

中国電力株式会社南原発電所用

318,000kWポンプ水車の開発・製作と現地試験結果

Design, Manufacturing and Field Test Results of 318,000kW Pump Turbines for the Nabara Power Station, Chugoku Electric Power Co.

我が国で単機容量が最大である中国電力株式会社南原発電所用318,000kWポンプ水車は、このたび現地試験及び官庁試験を終了し、営業運転に入った。ここに本大容量ポンプ水車の開発、製作及び現地試験結果について述べる。

現地試験は、メタルならし運転、ポンプ起動試験、水車開度出力試験、水車負荷しゃ断、ポンプ入力しゃ断試験、吸出し管水圧振動試験、ガイドベーン実働応力測定試験などが実施された。本機には高落差機にもかかわらず普通鋳鋼のランナが採用されるなどの新設計点が多く折り込まれており、ここに300m級大容量ポンプ水車の技術が確立した。

久保真三* *Kubo Shinzō*喜多 弘* *Kita Hiroshi*新田貞夫** *Nitta Sadao*横山俊昭** *Yokoyama Toshiaki*

1 緒 言

単機容量で、我が国での従来の実績を大きく上まわる中国電力株式会社南原発電所(以下、南原発電所と略す)用318,000kWフランシス形ポンプ水車2台(No.1,2号機)が、現地試験及び官庁試験を終了し、昭和51年7月5日、両号機共に営業運転に入った。

南原発電所は、国内最大容量ポンプ水車として世界でも屈指の記録品である^{1),2)}。この大容量機の開発に当たっては、約

2年にわたり中国電力株式会社と日立製作所が共同研究を行ない、種々の模型試験によるポンプ水車の性能開発、水圧振動の把握などの検討を行なった。

特にこのポンプ水車については、放水路長さ500mの長放水路(サージタンク省略)が採用され、吸出し高さ H_s 決定に際しては水車負荷しゃ断時に発生する水柱分離現象が懸念されるため、十分な検討を実施して大容量機ポンプ水車の運転

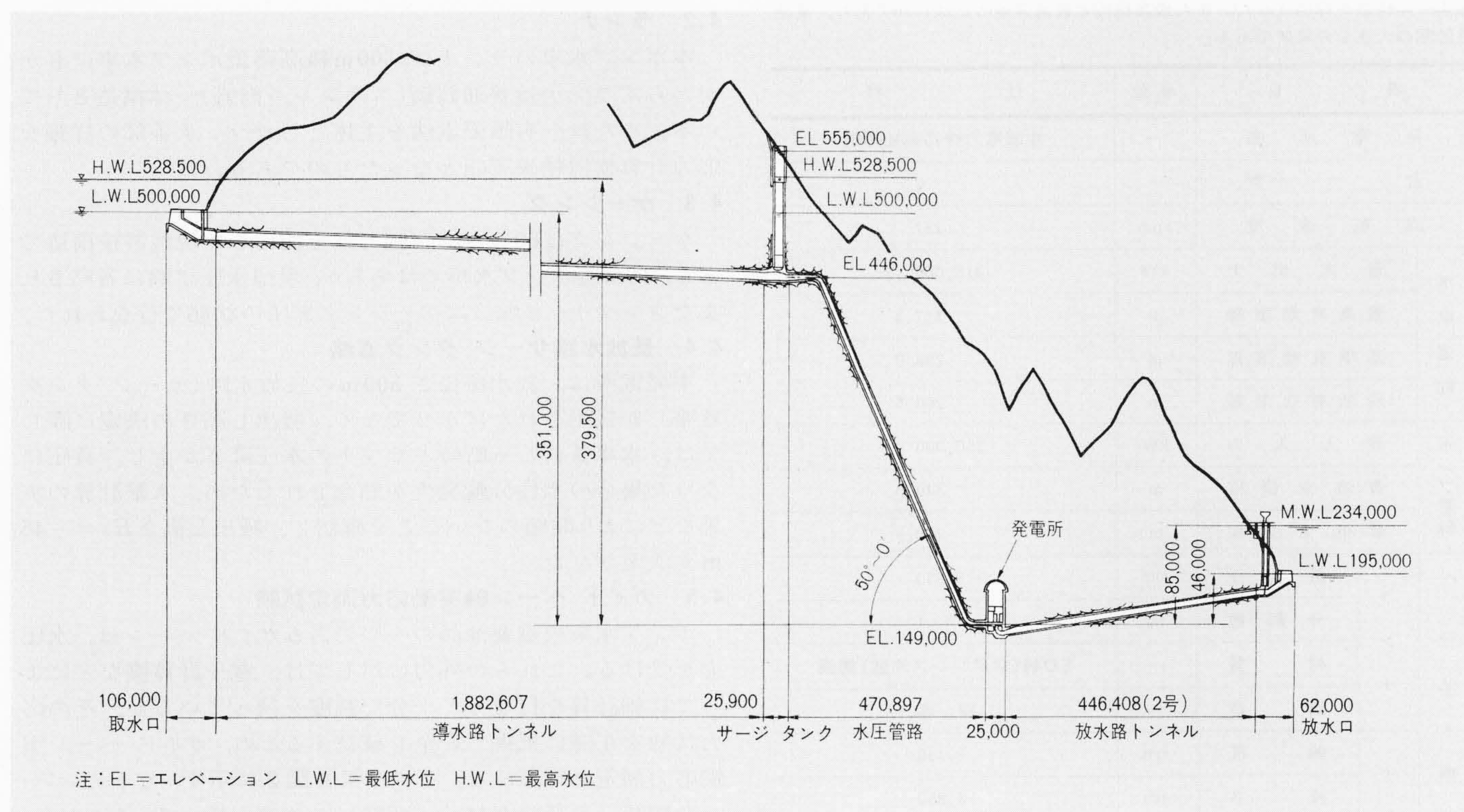


図1 水路縦断面図 上部貯水池より下部貯水池に至る水路の詳細を示す。放水路長さは500mにもかかわらず、サージタンクは省略されている。

での安全性及び信頼性の向上に努めた。

主要部品に対しては、応力解析を行ない機器の強度検討を行なうとともに、構造面では、300m級高落差ポンプ水車にもかわらず普通鋳鋼(ステンレス肉盛)を使用した。更に、現地試験では、各種試験に加え、ガイドベーン軸実働応力測定吸出し管水圧振動測定試験を実施し、貴重なデータを得ることができた。ここに、南原発電所のポンプ水車の開発、製作及び現地試験結果の概要を取りまとめ紹介し、関係者の参考に供する次第である。

2 発電所の概要

南原発電所は、広島県西部を流下し広島市で瀬戸内海に注ぐ太田川水系南原川に、高さ88.5mのロックフィルダムを築造して有効容量5,220,000m³の上部調整池とし、また下流に高さ86.5mのロックフィルダムを築造して有効容量5,246,000m³の下部調整池とし、この間、延長約2,860mの水路と地下発電所で結び、主として瀬戸内臨海工業地帯を中心に大容量のピーク電力を供給する純揚水発電所である。

図1に水路縦断面図を示す。

3 ポンプ水車の性能開発

3.1 模型試験

本発電所の高落差、大容量ポンプ水車の性能開発に当たっては、各種の模型性能試験が行なわれ、効率、流量特性の改善などが進められた。特に上池、下池水位変化の大きいことなどにより表1に示すように最高揚程/最低落差比が1.36と大きいため、ポンプ水車の入出力関係のバランス化に努力が払

表1 ポンプ水車仕様 300m級高落差機にもかかわらず、ランナは普通鋳鋼一体構造が採用された。また最高揚程と最低落差の比は1.36であり、変落差範囲の大きな発電所である。

項 目		単 位	仕 様
発 電 所 名		—	中国電力株式会社南原
台 数		—	2
回 転 速 度		rpm	257
水 車 運 転	最 大 出 力	kW	318,000
	最 高 有 効 落 差	m	317.5
	基 準 有 効 落 差	m	294.0
	最 低 有 効 落 差	m	250.5
ポ ン プ 運 転	最 大 入 力	kW	350,000
	最 高 全 揚 程	m	340.0
	最 低 全 揚 程	m	280.5
寸 法 ・ 構 造 ほか	ラ ン ナ	最 大 径	mm 5,950
		分 割 数	個 1
		材 質	— SC46(ステンレス肉盛)鋳鋼
		構 造	— 鑄 造
	主 軸	軸 径	mm 1,150
		長 さ	mm 4,850
		材 質	— SF
	ケーシング	入 口 径	mm 2,988
		最 大 幅	mm 14,060
		材 質	— 60HT

われた。

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、効率の低下を来す臨界キャビテーション係数と、羽根面に発生するキャビテーション気泡の崩壊の条件の両方によって検討した。特に本発電所の実物ランナは、高落差機であるが普通鋳鋼製を採用されるため、キャビテーション特性には特に留意する必要がある。そのため、ランナ内流れ解析³⁾によって、キャビテーション発生が少なくなるようなポンプ入口羽根先端形状が決定された。模型によるキャビテーション試験で、羽根キャビテーション気泡の観察を行ない、その安全性が確認できた。

3.3 振動特性

実機ポンプ水車が現地で運転される場合、定常運転時特に水車軽負荷運転時の吸出し管に発生するホワールによる水圧脈動、騒音に注意する必要がある。特に定格回転速度の257rpmによる、ドラフトホワールと電力系統の固有振動数が共振するおそれがあることと、コンクリート製の長放水路に与える影響を小さくするため、水圧脈動低減化が図られた。

またポンプ高揚程側運転の振動、騒音を低減するためには、揚水量揚程特性、すなわちQ～H特性の改善が有効である。このQ～H特性を改善するためには、ランナ内流れ解析方法により予測し、また模型試験により確認する方式を採った。その結果、水車軽負荷運転及びポンプ高揚程側運転の振動は十分満足できる結果を得ることができた。

4 構造及び強度上の特徴

主な構造上の特徴は次に記すとおりである。

4.1 ポンプ水車仕様

ポンプ水車の主な仕様を表1に示す。

4.2 ランナ

本ポンプ水車のランナは、300m級高落差ポンプ水車にもかかわらずランナは普通鋳鋼(ステンレス肉盛)一体構造としている。これは、有限要素法を主体としたランナ各部の詳細な応力計算検討結果可能となったものである。

4.3 ケーシング

ケーシングは60kg/mm²高張力鋼を使用した現地溶接構造である。高落差ポンプ水車ではあるが、現地水圧試験は省略されまたコンクリート埋設はケーシング無圧の状態で行なわれた。

4.4 長放水路サージタンク省略

本発電所は、放水路長さ500mの長放水路(サージタンク省略)が採用されたばかりでなく、吸出し高さの決定に際しては、水車負荷しゃ断時ドラフトの水圧降下が生じ、負圧になった場合の水柱分離発生が懸念されたため、水撃計算の実施などにより問題のないことを確認し、吸出し高さH_s=-46mが決定された。

4.5 ガイドベーン軸実働応力測定試験

ポンプ水車の重要部品の一つであるガイドベーンは、水圧力を受ける。これらの外力に対しては、電子計算機などによって詳細計算を行なって十分な強度を持っているが、その応力状態を正確に把握し安全を確認するため、ガイドベーン実働応力測定を行なった。その結果を図2に示す。ガイドベーン全閉時、負荷時及びしゃ断時での強度を持っていることと、その安全性を確認することができた。

5 ポンプ水車現地運転特性

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

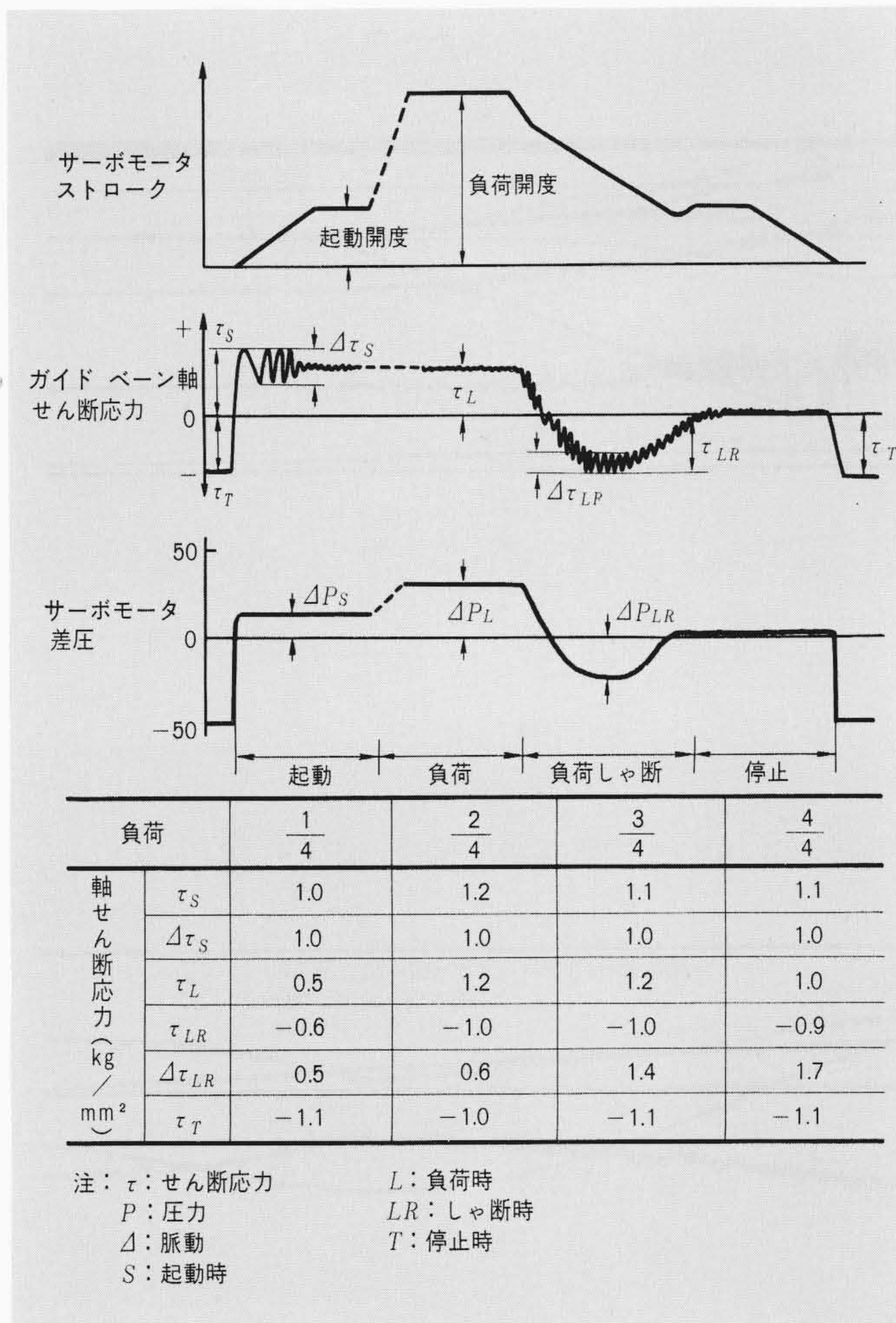


図2 ガイドベーン軸現地実働応力試験結果 応力は約1kg/mm²以下であり、十分安全であることが確認された。

ト形メタルを採用している。本発電所は純揚水発電所であるため、メタルならし運転は水面押下げ状態で起動用電動機により加速し、揚水方向から実施した。次いで初揚水試験後揚水運転によって湛水された上池の水によって発電方向のメタルならし運転を実施した。運転結果は全く異常は認められず軸受温度も安定した結果が得られた。

図3に揚水方向メタルならし運転結果を示す。約50分間の空転運転が行われたが、ランナ上部シール温度上昇は約7℃前後であり、長時間揚水方向の空転の可能性を得ることができた。

5.2 水車運転特性

最高、基準有効落差のいずれにおいても、模型試験結果よりの実物予想特性は、全ガイドベーン開度領域で満足できる結果が得られた。

また高落差領域での水車運転時の振動、騒音は小さく、部分負荷についても振動、騒音とも良好で、給気による振動防止は不要であることが確認された。

5.3 ポンプ起動特性

本発電所のポンプ起動は、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。また起動方式は、水面押下げ→起動用電動機による加速並列→排気プライミング水圧確立→側弁、入口弁開→入口弁30%開でガイドベーン開→適正開度（揚水）という方式を採用している。

起動操作から適正開度までの所要時間は約9分であり、排気開始からプライミング水圧確立までの時間は、25～30秒と良好な排気状態を示している。

図4に揚水起動時のオシログラムを示す。

5.4 ポンプ運転特性

ポンプ入力特性は、模型より予想した値と良く合致していた。また軸振れも小であり運転状態は良好であった。

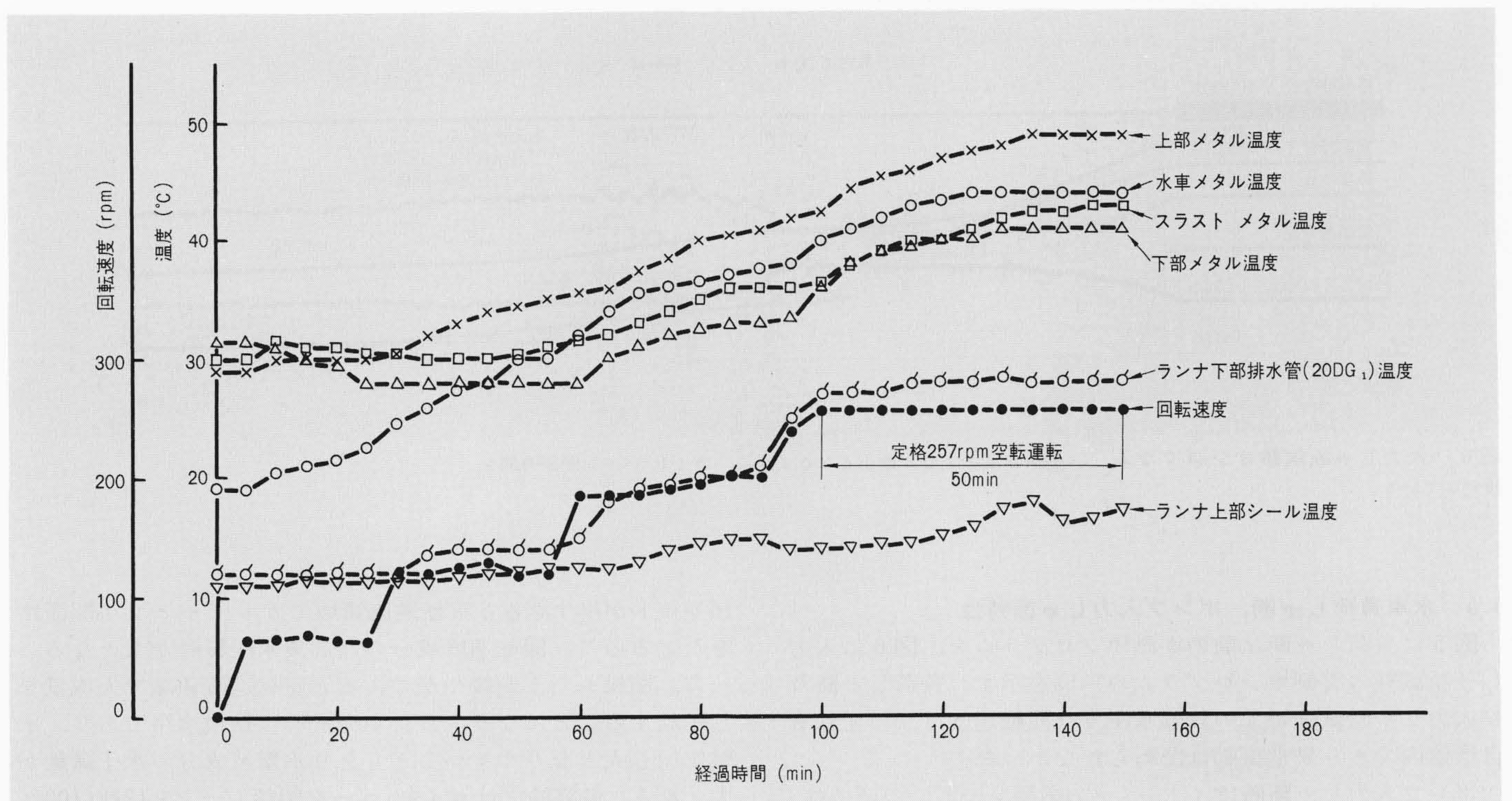


図3 メタルならし運転結果(揚水方向) 本発電所は純揚水発電所のため、当初に揚水方向のメタルならしを行なった。

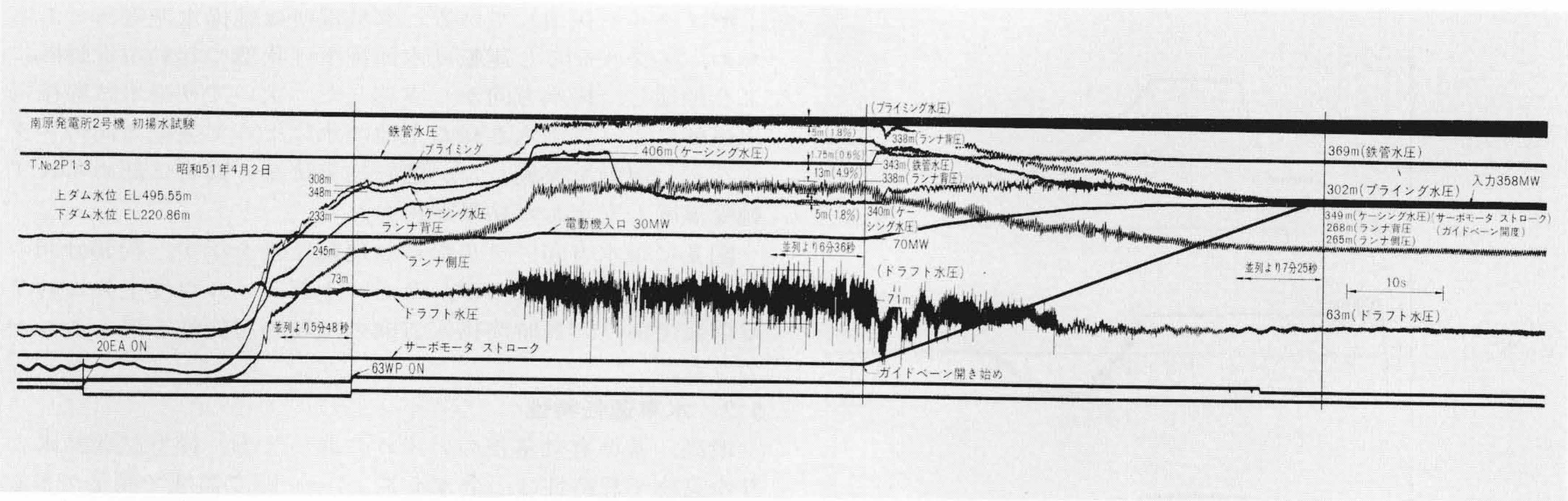


図4 ポンプ起動特性 起動操作から適正開度まで、約9分で起動できる。

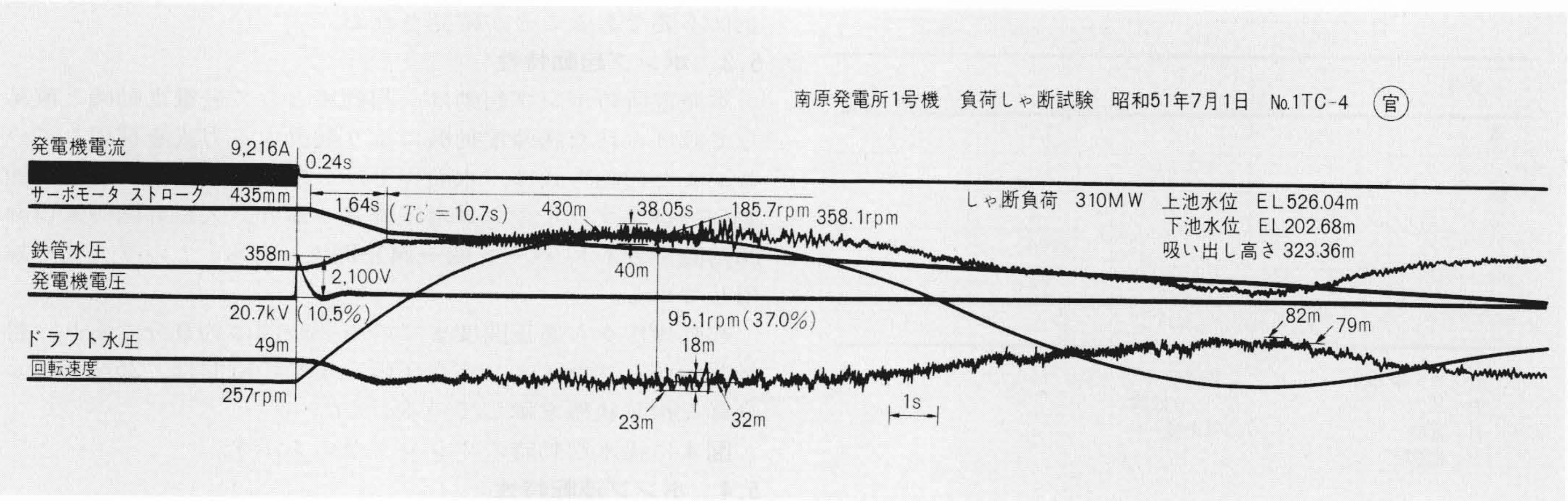


図5 負荷しゃ断試験オシログラム 水圧上昇及び速度上昇は、いずれも保証値以下である。

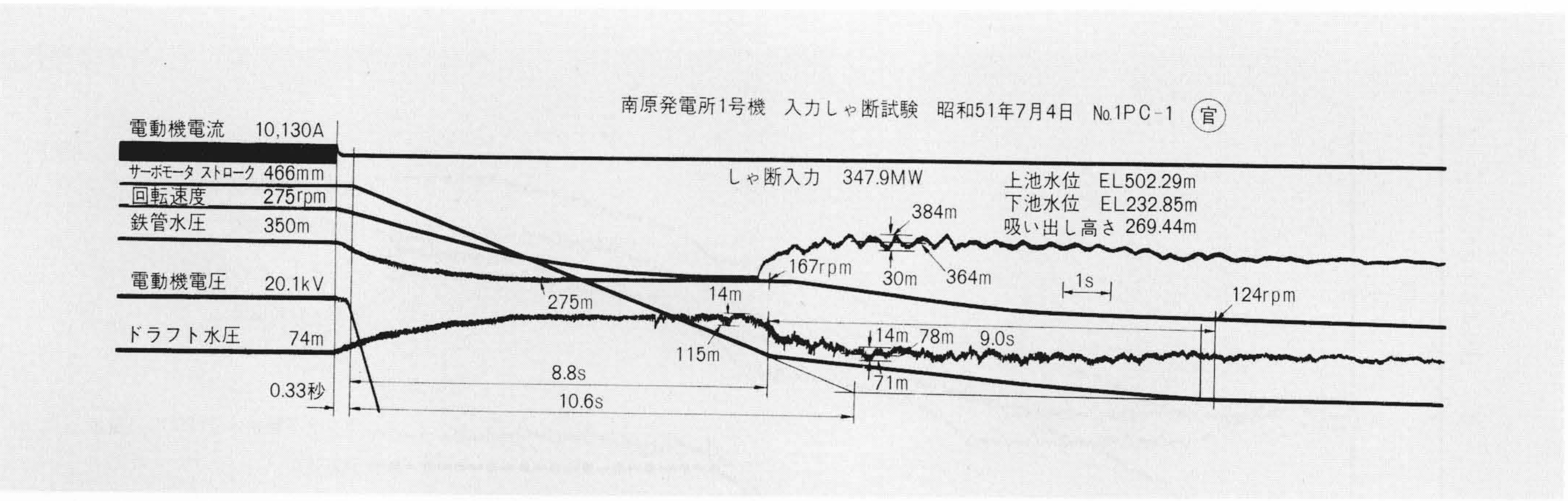


図6 入力しゃ断試験オシログラム 鉄管水圧の変動が最小となるように、ガイドベーン閉鎖時間を設定している。

5.5 水車負荷しゃ断、ポンプ入力しゃ断特性

図5に負荷しゃ断試験の実測オシログラムを、図6に入力しゃ断試験の実測オシログラムの一例を示す。負荷しゃ断及び入力しゃ断試験時での鉄管水圧及び回転速度は、いずれも目標値内であり異常振動は認められなかった。

ポンプ入力しゃ断時ガイドベーン閉鎖レートについては、3種の設定について比較試験を行なった。そのときの水圧脈動の特徴と、特性上のたどる道すじの関係を図7に示す。閉

鎖レートが早すぎると正転逆流領域でガイドベーン小開径路をたどるので、回転速度成分の高周波水圧脈動が大となる。一方、閉鎖レートが緩やかであると正転逆流領域で大流量をしゃ断することになり、また本発電所は長放水路であり、水撃作用も大となりやすいこともあり水撃波成分の水圧脈動が大となる。最終的にはガイドベーン閉鎖レートを12秒(100%開度当たり)として、鉄管側及びドラフト側の水圧脈動が小なるものとされている。

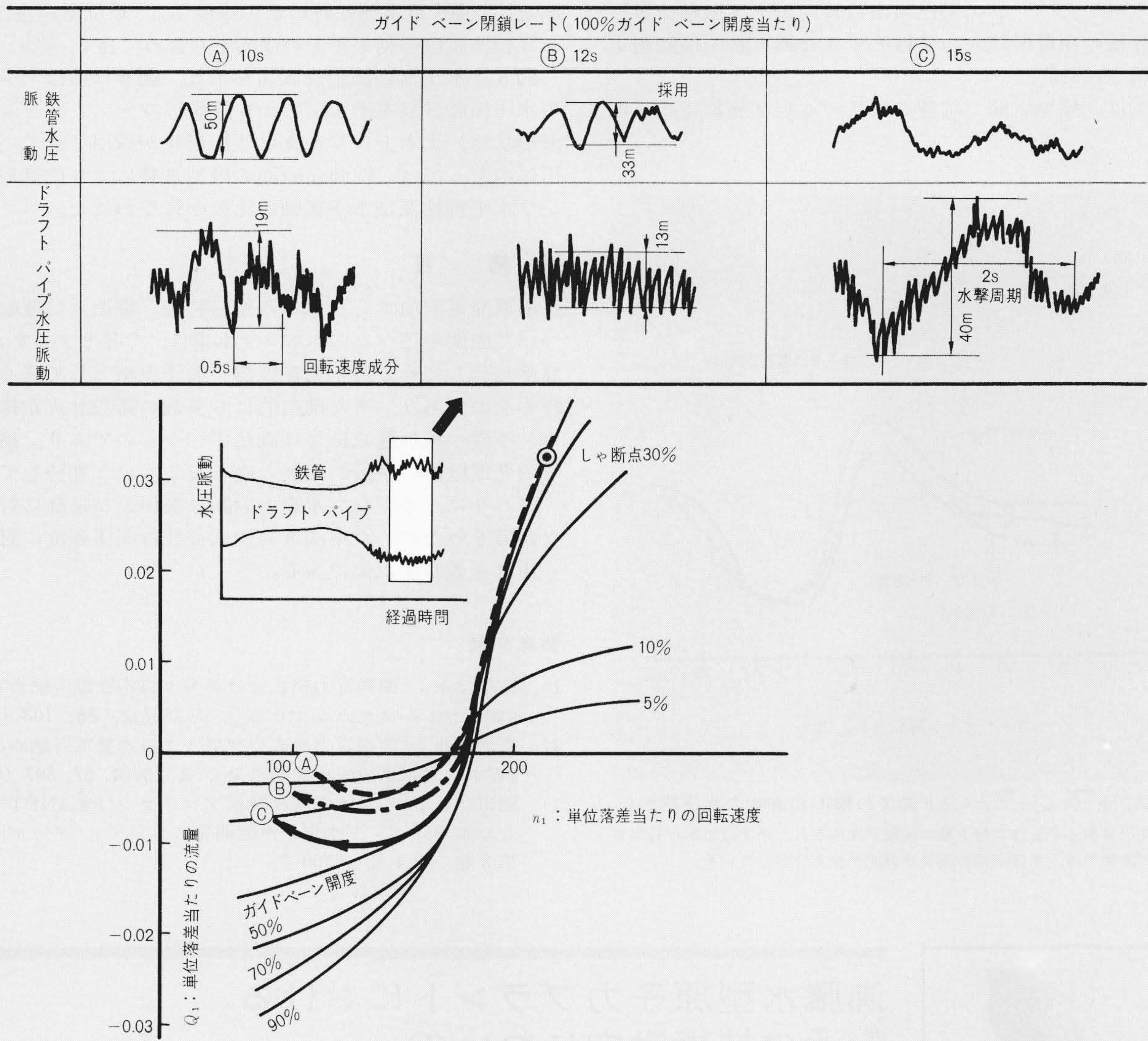


図 7 ポンプ入力しゃ断時のガイド ベーン閉鎖時間と水圧脈動 12秒閉鎖レートとし、鉄管及びドラフト水圧脈動の小さいものとなっている。

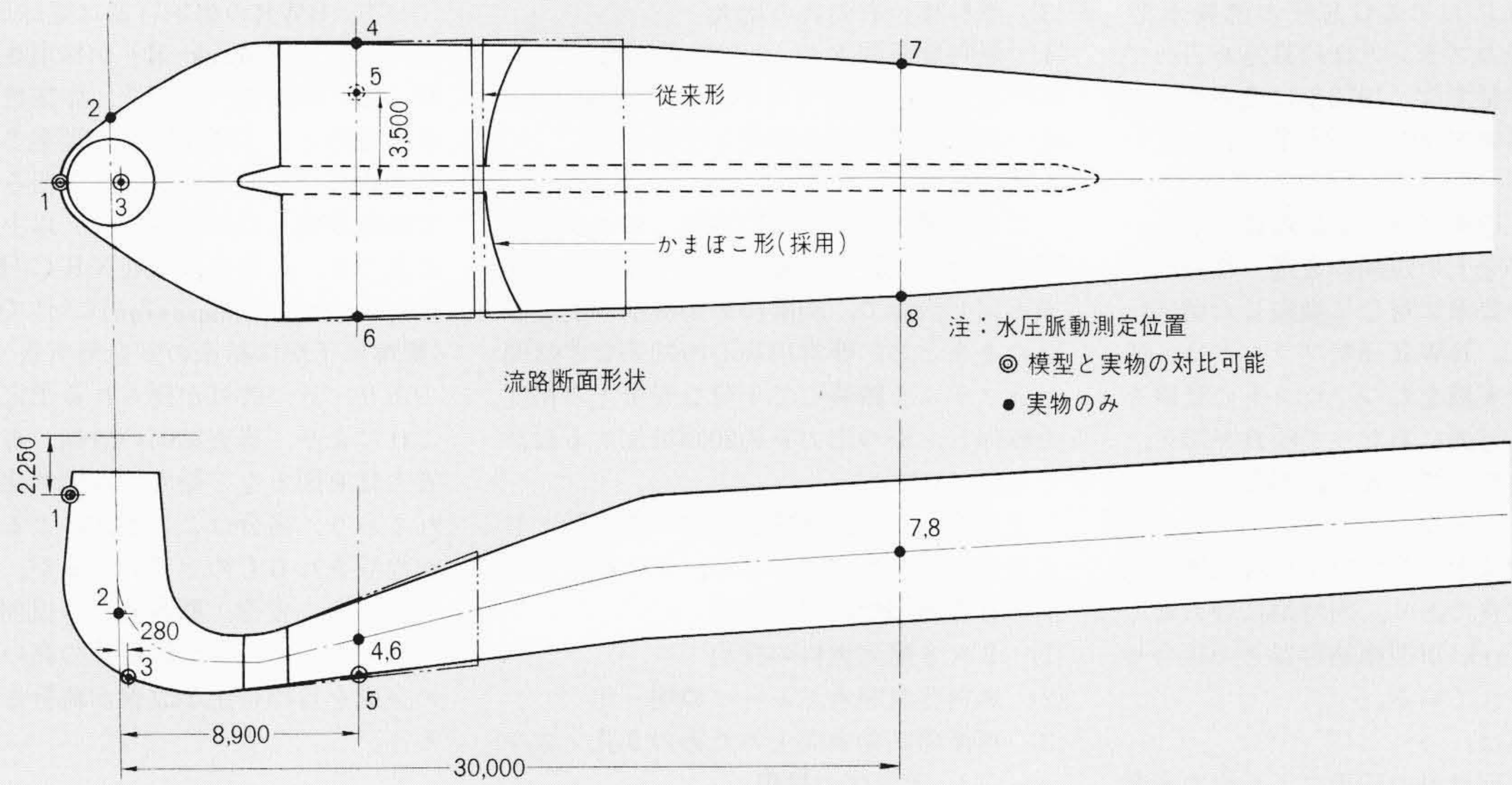


図 8 吸出し管水圧測定位置 水圧振動を測定するため、模型と実機と同一位置で測定した。

5.6 吸出し管水圧振動測定試験

放水路サージタンクのない、吸出し管内の水圧振動分布を把握し、今後の発電所建設の資料とするために水圧振動測定試験が実施された。

試験方法は、模型試験で確認されている定常運転時での水

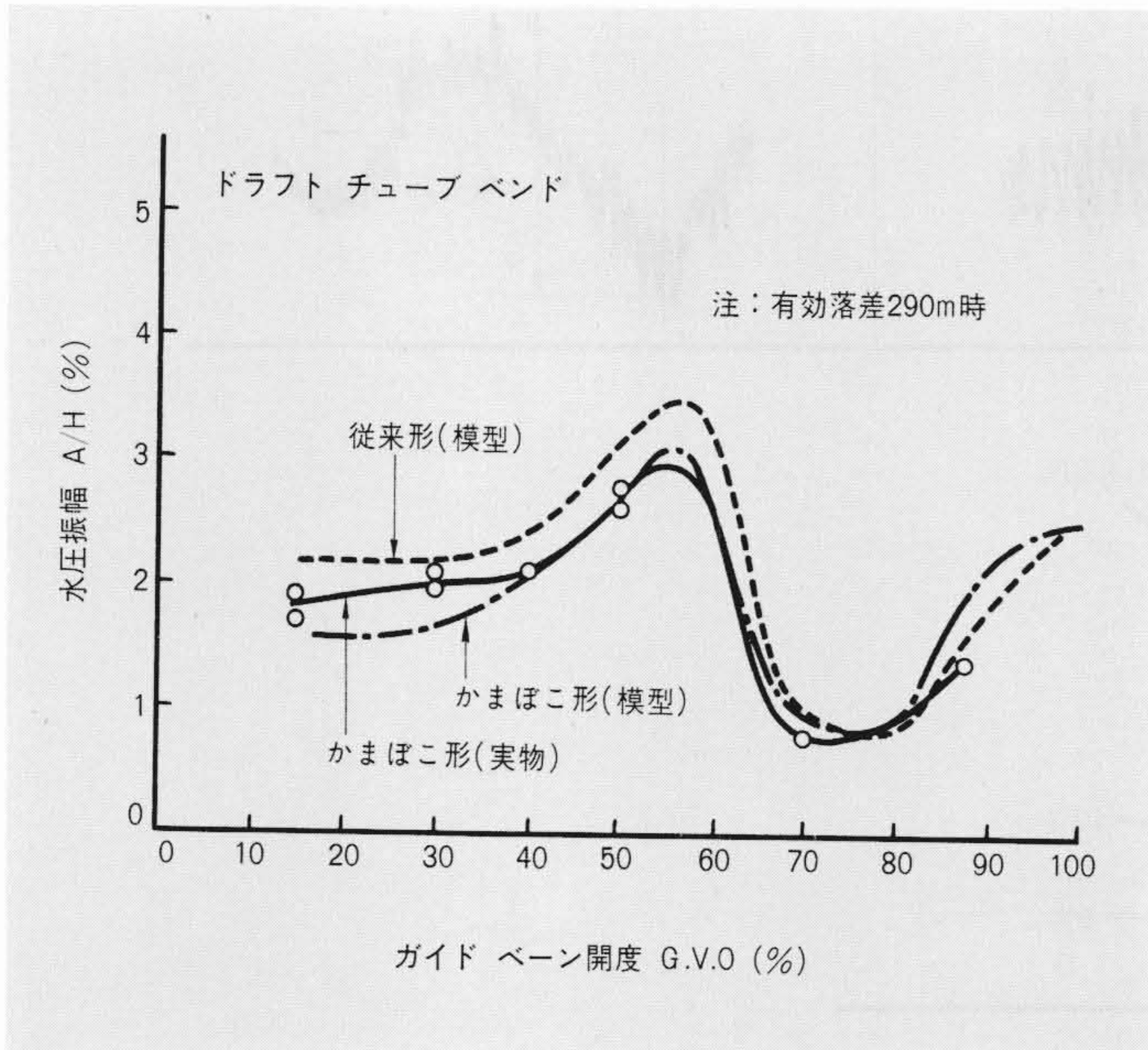


図9 ドラフトチューブベンド部での模型と実物の水圧脈動比較 模型で従来形とかまぼこ形2種の試験が実施され、かまぼこ形が採用された。模型と実物では、水圧振幅の値及び傾向が良く合致している。

圧振動の模型と実機との相関関係を明らかにするものである。測定の結果、定常運転時の水圧振動値は、単位落差当たりの比率は模型試験の結果とその傾向をも含めて良く一致している。

図8は水圧振動測定位置図を示し、図9は実機ポンプ水車の水圧振動試験を示す。なお本発電所のドラフトチューブ断面形状は、土木上よりかまぼこ形形状が採用されている。採用に当たっては、四角い断面の模型試験により従来形とのポンプ水平特性及び水圧脈動の比較が行なわれた。

6 結 言

南原発電所用ポンプ水車の運転特性、構造及び運転制御について概要を述べた。本ポンプ水車は、今後ますます大容量、高落差化してゆく揚水発電機器の製作実績として高く評価されるものであり、また構造的にも多数の新設計点が採用された。本機の現地運転結果は満足すべきものであり、揚水発電所用発電機器の技術的発展の礎となるものと期待している。

終わりに、本ポンプ水車の設計、製作及び試験に対し貴重な助言をいただいた中国電力株式会社の関係各位に対し、厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 高瀬ほか：「関西電力株式会社奥多々良木発電所納め310,000 kW フランス形ポンプ水車」、日立評論, 56, 103 (昭49-2)
- 2) 高瀬ほか：「関西電力株式会社奥多々良木発電所納め310,000 kW ポンプ水車の現地試験結果」、日立評論, 57, 597 (昭50-7)
- 3) 岡田ほか：「ランナ内流れ解析プログラム“FLANPT”を応用した水車、ポンプ水車の性能開発について」、ターボ機械, 第3巻, 第4号 (昭50-7)

論文抄録

沸騰水型原子力プラントにおける最近の技術動向について

日立製作所 大木新彦
日本機械学会誌 79—687 (昭51-2)

世界の原子力発電設備の主流は軽水炉であり、特にアメリカ内での実績は目覚ましい。アメリカにおけるGE社の沸騰水型(BWR)原子力プラントは約31%を占めている。発電容量では、1972年に発表されたBWR-6型標準プラントが大半を占めている。

GE社は、近年プラント信頼性向上の一環として、安全上の規制の変遷、性能向上及び合理化の要求に対して徹底した標準化を進めてきた。BWR-6型プラントは、従来の高い安全実績をもつプラントの経験をもとにして多方面にわたって改良を加え、特に大型に対処して、安全余裕度の大きい優れたプラントとなっている。

BWR-6型は主として原子炉蒸気供給系に対しての改良であり、同時期に合わせて開発されたMark-III型格納容器との組合せとして採用されている。

主な改良点は、

- (1) 8×8配列燃料の採用により出力密度

の増大

- (2) 装荷燃料の数の増大
- (3) 燃料棒の有効長の増大
- (4) 燃料要素間水ギャップの均一化
- (5) ジェットポンプの小型化と効率向上
- (6) 汽水分離器の小型化と圧損低減などである。

この結果、原子炉圧力容器、原子炉再循環系、主蒸気系など常用系的主要寸法は従来と同じ設計で、制御棒駆動機構は実証設計のままとし、非常用炉心冷却系などは同じシステムを踏襲して十分な安全上の裕度を確保し、かつ出力を約20%増加する設計となっている。

上述の特長は、BWR-6型の新設計として発表されたものであるが、その後一世代前のBWR-5型に対しても

- (1) 8×8配列燃料の採用
- (2) 燃料要素間水ギャップの均一化
- (3) 再循環系効率向上のための5孔ノズルジェットポンプの採用

などの新設計の改良点の導入が考慮されている。

一方、BWRの格納容器は電球形(Mark-I)と上下形(Mark-II)が採用されていたが、更に耐震性、接近性、作業性などの改良を目的としてMark-IIIが開発され、今回のBWR-6型原子炉供給系と組み合わせられて新型BWRに採用された。以上の考えに基づき、GE社は現在NRC(Nuclear Regulatory Commission)に対してGESSAR(標準原子炉供給系の安全解析書)を申請中であり、近々許可が得られる予定である。これにより、審査期間の短縮、審査業務の省力化を図るなど徹底的な標準化が進められており、当分はこの型式によるプラントが建設されるものと思われるが、将来とも安全規準の変遷、顧客要求の追加などにより、更に安全、かつ信頼性の高いプラントの完成を目標に進歩改善が続行されるであろう。