- 22) 城塚, 戸上, 広田: 化工協会第35年会前刷集 (1), 137 (1970)
 23) 城塚, 戸上, 広田: 同上, (1), 140 (1970)
 24) 城塚, 戸上, 広田: 化工協会第4回秋季大会前刷集, 37 (1970)
 25) 城塚, 戸上, 広田: 化工協会第36年会前刷集 (1), 74, (1971)

- 26) 城塚, 戸上, 広田: 同上 (1), 77, (1971)
 27) 杉田: 化学工学, 33, 994 (1969)
 28) Yang, H. H. and J. C. Brier: *A. I. Ch. E. Journal*, 4, 453 (1958)

抽出装置の動特性*

村上昭彦**

1. 緒言

物質移動装置の動特性解析は、プロセス制御のための動的挙動の予知, あるいは装置内でおきている現象の正確な把握のためきわめて重要である。従来, 物質移動装置の動特性に関する研究は, 主として蒸留塔, ガス吸収塔のような気液接触装置についてのものであり, 液液接触系である抽出装置に関する研究は比較的少ない。

抽出装置の動特性に関する研究は, 早くには理論的な取り扱いとして, Marshall and Pigford (1947年) による向流多段抽出塔の平衡到達速度の解析¹⁾, Jaswon and Smith (1954年) の充填抽出塔の取り扱い¹⁰⁾, および多段ミキサ・セトラーを取り扱った Lapidus and Amundson (1950年) の研究¹²⁾ がある。しかし, いずれの研究も実験的照合はなされておらず, 設定した仮定条件が動特性を表示する上で妥当であるかどうかは立証されていない。実験的研究は1960年代になって行なわれるようになったが, その数は少なく抽出装置の多様性にくらべて考えれば, きわめて不十分な段階である。

ここでは, 多段抽出塔 (多孔板抽出塔), 脈動多段抽出塔, 充填抽出塔, ミキサ・セトラーなどの諸形式の抽出装置の動特性について従来の研究の成果に基づいて順次述べることにする。なお現在までに行なわれた動特性の研究はほとんどすべて組成変動に関するものであり, 本稿では特に断わらないかぎり組成変動の動特性を意味するものとする。

2. 多孔板抽出塔の動特性

多段抽出塔のうち外部より分散のためのエネルギーを供給することのない形式としては多孔板抽出塔があり, 蒸留塔, 吸収塔と相似に取り扱われることが多かった

が, 抽出塔の特異な性質から同一に論じられない面もある。

理論的な取り扱いをするに際しては, 物質移動特性の表示として, 完全混合, 完全平衡の理想段を仮定¹⁰⁾するか, またはマーフリー段効率を用いる²⁾か, あるいは物質移動係数による表示^{20-24, 30)} が用いられている。多孔板抽出塔は段効率は一般に低いのが普通であり, このような場合には物質移動係数による表示がもっとも妥当であろう。

また, 段上の両相流体の取り扱いに際しては, 両相流量に差が少ないため滞留時間は同じオーダーであり, またホールドアップも同程度であるため, 気液接触系の場合と異なり, 分散相ホールドアップを無視することはできない。また分散相は二相混相部と均一相部に分けて考えねばならず²⁰⁾, 取り扱いは気液系の場合より複雑となる。

また一般に気液系, 液液系を問わず, 多段塔の動特性を解析するに際して, 初めから多段として取り扱うと複雑になりすぎ, 解を得るためには非常に簡単な仮定をしなければならぬことが少なくない。したがって動特性解析の1つの態度として, 単一段について充分解析し, この結果を多段塔の場合に拡張する手法も意義があると考えられる。

2.1 単一段塔の動特性

一般に単一段の接触は次式で表わされる。

$$C_{D0}(s) = G_1(s)C_{D1}(s) + G_2(s)C_{01}(s) \quad (1)$$

$$C_{00}(s) = G_3(s)C_{D1}(s) + G_4(s)C_{01}(s) \quad (2)$$

ここで, $G_1(s) \sim G_4(s)$ は伝達関数, $C_{D1}(t)$, $C_{01}(t)$ はそれぞれ分散相, 連続相の入口組成の定常状態からの変動濃度, $C_{D0}(t)$, $C_{00}(t)$ は両相出口の組成変動であり, s は時間 t に関するラプラス演算子である。したがって一段の接触を表わすブロック線図は, 図1のようになる。伝達関数 $G_1(s) \sim G_4(s)$ は段上の両相流体の混合状態などによって異なる形で与えられる。

* 昭和46年1月26日受理

** Akihiko Murakami 東京農工大学工学部化学工学科

城塚, 村上²³⁾ は単一段塔の動特性を解析するために, 段上の二相の接触に次のことを仮定した。(1) 連続相流体の混合は拡散モデルで表示できる。(2) 分散相は混相部と均一相部に分けて考え, 混相部ではピストン流, 均一相部では完全混合とする。(3) 物質移動は二相混相部の分散相液滴-連続相間および二相分離界面を通して行なわれる。(4) 平衡関係は直線近似ができる。すなわち,

$$C_D = mC_C^* + b$$

以上の仮定のもとに導かれる基本式を解くと

$$G_1(s) = \frac{f_4 \exp(-f_1) + (N_c/m) f_2 f_3 \{1 - (1 - H_c)/f_4\}}{f_4 f_6 - (N_s/m) f_3 \{1 - (1 - H_c)/f_4\}} \quad (3)$$

$$\equiv \frac{Y_1(s)}{X(s)} \quad (3')$$

$$G_2(s) = f_5(1 - H_c)/X(s) \quad (4)$$

$$G_3(s) = (1 - H_c) \{ (N_c/m) f_2 f_3 + (N_s/m) \exp(-f_1) \} / X(s) \quad (5)$$

$$G_4(s) = \{ (N_s/m) f_3 (1 - H_c)^2 / f_4 X(s) \} + H_c \quad (6)$$

ここで $N_c = K_c a V / F_c$, $N_s = K_s a_s S / F_c$ である。また $f_1 \sim f_6$ は分散相, 連続相の平均滞留時間, あるいは N_c , N_s , 両相流量比 γ などを含む s の関数であり, H_c は連続相の混合の程度を表わす修正ベクレ数 $M_c = u_c L / 2 E_c$ を含む s の関数である。

このようにして与えられる $G_1(s) \sim G_4(s)$ は実験応答をよく表わしている²³⁾ が, きわめて複雑な関数であって, 物質移動特性, 混合特性, 流量比などの諸因子がどのように応答に影響しているかを直観的にはあくすることはきわめて困難である。このような場合, 伝達関数と統計量との関係¹⁴⁾ を用いて近似伝達関数を求めることができる²³⁾。すなわち

$$G_1(s) = \frac{K_{p1} e^{-f_1 s}}{T_{1s} + 1} \quad (7)$$

$$G_2(s) = \frac{K_{p2}}{(T_{1s} + 1)(T_{2s} + 1)} \quad (8)$$

$$G_3(s) = \frac{K_{p3}(T_{3s} + 1) e^{-f_1 s}}{(T_{1s} + 1)(T_{2s} + 1)} \quad (9)$$

$$G_4(s) = K_{p4} G_3(s) \quad (10)$$

ここで,

$$T_1 = \frac{1 + N_c + N_s}{1 + N_c + N_s + \gamma N_s / m} \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \beta} \left[\frac{M_c + 2}{2 M_c} - \frac{1 + e^{-2(M_c + \beta)}}{(M_c + \beta)(2 M_c + \beta)} - \frac{4 M_c (1 + M_c) (\gamma N_s / m)}{(1 + \gamma N_s / m)(2 M_c + \beta)^2} \right] \quad (12)$$

$$T_3 = \frac{f_3 N_c \left\{ 1 - (\gamma N_c / 2m) + \frac{1}{6} (\gamma N_c / m)^2 \right\}}{N_s + N_c \left\{ 1 - (\gamma N_c / 2m) + \frac{1}{6} (\gamma N_c / m)^2 \right\}} \quad (13)$$

であり, $\beta = N_c + N_s$ である。また $K_{p1} \sim K_{p4}$ は物質移動

図1 単一段のブロック線図

特性, 流量比によって定まるゲイン定数である。なお時定数 T_1 , T_2 , T_3 の次元は, 連続相の平均滞留時間で無次元化した無次元時間である。段上の連続相流体の混合の程度を表わす修正ベクレ数 M_c は時定数 T_2 にだけ含まれている。 $G_3(s)$ は混合に関する拡散モデルの伝達関数である。

(7)~(10) 式の近似伝達関数の適用条件は

$$1 \leq M_c \leq 20 \quad (14)$$

であることであり, N_c , N_s , $\gamma N_c / m$, $\gamma N_s / m$ などの制限条件は, 通常操作の多孔板抽出塔では常に満足されていると考えてよい。修正ベクレ数 M_c の推算式としては, 次式が与えられている²²⁾。

$$Pe = \exp[5.1 - 15.7 F_D^{0.50} \Gamma_0^{-0.58}] \quad (15)$$

ここで Γ_0 は単位幅当りの連続相の流量である。以上は二相分離界面が低く連続相流体の混合が無視できない場合であるが, 二相分離界面高が大きくなると, $M_c < 1$ となることが多い。このようなとき, 連続相流体の混合に完全混合を仮定したモデルで充分よい近似ができる²³⁾。すなわち, $G_1(s) \sim G_4(s)$ は次式となる。

$$G_1(s) = \frac{K_{p1} e^{-f_1 s}}{T_{1s} + 1} \quad (16)$$

$$G_2(s) = \frac{K_{p2}}{(T_{1s} + 1)(T_{2s} + 1)} \quad (17)$$

$$G_3(s) = \frac{K_{p3}(T_{3s} + 1)}{(T_{1s} + 1)(T_{2s} + 1)} \quad (18)$$

$$G_4(s) = \frac{K_{p4}}{T_{3s} + 1} \quad (19)$$

ここで, T_3 は次式で与えられる。

$$T_3 = \frac{1 + \gamma N_s / m}{1 + N_c + N_s + \gamma N_s / m} \quad (20)$$

矢野ら²⁰⁾ は塔径 5.4 cm の単一段塔によって解析を行っている。分散相均一相部の混合に側容量モデルを用いている。

高松ら²⁷⁾ は異相系十字流接触段の動特性の理論解析

図2 多段抽出塔のブロック線図

を行なっているが、彼らのモデルでは分散相の均一相部については考慮されていないので、これは気液接触段に関してのみ有効な解析である。

2.2 多段抽出塔の動特性

多孔板多段抽出塔の動特性の表現は、段上の流体混合に完全混合のような簡単な仮定を用いてもきわめて複雑な形となる²⁰⁾。これを避け、かつ十分な精度を保持するためには、単一段の動特性に関する解析結果を利用すればよい。多段結合の場合をブロック線図で表わせば、図2(a)のようになる。異相間の相互関係を表わす伝達関数 $G_2(s)$, $G_4(s)$ は、変動の入った相に応じていずれかが無視可能となる^{20,21)}。たとえば分散相入口に変動があった場合には、 $G_2(s)$ のゲインが十分に小さいためにこれが無視できて、ブロック線図は図2(b)のように簡易化される。これは容易に等価変換でき、また多孔板抽出塔の段効率が25%以下の場合には、さらに簡易化することによって、多段塔の動特性は簡単な1次系の複合系で近似できる。すなわち、A相入口に入った変動に対する n 段目の B 相の応答を表わす伝達関数は^{20,21)}

$$G_{AB}(s) \equiv \frac{C_{B,n}(s)}{C_{A1}(s)} \approx \frac{K_{1,n}e^{-L_1s}}{T_{AB}s+1} - \frac{K_{2,n}e^{-L_2s}}{T_{AB}s+1} \quad (21)$$

ここで添字 A, B は、A が分散相のとき B が連続相、A が連続相のとき B が分散相であることを表わす。 $K_{1,n}$, $K_{2,n}$ は単一段の伝達関数のゲイン定数と段数 n との関係である。時定数 T_{AB} は近似的に次式で与えられる。

$$T_{AB} \approx \frac{T(A)+T(B)}{1-K_{p1}K_{p4}} \quad (22)$$

ここで $T(A)$, $T(B)$ はそれぞれ A 相, B 相流体の1段の平均滞留時間である。また変動の入った相に応じて K_{p1} , K_{p4} のいずれか一方は1に近くなるため(22)式の分母は近似的に変動の入った A 相の1段の接触における抽出率に等しくなる。したがって、抽出率の大きいほど多孔板抽出塔の異相間の応答は早い²⁰⁾。

一般に多段塔の動特性を考えると、異相間の入口・出口、もしくはそれに近い段の応答が重要である。このようなとき、(21)式中の無駄時間 L_1 , L_2 は $L_2 \gg L_1$ となり、応答の立ち上りは(21)式の第1項で近似することができる²⁰⁾。

同一相間の入口と各段の応答は、入口からの段数を k とすると

$$G_{AA}(s) = \left(\frac{K_{3,k}e^{-L_3s}}{T_{AA}s+1} \right)^k \quad (23)$$

の k 次遅れの伝達関数で近似できる。時定数 T_{AA} は変動の入った相の1段の平均滞留時間に近似的に等しい^{20,21)}。

このように多孔板抽出塔の動特性を表わす時定数や、ゲイン定数は、平均滞留時間、物質移動特性などと相関づけられること、特に異相間の応答を支配する時定数が(22)式で与えられることは重要である。

3. 脈動抽出塔の動特性

脈動多孔板抽出塔は装置形式としては多段接触装置であるが、動特性解析に際して多段接触モデルあるいは微分接触モデルが適用されている。

Biery and Boylan²⁾ は塔径 3 in. 79 段の脈動塔を用いて過渡特性を検討した。数学的モデルとして7種の多段接触モデル(集中定数系)と2種の微分接触モデル(分布定数系)を設定し、デジタル計算機で解いて検討した。最もよく実測応答を表わしたのは次の仮定によるモデルであった。すなわち、(1) 塔は任意の段に分けられる。(2) 物質移動特性は総括物質移動係数で表わされる。(3) 各段の出口組成を各段の平均組成とし、(4) 段の間の平均濃度推進力として一段上の段の平均濃度推進力を用いるものとする。以上の仮定によるモデルの基本式は、上から数えた任意の n 段について

$$H_0 \frac{dC_{C,n}}{dt} = F_C(C_{D,n-1} - C_{C,n}) - K_{Da}V_n(C_{D,n}^* - C_{D,n}) \quad (24)$$

$$H_D \frac{dC_{D,n}}{dt} = F_D(C_{D,n+1} - C_{D,n}) + K_{Da}V_n(C_{D,n}^* - C_{D,n}) \quad (25)$$

実測応答の定常値から、試行法により K_{Da} を算出し、

段数 n を変えて実測応答と理論応答との一致を行なっている。Biery らのモデルの欠点は、段数 n が現実の装置の段数とは何の関係もなく、単に応答を一致させるためのパラメータにすぎず何らの物理的意味を持たない点にある。

彼らはさらにピストン流を仮定して導いた微分接触モデルの基本式を差分式に変換して解き検討しているが、いずれも応答初期に振動特性を示し適合しなかった。

DiLiddo and Walsh⁶⁾ はディジタル計算機によるシミュレーションによって (1) 原料組成のステップ変動に関するスタートアップ問題 (2) 有機相原料組成、供給速度、脈動周波数などの操作条件のステップ変動に対する応答 (3) 原料組成のステップ変動に対する制御応答について検討した。シミュレーションは段効率 100% の 3 段塔と低段効率の 9 段塔について行なわれた。その結果、段効率の高い場合、有機相の 25% 流量変動の影響は、25% の組成変動より大きい、低段効率塔の場合には 25% 組成変動の影響の方が 25% 流量変動の影響よりはるかに大きいことがわかった。また脈動周波数は比較的影響が小さかった。

有機相入口組成のステップ変動に対する水相供給流量の比例-積分制御の効果は、比例制御だけではオフセットを生じるが積分制御を加えることによって除くことができ、変動の小さい場合には、比例-積分制御でよい制御性を示す。しかし、変動が大きい場合によっては水相流量の過大な増加のため、フラッシングを生じることがある。

Watjen and Hubbard²⁰⁾ はパルステスト法によって脈動多孔板抽出塔の動特性解析を行なった。両相流量、分配係数および容量係数を一定と仮定し、拡散モデルが適用できるとして導いた基本微分方程式を差分方程式に変換して伝達関数を導いた。差分方程式を解くに際して、両相濃度の相関にマッフル段効率を用いている。実験結果の検討はボード線図によって行なったが、モデルの応答と実測応答との一致は不良であった。

Foster ら²¹⁾ は脈動多孔板抽出塔の操作条件が変動したときのホールドアップの非定常変化を検討した。実験は有機相に蛍光染料を溶かし、蛍光の強さの変化によってホールドアップの変化を検出している。

流量変動に関する動特性を解析するうえで、流量によるホールドアップの非定常変化を知ることは重要であり、今後流動に関する動的挙動の研究は種々の抽出装置について行なわれなければならないと考える。

4. 充填抽出塔の動特性

充填抽出塔に関する研究は比較的少なく、理論的取り

扱いとしては Chernyshev⁵⁾ の研究、実験的研究としては Doninger and Stevens⁷⁾ の報告以外見るべきものは少ないようである。

Chernyshev⁵⁾ は充填抽出塔において、向流、両相流体はピストン流の仮定のもとに導いた偏微分方程式の理論解を求め、これから連続相組成変動に対する分散相出口組成の過渡応答の時定数が、塔断面積に比例し連続相流量に逆比例することを示している。すなわち、

$$T = \frac{\alpha S}{F_g} \left(1 - H_D + \frac{H_D F_c}{F_D} \right) \quad (26)$$

ここで、 S は塔断面積、 H_D は分散相のホールドアップであり、 α は定数である。Chernyshev は理論的に取り扱っただけで実験的検証は行っていない。

Doninger and Stevens⁷⁾ は充填抽出塔の組成変動に関する動特性をパルステスト法で実測し、ボード線図によって検討した。数学的モデルとしては、Gray and Prados⁹⁾ が充填ガス吸収塔の動特性解析において導出したセルモデルを適用した。気液系の場合と異なり、Gray らが無視した項が液液系では無視できず伝達関数はより複雑となる。

ボード線図における実測応答と理論応答との一致が悪いことから、振幅比および位相遅れに補正係数を導入した。すなわち、両相流量とこれらの補正係数との相関を実験的に求め、またセルの数 n と流量との相関をも求めておき、流量が設定されれば動特性が予知できるようにしている。Doninger らの手法では対象とする個々の抽出塔についてあらかじめ補正係数と流量の相関を実験的に求めておかなければならぬ一般性に乏しい。またセルの数 n は流体混合の程度を表わす槽数ではなく、単に応答を一致させるためのパラメータにすぎないことも動特性の合理的な予知の観点からは望ましくない点であろう。

充填塔による移動プロセスの非定常状態の理論的取り扱いとしては他に Jaswon and Smith¹⁰⁾ の両相にピストン流を仮定して行なった解析があるが、理論的にも実験的にも今後研究がなされなければならないと思われる。

5. ミキサーセトラの動特性

ミキサーセトラの動特性に関しては、Lapidus and Amundson¹²⁾ の並流多回抽出の動特性に関する理論的な取り扱い以後いくつかの報告がある。

Staffin & Chu²²⁾ は単一ミキサーの動特性をインパルス応答法によって解析し、二重境膜の動特性が有機相の片側境膜抵抗支配のときは 1 次系で、両相に境膜抵抗が存在するときには 2 次系で表わされることを示している。有機相の時定数 T_0 と Sc 数、 Re 数との間には次式

の関係がある。

$$\left(\frac{D_p}{\mathcal{D}_0 T_0 H_0 a}\right) \left(\frac{\mu_0}{\rho_0 \mathcal{D}_0}\right)^{-1/2} = J_0 \left(\frac{D_p^2 N \rho_0}{\mu_0}\right)^{b_0} \quad (27)$$

ここで N は回転数である。定数 J_0 , b_0 は

片側境膜抵抗支配のとき

$$J_0 = 10; b_0 = 0.6$$

両相境膜抵抗支配のとき

$$J_0 = 1.8; b_0 = 0.8$$

また両相境膜抵抗支配のときの水相の時定数 T_w は

$$\left(\frac{D_p}{\mathcal{D}_w H_w H_0 a}\right) \left(\frac{\mu_w}{\rho_w \mathcal{D}_w}\right)^{-1/2} = J_w \left(\frac{D_p^2 N \rho_w}{\mu_w}\right)^{b_w} \quad (28)$$

$$J_w = 0.03; b_w = 1.8$$

で与えられる。

Burns and Hanson⁴⁾によれば、向流多段のミキサーセトラーのインパルス応答およびステップ応答は非対称であり、特に負のステップ応答においては中間段の応答が出口応答よりも著しく遅れることを見だしている。これは溶質の循環によるものと考えている。

並流多段抽出については大沢¹⁵⁾とLowe¹⁶⁾の研究がある。大沢¹⁵⁾はミキサー内は完全混合とし、ミキサー内は完全平衡、セトラー内では分離のみが行なわれると仮定して動特性の解析を行なった。この結果ミキサーの動特性は(無駄時間+1次系)で近似される。またセトラーは(無駄時間+n次系)で近似して多段系の動特性を評価し、よい結果を得ている。大沢はさらに最適制御、最適計装の問題についても検討を加えている。

Johnson and Talbot¹⁷⁾は N 槽の向流多段抽出系で A , B 二成分混合物を分離する場合の解を与えた。すなわち

セトラーの容積を無視し、第 k 槽に $x[\text{gr}]$ の混合物を注入した場合の第 n 槽のインパルス応答は次式で与えられる。

$$C_{A,n}(t) = \frac{2}{N+1} \cdot \frac{mx(F_A+F_B)}{V(mF_A+F_B)} \left(-\sqrt{\frac{F_B}{mF_A}}\right)^{k-n} \\ \times \sum_{j=1}^N \sin \frac{jk\pi}{N+1} \cdot \sin \frac{jn\pi}{N+1} \cdot \exp\left[-\frac{F_A+F_B}{V} \left\{1 + \frac{\sqrt{mF_A F_B}}{mF_A+F_B} \left(2 \cos \frac{j\pi}{N+1}\right)\right\} t\right] \quad (29)$$

ここで V はミキサーの容積である。彼らは19段の多段系の中央段にインパルスを注入する実験によって各段の応答を実測し上式を確かめている。

結 言

現在までになされた抽出装置の動特性に関する研究はこれまでに述べたとおりであるが、物質移動装置の動特性解析の中では最も立ち遅れている分野であり、今後の研究に待たねば動特性の予知はおぼつかないのが現状である。

また、以上述べた他にスプレー抽出塔の動特性に関する矢野ら²⁰⁾の報告、スプレー抽出塔系の制御に関するAllenら¹⁾の研究、Sheibel塔に関するPollock^{18,19)}の報告、およびreciprocating plate抽出塔に関するSouhradaら²⁵⁾のシミュレーションがあるがここでは省略する。また、抽出塔の動特性に関するレビュー¹⁷⁾および動特性解析法の整理¹⁸⁾があることも付記しておく。

使 用 記 号

a = 比界面積
 a_s = 二相分離界面における単位断面積当りの接触面積
 b = 定数
 C = 組成
 D_p = 攪拌羽根の直径
 $\mathcal{D}$ = 拡散係数
 E = 混合拡散係数
 f = $f(s)$
 f_r = 混相部における分散相の滞留時間
 F = 流量
 G = 伝達関数
 H = ホールドアップ
 J = 定数
 k = 定数; 第 k 槽
 K = 総括物質移動係数
 K_p = ゲイン定数
 L = 段長; 無駄時間
 m = 分配率
 M = $Pe/2$; 修正ペクレ数
 n = 第 n 段

N = 回転数; 全段数
 $N_e = K_e a V / F_c$
 $N_s = K_s a_s S / F_c$
 $Pe = uL/E_c$: ペクレ数
 s = ラプラス演算子
 S = 塔断面積
 t = 時間
 T = 時定数
 u = 線速度
 V = 装置容積, 1段当りの容積
 x = 注入量
 α = 定数
 $\beta = N_e + N_s$
 $\gamma = F_D / F_c$
 Γ = 単位幅当りの流量
 μ = 粘度
 ρ = 密度
<添字>
 A = A 相
 B = B 相

C = 連続相
D = 分散相
i = 入口

n = 第n段
o = 有機相, 出口
W = 水相

引用文献

- 1) Allen, P., H.W. Kropholler and D.J. Spikins: The Chemical Engineer, No. 201, CE 182 (1966)
- 2) Apelblat, A. and M. Fraggi: *J. Nuclear Energy, Part A/B*, 20, 953 (1966)
- 3) Biery, J.C. and D.R. Boylan: *Ind. Eng. Chem., Fundamental*, 2, 44 (1963)
- 4) Burns, P.E. and C. Hanson: *Brit. Chem. Eng.*, 12, 75 (1967)
- 5) Chernyshev, V.N.: *Int. Chem. Eng.*, 6, 608 (1966)
- 6) DiLiddo, B.A. and T.J. Walsh: *Ind. Eng. Chem.*, 53, 801 (1961)
- 7) Doninger, J.E. and W.F. Stevens: *A. I. Ch. E. Journal*, 14, 591 (1968)
- 8) Foster, H.R. Jr., R.E. McKee and A.L. Babb: *Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop.*, 9, 272 (1970)
- 9) Gray, R.I. and J.W. Prados: *A. I. Ch. E. Journal*, 9, 211 (1963)
- 10) Jaswon, M.A. and W. Smith: *Proc. Royal Soc. (London)*, A 225, 226 (1954)
- 11) Johnson, J.D.A. and A. Talbot: *J. Chem. Soc.*, 1068 (1950)
- 12) Lapidus, L. and N.R. Amundson: *Ind. Eng. Chem.*, 42, 1071 (1950)
- 13) Lowe, J.T.: *Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop.*, 7, 362 (1968)
- 14) Marshall, W.R. Jr. and R.L. Pigford: "The Application of Differential Equations to Chemical Engineering Problems", Univ. of Delaware (1947)
- 15) 大沢: ケミカルエンジニアリング, 15, 454 (1970)
- 16) Otto, R.E. and L.E. Stout, Jr.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, No. 36, 57, 69 (1961)
- 17) Pollock, G.G. and A.I. Johnson: *Can. J. Chem. Eng.*, 47, 469 (1969)
- 18) Pollock, G.G. and A.I. Johnson: *ibid.*, 47, 565 (1969)
- 19) Pollock, G.G. and A.I. Johnson: *ibid.*, 48, 64 (1970)
- 20) 城塚, 村上: 化学工学, 30, 727 (1966)
- 21) 城塚, 村上: 同上, 31, 402 (1967)
- 22) 城塚, 村上: 同上, 31, 497 (1967)
- 23) 城塚, 村上: 同上, 32, 607 (1968)
- 24) 城塚, 村上, 曾根: 同上, 33, 809 (1969)
- 25) Souhrada, F., J. Landau and J. Prochazka: *Can. J. Chem. Eng.*, 48, 322 (1970)
- 26) Staffin, H.K. and J.C. Chu: *A. I. Ch. E. Journal*, 10, 98 (1964)
- 27) 高松, 中西: 化学工学, 27, 932 (1963)
- 28) Watjen, J.W. and R.M. Hubbard: *A. I. Ch. E. Journal*, 9, 614 (1963)
- 29) 矢野, 荒谷: 制御工学, 13, 652 (1969)
- 30) 矢野, 和田, 荒谷: 同上, 8, 71 (1964)

原子力における抽出装置*

—特に迅速抽出機について—

武田 宏**・三代 真彰**
山本 寛**

1. はじめに

原子力の分野において抽出操作は鉱石からのウラン、トリウム精錬、原子炉の使用済核燃料からのトリウム、ウラン、プルトニウムの分離回収、原子炉で製造するウラン-237や超ウラン元素の分離精製、特定の核分裂生成物の他の核分裂生成物からの分離など各種の分離工程に使用されているが、工業的規模で行なわれているのは核燃料物質であるウラン、トリウムの精錬や、使用済燃料からのウラン、プルトニウムなどの回収分離である。

このうち装置の面からみて最も問題となるのは再処理工程に含まれる抽出操作であるので、ここではこの問題に焦点を絞って述べることにする。再処理工程で現用されている抽出装置はパルスカラム、ミキサーセトラがそのすべてであるが、これらについてはすでに本協会誌にも述べられているから、今回は現在開発が進められている迅速抽出機だけについてその開発の状況を述べるとどめる。

2. 再処理における迅速抽出の必要性

原子炉から排出される使用済燃料の再処理に含まれる抽出工程では硝酸に溶解した燃料溶液をドデカン、クロ

* 昭和46年3月3日受理

** Hiroshi Takeda, Masaaki Mishiro and Yutaka Yamamoto
東京大学工学部原子力工学科