

## 2019 年度 化学工学技士(基礎)試験問題

## 第一部 13:00~15:20

問題 A1 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 5 点)

メタンガスの定圧比熱  $C_p^*$  [ $\text{kcal} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ] は、1 気圧では次式で表わされる。

$$C_p^* = 7.989 + 1.569 \times 10^{-2} t - 4.300 \times 10^{-6} t^2 \quad (1)$$

ここで  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ] はセルシウス温度である。これを  $C_p$  [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] および熱力学温度  $T$  [ $\text{K}$ ] で表わせば、

$$C_p = \boxed{a} + \boxed{b} T - \boxed{c} T^2 \quad (2)$$

となる。ただし、 $1 \text{ kcal} = 4.186 \text{ kJ}$ 、 $t$  [ $^\circ\text{C}$ ] =  $\boxed{d}$  であり、メタンのモル質量は  $\boxed{e}$   $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$  である。

[候補群]

- |             |                                |                                 |                                 |   |                                    |
|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|------------------------------------|
| $\boxed{a}$ | (1) 0.8827                     | (2) 1.296                       | (3) 3.381                       | (4) 7.790                                 | (5) 7.990                          |
| $\boxed{b}$ | (1) $1.003 \times 10^{-3}$     | (2) $4.708 \times 10^{-3}$      | (3) $1.003 \times 10^{-2}$      | (4) $1.570 \times 10^{-2}$                | (5) $1.804 \times 10^{-2}$         |
| $\boxed{c}$ | (1) $2.100 \times 10^{-7}$     | (2) $3.200 \times 10^{-7}$      | (3) $4.300 \times 10^{-7}$      | (4) $1.122 \times 10^{-6}$                | (5) $1.327 \times 10^{-6}$         |
| $\boxed{d}$ | (1) $T$ [ $\text{K}$ ] - 212.0 | (2) $T$ [ $\text{K}$ ] - 273.15 | (3) $T$ [ $\text{K}$ ] - 491.67 | (4) $\frac{T$ [ $\text{K}$ ] - 32.0}{1.8} | (5) $1.8(T$ [ $\text{K}$ ] - 32.0) |
| $\boxed{e}$ | (1) $1.008 \times 10^{-3}$     | (2) $12.01 \times 10^{-3}$      | (3) $16.04 \times 10^{-3}$      | (4) $18.02 \times 10^{-3}$                | (5) $32.04 \times 10^{-3}$         |

問題 A2 次の無次元数に関する説明について、空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 5 点)

無次元数	説明	定義式
レイノルズ数 ( $Re$ )	流れの特性を表す無次元数 ( <input type="text" value="a"/> / <input type="text" value="b"/> )	<input type="text" value="c"/>
ヌッセルト数 ( $Nu$ )	対流による熱伝達と流体の熱伝導の比	<input type="text" value="d"/>
プラントル数 ( $Pr$ )	流体の動粘度と熱拡散率 (温度拡散率) の比	<input type="text" value="e"/>

$C_p$ : 定圧比熱,  $g$ : 重力加速度,  $h$ : 熱伝達係数,  $L$ : 代表長さ,  $p$ : 圧力,  $u$ : 代表速度,  
 $\lambda$ : 熱伝導率,  $\mu$ : 粘度,  $\rho$ : 流体密度

[候補群]

- ~  (1) 慣性力      (2) 重力      (3) 圧力      (4) 粘性力      (5) 遠心力
- ~  (1)  $\frac{hL}{\lambda}$       (2)  $\frac{\rho C_p u L}{\lambda}$       (3)  $\frac{C_p \mu}{\lambda}$       (4)  $\frac{h}{\rho C_p u}$       (5)  $\frac{\rho u L}{\mu}$
- (6)  $\frac{p}{\rho u^2}$       (7)  $\frac{u^2}{gL}$       (8)  $\frac{\rho C_p u}{h}$

問題 A3 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 10 点)

アセトン ( $C_3H_6O$ ) と水素を反応させ、2-プロパノール ( $C_3H_8O$ ) を生成させる実験を行った。水素とアセトン蒸気を混合した原料ガスを管型反応器に導入し、440 K の触媒層 (充填層) を通過させ、生成ガスの組成を分析したところ表 A3-1 の結果が得られた。なお、生成ガス以外の生成物は無かった。

表 A3-1 反応実験の結果

	原料ガス組成 [mol%]	生成ガス組成 [mol%]
アセトン	25.0	6.0
水素	75.0	63.2
2-プロパノール	—	23.6
メタン	—	5.4
水蒸気	—	1.8
計	100.0	100.0

生成ガスの組成から、メタンと水が生成する副反応が起きていることが分かる。副反応は量論係数  $\alpha = \boxed{a}$ ,  $\beta = \boxed{b}$ ,  $\gamma = \boxed{c}$  とする式(2)である。



この実験結果を物質収支の関係から解析すると、原料ガス 100 mol あたり生成する 2-プロパノールは  $\boxed{d}$  mol, メタンは  $\boxed{e}$  mol と求められる。また、アセトンの反応率 (転化率) は  $\boxed{f}$ , 2-プロパノールの収率は  $\boxed{g}$ , そして 2-プロパノールの選択率は  $\boxed{h}$  となる。

[候補群]

$\boxed{a}$	(1) 2.5	(2) 3	(3) 3.5	(4) 4	(5) 4.5
$\boxed{b}$	(1) 2.5	(2) 3	(3) 3.5	(4) 4	(5) 4.5
$\boxed{c}$	(1) 1	(2) 1.5	(3) 2	(4) 2.5	(5) 3
$\boxed{d}$	(1) 14.7	(2) 15.2	(3) 18.8	(4) 20.4	(5) 22.5
$\boxed{e}$	(1) 3.0	(2) 4.3	(3) 5.8	(4) 6.7	(5) 7.9
$\boxed{f}$	(1) 0.68	(2) 0.74	(3) 0.81	(4) 0.85	(5) 0.89
$\boxed{g}$	(1) 0.61	(2) 0.75	(3) 0.81	(4) 0.88	(5) 0.93
$\boxed{h}$	(1) 0.77	(2) 0.83	(3) 0.88	(4) 0.93	(5) 0.97

問題 A4 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 10 点)

1) 120 °C の飽和水蒸気が流れている内径 41.6 mm, 外径 48.6 mm の円管 (熱伝導率  $16.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) があり, 円管の外部は 25 °C の大気と接している.

円管外壁側の熱伝達係数を  $8.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  とすると, 円管の長さ 1 m あたりの円管内部から大気へ移動する熱量は,  W, 120 °C の飽和水蒸気の蒸発潜熱は  $2.20 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  であるので, 管長 1 m あたりの凝縮水量は   $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$  となる. また, 円管壁内部の熱移動の抵抗は全体の抵抗の  % であり, 円管の外壁温度は内壁温度に等しいと見なしてよい.

2) 円管からの熱の漏洩を抑えるために, 熱伝導率  $0.035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 厚さ 20 mm の断熱材を円管の外壁に巻いた. この場合の外壁側熱伝達係数が  $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  であるとすれば, 管長 1 m あたりの漏洩熱量は,  W となる. また, 断熱材の熱移動の抵抗は全体の抵抗の  % であり, 断熱材外壁温度は  °C となる.

[候補群]

<input type="text" value="a"/>	(1) 13	(2) 17	(3) $1.3 \times 10^2$	(4) $1.7 \times 10^2$	(5) $2.5 \times 10^2$
<input type="text" value="b"/>	(1) 0.021	(2) 0.027	(3) 0.21	(4) 0.27	(5) 0.41
<input type="text" value="c"/>	(1) 0.1	(2) 0.2	(3) 0.4	(4) 1	(5) 2
<input type="text" value="d"/>	(1) 24	(2) 27	(3) 31	(4) 35	(5) 52
<input type="text" value="e"/>	(1) 73	(2) 75	(3) 77	(4) 80	(5) 87
<input type="text" value="f"/>	(1) 37	(2) 44	(3) 46	(4) 49	(5) 51

問題 A5 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。（配点 10 点）

内径 30 mm の鋼管を用いて 20 °C の水（密度  $\rho = 1.00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，粘度  $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）を流速  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  で大きな貯槽 A から貯槽 B へくみ上げる．貯槽 A の液面①から貯槽 B への供給配管出口②までは 10 m の高さがあり，管路の直管部の全長は 100 m で，管路中には 90°エルボ（配管のまがり）4 個と，弁 2 個が挿入されている（図 A5-1）．管路は粗面管とする．

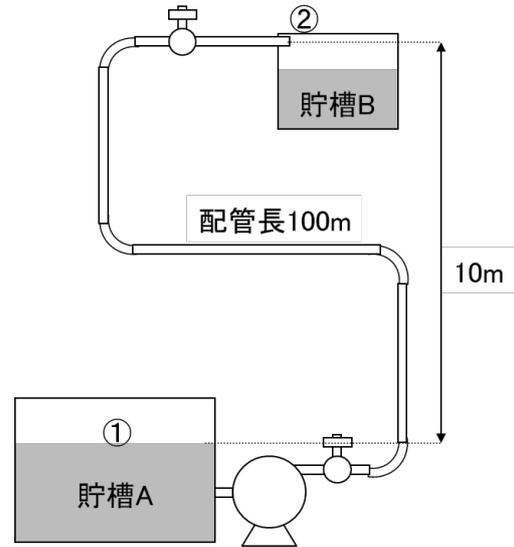


図 A5-1

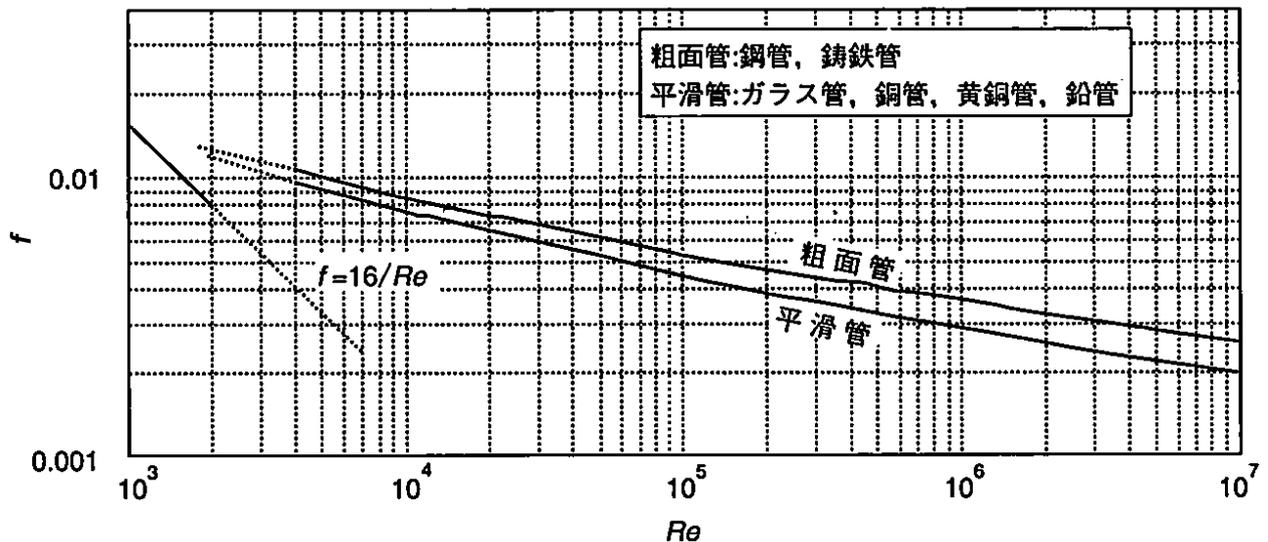


図 A5-2

1) 摩擦による配管のエネルギー損失

レイノルズ数は  $Re = \text{a}$  であり，管が粗面管であるので，図 A5-2 より摩擦係数  $f$  は  $\text{b}$  である．エルボの相当長さを内径の 32 倍，弁の相当長さを内径の 300 倍とすると，管路全体の代表長さは  $\text{c}$  m となる．したがって，Fanning の式  $F = \text{d}$  より管の摩擦によるエネルギー損失は  $F = \text{e}$   $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$  となる．ただし  $u$  は断面平均流速， $L$  は配管の代表長さ， $D$  は配管の内径である．

2) ポンプの必要動力

必要な動力  $W [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$  は以下の一般化された Bernoulli 式より算出できる．

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} + gh_1 + W = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} + gh_2 + F \quad (1)$$

添え字 1, 2 は流路断面の番号（図 A5-1 の①と②）を表し， $p$  は圧力， $g$  は重力加速度， $h$  は基準面

からの鉛直方向距離,  $u$  は流体の断面平均流速,  $\rho$  は流体密度を表す. 貯槽 B へ輸送される水の質量流量は  $\boxed{f}$   $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$  であるので, ポンプとモーターの総合効率  $\eta$  を 60 % としたときの必要動力は  $\boxed{g}$  kW となる.

**[候補群]**

- |             |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $\boxed{a}$ | (1) $1.0 \times 10^4$    | (2) $2.0 \times 10^4$    | (3) $4.0 \times 10^4$    | (4) $6.0 \times 10^4$    | (5) $1.0 \times 10^5$    |
| $\boxed{b}$ | (1) $1.0 \times 10^{-2}$ | (2) $8.0 \times 10^{-3}$ | (3) $6.0 \times 10^{-3}$ | (4) $4.0 \times 10^{-3}$ | (5) $2.0 \times 10^{-3}$ |
| $\boxed{c}$ | (1) 100                  | (2) 110                  | (3) 122                  | (4) 131                  | (5) 318                  |
| $\boxed{d}$ | (1) $2f \frac{L}{D} u^2$ | (2) $4f \frac{L}{D} u^2$ | (3) $2f \frac{D}{L} u^2$ | (4) $4f \frac{D}{L} u^2$ | (5) $8f \frac{L}{D} u^2$ |
| $\boxed{e}$ | (1) 20                   | (2) 107                  | (3) 165                  | (4) 195                  | (5) 390                  |
| $\boxed{f}$ | (1) 0.8                  | (2) 1.0                  | (3) 1.2                  | (4) 1.4                  | (5) 1.6                  |
| $\boxed{g}$ | (1) 0.29                 | (2) 0.42                 | (3) 0.47                 | (4) 0.61                 | (5) 0.70                 |

問題 A6 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 10 点)

吸着とは、対象となる物質を固体表面や細孔空間に留めることであり、その理論は吸着分離や  の理解において重要である。吸着量を表す理論式の一つとして、Langmuir の単分子層吸着理論に基づく吸着等温式があり、以下のように誘導される。

この理論の前提条件は次の通りである。

- 1) 吸着材表面にはエネルギー的に均質な一定数の吸着座がある。
- 2) 吸着座での吸着は、ただ一つの分子の吸着により完結する。
- 3) 吸着は可逆的で、分子は吸着時と同じエネルギーを得て脱着する。
- 4) 吸着分子同士の相互作用はない。

これらの条件から、吸着速度は、単位時間当たりに吸着座に衝突する着目成分の分子の数、分子が気体の場合はその着目成分の分圧  $p$  と、空いた吸着座の数の積に比例することとなる。また、吸着した分子が脱着のエネルギーを得る確率はすべての座について等しいと仮定したので、脱着速度は、単位質量の吸着材当たりの吸着分子数  $N$  とすべての吸着座が満たされたときの吸着分子数  $N_s$  の比  $\theta = N/N_s$  に比例することになる。 $\theta$  は表面被覆率と呼ばれる。以上より、 $k_A$  を吸着速度定数、 $K_D$  を脱着速度定数とすると、吸着速度  $v_A$  と脱着速度  $v_D$  は次式で表される。

$$v_A = k_A p(1-\theta) \quad (1)$$

$$v_D = \text{input type="text" value="b"} \quad (2)$$

平衡では  $v_A$  と  $v_D$  が等しくなるとして次式が導かれる。

$$\theta = \text{input type="text" value="c"} \quad (3)$$

吸着量  $q$  は、すべての吸着座が満たされたときの吸着量  $q_0$  と表面被覆率  $\theta$  に関する。吸着速度定数と脱着速度定数の比である吸着平衡定数  $K = k_A/K_D$  を用いれば、Langmuir 式と呼ばれる次式となる。

$$q = \frac{q_0 K p}{1 + K p} \quad (4)$$

着目成分の分圧を  に変えると液相での吸着材への吸着に適用できる。また、上記の Langmuir 式(4)において着目成分の気体の  場合は、吸着量は気体の分圧の 1 次に比例すると近似でき、Henry 式と同様となる。

単分子層吸着ではなく多分子層吸着が起こると考えて拡張した式として BET 式と呼ばれる次式がある。

$$\frac{q}{q_0} = \frac{c p}{(p_0 - p)[(c - 1)p + p_0]} \quad (5)$$

ここで、 $c$  は定数、 $p_0$  は測定温度における着目成分の飽和蒸気圧である。BET 式(5)は、固体の  を不活性気体の吸着量から算出する手法で用いられている。

[候補群]

a (1) 蒸留分離 (2) 熱分解反応 (3) 晶析分離 (4) 触媒反応 (5) ろ過分離

b (1)  $K_D p(1-\theta)$  (2)  $K_D p\theta$  (3)  $K_D(1-\theta)$  (4)  $K_D p$  (5)  $K_D \theta$

c (1)  $\frac{k_A}{K_D p}$  (2)  $\frac{k_A}{K_D + k_A}$  (3)  $\frac{k_A - K_D}{k_A}$  (4)  $\frac{k_A p}{k_A p + K_D}$  (5)  $\frac{k_A}{K_D p \left(1 - \frac{k_A}{K_D}\right)}$

d (1) 濃度 (2) 温度 (3) 密度 (4) 粘度 (5) 蒸気圧

e (1) 分圧が極めて高い (2) 分圧が極めて低い (3) 吸着平衡定数が極めて大きい  
(4) 分子量が極めて小さい (5) 分子量が極めて大きい

f (1) 密度 (2) 熱容量 (3) 比表面積 (4) 空隙率 (5) 酸性度

問題 A7 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 10 点)

理想気体を封じた水平のピストン-シリンダ系が一定温度の槽中に置かれている。初期圧力は  $p_1 = 1.40 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、初期体積は  $V_1 = 3.00 \times 10^{-2} \text{ m}^3$  である。

ピストンがシリンダ内を動くとき摩擦は無いと仮定し、ピストンにかかる力がゆっくり減少して、ピストンとシリンダの間に封じられた理想気体は可逆的に膨張し、その体積  $V_2$  が  $V_1$  の 2 倍になった時操作を終了する。操作終了時の圧力を  $p_2$  とする。温度は一定である。

この操作で理想気体が外力に対してする仕事は

$$W = \boxed{\text{a}} \quad (1)$$

と表わされる。しかし、温度は一定であるので、 $pV = \boxed{\text{b}}$  J は一定である。したがって  $W = \boxed{\text{c}}$  J となる。最終圧力は  $p_2 = \boxed{\text{d}}$  MPa である。

一方、ピストンにかかる圧力が、操作の最初に急に  $p_1$  から  $p_2$  に変化し、その後  $p_2$  を保ち、理想気体の体積が  $V_1$  から  $V_2$  に変化した場合、すなわち不可逆の場合は  $W = \boxed{\text{e}}$  J である。この場合は、可逆の場合の  $\boxed{\text{f}}$  % の仕事しか得られない。

**[候補群]**

$\boxed{\text{a}}$	(1) $\int_{V_1}^{V_2} p dV$	(2) $\int_{p_1}^{p_2} V dp$	(3) $\int_{V_1}^{V_2} p V dV$	(4) $\int_{p_1}^{p_2} p V dp$	(5) $\frac{1}{2} \int_{V_1}^{V_2} p V^2 dV$
$\boxed{\text{b}}$	(1) $2.10 \times 10^4$	(2) $2.91 \times 10^4$	(3) $4.20 \times 10^4$	(4) $6.06 \times 10^4$	(5) $7.47 \times 10^4$
$\boxed{\text{c}}$	(1) $2.10 \times 10^4$	(2) $2.91 \times 10^4$	(3) $4.20 \times 10^4$	(4) $6.06 \times 10^4$	(5) $7.47 \times 10^4$
$\boxed{\text{d}}$	(1) 0.300	(2) 0.400	(3) 0.500	(4) 0.600	(5) 0.700
$\boxed{\text{e}}$	(1) $2.10 \times 10^4$	(2) $2.91 \times 10^4$	(3) $4.20 \times 10^4$	(4) $6.06 \times 10^4$	(5) $7.47 \times 10^4$
$\boxed{\text{f}}$	(1) 34.6	(2) 50.0	(3) 69.2	(4) 72.2	(5) 81.1

問題 A8 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 10 点)

完全混合槽型反応器 (CSTR) を用いて, 物質 A を原料とする液相 2 次反応 (A の反応速度  $r_A = -kC_A^2$ ,  $k = 2.0 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $C_A$ : A の濃度 [ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ]) を等温条件下で行う. ただし, 原料の体積流量を  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 物質 A の入り口濃度を  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$  とする.

- 1) 1つの槽型反応器 (容積:  $3 \text{ m}^3$ ) を用いて行うとき, 物質 A の反応率 (転化率) は  となる.
- 2) 槽型反応器 (容積:  $3 \text{ m}^3$ ) を直列に 2 つ連結すると, 一つ目の反応器の出口の A の濃度は   $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ , 二つ目の反応器の出口の A の濃度は   $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ , 物質 A の総括反応率は  となる.
- 3)  の値と同じ反応率を 1 つの槽型反応器で得るにはその容積を   $\text{m}^3$  にすればよい.

[候補群]

<input type="text" value="a"/>	(1) 0.297	(2) 0.375	(3) 0.467	(4) 0.545	(5) 0.625
<input type="text" value="b"/>	(1) 0.375	(2) 0.455	(3) 0.533	(4) 0.625	(5) 0.703
<input type="text" value="c"/>	(1) 0.375	(2) 0.455	(3) 0.533	(4) 0.625	(5) 0.703
<input type="text" value="d"/>	(1) 0.297	(2) 0.375	(3) 0.467	(4) 0.545	(5) 0.625
<input type="text" value="e"/>	(1) 3.1	(2) 4.1	(3) 6.2	(4) 8.2	(5) 12.4

第二部 15:45～16:45

問題 B1 次の文中の空欄にあてまはる最も適切な答えを候補群から選びなさい。(配点 10 点)

1) 完全発達した円管層流では放物状速度分布が形成される。

$$\frac{u}{u_{\max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (1)$$

式中の  $u_{\max}$  は管中心速度,  $r$  は管中心からの半径距離,  $R$  は管半径である. 半径が  $r$  と  $r+dr$  の環状部を流れる流量は

$$dQ = u(2\pi r)dr \quad (2)$$

で表されるので, 管断面全体にわたって積分すると管内流量  $Q$  が得られ,

$$Q = \boxed{a} \pi R^2 u_{\max} \quad (3)$$

中心速度  $u_{\max}$  と断面平均流速  $\bar{u}$  の関係は次式で表される.

$$u_{\max} = \boxed{b} \bar{u} \quad (4)$$

円管乱流の  $u_{\max}$  と  $\bar{u}$  の関係を求めるために, 速度分布を 1/7 乗則で近似する.

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{R}\right)^{1/7} \quad (5)$$

式中の  $y$  は壁からの距離である.  $r = R - y$  の関係を用いて式(2)を積分し, 流量  $Q$  を求めると, 次の関係が得られる.

$$u_{\max} = \boxed{c} \bar{u} \quad (6)$$

2) 流体の単位質量当りの運動エネルギーは  $\frac{1}{2}u^2$  で表される. 半径が  $r$  と  $r+dr$  の環状部の質量流量は流体の密度を  $\rho$  とすると  $\rho dQ = \rho u(2\pi r)dr$  であるので, 環状部を単位時間当り流れる運動エネルギーは  $dE_k = \frac{1}{2}u^2 \rho dQ = \frac{1}{2}\rho u^3 2\pi r dr$  となり, 管断面を単位時間当り流れる運動エネルギー  $E_k$  は次式で表される.

$$E_k = \int_0^R \frac{1}{2}\rho u^3 2\pi r dr \quad (7)$$

流体の単位質量当りの運動エネルギーを  $e_k = \frac{E_k}{\rho Q} = \frac{E_k}{\rho \bar{u} \pi R^2} = \frac{\alpha}{2} \bar{u}^2$  と表すと, 層流の放物状速度

分布では  $\alpha = \boxed{d}$  となる. 一方, 乱流の速度分布として 1/7 乗則を用いると  $\alpha = \boxed{e}$  となり,  $\alpha$  は 1 に近い値をとる.

次式は, 流路断面 1 と 2 の区間における流体単位質量当りの機械的エネルギー保存則を, 断面平均速度  $\bar{u}$  を用いて表した式である.

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_1 \bar{u}_1^2}{2} + gh_1 + w = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{\alpha_2 \bar{u}_2^2}{2} + gh_2 + e_f \quad (8)$$

添え字 1, 2 は各断面を表し,  $p$  は圧力,  $g$  は重力加速度,  $h$  は基準面からの鉛直方向距離,  $w$  は流体単位質量当りに加えた機械的エネルギー (例えばポンプ動力),  $e_f$  は流体単位質量当りの摩擦損失を表す. 円管流路では, 速度分布が比較的平坦な乱流では  $\alpha = 1$  と近似することができるが, 放物状の速度分布が形成される層流では  $\alpha = \boxed{d}$  となる.

[候補群]

$\boxed{a} \sim \boxed{e}$  (1) 1/2 (2) 2/3 (3) 3/4 (4) 1 (5) 1.03 (6) 1.06 (7) 1.08 (8) 1.10  
(9) 1.16 (10) 1.22 (11) 1.33 (12) 1.40 (13) 1.5 (14) 2 (15) 2.5

問題 B2 以下の B2-1～B2-3 の 3 問のうちから 1 問を選んで解答しなさい。 (配点 10 点)

B2-1 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。

20 °C, 101.3 kPa で SO<sub>2</sub> 20 vol%, 空気 80 vol%の混合気体 3.0 m<sup>3</sup>を 24 kg の水と接触させ, 温度, 圧力一定のまま SO<sub>2</sub>を水に吸収させると, 水相の SO<sub>2</sub>濃度は時間の経過とともに平衡濃度に向かって徐々に増加する. 混合気体は理想気体, 空気は水に溶けないとして, 平衡に至るまでの液相中の SO<sub>2</sub>濃度と気相の SO<sub>2</sub>の組成の関係, 平衡に達したときの SO<sub>2</sub>の液相濃度と気相組成および溶解した気相中の SO<sub>2</sub>の体積を以下の手順で求める. なお, SO<sub>2</sub>のモル質量は 0.064 kg·mol<sup>-1</sup>とする.

- 1) 最初の混合気体中の SO<sub>2</sub>の体積は  m<sup>3</sup>である.
- 2) 水中の SO<sub>2</sub>の濃度を  $C$  [g-SO<sub>2</sub>/g-H<sub>2</sub>O]とすると, 水 24 kg 中の SO<sub>2</sub>の物質量は  kmol, また理想気体を仮定すると, 溶解した SO<sub>2</sub>の気相体積は, 20 °C, 101.3 kPa で  m<sup>3</sup>となり, 吸収されなかった SO<sub>2</sub>の気相体積は ( - ) m<sup>3</sup>となる.
- 3) 一方, 気相中の SO<sub>2</sub>の体積は, 分圧  $p$  [kPa]と SO<sub>2</sub>の液相濃度  $C$  [g-SO<sub>2</sub>/g-H<sub>2</sub>O]を用いて  m<sup>3</sup>と表されるので, 2)の結果と合わせると, SO<sub>2</sub>回分吸収過程の気相分圧  $p$  と液相濃度  $C$  の関係を表す操作線は次式で与えられる.

$$p = 101.3 \left( \frac{1-15C}{5-15C} \right) \quad (1)$$

- 4) SO<sub>2</sub>の水に対する溶解度が次式で表されるとき

$$p = 706C + 4443C^2 \quad (2)$$

溶解度曲線 (平衡曲線) と操作線の交点から平衡状態での SO<sub>2</sub>の液相濃度を求めると

g-SO<sub>2</sub>/g-H<sub>2</sub>O となる. さらに, 気相の SO<sub>2</sub>の組成を求めると, 15.1 mol%となり, 最終的に, 平衡に達するまでに溶解した気相中の SO<sub>2</sub>の体積が求められる.

[候補群]

- |                                |                                  |                                  |                                  |            |            |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|
| <input type="text" value="a"/> | (1) 0.60                         | (2) 0.62                         | (3) 0.64                         | (4) 0.66   | (5) 0.68   |
| <input type="text" value="b"/> | (1) 0.365C                       | (2) 0.375C                       | (3) 0.385C                       | (4) 0.395C | (5) 0.405C |
| <input type="text" value="c"/> | (1) 8.62C                        | (2) 8.72C                        | (3) 8.82C                        | (4) 8.92C  | (5) 9.02C  |
| <input type="text" value="d"/> | (1) $\frac{p}{101.3}(3.0-8.62C)$ | (2) $\frac{101.3}{p}(3.0-8.62C)$ | (3) $\frac{101.3}{p}(3.0-8.82C)$ |            |            |
|                                | (4) $\frac{p}{101.3}(3.0-9.02C)$ | (5) $\frac{101.3}{p}(3.0-9.02C)$ |                                  |            |            |
| <input type="text" value="e"/> | (1) 0.0193                       | (2) 0.0205                       | (3) 0.0212                       | (4) 0.0224 | (5) 0.0231 |

**B2-2** 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。

懸濁原液を濾材を通過させると、固体分は濾材上に沈積してケーキ層を形成する。こうして形成されたケーキ層も固液分離の役目を果たす。その一方で、このケーキ層はろ過抵抗になるために厚くならないことが好ましい。そこで考案されたのが、原液を流通させて行う **a** ろ過である。濾材面に **b** に原料液を流すことで、**c** によりケーキ層を剥離させて一定厚さにすれば、ほぼ流束が一定なるろ過を行うことができる。その時のろ過速度は **d** の式で表されることが知られている。

図 B2-1 は、実際に **a** ろ過を行った結果の例である。まず、ろ過圧力を増加するにつれ流束は比例して増大しているが、これはろ過抵抗が一定であることによるため、**e** ことを示唆している。ところが、ろ過圧力が 0.6 MPa 付近を超えると、流束の低下が見られる。これは、ケーキ層が **f** ためである。図 B2-1 の試験は原液流速  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  で行った結果であるが、もし流速を  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  に上げると、0.6 MPa 付近までのろ過流束とろ過圧力との関係は図中の **g** のようになると予測される。

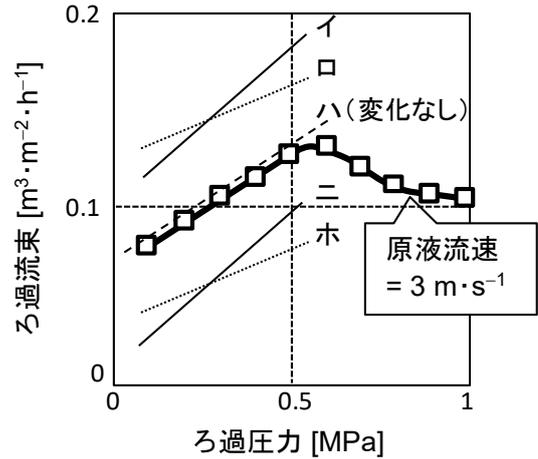


図 B2-1

**[候補群]**

- |          |                      |                |                     |              |                |
|----------|----------------------|----------------|---------------------|--------------|----------------|
| <b>a</b> | (1) Counter-flow     | (2) Cross-flow | (3) Convection-flow | (4) Dead-end | (5) Mixed-flow |
| <b>b</b> | (1) 斜め               | (2) 直角         | (3) 平行              | (4) 加速的      | (5) 周期的        |
| <b>c</b> | (1) 膨張               | (2) 収縮         | (3) せん断力            | (4) 伸長       | (5) 遠心力        |
| <b>d</b> | (1) Newton           | (2) Stokes     | (3) Kozeny          | (4) Ruth     | (5) Allen      |
| <b>e</b> | (1) ケーキ層厚さも一定に保たれている |                | (2) ケーキ層厚さが減少している   |              |                |
|          | (3) ケーキ層厚さが増加している    |                | (4) 濾材抵抗が減少している     |              |                |
|          | (5) 濾材抵抗が増加している      |                |                     |              |                |
| <b>f</b> | (1) 崩壊して抵抗が減少した      | (2) 膨潤して抵抗が増した | (3) 圧密化して抵抗が増した     |              |                |
|          | (4) 固化して抵抗が増した       |                | (5) 液状化して抵抗が減少した    |              |                |
| <b>g</b> | (1) イ                | (2) ロ          | (3) ハ               | (4) ニ        | (5) ホ          |

問題 B 2-3 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。

2成分混合物を分離するための蒸留塔の最小理論段数  $N_m$  と最小還流比  $R_m$  は、原料条件、分離条件および2成分系の気液平衡線図が与えられれば、作図によって求めることができる。

原料となる2-プロパノール水溶液（供給量  $F = 100 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 、2-プロパノールの組成  $x_F = 0.2$ 、熱的条件  $q = 1$ （沸点の液））から、大気圧下、連続蒸留塔を用いて以下の分離条件で2-プロパノールを回収することを考える。（組成はモル分率）

分離条件：塔頂製品中の2-プロパノールの組成  $x_D = 0.62$ 、2-プロパノールの回収率  $\eta = 0.90$ 。

大気圧（101.3 kPa）における2-プロパノール+水系の気液平衡線図（ $x$ - $y$ 線図）を図 B2-2 に与える。塔内の圧力損失が無視でき、等モル流れの仮定の下で、以下の問いに答えよ。

- 1) 分離条件から、塔頂製品流量  $D = \boxed{\text{a}}$   $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 、塔底製品流量  $W = \boxed{\text{b}}$   $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 、塔底製品中の2-プロパノールの組成  $x_W = \boxed{\text{c}}$  が求められる。
- 2) 塔頂製品組成  $x_D$ 、塔底製品組成  $x_W$  から、作図によって最小理論段数  $N_m = \boxed{\text{d}}$ （1理論段相当のリボイラーを含む）が求められる。
- 3) 気液平衡線図上で、塔頂製品の組成点（ $x_D$ ,  $x_D$ ）および $q$ 線と気液平衡曲線の交点とを通る直線を濃縮部の操作線とし、その直線から還流比  $R$  を求めると  $R = \boxed{\text{e}}$  が得られる。しかし、この直線の一部は気液平衡曲線の上を通るため、濃縮部の操作線として用いることはできない。また、求められた還流比は最小還流比にはならない。このような場合には、点（ $x_D$ ,  $x_D$ ）を通り気液平衡曲線に接する操作線から最小還流比  $R_m$  を求めることになり、 $R_m = 0.38$  が得られる。
- 4) 上記の原料条件の中で2-プロパノールの原料組成のみ  $x_F = 0.3$  に変更され、製品組成  $x_D = 0.62$  は同じとき、最小還流比  $R_m$  の値は  $\boxed{\text{f}}$ 。

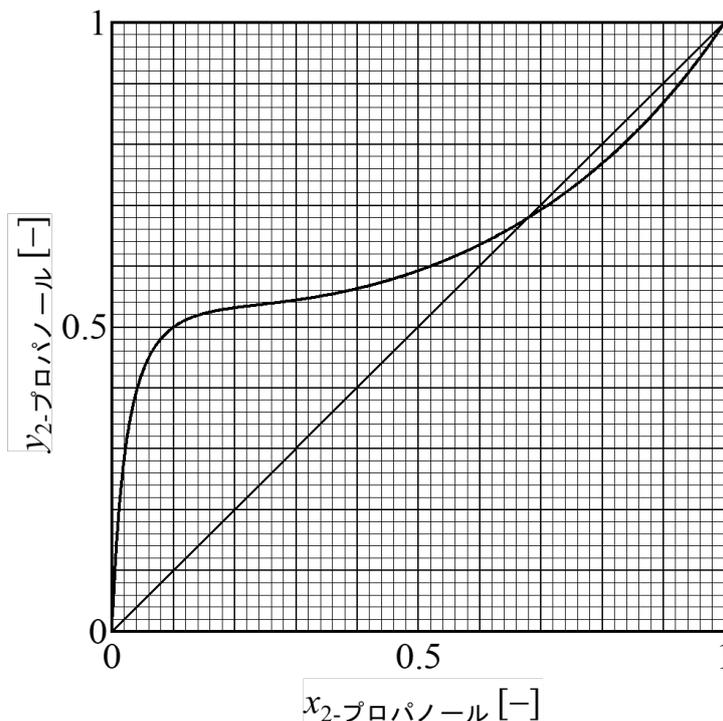


図 B2-2 2-プロパノール+水系気液平衡線図

**[候補群]**

<input type="checkbox"/> a	(1) 13.8	(2) 20.0	(3) 29.0	(4) 32.3	(5) 43.5
<input type="checkbox"/> b	(1) 56.5	(2) 67.7	(3) 71.0	(4) 80.0	(5) 86.2
<input type="checkbox"/> c	(1) 0.009	(2) 0.028	(3) 0.054	(4) 0.063	(5) 0.084
<input type="checkbox"/> d	(1) 2.0	(2) 2.5	(3) 3.0	(4) 3.5	(5) 4.0
<input type="checkbox"/> e	(1) 0.21	(2) 0.27	(3) 0.36	(4) 0.49	(5) 0.62
<input type="checkbox"/> f	(1) 変わらない	(2) 大きくなる	(3) 小さくなる	(4) 決まらない	

問題 B3 以下の B3-1～B3-3 の 3 問のうちから 1 問を選んで解答しなさい。 (配点 10 点)

B3-1 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。

空気の温度を  $t$  [°C]，湿度を  $H$  [kg-水蒸気/kg-乾き空気]とする。乾量基準含水率 0.7 の湿り材料を充填した層内に，質量流量  $G_0 = 5000$  kg-乾き空気 / (h·m<sup>2</sup>-充填層断面積)， $H_1 = 0.005$ ， $t_1 = 70$  °C の空気（熱風）を強制通気して乾燥する（図 B3-1）。充填材料の乾燥は表面蒸発期間であり，熱風は断熱的に材料を乾燥した後，湿度  $H_2 = 0.015$  で充填層出口から排出されるとする。充填層の高さは  $Z_T = 50$  cm，見かけ密度は  $\rho = 1000$  kg-無水材料 / m<sup>3</sup>-充填層，物質移動容量係数  $ka$  [kg-乾き空気 / (h·m<sup>3</sup>-充填層)] は一定とする。

熱風の流れ方向に対して垂直な方向の温度と湿度の分布が無視できるとすると，表面蒸発期間では，充填層全体の乾燥速度  $R_t$  [kg-水 / (h·m<sup>2</sup>-充填層断面積)] は，物質移動容量係数  $ka$  を用いて式(1)で表される。

$$R_t = G_0(H_2 - H_1) = G_0(H_w - H_1)[1 - \exp(-N_t)] \quad (1)$$

ただし， $N_t = \frac{kaZ_T}{G_0}$  とする。

式中の  $H_w$  は，充填層入口における熱風 ( $H_1$ ， $t_1$ ) の湿球温度  $t_w$  に対する飽和湿度である。空気-水系の湿度を図 B3-2 に示す。

次の問いに答えなさい。

- 1) 充填層全体の乾燥速度は， $R_t = \boxed{a}$  kg-水 / (h·m<sup>2</sup>-充填層断面積) である。
- 2) 通気乾燥中の充填層内の湿り材料表面温度は， $\boxed{b}$  °C である。
- 3) 充填層の出口温度は， $t_2 = \boxed{c}$  °C である。
- 4) 3時間の通気乾燥後の充填層内湿り材料の平均含水率は  $\boxed{d}$  である。
- 5) 充填層高さを 70 cm としたとき，充填層層全体の乾燥速度は， $R_t = \boxed{e}$  kg-水 / (h·m<sup>2</sup>-充填層断面積) となる。

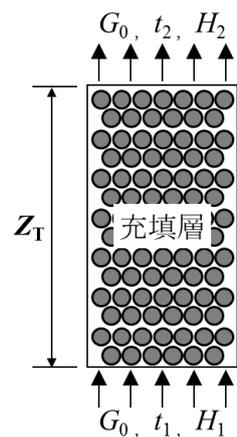


図 B3-1

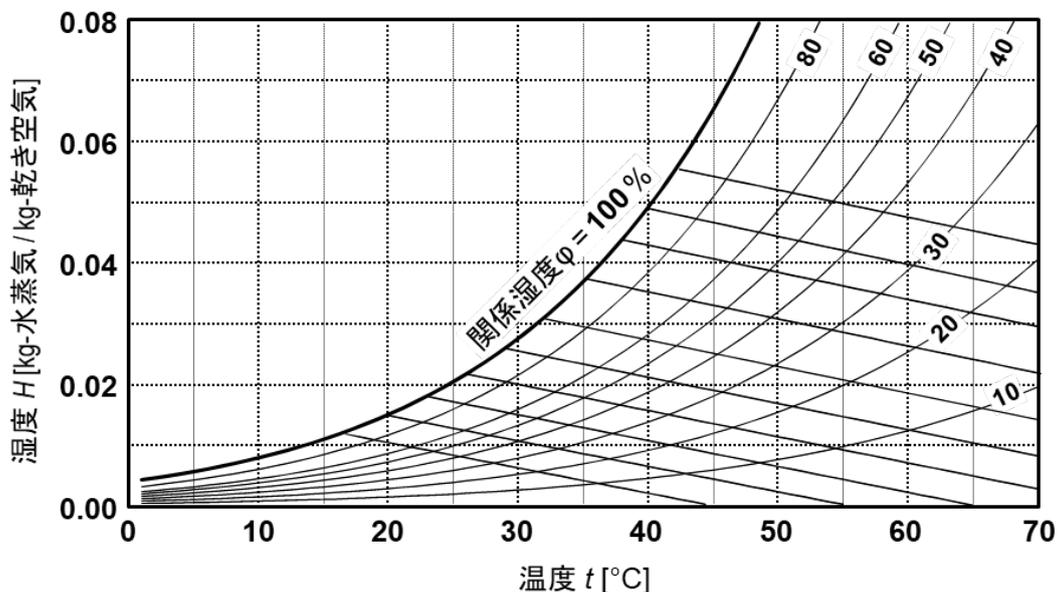


図 B3-2 湿度図表

[候補群]

<input type="checkbox"/> a	(1) 25	(2) 50	(3) 75	(4) 100	(5) 120
<input type="checkbox"/> b	(1) 17	(2) 24	(3) 27	(4) 34	(5) 47
<input type="checkbox"/> c	(1) 17	(2) 24	(3) 27	(4) 34	(5) 47
<input type="checkbox"/> d	(1) 0.30	(2) 0.35	(3) 0.40	(4) 0.50	(5) 0.55
<input type="checkbox"/> e	(1) 61	(2) 64	(3) 67	(4) 70	(5) 73

**B3-2** 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。

- 1) 式(1)で表される液相 1 次反応を、体積  $V = 2.0 \text{ m}^3$  の連続完全混合槽型反応器 (CSTR) を用いて行ったところ、成分 A の反応率 (転化率) は 0.50 であった。ただし、反応原料の体積流量は  $v_0 = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  である。



反応原料流体には A のみが含まれ、反応による体積変化はないとすると、反応速度定数は、 $k = \boxed{\text{a}} \text{ s}^{-1}$  と求まる。

反応温度、反応器体積と体積流量は上記 CSTR と同一条件とし、式(1)の反応を管型反応器 (PFR) にて実施すると、反応器出口での成分 A の反応率は  $\boxed{\text{b}}$  となる。

- 2) 上記 PFR の反応器出口流体の一部を反応器入口に循環させるリサイクル反応プロセスについて考える。反応温度、反応器体積  $V$ 、および体積流量  $v_0$  は上記と同一条件とし、反応器入口に循環される反応混合物の体積流量を  $v_R$ 、循環比を  $\gamma = v_R/v_0$  とする。

リサイクル反応プロセスの入口と出口における成分 A の濃度をそれぞれ、 $C_{A0}$  と  $C_{Af}$ 、プロセス全体の総括反応率を  $x_{Af}$  とすると、次の関係が成り立つ。

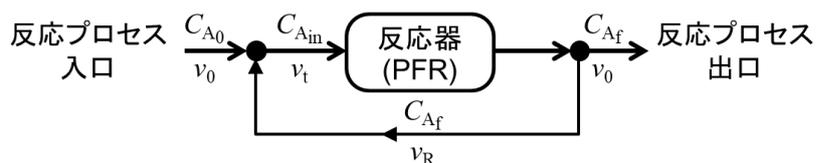
$$C_{Af} = \boxed{\text{c}} \quad (2)$$

また、反応器入口における原料流体の体積流量  $v_t$ 、成分 A の濃度  $C_{Ain}$  は、以下のように表される。

$$v_t = \boxed{\text{d}} \quad (3)$$

$$C_{Ain} = \boxed{\text{e}} \quad (4)$$

上記の関係を用いてリサイクル反応プロセス出口における反応率を求めると、 $\gamma = 1$  のとき  $x_{Af} = \boxed{\text{f}}$  となる。



**図 B3-3** リサイクル反応プロセス概略

[候補群]

- |          |   |  |   |  |  |
|----------|---|--|---|--|--|
| <b>a</b> | (1) 0.0015  | (2) 0.003  | (3) 0.015                                       | (4) 66.7                                 | (5) 667                                  |
| <b>b</b> | (1) 0.56  | (2) 0.63   | (3) 0.72  | (4) 0.86                                 | (5) 0.91                                 |
| <b>c</b> | (1) $C_{A_0} x_{A_f}$                                     | (2) $C_{A_0}(1-x_{A_f})$                                   | (3) $C_{A_0}(1-(1+\gamma)x_{A_f})$              |  |  |
|          | (4) $C_{A_0}\left(1-\frac{x_{A_f}}{1+\gamma}\right)$      | (5) $\frac{1}{1+\gamma}C_{A_0}(1-x_{A_f})$                 |   |  |  |
| <b>d</b> | (1) $v_0(1+\gamma)$                                       | (2) $v_0(1-\gamma)$  | (3) $v_0\gamma$                                 | (4) $v_0\left(1-\frac{1}{\gamma}\right)$ | (5) $v_0\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)$ |
| <b>e</b> | (1) $\frac{C_{A_0}(1-\gamma x_{A_f})}{1+\gamma}$          | (2) $\frac{C_{A_0}(\gamma-x_{A_f})}{1+\gamma}$             | (3) $\frac{\gamma}{1+\gamma}C_{A_0}(1-x_{A_f})$ |  |  |
|          | (4) $C_{A_0}\left(\frac{\gamma}{1+\gamma}-x_{A_f}\right)$ | (5) $C_{A_0}\left(1-\frac{\gamma}{1+\gamma}x_{A_f}\right)$ |   |  |  |
| <b>f</b> | (1) 0.56  | (2) 0.63   | (3) 0.72  | (4) 0.86                                 | (5) 0.91                                 |

**B3-3** 次の文中の空欄にあてはまる最も適切な答えを候補群から選びなさい。

図 B3-4 のようなプロセスにおいて、タンクから抜き出す液体の流量  $F$  を一定にする制御系を考える。タンク断面積は十分に大きく、液高さの変動は無視できるものとする。流量およびバルブ開度の定常値からの偏差を、それぞれ  $y$ ,  $u$  とおき、 $u$  から  $y$  への伝達関数が次の一次遅れ系で表されるとする。

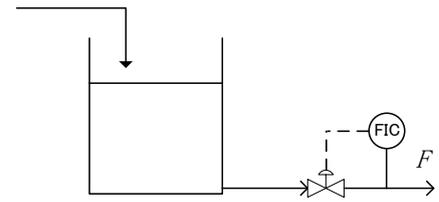


図 B3-4 流量制御

$$G_p(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (1)$$

ここで  $K$ ,  $\tau$  は定数であり、特に  $\tau$  を **a** と呼ぶ。

まず制御系を開いた状態で、あるとき、バルブ開度を定常状態からステップ状に  $A$  だけ増加させたとする、 $y$  はラプラス領域で **b** と表される。これを逆ラプラス変換することで任意の時刻の流量を求めることができる。例えば、時刻  $\tau$  における  $y$  は **c** と求められる。

次に、制御系を閉じて、比例ゲイン  $K_p$  の比例コントローラを使い、バルブを操作端として流量を制御する場合を考える。なお、測定は即時に正しい値が測定できるものとする。このとき、流量の設定値  $r$  から  $y$  への伝達関数は **d** と表される。したがって、流量設定値を定常状態から  $B$  だけステップ状に増加させた場合の  $y$  の最終到達値は **e** となり、流量設定値と比べて **f**。設定値と制御変数である流量の最終到達値との差を **g** と呼ぶ。この値を小さくするためには、 $K_p$  を **h** 必要がある。しかし、さまざまな要因によって  $K_p$  の設定できる値には限界があるため、現実的には **g** は 0 にはならないことが多い。0 にするためには、コントローラとして **i** を用いるのが一般的である。

**【候補群】**

- |          |                                |  |  |   |   |
|----------|--------------------------------|--|--|---|---|
| <b>a</b> | (1) むだ時間                       | (2) 遅れ時間                                     | (3) 時定数  | (4) 遅れ定数  | (5) 伝達時間  |
| <b>b</b> | (1) $\frac{K}{1 + \tau s}$     | (2) $\frac{K}{1 + \tau s} \frac{1}{s}$       | (3) $\frac{K}{1 + \tau s} \frac{A}{s}$           | (4) $\frac{K}{1 + \tau s} A s$                                      | (5) $\frac{K}{1 + \tau s} \frac{s}{A}$                              |
| <b>c</b> | (1) $0.10KA$                   | (2) $0.37KA$                                 | (3) $0.63KA$                                     | (4) $0.73KA$  | (5) $1.0KA$   |
| <b>d</b> | (1) $K_p \frac{K}{1 + \tau s}$ | (2) $\frac{1}{1 + K_p \frac{K}{1 + \tau s}}$ | (3) $\frac{K_p K}{1 + K_p \frac{K}{1 + \tau s}}$ | (4) $\frac{K_p \frac{K}{1 + \tau s}}{1 + K_p \frac{K}{1 + \tau s}}$ | (5) $\frac{1 + K_p \frac{K}{1 + \tau s}}{K_p \frac{K}{1 + \tau s}}$ |
| <b>e</b> | (1) $BKK_p$                    | (2) $\frac{B}{1 + KK_p}$                     | (3) $\frac{BKK_p}{1 + KK_p}$                     | (4) $\frac{1 + BKK_p}{B}$   | (5) $\frac{1 + BKK_p}{BKK_p}$                                       |
| <b>f</b> | (1) 上回る                        | (2) 下回る                                      | (3) 同じになる  | (4) 0.37 倍になる   | (5) 0.67 倍になる   |
| <b>g</b> | (1) オフセット                      | (2) ブロック                                     | (3) ディファレンシャル                                    | (4) 測定誤差  | (5) オーバーシュート  |
| <b>h</b> | (1) 大きくする                      | (2) 小さくする                                    | (3) ゼロにする  | (4) 振動させる   | (5) 設定値に合わせる  |
| <b>i</b> | (1) オンオフコントローラ                 | (2) 比例積分コントローラ                               | (3) 比例微分コントローラ                                   | (4) カスケード制御   | (5) 比率制御  |