

東京電力株式会社矢木沢発電所納 87,000kW ポンプ水車および 85,000kVA 発電電動機

87,000 kW Reversible Pump-Turbine and 85,000 kVA Generator-Motor for
the Yagisawa Power Station, Tokyo Electric Power Co., Inc.

外岡英徳* 長沼進* 永田一良*
Hidenori Tonooka Susumu Naganuma Kazuyoshi Nagata

内 容 梗 概

東京電力株式会社矢木沢発電所は当初貯水池式の発電所であったが、昭和32年頃より揚水の構想がとり入れられ、種々検討の結果ポンプ水車3台を設置し、最大出力 210,000 kW の方針が確立された。ポンプ水車を用いる揚水発電所の計画にあたっては、使用者側と機器の製作者側との密接な協力が必要であり、仕様決定にあたり東京電力株式会社と日立製作所の間で共同研究会が組織され、約1年半にわたる検討が行なわれた。これらの検討内容とともに、可逆ポンプ水車および発電電動機の仕様などについて述べる。

1. 緒 言

揚水発電所の計画に際しては、その特異性から計画の当初より使用者側と製作者側とが協力して検討を行なうことが望まれる。矢木沢発電所についても、揚水発電設備を信頼度が高く、高性能かつ経済的に設計するため、これに必要な揚水発電用機器の仕様およびその配置などについての基礎資料を得る目的で共同研究が行なわれ、昭和35年3月より研究会が発足した。

2. 概 要

2.1 計画の概要

八木沢地点は利根川最上流に位置する大容量貯水池地点であり、発電のほか農業、水道両用水の目的にも利用するため、群馬県、東京都、東京電力株式会社の三者で総合的な開発計画を進めていたが、昭和33年末にはこれに洪水調節能力を加え、さらに下流かんがい区域への用水補給をあわせた多目的ダムとして、建設省がダムの建設を担当することになり、35年度より本格的準備工事が開始された(38年に水資源開発公団に引きつがれた)。

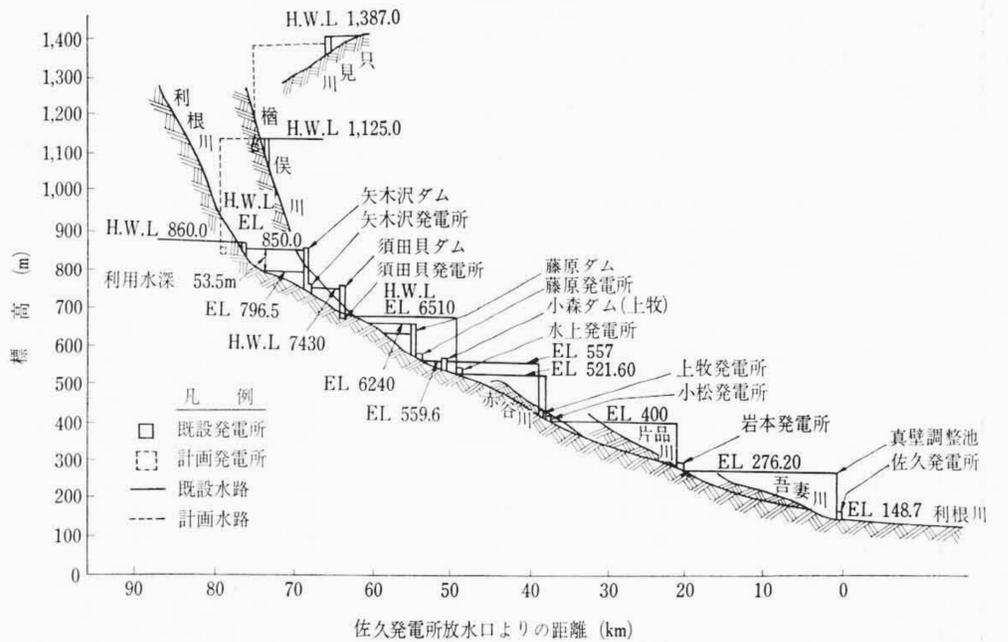
ダムは東京電力株式会社既設須田貝発電所の調整地最終端付近に位置する高さ131mのアーチダムで、総貯水量 $204.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、発電用有設貯水量 $153.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ の容量を有し、ダム直下に発電所が設けられる。その計画概要は次のとおりである。第1, 2図は矢木沢発電所付近の水系を示す。

(1) ダム

- (a) 取水河川 利根川水系利根川
- (b) 流域面積 167.4 km^2
- (c) 位置
地名 群馬県利根郡水上町大字
藤原字矢木沢
最寄駅 上越線水上駅および湯
曾駅
- (d) ダム形式
形式 アーチ式コンクリート造
(水資源開発公団施工)



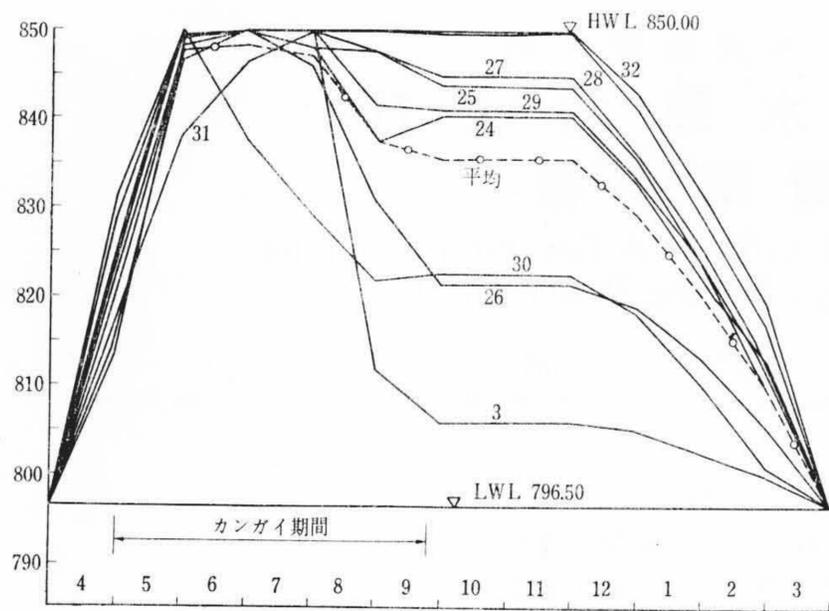
第1図 矢木沢発電所付近水系一覧図



発電所名	最大出力 (kW)	最大使用水量 (c. m. s)	有効落差 (m)	運転開始年月
矢木沢	240,000	300.0	91.5	昭和 39-11 昭和 40-11
須田貝	46,000	65.0	83.0	昭和 30- 9
水上	13,600	16.7	127.4	昭和 28- 8
藤原	21,600	23.7	92.32	昭和 31-12
小松	12,700	14.0	113.6	大正 11-11
上牧	30,000	25.0	143.4	昭和 33-12
岩本	27,300	30.5	108.3	昭和 24- 3
佐久	66,000	69.0	118.8	昭和 3-11

第2図 奥利根河川縦断面図

* 日立製作所日立工場



第3図 矢木沢貯水池水位曲線

堤 高 131 m
 堤 頂 長 402 m
 堤 体 積 690,000 m³

(e) 上部貯水池 (矢木沢)

総貯水量 204,300,000 m³
 有設貯水量 153,700,000 m³ (発電用)
 利用水深 53.5 m (ポンプ運転時 45 m)
 常時満水位 EL 850,000
 湛水面積 5.67 km²

(f) 下部貯水池 (須田貝)

有設容量 6,000,000 m³

利用水深 5 m

常時満水位 EL 742,632

なお、矢木沢では発電のほか、次の事業が行なわれる。

(a) 治水事業

常時満水位 EL 850,000 より上 4.5 m の容量 22,100,000 m³ を利用して洪水調節を行ない、八斗島における洪水量を 200 m³/s 軽減する。

(b) かんがい

融雪を本貯水池にためて夏季渇水時に放流し、下流利根川沿線 8,100 町歩の農地に対し、かんがい用水の補強を行なう。

(c) 水道

東京都の水道需要の増加に伴い新規水源を本貯水池に求めるもの。

(2) 発電所の規模

当初の規模は 70,000 kW × 3 台, 210,000 kW, 最大使用水量 300 m³/s であったが、運転仕様に対してポンプ水車の特性をどのように決定するか、一速度か、二速度かなど多くの問題があるので、機器としては単機容量 70,000 kW に限定することなく、経済的容量の決定に検討が加えられた。

(3) 貯水池の水位曲線

矢木沢貯水池の水位曲線を第3図に示す。

(4) 運転方法に関する基本事項

貯水池の使用は年間調整とし、揚水は日間調整とする。この場合発電時の水量と揚水時の水量の関係は、各時期の日々において3台で発電に使用した水量から下流への放流量を差引いた水量を3台で揚水することとし、式で表わせば次のとおりである。

$$3 Q_T h_T - 24 q \leq 3 Q_P h_P \dots\dots\dots (1)$$

第1表 機器名案比較表

案	A		B		C		D		E		F		G	
	一速度	72 MW	一速度	72 MW	二速度	72 MW	一速度	100 MW	一速度	100 MW	二速度	100 MW	一速度	120 MW
形式	フランシス可逆式													
最大出力 (kW)	72,000													
最高落差 (m)	109													
最低落差 (m)	55.5													
流量 (81 m にて) (m ³ /s)	103.1													
回転数 (rpm)	150													
所要動力 (kW)	76,600													
最高揚程 (m)	114													
最低揚程 (m)	60													
最大揚水量 (m ³ /s)	105.5													
回転数 (rpm)	150													
大略押込揚程 (m)	-8.5													
ランナ径 (mm)	5,500													
ケーシング入口径 (mm)	4,000													
主軸重量 (t)	27													
発電機容量 (kVA)	75,000													
発電機出力 (kW)	78,000													
発電機力率	0.9													
電動機力率	1.0													
周波数 (c/s)	50													
極数	40													
形式	立軸かさ形													
t 30 制限	最大重量物	シャフトカラ												
	最大輸送重量 (t)	29												
t 50 制限	最大寸法物	固定子わく 1,300 × 3,100 × 4,700												
	最大荷造寸法 (mm)	固定子 36												
概略クレーン容量 (t)	最大重量物	固定子 36												
	最大輸送重量 (t)	固定子 35												
t 50 制限	最大寸法物	固定子 1,500 × 3,500 × 4,700												
	最大荷造寸法 (mm)	固定子 35												

- Q_T : 各落差における発電時の使用水量 (m³/s)
- Q_P : 上記落差に対応する揚程における揚水量 (m³/s)
- h_T : 発電時間 (h)
- h_P : 揚水時間 (h)
- q : 下流への放流量 (m³/s)

h_T, h_P については需給面より、それぞれ5時間および7時間以内とすることになった。

したがって(1)式において $h_T=5, h_P=7$ とおけば

$$Q_T - 1.6q \leq 1.4Q_P \dots\dots\dots (2)$$

またポンプ水車の設計は水車に重点がおかれることとなった。

3. ポンプ水車

3.1 ポンプ水車の仕様

(1) 出力

単機容量については第1表のようなA~G案について、主としてポンプ水車の性能の比較検討が行なわれ、さらに模型試験結果をもとにして、水車出力に見合う発電機出力とした案(H案)電動機出力に見合う発電機出力とし、水車出力を制限する案(I, J案)あるいは発電機を二重定格にする案(K案)などについて検討が行なわれた結果最終的には80,000 kW, 使用最大水量 100 m³/s, 一速度のポンプ水車3台, 総出力 240,000 kW と決定された。

(2) 回転数

本発電所の場合地形上の制約から吸出高さ(吸込高さ)は-10m程度で押える必要があり、回転数は150 rpmが最も適当であり、また二速度式に対する検討も行なわれたが、本発電所の場合は経済的効果も少なく、また大容量二速度機の実例がない点から、150 rpm一速度を採用することに決定した。

(3) 利用水深

利用水深については53.5, 50, 45, 40 mのそれぞれにつき検討され、利用水深を縮小するほうが得策であるとの結論になったが、矢木沢ダムは多目的ダムであり、対外的関連もあるため計画どおり53.5 mとされた。

(4) 発生電力量の検討

発生電力量の検討は次の式によった。

$$\text{総発生電力量}(W) = \text{自流分}(W_1) + \text{揚水分}(W_2)$$

$$W_1 = \sum H_{sti} \times 24 q_i \times \eta_{ti}$$

$$W_2 = \sum H_{sti} \times (15 Q_{ti} - 24 q_i) \eta_{ti}$$

$$\therefore W = W_1 + W_2 = \sum H_{sti} \times \eta_{ti} \times 15 Q_{ti}$$

ただし、 H_{sti} : 各月別平均水位(静落差)

η_{ti} : H_{sti} における水車効率

q_i : 自流分水量

Q_{ti} : H_{sti} における水車使用水量

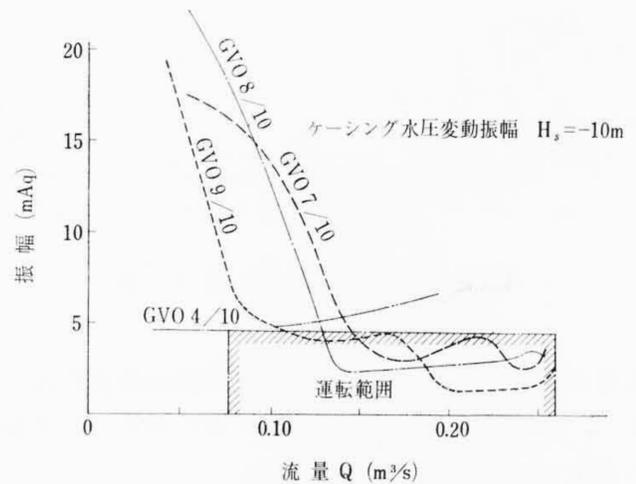
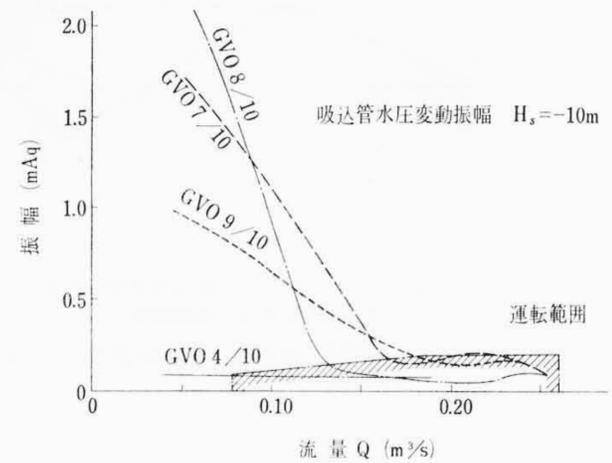
$15 Q_{ti} - 24 q_i$: 揚水分水量

上述計算式により一速度と二速度の比較、利用水深の影響、機械容量の検討などが行なわれた。

以上のような検討の結果、ポンプ水車の仕様は次のように決定された。

(a) 水車運転時

	有効落差	出力
基準	97m	87,000 kW
最高	111m	87,000 kW (制限)
最低	53m	33,500 kW
使用水量	有効落差 81~97 m にて 100 m ³ /s とし、97m 以上では出力を一定とし、流量を制限する。	
出力	基準落差 97 m において 87,000 kW,	



第4図 水圧変動モデル試験結果の一例 (通常運転は必ず図中のハッチング内で行なわれる。)

97 m 以上では 87,000 kW に制限する。

(b) ポンプ運転時

基準	最高	最低	揚程	流量 (m ³ /s)
標準	最高	最低	85 m	80 以上
最高	最高	最低	112.5 m	32 以上
最低	最低	最低	63 m	104 以上
回転数	150 rpm (水車, ポンプとも)			

3.2 ポンプ水車の運転特性

ポンプ水車では普通水車に比べ、ランナ直径が大きくなり、かつポンプ運転が行なわれるために、種々の配慮が必要となるが、特に落差揚程の変動範囲が大きい場合、普通水車以上に水力的に過酷な条件となる。すなわち、

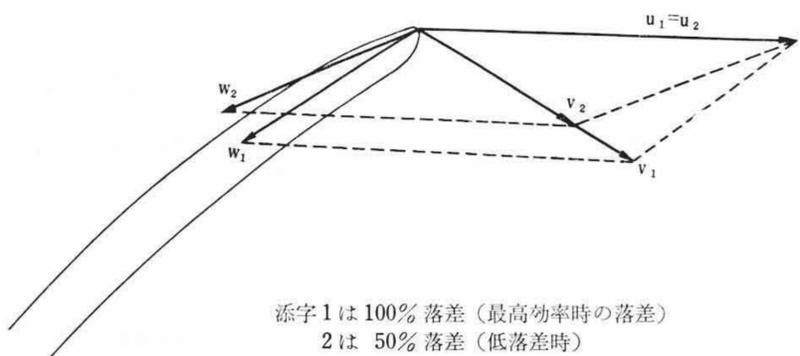
- (a) 水車低落差時
- (b) ポンプ高揚程時
- (c) ポンプ低揚程時

については、ランナの出入口における衝撃損失およびキャビテーション条件などより注意を要する。

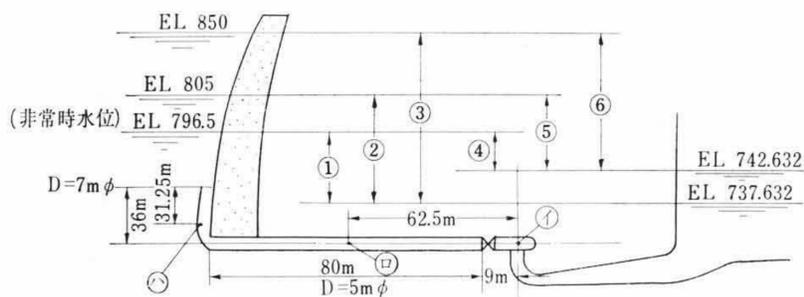
(1) ポンプの平常運転時の水圧脈動

モデルによる実揚程試験時のケーシングおよび吸込管内の水圧動揺の測定結果を第4図に示す。実物の場合はコンクリート中に埋込まれるため、これらに起因する機械振動については模型試験の状態とは必ずしも一致しないが、水力的振動はある程度の相似性があるものとみられ、参考までに高揚程、少量時に案内羽根開度が適正でない場合も示す。図中ハッチングの範囲外の開度の運転はあり得ないものであって、従来より各ポンプ水車について同様の横形試験を行ない、実物運転時の予想を立てており、本例につきこれらの一例を示した。なおポンプ起動時などにおける水圧動揺はこれらと多少異なったものとなっている。

實際上可動案内羽根を有するポンプ水車にては、揚程に応じた適正開度で運転するが、揚水量の小さい場合(高揚程時)、あるいは



第 5 図 水車運転時入口速度三角形



第 6 図 水圧鉄管路略図

は揚水量の大きい場合（低揚程時）は包絡線特性においても効率が低下し、この効率低下分の損失の一部が振動として表われることは普通水車におけると同様である。

(2) 水車運転時の振動

普通水車においても変落差範囲の大きい場合振動に対し十分な検討を要するが、ポンプ水車においてはランナ直径が大きいために、特に低落差時においては、ランナに流入する水の速度がランナ羽根角度と一致しなくなるために、羽根入口部で衝撃が生じ、これが振動の原因となる。いま最高効率を出す落差に対し50%落差が下がった場合の羽根入口部における流速の変化の一例を示すと第5図のとおりであり、低落差時の衝撃流れの様相がわかる。したがって、変落差範囲の大きな場合は、この影響をさけるためポンプ水車の設計上特別の配慮が必要となる。

(3) ポンプ運転に対する鉄管の負圧

ポンプ水車用の鉄管において考慮すべき事項として、ポンプ運転時にポンプトリップ現象や急激な揚水停止などが行なわれた場合に、鉄管の各部における水圧変動、特に負圧の程度につき検討した。

鉄管の条件は第6図のとおりである。

(a) 鉄管の平均径と長さおよび伝播速度

- 平均径 $d=5.64 \text{ m}$
- 長さ $L=125 \text{ m}$
- 伝播速度 $a=1,000 \text{ m/s}$

(b) 計算条件（落差揚程の関係）

- $H_{st}=58.868 \text{ m}, H_P=59.5 \text{ m}$
- 上部水位 796.5
- 下部水位 737.632

(c) 計算式

鉄管定数 $2\rho = a v_0 / \delta H_R$

$$K_1 \frac{2L}{a} = \frac{450 \times \delta \times H_R \times Q_R \times 4}{\pi^2 \times G D^2 \times \eta_R \times N_R^2} \times \frac{2L}{a}$$

(d) 計算結果

$$2\rho = 7, K_1 \frac{2L}{a} = 0.015$$

- ①点の水圧低下率(%) = 38
- ②点の水圧低下率(%) = 21
- ③点の水圧低下率(%) = 10.5

鉄管が第6図のように水平に配置される場合は負圧に対し安全側にあるが、一部水平部を有し、あと傾斜をもってポンプ水車につながるような鉄管においては、急激な水圧変化に対し安全なように鉄管の水平部に空気弁を設置して、水圧管を保護することが望ましい。

4. 発電電動機

4.1 電 圧

負荷の中心が京浜工業地帯にあるものとし、発生電力は京浜工業地帯に送られ、一方揚水運転時の所要電力は、負荷中心周辺の火力発電所から供給されるものと想定し、負荷地点における供給電圧を一定とすれば

$$\Delta E = (\dot{I}_G + \dot{I}_M) Z$$

ΔE : 発電時と揚水時の発電電動機端子電圧の差

\dot{I}_G : 発電電動機発電時の電流

\dot{I}_M : 発電電動機揚水時の電流

Z : 変圧器および送電回路のインピーダンス

となり、 ΔE は送電系統、潮流などから大略15%と予想された。しかし変圧器のタップ切替や他の電圧改善方法により減少し得るので

$$\Delta E = 10\%$$

すなわち揚水運転時の発電電動機端子電圧は、発電運転時のそれに比し約10%低いものと決定された。

4.2 発電電動機温度上昇

発電電動機の経済性を左右する要素の一つとして、発電電動機各部特に固定子および回転子の温度上昇がある。ポンプ水車の特性上発電機出力と電動機出力では必ずしも同等でなく、各運転時における電圧・力率とも変わるので、いずれかの温度上昇に余裕が生じると不経済な機械となる。この場合、設備全体としこの経済性を審議するには、単に発電電動機のみでなく、ポンプ水車の経済性ならびにポンプ水車の特性と運転計画により決定する必要がある。

(1) 電動機出力に対する発電機容量

電動機出力を82,000 kW一定とし、発電機出力に対する発電電動機の重量の変化を第7図に示す。ただし、端子電圧は発電時13.2 kV、揚水時12 kVとし、力率は発電時0.9、揚水時1.0としてある。

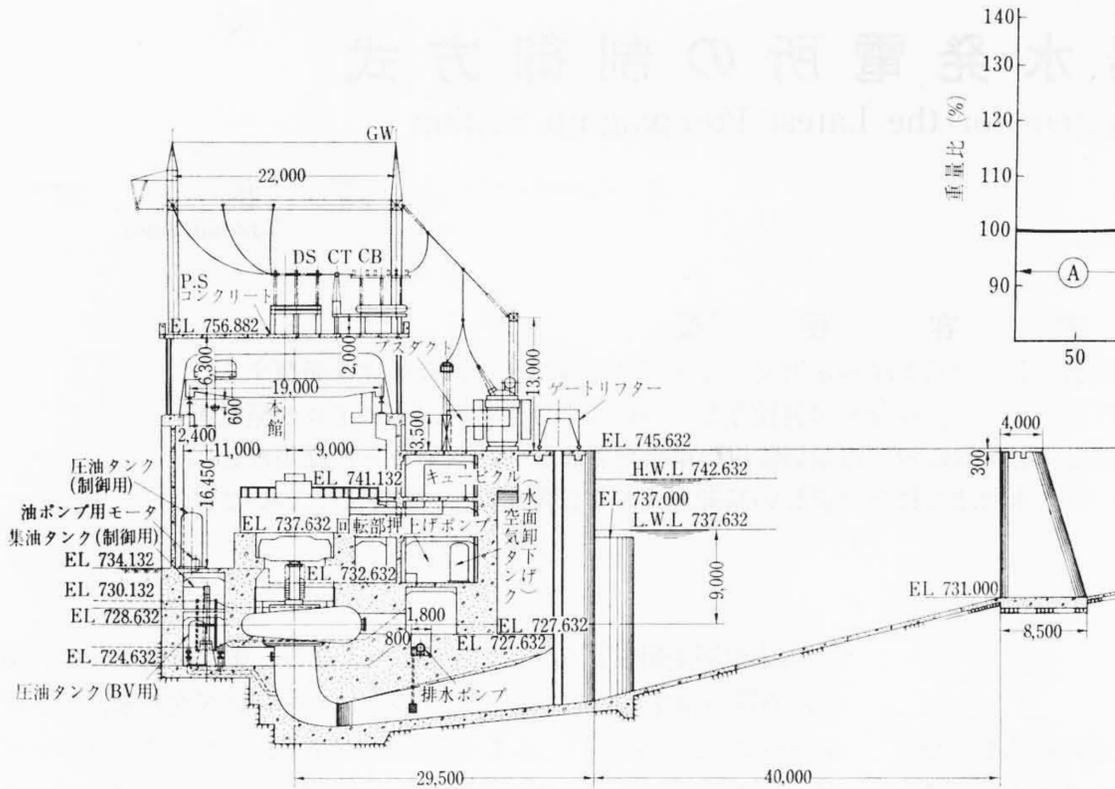
第7図において④の領域は温度上昇その他については、電動機定格から決定され、電動機定格を満足すれば、発電機仕様を満足する領域であり、③はこれとは逆に発電機定格により決定される領域である。中間の②の領域は、回転子が発電機出力によって決定される。

(2) 発電電動機の二重定格

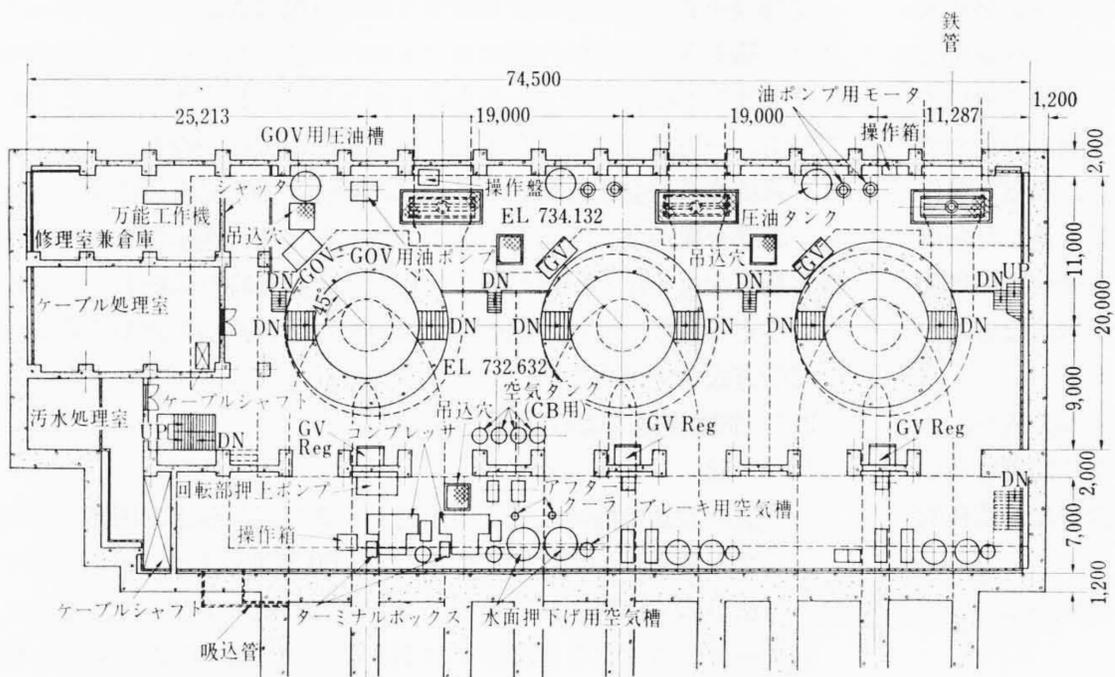
水車特性を十分生かすためには、発電機の出力を電動機の出力に比し相当大きくせねばならない(K案)。しかし年間の水位変動および流量の変化を考慮すれば、水車出力に見合う程度に発電機出力を大きくしてもその利用率が悪くなる。このため豊水時の短期間だけ発電機を過負荷運転することも考えられる。この点より発電機に約15%の過負荷容量をつけた二重定格について検討した結果を重量比で示すと第2表のようになる。

第2表 二重定格比較表

	一定格		二重定格 (I)		二重定格 (II)	
	発電機	電動機	発電機	電動機	発電機	電動機
出力	85 MVA	82 MW	85/100 MVA	82 MW	85/100 MVA	82 MW
GD ²	85 MVA 時の JN が 35% となる値		85 MVA 時の JN が 35% となる値		100 MVA 時の JN が 35% となる値	
重量	100 %		104 %		107 %	



第8図 発電所縦断面図

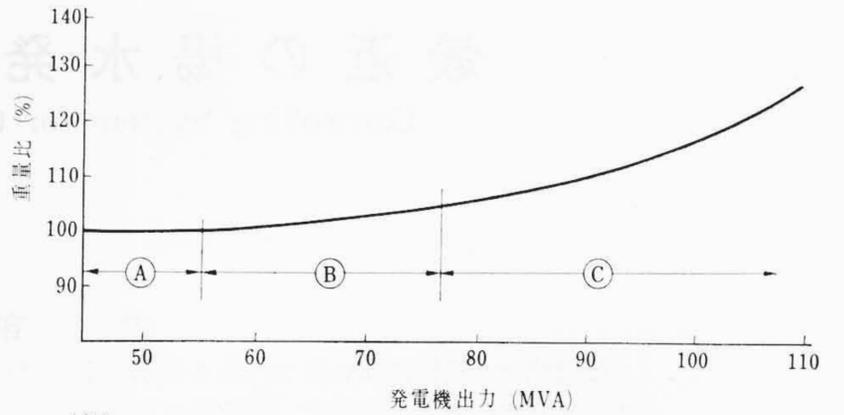


第9図 発電所据付平面図

4.3 発電電動機仕様

ポンプ水車の特性と運転計画ならびに発電電動機・ポンプ水車の経済性を検討のうえ決定された発電電動機の仕様を次に示す。

発電電動機仕様	
形 式	立軸かさ形回転界磁閉鎖通風循環形 (空気冷却器付)
定 格	連続
容 量	85,000 kVA 電動機として 87,000 kW
電 圧	13,800 V 電動機として 12,600 V
力 率	0.94 電動機として 1.0
周 波 数	50 c/s
回 転 数	150 rpm



第7図 重量比較
(電動機出力 82 MW 一定とした場合)

4.4 電動機起動について

可逆式揚水発電所においてポンプ起動の方法としては

- 同期起動法
- 自己起動法
- 起動機法

などがあるが、特別の設備を必要としない自己起動法が採用された。また自己起動法にも

- 分割巻線起動
- 低減電圧起動

などがあるが、主変圧器二次側半分の電圧のところには中間タップを設け 50% 電圧で起動する方式が採用されている。

5. 機器配置について

揚水発電所用ポンプ水車においては、付属機器が多いため、建屋内機器配置については十分な検討が行なわれた。

主機の据付様式はバーレル半二床式で、第8図のような配置である。EL 741.132は組立室とし、この階には主として電気関係のキュービクル類が設置されている。その下の階EL 734.132には、圧油ポンプ、圧油槽関係が設置され、EL 732.632には空気圧縮機および水面抑下装置の空気槽などが設置される。第9図は水車室

平面図を示す。

6. 結 言

本稿においては、主として矢木沢発電所の仕様決定に至る共同研究の内容とポンプ水車および発電電動機の一般的仕様などにつき述べたが、第1期工事2台は昭和40年8月、第2期工事1台は昭和41年8月に通水され、社内試験を行ない引きつづき運転にはいる予定である。なおこれらの主機および運転制御装置などの詳細については、後日稿をあらためて紹介する次第である。

終わりに本主機仕様の決定にいたる共同研究については、種々貴重な指針を与えていただいた東京電力株式会社関係者各位に本稿をかりて厚くお礼を申し上げる次第である。