

幌延深地層研究計画に関する 令和6年度の成果及び令和7年度の計画

(2) 必須の課題のうち令和6年度に取りまとめる課題

2. 処分概念オプションの実証

2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

令和7年3月11日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

解析条件などの詳細説明箇所には、
補足資料と付記しています。

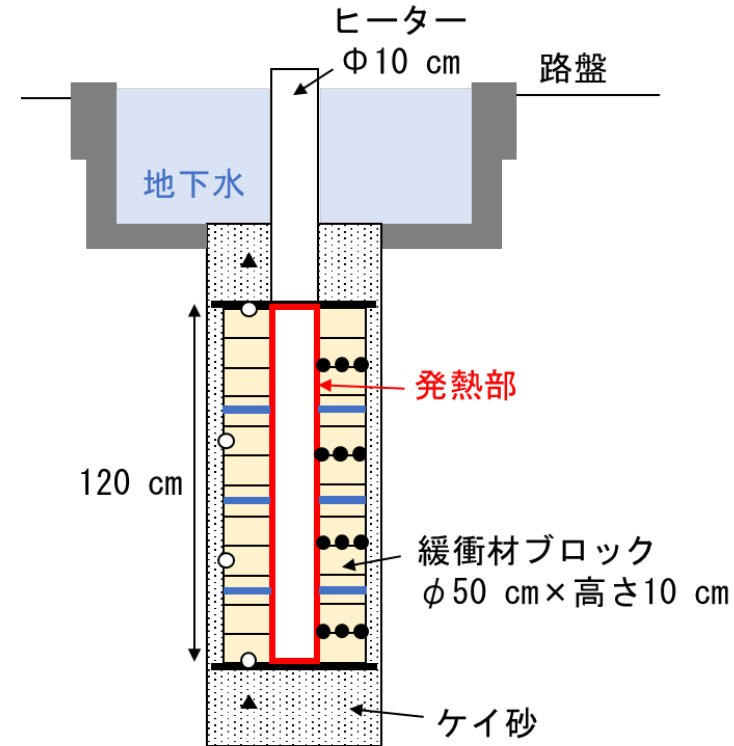
2.2 高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【第4期中長期計画 目的】

人工バリア中の緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で、人工バリアおよびその周辺岩盤領域(ニアフィールド)において発生しうる現象を整理し、人工バリア性能に関する試験データの整備および解析手法の開発を行い、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示

【令和6年度の計画】

- 高温条件下での原位置試験(350m試験坑道5)の継続(孔内の温度や水分分布などのモニタリング)
- ひと組の試験系の解体、100℃を超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認する試験・分析の実施
- 緩衝材に浸潤させる水の組成などの条件を変えた室内試験の実施



- 熱電対 (温度)
- ▲ 間隙水圧計 (水圧)
- 土圧計 (全応力)
- 比抵抗測定電極 (比抵抗→水分分布)

センサーの配置(断面図)

2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

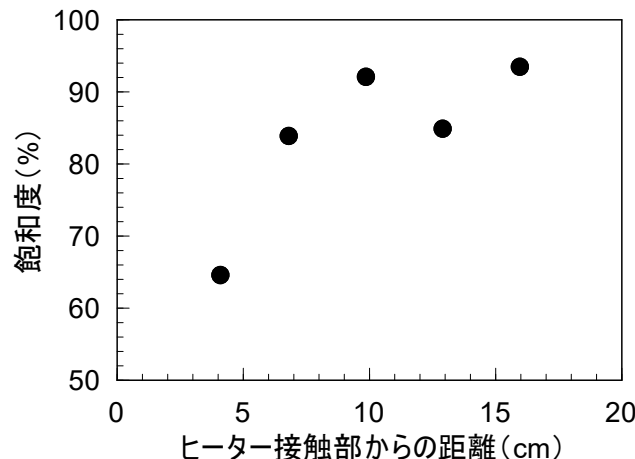
【成果取りまとめ】

- 加熱にともない生じる現象(緩衝材のヒーター接触部でのひび割れ等)や緩衝材特性の変化を、原位置試験の解体調査の結果をもとに整理
- 原位置試験で計測された温度変化の再現解析から、緩衝材の温度分布に影響する事象を整理
- 加熱による緩衝材のひび割れ・水の浸潤による閉塞挙動に関する室内試験結果の整理



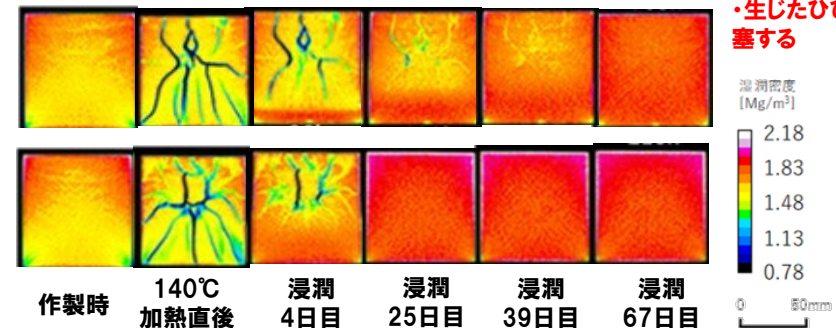
- ・上から2～12段目のヒーター接触部から外側に、最大10 cm程度まで、緩衝材の色調の変化を確認
- ・上から3～12段目のヒーター接触部で、緩衝材のひび割れを確認

緩衝材内部の色調の変化(左)、
ヒーター接触部に認められた
緩衝材のひび割れ(右)



・緩衝材の色調変化と整合的

緩衝材中の
飽和度の分析結果



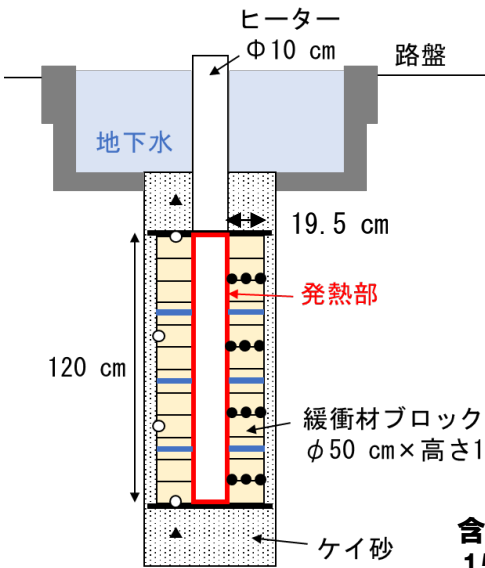
- ・ひび割れが優先的な水みちとなるような浸潤挙動は確認されない
- ・生じたひび割れは塩水でも閉塞する

緩衝材試料の湿潤に関する室内試験の結果
蒸留水(上)、塩水(下)

2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【原位置試験】

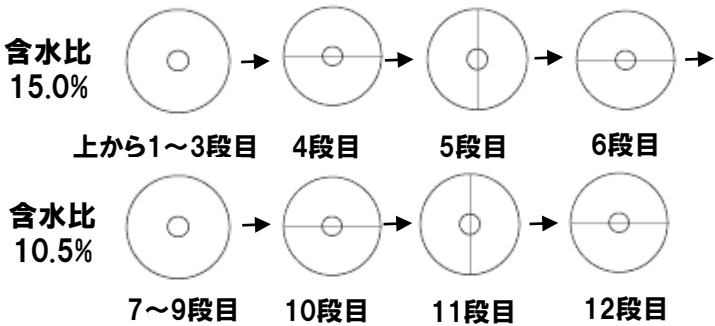
- 令和6年1月に試験体を定置し加熱を開始
- 令和6年9月に加熱を停止し、一組の試験体を解体



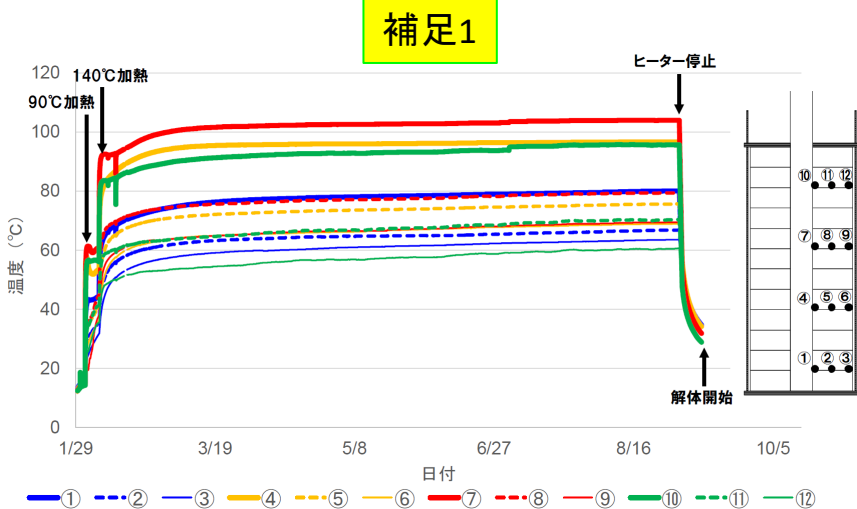
初期含水比10.5%(左)および15.0%(右)で作製した緩衝材ブロック

- 熱電対 (温度)
- ▲ 間隙水圧計 (水圧)
- 土圧計 (全応力)
- 比抵抗測定電極 (比抵抗→水分分布)

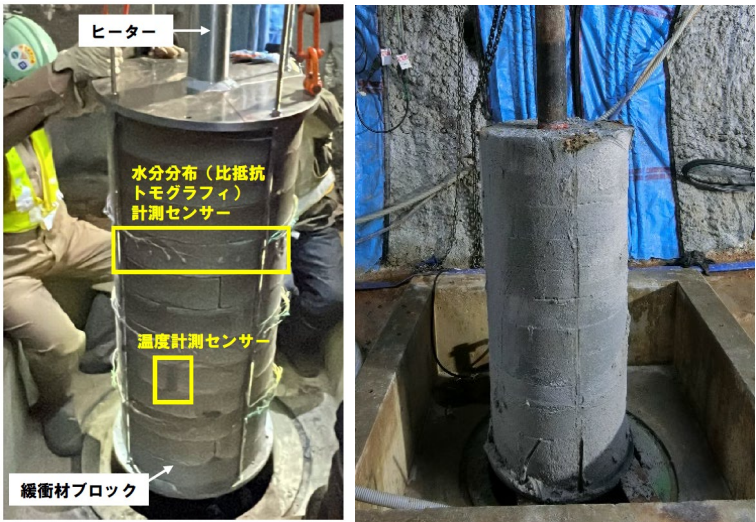
センサー設置概略図



緩衝材ブロックの積み上げ順



原位置試験の温度モニタリング結果



設置時(左)および解体時(右)の試験体

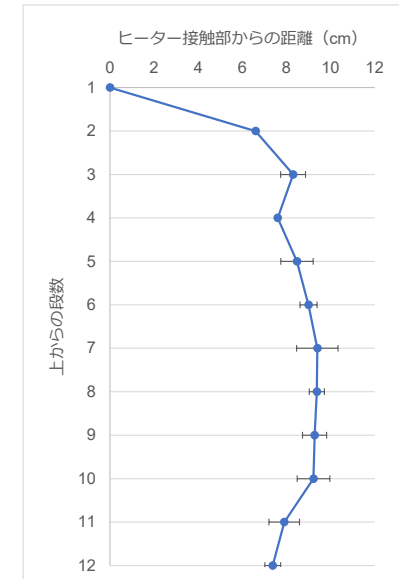
2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【解体調査】

- 現場での解体調査から、加熱にともない試験体に生じる現象を整理

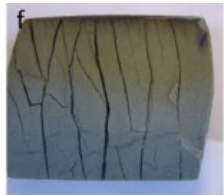


・上から3～12段目の
ヒーター接触部で、緩衝
材のひび割れを確認



ヒーター接触部に認められた緩衝材のひび割れ

緩衝材内部の色調の変化(左)、色調変化の範囲の計測結果(右)



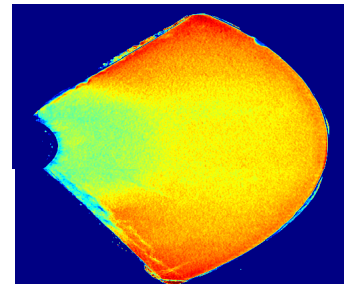
ABM2, 120℃(Wersin et al., 2021)



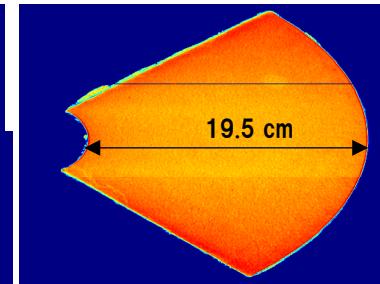
Lab exp., 90～110℃ (Pusch, 2000)



釜石, 100℃ (炭山, 1999)



上から6段目(約105℃)



初期作製試料(含水比15.0%)

補足2

X線CT分析による
緩衝材ブロックの
水分分布の定性分析

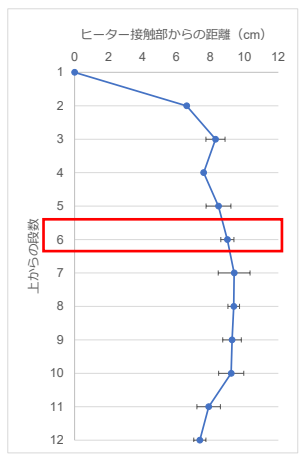
国内外で確認されている同様のひび割れ

- ヒーター接触部で、加熱に起因すると考えられる緩衝材のひび割れを確認
- 加熱にともなう水分移動に起因すると考えられる、緩衝材内側の水分分布の変化を確認

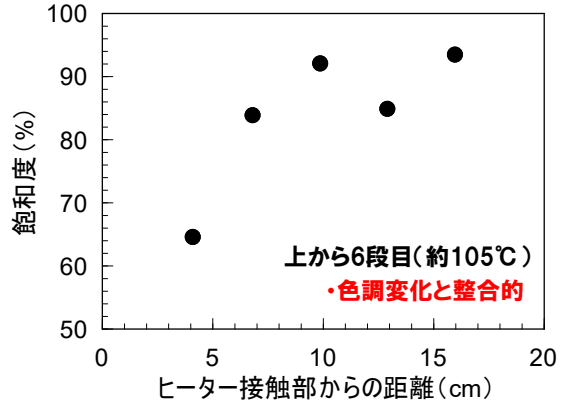
2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【緩衝材ブロックの物性・化学分析】

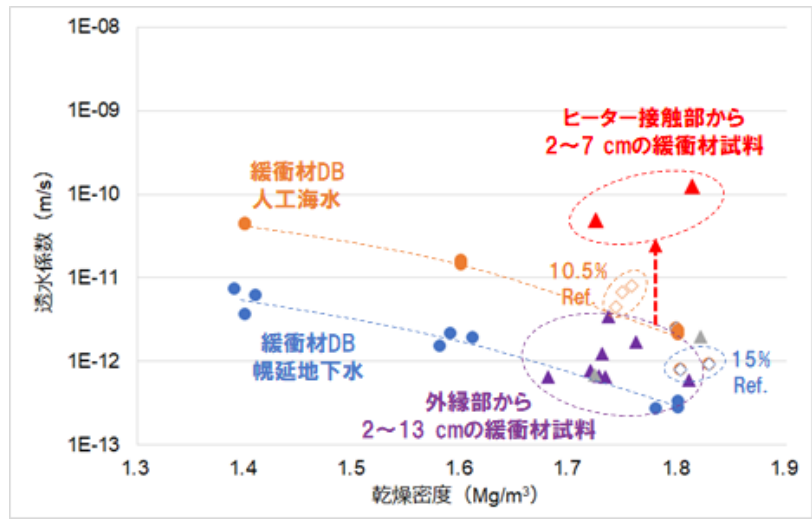
- 解体調査で採取した緩衝材ブロックの試験・分析により、加熱にともない生じる緩衝材ブロックの特性・化学状態等の変化を調査



色調変化の範囲の計測結果(再掲)

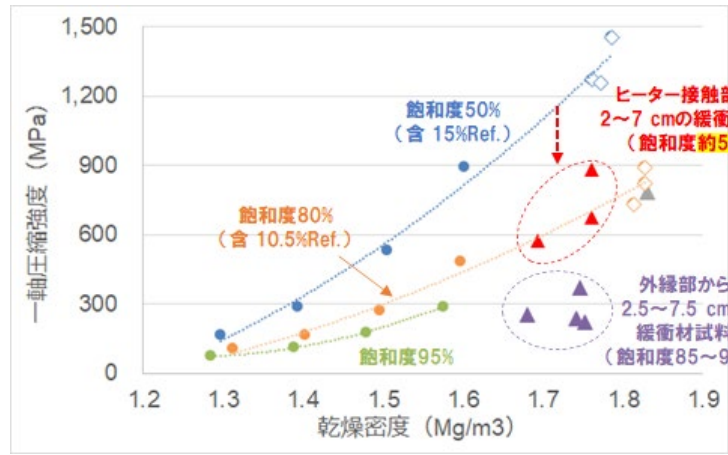


緩衝材中の飽和度の分析結果



緩衝材の透水係数と乾燥密度の関係

・ヒーター接触部付近の一部緩衝材の透水係数は、referenceや外縁部の試料より高い



・ヒーター接触部付近の緩衝材の一軸圧縮強度は、同程度の飽和度におけるreference曲線より低い

緩衝材の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

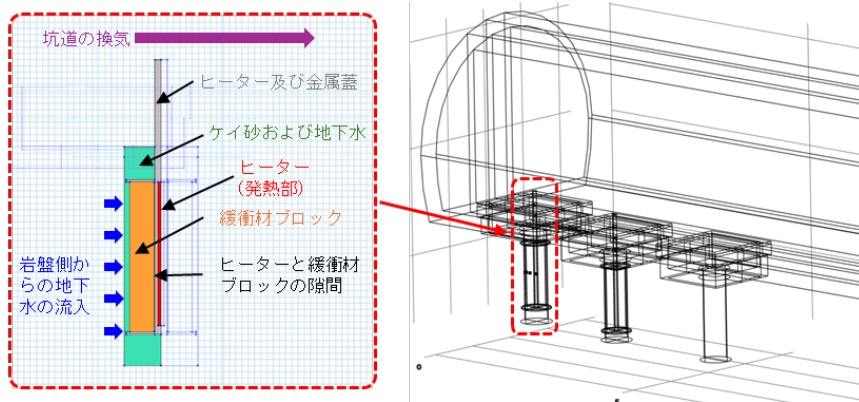
- ヒーター接触部付近の緩衝材において、一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向を確認
- 鉍物組成については、温度履歴の有無・程度による有意な差は確認されず

補足3

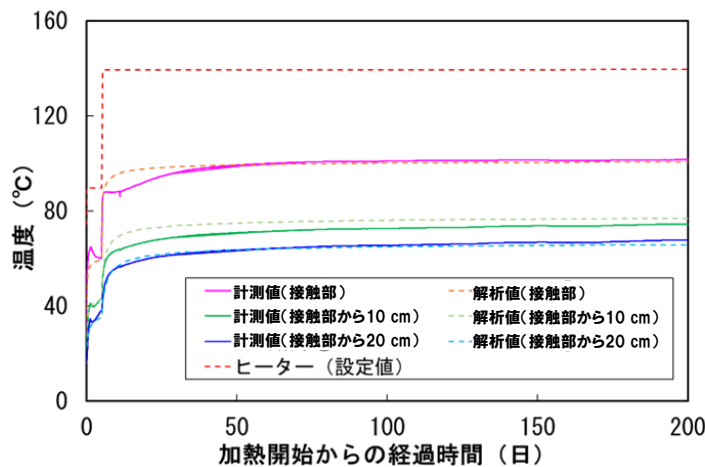
2.2 高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【温度変化の再現解析／室内試験】

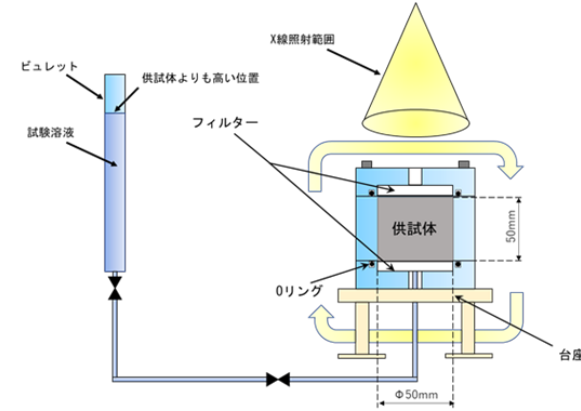
- 原位置試験で計測された温度変化の再現解析から、緩衝材の温度分布に影響する事象を整理
- 加熱による緩衝材のひび割れ・水の浸潤による閉塞挙動に関する室内試験結果の整理



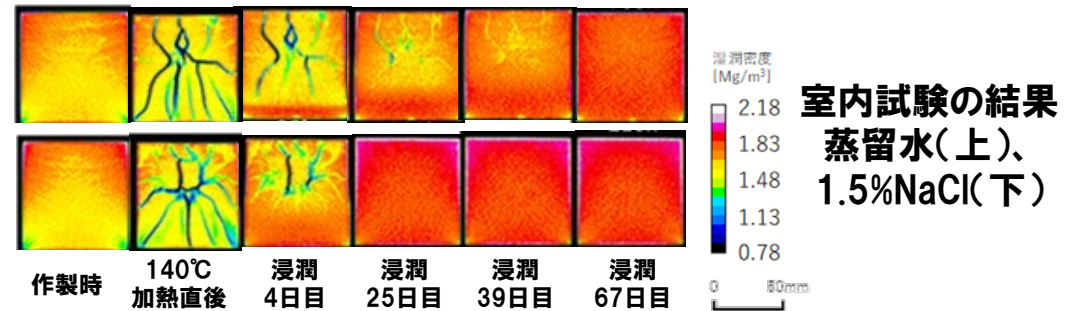
試験体周辺および試験坑道5の再現解析モデル



熱電対による温度の計測結果と再現解析の一例



緩衝材試料のひび割れ・
湿潤に関する室内試験
方法の概念図

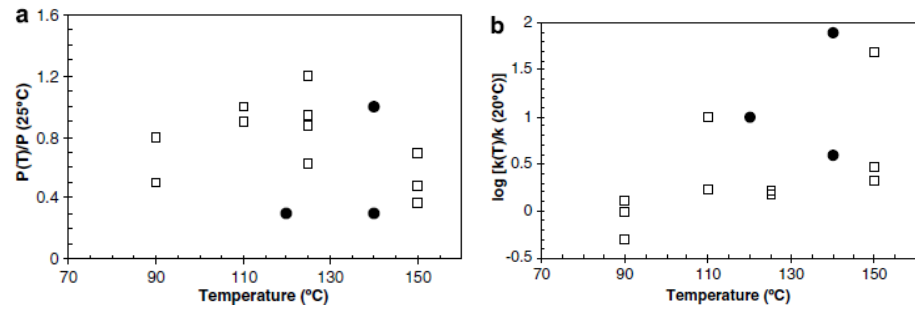


- 原位置試験で計測された温度変化を解析により再現し、温度分布に影響を与える要因を整理
- 加熱により生じたひび割れは優先的な水みちとならず、塩濃度の異なる複数の水の浸潤により閉塞されることを室内試験により確認

2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【上限温度の考え方】

- 国内外の知見や机上検討、幌延の原位置試験で観測された事象等をふまえ、上限温度設定の考え方を整理

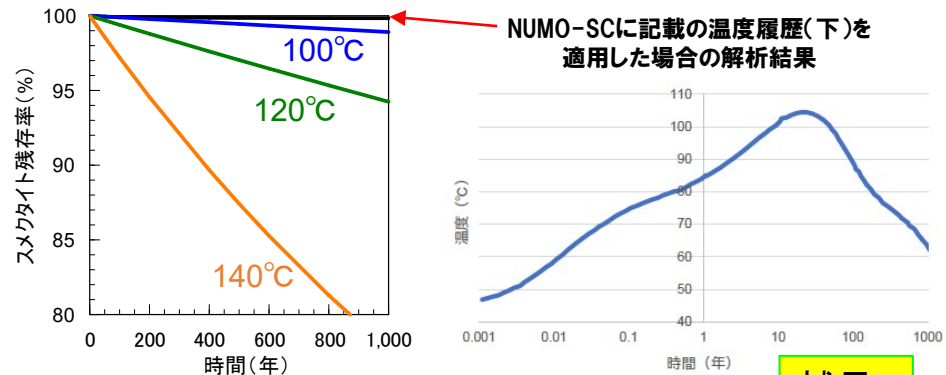


ベントナイトの、温度-膨潤圧(左)および温度-透水係数(右)の関係(Wersin et al., 2007)

temperatures lower than this (especially for pelletized materials). The evaluation of existing information for temperatures up to about 150 °C indicates no significant changes in safety-relevant properties (AMEC 2014, Hicks et al. 2009, Johnson et al. 2014, Leupin et al. 2014, Wilson & Bond 2016). A small number of large-scale in-situ heater tests at these higher

既往文献の記載(Kober et al., 2017)

温度とベントナイトの特性等の関係に係る知見

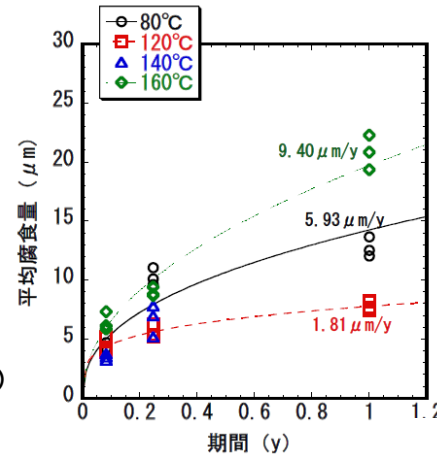


NUMO-SCに記載の温度履歴(下)を適用した場合の解析結果

$$-\frac{ds}{dt} = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot [K^+] \cdot S^2$$

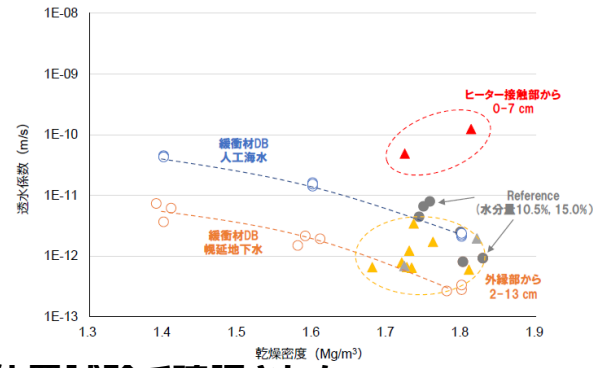
長期的な緩衝材変質(イライト化)に関する机上検討例

補足4



- ・140℃までに比べて160℃で腐食量増加
- ・局部腐食の要因となる不動態化も、140℃より高温でその兆候を確認(JAEA, 2012)

温度と炭素鋼の腐食挙動の関係 (JAEA, 2012)



幌延の原位置試験で確認された緩衝材のひび割れ(左)と透水係数の上昇(右)

- 緩衝材の変質に関する国内外の知見や検討に加えて、他の人工バリア材料への高温影響も考慮
- 原位置試験で観察された緩衝材の特性変化と、その後の再冠水過程での変遷を考慮

2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験に係る成果

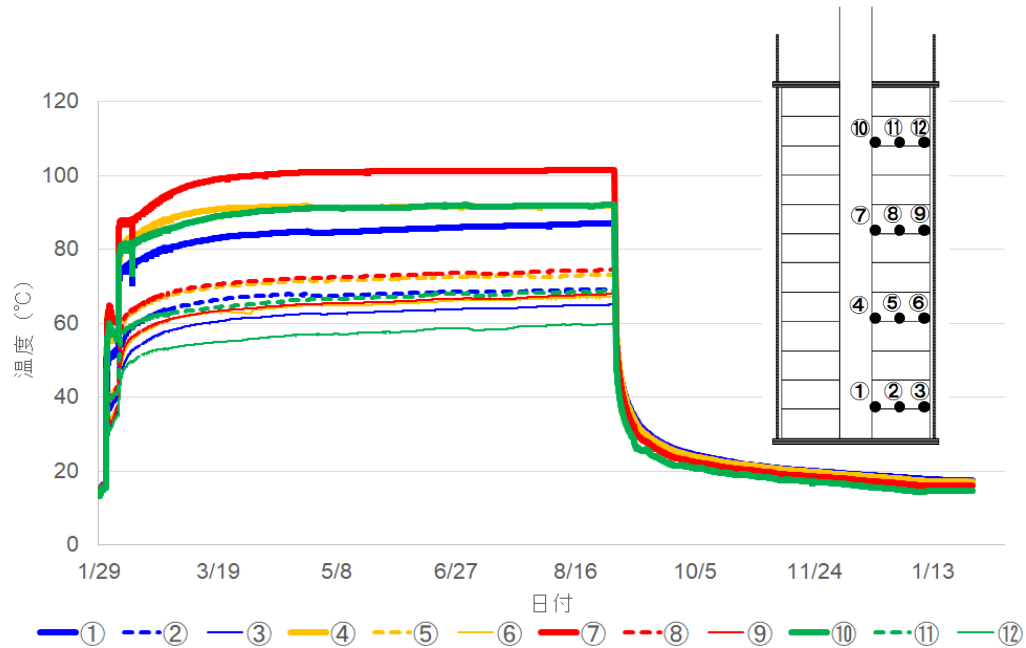
日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所
(2024): 令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業
[JPJ007597] 地層処分安全評価確証技術開発 ニアフィールド長期環境変遷評価技術
開発 報告書.
望月陽人, 佐藤稔紀, 和田純一: 高温条件下での稚内層計質泥岩の一軸圧縮試験, JAEA-
Research 2024-003, 2024, 86p.

文献リスト

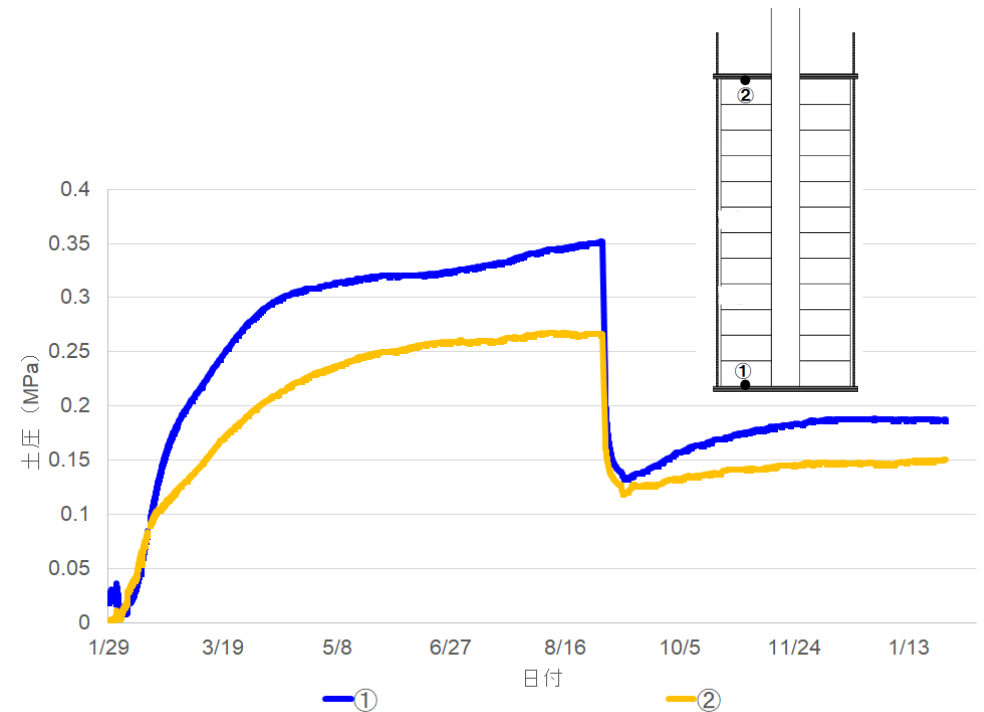
- Kober, F., Vomvoris, S., Finsterle, S. (2017) : HotBENT: Preliminary design study – overview of results, Arbeitsbericht NAB 17-29, 55p.
- 日本原子力研究開発機構 (2012) : 平成23 年度 地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書.
- Pusch, R. (2000) : On the effect of hot water vapor on MX-80 clay, SKB Technical Report TR-00-16, 41p.
- 炭山守男 (1999) : 土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究 (XI), JNC TJ8400 99-042, 203p.
- Wersin, P., Hadi, J., Jenni, A., Svensson, D., Greneche, J., Sellin, P., Leupin, O.X. (2021) : Interaction of Corroding Iron with Eight Bentonites in the Alternative Buffer Materials Field Experiment (ABM2), Minerals, 11, p.907.
- Wersin, P., Johnson, L.H., McKinley, I.G. (2007) : Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C: A critical review, Physics and Chemistry of the Earth, 32, pp.780-788.

補足1

【補足資料：原位置試験のモニタリング】



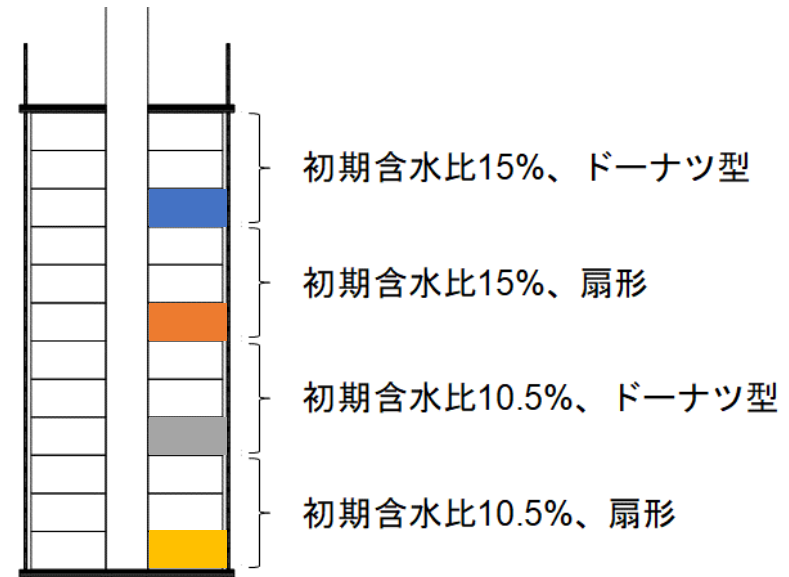
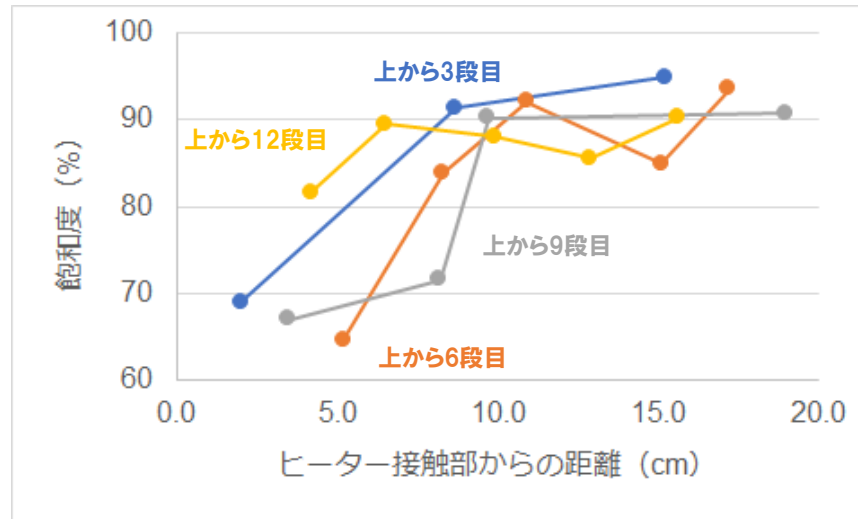
原位置試験の温度モニタリング結果(継続孔)



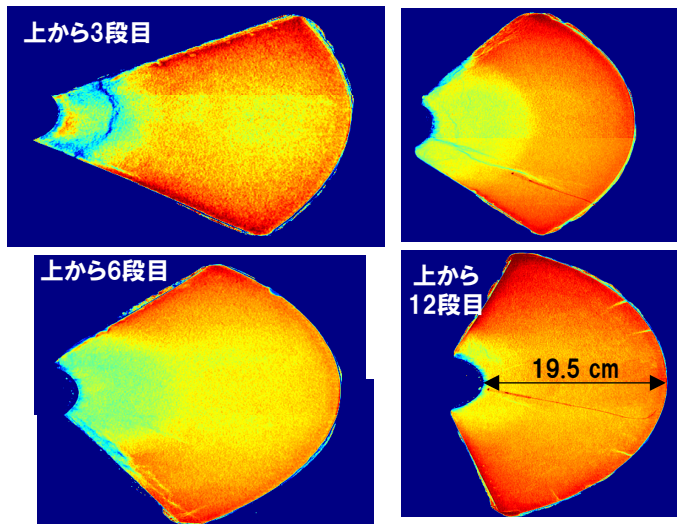
原位置試験の土圧モニタリング結果(継続孔)

補足2

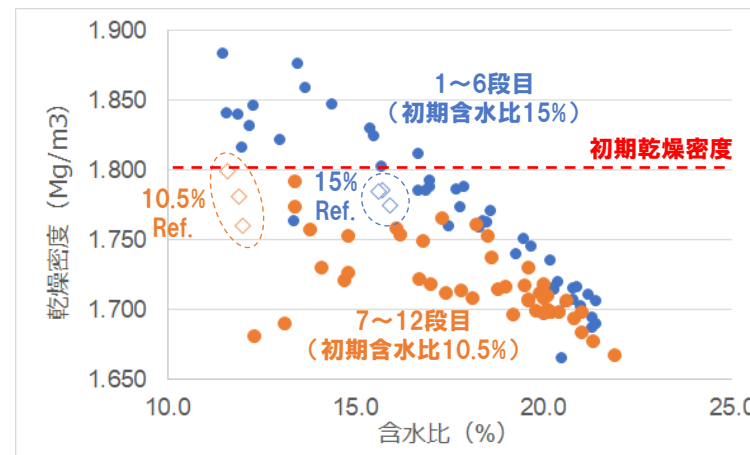
【補足資料:水分量】



複数段の緩衝材中の飽和度分布



複数段の
緩衝材の
X線CT測定

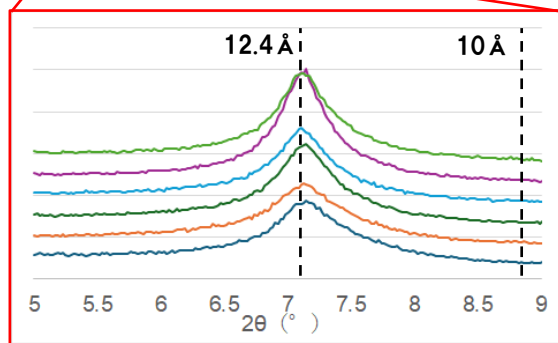
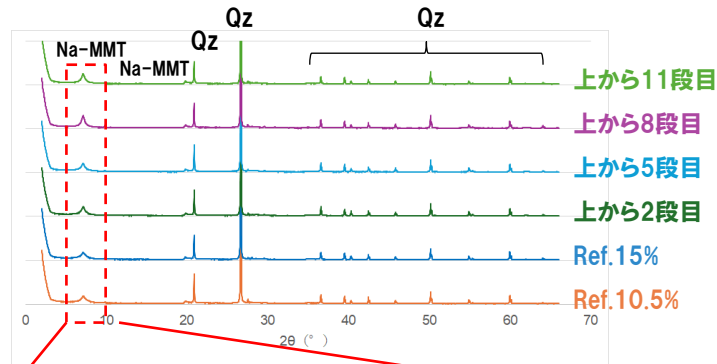


乾燥密度と含水比の関係

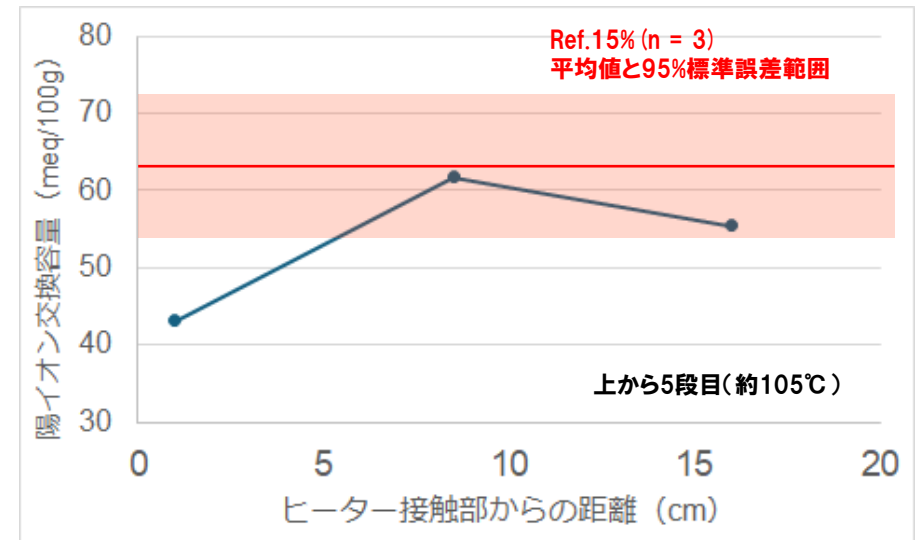
- 水分移動による外側の膨潤と内側の圧縮
- 1~6段目の方が傾きが急、一部乾燥密度が初期値を超える
- 初期含水比の違い？

補足3

【補足資料：鉱物・化学分析】



XRDパターン
(不定方位)



陽イオン交換容量の測定結果

- ヒーター接触部から0-3 cmで採取した試料はNa-モンモリロナイトのピーク(12.4 Å)を示し、イライトのピーク(10 Å)は認められない
- Cu (II) -トリエチレンテトラミン抽出により測定したCECは、ヒーター接触部付近の値がより遠方やReferenceと比べて低い (ABM試験は整合的、LOT試験とは逆傾向)

補足4-1

【補足資料：イライト化に関する解析条件】

解析条件

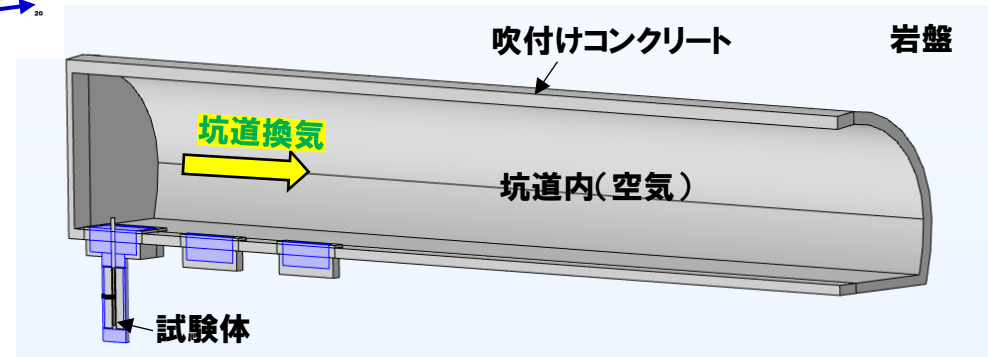
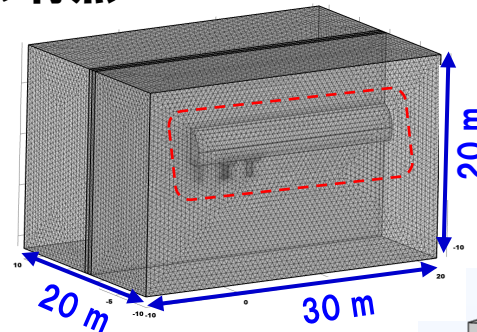
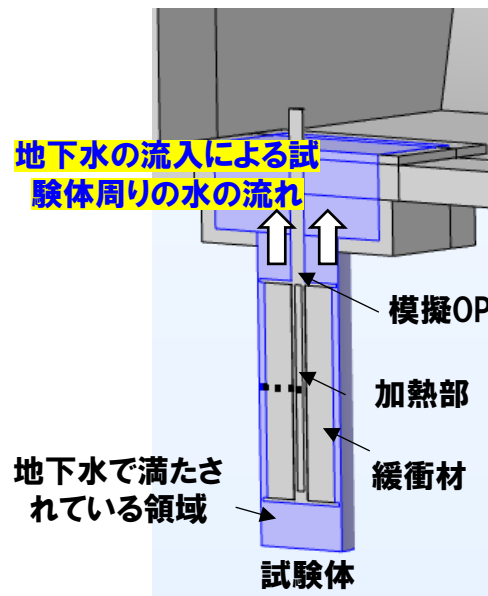
- 解析領域: 20m × 30m × 20m
- 境界条件: 23℃ (周辺岩盤の地温相当)
- 模擬OPの加熱温度: 140℃

検討した解析ケース

- 模擬OPと緩衝材ブロックの隙間の大きさ
- 坑道換気の有無
- 岩盤からの地下水の流入の有無

解析に使用した熱パラメータ

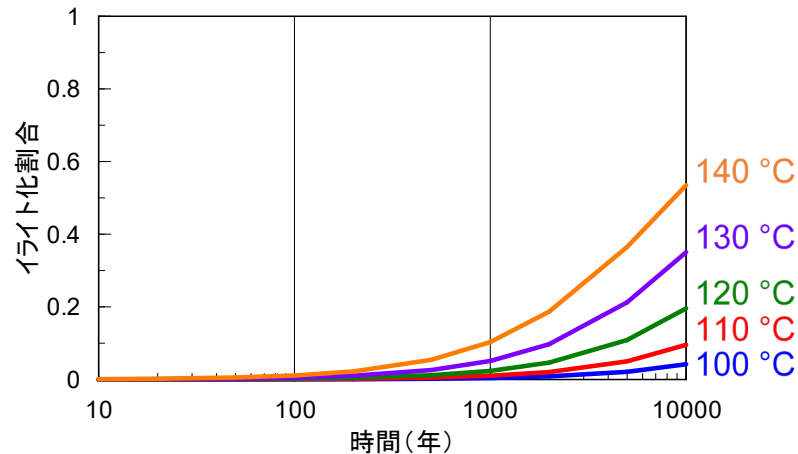
	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)	密度 (Kg/m ³)
岩盤	1.33	1560	1700
コンクリート	2.6	1050	2100
緩衝材	1.94	1378	1600
模擬OP	51.9	469	7860
空気	COMSOLの材料データライブラリを使用(温度の関数)		
水			



試験体周辺および試験坑道5の再現解析モデル

補足4-2

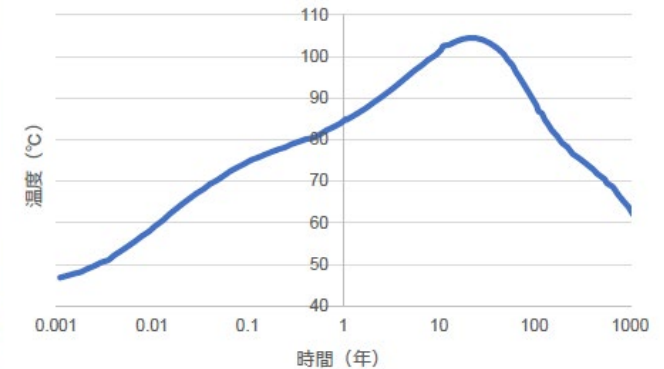
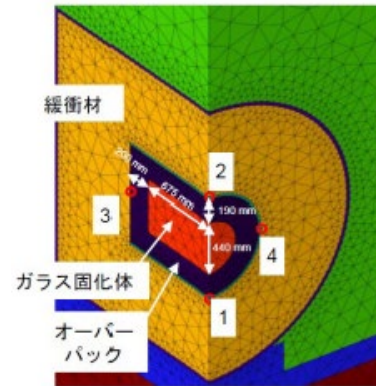
【補足資料：イライト化に関する解析条件】



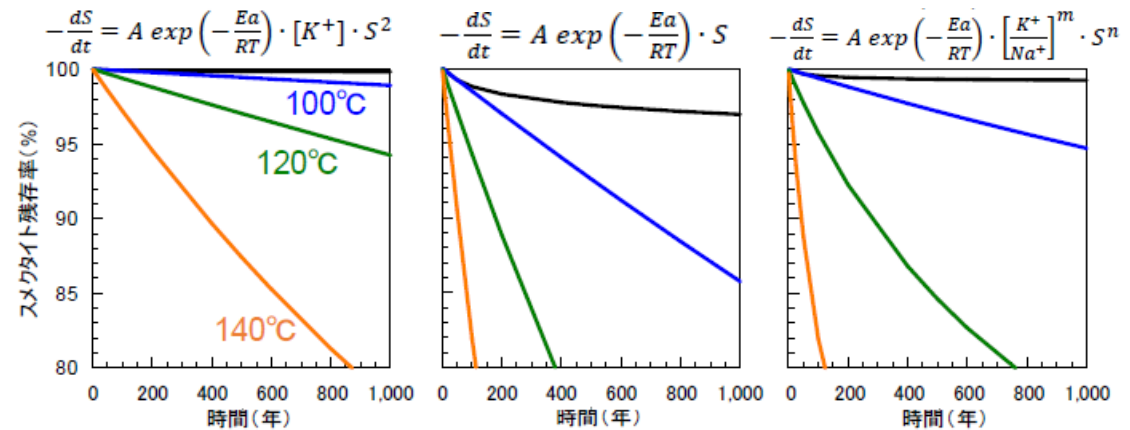
温度一定を仮定した場合のイライト化割合の解析結果

・計算式: $-\frac{dS}{dt} = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \cdot [K^+] \cdot S^2$

S: スメクタイト残存率、A: 頻度係数、Ea: 活性化エネルギー、
R: 気体定数、T: 温度、 $[K^+]$: 幌延地下水中の K^+ 濃度



NUMO-SCで検討されている温度履歴の一例
(深成岩・横置き; 「3」の点における温度)



温度履歴(一定／変化)および反応速度式の影響の比較
(黒線: NUMO-SC、色線: 各温度一定)

m, n: 定数、 $[Na^+]$: 幌延地下水中の Na^+ 濃度