

分離工学

【問1】以下の文章を読み、設問1)～2)に答えよ。

ベンゼン+トルエン2成分溶液を蒸留缶に仕込み、単蒸留によりベンゼンを留出器中に濃縮分離したい。単蒸留の操作中、時間とともに蒸留缶中の液量は減少し、留出器中にベンゼン濃度が増加した液が蓄積される。ここで、蒸留操作中のある瞬間の蒸留缶中の残留液の量を L [mol]、その時の液組成（ベンゼンのモル分率）を x とする。その時点から微小時間経過した際に液が dL だけ蒸発したとき、液組成 x と平衡にある蒸気組成を y とすれば、蒸気相に移動したベンゼン量は $y dL$ で与えられる。一方、液相中での減少量は $d(Lx)$ で与えられ、次式が成立する。

$$y dL = d(Lx) = x dL + L dx \quad (1)$$

これを变形すると次式が得られる。

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx}{(y-x)} \quad (2)$$

なお、対象系は Raoult の法則に従うとすると、 y と x との間には相対揮発度 α を用いて次の式が成立する。

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{p_{\text{benzene}}^{\text{vap}}}{p_{\text{toluene}}^{\text{vap}}}, \quad p_i^{\text{vap}}: \text{成分 } i \text{ の飽和蒸気圧}$$

- 1) 式(2)と式(3)から、単蒸留における残留液の量 L と液組成 x との関係を表現する式 (Rayleigh 式) を積分形として導出せよ。
- 2) 初期ベンゼン組成 $x_{\text{init}} = 0.40$ の溶液 10 mol を原料として単蒸留を開始し、蒸留缶の蒸気組成 y が 0.50 となった時点で蒸留を停止した。このときの留出器内に蓄積された液の量 D [mol] とベンゼン組成 x_D 、ならびに蒸留缶中の残留液のベンゼン組成 x_t を求めよ。なお、相対揮発度は $\alpha = 2.3$ で一定とする。数値を解答する際の有効数字は2桁とせよ。

【問2】以下の文章を読み、設問1)～5)に答えよ。なお、数値の場合は有効数字を3桁とせよ。

CO₂を6.00 mol%含む25.0°Cの処理ガスを、 1.00×10^5 Paにて水と接触させて、CO₂を吸収させる。処理ガス中のCO₂分圧 P_{CO_2} [Pa]と水中に飽和溶解したCO₂のモル分率 $x_{\text{CO}_2}^*$ は、式(1)の関係にある。

$$P_{\text{CO}_2} = 0.166 \times 10^9 \cdot x_{\text{CO}_2}^* \quad (1)$$

ここで、水の密度 ρ_w は 1.00×10^3 kg·m⁻³、水の粘度 μ_w は1.00 mPa·s、水の分子量 $Mw_{\text{H}_2\text{O}}$ は18.0 g·mol⁻¹であり、水の揮発はないものとする。また、CO₂を含む処理ガスは理想気体としてふるまうものとし、処理ガスの平均分子量 Mw_{gas} は35.0 g·mol⁻¹、気体定数 R は8.31 m³·Pa·mol⁻¹·K⁻¹である。

1) CO₂の飽和溶解度 $C_{\text{CO}_2}^*$ [mol·m⁻³]を答えよ。

$$x_{\text{CO}_2}^* \doteq \frac{n_{\text{CO}_2}^*}{n_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2)$$

なお、 $x_{\text{CO}_2}^*$ は式(2)で表せるとする。ここで、 $n_{\text{CO}_2}^*$ [mol]は飽和溶解したCO₂の物質質量、 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ [mol]は水の物質質量である。

2) 式(3)で与えられる吸収速度 N_A [mol·s⁻¹]でCO₂を吸収できる装置がある。ガス境膜物質移動係数 k_G [mol·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹]および液境膜物質移動係数 k_L [mol·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹]はそれぞれ、 3.12×10^{-6} および 9.80×10^{-4} であるとき、吸収速度 N_A を答えよ。

$$N_A = \left(\frac{H \cdot k_G \cdot k_L}{H \cdot k_G + k_L} \right) \cdot (C_{\text{CO}_2}^* - C_{\text{CO}_2}) \quad (3)$$

ここで、 C_{CO_2} は0.00 mol m⁻³とし、 H [Pa·m³·mol⁻¹]は式(4)で計算できるとする。

$$H = \frac{0.166 \times 10^9}{\rho_{w,m}} \quad (4)$$

なお、 $\rho_{w,m}$ [mol m⁻³]は水のモル密度である。

3) 槽径 $D = 1.50$ mの完全邪魔板条件の円筒槽に、水を槽径と等しい深さまで入れ、翼径 $d = 0.500$ m、翼幅 $b = 0.100$ mの標準6枚羽根タービン翼で120 rpmで攪拌しながら、CO₂を吸収させる。動力数 $N_p = 6.00$ であるとき、通気していない状態の攪拌所要動力 P_0 [W]ならびに攪拌レイノルズ数 Re を、式(5)および式(6)を用いて答えよ。

$$P_0 = N_P \cdot \rho_w \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (5)$$

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho_w}{\mu_w} \quad (6)$$

なお、 n [s^{-1}] は回転数である。

- 4) 設問3) の条件で、処理ガスを通気量 $Q_G' = 15.0 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ で通気して CO_2 を吸収させる。式(7)より、単位体積当たりの通気動力 P_{aV} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]を答えよ。

$$P_{aV} = 9.80 \cdot \rho_w \cdot \left(\frac{Q_G}{S} \right) \quad (7)$$

ここで、 Q_G [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$] は通気量であり、 S [m^2] は攪拌槽の断面積である。

- 5) 設問1), 3) および4) の条件における CO_2 の吸収速度 N_A^S [$\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$] を、式(8)を用いて答えよ。なお、 V [m^3] は水の液量であり、 C_{CO_2} は $0.00 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ である。

$$N_A^S = 2.00 \times 10^{-4} \cdot P_{aV} \cdot \left(\frac{300}{P_{aV}} + 0.33 \right)^{0.5} \cdot V \cdot (C_{\text{CO}_2}^* - C_{\text{CO}_2}) \quad (8)$$