

遠心力模型実験に適用可能な 小型水分量センサーの開発

西本 壮志¹・青木 稔^{1,2*}

¹(一財)電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²(株)ジオデザイン 技術部 (〒108-0023 東京都港区芝浦3-20-6 芝浦MYビル3F)

*E-mail: aoki@geodesign.co.jp

Key Words : centrifugal model test, moisture sensor, differential signal, high level radioactive waste disposal

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分場の周辺（ニアフィールド）において、廃棄体周辺の水分量（飽和度）の分布は、緩衝材の性能に大きな影響を与えることからその状態を把握することは重要である。ニアフィールドにおける数百年にわたる再冠水挙動の評価は、最終的には数値シミュレーションを活用することになるが、その妥当性確認のために、遠心場の相似則に基づき、現象（時間）を加速した結果が得られる遠心力模型実験が実施されている¹⁾。既往の遠心力模型実験と数値解析の比較を行った研究²⁾において、廃棄体周辺の高透水帯の有無によってオーバーパックの移動の経時変化が大きく異なることが明らかとなっている。また、岩盤中を流れる間隙水の移動を把握することにより解析結果の妥当性確認に資することにもなる。

地盤材料中の水分量（飽和度）を計測するセンサーとして土壌水分計が一般的である。一方、遠心力模型実験においては小寸法の縮尺模型を用いるため、模型中の水分量の分布を把握するためのセンサーには小型かつ、その感度範囲が狭いものが求められる。一般的な土壌水分計は寸法の制約がある縮尺模型実験にはサイズが大きく、また、感度範囲が広くなるためその適用が困難である。このため、遠心場で使用可能な小寸法模型に設置できるセンサーが必要となる。加えて、沿岸部処分を想定した場合、塩水環境下における水分量の測定が可能なセンサーも必要である。以上から本報では、遠心力模型実験で使用可能な小型の水位／水分量センサーを開発してきた内容を報告し、その成果と課題について述べる。

2. 水位センサーの開発

遠心力载荷実験において小寸法模型の水分量を計測することを目標に、まず、試料内の水位の計測が可能なセンサー（以降、水位センサー）を開発した（図-1）。水位センサーは2枚のステンレス板の電極（幅5mm×長さ10mm）からなる簡易な仕組みで、岩盤などの試料中の間隙水が2つの電極に接触すると通電し、出力が0から6Vに上昇する。出力確認試験の結果を図-2に示す。モールドに詰めたケイ砂中に水位センサーを設置し、ケイ砂を徐々に飽和させ、飽和した時点で別途用意したコン

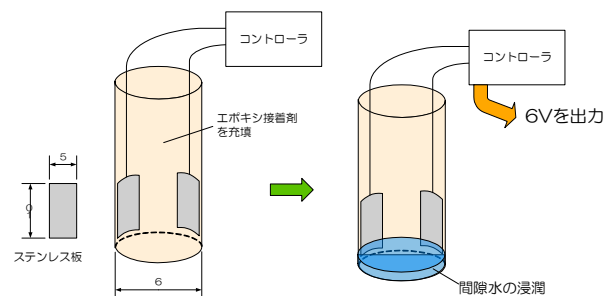


図-1 水位センサー概略図。

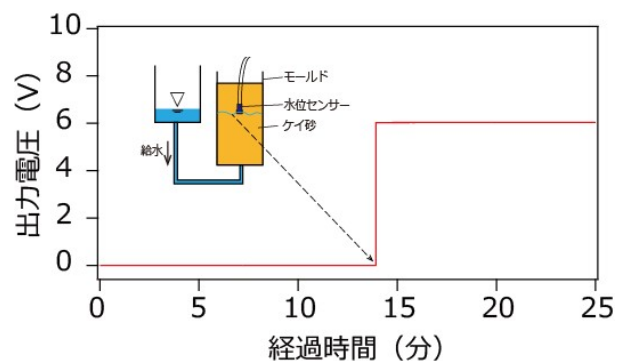


図-2 水位センサーの出力結果の例。

トローラを調整し6Vが安定して出力される最低の感度（抵抗値）に設定した。これにより試料（模型）内の水位の把握が可能となった。

適用事例として、周辺岩盤を含めた廃棄体（オーバーパック）周辺の1/50縮尺のニアフィールド模型を用いた遠心力载荷実験において、水位センサーが用いられている^{3),4)}。ここでは文献3)の結果について例として示す。図-3に示したニアフィールド模型には水位センサーが岩盤、埋戻し材中に4箇所設置されている（WG1～4）。実験では、有効応力4MPa（深度400m相当）、遠心加速度50G場の条件下で、模型下面から間隙水を注水している。水位センサーの出力結果を図-4に示す。水位センサーは模型の下部から約50～80mm間隔で設置されており、模型下面からの注水により、下方のセンサーから順に0から6Vに変化していることが分かる。このセンサーの出力時刻と模型下面からの距離により、模型内の間隙水の浸潤速度（不飽和時の間隙水の移動速度）が求められる（図-5）。

3. 2端子法による水分量センサーの開発

水位センサーは通電状況により0V/6V出力であるため、実際には徐々に変化する試料中の水分量（飽和度）が不明である。このため、次に、試料中の水分量が計測可能となるようなセンサーの開発に取り組んだ。

開発した水分量センサー（システム）の概略を図-6、電極の写真を図-7に示す。水分量センサーのシステムは図-6に示すように、ファンクションジェネレーターで10kHz、正弦波、 $\pm 5V_{pp}$ に調整した交流電流を発生させる。電極は2つ（2端子法）であり（図-7）、電極を試料内部に設置して印加する。印加により回路に電流が流れ、その電流量を抵抗に流して、そこで発生した電圧を直流電圧に整流、その信号の違いが水分量の違いであり、これをデータロガーで計測する。動作確認試験の結果を図-8に示す。動作確認試験では、高さ25mm、直径50mmの緩衝材供試体（クニゲルV1・70%+ケイ砂・30%、締固め密度 $1.6Mg/m^3$ 、初期含水比約10%）を鋼製容器に封入、供試体下部から100kPaで純水を注入し、電圧の経時変化を計測した。出力電圧と飽和度の関係は、予め飽和度（40～95%）を調整した緩衝材試料を準備し、それを計測することで電圧と飽和度の関係を整理し求めた。その結果、試験開始初期において下方に設置した電極①の電圧（飽和度）の増加が計測され、かつ順に、電極②、③についてもほぼ等時間間隔（5時間）で同様の電圧増加が確認された。試験終了時において、電極①（供試体下端面から6.25mmの位置）における飽和度は約96%であった。

適用事例として、高さ1mの長尺の緩衝材に対して間隙水を10年程度継続して注入している「一次元浸潤速度取得試験」（図-9、以降、1G場試験）^{3),5)}を対象に、その縮尺模型を用いた遠心力载荷実験において、水分量センサーが用いられている^{3),6)}。この遠心力模型実験では、実物の1G場試験に対し、遠心力（20、30、40G）と縮尺（1/20、1/30、1/40）を変えて比較する、モデリング・オブ・プロトタイプとモデリング・オブ・モデルズが実施され、緩衝材中の浸潤速度、飽和度の分布が比較されている。例として、30G場試験における縮尺模型を図-10に

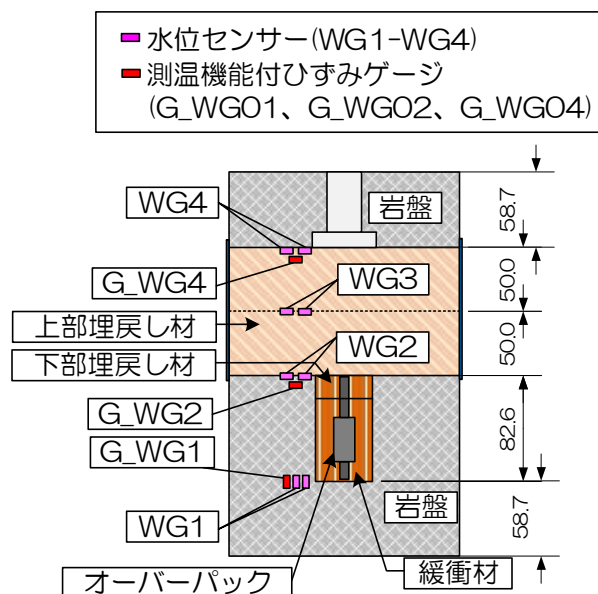


図-3 模型上の水位センサーの設置位置（長さは模型寸法）。

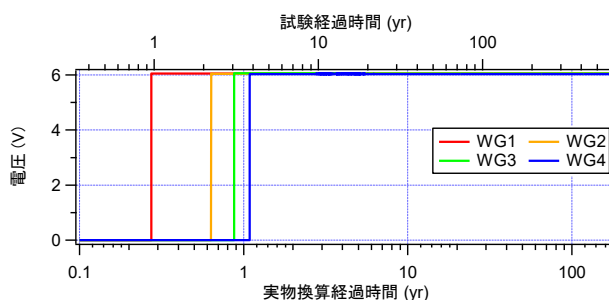


図-4 水位センサー電圧出力の経時変化。

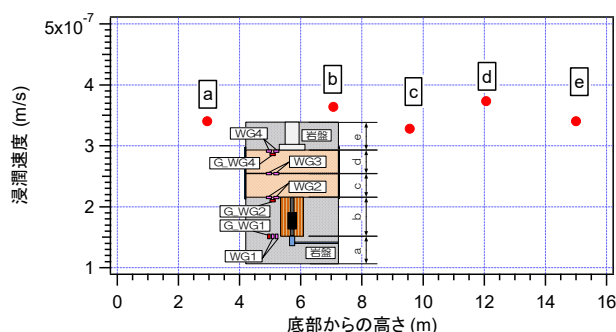
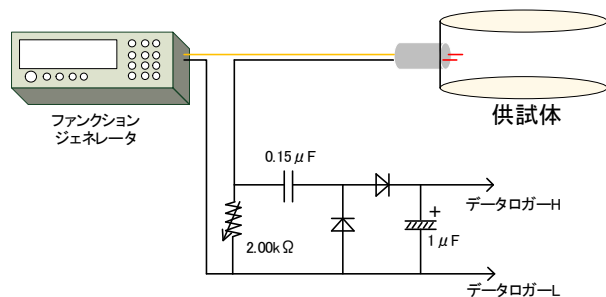
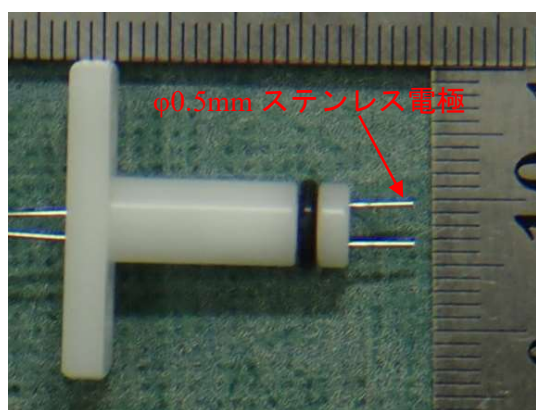


図-5 各区間における浸潤速度。

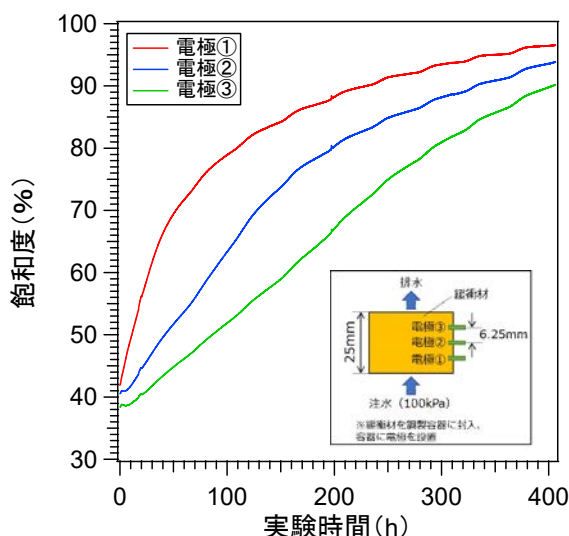
示す．1mの長尺の1G場試験の緩衝材に対し，その1/30寸法の高さ33.34mmの模型に5個の水分量センサーが設置されている（図－10）．1/20，1/40模型でも同様に，6個，3個の水分量センサーが設置されている．1G場試験と同様に，遠心力模型実験でも下面から緩衝材に間隙水が注入され，その結果，模型下面からの距離に応じて水分量センサーで飽和度の上昇が計測された（図－11）．また，1G場試験と遠心場試験の浸潤フロント（初期飽和度か



図－6 水分量センサー（2端子法）のシステム概略.

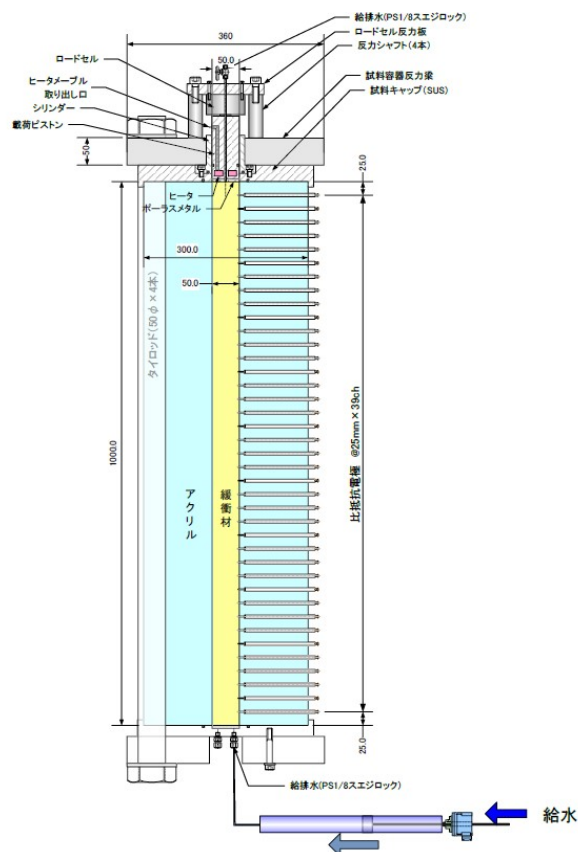


図－7 水分量センサーの電極写真.

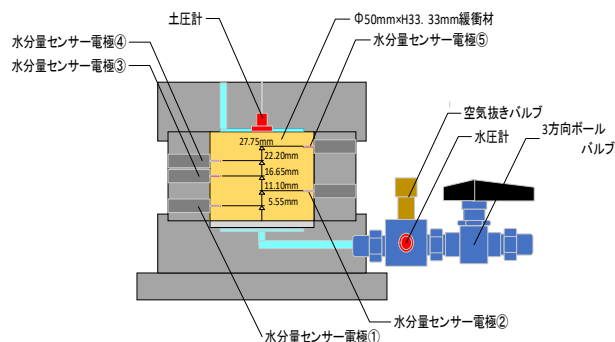


図－8 水分量センサー（2端子法）の出力電圧から求まる供試体の飽和度の経時変化.

ら1%増加した位置と定義）を比較した結果を図－12に示す．1G場試験と遠心場試験で若干の差があるものの（遠心場試験の方が浸潤速度がやや遅い），水分量センサーには誤差が5%程度あることを考慮すれば，1G場試験と遠心場試験，遠心加速度が異なる遠心場試験同士での間隙水の浸潤距離と浸潤時間の関係はほぼ同等の結果が得られている．すなわち，緩衝材中の水の浸潤に関して，モデリング・オブ・プロトタイプとモデリング・オブ・モデルズが成立し，相似則が成立していると考えられる^{9）}．



図－9 対象とする一次元浸潤速度取得試験の試験装置および供試体.



図－10 1/30 縮尺の模型およびセンサー配置概略図.

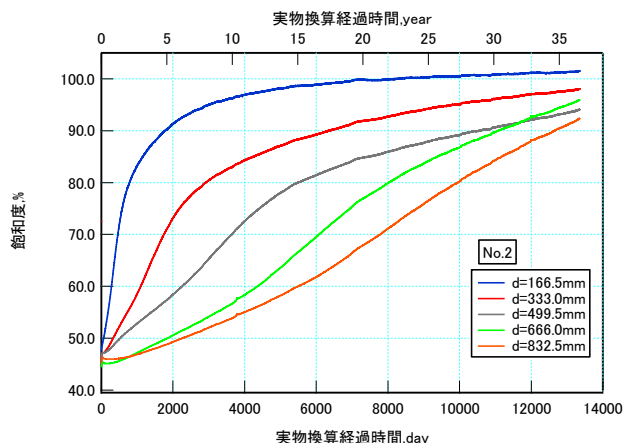


図-11 30G 場試験の実物換算時間と飽和度の関係。

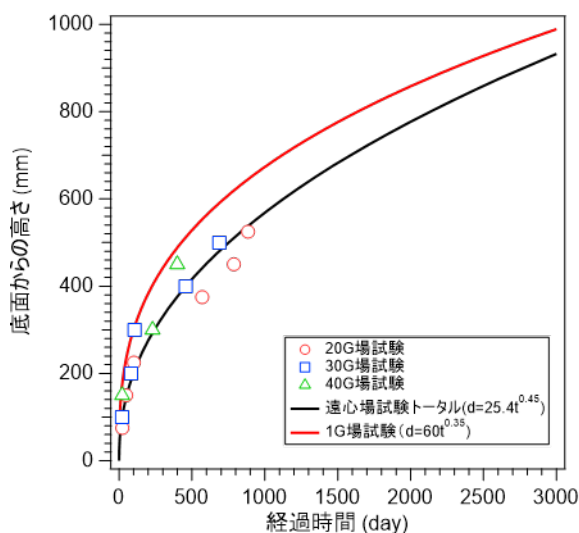


図-12 1G 場試験および遠心場試験 (20~40G) における浸潤フロントの進展状況。

4. 4端子法による水分量センサーの開発

2端子法による水分量センサーで遠心場における模型中の水分量（飽和度）計測の適用性が確認された一方、2端子法だと電極と材料間の接触状態の変化により出力電圧に少なからず誤差が発生することや、ノイズ成分を比較的多く計測するため、試験毎にキャリブレーションが必要であった。また、沿岸部処分場を想定した際、処分場の間隙水（地下水）に海水成分が含まれる。この場合、海水の電気抵抗が純水と比較して極めて低いことから、僅かな海水の浸潤で出力値が上限に達してしまい、試料内部の水分量を正確に計測できないなどが考えられる。このため、電極2つが一組となり差動信号として入出力を与える4端子（4極）法を採用し、

あわせて静電容量が測定可能となるように水分量センサーの改良を行った。4端子法は測定対象物に電流を印加する電極と検出する電極を分離することで、電極と対象物の接触抵抗の影響を低減することができる計測手法である。このためノイズを低減でき、より正確な信号が計測可能となる。

4端子法の概略を図-13に示す。試料に対し、図に示すように4端子法計測用電極に波形発生装置（AWG.1）と計測器（Ch.1, 2）を接続し、O-O' 電極に電圧、正弦波電流を印加すると、その周波数に応じて生じた電圧を I-I' 電極で検出する。なお、O-O' 間に印加した電流の大きさは100Ωのシャント抵抗（Reg.）により発生する電圧として計測される。

動作確認試験には、次に示す試料を用いた。すなわち、Na型ベントナイトと6号珪砂の混合土（混合割合7:3、乾燥密度1.6Mg/m³、含水比7.52%）と、同じ材料に人工海水を加え含水比18.9%とした2つの材料を締固めて供試体を作製した。結果の例を図-14に示す。図-14(上)はNa型ベントナイトと6号珪砂の混合土（以下、純水加水土）に10kHzの正弦波電流を印加した時のI-I' およびO-O' 間の電圧および電流である。図-14(下)は人工海水を加えた混合土（以下、海水加水土）の結果である。

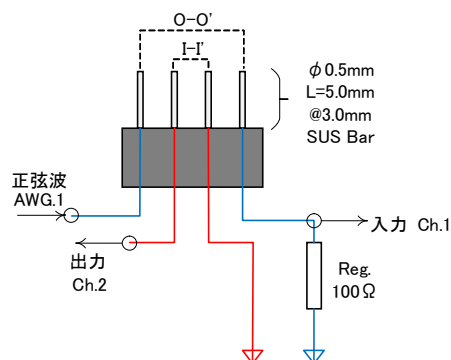


図-13 水分量センサー（4端子法）の概略図。

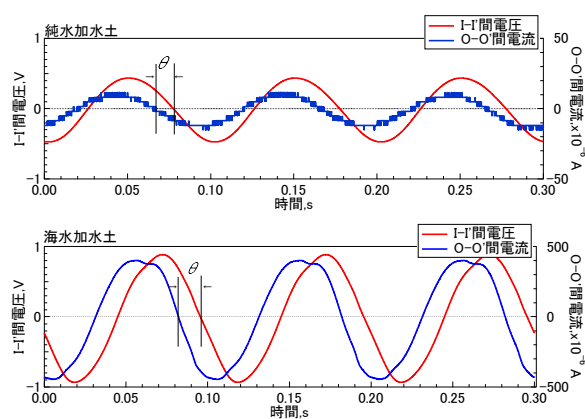


図-14 出力結果の例（4端子法）。

得られた電流、電圧の値からそれぞれ絶対値の平均値を電流、電圧の実効値とした場合、電気抵抗値は純水混合土で12513Ω、海水加水土で533Ωとなり、海水加水土の方が2オーダー低い。また、電流波形に対して生じる電圧の位相差 θ は、純水混合土で21.6°、海水加水土で48.8°であった。この位相遅れの大きさから静電容量を求め、予め含水比（飽和度）を調整した試料でキャリブレーションを行うことにより、海水成分を含む状態でも試料中の水分量の変化をとらえることが可能になると考えられ、現在開発を継続している。

5. おわりに（まとめと課題）

本報では、高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価のために実施されている遠心力模型実験において、その模型中の水分量を計測するための小型のセンサー開発について述べた。

まず、2枚一組のステンレス板から成る水位センサーの開発を行った。ステンレス板の間に間隙水が到達し通電による電圧を検出する簡易な仕組みであるため、キャリブレーション不要で出力が明確であり、試料中の間隙水の到達（水位の遷移）を容易に捉えることができた。一方、水分量（飽和度）の変化は捉えられず、次に2端子法による水分量センサーの開発を行った。

2端子法による水分量センサーは、ファンクションジェネレーターで発生させた正弦波を電極に入力し、試料内部の電流（電圧）の変化を計測する。これにより、試料中の飽和度の変化を捉えることが可能となったが、電極と試料の接触状況に影響を受けることや、ノイズ成分を比較的多く計測するなどの課題があった。このため、4端子法による水分量センサーの改良に着手した。

4端子法による水分量センサーは、測定対象の試料に電流を印加する電極と、試料に流れる電流から生じる電圧を検出する電極を分離する手法である。これにより、電極と試料間の接触による電気抵抗の影響を低減することができ、検出する水分量の誤差を減ずることができる。また、4端子法による水分量センサーは間隙水が純水／海水問わず計測できる可能性もあるため、利点も多い。現在、特定の飽和度における動作確認の段階であり、開発を継続している。今後、測定される正弦波を処理し電気抵抗と静電容量を求め、これらの経時変化を表示するプログラムを作成予定である。また、一台の計測システムで複数の計測点を測定するための多チャンネル化も進める予定である。これらの開発により、電気抵抗と静電容量を多点同時に計測し、その値から水分量および塩分濃度を推定する方法を検討している。

参考文献

- 1) Nishimoto, S., Sawada, M. and Okada, T. : New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, *Rock Mech. Rock Eng.*, 49, pp.3323–3341, 2016.
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 3 分冊）人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築、2017.
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等処分場に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 3 分冊）人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築、2018.
- 4) 西本壮志、高レベル放射性廃棄物処分場の処分孔坑道を有する模型を用いた遠心力載荷実験に関する技術検討、N19502, 2020.
- 5) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等処分場に関する技術開発事業 ニアフィールド評価確証技術開発報告書、2019.
- 6) 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、平成31年度高レベル放射性廃棄物等処分場に関する技術開発事業 ニアフィールド評価確証技術開発報告書、2020.