U.D.C. 621.221.4 : 621.675.001.4

九州電力株式会社納

諸塚揚水発電所用 56,500 kW ポンプ現地試験

On the Site Test of 56,500 kW Pump for Morozuka Pumped Storage Power Station, Kyushu Electric Power Co., Inc.

藤井亮一* 田中栄吉** 豊国義守**
Ryōichi Fujii Eikichi Tanaka Yoshimori Toyokuni

内 容 梗 概

既に揚水発電機器小特集号[1][2][3]に紹介されたように，世界的容量を誇る九州電力株式会社諸塚揚水発電所納 56,500 kW 揚水ポンプは，昨年3月から営業運転にはいった。現地試験の結果，ポンプ効率は保証値 90% に合格し，揚水運転中の動力遮断試験時の水撃圧力上昇値も保証値 18% の約半分と予想どおりの成果を収めた。

そのほか軸受部温度上昇，ポンプ各部の振動などについても，それぞれ厳密な試験が行なわれたが，いずれも十分満足すべき結果が得られた。

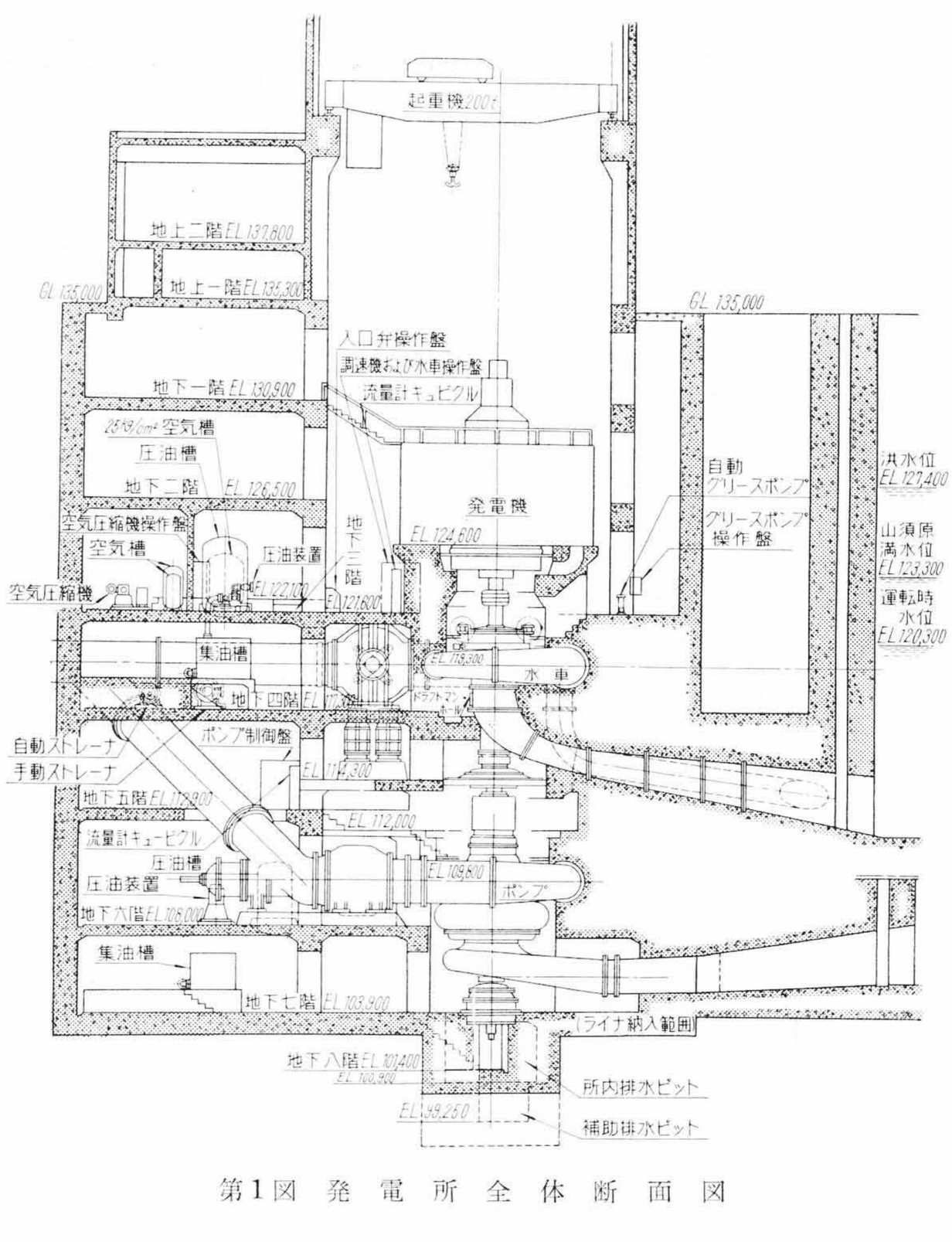
1. 緒 言

最近各電力会社において，余剰電力を利用して揚水した水をピーク時に発電用水として使用する，揚水発電所の計画が次第に多くなりつつある。今回九州電力株式会社諸塚揚水発電所に 56,500 kW の別置式立形2段の揚水ポンプを納入し，昨年2月初旬から現地試験にはいり，2月末には官庁試験に合格，3月から営業運転にはいった。このポンプは容量的に東北電力株式会社沼沢沼揚水発電所に納入した横形2段ポンプをはるかにしのぐ世界屈指のポンプだけに各界の注目を集めたが，今回その試験結果の概要を報告する。

2. 仕様の概要

九州電力株式会社諸塚揚水発電所は宮崎県東臼杵郡諸塚村に設置され，耳川の水を深夜火力または余剰火力を利用して約 240m 高所にある諸塚ダムに揚水し，ピーク時の発電用水とするため計画されたものである。**第1図**に示すように発電電動機，水車，ポンプが一軸上に垂直に直結され，水車，ポンプ間は油圧操作継手でつながっている。したがって発電時は継手を脱出して発電機—水車，揚水時は継手をかん入して電動機—水車—ポンプという組み合わせで運転される。揚水時の起動方法は，まず水車で起動し，約 250 rpm で吐出弁を 22% 予開し，300 rpm 同期速度で系統と並列させる。

並列後，水車ガイドベーンを徐々に閉めて負荷を次第に電動機に移し，これが完了すると同時に水車ケーシング内の水面を圧縮空気で押下げ，ランナを空転状態にさせる。水面押下げ完了と同時に吐出弁を全開まで開いて揚水するようになっている。制御方式としては順序制御器による“一人制御方式”を採用し，運転操作の簡単かつ確実化を計っている。またこのポンプは塚原発電所（旧耳川変電所）から遠隔操作もできるようになっている。仕様点は**第1表**に示すように3点で押えている。



第1図 発電所全体断面図

第1表 諸塚揚水発電所用ポンプの仕様概要

	全揚程 (m)	揚水量 (m^3/s)	予想効率 (%)
最高揚程時	245.9	18.2	89.5
基準揚程時	241.4	18.6	90.0
最低揚程時	235.5	19.1	89.5

回転数 300 rpm

3. ポンプの各試験結果

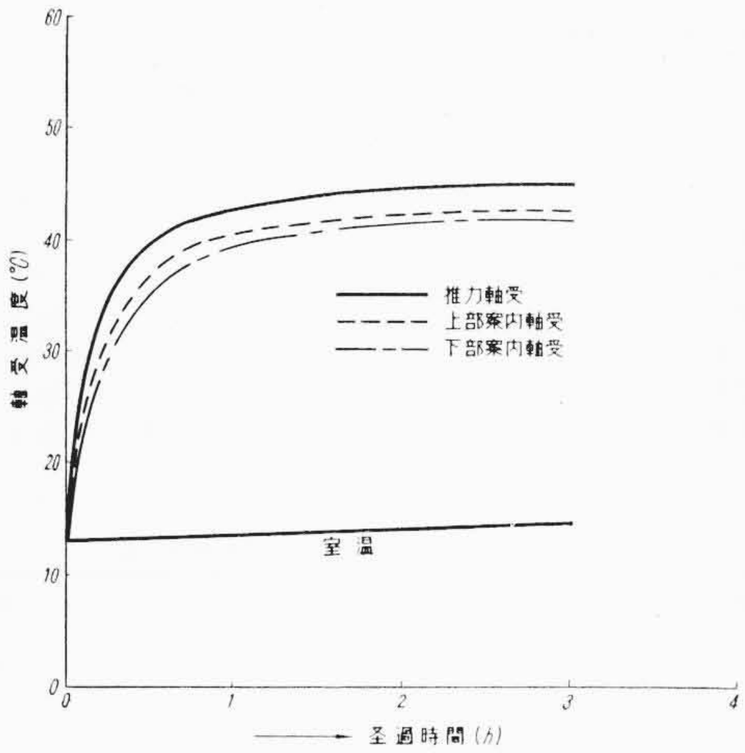
3.1 各軸受部の温度上昇

連続運転試験の結果は**第2図**に示すとおりである。推力軸受および上部，下部各案内軸受の温度上昇はそれぞれ 29.7°，27.8°，26.7° となり，問題はない。

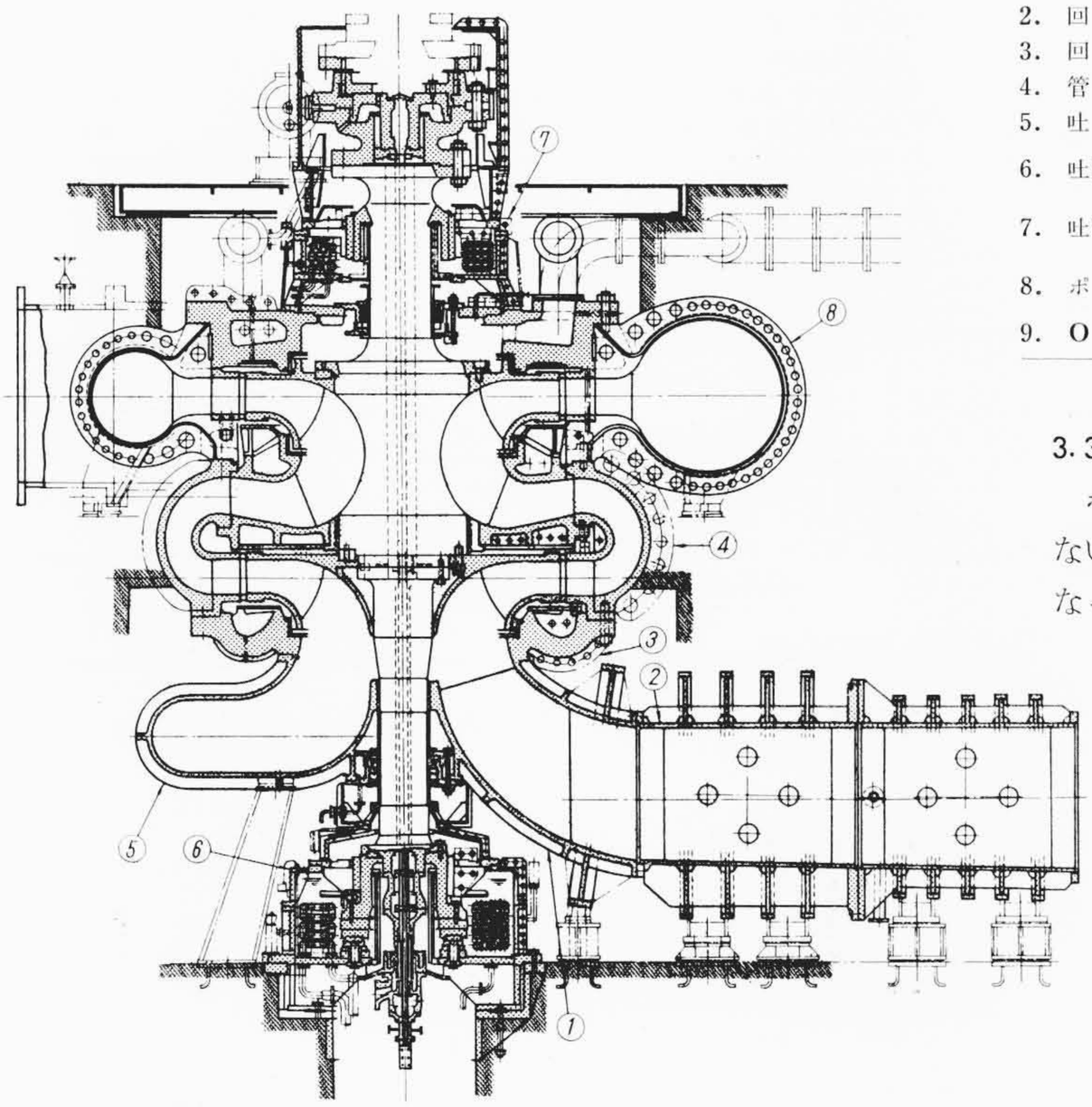
3.2 ポンプ各部の振動

ポンプ運転時，手持振動計で**第3図**に示す各部について振動を測

* 九州電力株式会社
** 日立製作所亀有工場



第2図　各軸受温度上昇曲線



第3図　振動測定位置

定した。振幅値は吐出弁開度 22%（予開状態）で最大 0.085 mm，吐出弁開度 100% で最大 0.03 mm であった。**第2表**に主要各部の振幅値を示す。

3.3 動力遮断試験

ポンプ運転中，停電などの理由で動力遮断された場合，または操作油圧が運転可能限界油圧 (30 kg/cm²) 以下に低下して，保護継電器動作による動力遮断が行なわれたときには，いずれも自動的に吐出弁用配圧弁が閉側に急速に切り替わり，吐出弁は全閉まで急閉鎖するようになっている。この場合水撃による鉄管水圧の上昇が生じ，この上昇率を極力下げて危険のない領域で閉鎖できるよう吐出弁速度を決めなければならない。この速度の決定のためには，亀有工場でポンプおよび吐出弁のモデルを作り種々の研究を行なった。最終的には吐出弁の閉鎖速度を2段モーションにした。スロットルバルブ，およびオリフィスで各段速度を所定速度に調整して現地試験を行なった。

第2表　運転時の主要な各部の振幅値

測定位置 ＼ 駆動方法	測定方向	水車	電動
	回転数 (rpm)	300	300
	吐出弁状態	22%開(予開)	100% 開
① サクションケーシング下面	上下方向	0.085	0.02
② B 短管腹板	上下方向	0.01	0.01
③ サクションカバー	上下方向	0.01	0.01
④ ステージケーシング	水平方向	0.01	0.005
⑤ サクションケーシング山側	上下方向	0.035	0.015
⑥ 下メタル	水平方向	0.005	0.005
⑦ 上メタル	水平方向	0.015	0.005
⑧ 吐出管	上下方向	0.015	0.005

（単位　mm）片振幅

使用振動計：　明石製手持振動計

第3表　動力遮断試験用電磁オシロエレメント

測定項目	オシログラム上の符号	測定方法
1. 時間	T	電接時計
2. 回転マーク	N	永久磁石の磁場を回転導体に切らせる方法
3. 回転数	N	水車軸からベルト掛けでDC発電機駆動
4. 管路圧力	P	吐出鉄管にて抵抗線ひずみ計式圧力計使用
5. 吐出弁ストロク	S	吐出弁主軸端にて抵抗線摺動式使用
6. 吐出弁シリンダ閉側油圧	P_b	吐出弁シリンダ閉側にて抵抗線ひずみ計式圧力計使用
7. 吐出弁シリンダ開側油圧	P_o	吐出弁シリンダ開側にて抵抗線ひずみ計式圧力計使用
8. ポンプ吐出圧力	P_p	スパイラルケーシングより抵抗線ひずみ計式圧力計使用
9. OCB 操作電流		配電盤から採る

電磁オシログラム（ハザウエー製）

3.3.1 試験方法

ポンプ運転中，人為的に継電器を動作させて動力遮断試験を行ない，また圧油槽油圧を人為的に下げて油圧低下急停止試験を行なった。動力遮断試験時の吐出弁開度は 22%, 50%, 75%, 100% で行ない，油圧低下急停止試験は 50%, 100% の吐出弁開度で行なった。これらの試験時の過渡現象の測定には電磁オシログラフを使用した。

3.3.2 測定方法

電磁オシログラフには，**第3表**に示すエレメントを入れ，これと並行してポンプ操作盤(地下5階)，圧油装置，吐出弁（地下6階）に人員を配置して同時計測を行なった。

3.3.3 測定結果

（1）　動力遮断試験

吐出弁全開状態で動力を遮断した場合，鉄管圧力 26.4 kg/cm² (基準揚程に対し 109.2%)，閉鎖時間 16.19 秒，吐出弁全閉時のポンプ回転数 30.6 rpm となっている。この試験結果を**第4表**および**第4図**に示し，さらに**第5図**に吐出弁全開時の動力遮断オシログラムを一例として示した。

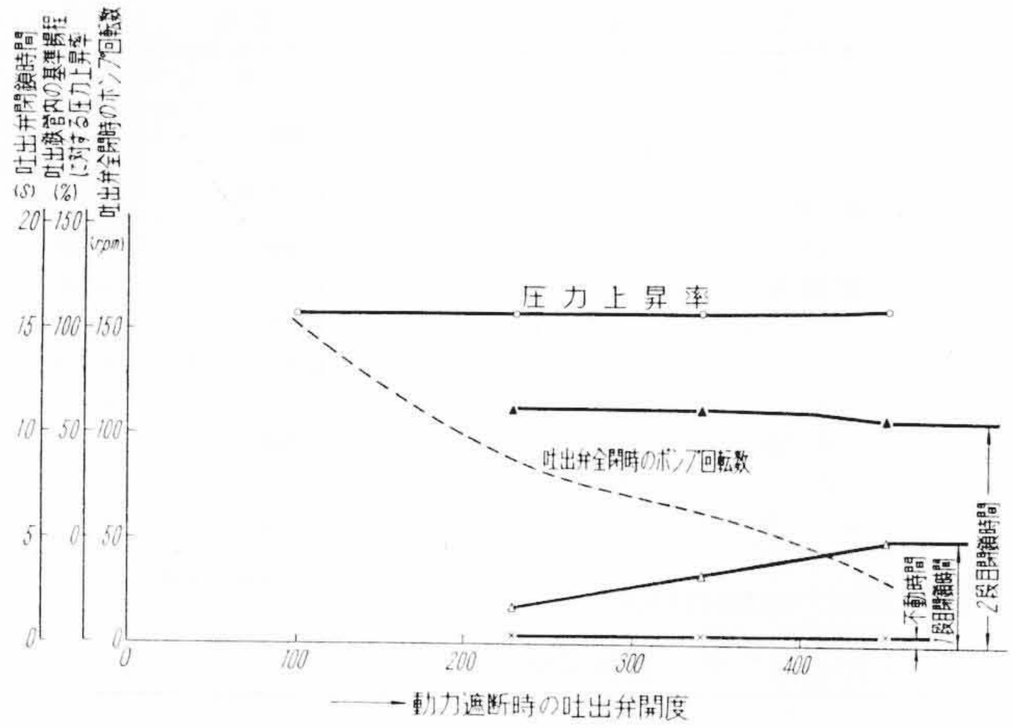
（2）　油圧低下急停止試験

吐出弁全開状態で圧力上昇は基準揚程に対し 108.1%，閉鎖時間 17.9 秒，吐出弁全閉時のポンプ回転数 0 rpm となった。この試験結果を**第5表**および**第6図**に示し，さらに**第7図**に吐出弁全開時の油圧低下試験オシログラムを一例として示した。

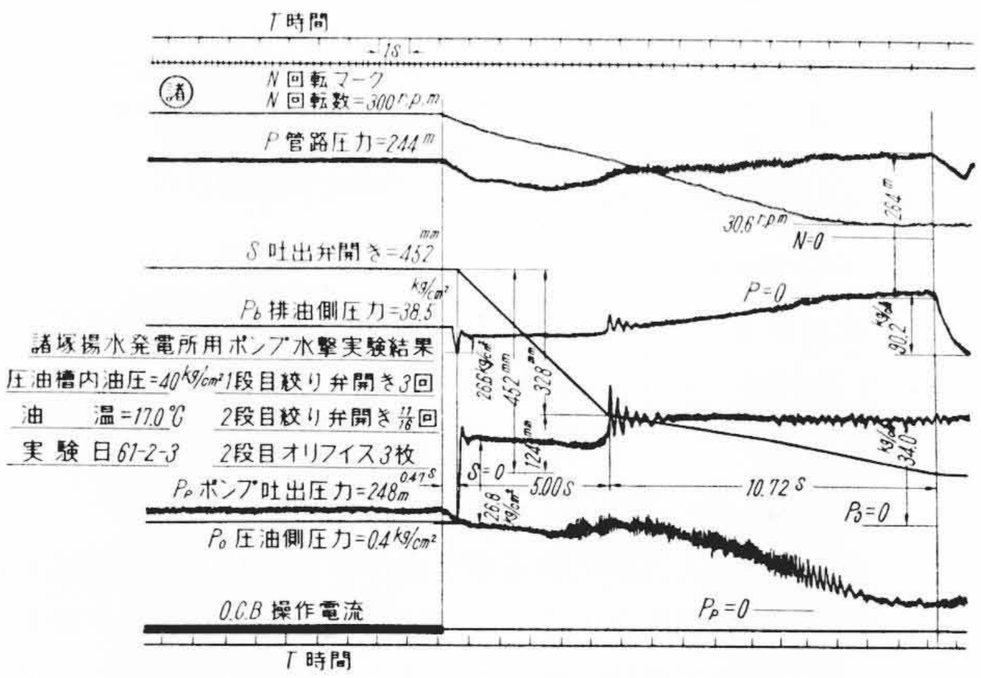
すなわち吐出弁開度がどんな位置で運転中でも保護継電器が動作して，動力遮断急停止の状態になったときの鉄管圧力上昇は 10%以内で問題なく，またポンプは逆転までゆかず正転領域で停止することを確認した。

3.4 効率試験

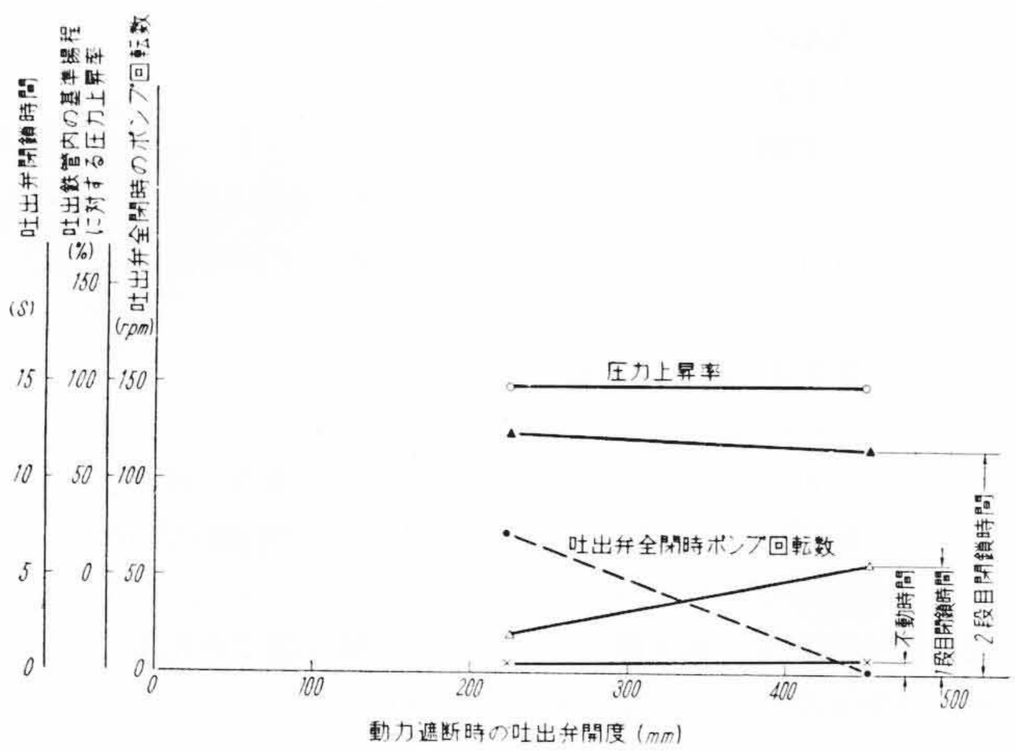
効率試験は吐出弁開度を種々変えて，その時の吐出圧力，吸込圧力，水量，電動機入力などを測定し，この結果から全揚程，軸動力，ポンプ効率などを算出し性能曲線を求めた。



第4図　動力遮断試験特性



第5図　吐出弁開度100%時の動力遮断オシログラム



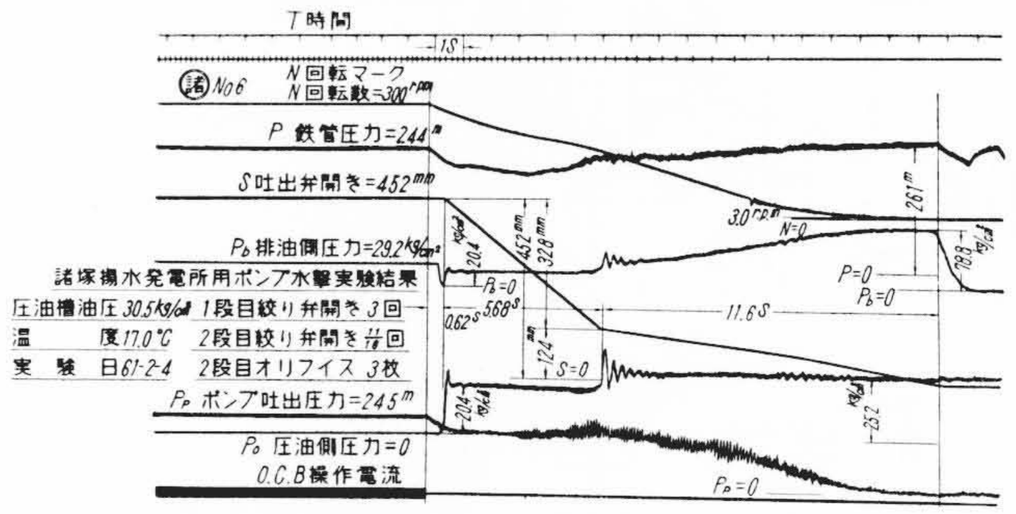
第6図　油圧低下急停止試験特性

第4表　動力遮断試験結果

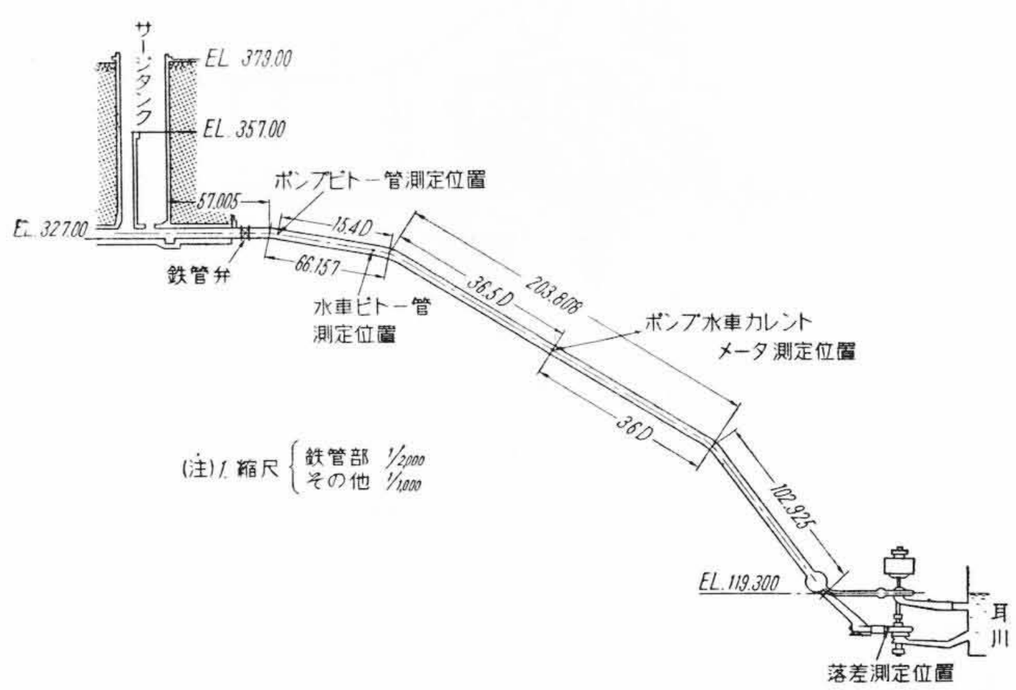
試験番号		No.1	No.2	No.3	No.4
遮断入力	(kW)	49000	54000	55000	55500
吐出弁ストローク	(mm)	99.5	228	341	452
ポンプ回転数	(rpm)	300	300	300	300
鉄管圧力 負荷時	(m)	238	242	243	244
鉄管圧力 遮断後最高	(m)	259	260	261	264
鉄管圧力 変動率	(%)	107.2	107.5	108.1	109.2
吐出弁閉鎖時間	(s)	9.27	13.16	14.89	16.19
吐出弁全閉時ポンプ回転数	(rpm)	153	86.7	62.3	30.6
サーボ開側最高油圧	(kg/cm²)	72.8	87.6	88.5	90.2

第5表　油圧低下急停止試験結果

試験番号		No.5	No.6
遮断入力	(kW)	54000	55500
吐出弁ストローク	(mm)	223.5	452
ポンプ回転数	(rpm)	300	300
鉄管圧力 負荷時	(m)	242	244
鉄管圧力 遮断後最高	(m)	259	261
鉄管圧力 変動率	(%)	107.2	108.1
吐出弁閉鎖時間	(s)	14.7	17.9
吐出弁全閉時ポンプ回転数	(rpm)	71.3	0
動作時圧油槽油圧	(kg/cm²)	30.5	30.6
サーボ閉側最高油圧	(kg/cm²)	78.5	78.8



第7図　吐出弁開度100%時の油圧低下急停止試験オシログラム



第8図　水圧鉄管断面図

3.4.1 測定方法

（1） 吐出弁開度

吐出弁開度は50%, 75%, 100%, 100%, 75%, 50% と変えて測定した。

（2） 揚程測定

吐出側は水道機工製ワマック H. K 形落差測定器を使用し，吸込側は吸込管で吸込水頭を圧力計で測定した。測定は10回測定し，その平均値を採った。

（3） 電動機入力

配電盤室にある回転形積算電力計で測定した。測定は1負荷状態で10回行ない，その平均値を採った。

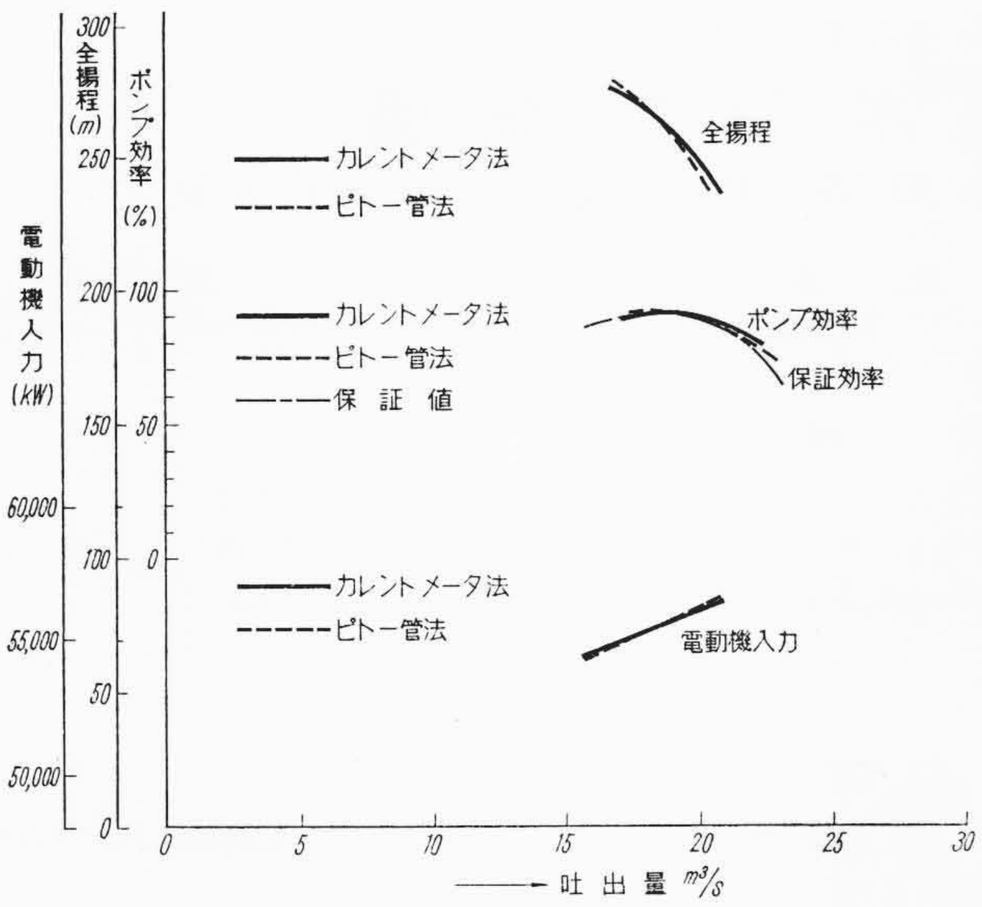
（4） 流量測定

カレントメータ法とピトー管法を併用した。

（a） カレントメータ法

オット一製のカレントメータ21個を使用し，スイス規格により行なった。カレントメータは所定位置の鉄管内部にX状に支持管を組み中央に1個，他は等面積になるよう半径方向に5個ずつ取り付けた測定は1負荷状態につき1分間行なった。測定位置は第8図に示すように鉄管のほぼ中央の直線部分である。

（b） ピトー管法



第9図　ポンプ性能曲線

ピトー管にはH.K式の多孔ピトー管を使用して，所定位置鉄管内部にX状に動圧管を組み中央に1個，他は半径方向に等面積となるよう5個ずつ動圧孔を設け水車流量測定方法ピトー管法により21点法で行なった。マノメータは1負荷につき10回測定し，その平均値を採った。測定位置は**第8図**に示してあるが，鉄管上部の鉄管弁に近い直線部分である。

3.4.2 測定結果

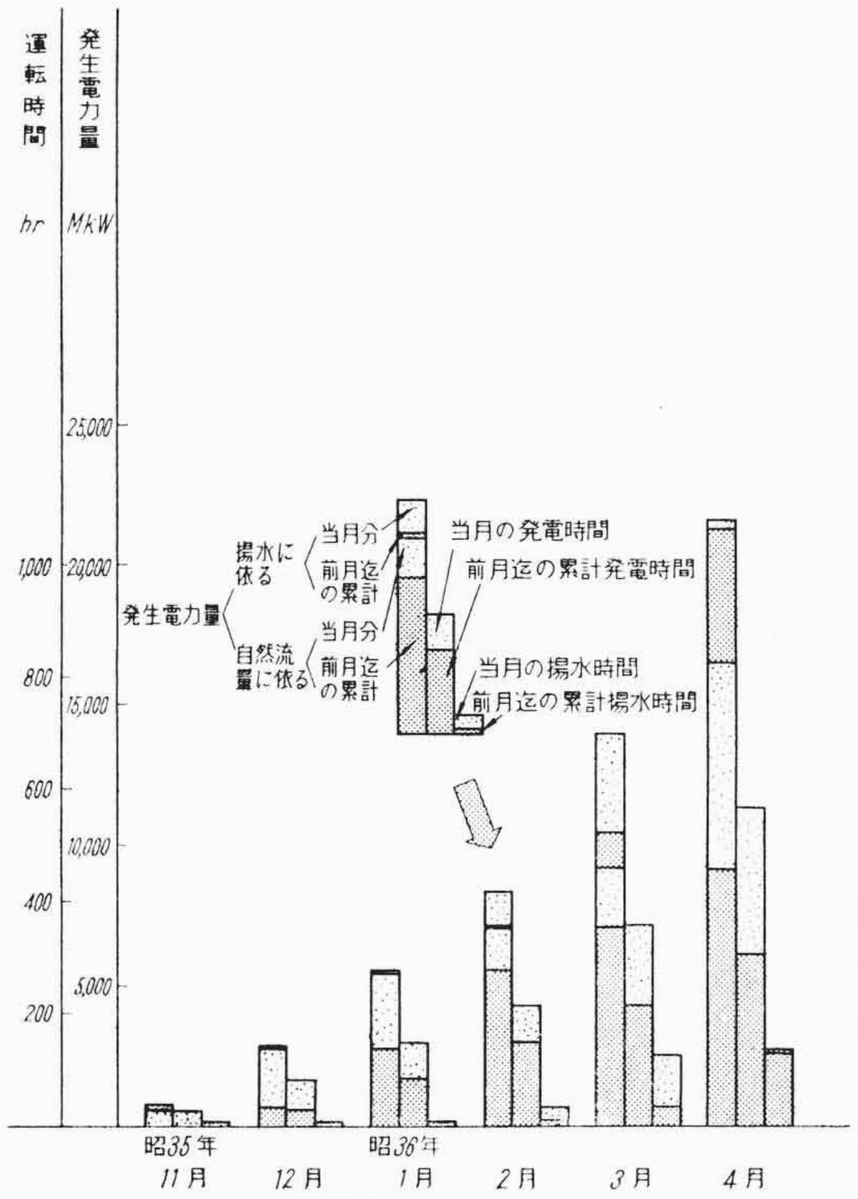
ピトー管法，カレントメータ法により求めた結果は**第9図**に示すとおりとなった。

3.4.3 試験結果の検討

第9図の結果から見ると，ピトー管法のほうはカレントメータ法に比し仕様流量付近の揚程において吐出量は少なく出ている。これはピトー管法測定位置の前後ともに，十分な助走路が採れなかった(**第8図**参照)ことの影響が多少あったのではないかと推定される。しかしながら現状の大流量測定技術では**第9図**に示す程度のバラッキは当然と考えられる。ピトー管法，カレントメータ法とも，最大効率は90% 以上，基準揚程で 89.5% と予想保証効率とほぼ一致し，予期したとおりの性能となった。日立製作所亀有工場にて3号モデルポンプで実験した結果では，ポンプ効率は82.5% となり，この効率を Moody の1/4乗公式を用いて実物のポンプ効率に換算した値は90.2% となり，今回の現地試験結果とほぼ近い値になっている。

4. 運転実績

3月の営業運転後4月までの運転実績を見ると，まだ約150時間にしかなっていないが，好調裡に運転を続けている。運転時間の短い原因は自流の増加したことと新鋭火力の稼動によるもので，諸塚揚水発電所が本当に威力を発揮するのは自流の減少時期と考えられる。**第10図**に運転実績を示したグラフである。



第10図　諸塚揚水発電所の運転実績

5. 結　　言

九州電力株式会社と日立製作所が，その技術の粋を傾けて完成した世界屈指の諸塚揚水発電所は，昨年3月から本格的運転にはいり，電力不足のにない手となっている。亀有工場としても，幾多のポンプおよび吐出弁のモデル試験を行ない，また現地でもあらゆる機能テストを行なった。以上の試験結果から以下のことがいえる。

(1)　Q-H曲線は仕様の3点を十分に満足している。(**第9図**)

(2)　ポンプ効率も仕様の3点において保証値を満足している。その最大効率は，モデル試験から得られた結果を Moody の1/4乗換算によって得た値とほぼ一致している。

(3)　動力遮断時の水撃による圧力上昇率は10% 以内である。(**第5,7図**)

(4)　動力遮断時どんな条件の下でも，吐出弁が全閉した時のポンプは正転領域内で停止する。(**第5,7図**)

(5)　サクションケーシングはプリローテーション形としたため，吐出弁全開状態では非常に静かな運転状態となる。

(6)　操作油圧は 40 kg/cm² の高油圧を使用したが，機能上なんら有害な現象は認められなかった。

本現地試験実施に当り，ご協力いただいた九州電力株式会社関係者各位，および日立製作所関係者各位に深甚なる謝意を表する。なお流量測定に際し，中央電力研究所水力タービン研究室鈴木，秋本の両氏からご協力いただき測定に当られたことをお礼申し上げる次第である。

参　考　文　献

(1)　寺田，田原，細田：　日立評論 **43**, 606-612 (昭 36-5)
(2)　大瀬：　日立評論 **43**, 617-620 (昭 36-5)
(3)　井原，高島：　日立評論 **43**, 599-605 (昭 36-5)