

平成 29 年度

高レベル放射性廃棄物等の地層処分
に関する技術開発事業

処分システム評価確証技術開発

5 か年成果報告書

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施した平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業「処分システム評価確証技術開発」の事業報告書である。

処分システム評価確証技術開発

The project for validating assessment methodology in geological disposal system

概 要

わが国の高レベル放射性廃棄物(HLW)及び長半減期低発熱性廃棄物(以下、TRU廃棄物)の地層処分計画を円滑に進めていくためには、地層処分の技術的信頼性をさらに高め、国民の理解と信頼を得ていくと同時に、実際の処分事業や安全規制の基盤となる技術を整備・強化していくための研究開発を着実に進めていく必要がある。このような考えのもと、地層処分場閉鎖前から閉鎖後の長期を対象として、処分施設周辺とその岩盤領域(以下、ニアフィールド)におけるシステム変遷と核種移行の評価確証技術の開発を、先端的な計算科学・分析技術や地下研究施設(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)の幌延深地層研究センターの地下施設(以下、幌延地下施設)や海外の地下研究施設)等を活用して実施した。TRU廃棄物については、HLWとの共処分(同一サイトでの処分)を想定し、ニアフィールド性能への影響評価技術の開発を行った。また、平成23年3月11日の東日本大震災や東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の教訓や大震災後に取りまとめられた内閣府原子力委員会の見解を反映し、巨大地震・断層活動を例とした過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価技術の開発を行った。さらに、地層処分の問題解決に関して、合意形成を目的とした可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分概念を提示するとともに、これらの評価確証技術の統合化を図った。

経済産業省資源エネルギー庁からの平成25年度から平成29年の5か年の委託事業として、本プロジェクトを原子力機構が実施した。

プロジェクトの全体構成

本プロジェクトは、以下に示す5つのサブプロジェクトから構成されている。各々のサブプロジェクトの概要を以下に示す。

(1) ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

処分場閉鎖前から閉鎖後の長期にわたるニアフィールドのシステム変遷と核種移行に係る複合現象評価確証技術を、先端的な計算科学/分析技術、地下研究施設等での確証試験等を通じて開発する。

(2) 多様な廃棄物(TRU廃棄物)の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発

高レベル放射性廃棄物や多様なTRU廃棄物との共処分におけるニアフィールドの影響評価技術の開発及び確証を行うことにより、多様な廃棄物の特徴を考慮した適切な共処分概念の提示に反映する。

(3) 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

過酷事象が、処分施設閉鎖後の超長期の安全性に及ぼす影響に関する評価確証技術を開発する。

(4) 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

(1)～(3)の評価に基づき、レジリアンス的視点からのロバスト性概念や、可逆性と回収可能性、モニタリングシステム等を考慮したシステム概念の具体的な提示を行う。

(5) 処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

(1)～(4)の成果に基づき、処分事業等に資するよう、先端的技術を反映した処分システム評価確証技術の体系化を図る。

図-1にプロジェクトの全体構成を示す。

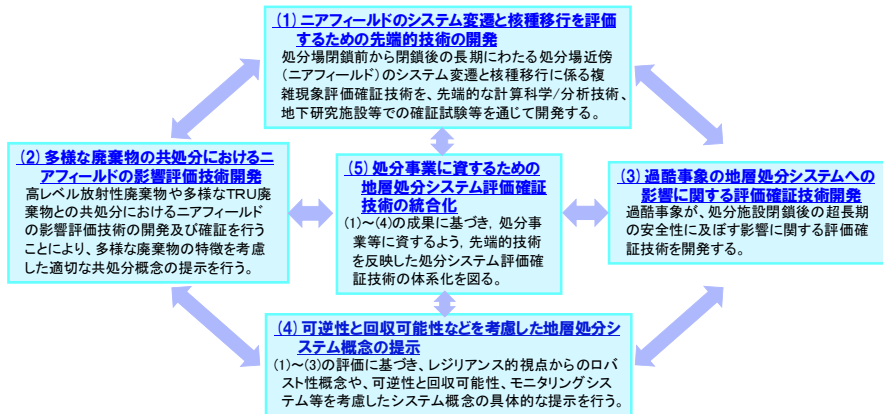


図-1 プロジェクトの全体構成

上述したプロジェクト構成にて、各サブプロジェクトを実施した。以下に、各々のサブプロジェクトの主要な成果を記述する。

ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

本サブプロジェクトでは、HLWの地層処分のニアフィールドのシステム変遷と核種移行評価に係る課題（図-2）に対して、処分場が地下水で飽和になるまでの過渡的な期間を対象とした評価技術の開発（システムの過渡的変化評価技術開発）、地下水が飽和しオーバーパックが破損した後の人工バリアの長期挙動と核種移行評価技術の開発（人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発）及び周辺岩盤の長期挙動と核種移行評価技術の開発（天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発）を行い、これらの成果を反映したニアフィールドの環境変遷評価手法とこれに対応した核種移行評価手法の開発（ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発）を行った。

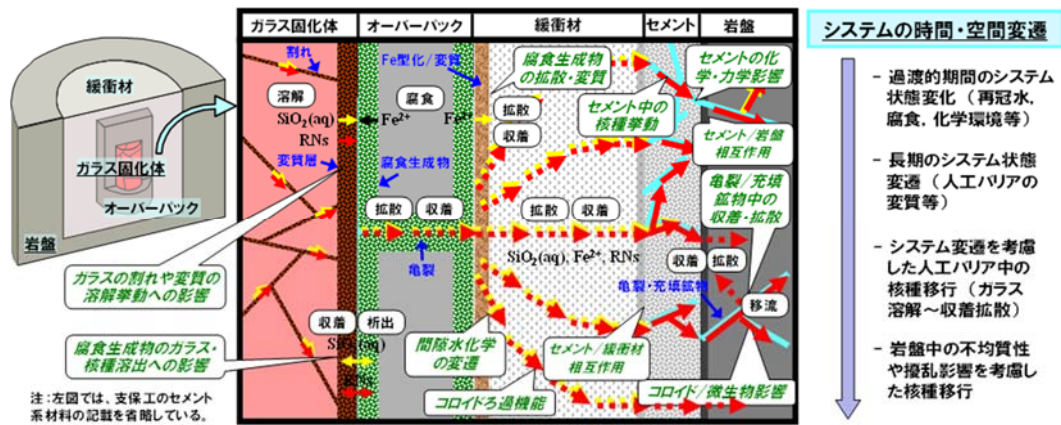


図-2 HLWの地層処分のニアフィールドのシステム変遷と核種移行評価に係る課題例

(1) システムの過渡的変化評価技術開発

過渡期を評価するための熱-水-応力連成解析モデルについては、緩衝材の膨潤変形による密度変化と、これに伴う熱特性、水理特性等への影響を考慮できるモデルを高度化し、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験への適用を通じ、モデルの有効性を確認した。さらに、ニアフィー

ルドの長期挙動に関する事例解析を実施し、安全評価における核種移行の初期状態の設定に必要な情報である過渡期終了時の緩衝材の密度分布などを提示した。

オーバーパックの腐食挙動に関する調査については、幌延深地層研究センターの地下施設における原位置試験において腐食センサーを適用し（図-3）、3年余りの計測データをもとにその妥当性や有効性を確認した。また、従来の想定範囲を超える地下水水質での腐食挙動については、高炭酸塩環境での応力腐食割れ感受性に関するデータや酸性条件での長期腐食データなどを整備した。

緩衝材の挙動に関する調査については、従来の想定範囲を超える高塩濃度や酸性の地下水条件における緩衝材の透水係数や膨潤圧などのデータを取得し、従来の設計の前提条件を超える条件に対する人工バリア性能を提示した。また、緩衝材のセメンテーションによる影響評価については、山形県月布のベントナイト鉱床の原鉱石を用いて、セメンテーションの発生状況、膨潤圧と透水係数への影響を把握した。



図-3 緩衝材中への腐食センサー設置状況と試験孔への試験体の設置状況

(2) 人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発

人工バリア中の核種移行評価技術として、最新の科学的知見に基づく現象理解を反映したより精緻な核種移行モデルの高度化開発を進めた。緩衝材として使用が検討されているナトリウム型ベントナイト（Na型モンモリロナイトを使用）に加え、カルシウム型ベントナイト（Ca型モンモリロナイトを使用）を対象に核種の拡散・収着データを取得するとともに、核磁共鳴法等により、圧縮モンモリロナイトの間隙構造の不均質性を定量評価し、層間イオン種、密度、塩濃度に条件変化に応じた間隙構造とその核種移行への影響を評価する手法を提示した。さらに、分子動力学計算及び量子化学計算技術の適用評価によって、モンモリロナイトの膨潤や層間中イオンの拡散挙動などのモデルの裏付けとなる知見を提示した。

オーバーパックの共存がガラスの溶解に及ぼす影響について、鉄共存下でのガラス浸出試験などの基礎データ取得によって、長期溶解への鉄影響を考慮する際に重要となる鉄ケイ酸塩鉱物種を同定するとともに、ガラス固化体の溶解寿命に対する影響評価を試みた。鉄との相互作用によるベントナイトの変質挙動については、原位置での変質試料の分析や、環境条件を制御した室内試験などによって変質鉱物種を同定するとともに、変質量評価に係るモンモリロナイトの溶解速度データを取得した。

鉄共存が核種移行に及ぼす影響については、モンモリロナイトへのセシウム、ニッケル、ユウロピウムの収着に対する鉄の競合影響に関するデータと、その影響評価モデルを整備した。

セメント系材料の化学モデルの開発では、低アルカリ性セメントを対象として、セメント水和物の初期組成設定方法の改良、カルシウムシリケート水和物表面吸着パラメータの見直し、マグネシウムシリケート水和物の溶解度モデルを構築し、これらを反映させた地球化学モデルにより、幅広い地下水条件でのセメント変質試験結果を精度良く表現できることを提示した。セメント系材料の力学挙動評価モデルの開発では、材料の劣化とひび割れの発生を同時に考慮できるようにモデルの高度化を行った。また、セメント系材料が核種移行挙動に及ぼす影響評価では、セメント共存環境中でのナトリウム型及びカルシウム型ベントナイトに対するニオブ、スズ、モリブデン等の収着データを取得し、これらのデータを反映することにより収着分配係数の設定値を更新した。

(3) 天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発

天然バリア中の核種移行については、結晶質岩と堆積岩のそれぞれの特徴と課題を踏まえ、割れ目等の不均質性をより精緻に評価するための室内試験と解析手法の改良、原位置条件への適用性評価を進めた。結晶質岩については、海外における地下研究施設における原位置試験を活用し、スイスのグリムゼル岩のマトリクス部及び割れ目部を対象に、鉱物・間隙の不均質性の定量化と、不均質性を考慮した解析手法の高度化を進め、実測データとの比較によってその手法の適用性を確認した。また、スウェーデンのエスポやフィンランドのオンカロにおける原位置トレーサー試験結果に対し、グリムゼル岩を対象に構築してきた評価モデルを適用し、その有効性を確認した。一方、堆積岩に対しては、幌延深地層研究センターの泥岩について、マトリクス部や割れ目部を対象とした原位置試験データを取得・解析するとともに、室内試験データとの比較分析などを通じ、その試験・評価手法の有効性を提示した(図-4)。さらに、幌延深地層研究センターにおける天然トレーサー分布データを活用し、地質環境の変遷等を考慮したより現実的なモデルの適用性を提示した。

有機物の影響評価手法の開発については、幌延深地層研究センターの深部地下水から分離・精製したフミン酸及びフルボ酸とIII価及びIV価の元素との錯生成データを取得し、より現実的なモデルパラメータを整備した。微生物の影響評価手法の開発では、幌延深地層研究センターの地下研究施設の深部地下水試料を用いて、微生物コロイドへの希土類元素の収着分配係数を評価した。また、堆積岩表面に形成されたバイオフィルムを対象に、メタゲノム解析データに基づく代謝機能解析を行い、主要な代謝と金属還元能力の有無を確認した。さらに、ここで整備した有機物や微生物のデータやモデルパラメータを用いて、有機物や微生物の影響を考慮したより信頼性の高い性能評価解析を提示した。

セメント系材料によるニアフィールド岩盤への影響評価については、実際の地下深部環境でのセメント系材料と周辺岩盤との接触事例として瑞浪超深地層研究所の坑道で施工されたセメント系グラウトに対して試料を採取し検討を進めた。原位置試料の分析や室内試験の結果をもとに、実際の地質環境下におけるグラウト材/岩盤相互作用メカニズムを加えたグラウト材の長期変遷に関する概念モデルを提示することができた。

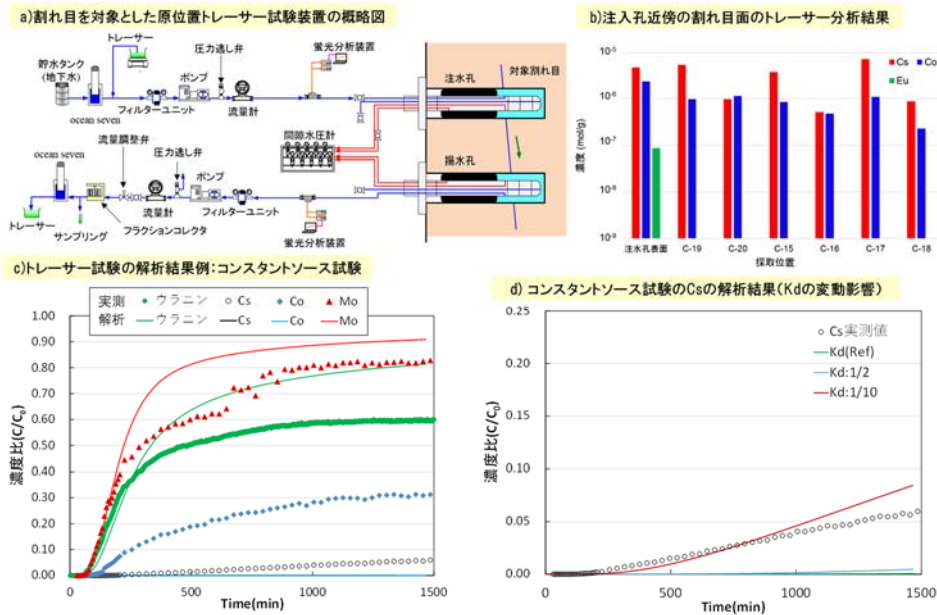


図-4 幌延深地層研究センターの泥岩の割れ目を対象としたトレーサー試験結果

(4) ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発

システム変遷と核種移行解析の体系的評価技術として、ニアフィールド複合現象評価手法-核種移行評価手法-共通モデルおよび一連の成果の体系化手法をプラットフォーム上でつなぎ合わせたニアフィールド総合評価システムのプロトタイプを開発した。本システムによって、ニアフィールドシステム変遷について、コンクリートのひび割れ発生・進展とその周囲の化学的変質に係る局所スケールの現象が、坑道全体スケールの挙動にどのような影響を及ぼすかという点に着目したマルチスケールの化学-物質輸送-力学連成現象を解析することができるようになった。また、そうしたニアフィールドシステム変遷の解析結果に追従して核種移行解析を行うことが可能となった。本システムは、プラットフォームの開発環境として国際的に利用されているモデル連成フレームワークOpenMIを用いており、今後、異なる分野で独自に開発された対象や手法の異なる最新の解析コードを適切に組み合わせることで、マルチフィジックス現象の相互作用による重要な連成効果の予見などに適用していくことが期待できる。

多様な廃棄物 (TRU廃棄物) の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発

本サブプロジェクトでは、HLWとTRU廃棄物の共処分 (図-5) で特に重要と考えられる、硝酸塩と有機物のニアフィールド性能に対する影響に着目して、これらの影響を評価するための技術開発を行った (廃棄物の特性を踏まえた共処分への影響評価技術開発)。影響因子のうち、硝酸塩については、処分システム性能への影響を最小化するための共処分レイアウト等の検討 (多様な廃棄物の影響を考慮した共処分概念案の構築) を行った。

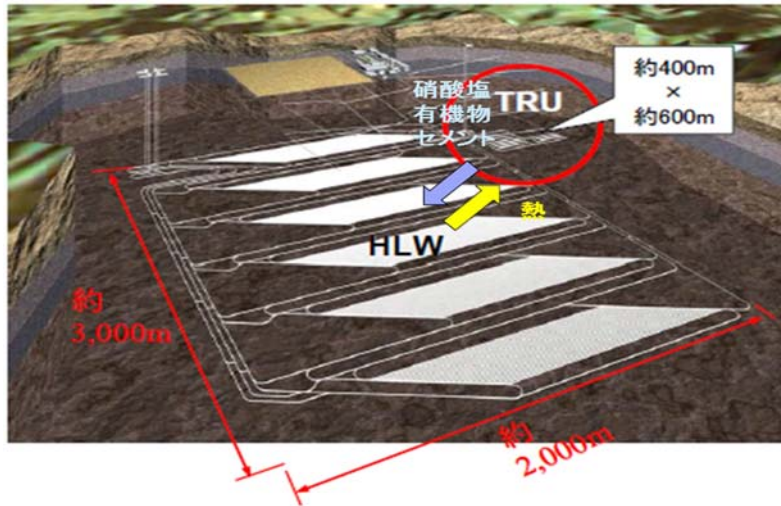


図-5 HLWとTRU廃棄物の共処分概念

(1) 廃棄物の特性を踏まえた共処分への影響評価技術開発

ニアフィールド性能に対する硝酸塩と有機物の影響として、廃棄体の固型化材として使用されるアスファルトと硝酸塩との反応熱による熱反応暴走の発生、鉱物中の黄鉄鉱等との反応による硝酸塩の変遷による影響、硝酸塩による人工バリア材料の安全機能に対する影響、および、放射性核種の移行に対する硝酸塩およびセルロース等の有機物の影響の4つに着目して、これらの影響を評価するための技術開発を行った。

硝酸塩とアスファルトとの反応熱による熱反応暴走の可能性については、これらの反応による熱量測定を実施し、発熱反応の定式化を行うと共に、地層処分環境を想定した熱収支解析を実施して、熱反応暴走開始温度(ROT)を算定した。算定したROTを用いて、熱反応暴走を誘発し得る、エネルギー(熱)を供給する外的要因(擾乱事象)を想定した安全性の試行的評価を実施した。その結果、熱反応暴走を誘発する可能性は低いことが示された。

硝酸塩が鉱物中の黄鉄鉱等との反応で変遷する挙動については、硝酸塩の化学的変遷モデル(NEON: Model for Nitrate Evolution due to mineral reaction, microbial activity and metal corrosion)の信頼性向上のための確認試験を行い、温度条件50~70°Cにおける黄鉄鉱と硝酸イオンの反応による変遷データを取得した。この結果を踏まえて反応速度式のパラメータの見直しを行った結果、既存の速度式と比べて試験結果の再現性を向上することができた。また、広島県生口島及びカナダ・Boyerne川周辺の事例等を対象として、広域的な硝酸性窒素の汚染調査事例に対する再現解析を行ったところ(図-6)、硝酸イオン等の濃度分布を再現することができ、長期的かつ大域的な条件におけるモデルの妥当性を確認できた。

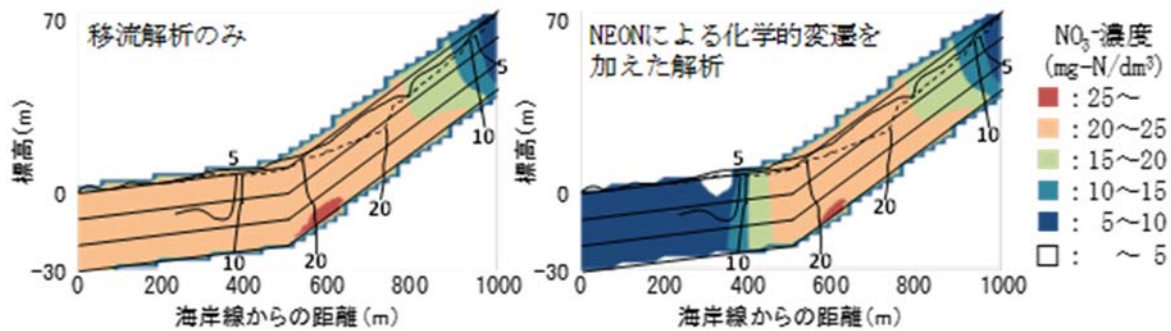


図-6 広島県生口島の事例における硝酸イオン濃度分布の比較
(図中の実線および数値は実測値を、コンターは解析結果をそれぞれ示す)

硝酸塩による人工バリア材料の安全機能に対する影響については、特に、硝酸イオンの変遷物質であるアンモニウムイオンの緩衝材への影響に着目して、硝酸塩影響とアルカリ影響の重畳によるスメクタイトのアンモニウム型化を評価可能な地球化学モデルを整備し、解析による影響評価を行った結果、地下水やセメント間隙水に含まれるナトリウム、カリウム及びカルシウムなどの陽イオンとの競合及び高pH条件でのスペシエーション変化によりアンモニウム型化は限定的であることが確認された。また、アンモニウム型スメクタイトの変質に関する実験的調査により、カリウム型と比較して非膨潤性鉱物になりにくいことが確認された。分子動力学法による混合エンタルピー計算からも、アンモニウム型スメクタイトが非膨潤化しにくいことが示唆された。

放射性核種の移行に対する硝酸塩およびセルロース等の有機物の影響については、硝酸塩が核種移行挙動に及ぼす影響の課題として残っていたテクネチウムの酸化還元挙動について、溶解度実験を通して確認し、テクネチウムの溶解度が系の酸化還元電位を用いた熱力学計算で説明可能であることを確認した。また、有機物が核種移行挙動に及ぼす影響評価として、最大の影響因子と考えられるイソサッカリン酸を対象として、ジルコニウム及びウラン（IVおよびVI）の溶解度測定を行い、不足していた熱力学データを取得した。得られた熱力学データを用いて溶解度を試算した結果、現在想定されているイソサッカリン酸の濃度以下では、これらの元素のイソサッカリン酸錯体は溶解度の増大に顕著な影響を及ぼさないことが確認された。

(2) 多様な廃棄物の影響を考慮した共処分概念案の構築

諸外国における、わが国のTRU廃棄物に相当する廃棄物とHLWとの共処分概念に関する検討事例を参考に、廃棄物間の相互影響を解析的に評価することにより、坑道レイアウト等の検討を行った。影響因子のうち重要性が最も高いと考えられる硝酸塩に着目し、3次元体系による移行解析を実施した結果、硝酸塩の影響範囲は200~300m程度であり、数百mの離間距離を設定することでその影響を回避可能であることが示された。

過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

本サブプロジェクトでは、東京電力（株）福島第一原子力発電所事故を受け、地層処分システムにおける過酷事象についてその概念構築（地層処分システムにおける過酷事象の概念構築）を行った。また、これに基づき地層処分における過酷事象の影響を評価するための手法を整備した。

さらに、過酷事象として巨大地震・断層活動を例として、過酷事象を評価するための評価手法（巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発）を具体化するとともに、巨大地震・断層活動に起因する個別事象等の調査・整理を実施し、これに基づく試行を通じて評価手法の適用性を確認した。

(1) 地層処分システムにおける過酷事象の概念構築

地層処分システムにおける過酷事象の定義を明確化すると共に、想定外を最小化することを念頭に置きつつ、人への甚大な影響（結果）を起点としたアプローチ、不安や懸念（原因）を起点としたアプローチ、それらを統合して過酷事象シナリオを描出する手順、重要度を評価する手順、対策技術を検討する手順を基軸とした過酷事象検討フローを確立し、その詳細を具体化した（図-7）。さらに、一連の試行を実施することで、検討フローの有効性を確認するとともに、地層処分システムの継続的な安全性向上に資する仕組みとして提示した。

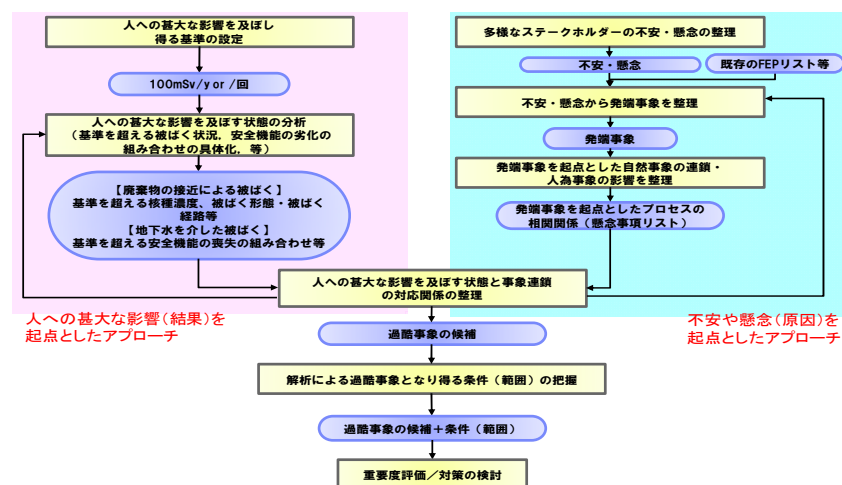


図-7 地層処分における過酷事象検討フロー

(2) 巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発

過酷事象の起因となる断層については、過酷事象評価を実施する上で必要な断層に関する情報を収集し、その中で考え得る最悪の想定を設定した。それはマグニチュード8.0規模の地震を発生させるような断層が水平に地層処分場を直撃した場合であり、人工バリア、天然バリアともに安全機能が喪失する可能性を考えたものであった。しかし、マグニチュード8.0規模の地震は、大規模な活断層が密に分布する地域で生じており、断層の回避条件を満足すれば、マグニチュード6.5以上の地震を発生させるような断層が地層処分場を直撃する可能性は低いことが分かった。そのうえで、地層処分場を直撃するような現実的な断層を想定するとすれば、連続性の低い既存の断層を連結するような断層であり、マグニチュード8.0規模の地震を発生させるような断層よりも小さい断層になると想定された。

断層のずれによる人工バリアのせん断変形の影響については、岩盤とオーバーパックがせん断衝突して、さらに大きな断層ずれが生じた場合のオーバーパックの破損の有無やガラス固化体と母岩の接触の有無を評価した。処分坑道径より大きな断層ずれが生じた場合の断層模擬せん断衝突模型実験

(図-8) 及びその再現解析を行った。その成果をもとに国内最大規模の地震を上限としたマグニチュード6.5～8.0の主断層ずれによる直撃及びマグニチュード8.0の主断層近くに生じる副断層ずれによる直撃を想定した実寸法人工バリアの大変形効果を考慮した非線形せん断衝突解析を実施した。この解析結果によりオーバーパックの破損の有無及びガラス固化体と母岩の接触の有無を判断して得られた知見を、性能評価のシナリオ構築のインプットとして反映した。

巨大地震による過酷事象を想定した地震動の人工バリア並びに処分施設への影響について評価を行った。オーバーパック（廃棄体）の母岩への接触による人工バリアの安全機能喪失並びに直接アクセス坑道自体やその周辺岩盤に形成される掘削影響領域を通じて核種が生活圏へ移行するシナリオを想定した解析からは、本事象が生じる可能性は低いと評価された。また、原子力関連施設における最新の耐震影響評価手法に基づく、基準地震動の設定方法を提示し、本手法を用いた国内最大級の内陸地震を参照した設計地震動を策定した。

巨大地震を対象とした影響評価手法の開発と誌行については、安全機能を軸に地震・断層活動に係る個別現象研究の成果を整理し、過酷事象に至る道筋・条件（過酷事象に至る可能性のあるシナリオの候補）を探索・具体化するとともに、安全機能に着目した予備解析を実施した。さらに、地震・断層活動に起因する過酷な状況を、より効果的に探索・抽出するために、過酷な状況を、①影響の種類、②影響が及ぶ部分、③影響の広がり観点でのバリエーション及び組み合わせの想定により分析した。このような分析と、安全機能の劣化・喪失を考慮した感度解析を組み合わせることで、過酷事象の起こりにくさを系統的に整理して提示できる見通しを得た。具体的には、過酷な状況が生じるためには、極めて発生可能性の低い複数の条件を同時に想定する必要があることを系統的に整理し提示できるようになった。

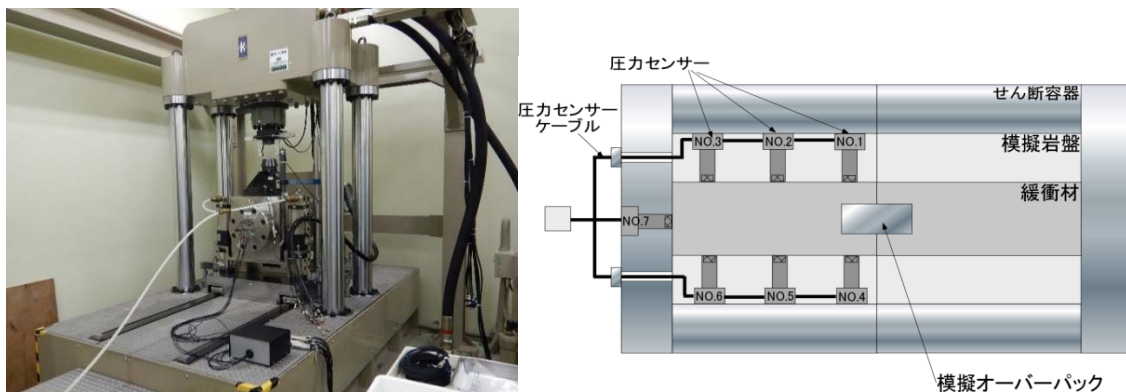


図-8 断層模擬試験設備（左図）と試験体のレイアウト（右図）

可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

本サブプロジェクトでは、処分計画の意思決定に関与する多様なステークホルダが地層処分の実施について確信を持つことができる（ステークホルダが合意することができる）地層処分システム概念を構築する上での有効な方法論やそれを支援する技術および構築に必要な知見についての整備を行った。また、その有効性を確認するために、模擬ステークホルダとの協働により、これら検討を行った方法論等を用いて「多様なステークホルダが合意することができる処分概念」の構築を試みた。創出にあたっては、地層処分に対して一般の人々が持つ不安や懸念を解消する視点に配慮した。地層処分に対して一般の人々が抱く「見えないこと」に対する不安に応え、処分施設の安全が見えるよう、例

えばベントナイトの代わりにレジン（樹脂）を緩衝材に採用するなどの「見える化技術」を導入し創出した新たな処分概念の事例を示した（図-9）。

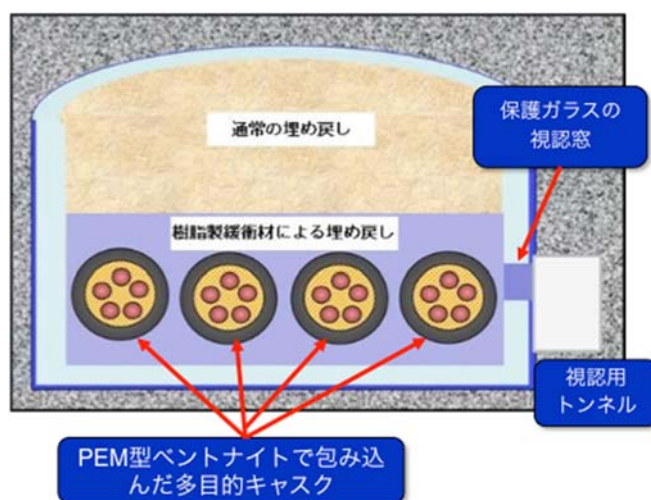


図-9 処分場の見える化技術を取り入れた大空洞貯蔵型処分概念の事例

今後の課題として、多様なステークホルダの合意が得られる処分概念を創出・提示していくためには、特に概念の構築過程の公正さを明示すること、構築にあたっては地層処分に高い関心を持つステークホルダの目線に立つこと、候補概念オプションを整備しておくこと、などが肝要であるとした。また、ステークホルダとの協働による概念構築にも慣熟しておくことも重要であり、そのためには異なる模擬ステークホルダとの協働試行を重ねるとともに、その過程を通じて得られる概念構築の手法/支援技術へのフィードバックも肝要であるとした。

処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

本サブプロジェクトでは、処分事業に資するための処分システム評価確証技術の統合化として、システム評価確証技術の統合化及び処分システム評価確証技術の認知拡大に関する試行を実施した。

(1) 処分システム評価確証技術の統合化に関する試行

4つのサブプロジェクトの成果を体系的に取りまとめ、特に非専門家向けに配慮することを目的として、統合プラットフォームの検討を行った。検討にあたっては、①合意形成のために求められる成果の要件の整理、②各分野における成果と①の要件とのマッピング、③分野横断的連携及び成果の融合、④研究成果の可視化、を考慮した。また統合化にあたっては、ソーシャルウェアを利用することにより、対話や双方向型コミュニケーション機能やグループウェアでの多分野の専門家間の知識共有が可能な機能を実装することが可能であることが示された。さらに、「確証性の高い（地層処分の実施について確信を持つことができる）地層処分のシステム概念」の構築に必要な要件の階層構造を視軸に、個々に行っている各サブプロジェクトの要素技術開発が、どの構成要件を担っているかの全体像を視覚的にも容易に把握できるよう、ツリー構造の樹

形図にて整理することができた。

(2) 処分システム評価確証技術の認知拡大に関する試行

地層処分技術について非専門家の関心を引きつけ、その仕組みや原理の理解といった知識の共有を容易なものとしていくための取り組みが今後一層重要となる。この観点から、これまで地層処分技術（事例として、火山等の自然事象の影響評価やナチュラルアナログ）のブランディング化に取り組み、そのブランドに対する共感や信頼といった非専門家にとっての価値を高めていく試みを行った。また、既存の双方向コミュニケーション（コミュニケーションデザイン）の考え方と手法を取り入れ、非専門家に対して地層処分技術（事例として、廃棄物施設への人間侵入評価）の知識共有を試みた。

5 か年報告書 目次

第1章 緒言

1.1 プロジェクトの背景と目的	1-1
1.2 プロジェクトの構成	1-1
1.3 報告書の構成	1-2
参考文献	1-3

第2章 ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

2.1 目的と5か年の実施内容	2-1
2.2 システムの過渡的变化評価技術開発	2-3
2.2.1 目的とアプローチ	2-3
2.2.2 システムの過渡的状态評価技術の開発	2-3
2.2.3 過渡的状态における人工バリアの挙動評価技術の開発	2-6
2.3 人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発	2-20
2.3.1 目的とアプローチ	2-20
2.3.2 緩衝材中の核種移行の現象理解と精緻化モデルの開発	2-21
2.3.3 システム変遷と核種移行評価のためのデータ・モデルの整備	2-33
2.4 天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発	2-51
2.4.1 目的とアプローチ	2-51
2.4.2 岩石マトリクス/割れ目中の核種移行評価技術の開発	2-52
2.4.3 有機物・微生物等の影響評価手法の開発	2-67
2.4.4 セメント系材料によるニアフィールド岩盤への影響評価技術の開発	2-83
2.5 ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発	2-88
2.5.1 目的とアプローチ	2-88
2.5.2 ニアフィールド総合評価システムの全体構想	2-88
2.5.3 個別現象の情報・知識の集約	2-90
2.5.4 分野横断的・整合的な現象解析のための共通モデル・シナリオの整理	2-91
2.5.5 ニアフィールド総合評価システムの開発	2-93
2.6 まとめ	2-108
2.6.1 システムの過渡的变化評価技術開発	2-108
2.6.2 人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発	2-108
2.6.3 天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発	2-109
2.6.4 ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発	2-109
参考文献	2-111

第3章 多様な廃棄物の共処分ににおけるニアフィールドの影響評価技術開発

3.1 目的と5か年の実施内容	3-1
-----------------------	-----

3.2 廃棄物の特性を踏まえた共処分への影響評価技術開発	3-2
3.2.1 種々の廃棄物の特性評価と廃棄物由来の影響因子の影響調査	3-2
3.2.2 廃棄物由来の影響因子の化学環境影響評価	3-6
3.2.3 廃棄物由来の影響因子のバリア候補材料への影響評価	3-10
3.2.4 廃棄物由来の影響因子の放射性核種への影響評価	3-12
3.2.5 廃棄物由来の影響因子の成果の取りまとめ	3-16
3.3 多様な廃棄物の影響を考慮した共処分概念案の構築	3-17
3.4 まとめ	3-19
3.4.1 廃棄物の特性を踏まえた共処分への影響評価技術開発	3-19
3.2.2 多様な廃棄物の影響を考慮した共処分概念の構築	3-20
参考文献	3-20

第4章 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

4.1 目的と5か年の実施内容	4-1
4.2 地層処分システムにおける過酷事象の概念構築	4-2
4.2.1 地層処分システムにおける過酷事象の定義	4-2
4.2.2 過酷事象の検討フローの開発・試行	4-3
4.2.3 過酷事象シナリオの重要度評価及び対策技術の検討	4-8
4.3 巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発	4-10
4.3.1 巨大地震・断層活動を対象とした評価手法の開発	4-11
4.3.2 巨大地震・断層活動に関連した個別現象の調査・評価	4-12
4.3.3 巨大地震・断層活動を対象とした影響評価の試行	4-27
4.4 まとめ	4-29
4.4.1 地層処分システムにおける過酷事象の概念構築	4-29
4.4.2 巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発	4-30
参考文献	4-33

第5章 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

5.1 目的と実施概要	5-1
5.2 研究開発のアプローチ	5-2
5.3 各アプローチに沿った検討	5-3
5.3.1 レジリエンス的視点に基づく地層処分システムのロバスト性概念の検討	5-3
5.3.2 公正性に根ざした合意形成型の処分概念構築手法の開発	5-5
5.3.3 合意形成の促進に資するモニタリング技術等の開発	5-11
5.4 模擬ステークホルダによる概念構築の試行	5-15
5.4.1 概要	5-15
5.4.2 処分場概念構築ワークショップでの議論	5-17
5.5 まとめ	5-19

参考文献	5-21
------	------

第6章 処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

6.1 目的と実施概要	6-1
6.2 処分システム評価確証技術の統合化に向けた全体的な枠組み	6-2
6.2.1 評価確証技術統合化に向けた統合プラットフォームのプロトタイプ構築	6-3
6.2.2 統合化に向けたポータルサイトのコンテンツの検討	6-4
6.3 用途に応じた評価確証技術の知識共有手法の検討調査	6-9
6.3.1 わかりやすい情報コンテンツ作成のための方法論の調査	6-9
6.3.2 技術情報に関する知識共有を図るための双方向コミュニケーションの調査	6-11
6.3.3 双方向型コミュニケーション手法の重要性	6-15
6.4 評価確証技術の認知の拡大に関する試行	6-16
6.4.1 処分システム評価確証技術のブランディング	6-16
6.4.2 コミュニケーションワークショップ	6-17
6.5 まとめ	6-22
参考文献	6-24

第7章 結言

7.1 プロジェクトの主な成果	7-1
7.2 おわりに	7-3

参考資料(高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発(処分システム評価確証技術開発実施期間：平成25～29年度の主な成果))

5 年報告書 目次

第 1 章 緒言

図 1-1	本プロジェクトの全体構成	1-2
図 1-2	本プロジェクトの報告書構成	1-3

第 2 章 ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

図 2.1-1	ニアフィールドのシステム変遷と核種移行評価に係る課題例	2-1
図 2.1-2	本課題における 4 つのサブタスクとそれらの関係	2-2
図 2.2.2-1	Couplys コードにおける熱-水-応力-化学連成解析モデルの概念図	2-4
図 2.2.2-2	ニアフィールド長期挙動解析結果 (間隙水の pH の分布)	2-5
図 2.2.2-3	緩衝材の密度変化を考慮した THM 連成モデル	2-6
図 2.2.3-1	腐食モニタリングセンサーの模式図	2-7
図 2.2.3-2	交流インピーダンス測定結果とパラメータ推定の例	2-7
図 2.2.3-3	R_s および R_p の経時変化	2-8
図 2.2.3-4	緩衝材中への腐食センサー設置状況と試験孔への試験体の設置状況	2-9
図 2.2.3-5	6 段目の腐食センサーの測定結果から求められた液抵抗と分極抵抗の 経時変化	2-10
図 2.2.3-6	緩衝材中における炭素鋼の腐食速度に及ぼす pH の影響	2-11
図 2.2.3-7	低酸素濃度下における炭素鋼の腐食進展に及ぼす温度の影響	2-12
図 2.2.3-8	浸漬試験後試験片の水素吸収量 (拡散性水素) の測定結果	2-12
図 2.2.3-9	SCC 破面率の電位依存性	2-13
図 2.2.3-10	膨潤圧・有効モンモリロナイト密度関係 (上図) 及び 透水係数・有効モンモリロナイト密度関係 (下図)	2-15
図 2.2.3-11	光学式 pH センサーの構成	2-16
図 2.2.3-12	薄膜発色材を用いた光学式 pH センサーの検量線	2-17
図 2.2.3-13	緩衝材膨出センサーの構成	2-18
図 2.2.3-14	緩衝材膨出センサーの設置イメージ	2-18
図 2.2.3-15	緩衝材膨出センサーによる鉛直方向の変位の経時変化	2-19
図 2.2.3-16	緩衝材膨出量の経時変化	2-19
図 2.3.2-1	Cs^+ の収着分配係数 K_d と HTO、 Cs^+ 、 I^- の実効拡散係数 D_e のイオン強度の 依存性	2-21
図 2.3.2-2	NaCl 系と Na_2SO_4 系での Sr の拡散・収着データ、及び ISD モデル評価の比較	2-22
図 2.3.2-3	温度制御条件での Cs, Sr の拡散・収着データの温度依存性	2-23
図 2.3.2-4	コロイドの安定性 (a) とベントナイト中の透過試験結果 (b)	2-24
図 2.3.2-5	NMR 緩和時間分析データ例 (a) と Na 型及び Ca 型モンモリロナイトの 間隙構造評価結果	2-25
図 2.3.2-6	Cs 置換率の異なる試料の NMR スペクトルと第一原理計算に基づく帰属	2-25

図 2.3.2-7	Se の Eh-pH ダイアグラム及びバッチ試験における値 (a), Se(-II) の UV-Vis スペクトル (b), Se(IV) 及び Se(-II) の収着エッジ (c), 及びモンモリロナイト中の Se の XANES スペクトル (d) ……………	2-26
図 2.3.2-8	異なるイオン型の電解質系における実効拡散係数の解析例： (a)Ca 型モデル、(b)Na 型モデル ……………	2-28
図 2.3.2-9	層電荷 0.5 の Na 型モンモリロナイトの膨潤挙動： 混合過剰エンタルピーと底面間隔との関係 (a)、 及び層間水の密度との関係 (b) ……………	2-29
図 2.3.2-10	CO ₃ ²⁻ 非共存下におけるモンモリロナイト層間・粒子間隙混合系での 拡散履歴 (298.15 K、1.2 ns)： スナップショット (a)、Na ⁺ (b)、Cl ⁻ (c)、及び UO ₂ ²⁺ (d) ……………	2-30
図 2.3.2-11	(a)モンモリロナイト (層電荷 0.5) の A-chain エッジモデル、 (b)p1~p5 における最安定表面エネルギー、及び単層モデル (single) と 積層モデル (stacking) での最安定エネルギーの比較 ……………	2-31
図 2.3.2-12	PHREEQC と ISDCalc を連携した不確実性評価ツールの処理流れ ……………	2-33
図 2.3.3-1	規格化浸出量の経時変化(グラフ内の数値は 91 日前及び後の平均溶解速度) …	2-34
図 2.3.3-2	FeCl ₂ 溶液中で変質させたガラスの XRD 分析結果 ……………	2-35
図 2.3.3-3	FeCl ₂ 溶液中で 56 日間変質させたガラスの TEM/ED/EDX 分析結果 ……………	2-35
図 2.3.3-4	Fe-Si 反応試験生成固相の SEM/EDX 分析結果 (Si/Fe モル比 0.5, pH11) ……	2-36
図 2.3.3-5	鉄製ヒーターとの接触界面のベントナイト試料の AFM 観察結果 (a: 高さ像; b: 高さ像中白枠内拡大像; c: 高さプロファイル) ……………	2-39
図 2.3.3-6	炭素鋼との接触面近傍のベントナイト試料中のモンモリロナイト量測定結果 (a: XRD 測定結果のリートベルト解析により算出、b: AFM 分析により算出) …	2-40
図 2.3.3-7	Fe ²⁺ 共存、非共存下での Na 型モンモリロナイトの収着分配係数： (a)Ni, (b)Eu ……………	2-41
図 2.3.3-8	シリカフェーム及びフライアッシュのポゾラン反応率の時間変化 ……………	2-42
図 2.3.3-9	液固比の変化に伴う HFSC の水和物組成の変遷 [a]XRD 回折パターン、 [b]PHREEQC (v3.4) 及び JAEA-TDB (v1.08) を用いてモデル化した鉱物組成 ……	2-43
図 2.3.3-10	液固比の変化に伴う HFSC の人工海水中の変質における pH および 化学成分の変遷 [a] pH, [b] K, [c] Na, [d] Ca, [e] Mg (検出限界以下), [f] Al (未測定), [g] Fe (未測定), [h] Si, [i] S, [j] C (未測定), [k] Cl ……………	2-44
図 2.3.3-11	Mg/Si 比の関数として示された M-S-H ゲルの溶解度データ及びモデル予測 [a] pH, [b] Mg, [c] Si ……………	2-45
図 2.3.3-12	DEM と MACBECE2014 のひび割れ進展状況の比較 ……………	2-46
図 2.3.3-13	セメントのひび割れ発生・進展の解析例 (上段: 解放力を載荷しないケース、下段: 解放力を載荷するケース) ……	2-48

図 2.3.3-14	カルシウム型ベントナイトに対するモリブデンの収着分配係数の経時変化 ((a) 0.002mol/dm ³ CaCl ₂ , (b) 0.02mol/dm ³ CaCl ₂)	2-50
図 2.4.2-1	グリムゼル花崗岩のマトリクス部の室内収着・拡散試験結果のまとめ	2-52
図 2.4.2-2	グリムゼル花崗岩マトリクス部(a)の X線 CT 分析による黒雲母の分布評価(b) を反映した不均質場モデル(c)及び拡散係数の評価結果(d)	2-53
図 2.4.2-3	割れ目を含むグリムゼル花崗岩を対象とした室内試験の体系	2-54
図 2.4.2-4	グリムゼル岩割れ目中における通液試験の解析のための 3 層モデル概念と パラメータ設定(a)、及び解析結果(b)	2-55
図 2.4.2-5	エスポにおける原位置トレーサー試験 LTDE-SD の試験概念(a), 解析モデル(b)及び解析結果例(c, d, e)	2-56
図 2.4.2-6	不均質場の核種移行モデル(a, b)、解析ケース設定(c)、 及び Cs の解析結果の例(d)	2-58
図 2.4.2-7	グリムゼル、エスポ及び瑞浪の 3 つのマトリクス岩の特徴と 核種移行モデルの適用性(a), 岩石中の実効拡散係数から評価される形状因子の比較(b)	2-59
図 2.4.2-8	グリムゼル、エスポ及び瑞浪の 3 つの岩石割れ目表面部の特徴と 核種移行モデルの適用性(a), 瑞浪の割れ目分類毎の拡散データから評価される形状因子の比較(b)	2-60
図 2.4.2-9	幌延泥岩マトリクス中の拡散(a)及び収着データ(b)への粘土モデルの 適用結果	2-61
図 2.4.2-10	幌延岩のマトリクス部を対象とした原位置拡散試験(D05 孔)の試験体系(a)、 オーバーコア試料の分析状況(b)、及び解析結果(c : 1 次元と円筒系の比較、 d : バックグラウンド濃度の影響評価)	2-62
図 2.4.2-11	幌延の泥岩マトリクス中の原位置及び室内拡散試験で得られたトレーサーの 実効拡散係数と収着分配係数の比較	2-63
図 2.4.2-12	幌延泥岩の単一割れ目の不均質な流れ場を考慮したモデル概念と解析結果	2-64
図 2.4.2-13	幌延 URL における割れ目を対象としたトレーサー試験結果	2-65
図 2.4.2-14	隆起・侵食の影響を考慮した移流・拡散モデルによる評価の一例	2-66
図 2.4.3-1	有機物影響評価ダイアグラム	2-67
図 2.4.3-2	腐植物質(a, フミン酸; b, フルボ酸)に対する Eu のローディングレベル ($\log(C_{Eu}/C_{r\alpha})$)と分配係数($\log K_{DOC}$)との関係への NICA-Donnan モデルの適用	2-69
図 2.4.3-3	幌延の地下研究施設の深度-250 m 地下水の溶存有機物の組成分析の結果	2-71
図 2.4.3-4	Eu 濃度と溶存炭素モル濃度との比の対数值($\log(C_{Eu}/C_{DOC})$)と Eu の腐植物質(a) ・未分画有機物(b)に対する分配係数の対数值($\log K_{d,DOC}$)との関係	2-72
図 2.4.3-5	有機物影響を考慮した性能評価解析の結果	2-73
図 2.4.3-6	処分環境条件の時間的変遷の概略と関連する微生物影響(ストーリーボード)	2-76
図 2.4.3-7	天然地下水中の全コロイド (0.2 μm 以上) への希土類元素の分配係数	2-77
図 2.4.3-8	天然地下堆積岩環境に形成されたバイオフィルム	2-79

図 2.4.3-9	亀裂性媒体におけるコロイドおよびバイオフィーム影響を考慮した 一次元平行平板モデルの概念図	2-81
図 2.4.3-10	各解析ケースの総線量の比較図	2-82
図 2.4.4-1	深度 300m 研究アクセス坑道におけるグラウチング充填割れ目の位置と状況	2-83
図 2.4.4-2	坑道への湧水量・周辺領域の水圧および透水性の変遷	2-84
図 2.4.4-3	坑道への湧水の水質変化	2-84
図 2.4.4-4	グラウト材料の岩石薄片観察結果	2-85
図 2.4.4-5	通水試験のイメージ	2-86
図 2.4.4-6	各試料の薄片写真	2-86
図 2.4.4-7	通水後の水質変化	2-86
図 2.4.4-8	グラウチングに伴うグラウト材/岩盤相互作用メカニズムの変遷に係る 概念モデル (案)	2-87
図 2.5.1-1	ニアフィールド総合評価の概念	2-88
図 2.5.2-1	ニアフィールド総合評価システムの全体構想	2-89
図 2.5.4-1	シナリオ 3 (腐食膨張による緩衝材変質部の割れと不均質な変質部の進展)	2-92
図 2.5.5-1	総合評価プラットフォームの基本構成	2-93
図 2.5.5-2	TRU 廃棄物地層処分施設 (Gr4) を対象とした連成解析の概念	2-95
図 2.5.5-3	DEM 粒子に割り当てられた間隙率とひび割れの関係	2-96
図 2.5.5-4	連成解析のフロー図	2-97
図 2.5.5-5	解析体系 (a)~(c) : MACBECE, (d) (e) : GARFIELD-CHEM	2-98
図 2.5.5-6	ひび割れ判定情報 (MACBECE)	2-98
図 2.5.5-7	ひび割れ開口幅	2-99
図 2.5.5-8	MACBECE と DEAFRAP のひび割れ開口幅分布の比較	2-99
図 2.5.5-9	1.2 万年時の間隙率および鉱物濃度の分布 (GARFIELD-CHEM)	2-100
図 2.5.5-10	解析モデルオプション 1~3 の連成解析結果 (最小主応力分布)	2-102
図 2.5.5-11	核種の分布	2-103
図 2.5.5-12	成果の体系化の全体構成	2-104
図 2.5.5-13	ニアフィールドの主要な状態変数の変遷のストーリーボード (抜粋)	2-105

第 3 章 多様な廃棄物の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発

図 3.1-1	HLW と TRU 廃棄物との共処分概念	3-2
図 3.2.1-1	アスファルトと塩の反応の概念図	3-4
図 3.2.1-2	熱量測定データの実測値と発熱速度式による計算値の比較	3-4
図 3.2.1-3	解析体系全体の温度を一定とした場合の熱収支解析結果	3-5
図 3.2.2-1	アンプル試験の結果の一例 (左 : pH 依存性、右 : 温度依存性)	3-7
図 3.2.2-2	アンプル試験結果と速度式改良前後の解析結果の比較 (pH4) (左 : 硝酸イオン濃度 右 : アンモニウムイオン濃度)	3-8
図 3.2.2-3	広島県生口島事例における硝酸イオン濃度分布の比較	3-8

図 3.2.2-4	カナダ Boyne 川周辺事例における硝酸イオン濃度分布の比較	3-9
図 3.2.2-5	地層処分施設周辺を対象とした硝酸塩化学的変遷挙動解析結果	3-9
図 3.2.3-1	各イオン型に処理したスメクタイト試料の相対湿度制御下での 底面間隔測定値	3-11
図 3.2.3-2	NH ₄ 型およびK型モンモリロナイトにおける層電荷が膨潤性に与える 影響評価結果	3-12
図 3.2.4-1	NaNO ₃ 溶液中の Tc 溶解度試験における pH および Eh 測定値 (34 d, [Na ₂ S ₂ O ₄] = 1 mmol/dm ³)	3-13
図 3.2.4-2	NaNO ₃ 溶液中の Tc 濃度の pH 依存性 (34 d, [Na ₂ S ₂ O ₄] = 1 mmol/dm ³ , 10kDa ろ過)	3-13
図 3.2.4-3	ISA 共存下における Zr 溶解度の熱力学計算結果の例 ([ISA] _{ini} = (a) 3×10 ⁻³ mol/dm ³ , (b) 10 ⁻¹ mol/dm ³)	3-14
図 3.2.4-4	ISA 共存下での溶存ウラン(IV)濃度の例 (プロット) と 最小二乗適合の結果 (実線) (ISA 濃度 10 ^{-1.5} mol/dm ³)	3-15
図 3.2.4-5	ISA 共存下での溶存ウラン(VI)濃度の例 (プロット) と 最小二乗適合の結果 (実線) (ISA 濃度 10 ^{-2.4} mol/dm ³)	3-15
図 3.2.4-6	ISA 共存下でのジルコニウム及びウランの溶解度試算結果	3-15
図 3.3.1-1	解析体系 (左: 全体図(計算領域)、右: 処分坑道レイアウト)	3-18
図 3.3.1-2	廃棄体 Gr. 3 から廃棄体 Gr. 4 方向への NO ₃ ⁻ の拡がり	3-18

第4章 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

図 4.2.2-1	地層処分システムにおける過酷事象の検討フロー	4-4
図 4.2.2-2	人への甚大な影響を起点としたアプローチの手順	4-4
図 4.2.2-3	1時間の吸入により 100 mSv となる放射能濃度 (ガラス固化体重量換算)	4-5
図 4.2.2-4	不安や懸念を起点としたアプローチの手順	4-6
図 4.2.2-5	過酷事象シナリオの描出手順	4-7
図 4.3.1-1	安全機能に着目した影響評価の手順	4-11
図 4.3.1-2	情報共有シートのフォーマット	4-12
図 4.3.2-1	断層模擬試験設備 (BORE-SHEAR)	4-17
図 4.3.2-2	試験体のレイアウト	4-17
図 4.3.2-3	X線 CT 画像 (Case3)	4-18
図 4.3.2-4	X線 CT による密度測定結果 (Case3)	4-18
図 4.3.2-5	ガス移行影響解析モデルの一例	4-21
図 4.3.3-1	安全機能に着目した予備解析の結果	4-27
図 4.3.3-2	地震・断層活動に係る影響分析の観点 (a) とそれらのバリエーション (b)	4-28
図 4.3.3-3	起こりにくさの分析	4-29

第5章 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

図 5.3.1-1	レジリエンス的考え方に基づく合意しやすい新たな処分概念の オプション構築	5-4
図 5.3.2-1	伝統的信頼モデル（左）と主要価値類似性モデル（右）	5-6
図 5.3.2-2	SSMに基づく処分概念構築の合意形成プロセスと必要な支援手法の提示	5-7
図 5.3.2-3	発明的問題解決理論の工学的矛盾マトリクス	5-10
図 5.3.2-4	品質機能展開に用いる品質表マトリクスの事例	5-11
図 5.3.3-1	処分事業の諸段階及び対応する意思決定の例	5-12
図 5.3.3-2	Active モニタリングのための処分実証施設の概念例	5-14
図 5.4.1-1	多様なステークホルダ間の合意形成に向けた協働の試行	5-15
図 5.4.2-1	CARE 型の地層処分概念	5-17
図 5.3.2-2	レジジン（樹脂）と昆虫類を内包した虫入り琥珀	5-18
図 5.3.2-3	処分場の見える化技術を取り入れた CARE 型処分概念の事例	5-19

第6章 地層処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

図 6.1-1	処分システム評価確証技術の統合化	6-2
図 6.2.1-1	統合プラットフォームのプロトタイプの要件と具体的な機能の事例	6-3
図 6.2.1-2	FRAM 法ツールを組み込んだモデルベースシステムの統合プラットフォームの 画面	6-4
図 6.2.2-1	成果統合の手順	6-6
図 6.4.1-1	ナチュラリアナログ研究 ポスター案	6-17
図 6.4.2-1	ワークショップで用いた GPIO サイクル	6-18
図 6.4.2-2	地上保管施設を対象とした集団の侵入	6-21
図 6.4.2-3	地層処分施設を対象とした集団の侵入	6-22

5 年報告書 表目次

第 2 章 ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

表 2.3.2-1	ランダムウォーク・シミュレーションの計算条件と解析結果	2-32
表 2.3.3-1	解析条件	2-37
表 2.3.3-2	C-S-H ゲルの吸着モデル	2-43
表 2.4.3-1	本事業により整備した幌延の地下研究施設の地下水から分離・精製した 腐植物質および Aldrich 社製フミン酸の NICA-Donnan モデルパラメータ	2-70
表 2.4.3-2	本調査において設定された評価対象核種の有機物への分配係数 (K_{d_DOM})	2-73
表 2.4.3-3	FEP リストに関連する微生物影響懸念事象と安全機能への影響検討の必要性	2-76
表 2.5.3-1	緩衝材へのオーバーパックの腐食影響に関連する知見	2-90
表 2.5.4-1	緩衝材へのオーバーパックの腐食影響に対する現象解析のためのシナリオ	2-92
表 2.5.5-1	ニアフィールドでの複雑な諸現象に関する課題の抽出・整理(例)	2-106
表 2.5.5-2	成果の表(例)	2-107

第 3 章 多様な廃棄物の共処分に於けるニアフィールドの影響評価技術開発

表 3.2.1-1	エネルギー供給要因および熱反応暴走を誘起する可能性の評価結果	3-6
表 3.2.5-1	TRU 廃棄物に由来するニアフィールド性能に対する影響因子	3-16
表 3.2.5-2	ニアフィールド性能への影響のまとめ	3-17

第 4 章 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

表 4.2.2-1	懸念事項リスト(自然事象)の一部抜粋	4-6
表 4.2.2-2	過酷事象シナリオの例(内部被ばく(吸入摂取))	4-8
表 4.2.3-1	重要度評価を行うための評価指標	4-9
表 4.3.2-1	実験ケース概要	4-17
表 4.3.2-2	ガス移行影響解析ケース	4-22
表 4.3.2-3	巨大地震による人工バリアに対する影響評価の検討概要	4-25
表 4.3.2-4	巨大地震による処分施設に対する影響評価の検討概要	4-26

第 5 章 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

表 5.2-1	成果の取りまとめに向けたアプローチ	5-2
表 5.3.1-1	新たな概念オプションそれぞれの方策についての考え方	5-5
表 5.3.3-1	Active モニタリングに関する開発が必要な技術	5-15
表 5.4.1-1	要求品質に応える処分概念の提案例	5-16

第 6 章 地層処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

表 6.2.2-1	知識ベースの枠組みと成果の要件	6-7
表 6.2.2-2	知識ベースの枠組みと各 SP 成果の統合整理	6-8

表 6.3.1-1	ブランディングにおいて用いられる戦略	6-9
表 6.3.1-2	Web サイトにおける情報アーキテクチャに課せられた課題と役割	6-10
表 6.3.1-3	旅行代理店のカスタマージャーニーマップの仕様例	6-11
表 6.3.2-1	参加型コミュニケーション手法の分類	6-13

1. 緒言

1.1 プロジェクトの背景と目的

わが国においては、現在、原子力発電所などで保管されている約18,000トンの使用済燃料を今後再処理すると、すでに再処理された分も合わせ、ガラス固化体の総数は約25,000本となる(原子力発電環境整備機構, 2017)。廃棄物を発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしないように、放射性廃棄物の地層処分対策を着実に進める必要がある。そのために、これまで地層処分の長期的な安全性に関する信頼性を高めることを目標に、安全評価上の保守性を重視したロバストな(頑健性の高い)地層処分システム概念の構築と評価手法の開発が進められてきた。一方、地層処分事業の処分実施主体である原子力発電環境整備機構においては、実用的かつ経済的合理性のあるものにするための技術開発が行われている。地層処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入れられるものとするためには、システムとしての評価に関する技術の確証¹が十分に行われる必要がある。システム評価においては、ロバスト性の概念を、安全評価の保守性だけでなく、システムが有するレジリアンス²性なども含めた拡張ロバスト性概念として再定義し、より包括的な視点を与えることが重要である。こうした視点に立って評価技術の確証を行うためには、計算科学等における先端科学技術の知見が最大限適用されていることを保証するとともに、特に東北地方太平洋沖地震を踏まえた過酷事象対策も念頭に置いたシステム概念と評価技術の開発が不可欠である。さらに、システム評価技術の科学技術的な先端化と併せて、社会的意思決定プロセスのなかにも、システム評価に関する確証性を高めていくための仕組みを考慮したシステム概念を提示していくことが必要である。

これらの背景を踏まえ、本プロジェクトでは、先端科学技術を駆使した解析評価技術を開発し、これらの解析評価技術と関連させ、地層処分にかかわる意思決定プロセスにおけるシステム評価の確証性を高めていくための仕組みを備えた地層処分システム開発の方法論を構築することを目的とした。処分場閉鎖前から閉鎖後の長期にわたる処分場近傍(ニアフィールド)を中心としたシステム変遷と核種移行を評価するための先端的評価技術、高レベル放射性廃棄物や多様な長半減期低発熱放射性廃棄物(TRU廃棄物)の共処分によるニアフィールドの影響評価技術、及び断層発生等が過酷事象に至る可能性を探索するための評価確証技術の開発を行うとともに、これらを用いた評価に基づき、可逆性と回収可能性、モニタリングシステム等を考慮した確証性の高い地層処分システム概念の具体的な提示を行った。さらに、処分実施主体が行う処分場設計や性能評価の科学技術的基盤を与え、安全裕度の定量化等に資すると同時に、安全規制策定に対しても科学技術的基盤を提供し、地層処分技術の社会的受容性向上に貢献するため、開発した評価技術を地層処分システム評価確証技術として統合化した。

1.2 プロジェクトの構成

前述した内容を実施するために、平成25年度から平成29年度の5か年、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業として本プロジェクトを実施した。実施にあたっては、以下に示す5つのサブプロジェクトを設定した。各々のサブプロジェクトの内容を以下に示す。

¹ 科学・工学の分野では、主に”Validation”の訳語として、「製品やサービスが意図する機能を満足する性能を持つことを確認すること」程度の意味(たとえば、IAEA, 2007)

² 全体としての機能を速やかに回復できるしなやかな強靱(きょうじん)さを表す言葉

- (1) ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発
 処分場閉鎖前から閉鎖後の長期にわたる処分場近傍（ニアフィールド）のシステム変遷と核種移行に係る複合現象評価確証技術を、先端的な計算科学/分析技術、地下研究施設等での確証試験等を通じて開発する。
- (2) 多様な廃棄物（TRU廃棄物）の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発
 高レベル放射性廃棄物や多様なTRU廃棄物との共処分におけるニアフィールドの影響評価技術の開発及び確証を行うことにより、多様な廃棄物の特徴を考慮した適切な共処分概念の提示に反映する。
- (3) 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発
 過酷事象が、処分施設閉鎖後の超長期の安全性に及ぼす影響に関する評価確証技術を開発する。
- (4) 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示
 (1)～(3)の評価に基づき、レジリアンス的視点からのロバスト性概念や、可逆性と回収可能性、モニタリングシステム等を考慮したシステム概念の具体的な提示を行う。
- (5) 処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化
 (1)～(4)の成果に基づき、処分事業等に資するよう、先端的技術を反映した処分システム評価確証技術の体系化を図る。

これらのサブプロジェクトの本プロジェクトにおける全体構成を図1-1に示す。

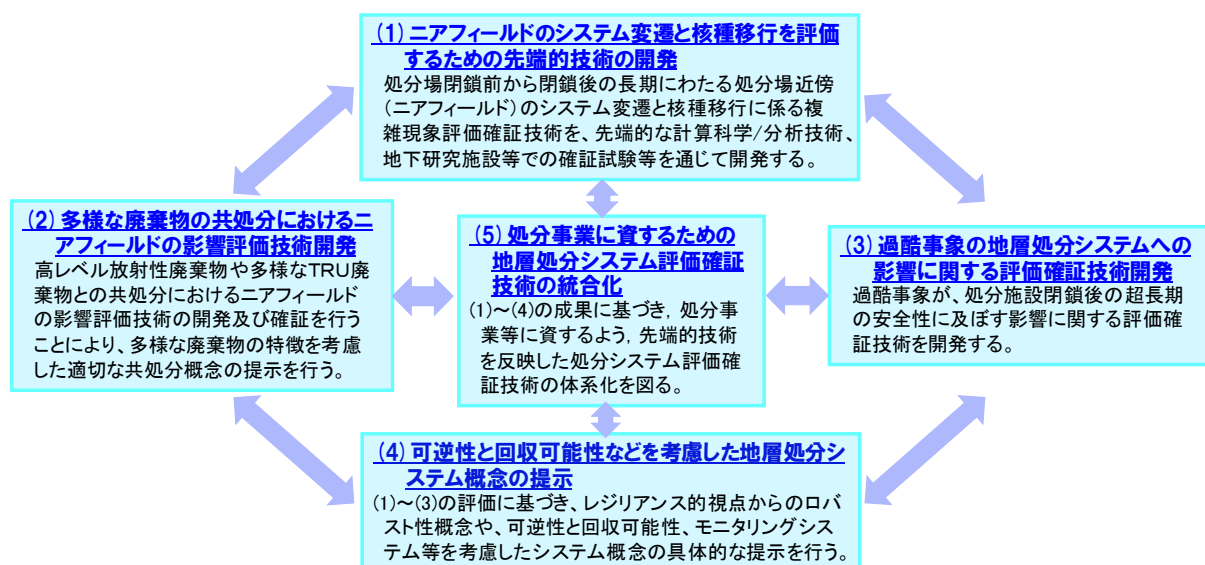


図1-1 本プロジェクトの全体構成

1.3 報告書の構成

本報告書は、平成25年度から平成29年度の5年間に実施した本プロジェクトの成果を要約し取りまとめたものであり、全部で7章から構成されている。

第1章「緒言」では、本プロジェクトの背景・目的とプロジェクトの構成について示した。第2章から第6章については、1.2で示した5つの各サブプロジェクトの成果を示した。第7章「結言」では、本プロジェクトの主な成果を総括して示した。

本プロジェクトにおける報告書構成を図1-2に示す。本報告書では、図1-2で示した各年度の報告書をそれぞれ平成25年度報告書（日本原子力研究開発機構，2014）、平成26年度報告書（日本原子力研究開発機構，2015）、平成27年度報告書（日本原子力研究開発機構，2016）、平成28年度報告書（日本原子力研究開発機構，2017）、平成29年度報告書（日本原子力研究開発機構，2018）と呼び引用するものとする。各サブプロジェクトの詳細な内容については、各年度報告書を参照して頂きたい。

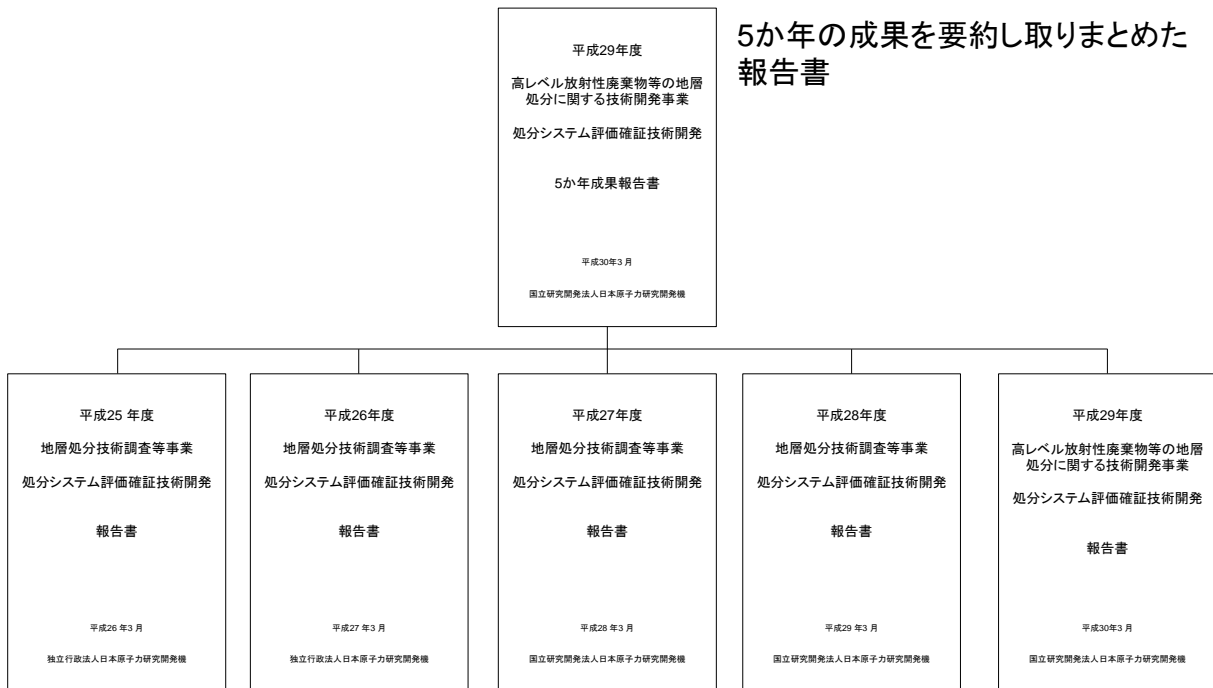


図1-2 本プロジェクトの報告書構成

参考文献

IAEA(2007)：IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 Edition.

原子力発電環境整備機構（2017）：2017年2月・3月地層処分セミナー 説明用参考資料
(http://www.chisou-sympo.jp/seminar/doc/pdf_2017_001.pdf).

日本原子力研究開発機構（2014）：平成25年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書
(http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2013/25-7-1.pdf).

日本原子力研究開発機構（2015）：平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書
(http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2014/26fy_hyoukakakusyuu.pdf).

日本原子力研究開発機構（2016）：平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書
(http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015

/27fy_hyoukakakusyuu.pdf).

日本原子力研究開発機構（2017）：平成28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書

(http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2016/27fy_hyoukakakusyuu.pdf).

日本原子力研究開発機構（2018）：平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム評価確証技術開発 報告書

2. ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

2.1 目的と5か年の実施内容

本課題では、処分場の閉鎖前から閉鎖後の長期にわたって人工バリアとその周辺岩盤（ニアフィールド）において発生することが考えられる様々な擾乱を含む複雑な現象について、現象の詳細なメカニズムや現象間の相互作用を理解することで、システムの変遷を適切にモデル化し評価するとともに、そのようなシステムの変遷や、地質環境が本来的に有している不均質性等を考慮して、核種移行を評価するための技術の開発を進めた。

地層処分は長期にわたる事業であるために、処分場を最終的に閉鎖するまで常に最新の科学的知見に照らして、システムの安全評価を行い、過去に実施された評価の確認や見直しが行われることが、社会的受容性の観点からも重要である。このため、最先端の科学的知見や手法を駆使して、処分システムにおいて発生することが想定される諸現象について、科学的な現象の理解を進め、より現象に忠実なモデルを開発し、それらに基づいて、処分システムの評価の妥当性を示すことを目標とした。この際、計算科学的な手法、室内試験、原位置試験あるいは天然類似事象の調査等のそれぞれのアプローチの特徴を踏まえ、それらを適切に組み合わせることで、モデルの確証性を高めていくこととした。さらに、対象とする処分システムの時間的変遷や、着目する現象の複雑さ、場の不均質性などを考慮して、不確実性要因とその影響を把握し、それらを適切にモデルに反映することが重要である。このような観点から、図2.1-1に示すようなニアフィールドで想定される様々な現象やプロセスの相互作用にも着目するとともに、それらを適切に取り扱う手法について検討を進めた。

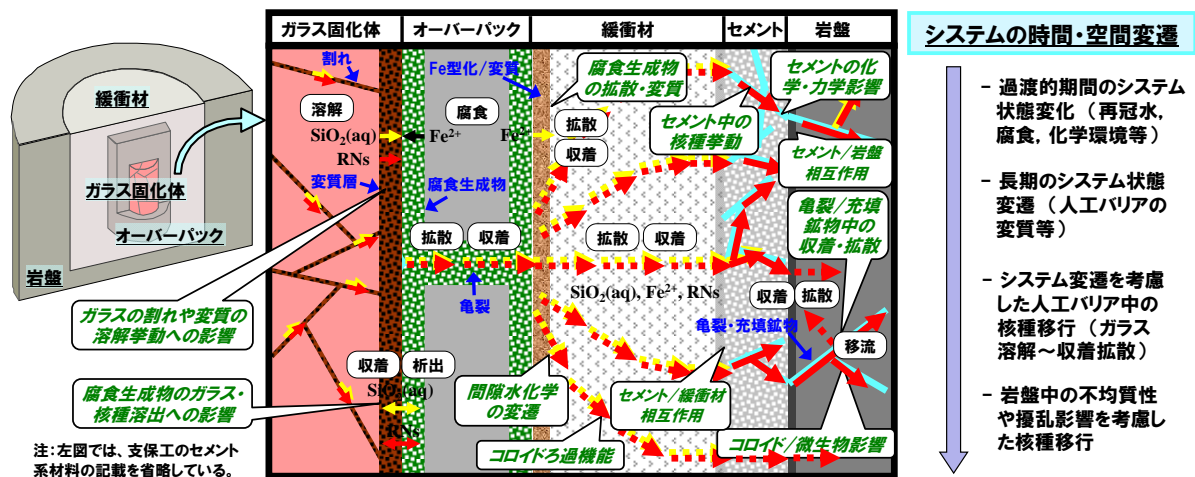


図 2.1-1 ニアフィールドのシステム変遷と核種移行評価に係る課題例

上記の目的を達成するために、本課題では、図2.1-2に示されるような空間軸及び時間軸で分担した3つのサブタスクと、それらの成果を反映して統合するための1つのサブタスクを設定し、以下のような内容で研究を実施した。

(1) システムの過渡的変化評価技術開発：

処分場閉鎖から核種移行開始までの過渡的期間に着目し、熱-水-応力-化学連成解析コードの高度化、環境条件の変遷を考慮した人工バリア特性データの拡充を実施し、ニアフィールドの過渡期状態変遷を評価する手法を開発する。

(2) 人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発：

最新の科学的知見や先端的な分析・計算科学手法を活用して、バリア材の共存による影響を含む人工バリアのシステム変遷やそれに係る不確実性要因を考慮した核種移行評価を可能とするモデルを開発する。

(3) 天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発：

最新の科学的知見や先端的な分析・計算科学手法を活用して、天然バリア（ニアフィールド岩盤）中でのシステム変遷やそれに係る不確実性要因を考慮した核種移行評価を可能とするモデルを開発する。

(4) ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発：

上記(1)～(3)の検討結果や成果を統合することによって、ニアフィールドの環境変遷とその不確実性を考慮して核種移行評価を実施できる体系的評価技術を開発する。

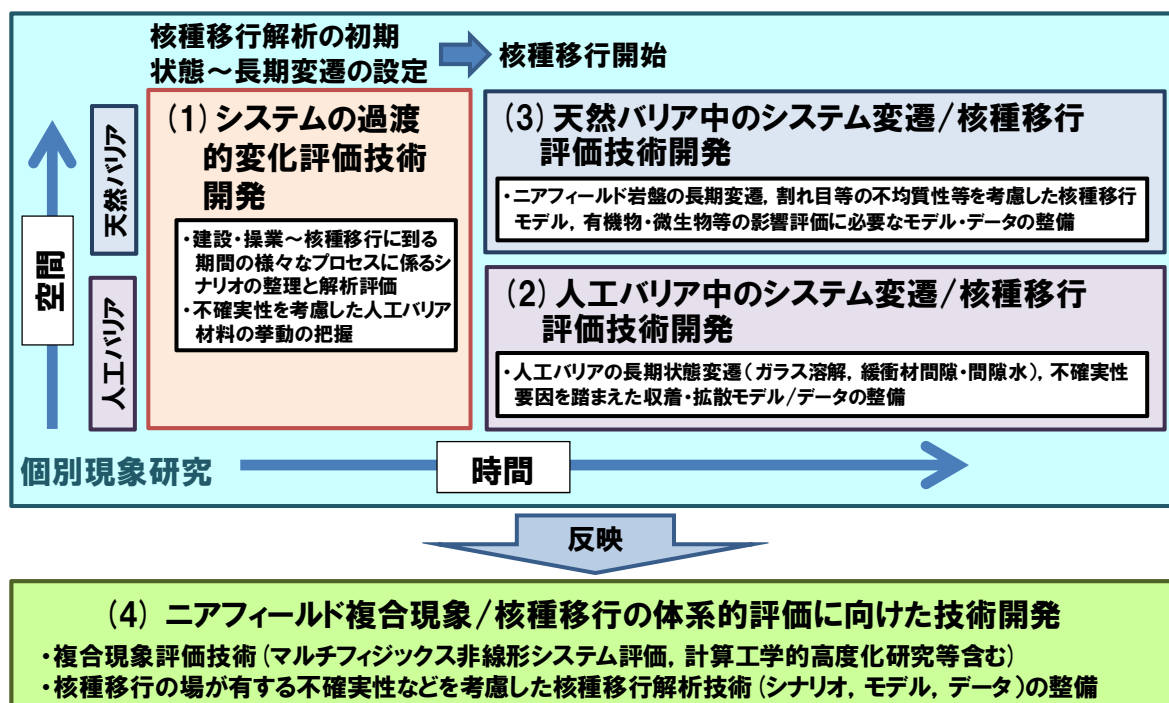


図 2.1-2 本課題における4つのサブタスクとそれらの関係

2.2 システムの過渡的変化評価技術開発

2.2.1 目的とアプローチ

本項では、ニアフィールドのシステムの過渡的な変遷における様々な不確実性を考慮して、安全評価において想定する核種移行の初期状態の設定やその設定の妥当性等を評価する技術の整備に資することを目的とする。

まず、ニアフィールド環境の過渡的変化を適切に表現するために、その評価を行う上で考慮すべき重要な事象を抽出し、連成現象を評価するための解析コードの高度化を行った。また、過渡的状态における人工バリアの挙動を評価するためのセンサー開発を行い、室内試験、原位置試験によりその適用性を確認するとともに、過渡的状态におけるデータの取得とそれに基づく人工バリア挙動の推定を行った。更に、過渡的状态においては廃棄体の発熱等の影響により地下水水質等の環境条件についてもより幅広い想定が必要となる可能性があることから、従来の想定範囲を超える条件を含む環境条件下での人工バリア特性に関するデータの拡充を行った。以下に、本項で実施した「システムの過渡的状态評価技術の開発」と「過渡的状态における人工バリアの挙動評価技術の開発」をそれぞれ示す。

2.2.2 システムの過渡的状态評価技術の開発

(1) 熱-水-応力-化学 (THMC) 連成解析モデルによるニアフィールド長期挙動評価

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、廃棄体を定置し埋め戻した直後の処分の初期段階では、地下に坑道を掘削したことに伴う地下環境の擾乱（掘削影響領域の発現、空気の混入、周辺岩盤の間隙水圧の低下、支保工等の人工材料の残置等）や、人工バリア埋設後のガラス固化体からの発熱、坑道周辺岩盤や緩衝材への地下水の浸潤、再冠水及びそれに伴う緩衝材における膨潤圧の発生、緩衝材中の地下水化学の変化、オーバーパックの腐食等、人工バリアとその周囲の岩盤を含む領域（ニアフィールド）で生じる物理化学的な現象が相互に影響を及ぼし合った複雑な系となることが想定されている。

本タスクでは、安全評価における核種移行の初期状態の設定やオーバーパックの寿命評価に必要なニアフィールド環境条件などに関する情報を安全評価側へ提供することを目的として、人工バリアを設置した時点から緩衝材が地下水により飽和に至るまでの過渡的な期間を対象として、ニアフィールドで生じる熱的作用（熱輸送、熱膨張）、水理的作用（地下水浸透、温度勾配による水分の移動）、力学的作用（応力変形、膨潤）及び化学的作用（物質移行、ガスの発生消費、間隙水の濃縮希釈、鈹物の溶解沈澱等）が相互に影響を及ぼし合いながら形成される場の変遷を評価するための熱-水-応力-化学連成解析コード（以下、Couplysという）の開発・改良を行った（平成25年度報告書、平成26年度報告書）。図2.2.2-1は、Couplysにおける熱-水-応力-化学連成解析モデルの概念図である。このうち、熱-水-応力間の連成現象については、連成解析コードTHAMES(Ohnishi et al. 1985)を、化学的な現象については地球化学解析コードであるPHREEQC (Parkhurst, 1995) を、不飽和状態での移流分散の現象については、これらの解析コードを連成させながら質量保存を確保するように開発された物質移行解析コード（木村ほか、2010）を用いており、連成対象となる変数を更新しながら解析を行うようにシステムが構成されている。

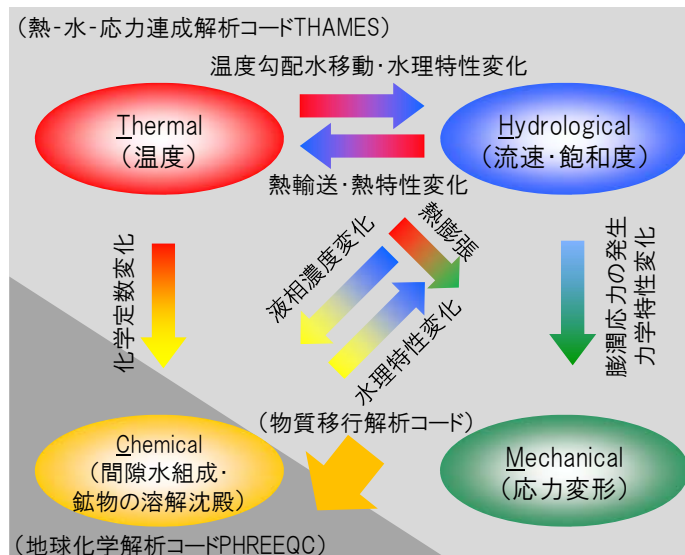


図2.2.2-1 Coupllysコードにおける熱-水-応力-化学連成解析モデルの概念図

Coupllysにおける物質移行の評価は、要素内の質量を質量粒子に分割して配置し、THAMESで計算された実流速で移動させる方法を採用しているが、メッシュモデル内に形状が大きく変形した六面体要素が含まれた場合に、質量粒子の座標位置が判定不能となることによって計算が続行できなくなるという潜在的な問題を内包していた。また、廃棄体竖置き仕様の場合など、節点要素数が多くなる大規模モデルの場合には、現実的な時間内で解を得ることができず、計算の高速化が課題となっていた。このため、質量粒子の座標位置が判定不能となった場合でも質量保存を確保しつつ計算が可能となるようプログラムの修正を行った（平成25年度報告書）。数値演算の高速化及び計算中に必要となるメモリを小さくするための数値解法として双共役勾配法（例えば、中田，2002）を選定しCoupllysへ実装した。そして、簡易モデルを用いた比較計算により、従来のCoupllysに比べて計算時間を約60%短縮できること、計算実行時に必要なメモリについては、90%以上低減できることを確認した（平成26年度報告書）。改良したCoupllysを用いて、地下水位が地表面にあると仮定して（深度500mの処分施設の全水頭を500mに設定）、地層処分システムの長期挙動に関する事例解析を行った（平成27年度報告書）。そして、本モデルを用いてガラス固化体の放熱と人工バリア内への地下水の浸潤に伴うニアフィールドの化学的な環境の変化を定量的に評価することが可能であることを示した。解析結果の一例として、緩衝材間隙水pHの変遷を図2.2.2-2に示す。さらに、処分場閉鎖直後から地下水位が変遷することによる影響を把握することを目的としたニアフィールドの長期挙動評価をCoupllysにて実施し、坑道掘削にともなう地下水位の低下が緩衝材の再冠水時間、緩衝材間隙水組成および鉱物の溶解沈殿挙動に対して感度を持つことが分かった（平成28年度報告書）。

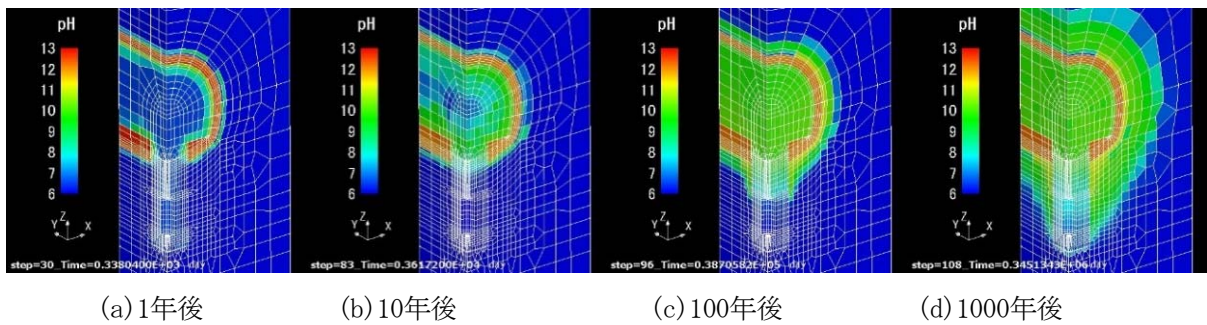


図2.2.2-2 ニアフィールド長期挙動解析結果（間隙水のpHの分布）

他方、このTHMCモデルは、例えば、応力変形による密度変化が熱や水理挙動に与える影響など、力学的な挙動の帰結として熱特性や水理特性へ与えられる影響について反映できていないことや、地下水組成が及ぼす緩衝材の剛性や発生する膨潤圧への影響、また、応力変形による屈曲度や分散長などの物質移行に関わる物性の変化など、力学と化学および物質移行との間の相互作用を考慮するまでに至っておらず、熱、水、応力および化学現象間で考慮すべき連成挙動が扱われていないことが課題として挙げられている。これらの課題に対して、まずは、Couplysを構成する熱-水-応力連成解析コード（THAMES）において、緩衝材の膨潤にともなう密度低下による剛性の低下を考慮できるように力学モデルを拡張し、緩衝材の膨潤挙動の評価の再現性が向上することを確認した（平成27年度報告書）。さらに、緩衝材の熱特性、水理特性および力学特性の密度依存性について、既往のデータを整理し、水分飽和度依存性を含めた関係式を整備するとともに、応力変形によって生じる緩衝材の密度変化にともなうこれらの特性への影響を考慮できるようにモデルの高度化を行った（平成28年度報告書）。このように、力学解析側から熱解析及び水理解析側へ解析結果を提供するスキームを追加した熱-水-応力連成モデルの概念を図2.2.2-3に示す。改良した解析コードについては、日本原子力研究開発機構が、北海道幌延町において幌延深地層研究計画に沿って実施している人工バリア性能確認試験を対象とした再現解析によりその適用性を確認した。さらに、緩衝材の膨出にともなう密度変化に着目したニアフィールドの長期挙動に関する事例解析を実施し、安全評価における核種移行の初期状態の設定に必要な緩衝材の密度分布に関する情報の提供が可能であることを示した。本モデルによって、緩衝材が膨潤し埋戻し材側へ膨出することによる密度の低下や、それにもなつて生じる熱物性、水理特性および力学特性の変化などを考慮した、より現実的なニアフィールド環境の評価が可能となった（平成29年度報告書）。今後は、力学特性に与える熱的影響や地下水水質の影響等を考慮できるように力学モデルを高度化していくことが必要である。また、将来的にはこの熱-水-応力連成モデルをCouplysに反映し、力学と化学および物質移行との間の相互作用のモデル開発を進めることによってTHMCモデルの高度化を図ることが可能となると考える。

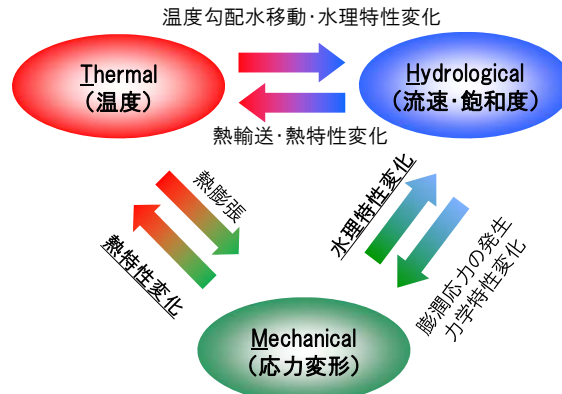


図2. 2. 2-3 緩衝材の密度変化を考慮したTHM連成モデル

2. 2. 3 過渡的状态における人工バリアの挙動評価技術の開発

過渡的状态における人工バリアの挙動を評価するために、過渡的条件下での腐食モニタリングセンサーとpH計測センサーの開発を行った。また、腐食センサーを用いて室内試験および原位置試験にて適用性の確認を行うとともに、過渡状态での腐食モニタリングを行った。また、従来の想定範囲を超える条件下でのオーバーパックスの腐食挙動及び緩衝材の膨潤性や透水性に関するデータを取得した。

(1) オーバーパックスの腐食挙動に関する調査

オーバーパックス埋設後初期の緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な状態では、溶存酸素による腐食が進展し、腐食速度や腐食の不均一化の程度は飽和した条件や還元性雰囲気と比較して大きいと考えられる。また、ガラス固化体からの発熱によって、緩衝材間隙水中成分の濃縮など水質の変化による影響を受ける可能性がある。よって、埋設後初期における再冠水過程での炭素鋼オーバーパックスの腐食挙動を把握することを目的として、不飽和緩衝材中における炭素鋼の腐食モニタリングを行うための電極の構造を検討して交流インピーダンス法による腐食モニタリングのためのセンサーを試作するとともに、室内試験により適用性を確認した。また、本センサーを幌延深地層研究センターの地下施設で実施されている人工バリア性能確認試験に適用し、腐食モニタリングを実施した（平成26年度報告書）。さらに、緩衝材間隙水中成分の濃縮を含め、従来の想定範囲を超える地下水水質での腐食挙動については、高塩濃度環境、酸性環境等での実験的検討を行い、データを取得した。

1) 腐食センサーによる腐食モニタリング

① 室内試験による腐食モニタリング

腐食モニタリング手法には、ベントナイト中で測定実績のある交流インピーダンス法を用い、その測定が可能な腐食センサーを検討した。腐食センサーの構造を図2. 2. 3-1に示す。3電極法による測定を考慮して試料極（炭素鋼電極）、参照電極および対極からなる構造とした。参照電極の材料については、あらかじめ幌延深地層研究センターの地下水で銀/塩化銀、グラッシーカーボン、白金、純チタン（ASTM Grade2相当）を対象としてそれぞれ電位測定を行い、最も安定した値を示したグラッシーカーボンを選定した。この腐食センサーを試作して緩衝材中に埋め込み、再冠水過程での緩衝材中における炭素鋼の腐食モニタリングを行った。緩衝材はベントナイト（70wt%）とケイ砂（30wt%）の混合体で、乾燥密度が $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ となるように $\phi 164 \times 50\text{mm}$ の寸法に圧縮成形した。また、下部には炭素鋼板を設置し、ヒータにより 90°C に加熱した。試験溶液には幌延URLのボーリング孔から採取された実地下水を用いた。自然電位は緩衝材の外部に設置した飽和カロメル電極との電位差として測定した。交

交流インピーダンス測定は、3電極法により自然電位から±10mVの印加電圧、1mHz～100kHzの周波数範囲にて行った。交流インピーダンス測定結果の例を図2.2.3-2に示す。図より、容量成分と抵抗成分からなるインピーダンス特性を示しており、炭素鋼電極界面について分極抵抗 R_p と「定相要素」(CPE定数)の並列回路に溶液抵抗 R_s が直列に結合した等価回路を仮定すると、全インピーダンス Z は以下の式で表される。

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1+(j\omega R_p T)^p} \quad (2.2.3-1)$$

R_s : 液抵抗

R_p : 分極抵抗

T: CPE定数 (定相要素)

p: CPE指数 ($0 < p \leq 1$)

ω : 角周波数 ($=2\pi f$)

$j^2 = -1$

この式に基づいて実測データにフィッティングを行い、各パラメータを推定した。

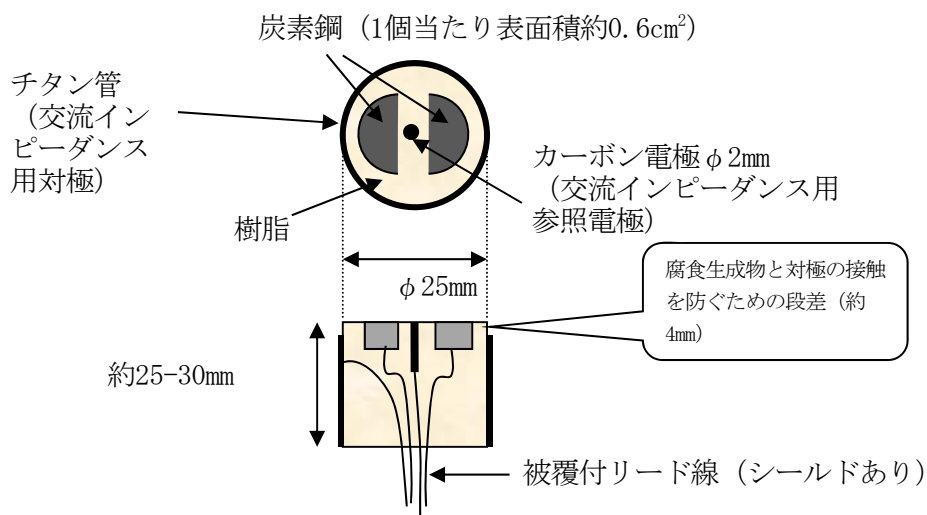


図2.2.3-1 腐食モニタリングセンサーの模式図

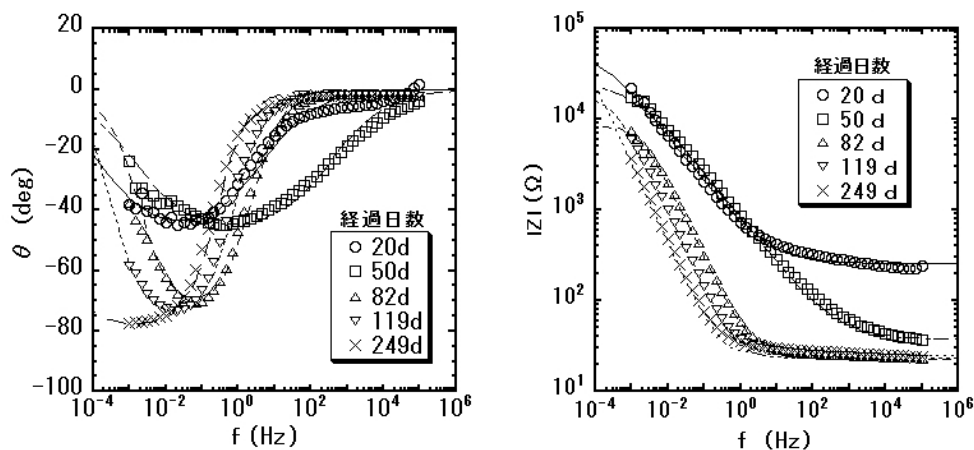


図2.2.3-2 交流インピーダンス測定結果とパラメータ推定の例

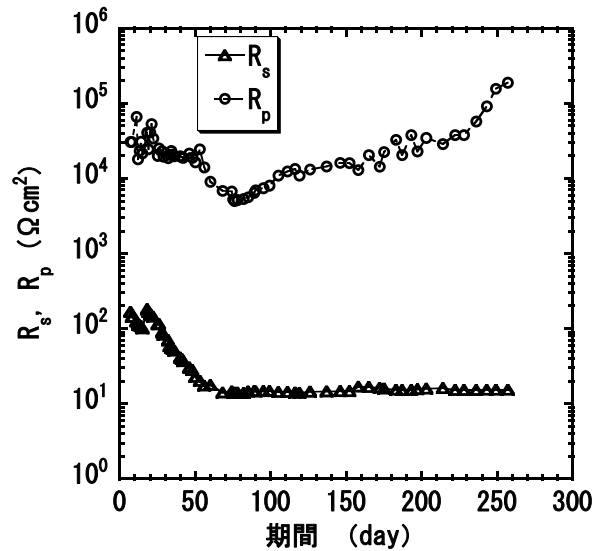


図2. 2. 3-3 R_s および R_p の経時変化

推定された R_s 、 R_p の経時変化を図2. 2. 3-3に示す。 R_s は時間とともに低下する傾向を示し、約70日以降でほぼ一定の値となった。約70日までは緩衝材への溶液の浸潤によってセンサー近傍の導電性が増加したものと考えられる。 R_p は約70日までは低下傾向を示した。これは緩衝材が乾燥状態から浸潤状態に変化する過程で腐食が促進されていることに対応するものと考えられる。約70日以降は時間とともに増加しており、溶液が十分浸潤した後は腐食速度が時間とともに低下することを示唆している。溶液が飽和したベントナイト中では溶存酸素の炭素鋼へのフラックスが著しく小さくなるため、カソード反応は酸素の還元反応から水の還元が支配的になると考えられた。また、ベントナイト中における低酸素濃度下での腐食速度は腐食生成物皮膜の形成により腐食速度が時間とともに低下することが確認された。 R_p の増加はこのような溶存酸素のフラックスの低下や皮膜形成による腐食速度の低下を反映していると考えられた。約250日以降は測定範囲で最も低い周波数（1mHz）においても位相差が小さくなる方向への変化が認められず、フィッティングにより R_p を推定することが困難となったため、約260日で測定を打ち切った。これは腐食生成物皮膜の成長に伴って発生する大きな擬似容量により、低周波数領域においても大きな位相差が生じているためと考えられた。ここで、分極抵抗から腐食速度への換算係数を20mV（西方ほか，1994）と仮定すると、 R_p が最も小さくなったときの値である約5k $\Omega \text{ cm}^2$ は約50 $\mu \text{ m/y}$ に相当し、比較的酸化性雰囲気での腐食速度にほぼ整合した。また、測定打ち切り直前（約250日後）の R_p の値である約100~200k $\Omega \text{ cm}^2$ は、約1~2 $\mu \text{ m/y}$ に相当した。これは飽和したベントナイト中における長期的な腐食速度とほぼ整合しており、概ね妥当な腐食速度が計測されていると考えられた。また、腐食速度から累積腐食量を導出すると、試験期間（約260日）での累積腐食量は約10 $\mu \text{ m}$ となった。一方、レーザープローブにより、センサーの炭素鋼電極部および試験セル底部の炭素鋼板の表面の形状測定を行い、腐食量を求めた結果、平均腐食量は7.6~13.6 $\mu \text{ m}$ であり、累積腐食量（約10 $\mu \text{ m}$ ）と整合した。よって、分極抵抗から算出した平均腐食速度は概ね妥当と考えられた。

② 幌延深地層研究センターの地下施設での腐食モニタリング

腐食センサーは、幌延深地層研究センターの地下施設における人工バリア性能確認試験とオーバーパック腐食試験に適用された。このうち、オーバーパック腐食試験で設置された腐食センサーを用いて交流インピーダンス測定を行った。オーバーパック腐食試験装置の設置状況を、図2.2.3-4に示す。緩衝材にはあらかじめセンサーの形状寸法を考慮した切り欠き加工がなされており、この部分に腐食センサーが埋め込まれている。腐食センサーは緩衝材の上段、中段、下段にそれぞれ4個（真北の方角に対して45, 135, 225, 315°）、計12個設置されている。炭素鋼電極については、オーバーパック腐食試験で用いられている模擬オーバーパックと同様のJIS G 3202 SFVC1 (C:0.25, Si: 0.23, Mn: 0.95, P: 0.014, S: 0.004mass%)である。交流インピーダンス測定は、3電極法により自然電位から振幅10mV、周波数範囲100kHz～1mHzにて測定した。なお、腐食生成物による擬似容量によって低周波数においても位相差が生じ、フィッティングによって分極抵抗 R_p を求めることが困難となったことから、400日以降は、100kHz～0.1mHzとより低い周波数領域まで測定を行った。



図2.2.3-4 緩衝材中への腐食センサー設置状況と試験孔への試験体の設置状況

①に示した室内試験と同様に2.2.3-1式に基づいて実測データに対してフィッティングを行い、各パラメータを推定した。フィッティングにより得られた R_s と R_p の経時変化を、図2.2.3-5に示す。 R_s は10～20 $\Omega \text{ cm}^2$ の値を示しており、センサーの場所による違いや経時的な変化は小さい。 R_p は、いずれのセンサーでも、約250～300日までは概ね時間とともに上昇する傾向を示したが、それ以降は一定となった。試験開始後80日後では、 R_p の値は約4～40 $\text{k}\Omega \text{ cm}^2$ となり、250日以降では約50～300 $\text{k}\Omega \text{ cm}^2$ に達した。

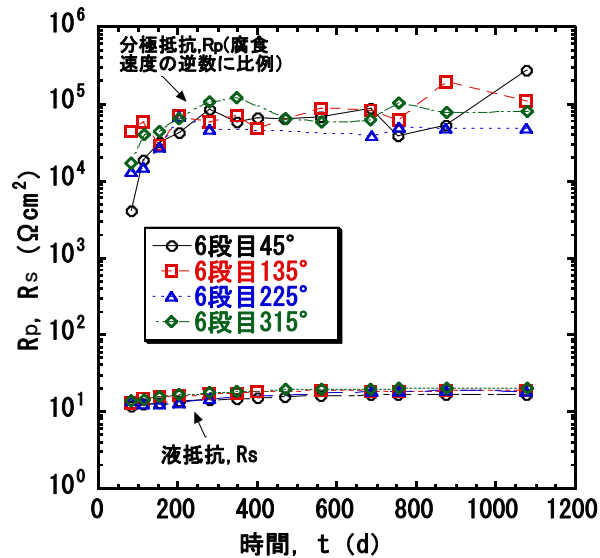


図2.2.3-5 6段目の腐食センサーの測定結果から求められた液抵抗と分極抵抗の経時変化

ここで、分極抵抗から腐食速度への換算係数を20mVと仮定すると（西方ほか，1994）、80日後の値である約4～40k Ω cm²は約6～60 μ m/yに相当し、約250日後のR_pの値である約50～300k Ω cm²は約0.8～5 μ m/yに相当する。この腐食速度の大きさや経時的な低下の傾向は、室内試験結果（平成26年度報告書）と同様であり、後者については、センサー近傍の酸素濃度の低下や腐食生成物の皮膜形成によって腐食が抑制されているとして説明できる可能性がある。上記の検討結果から、本センサーによって概ね妥当な腐食モニタリングがなされているものと考えられた。

以上のとおり、本センサーによって3年間程度以上は腐食モニタリングが可能であることが確認された。今後はより長期の計測を継続するとともに、解体調査によって劣化や変質の程度を評価し、耐久性等についてより詳細な評価を行う必要がある。また、幅広い条件に対する適用性の検討やモニタリングデータの拡充を行い、環境条件の変遷に伴う腐食挙動の応答について現象やメカニズムの解明を行う必要がある。

2) 従来の想定範囲を超える地下水水質での腐食挙動の検討

想定された環境条件の範囲を超えた条件での腐食挙動については、関連事業「先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発」（日本原子力研究開発機構，2013b）において、地震活動による地下水水質の変動を想定して、サイト選定で除外されると考えられる高温水、酸性水なども含めて、幅広くわが国の地下水の条件の整理が行われた。それに基づき、検討すべき条件として、以下が挙げられた。

- ・高塩化物環境（海水レベル以上の濃度）
- ・高硫酸塩環境（硫酸酸性を含む）
- ・高温水
- ・酸性水（pH<5）
- ・炭酸ガス、硫化水素ガス環境（酸性を含む）

上記のうち、高塩化物環境と高硫酸塩環境（酸性条件以外）については、関連事業「先進的

地層処分概念・性能評価技術高度化開発」(日本原子力研究開発機構, 2013b)においてデータが取得されており、高温水環境についても160°Cまでの範囲で浸漬期間1年(一部3年)までのデータが取得されている(谷口ほか, 2012)。また、硫化水素ガス環境についても短期(90日)のデータが取得されている(谷口ほか, 2001)。本事業では酸性環境(塩酸酸性、硫酸酸性)、炭酸ガス環境、高温水を含む広範な温度条件(長期試験データ等の拡充、炭酸塩環境での応力腐食割れ)を対象として実験的な検討を行った。以下にその概要を示す。

①酸性環境、炭酸ガス環境

実験方法は既報のとおりである(平成28年度報告書;平成27年度報告書)。酸性環境と高炭酸ガス環境における緩衝材共存下での炭素鋼の平均腐食速度におよぼすpHの影響を図2.2.3-6に示す。pHが最も低い条件(pH1)で比較的大きな腐食速度となったが、試験期間とともに低下し、弱アルカリ性の人工海水での値と比較しても著しく大きな値ではない。また、炭酸ガス環境でも30日の試験では比較的大きな腐食速度が得られたが、90日では中性~弱アルカリ性での値と同程度となった。一般に酸性水や炭酸ガス環境での炭素鋼の腐食速度は数mm/yに達する場合があります(石油公団石油開発技術センター, 1997;腐食防食協会, 1993)、実用上の耐食性をもたないが、緩衝材共存下ではこれらの環境による影響が大幅に緩和され、顕著な腐食促進には至らないと考えられる。

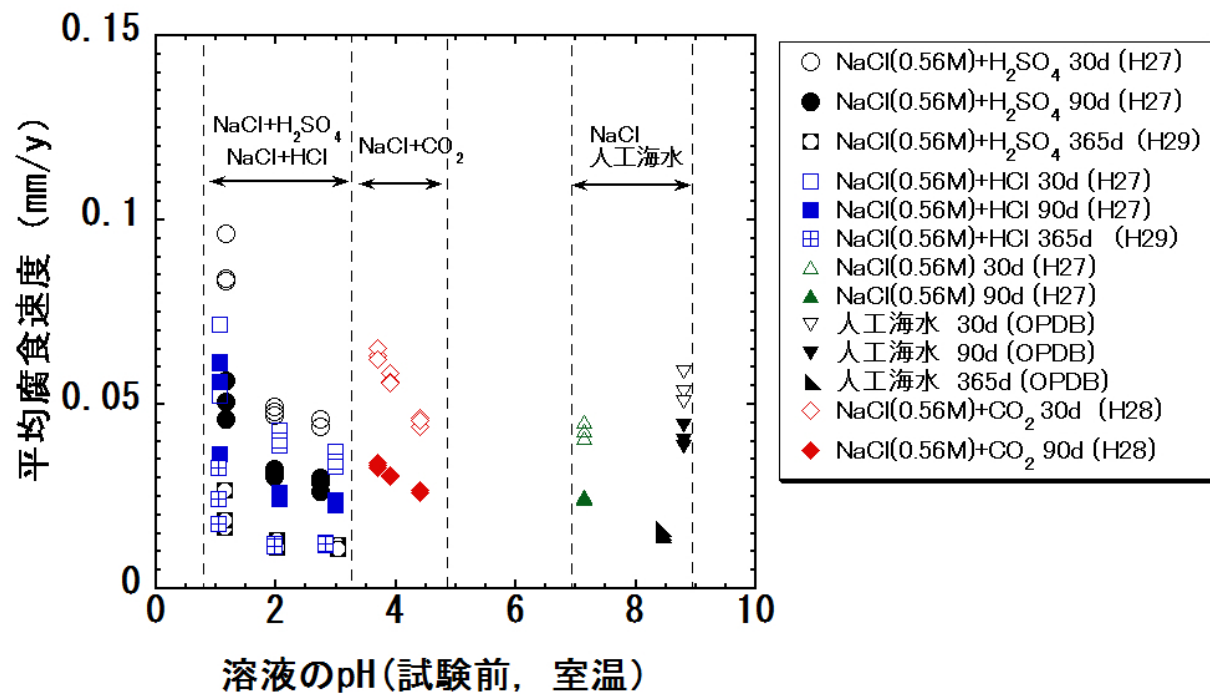


図 2.2.3-6 緩衝材中における炭素鋼の腐食速度に及ぼす pH の影響

②広範な温度条件での低酸素濃度下における腐食進展と水素吸収挙動

実験方法は既報(谷口ほか, 2012)に準じた。本事業では30~160における浸漬3年間の腐食量と1年間および3年間の水素吸収量に関するデータを取得した(平成26年度報告書;平成29年度報告書)。また、より高温条件として200°Cでの短期(90日間まで)のデータを取得した(平成25年度報告書)。各温度条件での腐食量の経時変化を図2.2.3-7に示す。図中にはKobayashi et al., (2011)による80°C

での3年間までのデータを腐食量に換算した値もプロットした。腐食量は概ね温度が高いほど大きな値となったが、両対数グラフ上での腐食深さの勾配は30~50°Cと160°Cではほぼ同様で、80および120°Cではこれよりも小さくなった。この勾配が皮膜の保護性に対応（勾配が大きいほど保護性が小さい）していると仮定すると（谷口ほか，2012）、80~120°Cで最も保護性の高い皮膜が形成していると考えられる。次に、30~160°Cの条件で浸漬試験後試験片の水素吸収量（拡散性水素）の測定結果を図2.2.3-8に示す。拡散性水素濃度は80°C以下の条件では初期に比較的高いものの、3ヶ月以降は 10^{-2} ppmのオーダーとなった。これは脆化の生じる濃度（ppmオーダー）（Okada, 1977）よりも十分小さく、腐食に伴う水素吸収による脆化は問題にならないと考えられる。

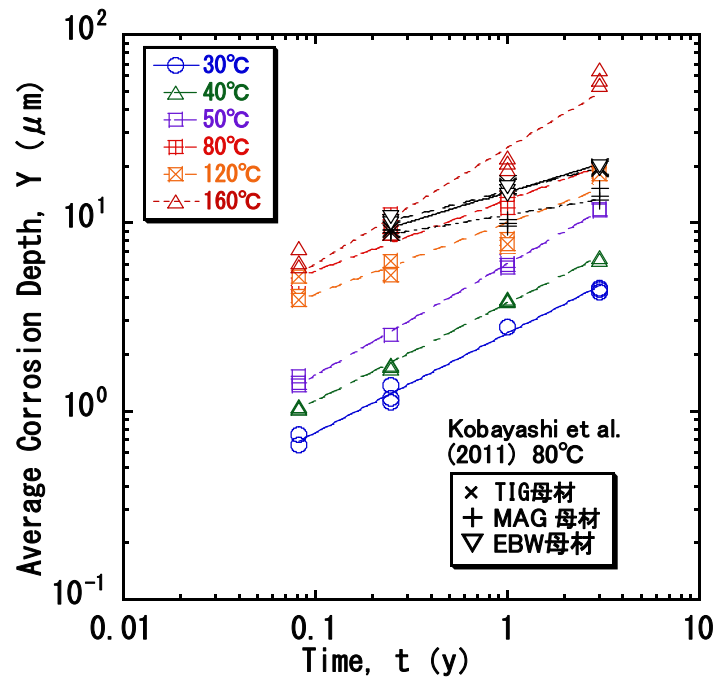


図 2.2.3-7 低酸素濃度下における炭素鋼の腐食進展に及ぼす温度の影響

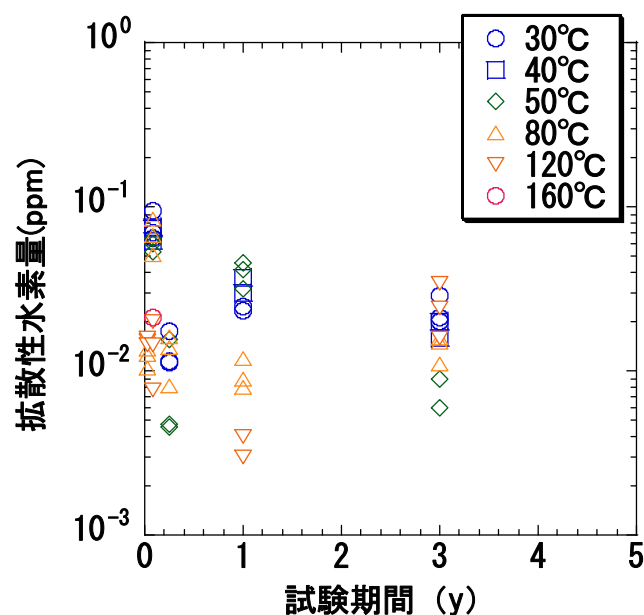


図 2.2.3-8 浸漬試験後試験片の水素吸収量（拡散性水素）の測定結果

③広範な温度条件での低酸素濃度下における応力腐食割れ感受性

炭素鋼に応力腐食割れが生じる代表的な環境である炭酸塩溶液中で低ひずみ速度法による応力腐食割れ (SCC) 試験を実施した。炭酸塩濃度 0.1~0.5M の範囲で温度 30~120°C の条件で活性態~不動態の電位条件で SCC 感受性におよぼす炭酸塩濃度と温度の影響を調べた (平成 29 年度報告書)。最大応力、破断ひずみ、絞り、SCC 破面率の尺度で調べた結果、最大応力、破断ひずみ、絞りについては SCC 感受性の比較が困難だったが、SCC 破面率については図 2. 2. 3-9 に示すように炭酸塩濃度が高いほど大きく、30~50°C で最も大きくなることがわかった。

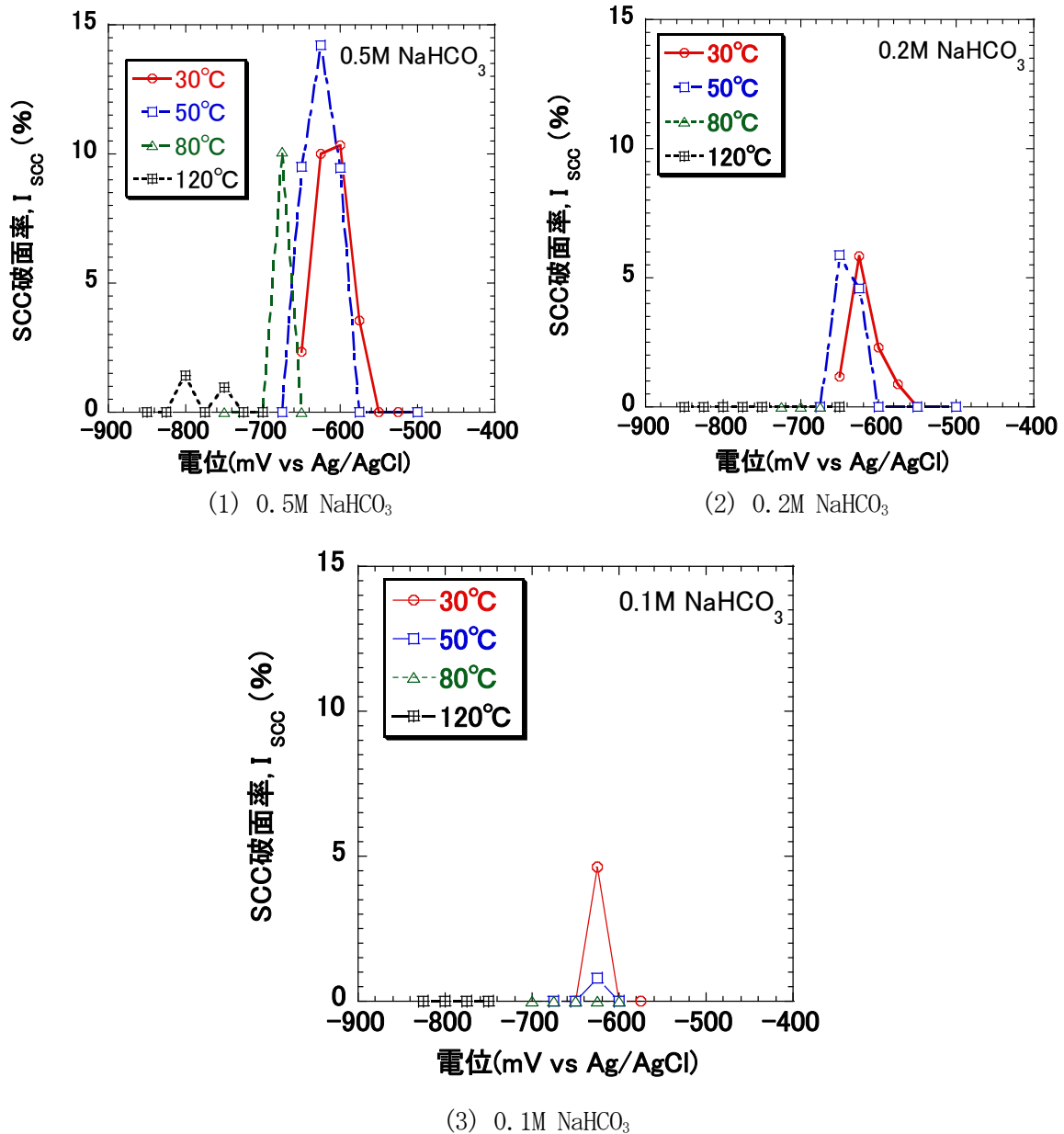


図2. 2. 3-9 SCC破面率の電位依存性

(2) 緩衝材の挙動に関する調査

1) 従来の想定範囲を超える地下水水質での緩衝材の挙動の検討

地震・断層活動による従来の想定範囲を超える地下水水質における緩衝材の挙動に関する検討として、高塩化物イオン水、酸性水を対象に、緩衝材の膨潤圧測定、透水試験を実施した。高塩化物イオンに関しては、イオン強度 4.0mol/dm^3 及び 6.0mol/dm^3 に調整した塩化ナトリウム水溶液を用いた膨潤圧試験及び透水試験を実施し、その結果、平衡膨潤圧は、 $0.15\sim 0.25\text{MPa}$ 程度、透水係数は 10^{-10}m/s オーダーが得られ、蒸留水と比較して2オーダーほど高い透水係数となることが判った。希塩酸 (0.1mol/dm^3 , $\text{pH}=1$) を試験溶液とした試験では、平衡膨潤圧が 0.52MPa 程度、透水係数が $6.7\times 10^{-13}\text{m/s}$ 程度となり、蒸留水を試験溶液とする試験と比較して大きな違いが見られなかった。ただし、希塩酸とカルサイト等の化学反応により発生したと考えられるガス (CO_2) が排水側のチューブに確認され、また透過溶液の pH が 9.0 であったことから、化学的に非平衡常態下における膨潤圧及び透水係数を示していると考えられる。

2) セメンテーションによる緩衝材の特性変化に関する検討

高レベル放射性廃棄物およびTRU廃棄物の処分施設において使用される緩衝材については、スメクタイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴ってアモルファスシリカ等の二次鉱物が間隙に沈殿して土粒子同士を固着させること（セメンテーション）によって、モンモリロナイトの鉱物学的変質が起こらない場合でも、膨潤特性や応力緩衝性などの緩衝材に要求される機能が劣化することが懸念される。このようなセメンテーションによるバリア材料の安全機能に対する影響を把握する上で、続成作用によって粒子同士が固着して岩石の状態で存在しているベントナイト原鉱石の特性を評価することが重要であり、まずは原鉱石の採取方法や試料の加工方法等を含む基本特性把握のための試験手法を確立する必要がある。本検討では、緩衝材の基本特性に対するセメンテーションによる影響を評価する取り組みの一環として、山形県月布のベントナイト鉱床の原鉱石を対象に、原鉱石の基礎的特性（メチレンブルー吸着量、土粒子密度、膨潤力等）を把握するとともに、粉状ベントナイトを圧縮成形して作製した供試体（圧縮ベントナイト）に対して実施されてきた既往の膨潤圧試験/透水試験と同様の方法を用いて原鉱石の膨潤圧・透水係数を取得した。

月布のベントナイト鉱床は、新第三紀中新世後期（ 10Ma 程度）の硬質頁岩中に互層状に夾在する火山ガラス質の凝灰岩が続成的に変質したものであるとされ、30数層のベントナイト層が確認されている。ここでは、クニゲル®V1の原料の1つとして使用される29番層および31番層、これらの番層よりもモンモリロナイト含有率が少ないと考えられる1番層から採取した原鉱石を使用した。原鉱石の採取については、試料採取後から試験までの期間における原鉱石内部の土粒子構造の変化をできるだけ抑えられるように、坑道壁面から比較的大きなブロックとして採取し、試験開始直前に供試体サイズに加工した。

図2.2.3-10に膨潤圧-有効モンモリロナイト密度関係及び透水係数-有効モンモリロナイト密度関係を示す。図中には、圧縮ベントナイトの膨潤圧試験結果をもとに提案されている関係式も示している。

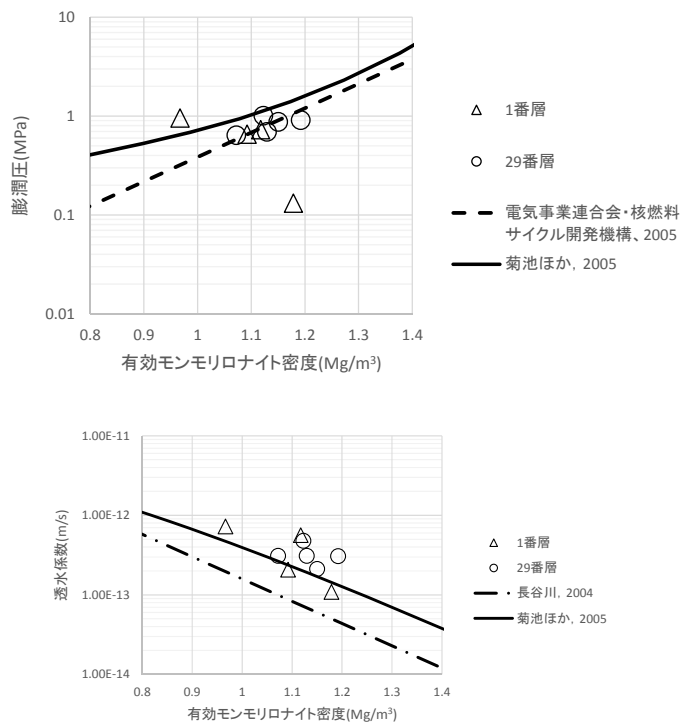


図2.2.3-10 膨潤圧-有効モンモリロナイト密度関係（上図）及び
透水係数-有効モンモリロナイト密度関係（下図）

試験に使用した原鉱石の透水係数は、圧縮ベントナイトと同等の透水係数を示している。そのため、透水性に与えるセメンテーションによる影響は小さい可能性が示唆された。一方、膨潤圧については、ほとんどの場合において圧縮ベントナイトと同等の値を示しているものの、圧縮ベントナイトの関係式の膨潤圧よりも1/10程度となっているものも見られた。したがって、セメンテーションの影響により膨潤特性は低くなる可能性も示唆された。今後更なるデータ拡充が必要である。また、今後は圧密特性等の変形挙動についても調べていく必要がある。さらに、このセメンテーションによる基本特性に対する影響については、セメンテーションがどの程度進展しているかを把握するための指標を設定し、それに対して定量的に影響を評価して結果を整理することが望ましいと考えられるが、このような指標については、明確に定められていないのが現状であり、セメンテーションがどの程度生じているかを定量化する指標（手法）の構築も必要である。

3) 光学式pHセンサーの開発

緩衝材の間隙水中の水素イオン濃度 (pH) は、金属材料の腐食挙動や放射性物質の地下水への溶解度に影響を及ぼすことから、処分システム的设计や安全評価において重要なパラメータのひとつである。緩衝材の間隙水量は極々微量であるため、電位差法に基づく一般的なpH計での計測が困難である。このようなことから、緩衝材間隙水のpHを長期にわたり連続的に測定するための技術開発は重要な課題のひとつとなっている。

本事業においては、緩衝材中の間隙水のpHを計測する方法として、光学式pHセンサーに着目し、発色材の開発、検量線の取得、圧縮ベントナイトを対象とした浸潤過程における間隙水pHの測定などを実施した。

光学式pHセンサーは、測定対象の溶液と接触させたpH感受性を持つ発色材の吸光度から、比色法に基づいて間接的にpHを測定する機器である。発色材には、酸塩基指示薬（以下、pH指示薬）が担持されており、吸光度とpHとの関係に基づきpHを求めることができる。pH指示薬は、その酸解離平衡において、水素イオン(H⁺)が結びついた酸型（以下、HXと表す）と、解離している塩基型（以下、X⁻と表す）の形態をとり、その割合はpHにより変化する。HXとX⁻の最大吸収波長は異なり、どちらか一方は可視光域にあるため、pHによってHXとX⁻の割合が変化すると可視光の吸収スペクトルが変化して色の変化が生じる。光学式pHセンサーの構成を図2. 2. 3-11に示す。本システムは、分光器、光源、センサープローブおよび計測用PCで構成されており、発色材はセンサープローブ先端に充填されている。

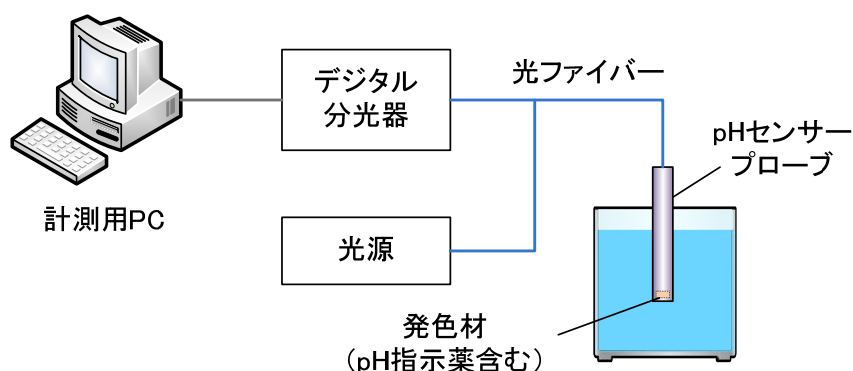


図2. 2. 3-11 光学式pHセンサーの構成

従来、緩衝材中の微量な間隙水のpHを計測するため、非極性スチレン系の粒状の合成吸着剤樹脂（平均径：0.49 μm～0.69 μm、最頻度細孔直径：120 Å）にpH指示薬を担持させた発色材（以下、粒状発色材という）の開発が行われてきた（日本原子力研究開発機構，2013）。しかしながら、この粒状発色材は、乾燥に対して耐性がなく、一度乾燥すると疎水性となり呈色反応を示さなくなることが懸念されており（平成25年度報告書）、不飽和な緩衝材中において乾燥した場合には、所定の呈色反応が生じていないことが懸念される。そこで、不飽和な圧縮ベントナイト中への水の浸潤にともなう粒状発色材の呈色状況を内視鏡を用いて確認するための試験を実施した。その結果、粒状発色材は、浸潤してきた間隙水と接触することによって呈色反応を示すことを目視で確認した（平成28年度報告書）。このことから、発色材を呈色させる量の間隙水があれば計測が達成できることや、不飽和な緩衝材中における発色材は、その性能を失うほど乾燥が進まないことが分かった。

さらに、乾燥に対して耐性がある発色材の開発を目指して、ゾルゲル法により作製したpH指示薬を含有するシリカゲル薄膜（以下、薄膜発色材という）を選定した（日本原子力研究開発機構，2014）。ゾルゲル法とは、アルコキシド（アルコール化物）の加水分解と縮合を利用した薄膜の生成方法を指す。アルコキシドとして2種類のアルコキシシラン（主要な原子団としてSi(OR)_nを含む化合物。Rはアルキル基を示す）を用いて作製した。シリカゲル薄膜の具体的な作製手順は、Kowada et al. (2005) に準じた。

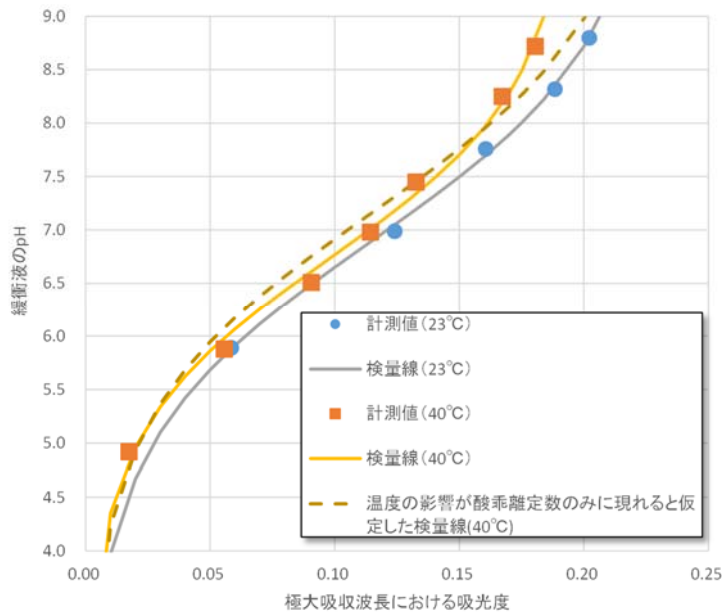


図2. 2. 3-12 薄膜発色材を用いた光学式pHセンサーの検量線

この薄膜発色材を用いた光学式pHセンサーを対象に、pHが既知の数種類のpH緩衝溶液（溶液温度23℃、40℃）の吸光度の測定を行い、最小二乗法により吸光度とpHの関係を表す検量線を求めた。さらに、理論的な背景に基づいて温度変化による検量線の補正方法を検討した。その結果、図2. 2. 3-12に示すように、23℃の条件で取得した検量線に対して、温度の影響が酸解離定数のみに現れると仮定した時の40℃の検量線は、計測値から求めた検量線と比べて、pH=8.5以下であれば差異は大きくないことが分かった（平成27年度報告書）。このpHセンサーを圧縮ベントナイト中に設置して、海水程度のイオン強度を持つアルカリ性の水溶液を浸潤させた場合の吸光度の変化を計測し、圧縮ベントナイト中の間隙水のpHが計測可能であることを確認した（平成26年度報告書）。

幌延深地層研究計画の人工バリア性能確認試験およびオーバーパック腐食試験では、前者には薄膜発色材を、後者には粒状発色材を充填した光学式pHセンサーがそれぞれ緩衝材中に設置してされており、これまでに取得した検量線に基づき間隙水のpHの時間変化が求められている（中山ほか，2016）。

4) 緩衝材膨出センサーの開発

処分孔縦置き定置方式では、処分坑道埋め戻し後に、処分孔内の緩衝材が埋め戻し材側へ膨出することが想定され第2次取りまとめでは、解析的な評価が行われている（核燃料サイクル開発機構，1999c）。日本原子力研究開発機構では、幌延深地層研究センターにおいて、実環境における人工バリア定置後の再冠水までの過渡期における熱-水-応力-化学連成挙動に関するデータ取得を実施している（花室，2017）。本事業において、緩衝材の膨出挙動の把握を目的として、緩衝材膨出センサーを開発・製作し、人工バリア性能確認試験において、その適用性の確認を行った（平成27年度報告書；中山ほか，2016）。

緩衝材膨出センサーは、緩衝材と埋め戻し材の境界部に設置され、2枚の薄板上の基盤に取り付けられた光ファイバーひずみゲージの位置およびひずみの値から、膨出量を算出するものである。緩衝材膨出センサーの構成を図2. 2. 3-13に、設置のイメージ図を図2. 2. 3-14に示す。セン

サーは当初岩盤に固定する計画であったが、試験孔周辺の岩盤では適切に固定できなかつたため、図 2. 2. 3-14 に示す位置（緩衝材ブロック上）で固定している。

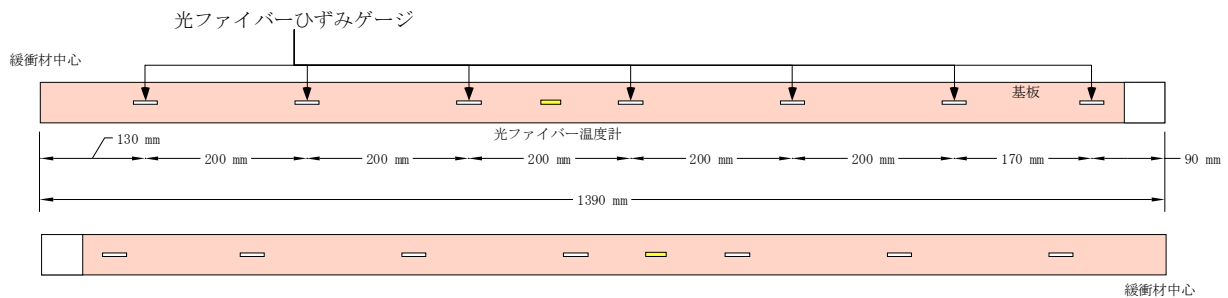


図2. 2. 3-13 緩衝材膨出センサーの構成

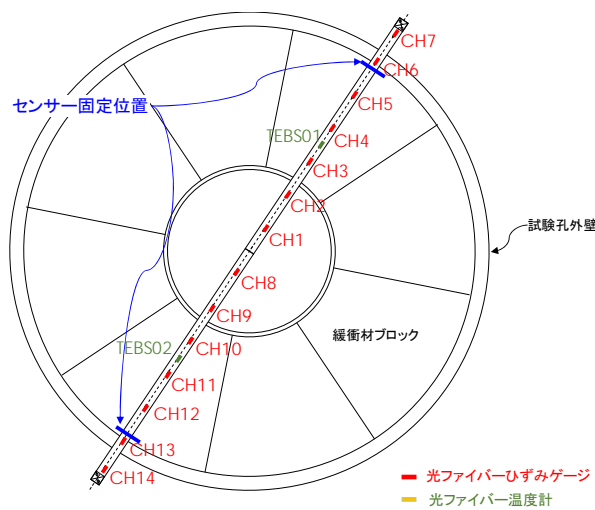


図2. 2. 3-14 緩衝材膨出センサーの設置イメージ

緩衝材膨出センサーによる鉛直方向の変位の経時変化を図 2. 2. 3-15 に示す。図 2. 2. 3-14 に示したセンサー固定位置より外側の計測データ（CH6, 7, 13, 14）については省略した。横軸はヒーターによる加熱の開始（平成 27 年 1 月 15 日）からの経過日数であり、図 2. 2. 3-14 に示したセンサー固定位置を不動と仮定して変位を算出した。2 枚の膨出センサーで CH1～CH5 の方が CH8～CH12 よりも大きな変位量を示す傾向が見られた。2 枚のセンサーともに試験孔中心部ほど変位量が大きく、外周部に向かうにつれて変位量が小さくなる傾向を示した。変位量が負の値を示す原因としては、人工バリア性能確認試験では、試験孔底から注水した地下水が、緩衝材と岩盤の隙間に設置したケイ砂層を通じて緩衝材外周部から供給されるため、緩衝材は外周部から徐々に膨潤をしていることが考えられる。今後、人工バリア性能確認試験で得られている各種データに基づく再現解析との比較や、解体調査における実地調査を通じた原因究明が必要である。

比較的大きな変位を示した CH1～CH5 のデータを用いて、膨出量の時間変化を図 2. 2. 3-16 に示す。図の横軸は試験孔中心からの距離であり、赤点線は緩衝材ブロックの境界を示している。図 2. 2. 3-16 から、時間の経過とともに緩衝材が膨出し、およそ 300 日以降は変位が収束している傾向が見られた。前述の THM 連成解析の鉛直方向の変位に関する解析結果と比較すると、最大の

変位量が解析では20~30mm(2~4年後)に対し、膨出センサー(985日後)では100(CH8)~300mm(CH1)と大きく異なっている。一方、人工バリア性能確認試験で設置している多段式の変位計からは、鉛直方向に数10mmの変位が示唆されている(中山ほか, 2016)。解析および変位計と膨出センサーとの変位量の絶対値の乖離は、上述のように膨出センサーの固定位置が実際には緩衝材の膨潤により移動していることなどが原因として考えられるが、最終的には、解体調査による実際の膨出形状および膨出量の確認が必要である。

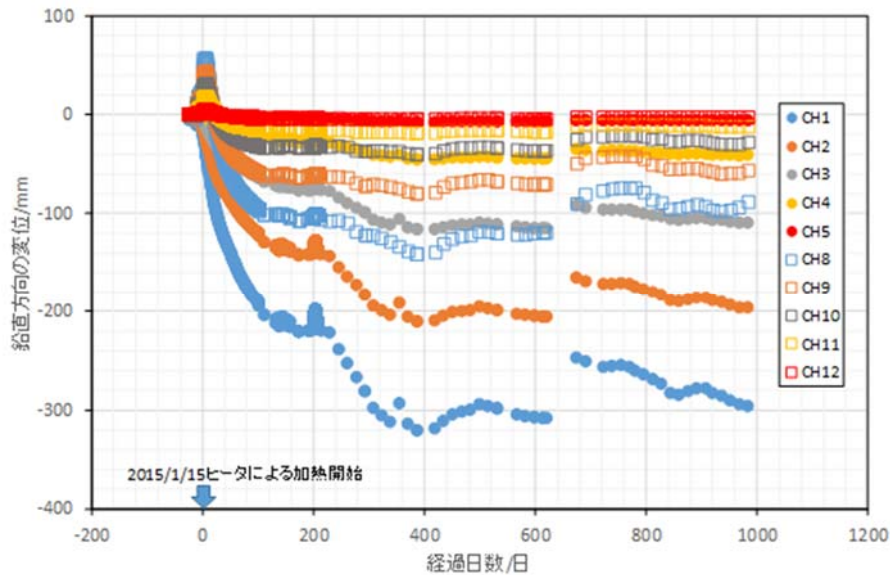


図 2.2.3-15 緩衝材膨出センサーによる鉛直方向の変位の経時変化
(センサー固定位置を不動と仮定している)

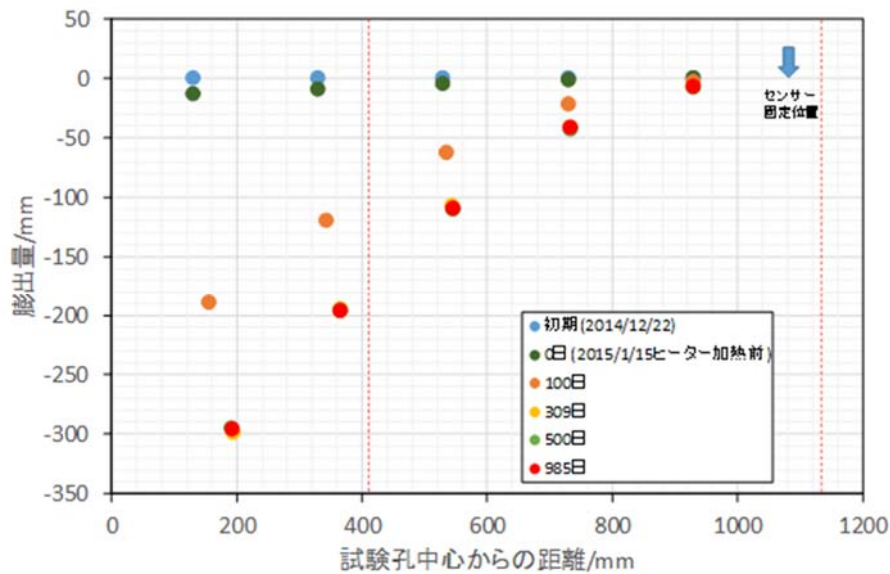


図 2.2.3-16 緩衝材膨出量の経時変化
(赤点線は緩衝材ブロックの境界を示す)

2.3 人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発

2.3.1 目的とアプローチ

人工バリア（ベントナイト）中のシステム変遷と核種移行を評価するうえでは、図2.1-1に示したように、ガラス固化体、オーバーパック、ベントナイト緩衝材、セメント系材料等の複数のバリア材の相互作用を含むシステムの状態変遷、各バリア材中や境界領域における間隙水中の化学環境や固相特性の変化、それらの影響を考慮したガラス固化体からの放射性核種の浸出、核種の溶解・沈殿、収着・拡散といった現象を考慮する必要がある。従来の性能評価においては、このような人工バリア環境の長期的な変遷の可能性やその核種移行に対する影響に関して、そのメカニズムや定性的な影響を理解した上で、これらの影響を簡略かつ保守的に評価することを重視したモデルとパラメータが採用されてきた。第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999a）において仮定されたような、オーバーパックやセメント材との共存系において時間的・空間的に変化しない緩衝材の物理・化学環境の設定、溶解速度を一定とした保守的なガラス溶解速度の設定等がその例である。地層処分の安全評価の信頼性を高め、信頼に足るものとして社会に受け入れられるためには、最新の科学技術を活用して、人工バリアシステムの長期変遷とその核種移行への影響に係る現象の理解を深化させるとともに、安全評価手法の精緻化を進め、それらが安全評価技術として有効であることを確証していくことが重要である。

本タスクでは、人工バリア中のシステム長期変遷と核種移行を対象として、上記のような個々のバリア材挙動や核種移行現象に加えて、バリア間の相互作用やその核種移行への影響プロセスに係る現象理解を進め、それらを踏まえたシステム変遷と核種移行をより精緻に評価するための技術を、先端的な計算科学/分析技術を適用して開発することを目的とする。この目的の達成に向けて、以下の2つの課題を設定し、相互に連携させつつ研究開発を進めた（平成25年度報告書；平成26年度報告書；平成27年度報告書；平成28年度報告書；平成29年度報告書）。

(1) 緩衝材中の核種移行の現象理解と精緻化モデルの開発

緩衝材中の核種移行モデルの精緻化の視点としては、間隙構造や間隙水特性の不均質性の影響、対象核種が複数の溶存化学種として共存することによる影響といった核種移行メカニズムの理解とモデルへの反映、さらにはバリア間の相互作用を含むシステムの時間的・空間的変遷の影響の理解と反映等が重要となる。このような視点での現象理解とモデル精緻化を実現するため、多様な環境条件での基礎データ取得を進めるとともに、先端的な分析技術の適用によりメカニズム解明のための研究を実施した。これらの成果に基づき、これまでに開発してきた核種移行モデルの精緻化を、計算科学手法を適用した評価も取り入れつつ進めた。

(2) システム変遷と核種移行評価のためのデータ・モデルの整備

システム変遷と核種移行の評価技術開発は、ガラス、オーバーパック、緩衝材、セメント材が共存する複合系に着目し、システムの変遷と核種移行への影響の双方の視点で、それらの評価のために重要となる基礎データ取得とモデル整備に取り組んだ。オーバーパックの共存影響については、緩衝材とオーバーパックの相互作用と変質に係る基礎データを取得するとともに、オーバーパック共存が緩衝材中の核種移行及びガラス溶解に及ぼす影響に関する基礎データとモデルを整備した。さらに、セメント材の共存影響については、セメントの長期挙動を評価するための化学・力学モデルに係る基礎データの拡充と解析手法の改良及びセメント影響を考慮した核種の収着分配係数設定のためのデータ取得を行った。

2.3.2 緩衝材中の核種移行の現象理解と精緻化モデルの開発

(1) 緩衝材中の核種移行に関する現象理解のための実験研究

システム変遷影響を含む緩衝材中の収着・拡散現象の理解とモデルの精緻化に資するため、本課題では、後述するメカニズムの解明のための分析やモデルの精緻化とも連携をとりつつ、1) 多様な環境条件とシステム変遷に着目したデータ拡充、2) システム変遷影響も考慮したコロイドのろ過機能に係るデータ取得に取り組んだ。

1) 多様な環境条件下における圧縮ベントナイト中の収着・拡散データの整備

システム変遷影響を含めた緩衝材中の核種移行モデルの精緻化のための現象理解の視点として、本課題においては、①システム変遷影響に直結する課題であるCa型ベントナイト中の収着・拡散データの整備、②化学種の混在や間隙構造の変化を含む複雑な系での収着・拡散データの整備、③収着・拡散挙動の温度依存性に関するデータの整備を実施した。

① Ca型ベントナイト中のイオンの収着・拡散データ整備

初期にNa型ベントナイトであった緩衝材が、セメント系材料との長期間の共存影響によってCa型化することが想定される。この際、モンモリロナイトの層間イオンがNaからCaに変化することに伴い間隙構造や間隙中の静電場が変化し、核種の収着・拡散挙動に影響を与えることが想定されることから、Ca型モンモリロナイト中のイオンの収着・拡散挙動を評価することが重要である。このため、Ca型モンモリロナイト中のトリチウム水 (HTO)、 Cs^+ 、 I^- の収着・拡散データを、乾燥密度や塩濃度をパラメータに取得し、Na型モンモリロナイトのデータと比較を行った（平成29年度報告書）。図2.3.2-1に、Na型及びCa型モンモリロナイトの Cs^+ の収着分配係数 K_d と、HTO、 Cs^+ 、 I^- の実効拡散係数 (D_e) の塩濃度依存性を取得した結果を示す。 K_d に及ぼすイオン強度の影響については、Ca型モンモリロナイトに対する Cs^+ の K_d は、低イオン強度においてNa型よりも小さく、Ca型ではイオン交換による Cs^+ の収着が生じにくいことが分かった。一方、 D_e に及ぼすイオン強度の影響については、Na型同様、Ca型においても、電気二重層による Cs^+ の陽イオン加速及び I^- の陰イオン排除の効果が見られた。しかしながら、Na型の Cs^+ と I^- の D_e と比較すると、Ca型モンモリロナイトの場合には、低イオン強度においても陽イオン加速及び陰イオン排除の効果が小さいことが分かった。これらの収着・拡散データをもとに、核磁気共鳴分光法を用いた間隙構造の分析と、それを踏まえた不均質系の間隙モデルの適用性について、2.3.2 (2) 及び (3) で詳細に議論する。

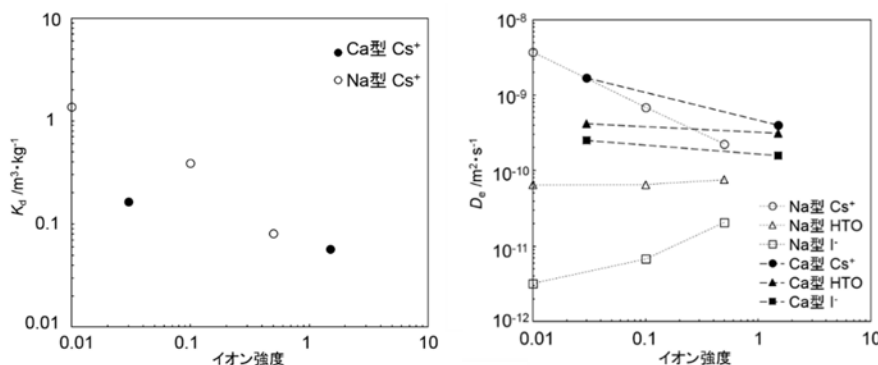


図2.3.2-1 Cs^+ の収着分配係数 K_d とHTO、 Cs^+ 、 I^- の実効拡散係数 D_e のイオン強度の依存性

② 化学種の混在や間隙構造の変化を含む複雑な系での収着・拡散データの整備

圧縮ベントナイト中の収着・拡散を評価するうえで、評価対象核種が複数の化学種として混在

する系における核種移行メカニズムの理解とその定量的な評価は、従来から重要な課題であった (Liu et al., 2011; Tachi et al., 2014)。特に、圧縮ベントナイト中の拡散挙動は、狭隙間隙中の静電的な相互作用に支配されるため、陽イオン、陰イオン、中性化学種で拡散挙動が大きく異なり、このような電荷が異なる化学種が混在する条件下での拡散挙動をどのように評価するかが課題となる。この課題に着目して、2つの化学種が混在する系でのSrの収着・拡散データを取得し、拡散メカニズムの理解と評価手法の検討を行うため、乾燥密度 0.8Mg/m^3 の圧縮モンモリロナイト(クニピア®F)を 0.05mol/L 、 0.1mol/L 、 0.5mol/L の3種類の濃度の Na_2SO_4 溶液で飽和させた条件で、Srの拡散データを取得した(平成25年度報告書)。得られた結果を、NaCl溶液系のデータ(Tachi and Yotsuji, 2012)と比較し、化学種共存が収着・拡散挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、実効拡散係数 D_e は、 Na_2SO_4 溶液系とNaCl系のいずれの条件でも図2.3.2-2(a)に示すように、明瞭な塩濃度依存性が確認され、また、 Na_2SO_4 溶液系の方が低い値を示した。同図(b)に示す収着分配係数も同様の塩濃度依存性を示した。同図(c)に示すSrの化学種計算からは、NaCl溶液系では Sr^{2+} となるが、 Na_2SO_4 溶液系では、塩濃度とともに $\text{SrSO}_4(\text{aq})$ の共存割合が増加する傾向が確認される。いずれの条件においても Sr^{2+} が支配化学種であるが、中性化学種である $\text{SrSO}_4(\text{aq})$ の共存の効果によって、 Na_2SO_4 溶液系の方が実効拡散係数と収着分配係数のいずれも低めの値を示すことは妥当な結果といえる。さらに、これらの傾向性は、定量性の面では差異があるものの、統合収着拡散(ISD)モデルの拡散モデル(3)参照)によって概ね解釈可能である。また、収着分配係数についても、Srと共存Naのイオン交換反応の競合に起因する塩濃度の影響、 $\text{SrSO}_4(\text{aq})$ の共存による収着分配係数の低減も含めて、イオン交換収着モデルによって解釈可能であることが確認された。このような化学種混在系での核種移行メカニズム理解は、アクチニドを含む多様な評価対象核種の核種移行パラメータの設定の妥当性を示すうえで重要な根拠となる。

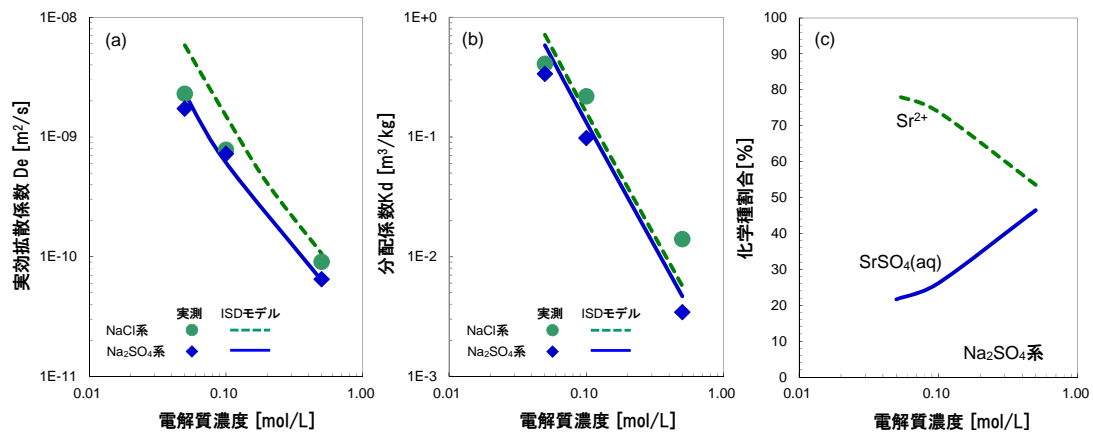


図2.3.2-2 NaCl系と Na_2SO_4 系でのSrの拡散・収着データ、及びISDモデル評価の比較

③ 収着・拡散挙動の温度依存性に関するデータの整備

Na型ベントナイト中のイオンの収着・拡散データについては、これまで多様なイオンを対象に、ベントナイトの乾燥密度、間隙水の塩濃度、温度条件等をパラメータにデータ取得を進めてきた。ここでは、圧縮ベントナイト中の収着・拡散データの温度依存性を把握するとともに、層間と粒子間隙からなる不均質な間隙中の拡散メカニズムの理解に資することを目的として、温度条件をパラメータにNa型モンモリロナイト中の拡張型透過拡散試験を実施した(平成27~29年度報告

書)。イオンの電荷と支配的な拡散経路との関係を把握するため、陽イオンのCs, Sr, 中性のHTO、陰イオンのIを対象としてデータを取得した。乾燥密度0.8と1.8Mg/m³のNa型モンモリロナイトを0.1M NaCl溶液で飽和させた系で、10、25、40、60℃の4種類の温度条件で拡散試験を実施した。ここでは、CsとSrの実効拡散係数(D_e)と収着分配係数(K_d)の温度依存性を図2.3.2-3に例示する(平成28年度報告書)。実効拡散係数はCs, Srのいずれも温度とともに増加する傾向が明瞭に確認され、両元素の拡散メカニズム及び移行経路は類似したものであると考えられる。一方で、収着分配係数については、Csの場合には温度とともに明瞭に減少する傾向が確認されていたが、Srの場合には温度依存性がほとんど見られない結果となった。このことは、CsとSrの水和エネルギーの違いによる収着メカニズムの差異を反映していると考えられる。ここで取得した多様なイオンの拡散・収着データの温度依存性は、後述するような間隙構造の不均質性等を考慮した拡散モデル開発や分子動力学計算等を活用したメカニズム解明研究に活用するとともに、核種移行パラメータ設定の重要な根拠となる情報として反映される。

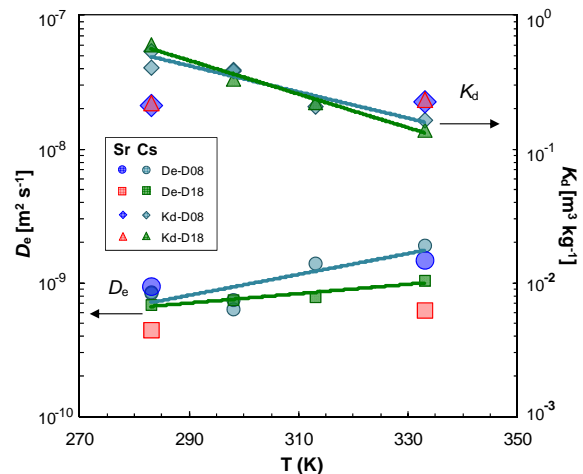


図2.3.2-3 温度制御条件でのCs, Srの拡散・収着データの温度依存性

2) システム変遷影響を考慮した緩衝材のコロイドろ過機能に係るデータ取得

緩衝材として用いられる圧縮ベントナイトは、コロイド粒子を物理的にろ過するコロイドフィルトレーション機能により、核種移行に及ぼすコロイドの影響を排除することが期待されている(核燃料サイクル開発機構, 1999c)。これまでに報告されている圧縮ベントナイト中のコロイドの透過試験においては、試験溶液の塩濃度やベントナイトの乾燥密度等の条件によっては、サイズの小さいコロイドがベントナイトを透過することが確認されている(黒澤, 2005)。しかしながら、既往の研究で検討された条件は限られており、より多様な環境変遷等を考慮した条件でデータを拡充し、ベントナイトがコロイドろ過機能を発揮する条件を明確化することが必要である。ここでは、一定の粒径を持った樹状高分子であり、表面電荷密度が高いため、高塩濃度条件でもコロイドとして安定だと考えられるデンドリマーに着目し、デンドリマーの高塩濃度下での安定性確認試験と、その条件下でのデンドリマーの透過拡散試験を実施した。安定性試験については、従来使用されている金コロイドの粒径が高塩濃度条件で凝集する(NaCl濃度0.1mol/dm³で粒径5nmが319nmに変化)のに対し、デンドリマーの場合には高塩濃度条件でも安定に存在しうること(初期粒径5.7nmでほぼ安定)が確認された(図2.3.2-4)。また、透過拡散試験により得られたデンドリマーの破過曲線を同図に示す。NaCl濃度0.5、0.05 mol dm⁻³の条件で、粒径5.7nmのデンドリマーの破過が確認された。0.5mol dm⁻³の試験では20日目以降、0.05mol dm⁻³の試験では42日目以降の積算透過量は直線的に増加しており、定常の拡散フラックスからデンドリマーのD_eは4.8~13.2×10⁻¹² m²/sと評価された。一方、NaCl濃度0.005 mol /dm³の条件においては、粒径が1.9 nmであってもデンドリマーの有意な透過は観察されず、より低塩濃度でコロイドが透過しにくいという既往の知見と整合する結果が得られた。以上の結果から、高塩濃度条件においても、デンド

リマーを用いることにより圧縮ベントナイト中のコロイドろ過機能が評価できる可能性が示された。

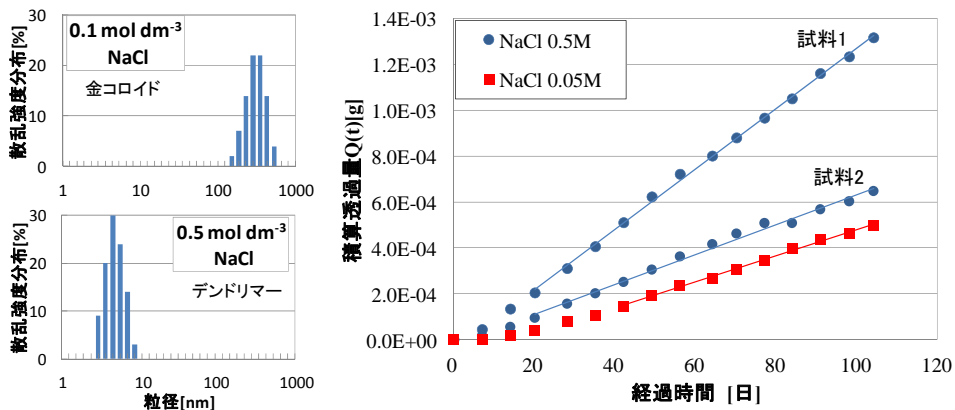


図2.3.2-4 コロイドの安定性(a)とベントナイト中の透過試験結果(b)

(2) 先端分析技術を適用した核種移行メカニズムの解明

圧縮ベントナイト中の収着・拡散現象の理解と、それを反映したより精緻なモデル開発を進めるうえで、先端的な分析技術により得られる収着・拡散メカニズムに関する知見は、モデルにおいて表現されているメカニズムが妥当であるかどうかを示す重要な根拠となる情報であり、近年、国際的にも分析技術の開発と適用が進められている (NEA, 2012, 2013)。ここでは、本タスクで重点的に取り組む圧縮ベントナイト中の収着・拡散モデルの前提となる圧縮ベントナイトの間隙構造や間隙水特性、及び核種の収着メカニズムに焦点を当てて、先端的な分析技術を適用した研究に取り組んだ。

1) NMR法による圧縮ベントナイトの間隙構造評価

圧縮ベントナイト中の核種移行を支配するモンモリロナイトの間隙には、層間間隙と粒子間間隙の2種類の間隙が存在し、ベントナイト中の核種移行モデルの高度化を進めるうえで、これらの複数種の間隙からなる間隙構造に関する定量的な情報が必要となる。圧縮ベントナイトの間隙構造を定量的に評価する手法として、プロトン核磁気共鳴 (¹H NMR) 測定から得られる縦緩和時間 ($T_{1\rho}$) を利用した間隙構造評価手法の適用性を検討してきた。乾燥密度や塩濃度の異なる条件でNa型モンモリロナイトを対象に¹H NMR測定を行い、得られる緩和時間分布及びその温度依存性を解析することによって、層間間隙及び層間外間隙の割合の塩濃度及び密度依存性の評価を行った (平成26年度報告書; Ohkubo et al., 2016)。さらに、バリア共存による長期変遷影響の観点から、Ca型モンモリロナイトを対象に同様の分析・評価を進め、最終的にNa型とCa型モンモリロナイトの密度や塩濃度に対する間隙構造の変化を定量的に評価した (図2.3.2-5)。全体的な傾向性として、高密度の条件ほど、外部間隙の存在が制限され、層間間隙が支配的になることが確認された。層間間隙については、Na型では、密度や塩濃度条件に応じて、1~4層の層間間隙の存在割合が変化するのに対し、Ca型では、高密度、高塩濃度の一部条件で2層が支配的になるものの全体的には3層状態で存在していることが確認できた。この層間間隙の変化は、XRD分析の結果とも定性的には整合する結果であった。このような間隙構造の定量的な評価は、前述したコロイドフィルトレーション機能の評価や、後述する圧縮ベントナイト中の拡散モデルの高度化において重要な根拠となる。

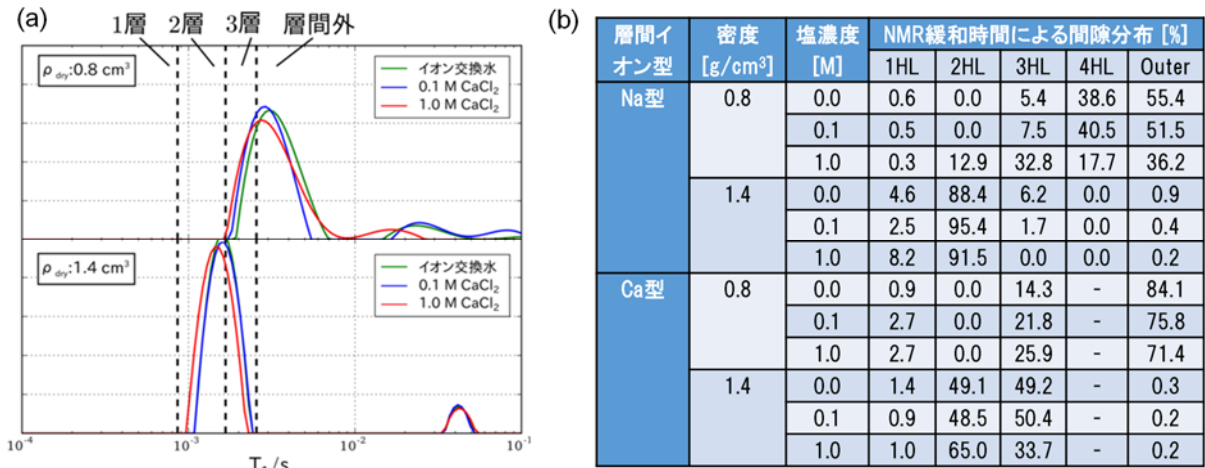


図2.3.2-5 NMR緩和時間分析データ例(a)とNa型及びCa型モンモリロナイトの間隙構造評価結果

2) NMR法による粘土鉱物へのCsの吸着機構の解明

緩衝材として用いられるベントナイトの主成分であるモンモリロナイトへのCsの吸着構造の理解は、処分の安全評価の妥当性を裏付ける重要な情報である。¹³³Cs 固体NMRは、高い分解能でCs吸着サイトを識別することができ、粘土鉱物上の様々なCs吸着サイトを解明するために有効な手法である。Cs置換量および含水状態の変化に伴うCs吸着サイトの変化を解明するため、Cs置換量および含水状態の異なるモンモリロナイトを調製し、系統的に¹³³Cs 固体NMRスペクトルを取得した。得られたスペクトルを第一原理計算と合わせて解析することで、Cs吸着サイトの同定および定量を試みた。ここでは、異なるCs置換率で調製した脱水状態のモンモリロナイトの¹³³Cs固体NMRスペクトルを図2.3.2-6に例示する。

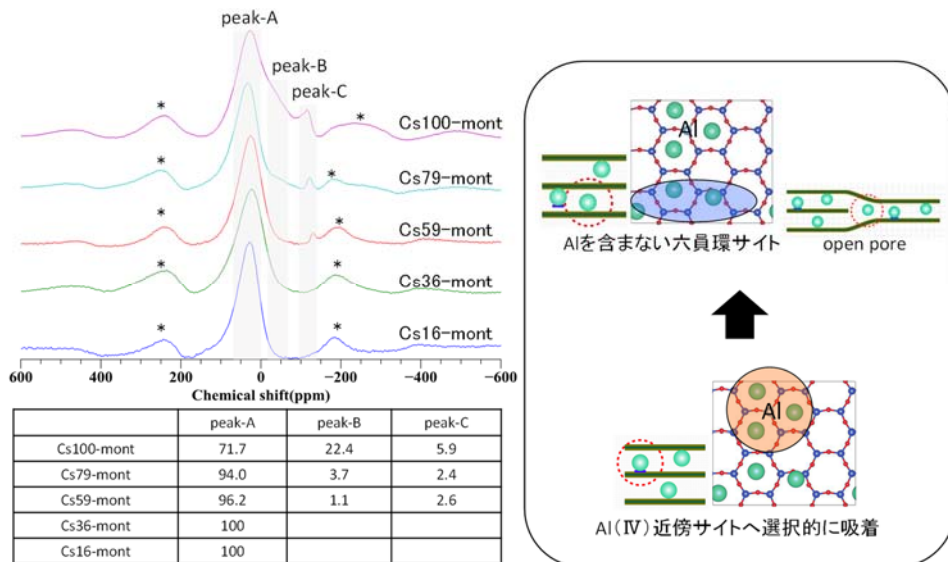


図2.3.2-6 Cs置換率の異なる試料のNMRスペクトルと第一原理計算に基づく帰属

Cs置換量が36% (図中Cs36-mont) および16% (Cs16-mont) においては、20 ppm に比較的対称な線形をもつピーク (peak-A) を示した。Cs置換率が59%以上に増加すると-100ppm近傍に複数のCsサイトに由来するピーク (peak-C) の出現を確認することができた。¹³³Cs NMRケミカル

シフトの理論計算によれば、底面間隔の増加で強い遮蔽が生じて-150 ppm付近まで高磁場シフトすることから、peak-Cの帰属は、積層構造のミスマッチや欠陥構造等で生じる層間より広い空隙に吸着したCs(site-C)に帰属されると考えられる。四面体層でSiと置換したAl近傍に吸着したCsのケミカルシフトは、30 ppm程度の低磁場シフトを示すことが理論計算よりわかっている。この結果より、peak-Aとpeak-Bの帰属は、Al置換サイトのある六員環に吸着したCs(site-A)と、それとは異なる場所に吸着したCs(site-B)に帰属できる。このような帰属に基づいて、Cs置換量の増加とCs吸着サイトの関係を整理することにより、Cs置換量が少ない場合、選択的にsite-Aに吸着し、site-Aが飽和した後にsite-Bへ吸着することを明らかにした。

3) モンモリロナイトへのSeの吸着メカニズム解明

Seは、酸化還元条件により化学種が変化し、-IIからVIまでの価数を取り、その溶存化学種は、いずれも陰イオンであるため、負に帯電するモンモリロナイトへの吸着による遅延を大きく期待することはできず、安全評価上重要な核種の一つである。処分環境の還元条件では、Seは-II価の HSe^- の化学種で存在すると考えられている(核燃料サイクル開発機構, 1999c; Iida et al., 2011; Iida et al., 2014)。本試験では、紫外可視分光法(UV-Vis)測定により溶液中におけるSeの支配化学種が HSe^- であることを確認した上で(図2.3.2-7(a), (b))バッチ吸着試験を行い、Se(-II)のモンモリロナイトへの吸着挙動を調べた。Se(-II)と同様に陰イオンであるSe(IV)のモンモリロナイトに対する吸着分配係数(K_d)は、イオン強度に依存せず、pHの上昇とともに減少することが報告されている(Goldberg and Galubig, 1988; Missana et al., 2009)。一方、本試験において得られたSe(-II)の K_d は、明瞭なイオン強度・pH依存性が見られず、Se(IV)のそれよりも1~2桁程度高い値であった(図2.3.2-7(c))。

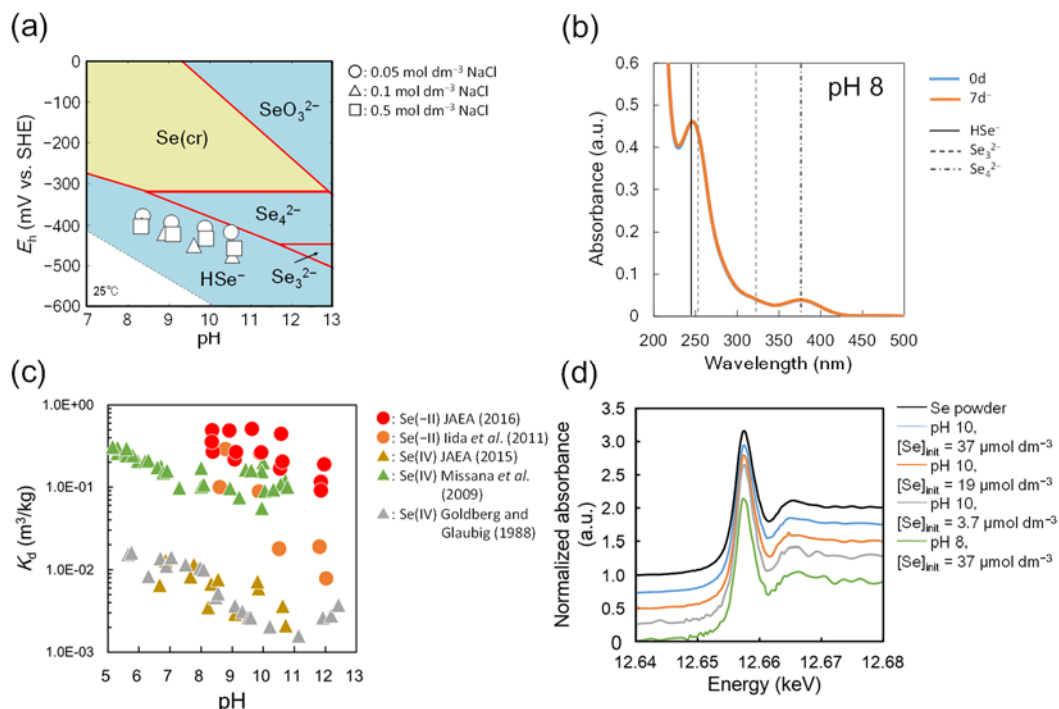


図2.3.2-7 SeのEh-pHダイアグラム及びバッチ試験における値(a), Se(-II)のUV-Visスペクトル(b), Se(IV)及びSe(-II)の吸着エッジ(c), 及びモンモリロナイト中のSeのXANESスペクトル(d)

Se(-II)のモンモリロナイトに対する収着形態を直接観察するため、エックス線吸収微細構造(XAFS)測定を実施した。バッチ収着試験を行い、回収した固相を大気に触れないように密封し、大型放射光施設(SPring-8)において蛍光法により測定を行い、エックス線吸収端近傍構造(XANES)スペクトルを取得した。その結果、固相中においてSeは0価として存在することが確認され(図2.3.2-7(d))、モンモリロナイトとの接触による酸化還元反応がSe(-II)の比較的高い k_0 に寄与している可能性が示唆された。本試験では、XAFS(XANES)スペクトルを得るため、初期Se濃度が溶解度に近い条件となったことが課題となった。今後、より初期Se濃度及び k_0 が低い条件で試験を行い、結果を比較する必要がある。また、モンモリロナイト界面における酸化還元反応には鉄が関与する可能性が報告されているが(Charlet et al., 2007)、本試験においても鉄が関与しているかどうかは不明であるため、鉄を含まない合成モンモリロナイトを用いて結果を比較することで、Se(-II)の収着機構を明らかにすることができると考えられる。

(3) 緩衝材中の核種移行に関する精緻化モデルの開発

圧縮ベントナイト中の収着・拡散現象については、これまでの受託事業「処分システム化学影響評価高度化開発」(日本原子力研究開発機構, 2013c)の成果を踏まえ、信頼性の高いデータ取得及び分析的手法によるメカニズムの理解に基づいて、統合収着拡散(ISD)モデルの開発を進めてきた。本事業では、これらの成果をもとに、先端的分析技術による圧縮ベントナイト中の多重間隙構造の理解とそれを反映した拡散モデル、同一元素で複数化学種が共存する系への拡散モデルの適用法を検討した。さらに、モンモリロナイト層間及び粒子間間隙が共存する系に対して分子動力学(MD)シミュレーションを適用し、モンモリロナイト層間の安定な水和構造や拡散挙動、層間間隙へのイオンのアクセス性及びサイズ効果などの検討を進めた。また、モンモリロナイトのエッジ表面を対象とした量子化学計算を行い、反応性の高い収着サイトを評価するとともに、酸解離定数などの反応定数の定量評価手法の検討も進めた。一方、ISDモデルとは異なったアプローチで、ナノスケールの構造・物性からマクロスケールの核種移行パラメータを評価するアップスケーリング手法の開発に取り組んだ。最終的には、これらの成果の核種移行モデルやパラメータ設定への反映と課題について取りまとめた。これらのうち主要な成果について以下に報告する。

1) 圧縮ベントナイト中の統合収着・拡散モデルの高度化

ISDモデルは、圧縮ベントナイト中における地下水組成等の間隙水化学、収着分配係数や拡散係数を、整合性のある考え方のもとにモデル化するアプローチである。特にISD拡散モデルでは、均質な間隙構造を仮定した平行平板中での静電的相互作用に電気二重層理論を適用してモデル化し、これにより比較的単純な構造の陽イオン・陰イオン・中性化学種に対する実効拡散係数(D_e)を幅広い条件の下で再現できている。そこで、より複雑な化学種へ適用するため、点電荷イオン・均質間隙構造の単純なモデルを拡張し、①均質間隙系での溶質/溶媒/鉱物固相の分子論的構造の考慮、②間隙の不均質構造/多重間隙の考慮、の2つの方向でモデル改良を検討した。①の検討の結果、鉱物間隙中の分子論的な詳細情報は、モデルによる解析の結果に本質的な影響を与えず、鉱物表面とイオンとの静電的相互作用が、拡散係数等のマクロな核種移行パラメータに大きく影響を及ぼすことが確認された(日本原子力研究開発機構, 2013c)。②については本タスクにおいて検討を進め、NMR測定により得られたベントナイト層間/粒子間間隙の体積分率を重みとして考

慮した拡散係数の平均化手法を構築した。このモデル化により、特に陰イオンに対する電解質濃度依存性のモデル評価が改善されることがわかった（平成27～29年度報告書）。

多重間隙モデルの適用事例として、以下ではモンモリロナイトのCa型化への影響評価について例示する。Ca型化した場合、Na型とは膨潤挙動が異なり、間隙のサイズが均質化されなくなると考えられる。計算対象は、Ca型化した乾燥密度800 kg/m³のモンモリロナイト（クニピア®F）をCaCl₂電解質溶液で飽和させた系とした。図2.3.2-8(a)に実効拡散係数の電解質濃度依存性のモデル計算結果を示した。モンモリロナイト層間間隙と粒子間間隙の体積分率は上記(2)に示したNMR緩和時間分析により得られたデータを用いた。比較のため、Na型クニピア®F - NaCl電解質系の計算結果を同図(b)に示した。図中にプロットした実測データは、Ca型は上記(1)で得られた拡散データ、Na型はTachi and Yotsuji (2012, 2014) から引用した。また、多重間隙モデルとともに、均質間隙モデルの評価結果も合わせて図示した。

Na型とCa型の計算結果を比較すると、2価のCa型は電気二重層の影響がNa型に比べて小さくなるため、イオン強度の依存性も低くなり、実測データとも調和的である。また、多重間隙モデルでは、均質間隙モデルに比べてイオン強度の依存性が低くなる傾向が現れている。これは、多重間隙モデルでは間隙幅が広い粒子間間隙が存在し、かつその存在割合が高いため、電気二重層の影響が弱められたことに起因する。その結果、粒子間間隙が主要な拡散経路となっていると思われる陰イオンに対しては、モデルによる再現性が改善された。同時に、従来開発してきた均質間隙モデルを仮定した拡散モデルも全体の傾向性を十分に表現できることを確認した。

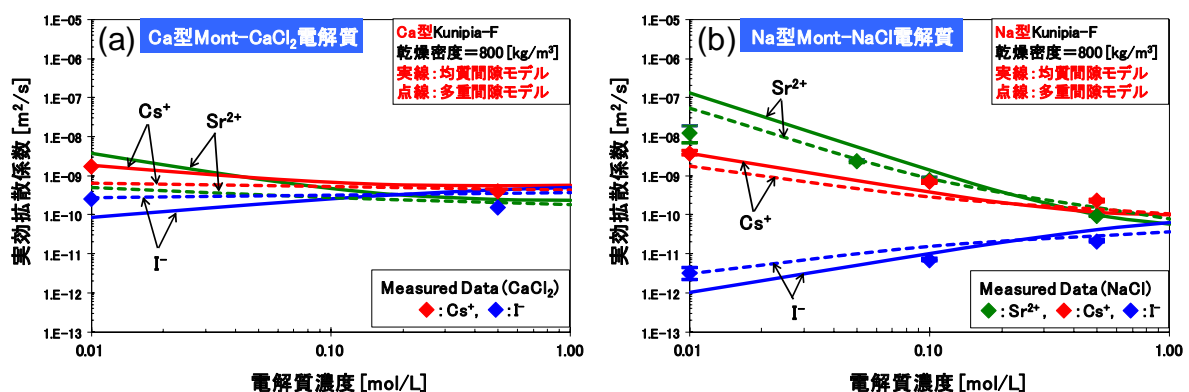


図2.3.2-8 異なるイオン型の電解質系における実効拡散係数の解析例：

(a)Ca型モデル、(b)Na型モデル。実線は均質間隙モデル、点線は多重間隙モデル

2) 計算科学的手法による核種移行モデルの高度化検討

多様な時間・空間スケールを取り扱う地層処分安全評価において、現在の分析試験レベルで認識可能な電子/原子レベルから、アップスケーリング手法の適用により第一原理的にマクロスケールの物性を評価して現象を理解することは、処分システムの評価検証において重要な課題であると考えられる。その際、実際には量子論的扱いが必要な原子・分子レベルの挙動においても、古典力学で十分近似可能な静的/動的過程に対しては、古典統計力学を用いてマクロ物性を評価することが、計算資源/負荷の上からも合理的である。地層処分研究においては、イオンの拡散挙動などの動的過程が重要な評価対象の一つであるため、古典分子動力学計算（以下、古典MD計算）が主に用いられてきた。一方で、鉱物表面へのイオンの吸着などの電子の授受を伴う化学反

応を対象とする場合には、第一原理分子動力学法や動力学を伴わない量子化学計算が適用されている。そこで本調査項目では、圧縮ベントナイト中の間隙水特性、溶存核種の存在形態、核種の収着・拡散挙動、さらに圧縮ベントナイトの間隙構造に影響を与える粘土鉱物の膨潤挙動等に着目し、分子モデルによるナノスケールでの評価、メカニズムの理解を目的として、計算科学的手法（量子化学、分子動力学計算、ランダムウォーク法等）を適用した評価解析を実施した（平成25～29年度報告書）。

古典MD計算を用いた解析事例として、モンモリロナイトの膨潤挙動、及び層間間隙におけるイオンの拡散挙動について、おもにイオン型の変化に対する影響評価を以下に示す。MD計算コードはMXDORTO/MXDTRICLシステム（平尾・河村，1994）を用い、原子間の相互作用ポテンシャルには、全自由度分子モデル（BMH-EX型；河村，2004）を採用した。モンモリロナイト-水の混合系を計算対象とし、等温・等圧のNTPアンサンブル、標準状態（25℃、1気圧）で計算した。Na型の場合、層間には対イオンのNaイオンと水分子のみが存在し、本計算では電解質は非共存とした。層間の水分子数に対する膨潤挙動を評価するための物理量として、まず平衡後の積層の底面間隔を計測した。また、モンモリロナイトと水を混合した際の安定性を評価するため、系の混合過剰エンタルピーと層間水の密度を計算した。

モンモリロナイト層間の膨潤挙動を、図2.3.2-9に示した。横軸 n は層間内の水分子数であり、層電荷0.5のNa型の場合、Naイオン0.5個に対して水分子が n 個存在する系を表す。図(a)の左側の縦軸は「底面間隔」を表し、黒線で示したものが「膨潤曲線」である。解析結果は、XRDによる実測データ（平成29年度報告書）と整合的であった。また「系の混合過剰エンタルピー」を、赤線で示した。混合過剰エンタルピーが右下がりの領域が安定な水和層に対応し、右上がりの領域は膨潤状態に対応している。図(b)は、同じくNa型を対象に混合過剰エンタルピーと層間水の密度をプロットしたものである。系の安定性は膨潤の自由エネルギーによって評価すべきであるが、混合によるエントロピーの影響が相対的に小さいものと仮定して混合のエンタルピーで評価すると、 $n = 2.5$ 付近に最も安定な水和状態（1層水和状態）が存在することが分かる。同様に $n = 5, 7.5, 10$ 付近にも比較的安定な状態が現れ、それぞれ2層水和状態、3層水和状態、4層水和状態を表しているものと思われる。一方、層間水の密度は膨潤曲線の曲率を反映した量であり、混合過剰エンタルピーとは反対に右上がりの領域が安定な水和層に対応し、右下がりの領域は膨潤状態に対応している。図(b)のNa型を見る限りでは、エンタルピーと水密度の間に高い相関が見られる。他のイオン型についても同様な検討が可能である（平成28年度報告書）。

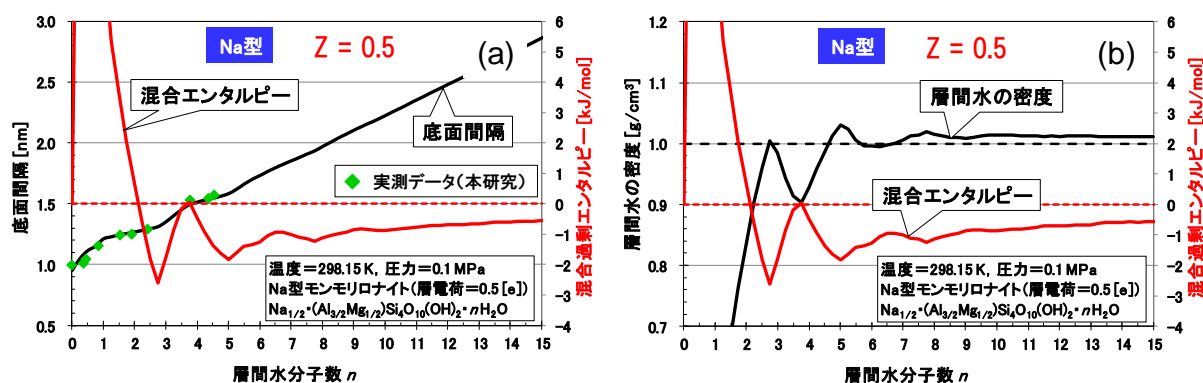


図2.3.2-9 層電荷0.5のNa型モンモリロナイトの膨潤挙動：
混合過剰エンタルピーと底面間隔との関係(a)、及び層間水の密度との関係(b)

古典MD計算を用いた他の解析事例として、圧縮ベントナイトにおけるアクチノイド核種の収着・拡散挙動の定量的評価を目指し、ウラニルイオン (UO_2^{2+}) を対象に、自由水中およびモンモリロナイト層間における拡散挙動を評価した。また、炭酸イオン (CO_3^{2-}) の影響を評価するため、 CO_3^{2-} を含む系でのシミュレーションを実施して、炭酸錯体の形成、その収着・拡散に及ぼす影響等について定量的に評価した。さらに、より現実的な間隙構造における核種の挙動を評価するため、層間間隙および粒子間間隙が共存するスーパーセルを作成し、水分子の分配に伴う層間の膨潤挙動、さらに各種イオンの層間への侵入挙動について評価を試みた（平成29年度報告書）。計算例として、初期状態の粒子間間隙にはNaイオンが存在せず（対イオンとして層間間隙にのみ存在）、炭酸イオンが共存しない系（陰イオンはすべて Cl^- のみ）のスナップショットと各イオンの拡散履歴を、図2.3.2-10に示した。図(b), (d)を見ると、炭酸イオンが共存しない場合にはNaイオンとウラニルイオンの交換がスムーズに起こり、ウラニルイオンの層間間隙への侵入が確認できる。これは、2層水和層間の間隙幅（およそ0.74 nm）に対するウラニルイオンの直径（0.58 nm、Marcus, 1997）から考えて矛盾しない。一方、炭酸イオンが共存する場合の同様の計算では、ウラニルイオンの層間間隙への侵入がいくぶん減少していた。これはウラニルイオンが炭酸イオンと錯イオンを形成し、イオンサイズの増大が起因して侵入を妨げるためであると推測することができる。また、2種類の陰イオン Cl^- 及び CO_3^{2-} はどちらも層間間隙にはほとんど侵入しておらず、「陰イオン排除」の現象を確認することができる。ウラニルイオンをネプツニルイオンに置き換えたシミュレーションでも、ほぼ同様な結果が得られた。

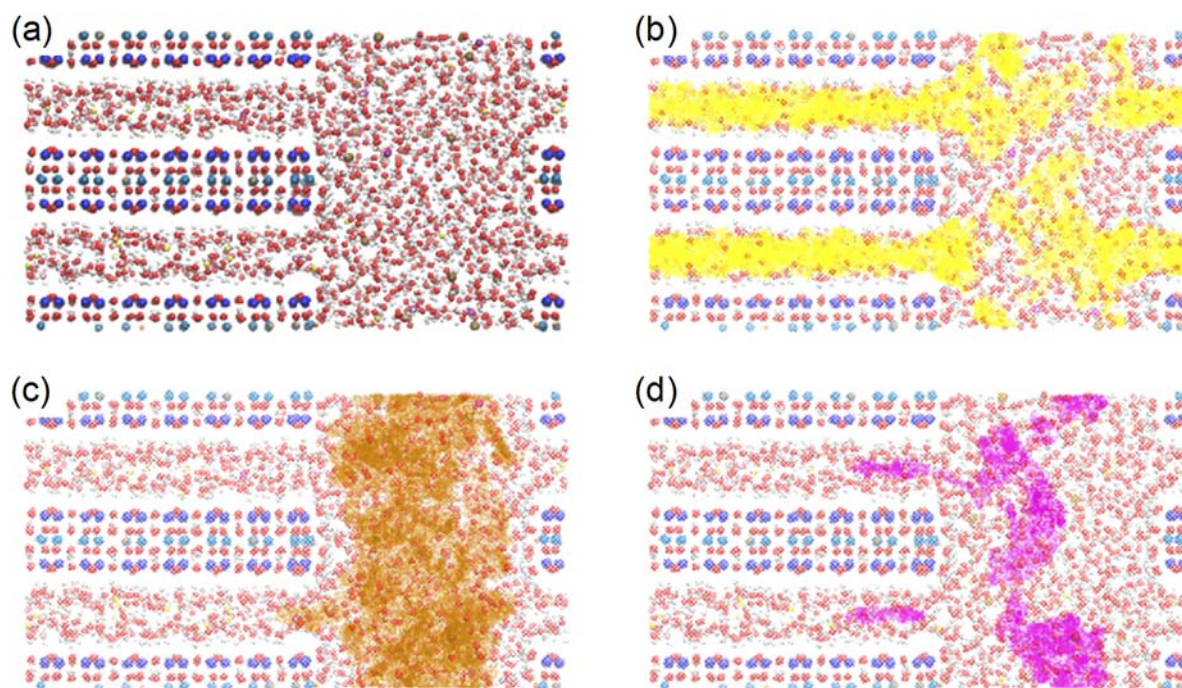


図2.3.2-10 CO_3^{2-} 非共存下におけるモンモリロナイト層間・粒子間間隙混合系での拡散履歴 (298.15 K、1.2 ns) : スナップショット(a)、 Na^+ (b)、 Cl^- (c)、及び UO_2^{2+} (d)

次に、密度汎関数理論による第一原理計算を用いた解析事例として、モンモリロナイトのエッジ表面における反応サイトの状態や核種収着形態を理解するため、エッジ構造モデルの構築とその安定性の定量的評価を実施した。モンモリロナイト・エッジ表面に対する量子化学計算の検討

事例は存在するが、評価すべきエッジ構造のバリエーションの膨大さから、十分な検討がなされているとは言えない状況である。そこで本タスクでは、同形置換や層間イオンの位置とエッジの安定性について定量的かつ網羅的に評価するとともに、積層による影響を考慮することで、精密なエッジの表面エネルギーを導出した。さらに、異なる層電荷の系で評価することにより、層電荷の影響についても考察した(平成28年度報告書)。評価すべきエッジ面としては、(110)、(010)、(100)、(130)の結晶格子面に対応してそれぞれ順にA-、B-、D-、E-chainモデルとした。ここでは、層電荷0.5のA-chainを例として、エッジ表面エネルギーの計算結果を示す。A-chainの考え得る同形置換位置(p1~p5)を網羅し、さらにNaイオンの位置の安定構造を探索して、p1~p5それぞれの最安定構造を図2.3.2-11(a)に示した。まずこれらの図から、NaイオンはMgイオンの近くの六員環(di-trigonalリング)で安定化することがわかった。これは、局所的にはMg近傍が負に帯電しているためと考えられた。また、同形置換の位置による最安定表面エネルギーの違いを図2.3.2-11(b)に示す。単層モデル・積層モデルとも、同形置換位置p2が最も表面エネルギーが低く安定である。この結果から、Mgはエッジ面近傍よりも結晶内部にある方が安定であると判断できる。同様の計算をB-、D-、E-chainに対しても実施し、さらに層電荷を $z=0.33$ とした系に対しても行った。その結果、安定なMgの置換位置としては、A及びD-chainでは結晶内部に、B及びE-chainではエッジ表面近傍にそれぞれ存在する場合であることが分かった。この傾向は、 $z=0.33$ 及び0.5に関する限り、層電荷の値には依存していない。また、層電荷0.5の場合と0.33の場合で最安定な表面エネルギーの比較をすると、いずれのエッジ表面でも層電荷0.5の方が表面エネルギーは低く、安定であることが分かった。このことは、層電荷が増大するとエッジ面が安定化することを示唆している。

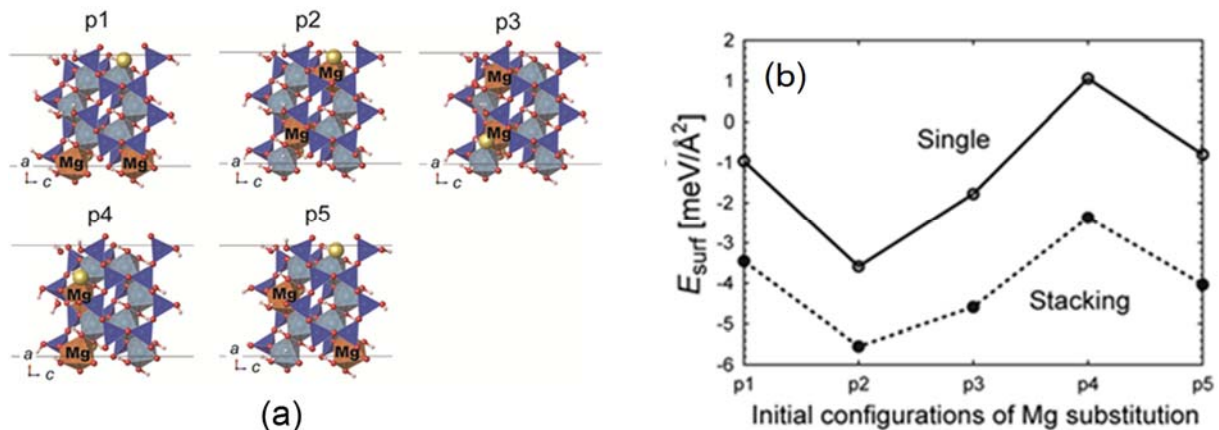


図2.3.2-11 (a)モンモリロナイト(層電荷0.5)のA-chainエッジモデル((001)面を上から見た図、Mgの同形置換部を茶色、層間Naイオンを黄色で示す)、(b)p1~p5における最安定表面エネルギー、及び単層モデル(single)と積層モデル(stacking)での最安定エネルギーの比較

次に、計算科学的手法を適用したアップスケーリングの評価事例について示す。本事業では、①メソスケールに着目した間隙構造のモデル化とマクロパラメータ算出の方法論の検討、②設定された間隙構造のもとでRW法による粒子透過フラックスの評価手法の開発を進めた。①については、ミクロスケール、メソスケールおよびマクロスケールまでのマルチスケール評価に着目し、多孔質媒体の間隙構造のメソスケールに着目したモデル化手法と、その結果に基づく実測値と比較可能なマクロ物性値(拡散係数、弾性係数等)の算出方法の整備を進めてきた(平成28~29年

度報告書)。以下では、②の解析事例について示す。

ベントナイト緩衝材を対象としたアップスケール手法の確立を目的として、Churakov et al. (2011)で用いられた手法を参考に、ランダムウォーク・シミュレーションを用いた解析評価を進めた(平成28～29年度報告書)。解析コードとしては、花崗岩中の拡散メカニズムを理解するために黒雲母の層状構造を考慮した仮想的な解析体系に適用してその有効性が示されているPARTRIDGEコードを用いた。佐藤(2002)では、圧縮ベントナイト中の拡散移行経路の異方性について議論するため、圧縮ベントナイトの構造を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察するとともに、透過拡散試験によりHTOの実効拡散係数 D_e を圧縮成型方向に対して同軸方向及び直角方向に対して測定した。そこで本解析では、佐藤(2002)で用いられた試料を想定して間隙構造を構成し、分子シミュレーションによる再現性を検討した。試計算としてモンモリロナイト含有率100%の系をモデル化し、モンモリロナイト粒子をモデル化した層間間隙を有する“鉱物ユニット”と、粒子間間隙をモデル化した“間隙ユニット”の2種類の $7\text{nm} \times 7\text{nm} \times 7\text{nm}$ の立方体構造で表現した。縦・横・高さそれぞれ28ユニットずつ $(28)^3 = 21,952$ 個のユニットから構成され、一辺の長さが約 $0.2 \mu\text{m}$ の立方体試料に相当する。佐藤(2002)の試料条件に合わせて、乾燥密度 $= 1000 \text{ kg/m}^3$ のクニピア®Fの場合は全体の間隙率を0.653とし、層間間隙と粒子間間隙の間隙割合が1:1になるように設定した。一方、乾燥密度 $= 1500 \text{ kg/m}^3$ のケースは全体の間隙率を0.479とし、層間間隙と粒子間間隙の間隙割合が9:1になるように設定した。なお本解析では、試計算のため拡散粒子として中性粒子のHTOを想定し、層間間隙及び粒子間間隙における局所的な拡散係数には電粘性を考慮したISD拡散モデルによる計算値を設定した。

HTOの実効拡散係数は、下流側端面における粒子移行率の経時変化をプロットし、1次元拡散方程式の解析解とのフィッティングにより評価した。本解析の計算条件と解析結果の一覧を、表2.3.2-1に示す。表中の「局所拡散係数」は、ISD拡散モデルで計算した層間及び粒子間間隙における局所的な拡散係数である。「HTO実効拡散係数」が、今回実施したシミュレーションによる解析結果である。また右端の列には、各解析ケースに対応する条件での実測データを示した(佐藤, 2002)。本解析は極めて簡略化した構造モデルのシミュレーションではあるが、実測データと同じオーダーの実効拡散係数が得られた。また、乾燥密度 $= 1000 \text{ kg/m}^3$ のケースでは、「平行ケース」と「垂直ケース」の実効拡散係数の比を見ると、シミュレーション結果の $7.93/3.20 \cong 2.5$ に対し実測データは $2.7/1.2 \cong 2.3$ であり、比較的近い値が得られている。一方、乾燥密度 $= 1500 \text{ kg/m}^3$ の場合は実測データとの解離が見られ、層間/粒子間の間隙割合などの条件設定に対する検討が必要と思われる。今後の検討課題としては、より現実的な鉱物配置パターンの検討、イオンなどの荷電粒子に対するシミュレーション、あるいは静電場が局所的に与えられた場合の荷電粒子のランダムウォーク法の検討などが挙げられる。

表2.3.2-1 ランダムウォーク・シミュレーションの計算条件と解析結果

解析ケース	乾燥密度 [kg/m^3]	間隙率 [-]	鉱物ユニットの配向	局所拡散係数 [m^2/s]	HTO実効拡散係数 [m^2/s]	実測データ [m^2/s] (佐藤, 2002)
密度1.0平行ケース	1000	0.653 (層間:粒子間 = 1:1)	拡散方向に平行	層間: $8.48\text{E}-10$ 粒子間: $1.93\text{E}-9$	$7.93\text{E}-10$	$2.7\text{E}-10$
密度1.0垂直ケース			拡散方向に垂直		$3.20\text{E}-10$	$1.2\text{E}-10$
密度1.5平行ケース	1500	0.479 (層間:粒子間 = 9:1)	拡散方向に平行	層間: $7.07\text{E}-10$ 粒子間: $9.60\text{E}-10$	$3.08\text{E}-10$	$1.3\text{E}-10$
密度1.5垂直ケース			拡散方向に垂直		$1.83\text{E}-11$	$3.3\text{E}-11$

3) 核種移行パラメータ設定への反映と課題

圧縮ベントナイト中の間隙水化学は、核種の溶解度と支配化学種、収着や拡散パラメータの設定のための重要な前提条件である。従来、圧縮ベントナイト中の間隙水化学は、ベントナイトの主成分であるNa型モンモリロナイトの層間でのイオン交換、エッジでの酸塩基解離反応、随伴鉱物の溶解・沈殿等を考慮した平衡論モデルによって、不確実性も含めて評価されてきている（例えば、核燃料サイクル開発機構, 1999c）。また、収着と拡散のモデル及びパラメータについては、統合収着・拡散（ISD）モデルの開発において、不確実性に関する検討を行ってきた（日本原子力研究開発機構, 2013c）。そこで本受託事業では、地球化学計算コードPHREEQC（Parkhurst et al., 1995）による間隙水化学の評価と電気二重層理論に基づく実効拡散係数評価コードISDCalcコードを連携した不確実性評価コードUPhreeqcISDCalcの開発を進めた（平成26年度報告書）。その際、異なる化学種が共存する元素に対しては、各化学種の存在割合を考慮した平均化処理を実施するとともに、さらにISD多重間隙モデルへ拡張して、それぞれの間隙の体積分率を考慮した平均化処理機能を実装した（図2.3.2-12）。本解析コードにより、複数の溶存化学種を有する元素に対して、様々な間隙構造を考慮したベントナイト中での実効拡散係数や収着分配係数等の核種移行パラメータを評価することができ、加えて、間隙水化学特性を支配する種々のパラメータに対する核種移行パラメータの感度解析が実施可能になった（平成29年度報告書）。

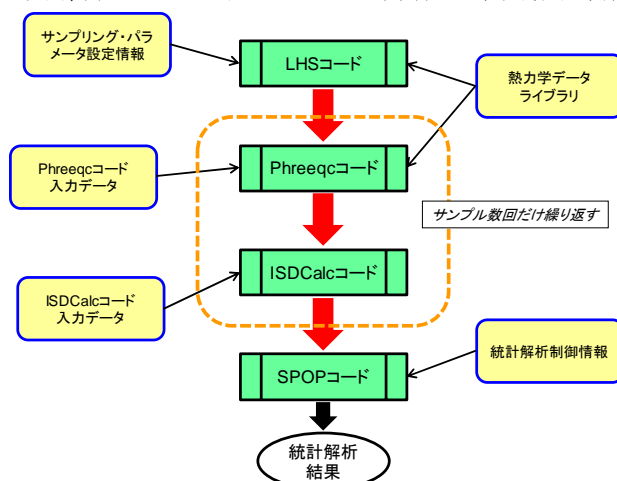


図2.3.2-12 PHREEQCとISDCalcを連携した不確実性評価ツールの処理流れ

2.3.3 システム変遷と核種移行評価のためのデータ・モデルの整備

(1) 鉄共存下での人工バリアの変遷と核種移行への影響評価

1) 鉄共存下でのガラス溶解評価

(a) 背景と目的

オーバーパックは、少なくとも放射能や発熱が高い期間、地下水がガラス固化体に接することを防ぐ安全機能が期待されており、この機能が発揮されるよう設計される（核燃料サイクル開発機構, 1999b）。この期間を超える長期的な腐食の進展に伴い、やがてはオーバーパックの厚さが減少し、構造的な強度が周囲からの応力を支持しえなくなった段階で、オーバーパックは機械的に破損すると考えられる。オーバーパックが破損した後、オーバーパック内部に浸入した地下水とガラス固化体が接触することで、ガラスの溶解及び変質が始まる。同時に、オーバーパックを構成する鉄の腐食は継続する。この条件において、ガラス固化体の溶解・変質がどのように進行

するのかを評価する必要がある。

平成25年度は、鉄共存下でのガラス溶解評価に係る課題として、現象理解とモデル整備に向けたパラメータ設定の必要性を示した（平成25年度報告書）。平成26年度及び27年度は、 Fe^{2+} と溶存ケイ素の反応によるFeケイ酸塩鉱物の析出についての現象理解の参考とするため、 Fe^{2+} と近いイオン半径を持つ Mg^{2+} を含む人工海水中で変質させた既存の模擬廃棄物ガラス試料の表面分析を行うとともに、 MgCl_2 溶液条件で、7～90日間の模擬廃棄物ガラスの浸出試験を実施した（平成26～27年度報告書）。平成28年度は、 MgCl_2 溶液条件で180日間の模擬廃棄物ガラスの浸出試験を実施し、より長期のデータを取得した（平成28年度報告書）。平成29年度には、 Fe^{2+} イオンを含有する FeCl_2 溶液条件で、7～56日間の模擬廃棄物ガラスの浸出試験を窒素雰囲気において実施した（平成29年度報告書）。また、平成28年度及び29年度には、処分環境で想定される中性からアルカリ性の条件において、どのようなFeケイ酸塩鉱物が生成し得るか確認するため、Si/Feモル比及びpHをパラメータとした Fe^{2+} イオンと溶存ケイ素の反応試験を行った（平成28～29年度報告書）。

(b) MgCl_2 溶液条件での模擬廃棄物ガラスの浸出試験

MgCl_2 溶液及び人工海水を用いた浸出試験を実施し、変質させた模擬廃棄物ガラス試料の表面分析等を行った。浸出試験で得られた脱イオン水及び MgCl_2 溶液（ $[\text{Mg}^{2+}] = 0.05 \text{ mol/dm}^3$ ）での規格化浸出量（溶解速度）の経時変化を図2.3.3-1に示す。比較として実施した脱イオン水条件では溶解速度が経時的に減少する一般的な傾向を示すのに対し、 MgCl_2 溶液及び人工海水条件では、長期（91日～）の試験期間において溶解速度の増加が観察された。XRD分析では、 MgCl_2 溶液及び人工海水中で変質させたガラス試料表面において hidroタルサイト（ $\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）とMgケイ酸塩鉱物であるタルク（ $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ）及びサポナイト（ $\text{E}_{0.3}\text{Mg}_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）が検出された。平野ら（2016b）は、 MgCl_2 溶液を用いた流水条件のガラス溶解試験で観察された溶解速度の低下について、ガラス表面に析出した hidroタルサイトが保護膜として機能したことが要因であると推定した。この報告を踏まえると、 MgCl_2 溶液及び人工海水条件で観察された特異な溶解挙動は、ガラス表面に析出するMg含有鉱物種の変化に関係している可能性が考えられた。

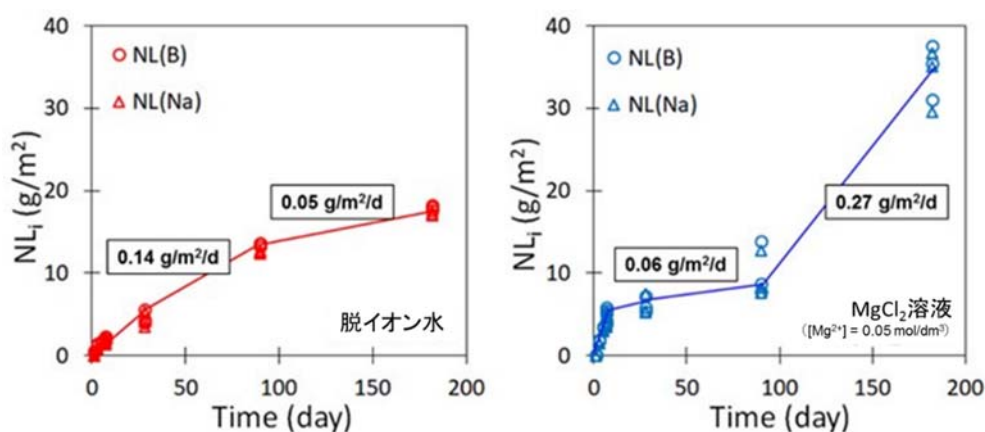


図2.3.3-1 規格化浸出量の経時変化（グラフ内の数値は91日前及び後の平均溶解速度）

(c) FeCl_2 溶液条件での模擬廃棄物ガラスの浸出試験

FeCl_2 溶液（ $[\text{Fe}^{2+}] = 0.01 \text{ mol/dm}^3$ ）を用いた浸出試験を実施し、変質させた模擬廃棄物ガラス試料をエックス線回折（XRD）分析、走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型X線分光法（SEM/EDX）分

析及び透過型電子顕微鏡/電子線回折/エネルギー分散型X線分光法 (TEM/ED/EDX) 分析に供した。FeCl₂溶液中で変質させたガラスのXRD分析結果を図2. 3. 3-2に、FeCl₂溶液中で56日間変質させたガラスのTEM/ED/EDX分析結果を図2. 3. 3-3にそれぞれ示す。XRD分析では、変質期間が14日以上ガラス試料表面において、Feケイ酸塩鉱物であるグリーンナライト (Fe₃Si₂O₅(OH)₄) 又はクロンステッダイト ((Fe²⁺, Fe³⁺)₃(Si, Fe³⁺)₂O₅(OH)₄) が検出された。TEM/ED/EDX分析では、Al含有量の異なる2種類のFeケイ酸塩鉱物を確認し、うち1つの電子線回折パターンはXRD分析で検出されたグリーンナライト又はクロンステッダイトと一致した。これらのFeケイ酸塩鉱物は、Dillmannら (2016) が実施した鉄ホイル共存条件での模擬廃棄物ガラスSON68の浸出試験、及び後述するFe-Si反応試験でも検出されており整合的であった。

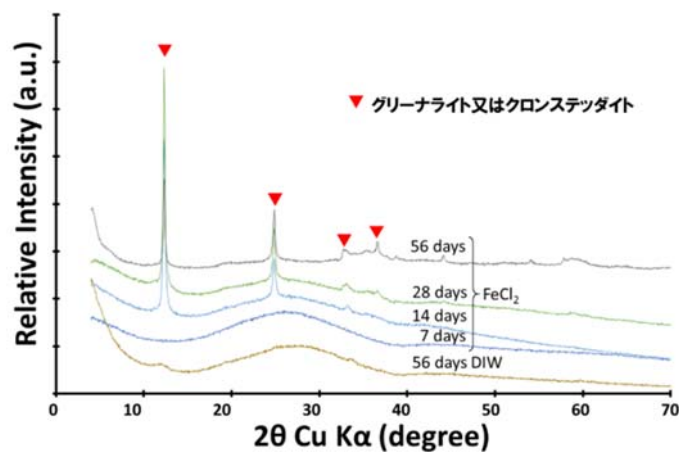


図2. 3. 3-2 FeCl₂溶液中で変質させたガラスのXRD分析結果

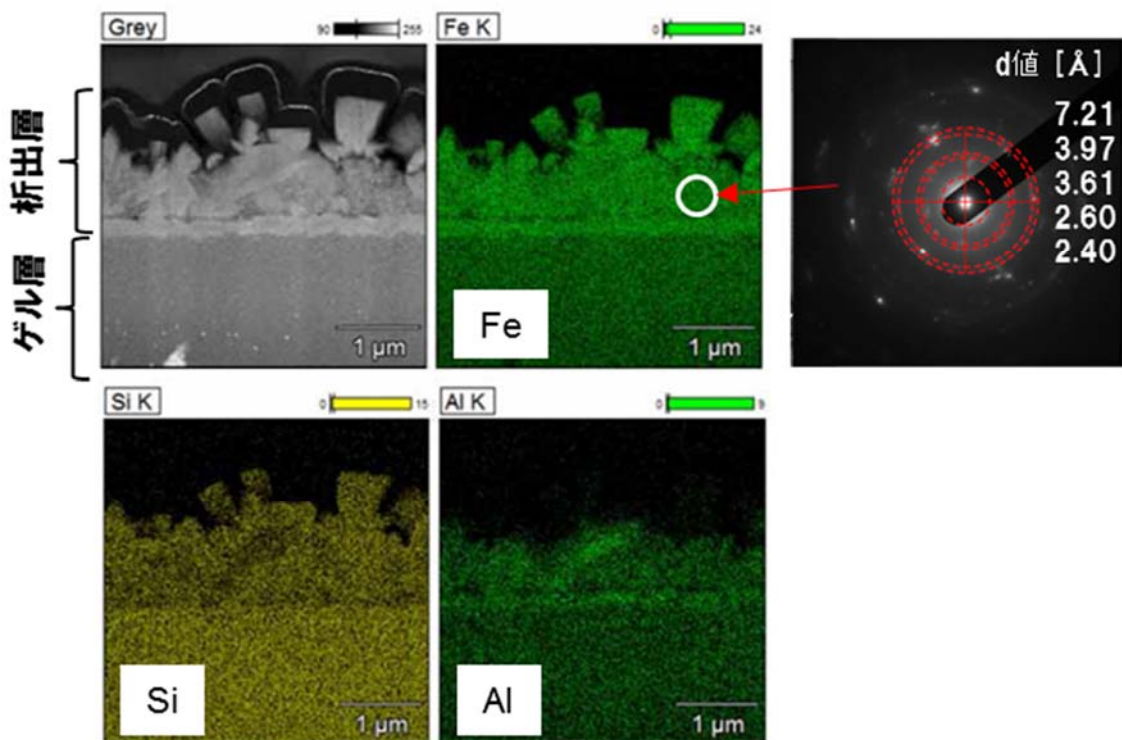


図2. 3. 3-3 FeCl₂溶液中で56日間変質させたガラスのTEM/ED/EDX分析結果

(d) Fe-Si反応試験

処分環境で想定される中性からアルカリ性の条件において、鉄共存下でどのようなFeケイ酸塩鉱物が生成し得るか確認するため、 Fe^{2+} イオンと溶存ケイ素の反応試験を行った。Si/Feモル比を0.5、1.0、2.0、pHを7、9、11とし、窒素雰囲気中で反応させた。固相分析のうち、XRD分析、SEM/EDX分析及びTEM/ED分析は120°Cの温度条件で固相を1週間熟成させたのちに実施した。XRD分析の結果、Si/Feモル比の増加に伴って、固相の結晶性が低下することが確認された。また、Si/Feモル比が0.5及び1.0、pHが9及び11の条件の析出物について、 FeCl_2 溶液条件での模擬廃棄物ガラスの浸出試験と同様に、蛇紋石-カオリナイト族であるグリーンナライト ($\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) 又はクロンステッダイト ($(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) が検出されたが、pH7の条件の析出物についてはFeケイ酸塩鉱物のピークは確認できなかった。一方、Si/Feモル比が2.0の条件においては、いずれのpHの析出物についてもミネソタイト ($\text{Fe}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) が検出された。Si/Feモル比0.5、pH11条件の試料をSEMで観察したところ、八面体結晶、板状結晶、フランボイダル結晶の3種類が認められた。図2.3.3-4にそれぞれの結晶 (図2.3.3-4のa、b、c) のSEM/EDX分析結果を示す。EDX分析の結果、八面体結晶については主に鉄を含有することから磁鉄鉱、残りの2種については鉄とケイ素を含有することからFeケイ酸塩鉱物 (グリーンナライト又はクロンステッダイト) と推定された。

TEM/ED分析においても、八面体結晶 (a) と板状結晶 (b) が認められ、それぞれの電子線回折パターンは磁鉄鉱及びFeケイ酸塩鉱物 (グリーンナライト又はクロンステッダイト) に対応し、SEM分析に基づく推定と一致した。なお、SEM分析で観察されたフランボイダル結晶は観察されなかった。

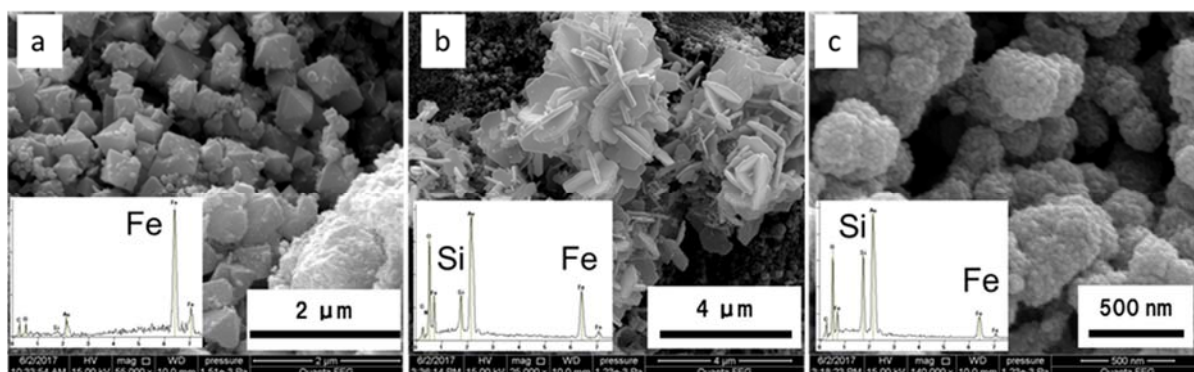


図2.3.3-4 Fe-Si反応試験生成固相のSEM/EDX分析結果 (Si/Feモル比0.5, pH11)

(e) Feケイ酸塩鉱物生成による影響の評価

(b)及び(c)項の結果、溶液のSi/Feモル比に応じて、蛇紋石-カオリナイト族のFeケイ酸塩鉱物 (グリーンナライト又はクロンステッダイト) とタルク-パイロフィライト族のFeケイ酸塩鉱物 (ミネソタイト) の生成が確認された。これらのFeケイ酸塩鉱物の生成による影響を評価するため、単純なモデルを用いてガラス固化体の溶解寿命 (ガラス固化体が溶けきるのに要する期間) を試算した。解析条件を表2.3.3-1に示す。

表2.3.3-1 解析条件

項目	値	単位	備考
オーバーパック密度 (ρ_{OP})	7.87	g/cm ³	
オーバーパック内側表面積 (S_{OP})	2.17	m ²	内側表面積は一定と仮定
オーバーパック腐食速度 (R_{OP})	1.00	μm/y	
鉄の原子量 (M_{Fe})	55.8	g/mol	
Feケイ酸塩鉱物中Si/Feモル比 (η)	0.67	-	グリーンライト ($Fe_3Si_2O_5(OH)_4$) の場合
	1.33	-	ミネソタイト ($Fe_3Si_4O_{10}(OH)_2$) の場合
ガラス固化体1本当たりの初期Si量 (m_{Si})	3200	mol/can	JNFL仕様のガラス固化体 ($SiO_2:48.5\%$) 400kgを想定

オーバーパック腐食速度に応じてオーバーパック内側表面から放出されるFe²⁺の全量がFeケイ酸塩鉱物の生成によって消費され、磁鉄鉱等のケイ素を含まない腐食生成物の生成はないと仮定すると、年間のFe²⁺放出量 W_{Fe} (mol/y) は以下の式によって求めることができる。

$$W_{Fe} = \frac{\rho_{OP} \times S_{OP} \times R_{OP}}{M_{Fe}} \quad (2.3.3-1)$$

年間のFe²⁺放出量 W_{Fe} にFeケイ酸塩鉱物中のSi/Feモル比 (η) を乗ずることで年間のSi消費量 (mol/y) に換算できるので、ガラス固化体の溶解寿命 T_{life} (y) は次式で求めることができる。

$$T_{life} = \frac{m_{Si}}{W_{Fe} \times \eta} \quad (2.3.3-2)$$

上式を用いて、蛇紋石-カオリナイト族のFeケイ酸塩鉱物（グリーンライト又はクロンステッダイト）とタルク-パイロフィライト族のFeケイ酸塩鉱物の場合でガラス固化体の溶解寿命を求めると、それぞれ約16,000年、約8,000年となる。今回試算した溶解寿命は、第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999c）で示された溶解寿命（約7万年）と比べて短い。より現実的な条件で鉄影響を評価するには、オーバーパック内側の腐食速度、磁鉄鉱等のSiを含まない腐食生成物の生成割合、ガラス変質層による溶解/変質抑制効果等の把握が必要である。また、Feケイ酸塩鉱物の種類はガラス固化体近傍の地下水のSi/Feモル比によって変化する可能性があることから、これに影響しうる処分環境におけるSA/V比（ガラス表面積/溶液量比）についても、合理的な値を設定する必要がある。

2) 鉄-ベントナイトの相互作用評価に関する調査

(a) 背景と目的

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材からなる人工バリア構成においては、オーバーパック材として用いられる炭素鋼と緩衝材である圧縮ベントナイトが直接接触し、鉄との相互作用によりベントナイト中の鉱物に変質する可能性が指摘されている（例えば、Lantenois et al., 2005）。ベントナイトの変質は、放射性核種の収着拡散特性やベントナイトの持つ自己シール性等の安全機能を低下させる可能性がある重要な現象の一つである。

鉄との相互作用によるベントナイトの変質挙動については、ベントナイトの主要構成鉱物であるスメクタイトの変質が顕著となる液性やスメクタイト組成などが明らかにされてきており（例えば、日本原子力研究開発機構，2008）、生成するスメクタイトの変質鉱物種として、パーチェ

リンや緑泥石等が実験的に確認されている（例えば、陶山ほか，2006）。また、これらの実験的研究により得られた知見や変質鉱物の生成に関する熱力学データ等に基づいて、圧縮ベントナイトの長期的な変質挙動の定量的な評価に向けたモデルが提案されてきている（例えば、日本原子力研究開発機構，2013）。変質挙動評価モデルの信頼性向上のためには、圧縮ベントナイトの変質メカニズムの理解を深め、モデルにおいて考慮する変質プロセスをより精緻にするとともに、モデルに必要なパラメータの不確実性の評価を元に、モデル解析結果の不確実性を評価しておくことが必要である。また、原位置試験等におけるベントナイト変質の調査結果とモデルによる解析結果を比較検討し、評価モデルの信頼性を検証していく必要がある。

本調査では、原位置試験の調査結果（平成25～27年度報告書）や変質挙動理解に必要な基礎的試験（平成28～29年度報告書）により、評価モデルの検証に必要なデータの拡充や、新たに評価モデルに取り込む必要のある現象の抽出、モデル評価に必要なパラメータ値の整備を進めた。

(b) 原位置での長期変質試験試料に対する調査

本調査の対象とした試料は、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社（SKB）による国際共同研究ABM（Alternative Buffer Material）プロジェクト（Eng et al., 2007）において行われた長期変質試験後の試料である。長期変質試験では、スウェーデンのÄspo HRL（Hard Rock Laboratory）の450m坑道に掘削された直径30cm、長さ約3mの鉛直下向きのボーリング孔へ、乾燥密度 1.7Mg/m^3 から 2.2Mg/m^3 で円筒状に圧縮成型したベントナイトブロックを定置し、中心部に設置された鉄製のヒーターにより、ベントナイトブロックが 130°C 程度に加熱された。調査は、Package2と呼ばれる約5年加熱された試料と、Package1と呼ばれる約2年半加熱された試料を対象とした。Package1とPackage2の試料は、加熱開始時期についても違いがあり、Package2はベントナイトを含水飽和させた後に加熱が開始されているのに対し、Package1は含水開始と同時に加熱が開始されている。試料の分析は、電子線マイクアナライザー（EPMA）、透過型電子顕微鏡（TEM）、原子間力顕微鏡（AFM）、微小部エックス線回折（ μ -XRD）を用いて行い、鉄製ヒーターとの界面近傍で生成しているモンモリロナイト変質鉱物の同定等を行った。

鉄製ヒーターとの接触界面のベントナイト試料のAFM観察結果を図2.3.3-5に示す。EPMA観察より鉄サポナイトの化学組成を有する鉱物、TEM観察及びAFM分析（図2.3.3-5、 $0.6\text{--}0.8\text{ nm}$ の底面間隔を有する鉱物を確認）より蛇紋石系鉱物（バーチェリン）と推定される鉱物、 μ -XRDより鉄緑泥石の存在が確認された。これらの鉱物はPackage1、Package2のどちらの試料においても検出されたが、生成量はいずれも微量であった。また、EPMA観察においては、鉄製ヒーターと圧縮ベントナイトの接触界面において、鉄製ヒーターの加熱に伴い発生した塩濃縮挙動が原因とみられる硫酸カルシウムの析出が確認された。

モンモリロナイトの変質鉱物として検出されたサポナイト、緑泥石、バーチェリンは、Fe共存下で生成しうる熱力学的に安定な鉱物種であるが、例えばFe-サポナイトが安定である条件は、間隙水中のFe及びSiの活量が高い場合であるのに対し、バーチェリンの生成はSiの活量が低い条件が好ましく（例えば、日本原子力研究開発機構，2013b）、熱力学的に安定な条件が異なる鉱物が同時に観察されている。このような結果の原因として、鉄製ヒーターと圧縮ベントナイトの接触界面での変質環境に違いが考えられた。目視による観察において、鉄製ヒーターとの接触面において硫酸カルシウムの析出状況に違いがあり、鉄製ヒーターとの接触状態が位置により異なっ

いたものと推測された。そのため、本調査において分析した原位置長期変質試験試料では、変質により生成する可能性のある鉱物が検出されたものの、それ以上の検討を行うことは難しいと考えられた。

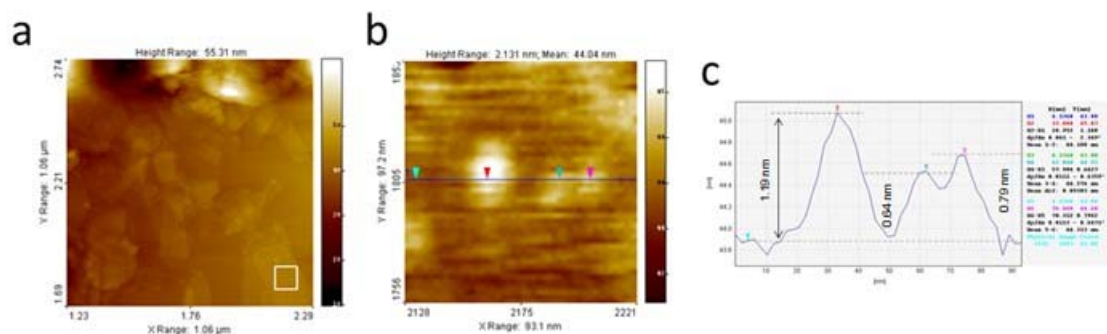


図2.3.3-5 鉄製ヒーターとの接触界面のベントナイト試料のAFM観察結果
(a: 高さ像; b: 高さ像中白枠内拡大像; c: 高さプロファイル)

(c) 室内試験によるモンモリロナイト変質速度の評価

(b)において分析した原位置長期変質試験試料では、変質により生成する可能性のある鉱物が検出されたものの、生成したモンモリロナイト変質鉱物は微量であることから、生成量を定量することができなかった。モンモリロナイトの変質量は、モンモリロナイトの変質速度を定量的に評価し、安全評価において重要となる長期的な変質量を推測する上で重要な知見となる。そのため、試験系や間隙水組成等のモンモリロナイトの変質環境を制御した条件での室内試験を実施し、モンモリロナイトの変質速度について評価を行った。

調査においては、内部の直径20mm、長さ20mm のスペースにベントナイトを圧縮充填し、圧縮ベントナイトの片方の端面に炭素鋼試料を設置して圧縮ベントナイトと接触させ、変質挙動を観察することが可能な構造の試験カラムを用いて試験を実施した。炭素鋼と反対側の圧縮ベントナイト端面は、フィルターを介して試験溶液に接触している。試験には、ベントナイト試料としてクニミネ工業製クニピア®F及びクニゲル®V1を使用した。使用したクニピア®Fは、pH を5 に調整した酢酸ナトリウム溶液により含有するカルサイトをあらかじめ溶解させて除去した。試験溶液は、0.01mol/lのNaCl 溶液を用いた。モンモリロナイト溶解量の評価は、炭素鋼との接触面からベントナイト試料をスライスし、そのスライス片を分析することにより行った。スライス片の分析は、XRD測定、AFM観察により行った。XRD測定においては、リートベルト解析によるスライス片中のモンモリロナイト量の定量、AFM測定では、モンモリロナイト粒子の形状観察による表面積の測定を実施し、モンモリロナイトの溶解量の評価した。また、変質環境のpHを推定するため、試験溶液のpHを11及び12に調整してベントナイト試料を浸漬し、試験溶液との接触面におけるモンモリロナイト溶解量についても評価を行った。

図2.3.3-6(a)に、XRD測定結果のリートベルト解析により求めたスライス片中のモンモリロナイト量を、(b)にAFM測定により算出したモンモリロナイト量を示す。どちらの手法においても、炭素鋼との接触時間が長いほど試料中のモンモリロナイト含有量が低下する傾向が見られている。また、試験期間約100日の試料間で比較すると、pH11及びpH12の試験溶液に接触させた試料中のモンモリロナイト溶解量と比較して、炭素鋼との接触界面のベントナイト中のモンモリロナイトの溶解量が大きいことがわかる。このことは、炭素鋼との接触界面ではpH12以上の高pH環境であり、

それによりモンモリロナイトの溶解が進行したことを示すものと推測される。なお、試験期間約100日の試料のAFM測定により求めたモンモリロナイト溶解速度は 7.8×10^{-12} mol/m²/sであった。

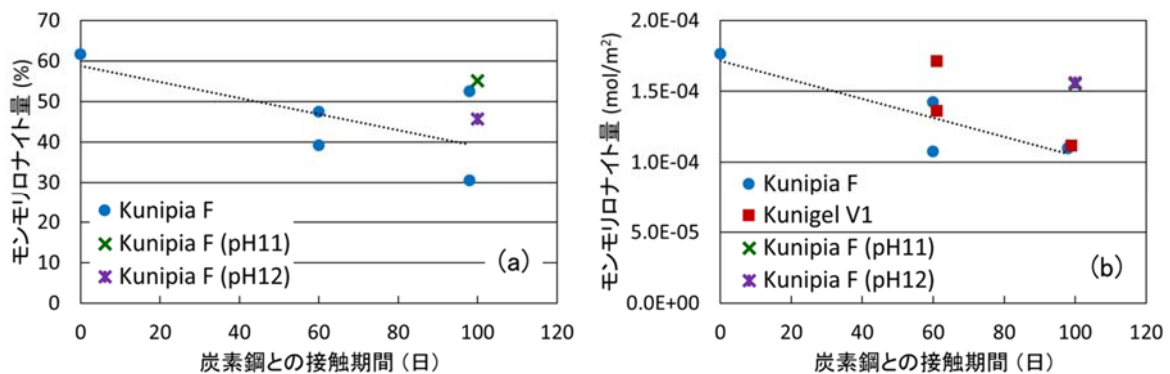


図 2.3.3-6 炭素鋼との接触面近傍のベントナイト試料中のモンモリロナイト量測定結果
(a : XRD 測定結果のリートベルト解析により算出、b : AFM 分析により算出)

(d) まとめと課題

鉄との相互作用によるベントナイトの変質挙動については、圧縮ベントナイトの長期的な変質挙動を定量的に評価するためのモデルが提案されてきており（例えば、日本原子力研究開発機構、2013a）、本調査において、原位置試験等におけるベントナイト変質の調査結果等に基づく評価モデルの信頼性の検証や、モデルにおいて考慮する変質プロセスの精緻化等に取り組んだ。その結果、原位置での長期変質試験試料の調査より、モンモリロナイトの変質鉱物として、Fe共存下で生成しうる熱力学的に安定な鉱物種であるサポナイト、緑泥石、バーチェリンが検出され、熱力学データに基づいた評価モデルの信頼性が概ね確認された。一方で、これらの鉱物は熱力学的に安定なFe及びSiの活量等の条件が異なっており、試験試料中の変質環境の違い等の可能性が考えられるとともに、これらの変質鉱物の生成量が微量であったことから、原位置試験においてはモンモリロナイト変質量の定量的評価の観点で課題が残った。このことから、室内試験により微量のモンモリロナイト溶解量を定量する手法を確立し、モデルの検証に向けて必要なデータの取得を可能するとともに、溶解速度に関するデータを取得した。

これまでの取り組みにより、モンモリロナイト溶解速度の定量手法を概ね確立し、比較的短期の試験結果に基づく評価モデルの検証が可能になったものの、超長期の変質挙動に関する評価モデルの信頼性検証手法や変質プロセスの精緻化が依然として課題のままである。このような長期の変質挙動に評価に向けて、ナチュラルアナログを活用した長期の変質事例の調査等を実施し、長期に渡る変質挙動のメカニズムに関する知見の拡充が必要である。また、現状においては、モンモリロナイトの溶解に伴って生成する変質鉱物やその生成メカニズムに関する知見が十分ではないことも課題である。生成する変質鉱物は、モンモリロナイト変質後の緩衝材性能の評価等を行う上で必要不可欠な知見であることから、室内試験等によりその生成メカニズム等を明確にすることが必要であると考えられる。

3) 鉄共存下での核種移行評価

ガラス固化体、炭素鋼製オーバーパック、緩衝材として設置される圧縮ベントナイトによって構成される人工バリア概念においては、オーバーパックの腐食により生成した鉄腐食生成物が圧

縮ベントナイト中に移行し、圧縮ベントナイト間隙水中の Fe^{2+} 濃度が上昇する。 Fe^{2+} の濃度が上昇すると、ベントナイトに収着した Fe^{2+} と放射性核種の収着が競合し、核種の収着量が低下する可能性がある。これまで、 Fe^{2+} 共存下での核種の競合収着に関して、 Fe^{2+} の存在下での移行挙動の解析 (Pfungsten et al, 2011) や競合収着に関する実験的研究 (Soltermann et al., 2013) 等の検討がなされているものの、報告例は限られている。

圧縮ベントナイト中においては、核種及び Fe^{2+} は主にベントナイトの主成分であるモンモリロナイトに収着する。モンモリロナイト中に存在する収着サイトは、1種類のイオン交換サイトと複数種の表面錯体サイトに分類されることが知られている (例えば、Bradbury and Baeyens, 2005)。そのため、核種と Fe^{2+} との競合収着を検討する上では、 Fe^{2+} の収着が飽和して核種との競合収着が顕著になる条件を、各収着サイトに対して把握するとともに、各収着サイトにおける Fe^{2+} と核種の交換挙動を把握する必要がある。

本調査では、 Fe^{2+} と核種の競合収着挙動を実験的に明らかにし、 Fe^{2+} が収着したベントナイトに対する核種の選択定数を整備して、競合収着の影響を定量的に評価することが可能なモデルを確立することを目的とし、Na型モンモリロナイトに対する Fe^{2+} 収着試験 (平成25年度報告書) 及び Fe^{2+} 共存下でのCs、Ni、Eu収着試験 (平成26~29年度報告書) を実施した。試験の結果、 Fe^{2+} のNa型モンモリロナイトへの収着挙動は、1種類のイオン交換サイトと2種類の表面錯体サイトを考慮することにより評価可能であることがわかった。また、試験結果より、各表面錯体サイトに対する Fe^{2+} と H^+ の選択定数、イオン交換サイトに対する Fe^{2+} と Na^+ の選択定数を整備した。 Fe^{2+} と核種の競合収着に関しては、共存 Fe^{2+} 濃度を調整して表面錯体サイトのみが Fe^{2+} により飽和した条件でのNa型モンモリロナイトに対するNi、Euの収着試験、イオン交換サイトを含む全ての収着サイトを Fe^{2+} に交換したFe型モンモリロナイトに対するCsの収着試験を実施し、 Fe^{2+} 共存下での競合収着現象について検討を行った。試験結果より、イオン交換サイトへの Fe^{2+} とCsの選択定数を算出した。Niの収着試験結果を図2.3.3-7(a)に示すが、同じNaCl濃度での収着分配係数を比較すると、 Fe^{2+} 非共存下に比べて、 Fe^{2+} 共存下ではNiの収着分配係数が低下している。このことは、 Fe^{2+} とNiの収着が競合し、その結果としてNiの収着分配係数が低下したことを示していると考えられ、これらのデータをもとにNiのエッジサイトへの表面錯体反応の選択係数を評価した。さらに、Euの収着試験結果を図2.3.3-7(b)に示すが、収着分配係数の値は Fe^{2+} 共存下と Fe^{2+} 非共存下ではほぼ同程度の値であり、Euのモンモリロナイトへの収着は、 Fe^{2+} の収着とは競合しないことが示唆された。これらのデータにより、 Fe^{2+} のモンモリロナイトへの収着挙動と、 Fe^{2+} とCs、Niのモンモリロナイトへの競合収着挙動について、定量的な評価を可能とした。

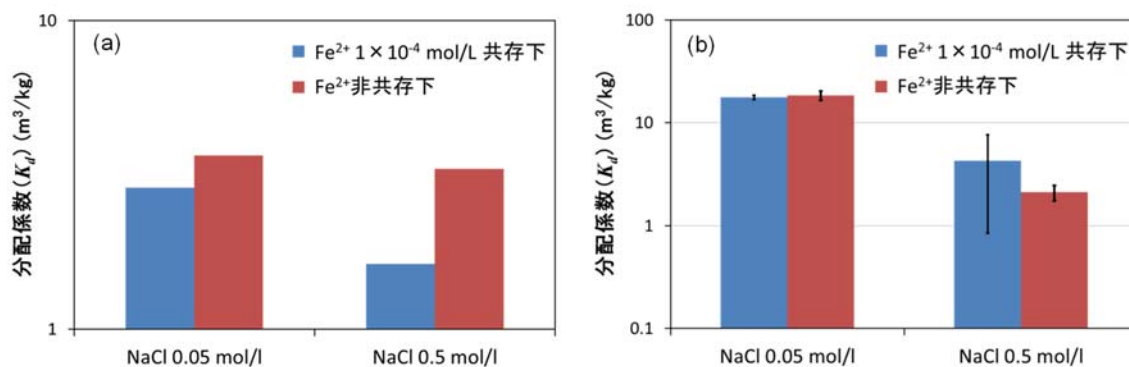


図2.3.3-7 Fe^{2+} 共存、非共存下でのNa型モンモリロナイトの収着分配係数：(a)Ni，(b)Eu

(2) セメント系材料の変遷と核種移行への影響評価

1) セメント系材料の化学挙動評価モデル開発

普通ポルトランドセメント (OPC) を用いたコンクリートなどのセメント系材料と接触した地下水は、セメント成分の溶解によりpH12.5以上の高アルカリ性となる (Byfors, 1987; Diamond, 1983; Lothenbach and Winnefeld, 2006)。高アルカリ性地下水の緩衝材・周辺岩盤への影響を低減する必要性 (Metcalf and Walker, 2004; Savage et al., 2007) から、低アルカリ性セメント (浸出液のpHを12.5より低くしたセメント) が用いられることも想定される (例えば、核燃料サイクル開発機構, 1999)。そのような低アルカリ性セメントの候補の一つとして、OPCに対してフライアッシュ (FA) とシリカフェーム (SF) を混合することで接触液のpHを11未満へ低下させたフライアッシュ高含有シリカフェームセメント (以下、「HFSC」) が開発された (Bodén and Sievänen, 2005; Mihara et al., 2008)。

本タスクでは、セメント系材料の長期的な評価を可能とするために必要となる化学挙動評価モデルの開発を行った。具体的には、フライアッシュ及びシリカフェームの長期的な水和の進行に伴う水和物組成の変化を評価するための「①セメント水和反応モデル」及び地下水とセメント水和物の反応溶解・沈澱による鉱物組成変化や間隙水組成変化を化学平衡計算で導出するための「②セメント水和物の溶解沈澱モデル」を開発した。「②セメント水和物の溶解沈澱モデル」の開発では、初期の水和物組成の導出方法についても検討した。

① OPCおよびHFSCの水和反応モデル開発

幅広い地下水条件でのセメントの水和及び変質を評価するため、OPCとHFSC424 (OPC = 40 wt. %, SF = 20 wt. % and FA = 40 wt. %) をそれぞれイオン交換水および人工海水に浸漬させた試料の液相と固相の分析を実施した (平成27年度報告書; 平成28年度報告書; 平成29年度報告書)。また、OPCクリンカーとHFSC424を液固比0.5、室温条件で最大1,824日間イオン交換水に浸漬させ、SFとFAのポゾラン反応率を取得し、シュリンキングコアモデルによる評価を実施した (平成27年度報告書; 平成28年度報告書; 平成29年度報告書)。結果を図2.3.3-8に示す。取得したデータは後述するHFSC424の水和反応モデルにおけるSF、FAの反応率として使用した。

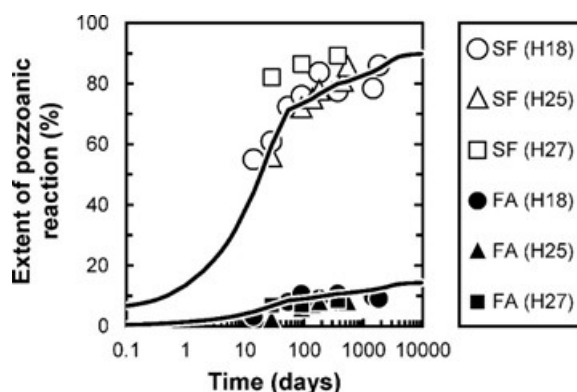


図2.3.3-8 シリカフェーム及びフライアッシュのポゾラン反応率の時間変化(プロットは実験による測定値、実線はシュリンキングコアモデルによる予測を表す)

② OPCおよびHFSC水和物の溶解沈澱モデル

異なる液固比、溶液条件におけるOPCとHFSC424のセメント水和物の溶解沈澱反応をモデル化することを目的に、180日間養生したOPCおよびHFSC424供試体を乾燥後90 μ m以下に粉砕し、液固比2、5、10、30、100、300、1,000、温度20 $^{\circ}$ Cの条件でイオン交換水および人工海水に4週間浸漬させ、浸漬後の固相及び液相を分析した(平成29年度報告書)。また、合成したM-S-Hゲルの25 $^{\circ}$ Cおよび50 $^{\circ}$ Cでの溶解度データを取得し、2成分系固溶体モデルの概念に基づくM-S-Hゲルの溶解度モデルを作成した(図2.3.3-11、平成29年度報告書)。表2.3.3-2に示すKとNaの吸着を考慮したC-S-Hゲルモデルおよび上述のM-S-Hゲルモデルを適用し、新たに導出した初期水和物組成及び①で求めたSF、FAの反応率を用いて、浸漬の液固比変化に伴うセメント水和物組成および液相組成の変遷を計算した。その結果、HFSC424を人工海水に浸漬させた試料のXRDによる固相分析から得られた鉱物組成の変遷(図2.3.3-9[a])をモデル解析(図2.3.3-9[b])によって再現することができた。また、液固比の変化に伴う液相中のpHおよび化学成分(K, Na, Ca, Mg, Si, Al, S, Cl)に関しても、分析値とモデル解析値の十分な一致がみられた(図2.3.3-10)。

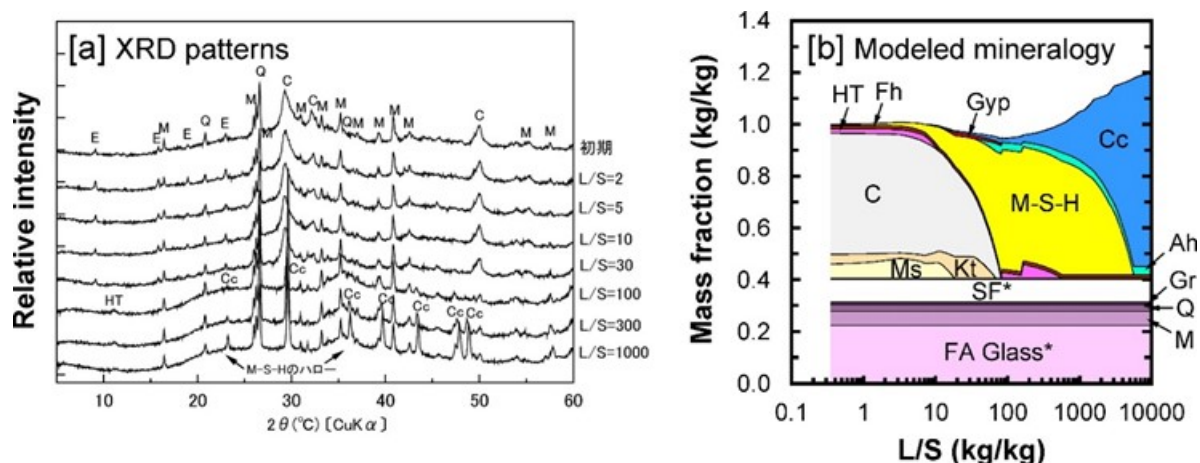


図2.3.3-9 液固比の変化に伴うHFSCの水和物組成の変遷

[a]XRD回折パターン、[b]PHREEQC(v3.4)(Parkurst and Apello, 2013)及びJAEA-TDB(v1.08)を用いてモデル化した鉱物組成。M: ムライト, Q: クォーツ, Gr: グラファイト, SF: シリカフェーム, E: エトリンガイト Ms: モノサルフェート, Kt: カトアイト(-Al, Fe, Si), C: C-S-Hゲル, HT: ハイドロタルサイト, Fh: フェリハイドライト, M-S-H: M-S-Hゲル, Gyp: ジブサム, Ah: Al(OH)3(mic), Cc: カルサイト

表2.3.3-2 C-S-Hゲルの吸着モデル (平成29年度報告書)

Sorption reaction	Log K_{eq}	Source
$\equiv\text{SiOH} = \equiv\text{SiOH}$	0	By default
$\equiv\text{SiOH} = \equiv\text{SiO}^- + \text{H}^+$	-12.3	(Viallis-Terrisse et al., 2001)
$\equiv\text{SiO}^- + \text{Na}^+ = \equiv\text{SiONa}$	$-2.2222 \cdot (\text{Ca}/\text{Si ratio}) + 2.6667$	Fitting
$\equiv\text{SiO}^- + \text{K}^+ = \equiv\text{SiOK}$	$-2.6815 \cdot (\text{Ca}/\text{Si ratio}) + 3.4244$	Fitting

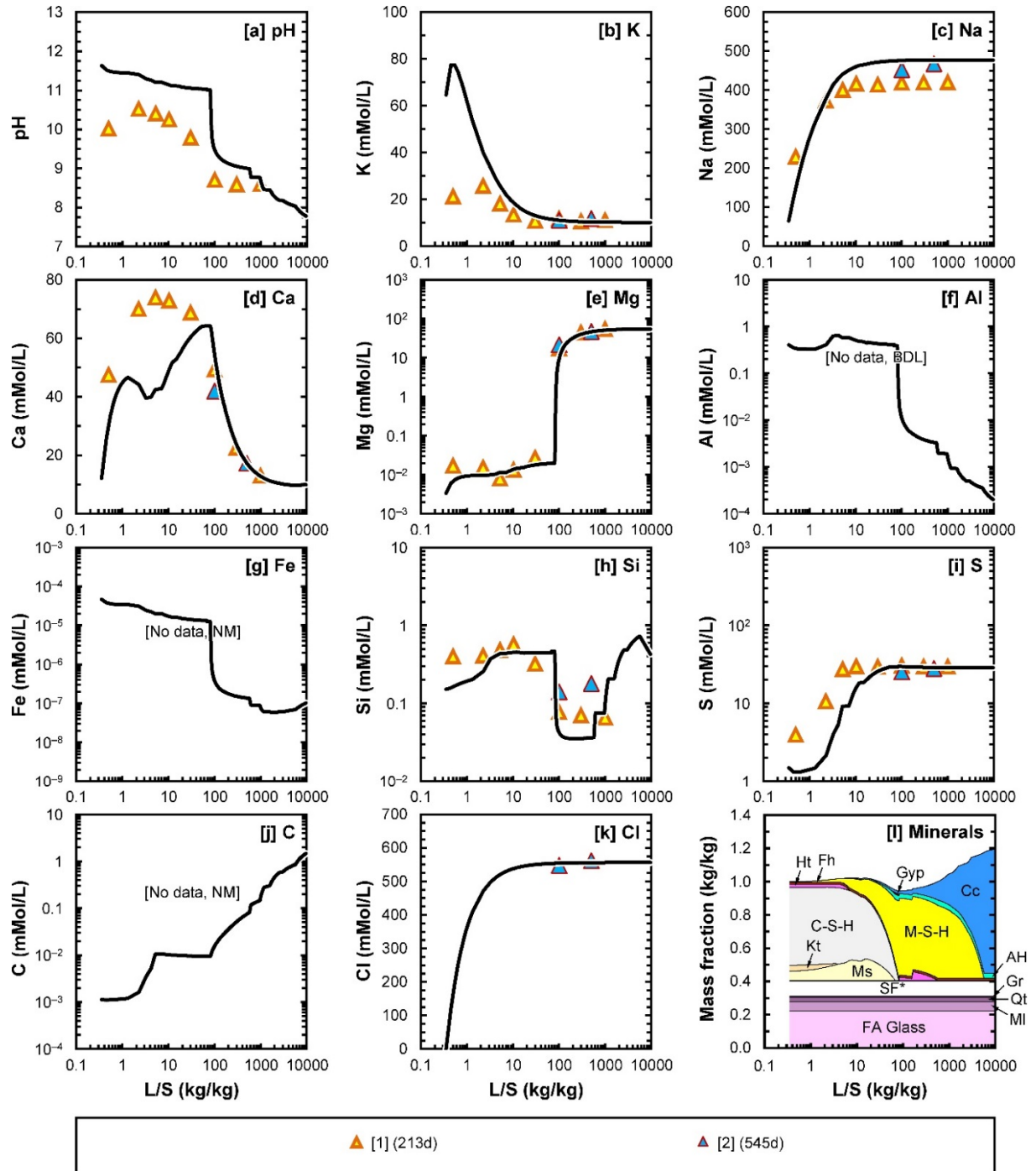


図2.3.3-10 液固比の変化に伴うHFSCの人工海水中の変質におけるpHおよび化学成分の変遷
 [a] pH, [b] K, [c] Na, [d] Ca, [e] Mg (検出限界以下), [f] Al (未測定), [g] Fe (未測定), [h] Si, [i] S,
 [j] C (未測定), [k] Cl。プロットは実験値、実線はPHREEQC(v3.4) (Parkhurst and Appelo, 2013)と
 JAEA-TDB(v1.08)による予測値。 参考文献: [1] (日本原子力研究開発機構, 2013d)。 [2] (Kamei et al., 2010)。

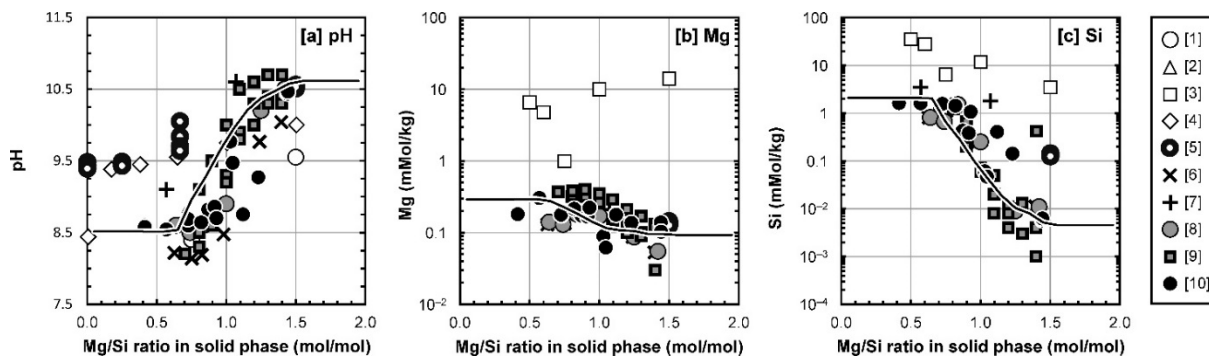


図2.3.3-11 Mg/Si比の関数として示されたM-S-Hゲルの溶解度データ及びモデル予測

[a] pH, [b] Mg, [c] Si。プロットは実験値、実線はPHREEQC (v3.4) (Parkhurst and Appelo, 2013)とJAEA TDB (v1.08)による予測値。参考文献: [1] (Yang, 1960). [2] (Siffert and Wey, 1962). [3] (Brew and Glasser, 2005). [4] (Zhang et al., 2011). [5] (Li et al., 2014). [6] (Lothenbach et al., 2014). [7] (Roosz, 2015). [8] (Nied et al., 2016). [9] (Bernard et al., 2017). [10] (日本原子力研究開発機構, 2015c, 2016a)。

今後、HFSCの水和モデル開発においては、FAのガラス成分の違いやSFとの相互作用が溶解速度に与える影響を定量化することで、幅広い組成のFAに対応が可能となると考えられる。また、幅広い条件に適用するためには、温度依存性や塩濃度依存性のデータ取得とモデルの検証が必要である。

2) セメント系材料の力学挙動評価モデル開発

TRU廃棄物の処分施設にセメント系材料を用いることでセメント系材料を含むバリア材料に長期的に化学的変質が生じると、これに伴い剛性や強度などの力学的特性も変化し、処分施設の長期力学挙動に影響を与える可能性がある。長期的な変質によるセメント系材料の強度・剛性の変化や、ひび割れの発生等により長期的に処分施設の力学場が変化すると、核種移行評価における場の状態が変化することになるため、このような力学挙動を評価できる技術開発が必要である。このような課題について、第2次TRUレポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005）では、セメント系材料からのCa溶脱による剛性・強度の低下、及びベントナイト緩衝材のCa型化による膨潤性能の変化等、バリア材料の化学的変質挙動を考慮に入れてニアフィールドの長期力学挙動評価が行われている。この評価では、化学-物質輸送解析との連成解析を行わず、化学的変質解析の結果に基づき、力学特性を設定して解析を行っているのみであるため、化学的現象、物質輸送現象及び力学的現象に跨るフィードバックループを含む非線形挙動は考慮されていない。このようなバリア材料の非線形的な変質・変形挙動を示す現象の一つとして、廃棄体パッケージの容器や構造躯体等に使用される金属材料の腐食膨張によって、周囲のセメント系材料において引張応力が作用することにより、ひび割れが発生する現象が挙げられる。個々のひび割れが連結して施設全体を貫通すると、ひび割れを流路として地下水が流れることによってひび割れ面からのCaの溶出が起これらと考えられる。これにより、剛性と強度が低下して新たなひび割れが発生すると、流入する地下水の量が増加し、さらにCa溶出が促進される可能性がある。

こうした観点から、処分施設の長期力学挙動とそれに伴う物質輸送特性の変化を評価する技術

開発の一環として、セメント系材料におけるCa溶出による剛性・強度の低下と、金属の腐食膨張等によりセメント系材料に割れが発生する現象を考慮できる力学挙動解析技術の開発を行った。本項ではこの検討の成果の概要を示す。

① セメント系材料に割れが発生する現象を考慮できる既往の力学解析技術

TRU廃棄物処分施設を対象とする長期力学解析を行うために開発された有限要素解析コードであるMACBECE2014 (Mechanical Analysis considering Chemical transition of Bentonite and Cement materials (2014)) は、Ca溶脱によるコンクリートの剛性・強度の低下を考慮できる非線形弾性体モデルが組み込まれた公開コードであるMACBECE (三原ほか, 2010) をベースとして開発されており、Ca溶脱による剛性・強度の低下と、せん断・圧縮破壊後の応力再配分及び引張りひび割れによる剛性低減を考慮した力学解析が可能である (平野ほか, 2016a)。

他方、上記の連続体モデルを不連続体モデルによる解析と組み合わせることにより、力学的変形によるひび割れなどの局所的な不連続体化現象を対象とする力学解析手法が検討されている (日本原子力研究開発機構, 2014b ; 2015c)。この評価手法では、不連続体モデルとして、粒状体個別要素法 (Distinct Element Method:DEM) を採用し、MACBECE2014により求められるセメント系材料周辺の材料の力学挙動による変位情報を境界条件として反映することにより、TRU廃棄物処分施設を対象とする解析を実施している。TRU廃棄物処分坑道断面を対象とした長期力学解析について、MACBECE2014単独の解析結果と、MACBECE2014の解析結果から鉄腐食膨張と岩盤クリープの変位情報を境界条件として反映し、セメント系材料の部分のみをDEMを用いて解析を行った結果を図2.3.3-12に示す。いずれの解析手法でも、廃棄体領域の角から坑道外側に向かってひび割れが発生し始めるという点では、MACBECE2014による解析結果とDEMの解析結果は整合的である。しかしながら、MACBECE2014の解析では、割れの発生範囲の全要素が割れる評価結果となっており、現実のひび割れ発生挙動 (割れ発生による応力解放とそれによる空間的局在化等) との乖離が見られる (日本原子力研究開発機構, 2015c)。一方、MACBECE2014の解析結果をDEMの解析モデルに反映させる解析手法では、ひび割れが生じた場合の応力が解放されることにより、割れの分布が局所的になる現実的な破壊挙動を表すことができているものの、DEMによる解析は一般的に計算負荷が大きく (清水ほか, 2014 ; Potyondy and Cundall, 2004)、このような手法に限定して処分施設断面の大領域を対象とする計算を行うことは合理的ではないと考えられた。

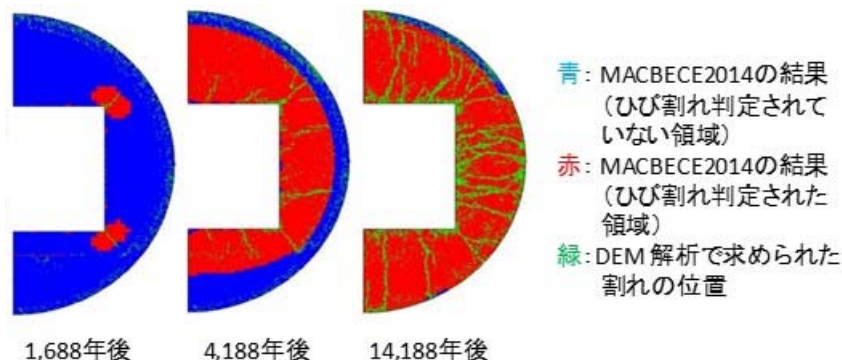


図2.3.3-12 DEMとMACBECE2014のひび割れ進展状況の比較

(日本原子力研究開発機構 (2015c) を一部加工。緩衝材を用いない処分施設を対象とした解析結果の例)

a. 本検討における力学挙動解析技術の高度化

上記の観点から、処分施設全体の性能評価解析の場の状態を設定するための基本となる解析手法である連続体モデルによる力学解析ツールを用いて、セメント系材料における局在化した割れの発生を表現するための技術開発を行った（平成27年度報告書）。具体的には、セメント系材料に対してひび割れ判定された要素に解放力を与える解析が可能となるように、上記に示したMACBECE2014の改良を行った。長期力学解析の結果の例として、セメント系材料における要素状態図を図2.3.3-13に示す。解放力を载荷する解析を行うことにより、ひび割れが局所的な分布をもって進展していく結果となり、図2.3.3-13で示したDEMによる割れの発生・進展挙動の解析結果と近い挙動を示す結果が得られた。しかしながら、上記のモデルでは、ひび割れ発生の原因となる鉄の腐食膨張挙動については、処分場閉鎖直後から鉄腐食生成物の弾性係数を用いて、弾性体モデルで膨張応力を解析しており、鉄が残留している状態では膨張応力を過小に評価している可能性が考えられた。また、セメント系材料においては、引張応力が引張強度を超える場合にひび割れが発生すると判定していたが、Ca溶脱による引張強度の低下については考慮していなかった。このことは、本項の冒頭で示した、化学的現象および物質輸送現象に跨る非線形挙動を対象とする場合に特に重要な課題であると考えられた。

こうした観点から、鉄が腐食する以前の剛性と腐食生成物の剛性を想定した要素を直列に結合する手法により、腐食の進行の程度に応じた等価な弾性係数を算出して腐食膨張解析を行う機能を追加すると共に、Ca溶脱率の依存性が考慮された引張強度をひび割れ発生の判定基準とできるように昨年度改良を加えたMACBECE2014に対して更なる改良を加えた（平成28年度報告書）。改良後のMACBECEを用いて、TRU廃棄物処分施設断面を対象とする長期力学解析を実施したところ、Ca溶脱によるセメント系材料の引張強度の低下を考慮する場合には、ひび割れ発生の判定基準となる引張強度が時間と共に低下することにより、Ca溶脱によるセメント系材料の引張強度の低下を考慮しない場合と比較して、処分後2.5万年までで貫通性のひび割れの発生本数が著しく増加する結果が示された。他方、ひび割れが広範囲で発生し、局所的な応力の集中が起こりにくい状態となったために、Ca溶脱によるセメント系材料の引張強度の低下を考慮しない場合と比較して、より小さな開口幅のひび割れが多数発生する結果となった（平成28年度報告書）。

鉄の腐食の進展による腐食膨張要素の剛性低下を考慮する場合には、鉄が全て腐食する以前の状態では、残留している健全な鉄の弾性係数と腐食生成物の弾性係数から求められる等価弾性係数を用いて、周辺のセメント材料に载荷される膨張応力が計算されることから、より開口幅の大きなひび割れが広範囲に発生する可能性が考えられた。しかしながら鉄の腐食の進展による腐食膨張要素の剛性低下を考慮して解析を行ったところ、処分後2千年でのひび割れの発生本数が鉄の腐食の進展による腐食膨張要素の剛性低下を考慮しない場合と比較してわずかに増加するのみであり、その後のひび割れの発生・進展の挙動はほぼ同様の傾向を示した。この理由として、腐食の進展に伴い、腐食膨張要素の剛性が低下して周辺のコンクリートに载荷される膨張応力が低下したこと、および、セメント系材料のCa溶脱が進行して剛性が低下することにより、腐食膨張に対する応力緩衝効果が作用したこと等が考えられた。

上記で示した、Ca溶脱による剛性・強度の低下と、せん断・圧縮破壊後の応力再配分及び引張ひび割れによる剛性低減を考慮した力学解析では、化学的な状態を規定する指標としてCa溶脱率が選択され、既往の式（戸井田ほか，2005）に基づきCa溶脱率から剛性および強度を導出して計

算が行われた。しかしながら、現実的には、セメント系材料の溶脱の進展による力学的な特性の劣化のみならず、二次鉱物が生成して材料の間隙が閉塞し、力学的な特性が向上する場合も考えられることから、化学的な状態を規定する指標として間隙率を新たに定義し、これにより、剛性および強度が変化する関係式を用いて解析を行うことができるようにモデルの改良を行った（平成29年度報告書）。

本項で示した力学解析ツールによる解析と、化学解析および水理解析とを連成して解析することにより、ニアフィールドの核種移行の場の状態を評価するための技術開発を行った。この成果については、2.4節で後述する。

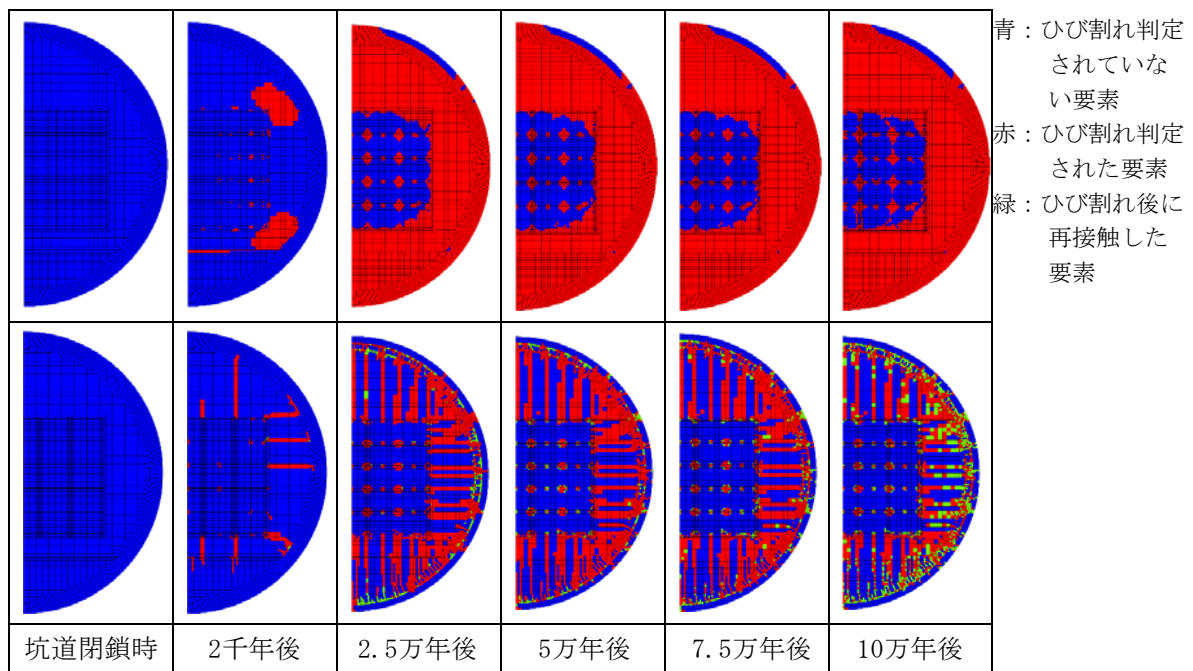


図2.3.3-13 セメントのひび割れ発生・進展の解析例
 (上段：解放力を載荷しないケース、下段：解放力を載荷するケース)

② セメント系材料による影響下での核種移行挙動の把握

セメントが放射性核種の移行挙動に与える影響因子として、水酸化カルシウムが存在することによる高 pH 条件 (11以上) や高カルシウム濃度 (最大で0.04 mol/dm³程度) が考えられる。これらの影響因子は、元素によっては放射性核種の溶解度及び溶存化学種の変化をもたらす可能性があり、セメントによる影響を考慮しない場合に比べて安全評価上の影響が大きくなる可能性が生じる。したがって、既往の文献を基に、安全評価上の重要元素の溶解度や収着分配係数に及ぼすセメント影響の調査の現状を把握するとともに、調査結果から抽出された課題の一部について実験データを取得した。さらに、取得した実験データなどを基に、セメント影響を考慮した核種移行パラメータ、特に溶解度及び収着分配係数を提案した。

a. セメント系材料の影響を考慮した核種移行データの取得

文献調査の結果、最優先で充実させるべきデータは、高pH条件における、またカルシウム型ベントナイトに対する遷移金属元素（ジルコニウム、ニオブ、モリブデン、スズ、等）の収着分配

係数であると結論づけた（平成27年度報告書）。したがって、ベントナイト（ナトリウム型及びカルシウム型）に対するこれらの元素の収着分配係数を実験的に取得した。

収着分配係数はバッチ法で取得した。固相には、クニミネ工業（株）製の高純度ナトリウム型モンモリロナイトであるクニピア[®]F及び、クニピア[®]Fから調製したカルシウム型ベントナイトを使用した。対象とした4つの元素のうちジルコニウム及びスズについては、放射性トレーサーのZr-95及びSn-113をそれぞれ用いた。カルシウム型ベントナイトを用いた実験では塩化カルシウム水溶液、比較のために実施したナトリウム型ベントナイトを用いた実験では塩化ナトリウム液を使用し、水溶液のpHは8.4～12.5に、塩濃度は $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}$ mol/dm³に調整した。さらに、上記すべての条件に対して、固相を含まないブランク試料を用意し、収着実験と同様の作業を行った。実験結果の再現性を確認するため、すべての条件において3つずつ収着実験試料を作製した。試験開始前後の各元素の溶存濃度を定量することで、収着分配係数を算出した。

スズ（平成27年度報告書）については、ナトリウム系のpHが8.4における試料では、スズの沈殿が生成し、収着時にスズの沈殿が再溶解することで、収着分配係数が過小に評価されている可能性が考えられた。カルシウム系で収着分配係数が導出できたpH ≥ 9 では、全体的にカルシウム型ベントナイトに対する収着分配係数がナトリウム型に対する値よりやや高くなった。収着分配係数の顕著な塩濃度依存性は見られなかった。アルカリ性水溶液中においてスズは加水分解種（ $\text{Sn}(\text{OH})_n^{(n-4)-}$, $n \geq 4$ ）（Rai et al., 2011）であることから、スズは表面錯体を形成して収着していると考えられた。

ジルコニウムについては、大半の試料で溶存ジルコニウム濃度が検出下限値未満となったことから、収着分配係数の導出ができたのはpH ≥ 11 の一部のデータだけであった（平成27年度報告書）。したがって、ジルコニウムの収着分配係数の導出は実験的には困難であり、他元素との化学的類似性を利用せざるを得ないと考えられた。

モリブデンについては、ナトリウム系における収着分配係数が、すべての試料で定量限界未満となった（平成28年度報告書）一方で、カルシウム系では、図2.3.3-14に示すとおり有意な収着分配係数が得られた。実験期間4週間の時点では、系が平衡に到達していない可能性が残るものの、いずれの濃度のCaCl₂水溶液中においても、収着分配係数はpHが高くなるにつれて高くなった。得られた収着分配係数は、セメントペーストに対する値（加藤ほか、2002）に近い値であった。なお、収着メカニズムとしては、ベントナイト中のエッジサイト（S-OH）における表面錯体が考えられた。

ニオブについては、ナトリウム系において、pH < 12では $10^{-1} \sim 1$ m³/kgの有意な収着分配係数が得られるとともに、pHの増加とともに高くなる傾向が見られた一方、塩濃度に対する依存性は見られなかった。カルシウム系においては、 $[\text{Ca}^{2+}] = 2 \times 10^{-4}$ mol/dm³では $10^{-1} \sim 10$ m³/kgの有意な収着分配係数が得られるとともに、pHの増加とともに収着分配係数が高くなる傾向が見られた。カルシウム系の収着分配係数は、全体的にナトリウム系より高い値であった。 $[\text{Ca}^{2+}] \geq 2 \times 10^{-3}$ mol/dm³では、 $10^1 \sim 10^2$ m³/kgの有意な値だが、ブランク試料中の溶存ニオブ濃度のばらつきに起因する大きなばらつきが見られ、pH 9～10付近で極小値を示した。収着分配係数のフィルター孔径依存性については顕著には見られなかった。

b. セメント影響を考慮した収着分配係数の提案値の更新

スズについては、従前はpH 8~14において1 m³/kgの収着分配係数を提案している（日本原子力研究開発機構, 2015c）。本プロジェクトの結果（平成27年度報告書）からは、概ね1 m³/kg程度の収着分配係数が得られた。したがって、本プロジェクトにおける結果は1 m³/kgの収着分配係数の提案値を強く支持するものであり、見直す必要はないと考えられた。

ジルコニウムについては、従前はpH 8~14において1 m³/kgの収着分配係数を提案している（日本原子力研究開発機構, 2015c）。本プロジェクトで得られた実測値がごくわずかであるため、残念ながら詳細な議論をできる状態にはない。それでも、得られた実測値はほぼ1 m³/kgを上回った（平成27年度報告書）ことから、1 m³/kgの収着分配係数の提案値を多少なりとも支持するものであり、見直す必要はないと考えられた。

モリブデンは地層処分及びTRU廃棄物処分環境中ではモリブデン酸イオン（MoO₄²⁻）であると予想されており（天野ほか, 2015；日本原子力研究開発機構, 2015c）、陰イオン種であるが故にベントナイトやセメント系材料等に収着しないとされ、安全評価では収着分配係数を0 m³/kgに設定することも多い（たとえばWieland, 2014; Ochs et al., 2016; 日本原子力研究開発機構, 2015c）。ナトリウム系については従前どおり収着分配係数を0 m³/kgに設定すべきであるが、溶存カルシウム濃度が0.002 mol/dm³以上である場合には10⁻² m³/kgを提案した。

ニオブについては、従前の提案値（日本原子力研究開発機構, 2015c）を見直し、本プロジェクトの実測値を基に、ナトリウム系について、pH ≤ 11では0.1 m³/kg、pH > 11では1 m³/kgを、カルシウム系について、pH ≤ 11では1 m³/kg、pH > 11では10 m³/kgを提案した。

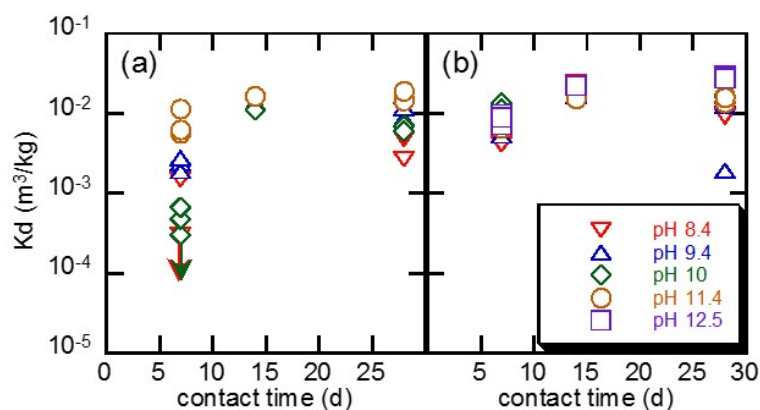


図2.3.3-14 カルシウム型ベントナイトに対するモリブデンの収着分配係数の経時変化
((a) 0.002mol/dm³ CaCl₂, (b) 0.02mol/dm³ CaCl₂)

2.4 天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発

2.4.1 目的とアプローチ

天然バリア中のシステム変遷と核種移行を評価するうえでは、岩石中の割れ目やマトリクス部の鉱物や間隙の特性、地下水の地球化学的特性、そこでの核種の収着・拡散特性といった岩石自体の特性評価に係る課題に加えて、有機物、微生物、コロイド等の地質環境条件に起因する不確実性要因を考慮する必要がある。さらに、隆起・侵食や海水準変動による地質環境変化の影響、セメント系材料等との相互作用に起因する岩石の変質などのシステム変遷やその核種移行への影響等についても考慮する必要がある。これらの天然バリア中のシステム変遷と核種移行評価について、従来の地質環境を特定しないジェネリックな評価段階においては、簡略かつ保守的に評価することを重視したモデルやパラメータが採用されてきた（核燃料サイクル開発機構，1999c）。しかし、地層処分長期安全評価の信頼性を高めるためには、最新の科学技術の成果を反映した現象理解の深化や評価手法の精緻化等を通じ、評価に用いるシナリオ、モデル、パラメータ等の設定手法の高度化と確証を図っていく必要がある。また、天然バリアにおいては、シナリオ、モデル、パラメータ等の設定に際し、実際の地質環境条件をいかに考慮するか、あるいは、実際の地質環境での原位置試験等によってそれらをいかに確証していくか、その方法論を検討しておくことが重要な課題である。

本タスクでは、天然バリア中のシステム変遷と核種移行に係る重要課題のうち、岩石中の割れ目の不均質性等を考慮した核種移行評価手法、有機物・微生物等の地下水環境や核種移行への影響評価手法、及びセメント系材料が岩盤に及ぼす影響に関する評価手法について、室内試験及び地下研究施設での原位置試験等を通じて高度化や確証を行うことを目的とする。これら3つの課題を対象として、以下に示すような研究開発を、相互に連携させつつ、また、その他のサブタスクとも連携しながら研究開発を進めた。

(1) 岩石マトリクス/割れ目中の核種移行評価技術の開発

結晶質岩と堆積岩のマトリクス部及び割れ目部における鉱物・間隙特性や拡散・収着データの室内試験による取得、不均質性等を考慮した評価モデルの開発、原位置トレーサー試験の結果を活用したモデル等の適用性評価、ナチュラルトレーサーに係る事例評価による長期時間スケールでのモデル等の妥当性評価等を実施し、それら一連の成果をもとに実際の地質環境の特性を反映可能な核種移行評価技術を開発した。

(2) 有機物・微生物等の影響評価手法の開発

有機物・微生物等による核種移行への影響評価手法については、室内及び原位置において有機物・微生物等の特性や核種との相互作用に係る基礎データを取得し、原位置条件へ適用可能な影響評価モデルを開発するとともに、これを用いた有機物・微生物影響の定量的評価を行い、その性能評価上の取扱いや課題を整理した。

(3) セメント系材料によるニアフィールド岩盤への影響評価技術の開発

セメント系材料がニアフィールド岩盤に及ぼす影響評価については、地下研究所におけるグラウト材と長期間接触した岩盤の変質状況に関するデータを取得するとともに、地下水特性やグラウト及び岩盤特性の経時変化や推定される変質メカニズムを検討し、それらをもとにセメント材による岩盤への影響評価手法や課題を整理した。

2.4.2 岩石マトリクス/割れ目中の核種移行評価技術の開発

(1) 結晶質岩の評価技術の開発

結晶質岩については、従来より国際共同研究として進めてきたスイスグリムゼル原位置試験場における原位置長期拡散 (Long Term Diffusion) 試験プロジェクト(LTDプロジェクト)との連携によって、花崗岩のマトリクス部及び割れ目中の不均質性を考慮した核種移行評価モデルの開発を進めた(平成25~29年度報告書)。また、本プロジェクトの後半から、スウェーデン及びフィンランドの地下研究施設での原位置トレーサー試験プロジェクトとの連携を通じ、多様な特性を有する花崗岩を対象に、特に原位置条件への核種移行評価モデルの適用性を評価した(平成28, 29年度報告書)。さらに、これらの成果と日本の花崗岩の特徴との比較分析を通じ、わが国の花崗岩に対する評価手法の適用可能性、並びに性能評価への反映手法を検討した(平成29年度報告書)。

1) 結晶質岩マトリクス中の核種移行モデルの開発

花崗岩のマトリクス部を対象とした不均質性等の影響を含む核種移行メカニズムの理解とモデルの開発については、グルムゼルのLTDプロジェクトと関連付け、先行事業「処分システム化学影響評価高度化開発」(日本原子力研究開発機構, 2013c)の成果を継承しつつ進めた。本プロジェクトの最初の2年間は、LTDプロジェクトの2回目の原位置試験と連携して、原位置試験場所から採取した岩石マトリクス試料を対象に、多様なトレーサー (Na, Cs, Cl, HTO, Se, Ba, Ni) を用いて、室内試験による収着・拡散データの取得を進めた(平成25, 26年度報告書)。これまでに取得した一連の試験データを図2.4.2-1に要約するが、花崗岩試料の鉱物と間隙の不均質性、及び室内試験試料の加工の際に生じる岩石試料の擾乱影響の重要性を示唆する結果が得られた。具体的には、同図(a)に示した実効拡散係数から、ベントナイトや粘土質岩と同様の狭隘間隙中での静電的相互作用に起因した陽イオン加速と陰イオン排除の傾向が確認され、その傾向は陽イオンの加速の方が顕著であり、これは花崗岩中の鉱物や間隙の不均質性に起因するものと推定された。一方で、拡散試験終了後に取得した岩石中の核種の濃度プロファイルは典型的な二重プロファイルを示し、このプロファイルから評価した分配係数、及び粒径サイズの異なる試料を用いたバッチ収着試験により得られた分配係数との比較(同図(b))によって、試料表面の擾乱を受けた部分と未擾乱のマトリクス部の分配係数、それらと粉碎試料を用いたバッチ法で得られた分配係数との関連性について定性的な理解を得ることができた。

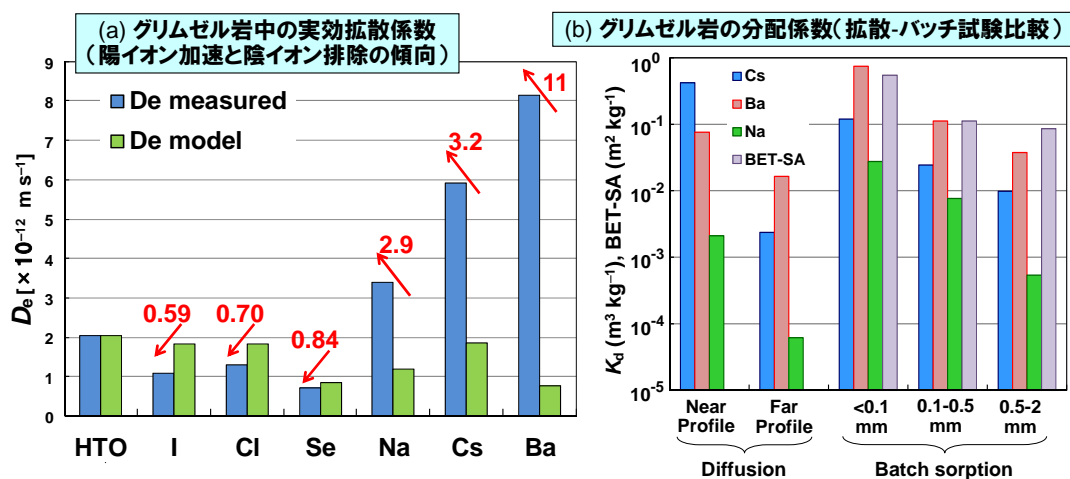


図2.4.2-1 グリムゼル花崗岩のマトリクス部の室内収着・拡散試験結果のまとめ

上記したグリムゼル花崗岩で観察された拡散挙動に及ぼす不均質性の影響を理解するうえで、特に黒雲母の形状や分布が、イオンの拡散係数や拡散の異方性に及ぼす影響の評価が重要と考えられた。このため、グリムゼル花崗岩試料の鉱物・間隙の不均質性の定量化と、不均質性を考慮した拡散挙動の解析手法の開発を進めた。具体的には、グリムゼル花崗岩マトリクス試料（図2.4.2-2(a)）に対して、X線CTと電子線マイクロアナライザー（EPMA）を適用することにより、花崗岩中の黒雲母等鉱物の含有率や葉理構造等の不均質な分布状況（図2.4.2-2(b)）、鉱物毎の粒子内間隙率等に関する定量的情報を取得した。このような分析情報に基づき、黒雲母の層状構造とその不均質な分布を反映した不均質場モデルを構築し（図2.4.2-2(c)）、ランダムウォーク法を用いて粒子の拡散解析評価を既存のPARTRIDGEコードを用いて検討した（平成27～29年度報告書）。モデル計算にあたっては、層状の雲母鉱物のサイズや配向性、鉱物間の粒界間隙の連続性、雲母間隙中における静電的相互作用による陽イオン加速や陰イオン排除の効果などを、上記の分析情報や既往の知見などをもとに変動させつつ解析を行い、多様な不均質性が拡散挙動へ及ぼす影響の把握を試みた。モデル解析の結果（図2.4.2-2(d)）、中性粒子の拡散挙動からは、層状の黒雲母の配置の影響や粒界間隙の連続性などの影響が確認された。一方、陽イオンと陰イオン種では、雲母間隙中の陽イオン加速と陰イオン排除の効果が明瞭に確認でき、陽イオンにおいて層状鉱物の配置パターンの寄与が大きい一方で、陰イオンにおいては相対的に配置パターンの寄与は小さいことが示唆された。グリムゼル花崗岩で実測された実効拡散係数を図2.4.2-2に示すが、同図(c)に示すような雲母の連結（雲母鉱物が4つ連続すると仮定）と粒界間隙の不連続（2/3が不連続と仮定）を仮定したモデルにおいて、実測された中性化学種の拡散係数、陽イオン加速とイオン排除の効果を概ね再現できることが確認された。今後、雲母の連結性や粒界間隙の不連続性、雲母間隙中の陽イオン加速と陰イオン排除効果などのモデルで仮定した条件を裏付ける根拠の提示や、他の花崗岩への適用性評価を検討する必要がある。

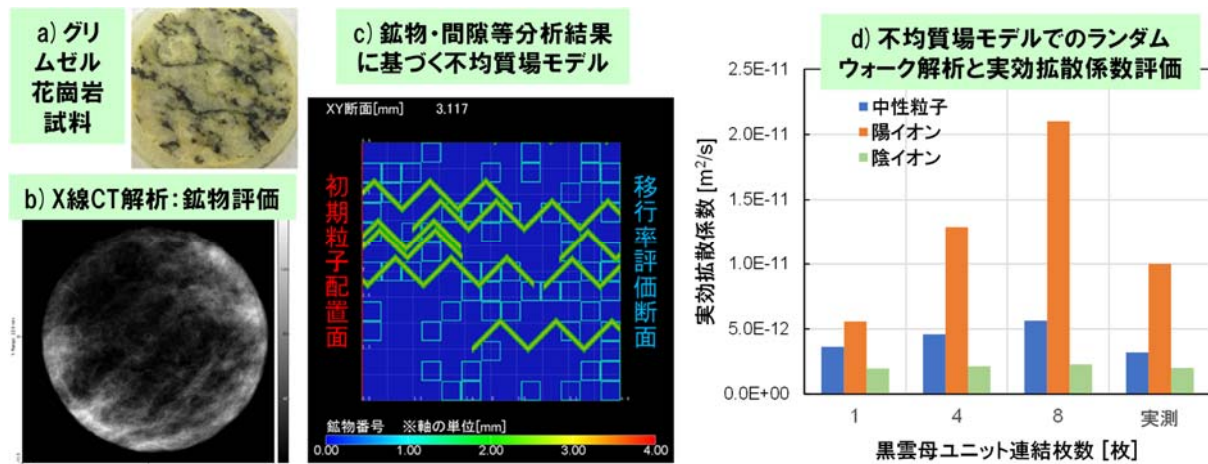


図2.4.2-2 グリムゼル花崗岩マトリクス部(a)のX線CT分析による黒雲母の分布評価(b)を反映した不均質場モデル(c)及び拡散係数の評価結果(d)

2) 結晶質岩割れ目中の核種移行モデルの開発

割れ目からマトリクスにかけての核種移行特性を総合的に理解するため、グリムゼル原位置試験場から採取した単一割れ目を含む花崗岩コア試料を対象として、割れ目部とマトリクス部の鉱物・間隙分布の分析、収着・拡散特性を評価するための試験と、割れ目を含むコア状の試料を用いた

通液試験を、図2.4.2-3に示すような体系で実施した。単一割れ目を含むコア試料から、割れ目を含む円柱状試料、割れ目近傍とマトリクス部から円板状試料及び粉末状試料を調製し、HD0(重水)またはHT0(トリチウム水), Cs, Se, Ni, Euを含む混合トレーサー溶液を用いて、割れ目中通液試験、透過拡散試験及びバッチ法収着試験を行った(平成27, 28年度報告書)。



図2.4.2-3 割れ目を含むグリムゼル花崗岩を対象とした室内試験の体系

透過拡散試験によって得られた実効拡散係数は、いずれのトレーサーにおいてもマトリクス部と比較して割れ目部が低い結果となり、拡散係数を低下させる要因が割れ目表面近傍に存在する可能性が示唆された。また、いずれの試料においても、陽イオン加速と陰イオン排除の効果を示す拡散データが、これまで実施してきたグリムゼルのマトリクス試料中の拡散試験結果と同様に確認された。透過拡散試験後の試料中濃度プロファイルの分析によって取得された分配係数は、割れ目部の近傍の評価結果では $Eu > Ni > Cs > Se$ の序列となり、マトリクス部と比較して1~2桁高い値を示した。一方、割れ目部近傍とマトリクス部の粉末試料を用いたバッチ収着試験で得られた分配係数は、元素間の大小関係は拡散試験で得られた傾向と整合する結果となった。割れ目中通液試験においても、非収着及び低収着性のHD0、Seが数日で破過したのち、収着性のCs, Ni, Euが破過し、元素間の遅延の傾向性 ($Eu > Ni > Cs > Se \approx HD0$) は、上記に示した収着・拡散試験から得られた各元素間の収着・拡散特性の関係と整合する結果となった。通液試験終了後に、割れ目面近傍のトレーサー元素の分布状況を把握した。

グリムゼル花崗岩の割れ目からマトリクスにかけての鉱物や間隙の不均質性を把握するため、X線CT及びEPMAによる分析を実施した。定流量通液試験で用いたコア状試料のX線CT分析によって、コア試料全体にわたって単一割れ目が連続していることを確認したほか、割れ目開口幅の不均質な分布とその平均開口幅を定量化した。さらに割れ目近傍の詳細な鉱物分布のX線CT及びEPMAによる分析によって、割れ目近傍には黒雲母及び白雲母が濃集していること、割れ目表層のごく近傍では雲母の風化がさらに進んだ高間隙率のパーミキュライト層が存在することが確認された。

上記で示した割れ目部やマトリクス部の拡散・収着試験の結果、及び割れ目の開口幅や割れ目近傍の鉱物や間隙の不均質性の分析結果を踏まえて、通液試験結果の解釈を試みた。基本的なモデル概念は、割れ目からマトリクスにかけての不均質性を考慮するものであり、不均質性を考慮

しない均質（1層）から、不均質性を考慮するための2～3層のモデルを検討した。3層モデルの概念は、図2.4.2-4(a)に示すように、1層目は高間隙率のバーミキュライト層、2層目は配向した雲母層であり、分析データに基づき厚さや間隙率を設定し、実効拡散係数や分配係数については拡散試験の実測データから導出・推定された値を設定した。この3層モデルによる解析結果を、1層モデルの結果とあわせて図2.4.2-4(b)に示す。割れ目近傍の不均質性を忠実に考慮した3層モデルによって、高収着性トレーサーの破過曲線の実測データとの整合性が大幅に改善され、特に、十分な精度を有するCsの破過曲線の立ち上がりを再現できることが確認された。

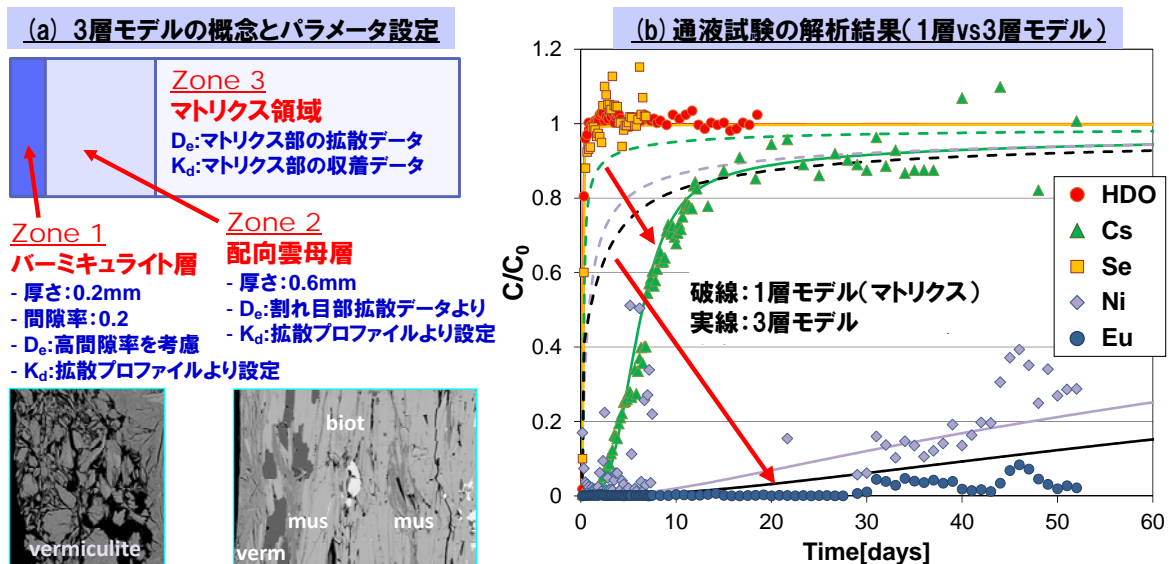


図2.4.2-4 グリムゼル岩割れ目中における通液試験の解析のための3層モデル概念とパラメータ設定(a)、及び解析結果(b)

3) 結晶質岩マトリクス/割れ目中の核種移行モデルの原位置試験データ等による確認

結晶質岩については、マトリクス部と割れ目部を対象に、鉱物や間隙の不均質性の影響等も考慮して、室内試験に基づき構築した評価モデルを、最終的に原位置条件において適用し、その妥当性を確認することが重要である。このような観点から、本プロジェクトで主たる対象としてきたスイスのグリムゼルに加え、スウェーデンのエスポ、フィンランドのオンカロの原位置トレーサー試験を調査・分析し、それぞれの岩石や原位置試験の特徴を比較しつつ、モデルの適用性評価を進めた（平成28, 29年度報告書）。本プロジェクトにおいては、エスポとオンカロの原位置トレーサー試験結果を対象に検討を行ったが、ここでは、エスポにおける原位置トレーサー試験（LTDE-SD: Long Term Diffusion Experiment-Sorption-Diffusion）への適用性評価の概要を示す。

エスポ原位置試験場で実施されたLTDE-SDプロジェクトは、マトリクス部と割れ目部の原位置条件での収着・拡散データを取得することを目的に実施されたものである（Widstrand et al., 2010a, 2010b; Nilsson et al., 2010）。マトリクス部と割れ目部のデータを同時に取得するために、図2.4.2-5(a)に示すように、天然の割れ目面（Stub section）及びマトリクス部（Slimhole section）に、10種を超える放射性核種を含むトレーサー溶液を約200日間にわたって循環させ、トレーサー溶液中の核種濃度の減衰データを取得するとともに、試験終了後のコア採取と分析によって割れ目部とマトリクス部のトレーサー濃度プロファイルが取得された。エスポの岩石は、マトリクス部は花崗閃緑岩であり、割れ目近傍には変質したマイナイト層、割れ目表面には方解

石や緑泥石等の割れ目充填鉱物を不均質に被覆した特徴を有する。このような特徴を有する岩石中の多様な核種の原位置移行データに対して、これまでグリムゼル岩を対象に構築してきた室内データから原位置条件へのスケージング手法を含めた核種移行評価手法の適用を試みた。LTDE-SD試験の対象割れ目の分析データ、原位置試験で取得された濃度プロファイルデータ等をもとに、グリムゼル岩を対象に検討してきた表層近傍の擾乱影響を考慮した2層モデルを、エスポ岩のマトリクス及び割れ目表層に対して適用した。モデル概念としては、マトリクス部と割れ目部の表層領域（5mmまで）において、間隙率と拡散係数、分配係数が徐々に低下していくこと、一方、5mmより深いマトリクス部では一定の特性を有することを仮定した（図2.4.2-5(b)）。このモデル概念に基づき、マトリクスと割れ目部の表層領域、マトリクス領域の核種移行パラメータを設定し、トレーサー溶液中の核種の減衰曲線、マトリクス（Slimhole）及び割れ目部（Stub）中の核種濃度プロファイルをGoldSimコードによって解析した。ここで、核種移行パラメータの設定にあたっては、LTDS-SDプロジェクトで実施された室内試験データをもとに、これまでグリムゼル岩で構築してきた室内データから原位置パラメータを推定評価する手法（間隙率と実効拡散係数、粒径と収着分配係数の関係性等）を適用した。同図(c)に示すように、原位置での表面近傍部とマトリクス部の間隙率はClやNaの拡散プロファイルから評価し、グリムゼル岩で確認されているような陽イオン加速あるいは陰イオン排除の傾向が確認された。多様なトレーサー核種を対象とした解析の結果の例として、Raの減衰曲線を同図(d)に、割れ目部（Stub）の濃度プロファイルを同図(e)に示す。上記したモデル概念とパラメータ推定手法を一貫して多様な核種に適用することによって、一部の高収着性核種で実測との乖離があるものの、全体的な傾向性を概ね表現できることが確認できた。これにより割れ目やマトリクス部の核種移行評価の概念モデルや室内試験データから原位置パラメータを推定評価する手法の有効性が確認できた。

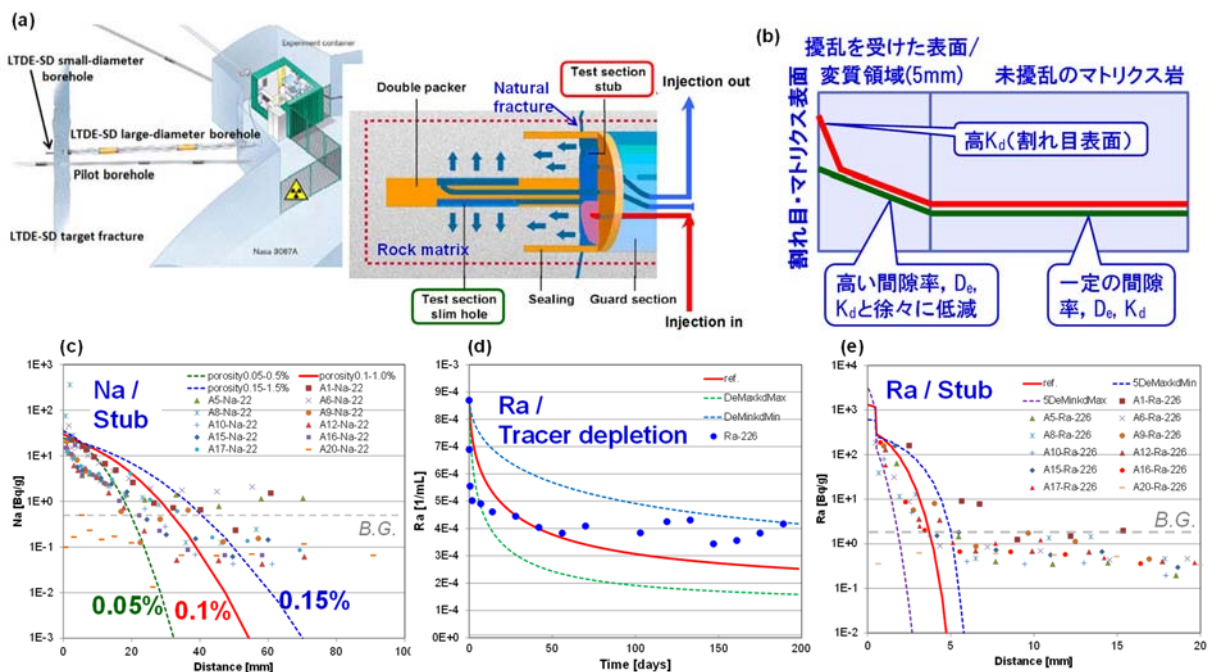


図2.4.2-5 エスポにおける原位置トレーサー試験LTDE-SDの試験概念(a), 解析モデル(b)及び解析結果例(c, d, e)

4) 性能評価への反映と今後の課題抽出

上記の海外の結晶質岩を対象に得られた成果の取りまとめの一環として、ここでは、マトリクス部や割れ目部における不均質性の理解やその定量評価モデルの性能評価への反映方を検討するとともに、海外と日本の花崗岩の特徴の比較分析を通じ、わが国の花崗岩に対する評価手法の適用可能性について検討した（平成29年度報告書）。

本プロジェクトでは、結晶質岩の核種移行評価において考慮すべき不均質性として、図2.4.2-6(a)に示すように、マトリクス部の不均質性（図中①）、割れ目からマトリクスにかけての不均質性（図中②）の核種移行への影響を把握し、その定量評価モデルを構築してきた。さらに、割れ目の開口や連続性の不均質性（図中③）についても、グリムゼルの割れ目岩を用いた室内試験ではその影響を評価できなかったものの、幌延の泥岩の割れ目を対象とした室内試験において、その影響評価手法を検討してきた。ここでは、このうちの②と③の不均質性に着目して、それらを反映した核種移行解析手法を検討するとともに、それらの不均質性が核種移行解析に及ぼす影響を評価した。解析は、均質場の核種移行モデルをレファレンスとし、同図(b)に示すような不均質場の核種移行モデルを設定した。具体的には、(1)グリムゼル岩の割れ目評価結果に基づく、割れ目からマトリクスにかけての3層モデル、(2)割れ目開口部の不均質性（チャンネル構造）に起因するFlow領域とStagnant領域を組合せた流れの不均質場モデル、(3)両者を組合せたモデルを設定し、GoldSimコードを用いて解析を実施した。同図(c)に示すように、割れ目からマトリクス部の1層または3層モデル、Flow領域の割合を2/5または1/5とした条件、さらに割れ目中の地下水流速条件を組合せた解析ケースを設定した。モデルサイズやパラメータは、上記2)で示したグリムゼルの割れ目を対象とした室内試験体系をベースとして設定した。非収着性のトリチウム水（HT0）、収着性のCsとNiを対象に解析を行ったが、ここでは割れ目中の地下水流速が遅いケースでのCsのフラックスの比較を同図(d)に例示する。flow領域が狭く割れ目内流速が大きいほどフラックスが大きくなる傾向（case1→2→3）が確認できる。一方、収着性のCsでは1層モデルに対して3層モデルで、フラックスの立ち上がりに大幅な遅れが認められ、これは主に3層モデルにおける割れ目表層の収着分配係数の効果によるものと考えられる。核種の収着・拡散特性や地下水流速などの条件によってその影響の程度は変わってくるものの、割れ目からマトリクスにかけての3層モデル、割れ目開口部の不均質性に起因するFlow領域とStagnant領域を組合せた流れの不均質場モデルのいずれも割れ目中の核種移行評価に大きく影響を及ぼすことが確認された。ここでの評価は、室内試験の試料サイズや時間スケールをベースとして小規模・短期間を対象としたものであるが、今後、より大きな体系へのアップスケーリング、性能評価の時間スケールまでの影響評価を検討していく必要がある。

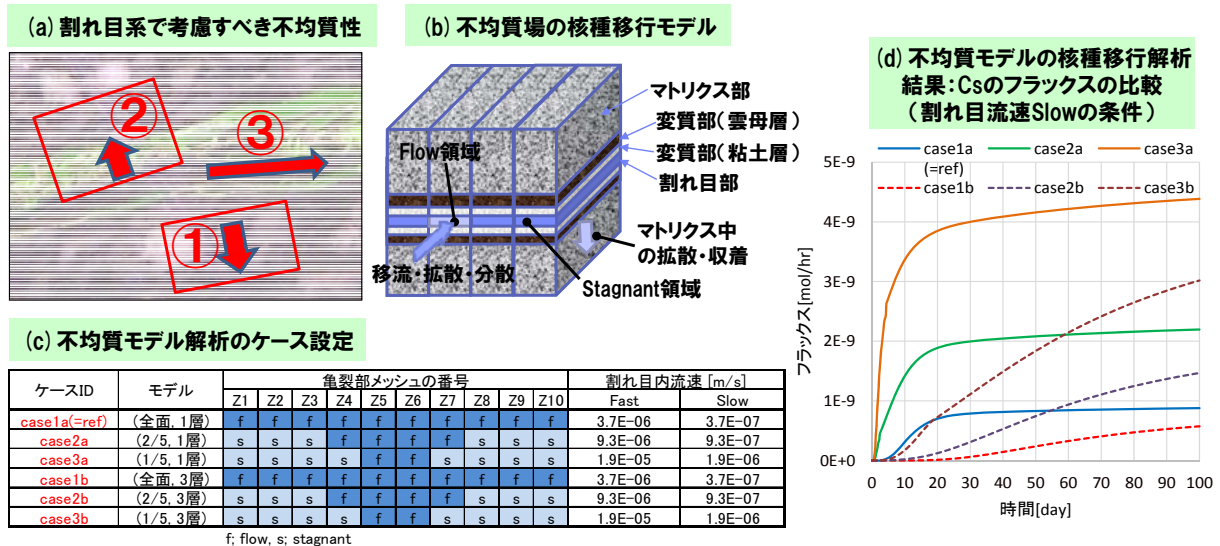


図2. 4. 2-6 不均質場の核種移行モデル(a, b)、解析ケース設定(c)、及びCsの解析結果の例(d)

本プロジェクトでは、結晶質岩を対象とした核種移行評価モデルの高度化と原位置までを含む条件での適用性評価を目指して、スイスのグリムゼル岩（花崗閃緑岩）を主たる対象にモデルや評価手法の開発を進め、スウェーデンのエスポ岩（花崗閃緑岩）やフィンランドのオンカロ岩（片麻岩）を対象にその適用性を確認してきた。ここでは、本プロジェクトで取り組んできたマトリクス部と割れ目部の不均質性等を考慮した評価手法の妥当性の観点から、これらの海外の3つ岩石の特徴や適用性評価の結果を整理・比較した。さらに、わが国の結晶質岩の代表例として瑞浪の花崗岩の特徴を上記海外の岩石の特徴と対比させつつ、ここで開発してきた評価技術のわが国の結晶質岩に対する適用可能性と課題を検討した（平成29年度報告書）。

最初にグリムゼル、エスポ、瑞浪の3つの岩石マトリクス部の特徴と、本プロジェクト等で検討してきた核種移行モデルの特徴や適用性の要点を、図2. 4. 2-7(a)に示す。本プロジェクトで主たる対象としたグリムゼル岩において、陽イオン加速や陰イオン排除効果を確認するとともに、これらが黒雲母の含有率やその配向性等によって影響されることを明らかにし、その定量評価モデルを構築した（上記1）。さらに、同様の考え方がエスポ岩やオンカロ岩へ適用できるかについて検討し、特に、エスポ岩については、多様な核種の原位置拡散データをもとに評価モデルの適用性を確認した（上記3）。図2. 4. 2-7(b)には、既往の報告データを含めて、これら岩石マトリクスに対して取得された中性、陰イオン、陽イオン化学種の実効拡散係数から評価される形状因子（フォーメーションファクター：間隙率及び幾何学因子の積）の比較を示す。いずれの岩石においても、陽イオン加速と陰イオン排除の傾向性が明瞭に確認できる。同図中に示した数字は、陽イオン加速と陰イオン排除の効果を定量化したものであり、陽イオン加速が黒雲母や緑泥石の含有率や配向性によって影響されている可能性が確認できる。瑞浪の花崗岩の場合には、黒雲母や緑泥石の含有率が相対的に低いために、陽イオン加速の効果も小さいものと考えられる。このように黒雲母や緑泥石などの層状ケイ酸塩鉱物の含有率や配向性の理解が、花崗岩等マトリクス中の核種移行モデルの構築において重要となることを確認できた。

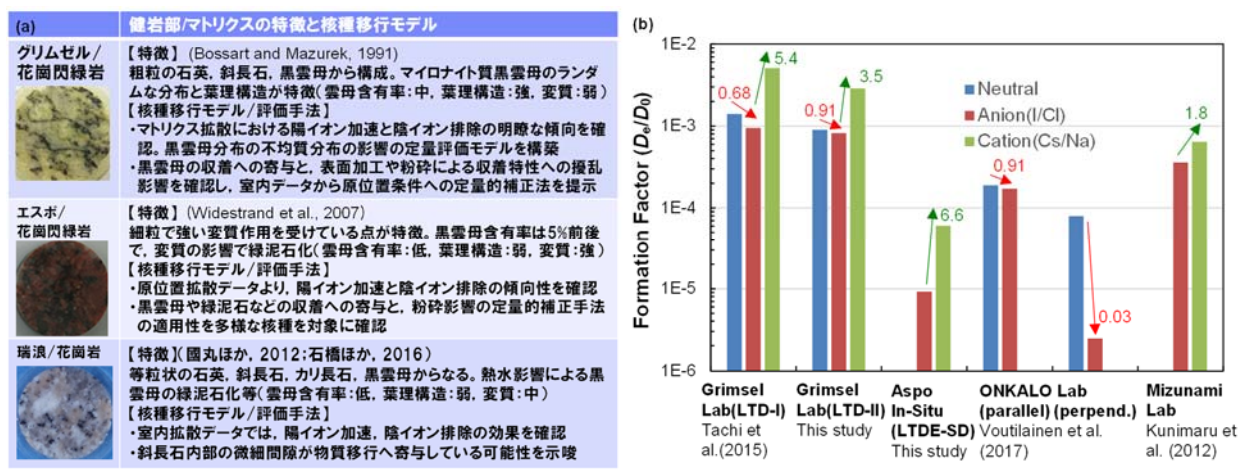


図2. 4. 2-7 グリムゼル、エスポ及び瑞浪の3つのマトリクス岩の特徴と核種移行モデルの適用性
 (a)、岩石中の実効拡散係数から評価される形状因子の比較(b)

一方で、3つの岩石の割れ目表面部(充填物や変質層)の特徴と、本プロジェクト等で検討してきた核種移行モデルの特徴や適用性の要点を図2. 4. 2-8(a)に整理した。本プロジェクトで主たる対象としたグリムゼル岩において、割れ目表面に存在する不均質な鉱物分布層(配向した黒雲母層、風化した高間隙率のバーミキュライト層)の存在を把握し、それらの層を収着・拡散特性を考慮した3層モデルを構築し、その適用性を確認した。さらに、エスポ岩についても、その特徴は異なるものの割れ目最表面の充填鉱物(緑泥石や方解石等)及び変質層を考慮したモデルの適用性を、当該事業で検討した原位置トレーサー試験(LTDE-SDプロジェクト)の解釈を通じて確認した。瑞浪の花崗岩の割れ目の特徴は、國丸ほか(2011)によって、やはり充填鉱物や変質層の存在や特徴によって分類されている。このように分類された割れ目表面を含む試料及び割れ目表面から離れた部分から採取されたマトリクス試料を対象に、陽イオン(Cs)と陰イオン(I)の実効拡散係数が報告されており、ここではそれらのデータに基づき評価される形状因子を比較した(図2. 4. 2-8(b))。同図中に示す数字は、それぞれの試料の陽イオンと陰イオンの形状因子の比をとったものであるが、I割れ目タイプは値自体が他と比べて大きいものの、マトリクス部の比は1~2の範囲の値を示すのに対し、割れ目表面部ではいずれの割れ目タイプでもその値が上昇している。このことは、割れ目充填物や変質層に存在する緑泥石などの層状ケイ酸塩鉱物が特に陽イオンの加速に寄与している可能性を示唆するものである。本事業でグリムゼル岩やエスポ岩で実施したような鉱物や間隙の詳細分析を実施することによって、このようなメカニズムの解明や定量評価モデルの構築が実現できると考えられ、そのような取り組みを通じて、わが国の岩石への適用性を確認していく必要がある。

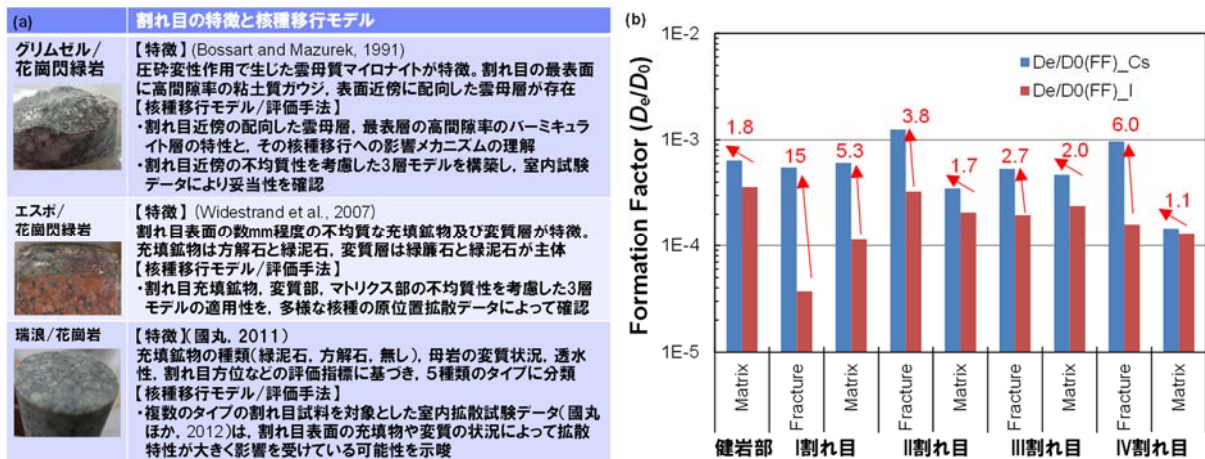


図2. 4. 2-8 グリムゼル、エスポ及び瑞浪の3つの岩石割れ目表面部の特徴と核種移行モデルの適用性(a), 瑞浪の割れ目分類毎の拡散データから評価される形状因子の比較(b)

(2) 堆積岩の評価技術の開発

堆積岩系(粘土質岩)については、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの泥岩(幌延泥岩)を対象としており、これまでの研究に基づけば幌延泥岩においては結晶質岩の場合と同様に割れ目の評価も重要となる。このため、幌延深地層研究センターで実施中のマトリクス部及び割れ目部の双方を対象とした原位置トレーサー試験(日本原子力研究開発機構、2018b)との連携を通じ、原位置試験とも関連付けた室内試験による現象理解とモデル開発を進めるとともに、原位置トレーサー試験の結果に基づくモデルの適用性評価を実施した。さらに、ナチュラルトレーサーを活用した長期時間スケールでの物質移行モデルの評価について検討を行い、一連の成果をもとに性能評価への反映と今後の課題について検討を行った。

1) 堆積岩マトリクス中の核種移行モデルの開発と原位置への適用性の評価

幌延泥岩の健岩部(マトリクス部)の評価については、深地層研究センターのボーリング孔(HDB-6孔)の深度500m付近の稚内層岩石を対象として、先行する受託事業「処分システム化学影響評価高度化開発」(日本原子力研究開発機構、2013d)の成果を継承しつつ、多様な核種の収着・拡散データを室内試験により拡充するとともに、粘土成分を主体としたモデル化手法を構築してきた(Tachi et al., 2011, 2016;平成26年度報告書)。図2. 4. 2-9(a)に示すように、拡散モデルによって、陽イオン加速と陰イオン排除の効果を含む多様な核種の D_e の傾向性($Cs^+ > Ni^{2+} > HTO > I^- > SeO_3^{2-} > Am(CO_3)_2^-$)、およびその塩濃度依存性を概ね表現可能なことを確認した。また、同図(b)に示すように、分配係数 K_d はバッチ収着試験と拡散試験で整合すること、岩石中の粘土鉱物が収着に支配的に寄与することを仮定した加性則モデルによって説明できることなどを確認してきた。

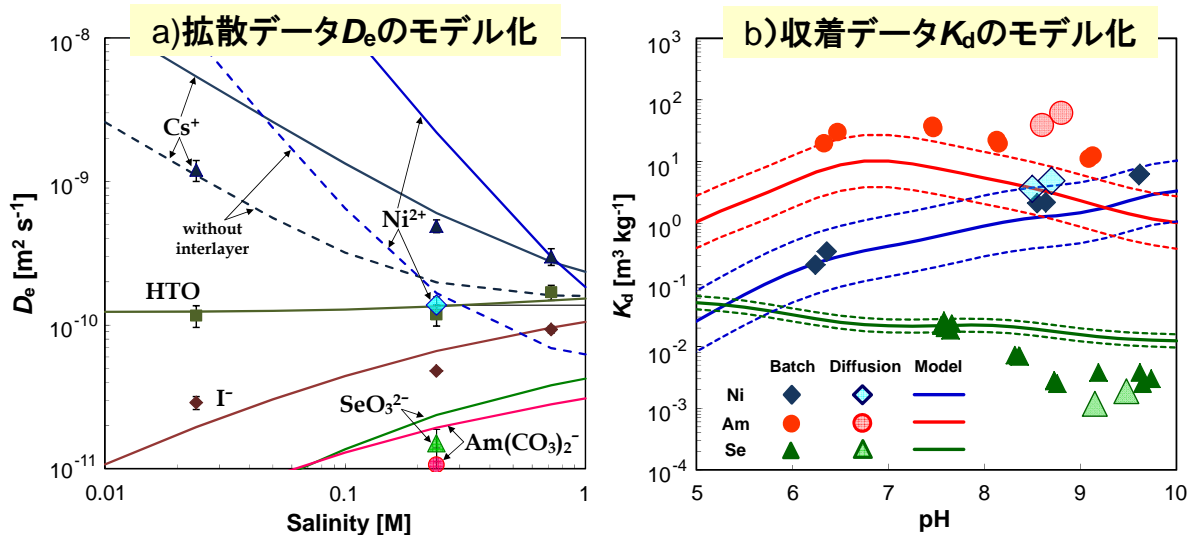


図2.4.2-9 幌延泥岩マトリクス中の拡散(a)及び収着データ(b)への粘土モデルの適用結果

平成27年度からは、幌延深地層研究センターにおける岩石マトリクス部の原位置トレーサー試験と連携することによって、これまでに室内試験で構築してきたマトリクス部の拡散・収着モデルを、実際の原位置環境に対して適用・評価することを目指した取り組みを進めた。具体的には、幌延の350m調査坑道におけるマトリクス部を対象とした原位置トレーサー試験と並行して、原位置試験場所から採取したコア試料を用いた室内拡散データの取得、原位置トレーサー試験後の試料中の濃度プロファイル分析を実施しつつ、原位置トレーサー試験結果の解析を行い、室内と原位置とのデータの比較・分析、モデルの適用性評価等を実施した。なお、原位置試験においては、放射性トレーサーを利用できない状況も考慮して、原位置条件でいかに信頼性の高いデータを取得し、処分条件に適用可能な核種移行モデルとして確証していくかといった視点が重要な課題であり、これらの課題への対応も念頭に取り組みを進めた（平成27～29年度報告書）。

マトリクス部の原位置拡散試験は、幌延深地層研究センターの350m調査坑道の試験孔(D05孔-孔径76mm)を対象とし、図2.4.2-10(a)に示すような体系で、 H_2O （重水）、 I 、 Mo 、 Cs 、 Sr 、 Co 、 Eu 等の安定同位体トレーサーを含む模擬地下水を循環させ、トレーサー濃度の減衰データを約11カ月間取得したうえで、オーバーコア岩石中のトレーサー分布を取得した（同図(b)）。D05孔内のトレーサー減衰データと岩石のトレーサー濃度プロファイルについては、同図(c)に Cs と Sr の結果を例示するように、各トレーサーの収着特性等に対応した良好なデータが確認された。各トレーサーの減衰データ及び濃度プロファイルを対象として、1次元の境界条件が変動する体系での拡散方程式の厳密解を同時フィッティングすることによって、実効拡散係数(D_e)及び収着分配係数(K_d)を導出した。さらに、同様の1次元系及び実際の原位置試験の円筒系での解析をGoldSimコードによって実施することで、同図(c)で比較するように、この解析体系の違いによる影響はわずかであり、1次元の解析の妥当性を確認した。また、安定同位体トレーサーを用いた条件でのデータ取得の有効性を確認するため、バックグラウンド(BG)濃度が初期に存在する系での解析を行い、最もBG濃度の影響が大きい Sr の場合でも、その影響はわずかであることを確認した（同図(d)）。

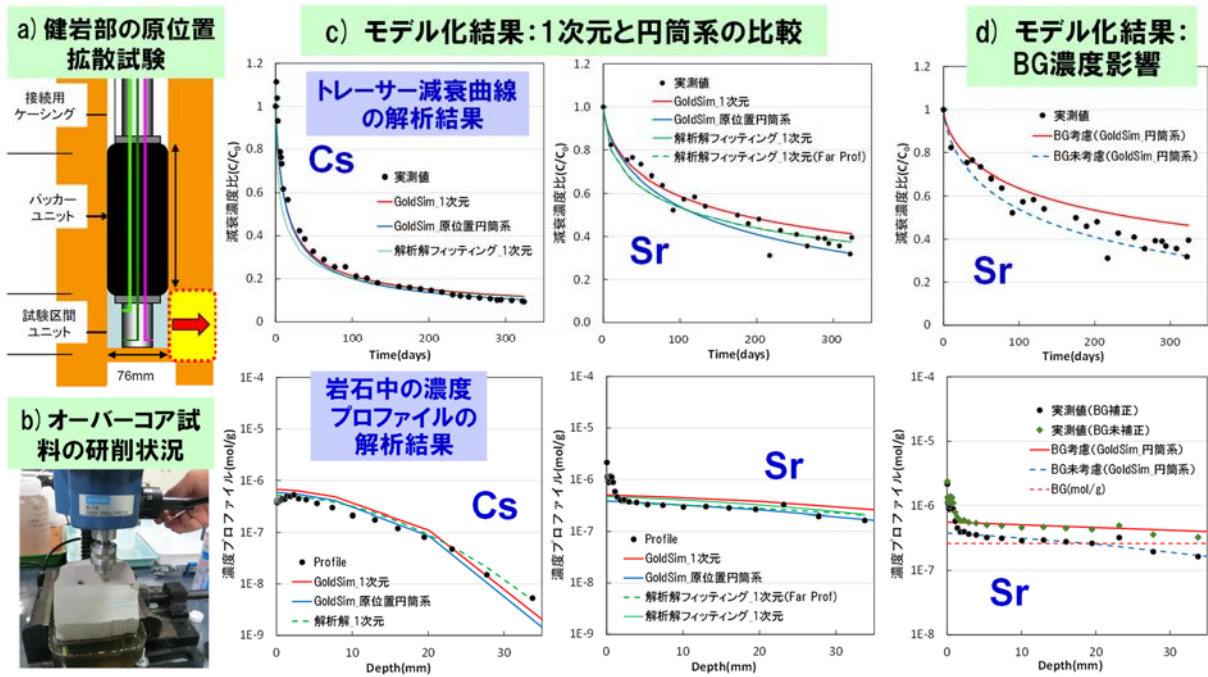


図2.4.2-10 幌延岩のマトリクス部を対象とした原位置拡散試験 (D05孔) の試験体系 (a)、オーバーコア試料の分析状況 (b)、及び解析結果 (c: 1次元と円筒系の比較、d: バックグラウンド濃度の影響評価)

原位置拡散試験で得られた幌延泥岩マトリクス中の多様な元素の実効拡散係数及び吸着分配係数データについて、D-05試料を用いた室内拡散試験結果、及び既往の報告事例 (HDB-6孔、深度500m付近の試料を対象) との比較を図2.4.2-11に示す。図中の左側及び中央に示すグラフが、今回の05孔における原位置拡散試験及び室内拡散試験によって得られたデータセットである。これに対して、同図右側のグラフは、HDB-6孔の深度500m付近の泥岩コアを対象に、主に放射性トレーサーを用いて取得されたデータである (Tachi et al., 2011; Tachi et al., 2016)。これらの3つのデータセットを比較するうえでは、間隙率や模擬地下水のイオン強度の若干の差異に加え、原位置と室内試験での地下水のpH条件の差異に特に留意する必要がある。まず、比較的単純なイオンを比較すると、まず、陰イオン種 (I, Mo, Se) は電荷に応じた陰イオン排除の効果が整合的に確認できる。一方、陽イオンであるCsについては、拡散係数の陽イオン加速の効果に加え、吸着分配係数の値についても、3つの試験で概ね整合する結果が得られた。ここで、CsとIの拡散係数を原位置と室内試験とで比較すると、いずれも原位置の方が若干低くなっており、この差異は原位置での岩圧による影響によるものと推定される。一方で、Ni/CoやAm/Euについては、その関係性は複雑であり、拡散係数の変動については条件による支配的な化学種や電荷の差異、吸着分配係数の変動については原位置と室内試験におけるpHの差異に起因する化学種及び吸着特性の変化による影響と考えられる。このような原位置と室内試験のデータセットの比較を通じて、今回原位置で取得した拡散・吸着データの妥当性を確認すると同時に、原位置におけるトレーサー濃度設定等に起因する課題、原位置と室内試験での条件の差異に起因する課題等も考慮した取得データの妥当性評価やパラメータ設定の必要性を確認した。

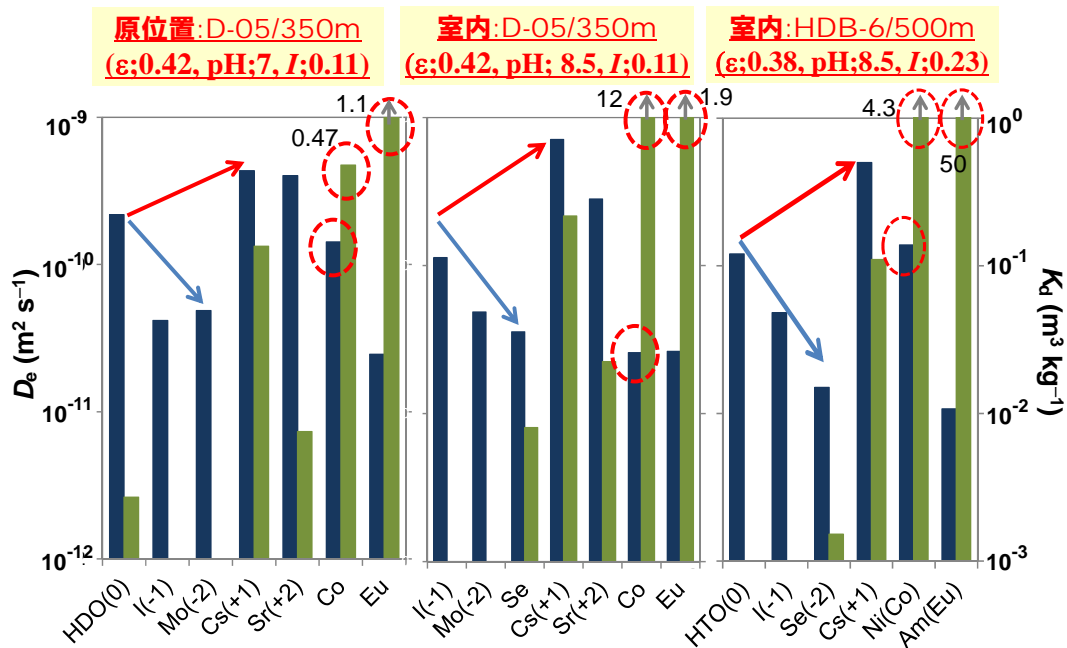


図2. 4. 2-11 幌延の泥岩マトリクス中の原位置及び室内拡散試験で得られたトレーサーの実効拡散係数（青色バー）と収着分配係数（緑色バー）の比較

2) 堆積岩割れ目中の核種移行モデルの開発と原位置への適用性の評価

単一割れ目を対象とした原位置トレーサー試験に先駆けて、図2. 4. 2-3に示した花崗岩の試験体系と同様のアプローチで、幌延泥岩の割れ目中の核種移行特性の室内試験による把握・評価に取り組んだ（平成26, 27年度報告書）。幌延深地層研究計画において掘削された既存のボーリングコアから、天然の単一割れ目を含む保存状態の良好な試料として、SAB-2孔の深度288-289mの稚内層（珪質泥岩）コアを採取し、割れ目部とマトリクス部の鉱物、間隙、収着・拡散等の一連の特性分析、割れ目を含む円柱状の試料を用いた通液試験を、H₂O（重水）、I、Se、Cs等をトレーサーとして実施した。室内拡散試験とバッチ法収着試験の結果、実効拡散係数における陽イオン加速と陰イオン排除の効果、拡散試験とバッチ試験での収着分配係数などが確認されたほか、割れ目部とマトリクス部では拡散・収着特性に顕著な差異はないことを確認した。割れ目中の通液試験において得られたトレーサーの破過データ（図2. 4. 2-12(b)）及び試験後の割れ目からマトリクスにかけての濃度プロファイル（同図(c)）に対して、平行平板モデルと実験結果に基づく収着・拡散パラメータとの組み合わせた解析では再現できず、割れ目中の不均質な流れ場を考慮したモデル化手法を構築した（平成27年度報告書）。図2. 4. 2-12(a)に示すようなモデル形状を流れの向きに対して8分割することで流れる領域を選択できるようにモデル化を行い、全面、1/2、1/4、1/8を流れるモデルを作成し、選択的な流れの影響を考慮した解析を行った。同図(b)及び(c)に示すような、破過曲線及び濃度プロファイルの解析結果と実測データと比較することによって、流路を1/8と設定したモデルが、実測データ全体に近づく傾向を示した。今後、このような不均質な流れ場を定量的に評価するための根拠データの取得を含めて、不均質系モデルの改良や妥当性の確認を進めるとともに、単一割れ目を対象とした原位置トレーサー試験の結果のモデル化においても、その適用性を確認していく必要がある。

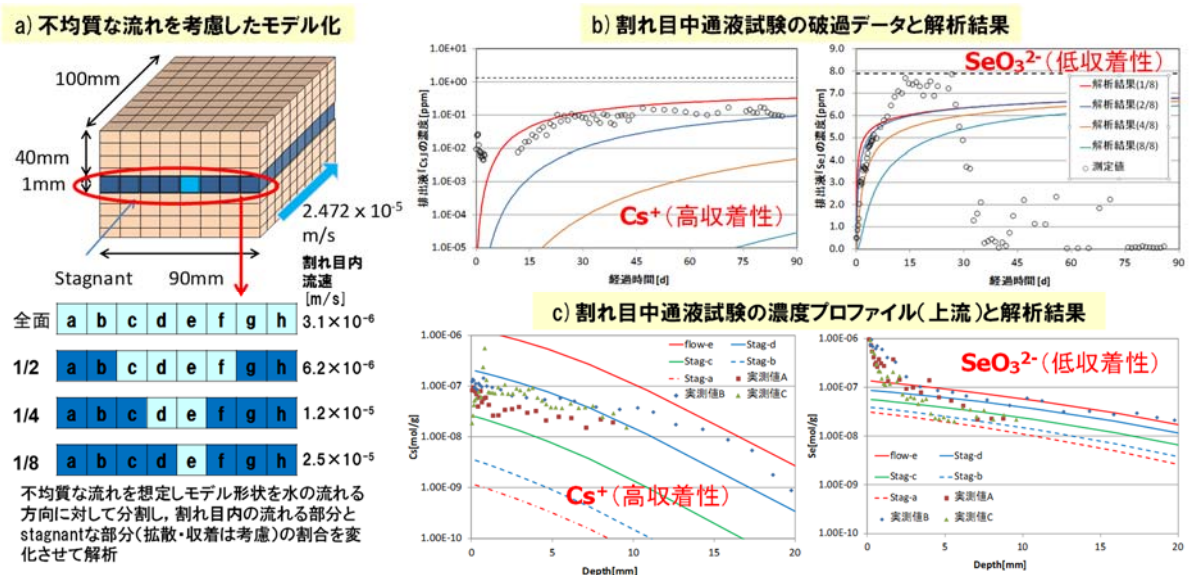


図2.4.2-12 幌延泥岩の単一割れ目の不均質な流れ場を考慮したモデル概念と解析結果

さらに、天然の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験が、幌延深地層研究センターの深度350 mの調査坑道において、図2.4.2-13(a)に示すような複数の割れ目が存在する割れ目帯領域を対象に、2本の試錐孔を利用した孔間方式で実施された(武田ほか, 2017)。注入孔から揚水孔に一定流量(30mL/min)で多様なトレーサー(Cs, Co, Mo, I, 重水, ウラニン)を含んだ模擬地下水が通液され、トレーサーの破過曲線が取得された(日本原子力研究開発機構, 2018b)。最初にトレーサー溶液が注水孔に10分間のみ投入され(ポイントソース試験)、さらに同様の試験体系において、注水孔のトレーサー濃度が常に一定の条件でトレーサー溶液を投入し続けるトレーサー試験が実施された(コンスタントソース試験)。この試験終了後に、注水孔付近の割れ目の状態の観察及び孔間の割れ目中でのトレーサーの移行経路を把握するため、注水孔側部周辺及び孔間からコア試料を採取した。本事業では、採取されたコア試料のX線CT分析、割れ目表面のトレーサー元素の分布を行うとともに、試験結果の解析評価を検討した(平成29年度報告書)。

注水孔付近の割れ目の状態観察のため、注水孔を含む採取コア試料を対象にX線CT像を取得し、注水孔付近の岩盤にはいくつかの割れ目が存在していること、割れ目の開口幅は1mm程度であることを確認した。さらに、注水孔表面及び割れ目断面のトレーサー濃度分析を行い、図2.4.2-13(b)に示すようなCs, Co及びEuの濃度分布を把握した。このような分析データを取得したものの、移行経路となる割れ目や連続性などのトレーサーの移行経路に関する情報は限られるため、ここでは、まず単純な平行平板モデルと均質な流れ場を仮定したモデル解析を検討した。ここで割れ目については、流路長を150cm、流路幅(割れ目幅)を10cm、開口幅を1mmに設定し、その流路面積を変動させ、一方、マトリクス拡散と収着に関する実効拡散係数や収着分配係数のパラメータはこれまでに幌延のマトリクス岩を対象に取得されたデータをもとに設定を行った。ポイントソース試験のウラニンの破過データの再現性から流路面積を設定し、さらに、その条件でのコンスタントソースのデータの再現性を確認した(図2.4.2-13(c), (d))。ウラニンとMoの結果をみると破過挙動を過大評価しており、これはポイントソースでの解析と実測のずれと整合的である。一方で、Csについては実測データで認められるような立ち上がりを確認できない。ここで、Csの収着分配係数についてはCs濃度依存性を考慮して、収着分配係数を1/2及び1/10に設定した解析を実

施したところ、1/10の条件で実測データと同程度の破過が得られる結果となった。今後、コア情報等に基づく割れ目の空間分布、それらの連続性、流れの不均質性を考慮した、より現実的な解析モデルについて検討するとともに、上記の割れ目表面のトレーサー分析データ等をもとに、モデルの妥当性を確認していく必要がある。

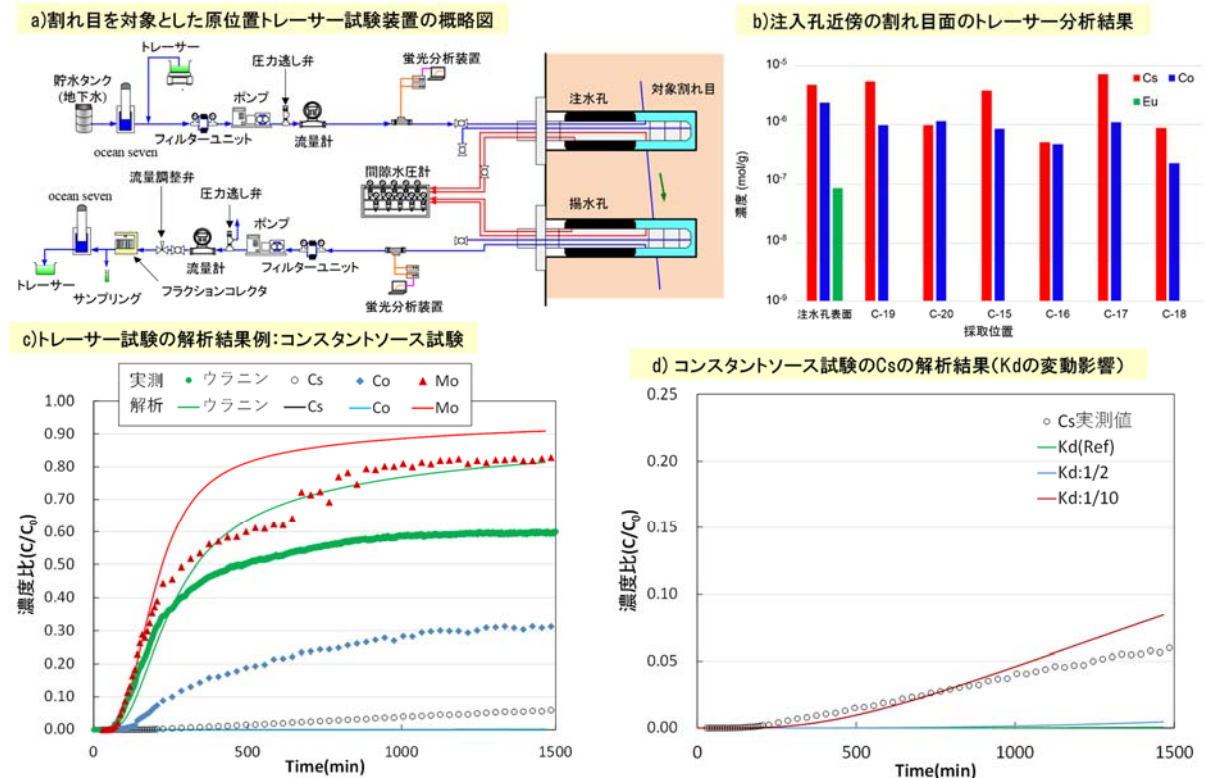


図2.4.2-13 幌延URLにおける割れ目を対象としたトレーサー試験結果

3) ナチュラルトレーサー評価検討と課題

粘土質堆積岩は、透水性が極めて低い拡散バリアとしての性能が期待されており、諸外国でもこれら岩石における長期にわたる拡散バリア性能の立証が中心的な課題となっている。本検討では、幌延の堆積岩を一例に、地下水（間隙水）中に含まれる非吸着性（弱吸着性）の元素濃度プロファイル（ナチュラルトレーサープロファイル；以下「NTプロファイル」と略す）をもとに、NTプロファイルの形成過程の解釈を試み、主要な物質移行プロセスを推定することを目標とした。

検討にあたっては、諸外国における類似検討例（CLAYTRACプロジェクト；Mazurek et al.、2009）でのアプローチを参考とし、初期／境界条件の変化に影響を与える①天然事象（隆起・侵食）に関わる既往情報や②古水理地質学的情報の整理、③幌延の地下施設周辺における複数のボーリング孔を対象にした深度方向でのNTデータの整理と各ボーリング孔におけるNTプロファイルの明確化、④NTプロファイル解釈のための概念モデルの構築、⑤拡散または移流・拡散モデルによる解析結果と実測値の比較に基づく主要な物質移行プロセスの推定、の順に評価を進めた。

平成26年度は、幌延の堆積岩を対象とした検討を進めるにあたり、関連する既往の研究例として、岩石コア中の間隙水の安定同位体比に着目した研究（寺本ほか、2006）や地下水年代測定に着目した研究（中田・長谷川、2010）のレビューを行いつつ、既往の知見やデータの整理を行った（平成26年度報告書）。平成27年度は、NTプロファイルの形成過程の解釈を進めるためのアプ

ローチを具体化すると共に、モデル化に関わる予察的な検討を行った（平成27年度報告書）。平成28年度は、平成27年度の子察検討結果を踏まえつつ、具体的な評価例として、幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）で掘削されたボーリング孔の1つであるHDB-1孔を対象に隆起・侵食の影響も考慮しつつ、NTプロファイルの評価を行った（平成28年度報告書）。平成29年度は、HDB-1孔とはNTプロファイルの形状が異なるHDB-3孔を対象にした評価を進めると共に、幌延の堆積岩を一例とした検討の結果として、長期（～百万年）・数百メートルといった時空間スケールでの主要な物質移行プロセスの推定に関わる現状や今後の課題を整理した（平成29年度報告書）。

本検討により、幌延の堆積岩中における非収着性（弱収着性）元素の主要な物質移行プロセスとしては、基本的に移流・拡散が支配的であると推察された。図2.4.2-14に、HDB-1孔およびHDB-3孔を対象にした場合の隆起・侵食の影響を考慮した移流・拡散モデルによるNTプロファイルの評価例を示す。この評価では、移流・拡散期間の最大として1Maを想定した場合の結果であるが、評価結果の解釈にあたり、地層の透水性の仮定によっては0.1～1Ma程度の幅が考えられた。現状の評価では、地層（フォーメーション）スケールでの透水性の確からしさや、天水の浸透開始時期に関する不確実性が大きいといった課題はあるものの、諸外国での先行事例と同様な評価が可能な解析技術を整備することができた。本検討で試みた室内や原位置試験で対象となる数cm～数mスケールでの評価を、地層処分の性能評価における天然バリアで対象となるような数百mのフォーメーションスケールでの評価に反映することを念頭にした取り組みは、時空間スケールを考慮した物質移行プロセスの評価を確認する上で不可欠である。我が国においては、このような試みは少ないが、地層中における非収着性（弱収着性）元素の長期的な移行挙動に関わるナチュラルアナログの観点でも重要である。

なお、本検討では、室内や原位置試験で得られたパラメータ（透水係数、拡散係数）をもとに、フォーメーションスケールでの物質移行プロセスの検討を行ったが、用いるパラメータのスケール効果による影響に関わる評価については、今後の課題である。また、本事業における評価では、各ボーリング孔における鉛直方向での流れ（物質移行）しか考慮していないが、幌延の地下施設を含む比較的広域な領域を対象にした場合、大局的には、東側から西側への地下水流動が支配的であることが推察されている（太田ほか、2007）。さらに、地質環境の長期変動性を考慮する場合、氷期・間氷期における動水勾配の違いによる陸域部分での地下水流動への影響も示唆される（日本原子力研究開発機構、2016b）。今後、幌延におけるナチュラルトレーサー評価の信頼度を高める上では、現実的な水理場の評価結果も踏まえた検討も必要になる。

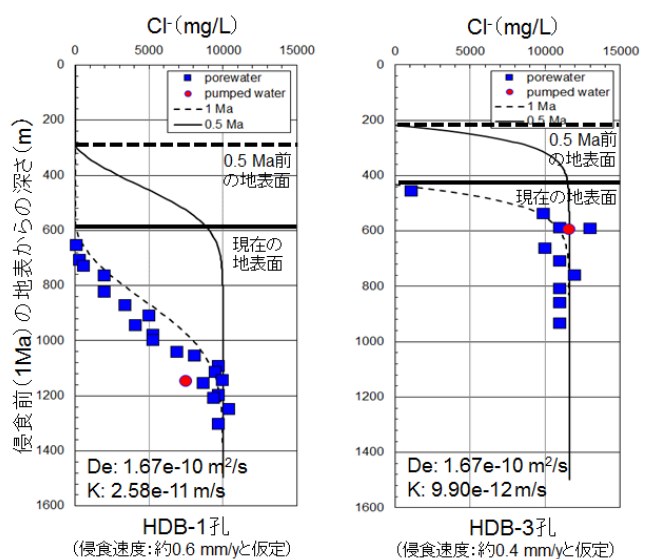


図 2.4.2-14 隆起・侵食の影響を考慮した移流・拡散モデルによる評価の一例

2.4.3 有機物・微生物等の影響評価手法の開発

(1) 有機物影響評価技術の開発

本タスクは、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性に影響を及ぼす可能性のある有機物の一つとして、地下水中に溶存する天然有機物に着目し、その核種移行に対する影響を定量評価するための技術開発を目的に計画されたものである。地下水に溶存する天然有機物には、カルボキシル基や水酸基等の酸性官能基を有するものがあり、金属イオンと安定な錯体を生成することが出来るものが存在する (Thurman, 1985)。地層処分システムにおいて、核種がそのような有機物と錯生成すると、地下水に対する核種の溶解度が上昇するとともに、母岩への核種の収着・拡散が抑制され、核種移行が促進する可能性がある。この核種移行の促進に対する有機物の影響は、コロイドの影響評価と同様に、Millerら (2000) のダイアグラム (図2.4.3-1) に従って概括的に評価することができる。日本原子力研究開発機構 (平成25年度報告書；平成26年度報告書) は、このダイアグラムに従って天然有機物による核種移行への影響を概括的に評価し、処分システムにおいて有機物による影響が顕在化する可能性を指摘した。この結果を踏まえ、より現実的な影響評価を実施するため、既存の錯生成に係る知見や技術をもとに評価対象核種の有機物への分配係数を整備し、これらの値を用いた性能評価解析を保守的な条件で試行した (平成27年度報告書)。その結果、より現実的な影響評価においても天然有機物による影響が顕在化する可能性が示された。しかし、解析に用いた分配係数には不確実性がある他、過度に保守的な条件を設定して解析を行っている場合があるなど、用いた定量評価手法には課題があることを同時に指摘した。



図2.4.3-1 有機物影響評価ダイアグラム

信頼性の高い影響評価を実現させるには、より現実的な評価手法の整備が不可欠であり、以下のモデル/パラメータデータベースの開発に取り組む必要がある。本事業では、「a. 天然有機物の錯生成モデル/パラメータの開発」が影響評価の基盤技術となることを踏まえ、「酸化数がⅢ価・Ⅳ価核種に対するモデル/パラメータの信頼性の向上」と「天然有機配位子としての腐植物質の代表性の確認」について優先的に着手した。

a. 天然有機物の錯生成モデル/パラメータの開発

- ・Ⅲ価・Ⅳ価核種に対するモデル/パラメータの信頼性の向上
- ・錯生成モデルパラメータデータベースの拡充 (Zr(IV), Nb(V), Pd(II), Sn(IV)等)
- ・天然有機配位子としての腐植物質の代表性の確認
- ・核種-有機物錯生成における瞬時/可逆性の把握

b. 核種-有機物-母岩三元系における収着・拡散モデルの開発

- ・母岩に対する有機物の収脱着挙動の把握 (有機物種類、核種の種類、母岩の種類)
- ・フィルトレーション効果の把握

1) 天然有機物の錯生成モデル／パラメータの開発

これまでに、日本原子力研究開発機構（2013c）は、多様な地下水条件での錯生成評価に用いるモデルとして、NICA-Donnanモデル（式2.4.3-1）を暫定的に選定している。このモデルは、金属イオンと天然有機物との相互作用に特徴的な錯生成反応の不均一性（非線形性）と静電相互作用を考慮することで、熱力学モデルに類似した評価を可能としており（Kinniburgh et al., 1996; Benedetti et al., 1996; Koopal et al., 2005）、様々なイオンが共存する地下水中での核種と天然有機物との錯生成を定量的に評価できる可能性がある。しかし、NICA-Donnanモデルは、錯生成試験から取得したデータセットへのモデルの当てはめ（フィッティング）によってモデルパラメータを設定することから、フィッティングに用いたデータセットから外れる条件（例えば、異なる有機物、高いpH条件、低い核種濃度など）での錯生成評価に対しては、評価の信頼性を確保できないという課題がある。

$$Q_i = \frac{n_{i1}}{n_{H1}} \cdot Q_{\max 1, H} \cdot \frac{(\tilde{K}_{i1} C_i)^{n_{i1}}}{\sum_i (\tilde{K}_{i1} C_i)^{n_{i1}}} \cdot \frac{\left[\sum_i (\tilde{K}_{i1} C_i)^{n_{i1}} \right]^{p_1}}{1 + \left[\sum_i (\tilde{K}_{i1} C_i)^{n_{i1}} \right]^{p_1}} + \frac{n_{i2}}{n_{H2}} \cdot Q_{\max 2, H} \cdot \frac{(\tilde{K}_{i2} C_i)^{n_{i2}}}{\sum_i (\tilde{K}_{i2} C_i)^{n_{i2}}} \cdot \frac{\left[\sum_i (\tilde{K}_{i2} C_i)^{n_{i2}} \right]^{p_2}}{1 + \left[\sum_i (\tilde{K}_{i2} C_i)^{n_{i2}} \right]^{p_2}} \quad (\text{式2.4.3-1})$$

Q_i	: 有機物に結合した金属イオン <i>i</i> の濃度 [mol g ⁻¹]
C_i	: 遊離体の金属イオン濃度 [mol dm ⁻³]
$Q_{\max 1, H}$: 結合サイト1の濃度 [meq g ⁻¹]
$Q_{\max 2, H}$: 結合サイト2の濃度 [meq g ⁻¹]
$\log K_{i1}$: 金属イオン <i>i</i> の結合サイト1に対する親和定数（結合定数）
$\log K_{i2}$: 金属イオン <i>i</i> の結合サイト2に対する親和定数（結合定数）
n_{H1}	: H+結合サイト1の不均一パラメータ
n_{H2}	: H+結合サイト2の不均一パラメータ
n_{i1}	: 金属イオン <i>i</i> に対する結合サイト1の不均一パラメータ
n_{i2}	: 金属イオン <i>i</i> に対する結合サイト2の不均一パラメータ
p_1	: 結合サイト1の親和性分布幅
p_2	: 結合サイト2の親和性分布幅

本タスクでは、幌延深地層研究センターの深部地下水に溶存する有機物の一分画である腐植物質（フミン酸およびフルボ酸）を対象に、III・IV価核種との錯生成データの取得とそのデータへのNICA-Donnanモデルの適用確認から、既存のモデルパラメータの課題を抽出するとともに、モデルの高度化とパラメータの最適化を通して、より現実的な地下水中の溶存腐植物質の錯生成モデル／パラメータを整備した。また、整備したモデル／パラメータを、Euと地下水に溶存する未分画有機物（腐植物質と非腐植物質から構成）との錯生成データへ適用し、未分画有機物の一分画に過ぎない腐植物質の錯生成モデル／パラメータの有効性を提示した。

① III 価・IV 価核種と腐植物質との錯生成データへのNICA-Donnanモデルの適用

溶媒抽出法（Kubota et al., 2002）を用いて、初期濃度 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ mol dm⁻³の低濃度のEuと分離・精製した腐植物質との錯生成データを様々なpHとイオン強度条件で取得し、それへのNICA-Donnanモデルの適用性を調査した（平成26年度報告書；平成28年度報告書；平成29年度報告

書)。その結果、NICA-Donnanモデルは、Aldrich社製フミン酸 (AHA) の実験値を大凡再現する一方で、深地層研究センターの地下水から分離・生成したフミン酸 (HHA) については、このフミン酸に固有のモデルパラメータを導入した場合においても、実験値を十分再現できないことを確認した (図 2.4.3-2a)。実験値とモデルが大きく乖離する低いローディング条件 (腐植物質の有効結合サイト濃度とEu濃度との対数比: $\log(C_{Eu}/C_R\alpha)$) について、二つの結合サイトの寄与をモデル解析した結果、AHAでは、カルボキシル基サイト (サイト1) との結合が優位であるのに対し、HHAでは、水酸基サイト (サイト2) への結合が優位になっていることを見出した。また、非水滴定により評価した水酸基サイトのプロトン交換容量と本調査で用いたNICA-Donnanモデルパラメータの $Q_{\max 2, H}$ (水系滴定から評価した水酸基のプロトン交換容量) とは良く一致し、HHAのH⁺結合パラメータは適切に評価されていることを確認した。一方、HHAに対するEuの結合パラメータは、一つのローディング条件で取得した錯生成データへのフィッティングから設定しており、錯生成の濃度依存性が考慮されていない (日本原子力研究開発機構, 2013c)。従って、EuとHHAとの錯生成をNICA-Donnanモデルが説明できないのは、サイト2に対するEuの結合パラメータ ($\log K_{2, Eu}, \Omega_{2, Eu}$) が、錯生成の濃度依存性に対して十分に最適化されていないためであると考えられた。以上の課題は、幌延深地層研究センターの同地下水から分離・精製したフルボ酸 (HFA) についても確認された (図 2.4.3-2a)。従って、より現実的なIII価核種のパラメータの設定には、pHやイオン強度とともに、錯生成の濃度依存性を考慮してパラメータを最適化する必要があることを指摘した。

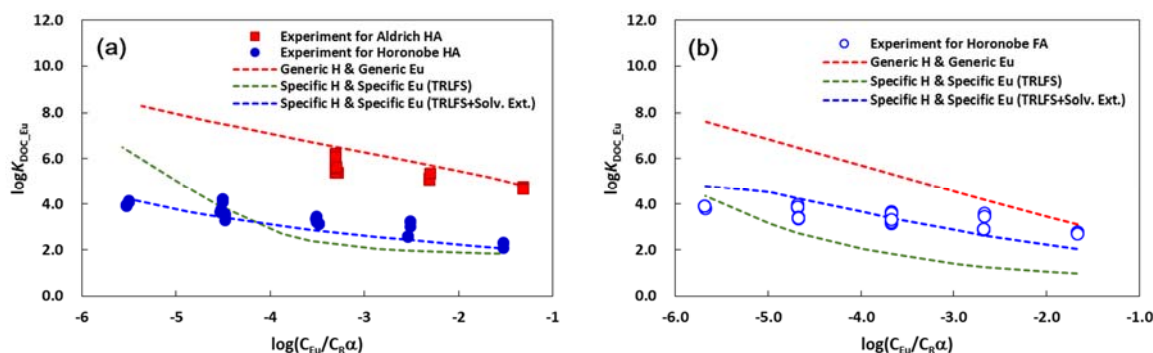


図 2.4.3-2 腐植物質 (a, フミン酸; b, フルボ酸) に対するEuのローディングレベル ($\log(C_{Eu}/C_R\alpha)$) と分配係数 ($\log K_{Doc}$) との関係へのNICA-Donnanモデルの適用
(平成26年度報告書; 平成27年度報告書; 平成28年度報告書; 平成29年度報告書)

一方、ThをはじめとするIV価核種については、既存の条件付錯生成定数 ($\beta_{\alpha, Th}$) から算出した分配係数と既存の一般化パラメータ (Milne et al., 2001, 2003) を用いるNICA-Donnanモデルから算出した分配係数とを比較した結果、NICA-Donnanモデルから算出した分配係数の値は文献値と比べて約 10^{10} 倍高いことを確認し、解析に用いたThのNICA-Donnanモデルパラメータ ($\log K_{i, Th}, m_{i, Th}$) が過大評価されていることを指摘した (平成26年度報告書)。このThのパラメータは、第一加水分解定数 ($\log \beta_{OH}$) との線形自由エネルギー相関 (LFER) を用いて間接的に算出された値であることから、実験を通して取得した錯生成データへの直接フィッティングから、現実的なパラメータを整備する必要があることを指摘した。

② NICA-Donnan モデルパラメータの整備

モデルの適用確認を通して抽出した課題へ対応するため、Euと幌延の地下水中の腐植物質との錯生成おける濃度依存性データへのモデルフィッティング、ZrおよびThの錯生成データの取得とそれへのモデルフィッティングから、III価・IV価核種に対するパラメータを最適化した。具体的には、時間分解レーザー分光法（TRLFS法）を用いて取得したpH・イオン強度依存性のEuとHHAあるいはHFAとの錯生成データに加えて、本タスクで溶媒抽出法を用いて取得した濃度依存性の錯生成データ（結合等温線データ）へのモデルの同時フィッティングから（図2.4.3-2（青色点線））、Euのモデルパラメータを最適化した（表2.4.3-1）。また、ZrとHHAとのモデルパラメータは、新たに開発したFFF-ICPMS法を用いて取得した錯生成データへのモデルフィッティングから整備し、Thのモデルパラメータについては、文献（Sasaki et al., 2012）により報告されたTh⁴⁺とAHAとの錯生成データ（結合等温線データ）を最適化した（表2.4.3-1）。以上の最適化を通して、本タスクでは、III価・IV価核種に対して、より現実的なNICA-Donnanモデルパラメータを整備した。ただし、IV価核種については、加水分解種が腐植物質と結合する可能性があることから、錯生成機構の把握を通してのモデルの高度化やパラメータの最適化が必要と考えられた。

表2.4.3-1 本事業により整備した幌延の地下研究施設の地下水から分離・精製した腐植物質およびAldrich社製フミン酸のNICA-Donnanモデルパラメータ

幌延深地層研究センターの深部地下水から分離・精製したフルボ酸（60.2 %C）					出典
Substrate parameters	$b, 0.87; Q_{\max1,H}, 5.64; Q_{\max2,H}, 4.09; p_1, 1; p_2, 0.27$				
Ion-specific parameters	$\log K_1$	n_1	$\log K_2$	n_2	
H ⁺	3.63	1	10.48	1	Saito et al., 2015
Cu ²⁺	1.16	1	15.05	0.29	Saito et al., 2015
Eu ³⁺	-0.06	0.54	10.17	0.40	平成 29 年度報告書
幌延深地層研究センターの深部地下水から分離・精製したフミン酸（62.3 %C）					出典
Substrate parameters	$b, 0.81; Q_{\max1,H}, 4.38; Q_{\max2,H}, 4.44; p_1, 1; p_2, 0.36$				
Ion-specific parameters	$\log K_1$	n_1	$\log K_2$	n_2	
H ⁺	3.74	0.82	10.62	1	Saito et al., 2015
Cu ²⁺	1.32	1	14.43	0.28	Saito et al., 2015
Cd ²⁺	0.48	0.55	8.44	0.32	日本原子力研究開発機構, 2013c
Eu ³⁺	0.95	0.72	11.53	0.41	平成 28 年度報告書
Zr ⁴⁺	8.20	0.28	n.d.	n.d.	平成 29 年度報告書
精製した Aldrich 社製フミン酸（52.6 %C）					出典
Substrate parameters	$b, 0.63; Q_{\max1,H}, 2.99; Q_{\max2,H}, 2.66; p_1, 0.89; p_2, 0.38$				
Ion-specific parameters	$\log K_1$	n_1	$\log K_2$	n_2	
H ⁺	3.53	0.66	7.95	0.66	Saito et al., 2004
Cu ²⁺	2.26	0.42	6.96	0.47	Saito et al., 2004
Cd ²⁺	1.42	0.82	3.17	0.43	Koopal et al., 2005
UO ₂ ²⁺	3.84	0.49	6.92	0.39	Saito et al., 2004
Eu ³⁺	2.73	0.62	4.41	0.33	平成 28 年度報告書
Th ⁴⁺	3.16	0.46	6.37	0.28	平成 28 年度報告書

一方、本タスクでは、HHAおよびAHAについて、III価・IV価核種のモデルパラメータを整備したことにより、これまでに整備したII価の金属イオンのパラメータと合わせて、II～IV価核種の一連のNICA-Donnanモデルパラメータの整備を達成した。この成果により、金属イオンの結合パラメータ ($n_i \log K_i$ および n_i) と第1加水分解定数 ($\log K_{OH}$) との線形自由エネルギー相関 (LFER) を構築することが可能となり、これを用いた評価対象核種や地下水中の共存金属イオンの一連のNICA-Donnanモデルパラメータの算出が可能となる。ただし、本タスクでは、限られた数の金属イオンを対象にLFERを構築していることから、良好な相関性が得られていない。今後、モデルパラメータを拡充することにより、構築したLFERの信頼性を向上させる必要がある。

a. 幌延の地下研究施設の地下水から分離・精製したフミン酸の LFER

サイト 1: $n_1 \log K_1 = 0.185 \log K_{OH} + 2.277$, $R^2 = 0.8813$; $n_1 = -0.042 \log K_{OH} + 0.380$, $R^2 = 0.388$

サイト 2: $n_2 \log K_2 = 0.642 \log K_{OH} + 9.140$, $R^2 = 0.9559$; $n_2 = 0.014 \log K_{OH} + 0.455$, $R^2 = 0.1201$

b. 精製した Aldrich 社製フミン酸の LFER

サイト 1: $n_1 \log K_1 = 0.060 \log K_{OH} + 1.817$, $R^2 = 0.1985$; $n_1 = -0.041 \log K_{OH} + 0.293$, $R^2 = 0.5193$

サイト 2: $n_2 \log K_2 = 0.044 \log K_{OH} + 2.403$, $R^2 = 0.0225$; $n_2 = -0.019 \log K_{OH} + 0.253$, $R^2 = 0.5218$

③ 深部地下水中の有機配位子としての腐植物質の代表性

深部地下水には、腐植物質だけでなく、その他の有機物も溶存しており、有機物配位子として機能する可能性がある。これまでに開発した錯生成モデル/パラメータは、分離・精製した腐植物質を対象に整備されたものであり、それらが必ずしも全ての溶存有機物（未分画有機物）の錯生成評価に対して有用とは限らない。本タスクでは、腐植物質を分離・精製した地下水（幌延深地層研究センターの地下研究施設の深度-250 mの地下水）を対象に、溶存有機物の組成を明らかにするとともに、Euと未分画有機物との錯生成データへのNICA-Donnanモデルの適用性を評価した。

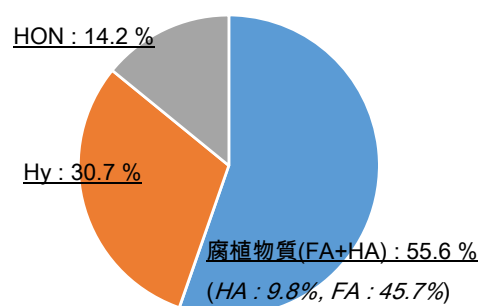


図2.4.3-3 幌延の地下研究施設の深度-250 m地下水の溶存有機物の組成分析の結果. 組成値は、炭素濃度に基づいて評価.

組成分析の結果 (図2.4.3-3)、幌延の深部地下水に溶存している有機物は、全体の56%を腐植物質が占め、残りの44%を腐植物質以外の有機物 (31%を親水性有機酸 (Hy)、14%を疎水性中性有機物 (HON)) が占めることを明らかにするとともに、既存のカラム法を用いて分離・精製した腐植物質 (日本原子力研究開発機構, 2013c) が、未分画有機物の9%程度に相当 (56%の腐植物質のうちの約12%に相当) することを明らかにした。したがって、表2.4.3-1に示すNICA-DonnanモデルパラメータやLFERは、地下水に溶存している腐植物質の一部分のみを対象に整備されたものであることを確認した。この一部分の腐植物質を対象にして整備したNICA-Donnanモデルパラメータの有効性を確認するため、Euと全溶存腐植物質 (バッチ法によるDAX-8抽出物) 及び地下水の全溶存有機物 (未分画有機物) との錯生成データを、溶媒抽出法を用いて取得し、それへの

NICA-Donnanモデルの適用性を評価した。図2.4.3-4に、Eu濃度と溶存炭素モル濃度との比の対数値 ($\log(C_{Eu}/C_{DOC})$) とEuの有機物への分配係数の対数値 ($\log K_{d_DOC}$) との関係を示す。図2.4.3-4aより、DAX-8抽出物の $\log K_{d_DOC}$ 値と分離・精製したHHAおよびHFHAの $\log K_{d_DOC}$ 値とは良く一致し、一部の腐植物質を対象にして整備したNICA-Donnanモデルパラメータが、全ての腐植物質に対しても有効であることを確認した。一方、99.9%の炭酸を除去した地下水試料について取得した $\log(C_{Eu}/C_{DOC})$ と $\log K_{d_DOC}$ との関係へ、NICA-Donnanモデルを適用したところ、実験値と計算値とが良く一致することを確認した(図2.4.3-4b)。この結果から、LFERから設定した地下水中の共存金属イオン(Ca, Mg, Al, Fe)に対するモデルパラメータの妥当性ととも、Euと非腐植物質分画(Hy, HON)との錯生成は腐植物質との錯生成として記述できる可能性を提示した。一方、本タスクで確認できたのは、二点の試験条件に限られたことから、異なるEu濃度・核種・地下水を対象に、錯生成データの取得とモデルの適用確認や共存金属イオンとの競合性の把握を通して、評価手法の妥当性を確認する必要があるものと考えられた。

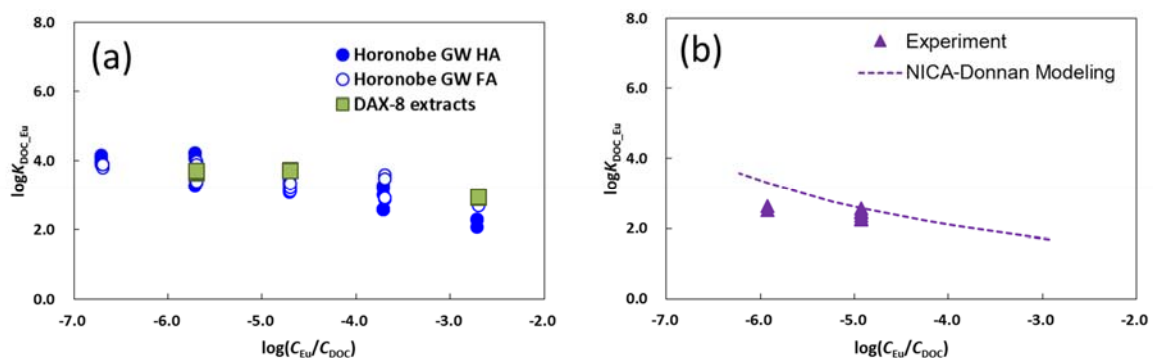


図2.4.3-4 Eu濃度と溶存炭素モル濃度との比の対数値 ($\log(C_{Eu}/C_{DOC})$) とEuの腐植物質 (a) ・未分画有機物 (b) に対する分配係数の対数値 ($\log K_{d_DOC}$) との関係。

2) 核種移行に対する天然有機物の影響評価解析と課題

本タスクにおい整備した知見やモデル・パラメータを用いて、H12レポート(核燃料サイクル開発機構, 1999c)におけるレファレンスケース(降水系地下水条件)を対象に、評価対象核種の有機物への分配係数の設定とそれを考慮したより信頼性の高い性能評価解析を実施するとともに、既存の解析結果との比較を通して、影響評価手法がどのように高度化されたのかを提示した。

① 天然有機物共存下における核種移行解析

降水系地下水に溶存する有機物として、過度に保守的な評価にならず、且つ現実的な評価が可能な有機物としてAHAを仮定し、本タスクによって構築したAHAに固有のLFERを用いて、未設定の評価対象核種および地下水中共存イオンのNICA-Donnanモデルパラメータを設定した(平成29年度報告書)。また、設定したNICA-Donnanモデルパラメータを用いて、H12レポート(核燃料サイクル開発機構, 1999c)におけるレファレンスケース(降水系地下水条件)における評価対象核種のAHAへの分配係数を算出し(表2.4.3-2)、これを性能評価解析コード(GoldSim, 仲島ほか, 2009)へ導入することで、有機物による核種移行影響を評価した。その結果(図2.4.3-5b)、評価された総線量は、処分後800万年に最大値に到達し、その値は $1.3 \mu\text{Sv y}^{-1}$ と見積もられた。この値は、

日本の自然放射線レベル (900~1200 $\mu\text{Sv y}^{-1}$) や諸外国で提案されている安全基準 (100~300 $\mu\text{Sv y}^{-1}$) と比べて2~3桁程度低く、有機物の錯生成影響が限定的になる可能性を示唆している。また、平成26年度の結果 (図2. 4. 3-5a) と比べると、平成29年度に評価した総線量 (赤色点線) は、2桁程度低くなり、新たに設定した K_{d_DOM} の値が平成26年度の値と比べて小さい値に設定された結果を反映した (表2. 4. 3-2)。特に、有機物の影響を支配するThの K_{d_DOM} 値は、平成26年度の値と比べて、平成29年度では60分の1程度に設定されている。平成26年度のThの K_{d_DOM} 値は、炭酸イオン以外の共存イオンとの競合が考慮されていないのに対し、平成29年度のThの K_{d_DOM} 値は、それらとの競合が考慮されているため、より現実的な値が設定されたものと考えられた。

表2. 4. 3-2 本調査において設定された評価対象核種の有機物への分配係数 (K_{d_DOM})

核種	核種濃度 mol dm ⁻³	有機物濃度 mgC dm ⁻³	log K_{d_DOM}		備考 (H29年度の K_{d_DOM} 設定)
			H26年度	H29年度	
Se	n.a.	n.a.	3.0	3.0	コロイドに対する K_d 値(H12レポート)を採用
Zr	1×10^{-6}	10	5.1	3.3	log $K_{d_DOM_Th}$ 値を採用
Nb	n.a.	n.a.	3.0	3.0	コロイドに対する K_d 値(H12レポート)を採用
Tc	4.3×10^{-9}	10	3.0	3.0	1:1結合モデルから算出 (Maes et al., 2003)
Pd	n.a.	n.a.	3.0	3.0	コロイドに対する K_d 値(H12レポート)を採用
Sn	n.a.	n.a.	3.0	3.0	コロイドに対する K_d 値(H12レポート)を採用
Cs	1.0×10^{-6}	10	-0.2	-0.6	NICA-Donnanモデル+NIST_TDBから算出
Sm	n.a.	n.a.	4.1	2.8	log $K_{d_DOM_Am}$ 値を採用
Pb	1.3×10^{-6}	10	3.3	1.7	NICA-Donnanモデル+NIST_TDB+JAEA_TDBから算出
Ra	3.5×10^{-5}	10	1.4	1.5	NICA-Donnanモデル+NIST_TDB+JAEA_TDBから算出
Ac	n.a.	n.a.	4.1	2.8	log $K_{d_DOM_Am}$ 値を採用
Th	7.1×10^{-9}	10	5.1	3.3	NICA-Donnanモデル+NIST_TDB+JAEA_TDBから算出(※1)
Pa	n.a.	n.a.	3.0	3.0	log $K_{d_DOM_Tc}$ 値を採用
U	9.0×10^{-8}	10	5.1	1.7	NICA-Donnanモデル+NIST_TDB+JAEA_TDBから算出(※2)
Np	n.a.	n.a.	5.1	3.3	log $K_{d_DOM_Th}$ 値を採用
Pu	n.a.	n.a.	5.1	3.3	log $K_{d_DOM_Th}$ 値を採用
Am	1.0×10^{-6}	10	4.1	2.8	NICA-Donnanモデル+NIST_TDB+JAEA_TDBから算出(※3)
Cm	n.a.	n.a.	4.1	2.8	log $K_{d_DOM_Am}$ 値を採用

※1 pH 6.5以下での K_d 値が算出可能。pH 8.5の K_d 値は、pH 4.0 ~ 6.5の外挿値を採用。

※2 U(IV)の K_d 値を採用。

※3 pH 6.5以下での K_d 値が算出可能。pH 6.5の K_d 値を採用。

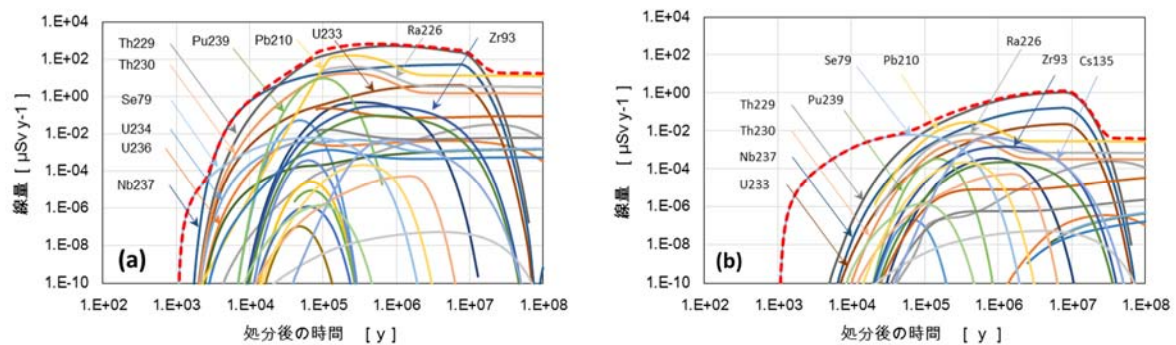


図2. 4. 3-5 有機物影響を考慮した性能評価解析の結果。

(a) 平成26年度の解析結果、(b) 本調査による解析結果。線量は、断層出口での値。

② 今後の課題

本タスクでは、III価・IV価核種との腐植物質との錯生成におけるモデル・パラメータの整備や腐植物質の代表性の調査を通して、より現実的な分配係数を設定し、これを性能評価解析に用いることでより現実的な有機物影響評価を試行した。しかし、現実的な分配係数を設定できない核種 (Se, Nb, Sn, Pd) が存在する他、分配係数を設定できた核種 (Tc, Pa, Np, Th, Zr等) についてもモデル化やパラメータ設定が不十分であるなどの課題がある。また、有機配位子としての腐植物質の代表性は、1条件の地下水と核種について確認したのみであり、有機物の特性が異なる他の地下水条件に対しても得られた知見が有効とは限らない。さらに、地下水中の有機物の特性は地下環境条件に応じて異なるため、本調査で採用したAHAが降水系地下水の有機物の錯生成を現実的に評価するのか確認できていない。その他、核種と天然有機物との錯生成は、不可逆になる事例が報告されているが、評価対象の地下水や有機物が不可逆性を発現する条件かの判断は出来ていない。より現実的な核種移行を評価する上では、有機物あるいは有機錯体と母岩との相互作用を考慮して、有機物共存下での核種の母岩への収着・拡散を評価する必要があるが、本調査では、この影響は考慮されていない。また、岩石の亀裂を移行する過程での有機物のフィルトレーション効果についても考慮されていない。今後、核種移行に対する、信頼性の高い有機物影響評価の実現に向けて、核種と天然有機物との錯生成モデルの開発・高度化とパラメータ整備、核種－天然有機物－岩三元系モデルの開発に取り組む必要があるものと考えられた。

(2) 微生物影響評価技術の開発

地層処分システムにおいてニアフィールドを構成する人工バリアや周辺母岩および天然バリアには、放射性物質の移行を抑制する安全機能が期待される。しかしながら、地下環境には膨大な数の微生物が存在することが明らかにされており（例えば、Fredrickson and Fletcher, 2001）、処分システムの安全機能にこれらの微生物反応が影響を及ぼす可能性が指摘されている（Pedersen, 1999; West et al., 2002; Pedersen, 2005）。地下微生物活性の影響を考慮した性能評価を可能にすることは、処分システムの安全評価における不確実性を低減させることにつながる。しかし、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を示した第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999c）において実施された性能評価解析の中では、圧縮ベントナイトのフィルター効果により人工バリア内の微生物活動は抑制される可能性が高いため、地層処分システムへの影響が小さいと判断され、安全評価の解析では考慮されていなかった。また、天然バリアにおける影響については、微生物影響に関する詳細な検討は、具体的な地質環境条件での今後の研究に依存することとされていた。第2次取りまとめの公表から十数年が経過し、地下環境を対象とした微生物に関する知見が集積し、それを基に各国において性能評価が進んでいる。そこで本タスクでは、これまでに国内外で集積された最新の知見について網羅的に調査し、性能評価に影響を及ぼす微生物が関わる現象と諸外国を含めた性能評価の取扱の現状について整理した。また、地層処分システムの安全機能に影響を及ぼしうる微生物活動を考慮した評価シナリオを構築し、評価が必要な微生物影響事象を抽出するとともに、評価が必要として抽出された微生物関連事象のうち、①微生物の核種移行挙動に関する現象モデル開発、②水質形成や核種移行に関わる微生物代謝活性の評価について、評価手法を開発した。それらの結果を考慮して、微生物影響を考慮した性能評価解析を行い、天然バリアにおける核種移行への微生物影響に関する評価

を行った。

1) 地層処分システムに及ぼす微生物影響シナリオの構築

本タスクでは、これまでに実施された微生物影響を考慮したシナリオ構築に関する取り組み結果 (Yoshikawa et al., 2009; 日本原子力研究開発機構, 2009) を踏まえつつ、第2次取りまとめ、大井ほか (2008)、牧野ほか (2007)、原子力発電環境整備機構 (2011) など記述されているシナリオ構築手法に従って、最新の知見に基づいて網羅的に微生物影響事象を抽出・整理し、包括的FEP (Features, Events and Processes) リスト (OECD/NEA, 1999, 核燃料サイクル開発機構, 1999) に基づくシナリオ構築を実施した (平成26年度報告書)。

これまでに整理した国内外の最新の知見 (平成25年度報告書) を踏まえて、処分システムへの微生物影響事象を整理し、FEPとの相関関係をインフルエンスタグラムとしてまとめた (図2.4.3-6)。また、システムを理解するために、閉鎖後の閉じ込めを確保するために必要な安全機能とその機能を担う地層処分システムの構成要素、およびそれぞれの安全機能がどのように時間変化するかを整理し、それぞれの機能や環境条件と微生物影響事象との関連性について、ストーリーボードとして、対象とする時間スケールあるいは空間スケールごとにバリアの状態や核種の移行に関係するプロセスを概念図と言葉を用いて描写し、枠組みを用いて整理した (図2.4.3-6、平成26年度報告書)。この整理手法により、分野の異なる専門家やジェネラリストが議論する際の共通の枠組みを提供し、分野横断的なシステム理解を行う上で有用な情報として利用できる。ストーリーボードの整備の過程で抽出された、システムにおける微生物反応が関連する不確実性についても記述した。さらに、作成したストーリーボードをもとに、安全機能への影響の可能性について微生物反応が関連するFEPのスクリーニングを行うとともに現象理解の現状について整理した (表2.4.3-3)。その結果、ニアフィールド岩盤を含む天然バリア環境において核種移行に影響を及ぼす微生物関連事象として、下記の事象を「安全機能への影響評価が必要であるが結論が得られていないと見なせる項目」として抽出した。なお、今回構築されたシナリオは、第2次取りまとめ (核燃料サイクル開発機構, 1999c) において構築された「地下水移行シナリオ」のレファレンスケースにおける微生物影響事象を対象として検討されたものである。

- ① 「プラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材」領域における、微生物活性に伴う pH, Eh, 地下水組成の変化
- ② 「母岩」領域における、微生物コロイドおよびバイオフィルムによる核種の収着
- ③ 「母岩」領域における、バイオフィルムの母岩被覆に伴う母岩の収着・拡散能力の低下
- ④ 「母岩」領域における、微生物コロイドおよびバイオフィルムへの核種の不可逆的挙動 (核種の濃縮, 形態変換, 鉱物化)

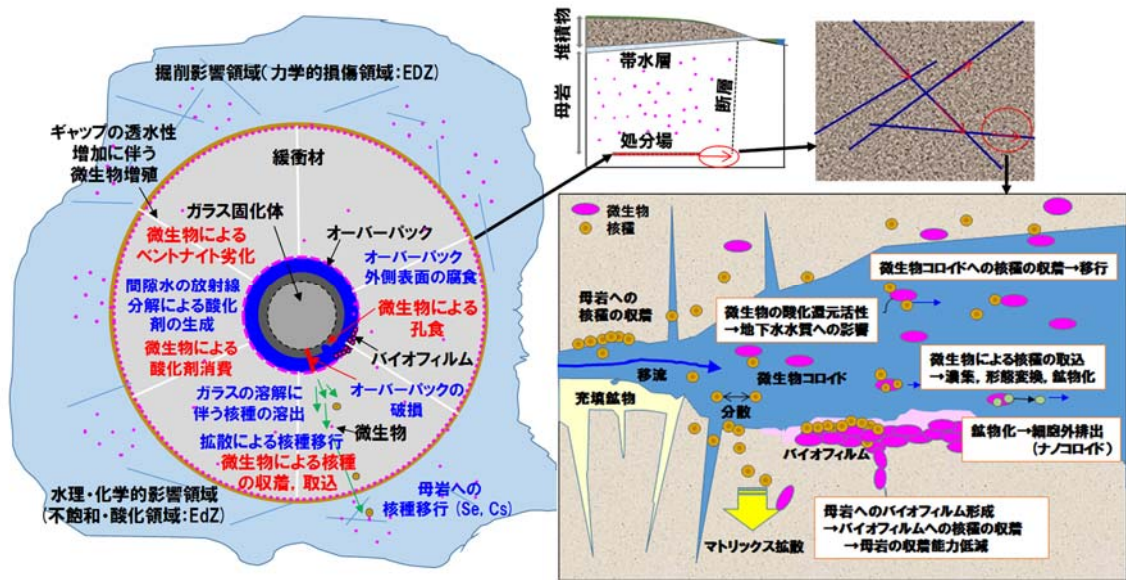


図2.4.3-6 処分環境条件の時間的変遷の概略と関連する微生物影響 (ストーリーボード)

Stage II: 1000~100000年

表2.4.3-3 FEPリストに関連する微生物影響懸念事象と安全機能への影響検討の必要性

時間		stage I: 処分場閉鎖~1000年後	stage II~III: 1000~10万年後		
領域/環境条件	D. プラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材	4. 化学的現象・特性	D-4.2 プラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の地下水化学	微生物活性に伴うpH, Eh, 地下水組成の変化(処分場建設・人工材料・埋め戻し材の影響を受けた水-岩石/有機物-微生物相互作用)	微生物活性に伴うpH, Eh, 地下水組成の変化
		D-4.3 プラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材と地下水の反応	埋め戻し時に混入した酸素の消費	微生物活性に伴う還元状態の維持	
		D-4.4 ガスの発生/影響	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ , H ₂ Sの発生/消費		
		D-4.5 微生物の影響	埋め戻し時に混入した酸素の消費および酸化還元反応による還元環境回復	微生物活性に伴う還元状態の維持	
		D-4.8 プラグ/グラウト, 支保, 埋め戻し材の化学的変質	微生物活性に起因するコンクリート等人工材料物の劣化		
	H. 母岩	4. 化学的現象・特性	H-4.2 母岩の地下水化学	微生物活性に伴うpH, Eh, 地下水組成の変化(処分場建設影響を受けた水-岩石/有機物-微生物相互作用)	微生物活性に伴うpH, Eh, 地下水組成の変化
			H-4.4 ガスの発生/影響	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ , H ₂ Sの発生/消費	
			H-4.5 微生物の影響	微生物活性に伴う酸素消費および還元環境の回復	微生物活性に伴う還元環境の維持
			H-4.7 コロイドの形成		微生物による核種の取込み・鉱物化とそれに伴うナノコロイドの生成
		6. 物質(核種)移動現象・特性	H-6.2 幾何形状/間隙構造	微生物による間隙構造閉塞	
H-6.3 母岩中での核種の移行 H-6.3.2 拡散			バイオフィームの母岩被覆に伴う母岩の拡散能力の低下		
H-6.3.3 吸着			微生物コロイドおよびバイオフィームによる核種の吸着 バイオフィームの母岩被覆に伴う母岩の吸着能力の低下		
H-6.3.4 沈澱/溶解		微生物による核種の鉱物化, 溶解			
H-6.3.5 コロイドによる移行		核種を吸着した微生物コロイドの移行 微生物コロイドへの核種の不可逆的挙動(核種の濃縮, 形態変換, 鉱物化)			
赤字: 影響が懸念されるが, 評価に用いるための結論が得られていないと見なせる項目					
桃字: システムの安全性に好影響をもたらすと見なせる項目					
青字: 影響が検討され, 有意な影響がないと見なされた項目					

2) 微生物の核種移行影響に関する現象モデル開発

地下環境における微生物の存在形態は、浮遊性と付着性に分けられる。浮遊性微生物は、その形態的特徴から、処分システムにおいては「コロイド」として取り扱うことが可能と考える。一

方、付着性微生物は、固体表面に付着して「バイオフィーム」と呼ばれる高次構造体を形成する。本研究では、コロイド状の微生物（以下、微生物コロイド）とバイオフィームに着目して評価を行った（平成26年度報告書；平成27年度報告書；平成28年度報告書；平成29年度報告書）。

本タスクでは、平成26年度までに提案した微生物コロイドおよびバイオフィームの核種移行影響評価手法に基づいて、地下水中に存在する密度、元素の収着分配係数、群集組成についてデータの拡充を目的とし、幌延深地層研究センター地下施設を利用して試験を実施した。

その結果、地下水中のコロイド濃度は0.091～1.66 mg/Lの範囲で分布しており、地質学的・地球化学的特性等の地質環境条件によってコロイド濃度が異なる空間分布を示すことが示された。微生物コロイド（全菌数）の濃度は、0.01～0.05 mg/Lの範囲で検出され、各試料間において全コロイド重量で認められたような密度の差はなかった。これらの微生物コロイド濃度を既存の知見に基づく大腸菌1細胞あたりの重さ（ 1.0×10^{-13} g/cell; Madigan et al., 2009）を参考にして重量換算した場合、全コロイドに対する微生物コロイドの割合は、0.6～22%の範囲で算出された。したがって、地下水中のコロイドは、そのほとんどが無機コロイドか微生物細胞以外の有機コロイドであると推定された（平成26年度報告書、平成27年度報告書、平成28年度報告書）。

地下水中のコロイドを対象とした元素の収着特性評価試験について、地下水中に存在する全コロイド（無機/有機コロイドおよび微生物コロイド）への希土類元素の収着挙動に関する経時変化に関するデータを取得した（平成26年度報告書、平成27年度報告書、平成28年度報告書）。その結果、希土類元素のコロイドへの収着パターンは、重希土類と比較して軽希土類のほうが収着しやすく、 $0.2 \mu\text{m}$ 以上のコロイドに元素のほとんどが収着することが示された（図2.4.3-7）。また、地下水中の全コロイドのうち微生物コロイドへの希土類元素収着挙動に関するデータを取得するために、捕集した全コロイドを殺菌処理した後、希土類元素との収着試験を実施した。その結果、微生物コロイドへの希土類元素の分配係数は $\log K_d$ として2.5-3.0に分布することが確認された

（平成29年度報告書）。この結果は、培養微生物を対象とした希土類元素の収着試験の既存報告と概ね一致しており（Takahashi et al., 2005, 2010; Tanaka et al., 2015; Ohnuki et al., 2015）、実験室レベルの収着試験結果を天然地下環境に存在する微生物コロイドに適応可能であることの事例になると考える。今後、本試験で取得したデータの再現性やコロイド濃度の違いによるデータのばらつきについてより詳細な検討を行うとともに、様々な地下環境を対象とした天然コロイドへの分配係数に関するデータを拡充していく必要がある。

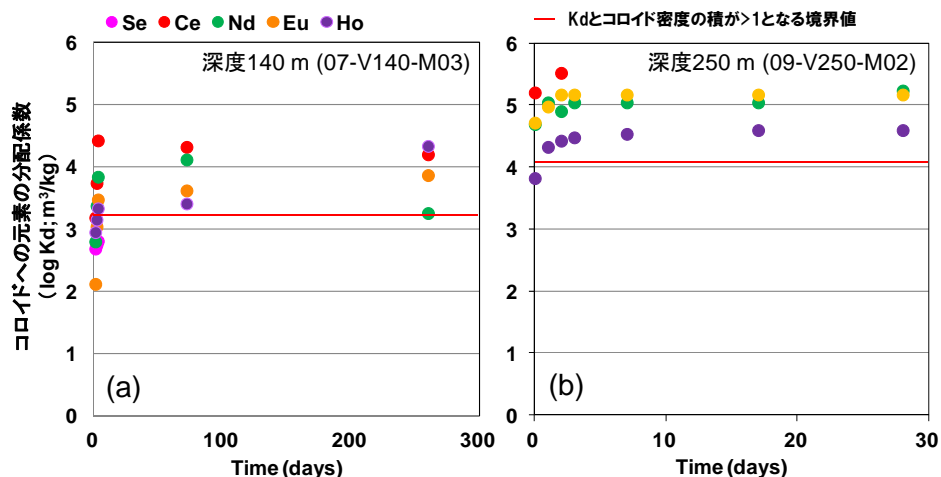


図2.4.3-7 天然地下水中の全コロイド（ $0.2 \mu\text{m}$ 以上）への希土類元素の分配係数

また、希土類元素と微生物群集の相互作用の評価を目的として、微生物が存在する地下水に希土類を添加した室内培養試験を行った。その結果、希土類元素を添加した系で微生物の群集組成に著しい変化が認められた。添加2週間後から、*Alphaproteobacteria*に属する*Rhodobacter* sp. に近縁な種が増殖しており、希土類および還元剤添加後2ヶ月では全体の約70%を占める優占種となる結果が得られた。試験溶液中の全菌計数の結果から、希土類元素添加の試料中の菌数は、無添加の試料中の菌数と比較して顕著な増加傾向を示していることから、希土類添加溶液中では*Rhodobacter* sp. に近縁な種が有意に増加しているものと考えられる。これまでに取得した地下水中微生物のメタゲノム解析データを活用し、*Rhodobacter* sp. 等の希土類元素との相互作用の可能性のある微生物種について、ゲノムデータを用いた代謝解析を行った結果、金属還元に関連するシトクロムc遺伝子を多く有していることが示された（平成29年度報告書）。しかしながら、ウランやコバルト等の重元素還元能力を有する鉄還元菌として知られる*Geobacter sulfurreducens*や*Shewanella oneidensis*と比べるとその数は少なく、またこれらの鉄還元菌が有するMtrA, MtrC, MtrF, OmcAなどのマルチヘムシトクロムcも有していないことから、*G. sulfurreducens*や*S. oneidensis*のような高いレベルで、シトクロムcを用いた鉄やウラン還元能力を有する可能性は低いと考えられる。また、鉄などの金属還元反応には、シトクロムc以外にも電気伝導性ナノワイヤーやフラビン類、キノン等の電子伝達仲介物質を利用した細胞外への電子伝達により生じるものが報告されており、*Rhodobacterales*および*Rhodocyclales*も運動性に関連する遺伝子を有していることから、これらの電子伝達様式を用いている可能性もある。希土類元素とこれらの菌の代謝反応との関連性については今後詳細な研究が必要であるが、微生物のゲノム情報を用いて潜在的な代謝機能を推定し、それらの知見を拡充することで微生物が核種移行に及ぼす影響の不確実性の低減につなげていく必要がある。

母岩中の核種の移行挙動に対するバイオフィルムの影響については、バイオフィルムが花崗岩亀裂表面を被覆することにより、花崗岩に対する核種の収着性が低下する現象、および核種のマトリクス拡散が抑制される現象が報告されている（Vandergraaf et al., 1997; Anderson et al., 2006; 2007）。一方で、バイオフィルムが岩石表面に形成されることにより核種の移行を遅延させる効果が期待されるとする報告もあるが（Amano et al., 2017; MacLean et al., 2007; Takahashi et al., 2005; Takahashi et al., 2007）、地下の岩石亀裂表面にバイオフィルムが形成される環境要因や、バイオフィルムがどの程度の密度で存在しうるかに関する知見が、ほとんど存在しないのが現状である。そこで、本事業において、核種移行へのバイオフィルム影響の評価手法フローを作成し（平成26年度報告書）、それに基づいて平成26年度から幌延深地層研究センター地下施設の立坑壁面から採取した堆積岩試料を用い、深度140m坑道に掘削されたボーリング孔の地下水を利用した原位置バイオフィルム形成試験を実施した（平成26年度報告書）。また、ボーリング孔地下水採取に利用する採水チューブ内に形成されたバイオフィルムの特性調査を行った（平成27年度、28年度報告書）。様々な環境下で形成されたバイオフィルムを観察し、計数した細胞数からバイオフィルム乾燥密度を算出するとともに、バイオフィルムの代謝機能推定を目的とした微生物群集組成に関するデータを取得した（平成27年度、28年度報告書）。その結果、堆積岩表面において18.8kg/m³もの高密度バイオフィルムが形成されていることが確認され、既存の報告による花崗岩表面にて形成された値よりも高い密度で形成されることが示された（平成28年度報告書）。また、ボーリング孔地下水採取に利用する採水チューブ内に形成されたバイオフィ

ルムの特性調査を行い、バイオフィーム密度や微生物群集組成、化学分析結果からバイオフィームに濃集した金属元素の見かけの分配係数を算出した（平成27年度、28年度報告書）。さらに、ボーリング孔から採取した地下水中から、高密度のバイオフィーム様微生物細胞集合体と、その細胞近傍に細胞外多糖のような粘性物質の観察に成功したことで、天然地下環境の堆積岩岩盤中にバイオフィームが形成されている証拠を示すことができた（図2.4.3-8）。これらの天然堆積岩岩盤中のバイオフィームは、その群集の約80%が未知微生物群として知られているSM1やJS1で構成されていることも明らかになった。これらのバイオフィームはウランやトリウム等の重元素を濃集していることが示されており（平成27年度報告書）、またメタゲノム解析手法に基づく代謝解析からも、電子伝達反応による金属還元反応に関連する可能性が予察的な結果として得られている（平成29年度報告書）。この事象は、岩盤表面に形成されたバイオフィームが核種移行の遅延効果をもたらす一方で、何らかの環境変化によりバイオフィームが岩盤表面から剥離され、地下水中で浮遊体となった場合には、核種移行を促進させる可能性がある。しかしながら、今回天然環境から採取されたバイオフィームはかなり高い密度で存在していることから、万が一岩盤表面から剥がれた場合でも時間の経過とともに沈降し、浮遊体ではなくなると推測されるが、その挙動は剥離の規模や塩分濃度等の地下水条件によっても異なる可能性がある。今後は、様々な環境下におけるバイオフィーム特性のデータを拡充するとともに、バイオフィーム中に共存する鉱物や微生物由来の細胞外高分子物質等も考慮した核種との相互作用に関する知見の整備が必要である。

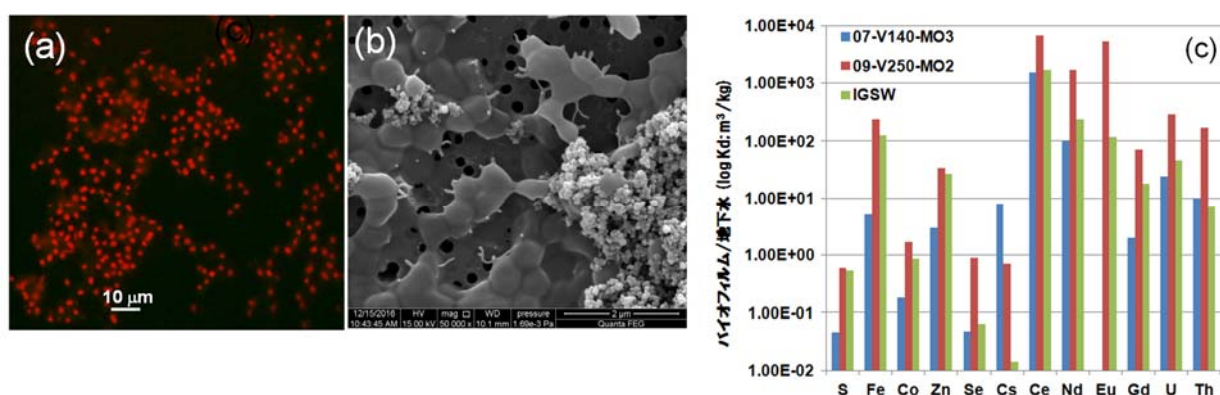


図2.4.3-8 天然地下堆積岩環境に形成されたバイオフィーム

(a)天然環境に形成されているバイオフィームの蛍光顕微鏡像，(b) (a)のSEM像，(c)原位置環境下で形成されたバイオフィームへの重金属元素の見かけの分配係数

3) 水質形成や核種移行に関わる微生物代謝活性の評価手法開発

微生物代謝は、核種の収着、濃縮、形態変換、鉱物化、様々な酸化還元反応、錯化剤やガス生成等にて周辺の水質形成や核種移行に影響を及ぼす可能性があり、それらの影響評価技術を構築する必要がある。これまでの知見により、地下環境における微生物生息域が広範囲にわたるとともに、その代謝活性や系統学的多様性は非常に複雑であることが分かってきた（例えば、Fredrickson and Fletcher, 2001）。また、地下環境から検出されている微生物群集は、これまで培養されていない微生物が数多く検出されており、それらの微生物の代謝機能については、未

解明な部分が多く残されている。このような未知微生物群の未知の代謝機能は、地層処分システムの長期的安全性を評価する上で、核種移行影響における不確実性要因となりうる。そこで本タスクでは、幌延深地層研究センター地下施設から採取した地下試料を対象として、核種移行への微生物影響の不確実性要因となりうる未知微生物も考慮した地下微生物全体の代謝活性を予測するために、遺伝子解析技術を活用した評価手法の開発を行った（平成26年度報告書；平成27年度報告書；平成28年度報告書；平成29年度報告書）。

採取した地下水について、次世代シーケンサーを用いて、微生物の16S rRNA 遺伝子領域を増幅したPCR産物を対象とした解析及びメタゲノム解析を実施し、多様性や代謝活性の経時的変化について評価を行った。その結果、全5試料中3試料では、両解析結果とも、過去5年間に於いて検出される微生物種は著しい変化を示さなかったことから、比較的安定した菌叢が形成されていることが示された。同試料地下水中の化学組成分析結果からも、主要成分の大きな変化は確認されておらず安定した地球化学状態であることを示している（天野ほか，2012；笹本ほか，2015）。しかし、一部の試料においては、水質の変化が認められていないにも関わらず、時間の経過とともに微生物種の構成割合に変化が確認された。このことは原位置環境において微生物の代謝活性が酸化還元状態あるいはその他の変化に鋭敏に反応していることを示しており、水質分析等の地球化学調査では通常検出できないレベルで原位置の酸化還元状態の変化が生じていることが示唆された。一方で、酸化還元電位のモニタリング結果は、観測初期から現在までの間で約-220 mV程度の値からほとんど変化していないことから、微生物の酸化還元に関わる代謝反応も原位置の酸化還元状態の保持に大きく寄与していると考えられる。

メタゲノム解析については、再構築されたゲノム配列結果を基に、それぞれの検出種の代謝機能を推定するとともに、解析データの信頼性確認を継続して実施した。その結果、600以上のゲノムを検出し、そのうち250ゲノムは異なる生物種に由来していることが示された。複数年にわたるメタゲノム解析に基づく微生物群集代謝機能の経時的変化について解析を進めた結果、炭酸固定反応、高分子有機物分解、メタン代謝、硫黄代謝、発酵、水素代謝、鉄還元等の金属還元反応等に関連する遺伝子の存在が示され（Hermsdorf et al., 2017）、検出される群集組成及び代謝機能は経時的に大きく変化していないことから、地下施設建設による酸化還元状態に対する多少の擾乱影響は生じているものの、メタゲノム解析結果からも地下施設近傍の水理・地球化学状態には著しい変化が生じていないことが示された。

検出された微生物代謝反応のうち、金属還元に関わる微生物代謝反応を評価するために、multi-heme cytochromes (MHCs) に関与する遺伝子について解析を行った。MHCsは*Geobacter sulfurreducens*や*Shewanella oneidensis*などのような金属還元菌において電子伝達をおこなう成分として知られていることから、潜在的な金属還元反応について評価を行うことができる。ゲノムデータベースを利用してMHCsについて解析を行った結果、全体の90%が異化型金属還元反応に関連する遺伝子を有することが示され、そのうちの1.2%は特異的なMHCsであることが示された。また、幌延の地下環境で優占種であり、未培養微生物群として知られるANME-2d（嫌氣的にメタン酸化を行うメタン生成菌群）も多くのMHCsを有することから、金属還元能力を有しており、金属還元と嫌氣的メタン酸化の共反応を行っている可能性が示唆された。これらの代謝反応を行うことが可能な微生物は、核種の取り込み等酸化還元反応にも関与する可能性があり、今後より詳細な評価を行うことで、核種移行への影響を明らかにできると考える。微生物の生理生態学的特性

を明らかにするために、従来培養法を用いた評価が行われてきたが、未培養微生物群は培養に成功していない群集で構成されていることから、その代謝活性を推定することが難しい。一方で、メタゲノム解析手法を活用した代謝活性評価をおこなうことで、環境中における微生物代謝反応を推測することが可能となり、未培養微生物群の代謝を推定する手段として極めて有効な手法であり、微生物による処分環境の酸化還元状態等への影響や核種移行への影響評価に有用な手法であることが示された。

4) 微生物影響を考慮した核種移行解析と課題

本タスクにて抽出された微生物影響の不確実性を適切に取り扱い、定量的な評価をおこなうためには、これらが関与する事象を核種移行パラメータとして反映した性能評価解析が必要となる。そこで、既存の知見および本研究で得られた結果を基に、汎用シミュレーションソフトウェア GoldSim (GoldSim Technology Group LLC, 2014) を用いて、これまで日本原子力研究開発機構で構築されてきた核種移行解析モデル (核燃料サイクル開発機構, 1999c ; 仲島ほか, 2009 ; 小尾・稲垣, 2010) に微生物パラメータを追加し、微生物影響を考慮に入れた核種移行解析を実施した (図2.4.3-9) (平成26年度報告書 ; 平成29年度報告書)。解析を行うにあたり、平成29年度までに微生物影響を考慮するために必要なデータを天然地下環境に生息する微生物コロイド、バイオフィルムを対象として取得し、それらの知見を活用してGoldSimを用いた核種移行解析を実施した。

なお、本検討では、地層処分の人工バリアおよび天然バリアを対象とし、特に天然バリアについては、バイオフィルムの分布領域が主に亀裂性媒体であると推測されることから、天然バリアを亀裂性媒体として取り扱う核種移行モデルの構築を試みた。

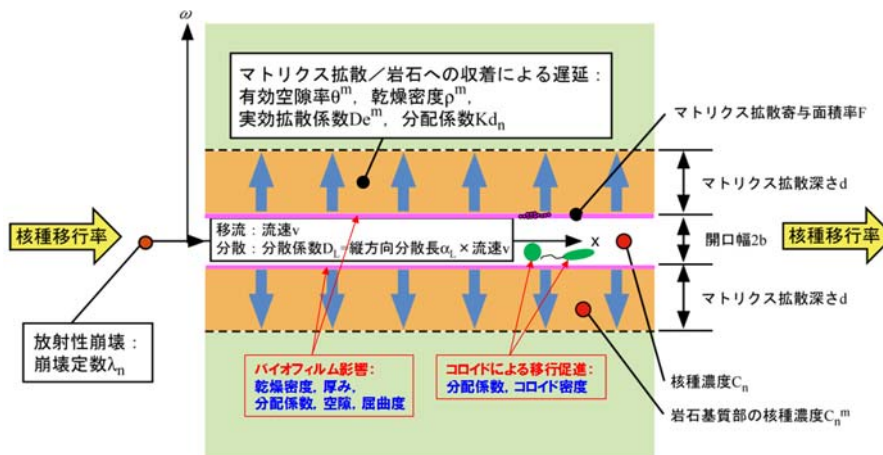


図2.4.3-9 亀裂性媒体におけるコロイドおよびバイオフィルム影響を考慮した一次元平行平板モデルの概念図 (核燃料サイクル開発機構, 1999cを改変)

核種移行解析の結果、全コロイド影響を考慮した解析ケースで核種移行の助長が顕在化することが示されたが、原位置環境下で取得されたバイオフィルム特性に基づくバイオフィルム影響を考慮に加えた場合、バイオフィルムが核種の遅延効果をもたらすことが示された (図2.4.3-10)。平成26年度に実施した核種移行解析においては、バイオフィルムに関するパラメータが不足していたことから、限られた知見を用いて暫定的に設定したパラメータを用いて解析を行っており、バイオフィルム影響を考慮した解析ケースについては、レファレンスケースと比較して変化が認

められなかった。しかしながら、原位置環境において取得されたバイオフィーム密度、厚み、各元素の分配係数値を設定した場合、全コロイドのみの影響を考慮した解析ケースと比較して著しい遅延効果が認められており、より現実的な信頼性の高い影響評価結果が得られているものと考えられる。微生物コロイドを対象とした影響評価については、微生物コロイドの密度が全コロイドに対する密度と比較して小さいことや、設定値として用いた分配係数値も全コロイドに対する値と比較して小さいことから、微生物コロイドへの核種の収着反応のみを考慮した場合、核種移行への影響は限定的であるといえる。しかしながら、本事業で実施した核種移行解析は既存の核種移行モデルに微生物に関連したパラメータを追加・変更することによって実施されたものであり、本モデルには微生物特有の重要な現象である核種の“取込み反応”、すなわち、コロイドおよびバイオフィームの形態として存在する微生物が核種を細胞内に濃集、形態変換、鉱物化する「不可逆反応」を組み込むことができていない。したがって、より信頼性の高い微生物影響評価を行うためには、微生物固有の現象である核種に関連する代謝反応を考慮に入れたモデルの開発が必要である。

本事業において、天然の地下環境に存在する全コロイド、微生物コロイド、バイオフィームを対象として、それらの特性データおよび核種の分配係数に関する知見を拡充し、これらの影響を考慮したより信頼性の高い核種移行影響評価を行うことが可能となった。今後は、本事業で取得した各パラメータの信頼性を高めるとともに、様々な地下環境を対象とした微生物関連データを拡充し、微生物代謝反応を考慮に入れた影響評価モデルの構築やデータ整備を行っていく必要がある。

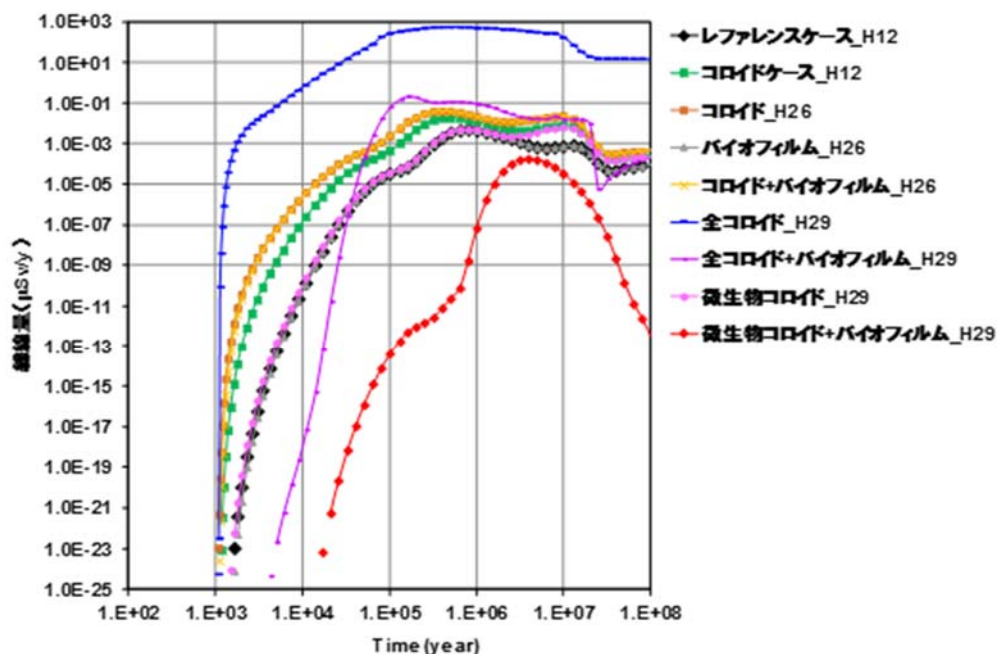


図2.4.3-10 各解析ケースの総線量の比較図

2.4.4 セメント系材料によるニアフィールド岩盤への影響評価技術の開発

(1) 目的と実施概要

処分場建設時には、湧水抑制対策としてセメント系材料を用いたグラウチングが行われることが想定される。セメント系材料は、人工バリア材料のみならず、周辺岩盤に化学的影響として変化を生じさせ天然バリアの性能を低下させることが懸念される。これまで、セメント系材料による周辺岩盤への影響に関する研究が国内外で行われているが、特に亀裂性媒体においては物質移行を促進もしくは遅延する両ケースの研究事例が報告されており、現状十分な知見が得られているとは言い難い（Steeffel and Lichtner, 1994; Bateman et al., 1998, 1999; Soler, 2003など）。特に、実際の地下環境におけるグラウト材料そのものの変遷やセメント系材料による周辺岩盤への影響に関する知見は乏しいと言える。以上の背景の下、地層処分の安全評価の信頼性向上に向けて、原位置におけるセメント系グラウト材料の変遷とその周辺岩盤への影響について理解すると共にこれらの概念モデルの構築を目標として平成27年度から3ヶ年の研究を実施した（平成27～29年度報告書）。

瑞浪超深地層研究所では、換気立坑の深度200m付近、深度200mの水平坑道、深度300mの研究アクセス坑道、換気立坑の深度400～500m及び深度500mの研究アクセス南坑道においてプレグラウチングが実施されている（見掛ほか、2010；石井ほか、2011；石橋ほか、2014など；図2.4.4-1）。

そこで、平成27年度は、深度200mおよび深度300mで採取したグラウト材料（普通ポルトランドセメント；OPC）で充填された割れ目（グラウト充填割れ目）とその周辺岩盤（以下、岩石試料）を対象としてグラウト材料とその周辺岩盤の特徴把握に向けた検討として、岩石試料を用いた岩石薄片の作製・観察、走査型X線分析顕微鏡（SXAM）を用いた元素マッピング、SEM-EDX分析に加えて新たな手法として非破壊連成CT-XRD観察を実施した（平成27年度報告書）。平成28年度は、平成27年度の結果を受けて、施工後の経過年数によるグラウト材料の変化と周辺岩盤への影響について検討を行った（平成28年度報告書）。具体的には、深度300mにおいて採取した施工後約3年経過岩石試料で作製した岩石薄片の偏光顕微鏡観察、SXAM分析、SEM観察、微小領域を対象としたXRD分析（ μ -XRD分析）を実施した。また、施工後約7年経過した岩石試料およびグラウト材料の初期状態を推定するために作成したOPC供試体を用いて岩石薄片の作製・観察を行った。加えて、グラウチングによる周辺環境への影響を把握するために、グラウチング領域の平均的な透水性の変化や水質（pH, Ca）の変化について整理した。そして、平成29年度は、グラウチングに伴うグラウト材料およびニアフィールド岩盤への影響の変遷に係る概念を検討し、その妥当性を検討するために、グラウト材料と深度300mで採取した岩石試料の観察・分析および通水試験を実施した（平成29年度報告書）。

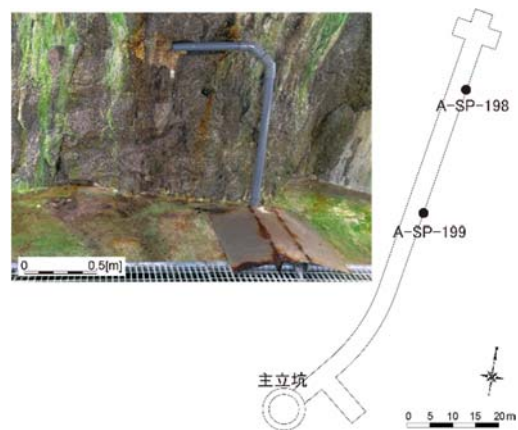


図2.4.4-1 深度300m研究アクセス坑道におけるグラウチング充填割れ目の位置と状況

(2) グラウチング領域の概要と周辺環境の変遷

研究対象とした瑞浪超深地層研究所の深度300m研究アクセス坑道は、湧水抑制対策として坑道全体の透水性が約2Lu（ルジオン）以下となるように、坑道掘削前にOPCを用いてプレグラウチングを実施している（見掛ほか、2010；図2.4.4-1）。研究アクセス坑道の掘削中に実施した壁面地質観察結果では、グラウト材料（水-セメント比（W/C）は0.75～8.0）は、観察された1,670本の割れ目のうち、118本の割れ目で認められた（石橋ほか、2014；図2.4.4-1）。また、本坑道については、坑道全体の湧水量の計測や周辺領域における水圧計測および坑道内への湧水の水質分析が実施されている（佐藤ほか、2014；上野ほか、2014, 2017；狩野ほか、2011, 2012, 2013；別府ほか、2014；濱ほか、2014, 2015, 2016；石橋ほか、2018など）。そこで、グラウチング後のプレグラウチング領域を含む坑道近傍の環境変化について、前述のデータを利用した検討を実施した。

その結果、坑道周辺のグラウチング領域の透水性は、施工後4～5年程度の期間は増加していたが、その後4～5年程度の間では系統的な変化は見られないと推定される（平成29年度報告書；図2.4.4-2）。一方で、坑道への湧水のpHは、施工直後は9程度の値を示すが、施工後2～3年まで低下傾向を示し8.0～8.6程度の値を示す。pHと坑道への湧水量は逆相関関係（湧水量が増加するとpHが低下する）が認められることから、pHの変化は坑道への地下水の供給量の増加に伴う希釈で生じた可能性が高い。Ca²⁺濃度については、施工後4年程度までバックグラウンドのCa²⁺濃度からの付加が上昇し、その後、Ca付加が減少する傾向があることがわかった。なお、HCO³⁻の地下水中の濃度は、明瞭な変化はなく約20～30ppmを示す（新宮ほか、2011, 2012；大森ほか、2013, 2014a, 2014b；林田ほか、2016）。

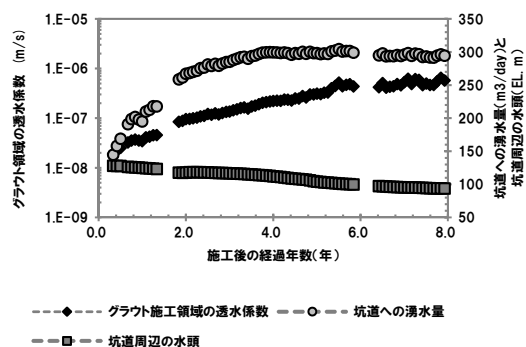


図2.4.4-2 坑道への湧水量・周辺領域の水圧および透水性の変遷

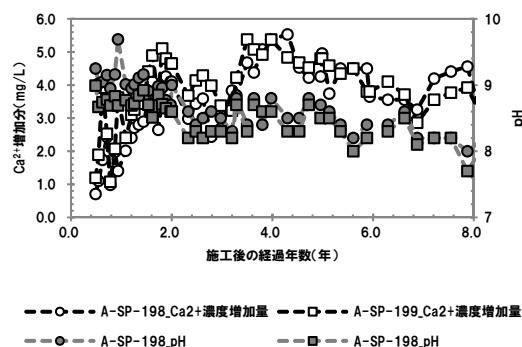


図2.4.4-3 坑道への湧水の水質変化

(3) セメント系グラウト材料とその周辺岩盤の変化

セメント系グラウト材料が及ぼす周辺岩盤への影響を検討するために、グラウチング後約3年経過後および約7年経過後のグラウト材料を含む岩盤コアを採取した。また、グラウト材料の初期状態を推定するために水-セメント比（W/C）の異なるセメント供試体を作製し、原位置で取得した試料と共に岩石薄片を作製し、観察・分析を実施した（平成28, 29年度報告書）。

グラウト材が接触する岩盤領域については、施工後約3年、7年経過した試料共に、グラウチングの影響と考えられる、鉱物の溶脱や二次鉱物の形成は認められない（図2.4.4-4）。これは、2.4.4

(2) に示したように、多量の天然の地下水の供給により、グラウト材料からの溶出水は瞬時に希釈され、高pH溶出水と岩盤の接触時間が短いため、岩盤に対して化学的な影響が生じ難かったことが要因と考えられる。

一方、グラウト材料そのものでは、性状や空隙率などの変化が認められた(図2.4.4-4)。施工後約3年、7年経過した試料では、全体にまばらに方解石が分布する領域と、グラウト材料中の微細割れ目やグラウト材料-岩盤境界付近に方解石が密集する領域が認められる(平成28年度報告書; 図2.4.4-4)。原位置の地下水を用いて水セメント比を変えて作成したセメント供試体の観察結果から、全体にまばらに分布する方解石は、固化直後に形成されたものと考えられた(平成28年度報告書)。これは、既存研究結果(谷・内田, 1999など)も鑑みると高W/Cのセメントミルクを用いてグラウチングが行われるため、セメントミルクの段階で大気中のCO₂が取り込まれ、早い段階から方解石が形成された結果であると推定できる。また、方解石の密集部については、グラウト材料中の微小割れ目や岩盤との境界部に発達するという観察結果、基質部および方解石密集部のバルク試料でのXRD分析や微小領域を対象としたXRD(μ -XRD)分析結果およびSEM-EDSを用いた観察・分析の結果から、地下水流動に伴い供給された地下水中のHCO₃⁻とグラウト材料中のポルトランドイトの溶解により供給されたCaの反応により形成されたと考えられる。

また、グラウチングに伴う地下水へのCa供給量は、施工後3~4年目以降より、低下傾向を示す(図2.4.4-3)。バルク試料のXRD分析の結果から、ポルトランドイトは施工後約7年経過した時点でも残存していることから、ポルトランドイトの消失によるCa供給量の低下とは考え難い。一方、セメント系材料と水の接触面に方解石層が形成されることでセメント系材料からのCaの溶脱が抑制されることが指摘されている(蔵重・廣永, 2007)。施工後約3、7年試料共に地下水との接触面と考えられる個所では方解石の形成が認められる。このことから、地下水へのCaの供給量の低下は、地下水-グラウト材料接触面における方解石の形成によるものと推察される。

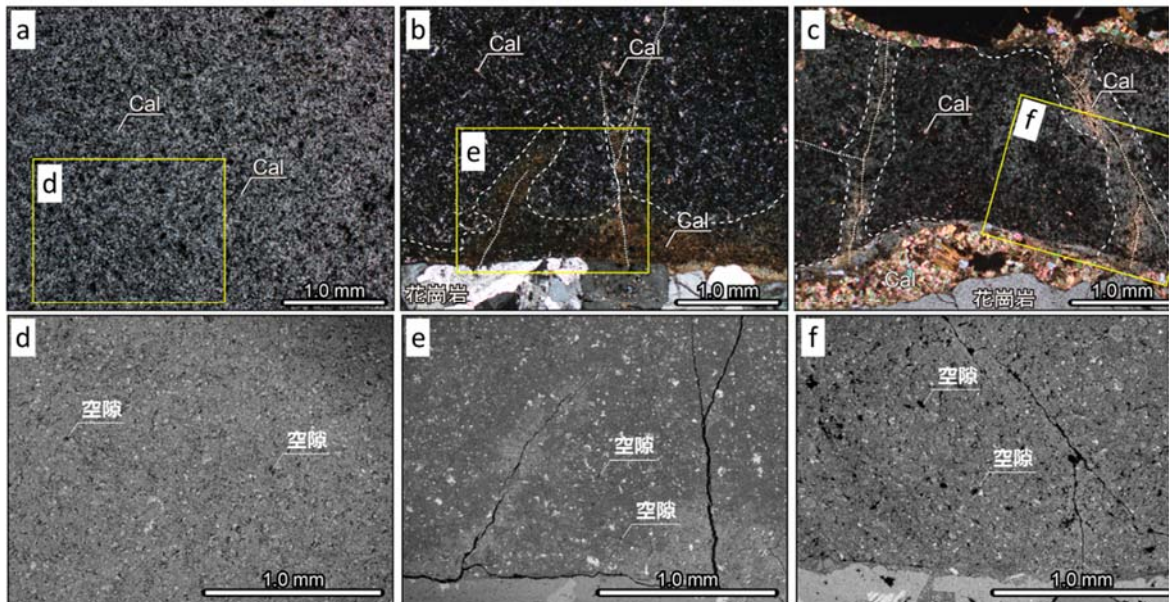


図2.4.4-4 グラウト材料の岩石薄片観察結果 (a - c: クロスニコル画像、d - f: BSE画像)
a, dはセメント供試体 (W/C=1.0)、b, eは施工後約3年試料、c, fは施工後約7年試料の結果を示し、a - cの黄色枠はSEM観察箇所を示す。

(4) グラウト材料及び岩盤の変遷を把握する通水試験

昨年度までに把握した知見に基づく概念モデルの妥当性の検討に向けて、グラウト材料及び岩盤について地下環境における変遷および影響把握を目的として、室内試験を実施した。具体的には、深度300m研究アクセス坑道で

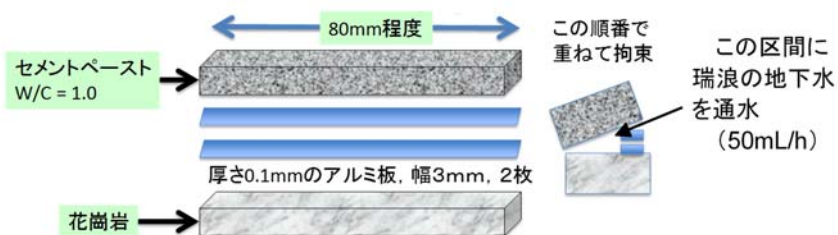


図2. 4. 4-5 通水試験のイメージ

取得した岩石試料を用いて、これに接触させる形でセメント供試体を形成する。その後、岩石試料とセメント供試体を剥離して両試料間にスペーサー（酸化アルミニウム）を設置して空隙を設定した上で、深度300m研究アクセス坑道から採水した地下水を通水させて、両試料の変遷を把握した。通水後の岩石試料とセメント供試体は、偏光顕微鏡観察、エネルギー分散型X線分析装置付きの走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）による観察・分析、微小領域を対象としたX線回折（ μ -XRD）分析、通水前後の地下水の水質分析を行った。

その結果、いずれの通水期間の場合も通水区間にカルサイトの沈殿物が確認された。薄片観察結果を図2. 4. 4-6に示すが、特に4週間通水した試料については、通水区間においてカルサイトの沈殿物やセメント供試体中の空隙が確認された。通水後の水質変化を図2. 4. 4-7に示すが、pHや Na^+ 、 Ca^{2+} 濃度は通水後に減少した後、安定したことが分かる。これらから、地下水中のCa及びセメント

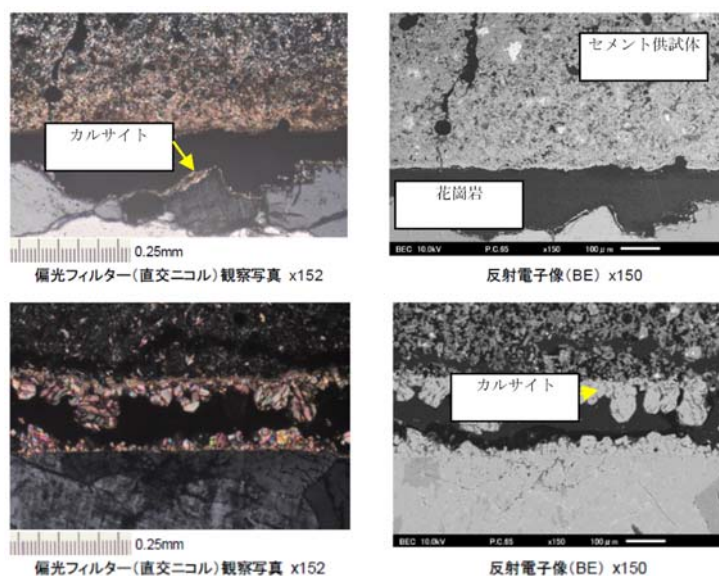


図2. 4. 4-6 各試料の薄片写真

(2週間通水（上）及び4週間通水（下）)

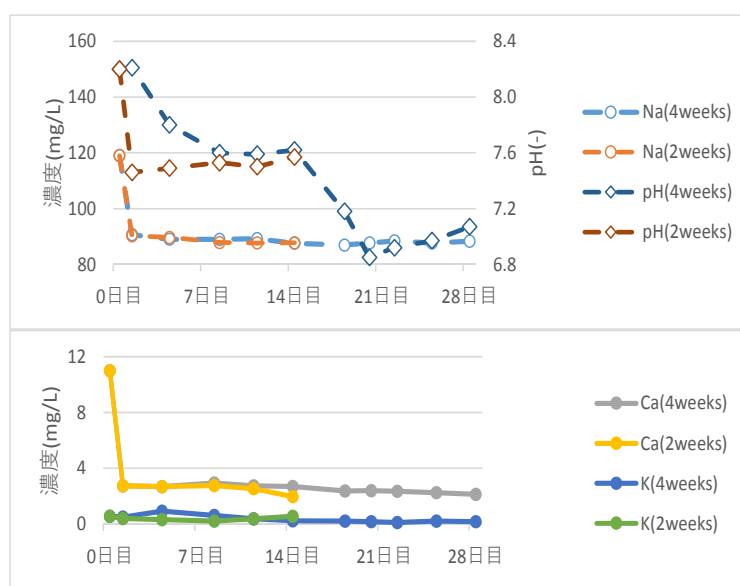


図2. 4. 4-7 通水後の水質変化

部分から供給されたCaと、地下水に含まれる HCO_3^- が反応してカルサイトが生じたものと考えられるが、pHやCa濃度が通水後1日目で減少していることから、通水後1日でカルサイトの沈殿といった反応が発生したことが考えられる。

(5) ニアフィールド岩盤への影響評価技術に関する検討・課題

以上の結果より、グラウチングにともなうニアフィールド岩盤への影響について時系列な検討を実施した(図2.4.4-8)。その結果、坑道開放状態では、周辺岩盤から坑道に向かう導水勾配により地下水が集中的に供給されることで、セメント系材料の岩盤への注入に伴う影響が緩和され、この時期には岩盤そのものへの影響は無い可能性が示唆された。一方、施工後7年程度の状況でもポルトランドイトなどのセメント水和物も残存することが確認された。ポルトランドイトなどのセメント水和物が存在している間は接触している地下水のpHは上昇する可能性がある。このことから、坑道閉鎖時に至るまでポルトランドイトなどが残存すると仮定すると、坑道閉鎖後にはグラウチング領域への地下水の供給が減少し、地下水が高pH化し岩盤への影響が生じうる可能性が考えられた。

なお、H29年度実施した室内通水試験から得られた図2.4.4-6の薄片分析結果等から、セメント共試体中の空隙や割れ目における方解石の形成が短期間(2~4週間)で発生することが確認できた。より長期の通水によってどのような状況になるのか把握する必要がある。

このように、セメント系材料を施工した箇所においても、セメント系材料とその周辺岩盤の変遷について系統的に整理・検討することで、坑道閉鎖後の検討を行う初期状態についてより具体的が情報を得られる可能性が見出せた。しかし、現状の情報は施工後8年程度までの情報であり、図2.4.4-8に示す概念についても、特に坑道閉鎖後に生じると推定している事象をはじめとして不確実性が存在すると考えられる。今後は、モデルと全体挙動との関係の把握するため室内試験方法のさらなる検討や、より大きなスケールや長期間における相互作用メカニズムを把握するための手法、解析・予測評価モデルへの反映方法の検討が必要と考えられる。

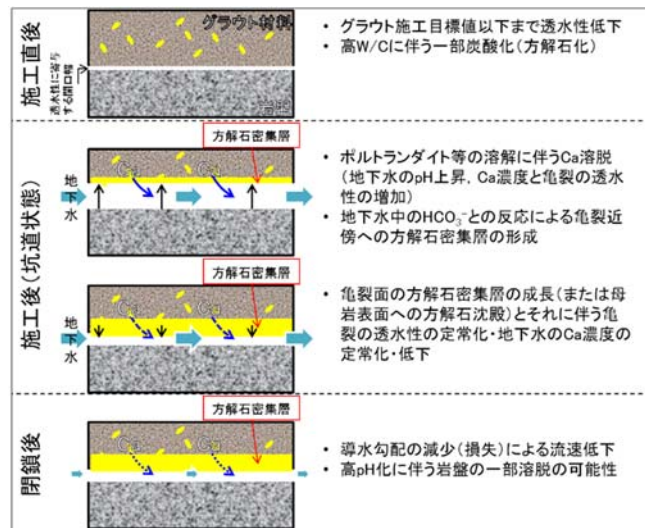


図2.4.4-8 グラウチングに伴うグラウト材/岩盤相互作用メカニズムの変遷に係る概念モデル(案)

2.5 ニアフィールド複合現象／核種移行の体系的評価に向けた技術開発

2.5.1 目的とアプローチ

本タスクでは、ニアフィールドの環境変遷とバリアシステムの状態変遷（以降、「ニアフィールドシステム変遷」という）とその不確実性を考慮して核種移行を評価できる技術（以降、「ニアフィールド総合評価技術」という）の開発について述べる。

ニアフィールド総合評価の概念を図 2.5.1-1 に示す。処分システムの長期性能に影響を及ぼす可能性がある要因に対し、個々の現象に忠実なモデル開発を行い、現象の相互関係を考慮しながら個別現象モデルを適切に組み合わせて複合現象評価を行う。これによりシステム全体としての環境や状態の変遷についての知見を拡充し、この知見を核種移行の場の設定に反映させて核種移行解析を行うという構造である。このような評価を体系的に実施するために以下の検討を行い、これらをニアフィールド総合評価システムとしてまとめた。

- ・ 必要となる個別現象の情報・知見の集約
- ・ ニアフィールドシステム変遷についての分野横断的・整合的な現象解析に向けた共通モデル・シナリオの整備
- ・ ニアフィールド複合現象評価手法の開発
- ・ ニアフィールドシステム変遷の理解に基づき核種移行解析を行う手法の開発

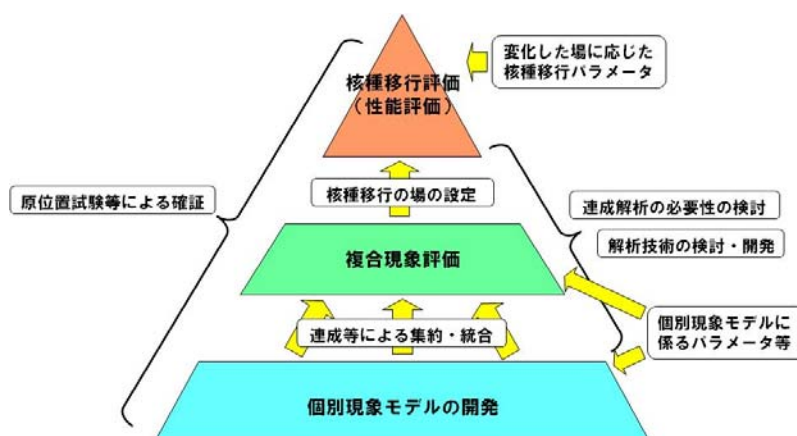


図 2.5.1-1 ニアフィールド総合評価の概念

2.5.2 ニアフィールド総合評価システムの全体構想

ニアフィールド総合評価システムの全体構想（平成28年度報告書）を図2.5.2-1に示す。ニアフィールド総合評価システムは、ニアフィールド複合現象解析モデル、ニアフィールド核種移行解析モデル、共通モデル・シナリオ及び共通データベース、成果体系化・ユーザ支援ツール、及びこれらの動作基盤としての総合評価プラットフォームで構成される。

ニアフィールド核種移行解析モデルは、最新の知見に基づくニアフィールド変遷の情報を反映させた状態で地層処分システムの性能を定量化できることを目標とした。これによって従来の性能評価に含まれる安全裕度の可視化やサイト・設計オプション等の選択肢間の比較を可能とし、長期安全性についての説明性の向上、及び地層処分事業の各段階における多様なステークホルダの合意に基づく意思決定の根拠となる信頼性の高い情報の提供に資することを旨とした。

ニアフィールド複合現象解析モデルは、現象理解および計算科学の視点から、以下に留意して開発を進めることにより、関連する多様な現象及びこれらの相互関係の重要な特徴を失うことなく、現実的な計算時間の中でこれらの総体について十分な精度でのシミュレーション実施を可能とすることを目標とした。

- ・ 個別現象についての最新の知見を活用し、最先端のモデルや手法を組み合わせたstate-of-the-artな評価基盤の整備
- ・ マルチフィジックス性の現象群全体としての新たな挙動の創発（逡増や逡減のような連成現象に固有の特徴があらわれること）の予見
- ・ マルチスケール性により、異種材料間の境界等における局所的な現象がシステムの全域的な挙動を支配する機構等の予見
- ・ 知識ギャップ（複数の分野間の境界等のように従来の研究で得られた知見が不足している領域）による不確実性の影響の取扱い
- ・ 異なる分野の解析間（時間的空間的な離散化の違いなどが存在する）での整合性の向上

共通モデル・シナリオ及び共通データベースは、共通する現象に対する研究領域間での取扱い、仮定、モデルについての競合・矛盾などを解消するため整備するもので、複合現象評価及びニアフィールド核種移行解析の入力情報として使われる。また、成果体系化・ユーザ支援ツールは、現象理解や計算科学の視点から多様なデータやツール群を連携させるのみではなく、これらの開発や利用に携わるユーザがそれぞれ所有している知識やノウハウの効率的な共有及び分野横断的な協働による新たな知識の創出を支援するという知識マネジメントの視点に基づき整備するものである。

総合評価プラットフォームには、個別の分野で開発されるモデル群を柔軟に組み合わせて解析を実行するためのミドルウェアとしての機能が与えられる。ミドルウェアを中核とした構造とすることで新たなモデルに更新可能となり、長期にわたり多分野のステークホルダが利用し協働できるシステム開発を目指した。

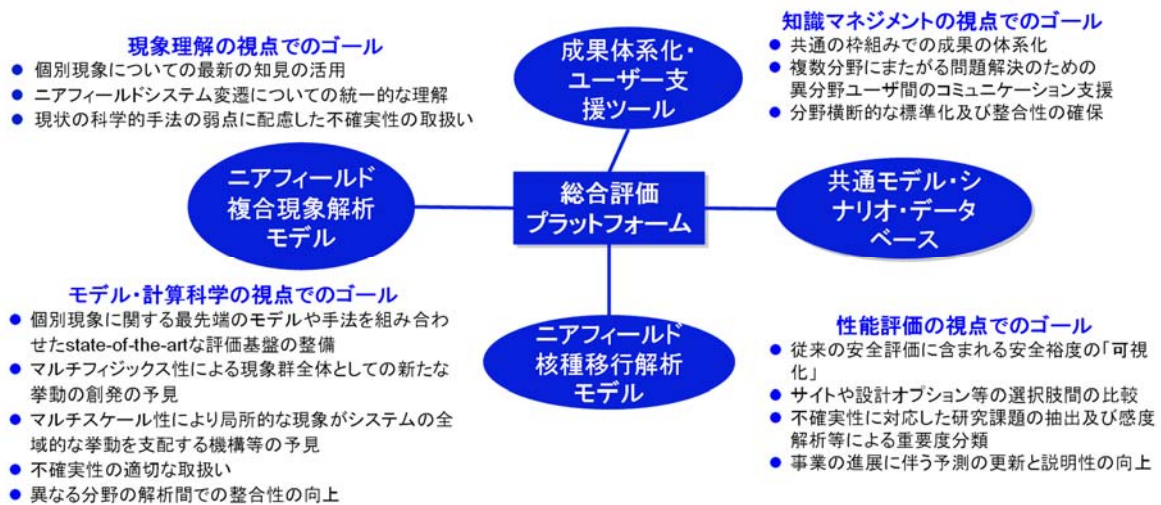


図 2.5.2-1 ニアフィールド総合評価システムの全体構想

2.5.3 個別現象の情報・知識の集約

ニアフィールド総合評価で必要となる基盤情報整備として、ニアフィールドシステム変遷に係る現象やこれらの相互関係とシステム性能（核種移行挙動）に及ぼす影響について情報・知見を集約し、これに基づきシステム性能への影響という観点から重要となる現象/プロセスの抽出を行った。また、抽出された現象/プロセスについて、各研究領域における最新の知見・モデル・評価事例、研究領域間での現象の取り扱いに関する関係性や矛盾・競合、現象解析上の課題（例えば、個別現象間での連成の必要性）等に着目して調査を行い、ニアフィールドシステム変遷に係る現象解析に向けての課題を整理した（以上、平成26年度報告書；平成27年度報告書）。

重要な現象/プロセスのひとつである緩衝材へのオーバーパックの腐食影響に対する知見を表2.5.3-1に例示する。表2.5.3-1に示した「鉄影響による（緩衝材）変質部のひび割れ」についての現象解析では、緩衝材変質に係る化学-物質輸送プロセスとオーバーパックの腐食膨張という力学的プロセスという異なる現象を連成させる必要があり、この際には異なる現象/領域間のマルチフィジックス性のフィードバックループを適切に考慮する必要がある。また、異種材料間の境界などの局所的現象がシステム全体の挙動に影響する可能性があることから、上記のマルチフィジックス性に対処すると同時にマルチスケール性に留意することも重要である。例えば、上述の緩衝材へのオーバーパックの腐食影響についての現象解析では、「鉄-ベントナイト境界面での二次鉱物沈殿による間隙閉塞」（表2.5.3-1）という局所スケールでの化学-物質輸送プロセスの特徴とその影響を適切な解像度で捉えて、システム全体に反映することが必要となる。

表2.5.3-1 緩衝材へのオーバーパックの腐食影響に関連する知見

（平成27年度報告書より抜粋、一部改訂、引用文献省略）

鉄腐食生成物と鉄ケイ酸塩鉱物の生成割合	オーバーパック腐食に伴い生じ、緩衝材中を拡散で移行する鉄イオンは、鉄腐食生成物や鉄ケイ酸塩鉱物をはじめとした二次鉱物の生成によって消費される。鉄腐食生成物と鉄ケイ酸塩鉱物の生成割合はこれらの鉱物の沈殿速度や鉄イオンの移行速度の影響を受け、また、共存イオン濃度や温度条件などによっても異なると考えられる。
オーバーパック腐食膨張による緩衝材圧密	オーバーパックの鉄腐食膨張により、緩衝材の密度や厚さが変化する可能性がある。腐食膨張により緩衝材は外側方向に圧縮されるため、緩衝材の半径方向の厚さを低減させるとともに、緩衝材が圧密されて間隙率が減少する。これにより緩衝材の拡散係数等へ影響が生ずると考えられる。
鉄-ベントナイト境界面での二次鉱物沈殿による間隙閉塞	鉄影響によるベントナイト変質過程において、境界部で二次鉱物が沈殿することにより緻密な変質層が形成されると、これにより鉄イオン等の拡散が抑制され、ベントナイトの変質は境界近傍に限定される可能性がある。しかし、緩衝材中で緻密な変質層が形成して保護的に働くかについては条件によっても異なる可能性があり、不明な点も多い。また、鉄腐食膨張等による応力、未変質のベントナイト領域の膨潤圧、変質層の強度などの力学的均衡については実験的にも解析的にも確認されていない。
鉄影響による変質部のひび割れ	圧密ベントナイト中の鉄製ワイヤの腐食試験では、鉄表面付近の鉄ケイ酸塩を含む変質領域から放射状に広がった微小亀裂に沿った鉄の移動が観測されている。微小亀裂は、鉄表面近傍の鉄ケイ酸塩鉱物の生成した領域における膨潤性・可塑性の低下が原因と考えられる。この観察事実は、ベントナイトの変質部で微小亀裂を生じると、その割れ目に沿ってFeイオンが拡散することによって変質領域が拡大する可能性を示唆するものと考えられる。

以上のようなマルチフィジックス性、マルチスケール性の特徴が重要となるのは、上記の例に限らず、TRU廃棄物地層処分施設におけるコンクリート埋め戻し材の鉄腐食膨張に伴うひび割れという現象解析についても同様である。TRU廃棄物地層処分施設（Gr3/4）では、2.3.3(2)2項で検討したように、鋼製材料の腐食膨張などによってコンクリート埋め戻し材にひび割れが生じると考えられる。ひび割れが生じた箇所では、ひび割れ部を中心としたコンクリート成分の溶脱により強度が低下することとなり、さらにひび割れが進行するといった現象が生ずる可能性がある。また条件によっては、割れ目内を二次鉱物が生成して塞ぐことにより、連続するプロセスを抑制する可能性もある。こうしたマルチフィジックス性の問題を対象としたニアフィールド複合現象解析では、施設の変形挙動やニアフィールド全体としての地下水流動といった巨視的スケールで捉えるべき現象に対しては、系全体を対象とした解析を行う必要がある一方、ひび割れ近傍での局所的な振る舞いについては、これを考慮しない場合には現象の本質的特徴が表現できないので、高い解像度でモデル化して解析に反映することが重要となる。

2.5.4項のニアフィールド複合現象解析モデルの開発では、以上のようなマルチフィジックス性、マルチスケール性の課題に取り組んだ。

2.5.4 分野横断的・整合的な現象解析のための共通モデル・シナリオの整理

ニアフィールドシステム変遷の解析では、関係する多様な個別現象やそれらの相互関係についての取り扱いがシステム全体として矛盾のないものとするのが重要である。このため、2.5.5項におけるニアフィールド複合現象解析モデル開発に用いるための、分野横断的・整合的な現象解析のための共通モデル・シナリオを整理した（平成27年度報告書）。共通モデル・シナリオの整理では、2.5.3項で整理した各研究領域における最新の情報などに基づき、共通する現象や境界領域に対する異なる解釈・仮定などの不確実性、知見の不足に由来する不確実性、マルチフィジックス性とマルチスケール性の連成・連携、複合現象における物質収支の確保、その他共通的に利用する情報の統一といった観点に留意して、利用可能なモデルオプション群を抽出するとともに可能性のある複数のシナリオを構築した。緩衝材へのオーバーパックの腐食影響に対する現象解析に向けて整理したシナリオを表2.5.4-1に、その一部を図2.5.4-1に例示する。

以上のように設定したシナリオについては、いずれの可能性も現状の知見では否定できないものの、相互に矛盾した仮定を含んでおり、また、物質収支（この場合は鉄イオン）の点から考えても、少なくとも同時には成立しないことが明らかである。このような可能性のある複数のシナリオに対して、上述のモデルオプションを適切に選定して、ケーススタディ的に現象解析を実施することで、それぞれのシナリオの生起可能性やその条件を評価することができるようにした。

表2.5.4-1 緩衝材へのオーバーパックの腐食影響に対する現象解析のためのシナリオ

シナリオ1	鉄腐食に伴い溶出した鉄イオンは鉄腐食生成物として、あるいは鉄ケイ酸塩鉱物としてオーバーパックと緩衝材の境界面近傍で沈殿する。また、こうした二次的な沈殿物によりオーバーパック表面は保護的皮膜で覆われ、あるいは境界面近傍で緻密な変質層が形成され、これらにより鉄イオンの緩衝材領域への拡散が抑制されることを想定する。さらに、オーバーパックの腐食膨張などによって緻密な変質層が破壊されることがあっても、二次鉱物の沈殿によって自己修復されるとする。このようなプロセスによって、長期間にわたって緩衝材変質部は境界近傍に限定される可能性があるとする。
シナリオ2	温度条件や化学的条件等によっては鉄腐食生成物の皮膜生成が抑制される可能性がある。そこで、鉄腐食に伴い放出される鉄イオンは主として緩衝材領域へ拡散し、非膨潤性の鉄ケイ酸塩鉱物として沈殿することを想定する。また、緩衝材強変質部は二次鉱物が非膨潤性であるために収縮して微細な割れが生じる可能性があり、こうした変質部の微細な割れを通じて鉄イオンの拡散が促進されることにより緩衝材の変質部が時間とともに拡大する可能性があるものとする。
シナリオ3 (図2.5.4-1)	シナリオ1で想定した鉄腐食生成物の保護的な皮膜や鉄影響による緩衝材変質部が生じるものの、それによる鉄イオンの拡散抑制は機能せず、緩衝材変質部が拡大することを想定する。また、緩衝材強変質部では非膨潤性鉱物への変質や二次鉱物沈殿によるセメンテーションなどが生じ、脆性材料の挙動を示すようになることに加えて、オーバーパックの腐食膨張やガス圧力上昇等の力学的な作用により皮膜や変質層のひび割れが生じるとする。このような割れを通じて鉄イオンの拡散が促進されることにより、結果的に長期間にわたり緩衝材変質部が拡大する可能性があるとする。さらに、坑道外側のコンクリート支保等の劣化によって拘束力が低下し、緩衝材強変質部外周部に引張応力が発生する場合には、変質部の不均質性などに起因して割れが発生することとなり、この割れに沿って変質が局部的に拡大する可能性があるとする。

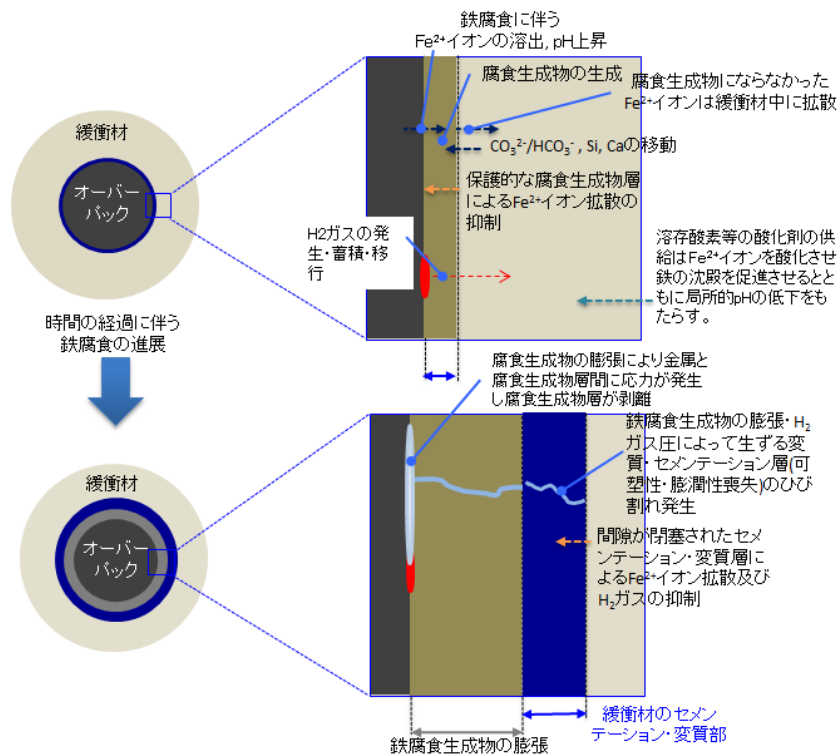


図2.5.4-1 シナリオ3 (腐食膨張による緩衝材変質部の割れと不均質な変質部の進展)

2.5.5 ニアフィールド総合評価システムの開発

(1) ニアフィールド総合評価システムの設計

2.5.2項に示したシステムの全体構想と開発目標に沿って、システム構成要素の機能要件を具体化し、基本設計としてまとめた（平成28年度報告書）。

ニアフィールド複合現象解析モデルでは、化学-物質輸送-力学連成挙動を合理的に評価するための連成解析技術が必要となる。こうした連成解析技術では、マルチフィジックスとマルチスケールの複合問題に対処するために、そのような複合問題に含まれる多様な解析タスクの全体を、現実的な計算時間で実行可能なシステムを構築する必要がある。また、個別現象について最新の知見を活用するという目的から、既に各分野で研究が進められている、また、今後進められる最新のモデルや知見を取り込めるような柔軟性が求められる。そのため、それぞれの分野で独自に開発された対象や手法の異なる種々の解析コードを、総合評価プラットフォーム上で適切に組み合わせる連携させる手法をとることとした。総合評価プラットフォームの基本構成を図 2.5.5-1に示す。ニアフィールド複合現象解析モデルに組み込まれた個別解析コードは、それぞれについて専用で作成されたインタフェースを通じてミドルウェアと呼ばれる実行指示や共有データストレージ、パラメータ授受等を管理する役割を持つソフトウェアに接続する。ミドルウェアから各解析コードに対しては、実行や停止といった実行指示命令の他、各モデルへの入力情報等を送り、各個別解析コードからは、モデルの実行により得られた出力データをミドルウェアに送るという構成である。また、連成解析によって得られる空間的、時間的なシステム変遷に関する情報は、核種移行の場の設定の情報として、ニアフィールド複合現象モデルからニアフィールド核種移行解析モデルに適切な解像度で渡される。共通モデル・シナリオ及び共通データベースをミドルウェアと紐づけることで、ニアフィールド複合現象解析モデルやニアフィールド核種移行解析モデルにこれらの情報を活用できるシステムとすることとした。

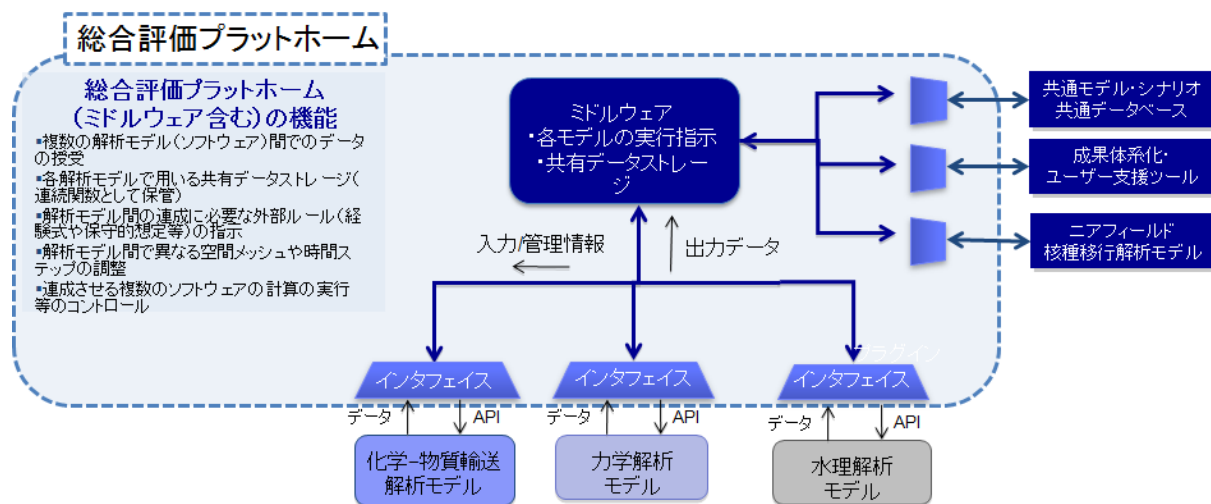


図 2.5.5-1 総合評価プラットフォームの基本構成

総合評価プラットフォームについては、欧州を中心とした非営利グループによって開発されているモデル連成フレームワークOpenMI (Open Modeling interface、<http://www.openmi.org/>)を利用した。OpenMIは、連携するソフトウェア（解析コード）のインタフェースを定義する規格と、この規格に沿ってデータ交換、計算制御を行うための環境を提供している。

(2) ニアフィールド複合現象解析モデルの開発

1) ニアフィールド複合現象解析モデルプロトタイプ作成

ニアフィールド複合現象解析モデルの開発では、「緩衝材へのオーバーパックの腐食影響」や「コンクリート埋め戻し材の鉄腐食膨張に伴うひび割れ」(2.5.3項)というマルチフィジックス性とマルチスケール性の複合問題を対象として、これに対処可能な化学-物質輸送-力学連成解析技術の開発を行った(平成27年度報告書;平成28年度報告書;平成29年度報告書)。

図2.5.5-2に、「コンクリート埋め戻し材の鉄腐食膨張に伴うひび割れ」について、本検討で構築したTRU廃棄物地層処分施設(Gr4)を対象とした連成解析の概念を示す。処分坑道全体スケールでは、岩盤クリープおよび鉄腐食膨張を考慮した坑道全体の変形を扱う有限要素法による力学解析コードMACBECE2014の改良版(平成29年度報告書、以下本項では単にMACBECEと記す)、地下水との反応によるコンクリート埋め戻し材やコンクリート支保工の化学的変質解析を扱う可変グリッド型化学-輸送解析コードGARFIELD-CHEM(Grid Adaptive Refinement FInite ELeMent Discretisation-CHEMistry)、坑道全体を横切るような地下水流れを扱う水理コードFEMWATER(Hsin-Chi J. et al., 1997)を用いた連成解析を行った。このような体系で力学解析を行うと、2.3.3(2)2項で示したように、廃棄体部から支保までを貫通するようなひび割れが廃棄体の隅角部周辺に集中して生じることが予想される。このようなひび割れの集中した領域を対象として、粒状体個別要素法(DEM)による力学解析コードDEAFRAP(Distinct Element Analysis for FRActure Propagation)を用いた高解像度の力学解析を行った。MACBECEからひび割れの発生位置とその時点での施設全体の変形および応力状態の情報が得られるのに対して、DEAFRAPからはひび割れ発生域における局所スケールでのひび割れの形状、本数および連続性などの情報を得ることができる。GARFIELD-CHEMでは、ひび割れ発生域に対しては高解像度の解析を行うようにグリッド変更を行い、DEAFRAPから得られたひび割れの詳細情報を反映させたマルチスケールの化学-物質輸送解析を行った。データ授受の詳細については2.5.5(2)1)の試解析で述べる。

上記のGARFIELD-CHEMは、dealii.orgの提供するDeal.IIという有限要素法ライブラリ(<https://www.dealii.org/>)をベースとして作成されており、各時点の計算結果に応じて詳細な解像度を適用すべき部分とむしろ粗いメッシュの使用が許容される領域とを区分する可変グリッド機能を有する(日本原子力研究開発機構, 2015b)。本検討では、GARFIELD-CHEMについて、計算負荷の主な要因となっていた微分代数方程式を解く際のヤコビアン計算の回数の減少や並列計算の導入などにより計算効率を改善させるとともに、連成解析で必要となる化学反応系機能の拡充、リスタート機能の追加等を行った。

また、DEAFRAPに用いた粒状体個別要素法は、各要素を剛体粒子として、接触状態にある粒子間の相互作用をVoigtモデル(ばね・ダッシュポット)で表現するものである。多数の粒子の運動を追跡しつつ、接触状態にある粒子を検索して、フックの法則とニュートンの第2法則を細かい時間刻み(タイムステップ)で適用することで、モデル化されたすべての粒子の運動軌跡を計算により求めることが可能である。本手法は、もともと土や砂のような粒状体の集合体を対象とする解析手法であるが、要素間に引張力(結合力)を導入することにより、コンクリートのひび割れの発生・進展挙動の解析に適用することが可能である(日本原子力研究開発機構, 2015b)。本検討では、このコンクリートのひび割れの発生・進展挙動の解析を扱う既往の解析コードをベースとして、セメント系材料の間隙率と剛性・圧縮強度との関係式を導出し、その関係式に基づき、DEMの力学モデルにおける粒子間結合ばねの剛性や

強度を間隙率の関数として表現することで、化学計算によって変化した間隙率変化に応じて粒子間相互作用を変化させることのできる力学解析モデルDEAFRAPを作成した。

併せて、「鉄影響における緩衝材変質」を対象とした連成解析技術を構築した。ここでは、有限要素法による力学解析コードMACBECE2014（平野ほか，2016a）と有限体積法を用いた化学物質輸送解析コードQPAC（Quintessa，2013）を用いて、ガラス固化体、炭素鋼製オーバーパック、ベントナイト緩衝材、コンクリート支保及び岩盤からなるHLW地層処分システムの体系（坑道横置き鉛直二次元断面）を対象とした連成解析を実施した。また、「割れ」の進展については、上述の粒状体個別要素法を用いて、ベントナイトが変質により収縮し可塑性を失うような可能性を取り扱う問題に対処可能な力学解析モデルを開発し、これによる予察的解析を行い割れのパターンや局所性などに関する定性的情報を得て、連成解析に反映させた。

以上の方法でニアフィールド複合現象解析モデルプロトタイプを作成し、試解析に用いた。

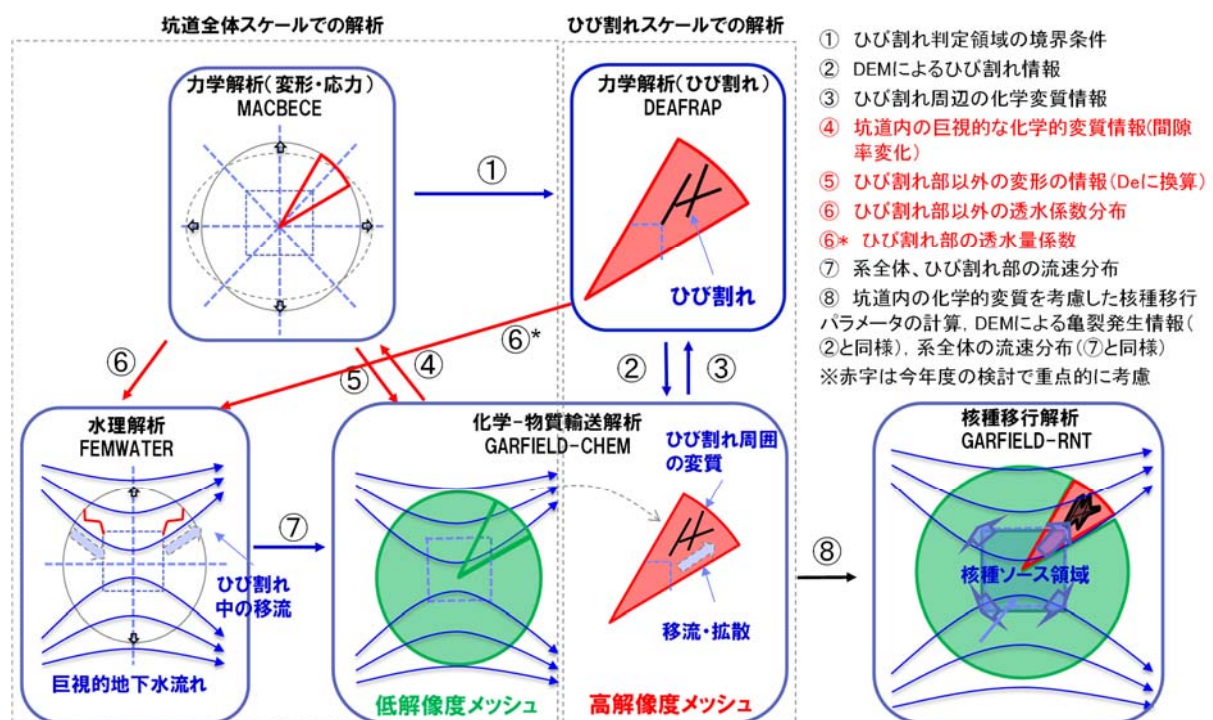


図 2.5.5-2 TRU廃棄物地層処分施設(Gr4)を対象とした連成解析の概念

(○数字はデータ交換の内容を表す)

2) コンクリート埋め戻し材の鉄腐食膨張によるひび割れについての試解析

TRU廃棄物地層処分施設（Gr4）を対象とした試解析に先立ち、ひび割れ部を含む小領域に対してDEAFRAPとGARFIELD-CHEM間の連成解析を試行した結果（平成28年度報告書）を示す。小領域の解析では、コンクリートのひびわれ内で二次鉱物が沈殿した場合の間隙率低下やひび割れ周囲のCa溶脱（ポルトランドライトなどの溶解）などの化学的現象が、DEAFRAPとの連成解析を行った場合に力学挙動にどのように影響するかといった点に着目した。既往のMACBECEの解析結果（日本原子力研究開発機構、2015b）を利用して、MACBECEの単位要素を解析対象とし、当該領域の変位情報を取り出してDEAFRAPの境界条件として与え、DEAFRAPとGARFIELD-CHEM間の連成解析を行った。この連成解析では、DEAFRAPで

求められた亀裂の発生状況を画像で表現し、画像上の位置情報を数値データとして取得することが可能な画像処理ソフトを用いて数値化した上で、GARFIELD-CHEMのモデルに反映させた。GARFIELD-CHEMの計算では、セメント水和物やカルサイトなどの溶解沈殿反応と2次元の拡散に加えて、ひび割れ部に対する垂直方向の移流を与えた。

DEAFRAP からGARFIELD-CHEMへの情報反映については、DEAFRAPの解析で求められる個々の粒子間の結合の破断により生じるひび割れの中には、選択的な物質移行経路として寄与しない非貫通性のひび割れも多数含まれ、全てのひび割れをGARFIELD-CHEMのモデルに反映することは効率的ではないと考えられた。そこで、既往の検討（日本原子力研究開発機構，2015b）における「連続亀裂」の概念を導入して、物質移行への寄与が大きい連続亀裂（連続したひび割れ）のみを予め定めた指標に従って抽出し、GARFIELD-CHEMのモデルに反映させた。GARFIELD-CHEMからDEAFRAPへの情報反映については、近接する複数のCellの間隙率を平均化させる手法の一種である逆距離加重法(Inverse Distance Weighted: IDW) (Shepard, 1968)を用いて、GARFIELD-CHEMによって計算された間隙率分布をDEAFRAPにおける各粒子の間隙率に反映させた。

ひび割れ発生後250年経過時の解析結果を図2.5.5-3に示す。図2.5.5-3では、DEAFRAP解析においてDEM粒子に割り当てられた間隙率と、ひび割れの位置を示しており、一度発生したひび割れが再結合した部分を緑色、新たに発生したひび割れ部分を赤色で記している。この図によると、間隙率の低下している部分の周囲に間隙率が増大している部分が広がっているのと同時に、間隙率低下が進んでいる部分で再結合が進んでおり、周囲の間隙率が高い部分に新たな亀裂が生成していることがわかる。これは、最初にひび割れの入った部分で地下水とコンクリートが反応し、二次鉱物の沈殿により間隙率の低下した部分と、その周囲のCa溶脱（ポルトランドイトの溶解）により間隙率が増加した部分を示しており、その間隙率が増加した部分でさらに亀裂が発生しては伸展していくような振る舞いが見られた。

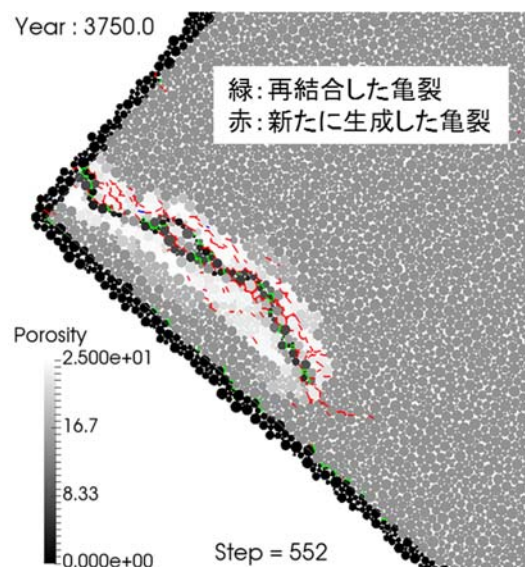


図 2.5.5-3 DEM粒子に割り当てられた間隙率とひび割れの関係
(ひび割れ発生後から250年経過時、図中ではひび割れを亀裂として記載)

続いて、図2.5.5-2に示した連成解析の概念に沿って、TRU廃棄物地層処分施設(Gr4)を対象とした試解析を行った（平成29年度報告書）。試解析における連成解析フローを図 2.5.5-4に示す。基本

的には既に述べたように、GARFIELD-CHEM とMACBECEによる坑道全体スケールでの化学-物質輸送-力学連成解析を主軸とし、DEAFRAPの力学解析はひび割れの詳細情報を得るために補足的に用いている。

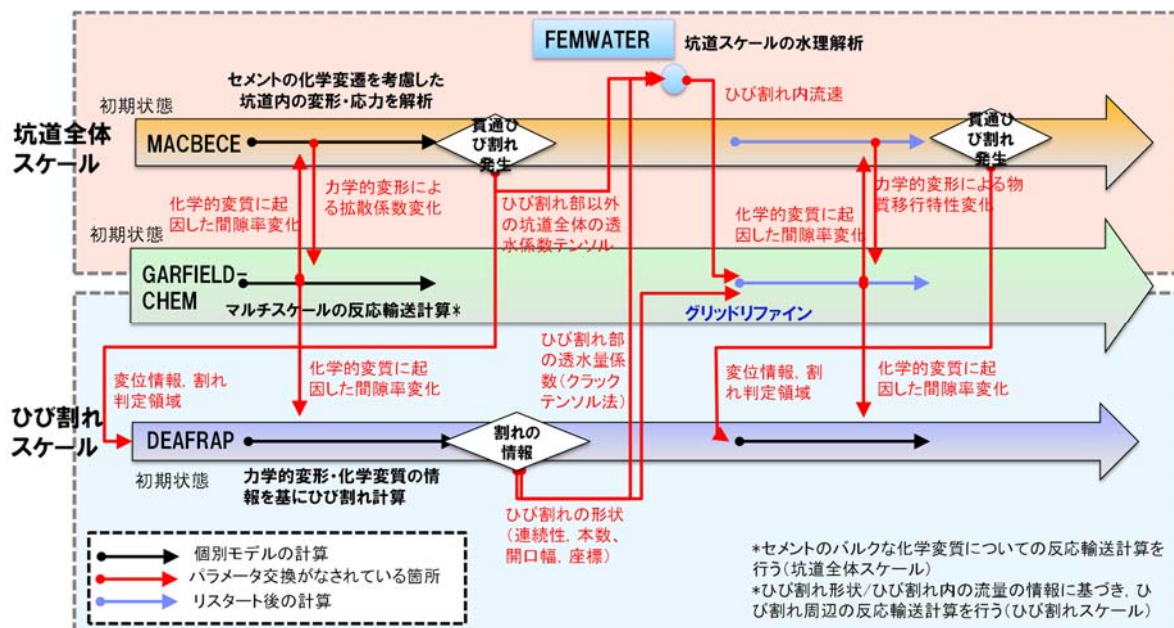


図 2.5.5-4 連成解析のフロー図

この連成解析フロー(図2.5.5-4)の手順に沿って、①坑道全体スケールにおけるMACBECEとGARFIELD-CHEMの連成解析、②坑道全体スケールの連成解析の情報を反映させたひび割れスケールの力学解析(DEAFRAP)、③ひび割れスケールの情報を反映させた坑道全体スケールの連成解析(FEMWATER、MACBECEとGARFIELD-CHEM)を実施した結果を以下に記す。

坑道全体スケールにおけるMACBECEとGARFIELD-CHEMの連成解析における解析体系を図2.5.5-5に、MACBECEの解析結果から得られたひび割れ判定情報を図2.5.5-6に示す。1000年時には廃棄体領域隅角部近傍でひび割れが見られ、1万年時には放射状に多くの割れが発生していることがわかる。特に廃棄体領域隅角部近傍から伸びているひび割れは支保工領域まで貫通したように見え、埋め戻し材領域では1mm以上、覆工・支保領域では数百 μm ~1mm以上の分布を示した。

坑道全体スケールの連成解析結果に基づき、1万年時点で、廃棄体領域隅角部近傍で貫通するひび割れが発生した可能性があるとみなし、この部分におけるひび割れ発生挙動についてDEAFRAPで詳細に解析した。連成解析フローに沿って、MACBECEで計算した変位の時間変化の情報を解析体系の外側の境界に与え、GARFIELD-CHEMで計算した間隙率分布の時間変化の情報を各DEM粒子に割り振ってDEAFRAPの解析を実施した。DEAFRAPの解析により得られたひび割れ開口幅を図2.5.5-7に示す。1万年時点では、坑道外縁部(支保工領域の外縁部)に細かいひび割れが集中しており、また廃棄体領域隅角部から坑道外縁部に向かって連続性のある数百 μm の開口幅を有するひび割れが卓越している様子がわかる。また、図2.5.5-8に示すように、DEAFRAPによって得られた100 μm 以上の開口幅を有するひび割れの位置は、MACBECEで100 μm 以上の開口幅を有すると算定されたひび割れ判定領域の位置と概ね一致していることがわかる。特に、廃棄体領域隅角部から右上斜め方向に向かってひび割れの傾向についてよく一致していた。

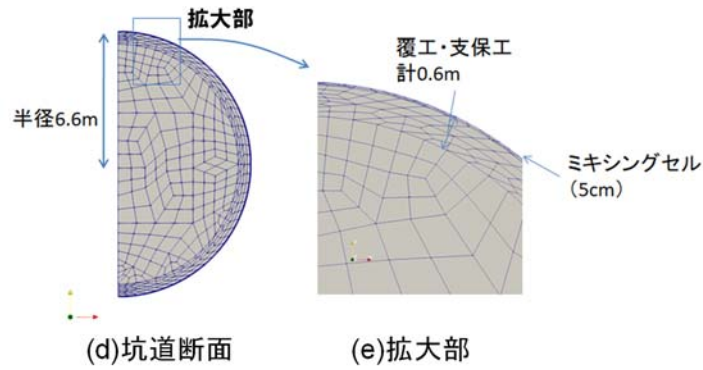
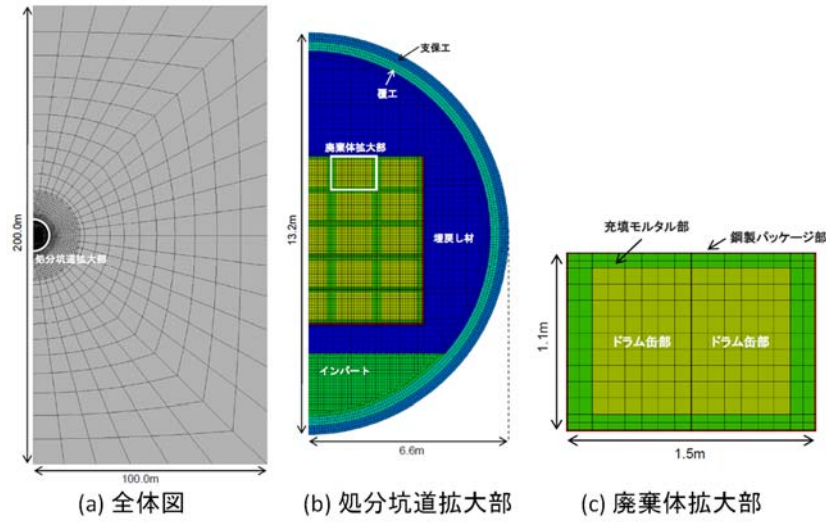


図 2.5.5-5 解析体系

(a)～(c) : MACBECE, (d) (e) : GARFIELD-CHEM

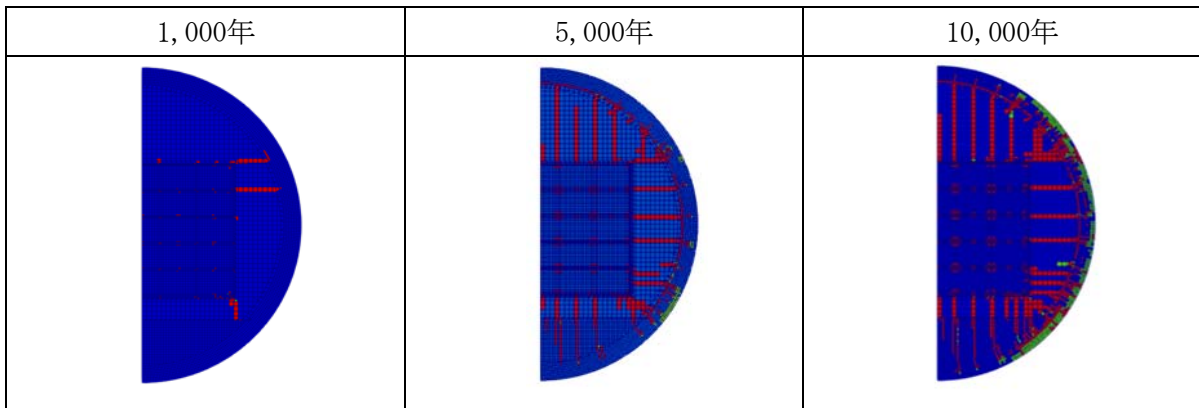


図 2.5.5-6 ひび割れ判定情報 (MACBECE)

(赤がひび割れ判定領域、緑が力学的に再接触したと判定された領域を表す)

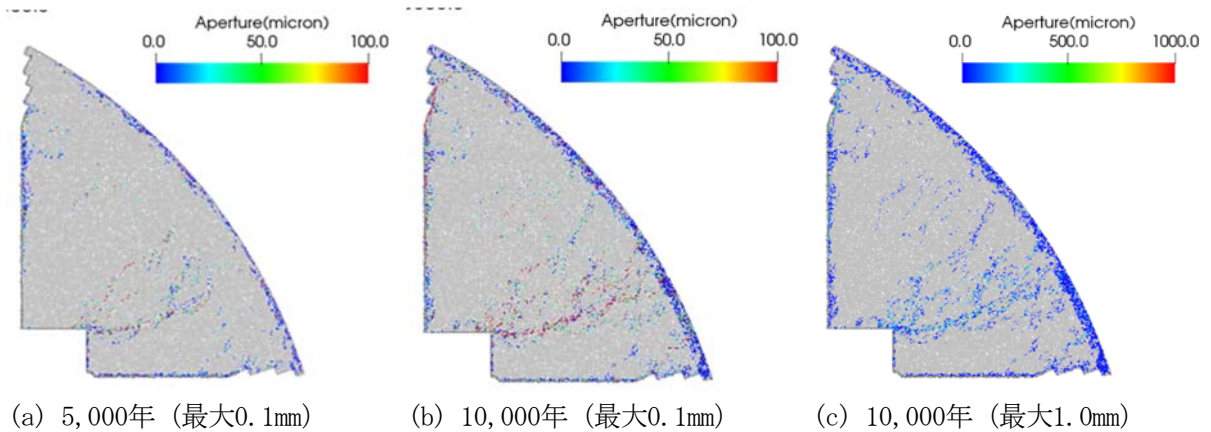


図 2.5.5-7 ひび割れ開口幅

(連続亀裂の抽出方法をルール化し、10以上のひび割れを含むグループを選択)

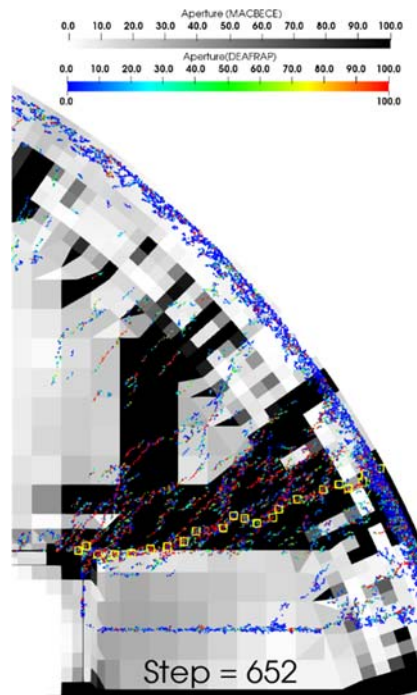


図 2.5.5-8 MACBECEとDEAFRAPのひび割れ開口幅分布の比較

(グレースケールがMACBECEのひび割れ開口幅、レインボーカラーバーがDEAFRAPのひび割れ開口幅分布。図中の黄色いマーカーは、貫通ひび割れを表す代表点として選択した点)

ひび割れスケールの情報を反映させた坑道全体スケールの連成解析 (FEMWATER、MACBECEとGARFIELD-CHEM) では、先ず、DEAFRAPから得られたひび割れ情報を用いたFEMWATERによる水理解析を行った。FEMWATERの水理解析では、ひび割れ部を除く坑道全体の透水係数分布については、図2.5.5-4のフローに沿って、ひび割れが貫通した1万年時点のMACBECEによって計算された値を用いることになるが、本試行では、力学的変形による透水係数の変化はほとんど見られなかったため、TRU第2次レポートの設定に用いられたパラメータを代用した。ひび割れ部の透水量係数は、DEAFAPの結果に基づき抽出した連続性のあるひび割れ (貫通ひび割れ) の開口幅の代表値を用いて、三乗則に従うものとして導出した。FEMWATERの解析結果から、ひび割れ部を含む領域から坑道外側の掘削影響領域に流出する水の

総流量を求め、これよりひび割れ内の流量 ($7.79 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$) を得た。続いて、貫通ひび割れに関する詳細情報（本数、開口幅、位置）とひび割れ内の流量の情報を用いて、再び、坑道全体スケールのGARFIELD-CHEMとMACBECEの連成解析を行った。貫通ひび割れが発生した後は、仮想的に左右対称にひび割れがはいっているとして、画面の左側のひび割れ部から地下水が浸透し、廃棄体領域を通過して右側のひび割れ部に移動し、ミキシングセルに抜けていくような経路を想定した。浸透する地下水はミキシングセルの境界条件に与えたモデル地下水(pH 8.45)と同じ組成とした。1.2万年時までにGARFIELD-CHEMで得られた間隙率、Calcite濃度、Portlandite濃度を図 2.5.5-9に示す。ひび割れ部とその周辺部ではPortlandite濃度の低下が健在化していた。この部分ではpHの低いモデル地下水が流入するものの、Portlanditeが溶解することによって間隙水のpHは12.2~12.4に保たれていた。同じひび割れ部で、モデル地下水との反応によってカルサイトの若干の沈殿も生じていた。間隙率は、Portlanditeの溶解した範囲で増加するが、カルサイトが沈殿するひび割れ部はその増加が抑制されていた。このことは、ひび割れ部がCalciteの沈殿によって閉塞に向かう一方で、その周辺では間隙が増大し、その間隙が増大した周辺部に新たな亀裂が生ずるといった逡増の効果を示唆しており、より長期の連成解析を継続することで、そうしたひび割れ進展のプロセスが坑道全体スケールにおいても表れてくる可能性がある。

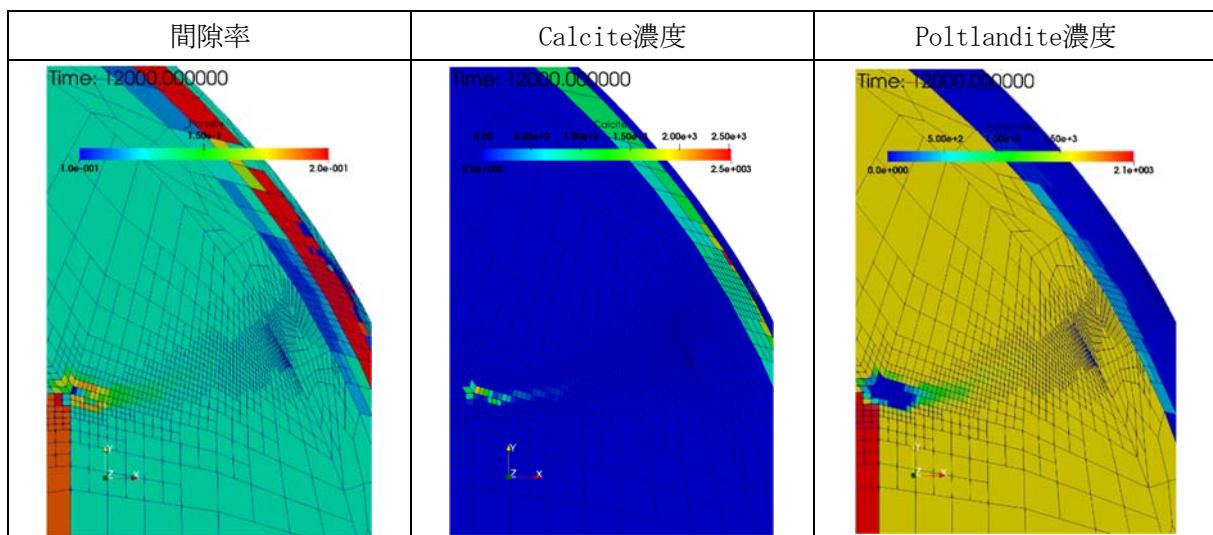


図2.5.5-9 1.2万年時の間隙率および鉱物濃度の分布 (GARFIELD-CHEM)

3) 鉄影響によるベントナイト変質についての試解析

鉄影響による緩衝材変質について試解析を行った（平成27年度報告書）。この試解析では、ガラス炭素鋼-ベントナイト-コンクリートで構成されたMACBECE2014による2次元連続体モデルと、QPACによる1次元連続体モデルの連携を行っている。QPACによる1次元連続体モデルは、処分孔/処分坑道断面の体系に対する2次元極座標の半径方向（以下、モニタラインとする）として位置づけ、モニタライン間を適切に内挿する方法（日本原子力研究開発機構、2015b）を用いてMACBECE2014と同一の2次元の解析体系に反映させた。MACBECE2014では、QPACの解析結果からモンモリロナイト残存量などを指標に緩衝材の変質程度の情報を得て、予め定めた指標に基づいて強変質部と判断された要素に対して岩石相当の硬い脆性材料（MACBECE2014では弾性体として扱う）の特性を与えて解析を行う（未変質部については

弾粘塑性体として扱う) こととした。また、MACBECE2014では要素変形に伴い要素自体の大きさや固相密度が変化するため、QPACの解析においてもこの要素変形に伴い、体系の大きさや固相密度を変化させることが本来望ましいが、体系や固相密度を変化させることは計算負荷の点から困難であった。このため、本タスクではその代替手段として、MACBECE2014の解析結果から要素の力学的変形に伴って変化する拡散係数を、体積ひずみや割れの判定を指標として計算し、これをQPACへ渡した。

試解析においては、2.5.4項で整理した「鉄影響による緩衝材変質」に対するシナリオに基づき、4つの解析モデルオプションを設定した。解析モデルオプション0では、個別研究分野のそれぞれにおける保守的設定をあえて取り入れた、過度に保守的な仮定に基づく解析を行った。この解析結果と比較することで、本研究で目標としている分野横断的な現象解析の効果を確認した。これに対して、解析モデルオプション1~3では、2.5.4項に記したシナリオ1及び3を対象として、鉄腐食による溶解、腐食生成物や鉄ケイ酸塩鉱物の沈殿、領域間の拡散による物質輸送にかかわる鉄(II)イオン等の物質収支のとれた解析を行った。

シナリオ3に対応する解析モデルオプション3では、放射状の割れが生じ局部的に拡大すると仮定した解析を行う。DEM法による予察解析結果に基づき、局在化した割れ目の本数、位置を仮定し、割れ目の開口幅はMACBECE2014によって計算された同一半径上の各要素の歪みの総量を、これら局在化した割れ目に按分して与えることとした。QPACではこれらの割れ目を明示的に考慮した体系と、割れ目の入っていない体系を設定し、これらを各モニタラインに対応させた連成解析を行った。

解析モデルオプション0に対する試解析の結果、溶解した鉄の全量が緩衝材変質に使われるという仮定の下では、強変質部が鉄側境界から50~60cmの範囲まで進展していること示された。また、強変質部において強い引張応力が生じており、この時の引張応力は強変質部の引張強度として与えた0.486MPa(鉄型サポナイトや緑泥石などの粘土鉱物を含む緑色凝灰岩の特性を参考とした)を超えていた。以上より、過度に保守的な仮定の下では、緩衝材の殆どの領域で変質が進展し、腐食膨張によってひび割れが発生すると計算された。解析モデルオプション1~3におけるMACBECEによる最小主応力分布の計算結果を図2.5.5-10に示す。モデルオプション1では、緩衝材が殆ど変質しないため、腐食膨張による応力の働く方向は緩衝材全領域において圧縮方向のみであった。モデルオプション2では、オーバーパック近傍数cm程度の領域で局部的に緩衝材が変質し、当該領域でのみ腐食膨張の影響により上述の引張強度を超える引張応力が働くこととなった。それ以外の緩衝材領域における応力分布は圧縮方向のみであった。モデルオプション3では、割れが発生したとするモニタライン上で変質が生じてひび割れが生じたと判定されたものの、そうした現象はモデルオプション2と同様にオーバーパック近傍数cmの領域に限定されていた。このように、適切に物質収支を考慮して化学-物質輸送-力学連成解析を行うことにより、過度に保守的な仮定に基づくモデルオプション0の解析結果に比べて、緩衝材変質は局部的であり、力学的な割れが生ずる箇所も限定されるという可能性を示すことができた。

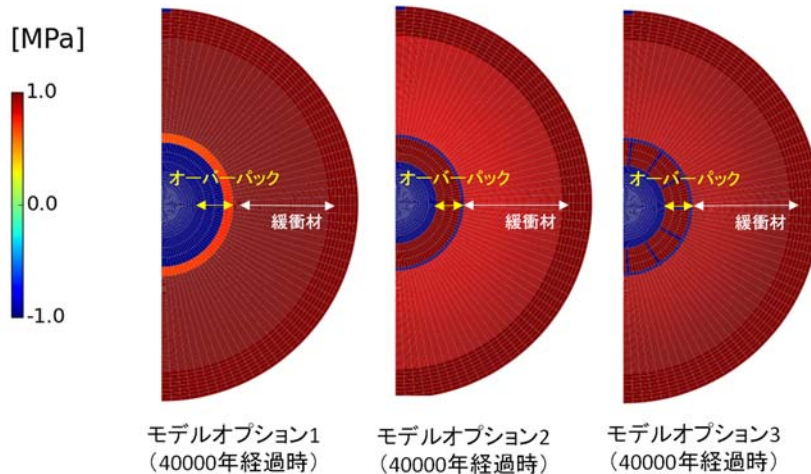


図 2.5.5-10 解析モデルオプション1～3の連成解析結果（最小主応力分布）

(3) ニアフィールド核種移行解析モデルの開発

2.5.5(1)で示したニアフィールド核種移行解析モデルの基本概念に基づき、ニアフィールド複合現象解析モデルによって評価される過渡的な場の状況を捉えて、核種移行解析を行うことのできる可変グリッド型核種移行解析モデルGARFIELD-RNT (Grid Adaptive Refinement FInite Element Discretisation-RadioNuclides Transport)を開発した(平成28年度報告書;平成29年度報告書)。GARFIELD-RNTは、核種の移行遅延効果、溶解度制限および崩壊連鎖を考慮した解析をするための機能、並びに核種のソースタームを設定する機能を有する。また、可変グリッド型化学-物質輸送解析モデルGARFIELD-CHEMの解析体系と物質輸送の計算結果を共有しながら、GARFIELD-CHEMによって計算される主要環境条件変化に応じて適切なタイミングで変化させた核種移行パラメータを読み込んだ解析ができるので、核種移行の場の時間的空間的变化に追従した核種移行解析が可能である。

このGARFIELD-RNTを用いて、2.5.5(2)1)に示したTRU廃棄物処分施設(Gr4)を対象としたニアフィールド複合現象解析と連携させた核種移行解析を試行した。解析の対象とする核種は、第2次TRUレポートにおける評価結果から重要な核種のうち、核種移行特性が化学条件に鋭敏であると考えられるNi-59、Sn-129およびPu-239の3核種とした。

核種移行解析の結果として、1.2万年時点でのNi-59、Sn-126、Pu-239の濃度分布を図2.5.5-11に示す。いずれの核種についても廃棄体領域から浸出した核種の拡散による拡がり、移流によるひび割れに沿った移行が見られた。ひび割れ部では覆工にまで達しており、また、Sn-126やPu-239に比べてNi-59の濃度が高かった。坑道内はほぼ全域でpHは12.2～12.4程度であり、Ni-59に対して移行遅延効果が低く、拡散・移流のそれぞれによって核種が移行しやすいような状態であったと考えられる。Sn-126、およびPu-239については、ひび割れに沿った核種の浸出は見られないが、拡散によって廃棄体領域から僅かに浸出していく様子が見られた。これら核種は、移行遅延効果が高く、核種の移動が抑制された状態であったと考えられる。

また、このように環境条件変化を直接的に反映させた核種移行解析の効果を考察するために、第2次TRUレポートなどの従来の評価で取り扱われている保守的(安全性を厳しく評価する側)な設定を与えた核種移行解析を実施し、上述の解析結果と比較した。保守的とされる設定の解析では、上

述の核種移行解析と同じ解析体系を用いるが、化学-物質輸送-力学の場の変遷を一切考慮せずに、坑道内は一様に微細砂並みの透水係数と自由水中のCsの拡散係数（60℃）に間隙率を乗じただけの高い拡散係数であり、化学的条件としてはRegionIIの状態が継続するという単純な条件とした。この結果、坑道内の核種移行率について、保守的とされる設定の方が明らかに高く見積もるが、環境条件変化としてひび割れ部で選択的な移流が生じる条件では、局所的には高収着性核種の移行率がより高くなる場合があることがわかった。

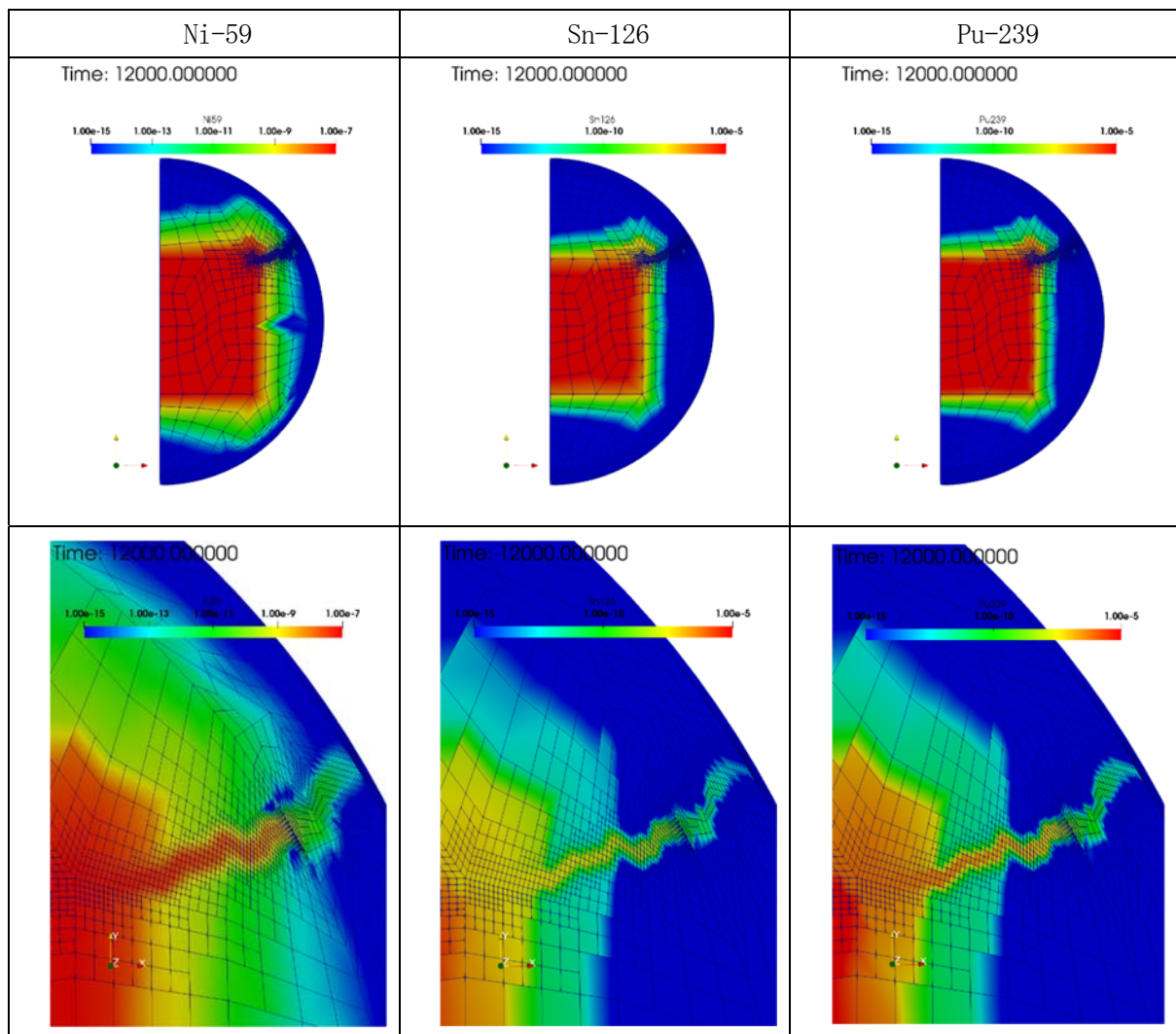


図2.5.5-11 核種の分布

(上段が坑道全体スケール、下段がひび割れ部を中心とした拡大図)

(4) ニアフィールド総合評価に関する一連の成果の体系化

ニアフィールド総合評価システムの全体構想(図2.5.2-1)では、現象理解や計算科学の視点から多様なデータやツール群を連携させるのみではなく、これらの開発や利用に携わるユーザーがそれぞれ所有している知識やノウハウの効率的な共有及び分野横断的な協働による新たな知識の創出を支援するという知識マネジメントの視点に基づき、成果体系化・ユーザー支援ツールを開発することとした。成果体系化・ユーザー支援ツールの開発では、以下の要件を満たすことを目標としている。

- ・ 共通の枠組みでの成果の体系化：シミュレーションやストーリーボード等の共通の枠組みの作成によってシステム全体の挙動についての理解を統一的に表現する
- ・ 複数分野にまたがる問題解決のための異分野ユーザー間のコミュニケーション支援
- ・ 分野横断的な標準化及び整合性の確保

本検討では、成果体系化・ユーザー支援ツールの開発として、ニアフィールドのシステム変遷と核種移行に関する研究成果をHTMLによりマルチメディア情報として示すとともに、関連のあるコンテンツ間については適宜参照リンクを作成する形式をとることとし、ニアフィールド総合評価知識ポータル（以下、KNOSSOS ; KNOWledge portal for multi-Scale multi-physics Simulation Of near field processes and Safety analysisと称する）を構築した。

KNOSSOSの全体の構造を図2.5.5-12に示す。KNOSSOSでは、種々の情報・成果をニアフィールドシステム変遷と核種移行に関するシナリオの記述、関連する情報の知識、シミュレーション、数値計算技術の4つのコンテンツに分類し、各コンテンツを拠点として個々の要素およびそれらの関連性を紐付けすることで、全体を俯瞰しつつ、着目する興味に応じて情報にアクセスできるものとした。

システム変遷と核種移行に関するシナリオのコンテンツには、2.5.5(2)で行った一連のTRU Gr4の処分坑道を対象とした連成解析結果から得られた状態変遷のシナリオと、解析の不確実性に起因して生じ得るシナリオなどをロジックツリー方式で整理した。また、同じく2.5.5(2)で得られた解析結果に基づき、状態変遷の状態をストーリーボードとして整理した（図2.5.5-13）。

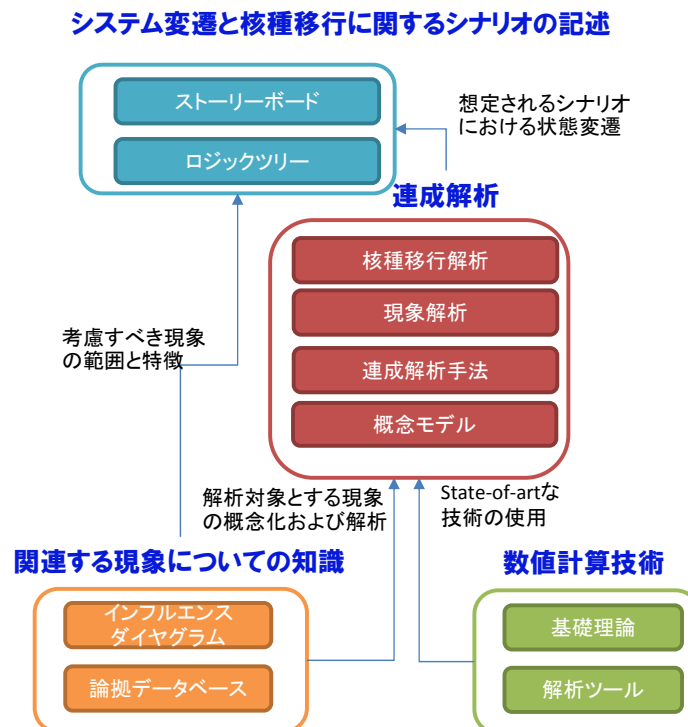


図 2.5.5-12 成果の体系化の全体構成

また、本節における2.5.3～2.5.5(2)項、および2.2～2.3節を通して得られた、ガラス固化体の地

層処分システムに対するニアフィールドのシステム変遷と核種移行に関する成果について、上記の体系化手法に沿って整理する方法を検討した。HLW地層処分の場合は、処分システムを構成する要素が多く、それぞれに期待される安全機能が異なり、性能評価の観点から重要となる個別現象/プロセスおよびこれら相互作用に着目した研究は多岐にわたる。平成27年度までに、こうした様々な研究の成果を反映させて、ニアフィールドシステムの状態設定に係る諸現象や、それらがその後の核種移行プロセスに及ぼす影響をストーリーボードとして整理するとともに、これらの現象や影響が、国内外の性能評価プロジェクトにおいて安全評価上どのように取り扱われているかを調査し、課題と捉えられるものを抽出した。ストーリーボードの一例を表2.5.5-1に示す。HLW地層処分システムに関する成果の体系化は、このストーリーボードを中心に据え、抽出された課題に対して、本サブプロジェクトで得られた研究成果を記載した「成果の表」を対応させることで、関連付けていく方法とした。成果の表には、研究成果の概要を簡潔に示すとともに、本成果がニアフィールド変遷の状態設定や核種移行解析評価における現象の取扱いにどのように反映可能か、モデル化、パラメータ設定等に対してどのような考え方や概念で利用可能かといった点を記した。また、特にニアフィールド変遷に関わる複合現象解析への活用を考慮し、異なる研究領域で開発されている個別現象解析モデル間の連続性、接合、整合性などの問題（過渡期挙動と長期挙動、マイクロ現象とメソ・マクロ特性、局所と全体スケール、境界条件の近似や簡略化、共通の現象についての取扱い方など）に着目した課題を記載した。成果の表の一例を表2.5.5-2に示す。

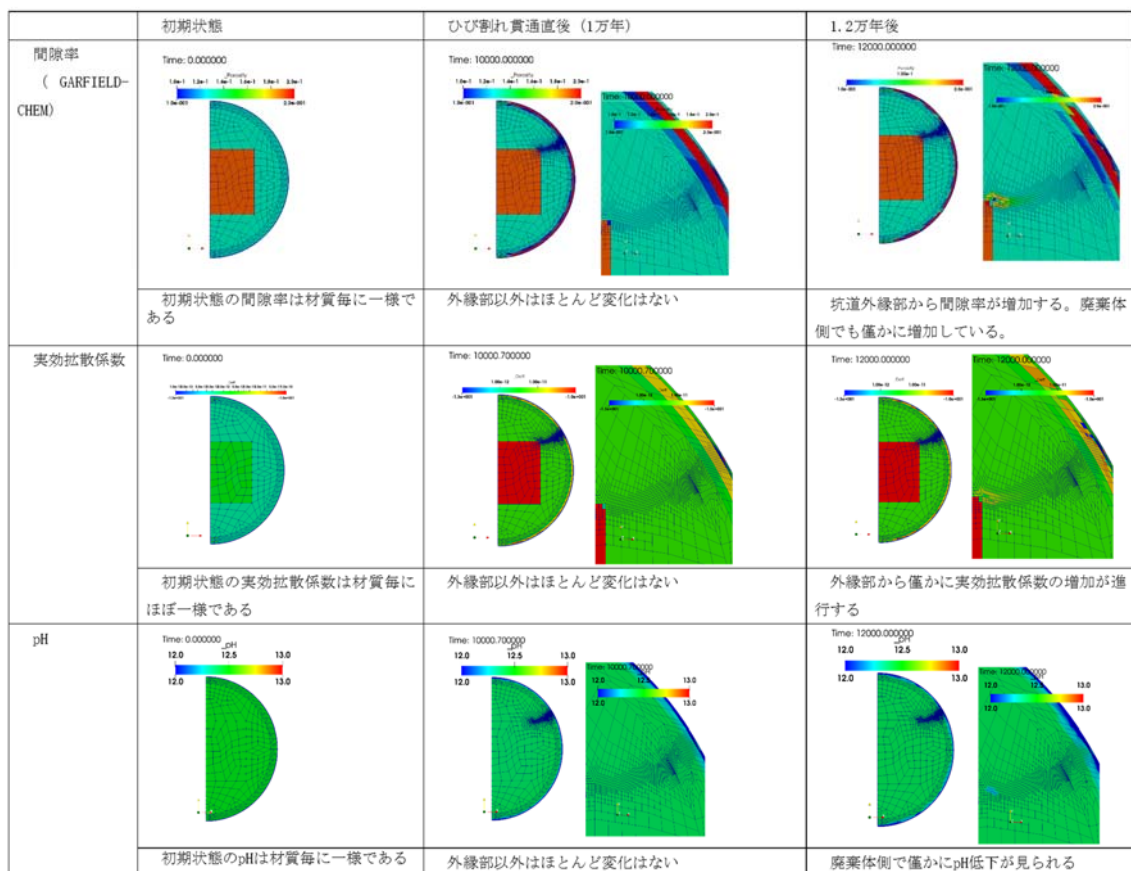


図 2.5.5-13 ニアフィールドの主要な状態変数の変遷のストーリーボード(抜粋)

表2.5.5-1 ニアフィールドでの複雑な諸現象に関する課題の抽出・整理(例)

期間	環境条件が定常に至る期間	
閉鎖後年数	数万年	
ニアフィールドの状態変遷の概念		
	閉鎖後安全機能	<ul style="list-style-type: none"> ・地層による生活圏からの物理的隔離 ・ガラス固化体の浸出抑制 ・放射性核種の溶解度制限 ・緩衝材の低透水性 ・緩衝材の地下水浸透抑制及びその中での流れの制限 ・緩衝材のコロイドろ過性 ・緩衝材の核種収着性 ・母岩の低透水性 ・母岩の核種収着性 ・坑道周辺の卓越した移行経路の回避
ニアフィールド環境条件	T	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の発熱は低下し、発熱の影響は無視できる。
	H	<ul style="list-style-type: none"> ・地形および密度差（塩水影響）による岩盤中の地下水は流動する。 ・岩盤の透水性亀裂および坑道掘削や熱応力によって生成あるいは開口した亀裂に沿った高透水路の形成による卓越した地下水流動起こる。ただし、プラグ等によって連続した卓越移行経路となることが抑制される。 ・再冠水により水分飽和状態となった緩衝材の低透水性により人工バリア内の流動は無視できる。ただし、水素ガス圧による間隙水の押し出しの可能性はある。
	M	<ul style="list-style-type: none"> ・飽和後の流出/膨出による密度低下が生ずる可能性がある。 ・オーバーバックの腐食膨張による緩衝材の圧密、ガラスの割れおよび周辺岩盤への応力発生が発生する。 ・周辺岩盤のクリープが発生する（軟岩の場合）。 ・緩衝材の変質に伴い力学特性が変化する。
	C	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄およびコンクリートとの境界面において二次鉱物沈殿により間隙が閉塞する。 ・ガラスの溶解が進み表面変質層生成が形成される。 ・還元環境での炭素鋼腐食による水素発生と二次鉱物沈殿（腐食生成物）が起こる。 ・鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材変質（モンモリロナイト溶解・Feケイ酸塩鉱物沈殿）が起こる。 ・コンクリート-ベントナイト相互作用による緩衝材変質（モンモリロナイト溶解・二次鉱物沈殿）が起こる。
	R	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス溶解に伴い核種が浸出する。 ・難溶性元素は溶解度により再沈殿する。 ・緩衝材中での拡散による核種の移行および収着による遅延が起こる。 ・緩衝材と鉄・コンクリート境界面での間隙閉塞による核種移行の制限が起こる可能性がある。 ・水素ガスの圧力による緩衝材間隙水押し出しによる核種移行（移流）が起こる可能性がある。
課題	不均質性	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の不均質性に応じた離散的ガス通気経路の形成についての室内試験および解析（各国） ・緩衝材間隙水の微視的不均質性（層間水等の区分）を考慮した統合的な水理・化学モデル（本検討で新たに抽出した課題） ・長期的な緩衝材や埋め戻し材の密度不足による膨潤圧低下やベントナイトの流出の可能性（SKB等） ・長期的な緩衝材の押し出しによる密度低下の可能性（SKB等） ・亀裂ネットワーク中の物質移動挙動に関する原位置トレーサ試験（Åspö等） ・マトリクス近傍岩石中微視的不均質鉱物組成の核種移行挙動への影響（本検討で新たに抽出した課題） ・コロイドの性状の把握（Åspö等） ・微生物の影響の予測（Åspö等）
	挙動的	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス通気後の緩衝材中開口部の自己閉塞挙動（各国） ・処分場周辺の酸化還元環境の変化（Nagra等） ・地下水の放射線分解の影響の予測等（SKB等）
	非線形・連続・形成	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス、鉄、緩衝材、セメントの化学的相互作用、鉄腐食膨張による圧密及び水素ガス発生といったマルチフィジックス連成効果についての予測解析（本検討で新たに抽出した課題） ・グラウト施工による周辺岩盤の初期～長期の地球化学的変化と核種移行挙動への影響評価

表2.5.5-2 成果の表(例)

課題名	ガラス、鉄、緩衝材、セメントの化学的相互作用、鉄腐食膨張及び水素ガス発生といったマルチフィジックス連成効果についての予測解析
取り扱う現象	鉄ケイ酸塩鉱物等の沈殿によるガラス溶解への影響
成果の分類	(A) バリア特性やその影響因子に直接関係する現象/プロセスの知見
成果	<p>【概要】</p> <ul style="list-style-type: none"> 低酸素条件における、FeCl₂溶液を用いた模擬廃棄物ガラスの浸出試験及びFe²⁺イオンと溶存ケイ酸の反応試験 (Fe-Si反応試験) を実施した。各試験で生成した析出物をエックス線回折分析及び透過型電子顕微鏡/電子線回折分析により分析し、溶液中のSi/Feモル比に応じて異なるタイプ (蛇紋石族, タルク族) の鉄ケイ酸塩鉱物が生成することが確認できた。 <p>【反映先】</p> <ul style="list-style-type: none"> インフルエンスダイアグラム(下図)に示すように、鉄イオンや鉄腐食生成物とガラス起源の溶存Siが反応し、「鉄ケイ酸塩鉱物が生成」することによって「ガラスの溶解促進」、さらにはガラス固化体からの核種浸出率の増加につながる。 また、鉄の「腐食膨張」によってガラスの割れが生じ、比表面積が増大すると核種移行への影響が生ずるだけでなく、SA/V比 (ガラス表面積/溶液量比) の変化を通じてガラス近傍地下水中のSi/Feモル比にも影響を及ぼす。本試験により、溶液中のSi/Feモル比に応じて異なるタイプ (蛇紋石族, タルク族) の鉄ケイ酸塩鉱物が生成することが確認されている。このように「鉄ケイ酸塩鉱物の生成」に「鉄腐食膨張(力学的現象)」が影響する。 よって、ガラスの長期溶解モデルでは、「鉄ケイ酸塩鉱物の生成」を考慮する必要があり、また、「鉄ケイ酸塩鉱物の生成」には「腐食膨張」等によるSA/V比の変化を考慮する必要がある。本研究成果は、「鉄ケイ酸塩鉱物の生成」の評価における二次鉱物種の設定などに利用可能であり、「ガラスの溶解促進」の評価につながる。 蛇紋石-カオリナイト族のFeケイ酸塩鉱物 (グリーンライト又はクロンステッドタイト) とタルク-パイロフィライト族のFeケイ酸塩鉱物の場合でガラス固化体の溶解寿命を求めると、それぞれ約16,000年、約8,000年と試算された。今回試算した溶解寿命は、第2次取りまとめ (核燃料サイクル開発機構, 1999c) で示された溶解寿命 (約7万年) と較べて短い。
関連する現象への影響	<ul style="list-style-type: none"> 「鉄ケイ酸塩鉱物の生成」の評価には、鉄イオンの供給速度、ガラスの溶解によるSiの供給速度、SA/V比の設定が必要となる。現実的なFe²⁺イオンの供給速度を決定するためにはオーバーパック内側の腐食速度、磁鉄鉱等のケイ素を含まない腐食生成物の生成割合が必要である。ガラスの溶解によるSiの供給速度を決定するためには、ガラス変質層による溶解/変質抑制効果等の把握が必要である。 「鉄ケイ酸塩鉱物の生成」は、鉄イオンの取り合いという観点から「腐食生成物の蓄積」や「鉄腐食による緩衝材変質」の影響を受ける可能性がある。

2.6 まとめ

本章では、ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術として、4つのサブタスクごとに技術開発を進め、以下に示すような成果を取りまとめた。

2.6.1 システムの過渡的变化評価技術開発

過渡期を評価するための熱-水-応力連成解析モデルについては、緩衝材の膨潤変形による密度変化と、これに伴う熱特性、水理特性等への影響を考慮できるモデルを高度化し、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験への適用を通じ、モデルの有効性を確認した。さらに、ニアフィールドの長期挙動に関する事例解析を実施し、安全評価における核種移行の初期状態の設定に必要な情報である過渡期終了時の緩衝材の密度分布などを、今後の課題とともに提示した。

オーバーパックの腐食挙動に関する調査については、幌延URLにおける原位置試験において腐食センサーを適用し、3年余りの計測データをもとにその妥当性や有効性を確認した。また、従来の想定範囲を超える地下水水質での腐食挙動については、高炭酸塩環境での応力腐食割れ感受性に関するデータや酸性条件での長期腐食データなどを整備した。

緩衝材の挙動に関する調査については、従来の想定範囲を超える高塩濃度や酸性の地下水条件における緩衝材の透水係数や膨潤圧などのデータを取得し、従来の設計の前提条件を超える条件に対する人工バリア性能を提示した。また、緩衝材のセメンテーションによる影響評価については、山形県月布のベントナイト鉱床の原鉱石を用いて、セメンテーションの発生状況、膨潤圧と透水係数への影響を把握するとともに、更なるデータ拡充を含めた今後の課題を提示した。

2.6.2 人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発

人工バリア中の核種移行評価技術として、最新の科学的知見に基づく現象理解を反映したより精緻な核種移行モデルの高度化開発を進めた。従来のNa型に加え、Ca型の圧縮モンモリロナイトを対象に拡散・収着データを取得するとともに、NMR法等により間隙構造の不均質性を定量評価し、層間イオン種、密度、塩濃度の条件変化に応じた間隙構造とその核種移行への影響を評価する手法を提示した。さらに、分子動力学計算及び量子化学計算技術の適用評価によって、モンモリロナイト層間中の膨潤やイオンの拡散挙動などのモデルを裏付ける知見を提示した。

オーバーパックの共存がガラス溶解に及ぼす影響について、Fe共存下でのガラス浸出試験などの基礎データ取得によって、長期溶解への鉄影響を考慮する際に重要となる鉄ケイ酸塩鉱物種を同定するとともに、ガラス固化体の溶解寿命に対する影響評価を試みた。鉄との相互作用によるベントナイトの変質挙動については、原位置での変質試料の分析や、環境条件を制御した室内試験などによって変質鉱物種を同定するとともに、変質量評価に係るモンモリロナイト溶解速度データを取得した。鉄共存が核種移行に及ぼす影響については、モンモリロナイトへのCs, Ni, Euの収着に対するFe²⁺の競合影響に関するデータと、その影響評価モデルを整備した。

セメント系材料の化学モデルの開発では、低アルカリ性セメントを対象として、セメント水和物初期組成設定方法の改良、カルシウムシリケート水和物表面吸着パラメータの見直し、マグネシウムシリケート水和物の溶解度モデルの構築を実施し、これらを反映させた化学モデルにより、幅広い地下水条件でのセメント変質試験結果を精度良く表現できることを提示した。セメント系材料の力学挙動評価モデルの開発では、材料の劣化とひび割れの発生を同時に考慮できるよ

うにモデルの高度化を行った。また、セメント系材料が核種移行挙動に及ぼす影響評価では、セメント共存環境中でのNa型及びCa型ベントナイトに対するニオブ、スズ、モリブデン等の収着データを取得し、これらのデータを反映することにより収着分配係数の設定値を更新した。

2.6.3 天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発

天然バリア中の核種移行については、結晶質岩と堆積岩のそれぞれの特徴と課題を踏まえつつ、割れ目等の不均質性をより精緻に評価するための室内試験と解析手法の改良、原位置条件への適用性評価を進めた。結晶質岩については、グリムゼル岩のマトリクス部及び割れ目部を対象に、鉱物・間隙の不均質性の定量化と、不均質性を考慮した解析手法の高度化を進め、実測データとの比較によってその手法の適用性を確認した。また、エスポやオンカロの原位置トレーサー試験結果に対し、グリムゼル岩を対象に構築してきた評価モデルを適用し、その有効性を確認した。一方、堆積岩の幌延泥岩については、マトリクス部や割れ目部を対象とした原位置試験データを取得・解析するとともに、室内試験データとの比較分析などを通じ、その試験・評価手法の有効性や課題を提示した。さらに、幌延における天然トレーサーの分布データを活用し、地質環境の変遷等を考慮したより現実的な物質移行モデルの適用性を課題とともに提示した。

有機物影響評価手法の開発については、幌延地層研究センターの深部地下水から分離・精製したフミン酸及びフルボ酸とIII価及びIV価元素との錯生成データを取得し、より現実的なモデルパラメータを整備した。微生物影響評価手法の開発では、幌延の地下研究施設の深部地下水試料を用いて、微生物コロイドへの希土類元素の分配係数を評価した。また、堆積岩表面に形成されたバイオフィルムを対象に、メタゲノム解析データに基づく代謝機能解析を行い、主要な代謝と金属還元能力の有無を確認した。さらに、ここで整備した有機物や微生物のデータやモデルパラメータを用いて、有機物や微生物の影響を考慮したより信頼性の高い性能評価解析を提示した。

セメント系材料によるニアフィールド岩盤への影響評価については、原位置でのセメント系材料と周辺岩盤との接触事例として瑞浪超深地層研究所の坑道で採取した試料を用いて検討を進めた。原位置試料の分析や室内試験の結果をもとに、実際の地質環境下におけるグラウト材/岩盤相互作用メカニズムを加えたグラウト材の長期変遷に関する概念モデルを提示した。

2.6.4 ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発

システム変遷と核種移行解析の体系的評価技術として、ニアフィールドシステム変遷についての複合現象の解析とその現象解析結果に追随して核種移行解析を行う手法を開発し、ニアフィールド複合現象評価手法-核種移行評価手法-共通モデル・シナリオ・データベース-成果の体系化手法をまとめたニアフィールド総合評価システムプロトタイプを構築した。本システムによって、コンクリートのひび割れ発生・進展とその周囲の化学的変質に係る局所スケールの現象が、坑道全体スケールの挙動にどのような影響を及ぼすかという点に着目したマルチスケールの化学-物質輸送-力学連成解析が可能となった。ニアフィールド総合評価システムの動作基盤となるプラットフォームには、その開発環境として国際的に利用されているモデル連成フレームワークOpenMIを用いており、異なる分野で独自に開発された対象や手法の異なる最新の解析コードを適切に組み合わせることで、マルチフィジックス現象の相互作用による重要な連成効果の予見などに適用できると考えられる。また、成果の体系化手法では、ニアフィールド複合現象評価知識ポータル

KNOSOSを作成し、システム変遷のストーリーボードを起点として、現象理解からモデル開発、現象解析および性能評価にいたる様々な研究成果を関係付けることで、階層的な知識の構造を表現した。

参考文献

- Amano, Y., Iwatsuki, T., Naganuma, T. (2017): Characteristics of naturally grown biofilms in deep groundwaters and their heavy metal sorption property in a deep subsurface environment. *Geomicrobiology Journal*, 34, pp.769-783.
- 天野由記, 近沢孝弘, 千々和辰訓, 江橋健, 畑中耕一郎, 平野史生, 本田明, 石寺孝充, 石谷和己, 亀井玄人, 加藤智子, 河口達也, 北村暁, 小尾繁, 前川恵輔, 牧野仁史, 三木晋, 長尾郁弥, 澤田淳, 柴田雅博, 塩月正雄, 杉田裕, 陶山忠宏, 鈴木祐二, 館幸男, 谷口直樹, 寺島元基, 若杉圭一郎, 山口正秋 (2015): わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価—直接処分第1次取りまとめ—, JAEA-Research 2015-016.
- 天野由記, 山本陽一, 南条功, 村上裕晃, 横田秀晴, 山崎雅則, 國丸貴紀, 大山隆弘, 岩月輝希 (2012): 幌延深地層研究計画における地下水, 河川水および降水の水質データ (2001~2010年度), JAEA-Data/Code 2011-023.
- Anderson, C., Pedersen, K. and Jakobsson, A.-M. (2006): Autoradiographic comparisons of radionuclide adsorption between subsurface anaerobic biofilms and granitic host rocks. *Geomicrobiology Journal*, 23, pp.15-29.
- Anderson, C., Jakobsson, A.-M. and Pedersen, K. (2007): Influence of in situ biofilm coverage on the radionuclide adsorption Capacity of subsurface granite. *Environmental Science & Technology*, 41, pp.830-836.
- Bateman, K., Coombs, P., Noy, D. J., Pearce, J. M. and Wetton, P. D. (1998): Numerical modelling and column experiments to simulate the alkaline disturbed zone around a cementitious radioactive waste repository, *Sci. Basis Nucl. Waste Manage., Materials Research Society*, 506, pp.605-611.
- Bateman, K., Coombs, P., Noy, D. J., Pearce, J. M., Wetton P., Haworth, and Linklater, A. C. (1999): Experimental simulation of the alkaline disturbed zone around a cementitious radioactive waste repository: numerical modelling and column experiments, *Geological Society of London*, 157, pp.183-194.
- Benedetti, M. F., Van Rimemsdijk, W. H. and Koopal, L. K. (1996): Humic substances considered as a heterogeneous donnan gel phase, *Environ. Sci. Technol.*, 30, pp.1805-1813.
- 別府伸治, 狩野智之, 竹内竜史, 尾方伸久 (2014): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング 2012年度, JAEA-Data/Code 2013-023.
- Bernard, E., Lothenbach, B., Rentsch, D., Pochard, I. and Dauzères, A. (2017): Formation of magnesium silicate hydrates (M-S-H). *Phys. Chem. Earth A/B/C* 99, 142-157.
- Bodén, A. and Sievänen, U., (2005): Low-pH injection grout for deep repositories, Summary report from a co-operation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden). *Svensk Kärnbränslehantering AB*, p. 82.
- Bossart, P., and Mazurek, M. (1991): Grimsel Test Site - Structural geology and water flowpaths in the migration shear zone. *Nagra Technical Report NTB 91-12*. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2005): Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(III), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V) and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, pp.875-892.
- Brew, D.R. and Glasser, F.P. (2005). Synthesis and characterisation of magnesium silicate hydrate gels. *Cem. Concr. Res.* 35, 85-98.
- Byfors, K. (1987): Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and pH values in cement paste. *Cem. Concr. Res.* 17, 115-130.
- Charlet, L., Scheinost, A.C., Tournassat, C., Greneche, J.M., Géhin, A., Fernández-Martínez, A., Coudert, S., Tisserand, D. and Brendle, J. (2007): Electron transfer at the mineral/water interface: Selenium reduction by ferrous iron sorbed on clay, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 71, pp.5731-5749.
- Churakov, S.V. and Gimmi, T. (2011): Up-Scaling of Molecular Diffusion Coefficients in Clays: A Two-Step Approach, *J. Phys. Chem. C*, 115, pp.6703-6714.
- 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構(2005): TRU廃棄物処分技術検討書, 一第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- Diamond, S. (1983): Effects of microsilica (silica fume) on pore-solution chemistry of cement pastes. *J. Am. Ceram. Soc.* 66, C82-C84.
- Dillmann, P., Gin, S., Neff, d. and Gentaz, L. (2016) Effect of natural and synthetic iron corrosion products on silicate glass alteration processes, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 172, pp.287-305.
- Eng, A., Nilsson, U. and Svensson, D. (2007): Alternative buffer material installation report, IPR-07-15.
- Fredrickson, J.K. and Fletcher, M. (eds.) (2001): *Subsurface microbiology and biogeochemistry*, Wiley-Liss, Inc., New York.
- 原子力発電環境整備機構(2011): 地層処分事業のための安全評価技術の開発(I)ーシナリオ構築技術の高度化ー. 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-10-09.
- GoldSim Technology Group LLC, (2014): *The GoldSim User's Guide*. GoldSim Version 11.1.
- Goldberg, S., Glaubig, R.A. (1988): Anion sorption on a calcareous, montmorillonitic soil-Selenium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 954-958.
- 濱克宏, 見掛信一郎, 西尾和久, 川本康司, 山田信人, 石橋正祐紀, 村上裕晃, 松岡稔幸, 笹尾英嗣, 真田祐幸, 大貫賢二, 佐藤成二, 別府伸治, 尾上博則, 竹内竜史, 三枝博光, 大森一秋, 長谷川隆, 宗本隆志, 湯口貴史, 岩月輝希, 岩崎理代, 池田幸喜, 堀内泰治, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 小出馨, 杉原弘造(2014): 超深地層研究所計画 年度報告書(2013年度), JAEA-Review 2014-038.
- 濱克宏, 見掛信一郎, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 桑原和道, 上野哲朗, 大貫賢二, 別府伸治, 尾上博則, 竹内竜史, 三枝博光, 宗本隆志, 加藤利弘, 岩月輝希, 岩崎理代, 池田幸喜, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 小出馨(2015): 超深地層研究所計画 年度報告書(2014年度), JAEA-Review

- 2015-024.
- 濱克宏, 岩月輝希, 松井裕哉, 見掛信一郎, 石橋正祐紀, 尾上博則, 竹内竜史, 野原壯, 笹尾英嗣, 池田幸喜, 小出馨 (2016): 超深地層研究所計画 年度報告書(2015年度), JAEA-Review 2016-023.
- 花室孝広 (2017) : 幌延深地層研究計画 平成28年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2017-025.
- 長谷川琢磨(2004): ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所受託報告N04005
- 林田一貴, 宗本隆志, 青才大介, 乾道春, 岩月輝希 (2016): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究-瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集-, JAEA-Data/Code 2016-001.
- Hernsdorf A.W., Amano Y., Miyakawa K., Ise K., Suzuki Y., Anantharaman K., Probst A., Burstein D., Thomas B.C., Banfield J.F. (2017): Potential for microbial H₂ and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments. *The ISME Journal* 11, 1915-1929.
- 平野史生, 大谷芳輝, 京川裕之, 三原守弘, 清水浩之, 本田明 (2016a): TRU廃棄物処分システムの性能評価の観点からの人工バリアの透水性に対するセメント系材料のひび割れの影響に関する検討, *日本原子力学会和文論文誌*, 15, No. 2, pp. 97-114.
- 平野飛翼, 稲垣八穂広, 松本遼, 出光一哉, 有馬立身 (2016b): 国際標準模擬ガラス固化体ISGの溶解挙動に及ぼす溶存Mgの影響, *日本原子力学会2016年秋の大会*, 3D04.
- 平尾一之, 河村雄行 (1994): パソコンによる材料設計, 裳華房, 東京.
- Hsin-Chi J., Lin, et al. (1997): A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media, *Vwesion* 3. 0.
- 腐食防食協会編(1993): 環境材料学入門, 丸善
- Iida, Y., Tanaka, T., Yamaguchi, T., Nakayama, S. (2011): Sorption behavior of selenium(-II) on rocks under reducing conditions. *J. Nucl. Sci. Technol.* 48(2): 279-291.
- Iida, Y., Yamaguchi, T., Tanaka, T. (2014). Sorption behavior of hydroselenide (HSe⁻) onto iron-containing minerals. *J. Nucl. Sci. Technol.* 51(3): 305-322.
- 石橋正祐紀, 安藤友美, 笹尾英嗣, 湯口貴史, 西本昌司, 吉田英一 (2014): 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴—土岐花崗岩を例として—, *応用地質*, 55, pp. 156-165.
- 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 濱克宏 (2016) : 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散現象の特徴, *原子力バックエンド研究*, 23(2), 121-129.
- 石橋正祐紀, 濱克宏, 岩月輝希, 松井裕哉, 竹内竜史, 野原壯, 尾上博則, 池田幸喜, 見掛信一郎, 弥富洋介, 笹尾英嗣, 小出馨 (2018) : 超深地層研究所計画 年度報告書(2016年度), JAEA-Review 2017-026.
- 石井洋司, 渡辺和彦, 神谷晃, 早野明, 見掛信一郎, 竹内真司, 池田幸喜, 山本勝, 杉原弘造 (2011): 深度400m以深の換気立坑掘削において実施したプレグラウチングの施工結果と考察, *JAEA-Technology* 2010-044.

- 核燃料サイクル開発機構(1999a): 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, JNC TN1400-99-020.
- 核燃料サイクル開発機構(1999b): 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2, JNC TN1400 99-022.
- 核燃料サイクル開発機構(1999c): 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 99-23.
- Kamei, G., Honda, A., Mihara, M., Oda, C., Murakami, H., Masuda, K., Yamaguchi, K., Matsuda, S., Ichige, S., Takahashi, K. and Meguro, Y. (2010): Research and Development for Treatment and Disposal Technologies of TRU Waste JFY 2008 Annual Report. Japan Atomic Energy Agency, Japan, p. 80.
- 狩野智之, 毛屋博道, 竹内竜史(2011): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング 2009年度, JAEA-Data/Code 2011-002.
- 狩野智之, 竹内竜史(2012): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング 2010年度, JAEA-Data/Code 2012-002.
- 狩野智之, 竹内竜史(2013): 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング 2011年度, JAEA-Data/Code 2013-007.
- 加藤大生, 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫, 本田明(2002): セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備, JNC TN8400 2001-029.
- 河村雄行(2004): ベントナイト中の物質移行モデルの高度化研究(Ⅲ), JNC TJ8400 2004-028.
- 菊池広人, 棚井憲治(2005): 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2004-005.
- 木村誠, 九石正美, 藤田朝雄, 中間茂雄, 鈴木英明(2010): 緩衝材中の化学影響評価に向けた熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発, JAEA-Research 2010-034
- Kinniburgh, D.G., Milne, C.J., Pinheiro, J.P., Filius, J., Koopal, L.K. and Van Riemsdijk, W.H. (1996): Metal ion binding by humic acid: application of the NICA-Donnan model, Environ. Sci. Technol., 30, pp.1687-1698.
- Kobayashi, M., Yokoyama, Y., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N. and Naito, M. (2011): Long term integrity of overpack closure weld for HLW geological disposal Part 2 - corrosion propertyies under anaerobic conditions.
- Koopal, L.K., Saito, T., Phinheiro, J.P. and van Riemsdijk, W.H. (2005): Ion binding to natural organic matter: general considerations and the NICA-Donnan model, Colloids Surf., A 265, pp.40-54.
- 小尾繁, 稲垣学(2010): GoldSimによる核種移行パラメータの時間的変化を考慮した地層処分核種移行解析モデルの構築. 日本原子力研究開発機構 技術報告書. JAEA-Data/Code 2010-006.
- Kowada, Y., Ozaki, T. and Minami, T. (2005): Preparation of Silica-Gel Film with pH Indicators by the Sol-Gel Method, Journal of Sol-Gel Science and Technology, Vol 33, Issue 2, pp.175-185.

- Kubota, T., Tochiyama, O., Tanaka, K. and Niibori, Y. (2002): Complex formation of Eu(III) with humic acid and polyacrylic acid, *Radiochim. Acta* 90, pp.569-574.
- 國丸貴紀ほか (2011) : 超深地層研究所計画 年度報告書 (2009年度), JAEA-Review 2011-007.
- 國丸貴紀, 森川佳太, 舘幸男, 久野義夫, 細谷真一, 下田紗音子, 加藤博康, 中澤俊之, 生瀬博之, 久保田政子 (2012) : 花崗岩試料を用いた収着・拡散試験及び間隙率測定, JAEA-Data/Code 2012-013.
- 蔵重勲, 廣永道彦 (2007) : 地下水梅雨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), 電力中央研究所報告, N06028.
- 黒澤進 (2005) : 高レベル放射性廃棄物地層処分システムにおける核種移行評価に及ぼすコロイド影響に関する研究 - 第2次とりまとめ以降の検討 -, JNC TN8400 2005-007
- Lantenois, S., Lanson, B., Muller, F., Bauer, A., Jullien, M. and Plancon, A. (2005): Experimental study of smectite interaction with metal Fe at low temperature: 1. smectite destabilization, *Clays and Clay Minerals*, 53, pp.597-612.
- Li, Z., Zhang, T., Hu, J., Tang, Y., Niu, Y., Wei, J. and Yu, Q., (2014): Characterization of reaction products and reaction process of MgO-SiO₂-H₂O system at room temperature. *Constr. Build. Mat.* 61, 252-259.
- Liu, C., Shang, J. and Zachara, J.M. (2011): Multispecies diffusion models: A study of uranyl species diffusion, *Water Resources Research*, 47, W12514.
- Lothenbach, B. and Winnefeld, F. (2006): Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Cem. Concr. Res.* 36, 209-226.
- Lothenbach, B., Nied, D., L'Hôpital, E., Achiedo, G. and Dauzères, A. (2014): Calcium and magnesium silicate hydrates, 2nd International Symposium on Cement Based Materials for Nuclear Waste (NUWCEM), Avignon, France, p. 12.
- MacLean, L.C.W., Pray, T.J., Onstott, T.C., Brodie, E.L., Hazen, T.C., Southam, G. (2007): Mineralogical, chemical and biological characterization of an anaerobic biofilm collected from a borehole in a deep gold mine in South Africa. *Geomicrobiol Journal*, 24, pp.491-504.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Dunlap, P.V., and Clark, D.P. (eds.) (2009): *Brock Biology of Microorganisms*, Prentice hall International, Inc. New Jersey. p 54.
- Maes, A., Bruggeman, C., Geraedts, K., Vancluysen, J. (2003): Quantification of the interaction of Tc with dissolved Boom Clay humic substances, *Environ. Sci. Technol.* 37, pp. 747 - 753.
- 牧野仁史, 川村淳, 若杉圭一郎, 大久保博生, 高瀬博康 (2007) : 高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発. 日本原子力研究開発機構 技術報告書. JAEA-Data/Code 2007-005.
- Marcus, Y. (1997): *Ion properties*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T. and Waber, H.N. (2009): Natural tracer profiles across argillaceous formations: The CLAYTRAC project, OECD/NEA Report 6253,

- OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- Metcalf, R. and Walker, C., (2004): Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments. NUMO, Tokyo, Japan, p. 190.
- Mihara, M., Iriya, K. and Torii, K. (2008): Development of low-alkaline cement using pozzolans for geological disposal of long-lived radioactive waste. J. Japan Civ. Eng. Soc. 64, 92-103.
- 三原守弘, 佐藤信之, 大野進太郎, 森川誠司(2010): TRU 廃棄物地層処分施設の力学挙動解析コード(MACBECE)の開発, JAEA-Data/Code 2009-026.
- 見掛信一郎, 山本勝, 池田幸喜, 杉原弘造, 竹内真司, 早野明, 佐藤稔紀, 武田信一, 石井洋司, 石田英明, 浅井秀明, 原雅人, 久慈雅栄, 南出賢司, 黒田英高, 松井裕哉, 鶴田忠彦, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡稔幸, 水野崇, 大山卓也(2010): 結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2010-026, pp.78-117.
- Miller, W.M., Alexander, W.R., Chapman, N.A., McKinley, I.G. and Smellie, J.A.T. (2000): Geological Disposal of Radioactive wastes and Natural Analogues, Waste Management Series, 2, Pergamon, Amsterdam.
- Milne, C.J., Kinniburgh, D.G. and Tipping, E. (2001): Generic NICA-Donnan model parameters for proton binding by humic substances, Environ. Sci. Technol. 35, pp.2049-2059.
- Milne, C.J., Kinniburgh, D.G., Van Riemsdijk, W.H. and Tipping, E. (2003): Generic NICA-Donnan model parameters for metal-ion binding by humic substances, Environ. Sci. Technol. 37, pp.958-978.
- Missana, T., Alonso, U. and García-Gutiérrez, M. (2009): Experimental study and modelling of selenite sorption onto illite and smectite clays, J. Colloid Interf. Sci. 334, pp.132-138
- 仲島邦彦, 小尾繁, 蛭名貴憲, 江橋健, 稲垣学(2009): GoldSimによる第2次取りまとめレファレンスケースの安全評価モデルの構築. 日本原子力研究開発機構 技術報告書, JAEA-Data/Code 2009-009.
- 中田和秀(2002): 大規模線型方程式を解くためのクリロフ部分空間法の前処理, 数理解析研究所講究録, 1288巻, pp.52-63.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その10) - 北海道幌延地域における $4\text{He} \cdot 36\text{Cl}$ 法適用の試み-, 電力中央研究所報告, 研究報告: N09027.
- 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人 (2016) : 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 計測データ集 (平成27年度) , JAEA-Data/Code 2016-005.
- NEA (2012) NEA Sorption Project. Phase III: Thermodynamic sorption modeling in support of radioactive waste disposal safety cases. OECD-NEA, Paris.
- NEA (2013): Clay characterization from nanoscopic to microscopic resolution. NEA Clay Club workshop proceedings. OECD-NEA, Paris.
- Nied, D., Enemark-Rasmussen, K., L'Hopital, E., Skibsted, J. and Lothenbach, B. (2016):

- Properties of magnesium silicate hydrates(M-S-H), Cement and Concrete Research, 79, pp. 323-332.
- 日本原子力研究開発機構(2008):平成19年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書 平成20年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2009):平成20年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書 平成21年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2013a):平成24年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書 平成25年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2013b):平成24年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念・性能評価技術 高度化開発 ―巨大地震・津波を含む想定外事象への対応― 報告書 平成25年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2013c):平成24年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発総括報告書―6か年研究成果の取りまとめ―.
- 日本原子力研究開発機構(2013d):平成24年度 地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処分技術セメント材料影響評価技術高度化開発報告書 平成25年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2014a):平成25年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書 平成26年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2014b):平成25年度 地層処分技術調査等事業 TRU廃棄物処分技術セメント材料影響評価技術高度化開発報告書 平成26年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2015a):平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書 平成27年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2015b):幌延深地層研究計画 平成26年度調査研究成果報告.
- 日本原子力研究開発機構(2015c):平成26年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発報告書 平成27年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2016a):平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書 平成28年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2016b):平成27年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書 平成28年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2017):平成28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書 平成29年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2018a):平成29年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証 平成30年3月.
- 日本原子力研究開発機構(2018b):深地層の研究施設計画の進捗と今後の課題について ②幌延深地層研究計画, 深地層の研究施設計画検討委員会(第22回), 第22回URL検討委員会資料22-3.
- Nilsson, K., Byegård, J., Selner, E., Widestrand, H., Höglund, S., Gustafsson, E. (2010): Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Results from rock sample analyses and modelling, SKB R-10-68.

- 西方篤, 高橋岳彦, 侯保栄, 水流徹(1994): 乾湿繰り返し環境における炭素鋼の腐食速度のモニタリングとその腐食機構, 材料と環境, 43, No. 4, pp.188-193.
- Ochs, M., Mallants, D. and Wang, L. (2016): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete, Springer International Publishing Switzerland.
- OECD/NEA(1999): Safety assessment of radioactive waste repositories: an international database of Features, Events and Processes. OECD/NEA.
- Ohkubo, T., Ibaraki, M., Tachi, Y and Iwadate, Y. (2016): Pore distribution of water-saturated compacted clay using NMR relaxometry and freezing temperature depression; effect of density and salt concentration, Appl. Clay Sci., 123, pp.148-155.
- 大森一秋, 新宮信也, 萩原大樹, 増田薫, 飯塚正俊, 乾道春, 岩月輝希(2013): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—(2011年度), JAEA-Data/Code 2013-001.
- 大森一秋, 新宮信也, 増田薫, 青才大介, 乾道春, 岩月輝希(2014a): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—(2012年度), JAEA-Data/Code 2013-024.
- 大森一秋, 長谷川隆, 宗本隆志, 増田薫, 青才大介, 乾道春, 岩月輝希(2014b): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—(2013年度), JAEA-Data/Code 2014-019.
- Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. (1985): Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviors of a saturated-Unsaturated medium, Proc. of Int. Symp. on coupled process affecting the performance of a nuclear waste repository, Berkeley, pp.263-268.
- Ohnuki, T., Jiang, M., Sakamoto, F., Kozai, N., Yamasaki, S., Yu, Q., Tanaka, K., Utsunomiya, S., Xia, X., Yang, K. and He, J. (2015): Sorption of trivalent cerium by a mixture of microbial cells and manganese oxides: Effect of microbial cells on the oxidation of trivalent cerium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 163, pp.1-13.
- 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 紫野一則, 濱克寛, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗(2007): 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044.
- 大井貴夫, 稲垣学, 川村淳(2008): シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法の整備. 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-023.
- Okada, H. (1977): Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Cracking of Structural Steels, Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys; Unieux-Firminy; France; 12-16 June 1973. pp.124-134.
- Parkhurst, D.L. (1995): User's Guide to PHREEQC—A Computer Program for Speciation, Reaction-Path, Advective-Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 95-4227.

- Parkhurst, D.L. and Appelo, C. A. J. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, Denver, CO, USA.
- Pedersen, K. (1999): Subterranean microorganisms and radioactive waste disposal in Sweden, *Engineering Geology*, 52, pp.163-176.
- Pedersen, K. (2005): Microorganisms and their influence on radionuclide migration in igneous rock environments, *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, 6, pp.11-15.
- Pfingsten, W., Bradbury, M. and Baeyens, B. (2011): The influence of Fe(II) competition on the sorption and migration of Ni(II) in MX-80 bentonite., *Appl. Geochem.*, 26, pp.1414-1422.
- Potyondy, D. O. and Cundall, P. A. (2004): A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, pp.1329-1364.
- Quintessa (2013): QPAC: Quintessa's General-Purpose Modelling Software, QRS-QPAC-11, (<http://www.quintessa.org/qpac-overview-report.pdf>).
- Rai, D., Yui, M., Schaef, T. and Kitamura, A. (2011): Thermodynamic model for SnO₂(cr) and SnO₂(am) solubility in the aqueous Na⁺-K⁺-OH⁻-Cl⁻-H₂O system, *J. Solution Chem.*, 40, 1155-1172.
- Roosz, C., Grangeon, S., Blanc, P., Montouillout, V., Lothenbach B., Henocq, P., Giffaut, E., Vieillard, P. and Gaboreau, S. (2015): Crystal structure of magnesium silicate hydrates(M-S-H): The relation with 2: 1 Mg-Si phyllosilicates, *Cement and Concrete Research*, 73, pp.228-237
- Saito, T., Koopal, L.K., Nagasaki, S., Tanaka, S. (2004): Application of the NICA-Donnan model for proton, copper and uranyl binding to humic acid, *Radiochim. Acta*, 92, pp.564-574.
- Saito, T., Terashima, M., Aoyagi, N., Nagao, S., Fujitake, N., Ohnuki, T. (2015): Physicochemical and ion-binding properties of highly aliphatic humic substances extracted from deep sedimentary groundwater, *Environ. Sci.: Processes Impacts* 17, pp.1386-1395.
- Sasaki, T., Aoyama, S., Yoshida, H., Kulyako, Y., Samsonov, M., Kobayashi, T., Takagi, I., Miyasoedov, B. and Moriyama, H. (2012): Apparent formation constants of Pu(IV) and Th(IV) with humic acids determined by solvent extraction method, *Radiochim. Acta*, 100, pp.737-745.
- 笹本広, 山本信幸, 宮川和也, 水野崇(2015): 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ(2011年度~2013年度), JAEA-Data/Code 2014-033.
- 佐藤治夫 (2002): 圧縮ベントナイト中の拡散移行経路の異方性に関する基礎的研究, *サイクル機構技報*, 16, pp.125-136.
- 佐藤成二, 尾方伸久, 竹内竜史, 武田匡樹(2014): 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測(2004~2011年)データ集, JAEA-Data/Code 2013-020.

- Savage, D., Walker, C.S., Arthur, R.C., Rochelle, C.A., Oda, C. and Takase, H. (2007): Alteration of bentonite by hyperalkaline fluids: A review of the role of secondary minerals. *Phys. Chem. Earth* 32, 287-297.
- 石油公団石油開発技術センター(1997): 石油開発における腐食と耐食性材料, 石油公団石油開発技術センター.
- Shepard, D. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, pp. 517-523.
- 清水浩之, 平野史生, 大野進太郎, 高瀬博康, 本田明(2014): 粒状体個別要素法による鉄筋コンクリートモデルの構築, 資源・素材学会平成26年度(2014年度)春季大会.
- 新宮信也, 齋正貴, 萩原大樹, 水野崇(2011): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—(2009年度), JAEA-Data/Code 2011-004.
- 新宮信也, 萩原大樹, 増田薫, 飯塚正俊, 乾道春, 水野崇(2012): 超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—(2010年度), JAEA-Data/Code 2012-003.
- Siffert, B. and Wey, R. (1962): Synthèse d'une sépiolite à température ordinaire. *Académie des Sciences (Paris) Comptes Rendus* 254, 1460-1462 [in French].
- Soler, J.M. (2003): Reactive transport modeling of the interaction between a high-pH plume and a fractured marl: the case of Wellenberg, *Appl. Geochem.*, 18, pp.1555-1571.
- Soltermann, D., Fernandes, M.M., Baeyens, B., Dähn, R., Miehé-Brendlé, J., Wehrli, B. and Bradbury, M.H. (2013): Fe(II) Sorption on a Synthetic Montmorillonite. A Combined Macroscopic and Spectroscopic Study, *Environ. Sci. Technol.*, 47, pp.6978-6986.
- Steeffel, C.I. and Lichtner, P.C. (1994): Diffusion and reaction in rock matrix bordering a hyperalkaline fluid-filled fracture, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, pp.3595-3612.
- 陶山忠宏, 柴田雅博, 笹本 広(2006): 鉄型化ベントナイト水熱試験—低酸素雰囲気での高温条件下における鉄型化ベントナイトの変化の同定—, JAEA-Research 2006-064.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y. and Yui, M. (2011): Diffusion and sorption of Cs⁺, I⁻ and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, pp.6742-6759.
- Tachi, Y. and Yotsuji, K. (2012): Diffusion and sorption of Sr²⁺ in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity. *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. 5th International meeting. P/MT/DP/20.*
- Tachi, Y. and Yotsuji, K. (2014): Diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity: Integrated sorption and diffusion model, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 132, pp.75-93.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Suyama, T. and Ochs, M. (2014): Integrated sorption and diffusion model for bentonite. Part 2: porewater chemistry, sorption and diffusion modeling in compacted systems, *Journal of Nuclear Science and Technology* 51(10), pp.1191-1204.

- Tachi, Y., Ebina, T., Takeda, C., Saito, T., Takahashi, H., Ohuchi, Y. and Martin, A. J. (2015): Matrix diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in granodiorite: laboratory-scale results and their extrapolation to the in situ condition, *J. Contam. Hydrol.*, 179, pp.10–24.
- Tachi, Y., Suyama, T., Yotsuji, K., Ishii, Y. and Takahashi, H. (2016): Clay-based modelling approach for diffusion and sorption in the argillaceous rock from the Horonobe URL: Application for Ni(II), Am(III) and Se(IV), CMS workshop lecture series 21 (Filling the gaps - from microscopic pore structures to transport properties in shales), Chap. 19, pp. 241–250.
- Takahashi, Y., Chatellier, X., Hattori, K.H., Kato, K., Fortin, D. (2005): Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for Ree sorption onto natural microbial mats. *Chem Geol*, 219, pp.53–67.
- Takahashi, Y., Hirata, T., Shimizu, H., Ozaki, T., Fortin, D. (2007): A rare earth element signature of bacteria in natural waters? *Chem Geol.*, 244, pp.569–583.
- Takahashi, Y., Yamamoto, M., Yamamoto, Y., Tanaka, K. (2010): EXAFS study on the cause of enrichment of heavy REEs on bacterial cell surfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, pp.5443–5462.
- 武田 匡樹, 大野 宏和, 石井 英一, 舘 幸男 (2017) : 幌延 URLにおける物質移行特性評価 : (1) 泥岩中の割れ目およびマトリクスを対象とした原位置トレーサー試験, 日本原子力学会2017年秋の大会 予稿集1H14.
- Tanaka, K., Tani, Y., Takahashi, Y., Tanimizu, M., Suzuki, Y., Kozai, N. and Ohnuki, T. (2010): A specific Ce oxidation process during sorption of rare earth elements on biogenic Mn oxide produced by *Acremonium* sp. Strain KR21-2, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, pp.5463–5477.
- 谷口直樹, 川崎学, 藤原和雄 (2001) : ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響, JNC TN8400 2001-011.
- 谷口直樹, 鈴木宏幸, 川崎学, 九石正美, 渡邊正敏, 建石剛 (2012): 低酸素濃度下のベントナイト中における炭素鋼の腐食におよぼす温度の影響, 第59回材料と環境討論会講演集, A-103.
- 谷智弘, 内田善久 (1999): セメントミルクの濃度と注入特性の関係について, *ダム工学*, 9, pp. 175–186.
- 寺本雅子, 嶋田 純, 国丸貴紀 (2006) : コア間隙水中の安定同位体比をもとにした低透水性堆積岩盤における地下水挙動の兆候, *応用地質*, 第47巻, 第2号, pp. 68–76.
- Thurman, E.M. (1985): *Organic geochemistry of natural waters*, Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, a member of the Academic publishers group, DORDRECHT / BOSTON / LANCASTER.
- 戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一 (2005) : 人工バリア材料の力学的物性取得試験, JNC TJ8400 2004-036.
- 上野哲朗, 佐藤成二, 竹内竜史 (2014): 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測 (2012~2013年)データ集, JAEA-Data/Code 2014-018.

- 上野哲朗, 竹内竜史 (2017): 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集 (2014~2015年), JAEA-Data/Code 2017-003.
- Vandergraaf, T. T., Miller, H. G., Jain, D. K., Hamon, C. J. and Stoes-Gascoyne, S. (1997): The effect of biofilms on radionuclide transport in the geosphere: Results from an initial investigation. Atomic Energy of Canada LTD. Technical Report, TR-774, COG-96-635-I.
- Viallis-Terrisse, H., Nonat, A. and Petit, J. C. (2001): Zeta-potential of calcium silicate hydrates interacting with alkaline cations. *J. Coll. Inter. Sci.* 244, 58-65.
- Voutilainen, M., Kekäläinen, P., Kuva, J., Siitari-Kauppi, M., Yli-Kaila, M. and Koskinen, L. (2017): Laboratory scale advection-matrix diffusion experiment in Olkiluoto veined gneiss using H-3 and Cl-36 as tracers. *MRS Advances.* 2, 12, 655-660.
- West J.M., McKinley, I.G. and Stoes-Gascoyne, S. (2002): Microbial effects on waste repository materials, In Keith-Roach, M.J. and Livens, (ed.) *Interactions of Microorganisms with Radionuclides*, Elsevier, pp.255-277.
- Widestrand, H., Byegård, J., Cvetkovic, V., Tullborg, E.-L., Winberg, A., Andersson, P., and Siitari-Kauppi, M. (2007): Sorbing tracer experiments in a crystalline rock fracture at Äspö (Sweden): 1. Experimental setup and microscale characterization of retention properties. *Water Resour. Res.*, 43, W10413.
- Widestrand, H., Byegård, J., Nilsson, K., Höglund, S., Gustafsson, E. and Kronberg, M. (2010a): Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Performance of main in situ experiment and results from water phase measurements, SKB-R-10-67.
- Widestrand, H., Byegård, J., Selnert, E., Skålberg, M., Höglund, S. and Gustafsson, E. (2010b): Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Supporting laboratory program - Sorption diffusion experiments and rock material characterisation. With supplement of adsorption studies on intact rock samples from the Forsmark and Laxemar site investigations, SKB R-10-66.
- Wieland, E. (2014): Sorption data base for the cementitious near field of L/ILW and ILW repositories for provisional safety analyses for SGT-E2, Nagra Technical Report 14-08.
- Yang, J.C.-S. (1960): The system magnesia-silica-water below 300°C.: I, Low-temperature phases from 100°C to 300°C and their properties. *J. Am. Ceram. Soc.* 43, 542-549.
- Yoshikawa, H., Inagaki, M. and Miyasaka, I. (2009): Development of scenario analysis and database for quantitative analysis of microbial effects on the repository performance, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII*, pp.375-380.
- Zhang, T., Cheeseman, C.R. and Vandeperre, L. J., (2011): Development of low pH cement systems forming magnesium silicate hydrate (M-S-H). *Cem. Concr. Res.* 41, 439-442.

3. 多様な廃棄物の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発

3.1 目的と5か年の実施内容

地層処分対象となる廃棄物には、高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体、以下、「HLW」)以外にも、再処理施設およびMOX燃料加工施設の運転・解体に伴い発生する超ウラン核種を含む放射性廃棄物も含まれる。これらの廃棄物はTRU廃棄物と呼ばれ、HLWと同一サイトでの処分(共処分(あるいは、併置処分とも言う))の概念が、平成17年に取りまとめられたTRU廃棄物処分技術検討書(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)(以下、「第2次TRUレポート」)において示され、内閣府原子力委員会の検討会にて技術的成立性の評価が実施された(原子力委員長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会, 2006)。平成19年には、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が改正され、地層処分対象低レベル放射性廃棄物(以下、「TRU廃棄物」)の最終処分が制度化された。処分実施主体が選択可能な事業オプションとして、共処分概念が位置づけられており、最終処分計画に基づく廃棄物量に基づき、TRU廃棄物の処分施設設計例が示されている(原子力発電環境整備機構, 2011)。共処分を行う場合には、HLWの地層処分事業と一部事業が共通化することから、両処分事業あわせて3,000億円程度の節減効果があると試算されている(総合資源エネルギー調査会, 2006)。

この共処分概念をより社会に受け入れられるものとしていくためには、共処分評価技術の確証性の検討を十分に行い、適切な共処分概念を提示する必要がある。第2次TRUレポートでは、閉鎖後の安全性能に関して、両処分施設間で相互に影響を及ぼす可能性のある因子(相互影響因子)を抽出し、これらの影響を定量的に検討することを通じて、図3.1-1に示すような共処分概念が提示された。相互影響因子としては、HLWの処分施設からTRU廃棄物処分施設への熱の伝播による影響、TRU廃棄物処分施設からHLW処分施設への、廃棄物に含まれる有機物の移行による影響、硝酸塩の移行による影響及びセメント系材料に由来する高pHプルームの移行による影響の4つを対象として評価が行われた。この第2次TRUレポートでの評価に基づき、硝酸塩の影響が共処分におけるHLWとTRU廃棄物処分施設の離間距離を検討する際に最も重要であるとの認識から、平成19年度から平成24年度にかけて、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業【硝酸塩処理・処分技術高度化開発(H19からH24)】にて、硝酸塩の影響評価システムのプロトタイプが開発された(日本原子力研究開発機構, 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013a; 2013b)。

本サブプロジェクトでは、このような、HLWとTRU廃棄物を共処分する場合を想定したこれまでの研究開発の成果を踏まえて、HLWと多様なTRU廃棄物との共処分におけるニアフィールドの影響評価技術の開発と、開発された技術の確証を行い、その結果を、多様な廃棄物の特徴を考慮しつつ共処分概念を適切に構築するための基盤的情報として整備した。具体的には、地層処分対象となるTRU廃棄物の特性等に関する、原子力発電環境整備機構(NUMO)等の最新の情報に基づき、廃棄物の特性の調査と、それに基づき、処分システム性能に対する影響因子の抽出を行い、この結果を踏まえて、共処分に対する個別の影響評価技術の開発を行った。また、影響因子のうち、硝酸塩の影響に着目して、システム性能に対する硝酸塩の影響を最小化するための共処分のレイアウト等の検討を行った。前者については、アスファルトで固化する場合の、硝酸塩とアスファルトとの熱反応暴走の可能性の評価、硝酸塩が鉱物中の黄鉄鉱等との反応で変遷する挙動の評価、硝酸塩による人工バリア材料の安全機能に対する影響評価、および、放射性核種の移行に対する、硝酸塩およびセルロース等の有機物の影響評価の4つを対象として、個別の要素技術の開発を行っ

た。後者については、TRU廃棄物処分施設を対象として、3次元モデルによる硝酸イオンとTRU廃棄物に含まれる放射性核種の中で、最も線量に大きく影響するI-129の移行解析を行い、核種移行に対する硝酸塩の影響を最小化できる坑道レイアウトを例示した。

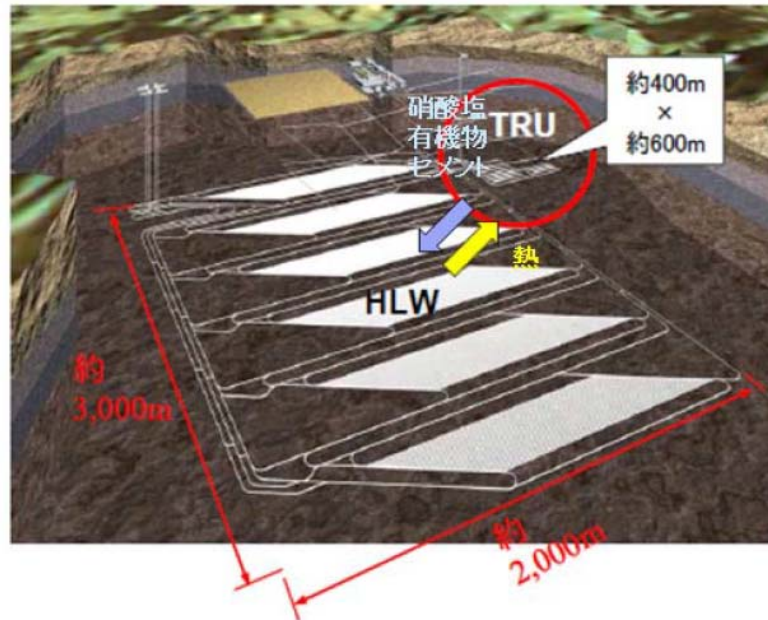


図3. 1-1 HLWとTRU廃棄物との共処分概念
(第2次TRUレポート)

3.2 廃棄物の特性を踏まえた共処分への影響評価技術開発

3.2.1 種々の廃棄物の特性評価と廃棄物由来の影響因子の影響調査

原子力発電環境整備機構(2011; 2014)を参考に、発生が想定される地層処分対象のTRU廃棄物について、物量・インベントリ・発熱量・含有化学物質等の特性、廃棄物由来の影響因子及びその影響を廃棄物グループごとに整理した(平成25年度報告書; 平成26年度報告書)。

HLWとの共処분을検討する上で最も重要なTRU廃棄物は、硝酸塩を多量に含む廃棄体グループ3であり、特に溶媒洗浄廃液I(原子力発電環境整備機構(2014)等による表記)(以下、「アスファルト固化体」)に含まれる硝酸塩や有機物(アスファルト等)の評価が必要である。硝酸塩については、これまでの研究によって、硝酸イオンの変遷挙動のモデルの開発や硝酸イオンの放射性核種への影響に関わるデータの取得が一部行われている(たとえば、日本原子力研究開発機構, 2013b)。しかしながら、アスファルトについては、硝酸塩等の酸化剤として作用する塩との相互作用に関わる知見が不足しており、特に、高温条件では、硝酸塩とアスファルトが反応することにより、熱による反応暴走(以下、「熱反応暴走」)に至る可能性があるものの、処分施設を対象とする詳細な評価は行われていない。そのため、ここでは、アスファルト固化体を対象として、アスファルトと硝酸塩の反応で熱反応暴走が起こる可能性に着目し、発熱反応の定式化を行うと共に、これに基づき、TRU廃棄物処分施設を対象とする熱収支解析を実施することで、当該固化体の熱反応暴走の評価に必要な熱反応暴走開始温度(ROT: Runaway Onset Temperature)の算定及び安全性の試行的評価を実施した。

(1) アスファルトと硝酸塩の発熱反応の定式化

模擬アスファルト固化体(鈴木・三浦, 1999)の熱量測定データ等の取得(平成26年度報告書;平成27年度報告書;平成28年度報告書;平成29年度報告書)並びに、得られた測定データ及び既往の研究(Hasegawa and Li, 2000)を参考に、以下の(i)～(iv)に示す仮定及び検討から当該固化体の発熱速度モデルを構築した。図 3.2.1-1 にアスファルトと塩の反応の概念図、式(3.2.1-1)～式(3.2.1-4)に発熱速度式を示す。

なお、平成29年度においては、測定データの再現性向上のため、平成28年度に構築した発熱速度式の見直しを実施している。しかしながら、アスファルト固化体が熱反応暴走を起こす可能性を評価する上で重要な ROT は、平成28年度または平成29年度の発熱速度式のいずれを用いても 200°C程度と、ほぼ同様の結果が得られている。また、上記の評価は、保守的に最も低い ROT を参考に実施しており、当該 ROT は平成28年度に構築した発熱速度式を用いて算出されている。したがって、ここでは、検討された発熱速度式の代表として、平成28年度に構築した発熱速度式を示す。

- (i) アスファルトの軟化点(90°C程度)及び塩の融点(NaNO_3 : 308°C、 NaNO_2 : 271°C)から、これら成分の固液状態は温度の上昇とともに、アスファルト(固体)/塩(固体)、アスファルト(液体)/塩(固体)、アスファルト(液体)/塩(液体)と変化することが想定される。したがって、アスファルト固化体の発熱速度は、これら3つの固液状態での発熱速度を組み合わせることで表現できると考えられる。ただし、熱量測定においては90°C以下における発熱が認められなかったため、アスファルト(固体)/塩(固体)における発熱は考慮しないものとする。
- (ii) アスファルト(液体)/塩(固体)の固液状態において、塩粒子を球状と仮定すると、アスファルトはその周辺に存在していると考えられる(図 3.2.1-1)。初期においてはアスファルトと塩粒子は接触していると想定されるが、接触界面で反応が生じるとアスファルトと塩粒子の間には生成物層が形成されるため、以降は生成物層を拡散により移動した塩の成分が反応領域に達することでアスファルトと塩の反応が進行する。したがって、生成物層における塩の成分の拡散を考慮する。また、反応の進展に伴い、塩粒子半径の減少及び生成物層厚さの増加を考慮する。
- (iii) アスファルト(液体)/塩(固体)の固液状態において、アスファルトと反応する塩は硝酸塩及び亜硝酸塩の2成分を仮定する。
- (iv) アスファルト(液体)/塩(液体)の固液状態は、塩の融点以上を想定している。このような温度においては、生成物層は安定に存在せず、液体のアスファルトと塩が均一な混合状態であるとし、アレニウス則に従うとする。このとき、塩の成分は見かけ上、1成分とする。

以上の検討から、式(3.2.1-1)～式(3.2.1-4)に示すように、アスファルト固化体の発熱速度式は、アスファルト(液体)/亜硝酸塩(固体)(添え字: LS_N02)、アスファルト(液体)/硝酸塩(固体)(添え字: LS_N03)、アスファルト(液体)/塩(液体)(添え字: LL)の3つの固液状態における発

熱速度を足し合わせることで定義した。なお、式(3.2.1-1)～式(3.2.1-4)におけるArea、N等の物理的意味や計算式、 ρ や ΔH 等の設定値は平成28年度報告書及び平成29年度報告書に示した。

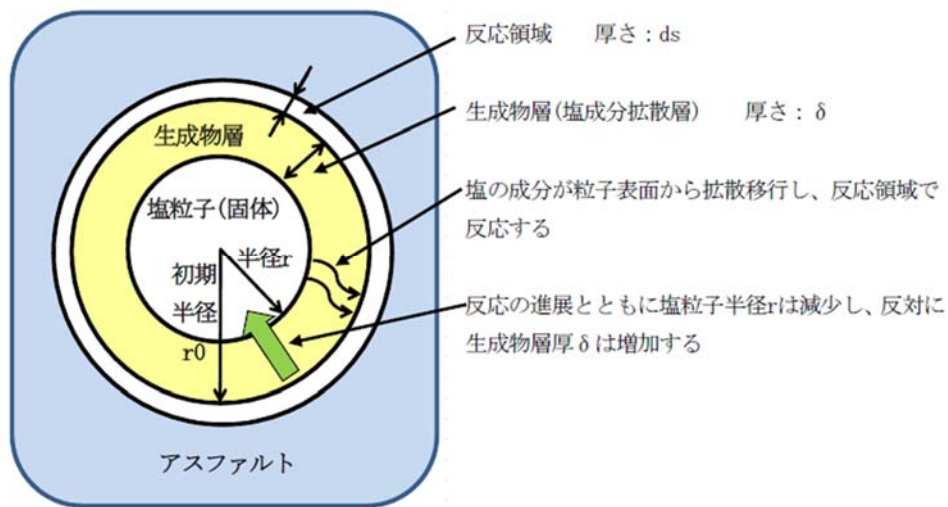


図 3.2.1-1 アスファルトと塩の反応の概念図

$$S = S_{LS_N02} + S_{LS_N03} + S_{LL} \quad (3.2.1-1)$$

$$S_{LS_N02} = \rho_{aw} \cdot \Delta H \cdot Area \cdot N_{LS_N02} \cdot ds \cdot A_{LS_N02}^* \cdot \exp(-E_{LS_N02} / (R \cdot T)) \quad (3.2.1-2)$$

$$S_{LS_N03} = \rho_{aw} \cdot \Delta H \cdot Area \cdot N_{LS_N03} \cdot ds \cdot A_{LS_N03}^* \cdot \exp(-E_{LS_N03} / (R \cdot T)) \quad (3.2.1-3)$$

$$S_{LL} = \rho_{aw} \cdot \Delta H \cdot (1 - X) \cdot A_{LL} \cdot \exp(-E_{LL} / (R \cdot T)) \quad (3.2.1-4)$$

模擬アスファルト固化体の熱量測定より得られた実測値及び上記の発熱速度式による計算値を図3.2.1-2に示す。検討した発熱速度式によって、実測値を概ね再現可能であることがわかる。

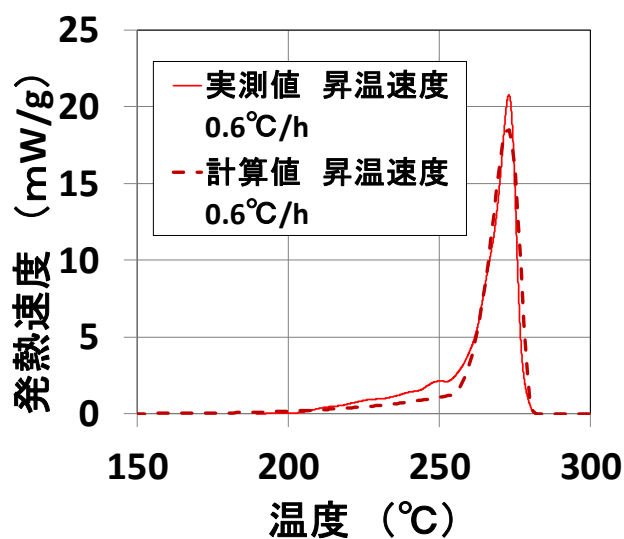


図 3.2.1-2 熱量測定データの実測値と発熱速度式による計算値の比較

(2) 地層処分環境において熱反応暴走が起こる可能性に着目した安全性の試行的評価

アスファルト固化体の地層処分環境における ROT を算定することを目的として、(1) で構築した発熱速度式を用いて熱収支解析を実施した。解析には、有限要素法の汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics® (<http://www.kesco.co.jp/comsol/>) を用いた。

1) ROT の算定

結晶質岩を母岩として深度 1,000m に処分施設を建設することを想定し、原子力発電環境整備機構 (2014) を参考に作成した解析体系を用いて、固体の伝熱のみを扱う、非定常の熱伝導方程式により解析を行った (物性値や境界条件等の解析条件の詳細については、平成 28 年度報告書及び平成 29 年度報告書を参照のこと)。体系全体を温度一定とする初期温度を与えた解析の結果を図 3.2.1-3 に示す。図 3.2.1-3 より、急激な温度上昇が観察された 195°C を ROT と評価した。

なお、ROT は解析条件により、異なる値が算定される。先述したように、後段の安全性の試行的評価においては、保守的に最も低い ROT (195°C) を基準として検討を実施しており、図 3.2.1-3 は当該 ROT が算定された平成 28 年度の結果である。

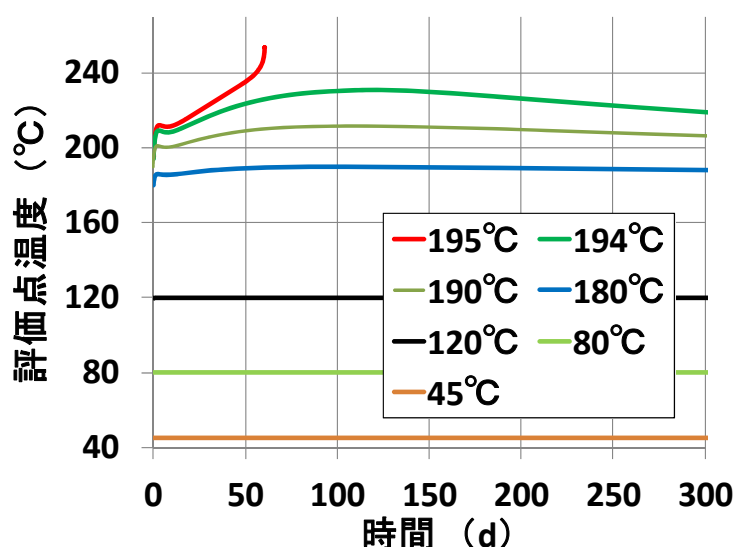


図 3.2.1-3 解析体系全体の温度を一定とした場合の熱収支解析結果

2) 熱反応暴走を誘発する可能性のあるエネルギー供給要因を想定した安全性の試行的評価

実際の地層処分環境における安全性については、エネルギー(熱)を供給するような外的要因を検討し、想定される温度分布やその時間変化等を反映した評価を行う必要がある。そこで、地層処分環境においてエネルギー供給源として作用する要因を整理するとともに、それら要因からの熱影響を想定した熱収支解析を実施し、試行的な評価を行った。表3.2.1-1に想定したエネルギー供給要因及び熱反応暴走を誘起する可能性の評価結果をまとめて示す(解析条件及び評価結果等の詳細については平成28年度報告書及び平成29年度報告書を参照のこと)。ここでは、ROT (195°C) 以上の温度が観察された解析条件においては、熱反応暴走が生じる可能性があるものとし、その解析条件の現実性について検討した。いずれの要因についても、熱反応暴走が起こる可能性は低いと考えられた。

表 3.2.1-1 エネルギー供給要因および熱反応暴走を誘起する可能性の評価結果

エネルギー供給要因	具体的に想定した現象	熱反応暴走を誘起する可能性の評価結果
微生物活動に伴う発熱	アスファルト固化体内部における、微生物活動に伴う発熱を想定	微生物活動により当該固化体に 300W/m ³ 程度の一定発熱が生じた場合、熱反応暴走が誘発される可能性がある。しかしながら、微生物共存下での模擬アスファルト固化体の熱量測定では、微生物活動に起因すると考えられる発熱が観察されていないこと等から、その可能性は低いと考えられる。
高温流体の接近温度	1,400°Cで厚さ 5m のマグマの接近を想定	坑道壁面から 7m 以下の距離に、想定した高温流体が接近した場合、熱反応暴走が生じる可能性があるが、その可能性は低いと考えられる。
硝酸イオンと黄鉄鉱の反応熱	硝酸イオンと周辺母岩に含まれる黄鉄鉱 (FeS ₂) の反応熱を想定	坑道周辺の母岩に黄鉄鉱が 2.8%以上存在する場合、熱反応暴走が生じる可能性があるが、平均的な母岩の黄鉄鉱含有率と比較すると十分高く(例えば、堆積岩では 0.5%程度、火成岩では 0.25%程度)、その可能性は低いと考えられる。
トンネル火災	トンネル火災により廃棄体パッケージ壁面が高温状態になることを想定	壁面が 85 分間 1,200°Cに保持されるような火災においては熱反応暴走が生じる可能性があるが、適切な対策を講じることで予防できると考えられる。

3.2.2 廃棄物由来の影響因子の化学環境影響評価

廃棄物由来の影響因子のうち硝酸塩について、平成 19 年度から平成 24 年度にかけて経済産業省の委託事業「硝酸塩処理・処分技術高度化開発」(日本原子力研究開発機構, 2008 ; 2009 ; 2010 ; 2011 ; 2012 ; 2013a ; 2013b)が実施され、ニアフィールド環境への硝酸塩の影響評価技術開発が進められた。ニアフィールドの化学環境において、廃棄物から溶出した硝酸イオンは、処分施設内の金属、母岩中の鉱物、及び微生物との反応により、亜硝酸イオン、アンモニア、及び窒素ガスに変遷しながらニアフィールド中に広がっていくことが想定されるため、これらの反応を考慮した硝酸イオン化学的変遷挙動評価モデル (NEON : Model for Nitrate Evolution due to mineral reaction, microbial activity and metal corrosion) が構築されている(日本原子力研究開発機構, 2013b)。本項では、この構築されたモデルの信頼性向上を目的とする室内試験の成果、及び長期的評価の妥当性確認として天然事例(ナチュラルアナログ)を活用した再現解析の結果について記載する。

(1) NEON の信頼性向上のための確証試験

NEON の金属反応及び微生物反応は室内試験を概ね再現し妥当性が評価された(日本原子力研究開発機構, 2013b)。一方、鉱物反応モデルは温度条件 80°C以上で行った室内試験の結果から構築されており、80°C未満においてはその反応速度を外挿により算出する必要がある。そこで実際の地層処分環境として想定される 80°C未満における NEON の鉱物反応モデルの適用性を評価するた

め、このような条件でのアンブル試験等の室内試験を実施した(平成 25 年度報告書;平成 26 年度報告書;平成 27 年度報告書;平成 28 年度報告書;平成 29 年度報告書)。試験結果の一例として反応速度定数 k と pH ならびに温度条件との関係について整理し、図 3.2.2-1 に示す。アンブル試験の結果を踏まえて、NEON の鉱物反応の速度式のパラメータの見直しを行ったところ、式 3.2.2-1 を得た。温度条件 50~70°C のアンブル試験結果を含めて見直しを行ったため、同温度条件における適応性も有している。さらに、式 3.2.2-1 を用いて再現解析を行い、試験結果と比較した。再現解析は NEON を PHREEQC (Ver. 3) (Parkhurst and Appelo, 2013) に実装して実施し、熱力学データベースは日本原子力研究開発機構が公開している 050700c0.tdb (Arthur et al., 2005) を用いた。結果を図 3.2.2-2 に示す。硝酸イオン濃度については全体的に再現性が向上し、アンモニウムイオン濃度については 50°C 及び 60°C の実測値をよく再現していた。以上のことから、既存の反応速度式を用いたときよりも相対的に再現性が高いことが確認された。

なお、上記のアンブル試験における試験期間が短い場合において反応生成物であるアンモニウムイオン濃度が定量下限値未満となったため(平成 26 年度報告書)、反応に伴い発生する微小な熱量を測定することで間接的に反応量を評価する手法を検討した。その結果、見かけのアンモニウムイオンの生成熱が得られ、熱量測定の結果から鉱物反応におけるアンモニウムイオンの生成量の推定が可能となった(平成 29 年度報告書)。ただし、アンブル試験を補完するデータとして活用するには、アンブル試験の結果と整合性の高いデータを取得する手法を構築する必要がある。

$$\frac{d[NO_3^-]}{dt} = -1.58 \times W \times [H^+]^{0.1353} \times \exp\left(\frac{-5.129 \times 10^4}{R \cdot T}\right) \times [NO_3^-] \quad (3.2.2-1)$$

W : 固液比 (kg/dm³)

R : 気体定数 (8.314 J/(mol·K))

T : 絶対温度 (K)

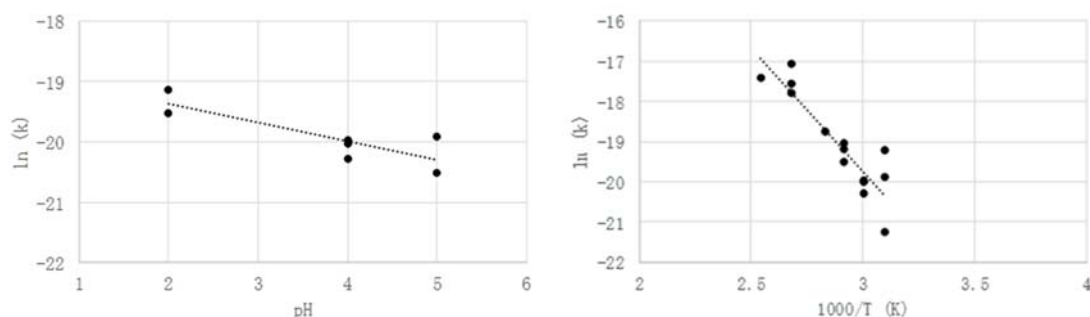


図 3.2.2-1 アンブル試験の結果の一例 (左 : pH 依存性、右 : 温度依存性)

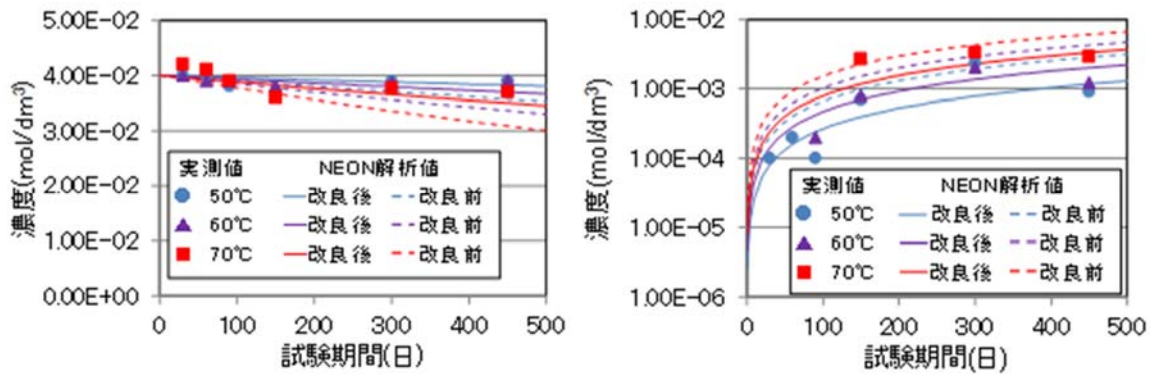


図 3.2.2-2 アンプル試験結果と速度式改良前後の解析結果の比較(pH4)
(左：硝酸イオン濃度 右：アンモニウムイオン濃度)

(2) ナチュラルアナログを活用した NEON による長期的評価の妥当性確認

(1)で示したように、NEON の信頼性向上のための各種室内試験を実施した結果、短期間における NEON の妥当性について評価でき、信頼性が向上した(平成 26 年度報告書;平成 27 年度報告書;平成 28 年度報告書;平成 29 年度報告書)。しかしながら、地層処分を検討する上で必要となるのは室内試験規模の時間や空間のスケールを超える評価技術である。したがって、長期的かつ大域的な硝酸塩の移行・化学的変遷挙動の NEON の信頼性向上を図る必要があり、そのためにはナチュラルアナログを活用しフィールドデータを再現することが有効である。そこで硝酸イオンの変遷に関するナチュラルアナログとして複数の事例を抽出し、適用性の検討を行った結果、広島県生口島事例及びカナダのオンタリオ州における Boyne 川周辺事例について再現解析を実施することで、NEON の微生物反応モデルにおける長期的評価の妥当性を検証した(平成 26 年度報告書;平成 27 年度報告書;平成 28 年度報告書)。

化学平衡-物質移行計算コードである PHAST(Ver. 2.2) (Parkhurst et al., 2010)に NEON を実装して解析を実施し、解析結果を、NEON を実装しない単純な移流解析の結果と比較した。広島県生口島事例とカナダ Boyne 川周辺事例を対象とする解析結果の一例を図 3.2.2-3 および図 3.2.2-4 にそれぞれ示す。いずれの事例でも、硝酸イオンと微生物との反応を NEON で解析することにより、実測された硝酸イオン濃度の分布を概ね再現できた。これは、NEON の微生物反応について妥当性を示す根拠となり得ることから、NEON を用いることで長期的な硝酸イオンの化学的変遷挙動の評価が可能であると考えられた。

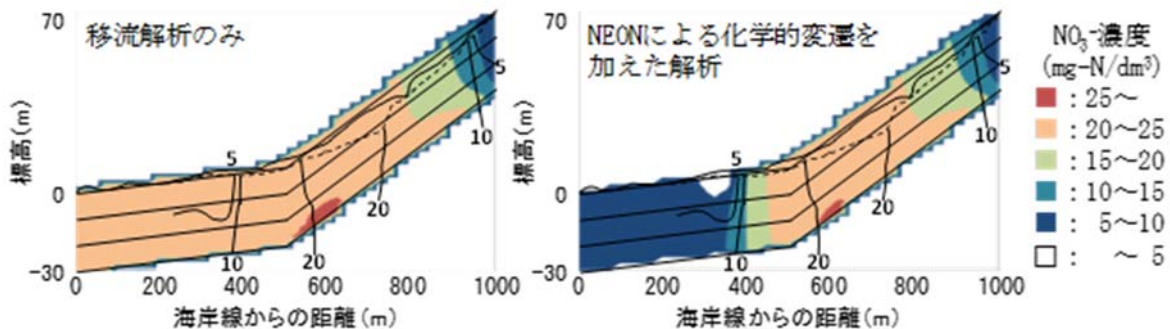


図 3.2.2-3 広島県生口島事例における硝酸イオン濃度分布の比較
(図中の実線および数値は実測値を、コンターは解析結果をそれぞれ示す)

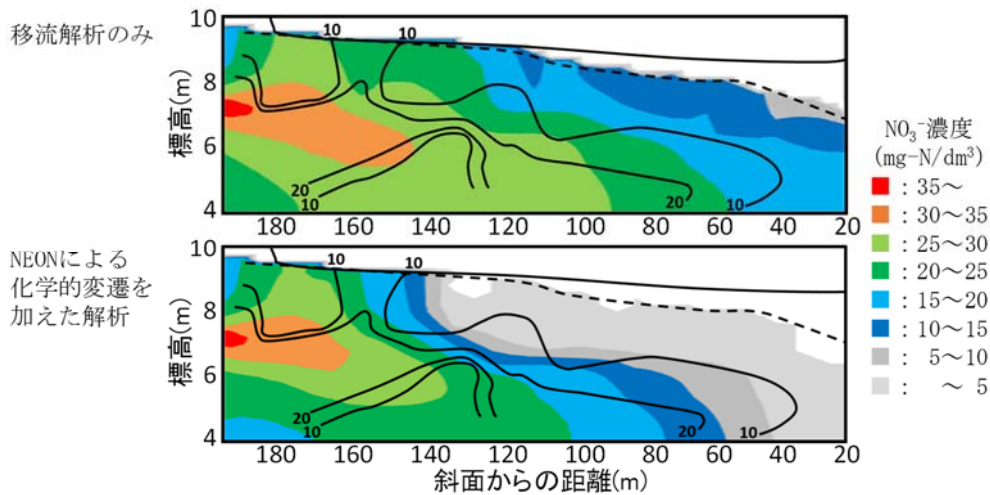


図 3.2.2-4 カナダ Boyne 川周辺事例における硝酸イオン濃度分布の比較
(図中の実線および数値は実測値を、コンターは解析結果をそれぞれ示す)

(3) 地層処分施設周辺を対象とした硝酸塩化学的変遷挙動の解析例

TRU 廃棄物処分施設の閉鎖後長期の硝酸塩の化学変遷と変遷物の周辺母岩中の移行挙動を、前項までの検討で見直された NEON のモデルにより解析し、見直しによる長期挙動の評価への影響を確認した(平成 29 年度報告書)。解析体系や条件については、既往の検討と同様とした(日本原子力研究開発機構, 2012)。結果を図 3.2.2-5 に示す。1,000 年経過時における硝酸イオン濃度分布に若干の差が確認されたが、それ以外に顕著な差は確認されなかった。したがって式 3.2.2-1 を適用した NEON においても長期的かつ大域的な硝酸イオンの化学的変遷挙動の評価が可能であると考えられる。

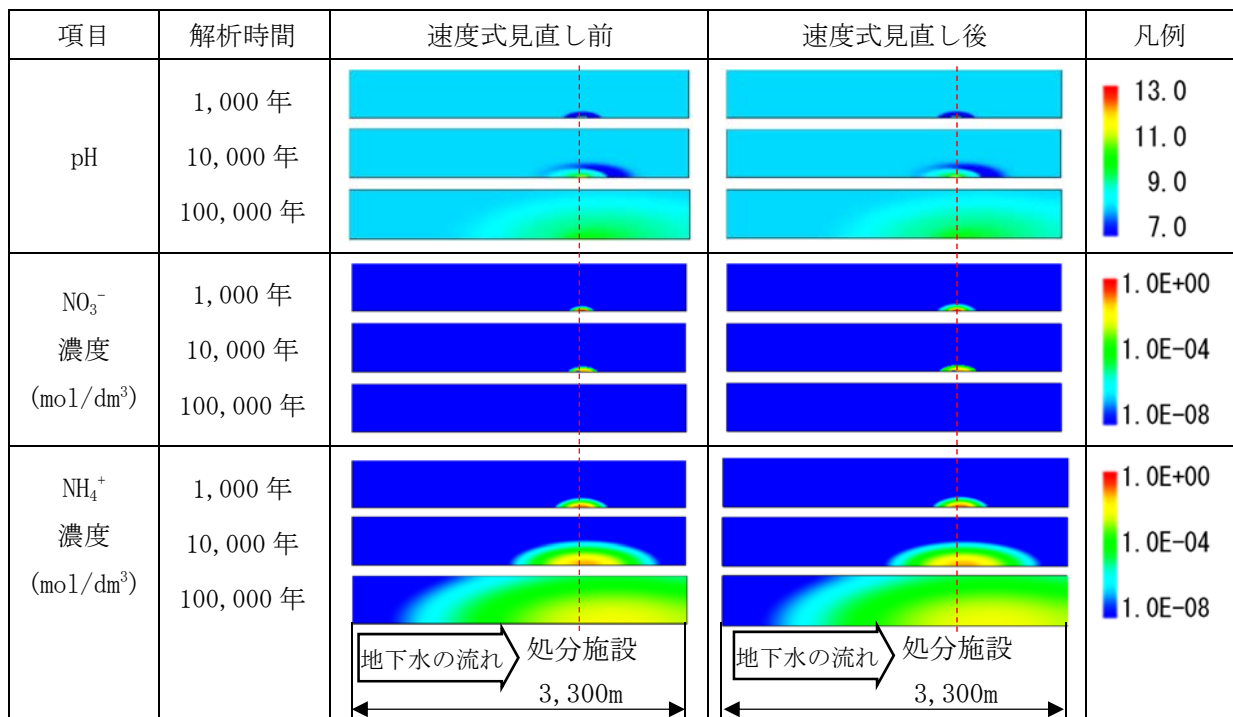


図 3.2.2-5 地層処分施設周辺を対象とした硝酸塩化学的変遷挙動解析結果

3.2.3 廃棄物由来の影響因子のバリア候補材料への影響評価

地層処分システムでは、ベントナイトを用いた人工バリア材料に地下水移動抑制や応力緩衝等の機能が期待される。これは、ベントナイトが低透水性・膨潤性等を有するためであるが、このような特性は、ベントナイトが主に膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトによって構成されていることによる。一方、これまでに述べたように、廃棄物から溶出した硝酸イオンは、地下深部の処分環境においてアンモニアやアンモニウムイオンに変化すると考えられる。アンモニウムイオンは、スメクタイトに陽イオン交換によって吸着する性質があるが、吸着に伴うスメクタイトの特性や長期安定性への影響については不明な点が多く、これを明らかにする必要がある。

本項では、ベントナイトを用いた人工バリア材料への硝酸イオン変遷物質の影響評価として、スメクタイトの特性や長期安定性に及ぼすアンモニウムイオンの影響について調査を行った。

(1) アンモニウム型化の条件の評価

アンモニウムイオンのスメクタイトの層間への陽イオン交換について、処分環境では、廃棄物由来のアルカリプルームの影響の重量を考慮する必要がある。アルカリプルームの影響としては、高 pH 条件における $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$ のスペシエーションや、 Na^+ 、 K^+ 及び Ca^{2+} との競合が挙げられる。そこで、 NH_4^+ と競合陽イオン間のイオン交換定数を実験的に取得するとともに（平成 28 年度報告書）、pH 条件に応じた $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$ のスペシエーションと競合陽イオン濃度の影響を考慮して、スメクタイトのアンモニウム型（以下、 NH_4 型）化をセメント-ベントナイト解析体系において評価した（平成 29 年度報告書）。その結果、FRHP 相当の地下水により移行した 0.01 mol/dm^3 程度の NH_4^+ を含むコンクリート外側溶液条件下での解析においては、FRHP 中の Na^+ などとの競合及びベントナイト外側のセメント系材料によるアルカリ影響により、 NH_4 型化しにくい傾向にあることが確認された。

(2) アンモニウム型スメクタイトの特性評価と鉱物学的変化に関する検討

アンモニウムイオンが吸着した NH_4 型スメクタイトの特性については、 Na 型に比べて透水係数が高くなることが知られているものの知見は限られている（平成 25 年度報告書）。また、 NH_4 型スメクタイトの鉱物学的変化については、湿潤乾燥処理（WD 処理）条件や高温高圧条件では、アンモニウムイオンの固定、脱水、 NH_4 型スメクタイトとイライト成分の混合層の生成、及び非膨潤性鉱物であるアンモニウム雲母への変質等の可能性が示されている（Cicel and Machajdik, 1981; Sucha and Siranova, 1991; Miklos and Cicel, 1993; 大原ほか, 2003）。ここでは、 NH_4 型スメクタイトの特性および非膨潤性鉱物への変化についての実験的手法および計算科学的手法による検討を行った。

1) アンモニウム型スメクタイトの特性評価に関する実験的検討

NH_4 型化した場合のスメクタイトの膨張性を調べるため、 NH_4 型や他のイオン型にイオン交換させたクニピア P®（山形県月布産ベントナイトを精製したスメクタイト）を用い、相対湿度制御下での X 線回折により底面間隔変化の比較を行った（図 3.2.3-1、平成 26 年度報告書、平成 27 年度報告書参照）。その結果、 NH_4 型スメクタイトは脱水しにくいことがわかった。また、一度 NH_4 型に処理したスメクタイトの膨張性は、 NH_4 型スメクタイトを NaOH 溶液に浸漬させた後と NaCl 溶液に

浸漬させた後とで異なる結果が得られ、(1)でモデル化したような pH に依存して変化する NH_4 のスペシエーションと、競合イオンである Na とのイオン交換の影響を受けることが示唆された。

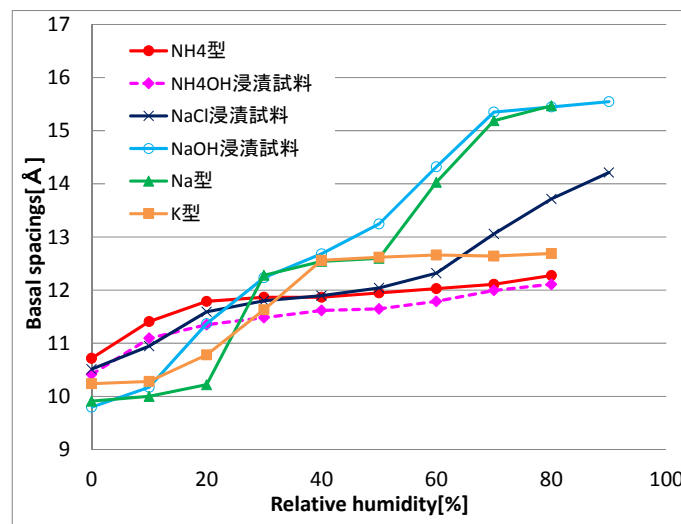


図 3.2.3-1 各イオン型に処理したスメクタイト試料の相対湿度制御下での底面間隔測定値

2) アンモニウム型モンモリロナイトの鉱物学的変化に関する実験的検討

NH_4 型化したスメクタイトの非膨潤性粘土鉱物への変化を念頭に、WD 処理による NH_4 型モンモリロナイトの底面間隔変化を相対湿度制御下 XRD により測定し、層間アンモニウムイオンの固定及び混合層生成の生起可能性を調べた。その結果、100 サイクルの WD 処理では、K 型ほど非膨潤性鉱物へ変質する割合が大きくないことが確認された。さらに、WD 処理で取得した変質挙動をより詳細に理解するため、140 および 185°C の高温条件で 2 週間のバッチ試験を実施し、変質の度合いを評価した。2 週間の変質試験後、K 型モンモリロナイトは、140°C 条件で 45-50% 程度、185°C 条件で 50% 以上がイライト化していると判定された。一方で、 NH_4 型モンモリロナイトでは、顕著な XRD パターンの変化が確認できなかった。WD 試験よりもさらに変質が進む条件である高温バッチ試験においても、イライトースメクタイト混合層の判定から NH_4 型の方が K 型と比較して非膨潤性鉱物化しにくいことが確認された。

3) アンモニウム型スメクタイトの特性評価に関する計算科学的手法による検討

上記 1) の検討により、 NH_4 型スメクタイトは他のイオン型スメクタイトと比較し脱水しにくいことが確認された。また、上記 2) の検討により、 NH_4 型の方が K 型と比較して非膨潤性鉱物化しにくいことが確認された。こうしたメカニズムを明らかにするため、アンモニウムイオンとスメクタイトとの相互作用に関する分子レベルでの挙動を計算科学的手法により調べた。

計算には汎用分子動力学法計算のための MXDORTO/MXDTRICL システム (平尾・河村, 1994; Frenkel and Smit, 2002) を用いた。MXDORTO は直交系の分子動力学計算プログラム、MXDTRICL は斜交系の計算プログラムである。計算に必要となるスメクタイトおよび水分子のモデルは Nakano and Kawamura (2006)、河村 (2008) からそれぞれ引用した。また、層間陽イオンとしてカリウムイオンのモデルは Sakuma and Ichiki (2016) より引用し、アンモニウムイオンはアンモニウム型モンモリロナイトの底面間隔の実験値を再現するモデルを採用した (平成 29 年度報告書参

照)。

まず、NH₄型がK型と異なり、低湿度側で膨張しやすい理由として考えられる水素結合の存在を検証するため、原子密度分布を算出し、NH₄⁺の配位環境を評価した。結合距離から、底面酸素—NH₄⁺間は強い水素結合であることが確認された。計算により得られた知見から、NH₄型スメクタイトではNH₄⁺が底面酸素と水素結合することでK型よりも粘土層の六員環構造にはまり込みにくく、その結果、底面間隔が小さくならず非膨潤化しにくいということが示唆された。これは、本研究で実施したWD試験や高温バッチ試験、同じくWD試験を実施したMiklos and Cicel (1993)の結果と調和的であり、計算科学的手法からもNH₄型スメクタイトの非膨潤性鉱物への変質の程度はK型を下回ることが示された。

さらに、スメクタイト構造中の四面体電荷を増加させ、NH₄型およびK型スメクタイトの膨張を混合エンタルピー計算により比較・評価した(図 3.2.3-2)。その結果、K型が層電荷0.48(esu/h.u.c)程度で非膨潤化するのに対して、NH₄型は0.8程度まで非膨潤化しないという結果を得た。また、K型では先行研究(Sato et al., 1996)と整合的な値が得られており、本計算結果によるモデルの妥当性が支持された。

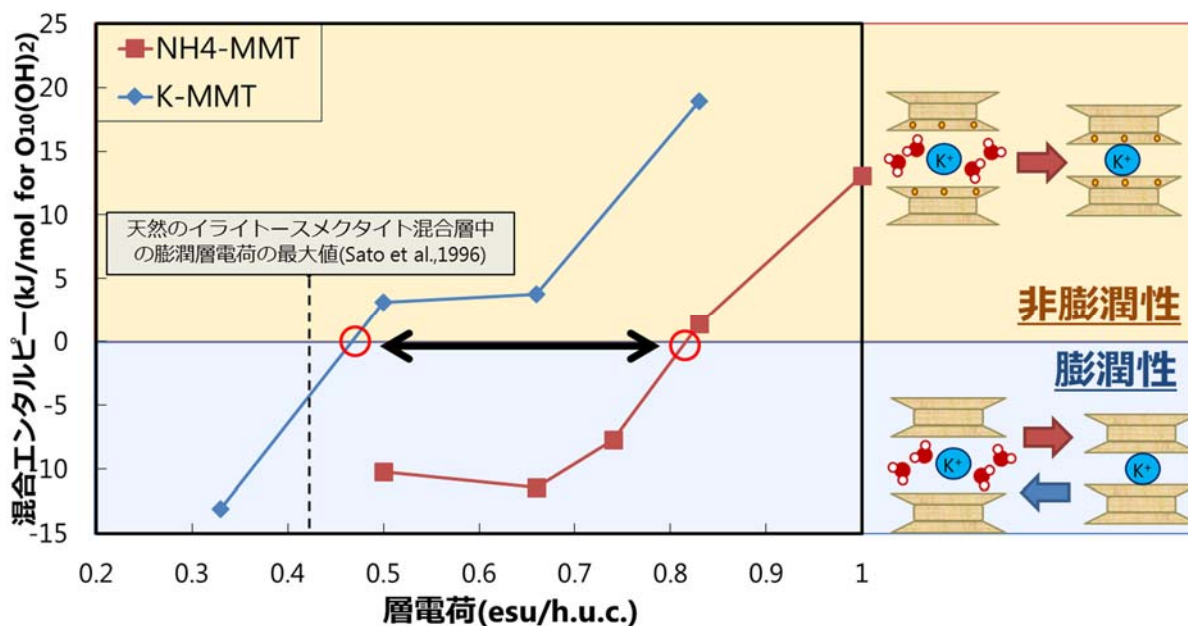


図 3.2.3-2 NH₄型およびK型モンモリロナイトにおける層電荷が膨潤性に与える影響評価結果

3.2.4 廃棄物由来の影響因子の放射性核種への影響評価

TRU 廃棄物由来の物質として放射性核種の移行挙動に影響を及ぼすと考えられるものは、窒素(酸化還元状態により硝酸イオンやアンモニウムイオン等となる)及び有機物である。このうち、窒素を含むイオンの影響については、平成19年度から平成24年度にかけて、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業【硝酸塩処理・処分技術高度化開発(H19からH24)】にて、安全評価上重要な元素に及ぼす影響を調査してきた。その結果、硝酸イオンが及ぼす酸化還元および錯生成の影響については一部の元素を除いて顕著ではないこと、ニッケルおよびパラジウムについてはアンモニウムイオンとの錯生成が顕著に見られることが確認された。当該事業中に残された課題としてテクネチウムの酸化還元に対して硝酸イオンが影響する可能性が挙げられた。

一方、有機物及びその分解生成物が金属イオン等との錯生成に及ぼす影響をレビューした結果、かねてより指摘されていたセルロースの分解生成物であるイソサッカリン酸 (ISA) に対する評価が重要と判断された。しかしながら、実測データの存在しない、もしくは信頼性の低い元素については、ISA が溶解度や収着分配係数に及ぼす影響が十分には評価されていない。

以上を踏まえ、本プロジェクトでは、テクネチウムの酸化還元に及ぼす硝酸イオン等の影響について、溶解度実験を通して調べるとともに、ジルコニウム及びウラン (IV 及び VI) の溶解挙動に及ぼす ISA の影響を調査した。

(1) 硝酸塩共存下におけるテクネチウム (IV) の溶解度実験

テクネチウムの 4 価の固相を準備し、溶液の酸化還元条件を弱還元条件から強還元条件に制御するために 3 種類の還元剤を用いて、硝酸ナトリウム水溶液とその比較用として塩化ナトリウム水溶液及び過塩素酸ナトリウム水溶液での未飽和側からの溶解度試験を実施した。

結果の一例を図 3.2.4-1 及び図 3.2.4-2 に示す。どの還元剤を使用した場合でも、系の酸化還元電位を入力値とした熱力学計算結果が、実測値を概ね再現することがわかった。その一方で、6 mol/dm³ の NaNO₃ 濃度の試験においては、酸化還元電位が高くなる傾向にあり、Tc の濃度も高くなった。また、NaNO₃ 濃度が 0.1 mol/dm³ 以下においては酸化還元はみられず、Tc 濃度は系の酸化還元電位の変化で説明できることが示された。

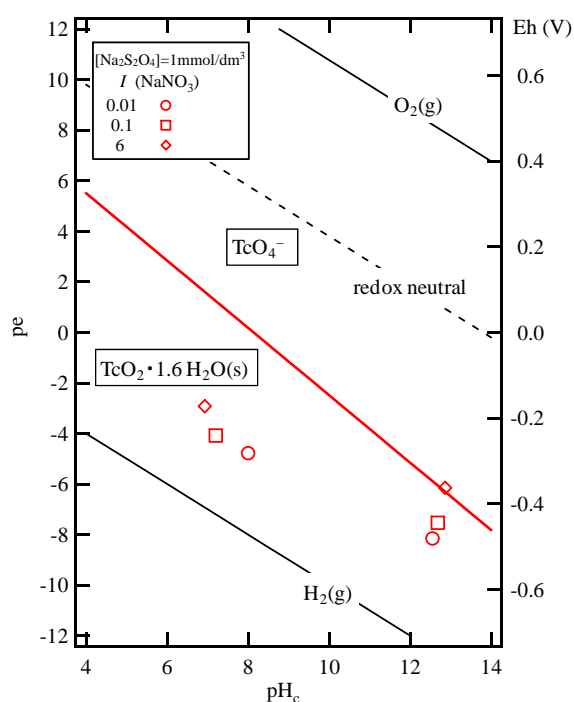


図 3.2.4-1 NaNO₃ 溶液中の Tc 溶解度試験における pH および Eh 測定値 (34 d、[Na₂S₂O₄] = 1 mmol/dm³)

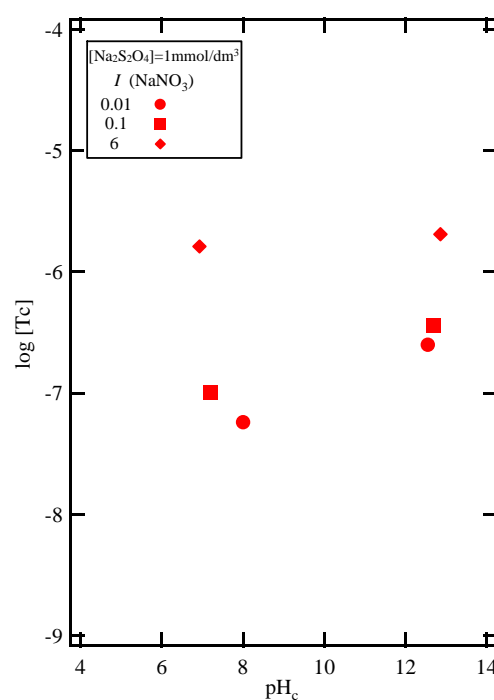


図 3.2.4-2 NaNO₃ 溶液中の Tc 濃度の pH 依存性 (34 d、[Na₂S₂O₄] = 1 mmol/dm³, 10kDa ろ過)

(2) グルコン酸及びイソサッカリン酸共存下におけるジルコニウムの溶解度実験

廃棄体由来化学物質のうち有機物を対象として、放射性核種の核種移行挙動に及ぼす影響を研

究した。影響物質として挙げられる有機物のうち、核種移行挙動への影響を評価することが重要であるものとして、イソサッカリン酸を選定した。

イソサッカリン酸 (ISA) および ISA と類似した化学構造を持つグルコン酸 (GLU) について、ジルコニウムの見かけの溶解度に及ぼす影響を調査した。結果の例を図 3.2.4-3 に示す。ジルコニウム溶解度の pH 依存性や ISA および GLU 濃度依存性から、支配的な溶存化学種を推定した。これら溶存化学種の存在を仮定し、溶解度の熱力学解析を行うことによりそれぞれの錯生成定数を決定した。ISA および GLU 共存下における分画分子量 10^4 (10 kDa) 通過後のジルコニウム溶解度は、熱力学計算により概ね再現できることが示された。一方、中性 pH からアルカリ性 pH 領域において、 $0.45 \mu\text{m}$ 通過成分の濃度は 10 kDa 通過成分の濃度より顕著に高い値を示したことから、ISA 及び GLU 共存下では、大きなサイズのコロイド種が存在することが分かった。同程度の鎖長を持つジカルボン酸では、このようなコロイド種の生成は見られなかったことから、ISA や GLU 共存下で観察されたコロイド種は、ポリヒドロキシカルボン酸に特有のものであり、その影響評価は今後の課題と考えられる。

また、ISA 共存下で生成するジルコニウムのコロイド種に着目し、3 kDa から $0.45 \mu\text{m}$ までの異なる孔径のフィルターを用いてろ過することでコロイド種の粒径分布を調べた。コロイド種の粒径分布は、特に ISA 濃度 (ISA/Zr 比) に応じて大きく変化し、ISA 濃度が高い条件下ではコロイド種の生成は顕著ではなく、Zr-OH-ISA の単核錯体が支配種と考えられた一方、ISA 濃度が低い条件下では数十 nm サイズのコロイド種が生成されると考えられた。

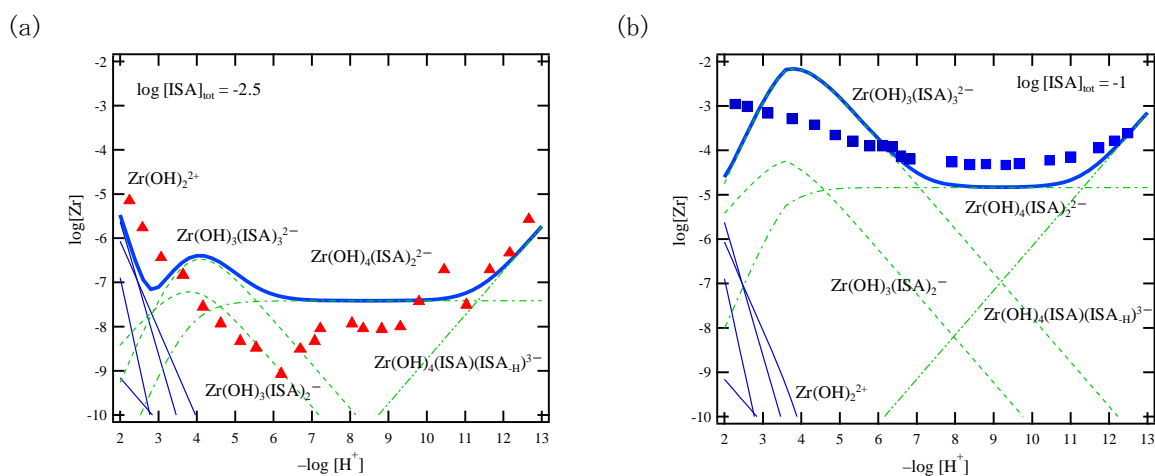


図 3.2.4-3 ISA 共存下における Zr 溶解度の熱力学計算結果の例 ($[\text{ISA}]_{\text{ini}} =$ (a) $3 \times 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ 、(b) 10^{-1} mol/dm^3 ; プロットは実測値を、実線は最小二乗適合結果を示す)

(3) イソサッカリン酸共存下におけるウラン (IV, VI) の溶解度実験

廃棄体由来化学物質の一つであるイソサッカリン酸 (ISA) を用いて、ISA 共存下におけるウラン (IV 及び VI) の溶解度に及ぼす ISA 影響を調べた。

ウラン (IV 及び VI) の溶解度測定と最小二乗適合を行った熱力学計算結果の例を、それぞれ図 3.2.4-4 及び図 3.2.4-5 に示す。いずれの結果についても得られた熱力学データにより溶解度の実験値を概ね再現できることが示され、 $\text{U}(\text{OH})_4(\text{ISA})_2^{2-}$ および $\text{U}(\text{OH})_5(\text{ISA})_2^{2-}$ の存在を仮定し、溶

解度実験値の熱力学解析を行うことで、それぞれの錯生成定数を決定することができた。一方、ウラン(VI)の溶解度の場合、 $UO_2(OH)_3(ISA)_2^{2-}$ の存在を仮定し、溶解度実験値の熱力学解析からその錯生成定数の値を求めることができた。以上の錯生成定数については、JAEA-TDBへの反映が可能であることから、次回のJAEA-TDB更新時に採用する予定である。

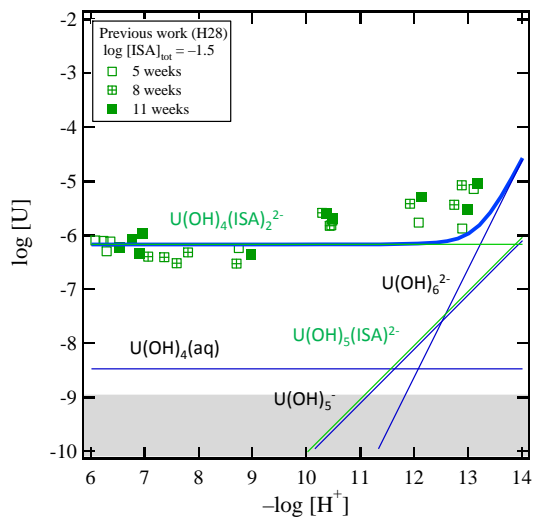


図 3.2.4-4 ISA 共存下での溶存ウラン(IV) 濃度の例 (プロット) と最小二乗適合の結果 (実線) (ISA 濃度 $10^{-1.5}$ mol/dm³)

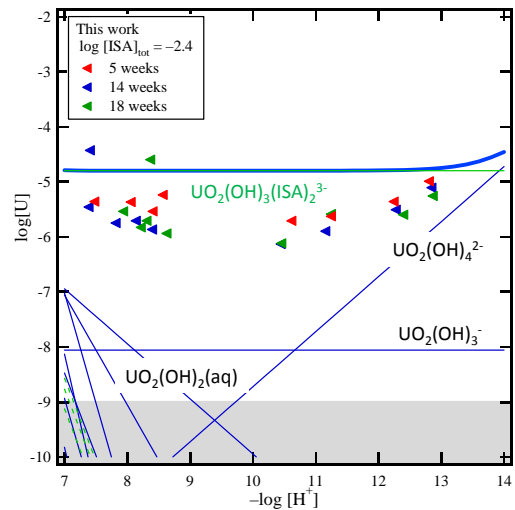
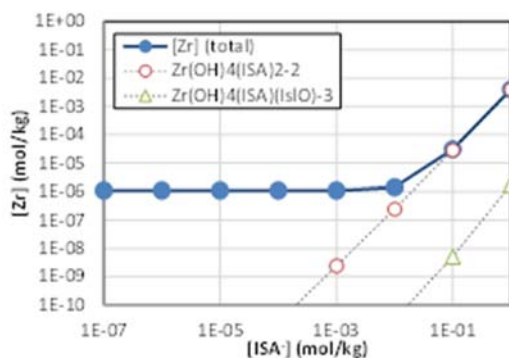


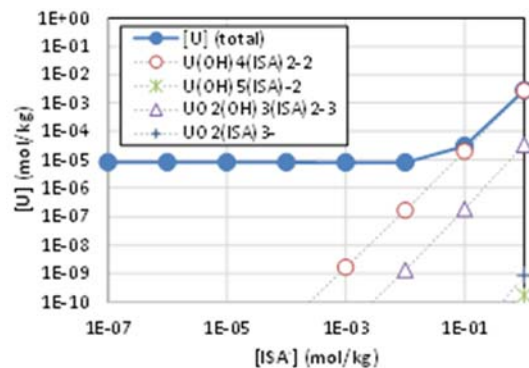
図 3.2.4-5 ISA 共存下での溶存ウラン(VI) 濃度の例 (プロット) と最小二乗適合の結果 (実線) (ISA 濃度 $10^{-2.4}$ mol/dm³)

(4) イソサッカリン酸の影響を考慮したジルコニウム及びウランの溶解度の試算

本研究で得られたジルコニウム及びウランの ISA 錯体の熱力学データを用いて、ISA 錯体を考慮したこれらの元素の溶解度を試算した。得られた結果を図 3.2.4-6 に示す。第 2 次 TRU レポートでは、最も保守的な検討で得られた ISA 濃度が 10^{-5} mol/dm³ 程度と評価されていることから、ウランやジルコニウムの溶解度に対して ISA 錯体は顕著な影響を及ぼさないことが確認された。また、他の元素についても同様に試算を実施した結果、ISA 錯体の影響が最も顕著だったのはプルトニウムで、ISA 濃度が 10^{-5} mol/dm³ でもわずかながら ISA 錯体の寄与が確認される (ただし顕著ではない) ことがわかった。



(a) ジルコニウム



(b) ウラン

図 3.2.4-6 ISA 共存下でのジルコニウム及びウランの溶解度試算結果

3.2.5 廃棄物由来の影響因子の成果の取りまとめ

原子力発電環境整備機構(2011; 2014)を参考に、発生が想定される地層処分対象の TRU 廃棄物について、HLW と共処分することを想定した場合のニアフィールド性能に及ぼす影響因子を整理した結果を表 3.2.5-1 に示す(平成 25 年度報告書)。本検討では、このうち、アスファルトで固化する場合の、硝酸塩とアスファルトとの熱反応暴走の可能性の評価、硝酸塩が鉱物中の黄鉄鉱等との反応で変遷する挙動の評価、硝酸塩による人工バリア材料の安全機能に対する影響評価、および、放射性核種の移行に対する硝酸塩およびセルロース等の有機物の影響評価の 4 つを対象として、個別の要素技術の開発を行った。これらについて、ニアフィールド性能への影響を整理した結果を表 3.2.5-2 に示す。

表 3.2.5-1 TRU 廃棄物に由来するニアフィールド性能に対する影響因子

(本項で検討を行った影響因子を太字で示す)

グループ	因子	主な影響内容	
2	熱	バリア材料	・バリア材料の熱変質
	有機物 (セルロース等) ^{※1}	放射性核種	・分解生成物であるイソサッカリン酸と放射性核種との錯体形成
3	硝酸塩(NaNO ₃)	化学環境	・Na ⁺ による高イオン強度環境の形成 ・NO ₃ ⁻ が、NO ₂ , NH ₃ /NH ₄ ⁺ , N ₂ に変遷
		放射性核種	・高イオン強度環境の形成による溶解度・分配係数の変化
			・NO ₃ ⁻ による放射性核種の酸化状態の変化
			・NO ₃ ⁻ との放射性核種との錯体形成
		バリア材料	・金属容器の腐食速度の変化
			・ベントナイトの透水係数の変化
	・ベントナイトの変質		
	・セメント系材料の溶出挙動の変化 ・Na ⁺ とセメント系材料の骨材との反応		
	有機物 (アスファルト)		・熱反応暴走の発生
	NH ₃ (NO ₃ ⁻ から生成)	バリア材料	・NH ₄ ⁺ のモンモリロナイト層間への固定
		放射性核種	・NH ₃ との放射性核種との錯体形成
	リン酸塩(NaH ₂ PO ₄)	バリア材料	・セメント系材料との反応 ・Na ⁺ とセメント系材料の骨材との反応
		放射性核種	・PO ₄ ³⁻ との放射性核種との錯体形成
アスファルト ^{※1}	放射性核種	・アスファルト劣化物の放射性核種との錯体形成	
DBP/TBP 等(廃溶媒) ^{※1}	放射性核種	・DBP/TBP 等の放射性核種との錯体形成	
共通	セメント添加有機物 ^{※1}	放射性核種	・溶出成分の放射性核種との錯体形成
	金属容器 (ドラム缶/キャニスタ)	バリア材料	・バリア材料腐食に伴うガス発生による施設内の水理条件の変化
	セメント系材料	バリア材料	・アルカリ条件によるベントナイト等の変質
放射性核種		・OH ⁻ , Ca ²⁺ との錯体形成	

※1: 微生物の活動に伴う分解生成物の影響も考慮する必要がある

表 3.2.5-2 ニアフィールド性能への影響のまとめ

影響の内容	評価結果の概要
硝酸塩とアスファルトとの熱反応暴走による影響	処分環境においてアスファルト固化体が 200℃程度以上の温度に達すると熱反応暴走が誘発される可能性があると考えられる。このような温度に達する外的要因として、微生物活動に伴う熱の発生、溶出した硝酸イオンと周辺母岩に含まれる黄鉄鉱の反応熱、高温流体の処分場への接近および処分施設の建設・作業中のトンネル火災の発生を想定して試行的な評価を行ったが、いずれについても熱反応暴走が起こる可能性は低いと考えられた。
硝酸塩が鉱物中の黄鉄鉱等との反応で変遷することによる影響	廃棄物中に含まれる硝酸イオンは、鉱物中の黄鉄鉱との反応により、主にアンモニウムイオンへ変遷し、周辺岩盤へ移行する。標準的な岩盤の物質移行特性を想定すると、アンモニウムイオンは、地下水の下流側に数百 m の範囲で分布する可能性があり、HLW と共処分する場合には、これによる安全評価への影響を考慮する必要が生じる可能性がある。
硝酸塩による人工バリア材料の安全機能に対する影響	地下水中の Na ⁺ などの陽イオンとの競合及びベントナイト外側のセメント系材料によるアルカリ影響により、処分環境において NH ₄ 型スメクタイトが生成する可能性は低いと考えられる。また、NH ₄ 型スメクタイトは、高温下では非膨潤性鉱物に変質する可能性があるが、K型スメクタイトと比較すると、その可能性は低い。
放射性核種の移行に対する硝酸塩およびセルロース分解生成物等の有機物の影響	硝酸塩が核種移行挙動に及ぼすと考えられる酸化還元の影響については、系の酸化還元電位に応じた熱力学計算で説明可能である。また、塩濃度の増大が及ぼす影響については、他の塩と同様に対応可能である。一方、核種移行挙動に及ぼすと考えられる有機物の影響については、最大の影響因子と考えられるセルロース分解生成物のイソサッカリン酸を用いた場合でも、想定されている最大濃度以下の範囲では顕著な影響を及ぼさない。

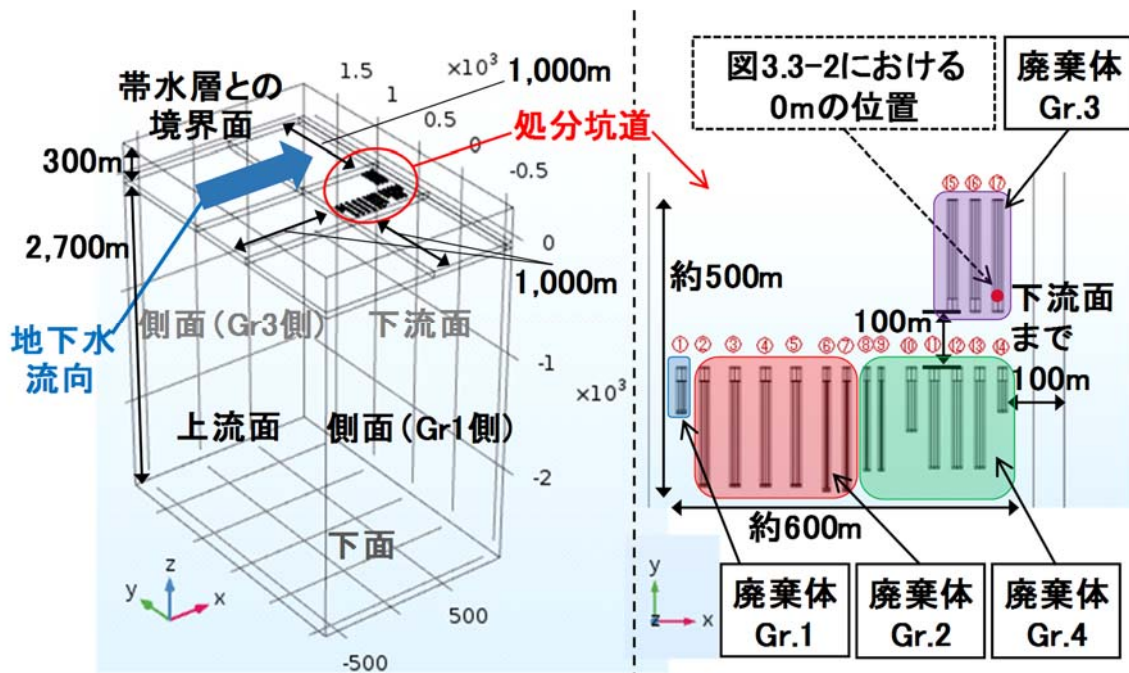
3.3 多様な廃棄物の影響を考慮した共処分概念案の構築

わが国の TRU 廃棄物に相当する廃棄物と HLW の共処分を検討している国々を対象に、共処分の概念及び、廃棄物間の相互作用の影響評価の事例などに関する文献調査を行った。各国ともに HLW と TRU 廃棄物の相互影響を最小化するために、これらの廃棄物処分エリアを数百 m 程度離して配置するレイアウトが検討されていること、廃棄物に含有される化学物質や崩壊熱による影響を解析的に検討している事例があること等が確認された(平成 25 年度報告書；平成 26 年度報告書)。

ここでは、これら海外の事例と同様に、廃棄物間の相互影響を解析的に評価することにより、坑道レイアウト等の検討を行った(平成 27 年度報告書；平成 28 年度報告書；平成 29 年度報告書)。影響因子としては、重要性が最も高いと考えられる硝酸塩の影響に着目し、硝酸イオンの存在により、人工バリアに対する核種の収着性が低下すること等を考慮した、3 次元モデルによる硝酸イオン及び核種の移行解析を行うことを通じて、硝酸塩の影響を最小化するための坑道レイアウト等の検討を行った。

3 次元解析の解析体系と、硝酸イオンの移行解析結果の一例を図 3.3-1 及び図 3.3-2 に示す。硝酸イオンによる影響が及ばない閾値を、 $3.9 \times 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$ (降水系高 pH 地下水に含まれる全陰イオン濃度の 10 分の 1)、あるいは第 2 次 TRU レポートと同様に $1 \times 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$ とすると、隣接

する廃棄体 Gr. 4 の処分坑道に対して、300~400m 程度の離間距離を設定する必要があることが示された。



※地表より深度 200m までの領域を帯水層とし、帯水層については解析体系には含めなかった。

図 3.3-1 解析体系 (左：全体図(計算領域)、右：処分坑道レイアウト)

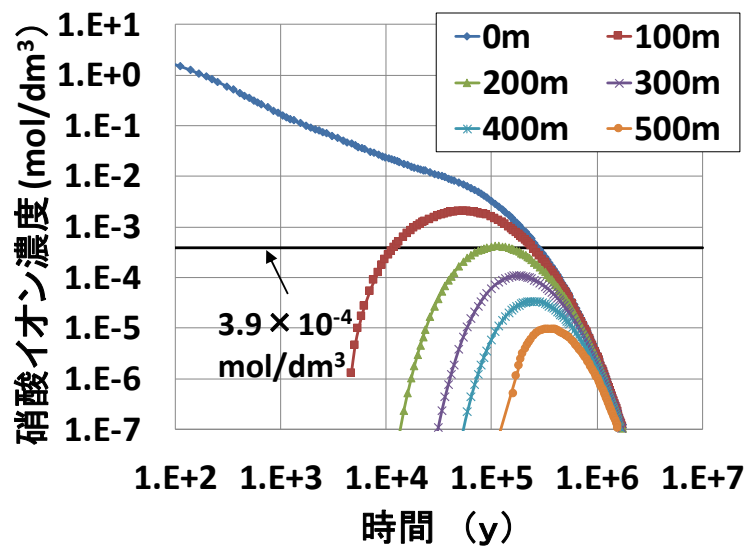


図 3.3-2 廃棄体 Gr. 3 から廃棄体 Gr. 4 方向への NO_3^- の拡がり
(凡例は、坑道⑦の端から -y 方向への距離を示す)

3.4 まとめ

3.4.1 廃棄物の特性を踏まえた共処分への影響評価技術開発

(1) 種々の廃棄物の特性評価と廃棄物由来の影響因子の影響調査

硝酸塩含有廃棄物としてアスファルト固化体を対象に、地層処分環境において、アスファルトと硝酸塩の反応による熱反応暴走が起こる可能性に着目し、取得した熱測定データ等を参考に、当該固化体の発熱特性(発熱速度式)を検討した。

検討した発熱速度式を用いて地層処分環境を想定した熱収支解析を実施し、熱反応暴走開始温度(ROT)を算定した。また、算定した ROT を用いて、熱反応暴走を誘発し得る、エネルギー(熱)を供給する外的要因(擾乱事象)を想定した安全性の試行的評価を実施し、いずれの外的要因についても、熱反応暴走を誘発する可能性は低いことが示された。

(2) 廃棄物由来の影響因子の化学環境影響評価

硝酸塩の化学的変遷モデルの信頼性向上のための確証試験を実施した。温度条件 50~70℃における黄鉄鉱と硝酸イオンの反応による変遷データを取得し、既往の試験で取得した温度条件 80℃以上の温度条件における変遷データと併せて反応速度式の各パラメータを見直した。見直し前後の速度式を用いた再現解析の各結果とアンプル試験結果を比較したところ、見直し後の速度式は既存の速度式より相対的に再現性が高いことが確認された。

また、既存モデルの長期的妥当性の確認のため自然界における硝酸性窒素汚染事例の再現解析を実施した。広島県生口島及びカナダ・Boyne 川の事例において、現地情報と既存モデルを用いた解析の結果を比較したところ、精度良く再現することができ、長期的かつ大域的な条件におけるモデルの妥当性を確認できた。

さらに、速度式見直し後のモデルを用いて地層処分施設周辺環境における硝酸イオンの化学的変遷挙動の解析を実施したところ、既存モデルによる解析結果と比較して顕著な差は確認されなかった。従って、見直し後の速度式を適用したモデルにおいても長期的かつ大域的な硝酸イオンの化学的変遷挙動の評価が可能であると考えられた。

(3) 廃棄物由来の影響因子のバリア候補材料への影響評価

硝酸塩影響とアルカリ影響の重畳によるスメクタイトの NH_4 型化を評価可能な地球化学モデルを整備した。地下水やセメント間隙水に含まれる Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} などの陽イオンとの競合及び高 pH 条件でのスペシエーション変化により NH_4 型化は限定的であることが確認された。

NH_4 型スメクタイトの変質に関する実験的調査により、K 型と比較して非膨潤性鉱物になりにくいことが確認された。分子動力学法による混合エンタルピー計算からも、 NH_4 型スメクタイトが非膨潤化しにくいことが示唆された。

以上より、 NH_4^+ による緩衝材の性能劣化は、 K^+ に比べて小さいことが明らかになったが、 NH_4^+ や K^+ による緩衝材の性能への影響評価のためには、高アルカリ環境における主要陽イオン(Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})とのイオン交換反応の定量的理解や、 NH_4^+ や K^+ スメクタイトの物質移行特性の理解、イライト化の速度論的理解が必要である。

(4) 廃棄物由来の影響因子の放射性核種への影響評価

硝酸塩が核種移行挙動に及ぼす影響の課題として残っていたテクネチウムの酸化還元挙動について、溶解度実験を通して確認し、テクネチウムの溶解度が系の酸化還元電位を用いた熱力学計算で説明可能であることを確認した。

有機物が核種移行挙動に及ぼす影響評価として、最大の影響因子と考えられるイソサッカリン酸を対象とし、ジルコニウム及びウラン (IV および VI) の溶解度測定を行い、不足していた熱力学データを取得した。得られた熱力学データを用いて溶解度を試算した結果、現在想定されているイソサッカリン酸濃度以下では、これらの元素のイソサッカリン酸錯体は溶解度の増大に顕著な影響を及ぼさないことが確認された。

3.4.2 多様な廃棄物の影響を考慮した共処分概念の構築

諸外国における、わが国の TRU 廃棄物に相当する廃棄物と HLW との共処分概念に関する検討事例を参考に、廃棄物間の相互影響を解析的に評価することにより、坑道レイアウト等の検討を行った。影響因子としては、重要性が最も高いと考えられる硝酸塩に着目し、3次元体系による移行解析を実施した結果、硝酸塩の影響範囲は 200~300m 程度であり、数百 m の離間距離を設定することでその影響を回避可能であることが示された。

参考文献

- Arthur, R. C., Sasamoto, H., Oda, C., Honda, A., Shibata, M., Yoshida, Y. and Yui, M. (2005): Development of thermodynamic database for hyperalkaline, argillaceous systems, JNC-TN8400 2005-010.
- Cicel, B. and Machajdik, D. (1991): Potassium- and ammonium-treated montmorillonite. I Interstratified structures with ethylene glycol and water. *Clays and Clay Miner.*, 39, pp. 40-46.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): 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, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- Frenkel, D. and Smit, B. (2002): *Understanding Molecular Simulation from Algorithms 2nd ed. to Applications*, Academic Press, pp. 638.
- 原子力発電環境整備機構 (2011): 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分技術と安全性「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.
- 原子力発電環境整備機構 (2014): 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性向上に関する検討—多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念の検討—, NUMO-TR-14-03.
- 原子力委員会 長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会 (2006): 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方—高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性—.
- Hasegawa, K. and Li, Y. (2000): Explosion investigation of asphalt-salt mixtures in a reprocessing plant, *Journal of Hazardous Materials* A79(2000) pp. 241-267.
- 平尾一之, 河村雄行 (1994): パソコンによる材料設計, 裳華房, pp. 217.

- 河村 雄行 (2008): 鈹物-水系の分子シミュレーション, 地球化学 42, pp.115-132.
- Kitamura, A., Doi, R. and Yoshida, Y. (2014): Update of JAEA-TDB; Update of thermodynamic data for palladium and tin, refinement of thermodynamic data for protactinium, and preparation of PHREEQC database for use of the Brønsted-Guggenheim-Scatchard model, JAEA-Data/Code 2014-009.
- Miklos, D. and Cicel, B. (1993): Development of interstratification in K- and NH₄-smectite from Jelsovy Potok (Slovakia) treated by wetting and drying. Clay Miner., 28, pp. 435-443.
- Nakano, M. and Kawamura, K. (2006): Adsorption Sites of Cs on Smectite by EXAFS Analyses Molecular Dynamics Simulations, Clay Science 12 Supplement 2, pp.76-81.
- 日本原子力研究開発機構 (2008): 平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発, 平成 20 年 3 月.
- 日本原子力研究開発機構 (2009): 平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発, 平成 21 年 3 月.
- 日本原子力研究開発機構 (2010): 平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発, 平成 22 年 3 月.
- 日本原子力研究開発機構 (2011): 平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発, 平成 23 年 3 月.
- 日本原子力研究開発機構 (2012): 平成 23 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発, 平成 24 年 3 月.
- 日本原子力研究開発機構 (2013a): 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発, 平成 25 年 3 月.
- 日本原子力研究開発機構 (2013b): 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処理・処分技術高度化開発—6 カ年研究成果のとりまとめ—, 平成 25 年 3 月.
- 大原祥平, 掛川武, 赤石寛, 中沢弘基 (2003): トベライト (アンモニウムマイカ) の高温高压化での安定性. 粘土科学, 42(3), pp.177.
- Parkhurst, D.L., Kipp, K.L. and Charlton, S.R. (2010): PHAST Version 2 - A Program for Simulating Groundwater Flow, Solute Transport, and Multicomponent Geochemical Reactions, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A35, pp.235.
- Sakuma, H. and Ichiki, M. (2016): Density and Isothermal Compressibility of Supercritical H₂O-NaCl Fluid: Molecular Dynamics Study from 673 to 2000 K, 0.2 to 2 GPa, and 0 to 22 wt% NaCl Concentrations, Geofluids, 16, pp.89-102.
- Sato, T., Murakami, T. and Watanabe, T. (1996): Change in layer charge of smectites and smectite layers in illite/smectite during diagenetic alteration. Clays Clay Miner., 44, pp.460-469.
- 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会原子力部会 放射性廃棄物小委員会 (2006): 放射性廃棄物小委員会 報告書, 平成 18 年 6 月 16 日.
- Sucha, V. and Siranova, V. (1991): Ammonium and potassium fixation in smectite by wetting and drying. Clays Clay Miner., 39, pp.556-559.

鈴木弘, 三浦昭彦 (1999): アスファルト固化処理施設火災爆発事故の中期的課題の対応～小型
2軸エクストルーダ試験～, JNC TN8410 99-041.

4. 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

4.1 目的と5か年の実施内容

地層処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入れられるためには、システムとしての評価に関する技術の確証が十分に行われる必要がある。特に、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震及びそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえれば、常に地球科学や社会科学分野の最新の知見を反映し、これまで想定外とされていたあるいは未知の事象を探り出し、地層処分の安全性について示していくことが必要である。この地層処分の安全性を示すことの一環として、東北地方太平洋沖地震を踏まえた過酷事象対策も念頭に置いたシステム概念と評価技術の開発を行うことを目的とした。

本サブプロジェクトでは、地層処分システムにおける過酷事象の概念構築を行った上で抽出された事象に係る評価技術の開発を行った。地層処分システムにおける過酷事象の概念構築では、原子力施設等における過酷事象の考え方を整理したうえで、地層処分システムにおける過酷事象の概念構築(定義)をはかるとともに、地層処分システムにおける過酷事象として考慮すべき事象を抽出し、地層処分システムにおける過酷事象対策技術のあり方を取りまとめた。評価技術の開発では、過酷事象の概念構築に基づいて抽出された事象に対して、過酷事象を評価するためのシナリオ構築手法の開発、過酷事象に繋がり得る発端事象の地質環境及び人工バリアへの影響調査、過酷事象の生起可能性を評価する技術の開発を行った。特に、本章では、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震及びそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により、一般公衆が抱く漠然とした不安や疑問を持っていると考えられる巨大地震・断層活動を事例としてとりあげ、過酷事象となる可能性の検討を通して評価確証技術の開発を行った。具体的には、巨大地震・断層活動に起因する過酷事象を考慮したシナリオ構築手法を開発するとともに、巨大地震・断層活動の特性調査、深部流体の影響調査、地下水の流動・水質などの地質環境への影響調査、模型試験等を用いた人工バリアへの影響調査、地震動による地下施設への影響調査、断層起源のガスの影響調査を実施し、シナリオに基づく定量的な影響評価技術の開発を行った。

上記の全体フレームにしたがい、平成25年度から5か年の期間をスコープにおき、最初の3か年までに基本技術を示し、残り2年で開発された技術の改良・高度化を実施した。

具体的には、最初の3か年では、まず、地層処分システムにおける過酷事象の概念について、他の原子力関連施設における過酷事象の取り扱いを参考にしながら、その定義を明らかにすると共に、これに従い、地層処分システムにおける過酷事象を具体化するための方法論を開発した。また、東北地方太平洋沖地震を踏まえ地層処分システムの過酷事象の候補として考えられる巨大地震・断層活動を事例とした検討においては、安全機能に着目した評価手法の開発を行うと共に、巨大地震・断層活動に関連する個別現象について、最新の科学的知見も含めて調査、評価を行い、これらを巨大地震・断層活動に起因する過酷事象の評価に必要な基盤情報として整理した。

残りの2年においては、過酷事象の候補を具体化する技術、その影響評価技術及び過酷事象への対策技術を整備し、過酷事象を評価するための実務的な手順を明らかにした。また、巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発では、巨大地震・断層活動に関する最新情報を調査・分析して情報共有シートを作成するとともに、安全機能に着目した評価手法に基づき、個別現象の分析及び影響評価の試行を実施した。

以上の検討を通じて得られた成果に基づき、地層処分システムにおける過酷事象を具体化するため

の技術として体系化を図った。

4.2 地層処分システムにおける過酷事象の概念構築

原子炉安全の分野においては、東北地方太平洋沖地震及びそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所事故を契機として、これまでの想定を超える事象が起こり得ると認識することの重要性がより一層高まってきている。すなわち、設計基準事象を大幅に超える過酷事故を考慮して対策を検討することで、より一層の安全性を追求していくことが重要と認識されている。たとえば、経済産業省・総合資源エネルギー調査会では、原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループが設置され、「わが国は、規制水準を満たせばリスクがないとする「安全神話」から決別し、産業界の自主的かつ継続的な安全性向上により、世界最高水準の安全性を不断に追及していくという新たな高みを目指すことが重要」という認識の下、産業界が自主的に安全性を向上していく取組みの在り方について議論が進められた（経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ，2013）。その結果、このワーキンググループでは、網羅的なリスク評価や残余のリスクの低減、レジリエンスの向上等の観点から、原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言が取りまとめられた（経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ，2014）。

一方、地層処分の分野においては、これまで、第2次取りまとめや第2次取りまとめ以降の継続的な研究開発（例えば、経済産業省の委託事業報告書、原子力発電環境整備機構の技術開発報告書、日本原子力研究開発機構のCoolRep等）において、地層処分システムの長期安全性に係る知識基盤を積み上げてきた。これらのレポートでは、原子力施設における過酷事故に相当すると考えられる稀頻度事象シナリオやwhat-ifシナリオを設定し、地層処分システムをより危険な状況にさらした評価が実施されている。

今後、地層処分システムの頑健性をさらに向上させ、その結果として社会からの受容性を高めるためには、上述の原子炉分野の潮流を踏まえ、原子力施設における過酷事故の考え方を参考として、地層処分における過酷事象の概念を構築することが必要となる。すなわち、地層処分システムの分野においても、現時点において認識できていない事象はあり得るという前提に立ち、安全機能を著しく低下・劣化させる可能性のある事象をあえて想定することで、より一層の安全性を追求することが極めて重要である。

このため、本検討では、これまでの安全評価とは異なるアプローチを用いて、地層処分システムにおける過酷事象を探索するための枠組みを整備することを目的として、閉鎖後の地層処分システムにおける過酷事象の概念を構築し、シナリオの探索・重要度評価を行う技術及びその対策技術を整備した。

4.2.1 地層処分システムにおける過酷事象の定義

地層処分の分野において、これまで過酷事象が検討された事例は無いため、まず地層処分システムにおける過酷事象の定義を検討した。検討に際しては、実績が豊富な原子炉分野における過酷事故の定義を参照するとともに、地層処分に係る技術的・社会的な有識者によるワークショップ（日本原子力研究開発機構，2016）により議論を行い、地層処分システムにおける過酷事象の定義を決定した。

原子炉分野における過酷事故の定義は「設計基準事象を大幅に超える事象であって、安全設計の評価上想定された手段では適切な炉心の冷却又は反応度の制御ができない状態であり、炉心の重大な損

傷に至り、公衆への甚大な影響を及ぼしうる事象」とされている。この表現を一般化した上で、地層処分システムの特徴も踏まえた場合、「(その時点の)地層処分システムのセーフティケースで想定される範囲を大きく超える事象であり、期待する安全機能が早期に著しく低下することにより、公衆への甚大な影響を及ぼしうる事象」と記述することができる。これに対し、地層処分に係る技術的・社会的な有識者によるワークショップでは、「当該事象が過酷事象か否かを判断するために最初に考慮すべきは、人への影響であり、発生確率やシナリオの確からしさは考慮すべきではない」、「過酷事象の検討範囲は、これまでに検討されたことがあるか否かに捉われないことが重要である」等の指摘がなされた。これらを踏まえ、地層処分システムにおける過酷事象の定義は、4つの補記を含めて以下のとおりとした。

『人への甚大な影響を及ぼしうる程度に、安全機能を著しく低下・喪失させる事象』

補記1：現時点のセーフティケースでの想定に捉われずに検討を行う。

補記2：甚大な影響とは、例えば、放射線被ばく線量の目安として、100mSvが考えられる。「甚大な影響」の基準は、別途議論が必要。

補記3：高レベル放射性廃棄物の管理のライフサイクルの中で、閉鎖前までは、原子力施設を対象とした定義と同様と考えられる。

補記4：サイト選定時のミスなど、事象進展シナリオの起点は、閉鎖前を含む。

4.2.2 過酷事象の検討フローの開発・試行

上述のとおり、地層処分システムにおける過酷事象検討では人への甚大な影響を及ぼす（例えば100mSv）被ばくをもたらし事象を対象として検討することが重要であり、想定外事象（これまで想定しなかった事象や事象の程度）を検討に組み入れる必要があるため、従来の安全評価手法とは異なるアプローチが必要であると考えられる。

そこで、本検討では、以下に示す2つの方針を取った。

- ・方針1：人への甚大な影響として100mSvの被ばくを目安として、それが引き起こされる条件を探索した。なお、この値はICRPの公衆に対する緊急被ばく状況の参考レベルの上限値である（ICRP, 2007）。
- ・方針2：想定外事象をできるだけ排除するため、科学的に否定される事象を除いてあらゆる事象を検討対象とした。（まずは発生確率やシナリオの確からしさは考慮しない）。

方針1は、効率的に過酷事象を探索するため、既往の安全評価の方法論（想定されるシナリオを構築し、被ばく線量評価を行い、被ばく線量が十分に小さいことを確認する）とは逆方向のアプローチを求めるものである。また、方針2は、「地層処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入れられるため」とする本検討の目的を念頭に、多様なステークホルダーが不安や懸念に思う事象も含めて、幅広く事象を検討対象とするアプローチを求めるものである。

これらの方針を踏まえた、地層処分システムにおける過酷事象の検討フローを図4.2.2-1に示す。人への甚大な影響を起点としたアプローチは方針1に対応するものであり、100mSvの被ばく状況を出発点として、その様な状況が実現するための条件を明確化しようとするアプローチである。一方、不安や懸念を起点としたアプローチは方針2に対応するものであり、多様なステークホルダーの不安や懸念を出発点として、過酷事象の候補を、想定外事象を可能な限り排除できる様な形で整理しようとする

るアプローチである。これらの両アプローチの結果から、すなわち、100mSv を超える可能性のある条件群と、あらゆる過酷事象の候補の両者から、過酷事象シナリオを描出し、必要に応じて重要度評価（複数の過酷事象シナリオが描出された場合において、対策技術の検討を行う際の優先順位付けを行う。原子力発電所における過酷事故検討の方法論を参照したものである。）を行った上で、対策技術の検討を行った。最終的には、当該対策技術をセーフティケースに反映するか否かの意思決定を行った。このような仕組みを備えておくこと、また、仕組みに沿った検討を継続して行うことで、地層処分システムの安全性と信頼性をより一層向上させることができ、社会に受け入れられる素地をつくり出すことができると考えられる。

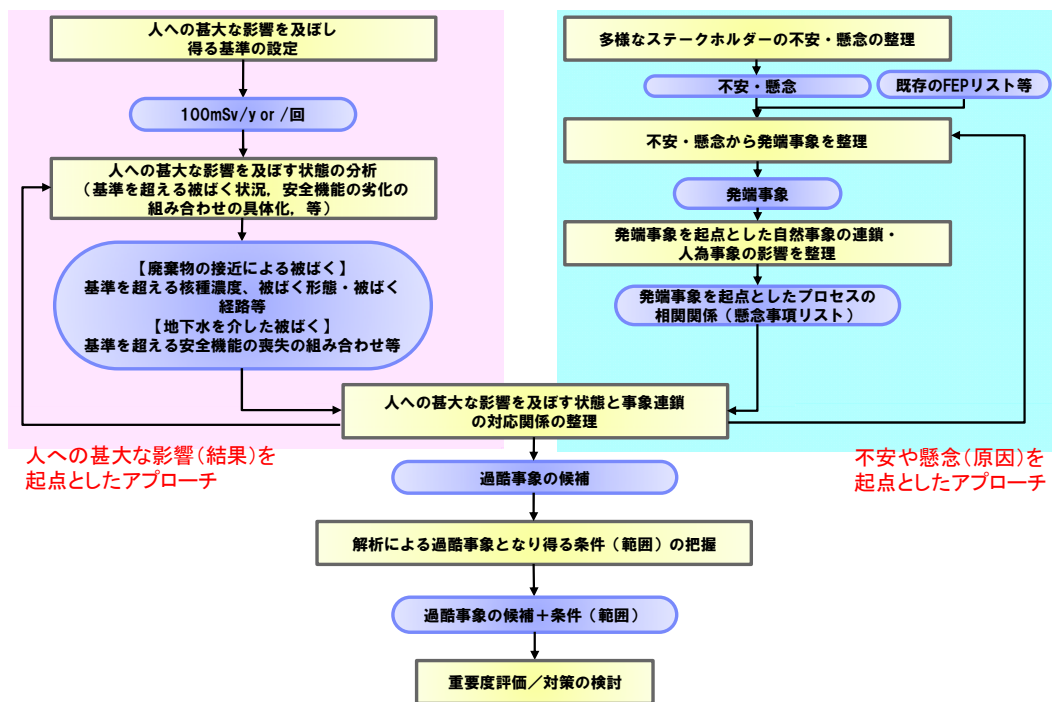


図 4. 2. 2-1 地層処分システムにおける過酷事象の検討フロー

人への甚大な影響を起点としたアプローチにおけるアプトプットは、100mSv の被ばくをもたらすための「条件」（群）である。条件は多様な階層及び多様な視点で描かれる。これらの条件は過酷事象シナリオを探索する過程において羅針盤の役割を果たすこととなる。

具体的な検討の手順を図 4. 2. 2-2 に示す。

手順1	基準の設定	■ 基準値の設定
手順2	条件の分析	■ 被ばく経路・形態、対象時刻、対象核種の設定
手順3		■ 数学モデルおよび解析コードの設定、データの設定
手順4		■ 基準値を下回るための条件を把握

図 4. 2. 2-2 人への甚大な影響を起点としたアプローチの手順

手順1では、人へ甚大な影響を及ぼし得るかどうかの基準値を設定した。なお、基準値は、地層処分

システムにおける過酷事象の定義を勘案し、100mSvの被ばくとした。

手順2では、被ばく状況の設定を行う。廃棄体と人が接近する場合と、地下水を介する場合との2つに大別できることから、100mSvの被ばくをもたらすための条件の分析も、これら2つの場合を分けて検討した。廃棄体と人が接近する場合を念頭においた場合、100mSvの被ばくをもたらすための条件は、被ばくに寄与する核種濃度や核種量、年代によって表現することが可能である。一方、地下水を介する場合を念頭においた場合、100mSvの被ばくをもたらすための条件は、地層処分システムの安全機能の劣化の組み合わせ、年代によって表現することが可能である。

手順3では、手順1で設定した被ばく状況の種類毎に、評価モデル・データを設定した。評価モデルは、手順2で設定した被ばく状況を勘案して、適切なモデルを設定した。一方、データに関しては、取り得る範囲と組合せを考慮した解析（パラメータスタディ）を必要に応じて実施することが有効である。

手順4では、手順3で設定したモデル・データによって解析を行い、100mSvを超える（もしくは下回る）条件を明確化した。条件は過酷事象シナリオの探索に用いることを勘案すると、条件の提示は複数の図（異なる軸）で表現されることが望ましい。

図 4. 2. 2-3 に、吸入被ばく（廃棄体と人が接近する場合）によって 100mSv を超える条件を明確化した試行結果を例示した。図中の曲線より上の領域が、吸入摂取によって 100 mSv 以上の被ばくが生ずる放射能濃度である。

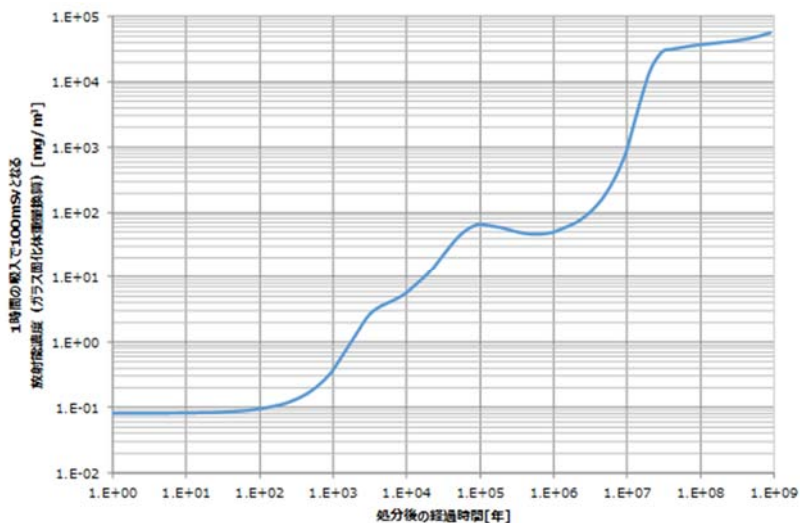


図 4. 2. 2-3 1 時間の吸入により 100 mSv となる放射能濃度（ガラス固化体重量換算）

一方、不安や懸念を起点としたアプローチにおけるアプトプットは、100mSv の被ばくをもたらすことが否定できない「事象・プロセスの連鎖」を整理したものである。ここで取り扱う事象・プロセスは、それ自身は過酷事象になり得ない場合でも、それらを組み合わせることで過酷事象となり得ることに留意が必要である。

具体的な検討の手順を図 4. 2. 2-4 に示す。

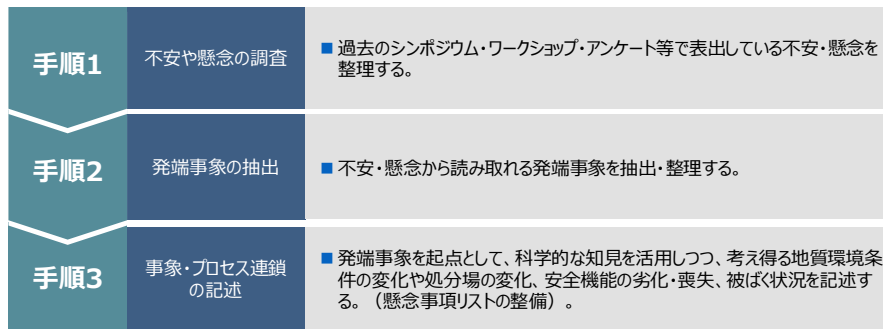


図 4.2.2-4 不安や懸念を起点としたアプローチの手順

手順1では、過去に地層処分の実施主体が実施したシンポジウム、ワークショップで得られた意見、さらには科学的特性マップに関する全国規模での説明会で寄せられた意見等を調査し、整理した。

手順2では、手順1で整理された不安や懸念から読み取ることができる発端事象を抽出した。具体的には、シンポジウム等で得られた不安や懸念に関する文章から、自然事象や人為事象に関するキーワードを抽出した。なお、それらのキーワードがどの様に抽出されたのかを追跡可能とするため、手順1で整理した情報からの抽出過程を記録した。自然過程と人為過程では、懸念事項の特性が異なるため、これらを区分して作成した。

手順3では、手順2で整理した発端事象を起点として、考え得る地質環境条件の変化や処分場の変化を記述した。ここでは、科学的な知見に基づき物理化学的に否定できるものは記載しないこととした。それでも、全ての考え得る変化の連鎖を記述しようとするとその量は膨大となってしまうこと、及び過酷事象に達しないことが明らかな連鎖が数多く含まれることが想定された。そのため、明らかに人への甚大な影響に繋がらないと判断できる連鎖についても記載しないこととした。次に、地質環境条件の変化から安全機能の劣化・喪失、処分システムへの影響、想定される被ばく状況、について記述した（懸念事項リスト）。

懸念事項リスト作成の試行事例として、表4.2.2-1に一部を抜粋して掲載した。

表4.2.2-1 懸念事項リスト（自然事象）の一部抜粋

発端事象	地質環境の変化	処分システムへの影響	状態の変化	変化する地質環境条件	対応する安全機能の劣化・喪失	
I-A マグマ上昇経路の変化・新生	処分施設を直撃するマグマの貫入	火山の噴火(溶岩の流出)	破壊・溶融された廃棄物が溶岩と一緒に噴出する	・地表放出	T,H,M,C,G	物理的距離が喪失する 安全機能E
		火山の噴火(火山灰の噴出)	廃棄物の破片や溶融した廃棄物が火山灰と一緒に噴出する	・地表放出	T,H,M,C,G	物理的距離が喪失する 安全機能E
		火山の噴火(火砕流の発生)	廃棄物の破片や溶融した廃棄体を含む火砕流が発生する	・地表放出	T,H,M,C,G	物理的距離が喪失する 安全機能E
		火山噴火の未遂	地表には達しないが、廃棄物が破壊されバリア機能が損なわれる	・溶解の促進	T,H,M,C,G	ガラス固化体からの放射性核種の溶出が促進される 安全機能A 緩衝材が破壊され、核種の溶解度の増加・移行速度の増加・吸着性能の低下が生じる 安全機能B
I-B	マグマが処分場近傍に達して、地下水が高温、低pHとなる	分配係数、溶解度が変化し、バリア機能が劣化する	・溶解の促進 ・核種濃度の増加	T,C	ガラス固化体からの放射性核種の溶出が促進される 安全機能A 緩衝材中に高温熱水が浸潤し、核種の溶解度の増加・移行速度の増加・吸着性能の低下が生じる 安全機能B	

上述した、人への甚大な影響を起点としたアプローチにおけるアプトプット及び不安や懸念を起点としたアプローチにおけるアプトプットを用いて、過酷事象シナリオを描出する手順を図4.2.2-5に示す。

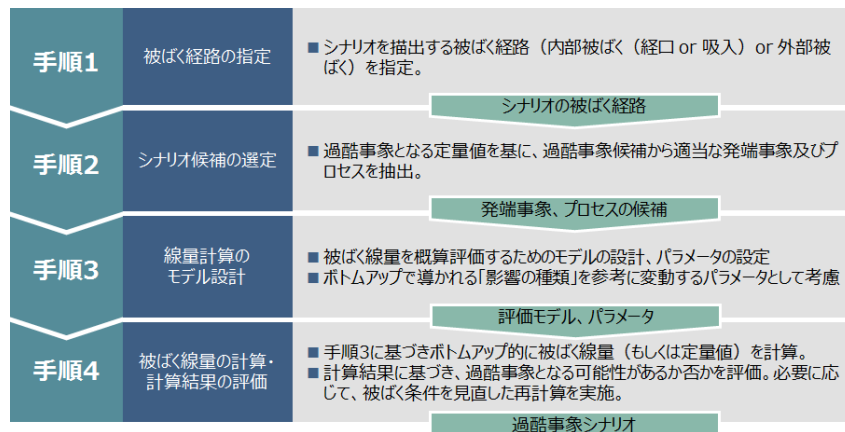


図4.2.2-5 過酷事象シナリオの描出手順

手順1では、シナリオを描出する被ばく経路を指定した。具体的には、経口摂取による内部被ばく、吸入摂取による内部被ばく、外部被ばくの3つの被ばく経路を取り扱うこととした。指定した被ばく経路に対して、人への甚大な影響を起点としたアプローチの結果を参照し、過酷事象となる放射線量や放射能濃度等（過酷事象となる定量値）や安全機能の劣化の組み合わせを、設定した被ばく状況とともに明確化した。また、これらの定量的なデータから、事象・プロセス連鎖に求められる要件を定性的な形式で整理した。なお、ここでの整理は厳密なものではなく、定量値と事象の対応関係を検討し易くすることが目的である。関連領域の科学的知見を踏まえ、常に見直しが求められるものである。

手順2では、上記で明確化した被ばく状況及び過酷事象となる定量値を元に、事象・プロセス連鎖のリストからシナリオ候補となり得るものを抽出した。

手順3、手順4では、手順2で抽出したシナリオ候補について線量評価を実施した。まず手順3において、発端事象から被ばくにいたる一連のプロセスについてのモデルを設計した。本検討においては、各プロセスを記述する精緻なモデルの設計は目的としない。複雑かつ大規模な自然事象をプロセスに含むため、本検討フローの中で精緻なモデルを設計することは現実的ではない。各研究領域における研究結果を参照し、必要に応じて専門の研究者の助言の下でモデルを検討する必要がある。また、モデルの設計とともに、前提となるパラメータセットを決定した。パラメータの値についても、専門領域の科学的知見を参照し、妥当な値を選択した。

手順4では、手順3で設計したモデルに基づき、ボトムアップ的に被ばく線量を評価した。評価結果については、100 mSvを超えるか否かだけでなく、重要なパラメータに対する感度を評価することで、過酷事象となる可能性や過酷事象となる範囲を検討した。

これらの手順に従って描出した過酷事象シナリオの一例を表4.2.2-2に示す。

表4.2.2-2 過酷事象シナリオの例（内部被ばく（吸入摂取））

	事象プロセス連鎖	特徴変数	過酷事象の範囲
発端事象	マグマ上昇経路の変化・新生	発生	1,000 年
地質環境の変化	処分施設を直撃するマグマ貫入によって、火山が噴火する	火道域直径	2.8E+02 ~ 4.5E+02 m
処分システムへの影響	廃棄体の破片や溶融した廃棄体が火山灰と一緒に噴出する	マグマ供給量	1.0E+05 m ³ /日
		損壊廃棄体数	2.4E+02 ~ 6.4E+02 本
状態の変化	地表放出	噴出物中の放射能濃度	9.3E-10 ~ 2.4E-09 本/g
被ばく経路	核種が拡散した大気を吸入する	大気中の放射能濃度	9.3E-10 ~ 2.4E-09 本/m ³
被ばく	内部被ばく	被ばく線量	100 ~ 260 mSv

4.2.3 過酷事象シナリオの重要度評価及び対策技術の検討

ここでは、上記で具体化した過酷事象シナリオのそれぞれについて重要度を評価するとともに、地層処分システムの安全性を向上させるための対策を検討した。過酷事象シナリオが複数描出される場合、それらの優先順位を定め、対策の検討を進めることが適切である。この対策の優先順位を定めることを目的とした重要度について評価した。

評価にあたっては、過酷事象の候補について相互比較を行うために必要な範囲・レベルで評価を行うことが重要である。評価にあたっては、表4.2.3-1に示す評価指標を用いた。どの指標の評価においても、評価上の前提条件・制約条件等の影響を大きく受けることから、これらを文書化しておくことが必要である。なお、過酷事象シナリオの描出に関して発端事象の条件や事象・プロセス連鎖の粒度が粗く、評価指標における評価が困難な場合には、前段の「人への甚大な影響を及ぼす状態と事象連鎖の対応関係の整理」に対して、詳細化すべきポイントをフィードバックした。

表4.2.3-1 重要度評価を行うための評価指標

	評価指標	評価方法（概要）	設定の考え方
1	蓋然性	発端事象の発生、各シナリオの分岐について、確率として定量評価が可能な場合は定量評価を行う。定量評価が困難な場合は、可能な限り詳細な記述を行う。	一般的にリスクを評価する際には、蓋然性と影響の大きさを評価指標としており、この重要度評価でも重要な指標と判断し設定する。
2	影響範囲	100mSvの被ばくとなる人数を評価する。基本的には、100mSvの被ばくを受けうる環境下に存在する人数を検討する。基本的には、「事象発生に直接的に関与する人たち」「処分場従事者」「影響を受ける一般公衆」等で区分して、それぞれの人数を定量的に評価する。	一般的なリスク評価では、蓋然性と影響の大きさを評価指標としているが、重要度評価の対象となる過酷事象シナリオは、「100mSvの被ばく」に至るシナリオである。被ばく線量の観点からは、影響の大きさが固定されているため、影響の大きさを示す指標として、100mSvの被ばくを受ける影響範囲（人数）を指標とする。
3	不確実さ	上記の蓋然性や影響範囲に関して、定量的な評価が困難な場合や、シナリオの条件がある範囲を有する場合等に、設定の不確実さに関する内容を可能な限り詳細に記載する。不確実さの要因が「データ」なのか「モデル」なのか「知識」なのかを検討し、感度解析（結果に大きな影響を及ぼすパラメータの不確実性を評価）やバウンディング解析（発生確率を1/0として、リスクの変動を評価）等を行う。	蓋然性や影響範囲について、不確実さの小さい信頼できるデータやモデルに基づく定量的評価が行えるケースは少ないものと考えられる。そのため、「蓋然性」や「影響範囲」の1点での数値だけではなく、どの程度の信頼性があるのか、不確実さがどの程度なのかを指標とする。
4	社会的影響 （オプション的な指標）	類似事例を収集し、過酷事象シナリオが顕在化した場合の社会的影響について記載する。例えば、「風評被害により当該地域の農産物市場が事実上崩壊する」等。評価の視点は、①経済的な影響と②避難の有無・範囲・期間の2つ。 ※影響の発現時期によっては、実質的な評価が困難な場合も多いことから、現在の社会的状況が継続した場合を条件とする等、評価条件の設定を行う。	シナリオが顕在化した場合の社会的な影響、あるいは、そのシナリオが潜在的ではあるものの、一定の現実性を持つとされた場合の社会的な影響を考慮するための指標として、オプション的に指標とする。

本検討での重要度評価では、上記の複数の指標を踏まえて総合的に対策検討の優先順位を検討する必要がある。また、種々の過酷事象シナリオの重要度評価において、様々な分野の知見が必要である。

さらに、評価に用いる各数値は学術的に定まったものとは限らず、一定の仮定・仮説に基づき設定される場合も多いことが想定されることから、仮定や仮説の妥当性や適用限界、さらには数値そのものの適切性については、現在の知見に基づく専門的な判断が必要となる。そのため、各指標の値の設定や複数の指標の総合的な判断については、複数の専門家の知見を取り入れることが望ましい。重要度評価においては、処分場立地地点の地質環境、過酷事象の蓋然性（起こりうる期間における最大値または期待値）、影響範囲、不確実性、社会的影響などの要因についてそれぞれ評価し、総合的に判断して優先順位を評価した。総合的な判断においては、専門家の知見も踏まえつつ評価を行った。

上記の重要度評価の結果を踏まえ、優先的に対策を検討すべき過酷事象シナリオに対して、対策検討を行った。過酷事象に対する対策は、事象進展のいずれの段階においても実施できる可能性がある。そのため、対策を検討する対象となる過酷事象シナリオを、事象進展（プロセスの連鎖）を念頭において複数のステップに分割した。例えば、事象Aが発生し、その結果として地質環境がBという状態になることが想定された過酷事象シナリオであれば、事象Aと状態Bは分割して検討することが望ましい。なぜなら、事象Aに対する対策と状態Bが発現することに対する対策は異なる可能性があるためである。このような分割を行うことで、どのような事象や状態に対して対策を打つべきかの検討をより鮮明に行うことが可能となる。

対策の検討は原子力施設における防災の考え方である「発生防止」、「異常検知」、「拡大防止」、「影響緩和」の4つの視点において検討することが考えられる。さらにこれらに加えて重要度評価の結果も鑑み、「科学的知見の拡充」や「安全評価手法の高度化」を行うことも対策の視点として考えられる。これは、より詳細な科学的知見や、詳細な評価手法を用いることで、過酷事象となる蓋然性を低減させること（過度な保守性を低減させること）が期待されるためである。これらの視点で検討することにより、抜け漏れのない効率的な対策検討が可能となった。また、対策を施すタイミングについては、サイト選定時の対策、設計・施工時の対策、事故後の対策が考えられ、対策検討時にはこれらのタイミングについても勘案することが望ましい。

対策を選定した後は、当該対策の有効性を分析した。分析の視点としては、当該対策を講じることによる地層処分システム全体への負の影響の有無、当該対策の頑健性（蓋然性の高い事象によって簡単に無効化されないか）が挙げられた。加えて、当該対策の採用の可否に係る意思決定に供するための留意点（実現性、コスト、課題等）についても検討し、とりまとめた。

4.3 巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発

本節では、4.2節で検討された「地下水を介して被ばくに至る想定」について、具体的な事象を想定し、個別現象研究から安全評価に至る一連の評価手法の具体化と適用性の確認を試行した。ここでは具体的な事象として、地震・断層活動を例に、通常の評価では取り扱わない過酷な状況をあえて想定するとともに、過酷な状況に至る道筋や条件を把握し、それらの発生可能性や起こりにくさの議論に資する情報を整備し、ステークホルダーと共有できるようにすることを目的とした。これにより、最大規模の地震・断層を想定しても甚大な影響には至りにくい、あるいは甚大な影響が発生する可能性が極めて低いことを様々なステークホルダーと共有することにより、地震・断層活動に係る一般公衆の不安や懸念が低減されることが期待されるほか、過酷な状況に至る道筋や条件に係る知見を個別現象研究にフィードバックすることで、不確実性の低減につながることを期待される。具体的には、1) 巨大地震・断層活動に起因する過酷事象を評価するための評価手法を具体化するとともに、この手法を踏

また、2) 巨大地震・断層活動に起因する過酷事象に関係する個別事象等の調査・整理を実施した。さらにそれらを基に、3) 巨大地震・断層活動に起因する過酷事象の評価の試行を行った。以下に、それらの5カ年の成果をまとめた。

4.3.1 巨大地震・断層活動を対象とした評価手法の開発

ここでは、4.2節で検討された「地下水を介して被ばくに至る想定」について、地震・断層活動を例に、過酷事象を評価するための一連の評価手法を具体化した。本研究では、処分システムの安全機能やバリア性能の劣化・喪失に着目して感度解析を行なうことで、過酷事象につながる安全機能の状態・組み合わせを効果的に抽出できることを踏まえ、こうした安全機能の劣化・喪失を軸とした感度解析、地震・断層活動に係る個別現象研究の知見を抽出・整理、それらに基づく過酷な状況に至る道筋や条件の把握を通じて、それらの発生可能性や起こりにくさを論証する一連の手順を構築した（図4.3.1-1）。

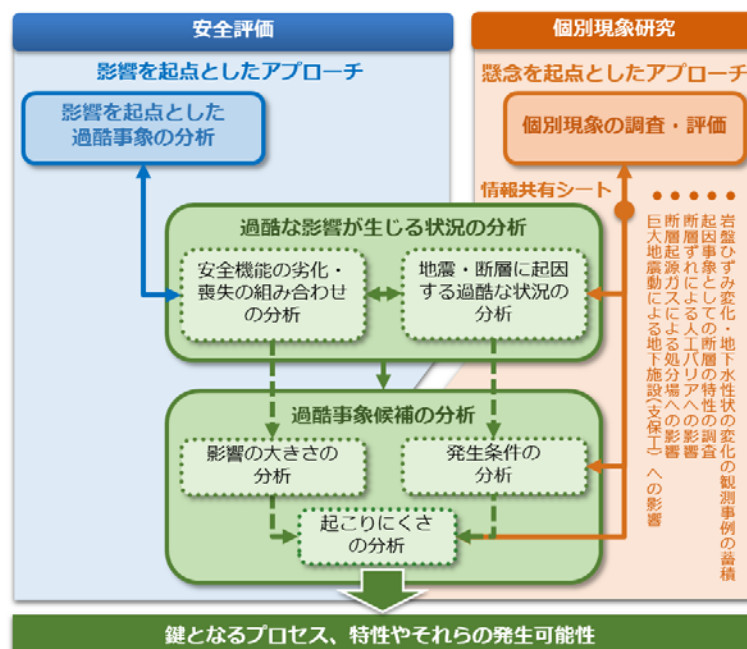


図4.3.1-1 安全機能に着目した影響評価の手順

また、処分システムの安全機能に影響を及ぼす可能性のある個別現象として、①起因事象としての断層の特性、②深部流体の影響、③地表水の流入の影響、④断層のずれによる人工バリアのせん断変形の影響、⑤母岩の透水性への影響、⑥地震動による人工バリア・処分施設への影響、⑦断層起源ガスの発生の影響の7種類の現象に着目するとともに、こうした個別現象研究の知見を、関係者が共有・記録するための「情報共有シート」を作成した（図4.3.1-2）。

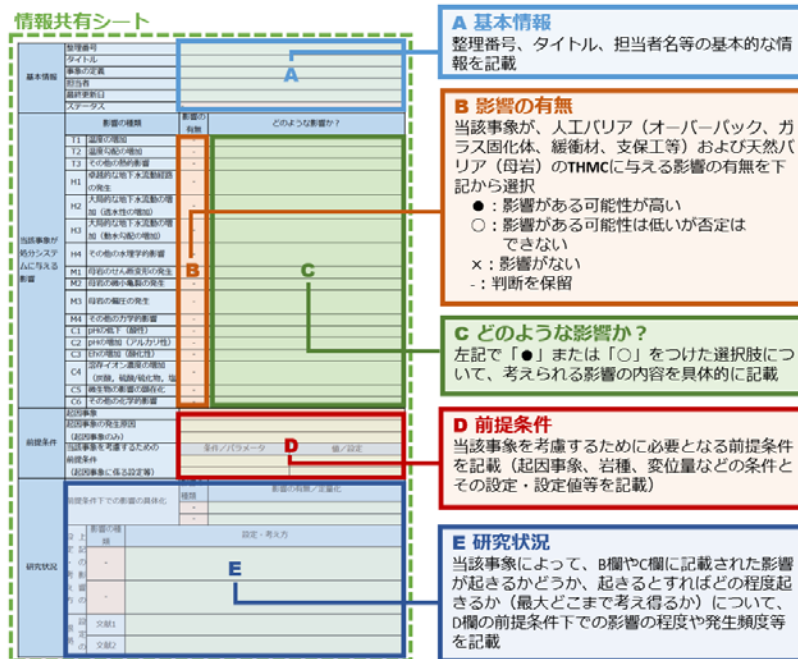


図4.3.1-2 情報共有シートフォーマット

4.3.2 巨大地震・断層活動に関連した個別現象の調査・評価

本節では、巨大地震・断層活動に関連した個別現象の調査・評価を実施した。まず、巨大地震・断層活動を発端とした過酷事象の検討において前提条件となる断層について、巨大地震を生じさせるような断層の幾何学的な形状、断層破碎帯の性状、透水性などの調査を行った。

(1) 過酷事象の起因となる断層に関する検討

1) 背景と目的

地震・断層活動は地層処分の根幹である地質環境の長期安定性に影響を及ぼす天然現象の一つとして、第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999a）において、地震・断層活動の様式、活断層の分布、断層活動の影響範囲、及び地震による地質環境への影響に関する知見が取りまとめられた。これらの知見を基に、地質環境の長期安定性に関するサイト選定の要件の一つ「断層活動の影響（岩盤の破断・破碎、変位）によって、地層処分システムの所期の性能が損なわれるような場所ではないこと」として適切なサイト選定の必要性が述べられており、「この要件を満たす場所は、主要な活断層（過去数十万年以内に繰り返して活動している断層）から十分に離すことにより確保できる」とし、地震・断層活動の有意な影響が及ぶ範囲を適切に回避する論拠を示している。第2次取りまとめ以降も、原子力発電環境整備機構をはじめ、多くの機関や委員会等で最新の知見をもとに整備された地震・断層活動を回避するための条件が示されており、平成29年7月に発表された「科学的特性マップ（経済産業省資源エネルギー庁, 2017）」では、「活断層に、破碎帯として断層長さ（活動セグメント長さ、または起震断層長さ）の1/100程度（断層の両側合計）の幅を持たせた範囲」を基準として示した。このような回避条件、基準を満足するサイト選定により、断層活動が起因となる過酷事象は回避できると判断される。一方で、現在の科学的知見からは、確度の高い地震の発生の確実な予測は困難であるとして防災対応のあり方について協議されている（中央防災会議, 2017）こともあり、一般の公衆が地震・断層活動に対して抱く不安に対し真摯に応えて行くことが重要と考えられる。

そこで本節では、回避条件を満足させてもなお残る不確実性への対応を目的として、段階的な調査

を経たにもかかわらず、処分場内または近傍で生じた断層が地層処分システムへ与える影響評価を行うために必要な情報を近年発表された地震・断層活動に関する文献を中心に収集した。断層の空間的な広がり、断層の影響範囲（断層破砕帯、プロセスゾーンなど）は、地震の規模（マグニチュード）に応じてある程度定められる（例えば、松田，1975；金折，2001など）ことから、シナリオ構築、安全影響評価に必要なパラメータを地震の規模を基に設定する必要がある、処分場を直撃する断層として現実的には想定しにくい、国内の内陸型地殻内地震で最大規模であった濃尾地震（M8.0）を上限に、回避条件を満足しても生じる可能性のある地震の規模の検討を行った。また、現実的に処分場を直撃する可能性のある断層がこういった種類や性状のものであるか、他の活断層や地表地形要素と断層が交差することで、想定を超えた水質や温度条件の地下水（深部流体や地表水）が処分場に流入する可能性等についても検討を行った。

2) 断層に関する調査結果

①断層の形状に関する調査結果

断層が地層処分システムに与える影響を評価する上で必要な情報として、断層長、断層破砕帯の幅、変位量、傾斜角などが基本的な情報としてあげられる。これらの情報は、既存の調査データから得られている地震の規模を示すマグニチュードや断層長と関係付けられており（たとえば、松田，1975；金折，2001など）、M8.0規模であれば断層長は80km、断層破砕帯幅は片側500m以上に及ぶことになる。後述するようなワーストケースでは、軟岩のサイトでは断層破砕帯が処分場から地表にまで達する可能性があり、硬岩のサイトであれば、処分場の深度から500m以内が断層破砕帯、そこから地表までがプロセスゾーンとなり、天然バリアの機能はほぼ喪失することになると判断された。

②断層の透水性に関する調査結果

断層の透水性は、硬岩の場合、健岩部（ 10^{-8} m/s程度）より1オーダー高い透水係数（ 10^{-7} m/s程度）となり、軟岩では健岩部（ 10^{-9} m/s程度）より2オーダー高い透水係数（ 10^{-7} m/s程度）を示すことが調査結果よりわかった。また、活動直後に高透水となった断層が、時間の経過とともに透水性が低下する現象（断層の透水性の回復）が、1995年兵庫県南部地震で出現した野島地表地震断層の調査結果で報告されている（例えば、北川ほか，2001；北川ほか，2004；Kitagawa et al., 2002）。このことから、断層活動に伴って生じた断層ダメージゾーンの高透水性は長期間にわたって継続しないことがわかった。

③他の地質要素や地形との関係で生じる事象に関する調査結果

地層処分場を直撃した断層が、近傍に存在する活断層と交差した場合に生じる事象として、断層破砕帯の交差部の高透水性及び高透水性部の連結等により、地表水の流入部もしくは地下水の流出部になる可能性、高透水性部を通じて想定外の水質の地下水が流入する可能性が考えられる。交差した断層が大規模な構造であった場合は、深部流体がその断層を水みちとしている可能性などが示唆されており（村上，2016）、地層処分システムの安全機能に大きな影響を与える事象に発展すると考えられた。

地層処分場を直撃した断層が地表に達し、河川と交差する場合は酸化性の地表水が処分深度まで流入し、酸化性地下水に人工バリアが曝される可能性があること、また、地層処分場を通過した地下水の河川への流出など、地層処分システムの安全機能に大きな影響を与える事象に発展することが考えられた。

3) 過酷事象評価における断層のワーストケース

断層が起因となる過酷事象評価において考え得る最悪の想定は、M8.0規模の地震を発生させるような断層が水平に地層処分場を直撃した場合であり、人工バリア、天然バリアともに安全機能が喪失す

る可能性が考えられる。ただし、内陸地震に関する文献調査を実施した結果、M6.5以上の内陸地震の多くが活断層と関連またはその近傍で生じていること、特にM8.0規模の地震の多くは、神戸－新潟歪集中帯、中央構造線などの大規模な活断層が密に分布する地域で発生していることがわかっており、従来の断層の回避条件を満足していれば、M6.5以上の規模の地震を発生させるような断層が地層処分場を直撃する可能性は低いことがわかった。そのうえで地層処分場を直撃する断層を現実的に想定するとすれば、連続性の低い既存の断層を連結するような断層であり、2000年鳥取県西部地震（M7.3）の事例が参考になると考えられた。

(2) 深部流体の流入の影響

経済産業省の総合エネルギー調査会に設置された地層処分技術ワーキンググループが取りまとめた「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価」（総合エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループ，2014）によれば、地層処分システムにおける閉じ込め機能の喪失につながる事象の一つとして、「断層のずれに伴う透水性の増加」による水理場や化学場の変動が指摘されている。また、化学場や熱環境の変動要因として「火山性熱水や深部流体の移動・流入」や「地熱活動（非火山性を含む）」が挙げられており、このような事象の発生や、他の事象も同時に生じる複合的な現象の発生を加味した安全評価の必要性が示されている。

深部流体は、沈み込むスラブやマントル起源の流体が断裂系等を通じて地表付近に上昇する（産業技術総合研究所，2012）と考えられている。地震活動（断層運動）に伴い、地下深部から上昇した流体の混入によって地下水の化学組成が変化した顕著な事例としては、1965年から始まった松代群発地震の活動域での水質変化があげられる（例えば、大竹，1976；奥澤・塚原，2001）。これまでの研究によると、地震活動に伴って湧出した地下水は、約1千万t/4ヵ月に達した（中村，1971）。また、その湧水は、地表付近の通常の循環水とは異なり、高濃度のCl⁻を主要溶存成分とする塩水であり（Kitano et al.，1967；Yoshioka et al.，1970）、その濃度は地震発生前の2～3倍に増加したと報告されている（奥澤・塚原，2001）。流入した地下水の起源については諸説あるが、断層から採取した土壤ガス中のヘリウム同位体比（³He/⁴He比）から、マントル起源の流体であるとも指摘されている（Wakita et al.，1978）。ただし、このような地震活動に伴う深部流体の流入を示唆する事例は極めて少ない。また、深部流体そのものの性状についても明確になっていないのが現状である。

本サブプロジェクトでは、内陸地震の発生前後における地下水性状変化に関するデータを蓄積するため、2011年以降に発生した長野県中部地震（M5.4）、長野県北部地震（M6.7）、福島県浜通り地震（M7.0）のほか、関東・中部地方の各地で東北地方太平洋沖地震後に活発化した地震活動域を事例として、地下水性状の変化に関する情報を収集した。これらの事例においては、地震発生後に水温がわずかに低下している温泉が多く、主要溶存成分のイオン濃度はほとんど変化していない温泉が多い。さらに、地震後に採取された温泉水の酸素・水素同位体比は、主として天水または海水に起源をもつことを示唆することから、ここで収集された地震前後の地下水性状変化は、主に溶存成分に乏しい天水やごく浅部の地下水が混入したことによると推定した。

一方で、深部流体そのものの性状については、それを知る手掛かりの一つとして、非火山地帯での熱水活動があげられる。その典型例として知られる有馬型熱水（例えば、松葉谷ほか，1974）については、沸騰温度の自然湧出が認められている（産業技術総合研究所，2012）。また、紀伊半島の温泉井及び掘削井における地化学調査の結果（新エネルギー・産業技術総合開発機構，1996）によると、深部からの熱水（約210℃）の上昇により、1,500m深度で100～180℃、地表では最大92.0℃の温泉が自噴している

と報告されている(西村, 2000)。さらに、化学的性状に関して、有馬型熱水については、1000m 深度におけるCO₂による飽和条件下ではpH=3 の酸性を示すと推定されているほか(産業技術総合研究所, 2012)、その地下には、塩化物イオン濃度が海水の約2倍程度(約50g/l)となる熱水が存在するといったことも指摘されている(網田ほか, 2005)。

このように深部流体が関与すると考えられる地下水の化学的性状を多数の事例に基づいて把握するため、本事業では「ヘリウム同位体比データベース」(草野ほか, 2012)に掲載される地下水化学組成等のデータに基づいて、非火山性の深部流体と考えられるデータを抽出し、深部流体及びそれ以外の地下水についての水温、pH、炭酸化学種(HCO₃⁻)濃度の累積度数分布を示した。その結果によると、pH及びHCO₃⁻濃度については、深部流体とそれ以外の地下水の傾向に明瞭な差は認められない。その一方で、水温については両者に差が認められ、深部流体はそれ以外の地下水に比べて高温である傾向を示すことが明らかになった。また、ここで抽出された地下水のHCO₃⁻濃度は26~8097 mg/lの範囲であり、その平均値(1576mg/l)は、深部流体以外の地下水の平均値(803mg/l)や付加コンプレックスにおける地下水の平均値(799mg/l, 尾山ほか, 2011)に対して高く、深部流体の特徴的な化学的性状を示している可能性を示唆する結果が得られた。

(3) 地表水の流入の影響

「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価」(総合エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループ, 2014)では、閉じ込め機能の観点で好ましい地質環境特性のうち、化学場に対して著しい影響を与える影響要因の一つとして「酸化性地表水の流入」が示されており、処分深度に到達している断層が活動した際に断層の透水性が増加することにより、酸化性の地表水が地下に向けて流入する可能性が指摘されている。

地震活動(断層運動)に伴って、酸化性の地表水が地下に向けて引き込まれたと推定されている事例としては、1995年に兵庫県南部地震(M 7.3)を引き起こした野島断層を対象とした一連の研究があげられる。このうち、野島断層を貫くボーリングコア試料の観察等では、酸化割れ目や炭酸塩・粘土鉱物からなる軟質褐色粘土脈が、深度1,800mの孔底に至るまで認められており、断層破碎帯沿いに地表付近の地下水が流入したことによると推定されている(宇田ほか, 1998; Uda et al., 2001)。一方、このボーリング孔を利用した繰り返し注水実験によって、地震発生後、時間の経過とともに透水性が低下するといった観測結果も報告されている(北川ほか, 2001, 2004; Kitagawa et al., 2002)。また、地震観測データのS波スプリッティング解析に基づいて推定された地震波速度の異方性によると、地震発生から9~12か月後においては断層運動に伴う破碎帯(割れ目帯)の存在を示唆する、断層に沿う方向の異方性の卓越が認められた(Tadokoro et al., 1999)。しかしながら、地震発生から33~45か月後を対象とした同様の解析結果においては、それらが広域応力場に対応する方向に回転していることから、地震発生後にみられた割れ目帯の特性が、本震発生の33か月後にはhealing(回復)していたとも指摘されている(Tadokoro and Ando, 2002)。また、このような断層深部への天水や海水の引き込みは、比較的規模の大きな地震活動(断層運動)に伴って繰り返し生じているとのモデルが示されている(Lin et al., 2003)。以上の観測事例によれば、断層運動に伴う岩盤の透水性増加によって生じる地下への地表水の流入は、処分深度に到達するものの、その程度は永続的ではないとみられるが、断層運動に伴って繰り返し生じ得る現象であると考えられる。

(4) 断層のずれによる人工バリアのせん断変形の影響

1) 目的

ここでは、断層が処分場を直撃した際を想定し、断層のずれによる人工バリアへの影響評価を試みた。具体的には、大きな断層のずれに対する緩衝材の機能の確認、岩盤とオーバーパックの衝突により、人工バリアや周辺岩盤が受ける力学的影響を設計用実寸法スケールの数値解析により評価し、断層のずれにより岩盤と廃棄体がせん断衝突変形した場合のオーバーパックの破損の有無及びガラス固化体と母岩の接触の有無の判断に資する情報を提供して、性能評価のシナリオ構築に反映することを目的とした。

評価に用いた数値解析については、1/40縮尺の人工バリア及び模擬岩盤より構成されるモデルを使用した断層模擬せん断衝突モデル実験により得られた緩衝材の土圧の変化や、せん断後の試験体内部の状況について、再現解析を実施した。

2) 断層模擬せん断衝突モデル実験

①断層模擬せん断衝突モデル実験の概要

本実験は、巨大地震・断層活動が地層処分システムに与える影響の一つとして断層が処分場を直撃した場合を想定した、断層のずれに伴う人工バリアのせん断挙動を模擬したせん断衝突モデル実験（以降、せん断衝突実験）である。模擬岩盤、緩衝材、模擬オーバーパックより構成される試験体（縮尺1:40）を、図4.3.2-1に示す断層模擬試験設備（BORE-SHEAR）を用いてせん断し、せん断時の緩衝材の土圧の変化や、せん断後の試験体内部の状況をX線CT測定により確認した。表4.3.2-1に平成26年より平成29年度に実施した実験ケースの概要を示す（平成26年度報告書；平成27年度報告書；平成28年度報告書；平成29年度報告書）。実験は、模擬岩盤と模擬オーバーパックのせん断後の状況から、非衝突と衝突に分けられ、衝突はさらに、接触、浅い衝突、深い衝突と分けて実験ケースを設定した。

非衝突ケースでは、模擬オーバーパックの挙動とそれに伴う緩衝材の変形に着目し、せん断後の試験体内部の状況をX線CT測定により確認するとともに、緩衝材の密度測定を行い、変形に伴った密度変化を確認した。衝突ケースでは、模擬オーバーパックと模擬岩盤の接触から深い衝突に至る実験を実施し、せん断後にX線CT測定を実施し、模擬オーバーパック、緩衝材、模擬岩盤の挙動を確認した。いずれのケースでも、図4.3.2-2に示すように緩衝材と模擬岩盤境界部に設置した土圧計により、せん断時の緩衝材の土圧を測定し、せん断に伴う土圧の変化を確認した。

本実験により、断層のずれによる人工バリアのせん断影響を1/40縮尺のモデルの挙動により確認できるが、せん断に伴う緩衝材の変形挙動は、粘弾塑性的な変形、それに伴う密度勾配の形成、間隙水圧の変化と間隙水圧勾配の形成と水分移動など、複雑な現象が重なった非線形問題であるため、単純に実寸法スケールに相似拡張できないことに注意が必要である。このことを踏まえ、本実験では、せん断後の試験体（周辺岩盤を含む人工バリア）の状況把握に重きを置いた。

表4.3.2-1 実験ケース概要

実施年度	H26	H27			H28		H29	
実験ケース	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	
模擬岩盤と模擬オーバーパックのせん断後の状況	非衝突	非衝突	非衝突	非衝突	衝突 [接触]	衝突 [浅い]	衝突 [深い]	
試験条件	せん断変位量 ^{※1} 1 (mm)	20 (0.4D)	20 (0.4D)	25 (0.5D)	25 (0.5D)	26 (0.52D)	30 (0.6D)	50 (1.0D)
	せん断速度 ^{※2} (mm/sec)	100	100	100	100	100	100	100
人工バリアの仕様	緩衝材 ^{※3}	タイプ1	タイプ2	タイプ2	タイプ1	タイプ1	タイプ1	タイプ1
	模擬岩盤の仕様	樹脂製 (POM) φ150mm×350mm						
	模擬オーバーパック	外径18mm×長さ39mmアルミニウム合金製充実型 (Case5のみアルミニウム合金製中空型)						

※1:せん断変位の括弧書きは、緩衝材径 (50mm) を1Dとした場合の比率。

※2:断層模擬試験設備の最大せん断速度は100mm/s。

※3:ベントナイト系材料:Na型クニゲル®V1、混合材料ケイ砂、タイプ1:ケイ砂混合率30[wt%]、乾燥密度1.6[Mg/m³]、タイプ2:ケイ砂混合率0[wt%]、乾燥密度1.37[Mg/m³]



図4.3.2-1 断層模擬試験設備 (BORE-SHEAR)

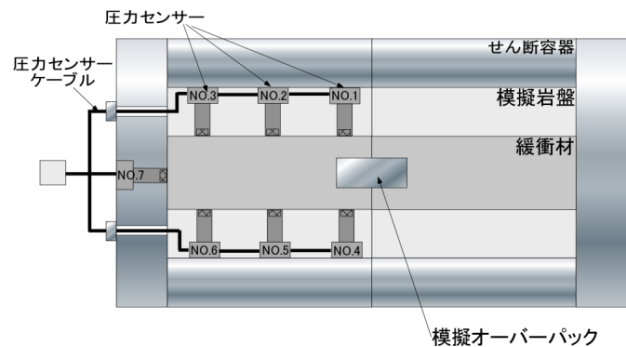


図4.3.2-2 試験体のレイアウト

②実験結果と考察

a. 非衝突ケース (平成26年度報告書;平成27年度報告書)

図4.3.2-3のせん断後のX線CT測定画像を示す。せん断に伴って模擬オーバーパックが緩衝材内で回転していること、回転に伴い端部に空隙が生じていることが確認され、非衝突の全ケースではほぼ同様の傾向を示した。この実験結果より、緩衝材の機能低下として考えられることは、緩衝材厚さの減少、空隙発生による透水経路の形成が考えられた。後者に関しては、目視できるような空隙の連結と目視が困難な緩衝材の密度変化に起因する透水性の変化が考えられた。X線CT画像及び模擬オーバーパックの取り出し時の状態から、模擬岩盤に連結する目視できるような空隙が確認されなかったこと、図4.3.2-3に示す断面位置で、X線CT測定によりせん断部付近の緩衝材の密度の低下は見られず (図4.3.2-4)、せん断によって緩衝材中に顕著な透水経路形成された可能性は低いと考えられた。以上より、模擬岩盤と模擬オーバーパックが接触・衝突に至らない非衝突ケースでは緩衝材の厚さの減少が主な機

能低下事項と判断された。

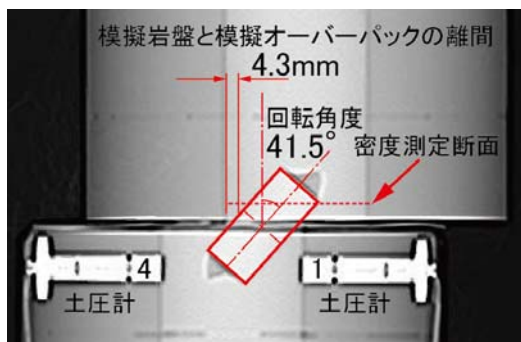


図4.3.2-3 X線CT画像(Case3)

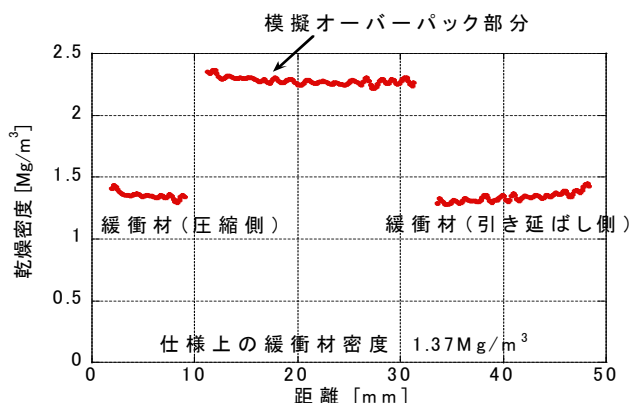


図4.3.2-4 X線CTによる密度測定結果(Case3)

b. 衝突の実験結果（平成28年度報告書;平成29年度報告書）

せん断後の状況は、模擬オーバーパックの回転、端部の空隙は、非衝突ケースと同様であった。模擬岩盤と模擬オーバーパックが接触、または食い込んでいるため緩衝材は分断され、所期の機能は失われると判断された。模擬オーバーパックに作用している応力やひずみに関しては直接計測することが困難であるために、せん断時に生じている荷重から簡易的に評価することを試みたところ、簡易計算による荷重と実験時の荷重が概ね一致することが確認された。そこで、この簡易計算法を用いて、模擬岩盤に硬岩、軟岩、模擬オーバーパックに炭素鋼の弾性係数を設定し、処分坑道径（緩衝材径）のせん断変位量を与えた場合の計算を行い、模擬オーバーパックに作用する応力を算出したところ、硬岩設定ケースでは模擬オーバーパックが破損する可能性があること、軟岩設定ケースでは模擬オーバーパック破損の可能性はないという結果が得られた。この結果は、後述の実寸法人工バリアの大変形せん断衝突解析と整合する結果となった。

3) 断層のずれによる実寸法人工バリアの大変形せん断衝突解析

①目的及び概要

巨大地震・断層活動を事例としたシナリオとして、断層のずれにより岩盤と廃棄体がせん断衝突変形した場合のオーバーパックの破損の有無及びガラス固化体と母岩の接触の有無を評価するために、断層模擬せん断衝突実験の再現解析及び実寸法の人工バリアの大変形効果を考慮した非線形せん断衝突解析を実施した。これらの解析結果によりオーバーパックの破損の有無等を判断し、性能評価のシナリオ構築のインプットとして反映することを目的とした。

②解析条件

実寸法人工バリアの解析対象は、硬岩系岩盤（処分深度1000m）及び軟岩系岩盤（処分深度500m）の横置き方式の実寸法人工バリアである。岩盤、覆工コンクリートセグメント、緩衝材、廃棄体（中空円筒容器のオーバーパック、ガラス固化体約500kgの重量のみを考慮）を3次元有限要素モデルにてモデル化した。本解析における硬岩系岩盤及び軟岩系岩盤の構成則モデルは、モール・クーロンによる破壊を考慮した塑性モデルを適用した。覆工コンクリートセグメントの構成則モデルは、コンクリート損傷塑性モデル（圧縮損傷及び引張りひび割れ損傷を考慮）を適用した。緩衝材の構成則モデルは、修正Cam-Clayモデルを適用した。オーバーパックの構成則モデルは、降伏応力及び引張強さをを用いた多直

線近似の非線形モデルを適用した。

断層のずれによるオーバーパックへの岩盤の直撃は動的事象であるため、本解析では断層のずれによる強制変位を作用させるのではなく、断層すべり速度を荷重として作用させた。なお、断層模擬せん断衝突実験の詳細な解析モデル及び解析条件や、実寸法人工バリアの詳細な解析モデル、物性値、初期条件、境界条件、荷重条件については、平成29年度報告書に記載した。

③解析手法及び解析コード

本解析では、断層ずれが処分場を直撃する場合を想定し、岩盤とオーバーパックの衝突及び大きな断層ずれの計算が可能な陽解法による大変形効果を考慮した非線形せん断衝突解析を実施した。断層すべり速度を作用させた動的解析手法は、使用済核燃料輸送容器キャスクの安全審査におけるキャスク落下衝撃事象の解析手法（原子力安全基盤機構, 2005）及び原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法（原子力安全推進協会 敷地内断層評価手法検討委員会, 2013）を地層処分における断層ずれによる岩盤と人工バリアのせん断衝突事象に応用したものである。解析には、汎用有限要素法解析ソフトウェアAbaqus 2016（Abaqus, 2016）を使用した。

④解析ケース

断層活動シナリオは、M6.5～M8.0の主断層ずれによる直撃及びM8.0の主断層の近くに生じる副断層ずれによる直撃の場合とした。断層の規模、断層すべり速度、断層変位については、平成29年度報告書に記載した。岩盤の種類は、硬岩系岩盤及び軟岩系岩盤であり、断層ずれの発生時期は閉鎖直後及び閉鎖後から1000年近くとし、オーバーパックの板厚は、閉鎖直後の190mm及び閉鎖後から1000年近くの設計上腐食代40mmを除いた150mmとした。断層ずれによる実寸法人工バリアの大変形せん断衝突解析の詳細な解析ケースについては平成29年度報告書に記載した。

⑤解析結果の考察及びまとめ

断層模擬せん断衝突実験の再現解析結果及び断層ずれによる実寸法人工バリアの大変形せん断衝突解析の詳細な解析結果の変形図、オーバーパックのミーゼス相当応力コンタ図及び相当塑性ひずみコンタ図、岩盤の最大主応力差コンタ図については、平成29年度報告書に記載した。

断層ずれによる実寸法人工バリアの大変形せん断衝突解析から得られた詳細な知見は平成29年度報告書に記載した。本解析により得られた知見として、閉鎖直後にM7.3～M8.0の主断層ずれにより断層すべり速度1.9m/s～7.1m/sで硬岩系岩盤がオーバーパックに直撃した場合、断層変位2.22m～6.3mでオーバーパックはせん断座屈破壊する可能性があり、ガラス固化体と母岩が接触する可能性がある。M7.0の主断層ずれにより断層すべり速度1.7m/sで硬岩系岩盤がオーバーパックに直撃した場合は、断層変位1.6mでオーバーパックはせん断座屈しないが多少変形し、オーバーパック胴部の一部外表面が破断ひずみに達するがオーバーパックの破損には至らないため、ガラス固化体と母岩は接触しないと考えられた。硬岩系岩盤でM6.5の主断層ずれが生じた場合、断層変位は0.8mであり緩衝材合計厚さの1.4mよりも小さいため、オーバーパックに硬岩系岩盤がせん断衝突することはなくオーバーパックは健全性であり、ガラス固化体と母岩は接触しないと考えられた。

一方、軟岩系岩盤の場合、M7.5～M8.0の主断層ずれにより断層すべり速度4.4m/s～7.1m/sで軟岩系岩盤がオーバーパックに直撃した場合は、断層変位3.2m～6.3mでオーバーパックはせん断座屈破壊する可能性があり、ガラス固化体と母岩が接触する可能性がある。M7.3の主断層ずれにより断層すべり速度1.9m/sで軟岩系岩盤がオーバーパックに直撃した場合は、断層変位2.22mでオーバーパック下側の覆工コンクリートセグメント及び軟岩が大きく変形するため、オーバーパックは多少変形する程

度でありせん断座屈は生じなく、オーバーパック蓋部コーナーの一部外表面で破断ひずみに達するがオーバーパックの破損には至らないため、ガラス固化体と母岩は接触しないと考えられた。M7.0の主断層ずれにより断層すべり速度1.7m/sで軟岩系岩盤がオーバーパックに直撃した場合には、断層変位1.6mでオーバーパックの外表面のわずか一部に相当塑性ひずみ0.1%が生じるが、オーバーパックは健全であるため、ガラス固化体と母岩は接触しないと考えられた。軟岩系岩盤でM6.5の主断層ずれが生じた場合、断層変位は0.8mであり緩衝材合計厚さの1.4mよりも小さいため、オーバーパックに覆工コンクリートセグメント及び軟岩系岩盤がせん断衝突することはなくオーバーパックは健全であり、ガラス固化体と母岩は接触しないと考えられた。

また、断層ずれの発生時期が閉鎖後から1000年近くの場合では、M7.0の硬岩系岩盤の主断層ずれにより断層変位1.6mでオーバーパックの変形はほとんどなく、オーバーパック胴部の一部外表面にわずかであるが破断ひずみになるが破損には至らない。M7.0の軟岩系岩盤の主断層ずれが生じても相当塑性ひずみが0でありオーバーパックは健全であり、いずれの場合もガラス固化体と母岩は接触しないと考えられた。

これらの断層ずれによる実寸法人工バリアの大変形せん断衝突解析から得られた知見を、次項4.3.3で実施する性能評価のシナリオ構築のインプットとして反映した。

(5) 断層起源ガスの発生の影響

本サブプロジェクトでは、従来対象としていない巨大地震・断層活動に伴う地下に賦存するガスの放出、高速すべり断層運動に伴って発生する断層起源ガス (Hirose et al., 2011) 等の大規模なガスの放出や移行に焦点をあて、これらが生じた場合の人工バリア性能に与える影響を評価することを目的とした。そのため、断層運動に伴って発生するガスが地下水流動場や処分システムに与える影響を把握するために必要となるパラメータを整備する観点から、幌延深地層研究計画で採取された岩石試料を対象に透気特性データの取得を行った。また、ガス放出等を考慮した解析検討のため、幌延の地下水に溶存しているガスの初期状態を把握する調査を行った。これらの成果をもとに断層起源ガスの地層処分システムへの影響を把握し、断層シナリオの性能評価に用いるパラメータ (緩衝材からの押し出し流量など) の整理を行った。

岩盤の透気特性については、これまでほとんどデータが得られていないことから、数値解析によるガス移行評価を行うための入力パラメータの整備として、岩石試料の物性データ及び透気特性データの取得を行った。対象とした試料は、幌延 URL において初期地圧観測孔から採取された岩石コアである。岩石コアは、寸法が直径約 200mm×長さ 200mm であり、試験に供するためにコアドリルを用いて直径約 50mm×長さ約 200mm に再コアリングを行った後、直径 50mm×長さ 50mm の試料を 6 つに成型した。取得したデータは、密度、間隙率、間隙径分布、透水係数、絶対浸透率、相対浸透率及びスレッシュド圧力である。岩石コアによる測定の結果、絶対浸透率は、 $3.24\sim 3.69\times 10^{-3}$ (10^{-15} m²) 毛管圧曲線から間接的に推定されたスレッシュド圧力は 1.23MPa 及び 1.65MPa、試験により直接的に得られたスレッシュド圧力は 0.94MPa であった。また、ガスの浸透率試験により、本試験に供した岩石コアの間隙水はガスによって置換されにくく、ガスは供試体内の間隙の経路を選択的に移行するものと推測された。

溶存ガスの状態調査については、幌延深地層研究センターの地下施設GL-350m調査坑道から、採取地点の圧力を維持するように地下水試料を採取し、採取時の圧力、温度、及び、塩濃度の状態における溶存ガス成分の飽和・不飽和状態調査を行った。調査の結果、試験坑道の掘削などのために間隙水圧が減

少しているとき、減圧に伴い液中から気相に向けて相分離が生じやがて平衡状態に至ることが考えられるが、ガス成分が坑道などの境界から排出されるまでの過渡的な状態では、過飽和状態を形成していることが示唆された。

断層起源ガスの地層処分システムへの影響評価としては、緩衝材及び岩盤のガス相圧力からガスフラクチャリングが生じる可能性や緩衝材からの押し出し流量から汚染水の押し出し流量の推測を行うため、圧力依存透過性モデルによるガス移行影響解析を実施した。本検討では、多相多成分流動系を取り扱える積分型有限要素法の汎用三次元地圏流体シミュレータ (GETFLOWS) (Tosaka et al., 2010) を用いた。断層については、ガラス固化体の中心を通り、45度の傾斜を持つように配置し、初期状態は、完全飽和状態を仮定、地表面に水位があると静水圧状態とした (図4.3.2-5)。境界条件については、モデル上面、下面を定圧境界にし、側面は鏡面对称性を仮定し不浸透境界とした。地温については、地表面温度を15°C、地温勾配を0.03°C/mとした。

解析ケースとしては、断層が人工バリアに到達し、その際にガスが侵入するケースを基本ケースとし、その比較ケースとして、①放出側に断層が存在する場合、②断層で発生したガスの発生量を変化させた場合の合計4ケースの解析を実施した (表4.3.2-2)。一方、断層起源ガスの発生量については、Hirose et al. (2011) が、回転式高速度摩擦試験を用いて行った実験結果をもとに、マグニチュードの規模を $M_w=7.9$ とした。その根拠はマグニチュードの規模については、Well and Coppersmith (1994) におけるモーメントマグニチュードと地震パラメータ (変位量、破砕面積など) の相関などから、 $M_w=7.9$ における水素ガス発生量は $5.9 \times 10^8 \text{ mol}$ となった。解析の結果、断層起源ガスの流入によるガス相圧力の上昇がみられ、全てのケースにおいて埋め戻し部、緩衝材及び岩盤において、ガスフラクチャリングを起こすことが示唆された。また、流出側に断層が存在する場合では、緩衝材に到達したガスは、周辺の断層を伝って移動するため、緩衝材からの押し出しガス流量はみられなかった。今回の影響評価解析では、Hirose et al. (2011) の実験結果から断層運動に伴う水素ガスの発生量を推定したが、断層起源ガス発生については、未だ不確実な面もあることから、今後の更なる研究の進展に期待すべき点が多いと考えられた。

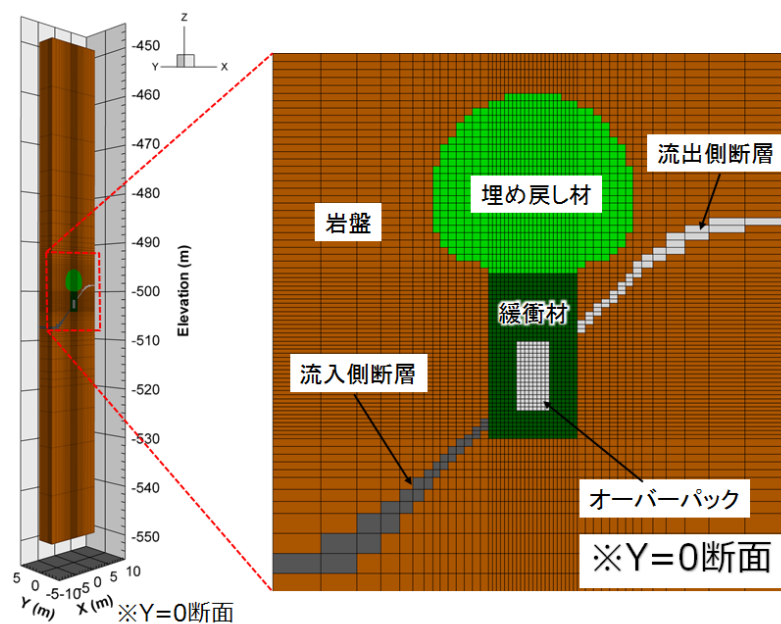


図4.3.2-5 ガス移行影響解析モデルの一例

表 4.3.2-2 ガス移行影響解析ケース

ケース名	ガス流量	溶存メタンガスの考慮	断層の状態	備考
ケース1	528.8 Nm ³	考慮しない	流出側なし	基本ケース
ケース2	528.8 Nm ³	〃	流出側あり	放出側の断層影響ケース
ケース3	52.88 Nm ³	〃	流出側なし	ガス流量の影響把握
ケース4	5.288 Nm ³	〃	流出側なし	ガス流量の影響把握

(6) 地震に伴う岩盤ひずみ及び地下水流動の変化

地震・断層活動に伴い観測井の水位、間隙水圧、湧水などに変化が生じた事例が数多く報告されており、地震・断層活動が地下水流動環境に影響を与えるとする考え方は妥当なものである。また、地下水流動環境と岩盤の状態が密接に関わっていることも同様である。ここでは、このような地下水流動環境の変化が地層処分システムに与える影響を評価することを目的として、わが国で最大規模となった東北地方太平洋沖地震の震央から約150km程度の距離にある岩手県の釜石鉱山坑道（以降、釜石）、及び国立天文台水沢VLBI観測所付属江刺地球潮汐観測施設（以降、江刺）の原位置観測データに着目し、地震時の岩盤状態の変化を岩盤ひずみ、弾性波観測の原位置観測データを分析した（平成25年度報告書；平成26年度報告書；平成27年度報告書）。これらのデータは岩盤中の含水状態の影響を受けるとされており、間隙水圧の原位置観測データと合わせて地震による地下水流動の変化について分析し、地層処分システムの安全機能の劣化・喪失に及ぶ可能性について考察を行った。

江刺における岩盤ひずみは、南北(NS) 方向、東西(EW) 方向、北東南西(NE) 方向の3方向の成分が計測されている。東北地方太平洋沖地震前後で岩盤ひずみの変動傾向に大きな違いが認められた。地震発生前後で伸縮方向が反転し、NE、EW方向は収縮から伸張に反転、NS伸張から収縮に反転していた。この観測結果は国土地理院の地殻変動データと整合する結果となっていた。

釜石の弾性波観測は、坑道の枝部を利用して4方向（NS、EW、NE、NW）の経路で連続計測が行われており、弾性波の初動到達時間の変化（Differential Travel Time：以下、DTT）から、岩盤の弾性的性質の変化を評価している（Sano et al., 1997；田中ほか, 1995；田中ほか, 1997）。DTTは東北地方太平洋沖地震で不連続となるまで各経路ともに減少傾向を示しており、2011年の東北地方太平洋沖地震前の応力場はNE方向に最も大きな圧縮を受けていたと考えられ、太平洋プレートの沈み込みに起因する東西の圧縮方向と調和的であった。東北地方太平洋沖地震では、すべての経路でDTTが不連続に大きく上昇（岩盤が伸張）し、地震後1年で大きく減少（岩盤が収縮）し、その後徐々に変化の割合が緩やかになり、NS方向は2005年レベルの値まで回復し季節変動を主とする挙動に移行していた。釜石の間隙水圧観測データは、地震時の応答よりも季節変動の変動幅の方が大きかった。一方、釜石鉱山よりも震源から離れている岐阜県の瑞浪の観測所は間隙水圧の変化が確認されている（Niwa et al., 2012）。また、Niwaら（2012）は地震による水圧変動の影響は長期的なものではなく、時間の経過とともに元の状態に戻るとしており、前述の岩盤ひずみ、弾性波観測データにみられる回復傾向がこれに相当するものと判断された。

上記の観測結果より、東北地方太平洋沖地震の震央から150km離れた観測点では、過酷事象に結びつくような岩盤の損傷や透水性の増大には至っていないと判断された。ただし、4.3.2(3) 地表水の流入の影響において述べているように、1995年の兵庫県南部地震(M7.3)の地表地震断層である野島断層周

辺では、地震後に地下水流動環境が大きく変化したという報告（例えば、佐藤・高橋，1997；徳永，1999；Tokunaga，1999）があり、地震断層（震源断層）付近では、急激に透水性が高くなることが予想され、過酷事象シナリオを構築する際には、処分場と断層の位置関係により、地層処分システムの安全機能への影響が異なることに注意が必要である。

(7) 巨大地震動による人工バリア・処分施設への影響

1) 目的

廃棄体（ガラス固化体・オーバーパック）と緩衝材で構成される人工バリアでは、密度や強度などの物理・力学的特性が廃棄体と緩衝材で大きく異なることから、巨大地震動の影響を受けた場合の振動影響を評価し、その機能が長期にわたって健全に保たれることを確認することが必要である。また仮に人工バリアの安全機能が破綻した場合においても、処分施設（処分坑道及びアクセス坑道等）や周辺岩盤に対して、これらを経由した生活圏へ核種の移行についても、同様な振動影響を評価しておく必要がある。

本検討では、第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999b）の考え方をベースに新たな知見を取り入れ、従前からの処分システム仕様に対して保守的な条件設定を行うことで施設閉鎖後の人工バリア並びに処分施設に対する過酷事象を再現することを試みた。当初1年目から3年目までは（平成25年度報告書；平成26年度報告書；平成27年度報告書），“人工バリア”では、緩衝材や耐震影響に関する国内外における事例調査に続き、各種力学試験を用いた人工バリアの振動解析に必要なパラメータを導くための試験データの拡充を行うとともに試験結果より設定したパラメータ並びに実際の入力地震動を用いた耐震影響解析を行った。“処分施設”では、資料等調査を実施するとともに「巨大地震・断層活動による地下施設への影響評価手法の開発」及び「地震動による地下施設（支保工）の破壊に伴う透水性の増加によりクリティカルパスを形成する可能性の評価」を行った。さらに3年目から5年目までは（平成28年度報告書；平成29年度報告書）、想定外事象を念頭とした「過酷事象シナリオ」に対する個別検討として、施設閉鎖後の巨大地震発生を想定し、これにより人工バリアがシステムとして健全で期待される安全機能（閉じ込め機能等）が喪失する可能性の有無、処分施設（立坑）の破壊及びその周辺岩盤のEDZ拡大による透水性の増大により、地下水を通じた核種移行による生活圏へ到達する可能性の有無を明らかにすることで過酷事象シナリオに取り組むべき、地震動の影響について評価を行った。

2) これまでの検討概要と主な成果

平成25年度からこれまでの5年間に実施してきた検討概要と主な成果について、人工バリア耐震影響評価の検討概要を表4.3.2-3に処分施設に対する耐震影響評価の検討概要を表4.3.2-4に示すとともに以下にそれらの結果をまとめて示す。

①人工バリアの検討結果

母岩のせん断変形に伴い緩衝材がせん断変形し、巨大地震に伴う人工バリアにおける安全機能喪失の可能性の評価を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ・繰り返し三軸圧縮試験（地盤工学会a，2009）及び繰り返しねじりせん断試験（地盤工学会b，2009）により緩衝材の変形特性のパラメータを拡充、それらのデータから、R-0モデルやH-Dモデルでフィッティングを実施、試験値との整合が確認された。2011年東北地方太平洋沖地震を想定した入力地震動を10秒間作用させた全応力非線形地震応答解析を行った。さらに繰り返し非圧密三軸試験（地盤工学会c，2009）によりダイレイタンシー特性を把握し、入力地震動を300秒×10回作用させた有効応

力非線形地震応答解析より、衝材の内部に過剰間隙水圧はほとんど発生せず、オーバーパックが岩盤に接触する可能性が低いことを確認した。

- ・2008年岩手・宮城内陸地震の地震動を処分深度500mに引き戻した入力地震波(①)を使用し、有限要素法モデルでの振動影響解析を実施した。緩衝材に非線形モデルを適用した場合には、オーバーパックと岩盤との離隔は最大で0.1mm以下で緩衝材の塑性化せず、加速度振幅10倍でも離隔の大きな増加はなかった。逆に線形モデルを適用した場合には、入力地震動が1万回以上発生しなければオーバーパックと岩盤が接触しない結果となり、緩衝材への巨大地震の影響は小さいものと考えられた。

②処分施設の検討結果

巨大地震・断層活動による地下施設への影響評価手法の開発及び巨大地震動に伴う地下施設及び周辺岩盤における核種移行経路の形成する可能性の評価において、以下の知見が得られた。

- ・地下施設(立坑)施工実績による建設・作業時の耐震影響評価を行い、サロベツ断層帯による最大地震動を解放基盤面に入力、覆工クラックを考慮した応答震度法による解析の結果、深部でのクラックによる応力増加や周方向応力による支保工への影響は小さい。また、確率論的余震活動モデルと最大余震を設定し、施工実績を反映させた地下施設の建設・作業時における応答震度法による解析の結果、立坑全体モデルで最大圧縮応力が接続部の一部で設計基準強度を超過するが、周方向圧縮応力は設計基準強度以下で空洞は安定となることが判明した。さらに基準地震動を見直し、埋戻し前の立坑に対する耐震性評価の結果、断層モデルを用いた解析では、コンクリートの設計基準強度を超える応力の発生箇所は少なく、施設直下にアスペリティが位置し、応力を1.5倍としたモデルでは、断面形状は維持されるが、設計基準強度を超える応力が発生する可能性が示唆された。
- ・埋戻し材にセメント系材料を想定し、施設閉鎖後の埋め戻されたアクセス坑道(立坑)を対象とし、地震波(①)を入力し一次元応答解析で得られた加速度を繰り返し作用させた結果、過去最大規模の内陸地震が繰り返し発生しても立坑周辺岩盤の弾性状態が保たれることから、立坑周辺岩盤のEDZは拡大せず、核種の生活圏への到達の可能性は低いものと考えられた。
- ・同様に埋戻し材に混合土(ベントナイト15%・砂85%)を想定した地震影響評価では、坑道(立坑)内外の隙間形成並びに立坑周辺岩盤の塑性化により、深度300m以上においてEDZが生じるものの、3MPa以上の高拘束下にあることから、透水性の急激な変化はないと考えられた。さらに過酷事象を考慮した巨大地震の繰り返しや岩盤強度の低下による条件下においても、岩盤の塑性領域の拡大や支保工の変形が生じるものの、地下水流動の急激な変化は生じないと評価され、人工バリア並びに天然バリアの機能が維持されることから、地層処分システムの安全性が確認できた。

表4.3.2-3 巨大地震による人工バリアに対する影響評価の検討概要

項目	内容	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	
概要	巨大地震動に伴う人工バリアにおける安全機能喪失の可能性の評価	巨大地震・断層活動に伴う人工バリアのせん断及び振動に対する影響の把握解析モデルや評価手法の妥当性確認のためのデータ取得		処分場閉鎖後の人工バリアを対象と地震動による緩衝材内での廃棄体の移動の可能性を評価		
室内試験	緩衝材の力学特性 (ベントナイト単体:クニゲルV1) 乾燥密度 ^{※1)} :0.8Mg/m ³ 飽和状態	強度特性	一軸圧縮試験:1供試体	—	—	
		変形特性	繰り返し三軸試験:3供試体	繰り返しねじりせん断試験:3供試体	—	
		ダイレイタンス特性	—	—	土の繰り返し非排水三軸圧縮試験:3供試体	
	緩衝材の非線形性に関する数値モデルへのフィッティング検討	R-Oモデル:4例 H-Dモデル:3例	R-Oモデル:1例	R-Oモデル (H26試験結果修正)	H27R-Oモデルのフィッティング後、 H-Dモデル設定 ^{※2)}	
要素シミュレーションによる試験結果へのフィッティング検討	—	—	おわんモデル (ダイレイタンス考慮)	—		
地震応答解析	人工バリアの仕様		—	処分坑道横置き方式(軟岩系岩盤) ^{※3)}		
	解析モデル	モデル化の方法	—	深度500mをモデルの中心とした地中の一部を3次元モデル化		
		加振方向	—	水平軸方向	水平横断方向	鉛直・水平横断方向(同時)
	解析条件	境界条件	—	側面:多点拘束 上面・底面:粘性境界	上面:水平ローラー 側面:多点拘束 底面:粘性境界	【自重解析】 側面:鉛直ローラー 底面:水平・鉛直拘束 【地震応答解析】 側面:多点拘束 上面・底面:粘性境界
		解析手法	—	直接積分法(逐次時刻歴解析)		応答震度法
	物性値	ガラス固化体	—	線形弾性 ^{※3)}		
		オーバパック	—	線形弾性 ^{※3)}		
		緩衝材	—	上記試験結果から設定(全応力) ^{※4)}	上記試験結果から設定(ダイレイタンス特性考慮) ^{※4)}	マルチスプリング要素(大変形を考慮) ^{※5)}
		岩盤	—	線形弾性 ^{※3)}		
	解析コード	—	SoilPlus 2015		FLIP TULIP	
	想定地震動	—	2011年東北太平洋沖地震(KiK-net田尻, EW波)		岩手・宮城内陸地震(KiK-net関西, UD波, EW波)	
入力地震動	—	地表面における最大加速度を1000galに標準化後、軟岩系岩盤モデルで引き戻した露頭波		地表面観測波を軟岩系岩盤モデルで深度500mに引き戻した露頭波		
		2E波 継続時間10秒	2E波 継続時間300秒 ×10回	2E波, 振幅整数倍OPと岩盤接触まで増大 2E波, 繰り返し加振OPと岩盤接触まで加振		
その他の解析手法による検討	—	—	粒状体個別要素法(DEM)による影響評価手法の開発		粒状体個別要素法(DEM)による影響評価手法の試行(2次元個別要素法解析ソフトウェアPFC2D) ^{※6)}	
資料等調査	国内外における耐震影響評価に関する最新動向	耐震安定性評価, 耐震に関する研究, ベントナイト振動影響の研究等について事例の収集・整理を実施				
	地震応答解析手法の最新動向	市販ソフトウェア等に関する現状及び技術的課題, 最新の動向や技術的知見について調査, 関連する資料の収集と整理				
備考	^{※1)} :設定乾燥密度は, 緩衝材間隙構造によるコロイドろ過可能性下限値(黒澤2005)に設定, ^{※2)} :繰り返し三軸試験データ(高治・谷口, 1999)を使用, ^{※3)} 第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999), ^{※4)} :試験結果に基づき変形特性を考慮, ^{※5)} :緩衝材仕様(ベントナイト:砂=70:30, 乾燥重量:1.6Mg/cm ³), ^{※6)} :PFC2D(2014):2次元/3次元粒状体挙動解析プログラムPFC2D/PFC3D, Itasca Consulting Group Inc., 2014.					

表4.3.2-4 巨大地震による処分施設に対する影響評価の検討概要

実施項目	内容	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	
概要	巨大地震・断層活動による地下施設への影響評価手法の開発	地下施設での地震観測に基づく最大地震動を用いた耐震安定解析と設計値の妥当性検証並びに維持管理を考慮した対策工の適用検討	地下施設の維持管理及び性能評価に資する岩盤情報を得るため、余震活動推定方法の検討及び耐震性能評価を実施	原子力規制委員会規制基準に基づいた審査資料等の収集により得られた手法から基準地震動を策定	—	—	
	巨大地震動に伴う地下施設及び周辺岩盤における核種移行経路の形成の有無の評価	—	—	地震動による地下施設(支保工)の破壊に伴う透水性の増加によりクリティカルパスを形成する可能性の評価	巨大地震による閉鎖後の地下施設(立坑)周辺のEDZが拡大による水みちの形成で核種を含んだ地下水が生活圏に影響を及ぼす可能性の評価	巨大地震が発生した際の連絡坑道(立坑)内の埋戻し材の塑性、残留変形による空洞形成並びにこれに伴う立坑周辺EDZ拡大の可能性の評価	
	評価対象に使用した地質モデル	横延深地層研究施設を対象に想定される最大地震動と施工実績を反映したモデルを用いた地震応答解析を実施、地下施設の力学的安定性を評価			第2次取りまとめ軟岩系岩盤モデルで検証		
基準地震動の策定	想定地震動	文部科学省地震調査研究推進本部策定(平成19年11月)サロベツ断層帯による最大地震動	サロベツ断層帯の最大余震による地震動(平均+標準偏差1σ)	震源を特定して策定した地震動(サロベツ断層帯)と震源を特定しない地震動(岩手・宮城内陸地震)	岩手・宮城内陸地震(KiK-net-関西, EW波)	平成28年度策定地震動を使用	
	地震動策定手法	—	—	基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイドに準拠	想定地震動を用いた応答スペクトルに基づく地震動評価手法		
対象構造物/モデル化範囲		東立坑 0~350m(ショートステップ工法)	東立坑 0~350m / 水平坑道接続部	東立坑 0~350m(ショートステップ工法)	地下処分場アクセス坑道(立坑) ^{※1)} 0~500m		
掘削解析	解析手法	三次元逐次掘削解析	—	—	—	深度毎掘削解析	
	解析コード	SoilPlus 2013	SoilPlus 2014	—	—	FLAC3D	
	構成モデル(堆積岩系)	岩盤部	完全弾塑性体(Mohr-Coulomb)	—	—	—	完全弾塑性体(Mohr-Coulomb)
		(表層シルト部) 0~25m	(非線形考慮せず)	非線形を考慮	—	—	—
		覆工ほか	線形弾性体	—	—	—	線形弾性体
	物性値	岩盤部	施工実績データを考慮し、実施設計 ^{※2)} を一部修正	—	—	—	第2次とりまとめ
		覆工コンクリート	コンクリート標準示方書「設計編」準拠(早強ポルトランドセメント)	—	—	—	第2次とりまとめ
		移動鋼製型枠	弾性係数: 8.45 × 10 ⁹ N/mm ² ポアソン比: 0.3	—	—	—	—
		鋼製支保工	実施設計値 ^{※2)}	—	—	—	—
	その他	深度60mごとに掘削区分要素分割	—	—	初期応力は、H26年度解析結果を使用	—	掘削・支保工打設・埋戻しの各段階を考慮した初期応力状態を再現
地震応答解析	解析手法	一次元応答解析					
	解析コード	DYNEQ ^{※4)}			ArkQuake ^{※5)} Version.3.08 (Lev.01)	—	
	地盤の動的物性値	表層(シルト部)	動的変形特性を考慮等価線形化法 ^{※3)}	非線形弾塑性性(等価線形化法 ^{※3)} / R-Oモデル	動的変形特性を考慮等価線形化法 ^{※3)}	Mohr-Coulomb破壊 完全弾塑性性	—
		岩盤部	実施設計値 ^{※2)}	—	—	Mohr-Coulomb破壊 完全弾塑性性	—
	入力地震動	模擬地震動(最大加速度: 545gal)	最大余震(最大加速度: 976.49gal)		上記想定地震動を地表に入力し、深度500mに引き戻した2E波(最大加速度: 2,234gal)		
	地震動入力深度	弾性波速度層(S波速度: 900m/s) 上面(深度326m)			立坑直下、深度500m		
	応答震度	最大せん断ひずみ分布を再現する等価震度			地盤応答法		
地震影響評価	解析手法	応答震度法		—	震度法	地盤応答法	
	解析コード	SoilPlus 2013	SoilPlus 2014	—	ArkQuake ^{※5)} Version.3.08 (Lev.01)	FLAC3D	
	物性値	表層(シルト部)	動的変形特性を考慮等価線形化法 ^{※3)}	非線形弾塑性性(等価線形化法 ^{※3)} / R-Oモデル	—	—	—
		周辺岩盤	線形弾性	—	—	Mohr-Coulomb破壊 完全弾塑性性	—
		覆工コンクリート	線形弾性	—	—	経年劣化による剛性低下を考慮	—
		埋戻し土	※操業時の安定性評価のため立坑内は空洞			—	コンクリート系材料
	その他	覆工の縦断クラック発生区間を考慮(E, W内空側壁)	—	H26年度一次元応答解析結果との比較による簡易評価	—	掘削・支保工打設・埋戻しの各段階を考慮した初期応力状態を再現	
資料等	(平成27年度)基準地震動策定に関する動向整理 (平成27年度)地震による山岳トンネル被害事例	①新規基準および関連資料、②基準地震動策定関連資料及び③新規基準適合性に係る審査資料の収集・整理 地震による山岳トンネルの被害17事例の解説と被害パターンを「小土被り・偏圧」、「地質不良区間」及び「断層のずれ」の3つに区分					
備考	※1): 核燃料サイクル機構, 1999. ※2): 日建設計, 2005. ※3): 建設省土建資料, 1982. ※4): 吉田望・末富岩雄, 1996. ※5): アーク情報システム, 2014						

3) まとめ

本検討では、巨大地震による過酷事象を想定した地震動の人工バリア並びに処分施設（立坑）への影響について評価を行った。オーバーパック（廃棄体）の母岩への接触による人工バリアの安全機能喪失並びに直接アクセス坑道（立坑）自体やその周辺岩盤に形成される掘削影響領域（EDZ）を通じて核種が生活圏へ移行するシナリオを想定した解析からは、本事象が生じる可能性は低いと評価できる結果が得られた。また、原子力関連施設における最新の耐震影響評価手法に基づく、基準地震動の設定方法を提示し、本手法を用いた国内最大級の内陸地震を参照した設計地震動を策定した。なお、本報告結果は、地下処分システムにおいて現在想定されている一定の条件で仮定した地盤モデル、処分施設レイアウト並びに処分方法をもとに検討を行ったものである。これから近い将来に処分施設サイト候補地が選定された暁には、本検討報告書に示された手順並びに手法により、実地点における地質環境並びに施設設計に基づいた地震動を策定し、調査・試験結果より具体的に設定したパラメータを用いることで人工バリア並びに処分施設への影響評価を行うことが望まれる。

4.3.3 巨大地震・断層活動を対象とした影響評価の試行

ここでは、地震・断層活動を例に、過酷事象を評価するための、図4.3.1-1に示した一連の手順にしたがって、影響評価の試行を行うとともに、試行を通じた手順の適用性の確認、及び課題の抽出を目的とした。具体的には、過酷な影響の生じる状況を、安全機能の劣化・喪失の観点で分析した上で、抽出された過酷な状況について、影響の大きさを分析するとともに、個別現象研究の知見を踏まえて各条件やその組み合わせの起こりにくさを効果的に論証・提示するための手法をさらに具体化しつつ、それらの試行を通じて手法や考え方の適用性を確認した。

(1) 過酷な影響の生じる状況の分析（安全機能の劣化・喪失の分析）

ここでは、安全機能を軸に地震・断層活動に係る個別現象研究の成果を整理し、過酷事象に至る道筋・条件（過酷事象に至る可能性のあるシナリオの候補）を探索・具体化した。本研究では、安全機能に着目した予備解析を実施し（図4.3.3-1）、安全機能の劣化・喪失に着目することで、過酷事象につながる状況を効果的に抽出できる可能性が示された。

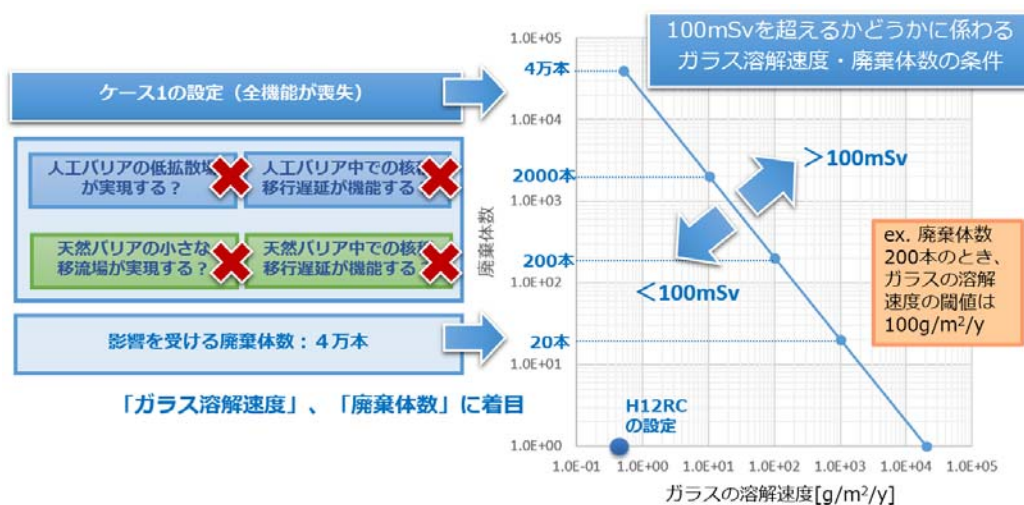


図4.3.3-1 安全機能に着目した予備解析の結果

一方、こうした安全機能の劣化・喪失の組み合わせ方や順番にはさまざまなバリエーションがあるため、それらの中から地震・断層活動に関係する組み合わせや順番のみを、系統的に抽出できるようにする必要がある。そこで本研究では、地震・断層活動に起因する処分システムへの影響を、①影響の種類、②影響が及ぶ部分、③影響の広がり の3つの観点に区分した上で (図4.3.3-2a)、それらの考え得るパターンと組み合わせ方のバリエーションを、マトリックス表等を用いて整理することで、地震・断層活動に起因する過酷な状況を、系統的に抽出できる見通しが得られた (図4.3.3-2b)。

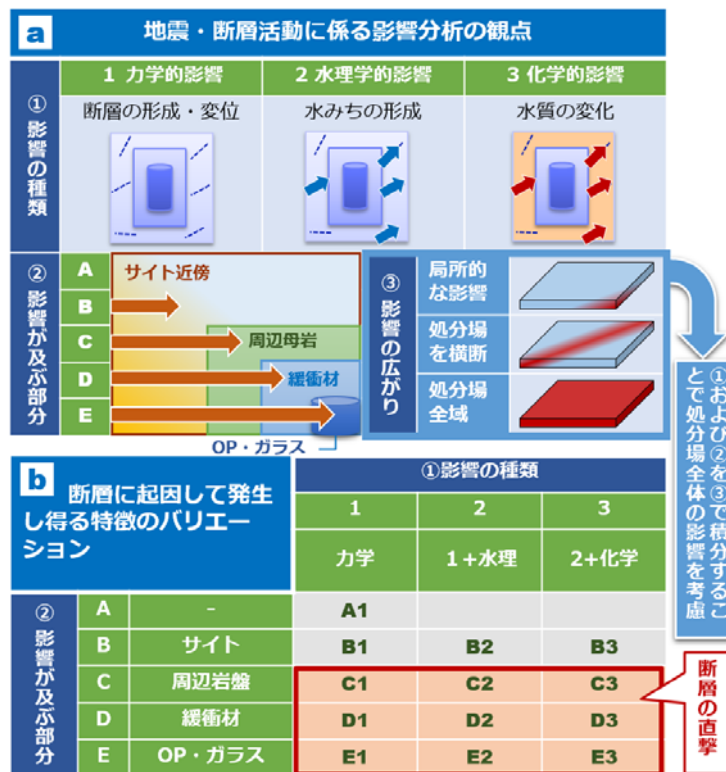


図4.3.3-2 地震・断層活動に係る影響分析の観点 (a) とそれらのバリエーション (b)

(2) 過酷事象候補の分析

ここでは (1) で具体化された過酷につながる可能性のある状況と安全機能の劣化・喪失の組み合わせ (以下、過酷事象の候補という) について、「影響の大きさ」と「発生条件」の観点から分析を行い、両者を統合することで、マトリックス表で想定されている各過酷事象の候補 (マトリックスの各セルに相当) の発生可能性や起こりにくさを分析した。

このうち、影響の大きさについては、(1) で具体化した過酷な状況 (マトリックス表の各セルに相当) に対応する安全機能の劣化・喪失の組み合わせを考慮した感度解析を実施し、各状況の影響の大きさを把握する。具体的には、第2次取りまとめにおけるバリア構成を踏まえ、閉鎖後1000年程度までの比較的初期において安全機能が期待される、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、周辺母岩を対象に、(1) で定義した各バリアの安全機能の劣化・喪失の組み合わせを考慮した核種移行解析を実施した。

さらに、前出のマトリックス (図4.3.3-2) を用いて想定される各状況の発生条件を分析した。このマトリックス表では、各セルの状況が発生するための条件が、横軸の「①影響の種類」と縦軸の「②影響が及ぶ部分」の2つの観点から示されており、各セルの状況が生じるためには、双方の条件が同時に満

たされる必要がある。また、各観点のうち、横軸の「①影響の種類」については右の列ほど多くの、縦軸の「②影響が及ぶ部分」については、下の行ほど多くの部分に、影響が及ぶことを同時に考慮する必要がある。図4.3.3-3には、マトリックスの左上から右下にかけて、同時に満たされるべき条件が多くなる様子を、具体的な条件の重なりとして視覚的に示すことができた。

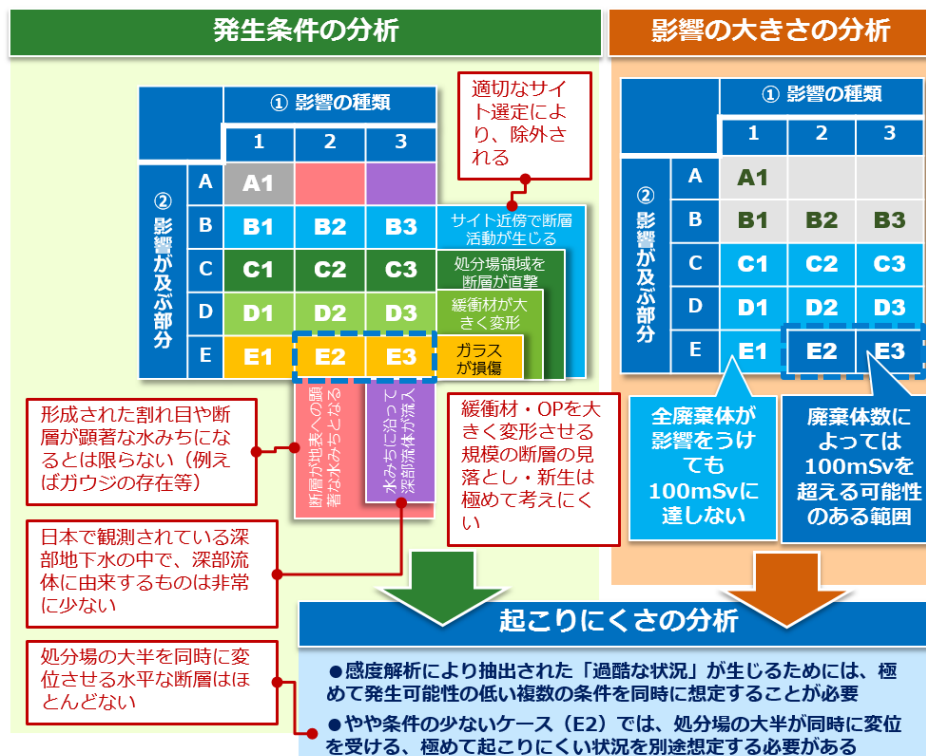


図4.3.3-3 起こりにくさの分析

さらに、前出の「影響の大きさの分析」と、「発生条件の分析」の結果を統合することにより、過酷な状況の起こりにくさを分析した。具体的には、感度解析によって抽出された「過酷な状況」であるE2やE3が発生するためには、極めて発生可能性の低い条件を同時に想定する必要があることを、2)の「発生条件の分析」の結果によって視覚的に確認することができる。このうち、E3よりも発生条件の少ないE2については、別途影響の空間的な広がりを考慮することで、処分場の大半が同時に変位を受ける、極めて起こりにくい状況を想定する必要がある点を示すことができる。このような方法により、過酷な状況が生じるためには、極めて発生可能性の低い複数の条件を同時に想定する必要があることを系統的に整理し提示することができることを確認した。

4.4 まとめ

4.4.1 地層処分システムにおける過酷事象の概念構築

地層処分システムにおける過酷事象の定義について、専門家実績が豊富な原子炉分野における過酷事故の定義を参照するとともに、地層処分に係る技術的・社会的な有識者によるワークショップにより議論を行い、明確化した。

本検討は、想定外事象（これまでに想定してこなかった事象や事象の程度）を検討するものであり、従来の評価手法とは異なるアプローチが必要であった。そこで、人への甚大な影響（結果）を起点とし

たアプローチ、不安や懸念（原因）を起点としたアプローチ、それらを統合して過酷事象シナリオを描出する手順、重要度を評価する手順、対策技術を検討する手順を基軸とした過酷事象検討フローを確立し、その詳細な手順を明確化した。さらに、一連の試行を実施することで、検討フローの有効性を確認するとともに、地層処分システムの継続的な安全性向上に資する仕組みとして提示した。

以上の検討を通じて、地層処分システムにおける過酷事象を効率的、効果的に抽出するための評価フローを構築し、個別手順の具体化を行うとともに、試行を通じてその有効性について確認することができた

4.4.2 巨大地震・断層活動を事例とした評価技術開発

(1) 巨大地震・断層活動を対象とした評価手法の開発

地震・断層活動を例に、過酷事象を評価するための一連の評価手法を具体化した。具体的には、安全機能の劣化・喪失を軸とした感度解析、地震・断層活動に係る個別現象研究の知見の抽出・整理、それらに基づく過酷な状況に至る道筋や条件の把握を通じて、それらの発生可能性や起こりにくさを論証する一連の手順を構築した。また、処分システムの安全機能に影響を及ぼす可能性のある個別現象として、①起因事象としての断層の特性、②深部流体の影響、③地表水の流入の影響、④断層のずれによる人工バリアのせん断変形の影響、⑤母岩の透水性への影響、⑥地震動による人工バリア・処分施設への影響、⑦断層起源ガスの発生の影響の7種類の現象に着目するとともに、こうした個別現象研究の知見を、関係者が共有・記録するための「情報共有シート」を作成した。

(2) 巨大地震・断層活動に関連した個別現象の調査・評価

1) 過酷事象の起因となる断層に関する検討

断層を起因とする過酷事象評価を実施する上で必要な断層に関する情報を収集し、その中で考え得る最悪の想定（ワーストケース）を設定した。それはM8.0規模の地震を発生させる断層が水平に地層処分場を直撃した場合であり、人工バリア、天然バリアともに安全機能を喪失する可能性を考えたものである。ただし、内陸地震に関する文献調査を実施した結果、M6.5以上の内陸地震の多くが活断層と関連またはその近傍で生じていること、また、M8.0規模の地震の多くは、神戸－新潟歪集中帯、中央構造線などの大規模な活断層が密に分布する地域で発生していることから、断層の回避条件を満足すれば、M6.5以上の地震を発生させるような断層が地層処分場を直撃する可能性は低いことがわかった。一方、地層処分場を直撃するような断層の現実的な想定は、連続性の低い既存の断層を連結するような断層であり、M8.0の地震を発生させる断層よりも規模の小さい断層になると想定された。

2) 深部流体の影響

断裂系等を通じて地下深部から地表付近に上昇すると考えられる深部流体について、その流入に伴う地層処分システムへの影響を評価するためには、深部流体の性状に関する知見が必要となる。そのため、深部流体の湧出に関する既存の研究事例や、国内の地下水化学組成に関するデータベースを用いた分析をもとに、その温度や化学的性状について検討した。その結果、マントルを起源とする深部流体は高温で酸性を示す場合があるほか、 HCO_3^- 濃度が高い傾向を示すことが確認された。深部流体が生じる原因は、わが国がプレートの沈み込み帯に位置することが深く関与していると考えられている。しかしながら、その詳細な分布や形成・移動機構等について現状では明らかでない点が多い。また、ここで検討に用いた深部流体の湧出に関する観測事例は、わずかな地域に限られる。このため、深部流体

や非火山性熱水に関する更なる研究事例の蓄積も重要であると考えられる。

3) 地表水の流入の影響

処分深度に到達する断層が活動し、その近傍における透水性が増加することによって酸化性の地表水が地下に向けて流入する可能性について、その時間的な変化（流入の継続性）に着目して情報を整理した。既存の研究事例によれば、断層運動に伴う岩盤の透水性増加によって生じる地下への地表水の流入は、処分深度に到達するものの、その継続時間については永続的ではないとみられるが、断層運動に伴って繰り返し生じ得る現象であると考えられる。このことは、長期間における処分システムへの影響を評価する際に考慮することが重要であると考えられる。

4) 断層のずれによる人工バリアのせん断変形の影響

巨大地震・断層活動を事例としたシナリオとして、断層のずれにより岩盤とオーバーパックがせん断衝突して、さらに大きな断層ずれが生じた場合のオーバーパックの破損の有無及びガラス固化体と母岩の接触の有無を評価するために、処分坑道径等の大きな断層ずれが生じた場合の断層模擬せん断衝突模型実験及びその再現解析や、国内最大規模の地震を上限としたM6.5～M8.0の主断層ずれによる直撃及びM8.0の主断層近くに生じる副断層ずれによる直撃を想定した実寸法人工バリアの大変形効果を考慮した非線形せん断衝突解析を実施した。この解析結果によりオーバーパックの破損の有無及びガラス固化体と母岩の接触の有無を判断して得られた知見を、性能評価のシナリオ構築のインプットとして反映した。

5) 断層起源ガスの発生の影響

巨大地震・断層活動に伴う地下に賦存するガスの放出、高速すべり断層運動に伴って発生する断層起源ガス等の大規模なガスの放出や移行により、地層処分システムに与える影響を評価することを目的とし、解析上必要な岩盤の透気係数などの透気特性データや地下水に溶存しているガスの状態調査を行い、それらを踏まえた解析により断層シナリオの性能評価に用いるパラメータ（緩衝材からの押し出し流量など）を明確化した。解析の結果、断層起源ガスの流入によるガス相圧力の上昇がみられ、全てのケースにおいて埋め戻し部、緩衝材及び岩盤において、ガスフラクチャリングを起こすことが示唆された。また、流出側に断層が存在する場合は、緩衝材に到達したガスは、周辺の断層を伝って移動するため、緩衝材からの押し出し流量はみられなかった。今回の影響評価解析では、Hirose et al. (2011)の実験結果から断層運動に伴う水素ガスの発生量を推定したが、断層起源ガス発生については、未だ不確実な面もあることから、今後の更なる研究の進展に期待すべき点が多い。

6) 地震に伴う岩盤ひずみ及地下水流動の変化

地震に伴う地下水流動環境の変化が地層処分システムに与える影響を評価することを目的として、わが国で最大規模となった東北地方太平洋沖地震の震央から約150km程度の距離にある岩手県の釜石鉦山坑道及び国立天文台水沢VLBI観測所附属江刺地球潮汐観測施設の原位置観測データに着目した。その結果、過酷事象に結びつくような岩盤の損傷や透水性の増大には至っていないと判断された。ただし、地震断層周辺では、地震後に地下水流動環境が大きく変化したという報告があり、過酷事象評価の際には断層が発生する位置に注意が必要である。

7) 巨大地震動による人工バリア・処分施設への影響

巨大地震による過酷事象を想定した地震動の人工バリア並びに処分施設（立坑）への影響について評価を行った。オーバーパック（廃棄体）の母岩への接触による人工バリアの安全機能喪失並びに直接アクセス坑道（立坑）自体やその周辺岩盤に形成される掘削影響領域（EDZ）を通じて核種が生活圏へ

移行するシナリオを想定した解析からは、本事象が生じる可能性は低いと評価された。また、原子力関連施設における最新の耐震影響評価手法に基づく、基準地震動の設定方法を提示し、本手法を用いた国内最大級の内陸地震を参照した設計地震動を策定した。

(3) 巨大地震・断層活動を対象とした影響評価の試行

ここでは、(1)における一連の評価手順の具体化と並行して、具体化した手順の試行を実施し、課題等を適宜(1)の評価手順にフィードバックした。具体的には、安全機能を軸に地震・断層活動に係る個別現象研究の成果を整理し、過酷事象に至る道筋・条件(過酷事象に至る可能性のあるシナリオの候補)を探索・具体化するとともに、安全機能に着目した予備解析を実施した。この試行により、安全機能の劣化・喪失に着目することで、過酷事象につながる状況を効果的に抽出できる可能性が示された一方、こうした安全機能の劣化・喪失の組み合わせ方や順番にはさまざまなバリエーションがあるため、それらの中から地震・断層活動に関係する組み合わせや順番のみを、系統的に抽出できるようにする必要があることが明らかになった。そこで、地震・断層活動に起因する過酷な状況を、より効果的に探索・抽出するために、過酷な状況を、①影響の種類、②影響が及ぶ部分、③影響の広がり観点でのバリエーション及び組み合わせの想定により分析することとした。このような分析と、安全機能の劣化・喪失を考慮した感度解析を組み合わせることで、過酷事象の起こりにくさを系統的に整理して提示できる見通しを得た。具体的には、過酷な状況が生じるためには、極めて発生可能性の低い複数の条件を同時に想定する必要があることを系統的に整理し提示できるようになった。

参考文献

- Abaqus(2016) : Abaqus finite element system, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- 網田和宏, 大沢信二, 杜建国, 山田誠(2005) : 大分平野の深部に賦存される有馬型熱水の起源, 温泉科学, Vol. 55, pp. 64-77.
- ArkQuake(2016) : SHAKE 相当の成層地盤地震応答解析プログラム「ArkQuake Version 3.08 Lev.01」, 株式会社アーク情報システム, 2016.
- 中央防災会議(2017) : 南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応のあり方について, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taio_wg/pdf/h290926honbun.pdf.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005) : TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 平成17年9月.
- DYNEQ(1996) : 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 吉田望・末富岩雄, 佐藤工業(株)技術研究所報, 61-70, 1996.
- 原子力安全基盤機構(2005) : 金属キャスク構造健全性解析に関する報告書(平成16年度), JNES/SAE05-103, 平成17年12月.
- 原子力安全推進協会 敷地内断層評価手法検討委員会(2013) : 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書, JANSI-FDE-01 rev.1, 平成25年9月.
- Hirose, T., Kawaguchi, S. and Suzuki, K. (2011): Mechanoradical H₂ generation during simulated faulting : implications for an earthquake-driven subsurface biosphere, Geophysical Research Letters, VOL. 38, L17303, doi:10.1029/2011GL048850, 2011.
- ICRP(2007) : The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, 37, (2-4).
- 地盤工学会a(2009) : 土の繰返し非排水三軸試験方法, 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会地盤調査法改定編集委員会編, JGS0541-2009, 平成21年11月.
- 地盤工学会b(2009) : 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法, 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会地盤調査法改定編集委員会編, JGS0542-2009, 平成21年11月.
- 地盤工学会 c(2009) : 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法, 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会地盤調査法改定編集委員会編, JGS0543-2009, 平成21年11月.
- 核燃料サイクル開発機構(1999a) : 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1 わが国の地質環境, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021.
- 核燃料サイクル機構(1999b) : 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2 地層処分の工学技術, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-022.
- 経済産業省 資源エネルギー庁(2017) : 科学的特性マップ公表用サイト, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/area.html.
- 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全

- 性向上に関するワーキンググループ(2013)：総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 第1回会合 資料1 平成25年7月.
- 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ(2014)：原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言、平成26年5月.
- 建設省土建資料(1982)：地盤の地震時応答特性の数値解析法 -SHAKE:DESRA-, 土研資料No. 1778号, 建設省土木研究所, 1982.
- 北川有一, 藤森邦夫, 小泉尚嗣, 野津憲治, 五十嵐丈二(2001)：繰り返し注水実験による淡路島800m孔の湧水量変化から推定された岩盤の透水性の時間変化, 地球, Vol. 23, pp. 245-249.
- Kitagawa, Y., Fujimori, K. and Koizumi, N. (2002)：Temporal change in permeability of the rock estimated from repeated water injection experiments near the Nojima fault in Awaji Island, Japan, Geophys. Res. Lett., Vol. 29, doi:10.1029/2001GL014030.
- 北川有一, 藤森邦夫, 小泉尚嗣(2004)：大地震発生後の断層帯の透水性の時間変化—繰り返し注水実験による測定—, 地質ニュース, Vol. 596, pp. 29-34.
- Kitano, Y., Yoshioka, R., Okuda, F. and Kazuo, K. (1967)：Geochemical study of ground waters in the Matsushiro area. Part 1: Chemical composition of ground waters, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Vol. 17, pp. 47-71.
- 黒澤進(2005)：高レベル放射性廃棄物地層処分システムにおける核種移行評価に及ぼすコロイド影響に関する研究—第2次取りまとめ以降の検討—, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2005-007, 2005.
- 草野友宏, 浅森浩一, 梅田浩司(2012)：日本列島における地下水・温泉ガスのヘリウム同位体比データベースの作成, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-017.
- Lin, A., Tanaka, N., Uda, S. and Satish-Kumar, M. (2003)：Repeated coseismic infiltration of meteoric and seawater into deep fault zones: a case study of the Nojima fault zone, Japan, Chemical Geology, Vol. 202, pp. 139-153.
- 松葉谷治, 酒井均, 鶴巻道二(1974)：有馬地域の温泉, 鈹泉の水素と酸素の同位体比について, 岡山大学温泉研究所報告, Vol. 43, pp. 15-28.
- 松田時彦(1975)：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震(II), 第28巻, pp. 269-283.
- 中村一明(1971)：松代地震から学んだこと—一手に入れた地震制御へのデータ—, Vol. 10, pp. 127-133.
- 金折裕司(2001)：断層の影響はどこまで及んでいるか, 応用地質, 41(6), pp. 323-332.
- 日本原子力研究開発機構(2014)：平成25年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- 日本原子力研究開発機構(2015)：平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- 日本原子力研究開発機構(2016)：平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- 日本原子力研究開発機構(2017)：平成28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- 日本原子力研究開発機構(2018)：平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事

業 処分システム評価確証技術開発 報告書.

- 西村進(2000) : 紀伊半島の温泉とその熱源, 温泉科学, Vol. 51, pp. 98-107.
- 日建設計(2005) : 幌延深地層研究計画 地下施設実施設計 - 設計報告書 -, JNC TJ5410 2005-002.
- Niwa, M., Takeuchi, R., Onoe, H., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, K. and Sugihara, K. (2012): Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 13, Q05020.
- 奥澤保, 塚原弘昭(2001) : 松代群発地震地域に湧出する深層地下水, 地震 第2輯, Vol. 53, pp. 241-253.
- 大竹政和(1976) : 松代地震から10年, 科学, Vol. 46, pp. 306-313.
- 尾山洋一, 高橋正明, 塚本斉, 風早康平, 安原正也, 高橋浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦(2011) : 日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について, 原子力バックエンド研究, Vol. 18, pp. 25-34.
- PFC2D(2014) : 2次元/3次元粒状体挙動解析プログラム PFC2D/PFC3D, Itasca Consulting Group Inc., 2014.
- 産業技術総合研究所(2012) : 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性—, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, No. 560.
- Sano, O., Mizuta, Y., Murakami, T., Tanaka, Y. (1997): Sound Velocity as a Measure of Small Stress Change, *Rock Stress*, Balkema Publ., pp. 241-246.
- 佐藤努, 高橋誠(1997) : 淡路島の異常湧水の化学組成変化—1995年兵庫県南部地震による影響—, 地球化学, 31, pp. 98-98.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1996) : 本宮地域—地熱開発促進調査報告書—, No. 37.
- 総合エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ (2014) : 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—.
- Tadokoro, K. and Ando, M. (2002): Evidence for rapid fault healing derived from temporal changes in S wave splitting, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, doi: 10.1029/2001GL013644.
- Tadokoro, K., Ando, M. and Umeda, Y. (1999): S wave splitting in the aftershock region of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, pp. 981-991.
- 高治一彦, 谷口航(1999) : 緩衝材の動的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-042.
- 田中義晴, 平田篤夫, 石田一成, 佐野修(1995) : “釜石鉾山における弾性波速度の高精度測定手法の開発とその応用” , 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 539-543.
- 田中義晴, 稲葉力, 平田篤夫, 石田一成, 佐野修(1997) : 原位置における高精度弾性波測定システムを用いた岩盤モニタリング技術の開発, 土木学会論文集, Vol. III-38, No. 561, pp. 185-192.
- Tokunaga, T. (1999) : Modeling of earthquake-induced hydrological changes and possible permeability enhancement due to the 17.1.1995 Kobe Earthquake, Japan, *Journal of Hydrology*, 223, pp. 221-229.
- 徳永朋祥(1999) : 地震時の地下水変動から推定される淡路島北部地域の水理特性, 応用地質, 40(2), pp. 99-106.
- Tosaka, H., Mori, K., Tada, K., Tawara, Y., and YAMASHITA, K. (2010): A General - propose

terrestrial fluids/heat flow simulator for watershed system management, IAHR International Groundwater Symposium 2010.

Uda, S., Lin, A. and Takemura, K. (2001): Crack-filling clays and weathered cracks in the DPRI 1800m core near the Nojima Fault, Japan: Evidence for deep surface-water circulation near an active fault, Island Arc, Vol.10, pp.439-446.

宇田進一, 林愛明, 竹村恵二(1998) : ボーリングコアから見た野島断層破碎帯の地下水の流動, 地球, 号外No.21, pp.171-175.

Wakita, H., Fujii, N., Matsuo, S., Notsu, K. and Takaoka, N. (1978): "Helium Spots" : Caused by a Diapiric Magma from the Upper Mantle, Science, Vol.200, pp.430-432.

Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 4, pp.974-1002, August 1994.

Yoshioka, R., Okuda, S. and Kitano, Y. (1970): Calcium chloride type water discharged from the Matsushiro area in connection with swarm earthquakes, Geochem. J., Vol.4, pp.61-74.

5. 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

5.1 目的と実施概要

わが国の地層処分計画が研究開発の段階から処分事業の段階に入った2000年の時点から、計画の意思決定に関わるステークホルダは、地層処分の専門家中心の関係者から非専門家を含む多様な幅広い層に取って代わってきた。地層処分が受け入れられるかどうかの判断については、研究開発の段階では、専門家などの関係者がステークホルダの中心であったため、提供材料としては「地層処分研究開発第2次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構，1999）などの地層処分概念の技術的成立性や安全性に関わる「科学・技術的根拠」を提示することであった。しかし事業の段階に入り、「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が処分事業の実施主体によって開始されたが、これまでに公式に受け入れを行った自治体が現れていない。その背景として、事業の段階に入ってから非専門家を含む多くの関係者がステークホルダとして計画に関与することになり、2007年の東洋町の事例に見られるように、地層処分に対する許容の度合いは、かつて専門家が考えていたよりも一段と難しいものであることがわかってきた。

地層処分の理解は専門家であっても容易ではない。その要因の一つは、原子力発電所など他の原子力施設には見られない地層処分固有の特徴が存在することにある。地層処分対象となる高レベル放射性廃棄物は初期の放射能レベルが極めて高く、発生と同時に人間環境から隔離する必要がある。さらに超長半減期の放射性核種も含むため、その潜在的な危険性は数万年以上にもわたり、従来の社会システムが扱ってきた時間スケールを遥かに超えてくることから、その隔離にあたっては、従来の地上保管といった人間が継続的に関与する方式では極めて困難となる。

このことから、人間の管理に依存しない地下深部の天然の地層（岩盤）に廃棄物の隔離を委ねる地層処分が一つの解決策として提案されてきた（たとえば、USDOE, 1981； OECD/NEA, 1984）。またシステムによる超長期の安全性確保を示すことについては、原子力発電所など従来の工学プラントのように系全体を試験的に動かしながらシステムの安全性を確認するという直接的な実証が困難となるため、地層処分では予測に基づいて間接的に安全性を実証する方法に依存するほかない。しかし研究開発による技術の進展や規制の強化によって安全性の向上を図っていくことは可能であるが、対象が超長期の時間スケールに及ぶことから、どこまでいっても不確実性や未知の部分が残し、リスクはゼロとならない。したがって、地層処分の問題解決は「科学的」な知識だけから導くことができない問題であるという特徴を有する。このことから、超長半減期の放射性廃棄物管理の検討にあたっては、科学が示唆する技術的な解決策を複数の政策上の選択肢にまとめた上で、どのような価値を尊ぶかという判断（価値選択）に基づき、そのうちのどれかを選び取ったり、あるいはそのうちのいくつかを組み合わせたりして、暫定的な解を導き出し続ける作業を、社会を挙げて行う必要があると指摘されている（このように社会を挙げて答えを導いていくプロセスは「社会的合意形成」と呼ばれ、その結果行われる決定は「社会的意思決定」と呼ばれる）（寿楽，2016）

このような観点を取り入れ、本サブプロジェクトでは、処分計画の意思決定に関与する多様なステークホルダが地層処分の実施について確信を持つことができる（ステークホルダにとって納得のいく）地層処分システム概念を構築するためには、従来から行ってきた「科学・技術的根拠の提示」以外に、社会的合意形成の視点からの「概念構築過程での意思決定プロセスの公正性の確保」が不可欠な要素と捉え、これらを併せて処分システム概念を構築するうえで有効な方法論やそれを支援する技術の開発および構築に必要な知見を整備することを目的として平成25年度より開始した（日本原子力

研究開発機構，2014)。

5.2 研究開発のアプローチ

本サブプロジェクトでは、地層処分のシステム概念について多様なステークホルダが確信を持ってもらえる（ステークホルダにとって納得がいく）ようにするため、提示される科学・技術的根拠の妥当性の提示を通じて情報発信者が能力を有しているかどうかを知らしめることに加え、地層処分概念を構築するプロセスそのものが手続き的に公正であることを確保するための手法を提示することを目標としている。このうち、前者の「科学・技術的根拠の提示」については、これまでの地層処分研究開発第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999）など研究開発の段階から行われている従来の手法そのものであることから、本サブプロジェクトでは、これを補完するアプローチとして、特に「①レジリエンス的視点に基づく地層処分システムのロバスト性概念の検討」に焦点をあてた科学・技術的基盤を整備していくこととした。一方、後者については、ステークホルダとの話し合いにより合意形成を図りながら概念を構築していくアプローチを採用し、そのための有効な方法論やそれを支援する技術の開発および構築に必要な知見の整備を、「②公正性に根ざした話し合いによる合意形成型の処分概念構築手法の開発」として取り組んでいくこととした。また、前者の「科学・技術的根拠の提示」と後者の「概念構築過程での意思決定プロセスの公正性確保」はそれぞれ独立したものではなく、相互に密接に連携させていくことが重要であり、特に、

- 計画段階での科学・技術的予測や（許認可等の）事前評価の妥当性を確認するためのモニタリング
- 閉鎖の意思決定を行うまでの建設・操業段階において地層処分システムの状態が初期の計画段階での予測や事前評価から大きく逸脱した場合の計画の可逆性や廃棄体等の回収
- 想定外の事象に対するシステムの頑健性を示すためのストレステスト

といった技術や対策は、前者の科学的・技術的根拠に基づく評価の限界を補い、後者の合意形成に至るための鍵となる境界領域と考えられる。このような観点から、この境界領域について、本サブプロジェクトでは、上記①②に加え「③合意形成の促進に資するモニタリング技術等の開発」として検討を進めてきた。

上記①から③の検討について、平成25年度よりそれぞれのテーマごとに進めてきたが、平成27年度からは、それまでの各成果を基に、成果全体の取りまとめに向け、表5.2-1に示す枠組みに沿って検討を進めた。

表5.2-1 成果の取りまとめに向けたアプローチ（日本原子力研究開発機構，2016）

平成25年度～26年度	平成27年度～	
①レジリエンス的視点に基づく地層処分システムのロバスト性概念の検討	(1) 閉鎖後長期安全性に関するロバスト性の高い地層処分システムの概念構築	(3) 多様なステークホルダ間の合意形成に向けた協働の試行
③合意形成の促進に資するモニタリング技術等の検討・開発	(2) 受動的な安全系へ推移するまでの期間におけるレジリエンス的取り組みの具体化	
②公正性に根ざした合意形成型の処分概念の構築手法の開発		

以下、①～③の各アプローチに沿った検討内容を 5.3 項に、そこで提示した手法等を活用しながら模擬ステークホルダによる合意形成に向けた新たな処分概念構築の協働の試行結果を 5.4 項にそれぞれ示す。

5.3 各アプローチに沿った検討

5.3.1 レジリエンス的視点に基づく地層処分システムのロバスト性概念の検討

(1) レジリエンスとは

レジリエンスは、複数の要素から構成されるシステム全体としての特質であり、個別の要素が機能を喪失、消滅あるいは他のものに置換された場合でも、システム全体としての統一性を維持し、何らかの形で機能を回復する能力のことを指す。レジリエンスの定義は必ずしも統一されている訳ではないが、Longstaff et al. (2010)では、最も簡明なものとして次のように提案している。

レジリエンスは、*Resistance*と*Recovery*を組み合わせたものである。前者の*Resistance*とは、システムが外界の擾乱に対してその機能を維持する特性、即ち信頼性を指し、後者の*Recovery*とは、システムが機能の一部を失った時に、その障害から回復する能力を指す。

レジリエンスという概念は未だ新しく、また、関連する分野が多岐にわたることもあり、システムのレジリエンスを高めるための戦略についても様々なものがこれまで提案されている。その中で、複数の分野で共通し比較的汎用性が高いと考えられるものとしては、以下が挙げられる（丸山ほか、2012）（Maruyama, 2013）。

- ① 冗長性：人工物によく見られる戦略であり、同じ機能を持つ複数の部品を用意しておくことにより、一部の部品の故障に対して代替の部品が機能を補完することによってシステムのレジリエンス性を確保する
- ② 多様性：生物によく見られる戦略であり、未知の脅威に対して、多様な要素のどれかが生き残ることによって回復を可能とする
- ③ 環境適応性（適応・再生）：システムの古くなった要素を、致命的になる前に壊して新たに作り直すこと。生態系等においてよく見られる
- ④ 危機管理（変更や修正に関する柔軟性または能動的レジリエンス）：組織において主として見られる戦略であり、想定外の事象が起きた場合に、その状況を正確に把握し、適切な対応をとることによって回復を早めようとするものである

これらの考え方を地層処分に適用し、地層処分システムのロバスト性を向上するためのレジリエンス的取り組みとしての課題及び具体的な方策の検討を行った。まずシステムのロバスト性を向上させるためのレジリエンス的な取り組みについて、良好事例の情報を収集することを目的に、以下の専門家に対するヒアリングを実施した。

- 地層処分の分野における国内外の専門家：
 - ▶ これまで、英国（BNFL, UKAEA）、スイス（Nagra）、スウェーデン（SKB）の担当者として処分概念構築や安

全確保戦略の立案に携わった専門家及び国内で同様の知見を有する専門家

- 二酸化炭素の回収・貯蔵（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）分野の専門家：
 - ▶ CO₂の多重のトラッピング機能の活用に関して基本的な概念構築に参加した専門家
- 他の分野の専門家：
 - ▶ 超寿命材料の開発、情報セキュリティ、防災、免疫、原子力発電所等

上記のヒアリングを実施した延べ人数は8名であり、対面又はメールにより実施した。ヒアリングでは、システムのロバスト性向上のための4つのレジリエンス的取り組み（「冗長性」、「多様性」、「環境適応性（適応・再生）」及び「危機管理（変更や修正に関する柔軟性）」について説明を行い、各専門分野で行われている取り組みに関連する情報を提供してもらった。

(2) レジリエンス的取り組み方策に基づく合意しやすい地層処分システム概念の構築の試行

前項の検討結果を踏まえ、システムのレジリエンス性を向上させる4つの方策（冗長性、多様性、環境適応性（適応・再生）、危機管理（変更や修正に関する柔軟性）の観点から、以下の「合意しやすい地層処分システム」のオプション構築を試行した。その事例オプションを図5.3.1-1に示すとともに、それぞれの考え方を表5.3.1-1に示す。

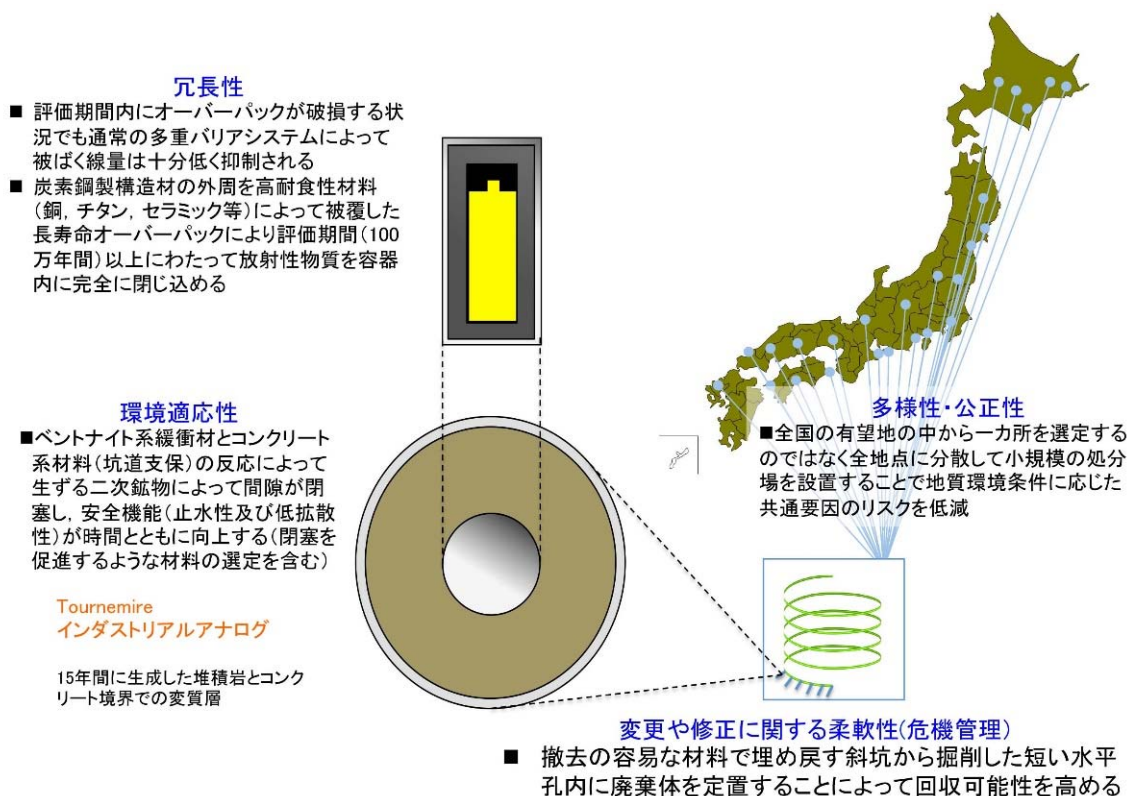


図5.3.1-1 レジリエンス的考え方に基づく合意しやすい新たな処分概念のオプション構築

（日本原子力研究開発機構，2014）

表5.3.1-1 新たな概念オプションそれぞれの方策についての考え方

冗長性	<ul style="list-style-type: none"> 炭素鋼製構造材の外周を高耐食性材料（銅、チタン、セラミック等）によって被覆した長寿命オーバーパックにより評価期間（100 万年間）以上にわたって放射性物質を容器内に完全に閉じ込める 評価期間内にオーバーパックが破損する状況でも通常の多重バリアシステムによって被ばく線量は十分低く抑制される
多様性 （/公平性）	<ul style="list-style-type: none"> 図に示すように、全国の有望地の中から一カ所を選定するのではなく全地点に分散して小規模の処分場を設置することで地質環境条件に応じた共通要因のリスクが低減される。ここでの多様性の方策は、立地の観点から地域間の公平性ももたらす。
環境適応性 （適応・再生）	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイト系緩衝材とコンクリート系材料（坑道支保）の反応によって生ずる二次鉱物によって間隙が閉塞し、安全機能（止水性及び低拡散性）が時間とともに向上する（閉塞を促進するような材料の選定を含む）
危機管理 （変更や修正に関する柔軟性）	<ul style="list-style-type: none"> 撤去の容易な材料で埋め戻す斜坑から掘削した短い水平孔内に廃棄体を定置することによって回収可能性を高める

5.3.2 公正性に根ざした合意形成型の処分概念構築手法の開発

本サブプロジェクトで対象とする「可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念」とは、処分計画の意思決定に関与する多様なステークホルダが地層処分の実施について確信することができるものを指す。このようなステークホルダにとって合意することのできる地層処分のシステム概念を構築するためには、5.2で示したように、従来から行われてきた「科学・技術的根拠の提示」以外に、「概念構築過程での意思決定プロセスの公正性の確保」が極めて肝要な要素となる。このアプローチは、「能力についての認知」と「公正さについての認知」によって信頼が確立されるという「伝統的信頼モデル（二要因モデル）」モデルに合致する。二要因モデルでは、どのような相手や対象が信頼されるかを説明したものであり、後者の「公正さについての認知」については様々な事例が報告され若干幅広い解釈がなされているが、基本的には一つの同じモデルとして捉えられている（図5.3.2-1左側）。さらに、中谷内・Cvetkovich（2008）によれば、二要因モデルは、対象となる問題への（ステークホルダの）関心が低い場合に当てはまり、信頼の確立においては、対象となる主体（もしくは概念）の技術的能力や公正さが重要となるが、関心が高い場合には、「主要価値類似性モデル」（Earle & Cvetkovich, 1995）（図5.3.2-1右側）が該当するとしている。これは、ステークホルダの関心が高い場合、技術的能力や公正さという要因よりも、対象となる概念（もしくは相手）が有する主要価値¹⁾が自分のそれと類似していると認知した時、その概念（もしくは相手）を信頼するというモデルである。すなわち、関心の高い人々は、問題に対する結論を導くうえで、何を守ることが重要なのかといった当該問題に対する価値観を明確に持っていることから、価値を共有し、その実現に寄与しうる概念（もしくは相手）を信頼することを示している。

従って、本項のアプローチでは、後述するように、多様なステークホルダとともに共同で処分概念を構築する枠組みとして市民参加プログラムを概念構築過程に取り入れることにより「公平さの認知」が得られる。さらにその枠組みにおいては、これまでのように、（専門家の視点に立った）処分概念をもって説得し続けるのではなく、非専門家を含む多様なステークホルダの視点・意見（とくに不安や懸念）にも配慮し、合意に向けた新たな概念の創出を模索していくことにより関心の高い人々の「主要価値」にも寄り添っていくことができることから、上記2つのモデルに沿って地層処分に関

¹⁾ 主要価値(salient value)とは、ある問題に対処するとき、問題をどのように見立て、何を重視するかということ。相手が当該問題にかかわる主要な価値を自分と共有していると感じると、その相手を信頼する。

心の高い人から低い人に至るまでの信頼を確立する土台を構築することが可能となる。



図5.3.2-1 伝統的信頼モデル（左）と主要価値類似性モデル（右）

(1) ソフトシステムズ方法論の適用

上記でも述べたように、(ステークホルダにとって納得のいく) 地層処分システム概念を構築するため、従来から行ってきた「科学・技術的根拠の提示」に加え、社会的合意形成の視点からの「概念構築過程での意思決定プロセスの公正さの確保」が不可欠な要素と捉え、これらを併せて処分システム概念を構築するうえで有効な方法論やそれを支援する技術の開発および構築に必要な知見を整備することとしている。

このうち「公正さの確保」については、多様なステークホルダとともに共同で処分概念を構築する枠組みとして市民参加プログラムを概念構築過程に取り入れることとし、そこでの話し合いによる合意形成を支援するための具体的な方法論として、これまで実施した調査から「ソフトシステムズ方法論 (SSM: Soft System Methodology)」が存在する (Checkland, 1994)。SSMは、複雑な対象を分析するための方法論であり、「何を」「どうする」といった形での行動案の導出を目指す分析手法でもある。SSMでは、このような行動案の導出に際して、かかわる人々の立場によって、見方や考え方が異なるような状況において、「何が問題か」「何を目標とすべきか」を明らかにしつつ、世界観 (立場によって異なる「考え」や「思い」) を調整して合意形成を探る (世界観の違いを認め、ある種の納得をしつつゴールに向かって行動することを目指す)。SSMのプロセスは、現実世界の問題点を洗い出して、まず、理論上はどのようにすべきかを考え、次に理論と現実世界を対応させて現実性を追加して実行可能な形を明らかにした上でそれを実行に移すというものであり、7つのステージに区分される (Checkland, 1994)。

このSSMを、地層処分システム概念についての合意形成に向けた話し合いを進める際の具体的な方法論として適用してみると、7つのステージは以下の図5.3.2-2のように進めていくことになる。

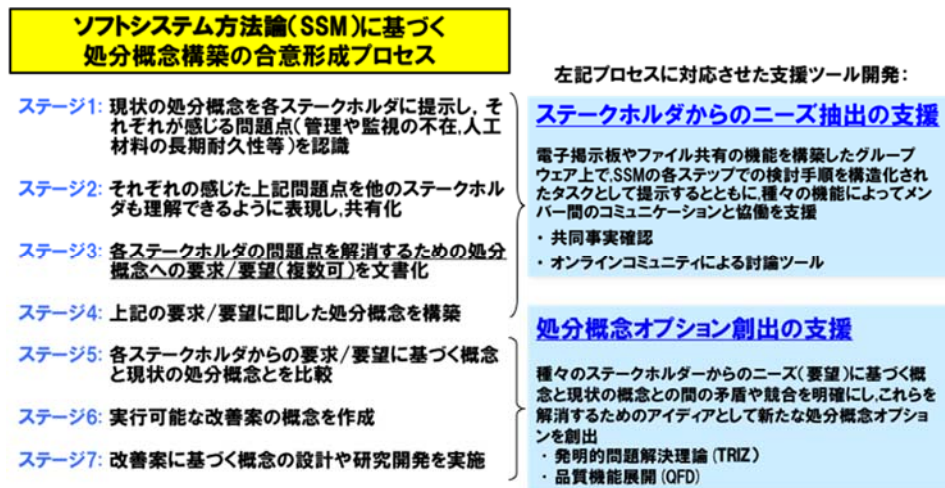


図5.3.2-2 SSMに基づく処分概念構築の合意形成プロセスと必要な支援手法の提示

上記7つのステージからなるSSMの実施手順(図5.3.2-2)に即した支援手法の検討を以下に示す。

① ステージ1~4における支援手法の検討(ステークホルダからのニーズ抽出の支援)

ステージ1~4における活動のねらいは、合意することのできる地層処分概念に対するステークホルダからのニーズを抽出することであり、そのために、ステージ1では、まず現状の処分概念を各ステークホルダに提示し、それぞれが感じる問題点(管理や監視の不在、人工材料の長期耐久性等)を把握する。ステージ2~4では、それぞれの感じた上記問題点を他のステークホルダも理解できるように表現し、要求/要望に即した処分概念として共有化する必要がある。各ステークホルダの思い違いや知識のバイアス等を揃える必要がある。地層処分の検討においては科学的情報が重要な役割を果たすが、一般に異なる認識や利害関心を持つステークホルダがいる場合には、それぞれ自らの利害関心に適う科学的情報を選択的に利用するため、人間や組織として意見や利害が対立するだけでなく、科学的情報そのものについての対立が起こり、納得・合意がなかなか得られないことが想定される。このため、地層処分に関わる科学的情報と(原子力)政策、地層処分に関わる科学者・専門家と非専門家を含むステークホルダとの関係などを再構築する必要に迫られる。このような問題解決の対策の一つとして、「共同事実確認」(Joint Fact-Finding)という取組みがこれまで実践されている。共同事実確認とは、現時点で利用しうる科学的情報(best available scientific information)に基づき、ステークホルダとの対話において、多様な、時には結論が対立する科学的情報を吟味し、背後にある前提条件、モデル、感度分析等を含めて公開したうえで、ステークホルダがある程度納得できる科学的情報と、現在の科学の限界を整理することで、社会的意思決定をできるだけ科学的情報に基づくものとする取組みである(IJFF, 2014)。

また、議論の過程においては、異なる職業や年齢等で構成される幅広いステークホルダの参加を考慮に入れる必要があることから、オンラインでの議論も想定し、複数の関係者が同じ図や表現を眺めつつコミュニケーションを行い、多様な視点から問題状況から切り出すことなども想定される。このため、効果的かつ効率的に議論するための「オンラインコミュニティによる討論ツール」として、一般的なグループウェア(コンピュータネットワークを活用した情報共有のためのシステムソフトウェア)を用いた支援ツールにより実現可能と考えられる。

② ステージ5～7における支援手法の検討（合意することのできる地層処分のシステム概念を創出するうえでの支援法）

ステージ5～7においては、既往の地層処分のシステム概念をベースに、ステークホルダの意向やニーズを汲み入れ、合意することのできる概念の改善もしくは代替となる新たな創出案を提示することが重要となる。特に、ここでの新たな概念の創造性や柔軟性が合意形成に向けた取り組みの成否をわけることも少なくなく、そのため鍵となる要素としては、

- ステークホルダのニーズを取り入れた新たな概念オプションの創出と、
- それをベースにステークホルダとの合意形成に向けた議論の効果的な運用に資する手法の提示である。このうち前者については、新たな概念を創出する創造的な問題解決を支援する手法として、「発明的問題解決理論」(TRIZ)と「品質機能展開」(QFD: Quality Function Deployment)が挙げられる。一方、後者の取り組みについては、①でも取り上げた「オンラインコミュニティによる討論ツール」が有効である。また、合意形成に向けた議論の過程で得られるステークホルダの処分概念に対する意見・態度の変容の記録を基に傾向分析を行い、その結果を基に「マルチエージェントシミュレーション」モデルを構築することができる。このモデルを用いたシミュレーションにより、異なる新たな概念に対して導き出されるかもしれない代替的な結論や意見形成の経路等について予測的な知見を得ることが可能となり、合意形成に向けた議論を継続していく上で、ステークホルダに都度提示する概念の絞り込みなどの効率的な運営に資することができる。

以上、上記の①と②で取り上げた、「共同事実確認」、「オンラインコミュニティによる討論ツール」、「発明的問題解決理論」、「品質機能展開」、「マルチエージェントシミュレーション」それぞれの手法についての概要を以下に示す。

(2) ステークホルダからのニーズ抽出の支援手法

1) 共同事実確認(Joint Fact-Finding)

「共同事実確認」とは、ほぼ全ての当事者が納得できる「エビデンス(根拠)」を、議論の当事者たちが、科学者・専門家等との協力によって探索・形成する議論の方法論である(IJFF, 2014)。一般に、ステークホルダがその主張の根拠として異なる科学的な情報や専門家の意見をそれぞれ持ち寄ることで、議論が噛み合わずに混迷するという事態が生じるが、それに対応するため、1980年代より、「Joint Fact-Finding (共同事実確認)」という概念が米国では提唱された(Ozawa and Susskind, 1985)。

政策、計画、規制、事業、未来予測などの検討において、エビデンスを参照するとき、参照するエビデンスの内容や範囲について異なる当事者たちが異なる見解を示している場合、あるいはそのような状況が事前に想定される場合に、共同事実確認を実施することができる。

共同事実確認によって、当事者たちが納得できるエビデンスを特定・整理することができ、結果として、その後の議論や判断がスムーズになる。逆に、このような作業を行わないと、望ましい政策等を議論すべき場において、何が正しいエビデンスなのか、誰が正しいエビデンスの提供者なのか、に関する論争に陥ってしまう危険がある。

2) オンラインコミュニティによる討論ツール

図5.3.2-2のステージ2～4では、議論を効果的かつ効率的に行うために、オンラインによるコミュニティ討論が想定される。このような支援ツールとして用いられるグループウェアに必要な要件は、

- コミュニケーションを行うメンバーを識別し、指定のメンバーに対しメッセージを送受信できること
- 物理的に離れた場所に居るメンバー同士で使用できること
- メッセージを蓄積し、管理ができること
- ツールの使用者に特別な作業負担をかけることなく使用できること
- 情報に対するセキュリティを確保すること

これらを考慮すると、フリーウェアである「XOOPS」(<https://xoops.org/>)が適切なグループウェアとして選定できる。なお、XOOPS（ズープス、“eXtensible Object Oriented Portal System”）は、ポータルシステムとして開発されたコンテンツ管理システム²⁾(CMS)の名称である。XOOPSはポータルシステムとして開発が始められたが、現在はWebアプリケーションプラットフォームとして発展しており、機能拡張の実装においてオブジェクト指向の考え方を適用した最初の頃のCMSの一つとなっている。

(3) ステークホルダのニーズを取り入れた新たな概念創出に向けた支援手法

ここでは、「発明的問題解決理論 (TRIZ)」と「品質機能展開 (QFD: Quality Function Deployment)」の概要を以下に示す。

1) 発明的問題解決理論 (TRIZ)

「発明的問題解決理論 (TRIZ)」とは、旧ソ連海軍の特許審査官であったアルトシューラー (G. Altshuller) によって提唱された二つの矛盾するパラメータ (トレードオフが必要な関係) の解決策を探るうえでの支援手法である。アルトシューラーは異なる分野・課題における多数の特許に類似の解決策が繰り返し適用されていることに着目し、膨大な数の特許案件の分析を行い、そのうち約3%の独創的な解決策から類似パターンを抽出し、ほかの発明に応用できるように、「分割」「非対称」などの汎用性のある40の原理 (図5.3.2-3参照) にまとめた。これは「発明的問題解決理論」と呼ばれ、発明や問題解決の定石として体系化されている。この手法の特徴は妥協点を探るものではなく、新たな解決案を創出する方向性 (ヒント) を与えてくれるものである。なおTRIZとはロシア語の「発明的問題解決の理論」の頭文字である。

2) Webコンテンツを構成するテキストや画像などのデジタルコンテンツを統合・体系的に管理し、配信など必要な処理を行うシステムの総称

40の発明原理(解決の糸口)

1.分割 2.除去 3.局所性 4.非対称 5.組み合わせ 6.汎用性 7.入れ子 8.つりあい 9.先取り反作用 10.先取作用 11.事前保護 12.等ポテンシャル 13.逆発想 14.曲面 15.ダイナミック性 16.アバウト 17.他次元移行 18.機械的振動 19.周期的作用 20.連続性 21.高速実行 22.災い転じて福となす 23.フィードバック 24.仲介 25.セルフサービス 26.代替 27.高価な長寿命より安価な短寿命 28.機械的システム代替 29.流体利用 30.薄膜利用 31.多孔質利用 32.変色利用 33.均質性 34.排除/再生 35.パラメータ変更 36.相変化 37.熱膨張 38.高濃度酸素利用 39.不活性雰囲気利用 40.複合材料

工学的矛盾マトリクス

- 特許に現われる各々の工学的矛盾が、それぞれどの発明原理を用いて解決されているかを調査し、この作業において工学的矛盾は縦横39のマトリクスに整理
- 縦軸に示される「改良する特性」と横軸に示される「悪化する特性」により表わされる39の汎用パラメータの交点には、工学的矛盾問題の解消に利用された発明原理がその頻度に従い最大4つまで記入

(一部抜粋) 対立するパラメータ(特性)

対立項目	24 情報の損失	27 信頼性	32 製造性	33 使いやすさ	34 軽便性	35 通気性	36 表面の粗さ	39 生産性
24 情報の損失		10 28	32	27 22	-	-	-	13 23
27 信頼性	10 28		-	27 17 40	1 11	13 35 8 24	13 35 1	1 35 29 38
32 製造性	32 24 18 16	-		2 5 13 16	35 1 11 9	2 13 15	27 26 1	35 1 10 28
33 使いやすさ	4 10 27 22	17 27 8 40	2 5 12		12 26 1 32	15 34 1 16	32 26 12 17	15 1 28
34 軽便性	-	11 10 1 16	1 35 11 10	1 12 26 15		7 1 4 16	35 1 13 11	1 32 10
35 通気性	-	35 13 8 24	1 13 31	15 34 1 16	1 16 7 4		15 29 37 28	35 28 6 37
36 表面の粗さ	-	13 35 1	27 26 1 13	27 9 26 24	1 13 28 37	29 15		12 17 28
39 生産性	13 15 23	1 35 10 38	35 28 2 24	1 28 7 19	1 32 10 25	1 35 28 37	12 17 28 24	

マトリクス中の太字番号は上記発明原理の番号に相当

図5.3.2-3 発明的問題解決理論の工学的矛盾マトリクス

一般に、図5.3.2-3の工学的矛盾マトリクスにあるように、地層処分概念に対してステークホルダのニーズ（懸念への対処などの要求：改良するパラメータ）を取り込もうとすると、たいていは概念を構成するいくつかの機能（悪化するパラメータ）に競合や矛盾が生じ、その結果、概念の合意形成を行う過程において支障をきたすことになる。上記の「発明的問題解決理論（TRIZ）」は、このような競合・矛盾関係を解消し、両者が歩み寄れる調停としての新たな概念を創出するうえで有効な解決案の方向性（ヒント）をマトリクスの中から与えてくれる。地層処分概念の合意形成の諸過程の中で「競合あるいは矛盾する意見の調停」は極めて重要な意味を持つものであり、このような調停にあたっては、競合や矛盾を解消し得るような新たな処分概念オプションの創出が期待されることとなる。

2) 品質機能展開 (QFD)

品質機能展開 (QFD: Quality Function Deployment) とは、顧客（ここではステークホルダ）のニーズや期待を整理し、技術的にどうすれば、顧客の要望する品質レベルを確保することができ、顧客に喜んでもらえるかを明確にする方法である（たとえば水野・赤尾, 1978）。一般に、放射性廃棄物に馴染みのないステークホルダにとって、地層処分は程度の差こそあれ未知の得体の知れない概念であることから、その懸念への対処などの要求は多種多様であり、また潜在的な形での言い方や表現、クレームといった形態をとる場合もある。本サブプロジェクトでは、これら言語情報を含む幅広い表現を拾い集め、類似度によって集約しながら、それぞれに関係する要求や要望などのニーズを要求品質（ここでは、地層処分概念の科学的・社会倫理的な設計因子）に結びつけ階層構造的に整理するための手法として用いている。その展開において基本となるのが、顧客（ステークホルダ）のニーズを明確化していく「要求品質（要求概念）」と、その要求品質を実現していくために具体的な「品質特性（地層処分概念の技術的・社会倫理的な設計因子）」へ変換していくための「品質表」（図5.3.2-4参照）である。なお、図の表の縦軸に相当する「要求品質（要求概念）」は、顧客（ステークホルダ）の製品・サービス（地層処分概念）に対するニーズを「生の声」から把握することによって得ら

れる。



要求概念 (品質) と設計因子をそれぞれ比較できるようにマトリクスを用いて、すべての要求品質と設計因子の組み合わせにおける関係性を確認

図5.3.2-4 品質機能展開に用いる品質表マトリクスの事例 (日本原子力研究開発機構, 2017)

(4) ステークホルダ間の合意形成に向け議論の効果的な運用手法

1) マルチエージェントシミュレーション

マルチエージェントシミュレーションは、自然科学分野にみられるような現実を模擬するシミュレーションではなく、非一様な行動モデルを持つ行動主体 (人間や組織を単位とする個別のエージェントとして表現) が相互に作用することによって様々な社会現象を生み出すシミュレーションを指す。マルチエージェントシミュレーションを、実社会に適用可能な社会システムや制度を創造する手段として用いるには、個々のエージェントには、現実の人間行動の再現性が高い水準で求められ、そのためには、実際の問題環境に接近して人間の振る舞いを観察し、人間の行動を理解・解釈し、計算モデル化するための技術と方法論が重要となる。

たとえば、二次元のある視軸に沿って構成される複数の概念オプションを提示しながら、各ステークホルダの選好の対象がどのオプションに位置するかを議論の段階ごとに集計し、その都度どの位置にそれぞれ何人の参加者が含まれるかを集計した意見分布ベクトルを生成することにより、参加者集団の選好の傾向を数学的に把握することができる。この傾向を基にマルチエージェントモデルを作成し、様々な概念オプションについてのモンテカルロシミュレーションを行うことによって、新たに提示する異なる概念オプションに対して導き出されるかもしれない当該ステークホルダの選好の傾向を予め把握することが可能となる。この結果により、合意形成に向けステークホルダに都度提示する概念オプションの絞り込みなどの議論の効率的な運営に資することが期待できる。

5.3.3 合意形成の促進に資するモニタリング技術等の開発

地層処分計画に関わるステークホルダは、特に処分計画の段階ごとに次のステップに移行すべきか

どうかについての意思決定に何らかの形で関与することになる。意思決定者が認識するか否かに拘らず、あらゆる意思決定には必ず「不測の事態」の生ずる可能性を伴う。この可能性を排除してしまうか計画に明示的に取り込むかは政策あるいはプロジェクト管理上の選択肢となる。前者の場合、不測の事態が実際に生じた場合のその場しのぎの対応は計画全体についての確信の低下や責任主体に対する不信を招く可能性がある。このため「可逆性」は、先行する意思決定を進んで再評価し常に疑問を持ち続けるような態度に根ざすものであり、必要に応じて、意思決定の見直しや計画変更を過度な負担を伴わずに実施できるよう、処分事業の柔軟性を最大限に確保することが重要となる。また、廃棄物が処分場に埋設された後においても、「可逆性」を確保するためには、安全な管理が合理的に継続される範囲内において、処分場の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（「回収可能性」）を維持しておく必要がある。

このように、計画の「可逆性」や廃棄物の「回収可能性」の確保に関わる取組みは、地層処分計画の意思決定に関与するステークホルダにとっては、決して後戻りできない状態に至ることはないという安心感を与え、意思決定を行ううえでの負担が軽減される。このため、5.2で述べたように、「可逆性」や「回収可能性」の確保は、ステークホルダが地層処分という概念を受け入れるうえで、「科学・技術的根拠の提示」に基づく評価の限界を補い、「概念構築過程での意思決定プロセスの公正性確保」に至るための鍵となる境界領域の一つと位置付けられている。また、許認可等の事前評価の妥当性を確認（処分場の閉鎖後も含む）するための「モニタリング」についても、一旦処分した廃棄物の異常を検知することができることから、上記の境界領域の一つと考えられる。

以下に、計画の「可逆性」、廃棄物の「回収可能性」、「モニタリング」の各取組みの定義や役割等について示す。

(1) 計画の可逆性

可逆性 (reversibility) とは、処分事業の段階的な進展において、一旦下した意思決定を差し戻すことのできる可能性を原則として保持すること（たとえばOECD/NAE, 2012）である。

可逆性を満足するための最善の手段としては、計画に段階的な意思決定プロセスを採用することが挙げられる。そのためには、処分事業の諸段階（図5.3.3-1参照）において、決定された計画の執行を猶予する期間 (hold points) を設け、幅広い人々の熟慮を促すとともに、予め定められた基準に照らして決定を差し戻すか否かの判断が為され、その結果が記録される必要がある。

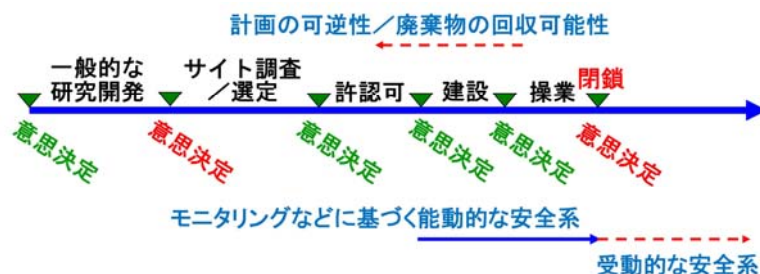


図5.3.3-1 処分事業の諸段階及び対応する意思決定の例（日本原子力研究開発機構，2014）

(2) 廃棄物の回収可能性

回収可能性 (retrievability) とは、処分場に定置した廃棄物あるいは廃棄物パッケージ全体（廃棄体）を回収することのできる可能性を原則として保持すること（必要であれば廃棄物を回収できる

ような準備をしておくこと) である (たとえば OECD/NEA, 2012)。

閉鎖後長期の安全性は、モニタリングを含む制度的管理に依存するものであってはならず、回収可能性は、安全性の立証が不十分な処分事業をとりあえず進める際の言い訳に使われてはならない。回収可能性について検討を進めている各国において、共通した考え方は以下のとおりである。

- 動機：①将来の様々な可能性に対する謙虚で開かれた姿勢を保つ、②安全性に対する付加的な保証の準備、③公衆の持つ「後戻りできない状況への恐怖」への配慮
- 技術的要件：将来の廃棄物の回収を容易にするための特段の技術を求めるものではなく、将来世代による廃棄物の可能性が原理的に可能であること、そして、回収を妨げるような不必要な障害が排除されていることを求めるものである

すべての地層処分システムにおける放射性物質の閉じ込めと限られた領域内での保持は、廃棄物の回収可能性の観点から好ましいものとなる。このため、処分場閉鎖後に制度的管理が終了した後も容器が健全な期間内の廃棄物の回収は技術的に可能であり、また、それよりもさらに遠い将来においてすら廃棄物の回収は不可能ではない。なお回収可能性は、on/offの属性ではなく、程度問題であり、そのために必要なリソースや付随するリスクは処分事業の進展とともに増大する (OECD/NEA, 2012) という認識を広く共有しておく必要がある。

(3) 閉鎖後モニタリング

地層処分の概念は、人間による関与を必要としない受動的な安全系で構成されることから、処分場閉鎖後のモニタリングは、技術的な観点からは不要であるが、諸外国ではステークホルダを含め一般の人々の不安を払拭することに資するよう念のため実施するというロジックで用いられている。しかしながら、導入するにあたっては、閉鎖後モニタリングそのものの目標が明確ではないことから、その意義が曖昧なまま始まり、また意義が不明であるが故に完了期間を設定できないというモラトリアムに到る可能性がある。そこで、このような状況を避けるためには、むしろ、「閉鎖後モニタリングの意義を明確にするとともに、一定期間経過後にはそれが不要になることも併せて説明する」という名分が必要と考えられる。

ここでは処分システムの挙動を、

- ① 初期不良や過渡的变化に伴う故障の生じ得る期間 (数百年間)
- ② 地層処分システムが定常的な状態にある期間 (数十万年間)
- ③ 人工材料の変質や地質環境条件の変遷によってバリア機能が低下する期間 (数十万年後以降)

という三つの期間に区分し、①の期間においては、複数のプロセスのVariability (可変性) や Uncertainty (不確実性) が相互に影響を及ぼしながら機能共鳴によって処分システムが予想しなかった極端な状況に到る可能性を指摘し、そのような可能性を種々のモニタリング手法によって注意深く監視し、システムが②の定常的な状態へと推移することを確認するという積極的な技術的位置づけを与える。また、これにより、②の状況では処分システムが安定な状態となり、その状態での核種移行率や想定し得る擾乱の影響が十分に小さいことを安全評価で立証可能であることを説明した上で、モニタリングや可逆性・回収可能性が不要となることを明確に主張することが有効と考えられる。

上記に基づき、閉鎖後モニタリングと可逆性・回収可能性に対して期間限定の積極的な役割を与える方針を採ることとした場合、閉鎖後モニタリングに対する要件としては、前述した種々のプロセスについての内的要因及び外的要因のVariabilityとUncertaintyのそれぞれについて測定・監視するこ

との可能なモニタリングシステムを数百年にわたって保持するとともに、可逆性・回収可能性についても同程度の期間にわたって保持することの可能な処分システムとすることが求められる。しかしながら、上述したモニタリングや可逆性・回収可能性の要求は、処分事業における大きな制約になるとともに、費用の面でも将来世代にまで負担を強いるものとなる可能性がある。

そこで、代替的かつ現実的なアプローチとして、処分場施設内の廃棄体の定置領域とは離れた位置にダミー廃棄体を定置した処分施設と同等仕様の処分実証施設エリアを設け、人為的な擾乱を与えてシステムの応答を監視（Activeモニタリング）することにより、比較的短期のうちに種々の機能共鳴に到る可能性の有無を把握することができる。また対策の必要なものについては同施設において所要の措置を試行し、その有効性を検証することができる。このタイプのモニタリングとして、平成25年度の検討では、「Activeモニタリング」に加え、「危険予知型モニタリングシステム」や「モニタリング情報の可視化」といった方法を取り上げた（日本原子力研究開発機構，2014）。

Activeモニタリングの具体化については、処分場の閉鎖前後の処分システムにおいて生ずる多様なプロセスに着目し、その変動（Variability）や不確実性（Uncertainty）があるパターンの時間的順序や空間的配置で組み合わせられることによって生ずる機能共鳴的な現象が予想外の状態に発展する可能性を把握することから始まる。方法としては、機能共鳴分析法（FRAM法：Functional Resonance Analysis Method）（Hollnagel, 2012）を用いることにより、機能共鳴的な状態に到る複数の環境変化を予め把握することができる。その状態を敢えて処分実証施設エリアのシステムに人為的に与え、その応答を観察するというProactiveなモニタリングを行うことが有効である。そのActiveモニタリングの事例として、平成25年度の検討に示した概念（模擬廃棄体を定置した処分実証施設）を図5.3.3-2に示す。ここでは、種々の擾乱を所定の空間的配置及び時間的順序で組み合わせることにより、上述の機能共鳴に至るシーケンスを人為的に模擬することを可能としている。

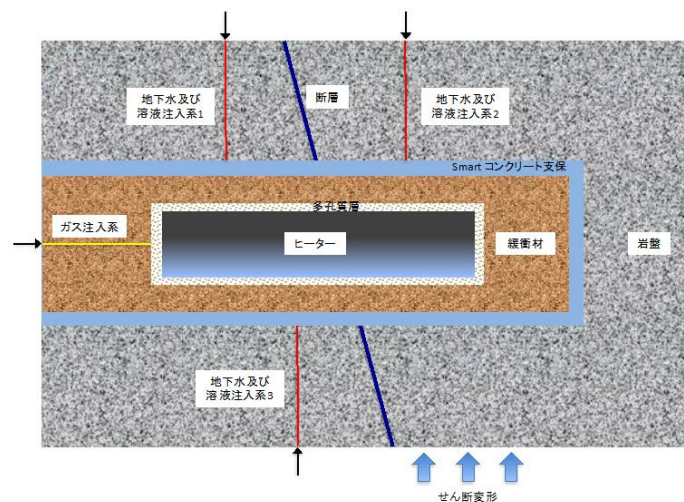


図 5.3.3-2 Active モニタリングのための処分実証施設の概念例（日本原子力研究開発機構，2014）

このような実証施設におけるActiveモニタリングに必要な技術としては、個別にはすでに既存のものがほとんど考えられるが、いくつかの要素については新たな開発が必要となる（表5.3.3-1参照）。また施設全体として、多数のモードの変遷を同時に進行させるような柔軟な運用を可能とするシステムの設計が課題になるものと考えられる。さらに、試験作業従事者の安全を確保するととも

に、使用する種々の溶液や大規模変形等の影響を施設内の一定の領域内に制限し、実際の処分場施設等への影響を回避する安全対策の具体化も開発上の課題となる。

表5.3.3-1 Activeモニタリングに関する開発が必要な技術（日本原子力研究開発機構，2014）

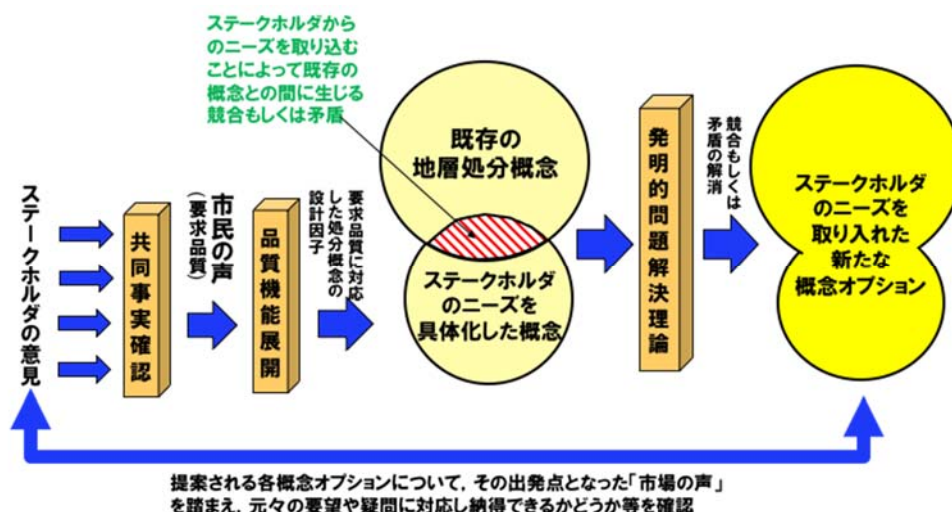
技術開発要素	主な開発項目
個別の技術要素の開発	<ul style="list-style-type: none"> 断層に沿ったせん断変形の模擬手法 Smart コンクリート³による緩衝材と岩盤境界の変形や応力の測定・診断 その他各種の測定技術
全体システム的设计	<ul style="list-style-type: none"> 多数のモードを同時に進行させるような柔軟な運用を可能とするシステム的设计
安全対策	<ul style="list-style-type: none"> 試験作業員の安全を確保するとともに、使用する種々の溶液や大規模変形等の影響を施設内の一定の領域内に制限し実際の処分施設等への影響を回避する安全対策の具体化

5.4 模擬ステークホルダによる概念構築の試行

5.4.1 概要

本項では、SSMの実施手順（図5.3.2-2参照）に基づき5.3で提示した各手法を活用しながら、いわゆる非専門家である一般市民を含む模擬ステークホルダが抱く地層処分に対するニーズ（要望など）を取り入れ、合意することのできる新たな処分概念オプション事例の構築を試みた。

まず、模擬ステークホルダに対して種々の政策や技術のオプション間のリスクトレードオフなどに焦点をあてた「共同事実確認」（5.3.2項(2)1参照）を行い、地層処分に対する懸念や要求（要望）を「市場の声」として抽出した。次に、この「市場の声」に基づく要求品質と地層処分システム概念の技術的/社会的因子を関連づけるための「品質機能展開」（5.3.2項(2)2参照）に関する協働を行った。



³ ピエゾケーブルなどを構造体に埋め込むことにより、力やひずみに比例した物理量（自己診断的にひび割れの発生など）が検知できるコンクリート

その結果、市場の声に基づき抽出した要求概念（品質）と処分概念の設計因子とをそれぞれ比較検討ができるよう、品質機能展開のマトリクス（5.3.2項(3)2参照）による「品質表」により対応付けた。その結果、品質表の作成を通じ、要求品質（ステークホルダのニーズ）を実現する概念を、既存の処分概念を適用するとすると、たいていの場合矛盾点や競合点が生じる。このような要求品質を実現する上での設計上の課題（矛盾）を特定し、それを克服するために発明的問題解決理論（TRIZ）（5.3.2項(3)1参照）を活用しながら新たな候補概念のオプションを提案した（表5.4.1-1参照）。

表5.4.1-1 要求品質に応える処分概念の提案例（日本原子力研究開発機構，2017）

要求品質	要求品質に対応する設計因子を考慮した候補オプション例
<ul style="list-style-type: none"> •可逆性や回収可能性を確保すべき •保管・貯蔵の維持/継続 •地層処分の安全性が見えるようにすべき •... 	<p>【地下施設等：〈1〉 CARE型地下施設】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 廃棄物の回収可能性を一定期間保持しその間に廃棄物の状態を監視し続けることの可能なCARE型の地下施設概念
<ul style="list-style-type: none"> • 地層処分の安全性が見えるようにすべき • 安全性に確信が持てない • ... 	<p>【安全確認・監視：〈2〉 処分場の見える化と情報ポータル】</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地下の廃棄物や人工バリアシステム及び周辺の岩盤や地下水流動・水質等の情報を多角的に可視化し常時公開・発信するポータル
<ul style="list-style-type: none"> • 処分場の価値を高めることを考えるべき • 社会的公正さを重視した意思決定プロセスが必要 • コミュニケーションや教育が重要 • ... 	<p>【社会的特性：〈3〉 市民参加と社会的公正さ】</p> <p>地上施設には、セキュリティを確保しつつ多様なステークホルダが来場し、地層処分事業の進め方や安全確認の方法等について公衆参加で議論するフォーラムや関連する科学・技術的知識を学ぶ教育センターを設置（他のプロジェクト（CCSや遺伝子組み換え技術等）についても同様の場を提供する「市民参加と合意形成の殿堂」として地域における施設の価値を高める）</p>

これらの結果を踏まえ、非専門家と専門家で構成する模擬ステークホルダによるワークショップを開催し、より多くのステークホルダの合意を得ることのできるような「可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム」の概念を試行的に具体化した（5.4.2項参照）。また、このワークショップにおける数度の対話によって生じる各参加者の意見や態度の変容についての傾向分析を行い、提案される各概念オプションについて、その出発点となった「市場の声」を踏まえ、元々の要望や疑問に対応し納得できるものかどうか等の結果から「マルチエージェントモデル」を作成し、そのシミュレーションを別途行うことにより、異なる類型に属するメンバーによって導き出されるかもしれない代替的な結論や意見形成の経路等について予測的な知見を得た（5.3.2項(4)参照）。

なお、これらの取り組みにおいては、これまでの成果を活用し、非専門家を含む多様なステークホルダ間の合意を得つつ処分概念構築を行う上での課題となる以下の事項を考慮に入れ、合意することのできる処分概念構築の開発に資することとした。

- 地層処分場の概念に関する議論に先立ち、もしくはこれと並行して、原子力発電や核燃料サイクル等に関する政策オプション、長期貯蔵や他の代替的対策選択の可否といった事項に関する知識が共有されること
- 非専門家を含む多様なステークホルダが放射性廃棄物対策に求める要件には、概念的あるいは感覚的なものも多く含まれ、専門家が処分場概念構築や設計において検討対象とする技術的因子とは大きく異なる。このため、これらの要件と技術的因子とを関連づけること

上記の目的を達成するため、図5.4.1-1の実施フローに沿って、概念構築の試行を行った。

5.4.2 処分場概念構築ワークショップでの議論

模擬ステークホルダの参加者として、学生、NPO関係者、地層処分以外の専門家、地層処分専門家で構成した。このワークショップの目的は、

- 「市場の声」に関連付けて、表5.4.1-1に示した概念オプション（〈1〉 CARE型地下施設概念、〈2〉 処分場の見える化、〈3〉 市民参加と合意形成）それぞれについて、関連する技術的・社会的な観点から参加者による意見収集を行い、合意することのできる概念を補強すること
- 対策としての地層処分に加え、新たな概念の処分技術や制度・政策に関わる基本的知識や客観的事実を十分共有したうえで議論すること
- 最終的な目標として、新たな概念オプションを実現する上で何が明確となっておりどこに不確実性が残されているかについて参加者が共通に認識（可能であればその解決法についても）すること

としている。以下では、「〈1〉 CARE型地下施設概念」に焦点をあて、ワークショップでの概念補強の検討経緯を示す。

(1) CARE型の処分概念のメリットとデメリット

「CARE型の処分概念」とは、Masuda et al. (2004) によって提案され、一般に100年以上の長期にわたる事業段階において、計画の変遷とともに変化し得る社会的な要請などに対して柔軟に対応できる概念オプションの一つである（図5.4.2-1参照）。これは、最終処分への意思決定がなされるまでの期間にわたり、可逆性と回収可能性の保証と、廃棄物の状態の直接監視により、ステークホルダが何らかの異常発生への懸念や不安を容易に解消することが可能となり、地域社会における社会的受容性の醸成を獲得するという利点を有する。一方で、結果的に地下の処分場施設の空間を最終的に閉鎖するまで開放しつづけることから、地下深部が本来有する所期の環境条件への回帰が脅かされ、結果として閉鎖後のシステムの長期安全性や空洞の安定性に関わるリスクが増加する。また、処分場施設への意図的な人間侵入に対する可能性も高まることから、従来一般的な坑道閉鎖型の地層処分概念と比べ、閉鎖前段階の安全性確保や閉鎖後の長期性能への配慮が重要となる。このため、坑道を開放し続けることによって生じるこれら矛盾するデメリットの問題の解決策についてワークショップにて検討を行った。

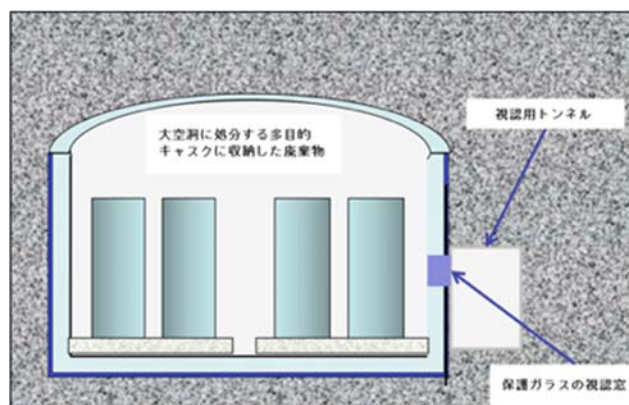


図5.4.2-1 CARE型の地層処分概念

(2) 「処分場の見える化」技術の導入（概念補強となるオプションの創出）

その結果、計画の可逆性や廃棄物の回収可能性を確保しつつも、「処分場の見える化」技術を取り入れ、従来のCARE型概念に新たな工夫を加えた候補オプションを創出することが望ましいという結論となった。「処分場の見える化」技術を導入することの問題意識は、「見えないことへの不安」に対する工夫を行うことにある。地層処分概念そのものは、地下深部に廃棄物を閉じ込め、人間の生活圏から遠ざけることにより、例えば放射能の直接的影響から防護を図ることを意図している。そのため（特に長期安全性の観点から）廃棄物を地下に定置後直ちに埋め戻す必要がある。しかし、地下に閉じ込める概念では、見ることのできない放射線や廃棄物の管理は事業者任せられ、一般の市民はその状況を直接確認することができないため、上記(1)で述べたように多くのステークホルダは安全性への懸念や不安を感じる。この問題を解決するために、ワークショップでは、発明的問題決定理論（TRIZ）などを活用しながら廃棄物を直観できないことに対する解決策の一つとして「見える化技術」を導入した。その方策としては、廃棄体を取り巻く緩衝材について、ベントナイトの代わりにレジジン（樹脂）を用いることにより、埋設する廃棄体を透かして見ることのできる透明の処分場概念を提案することとなった。また、廃棄体からの放射線についても直接監視できるよう、その可視化の方法として、レジジンの緩衝材中に無機シンチレータを埋め込む概念とした。さらに埋設した廃棄体を含む人工バリアのシステム状況（温度、水分飽和度等）のモニタリングデータを常時リアルタイムで多元的に発信できる工夫も加えている。

一方で、レジジン（樹脂）を緩衝材として用いる概念では、オーバーパックスの物理的保護の役割において、ベントナイトと同等もしくはそれを上回る性能を確保することが期待できるが、オーバーパックス破損後に期待されるバリア機能と同等の役割を果たすことについては、これまでベントナイト緩衝材に対して行ってきた様々な同等の研究開発を実施し確認する必要がある。しかしながら、ナチュラル・アナログとして自然界において何千万年という時間スケールにわたって繊細な有機構造体さえも保存している「虫入り琥珀」に見られる事実から、レジジン（樹脂）による閉じ込め機能を有する概念の実現可能性を説明することができる（図5.4.2-2参照）。



図5.4.2-2 レジン（樹脂）と昆虫類を内包した虫入り琥珀（日本原子力研究開発機構，2017）

琥珀はレジジン（樹脂）が地中で固化してできるものであり、その内部に昆虫や植物の葉などが混入しているものも多く発見され、混入した昆虫やクモ類などの状態は、図5.4.2-2に見られるように通常の化石ではあり得ないような細部までが保存されており、この事実は、レジジンが廃棄物の閉じ込め性能を証明するエビデンスとしての可能性を有しているものと結論づけられる。したがって、こ

の新たな提案概念についてステークホルダによる合意の可能性や関心が高まるのであれば、緩衝材としてレジン（樹脂）に関する研究開発の優先度が高まる。

さらに図5.4.2-3に示すように、「見える化」技術の導入によるモニタリング機能をさらに強化する手段として、空洞内の様子をテレビカメラで常時モニターを行い、その様子を地上施設のビジターセンターなどでリアルタイム放映したり、映像をWebsiteに搭載することにより、関心のある人は誰でも地下の廃棄体の状態をいつでも監視できる概念を可能としている。さらに(PEM型⁴⁾廃棄体キャスク表面に無機シンチレータ⁵⁾をコーティングすることにより、廃棄物から放出される放射線強度や放射性核種漏洩の有無や、赤外線カメラにより廃棄体表面温度も直接確認することができる概念となっている。

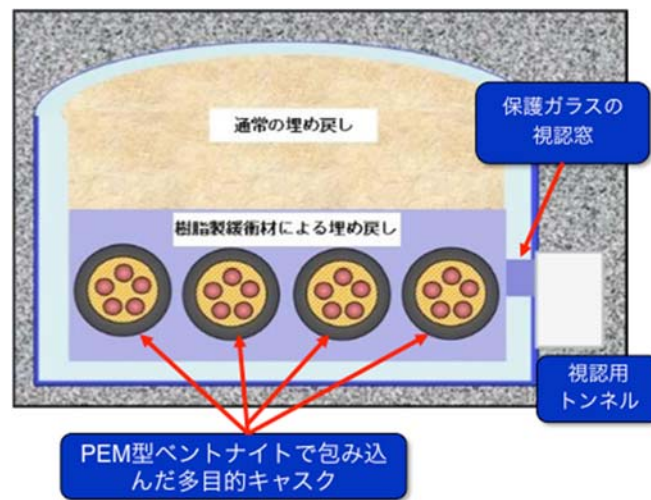


図5.4.2-3 処分場の見える化技術を取り入れたCARE型処分概念の事例（日本原子力研究開発機構，2017）

5.5 まとめ

本章「可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示」のサブプロジェクトでは、平成25年度より3つの項目（「①レジリエンス的視点に基づく地層処分システムのロバスト性概念の検討」、「②公正性に根ざした合意形成型の処分概念の構築手法の開発」、「③合意形成の促進に資するモニタリング技術等の検討・開発」）に大別して検討を行った。また、平成27年度からは成果の集約取りまとめに向け、これまでの成果をもとに、「(1)閉鎖後長期安全性に関するロバスト性の高い地層処分システム概念の構築」、「(2)受動的な安全系へ推移するまでの期間におけるレジリエンス的取り組みの具体化」、「(3)多様なステークホルダ間の合意形成に向けた協働」として検討を行った。特に、後者の「(3)多様なステークホルダ間の合意形成に向けた協働」に焦点をあて、これまでのパブリックコメント等での非専門家からの処分概念に対するニーズを「市場の声」として抽出し、それに対応する処分概念の技術的・社会的因子とを品質機能展開の手法を導入し関連付けを行った。その中

⁴⁾ “Prefabricated Engineered barrier system Module” の頭文字をとったもので、地層処分における人工バリア施工方法の1つ。地上施設において、廃棄物、オーバーバック、緩衝材等の人工バリア構成要素を専用の容器内に組立て、一体化した人工バリアシステムとして地下施設に搬送・定置することにより、地下での作業の効率化が図られる。

⁵⁾ 荷電粒子が通過するときに発光する物質（シンチレーター）に、無機質の材料（NaI(Tl)、BGO、CsI(Tl)等の無機結晶や、Ar、Xeなどのガスや液体）を用いたもの。無機結晶シンチレーターでは、荷電粒子がイオン化により、電子を価電子帯から伝導帯へと励起させる。そして電子が励起状態の伝導帯から基底状態の価電子帯へと戻るときに発光する。

で主要な市場の声に対する事例として3つの概念（CARE型地下施設概念、処分場の見える化、市民参加と合意形成）を提案し、学生や有識者による処分場概念構築ワークショップを開催し、提案概念の補強を行った。その結果、CARE型地下施設概念については、地下施設を開放している期間に応じて閉鎖後の性能に影響を与えるリスクが増大することから、2つ目の概念である処分場の見える化の技術も取り入れ、ベントナイトの代わりにレジジン（樹脂）を用いた透明のCARE型地下施設の概念を提案した。

以上を踏まえ、今後の課題として、以下の点を提示する。非専門家を含む多様なステークホルダの合意が得られる地層処分概念を提示するためには、特に概念構築過程の公正さの明示が重要であり、そのためPartnership制度など市民参加プログラムによる概念構築の枠組みを取り入れることが不可欠であることから、特にこの観点で先行している諸外国のLocal Partnership等の事例を参考に市民参加の枠組みとなる制度設計を行っていくことが肝要である。というのは、諸外国では、処分場立地プロセスにおける苦い経験の反省から、市民参加型のアプローチへの変更に至っているからである。また、最近明らかになった「主要価値類似性モデル」に基く知見に見られるように、関心の高いステークホルダの目線に立った概念構築への配慮も不可欠となることから、今後は「多様なステークホルダの要求にどれだけ歩み寄ったオプションが実現構築できるか」といった視点から新たに創出する支援技術の改良・改善を図るとともに、制約条件等を明示しながら（技術的な代替オプションが少ないと意に反して押し付けなどにとらえられるので）候補概念オプションを整備し、合意することのできる概念を創出していくことが肝要である。さらに、ステークホルダとの共同での概念構築プロセスに慣熟することを目的として、種々の異なる模擬ステークホルダを対象に多くの試行を重ね、必要に応じて概念構築の手法/支援技術へのフィードバックを図っていくことも肝要である。

参考文献

- Checkland, P. (著), Scholes, J. (著), 妹尾堅一郎(訳) (1994) : ソフト・システムズ方法論, 有斐閣.
- Hollnagel, E. (2012): FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-technical Systems, Ashgate.
- IJFF (2014): 共同事実確認のガイドライン, 共同事実確認手法を活用した政策形成過程の検討と実装, IJFF: Integrating Joint Fact-Finding into Policy-Making Processes, 2014年10月.
- 寿楽浩太(2016): 高レベル放射性廃棄物処分の「立地問題化」の問題点 - 最近の政府の政策見直しと今後のアカデミーの役割をめぐって, 学術の動向, 特集1 ◆高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策提言, 2016. 6.
- 核燃料サイクル開発機構(1999): 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次とりまとめ -, 総論レポート, JNC TN1400-99-020.
- 経済産業省 (2015) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針, 2015年5月22日.
- Longstaff et al. (2010) : Building Resilient Communities. Homeland Security Affairs, vol. 6, no. 3.
- 丸山宏, 井上克巳, 椿広計, 明石裕, 岡田仁志, 南和宏(2012): システムズ・レジリエンス, 第11回情報科学技術フォーラム, 2012年9月.
- Maruyama, H. (2013) : Towards Systems Resilience. The 1st Workshop on Systems Resilience (WSR), June, 2013.
- Masuda, S., Umeki, H., McKinley, I. G., Kawamura, H. (2004): Management with CARE, Nuclear Engineering International, 49 (604), pp. 26-29.
- 増田純男(2016): 高レベル放射性廃棄物を地下深く終う地層処分, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 2016年12月9日.
- 水野滋, 赤尾洋二(1978): 品質機能展開—全社的品質管理へのアプローチ, 日科技連出版社.
- 中谷内一也・Cvetkovich, G. (2008): リスク管理機関への信頼: SVSモデルと伝統的信頼モデルの統合, 社会心理学研究 第23巻第3号, pp. 259-268.
- 日本原子力研究開発機構(2014) : 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- 日本原子力研究開発機構(2016) : 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- 日本原子力研究開発機構(2017) : 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.
- OECD/NEA (1984) : Geological Disposal of Radioactive Waste, An Overview of the Current Status of Understanding and Development.
- OECD/NEA (2012): Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste, Considerations for National Geological Disposal Programmes, Radioactive Waste Management, ISBN 978-92-64-99169-9.

Ozawa, C.P. and Susskind, L. (松浦正浩, 渡邊倫 訳) (1985): 「科学の影響が強い政策論争のメ
ディエーション」原典: "Mediating Science-Intensive Policy Disputes" *Journal of Policy
Analysis and Management*, Vol. 5, No. 1, pp. 23-39.

USDOE (1981): Final Environmental Impact Statement, Management of Commercially Generated
Radioactive Waste, DOE/EIS-0046F.

6. 処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

6.1 目的と実施概要

1章で述べているように、「処分システム評価確証技術開発」の主たる目的は、先端科学技術を駆使した解析評価技術を開発するとともに、こうした評価技術と関連させ、地層処分に関わる意思決定プロセスにおけるシステム評価の確証性を高めていくための仕組みを備えた地層処分システム開発の方法論を構築することである。このため、システムの拡張ロバスト性概念の構築を行い、これに基づいて処分場閉鎖前から閉鎖後の長期にわたる処分場近傍（ニアフィールド）領域を中心としたシステム変遷と核種移行を評価するための先端的評価技術（第2章）、高レベル放射性廃棄物や多様な長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の共処分によるニアフィールドの影響評価技術（第3章）、及び断層発生などの過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術の開発（第4章）、可逆性と回収可能性などを考慮した処分システム概念の提示（第5章）に向けた検討をそれぞれ行っている。

これらの開発を通じ、処分実施主体が行う処分場設計や性能評価の科学技術的基盤を与え、安全裕度の定量化等に資すると同時に、安全規制の策定に対しても科学技術的基盤を提供し、地層処分技術の社会的受容性向上に貢献することが求められている。このような観点から、本章のサブプロジェクト「地層処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化」では、上記の第2章から第5章それぞれの各サブプロジェクトの成果について、

- 事業主体が行う処分場設計技術や性能評価技術の科学技術的基盤の構築
- 安全規制策定のための技術基盤の構築
- 地層処分技術の社会的受容性向上

それぞれに資することを目的に、相互の関連性を踏まえ、先端的技術等を反映した各要素技術の統合化と知識の体系化を行うための全体戦略を策定するとともにその方法論について調査・検討を行った。まずシステム評価確証技術の各要素技術の統合化に向けた全体的な枠組みを構築し、そのための統合プラットフォームを開発・改良を行ってきた。また、平成28年度までに専門家間の知識共有及びステークホルダとの対話・協働の試行を行い、その過程で得られた知見をもとに統合プラットフォームの改良を加えると同時に、段階的な技術と知識の体系化を図ってきた（日本原子力研究開発機構、2017）。

本プロジェクトで対象とする評価確証技術の要素技術の体系化と得られた知識の共有化の概念は以下の2点であり、それらを図式化したものを図6.1-1に示す。

- 専門家と非専門家を含む多様なステークホルダ間の連携の各局面における知識の生成・格納・利用等の一連のプロセスを支援するためのツールとして統合プラットフォームを構築する
- 統合プラットフォームを用いて、専門家と非専門家を含むステークホルダ間の対話と協働を試行する

特に、後者について、地層処分という一般に馴染みのない技術やシステム概念を非専門家に対してどのように周知し理解を得ていくかが課題となっている。

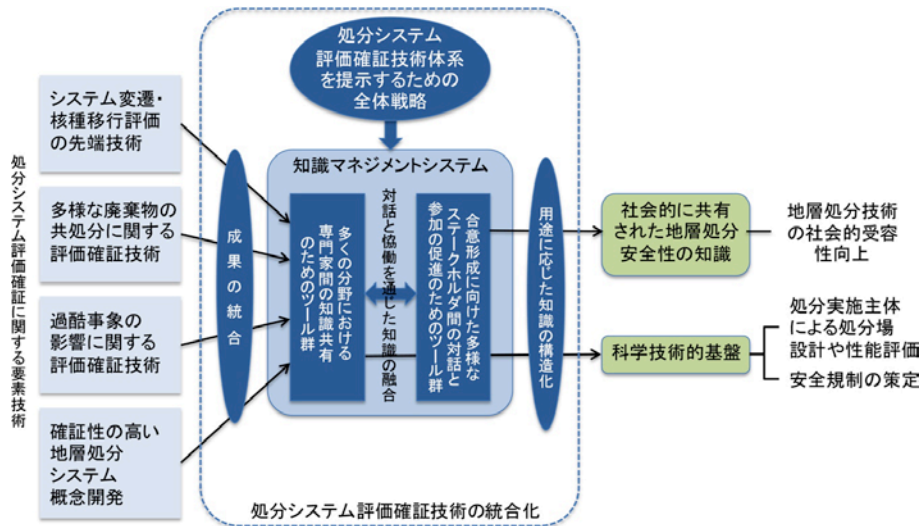


図 6.1-1 処分システム評価検証技術の統合化

6.2 処分システム評価検証技術の統合化に向けた全体的な枠組み

専門家と非専門家を含む多様なステークホルダ間の連携の各局面における知識の生成・格納・利用プロセスの一連の活動の中では、議論の経緯や判断の根拠の情報が発生することになり、それらが新たな知識として動的に更新されることになる。このように動的に作成・更新される情報の効率的な管理のためには、議論の結果と合わせて議論の経緯や判断根拠の情報を、それらの情報を作成・更新する活動の内容と適切に関連付けて管理すること、さらにそれら情報を参照・利用しやすいアクセス環境等を整備しておくことが効果的と考えられる。

そこで、各サブプロジェクトの要素技術開発で作成・更新される情報についての電子情報を効果的にリンクさせることのできるポータルサイトの構築、情報の適切な集約とポータルサイトで利用しやすい形での整理などを行うことで、情報の一元的な管理と参照・利用のための環境を整備する。また、一連の活動が終了したプロセスにおいては、静的な情報として体系的・構造的に整理しつつ見やすくアクセスしやすい形での提示を可能とするポータルサイトの機能要件や構成等の検討を行うこととした。また専門家と非専門家を含む多様なステークホルダ間の連携の各局面における「知識の生成・格納・利用プロセス」の支援においては、グループウェア¹⁾を活用し、知識データベースの統合化やツール間の情報の連携を強化することに加え、総合的に一連のプロセスを支援するツール環境を構築する。これら一連の仕組みを「統合プラットフォーム」と定義し、以下の3つの用途に集約される。

- 知識の生成と利用を円滑に行うための知識ベースの枠組みの整理
- 分野間での協働を支援するシステム利用環境の構築
- 関係者間での知識共有や分野横断的な議論の実施

1) 例えば、企業など組織内のコンピュータネットワークを活用した情報共有のための一連のシステムソフトウェア

以上を踏まえ、評価確証技術の統合化に向けた協働を行うために構築した統合プラットフォームのプロトタイプ概念を6.2.1項に示す。また、このプロトタイプをもとに統合化に向けたポータルサイトのコンテンツの検討の取組みを6.2.2項に示す。

6.2.1 評価確証技術統合化に向けた統合プラットフォームのプロトタイプ構築

統合プラットフォームのプロトタイプの構築にあたっては、専門家と非専門家を含む多様なステークホルダ間の連携の各局面における知識の生成・格納・利用等の一連のプロセスを支援する観点から、図6.2.1-1に示すように3つの要件を満たすことを目指した。

- 組織と業務の可視化
- 既往の知識の再利用
- 多面的な視点

これら要件を踏まえたプロトタイプには、議論を支援し知識を共有・統合するための「フローチャート（タスクフロー）」や「電子掲示板」といった機能や、種々のデータ・情報の視覚的な表示や関連付けに資する機能などがあげられる。

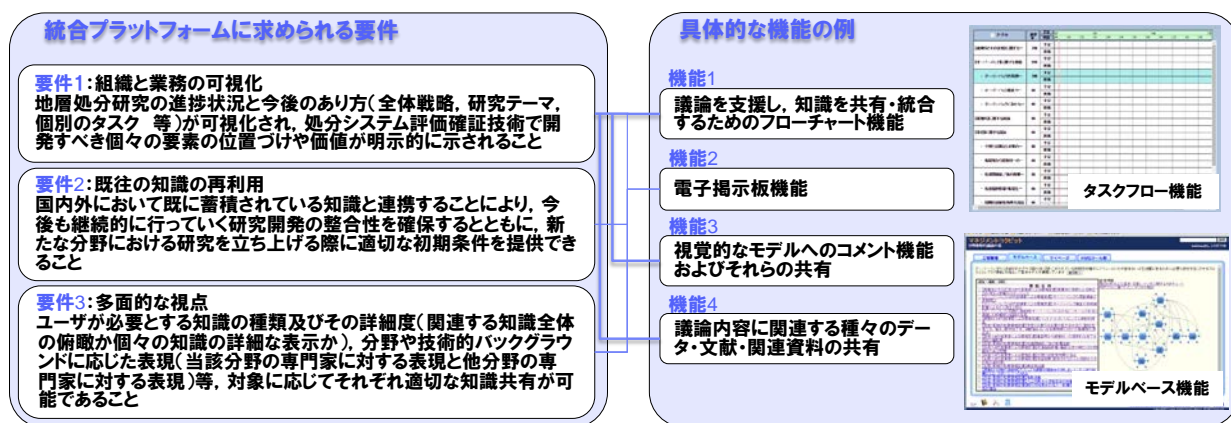


図 6.2.1-1 統合プラットフォームのプロトタイプの要件と具体的な機能の事例

この統合プラットフォームに搭載する機能をどのように用いられるかについては、例えば、外部の学識経験者を含むコミュニティを想定した場合、各課題の研究開発に従事している異なる専門家間の知識共有や協働による問題解決を行う場となり、議論の品質を確保する観点からグループウェアの一つである「電子掲示板」機能が重宝される。また関連する各タスク作業の途中成果、データ、計画及び問題点等を適宜効率的に共有するためのツールとしては、種々のツール群を管理・提供することを目的とした「マネジメントコクピット」機能により蓄積されている知識・情報を活用することになる。一方で、電子掲示板のカテゴリやフォーラムより関連する情報へ効率的にアクセスできるように外部とのリンク設定も可能である。

さらに、各サブプロジェクトで行われている個別要素技術開発間の連携を強化し、処分システム評価確証技術の全体戦略を实践する観点から、成果の可視化及び関連する情報・知識の体系化を目的とする「モデルベースシステム」機能を取り入れ、その事例として、平成25年度に本事業のサブプロジェクトSP1「ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端

的技術の開発」で検討されたFRAM法（Functional Resonance Analysis Method）²を取り上げた（図6.2.1-2）（日本原子力研究開発機構，2014）。FRAM法はリスク分析の新たな方法論で、従来のシナリオ構築手法が対象とするシステムについて暗に前提としている特性が多く、現実的なシステムでは成立しないことを指摘するとともに、その短所を補うための新しい考え方を提案する手法である。

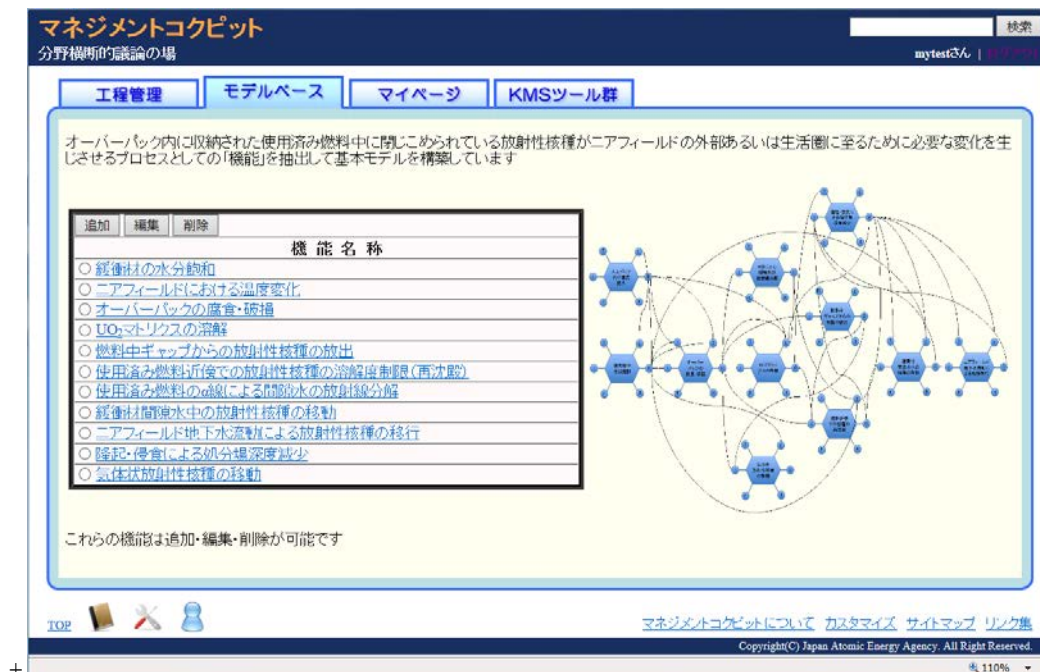


図 6.2.1-2 FRAM 法ツールを組み込んだモデルベースシステムの統合プラットフォームの画面

平成 26 年度に行った試行は、本事業のサブプロジェクト SP4「可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示」で検討する新たなモニタリング技術の提案を FRAM 法ツールを用いて試みた事例である。この検討では、サブプロジェクト SP1 と SP4 に従事している専門家同士が協働し、統合プラットフォームに組み込んだ FRAM 法のモデルベースシステムを用いて、処分坑道の閉鎖前後の処分システムにおける多様なプロセスが様々なパターンの時間的順序や空間的配置で組み合わせられる中から、予想外の状態結果に至る可能性を事故シーケンスとして抽出した。この結果から、そのような機能共鳴に到る複数の環境変化を敢えて人為的に処分実証施設に設ける模擬廃棄体を与え処分システムの応答を観察するという「Active モニタリング計画」の仕様を提案することに成功した（5.3.3 項参照）。

6.2.2 統合化に向けたポータルサイトのコンテンツの検討

本事業の各サブプロジェクト SP1 から SP4 の成果を体系的に取りまとめ、とくに非専門家向けに配慮することを目的として、統合プラットフォーム（ポータルサイトとして）のコンテンツの

²⁾ 機能共鳴分析法(Functional Resonance Analysis Method)：システムの各機能を定義して複数の機能を関係付け、それぞれの機能の出力変動の可能性を分析し、コントロール可能な変動の最大化と不可能な変動の最小化を検討することにより、個々の機能の出力変動（周波数と振幅、タイミングと正確さ）の可能性を特徴づけ、コントロールされていない出力の変動が起こる可能性等を把握

検討を以下の視点で行った。

- ① 合意形成のために求められる成果の要件の整理
- ② 各分野における成果と①の成果の要件とのマッピング
- ③ 分野横断的連携及び成果の融合
- ④ 研究開発成果の可視化

なお事業段階における地層処分に関する議論においては、直接的利害関係者のほか、政策決定者、社会科学系学識経験者、環境／エネルギー政策に興味を持つ市民、専門家、科学・技術系学識経験者、科学・技術に興味を持つ市民等の多様なステークホルダーが想定される。このためシステム評価確証技術の各要素技術の統合においては、当該分野の専門家だけではなく、研究の進捗に応じてこれらの非専門家から構成されるステークホルダーとの議論を通じて成果の共有や目標設定の見直し等を念頭に入れておく必要がある。上記①～④の視点については、ソーシャルウェア³⁾により、対話や双方向型コミュニケーション機能やグループウェアでの多分野の専門家間の知識共有が可能な機能を「統合プラットフォーム」に実装することにより、それぞれの用途に応じたコンテンツを検討することができる。

また個々の要素技術開発について、それぞれ統合化を効果的かつ効率的に行ううえでも、他の要素技術開発との（開発の目標や方向性の違いなど）相対的な位置関係を予め把握しておくことが重要となる。この観点から「確証性の高い（地層処分の実施について確信を持つことができる）地層処分のシステム概念」の構築に必要な要件の階層構造を視軸に、個々に行っている各サブプロジェクトの要素技術開発が、どの構成要件を担っているかの全体像を視覚的にも容易に把握できるよう、ツリー構造の樹形図にて整理したものが図 6.2.2-1 である。この樹形図の右側最下位に示す項目について、それぞれ各サブプロジェクトである「SP1:ニアフィールド先端技術開発」、「共処分ニアフィールド影響評価技術開発」、「過酷事象影響評価技術開発」、「可逆性と回収可能性などを考慮した合意型処分システム概念の提示」、「処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化」の要素技術開発の成果と対応付けることにより、今後の目的に応じて行う要素技術の統合化や、それぞれの知識・成果の体系化/可視化、分野横断的な連携もしくは融合などに資することが可能となる。

平成 27 年度の検討からは、この樹形図を基に知識ベースの枠組みを検討してきた（日本原子力研究開発機構，2016）。図の左側から展開される要件の整理では、「確証性の高い」というキーワードから「何が」、「どのように」、「なぜ」などのニーズに対応した文脈を重視して整理を行っているが、ここではさらに知識ベースの枠組みとして、データベース化に伴う情報の整理やアクセスの基本的枠組みとなるよう、目的の端的な表現や選択分岐の分かりやすい対応も考慮に入れた。その事例として、知識ベースの枠組みと各要件とを整理したものが表 6.2.2-1 である。また知識ベースの枠組みにて再整理した各サブプロジェクトの要素技術との対応を示したものが表 6.2.2-2 である。

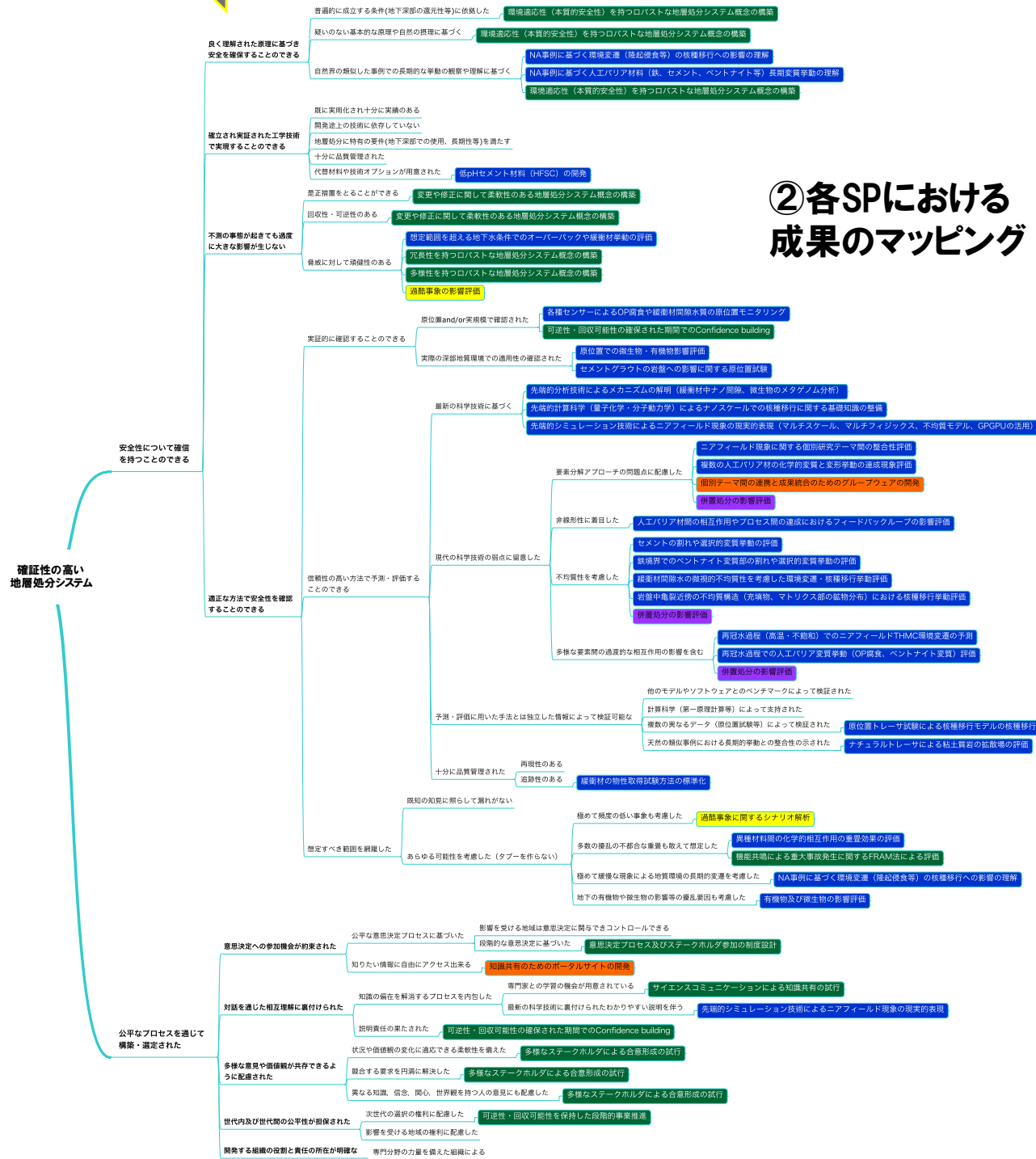
3) コミュニティなどの社会的要素または社会そのものを支援するソフトウェアや仕組みを意味する。

①合意形成のために求められる成果の要件

④研究開発成果の可視化

②各SPにおける成果のマッピング

③分野横断的連携及び成果の融合



SP1:ニアフィールド先端評価技術開発

SP2:共処分ニアフィールド影響評価

SP4:過酷事象影響評価技術開発

SP4:R&Rを考慮した合意型処分システム概念構築

SP5:処分システム確認評価技術の統合化

図 6. 2. 2-1 成果統合の手順

表 6.2.2-1 知識ベースの枠組みと成果の要件

知識ベースの枠組み	成果の要件
自然科学的安全性評価	安全性について確信を持つことができる
社会科学的安全性評価	公平なプロセスを通じて構築・選定された
理論・観察の評価	良く理解された原理に基づき安全を確保することのできる
技術の評価	確立され実証された工学技術で実現することのできる
性能の評価	不測の事態が起きても過度に大きな影響が生じない
安全性の評価	適正な方法で安全性を確認することのできる
意思決定型評価	意思決定への参加機会が約束された
対話型評価	対話を通じた相互理解に裏付けられた
価値観配慮型評価	多様な意見や価値観が共存できるように配慮された
公平性に基づく評価	世代内及び世代間の公平性が担保された
役割・責任の評価	開発する組織の役割と責任の所在が明確な
普遍的条件	普遍的に成立する条件(地下深部の還元性等)に依拠した
自然の摂理	疑いのない基本的な原理や自然の摂理に基づく
挙動観察・理解	自然界の類似した事例での長期的な挙動の観察や理解に基づく
実用的技術	既に実用化され十分に実績のある
開発中技術	開発途上の技術に依存していない
地層処分特有の技術	地層処分に特有の要件(地下深部での使用、長期的等)を満たす
技術の品質管理	十分に品質管理された
代替材料・技術オプション	代替材料や技術オプションが用意された
是正措置可能性	是正措置をとることができる
回収性・可逆性	回収性・可逆性のある
頑健性	脅威に対して頑健性のある
実証結果	実証的に確認することのできる
予測評価方法	信頼性の高い方法で予測・評価することのできる
評価の想定範囲	想定すべき範囲を網羅した
意思決定プロセス	公平な意思決定プロセスに基づいた
情報アクセス	知りたい情報に自由にアクセス出来る
対話プロセス	知識の偏在を解消するプロセスを内包した
説明責任	説明責任の果たされた
状況や価値観の変化	状況や価値観の変化に適応できる柔軟性を備えた
競合する要求の円満解決	競合する要求を円満に解決した
異なる知識、信念、関心、世界観を持つ人の意見を配慮	異なる知識、信念、関心、世界観を持つ人の意見にも配慮した
次世代の選択の権利に配慮	次世代の選択の権利に配慮した
影響を受ける地域の権利に配慮	影響を受ける地域の権利に配慮した
専門分野の力量を備えた組織	専門分野の力量を備えた組織による
原位置and/or実規模	原位置and/or実規模で確認された
実際の深部地質環境	実際の深部地質環境での適用性の確認された
最新の科学技術	最新の科学技術に基づく
現代の科学技術の弱点への対応	現代の科学技術の弱点に留意した
予測手法と独立した情報による検証	予測・評価に用いた手法とは独立した情報によって検証可能な
手法の品質管理	十分に品質管理された
既知の知見に照らして漏れないケース	既知の知見に照らして漏れない
あらゆる可能性を考慮したケース	あらゆる可能性を考慮した(タブーを作らない)
意思決定の管理	影響を受ける地域は意思決定に関与できコントロールできる
段階的な意思決定	段階的な意思決定に基づいた
専門家との学習	専門家との学習の機会が用意されている
科学的説明	最新の科学技術に裏付けされたわかりやすい説明を伴う
要素分解アプローチ	要素分解アプローチの問題点に配慮した
非線形	非線形に着目した
不均質性	不均質性を考慮した
相互作用	多様な要素間の過渡的な相互作用の影響を含む
モデルやソフトウェアでの検証	他のモデルやソフトウェアとのベンチマークによって検証された
計算科学(第一原理計算等)による検証	計算科学(第一原理計算等)によって支持された
複数の異なるデータ(原位置試験等)による検証	複数の異なるデータ(原位置試験等)によって検証された
天然の類似事例による検証	天然の類似事例における長期的挙動との整合性の示された
再現性	再現性のある
追跡性	追跡性のある
稀頻度事象	極めて頻度の低い事象も考慮した
多数の擾乱や不都合な重量を想定	多数の擾乱の不都合な重量も敢えて想定した
緩慢な地質環境の長期的変遷	極めて緩慢な現象による地質環境の長期的変遷を考慮した
地下の有機物や微生物の影響等の擾乱要因	地下の有機物や微生物の影響等の擾乱要因も考慮した

表 6.2.2-2 知識ベースの枠組みと各 SP 成果の統合整理

自然科学的 安全性評価	理論・観察の評価	普遍的条件	環境適応性(本質的安全性)を持つロバストな地層処分システム概念の構築	
		自然の摂理	環境適応性(本質的安全性)を持つロバストな地層処分システム概念の構築	
		挙動観察・理解	NA事例に基づく環境変遷(隆起侵食等)の核種移行への影響の理解 NA事例に基づく人工バリア材料(鉄、セメント、ベントナイト等)長期変質挙動の理解 環境適応性(本質的安全性)を持つロバストな地層処分システム概念の構築	
	技術の評価	実用的技術		
		開発中技術		
		地層処分特有の技術		
	システム性能の 評価	技術の品質管理		
		代替材料・技術オプション		
		是正措置可能性	低pHセメント材料(HFSC)の開発	
	安全性の評価	実証結果	原位置and/or実規模	変更や修正に関して柔軟性のある地層処分システム概念の構築 変更や修正に関して柔軟性のある地層処分システム概念の構築 想定範囲を超える地下水条件下でのオーバーバックや緩衝材挙動の評価
実際の深部地質環境			冗長性を持つロバストな地層処分システム概念の構築 多様性を持つロバストな地層処分システム概念の構築	
予測評価方法		最新の科学技術	過酷事象の影響評価	各種センサーによるOP腐食や緩衝材間隙水質の原位置モニタリング 可逆性・回収可能性の確保された期間でのConfidence building
		現代の科学技術の 弱点への対応	要素分解アプローチ	原位置での微生物・有機物影響評価 セメントグラウトの岩盤への影響に関する原位置試験 先進的分析技術によるメカニズムの解明(緩衝材中ナノ間隙、微生物のメタゲノム分析) 先進的計算科学(量子化学・分子動力学)によるナノスケールでの核種移行に関する基礎知識の整備 先進的シミュレーション技術によるニアフィールド現象の現実的表現(マルチスケール、マルチフィジクス、不均質モデル、GPUの活用)
			非線形	ニアフィールド現象に関する個別研究テーマ間の整合性評価 複数の人工バリア材の化学的変化と変質挙動の連成現象評価 個別テーマ間の連携と成果統合のためのグループウェアの開発
			不均質性	併置処分の影響評価 人工バリア材間の相互作用やプロセス間の連環におけるフィードバックループの影響評価 セメントの割れや選択的変質挙動の評価 鉄境界でのベントナイト変質部の割れや選択的変質挙動の評価 緩衝材間隙水の微視的不均質性を考慮した環境変遷・核種移行挙動評価 岩盤中亀裂近傍の不均質構造(充填物、マトリクス部の鉱物分布)における核種移行挙動評価
		相互作用	併置処分の影響評価	
		予測手法と独立した 情報による検証	モデルやソフトウェアでの検証 計算科学(第一原理計算等)による検証 複数の異なるデータ(原位置試験等)による検証 天然の類似事例による検証	再冠水過程(高温・不飽和)でのニアフィールドTHMC環境変遷の予測 再冠水過程での人工バリア変質挙動(OP腐食、ベントナイト変質)評価 併置処分の影響評価影響評価
手法の品質管理		再現性 追跡性	原位置トレーサー試験による各種以降モデルの核種移行 ナチュラルトレーサーによる粘土質岩の拡散場の評価	
評価の想定範囲		既知の知見に照らして漏れがないケース	追跡性	緩衝材の物性取得試験方法の標準化
	あらゆる可能性を 考慮したケース	稀頻度事象 多数の擾乱や不都合な重畳を想定 機能共鳴による重大事故発生に関するFRAM法による評価 緩慢な地質環境の長期的変遷 NA事例に基づく環境変遷(隆起侵食等)の核種移行への影響の理解 地下の有機物や微生物の影響等の擾乱要因	過酷事象に関するシナリオ解析 異種材料間の化学的相互作用の重畳効果の評価 機能共鳴による重大事故発生に関するFRAM法による評価 NA事例に基づく環境変遷(隆起侵食等)の核種移行への影響の理解 有機物及び微生物の影響評価	
社会科学 的安全性評価	意思決定型評価	意思決定プロセス 段階的な意思決定	意思決定プロセス及びステークホルダー参加の制度設計 知識共有のためのポータルサイトの開発	
	対話型評価	対話プロセス 専門家との学習 科学的説明	サイエンスコミュニケーションによる知識共有の試行 先進的シミュレーション技術によるニアフィールド現象の現実的表現	
	価値観配感型評価	説明責任 状況や価値観の変化 競合する要求の円満解決 異なる知識・信念・関心・世界観を持つ人の意見を配慮	可逆性・回収可能性の確保された期間でのConfidence building 多様なステークホルダーによる合意形成の試行	
	公平性に基づく評価	次世代の選択の権利に配慮 影響を受ける地域の権利に配慮	多様なステークホルダーによる合意形成の試行	
	役割・責任の評価	役割・責任の評価	可逆性・回収可能性を保持した段階的業務推進	

SP1: ニアフィールド先端評価技術開発
SP2: 共処分ニアフィールド影響評価
SP3: 過酷事象影響評価技術開発
SP4: R6Rを考慮した合意形成処分システム概念構築
SP5: 処分システム確証性評価技術の統合化

6.3 用途に応じた評価確証技術の知識共有手法の検討調査

6.3.1 わかりやすい情報コンテンツ作成のための方法論の調査

地層処分では、その特徴から一般の人のみならず技術的専門家でさえも分野が異なれば、おおよそ馴染みのない技術が用いられている。地層処分計画が事業の段階に入った現在、多くの非専門家がステークホルダとして関与することになり、それまでの技術的成果の取りまとめや表示の方法のままでは、意見や要望を聞くうえでも十分とは言えなくなってきた。このため、地層処分システムの社会的受容性を向上させる目的の一つとして、各サブプロジェクトの技術開発で実施されているそれぞれの要素技術や技術的知見について、ステークホルダとの議論を通じて成果の共有や体系化などができるかどうかの試みを行った。その過程においては、社会的受容性の向上や他のステークホルダと成果の共有を効果的/効率的に図っていくためにも、まず関心を引きつけたうえで肝心の情報をわかりやすく伝えるという視点が不可欠であるとした。さらに、後述するように「情報をわかりやすく伝える」という視点については、「ブランディング（ブランドデザイン）」に関する手法や広報ツールに加え、「情報デザイン」、「情報アーキテクチャ」、「デザインマネジメント」や「サービスデザイン」といった広告あるいは市場調査の分野で開発・利用されている手法についても検討調査を行った。以下に、これら手法についての検討調査結果を示す。

(1) ブランディング（ブランドデザイン）

広告活動が「自らのイメージを相手に伝える努力」であるのに対し、ブランディング（ブランドデザイン）とは「自らのイメージを相手に持ってもらおう努力」といえる。なおブランディングにおいて用いられる戦略として以下の表に示す5つの要素がある。

表 6.3.1-1 ブランディングにおいて用いられる戦略

ブランディング戦略	内容
ブランドポジショニング（位置）	ブランドが何を目的に誰の為に存在するかという存在意義を定める。ターゲットに対し、ブランドがどういった役割を果たすのかを明確にする。
ブランドパーソナリティ（属性）	優れたブランドには個性がある。それを作り出す手法として、例えば、無味簡素になりがちなプロダクトに対して、ブランドに生身の人間的なニュアンスを加え、ターゲットに親近感を与える事で、人々の心に残るブランドとなる。
ブランドアソシエーション（連想）	そのブランドが理想とするイメージと同じ、もしくは近い事柄と関連させる事で、人々にそのブランドが届けたい”雰囲気”を伝え、ブランド名を聞いた時にターゲットが連想するイメージを定義する。
ブランドストーリー（物語）	ブランドに関してターゲットの心に一番響くのが裏に隠されたストーリーである。たとえば、地層処分事業開始時の思い、研究開発の苦労とその巻き返しなどのストーリーはブランドを作り上げる上でとても重要な要素の一つとなる。このような物語は、ブランドとターゲットの距離を縮める
ブランドプロミス（約束）	ターゲットにとって最も重要なのが、そのブランドが自分は何をしてくれるかという事。ターゲットに対して安定した価値を継続的に提供することで、ブランドとしての価値を上げることができる。ブランドプロミスを通じ、ターゲットへの目に見えない”約束”を届ける事がブランド構築の上で一番効果のある事である。多くの企業はキャッチコピーに自社のブランドプロミスを盛り込む事が多い。

(2) 情報デザイン

デザインとは、「広辞苑」（新村、2008）によると、

「1. 下絵、素描、図案、2. 意匠計画。製品の材質・機能および美的造形性などの諸要素と、技術・生産・消

費面からの各種の要求を検討・調整する総合的造形計画」

としている。このデザインには対象の色や形といった意匠的な意味合いだけでなく、それらを含めた総合的な設計や計画といった意味合いも有している。このため「情報デザイン」は、様々な規模の情報を、何らかの物理的実体を介して表現する行為全体を指し、広範囲にわたって日常生活に深く浸透している（杉山ほか，2008）。

(3) 情報アーキテクチャ

Web サイトを情報のかたまりでできた建築物のように組み立てていく手法のこと。ウェブページの見た目ではなく、サイトの構造全体を考慮しながらそこを訪れたユーザーにとっての使い勝手を高めるデザインを高める上で欠かせない（渡辺，2001）。長谷川（2015）はWeb サイトにおける情報アーキテクチャに課せられた課題と役割を以下の3点に集約させた。

表 6.3.1-2 Web サイトにおける情報アーキテクチャに課せられた課題と役割

課題	役割
利用者が情報を発見できるようにする	これがWeb デザインにおいて、情報アーキテクチャ設計を行う一番大きな目的となる。サイトの規模が大きくなり、扱われる情報が増えてくると、情報を探している人が目的の情報に到達できない。これを解決するのが情報アーキテクチャ設計のもっとも主要な目的となる。この目的の達成のためには、「誰が利用者か」「どういった情報が必要なのか」を明示化する必要がある。
情報提供者が自分の意図通りに情報を提示できるようにする	これは、情報提供者、つまりサイトの運営者が提供したい情報を適切に届けることを意味する。Web サイトを立ち上げる際には、企業であれ個人であれ、なんらかの目的や意図が存在する。しかしながらただ情報を置いただけではその意図は利用者には伝わらず、「見せたいものが見てもらえない」「想定と違った見方をされてしまう」「せっかく作ったのにアクセスされない」といったことが起こる。こういった状況を避け、提供者の意図を反映させた Web サイトを構成することが情報アーキテクチャ設計のもうひとつの主要な目的となる。
サイト内の情報の変化、増減によるクオリティの低下を防ぐ	「情報の変化・増減に対応する」ことが情報アーキテクチャ設計の隠れた効果となる。情報アーキテクチャ設計プロセスの中ではコンテンツを解体し分析する。その中で、変化することがわかっている要素、追加される要素、属性が変化する要素（「今後の予定」が「過去の予定」に変化する、など）について、予めその変化を明示しておくことで、サイト構造やナビゲーションを設計する際にそのことを見込んだ形にしておくことができる。

(4) デザインマネジメント

デザインマネジメントとは、デザインを取り入れた戦略の事である。ここでのデザインは、情報デザインで述べたように総合的な計画を指している。したがって、デザインを戦略的な目標を達成するのに有効な手段として、これを中心に据えてプロジェクトをマネジメントする手法として用いられる。田子ほか（2014）によると、デザインマネジメントのプロセスは、課題の発見と抽出、革新的なシナリオ構築、シナリオの具体化、システム全体を統合した情報処理となっている。また、このプロセスを適用することによりビジョンが明確になり、「プロジェクトチームが活性化する」、「リソース（人的物的）を有効に活用する」、「戦略を創る」、「考えが深まる」、「本質を捉える」等の効果が得られる。（田子ほか，2014）

(5) サービスデザイン

サービスデザインとは、「顧客が求めていることをきちんと提供すれば、そこに価値が生まれる」という原理を再現したもので、ビジネスを顧客の視点から体系的に編成する取組みである。

また、顧客が何かを購入するかどうか（サービスを受けるかどうか）を検討しはじめた瞬間からスタートし、その購入品のライフ・サイクルが終了するまでのサービス全体をデザインする手法とも言える。この目的は、企業と顧客のインタラクション（接点）のあらゆる局面において、最適なカスタマーエクスペリエンス（顧客経験価値：商品やサービスを購入したり使用したりする経験によって得られる感覚的、感情的な付加価値）を提供することにある（クラール，2015）。

サービスデザインの手法の一つに「カスタマージャーニーマップ」がある。これは「カスタマージャーニー（顧客の行動）」を可視化し、それと結びつけたマーケティング施策を実施する際のツールであり、あらゆるマーケティング施策を実践する際に欠かせない顧客の行動や思考を体系的に把握するための手法となっている。表 6.3.1-3 に、鉄道チケットを購入する顧客（旅行者）の行動を事例とするカスタマージャーニーマップに必要な仕様と Website の URL を示す。

表 6.3.1-3 旅行代理店のカスタマージャーニーマップの仕様例

ケース	旅行代理店経由で鉄道チケットを購入	サービス	チケット購入
企業	旅行代理店 (Rail Europe)	顧客	旅行者
スタート	旅行の計画 (旅行に行きたい)	ゴール	旅行後
マップ 参考 URL	https://experiencematters.blog/2013/04/03/seven-steps-for-developing-customer-journey-maps/		

特に、地層処分技術に関するステークホルダとの知識共有にあたり、この「カスタマージャーニーマップ」を導入することによって、ステークホルダ（顧客）の行動プロセスの全体像を可視化し、それぞれの段階での行動・思考・感情・体験を推定・分析することにより、顧客が満足するためには何が必要か、どのように改善すれば良いかといった取るべき施策や必要なフィードバックをスムーズに行うことが可能となる。これがカスタマージャーニーマップの手法を地層処分技術の知識共有に採用する利点である。

6.3.2 技術情報に関する知識共有を図るための双方向コミュニケーションの調査

処分事業の進展にともない、実際に「確証性の高い地層処分システム概念」を今後構築していくうえでは、ステークホルダ（利害関係者）として、政策決定者、周辺住民、地方自治体関係者、社会科学系や科学技術系の学識経験者など様々な人々が関係する。このため地層処分というこれまで一般に馴染みのない技術について、専門的知識を持つ者と持たない者あるいは利害等の立場の異なる人々の間で知識共有や対話を行い相互の信頼関係を築き上げていく必要があることから、実社会ですでに展開され機能している双方向のコミュニケーション手法についての調査結果を以下に示す。

(1) コミュニケーションの分類

科学技術の開発や応用とそれに係る事業化においては、これまで様々な影響評価が試みられてきた。テクノロジーアセスメント (Technology Assessment : TA) もその一つであり、近年では市民参加によるコンセンサスや合意形成、意見収集など一般市民と専門家や行政とのコミュニケーションが注目され、様々な形式や方法が検討・議論されている。例えば、道路環境整備における公共政策において、自動車の交通処理だけではなく、歩行者、自転車、公共交通機関を初め、

さらには市民の価値観の多様化や高齢化等に対応する高質化が求められている。このような背景の中、大阪大学コミュニケーションデザイン・センター（CSCD）では、これからの道路環境整備に係る様々なニーズや課題に関して、地域住民との対話や熟議が重要であり、地域住民が自発的にインフラの維持・活用に参画するような取り組みが行われている。そこでは、交通・まちづくりに関する地域内での対話経験、総合的施策形成における行政内部での調整経験、ドイツや米国における行政・市民間の仲介者の動向に関する調査結果、法定外での紛争解決(ADR: Alternative Dispute Resolution)等に関する知見等を交えた討議から、施策形成場面における熟議・合意形成にむけて必要とされるコミュニケーションを、「モデレーション」、「ファシリテーション」、「コーディネーション」、「メディエーション」の4つに分類し、熟議を形成するメカニズム（民主的メカニズム、ソクラテス的メカニズム）及びコミュニケーションの形態（伝える、まとめる）の2軸で構造化できるとの仮説が提起されている（板倉ほか、2015；板倉ほか、2016）。なお、「熟議」とは、「多くの当事者による熟慮と討議を重ねながら課題解決・政策形成をしていくこと」（文部科学省、2012）であり、Chambers（2005）によると、ある議論が熟議的であるためには、二つの要素が必要としている。一つは「ソクラテス的メカニズム」（自分の主張をできるだけきちんと説明すること）であり、もう一つは「民主的メカニズム」（自分の主張が一般的に受け入れられるようにすること）である。前者は閉じられた場では働きやすいが、開かれた場では働きにくい、後者はその逆とされており（田村、2010）、その両立が課題となる。このため欧米では、討論型世論調査⁴⁾ (Deliberative Polling: DP)、コンセンサス会議⁵⁾、プランニングセル⁶⁾ 会議等の手法が編み出されている（板倉、2015）。

(2) コミュニケーションデザイン

一般に、異なる分野と分野の間に存在する、あるいは複数の分野にまたがり結果的にどの分野にも属さないという問題は多く存在する（ここで「分野」を「個人」もしくは「グループ」にも置き換えることができる）。この類の問題は、ある一つの分野からの視点のみでは、いかなる手法や技術をもっても解決できない。何が問題で何が解決であるかを定めることができないからである。すでに事業の段階に入った放射性廃棄物の地層処分に関わる問題は多岐の分野にわたり多様なステークホルダが関係する。このため、ここでの問題解決に向けた取り組みは、あまり馴染みのない（よく知らない）ことへの関心や懸念の度合いが異なるステークホルダ同士のゆるいつながりの中で行われることになる。このような特徴を有する地層処分などの公共性の高い問題の解決に向けては、対話（コミュニケーション）が成立するための意識的なデザインが必要であるとしている（西條、2014）。

「コミュニケーションデザイン」とは、このような問題解決に向けた対話（コミュニケーション）を設計（デザイン）することであり、その考え方は学際的で多岐の分野の問題解決にも参照できるとされ、以下のように定義される（西條、2014）。

4) 通常の世論調査とは異なり、1回限りの表面的な意見を調べる世論調査だけではなく、討論のための資料や専門家から十分な情報提供を受け、小グループと全体会議でじっくりと討論した後に、再度、調査を行って意見や態度の変化を見るという社会実験

5) 1985年にデンマークにおいて開発された、市民参加のテクノロジー・アセスメントの一つ

6) プランニングセルは、市民の中から無作為に選ばれたメンバーが、少人数の基本単位（細胞）に分れて討議し、討議にもとづいて提言を作成して計画づくりの指針とする制度

「問題の全体を人との相互行為により管理可能なものにしていくこと。何のためにという「目的」を明確にし、誰にどうなってほしいのか、誰と一緒にどうなりたいたいのかの「計画」を立て、そのための方法を考えて「実践」し、結果を観察して「考察」する。目的が達成できていなければ計画あるいは実践に、目的が達成されていれば目的にフィードバックして、新たな課題を設定する。」

この一連のプロセスにおいて最も大切に困難なことは「目的」の設定であるとしている。というのは、問題と対峙するとき、人は必ず何らかの視点から問題を見ている（本人の意識としては、視点を選ぶほどには意識的ではないことも多いが、様々な見方の中から一つを選択して問題を見ていることは事実のようである）。このため、その見方の選択をもっと意識的なものにし、かつ、個々の細かい視点からではなく問題の全体像を俯瞰できるよう問題の中から課題を抽出し目的を設定することが重要であるとしている。このような目的設定の観点から、コミュニケーションデザインの考え方は、「目的 (Goal)」－「計画 (Plan)」－「実践 (Implementation)」－「考察 (Observation)」からなる「GPIO サイクル」を経て、相手との相互作用の中から新たな視点を獲得し、問題を管理可能なものとしていくことであるとしている（西條，2014）。

(3) コミュニケーションの方法論

市民参加は、公衆を何らかの活動に関与させるまたは参加させることを指す言葉であるが、公衆の関与（巻き込み）もしくは参加といっても様々なレベルがある。その参加の段階をレベル分けしたもの（原科ほか，2005）として、「米国のアーンスタインの“8段梯子”」、「原科の“参加の5段階”」、「国際市民参画協会 (IAP2) の“参加のレベル”」がある。従来、わが国で使われている「市民参加」は、アーンスタインの“8段梯子”の分類にしたがえば、「3. 情報提供」から「8. 市民による管理」までを指している（石田，2001）。

コミュニケーションは、目的や対象者等に応じて適切な手法を選択し実践する必要があることから、参加者の特徴に応じて用いられる手法について検討が行われている（若松，2010）。ここでは、IAP2 の“参画のレベル”の分類にしたがい、利害関係者の参加程度が低い順に、「情報提供」、「意見聴取」、「関与」、「協働」、「権限付与」として検討が行われている。また、活用できる参加型コミュニケーション手法を、この参加の度合いに応じて整理したものを表 6.3.2-1 に示す（表の右に行くほど参加結果のインパクトは強くなる）。

表 6.3.2-1 参加型コミュニケーション手法の分類

分類	情報提供	意見聴取	関与	協働	権限付与
手法	ストーリーテリング		サイエンスカフェ	参加型テクノロジーアセスメント	投票
	理科実験	フィークス・グループ	シナリオ・ワークショップ	コンセンサス会議	代表者による決定
	ホームページ	カフェ・セミナー	プランニング・セル	ディープ・ダイアログ	

(4) テクノロジーアセスメント

テクノロジー・アセスメント (TA) とは、

「従来の研究開発・イノベーションシステムや法制度に準拠することが困難な先進技術に対し、そ

の技術発展の早い段階で将来の様々な社会的影響を予期することで、技術や社会のあり方についての問題提起や意思決定を支援する制度や活動を指す」

と定義されている（吉澤，2009；城山，2010；鈴木，2010）。また、その特徴は、

- ① 評価対象を技術自体だけではなくその社会的影響とすることであり、その評価は基本的に政治的・社会的プロセスを伴うこと
- ② その評価には技術専門家だけでは不十分であるため、学際的アプローチや不確実性及び価値の多様性を考慮に入れることが必要不可欠であること
- ③ 成果は、政策提言ではなく意思決定を支援するための選択肢の提示とその比較を行うこととされている（鈴木，2010）。

技術開発は人間や社会にとって利益をもたらすだけでなく、自然環境の破壊、伝統的な文化の破壊など様々な不利益ももたらす可能性があり、しばしば問題とされている。これを踏まえ、TAでは、技術の開発や適用に伴う人間社会、地球環境に及ぼす影響を多角的・客観的に調査し、事前に利害損失を総合的に評価することで、発生しうる弊害への対応策の策定や開発方向の修正などに資することを目的とした分析的評価の側面も有している。このように TA の活動は、関連する専門家や関係者を含む多様なステークホルダの協働を通じ、技術が及ぼす影響を幅広く俯瞰でき、新たな課題やその対応策の方向性を提示することが可能となる。

(5) コンセンサス会議

近年における高度な科学技術（例えば、遺伝子組換え技術、クローン技術、原子力技術など）については、それが新たに及ぼす影響に対する一般市民の理解や受容が社会的課題となりつつあり、その対応は政治・行政上の課題となっている。従来のテクノロジー・アセスメント(TA)のように専門家やごく限られた範囲の関係者による評価に代わり、一般市民の参加による専門家との双方向のコミュニケーションを介して対象となる科学技術の影響評価を行う試みが行われるようになり、そのための仕組みや活動がコンセンサス会議と呼ばれる。Joss & Durant (1994) は、

「コンセンサス会議とは、政治的、社会的利害をめぐって論争状態にある科学的もしくは技術的課題に関して、素人からなるグループが専門家に質問し、専門家の答えを聞いた後で、この話題に関する合意を形成し、最終的にかれらの見解を記者会見の場で公表するためのフォーラムである」

と定義している。また Grundahl (1995) は、

「コンセンサス会議とは、技術評価の一方法であり、専門家のパネルと市民のパネルの間の会議として組織される。市民パネルは社会的に議論を呼ぶような技術の開発を評価する」

と定義している。

コンセンサス会議の実施にあたって、特定の科学技術テーマの選定、「市民パネル」の募集と「専門家パネル」の選定が行われる。市民パネルは、議論するテーマと利害関係のない十数名の市民を募り、専門家パネルには大学教授、企業の従業員、公務員、民間団体の活動家などの数名が選出される。一般に、会議では専門家が市民パネルにテーマに関する科学技術の状況についてわかりやすい説明をし、市民パネルと質疑応答を行う。その後、市民パネルだけで議論を行い、その科学技術に対する判断や意見をまとめる。これがコンセンサスと呼ばれ、発表や新聞の記事として公開され、政治家や行政府などにコンセンサス会議報告書が配布され参考にされる。このような形で世論形成と政策形成に利用される。ただし、これらの意見には法的な拘束力はないと

されている（木場，1999）。

このようなコンセンサス会議については、1987年に遺伝子工学をテーマにデンマークにおいて初めての試みが行なわれ、それ以降はヨーロッパを中心に各国の社会的・政治的事情を取り入れながら様々な試みや活動が行われている。

(6)サイエンスカフェ

サイエンスカフェは、1992年にパリで始まった哲学カフェをモデルにして、1997年以降に英国やフランスで始まった、研究者と市民が一緒になって科学技術をめぐる話題について語ろうとする取り組みである。そこでは、日常のカフェのような場で、コーヒーやビールを片手に、科学者と市民とのあいだの双方向的なコミュニケーションを行ったり、専門家に限らない広範な人々の間で科学技術について議論するような場（基本的には小規模）を創出しようとするものとして実施されている（中村，2008）。

(7)理科実験

理科実験（実験、観察、工作など）は、参加者の興味・関心の喚起における実験の有効性や、実体験による先入観の変革への効果が指摘されている。これまでも理科授業や生徒・学生への科学教育啓発のために、教育現場を初め公共スペースにおいて理科実験を体験させる活動が行なわれている。ここでは、「実験は設備のそろった施設で行うもの」という印象を変化させるようなDNA実験や調査・観察を主体としたフィールドワークを組み込んだ実践など様々な分野での試みが「出前実験（授業）」として行われている。サイエンスカフェに対して出前実験の最も大きな違いは、サイエンスカフェが不特定な参加者を対象に行うものであることに対して、出前実験は事前に参加対象者が想定されていることである（児玉・竹本，2011）。

(8)ストーリーテリング

ストーリーテリングは、1960年代米国や英国の図書館の児童サービスの一環として始められ、本と子どもを結びつける一つの手だてとして普及してきた。言葉こそ目新しかったものの、内容は、昔から語りつがれてきた「お話」（語り）の流れを汲むものである。その特徴として、語り手側はお話を語る際の声や表現力、表情如何で話が面白くもつまらなくもなることが挙げられる（浅木，2014）。

6.3.3 双方向型コミュニケーション手法の重要性

6.3.2に示した種々のコミュニケーション手法の「コミュニケーション」という言葉自体に互いに伝達し合うことの意味があることから、あえて「双方向」と付す必要はないかもしれないが、地層処分に限らず一般に原子力技術に関する情報伝達の場面においては、事業者等の「情報の発信者」と一般市民を含む非専門家の「情報の受け手」という関係になりがちで、双方が有する情報の非対称性もあり、結果として一方的な方向の情報伝達のコミュニケーションとなっている。しかしながら、事業の段階に入った我が国の地層処分計画において、その意思決定に関与するステークホルダの多くは専門家ではない。地層処分技術は一般に馴染みがなく、また「発信者」側から供給されるその情報はこれまで専門家の目線で作成され、従来の方法によって

伝達されるため、「受け手」の非専門家にとってはその理解は容易ではなく知識は十分に共有されていないのが現状である。したがって、一般に馴染みのない地層処分技術について、如何にして非専門家を含む多様なステークホルダに関心や興味を抱かせ、地層処分に対する彼らの要望や意見を引き出し地層処分の計画や研究開発に適宜フィードバックさせ、双方で地層処分に関する知識の共有を図っていくことが重要となる。

6.4 評価確証技術の認知の拡大に関する試行

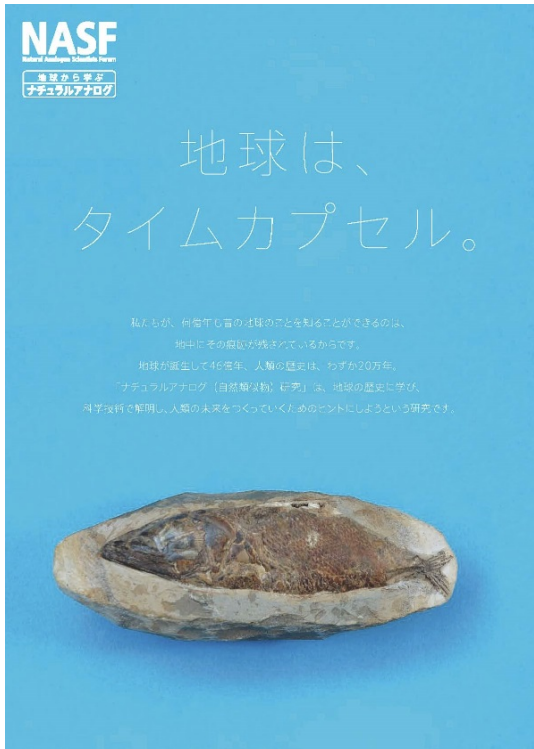
上記 6.3 で示したコミュニケーション手法や方法論について、実際に非専門家を対象に適用を試み、その具体例の提示やその有効性の評価などを行った。以下に、処分システム評価確証技術のブランディングの検討(6.4.1項)と、コミュニケーション手法を活用した知識共有の試行例(6.4.2項)を示す。

6.4.1 処分システム評価確証技術のブランディング

6.3.1 の戦略を踏まえ、これまで過酷事象の影響評価を題材としてブランディングをいくつか試行した。

例えば平成 26 年度では、「見たくないものをみる」「想定外を想定する」「10 万年の宿題」というキャッチコピーを軸に科学者の姿勢としての“約束”を提示し、これらのキャッチコピーから連想されるイメージを視覚的に訴えるようなポスターを作成した(日本原子力研究開発機構, 2015)。

また平成 27 年度では、ナチュラルアナログを題材とし、「地球はタイムカプセル」「温故知球」「100 万年の過去、100 万年の未来」「アナログに学べ」「地球は先生」というキャッチコピーを軸に地球に学ぶ科学者の姿勢としての“約束”を提示し、これらのキャッチコピーから連想されるイメージを視覚的に訴えるようなポスターを作成した(図 6.4.1-1)(日本原子力研究開発機構, 2016)。ポスター作製方針として、「私たちの未来を、地球の歴史から学ぶ」という研究姿勢を打ち出し、「ナチュラルアナログ」という、一般には異なる意味でポピュラーな言葉の組み合わせが、全く異なった意味であることを明快に説明することを目指している。また、先端科学技術に必ずしも好意的ではないステークホルダー層の“?”にストレスを与えない客観性で答えることを意識している。



「地球はタイムカプセル」



「温故地球」



「100万の過去、100万の未来」



「ナチュラルアナログってなんだ？」

図 6.4.1-1 ナチュラルアナログ研究 ポスター案

6.4.2 コミュニケーションワークショップ

ここでは、6.3に示した方法論や手法を適用してコンテンツを実際に作成し、非専門家を対象としたワークショップを実施し、廃棄物対策としての地層処分概念の優位性に関する知識共有を

目指すとともに、その結果を分析することにより手法の有効性の評価を行った。

(1) ワークショップの目的

ワークショップでは、非専門家に安全性の観点から地層処分のメリットを理解してもらうことを目的として、6.3.2の(2)で示したコミュニケーションデザインに基づき、安全性に関するテーマで実施した。その有効性に評価にあたっては「GPIO サイクル」(GPIO: 目的 (Goal)、計画 (Plan)、実践 (Implementation)、考察 (Observation) からなる) に当てはめて、地層処分の安全性についてどこまで理解できたかを考察した。これら一連のプロセス評価を GPIO サイクルで表示したものが以下の図 6.4.2-1 である。

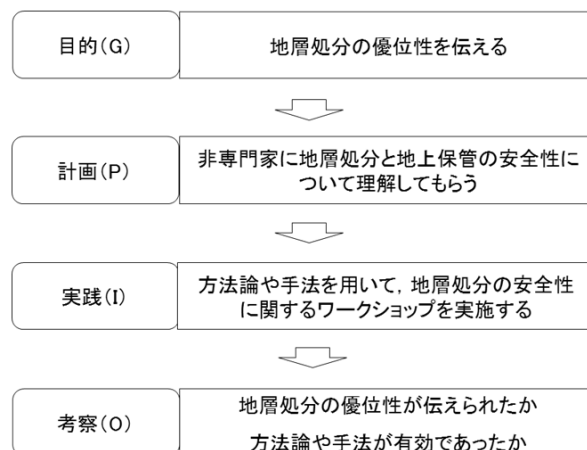


図 6.4.2-1 ワークショップで用いた GPIO サイクル

具体的な手順としては、まず、調査した方法論やコミュニケーション手法の中から有効性が高いものを選定する。次に、「処分システム評価確証技術開発」のプロジェクトとして実施している項目に関する例題を設定する。また、ワークショップで内容の理解を促せるようなコンテンツを作成する。そして、放射性廃棄物の非専門家を対象に、選定された方法論及び手法や例題に基づいたワークショップを実施し、双方向コミュニケーションを通じた知識共有を試行し、この試行の経過や結果を分析することにより、手法等の適用性を評価することとした。

(2) ワークショップに用いる方法論及び手法

1) サービスデザイン

6.3のサービスデザインの項で示した「カスタマージャーニーマップ」をワークショップの結果として用いた。ワークショップにおいて、非専門家の地層処分の安全性に対する信頼度を向上させるために必要な要素を見つけ出すためには、顧客の満足度を向上するために必要なプロセスを検証できるカスタマージャーニーマップが有効だと判断されるためである。

2) サイエンスカフェ

双方向コミュニケーションのためには、スピーチのような話題提供者が一方向的に語り掛けるのではなく、聴講者の非専門家も気軽に質問や意見が述べられるような雰囲気が必要である。そこで、サイエンスカフェ形式の場で実施することとした。

3) ストーリーテリング

地層処分の安全性という専門的かつ馴染みの無いテーマのため、非専門家には敷居の高いテ

マとなり、また学会発表のような専門的な技術開発の説明となってしまう可能性もはらんでいる。そこで、内容をかみ砕き、物語風で説明する事で、不慣れなテーマを分かりやすく伝える事が可能となる。したがって、ストーリーテリング形式で説明を行うこととした。

4) フォーカス・グループ

ワークショップ参加者に対するインタビューの手法として、フォーカス・グループ形式をとる。紙形式によるアンケートだけであると、書かれる内容が端的になってしまったり、回答も参加者からの一方通行であったりと、参加者の意図している内容を正確に捉える事が難しい。また、他の参加者の発言内容を聞くことで、発言しやすい雰囲気になったり、新たな思考を思いついたり、ワークショップの内容が充実する。したがって、フォーカス・グループによるインタビューを行うこととした。

(3) ワークショップに用いた例題

ワークショップでは、「処分場への人間侵入」を最初のテーマとして取り上げた。その理由として、人間侵入の説明には、地層処分特有の専門的な知識をそれほど多く用いる必要はなく、比較的イメージが湧きやすいテーマであることから、限られた時間で地層処分システムの安全性について話すテーマとして適していると判断して設定した。地層処分施設への人間侵入としては、一般に偶発的要因と人為的な要因のシナリオが考えられる。偶発的要因とは、地下資源探索等を目的としている活動において偶発的に地下深部の処分場の廃棄物にアクセスしてしまう事象である。一方、人為的（意図的な）な要因としては、テロリスト等の悪意を持った人間が目的をもって意図的に地下の処分場にアクセスする事象である。ワークショップでは、この人為的な要因である「廃棄物の奪取」を目的とした集団による侵入をテーマとして取り上げた。このため、机上での集団による処分場への侵入という疑似体験から、高レベル放射性廃棄物等の処分施設が有する固有の安全性（性能）に関する非専門家の知識共有の度合いの変遷を測ることとした。

ワークショップの進行は、参加者8名と専門家1名に加え、ファシリテーターによるストーリーテリング形式のシナリオに沿って行った。参加者には、原子力発電及び高レベル放射性廃棄物に関心のある非専門家の20歳代、30歳代、40歳代、50歳代の男女各1名、計8名とした。また、参加者はシナリオに基づく集団の構成員の役柄（ロールプレイング方式）が与えられ、また参加者の議論の過程で生じる疑問などに答えるアドバイザーとして地層処分の専門家1名も参加し、シナリオに沿ったフェーズごとにワークシートを記入しながら質問・意見交換を行った。

(4) ワークシートの内容

ストーリーに関する前の質問として、環境問題や社会問題に関するアンケートをワークシートに記入する形で実施した。これは、高レベル放射性廃棄物の地層処分以外に、本ストーリーの背景となる「戦争・テロ」、「核兵器の開発・使用」に対する関心を確認するためである。また、ここでのアンケート内容は、昨年度に実施したWebアンケート内容と同じあり、社会情勢の変化等に伴う一般市民の関心の変化を確認することにも活用できる。例えば、最近のフランスにおける同時多発テロ事件、ジカウィルス感染症、2016年の熊本地震等の影響により、社会の関心が変化する等である。次に、各フェーズ特有の質問（フェーズ1なら、例えば、地上保管施設と地層処分施設、あなたはどちらのほうが侵入しやすいと思いましたか。）を行った。

(5)各フェーズの進め方

フェーズ毎に作成された各侵入ルートシナリオに基づくスライドを用いて内容説明が行われ、説明後に参加者で議論を行った。シナリオに基づく内容説明においては、たとえば、地層処分場を海底から侵入して廃棄体を奪取する作戦計画の場面では、100年後に「マリンドリラー」なる掘削機械が開発されていることを想定している。用いたスライドの一部には、処分関係のWEBサイトで得られた情報も引用し、ストーリーにリアリティを加えている。また、スライドに基づく参加者のロールプレイングの過程では、必要に応じて、アドバイザーである専門家から補足説明が行われた。

(6)ワークショップ及びWebアンケートの結果の分析

1)カスタマージャーニーマップを用いたワークショップのまとめ

ワークショップの結果はカスタマージャーニーマップ形式にまとめた。参加者にはロールプレイング形式により違法侵入者という立場で処分施設に侵入するという疑似体験をしてもらい、その時に思った事、感じた事を基に同マップに反映した。このマップから、どの状況でどのようにどちらのシステムが侵入の観点から困難かが参加者によって評価され、それを基に高レベル放射性廃棄物対策についての双方向コミュニケーションの対象となる非専門家への今回のコミュニケーションの試みの有効性を判断できるこのようにして作成された地上保管と地層処分場それぞれのカスタマージャーニーマップを以下に示す。

①地上保管施設のカスタマージャーニーマップ

地上保管施設のカスタマージャーニーマップを図6.4.2-2に示す。計画フェーズでは、地上施設の方が侵入の観点で難しいという意見があり、これは地層処分では地層の厚みによる深さがある分、警備が手薄になるという理由からである。準備フェーズでは、侵入者が被ばくするとの意見が挙がっている。キャスクが持つ放射能の遮蔽性が一般市民の心配事である事が分かるので、保管状態のキャスクを始めとした遮蔽性についてのさらなる説明が必要かと思われる。実行フェーズでは、侵入に対する警備体制と回収に対する準備に関心が寄せられた。このため、警備体制の十分性を説明する事が大切である。輸送フェーズでは、輸送方法に難があることが認識された。

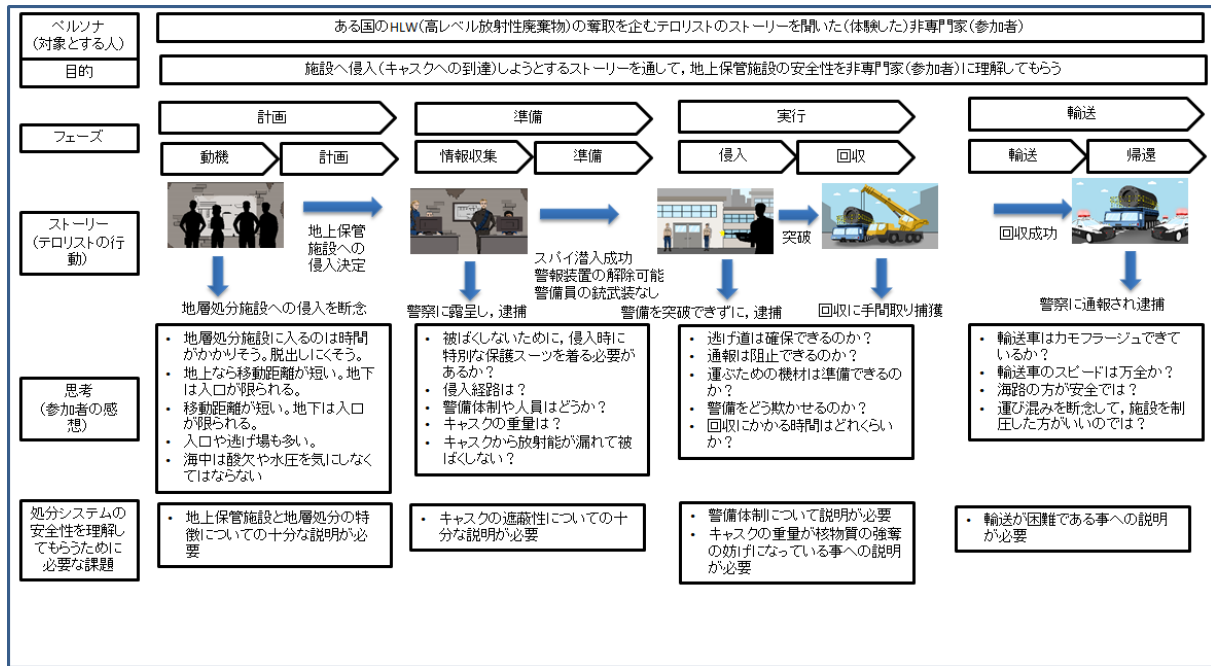


図 6. 4. 2-2 地上保管施設を対象とした集団の侵入

②地層処分施設のカスタマージャーニーマップ

地層処分施設のカスタマージャーニーマップを図 6. 4. 2-3 に示す。計画フェーズでは、被ばくを懸念してオーバーパックごと回収するという意見で一致した。さらに、地層処分場への侵入を実行できる環境を整えるため、マリンドリラー⁷⁾という架空の掘削機械を想定した。この機械がなければ、ボーリングで回収を試み侵入者が被ばくする、もしくは地層処分場への侵入を諦める、の2種類となり、ストーリーが進まなくなるからである。準備フェーズでは、新型の機械の影響もあり、簡単に掘削できる意見が多かった。地層が果たすバリア機能（放射性核種の移行阻止でなく、人間の侵入阻止）について十分に説明する必要があると思われる。実行フェーズでは、新型機械が海底下の目的物に正確にたどり着けるかが話題となり、石油発掘で用いている圧力・温度等のセンサーをうまく活用すれば成功率が高まるという意見が多数上った。このような楽観的な印象を与えていることに対しては、地層処分が持つ深度というバリアを十分に説明する必要がある。輸送フェーズでは、海底火山の影響を心配する声も挙がった。海底火山はテロリスト侵入との関連性は薄いと思われるが、地層処分を考える過程において疑問が参加者の間で湧いてきたと思われる。このように、一つのテーマから複合的に地層処分について考えてもらえる機会となった事は有益な結果であり、これは地層処分の安全性を理解してもらううえでの望ましいプロセスの一つになると思われる。

7) 海中を推進し、海底下の目標に向けて海底から掘削しながらアクセスすることができる有人の掘削マシン

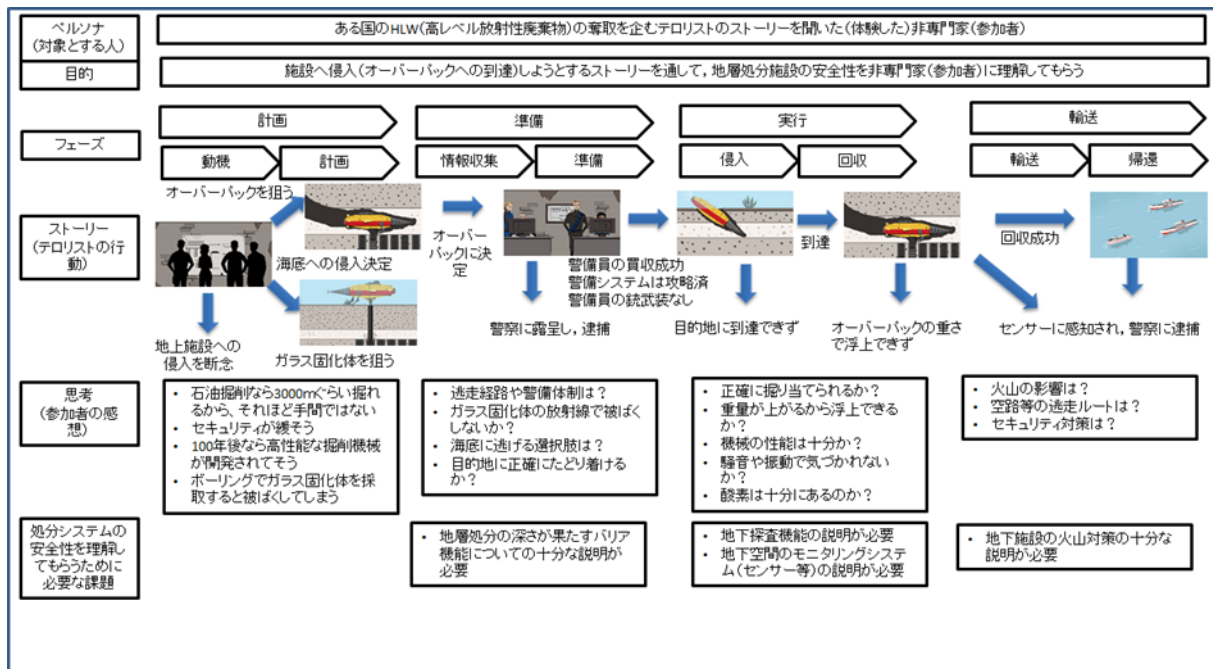


図 6.4.2-3 地層処分施設を対象とした集団の侵入

2) Web アンケート

地層処分の技術開発で得られた成果を Web で分かりやすく情報公開するため、参加者に対して Web アンケートも行った。アンケートに用いる例題は、ワークショップと同じ、高レベル放射性廃棄物対策の「地層処分」と「地上保管（暫定保管・貯蔵）」とした。本アンケートで用いるコンテンツは次に示す各団体の Web サイトで、見やすさ、分かりやすさ等の評価してもらった。

- ①NUMO : <http://www.numo.or.jp/chisoushobun/>
- ②地層処分ポータル : <http://chisoushobun.jp/>
- ③電気事業連合会 : <http://www.fepc.or.jp/nuclear/index.html>

調査対象は全国の 20 歳～69 歳の男女個人で、Web アンケートモニターから全国の性・年齢別人口比に応じて無作為抽出し、有効回収サンプル数が 1000 になるようにアンケートを行った。

「地層処分ポータル」は知りたい情報へのたどり着きやすさ、分かりやすさの点で一番であり、総合的な評価が高かった。次いで「NUMO」の評価が高く、電気事業連合会のサイトは、コンテンツの多さや階層の深さから、評価は高くなかった。「地層処分ポータル」が分かりやすい理由としては、「内容が頭に入りやすい」、「全体的にシンプルですっきりしている」などを挙げている。今回のアンケートでは、各ポータルサイトを見た後で、高レベル放射性廃棄物対策の方法についても質問している。「地層処分」と「地上保管（暫定保管・貯蔵）」のどちらを支持するかについては、「どちらともいえない」が 50%と半数を占めているが、どちらかを選択した答えをみると、「地層処分」は「地上保管（暫定保管・中間貯蔵）」の約 5 倍となっていて、サイトの内容を見て地層処分を選択した人も複数いる。一方、「地上保管（暫定保管・貯蔵）」を選ぶ人は、将来何が起こるか分からないことを理由に挙げる人が多かった。

6.5 まとめ

「処分事業に資するための処分システム評価確証技術の統合化」の主たる成果は、2つの項目

（「(1)システム評価確証技術の統合化に関する試行」、「(2)処分システム評価確証技術の認知拡大に関する試行」）に大別される。前者については専門家間のニーズに応じて従来から行われている技術の統合の実績があり、今後もこれまでの延長線上での取り組みが期待できるが、後者については、地層処分で用いられる多くの技術が非専門家にとってはまったく馴染みのないものである。このため、地層処分の社会的受容性を高めていくためには、地層処分に関わる知見や評価技術について非専門家の関心を引きつけ、その仕組みや原理の理解といった知識の共有をより容易なものとしていくための取り組みが一層重要となると考えた。

この観点から、本サブプロジェクトでは、これまで地層処分技術（事例として、火山等の自然事象の影響評価やナチュラルアナログ）のブランディング化に取り組み、そのブランドに対する共感や信頼といった非専門家にとっての価値を高めていく試みを行った。また、既存の双方向コミュニケーション（コミュニケーションデザイン）の考え方や手法を取り入れ、非専門家に対して地層処分技術（事例として、廃棄物施設への人間侵入評価）の知識共有を試みた。これら取り組みが有効に機能したかどうかの評価は主婦や学生等からなる非専門家グループへの事後評価のインタビューを通じて行い、その結果を評価し、次の段階に向けた改善点等を今後の課題として抽出している。

このように、本サブプロジェクトでは、地層処分に限らず馴染みのない技術に一般の人が話の切り口として興味を持ってもらえるかどうかをまず重要な目標であると捉え、いくつかの試みを行った。地層処分に限らず将来予測に関わる評価技術は科学的根拠に基づくチャレンジングなテーマであることから、今回のブランディングなどの認知拡大を目的とした試みは、地層処分そのものを理解してもらうのではなく、その予測技術に関わるコミュニケーションという切り口から取り組みを行った。ブランディングなどといった名称が適切かどうかは別として、何らかの形で非専門家である一般の人々との間で（地層処分のようなイデオロギーを目的としない教材の形態として）知識の共有化を試みる必要がある。また伝え方のツールとして、断片的にでも今回行ったストーリー的な展開のものも一種の価値があると考えられる。ブランドなど名称としてのローヤリティを高める意味はないが、心に伝わる（留まる）ことやわかりやすい説明を目的としたコミュニケーション手法には何らかの答えに繋がる糸口があるかもしれないことから、今後の過程においても試行錯誤を行い適宜見直していくことが重要である。

参考文献

Adaptive path Website : <http://adaptivepath.org/>

浅木尚美 (2014) : ストーリーテリング (お話) と国語教育, 淑徳短期大学研究紀要, 53, pp. 53-67.

Chambers, S. (2005): Measuring publicity's effect: Reconciling empirical research and normative theory, *Acta Politica*, 40 (2) , pp. 255-266.

クラール, J・マルゴス (2015) : サービス・デザイン入門, ビー・エヌ・エス新社.

Dallas, D. (2016): *Cafe Scientifique Deja Vu*, Cell, 126, pp. 227-229.

Grundahl, J. (1995): The Danish consensus conference model, *Public Participation in Science*, edited by Simon Joss and John Durant, Science Museum, p31.

原科幸彦(編) (2005): 市民参加と合意形成—都市と環境の計画づくり, 学芸出版社.

長谷川敦士 (2015) : 情報をわかりやすく伝える技術—情報アーキテクチャ, 情報の科学と技術, 65 巻, 11 号.

板倉信一郎 (2015) : わが国における地域インフラの維持・活用に向けたメディエーターの必要性.

板倉信一郎, 森栗茂一, 土井勉, 辻寛, 武知俊輔 (2016) : まち・みちづくりを通じた“公”の形成, *Communication-Design*, 14, pp. 1-18.

石田東生 (2001) : みちづくりと対話型行政, 道路行政セミナー, 11(12), pp. 7-10.

Joss, S. and Durant, J. (1994): Consensus conferences: A review of the Danish, Dutch and UK approaches to this special form of technology assessment, and an assessment of the options for a proposed Swiss consensus conference, London Science Museum, p12.

木場隆夫 (1999) : コンセンサス会議の社会的意義についての考察—日本とデンマークの比較を通して—, *総合政策*, 1(2), pp. 229-241.

児玉耕太, 竹本寛秋 (2011) : サイエンス・カフェに「粘菌」の実物を持ち込むことから見る来場者の意識変化に関する考察: 科学技術コミュニケーションにおける実体験の重要性, *科学技術コミュニケーション*, 10, pp. 16. 32.

文部科学省 (2012) : 「熟議」の取り組み紹介スライド,
<http://www.mext.go.jp/jukugi/archive/582.pdf>

中村征樹 (2008) サイエンスカフェ 現状と課題, *科学技術社会論研究*, 5, pp. 31-43.

日本原子力研究開発機構 (2014) : 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.

日本原子力研究開発機構 (2015) : 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.

日本原子力研究開発機構 (2016) : 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.

日本原子力研究開発機構 (2017) : 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書.

新村出 (編) (2008) : 広辞苑, 第六版, 岩波書店.

- 西條美紀 (2014) : コミュニケーションデザイン, くろしお出版, p216.
- 城山英明 (2010) : テクノロジーアセスメントの展望と課題, ジュリスト, 1409, pp. 2-6.
- 杉山公造, 永田晃也, 下嶋篤, 梅本勝博, 橋本敬 (2008) : ナレッジサイエンス, 近代科学社.
- 鈴木達治郎 (2010) : テクノロジーアセスメント (技術の社会影響評価) と原子力政策, 駒沢大学
実践メディアビジネス講座Ⅲ, 講演資料.
- 田子學, 田子裕子, 橋本寛 (2014) : デザインマネジメント, 日経 BP 社.
- 田村哲樹 (編) (2010) : 語る 熟議/対話の政治学, 風行社, p56.
- 若松征男 (2010) : 科学技術政策に市民の声をどう届けるか : コンセンサス会議, シナリオ・ワ
ークショップ, ディープダイアログ, 東京電機大学出版局, p242.
- 渡辺保史 (2001) : 情報デザイン入門, 平凡社.
- 吉澤剛 (2009) : 日本におけるテクノロジーアセスメントー概念と歴史の再構築, 社会技術研究
論文集, 6, pp. 42-57.

7. 結言

7.1 プロジェクトの主な成果

本プロジェクトで得られた成果を記述する。

2章「ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発」では、処分場閉鎖後の過渡期から長期にわたるニアフィールド環境変遷とその変遷を考慮した核種移行を評価するための技術を、様々な複合現象や不確実性要因の考慮、先端的な計算科学・分析技術の活用、地下研究施設等への適用等を通じて高度化・確証し、信頼性の高い安全評価基盤を構築することを目標とした。サブタスク1の「システムの過渡的変化評価技術開発」では、過渡期を評価するための熱-水-応力連成解析モデルを高度化し、幌延の原位置人工バリア性能確認試験への適用を通じて確証したほか、オーバーパック腐食センサー等の原位置での適用性や、従来の想定範囲を超える地下水水質でのオーバーパックや緩衝材性能を提示した。サブタスク2の「人工バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発」では、最新の分析技術や計算科学技術を適用して、多様な環境条件における緩衝材中の間隙構造と核種移行を評価する手法を構築したほか、オーバーパックの鉄腐食生成物がガラスや緩衝材の長期性能に及ぼす影響や、セメント系材料の長期変遷とその緩衝材への影響に関して、それら評価を可能とする室内試験データと影響評価モデルを提示した。サブタスク3の「天然バリア中のシステム変遷/核種移行評価技術開発」では、結晶質岩と堆積岩のそれぞれの特徴と課題を踏まえつつ、割れ目等の不均質性を考慮した核種移行評価技術、有機物や微生物の影響評価技術、セメント系材料による岩盤への影響評価技術に関して、特に原位置試験との連携を通じて、実際の地質環境に適用可能な評価モデルを提示した。サブタスク4の「ニアフィールド複合現象/核種移行の体系的評価に向けた技術開発」では、ニアフィールドシステム変遷についてのマルチスケールの複合現象解析とその解析結果に追随して核種移行解析を行う手法を開発し、コンクリートのひび割れ発生・進展とその周囲の化学的変質に係る局所スケールの現象が坑道全体スケールの挙動に及ぼす影響等に着眼した解析結果を示すとともに、これらの複合現象の理解とモデル開発から性能評価にいたる一連の研究成果の体系的整理を提示した。

3章「多様な廃棄物の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発」では、HLWと多様なTRU廃棄物との共処分における処分システム性能に対する相互影響の評価で重要となる硝酸塩と有機物の影響の評価技術を開発した。アスファルトと硝酸塩の化学反応熱により、処分施設内で熱が蓄積して熱反応暴走に至る可能性に着目し、廃棄物の発熱速度モデルを構築して評価を行ったところ、その可能性は小さいことが明らかとなった。また、岩盤中の黄鉄鉱等との反応により、硝酸イオンがアンモニウムイオン等に変遷していく挙動を評価できる化学的変遷モデルについて、室内試験の結果や、農業分野での硝酸性窒素の土壌の汚染調査結果をモデル解析により再現できることが確認され、モデルの信頼性を示すことができた。アンモニウムイオンについては、モンモリロナイトに吸着してアンモニウム型化することが知られており、これによる膨潤性への影響等を実験および計算科学的手法の両面から検討を行ったところ、カリウム型と比較して非膨潤性の鉱物に変質しにくい傾向があること等が明らかとなった。また、有機物および硝酸塩の放射性核種の移行挙動への影響について、特にイソサッカリン酸の溶解度への影響に着目して不足していた熱力学データを取得し、これにより溶解度を試算した結果、現在想定されているイソサッカリン酸濃度以下では溶解度の増大に顕著な影響を及ぼ

さないことが確認できた。

4章「過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発」では、東京電力（株）福島第一原子力発電所事故を受け、地層処分システムにおける過酷事象の定義を明確化すると共に、想定外を最小化することを念頭に置きつつ、人への甚大な影響（結果）を起点としたアプローチ、不安や懸念（原因）を起点としたアプローチ、それらを統合して過酷事象シナリオを描出する手順、重要度を評価する手順、対策技術を検討する手順を基軸とした過酷事象検討フローを確立し、その詳細を具体化した。さらに、一連の試行を実施することで、検討フローの有効性を確認するとともに、地層処分システムの継続的な安全性向上に資する仕組みとして提示した。さらに、地震・断層活動を例に、巨大地震・断層活動に起因する過酷事象を評価するための評価手法を具体化するとともに、巨大地震・断層活動に起因する過酷事象に関係し得る個別事象等の調査・整理を実施した。さらにそれらを基に、巨大地震・断層活動に起因する過酷事象の評価の試行を行い、過酷事象を成立させるためには極めて発生可能性の低い複数の条件を同時に想定する必要があることを確認し、それらを系統的に示すための手法を整備した。

以上の検討を通じて、地層処分システムにおける過酷事象を効率的、効果的に抽出するための評価技術を整備し、試行を通じてその有効性について確認することができた。

5章「可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示」では、平成25年度から平成28年度までの4年間の研究開発成果を集約し、処分計画の意思決定に関与する多様なステークホルダーが地層処分の実施について確信を持つことができる（ステークホルダーが合意することができる）地層処分システム概念を構築するため上での有効な方法論やそれを支援する技術および構築に必要な知見についての取りまとめを行った。取りまとめにあたっては、まず研究開発のアプローチとして採用した、処分概念の技術的根拠（能力）を提示するための「①レジリエンス的視点に基づく地層処分システムのロバスト性概念の検討」、概念構築プロセスの公正さを示すための「②公正性に根ざした合意形成型の処分概念の構築手法の開発」、およびこれら①と②の境界領域として、意志決定に関わる負荷の低減に寄与する「③合意形成の促進に資するモニタリング技術等の検討・開発」の3項目を取り上げ、それぞれの目標やねらい、特徴などを取り上げた。次に、研究開発項目ごとに、処分概念構築に適用する観点から導入・検討を行った個々の手法や方法論（例えば、「システムのレジリエンス性をさらに向上させるための共通の考え方」、ステークホルダーのニーズを取り入れることによって生じる矛盾や競合を解消するための「発明的問題解決理論」、新たな概念創出に向けた議論を支援するための「品質機能展開」や「共同事実確認」など）について取りまとめの記述を行った。そして、これら手法や方法論を駆使し、模擬ステークホルダーとの協働により「多様なステークホルダーが合意することができる処分概念」を新たな概念として創出するプロセスを紹介するとともに、その試みの成果となった創出概念の事例を提示した。新たな概念の創出にあたっては、地層処分に対して一般の人々が持つ不安や懸念を解消する視点に配慮し、例えばベントナイトの代わりにレジジン（樹脂）を緩衝材に採用するなどの「見える化技術」を導入した処分概念の事例を提示した。最後に、まとめと今後の課題として、多様なステークホルダーの合意が得られる処分概念を創出・提示するためには、特に概念の構築過程の公正さを明示すること、構築にあたっては地層処分に高い関心を持つステークホルダーの目線に立つこと、候補概念オプションを整備しておくこと、などが肝要であると結論づけ

た。さらに、ステークホルダとの協働による概念構築にも慣熟しておくことも重要であり、そのためには異なる模擬ステークホルダとの協働試行を重ねるとともに、その過程を通じて得られる概念構築の手法/支援技術へのフィードバックも肝要であるとした。

6章「処分事業に資するための処分システム評価確証技術の統合化」では、平成25年度から平成28年度までの4年間の研究開発成果を取りまとめた。主たる成果は、2つの項目（「(1)システム評価確証技術の統合化に関する試行」、「(2)処分システム評価確証技術の認知拡大に関する試行」）に大別される。前者については、各要素技術の統合化という観点で、専門家間のニーズに応じて従来から行われている実績があることから、今後もこれまでの延長線上をベースに、より一層の効率的/効果的に支援するための取り組みが期待できる。一方、後者については、地層処分で用いられる多くの技術が非専門家にとってはまったく馴染みのないものである。したがって、地層処分の社会的受容性を高めていくためには、地層処分に関わる知見や評価技術についてまずは非専門家の関心を引きつけたうえで、その仕組みや原理の理解といった知識の共有をより容易なものとしていくための取り組みが一層重要であるとした。この観点から、本サブプロジェクトでは、これまで地層処分技術（事例として、火山等の自然事象の影響評価やナチュラルアナログ）のブランディング化に取り組み、そのブランドに対する共感や信頼といった非専門家にとっての価値を高めていく試みを行った。また、既存の双方向コミュニケーション（コミュニケーションデザイン）の考え方や手法を取り入れ、非専門家に対して地層処分技術（事例として、廃棄物施設への人間侵入評価）の知識共有を試みた。これら取り組みが有効に機能したかどうかの評価は主婦や学生等からなる非専門家グループへの事後評価のインタビューを通じて行い、その結果を評価し、次の段階に向けた改善点等を今後の課題として抽出している。このように、本サブプロジェクトでは、地層処分に限らず馴染みのない技術に一般の人が話の切り口として興味を持ってもらえるかどうかを先ず重要な目標であると捉え、いくつかの試行を行った。地層処分に限らず将来予測に関わる評価技術は科学的根拠に基づくチャレンジングなテーマであることから、これまでのブランディングなど認知拡大を目的とした試みは、地層処分そのものを理解してもらうのではなく、その予測技術に関わるコミュニケーションという切り口から取り組みを行っている。今後においても、ブランディングなどといった名称が適切かどうかは別として、何らかの形で非専門家である一般の人々との間で（地層処分のようなイデオロギーを目的としない教材の形態として）知識の共有化を試みる必要がある。また伝え方のツールとして、断片的にでも今回行ったストーリー的な展開に関する取り組みも一種の価値があると考えられる。ブランドなど名称としてのローヤリティを高める意味はないが、心に伝わる（留まる）ことやわかりやすい説明を目的としたコミュニケーション手法には何らかの答えに繋がる糸口があるかもしれないことから、今後の過程においても試行錯誤を通じて適宜見直していくことが重要であるとした。

7.2 おわりに

本報告書は、平成25年度から平成29年度にかけて、資源エネルギー庁から原子力機構が受託を受けて、地層処分技術の信頼性向上を目的として実施した確証技術開発の成果を取りまとめたものである。地層処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入れられるものとするために本事業の成果が活用され、地層処分システムが、ステークホルダーにとってより納得のいくものとなることを期待している。

高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発

(処分システム評価確証技術開発 実施期間:平成25年度から平成29年度の主な成果)

1. 全体実施概要

わが国の高レベル放射性廃棄物(HLW)及び長半減期低発熱性廃棄物(TRU廃棄物)の地層処分計画を円滑に進めていくためには、地層処分の技術的信頼性をさらに高め、国民の理解と信頼を得ていくと同時に、実際の処分事業や安全規制の基盤となる技術を整備・強化していくための研究開発を着実に進めていく必要がある¹⁾。このような考えのもと、地層処分施設閉鎖後を対象として、処分施設周辺とその岩盤領域(ニアフィールド)におけるシステム変遷と核種移行の評価確証技術の開発(図1)を先端的な計算科学・分析技術や地下研究施設(日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの地下施設(幌延地下施設))等を活用して実施した。TRU廃棄物については、HLWとの共処分(同一サイトでの処分、図2)を想定し、ニアフィールド性能への影響評価技術の開発を行った。また、平成23年3月11日の東日本大震災や東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の教訓や大震災後に取りまとめられた内閣府原子力委員会の見解を反映し、巨大地震・断層活動を例とした過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価技術を行った。さらに、合意形成を目的とした可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分概念を提示するとともに、これらの評価確証技術の統合化を図った。

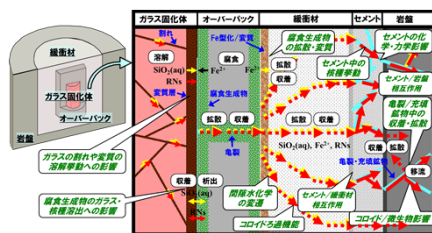


図1 ニアフィールドにおいて時間的変遷に伴い発生する現象(図中吹き出し)と核種の移行経路(図中矢印)の概念図

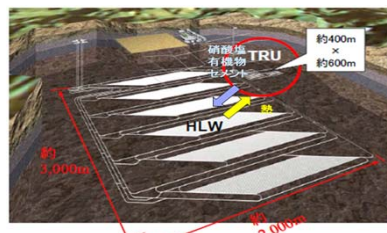


図2 HLWとTRU廃棄物との共処分概念例(HLWからは発熱の影響、TRU廃棄物からは廃棄体中の硝酸塩や有機物影響を考慮)

2. 主な成果

(1) ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発

処分施設閉鎖後におけるHLWの発熱、緩衝材への地下水の浸潤、それに伴う緩衝材の膨潤挙動の解析について、幌延地下施設(地下350m)で実施されている人工バリア性能確認試験を対象とした再現解析(図3)によりその適用性を確認し、解析手法の信頼性を向上させた。また、緩衝材に対する核種移行データをカルシウム型への変遷や塩濃度の高い液相条件にて取得した。先端的な分析技術を用いることで、ベントナイトのイオン型等の違いが核種移行データに及ぼす影響を評価することができ、人工バリアの変遷を考慮した核種移行解析を行う上で、より正確なデータ設定が可能となった。岩盤の核種移行については、岩盤に対するデータ取得や実際の岩盤の不均質性を考慮した移行モデルを構築することで、幌延地下施設や海外での地下研究施設で実施されたトレーサ試験結果の再現によりモデルの検証を行うことができた。処分施設に用いられるセメント系材料についても、長期的な変質やひび割れ発生・進展などの複合的な現象とこれに伴う状態変遷に追従して核種移行を解析する手法を構築した。

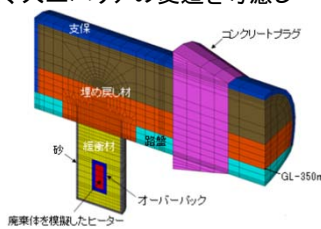


図3 人工バリア性能確認試験の解析メッシュモデル

(2) 多様な廃棄物の共処分におけるニアフィールドの影響評価技術開発

HLWとTRU廃棄物の共処分特に重要と考えられる硝酸塩と有機物の影響に着目して、廃棄体の固型化材に使用されるアスファルトと硝酸イオンの反応熱によって熱反応暴走が起こる可能性を評価する手法を構築し、試行的評価を実施した。その結果、熱反応暴走が誘発される可能性が低いことを示した。また、硝酸性窒素の汚染調査事例等を活用して硝酸イオンの化学的変遷モデルの長期的評価の妥当性の確認を行うと共に、バリア材料の安全機能及び放射性核種の移行挙動等への影響を評価した。

(3) 過酷事象の地層処分システムへの影響に関する評価確証技術開発

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を受け、地層処分システムにおける過酷事象の定義を明確化すると共に、人への甚大な影響を起点としたアプローチ、及び不安や懸念を起点としたアプローチを統合した手法を構築し、試行を通じてその適用性を確認した。また、巨大地震・断層活動に起因する過酷事象に関係する個別事象等の調査・整理を断層模擬試験設備(図4)による模型実験や数値解析手法を用いた再現解析等により実施した。さらに、それらを基に、巨大地震・断層活動に起因する過酷事象の評価の試行を行い、過酷事象を成立させるためには極めて発生可能性の低い複数の条件を同時に想定する必要があることを確認し、それらを系統的に示すための手法を整備した。



図4 断層模擬試験設備

(4) 可逆性と回収可能性などを考慮した地層処分システム概念の提示

処分計画の意思決定に関与する多様なステークホルダが地層処分の実施について合意することのできる地層処分概念を構築する上での有効な方法論やそれを支援する技術および構築に必要な知見についての整備を行った。また、その有効性を確認するために、模擬ステークホルダとの協働により新たな概念事例を示した。信頼を得るためには、概念構築のプロセスの公正さを明示するとともにステークホルダーの目線に立って概念を構築することが肝要であるとした。

(5) 処分事業に資するための地層処分システム評価確証技術の統合化

(1)から(4)で得られた各要素技術の統合化を行うためのプラットフォームを構築した。また、地層処分の社会的受容性を高めていくため、処分に関わる知見や技術についてまずは非専門家の関心を引付け、その仕組みや原理の理解といった知識の共有をより容易なものとしていくための取り組みを行った。

3. 地層処分計画への貢献

本事業で得られた成果について、論文投稿及び学会発表を行い、成果の普及を図った。また、諸外国の地層処分の実施主体(英国NDA、ベルギーONDRAF、仏国ANDRA、スイスNagra、スウェーデンSKB、フィンランドPosiva、合計6機関)や研究機関(ベルギーSCK、韓国KAERI)とのワークショップや情報交換会議で成果を発表した。さらに、わが国の地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構においても評価技術の一部が活用されており、地層処分計画に貢献した。

【参考文献】

- 1) 地層処分基盤研究開発調整会議(2013):地層処分基盤研究開発に関する全体計画(平成25年度~平成29年度)