

ニアフィールド岩盤領域を対象とした酸化還元場の時間変遷に関する検討

鹿島建設(株) 正会員 ○羽根幸司 並川 正 升元一彦
フェロー会員 森川誠司
(株)ブルーアースセキュリティ 正会員 森 康二

1. はじめに

処分場の掘削・操業期に発達した酸化領域が閉鎖後にどのように還元環境へ回復するかは、THMC 連成過程や長期的なバリア性能を評価する際の重要な着眼点である。坑道周辺の酸化還元領域に関する評価はこれまでに多数の研究事例があるが、水理・物質移行特性の不均質性やその時間変遷、数値モデルの次元等の評価上の不確実因子に着目した検討例は必ずしも多くはないと思われる。本検討では、このようなニアフィールド酸化還元領域における不確実性の定量化に向けて、水理・地球化学解析コード TOUGHREACT を適用した予察的検討を行った。本稿では、一次元モデルの感度解析により酸化環境になり得る範囲や還元環境に回復するまでの時間を幅として求め、処分坑道周辺の断面をモデル化した二次元解析結果との比較を行った結果を示す。

2. 先行研究

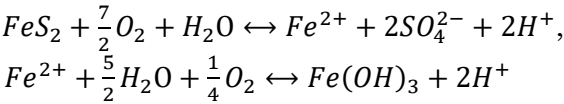
表－1に先行研究^{1)～6)}による知見を示す。坑道形状や母岩条件等の違いにより、酸化領域の広がりや回復に要する時間スケールについて幅広い結果が得られている。

表－1 坑道周辺の酸化・還元領域に関する先行研究例

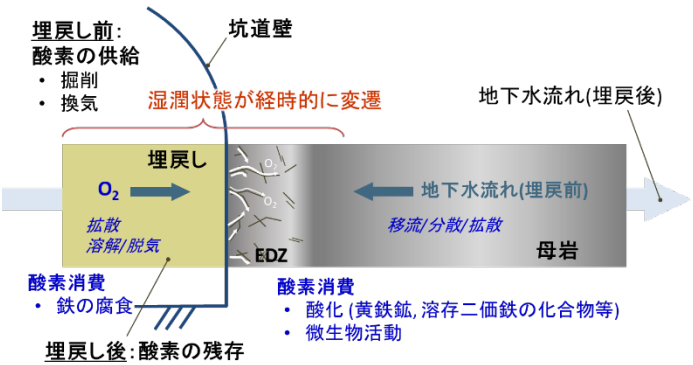
文献	母岩条件	評価コード*	酸化環境/還元環境に関する知見
Wersin et al. (1994)	—	STEADTQL	7年～290年でO ₂ 濃度が初期の1%
千葉ほか (1999)	結晶質岩, 堆積岩 (日本)	SPADE (2D)	閉鎖後50年以内に酸素消費 (堆積岩)
Yang et al. (2007)	花崗岩 (スウェーデン)	—	数週間～数百年でDO消費
Craen et al. (2008)	Boom粘土 (ベルギー)	PORFLOW(軸対称)	酸化領域は約1m
Windt et al. (2014)	粘土質岩 (フランス)	HYTEC	酸素ガスの拡散係数に強く依存
Giroud et al. (2018)	オパリナス粘土 (スイス)	COMSOL (3D)	閉鎖後数週間～数カ月で嫌気的条件

3. 解析モデルおよび解析条件

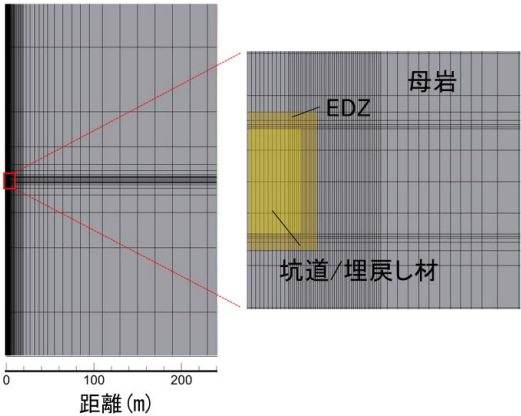
処分坑道周辺の酸化還元状態に影響を及ぼすと想定される事象を図－1に示す。このような場の評価にあたり、本検討では坑道掘削前の初期平衡状態、掘削後、埋戻し後の各段階で解析を行った。初期状態では PHREEQC を用いた平衡解析により模擬的な地下水組成を作成した。掘削後および埋戻し後に対する解析では処分深度 500m、操業期間を 20 年とし、埋戻し材、EDZ と母岩をモデル化した。EDZ は掘削と同時に形成されると仮定した。EDZ と母岩中の初期鉱物は黄鉄鉱を考慮し、以下の反応については速度論的に扱うこととした。



一次元モデルは処分坑道から水平方向に 250m までをモデル化し、二次元モデル (図－2) は水平方向の格子幅を一次元モデルに合わせて作成した。水理、二相流、物質移動の各特性に関わる解析物性は文献^{7)～9)}に基づいて設定した。境界条件は処分深度に応じた圧力、飽和度、温度および濃度をディリクレ条件で与えた。



図－1 坑道周辺の O₂挙動に関する概念モデル



図－2 二次元解析モデル

キーワード： 地層処分, 還元環境, 地球化学解析

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 TEL 03-6229-6724

なお、本検討ではバックグラウンドの巨視的な動水勾配を設定せず、地下水流れとしては坑道開放時に形成される圧力勾配に起因するもののみを考慮した。これらの条件に従い TOUGHREACT V3.3 (EOS3) を用いて解析を実施した。一次元解析においては、溶存酸素の拡散性 (Diffusivity) および酸化還元反応の速度パラメータの感度解析を実施した。二次元解析は、拡散性、反応速度がともに大きいケースを取り上げて実施した。

4. 解析結果および考察

一次元の感度解析では、溶存酸素の拡散性に関わるパラメータを屈曲度[-]、酸化還元反応の速さに関わるパラメータを速度定数で代表させ、屈曲度を 0.1~0.7、速度定数を $2 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-10} \text{ mol/m}^2/\text{s}$ の範囲で変化させた。解析結果の例として、屈曲度が 0.7、速度定数が $2 \times 10^{-13} \text{ mol/m}^2/\text{s}$ のケース (拡散性が最も大きく反応が最も小さいケース) における溶存酸素濃度の空間分布および時間変化を図-3 に示す。このケースでは坑道から最大 10 数 m 程度まで酸化され、坑道近傍が還元環境に戻るまでに 500 年以上要することが示される。一方、速度定数が上限値のケースでは、坑道近傍の溶存酸素濃度はほとんど上昇しない結果であった。

上記と同じ解析物性を用いた二次元解析の結果を図-4 に示す。一次元解析の結果と比較すると、坑道近傍の溶存酸素濃度が早く低減し、より早く還元状態に戻る傾向を示している。これは、溶存酸素が岩盤の鉛直方向に拡散する効果を考慮していることによるものと考えられる。

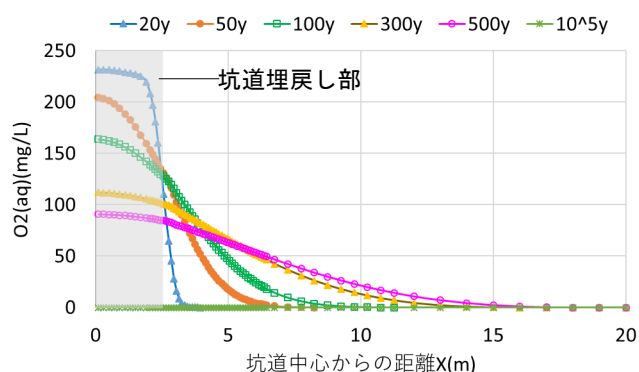


図-3 溶存酸素濃度分布 (一次元解析)

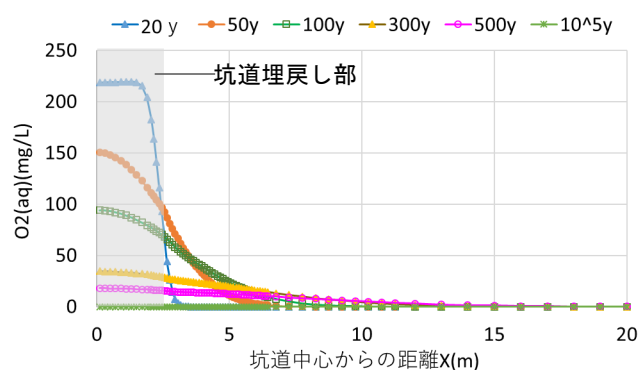


図-4 溶存酸素濃度分布 (二次元解析)

5. おわりに

処分坑道周辺岩盤の酸化領域の空間的・時間変遷に着目した予察的な解析・評価を行った。その結果、反応速度や溶存酸素の拡散係数の違いによって評価結果が大幅に異なる可能性が示唆された。本検討の状態設定の範囲では酸化領域はおおよそ 0.1m 以下~10 数 m であることなど、先行研究とほぼ矛盾しない結果が得られた。また、二次元解析は一次元解析よりも周辺岩盤が速やかに還元状態に戻る傾向が示された。今後は、実測データを用いることなどにより不確実性に着目したモデル化・評価の具体化・詳細化を図る予定である。

参考文献

- 1) Wersin, P. et al. : Time evolution of dissolved oxygen and redox conditions in a HLW repository (SKB-TR-94-02), 1994.
- 2) 千葉他: ニアフィールドにおける酸化還元状態の変遷に関する予察的解析, JNC TN84000 99-027, 1999.
- 3) Yang, C. et al. : Modelling geochemical and microbial consumption of dissolved oxygen after backfilling a high level radioactive waste repository. Journal of contaminant hydrology, 93(1-4), pp.130-148, 2007.
- 4) De Craen, M. et al. : 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, Parts A/B/C, 33, S350-S362, 2008.
- 5) De Windt et al. : Modeling of oxygen gas diffusion and consumption during the oxic transient in a disposal cell of radioactive waste. Applied geochemistry, 41, pp.115-127, 2014.
- 6) Giroud, N. et al. : On the fate of oxygen in a spent fuel emplacement drift in Opalinus Clay. Applied geochemistry 97, pp.270-278, 2018.
- 7) 原子力発電整備機構: 概要調査団化における設計・性能評価手法の高度化 (その 3) - NUMO-JAEA 協働研究報告書 (2013 年度) - . NUMO-TR-14-05, 2015.
- 8) 鈴木他: 熱-水-応力-化学連成解析による緩衝材の地球化学環境の変遷に着目したニアフィールド長期挙動評価の一例. 原子力バックエンド研究, 19(2), pp.39-50, 2012.
- 9) 森他: 人工バリアシステムの原位置ガス移行挙動試験における 2 相流モデリングの適用性に関する検討, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (土木学会), 第 34 巻, pp.41-48, 2005.