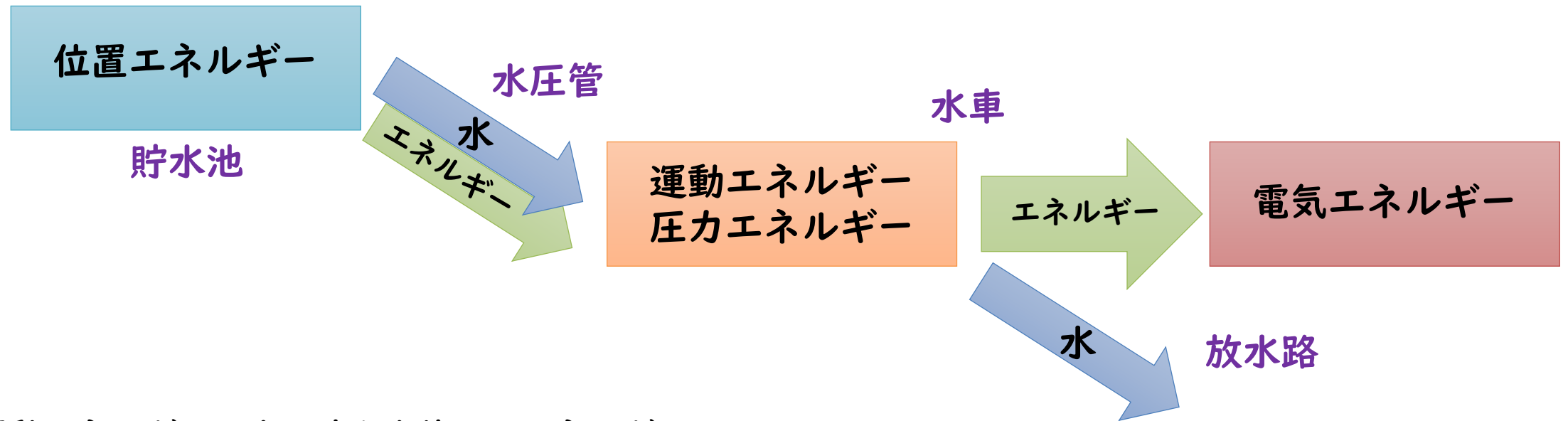


電験二種 オンライン講座

電力管理 水力発電 水力発電の出力に関する計算問題

水力発電

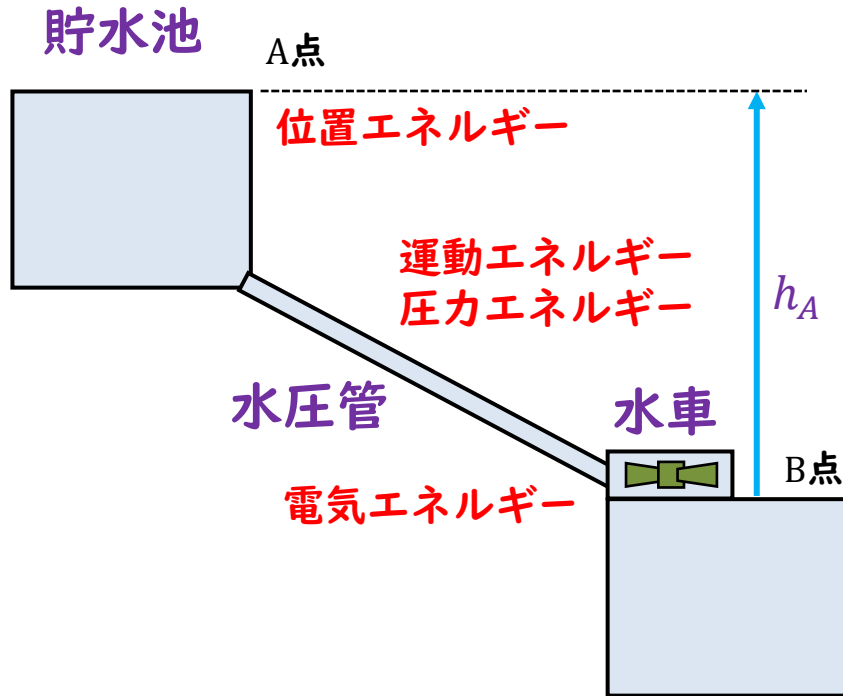
水が高いところから低いところへ落ちるときに発生するエネルギーを利用して、水車（発電機）を回転させて電力を得る



運動エネルギー：水の速さを使ったエネルギー

圧力エネルギー：水の重さ（押し付ける力）を使ったエネルギー

水力学 (水頭と電力)



$$h_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = h_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} = \text{一定 [m]}$$

ベルヌーイの定理
※単位が『m』であることに注意
各エネルギーを位置エネルギーの高さに換算したもので『水頭』という

A点からB点までの全てのエネルギーが電気エネルギーに変換されることを考えると

$$h_A + 0 + 0 = 0 + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} \rightarrow h_A = \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g}$$

B点の圧力エネルギーと運動エネルギーが全て電気エネルギーに変わる

位置エネルギー
 $U_A = F \cdot h_A = mg \cdot h_A = \rho V g \cdot h_A$

電力はエネルギーの時間変化量なので

$$P = \frac{dU_A}{dt} = \frac{d}{dt} (\rho V g h_A) = \rho g h_A \frac{dV}{dt} = \rho g h_A Q$$

体積の時間変化量は流量 Q [m³/s]
連続の定理より流量はどこでも同じ

理論水力
 $P_0 = 9.8 QH$ [kW]

$$P \text{ [W]} = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \times 9.8 \text{ [N/kg]} \times Q h_A \rightarrow P \text{ [kW]} = 9.8 \times Q h_A$$

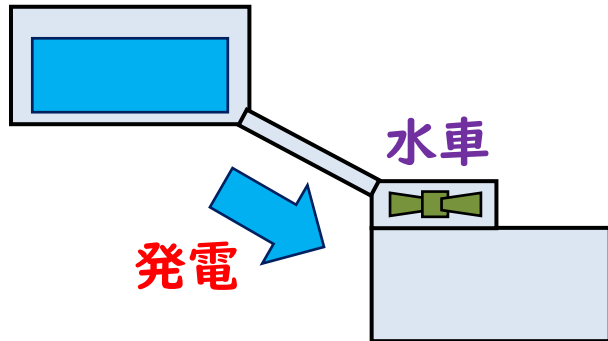
水は1000 cm³で1 kg
1 m³で1000 kg

揚力発電所

日中→ピーク電力を補うために発電
夜間→余った電力を使って上部貯水槽に水をためる (揚水)

水車とポンプが同じ→ ポンプ水車式
水車とポンプの軸を共有→ タンデム式
水車とポンプが別々→ 別置式

上部貯水槽

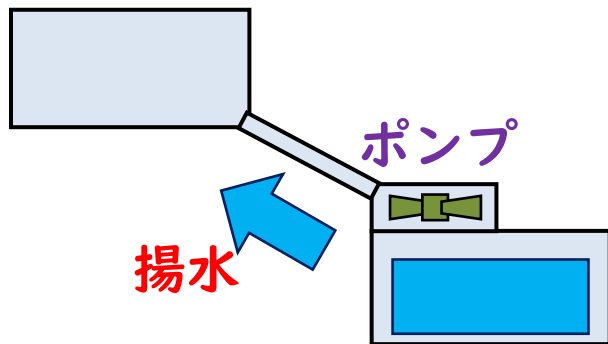


出力電力

$$P_o = 9.8Q_G (H - \text{損失水頭}) \times \eta_G \times \eta_T$$

総落差： H [m]
発電時の流量： Q_G [m³/s]
発電効率： η_G
水車効率： η_T

上部貯水槽



揚水入力 (ポンプに供給する電力)

(揚力入力) × (効率) = ポンプの消費電力

$$P_I \times \eta_M \times \eta_P = 9.8Q_P (H + \text{損失水頭})$$

$$P_I = 9.8Q_P (H + \text{損失水頭}) \times \frac{1}{\eta_M \times \eta_P}$$

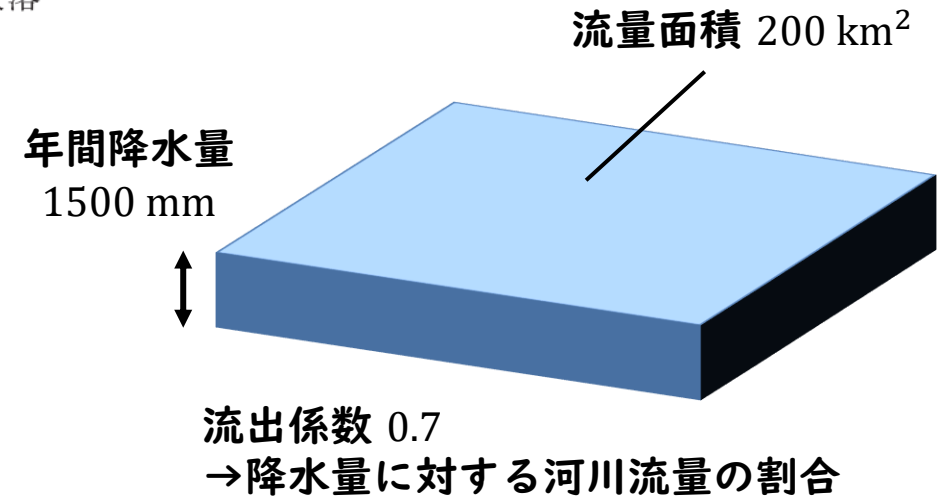
総落差： H [m]
揚水量： Q_P [m³/s]
電動機効率： η_M
ポンプ効率： η_P

H30 問1

問1 河川の流域面積が 200 km^2 ，年間降水量が 1500 mm ，流出係数 0.7 の河川がある。この河川に最大使用水量が年間平均流量の 2 倍の自流式発電所を設置するとき，次の問に答えよ。

ただし，取水口標高 420 m ，水車中心標高 185 m ，放水口標高 200 m ，損失落差を総落差の 5% ，水車効率 90% ，発電機効率 98% ，1年は 365 日とする。

(1) この河川の年間平均流量 $[\text{m}^3/\text{s}]$ を求めよ。



(2) 発電所の最大出力 $[\text{kW}]$ を求めよ。

理論水力

$$P_0 = 9.8 QH [\text{kW}]$$

効率の考え方



出力

H30 問1

問1 河川の流域面積が 200 km^2 、年間降水量が 1500 mm 、流出係数 0.7 の河川がある。この河川に最大使用水量が年間平均流量の 2 倍の自流式発電所を設置するとき、次の問に答えよ。

ただし、取水口標高 420 m 、水車中心標高 185 m 、放水口標高 200 m 、損失落差を総落差の 5% 、水車効率 90% 、発電機効率 98% 、1年は 365 日とする。

(1) この河川の年間平均流量 [m^3/s] を求めよ。

1 年間で使える水の量 = 河川の流域面積 \times 年間降水量 \times 流出係数

$$\frac{200 \text{ km}^2 \times 1500 \text{ mm} \times 0.7}{365 \text{ 日} \times 24 \text{ 時} \times 3600 \text{ 秒}} = \frac{200 \times 10^6 \times 1500 \times 10^{-3} \times 0.7}{365 \times 24 \times 3600} = 6.659 \text{ m}^3/\text{s}$$

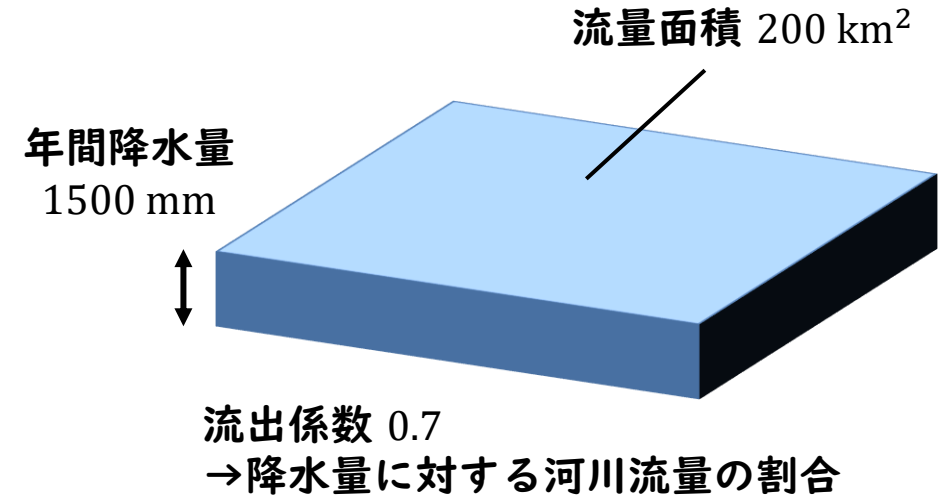
(2) 発電所の最大出力 [kW] を求めよ。

最大使用水量 Q_{max} は年間平均流量の 2 倍なので、

$$Q_{max} = 2 \times 6.659 = 13.318 \text{ m}^3/\text{s}$$

理論水力より

$$P = 9.8HQ\eta_T\eta_G = 9.8 \times (1 - 0.05) \times (420 - 200) \times 13.318 \times 0.9 \times 0.98 = 24059 \text{ kW}$$



H24 問1

問1 1台のポンプ水車と発電電動機による揚水発電所について、次の問に答えよ。ただし、諸元は次のとおりとし、貯水池水位の変動に伴う有効落差の変化はないものとする。

(1) 電動機の最大皮相電力を S_M [MV·A]、電動機出力（ポンプ入力）を機械最大出力 P_M [MW]、電動機入力を P_{Mi} [MW]、発電機容量を S_G [MV·A]、発電機の最大出力を P_G [MW] とした場合、次の関係式の に当てはまる記号を答えよ。

$$\cdot P_M = P_{Mi} \times \text{A}$$

$$\cdot P_{Mi} = \text{B} \times \text{C}$$

$$\cdot P_G = \text{D} \times \text{E}$$

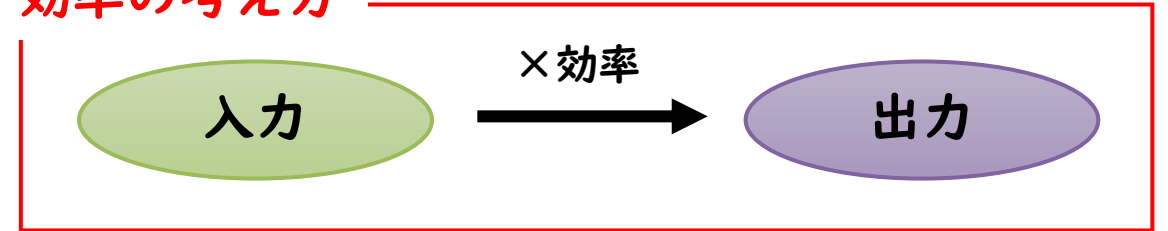
(2) さらに、発電機容量 S_G [MV·A] が電動機の最大皮相電力 S_M [MV·A] と同じとした場合、発電使用水量 Q_G [m³/s] を P_M など与えられた記号を用いて表せ。

(3) (2)の条件において、 $P_M=100$ [MW] の場合の発電使用水量 Q_G を計算せよ。

(4) (3)の条件において、有効貯水池容量をすべて使用するときの発電時間を計算せよ。

項目	記号	数値	単位	項目	記号	数値
有効貯水池容量	V	2×10^6	[m ³]	電動機効率	η_M	0.97
満水時静落差	H	150	[m]	発電機効率	η_G	0.95
発電時水路損失	H_L	10	[m]	ポンプ効率	η_P	0.88
重力加速度	g	9.8	[m/s ²]	水車効率	η_T	0.90
水の密度	ρ	1000	[kg/m ³]	電動機力率	ϕ_M	1.00
主変圧器容量	T	150	[MV·A]	発電機力率	ϕ_G	0.80

効率の考え方



理論水力

$$P_0 = 9.8 QH \text{ [kW]}$$

H24 問1

問1 1台のポンプ水車と発電電動機による揚水発電所について、次の問に答えよ。ただし、諸元は次のとおりとし、貯水池水位の変動に伴う有効落差の変化はないものとする。

(1) 電動機の最大皮相電力を S_M [MV・A]、電動機出力（ポンプ入力）を機械最大出力 P_M [MW]、電動機入力を P_{Mi} [MW]、発電機容量を S_G [MV・A]、発電機の最大出力を P_G [MW] とした場合、次の関係式の に当てはまる記号を答えよ。

$$\begin{aligned} \cdot P_M &= P_{Mi} \times \text{A} \eta_M \\ \cdot P_{Mi} &= \text{B} S_M \times \text{C} \phi_M \\ \cdot P_G &= \text{D} S_G \times \text{E} \phi_G \end{aligned}$$

(2) さらに、発電機容量 S_G [MV・A] が電動機の最大皮相電力 S_M [MV・A] と同じとした場合、発電使用水量 Q_G [m³/s] を P_M など与えられた記号を用いて表せ。

(1) より P_G は

$$P_G = S_G \phi_G = S_M \phi_G = \frac{P_{Mi}}{\phi_M} \phi_G = \frac{P_M}{\phi_M \eta_M} \phi_G$$

理論水力より ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ であることに注意)

$$P_G = g\rho(H - H_L)Q_G\eta_T\eta_G \text{ [W]}$$

$$Q_G = \frac{P_G}{g\rho(H - H_L)\eta_T\eta_G} = \frac{1}{g\rho(H - H_L)\eta_T\eta_G} \cdot \frac{P_M\phi_G}{\phi_M\eta_M}$$

項目	記号	数値	単位	項目	記号	数値
有効貯水池容量	V	2×10^6	[m ³]	電動機効率	η_M	0.97
満水時静落差	H	150	[m]	発電機効率	η_G	0.95
発電時水路損失	H_L	10	[m]	ポンプ効率	η_P	0.88
重力加速度	g	9.8	[m/s ²]	水車効率	η_T	0.90
水の密度	ρ	1000	[kg/m ³]	電動機力率	ϕ_M	1.00
主変圧器容量	T	150	[MV・A]	発電機力率	ϕ_G	0.80

(3) (2)の条件において、 $P_M = 100$ [MW] の場合の発電使用水量 Q_G を計算せよ。

(4) (3)の条件において、有効貯水池容量をすべて使用するときの発電時間を計算せよ。

H24 問1

問1 1台のポンプ水車と発電電動機による揚水発電所について、次の問に答えよ。ただし、諸元は次のとおりとし、貯水池水位の変動に伴う有効落差の変化はないものとする。

(1) 電動機の最大皮相電力を S_M [MV・A]、電動機出力（ポンプ入力）を機械最大出力 P_M [MW]、電動機入力を P_{Mi} [MW]、発電機容量を S_G [MV・A]、発電機の最大出力を P_G [MW] とした場合、次の関係式の に当てはまる記号を答えよ。

$$\begin{aligned} \cdot P_M &= P_{Mi} \times \text{A} \eta_M \\ \cdot P_{Mi} &= \text{B} S_M \times \text{C} \phi_M \\ \cdot P_G &= \text{D} S_G \times \text{E} \phi_G \end{aligned}$$

(2) さらに、発電機容量 S_G [MV・A] が電動機の最大皮相電力 S_M [MV・A] と同じとした場合、発電使用水量 Q_G [m³/s] を P_M など与えられた記号を用いて表せ。

(1) より P_G は

$$P_G = S_G \phi_G = S_M \phi_G = \frac{P_{Mi}}{\phi_M} \phi_G = \frac{P_M}{\phi_M \eta_M} \phi_G$$

理論水力より ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ であることに注意)

$$P_G = g\rho(H - H_L)Q_G\eta_T\eta_G \text{ [W]}$$

$$Q_G = \frac{P_G}{g\rho(H - H_L)\eta_T\eta_G} = \frac{1}{g\rho(H - H_L)\eta_T\eta_G} \cdot \frac{P_M\phi_G}{\phi_M\eta_M}$$

項目	記号	数値	単位	項目	記号	数値
有効貯水池容量	V	2×10^6	[m ³]	電動機効率	η_M	0.97
満水時静落差	H	150	[m]	発電機効率	η_G	0.95
発電時水路損失	H_L	10	[m]	ポンプ効率	η_P	0.88
重力加速度	g	9.8	[m/s ²]	水車効率	η_T	0.90
水の密度	ρ	1000	[kg/m ³]	電動機力率	ϕ_M	1.00
主変圧器容量	T	150	[MV・A]	発電機力率	ϕ_G	0.80

(3) (2)の条件において、 $P_M = 100$ [MW] の場合の発電使用水量 Q_G を計算せよ。

$$\begin{aligned} Q_G &= \frac{1}{g\rho(H - H_L)\eta_T\eta_G} \cdot \frac{P_M\phi_G}{\phi_M\eta_M} \\ &= \frac{1}{9.8 \times 1000 \times (150 - 10) \times 0.9 \times 0.95} \times \frac{100 \times 10^6 \times 0.8}{1.00 \times 0.97} \\ &= 70.31 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

(4) (3)の条件において、有効貯水池容量をすべて使用するときの発電時間を計算せよ。

$$V = Q_G t \rightarrow t \text{ [s]} = \frac{V}{Q_G} \rightarrow t \text{ [h]} = \frac{V}{Q_G} \times \frac{1}{3600}$$

$$t \text{ [h]} = \frac{2 \times 10^6}{70.31} \times \frac{1}{3600} = 7.902 \text{ h}$$

H2I 問I

問1 水車の案内羽根開度及び効率を一定とした場合に，次の問に答えよ。

(1) 水車の出力 P [kW] は有効落差 H [m] の関数として表されるが，その関係を次に示す諸量を表す記号を用いて式で表せ。

水車効率を η [%] ，水圧管の断面積を A [m²] ，重力加速度を g [m/s²] ，管路損失等による流速の低下を考慮した流速係数を k として用いること。

(2) (1)を用いて，有効落差 100 [m] ，最大出力 8000 [kW] の水力発電所が水位変化によって有効落差が 81 [m] に低下したときの最大出力を求めよ。

H2I 問I

問1 水車の案内羽根開度及び効率を一定とした場合に、次の問に答えよ。

(1) 水車の出力 P [kW] は有効落差 H [m] の関数として表されるが、その関係を次に示す諸量を表す記号を用いて式で表せ。

水車効率を η [%] , 水圧管の断面積を A [m²] , 重力加速度を g [m/s²] , 管路損失等による流速の低下を考慮した流速係数を k として用いること。

運動エネルギーと位置エネルギーの関係より流速 v は

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{2gH}$$

実際の速度は流速係数 k が影響することから

$$v = k\sqrt{2gH}$$

理論水力より ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)

$$P = g\rho HQ \frac{\eta}{100}, \quad Q = Av$$

$$P = g\rho HQ\eta = g\rho H\eta Av = g\rho H\eta A \times k\sqrt{2gH}$$

$$P = \sqrt{2}k\rho A \frac{\eta}{100} g^{\frac{3}{2}} H^{\frac{3}{2}}$$

(2) (1)を用いて、有効落差 100 [m] , 最大出力 8000 [kW] の水力発電所が水位変化によって有効落差が 81 [m] に低下したときの最大出力を求めよ。

(1) の式より

$$P = \sqrt{2}k\rho A \frac{\eta}{100} g^{\frac{3}{2}} H^{\frac{3}{2}} \rightarrow \sqrt{2}k\rho A \frac{\eta}{100} g^{\frac{3}{2}} = \frac{P}{H^{\frac{3}{2}}} = \frac{8000 \text{ kW}}{100^{\frac{3}{2}}}$$

有効落差を 81 m とすると、

$$P' = 8 \times 81^{\frac{3}{2}} = 8 \times 81 \times \sqrt{81} = 5832 \text{ kW}$$

ご聴講ありがとうございました!!