

本名発電所について

大河原 旭*

The Honna Power Station of Tohoku Electric Power Company

By Akira Okawara
Tohoku Electric Power Company

Abstract

As already introduced in the previous issue (Vol. 36 No. 2), the Honna Power Station was planned and constructed by Tohoku Electric Power Company on the River Tadami exploitation program, and is the largest of several power plants constructed on the same project. Completed recently, the plant has been engaging the attention of the power industry because of its record making installations consisting of a couple of 31,000 kVA generators coupled with 30,000 kW vertical Kaplan turbines, all supplied by Hitachi, Ltd. The figures represent the Japan's largest capacity in this type and, in addition, the turbines are driven by water pressure derived from 36.1 meter head which is also the Japan's record.

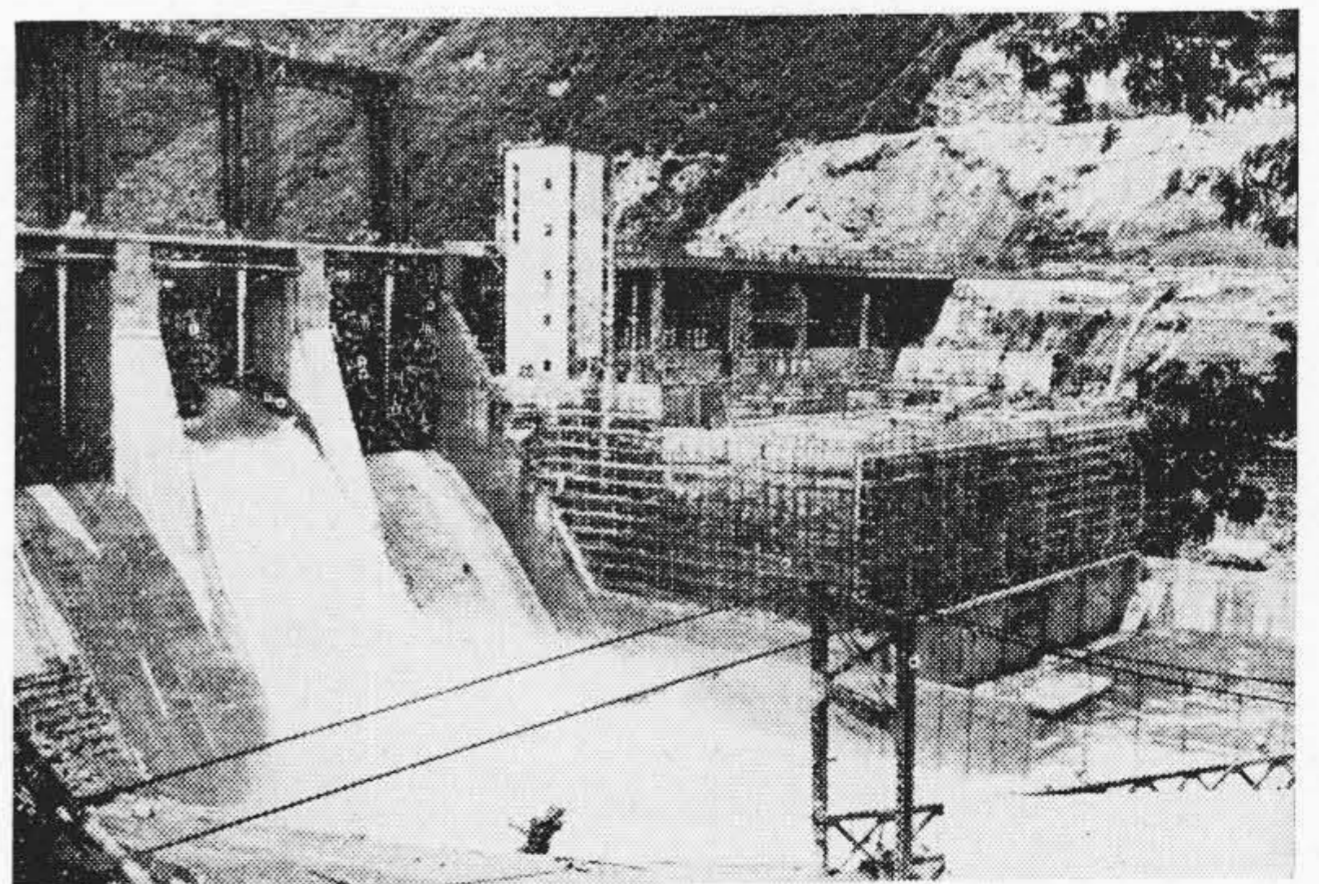
The writer, as a staff engineer in charge of the same plant, discloses in the article the results of his tests and measurements with these machines in actual operation, which have proved the general excellence of their characteristics.

〔I〕 緒 言

昭和 26 年東北電力発足と同時に只見川電源開発に着手して以来、沼沢沼、片門、柳津、宮下(増設)、上田、本名、伊南川(移設改修)各発電所をつぎつぎと完成し、すでに 281,400 kW を開発した。これら各発電所の設備概要を示せば第 1 表(次頁参照)の通りである。第 2 図(次頁参照)は只見川流域に開発されたこれら発電所群の関係位置を示したもので、それぞれの有する貯水池、調整池の利用によつて、水力資源をあますことなく、有効適切に利用しうる態勢を整えたことは誠に壮観というべく、我国産業界にとつて喜ばしき限りである。上流田子倉、奥只見の貯水池式発電所が開発されれば、これら発電所群はなお一層の偉力を発揮するものであることは言をまたないところである。

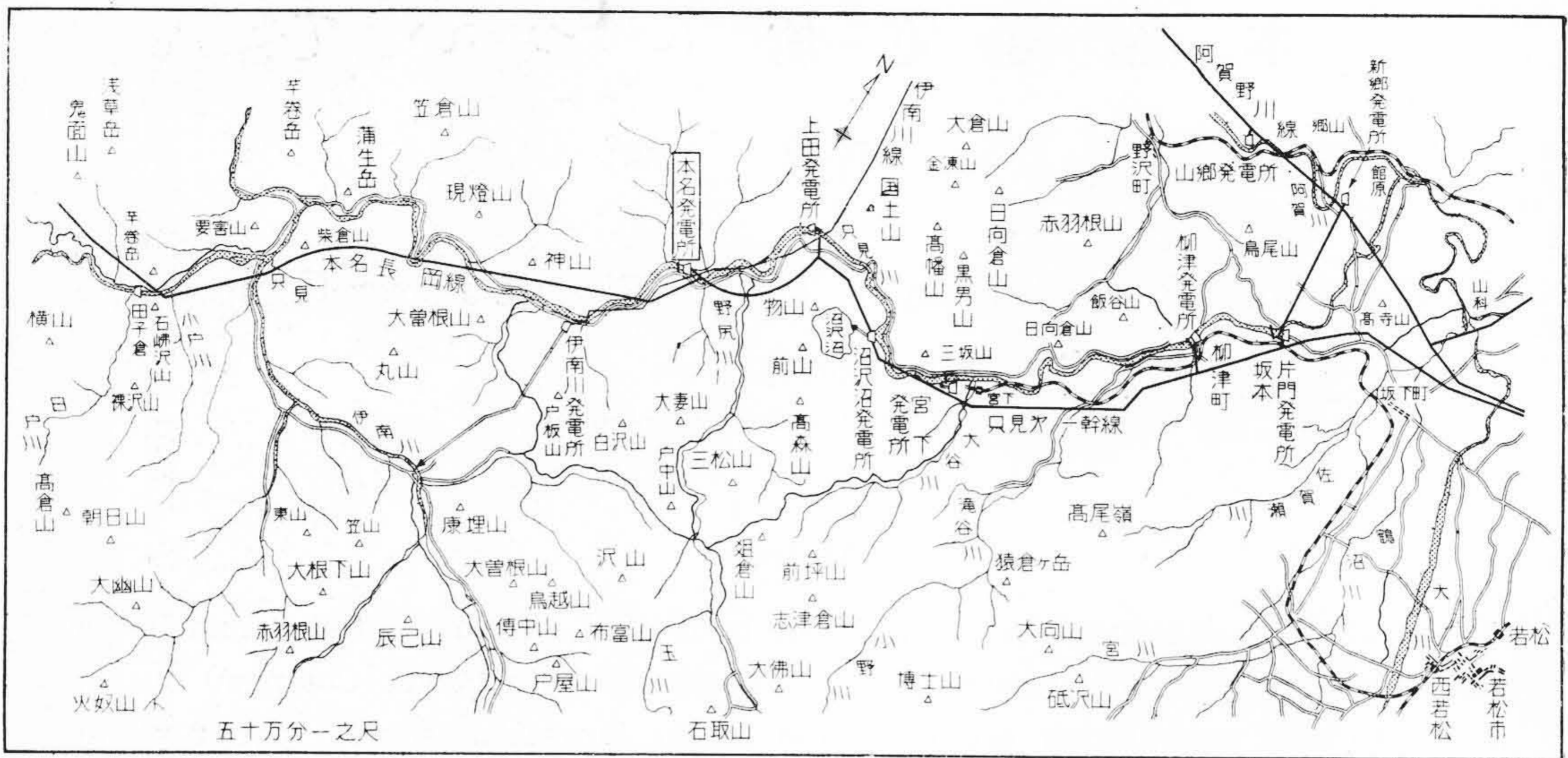
本名発電所は第 2 図からもあきらかな通り、現在のところこれら発電所群の最上流に位し、その調整池利用水深も 10 m という大幅にし、したがつて有効容量の増大

* 東北電力株式会社建設部次長



第 1 図 本名発電所全景
Fig.1. General View of Honna Power Station

を計り下流発電所群の活用を増大せしめたものである。したがつて本名発電所の利用方法いかんによつては下流発電所群の利用に影響するところ真に甚大であつて、本名発電所の使命は誠に重大であるといわねばならない。



第 2 図 発 電 所 関 係 位 置 図

Fig. 2. Location of Honna Power Station in Relation to Other Installations

第 1 表 只 見 川 筋 新 設 発 電 所 一 覧 表

Table 1. Newly Erected Power Plants on the River Tadami

発 電 所 名		沼 沢 沼	宮 下(増設)	片 門	柳 津	上 田	伊 南 川	本 名
出 力 (kW)		43,600	32,100	38,000	50,000	42,600	23,100	52,000
使 用 水 量 (m ³ /s)		24.2	100	230	230	189.33	24.6	173.33
有 効 落 差 (m)		215.54	38.8	19.34	25.39	26.3	109.25	34.9
調 整 池 有 効 容 量 (m ³)		85,203,000	4,056,000	4,618,000	5,791,800	4,237,000	124,606	14,287,000
利 用 水 深 (m)		30	3	3	3	3	5.4	10
水 車	型 式	横軸単輪複流 フランシス	縦軸フランシス	縦軸カプラン	縦軸カプラン	縦軸カプラン	縦軸フランシス	縦軸カプラン
	最 大 出 力 (kW)	23,000	21,000	22,500	29,000	24,000	25,000	30,000
	基 準 出 力 (kW)	20,500	18,500	20,000	25,900	22,880	—	28,100
	基 準 落 差 (m)	200	37.5	18.5	24.3	25.3	109.25	34.5
	回 転 数 (rpm)	500/600	167	125	143	150	300	167
	台 数	2	2	2	2	2	1	2
発 電 機	容 量 (kVA)	23,000	20,000	24,000	30,000	25,000	26,500	31,000
	電 圧 (V)	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000
	周 波 数 (Hz)	50~60	50	50	50	50	50	50
主 変 圧 器	容 量 (kVA)	23,000	20,000	24,000	30,000	25,000	10,000×4	31,000
	電 圧 一 次 (V)	11,000	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500
	二 次 (kV)	168/161/154/147	168/161/154	168/161/154/147	168/161/154/147	168/161/154/147	69/66/63	168/161/154/147
	三 次 (V)	なし	3,300	なし	なし	なし	なし	なし
起 重 機 (t)		80	115	200	80×2	160	110	200
		補 20	補 20	補 40	補 5	補 20, 5	補 20	補 20, 5
主 機 製 作 者	水 車	日立製作所	電 業 社	日立製作所	三 菱 重 工	三 菱 重 工	日立製作所	日立製作所
	発 電 機	日立製作所	東京芝浦電気	日立製作所	三 菱 電 機	三 菱 電 機	日立製作所	日立製作所
	変 圧 器	東京芝浦電気	東京芝浦電気	日立製作所	三 菱 電 機	三 菱 電 機	日立製作所	日立製作所
試 運 転 開 始 年 月		26. 11.	28. 3.	28. 6.	28. 6.	29. 2.	29. 5.	29. 7.

本名発電所の設計に当つては十分にこのことを考慮に入れ、取入口工作物の設計、水車の変落差自動運転装置の採用など苦心の払われたところである。

またこれら発電所群の主要機器建設に当つて、日立製作所の果たした役割がいかに重要なものであつたかは第1表を見てもわかる通り、日立製作所の納入した機器が数において最も多いことからおのずからあきらかである。その運転実績においてはいずれも優秀なる成績を取めえたことは日立製作所の誇りであるばかりでなく、国産品の優秀性を国外に誇るものであつて、誠に邦家のために慶賀に堪えない。

本名発電所用水車発電機についてはすでに本誌 Vol. 36, No. 2 に、計画概要とともに詳細発表されており、こゝに再掲の必要はないところであり、本文においては主として性能に関する問題ならびに運転実績について述べることにする。

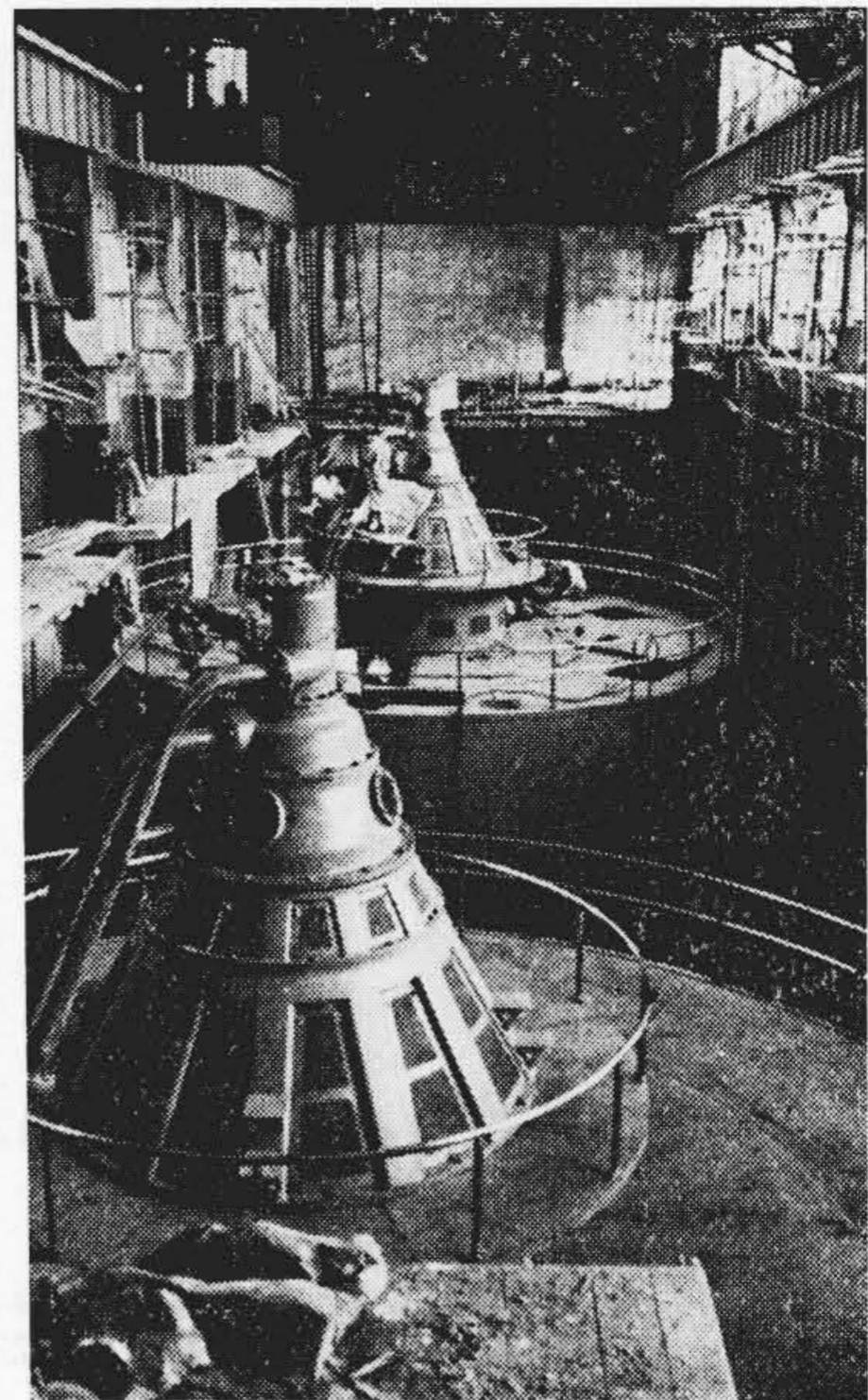
〔II〕 水 車 模 型 試 験

第1表に示す通り2台運転時の有効落差は34.9 mであるが、1台運転時には36.1 mとなり、 Kaplan水車としては本邦においては未経験の高落差であるばかりでなく、容量においても本邦随一のものである。かゝる高落差 Kaplan水車では空洞現象に基づくランナブレードの腐蝕あるいは振動の発生などについて懸念されたので多数の模型ランナによつて、その効率試験を行うとともに慎重なる空洞現象試験が施行された。模型ランナによる効率試験ならびに無拘束速度試験の結果、その保証値との比較は第2表の通りである。つぎに述べる空洞現象試験結果とも総合してモデル No. 1~No. 8のうちより最も成績のよいモデル No. 8が採用されたのである。

〔III〕 水車模型による空洞現象試験

高落差 Kaplan水車においては空洞の発生によるランナブレードの腐蝕または振動発生が問題となることは前述の通りであるが、試験装置においても従来の低落差試験設備では不安があつたので、実落差試験によりその安全性を確認するため特に高落差試験設備が新設されたのである。新設備による試験において実落差においても安全性が確認されたのであるが、低落差試験設備における試験も同時に施行され、比較検討されたことは将来 Kaplan水車の発展のためにも大いに有意義であつた。

空洞現象発生の過程を考えて見ると、流速の大なるときすなわち落差の高い程、出力の大きい程その危険性が大きい訳である。したがつて最高落差、最大出力の点でその発生がなければ安全な訳である。効率試験の結果最大出力に対するブレード角度およびガイドベーン開度は



第3図 本名発電所内景
Fig. 3. Inside View of Honna P.S.

第2表 模型水車試験成績
Table 2. Test Results of Model Turbine

1. 模型水車効率比較表

水車負荷 (%)	100	80	60	40
水車負荷 (kW)	30,000	24,000	18,000	12,000
保証効率	91.2	92.0	91.2	88.5
No. 7モデル効率	92.5	93.1	93.1	92.58
No. 8モデル効率	92.5	93.4	93.1	92.52

2. 無拘束速度

	モデル回転数 (rpm)	正規速度に対する比率 (%)	実物回転数 (rpm)
保証値	616	285	477
No. 7モデル	600	277	463
No. 8モデル	590	272	455

第3表 模型水車空洞現象試験結果
Table 3. Cavitation Test Results of Model Turbine

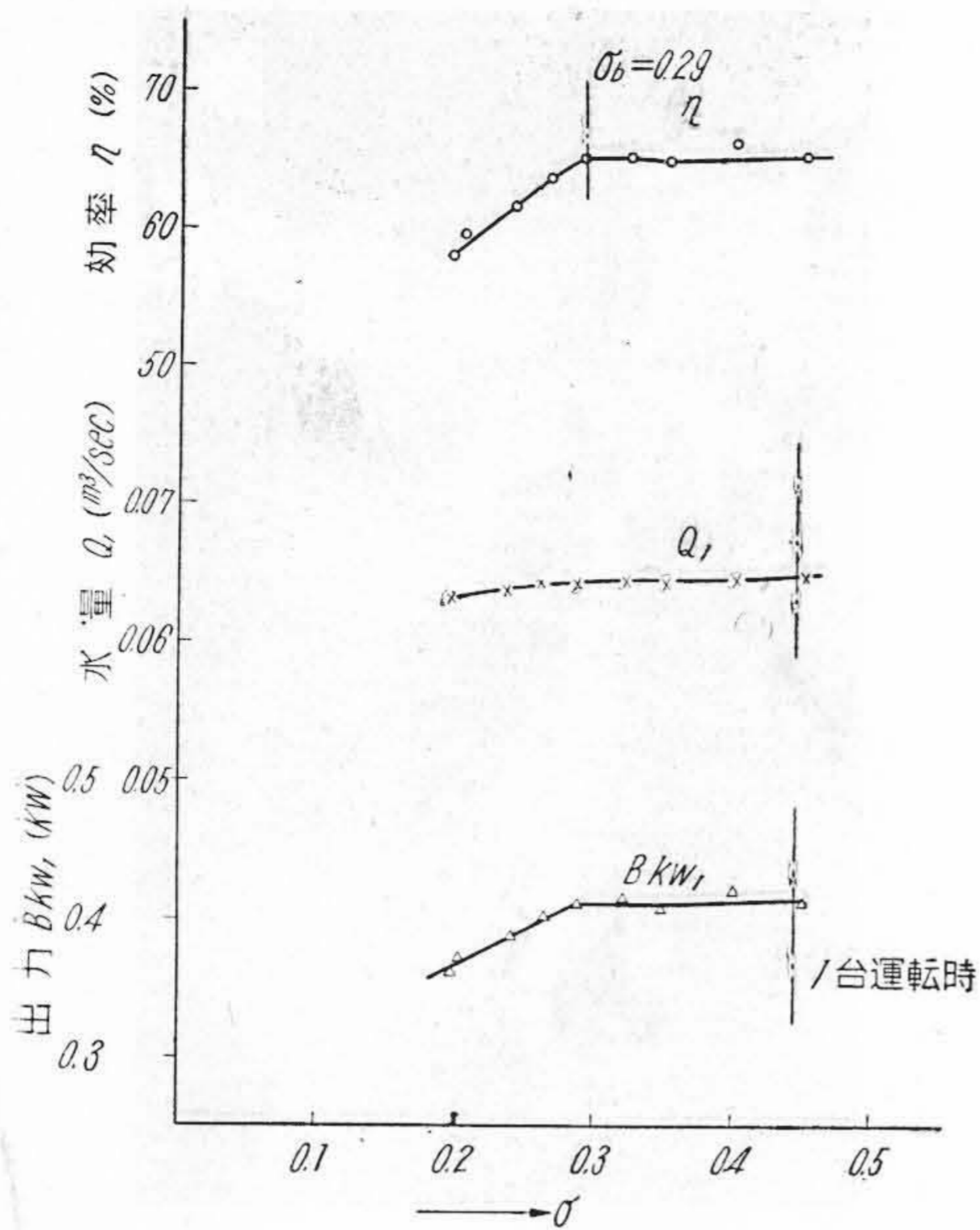
1. 供試ランナと σ Break との比較

供試ランナ番号	試験条件		σ Break
	ブレード角度	ガイドベーン開度	
No. 7	25°	98%	0.310
修正 No. 7	25°	98%	0.290
No. 8	25°	98%	0.290

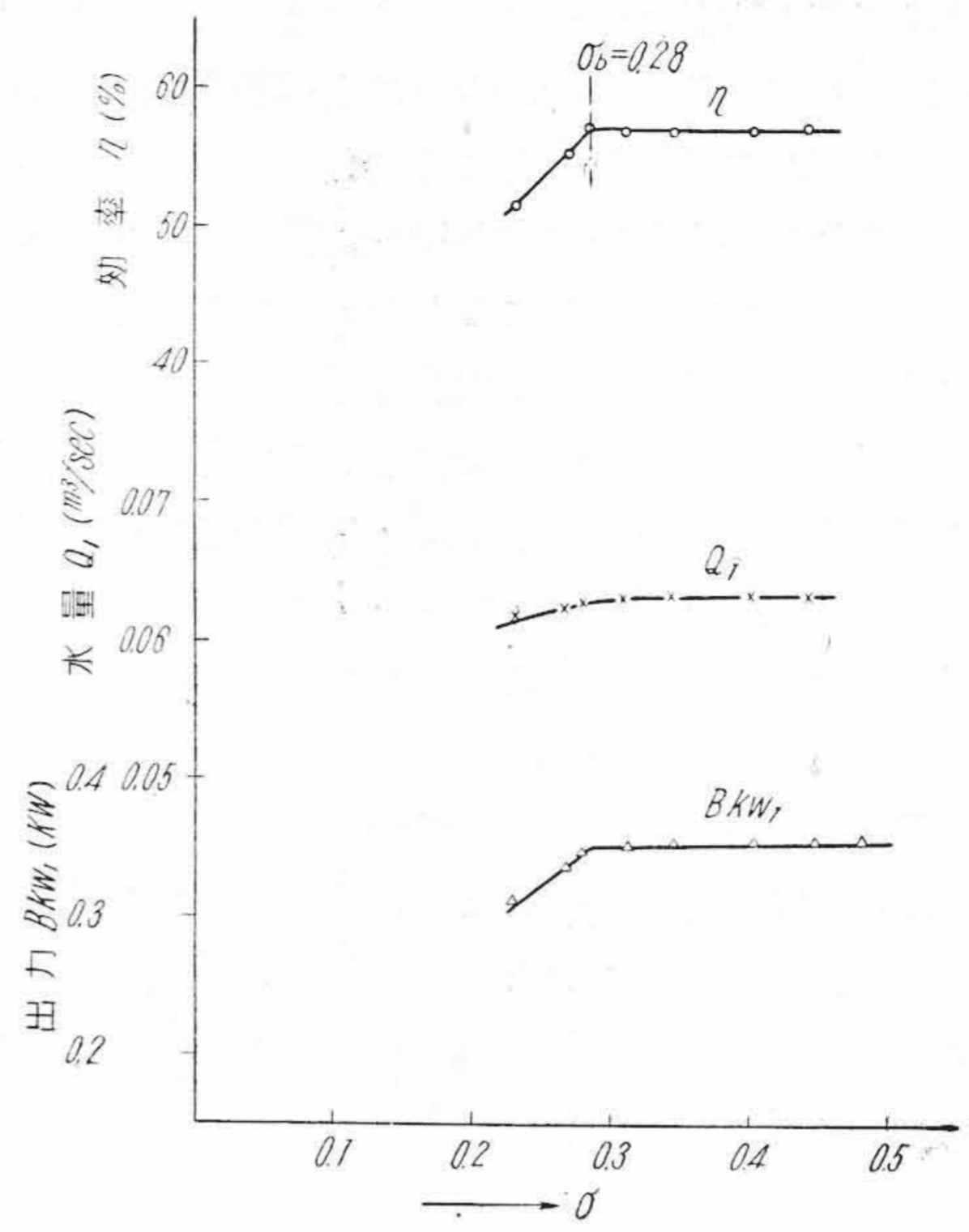
2. 試験落差による σ Break におよぼす影響 (供試ランナ No. 8)

試験条件	試験落差	σ Break
高落差試験装置	36 m	0.29
高落差試験装置	15 m	0.28
低落差試験装置	15 m	0.275

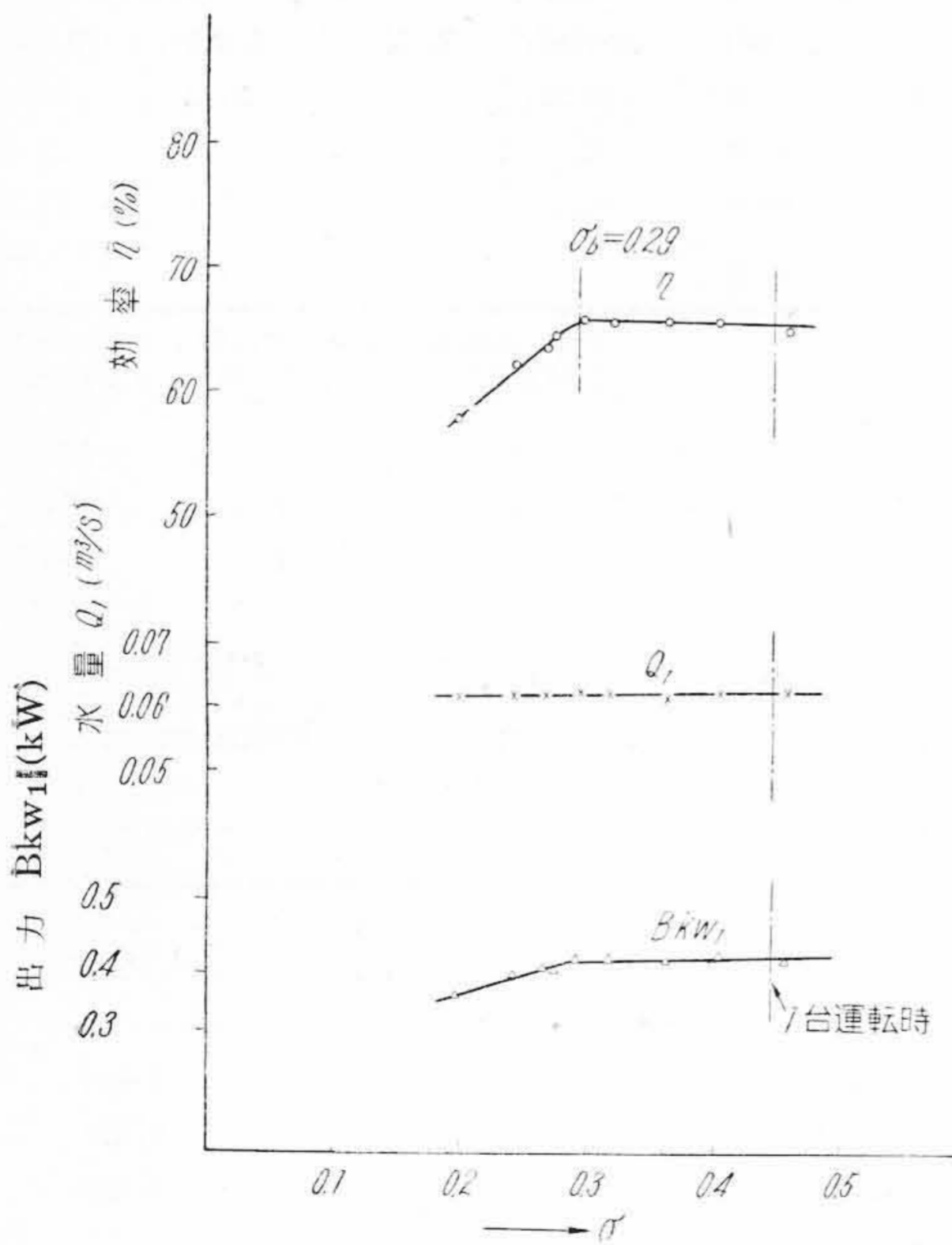
本名発電所にては停止時において $\sigma=0.395$



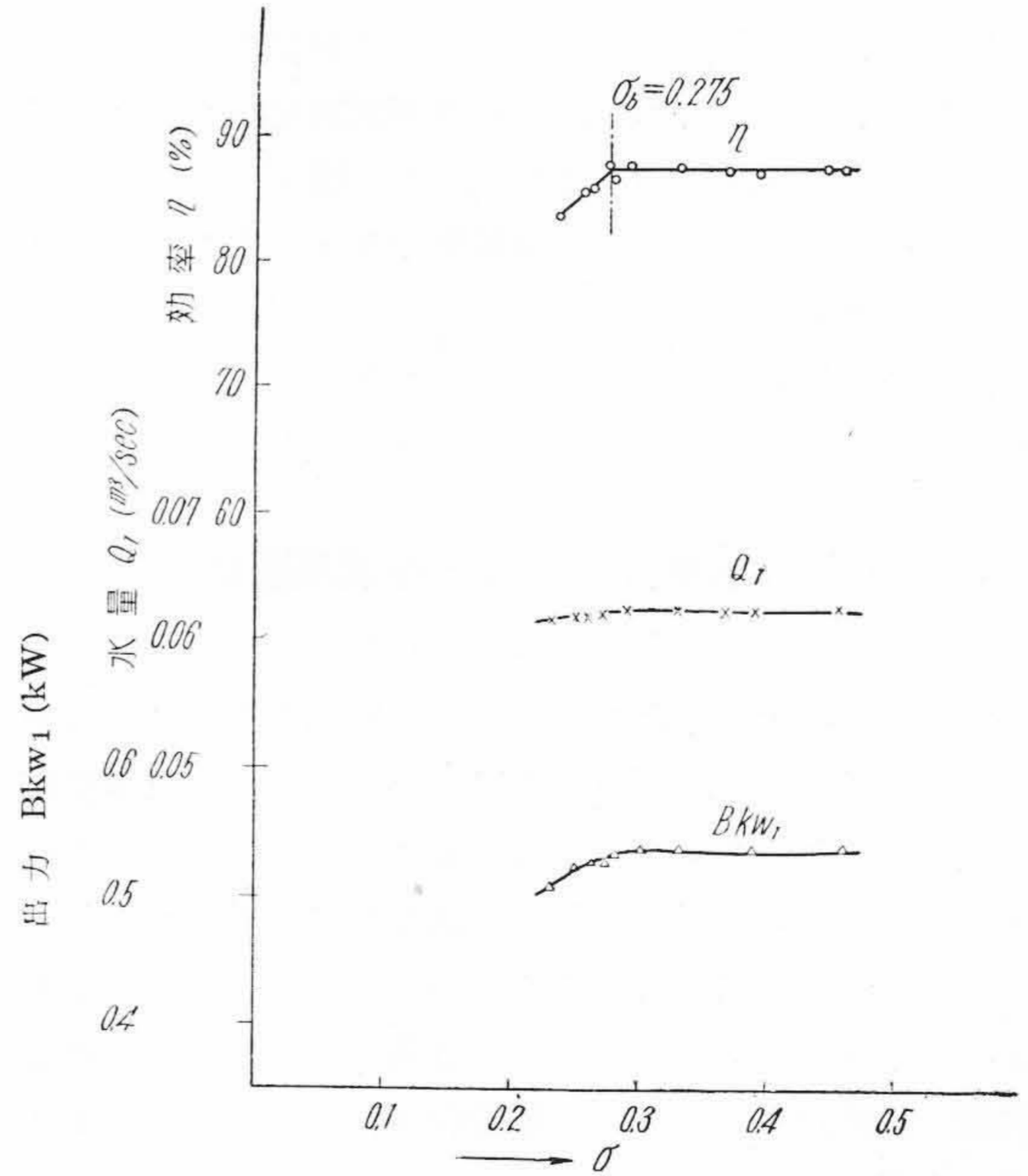
第 4 図 空 洞 現 象 試 験 (実落差)
(修正 No. 7 ランナ)
Fig. 4. Cavitation Test (Under Actual Head) (Modified No. 7 Runner)



第 6 図 空 象 洞 現 試 験
高落差試験装置 (試験落差 15 m)
Fig. 6. Cavitation Test, High Head Testing Equipment (Test Head 15m)



第 5 図 空 洞 現 象 (実落差)
案内羽根開度 98%, ブレード角度 25°
(No. 8 ランナ)
Fig. 5. Cavitation Test (Under Actual Head) Guide Vane Opening 98%, Blade Angle 25° (No. 8 Runner)



第 7 図 空 洞 現 象 試 験
低落差試験装置 (試験落差 15 m)
Fig. 7. Cavitation Test, Low Head Testing Equipment (Test Head 15 m)

それぞれ 25°, 98% と認められたので、その点を試験条件として試験した実落差試験の結果は第 4 図、第 5 図に示す通りである。

なお供試ランナと σ -break を比較すれば第 3 表の通りである。(σ -break とは能率の急降下する点における σ 値)

このランナ No. 8 は最も能率も優秀であり、空洞現象性能も良いものであつたので、本模型が実物に採用されたことは前述の通りである。ストロボにて観察の結果は効率の急降下するいわゆる σ -break の点よりかなり以前に、すなわち $\sigma=0.44$ 附近において多少ブレードの頂部に空洞が発生し始めるのが認められる。

本試験に関連して試験落差の変化による空洞限界点におよぼす影響について試験した結果は第 6 図、第 7 図に示す。

(1) 高落差試験装置による落差 15 m の場合 (第 6 図)

効率が急激に低下し始める $\sigma_b=0.28$ となり、前記実落差試験より僅かに遅れる。ストロボによる観察によつて空洞発生状況を比較して見れば実落差試験の場合と発生始めにおいてはその変化はきわめて微小であつた。

(2) 低落差試験装置による落差 15 m の場合 (第 7 図)

第 7 図に示す通り $\sigma_b=0.275$ となり前記実落差試験の結果より σ 値において 0.015 だけ小さくなつていゝ。ストロボ装置による観察の結果は高落差の場合とほとんど差異は認められない。しかしいずれの場合も実落差試験においては現象が明確に出て把握しやすくなるばかりでなく、一度空洞が発生すれば著しく状態が変化し、なお一層その差が認められる。

以上数種の試験結果を比較すれば第 3 表に示す通り、 σ -break 値においてあまり差異は認められない。しかし一般に模型試験の意義を考えて見るに、実物水車のトーマ係数と模型水車のトーマ係数が等しければ、両者の空洞現象は同じに起るかどうか、このことについては幾何学的に全く相似であれば理想流体の力学から見れば相似状態に運転する限り現象は全く同じであると考えられるが、粘性流体力学より見れば両者のレーノルズ数が等しくなければ現象は同一なりとはいへない。これに関しては模型と実物は対等とはならないのであつて、実物水車は模型より僅かながら空洞が発生しやすいといわれており、また空洞が発生してからの現象についても模型と実物は相似性が保てない。これらのことを考慮すれば誤差を少なくするためにはできるだけ模型は実物に近い状態で試験されることが望ましいのであつて、実落差試験に

よつて安全性が確認されたことは誠に意義があるものと思われる。

現在本名発電所において実物水車に対する空洞現象を直視する装置を考案し、その実現に努力中であるが、本装置完成の暁は世界にもその例を見ない装置として実物水車における空洞発生状況の観察、模型による試験の適否あるいはその確認などが可能となり、なおいつそう斯界に貢献するものと信ぜられる。

[IV] 発 電 機

本発電所用発電機は回転子の下側に推力軸承をもつと同時に回転子の上部にも案内軸受を有する半傘型といわれる構造のものである。工場においては諸性能試験のほかにも過速度試験も実施されたのであつて、かかる大容量機については前例のない試験であつた。

性能試験の結果保証値と比較すれば第 4 表の通りであり、過速度試験についてもその振動などについて特に慎重を期し、上部エンブラ補強などにより好結果をえたのであるが、無拘束速度試験時の振動特性は第 8 図 (次頁参照) に示す通りである。無拘束速度試験に決定された

第 4 表 31,000 kVA 発電機性能比較ならびに運転実績

Table 4. Comparison of Characteristics between No. 1 & No. 2 Generators (31,000 kVA) and Temperature Rise of No. 1 Unit

1. 効 率 比 較 表

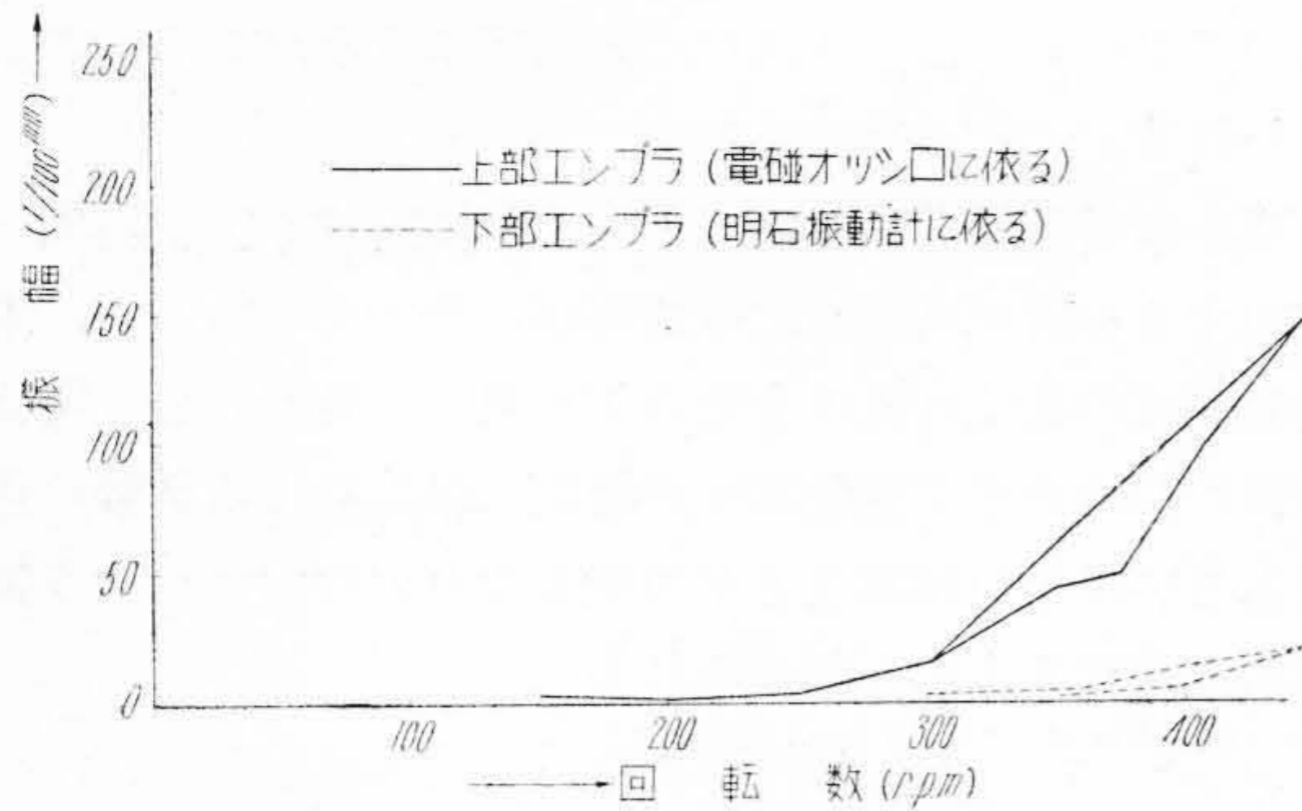
負 荷 (%)		100	75	50	25
力 率 100%	保 証 値	97.6	97.2	96.4	93.7
	No. 1 試験値	97.67	97.30	96.42	93.6
	No. 2 試験値	97.68	97.31	96.43	93.6
力 率 90%	保 証 値	97.1	96.7	95.8	92.8
	No. 1 試験値	97.19	96.79	95.85	92.75
	No. 2 試験値	97.21	96.81	95.86	92.77

2. 性 能 比 較 表

	電圧変動率		短絡比	温度上昇		G D ² (T-m ²)	軸受温度 (°C)
	力率 100	力率 90		電機子 (°C)	界磁 (°C)		
保 証 値	25%	30%	1.0	80	80	2,540	60
No. 1 試験値	11.8%	20.9%	1.4	67 (50~)	61.5 (50~)	2,760	スラスト 33 上部 37 下部 50
No. 2 試験値	11.8%	22.2%	1.4	65.2 (49~)	59 (49~)	2,750	スラスト 30.5 上部 33.5 下部 43.5

3. 試 運 転 実 績

	温 度 上 昇				
	固 定 子 線 輪	上 部 メ タ ル	ス ラ ス ト メ タ ル	下 部 メ タ ル	水 車 メ タ ル
1 号 機	54.5°C	31.5°C	37.5°C	42°C	1°C



第 8 図 無拘束速度試験時の振動特性
Fig. 8. Vibration Characteristics Shown in Runaway Speed Test

回転数は水車模型試験よりえた結果と発電機を負荷として水車が高無拘束速度で回転する場合の平衡条件によつたものである。

その他の諸特性の保証値と工場試験結果および発電所現場運転実績を比較すれば第 4 表 2, 3 に示す通りいずれも満足なる結果をえている。

〔V〕 発 電 所 に お け る 試 験

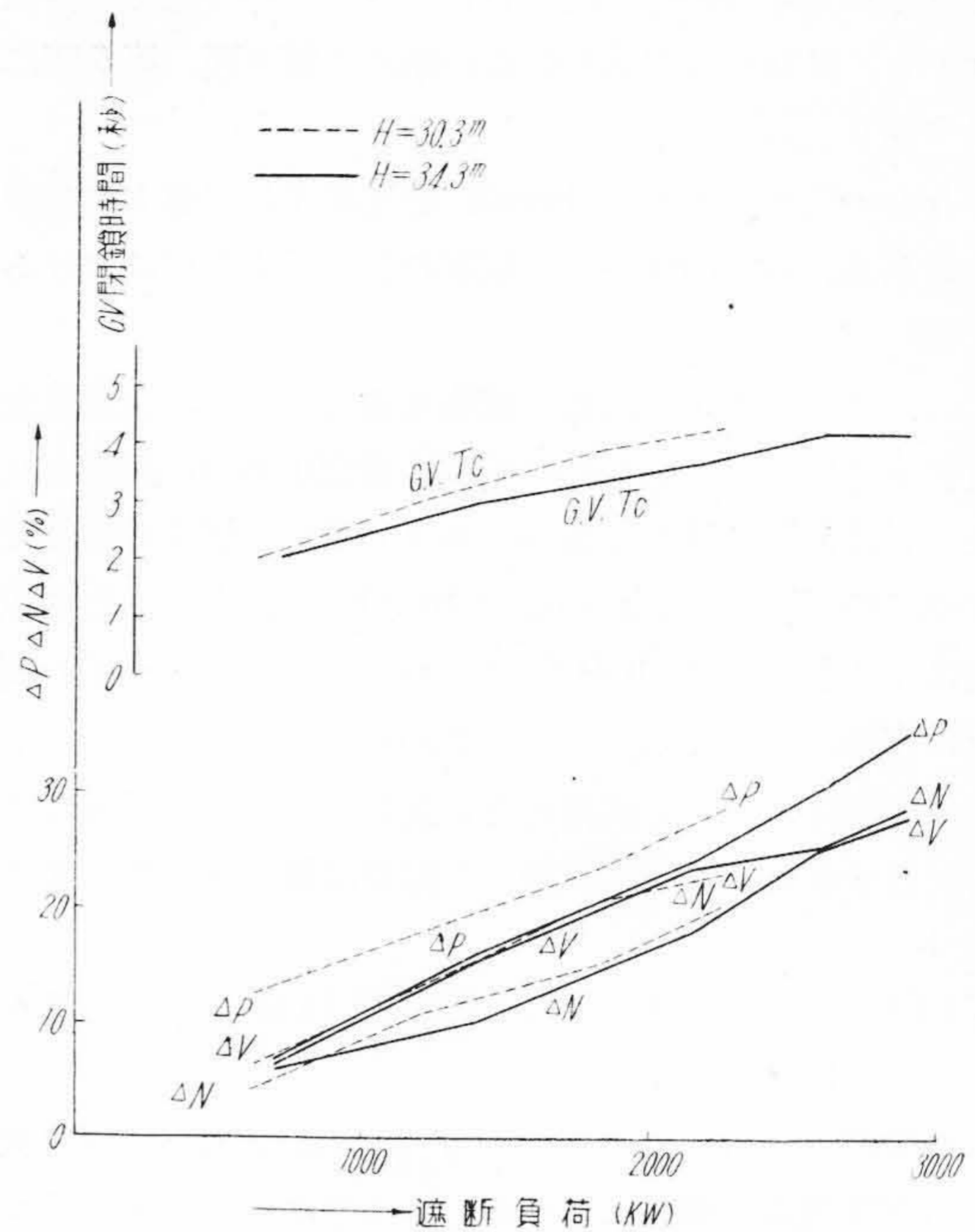
(1) 調 速 機 試 験

本名発電所の調整池容量は緒言にも述べた通り相当大なるために満水に致る過程において、すなわち落差 30 m 強において第一回の調速機試験を行い、満水時落差 34 m 強において第二回の調速機試験を行つた。その結果は第 5 表、第 6 表、第 9 図に示し、保証値との比較は第 7 表に示す通りいずれも良好なる結果がえられた。

第 5 表 1 号機調速機試験結果
オシログラム記録による
(H=30.3 m の場合)

Table 5. Test Results of Speed Governor of No. 1 Unit (H=30.3 m)

試 験 番 号		1	2	3	4
遮 断 時 刻		10°-36'	12°-34'	11°-45'	12°-20'
遮 断 負 荷 (kW)		6,200	12,000	18,200	22,400
発 電 機	電 圧				
	負 荷 時 (kV)	10.8	10.9	11.1	11.4
	最 大 (kV)	11.5	12.35	13.4	13.95
	上 昇 率 (%)	6.36	13.2	20.9	23.1
回 転 数	負 荷 時 (rpm)	168.5	167.0	167.0	167.0
	最 大 (rpm)	175.5	185.0	192.5	201.0
	上 昇 率 (%)	4.19	10.8	15.3	20.3
水 車	ケ ー 入 口				
	負 荷 時 (m)	36.4	36.0	35.7	34.5
	最 大 (m)	41.1	42.6	44.2	44.5
ガベ	負 荷 時 (s)	0.34	0.4	0.37	0.32
	②秒閉鎖時 (s)	1.71	2.64	3.58	4.03
	① + ② (s)	2.05	3.07	3.95	4.35



第 9 図 一 号 調 速 機 試 験
(オシログラム記録による)

Fig. 9. No. 1 Speed Governor Test (Oscillographic Record)

なお第 10 図上段は落差 30 m の場合の最大出力 22,400 kW 遮断時の、同図下段は落差 34 m の場合の最大出力 29,000 kW 遮断時のオシログラムである。

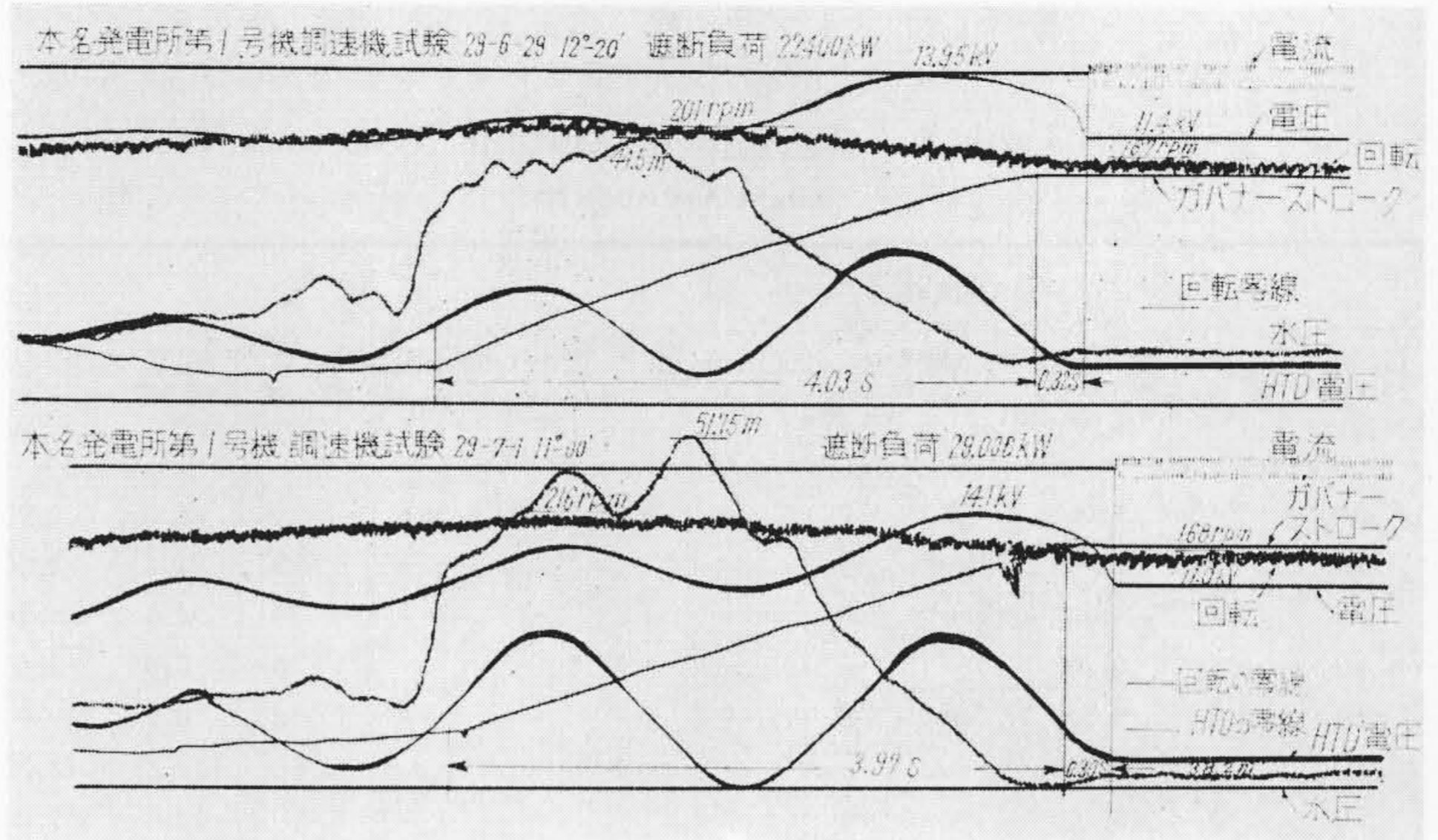
第 6 表 1 号機調速機試験結果
オシログラム記録による
(H=34.3 m の場合)

Table 6. Test Results of Speed Governor of No. 1 Unit (H=34.3 m)

試 験 番 号		1	2	3	4	5
遮 断 時 刻		9°-38'	9°-48'	10°-15'	10°-44'	11°-00'
遮 断 負 荷 (kW)		7,000	14,000	21,500	26,000	29,000
発 電 機	電 圧					
	負 荷 時 (kV)	10.2	10.6	10.75	10.8	11.0
	最 大 (kV)	10.9	12.3	13.35	13.6	14.1
	上 昇 率 (%)	6.37	15.5	23.6	25.4	28.2
回 転 数	負 荷 時 (rpm)	167	167	167	167.5	167.8
	最 大 (rpm)	177	184	197	210	216
	上 昇 率 (%)	6.0	10.2	18.0	25.4	28.7
水 車	ケ ー 入 口					
	負 荷 時 (m)	40.9	40.7	39.9	38.9	38.2
	最 大 (m)	43.7	47.2	49.5	50.85	51.75
ガベ	負 荷 時 (s)	0.50	0.41	0.37	0.31	0.3
	②閉鎖時間 (s)	1.55	2.62	3.34	3.95	3.97
	① + ② (s)	2.05	3.03	3.71	4.26	4.27

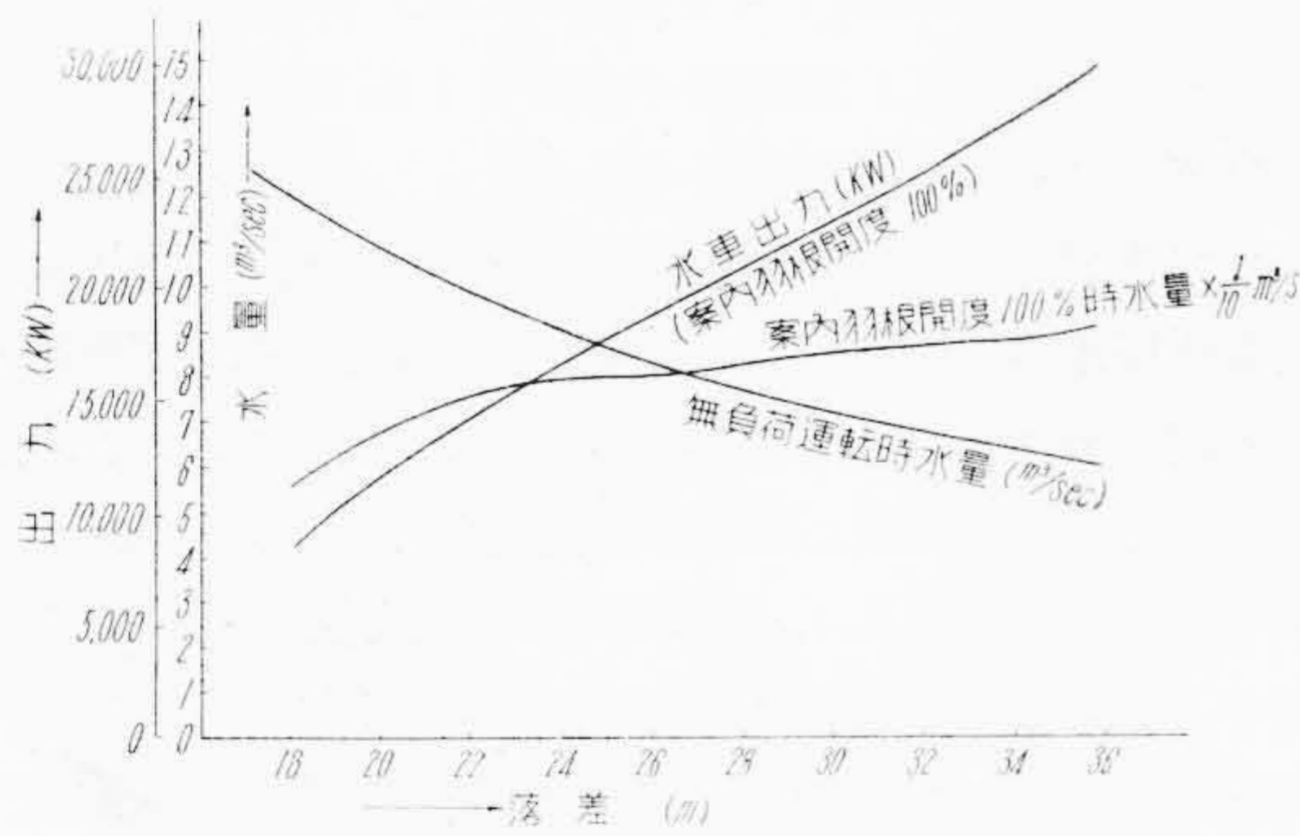
第10図 調速機試験のオシログラム

Fig. 10. Oscillogram of Speed Governor Test



第7表 調速機試験結果と保証値比較表
Table 7. Comparison between Test Values and Guaranteed Values of Speed Governor

	水圧上昇率(%)		速度変動率(%)		電圧上昇率(%)	案内羽根閉鎖時間(s)
	30,000 kW	29,000 kW	30,000 kW	29,000 kW		
保証値	40	—	30	—	30	3.3
試験値	—	35.5	—	28.2	28.2	4.27

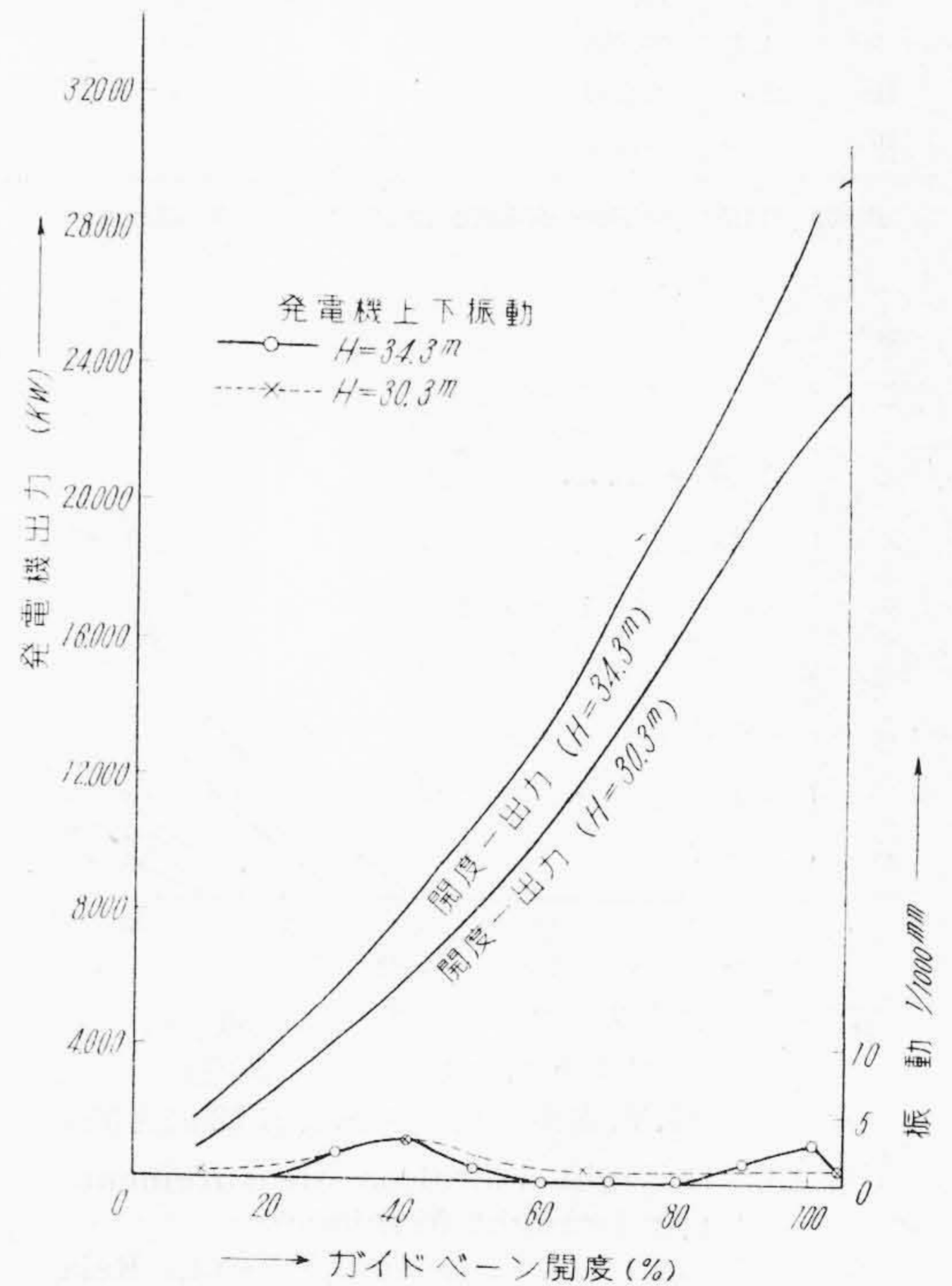


第11図 落差—出力関係曲線
Fig. 11. Head—Output Curve

(2) 出力試験ならびに振動測定

模型試験の結果よりガイドベーン開度100%の場合の落差と出力との関係は第11図のごときものであつたが、実際運転において出した出力は第12図に示す通りいづれも上記数値を上回るものであり、本 Kaplan 水車は効率の点で予想以上の好結果をえたものと思われる。

つぎに本 Kaplan 水車採用にあつて最も懸念された振動に関して各種の測定を行つた結果は第8表、第12図、第13図に示すごとく発電機主励磁機の下部において最大上下動 $\frac{3}{1,000}$ mm, 横振動 $\frac{1}{1,000}$ mm 以下という程度できわめて良好なる成績といふことができる。



第12図 ガイドベーン開度—出力曲線ならびに発電機振動測定値
Fig. 12. Guide Vane Opening—Output Curve and Measured Values of Generator Vibration

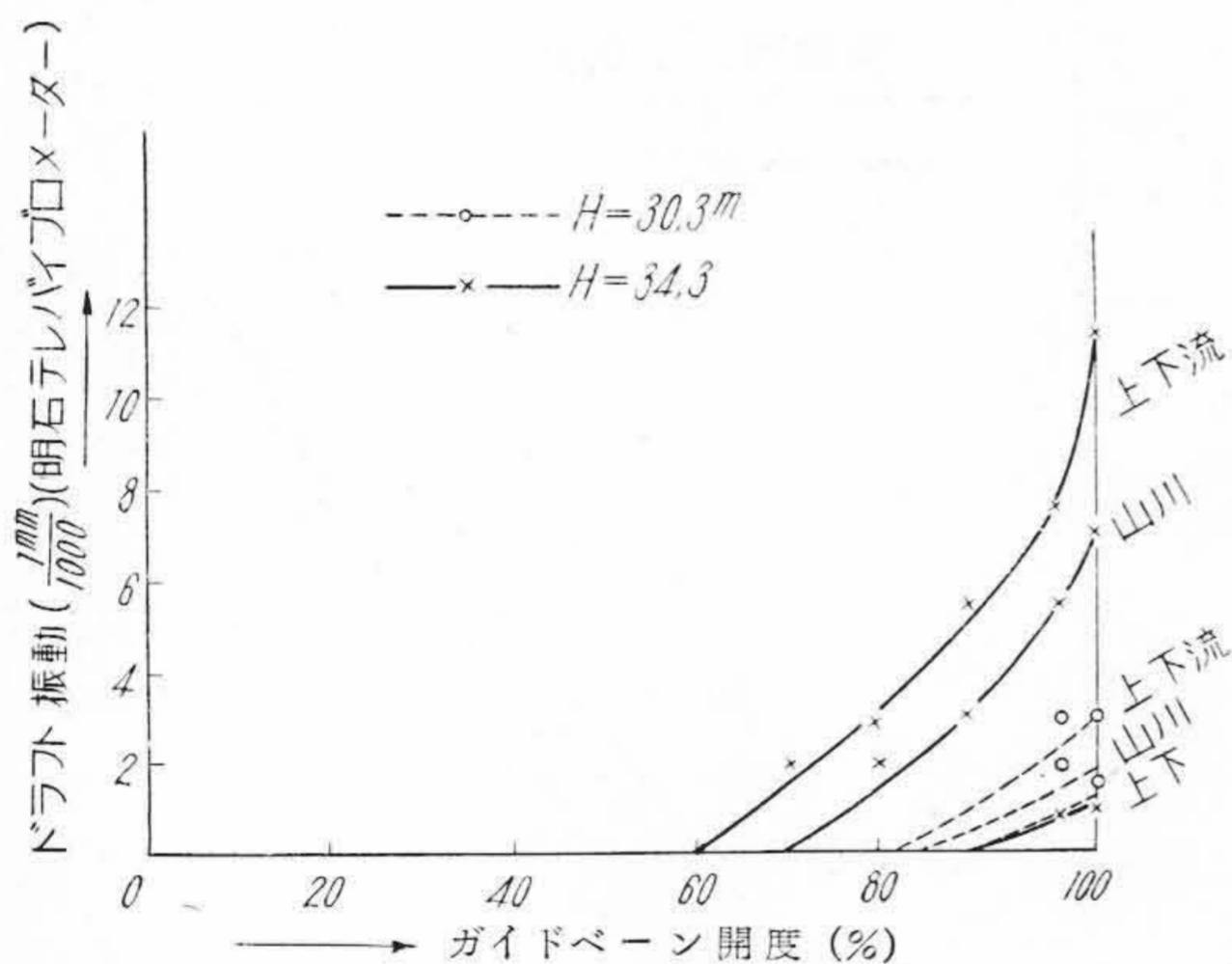
水車側ではドラフトパイプのマンホール部において測定したドラフトパイプ外壁の振動の測定結果は第13図に示すごとくであつて、負荷の増大に伴いその振幅も増加の傾向にあるが、振幅の最大値は約 $\frac{1}{100}$ mm 程度で非常に僅少であつた。ただしこの試験を行つた際には放水路水位が計画より上昇しており、 σ の値は計画値 0.446 に対し 0.52 であつた。したがつて計画水位においては条件は幾分苛酷になることはまぬがれない次第である。

第 8 表 1 号機出力試験ならびに振動測定
(明石テレバイプロメータによる)

Table 8. Results of Output Test and Vibration Measurement of
No. 1 Generator

落 差 30.3 m の 場 合									落 差 34.3 m の 場 合								
G. V. 開 度 (%)	R. V. 開 度 (°)	発 電 機 力 (kW)	水車振動 1/1,000mm			発 電 機 振 動 1/1,000mm			G. V. 開 度 (%)	R. V. 開 度 (°)	発 電 機 力 (kW)	水車振動 1/1,000mm			発 電 機 振 動 1/1,000mm		
			上 下	上 下 流	山 川	上 下	上 下 流	山 川				上 下	上 下 流	山 川			
10	4	1,000	0	0	0	0.5	0	0.5	10	4.3	2,000	0	0	0	0	0	0
20	4	3,000	—	—	—	—	—	—	20	4.4	4,400	1	1	1	0	0	0
30	4	4,200	0	0	0	—	—	—	30	4.4	5,700	1	1	1	2	0	0
40	6.5	6,200	—	—	—	3	—	—	40	7.0	8,000	2	1	1	3	0	0
50	8.8	8,000	0	0	0	—	—	—	50	9.2	10,900	1	1	1	1	0	0
60	11	10,500	—	—	—	1	—	—	60	11.2	13,300	0	1	1	0	0	0
70	14	13,400	0	0	0	—	—	—	70	14.5	17,000	0	1	1	0	0	0
80	17.2	16,500	—	—	—	0	—	—	80	18	20,400	1	2	2	0	0	0
90	20.5	19,500	—	—	—	—	—	—	90	21.6	24,000	3	4	3	2	1	1
100	23.8	22,300	1	3	2	1	—	—	100	27	28,800	1	1	1	3	1	1
103	25	23,000	1	3	1.5	—	—	—	103	28	29,500	4	4.5	4	1	1	1

振動測定箇所：発電機 発電機主励磁機台 水車 軸受台



第 13 図 ドラフト振動測定
(ドラフトマンホールにて測定)
(G.V. 開度 出力関係は第 12 図と同じ)

Fig. 13. Draught Vibration Measurement
(At Draught Manhole)
(as to G. V. Opening-Output Relation, Refer to Fig. 12)

[VI] 結 言

本名発電所用水車はカプラン水車として本邦最大容量であり、落差においても 36.1 m という国産品としては未経験のものであったので、その成果は各方面より多大の関心を寄せられておつた。未だ計画落差における各種試験、効率の測定、変落差カムの調整試験（これは近くインデクステスト法により実施の予定）など完成までには幾多測定、研究事項が残されておるとはいえ、現在までの試運転の結果は、上記各種の試験の示す通り誠に優秀なる成果を挙げえたものといふことができる。特に空洞現象についてはあらゆる研究によつて万遺憾なきを期

したのであつて、その結果最初より最も懸念された振動もきわめて少くまた騒音についてもこの種機械としては他に類を見ない程僅少で静かであることは特筆すべき事柄であり、日立製作所の技術の優秀性を実証したものといふことができる。

このことは日立製作所関係各位の撓ゆまざる努力と研究の成果であつて、国産品の優秀性を海外に誇りうる実績を挙げたものと御同慶に堪えない。

カプラン水車の空洞現象試験としては前記の通り本名発電所用水車で実施したほかに、片門、上田、柳津各発電所のカプラン水車に対し実施し、またフランス水車として宮下、伊南川両発電所用水車に対しいずれもモデルについてあらかじめ空洞現象試験を実施したのであるが、本試験は我国の大製作所においても今まであまり実施されていながつたので本試験施行に当つて各製作所（本名、片門、伊南川は日立、柳津、上田は三菱、宮下は電業社）とも非常なる苦心と相当の犠牲を払つて精進を続けられた。特に本名発電所の場合世界にもその例を見ない実落差試験装置を新設するなどその進歩発達は注目しに値するものがある。本名発電所用水車の優秀性もここに基因するといふも過言ではないと思われる。

本稿を終るに当りこれら製作者関係各位に深甚なる感謝の意を表するとともに今後一層の努力と研究を重ねてこの名声を弥増しに高からしめんことをこいねがつてやまない。

なお本問題につき終始熱心に推進を続けられた東北電力白川副社長に特に敬意を払うとともに、その指導に当つて戴いた東北大学沼知教授に厚く御礼申上げる次第である。