

揚水発電所用ポンプ水車

Pumps for Pumped Storage Power Stations

外 岡 英 徳* 長 沼 進*
Hidenori Tonooka Susumu Naganuma

内 容 梗 概

わが国における揚水発電所の建設も急激な進展をみつつあり、技術の進歩にともなう、今日では水力発電開発の主流を占めようとする気運にある。揚水発電所用機器の形式については直結形、可逆形などがあるが、本稿において、運転効率の基本となる発生電力量の考え方および機器選定にあたって考慮しなければならない点などについてのべるとともに、あわせて現在運転中および建設中の発電所用機器に対してその特長を概説したものである。

1. 緒 言

電源開発が進むに従い、発電容量の増加と同時に負荷の変動が激しくなり、その需給の調整用として揚水発電所の必要性が叫ばれるようになって、今日では揚水発電所の建設はむしろ水力発電開発の主流を占めようとする気運にある。

揚水発電所の形式はその運転条件が通常の発電所より複雑であり、総合効率を高め、より高い経済性を発揮するために多方面の角度からの検討を必要とし、かつ今後ますます大容量化する傾向にあるため、使用者側と製作者側の密接な協力が必要である。揚水発電所用主機として、可逆ポンプ水車が多数採用されるようになって、その必要性はさらに深くなったといえる。

従来、高落差、高揚程の揚水発電所地点には、沼沢沼あるいは諸塚式のいわゆる直結式機器が普通であったが、最近 300 m 程度の落差に対しても単段のポンプ水車が用いられるようになり、また低落差あるいは中落差領域に対して斜流形ポンプ水車が採用されるようになり、揚水発電所に対して可逆ポンプ水車は今後ますます大きな役割を占めることになろう。

ポンプ水車では通常の水車あるいはポンプに比べ、非常に多くの使用条件が与えられ、そのおのおの条件がお互に関連をもっているため、その計画にあたっては運転条件とポンプ水車特性を考慮して最も経済的な運転条件を決定する必要があると同時に、この条件に最も適した特性のポンプ水車性能の開発が要求される。

本稿ではポンプ水車の計画にあたって問題となる事項について検討を加え、あわせてわが国にてすでに建設が進められている発電所の特殊性について紹介することとする。

2. 揚水発電所の総合効率

揚水発電所に可逆ポンプ水車を採用すべきか、ポンプと水車を別に設けた直結式にすべきか、またポンプ水車を用いるにしてもフランシス形にすべきか、斜流形にするか、これらの選定は発電所の建設条件、運転条件などによって決められるが、特に揚水発電所では発生電力量を比較して、設備費などを含めた総合経済性が問題である。

揚水発電所の形式として、揚水した水のみを用いて発電する純揚水発電所と、発電に利用する水量がその発電所で揚水した水と、上部貯水池に流れ込む自流水量の合計となるいわゆる混合式揚水発電所とがある。イギリスの Ffestiniog 発電所、フランスの Lac Noir 発電所などは純揚水発電所の例で、わが国では神奈川県に建設中の城山発電所がこれに相当し、将来わが国でも順次純揚水発電所の例が多くなるものと予想される。しかし大森川、畑薙第一発電所をはじめ従来建設された揚水発電所はほとんど自流をもった混合式発電

所である。

揚水発電所で、総合効率の基礎となるのは年間の発生電力量と揚水に利用した消費電力量である。

混合式揚水発電所では発生電力量は次のような式で表わされる。すなわち

W : 年間発生電力量 (kWh)
 W_1 : 自流分発生電力量 (kWh)
 W_2 : 揚水分発生電力量 (kWh)
 W_3 : 揚水に消費した電力量 (kWh)

とすると、揚水発電所が発生する電力量 W は

$$W = W_1 + W_2 - W_3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

揚水発電所の経済性の考え方によって、(1)式の算出の仕方も種々異なってくるであろう。すなわち揚水に消費する電力は余剰電力としてその電力料を無視するとか、揚水運転を行ないうる時間を制限する場合とか、考え方によって種々の計算方法があるであろうが、一般に揚水発電所では貯水池の利用水深により落差揚程が変化するので、ポンプ水車の変落差特性に従い(1)式をもって計算するのが普通である。

W_1 は通常の発電所の場合と同様下記のような式となる。

$$W_1 = \sum 9.8 Q_T T_T H_T \eta_T \eta_G \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで Q_T : 水車の流量 (m^3/s)

H_T : 有効落差 (m)

T_T : 発電運転時間 (h)

η_T, η_G : それぞれ水車および発電機の効率

また W_2 は同様にして

$$W_2 = \sum 9.8 Q_p T_p H_T \eta_T \eta_G \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで Q_p : ポンプの揚水量

T_p : ポンプの運転時間

あるいは W_2 は、揚水に利用できる電力量が与えられている場合、その電力量を W_p とすると

$$W_2' = \sum W_p \eta_p \eta_M \eta_T \eta_G \quad \dots\dots\dots (3)'$$

ここで η_p, η_M : それぞれポンプおよび電動機の効率

また W_3 は

$$W_3 = \sum 9.8 \frac{Q_p \cdot T_p \cdot H_p}{\eta_p \cdot \eta_M} \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、総合発生電力量 W は

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 - W_3 \\ &= \sum 9.8 Q_T T_T H_T \eta_T \eta_G + \sum 9.8 Q_p T_p H_T \eta_T \eta_G \\ &\quad - \sum 9.8 \cdot Q_p \cdot T_p \cdot H_p / \eta_p \cdot \eta_M \end{aligned}$$

上部あるいは下部貯水池の水位の変動に従い H_T, H_p が変動し、また運転時間 T_T あるいは T_p は、せん頭あるいは非せん頭負荷の時間的關係および水車、ポンプの流量特性によって規定される。し

* 日立製作所日立工場

たがって落差あるいは揚程を季節的に区分けして、その時期に可能な運転時間を係数で表示すると、

$$W = \sum (\alpha Q_T + \beta Q_P) \eta_T \eta_G - \sum \gamma \cdot Q_P / \eta_P \cdot \eta_M \dots\dots\dots (5)$$

一般に揚水発電所の経済性を論ずる場合、揚水に利用する電力と発電の電力ではその価値が異なるために、 W に総合効率的性格をもたせるには、発電電力と揚水電力の価値をそれぞれ K_1 、 K_2 で表示すると、(5)式はさらに

$$W = \sum K_1 (\alpha Q_T + \beta Q_P) \eta_T \eta_G - \sum K_2 \cdot \gamma \cdot Q_P / \eta_P \cdot \eta_M \dots\dots\dots (5)'$$

となり、(5)' 式の W が最も大きくなるようなポンプ水車の特性が望ましいこととなる。揚水発電所を建設する以上、 K_1 は K_2 に対して常に大きくなるはずで、その程度は電力需給の面から算定されるべきものであるが、 $K_1/K_2=2\sim 5$ 程度の値になるとすれば、ポンプ水車の特性としてはポンプあるいは電動機の効率よりむしろ水車あるいは発電機の効率のほうが重視されることとなる。またこのような場合ポンプ特性としては揚水量の大きいほうが多少効率が低下しても、総合効率は大きくなることとわかる。特に純揚水発電所では揚水した水量だけしか発電に利用しえないという制限があるために、揚水量が発電の運転時間を規制することとなるので、高揚程時のポンプの揚水量を多くすることが望ましい。しかし揚水量をいたずらに大きくすることは電動機容量を大きくすることになり、機器製作上不経済となるので、これらの条件をも勘案して (5)' 式を基として総合経済性を計ることがポンプ水車の設計製作の基本となる。

揚水発電所の運転にあたり、上部貯水池と下部貯水池の容量は重要な意味を有するが、参考までに各所の貯水池容量を示すと第 1 表のとおりである。

3. 機器の選定

揚水発電所においてポンプ水車を採用するか、ポンプと水車を直結した直結式を採用するかは、計画にあたって最大の関心事であるが、ポンプ水車に対する研究が進み、その設計製作技術が日とともに進歩するに及んで、今では中落差領域まではポンプ水車を採用することが、経済的観点から論をまたない状態となってきた。したがって今後直結式か可逆式かを比較検討するのは 250~300 m 以上の地点においてのみなされることとなろう。

わが国において直結式の代表例は、東北電力株式会社沼沢沼発電所と九州電力株式会社諸塚発電所とであるが、いずれも落差揚程は 240 m 程度で、ポンプは二段式となっている。これをもし一段式のポンプとすればランナ外径が著しく大きくなり輸送制限の問題も生ずることとなるが、効率が向上し、かつ今ではランナを分割して製作することもできるので一段式も実現可能であり、さらに可逆式ポンプ水車にすることも当然考えられることである。

したがって、今後ますます可逆機に対する重要性が増加することとなろうが、従来ペルトン水車を使用してきたほどの高落差地点においてはやはり直結式が採用されることになるので、将来の揚水発電所がより高落差地点に重点がおかれることも考え合わせて、直結式の例も数多く出現するのではないかと予想される。

一方、低落差領域では斜流形ポンプ水車が多くの特色を有するこ

第 1 表 揚水発電所の貯水容量と利用水深

発 電 所 名	上 部 貯 水 池		下 部 貯 水 池	
	有効貯水量 (m^3)	利用水深 (m)	有効貯水量 (m^3)	利用水深 (m)
大 森 川	17.3×10^6	35	29.1×10^6	10.7
畑 薙 第 一	80×10^6	44	3.2×10^6	8
王 滝 川	68×10^6	48	—	—
城 山	3.2×10^6	28	51.2×10^6	29
矢 木 沢	171.5×10^6	53.5	3.52×10^6	5
沼 沢 沼	85.2×10^6	30	4.06×10^6	3
諸 塚	1.26×10^6	8	1.2×10^6	3

とから、フランシス形に代って各所で採用されようとしている。四国電力株式会社穴内川発電所は最初の斜流形ポンプ水車として注目されているが、可動翼であるために落差揚程の変動に対して流量、揚程がある程度自由に調節でき、かつ広い範囲に高い効率が得られるという特色がある。フランシス形と斜流形の特性の比較上最も重視されるのは、ポンプ運転に際し、フランシス形では揚程が与えられると、揚水量もほぼ決定的となるが、斜流形では高揚程側で羽根角度を立てることにより揚水量をも増大せしめることが可能である。また水車特性について両者を比較した例を示せば第 1 図のとおりである。第 1 図は落差約 70 m 程度のフランシス水車、フランシス形ポンプ水車および二種類の斜流形ポンプ水車の水車特性を示したもので、 N_1 (単位落差当り回転数)、 Q_1 (単位落差当り流量) をベースに、それぞれの機種等の等効率曲線による比較である。すなわちこの図から明らかなとおり、斜流形は落差の変化あるいは流量の変化に対し、広範囲に高い効率が得られることがわかる。

以上揚水発電所用機器として直結形、可逆式フランシス形、可逆式斜流形の特長を述べたが、これをまとめて比較すると第 2 表のとおりである。

第 2 表 各形式の特長比較表

	直 結 形	可逆フランシス形	可 逆 斜 流 形
適 用 落 差	200 m 以上	50~300 m	20~150 m
特 性	水車とポンプの特性は自由に選定できる。	水車とポンプの特性はお互に関連を有する。	水車とポンプの特性は関連はあるが、自由度が広い。
構 造	水車とポンプあるいは発電電動機との間に着脱可能のカップリングを必要とする。	最も簡単である。	ランナ羽根操作機構が複雑である。
ポンプの起動方式	水車による起動も可能で、充水中の起動が可能である。	空転起動とするため水面押下げが必要である。	起動時のトルクが少ないので充水起動が可能である。

第 3 表 各形式の寸法重量比較表

	直 結 形	可逆フランシス形	可 逆 斜 流 形
	立軸、落差 250 m、容量 50,000 kW の場合		
形 式	二段式ポンプ直結	単段ポンプ水車	
回 転 数	300 rpm	300 rpm	
ラ ン ナ 径	水 車 2,770mm ポンプ 3,300mm	4,150 mm	
総 軸 長	30m	12m	
ポンプ押込揚程	— 7 m (ポンプに必要な値)	— 10m	
重 量 (%)	170~200	100	
		落差 60m、容量 50,000 kW の場合	
形 式		単段ポンプ水車	単段斜流ポンプ水車
回 転 数		150 rpm	187.5 rpm
ラ ン ナ 径		4,880 mm	4,080 mm
ポンプ押込揚程		— 5.5	— 10
重 量 (%)		100	90~110

注：重量比較中には発電電動機の重量は含まず。

また各機種の選定にあたり、大まかな比較として同一仕様に対する寸法重量比較を示せば第 3 表のとおりである。

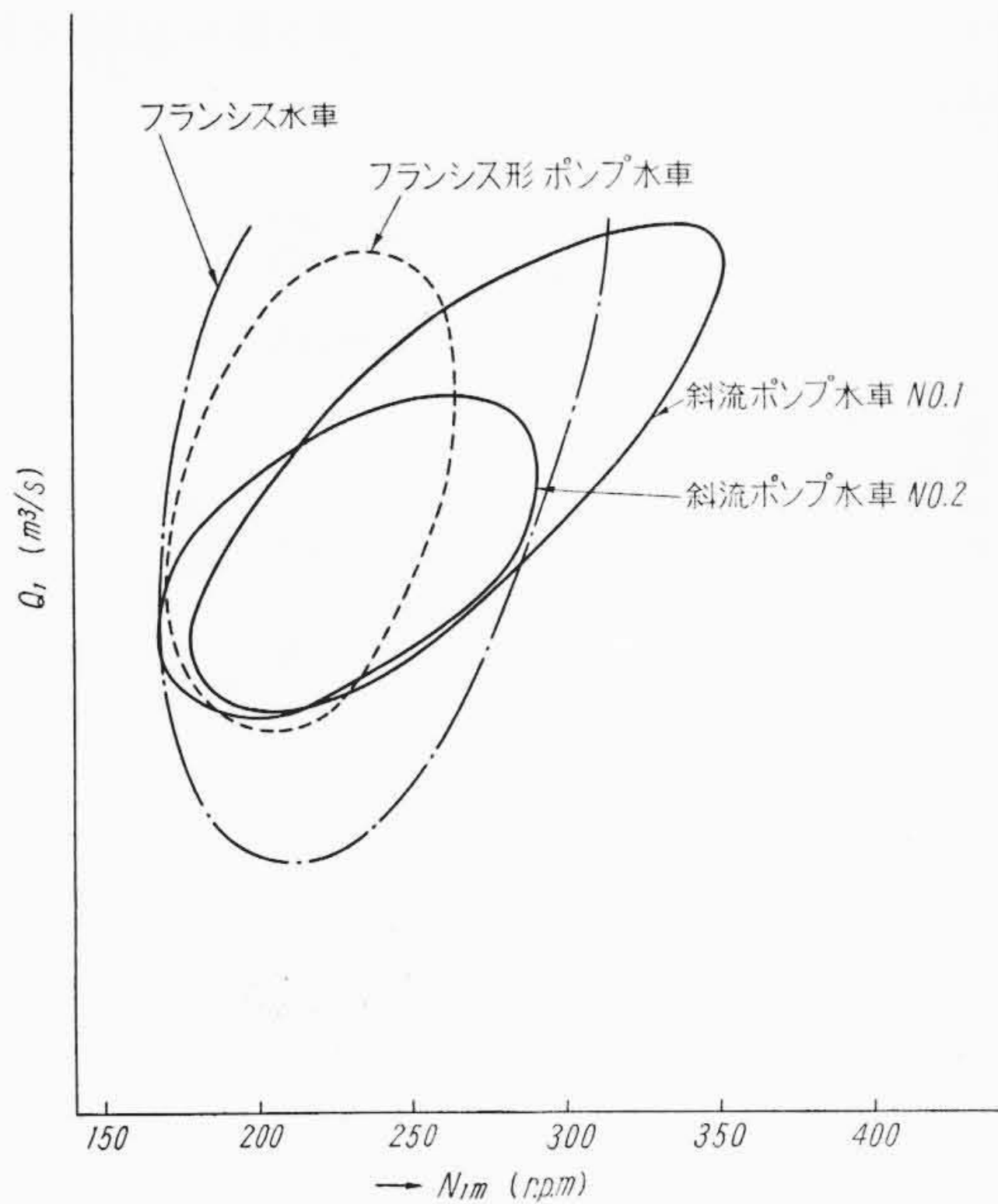
さらに機器の選定にあたり過去の実績は重要な意味をもつものであるが、わが国における揚水発電所の実例とその仕様を示すと第 2 表のとおりである。

4. フランシス形ポンプ水車を用いた発電所

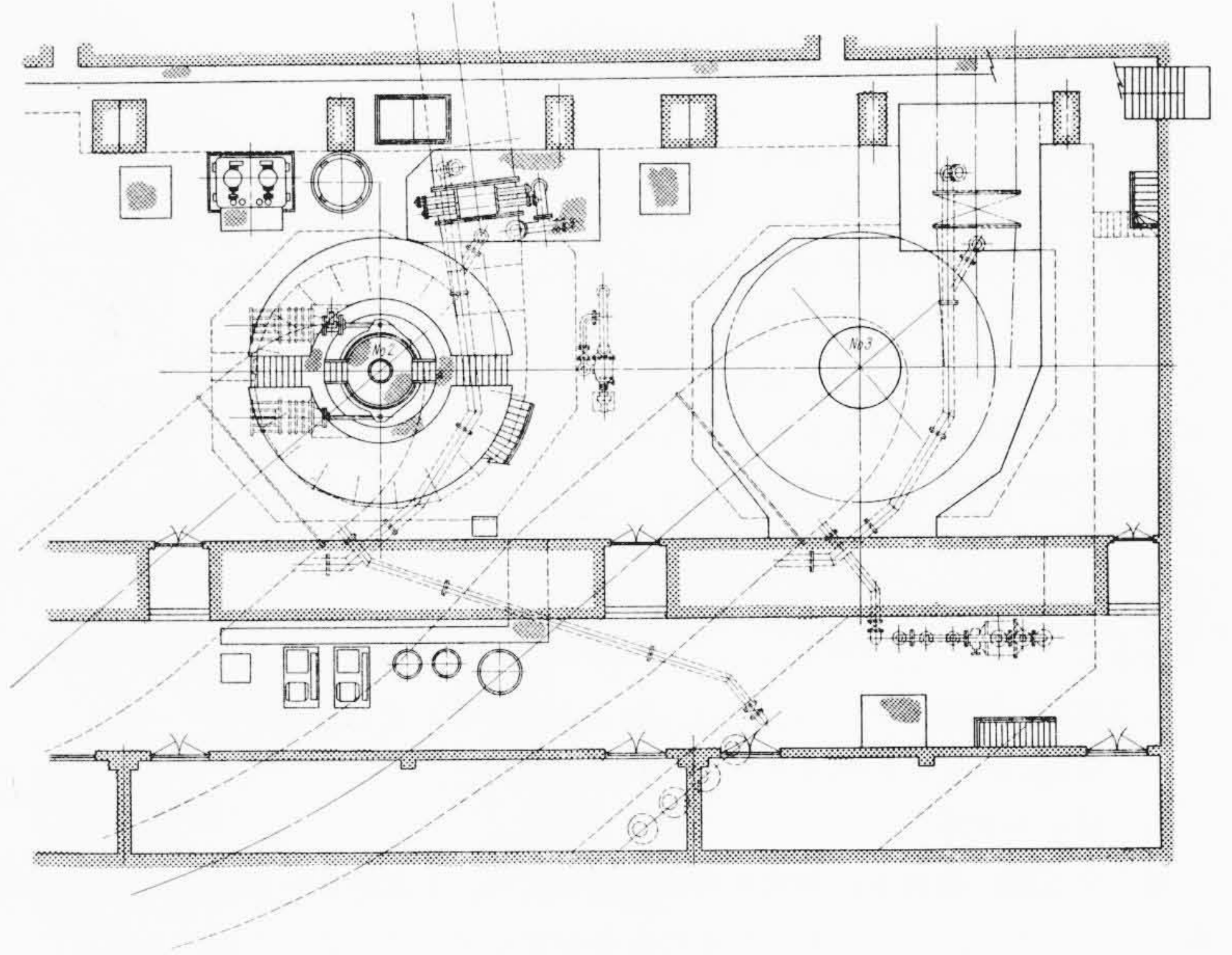
フランシス形ポンプ水車を用いた発電所は大森川発電所の建設以降すでに数箇所達しているが、ますます大容量化の傾向をとりつつあるので、近い将来単機容量 10 万 kW をこえるポンプ水車も実現することであろう。

第4表 揚水発電所主機仕様比較表

発 電 所 名		沼 沢 沼	諸 塚	大 森 川	畑 薙	穴 内 川	王 滝 川	矢 木 沢	城 山
形 式		直結横軸式 2	直結立軸式 1	フランシス形 可逆式 1	フランシス形 可逆式 3	斜流形 可逆 式 1	フランシス形 可逆式 1	フランシス形 可逆式 3	フランシス形 可逆式 4
水車仕様	出 力 (kW)	23,000	54,000	12,200	45,500	13,500	36,000	100,000	65,300
	最高落差 (m)	215.5	226	118	101.8	69.5	137	111	181.4
	回 転 数 (rpm)	590/600	300	400	200	360	277	150	273
ポンプ仕様	揚 水 量	8.85	18.6	13.0	50.0	13.0	28.5	107.5	44.1
	最高揚程	226.2	241.4	127.8	103.2	75.0	143	112	186.2
	回 転 数	590	300	400	200	360	277	150	300
発電機仕様	容 量	23,000	58,000	14,000	50,000/45,000	14,500	37,000/33,000	85,000	70,000
	電 圧	11,000	11,000	11,000	11,000/10,000	6,600	11,000/10,000	13,200	20,000
	極 数	12	24	16	36	20	26	48	22
電動機仕様	容 量	23,000	56,500	15,000	46,500	14,000	37,000	82,000	70,000
	電 圧	11,000	11,000	11,000	11,000	6,600	10,500	12,000	19,000
	極 数	12	24	16	36	20	26	48	20
製 作 者		日 立	日 立	日 立	2台一日立 1台-AC社 および富士	日 立	日 立	1台一日立 2台-AC社 および東芝	2台一日立 2台-東 芝
運 転 開 始		昭 和 27 年	昭 和 35 年	昭 和 34 年	昭 和 37 年	昭 和 38 年	昭 和 37 年	昭 和 41 年	昭 和 39 年



第1図 各形式の水車特性



第2図 畑薙第一発電所据付平面図

(1) 大森川発電所

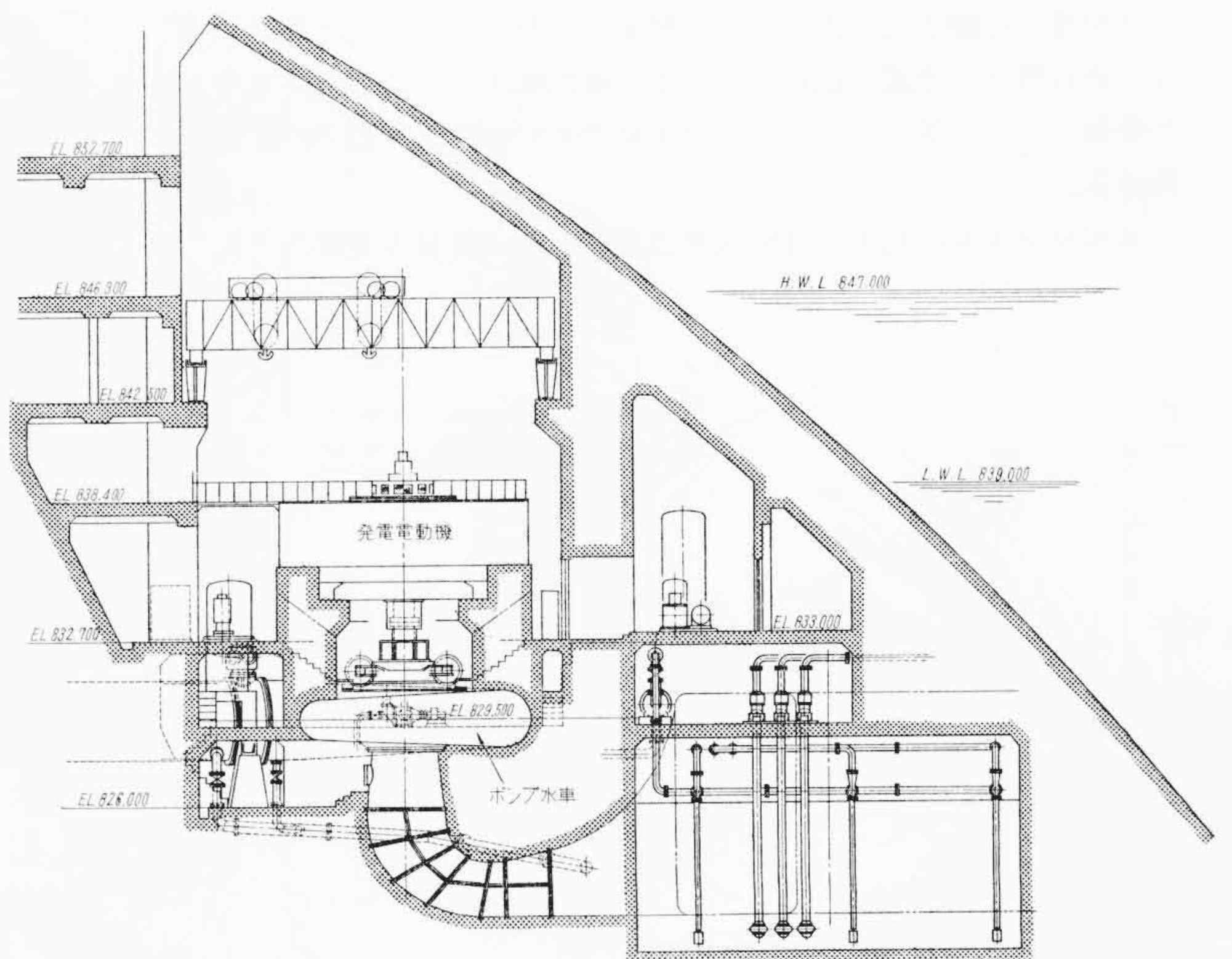
四国電力株式会社大森川発電所用ポンプ水車についてはすでに数多く紹介されているが、昭和34年8月以降好調な運転を続けている。運転後約2年間の発電運転が約3,500時間、揚水運転が約1,300時間で、揚水運転の回数は約300回に及んでいる。

本発電所の特長をあげると下記のとおりである。

- (a) 余剰電力をもって揚水するという考えから、効率は水車に重点をおいた。
- (b) 落差揚程とも100mをこえ、当時としては高落差、高揚程の記録品である。
- (c) ポンプ起動にあたり、渦巻きケーシングを含めて水面押下げを行なうが、ポンプ充水時、案内羽根の小開起動方式を採用している。したがって非常に静粛なポンプ起動が可能となっている。

(2) 畑薙第一発電所

本発電所はホロー、グラビティダムの中に設けた揚水発電所で3台のポンプ水車が設置されるが、2、3号機を日立製作所が納入する。機器の配置関係は第



2 図および第 3 図に示すとおりで、本ポンプ水車の特長は下記のとおりである。

- (a) 落差揚程の変動範囲が最高 100 m から最低 50 m まで大きく変動する。
- (b) 水車、ポンプとも比較的高落差高揚程側に効率の重点がおかれた。
- (c) 水車、ポンプとも最大流量は約 50 m³/s であり、落差揚程の変動範囲が大きいので、ポンプの所要軸馬力は水車最大出力の約 80% 程度となっている。
- (d) 輸送限界が比較的小さいため渦巻きケーシングは現地溶接構造とし、ランナはボルト締めで 2 分割構造である。
- (e) 1, 2, 3 号で吸出し管長はそれぞれ異なるが、3 号機では最も長く、約 60 m に達する。このため模型による種々の振動試験が実施された。

本発電所においては年間発生電力量の計算にあたり、ポンプ運転に利用できる電力量を与えて、次のような方式をもってポンプ水車特性の改善が行なわれた。すなわち

$$W = W_1 + W_2$$

$$= \sum \eta_T \eta_G (\alpha Q_T T_T H_T + \beta W_P \eta_P \eta_M)$$

(3) 王滝川発電所

本発電所の仕様は落差揚程とも大森川発電所と近似しており、ポンプ水車としては、特に変わった点はないが、鉄管側および放水路側にそれぞれサージタンクを有しており、ポンプ起動にあたり、特に下部サージタンクの水位が著しく低下するという現象が生ずる。このため種々の起動方法が検討されたが、その結果の一部を示すと第 4 図のとおりである。すなわちポンプ起動にあたり、案内羽根の開時間をある程度長くすることにより下部貯水池の異常水位低下は防げることとなる。下部サージタンクの水位変動は押込水位の変動を意味し、ポンプ運転に対し重要な意義をもつものである。

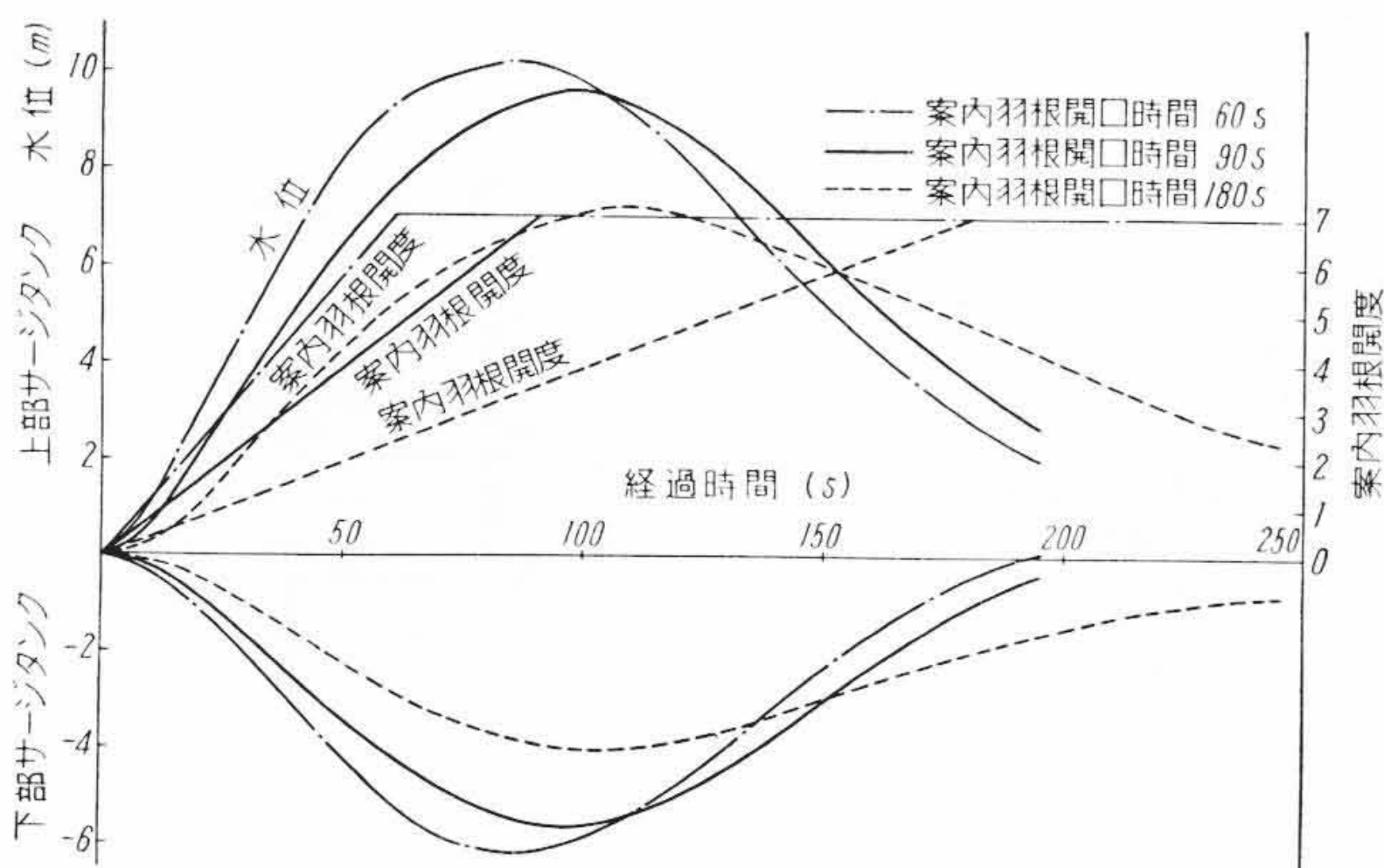
本発電所の運転効率については、揚水に消費する電力量も考慮して、前述(5)式に相当する計算式が採用された。

(4) 城山発電所

城山発電所は純揚水式発電所の代表例であり、上部貯水池が比較的小さいため、日々揚水した水のみを発電に使用することとなる。また最高揚程は 180 m に達し、ポンプ水車としては記録的製品である。

本発電所は地下式であるため、建家の面積をできるだけ減少するための種々の考慮が払われている。また吸出し管は地下発電所の特長として非常に長く、サージタンクまでの距離は約 100 m に達する。

本ポンプ水車に対する運転効率は自流のない純揚水発電所であ



第 4 図 ポンプ起動時におけるサージタンクの水位変化の一例

るため(5)式の第一項は零となり、

$$W = W_2 - W_3$$

なる形の計算式が採用される。

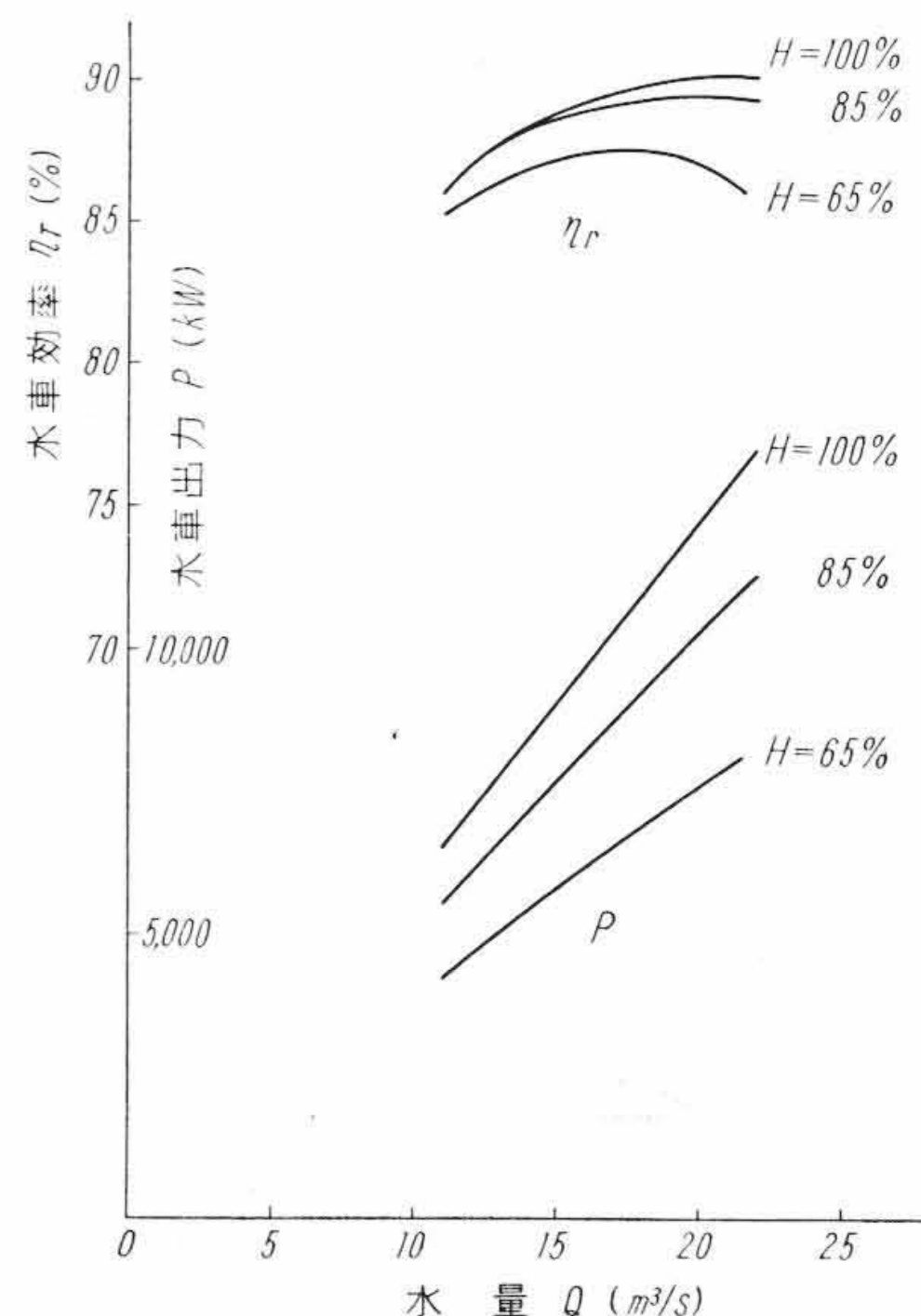
5. 斜流形ポンプ水車を用いた発電所

斜流形ポンプの最初は Sir Adam Beck 発電所に納入され、1958 年より運転にはいっている。わが国では四国電力株式会社穴内川発電所が最初のものである。

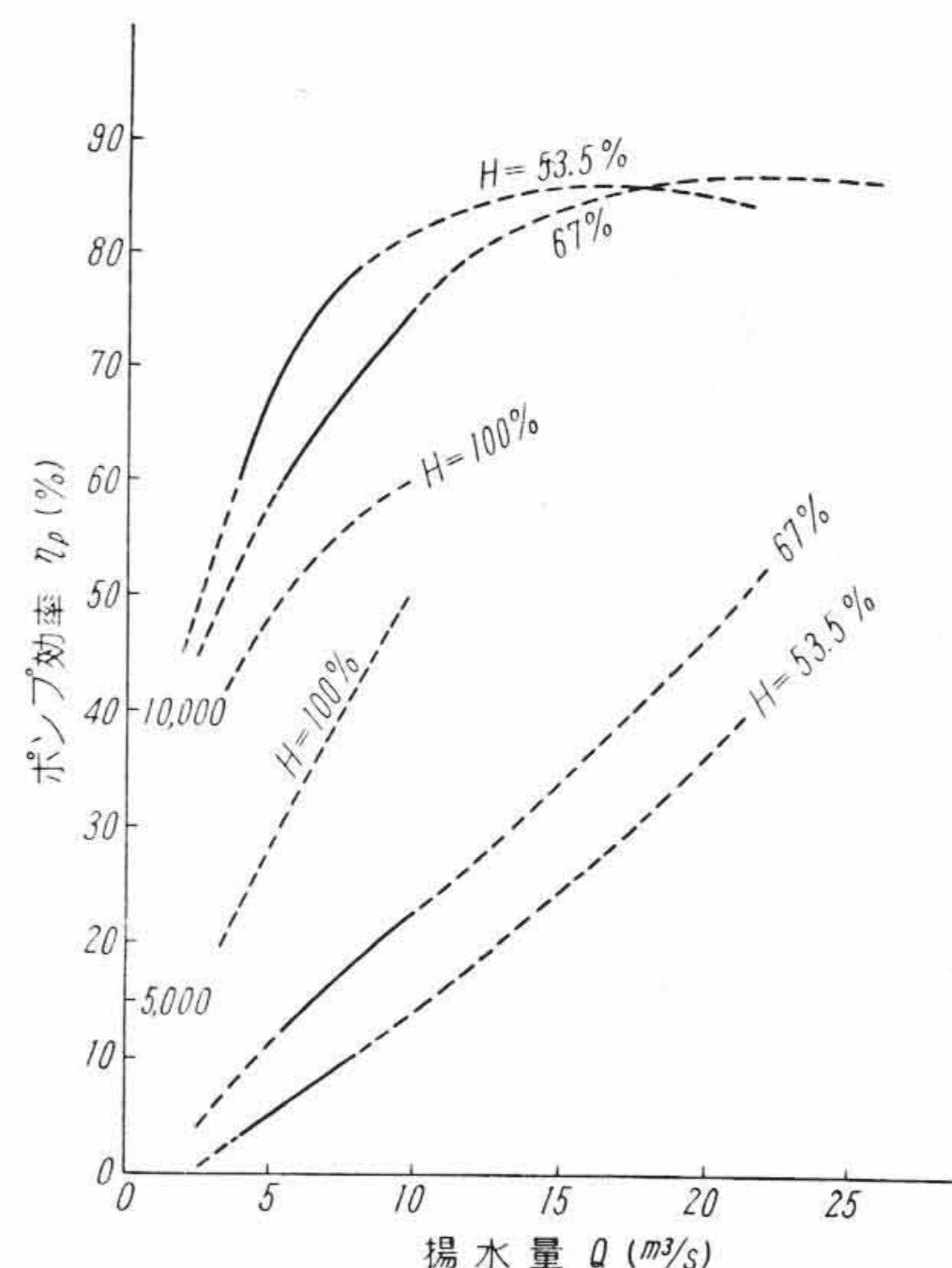
穴内川発電所用斜流ポンプ水車の特長は下記のとおりである。

- (a) 落差は水車として最高 69.5 m から最低 31.5 m まで、揚程は最高 75 m から最低 40 m まで大きく変る変落差発電所である。
- (b) 発電運転に重点がおかれているため水車性能を主体としてポンプ性能は従と考える。
- (c) ポンプ運転のために特にポンプ水車中心を下げることなく逆にポンプのキャビテーション特性から可能な範囲で揚水を行なう。
- (d) 水車、ポンプとも同一速度の運転を行なう。

本発電所のポンプ水車の概略の特性を示すと第 5 図および第 6 図のとおりである。



第 5 図 四国電力株式会社穴内川発電所用斜流ポンプ水車の水車特性



第 6 図 四国電力株式会社穴内川発電所用斜流ポンプ水車のポンプ特性

斜流ポンプ水車においては羽根角度が可動であるため、構造上種々の問題を含んでおり、また主軸の上下の変位が羽根先端と固定側との間げきを直接左右するので、組立上および保守上特別な注意が必要である。しかし、これらの問題はすでに運転にはいった東北電力株式会社新大倉発電所用 5,500 kW 斜流水車によって、十分満足な結果が実証されている。

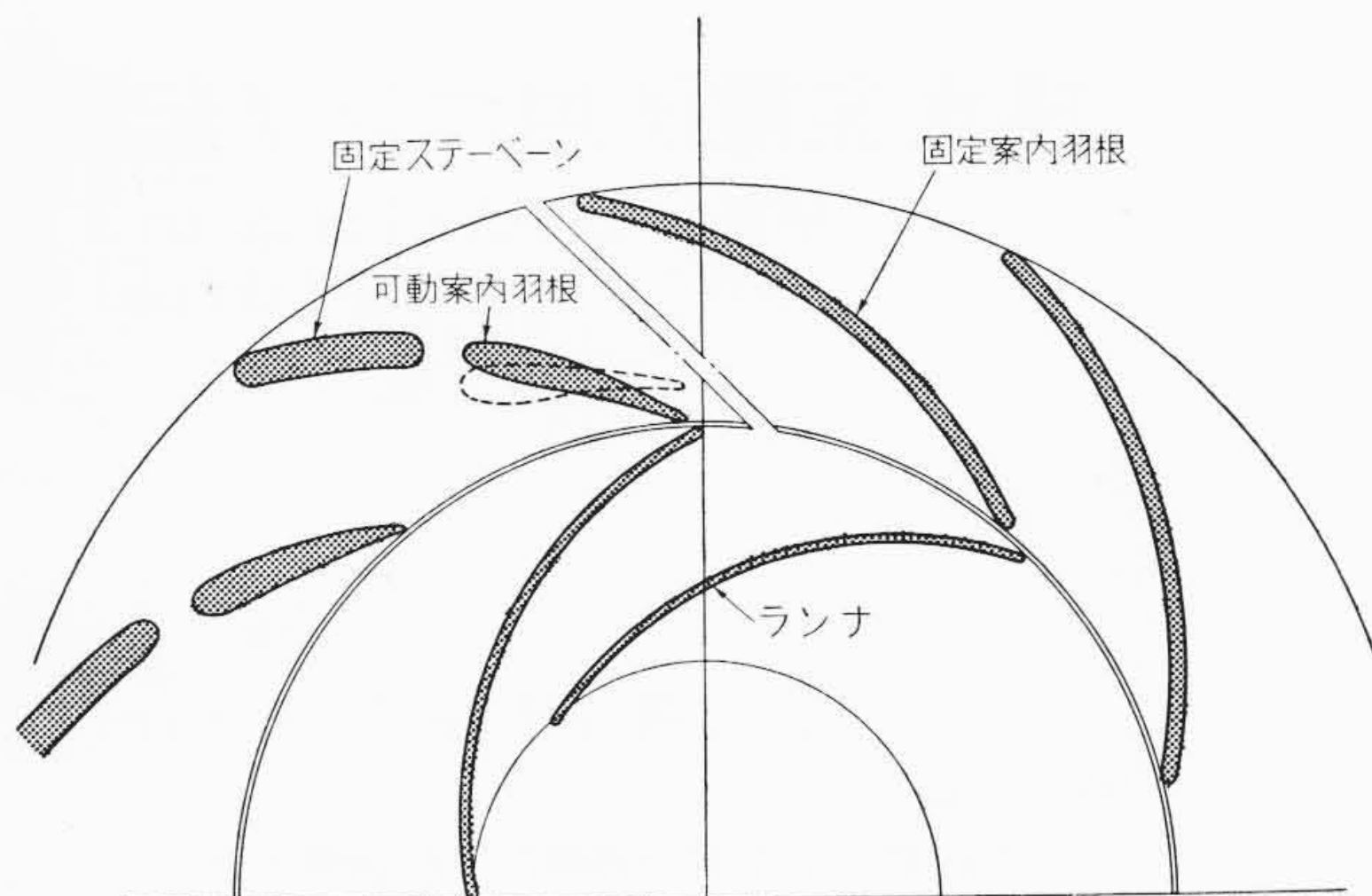
6. ポンプ水車の起動

揚水発電所の運転に際し、最も関心の払われるのはポンプの起動であり、また起動時の振動である。直結式のポンプでは一般に案内羽根は固定としているため起動に際し、吐出弁を全閉しておく、締切り運転となり、かなりの振動を生ずることとなる。この締切り運転を避けるため沼沢沼、諸塚発電所などではいわゆる予開起動方式がとられている。しかし可逆ポンプ水車では案内羽根が可動であるため起動の状態は通常のポンプと著しく異なる。すなわちポンプ水車ではポンプ充水時に案内羽根を大きな開度に保持しておく、固定案内羽根をもったポンプと同様かなりの振動を生じ、かつケーシング内に大きな水圧上昇が起こるが、充水時に案内羽根を小開の状態にしておけば水圧上昇も起こらず静かな充水が可能である。第7図は固定案内羽根を有する通常のポンプと、可動案内羽根をもったポンプ水車のランナ羽根と案内羽根との関係を比較したものであり、さらに第8図は締切り付近における案内羽根開度の異なる場合の消費軸馬力を示したものである。すなわち締切り付近で、案内羽根開度を大きくしておく、いたずらに大きな動力を消費すると同時にこの大きなエネルギーの一部が振動となって現われることも必然である。

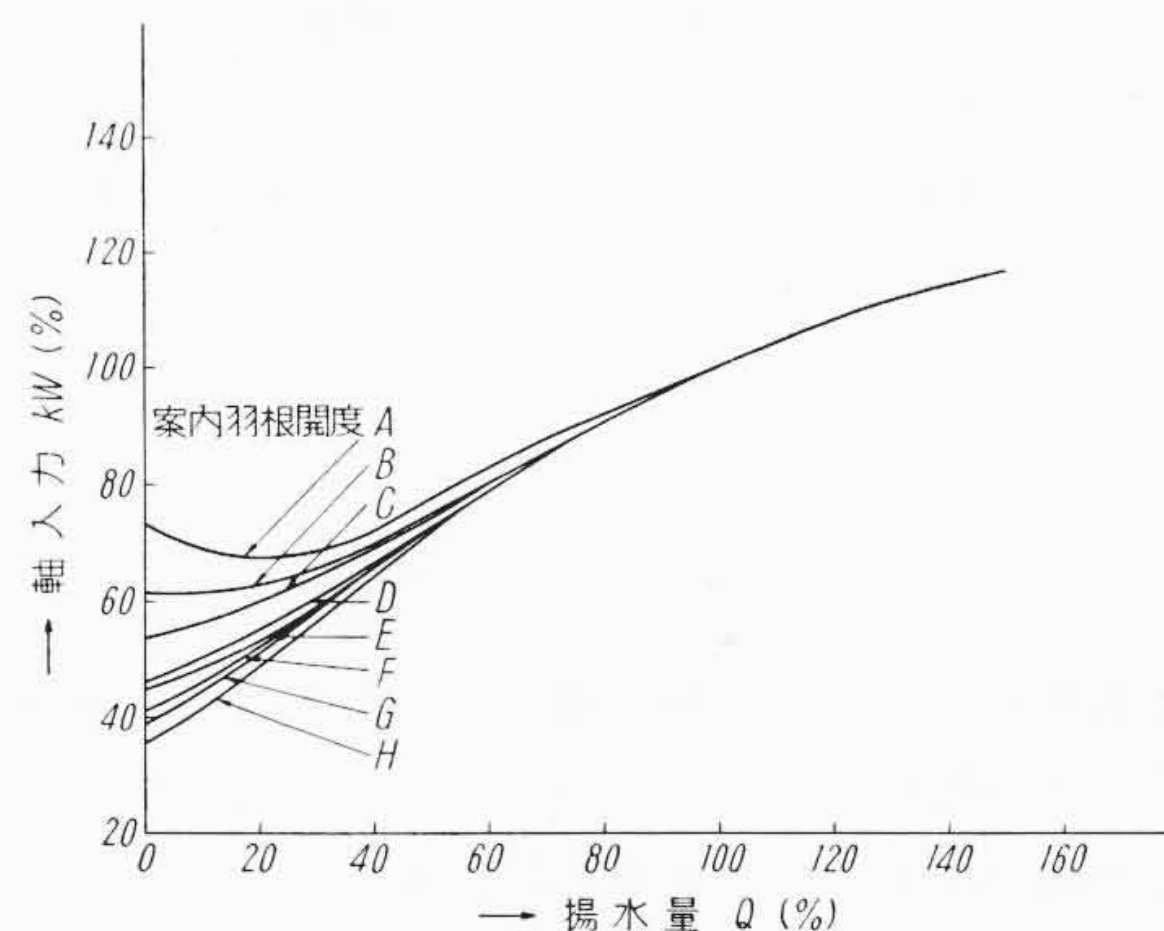
斜流ポンプ水車においてはポンプの起動はさらに容易であり、ランナ羽根を全閉することにより、充水中でも起動し、かつ規定回転まであげることが可能である。ランナ羽根全閉時の消費効力は羽根形状によっても異なるが、羽根角度が異なる場合の消費動力の一例を示せば第9図のとおりである。

7. 結 言

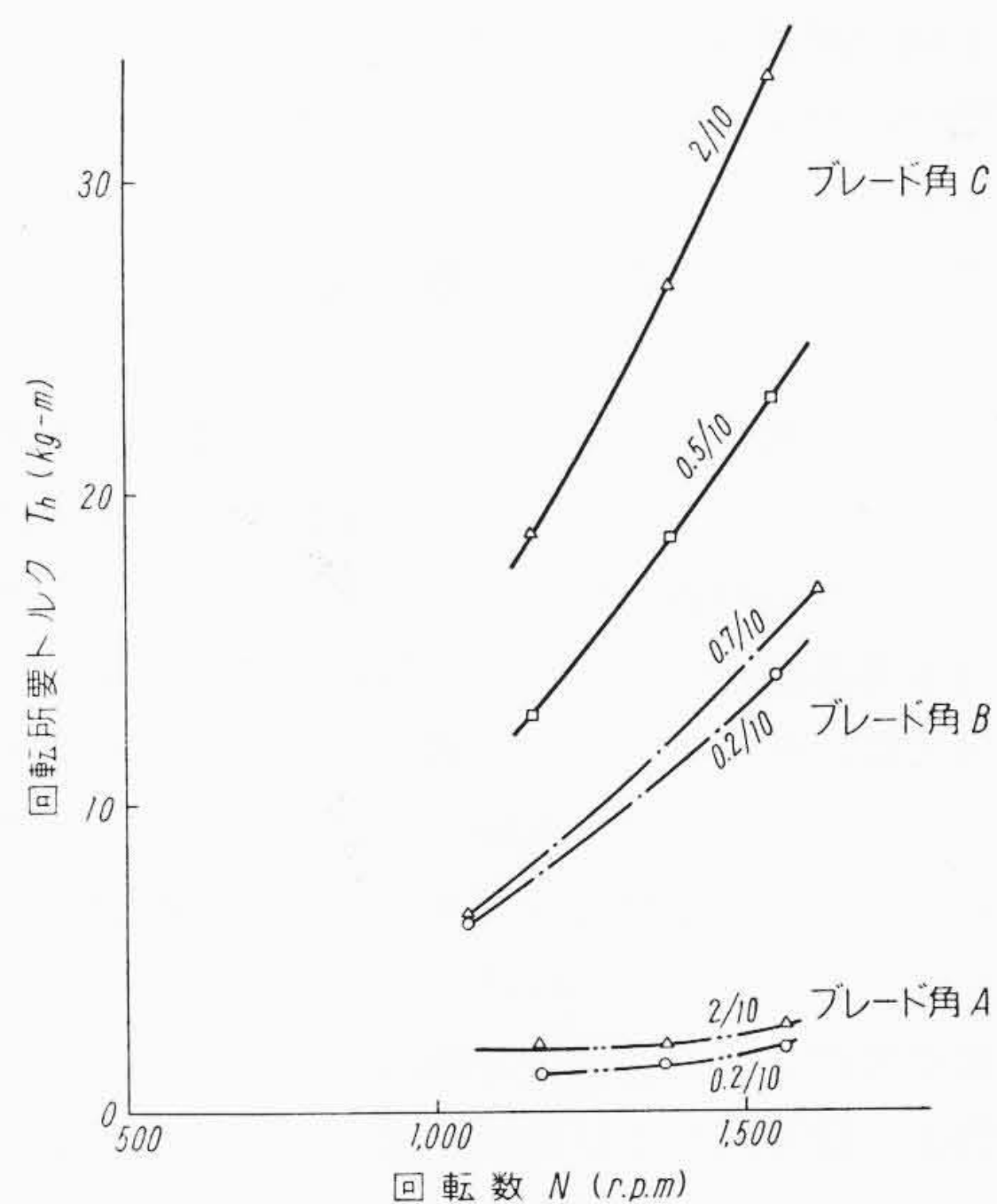
揚水発電所に対しては、現在直結形ポンプ水車、フランス形ポンプ水車、斜流形ポンプ水車などが用いられているが、これらの形式のいずれを採用するかは運転効率、機器の経済性などをそれぞれの発電所の仕様に対して十分比較検討したうえで決定されねばならぬ。本稿では運転効率計算の基本となる発生電力量の考え方および機器選定にあたって考慮すべき点について述べたが、要は総合的な経済性を計るために、場合場合に応じて、運転仕様に最も適するポンプ水車の研究が必要であろう。また将来揚水発電所はより高落差の方向にむかうであろうと考えられ、多段式のポンプ水車も近い将来実現するのではないかと予想される。



第7図 固定案内羽根と可動案内羽根の比較



第8図 案内羽根開度別軸入力曲線



第9図 斜流形ポンプ水車の有水時回転所要トルク測定結果の一例