

廃棄物埋設施設における  
許可基準規則への適合性について

第十条第四号 廃棄物埋設地

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-状態変化の評価(化学的影響)-

2020年1月

日本原燃株式会社

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 解析条件.....	1
(1) 解析コード.....	1
(2) 解析モデル.....	2
(3) 地下水組成.....	4
(4) 難透水性覆土の設定.....	4
(5) セメント系材料の設定.....	8
(6) 生成を想定した二次鉱物.....	10
(7) 熱力学データベース.....	12
3. 解析結果.....	12
(1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①) .....	12
(2) 難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合(ケース②) .....	13
4. 参考文献.....	29

添付資料1 パラメータ設定根拠集

添付資料2 地下水組成のチャージバランス計算

添付資料3 覆土が長期間にわたり低透水性を維持することができる要因

## 1. はじめに

本資料は、「第十条第四号 廃棄物埋設地（廃止措置の開始後の評価）」を補足説明するものである。

難透水性覆土に対する安全機能として低透水性が期待されている。難透水性覆土の透水性は、ベントナイト系材料に含まれる膨潤性鉱物であるモンモリロナイトにより支配されていることが知られている<sup>(1)</sup>。一方、廃棄体の固型化材や埋設設備には多量のセメント系材料が用いられている。セメント系材料と接触した地下水は、セメント系材料から溶出するセメント成分や1号廃棄物埋設施設に埋設された廃棄体に含まれる可溶性塩により組成が変化し、高アルカリ性となる。高アルカリ性の地下水は、ベントナイト系材料中のモンモリロナイトを溶解あるいは変質させ、難透水性覆土の低透水性機能が次第に低下することが懸念される。ここでは、これらの化学的影響を考慮しても難透水性覆土の低透水性が、期待する期間において維持されることを確認するため、難透水性覆土とセメント系材料を接触させた反応系における地球化学解析により、難透水性覆土中の等価透水係数の変遷を評価した。評価期間は、廃止措置の開始後の確からしい評価期間として1,000年後とした。（また、参考として地下水シナリオにおいて移行抑制機能を期待する数万年(20,000年後)についても評価した。）

なお、1号及び3号廃棄物埋設施設の評価結果は併記する。

## 2. 解析条件

### (1) 解析コード

本解析では、難透水性覆土へのアルカリ成分の移行挙動とモンモリロナイトの化学的な溶解を連成させて評価する必要があるため、これらを連成して解析できるPHREEQC-TRANS(化学反応物質移行連成解析コード)により、セメント系材料が用いられる埋設設備から難透水性覆土へのアルカリ成分の移行及び化学反応を評価した。

本解析で用いたPHREEQC-TRANSで中心となる地球化学解析は、アメリカ地質調査所(USGS)が開発・公開しているPHREEQC<sup>(2)(3)</sup>をベースとしている。PHREEQCはソースプログラムが公開されており、広く検証されている<sup>(4)</sup>。また、PHREEQC-TRANSは地球化学解析と物質移行解析を連成させることで、地球化学反応の進展に伴う物質移行パラメータ(空隙率、拡散係数)の変化も同時に反映しながら、長期の変質挙動を解析することができる解析コードである。

## (2) 解析モデル

本解析では、地下水は廃棄物埋施設設の下部より流入し、廃棄物埋施設設内を通過して再び廃棄物埋施設設下部より流出することから、セメント系材料から難透水性覆土への移流成分は少ないと想定されるため、地球化学解析における物質移行は拡散によつてのみ起こるものとした。

なお、埋設設備周辺の難透水性覆土及び下部覆土において、ペクレ数分布より、評価期間内で拡散場が継続することを確認している。(補足説明資料 6「透水係数の設定」及び補足説明資料 7「埋設設備からの流出水量」を参照。)

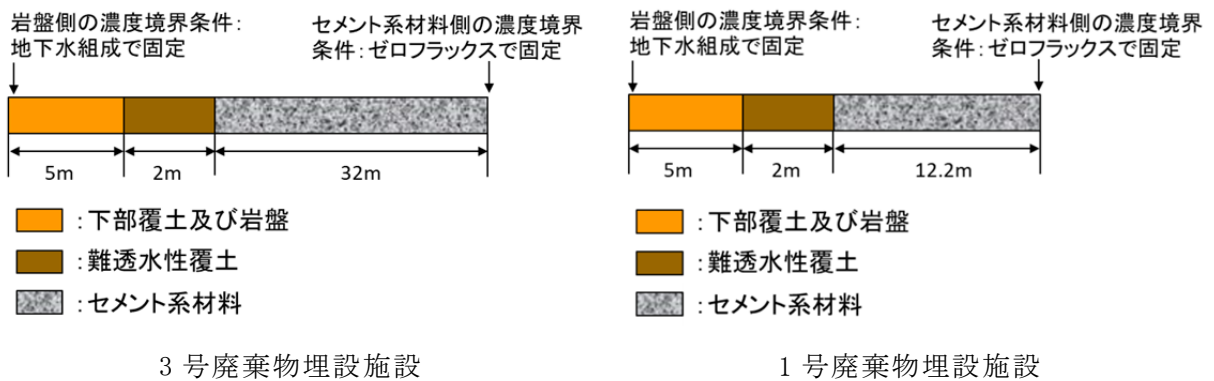
解析モデルについては、廃棄物埋施設設で用いられるセメント系材料が難透水性覆土に与える影響を検討するため、セメント系材料と難透水性覆土が接する領域を解析対象とした 1 次元モデルを設定した。難透水性覆土の厚さは 2m を設定した。

ここで、難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解量は、セメント系材料から溶出し難透水性覆土へ移行して化学反応に寄与するアルカリ量で決定される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合に加え、体積により決定される。1 次元体系では、体積は各材料のモデル長さに反映される。そこで、セメント系材料のモデル長さは、難透水性覆土に対して十分な長さとして、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分(3 号廃棄物埋施設設では 64m の半分の 32m、1 号廃棄物埋施設設では 24.4m の半分の 12.2m)の長さを設定した。(難透水性覆土とセメント系材料の体積比を考慮すると、難透水性覆土 2m に対するセメント系材料の長さは、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さより短い。)

なお、2 号廃棄物埋施設設は、3 号廃棄物埋施設設と同種の廃棄体(充填固化体)及び類似施設であり、解析結果はいずれかで代表することができる。埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さをセメント系材料のモデル長さに設定した場合、2 号廃棄物埋施設設と比べ 3 号廃棄物埋施設設の方が長く、その分アルカリ量は多く設定されることから、3 号廃棄物埋施設設の解析結果で代表することとした。一方、1 号廃棄体(均質・均一固化体)には塩類(硫酸塩、ほう酸塩)が含まれている。セメント系材料から浸出してくるアルカリ成分に加え、廃棄体から溶出する塩が難透水性覆土に含まれるモンモリロナイトの変質に影響を及ぼす可能性があり、評価が必要であると考えられる。そのため、3 号廃棄物埋施設設とは別に解析を行うこととした。

以上より、解析では 3 号廃棄物埋施設設と 1 号廃棄物埋施設設を評価対象とした。

また、本解析では、難透水性覆土とセメント系材料の相互作用に着目するため、難透水性覆土とセメント系材料のみ反応し、下部覆土及び岩盤は反応しないものとした。境界条件に関して、難透水性覆土端から離れた点では、セメント影響を受けずに地下水組成と同じ液相組成になると考えられるため、地下水組成固定条件を設定した。一方、セメント系材料端は、セメント系材料の成分がセメント系材料の端から解析体系外へ移行しないように濃度勾配ゼロの境界条件(反射条件)とした。3号廃棄物埋設施設及び1号廃棄物埋設施設の解析体系の概念図を第1図に示す。



第1図 解析体系概念図

(3) 地下水組成

廃棄物埋施設周辺地下水組成は、淡水で地表付近の地下水であるという特性をふまえ地表付近の淡水と大気圧との平衡を考慮したモデル地下水 FOHP (Fresh-Oxidizing-High-pH)<sup>(5)</sup> を参照することとした。解析で設定した地下水組成を第 1 表に示す。

第 1 表 設定した地下水組成

pH	8.46
Na	$3.22 \times 10^{-3} \text{mol/L}$
K	$5.79 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca	$1.01 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Mg	$6.50 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
C	$3.54 \times 10^{-3} \text{mol/L}$
S	$1.00 \times 10^{-6} \text{mol/L}$
Cl	$4.40 \times 10^{-6} \text{mol/L}$
Al	$3.61 \times 10^{-7} \text{mol/L}$
Si	$3.40 \times 10^{-4} \text{mol/L}$

(4) 難透水性覆土の設定

(i) 難透水性覆土の鉱物組成

ここでは Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様とした。難透水性覆土の乾燥密度は  $1.61 \text{Mg/m}^3$  と設定した。難透水性覆土の初期鉱物組成を第 2 表に示す。

第 2 表 難透水性覆土の初期鉱物組成

	Ca 型ベントナイト(クニボンド) 30wt%				
	モンモリロナイト				随伴鉱物
	Na-Mont	Ca-Mont	K-Mont	Mg-Mont	カルセドニ
mol/L <sub>water</sub> *1	0.33	1.94	0.06	0.23	2.94

\*1 空隙水 1L に対する鉱物のモル量

(ii) モンモリロナイトの溶解速度

モンモリロナイトの溶解速度は TRU2 次レポート<sup>(6)</sup>で使用されている式を使用した。セメント由来の高 pH 溶液の影響を考慮するため、Sato et al. (2004)<sup>(7)</sup>がモンモリロナイト試料を用いて種々の pH 条件(8~13)におけるフロースルー試験で測定された溶解速度の結果より pH の関数として求めた溶解速度式と、平衡に接近した場合のモンモリロナイトの溶解速度に対する飽和依存性の式について、Cama et al. (2000)<sup>(8)</sup>がモンモリロナイトの溶解速度実験データに基づきフィッティングによって求めた経験式を合わせた数式 1 を用いた。文献<sup>(9)</sup>では、強アルカリ性条件では、Cama et al. (2000)が弱アルカリ条件で求めた溶解速度の $\Delta$ (2 依存性よりも、より小さい $\Delta$ 依存性(より不飽和な環境)で溶解速度が小さくなることが確認されていること(第 2 図)から、Cama 式を適用した。

なお、第 2 図における数値中の E は、指数表記における基数の 10 を示す(例えば、1E+2 は  $1 \times 10^2$  を示す。以下、同様。)

また、鉱物の反応表面積は、モンモリロナイトの比表面積として Yokoyama, S. et al. (2005)<sup>(10)</sup>にて  $N_2$ -BET 法で算出された  $7\text{m}^2/\text{g}$  を用いてモンモリロナイト 1mol 当たりの反応表面積に換算して使用した。

$$\text{Rate} = \left( 4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{\text{OH}^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{\text{OH}^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{\text{OH}^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{\text{OH}^-}} \right) \cdot A_{\text{min}} \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$$

(数式 1)

*Rate* : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

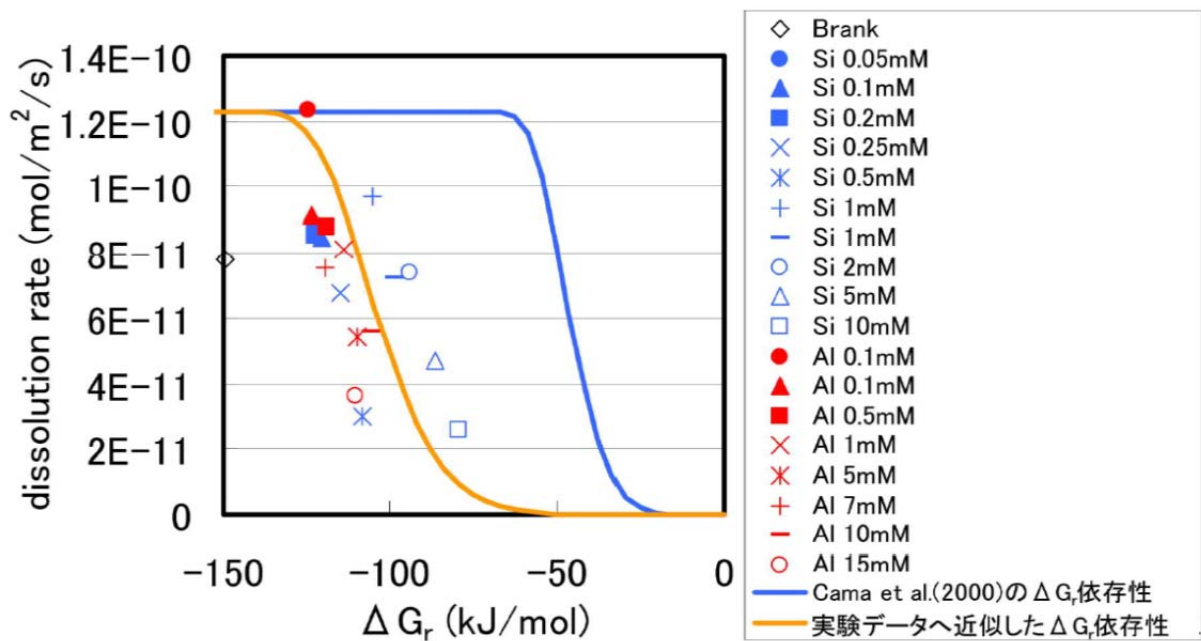
*R* : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

*T* : 絶対温度 [K]

$a_{\text{OH}^-}$  :  $\text{OH}^-$  イオンの活量

$A_{\text{min}}$  : 鉱物の反応表面積 [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta Gr$  : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力) [kJ/mol]



第2図 モンモリロナイトの溶解速度と化学親和力 $\Delta G_r$ の関係(文献<sup>(9)</sup>)

(iii) 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式

難透水性覆土の透水係数は、TRU2次レポート<sup>(6)</sup>で使用されている、ベントナイトに対し様々な条件下で求めた透水係数の実測値に基づき、伊藤ら(2005)<sup>(1)</sup>が求めたベントナイトと透水係数の関係式(数式2)を使用した。

$$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0 \quad (\text{数式 2})$$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$

$K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$$

ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

$C_i$  : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

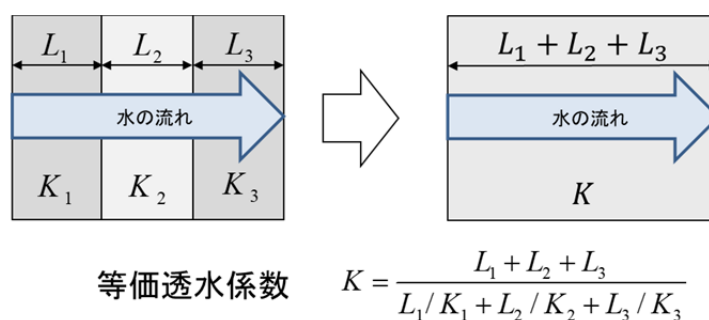


ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合[-]

$e_{sme}$  : スメクタイト間隙比[-]

$K$  : 透水係数[m/s]

難透水性覆土全体の透水係数に関しては、文献<sup>(11)</sup>を参考に、第3図に示すように異なる透水係数を持つ材料に対して直列となる方向の透水性を考えた場合の系全体の透水係数(等価透水係数)で表現した。



第3図 等価透水係数の設定(直列)

(iv) 難透水性覆土の拡散係数

難透水性覆土中の拡散係数は、TRU2次レポート<sup>(6)</sup>で使用されている、空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式<sup>(12)</sup>(数式3)を設定した現実的な拡散モデルとした(以下「ケース①」という。)

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon^n \quad (\text{数式 3})$$

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

$$f_s = a \times f_b$$

$D_e$  : 実効拡散係数[m<sup>2</sup>/s]

$\varepsilon$  : 空隙率[-]

$a$  : ベントナイト中のモンモリロナイト割合[-]

$f_b$  : ベントナイトの配合割合[-]

また、上記で設定した経験式(数式 3)において、ベントナイト中のモンモリロナイトの割合 $a$ (若しくはベントナイトの配合割合  $f_b$ )を 0 とした場合、 $\varepsilon$  の指数  $n$  は 1 となり、実効拡散係数は単純に空隙率に比例するという拡散モデル(拡散係数が大きい方が、アルカリ成分が難透水性覆土中を移動する速度を大きく見積もることになり、モンモリロナイトの溶解が広範囲に広がる可能性がある)となる(数式 4)。そのため数式 4 を用いた解析も行った(以下「ケース②」という。)

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon \quad (\text{数式 4})$$

#### (5) セメント系材料の設定

##### (i) セメント系材料の鉱物組成

廃棄物埋設施設で使用されているセメント系材料のうち、充填モルタルの配合を参照した。

なお、3号廃棄物埋設施設の充填モルタルの配合は候補配合とした。初期鉱物組成の算定方法は、文献<sup>(13)</sup>に記載されている算定方法を参考した。参照した算定方法では、初期鉱物として C-S-H ゲル、ハイドロタルサイト、エトリンガイト、(余剰  $Al_2O_3$  をギブサイト)、NaOH、KOH を想定しており、セメント系材料のバッチ式浸漬実験との比較において、液相成分の再現性が高く、適用可能なモデルであることが示されたもの<sup>(13)</sup>である。

なお、どちらの条件においても、骨材については反応しないものとした。

##### a. 3号廃棄物埋設施設

ここでは3号廃棄物埋設施設の充填モルタルの候補配合とした。3号廃棄物埋設施設の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第3表に示す。

第3表 セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設施設)

	結合材(C)					
	C-S-H ゲル	ハイドロタルサイト	エトリン ガイト	ギブサイト	NaOH	KOH
mol/L <sub>water</sub> *1	9.51	0.33	0.04	0.94	0.03	0.03

\*1 空隙水 1L に対する鉱物のモル量

b. 1号廃棄物埋設施設

1号廃棄物埋設施設で使用されている配合を参照した。1号廃棄物埋設施設の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第4表に示す。

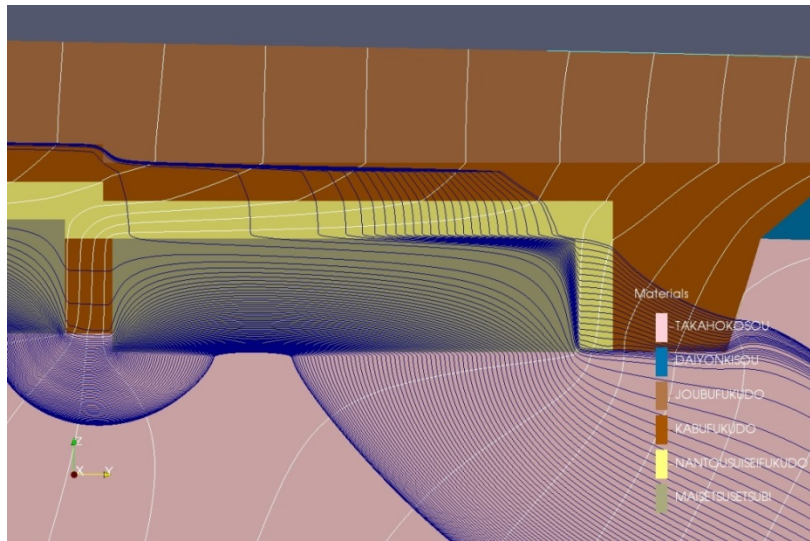
第4表 セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設施設)

	結合材(C)					
	C-S-H ゲル	ハイドロタルサイト	エトリン ガイト	ギブサイト	NaOH	KOH
mol/L <sub>water</sub> *1	6.46	0.41	0.01	1.19	0.01	0.01

\*1 空隙水 1L に対する鉱物のモル量

(ii) 廃棄体に含まれる塩量(1号廃棄物埋設施設で設定)

1号廃棄物埋設施設の廃棄体(均質・均一固化体)に含まれる塩類(ほう酸塩及び硫酸塩)の量について、1号廃棄物埋設施設の埋設実績から集計を用いて設定した。また、セメント系材料の幾何学的な劣化(ひび割れ)に伴い1号廃棄物埋設施設内には、地下水は難透水性覆土が設置されていない下部から入り込み、主に下部から岩盤中へと移行していく。したがって、廃棄物埋設施設内に存在する塩の大半は、それらの流れに乗って岩盤中へ移動していくと考えられる(第4図)。廃棄物埋設施設から流出する全体の流量のうち、難透水性覆土へ移動する流量を踏まえ、本解析では、難透水性覆土へ移動する塩量を全体の10%と設定した(地下水流動解析の詳細は、補足説明資料7「埋設設備からの流出水量」を参照)。1号廃棄物埋設施設の解析で設定した塩濃度を第5表に示す。



第4図 廃棄物埋設施の地下水流動概念図

第5表 解析で設定した塩濃度

ほう酸塩 ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	硫酸塩 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
0.01mol/L_water*1	0.07mol/L_water*1

\*1 空隙水 1L に対する鉱物のモル量

(iii) セメント系材料の拡散係数

セメント系材料中の拡散係数については、セメント系材料は長期的に化学劣化以外の幾何学的劣化(ひび割れ)が想定されるため、物質移動が速い状態となることを想定し、拡散係数として自由水中のトリチウム水の拡散係数 ( $2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}^{(14)}$ ) を設定した(拡散係数が大きい方がアルカリ供給速度は大きく見積もられる。)

(6) 生成を想定した二次鉱物

セメント系材料と地下水が反応した溶液が難透水性覆土へ移行する際に難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解が生じると、空隙水中の Si や Al あるいは Mg といった反応生成物である溶存化学種の濃度が徐々に上昇し、条件に応じて過飽和となり、種々の二次鉱物が沈殿すると考えられる。生成する二次鉱物の種類によって、溶液組成や pH、空隙率が変化し、難透水性覆土の透水性に影響を及ぼす可能性がある。

文献<sup>(15)</sup>では、セメント系材料と反応した溶液と接する緩衝材(ベントナイト系材料)

の鉱物学的変化の可能性について、室内試験結果、関連する天然事例から得られる情報に基づき考察を行い、多様な系の特徴に応じて生成頻度が高いと判断された鉱物をまとめている。

一方、二次鉱物の変遷は熱力学的平衡だけでなく反応速度の影響を受ける。しかしながら、反応速度に関する知見は乏しく反応速度の影響を定量的に表現するのは困難である。文献<sup>(15)</sup>では、熱力学的に安定な鉱物(安定相)、安定相と比べ相対的に準安定な鉱物(準安定相)に分類し、複数の鉱物変遷シナリオを作成している。本解析では、生成する可能性がある二次鉱物を幅広く網羅するために、準安定相や安定相を含め多くの二次鉱物を設定した(第6表)。

第6表 生成を想定した二次鉱物

フィリップサイト	ブルーサイト	$C_3ASH_4$
クリノプチロライト	カルサイト	$C_4AH_{13}$
ヒューランダイト	ドロマイト	$C_4AH_{19}$
C-S-H ゲル	カルセドニ	ゲーレナイト水和物
エトリンガイト	カリ長石	カオリナイト
モノサルフェート	アナルサイム	パイロフィライト
ハイドロタルサイト	ローモンタイト	フリーデル氏塩
セピオライト	イライト	2 水石膏
ポルトランダイト		

また、1号廃棄物埋施設では、廃棄体に含まれる塩とセメント成分及びベントナイトが反応して二次鉱物が生成する可能性も考えられる。そこで、塩影響に係る二次鉱物としてNa及びCaを含むほう酸塩及び硫酸塩を設定した(第7表)。1号廃棄物埋施設を対象とした解析では、第6表に加え第7表を設定した。

第7表 塩影響を考慮した際に生成を想定した二次鉱物(1号廃棄物埋施設で設定)

ほう酸塩	硫酸塩
Ca <sub>3</sub> B <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ・10H <sub>2</sub> O
CaB <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Thaumasite
CaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	エトリンサイト
NaBO <sub>2</sub>	2水石膏
Colemanite	

### (7) 熱力学データベース

熱力学データベースは、TRU2次レポート<sup>(6)</sup>で使用されていた JNC-TDB. TRU<sup>(16)</sup>をベースに、C-S-Hゲルの熱力学データとして A. Atkinson<sup>(17)</sup>のデータを追加して使用した。1号廃棄物埋施設ではセメント・ベントナイト相互作用だけでなく廃棄体に含まれる塩類による影響も評価するため、液相中のイオン濃度が高濃度になることが予想される。そのため、イオン強度が高い領域でも適用可能な活量補正モデルを用いる必要がある。ここでは、PHREEQCに同梱されている SIT モデルに対応した熱力学データベース(sit.dat)を用いた。

## 3. 解析結果

### (1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)

難透水性覆土の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋施設の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第5図に、1号廃棄物埋施設の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第6図に示す。また、3号廃棄物埋施設の鉱物組成と透水係数の分布図を第7図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第8図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第9図に示す。1号廃棄物埋施設においても同様に、鉱物組成と透水係数の分布図を第10図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第11図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第12図に示す。

3号廃棄物埋施設の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後には、セメント系

材料と接する面ではベントナイトが若干溶解することにより透水係数がわずかに上昇するものの、それより内側の領域ではベントナイトの変質は見られず透水係数も初期値を維持していた。一方で、岩盤側ではベントナイトの変質はごくわずかであり透水係数の上昇も見られなかった。1号廃棄物埋設施設のベントナイトの変質については、1,000年後の段階で、セメント系材料境界近傍のベントナイトが全溶解している層があった。セメント系材料由来のアルカリ成分の他に廃棄体に含まれる塩の影響を受け、3号廃棄物埋設施設の結果よりも早い段階からベントナイトの変質が見られた。

## (2) 難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合(ケース②)

難透水性覆土の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を0とし、単純に空隙率に比例するとしたモデル(数式4)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋設施設の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第13図に、1号廃棄物埋設施設の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第14図に示す。また、3号廃棄物埋設施設の鉱物組成と透水係数の分布図を第15図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第16図に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内のpH、Ca濃度分布図を第17図に示す。1号廃棄物埋設施設においても同様に、鉱物組成と透水係数の分布図を第18図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第19図に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内のpH、Ca濃度分布図を第20図に示す。

3号廃棄物埋設施設のベントナイトの変質については、1,000年後の段階では、(1)と同様、セメント境界近傍ではわずかに変質が見られる程度であった。

1号廃棄物埋設施設の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。

以上より、長期的な化学的影響を考慮した難透水性覆土の線量評価上の透水係数は、1,000年後において下記の値に基づき設定する(第8表)。

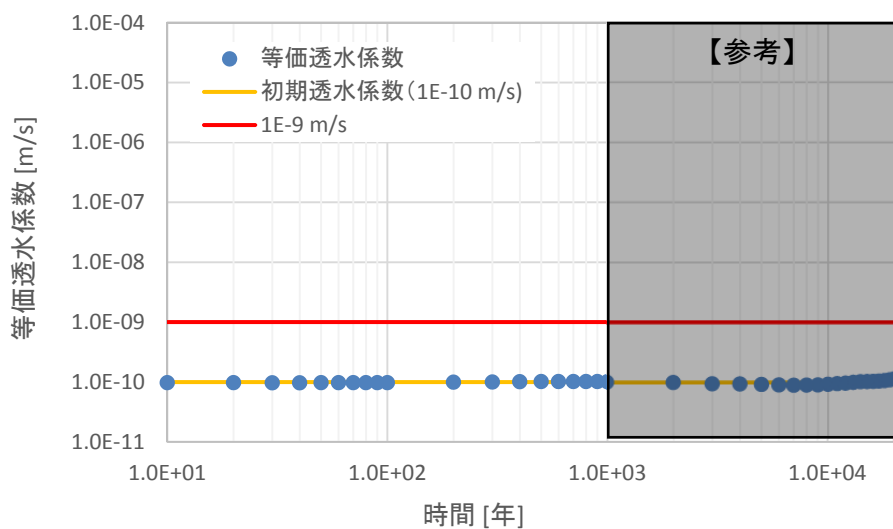
第 8 表 化学的影響の評価結果

	3号廃棄物埋施設 [m/s]		1号廃棄物埋施設 [m/s]	
	ケース①*1	ケース②*2	ケース①*1	ケース②*2
0年	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-10}$
1,000年後	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.02 \times 10^{-10}$	$1.42 \times 10^{-10}$	$1.84 \times 10^{-10}$

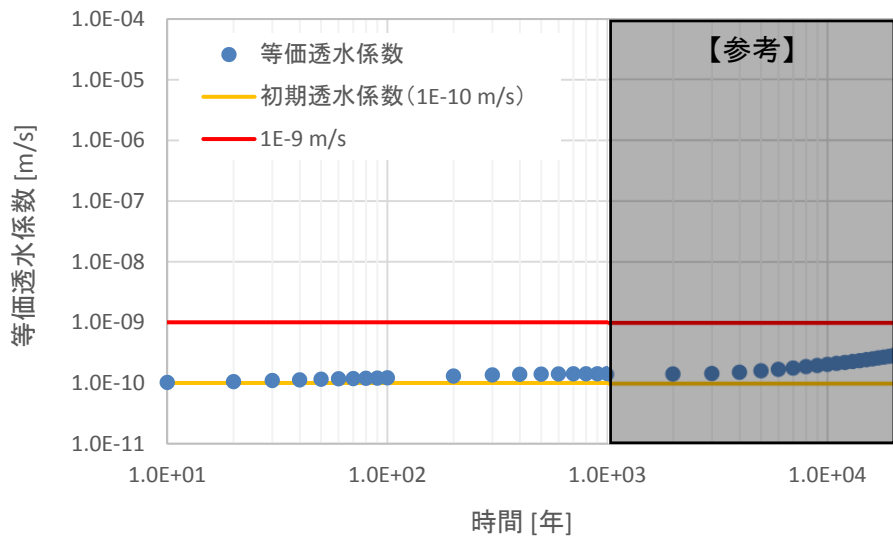
\*1 難透水性覆土の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式(数式 3)とする現実的な設定とした場合

\*2 難透水性覆土の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を 0 とし単純に空隙率に比例するという単純な設定(数式 4)とした場合

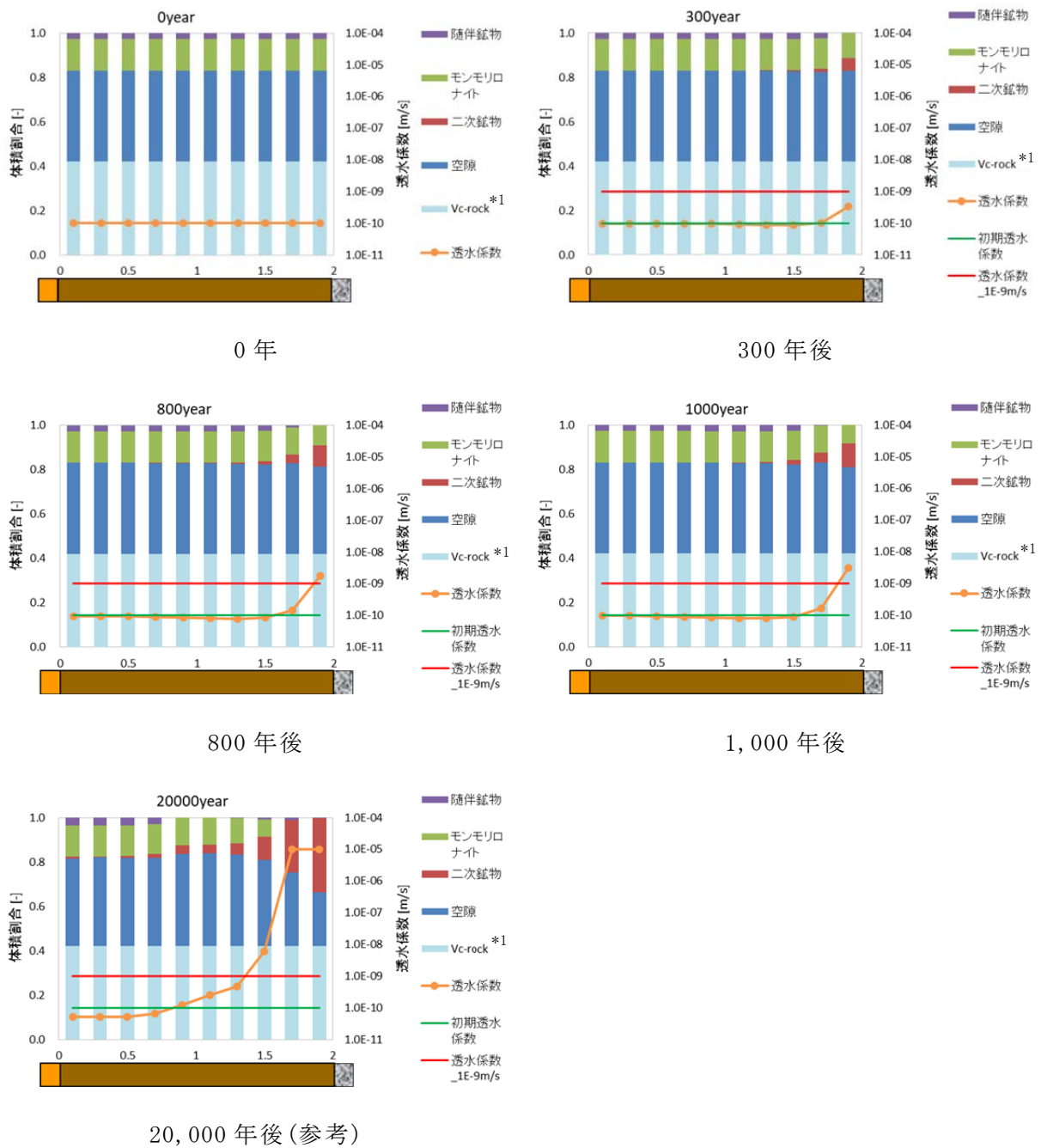




第5図 3号廃棄物埋施設のうち難透水性覆土の等価透水係数の結果  
(ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

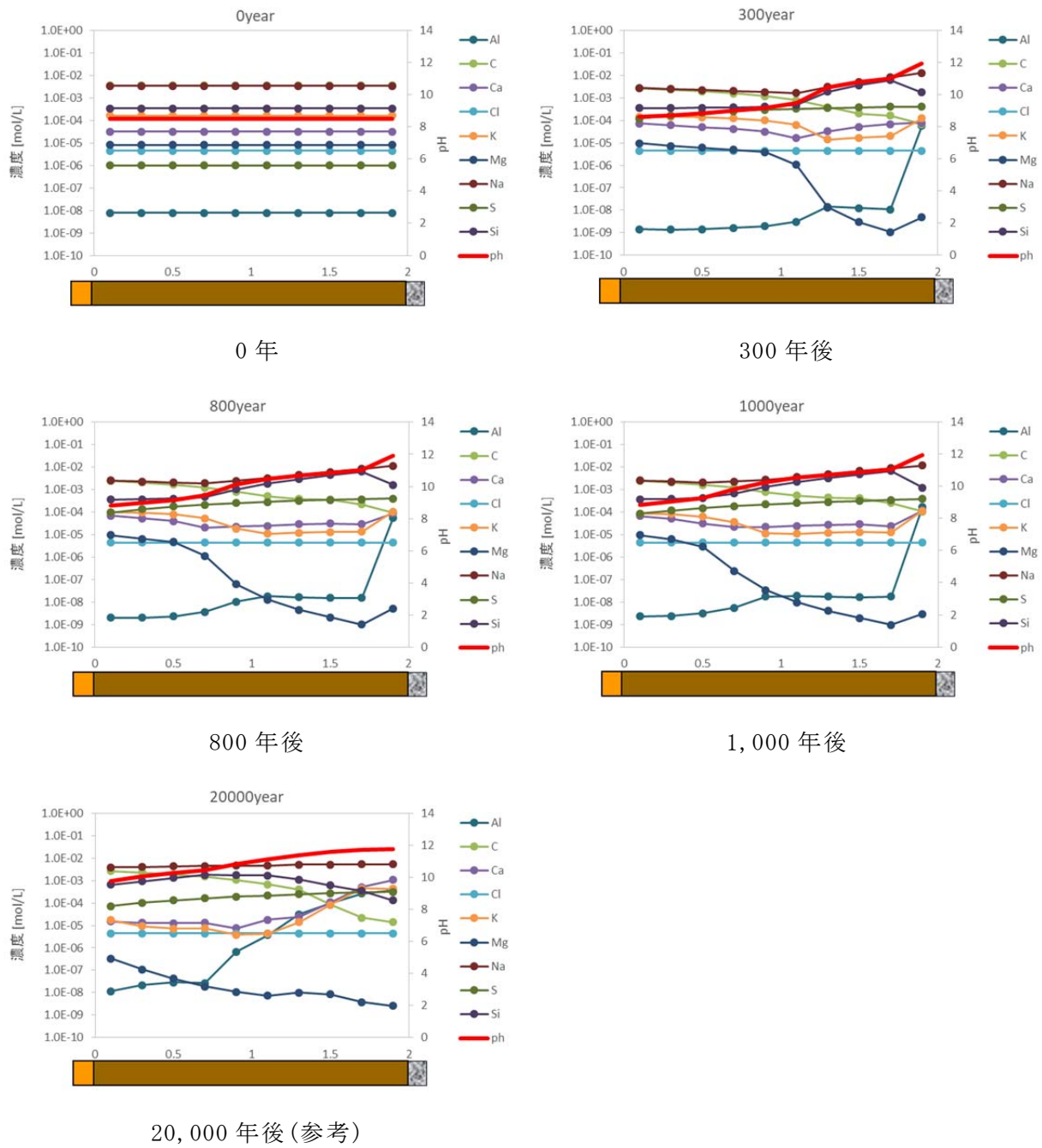


第6図 1号廃棄物埋施設のうち難透水性覆土の等価透水係数の結果  
(ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



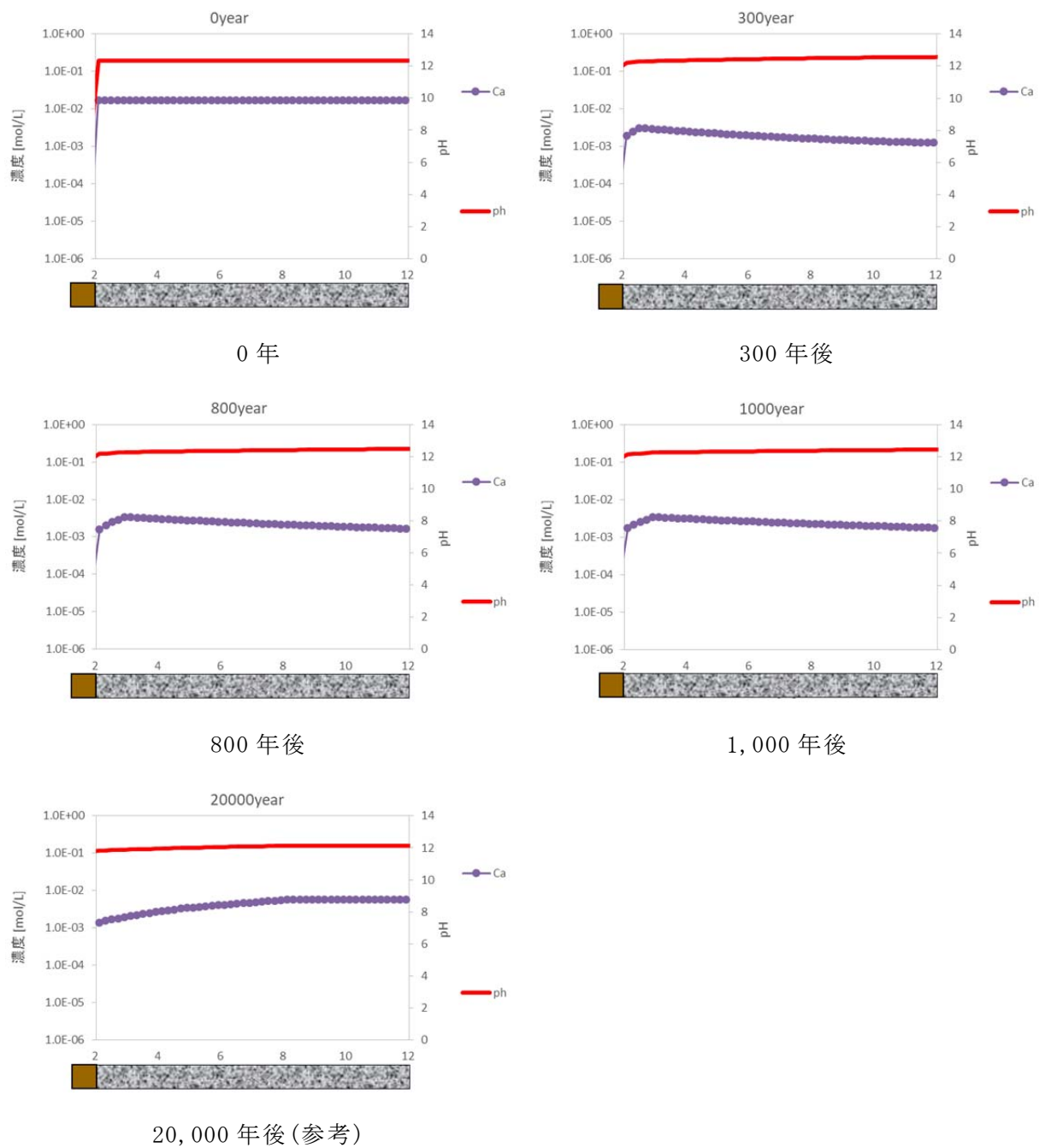
\*1 Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

第7図 3号廃棄物埋施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図  
(ケース①: 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

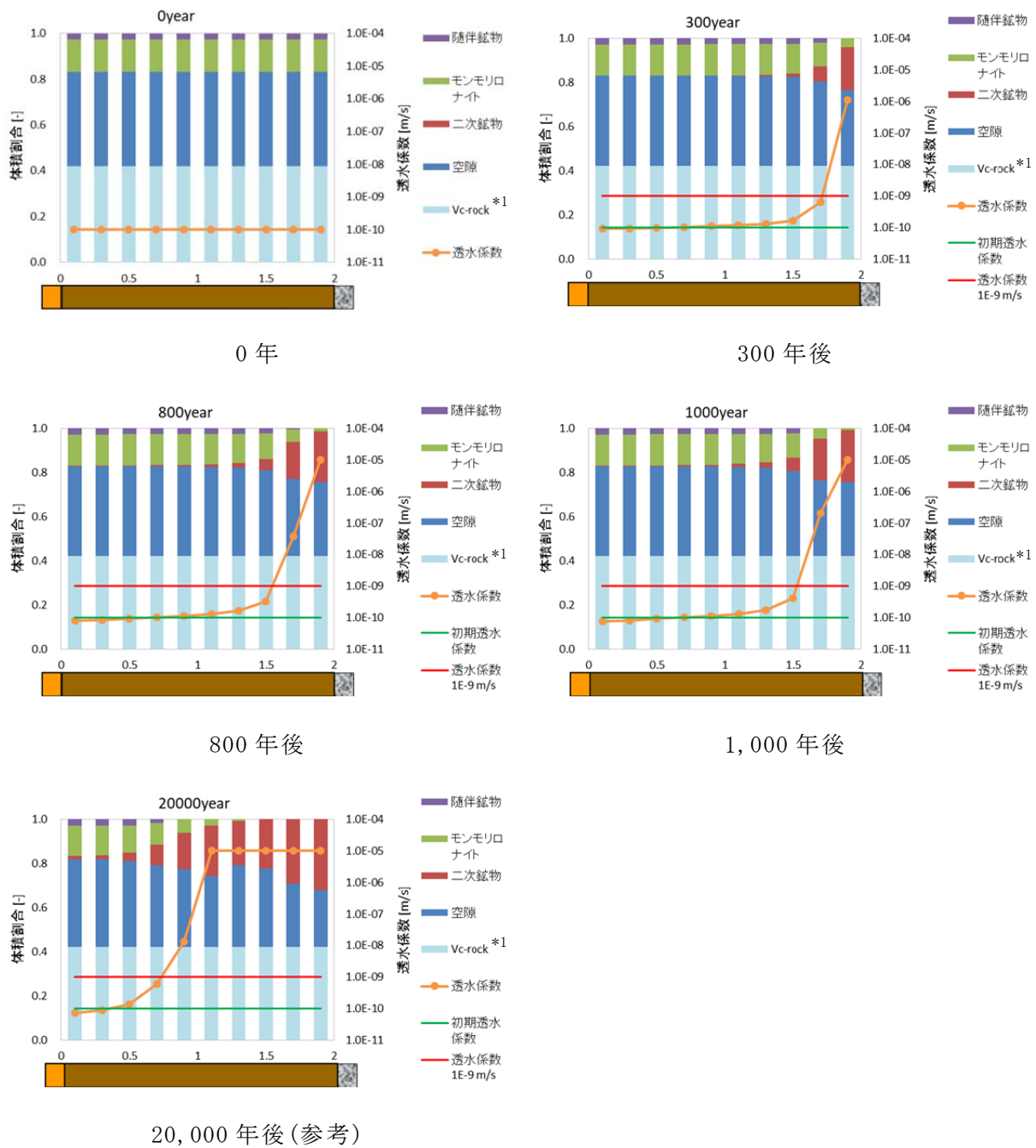


第 8 図 3 号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の液相組成の分布図

(ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

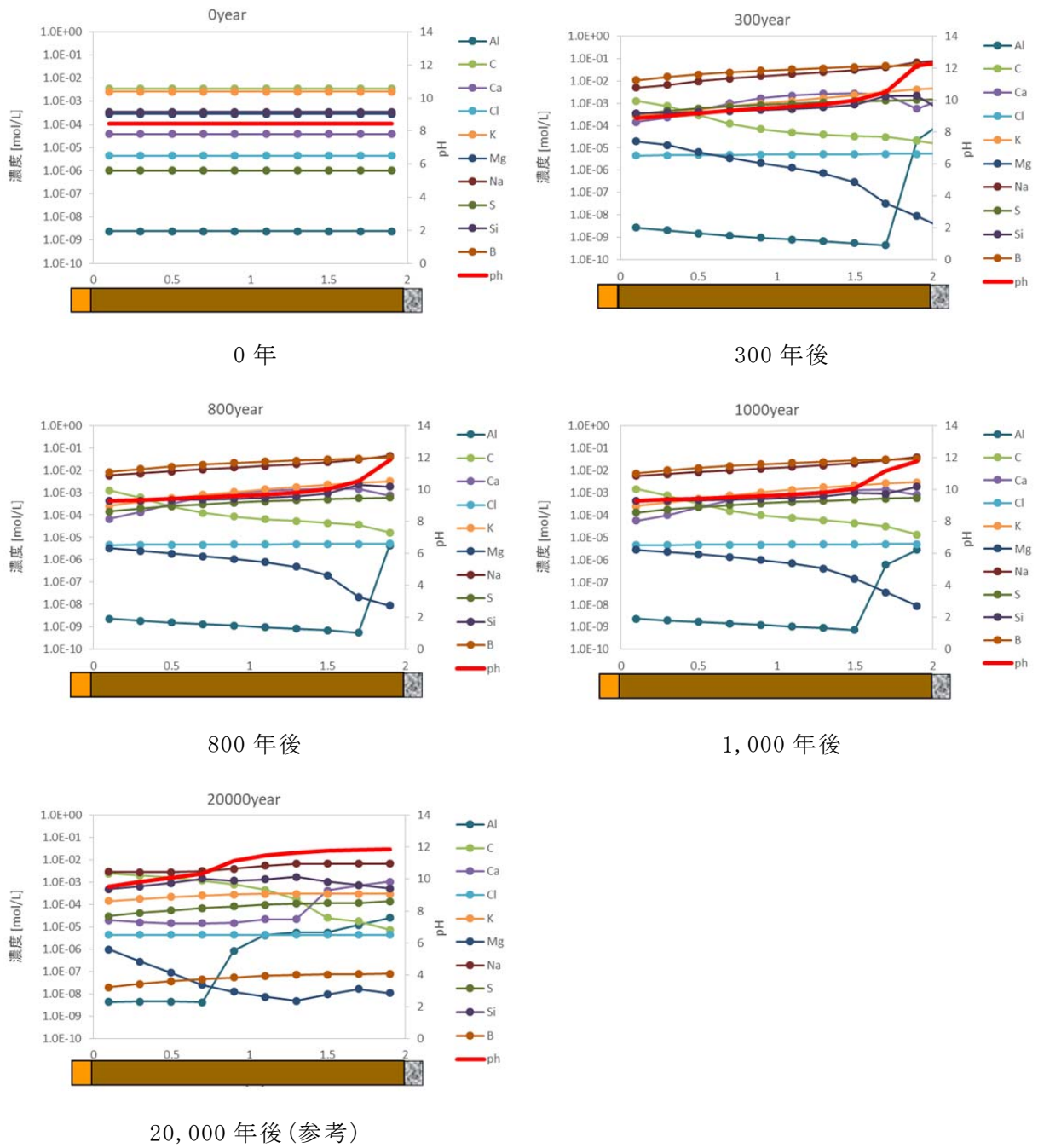


第9図 3号廃棄物埋設施設のうち埋設設備の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図  
 (ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

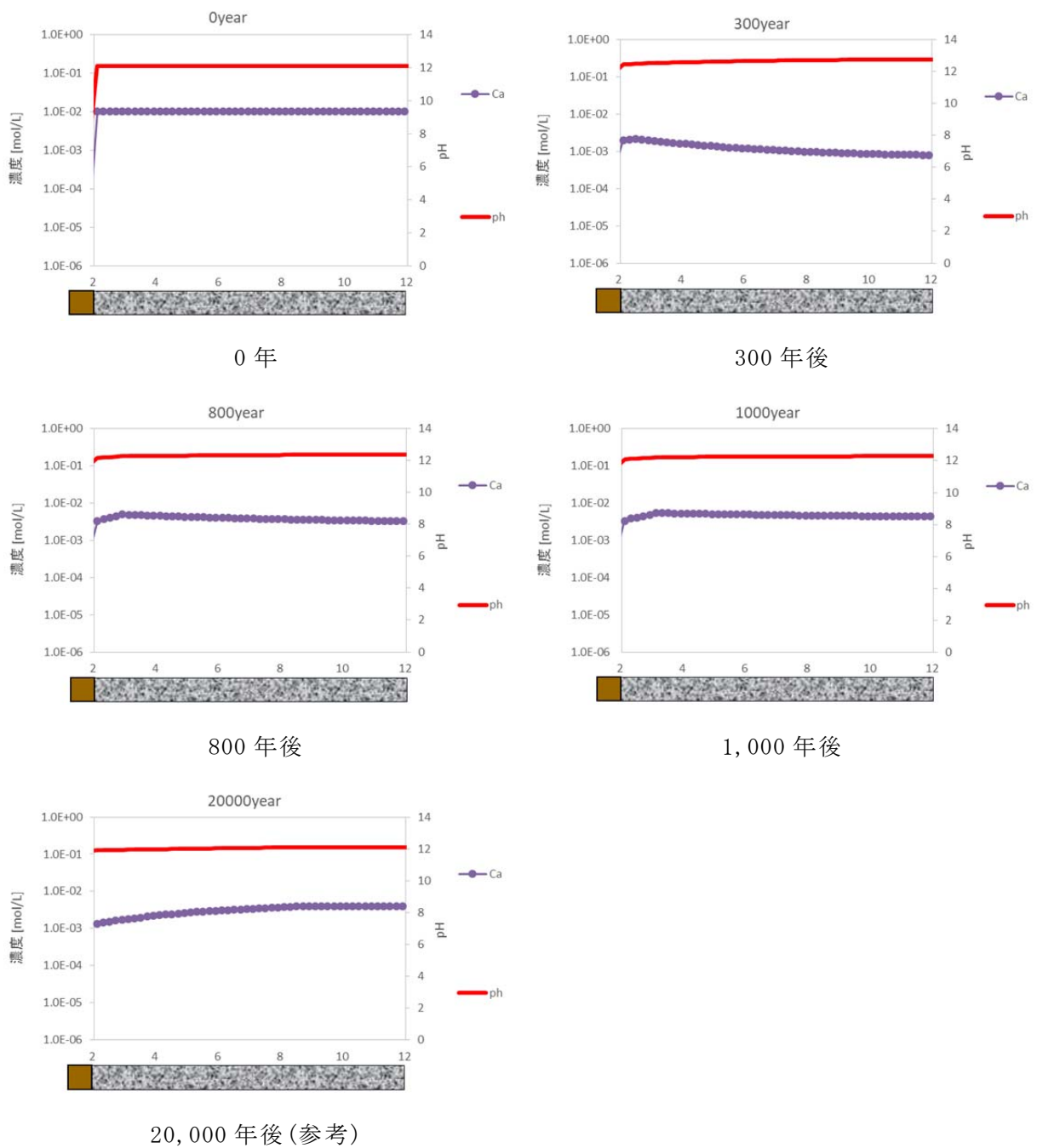


\*1 Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

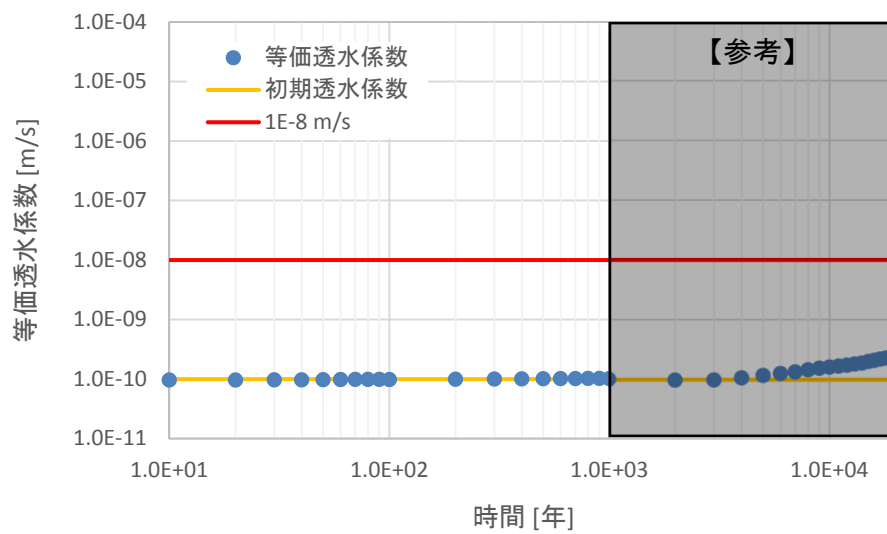
第 10 図 1 号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図  
(ケース① : 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



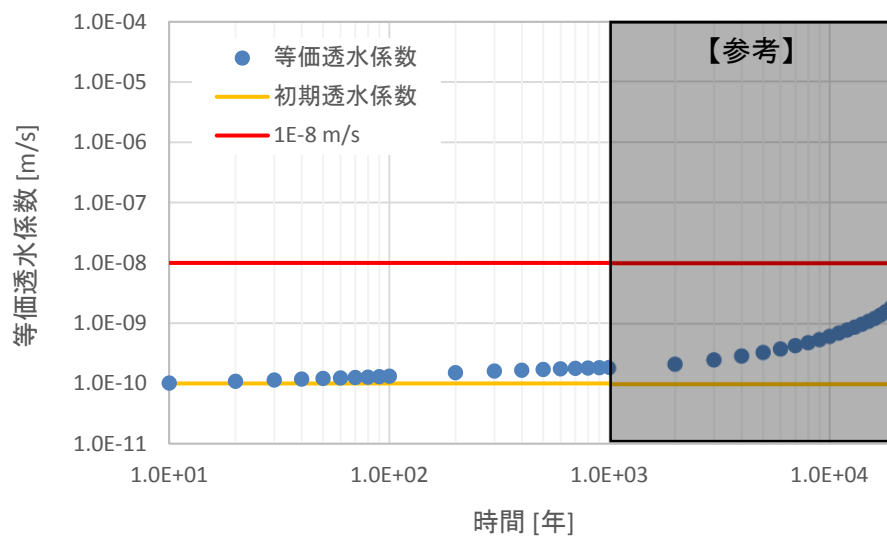
第 11 図 1 号廃棄物埋設施のうち難透水性覆土の液相組成の分布図  
 (ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



第 12 図 1 号廃棄物埋設施設のうち埋設設備の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図  
 (ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

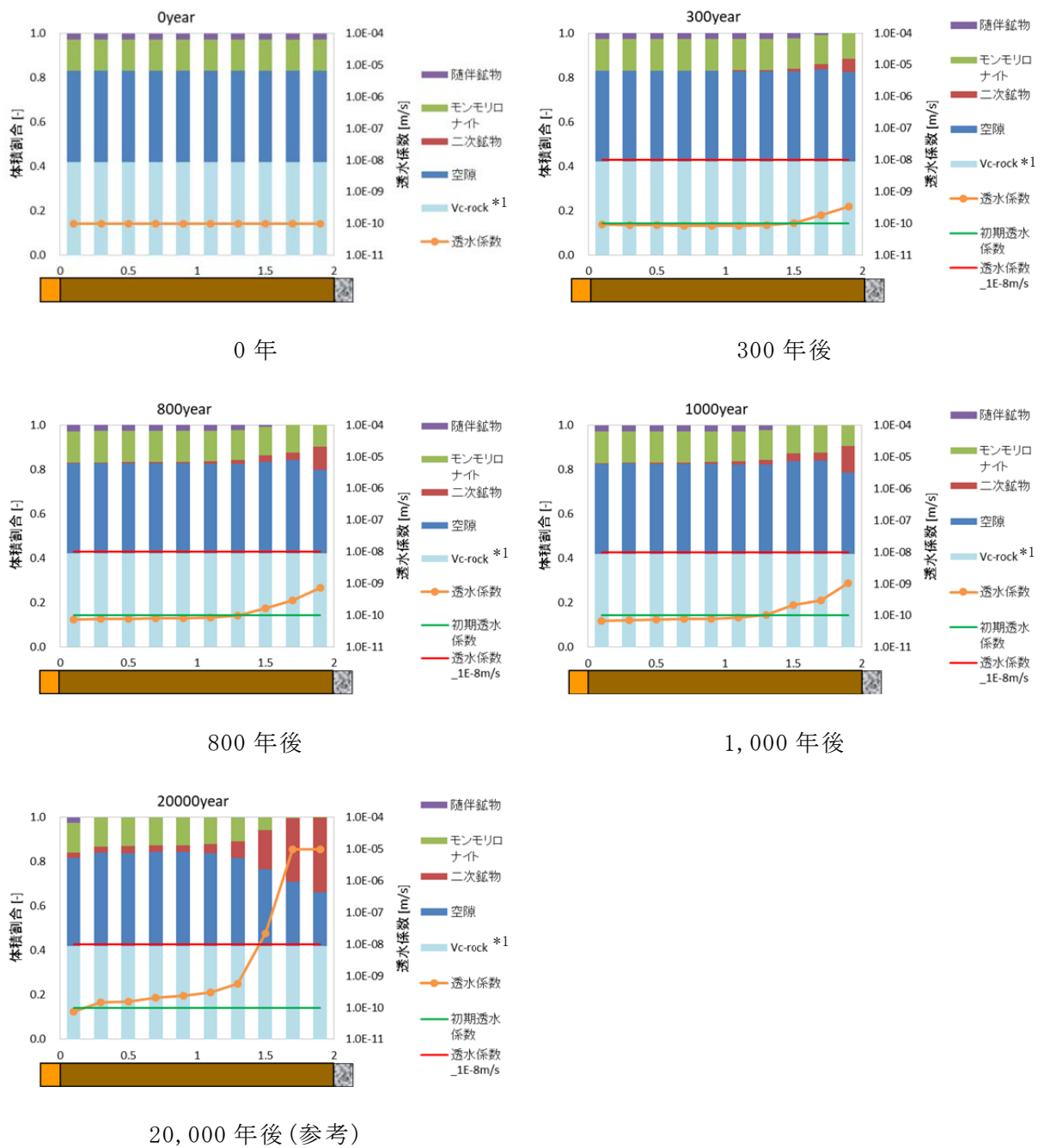


第 13 図 3号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の等価透水係数の結果  
 (ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



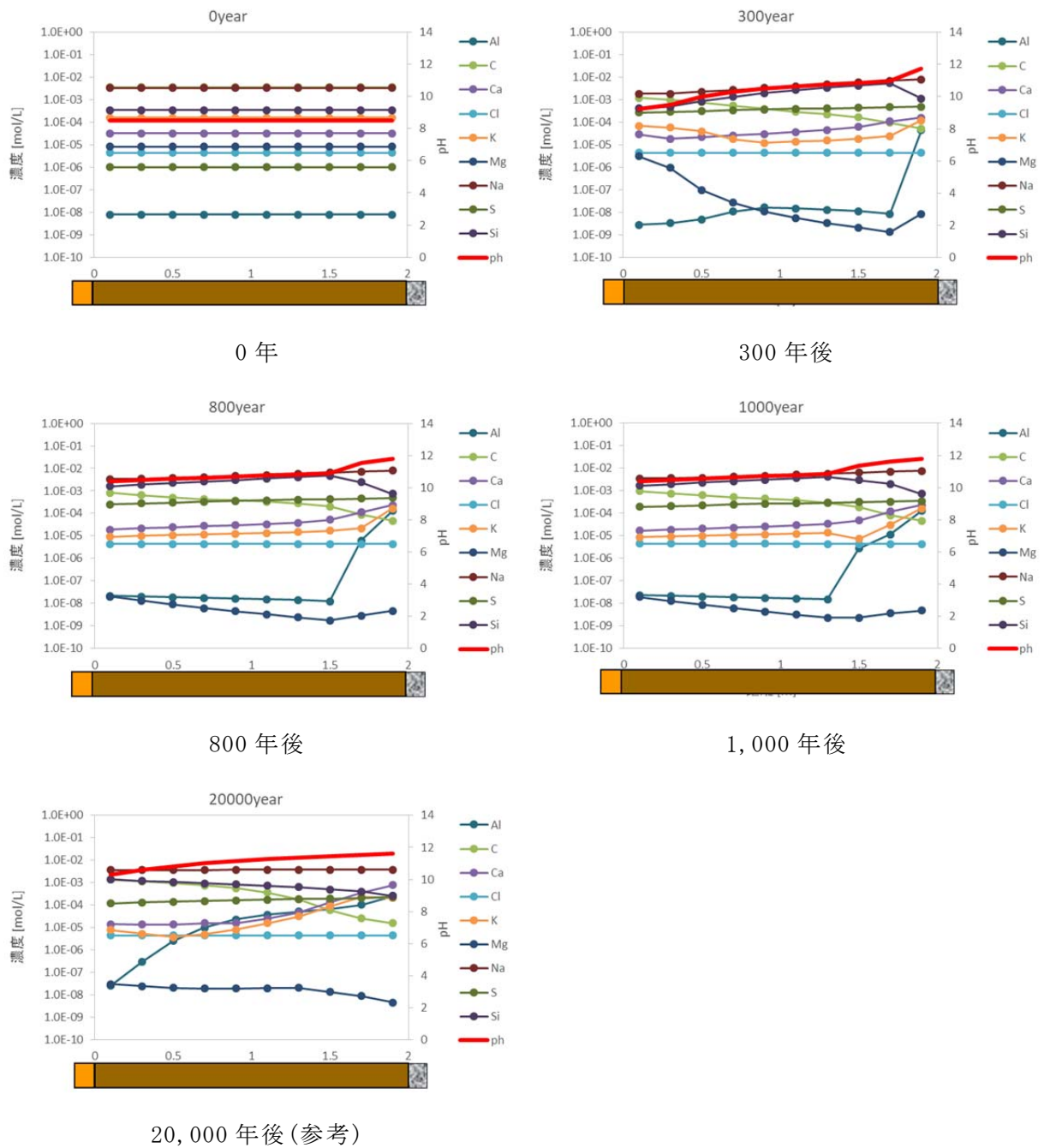
第 14 図 1号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の等価透水係数の結果  
 (ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



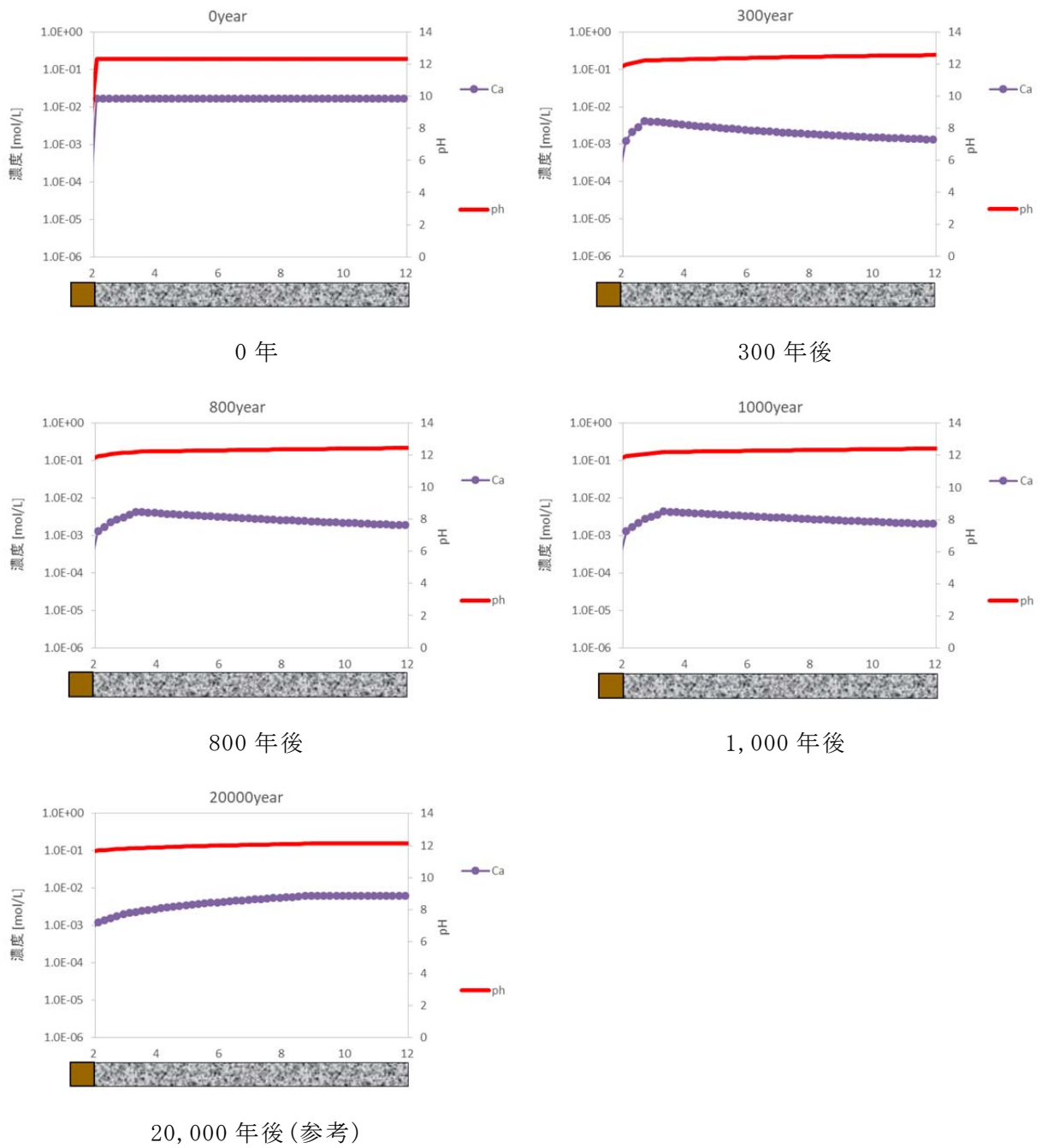


\*1 Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

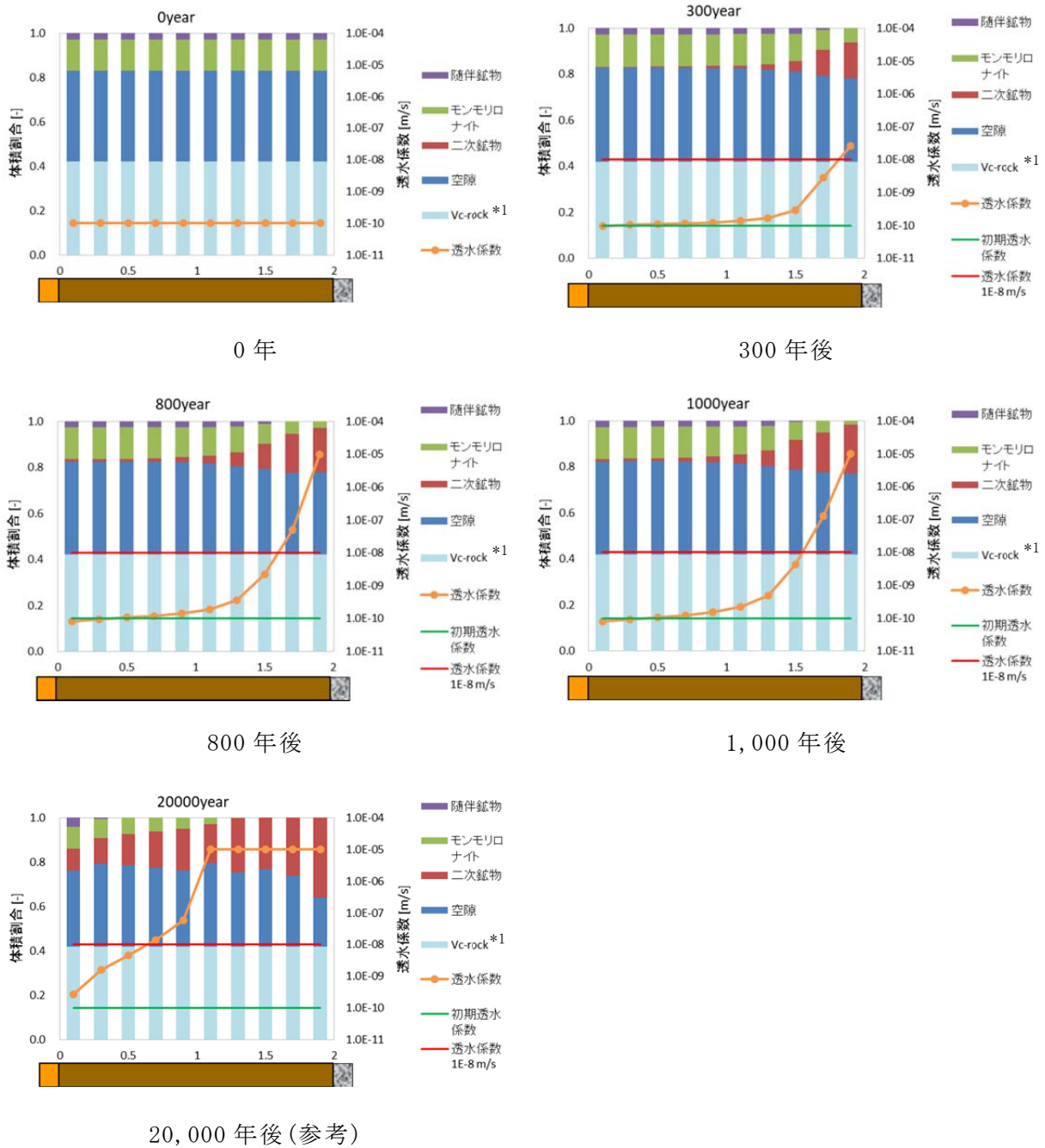
第 15 図 3 号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図  
(ケース② : 難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



第 16 図 3 号廃棄物埋設施のうち難透水性覆土の液相組成の分布図  
 (ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)

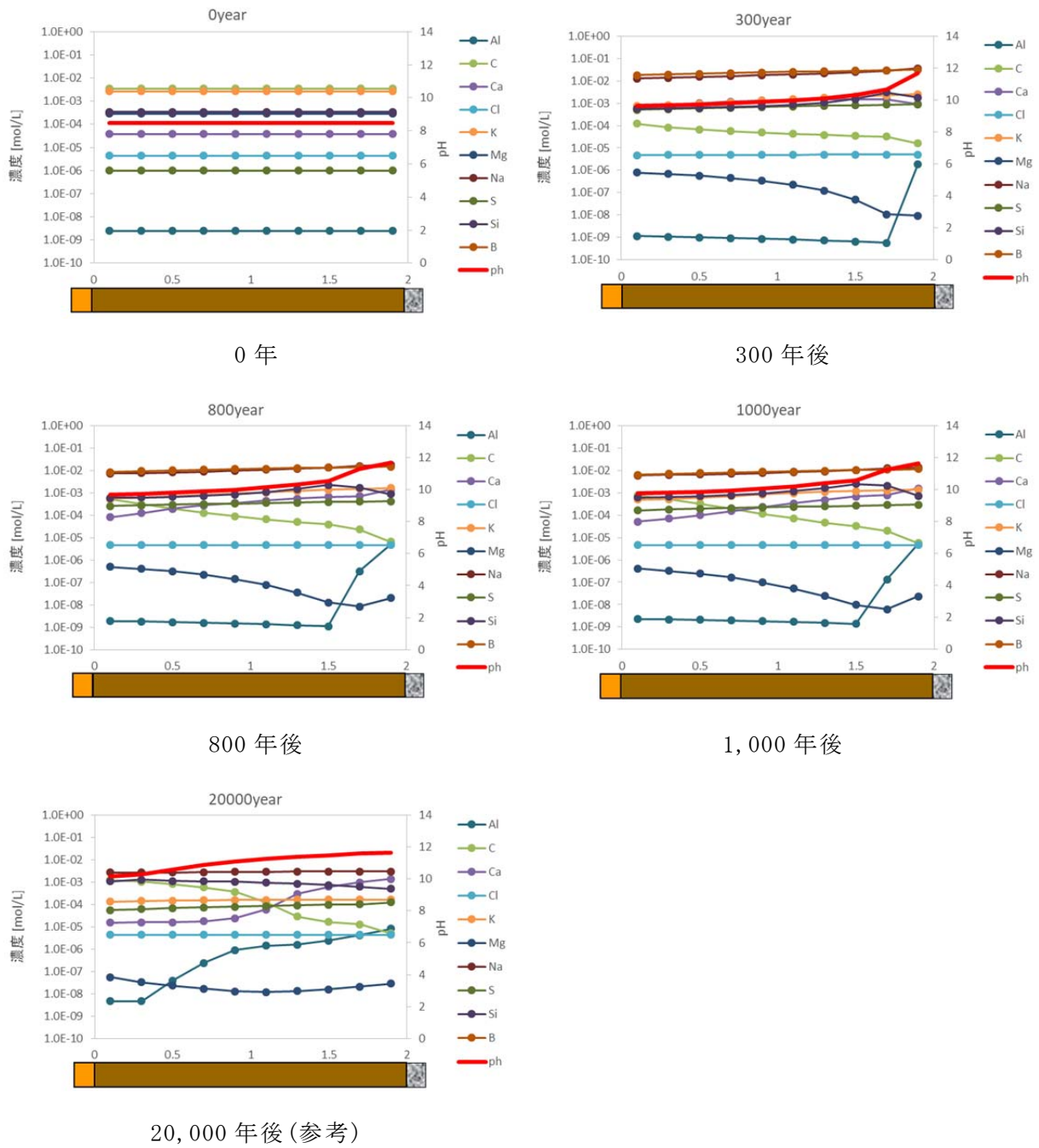


第 17 図 3 号廃棄物埋設施設のうち埋設設備の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図  
 (ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)

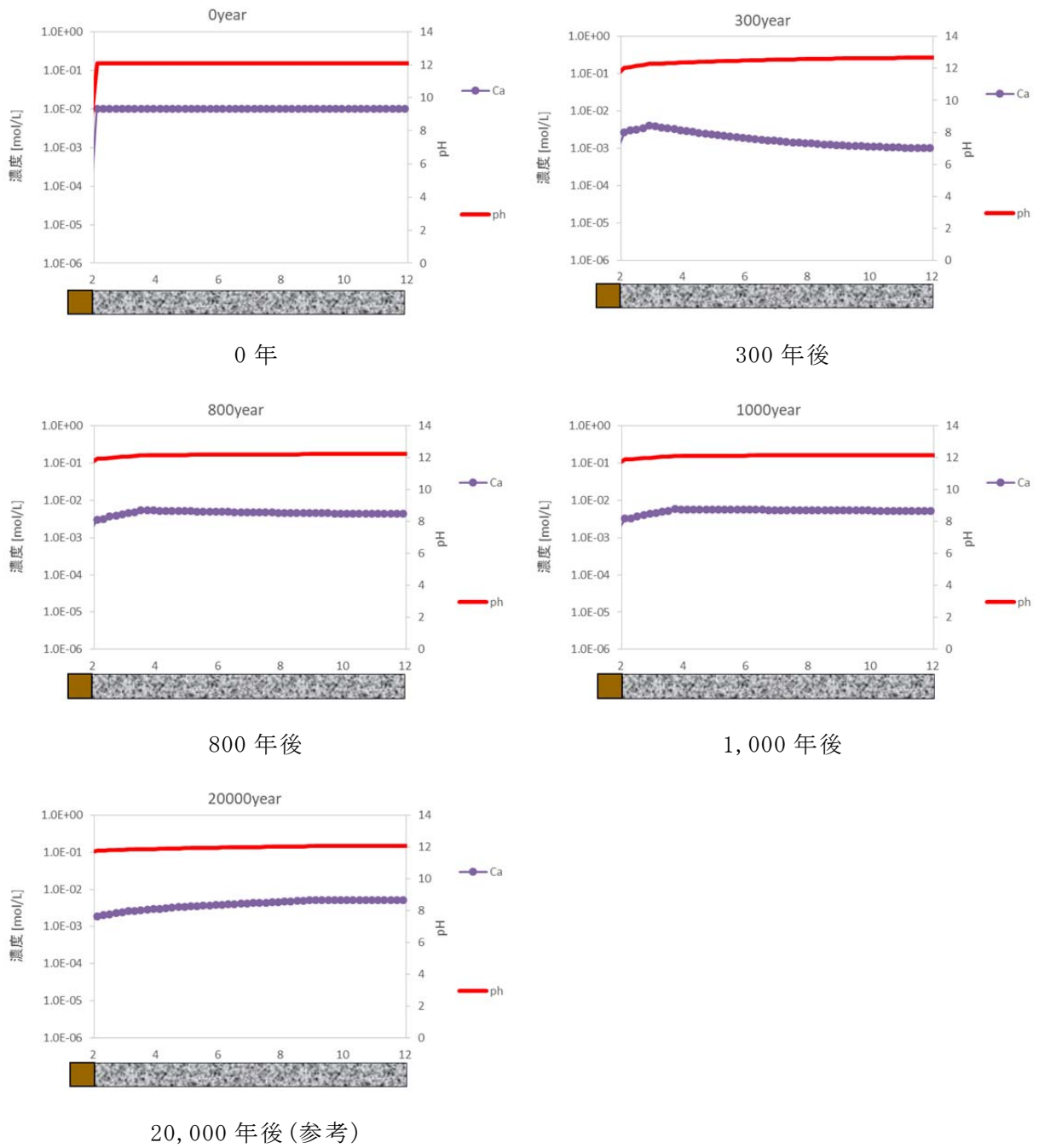


\*1 Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

第 18 図 1 号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図  
(ケース② : 難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



第 19 図 1 号廃棄物埋設施設のうち難透水性覆土の液相組成の分布図  
(ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



第 20 図 1 号廃棄物埋設施設のうち埋設設備の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図  
 (ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)

#### 4. 参考文献

- (1) 伊藤弘之、三原守弘(2005)：ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式、JNC TN8400 2005-029
- (2) Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (1999): User's guide to PHREEQC (ver. 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
- (3) Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA
- (4) Diederik JACQUES, Lian WANG, Evelien MARTENS and Dirk MALLANTS(2012): Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R
- (5) Mikazu Yui, Hiroshi Sasamoto, Randolph C Arthur(1999): Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC TN8400 99-030
- (6) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005)、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
- (7) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05
- (8) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.64, No.15, pp. 2701-2717
- (9) (独)日本原子力研究開発機構(2009)：TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 20 年度報告－JAEA-Research 2009-046
- (10) Yokoyama, S. et al. (2005): Atomic force microscopy study of montmorillonite dissolution under highly alkaline conditions. *Clays and Clay Minerals* 53(2),

147-154

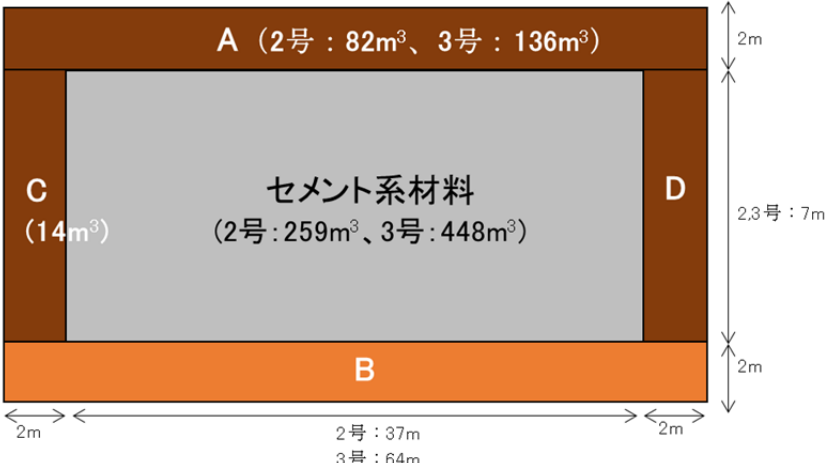
- (11) 原子力発電環境整備機構(2007):処分システムに求められる閉鎖性能の考え方ー処分場パネル規模の水理に関する試解析ー、NUMO-TR-06-01
- (12) Morihiro MIHARA, Ryouichi SASAKI(2005):Radio-nuclides Migration DATasets(RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027
- (13) (独)日本原子力研究開発機構(2015):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 報告書
- (14) 日本化学会(2004):化学便覧 基礎編 改定5版、丸善、東京、p-II.64
- (15) 小田治恵、佐々木良一、David Savage、Randolph C. Arthur、本田明(2005):緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ、JNC TN8400 2005-020
- (16) Randolph C. Arthur et al. (2005): Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010
- (17) A. Atkinson et al. (1991): Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O gels at 80 °C, DoE, DoE-HMIP-RR-91-045



# パラメータ設定根拠集

## 目 次

1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋設施設) .....	1
2. 解析のモデル形状(1号廃棄物埋設施設) .....	2
3. 地下水組成 .....	3
4. 難透水性覆土の初期鉱物組成 .....	5
5. 難透水性覆土の初期空隙率 .....	6
6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設施設) .....	7
7. セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設施設) .....	9
8. 廃棄体の塩量 .....	10
9. セメント系材料の初期空隙率 .....	11
10. 難透水性覆土の透水係数 .....	12
11. 難透水性覆土の拡散係数 .....	13
12. セメント系材料の拡散係数 .....	14
13. モンモリロナイトの溶解速度 .....	14
14. 二次鉱物 .....	15
15. 塩影響を考慮した二次鉱物(1号廃棄物埋設施設) .....	16

パラメータ	1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋施設)
設定値	難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 32m
設定根拠	<p>難透水性覆土のモデル長さは申請書に記載されている値から設定した。</p> <p>セメント系材料のモデル長さについて、3号廃棄物埋施設の形状を想定し、埋設設備の一基当たりの外形寸法の幅(64m)の半分の長さを設定した。なお、2号廃棄物埋施設は、3号廃棄物埋施設と同種の廃棄体及び類似施設であり埋設設備の一基当たりの外形寸法の長さの観点*1で3号廃棄物埋施設の解析結果で代表する。</p> <p>・3号廃棄物埋施設 埋設設備の一基当たりの外形寸法 64m×37m×7m (2号廃棄物埋施設 埋設設備の一基当たりの外形寸法 37m×36m×7m)</p> <p>*1 セメント系材料のモデル長さを埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さに設定したことについて補足する。3号及び2号廃棄物埋施設の鉛直断面概念図を下図に示す。中心のセメント系材料のアルカリ成分が、周囲の難透水性覆土(A、C、D)及び岩盤(B)へ移動していく現象に対して、難透水性覆土へのアルカリ成分の影響を大きく見積もるため、上面Aと側面Cのみにアルカリ成分が全て移動し側面(D)及び岩盤(B)への移行はないとしたケースについて考える。難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2号廃棄物埋施設で2.7、3号廃棄物埋施設では3.0である。これより、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、2号廃棄物埋施設で5.4m、3号廃棄物埋施設では6.0mとなる。</p> <p>本解析では、32mを設定しており、覆土に対して十分な長さといえる。</p>  <p>3号及び2号廃棄物埋施設の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ1mとする)</p>
参考文献	

パラメータ	2. 解析のモデル形状(1号廃棄物埋施設)
設定値	難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 12.2m
設定根拠	<p>難透水性覆土のモデル長さは申請書に記載されている値から設定した。</p> <p>セメント系材料のモデル長さについて、1号廃棄物埋施設の形状を想定し、埋設設備の一基当たりの外形寸法の幅(24.4m)の半分の長さを設定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1号廃棄物埋施設 埋設設備の一基当たりの外形寸法 24.4m×24.4m×6.2m</li> </ul> <p>セメント系材料のモデル長さを埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さに設定したことについて補足する。</p> <p>1号廃棄物埋施設の鉛直断面概念図を下図に示す。「1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋施設)」と同様にして、難透水性覆土へのアルカリ成分の影響を大きく見積もるケースについて考える。</p> <p>難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2.1である。これより、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、4.2mとなる。本解析では、12.2mを設定しており、覆土に対して十分な長さといえる。</p> <div data-bbox="475 1133 1292 1572" data-label="Diagram"> <p>この図は、埋設設備の鉛直断面を示しています。中央には「セメント系材料 (144m³)」が配置されています。その周囲には「難透水性覆土」が設けられており、その体積は「A(56m³)」、「B」、「C(12m³)」、「D」に分かれています。図の寸法は、幅が「1号: 24m」、高さが「1号: 6m」です。また、セメント系材料のモデル長さは「12.2m」であることが示されています。</p> </div> <p>1号廃棄物埋施設の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ1mとする)</p>
参考文献	

パラメータ	3. 地下水組成
設定値	<p>pH 8.46</p> <p>Na <math>3.22 \times 10^{-3} \text{mol/L}^{*1}</math></p> <p>K <math>5.79 \times 10^{-5} \text{mol/L}</math></p> <p>Ca <math>1.01 \times 10^{-4} \text{mol/L}</math></p> <p>Mg <math>6.50 \times 10^{-5} \text{mol/L}</math></p> <p>C <math>3.54 \times 10^{-3} \text{mol/L}</math></p> <p>S <math>1.00 \times 10^{-6} \text{mol/L}</math></p> <p>Cl <math>4.40 \times 10^{-6} \text{mol/L}</math></p> <p>Al <math>3.61 \times 10^{-7} \text{mol/L}</math></p> <p>Si <math>3.40 \times 10^{-4} \text{mol/L}</math></p> <p>*1 PHREEQCにてチャージバランスを保つように計算して設定</p>
設定根拠	<p>文献<sup>(1)</sup>で検討されているモデル地下水のうち、酸化性淡水の地下水(FOHP)を設定した。</p> <p>セメント系材料と難透水性覆土の化学反応に関する重要な成分(pH、Na、K、Ca、Mg、C、S、Cl、Al、Si)に着目し、それ以外の元素については考慮しないこととした。上記の成分を抽出し、Naでチャージバランスをとった値を用いることとした。</p> <p>地下水組成が解析に与える影響</p> <p>廃棄物埋施設周辺の淡水地下水は、廃棄物埋施設で用いられるセメント系材料と反応すると、セメント系材料中の成分が溶脱し、イオン強度が高く、高アルカリ性の組成になると考えられる。4種類の地下水組成を対象にセメント系材料との平衡計算を行い、各地下水組成の変化を比較した。セメント系材料の組成は「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋施設)」を参照した。</p>

検討した地下水の組成

	六ヶ所水質結果_最小	六ヶ所水質結果_中間の値	六ヶ所水質結果_最大	FOHP
pH	5.30	6.80	8.30	8.46
Na	$3.60 \times 10^{-4}$ *1	$6.40 \times 10^{-4}$ *1	$1.10 \times 10^{-3}$ *1	$3.22 \times 10^{-3}$ *1
K	$1.30 \times 10^{-5}$	$7.80 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{-4}$	$5.79 \times 10^{-5}$
Ca	$2.50 \times 10^{-6}$	$9.10 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-4}$
Mg	$4.10 \times 10^{-6}$	$8.00 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-4}$	$6.50 \times 10^{-5}$
C	$9.20 \times 10^{-5}$	$4.70 \times 10^{-4}$	$8.50 \times 10^{-4}$	$3.54 \times 10^{-3}$
S	$1.00 \times 10^{-5}$	$1.20 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-6}$
Cl	$3.60 \times 10^{-4}$	$4.70 \times 10^{-4}$	$5.70 \times 10^{-4}$	$4.40 \times 10^{-6}$
Al	—	—	—	$3.61 \times 10^{-7}$
Si	—	—	—	$3.40 \times 10^{-4}$

(濃度の単位は mol/L)

\*1 Na 濃度をチャージバランスにて設定

結果を以下に示す。地下水の組成が変化しても、セメント系材料と反応した地下水の組成に大きな違いは見られなかった。したがって、淡水系の地下水組成の変化は、本解析の結果に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

セメント系材料と反応した地下水の組成

	六ヶ所水質結果_最小	六ヶ所水質結果_中間の値	六ヶ所水質結果_最大	FOHP
pH	12.70	12.69	12.69	12.69
Na	$3.46 \times 10^{-2}$	$3.49 \times 10^{-2}$	$3.53 \times 10^{-2}$	$3.74 \times 10^{-2}$
K	$2.62 \times 10^{-2}$	$2.63 \times 10^{-2}$	$2.64 \times 10^{-2}$	$2.63 \times 10^{-2}$
Ca	$3.78 \times 10^{-3}$	$3.95 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-3}$	$5.22 \times 10^{-3}$
Mg	$1.83 \times 10^{-10}$	$1.86 \times 10^{-10}$	$1.87 \times 10^{-10}$	$1.99 \times 10^{-10}$
C	$9.21 \times 10^{-5}$	$4.70 \times 10^{-4}$	$8.50 \times 10^{-4}$	$3.34 \times 10^{-3}$
S	$2.28 \times 10^{-5}$	$2.27 \times 10^{-5}$	$2.27 \times 10^{-5}$	$2.25 \times 10^{-5}$
Cl	$3.60 \times 10^{-4}$	$4.70 \times 10^{-4}$	$5.70 \times 10^{-4}$	$4.40 \times 10^{-6}$
Al	$3.52 \times 10^{-3}$	$3.51 \times 10^{-3}$	$3.51 \times 10^{-3}$	$3.47 \times 10^{-3}$
Si	$3.51 \times 10^{-6}$	$3.50 \times 10^{-6}$	$3.50 \times 10^{-6}$	$3.46 \times 10^{-6}$

(濃度の単位は mol/L)

参考文献

(1) Mikazu Yui, Hiroshi Sasamoto, Randolph C Arthur (1999) :Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment(PA) Report, JNC TN8400 99-030

パラメータ	4. 難透水性覆土の初期鉱物組成
設定値	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ベントナイト(クニボンド)</li> <li>Na 型モンモリロナイト    0.33mol/L_water</li> <li>Ca 型モンモリロナイト    1.94mol/L_water</li> <li>K 型モンモリロナイト    0.06mol/L_water</li> <li>Mg 型モンモリロナイト    0.23mol/L_water</li> <li>カルセドニ                2.94mol/L_water</li> </ul>
設定根拠	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ベントナイト(クニボンド)の配合率:30wt%</li> <li>• ベントナイト(クニボンド)の鉱物組成<sup>(1)</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>モンモリロナイト    80%</li> <li>石英                5%</li> <li>クリストバライト    15%</li> </ul> <p>(解析の都合上、クリストバライトと比べ石英は安定な鉱物のため、解析では反応しない鉱物として設定した。また、クリストバライトは熱力学データベースに存在しないため、カルセドニとして設定した。)</p> </li> <li>• 乾燥密度：1.61Mg/m<sup>3</sup>(室内試験結果)</li> <li>• 初期空隙率：5. 難透水性覆土の初期空隙率を参照</li> <li>• 混合砂は反応しないものとした。(シリカ成分は、高アルカリ側の溶存化学種の加水分解により pH 緩衝性を有する。混合砂には多くのシリカ成分が含まれるが、本解析では緩衝性を無視するため反応しないものとした。)</li> <li>• クニボンドの陽イオン組成<sup>(2)</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>NaZ        10.3meq/100g<sup>*1</sup></li> <li>CaZ<sub>2</sub>     60.1meq/100g<sup>*1</sup></li> <li>KZ         1.9meq/100g</li> <li>MgZ<sub>2</sub>     7.2meq/100g</li> </ul> </li> </ul> <p>*1 初期透水係数が <math>1.0 \times 10^{-10}</math> m/s となるように調整した。</p>
参考文献	<p>(1) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘(1998)：カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性－膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数－, PNC TN8410 98-021</p> <p>(2) 直井優、小峰秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴(2005)：各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響、土木学会論文集 No. 785/III-70, 39-49</p>

パラメータ	5. 難透水性覆土の初期空隙率
設定値	0.41
設定根拠	空隙率の設定値 40.6%(乾燥密度 $1.61\text{Mg}/\text{m}^3$ より算出される値)を丸めて 0.41 と設定した。
参考文献	



パラメータ	6. セメント系材料の初期鉱物組成 (3号廃棄物埋設施設)																																																			
設定値	C-S-H ゲル	9.51mol/L_water																																																		
	ハイドロタルサイト	0.33mol/L_water																																																		
	エトリンサイト	0.04mol/L_water																																																		
	ギブサイト	0.94mol/L_water																																																		
	NaOH	0.03mol/L_water																																																		
	KOH	0.03mol/L_water																																																		
設定根拠	<p>3号廃棄物埋設施設の充填モルタルの候補配合を参照した。参照したセメントの配合では、高炉スラグ微粉末が多く配合されていることから普通ポルトランドセメントと比べ Si 成分が多い。そこで、初期鉱物組成の算定方法は、文献<sup>(1)</sup>に記載されているフライアッシュ高含有シリカフェームセメント (HFSC) の初期鉱物組成の算定方法を参照した。</p> <p>なお、骨材 (砕砂、陸砂) は反応しないものとした。</p> <p style="text-align: center;">3号廃棄物埋設施設の充填モルタルの候補配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">単位量 [kg/m<sup>3</sup>]</th> </tr> <tr> <th colspan="2">結合材 (C)</th> <th colspan="2">細骨材 (S)</th> </tr> <tr> <th>中庸熱ポルトランドセメント</th> <th>高炉スラグ微粉末</th> <th>砕砂</th> <th>陸砂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>127</td> <td>295</td> <td>440</td> <td>1026</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">中庸熱ポルトランドセメントの化学組成<sup>(1)</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SiO<sub>2</sub></th> <th>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></th> <th>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></th> <th>CaO</th> <th>MgO</th> <th>SO<sub>3</sub></th> <th>Na<sub>2</sub>O</th> <th>K<sub>2</sub>O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23.3</td> <td>3.80</td> <td>3.90</td> <td>63.3</td> <td>0.90</td> <td>2.40</td> <td>0.30</td> <td>0.35</td> </tr> </tbody> </table> <p>(単位は wt%)</p> <p style="text-align: center;">高炉スラグ微粉末の化学組成</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SiO<sub>2</sub></th> <th>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></th> <th>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></th> <th>CaO</th> <th>MgO</th> <th>SO<sub>3</sub></th> <th>Na<sub>2</sub>O</th> <th>K<sub>2</sub>O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34.2</td> <td>14.9</td> <td>0.84</td> <td>42.0</td> <td>6.09</td> <td>0.02</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table> <p>(単位は wt%)</p>				単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				結合材 (C)		細骨材 (S)		中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂	127	295	440	1026	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	23.3	3.80	3.90	63.3	0.90	2.40	0.30	0.35	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	34.2	14.9	0.84	42.0	6.09	0.02	0.00	0.00
単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]																																																				
結合材 (C)		細骨材 (S)																																																		
中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂																																																	
127	295	440	1026																																																	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O																																													
23.3	3.80	3.90	63.3	0.90	2.40	0.30	0.35																																													
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O																																													
34.2	14.9	0.84	42.0	6.09	0.02	0.00	0.00																																													

	<p>・水和鉱物量の算定方法<sup>(2)</sup></p> <p>(1) SO<sub>3</sub>の全量をエトリンサイトとして配分する。</p> <p>(2) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の全量を C<sub>3</sub>FH<sub>6</sub>として配分する。(ただし、C<sub>3</sub>FH<sub>6</sub>は反応しないものとした。)</p> <p>(3) MgOの全量をハイドロタルサイトとして配分する。</p> <p>(4) SiO<sub>2</sub>量及び残りの CaO 量に対し、これらの両成分が完全に消費されるような2種類の連続した Ca/Si 比を持つ C-S-H ゲルを設定する。 残りの Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量から C-S-Hゲルに取り込まれる Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量を下式に従って差し引く。その後、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が更に余剰するようであれば残りの Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>をギブサイトとして配分する。</p> <p>C-S-Hゲルに取り込まれる Al 量の算定式</p> $[Al/Ca \text{ モル比}] = 0.2723 \times [Si/Ca \text{ モル比}] - 0.0692$ <p>(5) Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O はそれぞれ NaOH、KOH として配分する。</p> <p>・初期空隙率：9. 参照</p>
参考文献	<p>(1) 五十嵐豪、寺本篤史、丸山一平(2012)：各種ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の結合水量と水蒸気 BET 比表面積の関係、日本建築学会構造系論文集、Vol. 77、No. 682、pp. 1819-1828</p> <p>(2) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：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 報告書</p>

パラメータ	7. セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設施設)																			
設定値	C-S-H ゲル	6.46mol/L <sub>water</sub>																		
	ハイドロタルサイト	0.41mol/L <sub>water</sub>																		
	エトリンサイト	0.01mol/L <sub>water</sub>																		
	ギブサイト	1.19mol/L <sub>water</sub>																		
	NaOH	0.01mol/L <sub>water</sub>																		
	KOH	0.01mol/L <sub>water</sub>																		
設定根拠	<p>1号廃棄物埋設施設で実際に使用されている配合を参照した。各水和鉱物量の算定方法は、「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設施設)」と同様、文献<sup>(1)</sup>のHFSCの算定方法を参照した。</p> <p>なお、骨材(砕砂、陸砂)は反応しないものとした。</p> <p style="text-align: center;">1号廃棄物埋設施設の充填モルタルの配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">単体量 [kg/m<sup>3</sup>]</th> </tr> <tr> <th colspan="2">結合材(C)</th> <th colspan="2">細骨材(S)</th> </tr> <tr> <th>中庸熱 ポルトランドセ メント</th> <th>高炉スラグ 微粉末</th> <th>砕砂</th> <th>陸砂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">42</td> <td style="text-align: center;">380</td> <td style="text-align: center;">877</td> <td style="text-align: center;">585</td> </tr> </tbody> </table> <p>・中庸熱ポルトランドセメントの化学組成：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設施設)」参照</p> <p>・高炉スラグ微粉末の化学組成：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設施設)」参照</p> <p>・水和鉱物量の算定方法：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設施設)」参照</p> <p>・初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照</p>				単体量 [kg/m <sup>3</sup> ]				結合材(C)		細骨材(S)		中庸熱 ポルトランドセ メント	高炉スラグ 微粉末	砕砂	陸砂	42	380	877	585
単体量 [kg/m <sup>3</sup> ]																				
結合材(C)		細骨材(S)																		
中庸熱 ポルトランドセ メント	高炉スラグ 微粉末	砕砂	陸砂																	
42	380	877	585																	
参考文献	(1) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：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 報告書																			

パラメータ	8. 廃棄体の塩量
設定値	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.01mol/L <sub>water</sub> $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 0.07mol/L <sub>water</sub>
設定根拠	<p>廃棄体1本あたりに含まれる塩量の平均値から1号廃棄物埋設施設の埋設設備の一基当たりの外形寸法の間隙に均一に分布していると仮定して設定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄体(ドラム缶1本あたり)に含まれる塩量の平均値  ほう酸塩 13kg/ドラム缶1本、 硫酸塩 25.6kg/ドラム缶1本</li> <li>・ 塩濃度の算出 <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 一基に埋設されるドラム缶の本数(5,120本)より、一基に埋設された塩量を算出  ほう酸塩 68t/基                      硫酸塩 131t/基</li> <li>(2) 廃棄体に含まれる塩量のうち、1/10が岩盤側に流出したと仮定*1し、塩量を算出  ほう酸塩 6.80t/基                      硫酸塩 13.10t/基</li> <li>(3) 廃棄体中の塩が埋設設備の一基当たりの外形寸法全体に均質に分布していると仮定し、1号廃棄物埋設施設の埋設設備の一基当たりの外形寸法(24m×24m×6m)で上記の塩量を割って、1m<sup>3</sup>当たりの塩量を算出  ほう酸塩 1.98kg/m<sup>3</sup>                      硫酸塩 3.79kg/m<sup>3</sup></li> <li>(4) 単位換算(kg/m<sup>3</sup>→mol/L)  ほう酸塩 0.01mol/L                      硫酸塩 0.03mol/L</li> <li>(5) 空隙水1Lに対する塩濃度を算出(空隙率で割る)  ほう酸塩 0.01mol/L<sub>water</sub>                      硫酸塩 0.07mol/L<sub>water</sub></li> </ol> </li> <li>・ 初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照</li> </ul> <p>*1 廃棄体に含まれる塩量のうち岩盤側へ流出する割合については、地下水流動解析の結果より設定した。</p>
参考文献	

パラメータ	9. セメント系材料の初期空隙率
設定値	0.36
設定根拠	<p>空隙率の設定値 35.7%(空隙率と透水係数の推定式より換算した値)を丸めて 0.36 と設定した。</p> <p>3号廃棄物埋設施設の解析で設定している 3:7モルタルの空隙率は 26.2%であるが、水セメント比を考慮して 1:9モルタルの値(空隙率 35.7%を丸めて 0.36)を参照した。</p>
参考文献	

パラメータ	10. 難透水性覆土の透水係数
設定値	$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0$ <p>ただし、<math>C_i &gt; 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}</math> のとき、<math>C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}</math></p> $K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ $K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$ $K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$ <p>ただし、<math>K_0 &lt; K_0 _{ESP=1}</math> のとき、<math>K_0 = K_0 _{ESP=1}</math></p> <p><math>C_i</math>: 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]  <math>ESP</math>: ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]  <math>e_{sme}</math>: スメクタイト間隙比 [-]  <math>K</math>: 透水係数 [m/s]</p>
設定根拠	透水試験結果を参照して取りまとめられている文献(1)の式を使用する。
参考文献	(1) 伊藤弘之、三原守弘(2005): ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式、JNC TN8400 2005-029

パラメータ	11. 難透水性覆土の拡散係数																		
設定値	$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^n$ $n = 2.22 f_s^{0.13} + 1$ $f_s = a \times f_b$ <p> <math>D_e</math> : 実効拡散係数[m<sup>2</sup>/s]  <math>\varepsilon</math> : 空隙率[-]  <math>a</math> : ベントナイト中のモンモリロナイト割合[-]  <math>f_b</math> : ベントナイトの配合割合[-] </p>																		
設定根拠	<p>空隙率と実効拡散係数の実測値にフィッティングした式<sup>(1)</sup>を用いて、実効拡散係数を設定した。Na型ベントナイトをCa型化して取得した実効拡散係数を既存のNa型ベントナイトの値と比較し、ほぼ同程度の値であると推定されている<sup>(2)</sup>。</p> <div data-bbox="635 1126 1129 1496" data-label="Figure"> <table border="1"> <caption>Data points estimated from Figure 4</caption> <thead> <tr> <th>Porosity</th> <th>Effective diffusion coefficient (m<sup>2</sup>/s)</th> <th>Source</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.25</td> <td>~5.0E-11</td> <td>PNC, 1994</td> </tr> <tr> <td>0.35</td> <td>~1.0E-10</td> <td>Shimura et al., 1995</td> </tr> <tr> <td>0.45</td> <td>~2.0E-10</td> <td>PNC, 1994</td> </tr> <tr> <td>0.65</td> <td>~5.0E-10</td> <td>PNC, 1994</td> </tr> <tr> <td>0.85</td> <td>~1.0E-09</td> <td>Kato et al., 1995</td> </tr> </tbody> </table> </div> <p style="text-align: center;">Figure 4 Relationship between porosity and effective diffusion coefficients of HTO in Kunigel V1</p> <p style="text-align: center;">(1) より引用</p>	Porosity	Effective diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /s)	Source	0.25	~5.0E-11	PNC, 1994	0.35	~1.0E-10	Shimura et al., 1995	0.45	~2.0E-10	PNC, 1994	0.65	~5.0E-10	PNC, 1994	0.85	~1.0E-09	Kato et al., 1995
Porosity	Effective diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /s)	Source																	
0.25	~5.0E-11	PNC, 1994																	
0.35	~1.0E-10	Shimura et al., 1995																	
0.45	~2.0E-10	PNC, 1994																	
0.65	~5.0E-10	PNC, 1994																	
0.85	~1.0E-09	Kato et al., 1995																	
参考文献	<p>(1) Mihara, M. and Sasaki, R. (2005): RAMDA; Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027.</p> <p>(2) 三原守弘、伊藤勝、加藤博康、上田真三 (1999) : カルシウム型ベントナイトのトリチウム、セシウム、ヨウ素及び炭素の実効拡散係数の取得 (試験報告)、JNC TN8430 99-011.</p>																		

パラメータ	12. セメント系材料の拡散係数
設定値	$2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$
設定根拠	セメント系材料は長期的に化学劣化以外の幾何学的劣化(ひび割れ)が想定されるため、物質移動が速い状態となることを想定し、拡散係数として自由水中のトリチウム水の拡散係数 <sup>(1)</sup> を設定する。
参考文献	(1) 日本化学会(2004):化学便覧 基礎編 改定5版、丸善、東京、p-II.64

パラメータ	13. モンモリロナイトの溶解速度
設定値	$Rate = \left( 4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \right. \\ \left. \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \\ \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$ <p>Rate : モンモリロナイト溶解速度 [mol/s]  R : 気体定数 [kJ/(K・mol)]  T : 絶対温度 [K]  <math>a_{OH^-}</math> : OH<sup>-</sup>イオンの活量  <math>A_{min}</math> : 鉱物の反応表面積 [m<sup>2</sup>]  <math>\Delta Gr</math> : 反応のギブス自由エネルギー変化 [kJ/mol]</p>
設定根拠	TRU2次レポート <sup>(1)</sup> の地化学解析で使用されている式を使用する。 モンモリロナイトが液相と平衡に近い状態になったときの溶解速度を表現可能な飽和濃度依存性 <sup>(2)</sup> と、高 pH の液相中の溶解速度へ適用するための pH 依存性 <sup>(3)</sup> を含んでいる。
参考文献	(1) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ- JNC TY1400 2005-013 FEPC TR2-2005-02 (2) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.64, No.15, pp.2701-2717. (3) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05.



パラメータ	14. 二次鉱物		
設定値	フィリップサイト クリノプチロライト ヒューランダイト C-S-H ゲル エトリングアイト モノサルフェート ハイドロタルサイト セピオライト ポルトランダイト	ブルーサイト カルサイト ドロマイト カルセドニ カリ長石 アナルサイム ローモンタイト イライト	$C_3ASH_4$ $C_4AH_{13}$ $C_4AH_{19}$ ゲーレンナイト水和物 カオリナイト パイロフィライト フリーデル氏塩 モノサルフェート 2 水石膏
設定根拠	TRU2 次レポート <sup>(1)</sup> の地化学解析で考慮されている鉱物を設定した。また文献 <sup>(2)</sup> では、TRU2 次レポート <sup>(1)</sup> でセメント系材料の二次鉱物として考慮されているものに加え 2 水石膏を追加していたことから、本解析でも 2 水石膏を考慮することとした。		
参考文献	(1) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005)：TRU 廃棄物分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－ JNC TY1400 2005-013 FEPC TR2-2005-02 (2) (独)日本原子力研究開発機構(2013)：平成 24 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 報告書		

パラメータ	15. 塩影響を考慮した二次鉱物(1号廃棄物埋設施設)										
設定値	<table> <tr> <td>Ca<sub>3</sub>B<sub>2</sub>O<sub>6</sub></td> <td>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>・10H<sub>2</sub>O</td> </tr> <tr> <td>CaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub></td> <td>Thaumasite</td> </tr> <tr> <td>CaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub></td> <td>エトリンサイト</td> </tr> <tr> <td>NaBO<sub>2</sub></td> <td>2水石膏</td> </tr> <tr> <td>Colemanite</td> <td></td> </tr> </table>	Ca <sub>3</sub> B <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ・10H <sub>2</sub> O	CaB <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Thaumasite	CaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	エトリンサイト	NaBO <sub>2</sub>	2水石膏	Colemanite	
Ca <sub>3</sub> B <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ・10H <sub>2</sub> O										
CaB <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Thaumasite										
CaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	エトリンサイト										
NaBO <sub>2</sub>	2水石膏										
Colemanite											
設定根拠	<p>塩影響に関わり得る鉱物(Na及びCaを含むほう酸塩及び硫酸塩)を熱力学データベース(PHREEQCに同梱されている sit.datより抽出、ただし、Colemaniteについては、PHREEQCに同梱されている llnl.datより、Thaumasiteについては文献<sup>(1)</sup>より抽出した。</p>										
参考文献	<p>(1) Thomas Schmidt, Barbara Lothenbach, Michael Romer, Karen Scrivener, Daniel Rentsch, Renato Figi(2008): A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cement and Concrete Research, 38, 337-349</p>										

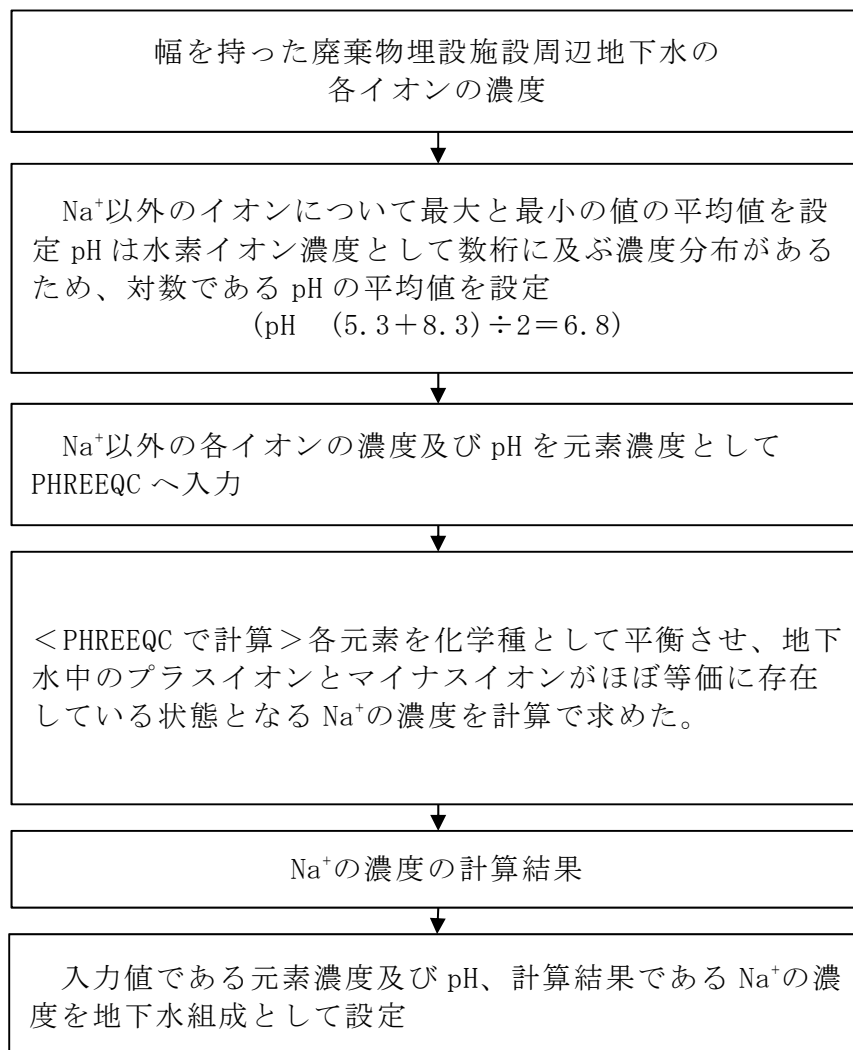
## 地下水組成のチャージバランス計算

地球化学解析において地下水組成を設定する場合、チャージのバランスがとれた状態(陽イオン、陰イオン、pHの電荷の合計が±0になっている状態)となるようにイオンあるいはpHで、電荷の合計を±0に調整して地球化学解析に与える。チャージバランスの計算はPHREEQCを用いた平衡計算となる。

六ヶ所水質試験結果(第1表)に基づいた地下水組成を設定する場合の流れを第1図に示す。ここでのチャージバランスは、元素濃度が他の元素モル濃度と比較して高く、チャージバランスの調整のため濃度が変動しても元の値から大きく外れないと考えて、Na<sup>+</sup>でチャージバランスをとることとした。例えば、FOHP(Fresh-Oxidizing-High-pH)地下水においても、Na<sup>+</sup>にてチャージバランスを計算している<sup>(5)</sup>。Na以外のイオンについては、最大と最小の値の平均値を設定した。

Na<sup>+</sup>の平均値の $8.4 \times 10^{-4}$  mol/L(第2表参照)に対して、チャージバランス計算後のNa<sup>+</sup>濃度は $6.4 \times 10^{-4}$  mol/L(第3表参照)であり、1/4程度の低下率となるが桁が変わるほどの変化ではないことが確認された。

参考として、Na<sup>+</sup>ではなくpHでチャージバランスをとったケースを第4表に示す。pHは9.8となった。



第1図 地下水組成設定計算フロー

第1表 六ヶ所サイトの水質試験結果(3号廃棄物埋施設申請書の水質試験結果)

Na <sup>+</sup>	7.2~31.5mg/L
K <sup>+</sup>	0.5~5.6mg/L
Ca <sup>2+</sup>	0.1~7.2mg/L
Mg <sup>2+</sup>	0.1~3.8mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.6~51.9mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.0~21.7mg/L
Cl <sup>-</sup>	12.9~20.3mg/L
pH	5.3~8.3

第2表 六ヶ所サイトの水質試験結果の平均値

Na <sup>+</sup>	19.35mg/L	$8.4 \times 10^{-4}$ mol/L
K <sup>+</sup>	3.05mg/L	$7.8 \times 10^{-5}$ mol/L
Ca <sup>2+</sup>	3.65mg/L	$9.1 \times 10^{-5}$ mol/L
Mg <sup>2+</sup>	1.95mg/L	$8.0 \times 10^{-5}$ mol/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	28.75mg/L	$4.7 \times 10^{-4}$ mol/L
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11.35mg/L	$1.2 \times 10^{-4}$ mol/L
Cl <sup>-</sup>	16.6mg/L	$4.7 \times 10^{-4}$ mol/L
pH	6.8	6.8

第3表 Na でチャージバランスを計算した後の地下水組成

Na <sup>+</sup>	$6.4 \times 10^{-4} \text{mol/L}^{*1}$
K <sup>+</sup>	$7.8 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca <sup>2+</sup>	$9.1 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Mg <sup>2+</sup>	$8.0 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$1.2 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Cl <sup>-</sup>	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
pH	6.8
*1 PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	

(参考) 第4表 pH でチャージバランスを調整した場合

Na <sup>+</sup>	$8.4 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
K <sup>+</sup>	$7.8 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca <sup>2+</sup>	$9.1 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Mg <sup>2+</sup>	$8.0 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$1.2 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Cl <sup>-</sup>	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
pH	9.8 <sup>*1</sup>
*1 PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	

覆土が長期間にわたり低透水性を  
維持することができる要因



## 目 次

1. はじめに	1
2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析	1
3. 難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性評価	5
(1) モンモリロナイトの溶解速度の影響	6
(2) 難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)の影響	8
(3) ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響	10
(4) セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)の影響	12
4. まとめ	14
【参考】 要因分析に資する参考データについて	15
1. モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について	15
2. 難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類について	19

## 1. はじめに

本資料は、補足説明資料 5(以下「補足 5 本文」という。)のうち「3. 解析結果」に示す地球化学解析結果(以下「解析結果」という)について追加説明するものである。

解析結果では、1,000 年までの範囲において難透水性覆土の低透水性の全体的な性能は維持されていた。そこで、1,000 年間という長期間にわたり難透水性覆土が低透水性を維持したことに寄与した要因について分析し、補足 5 本文に示す解析条件や解析結果の妥当性・保守性・安定性について検討する。

## 2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析

難透水性覆土の透水係数の変化は、モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合 ( $ESP$ )、モンモリロナイトと空隙の体積比 ( $e_{sme}$ )、及び空隙水の当量イオン濃度 ( $C_i$ ) の関数として表現される(補足 5 本文「2. (4). (iii) 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式」の数式 2)。透水係数に大きな影響を与えている因子を把握するため、各因子を変化させた場合に透水係数がどのような応答をするのか感度解析を行った。各因子の変化が透水係数に与える影響を第 1 図に示す。

$$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0 \quad (\text{数式 2})$$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$  のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0 \text{ のとき、} K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$$

$$K > 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ のとき、} K = 1.0 \cdot 10^{-5}$$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$$

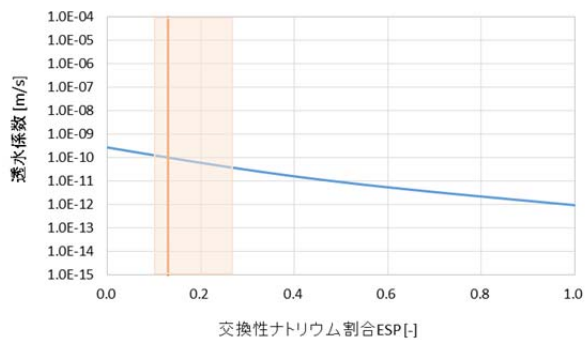
ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$  のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

$C_i$  : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

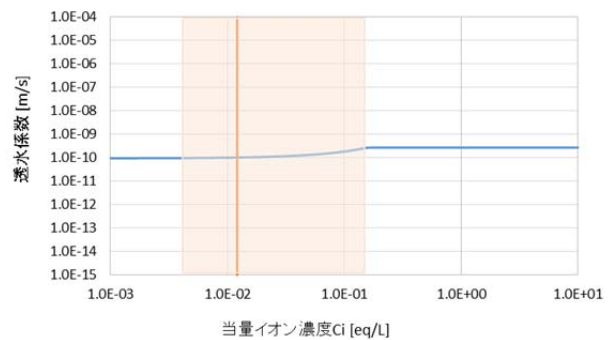
$ESP$  : ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]

$e_{sme}$  : スメクタイト間隙比 [-]

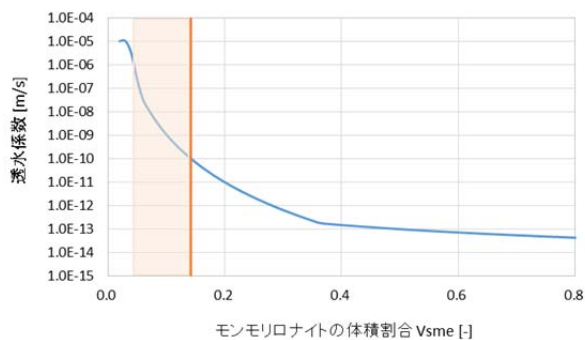
$K$  : 透水係数 [m/s]



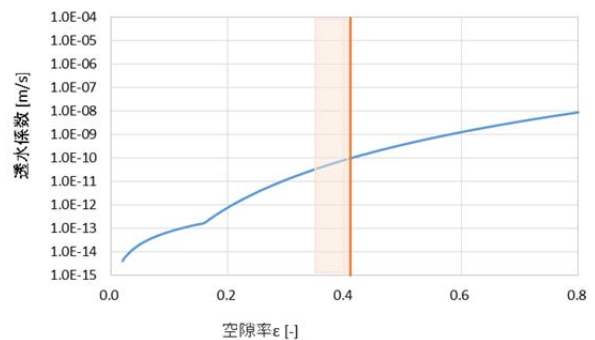
交換性ナトリウム割合ESP[-]  
モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合 (ESP)



当量イオン濃度 $C_i$  [eq/L]  
空隙水の当量イオン濃度 ( $C_i$ )



モンモリロナイトの体積割合  $V_{smc}$  [-]  
モンモリロナイト体積割合 ( $V_{smc}$ )



空隙率 $\epsilon$  [-]  
空隙率 ( $\epsilon$ )

\*1 橙色の線は初期値を、枠で囲まれている部分は補足5本文での解析における1,000年間の変化幅を示す。

\*2 変化させた因子以外のパラメータは、初期値で固定した。

第1図 各因子の透水係数への影響

#### ○交換性ナトリウム割合 ( $ESP$ )

第1図を見ると、 $ESP$ が増加するに従い透水係数は緩やかに低下する傾向を示している。解析では、モンモリロナイトのイオン交換反応により  $ESP$ が変化することで、透水係数に影響を及ぼすことが考えられる。難透水性覆土はCa型ベントナイトを配合した材料仕様となっていることから、交換性陽イオンは主にCaである(初期  $ESP$ は0.13程度)。また、セメント系材料の主要な化学成分はCaであり、NaやKに比べCaの供給量が多いことから、イオン交換反応は起こり難いと考えられる。そのため、本解析では  $ESP$ の影響はほとんどないものと思われる。

#### ○当量イオン濃度 ( $C_i$ ) (溶液濃度)

当量イオン濃度が透水係数に与える影響は、 $ESP$ の増加とともに顕著になること、透水係数が濃度によらず一定となり始める濃度は  $ESP$ の増加とともに大きくなる傾向がある。難透水性覆土の材料仕様はCa型ベントナイトであり初期  $ESP$ が小さいことから、当量イオン濃度が透水係数に及ぼす影響は小さいことが考えられ、第1図からも感度が小さいことがわかった。

#### ○モンモリロナイトと空隙の体積比 ( $e_{sme}$ ) (モンモリロナイト体積割合、空隙率)

モンモリロナイトと空隙の体積比 ( $e_{sme}$ )は、モンモリロナイトの体積割合 ( $V_{sme}$ )と空隙率 ( $\epsilon$ )の比である。

モンモリロナイトの体積割合について、第1図を見ると、空隙率を初期値で固定した場合、体積割合が減少するに従い透水係数が大きくなる傾向があり、特に体積割合が小さい領域では透水係数に与える影響が顕著に表れている。難透水性覆土のベントナイト配合率は30wt%、初期のモンモリロナイトの体積割合は0.14程度であり、モンモリロナイトが溶解し体積割合が減少すると、透水係数は大きく上昇することがわかる。

また、空隙率についても、第1図を見ると、モンモリロナイトの体積割合を初期値で固定した場合、空隙率が大きくなるほど透水係数も上昇しており、空隙率が透水係数に与える影響は大きいことがわかる。解析では、モンモリロナイトが溶解することで空隙率が大きくなる一方、二次鉱物が生成されることにより空隙率が小さくなることが考えられる。

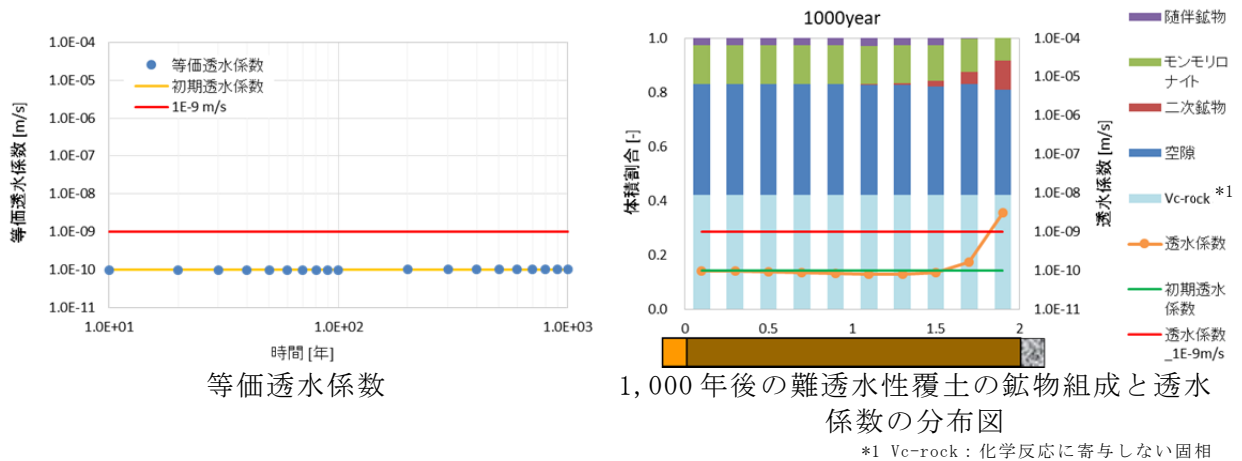
補足 5 本文「3. 解析結果」は、セメント境界面では、二次鉱物の生成により空隙率がわずかに減少している結果となっている一方で、透水係数は上昇している結果であった。これは、モンモリロナイトが溶解しモンモリロナイトの体積割合が減少する効果の方が大きいためであると考えられる。したがって、本解析では、透水係数に与える空隙率の影響はモンモリロナイトの体積割合に比べ小さいものと考えられる。

以上より、難透水性覆土の透水性に大きな影響を与える因子は「モンモリロナイトの体積割合」であると考えられる。すなわち、難透水性覆土が低透水性を維持するためにはセメント由来のアルカリ成分によるモンモリロナイトの溶解という化学劣化影響を加味しても十分なモンモリロナイトの体積が残存していることが重要な要因である。

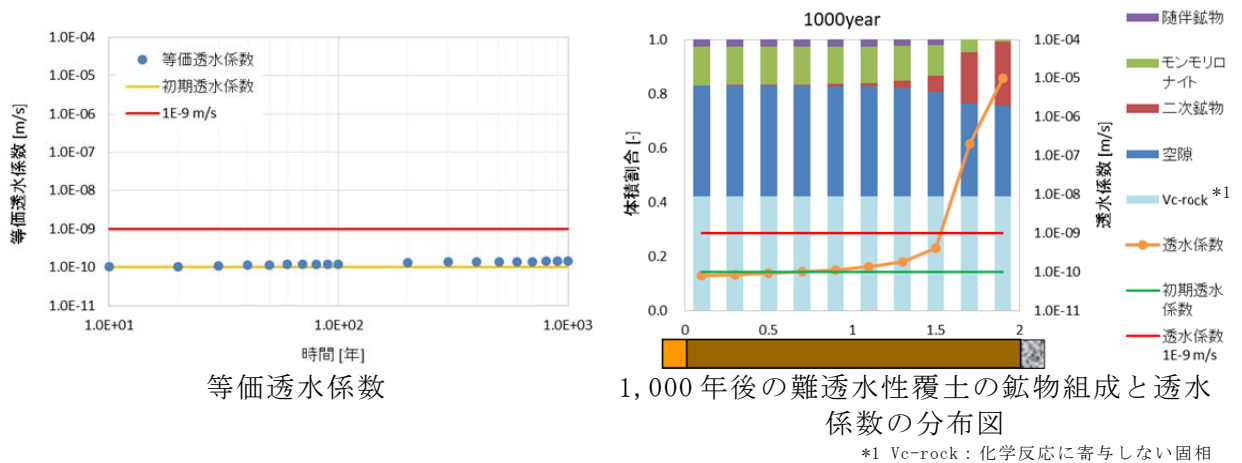
### 3. 難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性評価

「2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析」では、難透水性覆土の透水性に大きな影響を与える因子はモンモリロナイトの体積割合であることを確認し、難透水性覆土の低透水性が維持される要因は、セメント由来のアルカリ成分による化学劣化影響を加味しても十分にモンモリロナイトが残存していることだと考えた。そこで難透水性覆土の化学変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与え得る要因に着目した極端なケーススタディを実施し、モンモリロナイト体積割合への影響及び難透水性覆土の低透水性が維持されるとの結論の妥当性を評価した。

比較用のベースケースとして、補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を、3 号廃棄物埋設施設については第 2 図に、1 号廃棄物埋設施設については第 3 図に再掲して示す。



第 2 図 補足 5 本文の第 5 図及び第 7 図における 3 号廃棄物埋設施設の解析結果



第 3 図 補足 5 本文の第 6 図及び第 10 図における 1 号廃棄物埋設施設の解析結果

(1) モンモリロナイトの溶解速度の影響

難透水性覆土の化学変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、モンモリロナイトの溶解速度を変化させて影響を評価した。

補足 5 本文の地球化学解析に用いたモンモリロナイトの溶解速度条件は、試験より得られた経験式を組み合わせさせた式(補足 5 本文「2. (4). (ii) モンモリロナイトの溶解速度」の数式 1)とした。この式は、平衡に接近した場合の溶解速度の減少について考慮したものである。それに対してここでは、モンモリロナイトの溶解量を大きく見積もるため、モンモリロナイトの溶解が瞬時に平衡に達する(瞬時平衡)と仮定した解析を実施し、モンモリロナイトの溶解速度がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。

なお、モンモリロナイトの溶解速度以外の解析条件は補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3 号廃棄物埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第 4 図に、1 号廃棄物埋設施設の解析結果を第 5 図に示す。モンモリロナイトの溶解速度を経験式(補足 5 本文「2. (4). (ii)モンモリロナイトの溶解速度」の数式 1)とした場合の解析結果と比べ、セメント系材料の境界面において、モンモリロナイトの溶解量は多くなり透水係数も上昇する結果となった。ただし、変質は部分的であり、等価透水係数もわずかに上昇するだけで、全体的には大きな影響はなかった。

モンモリロナイトの溶解速度はモンモリロナイトの体積割合に大きな影響を与えることがわかった。しかし、平衡に接近した場合の溶解速度の減少を考慮しない、瞬時平衡とした場合でも 1,000 年程度は低透水性を維持できるモンモリロナイト量は残存することを確認した。

$$Rate = \left( 4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$$

(数式 1)

*Rate* : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

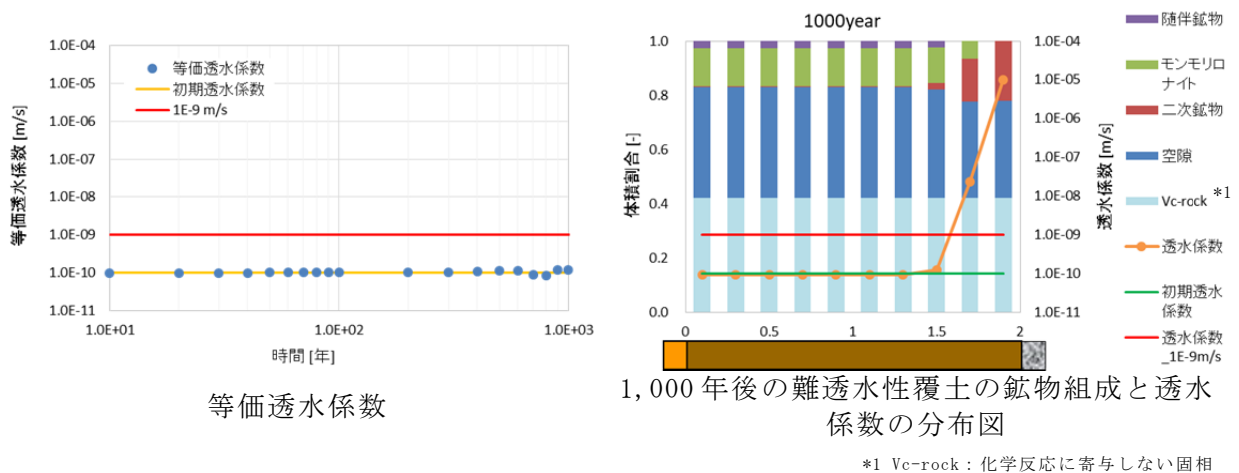
*R* : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

*T* : 絶対温度 [K]

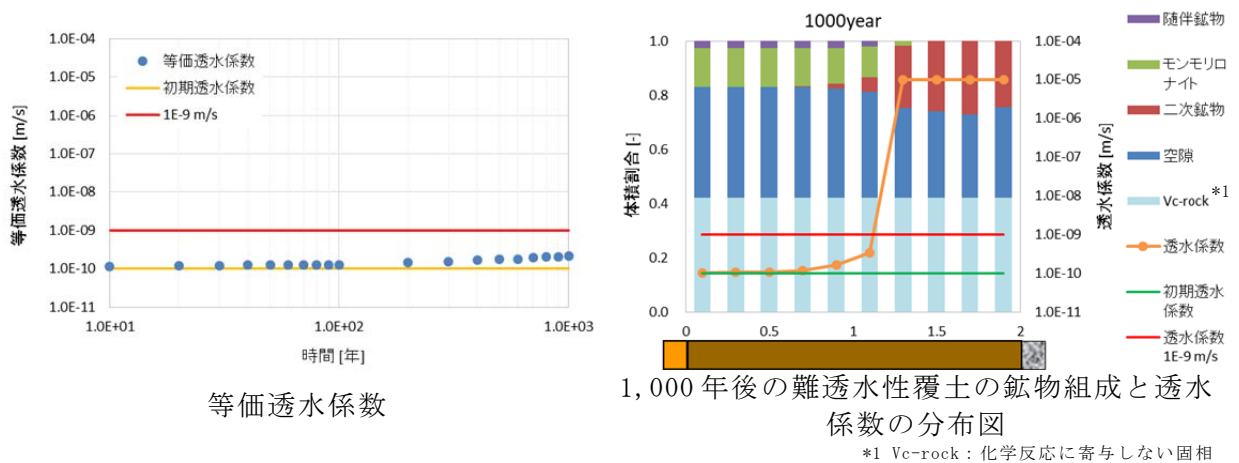
*a<sub>OH<sup>-</sup></sub>* : OH<sup>-</sup>イオンの活量

*A<sub>min</sub>* : 鉱物の反応表面積 [m<sup>2</sup>]

*ΔGr* : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力) [kJ/mol]



第4図 3号廃棄物埋設施設の解析結果(モンモリロナイトの溶解速度：瞬時平衡)



第5図 1号廃棄物埋設施設の解析結果(モンモリロナイトの溶解速度：瞬時平衡)

(2) 難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)の影響

難透水性覆土の変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)を変化させて影響を評価した。補足5本文の地球化学解析に用いた難透水性覆土の拡散係数条件は、ベントナイト系材料中のトリチウムの実効拡散係数測定結果より得られた経験式(補足5本文「2.(4). (iv) 難透水性覆土の拡散係数」の数式3)とした。それに対してここでは、モンモリロナイトの溶解量を大きく見積もるため、物質移動が速い状態の拡散係数として自由水中のトリチウム水の拡散係数( $2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ )を設定し解析を実施し、物質の移動速度がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。



なお、難透水性覆土中の拡散係数以外の解析条件は、補足 5 本文に記載されている条件と同様とした。

3 号廃棄物埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第 6 図に、1 号廃棄物埋設施設の解析結果を第 7 図に示す。経験式(補足 5 本文「2. (4). (iv) 難透水性覆土の拡散係数」の数式 3)ではモンモリロナイトが溶解した範囲はセメント系材料の境界面近傍のみであったが、拡散係数が大きい設定では溶解する範囲は広がる結果となった。しかし、3 号廃棄物埋設施設の解析結果については、全体的なモンモリロナイトの体積割合に大きな差は見られなかったため、等価透水係数にもほとんど影響は見られなかった。一方、1 号廃棄物埋設施設の解析結果については、全体的なモンモリロナイトの体積割合が減少しており、等価透水係数もわずかに上昇する結果となった。

難透水性覆土の拡散係数について、モンモリロナイトが溶解する領域に多少影響を与えることがわかった。しかしながら、十分な量のモンモリロナイトが残存するため、1,000 年程度の期間は難透水性覆土の低透水性は維持されることを確認した。

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon^n \quad (\text{数式 3})$$

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

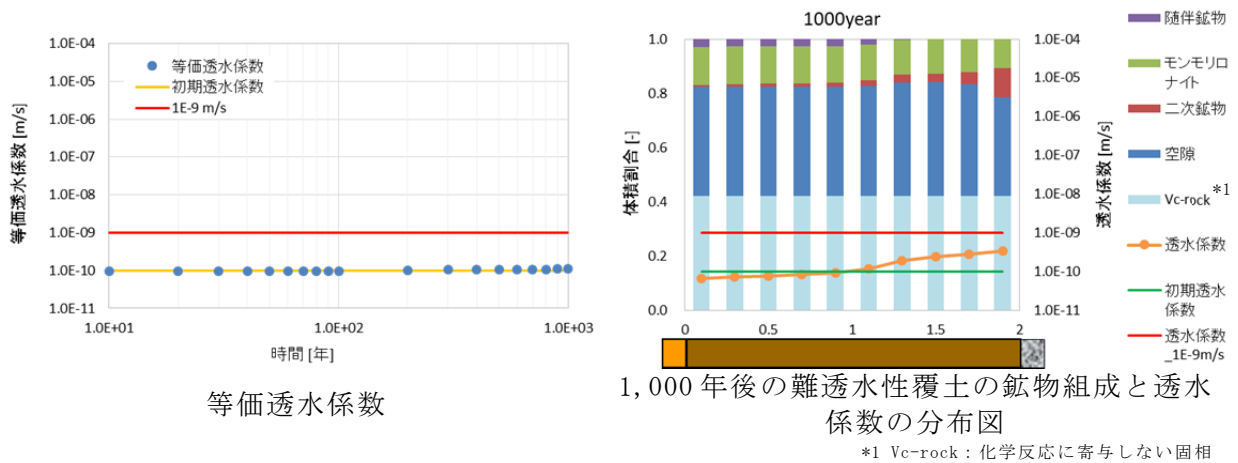
$$f_s = a \times f_b$$

$D_e$  : 実効拡散係数[m<sup>2</sup>/s]

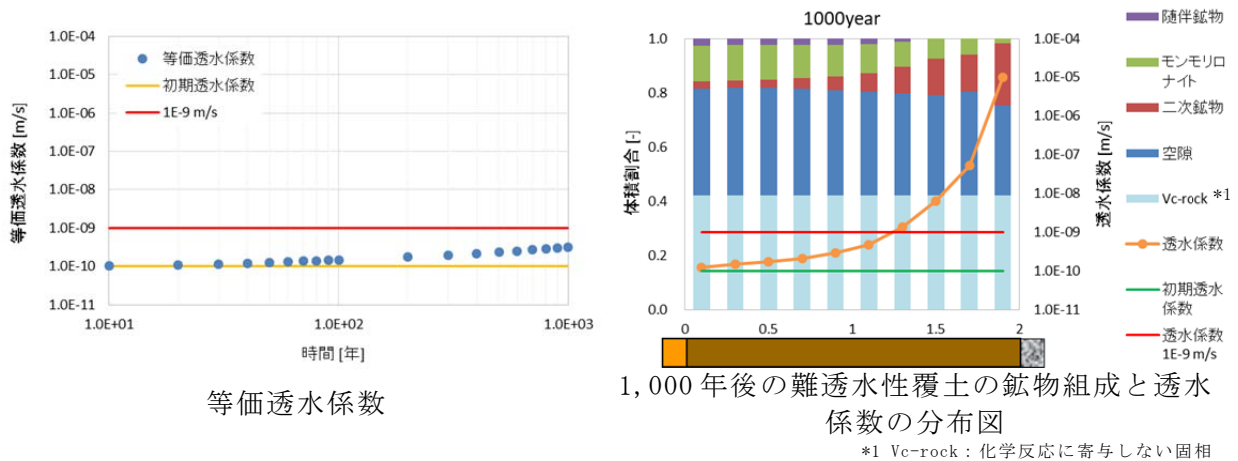
$\varepsilon$  : 空隙率[-]

$a$  : ベントナイト中のモンモリロナイト割合[-]

$f_b$  : ベントナイトの配合割合[-]



第6図 3号廃棄物埋設施設の解析結果  
(覆土の拡散係数：自由水中のトリチウム水の拡散係数)



第7図 1号廃棄物埋設施設の解析結果  
(覆土の拡散係数：自由水中のトリチウム水の拡散係数)

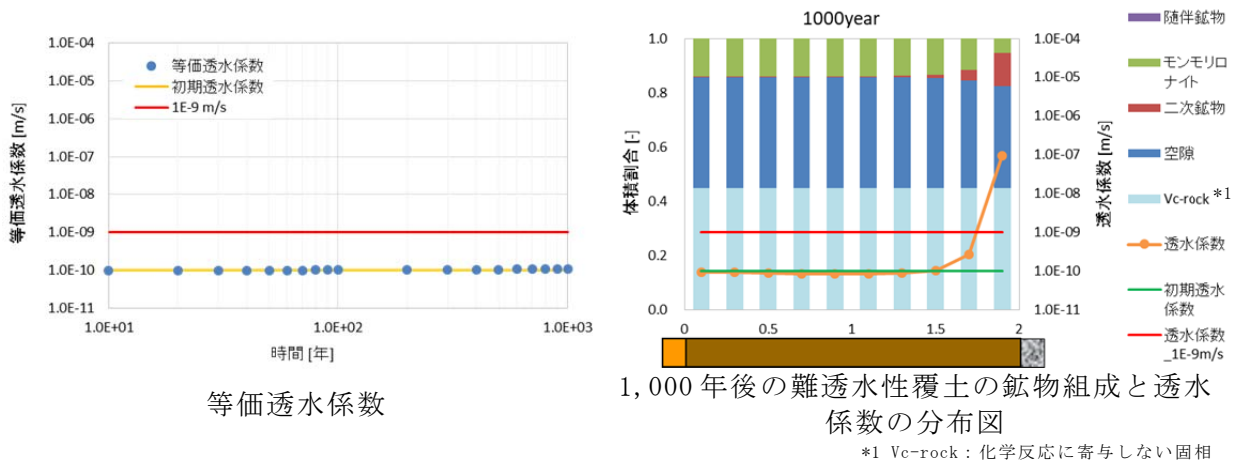
(3) ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響

難透水性覆土の変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、ベントナイト中の随伴鉱物の反応の有無を変化させて影響を評価した。

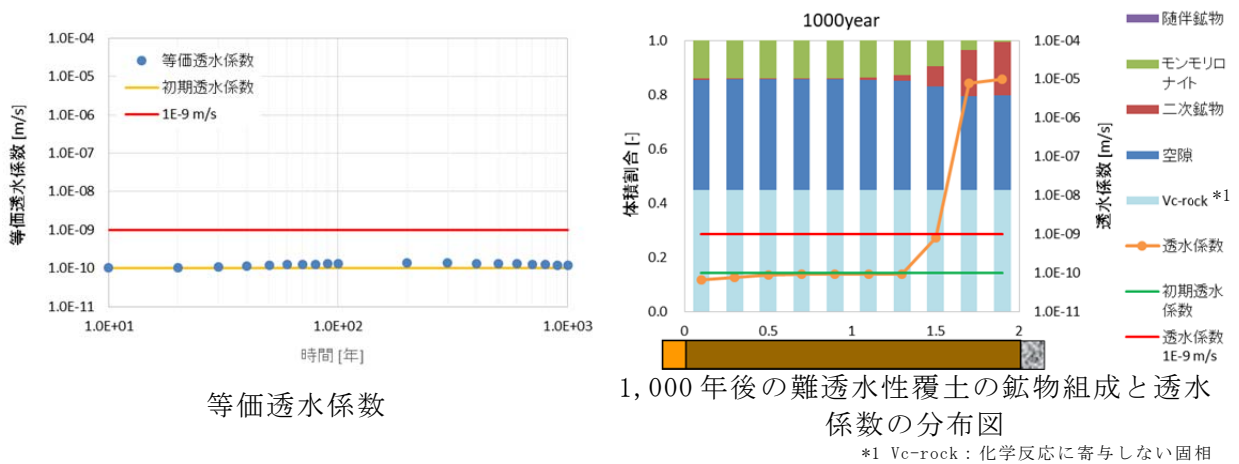
難透水性覆土中の初期鉱物組成として、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイトの他、ベントナイト中の随伴鉱物を設定し、補足5本文における解析では随伴鉱物の反応(緩衝作用)を考慮している。これらの随伴鉱物の溶解反応によって放出されるSiがモンモリロナイトの溶解反応や二次鉱物の沈殿反応に

寄与する溶存 Si 濃度に直接影響することから、これらの反応の有無は解析結果に影響を与える可能性がある。そこで、ここでは随伴鉱物の反応を考慮しない解析を行い、随伴鉱物の反応によるアルカリ緩衝性の有無がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。なお、その他の解析条件は補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3 号廃棄物埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物組成と透水係数の分布図)を第 8 図に、1 号廃棄物埋設施設の解析結果を第 9 図に示す。解析結果から、ベントナイトに含まれる随伴鉱物を地球化学反応において考慮しなかった場合でも解析結果に与える影響が小さいことが確認された。



第 8 図 3 号廃棄物埋設施設の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)



第 9 図 1 号廃棄物埋設施設の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)

(4) セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)の影響

難透水性覆土の変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)を変化させて影響を評価した。

モンモリロナイトの溶解量はセメント系材料由来のアルカリ成分量にも影響される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合、体積により決定される。補足5本文における解析に用いたセメント系材料の種類・配合は、実際の埋設設備に用いられる条件に基づき設定している。それに対してここでは、モンモリロナイトの溶解量を大きく見積もるため、セメント系材料の種類・配合として多量のアルカリ成分を含む普通ポルトランドセメントが主に配合された仕様を設定した。設定したセメント系材料の配合及び化学組成を第1表と第2表に、設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第3表、第4表に示す。なお、その他の解析条件は補足5本文「3.(1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3号廃棄物埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第10図に、1号廃棄物埋設施設の解析結果を第11図に示す。セメント系材料の仕様をOPCに変更するとモンモリロナイトの溶解量が多くなる結果となった。しかし、セメント境界面ではモンモリロナイトの溶解が促進されるものの局所的であり、難透水性覆土全体としてはほとんど変化しなかった。

第1表 コンクリート(OPC)の配合

単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]			
結合材(C)	粗骨材(G)	細骨材(S)	
普通ポルトランドセメント		砕砂	陸砂
296	1,023	218	654

第2表 普通ポルトランドセメント(OPC)の化学組成

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38

(単位は wt%)

第3表 セメント系材料の初期鉱物組成(アルカリ成分の供給が多い条件)  
(3号廃棄物埋施設)

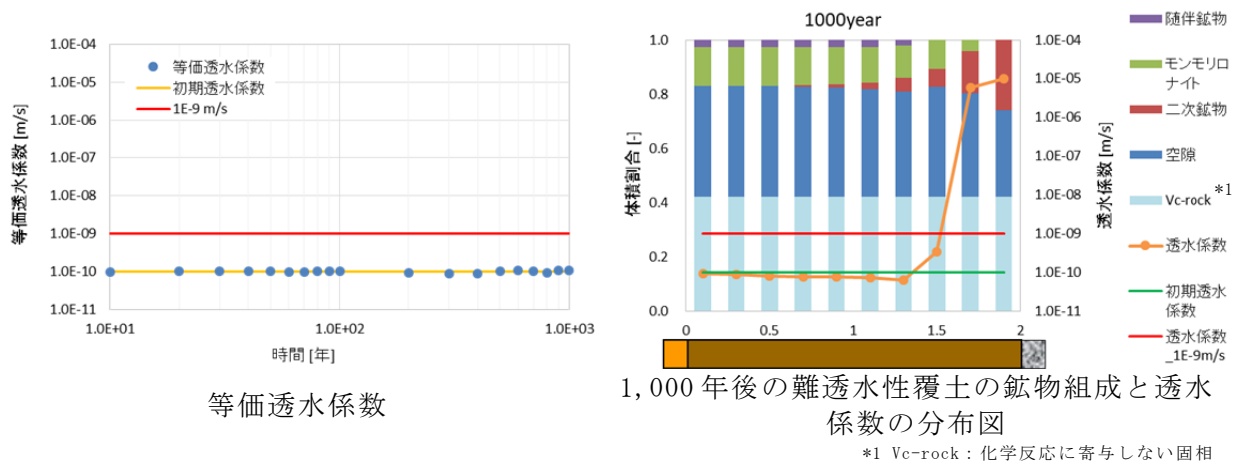
	結合材(c)					
	C-S-Hゲル	ハイドロタルサイト	エトリンガイト	ポルトランドアイト	NaOH	KOH
mol/L <sub>water</sub> *1	12.1	0.21	0.17	6.95	0.12	0.15

\*1 空隙水 1L に対する鉱物のモル量

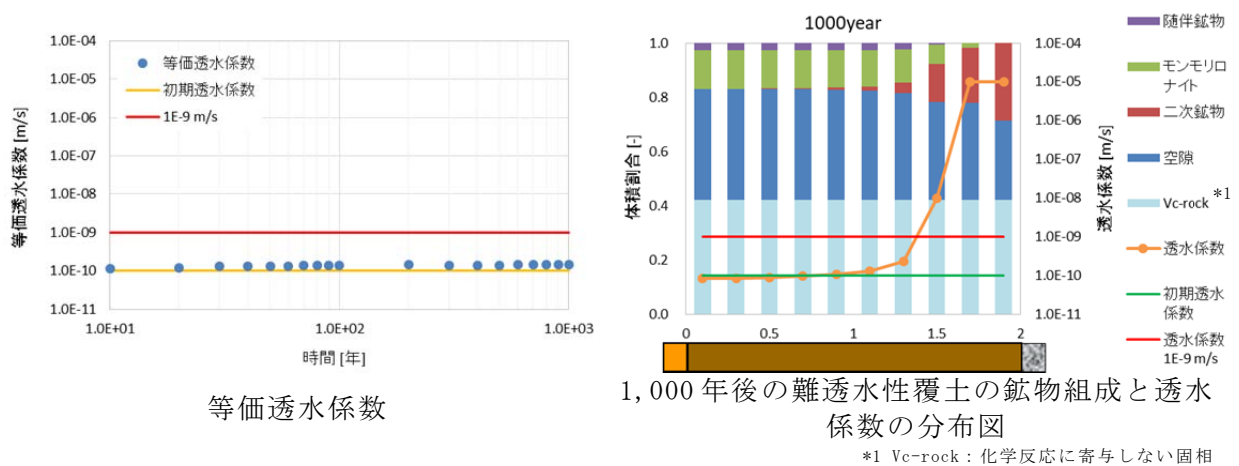
第4表 セメント系材料の初期鉱物組成(アルカリ成分の供給が多い条件)  
(1号廃棄物埋施設)

	結合材(c)					
	C-S-Hゲル	ハイドロタルサイト	エトリンガイト	ポルトランドアイト	NaOH	KOH
mol/L <sub>water</sub> *1	6.71	0.21	0.17	8.29	0.12	0.15

\*1 空隙水 1L に対する鉱物のモル量



第10図 3号廃棄物埋施設の解析結果(セメント系材料の仕様: OPC)



第 11 図 1 号廃棄物埋設施設の解析結果(セメント系材料の仕様：OPC)

#### 4. まとめ

1,000 年間にわたり難透水性覆土の低透水性が維持できる要因は、透水係数に影響を与える因子(当量イオン濃度、ベントナイトの交換性ナトリウム割合、空隙率、モンモリロナイトの体積割合)のうち、モンモリロナイトの体積割合の影響が大きく、セメント系材料から供給されるアルカリ成分によるモンモリロナイトの溶解が進んでも十分な量のモンモリロナイトが残存していることが必要である。

そのためモンモリロナイトの溶解量に影響を与え得る複数の項目(モンモリロナイトの溶解速度、難透水性覆土の拡散係数、ベントナイト中の随伴鉱物の反応、セメント系材料の配合)について、解析上極端な条件設定で感度解析を行ったが、難透水性覆土には十分な量のモンモリロナイトが残存した。これにより、補足 5 本文における地球化学解析結果より得られた「化学影響を踏まえても難透水性覆土が 1,000 年間にわたり低透水性を維持する」との結論が妥当であることを確認した。

## 【参考】要因分析に資する参考データについて

添付資料3の要因分析の参考とするため、モンモリロナイトのイオン型の時間変化及び二次鉱物の生成種類について参考データとして記載する。

### 1. モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について

難透水性覆土はCa型ベントナイトを配合した材料仕様となっている。そこへ、セメント系材料から供給されるNaにより、モンモリロナイトの一部がCa型からNa型化され交換性ナトリウム割合(*ESP*)が上昇することにより、難透水性覆土の止水性能が上昇する可能性が考えられる。上昇の程度は、添付資料3「第1図 各因子の透水係数への影響」に示したとおり小さいものと考えられるが、モンモリロナイトのイオン型の時間変化図と合わせて、難透水性覆土中のモンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について詳細を改めて再確認する。

補足5本文「3. (1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合、及びモンモリロナイトの残存割合と難透水性覆土の透水係数)について、3号廃棄物埋設施設は第13図に、1号廃棄物埋設施設は第14図に示す。難透水性覆土について等間隔に十層に分割し、岩盤・下部覆土側の難透水性覆土から第1層とし、セメント系材料に接する難透水性覆土を第10層とした(第12図)。

セメント系材料に接する第9層～第10層では、交換性ナトリウム割合がごくわずかに上昇しており、特に1号廃棄物埋設施設では、固化体に含まれるNa塩の影響によりモンモリロナイトのNa型割合がわずかに多い結果であった。それでも、難透水性覆土の止水性を大きく向上させるほどのNa型化は見られなかった。また、Na型化が見られた第9層～第10層では、モンモリロナイトが溶解し体積割合が大きく減少しており、そのため透水係数は初期値よりもわずかに上昇している結果であった。

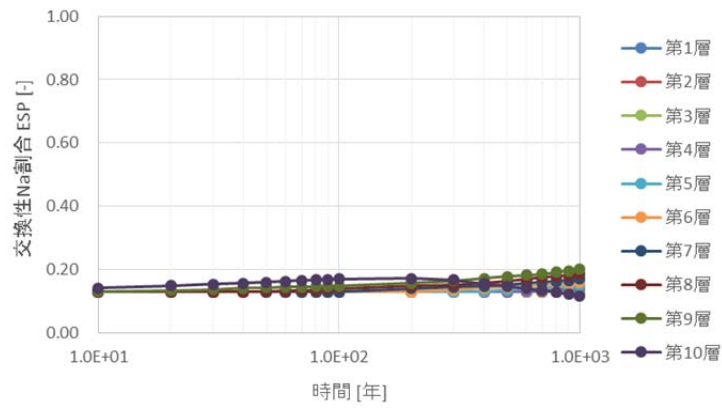
したがって、モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について、セメント系材料からNaの供給による難透水性覆土中のモンモリロナイトのNa型化はごくわずかであり、Na型化による止水性能の上昇よりも、モンモリロナイトの溶解に伴う止水性能の低下の影響の方が大きいことが確認された。



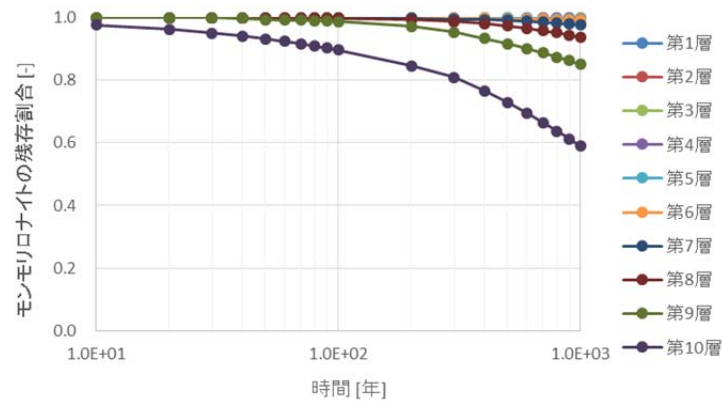
下部覆土側

埋設設備側(セメント)

第 12 図 難透水性覆土の層の定義



モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合

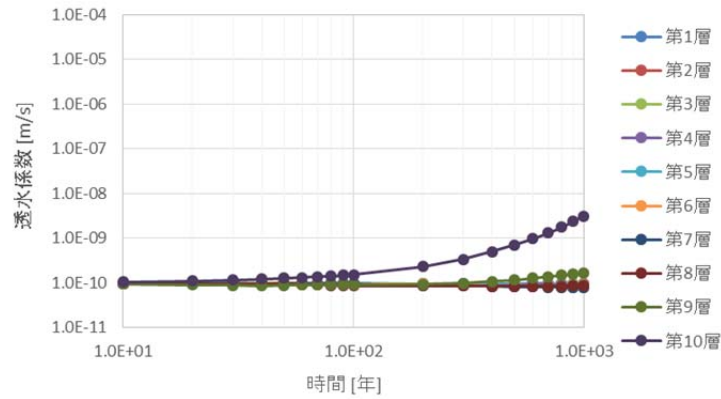


モンモリロナイトの残存割合

第 13 図 3号廃棄物埋設施設の解析結果(1/2)

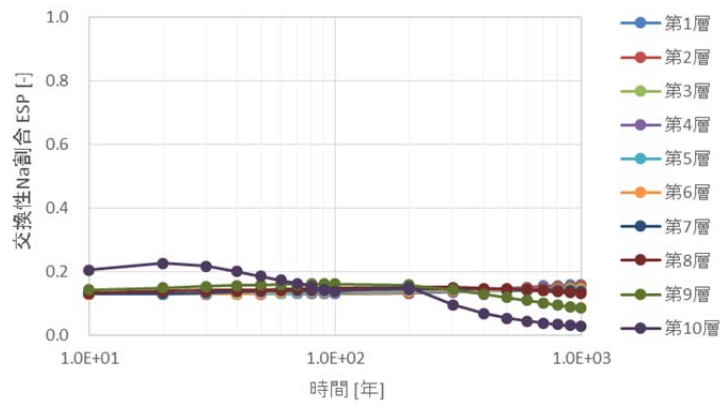
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)



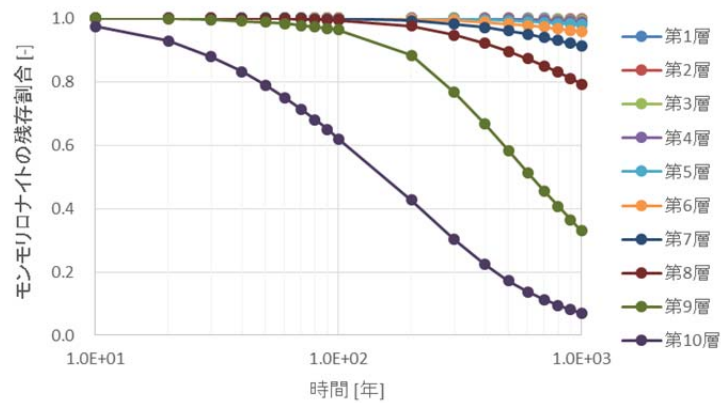


難透水性覆土の透水係数

第 13 図 3 号廃棄物埋設施設の解析結果 (2/2)  
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)

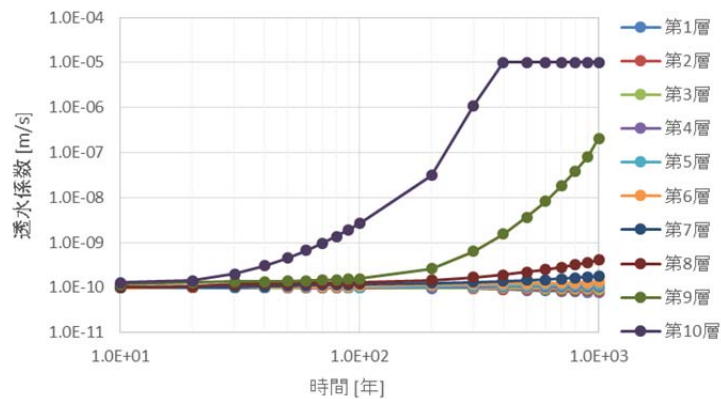


モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合



モンモリロナイトの残存割合

第 14 図 1 号廃棄物埋設施設の解析結果 (1/2)  
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)



難透水性覆土の透水係数

第 14 図 1 号廃棄物埋設施設の解析結果(2/2)  
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)

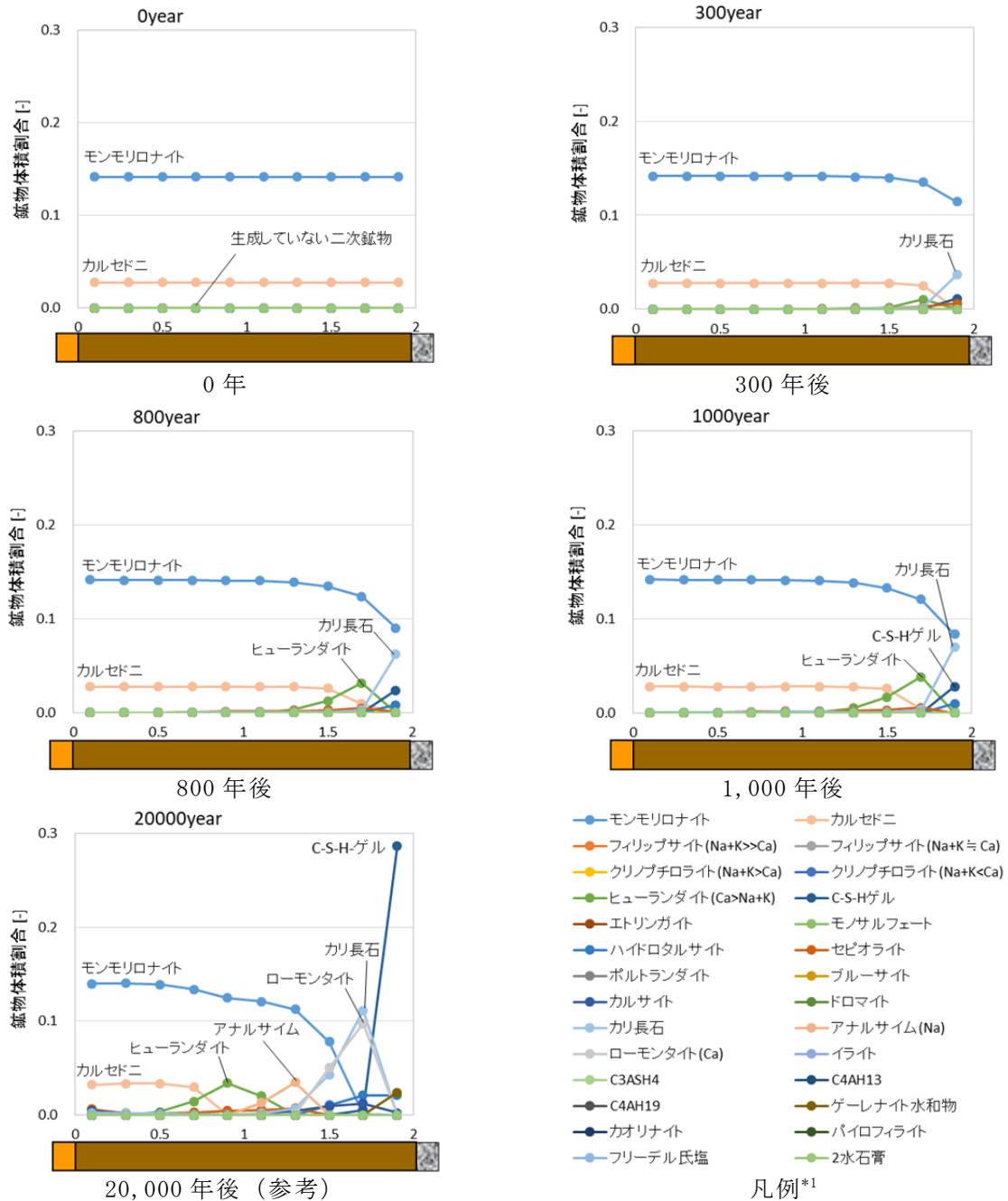
## 2. 難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類について

セメント系材料から供給されたアルカリ成分(Na、K、Ca)によりモンモリロナイトの溶解が生じると、モンモリロナイトを構成する主要元素である Al、Mg、Si の液相濃度が上昇するため、過飽和となり二次鉱物が生成する可能性がある。本解析においても、補足 5 本文「難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図」(第 7 図と第 10 図)に示すとおり、難透水性覆土中のモンモリロナイトが溶解すると同時に、二次鉱物が生成することが確認された。

そこで、難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類(鉱物体積割合)について、モンモリロナイトを構成する代表的な成分(Al、Mg、Si)及びセメント系材料から供給されたアルカリ成分(Na、K、Ca)に着目しながら確認することで、覆土が長期間にわたり低透水性を維持することができる要因分析の参考とした。

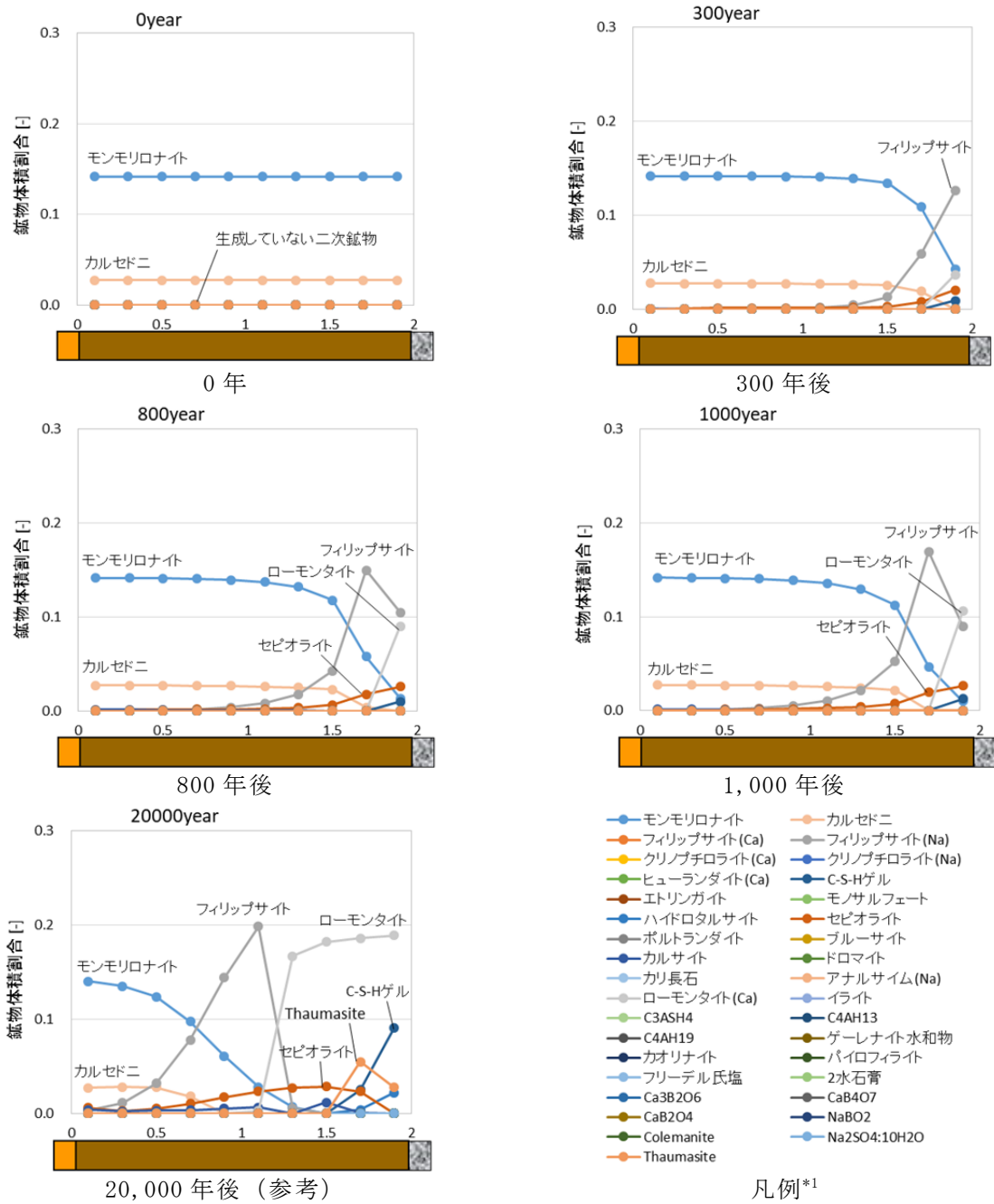
補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)について、3 号廃棄物埋設施設は第 15 図に、1 号廃棄物埋設施設は第 16 図に示す。二次鉱物として、カリ長石、ゼオライト(ヒューランダイト、フィリップサイト、ローモンタイト)が支配的であり、その他セピオライトや C-S-H ゲルも生成していることを確認した。セメント系材料から供給されるアルカリ成分について、Na はフィリップサイト ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )、K はカリ長石 ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )、Ca は主に C-S-H ゲル、ローモンタイト ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )、ヒューランダイト ( $\text{Na}_{0.167}\text{K}_{0.066}\text{Ca}_{0.55}\text{Al}_{1.333}\text{Si}_{4.667}\text{H}_{8.67}\text{O}_{16.335}$ ) により消費され

ているものと考えられる。一方、モンモリロナイトの溶解で生じた Al、Mg、Si について、Al は主にカリ長石とゼオライトに、Mg は主にセピオライト ( $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2(OH_2)_2 \cdot 4H_2O$ ) に、Si は生成した二次鉱物全般により消費されているものと考えられる。



\*1 鉱物名に記した( )内は、ゼオライトのアルカリ、アルカリ土類元素の組成を表す。

第 15 図 3 号廃棄物埋設施設の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)



\*1 鉱物名に記した( )内は、ゼオライトのアルカリ、アルカリ土類元素の組成を表す。

第 16 図 1 号廃棄物埋設施設の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)

以上

廃棄物埋設施設における  
許可基準規則への適合性について

第十条第四号 廃棄物埋設地

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

－透水係数の設定－

2020年1月

日本原燃株式会社

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 状態変化の評価.....	2
(1) 力学的影響.....	2
(2) 化学的影響.....	4
(3) 状態変化の重畳.....	6
3. 廃棄物埋設地の状態設定.....	8
(1) 覆土の状態設定.....	9
(2) 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数.....	12
(3) その他の廃棄物埋設地の状態設定.....	16

参考資料 1 低透水性を有する覆土に対して等価透水係数を設定することの妥当性

## 1. はじめに

本資料は「第十条第四号 廃棄物埋設地(廃止措置の開始後の評価)」のうち廃棄物埋設地の状態設定(透水係数の設定)を補足説明するものである。

覆土の透水係数及び厚さに対する状態変化の評価に基づき、廃棄物埋設地の長期状態を設定する。「補足説明資料 4\_力学的影響」及び「補足説明資料 5\_化学的影響」の評価結果を基に、力学的影響及び化学的影響を考慮した廃棄物埋設地の状態を設定し、線量評価に用いる覆土の等価透水係数を算出する。

なお、水理的影響により大きな状態変化は発生しないことから、状態設定においては直接的な影響として考慮しないものとする。

状態設定においては、埋設設備内に含まれる廃棄体の種類によって評価が異なることから、1号廃棄物埋設施設、2号廃棄物埋設施設及び3号廃棄物埋設施設で個別に設定を行う。

また、廃棄物埋設地における埋設設備及び地盤についても状態設定を行い、透水係数を設定する。

## 2. 状態変化の評価

### (1) 力学的影響

金属及び埋設設備の膨張並びに埋設設備の陥没に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性（透水係数及び覆土厚さ）への影響評価をした結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると評価する。（詳細は「補足説明資料 4\_力学的影響」を参照）

#### (i) 難透水性覆土の変形

##### a. 埋設設備の膨張による覆土の変形

難透水性覆土の状況を第 1 表に示す。確からしい設定においては開口が生じず、膨張量の大きい 2 号及び 3 号の厳しい設定において 2m の開口が生じると評価する。

第 1 表 埋設設備膨張量及び覆土状況

		1,000 年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3 号	埋設設備膨張量[m]	0.35	5.0
	難透水性覆土の状況	1m 以上残る (開口無し)	2m 開口
1 号	埋設設備膨張量[m]	0.0332	1.26
	難透水性覆土の状況	1m 以上残る (開口無し)	ほぼ残らない (開口無し)
2 号	埋設設備膨張量[m]	0.164	2.25
	難透水性覆土の状況	1m 以上残る (開口無し)	2m 開口



b. 埋設設備の陥没による覆土の変形

難透水性覆土の状況を第2表に示す。確からしい設定及び厳しい設定において、ともに破断や厚さの変化が生じないと評価する。

第2表 埋設設備陥没量及び覆土状況

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
1号	埋設設備陥没量 [m]	1.0	1.0
	難透水性覆土 の状況	厚さの変化 無し	厚さの変化 無し

(ii) 下部覆土の変形

破断や厚さの変化が生じないと評価する。

## (2) 化学的影響

地球化学解析を用いて等価透水係数の変遷を評価した結果から、透水係数に化学的変質が生じると評価する。(詳細は「補足説明資料 5\_化学的影響」を参照)

### (i) 難透水性覆土の変質

難透水性覆土の変質後における透水係数及び変質フロント(透水係数が初期値を下回る領域の到達点)に対する覆土の残り長さ(以下「健全部残長」という。)を第3表に示す。化学的影響は難透水性覆土内に留まると評価する。

第3表 変質後の難透水性覆土の透水係数及び健全部残長

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.02 \times 10^{-10}$
	健全部残長[m]	1.6	1.2
1号	透水係数[m/s]	$1.42 \times 10^{-10}$	$1.84 \times 10^{-10}$
	健全部残長[m]	0.8	0.2
2号*1	透水係数[m/s]	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.02 \times 10^{-10}$
	健全部残長[m]	1.6	1.2

\*1 3号の結果を流用

(ii) 下部覆土の変質

下部覆土の変質後における透水係数及び健全部残長を第4表に示す。下部覆土は化学的影響により変質を受けないと評価する。変質を受ける場合においても、直近の難透水性覆土の影響度合いが小さく、下部覆土に対する影響範囲は限定的であり、健全部残長は1.5m以上であると評価する。

なお、変質後の透水係数に関しても $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 以下であると評価する。

第4表 変質後の下部覆土の透水係数

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0
1号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0
2号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0

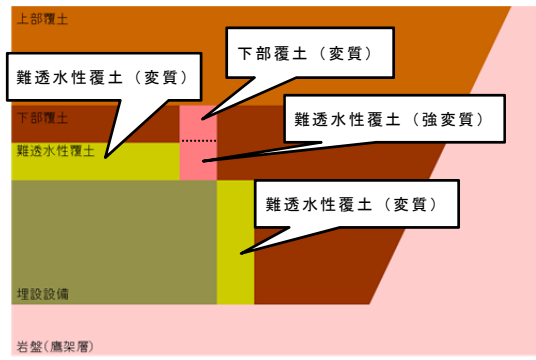
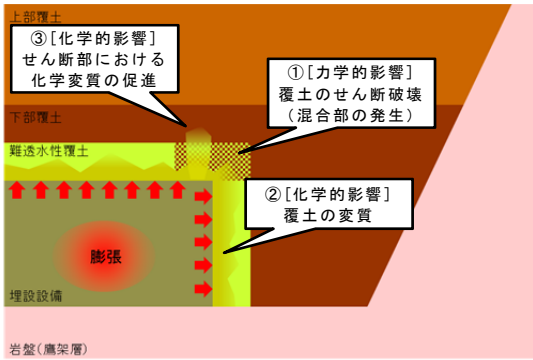
### (3) 状態変化の重畳

力学的影響により覆土は変形するが、透水係数は変化しないと評価している。ここで、化学的影響による透水係数上昇の主要因であるモンモリロナイトの溶解については、微粒分の変質現象であり、変形特性に対する影響は軽微であると考えられる。

化学的影響により覆土の透水係数が増加すると評価している。ここで、力学的影響では透水係数が増加しないため、覆土の変質要因である化学物質の供給量に対する影響は軽微であると考えられる。

以上のことから、力学的影響及び化学的影響は相互干渉せずに、独立して覆土に影響を与えると判断するが、状態設定においては、透水係数の増加を局所的に見込むものとする。

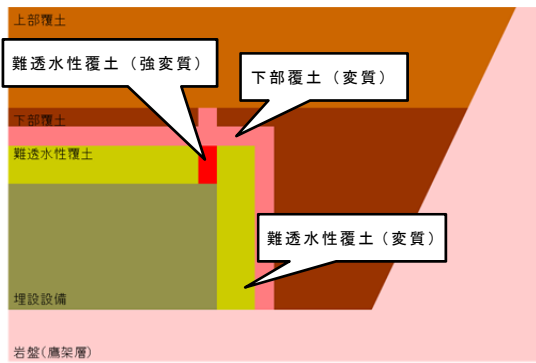
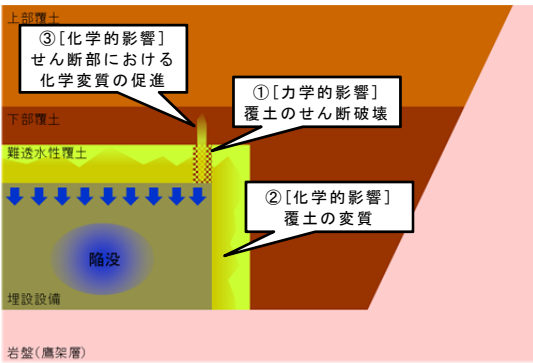
力学的影響及び化学的影響を重ね合わせた概念図について、力学的影響における変形形態の整理に倣い、埋設設備膨張時の状態変化を第1図に、埋設設備陥没時の状態変化を第2図に示す。



a. 状態設定で想定する状態変化の重畳

b. 覆土の状態設定

第 1 図 埋設設備膨張時の状態変化及び状態設定の概念図



a. 状態設定で想定する状態変化の重畳

b. 覆土の状態設定

第 2 図 埋設設備陥没時の状態変化及び状態設定の概念図

### 3. 廃棄物埋設地の状態設定

評価結果を基に、力学的影響及び化学的影響を考慮した廃棄物埋設地の状態を設定する。

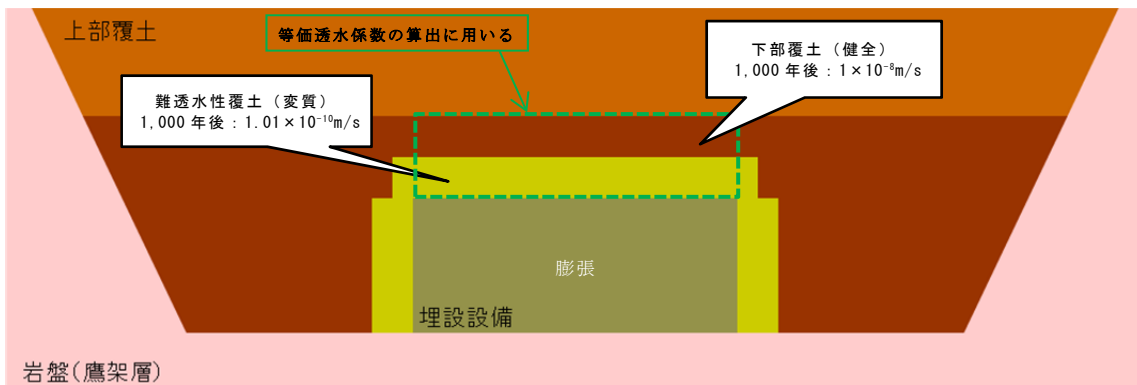
なお、側方の覆土状態に比べ、上方の覆土状態の変質度合いが大きいことから、埋設設備を取り囲む覆土の等価透水係数を算出する際には、上方の覆土状態を対象とした等価透水係数にて代表させる。

(1) 覆土の状態設定

(i) 3号廃棄物埋設地

a. 確からしい設定（開口が生じないケース）

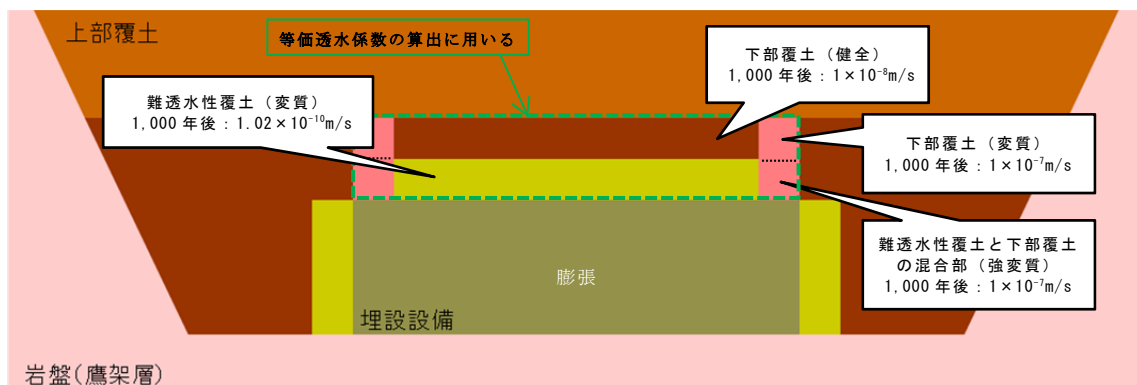
力学的影響により開口を生じないことから、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。設定した状態を第3図に示す。



第3図 3号廃棄物埋設地の状態設定（確からしい設定）

b. 厳しい設定（2mの開口が生じるケース）

開口部付近の「難透水性覆土と下部覆土の混合部（強変質）」においては化学変質が促進されるものとして、透水係数を変質後から更に2オーダー以上引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第4図に示す。

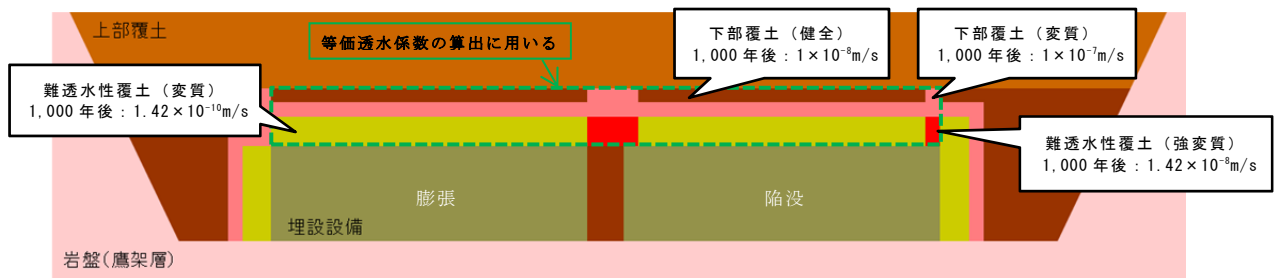


第4図 3号廃棄物埋設地の状態設定（厳しい設定）

(ii) 1号廃棄物埋設地

a. 確からしい設定（開口が生じないケース）

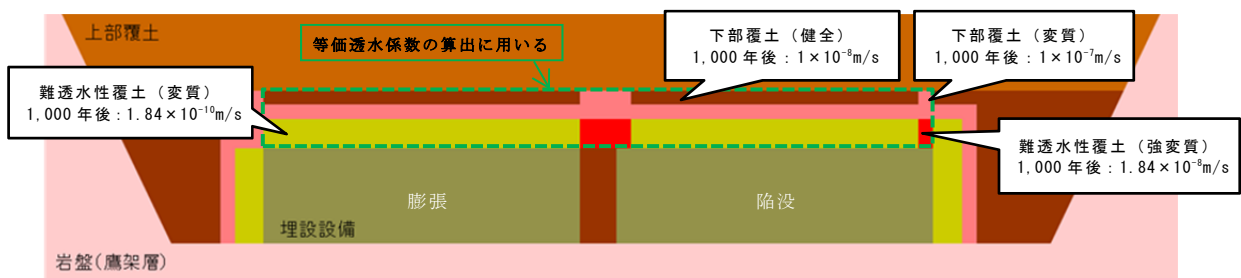
力学的影響により開口を生じないが、陥没によるせん断部付近の「難透水性覆土（強変質）」においては化学変質が促進されるものとして透水係数を変質後から更に2オーダー引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第5図に示す。



第5図 1号廃棄物埋設地の状態設定（確からしい設定）

b. 厳しい設定（開口が生じないケース）

力学的影響により開口を生じないが、陥没によるせん断部付近の「難透水性覆土（強変質）」においては化学変質が促進されるものとして透水係数を変質後から更に2オーダー引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第6図に示す。



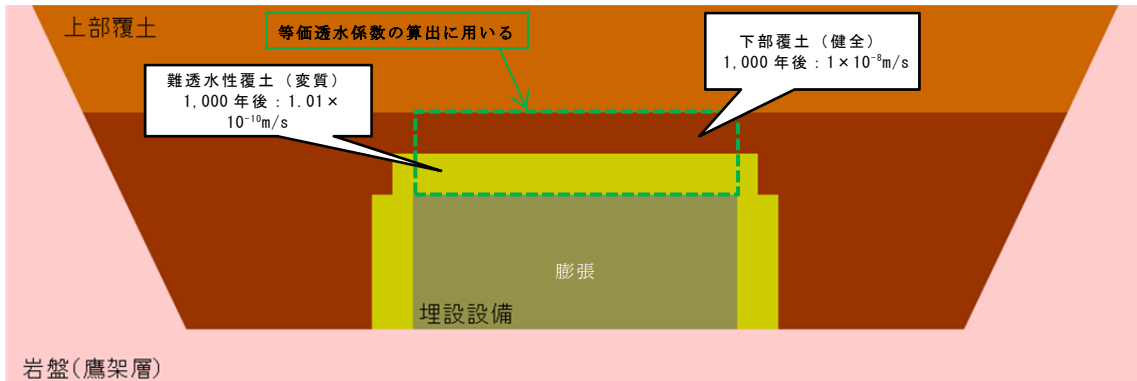
第6図 1号廃棄物埋設地の状態設定（厳しい設定）



(iii) 2号廃棄物埋設地

a. 確からしい設定（開口が生じないケース）

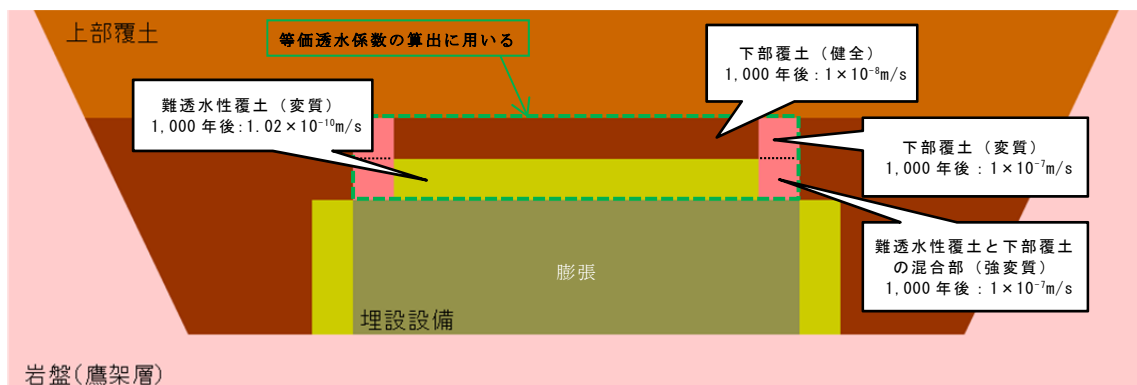
力学的影響により開口を生じないことから、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。設定した状態を第7図に示す。



第7図 2号廃棄物埋設地の状態設定（確からしい設定）

b. 厳しい設定（2mの開口が生じるケース）

開口部付近の「難透水性覆土と下部覆土の混合部」においては化学変質が促進されるものとして、透水係数を変質後から更に2オーダー以上引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第8図に示す。



第8図 2号廃棄物埋設地の状態設定（厳しい設定）

(2) 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数

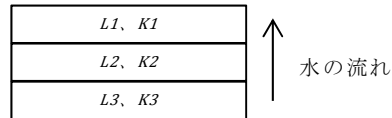
覆土の状態設定を用いて、難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数を算出する。側方の覆土状態に比べ、上方の覆土状態の変質度合いが大きいため、埋設設備の上方の覆土を対象に等価透水係数を算出し、流出水量の計算において上方及び側方の透水係数として用いる。したがって、覆土内の地下水の流動方向によらず、埋設設備から外部への核種移行を検討する際に用いる最も保守的な等価透水係数となる。

なお、透水係数の異なる複数の土質材料が存在していることから、以下に示す直列方向の合成と並列方向の合成を組み合わせることで、覆土の等価透水係数を算出する。

<鉛直直列方向の合成式> 
$$K = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i/K_i)}$$

$L_i$  : i 番目の層の覆土厚さ [m]

$K_i$  : i 番目の層の透水係数 [m/s]

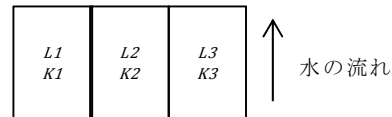


<鉛直並列方向の合成式>

$$K = \frac{\sum (K_i \times L_i)}{\sum L_i}$$

$L_i$  : i 列目の覆土幅 [m]



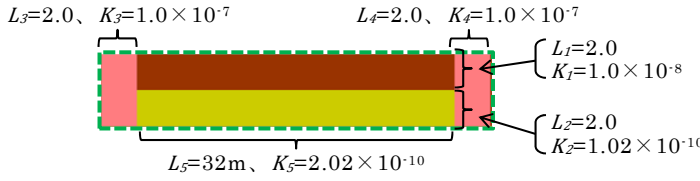
$K_i$  : i 列目の透水係数 [m/s]



(i) 3号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第5表及び第6表に示す。

第5表 覆土の透水係数設定 (3号廃棄物埋設地)

時期	—
0年 (初期)	
時期	確からしい設定
1,000年後	
時期	厳しい設定
1,000年後	

$L$ : 長さ (m)、 $K$ : 透水係数 (m/s)

第6表 覆土の等価透水係数 (3号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
計算値[m/s]	$1.98 \times 10^{-10}$	$2.00 \times 10^{-10}$	$1.13 \times 10^{-8}$
設定値[m/s]	—	$2.00 \times 10^{-10}$	$1.50 \times 10^{-8}$

(ii) 1号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第7表及び第8表に示す。

第7表 覆土の透水係数設定 (1号廃棄物埋設地)

時期	—	
0年 (初期)		
時期	確からしい設定	
1,000年 後		
時期	厳しい設定	
1,000年 後		

$L$ : 長さ (m)、 $K$ : 透水係数 (m/s)



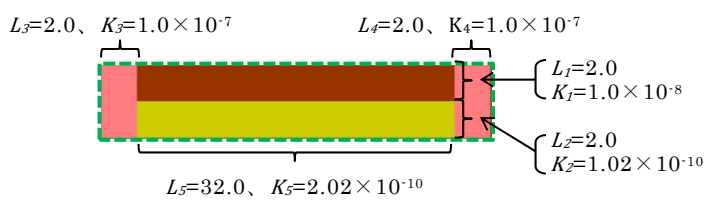
第8表 覆土の等価透水係数 (1号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
計算値[m/s]	$1.98 \times 10^{-10}$	$2.39 \times 10^{-9}$	$3.00 \times 10^{-9}$
設定値[m/s]	—	$2.50 \times 10^{-9}$	$3.00 \times 10^{-9}$

(iii) 2号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第9表及び第10表に示す。

第9表 覆土の透水係数設定 (2号廃棄物埋設地)

時期	—
0年 (初期)	
時期	確からしい設定
1,000年 後	
時期	厳しい設定
1,000年 後	

$L$ : 長さ (m)、 $K$ : 透水係数 (m/s)

第10表 覆土の等価透水係数 (2号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
計算値[m/s]	$1.98 \times 10^{-10}$	$2.00 \times 10^{-10}$	$1.13 \times 10^{-8}$
設定値[m/s]	—	$2.00 \times 10^{-10}$	$1.50 \times 10^{-8}$

(3) その他の廃棄物埋設地の状態設定

廃棄物埋設地における埋設設備及び地盤について、以下のとおり状態設定を行い、1,000年後の透水係数を設定する。

(i) 埋設設備

コンクリート構造物である埋設設備は、エトリングガイトの生成による内部破壊やセメントの溶脱による固結性低下により、長期状態においてほぼ砂程度の状態となることが想定される。そのため、確からしい設定及び厳しい設定における透水係数を  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$  と設定する。

(ii) 岩盤（「補足説明資料 1\_地質環境に係る長期変動事象」を参照）

断層運動及び地震の影響により岩盤の透水性は大きく変化しないと想定される。そのため、長期状態における透水係数は初期値のまま継続すると設定する。地盤の透水係数を第 11 表に示す。

第 11 表 地盤の透水係数

ケース	材料区分	3号廃棄物埋設地 [m/s]	1号廃棄物埋設地 [m/s]	2号廃棄物埋設地 [m/s]
確からしい 設定	第四紀層	$3.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-6}$
	鷹架層	$5.0 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^{-8}$
厳しい 設定	第四紀層	$3.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-6}$
	鷹架層	$5.0 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^{-8}$

低透水性を有する覆土に対して  
等価透水係数を設定することの妥当性

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 妥当性の確認方法.....	1
3. 確認結果.....	3



## 1. はじめに

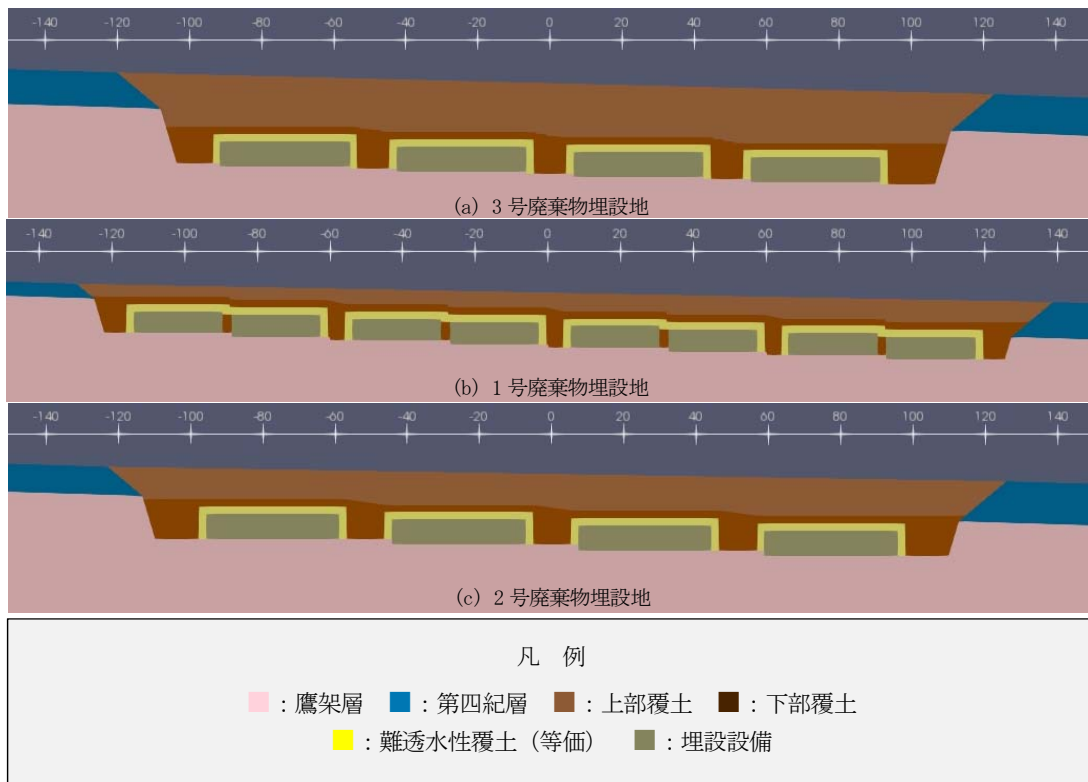
本資料は、2次元地下水浸透流解析で等価透水係数を設定することの妥当性を示すものである。

なお、2次元地下水浸透流解析は、線量評価パラメータである「埋設設備から覆土及び鷹架層への流出水量」を求めるために利用している。一方で、線量評価は1次元モデルにより解析を実施していることから、前段の2次元地下水浸透流解析においては、埋設設備から周辺への移行経路をモデリングしやすいように、低透水性を有する覆土の劣化後の透水係数を等価透水係数として設定している。

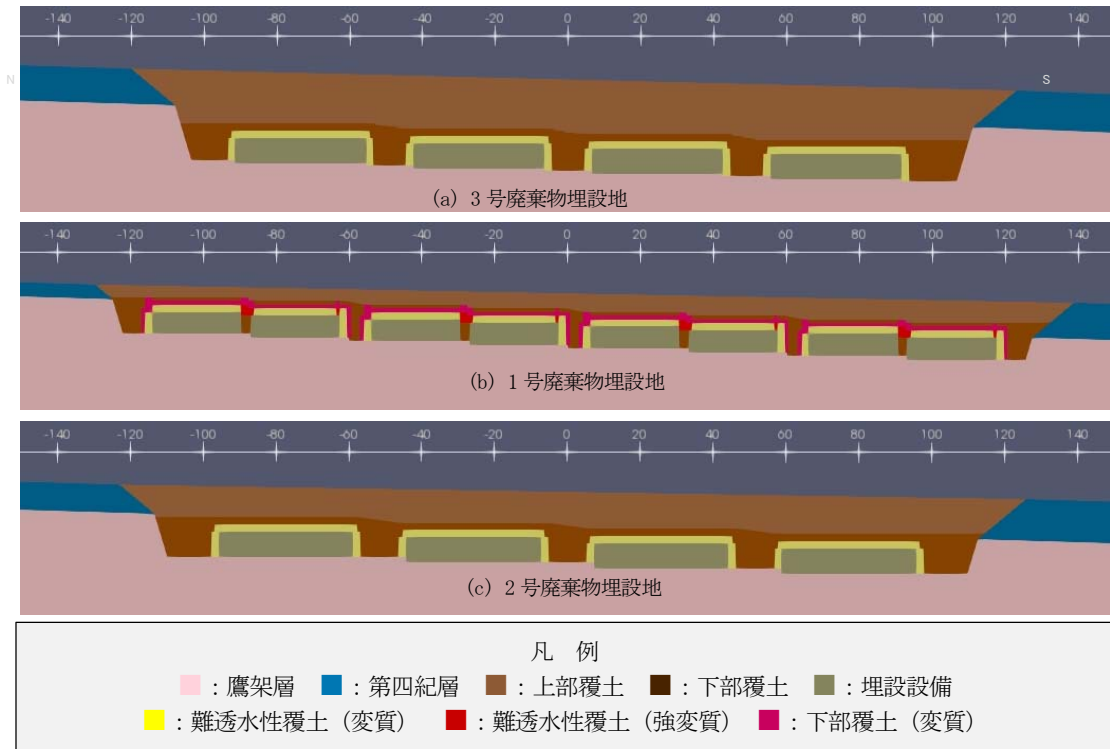
## 2. 妥当性の確認方法

力学的影響及び化学的影響を考慮した状態設定に従い、変質部の透水係数を部分的に配置したモデル（劣化箇所反映モデル）を第1図～第3図に示す。本モデルを用いて流出水量を算出後、等価透水係数を用いたモデル（等価透水係数モデル）による流出水量と比較し、必要に応じて線量評価により影響を確認する。

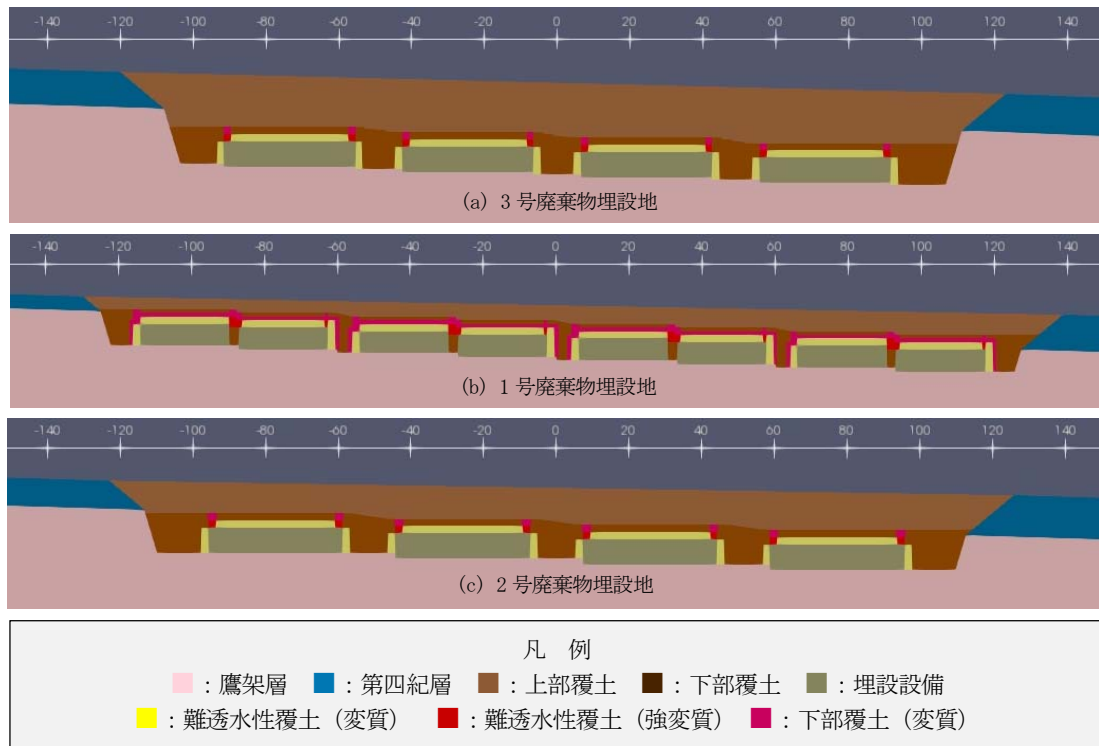
なお、モデル以外の解析条件は「補足説明資料7\_埋設設備からの流出水量」のうち「3. 埋設設備から覆土及び鷹架層への流出水量の計算に必要な条件設定及び計算結果」と同様とする。



第1図 廃棄物埋設地付近の材料分布(等価透水係数モデル)



第2図 廃棄物埋設地付近の材料分布(劣化箇所反映モデル 確からしい設定)



第3図 廃棄物埋設地付近の材料分布(劣化箇所反映モデル 厳しい設定)

### 3. 確認結果

等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルの埋設設備からの流出水量を第1表に示す。等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルにおいて大きな差はなく、劣化箇所反映モデルの線量評価に影響を与えない見込みがあることを確認した。

第1表 等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルの埋設設備からの流出水量

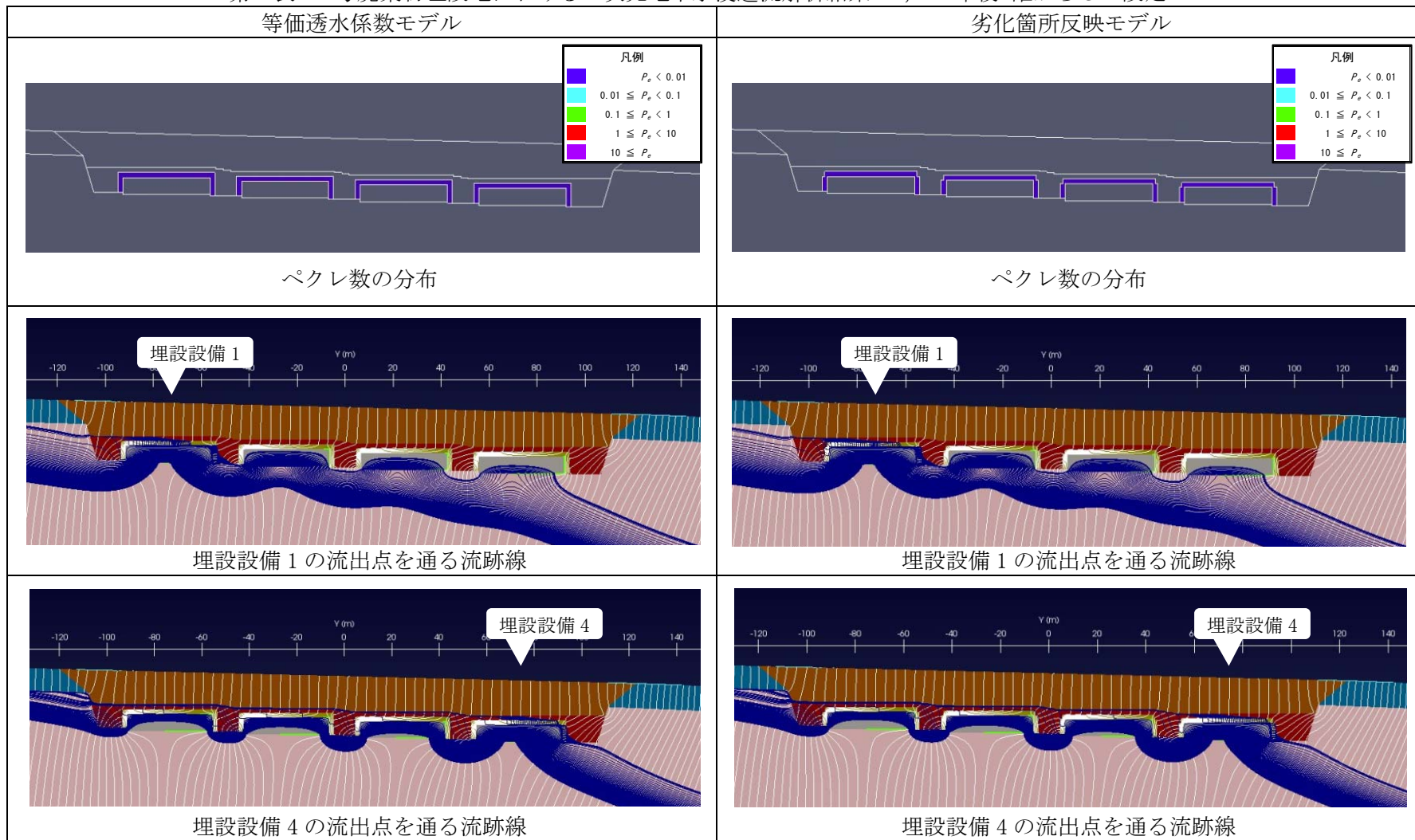
計算ケース	モデル	3号廃棄物埋設地		1号廃棄物埋設地		2号廃棄物埋設地		
		$Qco(t)$ [m <sup>3</sup> /y]	$Qgo(t)$ [m <sup>3</sup> /y]	$Qco(t)$ [m <sup>3</sup> /y]	$Qgo(t)$ [m <sup>3</sup> /y]	$Qco(t)$ [m <sup>3</sup> /y]	$Qgo(t)$ [m <sup>3</sup> /y]	
確からしい設定	寒冷化ケース	①等価透水係数モデル	10	630	130	2,200	20	920
		②劣化箇所反映モデル	10	630	110	2,200	20	910
		差(②-①)	0	0	-20	0	0	-10
	温暖期継続ケース	①等価透水係数モデル	10	630	130	2,200	20	920
		②劣化箇所反映モデル	10	630	110	2,200	20	910
		差(②-①)	0	0	-20	0	0	-10
厳しい設定	寒冷化ケース	①等価透水係数モデル	510	1,500	150	2,200	350	1,300
		②劣化箇所反映モデル	460	1,500	130	2,200	280	1,300
		差(②-①)	-50	0	-20	0	-70	0
	温暖期継続ケース	①等価透水係数モデル	510	1,500	150	2,200	350	1,300
		②劣化箇所反映モデル	460	1,500	130	2,200	280	1,300
		差(②-①)	-50	0	-20	0	-70	0

\*1  $Qco(t)$ : 埋設設備から覆土への流出水量[m<sup>3</sup>/y]  
 $Qgo(t)$ : 埋設設備から鷹架層への流出水量[m<sup>3</sup>/y]

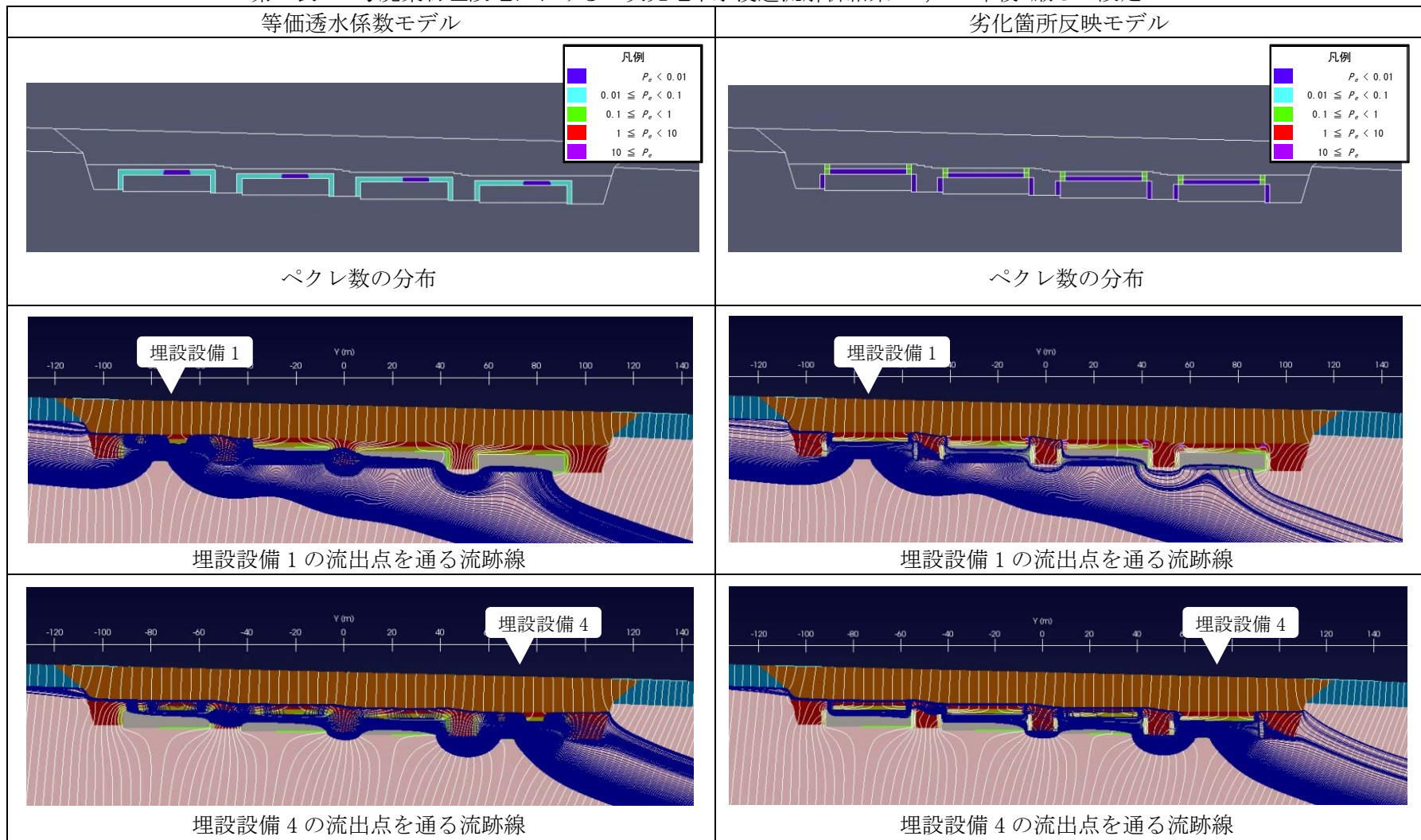
また、等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルのペクレ数分布及び流跡線を第2表～第7表に示す。低透水性を期待する難透水性覆土及び下部覆土において、両モデルともにペクレ数が1未満であることから、拡散場となっていることを確認した。流跡線についても、両モデルで傾向に大きな差異はなく、同等であることを確認した。

以上のことから、2次元地下水浸透流解析を行う際に、覆土における変質部の透水係数を部分的に配置せず、等価透水係数を設定することは妥当であると判断する。

第2表 3号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 確からしい設定>

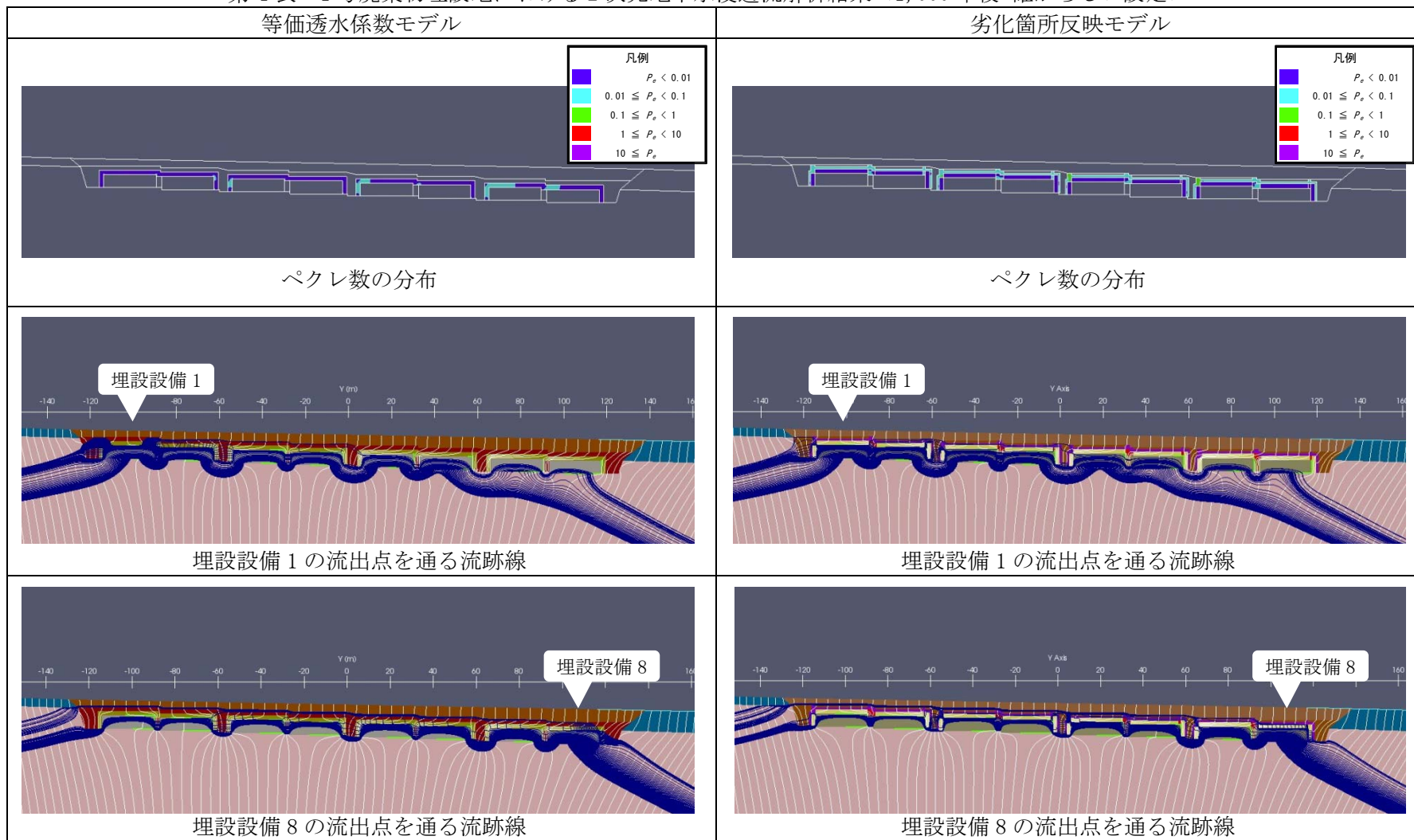


第3表 3号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 厳しい設定>

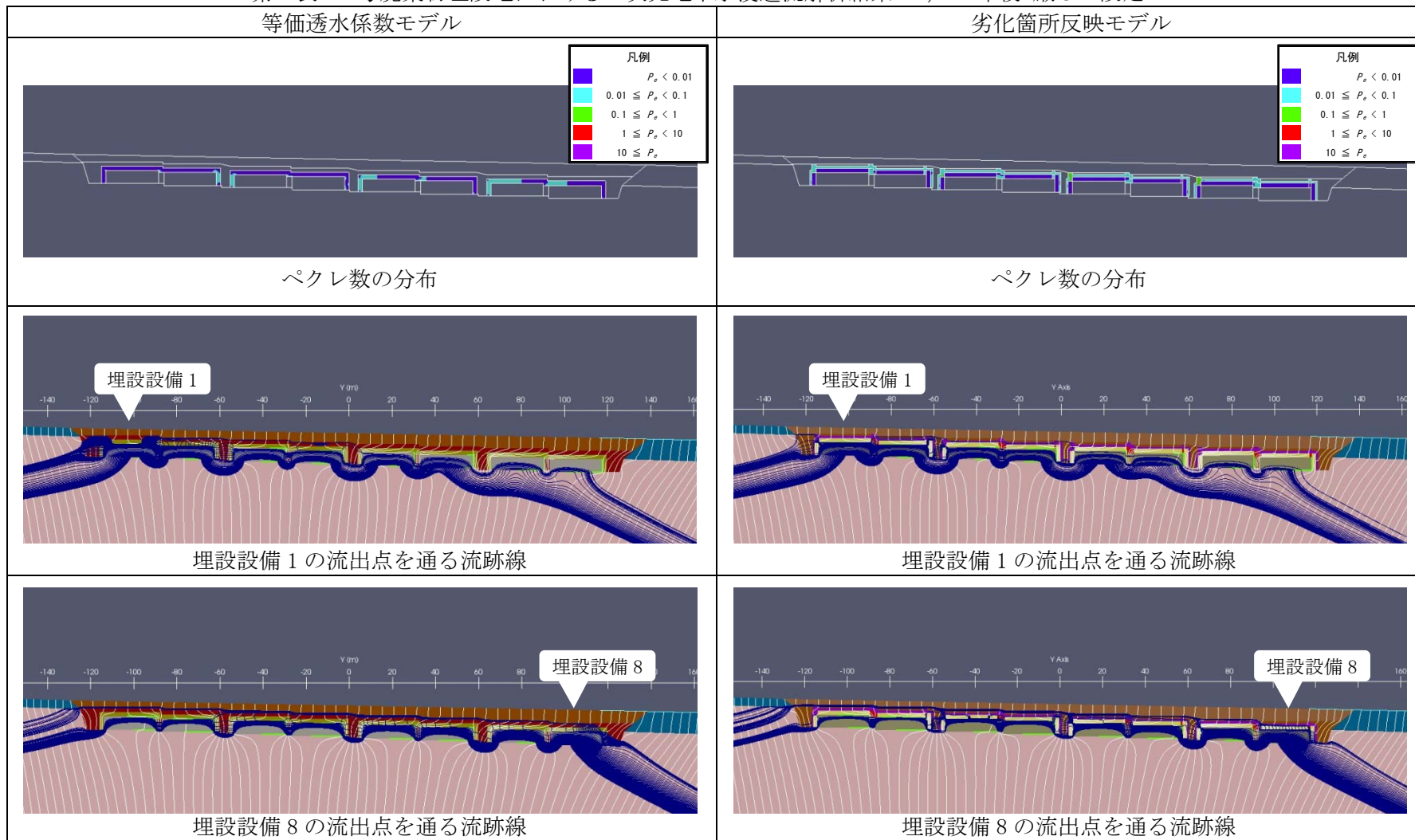




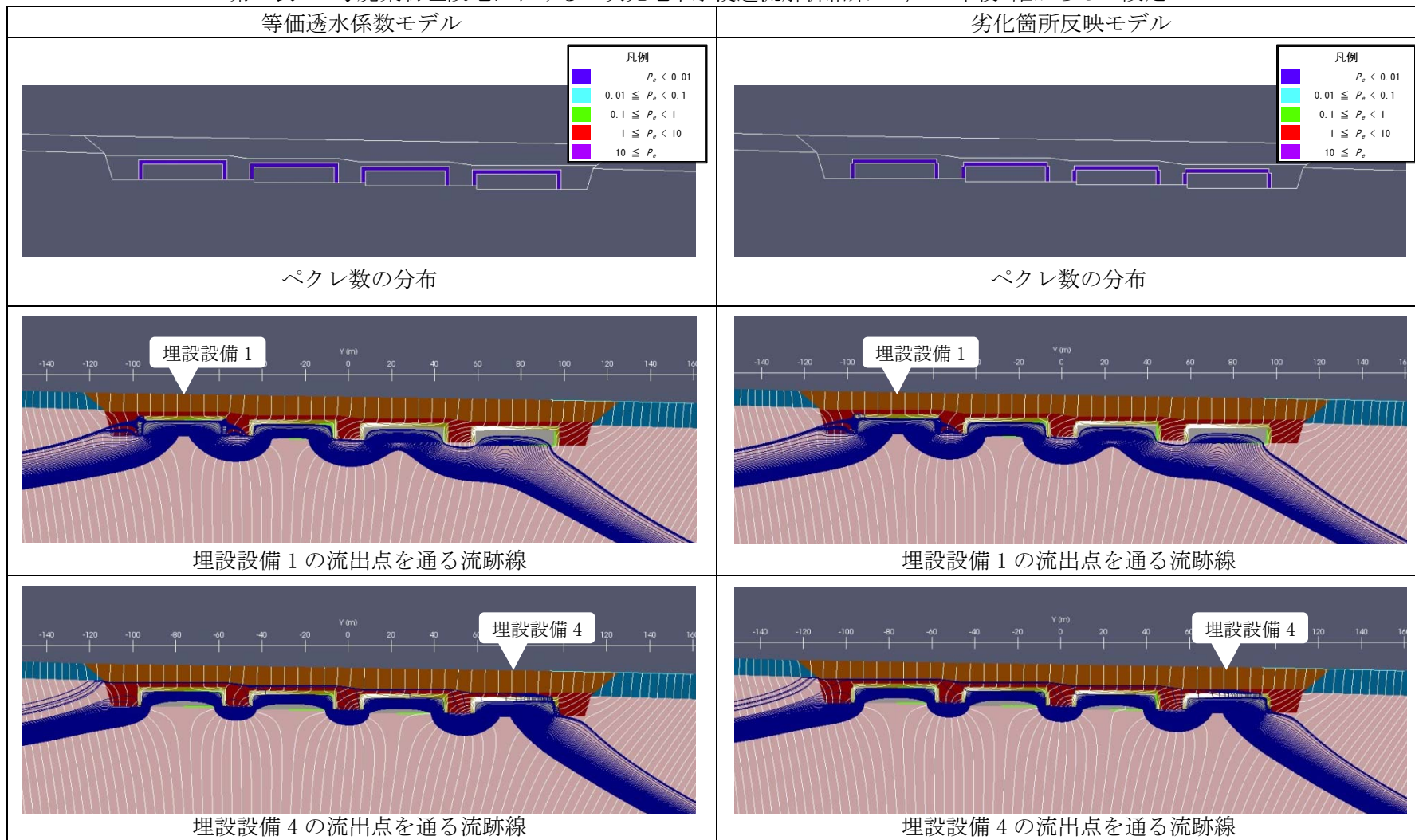
第4表 1号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 確からしい設定>



第5表 1号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 厳しい設定>



第6表 2号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 確からしい設定>





第7表 2号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 厳しい設定>

