

日本原子力学会
第 17 回中国・四国支部研究発表会
2023 年度第 2 回講演会

プログラム・要旨集

2023 年（令和 5 年）12 月 9 日
広島県健康福祉センター

日本原子力学会 中国・四国支部

粒子拡散モデルに基づく緩衝材の密度分布変化を考慮した 周辺岩盤亀裂への緩衝材の侵入挙動に関する研究

○山中健吾¹⁾、佐藤治夫¹⁾

1) 岡山大・院・自然科学

1. はじめに

原子力発電所からの使用済燃料を再処理することで発生する高レベル放射性廃棄物は、300m 以深の地層中に埋設処分(地層処分)される。地層処分は、天然バリア(岩盤)と人工バリアを組み合わせた多重バリアシステムによって長期的に放射性物質を生活環境から隔離する処分方法である。人工バリアは、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材(ベントナイトと呼ばれる天然の粘土)で構成され、その周囲は岩盤である。緩衝材は直接岩盤と接触していることから、周辺岩盤に亀裂がある場合、亀裂への侵入により密度低下が発生する可能性がある。緩衝材の亀裂への侵入挙動は、処分後の人工バリアの安定性を評価する上で重要な要因の一つである。昨年(2021)の支部研究発表会^[1]では、既存の研究^[2]にある模擬亀裂を用いた実験から解析モデルを作成し、蒸留水条件における密度分布の変遷(図 1)について解析し、長期的侵入距離(半径)について収束傾向にあることを示した。一方、塩水条件では大きく挙動が異なる。

本研究では、塩水系条件における緩衝材の亀裂への侵入半径と亀裂への侵入に伴う緩衝材内と亀裂内の密度分布の変遷について解析し、侵入現象の収束について検討した。

2. モデル解析

モデル解析は、実験系及び実際の系を考慮し、円筒座標系における半径方向の拡散方程式に基づいて、数値解析法(差分法)により実施した。亀裂中の拡散係数は実測データ^[3]から、また、緩衝材中の固相拡散係数は粒子拡散モデル^[4,5]から導出し、緩衝材中及び亀裂中の密度分布、並びに亀裂中への侵入距離を解析した。

3. 結果および考察

図 1 に蒸留水条件における緩衝材と亀裂中の密度分布の解析結果(右)と X 線 CT による実測結果(左)の例^[6]を示す。緩衝材中の密度分布は、緩衝材の外側に向かって低下し、緩衝材の半径が大きいほど実測結果と一致した。X 線 CT による密度分布の実測値のパラツキを考えると、良く再現していると言える。また、侵入距離の経時変化は時間経過に伴い収束する傾向を示し、実測結果と概ね一致した。図 2 に塩水系条件における長期的侵入距離の解析結果を示す。すべての条件で侵入距離が収束傾向にあり、緩衝材の流出に限界があることが分かった。

4. 結論

本研究では、塩水系条件における緩衝材の亀裂への侵入半径と亀裂への侵入に伴う緩衝材内と亀裂内の密度分布の変遷について解析した結果、すべての条件で侵入距離は収束傾向にあることが確認できたことから、緩衝材の流出に限界があることが分かった。亀裂内の密度分布の変遷についての解析結果は図 1 に示す蒸留水条件の結果と比較すると、塩水系条件の場合の方が蒸留水条件と比べて亀裂内に緩衝材が侵入しにくい。

【参考文献】

- [1]山中健吾・佐藤治夫:第 16 回中国・四国支部研究発表会, R4-07 (2022).
 [2]松本一浩・藤田朝雄: JAEA-Research 2011-014 (2011). [3]松本一浩・棚井憲治: JNC TN8400 2003-006 (2003).
 [4]Kanno, T. et al.: Proc. of ICEM'99, Nagoya, Japan (1999).
 [5]Kanno, T. et al.: Clay Sci. for Eng., Adachi & Fukui (eds.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 1579, pp.32-41 (2001).
 [6]松本一浩・棚井憲治: JNC TN8400 2003-035 (2004).

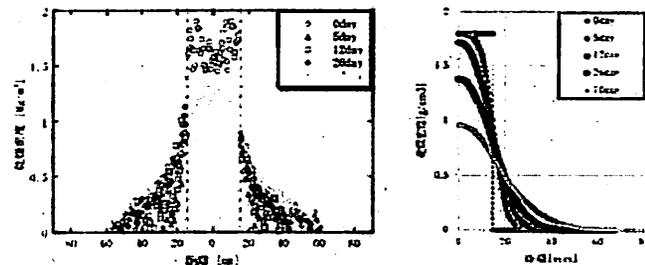


図 1 密度分布の解析結果と実測結果の例

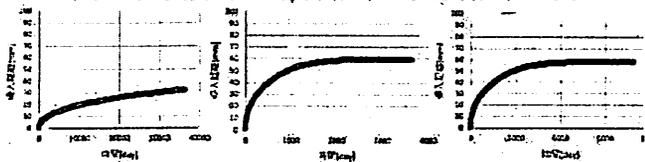


図 2 長期的侵入距離の解析結果(塩水系)

粒子拡散モデルに基づく緩衝材の密度分布変化を考慮した周辺岩盤亀裂への緩衝材の侵入挙動に関する研究

○山中健吾
佐藤治夫
岡山大学 自然科学研究科

目次

- 研究背景
地層処分に使われる緩衝材
既存の研究
既存の研究課題・目的
- 研究概要
解析手法
拡散係数の導出
密度分布の経時変化の解析/結果
侵入距離の経時変化の解析/結果
- 本研究のまとめと今後の展望

2022.11.22

岡山大学自然科学研究科

2022.11.22

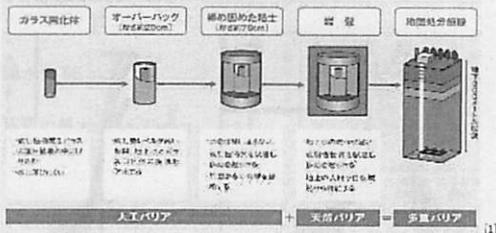
岡山大学自然科学研究科

2

研究背景

高レベル放射性廃棄物

- 我が国では使用済燃料の再処理過程で発生する廃液
- 放射能レベルが高く、減衰までに長い年月がかかる
- 地層処分に より 長期的な処分が必要



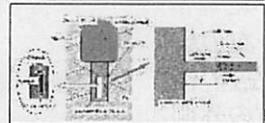
[1] 放射性物質の適切な処分の実現に向けて—高レベル放射性廃棄物 (mail.go.jp)

地層処分に用いられる緩衝材

- 緩衝材の材料
-ベントナイトの主な特徴-
- 膨潤性
 - 増粘性
 - イオン交換性



緩衝材を取り囲む岩盤の亀裂が多くなるとベントナイトが亀裂内へと流出

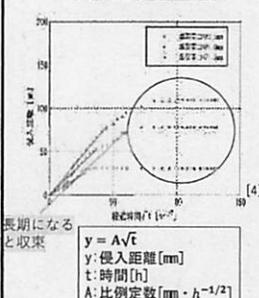


緩衝材内で密度低下が生じ、緩衝材としての機能が損なわれる

[2] (日本原子力産業協会)P:ケミエス工業 ベントナイトで放射性廃棄物処分など多様な分野で循環社会に貢献
[3] (菅野毅, 岩田裕美子: "緩衝材侵入現象モデルの検討", 核燃料サイクル開発機構, JNC-T18400-2003-026(2003))

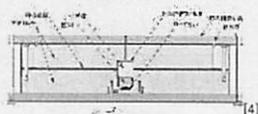
既存の研究 (1/2)

侵入距離と時間の関係



[4] (松本一浩, 藤田雅晴: "緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討(Ⅱ)", 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2011-014(2011))
[5] (松本一浩, 藤田雅晴: "緩衝材の流出/侵入特性", 核燃料サイクル開発機構, JNC-T18400-2003-035(2004))

模擬亀裂侵入実験

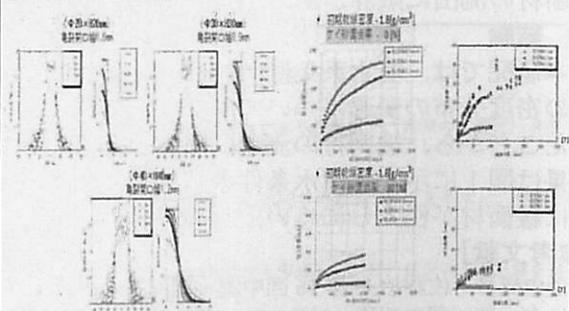


X線CT装置

密度分布測定



既存の研究 (2/2)



[5] (松本一浩, 藤田雅晴: "緩衝材の流出/侵入特性", 核燃料サイクル開発機構, JNC-T18400-2003-035(2004))
[6] (山中健吾, 佐藤治夫: 原子力学会 2022 年秋の大会, 3C01 (2022))
[7] (松本一浩, 藤田雅晴: ベントナイト緩衝材の流出特性の評価(Ⅱ), 核燃料サイクル開発機構技術報告書, JNC-T18400-2003-006 (2003))
[8] (山中健吾, 佐藤治夫: 第16回中国・四国支部研究発表会, RA-07 (2022))

既存の研究課題・研究目的

研究課題
蒸留水条件に対応できるシミュレーションモデルの作成は概ね達成したが、塩水条件などの水質条件の変化には対応できていない。

既存モデルを塩水条件に設定

塩水条件における侵入現象の収束を検討
幅広い条件に対応できるモデルの実現

2007.11.22

研究：工学系研究科水産学専攻(2012)

解析手法

拡散方程式

$$\frac{\partial C(t,r)}{\partial t} = \left(\frac{D}{r}\right) \frac{\partial C(t,r)}{\partial r} + D \frac{\partial^2 C(t,r)}{\partial r^2} \quad \text{--- ①}$$

差分法による離散化

$$C_i^{t+\Delta t} = C_i^t + \frac{\Delta t D}{2(\Delta r)^2} (C_{i+1}^t - C_{i-1}^t) + \frac{\Delta t D}{(\Delta r)^2} (C_{i+1}^t - 2C_i^t + C_{i-1}^t) \quad \text{--- ②}$$



D: 拡散係数 [cm²/s]
C_i^t: i における乾燥密度 [g/cm³]
Δr: 半径方向刻み [cm]
Δt: 時間刻み [s]
t_i = iΔt
[i=0, 1, 2, 3, ...]
r_j = jΔr
[j=0, 1, 2, 3, ..., m, ..., n-1, n]
(ただし, m = $\frac{R}{\Delta r}$, n = $\frac{R}{\Delta r}$)
R: 模擬亀裂半径 [mm]



④(日本一進、藤田健二)「緩衝材の侵入現象モデルの適用に関する検討報告」, 日本原子力学会 研究報告集, JAEA-Research 2011-014(2011)

2012.11.22

研究：工学系研究科水産学専攻(2012)

拡散係数の導出(塩水条件)

▶ 緩衝材内

粒子拡散モデル

$$D_e = \frac{ak dp_p}{\rho_w R \sigma} \quad [\text{cm}^2/\text{s}]$$

固相率

$$\sigma = \frac{C}{C_0} \quad [-]$$

透水係数

$$k = 1.18 \times 10^{-15} \times (e_{0s})^{3.62} \quad [\text{cm/s}]$$

$$-k = 3 \times 10^{-8} \times \text{EXP}(-1.447 \times C) \quad [\text{cm/s}] \text{ [ケイ砂なし]}$$

$$-k = 6 \times 10^{-8} \times \text{EXP}(-1.504 \times C) \quad [\text{cm/s}] \text{ [ケイ砂あり]}$$

膨潤圧

$$P_s = 10^{274.6e^6 - 618.75e^4 + 526.8e^2 - 226.25e^0 + 51.445e^0 - 0.0007} \quad [\text{Pa}]$$

$$-P_s = 3 \times 10^{-5} \times \text{EXP}(6.6657 \times 2.7 \times \sigma) \quad [\text{Pa}]$$

重力加速度

$$g = 980.665 \quad [\text{cm/s}^2]$$

水の密度

$$\rho_w = 0.997 \quad [\text{g/cm}^3]$$

⑤(Kanno, T. et al.: Proc. of ICEM'99, Nagoya, Japan (1999).

⑩(Kanno, T. et al.: Clay Sci. for Eng., Adachi & Fukui (eds.), Balkema, Rotterdam, 1998)

2012.11.22

研究：工学系研究科水産学専攻(2012)

侵入距離の解析条件(塩水)

- 初期乾燥密度 - 1.6[g/cm³]
ケイ砂混合率 - 30[%]
- 初期乾燥密度 - 1.8[g/cm³]
ケイ砂混合率 - 0[%]

初期乾燥密度 C ₀ [g/cm ³]	ケイ砂混合率 [%]	初期乾燥密度 C _{max} [g/cm ³]	亀裂開口幅 d [mm]	比強度 A [mm/h ^{-1/2}]	内部亀裂半長 D _e [cm ² /s]	時間刻み Δt [s]	空間刻み Δr [cm]
1.6	30	1.6	1.5	0.03	8.456 × 10 ⁻⁹	12000 (≒ 0.139day)	0.1

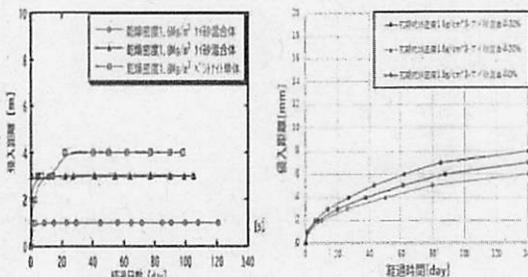
初期乾燥密度 C ₀ [g/cm ³]	ケイ砂混合率 [%]	初期乾燥密度 C _{max} [g/cm ³]	亀裂開口幅 d [mm]	比強度 A [mm/h ^{-1/2}]	内部亀裂半長 D _e [cm ² /s]	時間刻み Δt [s]	空間刻み Δr [cm]
1.8	0	1.8	1.5	0.03	8.456 × 10 ⁻⁹	12000 (≒ 0.139day)	0.1

2012.11.22

研究：工学系研究科水産学専攻(2012)

侵入距離の経時変化の解析(塩水)

侵入先端密度 C_{max}: 0.1 g/cm³



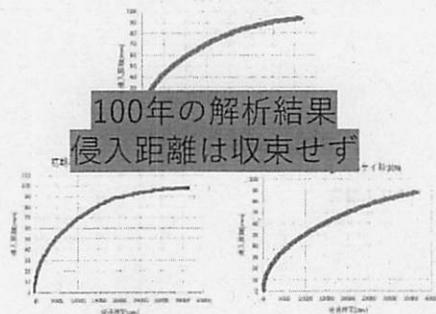
⑫(日本一進、藤井孝治)「緩衝材の流出/侵入特性」, 核燃料サイクル開発機構, INC TN8400 2003-035(2004)

2012.11.22

研究：工学系研究科水産学専攻(2012)

長期的な侵入距離の解析(塩水)

初期乾燥密度 1.6g/cm³ - ケイ砂 30%



100年の解析結果
侵入距離は収束せず

2012.11.22

研究：工学系研究科水産学専攻(2012)

