吸脱着による超多段精密分離の理論および工業における 反応を伴う分離ユニットと界面形成[†]

武田邦彦・市原 格・渡辺利典・小花和平一郎

旭化成工業(株) ウラン濃縮研究所^{††}

吸脱着による超多段精密分離の分離ユニットとしては、吸脱着反応だけではなく溶液内の化学反応を伴う分離ユニットが望ましい。また、超多段精密分離には置換型界面の形成が必要であり、さらに工業的規模の分離を効率良く行うためには三界面を置換型に維持することが必要である。置換界面は吸着剤の吸着選択性だけでは維持し得ず、界面での反応が必要であることを明らかにし、これらの平衡反応の定量的な検討のために付加ポテンシャル強度 4μ を導入し、炭素、ウランの同位体分離について理論計算、および実験により検討した。また付加子について考察し炭素、ホウ素の同位体分離においてはプロトン、ウラン同位体分離では電子、希土類元素分離では EDTA 等の配位子が分離ユニット内の化学反応を行う分離付加子であること、さらにそれぞれの場合の界面形成反応での付加子を明らかにした。

緒 言

吸脱着反応による分離操作は分離能力の高い吸着剤を用いて 1 段の操作で分離を行うか、または 10 段から 20 段程度の分離操作で高純度の製品を得るのが一般的である^{3,13)}。一方、最近では分離し難い物質を 1 万段以上、ウラン同位体分離の場合には数百万段の分離操作を行う超多段精密分離の技術が生まれた^{1,5,6,12)}。著者らは炭素¹⁴⁾、ウランなどの同位体分離^{9,11)}、クレゾール、キシレン¹⁰⁾などの異性体分離、および希土類元素の分離¹⁷⁾の研究を通じて、化学的性質の類似した物質の分離に超多段精密分離の技術を用いることが有効であることを見出し、その体系化を試みてきた。

本報では吸着剤自体に分離能力が無くても、反応を伴う分離ユニットを設定することによって分離が可能であることを述べ、置換型界面の形成条件を満たすための分離ユニットの要件、さらに付加平衡反応の制御により置換型界面の条件が成立することを示す。その結果、工業的な精密分離に新たな応用を与える可能性を得た。

1. 超多段精密分離に使用する分離ユニット

吸着分離は供給、吸着、分離、脱離の 4 つの単位操作により構成され、超多段精密分離はこの操作を数万段から数百万段繰り返す方法である。超多段精密分離におい

てこの 4 つの操作を行う分離ユニットとしては、次に示す 2 種類のものが考えられる。

1.1 溶液内で反応が起こらない分離ユニット

吸着剤に分離能力がある場合には、吸脱着反応だけで分離ユニットが形成される。その例を Fig. 1(a)~(c) に示す。(a) ではキレート基を持つ吸着剤に希土類元素 (Nd^{3+} , Pr^{3+}) を含む溶液が接した結果、キレート化合物を形成し易い Nd^{3+} が吸着剤に吸着することで分離される¹⁷⁾。(b) はイオン交換体の選択性を利用する分離ユニット⁴⁾。(c) は分子のサイズの違いを利用してキシレン異性体を分離する分離ユニットである¹⁰⁾。このように吸着剤が分離能力を持つ場合には、分離ユニットの構成は単純であるが、分離物質に対して選択性を有する吸着剤が必要である。

1.2 溶液内で反応が起こる分離ユニット

溶液内で化学反応を行わせ、吸脱着反応によって二相間に分配するという 2 種の反応の組み合わせで分離ユニットを形成することができる。この分離ユニットの概念を Fig. 2 に示す。 A_1 , A_2 は分離物質であり、それに“付加子” X を付加させる反応を行う。吸着剤には A_1 , A_2 が区別されず吸着するが D_1 , D_2 は吸着しない。ここで X が A_2 よりも A_1 に付加し易いとなると、吸着剤中には A_2 、溶液中には D_1 が富化し、その結果二相間で A_1 と A_2 が分離される。この例を Fig. 3 に示す。(a) は炭素同位体の場合で、 HCO_3^- に H^+ が付加する際に ^{13}C よりも ^{12}C に付加し易いため、溶液中には ^{12}C が残り、吸着剤中には ^{13}C が多くなる。(b) は電子の付加反応の差を利用し

[†] 1988年10月3日受理

^{††} 〒883 日向市竹島町1-1

Fig. 1 Examples of separation unit without chemical reactions in solution applied to various materials

Fig. 2 Concept of separation unit which includes chemical reactions in solution

たウラン同位体の分離ユニット, (c)は H^+ 付加の差を利用したホウ素同位体の分離ユニット¹⁹⁾, (d)は希土類元素(Nd^{3+} , Pr^{3+})の分離ユニットであり, 付加子(図中のL)はエチレンジアミン4酢酸(EDTA)である. 性質が類似しているために適当な吸着剤が存在しない場合でも, このように反応を伴うことによって分離ユニットを形成することができる.

2. 超多段精密分離の平衡論¹⁸⁾

平衡反応を記述する方法は一般に知られているが, 後述する理由から反応を伴う分離ユニットでの平衡反応式としてはEq. (1)が適当である.

ここでAはアクセプター, Xは付加子, Dはドナー, ν は付加数である. Eq. (1)において化学ポテンシャル変化は標準化学ポテンシャル μ° , 活量 a を用いて

Fig. 3 Various kinds of separation unit which include chemical reactions in solution (L^{4-} is ethylene diamine tetra acetic acid)

$$\begin{aligned} \mu_A^\circ + RT \ln a_A + \nu(\mu_X^\circ + RT \ln a_X) \\ = \mu_D^\circ + RT \ln a_D \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができ, これを変形すると

$$\begin{aligned} -RT \ln a_X = (\mu_X^\circ - (\mu_D^\circ - \mu_A^\circ)/\nu) \\ + (RT/\nu) \ln (a_A/a_D) \end{aligned} \quad (3)$$

を得る. ここで, 右辺第1項は付加反応当たりの反応種の標準化学ポテンシャルの差であり, 反応によって一定値をとるので, これを標準付加ポテンシャル強度 $\Delta\mu_{A/D}^\circ$ として

$$\Delta\mu_{A/D}^\circ \equiv \mu_X^\circ - (\mu_D^\circ - \mu_A^\circ)/\nu \quad (4)$$

と定義する. また, 付加子Xの化学ポテンシャル μ_X は

$$\mu_X = \mu_X^\circ + RT \ln a_X \quad (5)$$

であり, 付加子Xの標準状態との化学ポテンシャル差を付加ポテンシャル強度 $\Delta\mu_X$ としてEq. (6)で定義する.

$$\Delta\mu_X \equiv \mu_X^\circ - \mu_X = -RT \ln a_X \quad (6)$$

Eq. (3), Eq. (4), Eq. (6)から

$$\Delta\mu_X = \Delta\mu_{A/D}^\circ + (RT/\nu) \ln (a_A/a_D) \quad (7)$$

を得る. Eq. (7)は付加反応(Eq. (1))でのA, Dの平衡量が付加子の活量で決まる $\Delta\mu_X$ と, 付加反応固有の $\Delta\mu^\circ$ で支配されることを示している. $\Delta\mu^\circ$ は分離ユニットを選

Fig. 4 Two types of boundary conditions for separation of rare earth elements
(a. elution type, b. displacement type)

定すると値が決まるので、A, Dの平衡量は付加子の活量 ($A\mu_X$) で変化することになる。したがって、1つの分離ユニットの分離係数はXによって決まり、また界面反応を支配する。

平衡反応を平衡定数 K で示した場合、一般的に多元多次の連立方程式を解く必要が生じ複雑となるが²⁾、Eq. (7)を用いると複数の平衡反応が共存する時も平衡関係が多元多次にならない¹⁸⁾。

3. 置換型超多段精密分離の形成因子

次に、超多段精密分離の分離システムについて検討する。分離システムとしては第1に分離を短時間でかつ自動的に行うために、分離ユニットが連続に構成された仮想的なものであること、第2に展開段数が大きいこと、分離物質の濃度が低下しない置換型の界面により形成された分離システムが必要である。Fig. 4に(a)溶離型と(b)置換型の模式図を示す。溶離型では分離物質の吸着帯と溶離剤帯が形成されるが、置換型では分離塔の下から順に、前方置換剤帯域、分離物質の吸着帯域、後方置換剤帯域および前方置換剤帯域が形成される。

置換型の界面は後方成分の吸着力が前方成分の吸着力より強い場合に形成されるのが一般的であり、前方置換剤、分離物質、後方置換剤の順で吸着力が強くなる。その場合、Fig. 4(b)の最も上の界面では、吸着力の強い後方置換剤を吸着力の弱い前方置換剤で置換するために、吸着反応とは異なる別の反応を介在させる必要がある。また、これと異なり下方の二界面において反応を介在させて界面を形成し、後方置換剤を前方置換剤に置換する際により吸着力の強い前方置換剤を用いる系も考えられ

Fig. 5 Profiles of addition potential strength and components in the separation column

る。Fig. 5に置換型の界面が成立する場合、化学反応の付加子に注目して付加ポテンシャル強度の変化の模式図を示す。化学反応の付加子の受容能力が最も大きい前方置換剤で最も高い付加ポテンシャル強度になり、分離物質、後方置換剤と帯域が変わる毎に付加ポテンシャル強度が低下する。この二界面では前方の吸着物質を化学反応により脱離するが、その時の生成物質が後方の吸着物質に対して適した選択性を有することが必要である。さらに後方置換剤を前方置換剤に置換する時には、この付加子では界面を形成できないので第2番目の付加子である吸着剤の吸着ポテンシャルによって界面を形成する。その結果、化学反応の付加ポテンシャル強度は上昇し、前方置換剤帯域が形成できる。

超多段精密分離の代表例およびその系における反応をTable 1に示す。ここで新たに分離ユニットを支配する『分離付加子』と、置換界面形成を支配する『界面形成付加子』の2種類を定義する。炭素同位体分離においてはプロトンが分離付加子であり、界面形成付加子はプロトンと吸着剤である。ウラン同位体分離の場合は分離付加子が電子で、界面形成付加子は電子と吸着剤であるが、反応の種類が多く、それだけ自由度が高いので界面形成は炭素同位体の場合より容易になる。

4. 実験

炭素同位体およびウラン同位体の分離における付加子および界面形成状態に関する実験およびその理論計算による検討を示す。

実験1：炭素同位体の分離実験は、直径10mm、高さ1

Table 1 Key reactions occurring in various separation systems

Materials	Chemical	A	X	D	Addend for separation reaction	Addend for boundary formation
	species					
Carbon isotopes	CO ₂	HCO ₃ ⁻	H ⁺	CO ₂ ·H ₂ O	H ⁺	H ⁺ , R ⁺
		HCO ₃ ⁻	R ⁺	HCO ₃ ⁻ ·R ⁺		
	HCN	CN ⁻	H ⁺	HCN	H ⁺	H ⁺ , R ⁺
		CN ⁻	R ⁺	CN ⁻ ·R ⁺		
Uranium isotopes	UCl ₄	UO ₂ ²⁺	e ⁻	U ⁴⁺	e ⁻	e ⁻ , R ⁺
		UO ₂ ²⁺	L ⁻	UO ₂ L _n ²⁻ⁿ		
		UO ₂ L _n ²⁻ⁿ	R ⁺	UO ₂ L _n ²⁻ⁿ ·R ⁺ _{2-n}		
Rare earth elements	RE	RE ³⁺	L ⁴⁻	RE ³⁺ ·L ⁴⁻	L ⁴⁻ (ex. EDTA)	L ⁴⁻ , H ⁺
		L ⁴⁻	H ⁺	L ⁴⁻ ·H ⁺ ₄		
		RE ³⁺	R ⁻	RE ³⁺ ·R ₃ ⁻		
Cresol isomers	Cresol isomer	CR ⁻	H ⁺	CR ⁻ ·H ⁺	H ⁺	H ⁺ , R ⁺
		CR ⁻	R ⁺	CR ⁻ ·R ⁺		
L : ligand for complex formation RE : rare earth elements EDTA : ethylene diamine tetra acetic acid R ⁺ : anion exchange group in adsorbent R ⁻ : cation exchange group in adsorbent CR ⁻ ·H ⁺ : cresol isomers						

mのジャケット付ガラス製充填塔に強塩基性アニオン交換体を充填し、上部より100mol/m³のNaOH水溶液を供給してアニオン交換体をOH⁻型とした。アニオン交換体としては架橋度(*m*-ジビニルベンゼン含量)が16重量%のトリメチルスチレンアンモニウムクロリドと*m*-ジビニルベンゼンのコポリマーを自製した。次に0.98MPa加圧下でCO₂を水に溶存させた液を塔上部から供給した。CO₂は圧縮ガスとしてポンペに充填されているものを使用した。この時CO₂がH⁺濃度の低い前方置換剤帯と接すると酸解離してHCO₃⁻となる。これがアニオン交換体に吸着して逐次HCO₃⁻の吸着帯が形成される。次に脱離剤として100mol/m³のHCl水溶液を供給する。この時吸着しているHCO₃⁻がH⁺と反応してCO₂の形となって脱離し、アニオン交換体がCl⁻型となる。HClの供給を続けることにより重炭酸吸着帯域が下方に移動し、その間に炭素同位体の分離が行われる。その後再び100mol/m³のNaOHによって、アニオン交換体をOH⁻型に再生する。温度は363K、展開液の空塔線速度は6.0m/hで行った。

実験2：ウラン同位体の分離実験は、炭素同位体と同様の装置および方法により、順にFeCl₃水溶液、ウラン水溶液、TiCl₃水溶液、FeCl₃水溶液を供給することにより行った。温度は378K、空塔線速度は6.0m/hであった。

これらの実験条件および得られた分離結果をまとめてTable 2に示す。またTables 3, 4に炭素同位体分離とウラン同位体分離の主要な反応の標準付加ポテンシャル強度を示す。Figs. 6, 7には、実験により得られた系内の付

Table 2 Experimental conditions for isotopes separation of carbon and uranium and isotopic ratio observed

	Carbon	Uranium
Front eluent	NaOH	FeCl ₃
Rear eluent	HCl	TiCl ₃
Separation addend	H ⁺	e ⁻
Adsorbent	Anion exchanger	Anion exchanger
Temperature [K]	363	378
Maximum Pressure [MPa]	2.0	2.0
Superficial velocity [m/h]	6.0	6.0
Isotopic ratio		
feed	1.177 × 10 ⁻²	0.725 × 10 ⁻²
F.B.*	1.084 × 10 ⁻²	0.715 × 10 ⁻²
R.B.**	1.258 × 10 ⁻²	0.735 × 10 ⁻²
* front boundary		
** rear boundary		

加ポテンシャル強度、分離物質の濃度と付加型反応式により得られた理論値の比較を示す。ここで理論計算は、充填塔内を分離ユニットに分割し、計算機で分離ユニットごとに逐次計算を行って多段のシミュレーションを行った^{14,18)}。Fig. 6は炭素同位体分離の場合であり、展開ステップによるH⁺の付加ポテンシャル強度および液相CO₂濃度を示した。CO₂の濃度分布は矩形となり、界面では付加ポテンシャル強度が大きく変化することが示されている。また、Fig. 7にはウラン同位体分離の電子の付加ポテンシャル強度およびウラン濃度の変化を示した。

Table 3 Standard addition potential strength of various reactions in the separation system for carbon isotopes

Reaction	$\Delta\mu^\circ$ [kJ/mol]	ν
$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	36.22	1.0
$\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^-$	58.94	1.0
$\text{OH}^- + \text{R}^+ \rightarrow \text{OH}^- \cdot \text{R}^+$	- 6.0	1.0
$\text{HCO}_3^- + \text{R}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^- \cdot \text{R}^+$	- 2.79	1.0
$\text{CO}_3^{2-} + 2\text{R}^+ \rightarrow \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{R}^+_2$	-15.23	2.0
$\text{OH}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	(79.86)	1.0

Table 4 Standard addition potential strength of various reactions in the separation system for uranium isotopes

Reaction	$\Delta\mu^\circ$ [kJ/mol]	ν
$\text{Ti}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{3+}$	12.1	1.0
$\text{Ti}^{4+} + [\text{O}]^{2-} \rightarrow \text{TiO}^{2+}$	(144.8)	1.0
$\text{U}^{6+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{U}^{4+}$	29.0	2.0
$\text{U}^{6+} + 2[\text{O}]^{2-} \rightarrow \text{UO}_2^{2+}$	(72.4)	2.0
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	84.8	1.0
$\text{Ti}^{3+} + \nu_1 \text{Cl}^- \rightarrow \text{TiCl}_{\nu_1}^{3-\nu_1}$	each value for $\nu^{(8)}$	ν_1
$\text{TiO}^{2+} + \nu_2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{TiOCl}_{\nu_2}^{2-\nu_2}$	"	ν_2
$\text{U}^{4+} + \nu_3 \text{Cl}^- \rightarrow \text{UCl}_{\nu_3}^{4-\nu_3}$	"	ν_3
$\text{UO}_2^{2+} + \nu_4 \text{Cl}^- \rightarrow \text{UO}_2\text{Cl}_{\nu_4}^{2-\nu_4}$	"	ν_4
$\text{Fe}^{2+} + \nu_5 \text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_{\nu_5}^{2-\nu_5}$	"	ν_5
$\text{Fe}^{3+} + \nu_6 \text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_{\nu_6}^{3-\nu_6}$	"	ν_6
$\text{UO}_2\text{Cl}_{\nu_8+2}^{\nu_8-2} + \nu_8 \cdot \text{R}^+ \rightarrow \text{UO}_2\text{Cl}_{\nu_8+2} \cdot \text{R}_{\nu_8}$	2.1	2.2
$\text{FeCl}_{\nu_7+3}^{\nu_7-3} + \nu_7 \cdot \text{R}^+ \rightarrow \text{FeCl}_{\nu_7+3} \cdot \text{R}_{\nu_7}$	3.5	1.3

系内の付加ポテンシャル強度は、炭素同位体分離の場合には H^+ 活量を測定することにより求めた。ウラン同位体分離の場合には溶出液の液電位を測定して電子の付加ポテンシャル強度を求めた。ここで電子の付加ポテンシャル強度とは、付加子を電子とした場合にEq. (6)で定義される量であり、液電位にファラデー定数を乗じたものとなる。

5. 結果と考察

Fig. 6において、 H^+ の付加ポテンシャル強度は、界面(I), 界面(III)で鋭く変化しており、それに伴って CO_2 濃度が急激に増大, 減少していることが観測される。界面で変化する付加ポテンシャル強度差は、約20~30kJ/molで、Eq. (7)を用いた数値計算(実線)においても、明確な置換界面が形成されることがわかる。界面(III)では H^+ の付加ポテンシャル強度は界面(I), (III)に相当する分だけ上昇するが、そのポテンシャル変化は緩やかである。ここで、吸着の付加ポテンシャル強度の大きな変化があれば界面(III)も置換型になる。Table 3に示すように吸着の標準付加ポテンシャル強度差は約-6kJ/molであり、

Fig. 6 Correspondence between the theoretical calculation and experimental data of addition potential strength (dotted line and closed circles) and concentration of carbon (solid line and open circles) in the solution of the carbon isotopes separation system

Fig. 7 Correspondence between the theoretical calculation and experimental data of addition potential strength (dotted line and closed circles) and concentration (solid line and open circles) of uranium in the solution of the uranium isotopes separation system

明瞭な置換界面が形成できず、この界面は溶離型の形状を呈する。

一方、ウラン同位体の分離の場合は、Fig. 7 に示すように界面の付加ポテンシャル強度差は大きく、界面は炭素同位体の場合より明瞭である。さらに界面(Ⅲ)も鉄イオン錯体の吸着の標準付加ポテンシャル強度が約3.5kJ/mol であるので置換界面が形成された。ウラン同位体分離の場合は、錯体の種類が多く、吸着の付加ポテンシャル強度を制御する自由度が大きいことも三界面をいずれも置換型に維持することができる理由である。著者らは、このような置換界面の形成が可能な最小の付加ポテンシャル強度差を研究したところ、2kJ/mol 程度であろうと推定され、現在継続して研究を行っている。通常の吸脱着反応を用いた分離では吸着剤自体に分離能力が必要であるが、反応を伴う分離ユニットを用いる超多段精密分離では多種多様の反応を利用することができるため用途が広く、また分離係数を大きくするための特殊な吸着剤を開発することなく、一般の吸着剤を用いて分離ができる可能性を秘めている。しかし、超多段精密分離では一般に分離係数が小さいため、分離に要するエネルギーが大きくなる傾向にある^{7,16)}。したがってこれを工業的に実施するためには分離エネルギーの低減化が重要である。

結 言

(1) 連続的で仮想的な分離ユニットでは、吸脱着反応ではなく、溶液内の化学反応によって分離能力を発現し、それを吸着剤で二相分離することによって分離ユニットの機能が発揮される。

(2) 超精密多段分離を工業的に有意なものにするためには、置換型の三界面を形成することが望ましく、分離付加子の他に界面形成加子を考慮する必要がある。

(3) 三界面の置換型の維持は、複数の界面形成付加子相互の付加ポテンシャル強度の関係で決定される。

(4) このような系の解析には複数の付加子を含む反応の記述が必要で、付加型の平衡反応式、および付加ポテンシャル強度を用いることが望ましい。

Nomenclature

a	= activity	[mol/m ³]
C	= molar concentration of solution	[mol/m ³]
R	= gas constant	[kJ/(mol·K)]
T	= temperature	[K]
$\Delta\mu$	= addition potential strength	[kJ/mol]

$\Delta\mu^\circ$ = standard addition potential strength [kJ/mol]

μ = chemical potential [kJ/mol]

μ° = standard chemical potential [kJ/mol]

ν = addition number [-]

<Subscripts>

A = acceptor

D = donor

X = addend

A/D = addition reaction expressed by Eq.(1)

Literature cited

- 1) Benedict, M., T.H. Pigford and H.W. Levi: "Nuclear Chemical Engineering", McGraw-Hill, New York (1981)
- 2) Charlot, G. "Les Reaction eu Solution et Analyse Qualitative", Masson (1957)
- 3) Fujita, S. and H. Tohata: "Kagaku Kogaku", Tokyo Kagaku Dojin, Tokyo (1972)
- 4) Helfferich, F.: "Ion Exchange", McGraw-Hill, New York (1962)
- 5) Higashi, K.: "Uran Noshuku", Nikkan Kogyo Shimbun, Tokyo (1971)
- 6) Hutchison, C.A., D.W. Stewart and H.C. Urey: *J. Chem. Phys.*, **8**, 532 (1940)
- 7) King, C.J.: "Separation Process", McGraw-Hill, New York (1971)
- 8) Miyake, T., K. Takeda, H. Onitsuka and H. Obanawa: *Reactive Polymers*, **5**, 63 (1987)
- 9) Miyake, T., K. Takeda, K. Imamura and H. Obanawa: *Nucl. Technol.*, **64**, 237 (1984)
- 10) Seko, M., T. Miyake and K. Inada: *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, **18**, 263 (1979)
- 11) Seko, M., T. Miyake, K. Inada and K. Takeda: *Nucl. Technol.*, **50**, 178 (1980)
- 12) Spedding, F.H. and A.H. Daane: "The Rare Earths", R.E. Krieger Publ. Co., New York (1971)
- 13) Takeda, K.: "Bunri No Shikumi", Kyoritsu Shuppan, Tokyo (1988)
- 14) Takeda, K., H. Obanawa and N. Morita: *Sep. Sci. Technol.*, **22**, 103 (1987)
- 15) Takeda, K., H. Onitsuka, H. Obanawa, F. Kawakami and M. Sasaki: *Sep. Sci. Technol.*, **23**, 1329 (1988)
- 16) Takeda, K., H. Onitsuka, H. Obanawa and S. Saito: *Nucl. Technol.*, **81**, 421 (1988)
- 17) Takeda, K., M. Akiyama, F. Kawakami and M. Sasaki: *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **59**, 7 (1986)
- 18) Takeda, K., M. Sasaki, I. Iitaka and H. Obanawa: *Denki Kagaku*, **53**, 9 (1985)
- 19) Yoneda, Y., T. Uchijima and S. Makishima: *J. Phys. Chem.*, **63**, 2057 (1959)

Theory and Industrial Use of Ultra Multistage Separation with Adsorption-Desorption Reactions: Separation Unit with Chemical Reactions and Formation of Displacement Boundaries

Kunihiko Takeda, Itaru Ichihara, Toshinori Watanabe
and Heiichiro Obanawa

Uranium Enrichment Laboratory Asahi Chemical Industry
Co., Ltd. Miyazaki 883

Key Words : Adsorption, Separation, Multistage, Chemical Equilibrium, Chemical Reaction, Addend, Potential Strength, Distribution Function, Uranium, Carbon

Chemical reactions play an important role in an ultra multistage separation using an adsorption-desorption system. The reactions are favorable for forming displacement boundaries in a separation column as well as for enhancing separation efficiency in a separation unit. Several kinds of "addends", which dominate the boundaries and the efficiency, are discussed in this report. The addition potential strengths ($\Delta\mu_i$) of the addend were introduced, and the relation between the addition potential strengths and the formation of displacement boundaries was examined. As a result of semi-quantitative consideration, it was elucidated that more than two addends are indispensable for forming three displacement boundaries. The addends also act as separation addends, such as protons for separation of carbon or boron isotopes, electrons for uranium isotopes separation and organic compounds for separation of rare earth elements.