

分離工学

【問1】 ガス吸収による二酸化炭素（ CO_2 ）の除去に関する以下の説明文に対し、空欄に当てはまる適切な語句，文字式，もしくは数値を答えよ。

- 1) 工場排ガス中に含まれる CO_2 は地球温暖化の原因物質の一つであり，その排出抑制が求められている。排ガス中の CO_2 を除去する方法の一つにガス吸収法がある。ガス吸収法では，吸収塔と呼ばれる装置を用いて， CO_2 を含む排ガスと CO_2 を吸収する液（吸収液）を ア させることで， CO_2 を吸収させる。吸収塔の操作では，向流式吸収塔が一般的である。排ガスは吸収塔の イ から導入され，吸収液は ウ から導入される。代表的な吸収液としてはアミン水溶液があげられる。アミン水溶液は CO_2 と可逆的に反応するため，例えば，加熱などによって CO_2 を脱離させて エ させることができる。これにより，吸収液は繰り返し使用することが可能となり，経済的な運転が期待できる。
- 2) あるガス吸収塔において，大気圧下（1.00 atm），25.0°C で排ガス中の CO_2 を水に吸収させている。ここで，ガス側総括物質移動係数を K_G [$\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$]，ガス本体の CO_2 分圧を p_{CO_2} [atm]，水中の CO_2 濃度と平衡関係にある CO_2 分圧を $p_{\text{CO}_2}^*$ [atm] とする。このとき， CO_2 の水への吸収速度 N_A [$\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$] は， K_G ， p_{CO_2} ，および $p_{\text{CO}_2}^*$ の関数として計算することができる。なお K_G は， CO_2 のガス側物質移動係数 k_G [$\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$]， CO_2 の液側物質移動係数 k_L [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$]，および CO_2 の水に対するヘンリー定数 H [$\text{atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$] より，次式で求めることができる。

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{\text{オ}} + \frac{H}{\text{カ}} \quad (1)$$

下表の条件でガス吸収を行う場合， $N_A = \text{キ}$ $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ となる。

表 条件

CO_2 のガス側物質移動係数	$k_G = 5.00 \times 10^{-2} \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$
CO_2 の液側物質移動係数	$k_L = 0.100 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$
CO_2 の水に対するヘンリー定数	$H = 100 \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$
ガス中の CO_2 分圧	$p_{\text{CO}_2} = 0.100 \text{ atm}$
水中の CO_2 濃度	$C_{\text{CO}_2} = 5.00 \times 10^{-4} \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-3}$

【問2】膜分離法による二酸化炭素 (CO_2) の分離に関する以下の設問に答えよ。

1) 説明文中の空欄に当てはまる適切な語句または数値を答えよ。

近年、 CO_2 分離技術として膜分離法が注目されている。膜分離法は、高分子膜、無機膜、液膜などを用いて CO_2 を選択的に透過させることで、排ガスなどから CO_2 を分離除去する技術である。膜分離による CO_2 の透過は、膜の両側の CO_2 の 差を駆動力として生じる。 CO_2 を選択的に分離する膜を選定するために、分離係数が用いられる。分離係数は、あるガス成分 A とガス成分 B の透過速度の で定義され、燃焼排ガス中の CO_2 分離の場合、 CO_2 と窒素 (N_2) の分離係数が重要となる。

多孔質膜の場合、細孔径が分子の より十分小さく、分子が主に細孔壁と衝突するような場合を 拡散といい、細孔径が十分大きい場合は 流れという。 拡散の場合、理論的に分離係数は分子量の に反比例する。ここで、 拡散が成り立つ多孔質膜を用いた場合、 CO_2 の分子量は $44.0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 N_2 の分子量は $28.0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ であるので、分離係数 (CO_2/N_2) は となる。

非多孔質のプラスチック膜の場合、気体の膜の透過し易さは、プラスチック膜への気体の 性と 性に依存する。これを 機構という。柔軟なゴム状プラスチックの膜では、気体の が支配的なのに対し、ガラス状プラスチックの膜では気体の 性の寄与が大きい。ポリジメチルシロキサン非多孔質膜を用いた場合、 CO_2 および N_2 の気体透過係数はそれぞれ次の通りとなった。

CO_2 の気体透過係数	$3.75 \times 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
N_2 の気体透過係数	$6.06 \times 10^{-14} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$

このとき、この膜の分離係数 (CO_2/N_2) は となる。

2) ある膜モジュールを用いて CO_2 と N_2 からなる混合ガスから、炭酸飲料の原料として CO_2 を分離する。この膜の CO_2 の平均透過流束 J_{CO_2} は $2.00 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ であり、 N_2 は全く透過しないことがわかっている。混合ガスは理想気体としてふるまうものとし、その分圧の割合は $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 2$ である。膜モジュールに供給する混合ガスの全圧は 3.00 atm であり、操作温度は 25.0°C である。目標とする CO_2 の生産量を $50.0 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$ とするとき、必要な膜モジュールの有効膜面積 $A_{\text{membrane}} [\text{m}^2]$ を求めよ。なお、気体定数 $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ とする。

【問3】 蒸留に関する以下の文中の空欄に当てはまる適切な語句、文字式、もしくは数値を答えよ。

蒸留は、主に の異なる複数の成分を含む液体の混合物を分離する操作である。多段蒸留の場合、塔頂から出てきた を凝縮して得られた の一部を、再び塔頂に戻す操作のことを還流という。塔内部では上昇する と下降する を させることで成分分離を促進するが、同時に必要な を増加させるため、省エネルギー化が重要となる。

ここで、蒸留塔の設計や解析に用いられる McCabe-Thiele 法について考える。この方法は、気液の 線と塔内の物質収支から導かれる操作線をプロットし、理論段数を図解的に求めるものである。この際、供給時における原料の液状部分の分率を示す と操作線の交点から、濃縮部と回収部の操作線が引かれる。原料が飽和蒸気の場合、 の値は となる。

具体的に、ベンゼンとトルエンの混合液を連続的に精留する多段蒸留塔を対象として考える。供給液（飽和液体）中のベンゼンのモル分率は $x_F = 0.500$ であるとする。塔頂製品中のベンゼンモル分率を $x_D = 0.950$ ，塔底製品中のベンゼンモル分率を $x_W = 0.0500$ としたい。塔内の相対揮発度は一定で $\alpha = 2.50$ と仮定する。還流比は最小還流比の 1.5 倍で操作するものとする。この系では理想溶液と見なすことができ、Raoult の法則が成り立つとする。蒸留塔の各段で気液平衡が成り立つ場合、気相のベンゼン組成 y と液相中のベンゼン組成 x は次式で表現することができる。

$$y = \frac{\alpha x}{\text{ケ}} \quad (2)$$

与えられた条件から最小還流比 $R_{\min}$ を求めると となるため、この操作の還流比は となる。これより、濃縮部の操作線は次式となる。

$$y = \text{シ} \quad (3)$$

原料の温度が沸点の液体である場合、 と操作線の交点は次の点になる。

$$\text{交点}(x, y) = (\text{ス}, \text{セ})$$