電験二種　オンライン講座

電力管理 水力発電

2025.11.02 Sun

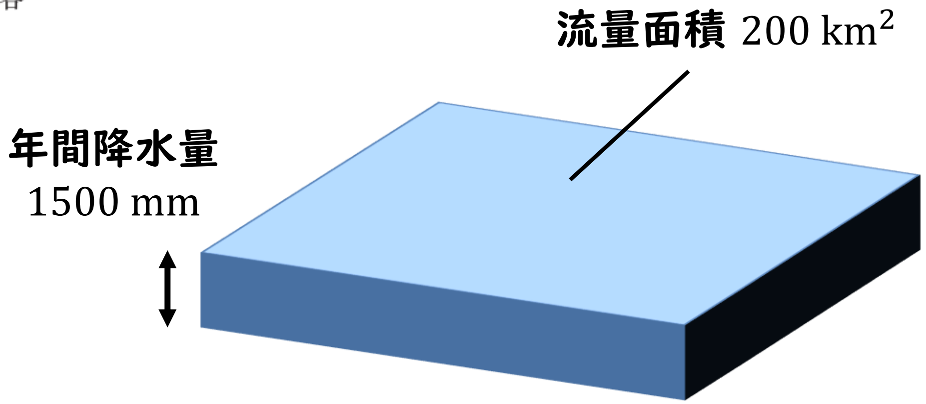
H30 問1

問1　河川の流域面積が 200 km^2，年間降水量が 1 500 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。

(2)　発電所の最大出力[kW]を求めよ。



流出係数 0.7
→降水量に対する河川流量の割合

理論水力

$$P_0 = 9.8\,QH\ [\mathrm{kW}]$$

効率の考え方

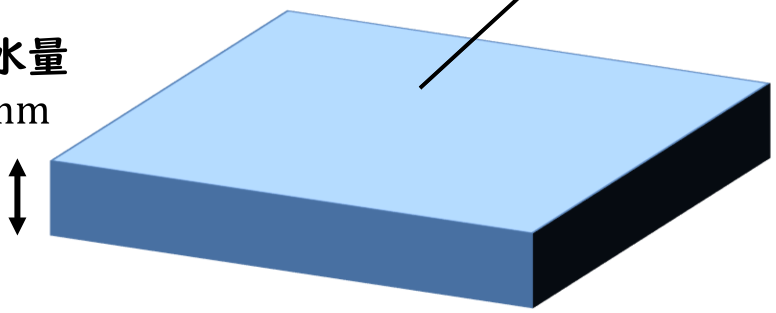
入力 ×効率 → 出力

H30 問1

問1　河川の流域面積が 200 km^2，年間降水量が 1 500 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[m³/s]を求めよ。



1年間で使える水の量＝河川の流域面積×年間降水量×流出係数

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

(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、

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

理論水力より

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

R04 問1

問1　調整池式の水力発電所の運用に関して，次の問に答えよ。

有効貯水量 $180\times10^3\ \mathrm{m}^3$ の調整池を有する有効落差 60 m の水力発電所がある。自然流量が $20\ \mathrm{m^3/s}$ であるとき，図に示す負荷曲線で運転した場合のピーク負荷時の出力[kW]及びオフピーク負荷時の出力[kW]を求めよ。ただし，年間を通して毎日同様の運転を繰り返すものとし，調整池は最大限活用し，オフピーク負荷時には越流させないこととする。

なお，水車と発電機の合成効率は，ピーク負荷時出力で 85 %，オフピーク負荷時出力で 80 %とする。

また，発電機の定格出力はピーク負荷を十分供給できるものとする。

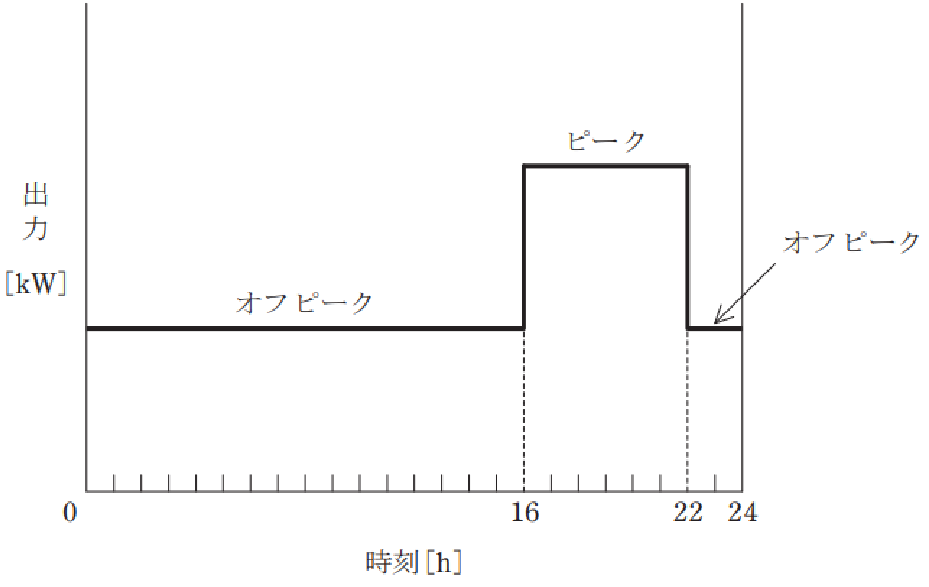


図　負荷曲線(運転パターン)

R04 問1

e-DEN【イーデン】 × 電験どうでしょう Let me inject Energy to you!

問1　調整池式の水力発電所の運用に関して，次の問に答えよ。

有効貯水量 $180\times10^3\ \mathrm{m}^3$ の調整池を有する有効落差 60 m の水力発電所がある。自然流量が $20\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ であるとき，図に示す負荷曲線で運転した場合のピーク負荷時の出力[kW]及びオフピーク負荷時の出力[kW]を求めよ。ただし，年間を通して毎日同様の運転を繰り返すものとし，調整池は最大限活用し，オフピーク負荷時には越流させないこととする。

なお，水車と発電機の合成効率は，ピーク負荷時出力で 85 %，オフピーク負荷時出力で 80 %とする。

また，発電機の定格出力はピーク負荷を十分供給できるものとする。

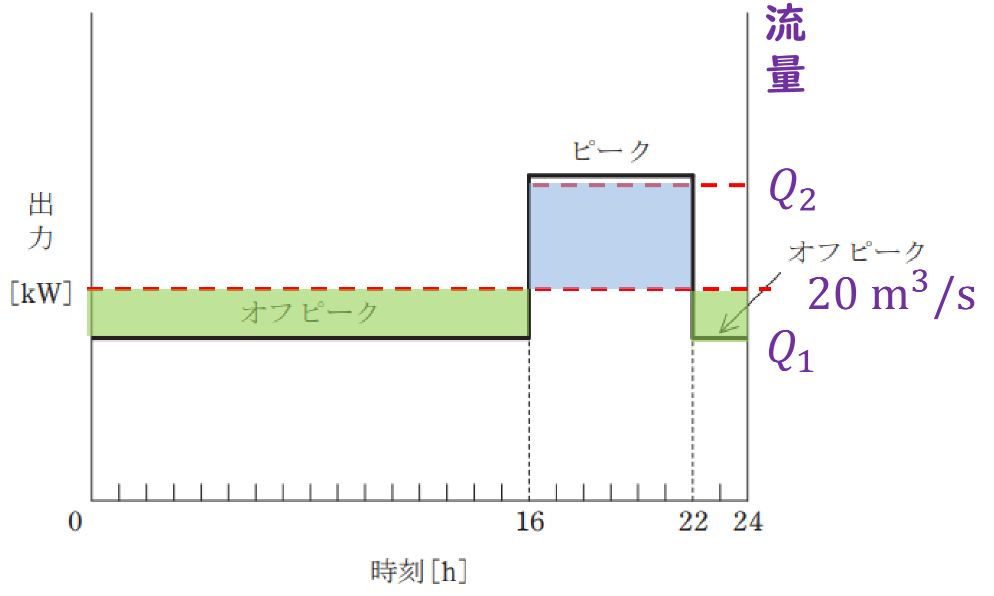


図　負荷曲線(運転パターン)

オフピーク時の流量：Q_1
ピーク時の流量：Q_2

$$(20-Q_1)\times18\times3600=180\times10^3$$

$$Q_1=20-\frac{180\times10^3}{18\times3600}=17.222\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

$$(20-Q_1)\times18[\mathrm{h}]=(Q_2-20)\times6[\mathrm{h}]$$
$$(20-Q_1)\times3=Q_2-20$$
$$Q_2=80-3Q_1=28.333\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

オフピーク時の出力：P_1
ピーク時の出力：P_2

$$P_1=\eta_1\times9.8Q_1H=0.80\times9.8\times17.222\times60=8{,}101.2\sim8{,}100\ \mathrm{kW}$$

$$P_2=\eta_2\times9.8Q_2H=0.85\times9.8\times28.333\times60=14{,}160.8\sim14{,}200\ \mathrm{kW}$$

H21 問1

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〔m^2〕，重力加速度を g〔m/s^2〕，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 8 000〔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。

H21 問1

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〔m^2〕，重力加速度を g〔m/s^2〕，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 8 000〔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。

運動エネルギーと位置エネルギーの関係より流速vは

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

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($\rho = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$)

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

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

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

（１）の式より

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

有効落差を$81\ \mathrm{m}$**とすると、**

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

問1　水車発電機の定格回転速度の選定の考え方に関して，次の問に答えよ。

周波数 60 Hz の系統の地点において，有効落差 162 m，出力 40 MW のフランシス水車1台を設置する場合，最も適切な水車の定格回転速度[min^{-1}]及び発電機の極数を求めたい。

(1) フランシス水車において，適用できる比速度と有効落差の関係が，次式によって表されるとき，次式に基づき算出される回転速度の上限値を求めよ。

$$n_s \leqq \frac{23\,000}{H+30}+40$$

ただし，n_s：比速度（m・kW 基準），H：有効落差[m]とする。

なお，比速度 n_s は，出力 P[kW]，回転速度 N[min^{-1}]としたとき，

$$n_s = \frac{N \times P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$ で与えられる。

(2) 選定すべき定格回転速度を求めよ。また，その理由を 100 文字程度で述べよ。

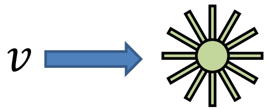
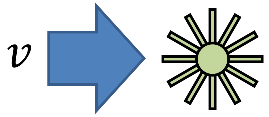
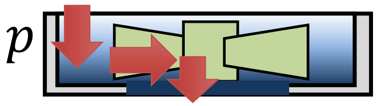
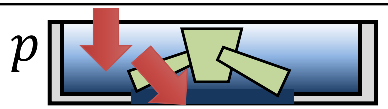
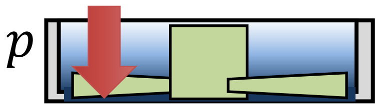
(3) 小問(2)の場合の発電機の極数を導出せよ。

比速度

比速度：水車の形状はそのまま大きさを変えて、単位落差(1 m)で単位出力(1 kW)を発生させる仮想水車の回転速度のこと

$$n_s = n\frac{P^{1/2}}{H^{5/4}} = n\frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

n_s: **比速度**
n: **水車の回転速度** $[\mathrm{min}^{-1}]$
P: **定格出力** [kW]
H: **有効落差**[m]
Q: **流量**$[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$

水車の種類		適用落差 H [m]	比速度 n_s	水車構造
衝動水車	ペルトン水車	150 ~ 800	17 ~ 25	
	クロスフロー水車	5 ~ 100	50 ~ 225	
反動水車	フランシス水車	40 ~ 500	75 ~ 350	
	斜流水車	40 ~ 180	140 ~ 370	
	プロペラ水車（カプラン）水車	5 ~ 80	250 ~ 980	

比速度が大きいと水車は回転しやすいが、高落差に適さない

R02 問1

問1　水車発電機の定格回転速度の選定の考え方に関して，次の問に答えよ。

周波数 60 Hz の系統の地点において，有効落差 162 m，出力 40 MW のフランシス水車1台を設置する場合，最も適切な水車の定格回転速度[min^{-1}]及び発電機の極数を求めたい。

(1)　フランシス水車において，適用できる比速度と有効落差の関係が，次式によって表されるとき，次式に基づき算出される回転速度の上限値を求めよ。

$$n_s \leqq \frac{23\,000}{H+30}+40$$

ただし，n_s：比速度（m·kW 基準），H：有効落差[m]とする。

なお，比速度 n_s は，出力 P[kW]，回転速度 N[min^{-1}]としたとき，

$$n_s=\frac{N\times P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$ で与えられる。

$$n_s \leq \frac{23000}{H+30}+40=\frac{23000}{162+30}+40=159.79$$

$$n_s \leq 159.79$$

$$n_s=\frac{N\times P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \rightarrow N=n_s\frac{H^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}}=n_s\times\frac{H\times H^{\frac{1}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}}$$

$$N=159.79\times\frac{162\times\sqrt{\sqrt{162}}}{\sqrt{40\times10^3}}=461.78\ \mathrm{min}^{-1}$$

R02 問1

問1　水車発電機の定格回転速度の選定の考え方に関して，次の問に答えよ。

周波数 60 Hz の系統の地点において，有効落差 162 m，出力 40 MW のフランシス水車1台を設置する場合，最も適切な水車の定格回転速度[min^{-1}]及び発電機の極数を求めたい。

(2) 選定すべき定格回転速度を求めよ。また，その理由を 100 文字程度で述べよ。

(3) 小問(2)の場合の発電機の極数を導出せよ。

周波数60 Hzの同期発電機の同期速度N_sは

$$N_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 60}{p} = \frac{7200}{p}$$

となり、極数pに応じた離散的な値しかとることができない。
ここで、設問（１）の解$N = 461.78\ \mathrm{min}^{-1}$が上限となることから、

$$N_s = \frac{7200}{16} = 450\ \mathrm{min}^{-1}$$

が選定すべき定格周波数となる。
このときの極数は、$p = 16$となる。

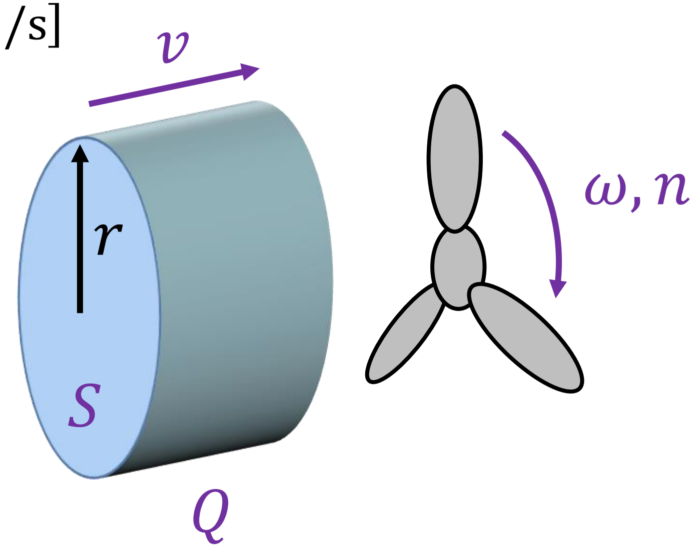
比速度の公式導出

e-DEN【イーデン】 × 電験どうでしょう Let me inject Energy to you!

比速度：水車の形状はそのまま大きさを変えて、単位落差(1 m)で単位出力(1 kW)を発生させる仮想水車の回転速度のこと

$$n_s = n\frac{P^{1/2}}{H^{5/4}} = n\frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

n_s: **比速度**
n: **水車の回転速度** [min^{-1}]
P: **定格出力** [kW]
H: **有効落差**[m]
Q: **流量**[m^3/s]



$$\frac{1}{2}mv^2 = mgH \ \rightarrow H \propto v^2$$

$$v = r\omega = r \cdot 2\pi\frac{n}{60} \ \rightarrow v \propto rn$$

$$H \propto r^2n^2 \ \rightarrow r \propto \frac{H^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$Q = Sv = \pi r^2 v \ \rightarrow Q \propto r^2 v \ \rightarrow \ Q \propto r^2(rn) \ \rightarrow \ Q \propto r^3 n$$

$$Q \propto \left(\frac{H^{\frac{1}{2}}}{n}\right)^3 n \ \rightarrow Q \propto \frac{H^{\frac{3}{2}}}{n^2}$$

$$n^2 \propto \frac{H^{\frac{3}{2}}}{Q} \ \rightarrow \ n \propto \frac{H^{\frac{3}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = 9.8QH \ \rightarrow Q \propto \frac{P}{H}$$

$$n \propto \frac{H^{\frac{3}{4}}}{\left(\frac{P}{H}\right)^{\frac{1}{2}}} \ \rightarrow n \propto \frac{H^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}}$$

状態１：P, H, n → $n = k\dfrac{H^{\frac{3}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}}$

状態２：1 [kW] , 1 [m], n_s → $n_s = k\dfrac{1^{\frac{3}{4}}}{1^{\frac{1}{2}}} = k$

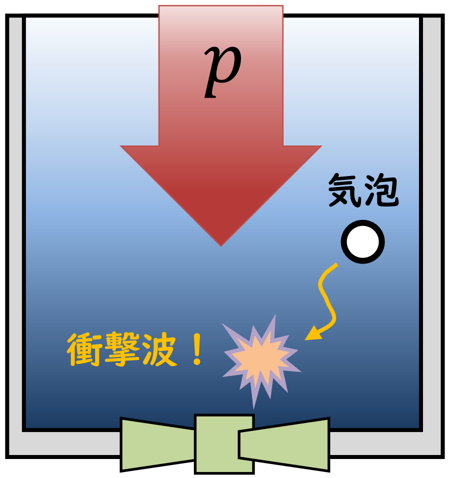
$$\frac{n}{n_s} = \frac{k\frac{H^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}}}{k} = \frac{H^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}} \ \rightarrow n_s = n\frac{P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = n\frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

キャビテーション

管内で発生した水蒸気の気泡が水車部分で圧縮され、衝撃波となって消滅すること

なぜ水蒸気の気泡が発生？

気圧が低いと沸点が下がるように、水の周りの圧力が低いと
一部の水が水蒸気となる

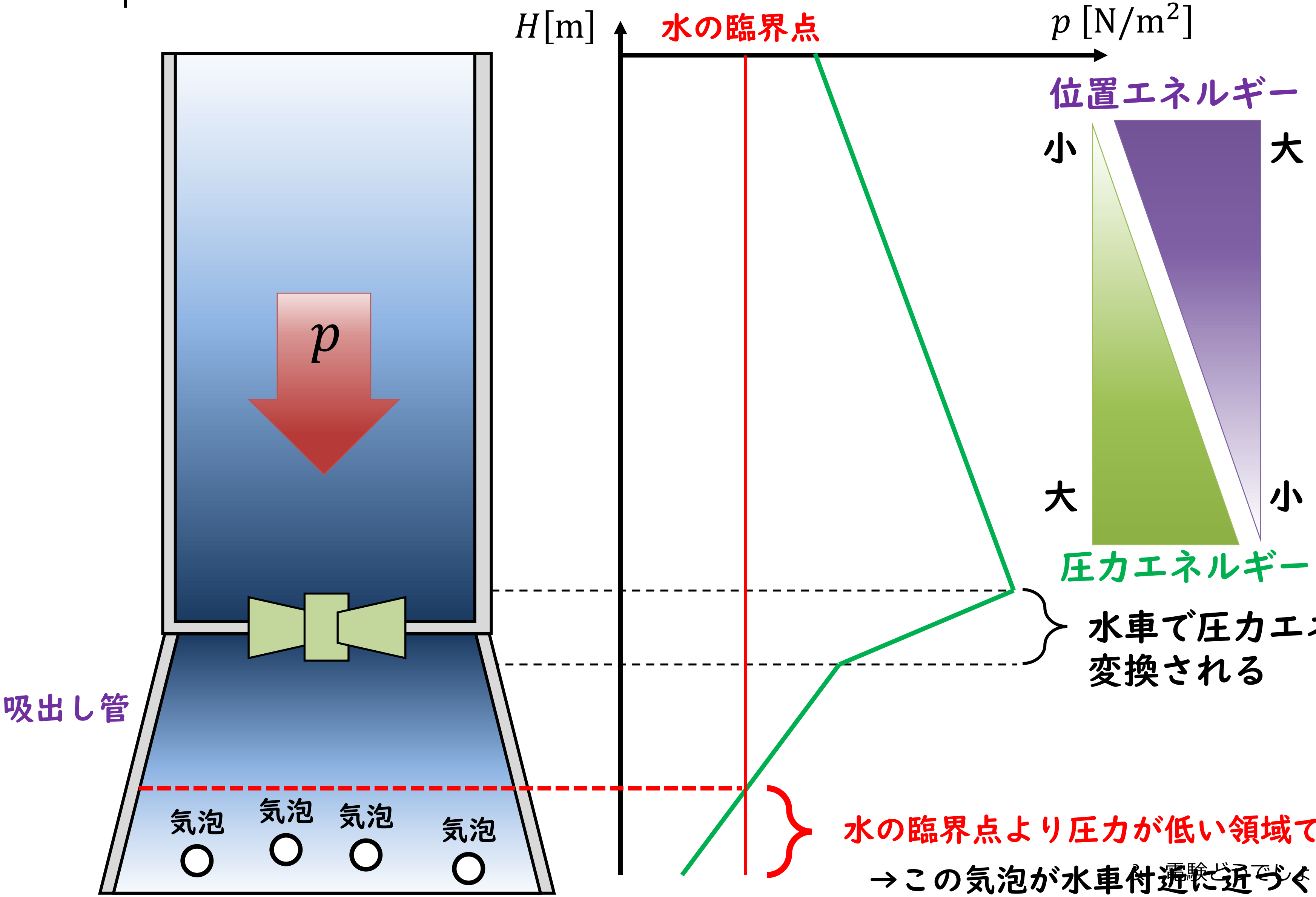


キャビテーションの原因は
水車付近（高圧力領域）の近くで水蒸気が発生（低圧力領域）が
できる圧力分布になること

キャビテーションが起こると、
・ランナで振動や騒音が発生
・ガイドベーンやランナが壊食

キャビテーション

【イーデン】 e-DEN × 電験どうでしょう Let me inject Energy to you!



$$H = \boxed{\frac{p_B}{\rho g}} + \frac{v_B^2}{2g}$$

反動水車は
速度水頭が小さい

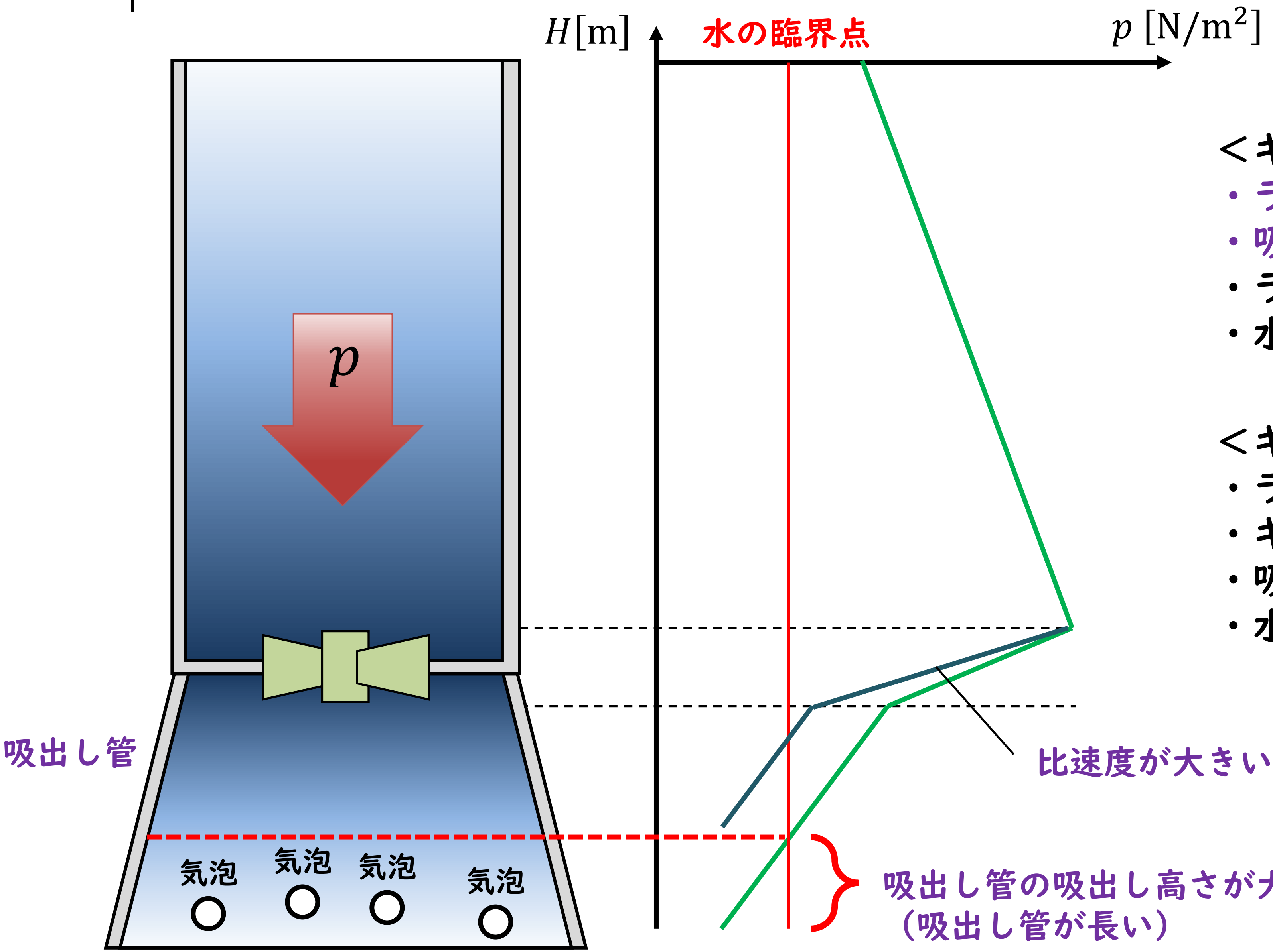
水車に近づくにつれて位置水頭
が圧力水頭に変換される

水車で圧力エネルギーが電気エネルギー
変換される

水の臨界点より圧力が低い領域で水蒸気が発生する

→この気泡が水車付近に近づくと、キャビテーションが発生

キャビテーション



＜キャビテーションの原因＞
・ランナの比速度が大きい
・吸出し管の吸出し高さが大きい
・ランナの表面仕上げが悪い
・水に接する部分の形状が適切でない

＜キャビテーションの防止策＞
・ランナの表面を平滑に仕上げる
・キャビテーションに耐えられる材料
・吸出し管に空気を入れる（圧力を上げる）
・水車の回転速度を上げすぎない

ご聴講ありがとうございました!!