

「初心者のための化学工学入門」

主催 化学工学会関東支部、化学工学会 S C E ・ N e t

企業で生産あるいは技術開発などに従事されて、業務上化学工学の知識や考え方が必要であるにも拘わらず、高専、大学などで化学工学を学んで来なかった、あるいは十分に学べなかった初心技術者を対象にしております。化学工学の基礎的な考え方や実用的な計算を身につけていただくことを目的にして、開講致します。

講師は、企業でトップレベルの技術開発を担ってきた化学工学会 S C E ・ N e t に所属するベテランの化学工学技術者が当たり、自らの実務経験を反映させて分かり易い講義に努めます。「化学工学の基礎」、「流体力学」、「熱工学」、「反応工学」、「平衡分離」、「分離操作」の6テーマに分け、それぞれのテーマについて内容を絞り、3時間で考え方と計算例を簡潔に分かり易く講義します。本講座で化学工学の初歩を学ばれた皆様がさらに化学工学を深く学ぶ機会となる「基礎化学工学講習会」に繋がります。

プログラム

第1日目

- ・ 午前 化学工学の基礎入門 講師；長安敏夫氏
- ・ 午後 流体力学入門 講師；山崎 徹氏

第2日目

- ・ 午前 熱工学入門 講師；平木一郎氏
- ・ 午後 反応工学入門 講師；河合治之氏

第3日

- ・ 午前 分離工学Ⅰ（蒸留操作）入門 講師；竹内亮氏
- ・ 午後 分離工学Ⅱ（分離操作）入門 講師；中尾 眞氏

初心者のための化学工学入門 1.
化学工学の基礎入門

講師：長安 敏夫

<講義概要>

化学工学とはどのような学問であるか、何のために学ぶかを先ず説明します。

次に後の各講義の基礎となる単位の取り扱い、基本的な物性を理解していただきます。基本的な物性、特に気体の温度、圧力と容積の関係、液体の温度と蒸気圧の関係などについても演習を交えて学びます。

続いて化学工学の全ての基本であり、プロセスを理解するために必須である物質収支、熱収支について学びます。演習を通じて、収支の解明がプロセスの全体像把握や特定テーマの解明に役立つことを実感していただきます。

説明とともに例題を一緒に解き、理解を深めます。

<講義の主な内容>

1. 化学工学とは

- (1-1) 化学工学の成り立ち
- (1-2) 化学工学の目的
- (1-3) 化学プロセスと単位操作

2. 単位と次元、代表的な物性

- (2-1) S I 基本単位と組立単位、次元
- (2-2) 単位の換算
- (2-3) 代表的な物性、液体の蒸気圧、気体の状態方程式

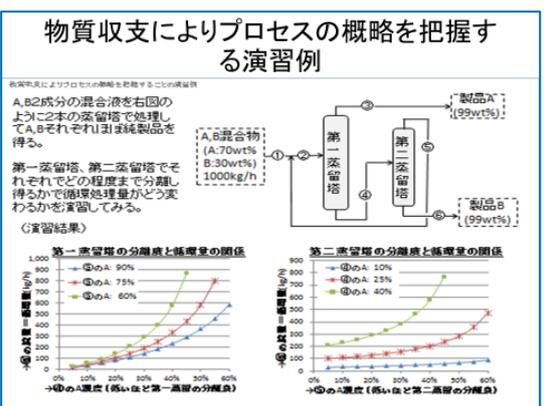
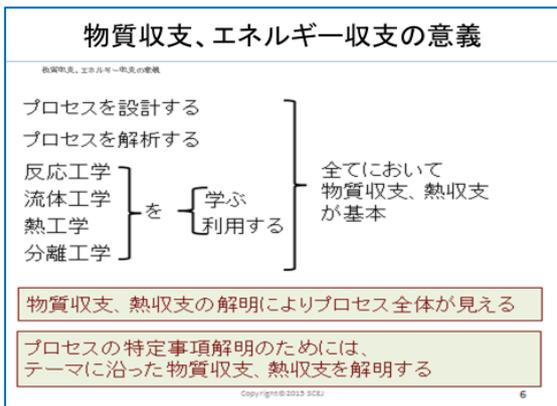
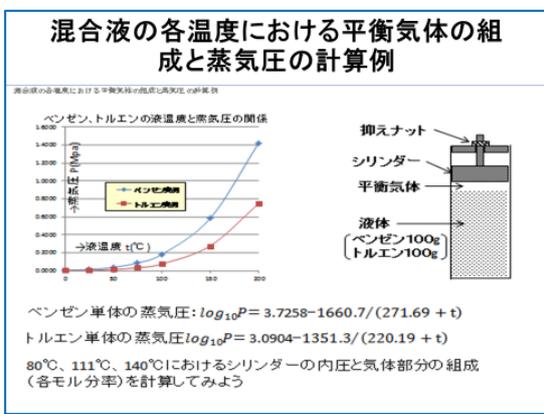
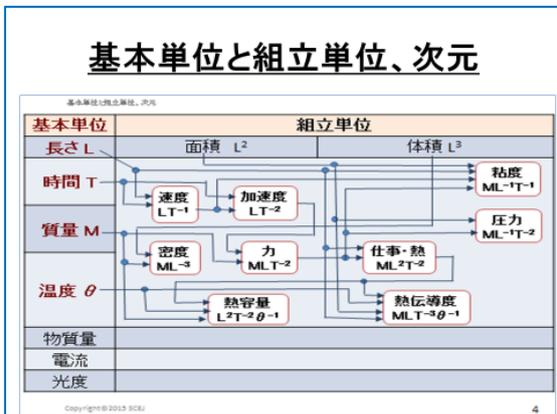
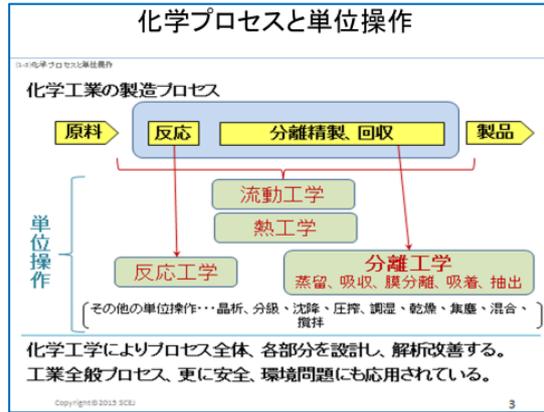
3. 物質収支とエネルギー収支

- (3-1) 物質収支と熱収支の基本概念
- (3-2) 物質収支、熱収支の意義
- (3-3) 演習

化学工学の成り立ち

19世紀後半	ヨーロッパを中心として世界の化学工業が発展 その発展のための学問が必要となった
イギリス	1880年 化学工業会 (The Society of Chemical Industry) を設立 1901年 Handbook of Chemical Engineering を刊行 マンチェスター工業技術学校のデービス (G.E. Davis)
アメリカ	1908年 アメリカ化学工学会 (AIChE) が設立 1922年 AIChE で単位操作の考えが確立 (リットルの提唱)
日本	1930年代 東京工大、京大、東北大に化学機械学科設置 (MITに留学した内田俊一、亀井三郎、八田四郎次による) 1936年 化学機械協会設立、 1956年 化学工学協会に、1989年 化学工学会に改名

Copyright © 2015 SCEJ 5



初心者のための化学工学入門 2. 流体工学入門

講師：山崎 徹

<講義概要>

化学プラントの多くは気体、液体などの流体を扱うので、その流れを扱う流体工学は流動操作ともいい、化学工学の基礎的な単位操作です。

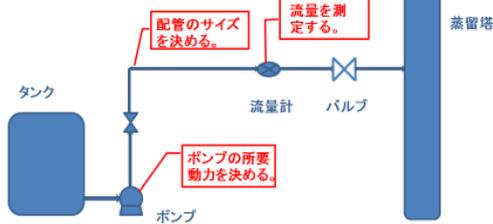
流体の流れとは何かを知り、化学プラントの配管や装置の中の流れを認識し、配管径やポンプの所要動力などの計算法を学びます。講義では、まず流体の流れを決める物性である粘度や円管内を流れる流体の流れの状態を規定する無次元数、レイノルズ数が何であるかに触れ、次いで流速分布や圧力損失、流れを発生させるために必要な動力などを計算する方法を解説します。講義の1ステップごとに簡単な演習を行い、理解を深めます。

<講義の主な内容>

1. 流体工学を学ぶと何ができるか？
2. 流れの基礎式(質量保存則と運動量保存則)とその応用
 - 2.1 流れの基礎式
 - 2.2 粘度とレオロジー
 - 2.3 流れの状態
 - 2.4 レイノルズ数
 - 2.5 流れの基礎式-運動量の保存則
 - 2.6 層流の流速分布
 - 2.7 流量と圧力損失の関係
 - 2.8 乱流の流速分布
3. 流れのエネルギー収支式とその応用
 - 3.1 流れ系のエネルギー収支(完全流体の場合) ベルヌーイの式
 - 3.2 管摩擦係数と圧損計算 ファニングの式 →例題
 - 3.3 ポンプの所要動力の計算 流れ系の機械的エネルギー収支の式
4. 流速、流量の測定
 - 4.1 計測技術(圧力) U字型マンオメーター
 - 4.2 計測技術(流速) ピトー管
 - 4.3 計測技術(流量) オリフィス

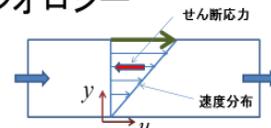
1. 流体力学を学ぶと何ができるか？

化学プラントにおける液体、気体の輸送



2.2 粘度とレオロジー

ニュートンの粘性法則



(流体の諸部分の間に滑り易さが欠けていることによって生じる抵抗) ∝ (流体の諸部分が互いに引き離されていく速度)

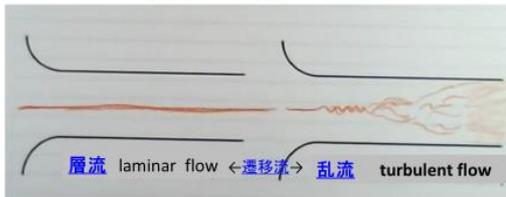
$$\tau = -\mu \frac{du}{dy}$$

(粘性抵抗) τ = (粘度) μ (剪断速度) $\dot{\gamma}$

せん断応力 τ [Pa] = [Pa·s] [m·s⁻¹] / [m]

2.3

流れの状態(2)

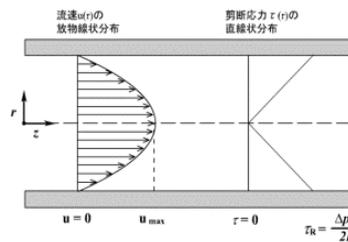


- 層流: 流れが遅い, 管が細い, 密度が小さい, 粘度が大きい. $\frac{\rho u D}{\mu} < 2300$
- 乱流: 流れが速い, 管が太い, 密度が大きい, 粘度が小さい. $\frac{\rho u D}{\mu} > 4000$

2.6

層流の流速分布(4)

円管内における層流の流速分布(ニュートン流体)図



3.2

管摩擦係数と圧損計算-ファニングの式(2)

$$\tau_w = f \cdot \frac{1}{2} \rho u_{av}^2$$

$$\tau_w = \frac{1}{4} \frac{\Delta P}{L} \cdot D$$

$$\Delta P = 4f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho u_{av}^2$$

ファニングの式

ΔP : 圧力損失 [N·m⁻²] → [N·m⁻²] → [J·m⁻³]
流れにより単位体積当たりこれだけのエネルギーを失う。

- 層流: f は Re のみの関数. ハーゲンポアズイユの式から $\Delta P = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} = \frac{32\mu L u_{av}}{D^2} = 4 \frac{16}{\rho D u_{av} / \mu} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho u_{av}^2$
- 乱流: Re と粗度の関数. 平滑管 プラジウスの式ほか $f = 0.0791 Re^{-1/4}$
- 粗面管 Re , 粗度と f の関係: グラフ

3.3

ポンプの所要動力の計算 流れ系の機械的エネルギー収支式(2)

バランス式

$$\frac{1}{2} \rho u_A^2 + g z_A + \frac{P_A}{\rho} + W = \frac{1}{2} \rho u_B^2 + g z_B + \frac{P_B}{\rho} + F$$

(速度頭)_A + (位置頭)_A + (圧力頭)_A + W = (速度頭)_B + (位置頭)_B + (圧力頭)_B + F

動力 (仕事)

$$W = \Delta(\text{速度頭})_{B-A} + \Delta(\text{位置頭})_{B-A} + \Delta(\text{圧力頭})_{B-A} + F$$

損失頭 (摩擦により失われるエネルギー)

$$F = \Delta p / \rho = 4f(u^2/2)(L/D) \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

所要動力 (仕事率)

$$W_p = \rho Q W / \eta \quad [kg \cdot m^3 \cdot [m^3 \cdot s^{-1}] \cdot [J \cdot kg^{-1}] = [J \cdot s^{-1}]$$

初心者のための化学工学入門

2. 熱工学入門

講師：平木 一郎

<講義概要>

化学プロセスにおいて、加熱・冷却などの伝熱操作は非常に多く使われており、重要な操作の一つです。

熱の伝わり方、すなわち伝熱の3様式（伝導、対流、放射）を理解するとともに、伝熱の基礎的計算法を学びます。また伝熱操作に広く使われている熱交換器（二重管式熱交換器、多管式熱交換器）の概要とその計算法についても学びます。

最後に演習問題に取り組み、理解を深めます。

<講義の主な内容>

1. 伝熱の基礎
 - ・ 伝熱操作を行う際の基礎的事項（伝熱の3様式、単位、熱流量と熱流束）
2. 伝導伝熱
 - ・ 平板壁内の伝導伝熱（フーリエの法則）
 - ・ 多層壁内の //
 - ・ 円管壁内の //
3. 対流伝熱
 - ・ 固体壁とそれに沿って流れる流体との間の伝熱（ニュートンの冷却の法則）
 - ・ 自然対流と強制対流
 - ・ 円管内の強制対流伝熱
 - ・ 相変化を伴う伝熱（沸騰伝熱、凝縮伝熱）
4. 放射伝熱
 - ・ 黒体および灰色体の平板間の放射伝熱
5. 熱交換器
 - ・ 総括伝熱係数（平板、円管）
 - ・ 二重管式熱交換器
 - ・ 多管式熱交換器
6. 演習問題

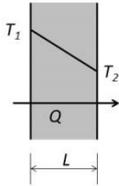
伝導伝熱

- 主として固体内部を高温側から低温側へ熱が移動する現象である。

平板壁内の伝導伝熱

フーリエの法則

$$Q = kA(T_1 - T_2) / L$$

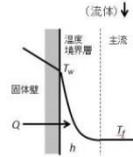


Q : 熱流量[W]
 A : 伝熱面積[m²]
 T : 温度[K]
 L : 壁の厚さ[m]
 k : 熱伝導率または熱伝導率[W・K⁻¹・m⁻¹]

Copyright © 2015 SCEI

対流伝熱

- 固体壁とそれに沿って流れる流体との間の伝熱



- 温度境界層
壁付近の流れの穏やかな薄い層で、温度勾配が大きい。

- 主流
流体の混合効果により、比較的溫度が均一な中央部分。

$$Q = Ah(T_w - T_f)$$

ニュートンの冷却の法則

T_w : 管壁温度[K], T_f : 主流温度[K]

h [W・m²・K⁻¹] は熱伝達係数または境膜伝熱係数と呼ばれる。

Copyright © 2015 SCEI

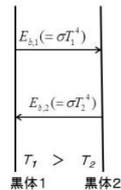
放射伝熱

- 物体間の放射伝熱

無限に広いと見なせる面積 A の黒体1と2が相対する場合
黒体平板間の放射伝熱

$$Q = A(E_{b,1} - E_{b,2}) = A\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

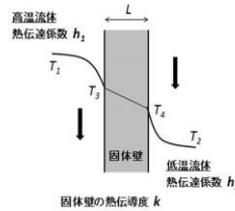
$$= 5.67A \left\{ \left[\frac{T_1}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_2}{100} \right]^4 \right\}$$



Copyright © 2015 SCEI

熱交換器(総括伝熱係数)

固体壁をはさむ2流体間の伝熱(平板の場合)



- A は固体壁の伝熱面積[m²]
- U は総括伝熱係数[W・m²・K⁻¹]

$$Q = UA(T_1 - T_2)$$

$$= h_1 A(T_1 - T_3)$$

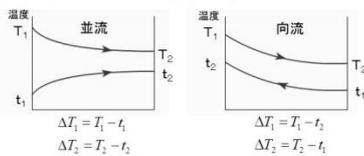
$$= \frac{k}{L} A(T_3 - T_4)$$

$$= h_2 A(T_4 - T_2)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2}$$

Copyright © 2015 SCEI

二重管式熱交換器(交換熱流量)



	高温流体	低温流体
質量流量 (kg・s ⁻¹)	M	m
比熱 (J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	C_p	c_p

高温流体が失う熱流量(W) $Q = MC_p(T_1 - T_2)$

低温流体が得る熱流量(W) $Q = mc_p(t_2 - t_1)$

熱交換器における交換熱流量(W) $Q = UA\Delta T_{lm}$

U : 総括伝熱係数[W・m²・K⁻¹] 対数平均温度差(K) $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$

A : 伝熱面積[m²]

Copyright © 2015 SCEI

多管式熱交換器(計算法)

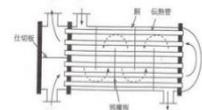
1. 胴側 1パス、管側 1パスの場合
二重管式熱交換器と同様に計算。

2. 多流路の熱交換器の場合
工業的に使用される熱交換器では多流路の熱交換器が用いられることが多い。

この場合には、向流として求められる対数平均温度差 ΔT_{lm} に温度差補正係数 F_T をかけた平均温度差 ΔT_m を使い、二重管式熱交換器と同様に計算。

$$\Delta T_m = F_T \Delta T_{lm}$$

Copyright © 2015 SCEI



(例) 胴側 1パス、管側 2パス

初心者のための化学工学入門

4. 反応工学

講師：河合 治之

<講義概要>

反応工学は反応装置と反応操作の設計を主目的とします。実際の設計ではコンピュータが不可欠となりますが、その手順を理解するためこの講座では関数電卓のみでアプローチできる単純化された例を取り扱います。実際に遭遇する課題のレベルとは解離がありますが、対処するための第一歩であることを説明します。

設計には反応速度式が不可欠となります。前半で反応速度式の概要とその定め方、温度の影響の推算式等について説明します。微分方程式を忘れていた方のためその復習を含む例題を交えながら行います。後半では反応の連続化手段を重点的に説明します。PFRとCSTRの基礎式とそれを導出する際の前提の説明の後、1次反応の場合のPFR、CSTR、多段CSTR、温度を変更して行く多段CSTRの各例について、演習を行います。

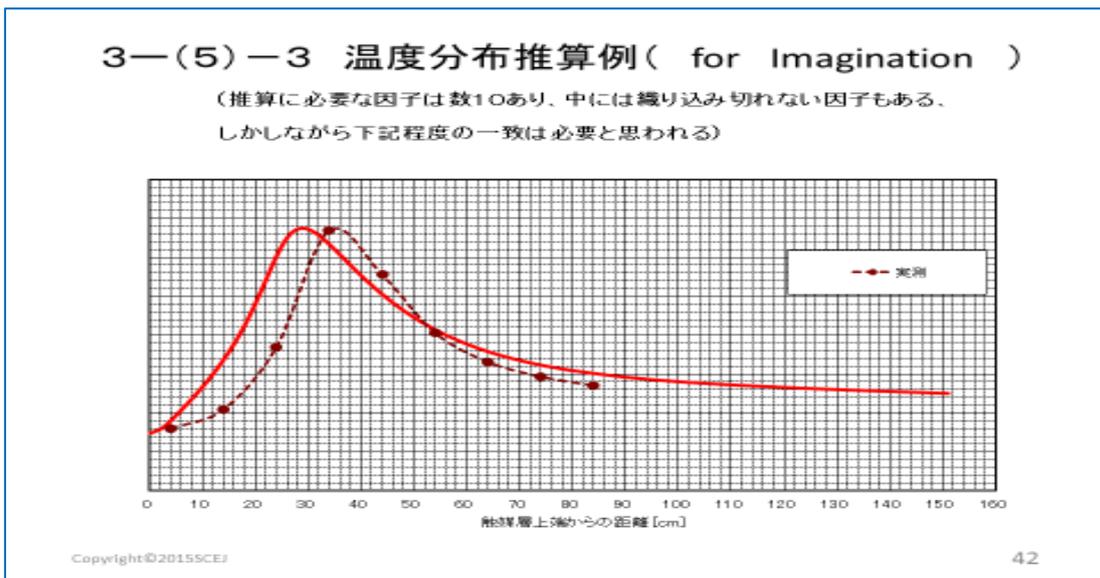
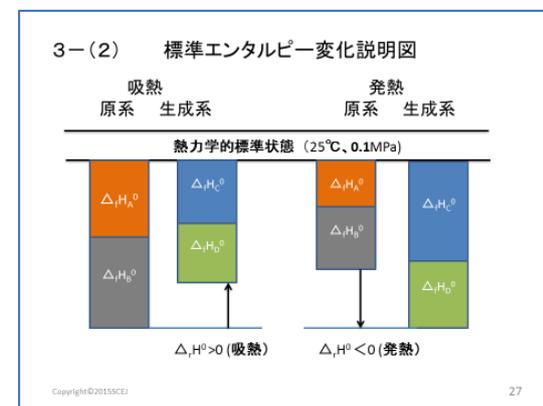
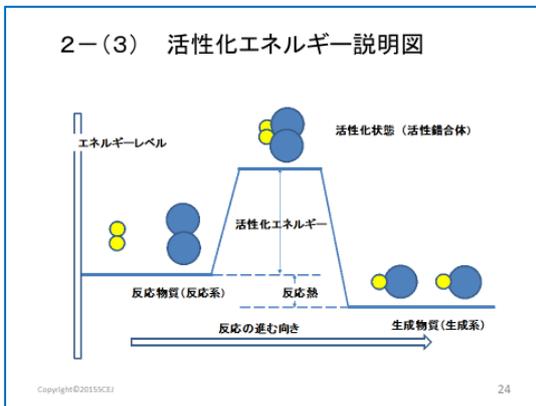
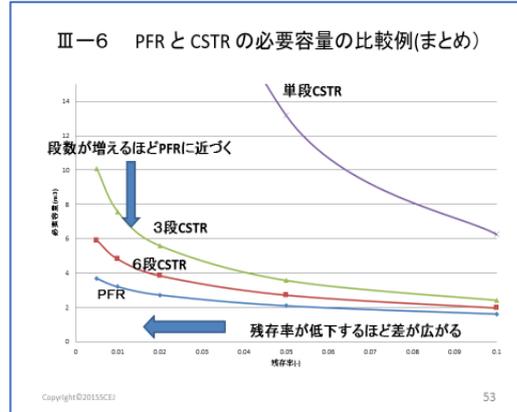
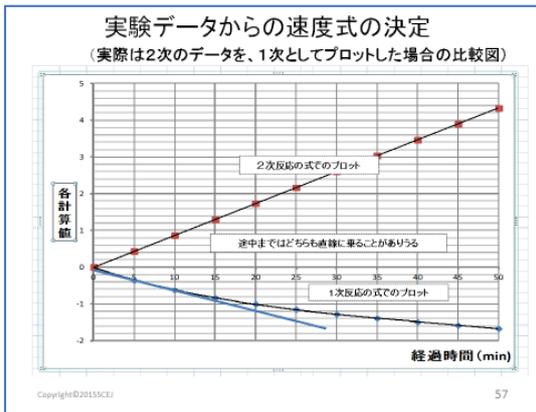
<講義の主な内容>

1. 反応速度式関係

- 1) 反応速度式とは
- 2) 中間演習その1 (微分方程式の復習)
- 3) 1次反応、2次反応、異分子2次反応の各場合の反応速度式とその判定法
- 4) 中間演習その2 (実測データの速度式へのまとめ)
- 5) 判定に際しての留意点、それに関連して湧いてくると思われる疑問とその答え
- 6) 反応速度の温度変化 (アレニウス式)、活性化エネルギー説明図
- 7) 中間演習その3 (活性化エネルギーの算出)
- 8) 反応に伴うエンタルピー変化とその計算法

2. 反応の連続化と反応器必要容量の計算

- 1) 反応器と反応操作、その組み合わせの例
- 2) PFRの基礎式と導出法、導出のポイント
- 3) 気固触媒反応器 (発熱反応) の温度分布計算例 (イメージの助けのため)
- 4) (上記を題材としての) 反応工学の安全、品質、コスト等との関わり
- 5) CSTRの基礎式と導出の前提
- 6) 多段CSTRの場合の式
- 7) 中間演習その4 (PFR、CSTR、多段CSTRの必要容量の計算)
- 8) PFR、CSTR、多段CSTRの必要容量の比較図
- 9) 工場で遭遇する課題の例
- 10) 反応関連のレポートが具備すべき事項



初心者のための化学工学入門 5.

分離工学 I 蒸留

講師： 竹内 亮

<講義概要>

蒸留は液中の各成分の蒸気圧の差を利用して成分を分離する技術です。この講座では最も単純な二成分系の蒸留を理解することを目的としています。蒸留計算は厳密に行えば、極めて多くの変数を試行錯誤で行うことになる為、コンピュータの力を借りて計算しているのが実態ですが、この講座では蒸留操作の本質を理解するために単純化されたモデルを扱うことと致します。

この蒸留操作の計算のためには気液平衡のデータが不可欠ですが、これを蒸留計算で使いやすい X-Y 線図の形にするところまでを第 1 章「気液平衡」で解説し、第 2 章で「単蒸留」「フラッシュ蒸留」「蒸留塔」の解説を行います。「蒸留塔」では、マッケープ・シール法による段数計算、還流比と理論段数の関係を解説し、最終的には蒸留塔の内部の状態についてのイメージまで持てる様に致します。

<講義の主な内容>

1. 気液平衡

- ・理想溶液の気液平衡と現実、即ち非理想溶液について
- ・X-Y 線図の意味と書き方
- ・活量係数を用いた非理想溶液の気液平衡データの補正
- ・ファンラル式による活量係数の計算
- ・アントワン式を用いた温度条件の取り込み

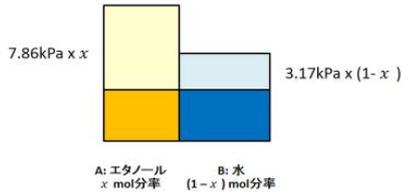
2. 蒸留

- ・実験室で行う蒸留、単蒸留の計算
- ・棚蒸留を連続化したフラッシュ蒸留の計算
- ・蒸留塔（フラッシュ蒸留を積み重ねた構造）
 - マッケープ・シール法による段数の算出
 - 還流比と理論段数の意味と段数の推算
 - 段効率・塔効率の考え方
 - 充填塔への応用
 - 蒸留塔の内部の状態と運転に与える影響

マッケープ・シール法は世の中にコンピュータが現れる以前に考案された段数計算の手法であり、多くの仮定に基づいた理論ですが、塔内の状態をイメージするには分かり易い手法です。化学工学初心者の方には是非、この方法を学んで頂きたいと思います。

もし、理想溶液ならば

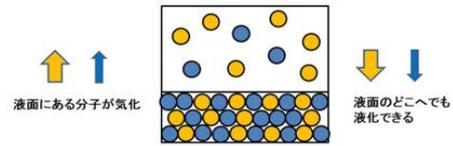
$$P = P_A \cdot x_A + P_B \cdot x_B \quad (\text{ラウールの法則})$$



Copyright©2015 SCEI

7

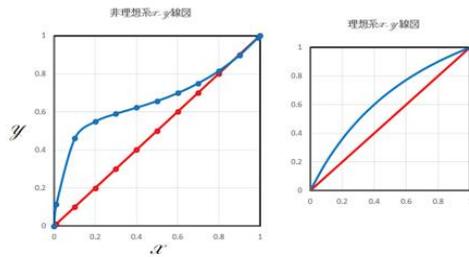
混合液とその気相のイメージ



Copyright©2015 SCEI

8

x - y 線図(非理想溶液)

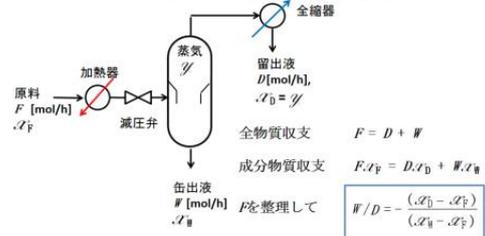


水-エタノール系を活量係数で補正した場合の x - y 線図

Copyright©2015 SCEI

30

フラッシュ蒸留(連続)



理想溶液の場合、相対揮発度 $\alpha = (y_A/x_A) / (y_B/x_B)$ より

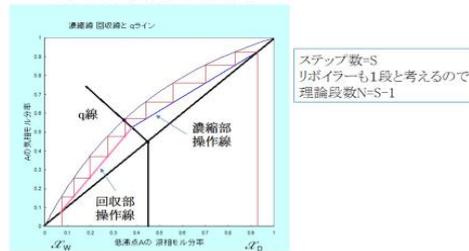
$$y_k = \alpha \cdot x_k / \{1 + (\alpha - 1) \cdot x_k\} \Rightarrow x_k^*$$

Copyright©2015 SCEI

37

x - y 線図上で理論段数を求める

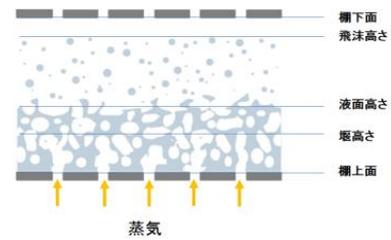
マッケープ・シール法 (McCabe-Thiele)



Copyright©2015 SCEI

49

棚段間のイメージ



Copyright©2015 SCEI

68

初心者のための化学工学入門 6.
分離工学Ⅱ（ガス吸収と膜分離）

講師：中尾 眞

<講義概要>

私たちは分離技術を使って様々な形で利用しています。例えば、工場ではガス吸収操作により、排ガスから有害物を除去して、清浄な空気を得ます。家庭では水道水を精密にろ過することで、飲料浄水を作っています。また、海水や排水から塩分や有害物を取り除いて、生活水を作ることができます。これらの分離には孔径や分子構造が制御された、分離膜が使用されています。

講義は2部に分かれており、前半では「ガス吸収」の工業的な利用を紹介するとともに、排ガス吸収塔の設計について、その手法を説明します。後半の「膜分離」では、圧力や濃度差、電位差などを利用した様々な工業的な分離プロセスを紹介するとともに、例題解説などを通して膜分離装置の設計方法について講義します。

<講義の主な内容>

第1部 ガス吸収

1) ガス吸収の実例と装置

- ・①身近な実例、②物理吸収と反応吸収、③気液接触の方法と装置

2) 工業的なガス吸収プロセスの紹介

- ・①アンモニアソーダ法重曹製造、②地下かん水からの沃素製造、③排煙脱硫プロセス

3) 排ガス吸収塔の設計

- ・①小型吸収塔による実験、②吸収塔内の流れと圧力損失、③実装置の設計

第2部 膜分離

1) 膜分離の実例と原理

- ・①身近な実例、②分離膜の種類と対象、③膜分離の基本原則

2) 工業的な膜分離プロセスの紹介

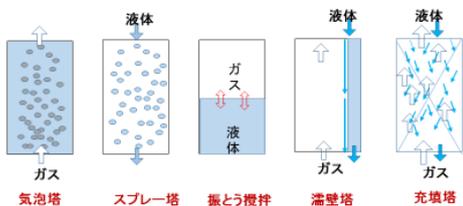
- ・①逆浸透膜による海水の淡水化、②ガス分離膜とその応用、③電気透析法による海水濃縮

3) 演習

- ・①家庭用浄水器の流量計算
- ・②逆浸透膜の膜面積の算出
- ・③水素分離膜の分離係数の算出

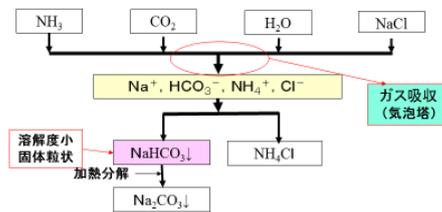
気液接触の方法

ガスを吸収させるには様々な方法があります。水中にガスを吹込む方法、空気中に液滴を分散させる方法、容器に液体を保持し振とうさせる方法、壁面に液体を伝わせる方法、充填物の中に液とガスを通過させる方法などがあります。



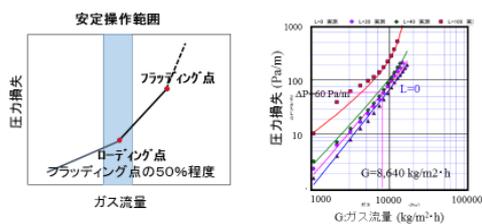
アンモニアソーダ法プロセス

炭酸水素ナトリウム(重曹)は、食塩とアンモニアと石灰石を原料として製造されます。ソルベー社が1872年に開発し、アンモニア合成法の確立後、世界中に広まりました。



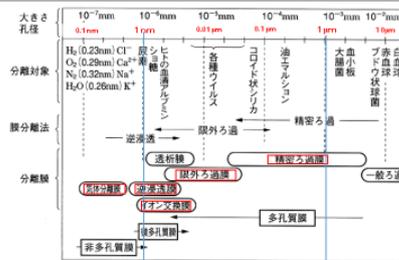
吸収塔の好適条件(液ガス比)

ガス流量を増加させると、圧力損失が急激に増大するフラッディング点 (FL) があります。FLの50%程度の流量付近(ローディング点)では、ガスと液が充分接触する好適条件となります。



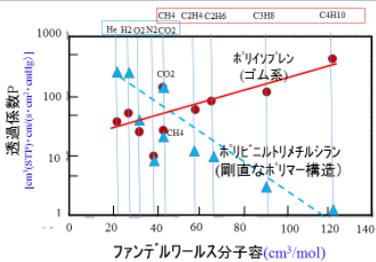
分離対象の大きさや適用膜

分離膜には様々な種類の膜があります。固形物を分離するろ過膜、分子を分離するガス分離膜、イオンを分離する逆浸透膜やイオン交換膜などです。



透過係数と分子サイズの関係

ガスの透過は分子の大きさに依存します。分子の小さい水素は透過しやすく、分子の大きい酸素や窒素は透過しにくい。膜素材によって変わり、ゴム系膜では溶解性の大きい炭酸ガスやブタンなどが透過しやすい。



浄水器のろ過水量の計算

家庭用浄水器は水道水の圧力を利用して、中空糸の細孔(0.1μm)に上水を通過させることで、清浄な水が得られます。浄水の流量を計算してみます。

条件1: 使用条件

細孔径	d : 0.1 μm	細菌を不透過
水道水圧力	ΔP : 100,000Pa	1 気圧と仮定
水の粘度(20℃)	μ : 0.001 PaS	1 C.P. @ 20℃
中空糸壁厚	l :	

条件2: 中空糸形状

中空糸外径	dH	1mm
中空糸長さ	LH	
中空糸1本の表面積	S1	
中空糸本数	n	
細孔部分の面積比率	ε	
細孔部分の面積	A	