

## 第 34 回深地層の研究施設計画検討委員会 議事録

【日時】 令和 5 年 8 月 28 日（月） 10:00～17:30

【開催場所】 日本原子力研究開発機構 東京事務所 第 1 会議室（Web 会議併用）

【出席者】 委員） 竹内委員長 川村委員 岸田委員 桐島委員 児玉委員 榊委員  
下茂委員 所委員 廣野委員 安原委員

機構） 地層処分研究開発推進部：瀬尾部長 濱次長 弥富課長  
西垣客員研究員 他

幌延深地層研究センター：岩月副所長 館部長 杉田 GL 石井 GL 他

オブザーバー） 電中研 長谷川分野統括 原環センター 江守部長  
NUMO 北川グループマネージャー

### 【配布資料】

資料34-1 地層処分研究開発と幌延深地層研究計画（まとめ）

資料34-2 幌延国際共同プロジェクト及び深度 500m への坑道展開

資料34-3 物質移行試験

資料34-4 人工バリア性能確認試験

資料34-5 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

資料34-6 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

資料34-7 地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

資料34-8 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

【議事概要】（委員からのご質問・ご意見を「○」、機構からの回答を「⇒」で示す。）

今回の委員会の主旨として、幌延の必須の課題における重要なトピックについて、技術的な議論を行うことを説明した。

### (1) 地層処分研究開発と幌延深地層研究計画（まとめ）

地層処分研究開発における深地層の研究施設計画や、幌延深地層研究計画のこれまで成果と課題、ならびに地層処分研究開発全体の研究成果の反映先と取りまとめについて、概要として説明した。

主な質疑は以下の通り。

○ 研究により得られたデータは蓄積されて報告書等にまとめられるが、解析手法や実験的手法といった汎用的な手法については、例えばデジタルプラットフォームのように今後展開できるような国の機関としての役割、仕組みを考えていただきたい。

⇒ 実験的手法等の汎用的な手法の展開については、処分事業や安全規制に活用できるように、DX 化の観点を取り入れつつ、委員からのご意見も踏まえて今後整理していきたい。

○ これまでの第 1 段階、第 2 段階までの成果が、文献調査や概要調査に役立つ事例はあるか。機構の成果が活用されていることをアピールできると良いと思う。

⇒ 例えば、「科学的特性マップ」に過去に火山学会が取りまとめた第四紀火山カタログが反映されている。この第四紀火山カタログは、機構の研究成果の一部である。概要調査については、まず計画策定では、地上からの調査のうち物理探査の側線やボーリング孔

の配置の検討に、幌延や瑞浪の第 1 段階の成果が活用されるのではないかと考えており、そのような成果を概要調査に反映できるように、CoolRep として取りまとめている。

また、NUMO が取りまとめた包括的技術報告書においても、機構が作成した技術報告書、論文等が 200 件程度引用されており、機構の成果が事業に積極的に活用されている。

- 機構の公開 HP のトップページから CoolRep へのリンクが分かりにくい。
- ⇒ トップページからのリンクについて、改善する。

## (2) 幌延国際共同プロジェクト及び深度 500 m への坑道展開

幌延国際共同プロジェクトの概要及び深度 500 m への坑道展開の意義や実施体制の概要について説明した。

主な質疑は以下の通り。

- 掘削予定深度を 500 m とした地質環境以外の理由は何か。国際的にコンセンサスが得られている深度なのか。
- ⇒ 幌延では、稚内層深部において原位置試験を実施できる最低限の深度として 500 m まで掘削することとした。これは約 20 年前の当初計画の段階から目標としている深度である。なお、処分深度については、各国の処分場の地質環境に依存する。スウェーデンで処分深度を 500 m としているのは、氷河の融解による将来的な地層の隆起等を考慮しているためである。
- 第 1 段階調査研究で物理探査により地質構造を推定し、第 2 段階調査研究で坑道掘削を行い、推定結果の妥当性確認を行ったとのことだが、結果はどうだったのか。その結果が、最終的に深度 500 m が適切と判断する根拠となったと思うが、物理探査の精度はどうだったのか。
- ⇒ 物理探査と建設用地内に事前に掘削したボーリング孔 1 本により予測した各立坑の稚内層と声問層の地層境界の推定深度と、立坑掘削により確認された実際の深度は、数メートル程度の差だった。地下施設の周辺の地層には褶曲構造が発達しており、掘削位置により地層境界の出現深度が大きく変わることを考慮すると、大よそ整合的な結果が得られたと考えている。
- 今後、深度 500 m 以深まで掘削する可能性もあるのか。
- ⇒ 現在、幌延では「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき研究を実施している。深度 500m での研究の必要性や、令和 10 年度までに成果を得て、技術基盤の整備が完了するように取り組むことを関係自治体や地域の皆様へ説明し、ご理解いただいております。500m 以深には掘削しない。日本の法律では高レベル放射性廃棄物は深度 300 m 以深に埋設することとされているが、幌延では深度 500 m まで掘削することで、声問層と稚内層浅部のみならず、稚内層深部というさらに異なる力学・水理特性を持つ地層を調査対象とすることができる。
- 幌延国際共同プロジェクトで日本以外に 7 つの国と地域から研究機関が参加することは、海外の有識者の知見を得ることができ非常に良いことだと思う。各国はそれぞれの地質環境に合った成果を取得したいと考えていると思うが、調査試験項目の選定や進め方については、参加機関の意見はどのように反映されるのか。また、得られた成果の評

価はどのように行うのか。

⇒ 3つの課題を設定しており、それぞれの課題における調査手法などに関して参加する機関が共同で議論しながら進めていく。最終的にはその成果は各国で共有することになるが、共同で進めることが成果の最大化につながると考えている。

○ 各ステップで参加機関が意見や要望を述べる機会はあるのか。

⇒ 「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき、研究スケジュールは既に決まっているものの、より良い成果を得るために参加機関の間で議論をしつつ進めていく。

○ 深度500mでの具体的な研究計画については本日この後説明があるのか。また、幌延国際共同プロジェクトでの議論を踏まえて、深度500mで実施すべき研究開発の議論はなされるのか。幌延国際共同プロジェクトにおいて他の参加機関からも積極的な調査の提案があれば深度500mでの調査研究の重要性が増すと思う。新たに調査等が追加される余地はあるのか。

⇒ 深度500mでの具体的な研究計画については本日ご説明する。全体の研究期間は決定しており、研究の全体スケジュールは決まっているが、原位置試験などの詳細は今後決定していく。そのような範囲内での検討は有り得る。

○ 深度500mでの坑道展開の最大のポイントの一つは、稚内層の浅部と深部という異なる特性の岩盤に対して、各試験の結果を比較できる点にもあると考えるが、そのような理解で良いか。また、成果を取りまとめる際には、コスト面も含めて深度350mとの総合的な比較まで行うことは工学的な観点から重要であると思われる、基礎的なデータと合わせてまとめるとより良い成果になると思われる。

⇒ ご理解の通りである。深度500mでの研究成果は体系化という観点でまとめる予定であり、深度350mまでの研究開発で培った知見や技術を含めて総合的に確認したい。また、どの深度が適切かという比較ではなく、地質環境の特徴に応じた調査・評価手法をまとめることを成果と考えている。その観点では、地層の特徴に応じた評価と、深度ごとの評価の二つの観点の評価になると考えており、工学的な観点も含めて取りまとめたい。また、稚内層の浅部と深部に加え、声問層にあたる深度140mや深度250mの研究成果もあるので、堆積岩の様々な特徴に対して技術を提供できると考えている。

### (3) 物質移行試験

必須の課題として取り組む「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」のうち、「物質移行試験」のこれまでの成果について説明した。

主な質疑は以下の通り。

○ 13頁において、一部のトレーサーのパラメータが室内と原位置試験で整合的であることを確認と述べ、移行経路の不均質を考慮したモデルにより挙動を解釈可能、と述べているが、この結果を処分事業における安全評価手法に反映することを念頭に置いた場合、移行挙動を予測する際の考え方について新たに得られた知見を教えてください。

⇒ これまでのモデル開発では物質移行現象の理解に重点を置いた検討を進めてきている。これまでの成果を安全評価に繋げる検討については、今後取り組みたいと考えている。

○ 原位置トレーサー試験について、「目的・内容」に「物質移行モデル化手法を検討」とあり、「研究の目標」に「堆積岩中の物質移行特性評価手法の整備」とあるが、説明を聞く限りではどちらかというモデル化よりも試験に独自の開発や新しいノウハウが含

まれている印象を受けた。そのような点も「整備」に含まれるのか。また、今後、幌延国際共同プロジェクトのタスク A で他の参加機関とデータを共有してモデル化やシミュレーションを実施するかどうかと思うが、試験についてのそのようなノウハウも他機関と共有していくのか。

⇒ ご理解のとおり、本研究の内容には、原位置試験に関連したノウハウや技術開発も含まれる。例えば、地下水中に存在する溶存ガスへの対応である。割れ目を対象としたダイポール試験は、可能な限り多くのトレーサーを回収するために揚水流量を大きくすることが一般的だが、地下水に溶存ガスが多く含まれる場合は、揚水に伴う減圧によりガスが遊離するため、気泡の発生を抑制しつつ品質の高いトレーサー試験を成立させるための流量設定が必要であった。このような知見も含め、これまでに得られた知見やノウハウは全て他機関と共有しながら進めていく。

○ 12 頁について、3 つの経路がある場合、元素によって通過する経路の違いや、傾向の違いはあるのか。割れ目の幅やトレーサーによって異なる経路が使われることがあるということか。

⇒ 割れ目開口幅に対してイオン半径などのトレーサーの大きさは十分に小さいため、経路の幾何学形状に起因して移行挙動がトレーサーにより異なることは無いと考えている。各モデルで流路長と割れ目の開口幅などの幾何学情報を与えているが、表に示される程度のパラメータの範囲では、トレーサーの動きが明瞭に変わるということではなかった。一方で、基質部のような微小間隙中の移行を考える場合、鉱物の表面が負に帯電していることに起因して、トレーサーの電荷状態により移行挙動は変わると考えられる。

○ 原位置トレーサー試験の結果はマルチチャンネルモデルにより精度良く再現できることは理解できるが、モデルの構築法に関して、試験結果が得られてからフィッティングなどによりチャンネル数を仮定してモデルを構築したのか、試験の前に現場で観察を行いチャンネル数の推定をしたうえでモデルを構築したのか、またはこれらの組み合わせなのかを教えてください。

⇒ ご指摘の前者のアプローチを適用することも考えられたが、事前調査としてボーリング孔掘削により生じ得る水理場の擾乱などが原位置トレーサー試験に及ぼす影響を回避するために、今回は前者のアプローチに加え、トレーサー試験後の割れ目観察結果を踏まえて、移行経路を推定して、モデルを構築した。

○ 割れ目を対象とした物質移行試験について、経路 1~3 を統合してモデル化する際には、事前にそれぞれの経路について最適な移行特性を検討しているのか。移行特性を変化させると、変化のさせ方によってはかなり複雑なパターンになってしまうのではないかと思う。また、説明いただいた手法は一般的ではない独特な手法であると思うため、丁寧な説明を心がけてほしい。

⇒ 今回のモデルでは割れ目中を模擬した移流部分と基質部を模擬した拡散部分を設定している。解析では水理的特性や、物質移行に関わる拡散係数や収着係数、幾何学形状など多様なパラメータが必要になる。特に幾何学情報（経路長、割れ目幅、開口幅）については具体的なデータが得られていないため、解析コードである Goldsim の最適化機能を使用し最適値を求めた。ご指摘の点を踏まえ、解析モデルのパラメータの設定方法について、今後丁寧な説明を行いたい。

○ 後半の説明に関して、幌延での成果を中心に説明いただき、ジェネリックな評価手法をまとめようとしていることは理解できる。一方で、高塩濃度の地下水ではコロイド濃度

はそれほど高くないと思われるが、その場合、高塩濃度環境下ではコロイドの影響が小さいことを示すこともまた一つのメッセージかと思う。淡水環境のようにコロイド濃度が高い場合の核種移行への影響と比較して、幌延のような高塩濃度環境においても、有意な影響が示唆されているのか、既存の知見があれば教えてほしい。

⇒ 少なくとも幌延においては、コロイド形成が核種移行促進に有意に影響するという結果は得られていない。22 頁の図にあるように、幌延の深部地下水環境におけるコロイドの安定性は比較的低く、特に 100 nm 未満のコロイドが凝集傾向にあることが分かっている。この主要因として、幌延の地下水の塩濃度が高いことが考えられるが、仮に地下水の塩濃度が高く、コロイドの凝集能が高いと期待される水質環境においても、地下水の pH と溶存有機炭素濃度が高い場合、コロイドの安定性が高くなる可能性はある。

○ 25 頁について、Se の微生物群集組成に対する影響の説明は、一般の方には「地下生物圏を改変する」という誤った意味で捉えられる可能性がある。深部地下環境に対して原位置試験などの擾乱を与えた場合、Se を用いることに関わらず、微生物群集組成は擾乱を受けて変化するということの説明に加えて、一方で人為的な影響を受けなくても変化するものであることの説明を丁寧にするべきである。

⇒ ご指摘の通りであり、今後留意して説明する。なお、25 頁の Se 添加試験は地下水を採取して室内で実施したものであり、原位置では Se の添加試験は実施していない。45 頁に示す通り、微生物群集組成は、擾乱がなければほとんど変化しない。また、坑道やボーリングの掘削により擾乱を受けた場合には、地下水中の微生物の存在量や種組成が変動するが、パッカー等で遮蔽後は、1~2 年程度で概ね掘削前の状態に回復することが分かっている。

○ 24 頁について、核種移行評価に繋げるためには、微生物については何をパラメータとして評価すれば良いか、見通しがあれば教えてほしい。

⇒ 微生物が地下水中で果たす役割は多岐にわたるが、コロイドと共通する項目としては、微生物の量と微生物そのものに対する核種の収着、微生物特有の項目としては、走化性や微生物細胞内への核種の取り込みが挙げられる。過去の核種移行解析において、核種移行に対する微生物コロイドの影響を、通常のコロイドと同様に量と分配係数から推定した例があるものの、検討の余地があると考えている。以上の点は核種の移行を促進させる現象である。移行を遅延しうる現象として、母岩中に形成されたバイオフィームが核種を収着することが挙げられる。これらの現象を評価するためのパラメータのうち、微生物量については、微生物コロイド・バイオフィームともに、蛍光顕微鏡法を中心とした分析から取得した情報をパラメータとして使用できると考えている。

○ 現在の検討対象は金属容器を腐食させない微生物のみかと思うが、場が変化して腐食を促進するような微生物が優勢になる可能性はあるのか。

⇒ 地下水環境が多少擾乱を被っても数年程度で元の状態に戻るとの結果も得られていることから、地下水の環境が大きく変わらない限りは腐食を促進するような微生物の影響は少ないと考えている。また、以前に幌延で実施したオーバーパック腐食試験の結果などを踏まえると、オーバーパックを取り囲む緩衝材が高乾燥密度・高膨潤圧というような期待された機能を発揮している条件下では、緩衝材中での微生物活性の維持や移動は難しいと考えている。

#### (4) 人工バリア性能確認試験

必須の課題として取り組む「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」のうち、

「人工バリア性能確認試験」のこれまでの成果について説明した。  
主な質疑は以下の通り。

- 緩衝材ブロックについて、クニゲル V1 が 70%かつ乾燥密度  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  という条件の場合、飽和とみなした状態で土圧が  $1 \text{ MPa}$  弱というのは妥当な値なのか。また、岩盤側の地下水の塩濃度が高いことも影響しているのか。  
⇒ 室内試験で得られたデータでは、乾燥密度  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  の場合の膨潤圧は約  $1.5 \text{ MPa}$  から  $2 \text{ MPa}$  に満たない程度である。原位置で計測された圧力はこれよりも小さいが、その理由として、原位置試験においてセンサーを緩衝材中に設置しているために、反力が固定されていないことの影響が考えられる。また、センサーを設置するために緩衝材ブロックに切り欠きを入れ、センサー設置後にセンサーが壊れないようベントナイトで少し緩めに埋めていることも影響している可能性がある。乾燥密度  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  の場合は、幌延の地下水の塩濃度では蒸留水条件と概ね同程度の膨潤圧となるため、塩濃度が影響しているとは考えにくい。岩盤と緩衝材ブロックの間に砂層を設けているが、この砂層にベントナイトが入り込むことによって膨潤応力が若干低下している可能性はある。
  
- ベントナイトの膨出は鉛直方向と半径方向の土圧の違いに基づいて推定しており、直接計測しているわけではないということか。また、膨出のオーダーはどの程度か。(スイスの) FEBEX 試験の解体では、緩衝材において、解体の際にブロックの界面が残っておりそのまま剥がれ落ちていた。この試験でも、解体の際に界面が見られれば、その深さを計測しておくことにより、鉛直方向の変位を把握できるのではないかと思う。数 mm の変位では分からないかもしれないが、ブロックには界面が残るということには留意すると良い。  
⇒ 膨出センサーとして歪計を設置しており、この歪計でおおよそその変形挙動を確認している。ただし、具体的な歪の大きさについてはまだデータの解釈ができていない状況であるが、膨出のオーダーは数 cm 前後であると考えている。
  
- 11 頁について、具体的には内側が蒸留水条件で外側は幌延地下水条件ということか。幌延のサイト特有のパラメータは水質と考えて良いか。  
⇒ その通りである。初期条件は、緩衝材中の水が蒸留水であり、境界条件は幌延地下水としている。
  
- 発熱している場合には中心部の飽和度が低下するが、飽和しても問題ないということか。また、計測データを用いてシミュレータを作成することにより、どのような条件でも信頼性のあるシミュレーションが可能になるということか。  
⇒ 廃棄体は  $100^\circ\text{C}$  を超えないように間隔をおいて定置され、また、廃棄体の発熱量は時間の経過とともに減少し、それに伴い廃棄体表面の温度が低下していく。本試験はその際に想定される現象を確認するため、模擬オーバーパック内部に設置したヒーターの温度を変化させることで廃棄体の温度低下を模擬し、緩衝材が飽和される状態を観測している。ご紹介している結果は温度ごとの飽和度の状態を示しており、一連の状態を解析的に再現することで解析手法の信頼性の向上を図っている。
  
- 6 頁の比抵抗トモグラフィの結果の図において斑点のようなものが見られるが、これは何か。また、解析結果における当該部分の 3 次元的形状はどのようなものか。  
⇒ 比抵抗トモグラフィの飽和度の斑点については、設置した他のセンサーの影響がないと

は言いきれず、また、設置した比抵抗電極の状態によっても誤差が生じている可能性がある。一方で、解析で仮定しているモデルでは他のセンサーの影響や電極のずれなどは考慮していないため、それらの影響も含めて解析による偽像が生じている可能性がある。最終的には、解体調査でセンサーの設置状態やより詳細な飽和度分布、比抵抗測定結果などを比較することで、斑点像の要因を特定したい。また、電極を2次元的に設置していることから解析も2次元平面で実施しているため、3次元の形状は不明である。

- 11頁に示される COUPLYS のケース3の計算では、応力情報は考慮したのか。飽和度が変化するという事は、乾燥密度も変化するのではないか。
- ⇒ この連成解析では力学影響を考慮していない。乾燥密度が変化すると浸潤挙動も変化するが、事前に実施した力学解析では飽和度が変化しても乾燥密度には大きな変化が見られなかったため、化学的影響をより単純に確認する目的で力学を含めずに解析した。

#### (5) 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

必須の課題として取り組む「処分概念オプションの実証」のうち、「操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証」のこれまでの成果について説明した。

主な質疑は以下の通り。

- 7頁において、有効粘土密度  $1.20 \text{ Mg/m}^3$  における透水係数が  $10^{-12} \text{ m/s}$  オーダーであることを述べているが、9頁の原位置試験ではそれより3桁高い  $2.7 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  の結果が報告されている。また、目標値が  $10^{-11} \text{ m/s}$  オーダーであることを述べているが、結果はそれより2桁高い値になっている。この差が生じる要因について、教えていただきたい。
- ⇒ 原位置試験から得られた  $10^{-9} \text{ m/s}$  オーダーの値は、粘土止水壁を含む EDZ 領域全体を対象とした試験結果であり、粘土止水壁そのものの透水係数を示した結果ではない。今回得られた透水係数の値は、同じボーリング孔内で区間を変えた透水試験で得られた透水係数の値と同じオーダーであり、粘土止水壁周辺の透水性を表していると判断している。
  
- 7頁において、ペレットが十分に膨潤しているかについては確認しているか。例えば、透水試験実施時における粘土止水壁の内側と外側の水位の変動の有無などは確認しているか。また、粘土止水壁の施工時には地下水があった状態で施工したのか。
- ⇒ 透水試験の実施後に粘土止水壁で囲まれた内側の水位を観測した結果、坑道底盤より 5 m 高い水位が確認された。また、粘土止水壁の外側における水位は底盤コンクリートと岩盤との境界部付近であった。このように内側領域が被圧状態になっていることから、ペレットが膨潤することにより止水壁の内側領域と外側領域が遮断されていると考えている。粘土止水壁の施工時は、溝に流入する地下水をポンプで排水しながら施工した。
  
- ブレーカーにより切り欠きを行うことで止水壁施工部に新たな EDZ の形成を抑制できるとのことだが、この点は一般に知られていることなのか。本研究以外に他にも事例があるのか。
- ⇒ 他には事例は無い。ブレーカーによる施工方法の場合、岩盤へ与える損傷が小さいと考え、どの程度 EDZ が形成されるのかを確認することも本試験の目的の一つである。施工試験前に実施したボーリング調査では、試験実施場所の坑道周辺の EDZ 割れ目を坑道の側壁から深さ約 40cm までの範囲で確認しており、それより深い領域では割れ目の密度が低い岩盤が続いていることを確認している。試験後に切り欠き部で実施したボー

リング調査の範囲では、切り欠き部近傍の岩盤内では割れ目は確認されなかった。この結果については、現在取りまとめ中であり、今後解析検討も含めて止水プラグの切り欠き部周辺に形成される EDZ の深さについて検討を進めたい。

- 16 頁において、吹付け部全体の乾燥密度が  $1.57 \text{ Mg/m}^3$  であることを確認しているが、吹付け部の原位置の透水性については試験を実施していないのか。  
⇒ 本試験はブレーカーによる岩盤の切り欠きやベントナイト系材料の吹付け施工技術の確認が主目的であり、坑道の全周に施工するのではなく壁面の一部のみに吹付けを施工しており、EDZ を確実に止水するレイアウトになっていない。このため、施工後の原位置透水試験は実施していない。
  
- 止水プラグには、止水性能の他に土圧に耐え得るせん断抵抗性能なども検討しているのか。  
⇒ NUMO の包括的技術報告書では、設計要件として低透水性と製作施工性が設定されて乾燥密度や有効粘土密度などが設計項目となっている。設計要件上は、せん断抵抗性は設定されていない。しかしながら、事業において止水プラグの設置時期と坑道の埋め戻し時期に時間差が生じることで、地下水位の回復により止水プラグにせん断応力が生じる可能性も考えられるため、今後予定されている止水プラグに関する原位置試験の中で、設計時に考慮すべき課題を整理していきたい。
  
- EDZ の定義はどのように考えているか。相対的な透水係数の変化を基準として定義を考えた方が良いと思うが、いかがか。  
⇒ 今回の調査では割れ目の観察を踏まえ、透水係数が低下した領域を EDZ として判断している。EDZ の透水係数は処分場の母岩など地質環境によるため、現時点で一概に透水係数の値を基準として EDZ を定義することは難しいと考えている。そのため、元の岩盤の透水係数と掘削による損傷を被った領域の透水係数を比較により、どの程度の EDZ の透水係数に対して止水プラグによる改良が必要となるかを検討していきたい。
  
- EDZ について、時間の経過とともに圧密などにより強度や透水性が回復することはないのか。例えば、石炭層にはそのような緩衝能力があるように感じているが、岩盤に緩衝能力が見られる場合、工学的な対策と合わせるとより安全性を高められると思う。幌延の例から、どのような岩盤が緩衝能力を有するのかについて知見が得られればより良いと思う。  
⇒ 海外の地下研の例では、岩盤を飽和状態とした際に岩盤に含まれる粘土鉱物の膨潤により割れ目がふさがり、力学的・水理的に回復することが報告されている。しかしながら、幌延では岩盤中に粘土鉱物が含まれているものの、現時点では透水性の回復挙動は確認されていない。このため、このような岩盤においては工学的な対策が重要になる。
  
- EDZ を対象として、長期的に透水係数の測定をしている場所はあるのか。また、そこには回復挙動は見られないのか。  
⇒ 試験坑道 3 周辺において、EDZ 及び健岩部の間隙水圧と透水係数の測定を 5 年程度実施しているが、回復挙動は見られていない。

- 2 頁の図にあるような力学プラグに関する検討は行っているのか。本来的には力学プラグと止水プラグの両者の性質を有することが望ましいと考えられるため、両者を設計段階から統一的に考える視点が重要と考える。
- ⇒ 「操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証」では、力学プラグに関する検討は行っていないが、「人工バリア性能確認試験」において設計・施工方法の確認を実施している。今後予定されている止水プラグ施工試験の検討においては、ご指摘の点に留意して取り組みたい。

#### (6) 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

必須の課題として取り組む「処分概念オプションの実証」のうち、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」のこれまでの成果について説明した。

主な質疑は以下の通り。

- 2 頁において、「処分坑道・ピットの配置の指標」とあるが、指標の候補とは具体的にどのようなものを考えているのか、また、指標を検討する、とは具体的にどのようなことを考えているのか。
- ⇒ 我が国では具体的な地質環境に対して定義された指標は無いが、先行して事業が進んでいるフィンランドやスウェーデンの事例や、NUMO の取りまとめ状況等を踏まえ、現状では坑道やピットへの湧水量や EDZ の範囲などを処分坑道・ピットの配置の指標に関連する特徴として考えている。本研究では、幌延における調査事例を通して、湧水量や EDZ など、具体的な指標を調査する方法論を示すことが重要であると考えている。地層処分の安全機能や処分場の設計要件に関する情報を収集したうえで、坑道やピットへの湧水量や EDZ の範囲との関係性を整理し、500 m 調査坑道の施工や調査においてこれらの指標を検出できるかどうかを検討していく。
- 12 頁において、「再冠水に伴う緩衝材の膨潤が生じて、せん断変位の増大に起因する将来的な透水係数の大きな変化はない。」とあるが、廃棄体周辺あるいは坑道周辺はケーシングまたはコンクリートで覆われると思うが、そうすると、膨潤圧の影響はその外側まで及ぶことは無いのではと思うが、どのように考えているのか。
- ⇒ ご指摘の通り、支保工を設置すると岩盤に対する緩衝材の膨潤の影響は無支保の場合と比較すると小さくなると思う。しかしながら、本成果は、せん断変位の大小によらず、何らかの外的要因により割れ目面に作用する垂直応力の低下が引き起こされない限りは EDZ の透水係数に大きな変化は無いと結論付けたものであるため、支保工の有無が将来的な透水性に及ぼす影響は小さいと考えている。
- 13 頁において、透水係数の低下は緩衝材への注水開始より以前から始まっているように見える。透水係数の低下要因について再考を願いたい。
- ⇒ 原因については検討中であるが、ピットの掘削により EDZ 割れ目が開口した状態において透水係数の初期値を取得したが、その後ピットに緩衝材を定置し、隙間にケイ砂を充填したことで、割れ目が若干閉塞し、注水開始前に透水係数が低下した可能性がある。一方で、注水の開始以降も透水係数は僅かに低下しているが、既存の経験式により膨潤圧の発生に伴う割れ目面に作用する垂直応力の増大による開口幅の減少が説明できることが分かっていることから、緩衝材の膨潤と EDZ の透水性の低下の間に因果関係は存在すると考えている。緩衝材や埋め戻し材の膨潤と EDZ の透水性の低下について、解析的な検証にも今後取り組みたい。

- EDZ の形成は、初期応力によっても大きく影響を受けると考えられる。幌延の場合は鉛直方向より水平方向の応力の方が大きいと考えられるが、EDZ の形成と初期応力との関係性をどのように考えているのか。
- ⇒ 幌延では、初期地圧測定結果を踏まえ、地下施設の設計段階において、東西方向の水平応力は、鉛直方向応力と比較して平均すると 1.3 倍大きな値であると推定した。これまでも、応力状態の異方性や掘削に伴う間隙水圧低下の観点から EDZ の発達範囲や破壊性状について検討してきた。今後も、地下施設内において得られた応力分布情報や地下水の排水に伴う間隙水圧の低下の影響を整理したうえで、解析的に EDZ の発達状況を予測したい。その際に、これまでの EDZ の割れ目の方向性や拡がりに関する観察結果を踏まえることにより、坑道周辺の応力状態から地下施設の掘削による EDZ の発達を、透水性分布も含めて推定できるようにし、500 m 調査坑道への展開に備えたい。
  
- 11 頁における変位量の見積もりについて、観察される開口割れ目はもともと既にずれていたものではなく、隙間なく重なり合っていたことが前提となっているのか。断層条線に沿って動いたというような考えか。
- ⇒ 健岩部から割れ目が生じたと考えているため、割れ目の形成前は隙間なく重なり合っていたと考えている。また、割れ目を観察した領域付近の応力状態及び割れ目の走向傾斜の情報を考慮すると、今回対象とした断面については、水平面内のせん断変位が最大となる平面での検討結果になると考えている。
  
- 16 頁における EDZ の透水性の予測に関して、具体的にどのように取り組むのか。また予測期間はどの程度を考えているのか。
- ⇒ まずは EDZ の初期の透水性分布を把握することが重要と考えている。その際には、DI の活用や、既存の経験式により、割れ目面の粗さと割れ目面に対する垂直応力から割れ目の開口幅を推定することで、EDZ の透水性を予測していきたい。350 m 調査坑道までにおける知見を踏まえると、500 m に分布する稚内層においても膨潤性は低いと考えられることから、坑道掘削後に大きな応力変化が生じない限り、EDZ の透水性は初期状態から大きく変化しないことが予測される。このような考えに基づいて透水性の将来予測も踏まえた事前解析を実施していきたい。
  
- 10 頁における EDZ の中でメタンと二酸化炭素により還元状態が保たれたということに関して、これは幌延に特有の条件であると考えられるが、このような知見を広く展開することはできないか。
- ⇒ ご指摘の点については、幌延に特有の事象であると理解しているガスなどの胚胎は酸化抑制メカニズムの一つであり、他にもコンクリートなどの覆工により酸素の岩盤への侵入が抑制されることも、主要かつ一般的なメカニズムの一つであると確認されている。また、仮に酸素が岩盤内部に侵入したとしても、微生物活動により緩衝されることも確認されており、これらのメカニズムを複合的かつ長期的に考えていくことが、幌延での知見を汎用化するに当たって重要な点であると考えている。
  
- EDZ の拡大について、強い地震動の発生時と AE の関係性などについて調べることも、長期的な EDZ の形成を予測する観点からは重要なことではないか。また、昨年度の震度 4 の地震などの影響については調べているか。
- ⇒ 昨年度に観測された震度 4 の地震時における AE の観測結果と、EDZ における間隙水圧

の観測結果や透水試験の結果などとの関係性については、今後検討したい。

#### (7) 地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

必須の課題として取り組む「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」のうち、「地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化」のこれまでの成果について説明した。

主な質疑は以下の通り。

- 比抵抗探査により地下水の塩濃度分布を推定することは、幌延のような均質な泥岩では可能かもしれないが、他の場所においても提案の手法は適用できるのか。処分事業への反映を考えた場合の適用性について教えてほしい。
- ⇒ 本日も説明した一連の手法を適用できる条件は、地下水の塩濃度が高いこと、及び地下水の流動が緩慢な場であることと考えている。幌延以外の地域に適用する場合、文献情報からその地域の地質環境と幌延の地質環境の相違点を確認する必要がある。比抵抗特性が大きく異なる岩盤・地層が不均質に分布する地域においては、本手法の適用は難しいと考えており、その場合、4頁に示される調査手順ではなく、比抵抗探査を参照しつつも、ボーリング孔を利用した地下水の採水調査結果と地層や地質構造分布との関連性から、広範囲の水質の空間分布を推測することになる。
  
- 14頁に示されるボーリング調査結果のうち流速や比抵抗分布についてはフローメータ検層から得られたものか。その場合、それぞれの流入点の透水係数も求まるはずだが、取得しているのか。
- ⇒ ご指摘の通り、フローメータ検層から得られた結果であり、ビルドアップ試験から得られたボーリング孔全体の透水係数とフローメータ検層結果を用いて各流入点の透水係数を求めている。電気伝導度は孔内水を清水で置換した後に一定流量で孔内水を揚水しながらセンサーを引き上げることにより測定したものであり、本調査手法は第1段階の調査時におけるHDBの調査手法に準じたものである。
  
- 17頁に示されるフルモデルに対してHDB-1とHDB-5の組み合わせが良い結果を与えるということについて、この結果の必然性を検証するために、HDB-5ではなくHDB-5の塩濃度分布と類似した分布を示す他のボーリング孔との組み合わせがどのような結果を示すのかについては、確認しているのか。本成果は、処分事業の概要調査計画に反映できる成果であると考えられるため、そのような視点から整理されると良い。
- ⇒ 塩濃度分布以外にも同量の比抵抗分布データが必要であり、データの分布密度も水質分布の推定結果に影響を与える。この観点からHDB-5の代替孔は無い。塩濃度と比抵抗の関係性は一義的なものではなく、また酸素同位体比とそれらとの関係性はより大きなばらつきを示すことから、対象地域において取り得る値の範囲を全体的に網羅するような水質分布が得られるボーリング孔を選定することが重要である。概要調査計画に使える手法として整備するために、得られた結果と地質構造との関係性についても整理していきたい。

#### (8) 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

必須の課題として取り組む「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」のうち、「地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握」のこれまでの成果について説明した。

主な質疑は以下の通り。

- 27 頁に示される注水試験の試験 8 日後から 44 日後にかけてのデータなどから、注水試験の影響範囲、割れ目の大きさなども分かっているならば、教えてほしい。例えば、水頭拡散率による評価など。また、デリバティブプロットの境界条件の考え方により、結果の解釈が変わると思うが、どのように考えているのか。
- ⇒ 27 頁で示した注水試験実施孔の近傍に位置する他のボーリング孔の断層交差部においても水圧観測とパッカー圧観測を行っており、注水試験中に同観測孔の断層も動いたことが確認できていることから (31 頁)、試験中の力学的な影響範囲は少なくともこれら試験区間・観測区間の離間距離である 4.5 m、あるいはそれ以上と考えられる。水頭拡散率を用いて評価した場合、かなり大きな影響範囲が求められてしまい、信憑性に乏しい結果が得られる。試験対象箇所の水みちのつながり方の次元は 1.1~1.3 程度に低い値を示すことから、水みちがチャンネル構造を有していることが考えられる。これは、水みちが曲がりくねるなどの屈曲度の増大の可能性が示唆されることから、屈曲度を考慮した評価が重要であり、現在検討中である。この要因により、水頭拡散率から求められた影響範囲が断層の大きさと比較してかなり大きい値になっている可能性が考えられる。デリバティブプロットの境界条件の考え方については、ボーリング孔近傍においてスキーン効果を考慮しなければいけない領域があると考えている。その上で、19 頁の右下図のように透水試験の後半の時間帯で傾きが 1.0 を示すような場合は水圧伝搬が不透水境界に達したと判断できるが、0.5 程度の傾きの場合でも不透水境界を仮定することで 0.5 程度の傾きを再現できてしまう場合もある。水みちのつながり方の次元については、デリバティブプロットに基づく診断のみならず、専用のシミュレータを用いた数値解析も重要と考える。なお、試験 8 日後から 44 日後にかけての変化については、試験 8 日後の試験結果に上記の観測孔で実施した別の注水試験の影響も含まれている可能性が高く、試験 8 日後から 44 日後にかけて何か場に変化があったというより、試験 8 日後の結果がイレギュラーな結果である可能性を考えている。
- 23 頁の多孔質弾性変形を考慮した浸透流解析について、先程は、 $DI=2$  を境に岩石の破壊モードが異なる (引っぱり破壊卓越 ( $DI<2$ )、せん断破壊卓越 ( $DI>2$ )) との説明があった。一方、立坑掘削時に観測された掘削応答水圧の変化 (上昇、低下) についても、 $DI=2$  を基準として岩盤の透水性を整理することで、多孔質弾性モデルで再現可能との説明があった。しかし、弾性変形領域では岩盤内で破壊が生じているわけではないため、破壊モードに対する  $DI$  と水圧応答に対する  $DI$  とでは、異なった意味を持つのではないか。
- ⇒ ここで言う弾性変形は地下施設の建設に伴って周辺岩盤で観測された水圧増加を再現するために多孔質弾性変形を考慮したことを意味している。ご指摘の通り、断層沿いに引張性割れ目が生じるプロセスは不可逆的であり、今回説明する  $DI=2$  を基準とした断層の水理的連結性の評価方法は、引張性割れ目の発達程度の違いが断層の水理的連結性を支配する可能性を前提としている。稚内層は過去から現在にかけて継続的な隆起を経ているため、 $DI$  の値は減少する一方であったと考えられることから、現在の  $DI$  の値は地史の中で最小の値を取ると考えられ、 $DI$  の値が 2 を下回る領域に地層が達した場合、引張性割れ目が卓越することで水理的連結性が増大した状態になり、以降はその状態が継続すると考えられる。これを踏まえ、浸透流解析において  $DI$  の値を基準とした透水性変化を仮定することにより、観測された水圧変化の再現が可能であった。しかしながら、 $DI$  の値は評価時点の状態を表しており、地層が隆起と沈降を繰り返しているような地質環境の場合、 $DI$  の値が 2 以上の領域においても過去に生じた引張性割れ目の影響が残っていると考えられるため、今回説明した方法では評価が困難である。そのような場合、15 頁の右図に示すような割れ目の弾性的な垂直変位の影響を考慮したモデルが重要となってくると考える。

- 9-10 頁において、割れ目面の粗さのパラメータと  $b$  値に幅を持たせることで、力学的割れ目開口幅の値は数十倍にも変わり得ると思われ、その結果として透水係数も数オーダーの幅を持つことになると思われる。このような状況において  $DI$  を用いるメリットは、様々な環境の異なる岩盤の透水性にそれぞれ大きな幅が見られる中においても  $DI$  を指標とすることで全体として透水性と応力状態の関係性に理論的な説明が可能という点にあるのか。
- ⇒ ご指摘の通りである。12 頁の左図に示されるように、ある  $DI$  の値において断層中の水みち割れ目の透水性は大きな幅を持つ。しかしながら 12 頁の左図が示す重要な点は、深度数百メートルで想定される 4 以下程度の  $DI$  では、断層の透水性が  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  や  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  といったような高い透水性になり得て、応力の効果だけで割れ目を閉じ続けることはできず、断層の透水性を低く保つには、鉱物や粘土の継続的な割れ目充填が必要だということである。但し、12 頁の右図に示すように、石英などの硬い鉱物が充填する場合は、断層がずれると充填が破壊され、 $DI$  と透水性の経験式の範囲まで透水性が増加する可能性があり、継続的な充填を担保できるのはオパリナスクレイのような粘土充填のみと考えられる。さらに 12 頁の左図が示す重要な点として、ある  $DI$  の値におかれている岩盤中の断層が取り得る透水性の上限値を、理論的な根拠を持って定量的に推定できるという点が挙げられる。
  
- 16 頁のモール円について、応力集中における差応力の増大の場合、一般的には最小応力は変わらず最大応力のみが大きくなる場合を考える。図中の矢印は最小応力も同時に低下しているが、これはどのような状況を考えているのか。
- ⇒ 図中の矢印はある特定の状況を表しているわけではなく、破壊が生じるためには差応力の増大もしくは有効応力の低下、あるいは両者の組み合わせの状況が必要であることを示すものである。
  
- 地下深部の岩盤物性が未知の状況においてその場の岩盤の透水性を予測するに当たり、平均有効応力は載荷重から見積れば良いが、地下深部の岩盤の引張強度はどのように求めるのか。例えば地下深部の還元的な環境とは異なる地表部の酸化的な環境において風化・変質した岩石の物性は、地下深部の物性とは異なると思われるため、この点には注意が必要であると考ええる。
- ⇒ 岩盤の引張強度は地下深部の封圧条件に依らないため、対象とする岩盤の地層が地表部に分布する場合は地表で採取した岩石試料を用いて室内試験により求めることができる。そのため、地下深部の原位置試験や地下深部の条件を想定した複雑な室内試験を実施する必要が無いことは、重要なメリットである。ただし、ご指摘の通り、試料の性状や代表性について注意し、試料間において引張強度が一定であることなどを担保することが重要である。
  
- 17 頁に示される結果は、三軸圧縮試験の結果か。また、切込み角度はどのように決定したのか。堆積岩などの軟岩の場合、ひずみ硬化の影響を強く受けている可能性も考えられるため、拘束圧には注意が必要であると思われる。また、モール円ではなく応力経路で破壊規準との関係を検討する方がより正確ではないかと思われる。
- ⇒ 非排水条件における三軸圧縮試験の結果である。切込み角度は  $45$  度であり、この角度は岩石の内部摩擦係数や切込みの静摩擦係数を測定したうえで、切込みが最初に滑り始める角度であること、及び切込みの作業効率性を考慮して決定した。ご指摘の通り、応

力履歴を考慮することは重要だと認識している。載荷時のみでなく除荷時においても細心の注意が必要であると考えており、この点に留意した応力履歴は、17 頁の右に示される図中の破線で示されている。実線で示される DI は載荷時に切込みが臨界応力状態にある時の DI、破線で示される DI は除荷時に切込みが臨界応力状態にある時の DI を示している。供試体に形成された二次割れ目は切込みが臨界応力状態にある時に形成されたと考えており、供試体の応力状態は軸圧、封圧及び間隙水圧から求めた。なお、二次割れ目の観察結果は一連の試験終了後の供試体から得られたものであり、圧密・載荷・除荷の途中段階における破壊の進展状況は目視により確認できていない。

- 断層中の水みちは面的な広がりを持つと考えられるが、一方で 17 頁などの室内試験から得られる結果は点的な情報であると思われる。室内試験の結果から天然の断層などの割れ目の水みちを評価する場合、試料あるいは試験結果の代表性について議論しなければいけないと思われるが、どのように考えているのか。
- ⇒ ご指摘の通り、透水性はスケールに大きく依存するため、試験から得られた結果はあくまで局所的なものであると理解している。より広い範囲の有効透水量係数を評価するためには、スケール範囲を網羅する複数個所の水圧観測区間が必要であり、また、より長時間の水理試験が必要であると考えている。DI の経験式の透水性のばらつきは、同一の断層内でも局所的な透水性が有意に変化し得ることを示唆するものだが、その経験式から求まる透水量係数の代表値、すなわちばらつきを示す透水量係数の対数平均値は、ある DI における断層の有効透水量係数の上限値の目安として利用できると考えている。
  
- 12 頁に示される図において、透水性の上限という意味は、ある DI の値における局所的な水みちの透水性が断層活動により変化したとしても、DI から予測される上限の範囲内に収まる、という理解で良いか。また、現在観察される水みち割れ目が、断層のずれる前のものなのか、ずれた後のものなのかについては、どのように判断するのか。
- ⇒ 透水性の上限という意味は、ご指摘の通りの理解である。ただし、隆起・侵食や沈降などにより応力場が変化した場合、DI の値の変化に伴い透水性の取り得る範囲も変化することになる。12 頁の右側に示した石英充填鉱物の例では、試験開始時の透水性が経験式の上限に達していなかったことから、過去に鉱物充填がなされてから断層がずれていない可能性が高い。また、試験により断層をずらした後、透水性が増加したが、これは一時的な透水性の増加であり、再び石英の沈殿により水みちが充填される可能性もある。

以 上