

第4章

安全評価手法

4-1 人工バリア長期挙動評価技術 (ガラス・セメント・粘土)	70
4-1-1 セメント水和物の変質モデル開発	
4-1-2 化学平衡・物質輸送連成計算コードの開発	
4-1-3 ガラス固化体処分時影響評価	
4-2 ニアフィールド中の核種移行評価技術	75
4-2-1 セメント系材料の核種収着挙動の評価	
4-2-2 セメント系材料バリア中の核種拡散による移行抑制効果	
4-2-3 セメント硬化体中での微量元素拡散挙動測定への LA-ICP-MS の適用	
4-2-4 セメント水和物からのコロイドの発生とその特性評価	
4-3 長期の放射性廃棄物処分における 不確実性評価技術	80
4-3-1 リスク論的安全評価手法の開発	
4-3-2 放射性廃棄物処分事業の体系的な品質保証概念の提案	
4-3-3 放射性廃棄物処分における 「技術的に最善の手段 (BAT)」 の考え方の適用	

4-1 人工バリア長期挙動評価技術 (ガラス・セメント・粘土)

4-1-1 セメント水和物の変質モデル開発

(1) C-S-H ゲルの溶解沈殿モデル^{1,2)}

長期にわたりセメント水和物は、地下水との接触によって構成成分が溶解し、化学的に変質する。セメントが変質すると、その化学的バリア性能にも変化が生じることとなるため、セメント水和物の化学的変質挙動を把握することが、長期的なバリア性能の評価において重要となる。セメント水和物は複数の水和鉱物から構成されるが、その溶解挙動において主要となる鉱物がC-S-Hゲル(カルシウムシリケート(CaO-SiO₂-H₂O)水和物)である。C-S-Hゲルの変質のモデル評価は、セメント系材料の長期的変質を評価するための基盤となる重要性をもつ。

当研究所は、C-S-Hゲルの新たな熱力学的溶解沈殿モデルを開発した。本モデルの特徴は、全てのCa/Si比にわたってC-S-HゲルをCa(OH)₂とSiO₂の非理想固溶体として表現し、これらのモデル固相の溶解反応のlog Kを、Ca/Si比の関数として数学的連続性を確保して記述したことにある。この特徴によって、C-S-Hゲルの非調和な溶解(元素組成が不定比に変化)を精度よく予測できるとともに、図4-1-1に示すように、従来モデルでは不可能であったCa/Si比の連続的な変化を伴う沈殿反応も、現象に即して再現することができる。また、C-S-Hゲル、ポルトランドライト、エトリンサイトなどの鉱物の共存系であるセメント水和物の溶解挙動についても、従来モデルと比較して、よりよく再現することができる。

当研究所が提案したC-S-Hゲルの溶解沈殿モデルは、C-S-Hゲルの非調和な溶解・沈殿に支配される条件のセメント系材料であれば、変質挙動を評価するための基礎モデルとして適用が可能である。なお、本モデルは上記の特徴から、我が国のTRU廃棄物処分に関する技術的検討³⁾において、セメント系人工バリアの変質解析のための基礎モデルとしてすでに採用された実績がある。

(2) 海水系地下水におけるセメント水和物の化学的変質⁴⁾

地下処分場環境において、処分施設に使用されるセメント系材料は、地下水と接触して変質するものと考えら

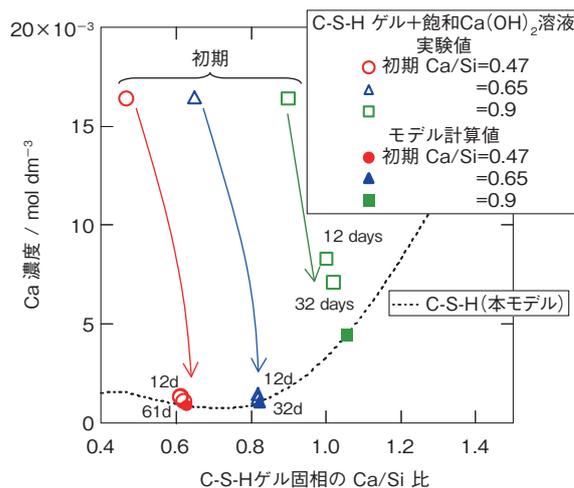


図 4-1-1 C-S-HゲルへのCa(OH)₂溶液接触による固相組成変化(Ca沈殿)に関する実験結果とモデル計算結果の比較

れる。我が国における処分候補地の可能性を考慮すると、海水起源の地下水など幅広い条件に対処できる評価手法の開発が必要である。

海水系地下水では、セメント系材料からのCa成分の溶脱が促進される可能性が知られているが、その反応機構については十分に解明されていなかった。そこで当研究所は、海水成分がセメント水和物の化学的変質に及ぼす影響因子を実験的に把握するとともに、その化学的変質反応のモデル化を行った。

NaCl濃度をパラメータとしたC-S-Hゲルの溶解度測定の結果、Na⁺はC-S-Hゲルに、その構成成分であるCa²⁺との交換反応によって収着することを見出した。これにより変質への影響として、NaCl濃度の増大により、Naとの交換によってC-S-HゲルのCaの溶脱が促進されることが明らかとなった。この結果に基づき、液相中のNaとC-S-Hゲル中のCaのイオン交換モデルと、C-S-H非調和溶解沈殿モデルを組み合わせた評価手法を構築した。

処分環境におけるセメント系材料の変質へのNaCl濃度の影響については、Ca/Si比の高い状態では、Caの溶解度が高くなることで交換性Naとの競合が起こり、イオン交換が抑制されるため、イオン強度の増大によるC-S-Hゲルの溶解度の増大を評価すれば十分であるが、長期の溶脱による変質が進みCa/Si比が低くなる場合は、NaとC-S-Hゲル中のCaの交換による溶脱促進の可能性を考慮する必要があると指摘できる。

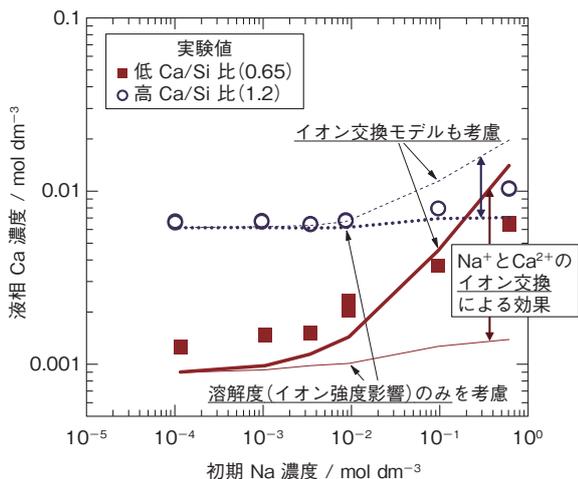


図 4-1-2 C-S-H ゲルからの Ca 溶脱の NaCl 濃度依存性に関するモデル解析結果

4-1-2 化学平衡・物質輸送連成計算コードの開発

(1) 開発コード群の概要

当研究所が開発・保有する人工バリア長期挙動評価、および核種移行評価を含めた性能評価コードを表 4-1-1 に示す。これらのうち、CCT、CCT-P、CCT-F は、4-1-1 (1) の C-S-H ゲルの溶解沈殿モデルを組み込んで開発したものであり、セメント系材料を含む処分施設の長期挙動評価を対象としている。

表 4-1-1 電力中央研究所の人工バリア性能評価コード

コード名	略称
化学平衡・物質輸送連成計算コード (コンパートメントモデル、多孔質媒体対象)	CCT ⁵⁾
化学平衡・物質移行連成計算コード (移流分散方程式、多孔質媒体対象)	CCT-P ⁶⁾
化学平衡・物質移行連成計算コード (準 2 次元、亀裂媒体対象)	CCT-F ⁷⁾
ガラス固化体溶解挙動解析コード	STRAG4 ^{8,9)}
オーバーバック容器腐食挙動解析コード	CRANP ⁸⁾
緩衝材中核種移行解析コード	GESPER ¹⁰⁾
人工バリア安全評価コード	RAPRAN ^{11,12)}
人工バリア性能不確実性解析コード	IMUPAS ^{13,14)}

(2) セメント硬化体の溶脱挙動解析^{6, 15)}

セメント硬化体中で構成元素の溶脱や二次鉱物の沈殿が起こると、セメント硬化体固相内部の物質移行特性が変化し、溶脱による変質の進行が抑制されることを示す実験結果を得ている¹⁶⁾。この結果は、セメント系人工バリアの表面で起こる沈殿反応が、セメント系材料とベ

ントナイト系材料あるいは岩盤との界面での物質移動に大きく影響する可能性を示すものである。そこで当研究所では、鉱物の溶解沈殿に伴う固相内の空間的な物質移行係数の不均質な分布を再現するモデルを構築し、セメント硬化体の溶脱挙動を評価するツールとして、解析コード CCT-P を開発した。

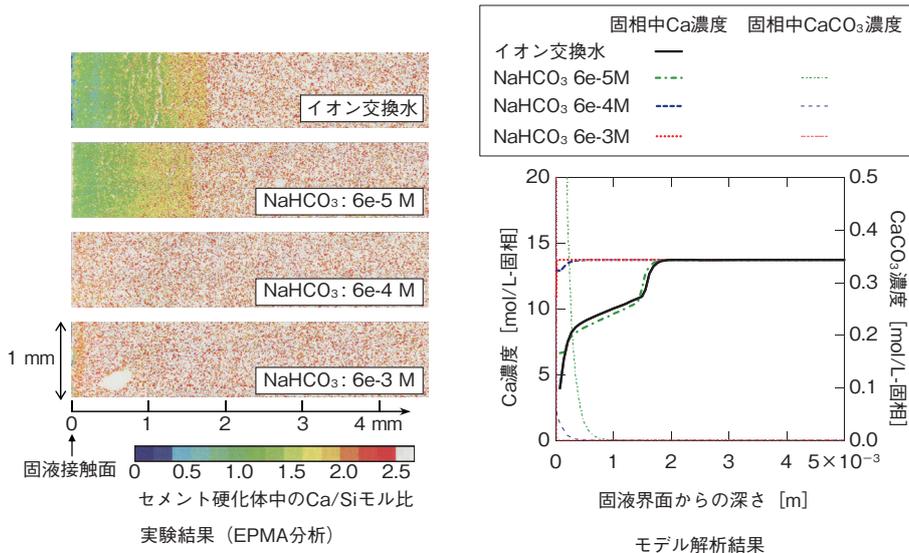
本手法は、セメント硬化体中の溶解／沈殿による鉱物量の増減から空隙率を算出し、これを拡散係数と遅延係数の変化に反映させたモデルを組み込んだものである。さらに、セメント硬化体表面近傍に炭酸カルシウム (CaCO₃) のような溶解度の低い沈殿が生じる場合には、これが物理的な閉塞の効果を示して硬化体内部からの成分の溶脱が極度に抑制されることを表現するため、浸漬溶液とセメント硬化体固相の間に Ca²⁺ と HCO₃⁻ が反応する層を追加した系を解析可能とするモデルを構築した。

開発した手法を用いて、セメント硬化体試料をイオン交換水および地下水成分のうち、重炭酸イオンを含んだ溶液 (NaHCO₃ 溶液) 中に長期間浸漬した場合の溶脱挙動を解析した結果を図 4-1-3 に示す。解析結果は実験結果を精度よく再現しており、溶脱により硬化体内部で空間的な不均質性を生じた場合の変質挙動、および硬化体表面に難溶性の沈殿が生じた場合の溶脱抑制挙動について、実現象に即して評価が可能であることを示した。本手法は、セメント系材料で構築される放射性廃棄物処分施設を対象に、地下水成分との反応を考慮した場合の長期的な変質挙動を、現実的に評価するツールとして活用が期待できる。

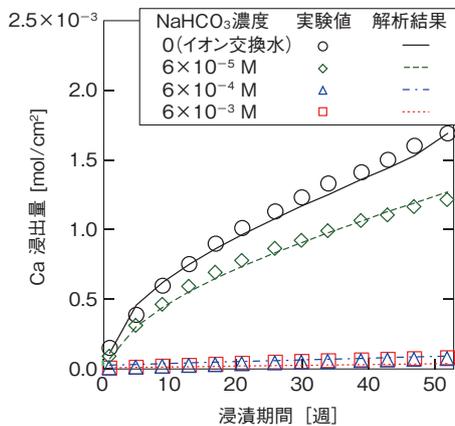
(3) 亀裂を有するセメント系材料の化学的変質解析¹⁷⁾

既存の性能評価の多くでは、セメント系材料について、均一な多孔質媒体としてのモデル表現のみで解析評価がなされている。しかし、実処分場の土木構造物ではひび割れ発生の可能性を否定できず、ひび割れ部において変質が卓越して不均質に進行する可能性が考えられる。そこで当研究所では、ひび割れを有するセメント硬化体の変質評価手法の開発を行っている。

人工的な単一ひび割れを導入したセメント硬化体試料を用いた連続通水実験によって、ひび割れに沿った変質現象を把握するとともに、これを表現するための準 2 次元の物質移行モデルを構築し、さらに 4-1-1 (1) で述べた C-S-H ゲルの非調和溶解沈殿モデルと組み合わせること



(a) 固相中の組成分布



(b) 構成成分の溶脱挙動

図 4-1-3 セメント硬化体の変質解析（浸漬実験との比較）

で、亀裂性セメント媒体の変質解析コード CCT-F を開発した。検討結果を図 4-1-4 に示す。

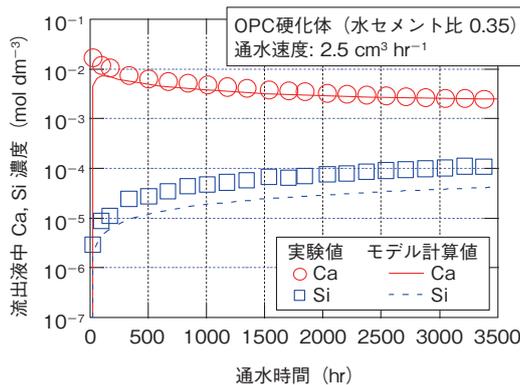
実験では、ひび割れ表面から Ca が溶脱し、表面近傍に変質層が生成した。変質層では、硬化体固相内部から表面に向かって Ca/Si が低下していた。ひび割れを通過した排出溶液の組成については、通水量が大きくなるに従って、Ca 濃度は低下、Si 濃度は増加した。これは初期の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解に続き、固相中の Ca/Si 比の低下を伴う C-S-H ゲルの非調和溶解が起こることで説明され、固相の分析結果と整合するものであった。これらは、C-S-H 系鉱物を主要構成要素とするセメント水和物の変質現象を特徴づけるものである。

開発した CCT-F コードを用いた解析結果は、単一ひび割れセメント硬化体の変質実験結果を妥当に再現した

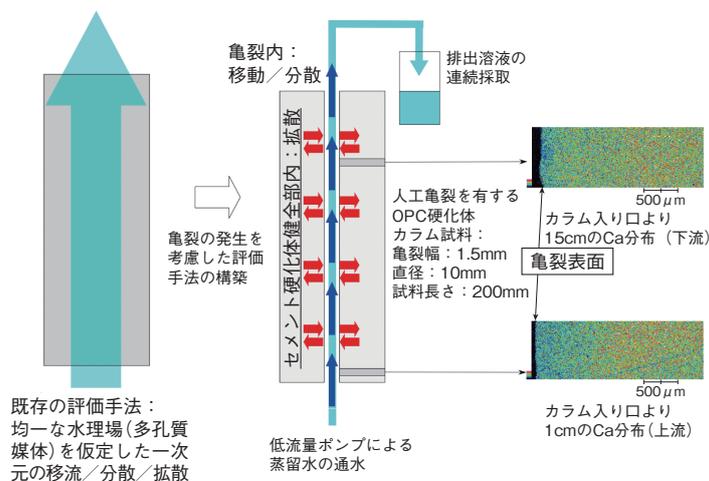
ことから、ひび割れを有するセメント媒体の変質評価に有用な解析手法としての妥当性を確認できた。しかし同時に、変質現象をより精度よく再現、予測するためには、速度論的な考察や間隙率変化を伴う変質の影響も含めた、拡散についてのより詳細な検討が必要であることも明らかとなった。これらを考慮した物質移行モデルの高度化については、今後の課題として引き続き検討する必要がある。

(4) セメント系材料を使用した処分施設周辺の化学環境解析¹⁸⁾

物質移行モデルとしてコンパートメントモデルを採用した化学平衡・物質輸送連成計算コード CCT を用いて、人工バリアシステムの性能評価に必要な情報となる、セ



(a) 流出液組成の経時変化



(b) 評価体系 (実験、モデル) と固相中の組成変化観察結果

図 4-1-4 人工亀裂セメント硬化体の変質に関する検討結果

メントから溶出する高 pH・高カルシウム濃度の地下水による周辺岩盤の変質挙動を試算した。

周辺岩盤は、ケイ酸塩鉱物の組成割合の高い花崗岩を想定し、石英 (Quartz, SiO_2)、カリ長石 (K-Feldspar, $\text{K Al Si}_3\text{O}_8$)、曹長石 (Albite, $\text{Na Al Si}_3\text{O}_8$) の混合物 (体積比としてそれぞれ 30%、20%、50%) と仮定して単純化した。図 4-1-5 に示す例のように、周辺岩盤中に石英などのケイ酸塩鉱物の溶解によって pH 変化が緩衝された領域 (pH が約 10.7) が形成されること、一方で、セメントから溶出した Ca とケイ素 (Si) の反応により、二次鉱物として C-S-H ゲルが析出することが示唆された。なお、低アルカリ性セメント (普通ポルトランドセメント (OPC) に SiO_2 を添加したポゾラン材料高含有セメント、以下、HFSC と記す) を処分施設に使用した場合には、構成鉱物の溶解や二次鉱物としての C-S-H ゲルの生成はほとんど見られず、周辺岩盤への影響が低

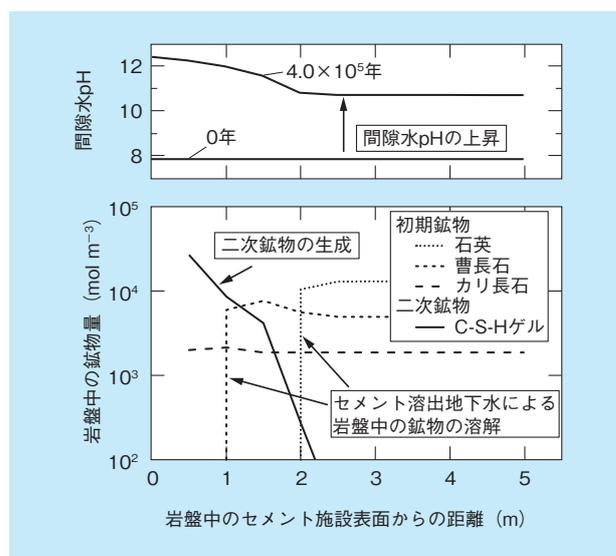


図 4-1-5 セメント溶出液の影響を受けた周辺岩盤の間隙水 pH および鉱物組成の分布 (4.0×10^5 年後)

減される可能性が示された。

4-1-3 ガラス固化体処分時影響評価¹⁹⁾

高レベル放射性廃液のガラス固化体製造時には、ガラス溶融時やキャニスターへの充填時の温度条件などにより、ガラスの成分元素や放射性核種の一部がガラスに取り込まれない事象（結晶化）が懸念され、析出相が黄色を呈することから「イエローフェーズ」と称される。日本原燃におけるアクティブ試験においても、イエローフェーズと考えられる相の発生が確認されたため、この微量の結晶相に関する調査および解析を行い、処分時に与える影響を評価した。

国内の処分の影響評価事例である「HLW 第2次取りまとめ」を参考に、文献情報をもとに仮定や条件を設定することにより、ガラス固化体中に結晶相が生成した場合の地層処分への影響を試算した。すなわち、高レベルガラス固化体の処分時の評価核種として⁹³Zr、⁹⁹Tc、¹⁰⁷Pd、¹³⁵Csに着目し、核種のインベントリの10%が随伴した場合を想定し、これらがガラス固化体の溶解寿命に比較して極めて短い期間（1年間を仮定）に早期溶出するとして、人工バリア、天然バリアを介した核種移行計算を行い、早期溶出しない（イエローフェーズが生じない）場合との比較により、ガラス固化体の処分時の影響の程度を把握した。

評価コードは当研究所開発による核種移行解析コードRAPRAN^{11, 12)}を一部改良したものを使用し、人工バリア領域を多孔質媒体モデルとして差分法で、天然バリアは多孔質媒体モデルと亀裂媒体モデル（平行平板モデル）の両者を採用し、前者は差分法で、後者は解析解で解析した。

種々の条件で核種移行計算を行った結果、次の結果が得られた。緩衝材からの漏出フラックスは、結晶相生成による早期溶出の影響により、初期に¹³⁵Csのフラックスが高くなったが、⁹³Zrには影響が見られなかった（図4-1-6）。⁹⁹Tcと¹⁰⁷Pdについては、ガラス固化体から溶出して緩衝材領域に入った時点で沈殿を生成することにより溶解度制限となるため、早期溶出の有無に関わらず緩衝材外側からの漏出フラックスに違いが見られなかった。また、天然バリア領域の移行まで考慮した解析では（図4-1-7）、ガラス固化体からの⁹³Zrおよび¹³⁵Csの早

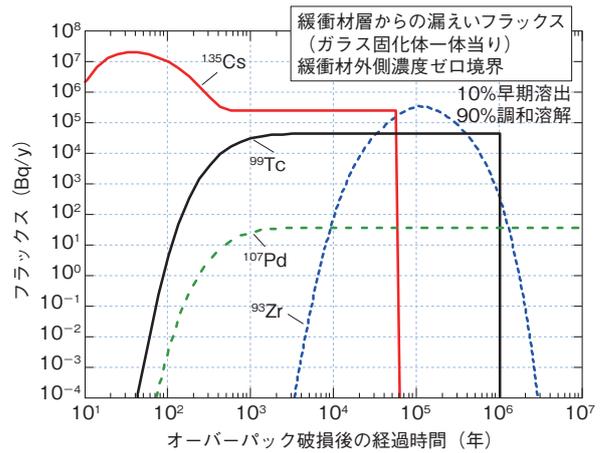


図 4-1-6 緩衝材からの漏出挙動
(インベントリの 10% が早期溶出する場合。天然バリアを亀裂性媒体モデルで評価。緩衝材外側での地下水濃度をゼロと設定)

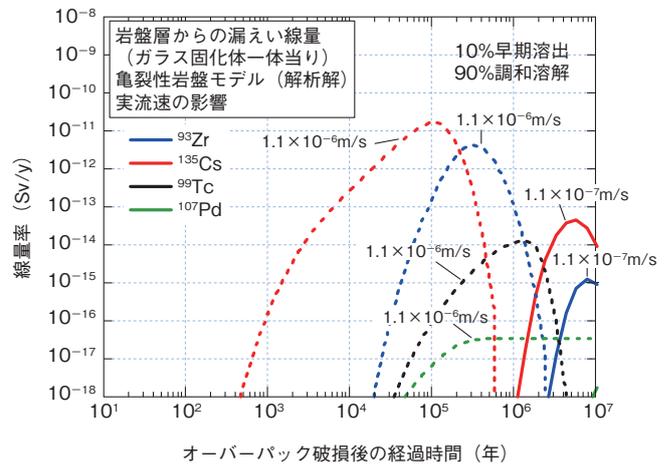


図 4-1-7 岩盤(天然バリア)からの漏出挙動
(インベントリの 10% が早期溶出する場合。ガラス固化体溶解寿命の影響。天然バリアを亀裂性媒体モデルで評価)

期溶出による被ばく線量への影響はほとんどないという評価結果となった。これは、緩衝材や天然バリア中での核種の収着による移行遅延や分散の効果により、ガラス固化体から早期に溶出した放射性核種の影響が無視できるほど小さくなったためである。⁹⁹Tcと¹⁰⁷Pdについては前述の理由により、線量への早期溶出の影響は見られなかった。これにより、今回設定された仮定においては、ガラス固化体以外のバリア機能や溶解度などの核種の特性により、結晶相生成の影響はない、または、非常に小さいことが評価結果として得られた。

これらの評価結果については、原子力学会「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」特別専門委員会の報告

書¹⁹⁾において、「イエローフェーズを含むガラス固化体が発生したとしても、処分システムの頑健性により、結果としての評価に大きな影響を及ぼすことはないことを概略評価したものとしては妥当なものである」と評価され、「さらに詳細で包括的な評価が必要であり、その妥当性をより確かなものとするためには、継続的に検討を行いつつ、着実に裏付けていくことが望ましいと判断する」とコメントされた。

4-2 ニアフィールド中の核種移行評価技術

4-2-1 セメント系材料の核種収着挙動の評価¹⁻³⁾

核種移行評価の際の基礎的な知見獲得を目的として、当研究所では、放射性廃棄物処分環境を想定した収着試験を実施するとともに、得られた収着データを熱力学的モデルで解析することにより、収着機構について研究を進めてきた。

セメント系材料による核種固定化機構として、セメント水和物との共沈殿の生成の可能性や、セメント系材料の水和時に、表面が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-Hゲルで覆われることを考慮し、アクチニド元素がセメント水和物表面の構成鉱物と共沈殿を生成して固定化されるとした、「表面共沈モデル」を提案した。本モデルは、セメント系材料へのアクチニド元素の収着は、主にC-S-Hゲルへの収着によって支配されると考え、アクチニド元素の水酸化物種がC-S-Hゲルの表面に吸着した後、C-S-Hゲル内部に取り込まれて生じた固相の溶解度制限によって固定化を表現するものである。図4-2-1に示すように、表面共沈モデルによって、中性化学種で溶存するアクチニド元素（トリウム、ネプツニウム、プルトニウム）のセメント水和物への収着実験結果を妥当に再現できた。表面共沈モデルは、固相の溶解度制限で放射性核種の固定化を表現するため、異なる環境条件下での核種収着評価への応用が期待できる。

処分施設に使用されたセメント系材料は、長期にわたって地下水への溶脱、反応性イオンとの反応による二次鉱物生成、あるいは熱による鉱物の変成などによって化学的に変質すると考えられる。セメント系材料に期待される化学的バリア性能は、構成鉱物による高い平衡

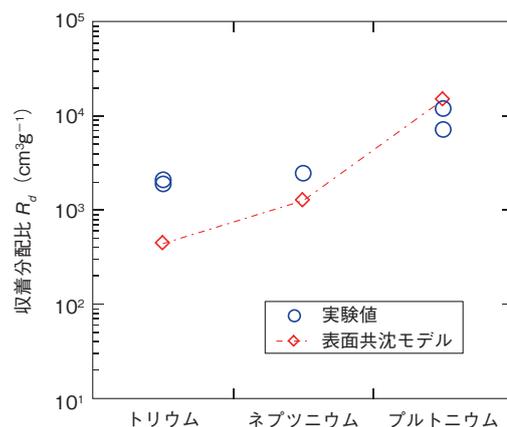
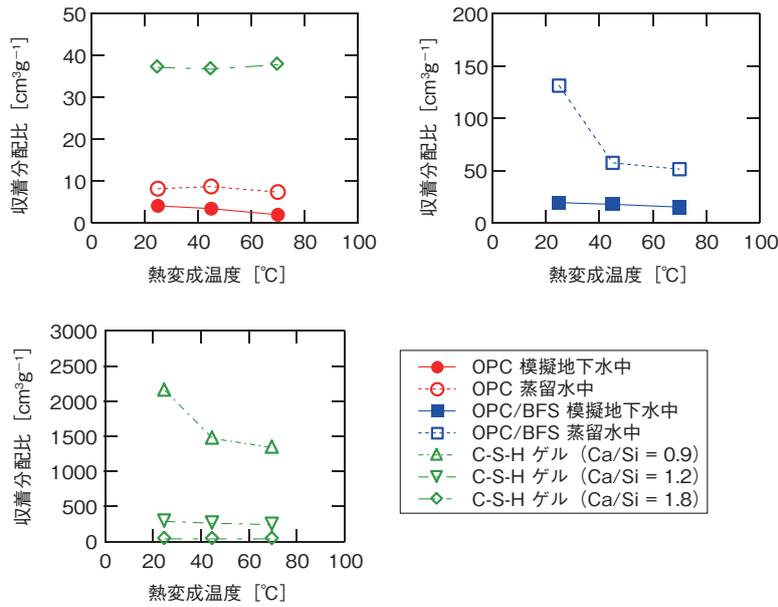


図 4-2-1 セメント (OPC) 水和物へのアクチニド収着のモデル解析結果

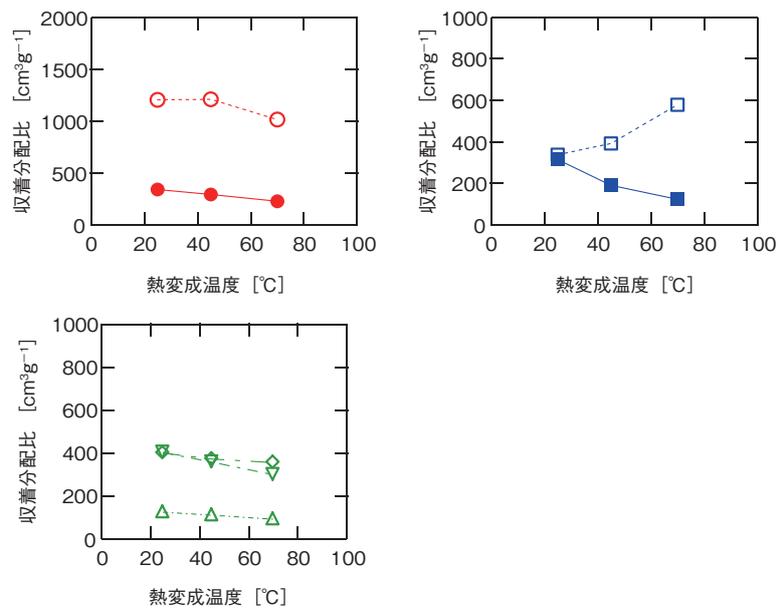
pH や、収着という化学現象によるものであるため、セメント系材料そのものの化学的な変質は、化学的バリア性能の変化に直結する可能性がある。当研究所では、化学的変質のうち熱変成反応に注目し、熱変成前後の核種収着特性の変化を実験的に把握するとともに、熱変成による構成鉱物の変化と収着性能の変化を関連付けた評価を試みた。

セメント (OPC、高炉スラグ混合セメント (OPC/BFS)) 水和物を蒸留水、海水系模擬地下水中で1カ月間、70℃まで加熱し、熱変成した試料を得た。熱変成後の各セメント試料に対する、ストロンチウム (Sr^{2+} 、陽イオン形態) およびセレン (SeO_3^{2-} 、陰イオン形態) のバッチ式収着実験を行った。結果を図4-2-2に示す。SrのOPC水和物、OPC/BFS水和物への収着では、熱変成温度の上昇により収着分配比は低下した。これは、セメント水和物を構成するC-S-Hゲルへの収着分配比の低下が原因であった。Seの収着では、蒸留水および模擬地下水中で熱変成したOPC水和物、模擬地下水中で熱変成したOPC/BFS水和物については、熱変成温度の上昇により収着分配比は低下した。これは、陰イオンを収着する構成鉱物のエトリンガイトが熱分解して消失することが主な原因であった。一方、蒸留水中で熱変成したOPC/BFS水和物では、Seの収着分配比が高くなった。これについては、エトリンガイトに代わって、陰イオンをより強く収着するモノサルフェイトが安定に存在するためであることが明らかとなった。

以上により、熱変成によってセメント系材料の収着性能が変化する可能性があり、その変化はセメントの構成



(a) ストロンチウム



(b) セレン

図 4-2-2 熱変成したセメント水和物および C-S-H ゲルへの吸着実験結果

鉍物の変化に関係づけて説明可能であることを示した。変質によって化学的バリア性能は向上する場合と低下する場合があり、一概に変質を「劣化」とする保守的評価に頼るのみでなく、現実的な評価を行うことが重要であると指摘できる。従って、本研究のような、反応機構の整理を継続して進めることが、長期の安全評価の信頼性を向上するために重要である。

4-2-2 セメント系材料バリア中の核種拡散による移行抑制効果⁴⁻⁷⁾

OPC および OPC にフライアッシュを混合したセメント (FAC) の硬化体について、酢酸および TRU 廃棄物の重要核種の評価を想定した、ヨウ素の透過型拡散実験によって拡散挙動を把握した。その結果、OPC 硬化体試料については $10^{-12} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ オーダーの有効拡散係数が得

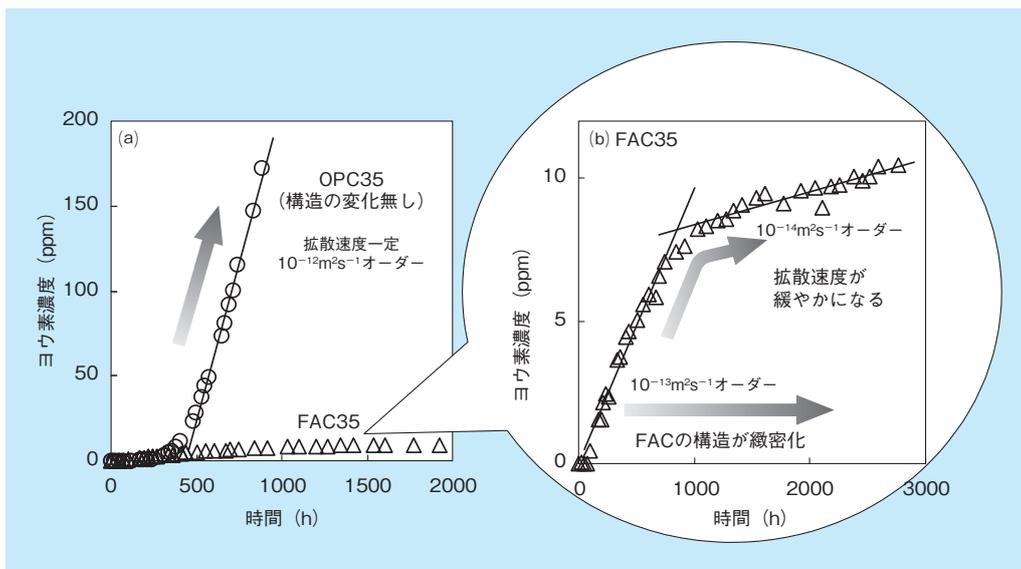


図 4-2-3 ヨウ素の拡散実験結果（低濃度側セルにおけるヨウ素濃度の経時変化）

られたのに対し、FAC 硬化体試料については、酢酸およびヨウ素ともに実験開始後では $10^{-13} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ オーダー、数カ月後では $10^{-14} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ オーダーの有効拡散係数が得られた。セメント硬化体中の物質移動は拡散に支配されており、それは十分に遅いことが示された。また、FAC 硬化体試料は、OPC 硬化体試料と比較して一桁小さい有効拡散係数を有するとともに、時間の経過に従ってさらに小さい拡散性を示すことが明らかになった。図 4-2-3 にはヨウ素の実験結果を示す。OPC 試料では、拡散速度が一定となる結果が得られたのに対し、FAC 硬化体試料では、時間の経過とともにヨウ素の拡散が緩やかになることが分かった。この現象は、FAC 硬化体試料に含まれるフライアッシュの水和反応の進行により、FAC 硬化体試料がより緻密な構造に変化したことに起因するものと考えられる。なお、酢酸の拡散についても、同様の現象が見られた。

これらのことは、FAC で構成された人工バリアが、低吸着性の有機炭素やヨウ素についても満足する遅延効果を発揮するとともに、処分場閉鎖後の長期にわたって、さらなる核種移行抑制効果の発現が期待できることを示唆するものである。

また、セメント系材料の熱変質が、核種の拡散挙動に及ぼす影響についても検討した。60℃および80℃で6カ月間熱負荷をかけた OPC 硬化体試料を使用した酢酸の拡散係数取得を実施したところ、図 4-2-4 に示すように、未変質の OPC 硬化体試料の空隙率依存性と比較し

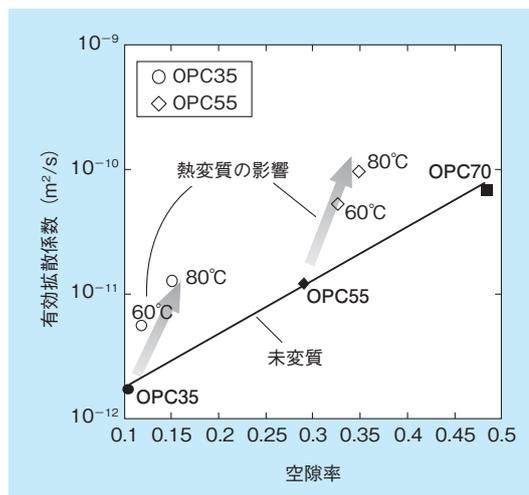


図 4-2-4 セメント硬化体に対する酢酸の有効拡散係数の空隙率依存性

て、熱変質影響による拡散係数の上昇が大きいことが分かった。このことから、熱変質によってセメント硬化体中で空隙の連結性が大きくなるなどのような、溶質の拡散がより速くなるような空隙構造の変化が生じている可能性が示唆される。

4-2-3 セメント硬化体中での微量元素拡散挙動測定への LA-ICP-MS の適用^{8,9)}

透過型拡散実験によるデータ取得は、試料や実験条件によっては非常に時間を要する。また、FAC 試料のように、時間経過とともに水和反応が進んで構造が緻密化

するような場合も同様であり、このような場合には、セメント硬化体内の放射性核種や微量元素の分布から拡散挙動の情報を得ることが機構解明に有効となる。さらに、多くのアクチニドやセシウム(Cs)のように比較的収着性が大きい元素については、硬化体内の元素分布から見かけの拡散係数が求められている。

そこで、硬化体内での微量元素の分布測定を比較的簡便に実施できる機器分析手法として、レーザーアブレーション-誘導プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)の適用性を調べた。本装置では、レーザー照射により固体表面を微粒化して直接粉末を採取し、ICP-MSで測定する。そのため、特別な試料の前処理が必要なく、多元素を同時に高感度で定量することが可能であるため、近年、岩石や金属試料中の微量元素分析に有効性が示されつつある。

本装置を用いてセメント硬化体中に拡散させたヨウ素(I)、セシウム(Cs)、ストロンチウム(Sr)(いずれも安定元素)の分布状況測定した。Csの浸入型拡散実験(図4-2-5)に供したFAC硬化体断面の元素分布を同装置で測定したところ、試料から薄片を作製し放射能測定や元素濃度測定により分布を調べる従来の分析法に比較して、迅速・簡便かつ再現性のよい詳細なデータを取得できた(図4-2-6)。分布データから見かけの拡散係数を算出した結果、既存の方法で求めた拡散係数と同オーダーの値となった。

なお、同一試料を従来の代表的な固体表面元素分析装置である走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型X線分析装置(SEM-EDS)で測定したが、いずれの元素も検出限界以下となった。従って、固体中の微量な元素の測定が必要な場合にはLA-ICP-MSによる測定が効果的かつ適切な定量性を有し、処分場の性能評価に反映できる詳細な元素分布情報取得の可能性が示された。

当研究所は、LA-ICP-MSによる分析手法を、6価ウランのセメント硬化体中での拡散係数の測定にも適用した。結果を図4-2-7に示す。

セメント硬化体中への6価ウランの浸入は、収着分配比が高いため、表面近傍数百 μm 程度のごく狭い範囲にとどまるが、LA-ICP-MS法を適用したことによって、固相中の6価ウランの分布の詳細な定量測定が可能となり、精度のよい拡散係数が得られた。6価ウランの見かけの拡散係数はOPC硬化体中で $\sim 4 \times 10^{-16} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、FAC

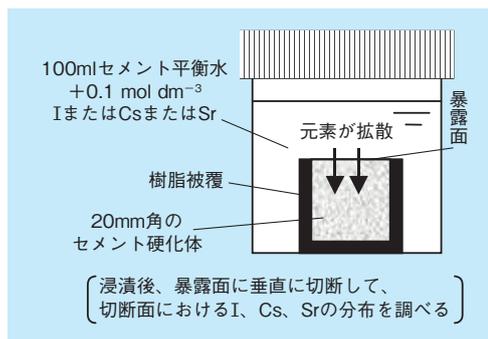


図 4-2-5 浸入型拡散実験の模式図

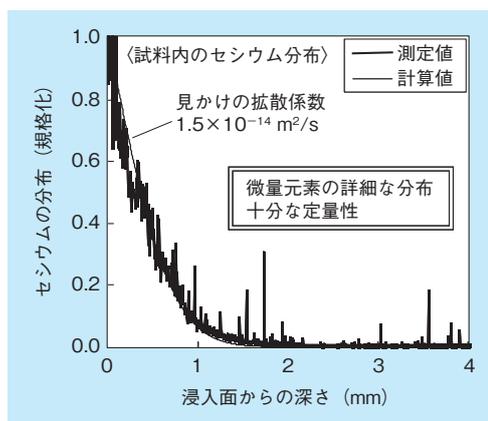


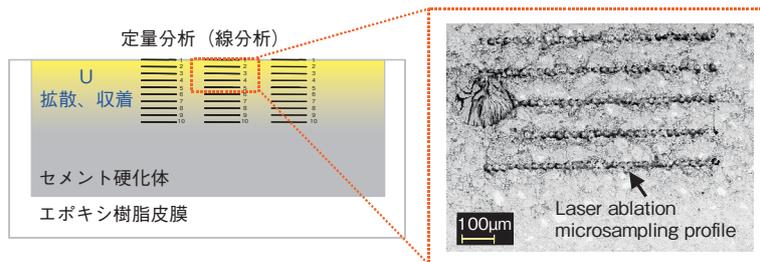
図 4-2-6 LA-ICP-MS 測定による Cs の分布

硬化体中で $\sim 2 \times 10^{-17} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ と非常に小さい値であり、セメント硬化体中における6価ウランの移行は低拡散性によって強く抑制され、バリア性能を十分に期待できることが示された。

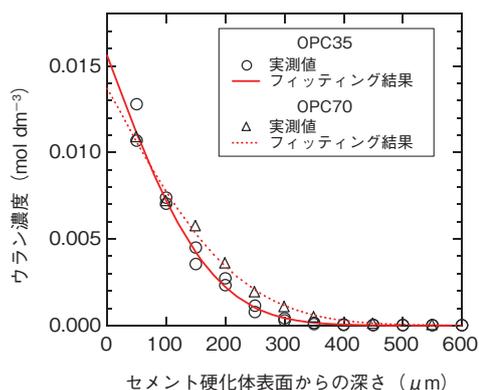
これらの測定結果は、処分施設におけるアクチニド元素の移行評価のための重要な情報となり、安全評価の基盤となる情報として活用が期待できる。

4-2-4 セメント水和物からのコロイドの発生とその特性評価¹⁰⁾

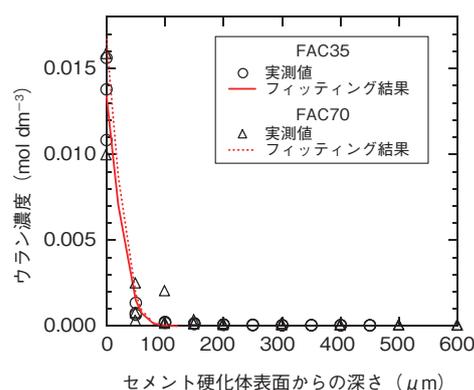
放射性廃棄物処分システムの性能評価において、放射性核種は地下水中にイオンや錯体といった形態で溶解し、移流・拡散によって移行する評価されることが多いが、その一方で地中における放射性物質などの汚染物質の移行に、地下水中のコロイド粒子の関与の可能性があることが認識されている。これは、地下水中に安定に存在するコロイド粒子に放射性核種が収着するなどし、イオン形態の核種とは異なった移行挙動をとるものと考えられ



(a) LA-ICP-MSによるセメント硬化体の分析



(b) 拡散実験のフィッティング解析結果(OPC)



(c) 拡散実験のフィッティング解析結果(FAC)

図 4-2-7 セメント硬化体中での6価ウランの拡散係数の測定結果

ている。セメントは処分施設への利用が検討されているが、その浸漬液はイオン強度が高くなるためにコロイドの安定性は低いと考えられていることから、実際に試験評価した例は非常に少ない。しかし、長期的な溶解劣化により組成の変化したセメント水和物や、周辺環境への化学的影響の少ない低アルカリ性を示すセメント水和物などについては、評価しておく必要がある。そこで、セメント系材料の地下水への浸漬により発生するコロイドの有無を確認し、その量、粒径、組成を把握した。また、

これらのコロイドの特性を評価し、その挙動を検討した。

対象として、溶解度の高いCa(OH)₂の含有量が低く、比較的コロイドを発生しやすいと考えられたポゾラン材料高含有 OPCセメント(以下、HFSC)を選択し、最長で8カ月の浸漬試験から発生したコロイドを、透過型電子顕微鏡によって観察した。その結果、次のことが示された(表 4-2-1)。

- ・HFSCからは、Si-Al-Caを主成分とする平均粒径50nmから200nm程度のコロイドが約10¹⁰～10¹²個

表 4-2-1 常温でHFSCから浸出したコロイドのTEM観察結果

固液比	浸漬期間2カ月			浸漬期間8カ月		
	コロイド数濃度 (N・L ⁻¹)	粒子形状及び組成	粒径分布、平均粒径 (nm)	コロイド数濃度 (N・L ⁻¹)	粒子形状および組成	粒径分布、平均粒径 (nm)
1:5	<1 × 10 ¹¹ (*)	D:クラスタ様の楕円形状のSi-Al-Ca	比較的粗大で広く分布	<6.3 × 10 ¹⁰ (*)	D:クラスタ様の楕円形状のSi-Al-Ca M:楕円形状のCa (Si, Fe, Ti)	比較的粗大で広く分布 200
1:50	1 × 10 ¹²	D:クラスタ様の楕円形状のSi-Al-Ca(Cl, S, K, Ti) M:棒状のAl-Si(Ca)、板状のCa	20-500 68	1.1 × 10 ¹²	D:楕円形状のSi-Ca-Al(Mg, Fe, S) M:棒状 M:板状	10-300 66
1:100	4 × 10 ¹²	D:クラスタ様の楕円形状のSi-Al-Ca(Cl, S, K, Ti) M:棒状のAl-Si(Ca)	20-500 76	1.1 × 10 ¹²	D:楕円形状のSi-Ca-Al(Mg, Fe) M:棒状	10-300 68

D: Dominant M: Minor ※artefactの発生

／ ℓ 観察され、平均粒径の小さいコロイドは比較的安定性が高い。

- ・観察されたコロイド数濃度や粒径は固液比によって変化し、固液比が高い場合にはコロイド数濃度は減少し、粒径は増大した。

この観察結果を、このコロイドの表面電位や模擬浸漬液による粒径分布変化測定結果と併せて評価した結果、次の結果が得られた。

- ・HFSC から発生したコロイドの数濃度や粒径は、浸漬液中のカルシウム濃度に主に依存した凝集の影響によるものであることが示された。

このことは、DLVO 理論に基づいた定量的な評価と整合し、発生したコロイドの安定性に関する定量的評価の可能性が示された。

4-3 長期の放射性廃棄物処分における不確実性評価技術

放射性廃棄物処分事業は数百年、その安全評価は数万年を超える長期間を対象とする。このため、遠い将来にわたる予測を行うにあたり、介在する種々の要因により派生する不確実性が避けられない。そこで、処分の安全性の説明においては、線量などの評価結果そのものに加えて、処分事業の各段階に含まれる不確実性に関する理解の程度を明示し、さらにそれらの不確実性について、現状の科学的知見に基づき適切に対処していることを提示することが必要と考えられる。当研究所では、放射性廃棄物処分に関わる技術開発と併せて、不確実性を適切に取り扱う安全評価の方法論に関する研究を重点的に実施している。

4-3-1 リスク論的安全評価手法の開発^{1,2)}

不確実性への対処の考え方として、長期間の影響の程度（被ばく線量など）と、その影響の発生する可能性（確からしさ）の両面を考慮して安全性を評価する、いわゆる「リスク論的考え方」に基づく安全評価手法の導入の必要性が、国際放射線防護委員会や原子力安全委員会によってうたわれてきた。しかし従来、手法を具体化する研究事例はほとんどなく、重要性の認識はあるものの概念レベルでの理解に留まっていたため、安全評価へ

の手法の適用が困難な状況にあった。そこで当研究所は、手法の具体化を重要課題と認識し、平成 16～17 年度には国からの受託研究として、その後は自主研究として継続実施して、具体的なリスク論的考え方に基づく安全評価手法の提案を進めてきた。数千年～数万年におよぶ長期の処分場での現象の不確実性を評価するには、現状の科学的知見に基づく専門家の判断が重要な要素となる。当研究所が提案している手法は、専門家の判断とともに、各判断に用いられた科学的知見（実験データや解析結果などの情報）を整理して示すものであり、不確実性の定量化における専門家判断の過程を可視化し、追跡可能とすることに特徴がある。

安全評価におけるシナリオや、モデルあるいはパラメータなどが一通りに決まらないことを意味する「不確実性」の原因としては、以下が考えられる。

- ・評価対象とする現象がランダムなものであること（Randomness）。例えば、処分場周辺岩盤の透水性の空間的不均質性など
- ・評価対象に対する情報や知識が不足していること（Ignorance）。例えば、処分場の人工バリアの劣化時期や劣化後の特性値など

これら二つの原因から生じる不確実性は意味が異なるため、分けて議論することが適切である。ここで、Ignorance による不確実性の表現は、専門家の主観的な判断に拠らざるをえず、通常確率とは異なる扱いが必要である。放射性廃棄物処分の場合には、評価期間が非常に長期にわたること、深部地下環境における各種データの入手が限られていることなどから、Ignorance による不確実性が顕著に存在すると考えられる。

そこで、専門家の主観的な判断に基づいた不確実性の定量化方法を構築した。本方法は、不確実性に関する専門家判断の選択肢を論理的な樹形図として整理し、樹形図の各分岐の確からしさを専門家の判断により Evidential Support Logic 法で数値化することで、Ignorance による不確実性が何に起因し、どの程度の幅と確からしさを内在しているかを、可視化・数値化するものである。

セメント系およびベントナイト系の人工バリアの劣化時期の確からしさを対象として、本方法の適用実験を実施した。ここでは、11 名の専門家（性能評価 6 名、設計・土木 5 名）に意見聴取を行った。人工バリアの劣化に関わる現象やモデルについて、ロジックツリーにより

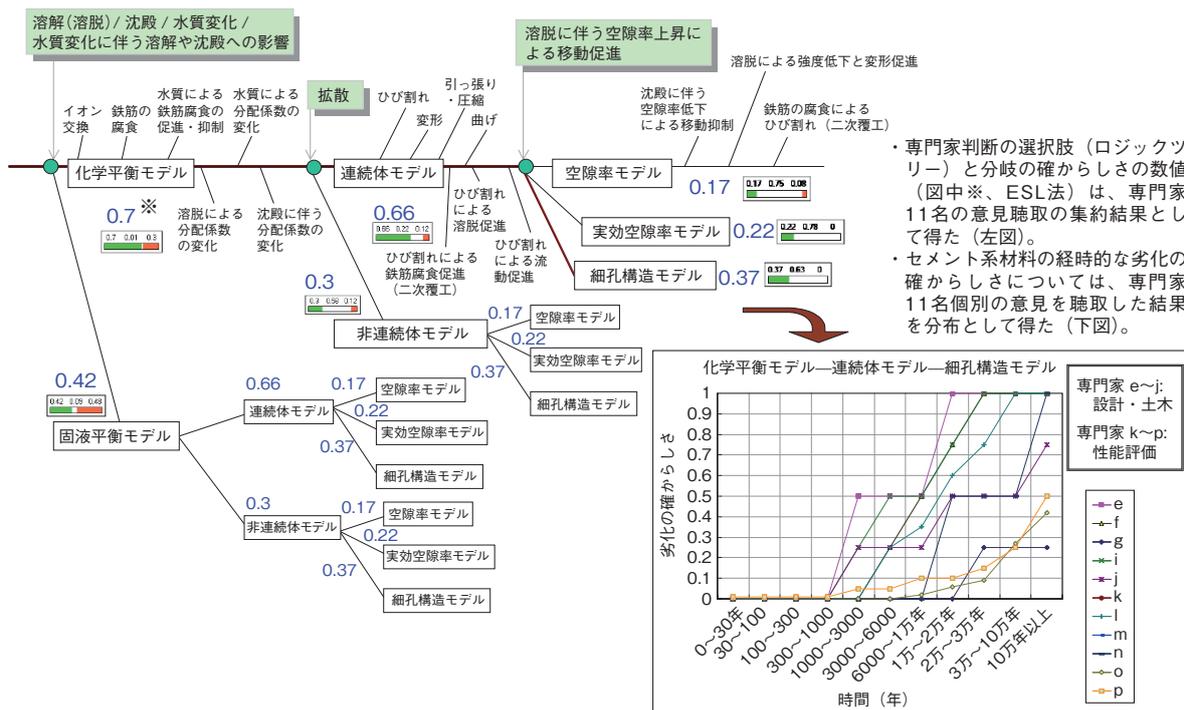


図4-3-1 本手法によるセメント系材料の劣化に関する専門家判断の可視化結果例

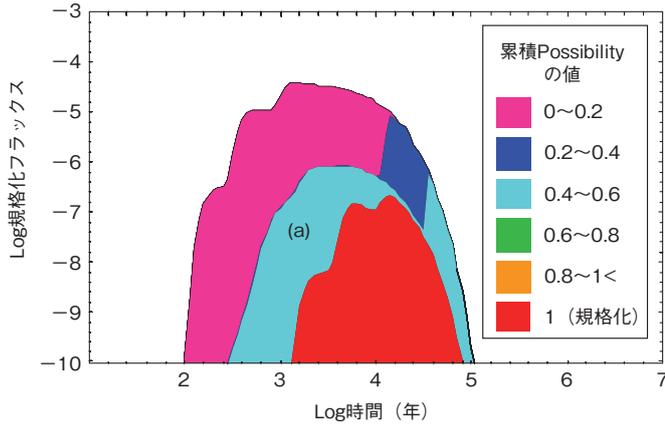
可視化された専門家判断の選択肢の派生を図4-3-1に示す。さらに、これらのモデルオプションの組合せごとに、人工バリア材の劣化時期の確からしさを各専門家に意見聴取し、経時的な劣化の確からしさに関する専門家意見の分布を得た。

専門家による劣化時期と程度の判断を示すグラフから、性能評価グループの専門家の回答は、時間の経過に伴い徐々に劣化が進行する傾向が、また、設計・土木グループの専門家の回答では、比較的劣化が速く、ある時期に劣化が始まると、性能維持の確からしさは1から急激に低くなる傾向が読みとれる。このような専門分野による判断の傾向は、性能評価計算で見られる経時的な変化の想定、あるいは土木構造物の設計の思想による判断の切り替えに起因する可能性が指摘できる。本手法により、専門家意見の分布を、専門家の専門性を反映して整理できるとともに、専門家判断を入手可能な情報や証拠といった科学的知見を併せて示すことにより、定量化した不確実性を追跡性と透明性を確保して提示できる手法とすることができた。

前述のように、専門家判断に基づき定量化した人工バリアの劣化時期の不確実性を反映した、リスク論的考え方による核種移行解析を試行した。天然バリアから生物

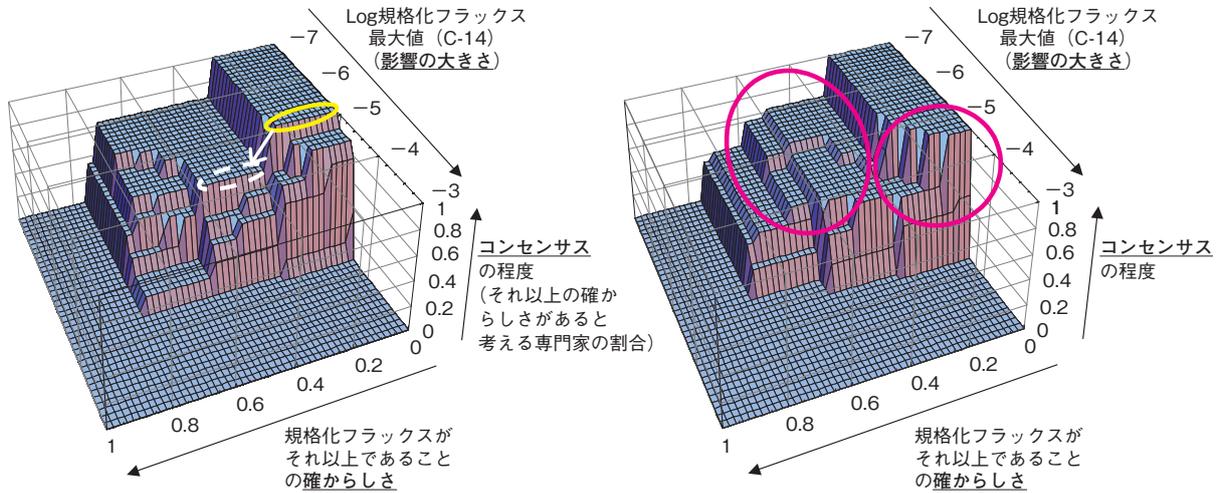
圏に移行する¹⁴Cのフラックスを、廃棄体中の初期イベントリによって除した規格化フラックスを求めた。得られた規格化フラックスの時間変化に、定量化した人工バリアの劣化時期の確からしさを重み付けすると、リスク論的な評価結果を示すことができる。結果の一例を、図4-3-2に示す。この表示は、影響の大きさをその発生の確からしさと併記して示す方法（分解アプローチ）に基づくものである。本手法による解析では、影響の大きさとその確からしさを併記して示す際、その内容（シナリオ）についても図4-3-1の可視化結果にさかのぼって提示することが可能である。すなわち、ある区分値を与えられた場合に、どのようなシナリオであるとその区分値を超えるかが議論でき、安全確保上の重要項目や研究開発の必要な項目の抽出を可能とする有効な方法であるといえる。

影響の大きさ／発生の確からしき／コンセンサスの程度の3軸で表示したリスク論的な解析結果の一例を、図4-3-3に示す。この方法は、不確実性に含まれる専門家間の意見の分布を可視化するものである。専門家の専門性による意見分布の差異が見られたことから、本手法により、不確実性に係る専門家知見・判断に関してさまざまな側面の情報を抽出できる可能性が示唆できる。



全体の包絡線は、保守的に考えた最大の規格化フラックスを示しており、これに対して例えば(a)の領域の規格化フラックスは、生じる確からしさが0.4~0.6程度となることを示している。

図 4-3-2 リスク論的解析結果の例(累積 Possibility (確からしさ) 分布)



(a) 専門家グループ全員

10^{-5} 以上の規格化フラックスが 0.2 の確からしきで発生することに専門家全員のコンセンサスがある (実線の楕円) が、それが 0.4 の確からしきで発生することに関してはコンセンサスの程度が低くなっている (点線の楕円) ことが読みとれる。

(b) 専門性を考慮(セメント、ベントナイトを別に考慮)

各バリアについて専門性の高い専門家の判断を適用すると、楕円で示した領域においてコンセンサスの程度が低下した。これは、規格化フラックスが生じる確からしきが低いと判断していることを意味し、さらにさかのぼれば、自分の専門とする人工バリアについて、長期に性能を維持するとの現実的な判断を行っていることを示している。

図 4-3-3 リスク論的解析結果の例 (専門家意見の分布)

当研究所の提案している手法は、放射性廃棄物処分の安全性を判断するにあたり、重要性が高い現象やシナリオを特定し、その根拠となる情報や専門家の意見・判断への追跡性を有すること、さらに、専門家間のコンセンサスの程度についても具体的に可視化できる手法であることから、処分事業の各段階における意思決定の基盤情報を提供可能な手法として有用となりうるものと考えられる。また、不確実性の可視化、意思決定への情報提供という観点からは、原子力利用におけるリスクを議論する上で共通するものと考えている。

本手法は、種々の不確実性の存在を前提としても、現状の科学的知見に基づいた処分方策が、放射線による健康影響を生じないと考えられる十分に低い「めやす値」を達成可能であることを明示するとともに、不確実性に関する専門家間の議論や相互理解を可能とし、処分事業の各段階における意思決定の材料を体系的に整備して提供することを狙うものである。このような取組みを土台として、時として複雑で専門性の高い内容に偏りがちな技術的情報を社会へ透明性を持って、分かりやすく、かつ真摯に伝えていくコミュニケーションに関する研究を

展開することによって、放射性廃棄物処分に対する社会の理解獲得や信頼性の醸成につなげていく活動を継続することが肝要と考えられる。

4-3-2 放射性廃棄物処分事業の体系的な品質保証概念の提案³⁾

放射性廃棄物処分の安全確保の考え方は、管理期間終了後に長期にわたる安全性の担保が求められることに特徴がある。そのため、処分事業の品質保証では、計画・サイト調査・設計・建設・操業・閉鎖の各段階に含まれる将来を予測することの不確かさ（以下、「不確実性」という）への対処が求められている。しかし、処分事業の各段階の個々の要素技術に関する品質管理項目・方法は、徐々に整理されてきてはいるものの、長期にわたる処分事業の全体を体系的に捉えた品質保証に関する検討はなされていない。そこで当研究所では、平成16～17年度に国からの受託研究、その後は自主研究として調査研究を実施し、長期にわたる処分事業の計画・サイト調査・設計・建設・操業・閉鎖の全段階で、「不確実性」の管理に統一的な視点を導入することによって、放射性廃棄物処分の体系的な品質保証の方法論の構築を進めている。

放射性廃棄物処分施設は、一般の土木・建築構造物とは異なり、閉鎖後の管理段階において、処分施設に工学的な補修や補強を含めた保全対策を施すことは極めて困難である。そのため、長期の将来の性能評価を綿密に実施し、その情報（不確実性）を各段階の品質保証行為に適切に反映する必要がある。当研究所ではこの概念を具体化するため、長期にわたる処分事業の全段階を対象とする「不確実性」の受け渡しに着目した統一的な視点による上位設問（各段階を通じて適用する基本設問）を設定し、この下で技術的な品質管理項目を関連付けて整備する方法論（図4-3-4）を提案した。

品質保証の体系化に向けて、上記の品質管理項目の有効性を評価した。すなわち、上記の考え方により設定した上位設問を、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分の低拡散層（セメント系人工バリア）のひび割れ性状評価を題材として適用し、情報整理の試行を行った。処分事業の各段階の状況に応じた具体的技術項目を、提案した上位設問で統制することによって、土木工学的検討と長

期の性能評価検討を適切に関連づけた説明を可能とする見通しを得た。これにより、本方法論が不確実性を内在する長期の処分事業の「安全性」を品質保証するものとして有効であることを示した。

4-3-3 放射性廃棄物処分における「技術的に最善の手段（BAT）」の考え方の適用⁴⁾

長期にわたる放射性廃棄物処分の将来の安全性を、現在の技術的知見に基づいて確保して説明するために有効な考え方として、スウェーデンなど諸外国の放射性廃棄物処分の安全規制において検討されてきた「技術的に最善の手段（Best Available Technique、以下BAT）」の概念の適用の有効性が指摘されている。しかし我が国では、放射性廃棄物処分の安全確保におけるBATの概念の定義や位置付けについて、十分な共通認識には至っていない。

そこで当研究所は、BATの概念に関する国内外の事例調査を行い、その定義および適用の意味を明らかにするとともに、我が国の放射性廃棄物処分における事業者側の観点からのBATの概念の具体的なあり方を先行的に提案した。

「北東大西洋の海洋環境保護に関する条約（オスパーラ条約）」によれば、BATの概念は、利用可能な範囲で技術的に最先端かつ最善の技術を、利用実績や経済的実現性をも考慮しながら利用することによって、汚染物質の排出、放出および廃棄を制限するという目的を達成する考え方として定義づけられている。欧州連合による統合的汚染防止管理指令（IPPC指令）の記述においても、BATの利用が要求されており、また、我が国の環境影響評価法においても、BATの検討の重要性に関する記述がすでに見られる（表4-3-1）。スウェーデンの規制機関の文書においては、放射性廃棄物処分の実施においてBATを考慮すべき、と述べられた例があった（表4-3-2）。また、米国や英国では、技術の可能性や適用性、環境への影響度、コストなどの観点から、規制側からBATを定量的に検討するための体系的な方法論も提唱されている。

以上の調査から、我が国の放射性廃棄物処分事業におけるBATの概念のあり方を考察した。BATの概念は、処分の実施者が処分概念の安全性を示す上で、現状利用

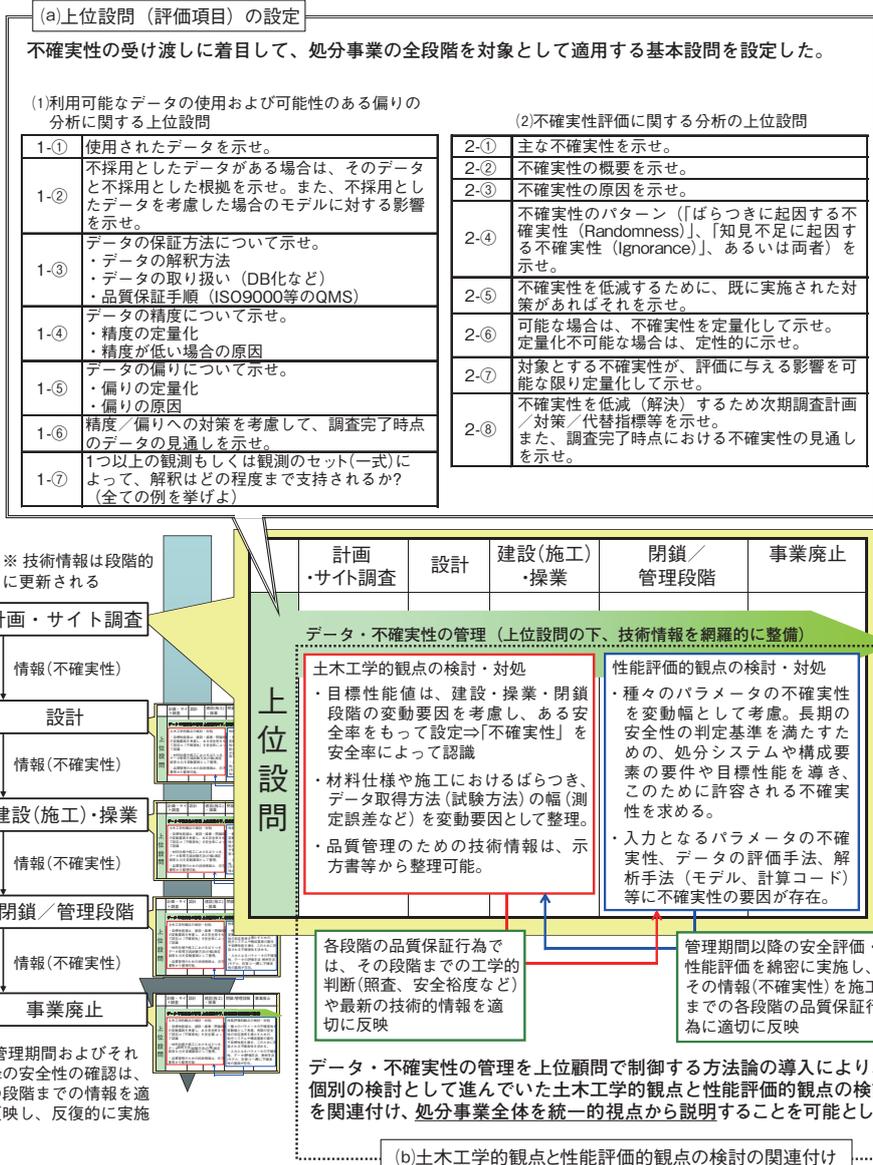


図 4-3-4 放射性廃棄物処分における体系的な品質保証の方法論の提案

可能な知見、技術に基づいて、放射性物質の放出を抑制すべく最善を尽くし続けていることを示すための定性的な概念として、位置付けることが適切であるといえる。このようなBATの概念を、規制者をはじめとする幅広い関係者間で共有した上で、まず事業者が、BATの概念に基づいた安全を確保する処分方策を、その根拠となる科学的知見を整理・文書化して、ともに提示することが重要である。これによって、関係者間で放射性廃棄物処分事業の進展や意思決定に資する議論を有効に構築できると考えられる。

参考文献

- 4-1
- 1) 杉山大輔、藤田智成、中西 潔：TRU 廃棄物処分環境におけるセメント系材料の化学的変質評価（その1）－カルシウムシリケート水和物の熱力学的溶解沈殿モデルの提案－、電力中央研究所研究報告 T01007、2001年11月。
 - 2) Sugiyama, D., Fujita, T. : A Thermodynamic Model of Dissolution and Precipitation of Calcium Silicate Hydrates, Cement and Concrete Research 36, pp.227-237, 2006.
 - 3) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、JNC TY1400-2005-013、FEP TRU TR2-2005-02、2005年。

表 4-3-1 国内外の環境分野における BAT の概念に関する記述例

文 書	記 述
北東大西洋の海洋環境保護に関する条約（オスパール条約）（The Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic (updated 2002).)	この目的を達成するために、締約国は、（中略）規定する基準を考慮して、計画と措置に関して、適切な場合には清浄技術（clean technology）を含め、 ・利用可能な最善の技術（best available techniques） ・環境上の最善の行為（best environmental practice）を定義しなければならない。 利用可能な最善の技術 2.用語「利用可能な最善の技術」は、排出（discharges）、放出（emissions）および廃棄（waste）を制限するための特定の措置の実際的な適合性を示す、運転のプロセス、設備あるいは方法の開発の最新の段階（最先端の運転のプロセス、設備あるいは方法）を意味する。
環境庁告示第八十七号、環境影響評価法に基づく基本的事項、平成九年十二月十二日、最終改正：平成十七年三月三十日環境省告示第二十六号。	建造物の構造・配置の在り方、環境保全設備、工事の方法などを含む幅広い環境保全対策を対象として、複数の案を時系列に沿って又は並行的に比較検討すること、実行可能なより良い技術が取り入れられているか否かについて検討すること等の方法により、対象事業の実施により選定項目に係る環境要素に及ぶおそれのある影響が、回避され、又は低減されているものであるか否かについて評価されるものとする。
環境庁企画調整局環境影響評価課、「実行可能なより良い技術」の検討による評価手法の手引きー環境影響評価における評価手法の考え方ー、平成12年8月。	「実行可能な」：事業者にとって科学的知見、施工性、経済性等の観点から実行可能であることを指す。 「より良い」：高水準な環境保全を達成するために最も効果的なことを指す。ただし、必ずしも最善の1つとは限らず、ある程度の幅を持つ一定の水準を指す。 「技術」：事業の計画、設計、建設、維持、操業、運用、管理、廃棄に際して用いられた幅広い技術、つまりハード面の「テクノロジー（technology＝科学技術・工業技術）」及び運用管理等のソフトの面の「テクニック（technique＝技法・手法）」を指す。 事業者の負担を軽減し「実行可能なより良い技術」の活用を進める観点から、国や地方公共団体により「実行可能なより良い技術」に関する情報を収集・整理し、技術評価を加え公開して、事業者や住民との間で共有化することを進めることにより、技術に関する情報の利用が可能となるしくみを構築することが必要となっている。

表 4-3-2 スウェーデンの放射性廃棄物処分分野の規制文書における BAT の概念の適用例

文 書	記 述
SSI FS 1998:1, 1998.	・利用可能な最善の技術（Best Available Technique）：人の健康および環境に関して、放射性物質の放出（release）およびその放出による有害な影響を制限するために利用可能な最も有効な方策で、不当な費用を伴わないもの ・最適化（Optimisation）：経済的および社会的要因を考慮して、人に対する放射線量を合理的に達成できるかぎり低く維持すること 使用済燃料および核廃棄物の最終管理においては、最適化が実施されなければならないとともに、利用可能な最善の技術が考慮されるべきである。
SSI Report 2000:18, 2000.	価値を非常に詳細に定量化できなくても、環境および健康の防護を含む作業において高い水準を達成するために、利用可能な最善の技術は用いることができる。
SSI Report 2001:21, 2001.	BAT は汚染してもよいという決定的な許認可ではなく、本質的には定性的な（質的な）プロセスの基準である。
SSI FS 2005:5, 2005.	規則は、最適化（Optimisation）を行わなければならないこと、および利用可能な最善の技術（Best Available Technique）を考慮すべきであることを要求する。最適化と利用可能な最善の技術は、処分場の防護能力を改善するという観点と並行して適用されるべきである。 報告は、最適化と利用可能な最善の技術の原則が処分場と付属するシステム構成要素のサイティングと設計にどのように適用されたか、および品質保証が処分場と付属物のリスク解析に関わる作業にどのように用いられたかについての説明を含むべきである。

- | | |
|---|---|
| <p>4) Sugiyama, D. : Chemical Alteration of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) in Sodium Chloride Solution, Cement and Concrete Research, 38, pp.1270-1275, 2008.</p> <p>5) 藤田智成、杉山大輔、塚本政樹：TRU 廃棄物処分環境におけるセメント系材料の化学的変質評価（その3）－カルシウムシリケート水和物の非調和溶解モデルを考慮した化学平衡-物質輸送連成計算コードの開発－、電力中央研究所研究報告 T02003、2002年11月。</p> <p>6) 杉山大輔、蔵重 勲：放射性廃棄物処分環境におけるセ</p> | <p>メント硬化体の化学的変質評価－セメント鉱物の溶解沈殿による物質移行特性変化を考慮した改良型化学平衡-物質移行連成解析コードの開発－、電力中央研究所研究報告 L06003、2007年4月。</p> <p>7) 杉山大輔：ひび割れを有するセメント系材料の化学的変質評価（その1）－単一人工ひび割れに沿った変質挙動の把握と解析コードの開発－、電力中央研究所研究報告 L05002、2005年11月。</p> <p>8) 大江俊昭、塚本政樹、藤田智成：高レベル廃棄物地層処</p> |
|---|---|

分の人工バリアシステムの安全評価、電力中央研究所総合報告 T92、1993 年 4 月。

- 9) Ohe, T., Tsukamoto, M., Kinoshita, M., Inoue, T. : Analysis of high-level waste glass performance by the physical and geochemical simulation code STRAG4. Waste Management 11, p.191, 1991.
- 10) 塚本政樹、大江俊昭：緩衝材・埋め戻し材中核種移行挙動解析コード GESPER の開発、電力中央研究所研究報告 T90011、1990 年 11 月。
- 11) 塚本政樹、大江俊昭、藤田智成：人工バリアシステム安全評価簡易解析コードの改良、電力中央研究所研究報告 T92011、1992 年 12 月。
- 12) Tsukamoto, M., Ohe, T., Fujita, T. : The effect of degradation of buffer material on radionuclide release from engineered barrier system for high-level waste disposal, in the proceeding of 1995 International Conference on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation. Berlin, Germany. Vol.1, pp. 807-813, 1995.
- 13) 塚本政樹、藤田智成：入力パラメータ値の分布を考慮した高レベル廃棄物地層処分人工バリア性能の解析、電力中央研究所研究報告 U96045、1997 年 3 月。
- 14) Tsukamoto, M. and Fujita, T. : Uncertainty analysis of performance of engineered barrier system for geological disposal of high-level waste, 1997 International Conference on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation. Singapore, pp.309-314, 1997.
- 15) 杉山大輔：鉱物沈殿を考慮したセメント硬化体の化学的変質評価手法の高度化、電力中央研究所研究報告 L08002、2008 年 7 月。
- 16) 蔵重 勲、廣永道彦：地下水中炭酸水素イオンによるセメント系材料の溶脱抑制メカニズムに関する検討（その 1）、電力中央研究所研究報告 N06028、2007 年 4 月。
- 17) Sugiyama, D., Fujita, T., Tsukamoto, M., Chira, T. : Alteration of Fractured Cementitious Materials, Cement and Concrete Research, 37, pp.1257-1264, 2007.
- 18) 藤田智成、杉山大輔、塚本政樹：TRU 廃棄物処分環境におけるセメント系材料の化学的変質評価（その 5）－処分施設のセメント変質及び溶出した地下水による周辺岩盤への影響の解析評価－、電力中央研究所研究報告 T02029、2003 年 4 月。
- 19) 日本原子力学会 バックエンド部会「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」特別専門委員会：イエローフェーズを含むガラス固化体の処分時影響評価試算結果の妥当性について（添付資料（1）：（財）電力中央研究所、ガラス固化体処分時影響評価試算について、平成 20 年 5 月 26 日）、2008 年 11 月。

4-2

- 1) Sugiyama, D., Fujita, T., Baston, G.M.N., Berry, J.A., Brownsword, M., Green, A., Ilett, D.J., Tearle, W.M., Tweed, C.J., Williams, S.J. : Experimental Measurements and Integrated Modelling Studies of Actinide Sorption onto Cement, CRIEPI Report:

T02023, April 2003.

- 2) Sugiyama, D., Fujita, T. : Modelling the Sorption of Actinides onto Cement: An Approach with the Surface Co-precipitation Model, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 757, pp.705-710, 2003.
- 3) Sugiyama, D., Fujita, T. : Sorption of Radionuclides onto Cement Materials Altered by Hydrothermal Reaction, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.556, pp.1123-1130, 1999.
- 4) 千田太詩、杉山大輔：透過型拡散実験によるセメント硬化体中における有機炭素の拡散挙動検討、電力中央研究所研究報告 L05012、2006 年 7 月。
- 5) 千田太詩、杉山大輔：フライアッシュ混合セメント硬化体中における有機炭素およびヨウ素の拡散挙動、電力中央研究所研究報告 L07018、2008 年 6 月。
- 6) Chida, T., Sugiyama, D. : Diffusion Behavior of Organic Carbon and Iodine in Low-Heat Portland cement Containing Fly Ash, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1124, pp.379-384, 2009.
- 7) 吉田崇宏、千田太詩、蔵重 勲、杉山大輔：熱変質した普通ポルトランドセメント硬化体中の有機炭素拡散挙動、電力中央研究所研究報告 L07009、2008 年 6 月。
- 8) Chida, T., Sugiyama, D. : Observation of Diffusion Behavior of Trace Elements in Hardened Cement Pastes by LA-ICP-MS, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.1107, pp.585-592, 2008.
- 9) Sugiyama, D., Chida, T., Cowper, M.M. : Laser Ablation Microprobe Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Study on Diffusion of Uranium into Cement Materials, Radiochimica Acta, 96, pp.747-752, 2008.
- 10) 藤田智成、杉山大輔、S.W. Swanton：放射性廃棄物処分の性能に与えるコロイドの影響－セメント水和物からのコロイドの発生とその特性評価－、電力中央研究所研究報告 U 99057、2000 年 5 月。

4-3

- 1) 電力中央研究所：平成 16 年度 核燃料サイクル関係推進調整等（放射性廃棄物等広報対策費等－放射性廃棄物処分におけるセーフティケースに関する社会的受容性調査）報告書、平成 17 年 3 月。
- 2) 電力中央研究所：平成 17 年度 核燃料サイクル関係推進調整等（放射性廃棄物等広報対策費等－放射性廃棄物処分におけるセーフティケースに関する社会的受容性調査）報告書、平成 18 年 3 月。
- 3) 藤谷昌弘、杉山大輔、藤田智成、千田太詩、南 浩輔、大津正士：放射性廃棄物処分事業の品質保証の体系化に向けた検討－不確実性の管理に着目した品質保証概念とその体系化－、電力中央研究所研究報告 L08010、2009 年 5 月。
- 4) 杉山大輔、長谷川宏：放射性廃棄物処分における「技術的に最善の手段（BAT）」の考え方－諸外国事例のレビューとわが国への示唆－、電力中央研究所研究報告 L06001、2006 年 11 月。