

可動翼斜流水車の特性

Characteristics of Movable Blade Diagonal Flow Turbine

井 上 久 男* 手 島 友 亮**
Hisao Inoue Tomoaki Tejima

内 容 梗 概

わが国最初の可動翼斜流水車として、日立製作所で製作中の東北電力株式会社新大倉発電所用 5,500 kW 斜流水車のために実施した模型試験をもとに、フランシス水車およびカプラン水車と比較して、可動翼斜流水車の水力的特長および効率、キャビテーション性能などの諸特性を明かにし、あわせて、新大倉発電所用 5,500 kW 斜流水車の概要を紹介した。

1. 緒 言

発電所用水力機械としての水車およびポンプ水車には、今日まで主として、輻流形および軸流形が使用されてきたが、近年になって斜流形が注目されるようになった。

斜流形の例としては、古くはスエーデンの Lilla Edet 発電所に Lawaczek 水車が据付けられたが、固定翼であったため、可動翼のカプラン水車に圧倒されて姿を消した。

近年カナダの Sir Adam Beck-Niagara 揚水発電所に可動翼の斜流ポンプ水車が据付けられ、ふたたび斜流形が注目されるようになった。

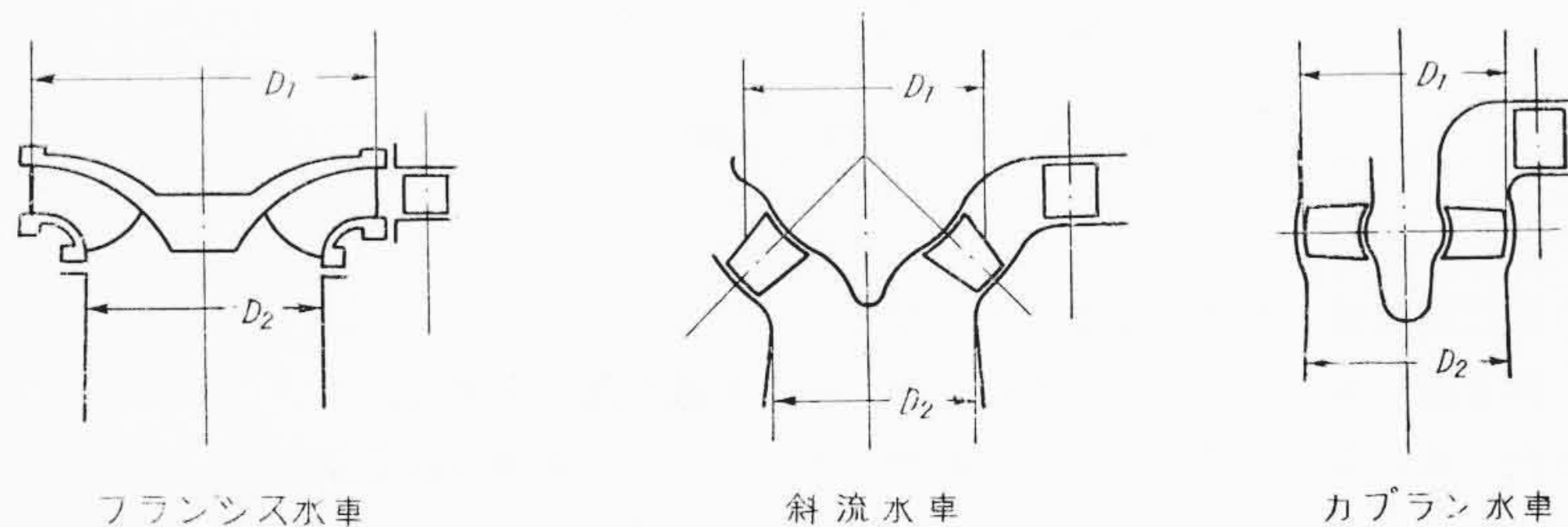
斜流形はランナ羽根角度を可変にできるという構造的特長をもち、ランナ羽根角度を可変にすることによって、カプラン水車のように落差変動や負荷変動に対してすぐれた特性を有し、しかも軸流形の適用落差よりも高落差に適用されるものと考えられる。

Sir Adam Beck-Niagara 揚水発電所に据付けられているものは斜流形の可逆ポンプ水車であるが、可動翼カプラン水車の適用落差限界を越えたフランシス水車の領域にまで適用できる可動翼形の純水車、すなわち可動翼斜流水車が実現することは容易に想像される。

以下日立製作所において製作中の東北電力株式会社新大倉発電所用 5,500 kW 可動翼斜流水車 ($H=96.9\sim70.3\text{m}$) を中心にその特性について述べる。

2. 可動翼斜流水車の水力的特長

従来から使われている水車をランナ内を通過する水の流入方向によって分類すると、主として輻流形、軸流形および混流形に分けられる。輻流形に属するものは低速形および中速形フランシス水車、軸流形に属するものがカプラン水車およびプロペラ水車、混流形に属するものが高速形フランシス水車である。斜流形はランナを通過する水の方向より考えれば混流形に近く、混流形は直角双曲線を回転して形成される回転体の表面に沿う流れに近い流れとなるが、斜流形はむしろ円錐体の表面に沿う流れに近い流れ方をする。斜流形ではランナボスおよびランナ羽根外周を球面にすることによって、ランナを可動翼にすることが可能である。したがって可動翼斜流水車は、混流形に属する高速形フランシス水車のランナを可動翼にしたものと考えられる。一方カプラン水車は適用される落差が高くなり、比速度が小さくなるに従って、ランナボス外径とランナ羽根外径との比すなわちボス比が大きくなり、羽根枚数が多くなってくる。可



第1図 ランナ形状比較

動翼斜流水車は考え方によればカプラン水車のボスを極端に大きくし、ランナ羽根を斜めにすなわち円錐体状に配置したものとも考えられる。

次に比速度 N_s をランナの形状を表わす (D_2/D_1) の関数として表わせば次のように導かれる。なお D_2 は吸出管入口部の直径、 D_1 はランナ入口部直径である。

$$N_s = N \frac{\sqrt{P}}{H^4} = N (9.8 \eta Q H)^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{5}{4}} = 3.13 N \eta^{\frac{1}{2}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{3}{4}} \quad (\text{m-kW}) \quad (1)$$

吸出管入口の直径 D_2 部を流れる流速を v_2 とし、 $v_2 = c_2 \sqrt{2gH}$ とすれば

$$Q = \frac{\pi}{4} D_2^2 c_2 \sqrt{2gH} \quad (2)$$

ランナ入口直径 D_1 部において周速度 u_1 を $u_1 = \phi \sqrt{2gH}$ とすると

$$N = \frac{60 \phi \sqrt{2gH}}{\pi D_1} \quad (3)$$

(1)式に(2)、(3)式を代入して

$$N_s = 3.13 \frac{60 \phi \sqrt{2gH}}{\pi D_1} \left(\frac{\pi}{4} D_2^2 c_2 \sqrt{2gH} \right)^{\frac{1}{2}} \eta^{\frac{1}{2}} H^{-\frac{3}{4}} \\ \div 494 \phi \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \sqrt{\eta} c_2 \quad (4)$$

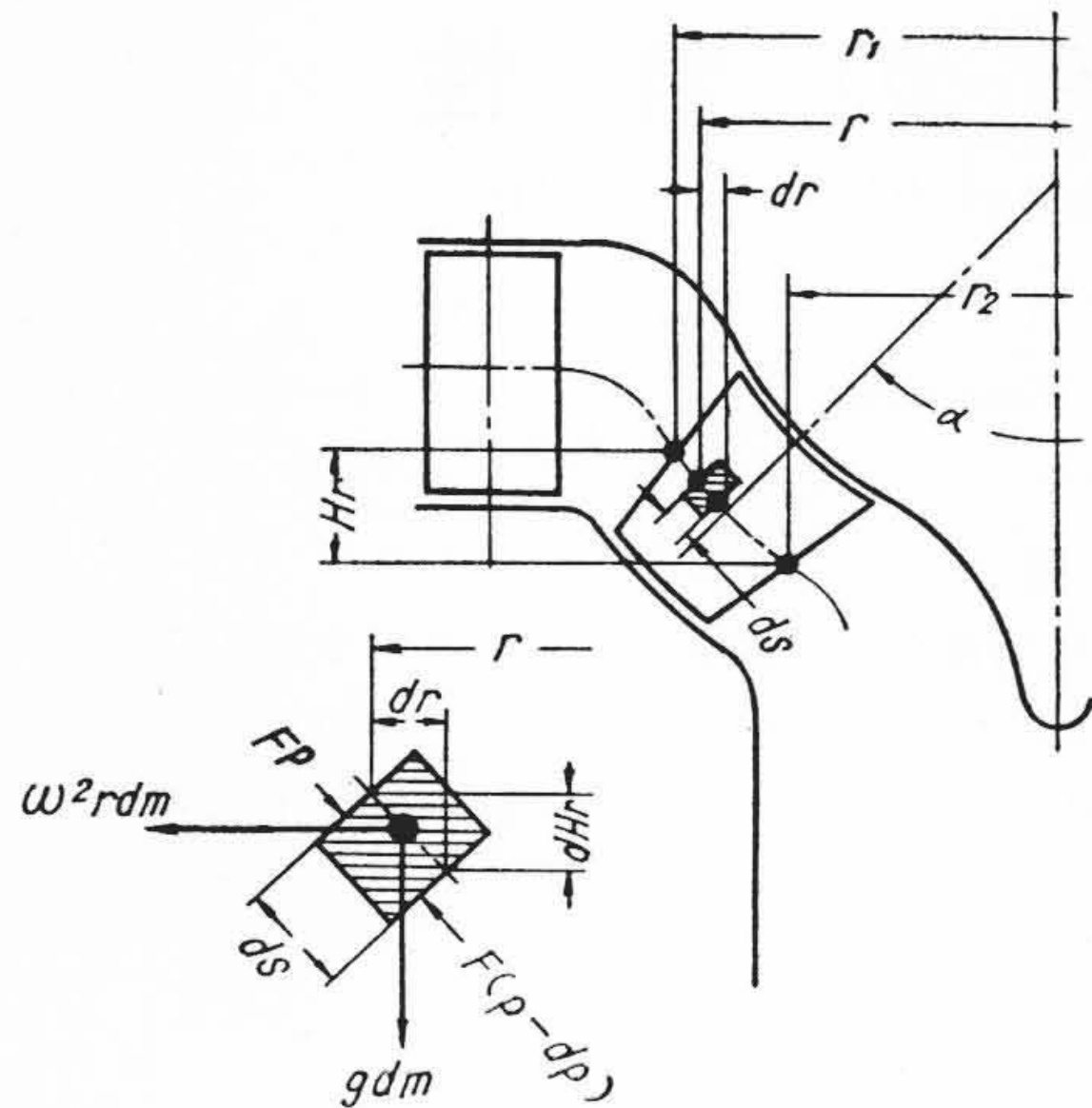
となる。

ここに N : 回転数 (rpm)
 P : 出力 (kW)
 H : 落差 (m)
 Q : 水量 (m^3/s)
 η : 水車効率
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 c_2 : 流速係数
 ϕ : 周速係数

(D_2/D_1) は軸流形では1となり最も大きく、輻流形では小さく、斜流形がこの中間となるから、比速度 N_s も輻流形、斜流形、軸流形

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所



第2図 記号図

の順に後者ほど大きくなることになる。

第2図において、ランナ内の流線に沿って微小部分を考え、ランナ内で水の有するエネルギーが機械的エネルギーに変換される過程を考えると、良く知られているように次の式で表わされる。

$$F dp ds = -w dw dm + \omega^2 r dm dr + g(dH_r - dH_l) dm \quad (\text{kg m}) \dots (5)$$

ここに

- F : 流線に直角な面積 (m²)
- w : 相対速度 (m/s)
- dm : 微小部分の質量 (kgs²/m)
- ω : ランナ角速度 (1/s)
- γ : 水の単位体積の重量 (kg/m³)

(5)式を水頭になおして流線に沿って、ランナ入口より出口まで積分すると、ランナ入口と出口の圧力差を水頭で表わしたものが得られる。

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = -\frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} - H_r + H_l \quad (\text{m}) \dots (6)$$

ここに u_1, u_2 はランナ入口、出口の周速である。

(5)式の右辺第2項 $\omega^2 r dm dr$ は微小部分に掛る遠心力 $\omega^2 r dm$ に逆って微小部分を通過する間に水の消失するエネルギーを表わしているから、(6)式の右辺第2項 $\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}$ はランナを流れる間に、単位重量の水が遠心力に逆って消失するエネルギーを表わし、このエネルギーはランナを通じて機械的エネルギーに変換される。 $\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}$ は軸流形では0であるが、斜流形、輻流形の順に後者ほど大きくなっている。ランナ内で相対速度を変化させることには限度がある。したがって、ランナ入口、出口の圧力差 $p_1 - p_2$ は軸流形、斜流形、輻流形の順に後者ほど大きくすることができ、高落差に適することがわかる。

模型試験によって明らかにされたところでは可動翼斜流水車の性能の良い範囲は

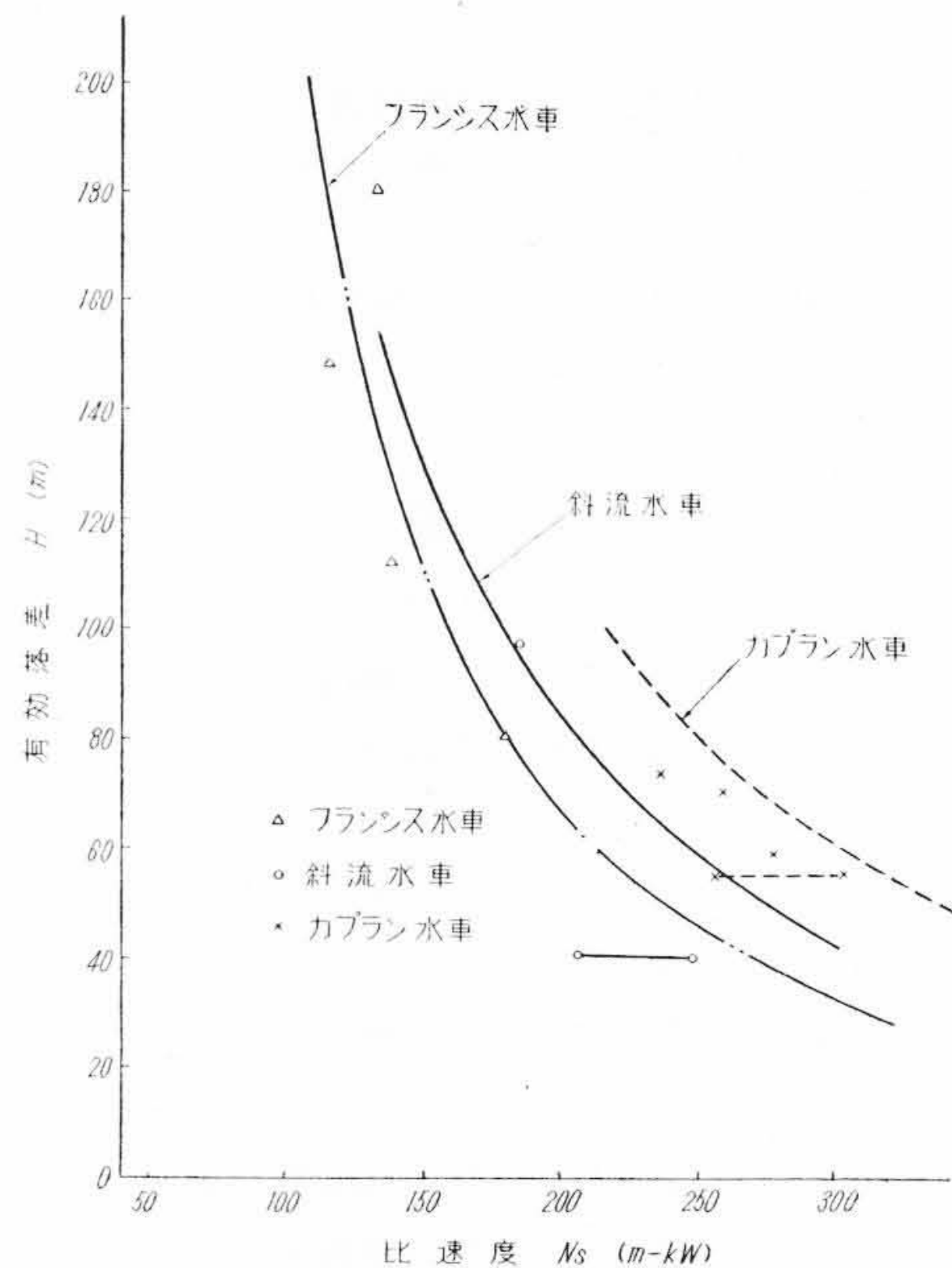
$$N_s = 100 \sim 350 \quad (\text{m-kW})$$

程度であって、これをほかの形の水車の比速度と比較すると第1表のとおり、輻流形に近いフランス水車の比速度と軸流形のカプラン水車の比速度の中間に入っている。

以上の考察と、後述する可動翼斜流水車のキャビテーション性能およびランナの強度なども考慮すると、可動翼斜流水車の比速度限界曲線は第3図のように、フランス水車とカプラン水車の比速度限界曲線の間をたどる曲線が妥当と考えられ、また可動翼斜流水車の適用落差範囲は一応 20~200m 程度と考えられる。

第1表 適用範囲

水車形式	比速度範囲	適用落差範囲
ベルトン水車	8~28 (m-kW)	300m 以上
フランス水車	40~300	30~500
斜流水車	100~350	20~200
カプラン水車	250~800	5~80



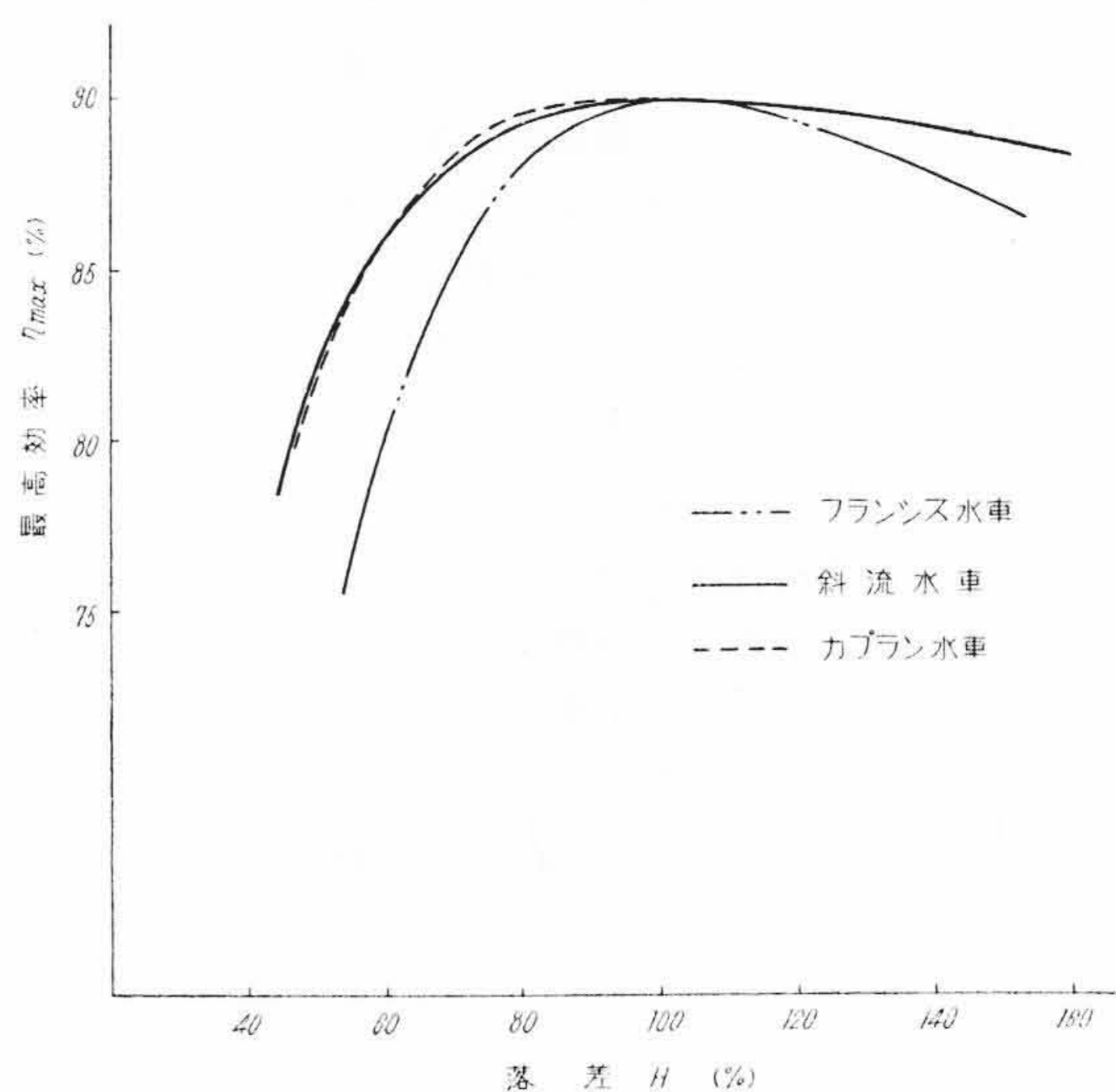
第3図 斜流水車比速度限界曲線

3. 可動翼斜流水車の特性

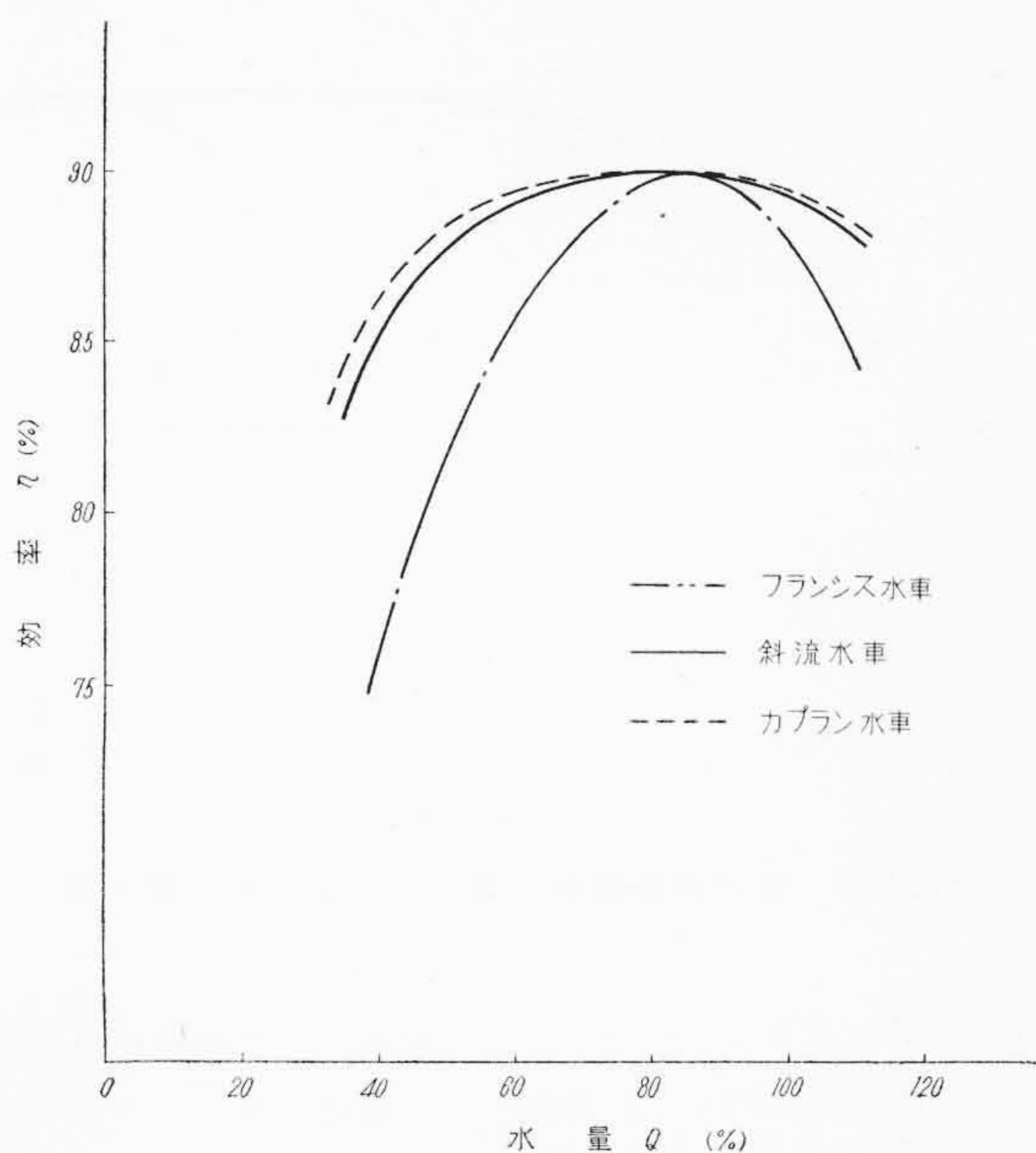
3.1 効率特性

可動翼であるから当然カプラン水車のように、水量変化や落差変動に対して効率の低下が少ないことが予想される。第4図は落差が変わった場合の最高効率の変化を示し、変落差に対してカプラン水車とほぼ同じ程度のすぐれた特性を有している。第5図は水量が変化した場合の特性を示し、負荷特性においてはカプラン水車より多少劣るが、フランス水車と比較すると、全負荷時および部分負荷時における特性はかなりすぐれている。

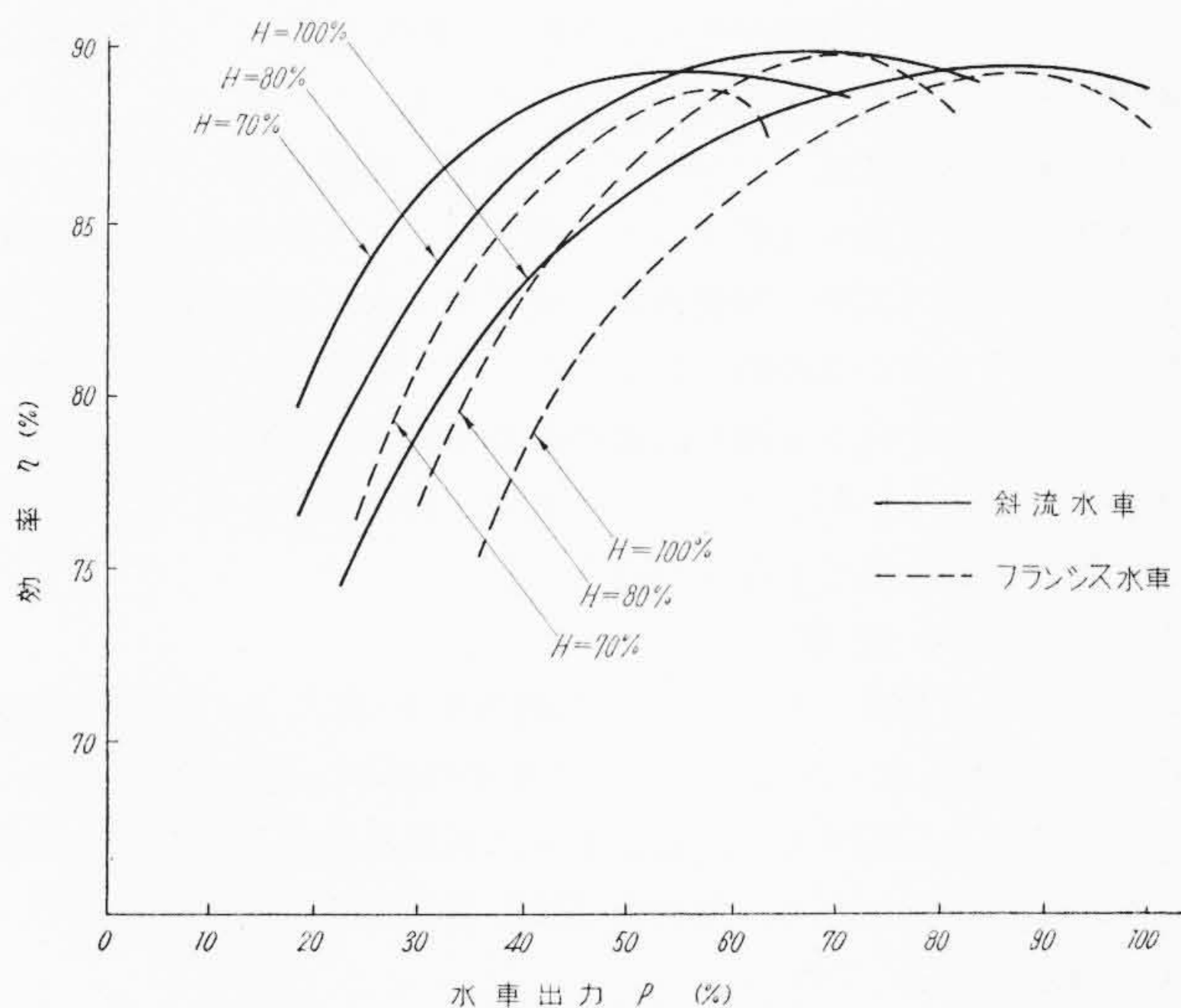
出力を横軸に取って、フランス水車、カプラン水車と特性を比較したものが第6図および第7図である。図より可翼斜流水車はフ



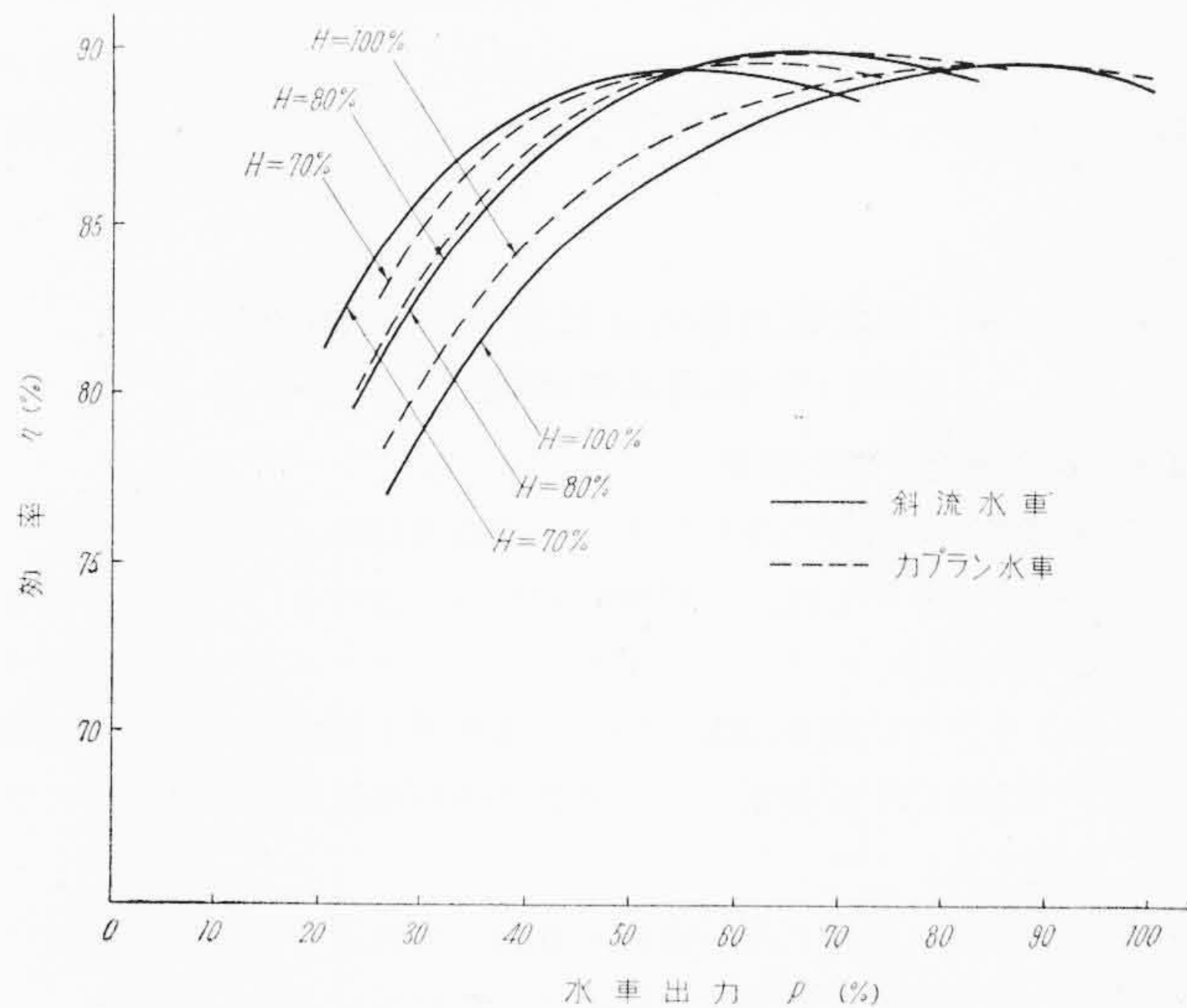
第4図 落差-最高効率比較曲線



第5図 水量-効率比較曲線

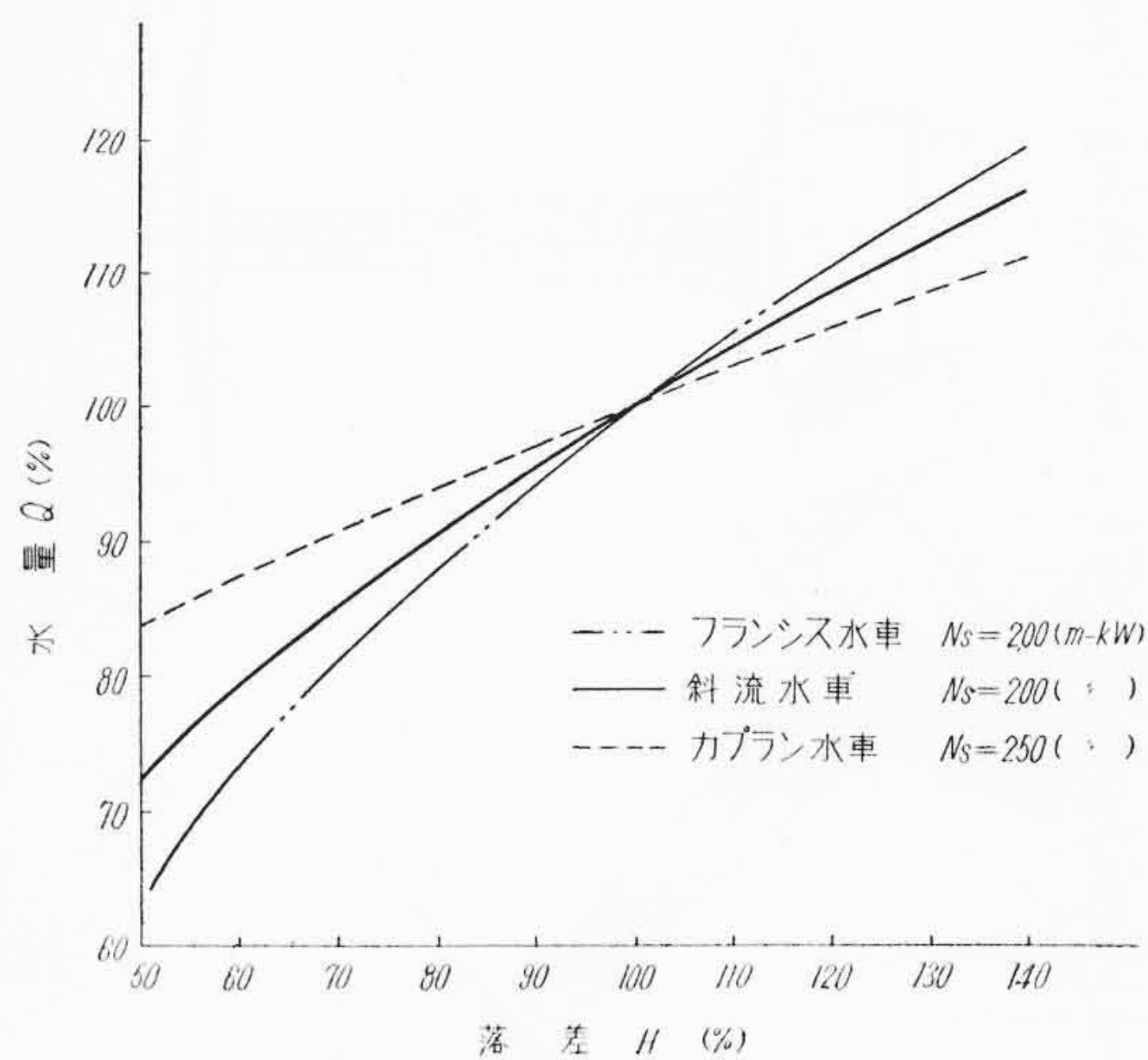


第6図 水車出力-効率比較曲線 (1)

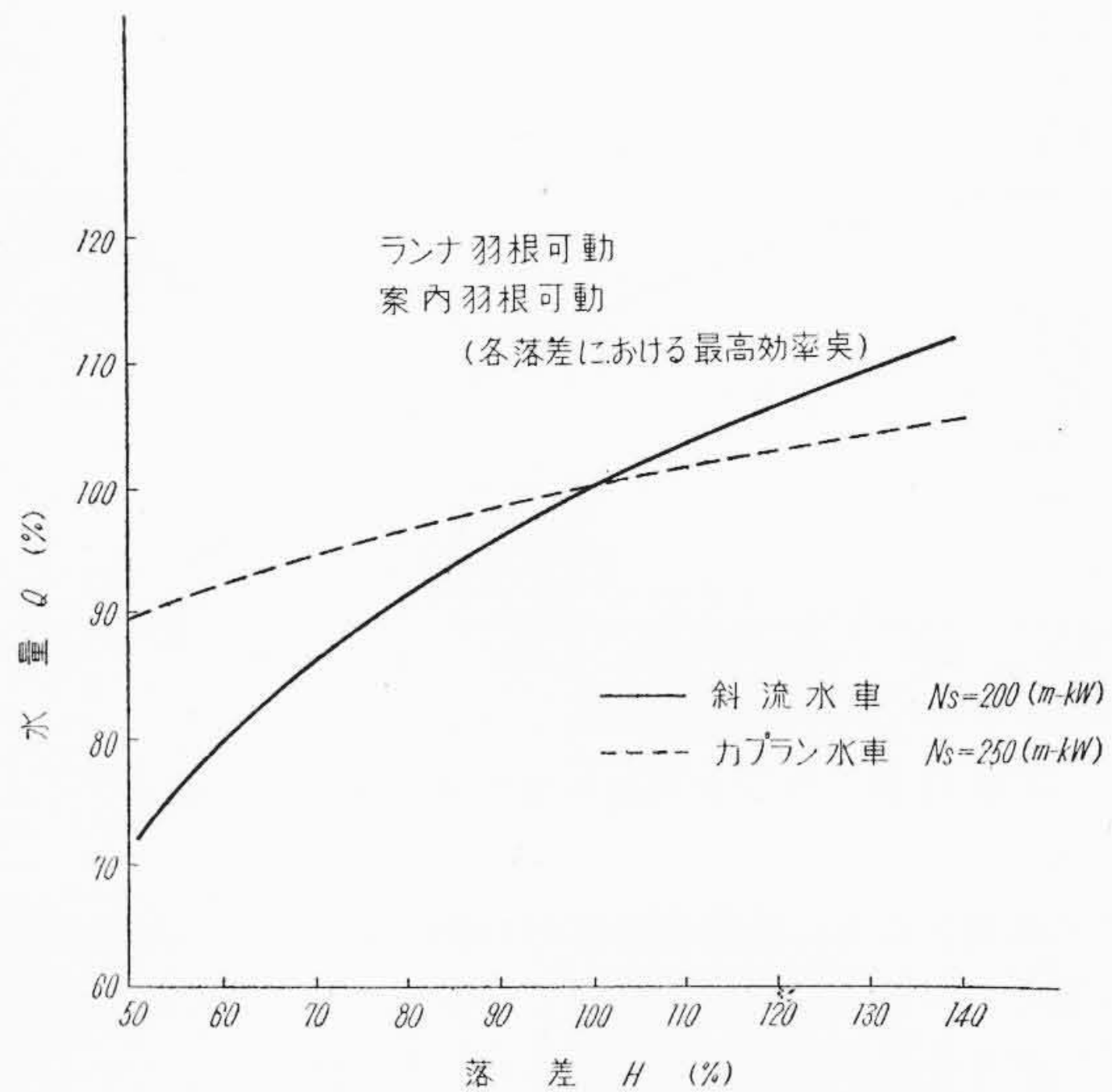


第7図 水車出力-効率比較曲線 (2)

ランシス水車にくらべて落差変動および負荷変動が大きい場合、非常にすぐれた特性を有し、カプラン水車に比較すると、高落差の部分負荷時、低落差の全負荷時の効率が劣り、低落差の部分負荷時の



第8図 水量特性比較例 (1)



第9図 水量特性比較例 (2)

効率はむしろすぐれていることがわかる。この傾向は第8図および第9図から容易に推定される。すなわちカプラン水車の最高効率点の単位落差当りの水量 Q_1 は落差が低くなると増加するが、斜流水車の最高効率点の Q_1 は落差の変化に対しあまり変化がない。

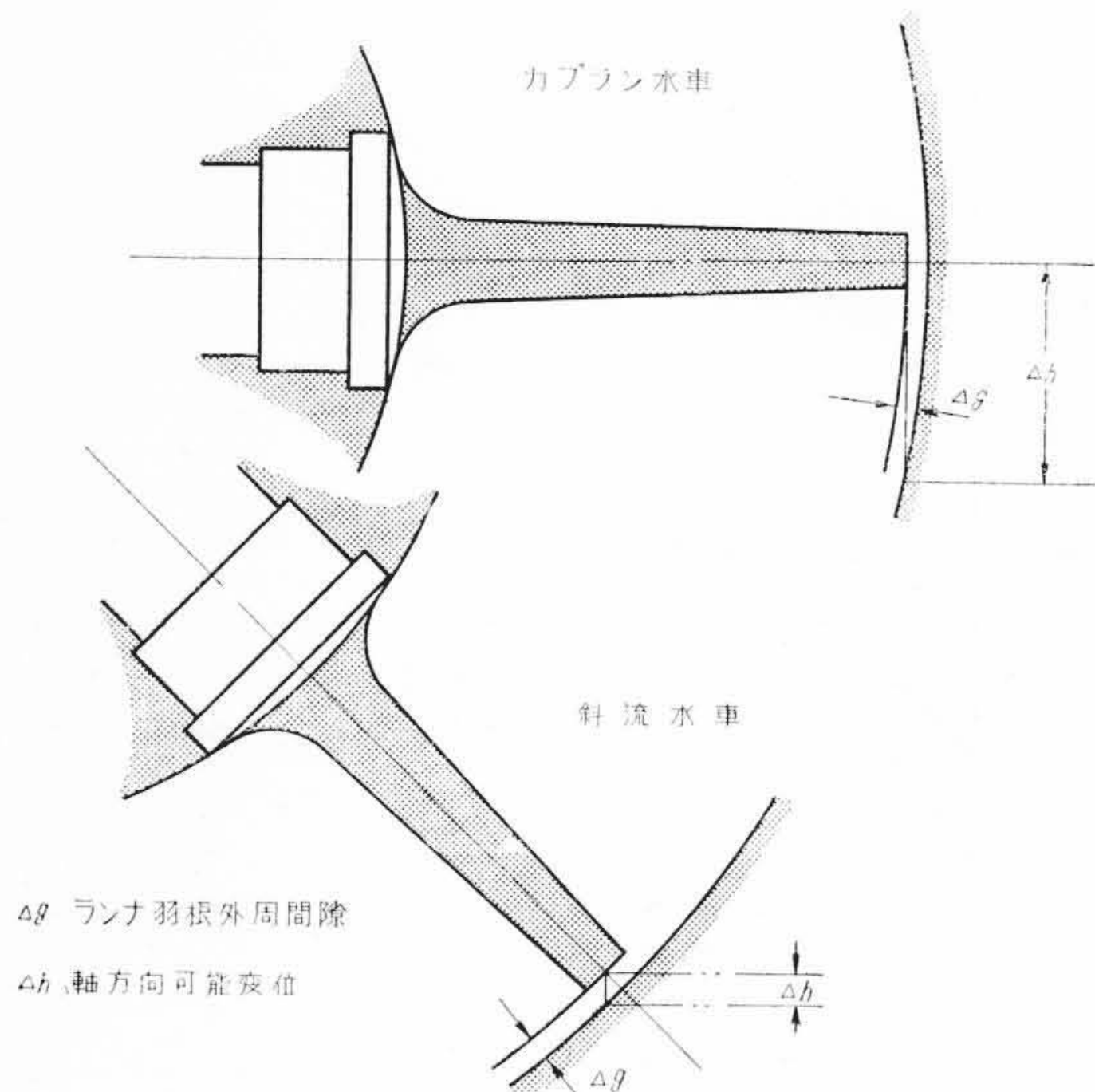
3.2 ランナ羽根外周間隙と性能

第10図に示すとおり、カプラン水車ではランナの上下方向の位置が多少変化しても、ランナ外筒に接触することはないが、斜流水車の場合、ランナ羽根の軸中心線が斜めになっているために、温度変化による主軸の伸び、軸方向推力の変化などによって、ランナ上下位置が多少変化すると、ランナ羽根がランナ外筒に接触するおそれがある。またランナ羽根外周間隙の多少は性能に大きな影響を与えることが試験より確かめられている。

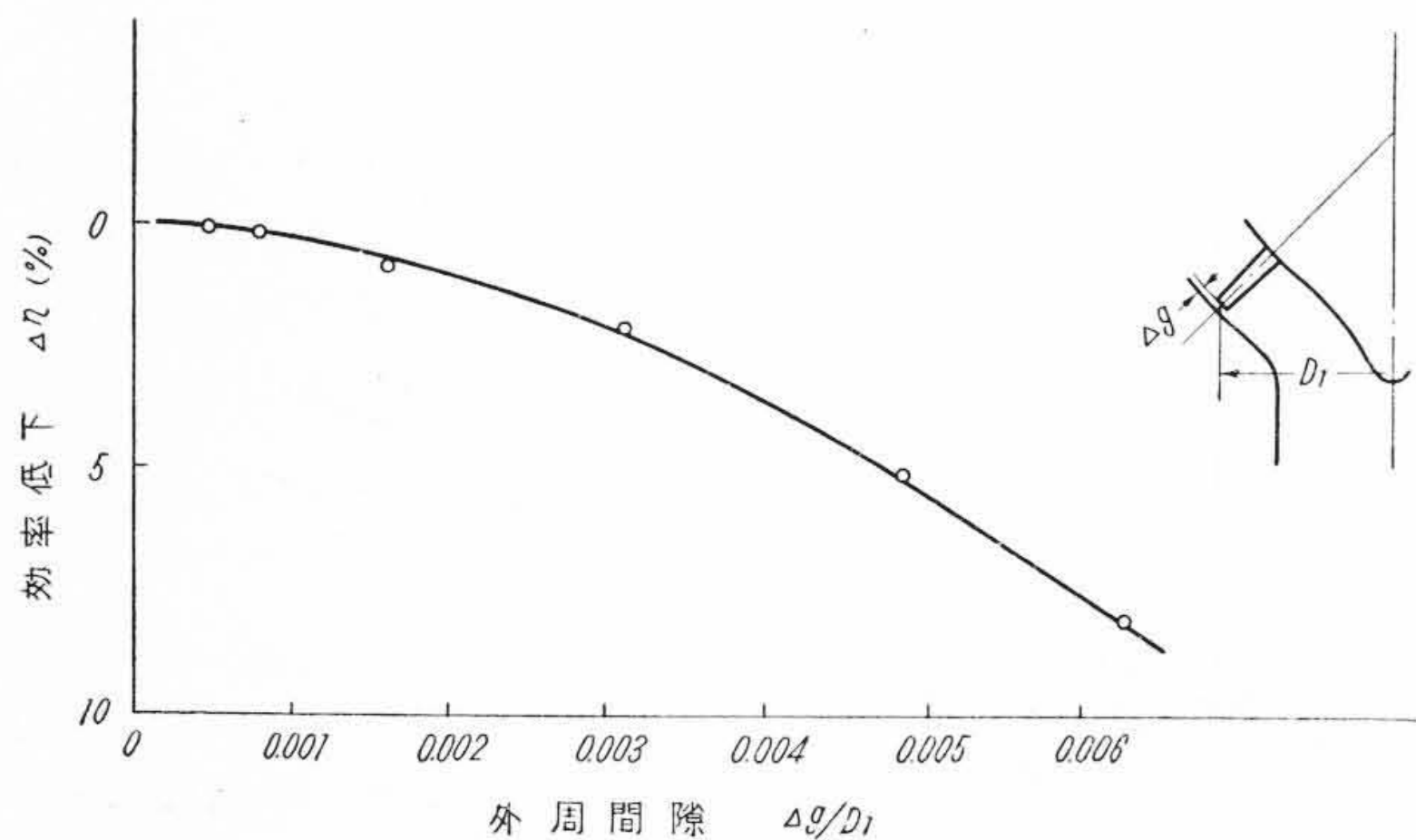
第11図はランナ羽根外周間隙を変えた場合の効率の低下の実験例を示す。

3.3 案内羽根構造と性能

斜流水車の案内羽根としては、従来のフランシス水車、カプラン水車と同様な垂直形配置と、一部の低落差カプラン水車、および筒形水車に採用されている斜形の2種類がある。斜形の案内羽根と垂直形の案内羽根によりランナの入口流れに与えられる旋回はそれぞれ異なったものとなり、ランナはそれぞれの入口流れに適合した設



第10図 ランナ羽根外周間隙比較図



第11図 ランナ羽根外周間隙と水車効率低下

計をする必要がある。垂直形の案内羽根により与えられる流れは自由渦に近くランナの設計には好適であるが、もちろん斜形の案内羽根によって与えられた流れに対し、ランナを設計することも可能である。

垂直形案内羽根採用の場合、案内羽根を出たあとで流れに曲りを与えることになるが、これは従来のカプラン水車あるいは筒形水車においても行われてきたもので、それに比べると斜流水車の場合は曲り角度が小さいだけに影響は少ないと考えられる。案内羽根とランナとの組合わせをあげてみると次のとおりになる。

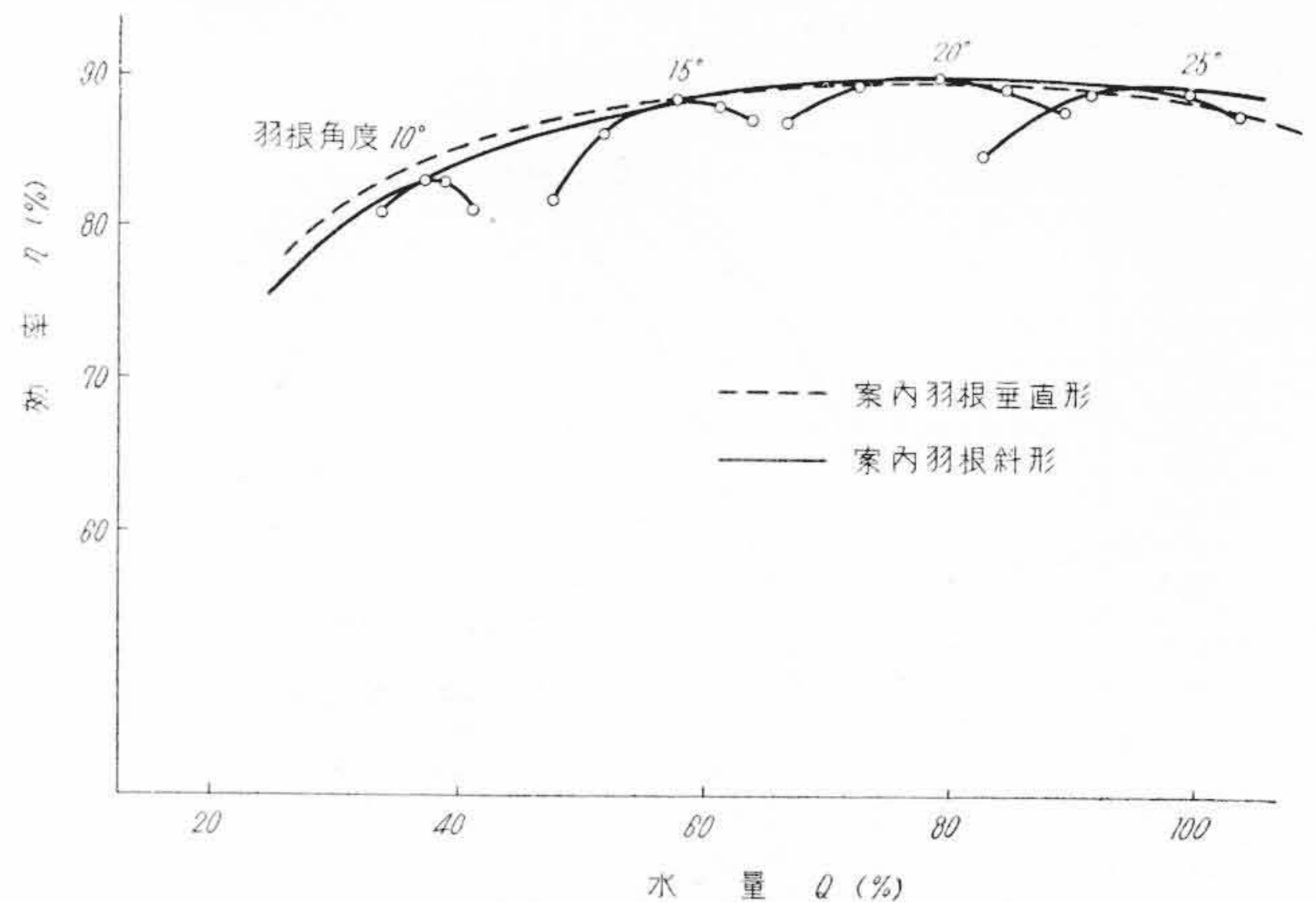
	ランナ	案内羽根	曲り角
カプラン水車	軸流	輻流	90°
低落差カプラン水車	軸流	斜流	約60°
筒形水車	軸流	斜流	約30°
斜流水車	斜流	輻流	30~60°

(垂直形案内羽根の場合)

垂直形の案内羽根および斜形案内羽根、それぞれに適したランナを設計製作し、比較試験を行った結果を第12図に示してある。垂直形は部分負荷時の効率がすぐれ、斜形は全負荷時の効率がすぐれているという傾向が認められるが、通常の運転範囲内では両者の性能的な差はほとんど問題にならない程度である。

3.4 キャビテーション性能

斜流水車はランナ入口径に比較して出口径が小さく、出口部の周速が小さくなるので、ランナ入口径と出口径がほぼ等しくなっているカプラン水車に比較してキャビテーションによるシグマブレイキ σ_B は低くなり、フランシス水車に比較するとフランシス水車の固定された羽根角度より大きな羽根角度まで運転して、流量を変えた場



第12図 案内羽根構造の違いによる水車性能比較

合の効率低下を小さくしたほうが、可動翼としての特長を発揮することになるので、このような運転を行う場合フランシス水車よりシグマブレイキ σ_B が高くなることが予想される。

模型試験結果より比較すると、同一比速度において、シグマブレイキ σ_B はカプラン水車のそれより約5~10%程度低く、フランシス水車のそれより約20%程度高くなっている。

いま、同一落差地点で、フランシス水車、斜流水車、カプラン水車の水車据付け位置を比較すると、前述のとおり性能的な面を考慮すればフランシス水車、斜流水車、カプラン水車の順に後者ほど回転数を高く取るのが合理的であるから、同一比速度におけるシグマブレイキ σ_B より決まる据付位置の差より実際の場合はさらに大きな差がある。すなわち、フランシス水車、斜流水車、カプラン水車の順に据付位置を低くしなければならない。

3.5 無拘束速度

斜流水車は可動翼であるため、羽根角度10度付近の無拘束速度が高くなり、固定翼であるフランシス水車の約30~40%増となるが、カプラン水車に比較すると、斜流水車は低落差の最大流量付近の効率が低くなる傾向があり、無拘束速度も約5~10%程度低くなる。

3.6 軸推力

カプラン水車の場合、ランナ羽根面に作用する水圧がすべて軸推力となるが、斜流水車の場合、ランナ羽根面に作用する水圧とランナボス面に作用する水圧とが相殺する関係にあり、水圧による軸方向推力はカプラン水車の半分以下、フランシス水車とほぼ同じ程度となる。

4. 東北電力株式会社新大倉発電所納 5,500 kW 斜流水車の紹介

4.1 新大倉発電所の概要

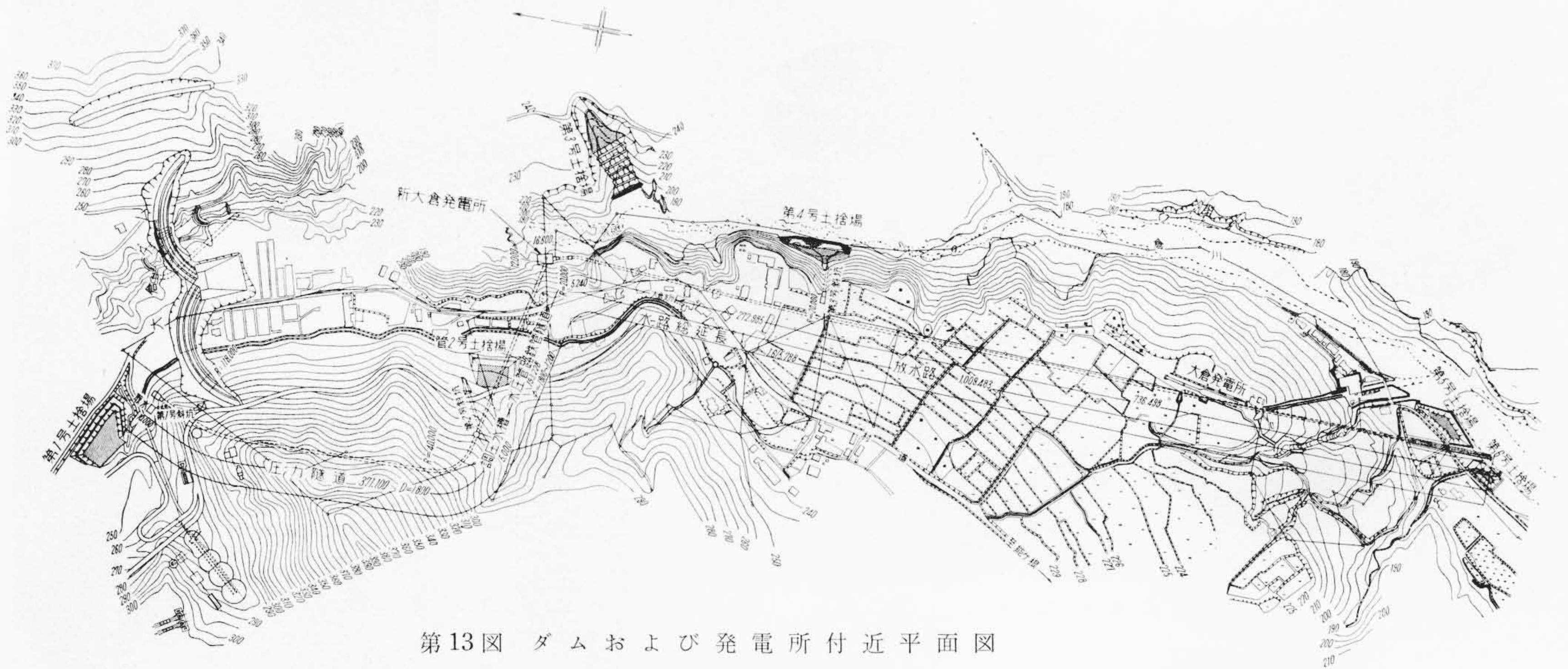
現在建設省が築造中の多目的ダム（堤高80.6m、堤頂長320mの二重アーチダム）の上流、右岸側に取水口を設けて、これより取水し、延長371.10mの圧力トンネルを経て、サージタンクに連絡する。これよりさらに延長205.73mの水圧管1条を経て、水車に導水し最大5,500kWを発電の上、延長1,024.09mの放水路を経て大倉川に放流する。

放水路が非常に長いため、吸出し管出口にサージタンクが設けられ、吸出し管の形状に特別な考慮がはらわれている。

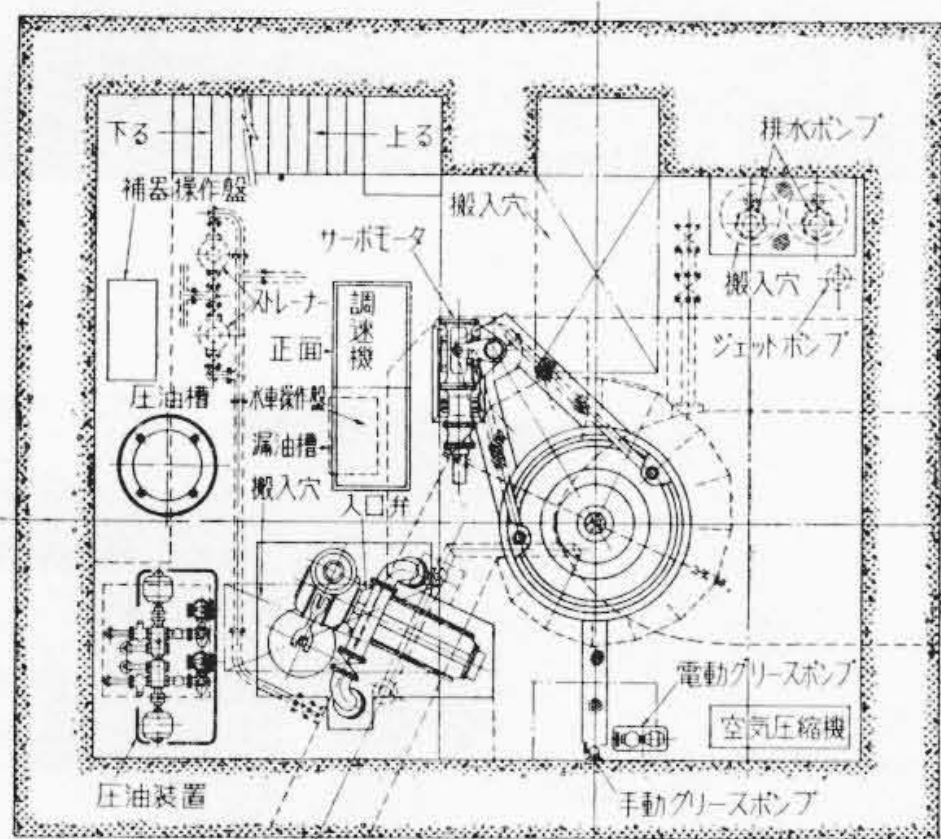
地表のE L 198.400に対し、水車中心はE L 166.450で、全地下式の発電所である。水車室は二床式になっている。

上水位および放水位の変化状況は下記のとおりである。

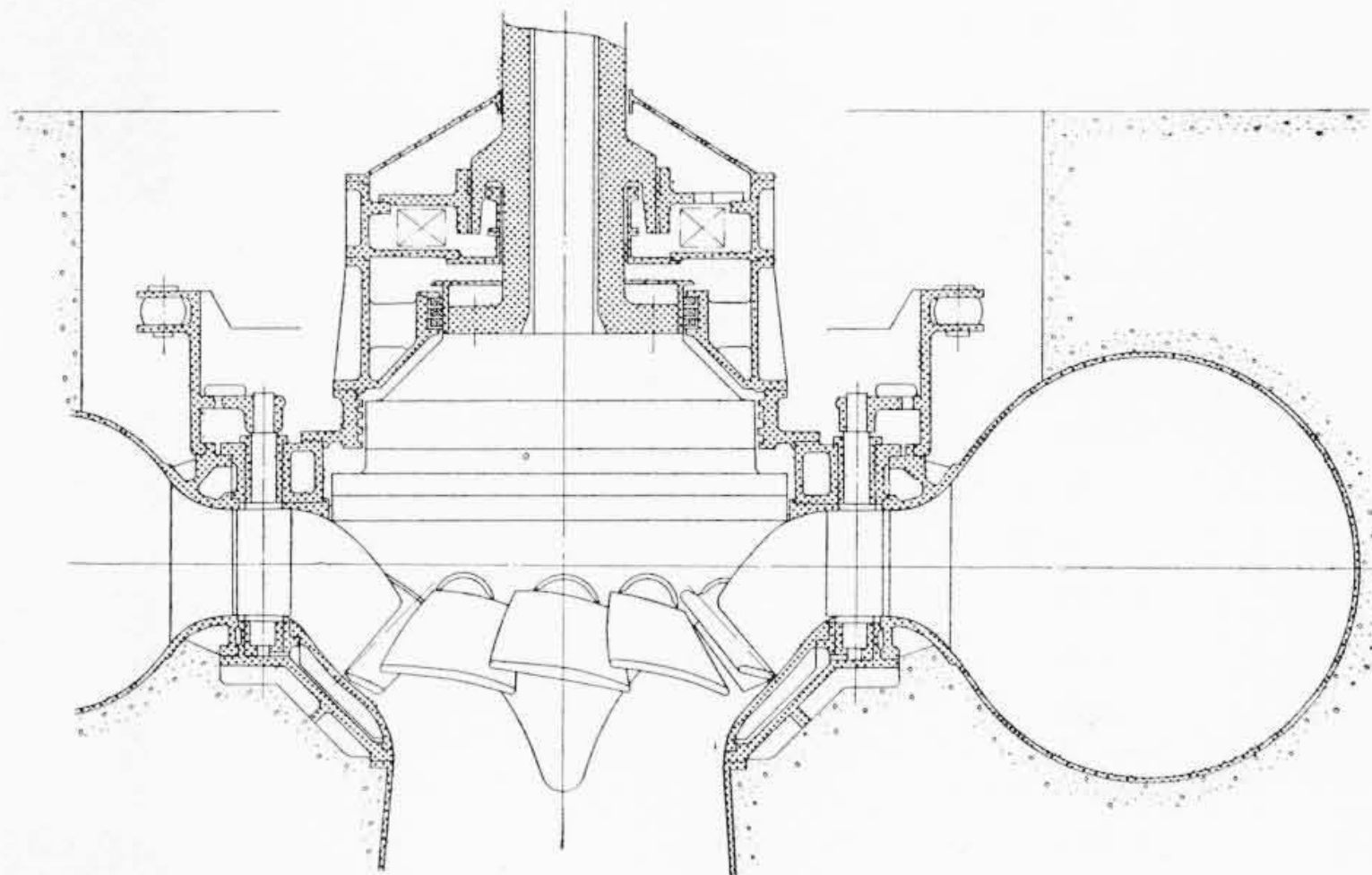
最大出力時 ($Q=6.5 \text{ m}^3/\text{s}$)	常時 ($Q=3.06 \text{ m}^3/\text{s}$)
取水口水位 EL. 270.60	EL. 240.65



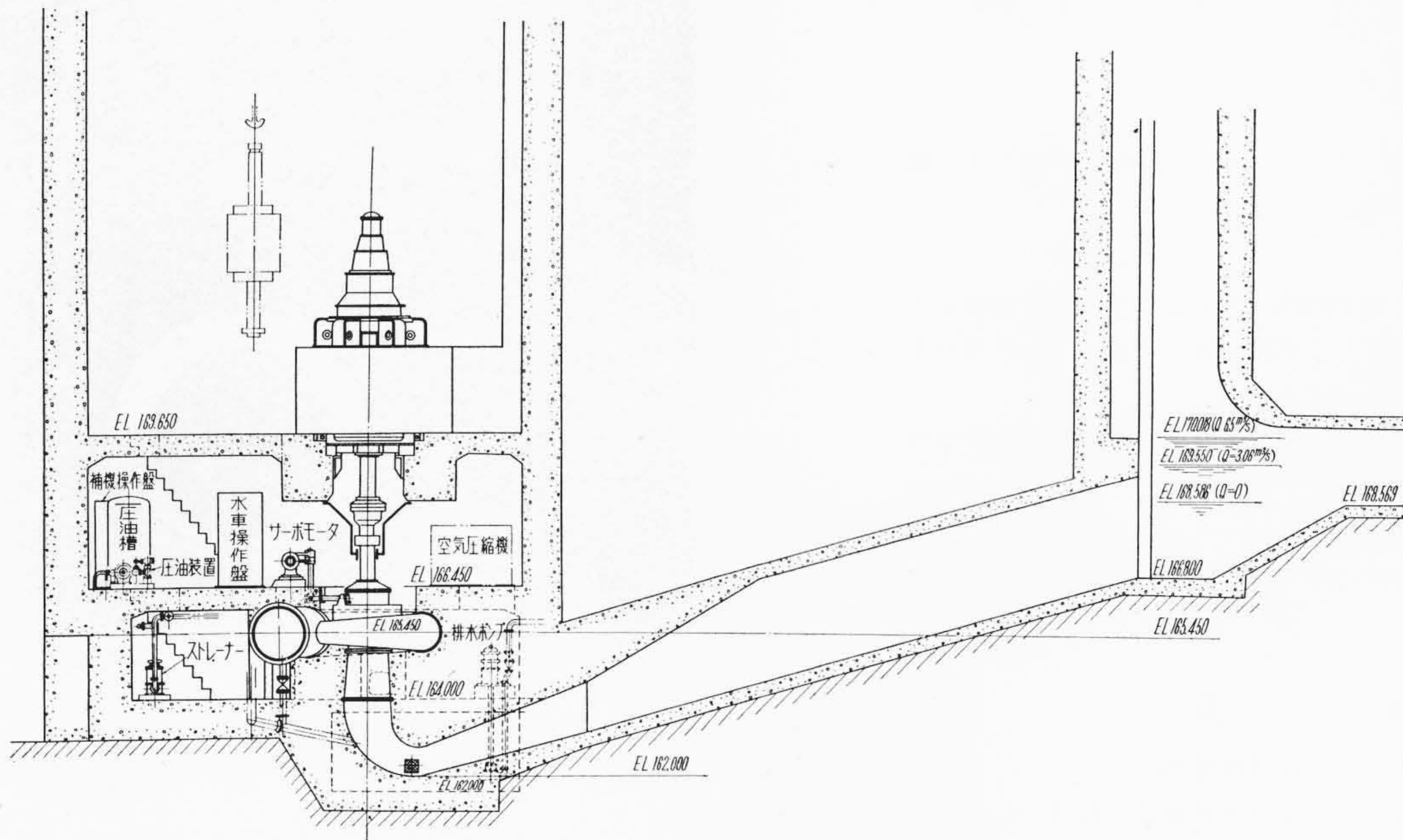
第13図 ダムおよび発電所付近平面図



第14図 5,500 kW 斜流水車据付平面図



第16図 5,500 kW 斜流水車構造図



第15図 5,500 kW 斜流水車据付断面図

水槽口水位	EL. 269.39	EL. 240.38
放水池水位	EL. 170.178	EL. 169.55
放水口水位	EL. 168.00	EL. 167.78

4.2 5,500 kW 斜流水車の仕様

本発電所の水車はわが国最初の斜流水車であるばかりでなく、可

動翼機構を採用した水車としては世界最高落差($H=96.9\text{m}$)のものである。本発電所に可動翼斜流水車を採用するにあたっては、フランス水車およびカプラン水車との得失を比較して、慎重に検討された。第2表はフランス水車との仕様比較を示す。

4.3 形状および構造

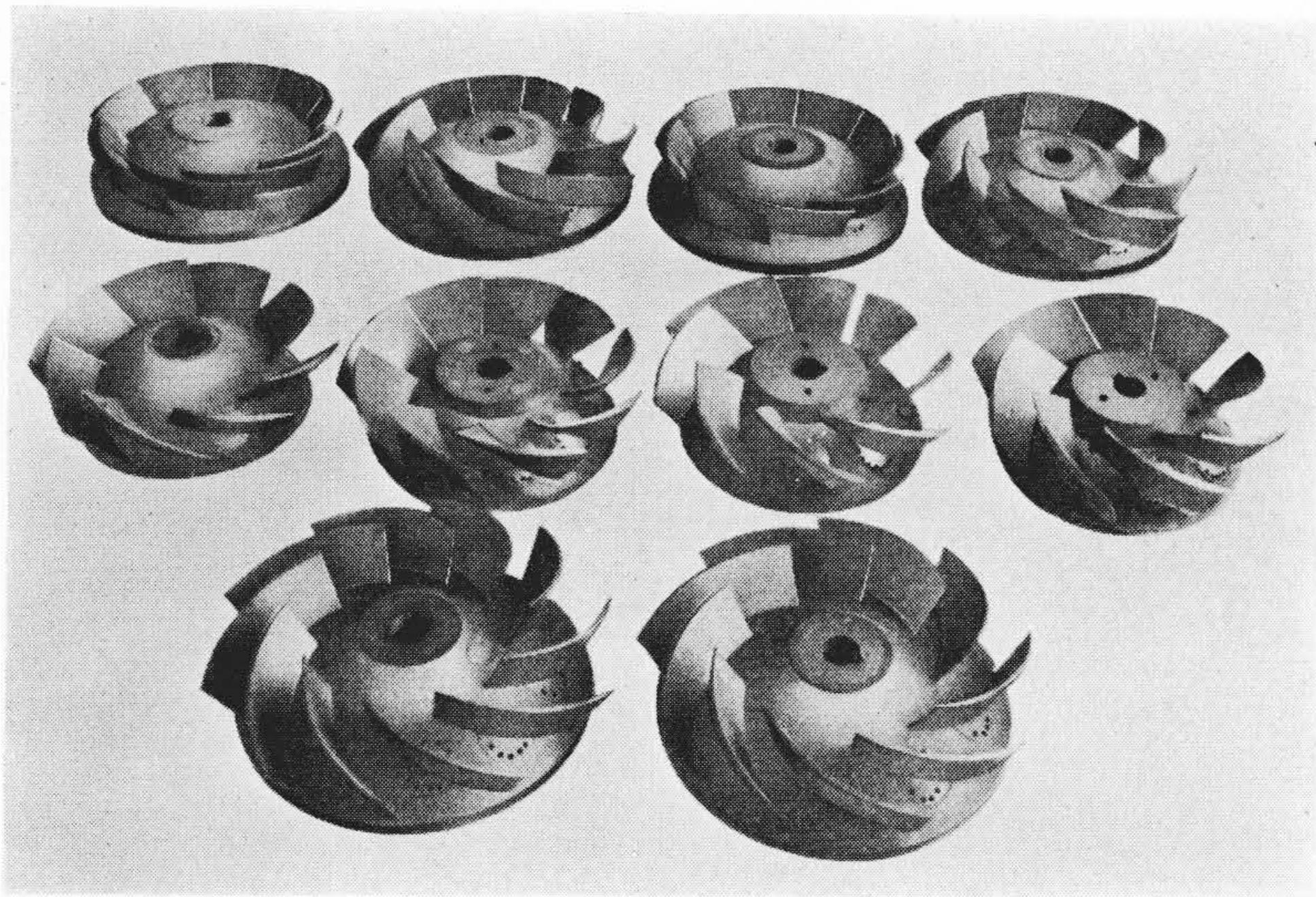
本発電所の斜流水車の概略構造は第16図のとおりである。

(1) ランナ

ランナ羽根の軸中心線の形成する円錐体の頂角は90度で、羽根枚数はキャビテーション性能を検討して、8枚に決定された。ランナ羽根操作機構は高落差に適し、従来の高落差カプラン水車の構造が十分応用できる、外側レバーと直動サーボモータを組合わせた構造が採用されている。

(2) 案内羽根

案内羽根は性能的に大差のない点より、従来のカプラン水車、フランス水車の構造がそのまま採用でき、分解および組立ての容易な垂直形構造とした。案内羽根枚数は18枚である。



第17図 斜流水車模型ランナ例

第2表 東北電力株式会社新大倉発電所仕様比較表

			単位	斜流水車	フランスス水車
水車	形	式×台数		DMS-V×1	FSS-V×1
	最高	落差	m	96.9	96.9
		水量	m ³ /s	6.50	6.50
		出力	kW	5,500	5,380
	基準	落差	m	85	85
		水量	m ³ /s	6.50	6.50
		出力	kW	4,830	4,700
	最低	落差	m	70.3	70.3
		水量	m ³ /s	6.38	6.05
		出力	kW	3,910	3,600
発電機	回	転	rpm	750	600
	比	速	(m-kW)	202	159
	力	率			
電機	形	式×台数		VFF-RD×1	VEF-RD×1
	出	力	kVA	6,500	6,500
	電	圧	V	6,600	6,600
	周	波		50	50
機	力	率		0.85	0.85

(3) 水封構造

カーボンパッキングを用いて、ランナボス外周で水封して、軸推力を減少させる構造を採用している。

4.4 模型試験

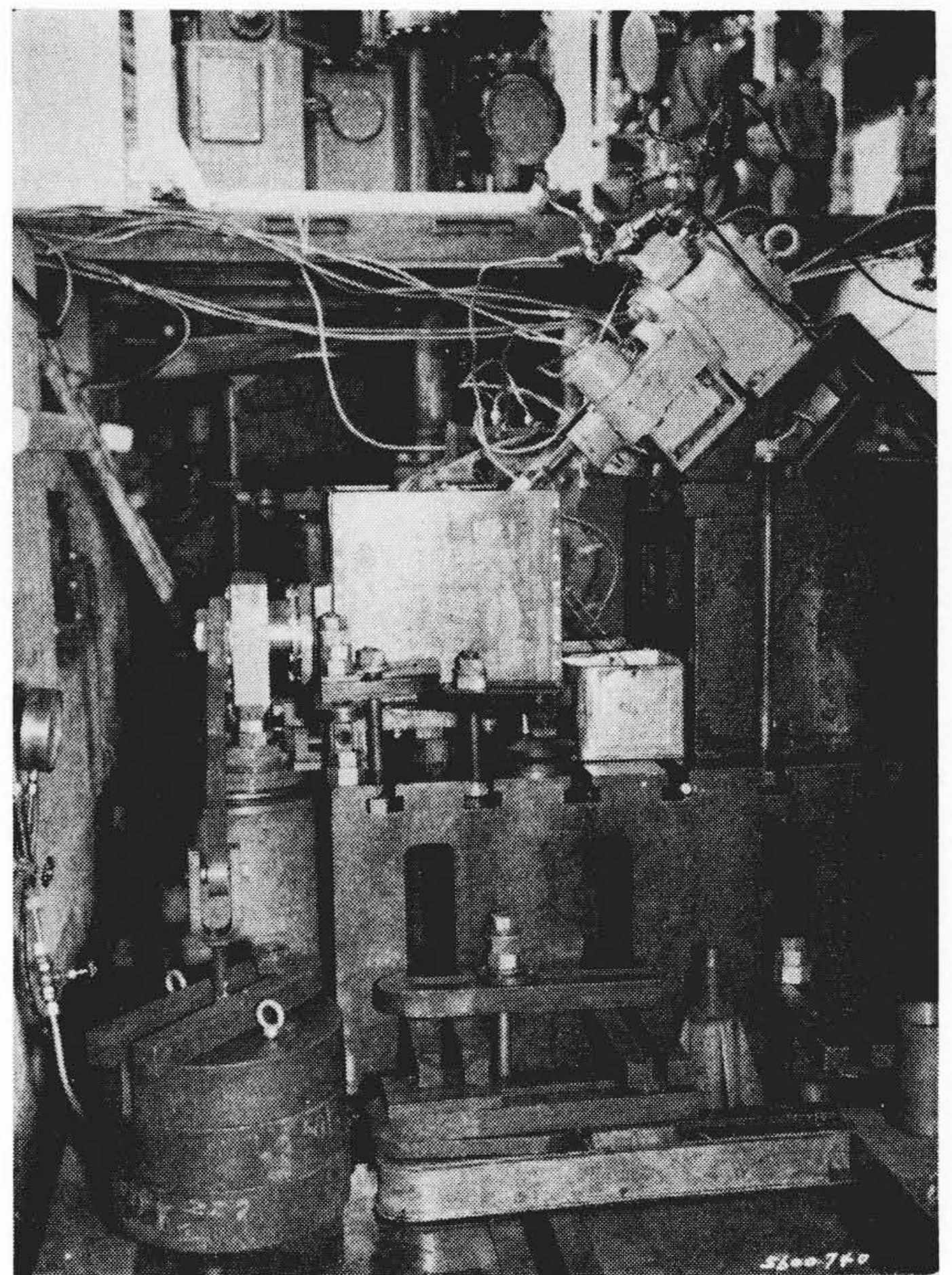
新形式の水車であるため、効率試験、キャピテーション試験とともに綿密に実施されたが、それらの試験結果よりも、実物水車のすぐれた運転成績が期待される。

ランナ操作機構については実物大の試験装置を製作し、20,000回の耐久操作試験を実施した。

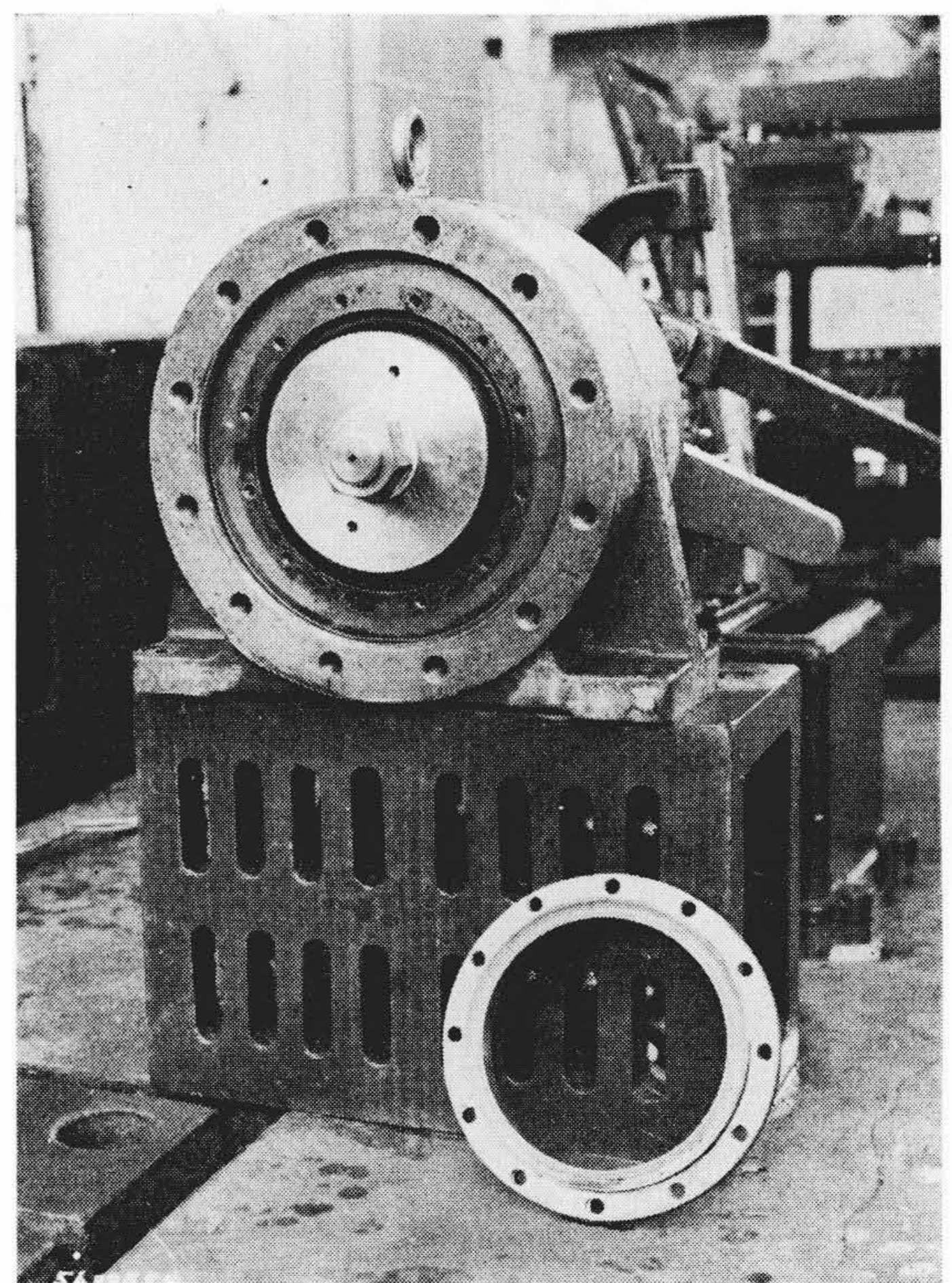
本水車は特に高落差に使用されるため、ランナ羽根ステムパッキング構造も、実物大の試験装置により試験を実施し優秀な結果が得られた。

5. 結 言

可動翼斜流水車は落差変動、および負荷変動にたいし、フランスス水車よりすぐれた特性を有し、カプラン水車より高落差に適している。また、構造的にもランナ羽根操作機構はやや複雑になるが、製作上の問題もすべて解決されたので、従来フランスス水車の領域であった落差範囲70~200mに進出できる条件を備えていると考えられる。すなわち、可動翼斜流水車はカプラン水車の適用される領



第18図 ランナ羽根操作機構試験装置



第19図 ランナ羽根ステムパッキング試験装置

域でなく、フランスス水車の適用される領域に進出するところに意義があると考えられる。

日立製作所がわが国最初の可動翼斜流水車を受注し、世界最高落差の可動翼水車を製作する機会を与えられた意義は誠に大きく、ここに東北電力株式会社の関係者各位に厚く謝意を表する次第である。