Concept and Theory of Separation for Recycling

by Atushi NANASAWA¹ and Kunihiko TAKEDA¹

1. Shibaura Institute of Technology, Minato-ku, Tokyo 108

The separation unit, separation factor, total flow in separation system, energy requirement, and second wastes by separation for recycling system have been studied theoretically. Theoretical equations of separation unit, and height of separation unit were introduced and it was pointed that the total flow in the separation unit was proportional inversely to the separation factor by two powers and the amount of the second waste materials is proportional to the factor. The second waste materials and the energy consumption should be considered in the aspect of the environmental assessment. The physical term and the social term have to be divided for the recycling separation more definitely than for the ordinal separation process.

KEY WORDS : Separation, Separation Unit, Total Flow, Recycling, Separation Energy, Cascade

1. は じ め に

化学プロセスの中で消費されるエネルギーの約 75 % が分離に関するものであるという試算があるように、一般的な化学プロセスにおいても分離工学の寄与は格段に大きい¹⁾。リサイクリング分野ではその比率はさらに大きく分離工学の重要性もより高いとできる。すなわち、天然界から産出される鉱物、有機物などの資源は必ずしもそのままの形で人間に有用なものとは限らないが、リサイクルの場合には、すでに人間が使用したものが対象であり、したがって平均的には自然から得られる物質と比較して化学反応などを経ずして有用である場合が多いといえるからである。

このようにリサイクリング分野での分離工学の重要性は極めて高いにもかかわらず分離工学が本来、天然界から得られる資源を対象物として理論体系、技術体系を構築してきたので、その歴史的な意味をも包含しているといえよう。すなわち、分離理論は、①分離ユニットの構成、②分離ユニットの重畳状態、③分離の理論エネルギーを主要な柱として極めて理論的に整備され、いわば“見事な理論体系”を有しているものである。さらに一般的な分離の研究の多くは具体的な分離プロセスの設計、問題点の解決などを主眼にしており、詳細で精緻な整理がなされている²⁾。その反面、多くの理論や装置上の工夫は天然資源から精製品を取得するための現象論的な方向に進み、必ずしも体系化された分離理論を考慮したものでないことも多い。今日の社会において物質やエネルギーのリサイクルの促進が急がれていることからリサイクルの分離工学が社会の環境を守るという倫理上の課題と密接に関係し、これまでの金属精錬工業、石油精製工業などのように工業的

に成立するものであるか、さらに経済的に有利なものであるかを基本的な視点として進められてきたアプローチと異なる。

本論文では天然界の資源を主たる対象とし、鉱物学、金属精錬、化学工業、電子工業などのなかで進歩してきた分離理論とリサイクルの関係について、分離ユニットの重畳形状と分離エネルギーを中心として研究した結果を述べる。特に、分離操作が一定以上の速度を求められたときの状態について考察した。また天然資源からの分離プロセスにおいてもリサイクルプロセスでの分離と類似のものもある。しかし、リサイクルプロセスにおける分離の位置づけが天然資源からの分離や化学プロセスや半導体製造などの分離プロセスと基本的な要請で異なることもあり、特に本論ではその差を論じることを目的としているので、相互の差を強調して論じた。

2. 理 論

2・1 リサイクルプロセスの分離ユニット

サイズ分離や浮遊選鉱、磁氣的、電氣的分離などの物理的分離、および化学平衡や反応を応用した分離は、その最小単位を1つの分離ユニットに還元することができる³⁾。分離ユニットでは準静的な操作のときに、静的な分離操作で得られる“理想的分離係数”に比例した係数を得ることができるものとして定義される。たとえば精緻に設計され純粋な物質を扱う蒸留操作の場合には、1つの棚段でほぼ完全な気液平衡を達成することができるので数少ない可視的な分離ユニットである。しかし、工業的な分離の場合、分離ユニットは一般的に不完全であり、さらに有限の時間で分離操作が行われるので、分離ユニットで達成される分離係数は無限時間経過後の分離係数に対して低い値を示す。

しかし、実験的に分離係数を求めるときには、無限時間経過した状態での係数を測定するので、実際の分離操作では分離係数が時間の関数になり、分離結果を予測するうえで不都合になる。

この問題を回避するためには、分離係数を物理的に意味の明確

* 1997年6月30日受付 11月27日受理

1. 正会員 芝浦工業大学大学院 地域環境システム

2. 正会員 工博 芝浦工業大学教授 工学部材料工学科

[著者連絡先] FAX 03-5476-3161 (芝浦工大・材料)

キーワード: 分離, 分離ユニット, 総流量, リサイクル, 分離エネルギー, カスケード

Fig. 1 Kinetics model of separation unit.

な性能とし、分離操作条件や時間とは無関係な定義でその概念を定め、分離ユニットの大きさを分離操作条件や時間の関数とすることが適切である⁴⁾。

分離されるものが固体であれ、液体、気体であれ、分離装置内を流れる物質を2つに分け、装置内を流れるすべての物質の平均の速度で移動する一群と、ある特定の要因で遅れながら移動するものを考える⁵⁾。

Fig. 1は分離装置内のある部分(分離ユニット)の物質の基本的な動きを示したもので、 z は空間の位置、 M_j は“遅れ要因”(j)による遅れ時間(t_j)の間に平均の速度(v)で動く物質群が移動する距離である。たとえば、吸着を応用した分離方法では吸着塔の中を平均速度で移動する物質と吸着という遅れ要素で遅れる物質との区別を示し、ふるいでの分別では、ふるいの目を通して下に落ちるものとふるいの上を移動する物質群に相当する。したがって、ここでいう“物質”とは分子の場合もあるし目に見えるような大きなものの場合もある。ここでふるいを例に取り分離係数と分離ユニットの大きさについての概念を示す。ふるいでは分離される物質の粒径分布に対してある網目の大きさ(開口寸法)を持ったふるいの通過率を無限時間経過した後の状態で表す。たとえば横軸に粒径、縦軸に通過率で示される典型的な図がそれに相当する。しかしふるいによる分離操作で有限の時間内ではふるいの目より小さいものもある確率でふるいの上に残る。見かけの分離係数が分離速度に依存するが、Fig. 1の取り扱いは速度による見かけ上の分離係数の変化を分離ユニットの大きさの変化としてとらえることを意味している。

ふるいの分離係数はふるいの開口寸法と分離対象の物質の寸法によって数学的に求められる係数として定義されることが望ましく、このような定義を用いれば分離係数はふるいや吸着剤などの分離機能材の機能に依存する値を得ることができる。さて、平均速度と遅れ時間との関係から、遅れ距離 M_j は式(1)で示される。

$$M_j = vt_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

また分離ユニット内を流れる全体の物質の数(N_t)に対して、要因jで遅れる。

$$\xi_j \equiv N_j/N_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

で示される⁶⁾。結局、分離ユニットの流れ方向の大きさは分率と遅れ距離の積となるので、

$$H_j = \xi_j \cdot M_j \quad \dots\dots\dots (3)$$

で示される。分離ユニット内で進む反応が擬一次反応と見なしうる場合には、遅れ要因jによる遅れ時間は反応速度定数(k)の逆数で示されるので、式(3)で示される分離ユニットの大きさは速度定数の逆数で示される。ここでいう「速度定数」とは化学反応の速度定数、拡散現象に基づく遅れ要因の速度、ふるいなどによるふるい面を通過するある固まりの通過時間などに基づくものなど制限はない。

Fig. 2 Individual operation in separation unit.

式(1)から式(3)で導いた分離ユニットの高さ(分離ユニットはその高さで面積で体積が決まるが、まず高さを求める)の定義は、蒸留、吸収、クロマトグラフィーなどの多くの分離方法で定義される分離ユニットの流れ方向の大きさと本質的に同じであるが、特定の分離方法で使用される定数などは含まれていない。また、化学工学では分離工学理論の普及が十分ではなくいわゆる「段階プロセス」と「微分プロセス」に分類されることがあるが、上記の理論展開で示されたように、分離工学は本来そこに存在する分子、成型品の固まりなどあらゆるものを同様に扱う工学である。そのため、上式は分離装置の種類や原理によらない。

上記に示した分離ユニットはそれぞれ1つの装置として独立しているときもあるが、多くの分離装置では装置内に複数の可視的あるいは仮想的分離ユニットを包含している。

分離ユニットで実現する分離係数は一般的に大きい方が好ましいと考えられている。たとえば、ある分離ユニットにおいて、分離対象の物質AとBがほぼ完全に分離されれば、好ましい分離ユニットと評価される。しかし、基礎研究で実施される分離システムのように単純で繰り返し分離が必要ないときには分離ユニットの分離係数が大きい方がよいが、リサイクルプロセスのように多種類の物質を扱うときには、1回の分離で目的が達せられる場合は少ない。

分離ユニットの単位操作をさらに分解すると、Fig. 2に示したように、供給、分離、洗浄、脱離の4つの素過程から構成されている。

分離ユニットに混合物を供給するときにはリサイクルする対象物質以外の物質を混入しないと仮定する。また、分離対象物質AおよびBを分離ユニットから脱離するときには脱離物質としてCおよびDを使用し、A、Bの量に対するC、Dの比率を a 、 b の量とする。C、Dは物質のときもあるし、分離プロセスによってはエネルギーである場合もある。ここではリサイクル分離プロセスを可能な限り統一的に扱うことを目的としているので、C、Dが物質であってもエネルギーであってもよいが、以下では物質として記述する。

リサイクル物質の分離によって新たに生じる物質の量 Q_T は、 i 成分の量を Q_i とすると次の簡単な関係によって表される。

$$Q_T = aQ_A + bQ_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

仮にリサイクルする物質の中で金属元素(A)のみを取り出し、有機材料(B)を捨てる方法を考えると、リサイクルによって生じる新たな廃棄材料の量は、式(4)にBを加えたものとなる。仮にBと比較してAが分離機能材に対してきわめて大きな親和性を有している場合には、分離係数は大きくなり好ましい分離ユニットと認識されるが、係数 a が大きいので分離ユニットの中に残存しているAを除去し、引き続きAとBの混合物を供給する準備に大きな負荷がかかる。この関係はリサイクルプロセスでの分離に限定されず、一般的分離に共通するものであるが、後に

述べるようにリサイクルプロセスの成立要件と特に深く関わっていることを指摘する。

C, Dが物質の場合にはこれらが新たな廃棄物にならないために、回収が必要とされるが、C, Dの回収操作も分離操作に他ならない。AとC, BとDの分離が蒸留などのようにエネルギーを使用し他の物質を加えない操作の場合には新たな廃棄物は発生しないが、エネルギーの回収を要する。また工業的によく用いられる水洗などの方法では、AとCの分離にさらに新たな廃棄物を生成することになる。結局、AとCの分離には新たな物質を用いないことが可能なプロセスでは、CおよびDの回収率を c , d とすると、リサイクル分離システムに供給される廃棄物の全体量に対する、リサイクル分離によって新たに発生した廃棄物量の合計の比率（これをリサイクル物質回収比（ γ_M ）と定義する）は、

$$\gamma_M = \frac{a(1-c)Q_A + (b(1-d)+1)Q_B}{Q_A + Q_B} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。係数 b は分離ユニットの分離のメカニズムや分離機能材の種類によって異なるので、一般的な関係を求めるのは困難であるが、特定分離機能材で用い、狭い範囲の分離係数の場合には分離係数と係数 b の間に簡単な比例関係、

$$b = e\alpha \quad \dots\dots\dots (6)$$

が仮定できる。係数 b は分離ユニットにおいて親和性が高い物質を分離ユニットから取り出す場合の係数であるから、分離係数 α が高くなればなるほど大きくなる。この係数の理論的取り扱いも研究されているが、あまり成功していない⁷⁾。その理由は α が分離機能材、あるいは分離ユニットの稼働原理によって異なる値をとるからであり、本論文でも詳述を避ける。一方、式(5)の係数 a は物質Aが分離ユニットに対して滞留性（分離ユニットの稼働原理が化学的であるときには親和性や反応性であり、サイズ分離等の場合には分離ユニットから脱離しやすいことを示す）が小さいことを仮定しているの、多くの場合、分離ユニットの中にある分離機能に無関係な体積（デッドボリューム）などの物理的要因に支配されることが多い。したがって、分離係数とは独立と考えて整理することができる。また、分離ユニットからA, Bを効率的に取り出すためにはC, DはA, Bと類似した性質を有していなければならない、その結果、A, BとC, Dを分離するとき分離負荷が新たにかかる結果をもたらす。すなわち少なくとも b と d の間には反比例の関係が存在する。

結局、 a , c は独立の値を取りうるとすると、リサイクル物質回収比は、

$$\gamma_M = \frac{a(1-c)Q_A + \left(e\alpha \left(1 - \frac{f}{e\alpha}\right)Q_B\right)}{Q_A + Q_B} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。たとえば $\alpha \gg 1$, $a \ll b$ の場合には γ_M は近似的に分離係数の1次に比例するので、分離係数が高いほど分離装置から排出される物質の量が增大する結果となる。すなわち見かけ上は“好ましい分離ユニット”を用いたにもかかわらず、分離操作で新たな廃棄物を排出することを避けることが重要なリサイクルプロセスにおける分離の場合には優れた分離方法とはいえない。

2・2 リサイクルプロセスの分離ユニットの総流量

分離は1つの分離ユニットですべての目的を達成するのは困難であるので、複数の分離ユニットを組み合わせ、目的にあったシステムを組み立てる必要がある。

混合物から特定の元素や化合物を取り出すための典型的な分離システムは、Fig. 3に示すような階段状の分離システムである。図の最上段に示した分離ユニットで分離された分離流は、次の段

Fig. 3 Separation system for recovering highly purified materials.

の分離ユニットに供給され、さらにその段の分離流が3段目の分離ユニットに供給される。

Fig. 3でA1, A2…は分離流の名称、 α は分離流間の分離係数であり、1つの分離ユニットで分離された物質は次の分離ユニットに効率的に移動する。一見、能率のよさそうに見えるこのシステムは、リサイクルに不利なシステムの1つと考えられる。仮に1つの分離ユニットで濃縮側と減損側の流れの量が一定であるとする、一段の分離の後、濃縮側（分離流の片方をいい、資源の分離などの場合は“取得したい物質の流れ”をいうが、リサイクルプロセスの分離の場合には“取得したい方”が存在しない。）の流量は半分になるので、たとえば6段の分離システムを組むと、最終的に分離した濃縮流の量は全体の1.5%にしかない。

リサイクルを行う主な目的は、廃棄物などの使用済みの製品を資源と見なしたり、環境的視点から社会に放出することを防がなくてはならないことから、その大半を回収することを目的としていることが多い。その点では低品位鉱石から少量の特定の元素を取り出し、他のものは捨てる場合とは根本的に異なる。もとよりリサイクルプロセスにおいても希少資源を少量回収する場合もあるが、回収に大量の石油エネルギーを使用し、回収対象となる製品より多くの物質を回収によって発生するプロセスは成立しにくい。金属資源を回収するためにその数倍の有機材料資源を消費する場合、(7)式の“リサイクル物質回収比”に加えて、“等資源消費”指数のような概念を入れる必要がある。

分離ユニットの組み合わせを一般化して数学的に取り扱うことにより、分離装置に供給した物質の大半を回収利用するシステムとしては、どのような分離システムが適当かを考察する。分離ユニットの一般的な組み合わせとその流れおよび組成をFig. 4に示した。

図で F は分離ユニットへの供給流、 P は濃縮流、 W は減損流、 z , y , x はそれぞれの分離流の濃縮成分のモル分率、 α は分離係数、 β は頭濃縮係数であり、添え字 i は分離ユニットの位置を示す。このような一般化された分離システムの第 $i+1$ 段の分離流は分離システムの外側で観測される濃縮流(P)の単位量に対して次式で表される⁸⁾。

$$\frac{W_{i+1}}{P} = \frac{1}{\beta-1} [y_p(1-\beta^{i-N}) + (1-y_p)\beta(\beta^{N-i}-1)] \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 N は総段数を示す。

式(8)を数値的に計算すると、分離装置内での混合を最小に抑

Fig. 4 General flow chart of separation unit cascade.

Fig. 5 Shape of separation process.

制したときの分離装置の外形の列の形は組成によって異なるがその一例を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 は 2 % の品位の原料を分離プロセスに供給し、回収率 50 % で 1 % の品位のものを廃棄し、99 % の純度のものと製品として取り出すときの分離装置の外形と示している。天然物からの分離取得の場合は経済的理由から原料の中に含まれる取り出したい成分や物質のすべてを取り出さず、経済的に最適な濃度で廃棄物とする場合が多いが、リサイクルの場合には廃棄物の減量という意味でより厳しい回収率が求められることもある。

一方、Fig. 5 での分離の労力の尺度（価値関数の和： V_{al} ）は次式に基づいて計算することができる。

$$V_{al} = \left((2x_p - 1) \ln \frac{x_p}{1 - x_p} \right) P + \left((2x_w - 1) \ln \frac{x_w}{1 - x_w} \right) W - \left((2x_f - 1) \ln \frac{x_f}{1 - x_f} \right) F \quad (9)$$

価値関数の和 V_{al} は濃縮流、減損流および供給流の濃縮成分濃度がそれぞれ、 x_p 、 x_w 、 x_f のときの労力の尺度であるから、この値を比較することにより特定の分離の困難さを表すことができる。Fig. 5 の組成では V_{al} は 75.2 であるが、廃棄物品位を 0.2 % に変更すると V_{al} は 132.9 になり、分離の労力は相対的に約 2 倍になることがわかる。

Fig. 6 Total flow of recycling separation system.

以上のように分離装置の外形は供給流、濃縮流および減損流の濃度によってさまざまな形を取るが、天然界の資源を分離精製するプロセスは減損側の負荷（消費されるエネルギーおよび物質の流量など）が濃縮側の負荷よりも大きい場合が多い。これが、分離プロセスにおいて回収側のエネルギー損失が大きく、廃液や廃材の発生する原因になっている。減損側の負荷を減少させるためには、分離効率を犠牲にする必要がある。ここでは具体的な例や式を挙げることはできないが、たとえば、Fig. 4 の一般化した分離ユニットの組み合わせにおいて、システム内の再混合をより積極的に認めれば廃液量を減少させるための理論的計算が可能である。しかし、廃液量や減損側の負荷を提言させるためには一般的に分離装置が巨大になり、工業的には採用されない場合が多い。

分離ユニットの分離係数も考慮に入れて分離装置内総流量を定量的に示すと、

$$\Sigma L = f \cdot V_{al} \quad (10)$$

でありここで f は分離ユニットの物理的性能に関する頭分離係数 β によって決まるものであり、

$$f = \frac{\beta + 1}{(\beta - 1) \ln \beta} \quad (11)$$

と書ける。しかし式(10)で示す総流量 ΣL は Fig. 6 に示すリサイクル分離系の最初の分離装置(I)の総流量に過ぎず、リサイクル分離のシステム全体の流量は、添字 j を分離システム内の j 番目の分離装置として、

$$(\Sigma L)_{\text{Recycle}} = \Sigma (\Sigma L_j) \quad (12)$$

で与えられる。

すなわち、Fig. 6 では装置全体の流れを簡単に示すために脱離材は D で示したが、分離装置(I)で分離された目的物 A および B は脱離材 D との分離を分離装置(II)および(III)で行う。さらに、2 種の脱離材はプラント内の分離装置(IV)および(V)で精製された後、再び装置内で再利用される。さまざまな分離システムにおいては 5 つの分離装置の一部を割愛できるものもあるし、反対により複雑な分離システムになる分離例もある。

また、通常の分離においても分離装置内総流量は式(9)で示されるが、天然物からの分離の現在までの分離理論では分離対象物をいかに効率的に分離するかということを主眼に理論研究が進んできており、分離装置内の総流量や分離装置から環境に排出される溶液などの廃棄物の負荷を求める概念は個別の対策として工業的に処理されており、理論体系や概念としては発達していない。しかし、リサイクルプロセスにおける分離ではもともと資源回収や環境負荷を問題にしているのであるから、Fig. 6 のような回収系をも含めた総流量理論と概念を構築する必要がある。この関係

は次の分離エネルギーとの関係とあわせて総合的に考察することが必要である。

2・3 リサイクルプロセスの分離エネルギー

分離の理論的エネルギーは分離理論の体系化の中で Cohen, King らによって整理された⁹⁾。その後の分離理論は彼らの理論を再整理したり、解説したりする例が多く目的物をいかに効率的に分離するかという点に絞られている。リサイクルにおける分離エネルギーについては、リサイクルというプロセスの社会的意義から、そこに使用される分離エネルギーも極小にする考え方が必要とされる。たとえば分離装置に供給される物質の大半を回収し、そこに投入される分離エネルギーも回収できることが望ましい。

従来の分離理論の取り扱いでは分離ユニットの操作が準静的に行われた場合は、分離のエネルギーは最小仕事 (E_{mwork}) になる。たとえば、モル分率 x_A である 2 成分の気体を純粋な状態での 2 種の流れに分ける分離ユニットで消費される分離エントロピー (ΔS) は、

$$\Delta S = -R(x_A \ln x_A + (1-x_A) \ln (1-x_A)) \quad \cdots \cdots (13)$$

とできる。ここで、 R は気体定数である。

しかし、準静的な分離は分離の時間がかかりすぎて工業的な意味がない。現実の分離プロセスにおける最小仕事は分離エネルギー全体に対して僅かな割合でしかなく、プロセスの支配的なエネルギーは、①分離ユニット内で A, B 2 つの物質を接触させるエネルギー、②分離システムの還流エネルギー、の 2 つである。分離対象となる 2 つの物質を接触させるエネルギーは液体を送るポンプ動力、ベルトコンベヤの動力などが主なものであり、その本質的な意味は、「分離すべき物質を Fig. 6 にあるような分離ユニットに送り込み、それによって 2 つの物質を接触させ、さらに接触後に分離する」一連の操作に要する動力である。蒸留などの場合には蒸留塔の圧力損失によるポンプの動力がこれに相当するし、ふるいの役目をするベルトコンベヤ上に乗せられた物質の分離の場合にはベルトコンベヤの動力が分離対象となる材料を新しいふるいの上に移動する動力として使われることになる。いずれにしても、分離物質が分離ユニットに連続的に運搬されなければ分離ができないのは当然である。

移動のエネルギー (E_{move}) は分離対象物が発生する場所からの移動 (E_r)、工場内の移動 (E_f) および分離装置全体の移動 (E_p) の 3 つに分かれる。

$$E_{move} = E_r + E_f + E_p \quad \cdots \cdots (14)$$

この中で、 E_r はリサイクル分離の場合に特に重要であり、使用済みの PET ボトルを回収しようとする、原油を輸送して工場内に運ぶのと比較して、格段の移動エネルギーを要することが指摘されている。 E_f は粉碎した固体や液体を輸送することが多い天然物の移動に対して、雑多な形状のものを取り扱うリサイクルでは、天然物からの分離に対して大きくなる場合がある。

以上の第 1 項、第 2 項は分離プロセスごとに異なるものであるが、それに対して第 3 項は分離の理論項であり、1 つの分離ユニットを通過する物質の単位エネルギー e_{su} と分離ユニットの総流量 ΣL の積で示される。

$$E_p = e_{su} \cdot \Sigma L \quad \cdots \cdots (15)$$

これに対して、還流エネルギー (E_R) は、分離とはより高い純度の組成のものと連続的に接触させることである、ということから必要となり、接触させるためには異なる状態に置かなければならないからである。蒸留においては気液の接触を要するのでリボイラーのスチームとクーラーの冷却エネルギーになる。多くの分離プロセスでこの還流エネルギーが分離エネルギーの大半を占める。分離ユニットの分離係数を α とし、分離装置の外形が箱

形の場合の最低必要な還流エネルギーは次式で示される¹⁰⁾。

$$E_R = \frac{x_p - x_f}{(\alpha - 1)x_f} \cdot \lambda_R \quad \cdots \cdots (16)$$

ここで λ_R は異なる状態間の物質の転換エネルギーを示す。

このように工学的意味における分離エネルギーは移動のエネルギーと還流のエネルギーで構成されるが、Fig. 6 に示すようにリサイクル分離では分離装置(I)におけるエネルギーのみに注目することはできない。したがってリサイクル分離装置内総流量に相当する移動エネルギーと回収系の還流エネルギーを考慮することを要する¹¹⁾。分離装置全体や分離装置の一部が環境温度と異なる場合や定常的な分離操作が困難で常に温度変化を伴う場合には、昇温や降温に伴う熱損失 (E_{tran}) や放熱による損失 (E_{div}) がある。

$$E_{Heat} = E_{tran} + E_{div} \quad \cdots \cdots (17)$$

プロセスの温度を決める要因は反応速度を上昇させたり、分離物質の劣化を防止するという場合もあるし、また温度差そのものが分離ユニットの分離係数を変化させ、それを分離原理とするプロセスもある。また、放熱による損失もプロセスの形状や特徴によって大きな割合を占めるときもある。

分離プロセスにおけるエネルギーは 4 種類の和として表現できる。

$$E_{total} = E_{mwork} + E_{move} + E_R + E_{Heat} \quad \cdots \cdots (18)$$

このように分離プロセスにおけるエネルギー消費は物質流れと同様に分離プロセスの優劣を決める因子であり、分離エネルギーを回収し、可能な限り可逆的に分離を行うことが必要になる。特にリサイクルにおける分離においては、分離に要するエネルギーはリサイクル自体の価値を支配することもあるし、リサイクルで回収する物質をエネルギー源として再利用するときには、リサイクルで使用するエネルギーが、回収されたもののエネルギーより小さいことを要求されるのはいうまでもない。したがって、リサイクルエネルギー回収比 (γ_Z) の定義と理論研究で進める必要がある。

3. 考 察

分離システムの基本的な現象の一つに、分離の負荷は、式(10)に示したように①分離ユニットが有する物理的要請 (関数 f)、と②分離したものの価値が決める社会的要素 (関数 V_{al}) に分割できることは大変興味のあることである¹²⁾。

分離システムの最適設計は、分離ユニットの物理的性能と、回収製品濃度および廃棄物量で決定される、リサイクルプロセスの分離システムの場合には、従来の分離工業のように「コスト最適」「最小分離装置」という要請よりも、「リサイクルに伴うエネルギー最小」または「廃棄物処理の結果生じる廃棄物の量を最小にする」という別の要請が発生する。その結果、分離装置全体の大きさは、式(10)では決めることができず、③エネルギー最小、あるいは④廃棄物最小の条件を付加する必要が生じよう。

リサイクルプロセスの分離における分離エネルギーを論じる場合には分離エネルギー回収系の概念を入れる必要があるが、これは別の機会に示すことにする¹³⁾。天然物を分離するときを考えられる分離の最適値はリサイクルプロセスでの分離でそのまま適用することに慎重である必要があることを指摘したい。特に社会的要請で決まる項 (V_{al}) が天然物からの分離とリサイクル分離で異なることは明らかである。また、物理的要因であり分離係数に依存する項 (f) は分離の性能であるから天然物の分離とリサイクルプロセスでの分離では差がないと考えられるが、先に示したように分離装置内の流量は分離係数の 2 乗に反比例する項と、

リサイクル分離に特有の分離係数に比例する項とを考慮する必要があるので、適切な分離装置を選択するうえでもリサイクル分離が天然物分離と本質的に異なることが考えられよう。リサイクルプロセスにおける分離は分離理論、概念および設計などの多くの面でこれまで分離効率重視で進んできたものと異なることは明らかであり、その一つ一つが今後解析されていくと考えられる。

引用文献

- 1) In discussion at 7th International Symposium of Separation Technology, Knoxville, Tenn., (1990)
- 2) 具体的な記述で整理されている分離工学の優れた著書は多いが、たとえば、古崎新太郎：分離精製工学入門，学会出版センター，(1989)，：Karger, B. L., Snyder, L. R. and Horvath, C. : An Introduction to Separation Science, (1973), : John Wiley and Sons, (New York) : Rousseau, R. W. : Handbook of Separation Process Technology, (1987), : John Wiley and Sons (New York) などがある。
- 3) Cohen, K. : Separation Process, (1947), McGraw-Hill Book Company (New York)
- 4) 武田邦彦・市原 格・渡辺利典・小花和平一郎：化学工学会誌，Vol. 15, No. 3, p. 559—566, (1989)
- 5) Takeda, K. and Morita, K. : Separation Science and Technology, Vol. 31, No. 19, p. 2655—2670, (1996)
- 6) Giddings, C. : Theory of Chromatography, (1982), Marcel Dekker, (New York)
- 7) King, C. J. : Separation Process, (1971), McGraw-Hill Book Company, (New York)
- 8) 武田邦彦他編：分離科学ハンドブック，(1991)，共立出版
- 9) 武田邦彦：高純度化分離技術，(1997)，フジテクノシステム
- 10) Nishigaki, Y., Onitsuka, H. and Takeda, K. : J. Nuclear Science and Technology, Vol. 89, p. 372—380, (1990)
- 11) Miyake, T., Takeda, K. and Obanawa, H. : Separation Science and Technology, Vol. 22, p. 963—971, (1987)
- 12) 武田邦彦：分離のしくみ，(1992)，共立出版
- 13) Miyake, T., Onitsuka, H., Obanawa, H. and Takeda, K. : Reactive Polymers, Vol. 87, No. 5, p. 63—72, (1987)