

## 拡散透析を用いたベントナイトからのコバルトイオンの除去†

高瀬久男 ††

田村浩一 ††

加藤尚武 ††

万一、土壤中に漏洩した放射性金属イオンが土壤に吸着したとき、その土壤を処理しイオンを除去回収する必要がある。このような状態を想定し、微細な土壤粒子（ベントナイト）からの放射性イオン（コバルト）の除去法として拡散透析法を用いた処理について研究を行った。微細な土壤粒子を含む溶液側を希釈槽、ストリップ液を含む溶液側を濃縮槽とし、両槽の間に陽イオン交換膜を挟み、回分操作による実験を行った。実験ではストリップ液として塩酸水溶液を用いたときが高度分離が達成できた。また、回分操作のシミュレーションを行った結果、ストリップ液の濃度、膜の選択、液と膜の接触状態を示す物質移動係数等がイオンの除去に大きな影響を及ぼすことが分かった。

A radioactive metal ion must be removed from contaminated soil which accidentally adsorbs the radioactive metal ion. With this situation, the authors examined the diffusion dialysis as a removal process of the radioactive ion from fine particles of the soil. In a dialyzer, the one side of the solution including fine particles of soil was referred to as diluting cell and the other side stripping was referred to as concentrating cell. The experiments by batch operations were carried out by interposing a cation exchange membrane (CMV) between both cells. The high separation of the ion from the soil could be achieved by the experiments when the aqueous solution of hydrochloric acid was used as stripping solution. Equations for batch diffusion dialysis system were set up and calculated. From the results of simulation, it was noted that the concentration of hydrochloric acid in the stripping solution, the selections of the membrane, and mass transfer coefficient at the surface of the membrane strongly affect the removal efficiency of the ion.

### 1. 緒言

放射性廃棄物の地層処分において廃棄物の万一の漏洩によって土壤が汚染された場合を想定したとき、この汚染土壤から放射性イオンの分離および回収法について検討する必要がある。最も一般的に考えられる分離回収方法としては土壤に吸着したイオンを溶離剤を用いて溶離し、そのスラリー溶液を遠心分離や沈降法（シクナー）によって土壤粒子と液体に完全に分離してイオン交換樹脂等による濾液からイオン交換又は蒸発等の操作によって金属イオンを濃縮する方法が考えられる。しかし、土壤が非常に細かい粒子を含む場合には、遠心分離の操作を用いても固液を完全に分離することは困難である。

また、イオンの回収率を犠牲にしても、遠心分離による回収操作が考えられるが、対象とする物質が放射性イオンであり完全な処理を要求されることから、この方法は不相当と考える。さらに、土壤中の有害金属イオンを対象としても溶離剤を用いて完全に金属イオンを土壤から溶離し、次に、このスラリー溶液を遠心分離によって分離し、この濾液に対してイオン交換樹脂による濃縮が考えられる。しかし、高濃度の溶離剤の存在のもとではイ

オン交換樹脂の交換容量が極端に低下することが予測され、やはり遠心分離による回収は適当ではないと考える。

筆者等は放射性イオンを吸着した土壤を含むスラリー溶液から、透析操作を用いて、放射性イオンの除去を試みた。透析操作は電気的な力を用いる電気透析と濃度推進力を用いた Donnan 平衡を利用する拡散透析がある。電気透析は電気的な力を利用するためイオンの移動は速く、水溶液中にイオンのみが存在する場合の処理に対して有効である。しかし、細かい粒子を含むスラリーに対して用いるとスラリー粒子まで電気的な力の影響を受け、膜に粒子が付着するため次第に透析効率が低下する。一方、拡散透析は電気エネルギーを用いないためイオンの移動は遅いが、粒子が電気的な力の影響を受けず、膜に粒子が付着することがないためスラリー溶液に対して有効である。

拡散透析による物質移動の研究は、廃液の処理などに関して数多くの研究 [1-5] があるが、スラリー中からの拡散透析によるイオンの回収についての研究は見当たらない。

本研究では、土壤が放射性イオンによって汚染されたとき、このイオンを除去することによって土壤が再生できる場合について、拡散透析によるベントナイトからのイオンの分離の可能性を実験およびシミュレーションにより検討した。

† Removal of Cobalt Ion from Bentonite Using Diffusion Dialysis, by Hisao Takase, Kouichi Tamura, Naotake Katoh

†† 工学院大学工学部化学工学科 Department of Chemical Engineering, Kogakuin Univ.

## 2. 実験および方法

本実験で用いた透析槽はアクリル樹脂製で希釈槽 (A) と濃縮槽 (B) に分かれている。各槽の大きさは縦 15cm、横 8cm、深さ 20cm である。両槽の間は陽イオン交換膜 (旭硝子 (株) 製、SELEMION、CMV) を挟んでいる。膜の透過面積は  $0.0120\text{m}^2$ 、膜厚  $0.0002\text{m}$  とした。また、両槽はマグネチックスターラーで搅拌した。膜は塩酸 1% 水溶液に 24 時間接触し H<sup>+</sup> 型にしたものを用いた。

実験は希釈槽に模擬放射性イオンを含む水溶液と、模擬放射性イオンを吸着した土壌を含むスラリー溶液を対象として行った。模擬放射性核種としてコバルトを用い、水溶液のみの実験では (A) 側に  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  を  $1.85 \times 10^{-4}\text{kg}$  含む水溶液  $2.3 \times 10^{-3}\text{m}^3$  を、(B) 側にはストリップ液として塩酸 2% 水溶液および塩化ナトリウム 2% 水溶液  $2.3 \times 10^{-3}\text{m}^3$  を入れ透析実験を行った。土壌を含むスラリーを用いた実験では、土壌としてベントナイト (クニゲル V1)  $2.3\text{g}$  を含むスラリー溶液  $2.3 \times 10^{-3}\text{m}^3$  に  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  を  $1.85 \times 10^{-4}\text{kg}$  入れ、24 時間搅拌し平衡近くまでにした溶液を用いた。このスラリー溶液を (A) 側に、(B) 側にはストリップ液として塩酸 2% 水溶液および塩化ナトリウム 2% 水溶液  $2.3 \times 10^{-3}\text{m}^3$  を用いた実験を行った。また、(A) 側のスラリー溶液に塩酸濃度 0.00245% とし、一部コバルトが溶離した状態での実験も行った。実験温度は  $298 \pm 2\text{K}$  で、試料は一定時間毎採取し、スラリーは遠心分離し、さらに限外濾過の後、濾液中の各イオンを分析した。また、ベントナイトに吸着しているコバルトイオンは採取したスラリーに塩酸を入れ塩酸濃度 1% とし、24 時間搅拌し、完全にベントナイトからコバルトイオンを溶離した溶液を遠心分離、限外濾過をした後、濾液中のコバルトイオンを測定した。各イオンの分析は原子吸光光度計を用いて行った。

## 3. 実験結果および考察

希釈側の槽にベントナイトを含まない水溶液だけを用いた透析実験の結果を図 1 に示す。約 3.5hr で希釈槽と濃縮槽の濃度は逆転し、約 30hr で希釈槽から濃縮槽へコバルトイオンがほぼ完全に移動した。また、希釈槽における水素イオン濃度は直線的に増加している。これらの結果より実験開始後、濃縮側の水素イオンは濃度拡散によって希釈側に移動すると、濃縮側の副イオンの塩素イオンが希釈槽溶液中のコバルトイオンおよび水素イオンを濃縮槽に引きつけ、濃縮槽および希釈槽において急激な濃度変化が起こる。また、浸透圧による影響で希釈

槽の溶液が 30hr で  $8.3 \times 10^{-5}\text{m}^3$  減少した。

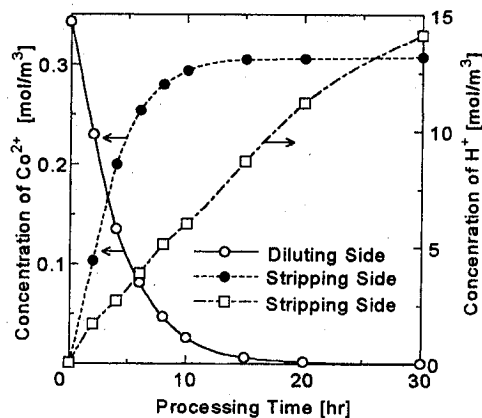


図 1 希釈側水溶液のみの場合の透析

希釈槽にコバルトイオンを吸着したベントナイトを含むスラリー溶液を入れた場合の透析実験を図 2 に示す。(a) において、希釈槽におけるスラリー溶液全体の濃度と濃縮槽の濃度は約 7hr で逆転し、約 80hr でベントナイト中のコバルトイオンは完全に液中に溶離していることが分かる。また、希釈側の水素イオン濃度はスラリーのない場合の透析と同様に直線的な変化を示している。(b) ではナトリウムイオンとベントナイト上のコバルトイオンの吸着量の変化を示す。ベントナイトとコバルトイオンの交換はベントナイト中のナトリウムイオンとの交換となる。実験初期の段階ではスラリー溶液中に一部のコバルトイオン、ナトリウムイオンが存在している。 $t > 0$  において、濃度拡散により水素イオンが濃縮側から希釈側へ移動すると希釈側のベントナイト中のコバルトイオンとナトリウムイオンが水素イオンによって溶液中に溶離され濃縮側に移動する。また、コバルトイオンの減少によっても平衡が崩れベントナイトよりコバルトイオンが液中に溶離する。希釈側のナトリウムイオンの変化量が濃縮側の変化量に比較して少ないのは、希釈側の溶液中のナトリウムイオンの変化に対してベントナイトからの溶離速度が大きいと膜へのナトリウムイオンの移動速度が大きいためであると考えられる。

希釈槽の塩酸濃度を 0.00245% 溶液にして、一部、コバルトイオンをベントナイトから溶離した状態で透析を行ったときの実験結果を図 3 に示す。希釈槽と濃縮槽のコバルトイオン濃度は約 5hr で逆転し前述の方法に比

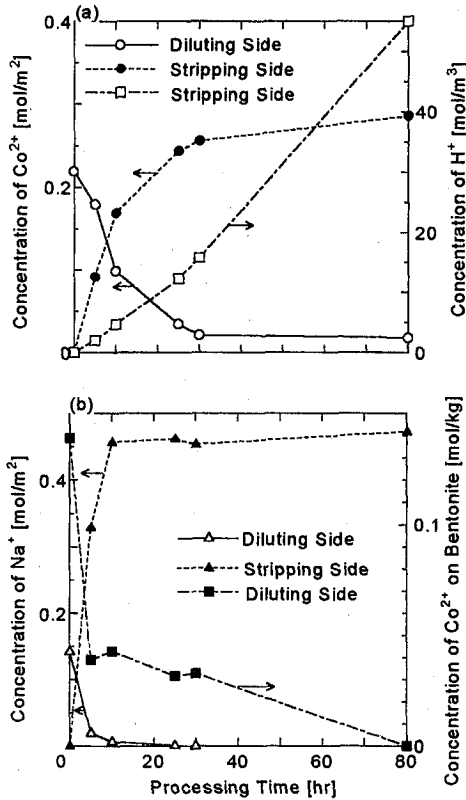


図2 希釈側にベントナイトスラリーを入れた場合の透析結果

べて透析によるイオンの物質移動速度は若干大きくなっている。希釈側の溶液中のコバルトイオンの濃度変化は5hrまで急激に変化するが、それ以降は希釈側に塩酸のないときの前述の実験結果と同様の変化を示した。また、希釈側の溶液中のナトリウムイオン濃度の変化は約10hrで0となった。希釈側の水素イオン濃度の変化は濃縮側では一定であるが希釈側においては5hr以降は僅かに変化している程度で大きな変化はなかった。ベントナイト中のコバルトイオンの吸着量の変化をみると僅かに減少する結果となった。これは、希釈槽において水素イオンによる平衡が崩れる現象よりも、コバルトイオンの減少によって、平衡関係が変化しベントナイト中のコバルトイオンが溶液中に溶離する現象であると考えられる。

濃縮側の塩酸濃度を变化させたときの実験結果を図4に示す。濃縮側の水素イオン濃度が高いほどコバルトイオンの移動速度が大きい。これは、膜両側の平衡関係が水素イオン濃度によって大きく影響されるためである。また、ベントナイト中の吸着量も希釈側に移動する水素

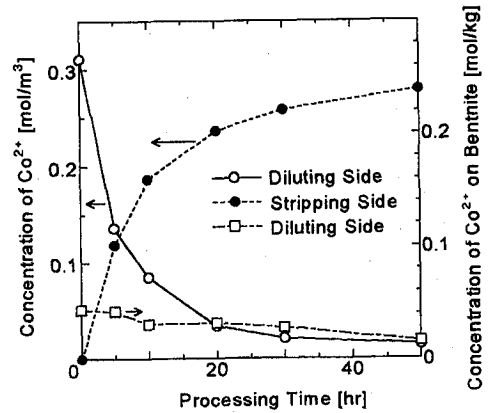


図3 希釈側塩酸初期濃度を0.00245%とした場合の透析結果

イオンの量も大きいことから濃縮側の水素イオン濃度が高いほどベントナイトに対するコバルトイオンの吸着量が低くなっていることが分かる。

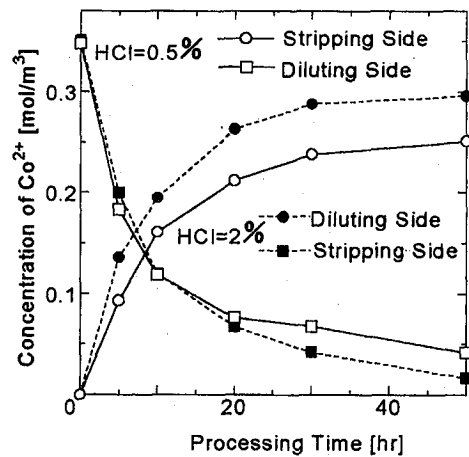


図4 濃縮側塩酸濃度を0.5%、2%とした場合の透析

図5に濃縮側にストリップ液として塩化ナトリウム1.6%を入れたとき、ストリップ液として塩酸1%水溶液としたときの実験結果を比較したものを示す。ナトリウムイオンの場合が、水素イオンの場合の実験結果よりコバルトイオンの移動速度が低い結果となった。また、ベントナイト中のコバルト吸着量の変化も水素イオンを

用いた方が大きくなる傾向となった。これは、ベントナイト及び膜に関してそれぞれのイオンの移動速度および膜の平衡関係が大きく影響しているものと考えられる。

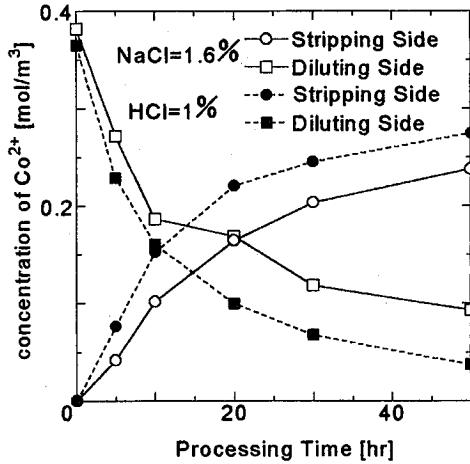


図5 濃縮側ストリップ液を NaCl 1.6%の場合と HCl 1%の場合の透析実験の結果

イオン交換膜およびベントナイトに関する平衡関係は次式で表されるものとする、

$$\frac{q_B}{C_B} = \alpha_A^B \frac{q_A}{C_A} \quad (1)$$

(1) 式より

$$\frac{C_A q_B}{(Q - q_B)} = \alpha_A^B C_B \quad (2)$$

$Q$  はイオン交換膜または、ベントナイトの交換容量、 $q$  は各イオンの膜またはベントナイトへの吸着量である。 $\alpha_A^B$  は A イオンに対する B イオンの分離係数である。 $C_A$ 、 $C_B$  は溶液中の A イオン、B イオンの濃度、 $q_B$  は膜又はベントナイトに吸着している B イオンの濃度とする。普通グラフの縦軸に  $C_A q_B / (Q - q_B)$  をとり横軸に  $C_B$  をとると (2) 式より勾配が  $\alpha$  の直線関係となる。

図6 にイオン交換膜に関するコバルトイオン-水素イオン、コバルトイオン-ナトリウムイオンおよびナトリウムイオン-水素イオンの平衡関係の実験結果を示す。この結果より、ナトリウム-コバルトイオンの分離係数がコバルト-水素イオンのそれよりも大きな値を示した。

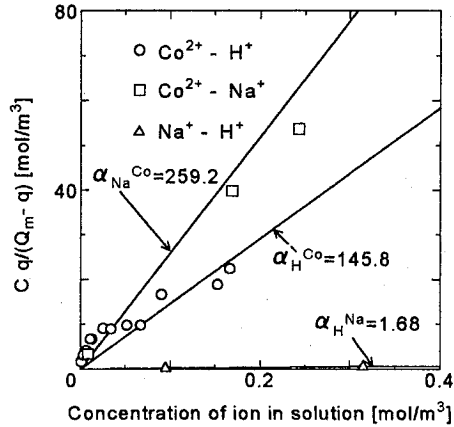


図6 陽イオン交換膜 (SELEMION CMV) に関する  $Co^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $H^+$  の平衡関係

図7 にベントナイトにおけるコバルトイオン-水素イオン、コバルトイオン-ナトリウムイオンおよびナトリウムイオン-水素イオンの平衡関係を示す。また、これらの結果より、イオン交換膜と同様ナトリウム-コバルトイオンの分離係数がコバルト-水素イオンのそれよりも大きな値を示した。

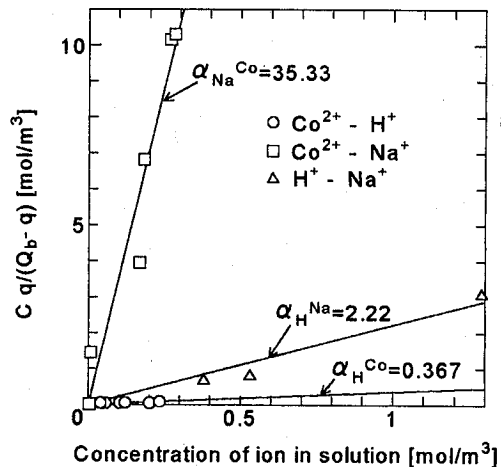


図7 ベントナイトに関する  $Co^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $H^+$  の平衡関係

$Q_m$ 、 $Q_b$  はそれぞれイオン交換膜およびベントナイトの交換容量である。

4. 理論

イオン交換膜を隔てた溶液においてストリップ液に濃度差があるときのイオンの移動に関するモデルを図8に示す。移動が始まる前の透析槽の状態は、希釈槽においてはベントナイト中のナトリウムイオンがコバルトイオンと交換して平衡状態となっている。一方、ストリップ液の塩酸は濃縮槽に高濃度で存在しているものとする。 $t > 0$ において、濃縮槽の水素イオンが濃度差による拡散によって膜を移動し希釈槽へ拡散する。そのとき、濃縮槽に残っている副イオンの塩素イオンが希釈槽の正イオンを引きつける。希釈槽の溶液中に存在するナトリウムイオン、水素イオンおよびコバルトイオンが濃縮槽の塩素イオンによって引きつけられ膜を隔てた濃縮槽へ移動する。このため、希釈槽のコバルトイオンが減少し、ベントナイト中に吸着しているコバルトイオンが溶液中のコバルトイオンとの平衡関係が崩れることによって、再び溶液に溶離し始める。さらに、水素イオンの濃度の増加によってベントナイト中のコバルトイオンの平衡関係が変化し溶液中に溶離する。このような移動が両槽の溶液が Donnan 平衡になるまで続くと考えられる。

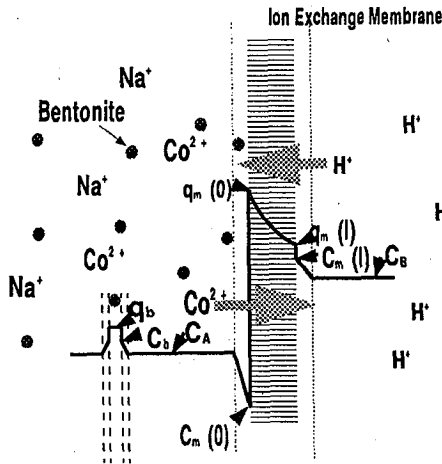


図8 拡散透析の物質移動モデル

本研究は、ベントナイトとイオン交換膜の両側の3種類の異なる平衡関係によってイオンが移動するという考えのもとで物質収支および速度式を導いた。

濃縮側から希釈側への水素イオンの移動速度は水素イオンの濃縮側からと希釈側からの移動速度の差によるものと考え、次式のような式で表される。

$$\frac{dC_{AH}}{dt} = \frac{\gamma_B A}{V_B} C_{BH} - \frac{\gamma_A A}{V_A} C_{AH} \quad (3)$$

ここで  $C_{AH}$ 、 $C_{BH}$  はそれぞれ希釈槽および濃縮槽の水素イオン濃度、 $V_A$  および  $V_B$  は希釈槽、濃縮槽の溶液量、 $\gamma_A$ 、 $\gamma_B$  はそれぞれ希釈槽から濃縮槽へ、濃縮槽から希釈槽へ移動する水素イオンの移動速度、 $A$  はイオン交換膜の膜透過面積である。

膜が完全に水素イオン型に処理されているものと仮定すると、水素イオンの移動に関しての透析槽の物質収支は

$$V_A(C_{AH} - C_{AH0}) = V_B(C_{BH0} - C_{BH}) \quad (4)$$

$C_{AH0}$ 、 $C_{BH0}$  は希釈槽および濃縮槽の溶液中の水素イオンの初期濃度である。

水素イオンの水溶液中の易動度はナトリウム及びコバルトイオンと比較して相当大きい、ベントナイトおよびイオン交換膜の液境膜中の水素イオン濃度は溶液本体濃度と等しいものと仮定する。ベントナイトと境膜液中のコバルトイオン及びナトリウムイオンとの交換平衡関係は

$$q_{bCo} = \frac{Q_b C_{bCo}}{C_{bCo} + \frac{1}{\alpha_{Co}} C_{bNa} + \alpha_{Co}^H C_{AH}} \quad (5)$$

$$q_{bNa} = \frac{Q_b C_{bNa}}{\alpha_{Na}^H C_{bCo} + C_{bNa} + \alpha_{Na}^H C_{AH}} \quad (6)$$

$$Q_b = q_{bH} + q_{bCo} + q_{bNa} \quad (7)$$

ここで、 $Q_b$  はベントナイトの交換容量、 $C_{bCo}$ 、 $C_{bNa}$  はベントナイト界面のコバルトおよびナトリウム濃度、 $q_{bCo}$ 、 $q_{bNa}$  はベントナイト上のコバルトおよびナトリウムの吸着量である。 $\alpha$  は分離係数である。

ベントナイトからのコバルトおよびナトリウムイオンの溶離速度は溶離速度をそれぞれ  $H_{Co}$ 、 $H_{Na}$  とすると、次式で表せるものとする。

$$\frac{dq_{bCo}}{dt} = \frac{H_{Co} V_A}{W_s} (C_{ACo} - C_{BCo}) \quad (8)$$

$$\frac{dq_{bNa}}{dt} = \frac{H_{Na} V_A}{W_s} (C_{ANa} - C_{BNa}) \quad (9)$$

$W_s$  は使用ベントナイト量である。

液境膜中の物質移動係数はコバルトイオン及びナトリウムイオンの易動度が同程度の値を持つため等しいとみると、希釈槽における両者のイオンの濃度変化は次式のようにになる。

$$\frac{d\{C_{ACo} - (W_s/V_A)Q_{bCo}\}}{dt} = -\frac{Ak_{RA}}{V_A}\{C_{ACo} - C_{mCo}(0, t)\}, \quad (10)$$

$$\frac{d\{C_{ANa} - (W_s/V_A)Q_{bNa}\}}{dt} = -\frac{Ak_{RA}}{V_A}\{C_{ANa} - C_{mNa}(0, t)\}. \quad (11)$$

$k_{RA}$ は希釈側液境膜物質移動係数、 $C_{mCo}$ 、 $C_{mNa}$ は液境膜中のコバルト、ナトリウムイオン濃度である。

膜表面と溶液中のコバルトイオンの平衡関係は  $q_{mCo}$ 、 $q_{mNa}$ 、 $q_{mH}$ はイオン交換膜のコバルト、ナトリウムおよび水素イオン濃度とみると

$$q_{mCo} = \frac{Q_m C_{bCo}}{C_{mCo} + \frac{1}{\alpha_{Co}^H} C_{mNa} + \alpha_{Co}^H C_{AH}}, \quad (12)$$

$$q_{mNa} = \frac{Q_m C_{mNa}}{\alpha_{Na}^H C_{mCo} + C_{mNa} + \alpha_{Na}^H C_{AH}}, \quad (13)$$

$$Q_m = q_{mH} + q_{mCo} + q_{mNa}. \quad (14)$$

膜内のイオンの移動は電位勾配によって変化することが考えられるが、ここでは膜内の拡散係数  $D$ はイオン濃度に関して独立であると仮定すると、コバルトイオンおよびナトリウムイオンが膜を移動する速度は

$$\frac{\partial q_{mCo}}{\partial t} = D_{Co} \frac{\partial^2 q_{mCo}}{\partial y^2}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial q_{mNa}}{\partial t} = D_{Na} \frac{\partial^2 q_{mNa}}{\partial y^2}. \quad (16)$$

初期及び境界条件は

$$t = 0, 0 \leq y \leq \ell, q_{mCo}(y, 0) = 0, q_{mNa}(y, 0) = 0, \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial q_{mCo}}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{k_{RA}}{\rho D_{Co}} \{C_{ACo} - C_{mCo}(0, t)\}, \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial q_{mNa}}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{k_{RA}}{\rho D_{Na}} \{C_{ANa} - C_{mNa}(0, t)\}, \quad (19)$$

$$\left. \frac{\partial q_{mCo}}{\partial y} \right|_{y=\ell} = \frac{k_{RB}}{\rho D_{Co}} \{C_{BCo} - C_{mCo}(\ell, t)\}, \quad (20)$$

$$\left. \frac{\partial q_{mNa}}{\partial y} \right|_{y=\ell} = \frac{k_{RB}}{\rho D_{Na}} \{C_{BNa} - C_{mNa}(\ell, t)\}. \quad (21)$$

濃縮側におけるイオン交換膜とそれぞれのイオンの平衡関係は (12)、(13) 式が適用できる。

濃縮側のコバルトイオン及びナトリウムイオンの濃度変化は次式で得られる。

$$\frac{dq_{BCo}}{dt} = \frac{Ak_{RB}}{V_B} \{C_{BCo} - C_{mCo}(\ell, t)\}, \quad (22)$$

$$\frac{dq_{BNa}}{dt} = \frac{Ak_{RB}}{V_B} \{C_{BNa} - C_{mNa}(\ell, t)\}. \quad (23)$$

$k_{RB}$ は濃縮側液境膜物質移動係数、 $C_{BCo}$ 、 $C_{BNa}$ は濃縮側のコバルトおよびナトリウムイオン濃度である。

(3)~(23) 式を連立してコバルトイオンの希釈槽及び濃縮槽における挙動を計算した。

## 5. 計算結果

シミュレーションで用いた数値は以下のとおりである。膜透過面積  $0.012 \text{ m}^2$ 、希釈側コバルトの初期濃度  $0.34 \text{ mol/m}^3$ 、濃縮側水素イオン濃度  $354.8 \text{ mol/m}^3$ 、イオン交換膜の厚さ  $2 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、希釈側、濃縮側の溶体量  $2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、イオン交換膜の密度 (乾燥基準)  $660 \text{ kg/m}^3$ 、イオン交換膜内のイオンの拡散係数  $6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、希釈側濃縮側の液側境膜物質移動係数  $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、ベントナイト及びイオン交換膜のコバルトイオン、ナトリウムイオン及び水素イオンに関する分離係数は図 6 及び図 7 で求めた数値を用いた。これらの数値をもとに、操作上のパラメータについて感度解析を行った。

図 9 に実験結果と計算値の比較を示した。計算値は液境膜物質移動係数  $k_{RA} = 10^{-5} \text{ m/s}$ 、膜内拡散係数  $D_{Co} = 6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、ベントナイトからの溶離速度  $H_{Co} = 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ を与えたときが最も実験値に近づいた。

図 10 に濃縮側の塩酸初期濃度を変化させたときのシミュレーション結果を示す。希釈側溶液の水素イオン濃

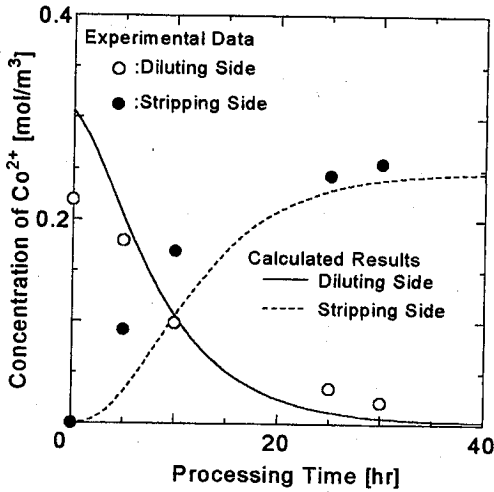


図9 実験値と計算値の比較

度が増加するとベントナイト中のコバルトイオンは溶離しやすくなるが、膜への吸着量が減少するため、高度分離は難しくなる。また、水素イオンが少ないとベントナイト上のコバルトイオンの変化も緩やかになり、膜への吸着量も増大するが、濃縮側への溶出量が減少する。

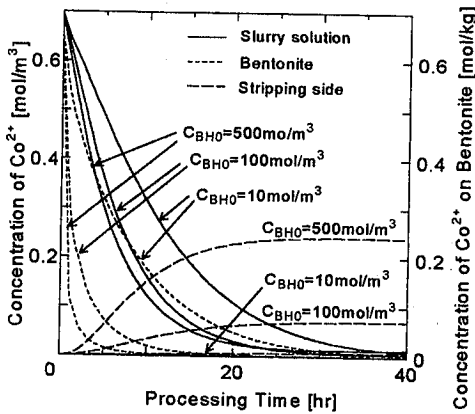


図10 濃縮側塩酸初期濃度の変化に対するシミュレーション

図11にイオン交換膜の交換容量(膜の種類)を変化させたときの計算結果を示す。希釈側のベントナイト及びスラリー溶液全体のコバルトイオンの変化はないが、濃縮側のコバルトイオン溶出量は交換容量が変化すると大きく変化する。このことから膜の選択は透析に大きく影響を与えることが分かる。

図12に希釈側の液境膜物質移動係数がどのように影

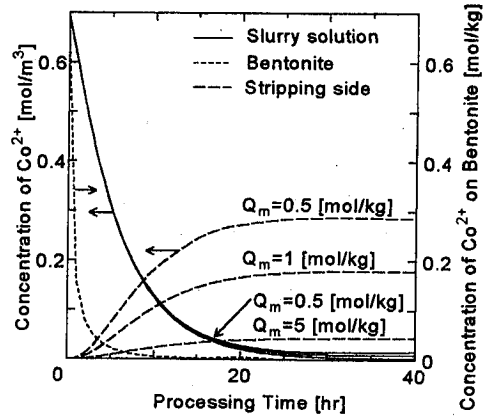


図11 イオン交換膜の交換容量の変化に対するシミュレーション

響を与えるかを調べた計算結果を示す。 $k_{RA}$ が減少すると希釈槽内の濃度は大きく変化する。 $k_{RA} > 10^{-4} \text{ m/s}$ では希釈槽の濃度変化がなくなることから、イオン交換膜内の拡散が律速であることを示した。対象溶液がスラリーであるため、膜界面における移動速度を大きくすることが非常に重要になる。

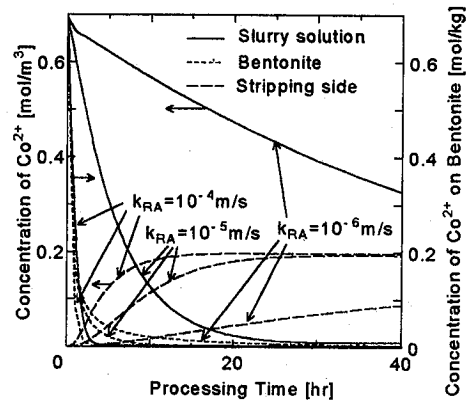


図12 希釈側の液境膜物質移動係数を変化させた場合のシミュレーション

図13にベントナイトからのコバルトイオンの溶離速度を変化させたときのシミュレーション結果を示す。溶離速度が大きくなるにつれて、濃縮側への移動量が増大する。対象とする土壌の種類、イオン等によって、溶離速度も大きく変わることが予想されることから、土壌が

らの溶離剤を兼ねたストリップ液の選択も重要な因子となる。

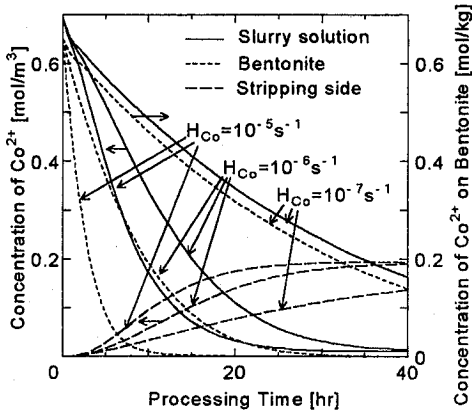


図 13 ベントナイトからの  $\text{Co}^{2+}$  の溶離速度を変化させた場合のシミュレーション

## 6. 結言

本研究では、土壌がイオン交換性の核種に汚染された場合その汚染土壌からイオンを拡散透析によって、土壌が再生できる可能性を明らかにするため、実験とシミュレーションを行った。そして、ベントナイトに吸着したコバルトイオンの透析ではストリップ液を塩酸溶液とすることでほぼ回収できることが分かった。

シミュレーションの結果よりストリップ液の濃度、膜の交換容量、膜界面の移動速度などがイオンの移動に大きく影響を与えることが分かった。

なお、本提案の拡散透析により大量の回収液が発生しても、既存のイオン交換塔や電気透析の手法により、放射性イオンを除去できるものとする。

## 7. 参考文献

- [1] Brajter, K. et al.: *Separation Sci. Technol.*, **23**, 321 (1988).
- [2] Adhia, J. D.: *Indian Chem. Eng.*, **XXVIII**, 23 (1986).
- [3] Yun H. C. et al.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 1186 (1993).
- [4] Liu H. C. et al.: *AIChE J.*, **40**, 40 (1994).
- [5] Hutter J. C. et al.: *ibid.*, **40**, 166 (1994).