U.D.C. 621.224.7-156

中部電力株式会社 馬瀬川第一発電所納め

大容量斜流ポンプ水車の開発と現地試験結果

Development and Field Test Results of Diagonal Flow Type Reversible Pump-turbines for Masegawa No.1 Power Station of Chubu Electric Power Co., Inc.

井上久男* *Inoue Hisao*
中野権郎* *Nakano Kenrô*
一ノ瀬勝* *Ichinose Masaru*
朝日直達** *Asahi Tadatatsu*

斜流形として世界最大容量を誇る中部電力株式会社馬瀬川第一発電所納め149MWポンプ水車は，このほど，現地試験及び官庁試験を終了し，営業運転に入った。本稿は，この斜流ポンプ水車の開発，及び現地試験結果について述べる。

技術開発については，長放水路での過渡現象の究明，高比速度ランナの開発とポンプ性能，及びキャビテーション性能の改善，模型ランナによる応力解析，耐キャビテーション金属溶射材と方案の確立などを行なった。現地試験については，水車運転特性，ポンプ運転特性，水車負荷しゃ断ポンプ入力しゃ断，調相運転特性などの試験が実施された。

1 緒　言

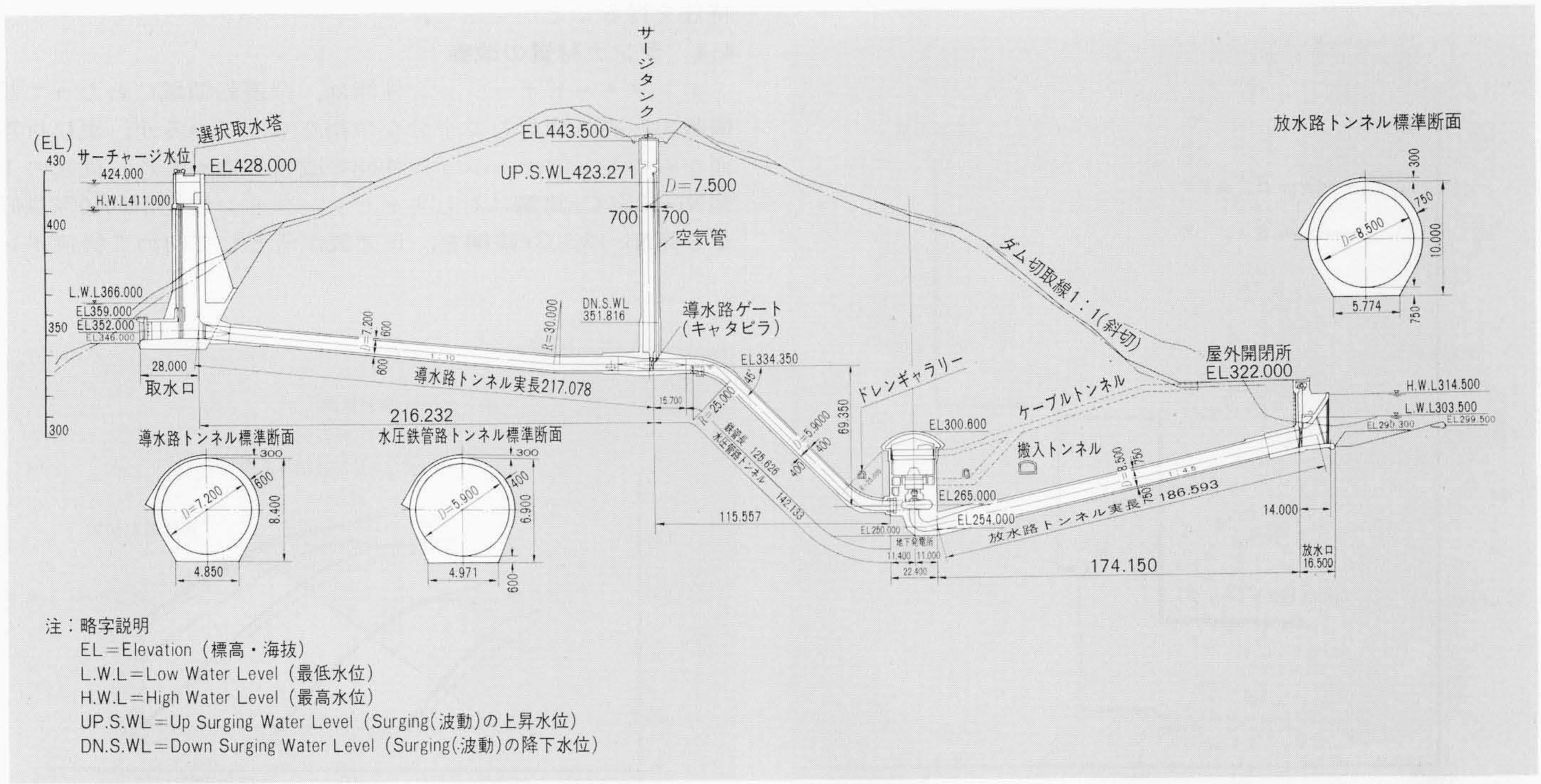
単機容量で世界最大を誇る，中部電力株式会社馬瀬川第一発電所(以下，馬瀬川第一発電所と略す)納め 149MW斜流ポンプ水車が，現地試験及び官庁試験を無事終了し，昭和51年6月25日にNo.2号機が，7月30日にはNo.1号機が営業運転を開始した。

本発電所は，落差が100mから50mと大きく変動すること，及び電力ピーク時の大きな負荷変動に追従することが必要であるため，これらの変動に対し高性能を発揮する可動翼斜流ポンプ水車が採用された。また，経済化を図るために，主機寸法の縮小化と運転性能の改善を主眼とした高速大容量ポンプ水車の開発，長放水路と揚水機器を総合した過渡現象の解明，揚水量揚程特性での不安定特性の除去などについて，中部電力株式会社と多年にわたる共同研究が行なわれた。

ここに，これら開発と現地試験の結果について述べる。

2 発電所の概要

馬瀬川第一発電所は，水資源の高度利用と効率的運用を目的として，木曽川水系飛弾川の支流である馬瀬川に発電，治



注：略字説明
EL＝Elevation（標高・海抜）
L.W.L＝Low Water Level（最低水位）
H.W.L＝High Water Level（最高水位）
UP.S.WL＝Up Surging Water Level（Surging(波動)の上昇水位）
DN.S.WL＝Down Surging Water Level（Surging(波動)の降下水位）

図1　馬瀬川第一発電所水路縦断面図(2号機)　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200mにもかかわらず，サージタンクは省略されている。

* 日立製作所日立工場　** 日立製作所日立研究所

水及び利水を兼ねた多目的ダムとして建設された岩屋ダムを上池とした完全地下式発電所であり，総出力 286MWの発電を行なった後，馬瀬川第二調整池である下池に放流する。また電力の軽負荷時には，火力原子力発電所などの余剰電力を使って下池から揚水を行ない，上池に貯水し尖頭負荷電力の増強に備えるものである。**図1**に水路縦断面図を示す。

3 仕　様

馬瀬川第一発電所の主な仕様を**表1**に，また斜流ポンプ水車の単機容量推移と本機器との関係を**図2**に示す。

表1　斜流ポンプ水車仕様　最高落差/最低落差比及び最高揚程/最低揚程比が2という非常に大きな変落差であることと，比速度の大きな発電所である。

項目		単位	水車	ポンプ
最高	出力（入力）	kW	149,000	160,000
	落差（揚程）	m	104.9	109.7
	流量（揚水量）	m^3/s	158.6	133.6
基準	出力（入力）	kW	149,000	
	落差（揚程）	m	99.6	
	流量（揚水量）	m^3/s	167.5	
最低	出力（入力）	kW	36.200	108,000
	落差（揚程）	m	50.5	55.0
	流量（揚水量）	m^3/s	96.0	167.5
回数速度		rpm	180	180
比速度			220m-kW	80.8m-m^3/s
最大水圧変動値	205.75m		最大速度変動率	40%
最高静落差	107.5 m		最高押込み高	−49.5m

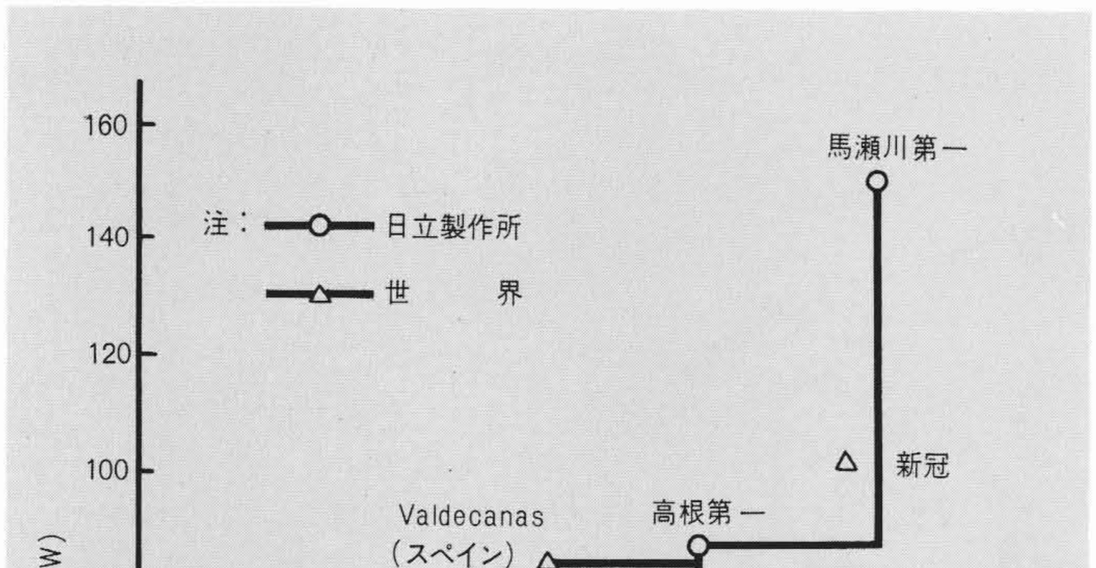


図2　斜流ポンプ水車容量推移　馬瀬川第一発電所は，従来の実績を大きく上回わる世界一の大容量機である。

4 斜流ポンプ水車の開発

4.1 模型試験

本発電所用の高比速度大容量斜流ポンプ水車の開発に当たっては，各種の模型試験により，性能改善及び実物運転上の安全性が確認された。特に，土木を含めた総合的経済化を図るための流水面各部の高流速化の推進，ポンプ揚水量—揚程特性の改善，及びランナベーン強度の検討に主眼を置き開発が進められた。

4.2 高流速化

鉄管，ケーシング及び放水路の流水面各部の高流速化が図られ，特に経済効果の大きい 200m を超す長放水路の高流速化に力点を置き開発が進められ，3種類の放水路を用いた模型試験により従来実績の1.8倍の流速となる実物直径8.5mの長放水路が採用された。更に，最終的に実物長さ 300m相当の長放水路をもつ模型を用いて，ポンプ実揚程試験を行ない実物運転上の安全性が確認された。

4.3 ポンプ揚水量(Q)—揚程(H)特性の改善

ポンプ$Q-H$特性に右上りの不安定特性，いわゆる凹みが存在する場合，この部分の運転時に大きな振動，及び騒音が発生するため，この凹みの除去に最重点を置き開発が進められた。この開発には，ランナ内流れ解析プログラム“FLANPT”を使用して設計段階より凹みの発生状況を確認しながら開発を進め，ランナベーンのそり及びポンプ出口部形状を改善することにより，**図3**の一点鎖線で示す特性を破線で示すような特性に改善することができた。しかし，**図4**に示すように$Q-H$特性の良好のものは，高揚程時のポンプキャビテーション性能が悪化するため，両者の最良点を選択することにより，最終的には両者の中間の実線で示す特性をもつ模型を採用し，ポンプ，水車共従来実績の効率を低下させることなく，ポンプ$Q-H$特性，キャビテーション特性共当初目標とした特性を得ることができた。

4.4 ランナ材質の改善

ポンプキャビテーション性能は，全運転領域にわたって設備吸出し高さに対して十分な余裕をもっているが，更に材料面からのキャビテーション性能の改善も進められ，従来の1%Ni-13%Cr鋳鋼に対しキャビテーション性能が約40%良好な5%Ni-13%Cr鋳鋼を，日立製作所として初めて斜流ポン

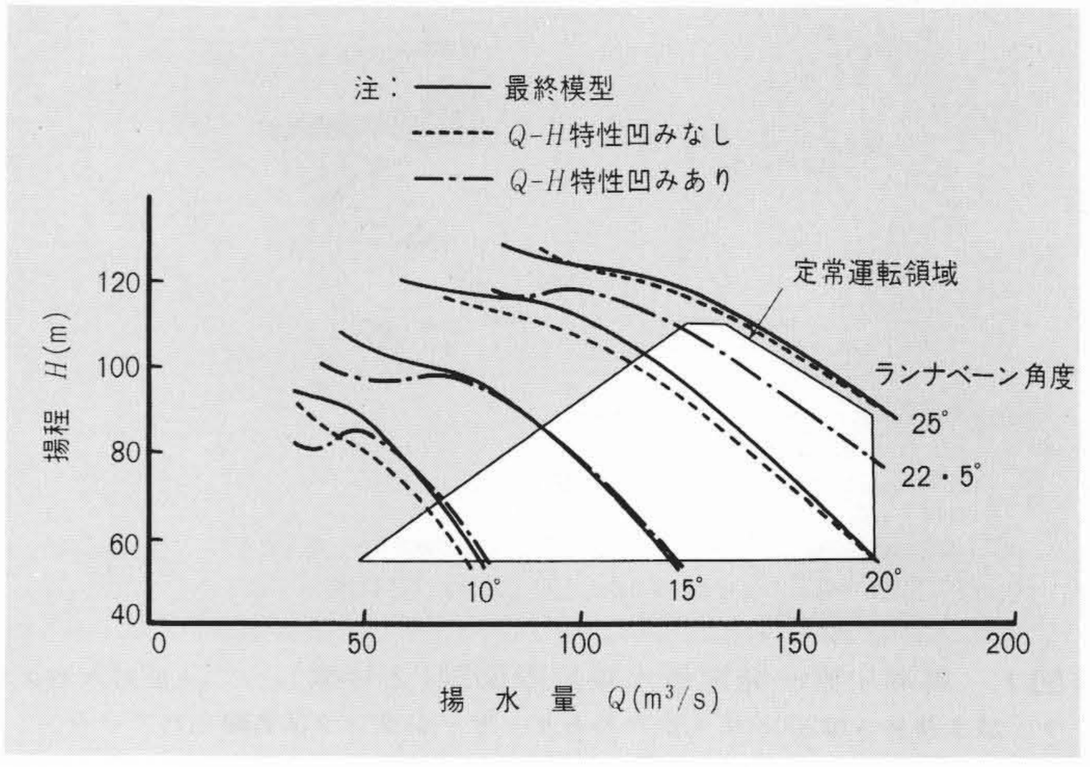


図3　実物換算揚水量(Q)—揚程(H)特性比較　ポンプ$Q-H$特性の改善とキャビテーション性能の改善とは相反する関係にあり，最終模型は両者の最良点を選択し，実線で示すものを採用した。

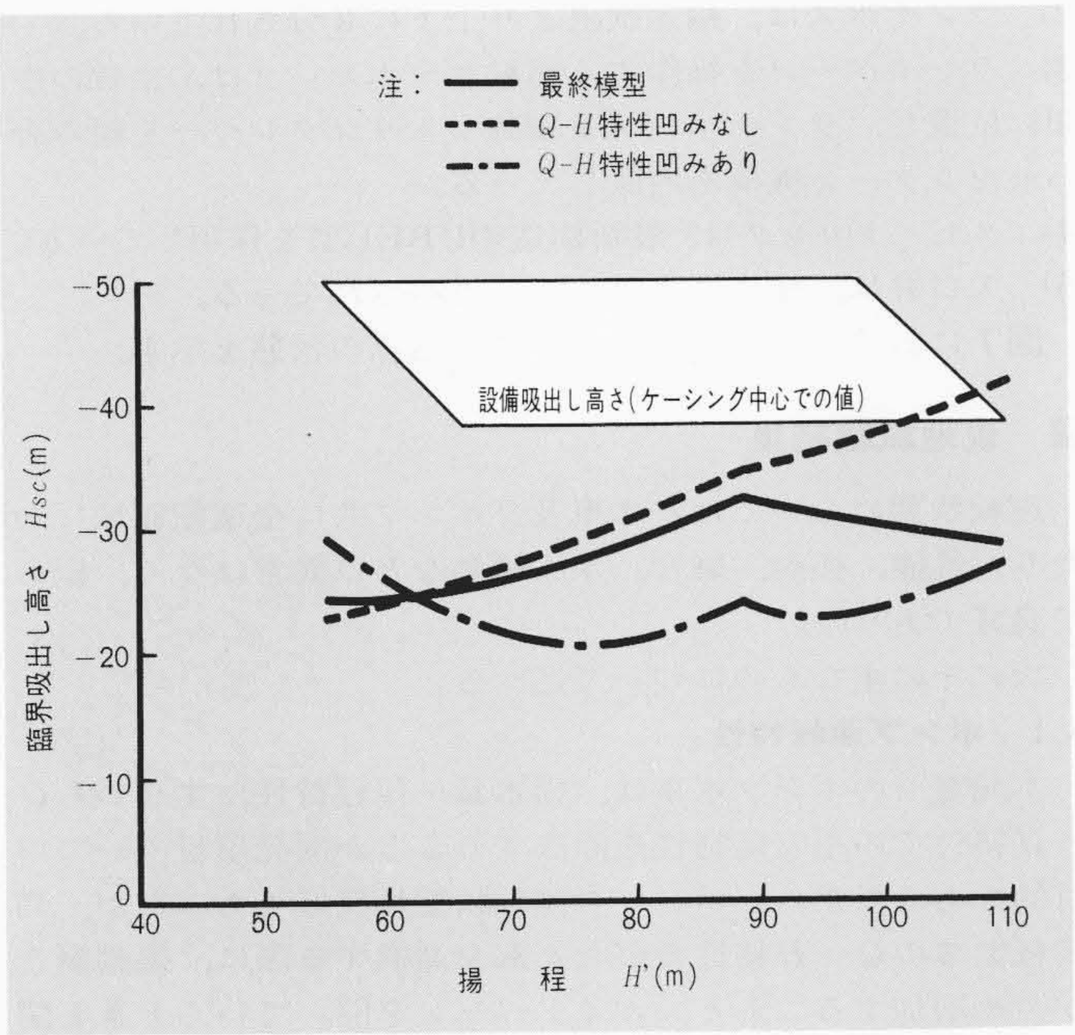


図4　実物換算ポンプキャビテーション性能比較　ポンプQ—H特性は，破線で示すように完全に除去されたが，ポンプキャビテーション性能は悪化した。最終模型は両者の最良点を選択し，実線のものを採用した。

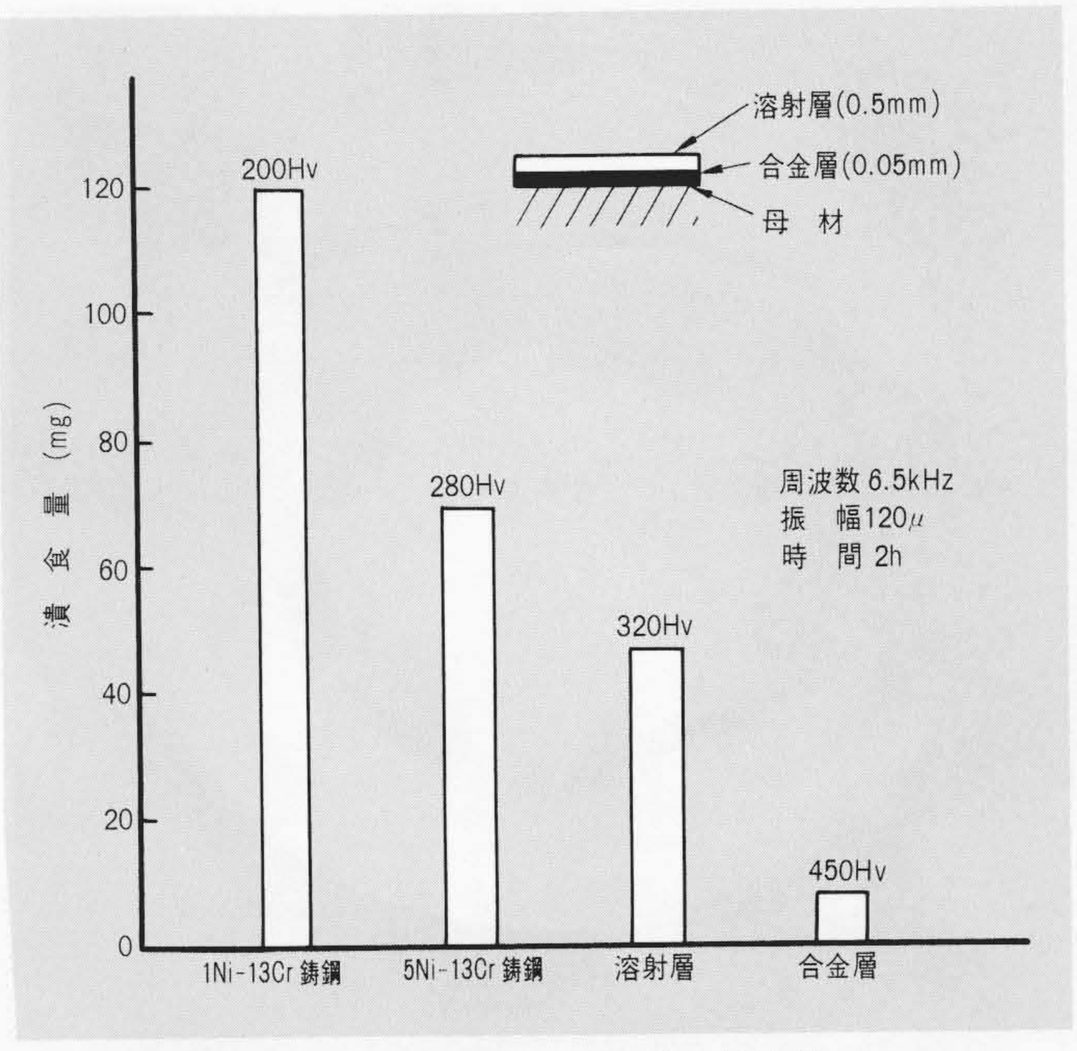


図5　13%Cr鋳鋼のキャビテーション潰食量比較　5%Ni-13Cr鋳鋼への金属溶射は，従来の1%Ni-13%Cr鋳鋼に対し，キャビテーション潰食量は約6%となり，大幅に改善された。

プ水車に適用した。更に，耐キャビテーション，耐摩耗性の優れた金属溶射材料の開発とその施工方案の確立，及び信頼性の確認を行ない，特にキャビテーションの発生しやすいランナベーンポンプ入口部反作用面に適用し，好結果を得た。**図5**に13%Cr鋳鋼の潰食量比較を示す。

4.5　ランナベーン強度

斜流ポンプ水車で強度上，最重要部であるランナベーン応力は，日立製作所開発の強度計算プログラムにより確認を行なうと同時に，ランナベーン付根部まで実物と相似な模型を用いて，運転時の平均応力，変動応力の測定を行なった。しかし，模型は約$\frac{1}{15}$であるので，ランナベーン付根部に発生する応力集中係数を十分な精度で測定することができない。このため，更に実物ランナベーンを用いて，これに静的荷重を加え，応力集中係数を測定した。**図6**にこの結果を示す。これらを総合し，ランナベーン強度は，5%Ni-13%Cr鋳鋼の疲労強度に対し十分安全であることが確認された。

5　構　　造

(1)　ランナは材力と耐キャビテーション性の優れた5%Ni-13%Cr鋳鋼で作られた8枚の可動翼である。

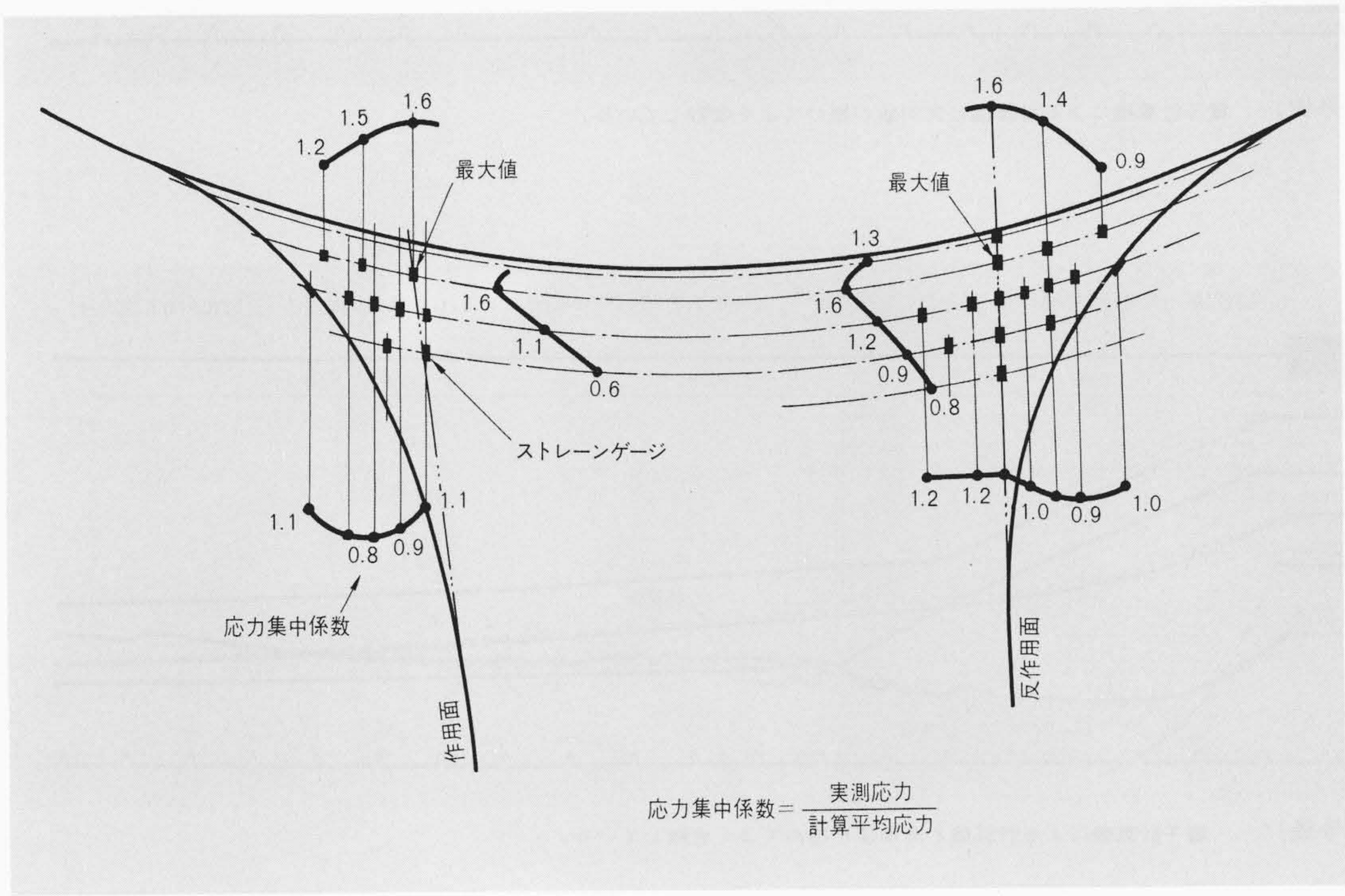


図6　ランナブレード荷重試験　油圧ジャッキによる荷重試験より，ランナブレードとステム付根の応力集中係数を求めた。応力集中の最大は，翼面の延長線上の付根Rの$\frac{1}{2}$のところに発生している。設計値は係数2としてブレードの応力計算を行なっている。

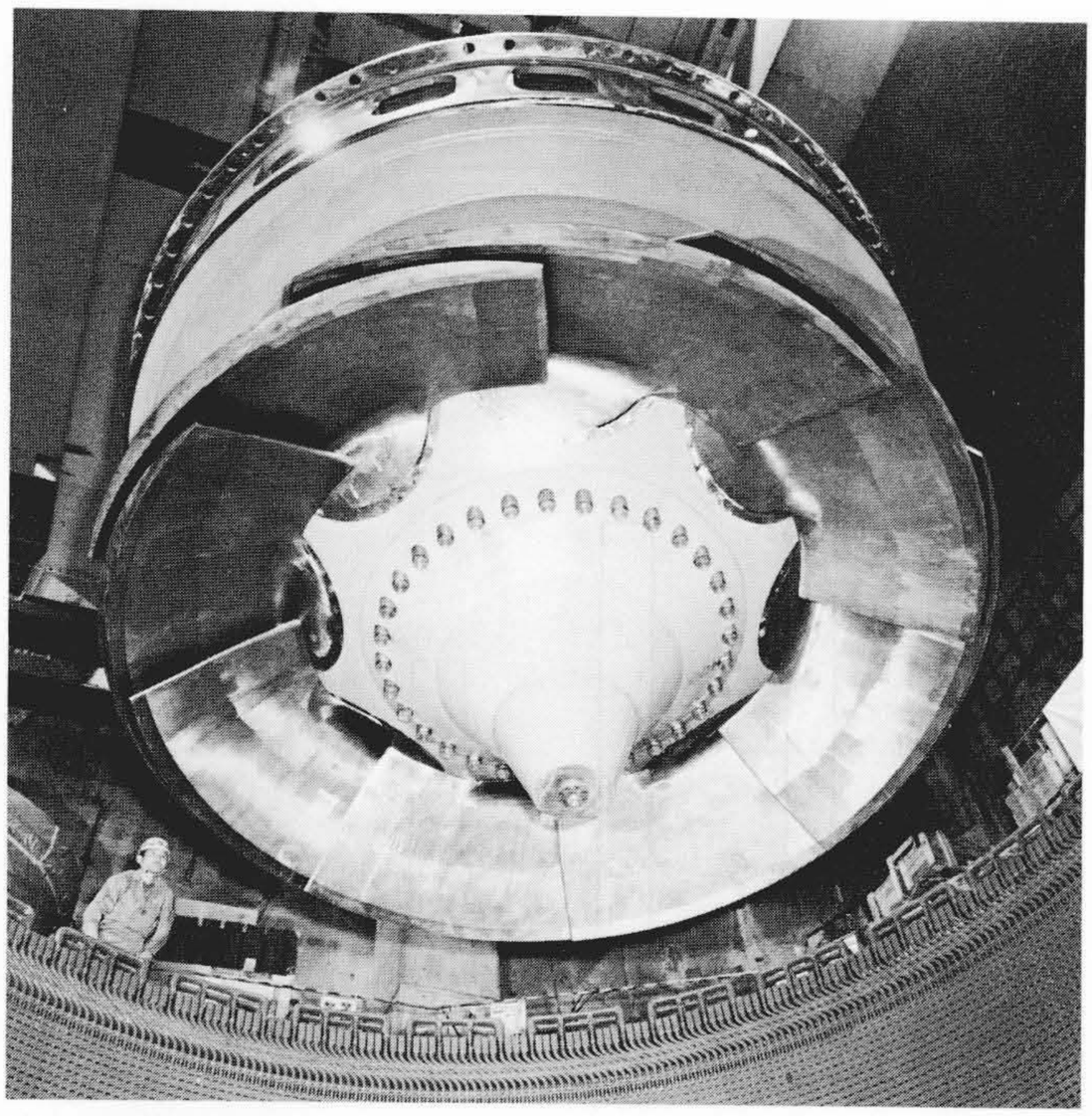


図7 149MW斜流ポンプ水車ランナつり込み　世界一を誇る斜流ポンプ水車ランナのつり込み状況を示すもので，このランナが落差変動，水量変動に応じて開いたり閉じたりして，効率の良い運転を行なう。

(2) ランナボスは，輸送制限より上下に2分されている。
(3) ランナベーンを操作する回転サーボモータは，主軸の中間に位置し，ランナベーンを制御するリンクレバーを組み合わせたレターン機構を内蔵している。
(4) スピードリングは，最新構造のUBEL型を採用している。
(5) 入口弁は，経済性の見地より省略されている。

図7に斜流ポンプ水車ランナつり込みの状態を示す。

6 現地試験結果

運転状態については，水車及びポンプ共に全運転領域にわたり，性能，振動，騒音，水圧脈動などに異常はなく，極めて良好であった。

次にその主なものについて述べる。

6.1 ポンプ運転特性

本発電所のポンプ水車は，揚水量—揚程特性，すなわちQ—H特性での不安定特性を除去することが開発項目の一つの目的であったため，ポンプの運転状態は良好であったが，高揚程側でのQ—H特性の平たん部を通過する際に，振動騒音がやや増加することと，ガイドベーンを開いていくときと閉じてくるときで電動機入力に差が現われる，いわゆる入力ヒステリシス現象が現われたが，この付近のランナブレード角度を1～2度立てることにより最適な運転特性を得ることができた。

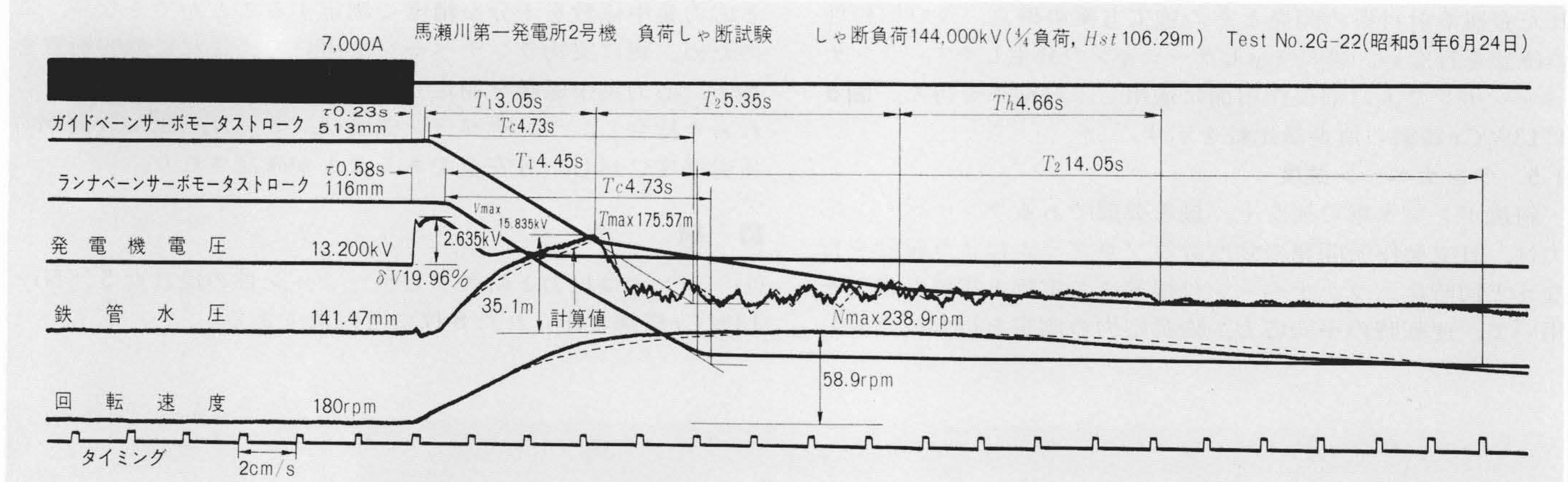


図8 負荷しゃ断試験結果(2号機)　電子計算機による計算値と実測値が極めてよく合致している。

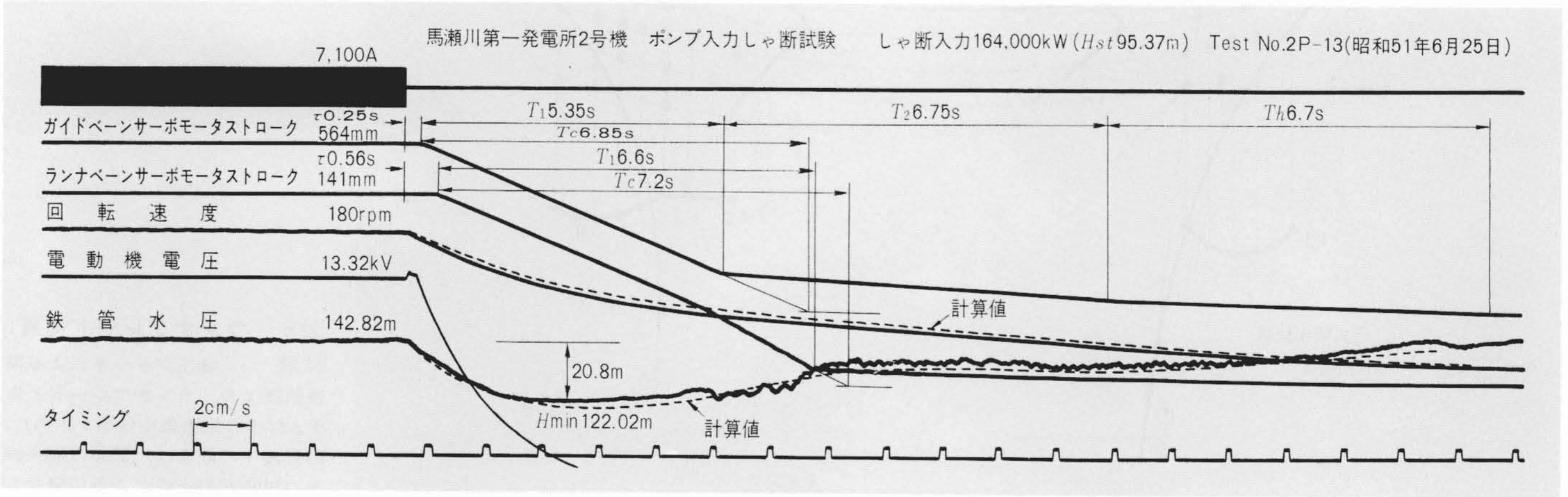
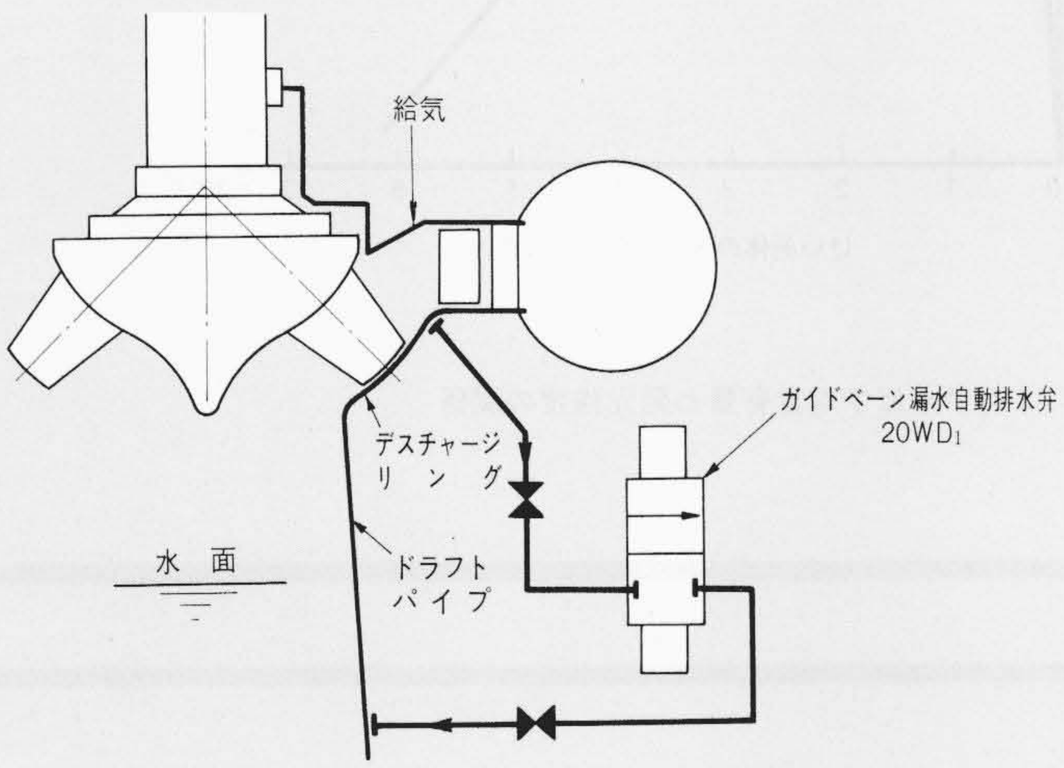


図9 入力しゃ断試験結果(2号機)　電子計算機による計算値と実測値が極めてよく合致している。

表2　しゃ断特性計算結果の一例　電子計算機によるしゃ断特性の一例であり，このほか各落差との組合せにより，約30ケースに及ぶ計算を行ない，最良の閉鎖時間を選定した。

項目	単位	保証値	負荷しゃ断				入力しゃ断			
			T-1	T-2	T-3	T-4	P-1	P-2	P-3	P-4
しゃ断落差(揚　程)	m		104.9	104.9	104.9	104.9	103	103	55	55
しゃ断出力(入　力)	MW		149	149	149	149	160	160	106	106
ガイドベーン閉鎖時間	s		7.2	6.7	6.2	5.7	6.65	6.65	6.65	6.65
ランナベーン閉鎖時間	s		6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	7.0	6.6	7.0
速度変動	rpm	252	242.9	241.4	239.9	238.2				
圧力変動(最大値)	m	205.75	177.3	178.5	176.4	178.5				
圧力変動(最小値)	m	55					111.9	113.5	77.2	78.2
			採　用				採　用		採　用	

注：T-1～4＝水車テストNo.　P-1～4＝ポンプテストNo.



項目	単位	20WD1 全閉	20WD1 全開
有効電力	kW	9	7.5
無効電力	Mvar	85	93
給気間隔	min	31	30
漏気量	m^3/min	5.2	4.8
ケーシング水圧	m	127	127
プライミング水圧	m	66	4
ランナ背圧	m	39	39
ドラフト水圧	m	40	40
水　温	℃	12	12
室　温	℃	19	19
デスチャージリング温度	℃	14.5	16
ドラフトパイプ温度	℃	14.2 採　用	15

注：HYD＝Hydraulic（油圧操作）
20WD1＝自動排水弁のデバイスNo.（WはWaterを，DはDrainを表わす）

図10　調相運転結果　長時間の運転にもかかわらず，デスチャージリング，ドラフトパイプなどの温度上昇も小さい。実に，給気間隔が設計値20～30分に対し31分であり，良好な運転状態である。

6.2　水車負荷しゃ断，ポンプ入力しゃ断特性

負荷しゃ断，入力しゃ断共モデル完全特性をもとにしゃ断条件を種々変えた電子計算機による計算結果より，しゃ断モードの良いものを選んで実機のガイドベーンとランナベーンの閉鎖時間を設定し，しゃ断試験を行なった結果，各落差とも計算結果によく一致した特性が確認された。**図8**に負荷しゃ断試験を，**図9**に入力しゃ断試験の現地実測オシログラフを，また**表2**にしゃ断特性計算結果の一例をそれぞれ示す。

6.3　調相運転

調相運転は水面押下げ状態で運転される。

発電運転から調相運転までの切換時間…4分38秒

調相運転から発電運転までの切換時間…3分30秒

どちらも好調に切り換わり，運転状態も良好である。**図10**に調相運転の実測結果を示す。各部の温度上昇が小さいとともに，圧縮空気の消費量も極めて少ない。

7　結　言

馬瀬川第一発電所の斜流ポンプ水車は，現地試験結果，全運転領域にわたって，水車及びポンプの運転状態は良好である。

本機は変落差の大きい低落差地点を経済的に開発する主力機としての技術確立を行ない得たものと考える。

最後に，本発電所の開発，設計及び製作に当たり，貴重な指針を与えていただいた中部電力株式会社の各位に対し，厚くお礼を申しあげる次第である。

参考文献

1）田中ほか3名：四国電力株式会社蔭平発電所納め高揚程47,700kW斜流ポンプ水車の運転特性，日立評論，創刊50周年記念論文集，5（昭43-12）
2）岩成ほか3名：中部電力株式会社高根第一発電所納め斜流ポンプ水車及び発電電動機の運転特性，日立評論，**53**，170（昭46-2）
3）馬瀬川水力建設所：発電水力No.128（昭49-1）
4）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）
5）玉村ほか：新溶射材料と水力機械への応用，金属表面技術協会技術解説（昭51）