

第5章 HMC 連成解析手法の検討

ここでは、多様な条件での人工バリアの長期挙動を評価し、設計、施工方法と長期挙動との関連について評価するための 2 次元の HMC 連成解析手法を検討する。

平成 26 年度までに、化学解析に関しては、平成 24 年度までの課題として挙げた、解析体系の 2 次元化を行った(地球化学・物質移動連成解析コード PHREEQC-TRANS[1])。力学解析に関しては、これまで構成モデルが化学変質による固相量や鉱物種の変化による体積変化が質量保存則により考慮できなかった点について改良し、2 次元 FEM 化した(土/水連成有限要素プログラム DACSAR-BA[2])。これにより化学解析との連成が可能となった[3][4]。

平成 27 年度は、化学解析手法について、これまでの検討で得られた課題のケーススタディによる検討及び長期試験の現解析を行い、今後の信頼性を向上に資する検討を行った(5.1 項)。加えて、HMC 解析手法に関して、解析の初期条件に施工条件の影響を考慮する手法とその長期的な影響についてケーススタディによる検討を行った(5.2 項)。

5.1 HMC 連成解析に関わる化学解析手法に関する検討

ここでは、化学解析手法に関する信頼性や高度化に資することを目的として検討を行った。

5.1.1 節では、平成 26 年度に挙げられた課題について、影響が考えられる条件を変えて解析した結果を比較検討することにより HMC 連成解析における化学解析の条件に付いて検討した。5.1.2 節では、第 3 章の化学・力学連成モデル試験を模擬した化学解析を実施して、分析結果と比較検討することにより、長期挙動解析の改善等に資する情報を得た。

5.1.1 力学－化学連成解析に向けた二次元地球化学解析

(1) 検討概要

平成 26 年度の力学－化学連成解析検討で挙げられた、地球化学解析に関する懸念事項とそれに関する平成 27 年度の検討内容を以下に示す。

- ・ モンモリロナイトの沈殿傾向がみられたが、モンモリロナイトが再沈殿しない条件での解析ではどのような解析結果になるのか、把握する必要がある。また、モンモリロナイトは過飽和になれば速やかに沈殿するのか。その場合、力学的にどのように考慮すべきか、といった検討が必要である。

これまでの解析的検討において、モンモリロナイトの溶解速度を Sato-Cama 式とした処分場環境の地化学解析では、モンモリロナイトの沈殿が顕著となる場合は殆どなく、平成 18 年度の検討においても、殆ど影響がないとしている。そこで、モンモリロナイトの沈殿傾向は、力学解析とのデータ受渡による影響である可能性が考えられる。妥当と考えられる結果が得られるようなデータの受け渡し条件について再考する。

- ・ モンモリロナイトの Ca 型化割合についても、計算結果（経時変化）に振動傾向があり、実際にそのような反応になるのか、計算条件も含めて検討が必要である。

平成 26 年度の解析結果のモンモリロナイトの沈澱傾向が、モンモリロナイトの Ca 型化の変遷に影響しているのか、検討する。

- ・ データを受け渡し時の計算条件等を精査する。

上記のような懸念事項は、力学解析と地化学解析とのデータ受け渡しによる影響である可能性が考えられるためデータ受け渡しの方法について検討する。力学解析プログラムと地化学解析プログラムとでは、物質収支の考え方が異なり、データを受け渡すことで質量保存則が成り立たない可能性があり、この誤差をできるだけ少なくなるようにすべきである。

これらの懸念事項に対する検討事項を踏まえた地球化学解析を実施した。具体的には、モンモリロナイトが再沈殿しない場合での解析を行い、モンモリロナイト再沈殿する場合との影響を、化学解析において把握した。また、モンモリロナイトの Ca 型化割合の傾向について、モンモリロナイトが再沈殿しない条件での化学解析において、計算入力条件の確認を行った。

次に、化学-力学連成解析において連成させるデータについては、次のように考えることとした。力学解析結果から地化学変質解析への反映は、空隙率分布とする。このとき、地化学解析における力学解析データ反映前後での空隙率変化による固相量については保存されないこととなる。力学解析と化学解析における、空隙水量と固相量についての考え方を図 5.1.1-1 に示す。力学解析結果（間隙比結果）を化学解析に反映する方法（固相濃度の与え方）について図 5.1.1-2 に示す。このとき、間隙比（ e ）と空隙率（ ϵ ）の関係は次式で示される。

$$\frac{V_{\text{eps}}}{V_{\text{all}}} = \epsilon = \frac{e}{1 + e}$$

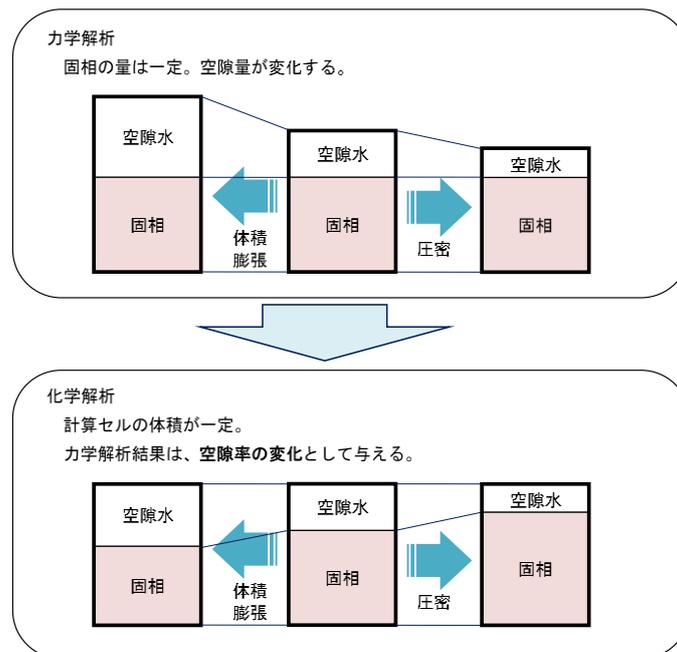


図 5.1.1-1 力学解析と地化学解析における緩衝材の固相と間隙の取り扱い

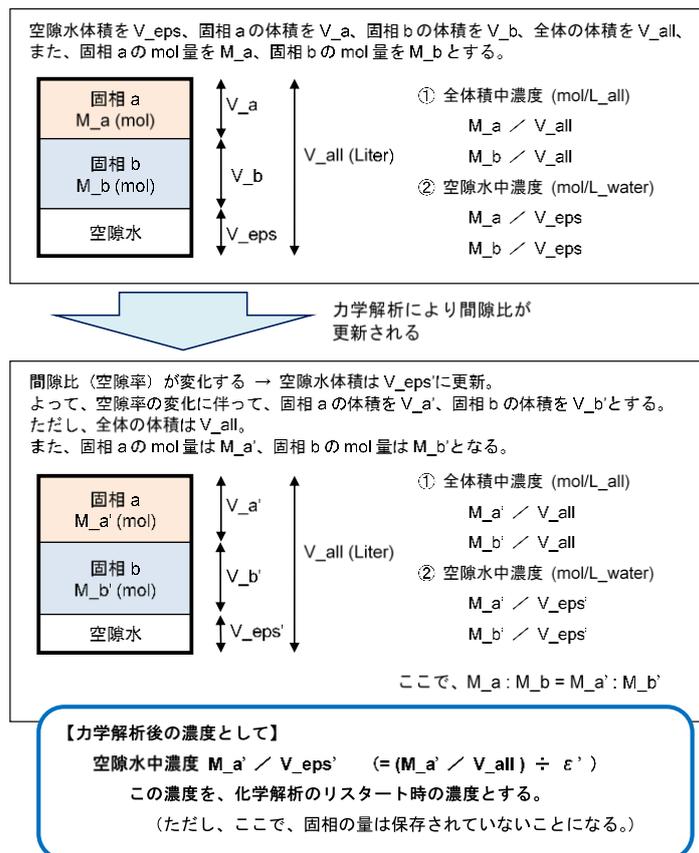


図 5.1.1-2 地化学解析において考慮している濃度単位

(2) 二次元地化学解析の条件

上記(1)の懸念事項について、地化学解析を行い検討した。計算ケースを、表 5.1.1-1 に示す。

モンモリロナイトの Ca 型化割合の経時変化に振動傾向があるため、この点について計算上の陽イオン交換の取扱について検討を行った。計算上の取扱において、固相の溶解・沈澱反応と陽イオン交換反応は別ものとして計算している。ここでは、固相反応の 4 種のモンモリロナイトの構成比を陽イオン交換の結果から得られる陽イオン交換サイトの構成比と同一にする作業を追加した。また、固相反応は 1 種類のモンモリロナイト (Na-Mont) とし、陽イオン交換のみ 4 種類を考慮した計算ケースも設定した。なお、解析に使用するプログラム PHREEQC-TRANS は PHREEQC を内包し、化学解析には PHREEQC を使用する。PHREEQC では、固相の溶解/沈澱反応と陽イオン交換反応は別の反応として計算する。そのため、モンモリロナイトについては、モンモリロナイト固相そのものの溶解と陽イオン交換による Na 等の放出を重複して液相の濃度へ反映してしまう可能性がある。そこで、この重複の影響を最小限にするため、モンモリロナイトの固相としての溶解反応は Na-Mont で代表させるとした。

また、モンモリロナイトの再沈殿をさせない場合についても考慮した。

なお、ケース 4 は、ケース 3 からベントナイトに関する二次鉱物セットを変更した計算ケースである。平成 20 年度に二次鉱物の組み合わせ及び沈澱速度についての検討を行い、ヒューラ

ンダイトの沈澱がモンモリロナイトの溶解に影響する（モンモリロナイトの溶解が促進される）ことを把握している[5]。また、短期間の試験ではヒューランダイトは同定されないことが示されており、一方で実際のナチュラルアナログ情報等ではヒューランダイトの生成が示唆される。そのため、長期的な変質解析にはヒューランダイトの沈澱挙動が重要な要素であると考えられる。ここで考慮した二次鉱物は、JAEAの検討[6]において考慮している鉱物セットである。ただし、このJAEAの検討は熱力学データベースを更新しており、また、全ての固相について反応速度を与えている。本検討では、モンモリロナイト以外の固相は瞬時平衡とし、熱力学データベースは第2次TRUレポート[7]で使用された鉱物の熱力学データはJNC-TDB.TRU[8]を基本とし、C-S-Hゲルの熱力学データとしてA. Atkinson[9]によるデータを使用した。

表 5.1.1-1 計算ケース

ケース	計算上の取扱い			備考
	固相中 モンモリロナイト (溶解・沈澱計算)		陽イオン交換サイト (イオン交換反応選択係 数による計算)	
0	Na-Mont、Ca-Mont、K-Mont、Mg-Mont	モンモリロナイト 再沈澱あり	NaZ、CaZ2、 KZ、MgZ2	昨年度の計算条件
1	Na-Mont、Ca-Mont、K-Mont、Mg-Mont	モンモリロナイト 再沈澱あり	NaZ、CaZ2、 KZ、MgZ2	固相中モンモリロナイトの構成比を陽イオン交換結果から再計算
2	Na-Mont、Ca-Mont、K-Mont、Mg-Mont	モンモリロナイト 再沈澱なし	NaZ、CaZ2、 KZ、MgZ2	固相中モンモリロナイトの構成比を陽イオン交換結果から再計算
3	Na-Mont	モンモリロナイト 再沈澱なし	NaZ、CaZ2、 KZ、MgZ2	固相中モンモリロナイトの反応はNa-Montのみ考慮
4	Na-Mont	モンモリロナイト 再沈澱なし 二次鉱物変更 (表 5.1.1-11)	NaZ、CaZ2、 KZ、MgZ2	固相中モンモリロナイトの反応はNa-Montのみ考慮

1) 計算体系

処分施設はTRU廃棄物グループ2[7]を想定した円形断面とする。解析体系概念図を図5.1.1-3に示す。処分施設周辺の岩盤領域としておよそ3mとした。岩盤の上流側・下流側境界は地下水濃度固定・水頭固定境界とした。ここでは、坑道の外周に用いられるであろう支保工については1次元に比較して解析メッシュが粗いため表現が難しい為、また、坑道体積

に比較して支保工のセメント量は少なく、また処分施設内が拡散場であるとき、解析上、支保工に含まれるアルカリ成分は施設内ではなく岩盤側へ流出する割合が大きい為、モデルから省いた。

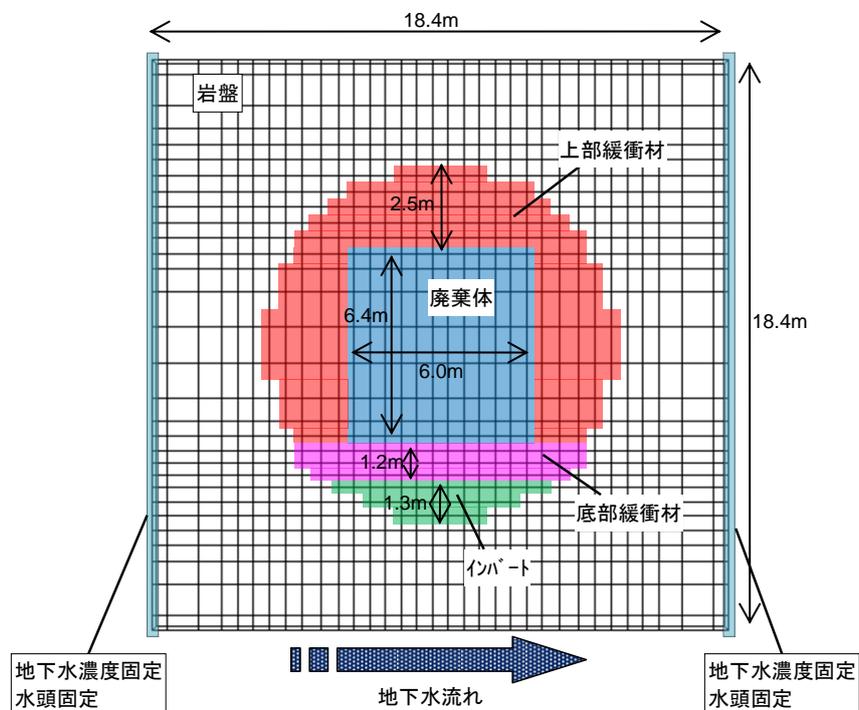


図 5.1.1-3 2次元解析体系概念図

2) パラメータ

計算に使用するパラメータについては、従来の地化学解析との比較を行う上で処分場体系のリファレンスと考えられる第2次 TRU レポート[7]において使用されているパラメータを参照した。

なお、各人工バリア材の拡散係数及び透水係数は次の式 (TRU2 レポート) に従う (セメント系材料について、ひび割れなしケース)。

セメント系材料の拡散係数

$$D_e = D^* \varepsilon^{3.05}$$

D^* : 自由水中の拡散係数

ε : 空隙率

セメント系材料の透水係数

$$K = 4.34 \times 10^{-9} \varepsilon^3 (1 - \varepsilon)^2$$

ε : 空隙率

ベントナイト系材料の拡散係数

$$De=2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^n$$

$$n=2.02f_b^{0.13}+1$$

$$n=2.22f_s^{0.13}+1$$

f_b : ベントナイト混合割合

f_s : モンモリロナイト含有割合

ε : 間隙割合

ベントナイト系材料の透水係数

$$K=10^{1.30C_i} \text{esme}^{3.48C_i} K_0$$

ただし $C_i \leq 10^{1.49ESP-1.0}$

$$K \leq 10^{1.63\text{esme}-0.24K_0} \text{かつ } K \leq 10^{-5}$$

$$K_0=(0.91-1.57ESP+2.00ESP^2) \times 10^{-13} \times \text{esme}^{7.44-5.69ESP} \quad : \text{esme} \leq 7.0$$

$$K_0=(0.91-1.57ESP+2.00ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44-5.69ESP} (\text{esme}/7.0)^{11.4} \quad : 7.0 < \text{esme}$$

ただし $K_0 |_{ESP=1} \leq K_0 \leq 10^{-5}$

C_i : 間隙水の当量イオン濃度

ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合

esme : スメクタイト間隙比

ここで、反応を考慮する固相のうちベントナイトに含まれるモンモリロナイトについては次の式に従い溶解速度を考慮した。

$$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-3957/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{2037/RT} \cdot a_{OH^-}}{1+177 \cdot e^{2037/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{-69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{2353/RT} \cdot a_{OH^-}}{1+0.0297 \cdot e^{2353/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6\right) \right\}$$

$Rate$: モンモリロナイト溶解速度 [mol/s]

A_{min} : 鉱物の反応表面積 [m²]

R : 気体定数 [kJ/K mol]

T : 絶対温度 [K]

a_{OH^-} : 水酸化物イオンの活量

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化 [kJ/mol]

表 5.1.1-2 から表 5.1.1-11 に、解析に用いたパラメータを示す。表 5.1.1-11 は、解析ケース 4 において用いた二次鉱物設定[6]である。

表 5.1.1-2 地下水組成

	組成(mol/l)
	FRHP 降水系高 pH 型地下水
pH	8.5
pe	-4.8
Na	3.6E-3
Ca	1.1E-4
K	6.2E-5
Mg	5.0E-5
Fe	9.7E-10
Al	3.4E-7
C	3.5E-3
S	1.1E-4
B	2.9E-4
P	2.9E-6
F	5.4E-5
N	2.3E-5
Cl	1.5E-5
Si	3.4E-4
Br	—
I	—

表 5.1.1-3 解析に用いた地下水の組成

	組成(mol/l)
	FRHP 降水系高 pH 型地下水
pH	8.5
Na *	3.4E-3
Ca	1.1E-4
K	6.2E-5
Mg	5.0E-5
Al	3.4E-7
C	3.5E-3
S	1.1E-4
Cl	1.5E-5
Si	3.4E-4

*電荷バランスを調整

表 5.1.1-4 セメントの化学組成

化学組成 wt%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
OPC	21.5	5.2	2.9	64	1.5	2	0.3	0.5
FA	47	14	0	7	0	0	0	0

表 5.1.1-5 セメント系材料の仕様

	間隙率 (-)	W/C (%)	単位 セメント量 (kg/m ³)	単位 水量 (kg/m ³)	細・粗骨 材量 (kg/m ³)
インバート コンクリート	0.13	55	300	165	1877
廃棄体 モルタル層	0.19	55	483	266	1449

表 5.1.1-6 緩衝材の仕様

	底部緩衝材	上部緩衝材
有効粘土密度 (Mg/m ³)	1.36	
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.60	1.36
ケイ砂混合率 (%)	30	0

表 5.1.1-7 クニゲル V1 の鉱物組成

鉱物	含有率 (wt%)
モンモリロナイト	48
カルセドニ	38
カルサイト	2.6

表 5.1.1-8 クニゲル V1 の交換性陽イオン組成

交換性陽イオン 組成	meq/100g	イオン交換反応 選択係数	
			logK
NaZ	51.4	2ZNa-Z2Ca	0.69
CaZ2	7.4	ZNa-ZK	0.42
KZ	0.6	2ZNa-Z2Mg	0.67
MgZ2	0.7	ZNa-ZH	1.88

表 5.1.1-9 初期鉍物濃度

初期鉍物 及び二次鉍物	鉍物濃度(mol/L_water)				mol 体積 (L/mol)
	廃棄体 モルタル	インバート コンクリート	底部緩衝材	上部緩衝材	
ポルトランドイト	9.98	9.06	0.0	0.0	0.0332
エトリングイト	0.212	0.192	0.0	0.0	0.726
ブルーサイト	0.946	0.859	0.0	0.0	0.0244
ハイドロガーネット	—	—	—	—	0.150
CSH(1.8)	16.4	14.9	0.0	0.0	0.0445
カルサイト	0.0	0.0	0.727	0.707	0.0369
石英 (QUARTZ)	0.0	0.0	17.7	17.2	0.0227
Na-Mont	—	—	3.13	3.04	0.134
Ca-Mont	—	—	0.451	0.438	0.134
K-Mont	—	—	0.0366	0.0355	0.136
Mg-Mont	—	—	0.0427	0.0414	0.133
Na ₂ O	0.123	0.112	—	—	—
K ₂ O	0.135	0.122	—	—	—
C-S-H ゲル	—	—	—	—	0.0547 (CSH(1.0))
カトアイト	—	—	—	—	0.137
アナルサイム	—	—	—	—	0.0974
ゲーレンナイトハイドレート	—	—	—	—	0.216
グロッシュラー	—	—	—	—	0.129
フリーデル氏塩	—	—	—	—	0.244
C3ASH4	—	—	—	—	0.160
C4AH13	—	—	—	—	0.216
C4AH19	—	—	—	—	0.216

表 5.1.1-10 初期物性値

透水係数 [m/s]	廃棄体	4.5E-11
	上部緩衝材	6.9E-13
	底部緩衝材	6.4E-13
	岩盤	1.0E-8 ~ 1.0E-5
実効拡散係数 [m ² /s]	廃棄体	1.3E-11
	上部緩衝材	2.8E-10
	底部緩衝材	1.6E-10
	岩盤	4.0E-10
空隙率 [-]	廃棄体	0.19
	上部緩衝材	0.50
	底部緩衝材	0.40
	岩盤	0.20

表 5.1.1-11 ケース4において考慮した二次鉱物 [6]

固相名	データベース内での名称	固相名	データベース内での名称
イライト	ILLITE	セピオライト	SEPIOLIT
カリ長石	K-FELDSP	ポルトランダイト	PORTLAN
アナルサイム	ANALCIM1	ブルーサイト	BRUCITE
ローモンタイト	LAUMONTI	ドロマイト	DOLOMITE
C-S-H ゲル	CSH(0.833)~ CSH(1.8)	ヒューランダイト	HEULANDI
C3ASH4	C3ASH4	クリノタイロライト	CLINOP_a
エトリンタイト	ETTRINGI		CLINOP_d
フリーデル氏塩	FRIEDEL_	フィリップサイト	PHILLI_a
ハドロタルサイト	HYDROTAL		PHILLI_d

(3) 計算結果

1) 計算ケース0

ケース0は、平成26年度の解析と同様の計算ケースである。

図5.1.1-4～図5.1.1-7は、それぞれ一次元断面による液相固相分布を、1万年後・10万年後について示した。図5.1.1-4は、施設中心部を通る鉛直方向一次元の結果を示した。左側が処分施設底面、右側が施設上部である。セメント系材料では、材料境界近傍でポルトランダイトの消失があり、10万年後にもC-S-Hは残存し、廃棄体中心部のポルトランダイトも残存した。ベントナイト系材料は、材料境界で石英（QUARTZ）が溶解し、モンモリロナイトは10万年後もほぼ残存する結果となった。石英（QUARTZ）の溶解に伴って、カルサイトが沈殿した。

図5.1.1-5は、施設中心部を通る水平方向一次元の結果である。各材料につき、図5.1.1-4と同様の傾向を示した。

図5.1.1-6は、廃棄体領域の最下端を通る水平方向一次元の結果である。ベントナイト系材料について図5.1.1-4及び図5.1.1-5と同様の傾向を示した。

図5.1.1-7は、底部緩衝材の、廃棄体と接する部分の水平方向一次元の結果である。図5.1.1-4及び図5.1.1-5と同様の傾向を示した。この水平断面にはセメント材料は存在しないが、セメントに近い部分（接している部分）は、石英（QUARTZ）の溶解が早く、また透水係数が大きくなる傾向を示した。石英（QUARTZ）の溶解に従って、二次鉱物としてC-S-Hが生成した。また、10万年後の結果より、廃棄体の角に接する部分は他の部分に比べて空隙率が大きくなった。空隙率が大きくなった部分は、二次鉱物として比較的密度が小さい（比較的小さい）C-S-Hではなくカルサイトが沈殿しており、固相の体積が減少したと考えられる。

セメントに接するベントナイト部の経時変化について、図5.1.1-8、図5.1.1-9、図5.1.1-10に示した。図5.1.1-8は図5.1.1-5に示したA地点（施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイトの廃棄体モルタル層との境界部）、図5.1.1-9は図5.1.1-6に示したB地点（廃棄体モルタルの最下端部の水平断面における下流側ベントナイトの廃棄体モルタルとの境界部）、図5.1.1-10は図5.1.1-7に示したC地点（底部ベントナイト部の廃棄体モルタルとの境界部の水平断面における底部ベントナイト中心部）の結果である。それぞれ、液相組成の経時変化、固相組成（体積割合）の経時変化、物性値（透水係数・拡散係数・空隙率・モンモリロナイトのCa型化割合）の経時変化を示す。これらの結果は、時間の経過に伴ってpHが低下し、石英が溶解して空隙率が徐々に増大した。モンモリロナイト量にはほとんど変化がなく（減少率が大きい点（点C）で、1割程度の減少）、透水係数はCa型化割合の変化によって変動した。点A（図5.1.1-8）と点B（図5.1.1-9）は、二次鉱物としてカルサイトが生成した。一方、点C（図5.1.1-10）は、二次鉱物としてC-S-Hゲルが生成した。点A、点B、点Cすべて、セメントが隣接するベントナイト部であるが、点Cはセメント系材料に挟まれている領域である。点A・点Bは、セメントではない材料境界は岩盤であり、地下水からの炭酸の供給によってカルサイトが生成した。点Cは、地下水の影響が比較的小さい為、

C-S-H が生成したと考えられる。

また、ベントナイト部のモンモリロナイトの Ca 型化の経時的な増減は、セメント系材料におけるポルトランドイトの消失により反応が変化したことによる空隙水組成の急変、及び、モンモリロナイト以外の反応は瞬時平衡であるために、固相が消失して平衡水組成が変わることの体系内の反応への影響によるものと考えられる。図 5.1.1-11、図 5.1.1-12 に、廃棄体モルタル部の経時変化を示した。図 5.1.1-11 は廃棄体中心部分、図 5.1.1-12 は廃棄体の上端かつ側面（廃棄体の角部）部分の結果である。この結果から、廃棄体中心では、初期からほとんど変化していないことがわかる。一方、図 5.1.1-12 は、廃棄体部の角部であり、廃棄体のうちベントナイトの影響を受けやすい部分である。ここでは、廃棄体中心部に比べて Na, K 成分は早々に溶脱によって消失し、鉍物が時間を追うごとに変化している。これらの、セメント成分の反応の影響により、Ca 型化率の増減が起きていると考えられる。

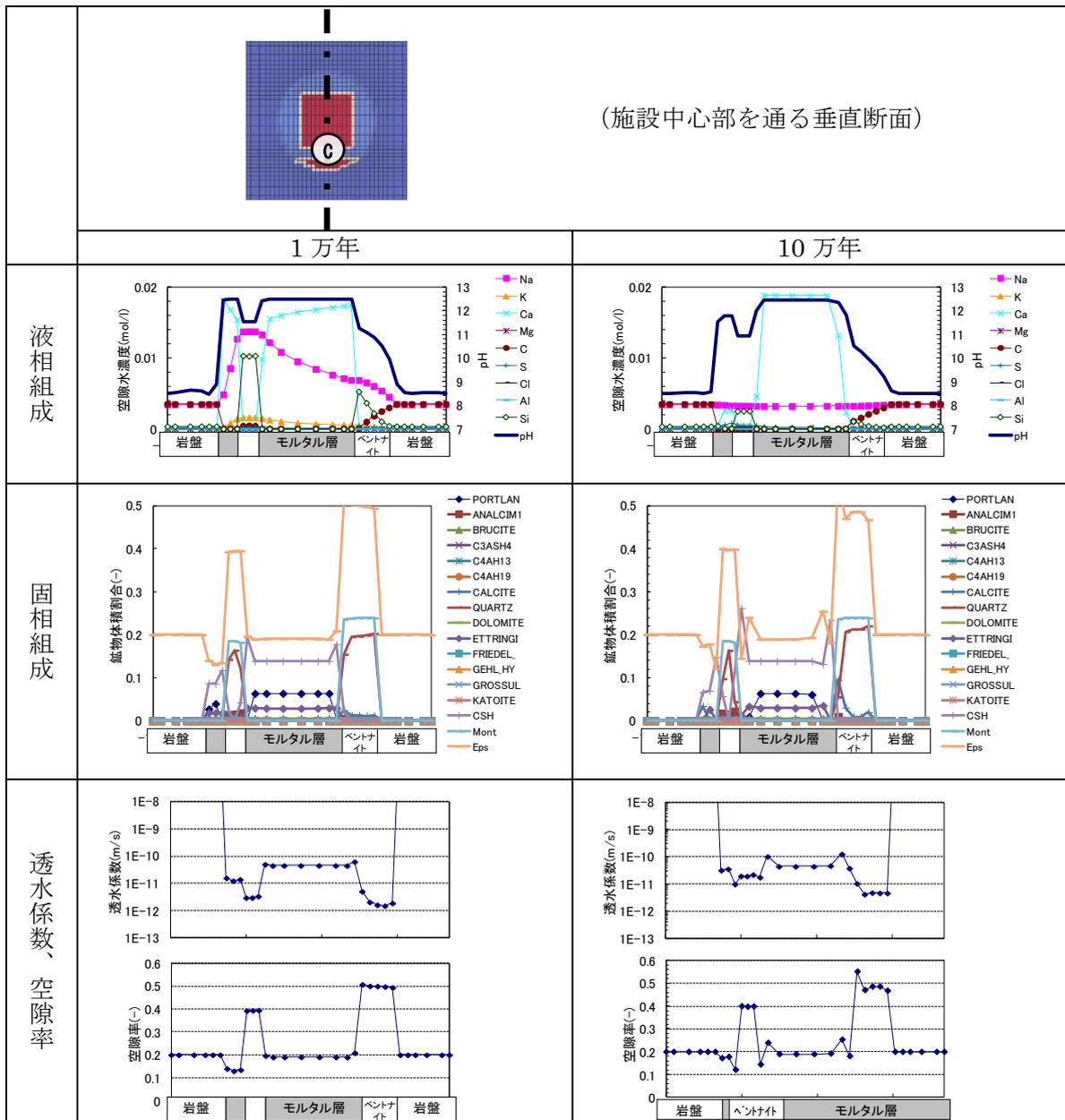


図 5.1.1-4 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面)

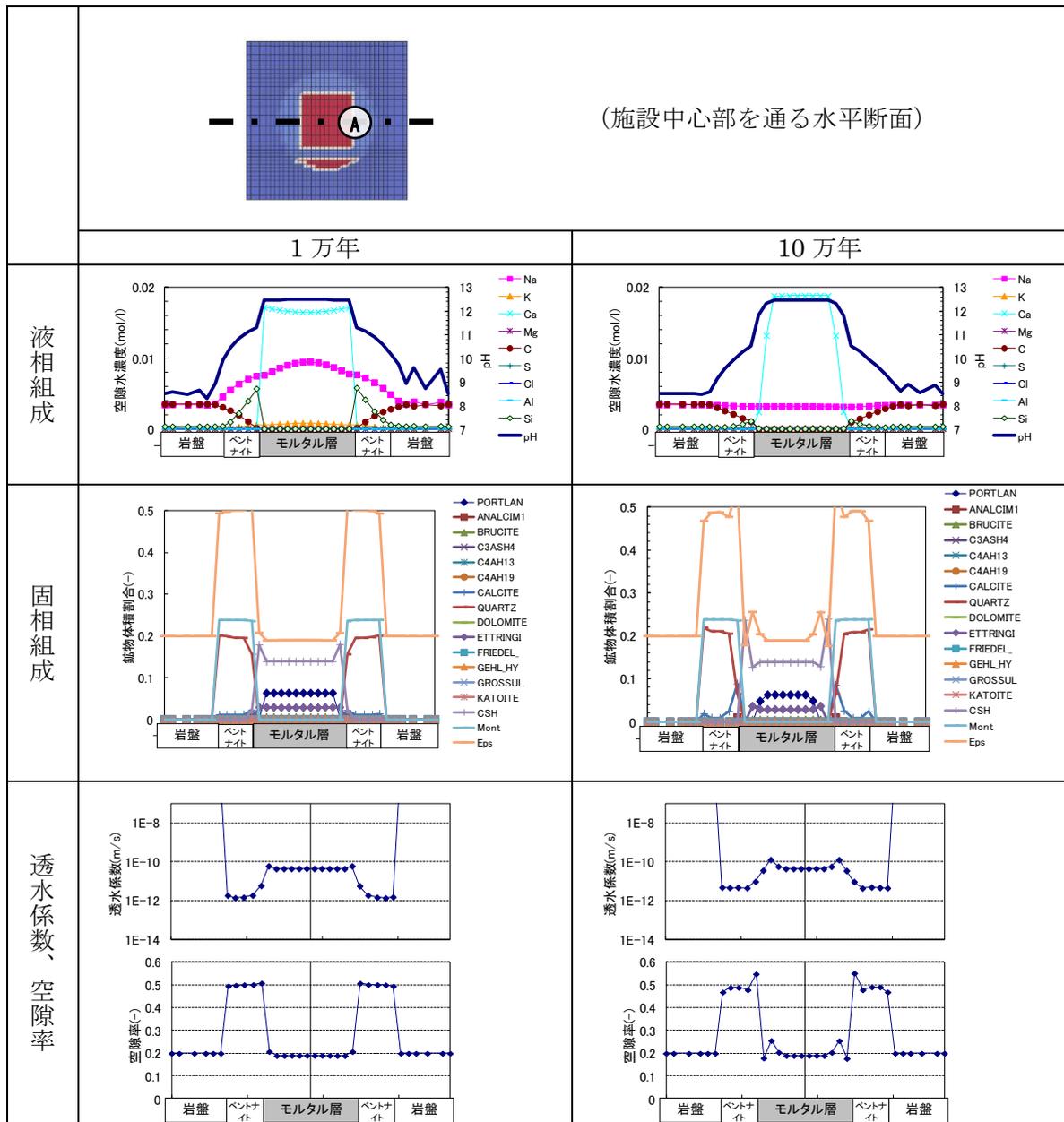


図 5.1.1-5 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面)

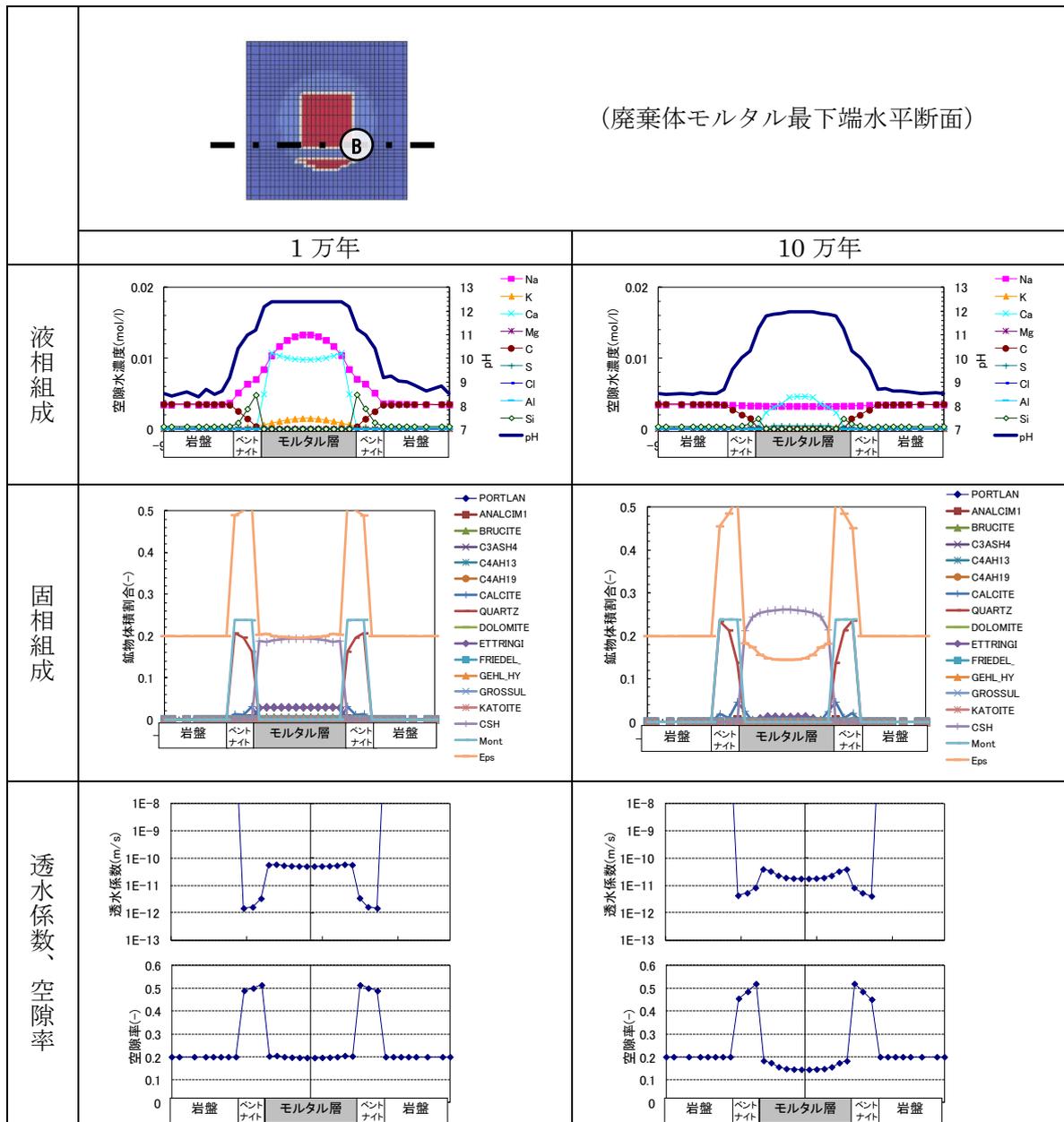


図 5.1.1-6 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面)

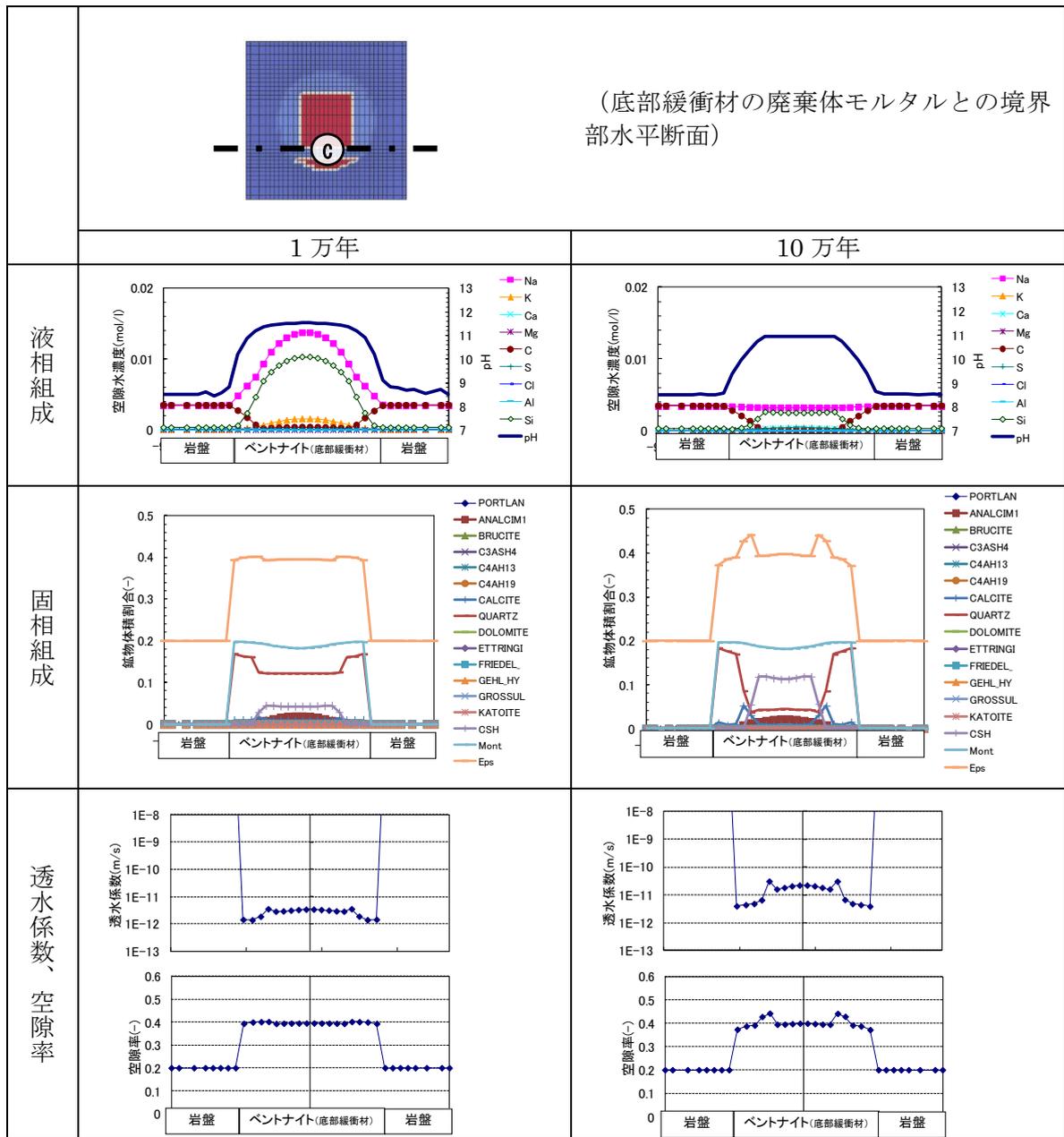
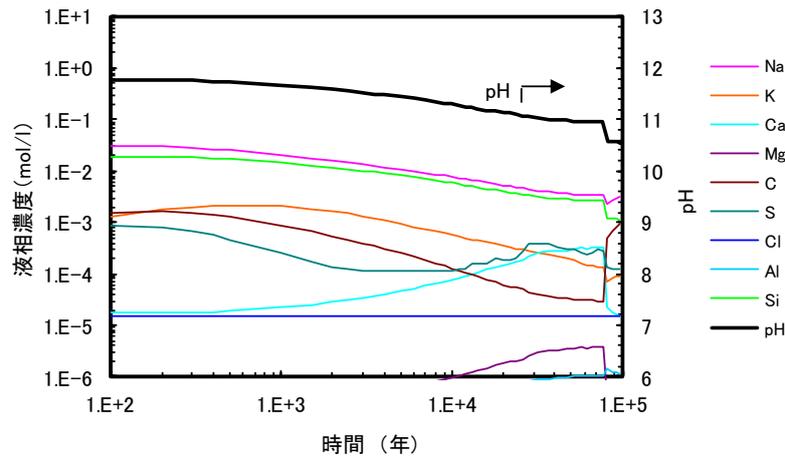
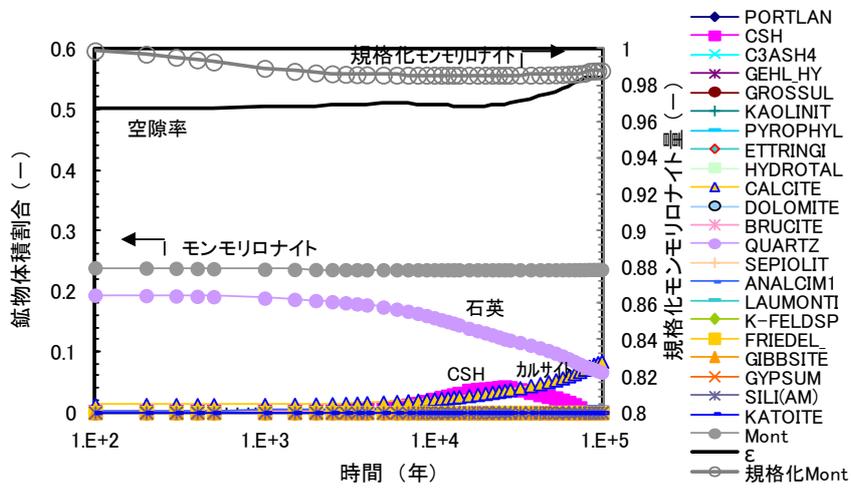


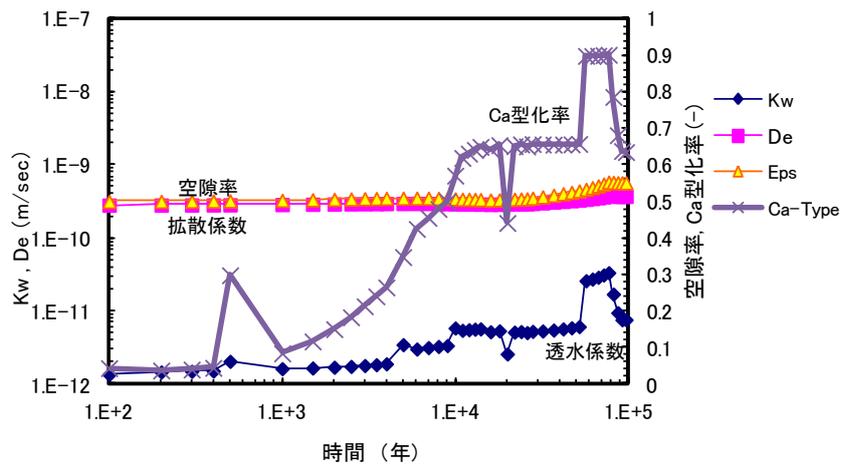
図 5.1.1-7 ケース0の1万年後、10万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)



液相組成

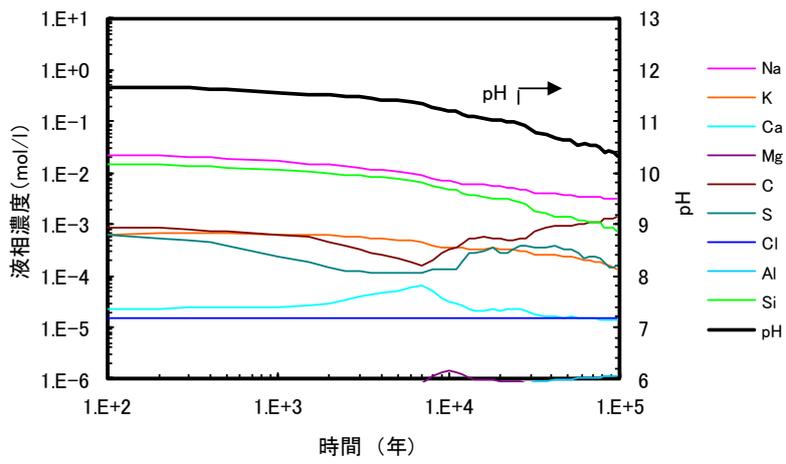


固相組成(体積割合)

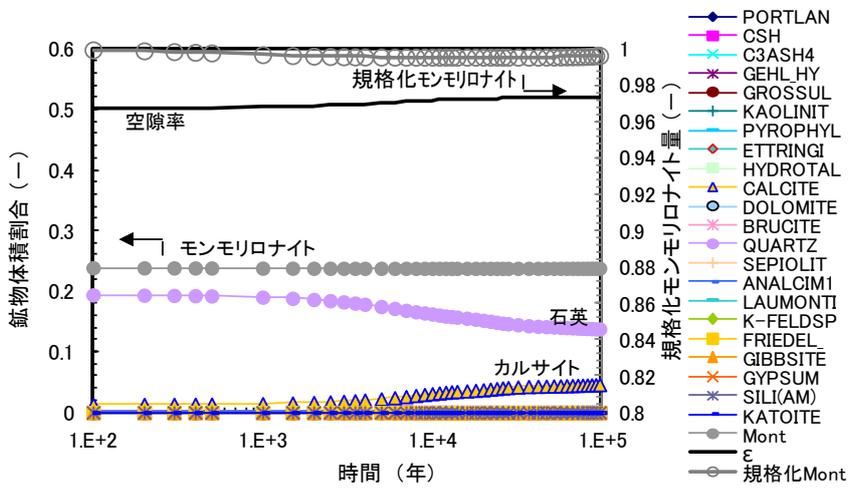


物性値

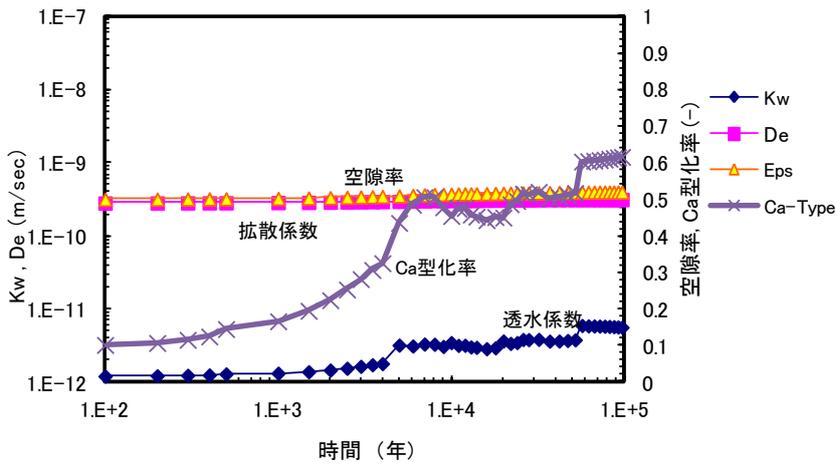
図 5.1.1-8 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース0)



液相組成

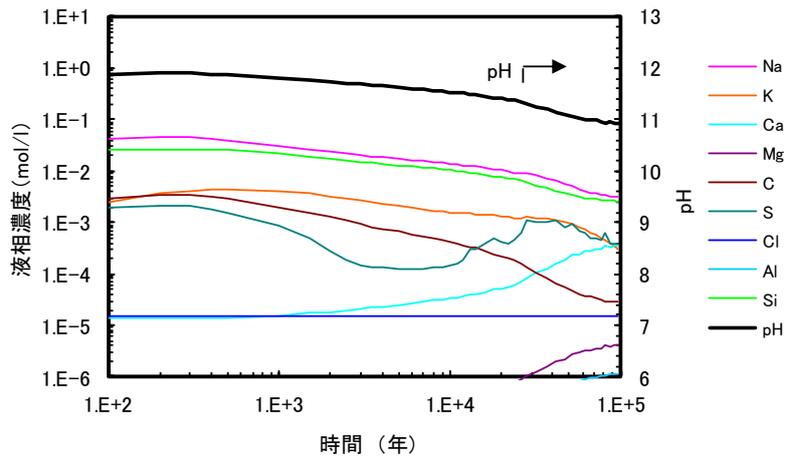


固相組成(体積割合)

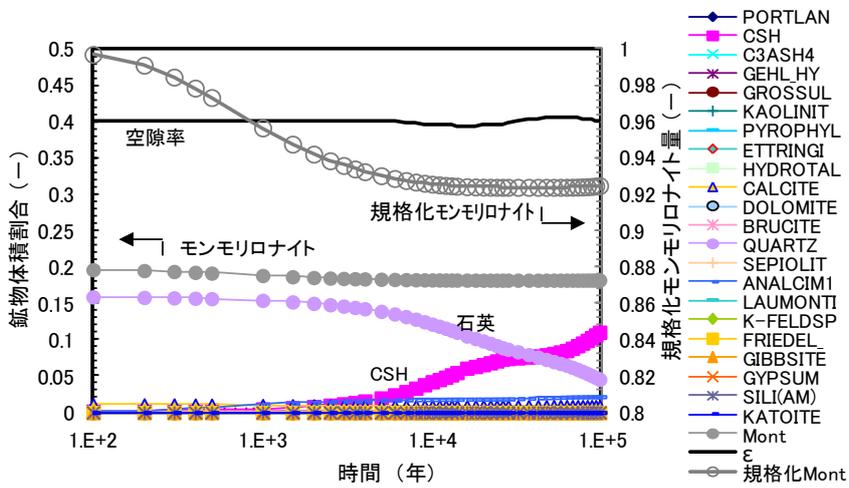


物性値

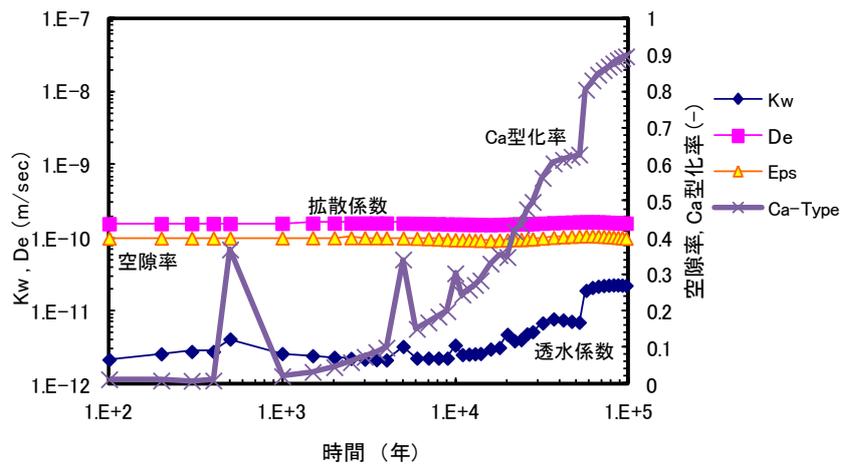
図 5.1.1-9 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース0)



液相組成

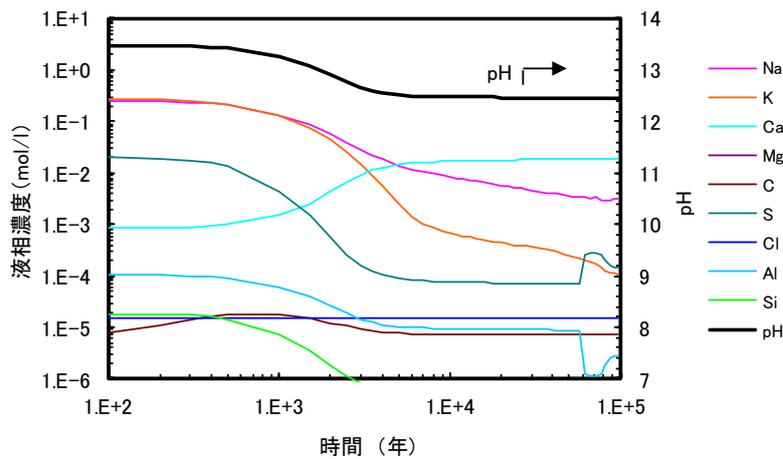


固相組成(体積割合)

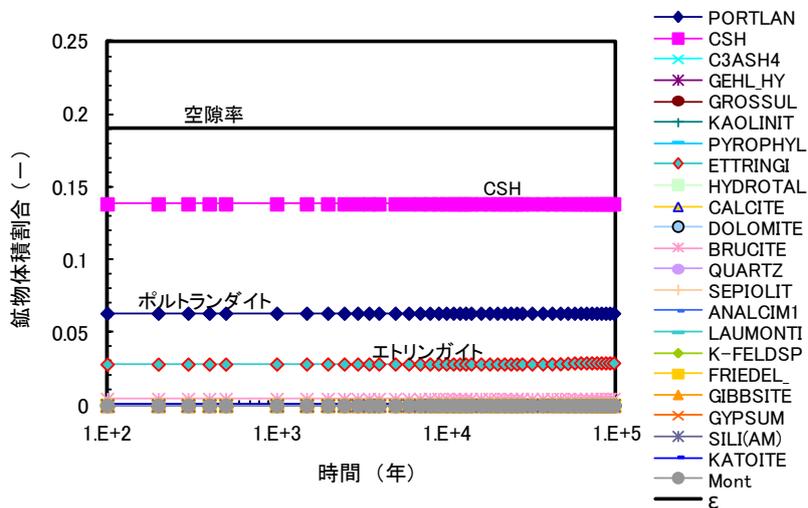


物性値

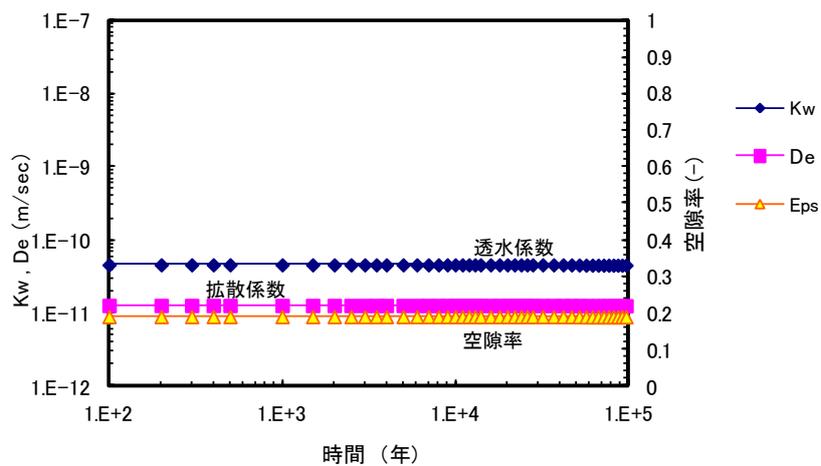
図 5.1.1-10 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース0)



液相組成

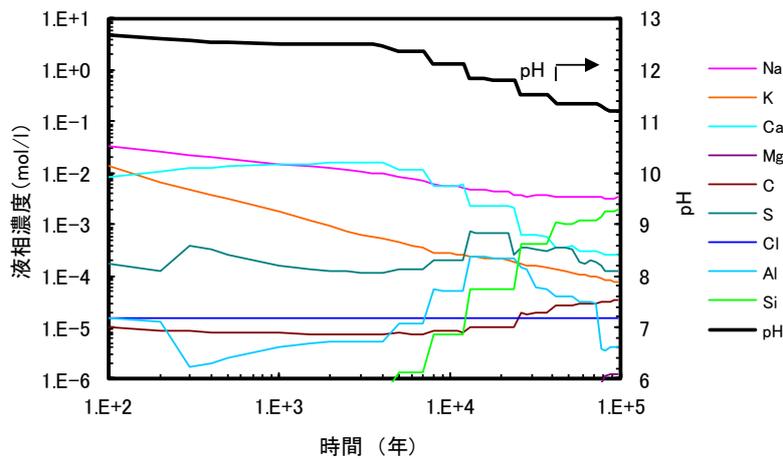


固相組成(体積割合)

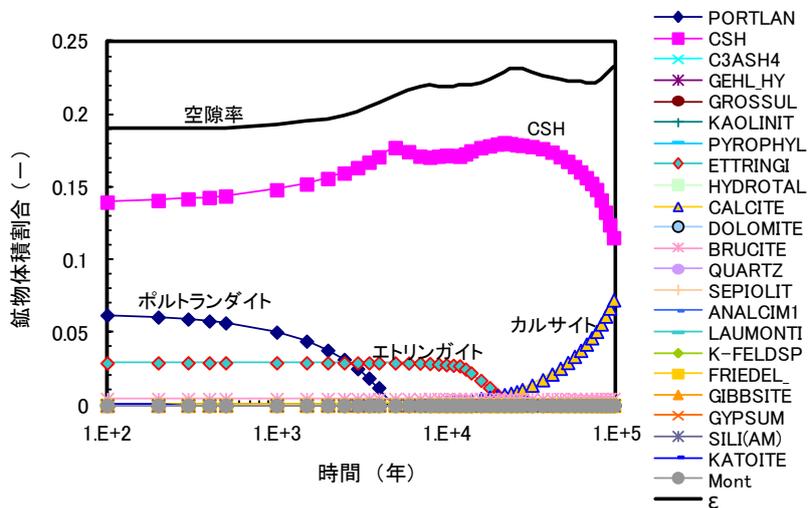


物性値

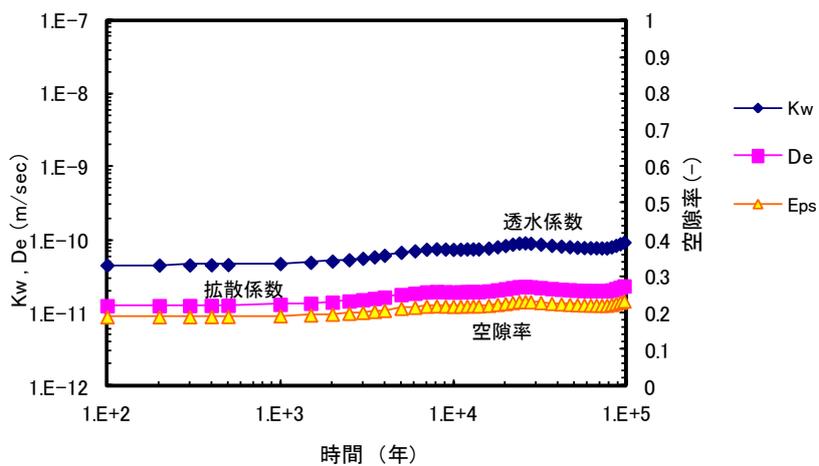
図 5.1.1-11 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース0)



液相組成



固相組成(体積割合)



物性値

図 5.1.1-12 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (ケース0)

2) 計算ケース 1

ケース 1 は、固相モンモリロナイトの Na 型/Ca 型/K 型/Mg 型の構成比が、陽イオン交換の計算結果と等しくなるように再計算しているケースである。

ケース 1 の結果は、ケース 0 と同様の結果となった。ただし、陽イオン交換に係る取扱を変更したため、Ca 型化率の変遷が変更した。ケース 0 と比較して、時間経過による振動が少なくなった（特に C 地点の Ca 型化率の変遷において、振動が少ない）。

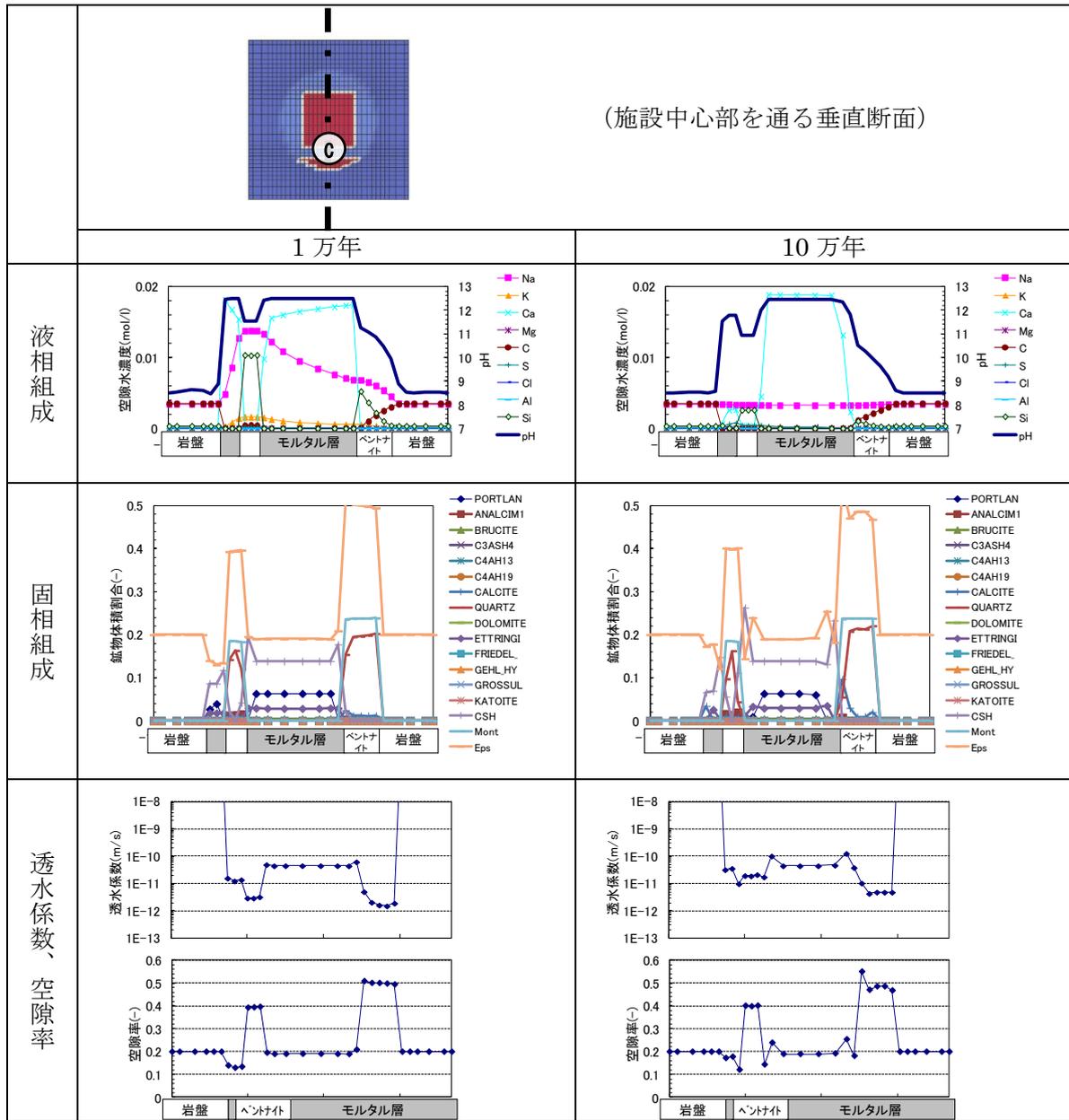


図 5.1.1-13 ケース 1 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面)

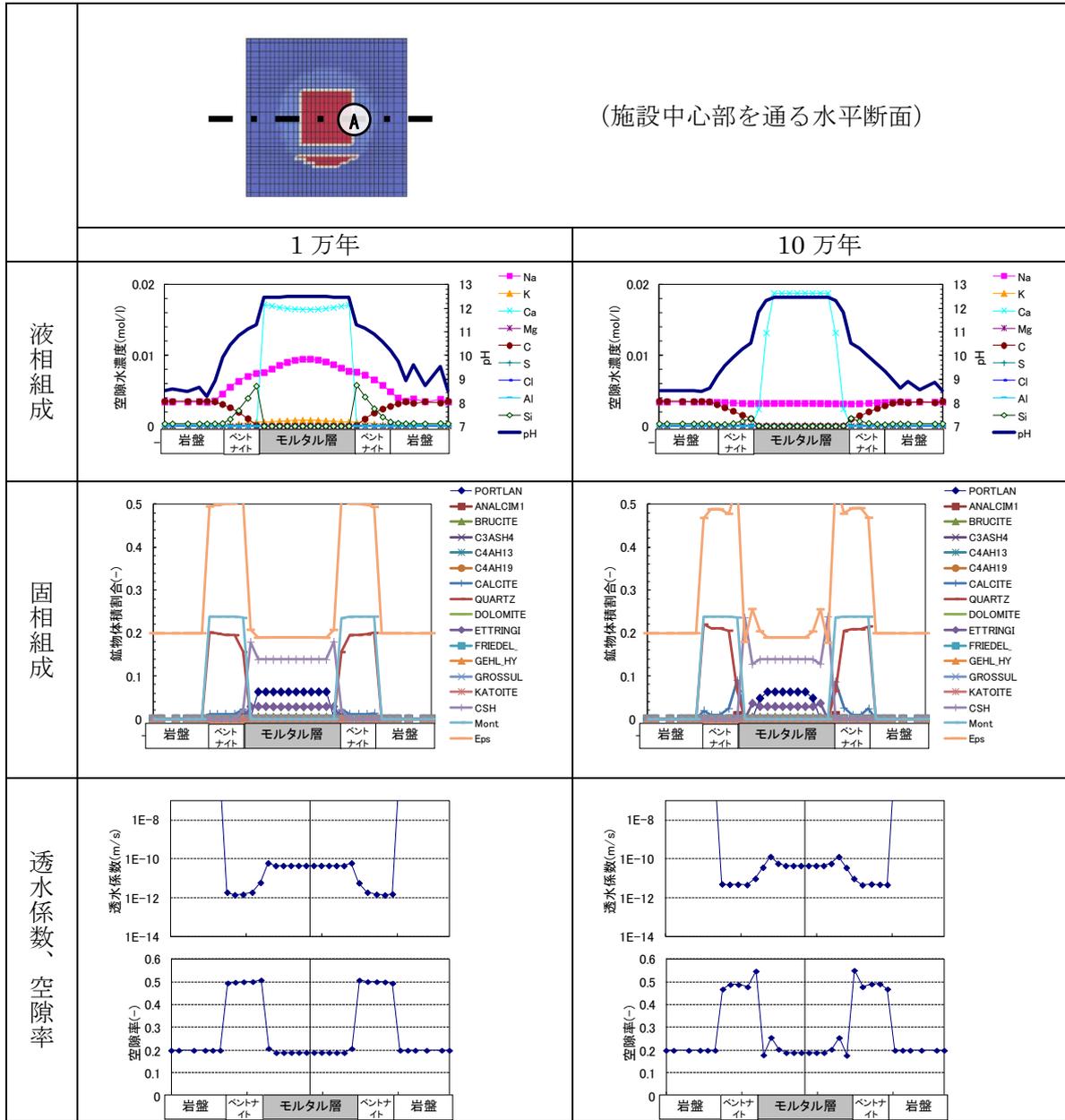


図 5.1.1-14 ケース 1 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面)

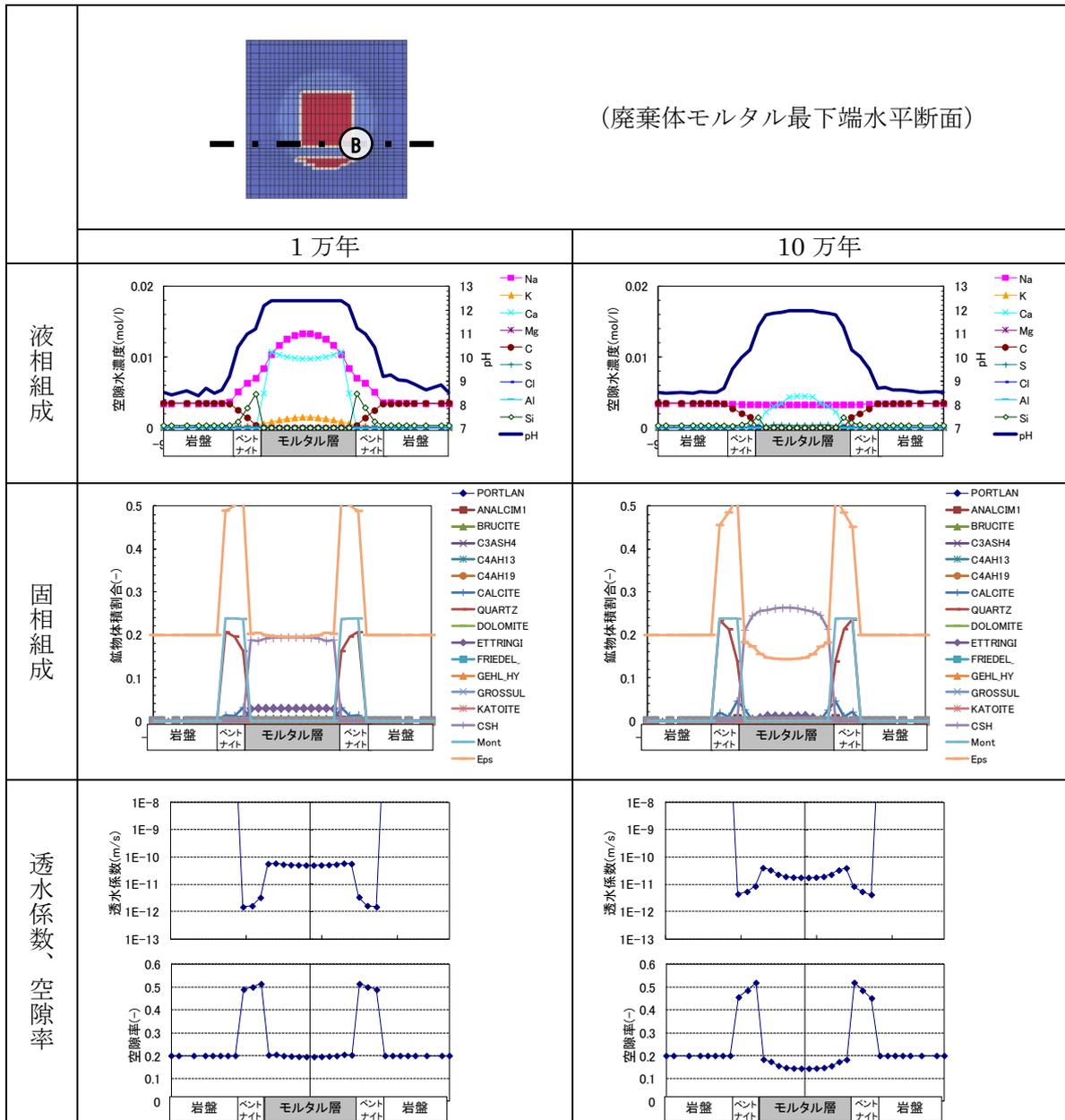


図 5.1.1-15 ケース 1 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面)

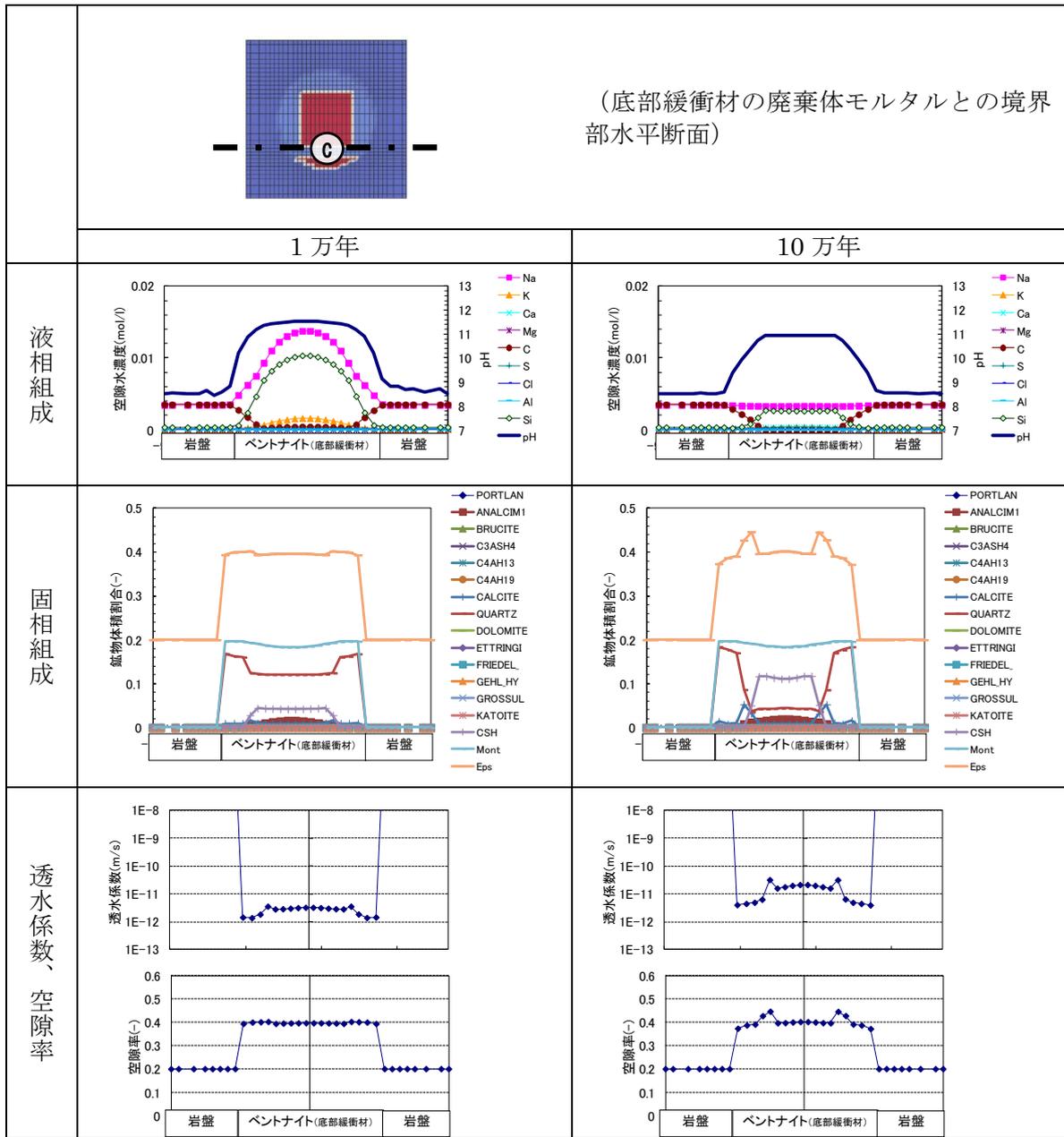
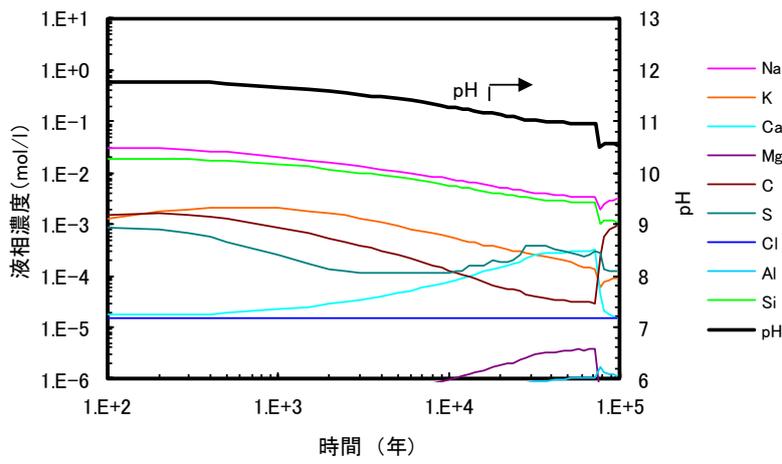
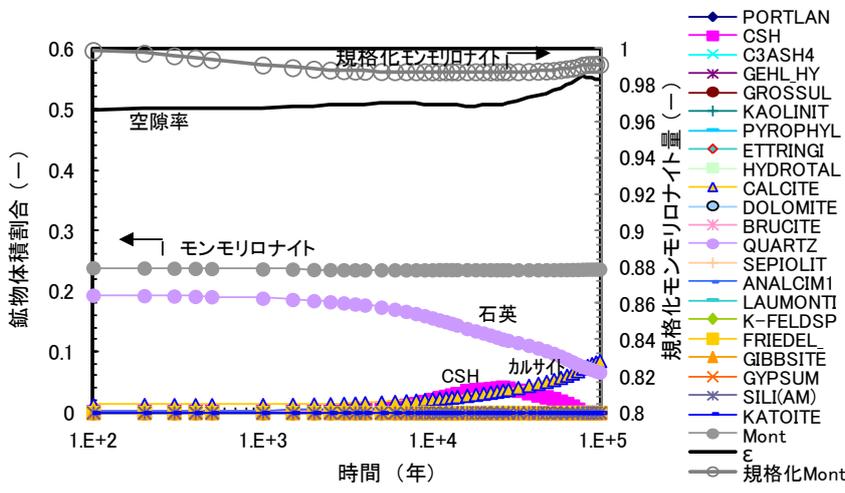


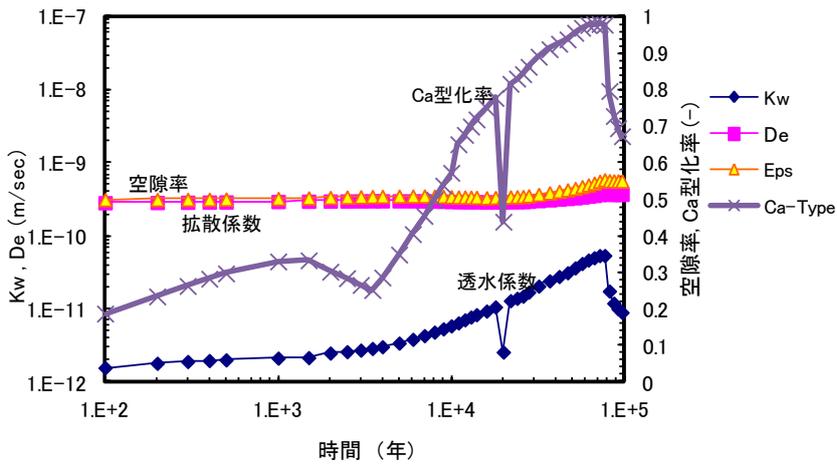
図 5.1.1-16 ケース 1 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)



液相組成

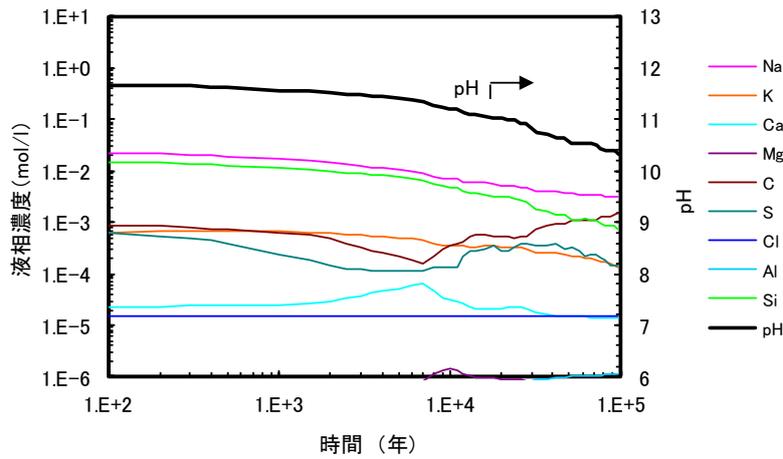


固相組成(体積割合)

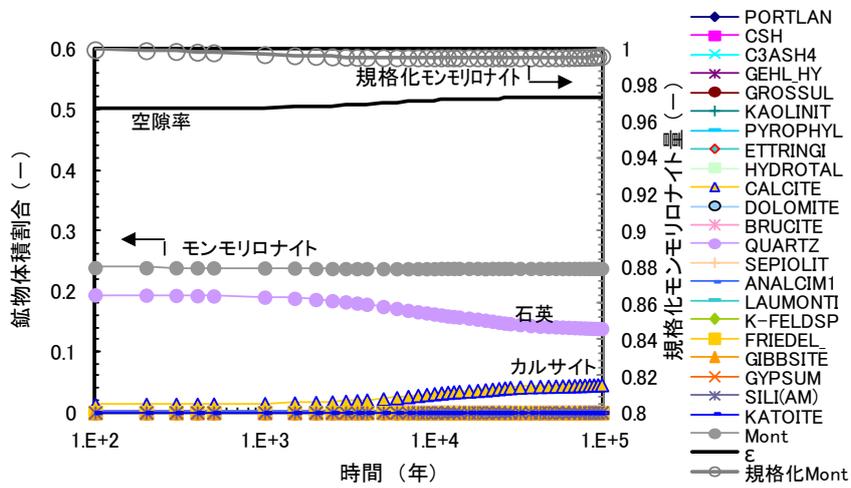


物性値

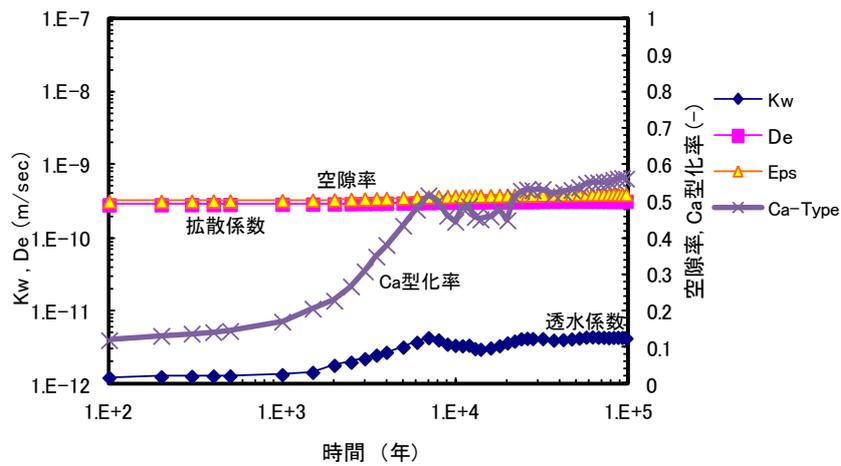
図 5.1.1-17 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース 1)



液相組成

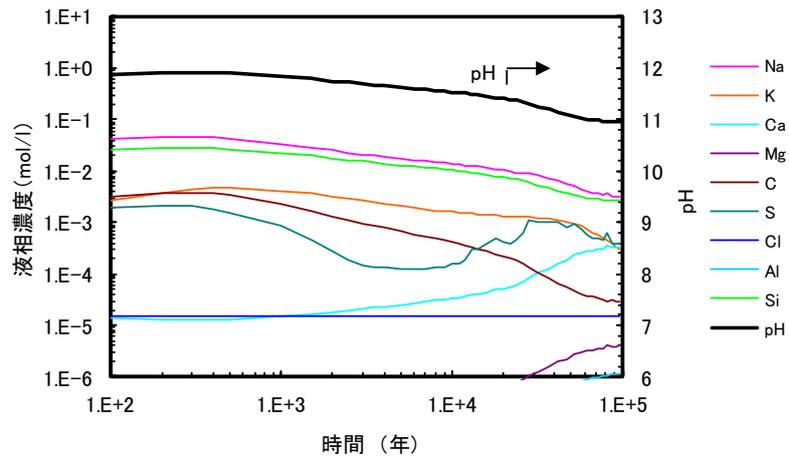


固相組成(体積割合)

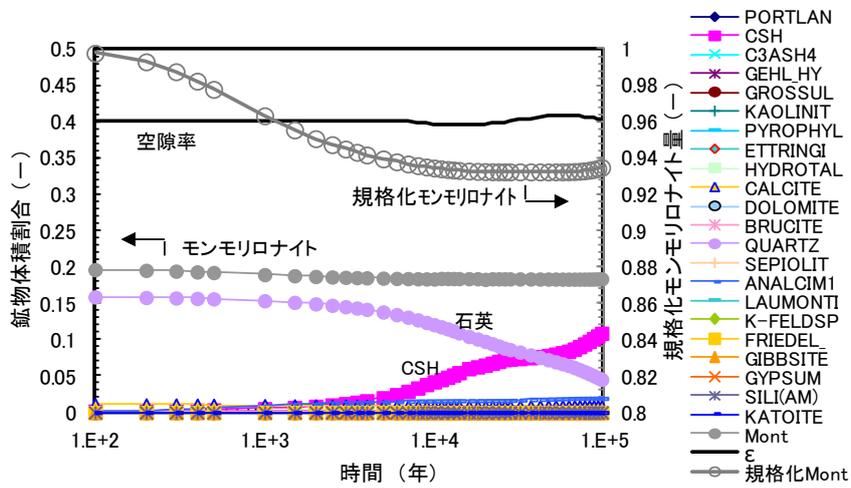


物性値

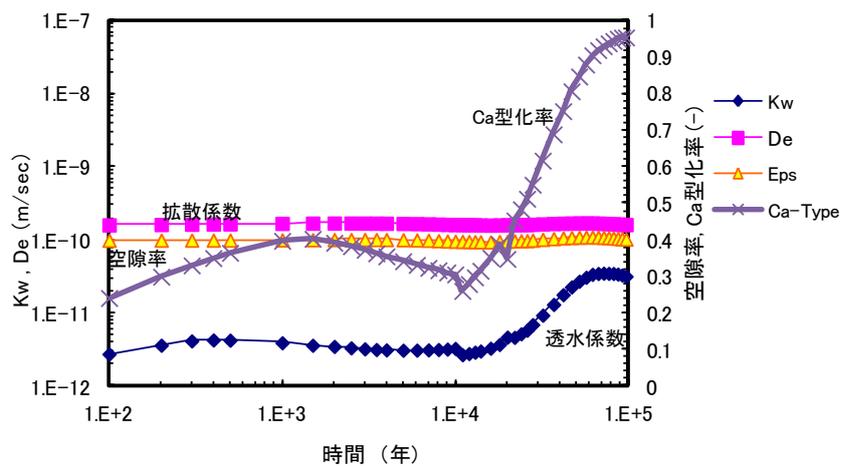
図 5.1.1-18 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース1)



液相組成

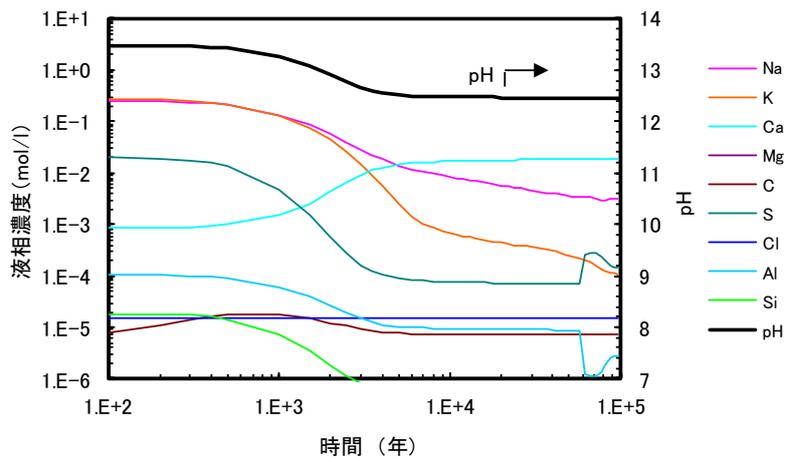


固相組成(体積割合)

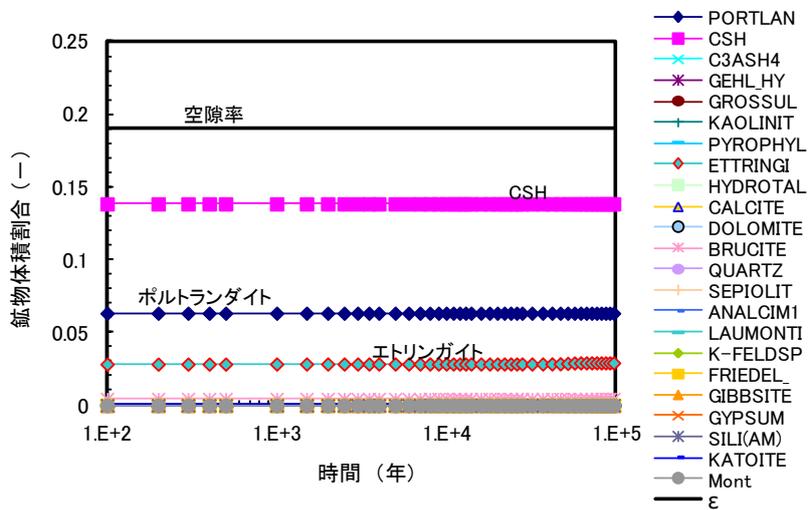


物性値

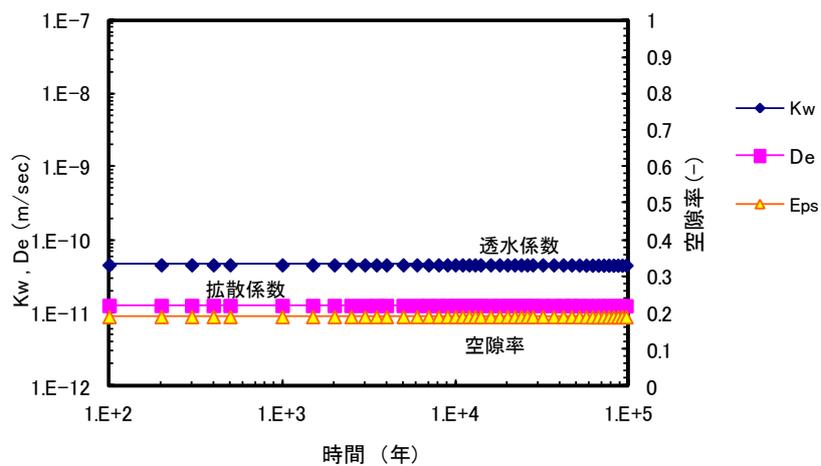
図 5.1.1-19 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース 1)



液相組成

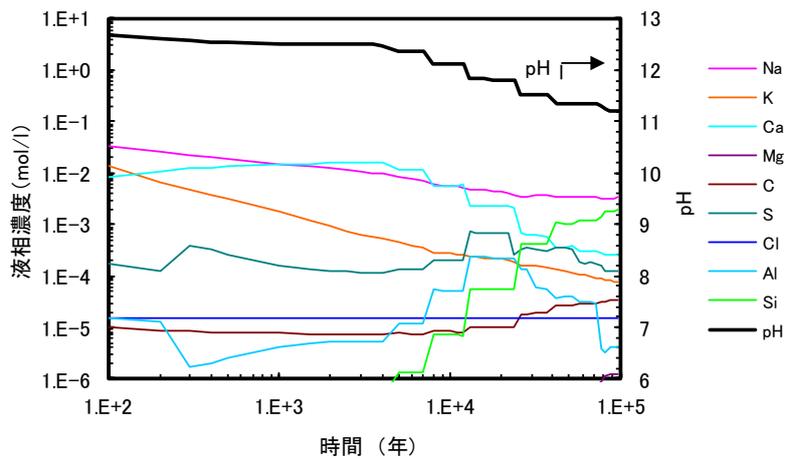


固相組成(体積割合)

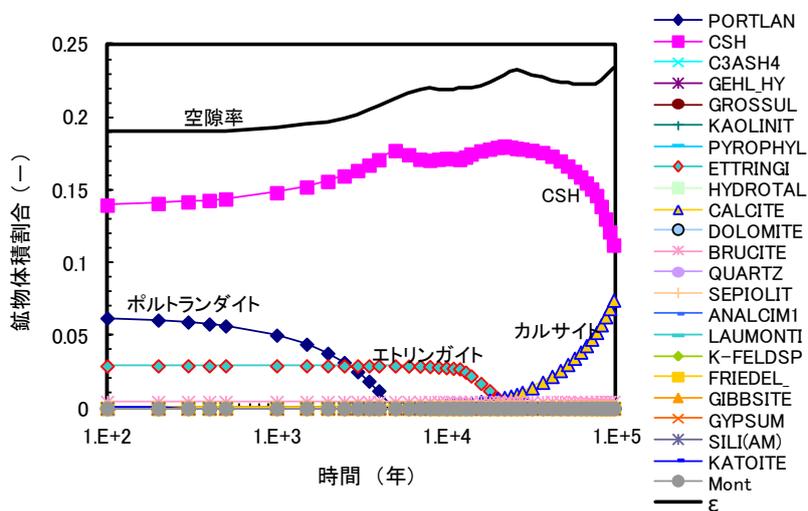


物性値

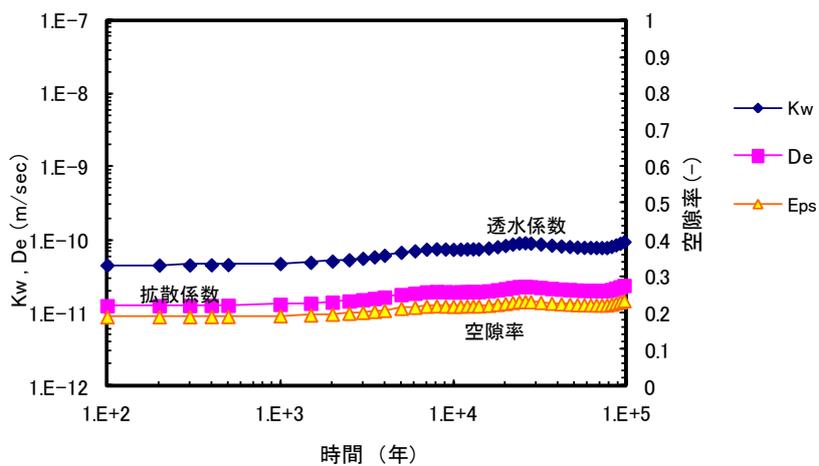
図 5.1.1-20 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース 1)



液相組成



固相組成(体積割合)



物性値

図 5.1.1-21 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面（地点 (2.75,-6.25)）の経時変化結果（ケース 1）

3) 計算ケース 2

ケース 2 は、ケース 1 において、モンモリロナイトが再沈殿しないようにしたケースである。

ケース 2 の結果は、ケース 1 と同等の結果となった。ケース 1 において、ほとんど再沈殿していなかったためと考えられる。

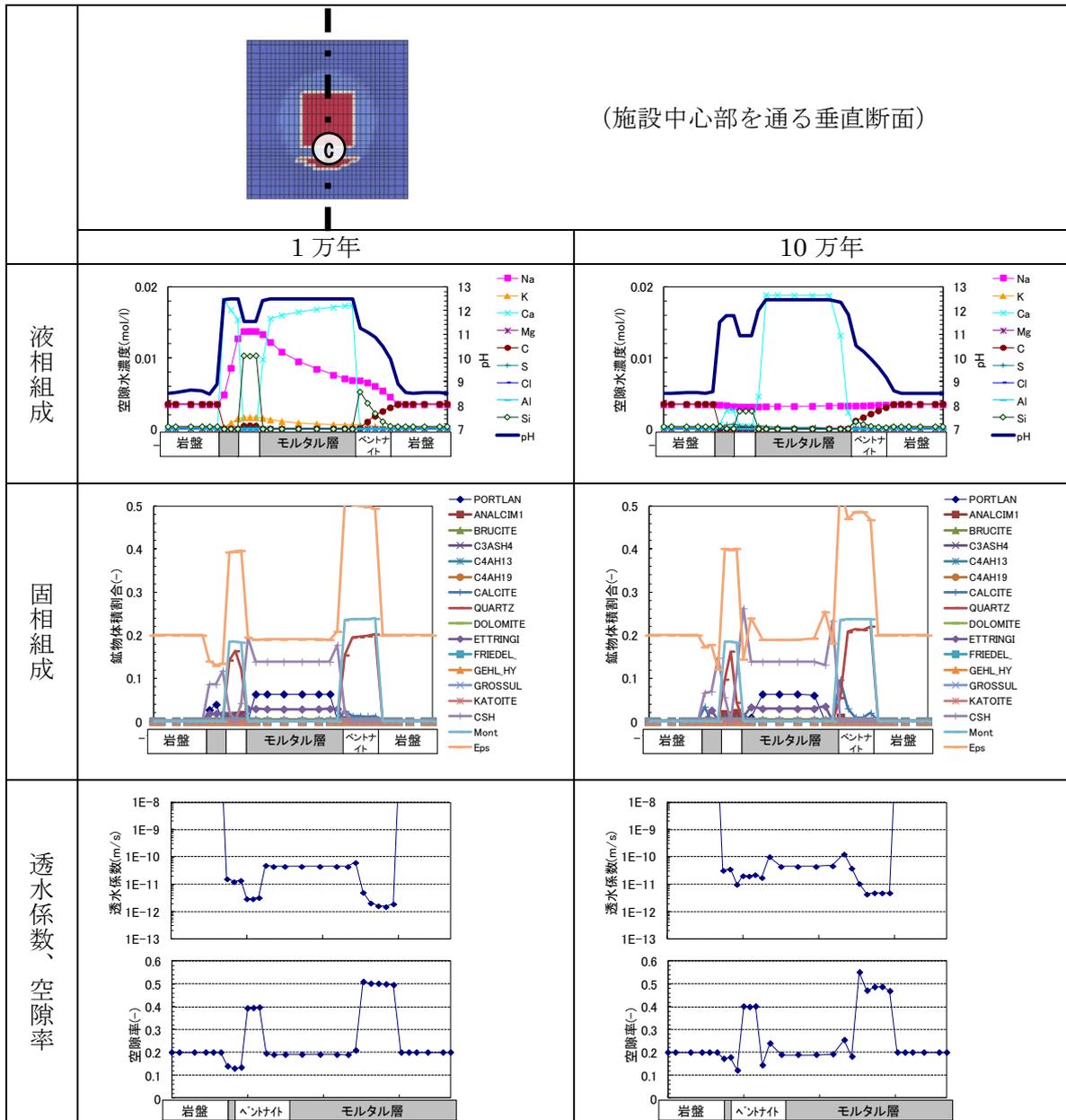


図 5.1.1-22 ケース 2 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面)

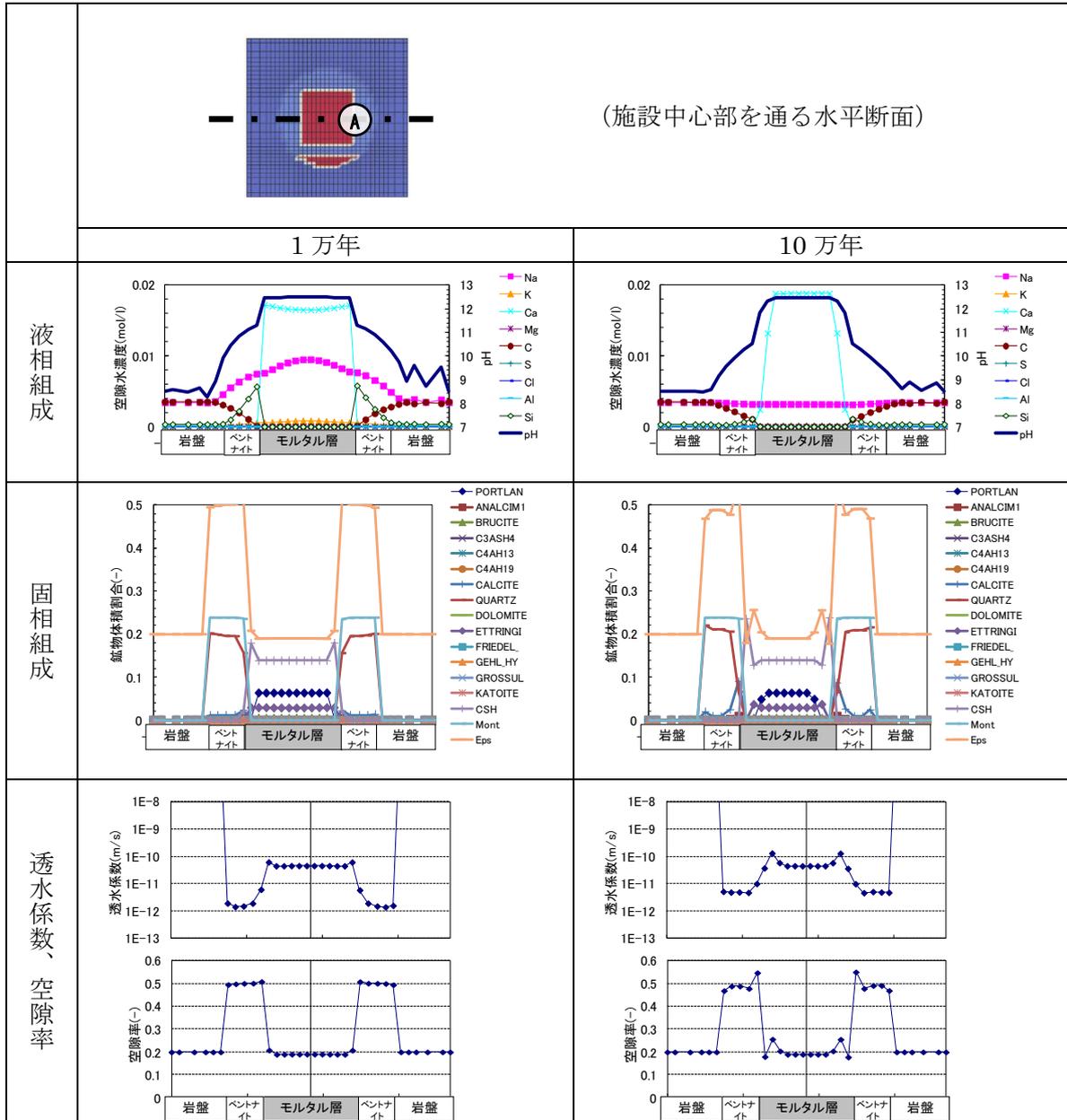


図 5.1.1-23 ケース 2 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面)

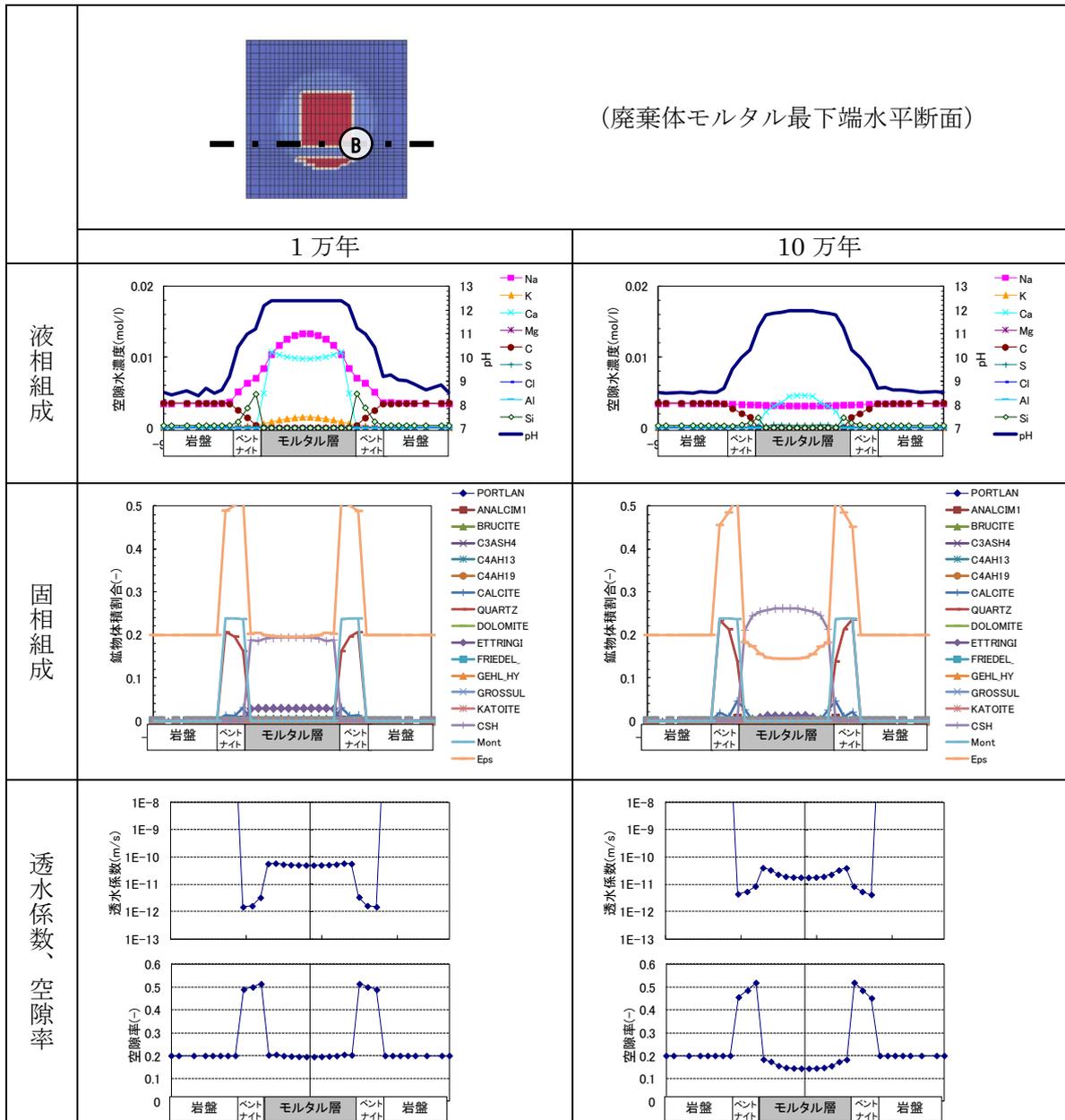


図 5.1.1-24 ケース 2 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面)

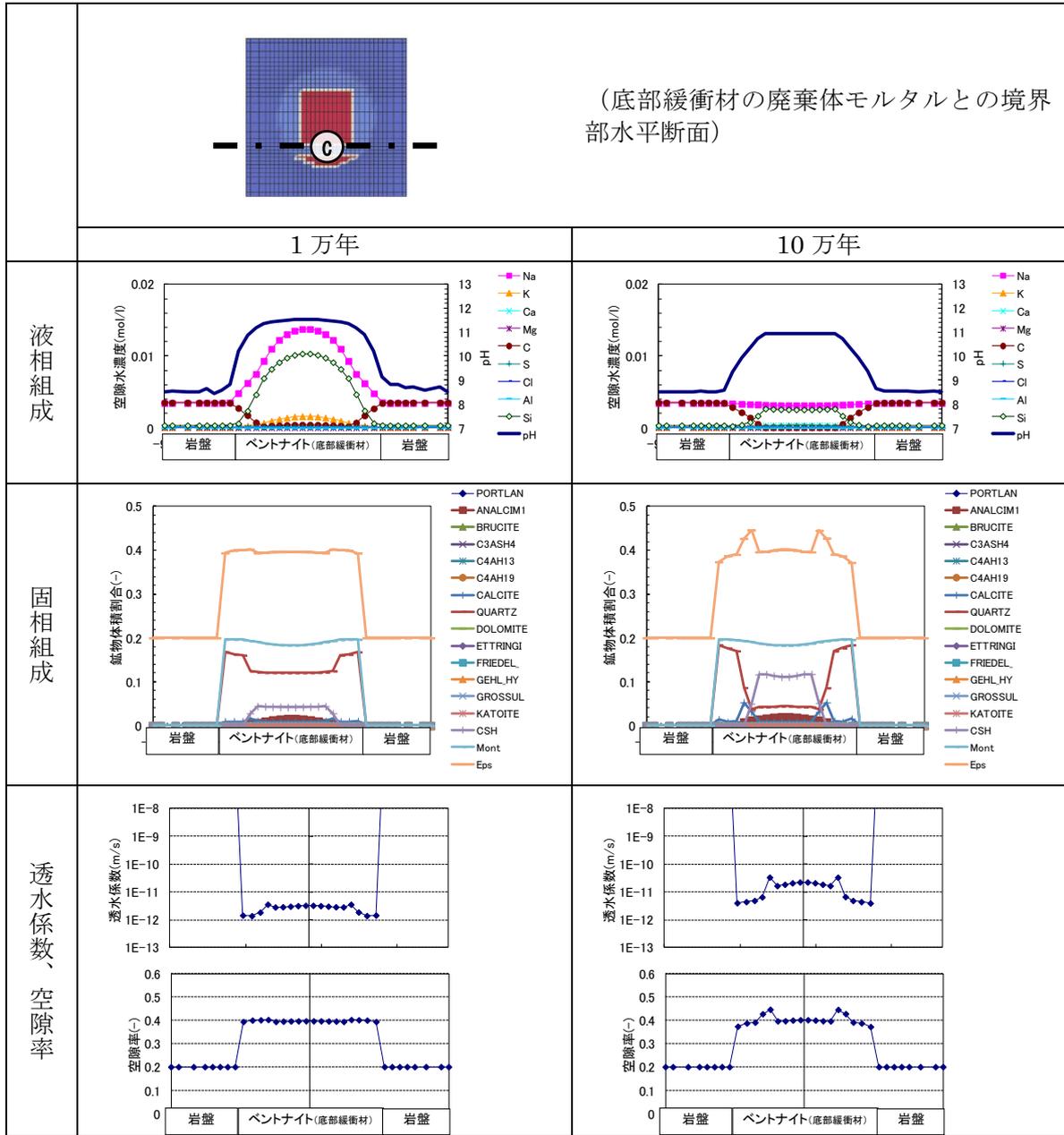
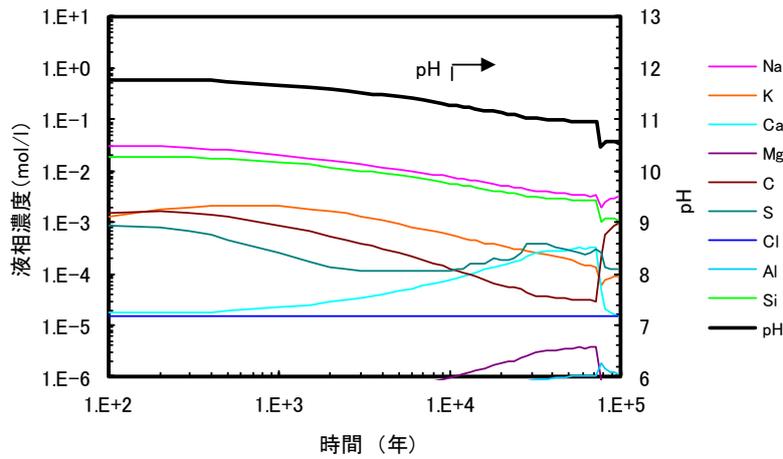
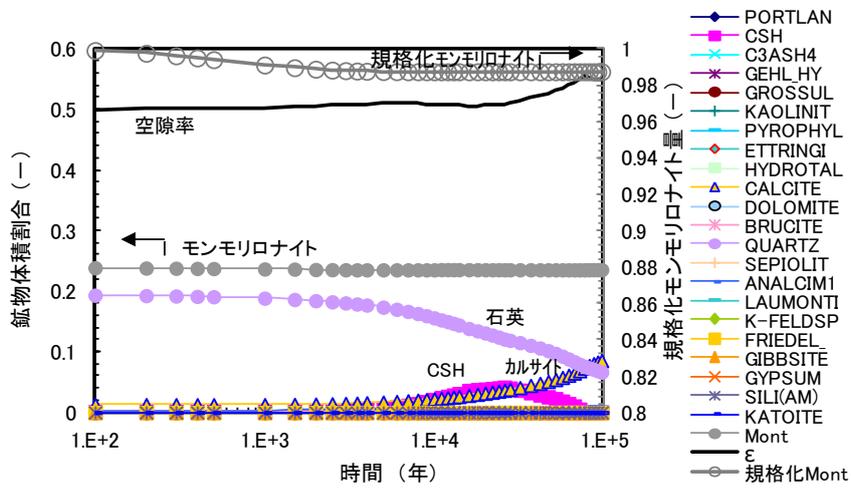


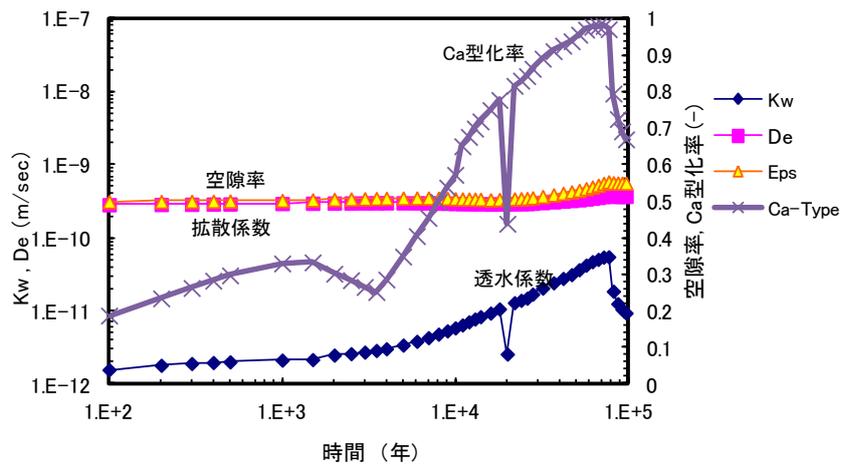
図 5.1.1-25 ケース 2 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)



液相組成

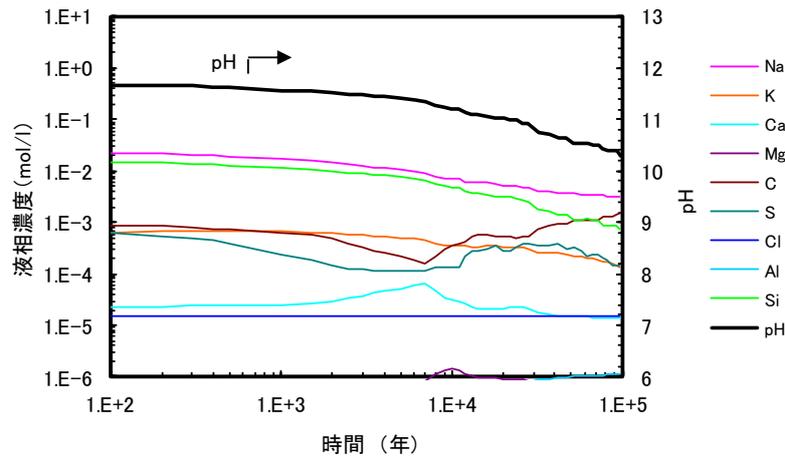


固相組成(体積割合)

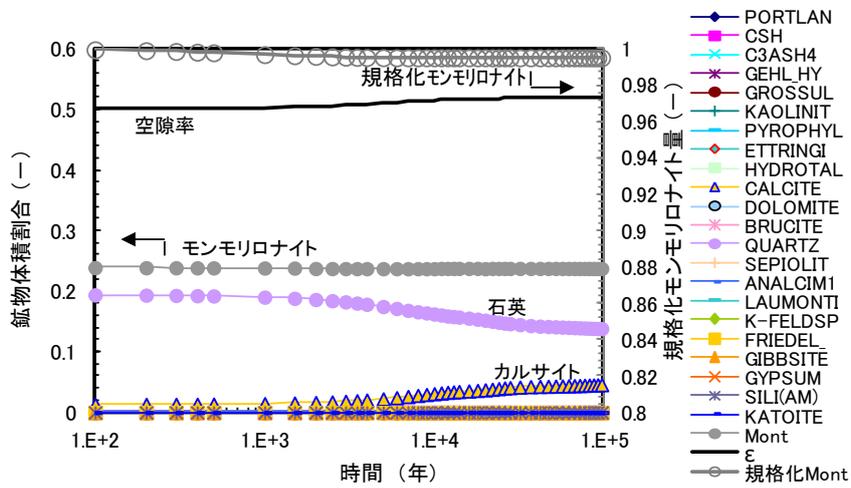


物性値

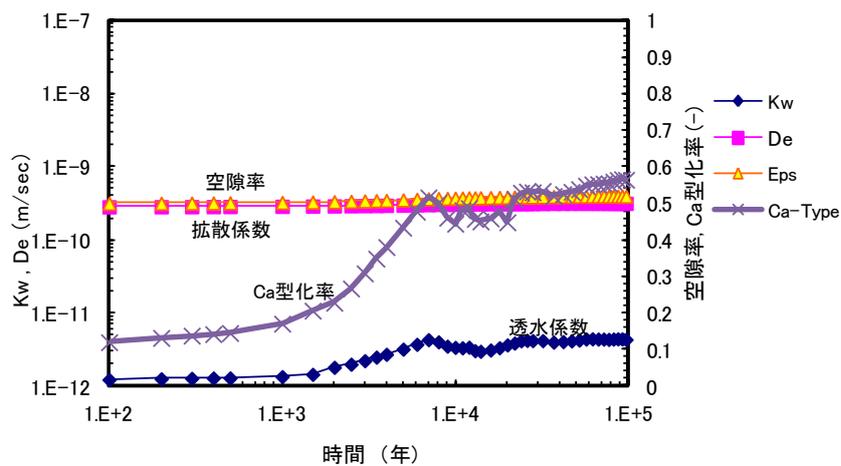
図 5.1.1-26 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース 2)



液相組成

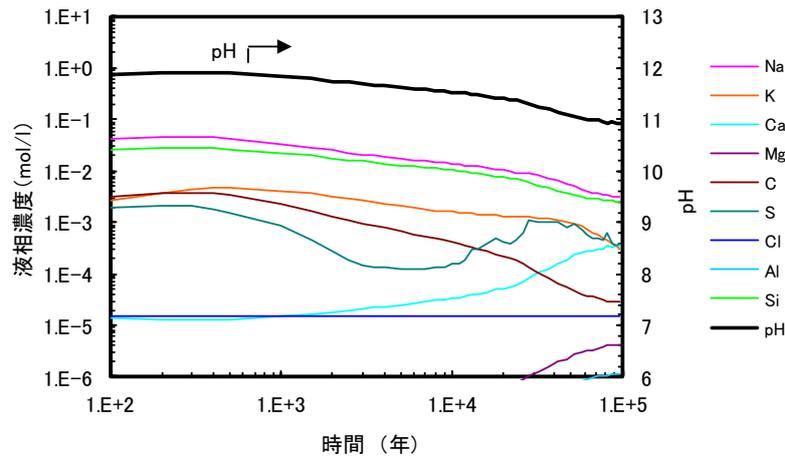


固相組成(体積割合)

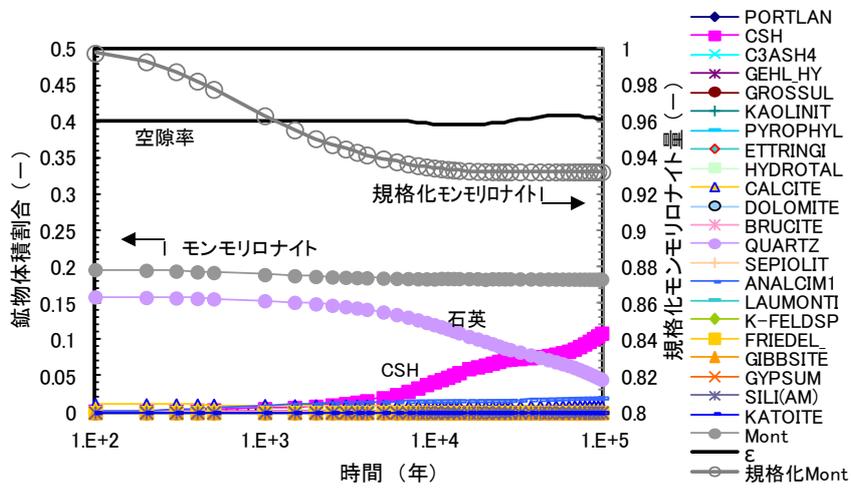


物性値

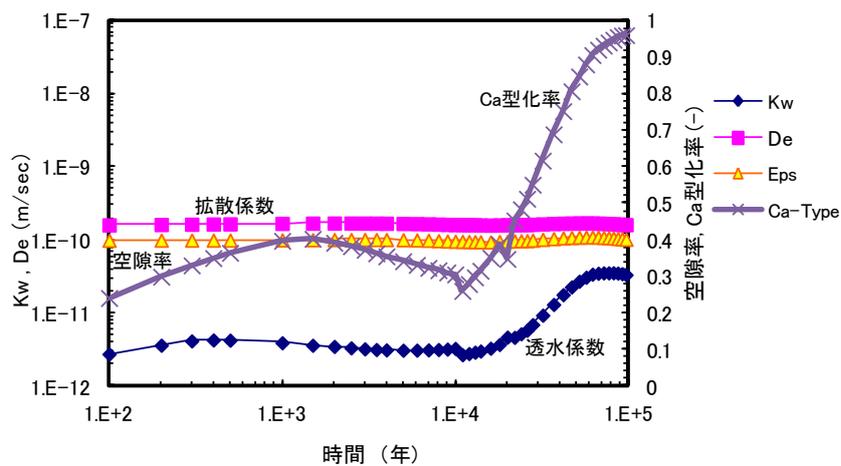
図 5.1.1-27 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース2)



液相組成

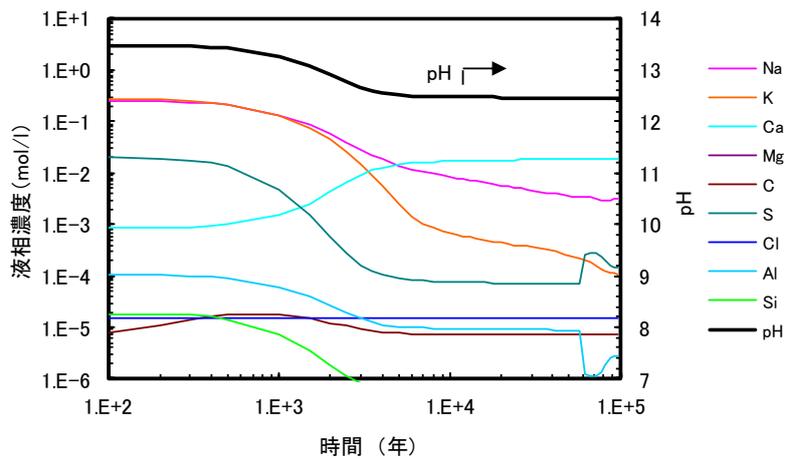


固相組成(体積割合)

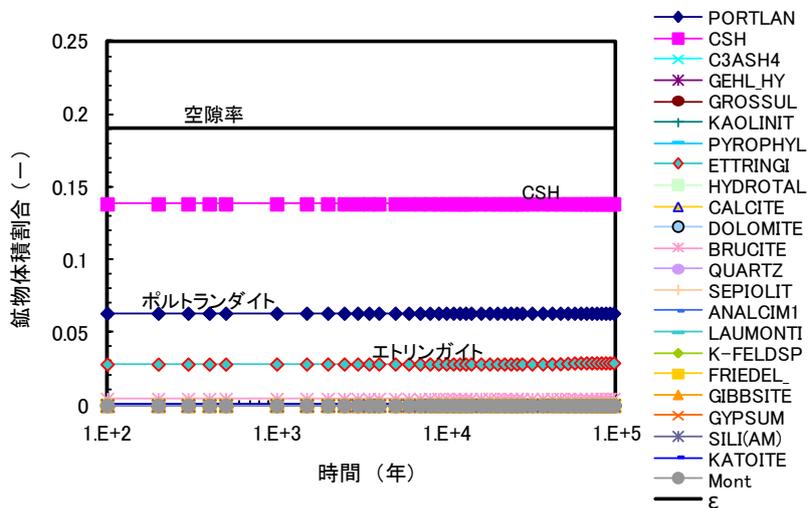


物性値

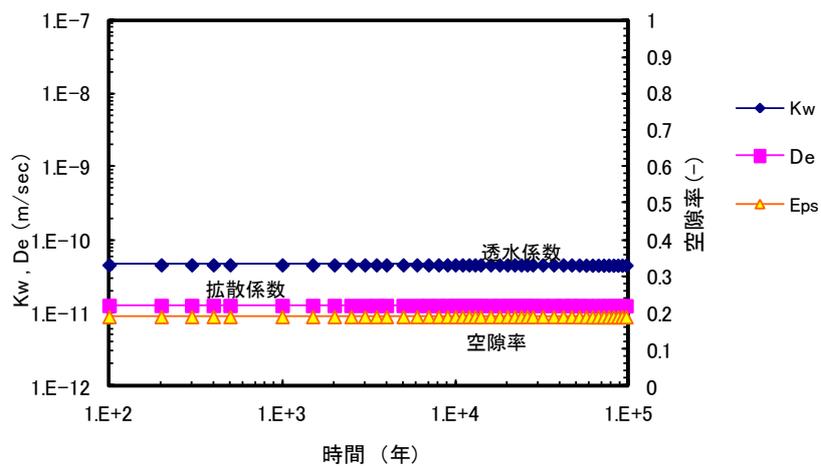
図 5.1.1-28 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース 2)



液相組成

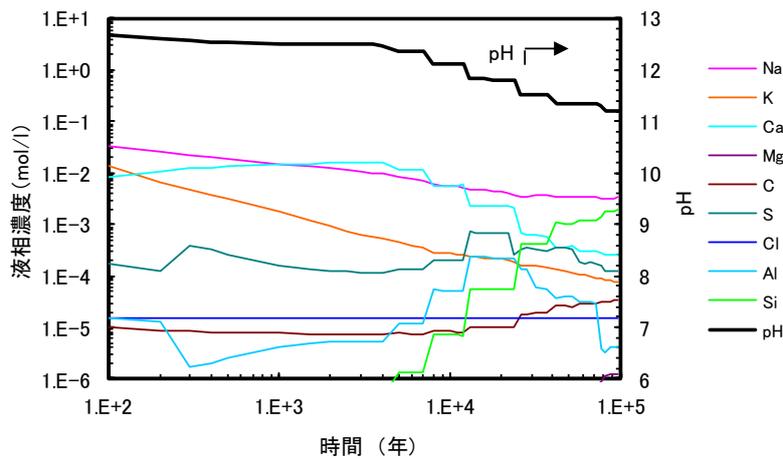


固相組成(体積割合)

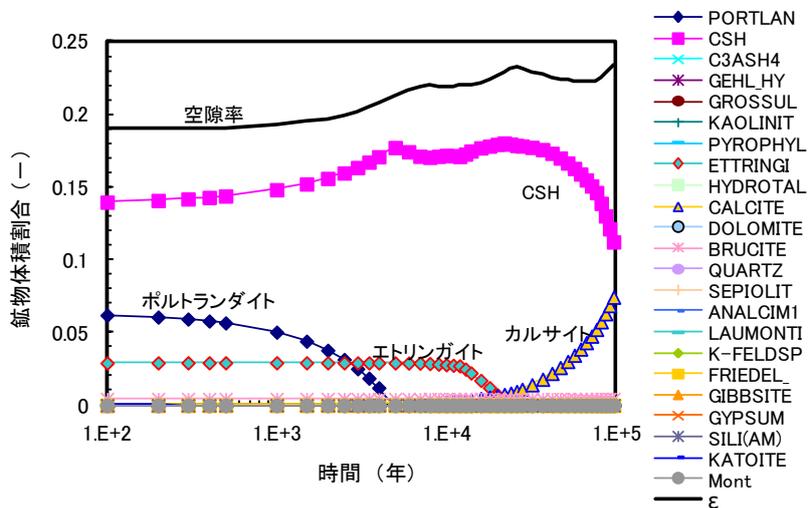


物性値

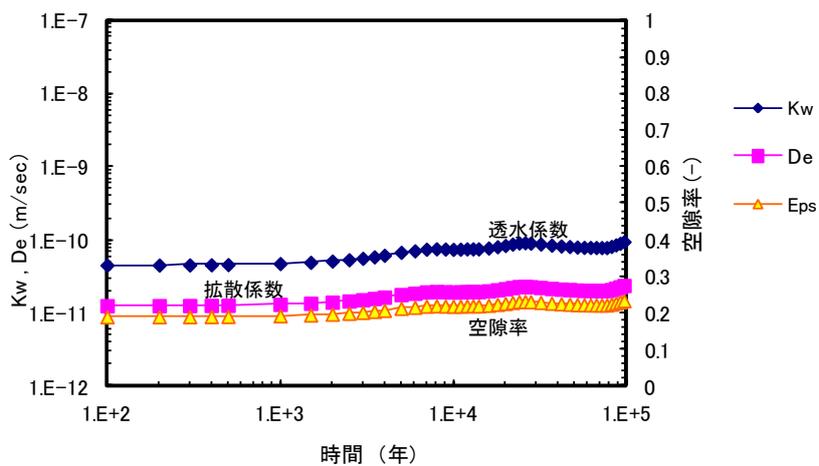
図 5.1.1-29 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース 2)



液相組成



固相組成(体積割合)



物性値

図 5.1.1-30 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (ケース 2)

4) 計算ケース3

ケース3は、固相モンモリロナイトの反応についてはNa型モンモリロナイト(Na-Mont)のみを考慮し、陽イオン交換の計算には4つの型を考慮した計算ケースである。

ケース3の結果は、上記のケース0～ケース2と同様な結果となった。固相のモンモリロナイトについてNa型のみとしたため、系内のCaが少なく、二次鉱物のカルサイトやC-S-Hの沈澱が計算ケース0～2に比較して少なくなった(10万年後)。同様に、Ca型化率についても、計算ケース0～2に比較してやや小さい値で変遷した。

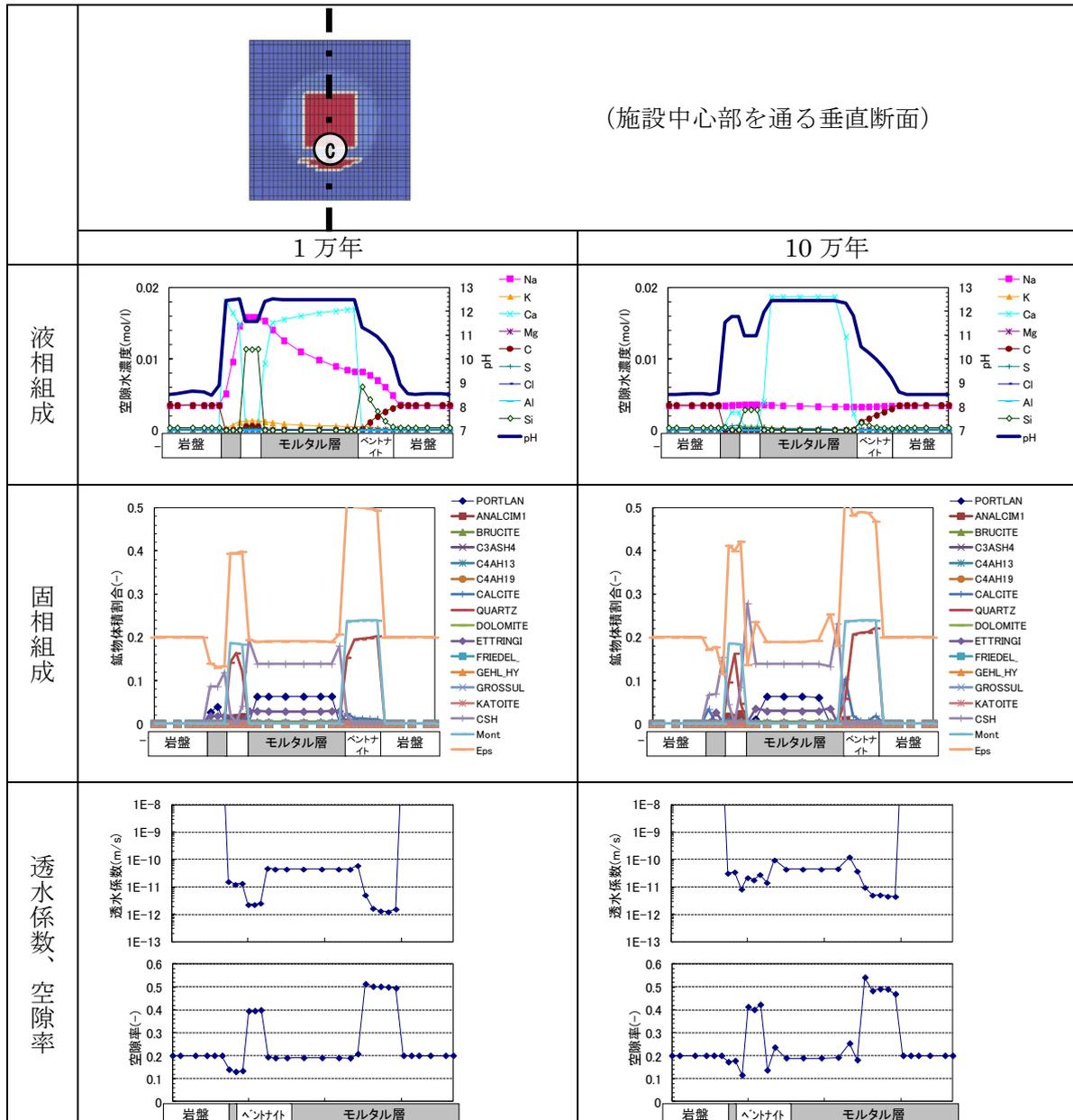


図 5.1.1-31 ケース3の1万年後、10万年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面)

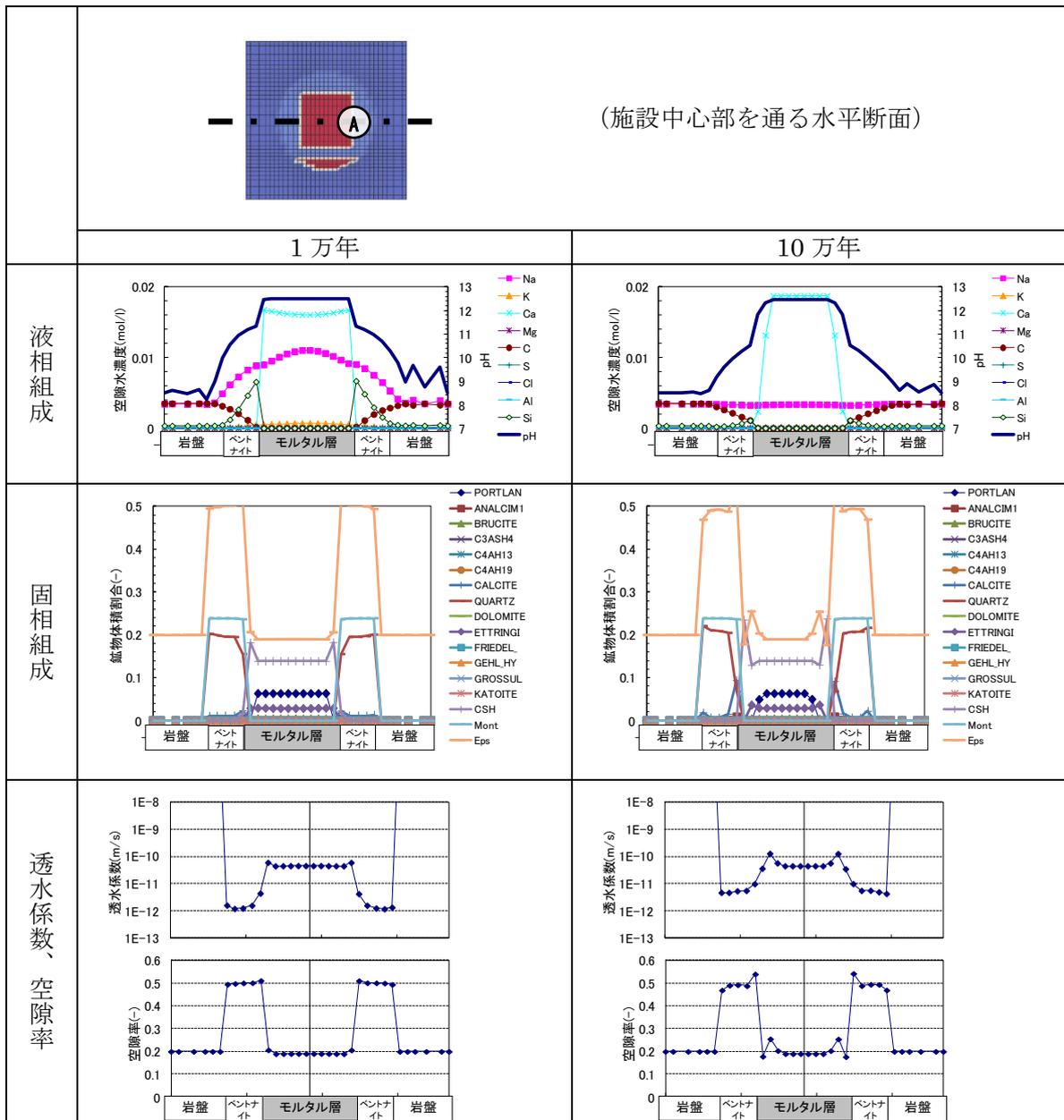


図 5.1.1-32 ケース 3 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面)

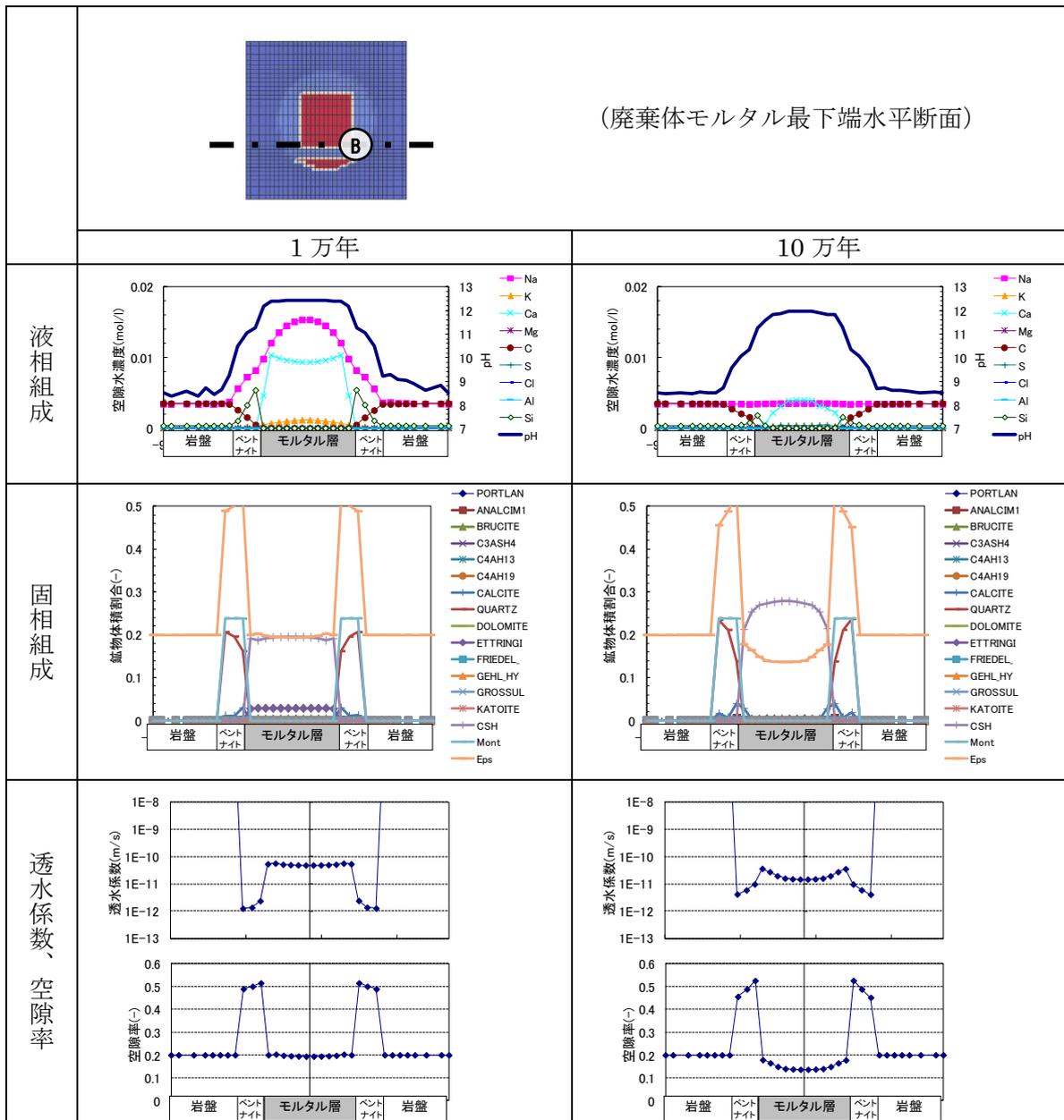


図 5.1.1-33 ケース 3 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面)

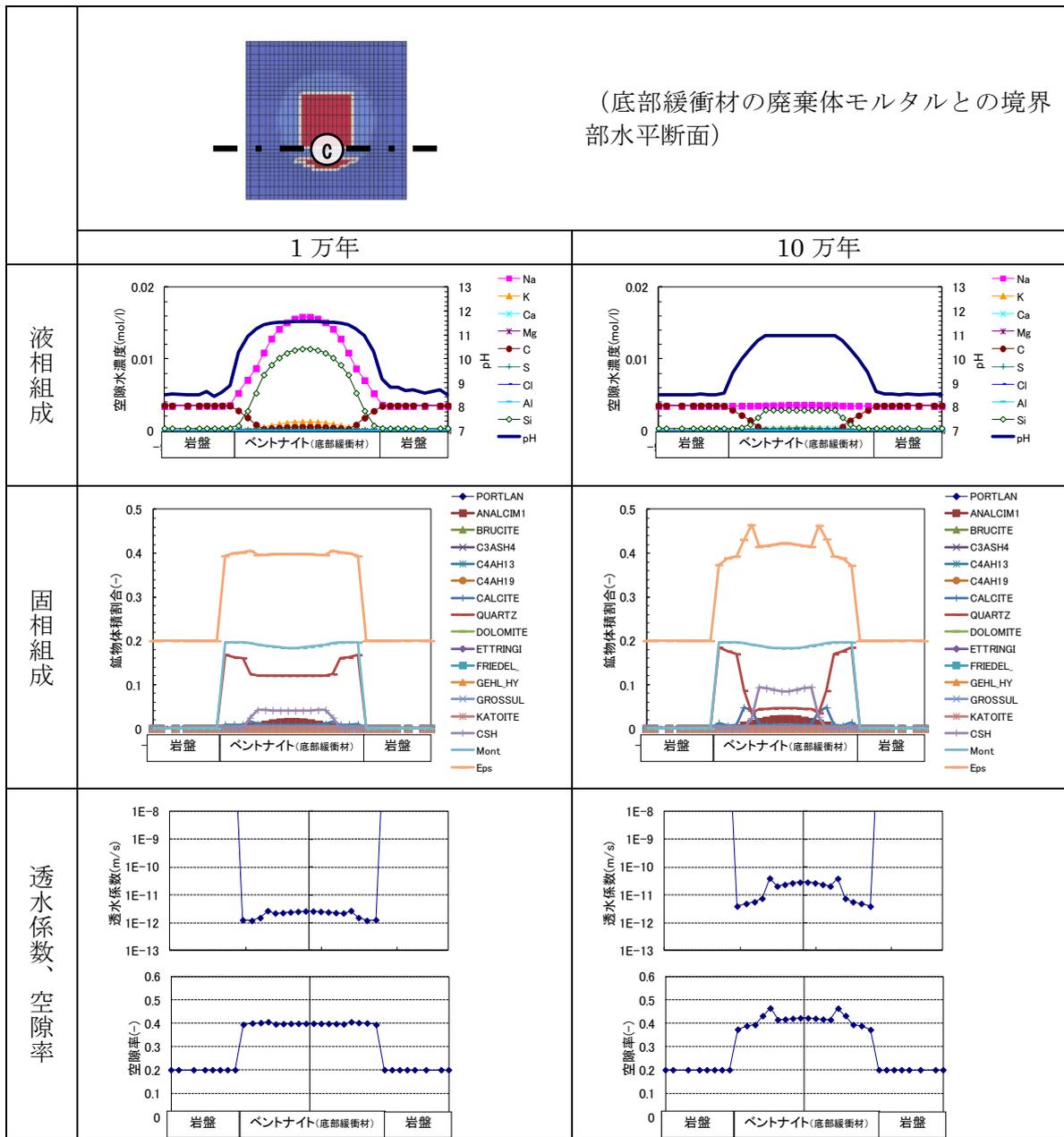
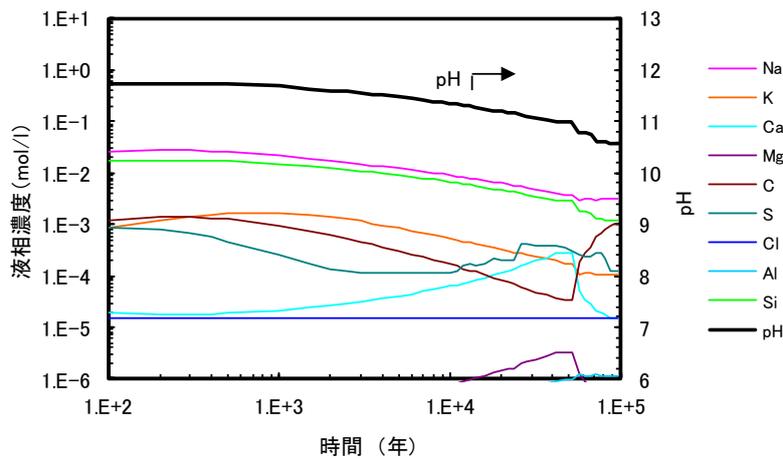
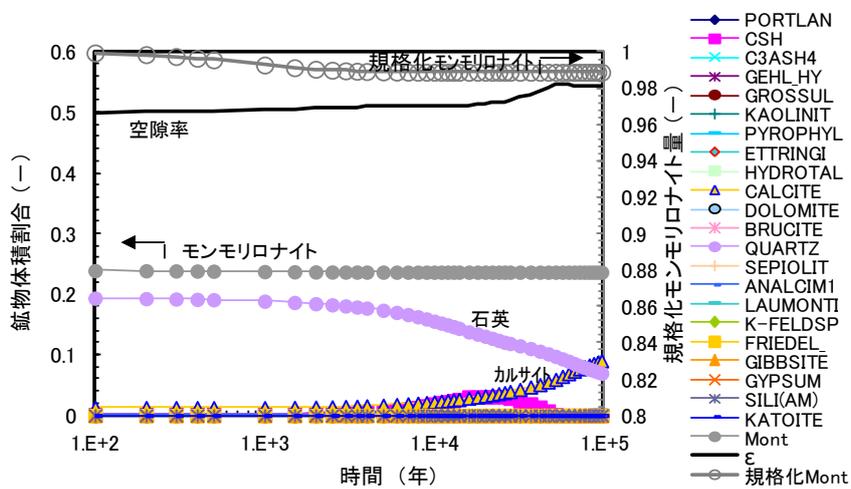


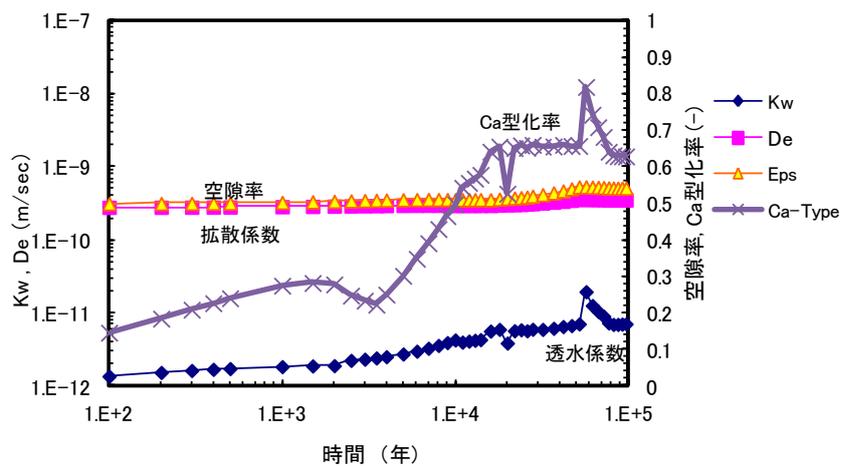
図 5.1.1-34 ケース 3 の 1 万年後、10 万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)



液相組成

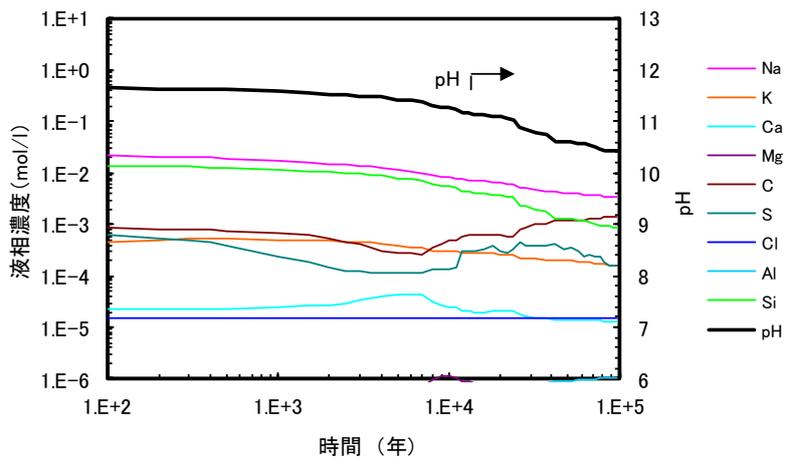


固相組成(体積割合)

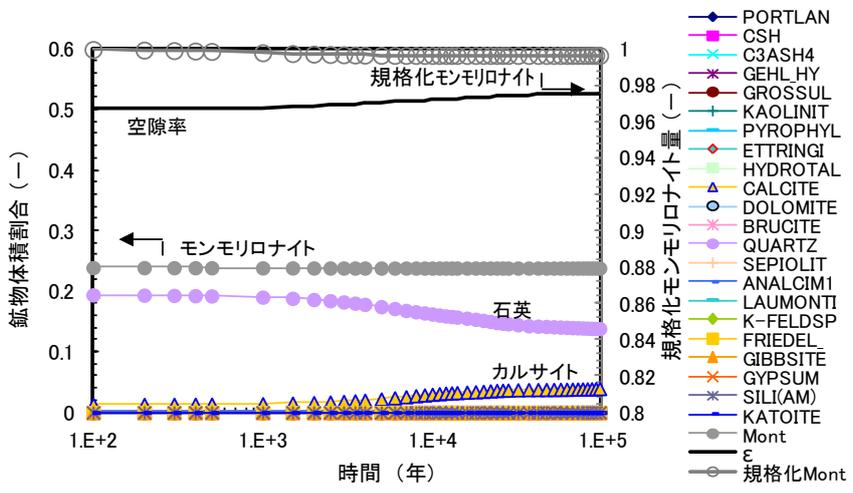


物性値

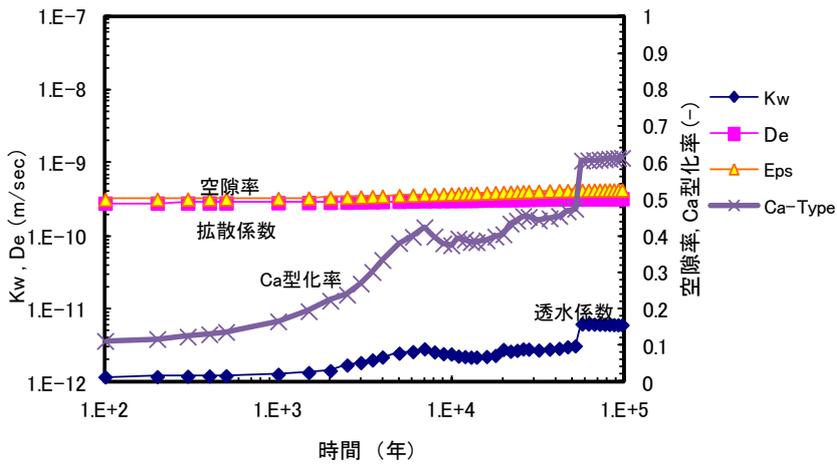
図 5.1.1-35 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース 3)



液相組成

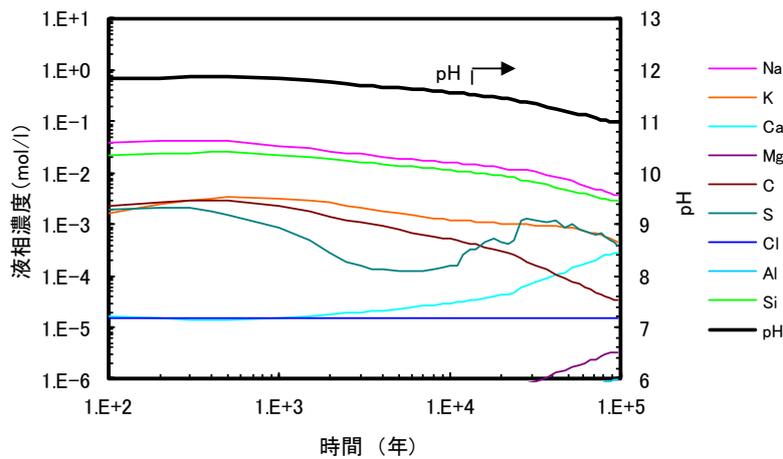


固相組成(体積割合)

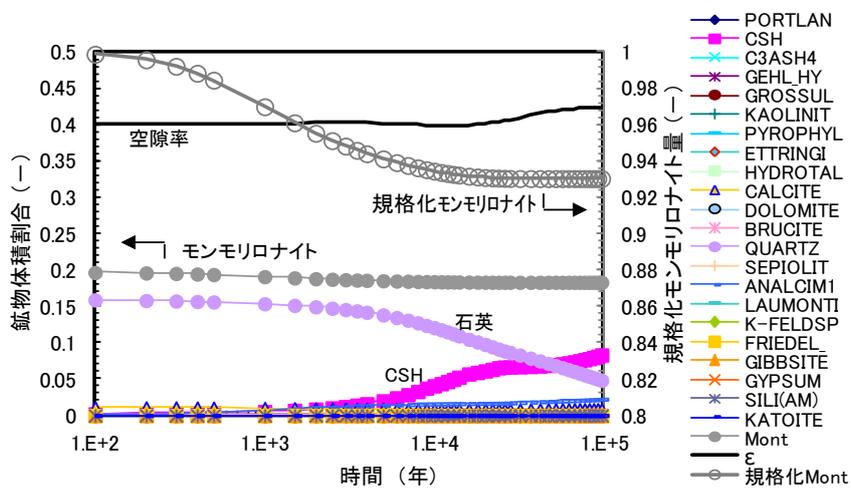


物性値

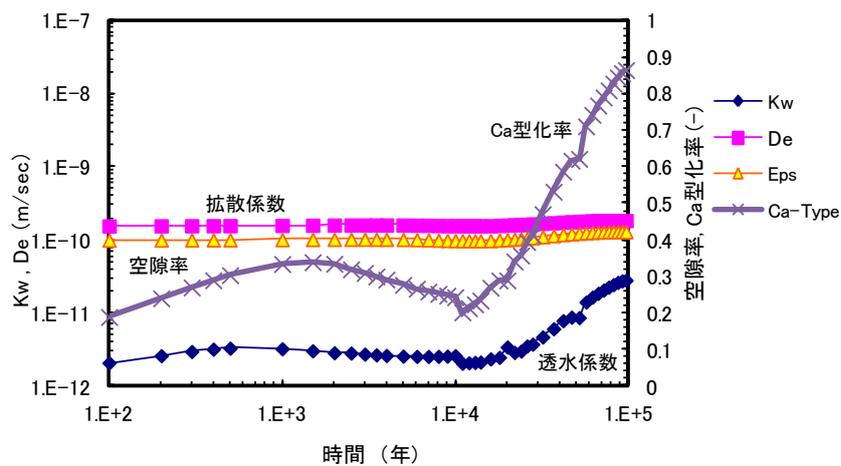
図 5.1.1-36 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース3)



液相組成

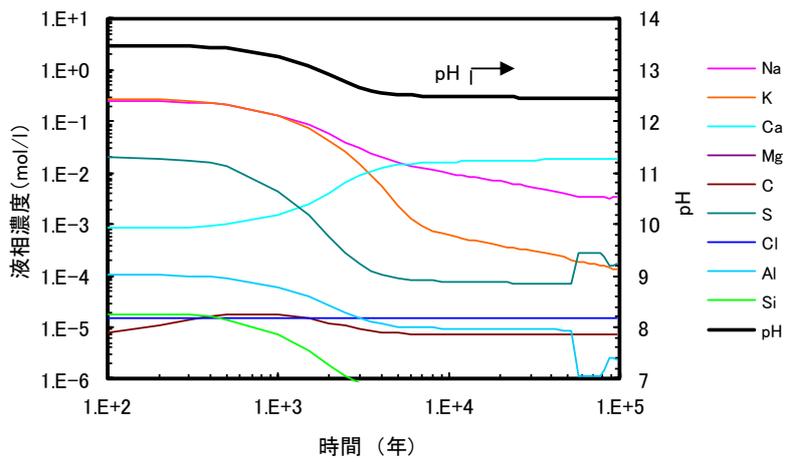


固相組成(体積割合)

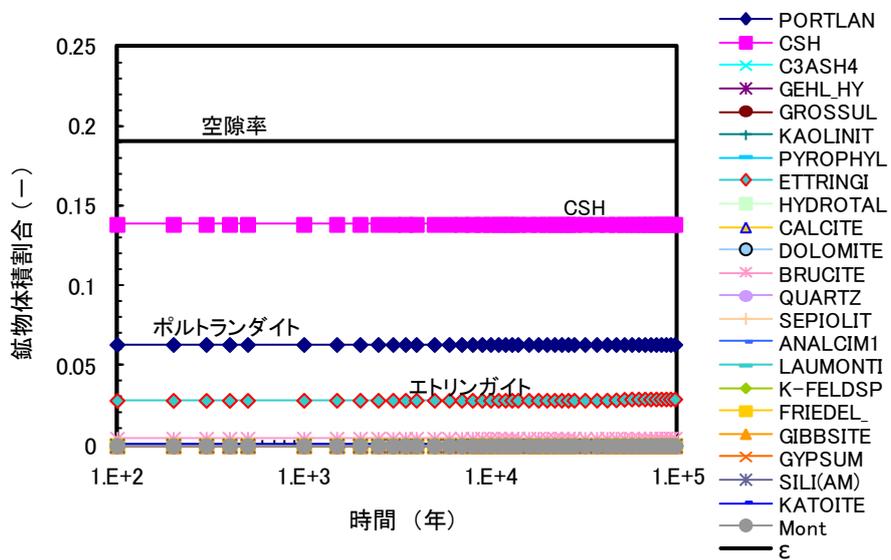


物性値

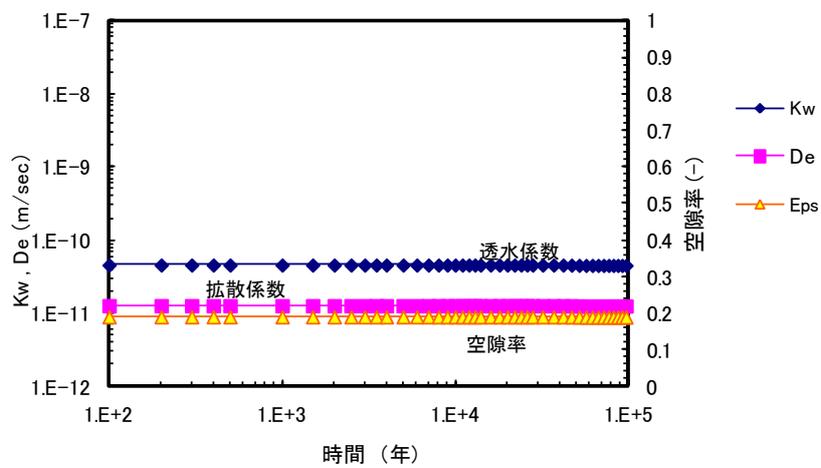
図 5.1.1-37 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース 3)



液相組成

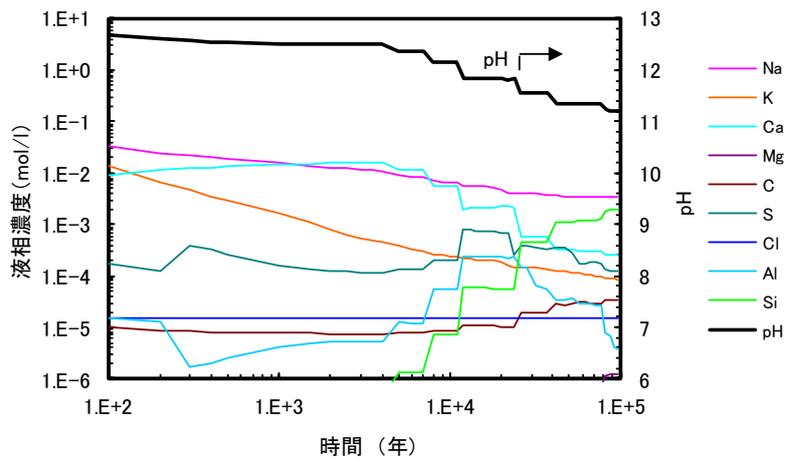


固相組成(体積割合)

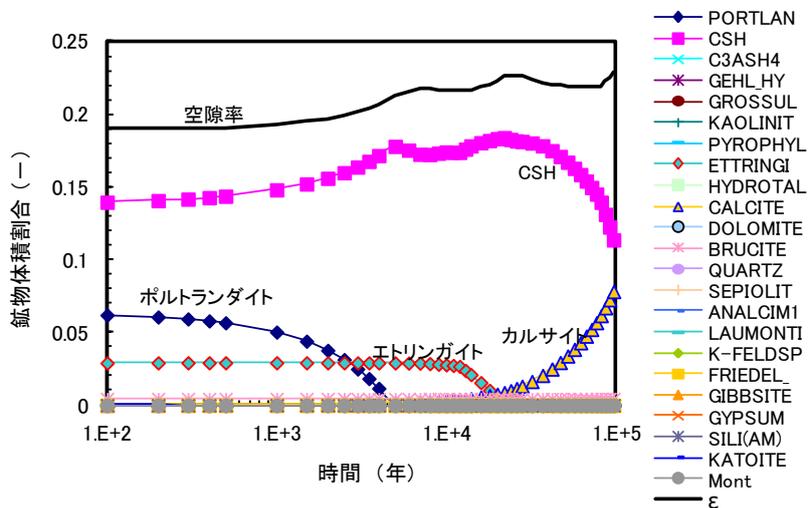


物性値

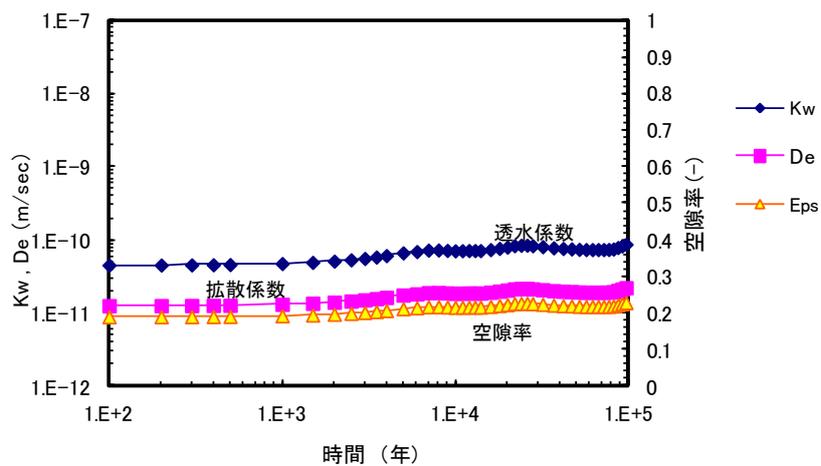
図 5.1.1-38 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース3)



液相組成



固相組成(体積割合)



物性値

図 5.1.1-39 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面 (地点 (2.75,-6.25)) の経時変化結果 (ケース 3)

5) 計算ケース4

ケース4は、固相モンモリロナイトの反応についてはNa型モンモリロナイト(Na-Mont)のみを考慮し、陽イオン交換の計算には4つの型を考慮した計算ケースであり、かつ二次鉱物セットを変更したものである。

ケース4の結果は、ケース0～3に比較して、モンモリロナイトの溶解は早くなった。モンモリロナイトが溶解して二次鉱物（ヒューランダイト）が生成し、空隙率は減少傾向であった。

ケース3の結果は、上記のケース0～ケース2と似た結果となった。固相のモンモリロナイトについてNa型のみとしたため、系内のCaが少なく、二次鉱物のカルサイトやC-S-Hの沈澱が計算ケース0～2に比較して少なくなった（10万年後）。Ca型化率についても、計算ケース0～2に比較してやや小さい値で変遷した。

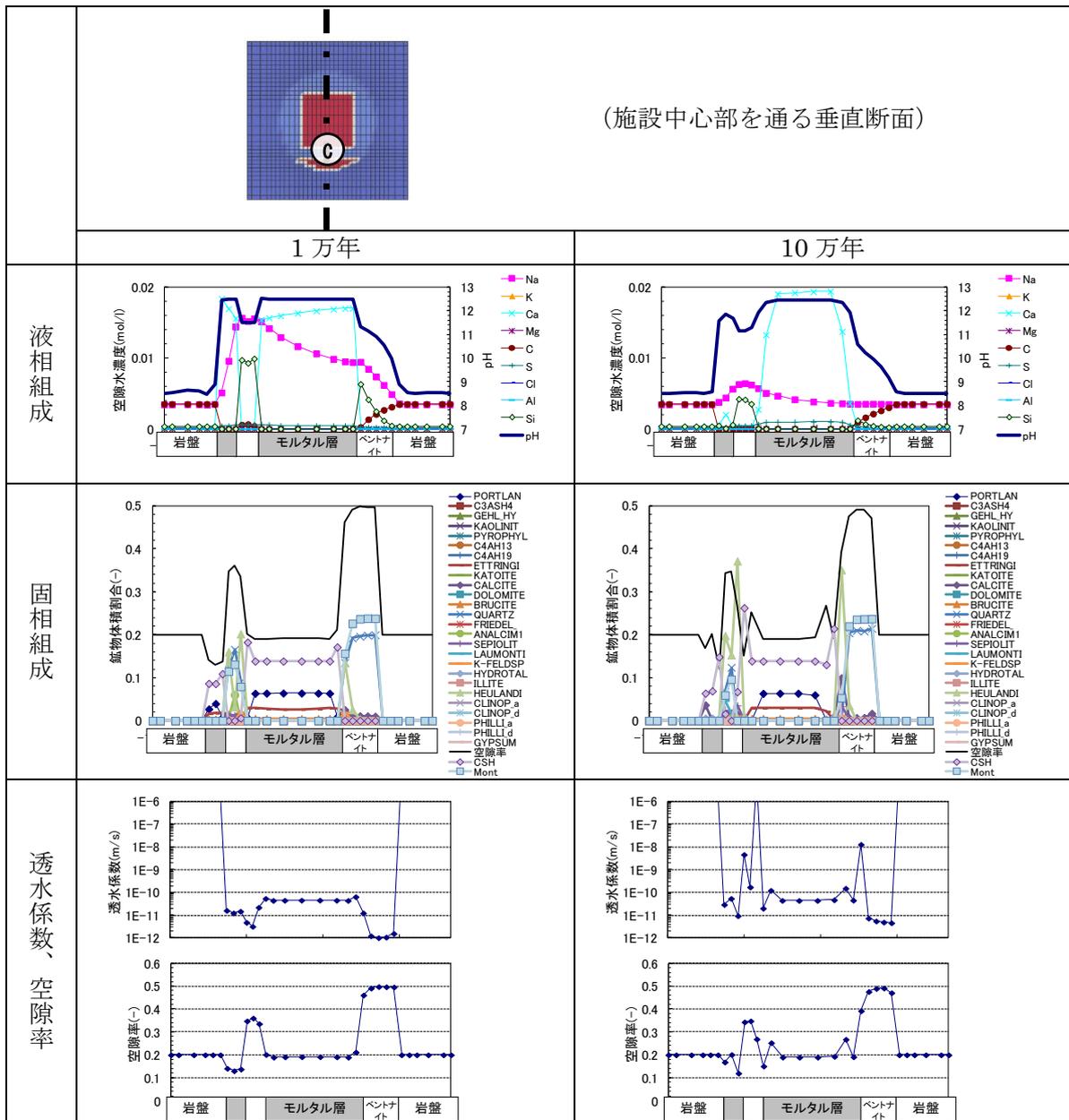


図 5.1.1-40 ケース4の1万年後、10万年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面)

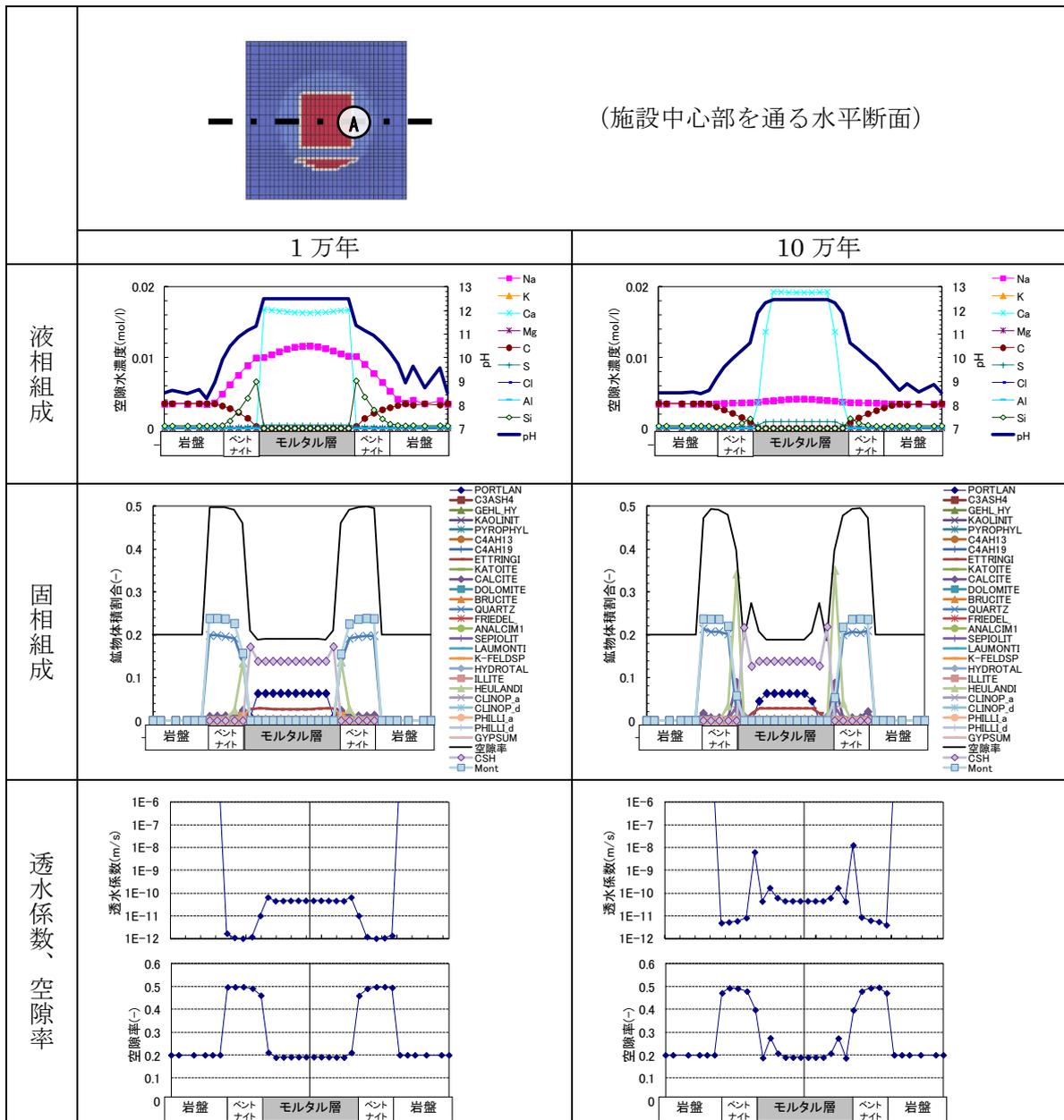


図 5.1.1-41 ケース4の1万年後、10万年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面)

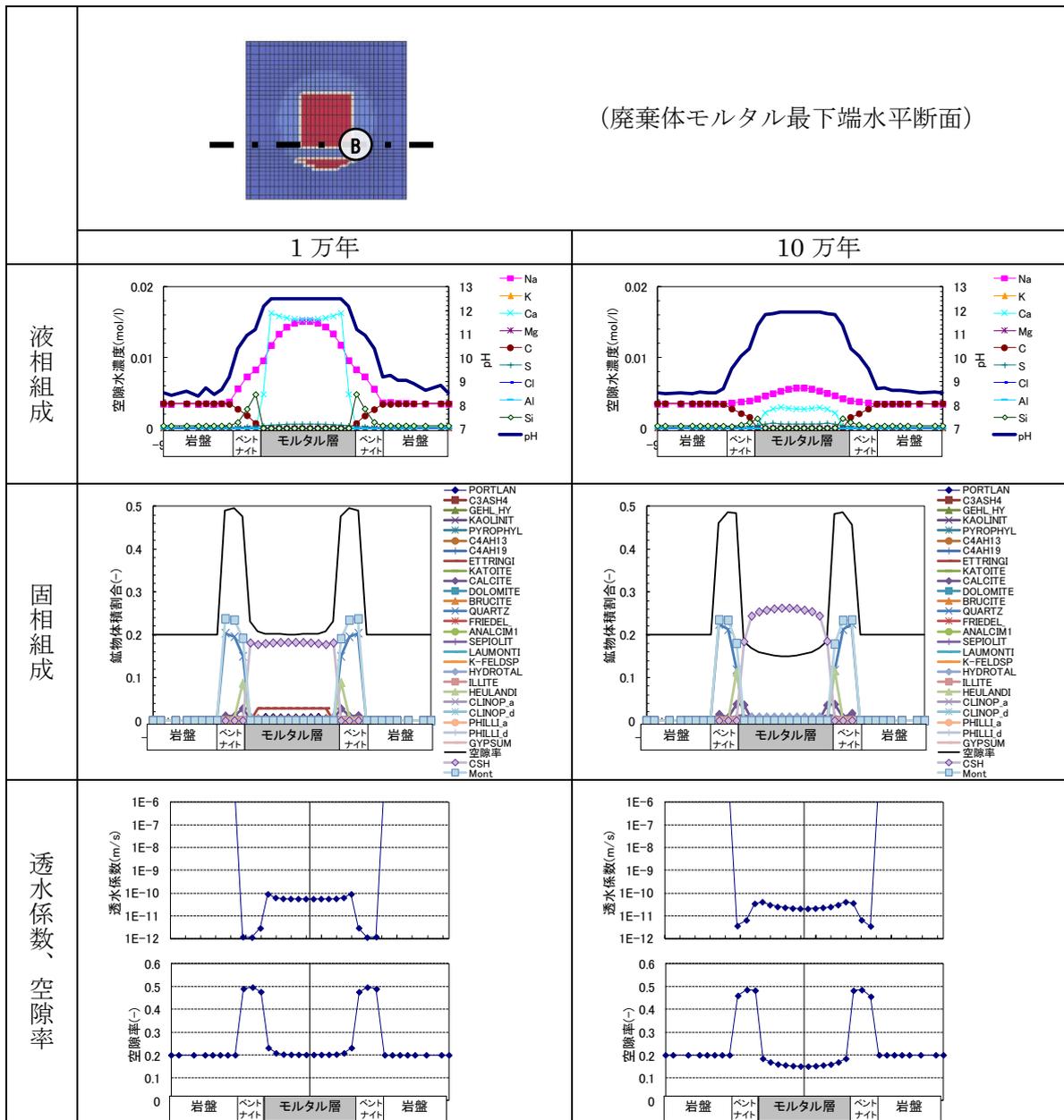


図 5.1.1-42 ケース4の1万年後、10万年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面)

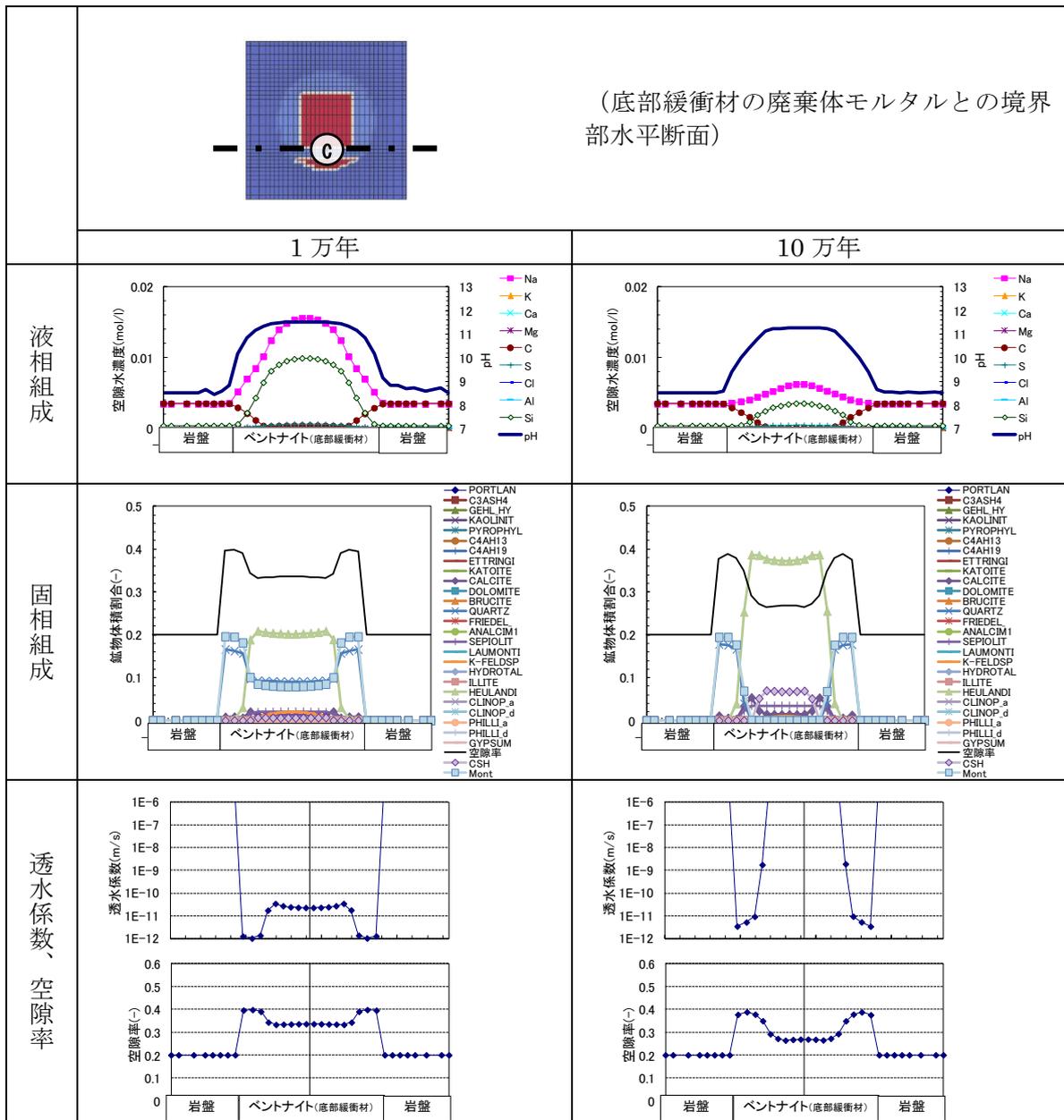
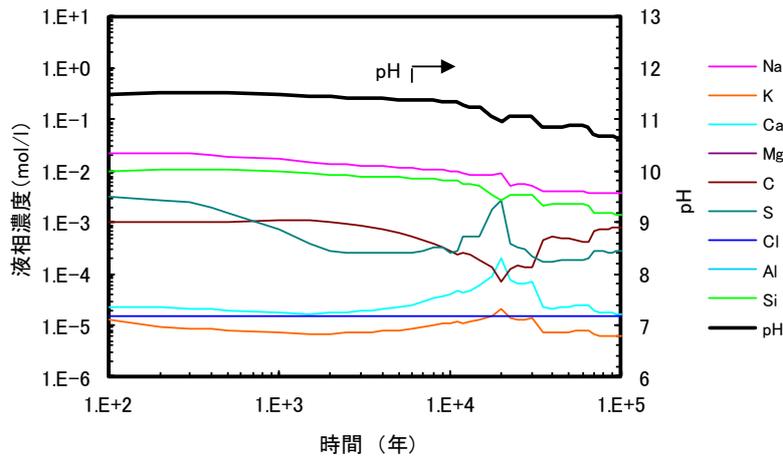
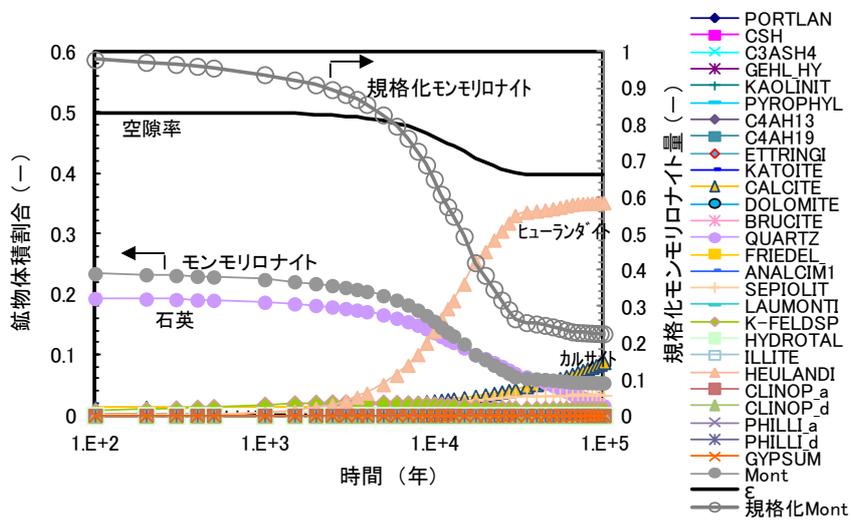


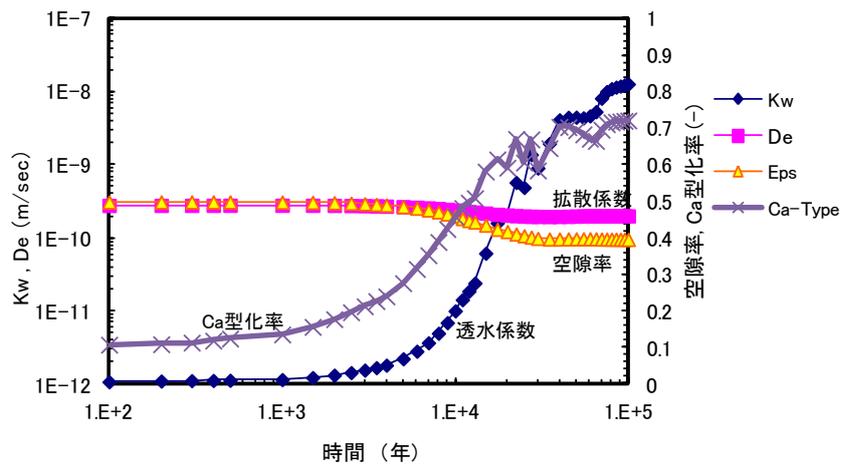
図 5.1.1-43 ケース4の1万年後、10万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面)



液相組成

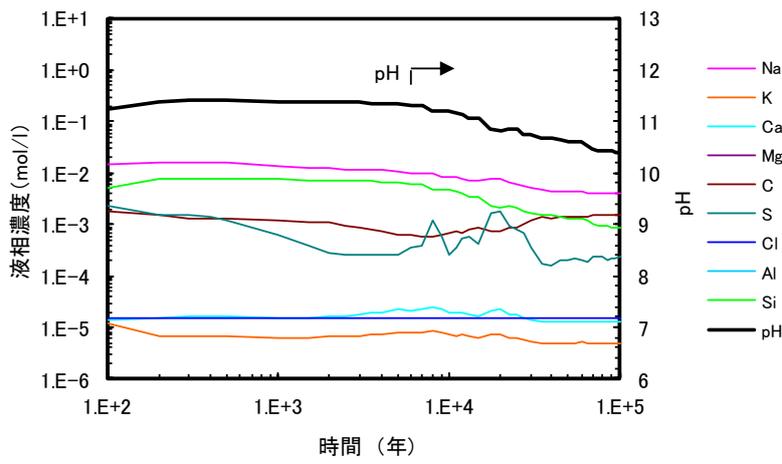


固相組成(体積割合)

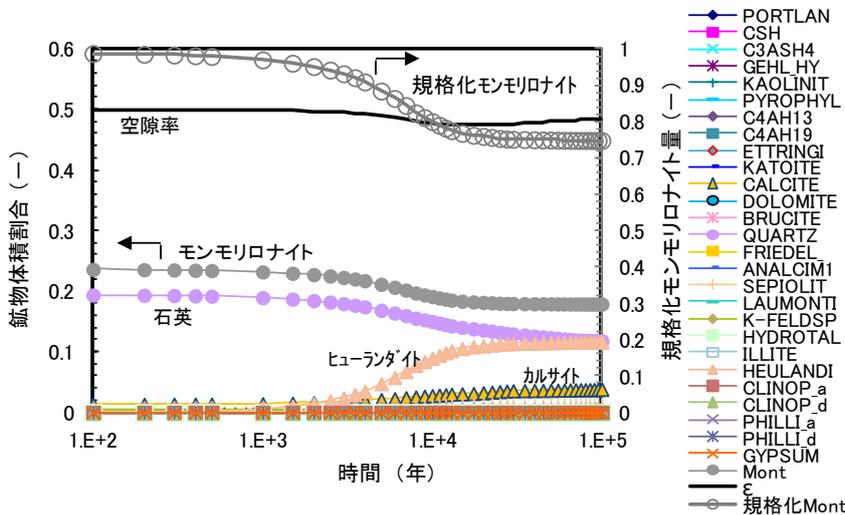


物性値

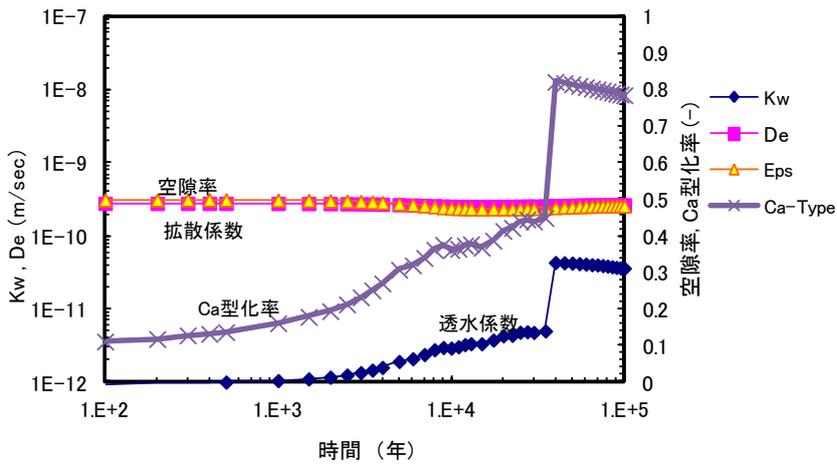
図 5.1.1-44 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース4)



液相組成

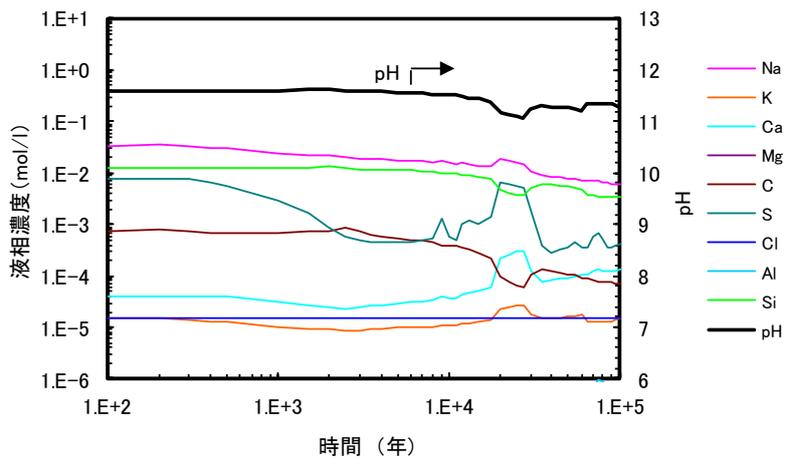


固相組成(体積割合)

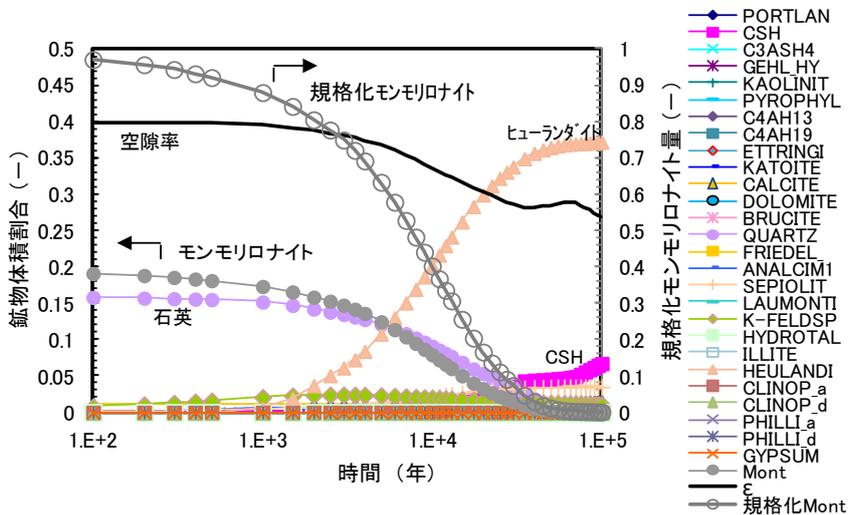


物性値

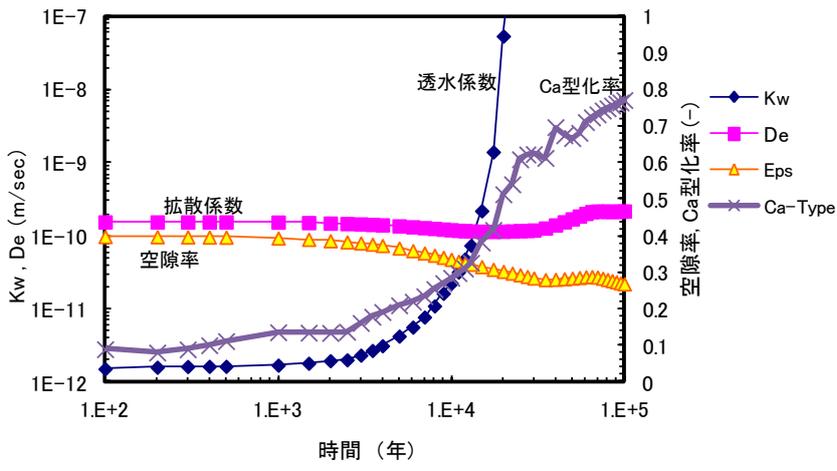
図 5.1.1-45 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース4)



液相組成

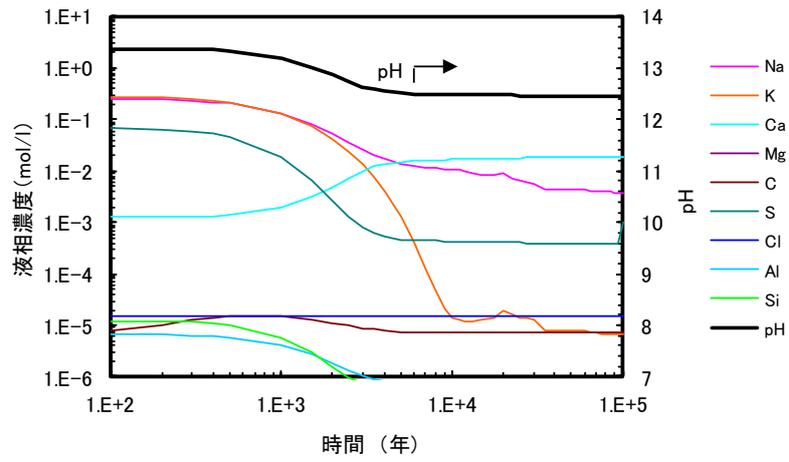


固相組成(体積割合)

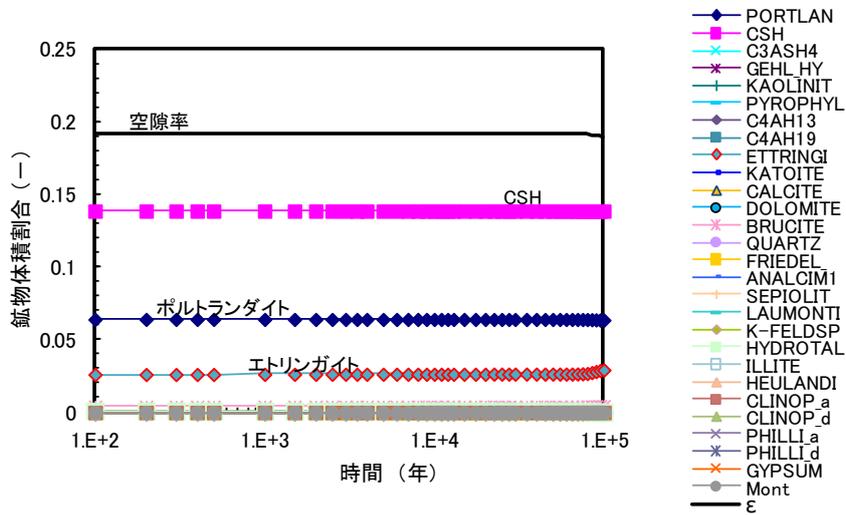


物性値

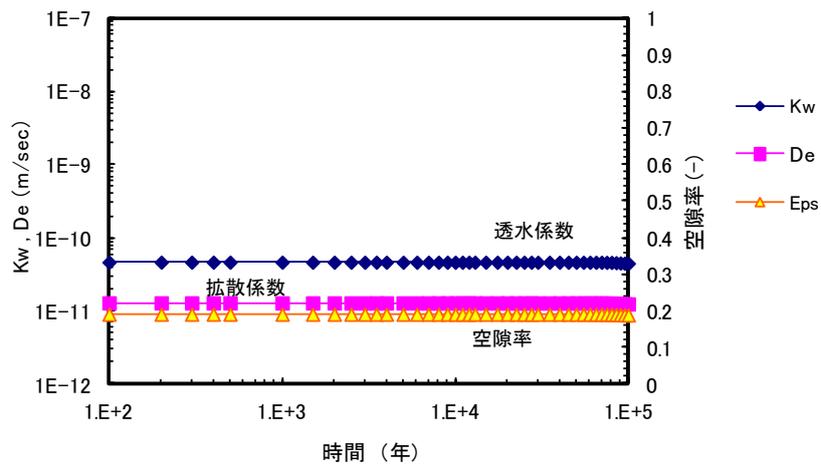
図 5.1.1-46 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース4)



液相組成

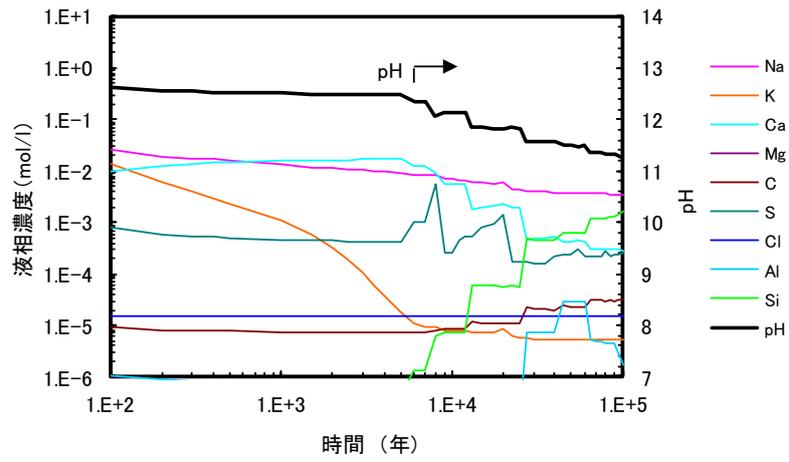


固相組成(体積割合)

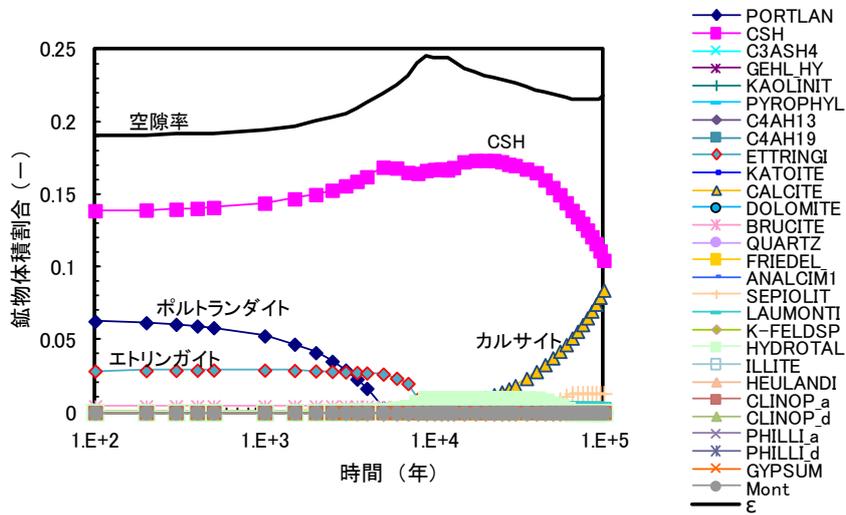


物性値

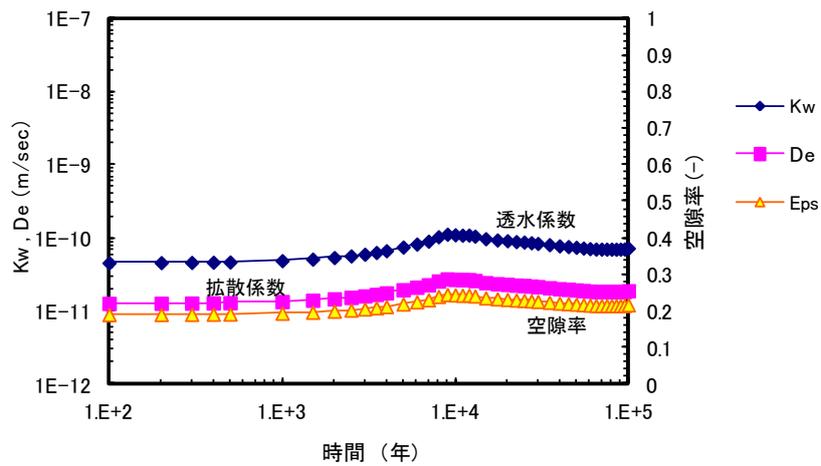
図 5.1.1-47 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース 4)



液相組成



固相組成(体積割合)



物性値

図 5.1.1-48 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面（地点 (2.75,-6.25)）の経時変化結果（ケース 4）

(4) 力学-化学連成解析に向けた二次元地球化学解析のまとめ

本検討の計算結果から、地化学解析において、モンモリロナイトの再沈殿を制限しないケースでも再沈殿を制限したケースでも、同等の解析結果が得られることがわかった。過去の解析的検討[10]と同様に、モンモリロナイトの再沈殿可・不可は計算結果にほとんど影響を与えないことが、今回の二次元の解析結果でも示された。よって、モンモリロナイトの沈殿傾向は、連成解析におけるデータの受け渡し条件による影響である可能性が考えられる。そのため次項の力学-化学連成解析においては、固相の濃度の取り扱いを、図 5.1.1-1 及び図 5.1.1-2 での検討を考慮した条件で検討を進めることとした。

陽イオン交換反応については、取り扱い方法を変えて計算を行ったが、いずれも Ca 型化率の時間変化において変曲点（振動）は存在した。これは、たとえば、セメント系材料に含まれるポルトランドイトが溶解して消失した瞬間の空隙水組成の急変（モンモリロナイト以外の反応は瞬時平衡としているため、ある固相が無くなると別の固相に平衡な空隙水組成となる。）のためであると考えられる。

また、解析ケース 4 で検討した二次鉱物の設定を変更することでモンモリロナイトの溶解が早くなった。モンモリロナイトは溶解速度式に従い溶解していくが、その溶解速度に影響する空隙水組成は随伴鉱物や二次鉱物の反応によって変化する。モンモリロナイト以外の固相の溶解等の反応により、モンモリロナイトの溶解速度が加速していると考えられる。解析ケース 4 では、ヒューランダイトの生成が顕著である。過去の検討においても、ヒューランダイトの沈殿挙動はモンモリロナイトの溶解に影響する[5]ことが分かっており、今回の計算結果も同じ現象である（ヒューランダイトの沈殿によりモンモリロナイトの溶解が促進される。）。

ベントナイトの変質によるヒューランダイトの生成は、試験においては同定されておらず、比較的短期の解析評価においては二次鉱物としてのヒューランダイトは考慮する必要はない可能性が高い。一方で、地層処分施設を対象とするような長期的な解析においては、ナチュラルアナログ情報からヒューランダイトの生成可能性は考えられ、二次鉱物としてヒューランダイトを設定する必要があると考えられる。ただし、そのヒューランダイトの生成挙動はモンモリロナイトの溶解に対して影響を及ぼすと考えられるため、ヒューランダイトの生成挙動を把握することは、長期変質解析において重要である。なお、解析ケース 4 において二次鉱物設定の参考にした JAEA の検討[6]においては、二次鉱物には沈殿速度を設定している（考慮した全ての固相に対して反応速度を設定している）。

加えて、モンモリロナイトの溶解については、モンモリロナイト自体の溶解速度（溶解挙動）とともに、他の二次鉱物の挙動による影響が考えられることは、今回の結果においてもわかった。今回の計算結果においては、ヒューランダイトの生成挙動等の二次鉱物の生成挙動を明らかにすることで、長期のベントナイトの変質解析の不確実性の低減につながると考えられる。

5.1.2 化学・力学連成モデル試験の化学解析による検討

第3章の3.2.3節で実施した化学変質に伴う力学挙動試験を対象として地球化学解析を行った。地球化学解析の結果は、この力学試験の試料に関して3.3節で実施した化学分析結果と比較して検討した。

(1) 対象とする力学挙動試験

化学解析を実施した力学挙動試験のケースを表5.1.2-1、表5.1.2-2に示す。力学挙動試験を模擬した化学解析の概念図を図5.1.2-1に示す。

表 5.1.2-1 Na型ベントナイトのアルカリ変質に伴う力学挙動変化の取得試験ケース

	呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考
No.8	KPDS-3	クニピア F 乾燥密度 1.6 Mg/m ³ 程度	0.1M NaOH	供試体高さ 5mm

表 5.1.2-2 イオン強度と陰イオン種の違いに伴う力学挙動変化の取得試験ケース

	呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考
No.11	KPDS-H	クニピア F 乾燥密度 1.6 Mg/m ³ 程度	蒸留水	供試体高さ 5mm
No.12	KPDS-N01	クニピア F 乾燥密度 1.6 Mg/m ³ 程度	0.1M NaCl 水溶液	供試体高さ 5mm イオン強度の影響把握

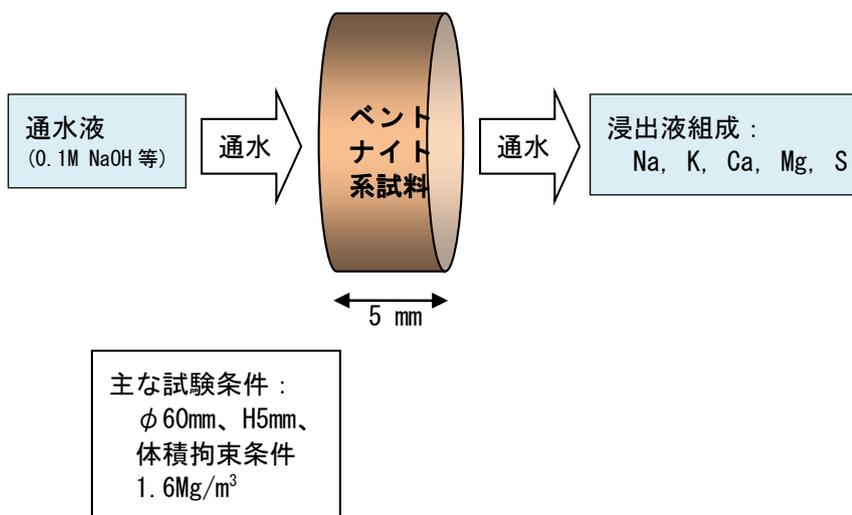


図 5.1.2-1 力学試験を模擬した体系概要図

(2) 解析条件

予備計算の為の解析体系を図 5.1.2-2 のように設定した。解析メッシュは、ベントナイト試料長さ 5mm を 10 分割した。また、物質移行は、拡散場とした。これは、力学挙動試験においては通水試験を行ったが排水液は非常に少なく、また、ベントナイトの拡散係数は比較的大きいため、拡散での移行が卓越すると考えられるためである。

計算条件を表 5.1.2-3 に示す。計算には PHREEQC[11]を使用した。物質移行に係わる拡散係数は時間・場所によらず一定とし、空隙率も時間・場所によらず一定であると仮定した。

表 5.1.2-3 計算条件

計算条件		
固相 (ベントナイト)	クニピア F	初期固相はモンモリロナイト、随伴鉱物として玉髄 (1wt%) とした。モンモリロナイトは溶解速度 (第 2 次 TRU レポート[7]) で溶解する。
試料直径	φ 60 mm	
試料厚さ	5 mm	
初期乾燥密度	1.6 Mg/m ³	乾燥密度から、真密度 2.7 とし、空隙率として 0.4 とした。
液相	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 蒸留水 ✓ NaCl 水溶液 ✓ NaOH 水溶液 	試験ケースに対応
拡散係数	1.2E-10 m ² /s	拡散のみ (移流での移行は考慮しない)

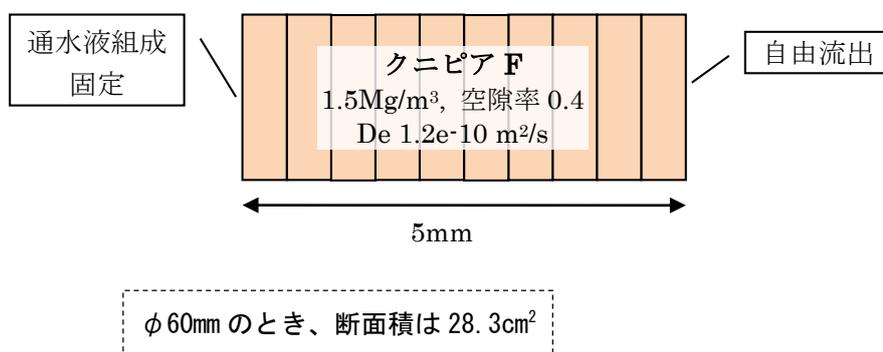


図 5.1.2-2 解析体系図

モンモリロナイトの溶解速度は、第 2 次 TRU レポート [7] で使用された次の式に従う。モンモリロナイトの反応表面積 A_{min} は、KPDS-3、KPDS-H 及び KPDS-N01 の 3 ケースで $7[m^2/g]$ とし [7]、KPDS-3 の 1 ケースで A_{min} を 2.3.2 節にて圧密状態を考慮して定式化した式 5.1.2-1 として計算を行った。

$$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-3957/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{2037/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{2037/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{-69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{2357/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{2357/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr / RT)^6 \right) \right\}$$

式 5.1.2-1

$Rate$: モンモリロナイト溶解速度 [mol/s]

A_{min} : 鉱物の反応表面積 [m^2]

R : 気体定数 [kJ/K mol]

T : 絶対温度 [K]

a_{OH^-} : 水酸化物イオンの活量

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化 [kJ/mol]

$$A_{min}(\rho_d) = -0.6 \ln(\rho_d) + 0.2 \quad \text{式 5.1.2-2}$$

A_{min} : 実効露出端面積 [m^2/g]、 ρ_d : 乾燥密度 [Mg/m^3]

(3) 計算結果

1) KPDS-3 の計算結果 (反応表面積 $7 m^2/g$)

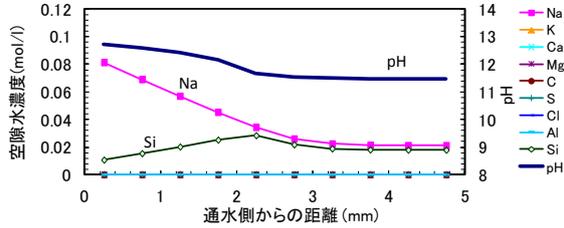
この化学解析は、クニピア F における、0.1M NaOH 溶液の通水における挙動変化試験を模擬したケースである。モンモリロナイトの溶解速度式の反応表面積は $7 m^2/g$ である。

図 5.1.2-3 は、経過時間ごとの、液相組成及び固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶解していないが、1,000 日後に通水側 (上流端) で 2 割程度 (1,500 日後では約 3 割) 減少した。随伴鉱物として設定したカルセドニは上流側から溶解した。カルセドニの溶解とともに、二次鉱物として C-S-H ゲルが生成した。また、平成 26 年度の解析 [4] ではブルーサイトとして沈澱していた Mg は、ハイドロタルサイトとして沈澱した。アナルサイトは、下流側で生成した。図 5.1.2-4 は、上流端及び下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、1,000 日後に、上流端で 2 割程度・下流端で約 6% 減少した。随伴鉱物のカルセドニは初期に消失した。また、上流端では、生成した C-S-H ゲルは、約 150 日後に消失した。

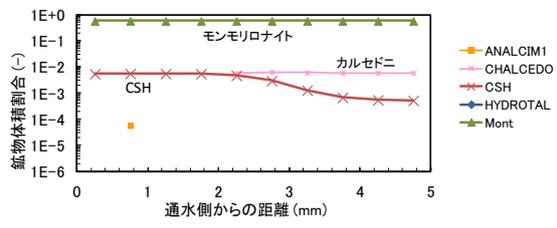
図 5.1.2-5 に、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示す。モンモリロナイトの溶解にともない、乾燥密度も上流側で減少し、下流側で大きな乾燥密度となった。試験結果も、同様の傾向であった。



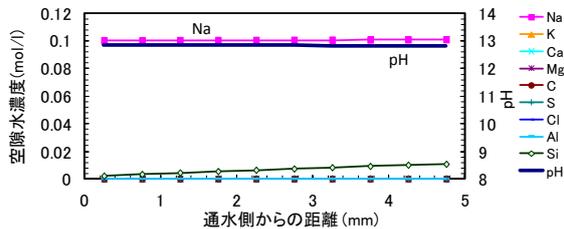
ただし計算は拡散場



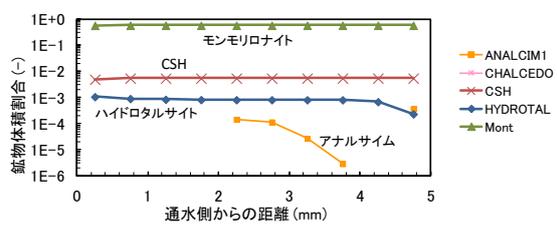
3 日



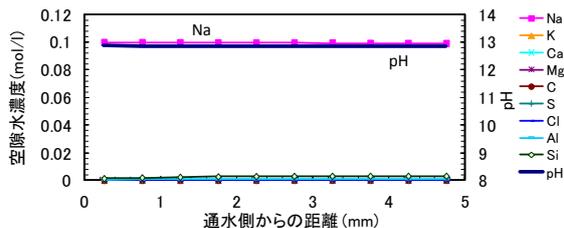
3 日



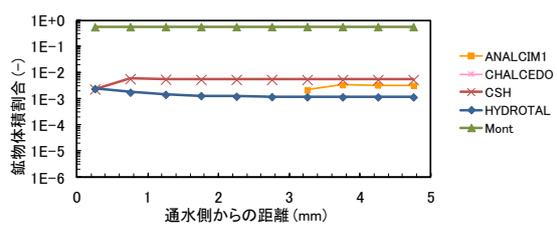
30 日



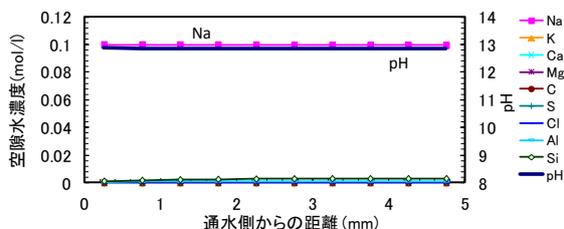
30 日



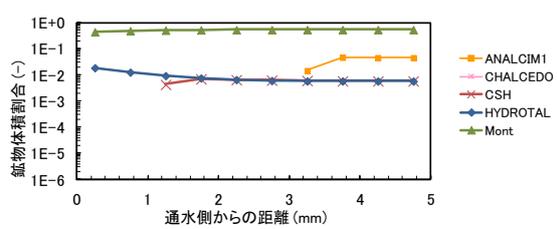
100 日



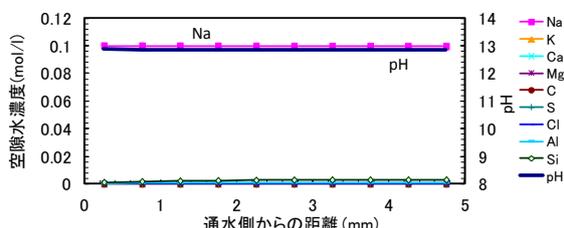
100 日



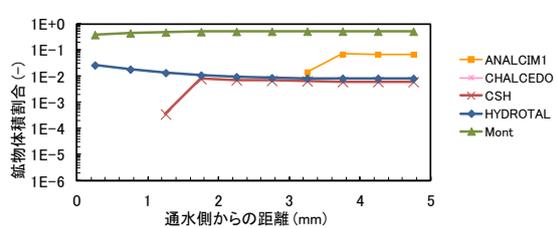
1,000 日



1,000 日



1,500 日



1,500 日

液相組成分布

固相体積分布

図 5.1.2-3 液相・固相分布結果図 (KPDS-3、反応表面積 7 m²/g)

図 5.1.2-6 に、1,000 日後の液相組成分布を、試験分析から得られた間隙水の化学組成とともに示す。上流側の方が、濃度が低い傾向は計算結果と試験結果とで同様であるが、上流側と下流側における濃度の差は、計算結果より試験結果の方が大きかった。また、Al 以外は試験結果の方が大きい濃度であった。間隙水組成は、モンモリロナイトの溶解だけではなく、微量に含まれる随伴鉱物の組成等によって異なる可能性がある。

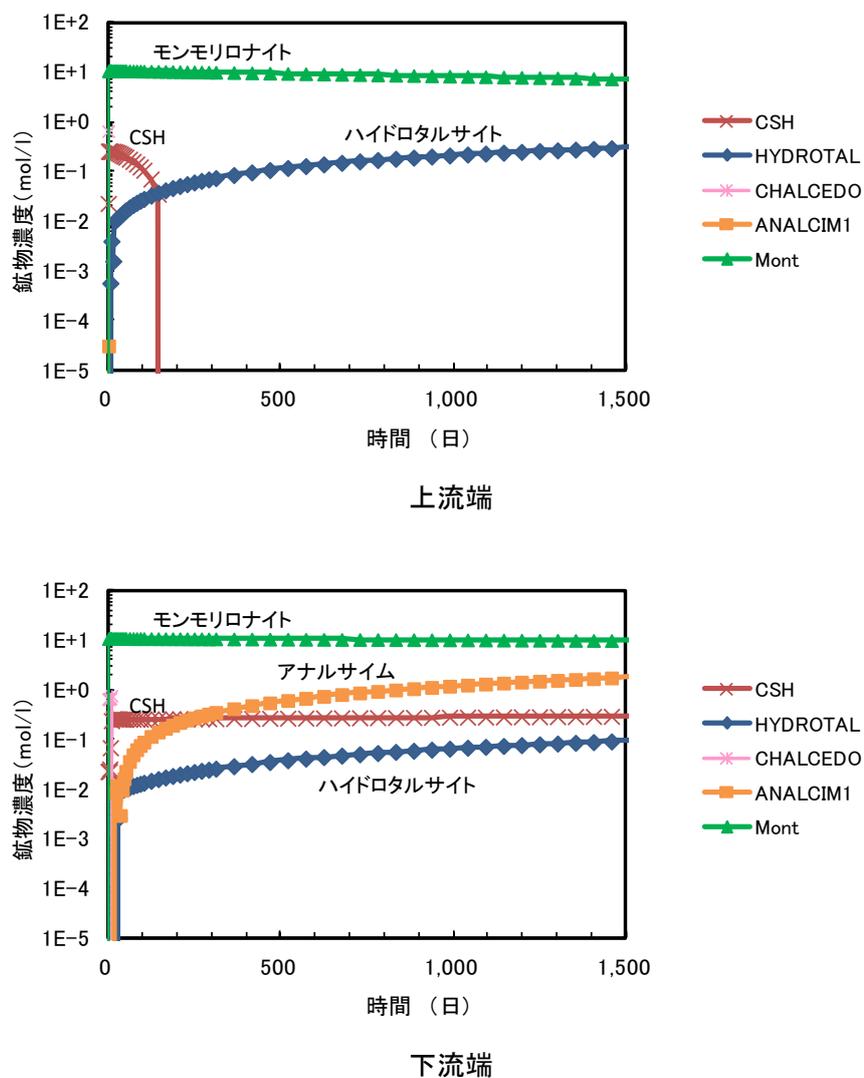


図 5.1.2-4 上流端及び下流端の固相濃度経時変化 (KPDS-3、反応表面積 7 m²/g)

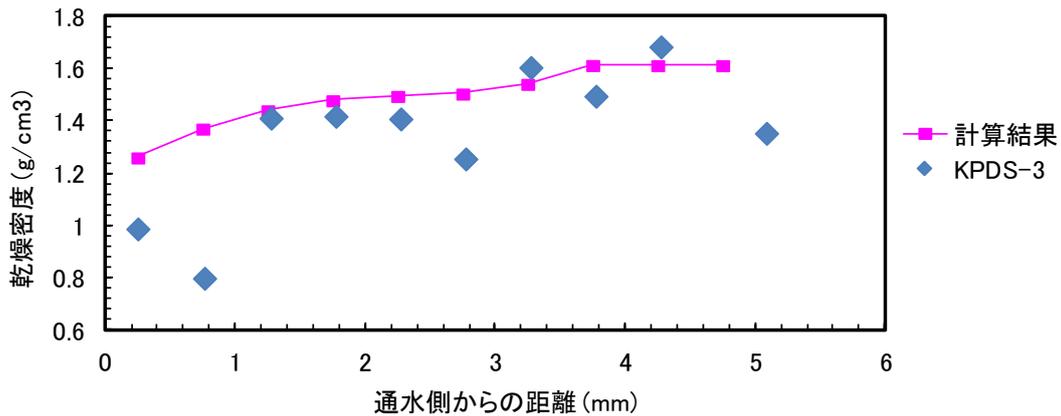


図 5.1.2-5 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-3、反応表面積 $7 \text{ m}^2/\text{g}$)

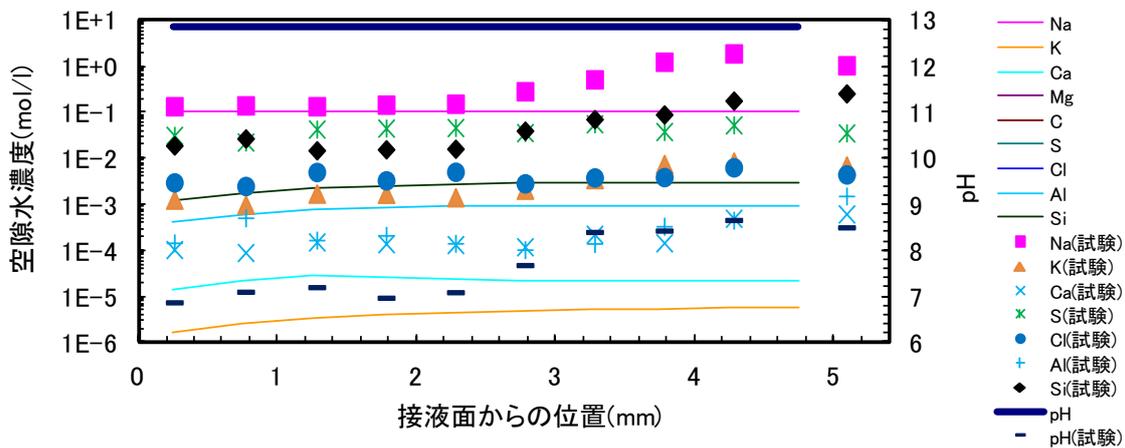


図 5.1.2-6 1,000 日後の液相組成分布 (KPDS-3、反応表面積 $7 \text{ m}^2/\text{g}$)

2) KPDS-H の計算結果 (反応表面積 $7 \text{ m}^2/\text{g}$)

この化学解析は、クニピア F における、蒸留水の通水における挙動変化試験を模擬したケースである。モンモリロナイトの溶解速度式の反応表面積は $7 \text{ m}^2/\text{g}$ である。

図 5.1.2-7 は、経過時間ごとの液相組成及び固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶せず、随伴鉱物として設定したカルセドニが上流側から溶解した。図 5.1.2-8 に、上流端及び下流端の、固相濃度の経時変化を示す。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、カルセドニが上流端では約 70 日後に消失し、下流端では 1,000 日後では解析開始時から約 6%減少した。

図 5.1.2-9 に、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示す。試験結果では、上流端・下流端で乾燥密度が低下する傾向があるが、計算結果では、モンモリロナイトの溶解がほとんどなかったため、乾燥密度も初期の $1.6 \text{ Mg}/\text{m}^3$ からほとんど変化していない。

図 5.1.2-10 に、1,000 日後の液相組成分布を、試験分析から得られた間隙水の化学組成と

ともに示す。上流側の方が、濃度が低い傾向はあるものの、計算ではほとんど変質していないため、計算結果は試験結果に比べて2,3桁以上小さい濃度となった。

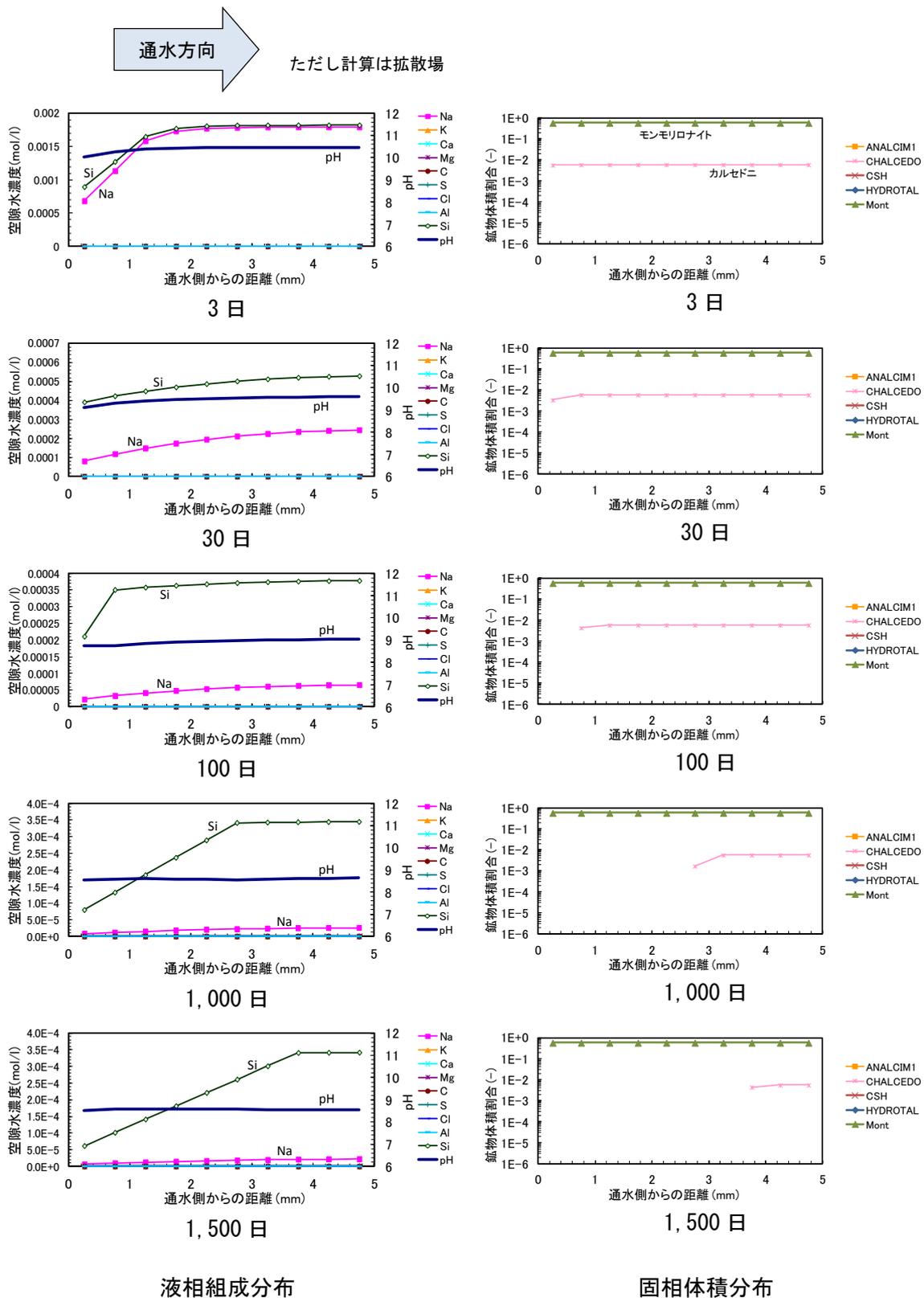


図 5.1.2-7 液相・固相分布結果図 (KPDS-H、反応表面積 7 m²/g)

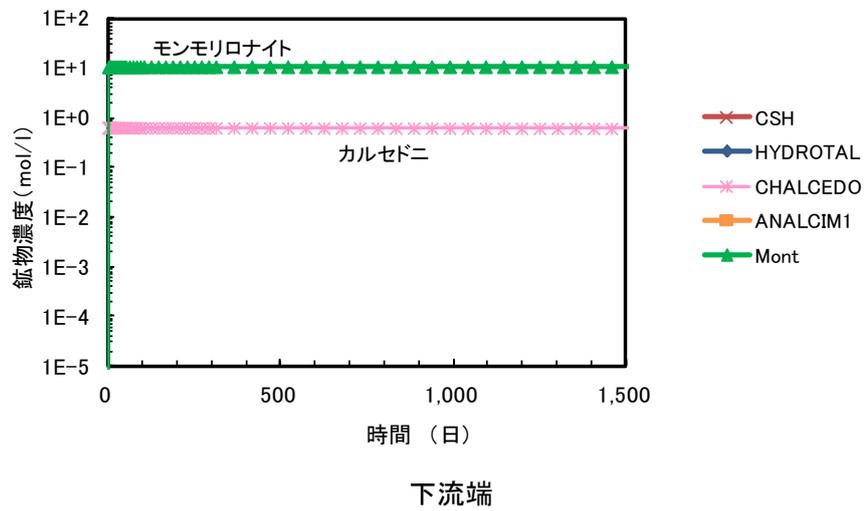
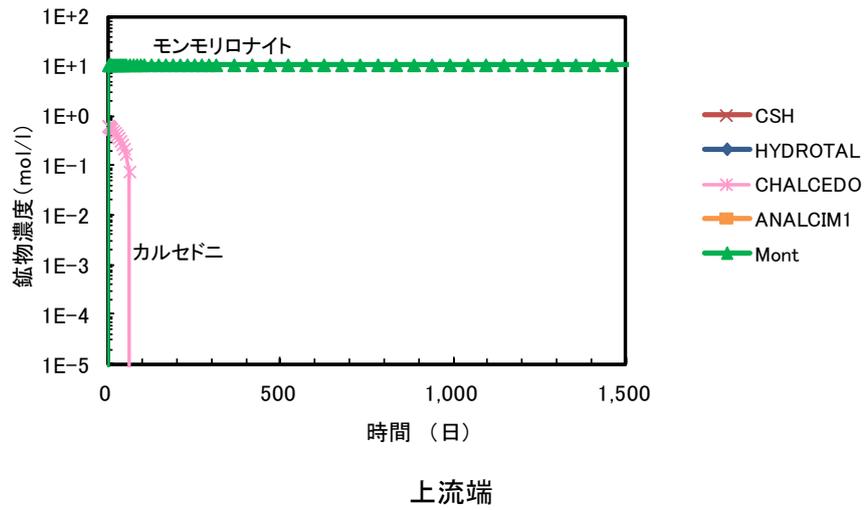


図 5.1.2-8 上流端及び下流端の固相濃度経時変化 (KPDS-H、反応表面積 7 m²/g)

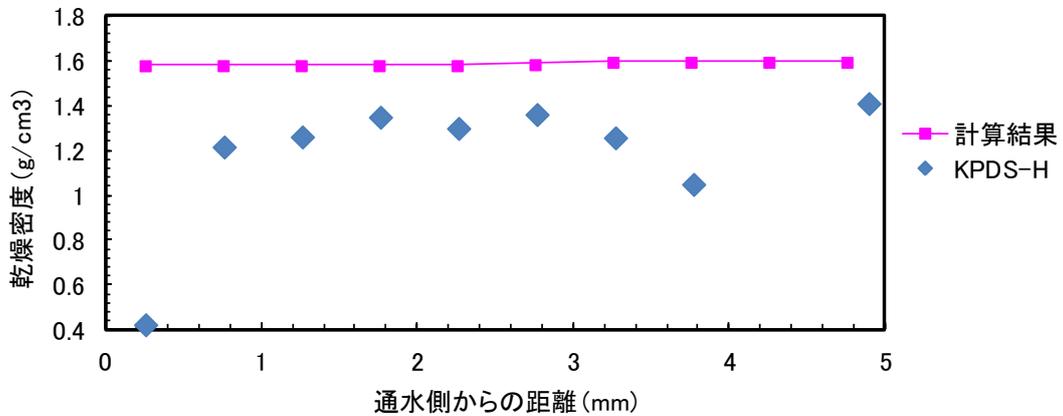


図 5.1.2-9 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-H、反応表面積 7 m²/g)

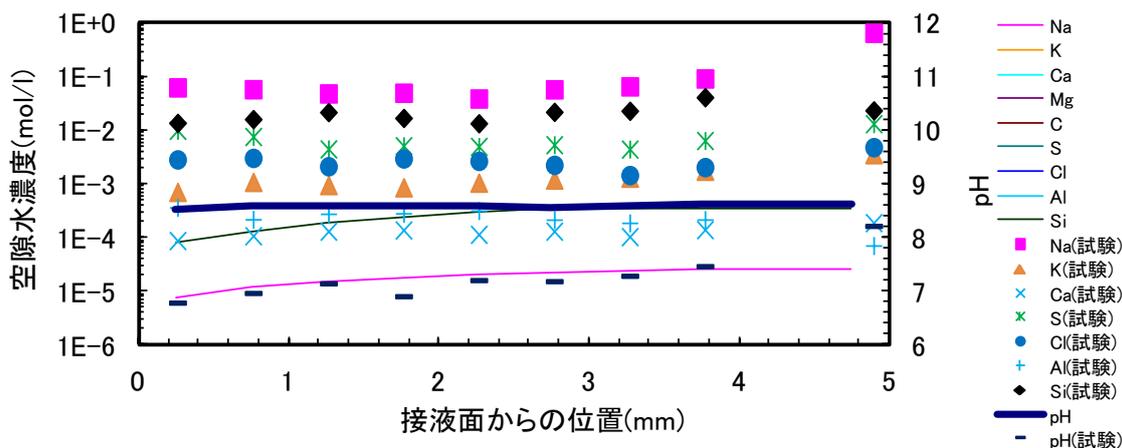


図 5.1.2-10 1,000 日後の液相組成分布 (KPDS-H、反応表面積 7 m²/g)

3) KPDS-N01 の計算結果 (反応表面積 7 m²/g)

この化学解析は、クニピア F における、0.1M NaCl 水溶液の通水における挙動変化試験を模擬したケースである。モンモリロナイトの溶解速度式の反応表面積は 7 m²/g である。

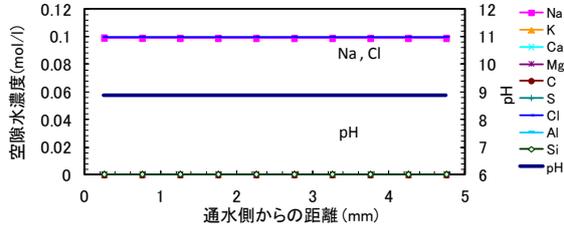
図 5.1.2-11 は、経過時間ごとの、液相組成及び固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶せず、随伴鉱物として設定したカルセドニが上流側から溶解した。図 5.1.2-12 に、上流端及び下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、カルセドニが上流端では約 80 日後に消失し、下流端では 1,000 日後に約 4%減少した。

図 5.1.2-13 に、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示す。試験結果は、上流端・下流端で乾燥密度が低下する傾向があるが、計算結果は、モンモリロナイトの溶解がほとんどなかったため、乾燥密度も初期の 1.6 Mg/m³ からほとんど変化していない。

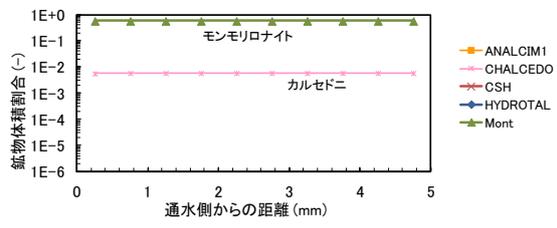
図 5.1.2-14 に、1,000 日後の液相組成分布を、試験分析から得られた間隙水の化学組成とともに示した。pH と Ca 濃度は、試験と計算結果とで同等のオーダーで示された。他の元素濃度については、上流側の方が、濃度が低い傾向はあるものの、計算結果は試験結果に比べて小さい値であった。



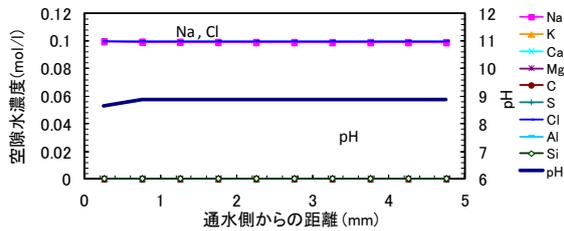
ただし計算は拡散場



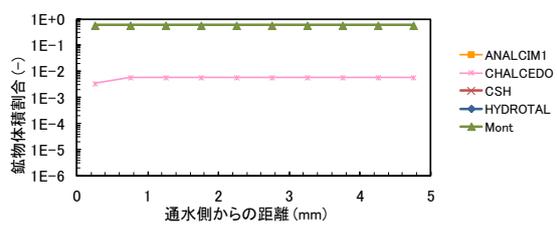
3 日



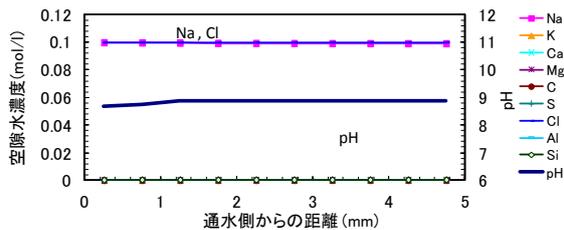
3 日



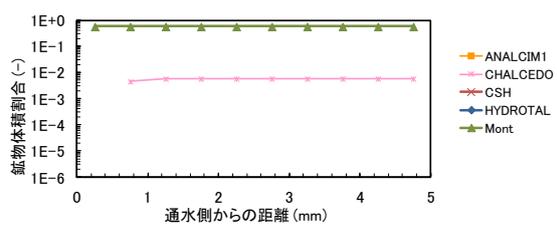
30 日



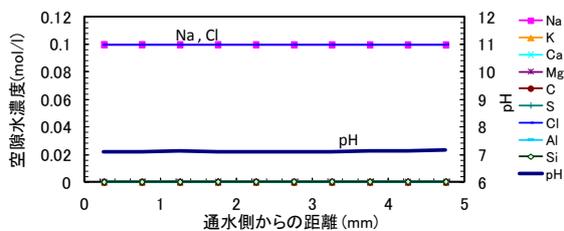
30 日



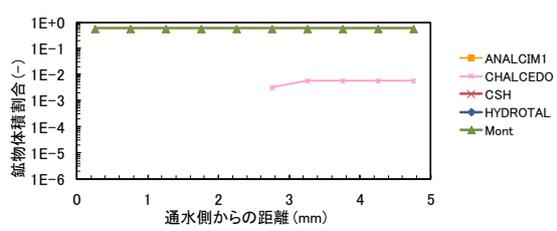
100 日



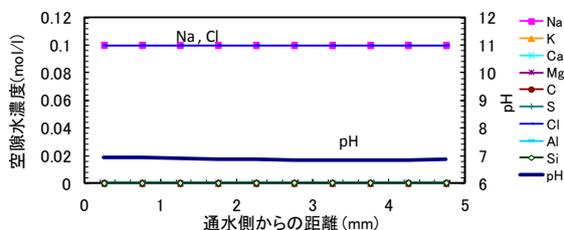
100 日



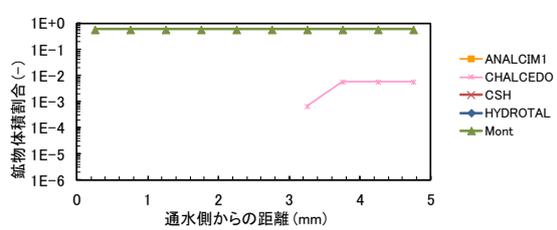
1,000 日



1,000 日



1,500 日



1,500 日

液相組成分布

固相体積分布

図 5.1.2-11 液相・固相分布結果図 (KPDS-N01、反応表面積 7 m²/g)

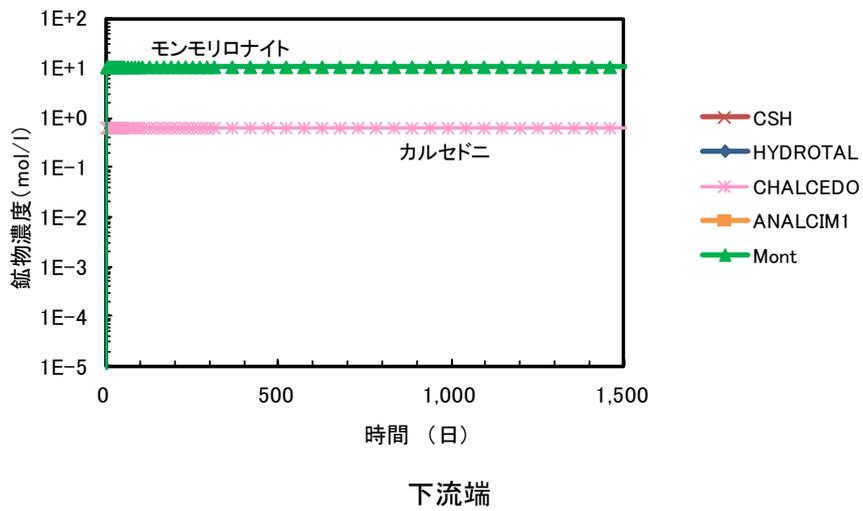
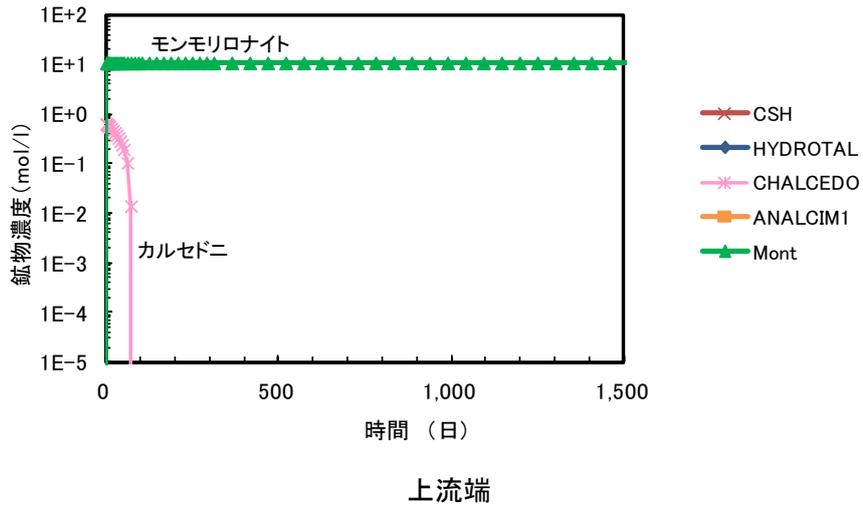


図 5.1.2-12 上流端及び下流端の固相濃度経時変化 (KPDS-N01、反応表面積 7 m²/g)

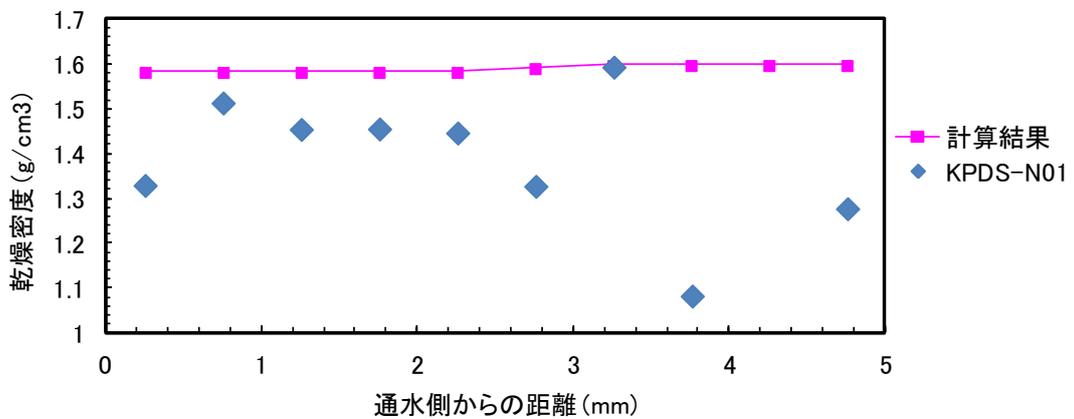


図 5.1.2-13 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-N01、反応表面積 7 m²/g)

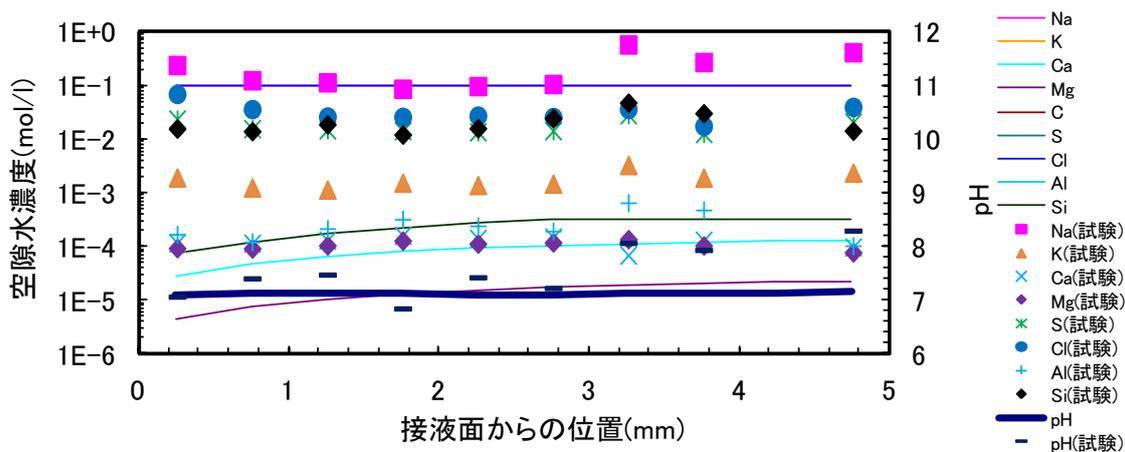


図 5.1.2-14 1,000 日後の液相組成分布 (KPDS-N01、反応表面積 7 m²/g)

4) KPDS-3 の計算結果 (反応表面積は圧密状態を考慮)

モンモリロナイトの溶解速度を変更して計算した結果について示す。クニピア F において、0.1M NaOH 溶液の通水における挙動変化試験を模擬したケースである。対象試料厚さは 5mm である。

図 5.1.2-15 は、経過時間ごとの、液相組成及び固相体積分布結果である。モンモリロナイトはさらに溶解しない結果となった。モンモリロナイトの溶解が少ないため、二次鉱物の生成も少ない結果となった。図 5.1.2-16 は、上流端及び下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解していない。随伴鉱物のカルセドニは初期に消失した。また、上流端では、生成した CSH ゲルは 80 日後に消失し、ハイドロタルサイトではなくブルーサイトが生成した。下流端ではアナルサイムの生成はなくブルーサイトが生成し、二次鉱物として生成した CSH は減少傾向であった。

図 5.1.2-17 は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。モンモリロナイトの溶解が非常に遅いため計算による乾燥密度はほとんど変化がなかった。

図 5.1.2-18 に、1,000 日後の液相組成分布を、試験分析から得られた間隙水の化学組成とともに示した。上流側のほうが、液相元素濃度が低い傾向は計算結果と試験結果とで同様であるが、Na と Ca 以外は、計算結果より試験結果のほうが 2 桁以上高い濃度であった。間隙水組成については、モンモリロナイトの溶解だけでなく、微量に含まれる随伴鉱物の組成等によって異なる可能性がある。

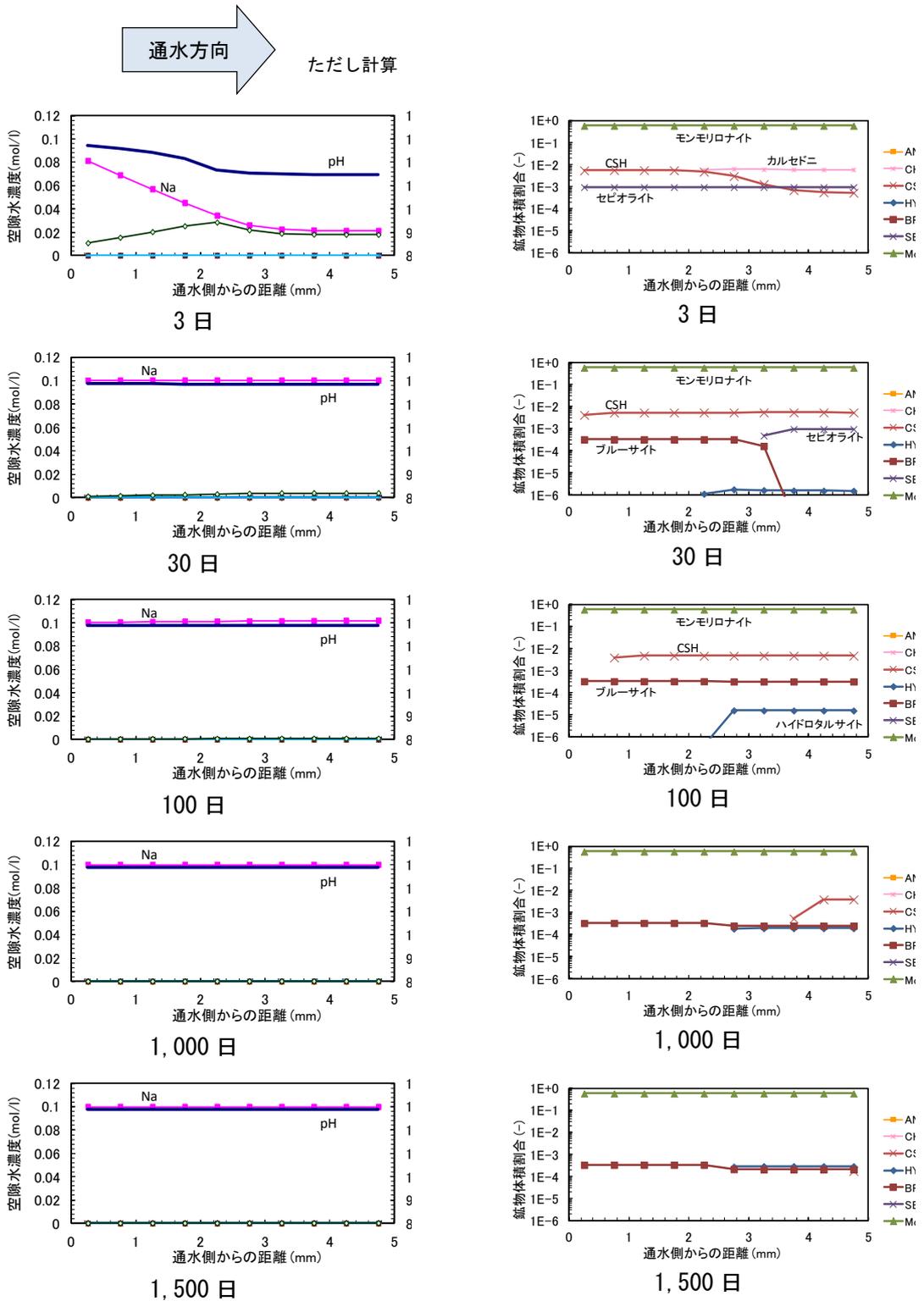


図 5.1.2-15 液相・固相分布結果図 (KPDS-3; 反応表面積は圧密状態を考慮)

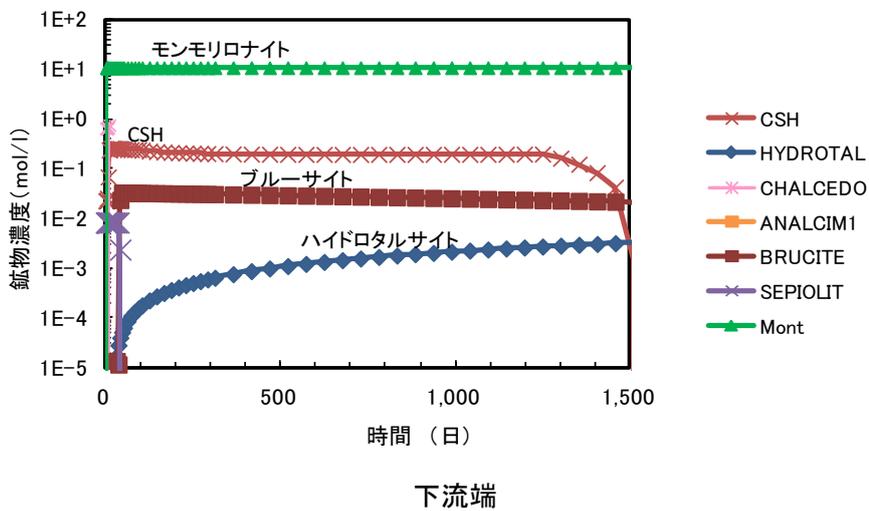
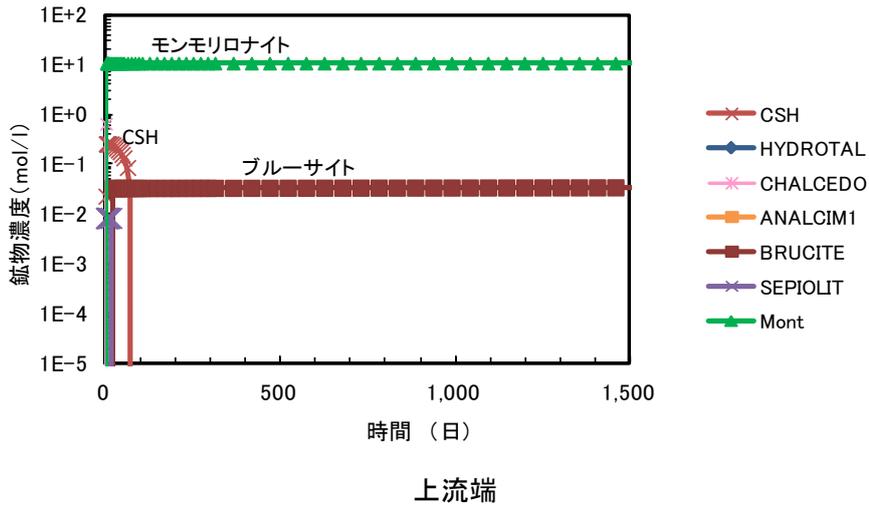


図 5.1.2-16 上流端及び下流端の固相濃度経時変化
(KPDS-3 ; 反応表面積は圧密状態を考慮)

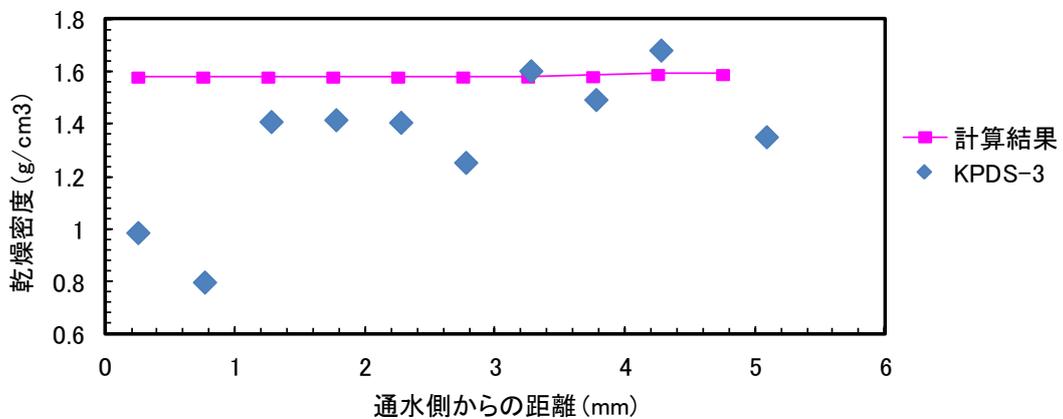


図 5.1.2-17 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-3 ; 反応表面積は圧密状態を考慮)

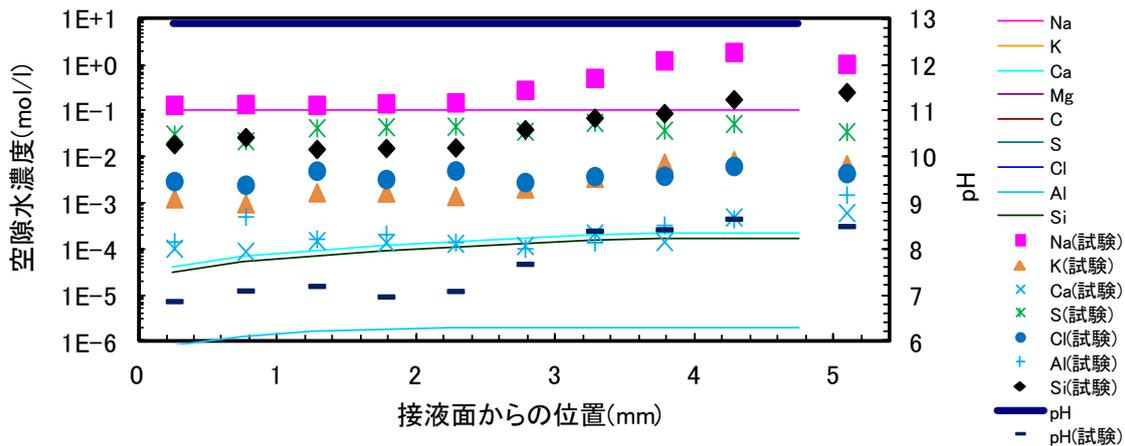


図 5.1.2-18 1,000 日後の液相組成分布 (KPDS-3 ; 反応表面積は圧密状態を考慮)

(4) 化学・力学連成モデル試験を対象とした化学解析のまとめ

本検討では、Na 型ベントナイトの溶解を伴う力学挙動試験の再現計算を行った。間隙水が 0.1M NaOH であるケース (KPDS-3) において、通水側に向かって徐々に乾燥密度が減少しているような分布が、計算結果でも再現することができた。

KPDS-3 試料のケース、反応表面積 $7 \text{ m}^2/\text{g}$ の条件での 1,000 日後の解析結果における、モンモリロナイト含有率とモンモリロナイト初期量で規格化したモンモリロナイト量を図 5.1.2-19 に示す。図 5.1.2-19 には、試験から得られたモンモリロナイト含有量もあわせて示した。

計算結果では、モンモリロナイト含有割合は下流側で減少し、モンモリロナイト量は上流側で減少している。これは、二次鉱物の生成が下流側に近づくに従って増加しているために、モンモリロナイト含有率は下流側で減少した。これは解析では二次鉱物が生成するが、試験結果二次鉱物は生成していなかったためである。

平成 27 年度の本検討の化学解析では、初期鉱物に随伴鉱物としてカルセドニを 1wt% 考慮した。これにより、モンモリロナイトよりも先にカルセドニが溶解する現象が見られた。

二次鉱物の生成については、計算条件としてモンモリロナイトの鉱物の反応は瞬時平衡を仮定しているため、1,000 日間の試験を模擬した化学解析では、モンモリロナイト以外の反応においても、反応速度の影響を受けているものと考えられる。

次に、同じく KPDS-3 試料のケースで、反応表面積を圧密状態に考慮した式 5.1.2-17 の条件で図 5.1.2-20 に示す。計算結果では、乾燥密度分布においてもほとんど変化がなかったが、同様にモンモリロナイト含有量についてもほとんどは変化しておらず、場所によって変化していない。

これらの計算結果と試験結果の比較から、モンモリロナイトは、両者の検討の間の速度で溶解していると考えられる。ただし、液相組成については試験と計算ではオーダーで異なっており、微量に含まれる随伴鉱物や二次鉱物の生成過程が、モンモリロナイトの溶解挙動に影響しているものと考えられる。また、本検討における化学解析と試験結果の比較においては、人工バリアの長期挙動評価の化学解析とは経過時間が異なる点の影響があることが推察されたが、

ここで得られた化学解析と試験結果の相違点を、今後の長期挙動解析手法の改善に役立てることが必要である。

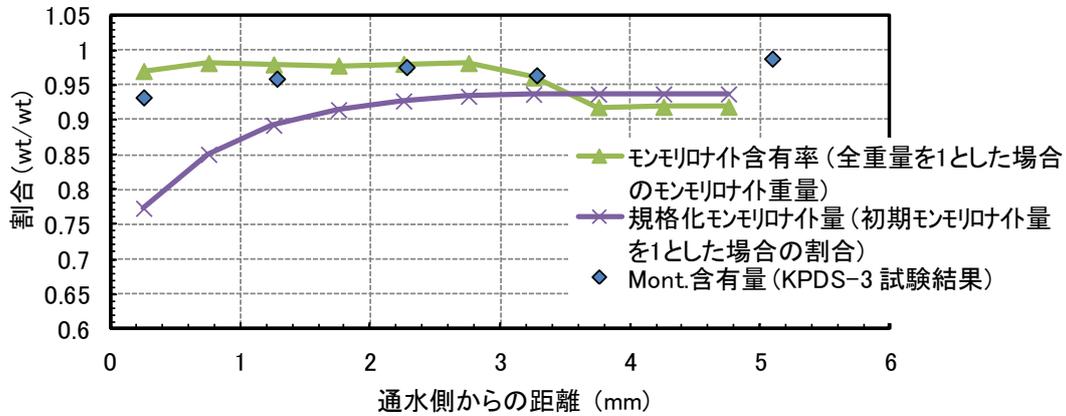


図 5.1.2-19 1,000 日後のモンモリロナイト量分布 (KPDS-3、反応表面積 7 m²/g)

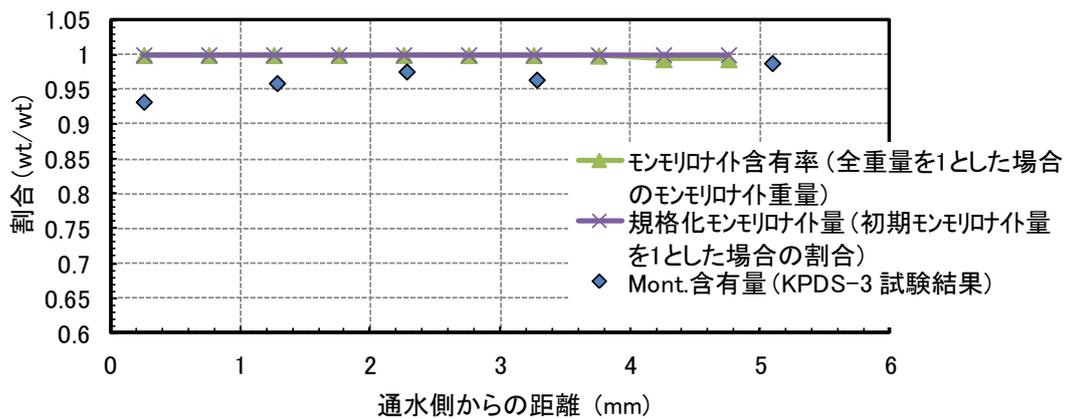


図 5.1.2-20 1,000 日後のモンモリロナイト量分布 (KPDS-3 ; 反応表面積は圧密状態を考慮)

5.2 処分場 2次元断面における力学-化学連成解析

ここでは、化学変質挙動と力学挙動を連成させた長期解析について検討した。これまで、HMC 連成解析における初期条件では、処分場断面における緩衝材の乾燥密度を均一としてしてきた。現実的には施工方法による乾燥密度の不均一があることが考えられる。5.2.1 節では、施工条件の影響を考慮した力学解析手法の検討及び化学変質のモデルケースを設定して力学解析に反映して長期挙動を計算することにより、施工条件と化学変質の長期力学挙動への影響について評価を行った。5.2.2 節では、化学解析と力学解析の弱連成解析で人工バリアの長期挙動への施工条件の影響の評価及び連成解析手法について検討をした。

5.2.1 モデル化学変質ケースによる長期力学挙動への施工条件影響の検討

(1) 緩衝材の化学変質の考慮した化学変質解析手法

1) 正規圧密線とモンモリロナイト含有率の関係

ベントナイトの力学特性は、モンモリロナイト含有率、層間陽イオンの種類、モンモリロナイト以外の鉱物の種類、珪砂混合割合等の影響を受けるが、ベントナイトの力学挙動に対してはモンモリロナイト含有率が支配的である。ベントナイトは飽和化に伴い、粒状体としての性質を消失し、飽和に至ると平均有効応力が正規圧密線上に到達することになる。したがって正規圧密線とモンモリロナイト含有率の関係を把握すれば、珪砂が含まれている場合や、クニゲルV 1 以外のベントナイトの力学特性もおおよそ把握することができると考えられる。図 5.2.1-1 はモンモリロナイト含有率の異なる飽和ベントナイト材料に対する一次元圧密試験の結果[12][13][14][15]で、図 5.2.1-2 は間隙比 0.65 における圧縮線上における鉛直有効応力をモンモリロナイト含有率ごとに整理したものである。

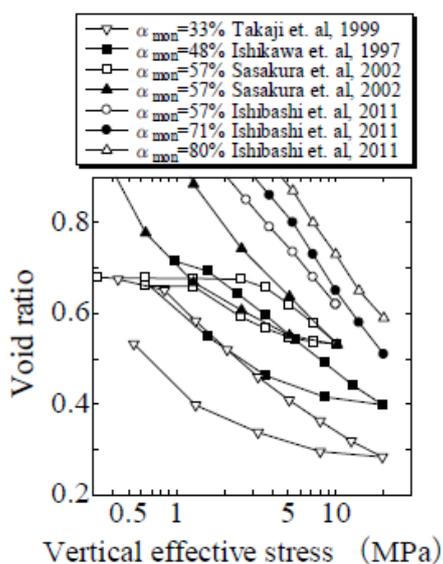


図 5.2.1-1 一次元圧密試験

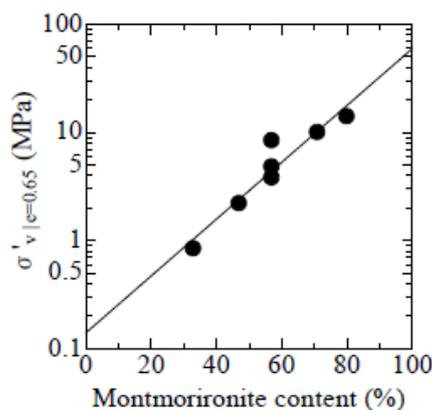


図 5.2.1-2 含有率と鉛直応力

図 5.2.1-2 よりフィッティング関数

$$\sigma'_v|_{e=0.65} = 0.14 \exp(0.06\alpha_{mon}) \quad (MPa) \quad \text{式 5.2.1-1}$$

を最小二乗法より求める。ここで $\sigma'_v|_{e=0.65}$: 間隙比 0.65 における鉛直有効応力、 α_{mon} : モンモリロナイト含有率(%)である。飽和ベントナイトの正規圧密線は

$$e = e_{ref} - \lambda \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \quad \text{式 5.2.1-2}$$

である。ここで e_{ref} : 基準間隙比、 p'_{ref} : 基準応力である。図 5.2.1-1、図 5.2.1-2 中の鉛直有効応力 σ'_v を平均有効応力 p' と仮定すると、式 5.2.1-1 における基準間隙比 e_{ref} と基準応力

p'_{ref} はそれぞれ、

$$e_{r, e=0.65}$$

$$p'_{ref} = 0.14 \exp(0.06\alpha_{mon}) \quad (MPa)$$

と書け、まとめると

$$e = 0.65 - \lambda \ln \frac{\sigma'}{0.14 \exp(0.06\alpha_{mon})} \quad \text{式 5.2.1-3}$$

となる。 $\lambda = 0.14$ を用いて、モンモリロナイト含有率ごとの飽和正規圧密線と描くと図 5.2.1-3 のようになる。

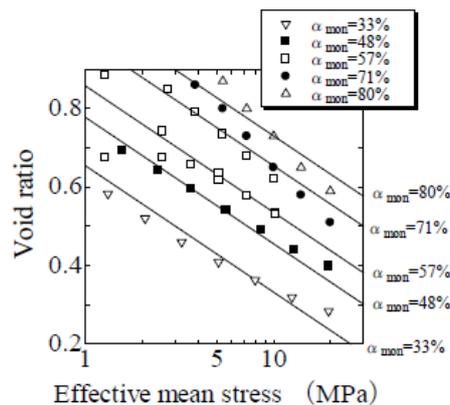


図 5.2.1-3 等モンモリロナイト含有率圧縮線

2) ベントナイトの化学変質

処分施設閉鎖後の再冠水により、充填材等に用いられるセメント系材料は長期にわたり地下水によって溶出される。その結果生じた高アルカリ水溶液の影響によりベントナイト緩衝材はイオンの交換によるイオン型の変化やモンモリロナイトの液相への溶解などの鉱物学的変化が起これると考えられている。イオンの交換によるイオン型の変化には、モンモリロナイトの層間に持つ Na^{2+} イオンがセメント系材料から溶出した Ca^{2+} イオンと置き換わる Ca^{2+} 型化、炭素鋼オーバーパックの腐食による発生した Fe^{2+} イオンと置き換わる Fe^{2+} 型化などがある。鉱物学的変化には、イライト化やゼオライト化等がある。

3) モンモリロナイト含有率を用いた変質現象の定式化

今までの土質力学の考えでは、間隙の変化量と体積ひずみの変化は一意であった。しかし固相の体積が変化する場合、間隙の変化量と体積ひずみの変化は一意ではなくなる。したがってモンモリロナイトの溶解、変質による固相の変化を考慮しなければならない。森本らの研究[16]によって変質現象が定式化された。図 5.2.1-4 より初期体積を

$$V_0 (= V_{v0} + V_{s0}) \quad \text{式 5.2.1-4}$$

とし、変質後の体積を

$$V (= V_v + V_s) \quad \text{式 5.2.1-5}$$

とする。ここで V_{v0} : 液相の初期体積、 V_{s0} : 固相の初期体積、 V_v : 液相の変質後の体積、 V_s : 固相の変質後の体積である。

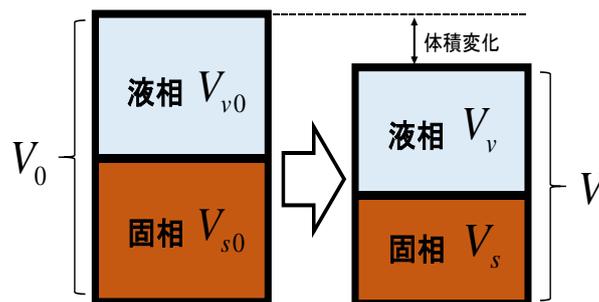


図 5.2.1-4 体積変化の概念図

固相の変質現象を考慮するために、

$$V_s = \alpha V_{s0} \quad \text{式 5.2.1-6}$$

と定義する。ここで α は変質や溶解による固相体積の変化率である。よって体積ひずみは、

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - \frac{\frac{V_s}{V_{s0}} + \frac{V_v}{V_{s0}}}{1 + e_0} = 1 - \frac{\alpha(1+e)}{1+e_0} \quad \text{式 5.2.1-7}$$

となる。ここで e_0 : 初期間隙比、 e : 間隙比である。この式に式 5.2.1-1 を代入すると

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{1.65\alpha}{(1+e_0)} + \frac{0.14\alpha}{(1+e_0)} \ln \frac{\sigma'}{0.14 \exp(0.06 \times \alpha_{mon})} \quad \text{式 5.2.1-8}$$

となり、応力-ひずみ関係を得ることができる。ここで式 5.2.1-7 の増分の式は、

$$\dot{\varepsilon}_v = -\frac{1+e}{1+e_0} \dot{\alpha} - \frac{\alpha}{1+e_0} \dot{e} \quad \text{式 5.2.1-9}$$

となる。式(2.3)の増分の式に式 5.2.1-9 を代入し整理すると次のようになる。

$$\dot{\sigma}' = \frac{(1+e_0)\sigma'}{\lambda\alpha} \dot{\varepsilon}_v + \frac{(1+e)\sigma'}{\lambda\alpha} \dot{\alpha} + 0.06\sigma' \dot{\alpha}_{mon} \quad \text{式 5.2.1-10}$$

次にベントナイトの変質について定式化する。図 5.2.1-5 はベントナイトに高アルカリ水溶液が作用した時の変質概念図である。

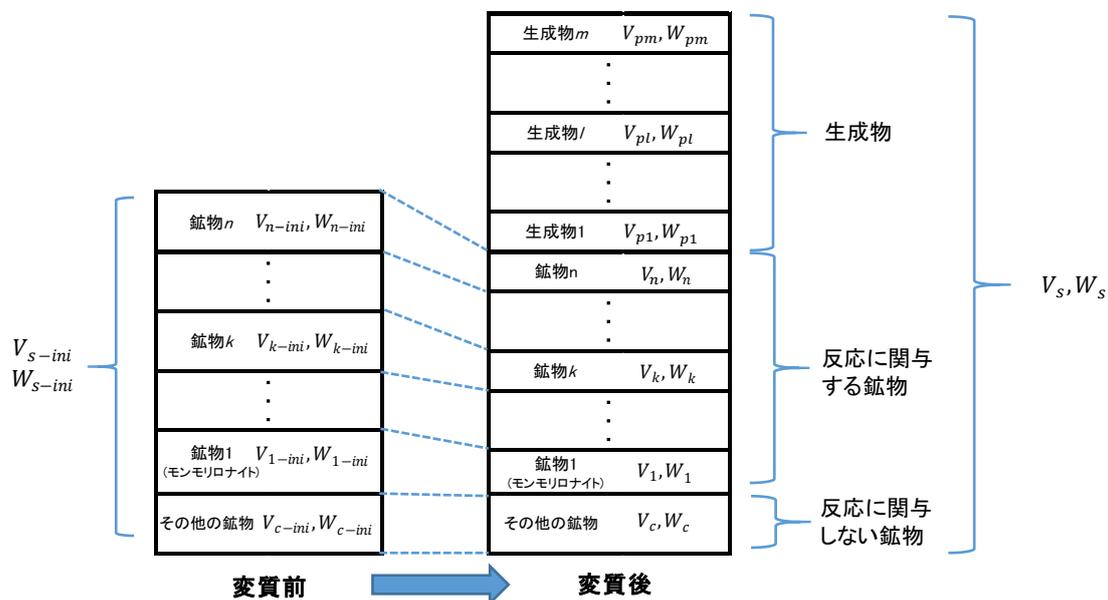


図 5.2.1-5 変質の概念図

変質前において、変質に関与しない鉱物と n 種類の変質に関与する鉱物によって構成されるとし、それぞれ鉱物 1~ n とする。ただし鉱物 1 をモンモリロナイトとする。また変質後において、 m 種類の変質による新たな鉱物が生成されるとし、それぞれ生成物 1~ m とする。変

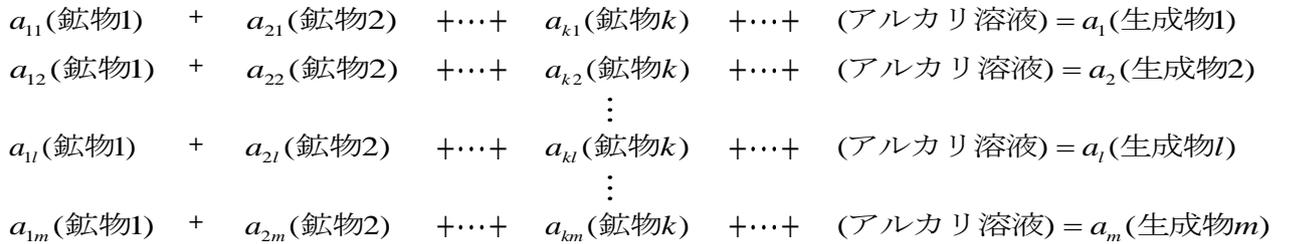
質前の鉱物全体の体積と重量と密度をそれぞれ V_{s-ini} 、 W_{s-ini} 、 ρ_{s-ini} とし、鉱物 k の体積と重量と重量をそれぞれ V_{k-ini} 、 W_{k-ini} 、 ρ_{k-ini} とする。変質後の鉱物全体の体積と重量と密度をそれぞれ V_s 、 W_s 、 ρ_s とし、鉱物 k の体積と重量と密度を V_k 、 W_k 、 ρ_k 、生成物 l の体積と重量と密度を V_l 、 W_l 、 ρ_l とする。したがって固相体積の変化率 α 、土粒子比重 ρ_s 、各鉱物の含有率 α_k は、

$$\alpha = \frac{V_s}{V_{s-ini}} = \frac{\sum_{k=1}^n V_k + \sum_{l=1}^m V_l + V_{c-ini}}{\sum_{k=1}^n V_{k-ini} + V_{c-ini}} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{V_k}{V_{c-ini}} + \sum_{l=1}^m \frac{V_l}{V_{c-ini}} + 1}{\sum_{k=1}^n \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + 1} \quad \text{式 5.2.1-11}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{V_{s-ini}}{V_s} \frac{W_s}{W_{s-ini}} \frac{W_{s-ini}}{V_{s-ini}} = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \frac{W_s}{W_{s-ini}} = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \frac{\sum_{k=1}^n \rho_k \frac{V_k}{V_{c-ini}} + \sum_{l=1}^m \rho_l \frac{V_l}{V_{c-ini}} + \rho_c}{\sum_{k=1}^n \rho_k \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \rho_c} \quad \text{式 5.2.1-12}$$

$$\alpha_k = \frac{W_k}{W_s} = \frac{\rho_k V_k}{W_s} = \frac{\rho_k V_k}{\rho_s V_s} \frac{V_{s-ini}}{V_{s-ini}} \frac{W_{s-ini}}{W_{s-ini}} = \frac{\rho_k \rho_{s-ini}}{\rho_s \alpha} \frac{V_k}{W_{s-ini}} = \frac{\rho_k \rho_{s-ini}}{\rho_s \alpha} \frac{\frac{V_k}{V_{c-ini}}}{\sum_{k=1}^n \rho_k \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \rho_c} \quad \text{式 5.2.1-13}$$

となる。またアルカリ溶液と複数の鉱物との化学反応式は



となる。ここで a_{kl} ：生成物 l の化学反応式における鉱物 k の係数、 a_l ：生成物 l の化学反応式における生成物 l の係数である(生成物 l への変質に関与しないとき $a_{kl}=0$)。

また鉱物 k と生成物 l のモル体積を v_{ml} とすると、生成物 l に変質した時の体積増加率 η_l は

$$\eta_l = \frac{a_l v_{ml}}{\sum_{k=1}^n a_{kl} v_{mk}} \quad \text{式 5.2.1-14}$$

と表される。よって鉱物 k の初期体積 V_{k-ini} において生成物 l に変質した割合を β_{kl} とすると、鉱物 k の体積は

$$V_k = \left(1 - \sum_{l=1}^m \beta_{kl} \right) V_{k-ini} \quad \text{式 5.2.1-15}$$

生成物 l の体積は

$$V_l = \eta_l \sum_{k=1}^n \beta_{kl} V_{k-ini} \quad \text{式 5.2.1-16}$$

と表される。鉱物 k が変質率 β_{kl} の割合だけ生成物 l に変質したとき、鉱物 k が生成物 l に変質した体積は $\beta_{kl} V_{k-ini}$ となる。したがって変質において消費したモンモリロナイトと鉱物 k の体積比は

$$\beta_{1l} V_{1-ini} : \beta_{kl} V_{k-ini} = a_{1l} v_{m1} : a_{kl} v_{mk} \quad \text{式 5.2.1-17}$$

となる。よって

$$\beta_{kl} = \frac{a_{kl} v_{mk} V_{1-ini}}{a_{1l} v_{m1} V_{k-ini}} \beta_{1l} = A_{kl} \beta_{1l} \quad \text{式 5.2.1-18}$$

となる。ただし、

$$A_{kl} = \frac{a_{kl} v_{mk} V_{1-ini}}{a_{1l} v_{m1} V_{k-ini}} \quad \text{式 5.2.1-19}$$

である。また $\rho_k V_{k-ini} = W_{k-ini}$ を用いて、

$$A_{kl} = \frac{a_{kl} v_{mk} \rho_k W_{1-ini}}{a_{1l} v_{m1} \rho_l W_{k-ini}} = \frac{a_{kl} v_{mk} \rho_k \alpha_{1-ini}}{a_{1l} v_{m1} \rho_l \alpha_{k-ini}} \quad \text{式 5.2.1-20}$$

と表される。 β_{1l} を β_l と置き、 β_l を生成物 l への変質率と定義する。したがって

$$\beta_{kl} = A_{kl} \beta_l \quad \text{式 5.2.1-21}$$

となり、モンモリロナイトが変質率 β_l だけ生成物 l に変質したとき、鉱物 k は β_{kl} だけ変質する。このときの β_{kl} と β_l の比が A_{kl} である。また生成物 l への変質に関与しないときは $A_{kl}=0$ である。

$$W_{c-ini} = W_{s-ini} - \sum_{k=1}^n W_{k-ini} \quad \text{式 5.2.1-22}$$

$$\alpha_{k-ini} = \frac{W_{k-ini}}{W_{s-ini}} \quad \text{式 5.2.1-23}$$

より、

$$\alpha_{c-ini} = \frac{W_{c-ini}}{W_{s-ini}} = 1 - \sum_{k=1}^n \frac{W_{k-ini}}{W_{s-ini}} = 1 - \sum_{k=1}^n \alpha_{k-ini} \quad \text{式 5.2.1-24}$$

となる。ただし α_{c-ini} : その他の物質の初期の含有率である。 $W_{k-ini} = \rho_k V_{k-ini}$ 、 $W_{c-ini} = \rho_c V_{c-ini}$ の関係を用いると、

$$\frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} = \frac{\rho_c}{\rho_k} \frac{W_{k-ini}}{W_{c-ini}} = \frac{\rho_c}{\rho_k} \frac{\alpha_{k-ini}}{1 - \sum_{k=1}^n \alpha_{k-ini}} \quad \text{式 5.2.1-25}$$

となる。初期の固相の密度 ρ_{s-ini} は、

$$\rho_{s-ini} = \frac{W_{s-ini}}{V_{s-ini}} = \frac{\sum_{k=1}^n \rho_k V_{k-ini} + \rho_c V_{c-ini}}{\sum_{k=1}^n V_{k-ini} + V_{c-ini}} \quad \text{式 5.2.1-26}$$

で、式 5.2.1-25 を代入して整理すると、

$$\rho_{s-ini} = \frac{\rho_c}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\rho_c}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} + 1} \quad \text{式 5.2.1-27}$$

となる。式 5.2.1-11 に式 5.2.1-15 と式 5.2.1-16 を代入すると固相の体積変化率 α は、

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^n \left(1 - \sum_{l=1}^m \beta_{kl} \right) \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \sum_{l=1}^m \eta_l \sum_{k=1}^n \beta_{kl} \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + 1}{\sum_{k=1}^n \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + 1} \quad \text{式 5.2.1-28}$$

となる。この式に式 5.2.1-25 を代入して整理すると、

$$\alpha = 1 + \frac{\sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n (\eta_l - 1) \beta_{kl} \frac{\rho_c}{\rho_k} \alpha_{k-ini}}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\rho_c}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} + 1} \quad \text{式 5.2.1-29}$$

となり、この式に式 5.2.1-27 より $\sum_{k=1}^n \left(\frac{\rho_c}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} + 1 = \frac{\rho_c}{\rho_{s-ini}}$ を代入すると、

$$\alpha = 1 + \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n (\eta_l - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_k} \alpha_{k-ini} \beta_{kl} \quad \text{式 5.2.1-30}$$

となる。また式 5.2.1-12 に式 5.2.1-15 と式 5.2.1-16 を代入すると現在の固相の密度 ρ_s は、

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \frac{\sum_{k=1}^n \rho_k \left(1 - \sum_{l=1}^m \beta_{kl} \right) \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \sum_{l=1}^m \rho_l \eta_l \sum_{k=1}^n \beta_{kl} \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \rho_c}{\sum_{k=1}^n \rho_k \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \rho_c} \quad \text{式 5.2.1-31}$$

となる。この式に式 5.2.1-25 を代入して整理すると、

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \left[1 + \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n \left(\eta_l \frac{\rho_l}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} \beta_{kl} \right] \quad \text{式 5.2.1-32}$$

となる。また式 5.2.1-13 に式 5.2.1-15 と式 5.2.1-16 を代入すると鉱物 k の含有率 α_k は、

となる。この式に式 5.2.1-25 を代入して整理すると、

$$\alpha_k = \frac{\rho_k \rho_{s-ini}}{\rho_s \alpha} \frac{\left(1 - \sum_{l=1}^m \beta_{kl} \right) \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}}}{\sum_{k=1}^n \rho_k \frac{V_{k-ini}}{V_{c-ini}} + \rho_c} \quad \text{式 5.2.1-33}$$

$$\alpha_k = \frac{\alpha_{k-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} \left(1 - \sum_{l=1}^m \beta_{kl} \right) \quad \text{式 5.2.1-34}$$

となる。以上をまとめると、

$$\alpha = 1 + \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n (\eta_l - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_k} \alpha_{k-ini} \beta_{kl} \quad \text{式 5.2.1-35}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \left[1 + \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n \left(\eta_l \frac{\rho_l}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} \beta_{kl} \right] \quad \text{式 5.2.1-36}$$

$$\alpha_k = \frac{\alpha_{k-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} \left(1 - \sum_{l=1}^m \beta_{kl} \right) \quad \text{式 5.2.1-37}$$

ただし、

$$\rho_{s-ini} = \frac{\rho_c}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\rho_c}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} + 1} \quad \text{式 5.2.1-38}$$

$$\beta_{kl} = A_{kl} \beta_l \quad \text{式 5.2.1-39}$$

$$A_{kl} = \frac{a_{kl} v_{mk} \rho_k \alpha_{l-ini}}{a_{1l} v_{m1} \rho_1 \alpha_{k-ini}} \quad \text{式 5.2.1-40}$$

$$\eta_l = \frac{a_l v_{ml}}{\sum_{k=1}^n a_{kl} v_{mk}} \quad \text{式 5.2.1-41}$$

また、液相 ($I=0$) に溶解する場合、

$\eta \sigma = 0$ 、 $\rho \sigma = 0$

である。

4) ゼオライト変質ケース

モンモリロナイトのゼオライト化の例として、モンモリロナイトがアナルサイムに変質した場合と、モンモリロナイトがクリノプチロライトに変質した場合、モンモリロナイトがヒューランダイトに変質した場合を挙げる。

a. アナルサイム化

モンモリロナイトがアナルサイムに変質するときの化学反応式は次のようになる。



$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$: モンモリロナイト

$NaOH$: 水酸化ナトリウム

$NaAlSi_2O_6(H_2O)$: アナルサイム

式 5.2.1-39, 式 5.2.1-40, 式 5.2.1-41 をこのアナルサイム化の場合で考えると、

$$A_{mon-ana} = \frac{a_{mon-ana} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}{a_{mon-ana} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}$$

$$\beta_{mon-ana} = A_{mon-ana} \beta_{ana} = \beta_{ana}$$

$$\eta_{ana} = \frac{a_{ana} v_{m,ana}}{a_{mon-ana} v_{m,mon}}$$

となり、式 5.2.1-35、式 5.2.1-36、式 5.2.1-37 に代入すると、

$$a = 1 + \sum_{ana} \sum_{mon} (\eta_{ana} - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_{mon}} \alpha_{mon-ini} \beta_{ana}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \left[1 + \left(\eta_{ana} \frac{\rho_{ana}}{\rho_{mon}} - 1 \right) \alpha_{mon-ini} \beta_{ana} \right]$$

$$\alpha_{mon} = \frac{\alpha_{mon-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} (1 - \beta_{ana})$$

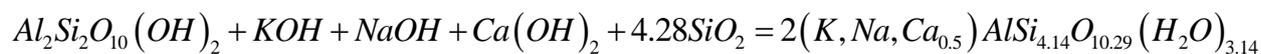
となる。ただし、ベントナイトに含まれる鉱物としてモンモリロナイトを考えるので添え字 k を $k=mon$ とし、また生成物はアナルサイムであるので添え字 l を $l=ana$ とする。図 5.2.1-6 にアナルサイム化に関する諸定数を示す。

図 5.2.1-6 アナルサイム化に関する諸定数

		$l = ana$
ρ_l	(g/cm ³)	2.74
v_{ml}	(cm ³ /mol)	131.5
a_l	(mol)	2
η_l		1.90
		$k = mon$
ρ_k	(g/cm ³)	2.74
v_{mk}	(cm ³ /mol)	138.07
a_{kl}	(mol)	1
A_{kl}		1

b. クリノプチロライト化

モンモリロナイトがクリノプチロライトに変質するときの化学反応式は次のようになる。



KOH : 水酸化カリウム

$NaOH$: 水酸化ナトリウム

$Ca(OH)_2$: 水酸化カルシウム

SiO_2 : 二酸化ケイ素

$AlSi_{4.14}O_{10.29}(H_2O)_{3.14}$: クリノプチロライト

よってモンモリロナイトがクリノプチロライトに変質するとき使用される鉱物はモンモ

リロナイトと二酸化ケイ素であることがわかる。

式 5.2.1-39, 式 5.2.1-40, 式 5.2.1-41 をクリノプチロライト化の場合で考えると、

$$A_{mon-clp} = \frac{a_{mon-clp} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}{a_{mon-clp} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}$$

$$\beta_{mon-clp} = A_{mon-clp} \beta_{clp} = \beta_{clp}$$

$$A_{b-clp} = \frac{a_{b-clp} v_{m,b} \rho_b \alpha_{b-ini}}{a_{mon-clp} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}$$

$$\beta_{b-clp} = A_{b-clp} \beta_{clp} = \beta_{clp}$$

$$\eta_{clp} = \frac{a_{clp} v_{m,clp}}{\sum_{k=mon,b} a_{k-clp} v_{m,k}}$$

これを式 5.2.1-35, 式 5.2.1-36, 式 5.2.1-37 に代入すると、

$$\alpha = 1 + \sum_{k=mon,b} (\eta_{clp} - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_k} \alpha_{k-ini} \beta_{k-clp}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \left[1 + \sum_{k=mon,b} \left(\eta_{clp} \frac{\rho_{clp}}{\rho_k} - 1 \right) \alpha_{k-ini} \beta_{k-clp} \right]$$

$$\alpha_{mon} = \frac{\alpha_{mon-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} (1 - \beta_{clp})$$

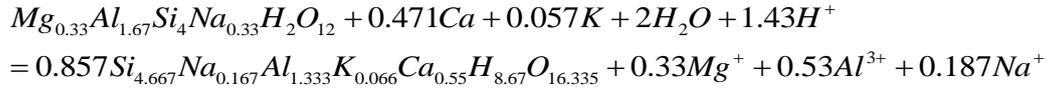
となる。ただしクリノプチロライト化において、ベントナイトに含まれる鉱物としてモンモリロナイトと二酸化ケイ素を考慮するので、添え字 k を $k=mon, k=b$ (二酸化ケイ素) とする。また、生成物はクリノプチロライトなので添え字 l を $l=clp$ とする。図 5.2.1-7 にクリノプチロライト化に関する諸定数を示す。

図 5.2.1-7 クリノプチロライト化に関する諸定数

		$l = clp$	
ρ_l	(g/cm ³)	2.24	
v_{ml}	(cm ³ /mol)	361.01	
a_l	(mol)	2	
η_l		3.07	
		$k = mon$	$k = b$
ρ_k	(g/cm ³)	2.74	2.65
v_{mk}	(cm ³ /mol)	138.07	22.67
a_{kl}	(mol)	1	4.28
A_{kl}		1	上部 : 0.86 底部 : 0.40

c. ヒューランダイト化

モンモリロナイトがヒューランダイトに変質するときの化学反応式は次のようになる。



$Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4Na_{0.33}H_2O_{12}$: Na 型モンモリロナイト

$Si_{4.667}Na_{0.167}Al_{1.333}K_{0.066}Ca_{0.55}H_{8.67}O_{16.335}$: ヒューランダイト

式 5.2.1-39, 式 5.2.1-40, 式 5.2.1-41 をこのヒューランダイト化の場合で考えると、

$$A_{mon-hld} = \frac{a_{mon-hld} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}{a_{mon-hld} v_{m,mon} \rho_{mon} \alpha_{mon-ini}}$$

$$\beta_{mon-hld} = A_{mon-hld} \beta_{hld} = \beta_{hld}$$

$$\eta_{hld} = \frac{a_{hld} v_{m,hld}}{a_{mon-hld} v_{m,mon}}$$

となり、式 5.2.1-35, 式 5.2.1-36, 式 5.2.1-37 に代入すると、

$$a = 1 + \sum_{hld} \sum_{mon} (\eta_{hld} - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_{mon}} \alpha_{mon-ini} \beta_{hld}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s-ini}}{\alpha} \left[1 + \left(\eta_{hld} \frac{\rho_{hld}}{\rho_{mon}} - 1 \right) \alpha_{mon-ini} \beta_{hld} \right]$$

$$\alpha_{mon} = \frac{\alpha_{mon-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} (1 - \beta_{hld})$$

となる。ただし、ベントナイトに含まれる鉱物としてモンモリロナイトを考えるので添え字 k を $k=mon$ とし、また生成物はヒューランダイトであるので添え字 l を $l=hld$ とする。図 5.2.1-8 にヒューランダイト化に関する諸定数を示す。

図 5.2.1-8 ヒューランダイト化に関する諸定数

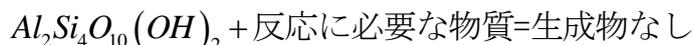
		$l = hld$
ρ_l	(g/cm ³)	2.2
v_{ml}	(cm ³ /mol)	210
a_l	(mol)	0.857
η_l		1.30
		$k = mon$
ρ_k	(g/cm ³)	2.74
v_{mk}	(cm ³ /mol)	138.07
a_{kl}	(mol)	1
A_{kl}		1

5) ベントナイトの溶解

ベントナイトの溶解として、モンモリロナイトが液相に溶解する場合とモンモリロナイト以外の鉱物が液相に溶解する場合を挙げる。

a. モンモリロナイトが溶解する場合

モンモリロナイトが液相に溶解するときの化学反応式は次のように仮定する。



よってこの場合、式 5.2.1-35、式 5.2.1-37 は次のようになる。

$$a = 1 + (\eta_{dis} - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_{mon}} \alpha_{mon-ini} \beta_{mon,dis}$$

$$\alpha_{mon} = \frac{\alpha_{mon-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} (1 - \beta_{mon,dis})$$

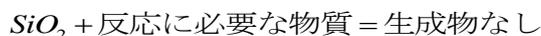
ただし、ベントナイトに含まれる鉱物としてモンモリロナイトを考えるので、添え字 k は $k=mon$ とし、生成物はないので添え字 l を溶解(dissolution)を示す $l=dis$ とする。また $\beta_{mon,dis}$ は溶解に伴うモンモリロナイトの減少割合とする。生成物はないと仮定しているので、生成物の係数 a_{dis} 、モル体積 $v_{m,dis}$ は 0 となる。よって式 5.2.1-41 より η_{dis} は 0 をとる。図 5.2.1-9 にモンモリロナイトが溶解する場合の諸定数を示す。

図 5.2.1-9 モンモリロナイトの溶解に関する諸定数

		$l=dis$
a_l	(mol)	1
η_l		0
		$k=mon$
ρ_k	(g/cm ³)	2.74
v_{mk}	(cm ³ /mol)	138.07
a_{kl}	(mol)	1
A_{kl}		1

b. モンモリロナイト以外の鉱物が溶解する場合

モンモリロナイト以外の鉱物として二酸化ケイ素の溶解を考える。このときの化学反応式を次のように仮定する。



よってこの場合、式 5.2.1-35、式 5.2.1-37 は次のようになる。

$$\alpha = 1 + (\eta_{b,dis} - 1) \frac{\rho_{s-ini}}{\rho_b} \alpha_{b-ini} \beta_{b,dis}$$

$$\alpha_{mon} = \frac{\alpha_{mon-ini} \rho_{s-ini}}{\alpha \rho_s} (1 - \beta_{mon,dis})$$

ただし、ベントナイトに含まれる鉱物として二酸化ケイ素を考えるので、添え字 k は $k=b$ とし、生成物はないので添え字 l を $l=dis$ とする。また $\beta_{b,dis}$ は溶解に伴う二酸化ケイ素の減少割合とする。生成物はないと仮定しているので、生成物の係数 a_{dis} 、モル体積 $v_{m,dis}$ は 0 となる。よって式 5.2.1-41 より $\eta_{b,dis}$ は 0 をとる。

(2) 長期力学挙動シミュレーション(モデル化学変質ケース)

1) 長期変質シミュレーション概要

力学計算で用いられる DACSAR-BA では、10 万年後のモンモリロナイト含有率、固相体積変化率 α 、土粒子比重 ρ_s を入力することにより緩衝材の力学挙動を表現することができる。この三種類の物理量を計算するには(1)の式 5.2.1-35 から式 5.2.1-41 より、モンモリロナイトから鉱物 1 への変質率 β_1 を求める必要がある。そのため地球化学反応と物質輸送現象を連成させた化学解析コード PHREEQC-TRANS を用いた解析結果を利用する。化学解析により求められた 10 万年後のモンモリロナイト含有率から変質率 β_1 を求め、固相体積変化率 α 、土粒子比重 ρ_s を求める。変質率を求める例として、初期のモンモリロナイト含有率を 40%、現在のモンモリロナイト含有率を 32% とすると変質率は

$$\beta_1 = 1 - \frac{32}{40} = 0.2$$

である。

PHREEQC-TRANS による二次元化学解析のメッシュは図 5.2.1-10 に示す。処分施設は地下 300m に設計し、半径 5.7m の円形処分場である。ただし化学解析において、処分坑道に用いられる支保工から溶出する高アルカリ水溶液は岩盤側に流出すると考える。各材料のパラメータを表 5.2.1-1 から表 5.2.1-7 に示す。

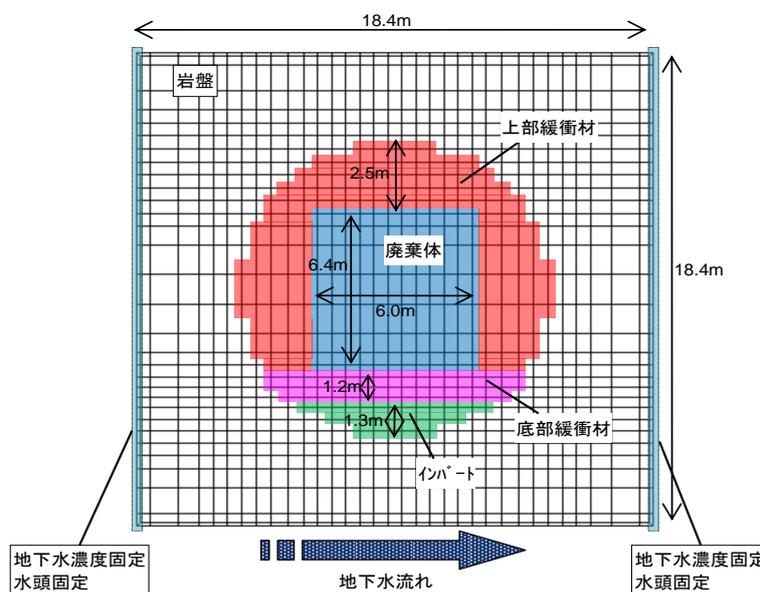


図 5.2.1-10 化学解析のメッシュ

表 5.2.1-1 各パラメータの説明

モンモリロナイト含有率(%)	α_{mon}	土粒子比重	G_s
圧縮指数	λ	飽和度	S_r
ポアソン比	ν'	初期固相体積変化率	α_{ini}
透水係数(m/year)	k_w	水の単位体積重量(tf/m ³)	γ_w
間隙比	e_i	土の水中単位体積重量(tf/m ³)	γ'
ラメの第一定数	$\tilde{\lambda}$	ラメの第二定数	$\tilde{\mu}$

表 5.2.1-2 底部緩衝材

α_{mon}	λ	ν'	k_w	e_i
33.6	0.14	0.45	3.2×10^{-4}	0.811
G_s	S_r	α_{ini}	γ_w	γ'
2.67	1.0	1.0	1.0	1.6

表 5.2.1-3 上部緩衝材

α_{mon}	λ	ν'	k_w	e_i
48	0.14	0.45	3.2×10^{-4}	0.931
G_s	S_r	α_{ini}	γ_w	γ'
2.72	1.0	1.0	1.0	1.36

表 5.2.1-4 インバートコンクリート

$\tilde{\lambda}$	$\tilde{\mu}$	k_w	e_i	γ'
8444.4	12666.7	1.57×10^{-3}	0.429	1.398

表 5.2.1-5 廃棄体

$\tilde{\lambda}$	$\tilde{\mu}$	k_w	e_i	γ'
4861.1	7291.7	126.144	0.429	1.906

表 5.2.1-6 岩盤

$\tilde{\lambda}$	$\tilde{\mu}$	k_w	e_i	γ'
235.47	156.98	0.3154	0.031	1.2

表 5.2.1-7 クニゲル V1 の鉱物組成

鉱物	含有率(%)
モンモリロナイト	48
カルセドニ	38
カルサイト	2.6

底部緩衝材はクニゲル V1 と珪砂が 7:3 の割合で混合しているのので、 $0.7 \times 0.38 + 0.3 = 0.566$ が珪砂の割合で、 $0.7 \times 0.48 = 0.336$ がモンモリロナイトの割合になる。また上部緩衝材は、珪砂が混合していないのでモンモリロナイト含有率は 0.48 となっている。

2) 施工条件の解析初期条件への考慮

処分施設の建設手順を図 5.2.1-11 に示す。岩盤中に円形の坑道を作り、その後インバートコンクリート、底部緩衝材、廃棄体、上部緩衝材の順に施工する。この一連の施工期間は 1 年とする。本検討ではこの施工段階の考慮を試みる。

実際には、坑道内の地下水は排水された状態で緩衝材及び廃棄体の施工が行われ、その後冠水状態となると考えられるが、ベントナイトの閉鎖後長期の変質に伴う力学変化を記述するモデル化において、閉鎖時点からの完全飽和状態を仮定していることから、施工に伴って生じると考えられる不飽和状態から飽和状態（冠水状態）への移行に伴う力学的変化を同時には考慮できない。よってここでの計算では、施工段階においても初期から冠水状態を仮定し、緩衝材及び廃棄体の水中重量 γ' （有効単位体積重量）に伴う力学状態変化を考えることにする。さらに、施工段階における緩衝材の積み上げに伴う沈下とそれによる上端部空洞化防止のための充填は考慮しない。よって、廃棄体下部では圧縮を過小側に、廃棄体上部では緩衝材の変形を伸長側（膨張）に評価してしまうこと注意する。

施工段階前の冠水前後における緩衝材の乾燥密度を表 5.2.1-8 に示す。建設段階終了時の緩衝材の乾燥密度の抽出要素を図 5.2.1-12 に、その抽出要素の乾燥密度を表 5.2.1-9 にそれぞれ示す。施工段階終了時の体積ひずみを図 5.2.1-13 に示す。

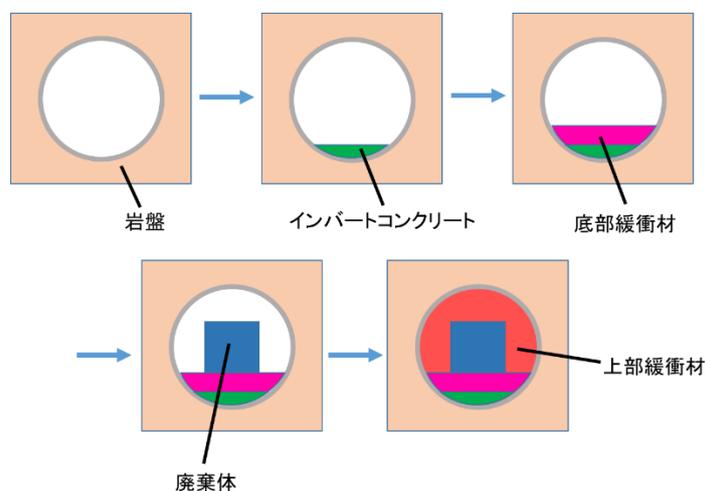


図 5.2.1-11 処分施設の建設手順

表 5.2.1-8 施工段階前の冠水前後における緩衝材の乾燥密度

	ρ_d	e(冠水前)	ρ_s	e(冠水後)	ρ_{sat}
底部緩衝材	1.6	0.68	2.688	0.811	1.5094423
上部緩衝材	1.36	1.01	2.7336	0.931	1.3920249

表 5.2.1-9 施工段階終了後の緩衝材の乾燥密度

要素番号	乾燥密度
底部緩衝材	
321	1.530502553
上部緩衝材	
437	1.401226073
538	1.391016353
677	1.380628062
809	1.375731241

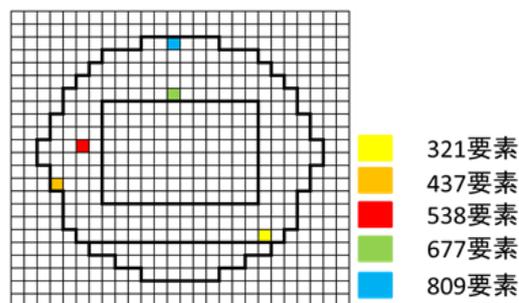


図 5.2.1-12 乾燥密度の抽出要素

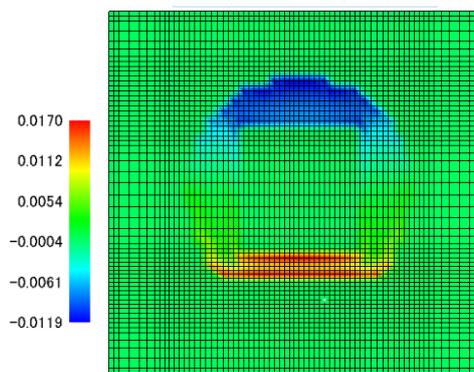


図 5.2.1-13 建設段階終了時の処分場の体積ひずみ

3) 解析条件

以下の変質の条件で解析を行う。

Case1 アナルサイムに変質した場合

Case2 クリノプチロライトに変質した場合

Case3 ヒューランダイトに変質した場合

Case4 モンモロロナイトが液相に溶解した場合

Case5 アナルサイム化：クリノプチロライト化：ヒューランダイト化：モンモロロナイトの溶解=1：1：1：1

実際の処分場では Case1~4 のすべての場合が生じると考えられる。そこで Case5 ではそれぞれの割合を 1 対 1 対 1 対 1 と仮定した。ただし Case5 においてモンモロロナイトの変質率が $\beta=0.4$ であると、 $\beta_{ana}=\beta_{clp}=\beta_{hld}=\beta_{dis}=0.1$ とする。

また化学解析結果より算出した変質率 β と、その変質率より算出した Case1~5 における固相体積変化率を図 5.2.1-14 から図 5.2.1-17 以下に示す。

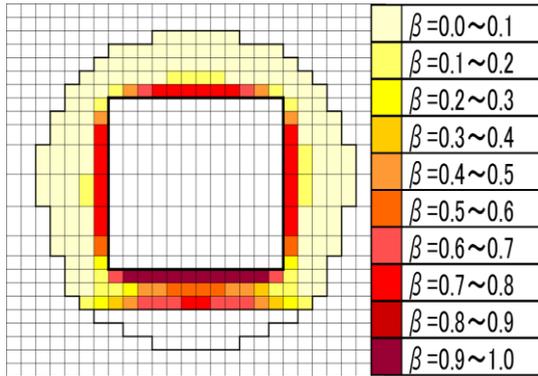


図 5.2.1-14 各要素の変質率

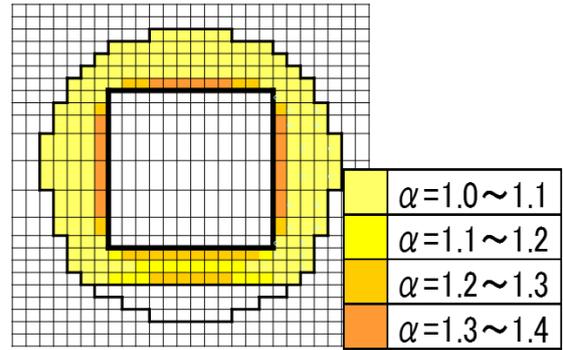
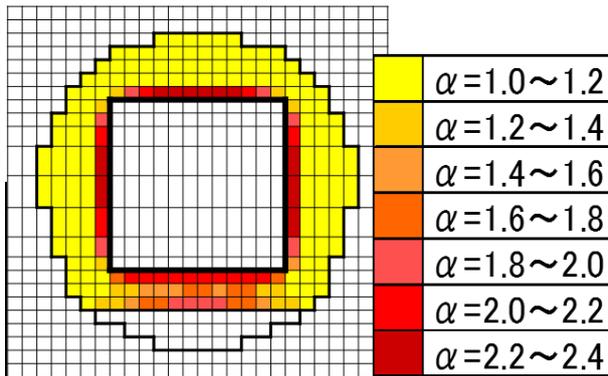
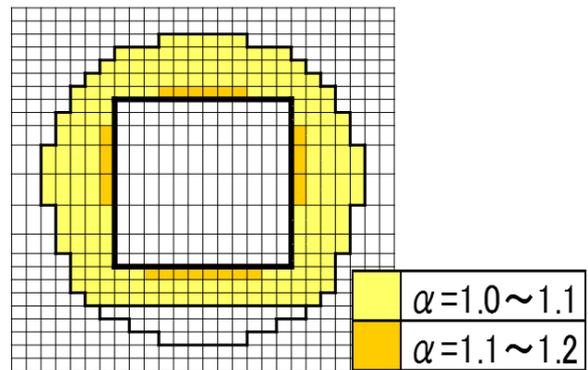


図 5.2.1-15 Case1 の各要素の固相体積変化率

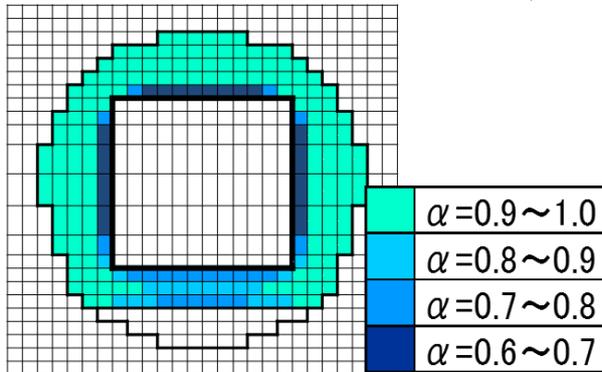


Case2

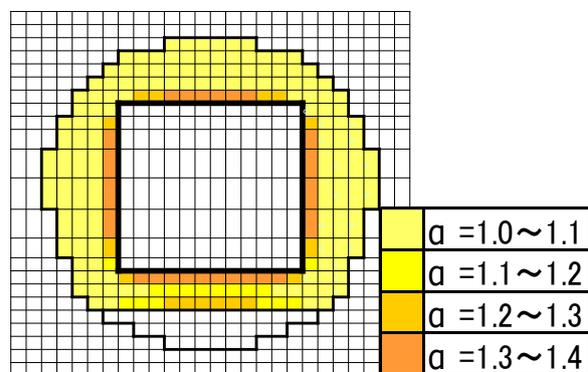


Case3

図 5.2.1-16 Case2,3 の各要素の固相体積変化率



Case4



Case5

図 5.2.1-17 Case4,5 の各要素の固相体積変化率

4) 解析結果

Case1(アナルサイムに変質するケース)の体積ひずみを図 5.2.1-18 に示す。図より 10 万年後において廃棄体付近の緩衝材が膨張している。これは図 5.2.1-15 より廃棄体付近の緩衝材の固相体積変化率が大きいからだと考えられる。また岩盤は頑丈なものと仮定しているので、廃棄体付近の緩衝材の膨張作用により廃棄体から離れている緩衝材は圧縮を示している。底部では処分坑道の建設により初期に圧縮されていた部分が 10 万年後、変質に伴う膨張により圧縮が緩和されている。

Case1 の水平変位を図 5.2.1-19 に示す。図より廃棄体付近の緩衝材の膨張により緩衝材が左側と右側でそれぞれ左方向と右方向に変位していることがわかる。

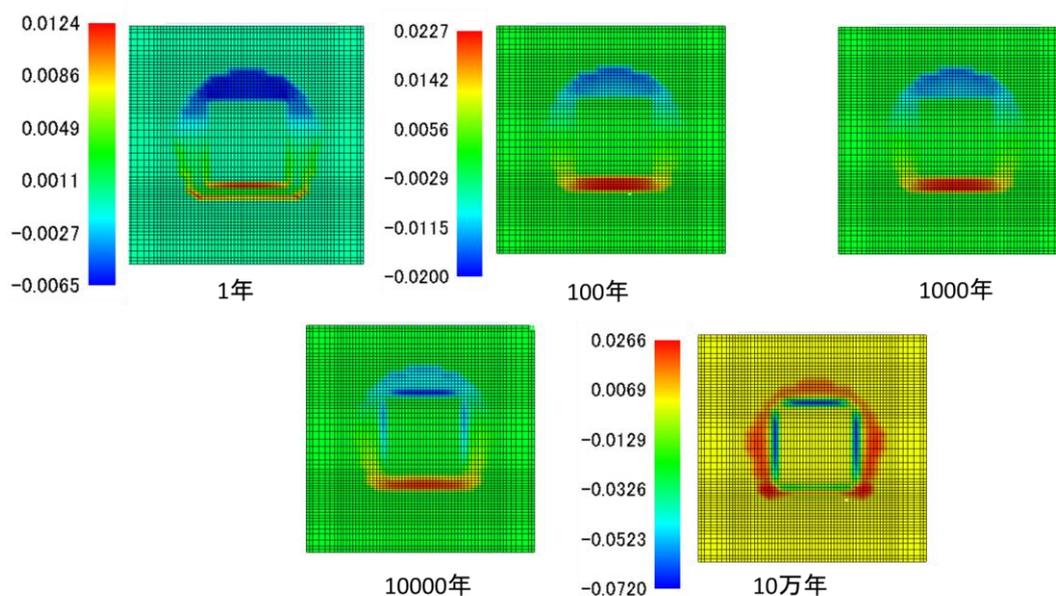


図 5.2.1-18 Case1 における体積ひずみの経時変化

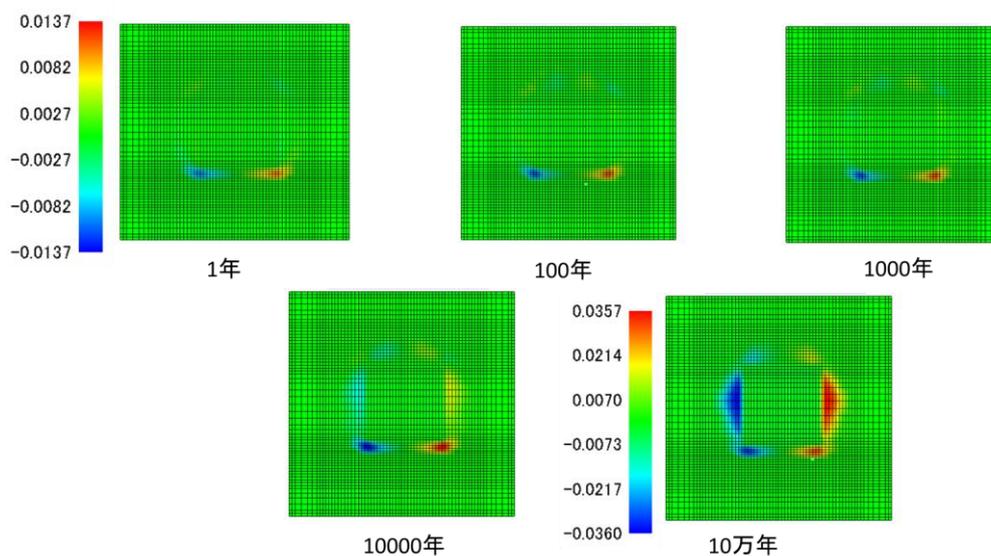


図 5.2.1-19 Case1 における水平変位の経時変化(m)

Case1 の鉛直変位を図 5.2.1-20 に示す。1 年後は処分場建設により処分場全体が負の方向に変位していることがわかる。10 万年後では底部緩衝材の膨張により 1 万年後に比べて廃棄体が正の方向に変位していることがわかる。また廃棄体付近上側の緩衝材の膨張により廃棄体上側の緩衝材の鉛直変位が他のところより大きい正の値を示している。

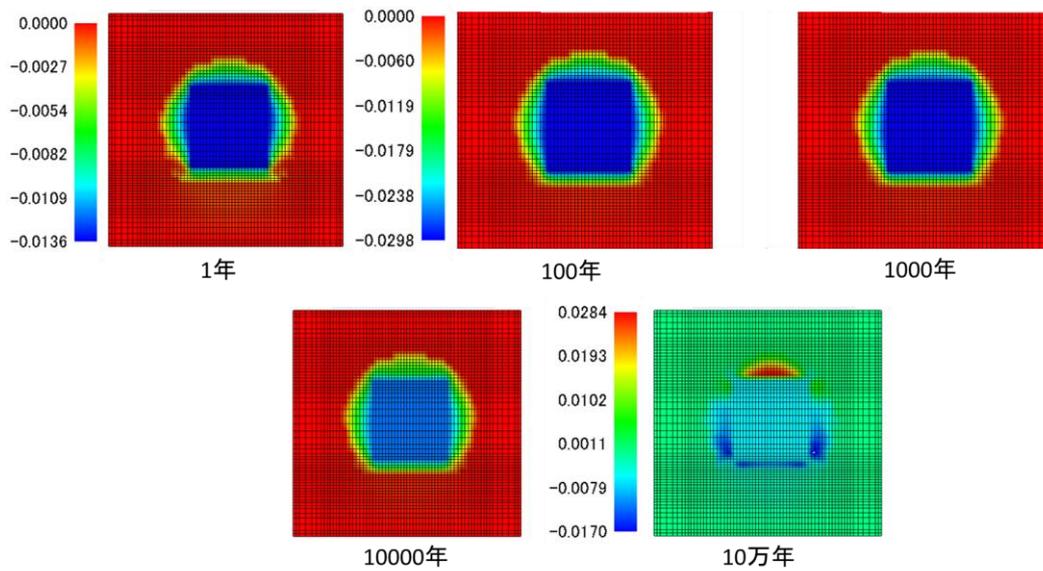


図 5.2.1-20 Case1 における鉛直変位の経時変化(m)

次に Case1 の有効応力を図 5.2.1-21 に示す。底部緩衝材で最も変質する要素である 380 要素と上部緩衝材で最も変質する要素である 677 要素を代表点とする (図 5.2.1-22)。処分場建設により初期に 380 要素は平均有効応力が増加し、677 要素は減少している。また変質率が大きい 380 要素の方が変質に伴う平均有効応力の増加率が大きいことがわかる。

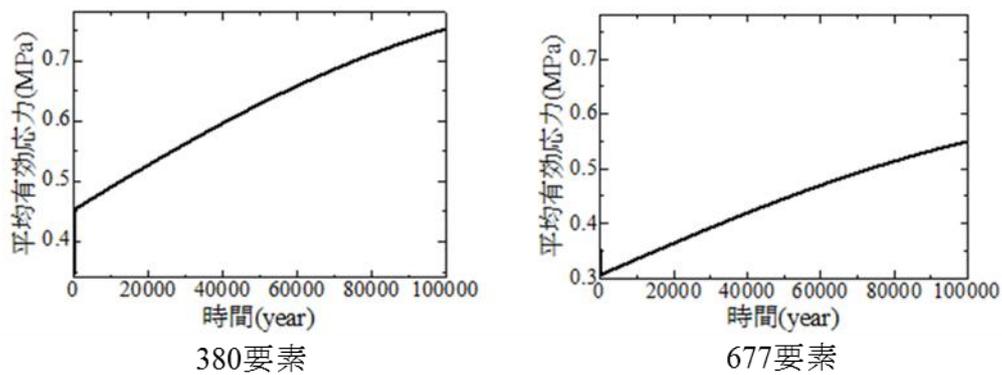


図 5.2.1-21 Case1 における平均有効応力の経時変化

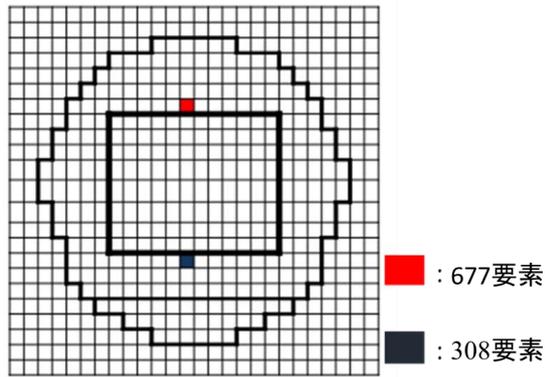


図 5.2.1-22 抽出要素

Case2(クリノプロライトに変質するケース)の体積ひずみを図 5.2.1-23 に示す。圧縮・膨張している部分は Case1 とほぼ同じであるが、体積ひずみの値は全く異なり、圧縮・膨張ともに約 6~7 倍になっている。これは図 5.2.1-16 より Case2 は他の場合に比べて固相体積変化率が非常に大きいからだと考えられる。

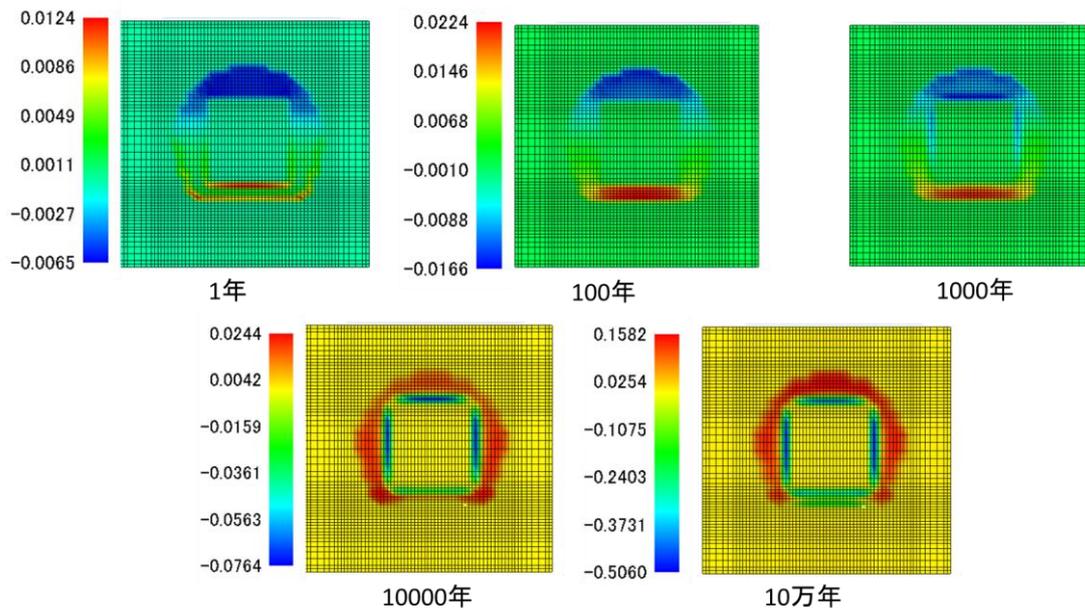


図 5.2.1-23 Case2 における体積ひずみの経時変化

Case2 の水平変位を図 5.2.1-24 に示す。水平変位も Case1 と比較して約 7 倍の値を示している。Case2 の鉛直変位を図 5.2.1-25 に示す。図より 10 万年後において処分場全体が正の方向に変位している。図 5.2.1-16 より底部緩衝材の固相体積変化率が廃棄体上部の緩衝材より全体的に大きく、処分場全体が上に変位したのだと考えられる。

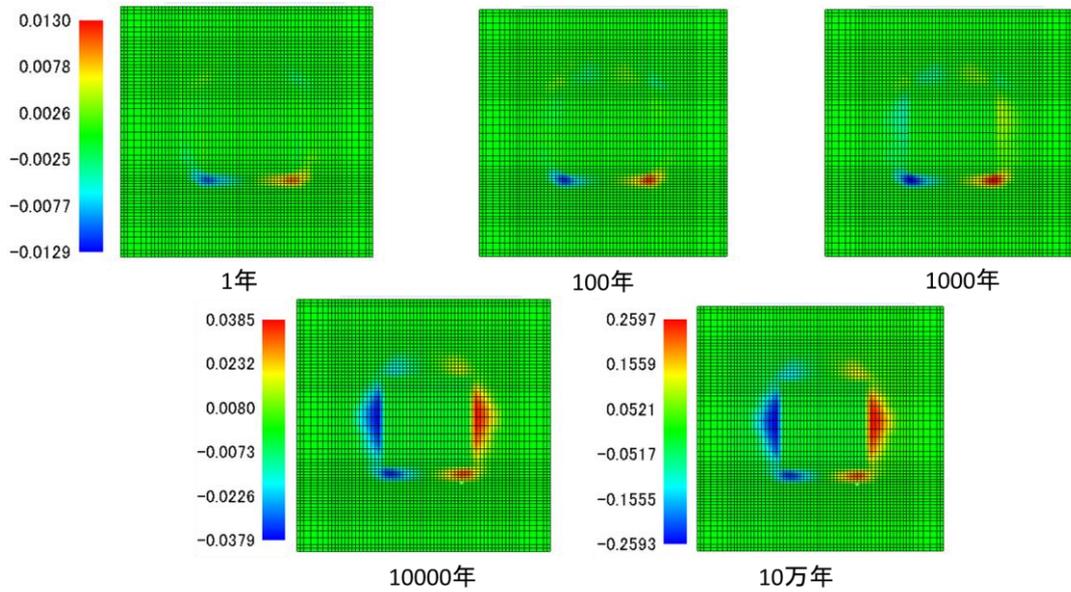


図 5.2.1-24 Case2 における水平変位の経時変化(m)

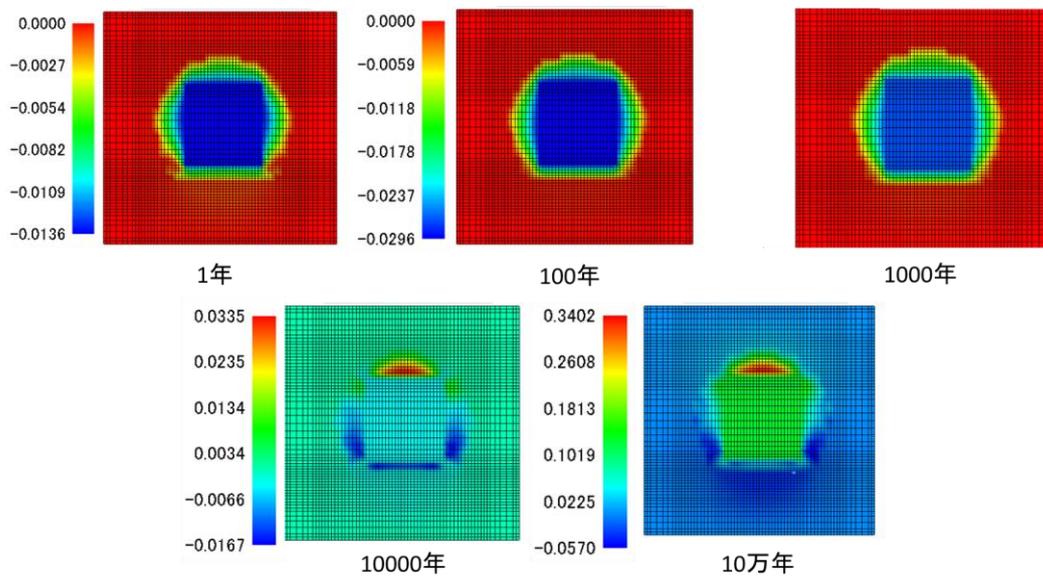


図 5.2.1-25 Case2 における鉛直変位の経時変化(m)

Case2 の平均有効応力を図 5.2.1-26 に示す。固相体積の増加に伴い Case1 より Case2 のほうが平均有効応力の増加量が多い。10 万年後における平均有効応力の値は Case1 と比較して 380 要素、677 要素ともに約 11 倍になっている。Case2 では平均有効応力の増加において施工時の载荷よりも化学変質が大きな要因となっている。

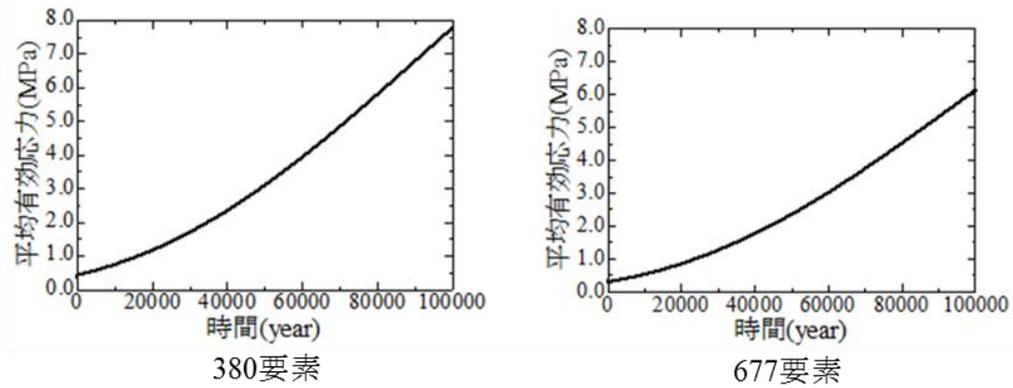


図 5.2.1-26 Case2 における平均有効応力の経時変化

Case3(ヒューランダイトに変質するケース)の体積ひずみを図 5.2.1-27 に示す。図 5.2.1-16 より Case3 では固相体積変化率が小さいゆえに緩衝材の膨張の影響をほとんど受けず、自重により底部緩衝材は圧縮し、反対に上部緩衝材は全体的に膨張している。

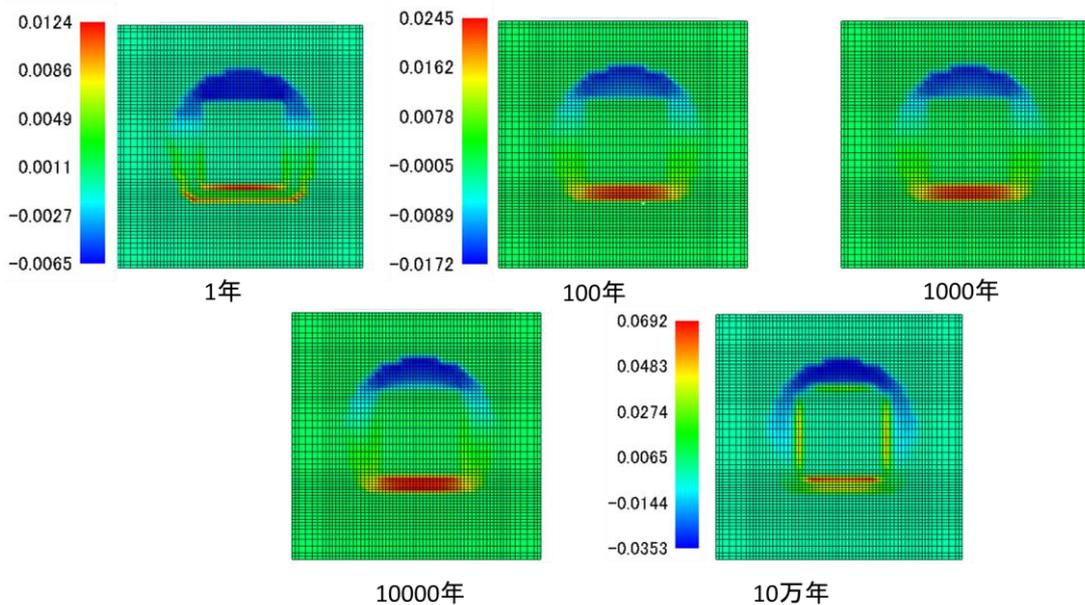


図 5.2.1-27 Case3 における体積ひずみの経時変化

次に図 5.2.1-28 に Case3 の水平変位を示す。図 5.2.1-16 より Case3 では全体的に固相体積変化率の値が 1.0~1.2 の間にあり、局所的に固相体積が増加している部分がない。したがって岩盤から押し出されるかたちで左側、右側の緩衝材はそれぞれ右、左に変位していることがわかる。

次に Case3 の鉛直変位を図 5.2.1-29 に示す。変質による特別な挙動は見られず、自重に伴い処分場全体が下に変位している。

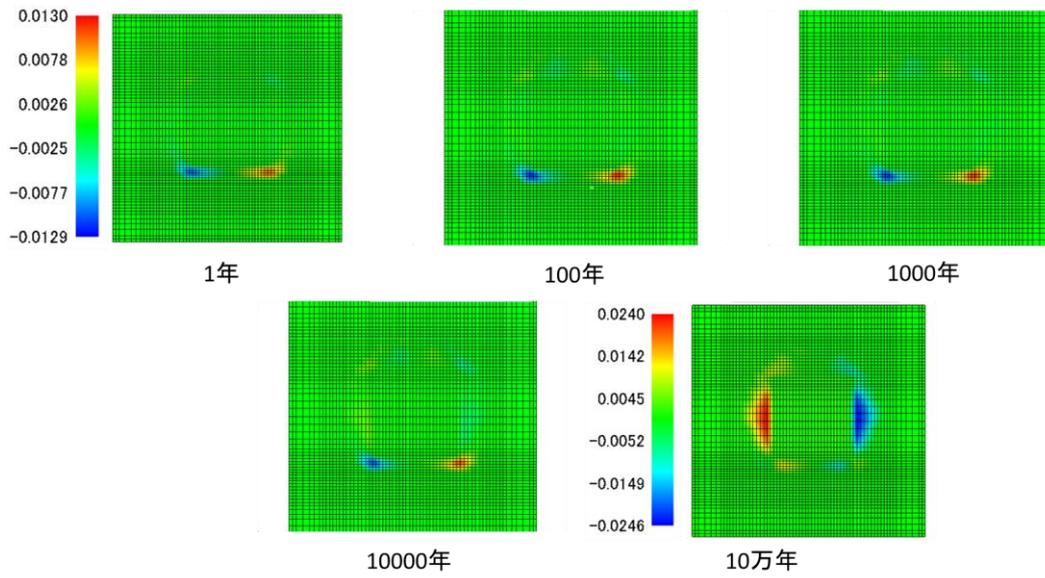


図 5.2.1-28 Case3 における水平変位の経時変化(m)

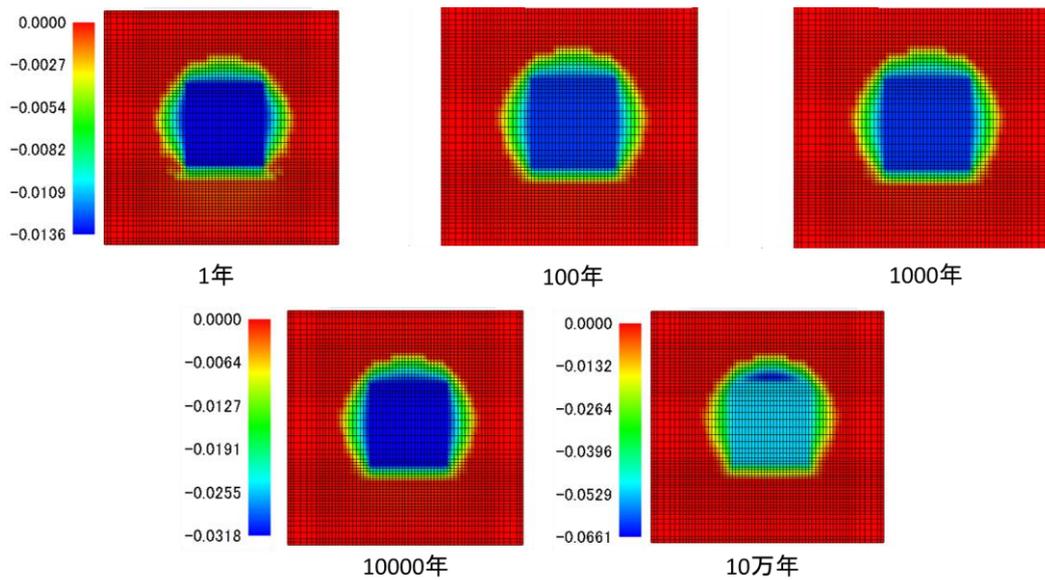


図 5.2.1-29 Case3 における鉛直変位の経時変化(m)

Case3 の平均有効応力を図 5.2.1-30 に示す。式 5.2.1-10 より有効応力の増分の式は

$$\dot{\sigma}' = \frac{(1+e_0)\sigma'}{\lambda\alpha} \dot{\varepsilon}_v + \frac{(1+e)\sigma'}{\lambda\alpha} \dot{\alpha} + 0.06\sigma'\dot{\alpha}_{mon}$$

となり、Case3 では固相体積がほとんど変化しないので、 $\dot{\alpha} \cong 0$ 、 $\alpha \cong 1$ とできる。よって 380 要素の場合、式 5.2.1-10 は定数の値を代入すると次のように変形できる。

$$\dot{\sigma}' = 12.94\sigma'\dot{\epsilon}_v + 0.06\sigma'\dot{\alpha}_{mon}$$

解析結果より 0 年から 10 万年後の体積ひずみの変化量は $\Delta\epsilon_v = 0.06$ 、モンモリロナイトの変化量は $\Delta\alpha_{mon} = -33.2$ であり、上の式と比較すると有効応力増分は負の値を示すと考えられる。677 要素の場合も同様となり、平均有効応力の変化が図 5.2.1-30 のようになったと考えられる。

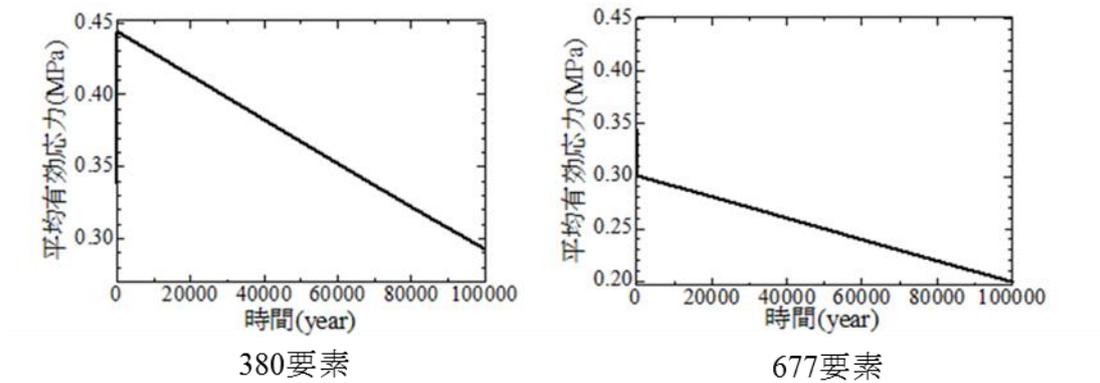


図 5.2.1-30 Case3 における平均有効応力の経時変化

Case4(モンモリロナイトが溶解するケース)の体積ひずみを図 5.2.1-31 に示す。図 5.2.1-17 より廃棄体付近の緩衝材の固相体積変化率が極端に減少している。したがって廃棄体付近の緩衝材が固相体積の減少に伴い圧縮を示している。また底部緩衝材では上側、下側の固相体積の減少率が大きいため、その間にはさまれた部分では圧縮が緩和されている。

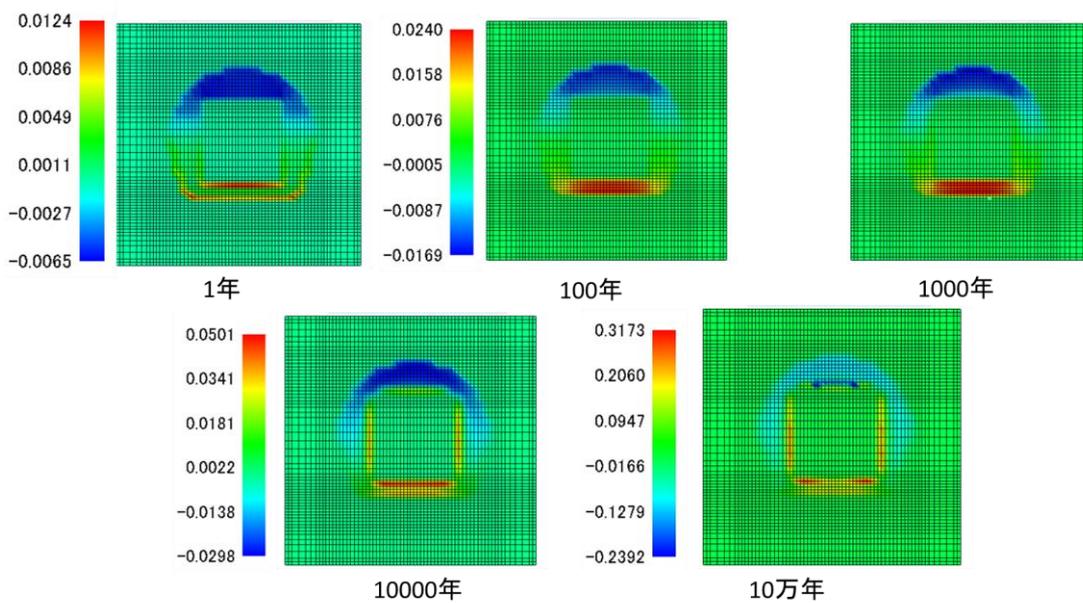


図 5.2.1-31 Case4 における体積ひずみの経時変化

次に Case4 の水平変位を図 5.2.1-32 に示す。廃棄体付近の緩衝材が圧縮しているため、それに伴い左右の緩衝材が廃棄体方向に変位していると考えられる。Case4 の鉛直変位を図 5.2.1-33 に示す。底部緩衝材が全体的に固相体積の減少率が大きいいため、処分場全体が下に大きく変位していることがわかる。

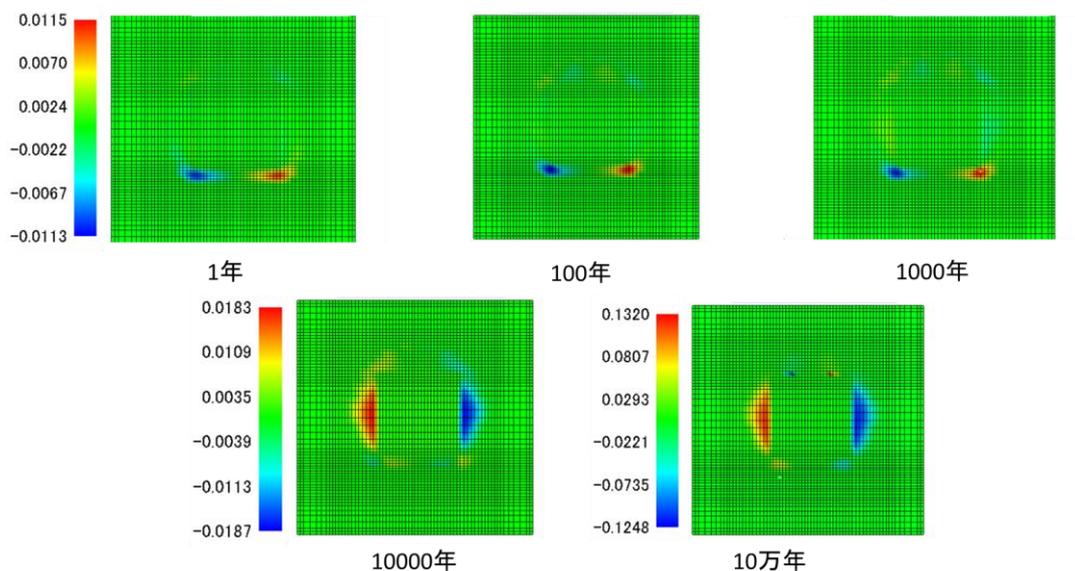


図 5.2.1-32 Case4 における水平変位の経時変化(m)

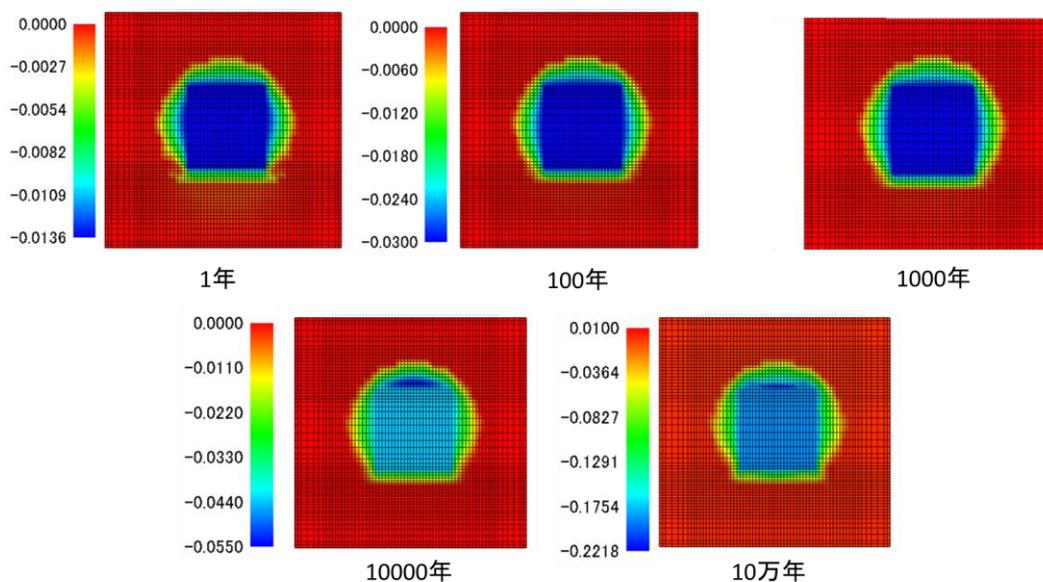


図 5.2.1-33 Case4 における鉛直変位の経時変化(m)

Case4 の平均有効応力を図 5.2.1-34 に示す。固相が大きく減少しているため、平均有効応力も大きく減少していることがわかる。

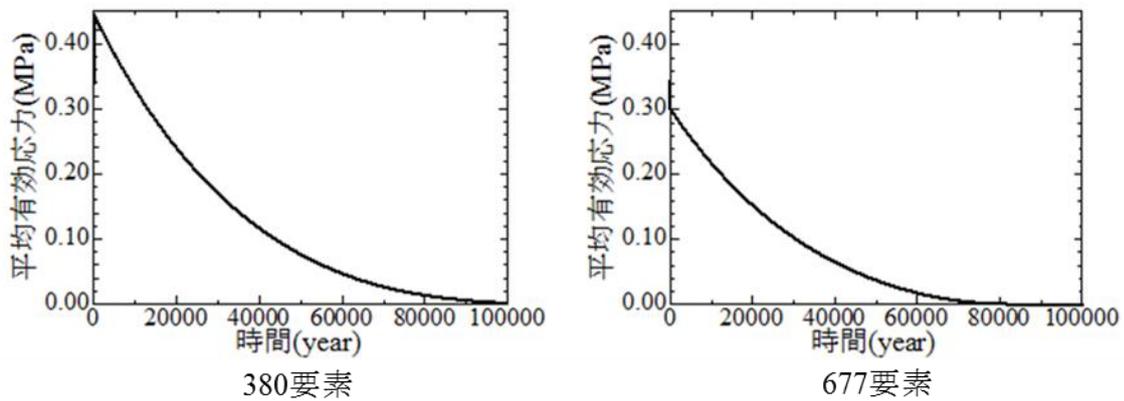


図 5.2.1-34 Case4 における平均有効応力の経時変化

Case5 の体積ひずみ、水平変位、鉛直変位、平均有効応力をそれぞれ図 5.2.1-35、図 5.2.1-36 図 5.2.1-37 及び図 5.2.1-38 に示す。図 5.2.1-17 より Case5 の固相体積変化率は Case1 とほぼ同じであるので Case1 と似ている挙動を示している。

Case5 では Case1~4 まだがすべて同じ割合で変質が生じるとされているが、クリノプチロライトに変質する割合が増加すれば固相体積変化率も増加し、処分場に与える影響力も大きくなると考えられる。

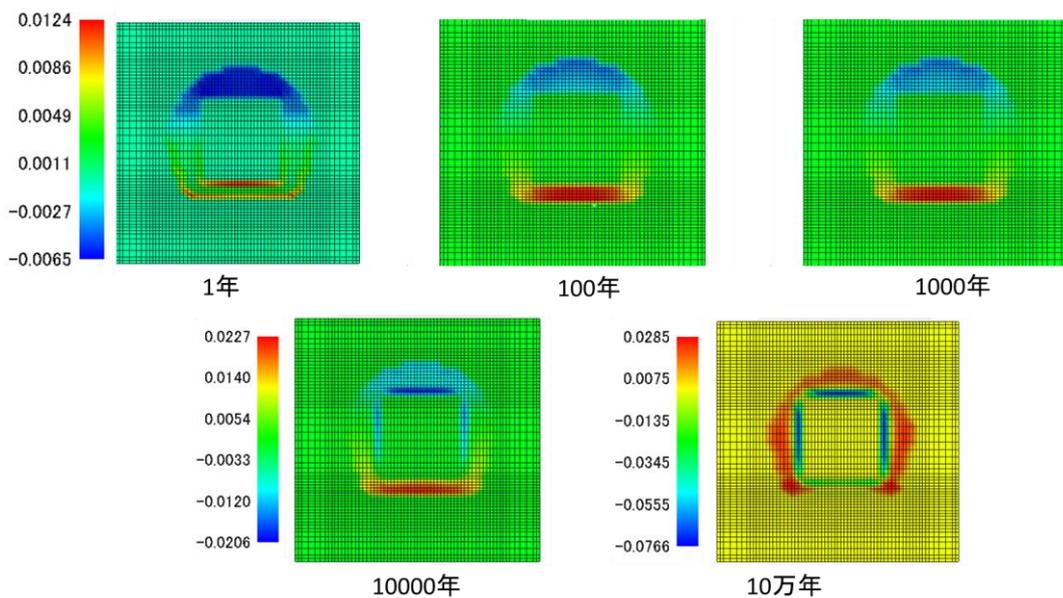


図 5.2.1-35 Case5 における体積ひずみの経時変化

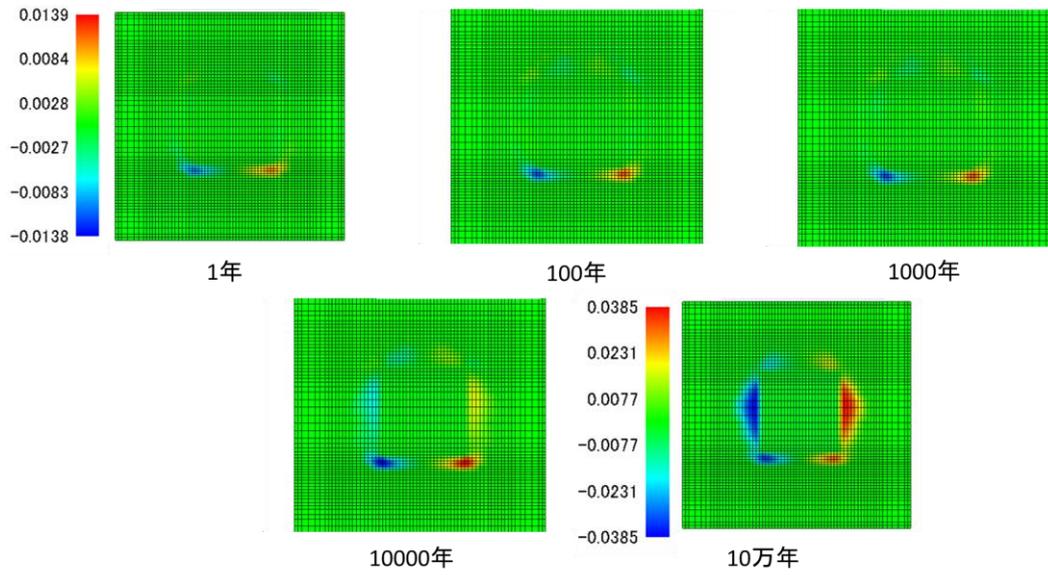


図 5.2.1-36 Case5 における水平変位の経時変化(m)

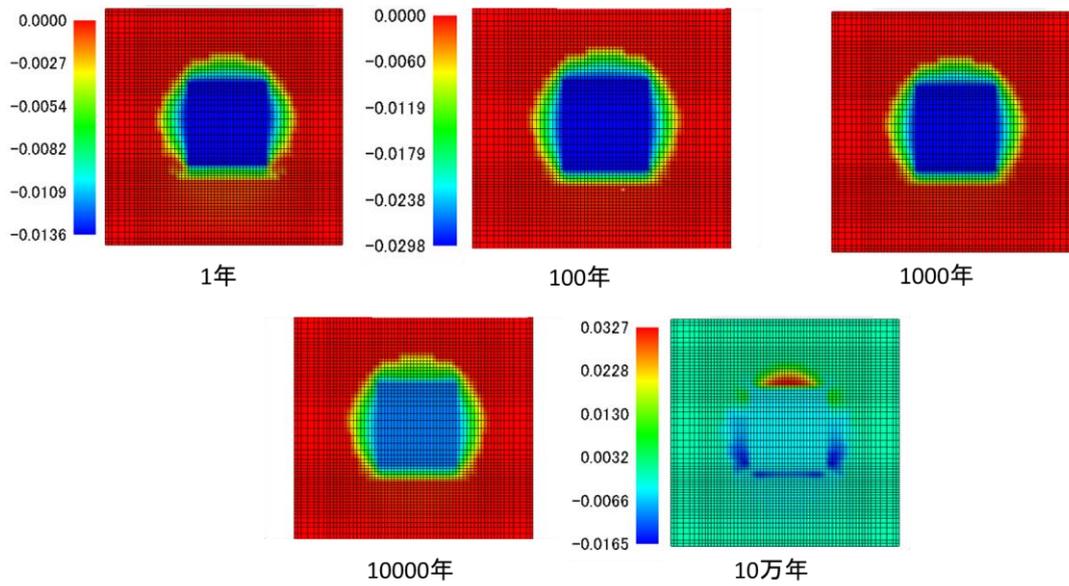


図 5.2.1-37 Case5 における鉛直変位の経時変化(m)

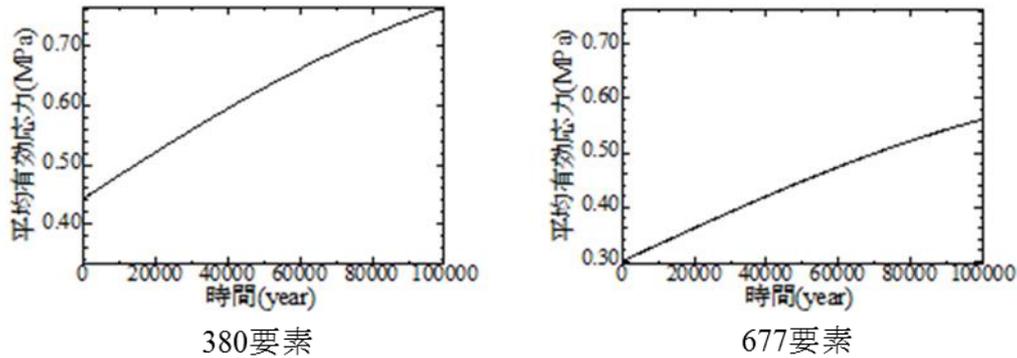


図 5.2.1-38 Case5 における平均有効応力の経時変化

(3) モデル化学変質ケースによる長期力学挙動への施工条件影響の検討のまとめ

緩衝材の主成分であるモンモリロナイトは高いアルカリ性の地下水によりアナルサイム、クリノプチロライト、ヒューランダイト等への変質及び、液相への溶解が想定されている。(2)の解析結果より、Case2 のモンモリロナイトがクリノプチロライトに変質する場合が最も処分場に影響を与えることがわかった。石英や長石等の随伴鉱物の溶解、二次鉱物のゼオライトがどの程度の量が生成するかを、化学解析によりより信頼性を高く長期予測を行い、力学解析に反映して計算する必要があるが、二次鉱物のゼオライト系鉱物の生成によって、力学及び水理の長期挙動への影響は異なることがわかった。モンモリロナイトが溶解し、二次鉱物が生成しないケースは、間隙が増加して力学及び水理の長期挙動への影響が懸念された。

上記の長期計算は、初期条件に施工を想定した緩衝材の乾燥密度の分布を与えて実施した。解析結果より、初期条件の乾燥密度の不均一さは長期挙動において大きな影響は及ぼさないものと考えられた。

今回の解析は緩衝材が初めから飽和しているという条件で行ったが、実際の緩衝材は地下水の再冠水から徐々に不飽和から飽和へと移行するとされている。今後の課題としては、初期の施工段階ではベントナイト緩衝材は不飽和とし、冠水により緩衝材が飽和した後徐々にしていくというモデルを構築するべきだと考えられる。

5.2.2 化学力学弱連成解析による長期挙動の検討

(1) 化学力学弱連成解析の方法

人工バリアの処分坑道の2次元断面を対象とした長期挙動解析をここでは、力学解析と化学変質解析のデータ受け渡し等による連成解析を行った。化学力学連成解析の方法を表 5.2.2-1 に示す。施工による緩衝材の乾燥密度分布の不均一の長期挙動への影響について、主にケース a とケース b で比較検討を行った。長期挙動解析における化学解析と力学解析のデータ受け渡しの条件の影響に関して、主にケース b とケース c で比較検討を行った。

表 5.2.2-1 化学力学連成解析の方法

		ケース a	ケース b	ケース c
初期条件 (緩衝材密度分布)		施工未考慮 (均一)	施工考慮 (不均一)	施工考慮 (不均一)
長期 解 析	データ受け 渡し	相互受渡しなし (弱連成なし)		相互受け渡しあり (弱連成あり)
	解析時間 の区切り	なし (0 から 10 万年)		あり (① 0~5 千年, ② 5 千年~1 万年, ③ 1 万年~2 万年, ④ 2 万年~5 万年, ⑤ 5 万年~10 万年の 5 区分)
	化学解析	0~10 万年で計算 (力学からの反映なし)		上記①から⑤の 5 区分ごとに計算 (各区分の計算開始時にはその年数の 力学解析の結果を反映)
	力学解析	0~10 万年で計算 (上記化学解析結果を時間 step 毎に 逐次反映)		上記①~⑤の 5 区分ごとに計算 (上記の各区分の化学解析結果を時間 step 毎に逐次反映)

施工を考慮した初期条件及び力学解析は、5.2.1(2)の 1)及び 2)の解析の方法及び条件で DACSAR-BA[2]を用いて行った。なお、施工を考慮した初期条件は、5.2.1(2)の 2)で述べた通り、長期挙動の評価のためのモデル化のために、緩衝材は冠水状態を仮定しているために、施工段階において冠水状態を仮定しているため、廃棄体下部では圧縮を過小側に、廃棄体上部では緩衝材の変形を伸長側(膨張)に評価してしまうこと注意が必要である。化学解析は、5.1.1(2)の計算条件で PHREEQC-TRANS[1]を用いて行った。なお、化学解析の詳細な計算条件は比較的モンモリロナイトの溶解の早い計算ケース 4 (表 5.1.1-1 参照)とした。

図 5.2.2-1 に、力学解析により施工時の不均一及び再冠水状況を計算した結果(再冠水直後)を反映した、地化学解析の初期条件(空隙率分布)を示す(ケース b 及びケース c)。図 5.2.2-2 に再冠水までの力学解析を反映しない場合の初期条件(5.1.1(2)の計算の初期状態)における空隙率分布を示す(ケース a)。

力学解析と化学解析との受け渡しデータとして、モンモリロナイト量(含有率)、空隙率(乾燥密度・固相体積)、を考慮した。化学解析結果から力学解析へ、各メッシュにおけるモンモリロナイト含有率と固相体積変化量、密度分布を与えることで、膨潤特性の変化による各メッシ

ユのひずみが算出される。このひずみにより空隙率の変化が得られる（膨潤／圧密による空隙量変化）。この空隙率の変化を、化学解析に反映する。このとき、化学解析に入力するパラメータとして、空隙率そのものと、空隙率の変化にともなって固相体積を変更させる。

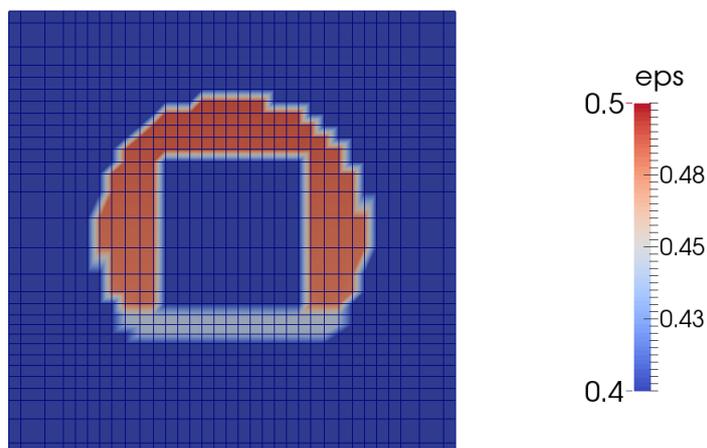


図 5.2.2-1 化学変質解析初期における空隙率分布（再冠水直後）

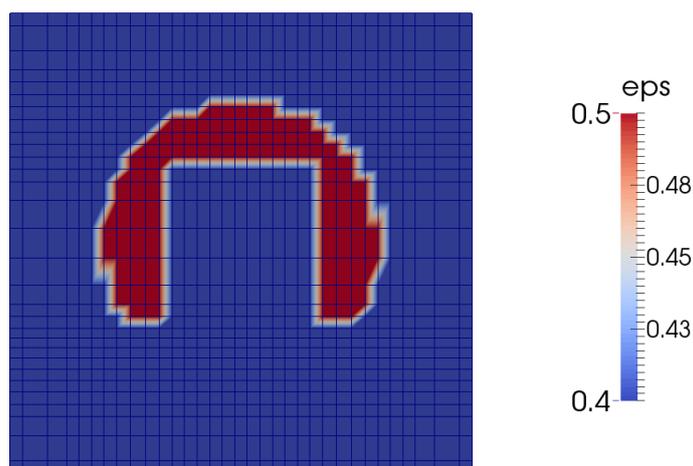


図 5.2.2-2 化学変質解析初期における空隙率分布（力学考慮なしー参考）

データ受け渡しのタイミングで、化学解析結果の空隙率を eps 、固相の体積割合（全体積を 1 とした時の固相の割合）を V_{min} 、この化学解析結果を考慮した力学解析から得られた空隙率を eps' 、固相体積割合を V_{min}' とする。このとき、力学解析結果からはデータとして eps' が得られ、これにともなって算出される V_{min}' から、 eps' に対応する固相濃度を再設定し、化学解析リスタートの入力とする。

$$1 = \text{eps} + V_{\text{min}}$$

$$1 = \text{eps}' + V_{\text{min}'}$$

eps：空隙率（化学解析結果）

eps'：空隙率（力学解析結果）

Vmin：固相体積（化学解析結果）（モンモリロナイト等考慮した固相の全体積）

Vmin'：固相体積（力学解析結果）

$$V_{\text{min}'} = V_{\text{min}} \times (V_{\text{min}'}/V_{\text{min}}) = V_{\text{min}} \times ((1-\text{eps}')/(1-\text{eps}))$$

なお、Vmin は各固相の体積の総量である。

$$V_{\text{min}} = \sum V_n \times M_n$$

Vn：任意の固相 n のモル体積（一定；固相 1 モルが占める体積）

Mn：任意の固相 n のモル濃度（力学解析結果）

また、それぞれ固相も、全体積の変化割合と同様の割合で変化すると考える。

$$V_{\text{min}'} = \sum V_n \times M_n' = (\sum V_n \times M_n) \times ((1-\text{eps}')/(1-\text{eps}))$$

Mn'：任意の固相 n のモル濃度（力学解析結果）

各固相の体積変化が同じ割合で変化すると想定すると、モル濃度変化も同じ割合で変化していると考えられる。力学解析結果の eps' を考慮した体積変化割合が ((1-eps')/(1-eps)) と示されるとすれば、モル濃度変化も ((1-eps')/(1-eps)) で示される。

$$M_n' = M_n \times ((1-\text{eps}')/(1-\text{eps}))$$

Mn'：任意の固相 n のモル濃度（力学解析結果）

以上より、データ受け渡しのタイミングで、力学解析結果から得られた空隙率 eps' から Mn' を算出し、eps' と Mn' を更新して化学解析を行うこととする。

なお、化学解析結果から力学解析へ供給するデータは、モンモリロナイト含有率、固相体積変化率、密度分布である。

次に、化学解析開始時(0年)の解析体系鉛直断面の固相組成及び空隙率の分布を図 5.2.2-3 に示す。施工条件を考慮した力学解析を行った場合、上部緩衝材と底部緩衝材の空隙率の差が小さくなるような分布（底部緩衝材の空隙率は大きく、上部緩衝材の空隙率は小さくなる傾向）を示している。

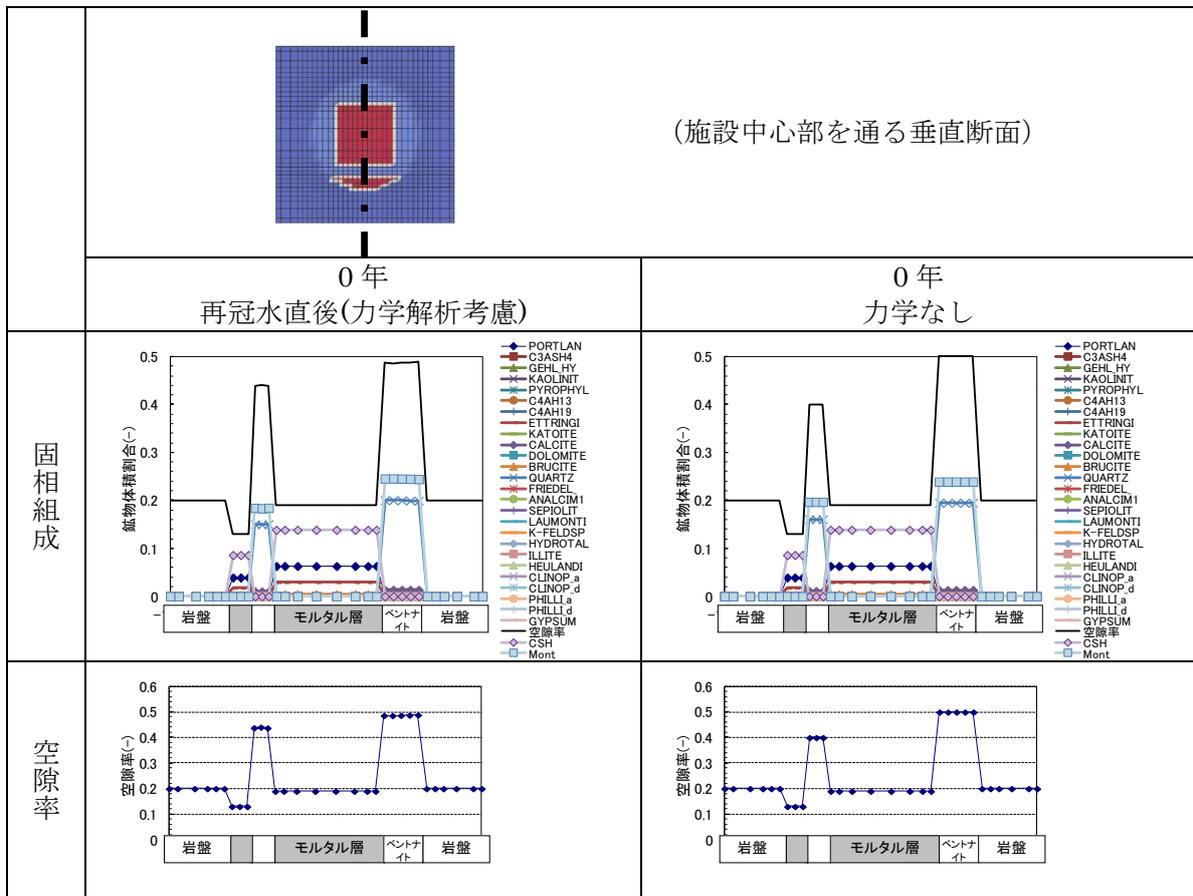


図 5.2.2-3 化学変質解析初期における固相組成及び空隙率分布

(2) 化学解析結果

ケース b 及びケース c の化学解析結果を以下に示す。なお、ケース a の化学解析結果は、5.1.1(3) の 5) の計算ケース 4 に示す結果と同様である。

1) 0 年から 5,000 年まで(ケース c : 弱連成あり)

図 5.2.2-4～図 5.2.2-7 に、それぞれ一次元断面による液相及び固相分布を、1,000 年後・5,000 年後の結果について示す。

5,000 年で力学解析とのデータ受け渡しを行った。5,000 年後の力学解析結果を考慮した分布について、一次元断面として図 5.2.2-8 及び図 5.2.2-9 に示す。

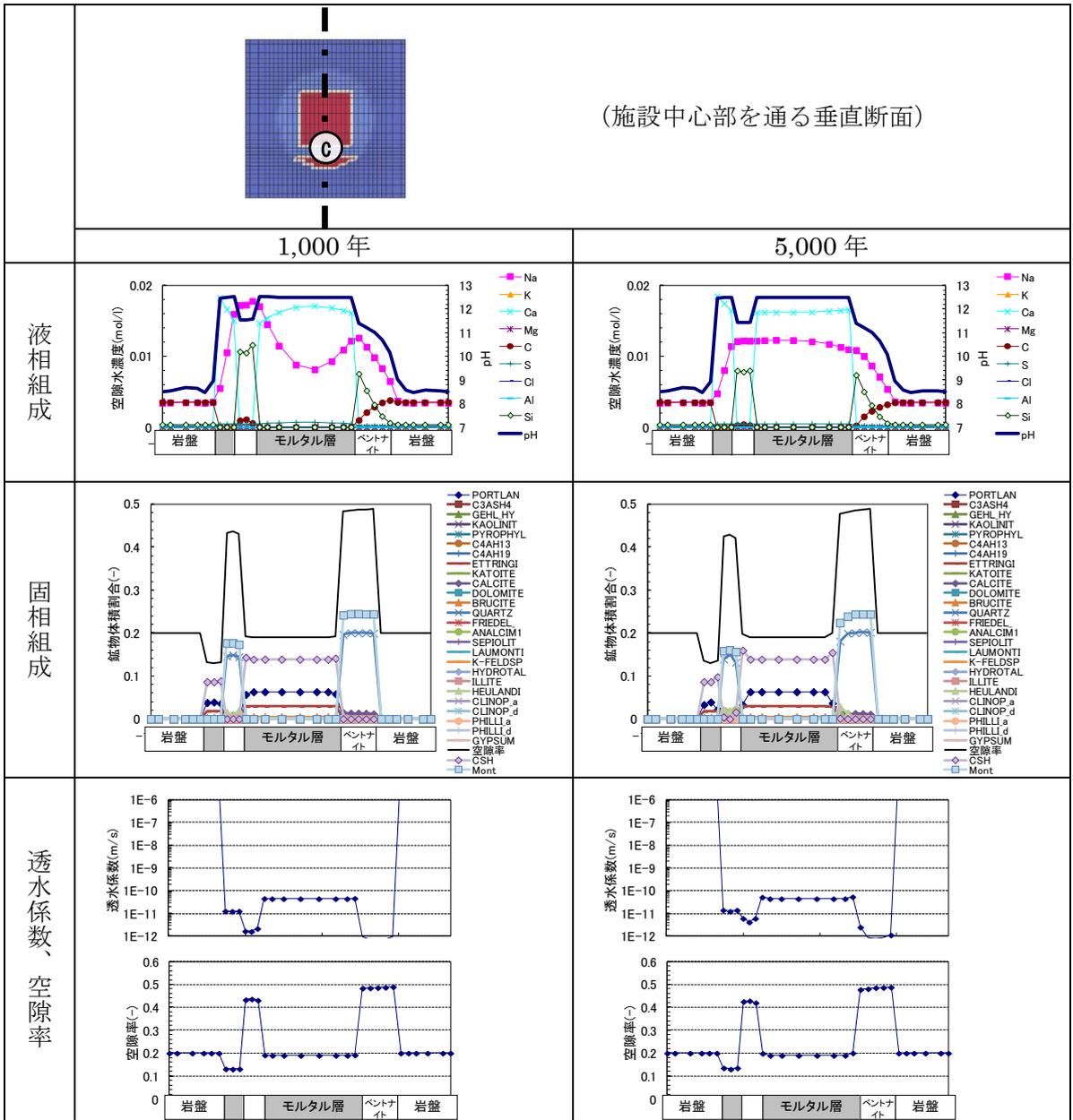


図 5.2.2-4 1,000 年後、5,000 年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面：ケース c)

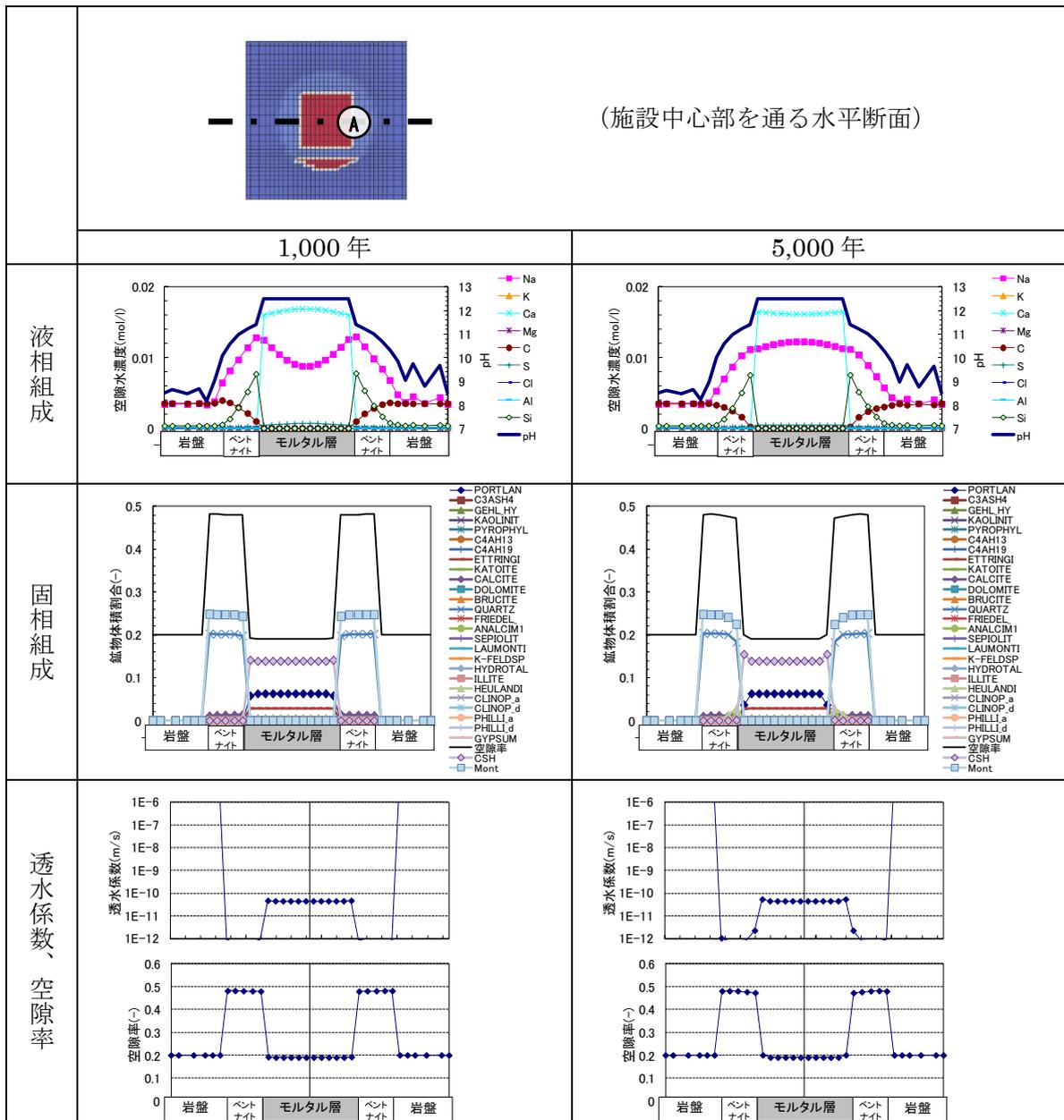


図 5.2.2-5 1,000 年後、5,000 年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面：ケース c)

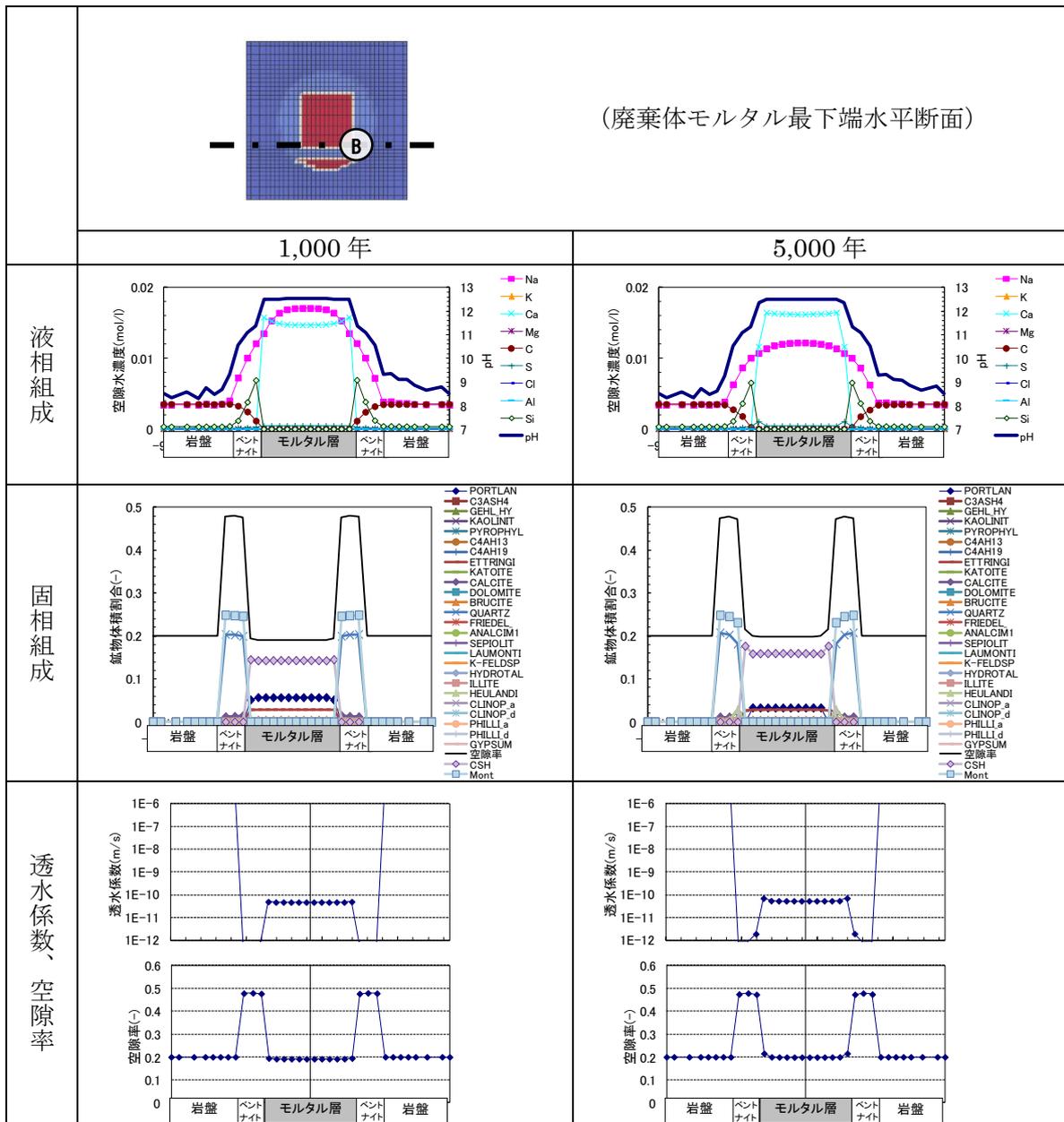


図 5.2.2-6 1,000 年後、5,000 年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c)

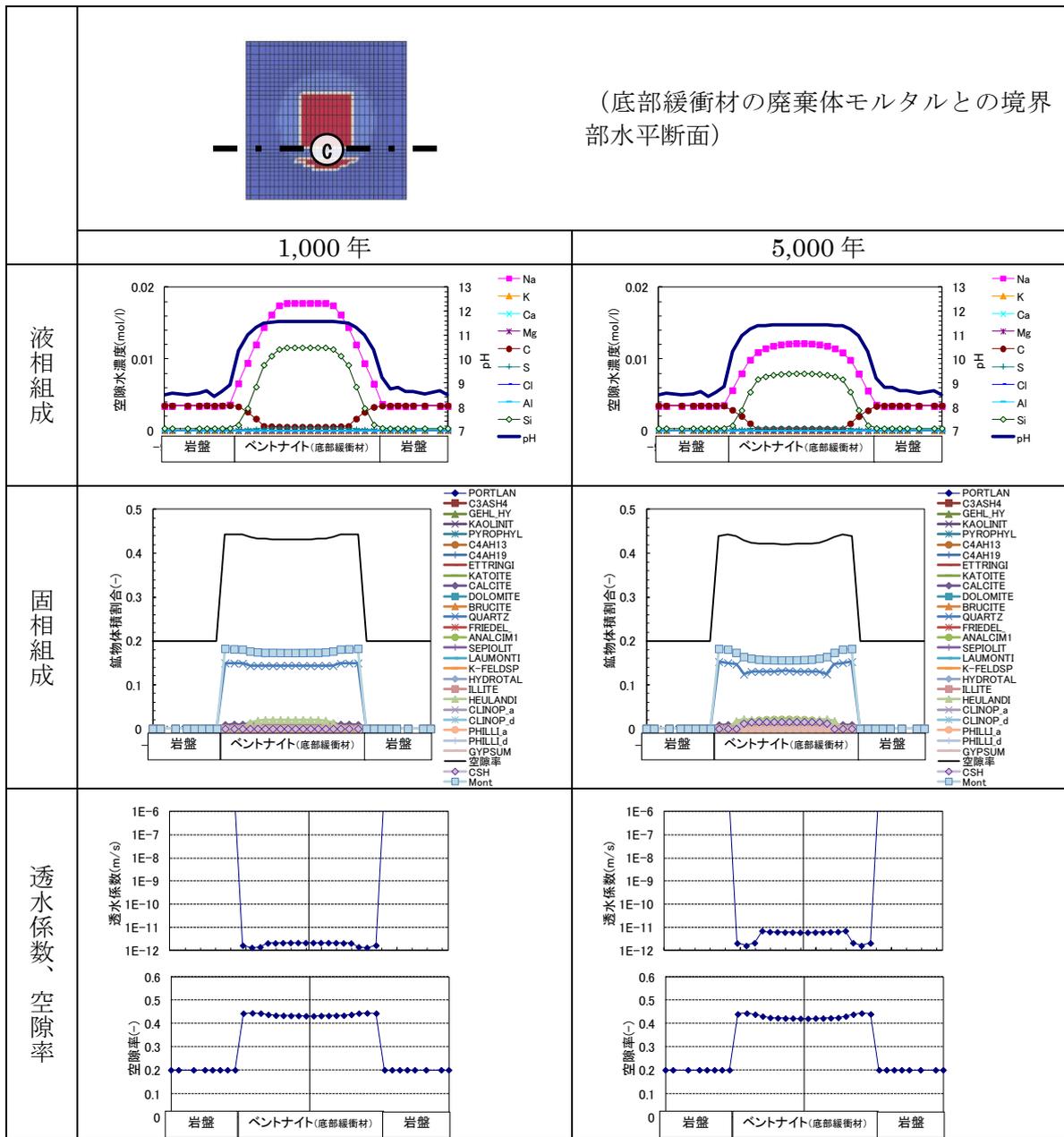


図 5.2.2-7 1,000 年後、5,000 年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面：ケース c)

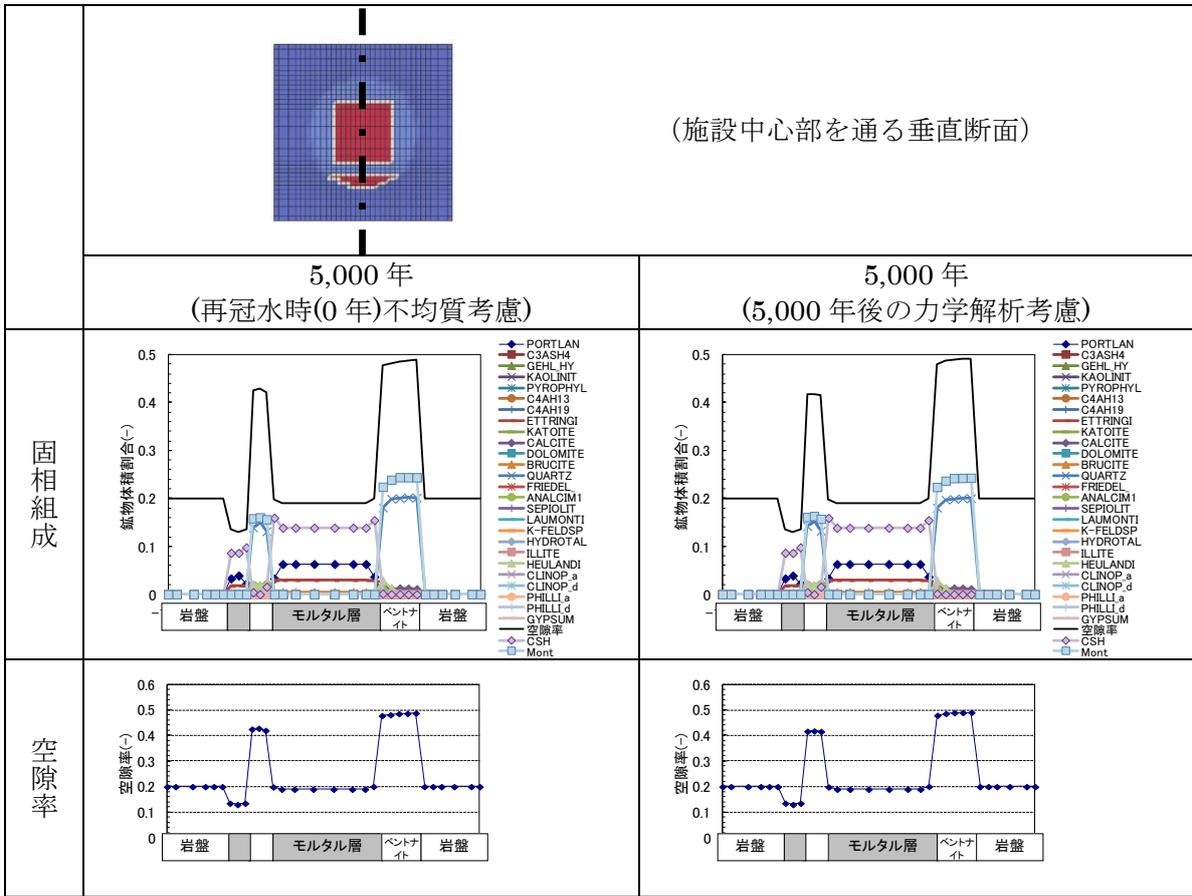


図 5.2.2-8 5,000 年後の化学変質解析結果と力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る垂直断面 : ケース c)

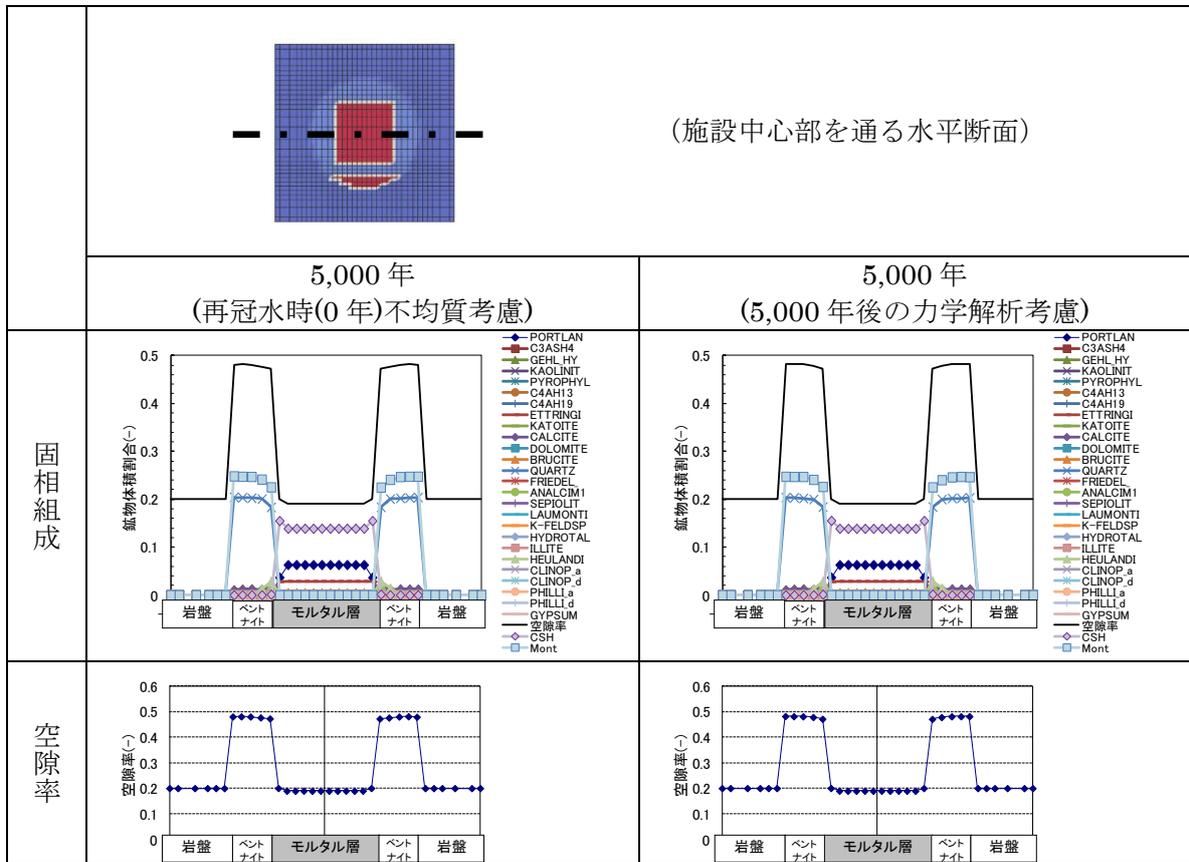


図 5.2-9 5,000 年後の化学変質解析結果と力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る水平断面 : ケース c)

2) 5,000年から1万年まで(ケースc:弱連成あり)

図 5.2.2-10~図 5.2.2-13 に、それぞれ一次元断面による液相及び固相分布を、7,000年後・1万年後の結果について示す。

1 万年で力学解析とのデータ受け渡しを行った。1 万年後の力学解析結果を考慮した固相分布及び空隙率分布について、一次元断面として図 5.2.2-14 及び図 5.2.2-15 に示す。

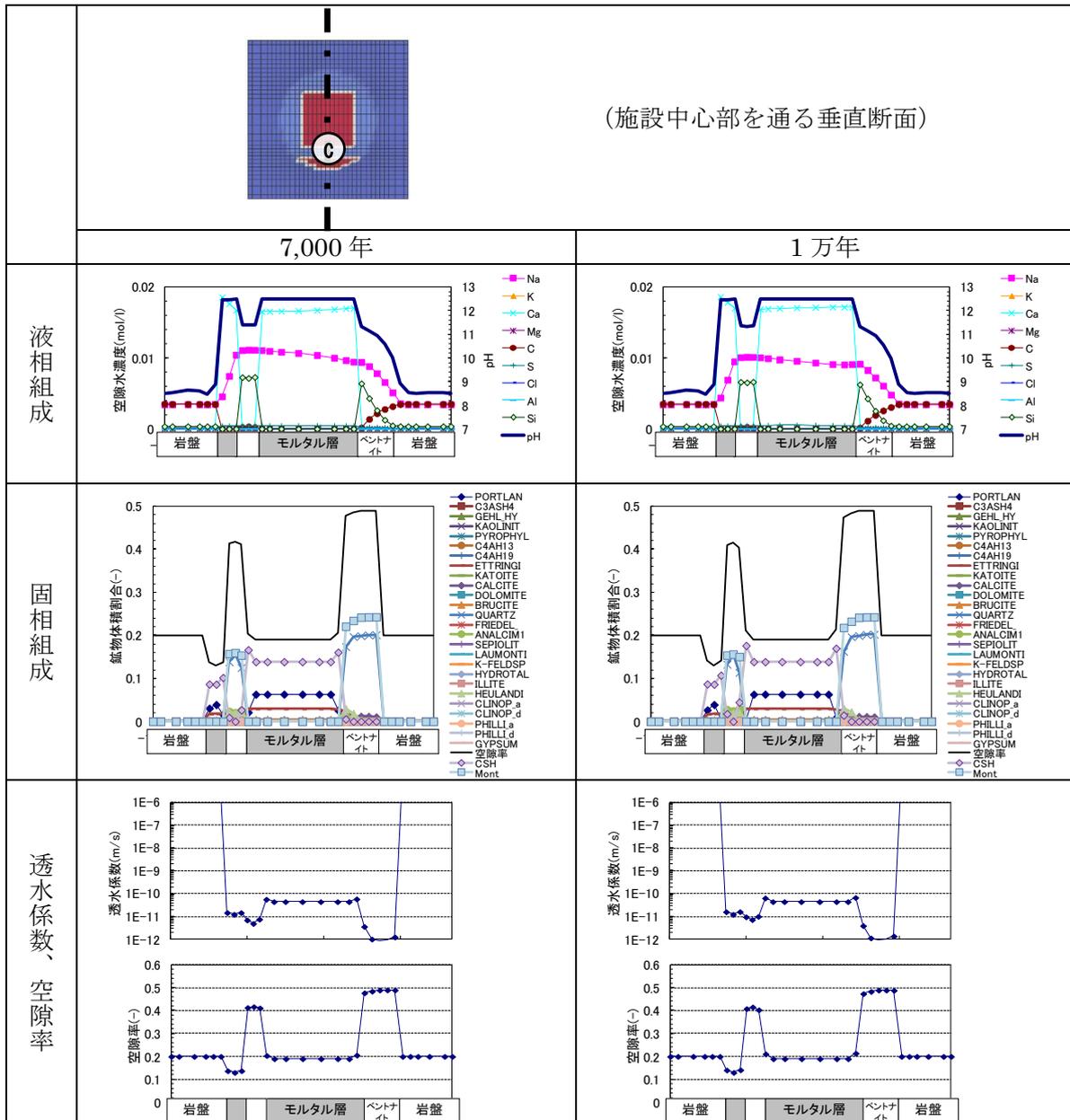


図 5.2.2-10 7,000年後、1万年後の計算結果
(施設中心部を通る垂直断面：ケースc)

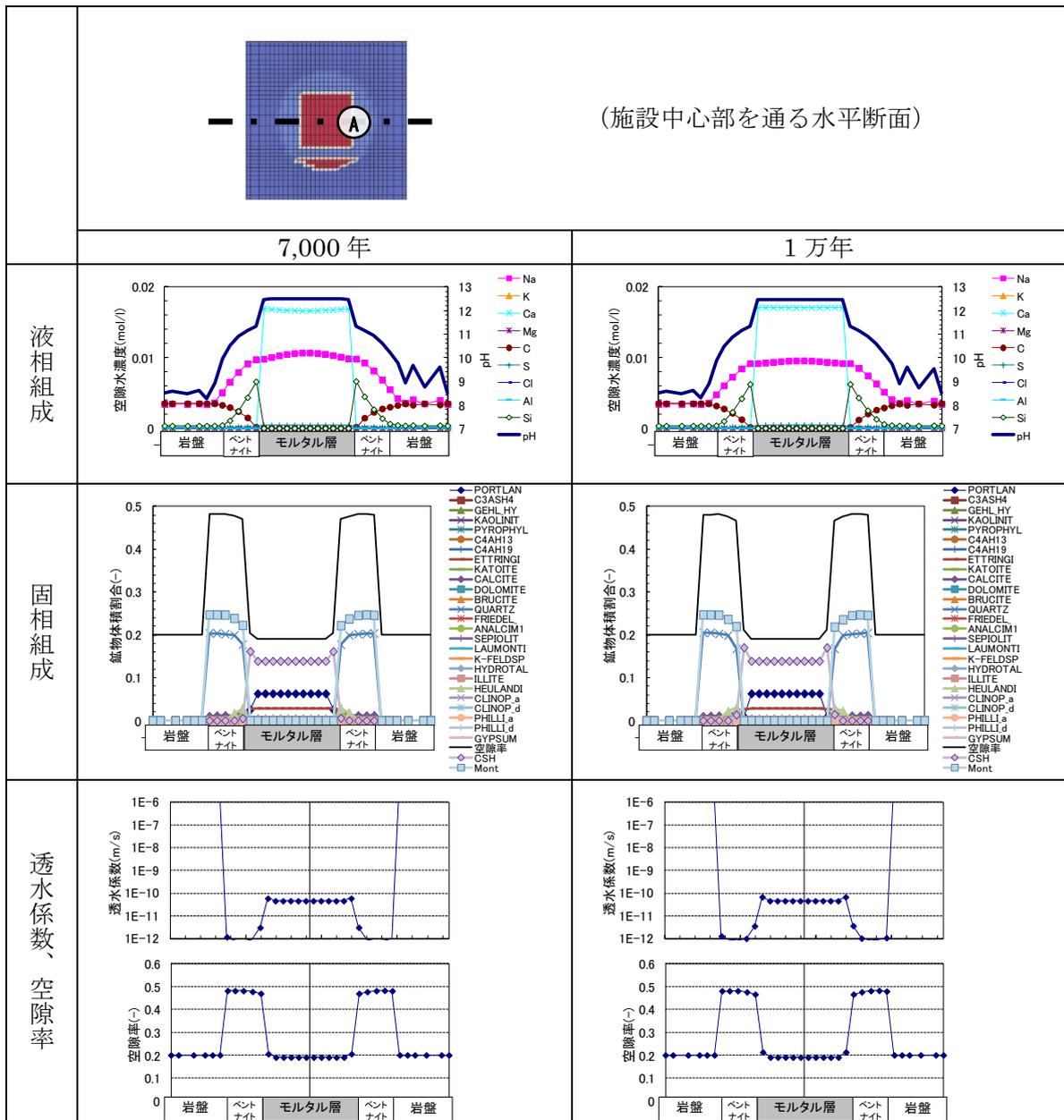


図 5.2.2-11 7,000年後、1万年後の計算結果
(施設中心部を通る水平断面：ケースc)

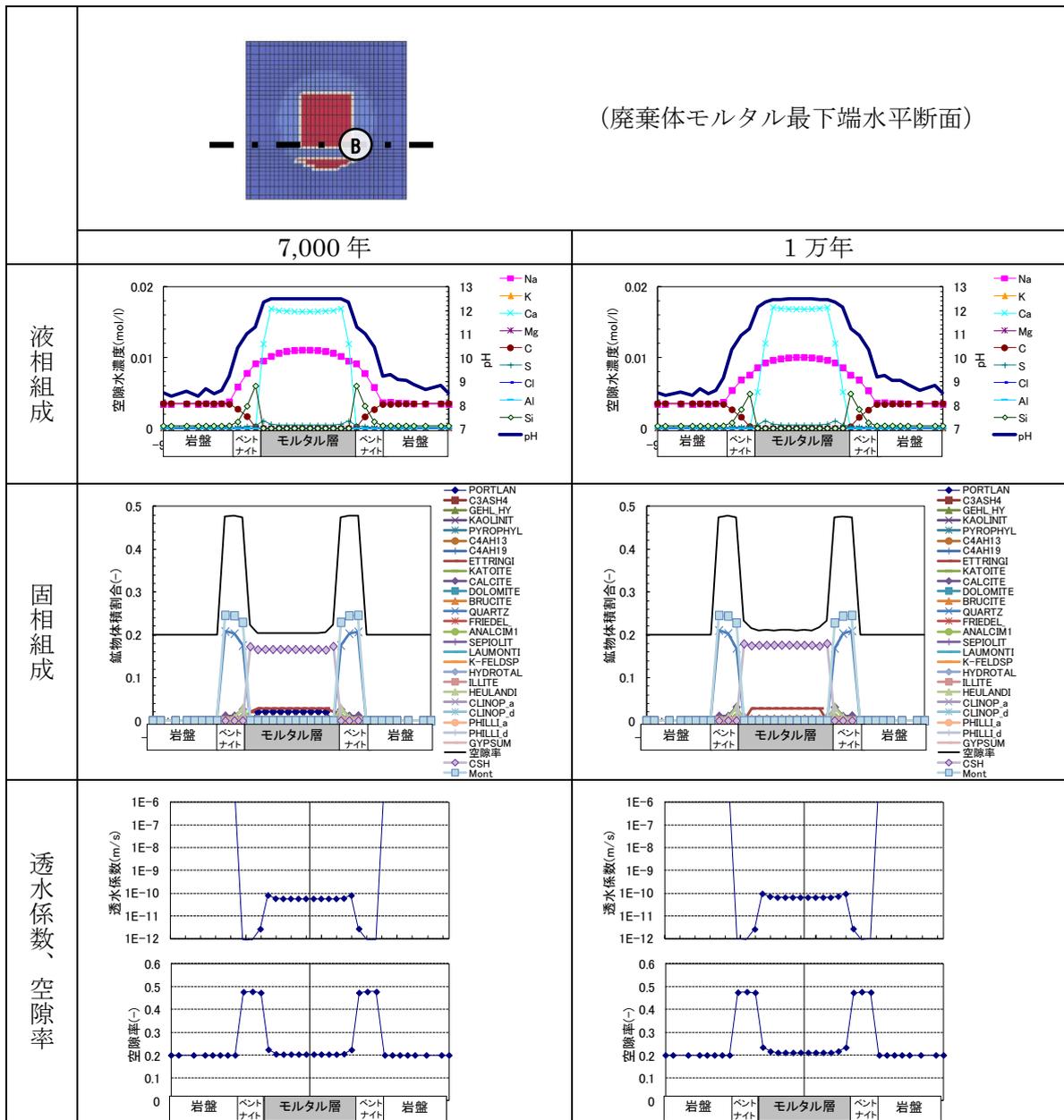


図 5.2.2-12 7,000年後、1万年後の計算結果
(廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c)

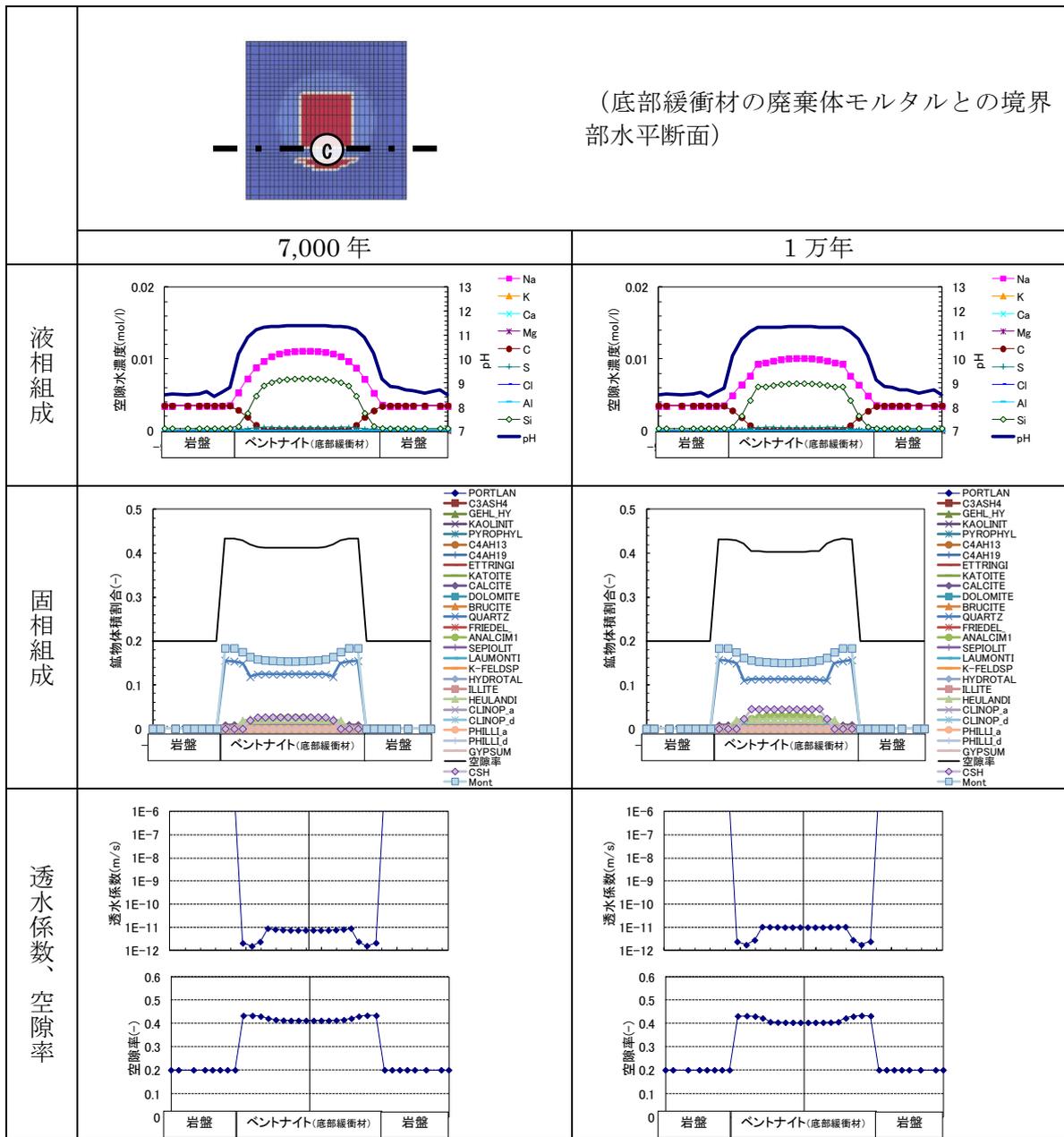


図 5.2.2-13 7,000年後、1万年後の計算結果
 (底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面：ケース c)

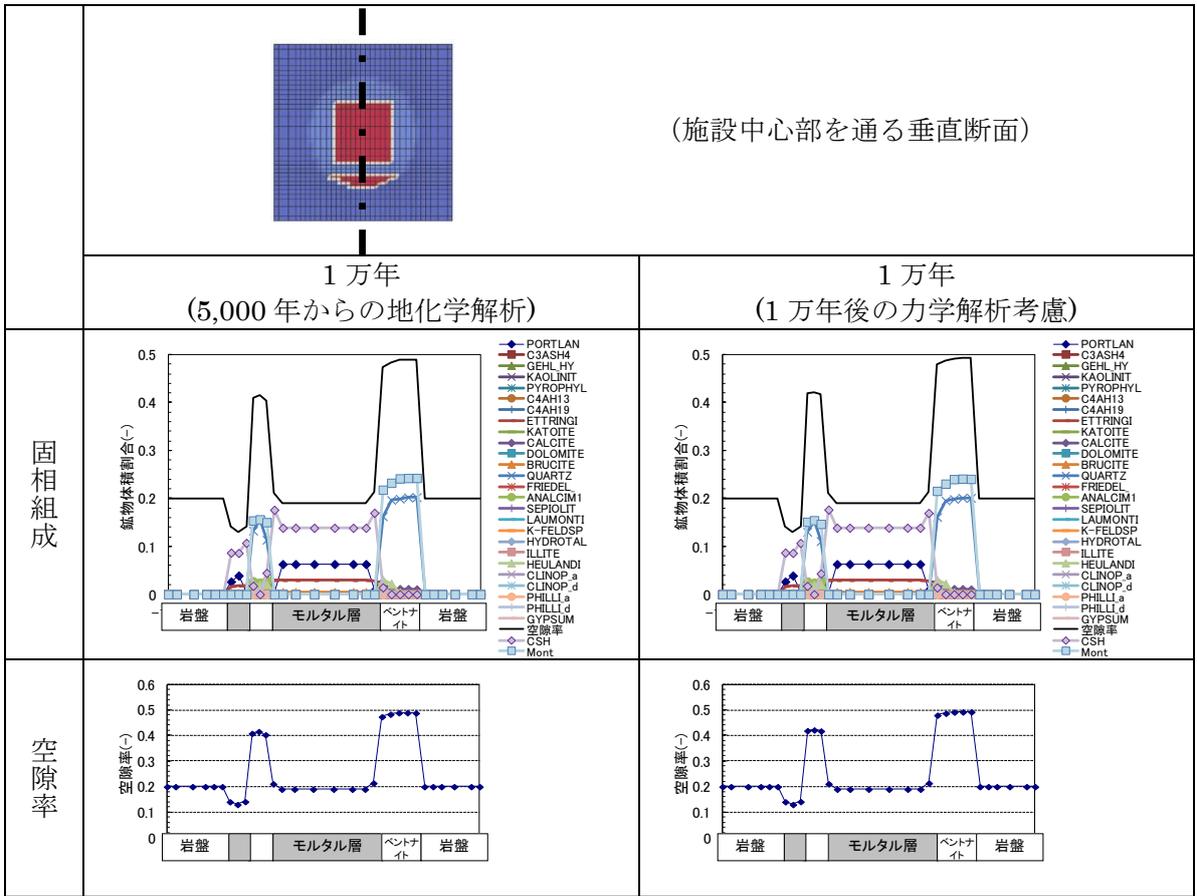


図 5.2.2-14 1 万年後の化学変質解析結果と力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る垂直断面 : ケース c)

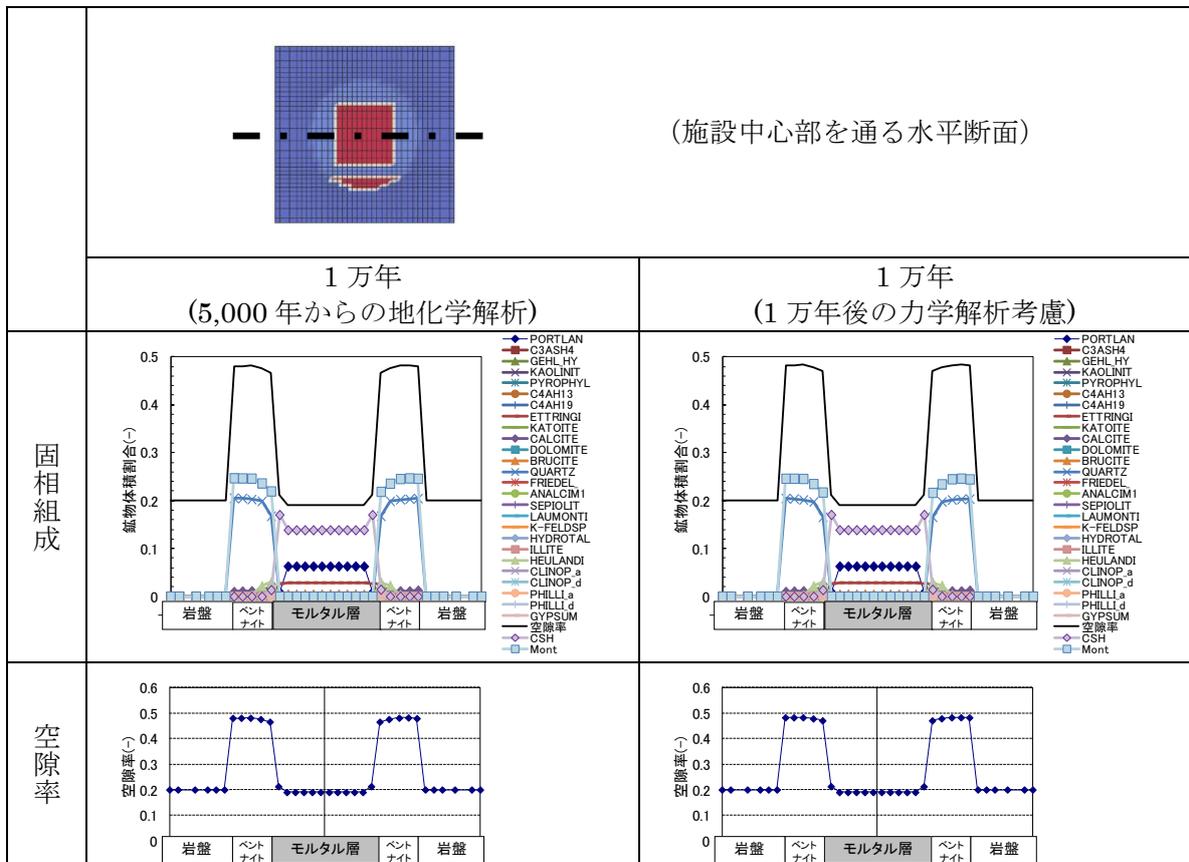


図 5.2.2-15 1 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る水平断面 : ケース c)

3) 1 万年から 2 万年まで(ケース c : 弱連成あり)

図 5.2.2-16 から図 5.2.2-19 に、それぞれ一次元断面による液相及び固相分布を、1.5 万年後・2 万年後の結果について示す。

2 万年で力学解析とのデータ受け渡しを行った。2 万年後の力学解析結果を考慮した固相分布及び空隙率分布について、一次元断面として図 5.2.2-20 及び図 5.2.2-21 に示す。

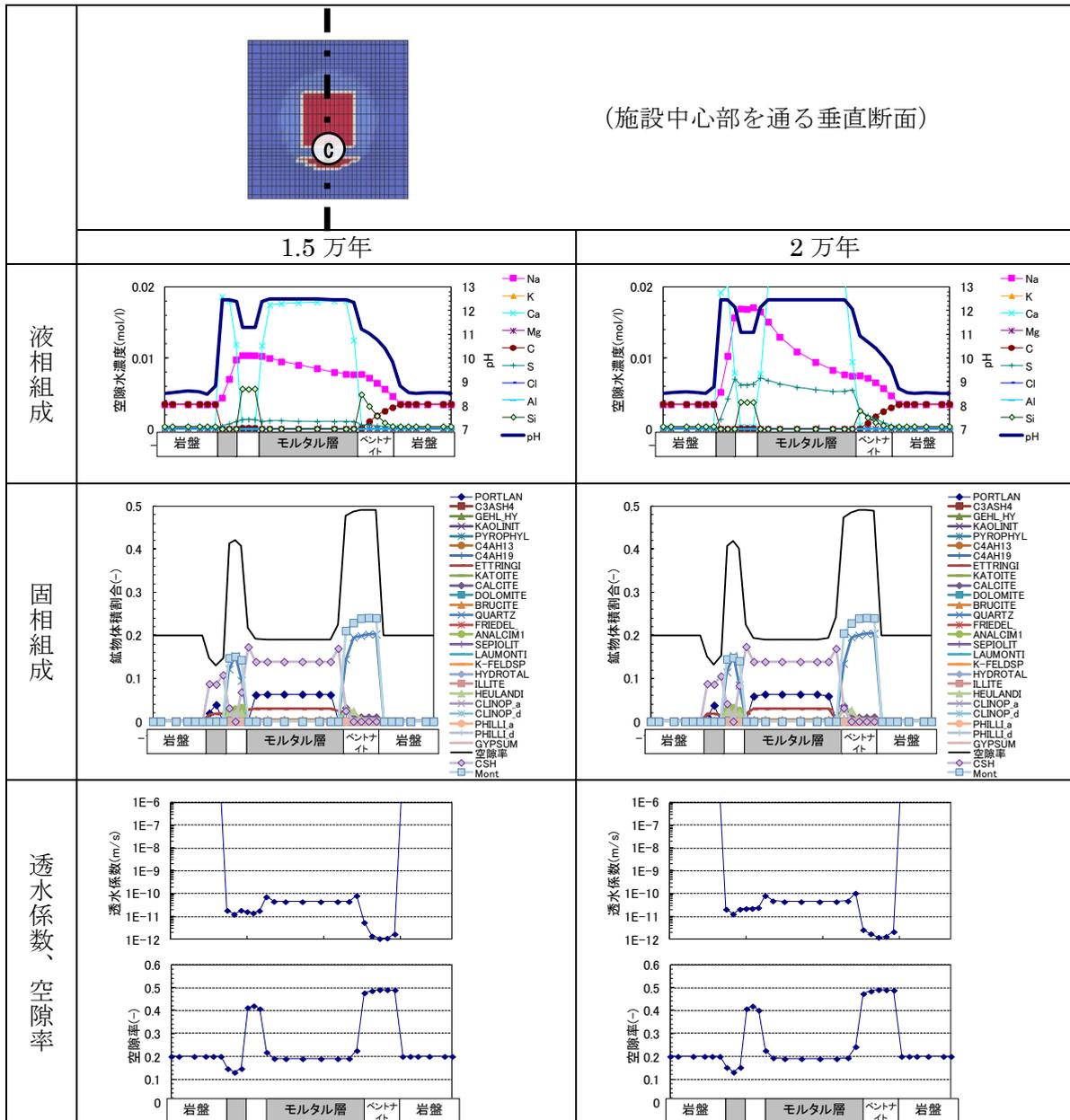


図 5.2.2-16 1.5 万年後、2 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面 : ケース c)

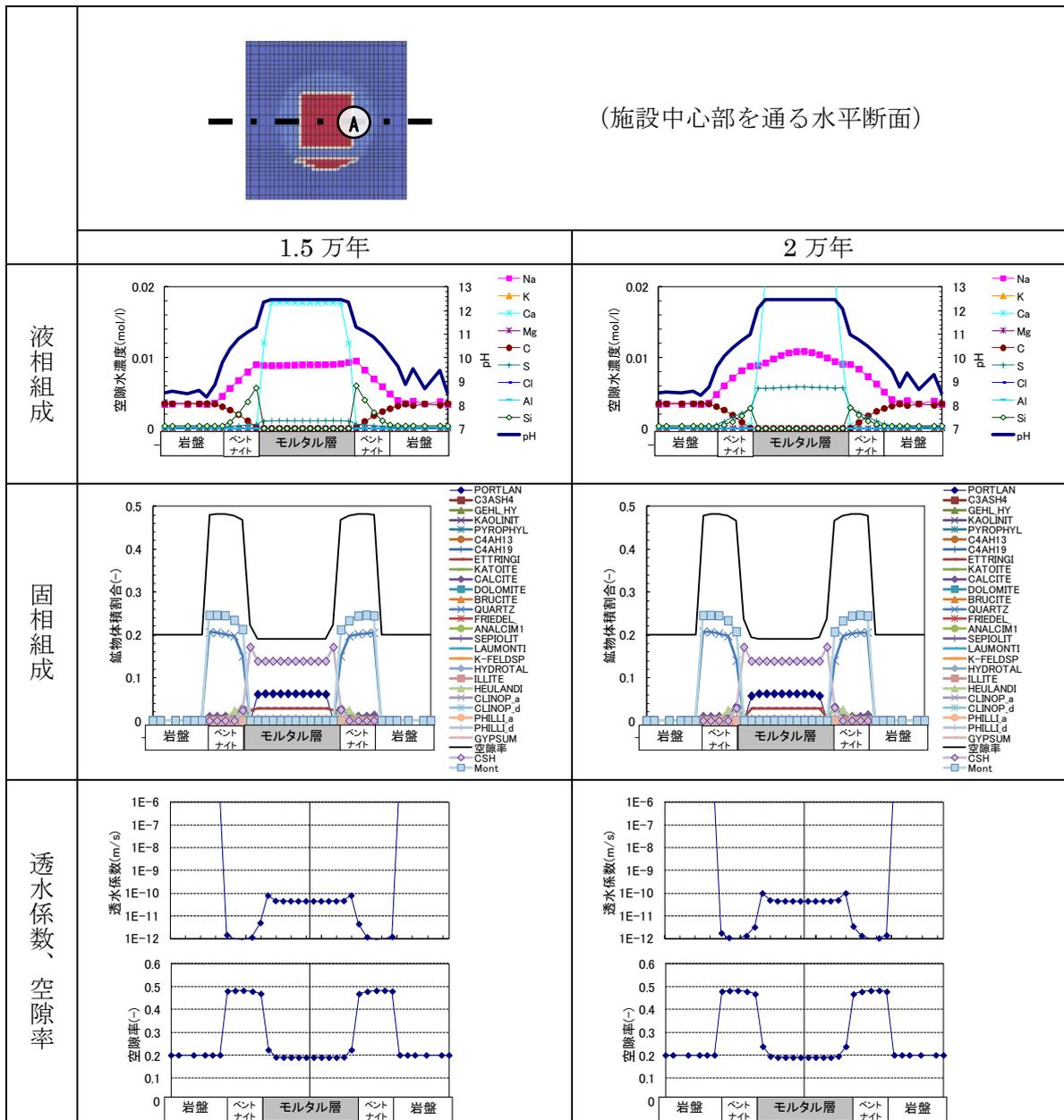


図 5.2.2-17 1.5 万年後、2 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面：ケース c)

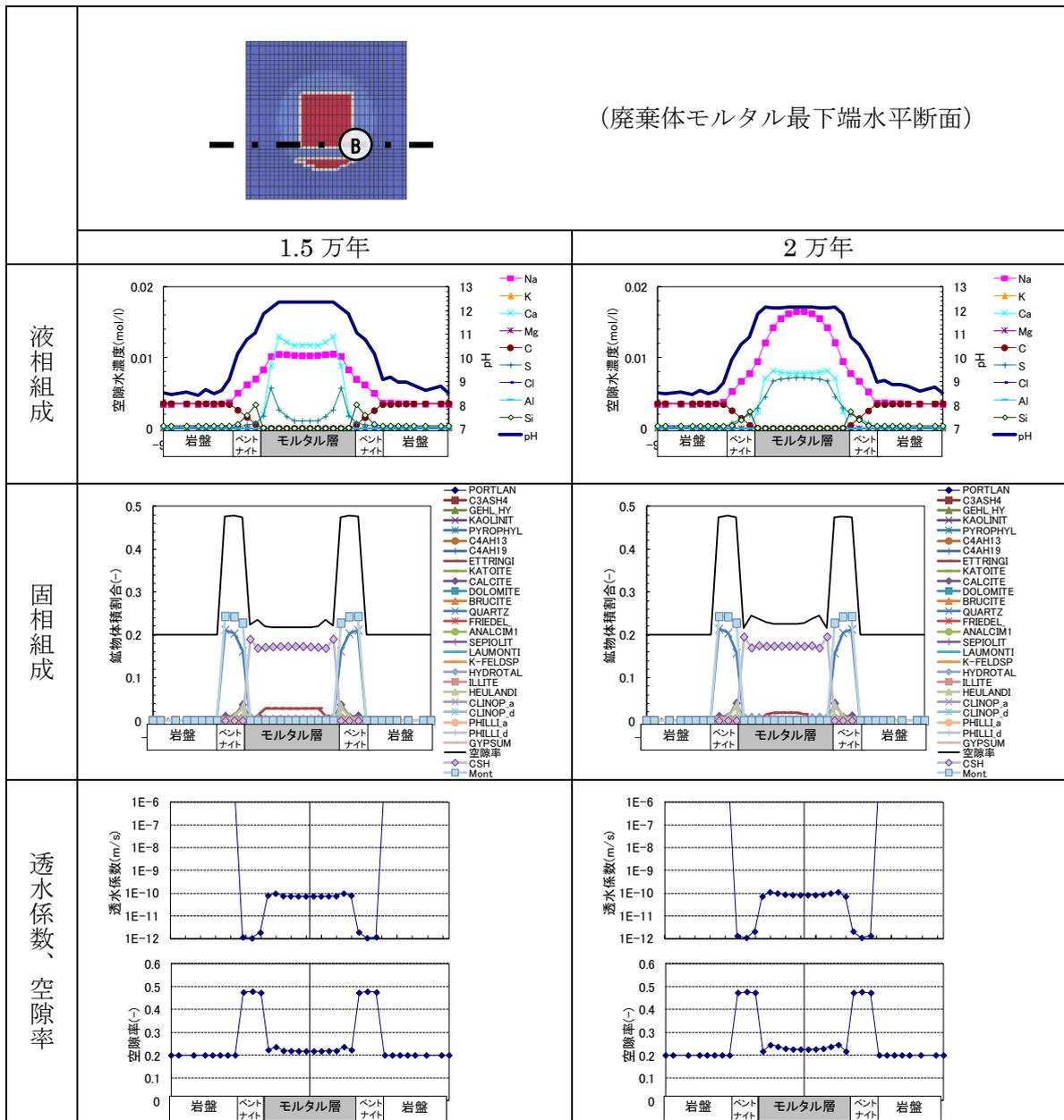


図 5.2-18 1.5 万年後、2 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c)

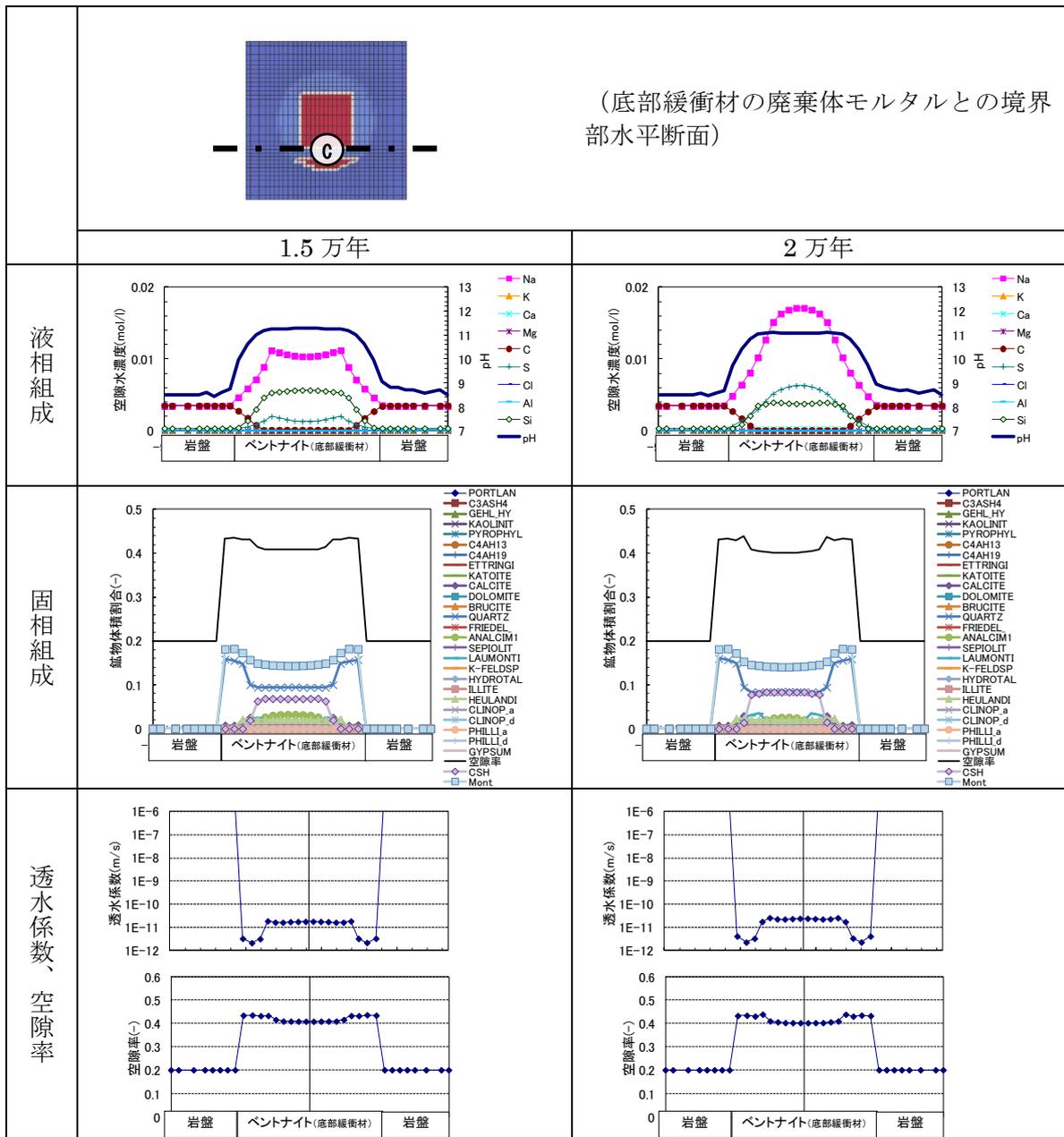


図 5.2.2-19 1.5 万年後、2 万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面：ケース c)

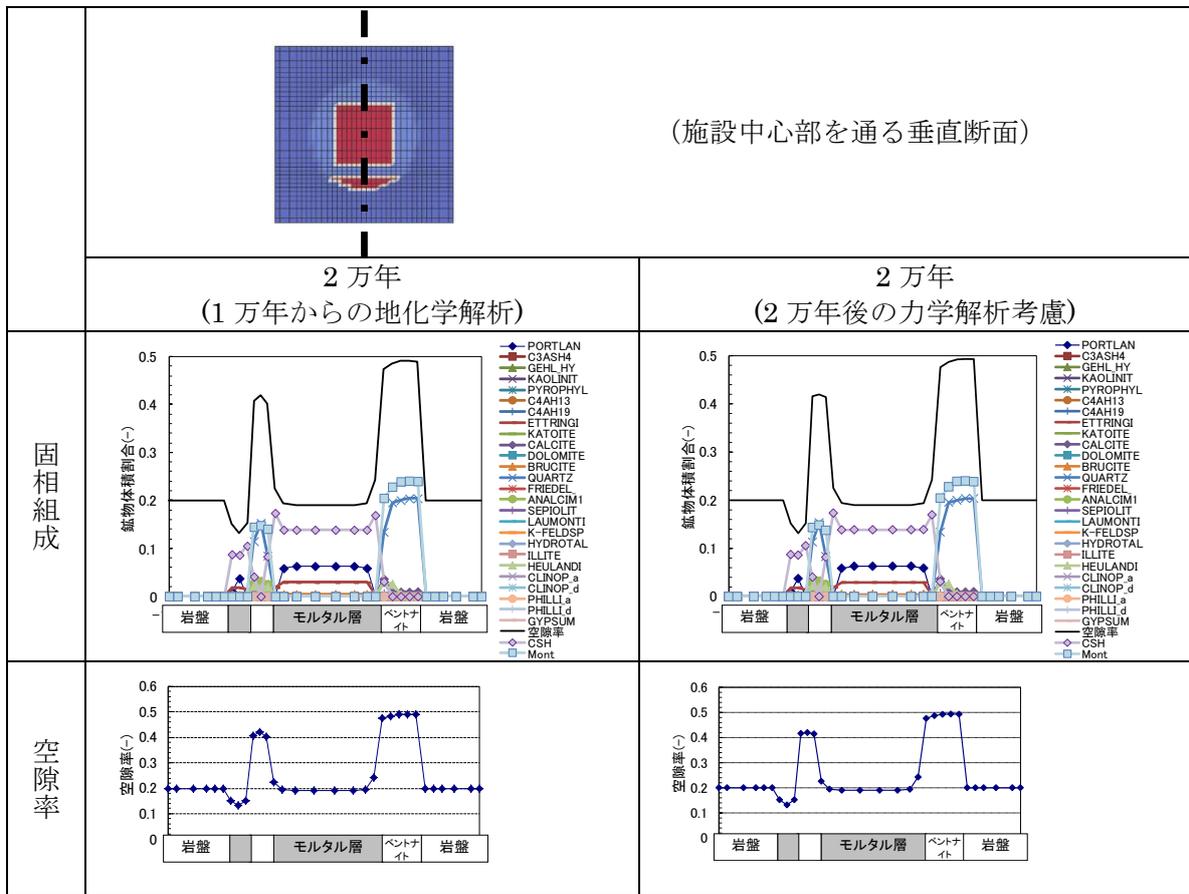


図 5.2.2-20 2 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る垂直断面：ケース c)

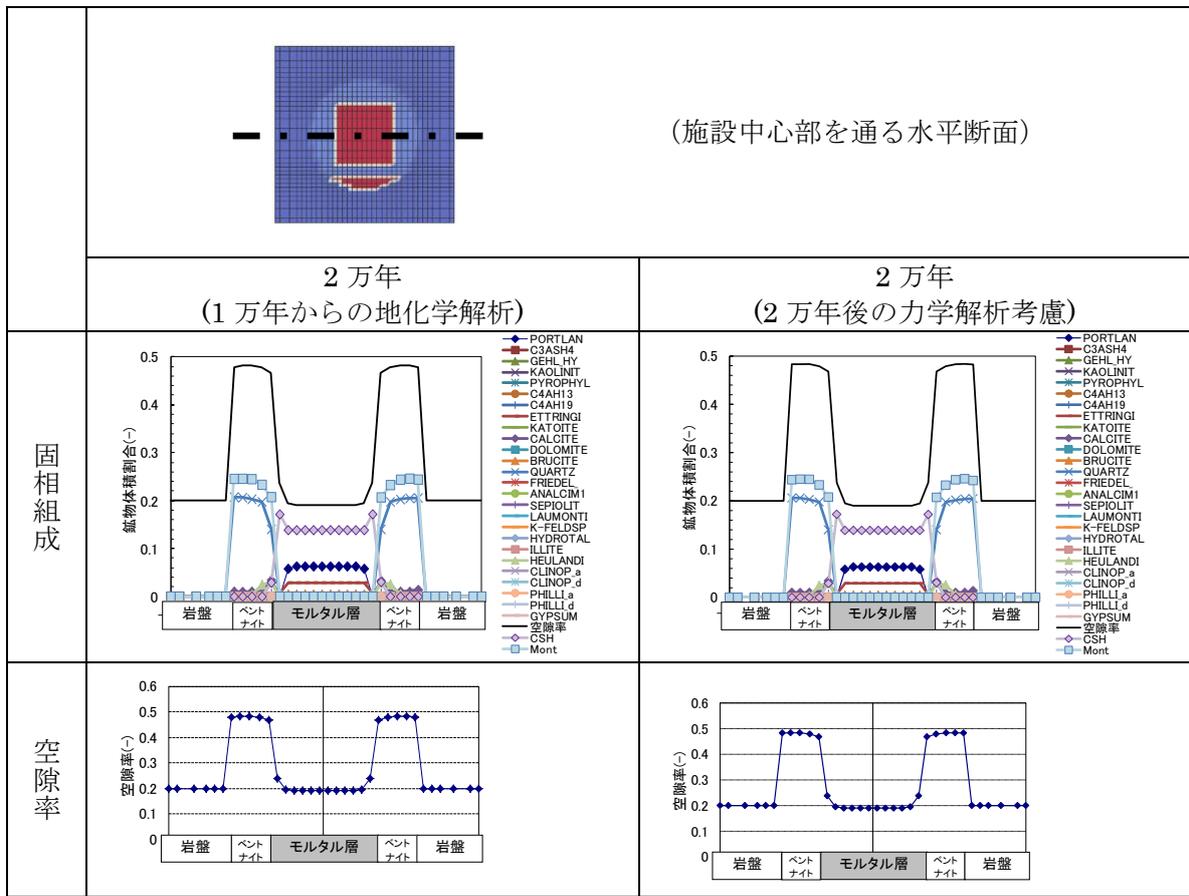


図 5.2.2-21 2 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る水平断面 : ケース c)

4) 2 万年から 5 万年まで(ケース c : 弱連成あり)

図 5.2.2-22~図 5.2.2-25 に、それぞれ一次元断面による液相及び固相分布を、3 万年後・5 万年後の結果について示す。

5 万年で力学解析とのデータ受け渡しを行った。5 万年後の力学解析結果を考慮した固相分布及び空隙率分布について、一次元断面として図 5.2.2-26 及び図 5.2.2-27 に示す。

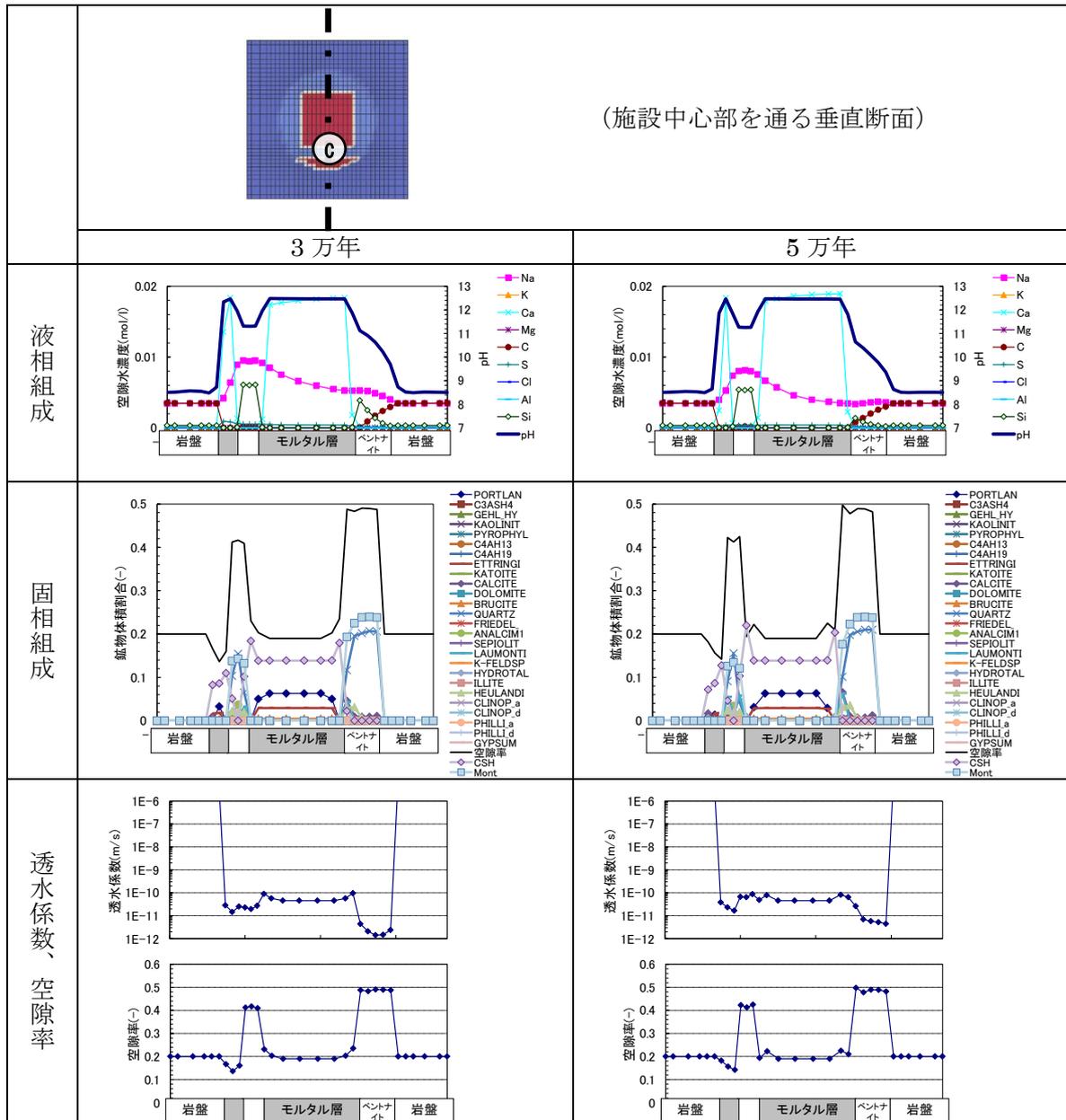


図 5.2.2-22 3 万年後、5 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面 : ケース c)

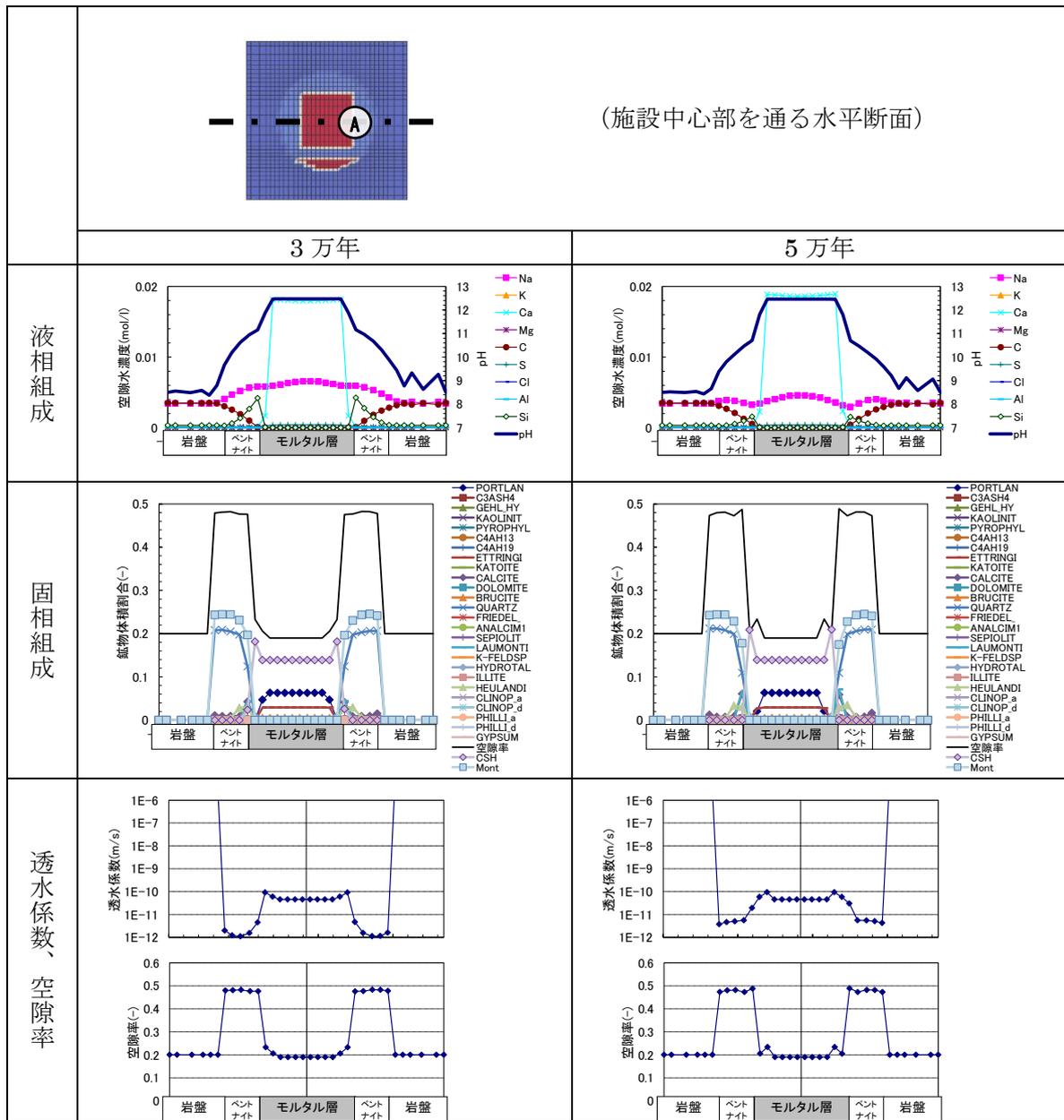


図 5.2.2-23 3 万年後、5 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面：ケース c)

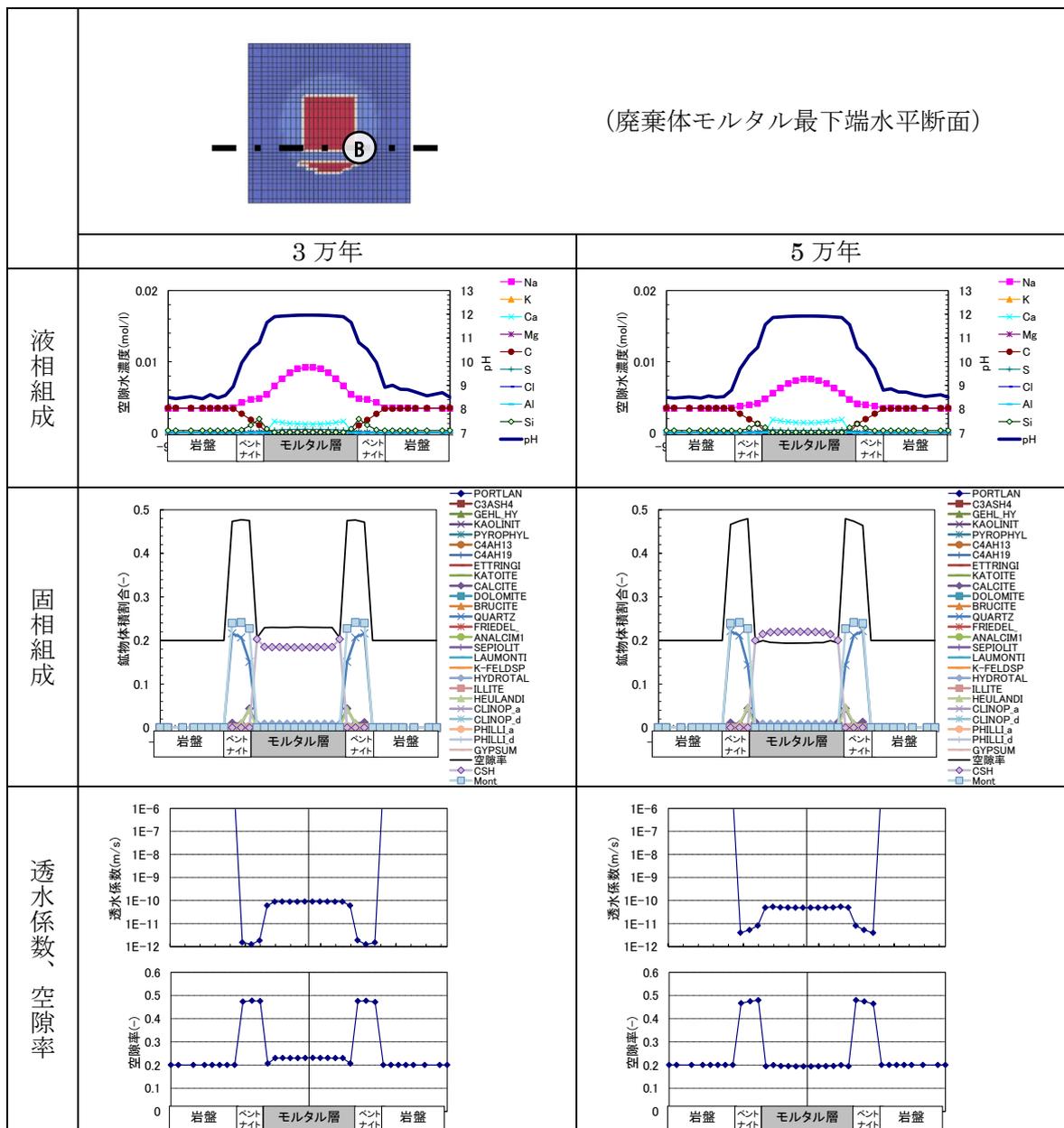


図 5.2.2-24 3 万年後、5 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c)

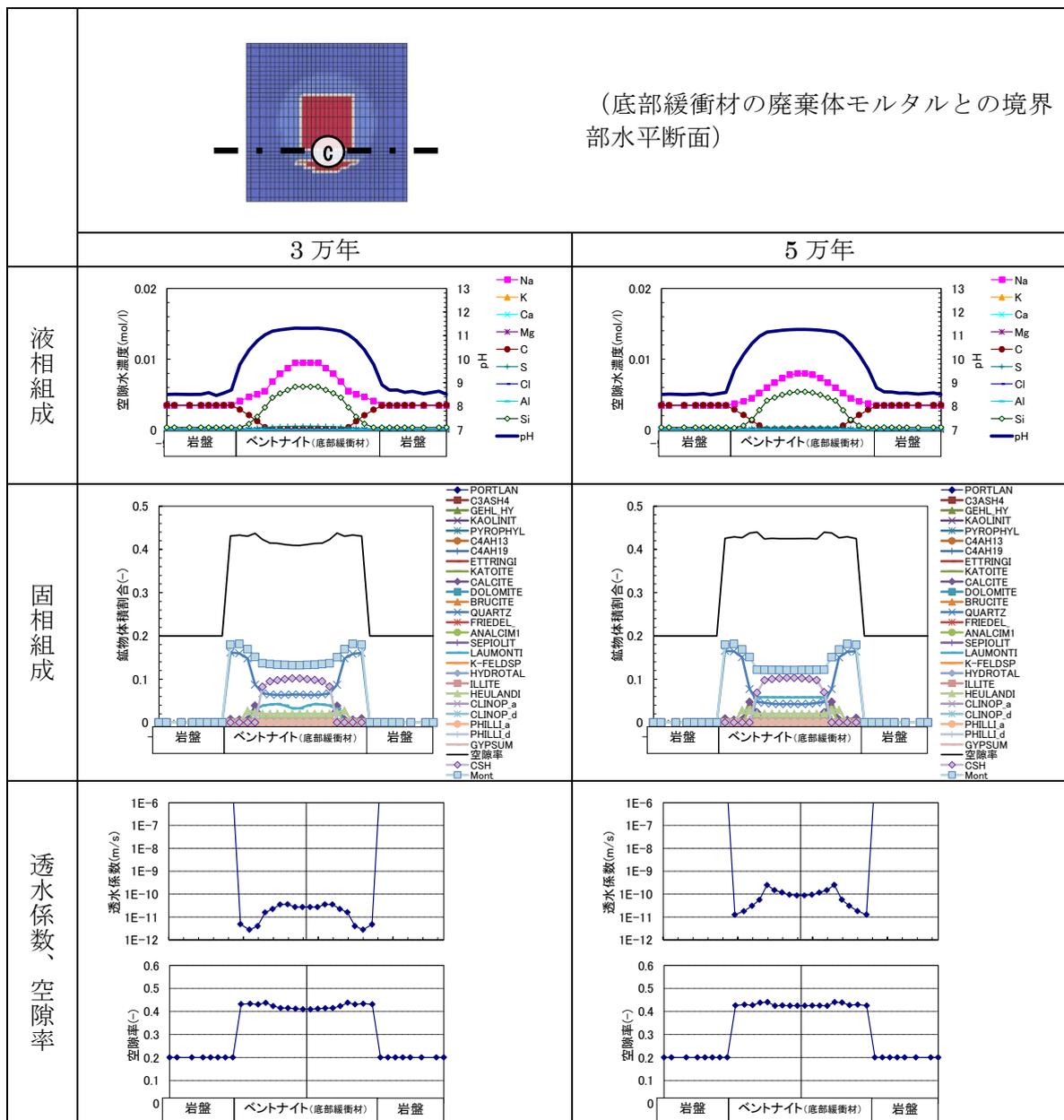


図 5.2.2-25 3 万年後、5 万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面：ケース c)

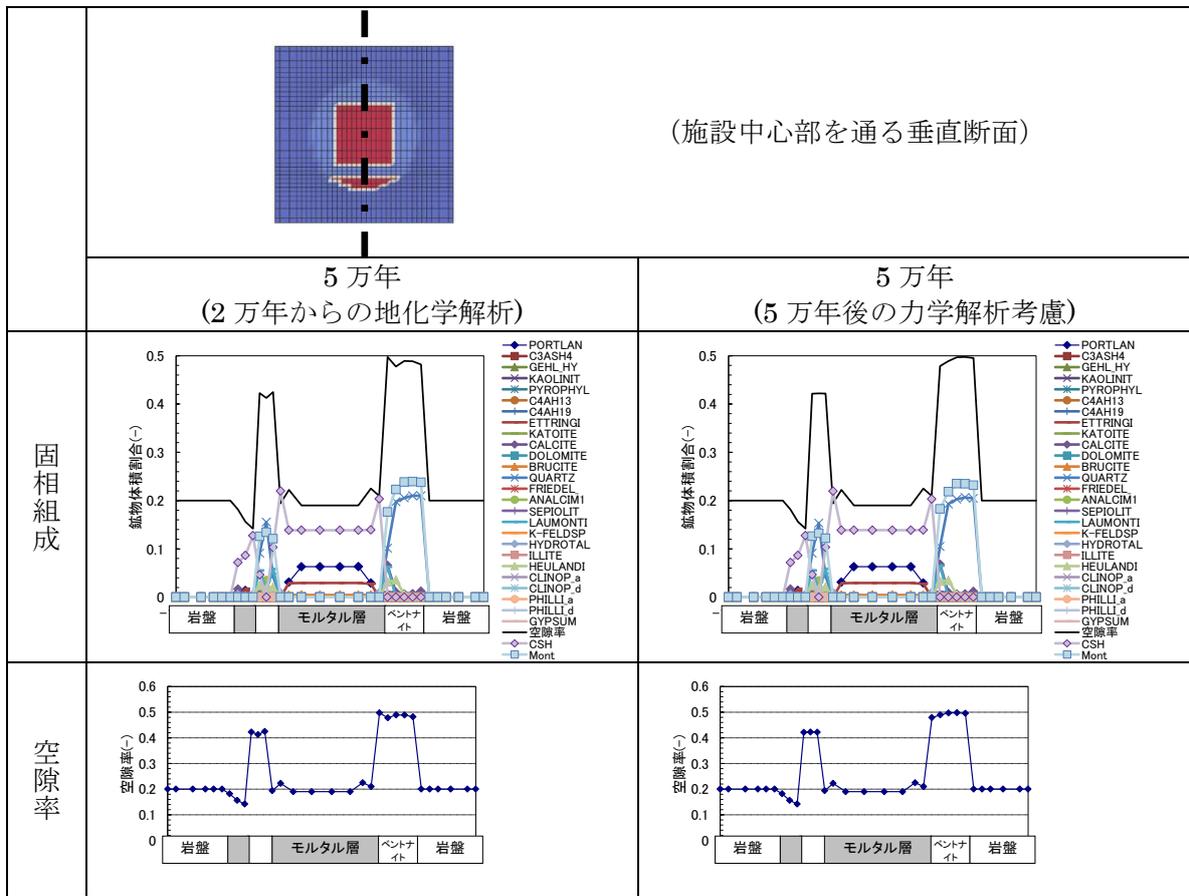


図 5.2.2-26 5 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る垂直断面 : ケース c)

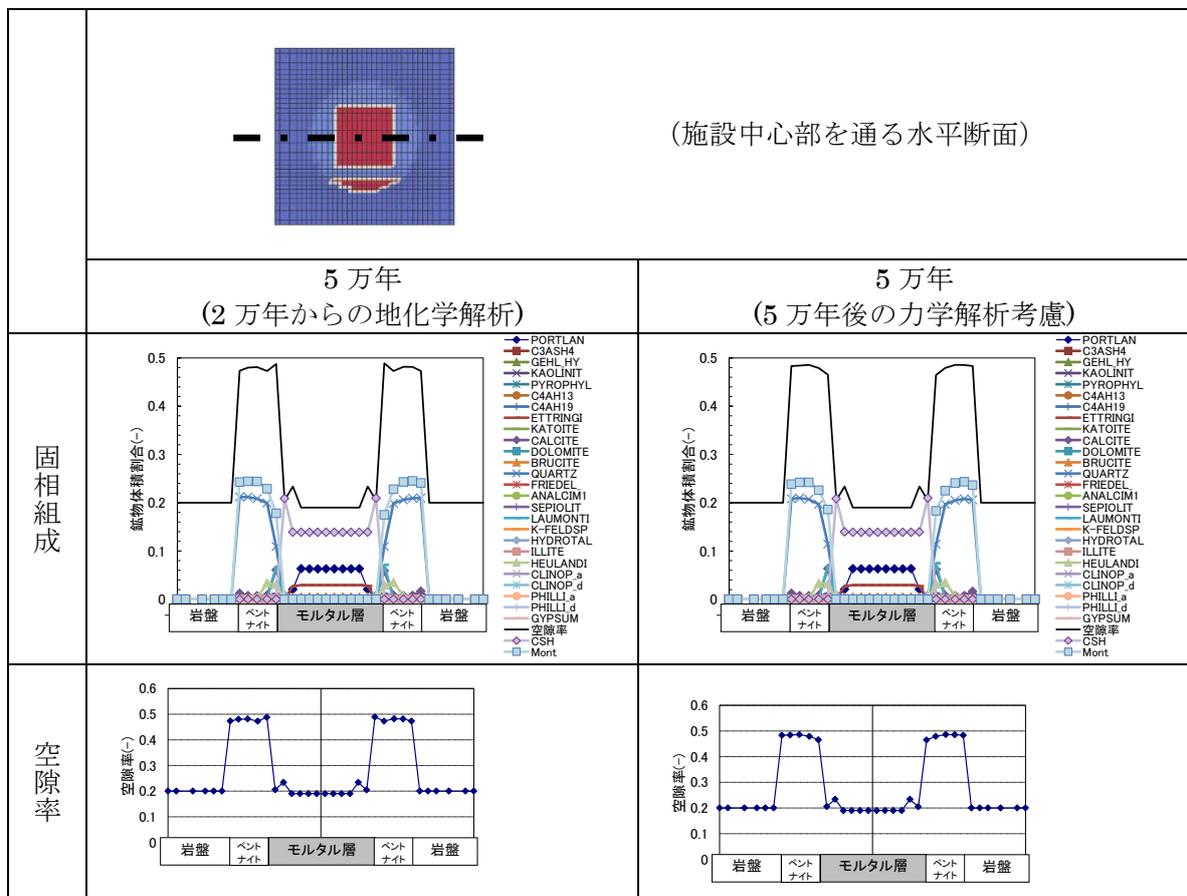


図 5.2.2-27 5 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る水平断面 : ケース c)

5) 5 万年から 10 万年まで(ケース c : 弱連成あり)

図 5.2.2-28~図 5.2.2-31 に、それぞれ一次元断面による液相及び固相分布を、7 万年後・10 万年後の結果について示す。

10 万年後の力学解析結果を考慮した固相分布及び空隙率分布について、一次元断面として図 5.2.2-32 及び図 5.2.2-33 に示す。

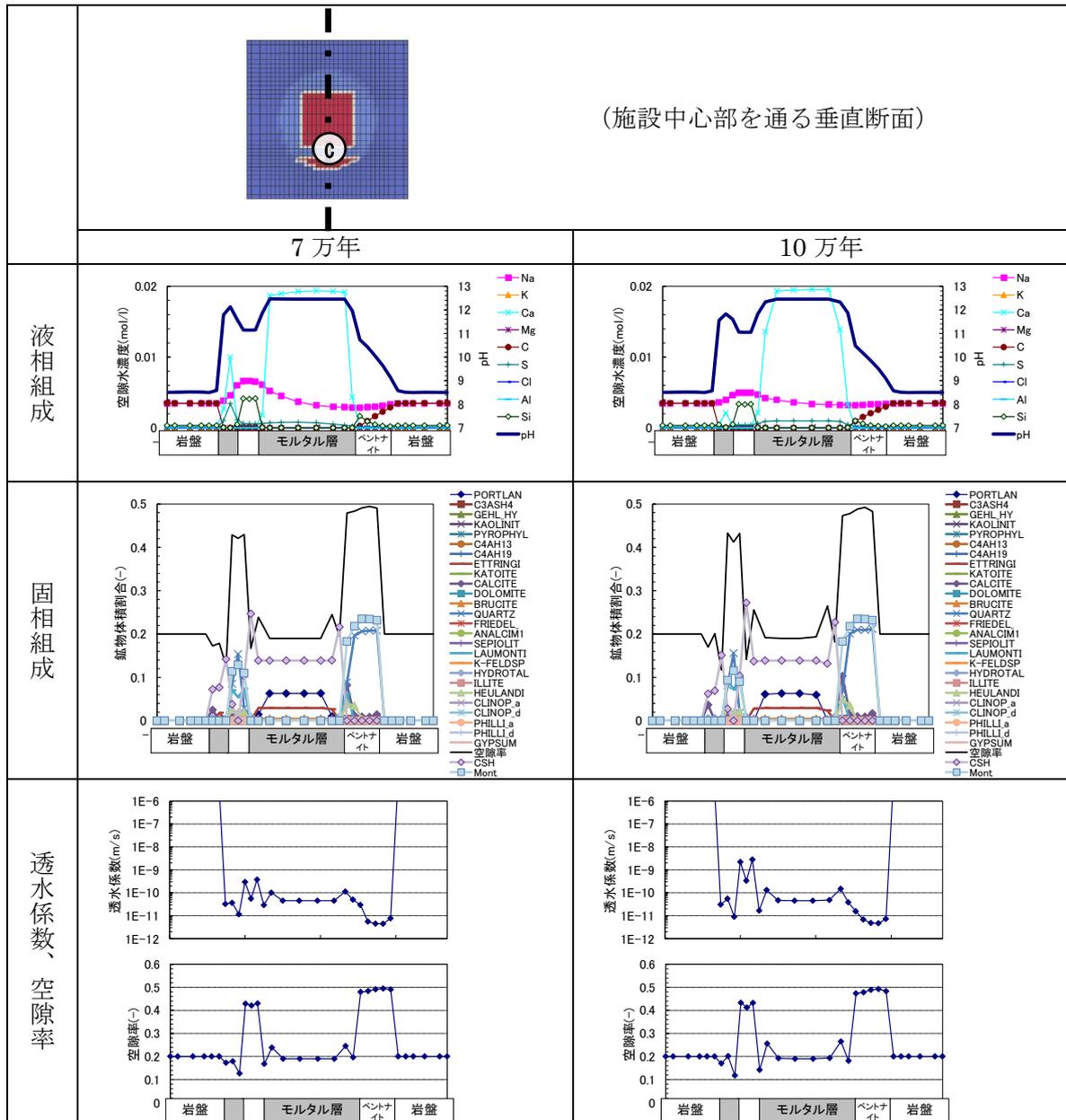


図 5.2.2-28 7 万年後、10 万年後の計算結果 (施設中心部を通る垂直断面 : ケース c)

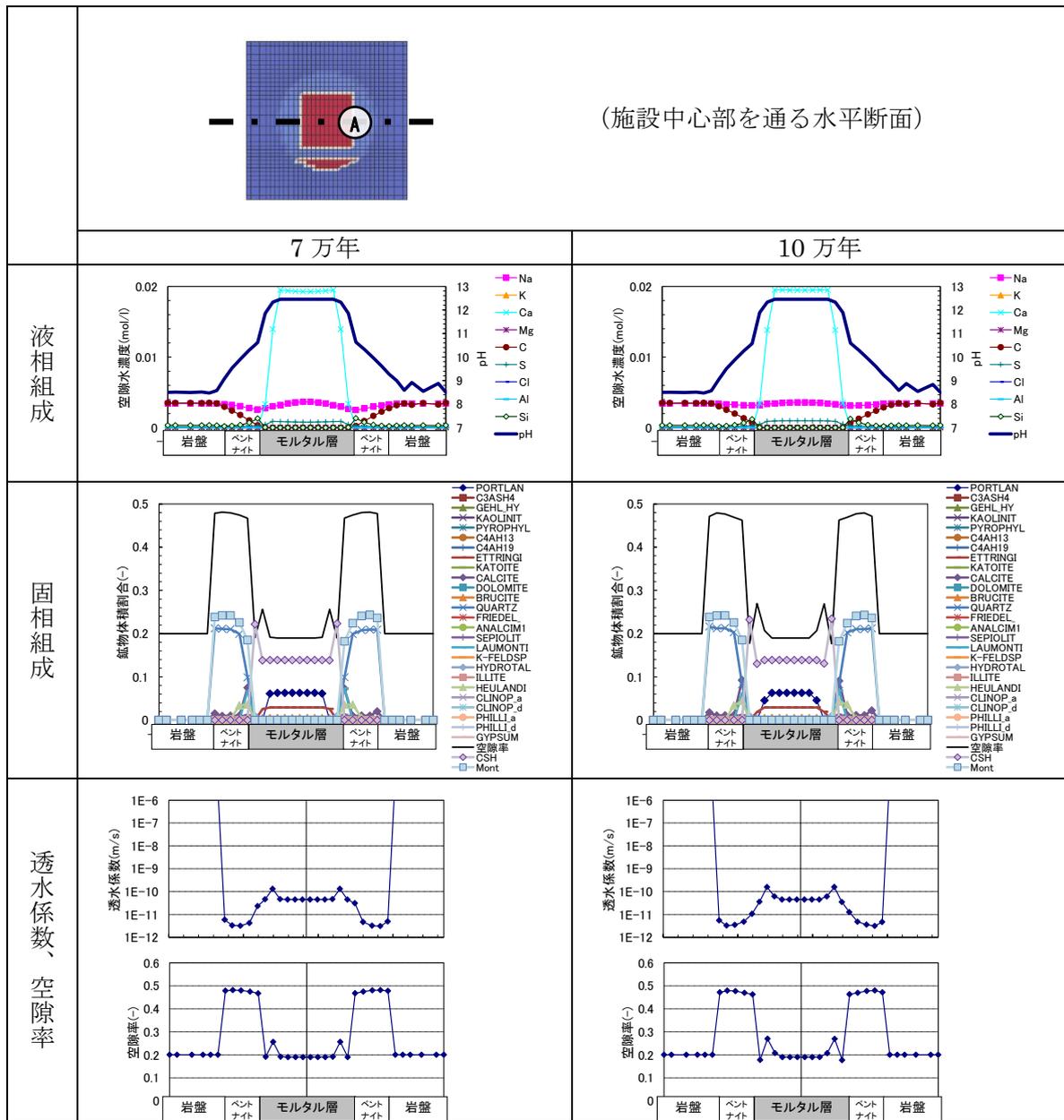


図 5.2.2-29 7 万年後、10 万年後の計算結果 (施設中心部を通る水平断面：ケース c)

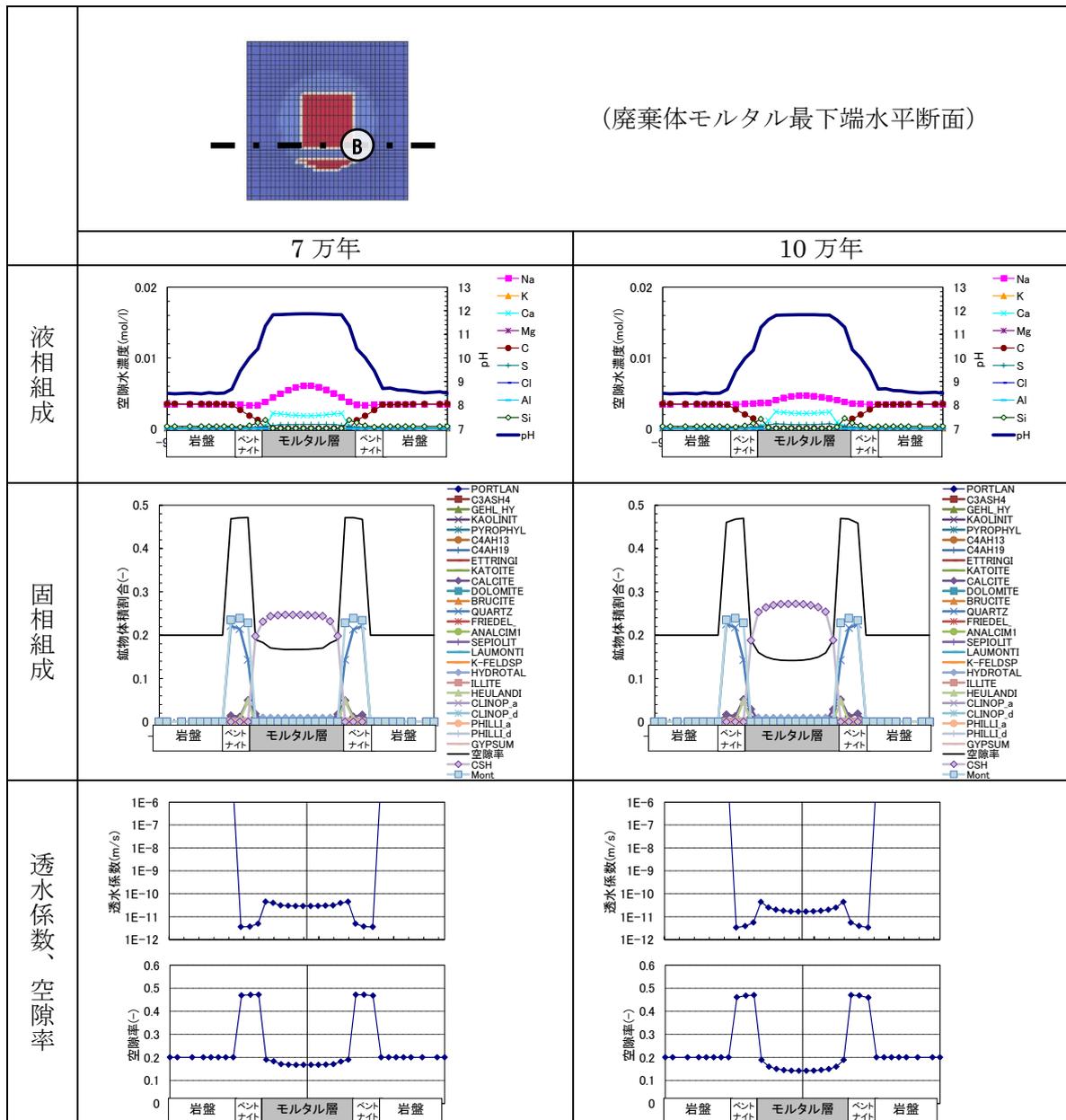


図 5.2.2-30 7 万年後、10 万年後の計算結果 (廃棄体モルタル最下端部水平断面：ケース c)

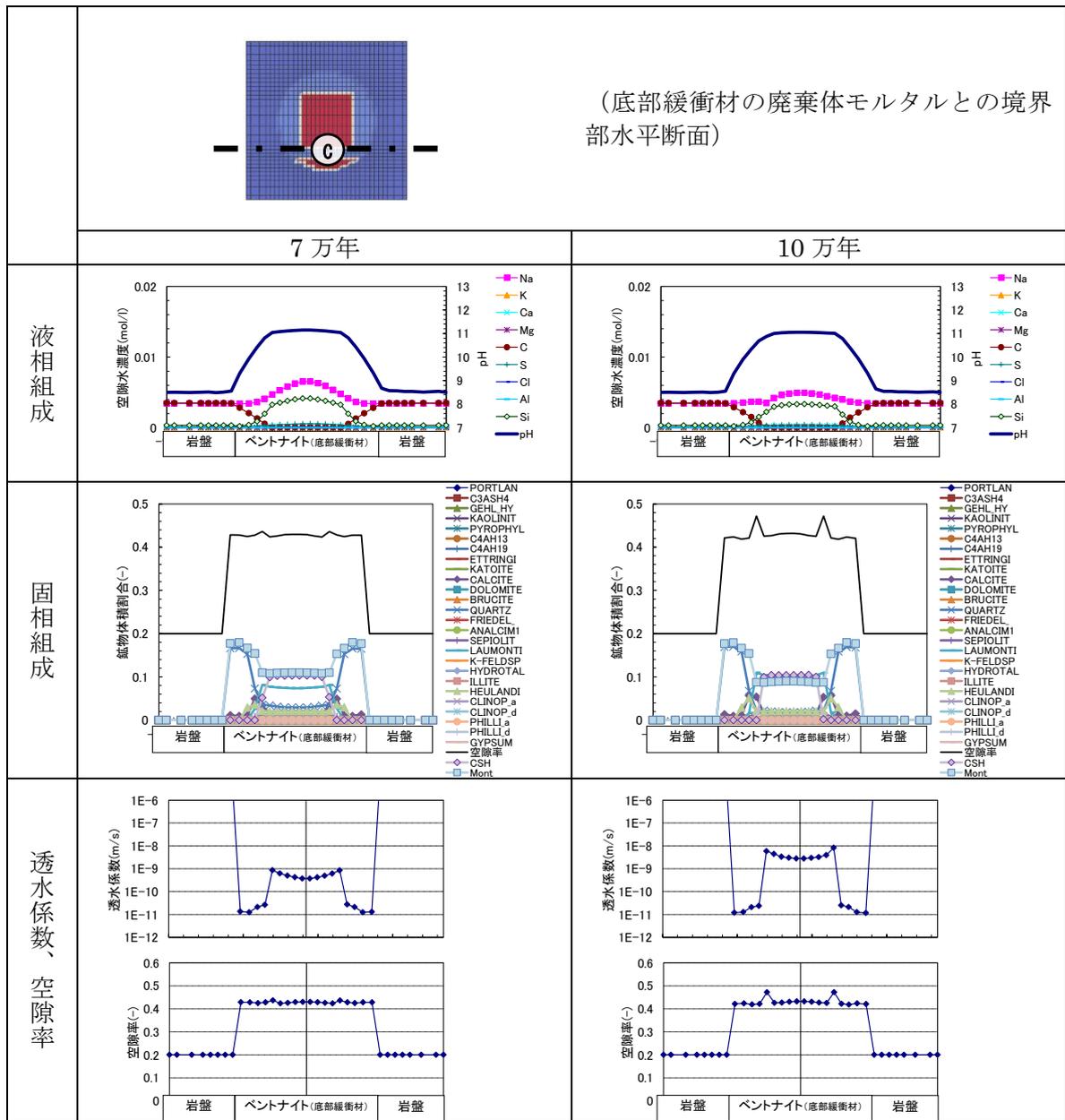


図 5.2.2-31 7 万年後、10 万年後の計算結果
(底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面：ケース c)

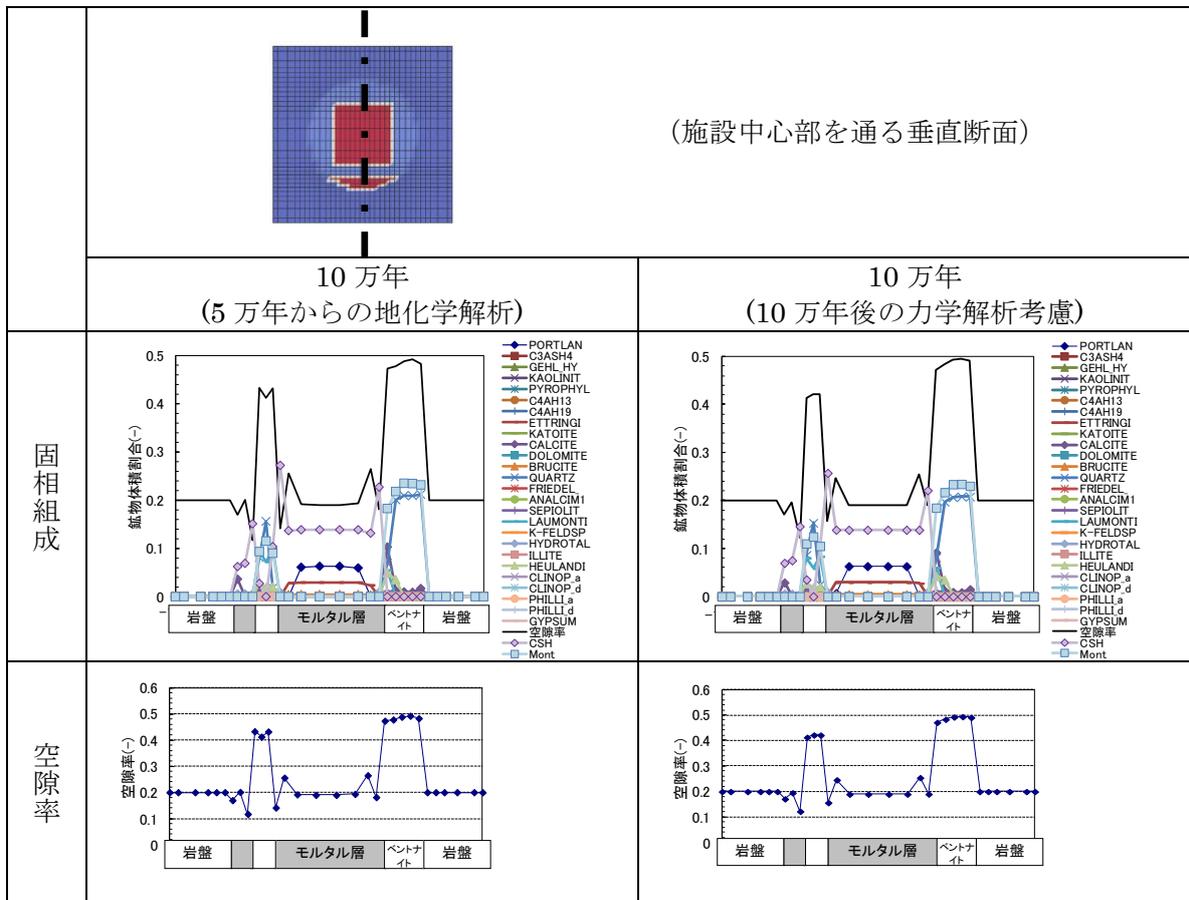


図 5.2.2-32 10 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る垂直断面: ケース c)

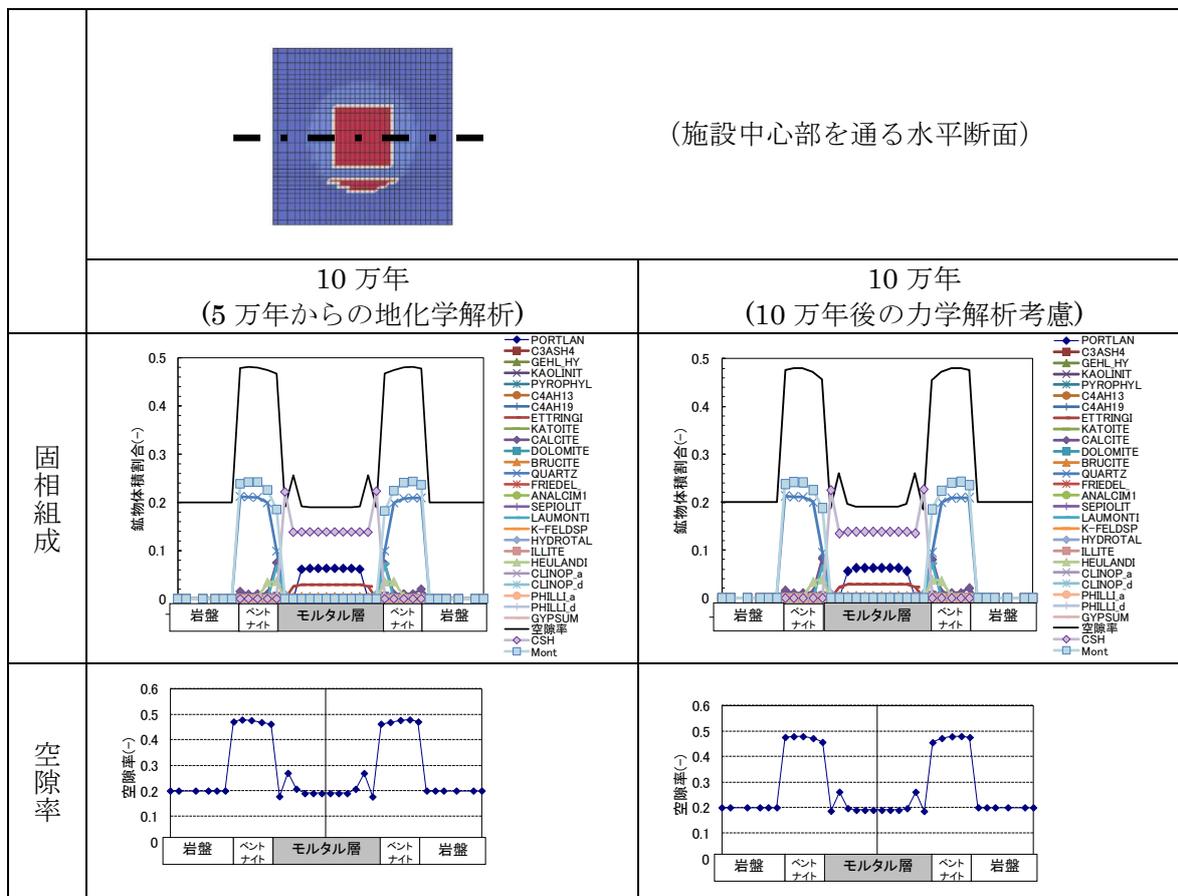


図 5.2.2-33 10 万年後の化学変質解析結果と、力学解析結果を考慮した固相組成及び空隙率分布 (施設中心部を通る水平断面 : ケース c)

6) 経時変化(ケース b : 弱連成なし及びケース c : 弱連成あり)

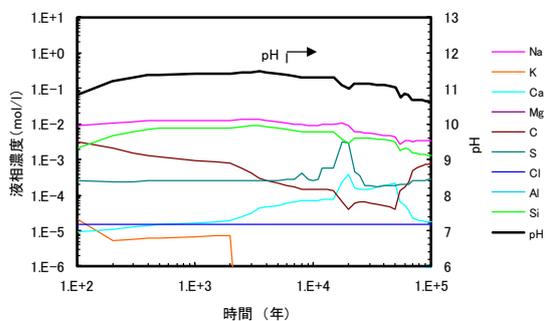
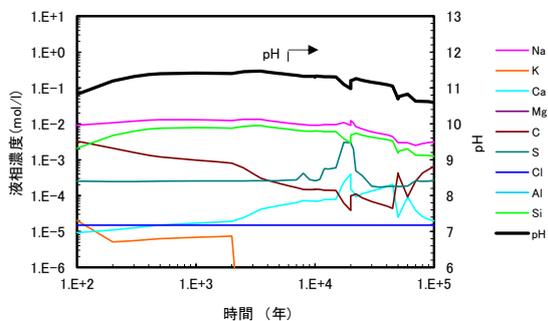
セメントに接するベントナイト部の経時変化について、図 5.2.2-34、図 5.2.2-35 及び図 5.2.2-36 に示した。図 5.2.2-34 は図 5.2.2-31 等に示した A 地点 (施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイトの廃棄体モルタル層との境界部)、図 5.2.2-35 は図 5.2.2-32 等に示した B 地点 (廃棄体モルタルの最下端部の水平断面における下流側ベントナイトの廃棄体モルタルとの境界部)、図 5.2.2-36 は図 5.2.2-33 に示した C 地点 (底部ベントナイト部の廃棄体モルタルとの境界部の水平断面における底部ベントナイト中心部) の結果である。それぞれ、液相組成の経時変化、固相組成 (体積割合) の経時変化、物性値 (透水係数・拡散係数・空隙率・モンモリロナイトの Ca 型化割合) の経時変化を示す。これらの結果は、時間に従って pH が低下し、モンモリロナイト・石英が溶解し、二次鉱物として C-S-H やヒューランダイトが沈澱した。

経時変化結果図には、初期 (0 年) に再冠水時の不均質条件として、その後は力学解析との連成解析を行わずに 10 万年までの計算を行った結果を並べて示した。この経時変化結果と、5.1.1(3)の 5)の計算ケース 4(ケース a)と比較すると、再冠水時の不均質状態を設定した影響が大きく、逐次力学解析とのデータ受け渡しの影響はそれほど大きくないことが分かる。

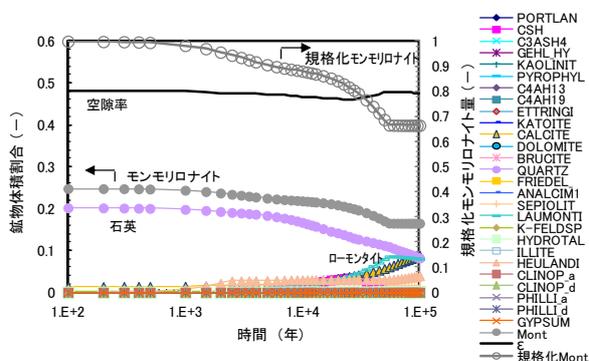
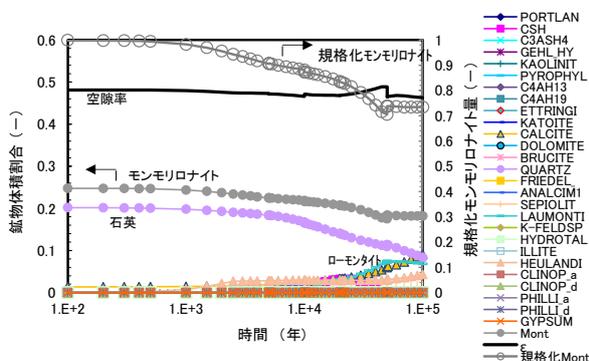
なお、Ca 型化率の増加に伴い透水係数の増加し二次元断面の部位によっては、透水係数が 3 桁程度増加するケースも認められた(図 5.2.2-34 及び図 5.2.2-36 の赤線囲み部分)この点については、透水係数の算定手法などの解析手法も含め検証を行う必要がある。

ケース c (弱連成あり)

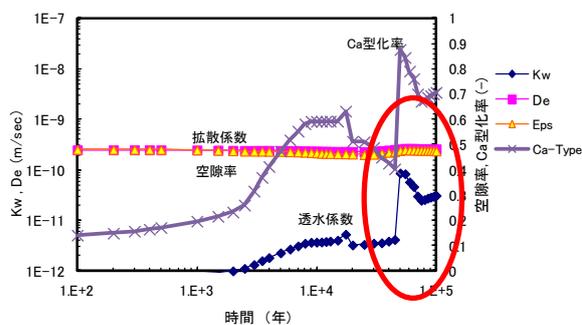
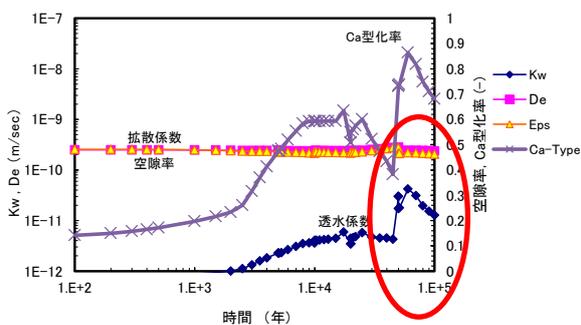
ケース b (弱連成なし)



液相組成



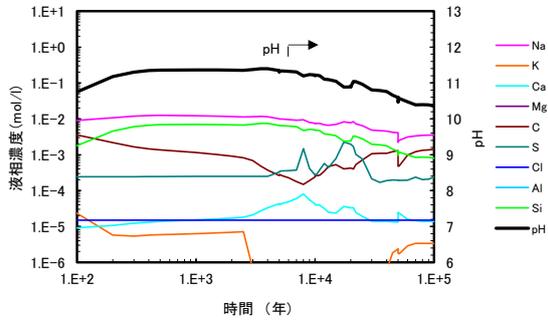
固相組成(体積割合)



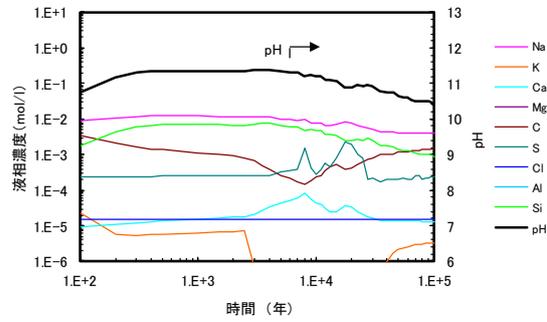
物性値

図 5.2.2-34 施設中心部を通る水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (A 地点 (3.25,-9.8)) の経時変化結果 (ケース b 及びケース c)

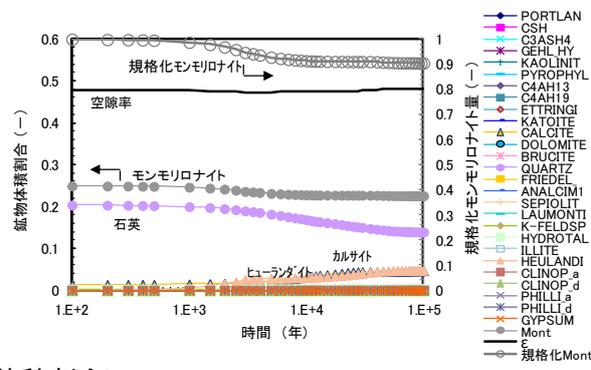
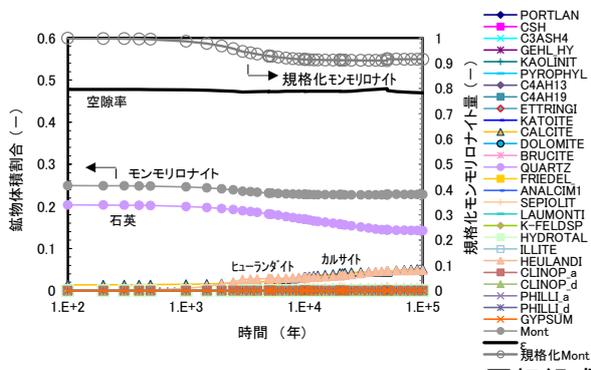
ケース c (弱連成あり)



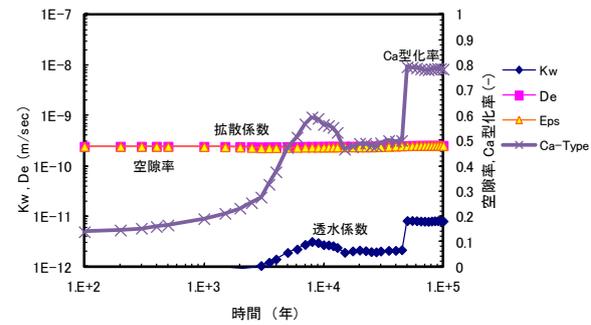
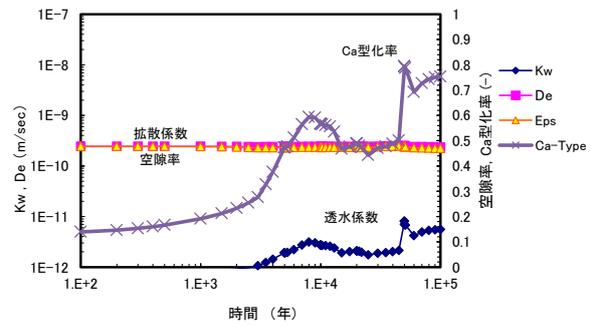
ケース b (弱連成なし)



液相組成



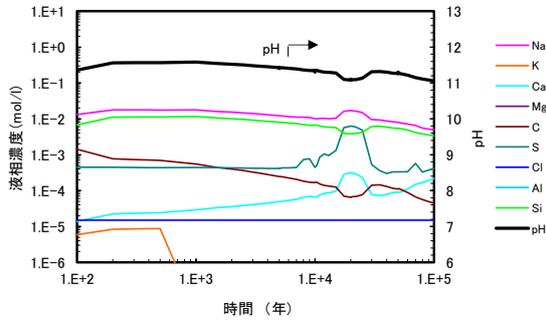
固相組成(体積割合)



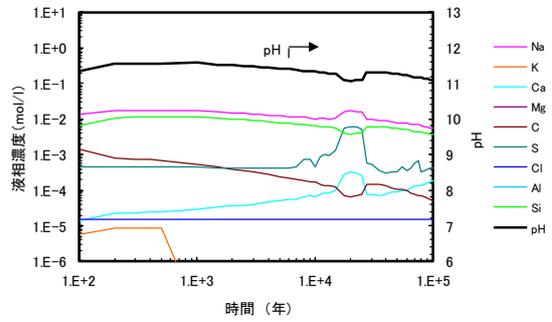
物性値

図 5.2.2-35 廃棄体モルタル最下端水平断面における下流側ベントナイト廃棄体部との境界部 (B 地点 (3.25,-12.15)) の経時変化結果 (ケース b 及びケース c)

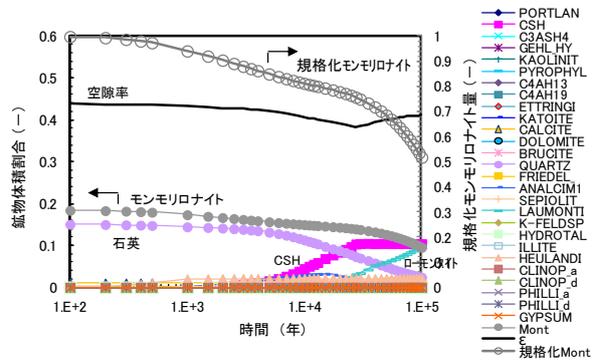
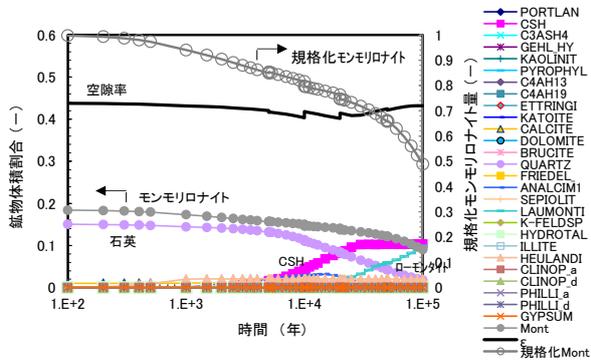
ケース c (弱連成あり)



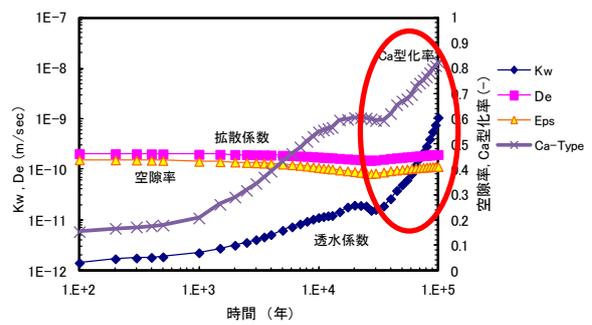
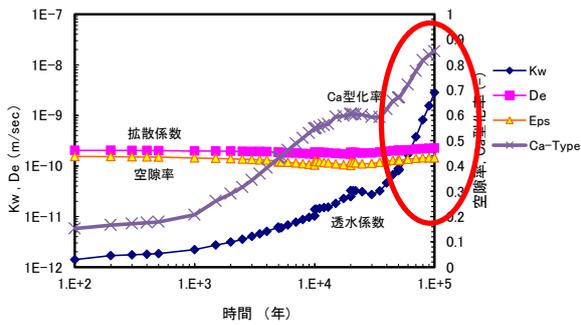
ケース b (弱連成なし)



液相組成



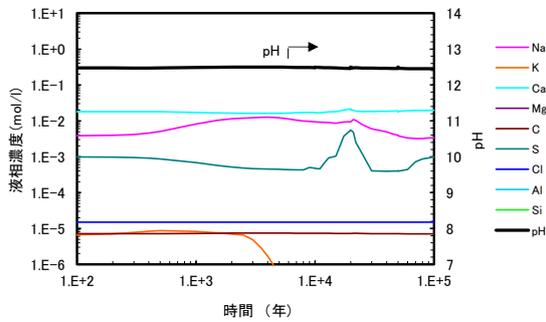
固相組成(体積割合)



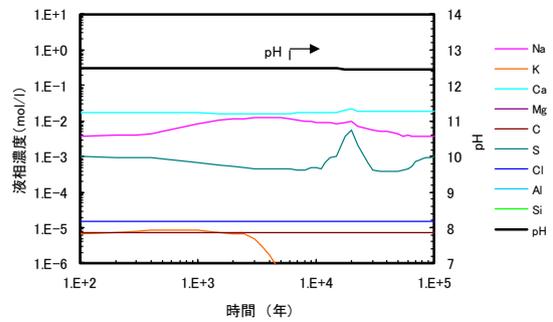
物性値

図 5.2.2-36 底部緩衝材の廃棄体モルタルとの境界部水平断面における底部緩衝材中心部 (C 地点 (0.25,-12.6)) の経時変化結果 (ケース b 及びケース c)

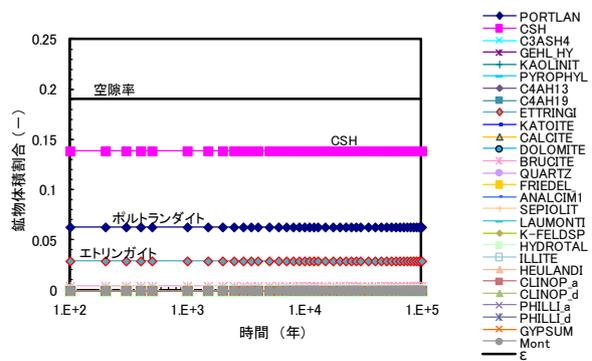
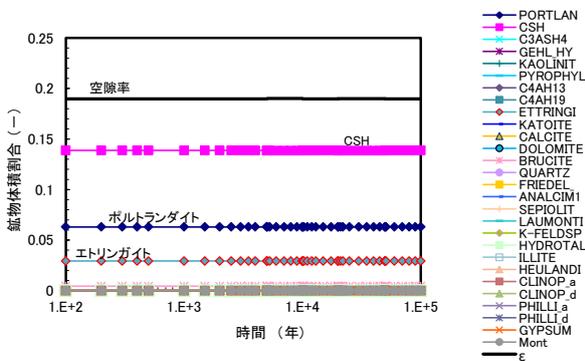
ケース c (弱連成あり)



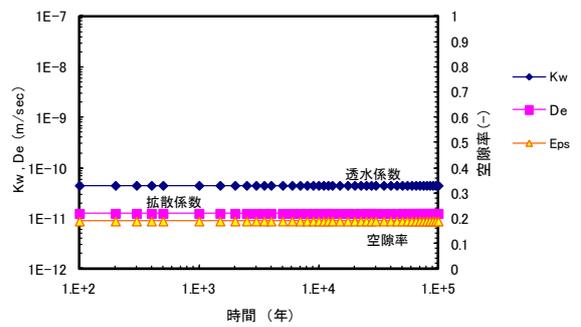
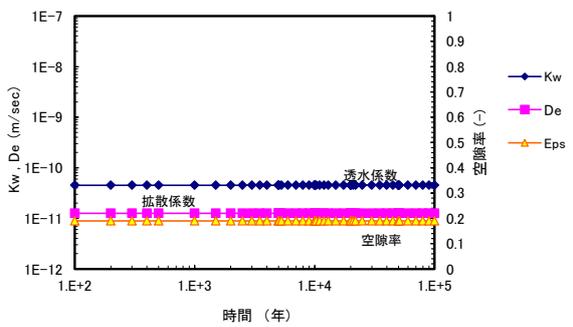
ケース b (弱連成なし)



液相組成



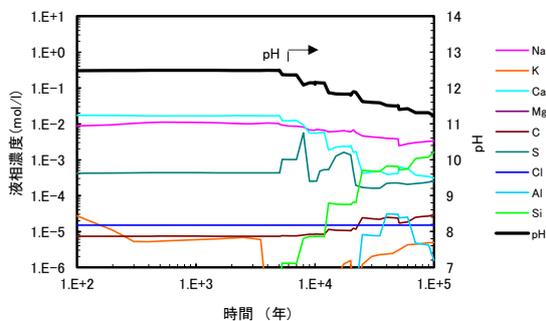
固相組成(体積割合)



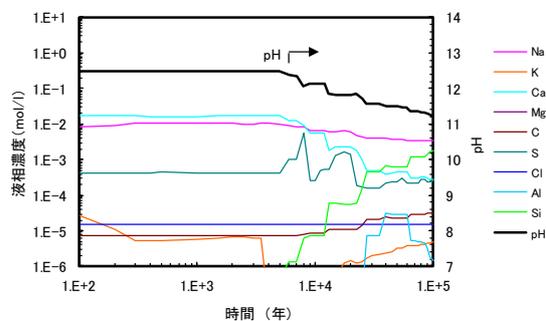
物性値

図 5.2.2-37 廃棄体モルタル中心部 (地点 (0.25,-8.6)) の経時変化結果 (ケース b 及びケース c)

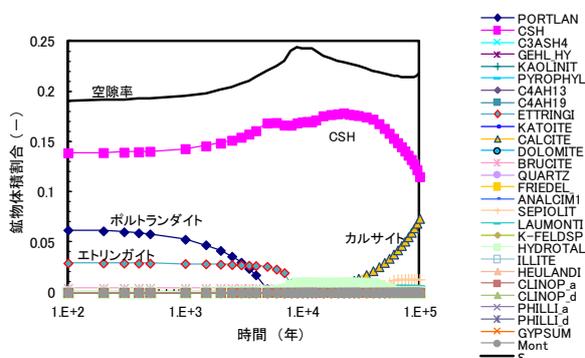
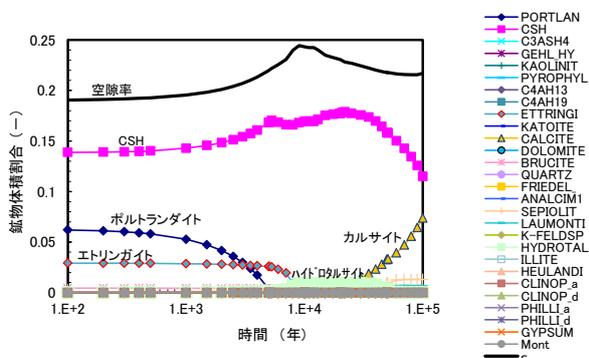
ケース c (弱連成あり)



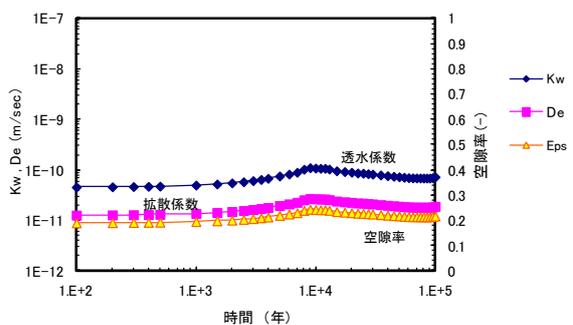
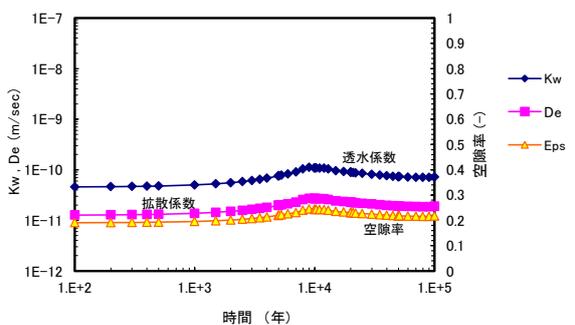
ケース b (弱連成なし)



液相組成



固相組成(体積割合)



物性値

図 5.2.2-38 廃棄体モルタル部の最上端かつ側面(地点(2.75,-6.25))の経時変化結果(ケース b 及びケース c)

(3) 力学解析結果

(2)の化学解析結果に対応した、ケース a(緩衝材均一、化学解析逐次反映：弱連成なし)、ケース b(緩衝材密度施工条件反映、化学解析逐次反映：弱連成なし)及びケース c(緩衝材密度施工条件反映、化学解析逐次反映：弱連成あり)の力学解析結果を以下に示す。

ケース a、b 及び c の力学解析結果の体積ひずみの変化を図 5.2.2-39、図 5.2.2-40 及び図 5.2.2-41 に示す。ケース a の水平変位の変化を図 5.2.2-42、に、鉛直変位の変化を図 5.2.2-43 に、ケース b の水平変位の変化を図 5.2.2-44 に、鉛直変位の変化を図 5.2.2-45 に、ケース c の水平変位の変化を図 5.2.2-46、に、鉛直変位の変化を図 5.2.2-47 にそれぞれ示す。

力学解析の初期条件の違い(緩衝材の施工を考慮しない密度分布の均一と施工条件を考慮した不均一)について、ケース a 及びケース b の体積ひずみを比較すると、初期条件に施工による密度分布の不均一を初期条件に有しても長期の力学挙動への影響は著しく生じるものではないと予想できる。また、ケース a とケース b の化学解析結果は、モンモリロナイトの溶解、その伴う二次鉱物の生成挙動が異なり、その原因について今後検証する必要があるが、これらの力学解析の結果を踏まえると、化学的な変質挙動の力学挙動へ影響は少ないものと予想できる。なお、本解析結果は、施工段階において冠水状態を仮定した計算のため、施工後に冠水を経たケースでの評価により施工段階及び冠水等の初期条件の影響の検討、加えて、現状は考慮されていない、変質により生成する二次鉱物の剛性の考慮の検討を進める必要がある。

力学解析における弱連成(データの化学力学相互受け渡し)の長期挙動への影響について、ケース b 及びケース c の体積ひずみで比較すると、両者に大きな差はなく、化学変質による緩衝材の変化が力学挙動へ及ぼす影響が少なかったためと考えられる。本解析の結果からは化学解析への力学挙動の影響(弱連成による相互のデータ受け渡し)は少ないが、力学挙動の化学変質挙動への影響に関しては、他の解析条件での検討を行い、その差について確認していく必要がある。一方、力学挙動の解析は、5.2.2 の(1)のモデル計算からもわかるように、化学解析から逐次反映が長期挙動の評価に重要であると考えられる。

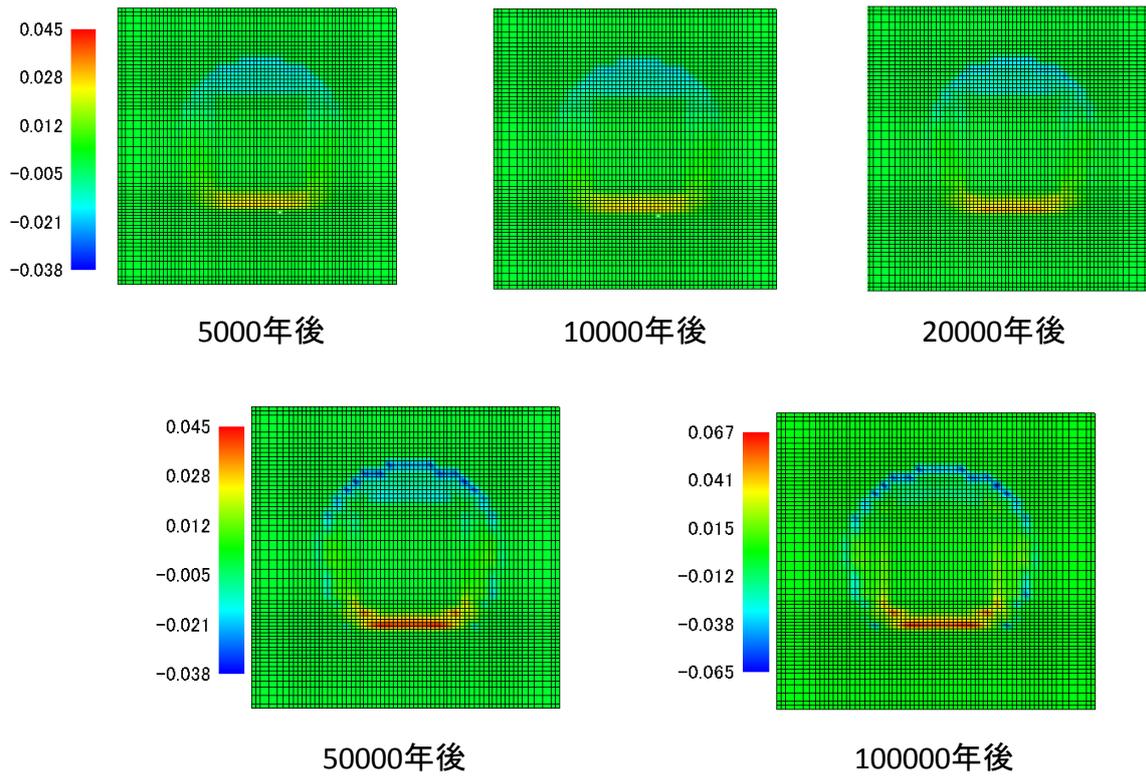


図 5.2.2-39 ケース a の力学解析結果(体積ひずみ)

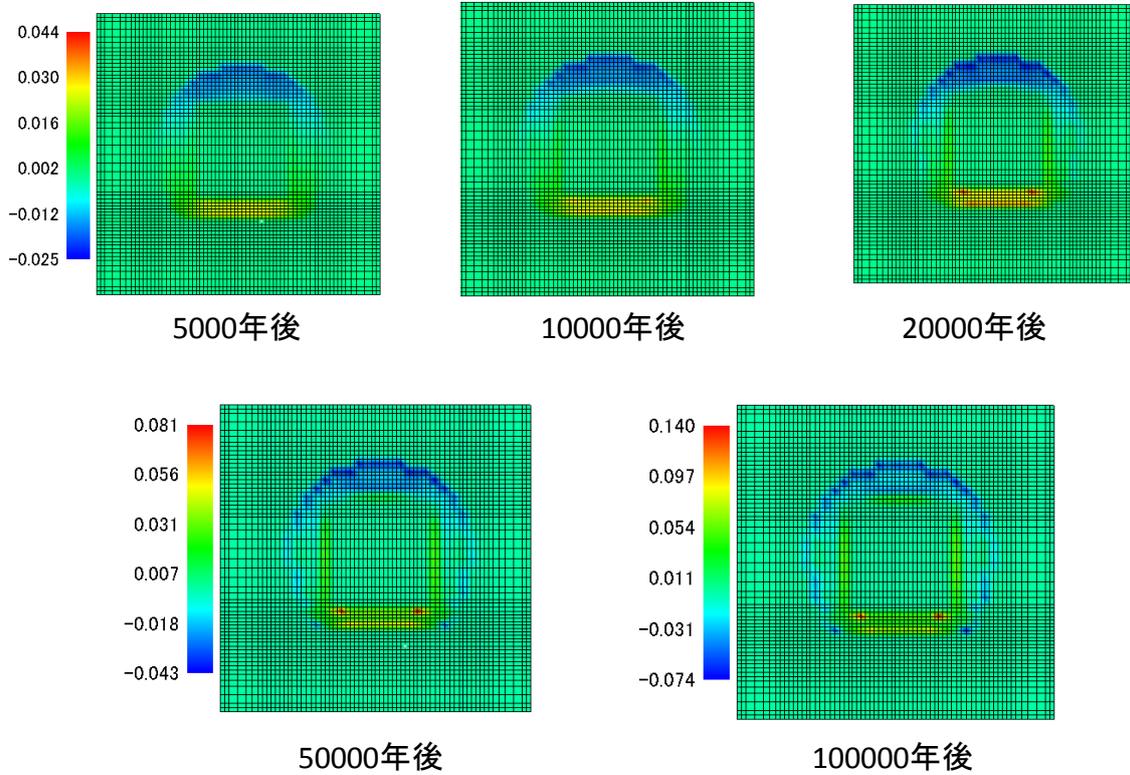


図 5.2.2-40 ケース b の力学解析結果(体積ひずみ)

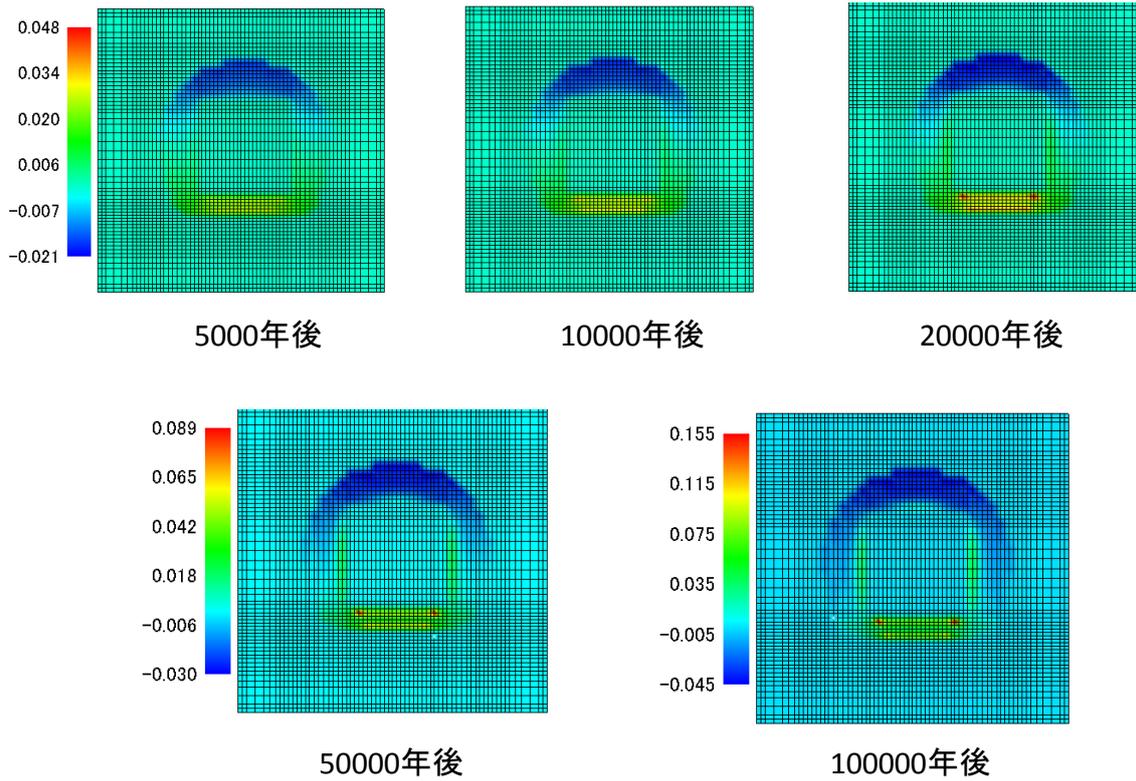


図 5.2.2-41 ケース c の力学解析結果(体積ひずみ)

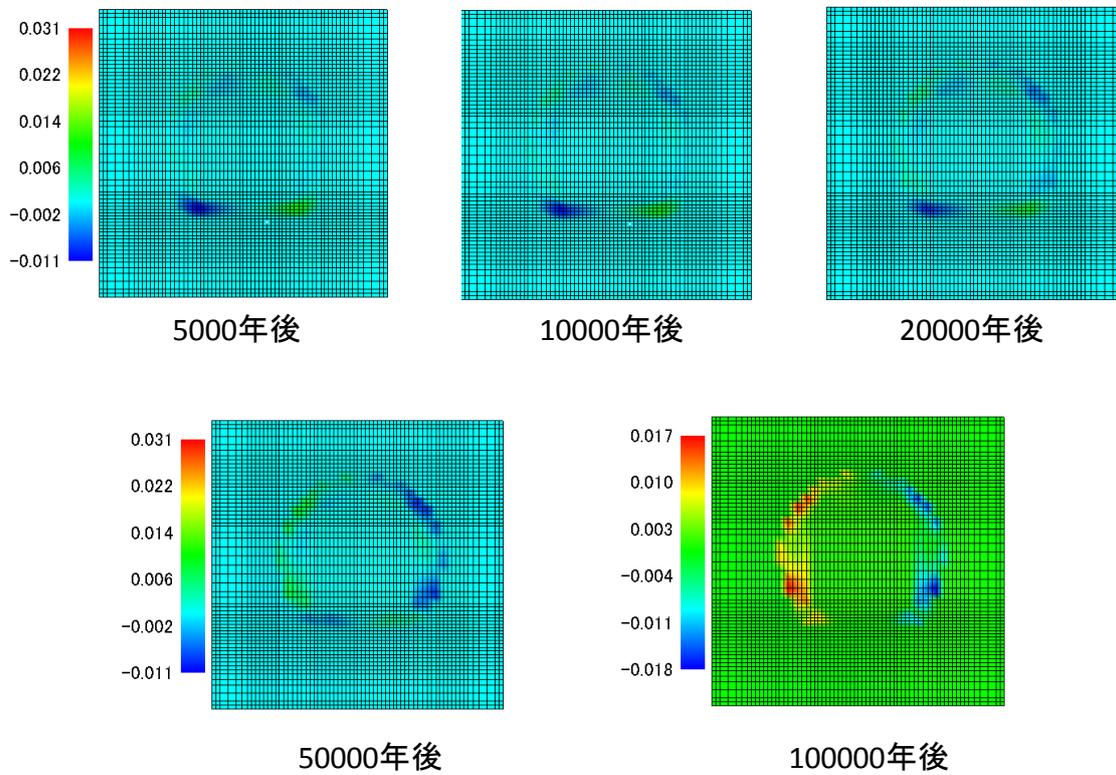


図 5.2.2-42 ケース a の力学解析結果(水平変位)

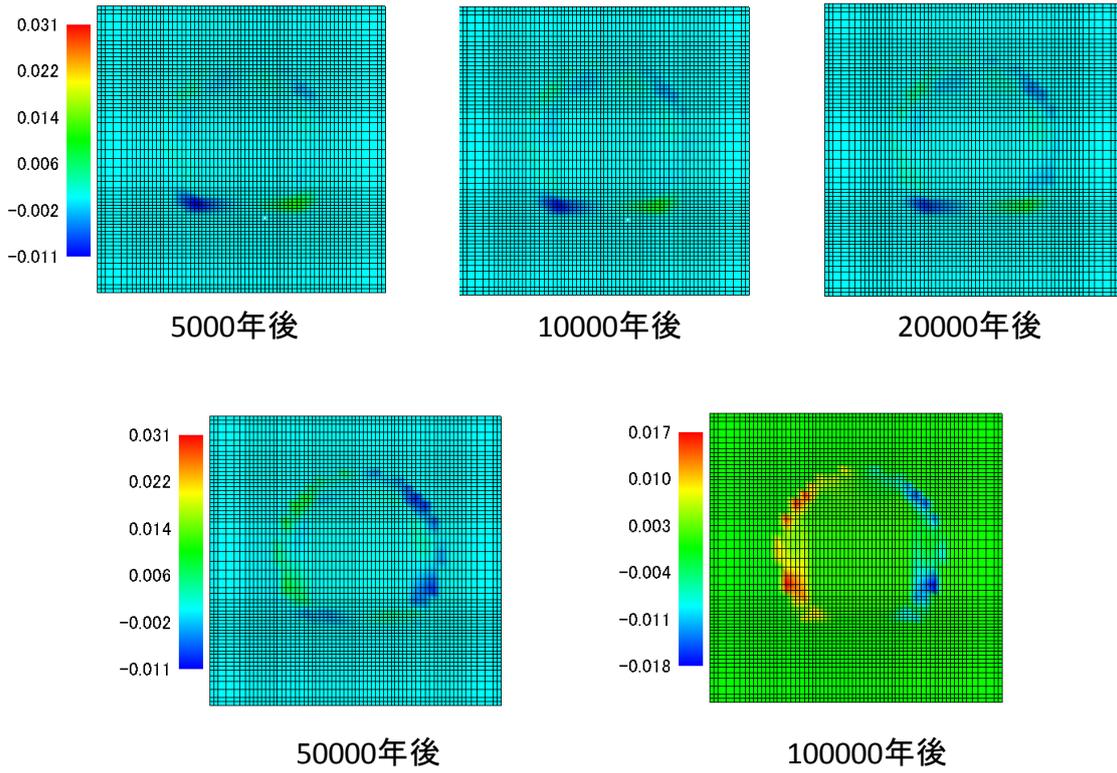


図 5.2.2-43 ケース a の力学解析結果(鉛直変位)

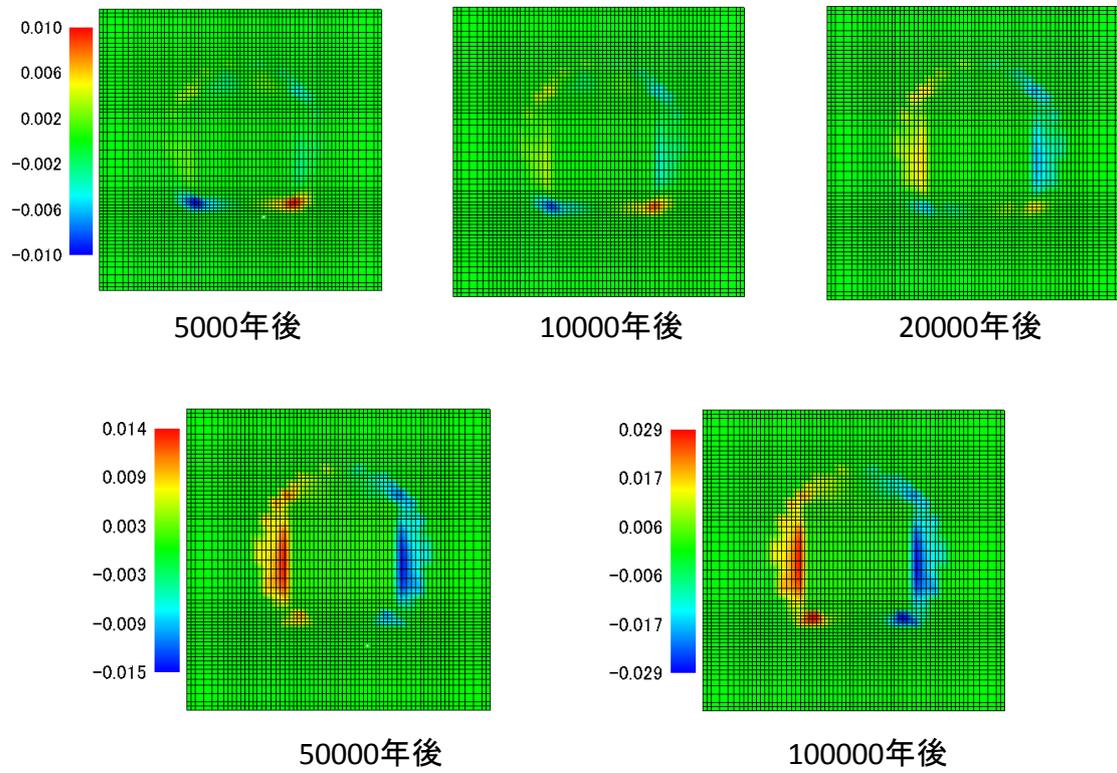


図 5.2.2-44 ケース b の力学解析結果(水平変位)

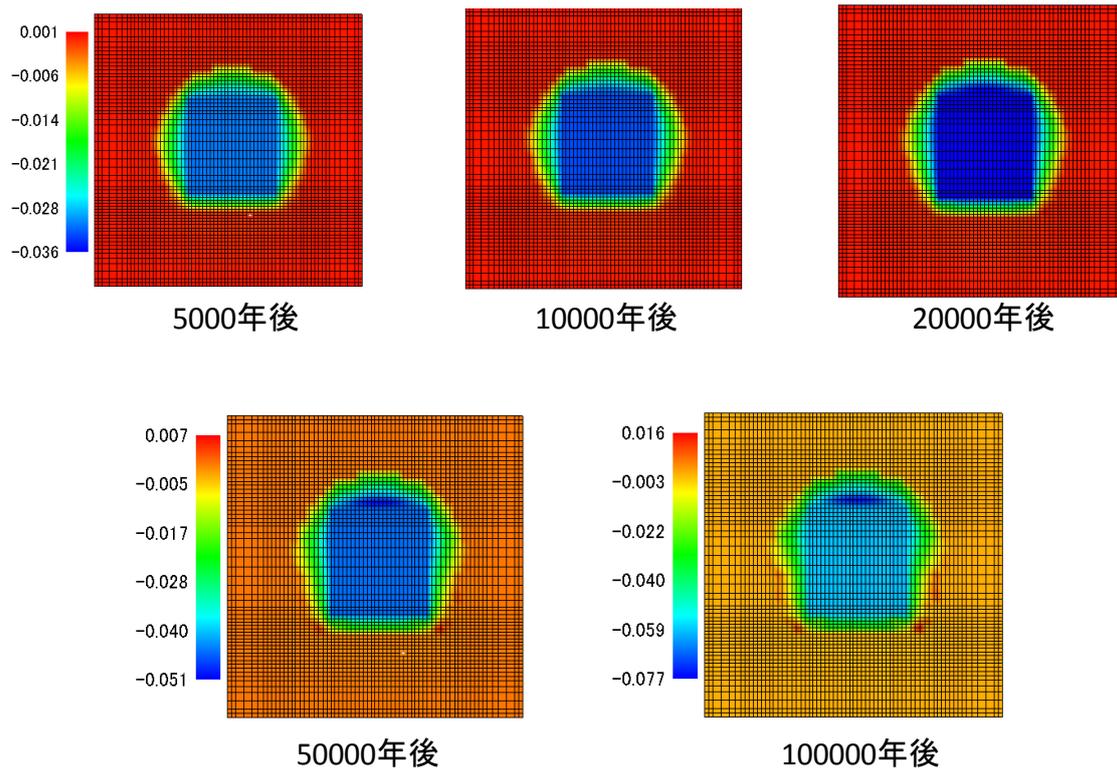


図 5.2.2-45 ケース b の力学解析結果(鉛直変位)

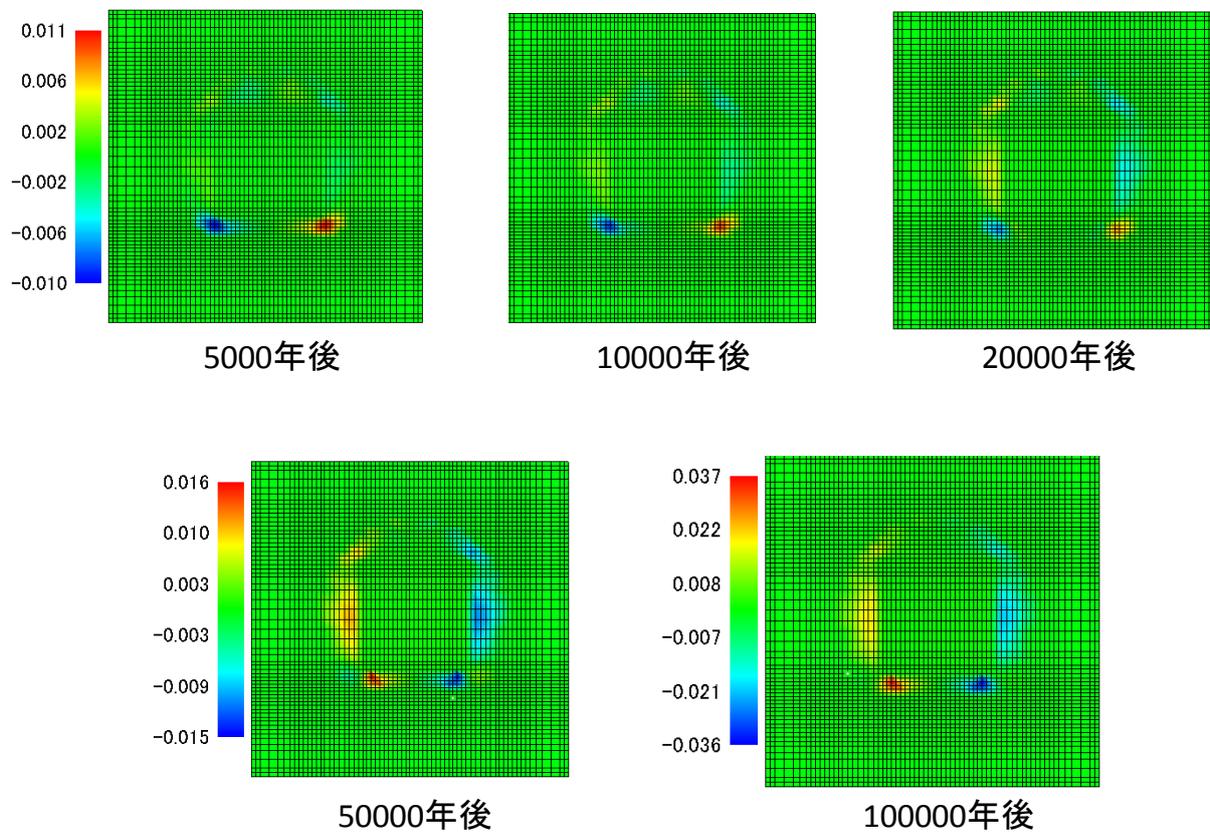


図 5.2.2-46 ケース c の力学解析結果(水平変位)

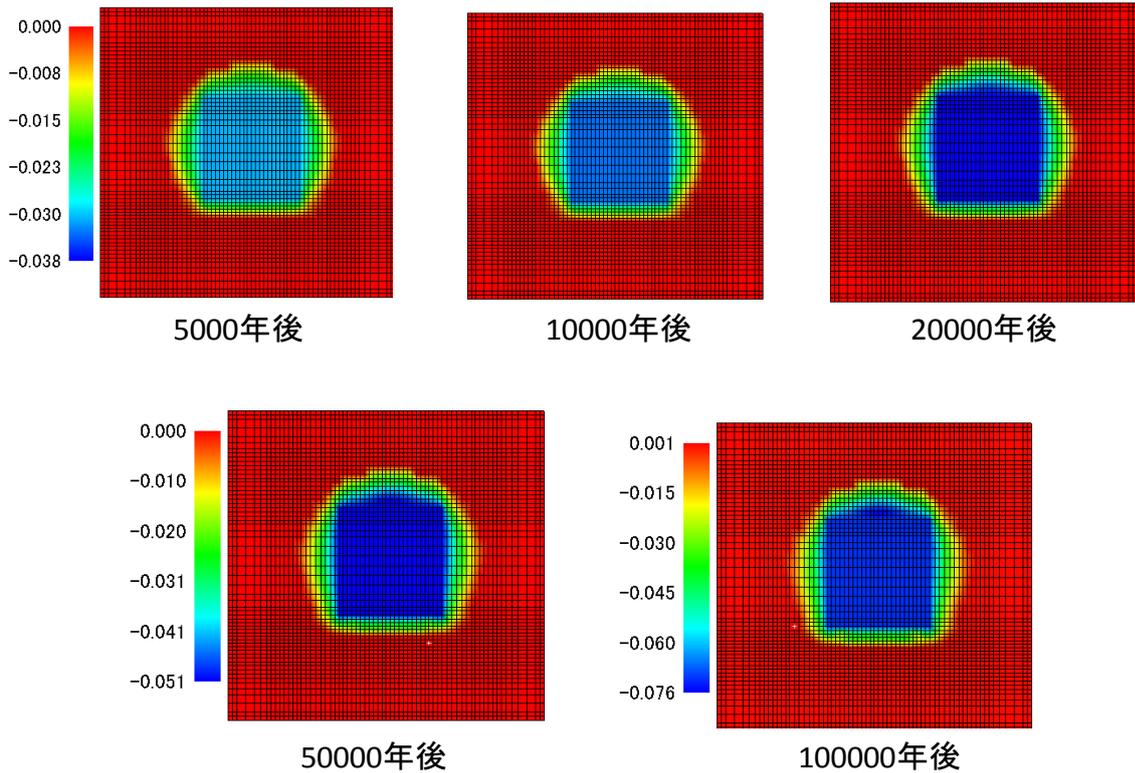


図 5.2.2-47 ケース c の力学解析結果(鉛直変位)

化学力学連成解析のケース a、b 及び c の各要素(図 5.2.2-48)の平均有効応力の経時変化を図 5.2.2-49 に、間隙比の経時変化を図 5.2.2-50 にそれぞれ示す。図 5.2.2-39、図 5.2.2-40 及び図 5.2.2-41 の体積ひずみ変化では、セメント影響により、底部緩衝材は、化学的な変質により圧縮され、上部の緩衝材は膨張の傾向である。そのため、化学的な変質により力学的な変形を伴い、廃棄体の上側の 677 要素及び 809 要素において、弱連成解析を行ったケース c は、弱連成解析を行っていないケース b よりも、間隙比が若干大きく、また有効応力が若干小さい点が認められるが、全体の経時変化の傾向は、間隙比が低下し、有効応力が増加の方向である。そのため、緩衝材は化学変質を受けても長期的な力学挙動は、比較的安定な結果となった。施工段階や冠水等の閉鎖までの順序の解析モデルへの考慮や解析条件のケース等を増やし、どのようなケースで化学変質の力学挙動への影響が大きいかなど、挙動の傾向について把握していく必要がある。

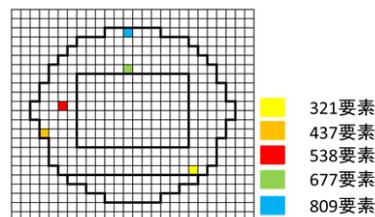
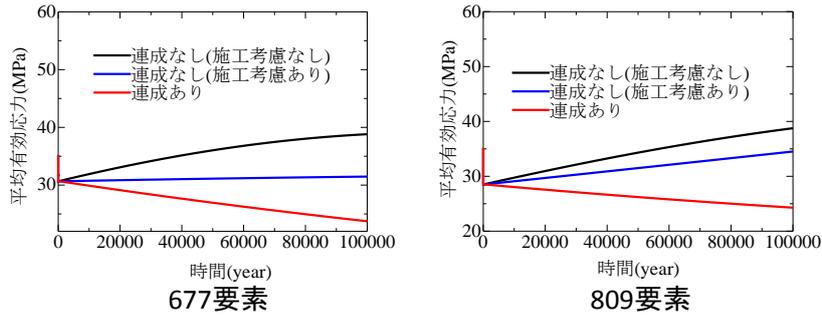
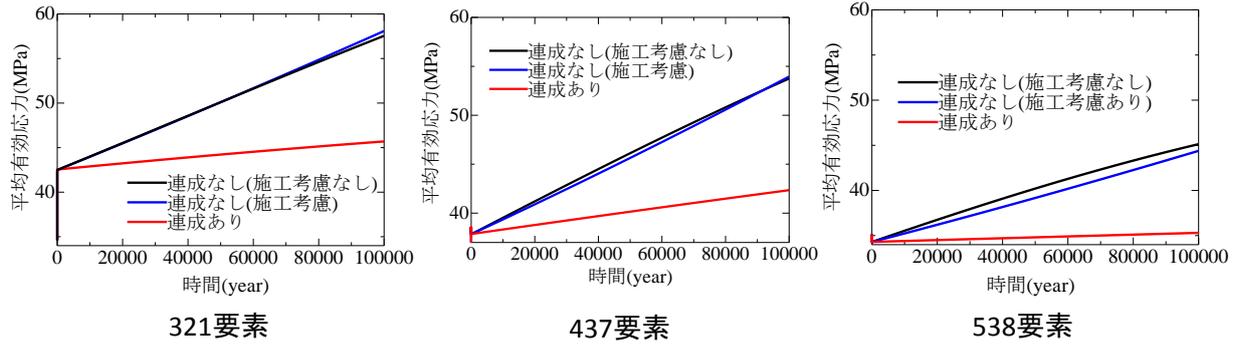
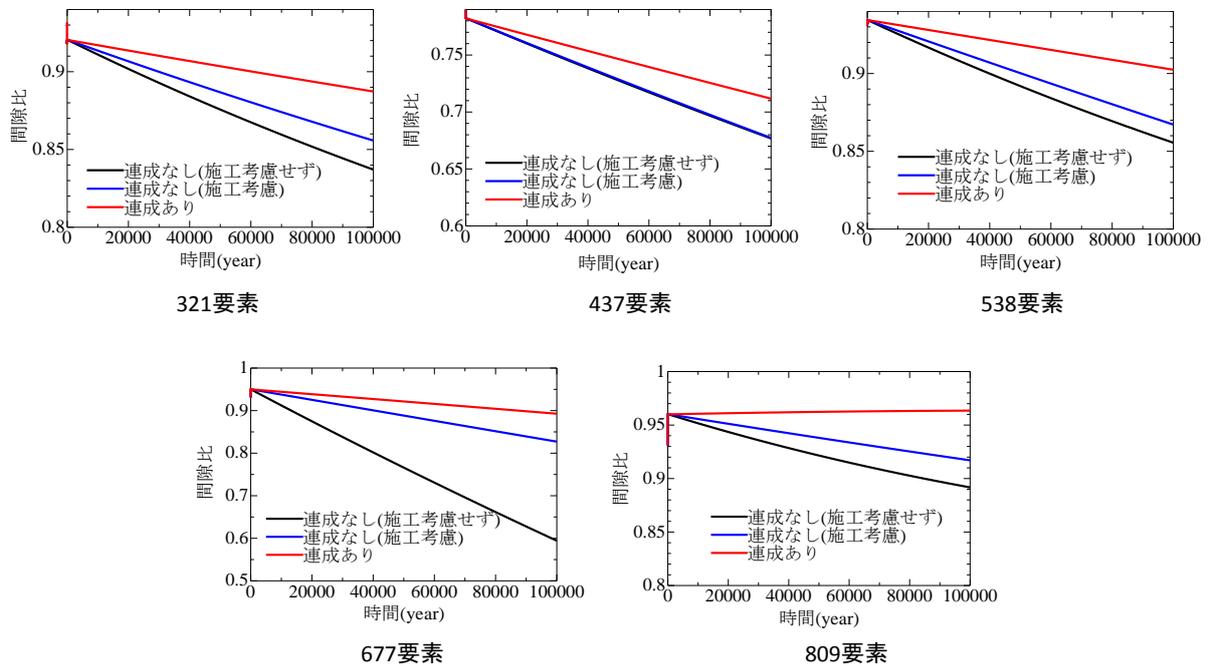


図 5.2.2-48 乾燥密度の抽出要素



※ケース a : 連成なし(施工考慮なし)、ケース b : 連成なし(施工考慮あり)、ケース c : 連成あり

図 5.2.2-49 ケース a、b 及び c の力学解析の各要素における平均有効応力の経時変化の比較



※ケース a : 連成なし(施工考慮なし)、ケース b : 連成なし(施工考慮あり)、ケース c : 連成あり

図 5.2.2-50 ケース a、b 及び c の力学解析の各要素における間隙率の経時変化の比較

(4) 化学力学弱連成解析による長期挙動の検討のまとめ

5.2.2 節では、化学変質挙動と力学挙動を連成させた長期解析について検討おこなった。化学解析と力学解析の弱連成解析で人工バリアの長期挙動への施工条件を初期条件に設定し、緩衝材の密度分布に不均質な状態があっても、長期の力学挙動への影響は小さいことがわかった。ただし、化学解析の変質挙動や水理挙動には影響があった点については原因の検討が必要である。長期挙動評価の初期条件を設定するための解析において施工段階に冠水状態を仮定しているため、閉鎖時までの段階を考慮した解析モデルの検討とその初期条件や長期挙動への影響の検討を進める必要がある。化学と力学の弱連成解析の有無で長期解析結果を比較したところ、力学挙動の化学変質挙動への影響は少なく、一方、5.2.2 の(1)のモデル計算からもわかるように、化学変質挙動の力学挙動への影響は大きく、化学解析から逐次反映は、長期挙動の評価に重要であると考えられる。ここでの化学変質を伴う長期力学挙動の解析結果は、大きな影響は受けない結果となった。解析条件のケース等を増やし、どのようなケースで化学変質の力学挙動への影響が大きいかなど、挙動の傾向について把握して化学解析と力学解析の連成手法を構築すると共に、初期条件や環境条件が人工バリアの長期挙動へどのような影響があるのか把握していく必要がある。

5.3 HMC 連成解析手法の検討のまとめ

第 5 章では、多様な条件での人工バリアの長期挙動を評価し、設計、施工方法と長期挙動との関連について評価するための 2 次元の HMC 連成解析手法を検討した。平成 27 年度は、化学解析手法について、これまでの検討で得られた課題の検討及び長期試験の再現解析を行い、今後の信頼性を向上に資する検討を行った(5.1 項)。加えて、HMC 解析手法に関して、解析の初期条件に施工条件の影響を考慮する手法とその長期的な影響について検討した(5.2 項)。

5.1 項では、化学解析手法に関わる、力学解析との弱連成解析で課題となっていた、Ca 型化率の変動やモンモリロナイトの再沈殿挙動について検証し、Ca 型化率の振動傾向データ受け渡しに問題はなく、モンモリロナイトの溶解/沈殿とイオン交換による液相の陽イオンの増減の足し合わせを見直した。加えて、3.2 項の化学・力学連成挙動試験の再現解析を行い、3.3 項の分析結果との比較検証を行った。乾燥密度の減少傾向は再現できるものの、解析において変質の進行が速いこと、二次鉱物が生成する等の分析結果との相違点が認められた。今後、化学解析手法及び、二次鉱物の生成のモデル化に関する検討等でこれらの課題について検討をする必要がある

5.2 項では、施工条件を HMC 解析の初期条件に反映し、化学変質をモデルケースで与えて長期の力学挙動の解析を行った。解析結果より、初期条件の乾燥密度の不均一さは長期挙動において大きな影響は及ぼさず、生成する二次鉱物種類により長期の力学挙動が異なった。また、HMC の弱連成解析を実施し、連成をしない化学解析と比較した。モンモリロナイトの溶解や二次鉱物の生成等の化学的な変質が長期の化学解析で示されたが、力学解析との弱連成を行っても化学変質挙動に大きな違いはなかった。このことから、今後も検討が必要であるが、化学解析から力学解析への連携は重要と考えられる。力学解析から化学解析への連携は必ずしも重要でないケース

もあると考えられるが、今後、他の解析条件での確認が必要である。このような解析結果への効果も考慮して連成解析手法を構築していく必要がある。なお、Ca 型化率の増加に伴い透水係数の増加し二次元断面の部位によっては、透水係数が 3 桁程度増加するケースも認められた(図 5.2.2 36 及び図 5.2.2 38 の赤線囲み部分)この点については、透水係数の算定手法などの解析手法も含め検証を行う必要がある。また、初期条件への閉鎖までの段階を考慮した解析モデルの検討、現状は力学解析で考慮されていない二次鉱物の剛性について検討をすることで、より信頼性のある HMC 連成解析手法が構築できるものと考えられる。検討を進めている化学変質と力学挙動の各モデル、セメント系材料の初期条件に関しても、今後 HMC 連成解析に反映していく必要がある。

5章の参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構 電気事業連合会：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－、JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02、根拠資料集 4-2 (2005).
- [2] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第1分冊)－人工バリアの長期挙動の評価一、pp.7-28~7-34 (2013).
- [3] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成25年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 (第4分冊)－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－(2014).
- [4] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 (第4分冊)－人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア初期条件の設定－(2015).
- [5] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第1分冊)－人工バリアの長期挙動の評価－(2009).
- [6] (独法)日本原子力研究開発機構：平成26年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発-4カ年研究成果の取りまとめ- 報告書 (2015).
- [7] 核燃料サイクル開発機構 電気事業連合会：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－ (2005).
- [8] Randolph C. Arthur et al. : Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkalene, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010 (2005).
- [9] A. Atkinson et al. : Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO₂-H₂O gels at 80 °C. DoE, DoE-HMIP-RR-91-045 (1991).
- [10] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成18年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査－人工バリア長期性能確認試験－報告書 (2/2) (2007).
- [11] Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J : User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259 (1999).
- [12] 笹倉剛、畔柳幹雄、岡本道考：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得、核燃料サイクル機構契約業務報告書、JNC TJ8400-2002-025 (2002).
- [13] 石川博久、石黒勝彦、並河努、菅野毅：緩衝材の圧密特性、PNC TN8410 97-051 (1997).
- [14] 石橋直樹、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、森拓雄、伊藤弘志：ベントナイトの圧密特性に及ぼすモンモリロナイト含有率の影響、第46回地盤工学会研究発表会 (2011).
- [15] 高治一彦、鈴木英明：緩衝材の静的力学特性、PNC TN8400 99-041 (1999).

- [16] 森本晃樹：ベントナイト緩衝材における化学変質を考慮した力学モデル、神戸大学卒業論文 (2014).

第6章 まとめ

TRU 廃棄物の地層処分における、人工バリアの長期挙動評価のために、今後 5 年間の事業として、「人工バリア材料長期挙動評価」では、主に緩衝材を対象に、水理力学化学（HMC）連成挙動及び解析による長期挙動評価の信頼性を高めることを目的とし、確証試験と解析への適応を検討した。一方、「人工バリア初期条件の設定」では、セメント系材料を主として、長期挙動評価への初期条件の設定及び影響に着目し、解析精度の向上を目的として操業中の熱の影響による初期設定への影響等を検討した。3 年目となる平成 27 年度は、平成 26 年度の成果を踏まえ、化学変質、力学・水理挙動の現象に関して試験を実施し、これまでに検討した成果も踏まえそれぞれの現象モデルの見通しを得ることを目標に検討した。初期条件の設定は、C-S-H の結晶化条件の整理を進め、それを踏まえ物性値への影響を検討した。加えて、長期挙動評価のための HMC 連成解析手法の構築について検討した。平成 27 年度の成果を以下に示す。

6.1 人工バリア材料の化学変質挙動に関する試験とモデル化（本報告書：第 2 章）

第 2 章では、人工バリア材料であるベントナイト系材料及びセメント系材料の化学変質挙動に関し、人工バリアの長期挙動を評価するための HMC 連成解析で重要となる、化学変質に関わる現象、力学挙動との相互影響を考慮すべき現象等を取りあげ、そのモデル化について検討をした。

(1) ベントナイト系材料の変質によるゼオライト系二次鉱物の生成に関するモデル化 (本報告書：2.1)

ベントナイト系材料の変質の長期挙動及び力学との相互影響に関わる二次鉱物の生成に関するモデル化では、干渉計によるその場観察試験、シリンジ試験等により、ベントナイトの変質に伴うゼオライト系の二次鉱物の生成挙動に関する知見を得ると共に、その生成挙動に関わるモデルを策定した。今後、古典的核形成理論の適用性等のモデルの検証や不足データの拡充を行うと共に化学解析への反映手法を検討していく。

(2) セメントーベントナイト接触部の挙動に関する試験(本報告書：2.2)

二次鉱物に関わるセメントーベントナイト接触部での二次鉱物生成挙動の確証試験では、平成 25 年度に Nagra の GTS より採取した試料を Ca-XAFS の分析等により接触部での変質状況を分析した。コンクリート部分の中性化により、セメント影響によるベントナイト系材料の変質が少ないこと、フライアッシュを添加したコンクリートからの Ca 等の影響が少なく、ベントナイト系材料の変質が少ないことが現実的な環境の試料で確認でき、人工バリアの長期挙動の評価に有益な情報が得られた。これらの試料の変質領域が小さいことから、現在検討している高分解能な XAFS 分析で C-S-H の定量を行い更なる知見の拡充を行う必要がある。

(3) ベントナイト系材料の溶解モデルの高度化 (本報告書 : 2.3)

平成 26 年に円盤状の積層モデルのモンテカルロシミュレーションにより数学モデルを検討して定式化した分散系から圧密系のモンモリロナイトの実効反応表面積について、数学モデルの信頼性を向上させるために、円盤状粒子の初期配向状態及び分散系粒子のそれぞれの影響について検討した。円盤状粒子の初期配向状態によっては準安定状態が存在することがわかったが、これらの因子は平成 26 年度の実効反応表面積の定式化への影響は少なく、信頼性を高めた。今後、積層構造の粒子間ポテンシャル、準安定状態となる条件、モンモリロナイト粒子形状(楕円状)を考慮した解析、空隙の定量手法等について、モデルの信頼性を担保する上で明確にしていく必要がある。

(4) セメント系材料の化学的変質に伴う物質移行特性変化のモデル化(本報告書 : 2.4)

2.4 項のセメント系材料の変質に伴う物質移行特性(拡散係数)変化のモデル化では、現実的な材料への対応として、混合セメントやモルタル材料への対応を検討した。試験結果に基づき、セメント種類ごとの C-S-H 部分の拡散係数のモデル化を行い、モルタル材料の拡散係数を算定するモデルを構築し、変質したモルタル材料の拡散係数の測定値と同等な計算結果を得られた。これにより、変質前の材料物性値によりモルタル材料の変質過程の拡散係数が算定できるようになった。今後は、遷移帯の設定などモデルの課題等を整理する必要がある。

(5) 人工バリア材料の化学変質挙動に関する試験とモデル化のまとめ

平成 27 年度は、25 年度から平成 29 年度の 5 年間の 3 年目にあたり、人工バリア材料の化学変質挙動に関するモデル化に関し、それぞれのモデルの策定を行った。今後、不足する試験データの拡充、及び検証を行い、モデル化を進めることが課題である。セメントーベントナイト接触部の試験は、接触部の有益な情報が得られ、今後はより高分解能な XAFS 分析等により接触部のより詳細なデータを取得していくことが課題である。

6.2 緩衝材の化学変質に伴う力学挙動に関する試験とモデル化 (本報告書 : 第 3 章)

第 3 章では、HMC 連成解析手法に関わる、ベントナイト系材料の化学変質挙動を考慮した力学挙動モデルの検討を行った。加えて、化学・力学連成モデル試験により化学変質の影響を受けた場合の力学挙動に関するデータを取得するとともに、試験体を解体して変質状況を分析により把握した。

(1) 力学挙動に関する試験とモデル化(本報告書 : 3.1)

力学挙動に関する試験とモデル化では、これまでに試験結果に基づいてモデル化を進めてきた、ベントナイトの化学変質(溶解と二次鉱物生成)を伴う力学挙動のモデルについて、平成 27 年度はモデルの基礎的な検討を実施した。完全飽和線の低応力部分の試験データの取得によるモデルの更新、変質によりモンモリロナイトが減少したベントナイトの平衡膨潤状態が、正規

圧密曲線と異なる点に対する非可逆比による整理及びベントナイトの限界状態線のモデル化について検討して現象を把握し、モデル化の方法についての方向性を見出すことが出来た。しかし、それぞれのモデルについての検討で挙げたように、モデル化に向けて確認すべき挙動があるため、今後は試験等を通して信頼性を向上させる必要がある。なお、緩衝材の化学変質では、ベントナイトが溶解して二次鉱物が生成する際にセメンテーションが起こることが懸念される。この様な現実的に起こる現象も念頭にモデル化を進めていくことも必要と考えられる。また、透水係数のモデルについても化学変質との関連の点から検証を行い、信頼性を向上させる必要がある。

(2) 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験(本報告書：3.2 及び 3.3)

3.2 項の長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験では、モンモリロナイトのアルカリ溶液による溶解等の力学挙動への影響について膨潤挙動に関する有益なデータを取得した。高アルカリの NaOH 溶液の通水による膨張圧の低下の原因について、通水液の種類を変えた試験によりイオン強度の影響が推定され、その他化学的な変質の影響等を確認するために試験体を解体して密度分布を確認して分析試料を得た。

3.3 項の化学・力学連成モデル試験後の試料の分析では、3.2 項で解体した試料を分析し、圧密下 (1.4~1.6Mg/m³ 程度) での長期間のモンモリロナイト(クニピア-F)の化学変質に関するデータを得た。アルカリ溶液等の影響により乾燥密度が低下している部分は、モンモリロナイトの溶解や間隙水の Si 濃度の上昇の傾向がみられたが、変質の量は比較的少なく、二次鉱物の生成は認められなかった。3.2 項の試験の力学挙動は、通水溶液のイオン強度の寄与が大きいものと推察される。また、モンモリロナイトの溶解速度は、干渉計を使用した圧密下での溶解挙動の検討の成果と同等な結果が得られ、これまでの成果を確証することも出来た。しかし、水や NaCl 溶液でも pH に依存せず溶解が認められ、圧密によるモンモリロナイトの割れによる端面積の増加等のモンモリロナイトの溶解モデルへ影響が懸念される事項があり、今後これらの事項について確認を進める必要がある。

(3) 緩衝材の化学変質を伴う力学挙動に関する試験とモデル化のまとめ

HMC 連成解析手法に関わる、ベントナイト系材料の化学変質挙動を考慮した力学挙動モデルは、平成 26 年度までに化学変質の影響を力学モデルへの反映を進めてきており、平成 27 年度は、モデルの基礎的な事項の検討を行い、現象を把握することでモデル化の方法についての方向性を見出すことが出来た。加えて、化学・力学連成モデル試験により化学変質の影響を受けた場合の力学挙動に関するデータを取得するとともに、試験体を解体して変質状況を分析により把握し人工バリアの長期挙動に有益な情報が得られた。緩衝材の力学挙動に関するモデルは、今後、二次鉱物の生成影響等について検証を進めモデルの信頼性向上を行う必要がある。また、化学・力学連成試験の成果は、HMC 解析の検討や化学変質挙動の検討へ反映して HMC 解析による長期挙動評価の信頼性を向上させる必要がある。

6.3 人工バリア評価の初期条件の設定（本報告書：第4章）

第4章では、セメント系材料の材料特性値(拡散係数、力学特性等の物性値)に対する、処分場の閉鎖までの放射性廃棄物の熱による変質の影響について、4.1項では、セメント系材料の熱変質の主な原因となるC-S-Hの結晶化条件について検討し、4.2項では、平成27年度より開始した、セメント系材料の熱変質が材料特性値へ及ぼす影響について検討した。

(1) セメント系材料の熱影響による結晶化の条件に関する試験（本報告書：4.1）

4.1項では、これまでに結晶化条件を確認するために実施してきた定温度試験に関して、試験水準によっては結晶化が進行していることから、試験を継続してデータを取得し、暫定的に整理した結晶化条件の信頼性を向上させた。C-S-Hは50℃においても結晶化が進行すること、Alの含有により結晶化は遅延することなどがわかっている。これまでの試験結果をも踏まえ結晶化条件に関して整理した。骨材のSiの溶解によるCa/Si比の低下が重要である。各種定温度試験のC-S-Hの結晶化は進行中であることから、試験を継続し結晶化がどの程度まで進むかを確認する必要がある。加えてC-S-Hの結晶化は全体のどの程度の量であるかも初期条件を設定していく上で重要な情報であるので、定温度試験で確認していく必要がある。また、混合セメントでの結晶化の可能性についても検討する必要がある。

(2) セメント系材料の熱変質が初期条件へ及ぼす影響に関する検討（本報告書：4.2）

4.2項では、セメント系材料のC-S-Hは、制限温度以下での結晶化が懸念されることから、結晶化のセメント系材料の物性値への影響について検討を行った。試験体を作製して20、50、70、80及び90℃の各温度に保管してC-S-H結晶化状態と物性値を測定することとした。試験開始1か月までにC-S-Hの結晶化は確認されていないが、C/Sの低下等の結晶化へ向かう挙動や、空隙径分布が小さい径へ変化すること等が確認された。今後も、試験を継続して、C-S-Hの結晶化の物性値への影響を確認する必要がある。加えて、セメント系材料のC-S-Hの結晶化による核種の溶解度及び収着挙動について既往の文献を調査した。セメントからの成分が浸出した地下水のpHは、初期において12.5程度(Region II)程度であるが、C-S-Hが結晶化(トバモライト化)することで、pHは10程度となるため、pH低下が核種パラメータへの影響を調査し、影響が懸念される範囲等を整理した。

(3) 人工バリア評価の初期条件の設定のまとめ

各種条件での定温度試験により、セメント系材料のC-S-Hの結晶化に関する条件の整理がされつつあり、TRUの人工バリアの制限温度80℃以下での結晶化の可能性が考えられる。そのため人工バリアの長期挙動評価に係わる初期条件の設定のために、結晶化の物性値への影響について平成27年度より検討を開始した。物性値の取得のための試験体を作製し、結晶化させるための定温度条件に保管を開始した。今後、試験体の定温度での保管を継続し、結晶化を進行させて材料物性値の基本情報となる空隙構造のデータ取得をする必要がある。加えて、これらの知見を初期条件の設定への反映方法の検討を進める必要がある。また、アナログ試料により

結晶化に関するデータを拡充することも本検討に有効と考えられる。

6.4 HMC 連成解析手法の検討（本報告書：第 5 章）

第 5 章では、多様な条件での人工バリアの長期挙動を評価し、設計、施工方法と長期挙動との関連について評価するための 2 次元の HMC 連成解析手法を検討した。平成 27 年度は、化学解析手法について、これまでの検討で得られた課題の検討及び長期試験の再現解析を行い、今後の信頼性を向上に資する検討を行った(5.1 項)。加えて、HMC 解析手法に関して、解析の初期条件に施工条件の影響を考慮する手法とその長期的な影響について検討した(5.2 項)。

(1) HMC 連成解析に関わる化学解析手法に関する検討(本報告書：5.1)

5.1 項では、化学解析手法に関わる、力学解析との弱連成解析で課題となっていた、Ca 型化率の変動やモンモリロナイトの再沈殿挙動について検証し、Ca 型化率の振動傾向データ受け渡しに問題はなく、モンモリロナイトの溶解/沈殿とイオン交換による液相の陽イオンの増減の足し合わせを見直した。加えて、3.2 項の化学・力学連成挙動試験の再現解析を行い、3.3 項の分析結果との比較検証を行った。乾燥密度の減少傾向は再現できるものの、解析において変質の進行が速いこと、二次鉱物が生成する等の分析結果との相違点が認められた。この相違点は人工バリアの長期挙動解析に比較して短い期間の解析である影響があると考えられるが、今後、化学解析手法及び、二次鉱物の生成のモデル化に関する検討等でこれらの課題について検討をする必要がある。

(2) 処分場 2 次元断面における力学－化学連成解析(本報告書：5.2)

5.2 項では、施工条件を HMC 解析の初期条件に反映し、化学変質をモデルケースで与えて長期の力学挙動の解析を行った。解析結果より、初期条件の乾燥密度の不均一さは長期挙動において大きな影響は及ぼさず、生成する二次鉱物種類により長期の力学挙動が異なった。また、HMC の弱連成解析を実施し、連成をしない化学解析と比較した。モンモリロナイトの溶解や二次鉱物の生成等の化学的な変質が長期の化学解析で示されたが、力学解析との弱連成を行っても化学変質挙動に大きな違いはなかった。このことから、今後も検討が必要であるが、化学解析から力学解析への連携は重要と考えられる。力学解析から化学解析への連携は必ずしも重要でないケースもあると考えられるが、今後、他の解析条件での確認が必要である。このような解析結果への効果も考慮して連成解析手法を構築していく必要がある。また、水理挙動の算定手法の検証、初期条件への閉鎖までの段階を考慮した解析モデルの検討、現状は力学解析で考慮されていない二次鉱物の剛性について検討をすることで、より信頼性のある HMC 連成解析手法が構築できるものと考えられる。検討を進めている化学変質と力学挙動の各モデル、セメント系材料の初期条件に関しても検討を進め、今後 HMC 連成解析に反映していく必要がある。

(3) HMC 連成解析手法の検討のまとめ

これまでに 2 次元での人工バリアの長期挙動評価の計算が可能となった HMC 連成解析手法について、化学解析については課題の検討等を行い、信頼性を上げることができた。化学連成力学試験を再現する化学解析では、試験と解析が整合しない点もあり今後の課題を整理していく必要がある。化学力学の連成解析手法の検討では、化学変質の情報を逐次反映して力学解析を実施することが有効であることがわかり、また、人工バリアの 2 次元断面における化学変質と力学挙動の相互の影響を考慮した長期挙動の評価が概略であるが出来つつある。平成 29 年度の本フェーズのまとめに向けては、今後の課題として挙げた事項の検討、各種現象モデルを考慮等により HMC 連成解析手法の信頼性を向上させると共に、人工バリアの長期挙動の評価を進めていく必要がある。