

## 分冊 2 「工学技術の開発」

## 要 約

本報告書は、第2次取りまとめ以降の処分事業や安全規制に関する動向を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が実施してきた工学技術の研究開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、核燃料サイクル開発機構が課題評価委員会による評価を受けながら策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）に示された目標および課題に対応したものになっている。

全体計画で示された第2次取りまとめ以降の処分技術の信頼性向上に関する目標は、これまで整備してきた地層処分に関連する様々な技術や手法を、実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確認していくこと（「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」）および処分システムに関連する現象への理解を深め、評価の信頼性を高めていくこと（「地層処分システムの長期挙動の理解」）である。第2次取りまとめ以降の処分技術開発については、人工バリアと周辺岩盤を含むニアフィールド環境における長期的な個別現象や連成現象の理解向上により、処分システムの長期性能に関する評価の信頼性向上に焦点を当てて研究を進めた。そのため、地層処分基盤研究施設（ENTRY）での工学試験や国際共同研究により、炭素鋼オーバーパックの腐食挙動や緩衝材の基本特性に関するデータベースの整備、熱-水-応力-化学連成モデルの開発などを進めるとともに、ナチュラルアナログ研究により人工バリア材料の長期挙動に関するデータの蓄積と評価手法の妥当性確認を進めた。また、海外の地下研究施設を活用した閉鎖技術の開発や低アルカリ性セメントの開発などの工学技術開発を進めた。さらに、深地層の研究施設を対象とした地表からの調査段階における地質環境条件の設定に基づく設計手法の適用性確認を行った。これら、個別課題に対する研究の遂行により、個別の設計手法やデータベースについて常に最新の知見が取り込まれ、最新技術への更新が可能となる。第2次取りまとめと異なり工学技術関連の全分野を網羅的にカバーするのではなく、工学技術の基盤として、設計に関わる人工バリア等の長期挙動評価のための現象理解、モデル開発、データベース開発、閉鎖技術に関わる検証や材料開発などの中から、重要な課題を選択して実施している。

本報告書は、全6章から構成されている。第1章は全体計画に基づく目標および課題、ならびに研究の進め方を示している。第2章（人工バリアの基本特性データベース）、第3章（人工バリア等の長期複合挙動に関する研究）、第4章（人工バリア等の工学技術の検証）、第5章（設計手法の適用性確認）の各項目においては、課題を設定した背景、第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映、今後の課題について記述した。課題を設定した背景においては、どのように第2次取りまとめの課題、国際的動向、事業・規制のニーズ等を考慮して課題を設定したかを記述した。第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映においては、各課題において得られた成果の処分技術および事業・規制における位置づけや反映点について記述した。また、最後に今後の課題として、次のフェーズで取り組むべき課題について記述した。第6章では、第2次取りまとめ以降の研究の進捗および事業・規制への反映点を要約した。

以下に、第2次取りまとめ以降の進捗を中心に各項目の概要を述べる。

## 人工バリアの基本特性データベース

オーバーパックの基本特性に関する研究では、炭素鋼の腐食挙動のうち、腐食生成物堆積による影響については、腐食生成物としてマグネタイトによる腐食加速に起因するオーバーパックの短期破損の懸念は小さいことを示した。セメント影響についてはpHが13以上で不動態化する可能性があることを示すと同時にアルカリ環境での腐食評価手法を提案した。同じく、溶接部の腐食速度については母材と同程度であることを確認した。代替オーバーパック

の腐食挙動では、チタンについては、還元性環境での実験データの取得により、長期の水素吸収・脆化の傾向を把握し、水素脆化寿命の評価手法を提案した。同じく、銅については、酸化性環境での実験データを取得し、腐食形態や酸素、硫化物の影響について腐食挙動の傾向性を把握した。さらに、現状の知見に基づき、地質環境条件に対する炭素鋼、チタン、銅といった材料の選定方法に関する基礎情報を整理した。

緩衝材の基本特性に関する研究では、海水系地下水条件下を模擬した飽和水理特性、膨潤特性、力学特性データの取得、関係式の一般化やデータ集の公開、データベース管理システムの一部を構築した。また、熱物性や力学物性測定手法について検討し、手法の違いによる影響を確認するとともに、標準化に関わる基盤情報に寄与する知見が得られた。

人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備では、設計段階における保証項目（案）（何を保証するのか）、評価方法（どのように保証するのか）、評価ツール（モデル、データベース、実験方法）の開発状況を整理した。また、人工バリア性能確認のためのモニタリング技術に関する情報や人工バリアの定置精度に関わる実験データに基づく知見が得られた。

### 人工バリア等の長期複合挙動研究

緩衝材の力学的変形挙動に関する研究では、既存のクリープ・モデルの体系的比較を行い、2つの評価モデルを選定するとともに、パラメータ設定手法を提示した。また、実験によりこれら2つのモデルが緩衝材構成モデルとして適用性を有していることを確認した。新たに選定されたモデルを用いてオーバーパックの自重沈下解析を行なった結果、第2次取りまとめより変形は大きくなったが、事例検討では、コロイドろ過性や自己シール性は維持されており安全評価上は問題にはならないことが示された。さらに、緩衝材-岩盤の長期力学的変形挙動に関する連成モデル構築に取り組んだ。

岩盤の力学的変形挙動に関する研究では、評価手法の検証のため地圧現象がナチュラルアナログ的手法として有望であることを示した。幌延の研究所用地に分布する稚内層硬質頁岩を対象として、力学変形挙動評価に関する基本データを取得し、内圧効果により力学的な安定性が期待できることを示した。掘削後早期に支保工などの工学的対策で内圧を与えることで長期の力学的安定性を改善可能であることがわかった。また、堆積岩に見られる自己回復特性は、空洞周辺の剛性が低下した領域の力学・透水特性が長期的に回復する可能性を示唆している。

緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究では、海水系地下水条件等を考慮したデータを整備するとともに、海水系地下水条件での影響は顕著ではないことが示された。また、流出現象を評価する拡散モデルの信頼性向上を目的として、X線CT法を用いて模擬亀裂中に侵入したベントナイトの密度分布やベントナイトの粘度を測定した。その結果、X線CTを用いた亀裂中の密度分布測定がモデルの検証に有効であることを示すとともに、モデルの適用性確認を実施した。また、ベントナイトコロイドの発生が海水系地下水条件では顕著でないことも示した。

人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究では、セメント影響、鉄の腐食生成物による影響等に関する緩衝材の長期安定性評価フローを作成し、概略的評価を行った。セメント影響については、現段階では支保工材料として低アルカリ性セメントを推奨した。また、鉄の腐食生成物による影響については実験的研究も行き、その影響は顕著ではないことを示した。

熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究では、化学現象を取り込んだ熱-水-応力-化学連成解析コードのプロトタイプを開発し、ユッカマウンテンの坑道規模加熱試験や連成室内試験により検証を進めた。本コードを用いて第2次取りまとめでの条件に対する解析を実施し、緩衝材の最高温度、再冠水時間や間隙水のpHに関して比較評価を行い、第2次取りまとめの評価の妥当性を確認した。また、処分環境で懸念される塩の蓄積に関する解析を実施して、顕著な影響はないことを確認した。本解析コードの開発によりニアフィールド環境の数値実

験の基盤が構築された。

緩衝材のガス透気回復挙動に関する研究では、海水系地下水がガス移行に与える影響は、降水系地下水の場合に比べ、それほど顕著でないことを示した。これにより降水系、海水系両地下水でのガス透気回復挙動に関する概略的な評価が可能となった。緩衝材中のガス移行挙動を直接観察するためX線CT法の適用性を確認し、選択的移行経路の形成によるガス移行挙動を確認した。X線CTを用いた可視化試験とガス移行モデルによる解析との比較検討により、モデルの妥当性を示すことができた。これにより、X線CTを用いた密度分布測定がガス移行モデルの検証に有効であることを示した。

人工バリアせん断応答挙動に関する研究では、人工バリアの1/20の模型を用いて、緩衝材厚さの80%にあたる変位のせん断試験を行ない、土圧や間隙水圧を実測し、既存モデルによりせん断時の緩衝材の力学的挙動の傾向性を表現できることがわかった。なお、オーバーパックは緩衝材中で回転し、損傷を受けていないことを確認した。

炭素鋼オーバーパックのナチュラルアナログ研究では、考古学的試料の調査が進み、1,000年規模のデータが取得された。また、弱酸化性から還元性環境での1,000年程度の考古学試料の研究結果より、第2次取りまとめにおける炭素鋼オーバーパックの腐食評価が保守的であることを事例的に示した。

### 人工バリア等の工学技術の検証

閉鎖技術に関する研究では、カナダの地下研究施設において施工されたプラグの閉鎖性能に関する検証データを取得し、低透水性を確認するとともに、解析によって、閉鎖性能を評価するモデルを開発することができた。花崗岩等岩盤性能が良好な場合、掘削影響領域が支配的な核種移行経路になることが示された。また、閉鎖システムを対象とした水理解析やFaultツリー分析による閉鎖シナリオ評価手法を提示した。さらに、海水系地下水条件での埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験を実施した。その結果、塩水環境下でも降水環境下と同様、ズリを基本とする埋め戻し材料に粘土を含有することにより、十分にシーリング性能が確保できることがわかった。

人工材料の開発では、支保工材料として普通セメントを用いた場合の高アルカリブルームによる緩衝材や岩盤の変質を避けるため、代替材料として低アルカリ性セメントの開発を進めた。低アルカリ性セメントとしては、普通ポルトランドセメントに、シリカフュームやフライアッシュなどを添加したHighly Fly-ash contained Silica-fume Cement (以下、「HFSC」という)を用いた検討を進めた。普通ポルトランドセメント、シリカフューム、フライアッシュの混合率を変え性能試験や品質確認を行なった。以下、普通ポルトランドセメント、シリカフューム、フライアッシュの混合率が各々40%、20%、40%の場合の低アルカリ性セメントをHFSC424と呼ぶ。検討の結果、HFSC424を用いたコンクリートは、施工に必要な流動性や支保強度を確保でき、その適用性が確認された。また、HFSC424を用いたモルタルは、粉体を水中浸漬することによりポゾラン反応が促進され、pHの低下は高温では速いが常温では遅く、目標とするpH11以下になるには長時間を要することがわかったが、モデル解析によるpH低下挙動の評価に見通しを得た。

### 設計手法の適用性確認

深地層の研究所用地の地質環境条件を対象とした事例研究により、処分場の全体設計フローの検討、地上からの調査段階における地質環境条件に関する設計用入力データの設定、処分施設や人工バリアの試設計等を行った。堆積岩系岩盤の一例として、稚内層硬質頁岩が分布する幌延の深地層の研究所用地を、結晶質岩系岩盤の一例として、土岐花崗岩が分布する瑞浪の研究所用地をそれぞれ対象とし、処分孔竖置き方式に関する検討を行った。検討対象深度は、力学的に処分孔の空洞安定性が確保されることなどから、幌延では450m、瑞浪では

1,000mを設定した。これらの検討結果に基づき、第2次取りまとめの設計手法の適用性、改良点、推奨すべき手法や地上からの調査段階における留意点を整理した。

処分場の全体設計フローの検討では、施設設計、人工バリア設計および埋め戻し材設計といった相互の複雑な関係を考慮し、影響因子と影響度合いについて検討を行った。検討の結果、第2次取りまとめの設計フローとの違いとしては、埋め戻し材や緩衝材の仕様設定上重要な処分坑道の支保工設計、処分孔への支保工の要否を考慮した空洞安定性評価および埋め戻し材設計を人工バリア設計の上位に配置したことなどが上げられる。

地上からの調査段階における地質環境条件に関する設計用入力データは、各研究所用地のボーリング調査による地質環境特性に基づき設定した。密度や熱特性については、幌延のような多孔質の堆積岩の場合、間隙率の密度依存性が見られることから、深度依存性の相関式より入力データを求めた。瑞浪の結晶質岩については、深度依存性が見られないことから、同じ層の平均値を採用した。力学特性については、岩盤等級に関する岩盤モデルを作成し、ボーリング調査で得られたデータを岩盤等級ごとに低減し、物性値を設定した。初期応力比は、深度によらずほぼ一定であったため、それらの平均値を採用した。水理特性に関しては、設定深度近傍の透水試験結果により透水係数を、地下水流動解析により動水勾配を設定した。地下水化学特性に関しては、水質の深度依存性、鉱物情報に基づく熱力学解析による補正を踏まえ設定した。

処分施設の試設計では、低アルカリ性コンクリートの設計用物性値を設定するとともに、上記の見直した設計フローに基づき処分孔、処分坑道の空洞安定性評価、離間距離の検討について第2次取りまとめと同程度の概略設計を行い、第2次取りまとめの設計手法の適用性確認を行った。また、幌延、瑞浪の深地層の地下研究施設設計画で検討している耐震検討、メタンガスの湧出量に関する検討、防災コンセプトの研究、情報化施工などについても、処分場設計において不可欠なものと考え、その検討例を提示した。

人工バリアの試設計では、緩衝材およびオーバーパックの設計手順の考え方を整理するとともに、個別設計フローを構築し、各研究所用地の地質環境条件の入力データをもとに試設計を行った。その結果、第2次取りまとめ仕様で十分対応可能であることがわかった。また、岩盤や緩衝材の長期力学挙動、緩衝材の流出・侵入挙動などの長期健全性に関する評価を行い、第2次取りまとめ仕様の人工バリアは長期にわたり健全であることを確認した。

閉鎖設計では、埋め戻し材や止水プラグに関わる設計要件と地質環境条件の留意点などを整理するとともに、概略的な設計フローの構築を行った。埋め戻し材については、基本特性試験や海外での検討例を参考に設計フローに基づき、幌延、瑞浪の地質環境の特徴により適した閉鎖材料の仕様例を示した。

以上の検討を通じて提示された第2次取りまとめの設計手法の適用性、改良点、推奨すべき手法について主なものを以下に整理する。

- ・ 処分場の全体設計フローに関してオーバーパック、緩衝材、埋め戻し材といった個別設計と施設設計の相互関係を整理し、より現実的な設計フローを提示した。
- ・ 空洞の力学的安定性評価では、経験的手法による標準支保パターンに基づく空洞安定性評価や情報化施工を考慮した現実的な評価指標を提案した。
- ・ 幌延の深地層の研究所用地に分布する堆積岩は強度が小さく、異方圧下、多孔質という特徴をもつため、第2次取りまとめと同様な空洞安定性評価・支保設計に加えて、岩盤が異方的な応力状態にある場合の長期安定性、建設、操業期間を対象とした岩盤の長期変形挙動、多孔質な岩盤である場合に考慮すべき掘削直後の水-応力連成現象などについても必要に応じて設計に反映することを提案した。
- ・ 地山強度比の小さい堆積岩の地下深部における処分孔では、定置までの岩盤クリープ挙動を考慮した場合、安定性が保てない可能性が高いため、処分孔（無支保）の安定性を評価する際には、弾完全塑性解析に加え、建設・操業中の岩盤のクリープ挙動を考慮し

た評価を実施しておく必要がある。

- ・ 瑞浪の深地層の研究所用地に分布する土岐花崗岩は、異方圧を受けているものの、強度が大きく力学的安定性が見込める結晶質岩であることから、第2次取りまとめと同様の弾完全塑性解析による設計が可能である。また、結晶質岩は、力学的に不連続面の影響が支配的になる場合があるため、潜在する割れ目の状況を調査で把握し、不連続面を考慮した評価・設計を実施し、設計の妥当性について確認することを提案した。
- ・ 人工バリアの設計については、第2次取りまとめにおいて示された考え方が適用可能である。また、人工バリアの長期健全性評価に関しては、第2次取りまとめ以降のモデルの改良や入力パラメータの充足により手法そのものの信頼性の向上が図られ、今回の検討によってその手法が適用可能であることが分かった。

次に、地上からの調査段階における留意点について、地質環境調査、施設設計、人工バリア設計、閉鎖設計などの観点から主なものについて以下に記述する。

- ・ 地質環境調査では、コンクリート支保工の化学的安定性から、処分施設に使用できる支保工材料に限られる場合には、その支保工材料で空洞が安定する地質環境が分布するか否かについて調査する必要がある。結晶質岩を対象とした場合、処分坑道を展開する深度として、割れ目など不連続面の影響が比較的少ない健全な岩盤が分布するか否かを調査する必要がある。地下水化学に関するデータに関しては、大気との接触などが避けられない場合が多いため、地下水水質の熱力学的解析結果や鉱物に関する情報などを総合的に考慮した補正が重要である。
- ・ 施設設計（空洞安定性、支保設計、坑道離間距離）では、地上からの調査段階だけでは、廃棄体を定置する地下深部の幅広い地質環境を詳細に理解することは難しく、段階を追った地質環境の理解を行っていく必要がある。そのため、情報化施工等により随時設計を更新してゆくとともに、設計の段階では、建設・操業で取得されるデータと直接比較できるパラメータ（例えば、内空変位など）を重視して評価する必要がある。また、堆積岩の場合、二重支保を採用することで支保工厚を低減することは可能であるが、二重支保は岩盤をある程度緩ませる考え方であるため、掘削影響領域を含め安全評価への影響に関する検討が必要である。
- ・ 人工バリア等の設計では、オーバーパック、緩衝材および埋め戻し材の設計に際して、相互に関連している項目の影響度合いを十分考慮し、地質環境条件を踏まえて影響が大きい設計因子を重点的に検討することにより合理的な設計が可能となる。また、地質環境条件と安全機能との関係を整理すること、例えば、緩衝材の流出・侵入現象の影響に関しては、海水系地下水条件では顕著ではなく、降水系地下水条件で重要であることなどを整理する必要がある。
- ・ 閉鎖設計では、地下水のイオン強度によっては、埋め戻し材の仕様に大きく影響を及ぼすことが考えられる。特に、海水系地下水条件の場合、埋め戻し材のベントナイト配合率について自己シール性に係わるデータの拡充が必要である。

## 今後に向けて

今後は、地層処分のセーフティケースの作成に必要な地質環境や処分場の設計に関するデータや情報、専門家の判断根拠などを知識としてわが国共通の資源とするため「知識ベース」の構築を行う。このため、地層処分基盤研究施設において、深地層の研究施設計画を中心とする深地層の科学的研究から得られる地質環境データや長期安定性に係わる知見も考慮し、特に海水系環境や軟岩系岩盤における処分場の設計の信頼性を向上できるよう、人工バリア等の長期挙動等に関わる基礎的データの拡充、モデルの改良、データベース開発を進める。また、評価に必要なデータ取得手法の標準的方法を提案し、関連機関の成果の統一化に資する。さらに、以上の成果と深地層の研究施設計画における研究成果を総合的に用いて、深地層の研究施設計画で得られた地質環境データに基づく設計手法の適用性確認を行う。

