

電験どうでしょう管理人  
KWG presents

# 電験オンライン塾

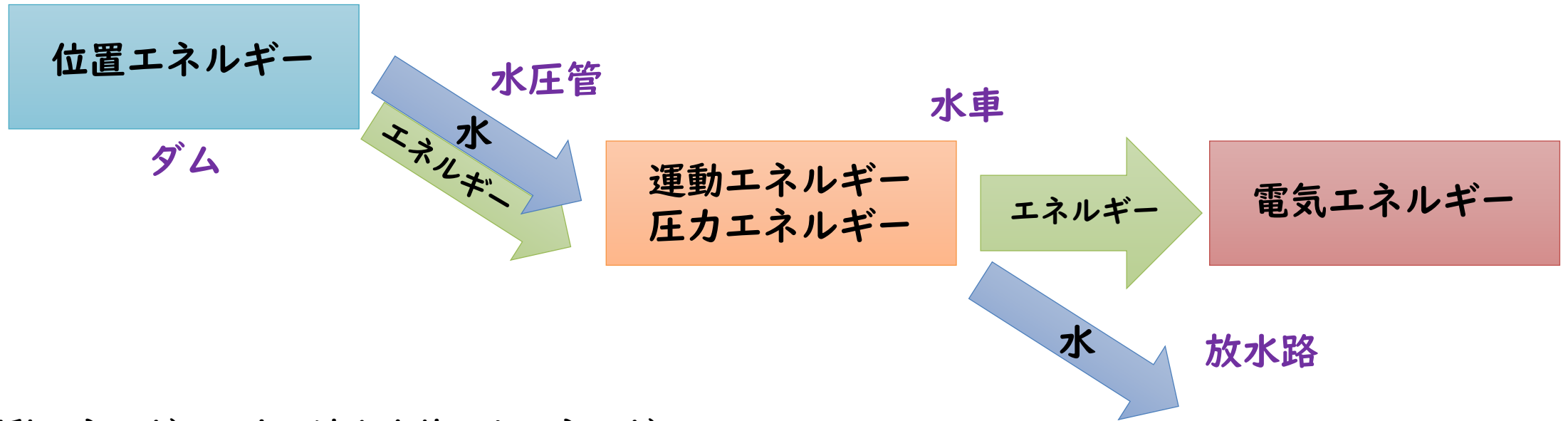
## 第1回

# 水力発電所の種類 ベルヌーイの定理

2022.04.09 Sat

# 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

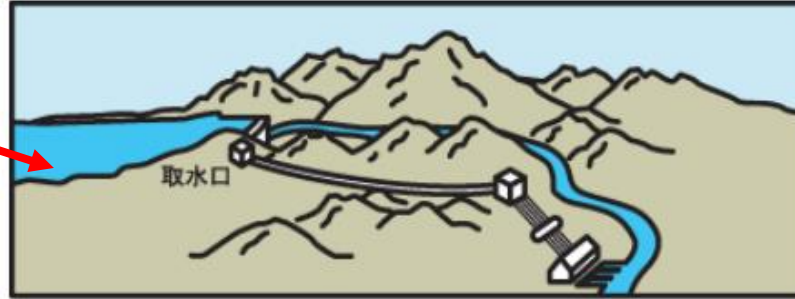


運動エネルギー：水の速さを使ったエネルギー

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

# 水力発電の分類

取水ダム  
河川上流で水を蓄えるための小さなダム



沈砂池  
水中の土砂などを取り除くための池

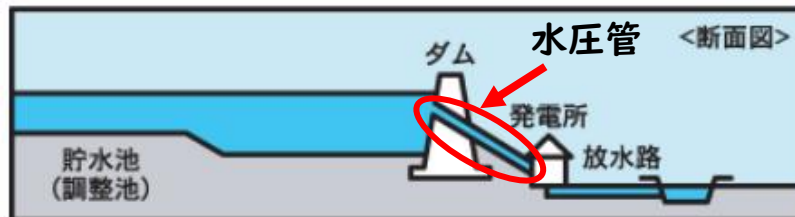
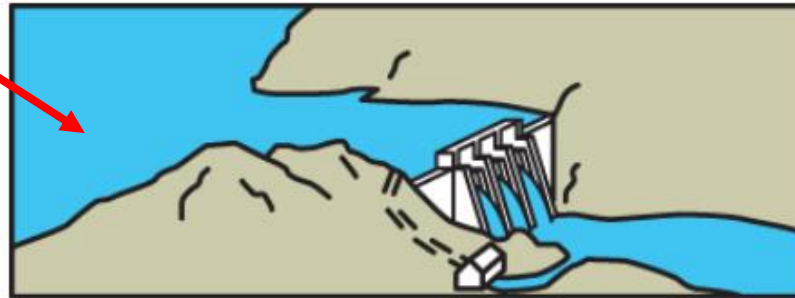


水路式発電：  
河川の上流に取水ダムを設けて、緩やかな水路で水を運び発電所付近の河川の落差を得て発電

水路  
発電所付近まで緩やかな傾斜で水を運ぶ

水圧管  
内部が水で充満した水路（圧力を逃がさないように）  
水の速度エネルギーと圧力エネルギーを発電機まで運ぶ

貯水池（調整池）  
河川をせき止めて水位をかせぐ



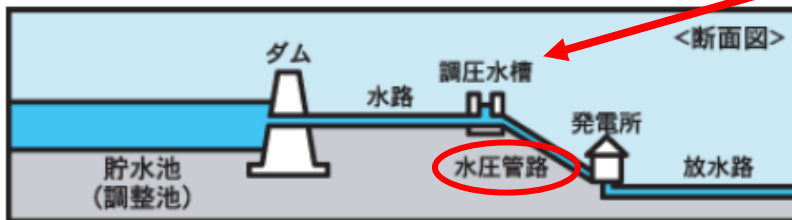
ダム式発電：  
河川を横断して高いダムを築造し、河川をせき止めることでできる水位の落差を得て発電

# 水力発電の分類

貯水池（調整池）  
河川をせき止めて水  
位をかせぐ



ダム水路式発電：  
ダムの水位と水路から発電所までの高低差できる  
落差を得て発電

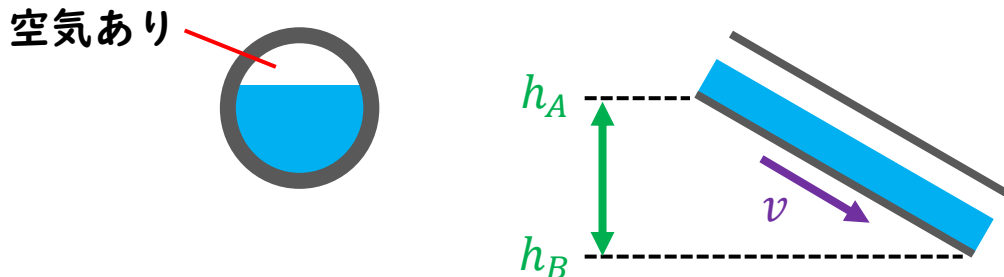


調圧水槽（サージタンク）  
水圧管内で圧力変動が生じたときに起こる衝撃波  
（水撃作用/ウォーターハンマー）を抑制するた  
めのクッションとして働く（圧力の逃げ道）

[https://www.chuden.co.jp/energy/renew/ren\\_shikumi/wat\\_shikumi/wat\\_hatsuden/](https://www.chuden.co.jp/energy/renew/ren_shikumi/wat_shikumi/wat_hatsuden/)

## 水路の種類と流速

水路（開きよ、無圧トンネル）



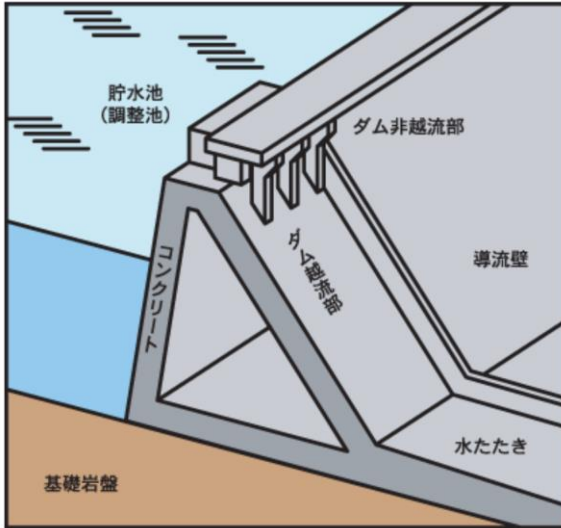
流速 $v$  は高低差で決まる

水圧管



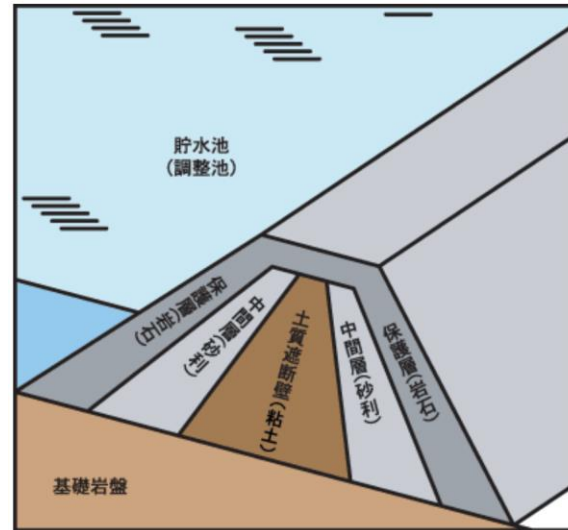
流速 $v$  は圧力差で決まる

# ダムの分類



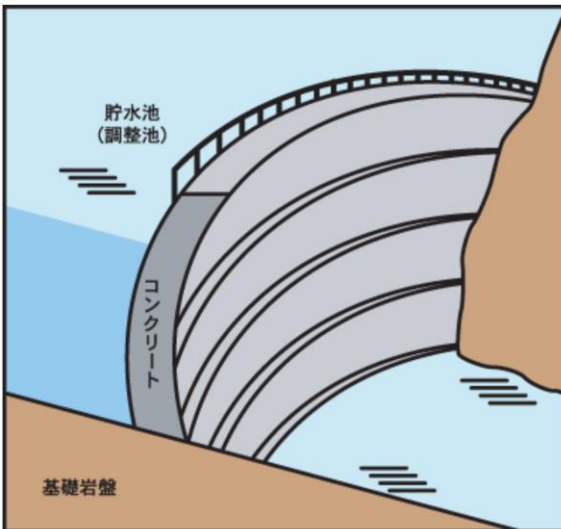
## 重カダム/中空重カダム：

ダム自体の重みで各種の外力に耐える。地震対して安全性が高く、日本のダムの約90%がこの方式。コストを下げるため、内部を空洞にしたものを中空重カダムという。



## ロックフィルダム：

岩石を積み上げ、水漏れを防ぐためにダムの内部または上流面を、水を通さない材料を用いて築いたダム。材料の岩石が近くにある場所には適している。



## アーチダム：

水圧を両岸の岩盤で支えるように、アーチ型にしたダム。ダムの厚さが薄くて済むため、材料コストが抑えられる。ダムの両岸の岩盤に大きな荷重が加わるので、両岸が狭く、岩盤が非常に丈夫な場所に適している。

# R03 問1

問1 次の文章は、水力発電所の種類に関する記述である。

水力発電所は (ア) を得る方法により分類すると、水路式、ダム式、ダム水路式があり、 (イ) の利用方法により分類すると、流込み式、調整池式、貯水池式、揚水式がある。

一般的に、水路式はダム式、ダム水路式に比べ (ウ) 。貯水ができないので発生電力の調整には適さない。ダム式発電では、ダムに水を蓄えることで (イ) の調整ができるので、電力需要が大きいときにあわせて運転することができる。

河川の自然の流れをそのまま利用して発電する方式を (エ) 発電という。貯水池を持たない水路式発電所がこれに相当する。

1日又は数日程度の河川流量を調整できる大きさを持つ池を持ち、電力需要が小さいときにその池に蓄え、電力需要が大きいときに放流して発電する方式を (オ) 発電という。自然の湖や人工の湖などを用いてもっと長期間の需要変動に応じて河川流量を調整・使用する方式を貯水池式発電という。

上記の記述中の空白箇所(ア)～(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	落差	流速	建設期間が長い	調整池式	ダム式
(2)	流速	落差	建設期間が短い	調整池式	ダム式
(3)	落差	流量	高落差を得にくい	流込み式	揚水式
(4)	流量	落差	建設費が高い	流込み式	調整池式
(5)	落差	流量	建設費が安い	流込み式	調整池式

# 導出のポイント

問1 次の文章は、水力発電所の種類に関する記述である。

水力発電所は (ア) **落差** を得る方法により分類すると、水路式、ダム式、ダム水路式があり、 (イ) **流量** の利用方法により分類すると、流込み式、調整池式、貯水池式、揚水式がある。

一般的に、水路式はダム式、ダム水路式に比べ (ウ) **建設費が安い**。貯水ができないので発生電力の調整には適さない。ダム式発電では、ダムに水を蓄えることで (イ) **流量** の調整ができるので、電力需要が大きいときにあわせて運転することができる。

河川の自然の流れをそのまま利用して発電する方式を (エ) **流込み式** 発電という。貯水池を持たない水路式発電所がこれに相当する。

1日又は数日程度の河川流量を調整できる大きさを持つ池を持ち、電力需要が小さいときにその池に蓄え、電力需要が大きいときに放流して発電する方式を (オ) **調整池式** 発電という。自然の湖や人工の湖などを用いてもっと長期間の需要変動に応じて河川流量を調整・使用する方式を貯水池式発電という。

水力発電  
位置エネルギー

→運動エネルギー (速度)  
→圧力エネルギー (圧力)

発電機へのエネルギーの取り込み方は異なる  
元となる位置エネルギーとしては「落差」が必要

上記の記述中の空白箇所(ア)～(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	落差	流速	建設期間が長い	調整池式	ダム式
(2)	流速	落差	建設期間が短い	調整池式	ダム式
(3)	落差	流量	高落差を得にくい	流込み式	揚水式
(4)	流量	落差	建設費が高い	流込み式	調整池式
(5)	落差	流量	建設費が安い	流込み式	調整池式

# R02 問1

問1 ダム水路式発電所における水撃作用とサージタンクに関する記述として、誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 発電機の負荷を急激に遮断又は急激に増やした場合は、それに応動して水車の使用水量が急激に変化し、流速が減少又は増加するため、水圧管内の圧力の急上昇又は急降下が起こる。このような圧力の変動を水撃作用という。
- (2) 水撃作用は、水圧管の長さが長いほど、水車案内羽根あるいは入口弁の閉鎖時間が短いほど、いずれも大きくなる。
- (3) 水撃作用の発生による影響を緩和する目的で設置される水圧調整用水槽をサージタンクという。サージタンクにはその構造・動作によって、差動式、小孔式、水室式などがあり、いずれも密閉構造である。
- (4) 圧力水路と水圧管との接続箇所に、サージタンクを設けることにより、水槽内部の水位の昇降によって、水撃作用を軽減することができる。
- (5) 差動式サージタンクは、負荷遮断時の圧力増加エネルギーをライザ(上昇管)内の水面上昇によってすばやく吸収し、そのあとで小穴を通してタンク内の水位をゆっくり通常のタンク内水位に戻す作用がある。

# 導出のポイント

問1 ダム水路式発電所における水撃作用とサージタンクに関する記述として、誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 発電機の負荷を急激に遮断又は急激に増やした場合は、それに応動して水車の使用水量が急激に変化し、流速が減少又は増加するため、水圧管内の圧力の急上昇又は急降下が起こる。このような圧力の変動を水撃作用という。
- (2) 水撃作用は、水圧管の長さが長いほど、水車案内羽根あるいは入口弁の閉鎖時間が短いほど、いずれも大きくなる。
- (3)** 水撃作用の発生による影響を緩和する目的で設置される水圧調整用水槽をサージタンクという。サージタンクにはその構造・動作によって、差動式、小孔式、水室式などがあり、いずれも密閉構造である。
- (4) 圧力水路と水圧管との接続箇所に、サージタンクを設けることにより、水槽内部の水位の昇降によって、水撃作用を軽減することができる。
- (5) 差動式サージタンクは、負荷遮断時の圧力増加エネルギーをライザ(上昇管)内の水面上昇によってすばやく吸収し、そのあとで小穴を通してタンク内の水位をゆっくり通常のタンク内水位に戻す作用がある。

**サージタンクは水圧管内の圧力の逃げ道なので、密閉してはいけない。水圧が大気に逃げない。**

# H29 問1

問1 水力発電所に用いられるダムの種類と特徴に関する記述として、誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 重力ダムとは、コンクリートの重力によって水圧などの外力に耐えられるようにしたダムであって、体積が大きくなるが構造が簡単で安定性が良い。我が国では、最も多く用いられている。
- (2) アーチダムとは、水圧などの外力を両岸の岩盤で支えるようにアーチ型にしたダムであって、両岸の幅が狭く、岩盤が丈夫なところに作られ、コンクリートの量を節減できる。
- (3) ロックフィルダムとは、岩石を積み上げて作るダムであって、内側には、砂利、アスファルト、粘土などが用いられている。ダムは大きくなるが、資材の運搬が困難で建設地付近に岩石や砂利が多い場所に適している。
- (4) アースダムとは、土壌を主材料としたダムであって、<sup>かんがい</sup>灌漑用の池などを作るのに適している。基礎の地質が、岩などで強固な場合にのみ採用される。
- (5) 取水ダムとは、水路式発電所の水路に水を導入するため河川に設けられるダムであって、ダムの高さは低く、越流形コンクリートダムなどが用いられている。

# 導出のポイント

問1 水力発電所に用いられるダムの種類と特徴に関する記述として、誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 重力ダムとは、コンクリートの重力によって水圧などの外力に耐えられるようにしたダムであって、体積が大きくなるが構造が簡単で安定性が良い。我が国では、最も多く用いられている。

(2) アーチダムとは、水圧などの外力を兩岸の岩盤で支えるようにアーチ型にしたダムであって、兩岸の幅が狭く、岩盤が丈夫なところに作られ、コンクリートの量を節減できる。

(3) ロックフィルダムとは、岩石を積み上げて作るダムであって、内側には、砂利、アスファルト、粘土などが用いられている。ダムは大きくなるが、資材の運搬が困難で建設地付近に岩石や砂利が多い場所に適している。

(4) アースダムとは、土壌を主材料としたダムであって、灌漑用の池などを作るのに適している。基礎の地質が、岩などで強固な場合にのみ採用される。

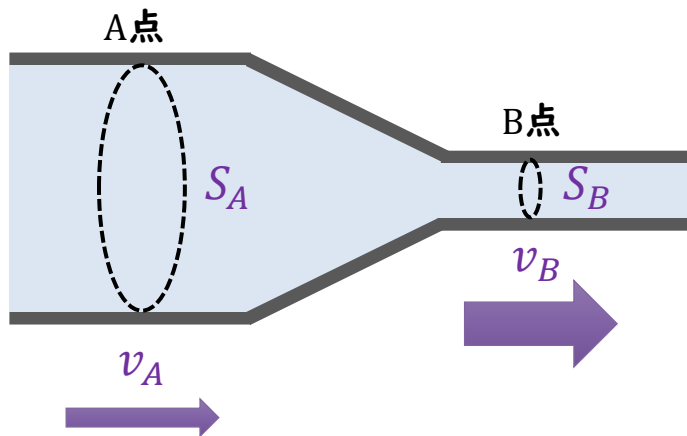
(5) 取水ダムとは、水路式発電所の水路に水を導入するため河川に設けられるダムであって、ダムの高さは低く、越流形コンクリートダムなどが用いられている。

## 基礎の地質が強固

→人工的な基礎（支柱を埋めるなど）が必要な場合  
地盤がしっかりしていないといけない。  
自然材料を使う場合は要求されない。

重力ダム、アーチダムは地盤が重要。

# 水力学 (連続の定理と圧力エネルギー)

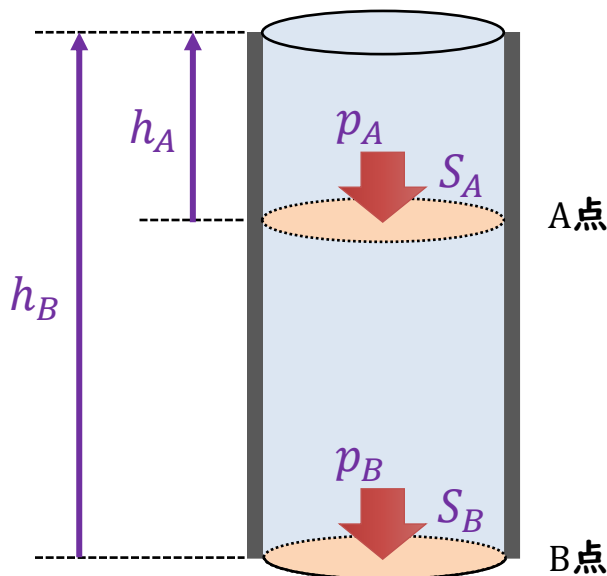


ホースの先をつまむと水の勢いが強くなる  
 →水の通路の断面積が小さくなると流速が上昇する  
 →断面積中を瞬間的に通過する水の量は変わらない  
 ⇒流量  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] は変化しない (連続の定理)

$$Q_A = S_A v_A$$

$$Q_B = S_B v_B$$

$$Q_A = Q_B \rightarrow S_A v_A = S_B v_B$$



A点の位置エネルギー

$$U_A = F_A \cdot h_A = p_A S_A h_A = p_A V_A = p_A \frac{m_A}{\rho}$$

$$m_A = \rho V_A$$

$\rho$ : 密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

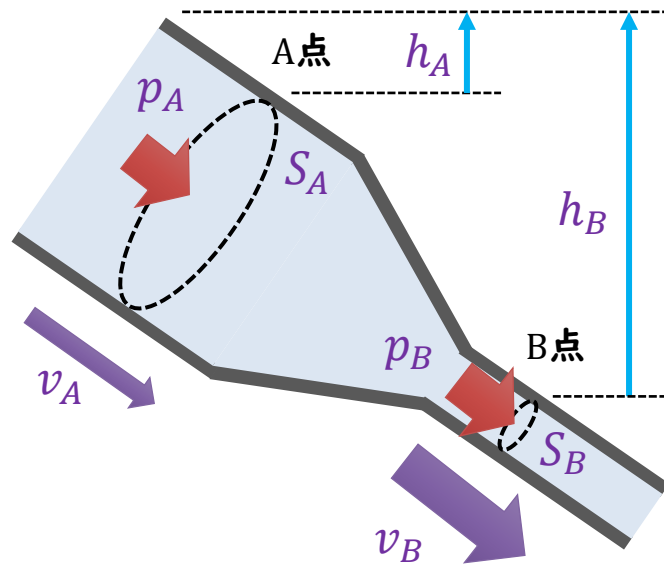
圧力×体積がエネルギーを表す

B点の位置エネルギー

$$U_B = F_B \cdot h_B = p_B S_B h_B = p_B V_B = p_B \frac{m_B}{\rho}$$

$$\text{圧力エネルギー} = p \frac{m}{\rho}$$

# 水力学（ベルヌーイの定理）



A点のエネルギー

=位置エネルギー+圧力エネルギー+運動エネルギー

$$E_A = m_A g h_A + p_A \frac{m_A}{\rho} + \frac{1}{2} m_A v_A^2$$

A点の単位体積当たりのエネルギー $e_A$ を考えると、

$$e_A = \frac{E_A}{V_A} = \frac{m_A}{V_A} g h_A + p_A \frac{m_A}{\rho V_A} + \frac{1}{2} \frac{m_A}{V_A} v_A^2 = \rho g h_A + p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2$$

同様にB点の単位体積当たりエネルギー $e_B$ は、

$$e_B = \frac{E_B}{V_B} = \frac{m_B}{V_B} g h_B + p_B \frac{m_B}{\rho V_B} + \frac{1}{2} \frac{m_B}{V_B} v_B^2 = \rho g h_B + p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

エネルギー保存則より、それぞれの単位体積当たりのエネルギーは一致する

A点の単位体積当たりのエネルギー $e_A$ を考えると、

$$h_A + p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = \rho g h_B + p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

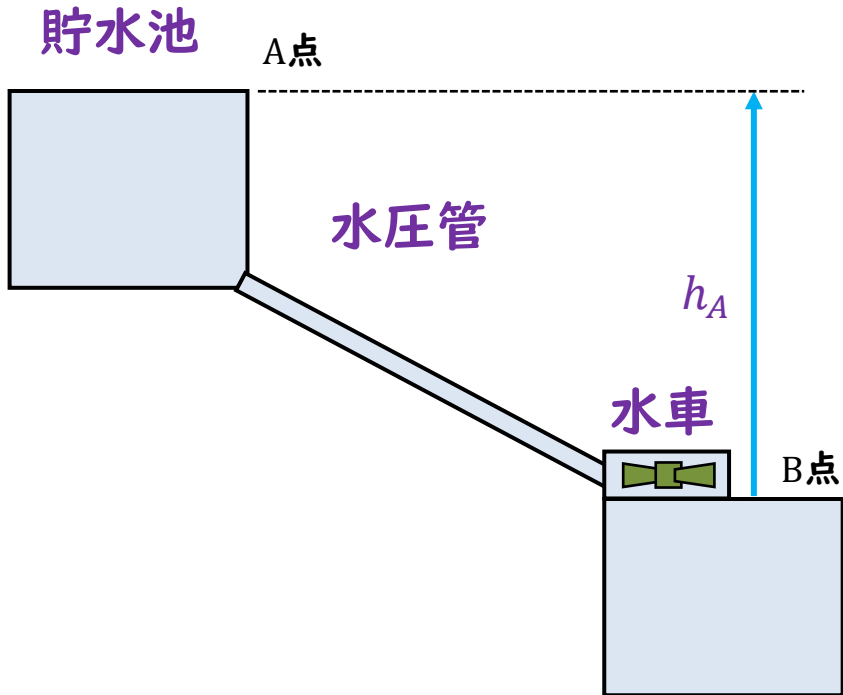
$$h_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = h_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} = \text{一定 [m]}$$

**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

# 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

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

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

水は1000 cm³で1 kg  
1 m³で1000 kg

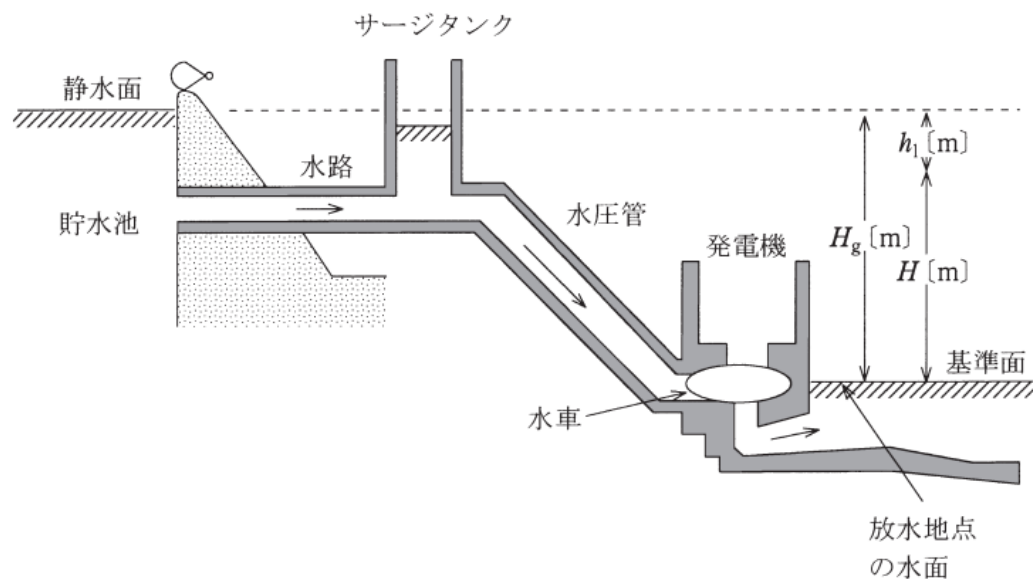
# H24 問1

問1 次の文章は、水力発電の理論式に関する記述である。

図に示すように、放水地点の水面を基準面とすれば、基準面から貯水池の静水面までの高さ  $H_g$  [m] を一般に (ア) という。また、水路や水圧管の壁と水との摩擦によるエネルギー損失に相当する高さ  $h_1$  [m] を (イ) という。さらに、 $H_g$  と  $h_1$  の差  $H = H_g - h_1$  を一般に (ウ) という。

いま、 $Q$  [m<sup>3</sup>/s] の水が水車に流れ込み、水車の効率を  $\eta_w$  とすれば、水車出力  $P_w$  は (エ) になる。さらに、発電機の効率を  $\eta_g$  とすれば、発電機出力  $P$  は (オ) になる。ただし、重力加速度は  $9.8$  [m/s<sup>2</sup>] とする。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)、(ウ)、(エ)及び(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	総落差	損失水頭	実効落差	$9.8QH\eta_w \times 10^3$ [W]	$9.8QH\eta_w\eta_g \times 10^3$ [W]
(2)	自然落差	位置水頭	有効落差	$\frac{9.8QH}{\eta_w} \times 10^{-3}$ [kW]	$\frac{9.8QH\eta_g}{\eta_w} \times 10^{-3}$ [kW]
(3)	総落差	損失水頭	有効落差	$9.8QH\eta_w \times 10^3$ [W]	$9.8QH\eta_w\eta_g \times 10^3$ [W]
(4)	基準落差	圧力水頭	実効落差	$9.8QH\eta_w$ [kW]	$9.8QH\eta_w\eta_g$ [kW]
(5)	基準落差	速度水頭	有効落差	$9.8QH\eta_w$ [kW]	$9.8QH\eta_w\eta_g$ [kW]

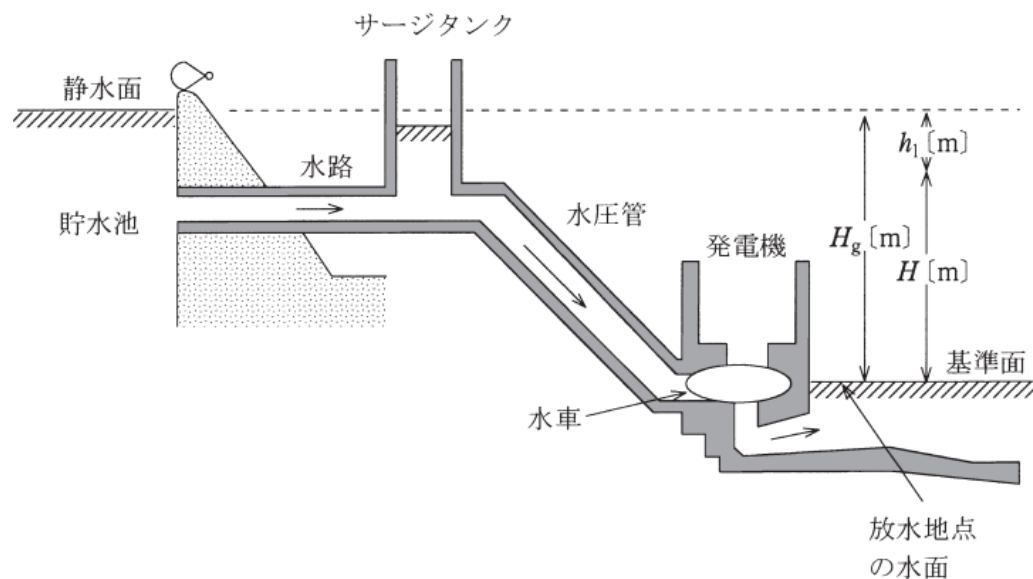
# 導出のポイント

問1 次の文章は、水力発電の理論式に関する記述である。

図に示すように、放水地点の水面を基準面とすれば、基準面から貯水池の静水面までの高さ  $H_g$  [m] を一般に (ア) **総落差** という。また、水路や水圧管の壁と水との摩擦によるエネルギー損失に相当する高さ  $h_1$  [m] を (イ) **損失水頭** という。さらに、 $H_g$  と  $h_1$  の差  $H = H_g - h_1$  を一般に (ウ) **有効落差**

いま、 $Q$  [m<sup>3</sup>/s] の水が水車に流れ込み、水車の効率を  $\eta_w$  とすれば、水車出力  $P_w$  は (エ)  $9.8QH\eta_w \times 10^3$  発電機の効率を  $\eta_g$  とすれば、発電機出力  $P$  は (オ)  $9.8QH\eta_w\eta_g \times 10^3$  になる。ただし、重力加速度は  $9.8$  [m/s<sup>2</sup>] とする。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)、(ウ)、(エ)及び(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

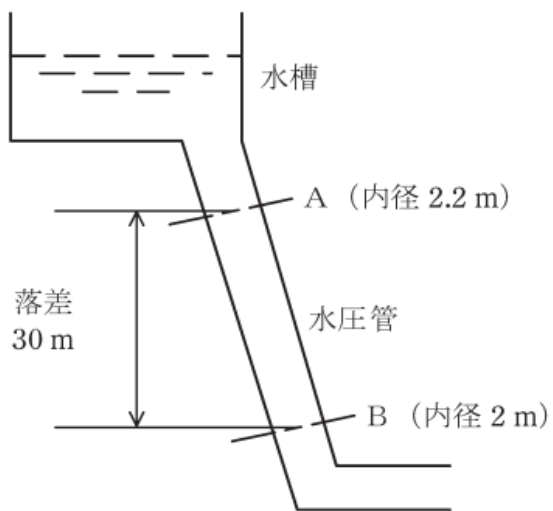


	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	総落差	損失水頭	実効落差	$9.8QH\eta_w \times 10^3$ [W]	$9.8QH\eta_w\eta_g \times 10^3$ [W]
(2)	自然落差	位置水頭	有効落差	$\frac{9.8QH}{\eta_w} \times 10^{-3}$ [kW]	$\frac{9.8QH\eta_g}{\eta_w} \times 10^{-3}$ [kW]
<b>(3)</b>	総落差	損失水頭	有効落差	$9.8QH\eta_w \times 10^3$ [W]	$9.8QH\eta_w\eta_g \times 10^3$ [W]
(4)	基準落差	圧力水頭	実効落差	$9.8QH\eta_w$ [kW]	$9.8QH\eta_w\eta_g$ [kW]
(5)	基準落差	速度水頭	有効落差	$9.8QH\eta_w$ [kW]	$9.8QH\eta_w\eta_g$ [kW]

# R03 問2

問2 図で、水圧管内を水が充満して流れている。断面Aでは、内径 2.2 m、流速 3 m/s、圧力 24 kPa である。このとき、断面Aとの落差が 30 m、内径 2 m の断面 B における流速[m/s]と水圧[kPa]の最も近い値の組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、重力加速度は  $9.8 \text{ m/s}^2$ 、水の密度は  $1000 \text{ kg/m}^3$ 、円周率は 3.14 とする。

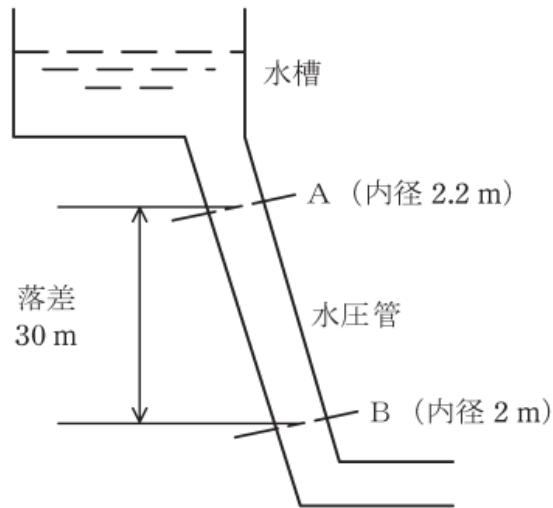


	流速[m/s]	水圧[kPa]
(1)	3.0	318
(2)	3.0	316
(3)	3.6	316
(4)	3.6	310
(5)	4.0	300

# 導出のポイント

問2 図で、水圧管内を水が充満して流れている。断面Aでは、内径 2.2 m、流速 3 m/s、圧力 24 kPa である。このとき、断面Aとの落差が 30 m、内径 2 m の断面 B における流速[m/s]と水圧[kPa]の最も近い値の組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、重力加速度は 9.8 m/s<sup>2</sup>、水の密度は 1000 kg/m<sup>3</sup>、円周率は 3.14 とする。



## 連続の定理より

$$S_A v_A = S_B v_B$$

$$\pi \left( \frac{D_A}{2} \right)^2 v_A = \pi \left( \frac{D_B}{2} \right)^2 v_B$$

$$D_A^2 v_A = D_B^2 v_B$$

$$v_B = \frac{D_A^2}{D_B^2} v_A = \frac{2.2^2}{2^2} \times 3 = 3.63 \text{ m/s}$$

## ベルヌーイの定理 (水頭) より

$$h_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g}$$

$$30 + \frac{24 \times 10^3}{1000 \times 9.8} + \frac{3^2}{2 \times 9.8} = \frac{p_B}{1000 \times 9.8} + \frac{3.63^2}{2 \times 9.8}$$

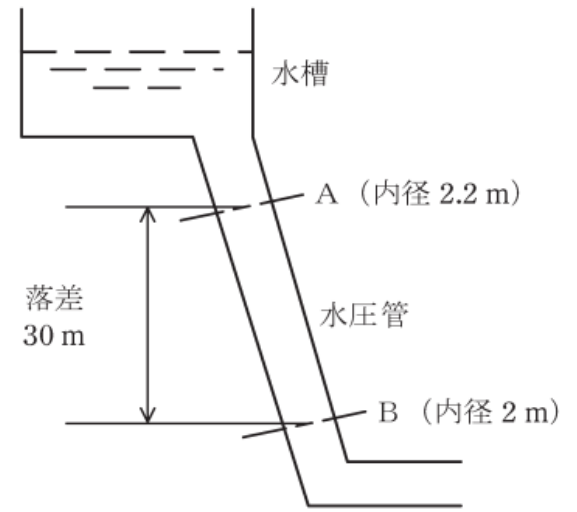
$$\frac{p_B}{1000 \times 9.8} = 30 + 2.45 + 0.46 - 0.67$$

$$p_B = 1000 \times 9.8 \times 32.24 = 316 \text{ kPa}$$

# R03 問2

問2 図で、水圧管内を水が充満して流れている。断面Aでは、内径 2.2 m、流速 3 m/s、圧力 24 kPa である。このとき、断面Aとの落差が 30 m、内径 2 m の断面 Bにおける流速[m/s]と水圧[kPa]の最も近い値の組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、重力加速度は  $9.8 \text{ m/s}^2$ 、水の密度は  $1000 \text{ kg/m}^3$ 、円周率は 3.14 とする。



	流速[m/s]	水圧[kPa]
(1)	3.0	318
(2)	3.0	316
(3)	3.6	316
(4)	3.6	310
(5)	4.0	300

ご聴講ありがとうございました  
ございました!!