

結晶質岩におけるグラウト材が地下水へ及ぼす 化学的影響に関する調査研究

松井裕哉^{1*}・水野 崇¹・笹本 広²・杉原弘造¹・油井三和²

¹日本原子力研究開発機構 瑞浪超深地層研究所
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

²日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所
(〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

*E-mail: matsui.hiroya@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究「地下坑道施工技術高度化開発」の中で、既存のグラウチング技術の有効性や、その化学的影響に関する調査研究を、平成19年度から実施してきた。本調査研究では、グラウト材が浸透・固化した領域に、水圧・水質連続モニタリングシステムを設置して、物理化学パラメータの連続観測と採水・分析を行い、近傍で実施中の地下水の地球化学的調査結果と比較し、その影響を検討した。その結果、地下水水質は、本モニタリング期間中にバックグラウンドと同等程度まで戻ったことが示され、影響が解消されるまでの期間は、空洞状態を保持している場合には、概ね2年程度と推定された。

Key Words : grouting, monitoring, groundwater chemistry, crystalline rock

1. はじめに

トンネルなどの岩盤での地下構造物の建設においては、工事の円滑な実施および安全確保といった観点から、グラウチングによる空洞内への湧水を抑制する対策がしばしば行われる。一方、高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおいて、グラウチングで一般的に用いられる普通ポルトランドセメントが用いられた場合、セメントから浸出する高pH溶液により、岩盤や地下水および人工バリアの一つである緩衝材（ベントナイトと呼ばれる粘土材料を主とする）の諸特性が変化する可能性があるため、地層処分を進める国内外の研究機関において、研究が精力的に進められている^{1) 2)}。このような観点から、経済産業省資源エネルギー庁は、地層処分における湧水抑制対策技術やその影響評価技術の開発を目的とした研究（地下坑道施工技術高度化開発）を、平成19年度より開始している。

本論文は、同研究受託の一部として、既存のグラウト材が地下水や岩盤に及ぼす化学的な影響を把握・評価する技術の整備を主目的として、(独)日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市において建設中の瑞浪超深地層研究所³⁾(以下、研究所と称す)の一部を利用し平成19~22年度の間実施した調査研究の成果を報告するものである。

2. 調査地点の地質環境およびグラウチング状況

図-1に、調査に使用したボーリング孔と坑道レイアウトを示す。研究所は、主立坑と換気立坑が40mの離隔で掘削中であり、両立坑を深度100m毎に予備ステージという水平坑道でつないでいる。深度300mには、主立坑から延長約100mの研究アクセス坑道という水平坑道を設けている。研究所掘削地点は、地表から深度170m程度までは新第三紀の堆積岩が、それ以深は白亜紀後期の土岐花崗岩が分布する。また、主立坑断面内およびその周辺に断層とそれに付随する強変質領域が存在する。

本調査は、深度200mの予備ステージ中央に位置する避難所（幅4m×高さ3m×長さ6m）周辺で実施した。地上からの調査および深度約180m地点から両立坑底より掘削したパイロットボーリング調査の結果によれば、調査地点は、花崗岩上部に存在する割れ目帯内であり、その中でも水平に近い低角度割れ目が密集する領域に位置する⁴⁾。このため、立坑・水平坑道掘削時に多量の湧水が生じる懸念があり、坑道掘削前の探りボーリングにより、湧水箇所と湧水量の特定を試みると同時に、多量の湧水発生が見込まれた避難所を含む数箇所ではプレグラウチングを実施した⁵⁾。プレグラウチング後に実施した避難所周辺部を対象とした調査研究により、周辺岩盤中のグラウト

材の浸透・固化状況と、その分布を把握している⁶⁾。なお、プレグラウチングでは、普通ポルトランドセメントを使用した。

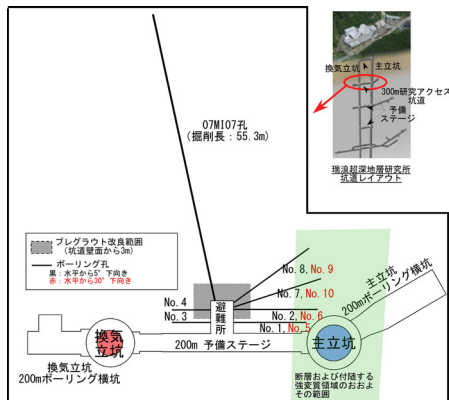


図-1 避難所周辺のボーリング孔配置図

3. 調査研究の概要

調査のために設置した多区間水圧水質モニタリングシステムの配置図を図-2に示す。調査を長期間にわたり合理的に行うため、多区間水圧・水質モニタリング装置をNo. 9, No. 10孔(孔長約20m)に設置し、2008年12月末(プレグラウチング後、約半年経過時)より各区間の水圧および地下水の物理化学パラメータ(pH, Eh, EC等)の連続モニタリングおよび同装置を利用した地下水の採水・分析を実施した。本モニタリング装置は、8時間おきに測定区間が自動的に切り替わり、一つのセンサで多点のモニタリングが可能である。物理化学パラメータ測定用センサには、実績のあるIn-situ Inc.社製のTroll 9000を用いた。測定間隔は、水圧と水質を10分間隔で測定し、それを1区間当たり8時間続けた。

測定区間の配置や設置ボーリング孔の選定は、事前に把握したグラウト材の浸透固化領域の分布や地質状況、地下水の湧水状況、パッカーの数量の制約や長期間に渡る観測に伴う避難所周辺の水理環境の変化(不飽和領域の発生可能性)を考慮した。具体的には、長期観測において不飽和領域の発生を無視できるよう、既設の予備ステージから離れかつ避難所底盤部より下向きに掘削した孔の中で、コアにおいてグラウト材の浸透・固化が明瞭に見られ、かつ事前の透水試験等で湧水量や透水性が異なっていたNo. 9, No. 10孔を選択した。測定区間は、両孔とも、コア観察によりグラウト浸透・固化領域と主立坑近傍の強変質部の境界が明瞭に区分できたため、図-2中の表に示す形で設定した。

なお、本調査領域には、研究所における他の調査のための観測孔(07MI07孔)が掘削され、同様に多区間水圧水質モニタリング装置が設置されていた。この観測孔はプ

レグラウチング改良範囲に比べ十分長い孔長を有していたことから、本調査研究では、この観測孔でのデータをバックグラウンドとし、グラウト材が地下水水質に及ぼす影響の有無について検討した。

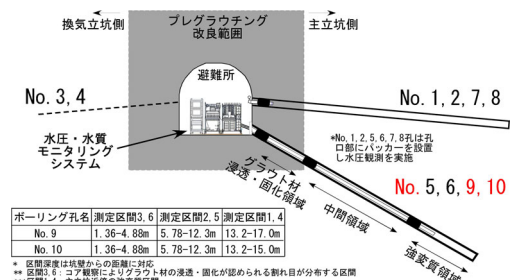


図-2 測定区間

4. 測定結果および考察

(1) バックグラウンドとなる避難所周辺の地下水水質

図-3に、07MI07孔における採水・分析で得られた地下水水質の経時変化を示す。計測開始時の高pH環境やCa, Kの濃度増加は、同孔掘削時に設置した孔口ケーシングのセメンチングの影響と考えられている。その後の地下水水質の経時変化をみると、硫酸、塩素、ナトリウムは測定区間毎の濃度差が大きい、それ以外の濃度は区間毎に大きな差はない。2008年9月頃水質が変動したが、以降の観測期間中の水質変化幅は相対的に小さい。

図-3 07MI07孔における地下水水質の経時変化

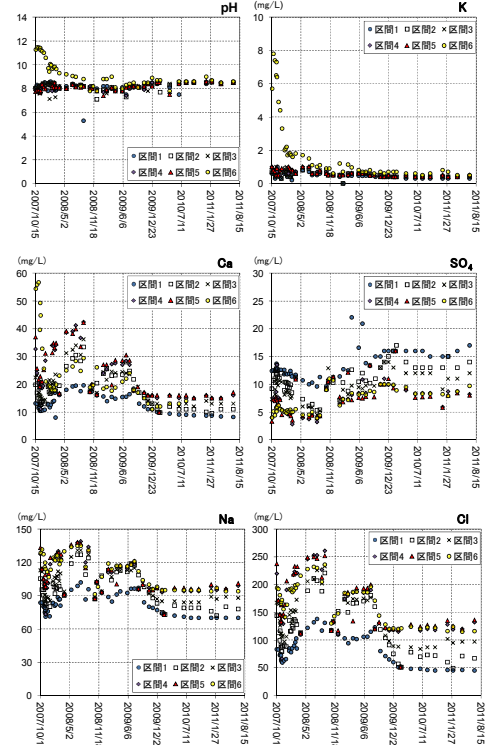


図-3 07MI07孔における地下水水質の経時変化

(2) グラウト材が地下水水質に及ぼす影響

図-4、図-5は、モニタリング結果のうち、地下水の水圧と水温の経時変化を示したものである。グラフの上段は、多区間水圧・水質モニタリング装置を設置しているNo. 9, No. 10以外のボーリング孔の孔口での測定結果、下段は、No. 9, No. 10に設置した多区間水圧・水質モニタリング装置の測定結果であり、測定期間中の主要なイベントを上段のグラフ中に概略的に示した。

図-4上段のグラフから、避難所坑口、すなわち予備ステージに近いNo. 1, No. 2 は初期水圧も低く、パッカー交換後に一時的に圧が戻っているものの低下傾向にある。No. 5, No. 6, No. 8 の水圧は、図-4下段のNo. 9, No. 10 孔で区間毎に観測されている圧力とほぼ同等である。研究坑道内でのイベントとの関係を見ると、300m 研究アクセス坑道(図-1)掘削領域は、多量の湧水(1000L/min以上)をとまなう割れ目帯が存在したエリアであり、同坑道掘削時には全ての孔で水圧低下が認められた。しかし、その絶対値は最大でも0.05 MPa程度にとどまっており、図-1中の主立坑沿いに分布する断層および強変質領域の遮水効果で、本調査領域への影響は最小限になったものと考えられる。一方、300m 予備ステージ(図-1)における調査用ボーリング孔掘削および水理試験などのインパクトは、前述の研究アクセス坑道掘削などのイベントにくらべ相対的に大きく、かつほぼ同時に起こっており、200m 避難所周辺から鉛直に近い方向の水理学的な連結性が高い水みちの存在が推察される。

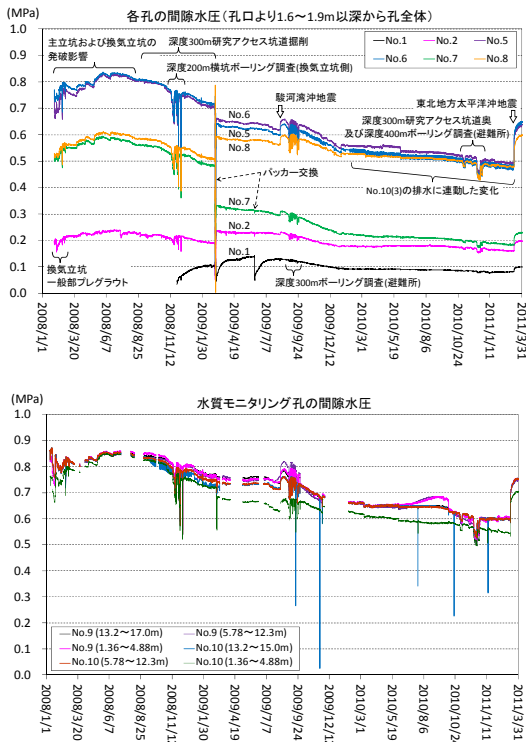


図-4 地下水水圧の経時変化
(上段: No. 1, 2, 5, 6, 7, 8 孔, 下段: No. 9, No. 10 孔)

No. 10 孔の区間1 と区間3 では2009 年9 月半ば以降にスパイク状の大きな圧力変動が見られるが、これは多区間水圧・水質モニタリング装置の電磁バルブの不具合が要因である。

図-5 には、No. 9, No. 10 孔の温度測定結果と、(財)東濃地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所が深度200m 換気立坑ボーリング横坑(図-1) から鉛直下向きに掘削し深さ約20m のボーリング孔孔底に設置した埋設型の応力計および傾斜計内の温度計測結果を併記している。多区間水圧・水質モニタリング装置のセンサー一部で計測しているNo. 9, No. 10 孔の水温は、明瞭な季節変動が見られ、通気で変動する坑内気温と連動していることがわかる。これは、物理化学パラメータの測定のため、センサー部に流入する地下水の流量を非常に少なくしていることと配管の長さやその熱伝導性の影響で、地下水がセンサー部に到達する時点で、ほぼ坑内気温と同じ温度になっているためと考えられる。また、坑内気温は水圧変動と異なり、研究坑道内での各種イベントとは無関係に変動していることから、季節変動と考えられる。

一方、埋設型の計測は、坑道から離れて、岩盤中に埋設あるいは水没した状態で行われていることから、おおむね原位置岩盤中の水温を計測していると考えられる。測定結果から、約2 カ月程度の時間遅れはあるが、坑内気温と同様の季節変動が認められる。これは、測定場所が花崗岩体上面の高透水性領域であることに起因すると考えられる。ただし、その変動幅は最大0.5°C程度であり、坑内気温の変動幅の1/50 程度しかない。

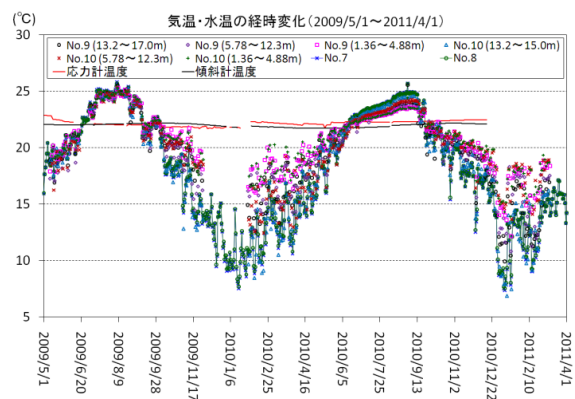


図-5 No. 9, No. 10 孔孔口部およびボーリング孔内埋設機器で計測した気温・水温の経時変化

図-6~図-8 は、物理化学パラメータのモニタリング結果のうち、pH, 酸化還元電位(以下、「Eh」という)、25°Cで補正した電気伝導度(以下、「EC」という)の約3 カ年の経時変化と地下水採水時(図中の青破線)の同パラメータの測定結果を比較したものである。図中の緑色破線は、モニタリング装置のメンテナンスを実施した日時を示している。Eh, ECは式(1), 式(2)により温度

補正を行った⁷⁾。なお、温度補正は、センサー部の水温（坑内気温）を用いて行った。

$$Eh = ORP (\text{測定値}) +$$

$$\{ 215.81 - \text{水温} \times (0.77942 + \text{水温} \times 0.001934) \} \quad (1)$$

$$EC = EC (\text{測定値}) \div \{ 1 + 0.0191 \times (\text{水温} - 25) \} \quad (2)$$

ここで、0.0191 : KCl 溶液の公称温度係数である。

一般的に、物理化学パラメータの変化は、水圧変動と異なり、**図-4**上段に示した研究坑道内での各種イベントと無関係な変化となっている。従って、水質分布に対する地下水流動場の変化の影響は小さいことが推測される。pH は、モニタリング装置設置初期で、プレグラウトの影響が残存する状態では、10 程度の値であったが、2011年8月現在は、8.5 程度の値を示している。pHは、地下水の採水時には圧力解放状態で測定している。連続モニタリングと採水時の測定値は、2008 年度は0.5~1 程度の差があったが、2009 年9月以降はほぼ同じ値を示した (**図-6**)。EC についても同様であり、2008 年度は50mS/m 程度の差があったが、2009 年9月以降はほぼ同じ値となった (**図-7**)。ORP より変換したEh の値は、現状でも採水時の値と比較し200~300mV の差がある (**図-8**) もの、変化の傾向は類似している。

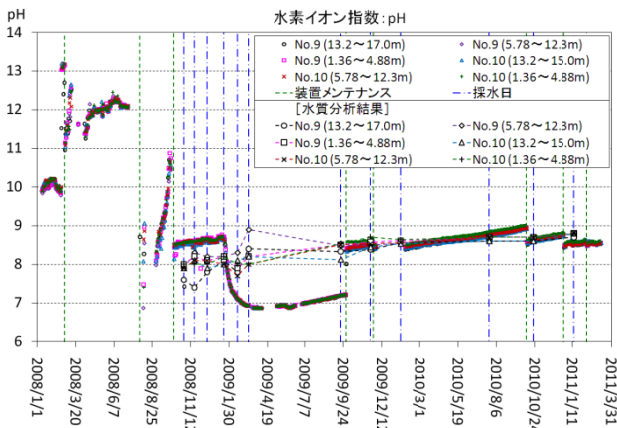


図-6 物理化学パラメータの経時変化 (pH)

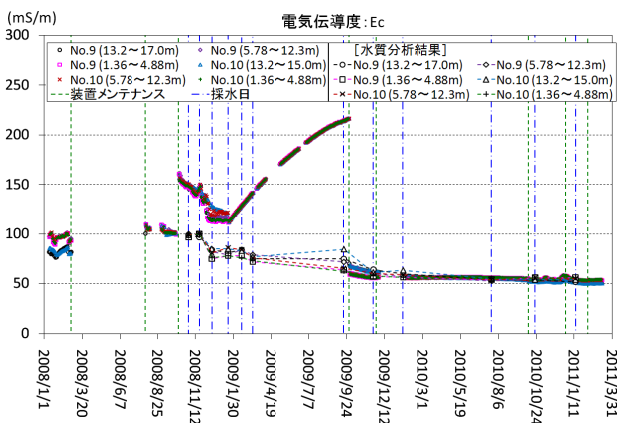


図-7 物理化学パラメータの経時変化 (EC)

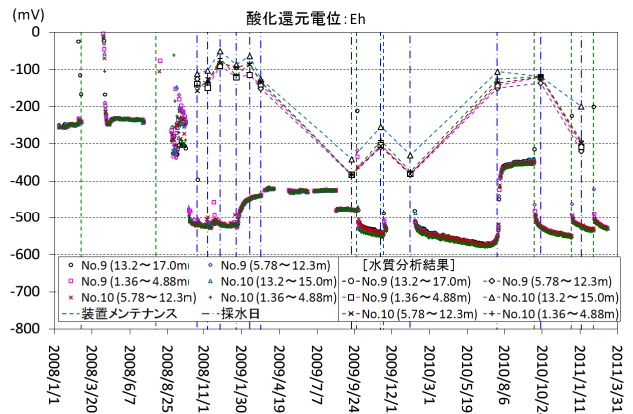


図-8 物理化学パラメータの経時変化 (Eh)

これらの変化は、モニタリング初期はマニュアルに基づきセンサー校正のみを行っていたが、モニタリング結果と分析結果の乖離の解釈が困難であったため、センサーを含む水質モニタリング装置全体のメンテナンスを、2009年度以降、年数回実施したことが理由と考えられる。すなわち、センサーのみマニュアルに基づき校正するだけでは、モニタリングデータの品質に問題が生じることから、センサーを含む測定系全体の定期的メンテナンスが重要であると考えられる。また、現行の水質モニタリング方式（単一のセンサーにより複数区間の水質モニタリングを行う機構）により物理化学パラメータの連続モニタリングが可能であることも同時に示されたと考える。

なお、深度200m 地点は、前述した水理地質的特徴から、地下水水温が季節変動の影響を受けた可能性があるが、計測された原位置岩盤中の水温変動幅は小さく、式(1)、(2)から考えてもそれが地下水中の物理化学パラメータに与える影響は無視できると考えられる。

次に、約2 年間No. 9, No. 10 孔の各測定区間毎に実施した地下水採水・分析結果を**図-9**に示す。2008年度に実施したNo. 9 孔での透水試験では、グラウト浸透・固化領域が $1.0E-05 \sim 1.0E-08$ m/s, 中間領域が $1.0E-05 \sim 1.0E-06$ m/s, 強変質領域が $1.0E-06 \sim 1.0E-08$ m/s 程度の範囲にあり、各測定区間で1~2 オーダー程度の透水性の差がある⁶⁾。

図-9の経時変化をみると、Ca, Na, Cl, Mg, Kは初期の状態と比べ低下する傾向にある。図-3 に示した07MI07 孔の測定結果と比較すると、いずれも同孔の測定値とほぼ同程度の値となってきた。増加傾向にあるのは SO_4 , Fであるが、 SO_4 については現状のバックグラウンドとほぼ同等の値である。透水性が低い強変質区間は、全体的に変化が小さい傾向にあるが、Al, Mgについても約2 年を経過し、ほぼバックグラウンドとなる07MI07 孔の測定値と同等の値に落ち着いてきている。各測定区間毎の変化をみると、グラウト材として使用した普通ポルトランドセメントに含まれるCaは、2008年度

測定開始時は、グラウト浸透・固化領域と中間領域で約45mg/Lと高い値を示したが、2009年度にはその濃度は低下し2010年度にはすべての区間で15mg/L程度となった。

以上の結果から、プレグラウチングにより注入されたグラウト材が及ぼす水質変化は、2カ年程度で解消され、バックグラウンドの水質と同程度になることがわかった。各測定区間の透水性は、地質状況やグラウチングにより1~2オーダー程度の差があったが、それらにかかわらずほぼ同等の水質となったのは、避難所のような空洞の近傍での水質変化を観測しているため、空洞に向かう卓越した地下水の流れにより、プレグラウチングの影響範囲外の地下水が各区間に引き込まれ置換されたことが一つの要因と考えられる。このような条件の下では、グラウト材と接触している岩石や地下水との化学的な反応の影響は、計測結果に影響を与えないほど小さいものと推測される。

図-10は、フィンランドで掘削中の地層処分施設にて実施されたグラウト後の地下水水質モニタリングの事例である⁸⁾。この計測事例においても、計測開始時には、グラウトの影響によると考えられる高いpH、高濃度のCaが観測されているが、ほぼ700日程度で収束してきていることがわかる。ONKALO サイトは、坑道内への総湧水量の基準が140L/min (100mの坑道長に対し平均1~2L/min)とされており、岩盤の透水性は1.0E-06~1.0E-08m/sが支配的である⁸⁾。

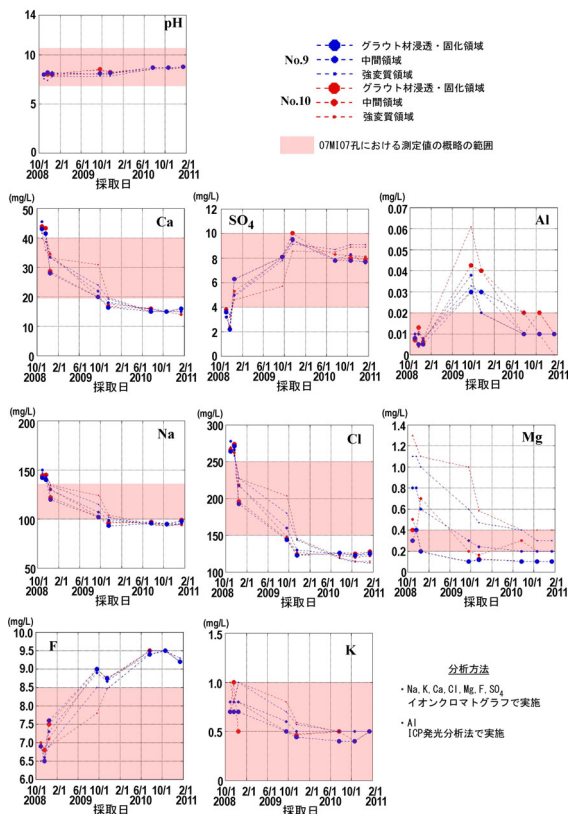
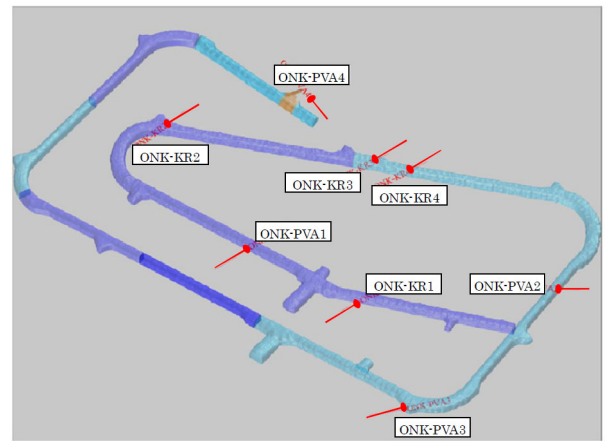
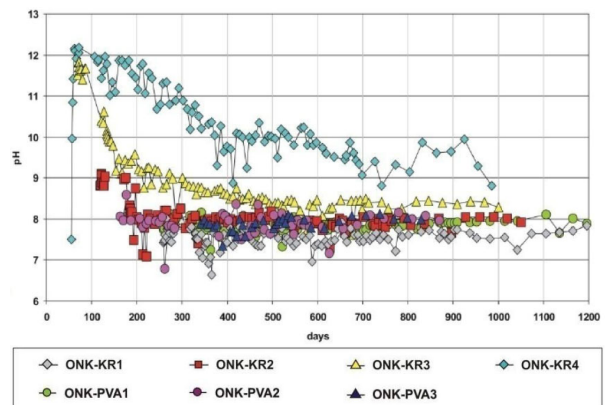


図-9 地下水の採水・分析結果 (No. 9, No. 10孔)



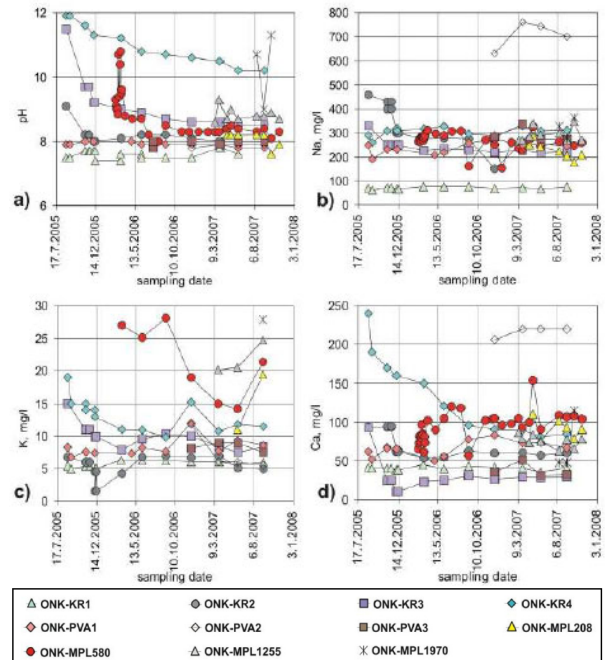
(1) 水質モニタリングボーリング孔の配置

(ONK-KR1 : 110m, ONK-PVA1 : 200m, ONK-KR2 : 370m, ONK-KR3 : 515m, ONK-KR4 : 540m, ONK-PVA2 : 727m, ONK-PVA3 : 860m, ONK-PVA4 : 1475m)



(2) ONK-KR と ONK-PVA におけるモニタリング結果

*days はグラウチング実施日或いはボーリング孔開孔時からの経過日数を示す。



(3) 各地点毎の地下水水質経時変化

図-10 グラウチング区間での地下水水質の経時変化に関する国外の計測事例 (ONKALO, フィンランド)⁸⁾

一方、瑞浪超深地層研究所は、研究坑道掘削前の探り孔からの湧水量が50L/min以上ある場合にグラウチングを実施することにしており、探り孔の平均的な長さ(10m程度)から考えると、100m 当たり500L/min が目安となる。岩盤の透水性は、高い所では1.0E-04m/s オーダーの割れ目帯も存在し、排水処理施設の設計には1.0E-08m/s の透水性を目安として用いている⁴⁾。

以上のように、両サイトの水理的な環境は異なるが、地下水水質へのグラウチングの影響が2 年程度で収束していることは興味深い。定性的には、前述した空洞へ向かう地下水流動による坑道周辺地下水の置換が両者に共通するメカニズムとして考えられ、グラウチングが地下水水質へ及ぼす影響は、空洞が存在する状態では約2 年程度で解消される可能性が高いことが示唆される。

5. まとめと今後の予定

2008年12月より約3 年6 カ月程度プレグラウチング領域内外の水圧・水質モニタリングや地下水の採水分析を実施した。その結果、グラウチングにより変化した地下水の水質は、本モニタリング期間中にバックグラウンドの水質分布と同等程度まで戻ることが示された。影響が解消される期間は、本研究および国外での計測事例より、空洞状態を保持している場合には、おおむね2 年程度と考えられる。言い換えれば、この状況下では、プレグラウチング2年程度経過後の地下水水質は、グラウチング前の環境とほぼ同一とみなすことが可能と思われる。また、本観測を通じ、水質モニタリングでは、測定系全体の定期メンテナンスが品質保証上重要な役割を示すこと、その頻度は年間数回で十分であることがわかった。

このような経時変化の観測は、グラウト材が地質環境に与える長期的な変化を評価する上でのメカニズムの理解や初期条件の把握の観点から重要であり、グラウチングが不可避と考えられる国内での地層処分計画では、

重要な検討項目と考えられる。今後は、No.9, No.10孔のグラウト浸透・固化領域のオーバーコアリングによって浸透・固化したグラウト材を含む岩石試料を採取し、時間経過に伴う岩盤の変質状況について各種分析等により確認していく予定である。

謝辞: データのとりまとめ及び図表を作成していただいた結晶質岩工学技術開発Gr 堀内泰治氏、埋設型応力計等の温度計測データを提供いただいた(財)東濃地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所 石井紘所長、浅井康広主任研究員に対し、ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構: Proceedings of the international workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, 2004.
- 2) Emmelin, A. et. al.: Rock Grouting Current competence and development for final repository, *SKB Report R-07-30*, 2007.
- 3) 原子力機構: 超深地層研究所計画 年度計画書(2010), JAEA Review 2011-027, 2010.
- 4) 見掛 信一郎 他: 結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察, JAEA-Technology 2010-026, 2010.
- 5) 松井裕哉, 見掛信一郎, 竹内 真司, 野田正利: 瑞浪超深地層研究所の深度200m レベルにおけるプレグラウトの概要, 土木学会第63 回年次学術講演会講演概要集, pp. 783-784, 2008.
- 6) 松井裕哉, 田中達也, 藤井治彦, 竹内真司, 弥富洋介, 杉原弘造: 結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究, 第38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 131-136, 2009.
- 7) In-situ Inc.: Multi-parameter TROLL 9000 WQP-100 Operations Manual, 2005.
- 8) Ahokas H., Hellä P., Ahokas T., Hansen J., Koskinen K., Lehtinen A., Koskinen L., Löfman J., Mészáros F., Partamies S., Pitkänen P., Sievänen U., Marcos N., Snellman M., Vieno T.: Control of Water Inflow and Use of Cement in ONKALO after Penetration of R19, *Working Report 2006-45*, 2006.

INVESTIGATION ON GEOCHEMICAL INFLUENCE OF GROUT MATERIAL ON GROUNDWATER

Hiroya MATSUI, Tadashi MIZUNNO, Hiroshi SASAMOTO,
Kozo SUGIHARA and Mikazu YUI

Japan Atomic Energy Agency has been conducted a contract study with METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) called "The project for Grouting Technology Development" since 2008. As a part of the study, the monitoring of groundwater chemistry in a pre-grouted area has been carried out for three and half years after pre-grouting in Mizunami URL. The results suggested that the chemical compositions in groundwater affected by pre-grouting was recovered and the period to recover is evaluated about two years around an underground opening.