JAEA-Research 2022-003 DOI:10.11484/jaea-research-2022-003



地下水と溶存ガスを考慮した三次元二相流解析による 掘削影響領域における飽和度分布

Spatial Distribution of Desaturation around the Tunnel Predicted by Three-dimensional Two-phase Flow Modeling of the Degassing Process of Dissolved Gases in Groundwater

> 宮川 和也 山本 肇 Kazuya MIYAKAWA and Hajime YAMAMOTO

核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

Horonobe Underground Research Department Horonobe Underground Research Center Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

May 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>). Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under

the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

地下水と溶存ガスを考慮した三次元二相流解析による掘削影響領域における飽和度分布

日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

宮川 和也,山本 肇*

(2022年2月28日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分場などの大規模地下施設の掘削により,坑道壁面近傍に割れ 目を伴う掘削損傷領域が形成され,不飽和な割れ目を通して岩盤内に酸素が侵入し,核種移行の 環境条件に影響を及ぼす可能性がある。新第三紀海成堆積層のように,CH4 などの溶存ガスを高 濃度で含む地層に坑道が掘削される場合,酸素の侵入は脱ガスした CH4 の坑道へ向かう流れによ り抑制されるものの,不飽和領域における気相拡散を介して促進される可能性が考えられる。本 研究では,地下水に多量の溶存 CH4が含まれる環境における地下施設の建設・操業に伴う不飽和 領域の三次元分布を推定する手法を例示することを目的として,幌延深地層研究センターの地下 施設の坑道掘削の実工程を反映した逐次掘削解析を行い,10 年間の気液二相流解析を実施した。 地下施設からの地下水とガスの湧出量の解析結果はそれぞれ,2017 年 1 月の時点で約 100~300 m³ d⁻¹ と 250~350 m³ d⁻¹ であり,それぞれの観測値(100 m³ d⁻¹ および 300 m³ d⁻¹)と近い値が得 られた。飽和度分布の解析結果は,250 m調査坑道周辺において相対的に高く,350 m 調査坑道周 辺において相対的に低くなっており,各調査坑道における観測結果と整合的であることが確認さ れた。このことから,地下水の坑道壁面からの排水条件やグラウト影響の取扱方法に関する課題 が残るものの,数値計算は概ね妥当であったと判断された。坑道掘削に伴う飽和度分布について は、定量的な評価には及ばないものの、定性的な観点では概ね妥当な解析結果が得られた。

幌延深地層研究センター:〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432 番地 2

^{*} 大成建設株式会社

JAEA-Research 2022-003

Spatial Distribution of Desaturation around the Tunnel Predicted by Three-dimensional Two-phase Flow Modeling of the Degassing Process of Dissolved Gases in Groundwater

Kazuya MIYAKAWA and Hajime YAMAMOTO*

Horonobe Underground Research Department Horonobe Underground Research Center Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development Japan Atomic Energy Agency Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received February 28, 2022)

The excavation of large-scale underground facilities, such as geological disposal of high-level radioactive waste, creates an excavation damaged zone (EDZ) with cracks around the tunnel. In the EDZ, oxygen invades the bedrock through unsaturated cracks and affects environmental conditions for nuclide migration. When a tunnel is excavated in a geological formation containing a high concentration of dissolved CH₄, such as the Neogene marine sediments, degassed CH₄ prevents oxygen intrusion. However, it may be promoted through gas-phase diffusion through desaturation. The purpose of this study is to illustrate the method of estimating the spatial distribution of desaturation associated with the construction and operation of underground facilities in a stratum that contains a large amount of dissolved CH₄. A sequential excavation analysis that reflected the actual process of 10-year excavation of the Horonobe Underground Research Laboratory (URL) was carried out along with gas-water two-phase flow analysis. The analysis results of the amount of groundwater and gas discharged from the URL were about 100 to 300 m³ d⁻¹ and 250 to 350 m³ d⁻¹, respectively, as of January 2017. These results showed values close to the observations (100 m³ d⁻¹ and 300 $m^3 d^{-1}$, respectively). The analysis results of the saturation distribution were relatively high around the 250 m gallery and relatively low around the 350 m gallery, confirming that they are consistent with the in-situ observations. Although there were still technical issues of analysis regarding the conditions for groundwater drainage from the tunnel wall and the method of handling grout effects, the numerical calculation was generally appropriate. Although the results of the saturation distribution associated with the excavation were insufficient as the quantitative evaluation, they were almost correct from a qualitative point of view.

Keywords: Desaturation, EDZ, Dissolved Gas, Horonobe URL

^{*} Taisei Corporation

目次

1.	はじめに	1
2.	水理地質構造モデルの構築	2
	2.1 モデル化・解析領域の設定	2
	2.2 三次元分割メッシュの作成	3
3.	地下水とガスを考慮した三次元二相流解析	4
	3.1 解析手法	4
	3.2 水理パラメータ	7
	3.3 境界条件の設定	10
	3.4 地下施設の掘削のモデル化	10
	3.5 グラウトの考慮	12
	3.6 初期条件	13
	3.7 解析ケース	13
4.	メタンガス湧出量の測定	14
	4.1 測定手法	14
	4.2 観測結果	15
5.	解析結果と考察	15
	5.1 地下施設への湧水量	15
	5.2 地下施設へのガス湧出量	17
	5.3 坑道掘削に伴う飽和度分布の変化	18
6.	まとめ	35
謝	辞	35
参	考文献	36

Contents

1. Introduction	1
2. Numerical model of hydrogeology	2
2.1 Modeling area	2
2.2 Three-dimensional mesh	3
3. Three-dimensional two-phase flow calculation of degassing process of dissolved gases	4
3.1 Methodology	4
3.2 Hydrological parameter	7
3.3 Boundary condition	10
3.4 Modeling of the excavation process of the Horonobe URL	10
3.5 Modeling of grouting	12
3.6 Initial condition	13
3.7 Analysis case	13
4. Monitoring of inflow rate of methane	14
4.1 Monitoring method	14
4.2 Result	15
5. Result and discussion	15
5.1 Inflow rate of groundwater	15
5.2 Inflow rate of associated gas	17
5.3 Time and spatial variation of desaturation	18
6. Summary	35
Acknowledgment	35
References	36

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物(HLW)の地層処分では,深度300m以深の地層中にHLWを埋設隔離 処分する必要がある。処分場などの大規模地下施設の建設に伴い,坑道近傍では岩盤の損傷によ る透水性の増大などの不可逆的な変化が生じ,地層が有する放射性核種の移行を遅延させる機能 に影響が生じる。このような領域は掘削損傷領域(Excavation Damaged Zone: EDZ)と呼ばれる^{1),2)}。 EDZ の周囲では,地下水圧の低下などの可逆的な変化が生じ,このような領域は掘削擾乱領域

(Excavation disturbed Zone: EdZ) と呼ばれ, EDZ と区別して呼ばれる³⁾。EDZ では,透水性の増 大の影響の他に,不飽和な割れ目を介した酸素の侵入とこれに伴う地下水の酸化の影響を評価す ることが重要である⁴⁾。例えば,ベルギーの HADES 地下研究施設の Boom Clay 層では,EDZ に おける不飽和な割れ目を介して酸素が岩盤内部に侵入し,20 年間の坑道換気により坑道壁面から 約1mまで酸化の影響が及んでいる⁵⁾。本邦の釜石鉱山では坑道壁面から2m付近まで酸素が侵 入し,東濃鉱山の堆積岩では割れ目に沿った酸素の侵入が認められるものの,割れ目のない部分 では坑道壁面から数 mm 程度までしか酸化の影響が及んでいないことが確認されている^{1),6)}。処 分場の建設・操業中に導入された酸素は,処分場の閉鎖後数十年から数百年程度の時間をかけて, 人工バリアのオーバーパックの腐食や緩衝材や坑道の埋め戻し材および周辺母岩中の黄鉄鉱等の 鉱物との反応^{7),8)}等により消費されることで,処分場とその周辺の地質環境は還元環境に回復し ていくと推測されている^{1),9)}。坑道周辺において形成された不飽和領域は,岩盤内への酸素の侵入 による地下水の酸化還元電位の変化や,CO2の溶解・脱ガスによる溶液組成の変化,鉱物の溶解 沈澱など,オーバーパックの腐食環境や核種移行の環境条件などに影響を及ぼすことが考えられ ることから,地球化学変遷を考慮した人工バリアの長期挙動について,より現実的な理解と予測 を目的とする熱-水-応力-化学連成挙動モデル/解析コードが整備されてきている^{10,11,12)}。

新第三紀の海成堆積層が広く分布する北海道幌延町に位置する幌延深地層研究センターの地下施設では、一部の覆工されていない坑道壁面から 10 cm 程度まで酸化が進んでいることが報告されている¹³⁾ものの、コンクリートライニングにより壁面が覆われた坑道周辺の EDZ における酸化の兆候はこれまでに認められていない¹⁴⁾。幌延町の深部地下水には、多量の CH₄ や CO₂ などの溶存ガスが含まれており^{15),16)}、地下水に含まれる溶存 CH₄ 濃度が高いほど、坑道掘削に伴う圧力低下による CH₄の脱ガスが生じることで、坑道周辺岩盤中の飽和度が低下し、不飽和領域の広がりが大きくなることが数値解析により示唆されている¹⁷⁾。岩盤中への酸素の侵入は、岩盤の透水性と地下水中の溶存 CH₄ 濃度がともに低い場合や、岩盤壁面における湿度が低下した場合において、不飽和領域における気相拡散を介して促進されることが数値解析により示されている¹⁸⁾。

このように、CH₄やCO₂などの溶存ガスを高濃度で含む地層に坑道が掘削される場合,坑道周 辺岩盤への酸素の侵入は脱ガスしたCH₄の坑道へ向かう流れにより抑制されるものの,脱ガスの 進行により溶存ガス量が低下した場合などは,不飽和領域における気相拡散を介して酸素の侵入 が促進される可能性が考えられる。このため,坑道掘削に伴う不飽和領域の三次元分布について 溶存ガスを考慮した評価手法を整備しておくことが望ましい。岩盤中の不飽和領域は,EDZの透 水性に大きく依存して形成されることが,結晶質岩を対象としたモデル化数値計算¹⁹⁾や粘土層を 対象としたモデル化数値計算^{5),20),21)}により示されているものの,これらのケースでは溶存ガスの 影響を考慮しておらず,不飽和領域の形成は主に EDZ 周辺に限られる。溶存ガスを考慮した解析 例¹²⁾では,CO₂による化学影響などに主眼が置かれており,幌延のような海成堆積層において脱 ガス量のほとんどを占める CH4 が考慮されていない。坑道掘削前の地下水が溶存ガスで飽和して いる場合,不飽和領域はより広範囲の水圧低下の影響が及ぶ領域である EdZ にまで広がる可能性 が,一次元感度解析により示唆されている²²⁾。このことから,地下水が溶存ガスで飽和している 状況における坑道掘削による不飽和領域の三次元的な広がりを評価するためには,EdZ を十分に 包含する程度に広域の水理場を対象として CH4 を考慮した気液二相流解析を実施する必要がある。

本研究では、地下水に多量の溶存 CH4 が含まれる環境における地下施設の建設・操業に伴う不 飽和領域の三次元分布を推定する手法を例示することを目的として、幌延深地層研究センターの 地下施設の建設開始から 10 年間を模擬した気液二相流解析を実施した。解析では、坑道掘削の実 工程を反映した逐次掘削解析を行い、地下施設からの地下水およびガス湧出量の時間変化を計算 し、それらを観測値と比較することで、数値計算の妥当性を検証した。さらに、不飽和領域の三 次元分布の解析結果を原位置における飽和度の観測値と比較することで、解析結果の妥当性を検 証した。

2. 水理地質構造モデルの構築

2.1 モデル化・解析領域の設定

地下施設の建設により, EdZ が 130-860 m に及んでいる可能性が,周辺ボーリング孔から得ら れた地下水圧の大気圧応答の解析から報告されている²³⁾。このことから,地下施設近傍の数百 m 四方の領域(以下,領域 S という)および領域 S における初期条件および境界条件を決定するた めの数 km 四方のより広範囲の領域(以下,領域 L という)をモデル化・解析領域とした(Fig.1)。 領域 L は, Fig.1 に示す東西約 9 km,南北約 6 km の尾根線に囲まれた領域とし,底面は標高-2,000 m に設定した。解析の際には,高速計算が可能な並列計算技術を活用し,領域 S の解像度を確保 しながら領域 L と領域 S を統合するモデルを採用し,両領域を同時に解析した。





(a) Wide area map and (b) magnified map of (a), geological map is from Sakai and Matsuoka (2015)²⁴⁾

2.2 三次元分割メッシュの作成

領域Sおよび領域Lにおいて構築した三次元分割メッシュのうち、多角形ボロノイ分割を用いた平面的なメッシュ分割の様子をFig.2に示す。領域Lはメッシュ間隔を約200mとし、領域Sに近づくに連れて徐々にメッシュ間隔を小さくし、領域Sでは約4mのメッシュ間隔とした。領域Lについては、地上からのボーリング孔であるHDB-1,3,4,5,6,7,8,9,10,11が、1つのメッシュ内に2つ以上入ることがないようにメッシュを分割した(Fig.2a)。領域Sについては、350m調査坑道の形状が表現できていることが分かるように(Fig.2b),3本の立坑(東立坑,換気立坑,西立坑)ならびに地下施設の各調査坑道(140m,250m,350m)の形状が表現できる程度に細かくメッシュを分割している。

三次元分割メッシュの鳥瞰図を Fig. 3 に示す。地形の起伏面は、国土地理院の 50 m メッシュ数 値地図に基づいて表現した(Fig. 3a)。Fig. 3b に、地層ならびに断層の割り当てを示す。本解析で は、既往の均質媒体によるモデル化²⁵⁾に倣い、新第三紀堆積層として勇知層、声問層、稚内層、 増幌層を考慮し、増幌層以深を古第三系として一括りにした。本来、地質区分と水理区分は 1 対 1 に対応するものではないが、幌延地域においては地質区分と水理特性に良い相関があることな どから、これらが同一に扱われてきた²⁶⁾。しかし、水理パラメータの空間分布と深度に相関性が 見られることから、透水係数の値に深度依存性や異方性を与えたモデルの構築が試みられてきた ^{26),27)}。その後、水理パラメータの空間分布のモデル化に対して等価不均質連続体²⁸⁾によるモデル 化などが試みられてきた。本研究では、既往の研究事例²⁵⁾に倣い、地質区分と水理区分を同一と して扱い、稚内層については、ダクティリティインデックス(Ductility index²⁹⁾)の値の 2 を基準 として浅部と深部に分けた。大規模不連続構造として、大曲断層を考慮した。ただし、地下施設 周辺で観察されている断層などの小規模不連続構造は考慮していない。全体のメッシュ数は 312,673 (3,257 格子/層 × 96 層、格子間接続 1,237,824) であり、このうち、領域 L には約 6 万、 領域 S には約 25 万のメッシュが含まれる。







Fig. 3 Three-dimensional model of (a) topography and (b) geological formations and fault

3. 地下水とガスを考慮した三次元二相流解析

2 章で構築した水理地質構造モデルを用いて、地下水ならびに地下水中の溶存ガスを考慮した 三次元気液二相流解析を実施した。坑道掘削の実工程を反映した逐次掘削解析を行い、坑道掘削 中ならびに掘削後の地下施設からの地下水とガス湧出量の時間変化を計算した。その際には、ガ ス湧出量の解析結果に大きな感度を有する相対浸透率やグラウトに関する水理パラメータを変化 させた5ケースを実施した。

3.1 解析手法

これまでに本地域を対象とした広域の三次元飽和不飽和浸透流解析が,大成建設株式会社により開発された有限要素法解析コード EQUIV_FLO を用いて実施されてきたが^{25),31),32),33),34)}, 幌延の深部地下水の主要な溶存ガスである CH₄や CO₂が考慮されていなかった。本研究では,主要な溶存ガスの溶解や脱ガスを考慮するため,数値解析コードには TMVOC³⁵⁾の並列計算版である TMVOC-MP³⁶⁾を用いた。TMVOC は TOUGH2V2.0 を基に開発され,水,ガス,揮発性有機化合物の非等温・多成分・三相系を扱うことが可能な流体解析コードである。各相内での移流・拡散に 係る物質移行だけでなく,各相間の蒸発や溶解に係る物質移行が考慮されている。ガス成分については,酸素,窒素,二酸化炭素,メタン,エタン,エチレン,アセチレン,空気から複数選択可能である。

(1) 支配方程式

TMVOC-MPでは, Eq.1に示すエネルギー・質量保存方程式を解く³⁵⁾。

$$\frac{d}{dt}\int_{V_n} M^{\kappa} dV_n = \int_{\Gamma_n} F^{\kappa} \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma_n + \int_{V_n} q^{\kappa} \, dV_n \tag{Eq. 1}$$

 V_n は、解析領域内の部分領域であり、 Γ_n は、 V_n の閉境界面である。 M^{κ} は、 V_n 内に含まれる成分 κ の単位体積当たりの質量またはエネルギーであり、 F^{κ} は、成分 κ の質量または熱のフラックスである。 q^{κ} は、成分 κ のシンクまたはソースであり、nは、面要素 $d\Gamma_n$ の法線ベクトル(領域内側向き)であ る。演算子「・」は、内積を意味する。ある β 相(液相または気相)中の成分 κ の質量 M^{κ} は Eq. 2 で 与えられる。

$$M^{\kappa} = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X^{\kappa}_{\beta}$$

 ϕ は、空隙率であり、 S_{β} は、 β 相の飽和度である。 ρ_{β} は、 β 相の密度であり、 X_{β}^{κ} は、 β 相の成分 κ の モル分率である。本計算では、収着項を考慮しない。熱は、成分 κ の1 つとして計算され(κ = NK + 1)、そのエネルギー M^{NK+1} は、Eq.3 で与えられる。

$$M^{\rm NK+1} = (1-\phi)\rho_{\rm rock}C_{\rm rock}T + \phi\sum_{\beta}S_{\beta}\rho_{\beta}u_{\beta}$$
(Eq. 3)

 ρ_{rock} は,岩石の密度であり、 C_{rock} は,岩石の比熱であり、Tは,温度であり、 u_{β} は、 β 相の比内部 エネルギーである。NK は、熱を除く成分 κ の総数である。成分 κ のフラックスは、移流フラックス $F^{\kappa}|_{\text{adv}}$ と拡散フラックス $F^{\kappa}|_{\text{diff}}$ の和で表される (Eq. 4)。

$$\mathbf{F}^{\kappa} = \mathbf{F}^{\kappa}|_{\mathrm{adv}} + \mathbf{F}^{\kappa}|_{\mathrm{diff}} \tag{Eq. 4}$$

移流フラックスF^K | advは,各相のフラックスの和として求められる(Eq.5)。

$$F^{\kappa}|_{adv} = \sum_{\beta} X^{\kappa}_{\beta} F_{\beta}$$
(Eq. 5)

各相のフラックスは、多相流に拡張したダルシー則により求められる(Eq. 6)。

$$\mathbf{F}_{\beta} = -k \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \left(\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g} \right)$$
(Eq. 6)

kは、絶対浸透率であり、 $k_{r\beta}$ は、 β 相の相対浸透率であり、 μ_{β} は、 β 相の粘性係数であり、 P_{β} は、 β 相の流体圧力であり、gは、重力加速度である。拡散フラックスF^K |_{diff}は、Eq. 7 で表される。

$$\mathbf{F}^{\kappa}|_{\text{diff}} = \sum_{\beta} -\phi \tau_0 \tau_{\beta} \rho_{\beta} D_{\beta}^{\kappa} \nabla X_{\beta}^{\kappa}$$
(Eq. 7)

 $τ_0 τ_\beta$ は, 屈曲度 (tortuosity) であり, D_β^{κ} は, β相における成分 κ の拡散係数である。一般に屈曲度 は間隙構造と各相の飽和率に依存し,本研究では,本地域を対象とした既往の気液二相流解析例 ^{17), 18), 22)}に倣い, 屈曲度を Eq. 8 のようにした。

$$\tau_0 \tau_\beta = \phi^{1/3} S_\beta^{10/3} \tag{Eq. 8}$$

本研究では、CH₄の水相と気相における拡散係数をそれぞれ 5×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ と 1×10⁻⁵ m² s⁻¹ とした ^{17), 18), 22)。 β 相の流体圧力 P_{β} は、Eq. 9 で与えられる。}

$$P_{\beta} = P + P_{c\beta} \tag{Eq. 9}$$

 $Pは、リファレンスとする相(通常は、気相)の圧力であり、<math>P_{c\beta}$ は、毛管圧力($P_{c\beta} < 0$)である。 熱フラックスは、伝導項と対流項の和として、Eq. 10で与えられる。

$$\mathbf{F}^{\mathrm{NK+1}} = -K\nabla T + \sum_{\beta} \mathbf{h}_{\beta} \mathbf{F}_{\beta} \tag{Eq. 10}$$

Kは、熱伝導率であり、hgは、β相の比エンタルピーである。

(Eq. 2)

(2) 数值解法

積分差分法^{37),38)}を用いて,前述の支配方程式を離散化して解いた(Eq. 11-Eq. 15)。

$$\int_{V_n} M^{\kappa} \, dV_n = V_n M_n^{\kappa} \tag{Eq. 11}$$

$$\int_{\Gamma_n} \mathbf{F}^{\kappa} \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma_n = \sum_m \mathbf{A}_{nm} \mathbf{F}_{nm} \tag{Eq. 12}$$

 M_n^{κ} は、領域 V_n にわたって平均した質量Mであり、 F_{nm} は、領域 $V_n \ge V_m$ の境界面セグメント A_{nm} を通じた平均フラックスである(Fig. 4)。ダルシー式(Eq. 6)を離散化すると Eq. 13 のようになる。

$$\mathbf{F}_{\beta,nm} = -k_{nm} \left[\frac{k_{r\beta}\rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \right]_{nm} \left[\frac{P_{\beta,n} - P_{\beta,m}}{D_{nm}} - \rho_{\beta,nm} \mathbf{g}_{nm} \right]$$
(Eq. 13)

添字nmは、グリッドブロックnとmの境界における平均を表す。 D_{nm} は、グリッドブロックnとmの節点間距離であり、 $D_{nm} = D_n + D_m$ である。 g_{nm} は、mからnに向かう方向の重力加速度成分である。

Eq.1に Eq.11と Eq.12を代入すると、時間に対する1階の常微分方程式を得る(Eq.14)。

$$\frac{dM_n^{\kappa}}{dt} = \frac{1}{V_n} \sum_m A_{nm} F_{nm}^{\kappa} + q_{nm}^{\kappa}$$
(Eq. 14)

Eq. 13 の右辺を新しい時間ステップ $t^{j+1} = t^j + \Delta t$ で評価することで、計算の数値安定性を向上させた(完全陰解法)。Eq. 14 を時間に関して離散化すると、Eq. 15 の非線形代数方程式が得られる。

$$R_n^{\kappa,j+1} = M_n^{\kappa,j+1} - M_n^{\kappa,j} - \frac{\Delta t}{v_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^{\kappa,j+1} + V_n q_n^{\kappa,j+1} \right\} = 0$$
(Eq. 15)

この式はグリッドブロック毎に成分 κ の数Gだけ得られ、グリッドブロックの個数をHとすると、 合計で H×L 個の非線形代数方程式が得られる。このようにして得られた代数方程式を、 Newton/Raphson 法による繰り返し計算により数値的に解いた。



Fig. 4 Schematic illustration of discretization in the integral finite difference method,

(a) average flux F_{nm} through the boundary A_{nm} between elements V_n and V_m , and (b) distance D_n and D_m between nodes n and m

(3) ガスの溶解と溶離

TMVOC-MP では、ガス成分の水相への溶解、気相への遊離といった相間の物質移行を取り扱うことが可能であり³⁵⁾、水相へのガスの溶解度は Eq. 16 の Henry 則により評価される。

 $P_{\rm g}^{\kappa} = X_{\rm g}^{\kappa} P_{\rm g} = X_{\rm w}^{\kappa} K_{\rm H}^{\kappa}$

(Eq. 16)

 P_{g}^{κ} は、成分 κ の分圧であり、 P_{g} は、気相の全圧であり、 X_{g}^{κ} は、気相中の成分 κ のモル分率であり、 X_{w}^{κ} は、水相中の成分 κ のモル分率であり、 K_{H}^{κ} は、成分 κ の Henry 定数である。

3.2 水理パラメータ

地質区分 水理パラメータ値の設定は、本地域を対象とした既往の地下水流動解析例 ^{25), 27), 39), 40), 41)に倣い、Fig. 3b に示した三次元分割メッシュの各地層および断層に割り当てた(Table 1)。稚 内層浅部と深部のそれぞれの透水係数については、地上からのボーリング調査により得られた結果の自然対数平均値を用いた。Fig. 5 に地上からのボーリング調査により得られた比貯留係数と透水係数 ^{42), 43), 44), 45), 46), 47), 48), 49)の関係を示す。割れ目を含むような一部の高透水性の区間の観測結果を除く透水係数が約 1×10^{-7} m s⁻¹ 以下の領域では、比貯留係数は、透水係数によらず約 1×10^{-5} m⁻¹ を示すことから、本研究では、全ての地層および断層における比貯留係数を 1×10^{-5} m⁻¹ とした。TMVOC-MP では、 1×10^{-5} m⁻¹の比貯留係数に相当する岩石圧縮率として、 1×10^{-9} Pa⁻¹を用いた。}}

	Hydraulic conductivity $(m s^{-1})$	Specific storage (m^{-1})	Porosity
Shallower part than Sarabetsu Fm.	1.0×10^{-6} ³⁹⁾	$1.0 imes 10^{-5}$	0.45 36)
Yuchi Fm.	9.4×10^{-10} ³⁷⁾	$1.0 imes 10^{-5}$	0.45 38)
Koetoi Fm.	6.5×10^{-9} 37)	$1.0 imes 10^{-5}$	0.50 38)
Wakkanai Fm. (Shallower part)	9.1×10^{-8}	1.0×10^{-5}	0.40 38)
Wakkanai Fm. (Deeper part)	2.8×10^{-9}	1.0×10^{-5}	0.40 38)
Masuporo Fm.	5.0×10^{-11} ³⁹⁾	$1.0 imes 10^{-5}$	0.10 25)
Deeper part than Masuporo Fm.	5.0×10^{-12} ³⁹⁾	$1.0 imes 10^{-5}$	0.10 ²⁵⁾
Omagari fault	$1.0 imes 10^{-7}$ ³⁷⁾	$1.0 imes 10^{-5}$	0.30 25)

Table 1 Hydraulic parameters of the hydrogeological model



Fig. 5 Relation between hydraulic conductivity and specific storage from the surface-based investigation

相対浸透率と気液飽和度の関係は Verma モデル⁵⁰⁾あるいは Corey モデル^{51), 52)}を用いた。Eq. 17 と Eq. 18 に Verma モデルにおける水相と気相の相対浸透率と飽和度の関係をそれぞれ示す。

$$k_{\rm rl} = \left(\frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{S_{\rm ls} - S_{\rm lr}}\right)^3 \tag{Eq. 17}$$

$$k_{\rm rg} = A + B \left(\frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{S_{\rm ls} - S_{\rm lr}}\right) + C \left(\frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{S_{\rm ls} - S_{\rm lr}}\right)^2$$
(Eq. 18)

 $k_{rl} \geq k_{rg}$ は、それぞれ水相と気相の相対浸透率であり、 S_l は、水相飽和度であり、 S_{lr} は、残留飽和度であり、 S_{ls} は、最大飽和度であり、A と B、C は定数である。Corey モデルにおける水相と気相の相対浸透率と飽和度の関係を、Eq. 19 と Eq. 20 にそれぞれ示す。

$$k_{\rm rl} = \left(\frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{1 - S_{\rm lr} - S_{\rm gr}}\right)^4 \tag{Eq. 19}$$

$$k_{\rm rg} = \left(1 - \frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{1 - S_{\rm lr} - S_{\rm gr}}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{1 - S_{\rm lr} - S_{\rm gr}}\right)^2\right]$$
(Eq. 20)

Sgrは,残留気相飽和度である。

毛管圧力と気液飽和度との関係には、Eq. 21 に示す van Genuchten モデル⁵³⁾を用いた。

$$P_{\rm cap} = -P_0 \left[\left(\frac{S_{\rm l} - S_{\rm lr}}{S_{\rm ls} - S_{\rm lr}} \right)^{-1/\lambda} - 1 \right]^{1-\lambda}$$
(Eq. 21)

 P_{cap} は、毛管圧力であり、 P_0 は、気相が空隙に入るために必要な最小圧力であり、 λ は、調整パラメータである。本研究では、本地域を対象とした既往の気液二相流解析例^{17),18),22)}に倣い、 $-1 \times 10^7 < P_{cap} < 0$ (Pa)とした。

相対浸透率については、ガスの湧出挙動に大きな影響を与えるものの、適切なパラメータを設 定するための検討事例が限られていることから、本研究では、パラメータを変えた相対浸透率を 3 通り設定した(Table 2)。パラメータを変えた複数の相対浸透率曲線(Eq. 19 および Eq. 20)を Fig. 6 に示す。Verma#1 における設定パラメータは、HDB-8 孔の区間 2 の揚水水理試験時の地下水 とガスの流量から得られたものであり⁵⁴⁾、Verma#2 と Corey は、それぞれ Verma#1 と比較してガ スの浸透性が高い設定と低い設定になる。毛管圧力と飽和度の関係(Eq. 21)については、山本ほ か(2007)⁵⁴⁾に従いパラメータを設定した(Fig. 7)。

Table 2 Parameters for relative permeability models

Model name	Reference model	Parameter settings
Verma#1	Verma model ⁴⁶⁾	$S_{lr} = 0.3, S_{ls} = 1.0, A = 1.0, B = -1.5, C = 0.5$
Verma#2	Verma model ⁴⁶⁾	$S_{lr} = 0.6, S_{ls} = 1.0, A = 1.0, B = -1.5, C = 0.5$
Corey	Corey model ^{47), 48)}	$S_{lr} = 0.3, S_{gr} = 0.01$



Fig. 6 Relative permeabilities for (a) water and (b) gas phases



Fig. 7 Capillary pressure against to water saturation

3.3 境界条件の設定

地表面境界条件を降雨涵養条件とし、モデル側面およびモデル底面境界は不透水境界とした。 地表面からの有効涵養量について、本研究と同様の水理地質構造モデルを用いた地下水流動定常 解析の結果から、地上からのボーリング調査により得られた水頭分布を最も良く再現可能な値と して 113 mm y⁻¹が報告されており³⁴⁾、本研究ではこの値を採用した。地温勾配は、本地域の地温 勾配⁵⁵⁾に倣い、深度 100 m につき 3 ℃増加することとし、地表面の温度についても同様に 15 ℃ とした。

3.4 地下施設の掘削のモデル化

地下施設の建設のモデル化では、Fig. 8 に示すように、実際の掘削工程を可能な限り正確に反 映した。解析では、この工程に従い、50日毎に掘削が終了した箇所に該当する解析メッシュの圧 力を大気圧に固定するとともに気相飽和度を100%に固定し、これを順次行なうことで地下施設の 建設を模擬した。モデル化した掘削過程の例を Fig. 9 に示す。実際の坑道壁面にはコンクリート ライニングやセメント吹付等の支保構造があり、その背面に排水材料が配置されている。このた め、坑道壁面からの排水部の湿度は高い状態に保たれていると考えられることから、坑道内の湿 度を100%に固定した。また、排水の状況によっては、岩盤と支保構造との接触部が大気圧条件を 常に満たすとは限らないが、本研究では、坑道壁面が完全に大気圧開放されることを仮定した。



Fig. 8 Process of the excavation



Fig. 9 Illustration of the process of the excavation model

3.5 グラウトの考慮

幌延深地層研究計画における地上からのボーリング調査により,深度 250 m 以深に高透水性の 割れ目の分布が確認されたため,地下施設の建設の際には,深度 250 m 以深の掘削に伴う湧水量 を適切に抑制するために,事前に予測された高透水性の割れ目に対して止水グラウトが施工され ている ^{56),57)}。グラウト施工による透水性の改良範囲は,グラウト注入孔を中心に半径 1.5 m であ り,換気立坑では壁面から約 3 m になるように設計され,東立坑および西立坑では壁面から約 4 m になるように設計された。深度については,例えば換気立坑からのグラウト施工では,深度 255.66~306.02 m および深度 342.91~374.48 m の範囲が改良されるように設計されている ⁵⁶⁾。ま た,グラウト施工後の割れ目を含む岩盤の透水性は,0.1 ルジオン(約1×10⁻⁸ m s⁻¹)以下になる ように施工されている ^{56),57)}。

換気立坑におけるグラウト施工を対象とした有限要素法によるグラウト施工後の透水係数の 分布の解析と透水性の改善効果の評価によると,グラウトは高透水性の割れ目を含む断層部のみ に浸透し,断層部の透水係数が4桁低下することで,周辺岩盤の透水係数がグラウト施工後の原 位置試験結果と整合的になることが報告されている⁵⁸⁾。しかしながら,主断層と比較してその周 囲に派生した割れ目の方がグラウトの浸透した痕跡が多く認められるなど⁵⁹⁾,透水性の高い割れ 目は複雑な連結性を有していることから,数値解析において止水グラウトの影響範囲や透水係数 の低下量をモデル化することは必ずしも容易ではない。例えば,2005年から2009年にかけて試 行された深度250m以深の高透水性の割れ目を含む領域に対する等価不均質連続体モデル²⁸⁾を用 いた予察解析では,グラウトの影響範囲を坑道の周囲10mとし,その範囲内の割れ目の透水性を $1 \times 10^{-8} \sim 2 \times 10^{-7} m s^{-1}$ としたが,深度280mまでの掘削時点における地下施設からの地下水の湧 水量が約300~2,000m³d⁻¹となり,大きな幅を示す結果が得られていた。このことは、割れ目の 連結性が高い稚内層浅部⁶⁰⁾を含む深度250m以深の稚内層では透水性のバラツキが4桁以上と大 きく^{29),61)},水理学的代表長さ(Representative Elementary Volume: REV⁶²⁾)が約200m⁶¹⁾であるため, これより狭い坑道周辺の領域では局所的なバラツキの影響が大きくなることが要因であると理解 される。

以上を踏まえ、本研究では、実際の設計とは大きく異なるものの、深度 250 m 以深における坑 道から半径 100 m の範囲を止水グラウトの施工範囲とすることで、高透水性領域の局所的なモデ ル化に対応した。この範囲に含まれる解析メッシュでは、透水係数の上限値が 1 × 10⁻⁸ m s⁻¹に設 定される。グラウトは深度 250 m 以深の坑道掘削前に一度に行なうこととし、ポストグラウチン グは考慮しないこととした。

3.6 初期条件

3.2 節および 3.3 節で示した水理パラメータ分布と境界条件において、地下施設の建設を考慮 しない条件で準定常状態まで地下水流動解析を実施した。その後、地下水が CH₄ で飽和されてい るとの仮定のもと、地下水圧に応じた溶存 CH₄ 濃度を与えた。実際の地下水には、CH₄ と同量程 度の CO₂ が溶存しているが ¹⁵)、Henry 定数が約 10 倍異なることや溶存 CO₂ の大部分が HCO₃⁻と して存在することから ^{63),64),65),66),67),68)、高圧状態からの脱ガス時の遊離ガス成分は、ほとんど CH₄ で占められる ⁶⁹⁾。このことから、本研究では、地下水中の溶存 CO₂ を無視した。このようにして 得られた水圧・溶存ガス分布を、地下施設の建設工程を考慮した三次元二相流解析における初期 状態とした。掘削により圧力が低下すると、CH₄ 溶解度も低下するため、溶解度を超える CH₄ が 遊離・脱ガスすることになる。}

3.7 解析ケース

解析ケースの一覧を Table 3 に示す。グラウトを考慮しない 3 ケース (ケース 1~3) では、不 確実性が大きくガス湧出量への感度が高いパラメータである相対浸透率を変化させた。相対浸透 率の与え方として Verma#1 を採用したものを基本ケース (ケース 1) とし、Verma#2 を採用した 比較的ガスの浸透性が高い場合 (ケース 2) と Corey を採用した比較的ガスの浸透性が低い場合 (ケース 3) を設定した。グラウトを考慮した 2 ケース (ケース 4, ケース 5) では相対浸透率の 与え方として Verma#1 を設定した。ケース 5 は、稚内層浅部の透水係数を 2 桁小さくし、稚内層 深部と同程度の値に設定したものである。

Case no.	Relative permeability model	Grouting	Note
1	Verma#1	Not considered	Base case
2	Verma#2	Not considered	High permeable for gas
3	Corey	Not considered	Low permeable for gas
4	Verma#1	Considered	
5	Verma#1	Considered	Hydraulic conductivity of the deeper part of the Wakkanai Fm. is the same as that of the shallower part of the Wakkanai Fm.

Table 3 Settings for analytical cases

4. メタンガス湧出量の測定

本研究における気液二相流解析では、モデルの検証データとして、地下施設からの地下水の湧水量の観測結果を用いる。ガスの湧出量は、相対浸透率に強く影響を受けるため、相対浸透率に 関するパラメータの与え方の妥当性について検討するために、地下施設からのガスの湧出量デー タがあると望ましい。労働安全衛生の観点から坑道内空気の酸素濃度や CO2 濃度の他に、可燃性 ガスである CH4 濃度の測定が常時実施されており、坑道換気が実施されている。しかしながら、 これらのガス濃度測定や換気風量の管理から得られたデータを用いて、地層からのガス湧出量を 精度良く把握することは困難である。ここでは、溶存ガスが脱ガスした際の遊離ガスの主成分で ある CH4 の地下施設からの湧出量のデータ取得について述べる。

4.1 測定手法

地下施設の換気は、東立坑および西立坑から坑道内に大気が吸い込まれ、換気立坑から坑道内 の空気が排出されることによって行われる。このため、換気立坑出口における換気風量と CH4 濃 度が得られれば、地下施設からの CH4 湧出量を算出することができる。本研究では、赤外吸光光 度法による CH4 濃度測定機(レーザーメタン mini-G、アンリツ株式会社)を用いて、換気立坑出 口における排気中の CH4 濃度の観測を、2015 年 11 月から 2017 年 1 月まで実施した。レーザーメ タン mini-G により得られる CH4 濃度は、濃度と距離の積であるカラム密度として得られる。検出 可能範囲は、1~50,000 ppm·m であり、精度は±10%である。検知距離は、0.5~30 m であり、検 知応答時間は、0.1 秒である。

レーザーメタン mini-G により得られた CH4 カラム密度を,測定距離で除すことにより,その 距離間における平均 CH4 濃度として,換気立坑出口における排気中の CH4 濃度を求めた。換気立 坑出口における総排気量については,排気の出口である換気立坑扇風機坑道における風速を計測 し,風速計測部の坑道断面積を乗じることで求めた。2016 年 2 月の換気立坑扇風機坑道における 坑道に垂直な断面上の7点の風速の計測結果(3.63 m s^{-1} , 3.72 m s^{-1} , 3.67 m s^{-1} , 3.63 m s^{-1} , 4.13 m s^{-1} , 4.12 m s^{-1} , 4.01 m s^{-1})の平均値は 3.84 m s^{-1} であった。この平均値から排気量を計算すると約1,570 m³ min⁻¹となり、地下施設の坑道換気の管理計画風量⁷⁰⁾と同じ値となることから、換気立坑出口における総排気量は、観測期間を通して一定の値1,570 m³ min⁻¹ であると仮定した。

4.2 観測結果

換気立坑出口における排気中の CH4 濃度の観測結果を Fig. 10 の左軸に示す。換気立坑出口に おける排気中の CH4 濃度は、2015 年 11 月から 2016 年 6 月頃までは約 200 ppm を示し、その後 徐々に減少し、2017 年 1 月に約 150 ppm を示した。換気立坑出口における一日当たりの排気量は、 約 2.3×10⁶ m³ d⁻¹ であり、これと CH4 濃度との積から CH4 湧出量を計算すると Fig. 10 の右軸のよ うになる。地下施設からの CH4 湧出量は、2015 年 11 月から 2016 年 6 月頃までは約 400~500 m³ d⁻¹ と計算され、その後 2017 年 1 月まで減少し、約 300 m³ d⁻¹ となった。



Fig. 10 CH₄ concentration at the exit of the Ventilation shaft (left axis) and discharge rate of CH₄ from the Horonobe underground research laboratory (right axis)

5. 解析結果と考察

5.1 地下施設への湧水量

地下施設への湧水量の解析結果を Fig. 11 に示す。図の横軸は,2006 年 9 月 19 日からの 10 年 間の経過時間を示している。50 日ごとに見られる湧水の短期的な階段状のピークは,3.4 節で述 べた逐次掘削解析の影響である。グラウトを考慮しないケース(Fig.11a)では,解析による湧水 量の大きな変化は,主に次の3 つの時点で生じている:換気立坑が深度約 250 m に達した時点 (2008 年 10 月頃,700~800 日頃),250 m 連絡坑道の掘削が再開し,東立坑が深度約 250 m に達 した時点 (2010 年 4 月頃,1,300 日頃),換気・東立坑が深度約 250 m 以深へ掘削を再開した時点 (2011 年 7~10 月頃,1,800 日頃)。また,350 m 調査坑道では掘削の進行とともに湧水量の増加 が見られ,それとともに換気ならびに東立坑への湧水量が減少する結果が得られた。西立坑の湧 水量が顕著になるのは,2013 年 1 月頃(2,300 日頃)に深度 250 m 付近に達した時点であり,そ の後の湧水量は3 つの立坑とも同じレベルで推移した。湧水量の合計は最終的に 800 m³ d⁻¹に達 した。また、ケース1~3の結果の間には大きな違いは見られないことから、相対浸透率の与え方は、地下水の湧出量には大きく影響しないことが分かる。

地下施設からの湧水量の観測値は,換気立坑が高透水性の稚内層浅部(深度 250 m)に達した時点(700~800 日頃)にステップ状に増加し,再び深度 250 m 以深への掘削を開始した時点(1,600 日~1,800 日頃)においてスパイク状の大きな増加が見られている。2,400 日頃に見られる瞬間的に 1,000 m³ d⁻¹を超える湧水は,350 m 東周回坑道掘削中に火山灰起源の粘土層である S1 断層⁷¹⁾に達した時点のものである。その後,地下施設からの湧水量は徐々に減少し,3,000 日頃には 100 m³ d⁻¹ となっている。

解析結果(Fig. 11a)と観測値を比較すると、1,800日頃までについては、総量としては整合的 であるものの、各坑道への湧水量の配分は異なっている可能性がある。湧水量の観測値に見られ る細かなスパイク状の変化は、割れ目や断層に起因する可能性があると考えられるが、解析では 均質等方性を仮定しているため、このような細かいスパイク状の変化を表現できていないと考え られる。また、上述のS1断層についても、解析モデルでは考慮していない。解析結果と観測値は、 1,800日以降に乖離しており、これは解析モデルにおいて止水グラウトの効果を考慮していないこ とが主な要因として考えられる。

止水グラウトを考慮した解析結果 (Fig. 11b) を見ると、1,800 日以降における深度 250 m 以深 の掘削時の湧水量の増加が大きく低減されているのが分かる。しかしながら、湧水量の観測値は グラウトを考慮したケース4の結果よりも低い値が得られている。例えば、3,000 日以降の解析結 果は約 300 m³ d⁻¹以上を示しているが、湧水量の観測値は約 100 m³ d⁻¹であり、3 倍以上の乖離が 見られる。本研究では坑道壁面からの排水条件に関して、岩盤とコンクリートライニングやセメ ント吹付等の支保構造との接触部の影響を考慮せず、坑道壁面が完全に大気開放されることを仮 定した。実際は支保構造による遮水により大気開放の条件よりも排水されにくくなることから、 このことが湧水量の解析結果と観測値に大きな乖離が生じさせた一因として考えられる。一方で、 稚内層浅部の透水係数を小さく設定したケース5 では、3,000 日以降の湧水量は、約 100 m³ d⁻¹で あり、観測値とほぼ同じ値が得られている。



Fig. 11 Time variations of groundwater-discharge rate from the HURL, results of (a) cases not considered grouting and (b) cases considered grouting

5.2 地下施設へのガス湧出量

地下施設へのガスの湧出量の解析結果を Fig. 12 に示す。ガスの湧出量の解析結果は、地下水の湧水量の解析結果 (Fig. 11) と同様に、深度 250 m に達した時点 (700~800 日頃) にステップ 状に増加し、再び深度 250 m 以深への掘削を開始した時点 (1,600 日~1,800 日頃) において大き く増加する結果が得られた。また、相対浸透率の設定により、湧出量に大きな違いが見られた。 2015 年 11 月~2016 年 5 月の期間に相当する 3,500 日前後におけるケース 1 と 2,3 の解析結果 は、それぞれ約 2,500 m³ d⁻¹、約 3,000 m³ d⁻¹、約 200 m³ d⁻¹であった (Fig. 12a)。グラウトを考慮 した場合のケース 4 と 5 を比較すると、深度 250 m の稚内層浅部に達した時点 (700~800 日頃) に 100 ~ 200 m³ d⁻¹の差が生じている。これはケース 5 では稚内層浅部の透水係数が小さく設定 されているためである。ケース 4 とケース 5 の差は、地下水の湧水量に見られる差と比較すると 小さい。これは、岩盤の透水性の違いは主に不飽和領域の広がりのみに影響し、飽和度にはあま り影響しないこと¹⁷⁾と整合的である。ケース 4 と 5 の 3,500 日前後における解析結果はそれぞれ、 350 m³ d⁻¹ と 250 m³ d⁻¹であった (Fig. 12b)。一方で、同時期に計測されたメタンガスの湧出量 (観測値) は、4.2 節で述べたように 2016 年 6 月頃までは約 400~500 m³ d⁻¹であり、グラウトを考慮 した解析結果よりやや大きな値が観測されているものの、その後徐々に減少し、2017 年 1 月には 約 300 m³ d⁻¹ となり、解析結果と近い値が得られている。



Fig. 12 Time variations of discharge rate of CH₄ from the HURL, results of (a) cases not considered grouting and (b) cases considered grouting

5.1 節で述べた地下水の湧水量の解析結果から、より適切なモデル設定はグラウトを考慮した ケース4と5の中間であると考えられる。例えば、坑道壁面からの排水条件として岩盤と支保構 造との接触部の影響を考慮し、坑道壁面における解析上の大気解放率を小さくするなどの工夫が 必要であると考えられる。相対浸透率の与え方については、地下水の湧水量に対してケース1~3 の結果に大きな差が見られない一方で、ガスの湧出量については、ケース3のガスを通しにくい 設定である Corey を採用した結果は明らかに小さい値となっていることから、基本ケースである Verma#1 もしくはガスを通しやすい設定である Verma#2 が適切であると考えられる。

5.3 坑道掘削に伴う飽和度分布の変化

坑道掘削の開始から1年,3年,10年経過時点における水圧と気相飽和度の三次元分布を,ケ ース1~ケース5について Fig. 13~Fig. 17にそれぞれ示す。また,東立坑と西立坑を通る断面図 について,Fig. 18 と Fig. 19にケース1の結果を,Fig. 20 と Fig. 21にケース2の結果を,Fig. 22 と Fig. 23にケース3の結果を,Fig. 24 と Fig. 25にケース4の結果を,Fig. 26 と Fig. 27にケース 5の結果をそれぞれ示す。地下水の湧水量が多く,ガスの湧出量が比較的多いケース1とケース 2 では,稚内層浅部の声問層との地層境界部において気相飽和度の増加領域の広がりが顕著であ ることが分かる。一方で,ガスを通しにくい設定であるケース3では,低いガスの湧出量が得ら れているが,気相飽和度は,地層境界部のみならず地下施設周辺の領域において全体的に高い値 を示していることが分かる。これは、地下水の湧出量や地下水圧分布についてケース1~3の間に 大きな違いが見られないことから,圧力の低下により地下水中から遊離したガスが周辺岩盤内に 溜まる傾向にあると理解される。ケース4とケース5では、グラウトの効果を考慮するために深 度 250 m 以深における坑道から半径 100 m の範囲の透水係数の上限値が1×10⁻⁸ m s⁻¹に設定され ており、ケース1~3と比較すると、稚内層浅部の声問層との地層境界部における気相飽和度が顕 著に小さくなっている。また、ケース4とケース5では、深度 250 m 以深の地下施設周辺領域、 特に 350 m 調査坑道周辺の気相飽和度が相対的に高くなっている。

140 m 調査坑道から掘削されたボーリング孔を利用した FDR-V 法⁷²による岩盤内部の水分量 の観測結果によると,2009 年 4 月から 2016 年 4 月の 7 年間における坑道壁面から 1 m の岩盤内 部の気相飽和度は 0.1~0.3 であった^{73),74}。250 m 調査坑道では,2013 年 7 月に西連絡坑道壁面の 岩石の飽和度が重量測定法により評価され,気相飽和度は 0.02~0.07 であった⁷⁵)。350 m 調査坑 道では、2013年9月から2014年8月にかけて西連絡坑道壁面の岩石表面の飽和度が比抵抗測定 法により評価され、気相飽和度は0~0.6であった⁷⁶⁾。ケース4またはケース5の気相飽和度分布 の結果(Fig.24~Fig.27)を見ると、250m調査坑道における気相飽和度が最も低く、350m調査 坑道における気相飽和度が最も高い結果が得られており、観測結果と一致した傾向が得られてい る。気相飽和度の絶対値については、観測値と比較して解析結果の方が小さい値を示す傾向にあ る。解析では坑道壁面の湿度を100%に固定したため、飽和度が低下しにくいが、250m調査坑道 および350m調査坑道において得られた観測値は、局所的に吹付セメントを取り除いた状況など の乾燥の影響を完全に取り除くことが困難な状況において計測された値であるため、このように して得られた観測値は解析結果と比較して高い値を示しやすい可能性が考えられる。解析結果と 原位置の観測値との差の要因を議論するためには、感度解析を通した解析手法の有する誤差の評 価や原位置の飽和度の測定手法が有する誤差の評価を行う必要があると考えられる。以上のこと から、坑道掘削に伴う飽和度分布について、定量的な評価の観点では課題が残されるものの、定 性的な観点では概ね妥当な解析結果が得られたと考えられる。



W-Shaft: West Shaft, V-Shaft: Ventilation Shaft, E-Shaft: East Shaft

Fig. 13 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 1



W-Shaft: West Shaft, V-Shaft: Ventilation Shaft, E-Shaft: East Shaft

Fig. 14 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 2



W-Shaft: West Shaft, V-Shaft: Ventilation Shaft, E-Shaft: East Shaft

Fig. 15 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 3



W-Shaft: West Shaft, V-Shaft: Ventilation Shaft, E-Shaft: East Shaft

Fig. 16 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 4



W-Shaft: West Shaft, V-Shaft: Ventilation Shaft, E-Shaft: East Shaft

Fig. 17 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 5



Fig. 18 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 1 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 1–4 years



Fig. 19 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 1 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 5–10 years



Fig. 20 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 2 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 1–4 years



Fig. 21 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 2 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 5–10 years



Fig. 22 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 3 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 1–4 years



Fig. 23 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 3 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 5–10 years



Fig. 24 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 4 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 1–4 years



Fig. 25 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 4 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 5–10 years



Fig. 26 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 5 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 1–4 years



Fig. 27 Time variations of water pressure and gas saturation along with excavation for case 5 Vertical cross section along the line between the West shaft and the East shaft for 5–10 years

6. まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分場などの大規模地下施設の建設では,坑道近傍で生じる岩盤 の損傷による透水性の増大の影響の他に,不飽和な割れ目を介した酸素の侵入とこれに伴う地下 水の酸化の影響を評価することが重要である。新第三紀の海成堆積層のように,CH4やCO2など の溶存ガスを高濃度で含む地層に坑道が掘削される場合,坑道周辺岩盤への酸素の侵入は脱ガス した CH4の坑道へ向かう流れにより抑制されるものの,脱ガスの進行により溶存ガス量が低下し た場合などは,不飽和領域における気相拡散を介して酸素の侵入が促進される可能性が考えられ る。このため,坑道掘削に伴う不飽和領域の三次元分布について溶存ガスを考慮した評価手法を 整備しておくことが望ましいが,これまでにCH4が考慮された解析例は示されていなかった。

本研究では、地下水に多量の溶存 CH4が含まれる環境における地下施設の建設・操業に伴う不 飽和領域の三次元分布を推定する手法を例示することを目的として、幌延深地層研究センターの 地下施設の坑道掘削の実工程を反映した逐次掘削解析を行い、10 年間の気液二相流解析を実施し た。深度 250 m 以深の割れ目の連結性が高い稚内層浅部を含む高透水性領域の掘削前に実施され た止水グラウトの影響を解析において考慮した場合、地下施設への湧水量は、グラウトを考慮し ない結果と比較して大きく低減され、10 年後における湧水量は約 300 m³ d⁻¹であった。また、不 確実性が大きくガス湧出量への感度が高いパラメータである相対浸透率の与え方による違いは、 湧水量には大きく影響しないことが分かった。同時期における湧水量の観測値は約 100 m³ d⁻¹で あったが、この違いの一因は、坑道壁面からの排水条件に関する岩盤と支保構造との接触部の影 響を考慮せず、坑道壁面が完全に大気開放されることを仮定したことであると考えられた。実際 は支保構造により遮水されるため、坑道壁面における解析上の大気解放率を小さくする必要があ ることが示唆された。一方で、10 年後における CH4 湧出量の解析結果は約 300 m³ d⁻¹ となり、観 測値と整合的であった。このことから、地下水の坑道壁面からの排水条件やグラウト影響の取扱 方法に関する課題が残るものの、数値計算は概ね妥当であったと判断された。

気相飽和度分布の解析結果は、250 m 調査坑道において最も低く、350 m 調査坑道において最 も高い値を示し、観測結果と一致した傾向が得られた。気相飽和度の絶対値については、観測値 と比較して解析結果の方が小さい値を示す傾向が得られたが、この違いの要因を議論するために は、感度解析を通した解析手法による誤差の評価や原位置の飽和度の測定手法が有する誤差の評 価を行う必要があると考えられる。以上のことから、坑道掘削に伴う飽和度分布の定量的な評価 には及ばないものの、定性的な観点では概ね妥当な解析結果が得られたと結論される。

最後に、本研究成果は、令和2年度以降の幌延深地層研究計画における必須の課題⁷⁷⁾の1つ である「処分概念オプションの実証」における回収可能性を維持した場合の処分場の安全性への 影響に関する品質評価手法の提示に関して、坑道解放条件における岩盤内部で生じる不飽和領域 の形成の正しい把握とその影響を評価する手法の提示⁷⁸⁾に参考になる成果である。

謝辞

大成建設株式会社技術センターの増岡健太郎氏と宮城充宏氏の両氏には,数値解析等を補助し ていただいた。この場をお借りして,深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート,JNC TN1400 99-020, 1999, 634p.
- 2) European Commission, Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, Proceedings of a European Commission Cluster conference and workshop, Luxembourg, 3 to 5 November 2003, Nuclear Science and Technology, EUR 21028 EN, 2005, 345p.
- Tsang, C.-F., Bernier, F. and Davies, C., Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.42, 2005, pp.109–125.
- Mazurek, M., Pearson, F. J., Volckaert, G., Bock, H., Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media, Radioactive Waste Management, OECD/NEA, ISBN 93-64-02148-5, 2003, 376p.
- 5) De Craen, M., Van Geet, M., Honty, M., Weetjens, E., Sillen, X., Extent of oxidation in Boom Clay as a result of excavation and ventilation of the HADES URF: Experimental and modelling assessments, Physics and Chemistry of the Earth, vol.33, 2008, pp.S350–S362.
- 6) 核燃料サイクル開発機構, 釜石原位置試験総括報告書, JNC TN7410 99-001, 1999, 348p.
- Mäder, U., Mazurek, M., Oxidation phenomena and processes in Opalinus Clay: Evidence from the excavation-disturbed zones in Hauenstein and Mt. Terri tunnels and Siblingen open clay pit, Materials Research Society Symposium Online Proceedings Library, vol.506, 1998, pp.731–739.
- Manaka, M., Kawasaki, M., Honda, A., Measurements of the effective diffusion coefficient of dissolved oxygen and oxidation rate of pyrite by dissolved oxygen in compacted sodium bentonite, Nuclear Technology, vol.130, no.2, 2000, pp.206–217.
- 9) 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-,NUMO-TR-20-03, 2021, 803p.
- 10) 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和, 熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析コードの開発, JNC TN8400 2002-022, 2003, 55p.
- 11) 伊藤 彰,川上 進,油井三和,高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発,JNC TN8400 2003-032, 2004, 46p.
- 12) 鈴木英明,藤崎 淳,藤田朝雄,坑道周辺における不飽和領域の生起にともなう地球化学反応 を考慮した水理-物質移行連成解析-高レベル放射性廃棄物の地層処分における熱-水-応力-化学連成挙動モデル/解析コードの適用-, JAEA-Research 2008-003, 2008, 48p.
- 13) 大山隆弘, 窪田健二, 堆積性軟岩地域のトンネル坑壁表面の掘削後の変化-幌延深地層研究施設での調査-, 日本応用地質学会平成 30 年度研究発表会 講演論文集, 札幌市, 2018, pp.13-14.
- 14) Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H., Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, Engineering Geology, vol.267, 2020, 105496.
- 15) Miyakawa, K., Ishii, E., Hirota, A., Komatsu, D.D., Ikeya, K. and Tsunogai, U., The role of low-

temperature organic matter diagenesis in carbonate precipitation within a marine deposit, Applied Geochemistry, vol.76, 2017, pp.218–231.

- 16) 宮川和也, 玉村修司, 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 幌延深地層研究計画に関わるガス組成データ, JAEA-Data/Code 2016-021, 2017, 60p.
- 17) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Sasamoto, H., Akaki, T. and Yamamoto, H., The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, The Extended Abstract of the ISRM 2019 Specialized Conference, Ginowan, Japan, 2019, 6p.
- 18) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H., Numerical simulation of oxygen infusion into desaturation resulting from artificial openings in sedimentary formations, 第15回岩の力学国内シンポジウム 講演論文集, 大阪市, 2021, pp.609–614.
- 19) 鈴木英明,伊藤 彰,杉田 裕,川上 進,水理学的ゆるみ域がおよぼす処分坑道周辺の不飽和 領域形成に関する感度解析,JNC TN8400 2002-008, 2002, 58p.
- Matray, J. M., Savoye, S. and Cabrera, J., Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France), Engineering Geology, vol.90, 2007, pp.1–16.
- 21) Fernández-Garcia, D., Gómez-Hernández, J. J. and Mayor, J-C., Estimating hydraulic conductivity of the Opalinus Clay at the regional scale: Combined effect of desaturation and EDZ, Physics and Chemistry of the Earth, vol.32, 2007, pp.639–645.
- 22) Miyakawa, K., Aoyagi, K., Akaki, T. and Yamamoto, H., A numerical simulation study of the desaturation and oxygen infusion into the sedimentary rock around the tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, JAEA-Data/Code 2021-002, 2021, 26p.
- 23) Miyakawa, K., Nohara, T., Tokiwa, T., Yamazaki, M., Seven-year history of vertical hydraulic diffusivity related to excavation around an underground facility, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol.70, 2014, pp.332–342.
- 24) 酒井利啓, 松岡稔幸, 幌延地域を対象とした地表踏査および地形データにもとづく地質分布 の推定, JAEA-Research 2015-004, 2015, 109p.
- 25) 日本原子力研究開発機構, 平成 29 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 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書, 2018, 206p.
- 26) 操上広志, 幌延深地層研究計画における地下水流動解析-平成 17 年度までの調査結果を踏ま えた再解析-, JAEA-Research 2007-036, 2007, 39p.
- 27) 操上広志,竹内竜史, 薮内 聡, 瀬尾昭治, 戸村豪治, 柴野一則, 原 稔, 國丸貴紀, 幌延深地 層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究, 土木学会論文 集 C, vol.64, no.3, 2008, pp.680–695.
- 28) 下茂道人,山本 肇,等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法,大成建設 技術研究所報, vol.29, 1996, pp.257–262.
- 29) Ishii, E., Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.100, 2017, pp.10–22.
- 30) 松井裕哉, 中山 雅, 真田祐幸(編) 幌延深地層研究計画 平成 18 年度調査研究成果報告, JAEA-Research 2007-092, 2008, 83p.

- 31) 中山 雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田 裕(編) 幌延深地層研究計画 平成 21 年度調査研究成果 報告, JAEA-Review 2010-039, 2010, 67p.
- 32) 中山 雅, 澤田純之, 杉田 裕 (編) 幌延深地層研究計画 平成 22 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2011-033, 2011, 80p.
- 33) 中山 雅 (編) 幌延深地層研究計画 平成 24 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2013-037, 2014, 63p.
- 34) 花室孝広(編) 幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2014-039, 2014, 69p.
- 35) Pruess, K. and Battistelli, A., TMVOC, a numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in saturated-unsaturated heterogeneous media, LBNL-49375, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2002, 192p.
- 36) Zhang, K., Wu, Y. S. and Pruess, K., User's Guide for TOUGH2-MP, A Massively Parallel Version of the TOUGH2 Code, LBNL–315E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2008, 108p.
- Edwards, A. L., TRUMP: A computer program for transient and steady state temperature distributions in multidimensional systems, UCRL–14754, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, CA, 1972, 259p.
- 38) Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P.A., An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, Water Resource Research, vol.12, no.1, 1976, pp.57–64.
- 39) 今井 久,山下 亮,雨宮 清,塩崎 功,堆積岩地域における広域地下水流動解析手法に関する 検討, JNC TJ1410 2001-002, 2001, 319p.
- 40) 今井 久,前田信行,塩崎 功,雨宮 清,千々松正和,幌延深地層研究計画における地下水流 動解析に関する検討, JNC TJ1400 2002-004, 2002, 357p.
- 41) 下茂道人, 熊本 創, 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究 (II), JNC TJ8400 2004-011, 2004, 184p.
- 42) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本 創, 幌延深 地層研究センターにおける試錐調査(HDB-1 孔), JNC TJ1400 2002-010, 2002, 921p.
- 43) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本 創, 幌延深 地層研究センターにおける試錐調査(HDB-2 孔), JNC TJ1400 2002-011, 2002, 961p.
- 44) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄, 幌延深地層研究 計画における試錐調査(HDB-3 孔), JNC TJ5420 2004-003, 2003, 918p.
- 45) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄, 幌延深地層研究 計画における試錐調査(HDB-4 孔), JNC TJ5420 2004-004, 2003, 788p.
- 46) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄, 幌延深地層研究 計画における試錐調査(HDB-5 孔), JNC TJ5420 2004-005, 2003, 855p.
- 47) 山本卓也,下茂道人,藤原靖,服部弘通,名合牧人,田所照夫,中垣真一,幌延深地層研究 計画における試錐調査(HDB-6,7,8 孔)のうち HDB-6 孔, JNC TJ5400 2005-004, 2004, 1182p.
- 48) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一, 幌延深地層研究 計画における試錐調査(HDB-6, 7, 8 孔) のうち HDB-7 孔, JNC TJ5400 2005-005, 2004, 704p.
- 49) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一, 幌延深地層研究

計画における試錐調査(HDB-6,7,8 孔)のうち HDB-8 孔, JNC TJ5400 2005-006, 2004, 795p.

- 50) Verma, A. K., Pruess, K., Tsang, C. F. and Witherspoon, P. A., A study of two-phase concurrent flow of steam and water in an unconsolidated porous medium, LBL–19084, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 1985, 9p.
- 51) Corey, A. T., The interrelation between gas and oil relative permeabilities, Producers Monthly, vol.19, 1954, pp.38–41.
- 52) Li, K. and Horne, R. N., Comparison of methods to calculate relative permeability from capillary pressure in consolidated water-wet porous media, Water Resources Research, vol.42, no.6, 2006, W06405.
- 53) Van Genuchten, M. TH., A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, vol.44, no.5, 1980, pp.892–898.
- 54) 山本 肇, 下茂道人, 國丸貴紀, 操上広志, 幌延深地層研究計画における立坑掘削時の地下水 からの脱ガスの予察解析, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2007, pp.293– 298.
- 55) Aoyagi, K., Kazama, T., Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis, Sedimentology, vol.27, issue 2, 1980, pp.179–188.
- 56) 澤田純之,中山雅,石川 誠,幌延深地層研究計画 地下施設建設におけるプレグラウチング の注入実績データ集-換気立坑のプレグラウチング結果-, JAEA-Data/Code 2013-018, 2013, 25p.
- 57) 佐藤稔紀, 笹本 広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野 明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山 雅, 武田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊藤洋昭, 幌延深地層研究 計画における坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第2段階: 深度 350m まで)研究 成果報告書, JAEA-Research 2016-025, 2017, 313p.
- 58) 中嶋仁慶,小山倫史,龍田圭亮,片山辰雄,青柳和平,幌延深地層研究センターの換気立坑に おけるグラウト注入シミュレーションおよびその効果の検証,第14回岩の力学国内シンポジ ウム講演論文集,神戸,2017,6p.
- 59) Tokiwa, T., Sawada, S., Ochiai, S., Miyakawa, K., Occurrence of high-permeability fracture estimated by grouting in Horonobe URL of Japan, 13th Japan Symposium on Rock Mechanics and 6th Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Ginowan, 2013, pp.1021–1025.
- 60) Ishii, E., Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, vol.54, no.5, 2018, pp.3335–3356.
- Kurikami, H., Takeuchi, R., Yabuuchi, S., Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, Physics and Chemistry of the Earth, vol.33, 2008, pp.S37– S44.
- 62) Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, Dover, New York, 1972, 800p.
- 63) 天野由記,山本陽一,南條 功,村上裕晃,横田秀晴,山崎雅則,國丸貴紀,大山隆弘,岩月 輝希,幌延深地層研究計画における地下水,河川水および降水の水質データ(2001~2010 年 度),JAEA-Data/Code 2011-023, 2012, 312p.
- 64) 笹本 広,山本信幸,宮川和也,水野 崇,幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ (2011 年度~2013 年度), JAEA-Data/Code 2014-033, 2015, 43p.

- 65) 宮川和也, 女澤徹也, 望月陽人, 笹本 広, 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質デー タ(2014 年度~2016 年度), JAEA-Data/Code 2017-012, 2017, 60p.
- 66) Tamamura, S., Miyakawa, K., Aramaki, N., Igarashi, T. and Kaneko, K., A proposed method to estimate in situ dissolved gas concentrations in gas–saturated groundwater, Groundwater, vol.56, no.1, 2018, pp.118–130.
- 67) 宮川和也,女澤徹也,望月陽人,笹本 広,幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質デー
 タ(2017年度~2019年度), JAEA-Data/Code 2020-001, 2020, 41p.
- 68) 宮川和也, 幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ(2020年度), JAEA-Data/Code 2021-003, 2021, 25p.
- 69) 中山 雅, 雑賀 敦, 木村 駿, 望月陽人, 青柳和平, 大野宏和, 宮川和也, 武田匡樹, 早野 明, 松岡稔幸, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 石井英一, 杉田 裕, 笹本 広, 棚井憲治, 佐藤稔紀, 大澤英 昭, 北山彩水, 谷口直樹, 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階(第3段 階: 必須の課題 2015–2019 年度)研究成果報告書, JAEA-Research 2019-013, 2020, 276p.
- 70) 松永浩一,田村彰教,村川史朗,西山誠治,青木七郎,布施正人,與三智彦,高橋剛弘,幌延 深地層研究計画 地下施設実施設計-設計報告書-(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書), JNC TJ5410 2005-002, 2005, 4897p.
- 71) Ishii, E. and Furusawa, A., Detection and correlation of tephra-derived smectite-rich shear zones by analyzing glass melt inclusions in mineral grains, Engineering Geology, vol.228, 2017, pp.158–166.
- 72) 西垣 誠,小松 満,金満鎰, FDR 法による土壌・地下水汚染のモニタリング手法に関する基礎的研究,地下水学会誌, vol.46, no.2, 2004, pp.145–157.
- 73) 藪内 聡, 國丸貴紀, 岸 敦康, 小松 満, 水平坑道の掘削に伴う坑道周辺の間隙水圧・岩盤水 分量モニタリング-幌延深地層研究所 140m 調査坑道での測定-, 土木学会論文集 C(地圏工 学), vol.67, no.4, 2011, pp.464-473.
- 74) 杉田 裕,青柳和平,窪田健二,中田英二,大山隆弘,幌延深地層研究施設における掘削影響 領域の評価(その1)深度140mを対象とした試験(共同研究), JAEA-Research 2018-002, 2018, 72p.
- 75) 青柳和平,津坂仁和,窪田健二,常盤哲也,近藤桂二,稲垣大介,幌延深地層研究所の250m 調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討,土木学会論文集 C(地圏工学), vol.70, no.4, 2014, pp.412–423.
- 76) Hashiba, K., Fukui, K., Sugita, Y. and Aoyagi, K., Mechanical and rheological characteristics of the siliceous mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory site, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2017, Bergen, Norway, 2017, 8p.
- 77) 中山 雅, 雑賀 敦 (編), 幌延深地層研究計画 令和 2 年度調査研究計画, JAEA-Review 2020-022, 2020, 34p.
- 78) 中山 雅, 雑賀 敦 (編), 幌延深地層研究計画 令和元年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2020-042, 2021, 116p.