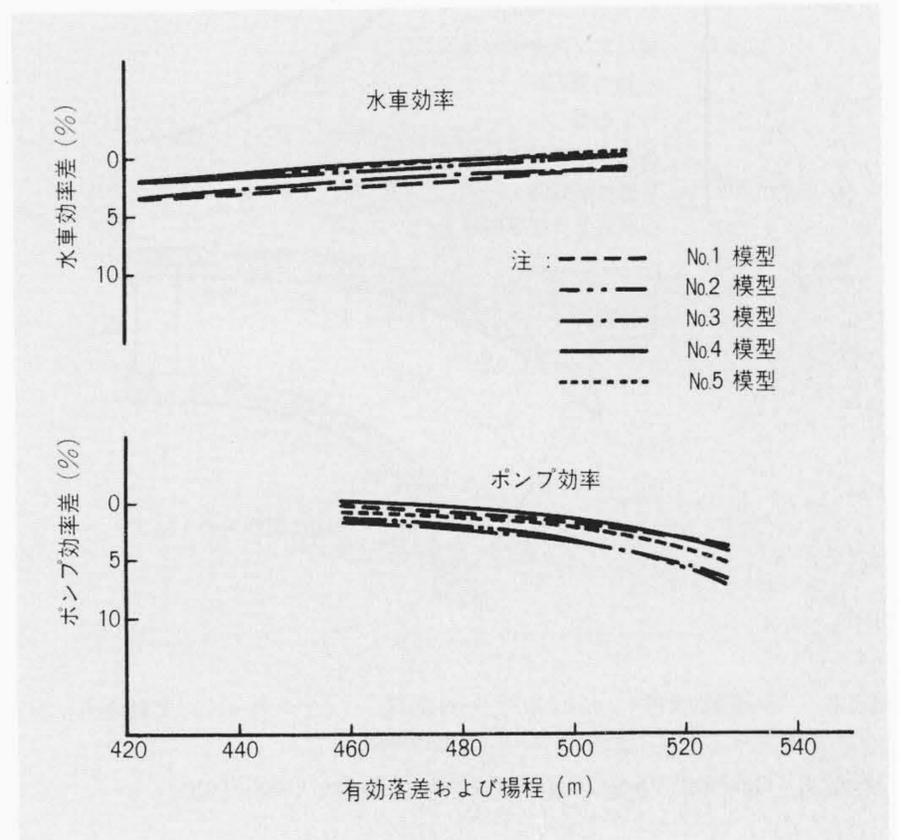


図6 モデルの効率特性比較 五つのモデルの効率特性が試験され、総合的に最も性能のすぐれたNo.4ランナが実機に採用された。

Fig. 6 Comparison of Model Test Results

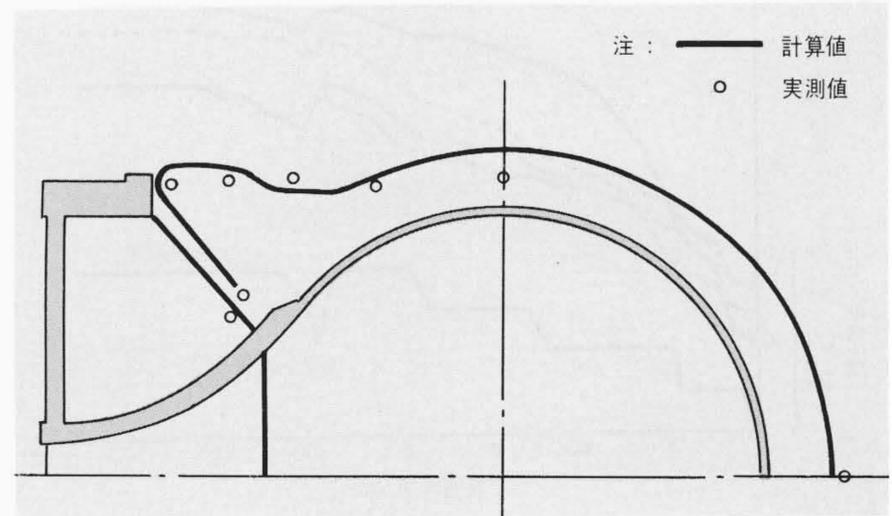


図7 ケーシング外面応力 計算値と実測値は、ほぼ一致している。

Fig. 7 External Stress of Spiral Case

ているが、その応力状態、特にランナの疲労破壊に対する安全率を確認するための、ランナ実動応力測定を行なった。図8はその一例を示すものである。

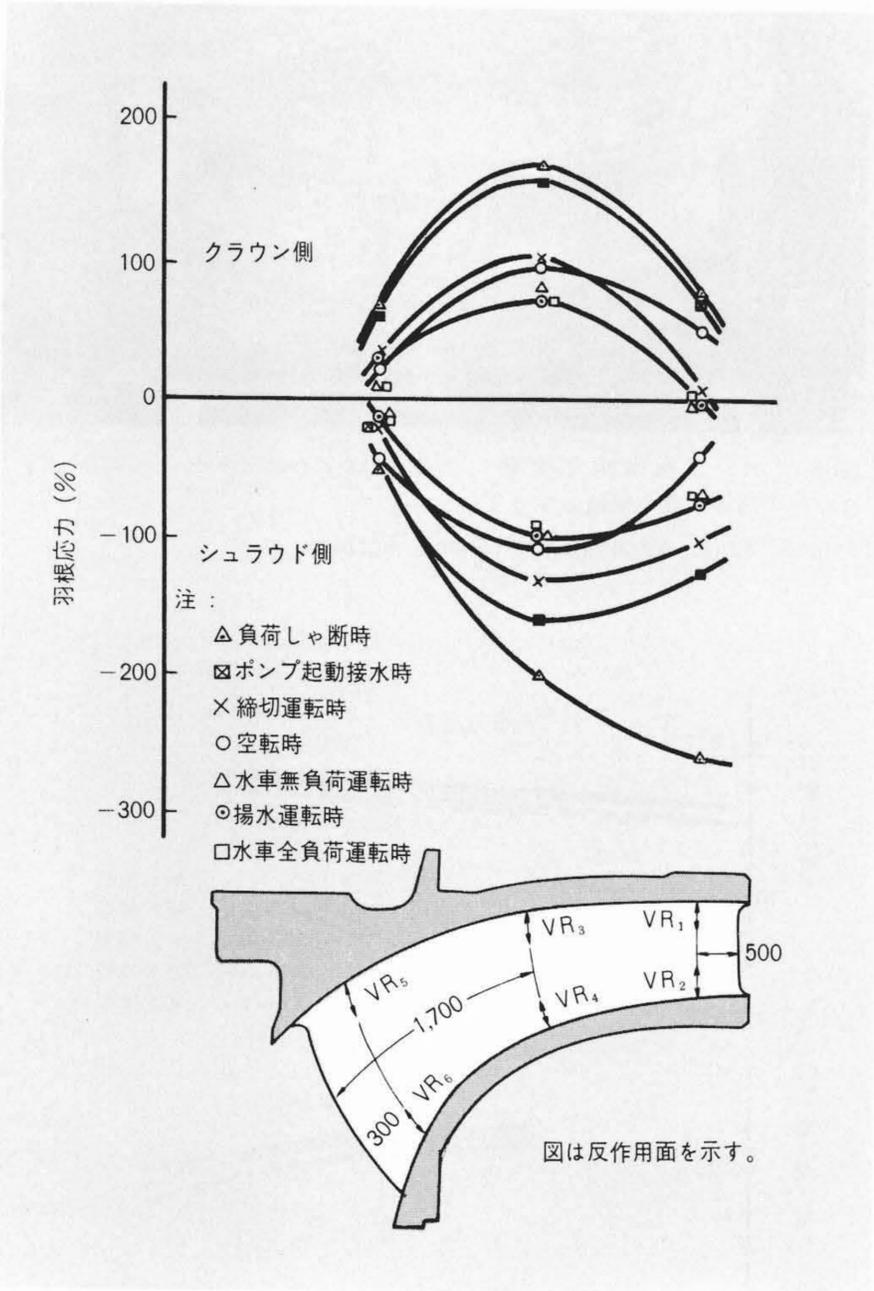


図8 各運転状態におけるランナ応力 ランナベーン実動応力がわかり高落差ランナの疲労寿命予測の信頼性が向上した。

Fig. 8 Runner Vane Stress Under Each Operation

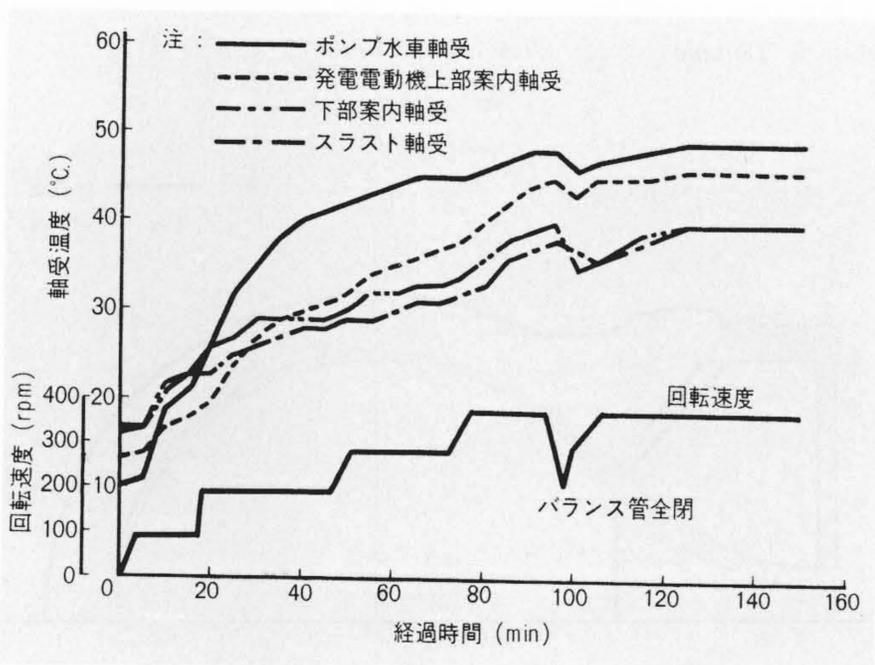


図9 メタルならし運転結果(水車方向) 運転後約2時間で安定した軸受温度特性が得られた。

Fig. 9 Running-in Test for Bearings at Turbine Operation

(4) 水柱分離

放水路長が約500mとこれまでにない長水路であるため、負荷しゃ断時の水柱分離現象についてはモデル試験を通じて現象解析を行なって対策を講じた(4)。

(5) 主軸封水装置

約1/2の模型試験装置をつくり、性能上の基本とされる摺(しゅう)動面の水膜圧力および摩擦係数などを実測し、カーボンパッキングの摺動特性、耐摩耗性および構造上の問題を検討し、実機封水装置に対する機能上の根拠を明らかにし実機に適用した。

5 ポンプ水車現地運転特性

下記はポンプ水車の仕様である。

- 形式：立て軸フランス形ポンプ水車
- 最大出力：230,000kW
- 有効落差：500~422m
- 最大流量：57.1m³/s
- 最大揚水量：50m³/s
- 全揚程：528~458m
- 回転速度：375rpm

5.1 メタルならし運転

本ポンプ水車の軸受には、12セグメントから成るセグメント形メタルを採用している。メタルならし運転は水車方向およびポンプ方向のそれぞれについて行なわれた。

運転結果は異常なく、軸受温度も安定した結果が得られた。図9は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すものである。

5.2 水車運転特性

出力開度試験の結果は図10に示すとおりである。

5.3 ポンプ起動特性

ポンプ起動方式は、1号機、3号機が起動用電動機方式、2号機が1号機または3号機による同期起動方式である。

起動に際しては入口弁を全閉としておき、漏水補給弁を使用したガイドベーン起動方式を採用している。

定格回転速度において、ランナ外周は約100m/sの周速となるため水面押下げ時のガイドベーン漏水を排出しランナ空転トルクを減少させるため、特別な配慮が払われている。

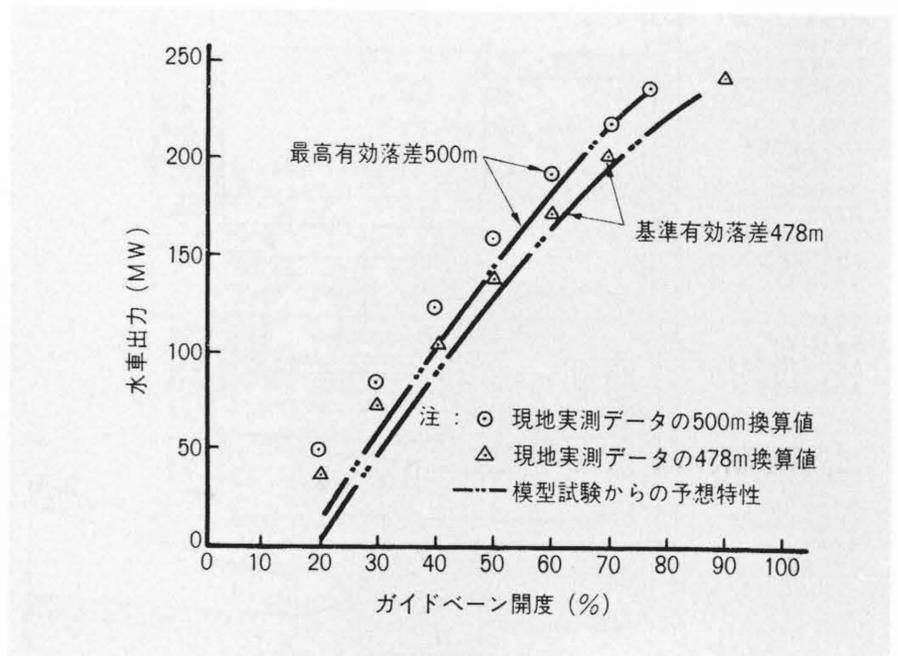


図10 水車運転特性 出力試験にも十分保証を満足する結果が得られた。

Fig. 10 Results of Turbine Load Test

5.4 ポンプ運転特性

図11は、ポンプ運転特性を示すものである。

5.5 水車負荷しゃ断およびポンプ入力しゃ断特性

図12は計算結果と実測値とを対比して示したものである。また図13は最高揚程における入力しゃ断時のオシログラムである。計算値と実測値はほぼ一致している。

5.6 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、基準落差付近の二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14に示すとおりで模型試験からの予想値とほぼ一致している。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 8 kg/cm^2 以下である。

5.7 水スラスト測定試験

発電電動機下部エンドブラケットのたわみ測定の方法により水圧スラストの測定を行なった。その結果は図15および図16に示すとおりであるが、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渡状態を含めた運転状態においても、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。

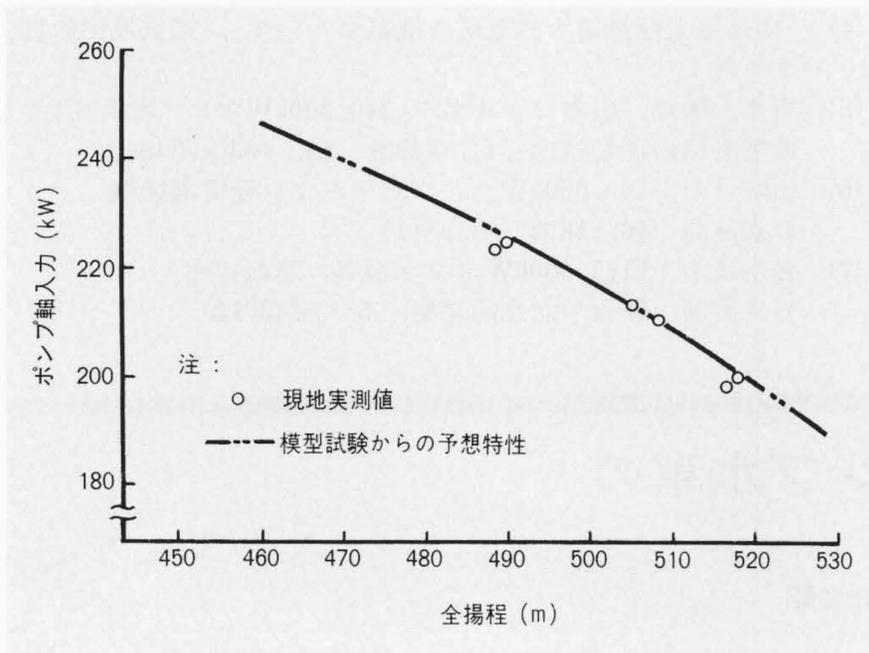


図11 ポンプ運転特性 予想特性と実測値がほぼ一致している。
Fig. 11 Results of Pumping Operation

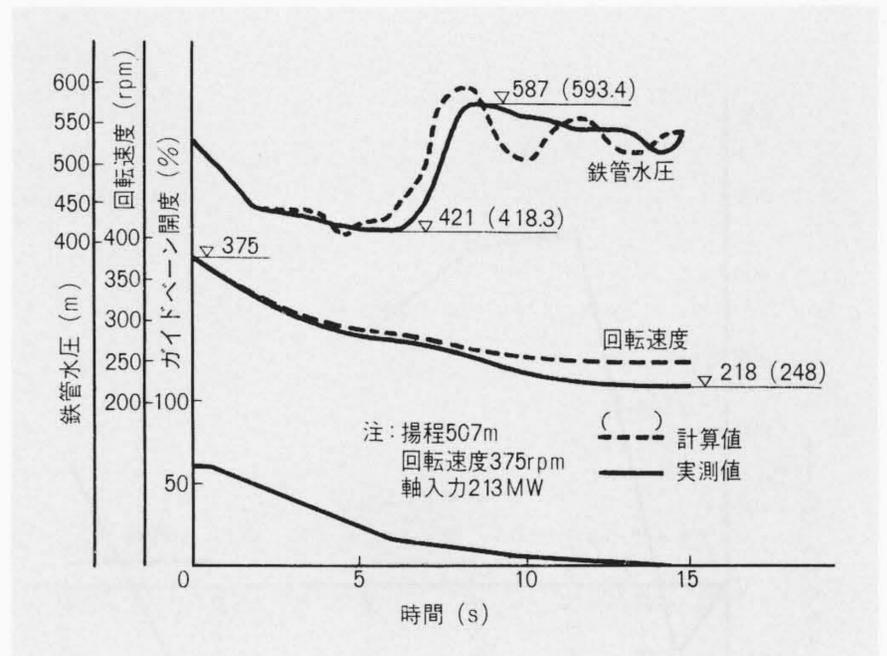


図13 入力しゃ断オシログラム 計算値と実測値がほぼ一致している。
Fig. 13 Results of Pump Input Rejection Test

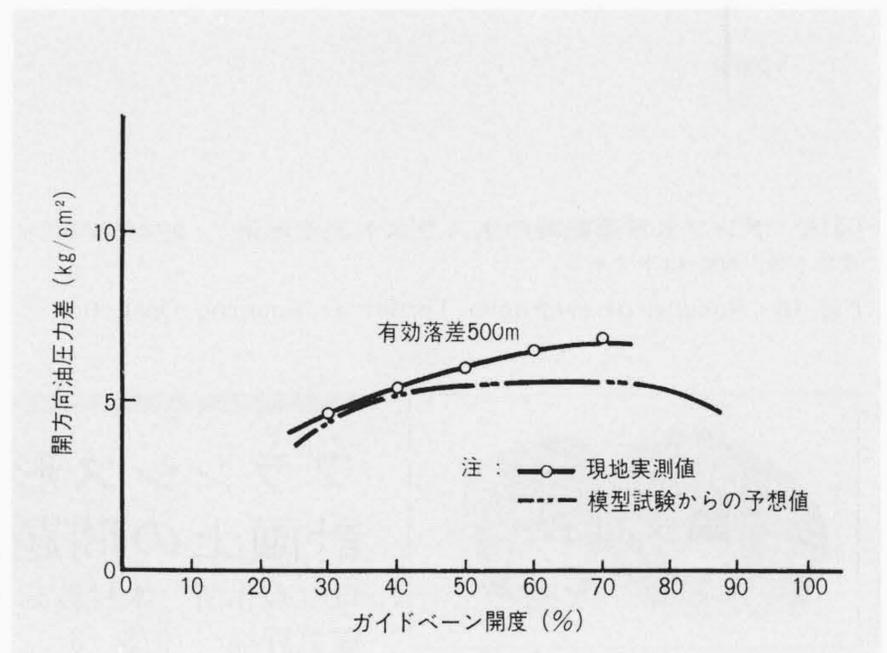


図14 ガイドベーン水力不平衡力測定結果 実測値が最大で約 1.5 kg/cm^2 大きくなっているが、傾向的には大略一致している。
Fig. 14 Results of Operating Force of Wicket Gates

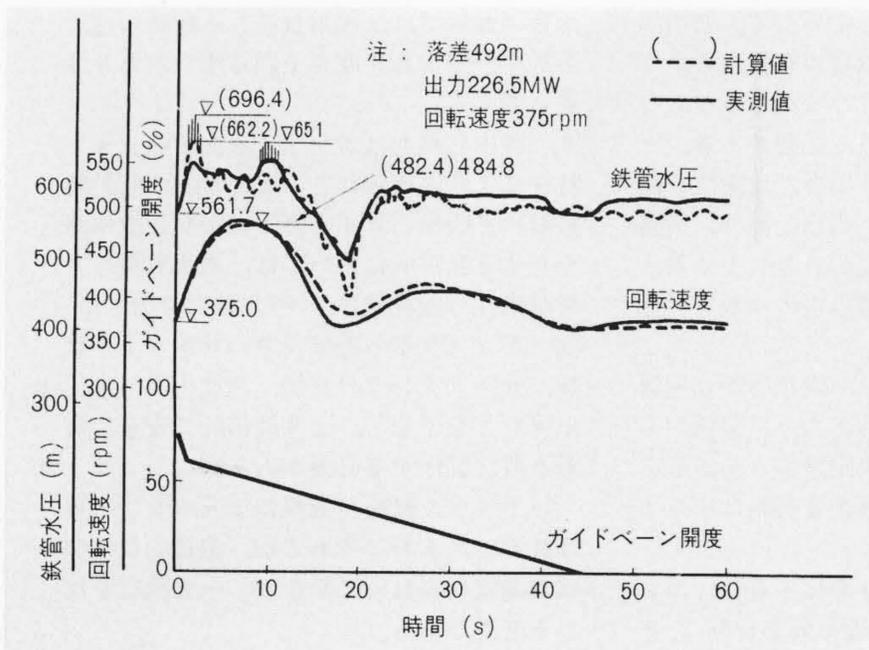


図12 負荷しゃ断試験オシログラム 計算値と実測値がほぼ一致している。
Fig. 12 Results of Load Rejection Test

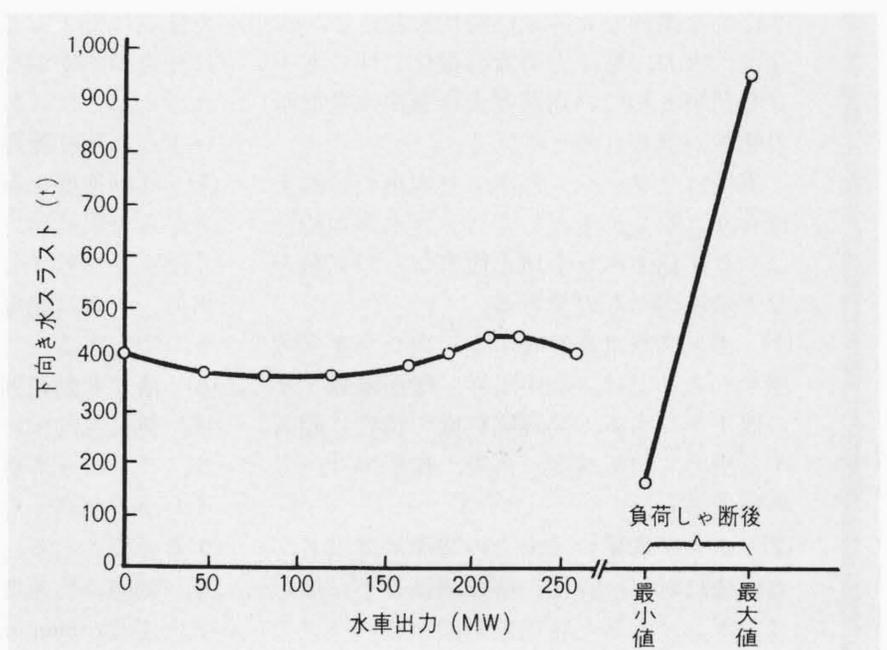


図15 水車運転時の水スラスト測定結果 定常運転時の水スラストは 500 t 以下である。
Fig. 15 Results of Hydraulic Thrust at Turbine Operation

6 結 言

電源開発株式会社沼原発電所用ポンプ水車の現地試験結果についてその概要を述べた。1段500mの壁を破ったポンプ水車は今後さらに高落差大容量化していく揚水発電設備の主役として活躍するものと考えられる。

終わりに臨み、本稿が今後の高落差大容量揚水発電所の建設ならびに運用の一助ともなりうれば幸いである。

今回の沼原発電所の製作にあたり貴重な指針を与えていただいた電源開発株式会社の関係各位に厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 田高ほか：「1段500m高落差ポンプ水車および発電電動機」日立評論 53, 176 (昭46-2)
- (2) 山本, 蜂谷：「高落差大容量ポンプ水車について」, 動力, 第22巻第122号, 1972, 1
- (3) 伏見, 大島：「含Ni 13%クロム鋳鋼の諸特性」, 日立評論 54, 461 (昭47-5)
- (4) 「高落差大容量揚水発電所の機器について」, 電気協同研究会テキスト
- (5) 吉本, 服部, 山本ほか4名：「240,000kWポンプ水車および発電電動機の運転特性」, 日立評論 53, 163 (昭46-2)
- (6) 山崎ほか：「80,000kWポンプ水車および発電電動機」日立評論 46, 1893 (昭39-11)
- (7) 鈴木ほか：「113,000kWポンプ水車の運転特性」日立評論 50周年記念論文集, 5 (昭43-12)

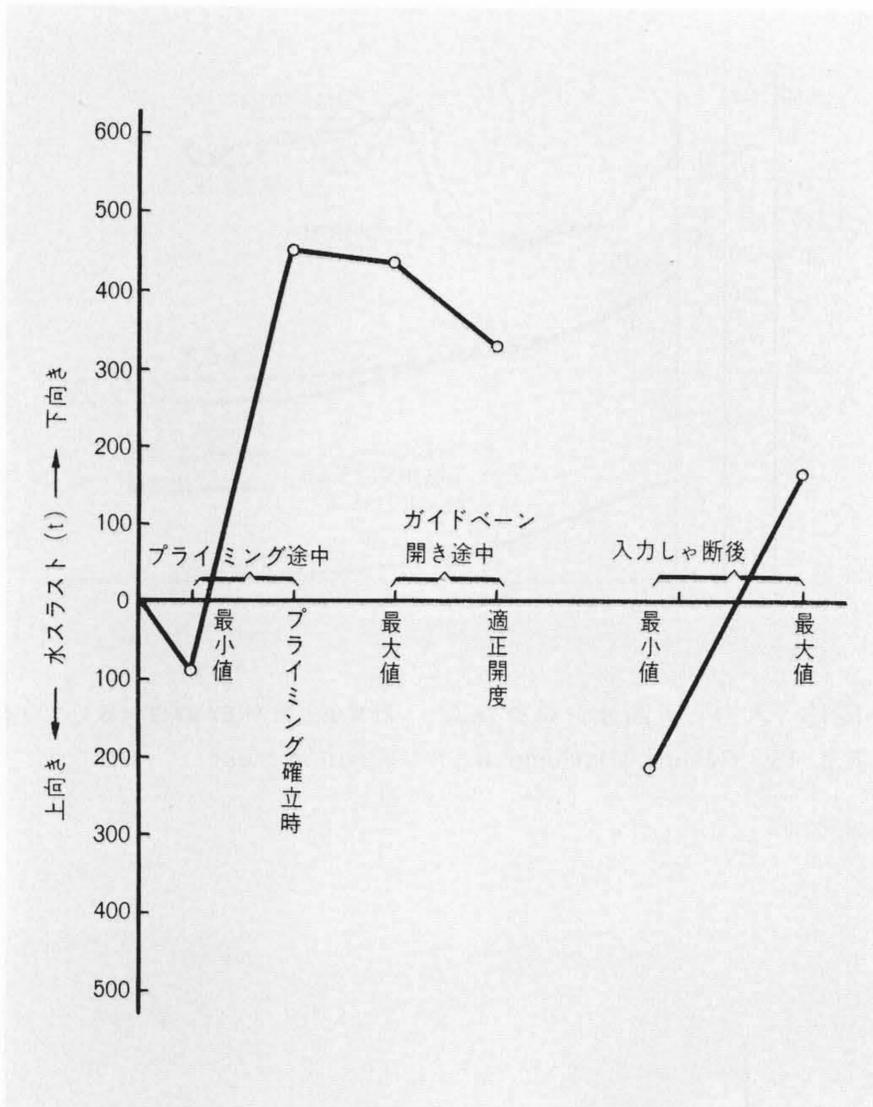


図16 ポンプ水車運転時の水スラスト測定結果 定常運転時の水スラストは、500t以下である。

Fig. 16 Results of Hydraulic Thrust at Pumping Operation



フランシス形ポンプ水車の計画上の問題点

日立製作所 木村義昭・横山俊昭
電気評論 1973. 3

揚水発電所は現在単機出力で343MW(アメリカ・ラディングトン発電所), 落差で512m(九州電力株式会社・大平発電所)のポンプ水車が設計製作および据付中であり, 本格的な高落差大容量機時代を迎えている。今後, 火力, 原子力の大容量化に伴いピーク負荷用としての高落差大容量揚水発電所の建設が進むものと考えられる。

本稿はフランシス形ポンプ水車の計画を行なうに際し, 主としてポンプ水車の特性につき注意すべき事項を従来からの実績をもとに述べたものである。

- (1) ポンプ水車を計画するにあたりまず考慮すべきことは, 製作限界, 輸送限界, その他ポンプ水車, 発電電動機の特性に起因する出力, 回転速度, 落差, 揚程等々の限界値である。
- (2) ポンプ水車の入出力の関係は要求される仕様に対し, 特性, 落差関係などに加えて, ポンプ水車と発電電動機とのバランス

- を考え, 入出力の関係を定める必要がある。
- (3) 特性面において, フランシス形可逆ポンプ水車は1個のランナで水車とポンプの両運転を行なうものであるため, その特性を独立に変えることはむずかしく, 必然的に種々の不安定な運転領域が存在する。それゆえ, これらの領域になるべくかからないように運転範囲を決める必要がある。
- (4) 回転速度を選定する場合, 比速度を従来からの実績値, 特性, 吸出し高さ, 機器寸法などを考慮して選定し, これと落差, 出力, さらに発電電動機のポール数を考慮して決定する。
- (5) 落差変動範囲はポンプ水車の不安定領域, 発電電動機の入出力と大いに関係があり, これらを考慮して決定すべきである。また落差が高くなれば落差変動幅は小さくする必要がある。
- (6) 効率は比速度により変化するが, ポンプ比速度が $50\text{m}^{-3}/\text{s}$ 付近の効率がよく, そ

- れより難れるに従い低下する傾向がある。
 - (7) 無拘束速度は比速度が大きくなれば増大する。これはランナなどの回転体の設計条件となるが, 最近の高落差大容量ポンプ水車においては, 水車負荷しゃ断時の速度変動率が無拘束速度を上回る場合があり注意を要する。
 - (8) 吸出し高さはポンプキャビテーション特性により決められる。またポンプ起動時における吸出し管圧力降下および長放水路を有する発電所においては, 水車負荷しゃ断時水柱分離現象についても検討を要する。
 - (9) ポンプ水車の過渡現象の解明により流速, サージタンクの有無, 速度上昇, 水圧上昇などを予想し, より経済的で安全な機器を設計製作する必要がある。
- 以上述べた概略の過程によりポンプ水車は計画されるわけであるが, 定量的には個々の発電所において異なり, 十分検討を加える必要がある。