

『標準 化学工学 I 収支・流体・伝熱・平衡分離』

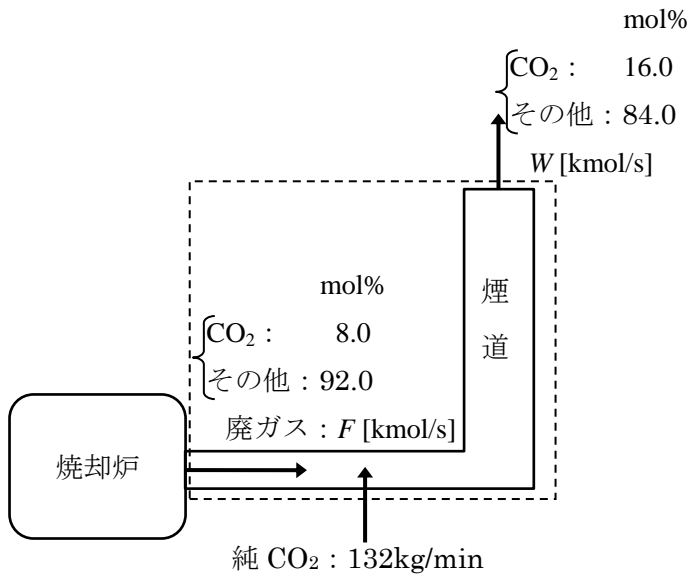
演習問題

(2019年8月9日作成)

第 2 章

【演習 2.1】

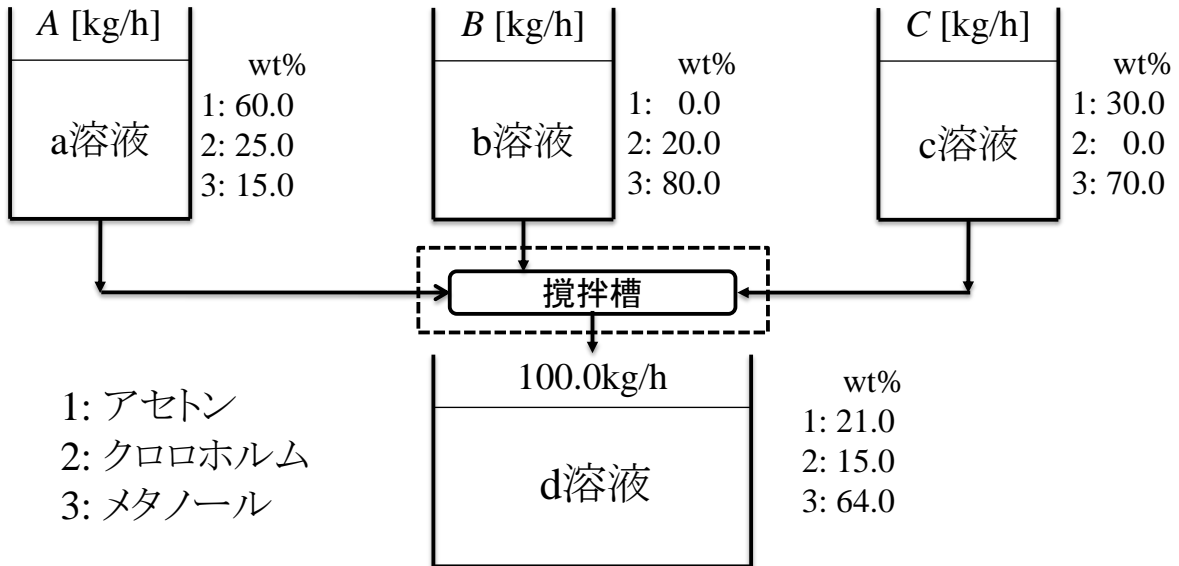
ゴミ処理工場で廃ガスの流量を知るために焼却炉と煙突底部との間で、純 CO_2 ガスを添加した。 CO_2 添加前の廃ガスには 8.0mol% の CO_2 が含まれており、132kg/min の割合で純 CO_2 ガスを添加した後の煙突出口ガスの CO_2 濃度は 16.0mol% である。この結果を利用して、焼却炉からの廃ガス流量を標準状態 ($P=101325\text{Pa}$, $T=273.15\text{K}$) の単位時間当たりの体積 [m^3/s] として求めよ。



【演習 2.2】

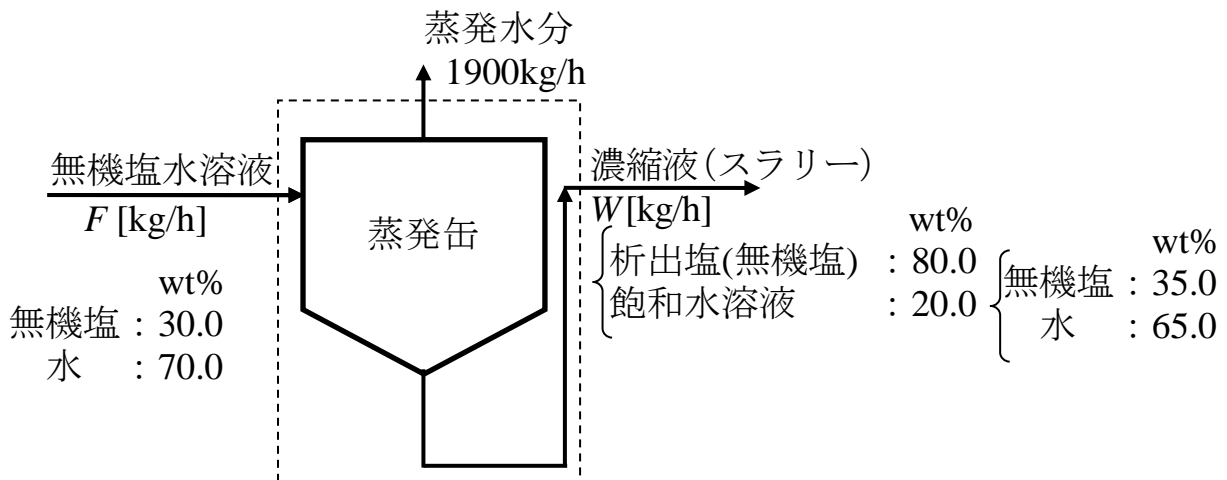
下表のような組成を持つ 3 種の溶液 (a, b, c) を連続的に攪拌槽に供給し、混合により溶液 (d) を得ている。溶液 (d) 100.0kg/h あたりの供給溶液 (a, b, c) の量 A, B, C [kg/h] を求めよ。

溶液	成分組成 wt%		
	アセトン	クロロホルム	メタノール
a	60.0	25.0	15.0
b	0.0	20.0	80.0
c	30.0	0.0	70.0
d	21.0	15.0	64.0



【演習 2.3】

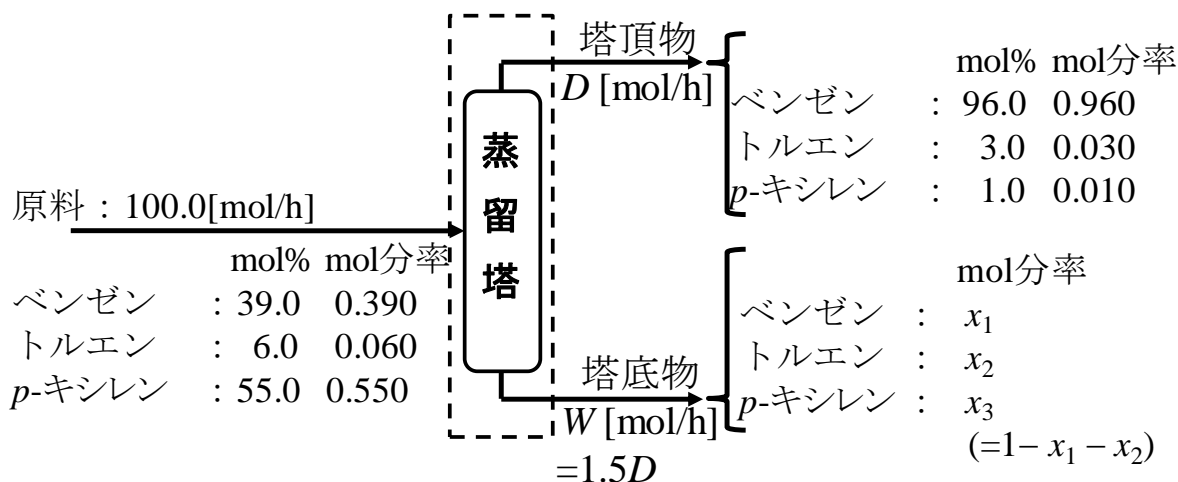
30.0wt%の無機塩を含む水溶液を単一蒸発缶によって水分を毎時 1900kg 除去している。缶出物は 80.0wt%の析出塩と 20.0wt%の飽和水溶液（塩濃度 35.0wt%）からなるスラリーである。この蒸発プロセスについて、原料の無機塩水溶液量[kg/h]および析出塩量[kg/h]を求めよ。



【演習 2.4】

ベンゼン 39.0mol%, トルエン 6.0mol%, *p*-キシレン 55.0mol%からなる溶液を連続蒸留塔に供給し、ベンゼン 96.0mol%, トルエン 3.0mol%を含む塔頂物を得ている。塔底物量は塔頂物量の 1.5 倍（物質基準）であるとき、原料 100.0mol/h について、次の間に答えよ。

- (1) 塔頂物と塔底物の量[mol/h]はいくらか。
- (2) 塔底物の組成（mol 分率）を求めよ。



【演習 2.5】

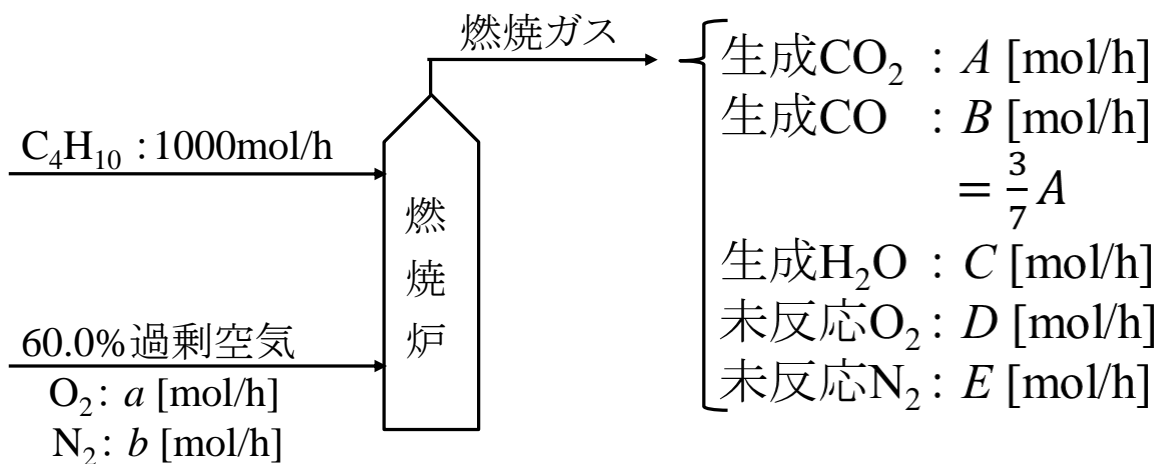
SO₂ ガスを 32.0kg/h で酸化反応塔に供給し、110%過剰空気によって、SO₃ を生成している。このプロセスについて、次の間に答えよ。

- (1) 供給空気量を 1 時間当たりの体積[m³/h] ($P=101325\text{Pa}$, $T=273.15\text{K}$ の標準状態) として求めよ。
- (2) 酸化反応出口の混ガスの組成 (mol% で小数点以下 1 桁まで) を求めよ。

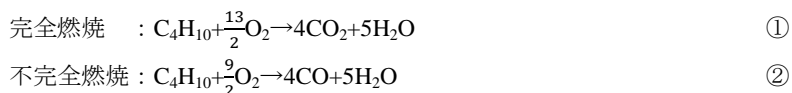
【演習 2.6】

ある化学プロセスで n-ブタンを 1000mol/h の割合で供給し、60.0%過剰空気 で燃焼させたにもかかわらず燃焼ガス中には CO も含まれており、その量は物質基準で CO₂ の 3/7 であることが分かった。このプロセスについて次の間に答えよ。

- (1) 理論酸素量[mol/h]はいくらか。
- (2) 燃焼ガスの組成 (mol% で小数点以下 1 桁まで) を求めよ。



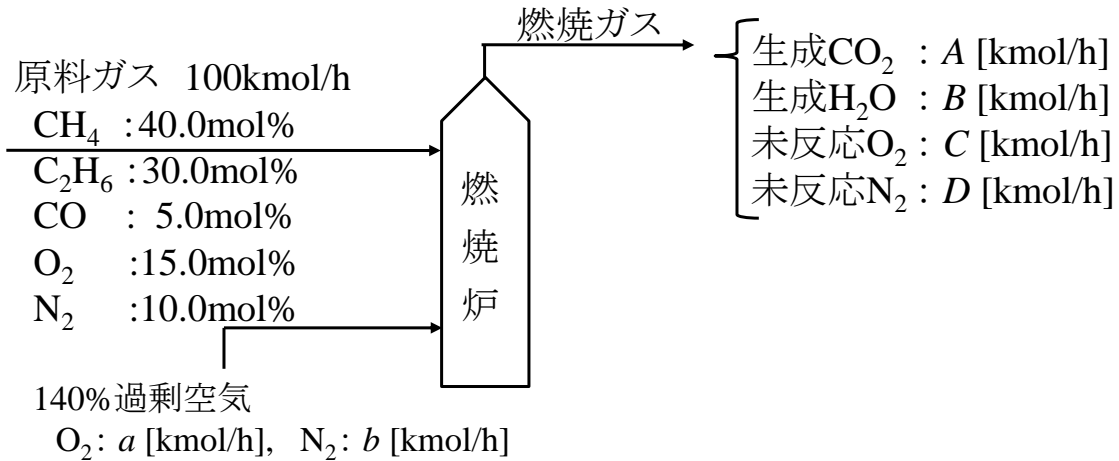
反応式



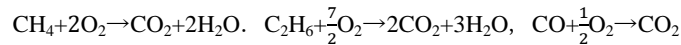
【演習 2.7】

メタン 40.0mol%, エタン 30.0mol%, CO5.0mol%, O₂15.0mol%, N₂10.0mol%からなる混合ガスを 100kmol/h で供給し, 140%過剰空気で燃焼させる. このプロセスについて次の値を求めよ.

- (1) 理論酸素量[kmol/h].
- (2) 燃焼ガスの組成 (mol%で小数点以下 1 桁まで).



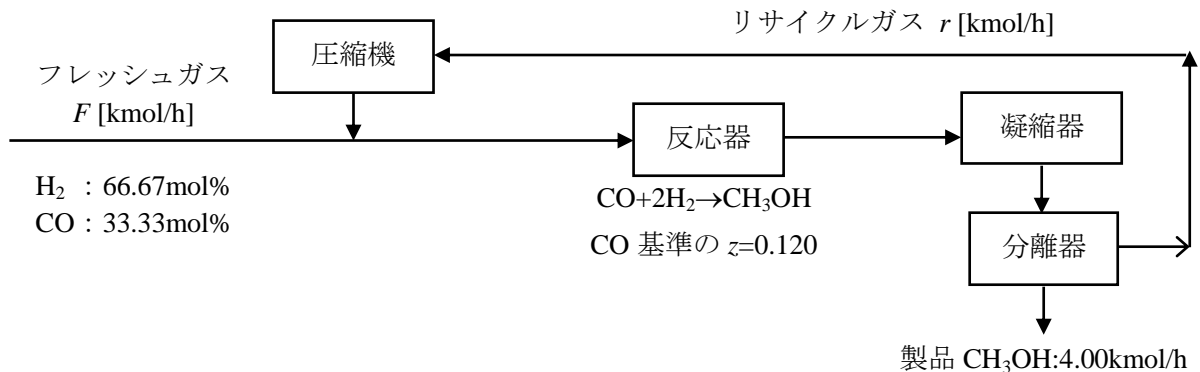
反応式



【演習 2.8】

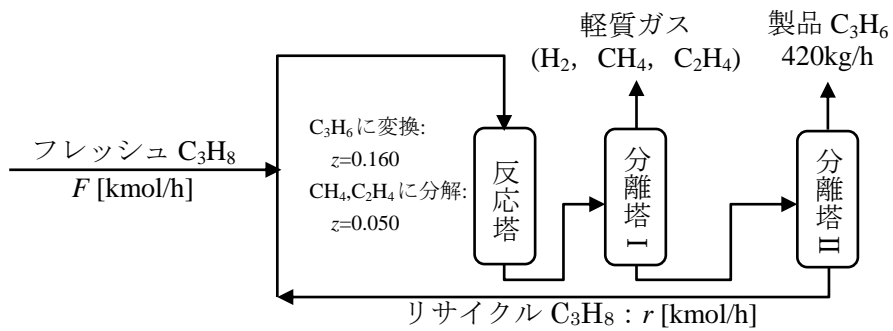
水素と一酸化炭素との反応によってメタノールを製造する際, 反応器に入る一酸化炭素の反応完結度 z はわずか 0.120 であった. そこで, 未反応ガスをすべてリサイクルさせるプロセスが用いられる. プロセスへの供給ガス (フレッシュガス) 中の水素と一酸化炭素のモル比は化学量論的比率であり, 製品メタノール量は 4.00kmol/h であるとして, 次の値を求めよ.

- (1) フレッシュガスおよびリサイクルガスの体積 ($P=101325\text{Pa}$, $T=273.15\text{K}$ の標準状態).
- (2) 反応器出口の混合ガスの組成 (mol%で小数点以下 1 桁まで).



【演習 2.9】

プロパンの脱水素反応によってプロピレンを製造するプロセスにおいて, 反応塔に供給されるプロパンのうち, 物質基準で 5.0%がメタンとエチレンに分解してしまい, 16.0%が脱水素してプロピレンに変換されるにすぎないことから, 次のような未反応プロパンをすべてリサイクルするプロセスが用いられている. 製品プロピレン 420kg/h について, 次の問に答えよ.



(1) 供給プロパン (フレッシュプロパン) の1時間当たりの質量[kg/h]はいくらか.

(2) フレッシュプロパンに対するリサイクルプロパンの割合を求めよ.

反応式



第 4 章

【演習 4.1】

厚さ 15.0 cm の耐火レンガ($k=0.12 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$), 厚さ 5 cm の断熱レンガ($k=0.03 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)からなる多重平板状固体層に厚さ 20.0 mm の保温材($k=0.03 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)をまきつけたところ保温材の表面温度が 280 K になった。壁面積 3.00 m²あたり単位時間に移動する熱を求めよ。また、耐火材と断熱材, 断熱材と保温材の各接触面積の温度を求めよ。

【演習 4.2】

縦 30.0 cm, 横 100 cm, 厚さ 15.0 cm の耐火レンガ($k=1.50 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)に厚さ 40.0 cm の断熱レンガ($k=0.100 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)および厚さ 4.20 cm の保温材($k=0.0600 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)を巻きつけた平面壁がある。耐火レンガおよび保温材の表面温度がそれぞれ 700 K および 300 K である時, 単位時間に移動する熱を求めよ。また, 耐火レンガ, 断熱レンガおよび保温材の各接触面の温度を求めよ。

【演習 4.3】

内径 50.0 mm, 厚さ 4.00 mm の鋼管($k=40.0 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)を厚さ 2.00 cm の断熱材($k=0.0150 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)で保温している。鋼管の内壁温度が 450 K, 断熱材の表面温度が 320 K であるとき, 管長 1.00 m あたり, 1 時間に逃げる熱を求めよ。

【演習 4.4】

外径 56.0 mm(肉厚 3.00 mm)の輸送管に断熱材を 5.00 mm の厚さで巻いて保温している。管内面温度が 370 K, 断熱材の外表面温度が 300 K のとき, 管長 1.00 m あたりの熱量を求めよ。ただし, 輸送管および断熱材の熱伝導度 k はそれぞれ 35.0 および 4.20 J/(s · m · K)とする。

【演習 4.5】

二重管式熱交換器の内管(外径 60.0 mm, 厚さ 5.00 mm, $k=50.0 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$)に高温水($C=4.50 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)を毎時 800 kg の割合で流し, 420 K から 345 K まで冷却する。冷却には, 入口温度が 300 K の冷媒($C=3.80 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)を用い, 向流に流して 330 K で出る。高温水および冷媒の境界膜伝熱係数がそれぞれ 550 および 930 J/(m² · s · K)である時, 冷媒の質量流量および熱交換器の所要長さを求めよ。

【演習 4.6】

温度の異なる鋼板 a と b(熱放射係数 $\xi_1=0.8$, $\xi_2=0.9$)が, わずかな距離を置いて平行に置かれている。鋼板 a, b の表面温度がそれぞれ 1273 K および 873 K である場合, 1 m²あたりの放射熱流量を求めよ。

【演習 4.7】

外径 20 cm の鋼管に厚さ 100 mm の保温材を巻いた輸送管内に 560 K のガスを送っている。保温材の表面温度は 380 K, 外気の温度は 320 K のとき, 管長 1.00 m あたりの熱損失を求めよ。ただし, 保温材表面側の境界膜伝熱係数は 7.5 J/(m² · s · K), 保温材表面の熱放射係数は $\xi=0.75$ と

する。

第 5 章

【演習 5.1】

全圧 101.3kPa においてメタノール(1)+エタノール(2)系が気液平衡にあるとき、次の値を求めよ。ただし、本系は理想溶液とし、純メタノールと純エタノールの飽和蒸気圧は次のアントアン式で計算すること。

$$\text{メタノール} : \log P_1^S [\text{kPa}] = 7.20587 - \frac{1582.27}{T[\text{K}] - 33.450}$$

$$\text{エタノール} : \log P_2^S [\text{kPa}] = 6.80607 - \frac{1332.04}{T[\text{K}] - 73.950}$$

- (1) 液相組成 x_1 が 0.500mol 分率における気相組成 y_1 と平衡温度 (沸点) $T[\text{K}]$.
- (2) 340.00[K]における気相と液相の mol 分率 x_1 と y_1 .
- (3) 気相組成 y_1 が 0.200mol 分率における液相組成 x_1 平衡温度 (露点) $T[\text{K}]$.

【演習 5.2】

理想溶液系である n -ヘプタン(1)+ n -オクタン(2)系の全圧 101.3kPa における x_1 - y_1 曲線を平均相対揮発度 α_{av} から、 $x_1=0.1\sim 0.9$ mol 分率の範囲で 0.1mol 分率間隔で求めよ。ただし、相対揮発度には平均相対揮発度 α_{av} を用いることとし、 α_{av} の決定に必要な純トルエンと純 p -キシレンの飽和蒸気圧は次のアントアン式で計算すること。

$$n\text{-ヘプタン} : \log P_1^S [\text{kPa}] = 6.12517 - \frac{1323.62}{T[\text{K}] - 50.232}$$

$$n\text{-オクタン} : \log P_2^S [\text{kPa}] = 6.05633 - \frac{1358.80}{T[\text{K}] - 63.295}$$

【演習 5.3】

最低共沸混合物であるエタノール(1)+水(2)系が全圧 101.3kPa において気液平衡にあるとき、次の値を活量係数式にウイルソン式を用いて求めよ。ただし、純エタノールと純水の飽和蒸気圧は次のアントアン式で計算し、ウイルソン式の 2 成分パラメータは、 $A_{12}=0.1663$, $A_{21}=0.8612$ を用いよ。

$$\text{エタノール} : \log P_1^S [\text{kPa}] = 6.80607 - \frac{1332.04}{T[\text{K}] - 73.950}$$

$$\text{水} : \log P_2^S [\text{kPa}] = 7.19621 - \frac{1730.63}{T[\text{K}] - 39.724}$$

- (1) 液相組成 x_1 が 0.400mol 分率における気相組成 y_1 と平衡温度 (沸点) $T[\text{K}]$.
- (2) 液相組成 x_1 が 0.950mol 分率における気相組成 y_1 と平衡温度 (沸点) $T[\text{K}]$.
- (3) この 2 成分パラメータを用いて共沸点の組成を求めると、 $x_1=0.888$ mol 分率であることを x_1 - y_1 関係を用いて検証せよ。

【演習 5.4】

n -ヘプタン 35.0mol%と n -オクタン 65.0mol%からなる 2 成分溶液を 100.0kmol で段塔に供給

し、96.0mol%の *n*-ヘプタンを含む留出液と、3.0mol%の *n*-ヘプタンを含む缶出液とに分離する。
この連続蒸留について、次の問に答えよ。

- (1) 留出液量と缶出液量を求めよ。
- (2) 還流比を 3.5 として、原料の供給状態を $q=1$ とする場合と、 $q=0.7$ とする場合について、濃縮部と回収部で下降する溶液量と上昇する混合蒸気量を求めよ。
- (3) 濃縮部および回収部の操作線の式を求めよ。

【演習 5.5】

n-ヘプタン 35.0mol%と *n*-オクタン 65.0mol%からなる 2 成分溶液を 100.0kmol で段塔に供給し、問題 5.4 の分離条件で連続蒸留する。ただし溶液は理想溶液とし、その平均相対揮発度には問題 5.2 の値を用い、原料は沸とう状態の液として供給し、蒸留は全圧 101.3kPa 一定で行われるものとして、次の問に答えよ。

- (1) 分離に必要な最小理論段数および最小還流比を求めよ。
- (2) 還流比を最小還流比の 1.9 倍としたとき（小数点以下 2 桁まで）、分離に必要な理論段数をマッケーブ-シーレ法を用いて求めよ。

【演習 5.6】

前問の演習 5.5 の(2)を段数と還流比の相関式を用いて計算せよ。

【演習 5.7】

演習 5.5(2)と同じ分離条件で連続蒸留するとき、塔頂より 1 番目の段上の溶液と平衡状態にある塔頂の混合蒸気の温度（露点）と、塔底の缶出液の温度（沸点）を求めよ。

【演習 5.8】

n-ヘプタン 35.0mol%と *n*-オクタン 65.0mol%からなる 2 成分溶液を演習 5.5(2)と同じ分離条件で連続蒸留するとき、段塔の内径 D [m]を求めよ。ただし蒸留は全圧 101.3kPa 一定で行われ、塔内の平均温度における溶液の密度は 614.5kg/m^3 、混合蒸気の密度は 3.4kg/m^3 、 C_s は 0.0700m/s とすること。また塔内の平均温度は、前問の演習 5.7 で求めた塔頂の混合蒸気の温度と塔底の缶出液の温度の平均値とせよ。

【演習 5.9】

図 5.A に示す連続固溶体系の相図について、温度 T_1 の条件で P 点の組成にある液体混合物を温度 T_2 まで冷却した場合に溶液組成および固体組成（純度）はどのように変化するか、具体的に説明せよ。

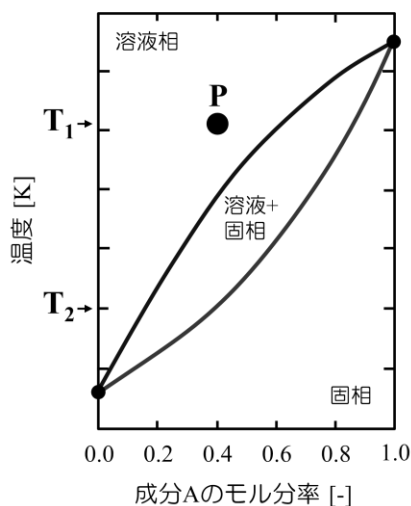


図 5.A 2 成分系の固-液平衡図（連続固溶体系）

【演習 5.10】

図 5.B に示す単純共晶系の相図について、温度 T_1 の条件で P 点の組成にある液体混合物を温度 T_2 まで冷却した場合に溶液組成および固体組成（純度）はどのように変化するか、具体的に説明せよ。

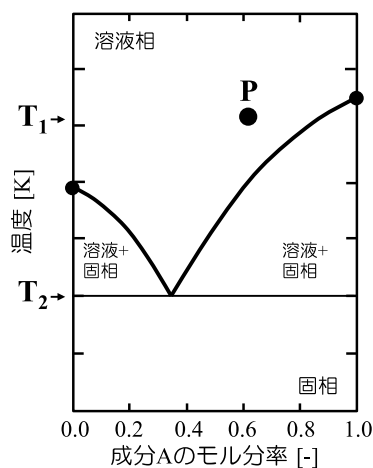


図 5.B 2 成分系の固-液平衡図（単純共晶系）

【演習 5.11】

50 wt% の Pt と Au を含む溶液 150 g を 1500 °C (O 点) に保ち、平衡状態に達した場合の液相と固相の重量、および各相中の Pt と Au の重量を求めよ。ただし、図 5.C に示した点 A および点 B における Pt の重量百分率は、それぞれ 20 wt%、60 wt% である。

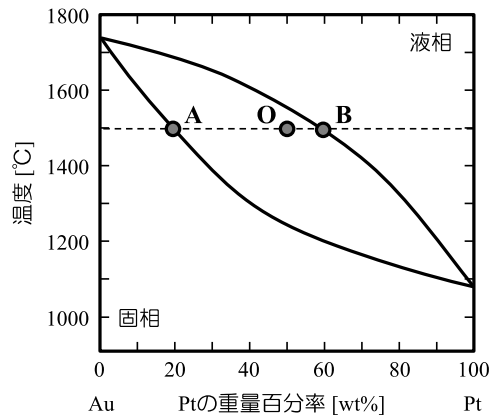


図 5.C 白金+金 2 成分系の固-液平衡図 (連続固溶体系)

【演習 5.12】

図 5.D に示すビスマス-カドミウム 2 成分系 (単純共晶系) を考える。ビスマスの組成 30 wt% の溶液 100 g を 200 °C に保ち (P 点), 平衡状態としたところ, 純粋なカドミウムの結晶 37.5 g が析出した。このとき, 溶液内のカドミウムの組成を求めよ。

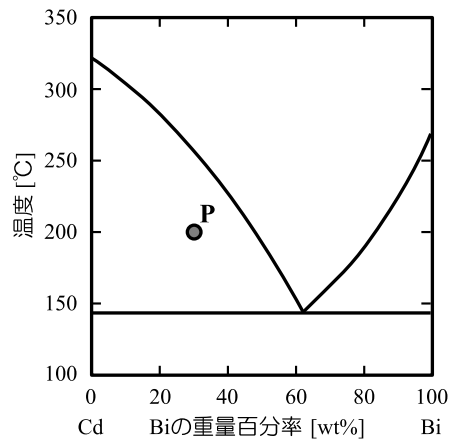


図 5.D ビスマス+カドミウム 2 成分系の固-液平衡図 (単純共晶系)

【演習 5.13】

液体混合物の分離方法として, 晶析が蒸留と比較して得意な分野 (混合物) について説明せよ。なお, 分離の原理についても簡潔に述べること。