

地層処分システムの工学技術と安全評価手法への活用

地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット
ユニット長 油井 三和

1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）東海研究開発センターでは、国の計画・方針にしたがい、地層処分研究開発を進めている。本稿では、地層処分研究開発のうち、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）で得られた地質環境データを活用した工学技術および安全評価手法の適用性確認の現状について報告する。

2. 目標と進め方

原子力機構は、処分事業や安全規制を支える技術基盤を強化していくという観点から、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」の2つの研究開発目標のもと研究開発を進めてきた。幌延深地層研究所は、前者の目標を達成するための中核の施設の一つである。

これら2つの研究開発目標に対して、幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階（第1段階）における段階目標としては、工学技術の開発では、処分場の設計手法の適用性確認とそれに基づく工学技術の改良、代替技術の開発や同段階における設計上の留意点の提示を掲げた。また、安全評価手法の開発では、処分場の安全評価手法の適用性確認とそれに基づく評価手法の改良や同段階における安全評価上の留意点の提示を掲げた。

研究の進め方としては、幌延深地層研究計画における調査研究のみでは個別現象のメカニズムや時間依存性の理解を進めるには限界があるため、条件を制御した室内・工学試験や放射性核種を用いた試験と連携することにより、理解や一般化を進め、設計や安全評価に関する技術の信頼性向上を図っていくこととした。また、調査の各段階において設計・施工、解析・評価などを進める際の留意点なども含めて地層処分技術の知識基盤として整理していく。

3. 幌延深地層研究計画の第1段階における地層処分研究開発の実施内容

1) 工学技術の適用性確認

ここでは、幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階で得られた地質環境データを活用した工学技術の適用性確認について代表的な成果例を報告する。成果例としては、具体的な地質環境に適用するための設計フローの更新、検討対象深度や地質環境条件の設定方法、空洞安定性評価指標の更新、施設や人工バリアの設計上の留意点などが挙げられる。

詳細は、「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『地層処分研究開発』（藤田他，2007）の第2章を参照されたい。

(1) 処分場設計フローの検討と更新

幌延深地層研究所で取得された具体的な地質環境データを利用して設計に関する検討を行うに当たっては、最新の知見を踏まえ、第2次取りまとめで示した処分場全体の設計フローを見直し、更新した。なお、処分方式としては処分孔縦置き方式を想定した。見直しにおいては、幌延地域の特徴である軟岩、海水系の地質環境であることに着目し、埋め戻し材とオーバーパックの設計順序、低アルカリ性コンクリート支保工設計などに留意した。

(2) 検討対象深度と地質環境条件の設定

① 検討対象深度の設定

第2次取りまとめでは、地質環境の長期安定性、地質環境特性、現在の建設技術や調査技術の適用範囲などを考慮し、合理的に地下施設を建設できる最大深度として、軟岩系岩盤では深度500mを想定した。一方、最終処分法では、深度300m以深に廃棄物を処分することが

明示されている。したがって、ここで検討する深度としては300～500mとした。

深度の設定に当たっては、処分孔の力学的安定性が確保されること、平面的な不均質性は小さいことなどから設置環境として鉛直方向に均質で大きな岩体が存在することの2つの条件を設定した。幌延深地層研究所の建設地点の岩盤等級区分、岩盤等級毎の変形・強度特性から、深度450m付近の岩盤が、ある程度の厚さを有し、かつ処分孔の力学的安定性を満たし得る領域と評価した。以降の検討は深度450mを目安として実施した。

② 設計のための地質環境条件の設定

岩盤の熱特性、水理特性、力学特性については研究所設置地区に近い複数のボーリング孔を対象とした原位置試験や岩盤コアを用いた室内実験結果などから設定した。地球化学特性については、アルカリイオンや塩素イオン濃度などは測定結果に基づくとともに、pH、EhやC、Fe、S濃度については地球化学モデルにより推定した。

(3) 低アルカリ性コンクリート支保工の開発

地下空洞を建設する際には、特に軟岩系においては周辺岩盤の力学的な安定性を図るため支保工を設置する場合が多い。原子力機構では、低アルカリ性セメントとしてフライアッシュ（FA）を高含有したシリカフューム（SF）セメント（HFSC: Highly Fly Ash Contained Silica Fume Cement）の開発を進めてきており、幌延深地層研究所にて計画しているHFSC吹付けコンクリートの原位置施工試験へ向け、試験計画案の策定ならびにコンクリートの配合選定試験を実施した。HFSC吹付けコンクリートの支保工への適用性については、幌延深地層研究所の地下施設の設計基準強度（36MPa（材齢28日））を目標とし、模擬空洞での吹付け試験により施工性について検討した結果、ほぼ適用可能との見通しを得た。pHの低下に関する室内実験では、65℃であれば目標の11近くまで低下するのに対し、常温では目標値まで低下するのに時間を要すると考えられたため、解析的な評価により補完した。

(4) 地下施設の設計

(2)で設定された地質環境条件を用いて地下施設を設計するに当たり重要なことは、軟岩系であることを考慮した空洞安定性評価指標の設定である。これは、①支保工応力度、②岩盤の局所安全率、③岩盤の直ひずみおよび最大せん断ひずみを指す。地下施設の設計では、③については、解析技術の進歩により情報化施工のための重要な指標として、また、②はどのような対策工がどの程度の範囲に対して必要かの判断基準として用いられるに留まっている。以上の実績を踏まえ、実際の地質環境を対象とした処分場の単一坑道の設計においては、①許容応力度設計法による支保工の健全性照査、②塑性領域が対策工（ロックボルト）により改良可能な範囲にあることの2つの基準を設けて支保工設計を行うこととした。

(5) 人工バリアの設計

上述の処分場の設計フローを踏まえ、緩衝材やオーバーパックに関する個々の設計手順を検討し、個別要素の設計フローの構築を行った。

幌延のような海水系地下水条件下においては、緩衝材の透水性や膨潤応力に関する性能が、降水系地下水と比較して、低下する傾向にあることから、これらの影響を考慮した緩衝材の試設計を行った。緩衝材の設計では有効粘土密度や厚さの設定が重要であるため、これらに着目して、止水性、コロイドろ過性、応力緩衝性などに関する性能と緩衝材仕様との関係について検討を行った。この結果、第2次取りまとめで示した緩衝材仕様により、所期の性能を確保できることがわかった。

幌延の地下水化学を考慮したオーバーパックの設計検討では、炭素鋼については、緩衝材中では不動態化せず全面腐食を受けると考えられること、銅については、活性溶解型の分極挙動であり、局部腐食発生の可能性は小さいことなどが示された。また、炭素鋼を用いた場合、第2次取りまとめで示したオーバーパック仕様により、所期の性能を確保できることがわかった。

(6) まとめ

幌延地域の地質環境は、軟岩、海水系地下水といった特徴を有しているため、これらの特徴を考慮した工学技術の適用性確認を進め、空洞安定性評価指標の見直し、低アルカリ性コンクリート支保工の開発、海水系地下水に対する人工バリア仕様の検討などを行った。これらは、地質環境が実際に与えられた場合の主要な設計手順を試行したものであり、その成果は、処分事業や安全規制の基盤技術として活用されるものと考えられる。

2) 安全評価手法の適用性確認

ここでは、幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階で得られた地質環境データを活用した安全評価手法の適用性確認について代表的な成果例を報告する。成果例としては、具体的な地質環境を対象とした物質移行解析作業フローの設定、物質移行経路情報の抽出、幌延深地層研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能の把握や安全評価上の留意点などが挙げられる。

詳細は、「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『地層処分研究開発』（藤田他，2007）の第3章を参照されたい。

(1) 物質移行解析作業フローの設定

幌延深地層研究所で取得された地質環境情報に基づき物質移行解析を実施するための具体的な手順を作業フローとして作成した。本作業フローでは、物質移行解析を行うために、ボーリング孔などを用いた調査や試験で取得した地質環境データから構築した地質構造の概念モデルに基づき、地下水流動に影響を及ぼす地質構造や透水性の分布などを水理地質構造モデルとして設定する。次に、地下水流動解析による地下水流動場の推定を行い、対象とする地質環境の物質移行挙動を表現するモデルの構築と地下水流速、移行距離などを設定する。また、物質移行に関する地下水化学、岩石の物理化学特性などの地質環境特性に関するデータを整理し、物質移行解析で用いる分配係数、拡散係数などを設定する。以上の作業フローに従って、物質移行解析を試行することにより、実際の地質環境に対して具体的な調査・解析・評価からなる一連の安全評価手法の構築が可能となる。

(2) 物質移行経路情報の抽出

地上からのボーリング孔などを利用した調査解析では、断層などの不連続構造、地質構造の空間分布、岩盤の透水性分布、地下水水質の三次元分布などが整理された。これらの調査結果に基づき、研究所設置地区周辺の地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデルなどが構築された。

地質構造モデルの検討においては、割れ目帯の分布や透水性への寄与が示唆されているものの、それらを定量化してモデルに取り込むまでには至っていない。また、大曲断層については、地表調査や物理探査、深層ボーリング調査の結果から推定した調査結果を統一的に説明できる同断層の三次元分布を考慮した。これらの水理特性に関わるデータの解釈を踏まえた水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を実施した。解析領域は幌延町全域を包含する約30km四方の領域とした。対象とした水理地質区分は、増幌層より下位、増幌層、稚内層、声問層、勇知層、更別層、表層、大曲断層とした。地下水流動解析は、実測値のもつ不確実性、取得されていない地層の透水係数、上部境界条件を考慮して、各層の透水係数などを変化した計18ケースの解析を実施した。物質移行の開始点は、工学技術の設計深度と同じ450mとした。以上により、概略的な物質移行経路を把握した。

(3) 幌延深地層研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能の把握

研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能の把握では、物質移行解析を進める上で感度の高い因子や不確実性の幅が大きな因子などに関する検討を通じて、地質環境の調査やモデル化を進める上で留意すべき点を抽出し次段階の調査計画へ反映することを目的

として検討を進めた。

物質移行モデルの具体化に当たっては、地下水流動解析による移行経路（流跡線）、地下水流速、移行距離などの移行経路情報が不均質性を有するという特徴を踏まえ、

① 移行経路情報の不均質性を物質移行解析に直接取り込む方法

② 移行経路情報の不均質性を統計処理などにより簡略化し、物質移行解析に取り込む方法を比較した上で、①は流跡線に基づく解析に、②は感度解析に、それぞれ用い考察を行った。

物質移行モデルは、対象地域が堆積岩であることから多孔質媒体モデルを仮定した。また、海水系地下水などの情報に基づき分配係数などの核種移行パラメータの設定を行った。代表的な核種である Cs-135, Se-79, Np-237 および Th-229 に対する物質移行解析の結果、稚内層、声問層とも高い遅延性能を有することが分かった。

しかし、調査で取得した割れ目帯の透水係数分布などを参考にすると、稚内層では割れ目帯が地下水流動に及ぼす影響が大きく、移行経路として機能している可能性が高いと考えられる。今後の調査を踏まえた水理地質構造モデルや物質移行モデルの見直しが必要である。

(4) まとめ

幌延深地層研究所で取得された地質環境情報に基づき物質移行解析を実施するための具体的な手順を作業フローとして設定し、地上からのボーリング孔などを利用した調査に基づく地下水流動解析により物質移行経路情報を抽出し、さらに移行経路情報の評価手法を比較検討した上で、研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能を把握した。以上を通じ、一連の評価手法の具体例を提示した。これらは、地質環境が実際に与えられた場合の主要な安全評価手順を試行したものであり、その成果は、処分事業や安全規制の基盤技術として活用されるものと考えられる。

4. 今後の予定

1) 工学技術の開発

第2段階を通じた工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を進め、成果を体系的に整理して提示していく。研究としては、「地下施設の掘削に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する研究」と「地下水や岩を用いた室内試験や解析的検討に関する研究」に分類し検討を進める。特に、建設工事の支保工材料としての低アルカリ性セメントの施工事例や留意点の整理、設計手法の検証や建設技術の例示・留意点の抽出、人工バリア材料の設計手法や長期挙動評価手法の信頼性向上、原位置試験計画の立案などを進める。

2) 安全評価手法の開発

第2段階を通じて物質移行解析に至る一連の手法の具体的な地質環境への適用性検討を進め、成果を体系的に整理して提示していく。特に、掘削段階で取得される地下水や岩石試料などを用いて、地下水流動や物質移行に関するデータ取得を進め、現象の理解と評価手法の高度化を進める。また、掘削段階で不可避なコンクリートやグラウトなどの長期性能への影響に配慮した評価手法を検討する。これら一連の作業を通じ、地質環境の調査・研究や工学技術の開発との連携を進め、経験を蓄積していく。

参考文献

藤田朝雄 他 (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「地層処分研究開発」, JAEA- Research 2007-045.