

放射性廃棄物の処分分野における地下水モニタリングの方法

村上裕晃*¹ 岩月輝希*¹ 竹内竜史*¹ 西山成哲*²

地層処分や中深度処分などの放射性廃棄物の埋設・処分分野においては、事業の進捗に合わせて処分施設周辺の地質環境の変化などの大量の情報を収集する必要がある。モニタリングは、処分場周辺の地質環境の把握、事業の意思決定プロセスの支援、利害関係者への情報提供などの目的のために実施される。本論では、国内外における地下水モニタリングの現状と課題を整理した。モニタリングに先立ち地質環境調査でのボーリング孔掘削、モニタリング地点や深度の選定については、作業手順や品質保証に加え、得られた結果の評価や判断の基準といった技術がこれまでの研究技術開発により確立している。一方で、モニタリング機器の長期運用、長期運用後の機器回収、モニタリング孔閉塞時の閉塞材搬送方法、保孔用ケーシングやストレーナ管を残置した場合の移行経路閉塞性などについては、現時点においては事例が乏しい。地下水モニタリングの計画立案時には、長期的なモニタリング機器運用、その後のモニタリング孔の閉塞施工性も念頭に置いた事前検討が必要になることを想定すると、長期間のモニタリングの実施からモニタリング孔を閉塞するまでについては、計画立案時にその計画の根拠となる技術的な知見の蓄積が必要であると考えられた。

Keywords: 地下水モニタリング, 地層処分, 中深度処分, モニタリング手法, ボーリング孔閉塞

Geological disposal of radioactive wastes requires the large amounts of fundamental technical knowledge throughout the project such as the investigation of geological environment, facility construction, operation and closure. Monitoring is carried out to collect site-relevant information for the creation of an environmental database, to assist in the decision-making process, to provide information for the various stakeholders, etc. We summarized the current technical level and problems of the groundwater monitoring in the world. Through the research and technology development so far, the technologies have been developed for drilling borehole in the geological environment survey prior to monitoring and the selection of the monitoring site. On the other hand, the following technical developments are remaining issues: long-term operation method of monitoring equipment, retrieving method of monitoring equipment after long-term operation, transport method of backfill material for borehole sealing, technical basis for the sealing performance when the borehole-protective casing and strainer tube are left. Thus, to plan for the groundwater monitoring, preliminary studies on long-term operation of monitoring equipment and abandonment of monitoring borehole are necessary.

Keywords: groundwater monitoring, geological disposal, intermediate depth disposal, monitoring method, borehole sealing

1 はじめに

低レベル放射性廃棄物の中深度処分や高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる事業（以下「処分事業」）では、人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステム概念と核種移行シナリオに基づく数値解析に基づいてその安全性が評価される（以下「安全評価」）。安全評価では、事業の各段階における不確実性や知識の限界を考慮し、事業の進捗に合わせて知見を蓄積・更新し、その信頼性を向上させていくことが考えられている[1]。

知見の蓄積・更新に際して、モニタリング（処分システムの各構成要素の挙動、処分場や処分場の操業が公衆・環境に与える影響を評価する際に役立つ環境学・工学・放射線学的パラメータの連続的または定期的な観察・測定[2]）は、以下の点で有用と考えられている[3]。

- ・ 処分場周辺の地質環境特性とその変化の理解
- ・ 処分事業の各段階における意思決定、利害関係者への情報提供に必要なデータベースの構築
- ・ 処分事業の規制要件への遵守の確認
- ・ 処分場閉鎖後の環境が予測と一致することの確認など

モニタリングは、その目的や実施時期に応じてさまざまな項目が対象となり[1, 4]、モニタリングにより得られる各段階の情報は、施設建設前は、地質環境特性の初期状態の理

解や安全評価上重要な FEP (Feature, Event, Process) の同定、施設建設～操業中は、地質環境特性の変化量の把握や地下施設設計・施工（レイアウト等）の妥当性確認、施設閉鎖時は、閉鎖設計への反映やモニタリングの終了・継続の判断、施設閉鎖後は、閉鎖後一定の期間の安全性の確認などにそれぞれ用いられる。

地層処分では、将来世代に過度の負担をかけるべきではないという原則に基づき、閉鎖後の安全性をモニタリングで確認する方法は規定されていない[5]。また、廃棄体と人工バリアの製造、設置および埋設が正常に行われ期待どおりの機能を発揮すれば、埋設に由来する放射性物質は埋設後、長期間にわたり地下施設周辺の地質環境において有意に検出されることはないという想定もある[6]。一方で、将来の利害関係者により閉鎖後のモニタリングが必要と判断され、監視措置の一部として継続される可能性も示唆されている[7]。

日本で検討されている第二種廃棄物の中深度処分では、施設閉鎖後のモニタリングに関して、廃棄体の受け入れから廃止措置の開始までの間（300～400 年）まで人工バリアの健全性を確認するための放射線モニタリング（以下「漏洩モニタリング」）を行うことが示唆されている[8]。加えて、事業許可申請の段階で施設閉鎖後のモニタリングについて技術的に妥当な方法を提示する必要があると指摘されている[9]。

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」）では、岐阜県東濃地域、北海道幌延地域において、地下研究所の建設前、建設中、維持管理中における地質環境特性の変化を理解するための地下水モニタリングを行ってきており、モニタリング技術に関わるさまざまな知見を蓄積してきた[10-15]。本稿では、それらの知見および国内外の既往の知見に基づき、各事業段階の地下水モニタリングについて技

Method for groundwater monitoring on the disposal of radioactive waste by Hiroaki MURAKAMI(murakami.hiroaki73@jaea.go.jp), Teruki IWATSUKI, Ryuji TAKEUCHI and Nariaki NISHIYAMA

*¹ 日本原子力研究開発機構 安全研究センター
Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

*² 株式会社オズベック
Osbec Inc.
〒105-0013 東京都港区浜松町 1-29

(Received 22 August 2019; accepted 23 January 2020)

術の現状や課題を取りまとめ、地下水モニタリングの計画立案時の留意点を整理した。

2 地下水モニタリング技術の現状と課題の整理

各事業段階での地下水モニタリングに関わる実施内容は、以下のように想定される。

- ・ 処分場建設前：建設予定地周辺の地質環境調査（物理探査やボーリング調査など）、モニタリング場所の選定、モニタリング方法の選定と機器の設置、地下水水圧や水質の初期値の把握
- ・ 処分場建設～操業中：放射性核種漏洩の有無の監視、地下水水圧や水質の経時変化量の観測と機器メンテナンス
- ・ 処分場閉鎖後：漏洩モニタリングへの移行（中深度処分の場合）、各モニタリング孔について継続・終了の判断、終了するモニタリング孔でモニタリング機器の撤去、孔閉塞

以下、各段階における詳細な実施内容について、既往情報を基に技術の成立性を整理して述べる。

2.1 地質環境調査のためのボーリング孔掘削

モニタリングを開始する前に行われる地質環境調査のためのボーリング孔掘削については、東濃地域・幌延地域における事例をはじめ[16, 17]、各国において多数の事例があり、モニタリング孔への転用を念頭においた品質管理項目や規制側の視点での判断基準を整理することができる[18]。

一般的に処分場の建設前には、建設予定地周辺の地質環境特性を把握するため、地表踏査、物理探査やボーリング調査が実施される。その結果に基づき、地下施設周辺の地質モデル、水理地質構造モデル、地下水流動モデル、地球化学モデルの構築が行われる[16, 17]。これらの調査・モデル構築の際には、施設建設予定地周辺の地形および地下水の流動方向を想定し、地下水流動の上・下流域の地下水圧や水位などの情報が取得される。

国内外の地下研究施設では、施設建設前に行われたボーリング調査孔の一部がその後のモニタリング孔に転用されており、実際の事業でも同様のことが想定される。この段階の地質環境調査のためのボーリング孔では、その後のモニタリング孔への転用も念頭において、データの品質管理やその追跡性や透明性の確保が必須となる。換言すれば、事業者により適切な品質保証がなされていないボーリング孔は、規制者の観点ではモニタリング孔への転用は不可となる。

例えば、不良事例として英国の沿岸域の堆積岩を対象としたボーリング掘削では、孔崩壊防止のため掘削水に添加したポリマー（Xanthan gum）が完全に排除できず、その後のモニタリング品質に影響している[19, 20]。一般的には、ボーリング孔掘削時の送排水（逸水）の量・場所、電気伝導度、トレーサー濃度、掘削水圧、カッティングス（岩種の概略を把握するため）、掘削速度などが重要な品質管理データとして挙げられる[21-23]。地下水汚染の指標として利用するトレーサーは蛍光染料（ウラニンなど）が一般的で

あるが[24, 25]、有機物が多く含まれる堆積岩・塩水環境の地下水では無機化合物（塩化リチウム、ヨウ化カリウム）やトリチウムなどが代替トレーサーとなる[19, 20]。また、掘削水や掘削中の洗浄方法は、地下水水質に与える影響を考慮して選定する必要がある、フィンランドでは掘削中の洗浄をエアリフト、掘削後の洗浄を化学影響のない金ブラシで実施している例がある[21, 22]。

なお、通常、ボーリング調査時には地表部および裸孔状態で孔壁保持が困難な地層（軟岩など）の孔壁崩壊を防止するため、金属製の保孔用ケーシングとその周囲にセメントが打設されることが多い。一方で、調査孔がモニタリング孔に転用される可能性があり、かつモニタリング孔閉塞後に人工物の残置を可能な限り少なくする必要があると想定すると、地質環境調査の時点でケーシングの回収の可否などモニタリング孔閉塞時の処置についても念頭においてボーリング調査の計画を立案する必要がある。

2.2 モニタリング地点の選定

前述のとおり、処分事業におけるモニタリングは、地下施設の建設・操業による地質環境の擾乱の程度や範囲を把握することと、廃棄体の埋設中に核種が漏洩していないことを確認すること（中深度処分の場合は閉鎖後の漏洩モニタリングも含む）であり、このためには、環境擾乱や核種漏洩を早期に感度よく検出できるモニタリング場所の選定が重要となる。

国内では、岐阜県東濃地域と北海道幌延地域において、十数年間にわたってモニタリング技術の確証のための研究技術開発が行われてきた。この結果から、重要な観測点と相対的に重要でない観測点などに関わる知見が経験的に得られており、環境擾乱の理解などさまざまな観点から観測点を設ける上での判断根拠も蓄積されている[26-32]。例えば、堆積岩のような透水性が異なる岩層の集合体では、相対的に透水性の低い岩層（粘土層等）が施設建設時の水理化学的擾乱を緩和するバリアに、透水性の高い岩層（礫岩層等）が優先的な水みちになることが示されている[12]。一般的に、古第三紀～新第三紀の海成堆積岩には泥岩層が存在するが、とくに粘土質の泥岩層が分布する場合は、泥岩層が処分施設から地表への水理的バリアになり得る[12]。地下水モニタリングでは、優先的な水みち（礫岩層等）に加えて粘土層の上下に観測点を設けることが重要と考えられる。また、施設閉鎖後のモニタリングにおける観測点の抽出についても、これらの結果に基づき優先順位を決定できる。

国外では、沿岸域において海域に連続する地質構造が存在する場合、割れ目の連結性に応じて潮汐変化に伴う水圧変動が観察され、海水侵入の有無に基づき重要な水理地質構造を抽出した事例などが報告されている[19-22]。

これらの知見に基づくと、2.1の地質環境調査で把握された地下水流動の上・下流を考慮し、地下施設建設予定地に連続する可能性のある透水性の高い水理地質構造をモニタリング場所として選定することが重要である。また、施設建設予定地周辺で密に、それから離れるに従って疎になるように配置する事も考えられる[19, 20]。

一方で、長期的な採水を伴う地下水モニタリングは、環境擾乱（滞留環境にある地下水を自然状態より速く移動させる可能性がある）の要因となることや、モニタリング終了後に撤去できなかったモニタリング機器が原因で閉塞が困難になる等の理由で孔が地下水の水みちとなる可能性があることから、対象地域の水理地質構造を踏まえ、目的達成に必要なモニタリング孔の最小数を議論しておくことが重要である[13]。

2.3 モニタリング方法の選定と機器の設置

地下水モニタリングの方法としては、地下施設（坑道）に採水管や観測機器を埋設して処分場直近のデータを直接採取する方法や、坑道の一部または処分場の近辺に参照用の坑道を掘削して地下水モニタリングを行う方法も考えられる。しかし、採水管や観測用ケーブルが水みちとなる可能性があり、また、処分場の近くに開放された坑道が存在することで坑道に向かう動水勾配が生じることで、モニタリングが処分場のバリア機能を喪失させる懸念がある。したがって、坑道でのモニタリングではなく、地表からのボーリング孔を利用してモニタリングを実施する方法が妥当であると考えられる。モニタリングの方法は、既往の生活利用井での水位計測・採水や単一の帯水層を対象とした計測、複数の帯水層を観測対象として多区間のモニタリング機器を設置する方法などが挙げられる。

単一の帯水層を対象とした水位計測や採水を行う場合は、観測対象とする帯水層に、ストレーナ部を備えた塩化ビニル製もしくはステンレス製の管（以下「ストレーナ管」）を挿入し、観測区間を礫など高透水性の埋戻し材で、観測区間以外の深度を低透水性の砂や粘土で埋めて、対象とする帯水層のみの水位計測・採水を行う方法が一般的である[33, 34]。これは、多区間の帯水層を対象として複数のストレーナ部を設けると、異なる帯水層間の水頭差によりストレーナ管を介して地下水が混合するため、1孔につき1深度の観測区間しか設けられないためである。また、この方法は深度100m程度までの適用事例が多く[35]、数百m規模のボーリング孔における事例は少ない[36]。さらに、漏洩モニタリングを想定すると、放射性核種が粘土材料に収着し、見かけ上の濃度が低くなる可能性がある。他方でモニタリング終了後の人工物撤去の観点では、原理が単純であるがゆえにストレーナ管の回収は比較的容易であると想定される。

多区間のモニタリング機器を利用する場合は、その設置時に、地質環境調査のボーリング時と同様に、データの品質に関わる確認を行う必要がある。水質については、ボーリング孔内に帯水層が複数存在する場合は、ボーリング孔掘削後からモニタリング機器設置までの間に、ボーリング孔を水みちとして水頭の異なる複数の帯水層の地下水が混合し[37]、モニタリング開始時に初期の水質の把握が困難になる事例もある[38]。このため、ボーリング孔内の掘削水を十分に除去[39]し、機器設置後には事前に調査した帯水層の分布や水頭などの結果と比較を行う必要がある。こ

こで得られる初期値は施設閉鎖後の安全評価の基盤となる重要なデータであるため、モニタリング開始直後は得られたデータの品質を入念に確認する必要がある。

多区間対応のモニタリング機器は、原理的に直接水圧計測方式とピエゾ水頭計測方式がある。両者の適用事例は、数百～1,000 m 級までのボーリング孔において複数報告されている[40]。直接水圧計測方式は、パッカーで区切られた観測区間に水圧計を定置し水圧を直接観測する方法である。この方法では、水圧の連続観測と、水圧を維持した状態でのボトル採水が可能である。一方で、すべての水圧観測プローブがケーブルで連結されているため、メンテナンス時には孔から全プローブを引き抜く必要があり、全区間のデータが欠測する。また、バッチ式（ボトル式）で水圧を維持したまま採水する場合は、一度に採水できる水量が限られる。

ピエゾ水頭計測方式は、複数の観測区間からピエゾ管を立ち上げ、管の口元に設置したセンサーで水位を観測する方法である。この方法ではピエゾ管内に設置したポンプを用いて採水が可能であるが、配管内の水を事前に長期排水する必要があり、水圧データに欠測が生じるとともに、採水時に水圧を維持できない。また、採水作業に伴う減圧により地下水から気泡が発生し水圧が真値からずれることがあり、定期的なメンテナンス・校正が必要な場合がある[32]。

これらの方法は、国内外の地下研究施設で多数の使用実績があり、化学的に安定な材質で作られたモニタリング機器によるモニタリング技術として確立されている。これらのモニタリング方法の特徴をまとめたものを **Table 1** に示す。

機器回収については後述するが、現時点では処分事業で検討されているモニタリング期間（100年規模）に匹敵する長期間のモニタリングの実施や、その後のモニタリング機器の回収の可否に関する知見が非常に少ない。モニタリング方法を選定する際は、機器の回収の可否も踏まえる必要がある[41]、回収時に残置物が発生した場合にそれらが地質環境に与える影響の不確実性や孔の埋戻し時の閉塞性も念頭に置いて、モニタリング方法を選択する必要がある。そのため、上述したモニタリング方法がモニタリング終了後の機器回収の観点で処分事業に適しているかどうかの技術的根拠の蓄積が課題として残されている。

2.4 モニタリング時のメンテナンス

モニタリング機器のメンテナンスについては、これまで国内外においてその知見が蓄積されている。例えば、水圧観測システムの健全性は、一般的には水圧の連続観測データに基づき判断される。連続観測データの異常は、先に述べたモニタリング機器が有する特徴に起因する変化に加えて、センサーのメンテナンス・交換に伴う値の変化や、地球潮汐や地震などの自然現象を反映する変動も含まれる[32, 42, 43]。モニタリング機器の健全性評価と地下施設の建設・操業影響の評価のためには、それぞれの異常の特徴を把握しておくことが重要となる。

Table 1 Properties of groundwater-monitoring method

観測方法	経済性	観測対象	作業の簡便さ・作業効率	観測孔数・区間数	データ品質	モニタリング機器の回収の可否
1. 裸孔での水位計測 (ストレーナ管または シングルパッカー)	2,3と比較すると安価	水圧	・ 相対的に簡便	・ 水頭の異なる帯水層が存在する場合は、帯水層毎に孔が必要	・ とくになし	2,3と比較すると単純な構造であることから、回収の困難性は低いと想定される
		水質	・ 相対的に簡便 ・ 大量揚水が可能	・ 水頭の異なる帯水層が存在する場合は、帯水層毎に孔が必要	・ 採水時に水圧を維持できない	
2. ピエゾ水頭計測方式 (スタンドパイプ)	1と比較すると高価	水圧	・ センサーが地上付近にあるため、メンテナンスが比較的容易	・ 複数の区間の水頭を1孔で同時に観測可能	・ 配管内に気泡が発生した場合は、計測値が真値からずれる	数十年規模の観測を実施した装置の回収事例がほぼ存在しないため、知見の収集が必須
		水質	・ ピエゾ管の径が細く、大量揚水には不向き ・ パッチ式(ボトル式)採水は適用不可	・ 複数の区間の水質を1孔で観測可能	・ 採水時に水圧を維持できない	
3. 多区間直接水圧計測方式	1と比較すると高価	水圧	・ 水圧計が各深度にあり、メンテナンス時に全ての水圧計を引き抜く必要がある	・ 複数の区間の水頭を1孔で同時に観測可能	・ メンテナンス時に全区間のデータ欠損が生じる	数十年規模の観測を実施した装置の回収事例がほぼ存在しないため、知見の収集が必須
		水質	・ 観測区間内の地下水を直接揚水できる採水機構(ポンピングポート)を設置することで大量揚水が可能 ・ パッチ式(ボトル式)採水の場合、大量の採水には工期が必要	・ 複数の区間の水質を1孔で観測可能	・ ポンピングポートから揚水する場合は、採水時に水圧を維持できない ・ パッチ式(ボトル式)採水の場合は、水圧・化学条件を維持した採水が可能	

地下水モニタリングは、地層処分の事業期間が約 100 年 [44]、中深度処分施設の閉鎖後モニタリング期間が 300～400 年 [8] であることから、100 年規模の時間スケールで実施されると考えられる。国内外の数～数十年間にわたる既往のモニタリング実績に基づく、水圧計測プローブは定期的なメンテナンスが必要であり [45]、数年おきに交換が必要となっている [46]。つまり、既往技術を利用して 100 年規模のモニタリングを行う場合、数十回のメンテナンスが必要となる。このため、モニタリング計画立案時には、メンテナンスの頻度と必要なデータの取得間隔を考慮しておく必要がある。また、既往事例のモニタリング期間は 20～30 年程度であり、100 年を超える長期間の機器本体やボーリング孔を含めたモニタリングシステム全体の健全性に関する知見の蓄積が必要である。モニタリングシステム全体の健全性次第では、モニタリング期間中にシステムそのもののスクラップ&ビルドを行うことも視野に入れる必要があると考える。

2.5 施設閉鎖後の漏洩モニタリングへの移行（中深度処分の場合）

施設閉鎖後のモニタリングについては、カナダ Manitoba 地域において地下研究施設の閉鎖に伴う地下水位の観測例 [47] や、日本での坑道冠水に伴う水圧・水質観測例 [48, 49] がある。いずれも数年～数十年程度のモニタリング結果の報告にとどまっており、処分場規模の地下坑道を閉鎖した際の長期的な環境変化の把握に関する知見は非常に限られている。

施設閉鎖段階では、地下施設による環境擾乱の程度および範囲をモニタリングデータによって理解した上で、施設閉鎖後の地質環境条件を推測し、その後のモニタリングに関わる検討がなされると想定される。具体的には、施設建設・操業時に環境条件が大きく変化した地点の環境回復（もしくは環境が変化した状態で定常化）のモニタリングが重要となるため、施設閉鎖後のモニタリング地点選定では、施設閉鎖前の地下水モニタリングで顕著な変化が認められた地点を選ぶことになる。一方で、放射性核種の移行経路

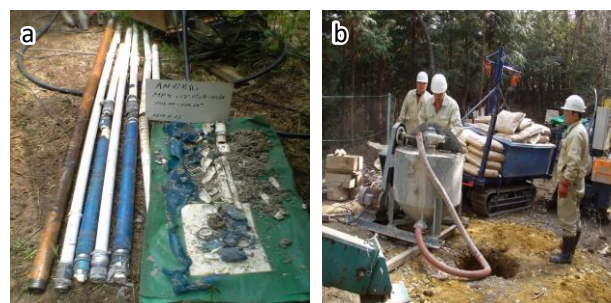


Fig. 1 Retrieving of MP system at TONO mine.

a: Retrieved MP system, b: Cement placement.

となる可能性もあることから、必要のないモニタリング孔は速やかに閉塞する必要がある。

2.6 モニタリング機器の撤去

モニタリング孔の廃止措置では、孔内を閉塞材料で隙間なく埋め戻すため、モニタリング孔から観測機器を回収する必要がある。前述のようにモニタリング機器の撤去事例は非常に少ないものの、東濃地域にわずかな事例がある。東濃鉱山では、1986 年から 2003 年までの約 17 年間にわたって、直接水圧計測方式の一種である MP システム（Westbay Instruments 社、カナダ）を利用して水圧・水質モニタリングを行ってきた。観測終了後、堆積岩に掘削された 6 本のボーリング孔（深度約 80～200 m, $\phi 76$ mm）に設置された MP システムの引き抜きが行われた（Fig. 1）。当時使用されていたパッカーに収縮機能がなかったため、引き抜き時には小型ボーリングマシンを使用してメタルロッドでパッカーを被せ切ることで MP システムの回収が試みられている。その結果、MP システムを完全には抜管できず一部のプラスチックケーシングを孔内に残置している。この原因として、被せ切りにより部品が破砕されて回収効率が大きく低下し、予算と工事工程の制約を受けたことに加え、粉々になった部品の全回収が困難であったことが挙げられている [18]。

モニタリング機器回収の可否は、後述するモニタリング

孔の閉塞性に直結する課題であるため、機器回収事例に関わる更なる知見の蓄積が必要である。

2.7 モニタリング孔の閉塞

ボーリング孔の閉塞については、石油探査分野において多数の実績があるものの、その要求事項が異なるため処分分野にそのまま適用はできない。国外の地下研究施設では、処分の観点でボーリング孔の閉塞に関する要件の整理と閉塞手法に関する研究が継続して行われており[50-52]、基本的な考え方が整理されつつあるが、日本においては既往の報告が少なく知見が整理されていないため、石油探査分野の事例も含めて詳述する。

2.7.1 処分分野におけるモニタリング孔閉塞の要件

処分分野におけるボーリング孔閉塞に関する要件は、処分場に期待される隔離機能を保証するため、ボーリング孔が長期的に地下水・ガスの流路にならないようにすることである[52, 53]。スウェーデンやフィンランドの事例では、その要求期間を10万年間としている[54]。閉塞性能については、周辺岩盤の低透水性部と同程度の透水性を達成する事であり[55]、例えば、スウェーデンでは閉塞材として使用するベントナイトの透水係数の目標値は岩盤と同程度の 10^{-12} m/sec以下としている[55]。一方で、高透水性の岩盤部では、ボーリング孔内を低透水性状態にしても孔の周囲で連結する岩盤中の高透水性部を介して物質が移動し得るため、この値を維持する必要はないと考えられている[56]。

2.7.2 石油探査分野の閉塞事例

石油探査分野では、国内外においてボーリング孔閉塞の実績が多数ある。米国では1890年代からボーリング孔の閉塞に関する規制が行われており[57]、地層間の流体の流れを最小限に抑えるための要件が提示されている[58]。日本では通商産業省および経済産業省が廃止措置に関する考え方を定めており[59, 60]、これらの方法に基づきボーリング孔が閉塞されている[61, 62 など]。国内外におけるこれらの基準はよく似ており[63]、ここ数十年において材料や手法等の基本的な考え方は大きく変化していない[64]。

日本における閉塞の基準[60, 65, 66]では、ボーリング孔の地質・地質構造と保孔用ケーシングの有無や設置深度を考慮した上で、埋戻し材としてセメント、泥水、砂利等を組み合わせて閉塞することが指定されている。閉塞作業の前に孔内の状態（水温や水圧等）を確認し、泥水を用いる場合は設置深度の静水圧を考慮して比重を調整する。ストレーナ部には砂利を充填する。ボーリングの孔径が途中の深度で減径され異なる径の保孔用ケーシングが複数設置されている場合は、その境界部の上下にセメントプラグを設置する。プラグの区間長の指定は国内外で十数 m～100 mと異なる[60, 67, 68]。プラグは、一定の圧力で加圧してその健全性を確認する。地表部は、数 m 以浅の保孔用ケーシング等をすべて撤去し、孔口を鉄板や密閉フランジで閉じて、セメントや土砂等で埋戻す。以上の方法に準拠して埋設されたボーリング孔では、地下水やガスの漏れは生じていない[69]。可燃性ガスが発生するガス井、温泉井戸、地熱井などのボーリング孔の閉塞については、ガスの漏出

や流体の噴出防止の観点から、プラグの設置に関してより詳細な指定がなされている[66, 70]。

主流の閉塞材であるセメントプラグは長期的に見れば劣化する可能性が指摘されており[64]、閉塞の長期健全性、経済性や作業効率の観点から、セメント以外の埋戻し材料の開発も行われている[71]。ベントナイトは有効な閉塞材と考えられており、圧縮ベントナイトペレットである Zonite® は、アメリカやオーストラリアをはじめとして、これまでに数千本のボーリング孔の閉塞に用いられている[72-74]。また、石英粒子と水の混合物である Sandaband® はコンクリートポンプで輸送が可能で石油井の閉塞実績がある[75]。

近年は、孔の閉塞に当たり、石油やガスの地表流出防止[60, 66]に加えて、異なる帯水層間の分離やガス含有層と生活用淡水層との分離といった淡水の保護が要求されている[67, 71, 76]。この考え方は処分分野における要件である「閉鎖したモニタリング孔の水みち化の防止」に適合し、実際に処分分野の孔閉塞の概念設計にも参照されている[52, 53]。一方で、閉塞の確認は主にプラグに負荷をかける形で行われており、閉塞材の設置状況や遮水機能などの実態は評価されていない。また、閉鎖後の状況をモニタリングした例がなく[76]、処分分野の時間スケールにおける閉塞機能の健全性はよく分かっていない。

2.7.3 処分分野の閉塞手法

モニタリング孔の閉塞に関する概念設計は、主に国外において実施されてきた[50, 53]。スウェーデン SKB 社とフィンランド Posiva 社で概念設計された Sandwich concept [53, 74]では、ボーリング孔の主要部分を物理的および化学的に安定な砂や砂利で充填し、割れ目や岩石欠損のない部分（いわゆる健岩部）を高圧縮ベントナイトで閉塞し、ベントナイトの上下に石英ベース（セメント成分を少量しか含まない）のコンクリートプラグを配置する。さらに、材料間の相互作用を防止し、長期的な安定性を保証するために、銅エキスパンダーをすべての材料境界に配置する。スイスの Nagra（放射性廃棄物管理共同組合）では、ボーリング孔の周囲に掘削損傷領域（Borehole Damage Zone ; BDZ）が存在することを想定し、BDZ が少ないと想定される健岩部を、長期間安定な天然材料（ベントナイト）で岩盤の透水性より低くなるように閉塞し、その上下はベントナイトを物理的に支持できるようにセメント、砂、泥水などで埋戻す概念を設計している[77]。これらの概念では、閉塞材であるベントナイトを孔全体に配置せず、健岩部にのみ配置する点が共通している。この理由として、BDZ の存在に加え、高透水性ゾーンにベントナイトを配置すると長期的に流失するおそれがあるためとされている[53]。

閉塞材の上下の砂や砂利は、設置区間の物理的な支持が可能な程度に細かく、ボーリング孔から流失しない程度の大きさであることが求められる[74]。セメントは、ベントナイトの膨潤性への影響を考慮して低アルカリ性セメントの使用が検討されており、いくつかのコンクリートレシピが開発されている[78, 79]。ベントナイトの膨潤や溶脱には、表面コーティングの有無や地下水の塩濃度の違いが影響する[74]。なお、コーティングは非水溶性の天然樹脂（シェ

ラック) が主な原料であるため、不純物としてボーリング孔内に有機物が残置される。銅エキスパンダーは、各材料の接触と相互作用を防止する役割が期待されているが、地下水や砂等に硫化物 (S^2) が含まれる場合は腐食する可能性がある」と指摘されている[53]。

Sandwich concept のように、ボーリング孔の水理地質構造を踏まえて閉塞材を配置する手法のメリットは、閉塞材の大部分が砂であるため設置が簡単なこと、閉塞材の定置深度が最適化されること、長期間安定であると期待されることなどである。一方で、ボーリング孔周辺の詳細な地質調査が必要であり、閉塞手順が複雑なため詳細な品質保証システムの構築が必要となる。また、ベントナイト量が少量のため流失した場合にその影響が大きい[80]。

また、処分事業では複数のモニタリング孔が想定されるが、処分施設からの距離や処分施設との水理地質学的な連続性の違いによって、孔の閉塞レイアウトが異なると考えられる。ボーリング孔を処分場からの距離と掘削長によって分類し、処分場から離れた相対的に掘削長の短いモニタリング孔は単純にベントナイトペレットや砂で埋め戻すという考え方も提示されている[80]。これらの考え方は現時点で確定されたものではないが、観測地点や地質によって異なる閉塞手法が適用される可能性がある。

2.7.4 ベントナイトの搬送方法

ベントナイトが閉塞材として有望であると考えられている一方で、水で満たされたボーリング孔内へベントナイトを搬送する方法は確立していない。ベントナイトが搬送途中で膨潤し閉塞深度に定置できず、閉塞機能を担保できない可能性が想定され、次に示すようなさまざまな搬送方法が検討されている (Fig. 2) [53]。

基本法 (Basic method) : 高密度の圧縮ベントナイトを有孔銅管に充填し、それをボーリング孔に挿入する方法である[53]。スウェーデン Äspö[81]やフィンランド Olkiluoto[82]において試験が実施されている (Fig. 3)。Olkiluoto では2006年に同手法で設置したベントナイトを2013年にオーバーコアリングしたところ、ベントナイトの膨潤圧で銅管が鉛直方向に割れていたものの、ボーリング孔内は膨潤したベントナイトで満たされており、銅管と岩石との間に顕著な移行経路は生じていないことが確認されている[83]。この方法では、銅管が残置物として孔内に残される。

コンテナ法 : ベントナイトをコンテナやダンプベラー等の筒状の容器に入れてからボーリング孔内に搬送する方法であり、搬送中のベントナイトの浸食や膨潤が抑制できる[53]。ダンプベラーは、ボーリング孔へのセメント打設を目的として石油探査分野で一般的に使われており[65]、技術として確立している。コンテナ法を用いてベントナイトをボーリング孔内へ設置した事例は報告されていないが、既存のベラーを対象に研究開発を行うことで、スラリー状、ペレット状、ブロック状のベントナイトを搬送できる可能性が示されている[52]。

ペレット法 (投げ込み法) : 数 mm から数 cm の粒状に圧縮成型したベントナイトをボーリング孔内へ落下させる方法[53]で、前述したとおり石油探査分野において使用実績がある。また、スイスの Wallenberg に掘削された SB4a/s

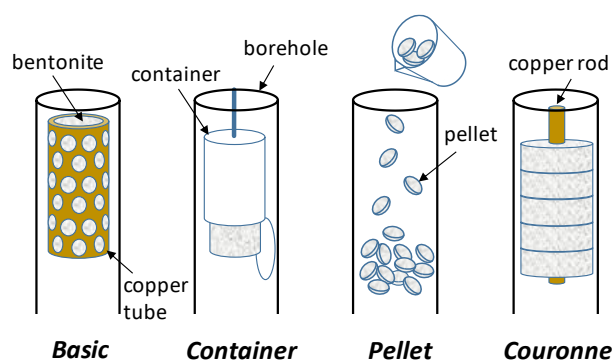


Fig. 2 Concepts of bentonite-carrier method



Fig. 3 Photograph showing the basic method (left) and the couronne method (right) [53]

号孔の閉塞で実際にこの方法が採用された。Nagra により設計された閉塞概念は、長さ約 28 m のベントナイト充填層と、その下の長さ約 54 m のバライト充填層から構成され、両者の間にはセメントプラグが設置された[84]。

孔長が数十mの孔でペレットを最深部から充填した事例がある一方で、孔長が 1,000 m 程度となるとペレットが沈降するのに約 1 時間かかり、ペレットが沈降途中で抑留した事例が報告されている[72]。膨潤を遅らせるためにはペレットの表面コーティングが有効であるが、この場合は相応の量の有機物が残置される。また、石油業界で用いられる弾丸状のベントナイトブロックは、抑留の可能性や、他の手法と比較してベントナイトの密度が低くなるため、閉塞手法として推奨されていない[52]。

クーロン法 : 銅の心棒にドーナツ状に成型した圧縮ベントナイトブロックをはめ込み、ボーリング孔内へ設置する方法である (Fig. 3) [53]。スウェーデン Äspö では、地下施設内の水平ボーリング孔を対象にクーロン法の試験が実施されている[85]。クーロン法を適用した場合、基本法と同様に銅管が残置物として孔内に残されることになる。

以上の手法に加えて、石油探査分野ではポンプやコイルドチュービング (流体を輸送可能なチューブがリールに巻かれており、リールを回転させることでボーリング孔内へチューブを昇降させる装置) を用いたセメントの搬送が標準的に行われており、ベントナイトをスラリー状にすることでこれらの手法も適用できる可能性が指摘されている[73]。ベントナイトスラリーはペレットやブロックと比べて密度が低く透水性が高い傾向があるため、閉塞要件で低透水性を要求される場合は適さない。

Table 2 Properties of bentonite-carrier methods

方法名	方法	材料準備	搬送効率	挿入中の ベントナイトの 浸食	ベントナイトの 密度	残置物	深度管理
基本法	有孔銅管にベントナイトを詰めて孔内に挿入、定置	製作作業が必要	1度に大量のベントナイトを設置可能	小	高	銅管	容易
投げ込み法 (ペレット)	ベントナイトペレットを孔口から投入、自然落下	容易	1度に大量のベントナイトを設置可能	大	低	コーティング (樹脂)	閉鎖深度以外の場所で 抑留する可能性がある
コンテナ法	コンテナ容器にベントナイトを詰め、閉塞深度まで搬送・定置	容易	1度に運搬できる量が制限されるため、 時間と手間がかかる	なし	低～高	なし	容易
クーロン法	芯棒にドーナツ状ベントナイトを付け孔内に挿入、定置	製作作業が必要	1度に大量のベントナイトを設置可能	大	高	銅管	容易
ポンプ輸送・ コイルドチュー ビング輸送	セメントミルク圧送用ポンプ等でスラリーにしたベントナイトを圧送	調整作業が必要	1度に大量のベントナイトを設置可能	なし	低	なし	スラリー状態なので定置深 度の確認が困難な可能性 がある

Fig. 2 の方法にポンプ輸送・コイルドチュービング輸送を加えた各搬送方法の特徴を Table 2 に示す。

ボーリング孔の閉塞作業の品質管理手法（閉塞材の定置方法、閉塞機能の確認方法など）は、現時点では確立されていない。また、閉塞材の長期安定性に関する研究はほとんどない。ベントナイトは処分坑道の閉塞材として使用されることが想定されているが、ボーリング孔の閉塞は処分坑道の閉塞と比較して用いられるベントナイトの量が少なくなるため、浸食や流失による機能低下の影響が大きい。また、セメント、表面コーティングベントナイトなどを使用する場合は、それらが閉塞機能や周辺環境に与える化学的影響の評価が必要である。

3 地下水モニタリング計画立案時の留意点

以上の知見を踏まえると、地下水モニタリングの計画立案時には、長期的なモニタリング機器運用、その後のモニタリング孔の閉塞施工性も念頭に置いて Fig. 4 のような事前検討が必要になると考えられる。

「1. 地質環境調査のためのボーリング孔掘削」段階では、孔掘削時に水頭の異なる複数の帯水層の存在を念頭に置いて、地下水の混合や掘削水による汚染の残留などに関わる品質管理を行う。品質管理項目としては、掘削水の逸水や平衡水位、掘削水・掘削泥材・逸水防止剤・ボーリングビット由来の鉄粉などの残留の有無の確認などの項目が挙げられる。また、廃止措置時の保孔用ケーシングの除去も念頭において、孔内に設置する保孔用ケーシング、セメンチング量を最小限に抑える。

「2. モニタリング地点の選定」段階では、安全評価を念頭に置いて地下水の移行経路を推測してモニタリング場所を選定する。卓越する地下水流動経路となる高透水性の地質・地質構造、その地下施設への連続性・空間分布、閉鎖後の漏洩モニタリング時の地下水流動の下流側・上流側などが重要な選定指標となる。

「3. モニタリング方法の選定と機器の設置」段階では、モニタリング終了後に機器を回収可能な方法を選定する必要がある。現時点では地質・地質構造、帯水層の分布にもとづき、ストレーナ管、直接水圧計測方式、ピエゾ水頭計測方式などのモニタリング方法を選択することが想定され

るが、国内外における連続モニタリングは 20 年程度の事例しかないため、今後、モニタリング機器の使用年数と回収の可能性に関わる知見をさらに蓄積することが必要となる。

長期運用を前提とすると、パッカーを使用した機器では、前述の東濃鉱山の事例のように機器の回収時に残置物が発生する可能性が高いため、Fig. 4 では、孔の頑健性、モニタリング区間数、孔長を判断指標とした上で方法の選択肢案を提示した。

モニタリング孔長が 100 m 程度と想定される中深度処分においては、オーバーコアリングなどで回収しやすいポリ塩化ビニル製もしくはプラスチック製のストレーナ管を孔内に設置（モニタリング対象となる帯水層が複数存在する場合は、帯水層の存在数に合わせてボーリング孔を掘削し、1 孔ごとにストレーナ管を挿入したモニタリング孔とする）することで、廃止措置を比較的簡便に実施できる可能性がある。例えば、ストレーナ管周囲の砂利、粘土などの埋戻し材が閉塞の要件を満たす場合は、ストレーナ管以外の材料は回収しなくても良い可能性がある。ただし、ボーリング孔が多いと、掘削水などによる人為的汚染、複数の帯水層の混合、地下水位の低下など、地質環境に与える擾乱が増加すると想定される。機器の回収と孔の閉塞に関する知見を蓄積することで、本内容に関してさらに具体的な検討が可能になると考えられるが、現時点では課題として残っている。

地層処分のモニタリングにおいて、ボーリング孔長が数百 m 規模に達する場合は、帯水層の数によっては、ボーリング孔の数が多数となり、環境擾乱の可能性が高まるため現実的でなく、パッカーを使用したモニタリング機器の使用が避けられないと想定される。この場合は、東濃鉱山における装置回収の事例から想定すると、10 年に 1 回程度、パッカーや孔の状況を確認する必要があると考えられる。

また、孔壁の崩壊が生じた場合はモニタリング機器の回収が困難になると推察される。孔壁の崩壊が発生する可能性が高い地質を対象とする場合でも、裸孔・モニタリング機器を設置しない状態で地下水位や水質の変化の有無を観測することで、地下施設の建設・操業の影響範囲や水理地質構造の連続性に関するデータとなる可能性がある。

「4. 地質環境モニタリングの実施」段階では、観測結果に基づき、地下施設の建設・操業による影響の有無を確認

地質環境調査・施設建設・操業・閉鎖

施設閉鎖後

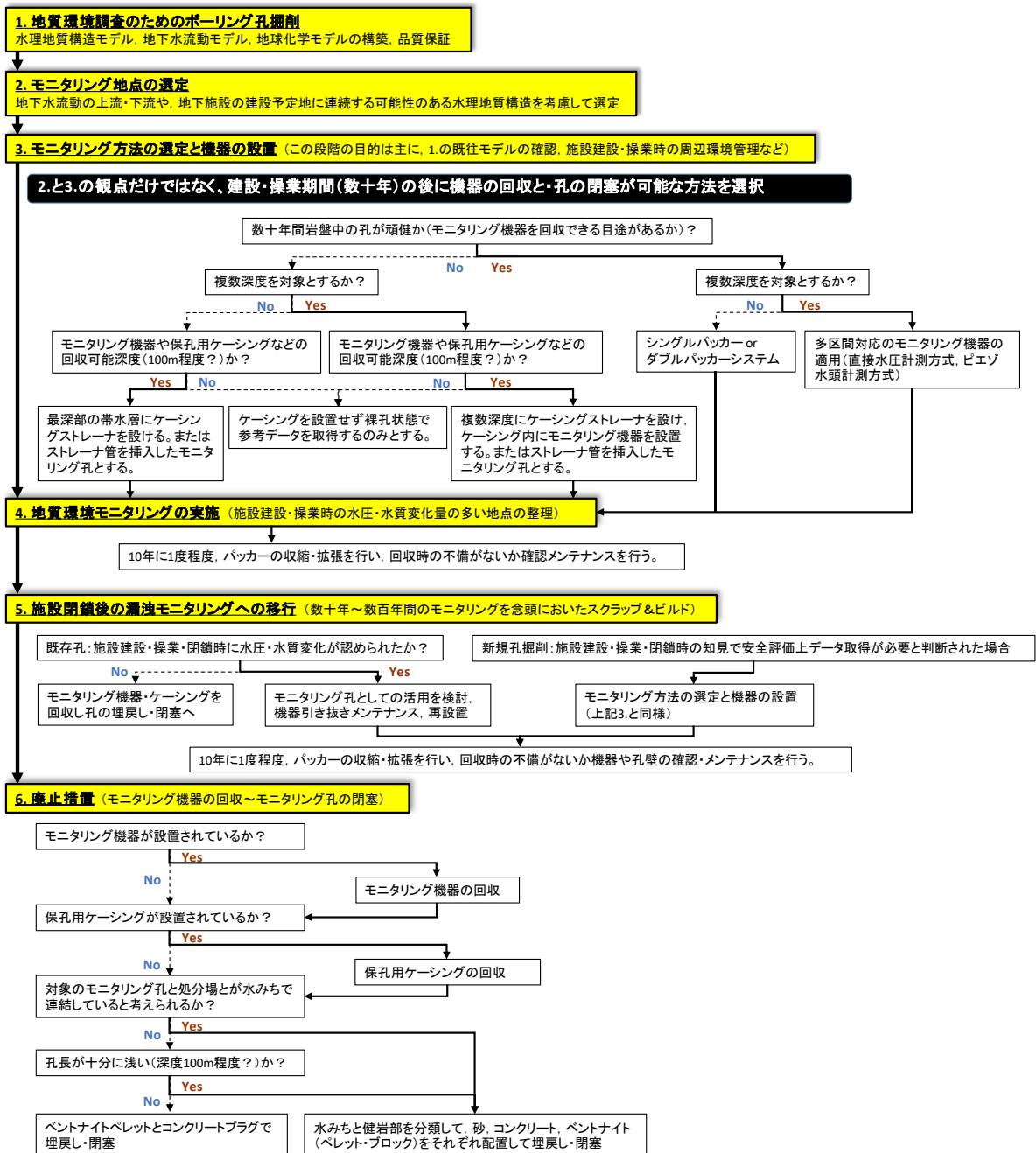


Fig. 4 Prior consideration for groundwater monitoring (from geological environment survey phase to post-closure phase)

して, 地下施設と連続性が高い水理地質構造を抽出する。また, モニタリング機器のメンテナンスおよび孔壁の状態確認を定期的実施し, モニタリング機器の回収の可否を随時確認する。

「5. 施設閉鎖後の漏洩モニタリングへの移行」段階では, それまでに実施したモニタリングの結果にもとづき, 事業者, 規制者, 利害関係者らが施設閉鎖後のモニタリング実施について議論することになると想定される。施設閉鎖後にモニタリングが実施される場合は, 観測項目は再検討されると考えられるが, 基本的には4.の段階と類似して実施されると想定される。また, これまでの施設建設・操業・閉鎖時に得られた知見から安全評価上新たなデータの取得が必要と判断された場合は, モニタリング孔の新規掘削と

機器設置を実施することも想定される。さらに, モニタリングシステムの健全性次第では, モニタリング期間中にシステムそのもののスクラップ&ビルドを行うこととなる。閉鎖後モニタリングを実施しない場合, あるいは閉鎖後モニタリングの観測対象から外れたモニタリング孔は, 地下と地表をつなぐ水みちとなり得ることから, モニタリング終了後に迅速に閉塞されるべきである。

「6. 廃止措置」段階では, まずモニタリング機器の回収が行われる。回収が困難な場合, オーバーコアリング(被せ切り)で機器を回収できる可能性があるが, 残置物が発生する可能性も高い。さらに, 保孔用ケーシングがある場合はそれも回収対象になる可能性がある。石油探査分野では適切にセメントプラグを行うことで保孔用ケーシングがそ

のまま埋設され、地表へのガスや石油の漏洩が報告されていない事例もあることから、孔閉塞後の経過年数とガス徴候に関わる既往の知見を整理することで、保孔用ケーシングの残置の可否に関する事例として参照できる可能性がある。

モニタリング孔の閉塞においては、閉塞材としてベントナイトが最も有力であり、孔内の水理地質構造に合わせてベントナイト、砂、セメントなどを配置する。また、地下施設との位置関係に基づきモニタリング孔を分類し、閉塞方法の最適化を図る。処分場と連続する水みちが乏しく、水理地質学的な連続性が低い浅い孔はベントナイトペレットで閉塞できる可能性がある[80]。一方、孔長の長いモニタリング孔におけるベントナイトの搬送・配置方法については、これまで複数の方法が検討されているものの、現時点では確立されておらず、更なる知見の蓄積が必要である。

なお、Fig. 4 に示した手順には現時点で課題として残されている内容が含まれているため、今後の研究開発、知見の蓄積に基づき更新していく必要がある。

4 まとめ

国内外の地下水モニタリングに関する知見を取りまとめ、処分事業の各段階における技術の現状、課題を整理した。モニタリングに先立つ地質環境調査でのボーリング孔掘削、モニタリング場所の選定については、これまでの研究技術開発により技術が確立している。一方で、100 年を超える長期間のモニタリング機器運用、その後の閉塞措置を念頭に置いたモニタリング技術について以下の課題が残されている。

- ・モニタリング機器の長期運用方法の確立
- ・長期運用後のモニタリング機器回収方法もしくは回収が容易なモニタリング機器の確立
- ・孔閉塞時の閉塞材搬送方法の確立
- ・孔閉塞時の閉塞機能の品質管理方法およびその長期健全性の評価方法の確立
- ・保孔用ケーシングやストレーナ管を残置して孔を閉塞した場合の水みちの閉塞性に関わる現象の理解や閉塞手法の妥当性といった技術的根拠の構築

今後、以上の課題に関わる知見を蓄積し、事業の開始前のモニタリング計画の立案に必要な技術的根拠を更新していく必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たり、日本原子力研究開発機構の前田敏克博士から貴重なご意見を頂いた。また、2 名の匿名の査読者からのご指摘により、本稿は大いに改善した。ここに記して感謝する。

なお、本研究には、原子力規制庁平成 30 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査）事業の成果の一部を用いた。

参考文献

- [1] White, M. J.: Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis. MoDeRn deliverable D-6.1, European Commission (2014).
- [2] IAEA: Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208, IAEA (2001).
- [3] IAEA: Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities. IAEA Safety Standards Series No. SSG-31, IAEA (2014).
- [4] 操上広志, 高橋美昭, 吉澤勇二, 三和公, 赤村重紀, 河野一輝: 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討. NUMO-TR-10-01, 原子力発電環境整備機構 (2010).
- [5] OECD/NEA: Preservation of records, knowledge and memory across generations (RK&M): Monitoring of geological disposal facilities - Technical and societal aspects. NEA/RWM/R(2014)2, OECD/NEA (2014).
- [6] 竹ヶ原竜大, 虎田真一郎, 朝野英一, 大内仁, 坪谷隆夫: 地層処分にかかわるモニタリングの研究－位置付け及び技術的可能性－. RWMC-TRJ-04003, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2004).
- [7] IAEA: Geological disposal facilities for radioactive waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, IAEA (2011).
- [8] 原子力規制委員会: 第 27 回原子力規制委員会 臨時会議, 資料 3, 第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案. 平成 29 年 7 月 31 日 (2017).
<https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/kisei/00000258.html> (accessed 2019-03-01).
- [9] 前田敏克: 中深度処分の安全確保に向けた課題について. 原子力バックエンド研究 25 (2), pp.119-122 (2018).
- [10] 古江良治, 岩月輝希, 濱克宏: 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対する試み. 応用地質 46 (4), pp.232-236 (2005).
- [11] 藪内聡, 操上広志, 瀬尾昭治, 原稔, 國丸貴紀, 竹内竜史: 幌延深地層研究計画におけるボーリング孔を用いた地下水の水圧の長期モニタリング. JAEA-Research 2006-056, 日本原子力研究開発機構 (2006).
- [12] 岩月輝希, 天野由記, 井岡聖一郎, 三枝博光, 竹内竜史, 大規模地下施設の建設に伴う周辺地下水環境の変化. 日本原子力学会和文論文誌 6 (1), pp.73-84 (2007).
- [13] 天野由記, 南條功, 村上裕晃, 藪内聡, 横田秀晴, 佐々木祥人, 岩月輝希: 北海道幌延地域における深部地下水調査－地上からの地球化学調査の妥当性評価と地下施設建設に伴う地球化学特性変化－. 地下水学会誌 54 (4), pp.207-228 (2012).
- [14] 水野崇, 青才大介, 新宮信也, 萩原大樹, 山本祐平, 福田朱里: 瑞浪超深地層研究所の建設に伴う地下水

- 水質の変化. 日本原子力学会和文論文誌 **12** (1), pp.89-102 (2013).
- [15] Iwatsuki, T., Hagiwara, H., Ohmori, K., Munemoto, T., Onoe, H.: Hydrochemical disturbances measured in groundwater during the construction and operation of a large-scale underground facility in deep crystalline rock in Japan. *Environmental Earth Sciences* **74** (4), pp.3041-3057 (2015).
- [16] 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工: 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書. JAEA-Research 2007-043, 日本原子力研究開発機構 (2007).
- [17] 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: 幌延深地層研究所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「深地層の科学的研究」. JAEA-Research 2007-044, 日本原子力研究開発機構 (2007).
- [18] 日本原子力研究開発機構: 平成30年度原子力発電施設等安全技術対策委託費(廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査)事業報告書. 原子力規制庁委託調査研究報告書 (2019).
- [19] Nirex: The geology and hydrogeology of Dounreay. NIREX Science Report, Report No. 653, Nirex (1994).
- [20] Bath, A., Richards, H., Metcalfe, R., McCartney, R., Degnan, P., Littleboy, A.: Geochemical indicators of deep groundwater movements at Sellafield, UK. *Journal of Geochemical Exploration* **90** (1-2), pp.24-44 (2006).
- [21] Luukkonen, A., Pitkänen, P., Partamie, S.: Evaluation of Olkiluoto hydrochemical data in 3-D—Extended with recent geochemical interpretation results. Working Report 2005-72, Posiva (2005).
- [22] Pitkänen, P., Ahokas, H., Ylä-Mella, M., Partamies, S., Snellman, M., Hellä, P.: Quality Review of Hydrochemical Baseline Data from the Olkiluoto Site. Working Report 2007-05, Posiva (2007).
- [23] 関陽児, 内藤一樹, 奥澤康一: 掘削された孔井により引き起こされる地下水流動—水理水頭の鉛直不均一分布への配慮は十分か?—. 地下水技術 **49** (6), pp.1-8 (2007).
- [24] Flury, M., Wai, N. N.: Dyes as tracers for vadose zone hydrology. *Reviews of Geophysics* **41** (1), pp.2-1 - 2-37 (2003).
- [25] 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 柏谷公希: 地下水トレーサとしての蛍光染料の分析と試料溶液の保管法の検討. 地下水学会誌 **59** (3), pp.205-227 (2017).
- [26] Hama, K., Seo, T., Yusa, Y.: A sampling procedure of formation water and its application to geochemical investigation of groundwater in the Tono area, Japan. *Hydraulic and hydrochemical characterization of argillaceous rocks: Proceedings of the Workshop*, Nottingham, United Kingdom, June 7-9, 1994, pp.213-225 (1995).
- [27] 池田則生, 佐々木伸幸, 大島和夫, 山口耕平, 斎藤茂幸, 阿部順之, 片野孝, 上田晃: 試錐泥材の水理学的・地球化学的影響調査. JNC TJ7440 2005-071, 核燃料サイクル開発機構 (1998).
- [28] 小出馨, 杉原弘造, 長谷川健, 武田精悦: 花崗岩を対象とした深部地質環境の調査技術開発の課題と現状—測定データの品質保証の観点で構築した地下水調査法の提案—. 資源と素材 **117** (10), pp.785-793 (2001).
- [29] 古江良治, 岩月輝希, 水野崇, 彌榮英樹: 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理. JNC TN7520 2003-001, 核燃料サイクル開発機構 (2003).
- [30] 井岡聖一郎, 岩月輝希, 酒井利彰, 石島洋二: 深層地下水の酸化還元状態—現状と今後の課題—. 日本水文科学会誌 **37** (4), pp.287-293 (2007).
- [31] 狩野智之, 毛屋博道, 竹内竜史: 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング(2009年度). JAEA-Data/Code 2011-002, 日本原子力研究開発機構 (2011).
- [32] 毛屋博道, 別府伸治, 竹内竜史: 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング(2013-2014年度). JAEA-Data/Code 2018-011, 日本原子力研究開発機構 (2018).
- [33] 竹下祐二: 最近の地下水調査方法と計測技術 6. 地下水動態の計測 6.1 地下水の水位・水圧の計測法. 地下水学会誌 **36** (3), pp.293-303 (1994).
- [34] 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説. 丸善出版, 東京 (2004).
- [35] 遠山茂行, 若松尚則, 岡崎彦哉: 正馬様用地における地下水位計の設置. JNC TJ7440 2000-018, 核燃料サイクル開発機構 (2000).
- [36] 関陽児, 内藤一樹, 鈴木庸平, 伊藤一誠, 渡部芳夫: ボーリング孔での原位置地下水試料の採取法と留意点. 資源地質 **62** (3), pp.235-247 (2012).
- [37] 嶋田純: 岩盤中の地下水挙動把握のための地下水サンプリング方法. 地下水学会誌 **29** (3), pp.137-141 (1987).
- [38] 井岡聖一郎, 古江良治, 岩月輝希: 深層ボーリング孔を用いた岩盤中の地下水の採取法—地下水の酸化還元状態の把握のために—. 日本水文科学会誌 **36** (4), pp.181-190 (2006).
- [39] Laaksoharju, M., Smellie, J., Nilsson, A-C., Skärman, C.: Groundwater sampling and chemical characterization of the Laxemar deep borehole KLX02. SKB TR 95-05, SKB (1995).

- [40] Gascoyne, M.: Methods of sampling and analysis of dissolved gases in deep groundwaters. Working Report 2002-21, Posiva (2002).
- [41] 須山泰宏, 田辺博三, 江藤次郎, 吉村公孝: 閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討. 原子力バックエンド研究 **17** (2), pp.71-84 (2010).
- [42] Yokota, H., Tomura, G., Maekawa, K.: Study of estimation of hydrogeological structures based on fluctuation of groundwater pressure at Horonobe area, Hokkaido, northern Japan. *Proceedings of 3rd International Workshop and Conference on Earth Resources Technology 2009*, Sapporo, Japan, May 13-14, pp.169-178 (2009).
- [43] 竹内竜史, 露口耕治, 尾上博則, 三枝博光, 別府伸治: 地震に伴う地下水压の変化が地下水流動特性に与える影響—東濃地域における事例—. 原子力バックエンド研究 **22** (2), pp.37-52 (2015).
- [44] 原子力発電環境整備機構: 地層処分事業の安全確保 (2010 年度版)—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—. NUMO-TR-11-01, 原子力発電環境整備機構 (2011).
- [45] Koch, R. J., Pearson, S. G.: Evaluation of sampling systems for multiple completion regional aquifer wells at Los Alamos National Laboratory. LA-UR-07-4034, Los Alamos National Laboratory (2007).
- [46] 野原壯, 三枝博光, 岩月輝希, 濱克宏, 松井裕哉, 見掛信一郎, 竹内竜史, 尾上博則, 笹尾英嗣: 超深地層研究所計画における研究坑道の掘削を伴う研究段階 (第 2 段階) 研究成果報告書. JAEA-Research 2015-026, 日本原子力研究開発機構 (2016).
- [47] Thompson, P., Priyanto, D.: Canada's Underground Research Laboratory (1980-2014). *Annual Waste Management Conference (WM2016)*, Arizona, USA, March 6-10, 2016, pp.1-14 (2016).
- [48] 高倉望, 伊藤誠: 再冠水に関する原位置試験研究(その 3). JNC TJ1400 2000-006, サイクル機構 (2000).
- [49] 林田一貴, 加藤利弘, 久保田満, 村上裕晃, 天野由記, 岩月輝希: 坑道閉鎖試験に基づく坑道掘削・閉鎖時の化学環境変化プロセスの考察. 地球化学 **52** (1), pp.55-71 (2018).
- [50] Blümling, P., Adams, J.: Grimsel Test Site Investigation phase IV borehole sealing. Technical Report NTB 07-01, Nagra (2008).
- [51] SKB: Design, production and initial state of the closure. SKB TR-10-17, SKB (2010).
- [52] RWM: Sealing site investigation boreholes: Phase 2. Task 5: Techniques used in the oil and gas industry for placing materials in boreholes. Potential application to generic sealing concepts for the RWM Siting Programme. RWM/03/046, RWM (2016).
- [53] Pusch R., Ramqvist, G.: Borehole project - Final report of Phase 3. SKB R-07-58, SKB (2007).
- [54] Karvonen, T. H.: Closure of the investigation boreholes. Working Report 2012-63, Posiva (2014).
- [55] SKB: Long term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, SKB (2006).
- [56] SKB: Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, SKB (2009).
- [57] Pennsylvania DEP: Pennsylvania's Plan for Addressing Problem Abandoned Wells and Orphaned Wells (DEP Document No. 550-0800-001), Pennsylvania Department of Environmental Protection - Bureau of Oil and Gas Management (2010).
<http://www.elibrary.dep.state.pa.us/dsweb/Get/Version-48262/550-0800-001.pdf> (accessed 2019-03-01)
- [58] Ground Water Protection Council (GWPC): State Oil and Natural Gas Regulations Designed to Protect Water Resources. Ground Water Protection Council, 26-27 (2009).
http://www.gwpc.org/elibrary/documents/general/State_Oil_and_Gas_Regulations_Designed_to_Protect_Water_Resources_0.pdf (accessed 2019-03-01).
- [59] 経済産業省(旧通商産業省), 石油鉱山の坑井の廃止に関する措置基準及び解説, 昭和 61 年 12 月 25 日 (1986).
- [60] 経済産業省, 鉱業権者が講ずべき措置事例 (内規) (平成 24 年 6 月 1 日時点版) (2012).
http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2012/06/240601-8.html (accessed 2019-01-21).
- [61] 日本原子力研究開発機構: 平成 21～22 年度地下水流動解析モデルの総合的検証手法の検討(幌延ボーリング調査) 最終調査報告書. 原子力規制庁 (旧 原子力安全基盤機構) 委託調査研究報告書 (2010).
- [62] 佐藤亮介: JOGMEC 柏崎テストフィールドの実験井 1 号井 (TRC-RW1) の廃坑について, 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (2018).
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1004762/1007485.html (accessed 2019-01-11).
- [63] 石油技術協会作井技術委員会安全規則/環境保護に関する分科会: 石油・天然ガス開発に於ける安全及び環境保護に関する規則等の概要(その 2). 石油技術協会 (1988).
- [64] National Petroleum Council: Plugging and abandonment of oil and gas well. Paper #2-25, In: *Prudent Development: Realizing the Potential of North America's Abundant Natural Gas and Oil Resources*, National Petroleum Council, Washington, DC (2011).
- [65] 鉱業労働災害防止協会: 鉱山保安テキスト 鉱場 (2014).
http://tengas.gr.jp/asset/00032/MASTER_SEIDO/20140414kozanhoann_text.pdf (accessed 2019-01-21).

- [66] 環境省: 可燃性天然ガスが発生する温泉井戸埋戻し方法. 平成 27 年 3 月 30 日 (2015).
<http://www.env.go.jp/press/100784.html> (accessed 2019-01-21).
- [67] NORSOK Standard D-010 Rev. 4: 2013. Well integrity in drilling and well operations.
- [68] Alberta Energy Regulator: Directive 020 - Well Abandonment (2018).
<https://www.aer.ca/documents/directives/Directive020.pdf> (accessed 2019-03-01).
- [69] 環境省: 第 1 回可燃性天然ガス発生温泉井戸の埋戻し方法検討会, 資料 5, 温泉井戸、鉱山及び石油採掘等の埋戻し事例. 平成 26 年 10 月 24 日 (2014).
<http://www.env.go.jp/nature/onsen/council/kanen/01kanen.html> (accessed 2019-01-21).
- [70] 新エネルギー財団, 地熱調査井の掘削標準・指針 (改訂版). 財団法人新エネルギー財団 (2003).
- [71] American Petroleum Institute. Exploration and Production Department: *Environmental Guidance Document: Well Abandonment and Inactive Well Practices for U.S. Exploration and Production Operations*. American Petroleum Institute, Washington DC (1993).
- [72] Carl, M. A.: Final close-out report. Department of Energy Award No.: DE-FG26-01BC15336, Interstate Oil and Gas Compact Commission (2004).
- [73] RWMD: Sealing deep site investigation boreholes: Phase 1 report. RWMD/03/042, RWMD (2014).
- [74] Sandén, T., Dueck, A., Åkesson, M., Börgesson, L., Nilsson, U., Goudarzi, R., Jensen, V., Karnland, O.: Sealing of investigation boreholes. Laboratory investigations of sealing components. SKB P-17-10, SKB (2017).
- [75] Saasen, A., Wold, S., Ribesen, B.T., Tran, T. N., Huse, A., Rygg, V., Grannes, I., Svindland, A.: Permanent abandonment of a North Sea well using unconsolidated well-plugging material. *SPE Drilling & Completion* **26**, pp.371-375 (2011).
- [76] Ide, S. T., Friedmann, S. J., Herzog, H. J.: CO₂ leakage through existing wells: current technology and regulations. *Proceedings of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Trondheim, Norway, June 19-22, 2006 (2006).
- [77] Brenner, R. P., Jedelhauser, P.: Bohrlochversiegelung: konzept und machbarkeitsnachweis. Technischer Bericht NTB 89-26, Nagra (1989).
- [78] Pusch R., Ramqvist, G.: Borehole sealing, preparative steps, design and function of plugs - basic concept. SKB IPR-04-57, SKB (2004).
- [79] Holt, E., Leivo, M., Vehmas, T.: Low-pH concrete developed for tunnel and plugs used in nuclear waste containment. *Concrete Innovation Conference 2014*, Oslo, Norway, June 11-13, 2014 (2014).
- [80] Sandén, T., Nilsson, U., Johannesson, L.-E., Hagman, P., Nilsson, G.: Sealing of investigation boreholes. Full scale field test and large-scale laboratory tests. SKB TR-18-18, SKB (2018).
- [81] Carlsson, L., Olsson, T., Neretnieks, I., Pusch, R.: Stripa project - Summary of defined programs. Technical Report NTB 81-05, Nagra (1980).
- [82] Rautio, T.: Borehole plugging experiment in OL-KR24 at Olkiluoto, Finland. Working Report 2006-35, Posiva (2006).
- [83] Karvonen, T., Hansen, J.: Posiva plans and experiences for borehole plugging. *D7.3 DOPAS 2016 Proceedings*, Turku and Olkiloto, Finland, May 25-27, 2016, pp.86-89 (2016).
- [84] Nagra: SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg. Technischer Bericht NTB 02-24, Nagra (2002).
- [85] Pusch, R., Ramqvist, G., Bockgard, N., Ekman, L.: Sealing of 300 mm boreholes KXTT3 and KXTT4 at Äspö HRL. Report of subproject 3 of borehole sealing project. SKB R-11-19, SKB (2011).