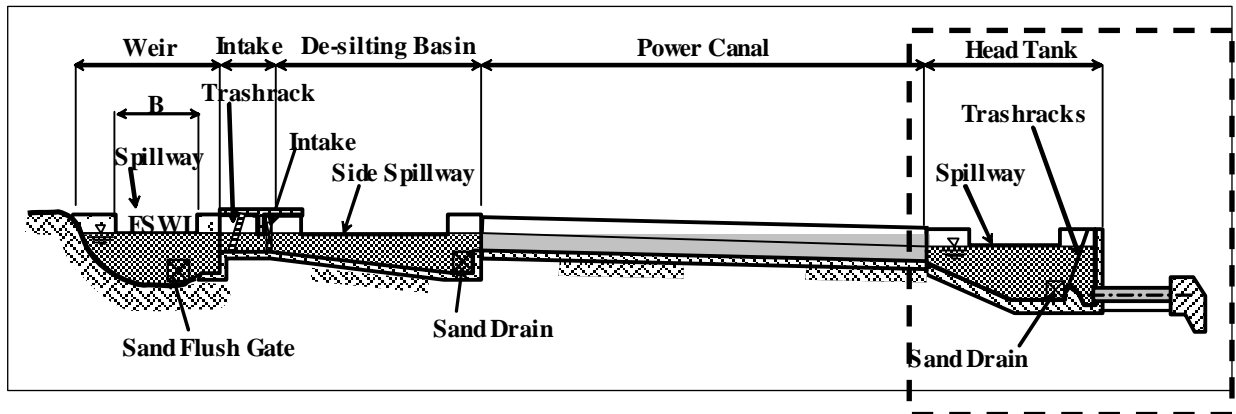


2.4 ヘッドタンク(上水槽)



Source: JICA Study Team

図 2.4.1 ヘッドタンク

サイト選定

- ヘッドタンクは、負荷変動に対応して水車流量を調節するために、導水路と水圧鉄管の接続部に設置する。また、サージタンクは、圧力トンネルや圧力暗渠を導水路として用いる場合に必要となる。水圧鉄管が沈砂池に直接接続している場合、沈砂池がヘッドタンクの役割を兼ねるように設計することもある。
- ヘッドタンクの位置は、地形・地質条件によるが、一般に、堅固な基礎を有する尾根を選ぶ。
- 余水吐きと排砂ゲートをヘッドタンクに設置することを検討する。



図 2.4.2

余水吐き付きヘッドタンク

余水吐きを設置する場合(省略できる場合もある)、余水路は、斜面の滑りや侵食が起こらないように適切に設計することが極めて重要である。

水理設計

- ヘッドタンクの容量は、発電所に設置された调速機(ガバナー)の反応特性に応じて決定される。

1) 機械式调速機、手動操作

$$V > (Q_{\max}) \times (120 \sim 180)$$

ここで V : 池の容量 (m^3)
 A : 池表面積 (m^2)
 Q : 最大設計流量 (m^3/s)

2) 電気式调速機、コンピュータガバナー、ダミーロードガバナー

$$V > (Q_{\max}) \times 20 \text{ sec} + A \times 0.8$$

- 余水吐きの流量は以下の式で計算される。

$$Q = 1.84 \cdot B_s \cdot H^{1.5}$$

ここで、 Q : 越流量 (m^3/s)
 B_s : 余水吐長さ (m)
 H : 溢流深さ (m)

- 排砂ゲートの流出能力は以下の式を用いて計算される

1) オリフィス流れ

$$Q = 0.6 \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Q : ゲート流量 (m^3/s)

A : 流水面積 (m^2)

$H = WL -$ オリフィス中心深さ (m)

2) 管路流れ

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + f_e + f_b + f}}$$

f_e : 入口損失係数 ($0.1 \sim 0.5$)

f_b : 曲がり損失係数

$= \{0.131 + 0.1632(D/R)^{3.5}\} (\theta/90)^{0.5}$

D : パイプ径 (m)

R : 曲率半径 (m)

θ : 曲がり角度($^{\circ}$)

f : 摩擦損失係数 = $124.5n^2 L/D^{(4/3)}$

L : 管長さ

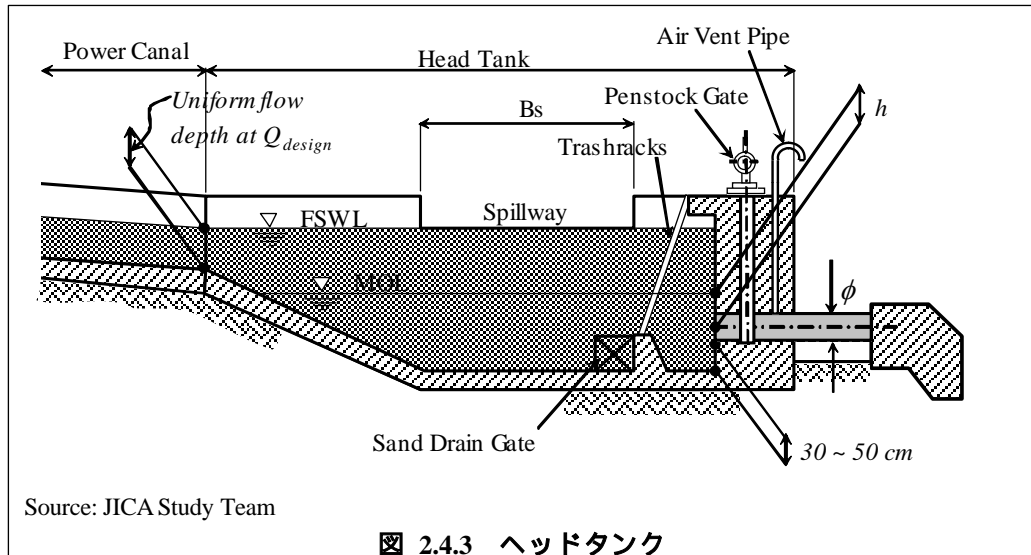


図 2.4.3 ヘッドタンク

- 最小運転水位 (MOL) と水圧鉄管入口中心標高の関係は、次式で設定する。

$$\begin{aligned} h > \phi & \quad (\phi < 1.0 \text{ m}) \\ h > \phi^2 & \quad (\phi > 1.0 \text{ m}) \end{aligned}$$

ここに h : MOL と管中心間の高さ (m)

ϕ : 水圧鉄管径 (m)

- 制水 (入口) ゲートを水圧鉄管入口に設置する場合は、空気管をゲートの下流側に設置する。空気管の直径は次の経験式で求める。

$$\phi = 0.0068 \left(\frac{P^2 L}{H} \right)^{0.273}$$

ここに ϕ : 排気パイプ径 (m)

P : 発電出力 (kW)

L : 排気パイプ長さ (m)

H : 水圧鉄管の水頭 (m)

- ヘッドタンクの断面を設計する際、渦の発生原因となる急な曲がり避ける。
- ヘッドタンクの平均勾配は、ヘッドタンクに堆積した土砂を排砂ゲートから排出するために、1/15 ~ 1/50 とすることが一般的である。

余水吐の省略

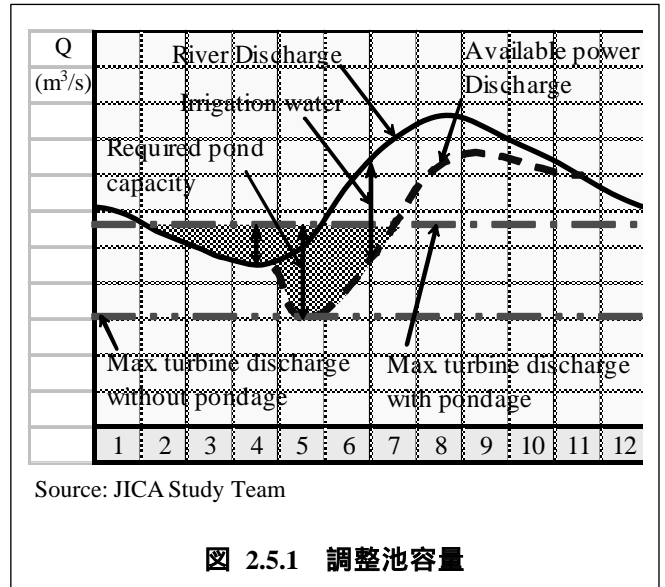
- ヘッドタンクの余水吐は、取水口の流量が一定であり、さらに以下の条件を満たせば、省略することが可能である。

1) ペルトン水車、ターゴインパルス水車にデフレクタが設置されている。

- 2) 負荷遮断時に水を排出するために、水圧鉄管から分岐するアウトレット・バルブが設置されている。このバルブの開放はガイドベーンの開塞と連動されている。
- 3) 300 kW 以下のミニ・マイクロ水力発電については、負荷遮断に対応するためのダミーロードガバナーが設置されている。

2.5 調整池

- 調整池は、日々のピーク発電のために利用する。その位置には、特に乾季電力需要を満たすために必要な容量を確保できる、平坦な地形を選定する。
- 電力需要を満たすための流入量が不足する場合、それを補う調整池の容量は、ピーク発電時には不足する流量を調整池から補給し、1日のピーク発電以外の時間には、調整池に貯水するように決定する。



- 調整池に設置した水位計を観測しながら、ピーク発電を行う。流入量は以下の式を用いて算定する。

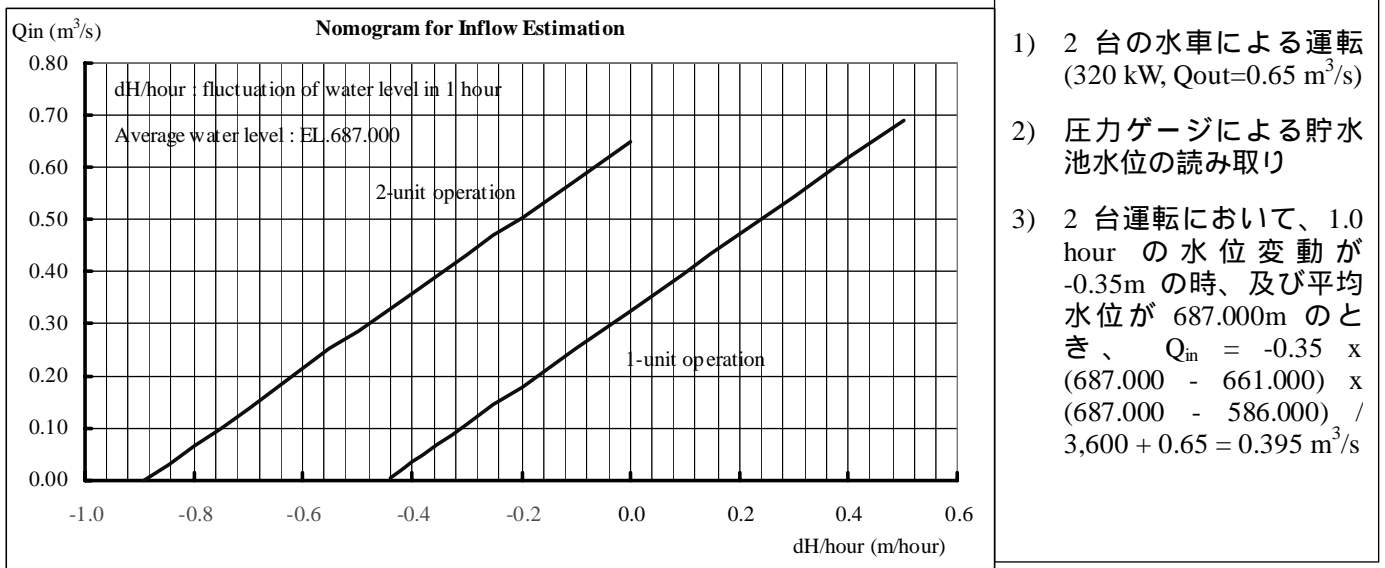
$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} = S(H) \cdot \frac{dH}{dt} = (Q_{in} - Q_{out}) \cdot 3,600$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{(Q_{in} - Q_{out}) \cdot 3,600}{S(H)}$$

$$Q_{in} = \frac{dH}{dt} \cdot \frac{S(H)}{3,600} + Q_{out}$$

ここで、 H : 調整池水位 (m)
 dH/dt : 1 時間あたりの調整池水位の変動 (m/hour)
 Q_{in} : 調整池流入流量(m³/s)
 Q_{out} : 発電機流量 (m³/s)
 S(H) : 調整池水位が H の場合の調整池面積(m²)。 (aH² + bH + c)で示される。

以下は、算出例である。



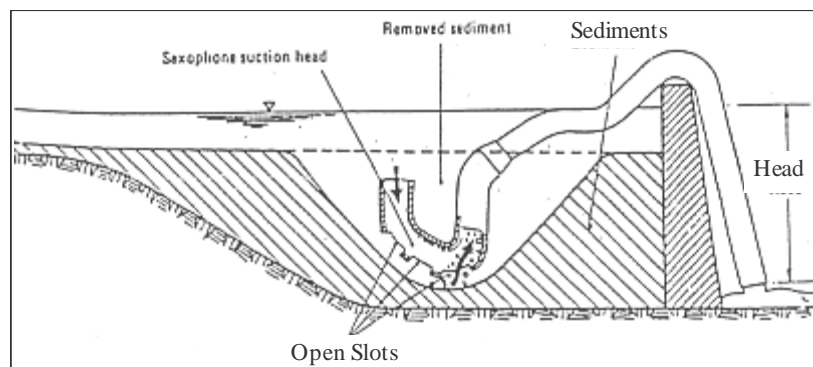
Source: JICA Study Team

図 2.5.2 流入量の推定

ピーク発電時には、ガイドベーン開度は原則として一定に保つと想定した。

サクソフォン型排砂装置

- 調整池と排出口間の水位差を利用し、電動機やディーゼルエンジンなどの動力を必要としない。
- 発電中でも排砂が可能である。発電を停止して排砂作業を行う必要はない。
- 体積密度で約 10%の砂が排出されるという実験結果がある。ただし、堆積物の性質によることに注意されたい。
- 単純な小規模装置が必要であるだけであり、調整池や沈砂池の粘性の低い砂粒子堆積物の排出に適していると言われている。



Source: D.K.Lysne, New Norwegian Institute of Technology

図 2.5.3 サクソフォン・ヘッド型排砂装置

例：

- 管径 $\phi = 15 \text{ cm}$, $L = 20 \text{ m}$

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot H}{1 + f_e + N \cdot f_b + f}}$$

$f_e = 1.00$ (入口損失), $N \cdot f_b = 0.40$ (曲がり損失), $f = 4.5$ (摩擦損失)

H (水頭) = 1.5 m のとき、 V (速度) = 2.06 m/s

- 管径 $\phi = 15 \text{ cm}$, $L = 20 \text{ m}$, $H = 1.5 \text{ m}$, $V = 2.06 \text{ m/s}$

$Q = 0.036 \text{ m}^3/\text{s}$ (= 2.19 m^3/min = 131 m^3/hr):

砂含有率 10% として、排砂量は 13.1 m^3/hr (= 315 m^3/day) :

表 2.5.1 サクソフォン・ヘッド型排砂装置の排砂容量

Dia. (m)	L (m)	H (m)	V (m/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/hr)	Sand (m^3/hr)	Sand (m^3/day)
0.10	10	1.5	2.17	0.017	61	6.1	147
0.10	10	3.0	3.06	0.024	87	8.7	208
0.10	20	1.5	1.70	0.013	48	4.8	116
0.10	20	3.0	2.41	0.019	68	6.8	164
0.10	30	1.5	1.45	0.011	41	4.1	98
0.10	30	3.0	2.05	0.016	58	5.8	139
0.15	10	1.5	2.51	0.044	160	16.0	384
0.15	10	3.0	3.56	0.063	226	22.6	543
0.15	20	1.5	2.06	0.036	131	13.1	315
0.15	20	3.0	2.92	0.052	186	18.6	446
0.15	30	1.5	1.79	0.032	114	11.4	274
0.15	30	3.0	2.53	0.045	161	16.1	387

Source: Calculation by JICA Study Team

2.6 水圧鉄管

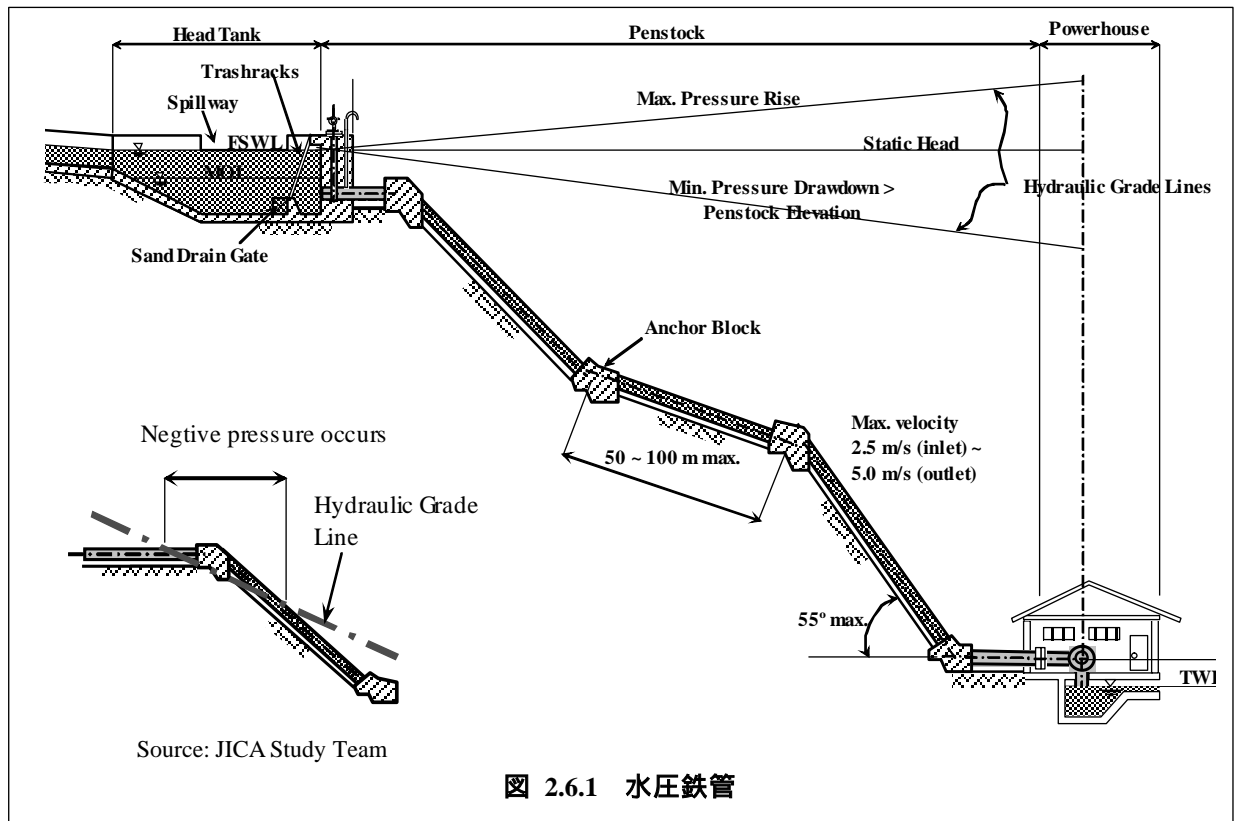
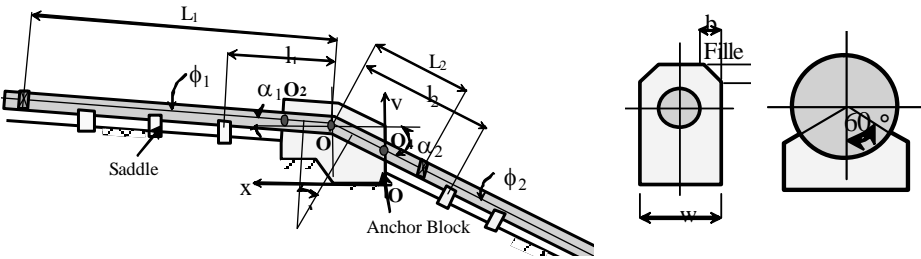
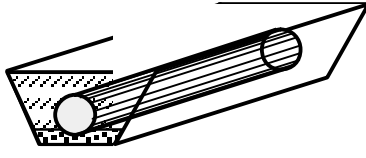


図 2.6.1 水圧鉄管

- 水圧鉄管の縦断形状は、負圧の発生を避けるため、無負荷状態における最低動水勾配線よりも低くなるように設計する。
- 水圧鉄管の型式は、以下に要約される。

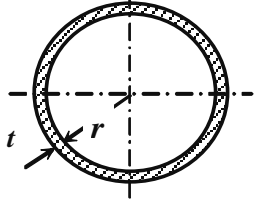
表 2.6.1 水圧鉄管の形式

形式	特徴
オープン型	 <ul style="list-style-type: none"> ● 小水力発電に最もよく適用される。 ● 曲がりの部分にはアンカーブロックを設置する。アンカーブロックは、滑動、転倒及び圧力に対して、水圧鉄管を支えることができるように堅固な基礎を土台とする。 ● それぞれのアンカーブロックの間隔は、一般に 100 m 以下とする。 ● 小支台（サドル）は一般に 6 m ごとに設ける。 ● 鉄管路の最大傾斜角は、55° である。 ● 鉄管据付のために掘削した斜面には、排水工と斜面保護工を実施する。 ● ヘッドタンクの直下と、各々のアンカーの間に、収縮継ぎ手（エクспанション・ジョイント）を設置する。 ● 腐食を避けるために、管とアンカー、サドルには瀝青材を塗布する。
埋め戻し式	<ul style="list-style-type: none"> ● 以下の条件に適用する。 <ul style="list-style-type: none"> (a) アンカーブロックを支持するだけの強度がない、軟弱地盤の場合。 (b) 流水や地すべりの危険がある地形の場合。 (c) 埋め戻した土砂の安定性を確保できる、緩やかな傾斜である場合。 ● 鉄管は、亜鉛めっきと、高濃度亜鉛ペンキあるいは瀝青材塗装を施す。 
トンネル式	<ul style="list-style-type: none"> ● 通常、小水力発電には用いられない。

Source: JICA Study Team

水撃圧解析

水撃圧は、鉄管路に分岐が無い場合には、アリビエの式により計算できる。プログラムおよび例題を Appendix 2-2-7 (第 6 巻、パート 2 参照) に添付する。

圧力波伝播速度	$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w_0}{g} \left[\frac{1}{K} + \frac{1}{E} \cdot \frac{D}{t} \right]}}$	
等価一様断面積	$A_m = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i/A_i)}$	
等価一様伝播速度	$a_m = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i/a_i)}$	
<p>アリビエの式</p> <p>(1) 第 1 段階</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 60%;"> $H_1' - 1 = 2\rho \cdot (1 - \psi_1 \sqrt{H_1'})$ \Downarrow $H_1'^2 - (2 + 4\rho + 4\rho^2 \psi_1^2) H_1' + (1 + 2\rho)^2 = 0$ </div> <div style="width: 35%;"> $t_i = t_1 + (i - 1) \cdot \mu$ $\psi_i = 1 - \frac{i \cdot \mu}{T}$ $\mu = \frac{2L}{a}$ </div> </div> <p>(2) 第 2 段階</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 60%;"> $H_{i-1}' + H_i' - 2 = 2\rho \cdot (\psi_{i-1} \sqrt{H_{i-1}'} - \psi_i \sqrt{H_i'})$ \Downarrow $H_i'^2 - (B - 2A) \cdot H_i' + A^2 = 0$ $A = H_{i-1}' - 2 - 2\rho \psi_{i-1} \sqrt{H_{i-1}'}$ $B = (2\rho \psi_i)^2$ </div> <div style="width: 35%;"> $\rho = \frac{a \cdot V_0}{2g \cdot H_0}$ $\rho = \frac{a \cdot V_0}{2g \cdot H_0}$ $H_i' = \frac{h_i + H_0}{H_0}$ </div> </div>		

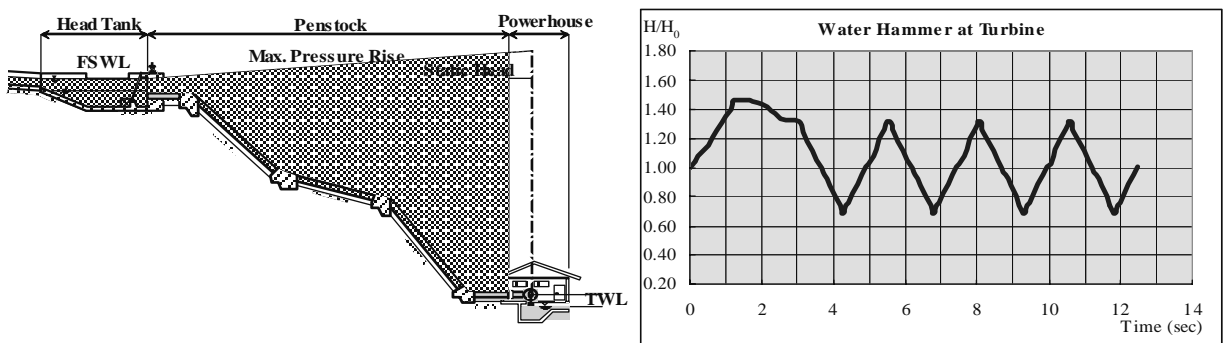
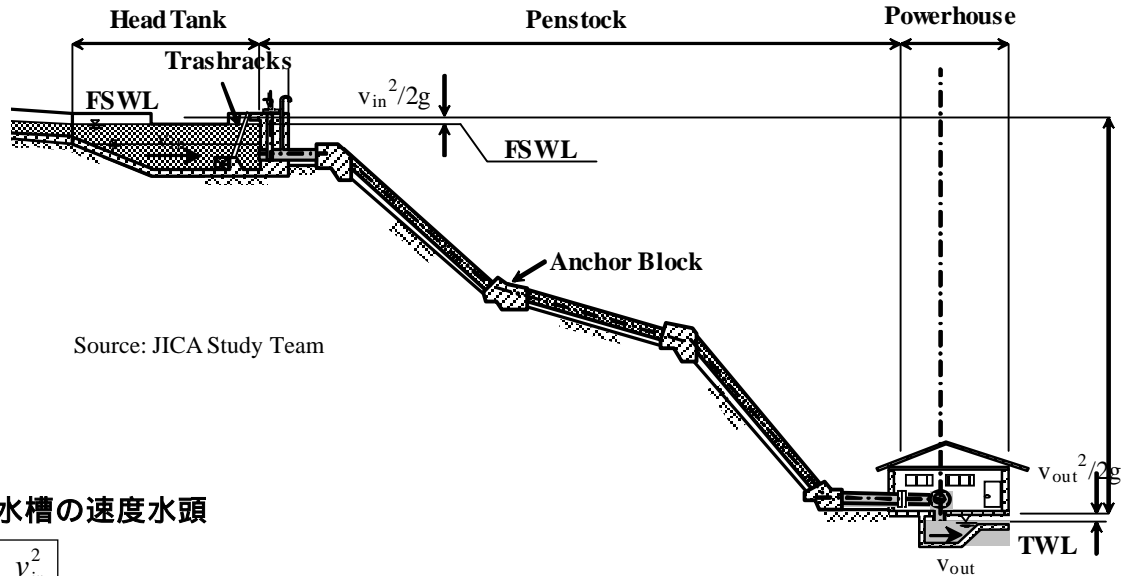


図 2.6.2 水撃圧解析

損失水頭

発電出力を推定するのに用いられる有効落差は、上水槽の満水位と発電所の放水位の差から、損失水頭を差し引くことで求められる。上水槽と発電所間の損失水頭は、以下のように表される。



(1) 上水槽の速度水頭

$$h_1 = \frac{v_{in}^2}{2g}$$

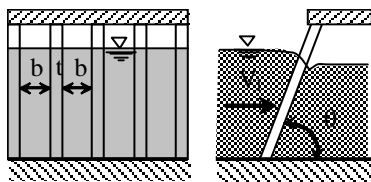
v_{in} : 上水槽流速(m/s)

図 2.6.3 損失水頭図

(2) スクリーンによる損失水頭

$$h_2 = f_r \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$

$$f_r = 2.34(\sin \theta) \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3}$$

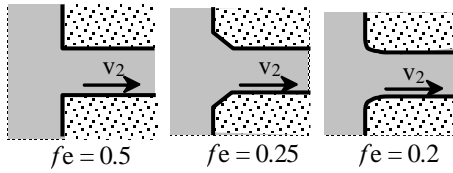


- h_2 : スクリーンによる損失水頭 (m)
- f_r : スクリーン損失係数
- v_1 : スクリーン上流側の平均流速 (m/s)
- θ : スクリーンの傾斜角(°) $\theta = 60 \sim 70^\circ$
- t : スクリーンバーの厚さ (mm) $t = 5 \sim 9$ mm
- b : スクリーンバーの間隔 (mm) $b = 100 \sim 150$ mm

図 2.6.4 トラシュラックによる損失水頭

(3) 水圧鉄管への流入による損失水頭

$$h_3 = f_e \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$



h_3 : 流入による損失水頭 (m)
 f_e : 流入損失係数
 v_2 : 流入後の流速 (m/s)

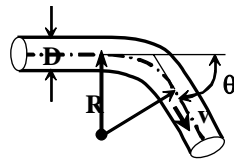
(4) 摩擦による損失水頭

$$h_4 = \frac{124.5n^2}{D^{4/3}} L \frac{v^2}{2g}$$

h_4 : 摩擦による損失水頭 (m)
 n : 管路の粗度係数
 ≈ 0.012
 D : 管路内径(m)
 L : 管路延長 (m)
 v : 管路平均流速 (m/s)

(5) 曲がりによる損失水頭

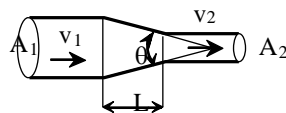
$$h_5 = \left\{ 0.131 + 0.1632 \cdot \left(\frac{D}{R} \right)^{3.5} \right\} \cdot \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0.5} \cdot \frac{v^2}{2g}$$



h_5 : 曲がりによる損失水頭 (m)
 D : 管の直径 (m)
 R : 曲率半径(m)
 θ : 曲がりの中心角 (°)
 v : 管内の平均流速 (m/s)

(6) 漸縮による損失水頭

$$h_6 = f_{gc} \frac{v_2^2}{2g}$$



h_6 : 漸縮部の損失水頭 (m)
 f_{gc} : 漸縮部の損失係数
 θ : 漸縮角 (°)
 L : 漸縮部長さ (m)
 v_1 : 漸縮部始点断面平均流速 (m/s)
 v_2 : 漸縮部終点下流断面平均流速 (m/s)

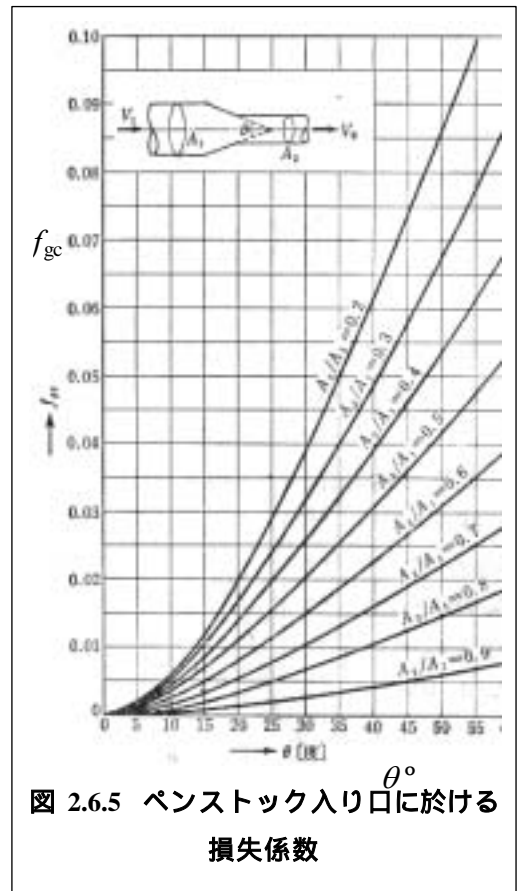
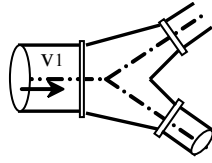


図 2.6.5 ベンストック入り口に於ける損失係数

(7) 分岐による損失

$$h_7 = f_b \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$



h_7 : 分岐による損失水頭 (m)
 f_b : 分岐による損失係数
 v_1 : 分岐点上流断面の流速 (m/s)

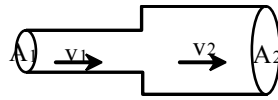
(8) 入口弁による損失

$$h_8 = f_v \cdot \frac{v^2}{2g}$$

h_8 : 入口弁による損失水頭 (m)
 f_v : 入口弁による損失係数
 v : 入口弁での平均流速 (m/s)

(9) 急拡による損失水頭

$$h_9 = \left\{1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\right\}^2 \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$



h_9 : 急拡による損失水頭 (m)
 A_1 : 急拡前の管断面積 (m²)
 A_2 : 急拡後の管断面積 (m²)
 v_1 : 急拡前の流速 (m/s)

損失水頭の計算例とそのプログラムを、Appendix-2-3(第6巻、パート2参照)に添付する。

2.7 発電所

位置選定

- 発電所の位置は、以下の項目を考慮に入れて選定する。

1) アクセス

建設後、運転と維持管理のために、アクセスが容易であること。

2) 基礎

基礎は岩盤であることが望ましいが、 5 ton/m^2 の設備の荷重に耐える堅い基礎であれば、許容範囲である。

3) 洪水と土砂崩れに対する安全

発電所の設計洪水水位は、下流河川の洪水水位よりも高く設定する。必要に応じて、発電所周辺での斜面防護工を行う。

4) 排水

発電所周辺の排水設備は、大雨時の洪水浸水や、斜面を流下する雨水・沢水の直撃を受けないよう、適切に設計する。

- 発電所放水水位は洪水時に背水の影響を受けないように決定する。

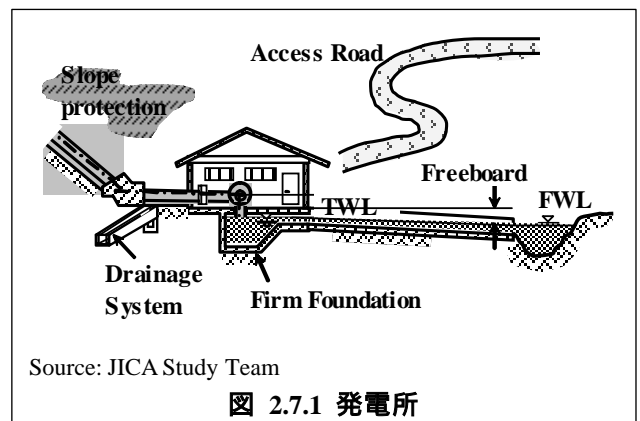


図 2.7.1 発電所

3 発電機器設計

3.1 水車

(1) 水車の分類

水車は、水のエネルギーの利用状態によって2種類に分類される。1つはノズルから噴射する水の打撃圧力を利用するタイプで、これを衝動水車という。この水車は噴出水をランナの周辺部、またはその近くに打ちつけてランナに回転力を与えるもので、ランナは大気中で回転する。

もうひとつは、流水を水車内に導入し、ランナ羽根に接しながら、水の圧力が羽根を押し出す力を利用するタイプで、これを反動水車という。この水車は、水をケーシング内に導入し、ガイドベーンを通してランナ羽根に均等に作用させて回転させるので、ランナは完全に水に満たされた中で回転している。

これらの水車には、さらに落差、流量、回転速度、構造などによって、多くの形式があり、その形式の分類や適用範囲の決定のために、比速度という指数を用いる。

1) 比速度

比速度とは、その水車と幾何学的に相似な水車を想定し、その水車が単位落差(1m)で単位出力(1 kW)を出すようにしたときの想定した水車の回転速度を言い、次式で表される。

$$n_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

n_s :	比速度	(m-kW)
N :	回転速度	(min^{-1})
P :	水車出力	(kW)
H :	有効落差	(m)

各水車形式には、使用される n_s に限界があり、各形式毎に有効落差に対する n_s の適用限界が、ほぼ決められている。

2) 水車の分類と選定

次表は、主として小水力発電に用いられる水車を分類したものである

表 3.1水車の種類と適用範囲

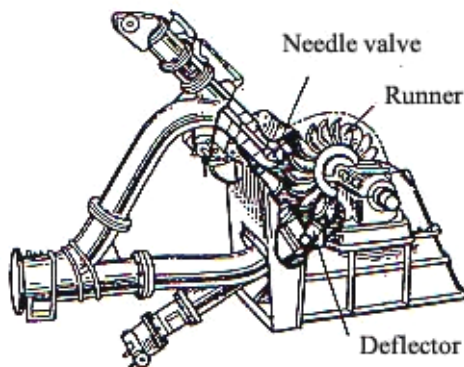
Type	Form	Applicable range		
		n_s (m-kW)	Effective head (m)	Maximum output (kW)
Impulse Turbine	Pelton turbine	12~25	75~500	300~5,000
	High relative speed Impulse turbine	55~65	40~300	300~5,000
	Crossflow turbine	90~110	8~60	50~1,000
Reaction Turbine	Francis turbine	50~350	20~300	300~5,000
	Package type bulb turbine	600~950	6~18	300~2,000
	S-shaped Tubular Turbine	500~850	3~18	100~3,000

Source: JICA Study Team

上表の水車は、中小水力発電用として、据付や運転保守の容易な横軸水車に限ったので、適用範囲も最大出力 5,000 kW を上限とした。

(2) 水車の構造と特徴

1) 横軸ペルトン水車



ノズルから噴出する水を、ランナ周辺のバケットに作用させて、軸を回転させる水車で、ノズル数が1本のもの、2本のものがある。

横軸2ノズルペルトン水車の構造を左図に示す。

ノズルが1本のは、高落差で小流量の場合に用いられる。2ノズルは比較的流量の多い場合に用いるが、一般的には2ノズルのものが多く採用されている。

図 3.1 ペルトン水車の構造

ノズルはニードルバルブ形式になっており、ニードルバルブの動きによって、噴出水の流量を調整することができる。

水車の効率は流量によって変わるが、ペルトン水車の場合は、1 ノズルでニードルの全開流量から 40 %位までの流量変化に対し、効率の変化は 2~3% 程度である。このため 2 ノズルの場合には全流量の 20 %位まで、効率の高い運転をすることができる。

ペルトン水車の n_s は 1 ノズルの値で示す。

今、水車の定格が、有効落差 H m、最大出力 P kW、回転速度 N min^{-1} の 2 ノズルペルトン水車の n_s は、次のようになる。

$$n_s = \frac{N\sqrt{P/2}}{H^{5/4}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

ノズル先端とバケットの間に、噴出水を遮るデフレクタがあり、回転速度の調整や、ランナに流入する噴出水を急遮断するために用いる。

ペルトン水車のランナ位置は、放水面にランナが接触しないように高くする必要があり、下部ノズルから放水面までの高さが落差損失となる。

しかし、構造は比較的簡易であり、デフレクタの使用によって急遮断時の水圧上昇や回転上昇を低くすることができるなど、中小水力発電用として適した水車である。

2) 高比速度インパルス水車

通称ターゴインパルス水車と呼ばれる水車で、インパルス水車としては、高い比速度の 65 ~ 55 m-kW で使用できるので、ペルトン水車に比較して落差の割合に大きな流量に適用される。

構造は 1 つのランナと 1~2 本のノズルを持っており、ペルトン水車に似ているが、ランナに対する噴出水の作用がまったく異なっている。

下図右はターゴインパルス水車の構造を、下図左はケーシング内部のランナーとノズルを示す。

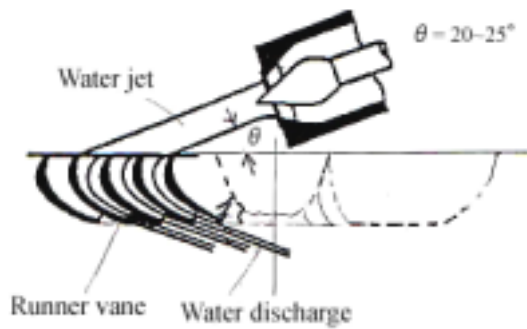


図 3.2 ターゴインパルス水車の水の作用

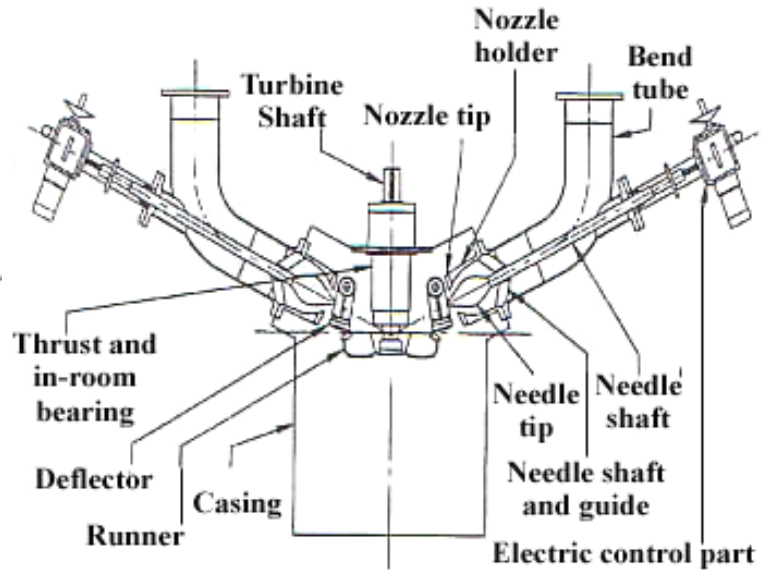


図 3.3 ターゴインパルス水車の構造

上図左はランナに対する噴出水の作用を示すもので、ランナ羽根の入口端が、平らに配列されたランナの入口面に対し、 $20^\circ \sim 25^\circ$ の角度で、1本の噴出水が3~4枚の羽根に同時に入水する。羽根に作用した噴出水は入口面と反対の出口面から、ほぼ軸方向に放出される。

水車の効率特性はペルトン水車に類似して、平坦な曲線で、軽負荷での効率低下が少ないが、最高効率がペルトン水車より2~3%低い。

またペルトン水車は、噴出水がランナの外周に接するようにバケットへ入るのに対し、ターゴインパルス水車の噴出水は、ランナの外周と軸の間に入るので、水の作用するピッチ円の径が小さくなり、同じ落差ではペルトン水車よりも20~40%高い回転速度が得られる。



図 3.4 ターゴインパルス水車の内部

水車の体格は、ランナの径を基準として定められており、落差と流量からランナ径を求める図表と、ランナ径から概略の水車寸法を求める図表を、Appendix 7 に示す。

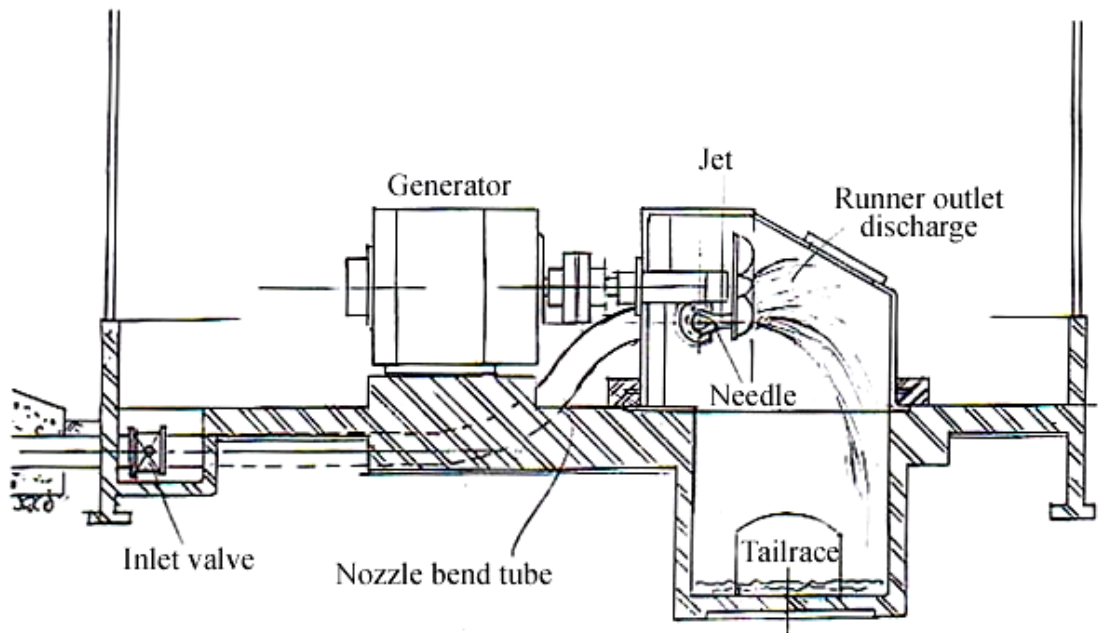


図 3.5 ターゴインパルス水車の据付と放水路

上図はターゴインパルス水車の据付状態を示すもので、ノズル曲管が、発電機の横を通して入口弁に直結するため、この部分が運転・保守上の邪魔にならないように、管の一部を埋設している。

ランナの材質は通常アルミブロンズを用いるが、特に落差が大きい場合や、土砂の流入が懸念される場合はステンレス鋼で铸造する。

この水車のデフレクタは構造が単純で強固なので、ノズルを全開したままでデフレクタで水車を停止し、そのまま放流を継続できるので、入口弁や余水路の省略や、河川維持用水の放流用としても使用することができる。

3) クロスフロー型水車

通称クロスフロー水車と呼ばれる水車で、原型はミッチェルターピン又はその改良形のパンキターピンで、比較的高落差に使用されていたものが、西ドイツのメーカーによって低落差用に改良され、大流量にも適用できるようになってから、この名で広く普及するようになった。

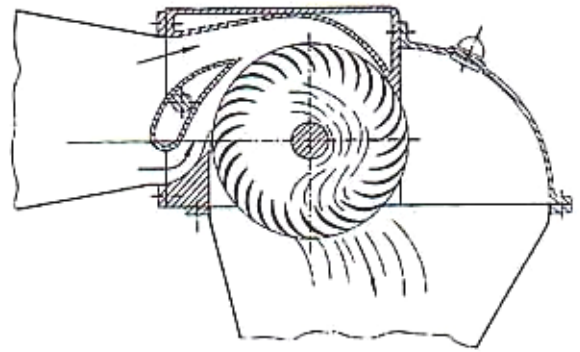
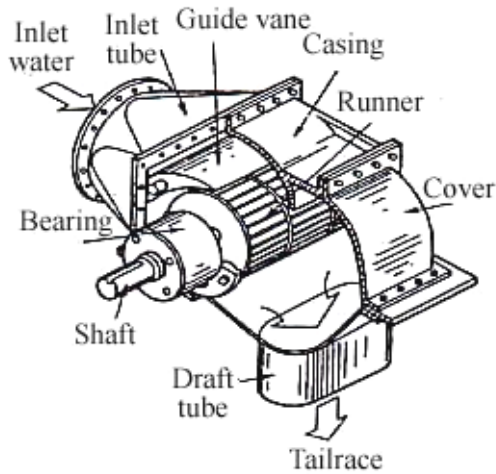


図 3.6 クロスフロー水車の構造

図 3.7 クロスフロー水車内の流れ

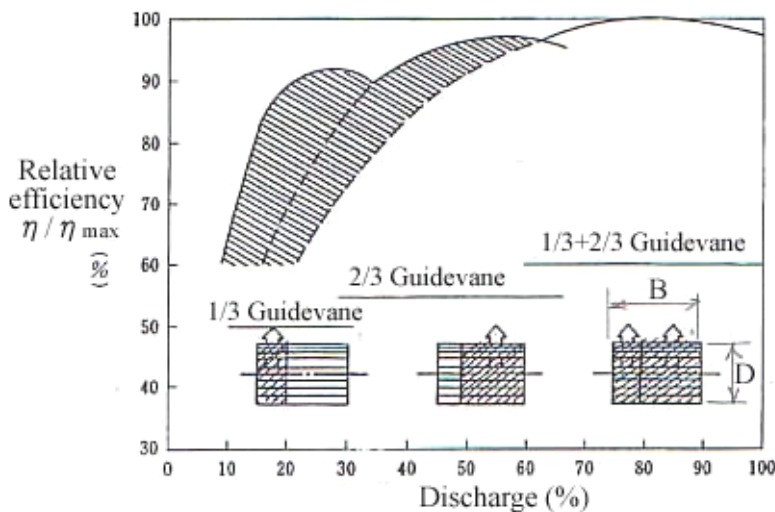
上図左はクロスフロー水車の構造を示す。主要部は細長い羽根を外周に配列したランナと、1枚または2枚のガイドベーンからなる簡単な構造になっている。

上図右はクロスフロー水車内の水の流れを示すもので、ガイドベーンで導入された水は、ランナの外周から流入し、羽根に作用した後、ランナ内部に出、さらに内部からもう一度羽根に入って作用し外周に放出される。

ランナは入口が軸方向に長い円筒形となっており、ガイドベーンは入口幅に応じて、1枚又は2枚で構成する。

最大流量の大きい水車では、ガイドベーンを流入幅の 1/3 と 2/3 の長さにした 2 枚の構成とし、流量の少ないときは 1/3 のみを使用し、流量が全流量の 1/3 以上になったときは、2/3 の長さのガイドベーンを使用する。さらに流量が増加した場合は、1/3 と 2/3、2 枚のガイドベーンを同時に使用することによって、流量の変化に対し効率低下の少ない運転をする。

図はクロスフロー水車の運転特性を示すもので、定格流量の 15% 程度まで、比較的高い



効率を維持できる。この特性は低落差における、カプラン水車の特性に似ており、カプラン水車より効率は低く、また特性の平滑度も劣るが、構造が簡単で保守が容易であり、機器の価格、据付工事費も安価であることから、小水力用として幅広く用いられている。

図 3.8 クロスフロー水車の特性

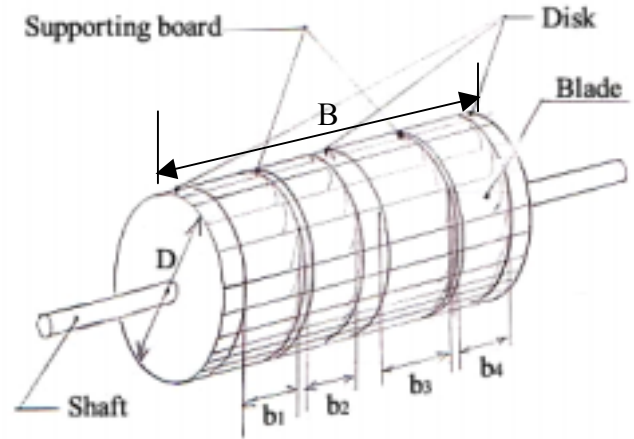
ランナ径は、0.3 m から 1.25 m の範囲で各メーカーごとに標準化されており、ガイドベーン幅はランナ径の 3.5 倍程度が最大とされている。

このようにランナ径とランナ幅が任意に組み合わせるので、この水車の n_s はランナ径とランナ幅の比が 1 の場合を単位ランナと考え、単位ランナの出力で計算する。

したがって、 n_s は次式で表される。

$$n_s = NP_r^{1/2} D^2 B^{-1/2} H^{-5/4}$$

- n_s : 比速度 m
- N: 定格速度 min^{-1}
- P_r : ランナ 1 個の定格出力 kW
- D: ランナ径 m
- B: ガイドベーン幅の合計
- H: 有効落差 m



Source: JICA Study Team

図 3.9 ランナ径とランナ幅

n_s の値は 90 ~ 100 m-kW の範囲にある。

今ランナ 1 個の定格出力 P_r で計算した比速度を n_s' とすれば、

$$n_s' = NP_r^{1/2} H^{-5/4}$$

となる。

$$\frac{n_s'}{n_s} = \left(\frac{D}{B}\right)^{1/2}$$

したがって $\frac{B}{D} = \left(\frac{n_s'}{n_s}\right)^2$ となり、ランナ幅を求めることができる。

また、この水車は衝動水車あるので、基本的にはランナと放水面の間に空間をおく必要がある。しかし、図のように吸水管を取り付け、ケーシングの空気弁から吸気して吸水管路内の水面とランナ下部の間に約 20 cm ぐらいの空間を空けることにより、 H_s 分の吸水水頭を有効落差として利用することができる。

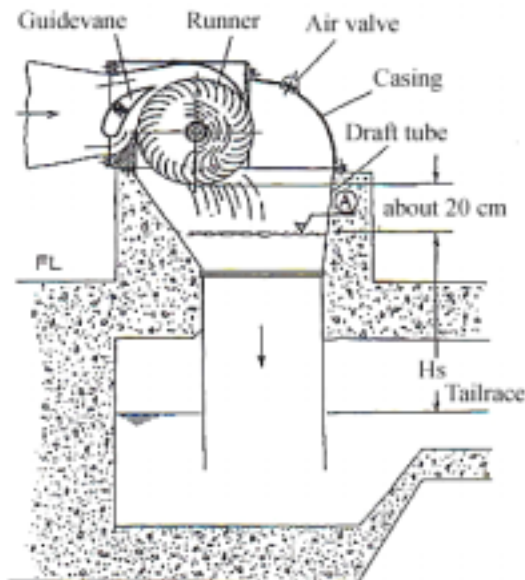


図 3.10 クロスフロー水車の吸出し高さ

ただしこの部分は空気が含まれているので、吸水管中の水の比重が軽減されることを考慮し、図に示す H_s の 80 % を有効とする。

一般にクロスフローの有効落差は、水車中心までの落差で計算されているが、この値に上記吸出高さを加えることにより、出力の増加が可能であり、特に相落差が 15 m 以下の比較的低いところに適用する場合や、洪水位変動を考慮して水車据付位置が高くなっている場合などに有効な方法である。

4) 横軸フランシス水車

フランシス水車は高落差から低落差まで、また大容量から小容量まで、広い範囲に用いられ、効率が良く、回転速度を高く取れる吸出し管の作用によって、放水位までの総落差を利用できる、など多くの特徴を持っており、中小水力発電用として最も多く採用されている。

出力 5,000 kW 以上の中小水力においては縦軸が多く用いられる。5,000kW 未満の横軸フランシス水車には使用する流量によって、次のように多くの種類がある。

- i 横軸単輪単流渦巻フランシス水車
- ii 横軸単輪複流渦巻フランシス水車
- iii 横軸単輪単流前口フランシス水車
- iv 横軸二輪単流前口双子フランシス水車
- v 横軸二輪単流露出双子フランシス水車

このうち最も多く用いられる水車が、下図左の単輪単流渦巻フランシス水車と、下図右の単輪複流渦巻フランシス水車である。

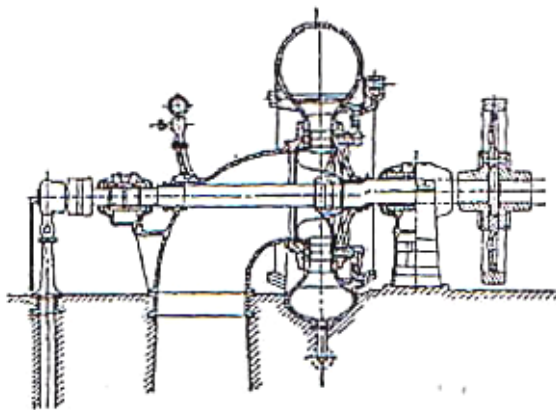


図 3.11 横軸単輪単流渦巻フランシス水車

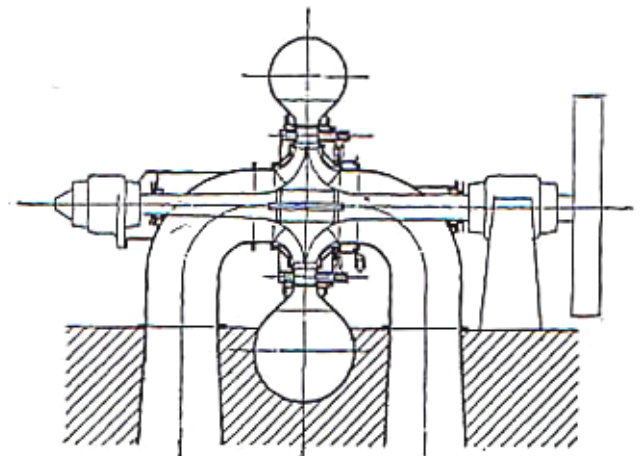


図 3.12 横軸単輪複流渦巻フランシス水車

その他のフランシス水車は主として低落差、大流量の領域に入るので、大型となり、価格が高く、保守上も難点が多いので、最近はほとんど採用されず、カプラン水車、チューブラ水車、クロスフロー水車などがこれに替わって採用されている。

単輪単流渦巻フランシス水車のうち n_s が 100 m-kW 以下のものは、軽負荷特性の良いターゴインパルス水車に替わる傾向が多く、特に 40%以下の軽負荷時には、キャビテーションの発生や振動などフランシス水車特有のトラブルが発生することもあるので、軽負荷運転時間の長い発電所では採用を敬遠されることがある。

5) チューブラ水車

円筒形(チューブラ)横軸プロペラ水車で、低落差の比較的流量の多い場合に適用する水車である。

ガイドベーンをランナ羽根の両方、又はどちらか一方を可動にすることによって、落差と流量の変動に対し、高い効率を維持できる。従来この領域では、縦軸カプラン水車を使用していたが、小水力の範囲では、建設、維持、運転、保守など、すべての点において横軸のほうが優れているので、最近多く採用されている。

チューブラ水車にも数多くの形式があるが、最も普及しているのは次の 2 種類である。

a. パッケージ式バルブ水車

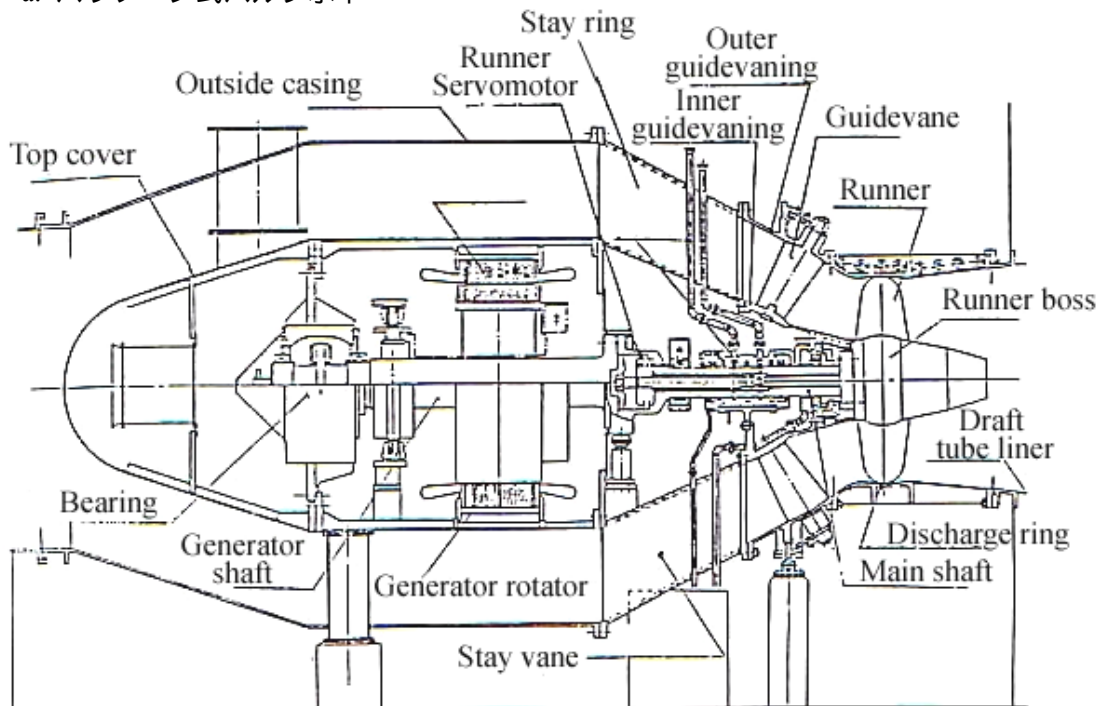


図 3.13 パッケージ式バルブ水車構造図

構造は上図の通り、流路内にバルブを設け、その中に水車軸、軸受、発電機を一括して納入し、管路の中間に挿入するので、据付面積が少なく、送水管中の余剰水頭利用など低落差で比較的流量が多く、落差、流量ともに変動の多い場合に適用される水車である。

しかし、ランナ径が 1.0m 以下になるとランナベーンを可動にすることが困難であること、発電機回転部の径を大きくすることが難しいので、はずみ車効果 GD^2 に限界があるなど、設計上の問題点も多い。

b. S 型チューブラ水車

S 型チューブラ水車の構造は下図に示すように、水車のドラフト部分を S 型に曲げて、水車軸をドラフト部分から外部へ引き出しているのが特徴である。

ガイドベーンやランナ部分は基本的にバルブ水車と同様であるが、回転部分の径を小さくできるので、小容量の場合にも適用可能であり、ガイドベーン固定・ランナベーン可動、ガイドベーン可動・ランナベーン固定、両部分とも固定式など設計の自由度も多い。

特に発電機は流路の外部にあるので、はずみ車の設置や、増速器の使用も可能となり、経済性も高く、取り扱いやすい装置である。

Inside casing	Outside casing	Top cover
Stay vane	Inside guidevane ring	Outside guidevane ring
Guidevane	Runner vane, runner boss	Discharge ring
Draft tube	Main shaft	Main bearing
Main shaft water sealing	Guidevane operation system	

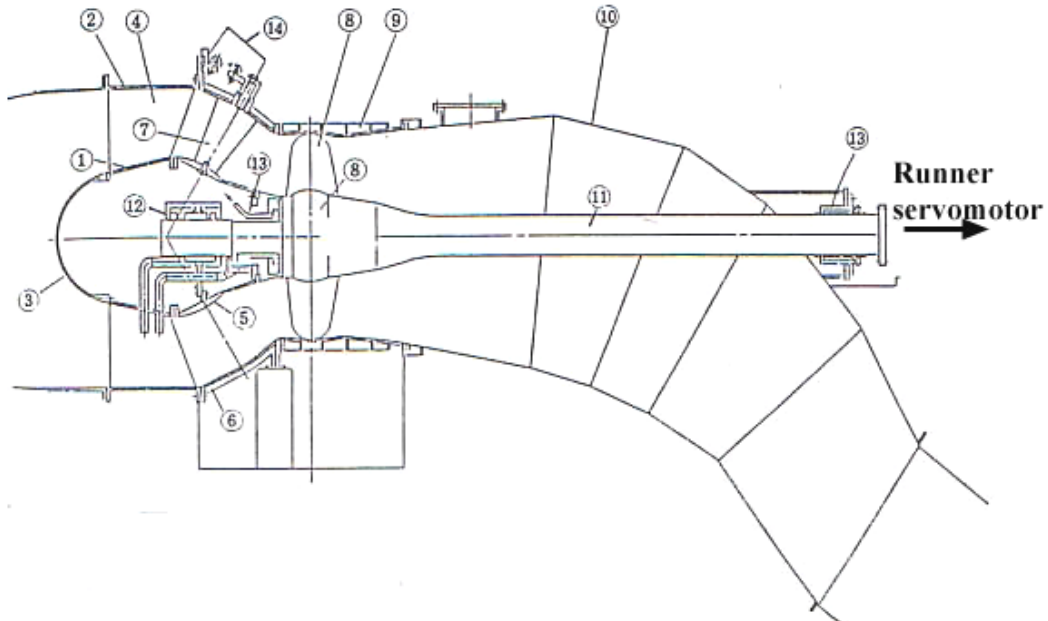


図 3.14 S 型チューブラ水車構造図

6) ポンプ逆転水車

ポンプの吐出側から吸込口の方向に水を流すと、ポンプの羽根車は水の作用を受けて反動水車となり回転する。この回転によって羽根車に直結されている誘導電動機を誘導発電機として動作させれば容易に発電を行うことができる。

この方法はポンプ逆転水車と呼ばれ、汎用機として量産されているポンプを使用でき、価格が安く、取り扱いが容易なので、小容量水力発電に利用されている。

図は縦軸軸流水中ポンプをそのまま逆転水車とする場合の構造と据付を示す。

この水車は本質的にランナベーン、ガイドベーンともに固定となるので適用できる落差、流量が特性的に限定される欠点がある。

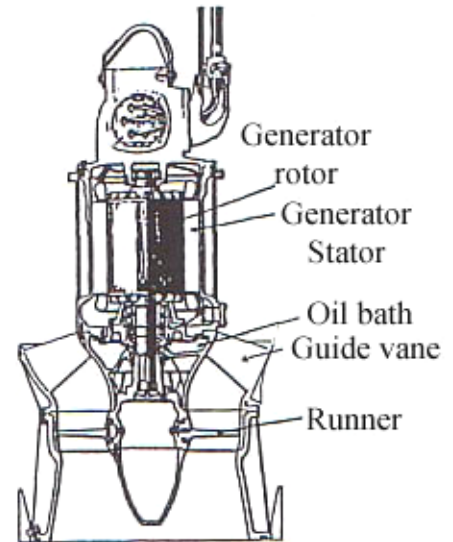


図 3.15 水中ポンプ型水車

また、本来水車として設計されたものではないので、採用に当たって特性を把握することが難しく、実験によってデータを作らなければならない。

(3) 水車の選定

水車発電用水車は、適用する落差と最大使用水量に応じ、諸種の形式の中から、比速度の範囲を考慮して、適用する水車の形式を選定する。下図は、これらの条件により、与えられた流量と落差から適用できる水車の形式を選定する図表である。

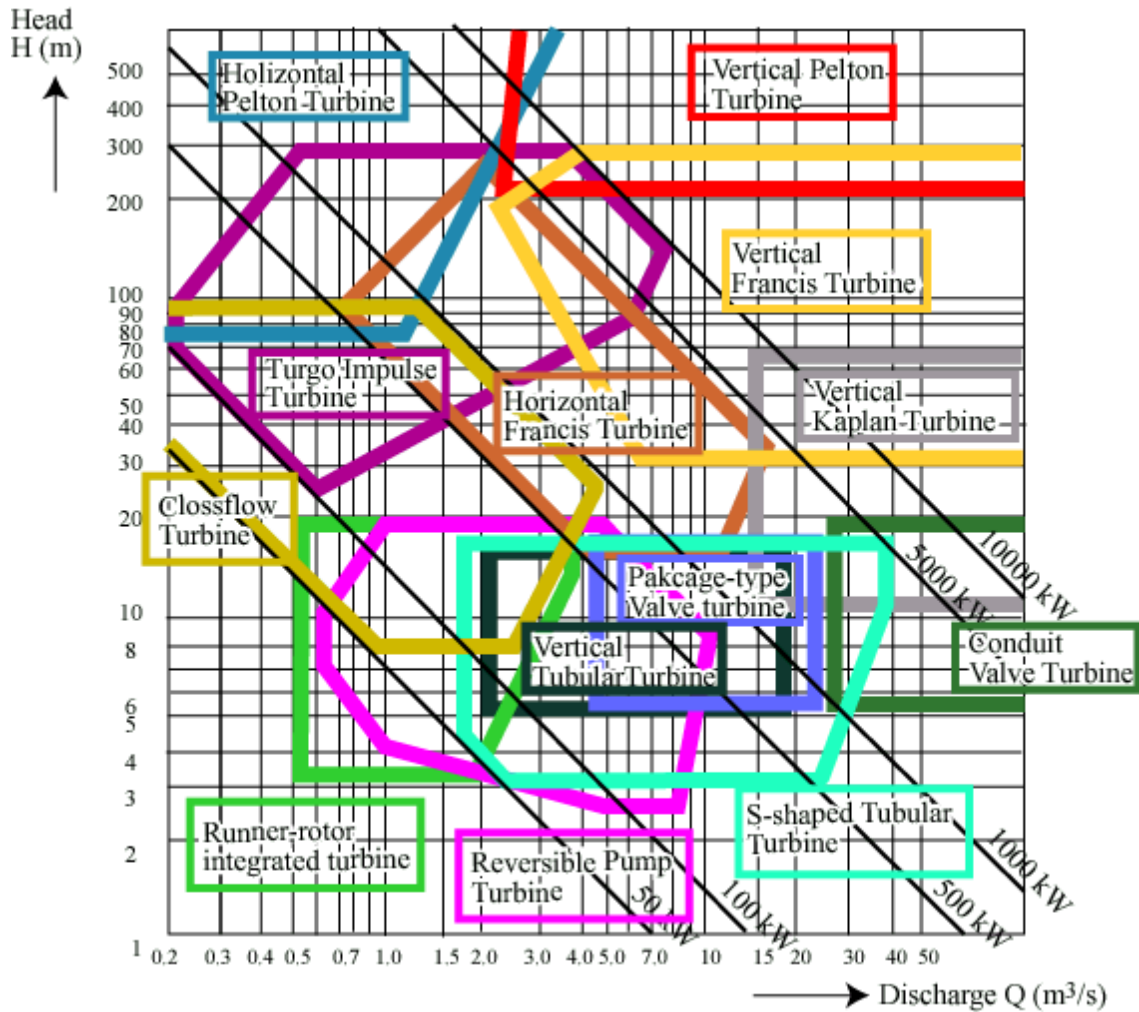


図 3.16 水車選定図

選定した形式の水車の大きさ、回転速度、効率測定などは、Appendix 7 によって求めることができる。

この選定図では、同じ落差と流量に対し、適用される形式が、複数選定できる場合がある。そのときはそれぞれの形式について、大きさ、効率などを求め、特徴を比較して、立地条件に最適なものに定める。

3.2 発電機

水力発電用の発電機には、同期発電機と誘導発電機の 2 種類があり、一般的には同期発電機が使用されている。発生する電気は 3 相交流で、電圧は小容量のものは低圧であるが、1000 kVA 程度以上 11,000 V が使用される。

(1) 同期発電機

磁極を回転させることによって、発電子のコイルに電圧を発生させる形式の発電機で、磁極の励磁方法によって、他励磁方式、静止励磁方式、交流励磁ブラシレス方式などの種類があり、小水力発電には保守の容易なブラシレス方式の発電機が多く採用される。

発電機の回転速度は、発生する電気の周波数と極数によって、次の式で定まる。

$$N = 120 f / P$$

N: 定格回転速度 min^{-1}

f: 定格周波数 Hz

P: 極数

発電機と水車は直結することが望ましいので、水車の回転速度は、できる限り使用する発電機の回転速度にあわせて選定する。しかし、どうしても両機の回転速度の整合が難しい場合や、水車の回転速度が低く、発電機の極数が多くなりすぎる場合は増速機を使用して結合する。

小水力発電の場合は、12極程度までが使用されており、それ以上の極数の発電機は高価で、体格も大きくなるので、増速機によって増速し、発電機は4～6極程度の高速なものを使用する 경우가多く、特にクロスフロー水車を使用したときにこのような必要性が起こる。

同期発電機の仕様には次の事項が必要である。

軸方向	横軸
容量	kVA
電圧	V
電流	A
力率	(0.8～0.5)
周波数	Hz
回転速度	min^{-1}
絶縁種別	(F種)
軸受の種類	(推力軸受の要・不要)
励磁方式	
短絡比	(大型の場合)

(2) 誘導発電機

誘導発電機は1次巻線と2次巻線を有する回転機で、巻き線間の電磁誘導作用によって発電するものである。

1,000 kW 程度以下の電力系統に並列する発電所に採用され、2次巻線をかご型にすることによって構造が簡単で安価な発電機を得ることができる。この発電機は一般には自己単独での電圧発生ができず、1次巻線に他電源から交流励磁を与えなければ、運転できない。また、無電圧の状態で系統に投入するとき定格電流の数倍の突入電流が流れるなど

の欠点がある。しかし、価格の安さ、保守の容易さ、運転制御の簡易さなどから、小水力に多く使用される傾向にあり、特に価格の安い汎用誘導電動機が発電機として転用される。

ただし、この場合、電動機には加速度耐力がないので、運転上が必要である。

誘導発電機の仕様には次の事項がある。

軸方向	横軸
定格	連続
出力	kW
電圧	V
電流	A
力率	(メーカーが表示する)
周波数	Hz
回転速度	
すべり	-%
絶縁種別	(F種)

誘導発電機は、接続される電力系統から、励磁電流を取って運転するので、単独運転はできず、力率も調整できない。

力率を改善するためには、発電機に並列コンデンサを接続する。

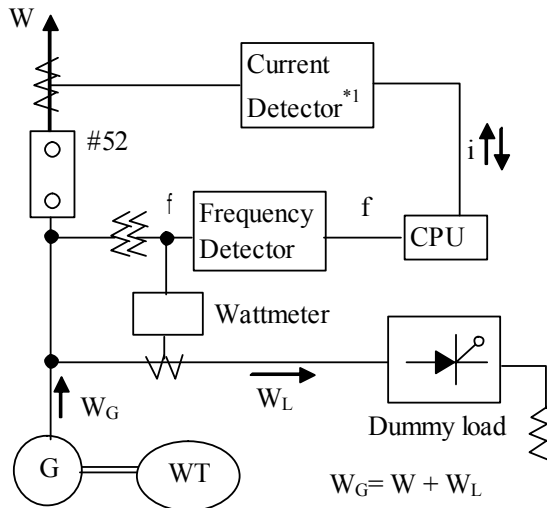
このコンデンサ容量が大きな状態で負荷遮断が行われると、回転数の上昇に伴って、コンデンサの進み電流により、発電機が励磁され、高い電圧を発生する自己励起現象を発生する可能性があるため、注意が必要である。

3.3 制御装置

(1) ガバナー

調速機は、水車のガイドベーン、ニードルバルブ、デフレクタなどいわゆる水口機構を調整して、流入する水量を調節し、水車の回転速度や出力を制御するものである。直接、水口機構を動かす部分は、大きな力を要するので中小水力用は油圧サーボモータを使用するが、小水力用は制御が正確で保守点検の容易な電動サーボモータが使用されている。速度、水位、流量、出力等制御対象の検出と制御量の演算および制御量のサーボモータへの伝達は、すべてCPUと電子回路で行われるが、CPU部分は他の運転制御と一体にした一体型制御装置に包含されているものが多い。出力が200 kW程度以下の場合、ダミーロードガバナーを採用することが多い。

ダミーロードガバナは下図に示すとおり、需要負荷と並列にダミーロードを接続し、両負荷の合計と発電機出力を平衡させるように、需要負荷の変化または発電機出力、周波数の変化を検知して、常に発電力と負荷が一致するようにダミーロードを自動調節し、周波数を一定に保つ。



*1 detect current and its director

この调速機は、サーボモータを作動させるなど、機械的な動作を伴わないので、応答特性が良く全出力に近い値の瞬時変化にもよく追従するので、小系統の単独運転やポンプ逆転水車など水口調整機構を持っていない水車発電機などに有効な调速機である。

Source: JICA Study Team

図 3.17 ダミーロードガバナ原理図

(2) 一体制御盤

発電所の制御・保護装置・運転記録などを CPU によって一括処理する装置を小型の配電盤としてまとめたものが、一体型制御盤として使われている。

その機能要素の一例は次の通りである。

制御機能	運転シーケンス・起動速度制御・電圧制御・力率制御・周波数制御・負荷制御・水槽水位制御・流量制御・プログラム運転制御・その他
保護機能	過電流・過電圧・不足電圧・母線地絡・欠相
表示機能	電圧・電流・電力・力率・周波数・水位・開度・軸受温度・故障・その他
記憶機能	kWh・取水量・故障履歴・運転日誌・月報・年俸・記録試験・その他

(3) 直流電源装置

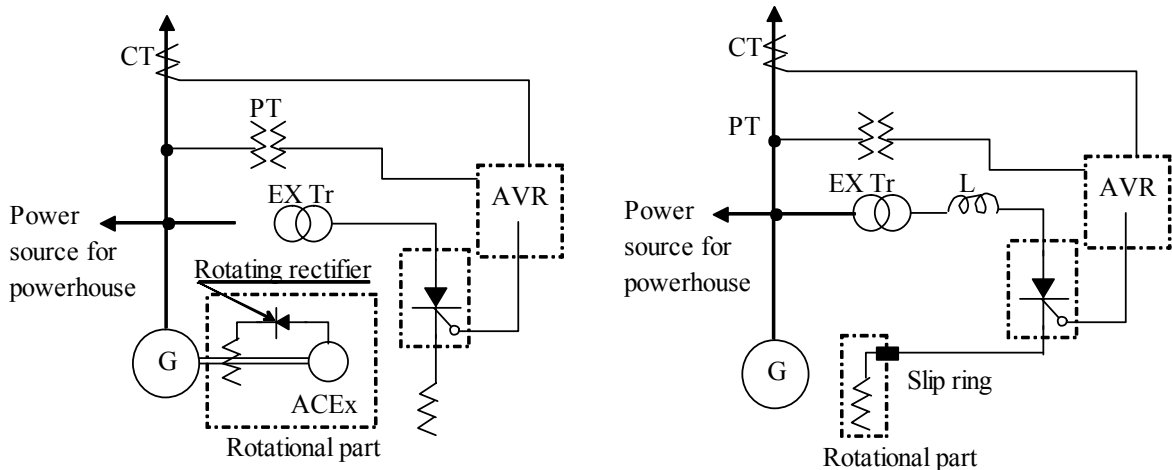
運転制御・保護リレーなどの電源として、充電器付蓄電池を設置する。一般に電圧 100 V を使用するが、小容量発電所では 24 V を用いる場合もある。

蓄電池の種類には鉛蓄電池とアルカリ蓄電池があり、最近では保安の容易なアルカリ蓄電池が多く採用される。

(4) AVR

同期発電機の励磁電流を制御して、発生電流を一定に保つ装置である。

下図は励磁方式の異なる2方式について、AVRを採用したものを示す。



- | | | | |
|------|-------------------------------|-------|------------------------------|
| AVR | : Automatic voltage regulator | CT | : Rheotrope |
| ACEx | : Alternating current exciter | Ex/Tr | : Transformer for excitation |
| G | : Generator | L | : Reactor |
| PT | : Transformer for meters | ↓ | : Thyristor rectifier |

Source: JICA Study Team

図 3.18 AVR を採用した励磁回路

AVR は両方式とも同じで、発電機母線の電圧変化を検出し、SCR のゲートを制御して励磁電流を調整するものであるが、ブラシレス励磁方式のほうは励磁電流が小さいので、制御もし易い。静止型は電流値が大きいで界磁回路の時定数も長いので、制御上留意が必要である。

両方式とも発電機電流の要素を導入しているのは、負荷電流による電圧降下を補償する、いわゆる複巻特性を与えるものである。

単独運転の場合の力率は、負荷力率によるもので、励磁電流では力率改善はできないが、系統並列している場合には、励磁電流によって力率制御や無効電力調整要素を備えたものもある。

3.4 入口弁

入口弁は水圧管の下流端の水車入口付近に設けられる。その用途・目的は次の通りである。

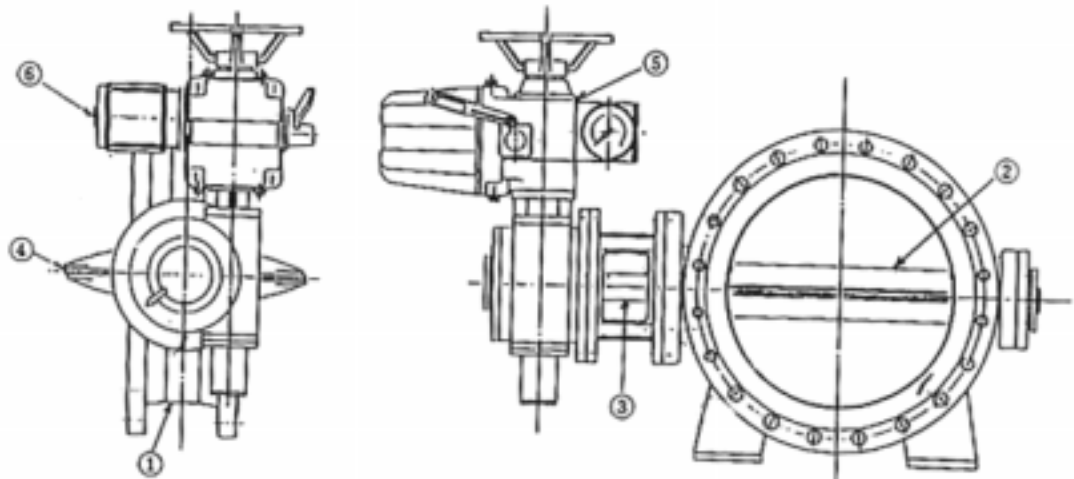
- 水車停止時の流路の遮断

- この場合、ランナへの水の流入は、ガイドベーンあるいはニードルで予め遮断される。
- ガイドベーンあるいはニードルの動作不能時の流水遮断
- 水車分解点検時の流水の止水

低落差・大流量で、入口弁の口径が大きくなる場合、上水槽の水圧管入口に制水門を備けて、入口弁を省略することがある。

入口弁には、蝶形弁、複葉弁、スルース弁がある。

(1) 蝶形弁



No.	Items	Material
	Valve Frame	Pressed and stretched steel plate for general structure
	Valve Body	Ditto
	Valve Axis	Stainless steel, Cast carbon steel, or carbon steel for mechanical structure
	Valve Sheet	Rubber
	Speed Reducer	-
	Electric Motor	-

図 3.19 蝶形弁構造図

蝶形弁は落差 150 m 以下に適用する弁で、上図にその構造を示す。

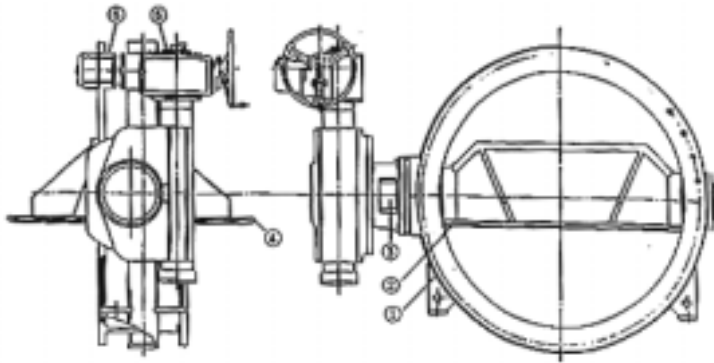
弁軸は上図のように横軸のものと縦軸のものがあるが、弁体の荷重を保持しやすい点で横軸のほうが優れている。

弁口径は水車入口管径の 1.1 ~ 1.2 倍に選定する。構造が簡単でゴムシール方式の発達によりシール効果も良いが、他の種類の弁に比較して損失水頭が大きいきらいがあるが、価格が安いので、比較的小口径に多く用いられる。

(2) 複葉弁

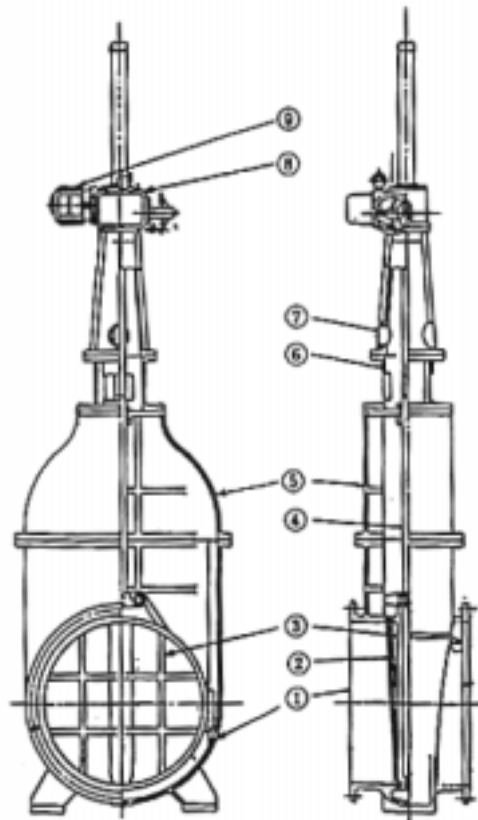
複葉弁は、落差 200 m 以下に適し、構造は蝶形弁と同じであるが、損失水頭を少なくするため、弁体を薄くし、2 枚を組み合わせて強度を出している。

図はその構造図を示す。弁径は蝶形弁と同様で、水車入口管径の 1.1 ~ 1.2 倍とする。



No.	Items	Material
	Valve Frame	Pressed and stretched steel plate for general structure
	Valve Body	Ditto
	Valve Axis	Stainless steel, Cast carbon steel, or carbon steel for mechanical structure
	Valve Sheet	Rubber
	Speed Reducer	-
	Electric Motor	-

図 3.20 複葉弁構造図



No.	Item	Material
	Valve Frame	Cast carbon steel
	Valve Sheet	Bronze
	Valve Body	Cast carbon steel
	Axis of Valve	Stainless steel or carbon steel for mechanical structure
	Cover	Cast carbon steel
	Stand	Cast iron
	Stand	Ditto
	Speed Reducer	-
	Electric Motor	-

図 3.21 スルース弁構造図

(3) スルース弁

スルース弁は高落差小流量の場合に多く用いるもので、損失水頭がほとんどない。上図にその構造を示す。

弁を操作するスピンドルは、電動操作の場合、弁体にめねじを取り付け、スピンドルの雄ねじを廻して上下させる内ねじ方式と、スピンドル上端で、めねじのほうを廻す外ねじ方式がある。前者は比較的大口径の場合に適用されるが、水力発電用としては、後者のほうが保安上優れているので多く採用される。

(4) 操作・駆動方式

自動操作の場合は、電動機駆動方式と油圧駆動方式がある。

チューブラ水車用など大口径のものには油圧駆動方式を用いるが、一般的には電動機駆動が多く、駆動電源は原則直流であるが、交流の場合もある。開閉時間は 180 以下が一般的である。