

処分システム性能へのコロイドの影響評価 - 室内試験, 原位置試験とモデル解析を踏まえて -

油井三和* 黒澤進* 飯島和毅*

本報告では、放射性廃棄物の地層処分の環境を人工バリア、天然バリアおよびその境界部に区分して、そこに生成あるいは元々存在するコロイド等の核種移行に及ぼす影響に関して、核燃料サイクル開発機構でこれまでに得られた知見を示した。また、地層処分研究開発に関する第2次取りまとめ以降、コロイド等の影響評価モデルの開発・高度化を目的として実施した室内および原位置試験の結果とそれら試験結果に関するモデル解析の結果等を報告するとともに、今後の課題を示した。

Keywords: 地層処分システム, 性能評価, 核種移行, コロイド, 有機物, 微生物

The experimental and theoretical studies which were performed by Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) to evaluate the influence of colloid, organic material and microorganism in the engineered barrier, the natural barrier and these boundary on performance assessment of radioactive waste geological disposal system were presented. The experimental and analytical results of laboratory and in-situ experiments which were performed to develop the transport model of radionuclide with colloid, organic material and microorganism were also presented after H-12 report.

Keywords: radioactive waste geological disposal, performance assessment, radionuclide transport, colloid, organic material, microorganism

1 はじめに

放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体から溶出する核種のうち、とくにアクチノイドイオンは加水分解反応等により真性コロイドを生成したり、環境中に存在するコロイドに収着して擬似コロイドを形成したりすることが知られている。また、処分環境下ではコロイド的挙動を示す有機物や微生物も存在する。近年の研究では、地下水中に溶解した核種がコロイド化した場合、地下水中の核種の移行はイオンの場合とは異なり、コロイドの移行にともなって促進されることが観測された例[1-2]もある。したがって、地層中における物質移行にはコロイド、有機物および微生物の存在が大きく関与すると考えられることから、放射性廃棄物の地層処分システムにおける核種移行評価ではこれらの影響評価が重要である。

本報告では、放射性廃棄物の地層処分におけるコロイドの生成やその移行評価に関して、核燃料サイクル開発機構(以下、JNC)でこれまでに得られた知見を紹介する。また、地層処分研究開発に関する「第2次取りまとめ」[3]以降、コロイド等の影響評価モデルの開発・高度化を目的として実施した室内および原位置試験の結果とそれら試験結果に関するモデル解析の結果等を報告するとともに、今後の課題を述べる。

2 「第2次取りまとめ」での処分システム性能へのコロイド等の影響評価のまとめ

放射性廃棄物の地層処分における人工バリア、天然バリアおよびその境界部に区分して、そこに生成あるいは元々存在するコロイド等の核種移行に及ぼす影響に関して、「第2次取りまとめ」までに得られた知見を述べる。

2.1 人工バリア中の核種移行に及ぼすコロイド等の評価

廃棄体から溶出する核種のうち、とくにアクチノイドイオンは加水分解反応等により真性コロイドを生成したり、環境中に存在するコロイドに収着して擬似コロイドを形成したりする。地層処分システムにおける人工バリア材の一つであるベントナイト系緩衝材は、その粒子間隙が微小構造であることからコロイドを物理的にろ過することが期

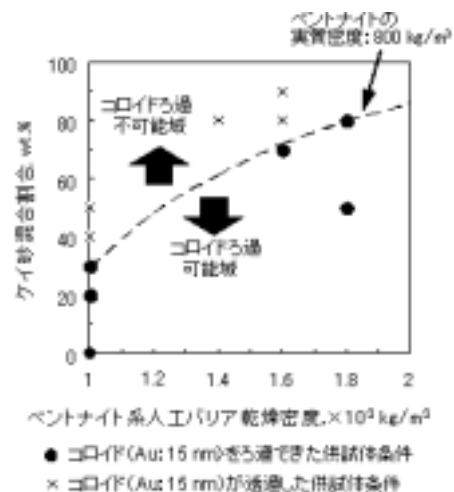


Fig.1 Results of colloid filtration test through compacted bentonite and sand-bentonite mixture, saturated with distilled water at several dry densities [4]

Effects of the colloids on performance assessment for radioactive waste geological disposal system - Laboratory, in-situ and modeling studies -, by Mikazu Yui (yui@tokai.jnc.go.jp), Susumu Kurosawa, Kazuki Iijima
本稿は日本原子力学会バックエンド部会第20回「バックエンド夏期セミナー」における講演内容に加筆したものである。

* 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部 Waste Isolation Research Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

待されている。金コロイド(15 nm)を直接用いたベントナイト系緩衝材のコロイドろ過性に関する実験[4]では、ベントナイトにケイ砂を混合させて施工する場合、ベントナイトを実質密度として 800 kg/m³ 以上含有されることによりコロイドはろ過されることが示された(Fig. 1)。また、ベントナイト系緩衝材はその施工条件により、有機物および微生物に対してもろ過効果を有することが確認されている[5-6]。

ただし、ベントナイト系緩衝材は、軟岩系処分場の支保工として用いられるセメント系材料から浸出するアルカリ性成分により化学的に変質して、間隙構造が変化する懸念がある。このため、今後は長期にわたるベントナイト系緩衝材のセメントによる変質とコロイド、有機物および微生物のろ過性に関する検討が必要である。

2.2 人工バリアからのコロイド発生・移行に関する評価

オーバーパック材料の腐食、ベントナイト系緩衝材の浸食および変質に起因して、人工バリアを起源としてコロイドが生成することが考えられる。

このうち、オーバーパック材料の腐食により生成するコロイドは、ベントナイト系緩衝材の内側で生成することから、緩衝材のろ過効果により核種移行挙動への影響は無視できるものと考えられる。

一方、ベントナイト系緩衝材が地下水流れ場に置かれたとき、ベントナイトは膨潤して岩盤中に侵入してその先端はゲル化する。この際、一定以上の外力(ここでは地下水の流れ)が加わるとゲルが崩壊し、粒子が地下水中に分散する[7](Fig. 2)。ベントナイト系緩衝材を起源とするコロ

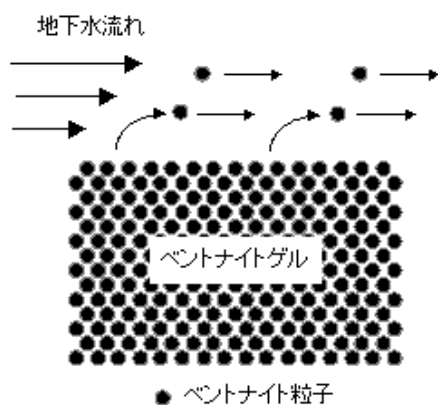


Fig.2 Concept of erosion process caused by groundwater flow [7]

イドの生成は、このようなゲル崩壊すなわちベントナイトの浸食に起因するものと考えられる。このことから、ベントナイトコロイド生成の可能性を、ベントナイト粒子間力と剪断力に相当する地下水流速の大小関係(Stokes の法則)により規定されるものとして評価が行われた。その結果、地下水中にベントナイトコロイドが生成(分散)するには、 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m/s の地下水流速が必要であることが見積もら

れた[8]。また、地下水流速をパラメータにベントナイト系緩衝材の浸食性を直接評価した実験でも、浸食には 10^{-5} m/s 以上の地下水流速が必要であることが確認されている[9]。これに対して、調査されたわが国の地下深部の地下水流速は一般的に 10^{-5} m/s より小さいことから、その対比により処分場環境下ではベントナイトコロイド生成の可能性は低い[8]ことの見通しを得ている。

ただし、地下水の水理特性は不均一性を有する。このため、ベントナイト系緩衝材の浸食に伴うコロイドの生成に関する評価は、上述の一般的検討に加えて、今後は原位置における地下水の水理的および地球化学的特性に基づく検討が必要である。

2.3 天然バリア中の核種移行に及ぼすコロイド影響評価

コロイドの影響を考慮した天然バリア中の核種移行評価に関して、「第 2 次取りまとめ」では、核種 - コロイド - 岩盤間の分配係数を設定した 1 次元平行平板亀裂中の核種移行モデルにより評価が行われた。この解析では、既往の文献、核種室内試験および釜石鉱山における原位置試験などに基づき、動水勾配、亀裂パラメータ、核種移行パラメータに関するデータに加えて、コロイドの移流速度、コロイド濃度および核種 - コロイド間の分配係数を設定して、核種移行に及ぼすコロイドの影響を評価した。

Fig. 3 に、地層処分システム性能に関するレファレンスケースの核種移行解析とコロイドの影響を考慮した解析に基づく最大線量とその時間の関係を示す。また、諸外国で提案される防護レベルとわが国の自然放射線レベルを参考として示した。これからわかるように、コロイドの影響を考慮した場合は、最大線量がレファレンスケースよりも増加しているが数倍程度であると推測された[3]。

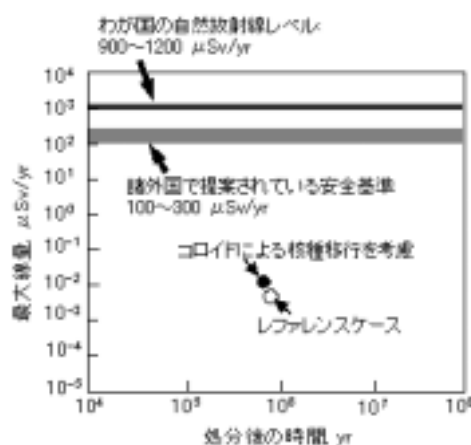


Fig.3 Results of total system performance analysis: magnitudes and times of maximum dose (40,000 waste packages) [3]

ただし、この際のコロイドの影響を考慮した核種移行解析では、核種 - コロイド間の分配係数に関して測定データが少ないことなどから、評価対象核種に対して分配係数

$10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$ を一律に与えた。コロイド濃度に関しては、国内の調査事例として報告される東濃鉱山(堆積岩層)での地下水中コロイド濃度の測定結果を参考に $1 \text{ ppm}(10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3)$ の値を設定した。また、その収着反応は瞬時/線形/可逆と仮定していることなどから、データの不確実性およびモデルの不確実性に関する検討が必要である。

3 「第2次取りまとめ」以降の処分システム性能へのコロイド、有機物および微生物の影響評価に関する研究

JNC では「第2次取りまとめ」以降、コロイドの核種移行に及ぼす影響評価に関する信頼性向上を目的として、Fig. 4 に示すような研究の枠組みを検討し、より現実的な影響評価モデルの構築に取り組んでいる。また、有機物および微生物に関しても、核種移行に及ぼす影響評価に関する基本モデルの開発を目的として、核種との相互作用に関する研究や、有機物および微生物をコロイド相当と見なすことによる核種移行評価モデルの検討を進めている。

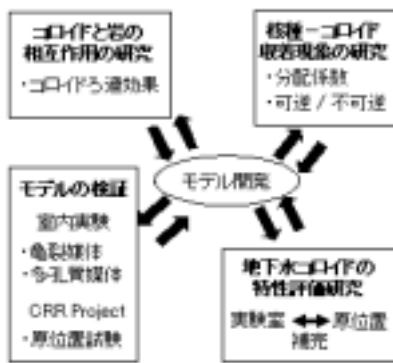


Fig.4 Framework for development of radionuclide-colloid transport model in JNC

3.1 コロイド影響評価に関する研究

3.1.1 地下水中のコロイド特性評価

地下水中には種々のコロイドが存在し、核種を容易に収着すると考えられる。このため、既存坑道を利用して地下水を採取し、地下水中のコロイドの特性評価を実施した。

その結果の一例として、坑道周辺の地質が古期堆積岩系(主に砂岩、頁岩、チャート)である地下水を採取してコロイドの特性評価を行った。その結果、地下水中には無機物および有機物から成るコロイドが存在することを実際に確認するとともに、粒径範囲ごとに評価したコロイド成分濃度は時間経過とともに変化することが認められた[10]。また、Ca成分が豊富な地下水を用いて、大気下および低炭酸素雰囲気中で炭酸分圧を変化させた場合、低炭酸分圧下(低炭酸濃度)ではCaが析出して元々存在するコロイド特性に影響を与えることなども確認された[11]。したがって、地下水中のコロイド特性は地下水化学の影響を鋭敏に受けることから、サンプリング、分析においては原位置条件

を十分に配慮した条件でのデータ取得が必要である。

3.1.2 コロイドの影響を考慮した核種移行モデルの高度化

(1) 室内試験

コロイドの影響を考慮した核種移行モデルの高度化を目的に、亀裂性媒体を充填したカラムを用いて粘土系コロイド共存下での核種の亀裂中移行実験を行い、核種の移行挙動に及ぼす核種-コロイドの収着反応速度の影響を検討した。移行実験では、収着性核種として Cs, コロイドとしてベントナイトコロイドを供した。ベントナイトコロイドは、モンモリロナイトを高純度で含有するクニミネ工業製クニピアFを分散させて供した。カラムには、人工的に単一亀裂(寸法 $50\text{W} \times 50\text{L} \times 0.5\text{t} \text{ mm}$)を加工した花崗岩を充填した。移行実験の結果については、核種-コロイドの収着反応を平衡論および速度論で扱うことができる核種移行計算コード COLFRAC[12]を用いて解析した。COLFRACでは、亀裂中の核種移行挙動について、Fig. 5 に示すように、移流・分散、亀裂表面とマトリクスへの収着およびコロイドへの収着が考慮されている。

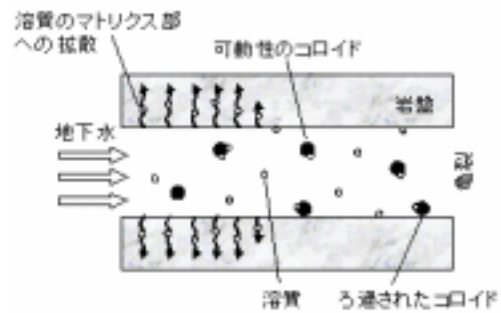


Fig.5 Concept of radionuclide and colloid transport through a fracture rock by the numerical code COLFRAC

Fig. 6 に解析の結果を示すが、その結果に関しては、次のように考察される[13]。Csのベントナイトコロイドへの

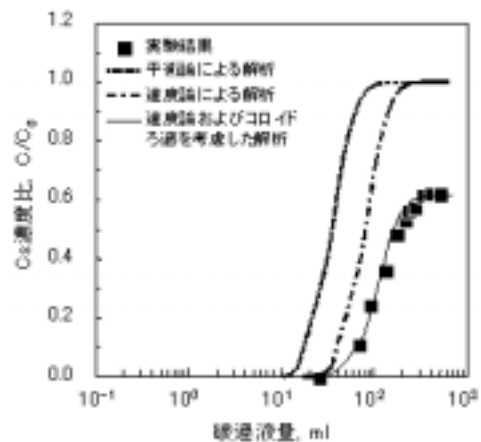


Fig.6 Comparison of experimental data with calculated results by using COLFRAC for elution profile of cesium with bentonite colloids [13]

収着反応を平衡論で解析した結果では、移行挙動が速く示された。換言すれば、この際の解析では Cs - ベントナイトコロイド間の収脱着の反応は瞬時に起こるものとして解くことから、実際の移行試験系での Cs の移行挙動に及ぼすベントナイトコロイドとの収脱着反応の影響が十分に評価できていないことが示唆される。一方、Cs のコロイドへの収着反応を速度論により解析した結果は、平衡論で解いた場合と比較して実験結果と整合する傾向にあることが示され、核種の収着プロセスとして速度論を考慮することの重要性が認められる。また、実験では、亀裂中でコロイドがろ過されることも認められ、コロイドの影響を考慮した核種移行解析モデルの高度化にあたっては、コロイドのろ過効果についても考慮する必要があると考えられる。

また、JNC では、上記 COLFRAC コードを改良して、亀裂ならびに多孔質媒体の両方においてコロイドの移行を取り扱う計算コード COLFRAC-MRL の開発にも取り組んでいる。

さらに、コロイドに対する収着現象の理解とデータの拡充のため、「第2次取りまとめ」以降は、核種とコロイドの収着試験を実施し、データ取得を行っている。試験結果の一例として、Fig. 7 に Cs と粘土系コロイドの収脱着

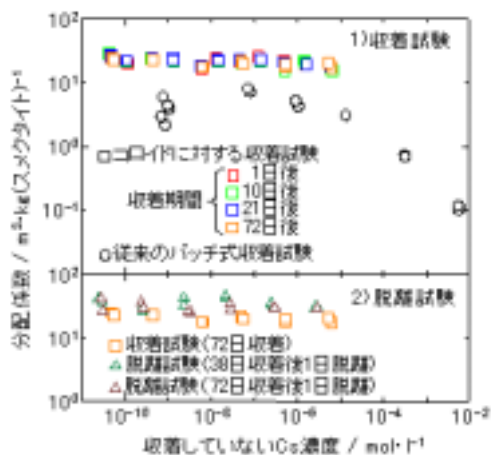


Fig.7 Distribution coefficient of cesium onto bentonite colloid obtained by sorption and desorption experiment

挙動[14]を示す。試験では、粘土系コロイドとしてベントナイトコロイドを供した。ベントナイトコロイドは、上記試験と同様にクニピア F を分散させて供した。Cs 濃度 $10^{-4} \sim 10^{-9}$ mol/l、コロイド濃度 1.02 g/l の条件で収着試験を実施し、分配係数として約 $20 \text{ m}^3/\text{kg}$ の値を得た。この値は、バルクのベントナイトに対する Cs の分配係数より 1 桁以上大きい。また、ベントナイトコロイドに収着した Cs の脱離試験も行い、少なくとも収着した Cs の約 20% が脱離する段階までは収着反応は可逆的であることなど、脱離挙動に関する知見も得ている。

(2) グリムゼル原位置試験(CRR プロジェクト)

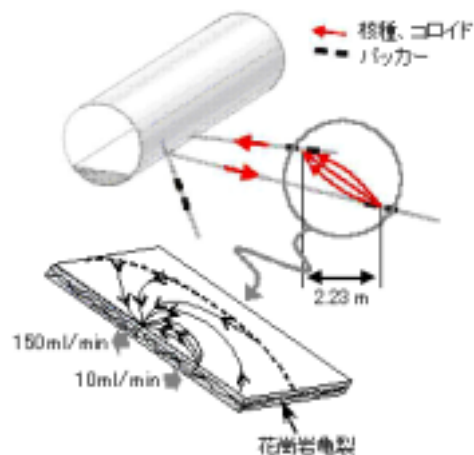


Fig.8 Schematic experimental set-up for CRR project in the Grimsel Test Site

JNC では、1998 年よりスイス放射性廃棄物管理共同組合 (Nagra) との共同研究の一環として、グリムゼル岩盤試験場(スイス)の花崗岩中の透水性亀裂を利用したコロイドと核種の原位置移行試験プロジェクト(CRR: Colloid and Radionuclide Retardation)に参画した。Fig. 8 に、原位置試験の概略図を示す。

原位置移行試験の結果[15]に関しては、実験対象亀裂でのコロイド共存 / 非共存下の核種移行挙動について、上述したコロイドの影響を考慮した核種移行計算コード COLFRAC により解析を行った[16]。Fig. 9 および Fig. 10 には、その一例として、コロイド非共存 / 共存系における Am に関する実験および解析の結果を示す。コロイド非共存系での ^{243}Am の移行に関する解析(Fig. 9)では、核種の亀裂表面への収着速度は遅いものと仮定することにより、非収着性の ^{131}I の移行と同様に移行遅延されない挙動が解析され、実験結果と整合する結果が得られた。また、コロイドを共存する場合の ^{241}Am の移行に関する解析(Fig. 10)では、核種はコロイドに収着しやすくかつその脱着速度は遅

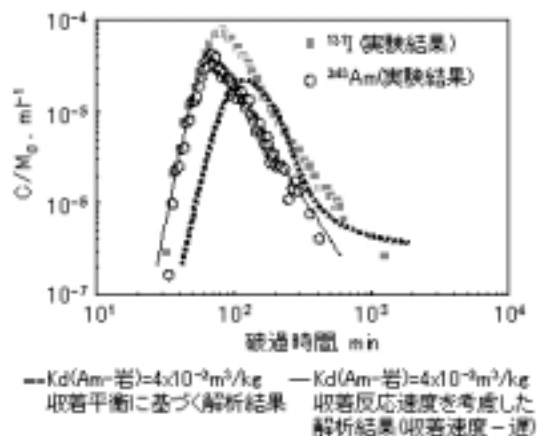


Fig.9 Calculated results by using COLFRAC compared to CRR experimental data for ^{243}Am without colloids

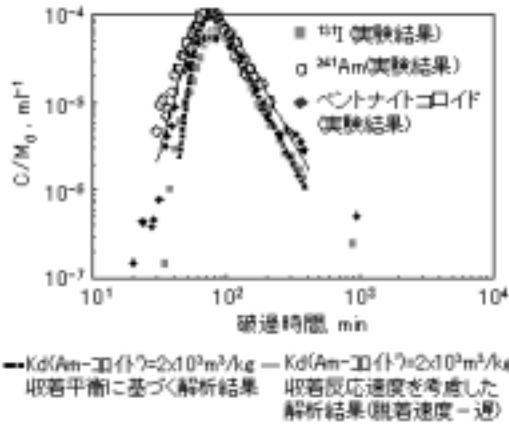


Fig.10 Calculated results by using COLFRAC compared to CRR experimental data for ^{241}Am with colloids

いものと仮定することにより, ^{241}Am はコロイドの移行特性に伴って移行する結果が得られ, 実験結果との整合が見られた。

これらの結果に基づけば, 地層処分システムにおける核種移行に関しては, アクチノイド系核種も核種 - 岩盤および核種 - コロイドの収着反応速度によっては移行遅延されないことから, 支配的になる可能性もあると考えられる。したがって, 地層処分システムにおける核種移行評価のさらなる信頼性向上においては, 核種 - 岩盤, 核種 - コロイドの収着反応速度に関するデータ取得が今後必要と考えられる。

3.2 有機物影響評価に関する研究

有機物の影響評価に関する研究の一つとして, これまでにフミン酸と核種(例えば, Np(IV) など)の相互作用に関する評価を実施した。フミン酸は地層中に存在する代表的な天然有機物である腐植物質の一種である。実験では, 精製した Aldrich 製フミン酸の酸塩基滴定を行って酸解離挙動を評価し, 得られた電荷密度の値を用いて, フミン酸と Np(IV) の錯生成の安定度定数 β_a を求めるとともに, 錯体の結合の強さについて検討した[17]。まず, フミン酸の酸塩基滴定結果から, 錯生成定数の導出に必要な $\text{pH} = 8$ におけるフミン酸の負電荷密度を求め, 4.35 meq/g の値を得た。次に, 初期 Np 濃度 $1.1 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$, $\text{pH} = 8$ で, フミン酸濃度が $5 \sim 500 \text{ mg/l}$ の時の Np(IV) 溶解度を調べた。フミン酸濃度が 5 mg/l の場合でも, 溶液中の全 Np 濃度は, フミン酸が存在しない場合に比べて 1 桁以上増加するのが認められ, 他に競合する配位子が存在しない条件下では, 溶解度の上昇が顕著であることが示された。また, フミン酸濃度が 50 mg/l より高い場合, 添加した 10^{-5} mol/l の Np 全てが溶存化学種として存在した。

Np の原子価を確認するために, TTA-キシレン溶液による溶媒抽出を行う場合, 抽出効率を上げるために pH を 0 付近まで下げるが, その時にフミン酸とともに一部の Np

が沈殿し, 回収されていない可能性がある。このような Np は, 解離しにくい強い結合の Np(IV) -フミン酸錯体と考えられる。溶媒抽出時に有機相に回収される Np の全 Np に対する割合に及ぼす Np とフミン酸の錯生成反応時間の影響を Fig. 11 に示す。フミン酸濃度が 50 mg/l より高い場合, 回収される Np は, 時間とともに減少した。これは, pH を下げた際にフミン酸とともに沈殿する Np が時間とともに増加していることを示している。つまり, 解離しにくい強い結合の Np(IV) -フミン酸錯体が時間とともに増加していると推測される。フミン酸の電荷密度データ及びフミン酸共存下での Np(IV) 溶解度データから, Np(IV) -フミン酸錯体の安定度定数として $\log \beta_a = 26.31$ が得られた。

今後は, Np(IV) -フミン酸錯体の安定度定数の信頼性確認および錯体生成の可逆性を検討するとともに, 詳細なフミン酸の分子量分布等の特性評価を進めていく予定である。

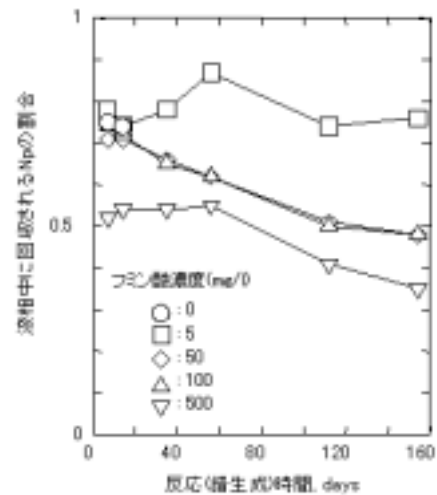


Fig.11 Ratio of neptunium recovered in organic and inorganic phase after TTA-xylene solvent extraction

3.3 微生物影響評価に関する研究

本研究では, 岩盤中の微生物に関する情報を整理し, コロイドの影響を考慮した核種移行計算コード COLFRAC を用いて, 微生物をコロイド相当と見なすことによる核種移行評価の検討を行った。その結果, COLFRAC では, 核種移行に及ぼす微生物 - 核種の相互作用およびバイオフィーム形成の影響に関して, それらの挙動はコロイド - 核種の収着およびコロイドろ過効果として代替評価し得るものと考えられた。そこで, 本研究では, まずは地下環境下における微生物と核種の相互作用に関する現象に着目して情報を収集して, 影響評価に必要な適切なパラメータ値(地下環境下での微生物濃度, 核種 - 微生物の分配係数など)を設定し, COLFRAC により核種移行に及ぼす微生物の影響を解析した[18]。

解析結果の一例を Fig. 12 に示すが、核種が微生物に取り込まれるような場合には、微生物濃度によっては核種移行が促進されることがわかった。このことは、これまでの核種移行評価において岩盤への吸着により移行遅延が期待される核種も、微生物のコロイドの挙動により有意に移行促進される可能性もあることを示している。しかしながら、微生物の存在形態としてバイオフィームが支配的となる場合には、核種が微生物に取り込まれることにより遅延される可能性も十分に考えられる。

今後は、微生物が核種を不可逆的に取り込む事象、バイオフィームが核種移行に及ぼす影響、微生物の成長と死滅、さらには微生物による地下水化学の変化を通じたアクチノイド元素等の化学形態の変化といった詳細な現象を把握し、核種移行への影響を検討する必要がある。また、これらの影響を考慮したモデル開発を行うことにより、微生物の挙動が性能評価に及ぼす影響をより具体的に評価することが可能になると考えられる。

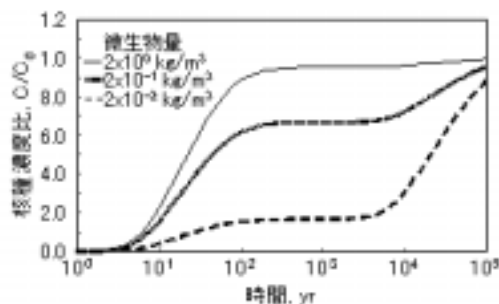


Fig.12 Concentration ratio of radionuclide at transport distance 100m in the geosphere, taking into account of radionuclide-microorganism irreversible sorption effect

4 おわりに

本報告では、地層処分研究開発に関する「第2次取りまとめ」以降、コロイドの核種移行に及ぼす影響評価に関する信頼性向上を目的に実施した現実的な影響評価モデル開発等に関する研究の状況を紹介した。以下に内容を概括する。

(1) 室内および原位置での核種およびコロイドの移行試験結果に関するモデル解析を通して、コロイドの影響を考慮した核種移行評価においては、核種-コロイド間の吸着の反応速度や亀裂によるコロイドろ過効果を考慮することの重要性が示された。

(2) コロイド共存下でのアクチノイドの移行は溶質の場合の移行とは異なることが認められ、アクチノイド-コロイド等(有機物および微生物も含めて)の吸着特性に関するデータ拡充が必要である。

今後は、これらの研究成果を踏まえ、亀裂性媒体および多孔質媒体におけるコロイド、有機物および微生物の影響

評価モデルの精緻化や、実際の地質環境を考慮したコロイド、有機物、微生物の核種との相互作用に関するデータ取得ならびにそのデータベース化などが必要と考えられる。

参考文献

- [1] J. K. Bates, J. P. Bradley, A. Teetsov, et al.: "Colloid Formation During Waste Form Reaction: Implications for Nuclear Waste Disposal," *Science*, **256**, 649(1992).
- [2] A. B. Kersting, D. W. Efurud, D. L. Finnegan, et al.: "Migration of Plutonium in Groundwater at the Nevada Test Site," *Nature*, **397**, 56(1999).
- [3] 核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊3 地層処分システムの安全評価", JNC TN1400 99-023, (1999).
- [4] S. Kurosawa, H. Kato, S. Ueta, et al.: "Colloid Filtration by Sand-bentonite Buffer Materials", *Radioactive Waste Management and Environmental Remediation-ASME*, Nagoya, Japan, H-11, (1999).
- [5] 金持真理子, 久野義夫, 油井三和: "圧縮ベントナイトに対する有機物の透過試験", JNC TN8400 99-080, (1999).
- [6] 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫: "微生物の珪砂混合ベントナイト中の移行に関する実験的研究", JNC TN8430 99-013, (1999).
- [7] R. Pusch: "Piping and Erosion Phenomena in Soft Clay Gels", SKB Technical Report 87-09, (1987).
- [8] S. Kurosawa, H. Kato, S. Ueta, et al.: "Erosion Properties and Dispersion-Flocculation Behavior of Bentonite Particles", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **556**, 679(1999).
- [9] 菅野毅, 松本一浩: "ベントナイト緩衝材の流出特性の評価()", PNC TN8410 97-313, (1997).
- [10] 黒澤進, 油井三和, 久野義夫, 他: "地下水中の天然コロイドの特性評価", 原子力学会「2002秋の大会」予稿集, F68(2002).
- [11] 久野義夫, 上田真三, 黒澤進, 他: "地下水中の天然コロイドの特性評価()", 原子力学会「2003秋の大会」予稿集, K54(2003).
- [12] M. Ibaraki and E. A. Sudicky: "Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media: 1. Numerical formulation and sensitivity analysis", *Water Resources Research*, **31**, 2945(1995).
- [13] S. Kurosawa, M. Ibaraki, M. Yui, et al.: "Experimental and Numerical Studies on Colloid-Enhanced Radionuclide Transport: -The Effect of Kinetic Radionuclide Sorption onto Colloidal Particles-", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **824**, (2004)(in press).
- [14] 飯島和毅, 増田嗣也, 戸村努: "ベントナイトコロイドに対するCsの吸着挙動", JNC TN1340 2004-001, 23, 51(2004).
- [15] A. Mōri, W. R. Alexander, H. Geckeis, et al.: "The Colloid and Radionuclide Retardation Experiment at the

Grimsel Test Site: Influence of Bentonite Colloids on Radionuclide Migration in a Fractured Rock”, *Colloid and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **217**, 33(2003).

- [16] 黒澤進, 茨木希, 油井三和, 他: “グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種及びコロイドの移行(2): - モデル解析 - ”, 原子力学会「2004 春の年会」予稿集, H5(2004).
- [17] 飯島和毅, 飛塚早智子, 小原幸利: “Np(IV)とフミン酸の錯生成挙動”, JNC TN8400 2004-005, (2004).
- [18] 黒澤進, 佐々木良一, 上田真三, 他: “COLFRAC を利用した性能評価に及ぼす微生物の影響に関する評価”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-012, (2004).

