

関西電力株式会社奥多々良木発電所納め

310,000kWポンプ水車の現地試験結果

Field Test Results of 310,000kW Pump Turbines for the Okutataragi Power Station, Kansai Electric Power Co.

我が国において単機容量が最大である関西電力株式会社奥多々良木発電所納め310,000kWポンプ水車の現地試験として、メタルならし運転、初揚水試験、ポンプ起動試験、空転損失測定試験、ポンプ適正開度試験、水車開度出力試験、振動・騒音測定試験、水推力測定試験及びランナ実働応力測定試験などを実施した結果、極めて良好な運転結果を得た。本機には、2分割構造ランナ及び新形(UBEL)ケーシングなどの新設計点を多く採用しており、ここに、400m級大容量ポンプ水車の開発技術が確立した。

高瀬光雄* Mitsuo Takase
高木宣輔* Nobuho Takagi
鎌田 勉* Tsutomu Kamata
山部正博** Masahiro Yamabe

1 緒 言

単機容量において、我が国における従来の実績を大きく上回る関西電力株式会社奥多々良木発電所納め310,000kWフランシス形ポンプ水車の1期工事分2台が、現地試験及び官庁試験を無事終了し、昨昭和49年6月(1号機)、7月(2号機)に相つぎ営業運転に入った。

このポンプ水車の特徴として、構造的には、400m級ポンプ水車としては世界で初めて2分割ランナ構造を採用したこと、また、応力的にバランスのとれたUBEL形ケーシングスピードリング構造を採用したことが挙げられ、更に特性の面では、ポンプ水車ランナ内流れ解析方法(FLANPT)を駆使し、キャビテーション性能、振動特性に、極めて優れたランナを開発し採用している。更に、現地試験においては、各種試験に加え、ランナ各部の実働応力測定を実施し、貴重なデータを手に入れることができた。

我が国においては、400m級ポンプ水車の実績はほとんどなく、本ポンプ水車の運転結果が大いに注目されるところであ

り、ここに、本ポンプ水車の現地試験結果の概要を取りまとめ紹介し、関係各位の参考に供する次第である。

なお、本発電所及び納入機器の概要については、既に文献⁽¹⁾で紹介済みであるが、図1に現地試験中のポンプ水車の水車室全景を、表1に本ポンプ水車の仕様を、更に図2に水位仕様を示す。

表1 ポンプ水車仕様 1本の水路系に2台のポンプ水車が設けられているので、同時運転台数によって仕様が異なる。

項 目		単位	仕 様
発 電 所 名		—	奥多々良木
顧 客		—	関西電力株式会社
台 数		—	2
回 転 速 度		rpm	300
水 車 運 転	最 大 出 力	kW	310,000
	最高有効落差	m	406
	基準有効落差	m	374
	最低有効落差	m	338
ポンプ運転	最 大 入 力	kW	314,000
	最高全揚程	m	424
	最低全揚程	m	367
寸 法 ・ 構 造 ほか	ランナ	最 大 径	mm 5,780
		分 割 数	個 2
		材 質	— 高Ni-13Cr 鋳鋼
		構 造	— 鋳造
	主 軸	軸 径	mm 1,100
		長 さ	mm 5,550
		材 質	— SF
	ケーシング	入 口 径	mm 2,862
		最 大 幅	mm 13,120
		材 質	— 60HT
		構 造	— UBEL形 現地溶接

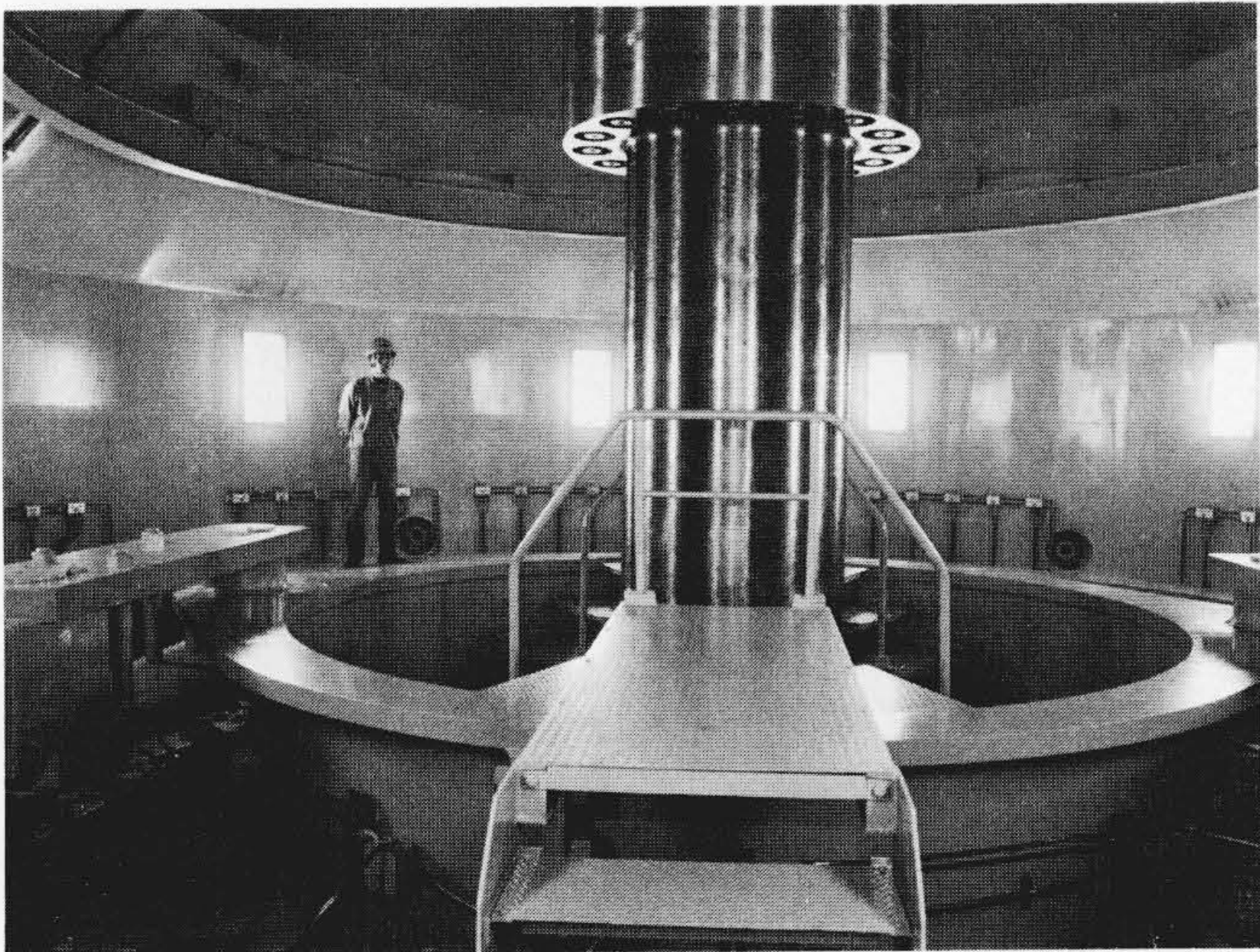


図1 310,000kWポンプ水車水車室全景 踏板の手すり主軸まわりを除いて省略され、水車まわりの点検が行ないやすくなっている。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所

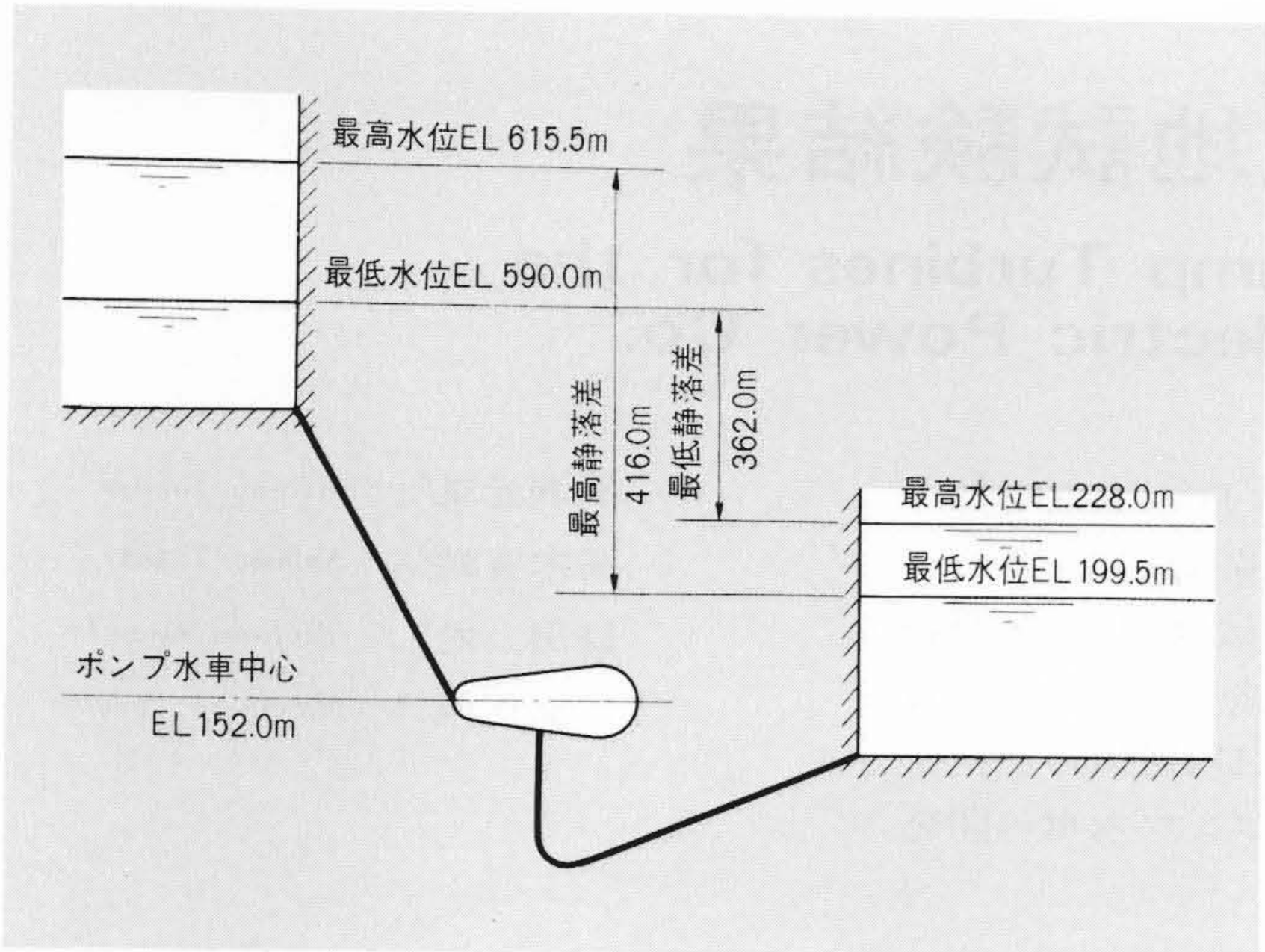


図2 水位仕様 上・下貯水池の水位差を示す。最高落差は400mを超える。

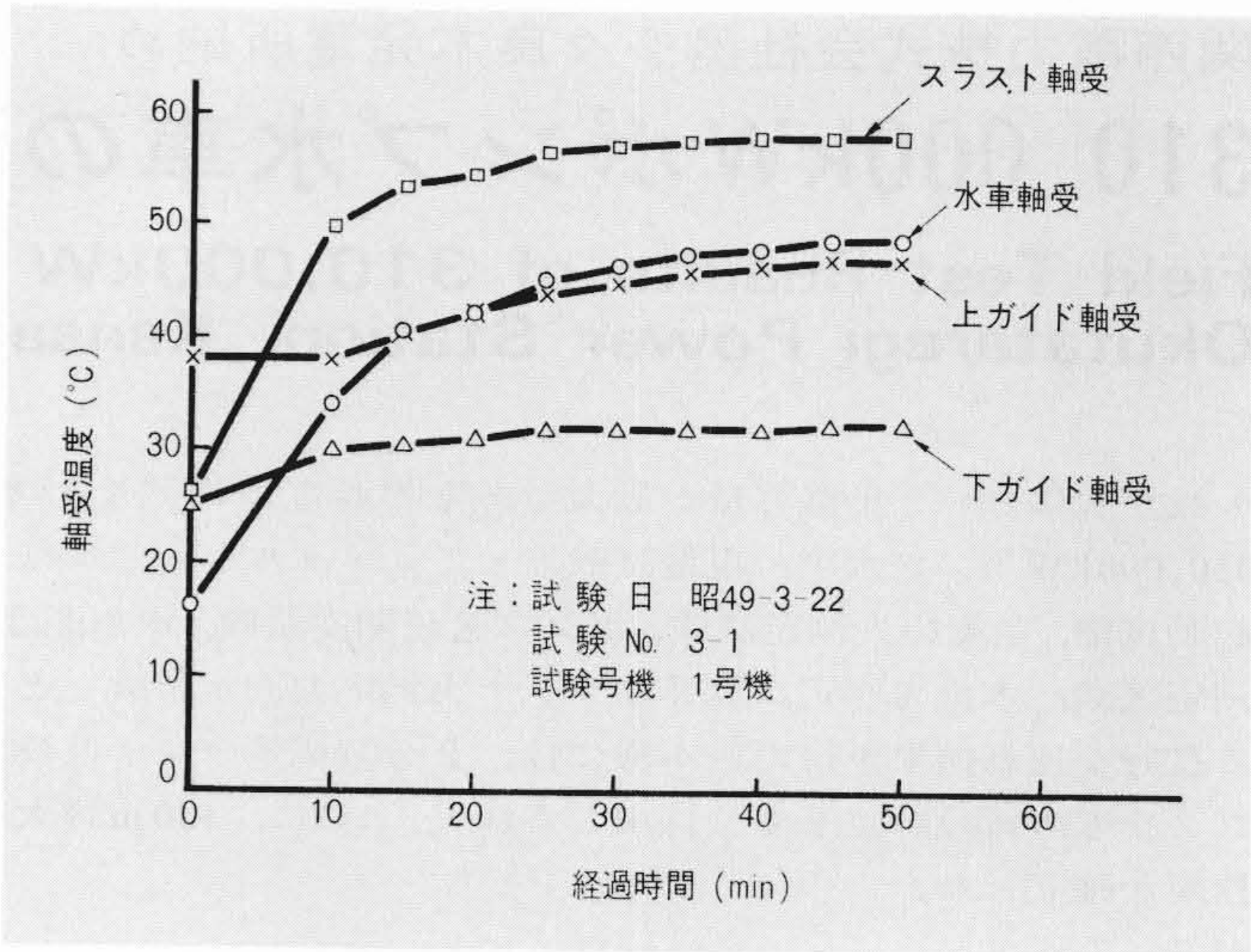


図3 メタルならし運転結果(ポンプ方向) 100%回転速度におけるメタルならし運転結果を示す。

2 現地試験結果

2.1 メタルならし運転

本発電所は、上・下貯水池ともに流れこみ式ダムであるが、上部貯水池は、自然流が極めて少ないため純揚水式発電所に似た形となっている。従って、有水試験前に上部貯水池にはほとんど貯水が得られなかったため、メタルならし運転は、水面押下げ状態で始動用電動機によりポンプ回転方向で実施した。ならし運転の回転速度は、定格回転速度の25%、50%、75%、100%と4段階に分けて行なった。図3に、ポンプ方向メタルならし運転(定格回転速度)時の各部メタル温度特性を示す。各部メタルともに、約45分で温度は定常状態になっている。

水車方向のメタルならしは、初揚水試験及び各種ポンプ試験によって上部貯水池に上げられた水を利用して実施した。

2.2 初揚水試験

ポンプ水車の現地試験において最も技術的に難しいものの一つである初揚水試験は、次の要領で実施した。

- (1) 最初にドラフトゲートを開放し、放水路を充水したのち、案内羽根、入口弁を開き鉄管へ水を導き、鉄管を、下部貯水池と同一水位となるよう充水した。
- (2) その後、入口弁、案内羽根を全閉し、上部貯水池底部にたまっていた自然湛水を充水ポンプにより汲み上げ、取水口下面まで鉄管を充水した。
- (3) 上記(1)、(2)の鉄管充水によって得られた静落差348m及び押込揚程65.3mという保証外極低揚程に対し、上部導水路の強度を考慮して、揚水量を制限する目的で案内羽根開度を適正開度の約70%に絞って運転を行なった。
- (4) 表2は初揚水試験結果を示したものであるが、振動その他異常現象の発生もなく、極めて良好な運転結果が得られた。

2.3 ポンプ起動特性

- (1) 水面押下げ排気及びランナ吐出し圧確立

ポンプ起動時においては、始動用電動機の容量を小さくするため、圧縮空気によりランナ室内の水を放水路方向へ押し下げ、空気中でランナを起動させ定格回転速度に達したのち、電力系統へ並入する。この並入ののち、排気弁を開いて排気を行なうが、排気が十分に行なわれることにより、押し下げた水面が上昇し、ランナ羽根の回転により上方のランナ吐出

表2 初揚水試験結果 初揚水時の構造振動を示すもので、保証外極低揚程、及び適正開度より約30%案内羽根開度を絞っているが、振動値は非常に小さい。

項 目		試 験 結 果
発電電動機入力		311MW
案内羽根開度		70%
振 動	発電電動機上部エンドブラケット	H : 12.5μ
	同 下部エンドブラケット	H : 16.5μ
	ポンプ水車上カバー	H : 6 μ V : 15 μ
ポンプ水車軸受温度		49°C
軸 振 れ	発電電動機上部軸 (1/100mm)	14
	発電電動機下部軸 (1/100mm)	11
	ポンプ水車軸 (1/100mm)	"

注： 1. Hは水平方向振動 5. 試験号機 1号機
2. Vは垂直方向振動 6. 上部貯水池EL 565.49m
3. 試験日 昭49-4-3 7. 下部貯水池EL 217.07m
4. 試験No. 9-4 8. 静落差 348.42m

し部圧力が上昇する。このランナ吐出し部圧力が、揚水開始に十分であるあらかじめ設定された圧力に達することにより、案内羽根を開いて揚水が開始される。

この排気現象は、図4に示す2系統の排気管A、Bのランナ室内開口部a部、b部に、ランナ外周シールを通過して流入する水が達した時点で完了となる。日立製作所では、かねてからこの排気現象を数値計算によって解析する方法を開発しており、現地における試験結果とこの解析結果は、図4に示すように極めてよく一致している。

なお、本ポンプ水車は、高揚程機であるため排気が不十分で、ランナ室内に空気が残留したままランナ吐出し圧が確立する現象(いわゆる疑似プライミング確立現象)を防止するた

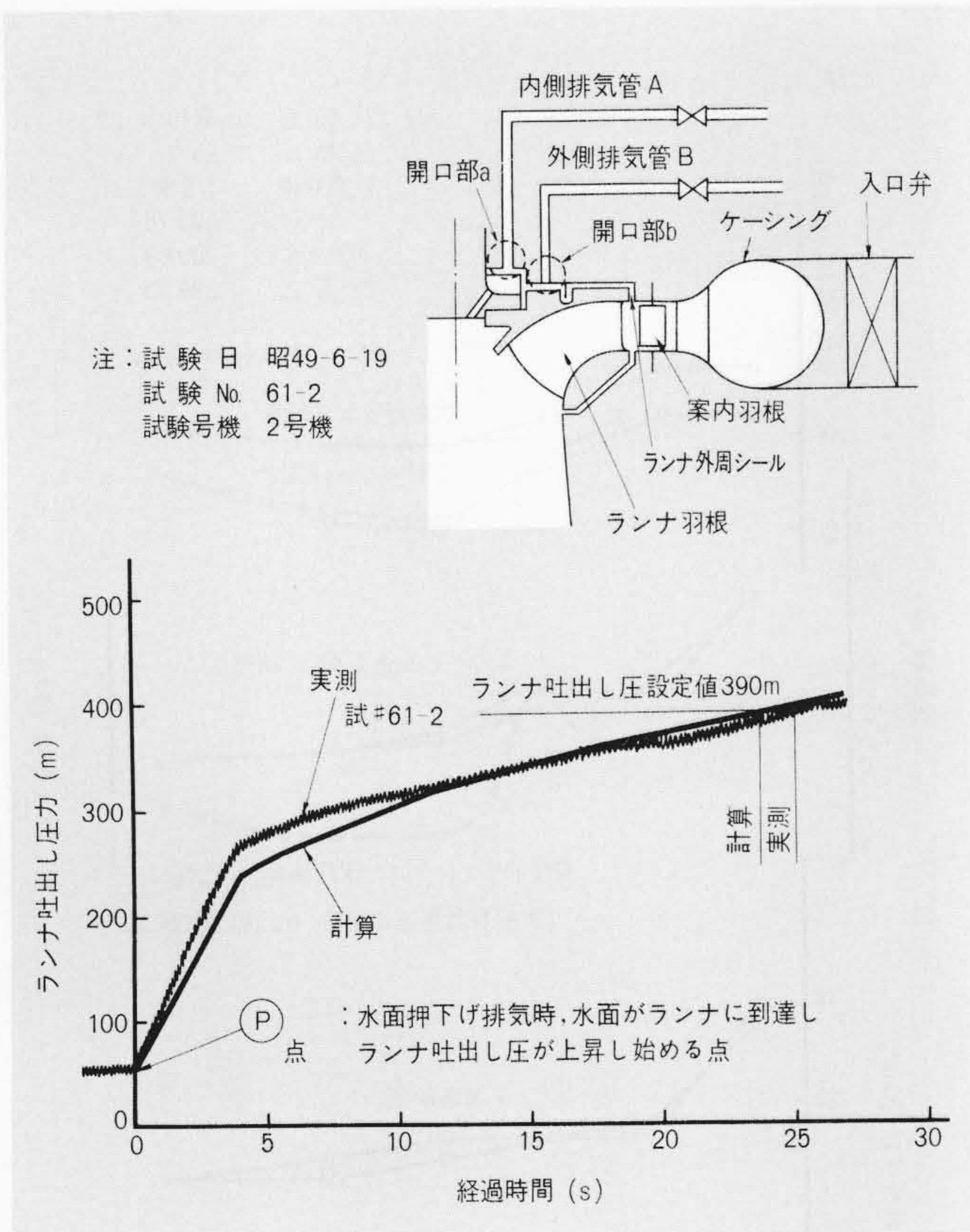


図4 ランナ吐出圧確立試験 ポンプ起動時の水面押下げ排気時のランナ吐出し圧上昇特性は、計算結果によく一致している。

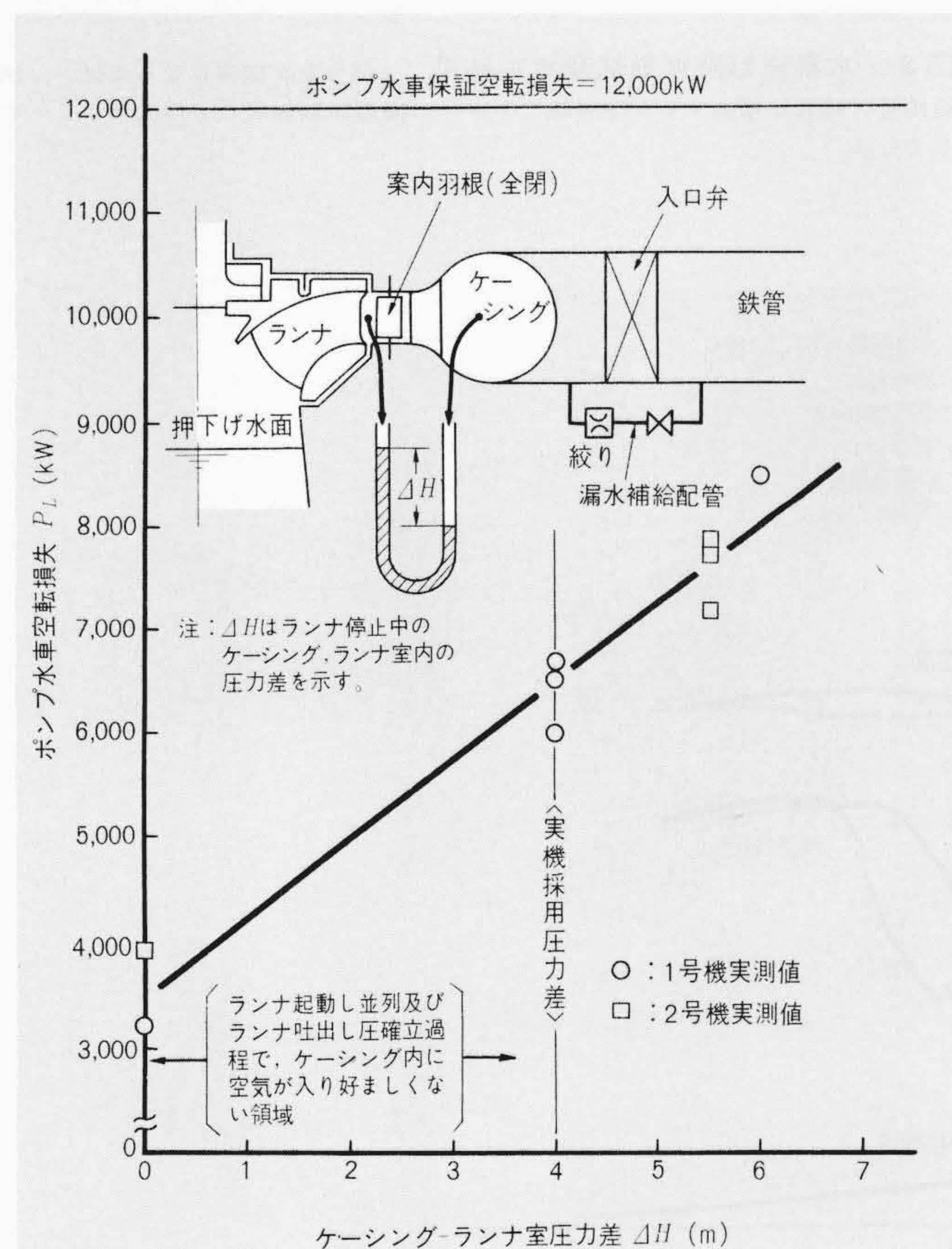


図5 空転損失測定結果 空転損失は、ケーシング、ランナ室圧力差が増すにつれて増加する。

め、入口弁全閉状態において排気を行ない、ランナ吐出し圧が確立後、入口弁及び案内羽根を順次開操作し揚水を行なわせる方式を採用している。

(2) 空転損失

ポンプ起動時の水面押下げ状態におけるポンプ水車空転損失は、ランナ室圧力とケーシング圧力の差圧、すなわち案内羽根を通過する漏水量の大小に大きく影響を受ける。ランナ停止時の上記差圧を ΔH (m)とすると、 ΔH の変化に対し、ポンプ水車の空転損失は図5に示すように変化する結果が得られた。

なお、差圧は鉄管とケーシングを結ぶ漏水補給配管中の絞り口径を変えることによって制御できるが、この差圧をあまりに小さくすると、ランナ吐出し圧確立までの間に、ケーシング内へランナ室の空気が入り、揚水開始時の異常振動の原因となることが予想され好ましくない。本ポンプ水車においては、差圧を約4 mとした。

2.4 ポンプ運転特性

図6に静落差364.5 mにおけるポンプ運転時の振動・騒音測定結果を示す。適正開度90%付近より、案内羽根開度を小さくしていくと、多少水車ピット内騒音が増加する傾向を示すが、軸振れ及び上カバー振動にはほとんど変化がない。

2.5 水車運転特性

図7に開度—出力特性を示す。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換算特性を、全案内羽根開度領域で満足している結果が得られた。

また図8には、静落差394 m(高落差領域)における水車運転時の振動・騒音測定結果を示す。

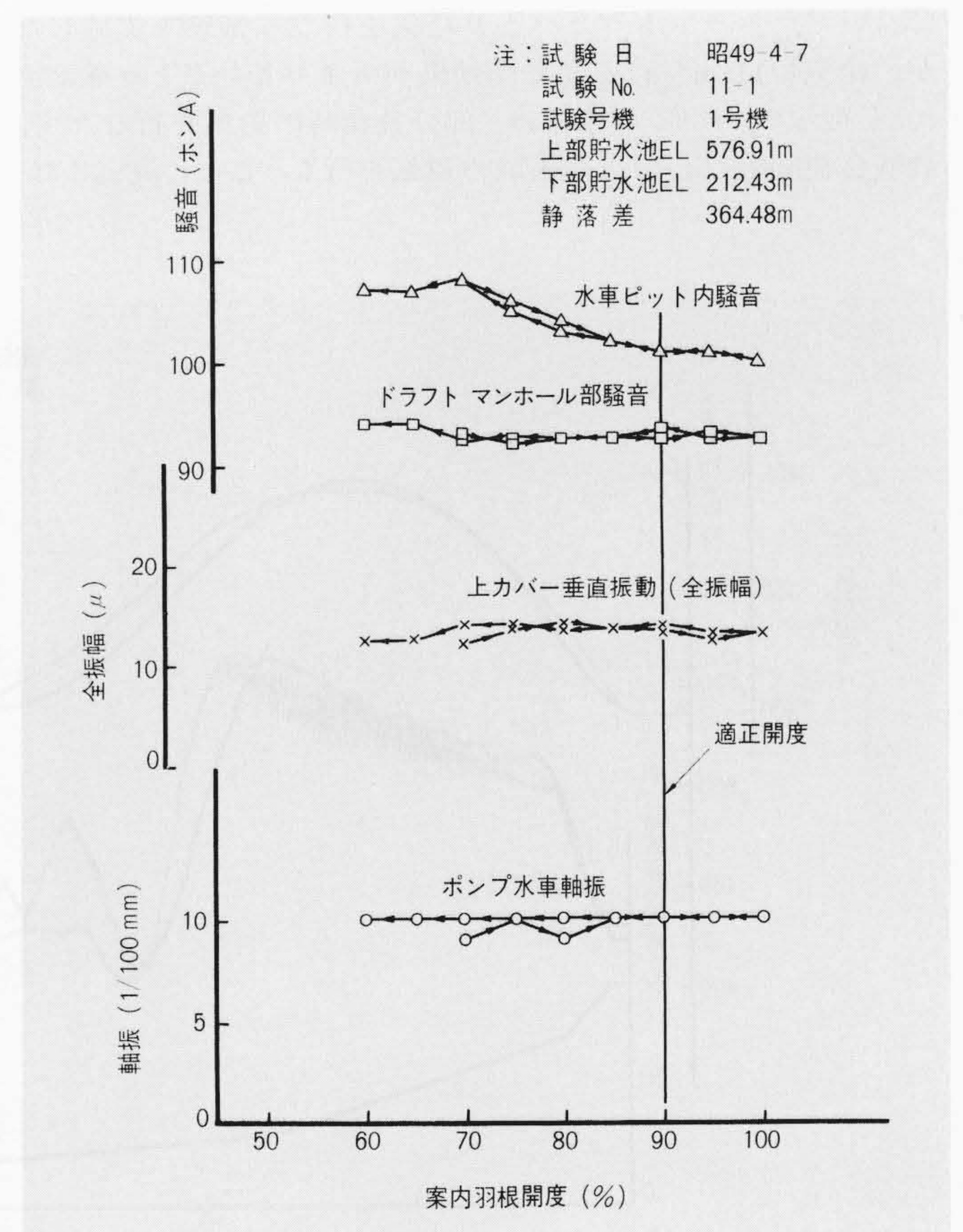


図6 ポンプ運転時振動・騒音測定結果 適正開度90%に対し、60～100%の範囲を変化させても構造振動はほとんど変化しない。

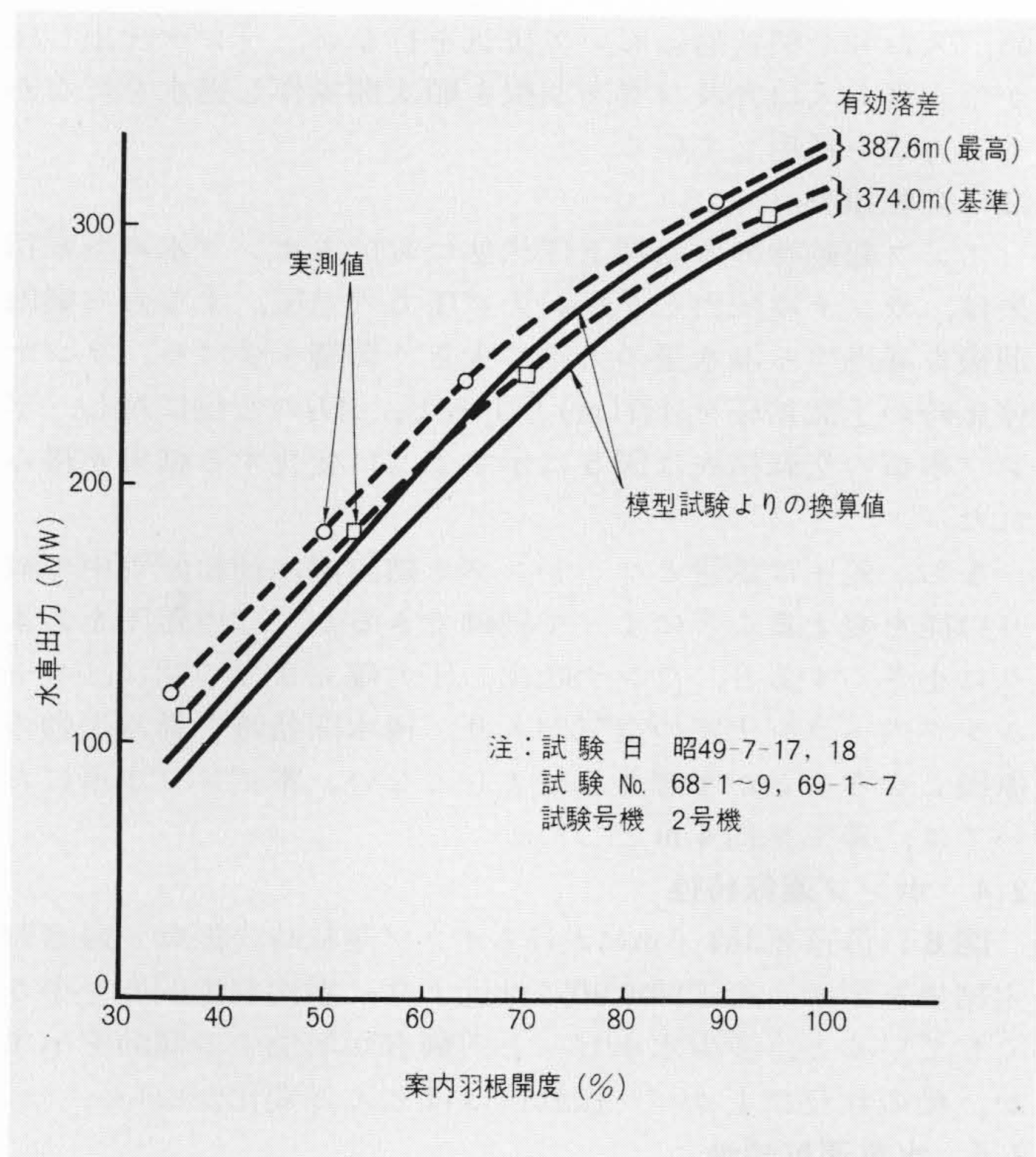


図7 水車開度出力特性 有効落差387.6m, 374.0mいずれの落差に対しても、全案内羽根開度領域で模型試験よりの換算値を満足している。

部分負荷開度になるに従い、振動・騒音ともに増加するが、振動の値は小さい。この傾向は、模型振動試験時のドラフトパイプ水圧振動の傾向に一致している。この部分負荷運転時において、ドラフトパイプより給気を行なう試験を実施したが、給気量11(m^3/s)程度では効果があまりないことが確認された。従って、本ポンプ水車は、部分負荷時の給気を行わず、最低負荷制限なしで、全領域の運転を行なうことに決定した。

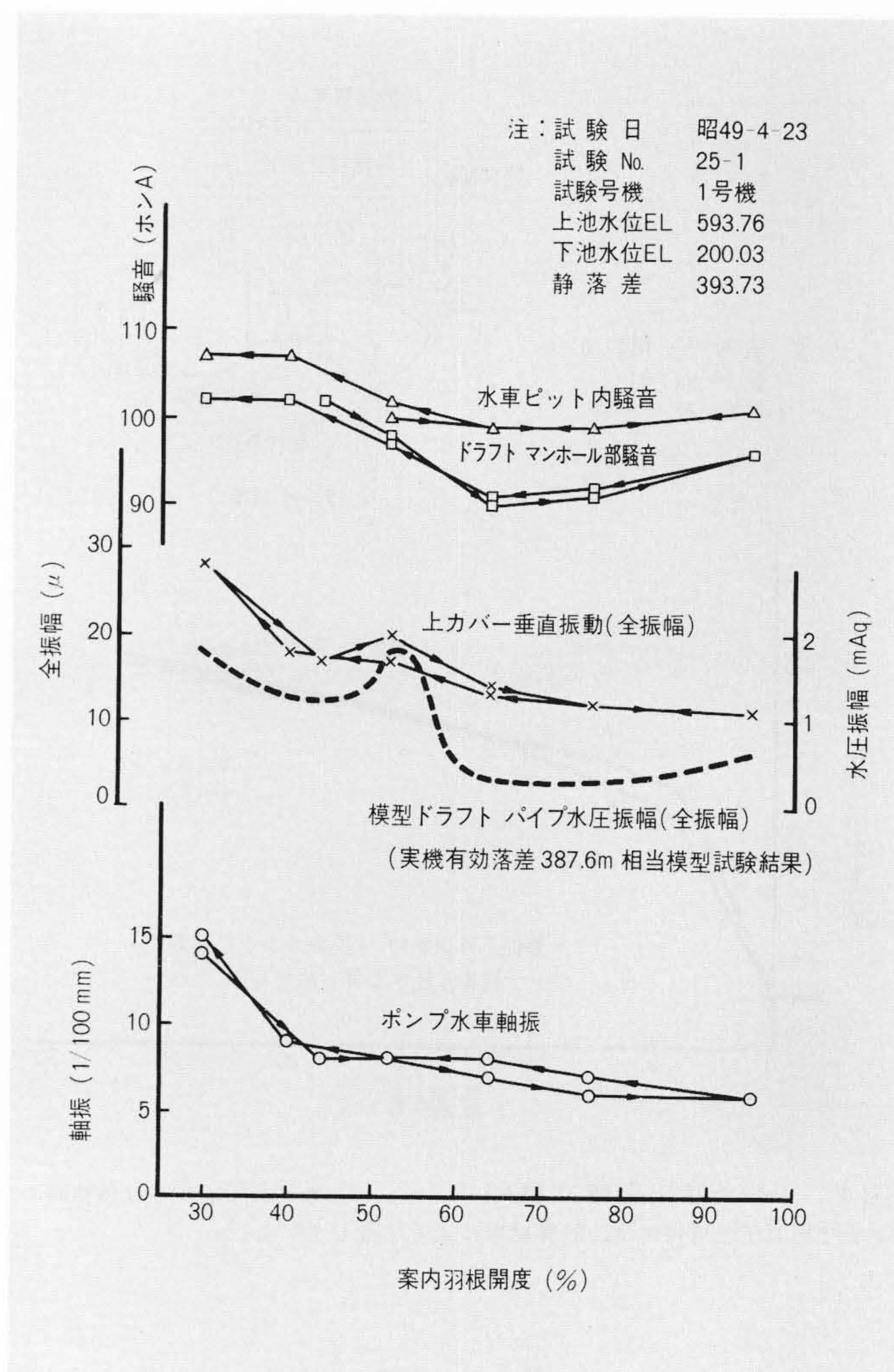


図8 水車運転時振動騒音測定結果 部分負荷開度になるに従い、構造振動・騒音が増加するが絶対値は小さい。模型試験結果とも傾向がよく一致している。

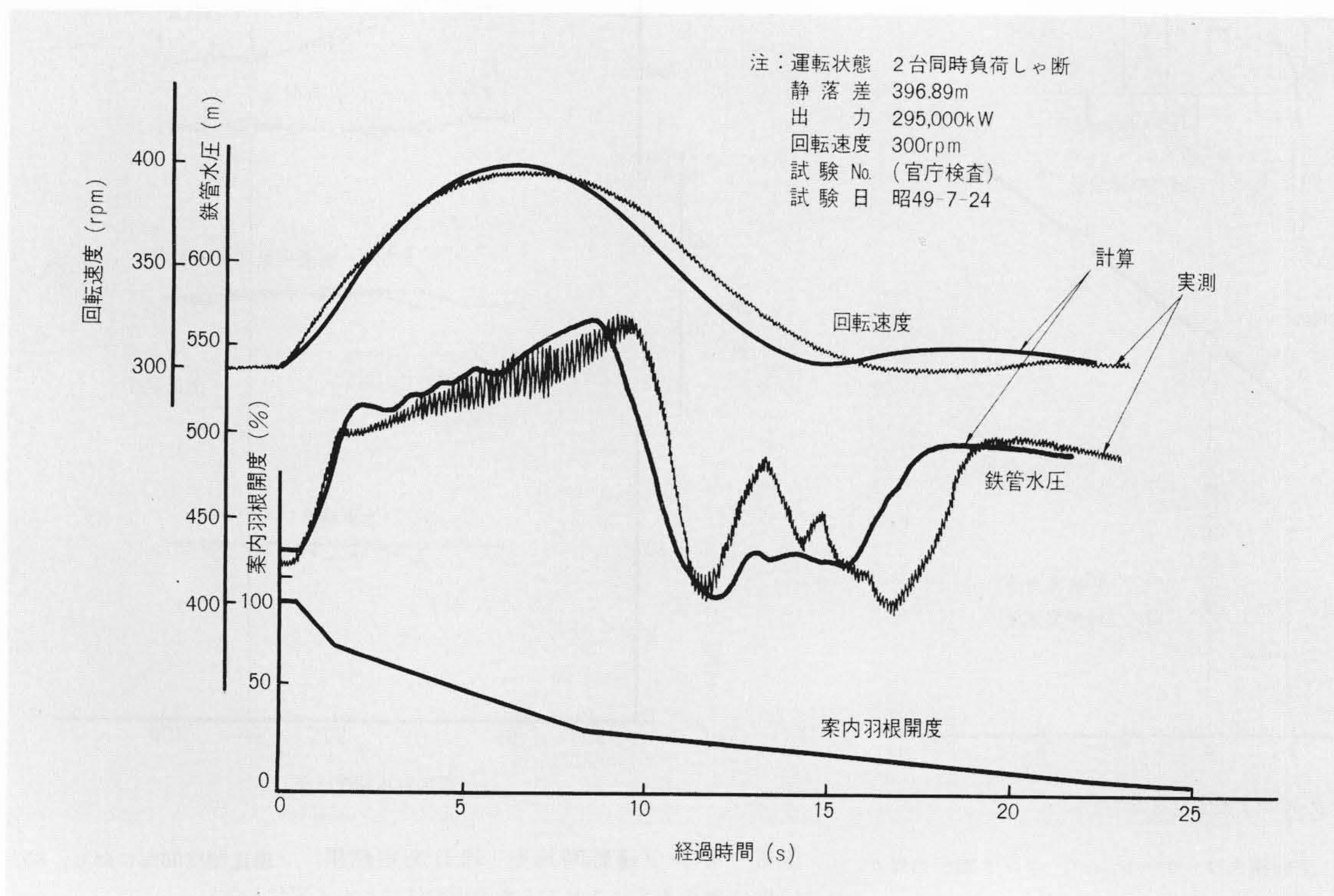


図9 水車負荷しゃ断試験結果 計算値と実測値は、かなりよく一致している。

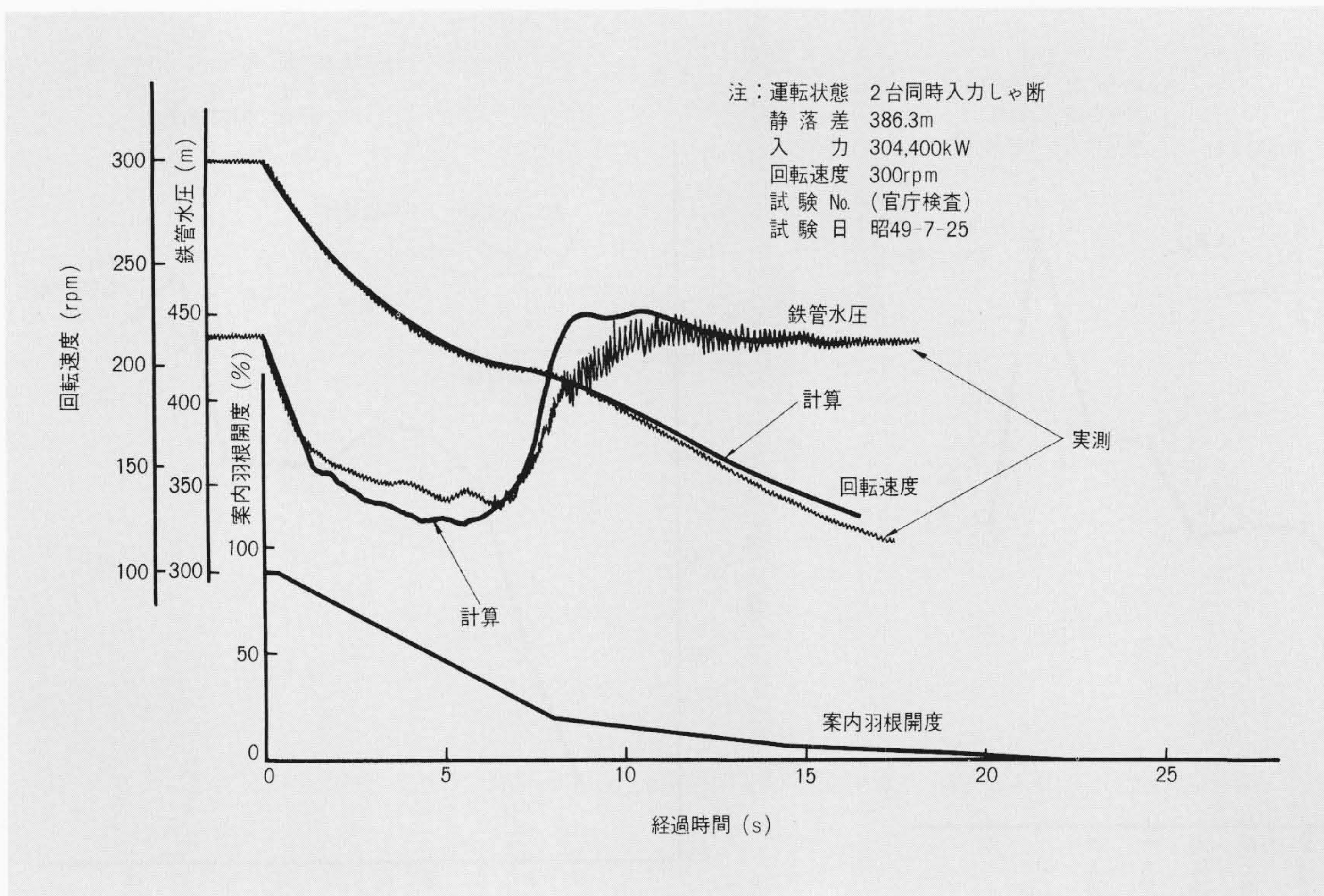


図10 ポンプ入力しゃ断試験結果 計算値と実測値は、かなりよく一致している。

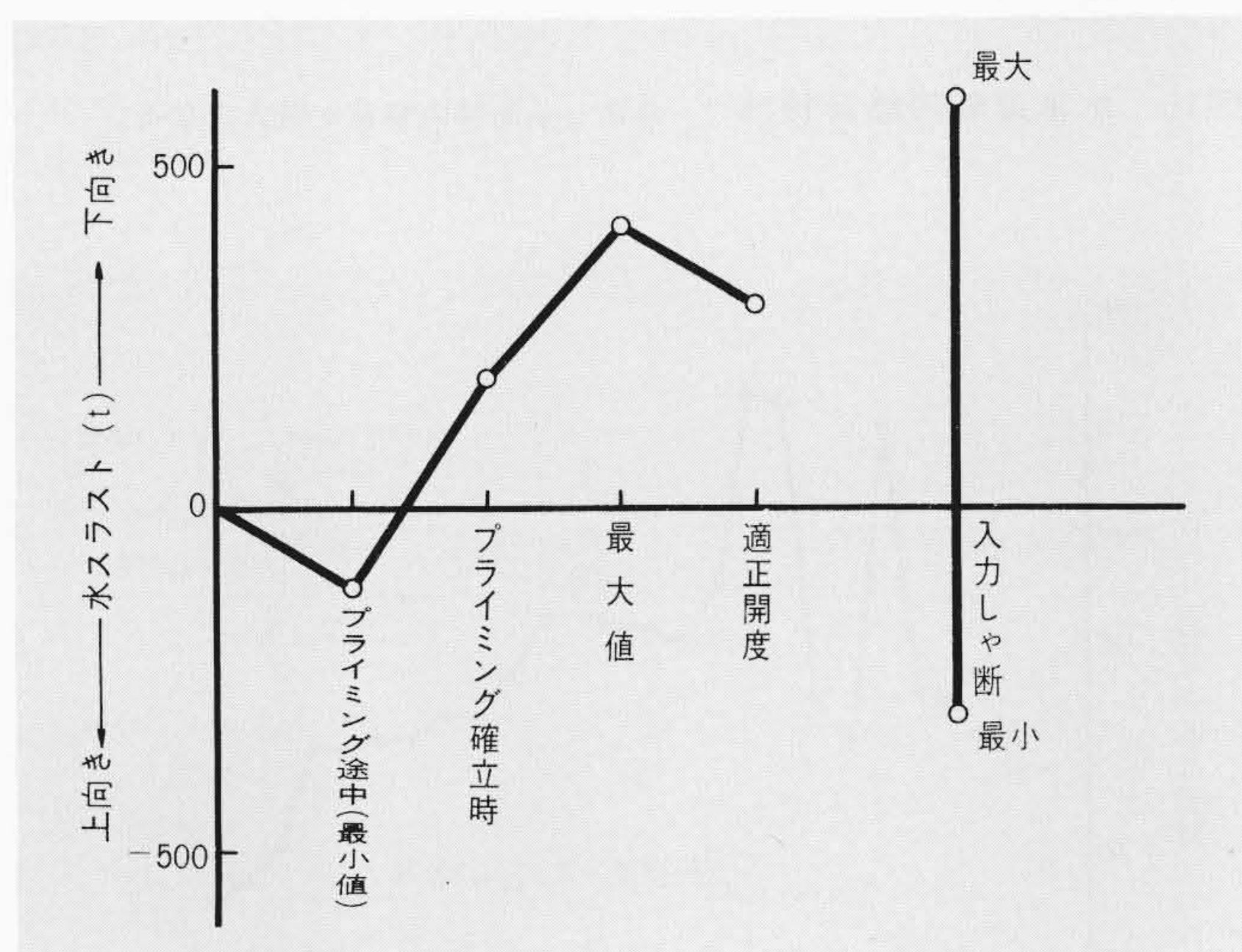


図11 ポンプ運転時の水推力特性 定常運転時の水推力は400t以下である。

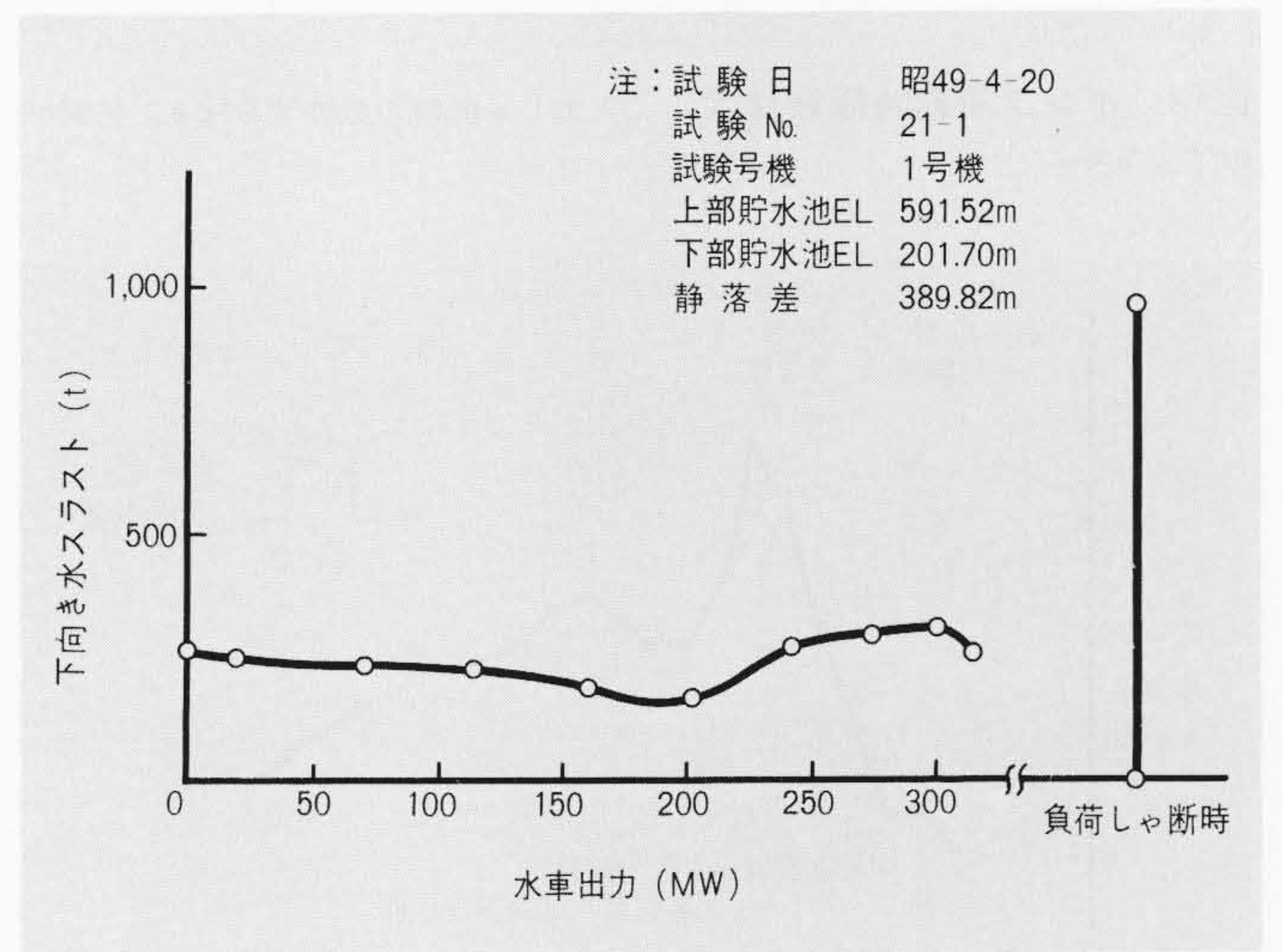


図12 水車運転時の水推力特性 定常運転時の水推力は300t以下である。

2.6 ポンプ入力しゃ断及び水車負荷しゃ断特性

図9は、静落差396.9mにおける2台同時負荷しゃ断の結果を計算値と比較したものである。本発電所は、1本の導水路及び放水トンネルに2台のポンプ水車主機が設置されている水路系を有しているが、かなりよく合致していることが確認された⁽²⁾。

図10は、静落差386.3mにおける2台同時入力しゃ断の結果を計算値と比較したものである。

2.7 水推力特性

本ポンプ水車には、内外バランス配管2系統を設置してあったが、その各バランスバルブの開度を変化させ、水推力ほかの各種試験を実施した結果、最終的には内側バランスバルブ全閉、外側バランスバルブも全閉とした。この状態におけるポンプ及び水車運転時の水推力測定結果を、図11、12に示

す。いずれも従来のポンプ水車の水推力特性と大差なく、保証水推力値を満足した結果が得られた。

2.8 騒音特性

ポンプ水車ピット内における騒音特性及び騒音の周波数特性を実測した。図13は、ポンプ運転の起動から停止にわたる全運転過程における騒音特性を示し、図14には、ポンプ適正開度運転における騒音の周波数特性を示す。

同様に、図15、16に水車運転時の騒音及び周波数特性を示す。

ポンプ及び水車運転ともに、騒音の最大を示す周波数は、100Hzであり、これは回転速度×案内羽根羽根枚数に相当する周波数である。

2.9 ランナ実働応力測定

本ポンプ水車には、400m級としては、初めて2分割構造のランナを採用している。設計段階においては、有限要素法を

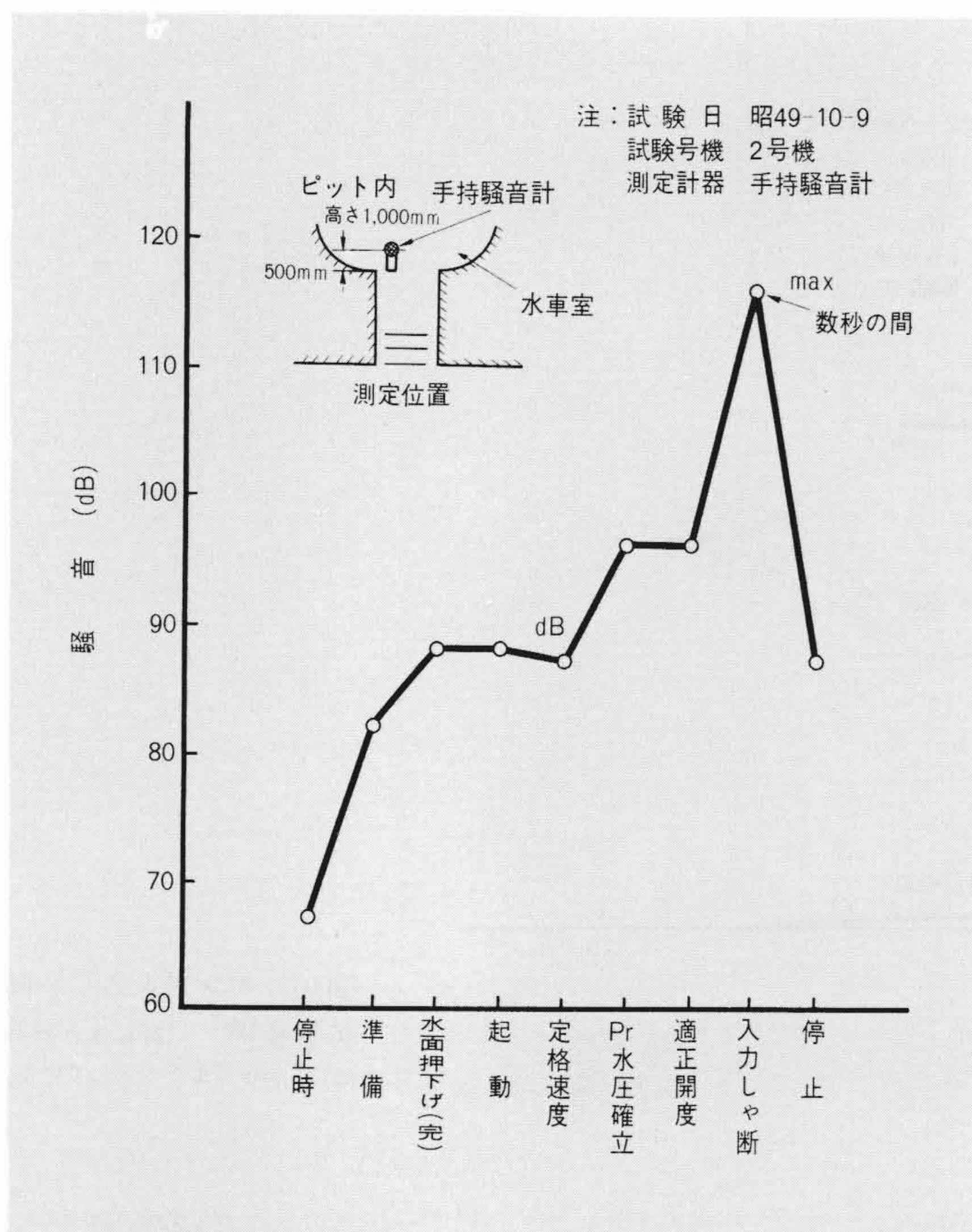


図13 ポンプ運転時騒音特性 入力しゃ断時の数秒間を除き、約96dB以下である。

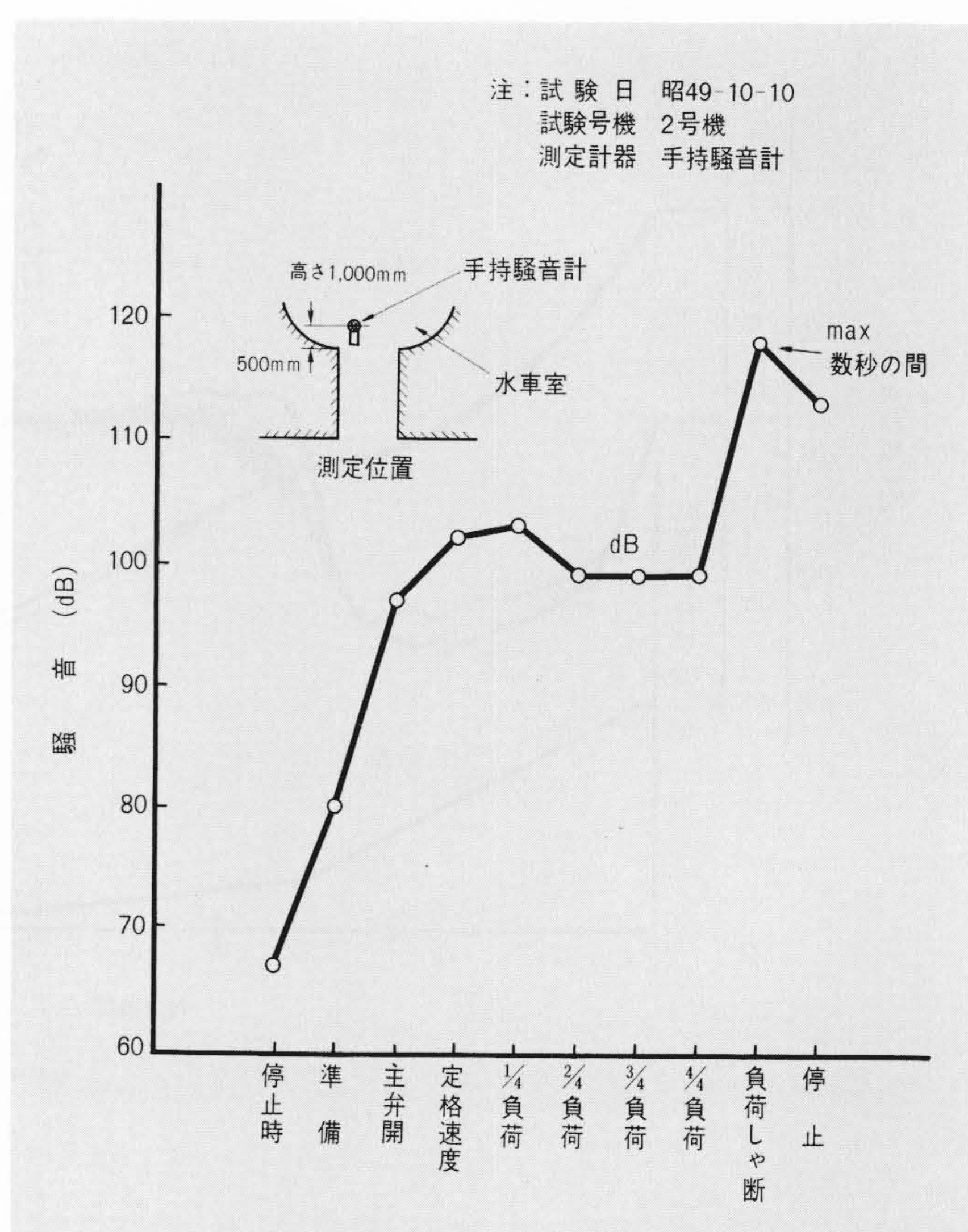


図15 水車運転時騒音特性 負荷しゃ断時の騒音が最大となる。

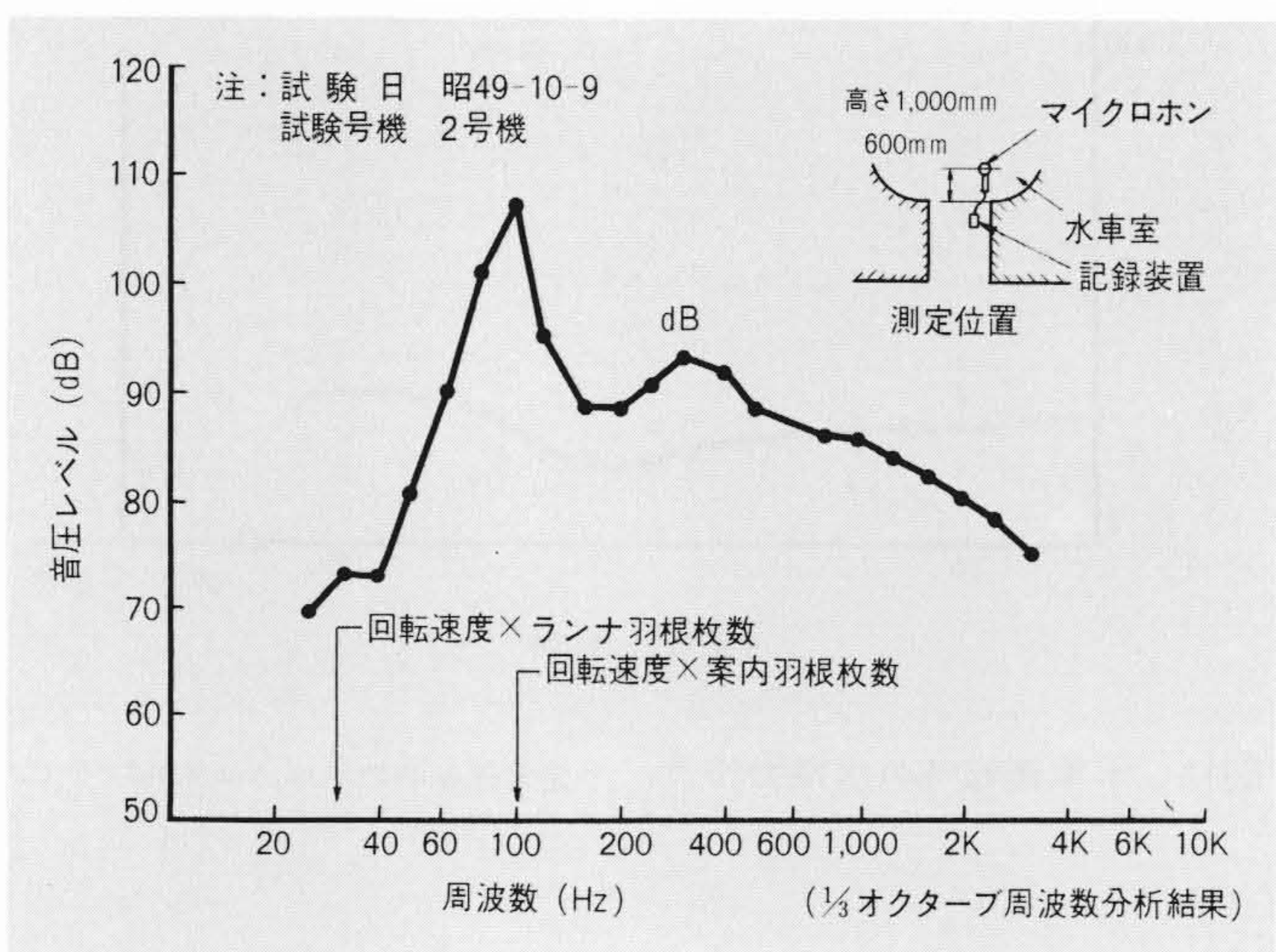


図14 ポンプ運転時騒音の周波数特性 最大の音圧レベルを示す周波数は、主機の回転数に案内羽根枚数を乗じた100(Hz)である。

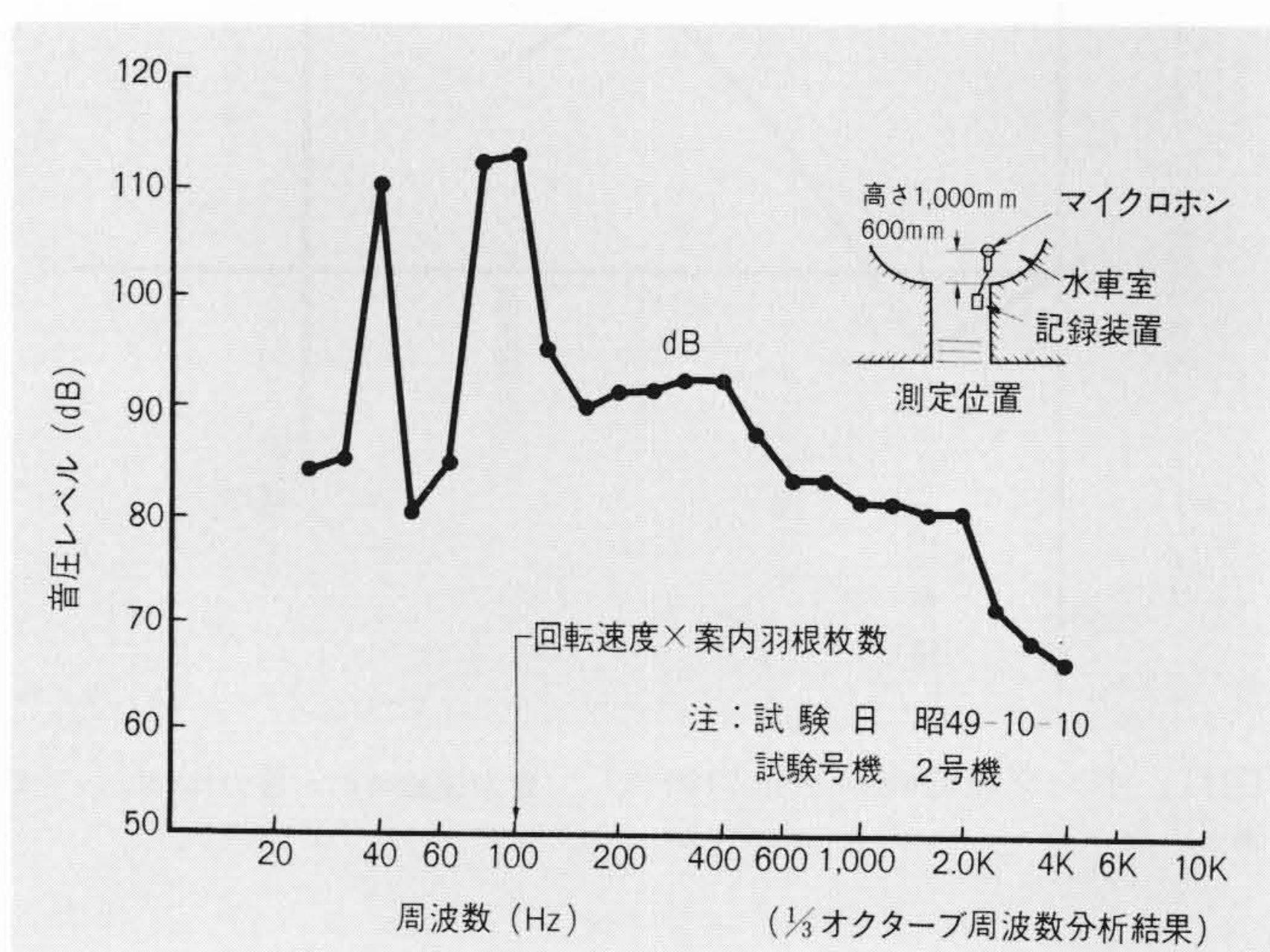


図16 水車運転時騒音の周波数特性 最大の音圧レベルを示す周波数は、主機の回転数に案内羽根枚数を乗じた100(Hz)である。

主体とした各部の詳細な応力解析を行なうとともに、モデルランナによる応力実測試験を実施し、強度的に十分信頼性の高いランナとなっているが、更に応力解析結果の確認と安全性の確認を目的とし、実機ランナの各種運転状態における実働応力を測定した。詳細結果は別報に報告する予定である。

3 結 言

我が国最初の400m級大容量ポンプ水車の現地試験結果についてその概要を述べた。構造的に多数の新設計点を採用した本機の現地運転結果は、満足すべきものであり、今後の大容

量・高落差化していく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。

最後に、本ポンプ水車の設計・製作・試験に貴重な助言をいただいた関西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「310,000kW フランス形ポンプ水車」日立評論 56, 103 (昭49-2)
- (2) 荒木ほか「水力発電所の水路系を考慮した主機トータルシステムの解析」日立評論 56, 1155 (昭49-12)