

処分技術と安全評価に関する研究開発の現状  
- 実際の地質環境を対象とした取組みを中心として -

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所 環境保全・研究開発センター  
処分研究部  
部長 石川 博久

## 1. はじめに

地層処分の研究開発において、モデル開発やデータ取得等の個別要素の開発に加えて、実際の地質環境における地層処分技術の適用性確認の取組みが重要である。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、これまで海外の地下研究施設や釜石鉱山等既存の地下施設を利用した研究により、東海事業所のエントリー等にて開発してきた処分技術や解析モデルについて適用性確認や検証を進めてきた。今後とも、エントリー及びクオリティにおける研究開発と、深地層の研究施設において段階的に進められる研究開発、海外の地下研究施設等における共同研究とを有機的に連携していくことにより、「処分技術の信頼性向上」及び「安全評価手法の高度化」に係わる研究開発を、効率的かつ合理的に進めていく。

本報告では、サイクル機構が国際共同研究として進めている海外の地下研究施設を活用した実際の地下環境を対象とした研究開発の取組みと、今後の進め方について報告する。

## 2. 研究開発課題と進め方

東海事業所で進めている地層処分研究開発の課題である、「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」について、これまでエントリーおよびクオリティにおける室内試験を中心に、長期挙動や現象の理解に基づき予測モデルや評価モデルの構築を進め、実際の地質環境条件の不確実性を考慮し、また、設計・施工条件と整合をとりつつ、ニアフィールドの長期挙動評価や安全評価におけるシナリオ、モデル、データベースの開発を進めてきた。妥当性の確認についてはナチュラルアナログ研究等を活用し、研究成果については、分かりやすい提示と透明性、追跡性の確保を主眼としてきている。これまでに、エントリーおよびクオリティにおいて、第2次取りまとめまでのデータの補完として、海水系のデータ等を中心にデータの拡充を図るとともに、データベース化を進めている。特に、熱力学データを中心とした核種移行データベースを構築し、公開準備を進めている。また、モデルの高度化として、様々な個別現象モデルを連携させる「連成モデル」の開発、天然の地層における空間的な不均質性や評価の不確実性を考慮した「水理物質移行モデル」の開発等、現象に則したモデル開発を着実に進めている。

今後は、深地層の研究施設計画における実際の地質環境データの取得の進展に合わせて、室内試験等に基づき開発してきた解析・評価手法の適用性や不確実性等について確認していくことが重要となってくる。特に、サイクル機構の特徴としては、工学規模から実験室規模までの条件を制御した試験が可能なエントリー、実際の放射性物質が取り扱えるクオリティに加え、幌延および瑞浪の深地層の研究施設という実際の地質環境の場があり、それぞれの施設の特徴を活かし、有機的に連携することにより信頼性が高く、普遍的な成果を得ることができる。図1に、室内試験と深地層の研究施設での試験との連携の考え方を示す。

海外の地下研究施設では、国際共同研究として取り組むことにより、各国の研究開発機関における最新の知見や成果を持ち寄り、効率的かつ合理的な研究開発に資することができる。国際共同研究に参画することにより、これまで開発してきたモデルや処分技術の確認とともに、今後のわが国の深地層の研究施設での研究開発計画に直接役立つことが期待される。なお、結晶質岩における地層処分研究開発については、海外の地下研究施設を活用しわが国の計画を補完することが重要である。

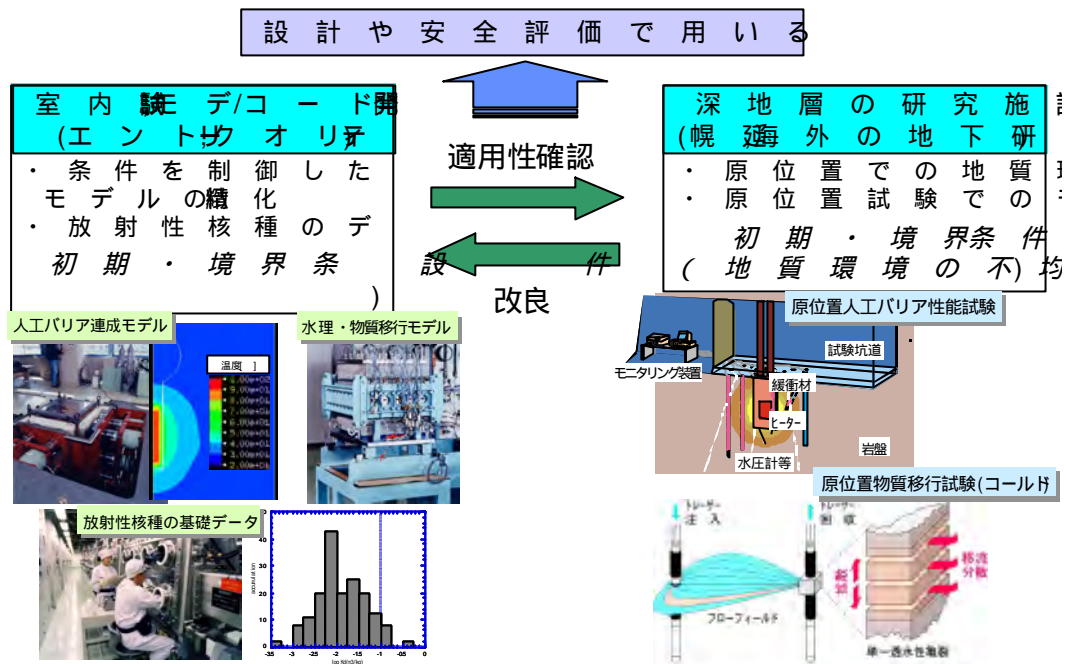


図1 室内試験と深地層の研究施設での試験との連携の考え方

### 3. 実際の地質環境を対象とした取組み

海外の地下研究施設を利用した「処分技術の信頼性向上」および「安全評価手法の高度化」に関わる取組みを以下に紹介する。「処分技術の信頼性向上」では、人工バリア工学技術の検証や人工バリア等の長期複合挙動に関する研究を、「安全評価手法の高度化」では、岩盤中での水理・物質移行モデルの開発、現象論的核種移行モデルの開発、コロイド等の影響評価モデルの開発を中心に、各国が共通して直面している技術的課題に海外の専門家と協力して取り組んでいる。これら先行的な取組みから得られる成果は、原位置試験と室内試験/モデル開発との連携手法等、今後深地層の研究施設等で直面する課題に対して貴重な情報を与えるとともに、研究計画の合理化につながるものと考えられる。

#### 3.1 処分技術の信頼性向上

##### 1) 人工バリア工学技術の検証

カナダ AECL との国際共同研究として AECL の地下研究施設（花崗岩）を利用したトンネルシーリング試験（TSX: Tunnel Sealing Experiment）を実施している。これは、地層処分システムとして安全評価上重要な人工バリア工学技術の一つである処分坑道の閉鎖技術に関する検証試験である。本試験の目的は、実規模プラグ（粘土及び低アルカリ性コンクリート）について、花崗岩の地質環境を考慮した設計・設置技術の適用性の評価、施工されたプラグのシーリング性能の評価、その性能に影響を与える要因の抽出である。特に粘土プラグは、サイクル機構が第2次取りまとめで示した仕様に基づいている。現在、設置したプラグの力学的・水理的挙動の計測・評価を行っている。粘土プラグの水理的挙動に関しては、プラグ及びプラグ近傍の岩盤を通過する湧水量・経路等に関するデータに基づき、プラグ周辺環境の湧水経路に関する評価技術の構築のため、計測データによる解析モデルの検証を実施している（升元・杉田，2002）。今後、この花崗岩における閉鎖技術の知見を取りまとめるとともに、岩種が異なることも考慮しつつ、幌延の深地層の研究施設における試験研究に反映させる予定である。

##### 2) 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

人工バリア等のニアフィールド環境における長期複合挙動をより現実的に評価するためには、二

アフィールドの時間・空間的変遷を、熱、水、応力、化学が連成する挙動として捉え、実現象に基づく解析コードによる予測が必要である。この連成挙動を評価する解析コードの開発・高度化には、他の解析コードとのベンチマークテスト解析や原位置試験等のデータを用いた確認が不可欠である。

実現象を理解するためには、原位置における試験を通じた研究を実施することが重要であるが、サイクル機構では、原位置における試験としてスウェーデン SKB の地下研究施設（花崗岩）を利用した PRP (Prototype Repository Project; Svemar and Pusch, 2000) に参加している。ここでは、図2に示すように複数本の実規模の人工バリア（廃棄体：廃棄体を模擬したヒーター）を地下深部に設置し、熱的、水理学的、力学的プロセスが相互に影響し合う挙動について、ニアフィールド環境を調査・評価するものである。これまでに、熱-水-応力連成挙動の計測技術に関する技術協力を行うとともに、実環境における現象の理解、計測データとの比較による熱-水-応力連成現象評価モデルの妥当性の評価を行っている。図3に、PRPにおける2本の廃棄体に対してサイクル機構が開発した連成モデルによる廃棄体定置後200日後の温度分布の解析例（予測評価）を示す。

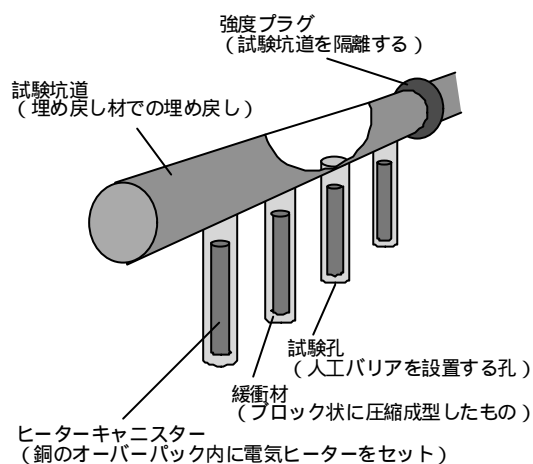


図2 PRP の模式図

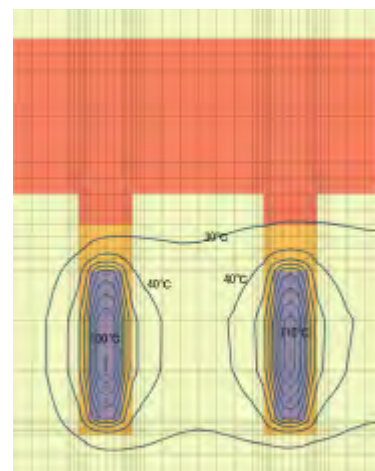


図3 定置後200日後の温度分布解析例

また、人工バリアにおける熱-水-応力連成挙動モデルの高度化に関する研究として、9カ国14機関から成る国際共同研究 DECOVALEX に参加し、連成モデルの開発・高度化を目的として、各国の連成解析コード間のベンチマークテスト解析や室内/原位置連成試験に対する確認解析を行っている(杉田ほか, 2002)。

### 3.2 安全評価手法の高度化

#### 1) 岩盤中での水理・物質移行モデルの開発

岩盤中での水理・物質移行に関しては、モデル開発にエントリーや国際共同研究における室内試験の成果を活用し、海外の地下研究施設を利用してモデルの適用性確認を行うことによりモデルの信頼性向上を図っている。

単一亀裂: スウェーデン・SKB の地下研究施設における sp 水理・物質移行モデリングタスクフォース

サイト特性調査と性能評価の連携を目的として、性能評価上重要なニアフィールド周辺岩盤中の亀裂中の核種移行評価の信頼性を向上させるため、トレーサー試験の持つ性能評価上の不確実性の評価を実施している。最終的には数10m～100mスケールを評価することを目標に、段階的に単一亀裂から亀裂ネットワークスケールへと課題を設定している。最初の段階として、単一亀裂で行われた5mスケールのトレーサー試験を説明可能なモデルを構築し、性能評価で用いる動水勾配(0.1%)でのモデルの挙動の比較検討を行った(吉添・Dershowitz, 2002a)。

サイクル機構は、空隙率の高い亀裂充填物が短期間のトレーサー試験に及ぼす影響に着目し、トレーサー試験結果を説明可能な空隙率の高い亀裂充填物を考慮したモデルと考慮しないモデルを構築した後、0.1%の動水勾配条件でモデルによる解析結果を比較した。空隙率の高い充填物を考慮したモデルと考慮しないモデルは、図4のように挙動が大きく異なり、パラメータを解釈する際に空隙率の高い充填物の存在を考慮しないとマトリクス拡散の効果を過大評価する可能性があることを指摘した。今後は100mスケールでの亀裂ネットワークでのトレーサー試験を対象とした不確実性解析を行い、亀裂交差部の影響など亀裂ネットワークスケールでの不確実性の影響を検討する予定である。

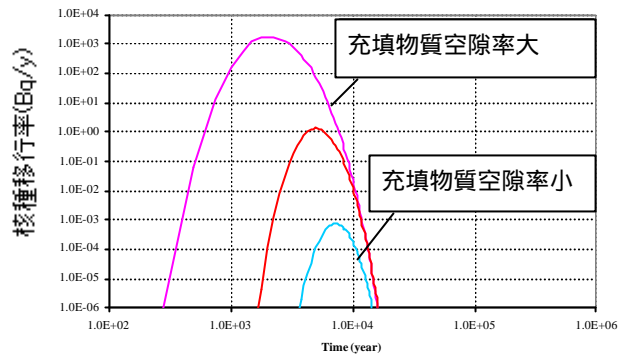


図4 空隙率の高い充填物を考慮した場合と考慮しない場合のAm241の破過曲線

#### 亀裂交差部：TRUE Block Scale 試験

エントリーで実施している亀裂交差部を含む50cm岩体での試験（NETBLOCK 試験）において、亀裂交差部が卓越経路であることを示す結果が得られている。一方、sp 地下研究施設で行われた100mスケールのトレーサー試験においては、亀裂交差部をまたいで実施されたトレーサー試験は回収率が低下する傾向を示しており、亀裂交差部が卓越経路であることを仮定すると実際の回収率を再現することができた(吉添・Dershowitz, 2002b)。

#### 2) 現象論的核種移行モデルの開発

ベルギー・モルのHADES地下研究施設（ブーム・クレイ粘土層）において、放射性核種添加ガラスを用いた原位置試験に関する国際共同研究（CORALUS プロジェクト）が行われており、サイクル機構も参加している。本プロジェクトの目的は、ブーム・クレイ粘土層における放射性核種を含むガラスの溶解やベントナイト中の核種移行挙動の把握とモデルの適用性確認であり、すでに放射性核種（Pu, Am, Np 等）添加ガラスやベントナイトが埋設されている(Iseghem et al., 1998)。各国とも事前にガラス浸出室内試験やモデル化等の協力を行っており、サイクル機構においても、第2次取りまとめで用いた人工バリア中の核種移行解析モデルや核種移行データベースの原位置試験による確証を目的として事前解析を実施した。解析においては、埋設予定期間2.5年を想定し、原位置地下水化学に基づき、圧縮ベントナイト中の間隙水化学、ガラスの溶解速度、核種の溶解度、核種の分配係数や拡散係数を予測・評価し、圧縮ベントナイト中の核種移行挙動を予測した。

#### 3) コロイド等の影響評価モデルの開発

スイス・グリムゼル原位置試験場（花崗岩）の研究用トンネルを横切る単一透水性亀裂を対象に、コロイドによる放射性核種の移行・遅延の評価を目的とした原位置試験プロジェクト（CRR プロジェクト; Smith et al., 2001）が1998年から国際共同研究プロジェクトとして展開され、サイクル機構も参加している。これまでに、亀裂中における核種とコロイドの移行挙動に関する知見が得られた。現在は、試験対象亀裂の水理特性を考慮した核種の移行・遅延に対するコロイドの影響評価モデルを開発し、安全評価手法としての信頼性評価を行って

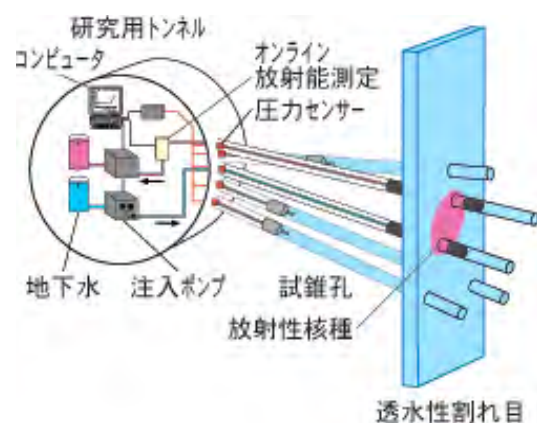


図5 グリムゼル原位置試験の概略



いる。サイクル機構は、エンタリーにおけるコロイド特性評価試験や亀裂中でのコロイド-核種-岩盤相互作用を考慮したモデル解析を実施した。図5にグリムゼル原位置試験の概略を、図6に、サイクル機構が実施したCRR実験におけるAmの移行挙動とモデル解析結果の比較例を示す。コロイドが共存する系でのAmの移行挙動は、コロイドからの脱離速度に影響を受けることが確認され、コロイドに対する核種の収着反応の不可逆性等に関して室内試験の重要性がより強く認識されるに至っている。

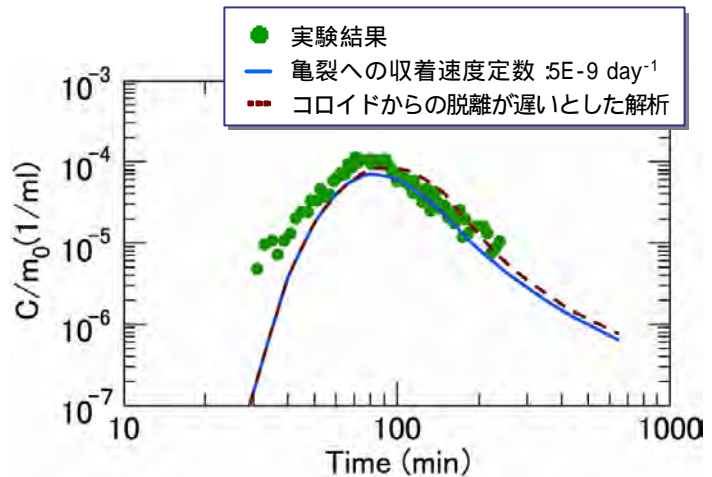


図6 CRR 実験における Am の移行挙動とモデル解析結果の比較例

また、当原位置試験場においては、処分場にセメント材料を用いた場合のセメント - 地下水反応により発生する高 pH 溶液の影響を調べる目的で、セメント影響原位置試験に関する国際共同研究 (HPF プロジェクト) も行われており、サイクル機構も参画している。セメントによる高 pH 溶液の影響については各国の共通の課題となっており、本研究では、花崗岩亀裂中での 2 次鉱物の生成等亀裂の変質の把握や核種移行挙動に関する原位置試験が行なわれる。

#### 4. 今後の進め方

##### 4.1 分野間の連携

地層処分システムの長期の安全性評価の信頼性は、安全評価分野の中での検討のみならず、地質環境特性や処分技術（設計）からの情報の入手、あるいは安全評価の結果に基づく必要情報の提示などのやりとりがくり返し行われることにより、段階的に向上していくことができると考えられる。また、今後の地層処分研究開発においては、具体的な地質環境を対象として安全性を評価することのできる技術の開発が重要となるが、そのような評価に関わる情報の種類や相互の関係は極めて複雑になることが想定される。

そのため、「深地層の科学的研究」「処分技術の信頼性向上」及び「安全評価手法の高度化」の分野間（以下、3分野と）での情報のやりとりを円滑に行うことができる環境を整備することは、3分野間の連携の効率的な実施を支援するために重要である。また、このような環境が整備されることにより、安全評価の整合性や追跡性が向上し、評価結果の品質の向上に資することが期待される。なお、ここで対象とする情報とは、様々な試験や調査の結果、それらの解釈・解析・考察・判断の結果、あるいはそれらを得るためのノウハウなどである。

このような環境を整備するための取組みとして、これまでに、第2次取りまとめを基礎として、情報の一般的な関係についての整理と体系化を進めてきている。また、平成 16 年度を目標に、体系化の成果を反映したデータベース機能、データの登録・参照機能、可視化機能などを備えた計算機システムとして具体化する予定である。また、このシステムを基本構成として、今後事例が増加する分野間での実務的な連携作業と情報のやりとりを適宜反映していくことにより、上記目的に沿った環境へと段階的に向上させていく。

原位置での調査研究と安全評価の間の相互の連携の有効性の検討にあたって、海外の事例調査として、米国サンディア国立研究所との国際共同研究の中で、米国における Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)、Yucca Mountain Project (YMP) および Greater Confinement Disposal (GCD; 軍事関係の TRU 廃棄物を 40m 深さのボアホール下部 15m 部分に処分) を対象に、不確実性評価の結果を原位置での調査研究の進め方にどのように反映しているかに着目した調査を行った。この結果、顕

著な効果が得られた例として、初期の段階から相互の連携をくり返し実施した GCD において不確実性の低減などの高い効果が得られたこと、また、調査が先行した WIPP においても、相互の連携を取り入れることにより重要課題の絞り込みが進むなどの効果が得られたことがわかった。一方、このような相互の連携を実現するためには、関係する全研究者が全体の目標を理解し自分たちの作業との関係を理解すべきこと、またくり返しを通じて一緒に進歩すべきこと、などが特に重要であることが示された。これらは、今後幌延等を対象とした原位置での調査研究と安全評価の間の相互の連携において重要な考慮事項と思われる。

#### 4.2 国際共同研究の役割

3.で述べた国際共同研究は、地下研究施設を利用した各国共通の技術課題であり、単に、一地下研究施設で解決できるものではなく、各国の当該専門家の協力が不可欠である。先行的にこれら地下研究施設を用いた国際共同研究に参加することで、国際的な課題に対する専門家の合意形成に寄与するだけでなく、特に、海外で先行的に進んでいる結晶質岩における重要な経験や技術的知見の処分事業や安全規制への提供、幌延等の深地層の研究施設における当該研究計画の合理化、既に専門家間で重要性が認識されている室内試験、モデル開発、データベース開発と原位置試験の連携手法の構築に寄与するものと考えられる。

サイクル機構が参加している国際共同研究は、いずれも上記 ~ の役割の多くを担っており、各国の専門家の英知を結集し、対応されているものである。

さらに、国際共同研究は、わが国の深地層の研究施設における研究開発の補完としての役割を有している。結晶質岩については、既に海外で実規模での試験等により人工バリアシステムの確認や水理物質移行モデルの確認等が行われていることから、ここで得られる知見を活用し、わが国で実施すべき項目を合理化している。

#### 4.3 今後の課題と進め方

3.で述べた国際共同研究による海外の地下研究施設を利用した原位置試験や室内試験 / モデル開発の経験を踏まえ、わが国の深地層の研究施設計画の進展に合わせて進めていく主要な個別課題について紹介する。

##### 1) 深地層の研究施設の進展における個別研究の重要課題

4.1で述べた3分野間の連携は、深地層の研究施設計画の各段階における情報量・質の程度に応じて適切に進められていく。以下、具体的に、深地層の研究施設計画における進展を踏まえ、水理・物質移行研究、地下水化学研究、処分技術開発の観点から、重要課題について述べる。

水理・物質移行研究に関しては、室内試験、原位置試験から得られた移行プロセス、断層・亀裂等の巨視的構造、移行経路の微視的構造に関する知見をモデル化し、性能評価の条件下での影響を評価することにより、性能評価上重要となる要因を抽出し、サイト特性調査側にフィードバックする。地表からの調査段階においては、断層・亀裂等の巨視的構造が課題となり、地下施設における調査段階では移行プロセスや移行経路の微視的構造が課題となる。サイクル機構の深地層の研究施設計画は地表からの調査研究段階であり、断層・亀裂等の巨視的構造が当面の課題となり、地下施設における調査段階にある海外の地下研究施設にない利点を有している。移行経路の微視的構造やそこで考慮すべき移行プロセスは、岩盤に依存するので、海外の地下研究施設で得られた知見を、わが国の岩盤条件に合わせて改良することが地下施設における調査段階におけるわが国の深地層の研究施設の役割となる。

地下水化学研究に関しては、人工バリア等の設計や核種移行評価等の性能評価で必要となる地下水化学特性（特に、pH、Eh、イオン強度、炭酸、有機物、コロイド、微生物）について、深地層の研究施設計画の各段階で得られる地下水化学や岩石の地球化学特性に応じて、地下水水質形成モデルや多変量統計解析等により水質の解釈を必要に応じて補正するとともに、水質の空間的分布を

把握していく。

処分技術開発については、深地層の研究施設計画の各段階で得られる水理、地下水化学、力学特性を用いた設計フローを構築し、地下施設設計・施工と連携しつつ、人工バリアの試設計を進めていく。これら処分技術開発の基礎となるデータは、2)、3)に述べる研究開発成果に基づき整備していく。これらの検討に基づき、設計手法の適用性確認を目指した個別現象の原位置試験計画の詳細化（例えば、深さ、スケール、環境条件等の設定）を進める予定である。

## 2) ニアフィールド環境に関する基盤情報の整備

地層処分では、地下深部環境において熱的、水理的、力学および地球化学的な現象が相互に影響し合い連成した挙動として捉えることが、より現実的な設計や安全評価を行うために必要である。これまでに、熱、水、力学における連成挙動を中心として、国際共同研究を通じて海外の地下研究施設を活用した連成試験の実施及びデータの取得、海外機関の連成コードとのベンチマークや原位置試験データを用いた確認を行い、処分技術に係わる基礎基盤情報・技術として整備してきた。今後も継続して原位置における試験データを取得するとともに、特に、国際的共通課題となっている地球化学的現象（海水系地下水、オーバーパックの腐食生成物、セメント等による岩盤や緩衝材への化学的影響）を考慮した連成挙動評価について、研究開発を行っていく。また、これらの成果を人工バリアや天然バリアに求められる性能やその評価手法の観点から整理するとともに、幌延の深地層の研究施設における熱-水-応力-化学連成現象を中心とした原位置試験計画に反映する予定である。

## 3) 人工材料の開発

人工材料の開発として取組んでいる低アルカリ性コンクリートは、諸外国でも普通コンクリートの有望な代替材料として検討されており、残されている主たる課題は施工性の確認である。サイクル機構における施工性開発では、室内実験により圧縮強度やpH挙動の把握を行うとともに、屋外での施工試験により基本的な施工性を確認している。また、低アルカリ性であるがゆえに問題となる鉄筋の腐食についても室内実験と屋外暴露による試験を実施している。今後の2～3年はこれらの実験を継続し、実際の工事で支障なく施工できるとともに、強度や耐久性など品質面でも問題のないことを確認する。これらの成果を踏まえて幌延の深地層の研究施設の建設に用いることにより最終的な施工性の確認を行う予定である。具体的な適用としては、立坑の支保工としての場所打ちコンクリート、水平坑道の支保工としての吹付けコンクリートを予定している。これらは、施設の一部に対して適用し、一般部には普通コンクリートを使用し、地下水への影響などを比較する。また、幌延の第3段階で実施される坑道閉鎖試験（プラグ）やセメント影響試験においても適用を検討している。

## 4) 核種移行評価研究

ニアフィールドの核種移行に関する原位置試験については、化学アナログに基づき、実際の放射性物質を用いた核種移行試験まで行う必要はないが、第2次取りまとめで用いた核種移行評価手法（シナリオ、モデル、データベース）の妥当性を確認する必要がある。特に、今後特定の場所を対象とした地質環境特性や処分場の設計（例えば、コンクリート支保の影響）を行うことができる技術の開発として、核種移行評価上かぎとなる原位置試験を、室内試験と連携し行う必要がある。人工バリア、特に圧縮ベントナイト中や岩盤マトリックス中の核種移行試験については、原位置の地下水を用いた室内試験で十分と考えられる。周辺岩盤中の物質移行試験については、支配的な物質移行経路を想定した原位置物質移行試験を、各段階の地質環境特性に関する情報量・質の程度に応じ設計、実施していく必要がある。核種移行試験に関しては、岩盤や地下水化学の特性はもとより、第2次取りまとめでは定性的な評価にとどまっていたコロイド、有機物、微生物の影響評価により力を入れていく必要がある。

## 5. おわりに

処分技術や安全評価手法の実際の地質環境への適用性確認は、地表からの調査段階から地下施設における研究まで段階を追って詳細化される地質環境特性に関する情報量・質の程度に応じ行なわれる。本稿で述べた海外の地下研究施設を活用した国際共同研究は、単に場の提供ではなく、世界各国が共通して直面している技術的課題に対して、当該分野の国際的専門家を動員して解決を図っていかねばならない課題であり、既に地下研究施設を有する国でも、他国のプロジェクトへ参画し共通課題として取り組んでいる。今後も、わが国の深地層の研究施設における主要な研究開発については、国際協力によって蓄積された技術的知見や動向も踏まえて、室内試験によるモデル化、データベース開発と連携しつつ、国際的合意形成も含めて合理的に研究を進めていくことが重要である。

## 参考文献

- Iseghem, P.V., Valcke, E. Godon, N. and Jockwer, N. (1998): CORALUS: an integrated in situ corrosion test on active glass, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.506*, pp.961-967.
- Kickmaier, W., Alexander, W.R., Vomvoris, S. and Mckinley, I.G. (2001): Grimsel 2000-Status of International Projects at the Grimsel Test Site (GTS), *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.663*, pp.893-900.
- 升元一彦, 杉田 裕 (2002): カナダ URL における実規模プラグの性能確認試験, 土木学会第 57 回年次学術講演概要集, 共通セッション, CS10-031.
- Smith, P.A., Alexander, W.R., Kickmaier, W., Frieg, B., McKinley, I.G. and Ota, K. (2001): Development and testing of radionuclide transport models for fractured rock: examples from the Nagra/JNC Radionuclide Migration Programme in the Grimsel Test Site, Switzerland., *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.47, pp.335-348.
- Svemar, C. and Pusch, R. (2000): sp Hard Rock Laboratory - Prototype Repository - Project description, SKB IRR-00-30.
- 杉田 裕, 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和, 大西有三, 小林 晃, 操上広志, 千々松正和, 雨宮 清 (2002): 人工バリアおよび周辺岩盤における連成モデルの開発プロジェクト -国際共同研究「DECOVALEX」, 土木学会第 57 回年次学術講演概要集, 共通セッション, CS10-051.
- 吉添 誠, Dershowitz, W. (2002a): 亀裂ネットワークモデル及び GoldSim による解析, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱商事), JNC TJ8440 2002-005.
- 吉添 誠, Dershowitz, W. (2002b): 亀裂ネットワークモデルによる解析作業の実施および長期揚水試験の計画策定に関する支援, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱商事), JNC TJ7400 2002-002.