

幌延を事例とした坑道周辺地質環境の長期挙動に関する解析
(その2：水理学的長期変化解析)

株式会社ダイヤコンサルタント 正○伊藤 諒, 正 前村庸之
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 正 松井裕哉, 正 尾崎裕介, 非 望月陽人
清水建設株式会社 正 郷家光男, 正 沖原光信, 正 戸栗智仁

1. はじめに 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における回収可能性の維持に伴う影響評価について、2020年度から3箇年計画で進めており、2021年度までに、幌延深地層研究センター地下施設の深度350m坑道周辺地質環境を事例として、1,000年間の坑道開放条件を仮定した数値解析により検討してきた^{1),2),3)}。本報では、それらの結果を踏まえて、坑道周辺部を対象として、坑道を掘削し長期開放し、ある時点で埋め戻した後の地質環境の長期変化に関する水理学的長期変化解析を試行した結果を示す。力学的長期変化解析は別報⁴⁾に述べた通りである。

2. 解析コード 解析には、多成分三相系の流体解析コードであるTOUGH3のTMVOCモジュールを用いた。このコードは、多孔質媒体中の水及びガスの浸透流、非凝縮性ガスの水への溶解及び水からの気化並びに溶解物質の移流分散の解析等が可能である。本報では、相として水（以下、液相）及び非凝縮性ガス（ガス相）を考慮し、ガス成分としてCH₄、CO₂、O₂及びN₂を考慮した。

3. 解析領域および解析メッシュ 解析領域は、対称性を考慮して坑道の右側半分とし、坑道は深度350mに位置するとした。鉛直方向は地表面（深度0m）から深度1350mまで、水平方向の幅は1000mとした。解析メッシュを図-1に示す。構成材料は、母岩及び掘削損傷領域（以下、EDZ）と、坑道もしくは埋戻し材とした。うちEDZは、岩盤面に近いほど割れ目が多く絶対浸透率が高いことを表現するため、EDZ1（岩盤面から0.4mの領域）とEDZ2（岩盤面から0.4～1mの領域）の2つに区分した。力学解析では考慮されている支保工は設定しなかった。

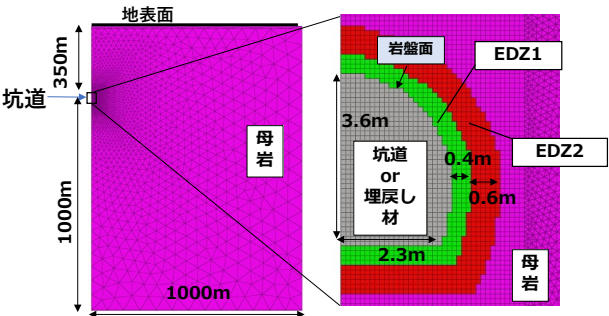


図-1 解析メッシュ（左:全体図、右:拡大図）

4. 水理学的長期変化解析の解析条件 最初に坑道掘削後、開放状態を維持したときの水理学的長期変化解析を実施し、その後、開放期間50年、100年、200年及び300年の解析結果を初期条件として、坑道に埋戻し材を設置し、掘削後1,000年までの水理学的長期変化解析を実施した。

設定した解析物性を表-1に示す。坑道開放状態でのEDZ1とEDZ2の絶対浸透率は、力学的長期変化解析結果（絶対浸透率の経時変化）を踏まえ設定した。埋戻し材の絶対浸透率は、透水試験結果⁵⁾を基に設定した。EDZ1とEDZ2の比貯留係数は、力学解析結果（ヤング率、ポアソン比の経時変化）を踏まえ、徳永⁶⁾を参考に設定した。母岩、EDZ1及びEDZ2の水分特性曲線は、保水性の大小が、母岩>EDZ2>EDZ1となるよう設定した。母岩、EDZ1及びEDZ2の比透水係数 k_{rl} は、Miyakawa et al.⁷⁾に基づき設定し、比透気係数 k_{rg} は、Miyakawa et al.⁷⁾よりも、高飽和度側における k_{rg} が小さくなるように設定した。これは、高飽和度では、気泡が連続せず比透気係数が低い状態を表現した。

力学解析結果を反映した絶対浸透率の経時変化の例として、EDZ1の設定を図-2に示す。なお、埋戻し後の絶

表-1 水理学的長期変化解析上の物性の設定

	母岩	EDZ1	EDZ2	埋戻し材
絶対浸透率 [m ²]	9.5×10 ⁻¹⁹	力学的長期変化解析の 結果を反映		3.3×10 ⁻¹⁸
比貯留係数 [1/mH ₂ O]	6.8×10 ⁻⁶	力学的長期変化解析の 結果を反映		0.0
有効間隙率	0.4			0.532
水分 特性 曲線				
比透水 係数 & 比透気 係数				

キーワード：高レベル放射性廃棄物、回収可能性、地質環境、掘削損傷領域、二相流解析、不飽和領域

連絡先：〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町 2-272-3 (株)ダイヤコンサルタント GE事業本部 Tel.: 048-654-3129

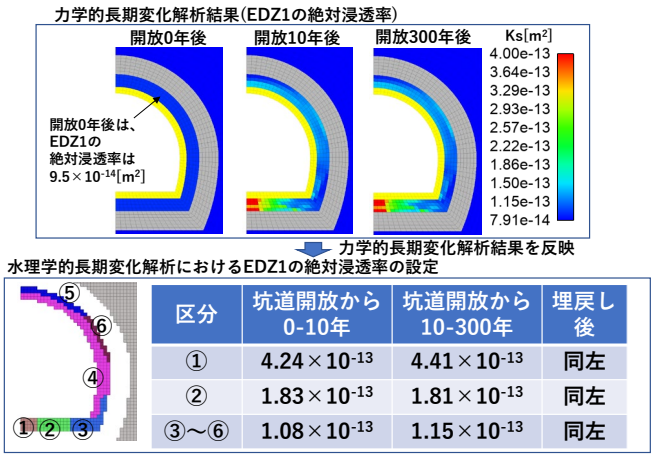


図-2 EDZ1の絶対浸透率の経時変化の設定

表-2 初期条件

		母岩	EDZ1	EDZ2	埋戻し材	
坑道開放状態	圧力	101300Pa（大気圧）				
	飽和度	1				
	液相モル分率	CH ₄	(初期圧力)/(CH ₄ のヘンリー定数)×0.922			
		CO ₂	(初期圧力)/(CO ₂ のヘンリー定数)×0.0177			
		O ₂	0			
N ₂						
坑道埋戻し状態	圧力	坑道開放状態の解析結果			101300Pa（大気圧）	
	飽和度				0.791	
	液相モル分率				ヘンリーの法則に従う	
	ガス相モル分率				CH ₄	0
					CO ₂	0.21(大気組成)
					O ₂	
					N ₂	

対浸透率は一定とした。また、圧力及び濃度の初期条件を表-2に示す。液相には圧力に応じたCH₄及びCO₂の溶解を考慮した。境界条件については、坑道及び地表面の圧力は101300Pa(大気圧)、飽和度は0、ガス相のモル分率はO₂が0.21、N₂が0.79(大気組成)を設定した。坑道と地表面以外の境界は、不透過とした。

5. 解析結果と考察 解析結果の例として、開放期間50年と300年のそれぞれについて、埋戻し後の坑道近傍の飽和度分布の変化を図-3に、単位間隙当たりのO₂のモル量(液相への溶解量とガス相の量を合算)分布の変化を図-4に示す。時間の経過とともに、埋戻し材、EDZ及び母岩の飽和度は上昇していき、飽和に達するのは埋戻し材→EDZ2→EDZ1の順であった。これは、同一サクション圧に対する飽和度の大小関係が、埋戻し材>EDZ2>EDZ1となっているためである。いずれのケースも、埋戻し後700年においてEDZ1上部に不飽和領域が残った。これは幌延のようにCH₄が地下水に多量に溶解した環境ではCH₄が再溶解しにくくなっているためと推察される。坑道開放50年のケースでは、埋戻し後950年にはガス相の成分が全て再溶解する結果となった。O₂のモル量分布の変化は、飽和度分布の変化に対応しており、ガス相中の量が支配的であることが分かる。なお、埋戻し後100年まで埋戻し材及びEDZ上部にてO₂が増加する傾向にあるが、これは坑道周辺のO₂が浸潤により押し

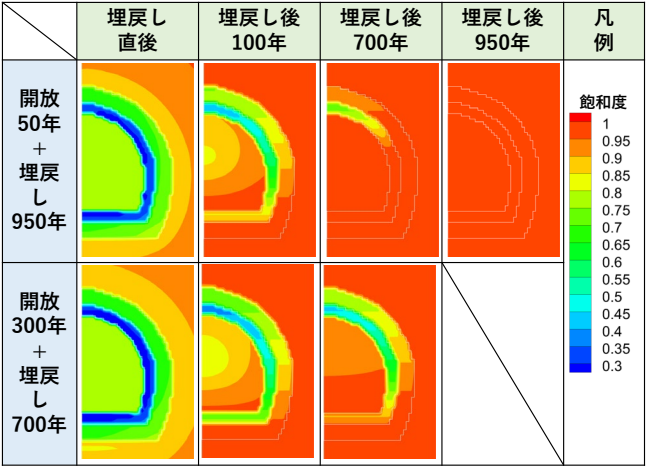


図-3 飽和度分布(白線:EDZ1、EDZ2 および母岩の境界)

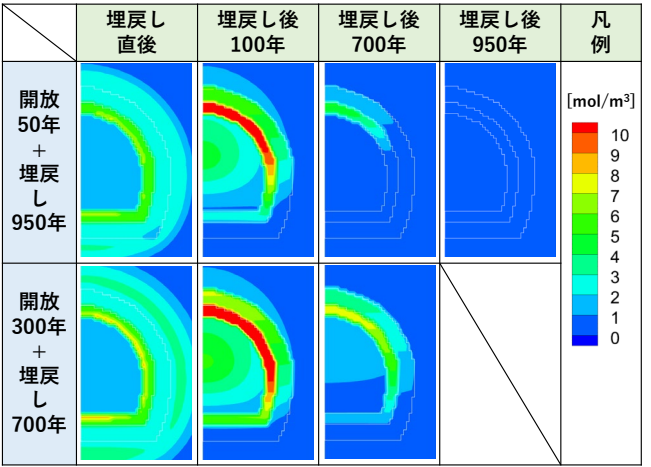


図-4 単位間隙当たりのO₂のモル量分布

出され、ガス相の残る埋戻し材及びEDZ上部に移動して集積したためと考えられる。坑道開放300年のケースは、坑道開放50年のケースよりも飽和度分布等の変化が遅れている。これは、坑道開放期間が長いと、坑道からEDZ及び母岩へと大気が入る期間が長くなり、埋戻し直後の時点での不飽和領域が広いためと考えられる。

6. おわりに 今後は、岩石鉱物とO₂の反応を考慮した化学解析等の、より現実に即した解析手法を検討していく必要があると考えられる。

本研究は、経済産業省からの委託研究「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(JPJ007597)(回収可能性技術高度化開発)」の一部である。

参考文献 1) 原環センター, 原子力機構: 令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(回収可能性技術高度化開発)報告書, pp.5-25-5-98, 2021. 2) 郷家ら: 日本原子力学会2021年度秋の大会, 1C06, 2021. 3) 原環センター, 原子力機構: 令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業 回収可能性技術高度化開発報告書, pp.5-60-5-198, 2022. 4) 郷家ら: 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集, 2023(投稿中). 5) 杉田ら: 幌延深地層研究計画で得られた掘削土を用いた埋め戻し材の特性試験(受託研究), JAEA-Data/Code 2020-017, 2020. 6) 徳永朋祥: 貯留係数に関する一, 二の議論, 応用地質, pp.475-479, 1998. 7) Miyakawa et al.: The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, YSRM2019 & REIF2019, Okinawa, pp.834-839, 2019.