

2021 年度 化学工学技士(基礎)試験問題

第一部 13:00～15:20

問題 A1 次の文中の空欄に当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)

1) 次の有機液体の混合物は理想溶液として扱えるとして以下の問いに答えなさい。なお、各液体の 20 °C における物性値は表 A1-1 の通りである。

(i) 気温 20 °C の室内で、ペンタン 10.00 kg、ヘプタン 20.00 kg、ノナン 15.00 kg を混合したとき、混合物の比熱は $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ である。

(ii) 上記混合物の密度は $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ である。

表 A1-1 20 °C における各成分の物性値

液体名	ペンタン	ヘプタン	ノナン
比熱 $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	2.427	2.224	2.179
密度 $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	0.6267	0.6858	0.7208

2) 実際には、混合すると体積変化が起こる場合がある。例えば、表 A1-2 はエタノール水溶液の濃度と密度の関係を表した国際アルコール表からの抜粋である。エタノールを水で希釈すると、その混合比率によって混合物の密度は表 A1-2 のように変化する。なお、この表における vol% とは、(混合前の純エタノールの体積) / (混合後のエタノール水溶液の体積) $\times 100$ で定義されている。以下の問いに答えなさい。

表 A1-2 15 °C におけるエタノール水溶液の密度

エタノール濃度 [vol%]	0	5	10	15	20	25	30
密度 $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	0.99910	0.99195	0.98573	0.98024	0.97517	0.97011	0.96465
エタノール濃度 [vol%]	35	40	45	50	55	60	65
密度 $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	0.95842	0.95121	0.94296	0.93375	0.92371	0.91296	0.90157
エタノール濃度 [vol%]	70	75	80	85	90	95	100
密度 $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	0.88956	0.87687	0.86342	0.84906	0.83344	0.81566	0.79351

(i) 温度 15 °C において、工業用含水エタノール (95 vol% のエタノール水溶液) を水で希釈して、消毒液 (60 vol% のエタノール水溶液) 1000 mL を作る場合、工業用含水エタノールは mL 必要である。

(ii) mL の工業用含水エタノールに、合計の容量が 1000 mL になるまで水を追加して 60 vol% エタノール水溶液を調製した。追加した水の量は mL であり、混合によって体積は 。

[候補群]

a	(1) 2.179	(2) 2.224	(3) 2.250	(4) 2.254	(5) 2.427
b	(1) 626.7	(2) 682.5	(3) 684.3	(4) 685.8	(5) 720.8
c	(1) 570.0	(2) 600.0	(3) 631.6	(4) 682.6	(5) 999.1
d	(1) 368.4	(2) 390.6	(3) 397.8	(4) 398.2	(5) 437.2
e	(1) 収縮する	(2) 膨張する	(3) 変化しない		

問題A2 式(1)の反応の自由エネルギー変化と平衡組成の温度、圧力による変動に関する次の記述のうち、正しいものを2つ選びなさい。(配点5点)



ただし、本反応は発熱反応であることが分かっている。

- 1) 定温、定圧下の状態変化は自由エネルギーが増大する方向に進行し、平衡状態で極大となる。
- 2) 本反応は発熱反応であるので、反応の進行は高温が有利である。
- 3) 本反応はモル数が減少するので、反応進行は高圧が有利である。
- 4) 絶対温度 T における標準自由エネルギー変化 ΔG_T^0 と平衡定数 K_a の間には次の関係がある。ただし、 R は気体定数である。

$$\Delta G_T^0 = RT \ln(K_a) \quad (2)$$

- 5) 絶対温度 T 、圧力 P での平衡組成 x は、フガシティー係数を1と仮定すると（理想気体を仮定すると）平衡定数を用いた次式で表される。式中、 P^0 は標準圧力である。

$$K_a = \left(\frac{P}{P^0} \right)^{-0.5} \frac{x_{\text{SO}_3}}{x_{\text{SO}_2} x_{\text{O}_2}^{0.5}} \quad (3)$$

ただし、 x は各成分のモル分率である。

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）

濃硫酸製造プロセスを図 A3-1 に示す。7.35 mol% の SO_3 を含む不活性ガスが吸収塔に供給され、吸収液（98.0 wt% 硫酸水溶液）に向流接触して SO_3 の全量が吸収される。吸収液は 99.5 wt% の硫酸水溶液になって吸収塔の底部から流出する。この 99.5 wt% 硫酸水溶液は混合槽で水で希釈されて 98.0 wt% 硫酸水溶液となり、一部は製品として系外に取り出され、残りは吸収液として循環される。

吸収塔の入口ガスの流量を $100 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$ としたときのプロセス諸量を以下の手順で求めなさい。ただし、 SO_3 モル質量は $80.06 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ とする。

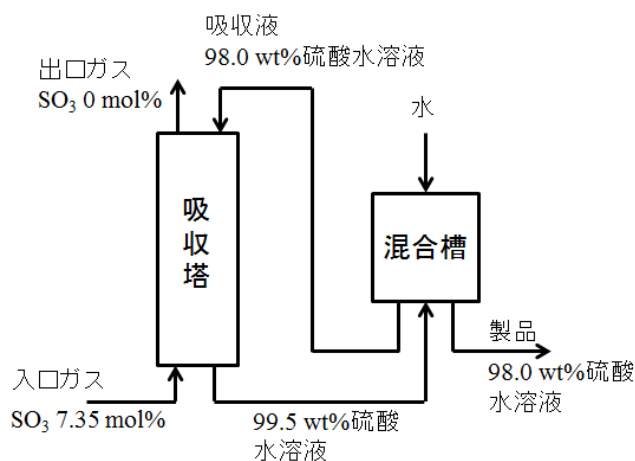


図 A3-1

- 硫酸水溶液を SO_3 と水 (H_2O) の混合物とみなすと、 H_2SO_4 の質量分率が x の硫酸水溶液中の SO_3 の質量分率は で表され、98.0 wt% 硫酸水溶液の SO_3 の質量分率は となる。
- 吸収塔における SO_3 の吸収速度は $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ である。プロセス全体の物質収支から、混合槽から製品として排出される 98.0 wt% 硫酸水溶液の流量は $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ，混合槽に供給される水の流量は $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ である。
- 吸収塔周りの物質収支から 98.0 wt% 硫酸水溶液の循環流量は $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ と求まる。

[候補群]

a	(1) 0.816x	(2) 0.822x	(3) 0.833x	(4) 0.861x	(5) 0.877x	
b	(1) 0.800	(2) 0.806	(3) 0.817	(4) 0.844	(5) 0.860	
c	~ f	(1) 7.35	(2) 14.7	(3) 73.5	(4) 94.7	(5) 1.47×10^2
		(6) 5.88×10^2	(7) 7.35×10^2	(8) 9.05×10^2	(9) 6.52×10^3	(10) 9.05×10^3

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)

水平な長い円管の完全発達定常流れを考え、次元解析を行う。単位長さあたりの圧力降下 $\frac{\Delta P}{L}$ を、管径 d 、流体密度 ρ 、流体粘度 μ 、断面平均流速 u のべき乗の積で表す。それぞれの物理量の指数を w, x, y, z とすると、 $\frac{\Delta P}{L}$ は、無次元定数 k を用いて以下の式(1)のように表される。

$$\frac{\Delta P}{L} = k d^w \rho^x \mu^y u^z \quad (1)$$

左辺と右辺の次元が一致する必要があることから、長さに関して、 $\boxed{\text{a}}$ の関係が成り立つ。質量と時間についても同様の関係式を立て、 $y = \alpha$ として、これを解くと、 $w = \boxed{\text{b}}$ 、 $x = \boxed{\text{c}}$ 、 $z = \boxed{\text{d}}$ となる。

これらの関係を式(1)に代入して整理すると、以下の式(2)が得られる。

$$\boxed{\text{e}} = k \left(\frac{\rho u d}{\mu} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

ここで、 $\frac{\rho u d}{\mu}$ は Reynolds 数である。摩擦係数を f として、式(2)を Fanning の式 $\Delta P = \boxed{\text{f}}$ と比較すると、 f を Re の関数として表すことで円管流れの圧力降下を評価できることが分かる。

円管流れの摩擦係数は、層流では $f = \frac{16}{Re}$ で表され、乱流では Blasius の式 $f = 0.0791 Re^{-1/4}$ が平滑管に対して適用される。体積流量 Q を一定に保って管径 d を 2 倍にしたとき、単位長さあたりの圧力降下 $\frac{\Delta P}{L}$ は、層流では $\boxed{\text{g}}$ 倍、平滑管の乱流では $\boxed{\text{h}}$ 倍となる。

[候補群]

$\boxed{\text{a}}$	(1) $-3 = w - 3x - 2y + z$ (4) $-1 = w - 3x + z$	(2) $-2 = w - 3x - 2y + z$ (5) $0 = w - 3x + y + z$	(3) $-2 = w - 3x - y + z$	
$\boxed{\text{b}}$	(1) $-2 - \alpha$	(2) $-1 - \alpha$	(3) $-1 - 2\alpha$	(4) $-1 + \alpha$ (5) $1 + \alpha$
$\boxed{\text{c}}$	(1) $-1 - \alpha$	(2) $-1 + \alpha$	(3) $1 - \alpha$	(4) $1 + \alpha$ (5) $2 - \alpha$
$\boxed{\text{d}}$	(1) $-2 - \alpha$	(2) $-2 + \alpha$	(3) $1 - \alpha$	(4) $2 - \alpha$ (5) $2 + \alpha$
$\boxed{\text{e}}$	(1) $\frac{\Delta P d}{2 \rho u^2 L}$	(2) $\frac{\Delta P d}{\rho u^2 L}$	(3) $\frac{\Delta P d}{\rho u L}$	(4) $\frac{\Delta P d}{2 \rho u L}$ (5) $\frac{2 \Delta P d}{\rho u^2 L}$
$\boxed{\text{f}}$	(1) $f \frac{\rho \bar{u}}{2} \frac{d}{L}$	(2) $4f \frac{\rho \bar{u}}{2} \frac{d}{L}$	(3) $4f \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \frac{d}{L}$	(4) $4f \frac{\rho \bar{u}}{2} \frac{L}{d}$ (5) $4f \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \frac{L}{d}$
$\boxed{\text{g}}$	(1) $\frac{1}{32}$	(2) $\frac{1}{16}$	(3) $\frac{1}{8}$	(4) $\frac{1}{4}$ (5) 2
$\boxed{\text{h}}$	(1) 0.037	(2) 0.074	(3) 0.15	(4) 0.30 (5) 1.4

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)

水槽に満たされた水を電気ヒーターにより加熱する。水槽内は十分に攪拌されており、水温は均一となっている(図 A5-1 参照)。

いま、水槽内の水の質量を w [kg]、比熱容量を C_p [kJ・kg⁻¹・K⁻¹]、水温を T [K] (初期温度 T_0 [K])、外気温を T_m [K]、ヒーターの発熱量を q [kW]、加熱時間を θ [s]、水槽の壁面の伝熱面積を A [m²]、壁面の総括熱伝達係数 U [kW・m⁻²・K⁻¹]としたとき、水槽周りの非定常熱収支式は以下のようになる。ただし、水槽および附属品の熱容量は無視し、水の蒸発は無いものとする。

$$wC_p \frac{dT}{d\theta} = \boxed{a} \quad (1)$$

- 1) 水槽は最初に 20℃ の水 40 L で満たされていて、完全に断熱されていると仮定したとき、ヒーターの発熱量を 2.1 kW に設定して電流を流し始めてから 60 分後の水の温度は $\boxed{b}$ °C になる。ただし、水の密度 1000 kg・m⁻³、定圧比熱 4.2 kJ・kg⁻¹・K⁻¹ は一定とする。

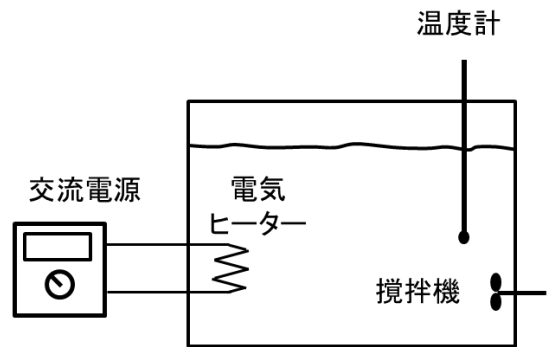


図 A5-1 ヒーター付き水槽

- 2) 実際に同じ実験条件で 60 分後の水の温度を測定したところ 63.5 °C であった。60 分間に水槽から周囲の空気へ逃げた熱量は $\boxed{c}$ kJ となる。

- 3) 次に、外気温が 20 °C 一定の条件で、ヒーターの発熱量を 0.16 kW に設定して、十分長い時間経過後、水温は 70 °C で変化しなくなった。このとき、総括熱伝達係数 U と伝熱面積 A の積 $UA = \boxed{d}$ kW・K⁻¹ となる。

- 4) 水槽内の水温 T の時間変化は、初期条件： $\theta = 0$ のとき、 $T = T_0$ (ただし、 $T_0 \geq T_m$) で、積 UA および発熱量 q を定数として、式(1)を積分して得られる次式から確認できる。

$$T = \boxed{e} \quad (2)$$

[候補群]

$\boxed{a}$ (1) $q - UA(T - T_m)$ (2) $q\theta - UA(T - T_0)$ (3) q (4) $q\theta$ (5) $-UA(T - T_m)$

$\boxed{b}$ (1) 45 (2) 65 (3) 68 (4) 71 (5) 74

$\boxed{c}$ (1) 2.5×10^2 (2) 2.7×10^2 (3) 2.9×10^2 (4) 3.1×10^2 (5) 3.3×10^2

$\boxed{d}$ (1) 2.3×10^{-3} (2) 3.2×10^{-3} (3) 4.0×10^{-3} (4) 8.0×10^{-3} (5) 1.2×10^{-2}

$\boxed{e}$ (1) $\left(T_0 + \frac{q + UAT_m}{UA}\right) \exp\left(-\frac{wC_p}{UA}\theta\right) + \frac{q + UAT_m}{UA}$ (2) $\left(T_0 + \frac{q - UAT_m}{UA}\right) \exp\left(\frac{UA}{wC_p}\theta\right) - \frac{q - UAT_m}{UA}$

(3) $\left(T_0 - \frac{q + UAT_m}{UA}\right) \exp\left(-\frac{UA}{wC_p}\theta\right) + \frac{q + UAT_m}{UA}$ (4) $\left(T_0 - \frac{q - UAT_m}{UA}\right) \exp\left(-\frac{wC_p}{UA}\theta\right) + \frac{q - UAT_m}{UA}$

(5) $\left(T_0 - \frac{q - UAT_m}{UA}\right) \exp\left(\frac{UA}{wC_p}\theta\right) + \frac{q - UAT_m}{UA}$

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)

自己触媒反応は、反応式を $A \rightarrow R + S$ で表すと、副生成物 S は触媒にもなり反応に関わる。その反応速度式は、反応速度定数 k 、原料濃度 C_A と副生成物濃度 C_S を用いて次式で表せるものとする。

$$r_A = -kC_A C_S \quad (1)$$

この自己触媒反応をプラグフロー反応器あるいは連続槽型反応器 (CSTR) で行う場合について以下の問いに答えなさい。

- 1) S は触媒でもあるので、原料に加えられる。その初濃度を C_{S0} [$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$]、 A の初濃度を C_{A0} [$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$] とし、任意時間での C_S を C_A の関数で表すと、 $C_S = \boxed{\text{a}}$ となる。
- 2) 反応速度 r_A は C_A に関して極値を有するが、その時の A の濃度 C_{Aex} は $C_{Aex} = \boxed{\text{b}}$ で与えられる。
- 3) この反応を連続槽型反応器で C_{Aex} まで進めるとき、必要な反応容積 V_T は $\boxed{\text{c}}$ L と計算される。ただし、 $k = 0.5 \text{ min} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $C_{A0} = 4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $C_{S0} = 0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、原料供給速度 v を $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ とする。
- 4) 次に、同条件でプラグフロー反応器にて C_{Aex} まで進めるとき、必要な反応容積 V_p を求めると $\boxed{\text{d}}$ L となる。
- 5) 上記の結果についての考察で最も適当なものは、下記のうち $\boxed{\text{e}}$ である。
 - ① プラグフロー反応器では、反応速度は順次増大するために、 $V_p < V_T$ となった。
 - ② 連続槽型反応器では、反応速度は入口濃度で決まるために、 $V_p < V_T$ となった。
 - ③ プラグフロー反応器では、出口で最も反応速度が小さくなるために、 $V_p < V_T$ となった。
 - ④ 連続槽型反応器では、反応速度は出口濃度で決まるために、 $V_p > V_T$ となった。
 - ⑤ プラグフロー反応器では、反応速度は順次減少するために、 $V_p > V_T$ となった。

[候補群]

$\boxed{\text{a}}$ (1) $C_{A0} + (C_A + C_{S0})$ (2) $C_{S0} + (C_{A0} - C_A)$ (3) $C_{S0} + (C_A - C_{A0})$ (4) $C_{A0} + (C_A - C_{S0})$
 (5) $C_{A0} - (C_A + C_{S0})$

$\boxed{\text{b}}$ (1) $\frac{C_{S0}}{2}$ (2) $\frac{C_{A0}}{2}$ (3) $\frac{C_{A0} + C_{S0}}{2}$ (4) $C_{A0} + C_{S0}$ (5) $C_{A0} - C_{S0}$

$\boxed{\text{c}}$ (1) 9.85 (2) 19.7 (3) 29.6 (4) 39.4 (5) 49.3

$\boxed{\text{d}}$ (1) 3.30 (2) 6.59 (3) 8.79 (4) 13.2 (5) 26.4

$\boxed{\text{e}}$ (1) ① (2) ② (3) ③ (4) ④ (5) ⑤

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）

トルエンと *p*-キシレンの混合液 1.00 kg を常圧単蒸留してトルエンを濃縮する。トルエンと *p*-キシレンの質量分率は 0.300 : 0.700, トルエンの分子量は 92.1, *p*-キシレンの分子量は 106 とする。

- 1) 単蒸留前の混合液の物質量は mol であり, トルエンのモル分率は, である。
- 2) 初留点温度 $T = 401\text{ K}$ における純物質としてのトルエンの蒸気圧を 161 kPa, *p*-キシレンの蒸気圧を 75.9 kPa とし, また 401 K, 1 atm における混合液およびその蒸気が理想溶液, 理想気体であると仮定すると, Raoult の法則より初留点でのトルエンの蒸気モル分率は となる。
- 3) 常圧単蒸留によりトルエンが濃縮された混合液 355 g を得た。残留液のトルエンの質量分率は 0.150 であった。残留液の物質量は mol であり, トルエンのモル分率は である。よって, 濃縮された混合液のトルエンのモル分率は となる。

[候補群]

a	(1) 0.459	(2) 2.83	(3) 9.86	(4) 10.4	(5) 102
b	(1) 0.330	(2) 0.462	(3) 0.572	(4) 0.669	(5) 0.729
c	(1) 0.291	(2) 0.393	(3) 0.442	(4) 0.524	(5) 0.682
d	(1) 2.91	(2) 3.34	(3) 4.53	(4) 6.22	(5) 6.97
e	(1) 0.0928	(2) 0.141	(3) 0.169	(4) 0.215	(5) 0.312
f	(1) 0.512	(2) 0.605	(3) 0.721	(4) 0.852	(5) 0.941

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）

圧力(p)–温度(T)線図で示される a は、液相と気相が平衡状態を保って共存するときの圧力と温度の関係を表している。液相と気相が相平衡をなして共存するための条件は、液相と気相の自由エネルギーが等しいことで与えられる。

$$G' = G'' \quad (1)$$

自由エネルギーは、エンタルピー H とエントロピー S を用いて、 $G =$ b で定義されるので、蒸気圧曲線における温度に対する圧力（蒸気圧）の変化はエンタルピー変化 ΔH と容積変化 ΔV を用いた次式で与えられる。

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V} \quad (2)$$

この式は c の式として知られている。

圧力が比較的低く気体が理想気体とみなされる範囲では、気体の体積に対して液体の体積は極めて小さいのでこれを無視し、また蒸発潜熱 ΔH は温度にかかわらず一定とみなすと、次式が得られる。ただし、 A は定数である。

$$\ln(p) = -\frac{\Delta H}{R} \text{ d } + A \quad (3)$$

ベンゼンの蒸気圧が 2 点与えられている。

温度 [K]	315.35	353.25
ベンゼン蒸気圧 [Pa]	26700	101300

このデータより、蒸発潜熱を求めると、 $\Delta H =$ e $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ である。333.75 K の時の蒸気圧は $p =$ f Pa である。ただし、気体定数は $R = 8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ を用いなさい。

[候補群]

a	(1) 融解曲線	(2) 昇華曲線	(3) 蒸気圧曲線	(4) 溶解度曲線	(5) 乾燥特性曲線
b	(1) $S - PH$	(2) $H + TS$	(3) $S + TH$	(4) $S - TH$	(5) $H - TS$
c	(1) Antoine	(2) Raoult	(3) Fanning	(4) Clausius-Clapeyron	(5) Hagen-Poiseuille
d	(1) T	(2) $\frac{1}{T}$	(3) $\ln(T)$	(4) $\frac{1}{\ln(T)}$	(5) T^2
e	(1) 32580	(2) 42380	(3) 52990	(4) 60950	(5) 70010
f	(1) 32580	(2) 42380	(3) 52990	(4) 60950	(5) 70010

第二部 13:00～15:20

問題 B1 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) x 方向に一様な速度で流れる含塵気流中に無限長の円柱（直径 D ）が直交して置かれている系を考える（図 B1-1）。粉塵粒子が x 方向に直進して移動すれば、十分に離れた上流域の円柱の投影面から流入した粒子は、全て物体に衝突する。しかし、気流の流線は物体に近づくにつれて歪み、粒子は慣性をもっているためにその移動は気流からずれる。そこで、円柱の表面に接する粒子軌跡を考えると、図に示した上下の軌跡の内部で移動する粒子は全て円柱に衝突することになる。この軌跡を a 粒子軌跡とよぶ。

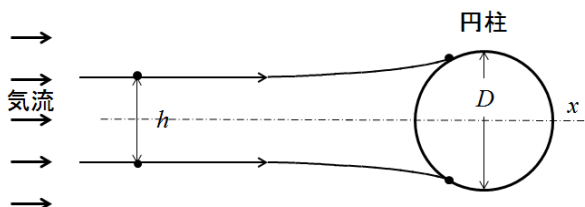


図 B1-1

図に示したように、上流域の流れに平行な a 粒子軌跡の間隔を h とすると、円柱から粒子の再飛散がない場合の捕集効率は $\eta =$ b で表される。円柱の代わりに球（直径 D ）を設置した場合には、捕集効率は $\eta =$ c となる。

- 2) 繊維フィルターの座標系を図 B1-2 に示す。含塵気体は、空塔速度 u_0 で高さ H 、幅 W 、厚さ L のフィルターを通過する。フィルターは直径 D_f の円柱状繊維で構成され、気体は繊維に対して直交に流入する。繊維の充填率（体積分率）を α とすると、フィルター単位体積あたりの繊維の長さ ℓ は、 $\ell =$ d となる。また、フィルターの空隙部を流れる速度 u は $u = \frac{u_0}{1 - \alpha}$ で表される。

厚さ Δx のフィルターに充填された繊維の総投影面積は $\ell D_f W H \Delta x$ であるので、気流中の粒子の個数濃度を C とし、個々の繊維の捕集効率 η を一定と仮定すると、単位時間あたりに繊維に捕捉される粒子量は e $\times W H \Delta x$ となる。この量が厚さ Δx のフィルターで集塵される粒子量 $u_0 W H [C(x) - C(x + \Delta x)]$ に等しいので、フィルター内の気流の濃度分布は次式で表される。

$$\frac{dC}{C} = -m dx \quad (1)$$

ここで $m =$ f (2)

フィルターに流入する気流の粉塵濃度を C_0 とすると、流出濃度 C_1 は次式となり、

$$C_1 = C_0 \text{ g } \quad (3)$$

フィルターの捕集効率 E は

$$E = \text{ h } \quad (4)$$

で表される。

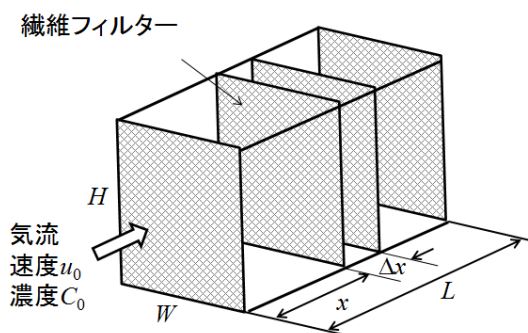


図 B1-2

[候補群]

a	(1) 限界	(2) 最小	(3) 衝突	(4) 接線	(5) 漸近
b	(1) $\frac{h}{D}$	(2) $\frac{h}{\pi D}$	(3) $\frac{2h}{\pi D}$	(4) $\left(\frac{h}{D}\right)^2$	(5) $\frac{1}{4}\left(\frac{h}{D}\right)^2$
c	(1) $\frac{h}{D}$	(2) $\frac{h}{\pi D}$	(3) $\frac{2h}{\pi D}$	(4) $\left(\frac{h}{D}\right)^2$	(5) $\frac{1}{4}\left(\frac{h}{D}\right)^2$
d	(1) αD_f	(2) $\frac{\alpha}{D_f^2}$	(3) $\frac{4\alpha}{D_f^2}$	(4) $\frac{\alpha}{\pi D_f^2}$	(5) $\frac{4\alpha}{\pi D_f^2}$
e	(1) $\eta Cu_0 \ell D_f$	(2) $\eta \alpha Cu_0 \ell D_f$	(3) $\eta Cu \ell D_f$	(4) $\eta \alpha Cu \ell D_f$	(5) $\frac{\eta Cu \ell D_f}{1 - \alpha}$
f	(1) $\frac{2\alpha\eta}{(1 - \alpha)D_f}$	(2) $\frac{4\alpha\eta}{(1 - \alpha)D_f}$	(3) $\frac{2\alpha\eta}{(1 - \alpha)\pi D_f}$	(4) $\frac{4\alpha\eta}{(1 - \alpha)\pi D_f}$	(5) $\frac{4(1 - \alpha)\eta}{\alpha\pi D_f}$
g	(1) $\exp(-mL)$	(2) $\exp(mL)$	(3) $1 - \exp(-mL)$	(4) $1 - \exp(mL)$	(5) $\frac{\exp(mL) - \exp(-mL)}{\exp(mL) + \exp(-mL)}$
h	(1) $\exp(-mL)$	(2) $\exp(mL)$	(3) $1 - \exp(-mL)$	(4) $1 - \exp(mL)$	(5) $\frac{\exp(mL) - \exp(-mL)}{\exp(mL) + \exp(-mL)}$

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。

蒸留塔は混合物の分離手段として幅広く利用されている。

図 B2-1 に、塔頂にコンデンサー（全縮器）、塔底にリボイラー（再沸器）を備えた棚段型の蒸留塔の概略を示す。いま、ベンゼン 60 mol%，トルエン 40 mol%の混合物 F を、 $100 \text{ kmol}\cdot\text{h}^{-1}$ で蒸留塔に供給し、ベンゼン 95 mol%の留出液 D とベンゼン 3 mol%の缶出液 W を得るために必要な還流比は 2 であった（基準運転）。このとき、留出液 D の流量は a $\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$ 、缶出液 W の流量は b $\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$ 、還流液 L の流量は c $\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$ であり、蒸留塔の最上段から発生する蒸気中のベンゼン濃度は d mol%である。

また、理想段を仮定したとき、蒸留塔の最上段から流出する液中のベンゼン濃度は e mol%となる。ただし、トルエンに対するベンゼンの相対揮発度 α_{12} は 2.5 とする。

以下では、運転条件の変更と還流比、リボイラーの熱負荷の関係を考察する。

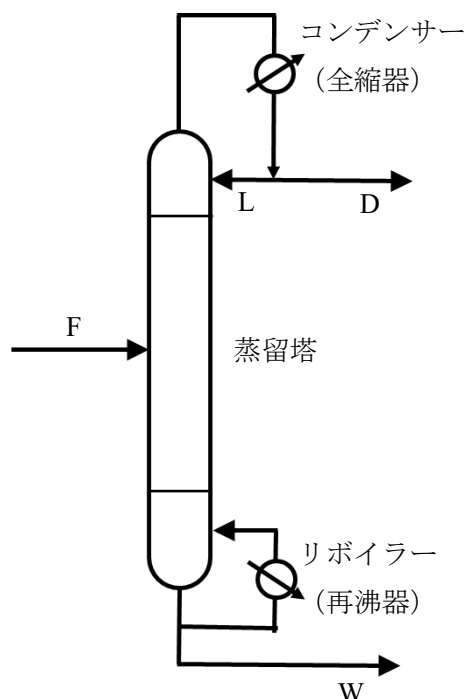


図 B2-1

[運転変更 A]

基準運転に対して、留出液のベンゼン濃度を 92 mol%に変更し、缶出液のベンゼン濃度を 3 mol%のままとなるように運転した場合、必要となる還流比は f .

[運転変更 B]

基準運転に対して、留出液のベンゼン濃度の 95 mol%は変えずに、缶出液のベンゼン濃度が 2 mol%となるように運転した場合、リボイラーの必要加熱量は g .

[候補群]

a	(1) 40	(2) 60	(3) 62	(4) 65	(5) 69
b	(1) 31	(2) 35	(3) 38	(4) 40	(5) 60
c	(1) 124	(2) 130	(3) 186	(4) 195	(5) 200
d	(1) 69	(2) 79	(3) 88	(4) 95	(5) 100
e	(1) 69	(2) 79	(3) 88	(4) 95	(5) 100
f	(1) 変わらない	(2) 小さくなる	(3) 大きくなる		
g	(1) 変わらない	(2) 小さくなる	(3) 大きくなる		

B2-2 遠心分離機に関する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。

半径 r の円周上を角速度 ω で回転する粒子（直径 D_p ）の半径方向の移動速度 v_c は、a の抵抗法則が適用される場合、次式で表される。

$$v_c = \frac{D_p^2(\rho_p - \rho_f)r\omega^2}{18\mu_f} = v_g Z \quad \text{ただし } Re = \frac{\rho_f D_p v_c}{\mu_f} < 6 \quad (1)$$

ここで、 ρ_p は粒子の密度、 ρ_f は流体の密度、 μ_f は流体の粘度、 v_g は a の重力沈降速度である。式(1)中の $Z = \frac{r\omega^2}{g}$ は遠心力と重力の比を表し、b という。粒子の半径位置を r_p とすると、

$\frac{dr_p}{dt} = v_c$ であるので、式(1)より式(2)が成り立つ。

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{v_g \omega^2}{g} r_p \quad (2)$$

式(2)より粒子が半径 r_1 から r_2 まで移動するのに要する時間は次式で表される。

$$t = \frac{g}{v_g \omega^2} \times \text{c} \quad (3)$$

粒子（最小粒径 $D_p = 2 \mu\text{m}$ 、密度 $\rho_p = 2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）を 0.1 wt% 含む油（密度 $\rho_f = 850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、粘度 $\mu_f = 0.015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）の分離処理をしたい。最小粒子の重力沈降速度は d $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ と遅いので、図 B2-2 に示す連続式回転円筒型遠心分離機を用いる。遠心分離機の寸法は、内円筒半径 $r_1 = 5 \text{ cm}$ 、外円筒半径 $r_2 = 10 \text{ cm}$ 、高さ $H = 1 \text{ m}$ である。装置底部から供給された油は回転する円筒間を上向きに流れ、油中の懸濁粒子に遠心力が働いて粒子は半径方向に移動（沈降）する。

分離機の回転数が $N = 5000 \text{ rpm}$ （rpm は 1 分間の回転数）のとき、角速度 ω は e $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、内円筒半径位置から流入した粒子が外円筒壁に達する時間 t は f s となる。回転円筒内の流れが一様で、粒子が流れに乗って上昇すると仮定すると、装置内の液の上昇速度が g $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であれば、流入した粒子全てが外円筒壁に到達する。したがって、この条件での最大処理流量は h $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ であり、これ以下の流量であれば粒子を含まない油が内側の出口から、粒子の濃厚スラリーが外側の出口から流出する。

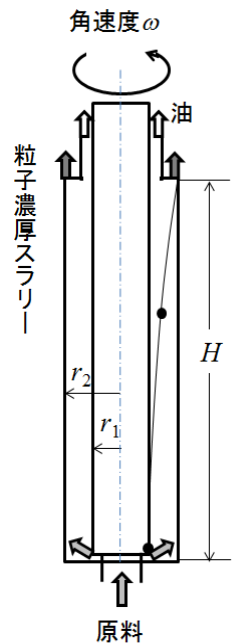


図 B2-2

[候補群]

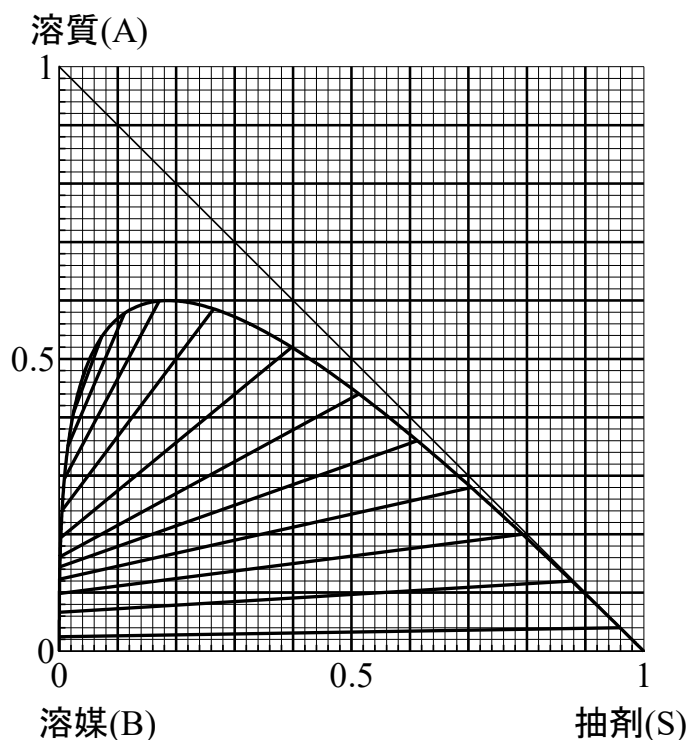
- | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| a | (1) Stokes | (2) Allen | (3) Amagat | (4) Euler | (5) Newton |
| b | (1) 無次元遠心加速度 | (2) 無次元遠心力 | (3) 遠心関数 | (4) 遠心効果 | (5) 遠心指数 |
| c | (1) $\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ | (2) $\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$ | (3) $r_2 - r_1$ | (4) $r_1 - r_2$ | (5) $r_1^{0.5} - r_2^{0.5}$ |
| d | (1) 1.05×10^{-5} | (2) 1.05×10^{-4} | (3) 2.11×10^{-4} | (4) 1.05×10^{-3} | (5) 2.11×10^{-3} |
| e | (1) 523 | (2) 587 | (3) 632 | (4) 780 | (5) 1058 |
| f | (1) 92 | (2) 98 | (3) 105 | (4) 108 | (5) 118 |
| g | (1) 6.5×10^{-3} | (2) 7.5×10^{-3} | (3) 8.5×10^{-3} | (4) 9.5×10^{-3} | (5) 10.5×10^{-3} |
| h | (1) 2.1×10^{-5} | (2) 9.3×10^{-5} | (3) 9.8×10^{-5} | (4) 1.5×10^{-4} | (5) 2.0×10^{-4} |

B2-3 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。

溶質(A) 40 mol%, 溶媒(B) 60 mol%からなる原料に純粋な抽剤(S)を加えて, 単抽出を行い, 抽出液を蒸留で分離して, 溶質を回収し, 抽剤を再生利用することを考える。

図B2-3に示した溶質(A) + 溶媒(B) + 抽剤(S)の液液平衡関係 (溶解度曲線とタイライン) を用いて解答しなさい。

- 1) 原料 30 kmol に抽剤 10 kmolを加えて得られる混合物Mの溶質(A)のモル分率 $x_A^M = \boxed{\text{a}}$ となる。
- 2) 混合物を静置して得られた抽出液Eと抽残液Rは平衡関係にあり, それぞれの溶質(A)のモル分率は $y_A^E = \boxed{\text{b}}$, $x_A^R = \boxed{\text{c}}$ となる。このとき, 抽出液量は $\boxed{\text{d}}$ kmol, 抽残液量は $\boxed{\text{e}}$ kmolとなる。
- 3) 2)で得られた抽出液を中間タンクに貯留した後, 連続精留塔を用いて分離する。塔頂から溶質(A)と溶媒(B)を, 塔底から抽剤(S)をそれぞれ100 %回収できると仮定したとき, 塔頂製品に含まれる溶質(A)のモル分率 $x_{DA} = \boxed{\text{f}}$ となる。



図B2-3 液液平衡関係 (組成はモル分率)

[候補群]

$\boxed{\text{a}}$	(1) 0.15	(2) 0.20	(3) 0.25	(4) 0.30	(5) 0.35
$\boxed{\text{b}}$	(1) 0.26	(2) 0.36	(3) 0.40	(4) 0.44	(5) 0.52
$\boxed{\text{c}}$	(1) 0.08	(2) 0.12	(3) 0.16	(4) 0.20	(5) 0.24
$\boxed{\text{d}}$	(1) 15	(2) 20	(3) 24	(4) 28	(5) 32
$\boxed{\text{e}}$	(1) 8.0	(2) 12	(3) 16	(4) 20	(5) 24
$\boxed{\text{f}}$	(1) 0.84	(2) 0.90	(3) 0.94	(4) 0.98	(5) 0.99

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。

連続槽型反応器 (CSTR) を用いて、 $A + B \rightarrow R + S$, $k = 10.0 \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ なる 2 次の液相反応を行う。反応原料 A の濃度は $3.0 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, B の濃度は $2.0 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ で、A, B は反応器 (体積 100 dm^3) に別々に等しい体積供給速度 $Q [\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$ で供給される。限定反応物質 B の反応率 X_B を 75 % にしたいとき、体積供給速度 Q は次のようにして求められる。

- 1) 反応器出口での B の濃度 C_B は a $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ になる。
- 2) A の反応率 X_A は b であり、反応器出口での A の濃度 C_A は c $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ となる。
- 3) A についての反応速度 $-r_A$ は d $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$ になる。
- 4) この連続槽型反応器の平均滞留時間は e min になる。
- 5) 等流量で供給される A, B それぞれの体積供給速度 Q は f $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ となる。

[候補群]

a	(1) 0.25	(2) 0.50	(3) 0.75	(4) 1.00	(5) 1.25
b	(1) 0.25	(2) 0.375	(3) 0.40	(4) 0.50	(5) 0.625
c	(1) 0.25	(2) 0.50	(3) 0.75	(4) 1.00	(5) 1.25
d	(1) 0.938	(2) 1.88	(3) 3.75	(4) 5.63	(5) 7.50
e	(1) 0.10	(2) 0.20	(3) 0.30	(4) 0.40	(5) 0.50
f	(1) 62.5	(2) 125	(3) 250	(4) 375	(5) 500

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。

図 B3-1 に示した液相回分吸着について考える．溶質濃度を C [$\text{kg} \cdot (\text{m}^3\text{-溶液})^{-1}$]，溶液体積を V [m^3]，吸着剤量を m [kg]とすると次式が成立する．

$$-V \frac{dC}{dt} = m \frac{dq_m}{dt} \quad (1)$$

q_m は平均吸着量 [$\text{kg} \cdot (\text{kg}\text{-吸着剤})^{-1}$]， t は時間 [h] である．式(1)を積分すると，ある時間 t における溶質濃度 C と平均吸着量 q_m の関係，式(2)が得られ，これが回分吸着操作における操作線となる．

$$V(C_0 - C) = m(q_m - q_0) \quad (2)$$

図 B3-2 に示した吸着等温線と操作線の関係より，吸着開始時 (C_0, q_0) と平衡時 (C_∞, q_∞) の間に成立する物質収支は a となる．一方，平衡状態に至るまでの吸着過程では，平均吸着量 q_m に対して平衡な吸着剤の仮想界面濃度 C^* を導入し，吸着速度が溶質濃度と界面濃度 C^* の差を推進力として次式で表されとする．

$$\frac{dq_m}{dt} = K_F S \times \text{ b } \quad (3)$$

ここで，吸着等温線が直線関係の $q_\infty = HC_\infty$ の場合には，

界面濃度は $C^* = \frac{q_m}{H}$ で与えられる． S [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$] は吸着剤の

粒子外表面積， K_F [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$] は総括物質移動係数である．式(3)を式(1)に代入することにより，溶質濃度 C に関する微分方程式が得られ，溶質濃度 C_0 から C_f までの吸着に要する時間 t は式(4)から求まる．

$$t = \frac{V}{K_F S m} \int_{C_f}^{C_0} \frac{dC}{(C - C^*)} \quad (4)$$

微量有機色素を含む液（体積 1 m^3 ）に活性炭 2 kg を投入し，有機色素を取り除く吸着操作について考える．吸着操作前の活性炭には有機色素は含まれていない．吸着平衡時における濃度と吸着量の関係（吸着等温線）が $q_\infty = 5C_\infty$ であるとき，吸着平衡に達したときの溶質濃度は $C_\infty = \text{ c } \times C_0$ となる．吸着平衡時に吸着除去される色素量 $V \times (C_0 - C_\infty)$ の 95% を吸着除去したときの溶質濃度を C_{f95} とする ($\frac{C_0 - C_{f95}}{C_0 - C_\infty} = 0.95$)．このとき， $C_{f95} = \text{ d } \times C_0$ となる．平均吸着量 q_m と平衡関係にある界面濃度 C^* は吸着等温線 ($q_m = 5C^*$) と操作線の関係から， $C^* = \text{ e }$ となる．95% の吸着除去に要する時間が 1 時間であったとすると， $K_F S = \text{ f }$ と求まる．得られた $K_F S$ を用いることで，任意の濃度 C ，溶液量 V ，吸着剤量 m に対し，吸着操作に要する時間 t を予測することができる．

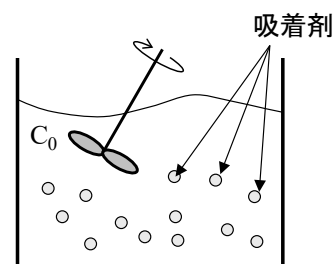


図 B3-1 回分吸着装置概略

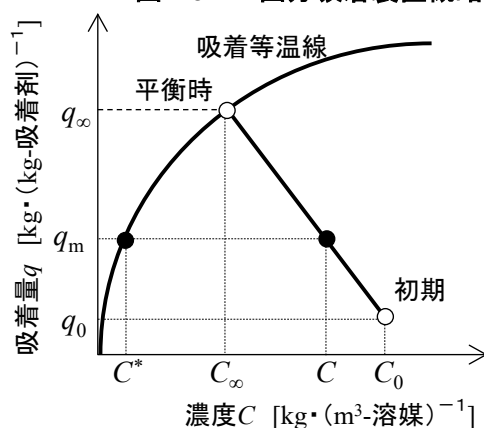


図 B3-2 吸着等温線と操作線

[候補群]

- | | | | | |
|---|---|---|---|--|
| a | (1) $V(C_\infty - C_0) = m(q_\infty - q_0)$ | (2) $V(C_0 - C_\infty) = m(q_\infty - q_0)$ | (3) $V(C_0 - C_\infty) = m(q_0 - q_\infty)$ | |
| | (4) $m(C_0 - C_\infty) = V(q_\infty - q_0)$ | (5) $m(C_\infty - C_0) = V(q_\infty - q_0)$ | | |
| b | (1) $C - C^*$ | (2) $C_\infty - C^*$ | (3) $C_0 - C^*$ | (4) $C^* - C$ (5) $C^* - C_\infty$ |
| c | (1) $\frac{1}{5}$ | (2) $\frac{1}{6}$ | (3) $\frac{1}{10}$ | (4) $\frac{1}{11}$ (5) $\frac{1}{21}$ |
| d | (1) $\frac{2}{21}$ | (2) $\frac{3}{22}$ | (3) $\frac{4}{23}$ | (4) $\frac{5}{24}$ (5) $\frac{6}{25}$ |
| e | (1) $\frac{C_0 - C}{5}$ | (2) $\frac{C - C_0}{5}$ | (3) $\frac{C_0 - C}{10}$ | (4) $\frac{C - C_0}{10}$ (5) $\frac{C_\infty - C}{10}$ |
| f | (1) $\frac{5}{11} \ln \frac{250}{41}$ | (2) $\frac{5}{11} \ln \frac{240}{31}$ | (3) $\frac{5}{11} \ln \frac{230}{21}$ | (4) $\frac{5}{11} \ln 20$ (5) $\frac{5}{11} \ln 210$ |

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 B3-3 に示すように、タンクに体積流量 F 、温度 T_1 で供給される液を温度 T_{CW} （一定）の冷却水で冷やすプロセスを考える。タンク内の液は完全に混合されており、その温度 T は均一とする。液面は制御されており、タンク内の液の体積 V は一定とする。冷却水による除熱速度を Q とし ($Q \leq 0$)、液の密度 ρ および比熱 C_p は一定とし、タンク周辺への除熱速度は無視できるものとする。

このとき、熱収支より、次式が成り立つ。

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \boxed{\text{a}} \quad (1)$$

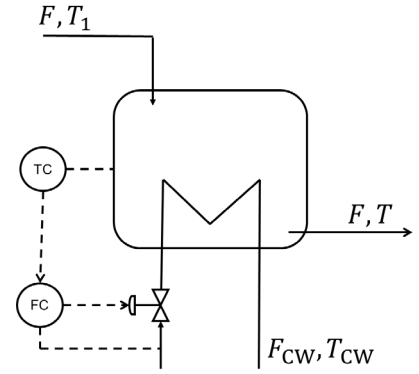


図 B3-3

ここで、定常状態では $T = T_s$ 、 $Q = Q_s$ とし、新たに $y = T - T_s$ 、 $u = \frac{Q - Q_s}{\rho C_p}$ と置くと式(2)となる。

$$V \frac{dy}{dt} = \boxed{\text{b}} \quad (2)$$

ラプラス変換して、 u から y への伝達関数を求めると式(3)となる。

$$G(s) = \boxed{\text{c}} \quad (3)$$

y の設定値を r とし、比例ゲイン K_p の比例制御によって制御することになると、 r から y への閉ループ伝達関数 $G_2(s)$ は次式となる。ここで、 u は直接操作できるとしてよい。

$$G_2(s) = \boxed{\text{d}} \quad (4)$$

したがって、 r を 0 から 1 にステップ的に変化させた場合の y の応答を求め、その最終到達値を求めると、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \boxed{\text{e}} \quad (5)$$

式(5)となる。比例ゲイン K_p 積分時間 T_1 の PI 制御で制御した場合には、同様に式(6)となる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \boxed{\text{f}} \quad (6)$$

なお、実際には、 u は直接操作できるわけではなく、温度 T_{CW} の冷却水の流量 F_{CW} を操作して制御することになる。すなわち、流量制御系を内側に持ち、その設定値を温度制御系が操作する。このような方式の制御系を $\boxed{\text{g}}$ と呼ぶ。

[候補群]

- | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| $\boxed{\text{a}}$ | (1) $\rho C_p F(T_1 - T) + Q$ | (2) $\rho C_p F(T_1 - T)$ | (3) $\rho C_p F(T - T_1) - Q$ | (4) $\rho C_p F T + Q$ | (5) $-Q$ |
| $\boxed{\text{b}}$ | (1) $Fy - u$ | (2) $Fy + u$ | (3) $-Fy + u$ | (4) $-u$ | (5) $-Fy - u$ |
| $\boxed{\text{c}}$ | (1) $\frac{-1}{Vs + F}$ | (2) $\frac{\rho C_p}{Vs + F}$ | (3) $\frac{1}{Vs + F}$ | (4) $\frac{s}{Vs + F}$ | (5) $\frac{1}{Vs - F}$ |
| $\boxed{\text{d}}$ | (1) $\frac{K_p G(s)}{1 + K_p G(s)}$ | (2) $\frac{K_p G(s)}{1 - K_p G(s)}$ | (3) $\frac{1}{1 + K_p G(s)}$ | (4) $\frac{K_p + G(s)}{1 - K_p G(s)}$ | (5) $\frac{-1}{1 + K_p G(s)}$ |
| $\boxed{\text{e}}$ | (1) 0 | (2) 1 | (3) $\frac{1}{K_p - F}$ | (4) $\frac{K_p}{K_p - F}$ | (5) $\frac{K_p}{K_p + F}$ |
| $\boxed{\text{f}}$ | (1) 0 | (2) 1 | (3) $\frac{1}{K_p - F}$ | (4) $\frac{K_p}{K_p - F}$ | (5) $\frac{K_p}{K_p + F}$ |
| $\boxed{\text{g}}$ | (1) 最適制御 | (2) カスケード制御 | (3) フィードフォワード制御 | (4) モデル予測制御 | (5) 比率制御 |