

## 「幌延深地層研究計画 令和 5 年度調査研究成果報告」に関する質問

【令和 6 年(2024 年)10 月 11 日(金) 追記】

第 3 回確認会議において、原子力機構から確認の上、後日提示するとしていた、渡邊教授の更問及び回答を 5 ページ下部に赤字で追記しました。

確 認 事 項	回 答
<p><b>【はじめに】</b></p> <p>■ 有識者(大西特任教授 1)(成果 P 2) 「(以下、第 4 期中長期目標)」(上から 6 行目)、「(以下、第 4 期中長期計画)」(上から 9 行目)と、似た内容の表現が続きます。正確には、それぞれ何を指しているのでしょうか？</p> <p><b>【令和 5 年度の主な調査研究の成果】</b></p> <p>■ 有識者(大西特任教授 2)(成果 P 8) 下から 12 行目 「安全側の評価」とは？</p> <p><b>【実際の地質環境における人工バリアの適用性確認】</b></p> <p>■ 有識者(渡邊教授 1)(成果 P 15) 坑道 7 の掘削による影響がなかったのはどのような理由によるのでしょうか。</p>	<p><b>【はじめに】</b></p> <p>■ 有識者(大西特任教授 1)(成果 P 2) 第 4 期中長期目標期間における業務については、国(文部科学省、経済産業省及び原子力規制委員会)が中長期目標を定め、原子力機構がその目標を達成するための中長期計画を策定し、国の認可を受けたうえで、計画に基づいて業務を実施しています。 「(以下、第 4 期中長期目標)」は国の定めた目標、「(以下、第 4 期中長期計画)」は原子力機構の定めた計画を指しています。</p> <p><b>【令和 5 年度の主な調査研究の成果】</b></p> <p>■ 有識者(大西特任教授 2)(成果 P 8) ここでは、解析の条件設定において不確実性を伴う場合に、より好ましくない結果を導く条件で解析・評価する行為を指しています。当該文では、より岩盤が破壊に至りやすい条件で解析・評価していることを意味しています。</p> <p><b>【実際の地質環境における人工バリアの適用性確認】</b></p> <p>■ 有識者(渡邊教授 1)(成果 P 15) 試験坑道 7 の掘削が試験坑道 4 の計測結果に影響を及ぼしていない理由は、定性的ですが以下の 2 点が大きいと考えています。 ・人工バリア性能確認試験の人工バリアは、350m 坑道底盤より下側に位置していますが、現在の地下水面は坑道埋戻し部への地下水の注水により 350m 底盤部より上にあり試験坑道 7 の掘削前・中・後で人工バリア周辺部が地下水で満たされている状態が変わっていないと考えられること。 ・試験坑道 7 の掘削ではほとんど湧水が発生しておらず、隣接する試験坑道 4 および人工バリア設置部と直接つながるような水みちも存在しないと思われるため、試験坑道 7 の掘削前・中・後で人工バリア周辺部が地下水で満たさ</p>

確認事項

■ 有識者（渡邊教授 2）（成果 P16）

図 7(a) オーバーパック、緩衝材のサイズを図中に記載した方が良いように思います。

回答

れている状態が変わらなかったと考えられること。

これらの理由から、坑道 7 の掘削が行われても地下水の移動がなく、図 9 (b) に示すとおり、試験坑道 7 の掘削前・中・後で緩衝材中の温度分布がオーバーパックからの距離とは無関係に 20℃程度（地下水温と同程度）で変動がなく、人工バリア性能確認試験の計測データに影響がなかったと考えております。

■ 有識者（渡邊教授 2）（成果 P16）

図 7(a) は埋設されている人工バリアの垂直断面図を模式的に示しています。オーバーパックは外径 82cm、高さ 173cm の円筒形で、その周辺に幅 70cm、底面側 70cm、上面側 175cm の緩衝材ブロック（1 段の高さ：35cm）を設置しています（下図参照）。今後、サイズ等の記載がある図面を示すようにします。

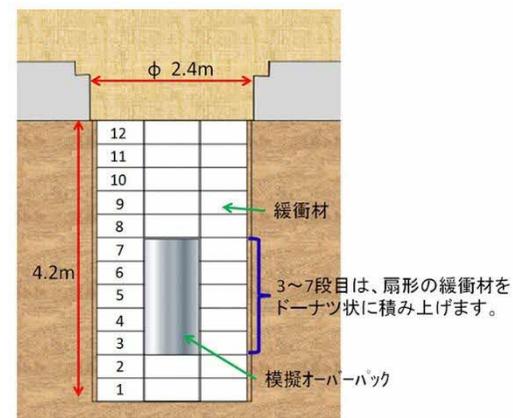
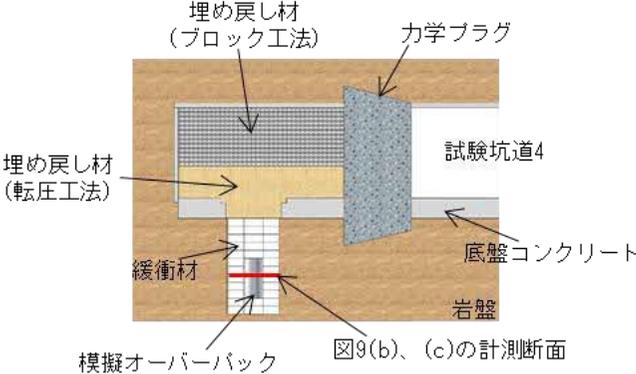


図 緩衝材および模擬オーバーパックの設置イメージ図

確認事項	回答
<p>■ 有識者（渡邊教授 3）（成果 P17）            図 9(a) の左の図面の凡例を教えてください。</p>	<p>■ 有識者（渡邊教授 3）（成果 P17）            色分けされた部分の凡例は以下の通りです。今後は詳細が分かるような図面を使用します。</p>  <p>図 9(b)、(c) の計測断面</p>
<p>■ 有識者（大西特任教授 3）（成果 P17～19）            「人工バリア性能確認試験で取得した緩衝材中の飽和度分布を対象とした検討」で、「ヒーター近傍の飽和度変化の解析結果は各機関で異なる場合があることを確認」（問題 1）とあり、また、「応力変化や変形などの力学挙動についても…緩衝材の変形挙動の解析結果が異なることを確認」（問題 2）とあり、なにか解決を要する「問題」があることを示唆されています。が、当初、18 頁の「ここでは」で始まる段落で、上記「問題 1・2」を解決する糸口の探求を始める、という文脈を十分に理解できませんでした。            17 頁から 18・19 頁にかけての説明を、文脈がもっと明確になるようにしていただければと思います。</p>	<p>■ 有識者（大西特任教授 3）（成果 P17～19）            DECOVALEX プロジェクトは熱—水理—力学連成解析コードの開発と検証を主な目的とした国際共同研究であり、本フェーズでは幌延で行っている人工バリア性能確認試験を題材とした共同解析（異なる解析コード間の比較）を実施し、各解析コードの妥当性の確認や課題の抽出を行いました。17 ページから 19 ページにかけての文章は、DECOVALEX において各機関の解析結果の比較によって得られた結果、各機関の解析結果と比較する前に原子力機構の解析コードで実施した検討の一例、DECOVALEX で明らかになった課題への今後の取り組み、の順に記載しています。            17 ページでご指摘の「問題 1, 2」は、参加機関の解析結果を比較することにより確認された結果を示しています。主な結果は以下の通りです。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 等温環境下の浸潤挙動を対象とした共同解析では、室内試験や原位置試験のうち温度の影響を受けにくい緩衝材外側の飽和度変化を良好に再現した（解析モデルの妥当性を確認）。</li> <li>② 温度勾配環境下の浸潤挙動を対象とした共同解析では、各機関で解析結果が異なり、解析モデルや設定するパラメータによっては、ヒーター近傍の飽和度変化を再現出来ないことを確認（パラメータ設定などに問題あり）。</li> <li>③ 飽和度変化に伴う膨潤変形挙動の共同解析では、弾性体モデルよりも弾塑性体モデルを採用した解析結果の方が、室内試験や原位置試験結果の再現</li> </ol>

確認事項	回答
	<p>性が高いことを確認（弾塑性体モデルの妥当性を確認）。</p> <p>18 ページの「ここでは、」からは、各機関の解析結果と比較する前に原子力機構の解析コードを使用した②に関する検討の一例（どのパラメータがどの程度解析結果に影響を及ぼしたのか？）を示しています。図 10 の結果は、温度勾配水分拡散係数がヒーター近傍の飽和度の解析結果に大きく影響を及ぼすことを示しており、このパラメータの感度の大きさが②の共同解析結果に違いが見られた原因と考えています。</p> <p>18・19 ページにかけては、今後の取り組み方針を示しており、②に対しては、感度が高いと確認された温度勾配拡散係数の精度を上げること、③に対しては試験結果を良好に再現した弾塑性体モデルを、2026 年度から実施予定の解体試験のデータを用いて検証することを示しています。</p> <p>以上のご説明を踏まえ、p17～p19 の文章について文脈が分かりやすくなるよう整理しなおしたものが以下になります（P17～P19 に記載されている解析結果の分析の詳細は省いています）</p> <p>「熱—水理—力学—化学連成現象に関する解析について、国際共同研究 DECOVALEX では、室内試験などからも求められたパラメータを使用し、人工バリア性能確認試験の計測データ（温度、飽和度、全応力、変位）を対象とした熱—水理—力学連成解析を実施し、結果の比較検討を実施しました。その結果、以下のような知見が得られました。</p> <p>① 等温環境下の浸潤挙動を対象した共同解析では、室内試験や原位置試験のうち温度の影響を受けにくい緩衝材外側の飽和度変化を良好に再現した（解析モデルの妥当性を確認）。</p> <p>② 温度勾配環境下の浸潤挙動を対象とした共同解析では、各機関で解析結果が異なり、解析モデルや設定するパラメータによっては、ヒーター近傍の飽和度変化を再現出来ないことを確認（パラメータ設定などに問題あり）。</p> <p>③ 飽和度変化に伴う膨潤変形挙動の共同解析では、弾性体モデルよりも弾塑性体モデルを採用した解析結果の方が、室内試験や原位置試験結果の再現性が高いことを確認（弾塑性体モデルの妥当性を確認）。</p> <p>共同解析結果において各機関によって解析結果に差異が見られた②、③について詳細な分析を行った結果、②に対しては感度が高いと考えられる温度勾配拡散係数の精度を上げること、③に対しては適用する力学モデルを弾塑性体モ</p>

確認事項	回答
<p>■ 有識者（渡邊教授 4）（成果 P21） 図 12 紫のモニタリング区間の間の緑の部分は何ですか。</p> <p>■ 有識者（渡邊教授 5）（成果 P22） ここでの「溶存有機物・微生物・コロイド」は 3kDa の限外ろ過で除去されるものという意味でしょうか。それぞれの内訳や特性は評価されていますか。</p> <p>■ 有識者（渡邊教授）[更問] 【令和 6 年(2024 年)10 月 11 日(金)追記】 これは過去の報告書に載っている内容ということでしょうか。</p>	<p>デルとすること、が連成解析の信頼性向上の観点から重要と考えられます。これらについては、令和 8 年度から実施予定の解体試験のデータを用いて解析・検証することを検討しています。」</p> <p>今後、成果報告書の作成の際には、一連の流れがわかりやすくなるように意識して作成するようにします。</p> <p>■ 有識者（渡邊教授 4）（成果 P21） ご指摘の紫のモニタリング区間の間の緑の部分はパッカー（モニタリング区間を仕切るゴム製の用具）の設置位置を示しています。パッカーの長さは H4-1 孔で 0.3 m、P 孔で 1.0 m です。</p> <p>■ 有識者（渡邊教授 5）（成果 P22） 図 15 の試験では、「溶存有機物・微生物・コロイド」のほぼすべてを除去できる限外ろ過サイズとして 3 kDa（数 nm）を選択しています。それぞれの内訳や特性についてはこれまでに評価を行ってきており、例えばサイズ分布については、溶存有機物が数 kDa～数十 kDa（数 nm～十数 nm 程度）、微生物が概ね&lt;0.2 μm、コロイドが数 nm～500 nm のサイズであることが分かっています。</p> <p>■ 有識者（渡邊教授）[更問] 【令和 6 年(2024 年)10 月 11 日(金)追記】 第 3 回の確認会議で報告した有機物・微生物・コロイドのサイズについて、その一部は研究論文で報告（コロイドについて以下の論文※に記載）していますが、これまでの幌延深地層研究計画の成果報告書には記載しておりません。令和 6 年度の成果報告書において、有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験のこれまでの成果を取りまとめる計画ですので、「有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験」の項目（令和 5 年度の成果報告書では 4.2 (2)に相当）に有機物・微生物・コロイドのサイズについても記載することとします。</p> <p>※Sasamoto, H. and Onda, S. (2018): Preliminary results for natural groundwater colloids in sedimentary rocks of the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan. Multiple Roles of Clays in Radioactive Waste Confinement. Geological Society, London, Special Publications 482.</p>

確認事項	回答
<p>■ 有識者（渡邊教授6）（成果P23）            図15 時間経過による濃度の減少はどのような理由によるものですか。</p> <p><b>【処分概念オプションの実証】</b></p> <p>■ 有識者（渡邊教授7）（成果P39～50）            「閉鎖後技術の実証」については個々の実験の結果がまとめてありますが、それらから具体的にはどのような内容が抽出され、今後、どのように要求性能などに反映されますか。</p> <p>■ 有識者（渡邊教授8）（成果P51～55）            「品質保証体系」では設計要件に対する施工方法による具体的な違い（例えばそれぞれの方法での透水性など）を比較し、技術的な側面をまとめることになるのでしょうか。施工速度や作業性、コストなども含めた評価となるのでしょうか。評価項目についてまとめたものがありませんでしたら、示してください。</p>	<p>■ 有識者（渡邊教授6）（成果P23）            当該試験では、試料分析の容易性等を考慮し、幌延の地下水水質における溶解度よりも高い濃度の希土類元素を添加しています。そのため、時間経過に伴い、希土類元素の沈殿（あるいは容器壁への収着）により、濃度が減少したと考えています。2つの室内試験間（図15と図16）で見られる濃度の減少速度の違いは、報告書に記載の通り、溶存有機物・微生物・コロイドの有無の違いによるものと考えています。</p> <p><b>【処分概念オプションの実証】</b></p> <p>■ 有識者（渡邊教授7）（成果P39～50）            「閉鎖技術の実証」では、坑道や掘削損傷領域が地上まで直結する移行経路となることを防ぐための技術としての埋め戻し材や止水プラグについて、施工技術の整備やそれらの設計や長期性能評価の視点で成果を取りまとめています（※）。</p> <p>例えば、埋め戻し材では設計仕様に対する評価項目である「緩衝材及び止水プラグの膨出抑制」が設定されていますが、その評価に必要となる、緩衝材と埋め戻し材が接触する場合に、緩衝材と埋め戻し材のそれぞれに生じる膨出挙動を把握するための試験を実施しています（※※）。</p> <p>これらの成果は、定量的あるいは定性的な知見として、幌延の350m調査坑道を事例とした埋め戻し材・止水プラグの要求性能、材料仕様や具体的な設計に反映します。</p> <p>※原子力機構，原環センター，令和4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[JPJ007587]地層処分施設閉鎖技術確証試験5ヵ年取りまとめ報告書，2023. など            ※※幌延深地層研究計画 令和4年度成果報告書 P54～p57</p> <p>■ 有識者（渡邊教授8）（成果P51～55）            これまでの閉鎖技術開発を取りまとめた成果の一つとして、実際に技術開発を進めてきた埋戻し材の施工技術（転圧工法、吹付け工法、スクリー工法、ブロック工法）に関して、ご指摘の施工速度や作業性に加えて適用可能な埋戻し材の材料範囲、現状の施工技術で得られる施工品質（乾燥密度）も含めた情報の整理を行っています（※）。コストも重要な評価項目の一つですが、施工機</p>

確認事項	回答
<p>■ 有識者（大西特任教授4）（成果P58）            図54で、「作製直後」「乾燥前」の説明が無いように思います。何の「作製」で、何の「乾燥」ですか？</p> <p><b>【地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証】</b></p> <p>■ 有識者（大西特任教授5）（成果P59～60）            繰り返し「水みちのつながり方の次元」という表現が登場しますが、ここでの「次元」の意味を理解できません。たとえば、ほかの表現等に変更するとしたら、どうなりますか？</p> <p>関連して、60頁図55に、「水みちのつながり方の次元の推定値：1.5」と「1.0～1.5」とあり、それぞれ（a）透水試験結果の解析例、（b）湧水量観測結果の解析例とあります。「透水〔水の染み込み？〕試験」と「湧水〔湧き水〕量観測」との関係／違い（入口と出口？）を理解できていないことと、上記「水みちのつながり方の次元」が重なっているため、59頁～60頁を全体として、理解できません。</p>	<p>械や品質管理方法などについての今後の技術開発によって大きく変わると考えられるため、現時点では評価項目には含めていません。今後の体系化の研究の中では、実証的な技術開発が進んでいる吹付け工法やブロック工法に絞って、幌延の地質環境を事例とした実規模大の止水プラグや埋め戻し材の設計・施工およびその品質確認などを一連のものとして行い、処分事業においても利用可能な形で技術的かつ体系的に整理していきます。</p> <p>※原子力機構，原環センター，令和4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[JPJ007587]地層処分施設閉鎖技術確証試験5ヵ年取りまとめ報告書，p.19，2023.など</p> <p>■ 有識者（大西特任教授4）（成果P58）            当該試験では、ベントナイトを圧縮して所定の含水比の緩衝材試料を作製し、140℃で加熱して乾燥させた後、蒸留水を浸潤させています。「作製」「乾燥」ともに、試験に供する緩衝材試料の作製および乾燥を意味します。</p> <p><b>【地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証】</b></p> <p>■ 有識者（大西特任教授5）（成果P59～60）            「水みちのつながり方の次元」を別の言葉で表現すると、「ある場所とつながる水みちの断面積Aをその場所からの距離rのべき乗<math>r^n</math>の関数で表した時のべき指数n」となります。しかしこの表現では難しいため、当該分野で一般的に用いられる「次元」という言葉を本報告書では用いました。加えて、報告書の用語集に「水みちのつながり方の次元」の説明として「地下水の通り道となる隙間同士をつなぎ具合を表す指標です。隙間同士が互いに良くつながり、三次元的なネットワークを形成する場合は三次元、隙間同士をつながりが限定的で、一次的なチャンネルを形成する場合は一次元となります。」（122ページ）と記述しました。</p> <p>透水試験と湧水量観測はいずれも岩盤から水が出たり入ったりする際の水圧や水量の計測値から水理学的なパラメータを推定する方法ですが、計測の仕方や推定の精度が異なります。透水試験は条件を制御した状態で区間を区切ったボーリング孔に人為的に水を出したり入れたりする際の水圧や水量を計測する方法で、その計測値から水理学的なパラメータを推定するため、推定の精度が高く、図55(a)では水みちのつながり方の次元を1.5と決定できています。</p>

確認事項	回答
	<p>一方、湧水量観測は、坑道掘削時に地下水が坑道に湧き出る水量を排水ポンプの吐出量から計測する方法で、その計測値から水理学的なパラメータを推定するため、透水試験と比べて推定の精度が低く、図 55(b)では水みちのつながり方の次元を 1.0～1.5 と幅を持って推定しています。図 55 は透水試験結果と湧水量観測結果の比較を意図したのではなく、単に両者の方法による解析の例示を意図したものでした。透水試験と湧水量観測はそれぞれ独立した方法であり、互いに関係し合うものではありません。いずれの方法でも水みちのつながり方の次元を推定することができます。</p> <p>ご指摘を踏まえて、分かりやすく表現すると、次のようになります。</p> <p>「令和 5 年度は、断層中の水みちのつながり方の次元（断層中の地下水の通り道となる隙間同士のつながり具合）と岩盤の力学的な指標 DI の定量的な関係を調べました。前者の次元は透水試験や湧水量観測のデータを解析することにより求めることができます（いずれのデータでも可）。ここでは両者のデータを用いて次元を決定しました（図 55）。得られた次元と既存の DI の情報を比較した結果、両者には負の相関が認められ（図 56）、DI が大きければ隙間の連結性が低く、DI が小さければ高い（図 57）ことを今回の解析により定量的に確認することができました。」</p> <p>今後、成果報告書の作成の際には、一連の流れがわかりやすくなるように意識して作成するようにします。</p>