

#### 4. 総合的な核種移行評価手法の整備

## 4. 総合的な核種移行評価手法の整備

### 4.1 はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物（以下、HLW）等の地層処分は、2000年10月の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」により事業化が行われている。その後、2007年の同法改正に伴い長半減期低発熱性放射性廃棄物（以下、TRU廃棄物）の一部も地層処分の対象に含まれた。最終的な処分地選定に向けて、今後、規制当局による処分候補地に対する安全審査等が行われ、その際には地層処分の安全性を判断するための評価手法が必要である。そのため、日本原子力研究開発機構安全研究センター（以下、JAEA）では、総合的な核種移行評価手法の整備を進めている。

地層処分の安全評価においては地質・気候関連事象を考慮した地下水流動条件を設定した上で、廃棄体から人工バリア、天然バリアを経由して放出される放射性核種のフラックス及び生物圏における被ばく量を一連で評価する必要がある（核種移行評価）。ここでは、第2章及び第3章における検討結果を考慮し、①人工バリアの各評価モデルの適切なリンケージの方法、②リスク論的考え方に基づく安全評価シナリオとそれらの長期評価における不確実性への対応などを検討し、我が国で想定される地層処分地下環境へ適用可能な総合的な安全評価手法としての方法論の全体とりまとめを行った。

平成25年度までに、確率論的安全評価コード（GSRW-PSA等）を始めとした総合的安全評価手法を体系的に整備し、廃棄体から人工バリア、天然バリアを経由して放出される放射性核種のフラックス及び生物圏における被ばく量を一連で評価するために、個々の要素モデル及びコード間のリンケージを図るとともに、コードの検証、評価手法についての課題の整理を行ってきた。

本年度は、仮想的な結晶質岩サイトを対象とした総合的な解析に向け、平成25年度までに整備した安全評価コード群について、廃棄体・人工バリアから亀裂媒体への核種移行を一連で評価するためのリンケージ機能を追加した。また、改良したコードを用いた感度解析等を通して、結晶質岩サイトを対象とした核種移行評価手法について安全審査に向けて残された課題の整理を行った。特に、廃棄体・人工バリアから亀裂媒体への核種移行を一連で評価するため、人工バリア材の透水性の時間的変化を評価できる解析コードMC-BUFFERと亀裂性媒体中での地下水流動・核種移行解析コードFRAC3Dのリンケージについて検討した。

また、3章で検討した地質・気候関連事象の中で、発生の可能性は小さいが発生した場合に影響の大きい事象として選定し、従来の機能では対象としていない火山活動による影響についてGSRW-PSAにその評価機能を追加し、コードを拡張した。

## 4.2 結晶質岩サイトの核種移行評価手法の整備

地層処分施設の安全評価シナリオのうち地下水シナリオにおいては、施設から漏洩する核種を含んだ地下水が、結晶質岩等の亀裂性媒体あるいは堆積岩等の多孔質媒体中を流動し、生態圏に到達することを想定している。このシナリオの中で最も重要なパラメータとして地下水流速があげられる。地下水流速は地質媒体の流動特性に強く依存し、周辺環境条件の変化によっても変動する。特に、地質媒体として亀裂を多く含む岩盤（花崗岩等の亀裂性岩盤）の場合、地下水は選択的に亀裂の間隙中を流動する。このような亀裂性媒体中での地下水流動を解析するため、FRAC3D コードを開発した。

FRAC3D では亀裂を円形平板状と仮定し、観測された走向・傾斜・亀裂密度等の統計的情報を元に亀裂ネットワークを作成する FRAC3D\_G、亀裂ネットワーク内での地下水流動解析を行う FRAC3D\_F、さらに亀裂ネットワーク内での核種移行解析を行う FRAC3D\_C、計算結果の可視化を行う FRAC3D\_P の4つのサブコードで構成されている。亀裂内での地下水流動・核種移行解析は、亀裂間の連結を1次元パイプモデルで仮定した解析と2次元平行円盤状の亀裂が立体的交差している状況を考慮した2次元平板モデルが用いることができる。

本年度は仮想的な結晶質岩サイトを対象とした総合的な解析手法の整備に向け、廃棄体・人工バリアから亀裂媒体への核種移行を一連で評価するためのリンケージ機能の追加を行った。特に、廃棄体・人工バリアから亀裂媒体への核種移行を一連の流れで評価するため、人工バリア材の透水性の時間的変化を評価できる解析コードMC-BUFFERと亀裂性媒体中での地下水流動・核種移行解析コードFRAC3Dのリンケージ機能を検討した。その後、3次元の広域スケール、サイトスケールでの亀裂性媒体（亀裂ネットワーク）、さらにその内部に存在する各人工バリア要素からなる処分坑道（内部3Dモデル）、の3つの評価体系を考慮可能とした地下水流動を解析するコードシステムの整備を実施した。具体的には3次元地下水流動解析コード：3D-SEEPと亀裂性媒体での地下水流動解析コード：FRAC3Dの解析機能を連携して解析できる評価手法を整備するとともに、MC-BUFFERにより出力された透水性の時間的変化の情報を、内部3Dモデルにおいて考慮可能となるよう改良を行った。整備した手法による解析の流れを図4.2-1に示す。

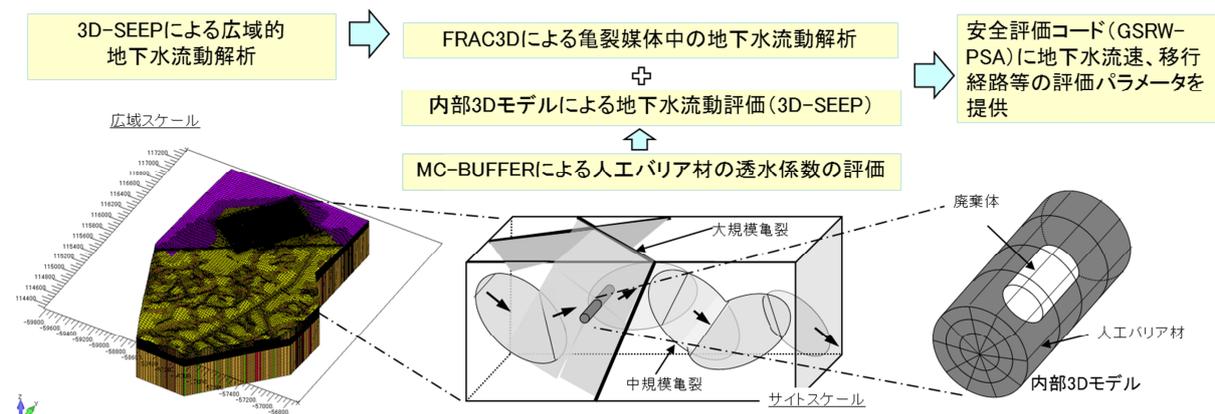


図 4.2-1 結晶質岩サイトの核種移行評価手法における解析手順

### 4.2.1 亀裂性媒体中での地下水流動解析に係るコード拡張

結晶質岩サイトを対象とした総合的な解析手法の整備に向け、廃棄体・人工バリアから亀裂媒体への核種移行を一連で評価するため、亀裂性媒体中での地下水流動・核種移行解析コード：

FRAC3D のリンケージ機能の拡張を行った。

この拡張では、亀裂性岩盤における亀裂ネットワーク内部・外部に、等価多孔体による 3D モデルが存在する場での地下水流動解析を可能とするための改良を行ったものである。FRAC3D による亀裂ネットワーク内部には、処分場坑道を模擬した等価多孔体による内部 3D モデルを考慮し、外部には地下水の流出域での環境を模擬した外部 3D モデルを考慮し、これらを連成させた地下水流動解析に対応するための改良を行った。これにより、処分坑道内部の地下水流動—処分場周辺の亀裂媒体中での地下水流動—処分施設を含む広域地下水流動を連成して解析することが可能となった。なお、等価多孔体である内部・外部 3D モデルに関しては有限要素法による 3 次元地下水流動・核種移行解析コード：3D-SEEP によって解析し、亀裂ネットワークモデルについては FRAC3D によって解析できる。具体的な拡張事項を以下に記述する。

#### (1) 内部および外部 3D モデルの処理機能の追加

広域スケールでの多孔質媒体 3D モデル（外部 3D モデル）には、内部に FRAC3D による亀裂ネットワークモデルが存在し、さらに、亀裂ネットワークモデルの内部に処分場を模擬した等価多孔体 3D モデル（内部 3D モデル）が存在する領域でのモデル作成機能の追加を行った。この処理を行うためには、外部 3D モデルと内部 3D モデルを区別する必要がある。入力データに外部 3D モデルと内部 3D モデルを区別するためのモデル種別を入力するためのデータ項目を追加するとともに、コード内で外部 3D モデルと内部 3D モデルをそれぞれ識別する機能を加えた。また、内部 3D モデルの外側境界の節点は、亀裂ネットワークモデルとの結合節点として使用するため、プログラム内部で内部 3D モデルの外側境界の節点を自動検出する機能を追加した。同様の処理を外部 3D モデルに対しても行った。

#### (2) 亀裂ネットワークのモデリング機能

解析開始時には、内部 3D モデルと亀裂ネットワークモデルは空間的に重複したモデルとなる。その後、重複部分を一時的に削除処理する必要があるため、亀裂性媒体モデルの重複部分をカットしてリモデリングする機能を追加した。この機能では、内部 3D モデルと亀裂ネットワークモデルの重複部分を自動検出し、亀裂ネットワークモデルの要素のうち、内部 3D モデルと重複する要素を削除し、また、亀裂性媒体モデルの要素を削除して残った部分の節点（亀裂ネットワークモデル内側境界節点）を自動検出し、内部 3D モデルとの結合部分として設定する機能である。

#### (3) 内部・外部 3D モデル結合機能

内部 3D モデルと亀裂ネットワークモデルを結合し、亀裂ネットワークモデル内に内部 3D モデルが存在するモデルを作成する機能を追加した。内部 3D モデルの外側境界節点と亀裂ネットワークモデルの内側境界節点を結合部節点として 1 対 1 に結合させた。この時、結合された内部 3D モデル節点と亀裂ネットワークモデル節点は、同じ圧力水頭値を持つものとして計算を行うこととした。同様の処理を外部 3D モデルに対しても行った。

#### (4) 粒子移行解析機能の改良

前項での改良を踏まえ、地下水流動解析結果を用いた粒子追跡法による移行経路解析コード：PASS\_TRAC の改良を行った。現状の PASS\_TRAC は、FRAC3D、3D-SEEP 個々の解析結果には対応しているが、前項での改良に伴う、処分坑道内部の地下水流動—処分場周辺の亀裂媒体中での地下水流動—処分施設を含む広域地下水流動に対応した変更が必要となる。

以下に改良の詳細を示す。

##### 1) 外部 3D モデル+亀裂ネットワークモデル+内部 3D モデルの読み込み

3D-SEEP ファイルからのモデル読み込み機能の改良を行った。FRAC3D において、亀裂ネッ

トワークモデルでの解析計算結果は、3D-SEEP の計算結果ファイルとは別ファイルとして出力されているため、PASS\_TRAC において、一連の出力ファイルを取り込めるよう改良を行った。

#### 2) 内部・外部 3D モデルと亀裂ネットワークモデルの接合部分の処理機能の追加

外部 3D モデルと亀裂ネットワークモデル間、内部 3D モデルと亀裂ネットワークモデル間のそれぞれの接合部分について PASS\_TRAC コード内で認識し処理する機能を追加した。流路計算時はこの接合部分を介して、3D モデルと亀裂性媒体モデル間を粒子が移動することになる。粒子がモデル結合部分に達した場合には、3D モデルと亀裂ネットワークモデル間においてパーティクルの往来処理をできるようにするとともに、粒子が結合部分以外のモデル境界に達したときには計算終了するよう改良した。

#### 3) 亀裂ネットワークモデル用粒子移行解析機能の改良

FRAC3D による亀裂ネットワークモデル内では亀裂内での流動を模擬した 1 次元パイプあるいは 2 次元平面要素内での粒子移行解析が行われる。そのため、外部・内部モデルの多孔質体内での粒子移行解析アルゴリズムとは処理が異なる。よって、一連の粒子移行解析を連携して行うための改良を行った。

以上の改良により、外部 3D モデルと亀裂ネットワークモデル、加えて内部 3D モデルを一連の解析処理で扱えるよう拡張した。図 4.2-2 に外部・内部 3D モデルを作成した例を示す。

この拡張したコードによる解析の手順は以下のようになる。

1. 3D-SEEP で広域地下水流動解析を実施する。この時の外部 3D モデルは亀裂性岩盤部分の要素（仮）を含めて計算する。
2. 外部 3D モデルの境界節点（広域モデルと亀裂ネットワークモデルの接続部分の節点）の圧力水頭計算結果を、亀裂ネットワークモデルの拘束条件として設定し、亀裂ネットワークモデルの地下水流動解析を行う。
3. 亀裂ネットワークモデルの境界節点の流量を求め、外部 3D モデルの境界条件として地下水流動解析を実施する。この時の外部 3D モデルは亀裂性岩盤部分の要素（仮）は削除したものを使用する。
4. 上記 2～3 を計算結果が収束するまで反復計算を行う。

この手法は、外部 3D モデル解析結果の圧力水頭値を亀裂ネットワークモデルの境界条件として反復計算を行うものであり、亀裂ネットワークモデルの流量を外部 3D モデルの内部境界条件とする手法である。この時、亀裂ネットワークモデルの境界部分における流量を境界条件として使用しているため、外部 3D モデルと亀裂ネットワークモデル間の質量は保存される。

さらに、亀裂ネットワークモデルの中に内部 3D モデルがある場合は、亀裂ネットワークモデルと内部 3D モデルにおいても同様の手順を実行する。つまり、2. 次のプロセスとして内部 3D モデルの地下水流動解析を行い、その結果を亀裂ネットワークモデルに返すことになる。

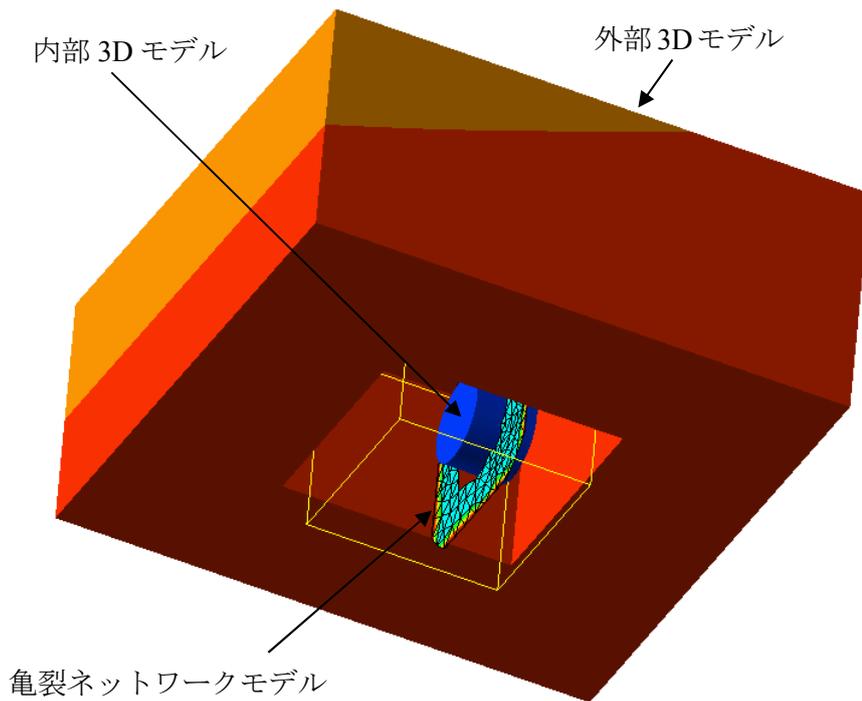


図 4.2-2 外側 3D モデルと亀裂ネットワークモデルと内部 3D モデルの連結例(切断面表示)

#### 4.2.2 仮想的な結晶質岩サイトを対象とした地下水流動解析

前項で改良した解析コードの適用性検討のため、仮想処分場を想定した地下水流動解析を実施した。より現実的な条件での亀裂性媒体中での地下水流動評価を実施するためには、亀裂ネットワークのモデル化とそれら物性値、周辺環境での境界条件の設定が必要となる。よって、亀裂性岩盤に関する調査事例が多数報告<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>されている愛媛県の菊間石油備蓄基地の花岡岩地域を仮想的な処分サイトとした地下水流動解析を実施した。

解析対象となる範囲を図 4.2-3 に示す。

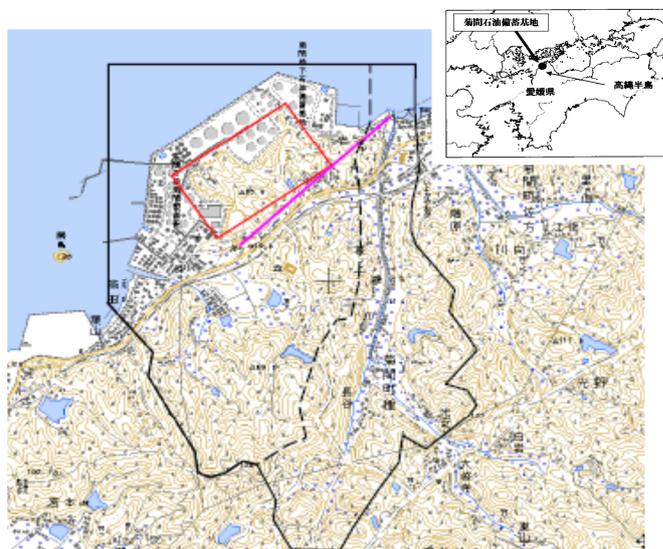


図 4.2-3 解析対象範囲（黒線は対象範囲、破線は稜線、赤線は亀裂ネットワークモデル作成領域、ピンク線は地質調査所(1986)<sup>(6)</sup>による断層帯を示す）

原子力機構では、菊間石油地下備蓄基地周辺領域に対する解析を実施している<sup>(6)</sup>。その際、亀裂データ（走向、傾斜、亀裂密度等の観測結果）等を収集・整理しており、それらデータを用いた広域地下水流動モデル（外部 3D モデルに相当）、仮想的処分場を含む亀裂ネットワークモデル、仮想処分場モデル（内部 3D モデルに相当）を作成し、一連の解析を実施し、本手法の適用性を確認すると共に、亀裂ネットワークモデルの対象である結晶質岩等に対する重要な調査項目を検討した。

まず、石油備蓄基地周辺における地表踏査および坑道掘進時に現れた亀裂等の観察結果を基に広域的な水理地質構造モデルを構築した。解析領域は東西方向 2 km×南北 3 km、深度-500m であり、要素数は約 280 万となった。このモデルに対し、3D-SEEP による広域地下水流動解析を行った結果を図 4.2-4 に示す。解析時の境界条件は海岸域で水位拘束、地表面で涵養量 73mm/y の条件とし、側面及び底面については不透水条件とした。解析に用いた各水理地質単元と水理パラメータを表 4.2-1 に示す。解析の結果から、大局的な流れとして標高の高い南部の領域から、海岸方向への流動が示された。また、仮想処分場を想定している領域（FRAC3D モデル領域）内での平均的地下水流速は、0.2~2.8m/y を示した。この解析結果を FRAC3D モデル境界位置での水頭値を境界条件として FRAC3D にデータを受け渡し、引き続き亀裂性岩盤中での地下水流動解析を実施した。

亀裂ネットワーク中での地下水流動解析においては、観測された亀裂を決定論に基づきモデル化することは可能であるが、未観測領域における亀裂をモデル化することができない。そのため、観測された亀裂の統計的データを基にして、未観測領域での亀裂ネットワークについて乱数を用いて確率的に亀裂を発生させ、その後、亀裂ネットワークを構築する（これをリアライゼーションと呼ぶ）。FRAC3D で作成した亀裂ネットワーク例を図 4.2-5 に示す。この亀裂ネットワークの作成に関わるデータ・手法に関しては次節の感度解析において詳細に記述する。

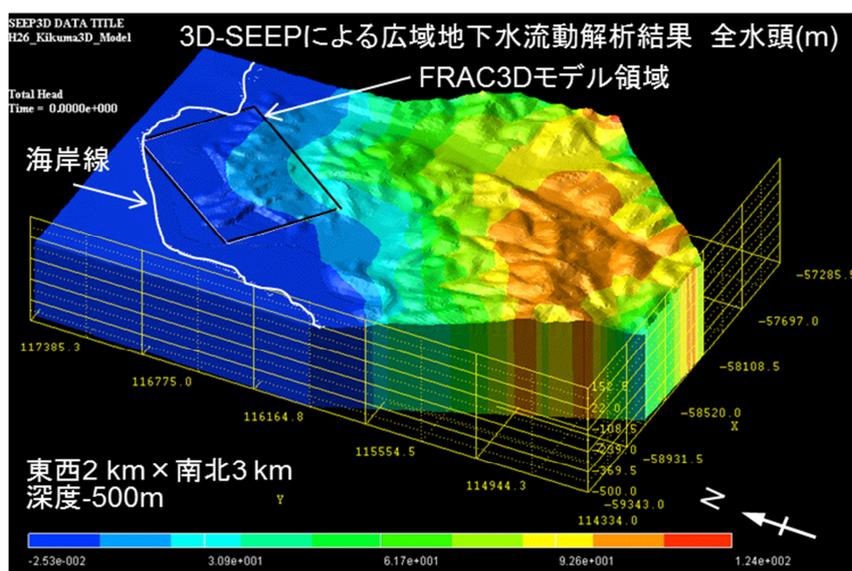


図 4.2-4 3D-SEEP による広域地下水流動解析結果

表 4.2-1 広域地下水流動モデルにおける各水理地質単元の水理パラメータ

地質時代		地質単元	水理地質単元	透水係数 (m/sec)	有効間隙率 (%)	
第四紀	完新世	沖積層	礫、砂および泥	$1.0 \times 10^{-5}$	20	
中生代	白亜紀	領家花崗岩類	花崗閃緑岩、 トータル岩	D級（マサ状風 化帯）	$1.0 \times 10^{-6}$	20
				CL～CM級	$1.0 \times 10^{-8}$	5
				CH～B級 （新鮮部）	$1.0 \times 10^{-10}$	1

断層	高透水性	$2.0 \times 10^{-7}$	10
亀裂帯	高透水性	$2.0 \times 10^{-7}$	10
亀裂帯	低透水性	$1.0 \times 10^{-8}$	5

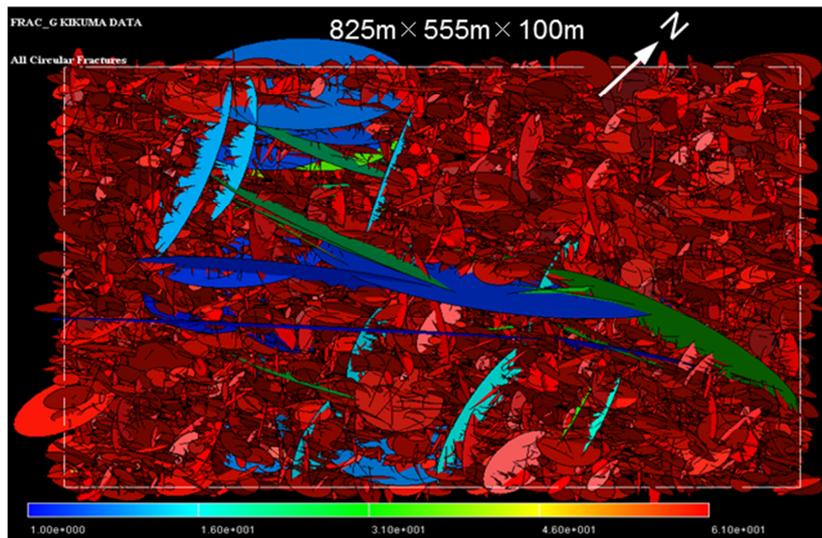


図 4.2-5 FRAC3D で作成した亀裂ネットワーク例  
(青、緑：観測された主要亀裂、赤：確率論的に発生した亀裂)

また、広域地下水流動解析の結果を受けて、亀裂ネットワーク中での地下水流動解析の結果を図 4.2-6 に示す。図では全水頭圧の変化を 1 次元パイプ状の地下水流動経路上にカラーコンターで示している。3D-SEEP の解析結果で示された山地部領域の全水頭圧の大きな影響は、FRAC3D による亀裂性媒体内での地下水流動にも影響を及ぼし、山地部付近から海側方向への流動が確認できる。

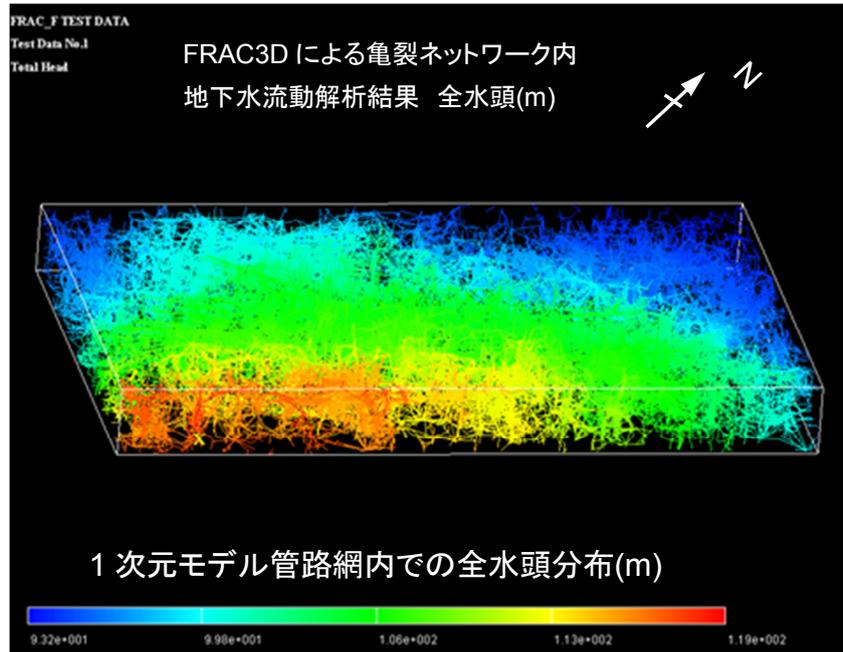


図 4.2-6 FRAC3D での地下水流動解析結果（リアライゼーションの一例）

FRAC3D 領域の内部に存在する仮想処分場として、人工バリアの各要素からなる処分坑道（内部 3D モデル）を図 4.2-7 のように作成した。作成にあたっては、NUMO-TR-05-02<sup>(7)</sup>等の既存情報を基に深度 300m 位置に処分坑道、連絡坑道のレイアウト（図 4.2-8、4.2-9）を参考に廃棄体周辺構造を含めて内部 3D モデルとして構築した。

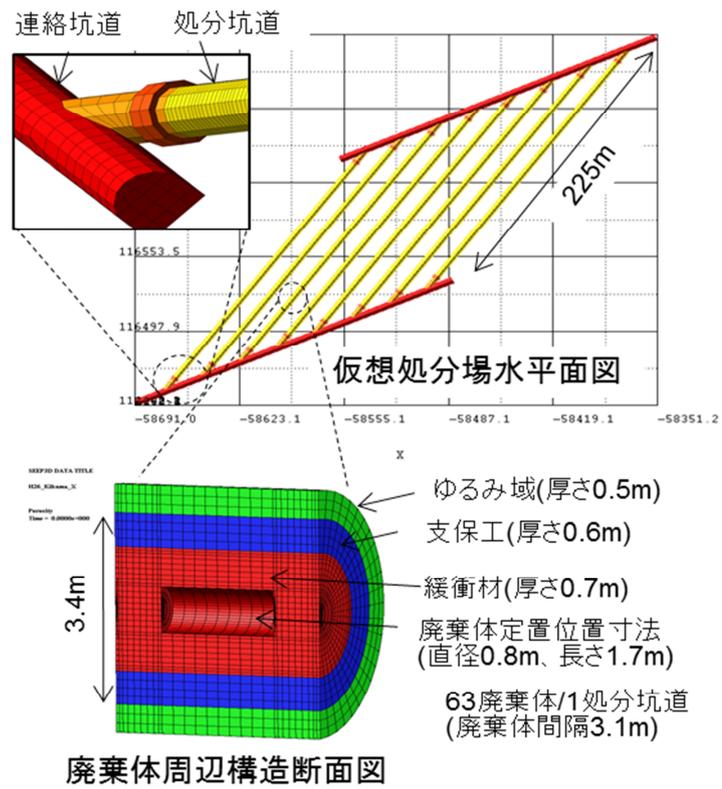


図 4.2-7 仮想処分場の設定 (内部 3D モデル)

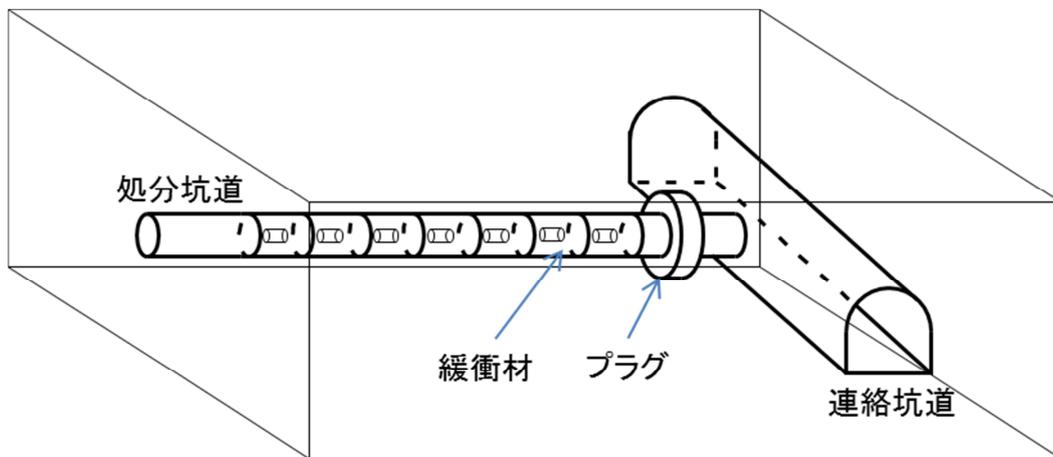


図 4.2-8 仮想処分場の構成

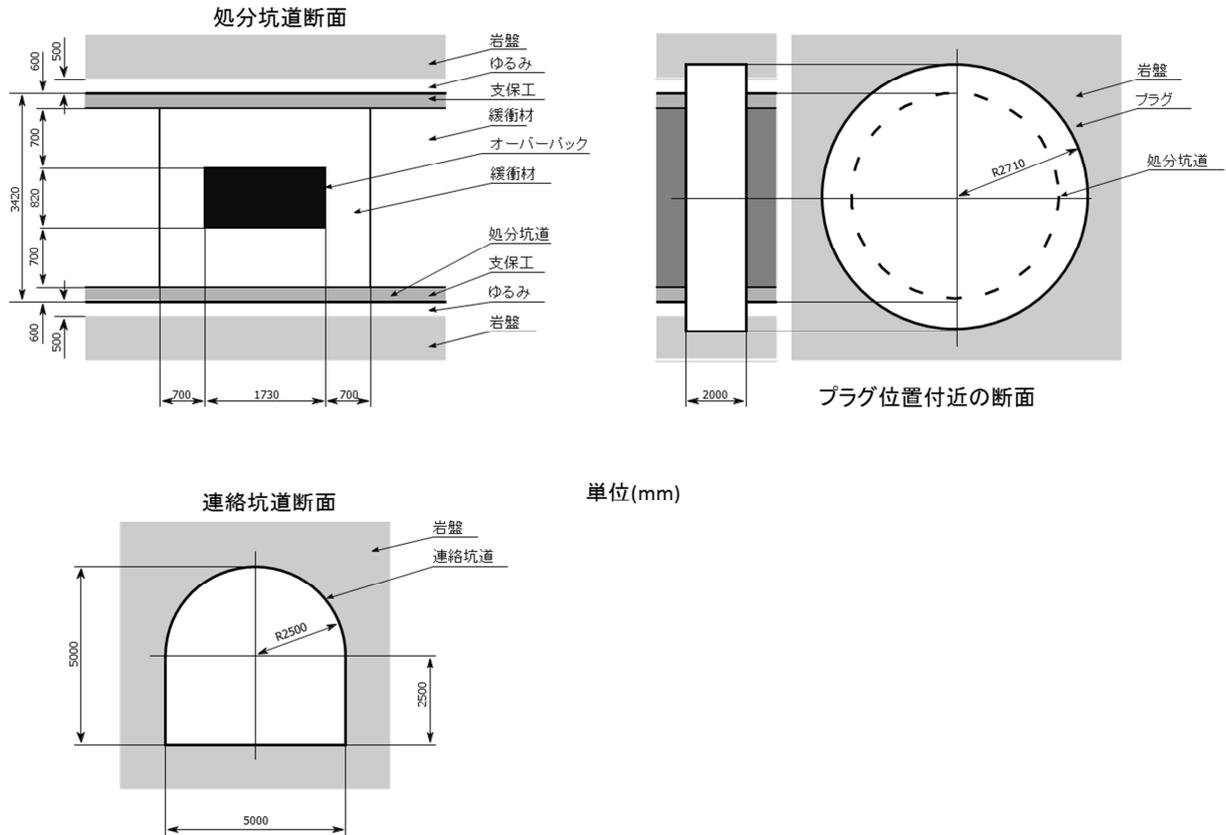


図 4.2-9 処分坑道、連絡坑道等の仮想寸法（単位：mm）

緩衝材、プラグの透水係数に関しては、H25 年度緩衝材変質・間隙水組成の評価<sup>(8)</sup>では 26 ケースの評価が行われており、亀裂性媒体地下水流動解析で本年度設定を考えている条件である降水系、緩衝材厚さ 0.7m、支保工厚さ 0.09m に近いケースの解析例を参照にした。表 4.2-2 に MC-BUFFER による処分開始時点および 10 万年経過時点での緩衝材の透水パラメータの変化を示す。その際の MC-BUFFER で想定されている条件を表 4.2-3 に示す。また、支保工や埋め戻し材、プラグの透水特性は「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<sup>(9)</sup>」を参考に設定した。

内部 3D モデルを多孔質媒体と仮定した場合、上記の FRAC3D による亀裂面と内部 3D モデルとの境界位置に対し、FRAC3D による全水頭解析結果を境界条件として与えることで、内部 3D モデル内での地下水流動解析を有限要素法による 3 次元地下水流動・核種移行解析コード 3D-SEEP によって解析が可能となる。また、この内部 3D モデルには MC-BUFFER による緩衝材の透水性の時間変化と連携する機能を持たせることによって、処分後の経過時間とともに緩衝材の透水性が変化した場合の地下水流動の解析を可能としている。

図 4.2-10 に内部 3D モデル内での全水頭圧の 3D-SEEP による解析結果を示す。図は亀裂が処分坑道内の廃棄体外側の緩み域と側面で接触している部分を示している。この場合では、亀裂間（図で右方向亀裂接触面と左方向亀裂接触面）で緩衝材等の内部 3D モデルを経て地下水流動が生じることになる。図は、動水勾配がおおよそ 0.1 程度の大きいケースを例とした。図は処分後の経過時間 10 万年の場合であり、MC-BUFFER の計算結果による緩衝材の透水性の劣化が著しい最も外側の部分（廃棄体から 0.7m の位置）では、その透水係数は  $6.4 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$  から 5 桁程度劣化し  $2.2 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$  に変化している。緩衝材の透水性の変化は緩衝材の内側部分（廃

棄体から 0.6m の位置以内) ではおよそ 1 桁程度の透水性の劣化を示し、支保工との接触部分以外は 10 万年程度の健全性を示している。

表 4.2-2 MC-BUFFER の計算結果から得られた処分開始時及び 10 万年経過時点での透水係数と間隙率

構成要素	廃棄体表面から要素代表点の距離(m)	透水係数 : m/sec		間隙率	
		処分開始時	100,000y	処分開始時	100,000y
緩衝材_1	0.025	6.42E-13	1.98E-11	0.4	0.376
緩衝材_2	0.075	6.42E-13	7.25E-12	0.4	0.338
緩衝材_3	0.175	6.42E-13	4.99E-12	0.4	0.344
緩衝材_4	0.275	6.42E-13	4.28E-12	0.4	0.346
緩衝材_5	0.375	6.42E-13	4.60E-12	0.4	0.345
緩衝材_6	0.475	6.42E-13	6.30E-12	0.4	0.337
緩衝材_7	0.575	6.42E-13	1.68E-11	0.4	0.307
緩衝材_8	0.625	6.42E-13	6.86E-11	0.4	0.215
緩衝材_9	0.675	6.42E-13	2.18E-07	0.4	0.038
支保工	1.000	1.00E-05	—	0.3333	—
ゆるみ	1.250	1.00E-07	—	0.366	—

表 4.2-3 MC-BUFFER での計算に用いられた諸条件

温度[°C]	地下水水質特性	緩衝材厚さ [m]	乾燥密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	混合率 [ベントナイト:クォーツ]	支保工厚さ[m]	溶存酸素
100~47	降水系	0.7	1600	7:3	0.6	無酸素

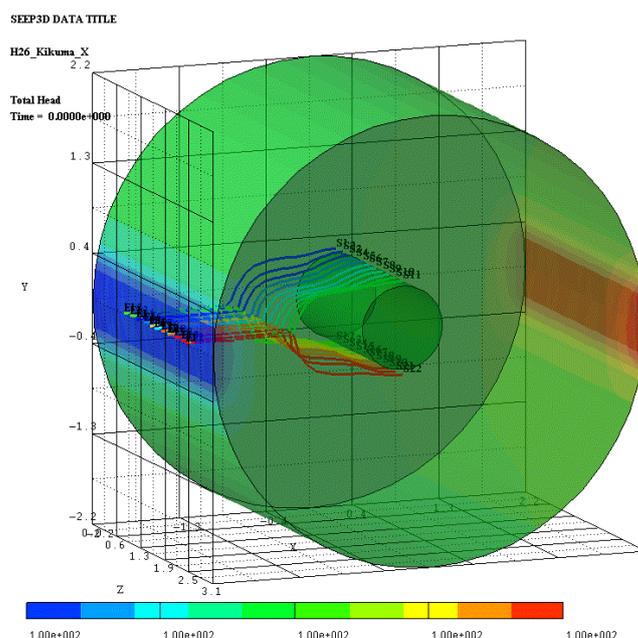


図 4.2-10 内部 3D モデル内での全水頭圧の解析結果 (両端の動水勾配 : 約 0.1)

また、図 4.2-10 には廃棄体直上からの核種の漏洩を想定した粒子移行解析の結果を示した(図中に移行経路を表示)。その結果、処分後 10 万年経過時点での、廃棄体直上位置から内部 3D モデルの最外側の要素である緩み域の領域外に粒子が移行するまでの平均時間は、約  $3.0 \times 10^5$  年(幾何平均値)であった。また平均移行速度は、 $2.7 \times 10^{-13} \text{m/sec}$  と非常に小さな値となった。

#### 4.2.3 亀裂性媒体中での地下水流動評価における影響解析

亀裂性媒体中での地下水流動評価において重要な調査項目を検討するため、亀裂ネットワークの設定条件と亀裂の透水性評価に関する影響を評価する解析を実施した。

##### (1) 亀裂長さと亀裂幅に関する感度解析

FRAC3D での亀裂ネットワークの構築においては、観測されたデータを基に構築するが、円形亀裂の直径(亀裂長さ)と亀裂幅(透水性)に関してはその評価手法が確定しているとは言い難い。そのため、①亀裂長さ、②亀裂幅に関する感度解析を実施した。

菊間石油備蓄基地での亀裂の空間分布は詳細に調査されている<sup>(10)</sup>。石油備蓄基地周辺における地表踏査および坑道掘進時に現れた亀裂等の観察結果から広域的には合計 22 条の亀裂帯が確認される。概略的特徴を以下に示す。

- ・ 走向：N30~40E 系、N60~70E 系、N30W 系と N70~80W 系の 4 方向
- ・ 傾斜：鉛直に近い急傾斜、 $30 \sim 60^\circ$  の緩い傾斜の 2 種類に分類

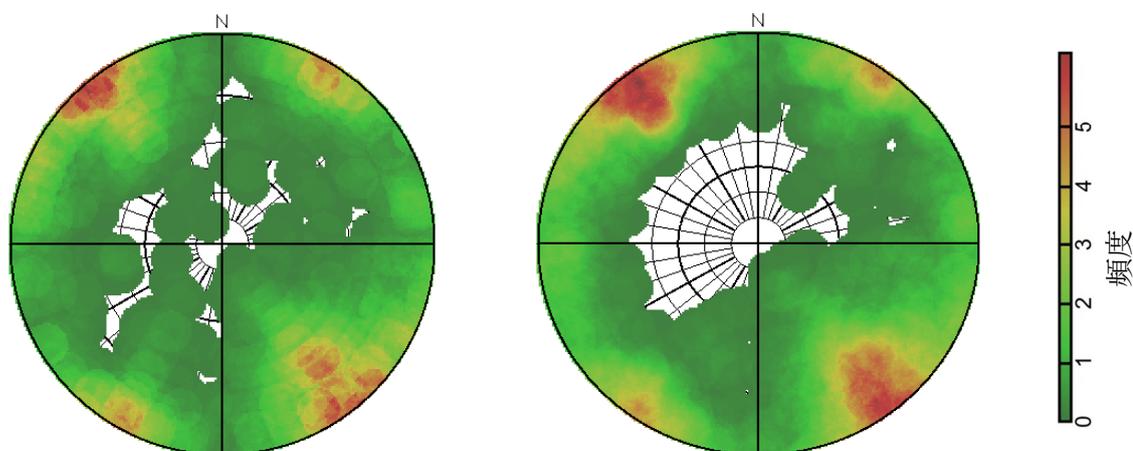
また、FRAC3D で亀裂ネットワークを構築するために発生させる亀裂は以下に分類される。

- 1) 坑壁観察結果から推定した連続する亀裂：20 系(大規模亀裂)を設定
- 2) その他に既往地質図に記載されている亀裂：57 系(中規模亀裂)を設定
- 3) 坑壁で観察した亀裂のデータ：1,843 点(小規模亀裂)

このうち、1)、2)は観測された亀裂長さを直径と仮定し、決定論的に円盤状亀裂を作成する。

3)については統計データを基に確率論的に生成する(1,000 リアライゼーション)。このシミュレーション結果が、観測された亀裂の亀裂密度  $0.367[\text{本/m}]$  となるよう亀裂発生数を調整することで亀裂ネットワークを構築している。この亀裂ネットワークに対する地下水流動解析・粒子移行解析を実施し、亀裂媒体中での開始位置(仮想処分場内の廃棄体直上位置)から亀裂媒体領域外に移行するまでの移行経路、移行時間、平均移行時間を評価した。

図 4.2-11 に石油備蓄基地で観測された亀裂帯の走向傾斜と FRAC3D によって発生させた亀裂ネットワークにおける走向傾斜に関するシュミットネットを示す。本図の色は出現頻度を示し、赤が高く緑が低い値を示している。



(a) 観測された亀裂の走向傾斜

(b)FRAC3D による亀裂の走向傾斜

図 4.2-11 亀裂の走向傾斜の観測値とシミュレーション結果

FRAC3Dによって発生させた亀裂ネットワークを用いて地下水流動解析を実施し、その結果に対し粒子移行解析を実施した。図4.2-12に粒子移行解析の移行経路に関する一例を示す。図には仮想処分場と共に上記1)、2)で示した決定論的亀裂のみを同時に表示している。

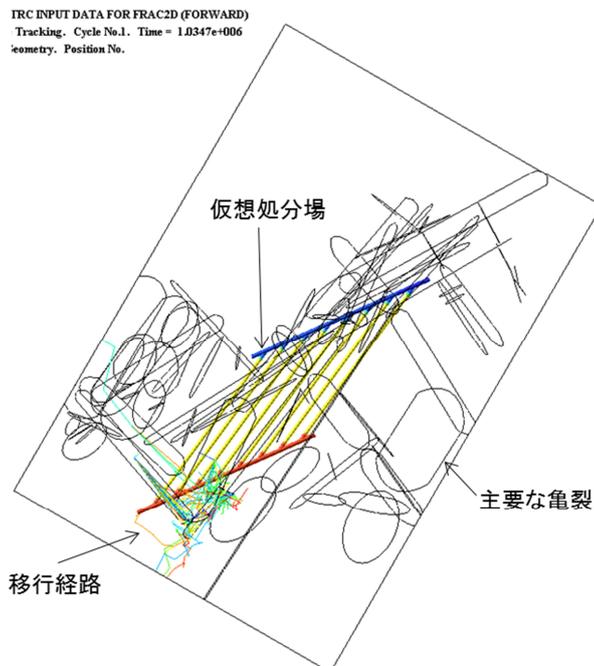


図 4.2-12 亀裂性媒体中での粒子移行解析の移行経路例

亀裂長さや亀裂幅に関する感度解析結果を図4.2-13に示す。図4.2-13(a)はFRAC3Dで発生させる円盤亀裂の亀裂長さ（亀裂直径）を変化させたケースである。亀裂長さが大きく、発生亀裂数が変化しない場合、亀裂密度が相対的に大きくなるため、亀裂密度は観測値0.367[本/m]と同一となるよう設定している。この場合、粒子の平均移行速度に大きな変化はみられなかった。このことは今回の解析では岩盤亀裂に関する調査データが多数蓄積しており、亀裂密度が十分に得られているため、亀裂密度が一定であれば、亀裂の長さなどの亀裂の形状に関する仮定はあまり影響がないことが推察される。同時に亀裂密度がある程度評価できる環境が地下水流動評価の不確かさを低減できることを示唆している。

一方、図4.2-13(b)はFRAC3Dで発生させる円盤亀裂の亀裂幅を変化させたケースである。FRAC3Dでの亀裂幅の変化は、その亀裂の透水特性に影響を与えるパラメータである。石油備蓄基地の調査では、主要な亀裂に対する透水性試験が実施されており、同時に壁面観察等から主要な亀裂幅の測定も行われている。また、石油備蓄基地に対する既存の地下水流動解析事例<sup>(10)</sup>では、主要な亀裂に対して、高透水性亀裂（透水係数： $2.0 \times 10^{-7}$ m/sec）と低透水性亀裂（透水係数： $1.0 \times 10^{-8}$ m/sec）に分類し、工学的判断を交えてそれぞれの亀裂に透水係数を付与した解析を実施している。そこで、亀裂幅の設定方法を変えた解析を比較した。1つはFRAC3Dにおいて観測された亀裂幅を基にした解析であり、一方は、亀裂幅を高透水性亀裂と低透水性亀裂に相当させて解析した既存解析例に倣った解析である。その結果、平均移行速度が10m/y以上の比較的速度の大きい解析結果に差異が生じている。亀裂性岩盤の透水特性を評価する手法はいまだ開発途上の技術であるが、これら亀裂の透水性の評価の差異が地下水流速評価に大きく影響することが定量的に示唆された。

このため、亀裂性媒体中での地下水流動評価においては、今回対象とした石油備蓄基地のように亀裂の分布・方向、亀裂密度等の特性に関するデータを十分に取得できるような調査が実施されることが望ましいと言える。重要な調査項目としては、亀裂の走向・傾斜の統計的分布から亀裂密度のデータ、亀裂の透水特性と亀裂幅の関連性に関する調査が重要であることが示唆された。

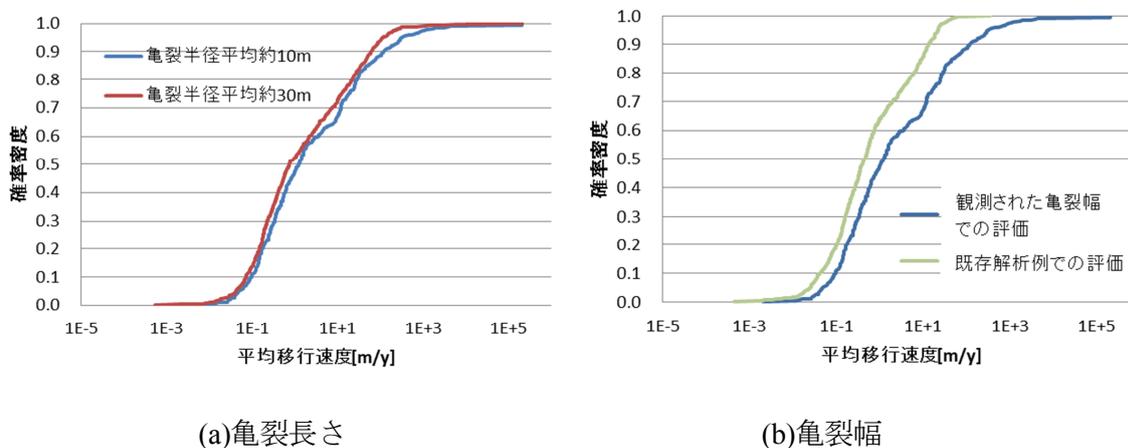


図 4.2-13 亀裂長さと亀裂幅に関する感度解析結果

## (2) 亀裂幅の時間変化に関する解析

花崗岩等の分布する亀裂性媒体中において、地震等の発生により亀裂幅が変化するケースが想定される。前節で示したとおり、亀裂幅の変化は透水性に大きく影響するため、将来的に地震発生シナリオを検討する中でその透水性の評価が重要な項目となる。これらの状況から、FRAC3D は亀裂幅の時間的な変化を考慮する機能を有しており、ここでは、亀裂の時間的変動によって亀裂内地下水流速の変動を評価した。

テストモデル1では複数の亀裂を用いた計算を行った。解析領域の大きさは、直方体状とし、領域の中心部分に半径 10m の円形亀裂を発生させた。解析条件を以下に示す。

- ・解析領域大きさ(m) : 40×30×20
- ・円形亀裂半径(m) : 幾何平均値 10m と設定して正規分布でランダムに発生
- ・円形亀裂法線方向 : (0, 1, 0)
- ・亀裂幅(m) : 0.0001

また、物性条件は以下のように設定した。

- ・水の密度(kg/m<sup>3</sup>) : 1000
- ・重力加速度(m/sec<sup>2</sup>) : 1.0
- ・動粘性係数(m<sup>2</sup>/sec) : 8.33E-9

作成した亀裂ネットワークモデルを図 4.2-14 に示す。

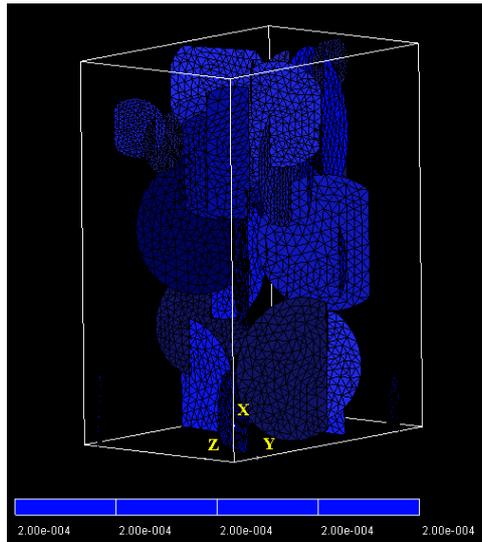


図 4.2-14 亀裂モデル図

亀裂ネットワークモデルの両端に動水勾配が生じ、図 4.2-14 の上端面から下端面への流動が生じていると仮定した。さらに、地震の繰り返し等のイベントにより、亀裂幅が 5 年で 2 倍となるシナリオをとした。5 年経過後は一定値となる設定とした。そのため、時刻 0y から時刻 5y までは一様に亀裂幅が広くなり、時刻 5.y 以降は元の亀裂幅の 2 倍で一定となる。

解析は時刻 0y における定常計算を実施し、その後、非定常計算を行った。非定常計算の解析時間ステップは時刻 6y までを 60 ステップで計算した。6y 経過時点での全水頭の解析結果を図 4.2-15 に示す。

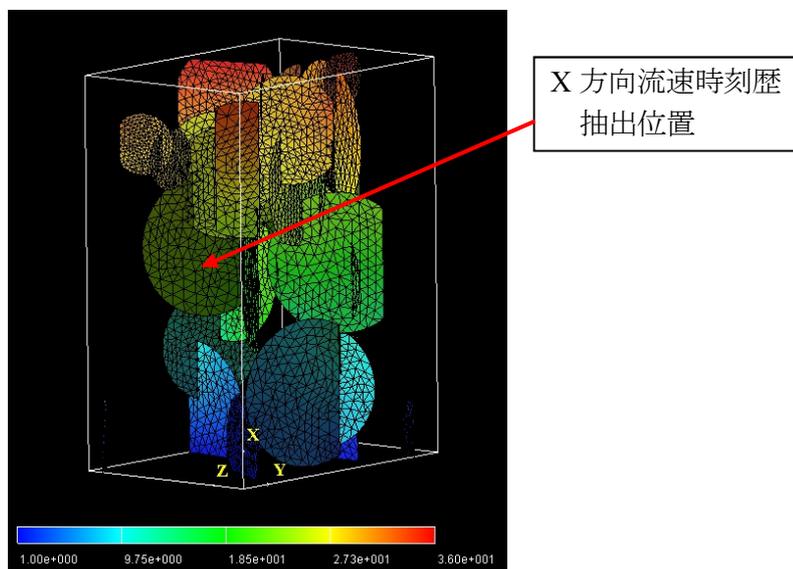


図 4.2-15 全水頭解析結果（時刻：6y）

解析結果は、地下水が円形亀裂の連結した部分を通して蛇行するように流れる状況を示したが、図から確認するのは困難である。そのため、亀裂ネットワークの中心付近の位置（図 4.2-15 に示す）における X 方向流速の経時変化を図 4.2-16 に示す。

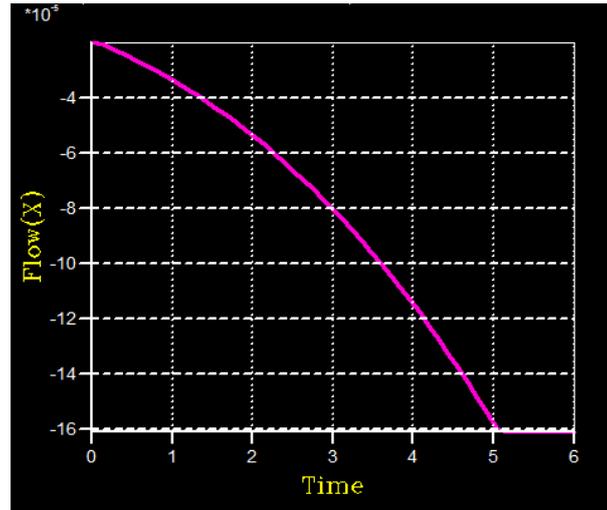


図 4.2-16 X 方向流速時刻歴変化 (縦軸：流速×10<sup>-5</sup>m/sec、横軸：時間 y、鉛直上方を+で表示)

FRAC3D では亀裂の透水係数を次式で評価している。

$$K = \frac{\rho g b^3}{12\mu} \quad (4.2.1)$$

ここに、 $\rho$ ：水の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $g$ ：重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)、 $b$ ：亀裂幅(m)、 $\mu$ ：動粘性係数(m<sup>2</sup>/sec)である。初期の亀裂幅における透水係数は、 $1.0 \times 10^{-5}$  m/sec となる。解析条件として動水勾配：0.875を与えている。したがって、1枚の亀裂中では、流速は鉛直下向きに  $8.75 \times 10^{-6}$  m/sec と評価できる。また、亀裂幅は徐々に大きくなり時刻 5y では元の亀裂幅の 2 倍になる。その結果、(1) 式より、透水係数は 8 倍の  $8.0 \times 10^{-5}$  m/sec となり、流速は  $7.0 \times 10^{-5}$  m/sec と評価できる。しかしながら、複数亀裂の存在する亀裂ネットワークモデルでは流れ場は複雑なため、個々の亀裂内の流速の絶対値による単純比較はできない。そこで、図 4.2-16 に示す亀裂中心位置の相当する任意の地点での流速に着目したところ、流速は約 16 倍となった。このように、亀裂幅が時間的に変化する様な場合、流速も亀裂幅の変化割合に応じて大きく変化することが示唆された。これらのことから、亀裂幅の変化は透水係数への影響が大きいと予想され、地震前後の地下水流動評価を実施する際には、亀裂幅の評価手法が重要となることが示された。

#### 今後の課題

亀裂性媒体中での地下水流動評価においては、現地試験や室内試験等を踏まえて、亀裂に関する透水特性を与える必要がある。また、本年度の作業において、広域からサイトスケール、サイトスケールから廃棄体スケールまでの一連の解析の連携を整備することができた。しかしながら、広域スケールとサイトスケールのモデル境界の考え方はその適用に明確な基準はないため、今回の石油備蓄基地を例とするような実環境を模した仮想的処分場を例とした解析事例を蓄積する必要がある。また、地震等に伴って亀裂幅が変化するようなシナリオにおいては、亀裂内での流動状況に大きな変化をもたらす可能性があるため、亀裂幅に関する変化特性に関する検討を進める必要がある。

### 4.3 火山活動による影響を対象とした GSRW-PSA 評価機能の拡張

地層処分の安全審査においては、気質・気候関連事象について、発生可能性は低い隔離機能への影響が大きい事象について、どのように取り扱うべきか検討が進められている。こうした影響が大きいと想定される事象について、3章においてこれまでの事例調査からその発生の規模を想定して処分システムへの影響を考慮したシナリオを整理した。

これまで本事業では、地下水移行シナリオに加え、それらの地質・気候関連事象シナリオを評価するため、地層処分の確率論的安全評価コード GSRW-PSA (Generic Safety Assessment Code for Geologic Disposal of Radioactive Waste for Probabilistic Safety Assessment)<sup>(11),(12)</sup>を軸とするコード群(個別事象に関する一連の評価コード)の開発・整備を行うとともに、それら一連のコード群を用いた解析結果を相互に連携させて、最終的に核種移行解析に集約させる「リンケージ」の整理を実施してきた。

平成25年度は、地質・気候関連事象のひとつである隆起・侵食を対象に、隆起・侵食による移行経路の時間的变化(移行距離の増減)、移行経路中の地質・水質の組合せに応じた核種移行パラメータセットの時間変化を適切に反映できるよう GSRW-PSA の機能拡張を実施した。

平成26年度は、3章で既述したように、隔離機能への影響が大きい事象としてとりあげ、従来の機能では評価できない火山活動による影響について GSRW-PSA にその評価機能を追加し、コードを拡張した。具体的には、処分坑道へのマグマ火道の交差と噴火による影響評価機能、処分坑道へのマグマの貫入による影響評価機能の2つについて整備を行った。

#### 4.3.1 処分坑道へのマグマ火道の交差と噴火による影響評価機能

3.4で既述したように、処分坑道へマグマ火道が交差し噴火に至った場合、以下の被ばくシナリオが想定される。

- ・ 噴火に伴う大気拡散堆積火山灰上での被ばく
- ・ 河川移行した火山灰を含む河川水利用による被ばく
- ・ 火口付近に露出した廃棄体への接近による被ばく
- ・ 火砕流堆積物上での被ばく

##### (1) 噴火に伴う大気拡散堆積火山灰上での被ばく

本評価では、噴火に伴う火山灰の2次元的な拡散を評価し、単位面積当たりの放射エネルギーを算出するための大気拡散モジュールを新たに作成した。

大気拡散によって居住地域の土壌に直接堆積する火山灰に含まれる放射性核種からの被ばく線量を評価する。被ばく経路は農耕土壌からの被ばくを想定する。火山灰の大気拡散は、Suzuki<sup>(13)</sup>および Jarzempa et al.<sup>(14)</sup>の数学モデルを参照した。大気拡散モデルにより、ある評価点における単位面積あたりの火山灰質量  $\chi$  (g/cm<sup>2</sup>) が求められる。これに火山灰と廃棄物の質量比、堆積厚さ、密度を考慮して、堆積した汚染火山灰中の単位質量あたりの核種量(Bq/kg)が求められる。

##### (a) 大気拡散堆積評価モデルの導入

###### 1) 評価式

火口を原点として、位置(x,y) (m) における火山噴出物の堆積量  $\chi$  (g/cm<sup>2</sup>) は次式で得られる。

$$\chi(x, y) = \int_{\rho=\rho_{\min}}^{\rho=\rho_{\max}} \int_{z=0}^H \frac{5QP(\rho, z)f(\rho)}{8\pi C(t_f + t_s)^{5/2}} \exp\left[-\frac{5\{(x-ut_f)^2 + y^2\} \times 10^4}{8C(t_f + t_s)^{5/2}}\right] d\rho dz \quad (4.3.1)$$

ここで、

- $\rho$  : 火山灰粒子直径  $d(\text{cm})$  の常用対数
- $z$  : 地表からの鉛直方向距離 (km)
- $H$  : 火口からの噴煙柱の高さ(km)
- $Q$  : 火山噴出物の総量 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
- $P(\rho, z)$  : 噴煙柱から離脱する火山灰粒子の分布
- $f(\rho)$  : 火山灰粒子サイズの分布
- $C$  : 渦拡散度と粒子降下時間に関連する定数 ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ )
- $t_f(\rho, z)$  : 粒子降下時間 (s)
- $t_s(z)$  : 噴煙柱内の粒子拡散時間 (s)
- $u$  : 風速 (m/s)

である。

粒径  $d(\text{cm})$  ( $\rho = \log_{10}(d)$ ) の火山灰が噴煙柱の高度  $z$  から離脱する確率密度分布  $P(\rho, z)$  は次式で与えられる。

$$P(\rho, z) = \frac{\beta W_0 Y \exp(-Y)}{V_0 H \{1 - (1 + Y_0) \exp(-Y_0)\}} \quad (4.3.2)$$

ここで、

- $\beta$  : 噴煙柱からの離脱パラメータ
- $W(z)$  : 高さ  $z$  における噴煙の上昇速度 (cm/s)
- $W_0$  : (=  $W(0)$ ) 火口における噴火速度 (cm/s)
- $V_0(d)$  : 粒径  $d$  の火山灰の終端速度 (cm/s)
- $Y(d, z)$  : 無次元化した上昇速度
- $Y_0(d)$  : (=  $Y(d, 0)$ )

であり、

$$W(z) = W_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (4.3.3)$$

$$Y(d, z) = \frac{\beta \{W(z) - V_0\}}{V_0} \quad (4.3.4)$$

である。火山灰の終端速度  $V_0(d)$  は

$$V_0(d) = \frac{\psi_p g d^2}{9\eta_a F^{-0.32} + \sqrt{81\eta_a^2 F^{-0.64} + \frac{3}{2}\psi_a \psi_p g d^3 \sqrt{1.07 - F}}} \quad (4.3.5)$$

で与えられていて、

- $\psi_a$  : 空気の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $\eta_a$  : 空気の粘度 ( $\text{g}/\text{cm}/\text{s}$ )

$\psi_p$  : 火山灰粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>)  
 $F$  : 火山灰粒子の形状ファクタ  
 $g$  : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

である。

粒子降下時間  $t_f$ (s)は次式で与えられ、

$$t_f(d, z) = 0.752 \times 10^6 \left[ \frac{1 - \exp(-0.0625z)}{V_0} \right]^{0.926} \quad (4.3.6)$$

粒子拡散時間は  $t_s$ (s)次式で与えられる。

$$t_s(z) = \left( \frac{5z^2 \times 10^{10}}{288C} \right)^{2/5} \quad (4.3.7)$$

火山灰の粒径分布  $f(\rho)$  は次式のと数正規分布に従うとする。

$$f(\rho) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left\{ -\frac{(\rho - \rho_m)^2}{2\sigma_d^2} \right\} \quad (4.3.8)$$

ここで、

$\sigma_d$  : 粒子サイズ対数の標準偏差

$\rho_m$  : 粒子直径の平均(cm)の常用対数

である。

Jarzemba et al. <sup>(14)</sup>は、粒子の密度は直径の関数であるとして、線形を仮定している。

$$\psi_p(\rho) = \psi_{low} - \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} (\psi_{low} - \psi_{hi}) \quad (4.3.9)$$

ここで、 $\psi_{low}$ 、 $\psi_{hi}$ は粒径が最小、最大のときの密度であり（粒径が小さい方の密度が大きい）、 $\Psi_p(\rho < \rho_{min}) = \Psi_{low}$ 、 $\Psi_p(\rho > \rho_{max}) = \Psi_{hi}$ とする。

2) 評価機能の確認

導入した各パラメータ式による計算を確認するため、終端速度、火山灰の噴煙柱からの離脱確率密度分布、火山灰の降下時間、拡散時間の各パラメータ評価について機能確認を行った。

i) 終端速度  $V_0$

図 4.3-1(a)に、Suzuki による粒径に対する終端速度の変化の図を示す。図 4.3-1(b)は火山灰密度を  $2.0\text{g/cm}^3$  としたときの終端速度、図 4.3-1(c)は  $0.8\text{g/cm}^3$  としたときの終端速度の計算値を図示している。粒子直径が  $0.01\text{cm}$  を境にすることで、(a) Suzuki Fig.3 の結果と一致している。図中、 $V_0$ は (4.3.5) 式の結果 (Suzuki (4)式) であり、eq(4)は Suzuki (4)式の結果である (それぞれ、図 4.3-1(a)の実線、点線に対応する)。図 4.3-1(d)は、式(4.3.9) ( $\Psi_{\text{low}}=2.5$ 、 $\Psi_{\text{hi}}=0.8$ 、 $\rho_{\text{min}}=-2$ 、 $\rho_{\text{max}}=-1$ ) に従い、粒径に応じて密度を線形変化させたときの終端速度である。

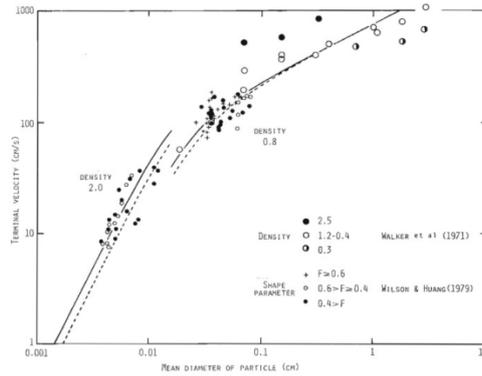
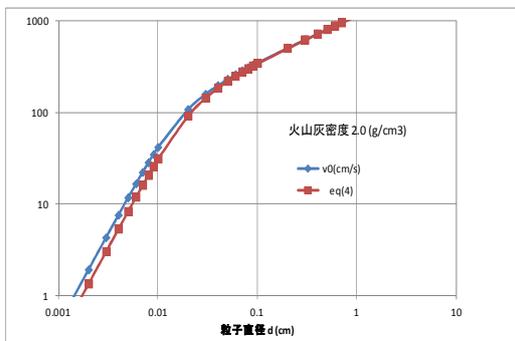
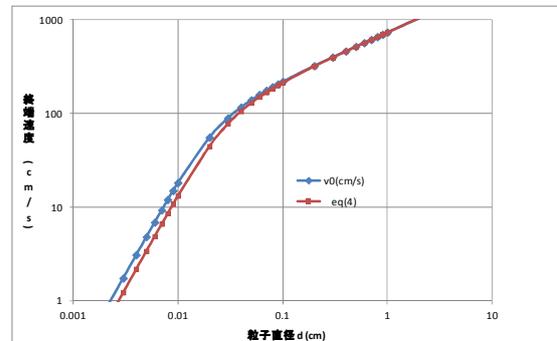


Fig. 3. Terminal fall velocity of volcanic particles vs. mean diameter of the particle at sea-level. Dotted curves; Eq. (4); solid curves; Eq. (4). All experimental data are from WALKER *et al.* (1971) and WILSON and HUANG (1979).

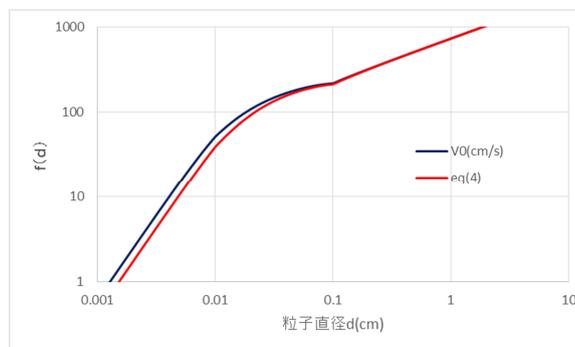
(a) Suzuki (1983) Fig.3



(b) 火山灰密度 :  $2.0\text{g/cm}^3$



(c) 火山灰密度 :  $0.8\text{g/cm}^3$



(d) 粒径に応じて密度を線形変化させた場合

図 4.3-1 終端速度  $V_0$

ii) 火山灰の噴煙柱からの離脱確率密度分布  $P(d,z)$

粒径ごとの、火山灰の噴煙柱からの離脱確率密度分布 ((4.3.2)式) を図 4.3-2 に示す。図より、粒径が大きい粒子は噴煙柱の上方まで届かず、小さい粒子は上方でしか離脱していない。

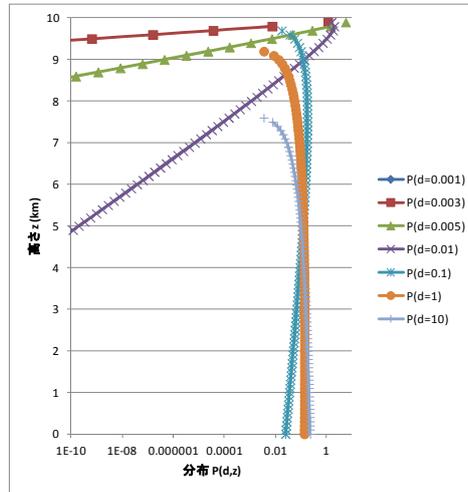


図 4.3-2 火山灰の噴煙柱からの離脱確率密度分布  $P(d,z)$

iii) 火山灰の降下時間、拡散時間

粒径による、火山灰の降下時間を図 4.3-3 に示す。火山灰の拡散時間  $t_s$  も載せている。拡散時間は高さ  $z$  のみの関数であり、粒径には依存しない。風速 10m/s の場合、風下方向 50km の位置への到達時間は  $50000\text{m} \div 10\text{m/s} = 5000$  (s) であることを考えると、粒径が 0.01 (cm) より小さい火山灰は  $P(d,z)$  分布より全量が 10km 付近での離脱となるため、火口より 100km 範囲程度には影響しない (降下時間が長いから、より遠くに流される)。

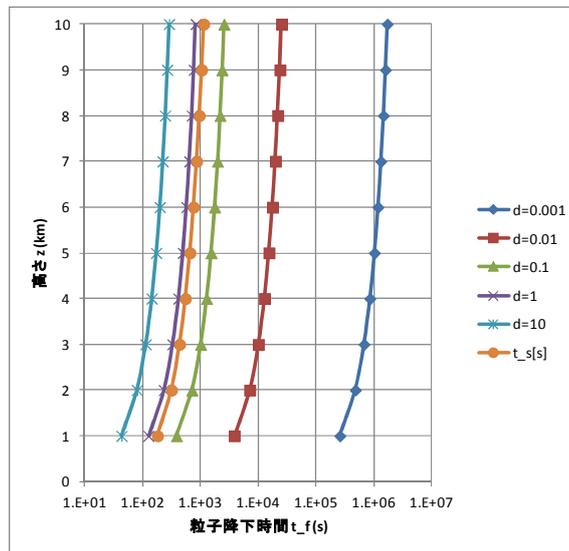


図 4.3-3 火山灰の降下時間、拡散時間

(b) 試計算

Suzuki 及び Jarzemba et al. <sup>(14)</sup> の数学モデルを実装し、試計算を行った。数学モデルの基本論文である Suzuki の Fig.6 を対象に、同様の結果が得られることを目標とした。

噴煙柱の高度に対する火山灰噴出量の分布図 (Suzuki Fig.6(a)) に対しては、同様の傾向が得られたことを確認した (図 4.3-4、図 4.3-5)。ここで、文献には粒子サイズの区分 f, m, c は fine, medium (=dm), coarse としか記載されていないので、図 4.3-5 においては 0.001~0.05, 0.05~0.3, 0.3~10.0 (cm) の範囲とした。

火山灰堆積密度の等質量線図 (Suzuki Fig.6(b)) も、同様の結果が得られたことを確認した (図 4.3-6、図 4.3-7)。また、火口からの距離に対する火山灰堆積密度の分布図 (Suzuki Fig.6(c)) も、同様の結果が得られたことを確認した (図 4.3-8、図 4.3-9)。

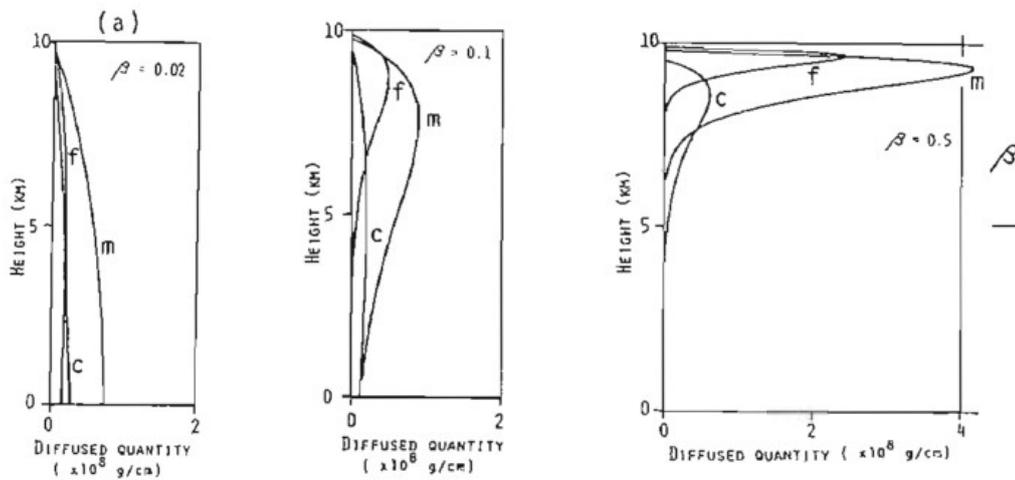


図 4.3-4 Suzuki Fig.6(a)より、噴煙柱の高度に対する噴出量の分布  
(左から $\beta=0.02, 0.1, 0.5$ )

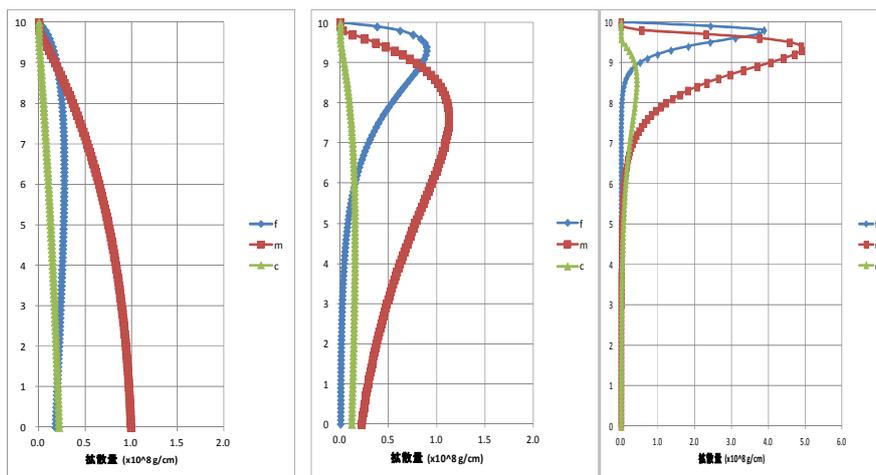


図 4.3-5 噴煙柱の高度に対する噴出量の分布 (左から $\beta=0.02, 0.1, 0.5$ )

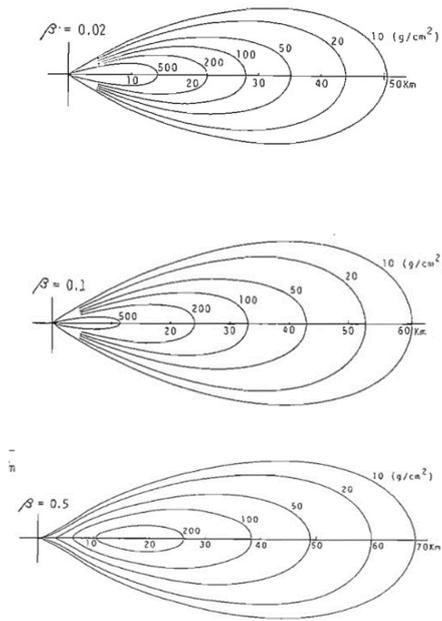


図 4.3-6 Suzuki Fig.6(b)より、堆積密度の等質量線 (上から $\beta=0.02, 0.1, 0.5$ )

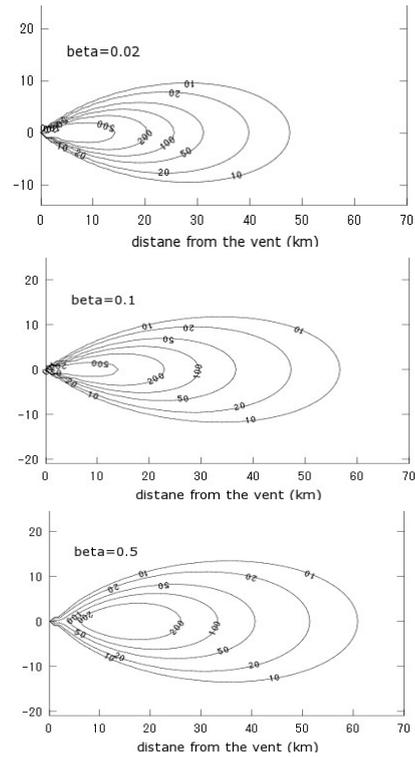


図 4.3-7 堆積密度の等質量線の計算結果 (上から $\beta=0.02, 0.1, 0.5$ )

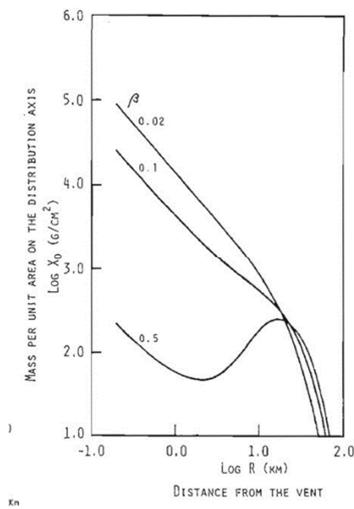


図 4.3-8 Suzuki Fig.6(c)より、火口からの距離に対する堆積質量( $\text{g}/\text{cm}^2$ )の分布 ( $\beta=0.02, 0.1, 0.5$ )

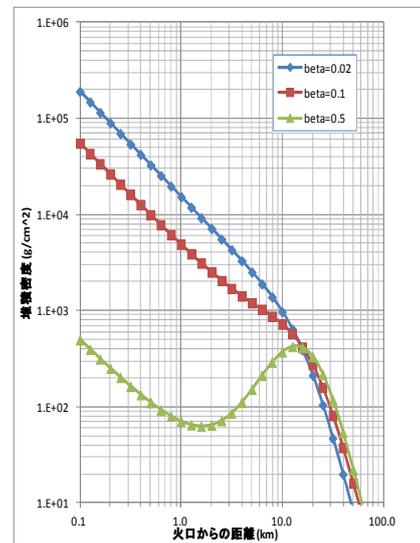


図 4.3-9 火口からの距離に対する堆積密度の計算結果 (上から $\beta=0.02, 0.1, 0.5$ )

図 4.3-10 には、Jarzemba の Appendix A に記載されている解析結果例の火山灰密度(xash) との比較を示す。火山灰密度を粒子直径対数の線形関数としたときの計算結果とほぼ一致していることを確認した。

以上から、火山灰の大気拡散計算は正しく行われていることを確認した。

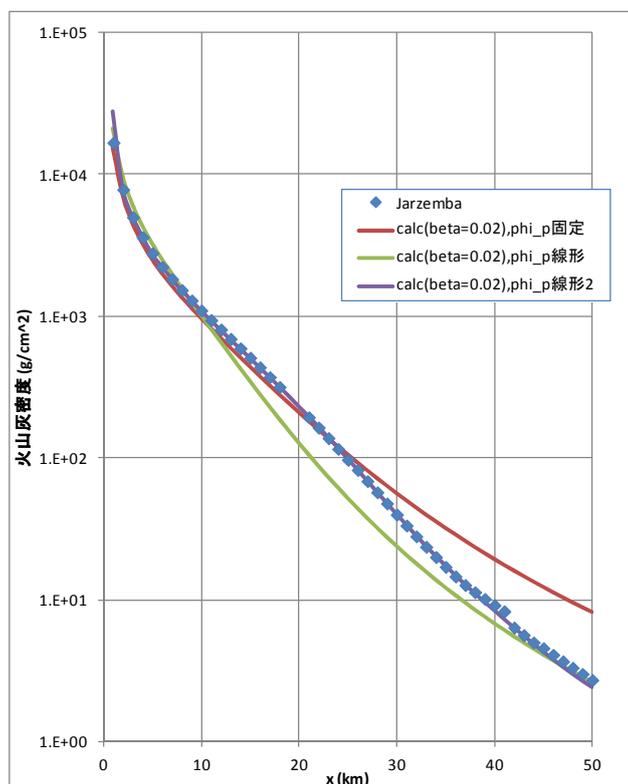


図 4.3-10 Jarzemba の AppendixA の計算結果 ( $\beta=0.02$ ) (凡例上から、(1)Jarzemba の値、(2)火山灰密度=0.8(g/cm<sup>3</sup>)で一定とした計算、(3)火山灰密度を直径に対し線形変化させたときの計算(直径を常用対数で-3 から 1 までの区間)、(4)(3)と同じく密度を線形変化させたときの計算(直径を常用対数で-2 から-1 までの区間))

### (c) 評価点設定機能

また、評価点の決定方法は i) 被ばく線量が最大となる点と ii) ユーザーが指定した点の 2 種類のオプションを選択できるようにした。ここで、(1)の評価点に関しては、非居住範囲の火口からの距離  $R_{\min}$  と評価する最大範囲 (火口からの距離)  $R_{\max}$  の間のドーナツ状の「評価対象となる居住地域」から半径方向と円周方向の分割数を指定できるものとした。なお、図 4.3-11 において、円の中心 (火口) を原点(0,0)、横軸を x、縦軸を y とすると、x 軸の正方向が風下方向となるので、 $y=0$  のとき、つまり、正の x 軸上に火山灰の堆積量が最大となる点が存在することになることに注意する ( $y \neq 0$  の点も評価し標準出力ファイルには出力するが、最大になることはない)。

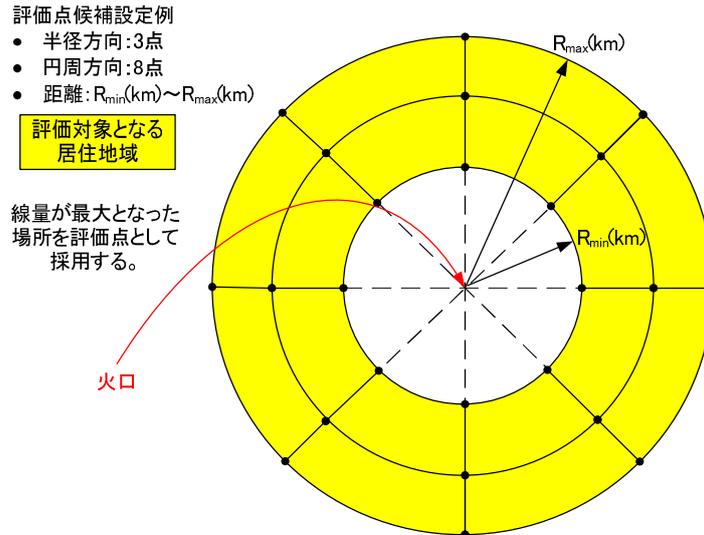


図 4.3-11 火山灰大気拡散シナリオの評価点

i) 被ばく線量が最大となる点

被ばく線量が最大となる点は、火山灰の堆積密度が最大となる点であり、y 方向には拡散でのみ移行するため、堆積密度が最大となるのは x 軸上 (y=0) である ( )。また、図 4.3-8、図 4.3-9 の  $\beta=0.5$  の場合からわかるように、火口付近を除いた x 軸上において、堆積密度のピーク位置は必ずしも火口最近接点ではない。この位置は、式(4.3.1)、(4.3.2)から、 $ut$  および  $\beta W_0$  に主に依存するため、評価する最大範囲と、非居住範囲と最大範囲との間に対して指定された分割数に基づき、その分割点において評価を行うこととした。

ii) ユーザーが指定した点

ユーザーは、評価点として任意の位置 (x,y) を指定する (単位は km)。このとき、ユーザーは、複数の評価点を設定することが可能であり、それらの評価点のうち、火山灰の堆積密度が最大となる点が、最終的に接続計算に使用される評価点となる。

(2) 火山灰河川移行シナリオ

火山灰河川移行シナリオでは火山灰に取り込まれた放射性核種がすべて表面水系に分配されることを想定した。まず、ソースタームモデルにおいて、表面水系 a における水中濃度  $C_a^i(t)$  を、次のように計算する。

$$C_a^i(t) = f_a \frac{A_M^i(t)}{V_a} \quad (t \geq T_f) \quad (4.3.10)$$

$C_a^i(t)$  : 損傷発生時刻  $T_f$ 以降の時刻  $t$ における表面水系 a 中の核種 i 濃度 [Bq/m<sup>3</sup>]

$f_a$  : 表面水系 a への降下割合 [-] (新規入力)

$A_M^i(t)$  : 損傷発生時刻  $T_f$ 以降の時刻  $t$ における核種 i の核種量 [Bq]

$V_a$  : 表面水系 a の容量 [m<sup>3</sup>]

ここで、想定する表面水系 a は、「w: 井戸水」を除く次の 4 つとした。

ur: 上流河川

l: 湖沼

$dr$  : 下流河川

$e$  : 沿岸海洋

移行フラックスは、上記の表面水系  $a$  における水中濃度を損傷発生時間  $T_f$  における初期値として次のように計算する。

$$J_a^i(t) = Q_a C_a^i(t) \quad (t \geq T_f) \quad (4.3.11)$$

$J_a^i(t)$  : 表面水系  $a$  からの核種  $i$  の移行フラックス [Bq/y]

$Q_a$  : 表面水系  $a$  の流量 [m<sup>3</sup>/y]

ただし、時刻  $t$  における核種量  $A_M^i(t)$  に関しては、次式のように物質収支を考慮する。

$$\frac{dA_M^i(t)}{dt} = -J_a^i(t) - \lambda A_M^i(t) + \lambda^{-1} A_M^{i-1}(t) \quad (t \geq T_f) \quad (4.3.12)$$

### (3) 火砕流、水蒸気爆発により露呈する廃棄物からの線量評価

ここでは2つのシナリオ（廃棄体接近シナリオ、火砕流流走シナリオ）を評価できるようにした。廃棄体接近シナリオでは、小規模火砕流または水蒸気爆発により廃棄物が火口付近に露呈し、そこへ放射性物質の存在を知らない人間が一定時間接近することを想定した。火砕流流走シナリオでは、火砕流中に廃棄体の有する放射性核種が取り込まれ、人間の居住領域まで到達、堆積すると想定した。以下に各シナリオにおける被ばく線量評価方法を示す。

#### (a) 廃棄体接近シナリオ

3章で述べたように、溶岩ドームを形成し、その崩壊によって生じる小規模な火砕流（メラピ式）が発生する場合、火口付近に廃棄体が露出し、放射性廃棄物の存在を知らずに立ち入った者の被ばくが想定された。そこで、廃棄体が火口付近に存在する場合の被ばくとして廃棄体からの外部被ばく、粉塵の吸入による内部被ばく、ラドンガスの吸入による内部被ばくを考慮した。火口付近における放射性核種の存在形態は、ガラス固化体が当初の形状を維持していない場合、堆積物中に放射性核種が含まれている場合など複数のケースが想定され、単位線源あたりの線量率（被ばく線量換算係数）がそれぞれ異なると考えられる。各ケースの被ばく線量換算係数ライブラリを整備した（(4)参照）。

ユーザーは、露呈している廃棄物の形状等の条件を考慮して、適切なライブラリを選択して使用する。このほか、評価対象者が廃棄体に接近して被ばくする時間及び廃棄体表面からの距離を入力とし、線源情報と被ばく線量換算係数から求められる線量率に被ばく時間を乗じて被ばく線量を算出する。なお、火口付近に露出する廃棄体数は火道直径に依存し、その最大数が決定されるが、水蒸気爆発及び火砕流で地表に放出される廃棄体数は、マグマ密度、流速及び廃棄体密度の関係からその数よりも小さくなることがあるため、廃棄体数を任意で与えることも可能である。

#### (b) 火砕流流走シナリオ

火砕流の流走に伴い人間の居住する範囲に火砕流堆積物が到達した場合には、火砕流堆積物の堆積厚さと堆積物の放射能濃度に基づいて、生物圏における被ばく線量評価を行う。堆積物の放射能濃度は、火砕流堆積物にガラス固化体に内蔵及び緩衝材に収着した核種が均質に混合

されているものとして、噴出量と残存放射性核種量から算出する。このとき、ガラス固化体に残存する放射性核種量、及び、緩衝材に収着される放射性核種量は、事象発生までの核種移行解析結果に基づいて設定できるオプションも用意した。また、火砕流堆積物の堆積厚さは、火砕流の流走距離を評価するモデル式（エネルギーコーンモデル<sup>(15)</sup> ( $H/L=\mu$  H:火砕流の出発点と到達点の比高, L:火砕流の水平方向の流走距離,  $\mu$ :火砕流と斜面との動粘性係数)) から求められる距離を参考に堆積厚さを決定して、廃棄物層初期厚さに入力することとした。被ばく経路は農業住居シナリオにおける被ばくを想定し、堆積する火砕流堆積物からの外部被ばく線量及び再浮遊堆積物の粉じん吸入摂取による内部被ばく線量の2つを評価する。

#### (4) 外部被ばく線量換算係数ライブラリの作成

これまでの GSRW-PSA では地下水移行シナリオにおける生物圏評価のための外部被ばく線量換算係数が内蔵されていた。上述のように、堆積火山灰からの外部被ばく、火口付近に露出した廃棄体からの外部被ばくはこれまでの外部被ばくの体系や物質組成と異なるため、新たに外部被ばく線量換算係数を解析によって求め、GSRW-PSA のライブラリとして格納した。大気拡散による火山灰の堆積、及び、火砕流流走による堆積物は同様のものとみなし、同一の体系を適用することとした。また、火山灰の河川移行は地下水移行シナリオの評価体系と同様であるため、既存の外部被ばく線量換算係数を用いることとした。したがって、火山灰堆積と露出廃棄体の2種類の幾何体系について外部被ばく線量換算ライブラリを整備した。

いずれの評価においても、解析コードは QAD-CGGP2R<sup>(16)</sup>を用い、表 4.3-1 に示す核種とその子孫核種を対象とした。

##### (a) 火山灰堆積物を線源とする外部被ばく換算係数

ある堆積厚さで無限遠方まで存在する火山灰（火砕流堆積物）が線源になるとする。これまでの GSRW-PSA による評価で用いてきた外部被ばく線量換算係数(JAEA-Data/Code 2008-003<sup>(17)</sup>)を参考にし、火山灰の組成と堆積厚さを考慮した変更を加えた。また、幾何形状は図 4.3-12 に示すように、半径 500m の円柱状線源を設定した。火砕流堆積物厚さは 1cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 50cm, 100cm, 200cm とした。なお、半径を 500m から 1000m に広げても線量の増加は無視できることを確認した。また、火山灰の物質組成は「新編火山灰アトラス p.50-53 (東京大学出版会)<sup>(18)</sup>」に基づき、空気は従来使用している値を適用し、表 4.3-2 に示すように設定した。評価点は円柱状線源の地表面の円の中心上、堆積物表面から高さ 1m の点とし、この点における AP 照射体系の実効線量を算出した。

火山灰堆積物を線源とする外部被ばく線量換算係数の評価結果を表 4.3-3(1), (2)に示す。堆積厚さが 50cm 以上となると、自己遮蔽のため換算係数の値はほとんど変化しない。

表 4.3-1 評価対象核種

核種		放射平衡を仮定した子孫核種	核種		放射平衡を仮定した子孫核種
4N系列	Cm-244	-	非系列核種	H-3	-
	Pu-240	-		Be-10	-
	U-236	-		C-14	-
	U-232	-		Cl-36	-
	Th-232	-		Ca-41	-
	Ra-228	Ac-228		Mn-54	-
	Th-228	Ra-224,Rn-220,Po-216,Pb-212,Bi-212,Po-212,Tl-208		Fe-55	-
4N+1系列	Cm-245	-		Fe-59	-
	Pu-241	U-237		Co-58	-
	Am-241	-		Co-60	-
	Np-237	-		Ni-59	-
	Pa-233	-		Ni-63	-
	U-233	-		Zn-65	-
	Th-229	-		Se-79	-
	Ra-225	-		Sr-90	Y-90
	Ac-225	Fr-221,At-217,Bi-213,Po-213,Tl-209,Pb-209		Zr-93	-
4N+2系列	Cm-246	-		Zr-95	Nb-95m
	Am-242m	Am-242,Np-238		Nb-93m	-
	Cm-242	-		Nb-94	-
	Pu-242	-		Nb-95	-
	Pu-238	-		Mo-93	-
	U-238	-		Tc-99	-
	Th-234	Pa-234m,Pa-234		Ru-106	Rh-106
	U-234	-		Pd-107	-
	Th-230	-		Ag-108m	Ag-108
	Ra-226	Rn-222,Po-218,At-218,Rn-218,Pb-214,Bi-214,Po-214,Tl-210		Ag-110m	Ag-110
	Pb-210	Bi-210,Hg-206,Tl-206		Cd-113m	-
	Po-210	-		Sn-121m	Sn-121
	4N+3系列	Cm-243		-	Sn-126
Am-243		Np-239		Sb-125	-
Pu-239		U-235m	Te-125m	-	
Np-235		-	I-129	-	
U-235		Th-231	Cs-134	-	
Pa-231		-	Cs-135	-	
Ac-227		Fr-223,At-219,Bi-215,Po-215,Pb-211,Bi-211,Po-211,Tl-207	Cs-137	Ba-137m	
Th-227		-	Ce-144	Pr-144m,Pr-144	
Ra-223		Rn-219,Po-215,Pb-211,Bi-211,Po-211,Tl-207	Sm-151	-	
			Eu-152	-	
		Eu-154	-		
		Eu-155	-		
		Ho-166m	-		
		Hf-178m	-		

表 4.3-2 火山灰及び空気の物質組成

火山灰		1.5 g/cm <sup>3</sup>
元素	組成比 (Weight%)	Partial density
O	0.491	7.360582E-01
Na	0.029	4.323645E-02
Mg	0.001	2.217802E-03
Al	0.069	1.033141E-01
Si	0.354	5.306757E-01
K	0.030	4.541738E-02
Ca	0.009	1.387533E-02
Ti	0.002	2.575450E-03
Mn	0.001	1.071043E-03
Fe	0.014	2.155850E-02

空気		0.0012049 g/cm <sup>3</sup>
元素	組成比 (Weight%)	Partial density
H	0.00001	1.204900E-08
C	0.00013	1.566370E-07
N	0.76469	9.213750E-04
O	0.23517	2.833563E-04

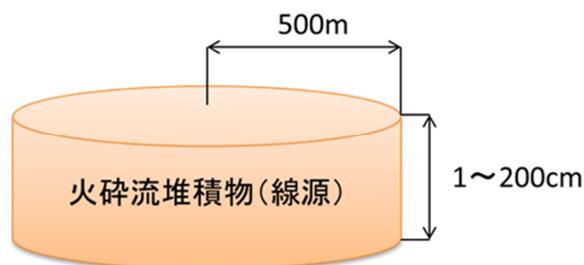


図 4.3-12 火山灰堆積物を線源とする外部被ばく線量評価幾何体系

表 4.3-3(1) 火山灰堆積物上の外部被ばく線量換算係数（系列核種）

核種		堆積厚さ							
		1cm	5cm	10cm	15cm	20cm	50cm	100cm	200cm
4N系列	Cm-244	6.6E-06	9.3E-06	1.1E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.3E-05
	Pu-240	5.9E-06	8.0E-06	8.7E-06	9.0E-06	9.1E-06	9.2E-06	9.2E-06	9.2E-06
	U-236	6.6E-06	1.2E-05	1.4E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.6E-05
	U-232	1.8E-05	4.4E-05	5.5E-05	5.9E-05	6.1E-05	6.2E-05	6.2E-05	6.2E-05
	Th-232	1.4E-05	3.5E-05	4.3E-05	4.5E-05	4.6E-05	4.6E-05	4.6E-05	4.6E-05
	Ra-228	3.7E-02	1.2E-01	1.7E-01	2.1E-01	2.2E-01	2.5E-01	2.6E-01	2.6E-01
	Th-228	5.6E-02	1.8E-01	2.7E-01	3.2E-01	3.5E-01	4.2E-01	4.3E-01	4.3E-01
4N+1系列	Cm-245	5.7E-03	1.8E-02	2.5E-02	2.8E-02	2.9E-02	2.9E-02	2.9E-02	2.9E-02
	Pu-241	2.8E-07	8.6E-07	1.2E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.4E-06
	Am-241	1.3E-03	3.3E-03	3.8E-03	3.9E-03	3.9E-03	3.9E-03	3.9E-03	3.9E-03
	Np-237	1.4E-03	4.0E-03	5.3E-03	5.7E-03	5.9E-03	6.0E-03	6.0E-03	6.0E-03
	Pa-233	1.1E-02	3.6E-02	5.1E-02	5.9E-02	6.3E-02	6.7E-02	6.7E-02	6.7E-02
	U-233	1.6E-05	4.2E-05	5.7E-05	6.3E-05	6.6E-05	6.9E-05	6.9E-05	6.9E-05
	Th-229	4.9E-03	1.5E-02	2.1E-02	2.3E-02	2.4E-02	2.4E-02	2.4E-02	2.4E-02
	Ra-225	5.5E-04	8.9E-04	9.1E-04	9.1E-04	9.1E-04	9.1E-04	9.1E-04	9.1E-04
4N+2系列	Ac-225	8.5E-03	2.8E-02	4.0E-02	4.6E-02	4.9E-02	5.3E-02	5.3E-02	5.3E-02
	Cm-246	1.7E-04	5.3E-04	7.7E-04	9.1E-04	9.9E-04	1.1E-03	1.1E-03	1.1E-03
	Am-242m	9.5E-04	2.9E-03	4.0E-03	4.4E-03	4.6E-03	4.8E-03	4.8E-03	4.8E-03
	Cm-242	7.0E-06	8.5E-06	9.0E-06	9.2E-06	9.3E-06	9.4E-06	9.4E-06	9.4E-06
	Pu-242	8.6E-06	1.9E-05	2.5E-05	2.8E-05	3.0E-05	3.3E-05	3.3E-05	3.3E-05
	Pu-238	6.0E-06	7.9E-06	8.6E-06	8.8E-06	8.9E-06	9.0E-06	9.0E-06	9.0E-06
	U-238	5.3E-06	1.0E-05	1.2E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.3E-05
	Th-234	1.3E-03	4.1E-03	5.7E-03	6.5E-03	7.0E-03	7.6E-03	7.7E-03	7.7E-03
	U-234	1.0E-05	2.3E-05	2.8E-05	3.0E-05	3.0E-05	3.1E-05	3.1E-05	3.1E-05
	Th-230	2.5E-05	7.0E-05	8.9E-05	9.5E-05	9.8E-05	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04
	Ra-226	7.1E-02	2.3E-01	3.4E-01	4.1E-01	4.4E-01	5.1E-01	5.2E-01	5.2E-01
4N+3系列	Pb-210	1.1E-04	2.1E-04	2.2E-04	2.2E-04	2.2E-04	2.2E-04	2.2E-04	2.2E-04
	Po-210	4.2E-07	1.4E-06	2.0E-06	2.4E-06	2.6E-06	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06
	Cm-243	6.9E-03	2.2E-02	3.1E-02	3.5E-02	3.7E-02	3.9E-02	3.9E-02	3.9E-02
	Am-243	9.7E-03	3.1E-02	4.3E-02	4.9E-02	5.2E-02	5.4E-02	5.4E-02	5.4E-02
	Pu-239	5.8E-06	1.3E-05	1.7E-05	1.9E-05	2.0E-05	2.0E-05	2.0E-05	2.0E-05
	Np-235	5.5E-05	1.4E-04	1.8E-04	2.0E-04	2.1E-04	2.1E-04	2.1E-04	2.1E-04
	U-235	1.0E-02	3.2E-02	4.5E-02	5.1E-02	5.4E-02	5.6E-02	5.6E-02	5.6E-02
	Pa-231	1.8E-03	5.6E-03	8.0E-03	9.1E-03	9.8E-03	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
Ac-227	5.0E-05	1.3E-04	1.7E-04	1.8E-04	1.9E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	
	Th-227	5.9E-03	1.9E-02	2.7E-02	3.0E-02	3.2E-02	3.4E-02	3.4E-02	3.4E-02
	Ra-223	1.6E-02	5.1E-02	7.2E-02	8.2E-02	8.8E-02	9.4E-02	9.4E-02	9.4E-02

表 4.3-3(2) 火山灰堆積物上の外部被ばく線量換算係数 (非系列核種)

核種	堆積厚さ							
	1cm	5cm	10cm	15cm	20cm	50cm	100cm	200cm
H-3	0.0E+00							
Be-10	0.0E+00							
C-14	0.0E+00							
Cl-36	6.7E-06	2.2E-05	3.1E-05	3.7E-05	4.0E-05	4.4E-05	4.4E-05	4.4E-05
Ca-41	0.0E+00							
Mn-54	3.6E-02	1.2E-01	1.7E-01	2.0E-01	2.2E-01	2.5E-01	2.5E-01	2.5E-01
Fe-55	1.6E-11	3.7E-11	4.9E-11	5.4E-11	5.6E-11	5.8E-11	5.8E-11	5.8E-11
Fe-59	4.8E-02	1.6E-01	2.3E-01	2.7E-01	3.0E-01	3.5E-01	3.5E-01	3.5E-01
Co-58	4.3E-02	1.4E-01	2.0E-01	2.4E-01	2.6E-01	2.9E-01	2.9E-01	2.9E-01
Co-60	9.9E-02	3.2E-01	4.8E-01	5.7E-01	6.3E-01	7.3E-01	7.4E-01	7.4E-01
Ni-59	7.5E-07	2.4E-06	3.5E-06	4.1E-06	4.5E-06	4.9E-06	4.9E-06	4.9E-06
Ni-63	0.0E+00							
Zn-65	2.3E-02	7.7E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.7E-01	1.7E-01	1.7E-01
Se-79	0.0E+00							
Sr-90	3.4E-09	5.8E-09	7.5E-09	8.6E-09	9.3E-09	1.1E-08	1.1E-08	1.1E-08
Zr-93	0.0E+00							
Zr-95	3.2E-02	1.0E-01	1.5E-01	1.8E-01	2.0E-01	2.2E-01	2.2E-01	2.2E-01
Nb-93m	5.1E-06							
Nb-94	6.8E-02	2.2E-01	3.2E-01	3.8E-01	4.1E-01	4.6E-01	4.7E-01	4.7E-01
Nb-95	3.3E-02	1.1E-01	1.6E-01	1.8E-01	2.0E-01	2.3E-01	2.3E-01	2.3E-01
Mo-93	2.8E-05							
Tc-99	3.6E-08	1.1E-07	1.4E-07	1.6E-07	1.6E-07	1.6E-07	1.6E-07	1.6E-07
Ru-106	9.3E-03	3.0E-02	4.4E-02	5.2E-02	5.6E-02	6.2E-02	6.3E-02	6.3E-02
Pd-107	0.0E+00							
Ag-108m	7.4E-02	2.4E-01	3.5E-01	4.1E-01	4.4E-01	4.9E-01	4.9E-01	4.9E-01
Ag-110m	1.2E-01	3.8E-01	5.5E-01	6.5E-01	7.1E-01	8.1E-01	8.1E-01	8.1E-01
Cd-113m	3.3E-06	1.1E-05	1.5E-05	1.7E-05	1.9E-05	2.0E-05	2.0E-05	2.0E-05
Sn-121m	1.0E-04	1.2E-04						
Sn-126	7.3E-02	2.4E-01	3.4E-01	4.0E-01	4.4E-01	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01
Sb-125	2.0E-02	6.5E-02	9.4E-02	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.3E-01	1.3E-01
Te-125m	7.9E-04	9.4E-04	9.6E-04	9.7E-04	9.8E-04	9.8E-04	9.8E-04	9.8E-04
I-129	7.0E-04	8.9E-04						
Cs-134	6.9E-02	2.2E-01	3.3E-01	3.8E-01	4.2E-01	4.7E-01	4.7E-01	4.7E-01
Cs-135	0.0E+00							
Cs-137	2.5E-02	8.2E-02	1.2E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.7E-01	1.7E-01	1.7E-01
Ce-144	2.2E-03	6.8E-03	9.7E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.4E-02	1.4E-02	1.4E-02
Sm-151	5.4E-08							
Eu-152	5.0E-02	1.6E-01	2.3E-01	2.7E-01	3.0E-01	3.4E-01	3.4E-01	3.4E-01
Eu-154	4.8E-02	1.5E-01	2.2E-01	2.6E-01	2.9E-01	3.3E-01	3.3E-01	3.3E-01
Eu-155	3.6E-03	1.0E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02
Ho-166m	7.4E-02	2.4E-01	3.5E-01	4.1E-01	4.4E-01	4.9E-01	4.9E-01	4.9E-01
Hf-178m	1.1E-01	3.6E-01	5.1E-01	5.9E-01	6.4E-01	6.9E-01	6.9E-01	6.9E-01

(b) 露出した廃棄体を線源とする外部被ばく換算係数

廃棄体については3.3で検討したように、廃棄体が火口付近に露出する際には、緩衝材ははがれることを想定し、JNC TN8400 2003-022<sup>(19)</sup>を参考に幾何体系を設定した。オーバーパックが残存することも想定し、初期設計値である19cm、亀裂の発生しうる11cmの2ケースを設定するとともに、地表における配置を縦置き／横置きで2ケース設定し、(1)と同様の核種を対象とした。オーバーパックが19cm厚さを維持し、縦置きに配置されたケースの幾何体系を図4.3-13

に示す。物質組成は JNC TN8400 2003-022 を参考に表 4.3-4 に示す 20 元素について設定した。評価点は高さ 1m で廃棄体表面から 0.5m、1m、5m、10m、50m、80m、90m 及び 100m の点を設定し、これらの点における AP 照射体系の実効線量を評価する。

オーバーパックがなく、ガラス固化体が横置き配置で地表に露出しているケースの評価結果を表 4.3-5(1), (2) に示す。そのほかのケースについては Appendix を参照のこと。

表 4.3-4 ガラス固化体、キャニスタ、オーバーパック及び空気の物質組成

空気		
0.0012049 g/cm <sup>3</sup>		
元素	組成比(Weight%)	Partial density
H	0.00001	1.204900E-08
C	0.00013	1.566370E-07
N	0.76469	9.213750E-04
O	0.23517	2.833563E-04

SUS304		
7.9 g/cm <sup>3</sup>		
元素	組成比(Weight%)	Partial density
Fe	0.6946	5.487340E+00
C	0.0004	3.160000E-03
Si	0.005	3.950000E-02
Mn	0.01	7.900000E-02
Cr	0.19	1.501000E+00
Ni	0.1	7.900000E-01

炭素鋼		
7.8 g/cm <sup>3</sup>		
元素	組成比(Weight%)	Partial density
Fe	0.9814	7.659516E+00
C	0.0035	2.731639E-02
Si	0.0035	2.731639E-02
Mn	0.011	8.585151E-02

ガラス		
2.6 g/cm <sup>3</sup>		
元素	組成比(Weight%)	Partial density
Li	0.01442	3.857122E-02
B	0.04526	1.210634E-01
O	0.50198	1.342717E+00
Na	0.07789	2.083434E-01
Al	0.02779	7.433386E-02
Si	0.22936	6.135018E-01
Ca	0.02231	5.967573E-02
Zr	0.0205	5.483426E-02
Mo	0.03251	8.695912E-02

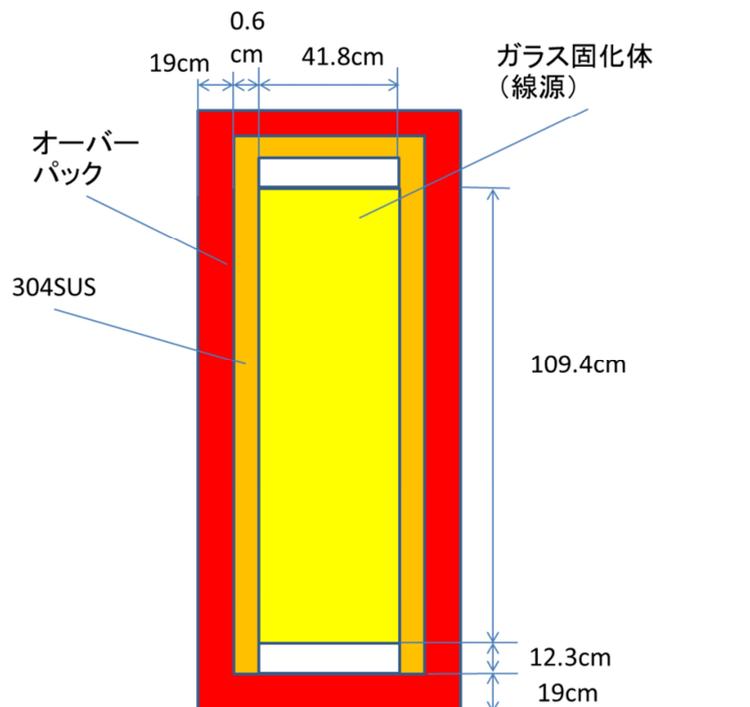


図 4.3-13 オーバーパック厚さ 19cm で縦置きの場合の幾何体系

表 4.3-5(1) 露呈した廃棄体接近時の外部被ばく線量換算係数 (系列核種)

核種		オーバーパックなし						
		横置き						
		1m	5m	10m	50m	80m	90m	100m
4N系列	Cm-244	1.8E-07	1.4E-08	3.6E-09	1.3E-10	4.3E-11	3.2E-11	2.5E-11
	Pu-240	4.8E-08	3.5E-09	9.0E-10	2.7E-11	8.2E-12	6.0E-12	4.4E-12
	U-236	1.3E-07	9.7E-09	2.5E-09	7.1E-11	2.1E-11	1.5E-11	1.1E-11
	U-232	8.3E-07	6.2E-08	1.6E-08	4.9E-10	1.5E-10	1.1E-10	8.1E-11
	Th-232	2.7E-07	2.0E-08	5.1E-09	1.5E-10	4.5E-11	3.3E-11	2.4E-11
	Ra-228	7.4E-03	5.6E-04	1.5E-04	5.2E-06	1.8E-06	1.3E-06	1.0E-06
	Th-228	1.2E-02	9.0E-04	2.3E-04	8.4E-06	3.0E-06	2.3E-06	1.8E-06
4N+1系列	Cm-245	5.3E-04	3.9E-05	9.9E-06	3.0E-07	8.9E-08	6.4E-08	4.7E-08
	Pu-241	2.5E-08	1.9E-09	4.8E-10	1.5E-11	4.5E-12	3.3E-12	2.4E-12
	Am-241	1.9E-06	1.5E-07	3.6E-08	8.1E-10	2.0E-10	1.4E-10	9.8E-11
	Np-237	7.6E-05	5.6E-06	1.4E-06	4.1E-08	1.2E-08	8.6E-09	6.3E-09
	Pa-233	1.8E-03	1.3E-04	3.4E-05	1.1E-06	3.7E-07	2.7E-07	2.1E-07
	U-233	1.4E-06	1.1E-07	2.7E-08	8.7E-10	2.8E-10	2.0E-10	1.5E-10
	Th-229	4.0E-04	3.0E-05	7.5E-06	2.3E-07	7.0E-08	5.0E-08	3.7E-08
	Ra-225	2.6E-12	2.5E-13	5.9E-14	9.2E-16	1.7E-16	1.1E-16	6.7E-17
Ac-225	1.5E-03	1.1E-04	2.8E-05	9.7E-07	3.2E-07	2.4E-07	1.8E-07	
4N+2系列	Cm-246	3.3E-05	2.5E-06	6.5E-07	2.3E-08	8.0E-09	6.0E-09	4.7E-09
	Am-242m	8.7E-05	6.4E-06	1.6E-06	5.0E-08	1.6E-08	1.1E-08	8.6E-09
	Cm-242	4.7E-08	3.5E-09	9.0E-10	2.9E-11	9.5E-12	7.0E-12	5.3E-12
	Pu-242	7.9E-07	6.0E-08	1.5E-08	5.4E-10	1.9E-10	1.4E-10	1.1E-10
	Pu-238	4.5E-08	3.3E-09	8.4E-10	2.5E-11	7.3E-12	5.3E-12	3.9E-12
	U-238	1.5E-07	1.1E-08	2.9E-09	9.5E-11	3.1E-11	2.3E-11	1.7E-11
	Th-234	1.8E-04	1.3E-05	3.4E-06	1.2E-07	4.0E-08	3.0E-08	2.3E-08
	U-234	3.3E-07	2.5E-08	6.3E-09	1.9E-10	5.5E-11	4.0E-11	2.9E-11
	Th-230	1.1E-06	8.2E-08	2.1E-08	6.5E-10	2.0E-10	1.5E-10	1.1E-10
	Ra-226	1.5E-02	1.1E-03	2.9E-04	1.0E-05	3.6E-06	2.7E-06	2.1E-06
	Pb-210	3.6E-10	3.1E-11	7.4E-12	1.3E-13	2.7E-14	1.7E-14	1.1E-14
Po-210	8.5E-08	6.5E-09	1.7E-09	5.9E-11	2.0E-11	1.5E-11	1.2E-11	
4N+3系列	Cm-243	9.2E-04	6.8E-05	1.7E-05	5.6E-07	1.8E-07	1.3E-07	9.8E-08
	Am-243	1.2E-03	9.0E-05	2.3E-05	7.4E-07	2.3E-07	1.7E-07	1.3E-07
	Pu-239	3.7E-07	2.8E-08	7.1E-09	2.3E-10	7.4E-11	5.5E-11	4.1E-11
	Np-235	2.7E-06	2.0E-07	5.0E-08	1.4E-09	4.1E-10	2.9E-10	2.1E-10
	U-235	1.4E-03	1.0E-04	2.6E-05	8.3E-07	2.6E-07	1.9E-07	1.4E-07
	Pa-231	2.9E-04	2.1E-05	5.5E-06	1.8E-07	6.0E-08	4.5E-08	3.4E-08
	Ac-227	3.4E-06	2.5E-07	6.5E-08	2.1E-09	6.9E-10	5.1E-10	3.9E-10
	Th-227	9.1E-04	6.8E-05	1.7E-05	5.8E-07	1.9E-07	1.4E-07	1.1E-07
Ra-223	2.4E-03	1.8E-04	4.7E-05	1.6E-06	5.3E-07	3.9E-07	3.0E-07	

表 4.3-5(2) 露呈した廃棄体接近時の外部被ばく線量換算係数（非系列核種）

核種		オーバーバックなし						
		横置き						
		1m	5m	10m	50m	80m	90m	100m
非系列核種	H-3	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Be-10	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	C-14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Cl-36	1.3E-06	9.7E-08	2.5E-08	8.7E-10	2.9E-10	2.2E-10	1.7E-10
	Ca-41	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Mn-54	7.3E-03	5.5E-04	1.4E-04	5.1E-06	1.7E-06	1.3E-06	1.0E-06
	Fe-55	1.1E-12	7.8E-14	2.0E-14	6.0E-16	1.8E-16	1.3E-16	9.7E-17
	Fe-59	1.0E-02	7.7E-04	2.0E-04	7.2E-06	2.5E-06	1.9E-06	1.5E-06
	Co-58	8.6E-03	6.5E-04	1.7E-04	5.9E-06	2.0E-06	1.5E-06	1.2E-06
	Co-60	2.1E-02	1.6E-03	4.2E-04	1.5E-05	5.3E-06	4.1E-06	3.2E-06
	Ni-59	1.5E-07	1.1E-08	2.8E-09	9.8E-11	3.3E-11	2.5E-11	1.9E-11
	Ni-63	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Zn-65	5.0E-03	3.8E-04	9.7E-05	3.5E-06	1.2E-06	9.2E-07	7.2E-07
	Se-79	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Sr-90	2.4E-10	1.8E-11	4.8E-12	1.8E-13	6.4E-14	4.9E-14	3.8E-14
	Zr-93	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Zr-95	6.5E-03	4.9E-04	1.3E-04	4.5E-06	1.5E-06	1.2E-06	8.9E-07
	Nb-93m	1.8E-26	2.2E-27	5.0E-28	5.5E-30	7.9E-31	4.5E-31	2.6E-31
	Nb-94	1.4E-02	1.0E-03	2.7E-04	9.5E-06	3.3E-06	2.5E-06	1.9E-06
	Nb-95	6.7E-03	5.0E-04	1.3E-04	4.6E-06	1.6E-06	1.2E-06	9.2E-07
	Mo-93	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Tc-99	1.6E-09	1.2E-10	3.0E-11	8.0E-13	2.2E-13	1.6E-13	1.1E-13
	Ru-106	1.8E-03	1.4E-04	3.6E-05	1.3E-06	4.3E-07	3.2E-07	2.5E-07
	Pd-107	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	Ag-108m	1.4E-02	1.1E-03	2.8E-04	9.8E-06	3.3E-06	2.5E-06	1.9E-06
	Ag-110m	2.4E-02	1.8E-03	4.7E-04	1.7E-05	5.7E-06	4.3E-06	3.4E-06
	Cd-113m	5.7E-07	4.2E-08	1.1E-08	3.6E-10	1.2E-10	8.8E-11	6.7E-11
	Sn-121m	1.6E-15	1.7E-16	3.9E-17	5.6E-19	9.9E-20	6.0E-20	3.7E-20
	Sn-126	1.4E-02	1.1E-03	2.7E-04	9.5E-06	3.2E-06	2.4E-06	1.9E-06
	Sb-125	3.8E-03	2.9E-04	7.4E-05	2.6E-06	8.6E-07	6.5E-07	5.0E-07
	Te-125m	1.5E-06	1.1E-07	2.8E-08	8.3E-10	2.4E-10	1.7E-10	1.3E-10
	I-129	3.6E-13	3.5E-14	8.2E-15	1.3E-16	2.3E-17	1.4E-17	9.1E-18
	Cs-134	1.4E-02	1.0E-03	2.7E-04	9.5E-06	3.2E-06	2.4E-06	1.9E-06
Cs-135	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	
Cs-137	5.0E-03	3.8E-04	9.8E-05	3.4E-06	1.2E-06	8.8E-07	6.8E-07	
Ce-144	3.5E-04	2.6E-05	6.7E-06	2.3E-07	7.9E-08	6.0E-08	4.6E-08	
Sm-151	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	
Eu-152	9.8E-03	7.4E-04	1.9E-04	6.8E-06	2.4E-06	1.8E-06	1.4E-06	
Eu-154	9.5E-03	7.2E-04	1.9E-04	6.6E-06	2.3E-06	1.7E-06	1.3E-06	
Eu-155	1.7E-04	1.2E-05	3.1E-06	8.7E-08	2.5E-08	1.8E-08	1.3E-08	
Ho-166m	1.4E-02	1.1E-03	2.8E-04	9.6E-06	3.3E-06	2.5E-06	1.9E-06	
Hf-178m	2.0E-02	1.5E-03	3.8E-04	1.3E-05	4.3E-06	3.2E-06	2.5E-06	

#### 4.3.2 処分坑道へのマグマの貫入による影響評価機能

マグマの貫入では、人工バリアにおいて物理的破壊または熱的、化学的影響によって地下水による核種移行が促進されるとともに、天然バリアでは貫入したマグマが冷却されて形成された岩脈に沿って新たに地下水移行経路が形成される。そのため、その移行経路上での核種移行を評価することが求められる。したがって、地下水移行シナリオの評価機能を拡張して対応した。図 4.3-14 に示すように、処分施設にマグマが貫入することにより廃棄体は、貫入を受けて破損する廃棄体、近傍で熱的影響を受ける廃棄体、影響を受けない廃棄体の 3 種類に分類される。これらのうち熱的影響を受ける廃棄体及び影響を受けない廃棄体は既存の機能をそのまま適用できる。一方、破損廃棄体は、以後人工バリアのバリア機能を完全に失うことから、既に GSRW-PSA に内蔵されている地震・断層活動-人工バリア損傷シナリオ評価モデルの機能が適

用できる。

処分施設を貫通するマグマ貫入は一度で終了せず、評価期間中複数回起こりうるため、図 4.3-15 に示すように、任意の時刻でフラックス出力ファイルを分割し、その時刻以降の計算に反映できるよう整備した。このとき、マグマ貫入の場所は重複しないと仮定した。

また、全廃棄体からの寄与を足し合わせるために各状態の廃棄体の数量については、全廃棄体数、処分施設における単位面積当たりの廃棄体数、貫入ごとの直撃および熱影響の範囲の面積を与えることによって求める。

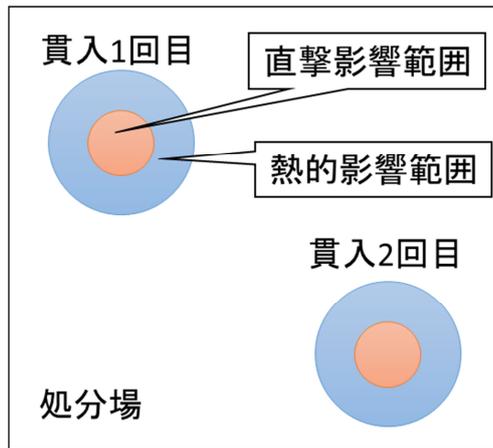
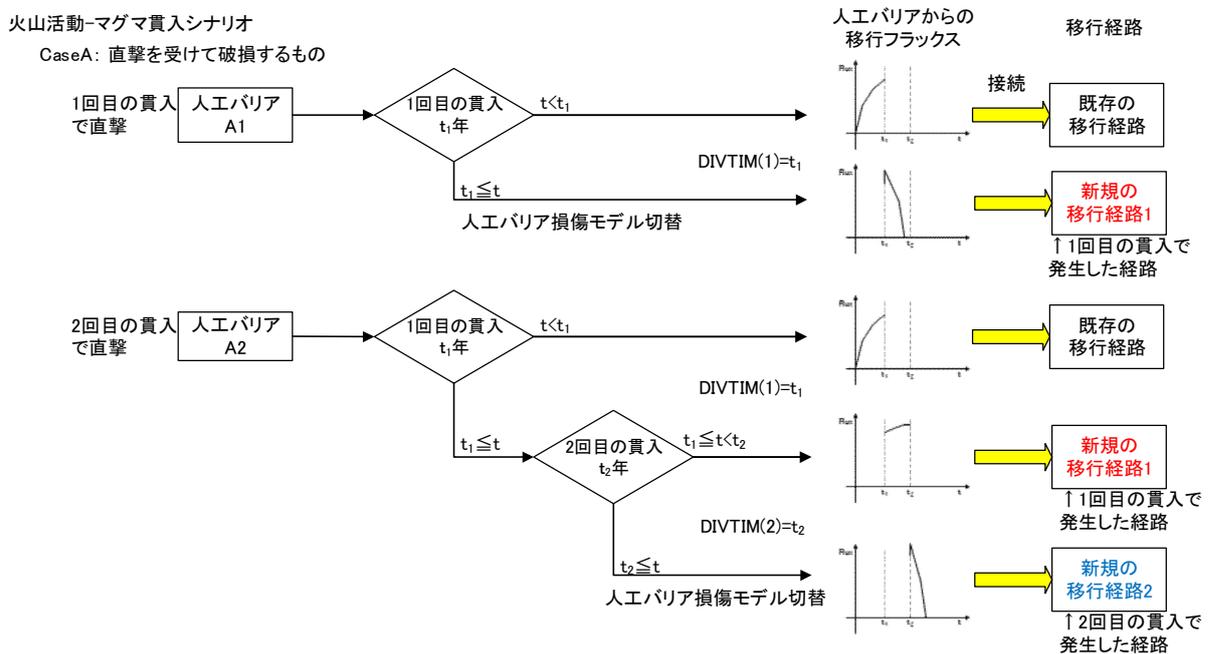


図 4.3-14 火山活動-マグマ貫入シナリオの概念図：鳥瞰図



※2回目の貫入で直撃を受けるものに関して、新規の移行経路1に切り替わる時刻は2回目の貫入発生時刻 $t_2$ ではなく、1回目の貫入発生時刻 $t_1$ であり、さらに2回目の貫入発生時刻 $t_2$ が新規の移行経路2に切り替わる時刻となるケース

図 4.3-15 貫入が2回発生する場合で人工バリア損傷シナリオ評価モデルに切り替わる時刻が移行経路の切り替わり時刻ではないケース

#### 4.4 まとめ

##### (1) 結晶質岩サイトの核種移行評価手法の整備

廃棄体・人工バリアから亀裂媒体への核種移行を一連で評価するため、人工バリア材の透水性の時間的変化を評価できる解析コード MC-BUFFER と亀裂性媒体中での地下水流動・核種移行解析コード FRAC3D のリンケージについて検討し、亀裂性岩盤における亀裂ネットワーク内部・外部に、等価多孔体による 3D モデルが存在する場での地下水流動解析を可能とするための改良を行った。

また、亀裂性媒体中での地下水流動評価においては、現地試験や室内試験等を踏まえて、亀裂に関する透水特性を与える必要があるため、亀裂密度や亀裂幅等の透水性に関する情報収集することが重要であることが示唆された。加えて、地震等に伴って亀裂幅が変化するようなシナリオにおいては、亀裂内での流動状況に大きな変化をもたらす可能性があるため、亀裂幅に関する変化特性に関する検討を進める必要があることが判った。

##### (2) GSRW-PSA への火山活動による影響評価機能の追加

また、3 章で検討した地質・気候関連事象の中で、発生の可能性は小さいが発生した場合に影響の大きい事象として選定し、従来の機能では評価できない火山活動による影響について GSRW-PSA にマグマ噴火による影響評価機能及びマグマ貫入による影響評価機能の 2 つについて評価機能を追加し、コードを拡張した。

マグマ噴火による評価では火山灰の大気拡散及び堆積について suzuki らの評価モデルを導入し、火口中心からの距離に応じた堆積厚さを評価できるようになり、処分施設に火道が交差して噴火し、放射性物質を含む火山灰が大気中を飛散し地表に堆積した場合の被ばく線量評価が可能となった。また、メラピ式の火砕流により廃棄体が火口付近に露出する場合の評価機能を追加するとともに、露出した廃棄体のオーバーパックの状態、地表への配置を考慮した外部被ばく線量換算ライブラリを整備した。さらに、マグマが処分施設内に貫入した場合の核種移行評価を地下水移行シナリオの中で評価できるように機能を追加した。

これら一連の機能を追加することにより、火山活動による影響評価を GSRW-PSA で実施できるようになった。5 章ではこれらの機能を利用して、火山活動による処分システムへの影響について総合的安全評価を実施した。

#### 4.2 の参考文献

- (1) 城代邦宏・植出和雄・本多眞・長谷川誠・小島圭二・小川輝繁, 地下石油岩盤タンクにおける水封機能の健全性評価手法に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol. 63 (2007) No. 2 P 624-634
- (2) 蒔田敏昭, 地下石油備蓄基地建設の概要, 資源・素材学会誌 107 (1991) No.13
- (3) 植出和雄・岡本明夫・本多眞・長谷川誠・鈴木誠, 気象・潮汐を考慮した水封式岩盤タンク周辺地下水位の変動評価, 土木学会論文集 Vol. 2003 (2003) No. 729 P 157- 168
- (4) 植出和雄, 原油岩盤タンクの水封機能評価技術に関する研究, UT51-2003-H870 (2003)
- (5) 地質調査所(1986) : 20 万分の 1 地質図幅「広島」
- (6) 日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書, 平成 22 年 3 月 (2010)
- (7) 原子力発電環境整備機構・核燃料サイクル開発機構, 処分システムに求められる閉鎖性能の考え方ー坑道交差部における水理解析ー (研究報告) 2005 年 9 月, NUMO-TR-05-02, JNC

TN8400 2005-016

- (8) 平成 25 年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備（安全審査に向けた評価手法の整備）報告書 平成 26 年 3 月 原子力研究開発機構
- (9) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 「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, 2005.
- (10) 日本原子力研究開発機構, 平成 20 年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査 報告書 (1/2) [確率論的アプローチによる長期的評価手法の調査], 平成 21 年 3 月 (2009)

#### 4.3 の参考文献

- (11) Kimura H., Takahashi T., Shima S. and Matsuzuru H., “A Generic Safety Assessment Code for Geological Disposal of Radioactive Waste: GSRW Computer Code User’s Manual”, JAERI-M92-161, 1992.
- (12) 武田聖司, 木村英雄, 確率論的評価手法 GSRW-PSA による地層処分システムの不確かさ解析: パラメータ不確かさおよび天然バリアの概念モデル不確かさの検討, JAREI-Research 2002-014, 2002.
- (13) Suzuki, T., “A Theoretical Model for Dispersion of Tephra.” Arc Volcanism: Physics and Tectonics, Proceedings of a 1981 IAVCEI Symposium, August–September, 1981, Tokyo and Hakone, 95–113. Tokyo, Japan: Terra Scientific Publishing Company, 1983.
- (14) Jarzempa, M.S., LaPlante, P.A., and Poor, K.J., ASHPLUME Version 1.0—A Code for Contaminated Ash Dispersal and Deposition, Technical Description and User’s Guide. CNWRA 97-004, Rev. 1. San Antonio, Texas: Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, 1997.
- (15) Sheriden, M.F. and Malin, M.C. Application of computer-assisted mapping to colcanic hazard evaluation of surge eruptions: Vulcano, Lipari, and Versuvius. Jour. Volcanol Geotherm Res., vol. 17, p.187-202, 1983.
- (16) Sakamoto Y. and Tanaka S., QAD-CGGP2 and G33-GP2; Revised versions of QAD-CGGP and G33-GP codes with the conversion factors from exposure to ambient and maximum dose equivalent, JAERI-M 90-110, 1990.
- (17) 佐々木利久他, 埋設処分における濃度上限値評価のための外部被ばく線量換算係数、JAEA-Data/Code 2008-003, 2008.
- (18) 町田洋, 新井房夫, 新編火山灰アトラス日本列島とその周辺、東京大学出版会, p.50-53, 2003.
- (19) 若杉圭一郎他、ガラス固化体からの放射線量に関する検討、 JNC TN8400 2003-022, 2003.

## 5. 安全設計の基本要件及び安全評価の 基本的考え方の整理

## 5. 安全設計の基本要件及び安全評価の基本的考え方の整理

### 5.1 はじめに

地層処分の安全評価においては、処分サイトの違いや地質・気候関連事象を考慮した地下水環境条件を設定した上で、廃棄体から人工バリア、天然バリアを經由して放出される放射性核種のフラックス（核種移行解析）及びそれに基づく生物圏における被ばく量を評価する必要がある。つまり、既存の研究や2章で検討した廃棄体・人工バリア材の性能評価モデルの整備結果、また、3章における地質・気候関連事象に対する評価シナリオを考慮して、人工バリアの各評価モデルの適切なリンケージの方法と、我が国で想定される地層処分地下環境へ適用可能な総合的な安全評価手法としての方法論の全体とりまとめ（体系的な安全評価手法の整備）を行い、閉鎖後の安全評価を対象に、我が国における地層処分システムの基本構成（天然バリアと人工バリアの組み合わせ）と多重安全機能としてのバリアシステムのあり方（安全を担保するための特性や構造）についての検討を行うことが求められる。なお、本章での検討結果は、ガラス固化体等の地層処分のみならず、福島第一原子力発電所事故によって発生した燃料デブリ等を対象とした処分システムの安全設計及び安全評価の考え方を検討する場合にも活用されるものである。

平成25年度までに、我が国の地層処分の閉鎖後の安全評価において想定される廃棄体・人工バリアの長期変遷に係るシナリオを対象として、ガラス固化体や各人工バリアの性能評価モデル、人工・天然バリア中における核種移行パラメータに対する評価手法及び確率論的安全評価コードGSRW-PSAにおける相互の入出力データをリンケージさせた10万年までの解析を実施した。この際、リスクや線量の代替指標として活用される重要核種の移行フラックス濃度の変化から、感度解析を行うことによって、評価パラメータ等の重要度分析を行い、安全評価上重要な廃棄体や人工バリア材の特性や構成等の基本的要件（安全機能）の観点から、安全評価の妥当性を判断するための判断指標を整理した。

さらに、我が国で想定される地下の水理、熱、化学環境の差異に関し、安全評価上設定すべきシナリオ（我が国の地質環境条件を踏まえた隆起・侵食（隆起形態（傾動・一様）の違いを含む）の影響を考慮）を想定し、人工バリアと天然バリアとをひとつながりで解析する総合的な核種移行解析を行い、人工バリアの変遷や個々のモデル/コードのリンケージを適用させた安全評価を実施した。また、それらの結果に基づき、核種移行フラックスへの影響が大きいパラメータやシナリオ設定などに対する重要度分析を実施し、本事業の他の実施内容の結果を含めた総合的な検討により、安全評価上重要な廃棄体や人工バリア材の特性や構成等の基本的要件（安全機能）の観点から、安全評価の妥当性を判断するための判断指標を引き続き整理した。

これらを踏まえ、平成26年度は、このうち、我が国で想定される地下の水理、熱、化学環境の差異による安全評価上設定すべきシナリオに基づく総合的な核種移行解析を行い、想定される地下の熱、水理、化学環境の範囲内での人工バリアと天然バリアの総合的な解析によって、長期的な隔離機能の変化、核種遅延効果の変化に関する不確実性の評価を行った。「5.2 安全評価手法の全体像」では、体系的な安全評価手法としてこれまで整備している人工バリア領域におけるリンケージ解析の評価体系や派生断層の成長によって影響を受ける天然バリア領域における評価体系、そして本年度実施したアップデートについて示した。これらに基づき、「5.3 人工バリアの変遷のシナリオを対象とした安全評価」では、特に処分サイトを想定しないジェネリックな環境条件において、昨年度示された埋設施設の基本設計ないし基本的設計方針の妥当性を判断する上で重要な項目である初期条件の設定、特に緩衝材に係る設計条件についてリンケージさせたモデル/コードに基づく人工バリアの変遷を考慮した性能評価を行うとともに、核種移行解析へのパラメータ設定をリンケージさせた安全評価を実施した。地質・気候関連事

象に天然バリアに関する事象を含む総合的な安全評価として、「5.4 派生断層の成長による影響を想定した安全評価」では、仮想的な堆積岩サイトを想定した場合の派生断層が処分施設と交差した場合の影響評価と、それに加え、断層成長の副次的な事象である深部流体の流入及び酸化性地下水の流入について、3章で実施した地下水流動解析結果に基づき、具体的な環境条件における人工バリアの変遷や個々のモデル/コードのリンケージを適用させた安全評価を実施した。また、「5.5 火山噴火による影響を想定した安全評価」では、3章における評価シナリオの設定に基づき、噴火による火山灰の大気拡散及び小規模火砕流における露出した廃棄体への接近における安全評価を実施した。そして、これらの評価結果に基づき、「5.6 重要な人工バリアの設計要件と天然バリアの調査要件に関する検討」において、人工バリアの性能劣化や核種移行フラックスへの影響が大きい設計条件を検討することにより、規制の観点として重要となるポイントについて整理するとともに、天然バリアの調査要件として重要な観点を抽出した。

## 5.2 安全評価手法の全体像

地層処分の安全審査では、事業許可申請の妥当性を判断することが重要になる。このため、判断の拠り所として「安全評価の基本的考え方」および「地層処分の安全評価手法」の整備が必要になるため、これらを取りまとめることが求められている。安全評価の基本的考え方としては、人工・天然バリアの安全機能（隔離、閉じ込め）を適切に評価することが必要であり、地層処分の安全評価手法としては、我が国において想定される代表的な地質、水理、熱及び化学的環境を踏まえた、核種移行や被ばくに与える影響を評価できる体系的な手法（シナリオ設定、モデル、解析コード、パラメータ評価）の整備が必要となっている。

また、体系的な手法にとっては、評価全体の一貫性が重要になってくることから、全体として「地質・気候関連事象を考慮した地下水流動条件を設定した上で、廃棄体から人工バリア、天然バリアを経由して放出される放射性核種のフラックス及び生物圏における被ばく量を“ひとつつながり”で評価すること」が必要であり、これを実現するため、個々の要素モデルやコード間の適切なリンケージを図った、総合的な安全評価体系の整備が求められる。

### （1）人工バリア領域を対象とした評価体系

我が国において想定される代表的な地下水の化学的環境を踏まえた、放射性核種の移行や周辺公衆への被ばくに与える影響を評価することのできる体系的な安全評価手法（シナリオ、モデル、コード）の整備を進めてきた。

平成22年度には、人工バリアの各評価モデルとの適切なリンケージの方法について、現状の知見として、モデルやコード間でのデータの受け渡しについて整理を行った。平成23年度には、人工バリア領域の変質評価に用いる、モデル、コード、パラメータについて、データの入出力関係、共通的に使用する設定データ（初期条件、境界条件）の適用関係について整理するとともに、従来の「緩衝材－支保工－EDZ」の人工バリア体系に、新たにOPを加え、OPの溶解（鉄の溶出）をリンクさせた評価手法をリンケージ解析のプロトタイプとして整備した。平成24年度には、人工バリア領域の温度変遷、10万年解析のためのリスタート機能、全面腐食時の最大溶解速度設定見直し、ガラス固化体溶解速度設定（Caを除外しMg濃度のみとする）等の整備を反映させた。平成25年度には、これまでに整備した人工バリア領域における変遷を評価するための各性能評価モデル/パラメータのリンケージについて、鉄珪酸塩鉱物の鉱物モデル・熱力学データを追加するとともに、核種溶解度にPA-SOLを適用し、ガラス固化体溶解速度設定

手法の見直しなどの整備を反映させた（図 5.2-1 参照）。

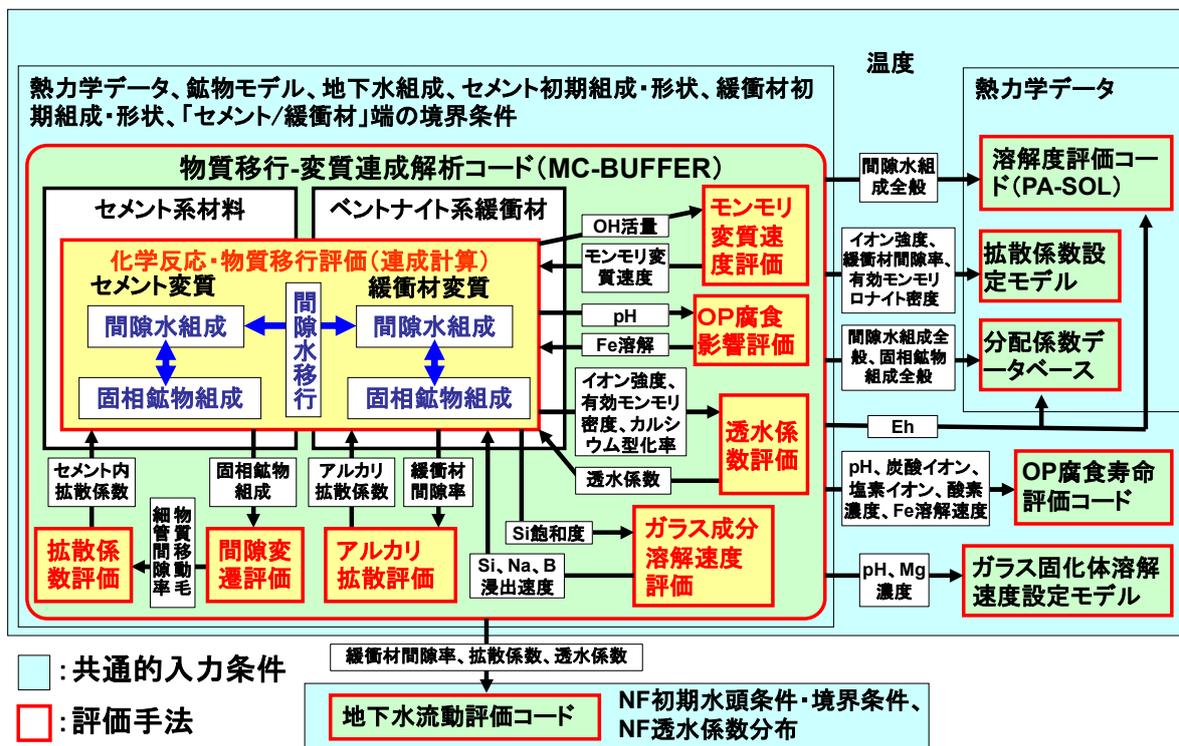


図 5.2-1 人工バリア領域の状態変遷を解析するための核種移行に繋がる評価体系

本年度は、ガラス固化体溶解速度設定手法の見直しを引き続き進めたが、5章で記述する総合的安全評価においては、平成25年度における人工バリア長期変遷解析との比較のため、平成25年度に整備した評価手法を引き続き適用して実施した。

## (2) 天然バリア領域を対象とした評価体系

HLW等を対象とした地層処分では、地震、火山、隆起・侵食、気候変動等の地質・気候関連事象が発生することが想定される場合に、処分サイト内の地質環境及び処分施設における熱、水理、力学、化学的な特性（以下、THMC）の変化の程度を評価し、さらに、その特性変化が処分施設からの核種移行に与える影響を評価する必要がある。地質・気候関連事象による処分施設の破壊や著しい特性の変化の影響はサイト選定により回避され、あるいは、処分場レイアウトの検討や適切な施設設計により、人工バリア及び天然バリア内の特性変化の影響を極力抑えられると考えられるが、将来の安全審査に向けて、地質・気候関連事象の発生による核種移行への影響の評価手法を整備しておく必要がある。本年度は、発生可能性は低い影響の大きい事象を評価するための事例調査と事例データに基づくシナリオの設定を行い、設定した評価シナリオに基づき核種移行・被ばく線量を評価する。前者については、第3章において報告している。後者については、第3章において検討された派生断層成長による地下水流動解析結果を基に、現在我が国で想定しうる処分施設に直接影響与える地質・気候関連事象（177事象のうち23事象、第3章にて詳細は記述）のうち、核種移行への影響評価の必要性が高いと考えら

れる「分岐断層による影響」及び「火山噴火による影響」を対象に、核種移行に繋がる評価体系の構築を進めた。

断層活動による処分システム内の特性変化を想定した核種移行評価のイメージを図 5.2-2 に示す。図に示すように、仮想的な堆積岩地層処分サイトにおいて、事前調査で見落とした伏在断層が成長し、断層と処分施設が交差することによる核種移行への影響を以下のように想定した。

- ✓ 処分施設内の母岩が力学的破壊を受け、人工バリアの安全機能が低下・喪失する
- ✓ 処分施設からの核種移行経路において、処分場と交差した断層沿いに新たな移行経路が形成され、地下水流速、生物圏までの移行距離、水質が変化し、さらに水質の変化は移行経路上の地質媒体の種類に応じて核種の収着特性に影響を与えること

これらの特性変化の影響を念頭に、整備した断層活動により影響を受けた処分システムにおける核種移行リンケージ評価体系の概念図を図 5.2-3 に示す。

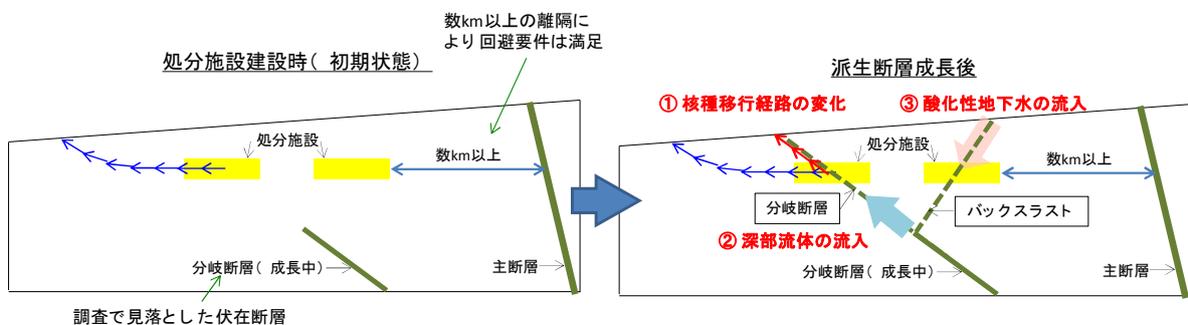


図 5.2-2 派生断層の成長による天然バリア内の特性変化を想定した核種移行評価イメージ

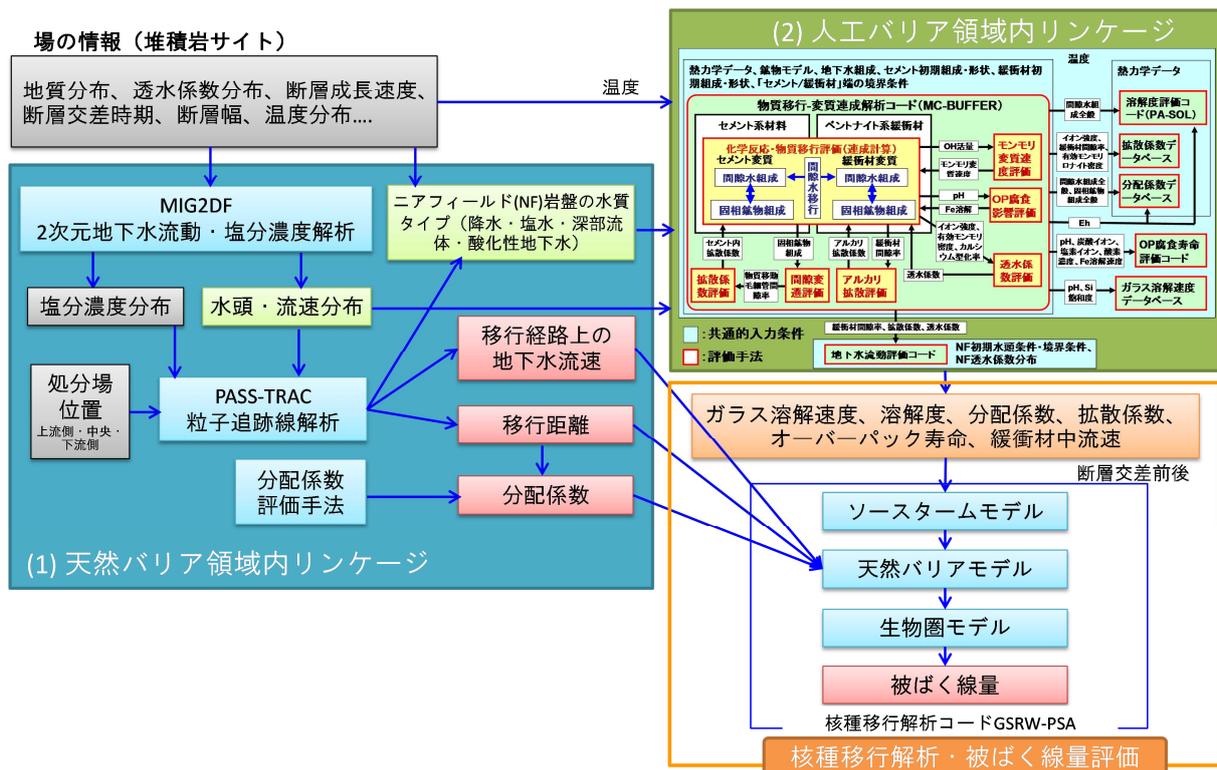


図 5.2-3 堆積岩サイトの派生断層の成長を想定した場合のリンケージ評価体系

天然バリア領域内では、まず、ガラーキン法を用いた有限要素法による2次元地下水流動解析コードMIG2DFにより、派生断層の成長に応じて透水性を変化させるなどして、水頭・流速分布及び塩分濃度分布の時間変化を計算する。連動した粒子追跡法による移行時間・移行経路の解析コード(PASS-TRAC)により、確率論的安全評価コードGSRW-PSAを用いて安全評価を行う際の天然バリアにおける核種移行の評価に必要なパラメータ(地下水流速、移行経路、水質条件等)を算出する(3.4参照)。また、算出された岩種や水質の情報を基に、核種移行データベースの整備の一環で進めている核種の分配係数評価手法により、移行経路上の分配係数を設定する。一方、ニアフィールド岩盤における水質の解析結果は、前述した一連の人工バリアにおけるリンケージ解析の入力となり、ガラス溶解速度や緩衝材中の分配係数、拡散係数などの核種移行パラメータを算出する。また、断層交差により影響を受けた人工バリアの核種移行パラメータについては、その影響度から保守的な値を個別に設定した。以上のパラメータ条件を基に、GSRW-PSAにより人工バリア内から天然バリア、生物圏に至るまでの核種移行の解析を可能とした。

一方、火山噴火による影響の評価では、4.3で述べたように、火山噴火に至るまでの人工バリアからの核種の漏出などについてリンケージ評価を行えるようになってきているが、人工バリアの閉じ込め機能が長期にわたって性能が保持される場合非保守的な評価となることが考えられるため、火山噴火による影響評価においてはリンケージせず、放射性崩壊のみを考慮した評価とした。

### 5.3 人工バリアの変遷のシナリオを対象とした安全評価

地層処分システムにおいて、緩衝材は止水機能や核種移行抑制機能などの安全機能が発揮されることが期待されており、緩衝材の有力な候補として、ベントナイト系緩衝材を用いることが検討されている。ベントナイト系緩衝材は、支保工などに使用するとされるセメント系材料が地下水と接触することにより流入する高アルカリ性地下水によって長期的に劣化することが指摘されている。また、ベントナイト系緩衝材における間隙水組成によっては、オーバーパックスの腐食状態や進展が促進され、早期破損することによりオーバーパックに期待されている核種浸出抑制機能が失われることが指摘されている。それに伴い、オーバーパック破損によってガラス固化体が地下水に接触することにより溶解・変質が生じ、放射性核種が溶出することが懸念されている。溶出後もセレン (Se) やネプツニウム (Np) のような半減期が長く、酸化還元鋭敏な核種移行性は緩衝材中間隙水の Eh や pH により大きく左右されると言われている。これらの安全機能を評価する上では、我が国における処分環境を考慮した緩衝材変質評価をする必要がある。

過去の原子力安全・保安院の委託事業である「放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査」では、これまでにベントナイト変質を実験的に定量化し、ベントナイト系緩衝材に期待されている止水機能の長期的な変動を評価するための手法となる評価モデルや評価式、評価データの開発を行ってきた。また、セメント系材料の変質にともなう固相および液相成分の変化を評価するための信頼性のある鉱物モデルおよびセメント硬化体中における鉱物の溶解・生成反応に伴う間隙構造変化と物質の拡散挙動との関係を定量化したモデルの構築し、これら評価モデル等を踏まえ導入した物質移行－変質連成解析コードの整備・検証を行ってきた。さらに、緩衝材中間隙水の酸化還元電位 (Eh) がオーバーパックスの腐食による還元作用への影響を評価する手法として、「炭素鋼オーバーパックスの腐食影響評価手法」を整備している。これらはお互い個別の評価手法として確立されており、人工バリアの安全機能を評価するには各評価手法を連動させ評価することが不可欠であり、平成 23 年度<sup>(1)</sup>には各評価手法を連動させるため、処分施設における要件として、オーバーパックス－緩衝材－支保工とした条件設定をし、物質移行－変質連成解析コード MC-BUFFER による緩衝材変質評価計算を実施している。さらに平成 24 年度<sup>(2)</sup>は、オーバーパック破損後におけるガラス固化体から溶出する放射性核種の人工バリア内核種移行を評価するには既存の 1 万年間の評価結果では期間が短いことから、評価期間を 10 万年間に延長し、オーバーパックからの温度変化等を考慮した評価を行った。平成 25 年度<sup>(3)</sup>は、鉄珪酸塩鉱物の鉱物モデル・熱力学データへの追加を行い、人工バリアの変遷シナリオを対象とした緩衝材変質評価計算を実施した。本年度は平成 25 年度に引き続き人工バリアの変遷シナリオを対象とした緩衝材変質評価計算を実施した。

#### 5.3.1 緩衝材変質・間隙水組成の変遷評価

本年度は結晶質岩サイトを想定した総合的な感度解析を行い、その結果より人工バリアに関する重要な設計要件を抽出するため、次の 2 つについての解析を実施した。

- ① 結晶質岩サイトで降水系地下水を設定した解析
- ② セメントの高アルカリ影響を、地下水組成を経時的に変化させることで模擬した解析

①については、結晶質岩サイトにおける環境条件のうち、地下水組成として降水系地下水を設定した。また、緩衝材を対象とした人工バリアの設計要件として、

- ・緩衝材の初期厚さ
- ・初期乾燥密度

- ・ベントナイト-珪砂混合率
- ・支保工の厚さ

について変化させた条件について検討を行った。

②については、結晶質岩サイトは堆積岩サイトに比べ岩盤強度が高いことから緩衝材-EDZ間に支保工が設置されない可能性があり、その場合に、グラウト、止水材、処分場構造体として使用されるセメント材料により、地下水が高アルカリ化することを想定し、セメント溶出水を高アルカリ地下水として設定した。

### (1) 解析体系

①の解析体系は、我が国の処分環境を考慮してHLW2次取りまとめ<sup>(4)</sup>および第二次TRUレポート<sup>(5)</sup>を参考に、平成24年度にも設定したHLWを模擬した1次元解析体系とした。図5.3-1に本解析体系概念図を示す。オーバーパックについては、HLW2次取りまとめにおいて人工バリア構成の配置として、処分孔への横置き方式および縦置き方式に検討され、岩盤の種類、オーバーパックの部位によらず、放射線遮蔽厚さ15cmに腐食代4cmを加えた19cmと提示されており、これを設定した。緩衝材については、HLW2次取りまとめにてオーバーパック及び緩衝材の材料、厚さ等の仕様に関する設計や、製作・施工性も含め検討され、性能に余裕を持たせた合理的な人工バリアの仕様例として提示されている70cmに設定した。さらに緩衝材の初期欠陥や緩衝材流出などを想定し、緩衝材厚さ10cm、20cm、30cm、40cm、50cm、60cmについても設定した。支保工については、HLW2次取りまとめおよびTRU2レポートにて提案されているもののうち60cmを設定した。さらに支保工のコンクリート使用量におけるアルカリ成分の緩衝材溶解への影響を把握するため、支保工厚さ10cm、20cm、30cm、40cm、50cmについても設定した。

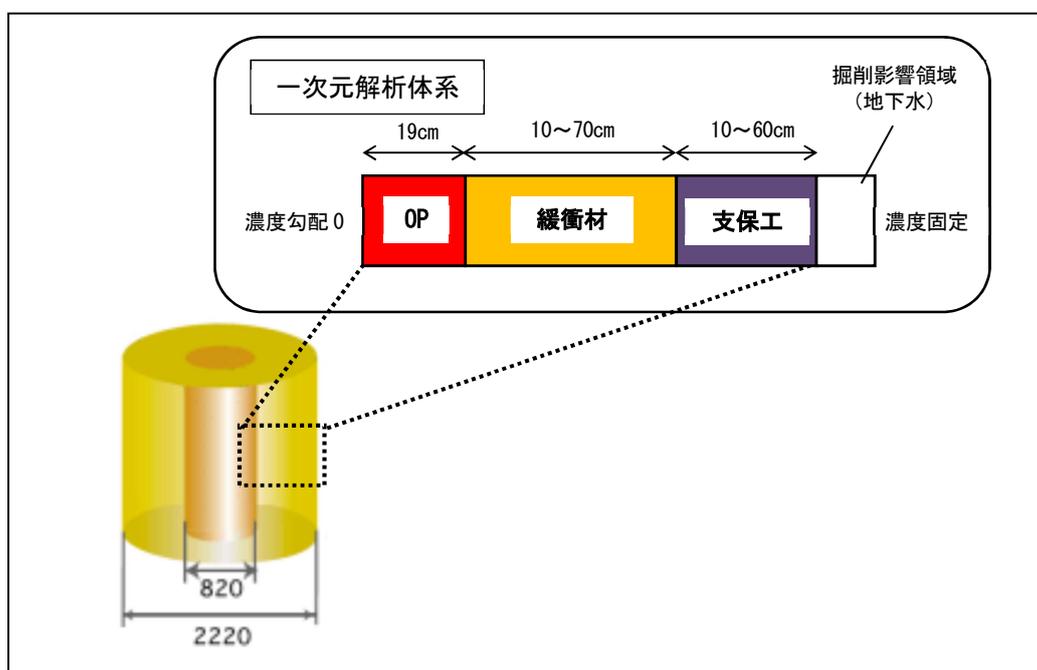


図 5.3-1 解析体系概念図 (解析①)

②のセメントの高アルカリ影響を、地下水組成を経時的に変化させることで模擬した解析に

おいては、支保工厚さは 0cm を設定した。HLW2 次取りまとめでは、人工バリアの外側には掘削影響領域（以下、「EDZ」という。）があり、境界条件として支保工外側に濃度固定条件を与えることにより、常にフレッシュな地下水が接する条件とし、OP 内側の境界には濃度勾配 0 の条件を与えた。

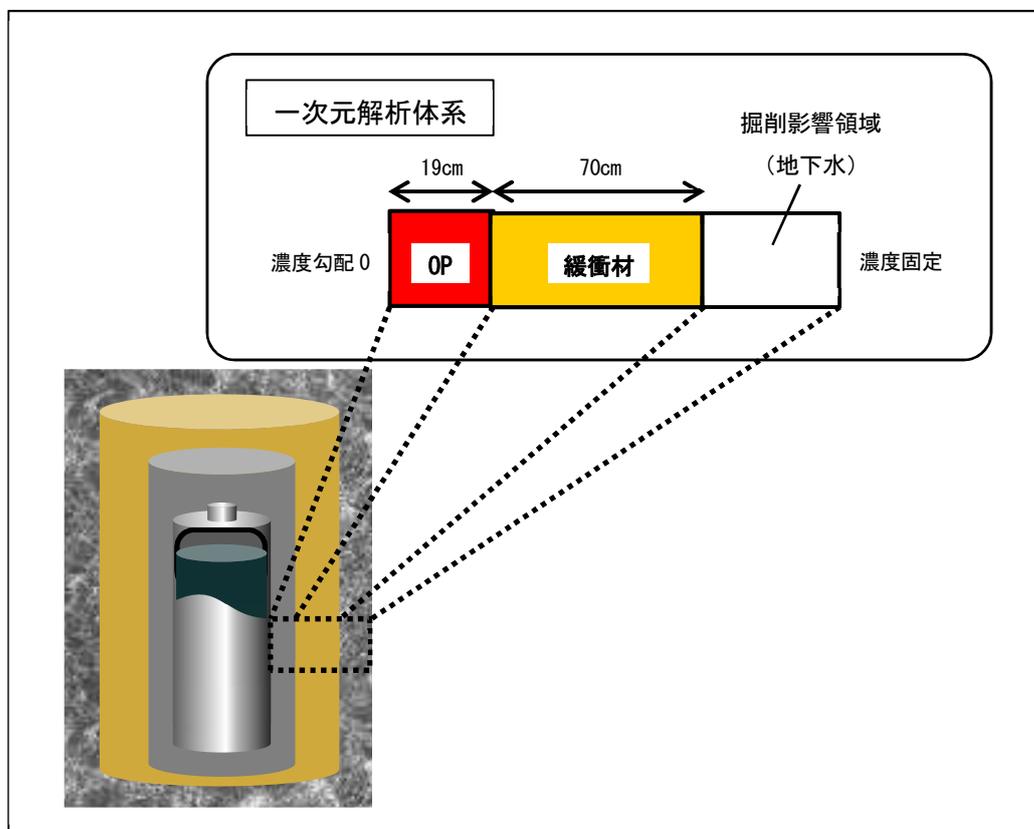


図 5.3-2 解析体系概念図（解析②）

## （2）解析条件

①および②の解析における解析評価時間は、平成 25 年度と同様に 10 万年を評価時間と設定した。また、本解析ではタイムステップを 1 ヶ月と設定しているが、10 万年まで解析において、間隙の閉塞などが要因となり計算が停止してしまうケースがあり、それらのケースについては、MC-BUFFER のリスタート計算機能を使用し、タイムステップを変更することで 10 万年までの評価を実施した。

### （ a ）温度

温度については、人工バリアの温度変遷を模擬するため、オーバーパックスの経時的な温度変化（100℃～47℃）を設定した。オーバーパックスの温度変化については、HLW2 次とりまとめでの「ニアフィールドの温度経時変化および隙間の影響」よりガラス固化体が 50 年中間貯蔵されたものを対象とした、処分孔縦置き方式による硬岩系岩盤、処分坑道離間距離 10 (2D)、廃棄体ピッチ 4.44 (2d) にて解析された温度の経時変化のうち、ガラス固化体に近い点を参照した。なお、HLW2 次とりまとめでは、廃棄体定置後約 1 万年で人工バリアの温度は初期定地温に戻

るとの評価であることから、1 万年以降のオーバーパックの温度については、47°C定温とした。  
 図 5.3-3 に設定したオーバーパック境界温度データを示す。

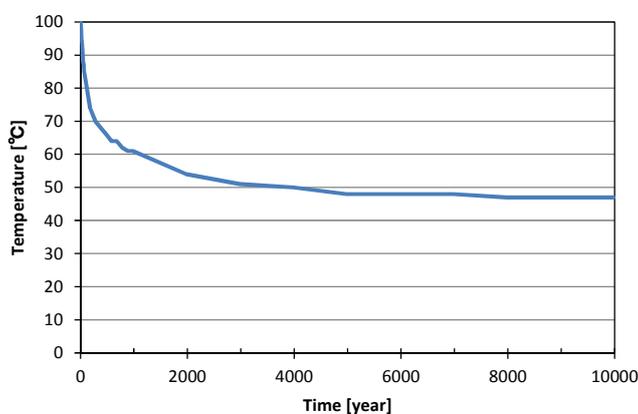


図 5.3-3 オーバーパック境界温度データ

人工バリアを構成する材料の熱物性については、オーバーパックおよび緩衝材は HLW2 次とりまとめの「岩盤および隙間の物性」より、支保工は TRU2 レポートの「各構成要素の熱物性データ」より熱伝導率および比熱を用いた。なお、MC-BUFFER では比熱ではなく、容積比熱での入力データとなるため、単位変換した値としている。表 5.3-1 に人工バリアを構成する熱物性データを示す。なお、本解析では各構成材料の変遷による熱物性データの変化は考慮せず、初期値一定条件としている。

表 5.3-1 人工バリアを構成する熱物性データ

構成要素	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [J/m <sup>3</sup> K]
オーバーパック	51.6	3.69E+06
緩衝材	0.78	1.01E+06
支保工	2.56	2.63E+06

(b) 地下水組成

①の解析における地下水組成は平成25年度と同様にHLW2次とりまとめにて高pH系代表的地下水として設定されている降水系地下水を設定した。表5.3-2に解析に使用した代表地下水組成を示す。

表 5.3-2 代表地下水組成

降水系地下水

pH	8.5
Na	3.42E-3 mol/L
K	6.20E-5 mol/L
Ca	1.10E-4 mol/L
Mg	5.00E-5 mol/L
C	3.50E-3 mol/L
S	1.10E-4 mol/L
Cl	1.50E-5 mol/L
Al	3.4E-7 mol/L
Si	3.4E-4 mol/L
Fe	9.7E-10 mol/L

②のセメントの高アルカリ影響を、地下水組成を経時的に変化させることで模擬した解析においては、セメント溶出水を高アルカリ地下水として設定した。高アルカリ地下水は、平成19年度<sup>(6)</sup>のセメントペースト浸出試験をシミュレートした解析結果(pH、Ca、Mg、Si濃度などの経時変化)を参照し、アルカリ成分濃度の変化に利用するセメント溶出水組成を8か所抽出し、それらを経時的にpHが高いものから順に切替えたものを高アルカリ地下水として、セメント溶出水1、2の2種類を設定した。

表5.3-3にセメント溶出水1として使用した地下水の組成を、表5.3-4にセメント溶出水2として使用した地下水の組成を示す。

表 5.3-3 高アルカリ地下水の組成 (セメント溶出水1)

pH	12.80	12.48	12.36	11.85	11.45	11.05	10.41	9.95
Na (mol/L)	4.34E-2	7.42E-3	3.62E-3	3.48E-3	3.45E-3	3.35E-3	3.33E-3	3.32E-3
K (mol/L)	3.24E-2	3.30E-3	2.24E-4	1.08E-4	8.36E-5	7.61E-5	7.12E-5	6.85E-5
Ca (mol/L)	4.74E-3	1.53E-2	1.32E-2	2.83E-3	7.34E-4	1.96E-5	1.36E-5	1.54E-5
Mg (mol/L)	4.65E-9	1.05E-8	9.21E-9	2.83E-9	9.02E-9	5.43E-8	3.70E-7	1.28E-6
C (mol/L)	1.31E-5	8.13E-6	8.12E-6	1.01E-5	1.67E-5	5.53E-4	1.53E-3	2.09E-3
S (mol/L)	4.83E-4	9.67E-5	9.24E-5	1.96E-4	2.47E-4	1.99E-4	1.69E-4	1.51E-4
Cl (mol/L)	1.50E-5							
Al (mol/L)	8.49E-6	3.93E-6	7.26E-6	4.07E-4	2.44E-4	9.53E-5	2.18E-5	7.53E-6
Si (mol/L)	1.30E-5	2.92E-6	4.71E-6	1.16E-4	1.05E-3	7.18E-4	3.74E-4	2.65E-4

表 5.3-4 高アルカリ地下水の組成（セメント溶出水 2）

pH		13.60	12.80	12.36	11.85	11.45	11.05	10.41	9.95
Na (mol/L)		4.03E-1	4.34E-2	3.62E-3	3.48E-3	3.45E-3	3.35E-3	3.33E-3	3.32E-3
K (mol/L)		3.24E-1	3.24E-2	2.24E-4	1.08E-4	8.36E-5	7.61E-5	7.12E-5	6.85E-5
Ca (mol/L)		3.81E-4	4.74E-3	1.32E-2	2.83E-3	7.34E-4	1.96E-5	1.36E-5	1.54E-5
Mg (mol/L)		6.47E-10	4.65E-9	9.21E-9	2.83E-9	9.02E-9	5.43E-8	3.70E-7	1.28E-6
C (mol/L)		4.26E-4	1.31E-5	8.12E-6	1.01E-5	1.67E-5	5.53E-4	1.53E-3	2.09E-3
S (mol/L)		6.64E-2	4.83E-4	9.24E-5	1.96E-4	2.47E-4	1.99E-4	1.69E-4	1.51E-4
Cl (mol/L)		1.50E-5	1.50E-5	1.50E-5	1.50E-5	1.50E-5	1.50E-5	1.50E-5	1.50E-5
Al (mol/L)		4.87E-5	8.49E-6	7.26E-6	4.07E-4	2.44E-4	9.53E-5	2.18E-5	7.53E-6
Si (mol/L)		3.71E-4	1.30E-5	4.71E-6	1.16E-4	1.05E-3	7.18E-4	3.74E-4	2.65E-4

(c) 鉱物組成

緩衝材領域のベントナイトについては、HLW2 次取りまとめにおいて示されているベントナイト系緩衝材の国内外ベントナイト鉱物組成より、また第 2 次 TRU レポートでも変質評価解析にて使用されているクニゲル V1 を採用した。解析に用いるベントナイト系緩衝材の鉱物組成については、平成 24 年度と同様の緩衝材初期鉱物組成を設定した。支保工については、第 2 次 TRU レポートで人工バリアに使用されるセメント系材料として示されている普通ポルトランドセメント（以下、「OPC」と言う。）を採用した。なお、OPC での W/C（水セメント比）は 55% に設定をした。オーバーパックについては、Fe(c)を設定し、水との化学反応を計算するため、便宜的に空隙率 40% の多孔質と仮定した。

二次鉱物は、平成 23 年度と同様に平成 21 年度報告書<sup>(7)</sup>の「セメントーベントナイト接合試験の結果を用いたセメント空隙変遷モデルおよび解析コードの検証」にて報告されているセメント・ベントナイト接合系の二次鉱物を設定した。鉄鉱物については、平成 25 年度に報告した鉄鉱物の検討によって選定した鉱物を二次鉱物として設定した。上記の初期鉱物および二次鉱物を考慮し設定した鉱物モデルについて表 5.3-5 に示す。

表 5.3-5 鉱物モデル

		計算に用いた鉱物	初期鉱物量 (wt%)	溶解反応の計算 (溶解速度式)
支保工初期鉱物 (OPC W/C=55%)		Ca(OH) <sub>2</sub>	17.0	平衡論
		C-S-H (1.8)	58.6	//
		Monosulfate (AFm)	10.6	//
		Hydrogarnet	11.7	//
		Brucite	2.1	//
ベントナイト 系緩衝材 初期鉱物	クニゲル V1 (含有率 10～ 100%)	Montmorillonite	49.0	速度論
		Quartz	38.0	平衡論
		Analcime	3.0	//
		Calcite	2.5	//
	Pyrite	0.6	//	
	ケイ砂	SiO <sub>2</sub>	100.0	速度論
オーバーパック初期鉱物		Fe(c)	100.0	//
上記以外に生成を許す鉱物		C-S-H(1.5), (1.3), (1.1), (1.0), (0.9), (0.833), (0.6), (0.4)	0	平衡論
		Ettringite (AFt)	0	//
		Gypsum	0	//
		Laumontite	0	//
		Brucite	0	//
		Kaolinite	0	//
		Katoite	0	//
		AS <sub>4</sub> H	0	//
		Friedel's salt	0	//
		Gibbsite	0	//
		Sepiolite	0	//
		Hydrotalcite	0	//
		Siderite	0	//
		Fe(OH) <sub>2</sub> (s)	0	//
		Magnetite	0	//
		Chukanovite	0	//
		Goethite	0	//
		Melanterite	0	//
Berthierine	0	//		
Gleenalite	0	//		

(d) 評価モデル

評価モデルは、これまでに「放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査」においてベントナイト変質における評価手法として整備したモンモリロナイト溶解速度モデル、ベントナイト透水係数評価モデル、アルカリ拡散モデル、quartz 溶解速度モデル、セメント間隙変遷モデル、表 5.3-5 で示した鉱物モデルを使用する。式(5.3-1)～式(5.3-12)に各評価モデル式を示す。ベントナイト透水係数式については、昨年度設定した適用条件を踏まえ、式(5.3-2)～式(5.3-4)のとおりに設定した。また、オーバーパックについては、炭素鋼腐食反応速度モデルを使用する。炭素腐食反応速度モデルについては、式(5.3-11)に示すように腐食反応速度 pH と硫化水素ナトリウム (NaHS) 濃度で表されているが、式(5.3-12)に漸近するように NaHS 濃度依存性を設定している。本解析では、HS 濃度が濃度依存性の影響を受けずまで上昇しないことを仮定し、NaHS を 0 とした、pH 依存性のみの式(5.3-12)を使用した。なお、腐食速度は最大  $1.5 \mu\text{m/y}$  となるよう設定した。支保工における透水係数 (Kw) の設定は、セメント間隙変遷モデルより式(5.3-10)に示す  $1.0 \times 10^{-15} \text{m/s}$  の一定条件としている。

- ・モンモリロナイトの溶解速度式

$$R_A = 3500 (a_{\text{OH}^-})^{1.4} e^{-51000/RT} \quad (5.3-1)$$

$R_A$  : 溶解速度( $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ )  
 $a_{\text{OH}^-}$  : OH 活量( $\text{mol dm}^{-3}$ )  
 $T$  : 温度(K)  
 $R$  : 気体定数( $8.314 \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

- ・ベントナイト透水係数式

$$K_w = 1.2 \times 10^{-7} I_s^{1.5} 10^{-0.0042\rho_m} (7.9 \times 10^{-5} T^2 - 1.9 \times 10^{-2} T - 0.21) \quad (5.3-2)$$

○ただし、イオン強度  $I_s$  が  $0.1 \text{ mol L}^{-1}$  以下の適用条件式

$$K_w = 1.2 \times 10^{-7} 0.1^{1.5} 10^{-0.0042\rho_m} (7.9 \times 10^{-5} T^2 - 1.9 \times 10^{-2} T - 0.21) \quad (5.3-3)$$

○また、 $\rho_m$  が  $0.04 \text{ g cm}^3$  以下の適用条件式

$$K_w = 1.2 \times 10^{-7} (7.9 \times 10^{-5} T^2 - 1.9 \times 10^{-2} T - 0.21) \quad (5.3-4)$$

$K_w$  : 透水係数( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $\rho_m$  : 有効モンモリロナイト密度( $\text{kg m}^{-3}$ )  
 $I_s$  : イオン強度( $\text{mol dm}^{-3}$ )  
 $T$  : 温度(K)

- ・緩衝材中におけるアルカリ拡散係数式

$$De = 5.0 \times 10^{-7} \phi^{2.1} e^{(-18600/RT)} \quad (5.3-5)$$

$De$  : 有効拡散係数( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )  
 $\phi$  : 間隙率(-)  
 $T$  : 間隙水の絶対温度(K)  
 $R$  : ガス定数( $8.31 \text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

- quartz の溶解速度式

$$R = k A (a_{\text{H}^+})^n (1 - Q/K) \quad (5.3-6)$$

$\log k$  : quartz の速度定数 (= -13.8 (70°C)) (mol/m<sup>2</sup>/s)

$A$  : quartz の表面積 (= 9.53×10<sup>3</sup>) (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

$a_{\text{H}^+}$  : H<sup>+</sup> の活量

$n$  : 定数 (= -0.55 (70°C)) (-)

$Q/K$  : quartz の飽和指数 ( $Q$  : イオン活量積、 $K$  : 平衡定数)

- セメント間隙変遷モデル式

$$De = 5.37 \times 10^{-10} \phi_{tra} \quad (5.3-7)$$

$$\phi_{tra}(t) = V_{cp-tra}(t) / V_{tot} \quad (5.3-8)$$

$$\Delta V_{cp-tra}(t) = \frac{V_{cp-tra}(0)}{V_{cp-tra}(0) + V_{cp-sto}(0) + V_a(0)} \Delta V_{pore}(t) \quad (5.3-9)$$

$De$  : 有効拡散係数(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)

$\phi_{tra}(t)$  : 物質移動毛細管間隙率

$V_{tot}$  : セメント硬化体の総体積

$V_{cp-tra}(t)$  : 物質移動毛細管間隙の体積

$V_{cp-tra}(0)$  : 初期の物質移動毛細管間隙の体積

$V_{cp-sto}(0)$  : 初期の貯留毛細管間隙の体積

$V_a(0)$  : 初期の水泡体積 (計算では 0)

$V_{pore}(t)$  : セメント硬化体間隙の体積

$$Kw = 1.0 \times 10^{-15} \text{ (一定)} \quad (5.3-10)$$

$Kw$  : 透水係数(m s<sup>-1</sup>)

- 炭素鋼腐食反応速度式

$$R = \frac{\log(10^{1.5} + 10^{340[\text{NaHS}^-]^{0.85}})}{1 + 10^{(\text{pH}-9.6)}} \quad (5.3-11)$$

$$R = \frac{1.5}{1 + 10^{(\text{pH}-9.6)}} \quad (5.3-12)$$

$R$  : 腐食反応速度(μm y<sup>-1</sup>)

$\text{NaHS}$  : 硫化水素ナトリウム濃度(mol dm<sup>-3</sup>)

### (e) 熱力学データベース

熱力学データベースは、多項式または van't Hoff 式を使って平衡定数の温度依存性を考慮することができる Spron-JNC<sup>(8)</sup>をベースに、CSH ゲル (CSH(0.833)~CSH(1.8)) に A. Atkinson<sup>(9)</sup>によるデータを考慮した熱力学データベースを使用した。この熱力学データベースは、「放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査」におけるベントナイトおよびセメント変質評価解析で使用された実績がある。オーバーパックにおける熱力学データについては、平成 19 年度に報告されている鉄化学種および平成 25 年度に報告されている鉄鉱物の検討によって選定された鉱物の熱力学データを使用した。なお、大塚ら<sup>(10)</sup>の報告ではカソード反応は水素発生反応が支配的で、炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) や硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) の還元生成物であるメタン ( $\text{CH}_4$ ) や硫化物イオン ( $\text{HS}^-$ ) が検出されていないことから、熱力学データベースからメタンと硫化物イオンの反応を除外することも検討されたが、本解析では考慮していない。

### (3) 解析ケース

①の解析ケースは、基本ケースとして、表 5.3-2 に示した降水系地下水 (case1) を設定するが、平成 25 年度に報告済みである。影響解析のケースは、緩衝材の初期欠陥や流出などを想定した影響因子として、緩衝材厚さ (case7P~case12P) および乾燥密度 (case13P~case17P)、ベントナイト-ケイ砂混合率を変化させた (case18P~case21P) ケースを、さらに人工バリアシステムにおいてベントナイト系緩衝材の溶解挙動に影響を及ぼすアルカリ成分を溶出するコンクリートについて支保工厚さ (case22P~case26P) を設定した。表 5.3-6 に解析ケース一覧を示す。

さらに、②の高アルカリ地下水を設定した解析ケースは、地下水質特性としてセメント溶出水 1 を設定し pH が 10 まで低下するまでの期間を 500 年~80,000 年と変化させた (case27C~case33C) ケース、地下水質特性としてセメント溶出水 2 を設定し、pH が 10 まで低下するまでの期間を 10,000 年とした (case30C#) ケースを設定した。表 5.3-7 に解析ケース一覧を示す。

表 5.3-6 解析ケース一覧 (①降水系地下水ケース)

ケース	緩衝材厚さ [cm]	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	混合率 [Bnt.:Qtz.]	支保工厚さ [cm]	地下水質特性
1	70	1.6	7:3	60	降水系
7P	60	1.6	7:3	60	降水系
8P	50				
9P	40				
10P	30				
11P	20				
12P	10				
13P	70	1.8	7:3	60	降水系
14P		1.4			
15P		1.3			
16P		1.2			
17P		1.1			
18P	70	1.6	10:0	60	降水系
19P			5:5		
20P			3:7		
21P			1:9		
22P	70	1.6	7:3	50	降水系
23P				40	
24P				30	
25P				20	
26P				10	

表 5.3-7 解析ケース一覧 (②高アルカリ地下水ケース)

ケース	緩衝材厚さ [cm]	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	混合率 [Bnt.:Qtz.]	支保工厚さ [cm]	地下水質特性	pHが10まで低下するまでの期間 [年]
27C	70	1.6	7:3	0	セメント溶出水1	500
28C						2,500
29C						5,000
30C						10,000
31C						20,000
32C						40,000
33C						80,000
30C#	70	1.6	7:3	0	セメント溶出水2	10,000

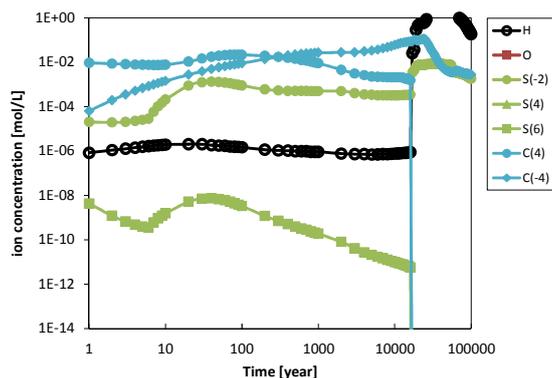
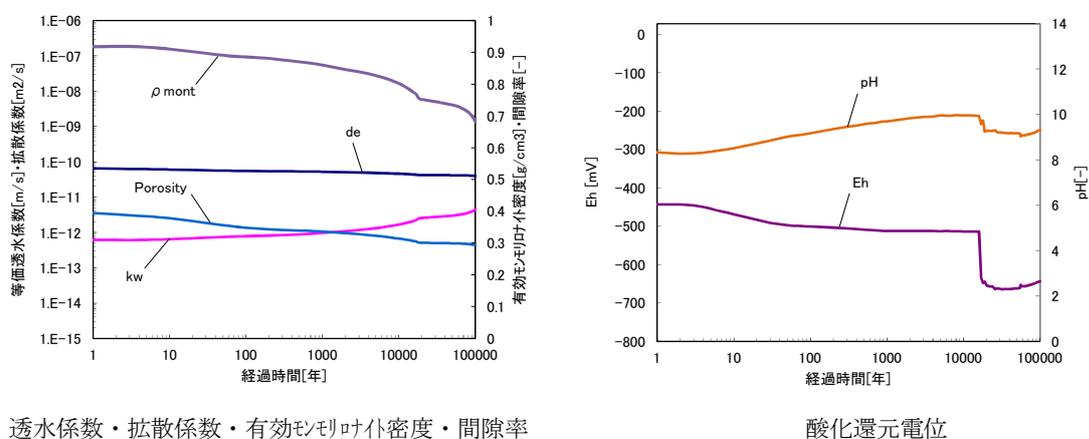
(4) 解析結果

後述のグラフにおける緩衝材領域の経時変化分布については、緩衝材領域平均とし、Eh のグラフについては、緩衝材のオーバーパック接触領域付近における経時変化分布とした。また、透水係数については、ベントナイト領域における等価透水係数にて示している。

なお、case1 の基本ケースの解析結果については、平成 25 年度に報告済みである。

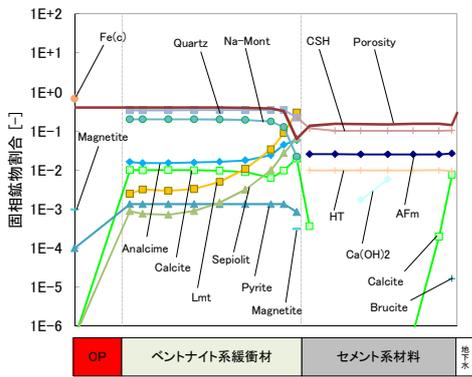
(a) 基本ケース

case1 の基本ケースについては図 5.3-4～図 5.3-7 に、平成 25 年度成果報告書<sup>(3)</sup>の解析結果を再掲する。

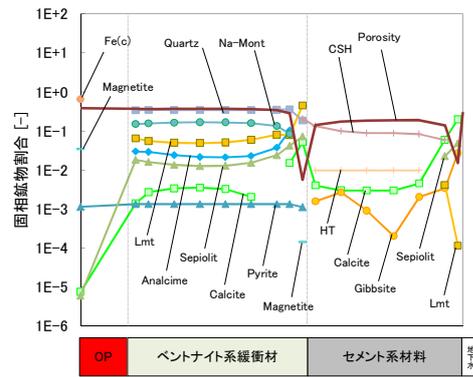


炭素種・硫黄種・溶存水素・溶存酸素濃度

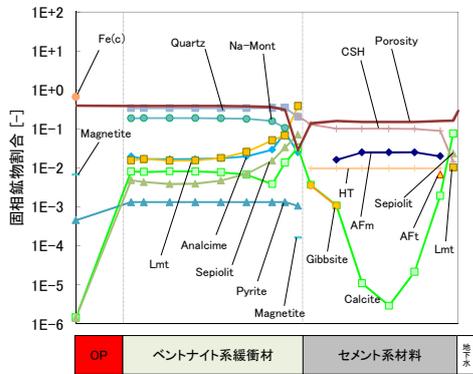
図 5.3-4 緩衝材領域における経時変化分布 (case1)



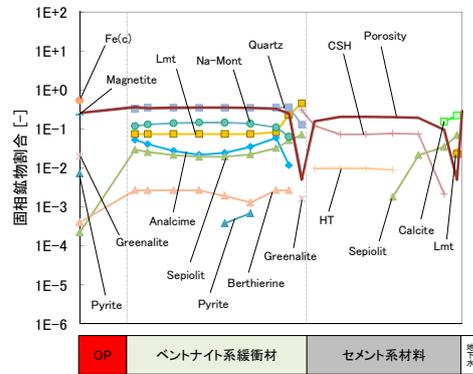
100 年後



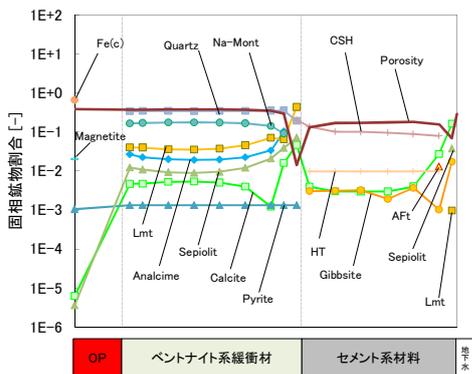
10,000 年後



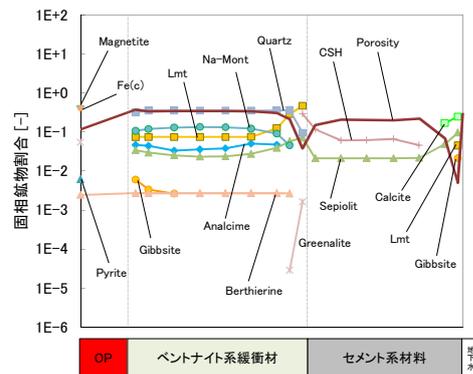
1,000 年後



50,000 年後



5,000 年後



100,000 年後

図 5.3-5 全領域における固相空間分布 (case1)

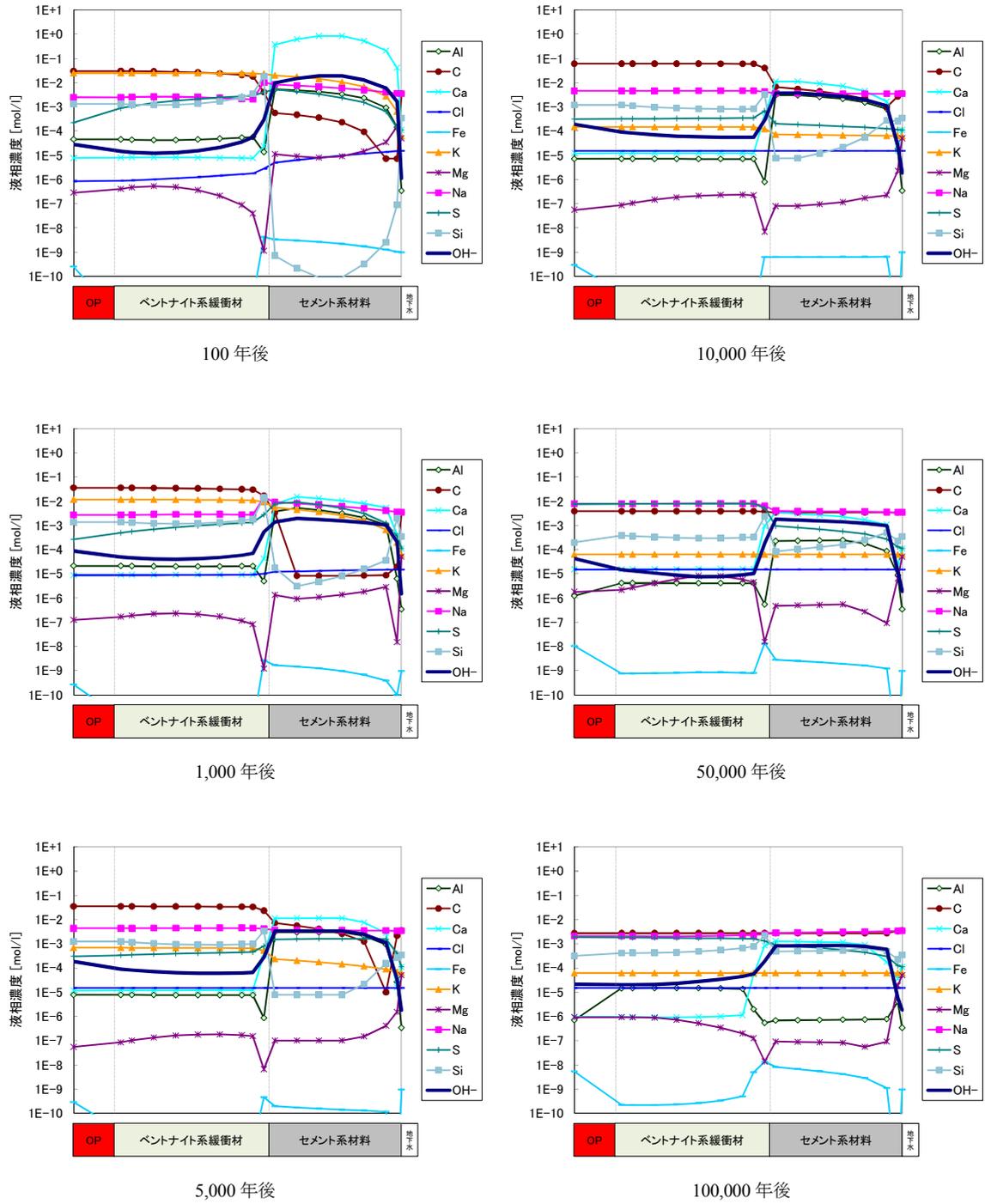
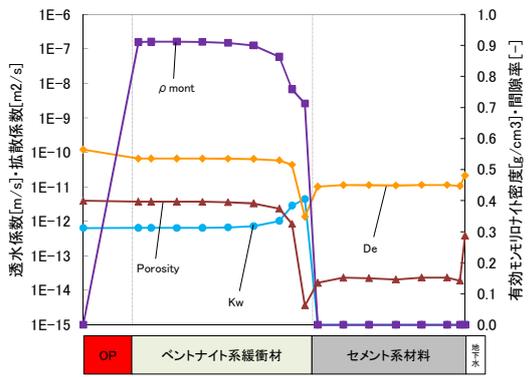
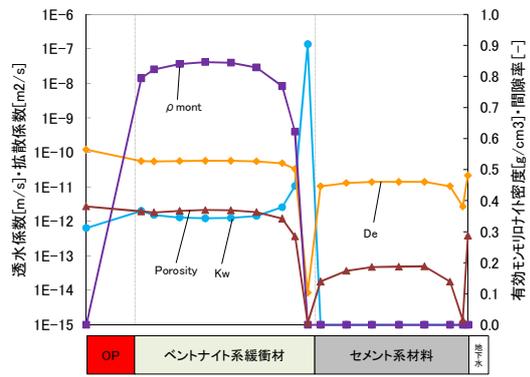


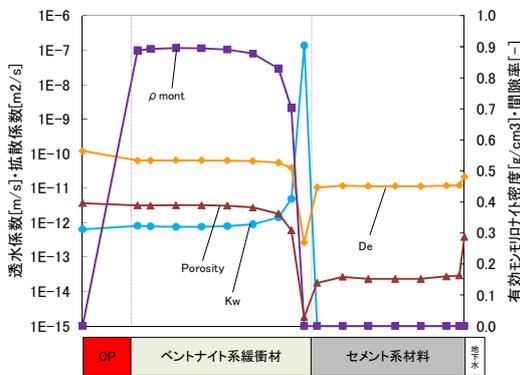
図 5.3-6 全領域における液相空間分布 (case1)



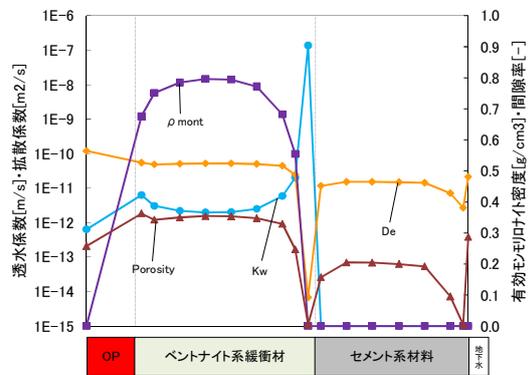
100 年後



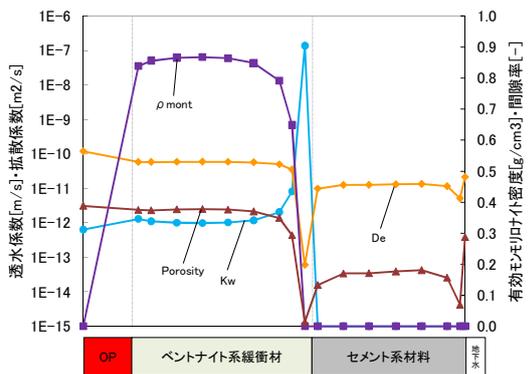
10,000 年後



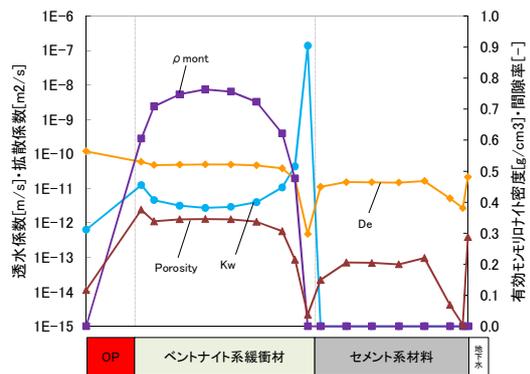
1,000 年後



50,000 年後



5,000 年後



100,000 年後

図 5.3-7 全領域における Kw · De ·  $\rho_m$  · Eps 空間分布 (case1)

(b) 緩衝材厚さによる影響解析

case1 および case7P～case12P の緩衝材厚さ変化 (10cm～70cm) を考慮した影響解析結果を図 5.3-8～図 5.3-12 に示す。図 5.3-8 に示すとおり、モンモリロナイトは緩衝材厚さ最小の case12P ではわずか 300 年で消失し、最長の case1 では 100,000 年間で  $0.68 \text{ g/cm}^3$  残存するなど多様な減少傾向がみられる結果となった。case1 においては、18,000 年後で有効モンモリナイト密度が横ばいになる傾向が確認できる。これは支保工付近の緩衝材領域において局所的に起こる CSH および Lmt による間隙閉塞 (間隙率=0.005) が 100,000 年後においても解消されずに継続したことにより、支保工からのアルカリ成分流入が抑制されたためと考えられる。case8P～11P においては、支保工付近の緩衝材領域における間隙率は一時的な低下はみられるものの、間隙が閉塞するまでには至らず、その後 100,000 年までかけてゆっくりと上昇している。ただし、この期間に局所的な間隙率低下が、緩衝材側から支保工側へと遷移しており、この緩衝材付近における支保工領域の間隙率低下は 100,000 年後まで継続したために、これらのケースでのモンモリロナイト溶解はなだらかに推移したものと思われる。図 5.3-9 の透水係数については case10P および case11P において、モンモリロナイト消失時期に対応して  $10^{-10} \text{ m/s}$  以上まで上昇していることがわかる。また図 5.3-11 をみると、case10P および 11P ではモンモリロナイトの消失時期と同時期に pH が上昇していることがわかる。これは、モンモリロナイト消失までに支保工領域における CSH が残存する結果となっていることから、支保工領域のアルカリ成分が緩衝材領域へ拡散し上昇したものと考えられる。図 5.3-12 の Eh では緩衝材厚さが 20cm 以上の各ケースにおいて、-520mV 辺りから -660mV まで低下している箇所が見られるが、このタイミングは、図 5.3-8 におけるモンモリロナイトの経時変化におけるグラフに見られる各変曲点のタイミングと一致している。これらは緩衝材領域における Calcite が消滅に向かうことにより  $\text{CO}_3^{2-}$  が全て還元したために  $\text{H}_2$  が支配的となり、Eh が低下しているものと考えられる。

以上の解析結果より、緩衝材厚さによる影響は傾向的に一定ではないことから、人工バリア変遷シナリオについて安全評価へリンクするケースは 2 つ採用することとする。最も緩衝材に影響を与えるケースは緩衝材厚さ 10cm の case12P であるが、モンモリロナイトがすぐに消失してしまっていることから、緩衝材厚さ 20cm の case11P を採用、もう 1 ケースは残りのケースの緩衝材初期厚さの中間に位置する case8P を採用することとした。これらの経時変化分布および空間分布については、Appendix I -A に示す。

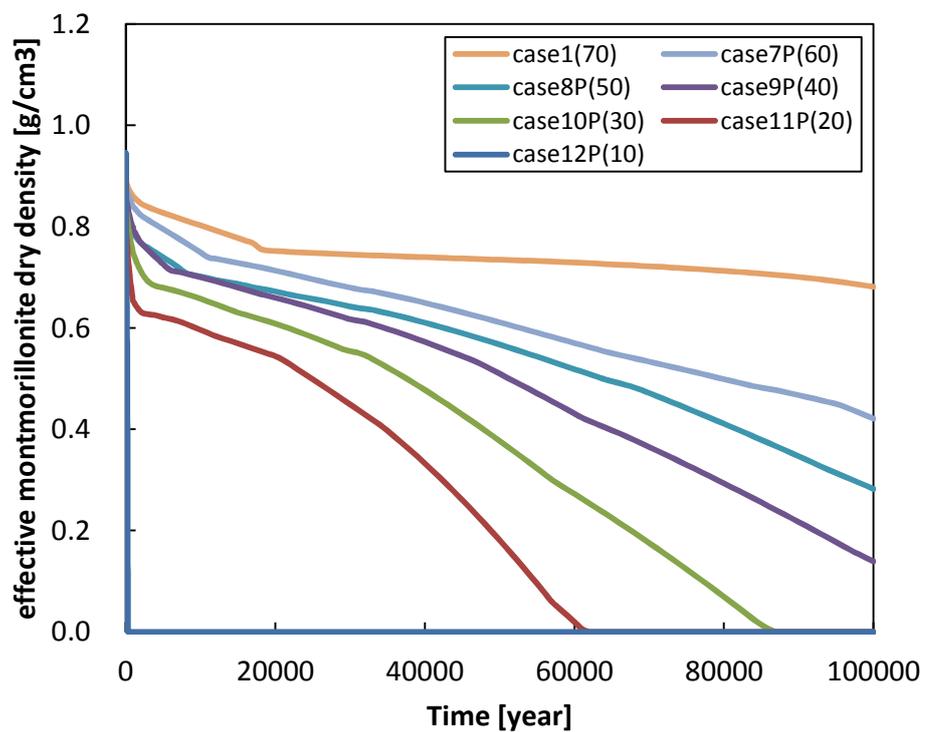


図 5.3-8 緩衝材領域の有効モンモリロナイト密度の経時変化分布（緩衝材厚さ）

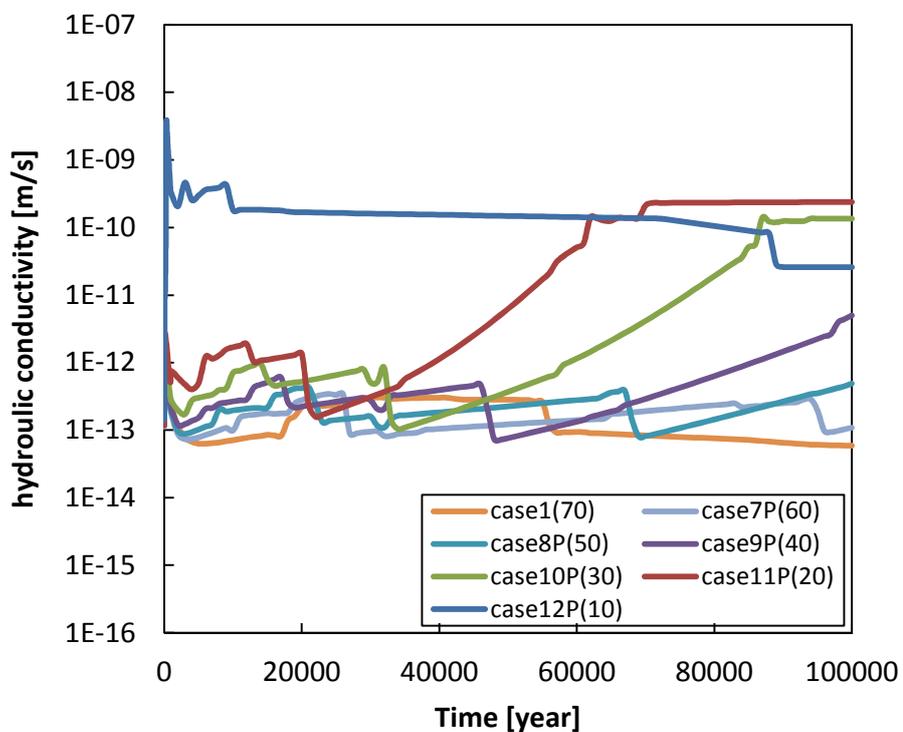


図 5.3-9 緩衝材領域の透水係数の経時変化分布（緩衝材厚さ）

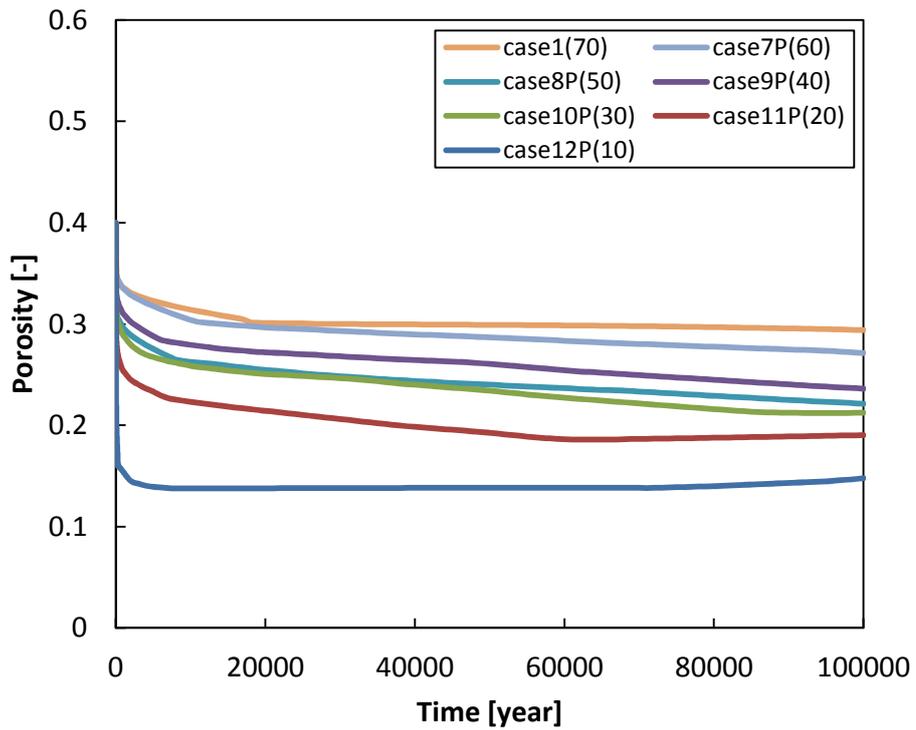


図 5.3-10 緩衝材領域の間隙率の経時変化分布（緩衝材厚さ）

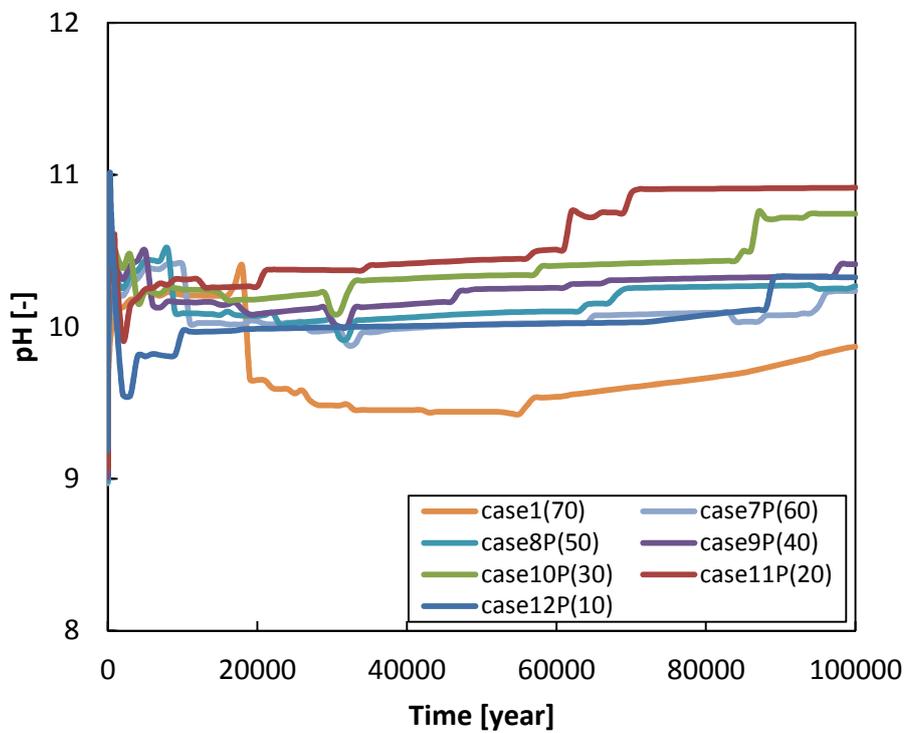


図 5.3-11 緩衝材領域の pH の経時変化分布（緩衝材厚さ）

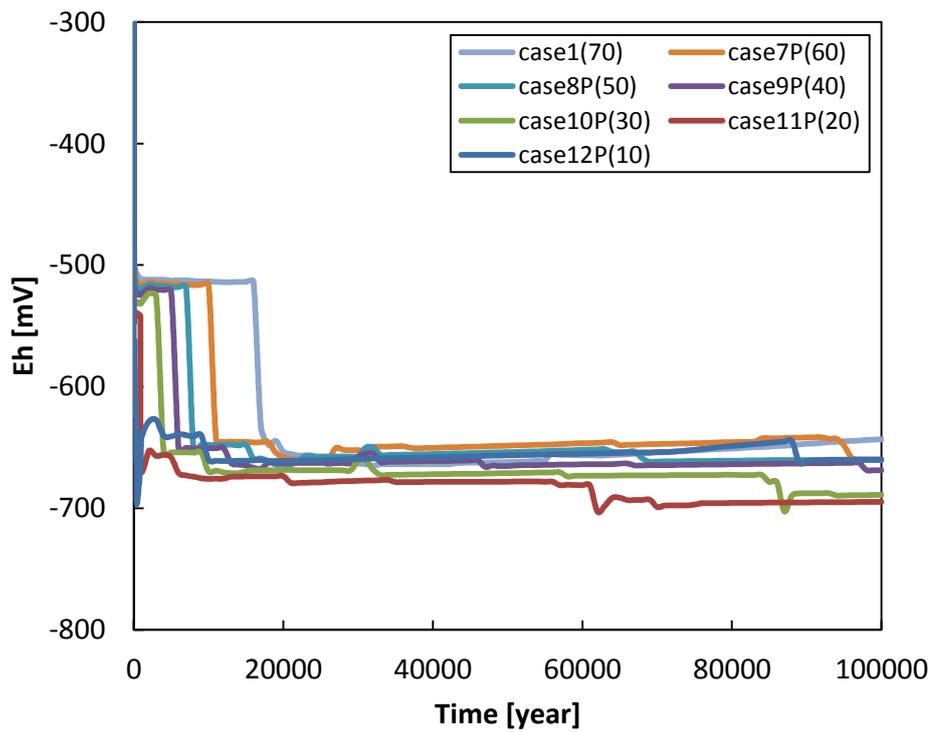


図 5.3-12 OP 近傍における緩衝材領域の Eh の経時変化分布（緩衝材厚さ）

(c) 乾燥密度による影響解析

case1 および case13P~case17P の乾燥密度変化 ( $1.1 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ ) を考慮した影響解析結果を図 5.3-14~図 5.3-17 に示す。モンモリロナイトは図 5.3-13 に示すとおり、最も乾燥密度の低い case17P で約 46,000 年間残存する結果となり、最も高い case13P において 100,000 年間で  $0.97 \text{ g/cm}^3$  残存する結果となった。case13P については約 28,000 年後で、横ばいになる傾向となっている。これは (a) 項で述べた case1 と同様に、支保工付近の緩衝材領域において局所的に起こる間隙閉塞によるものであり、本ケースにおいては 600 年後から 100,000 年後まで間隙率は下限値 (=0.005) のまま推移し、一度も間隙閉塞は解消されなかったため、モンモリロナイト溶解が抑制されたと考えられる。図 5.3-14 の透水係数について、case13P はその他のケースと比べ 5~6 オーダー低くなっており、前述した支保工付近の緩衝材領域における局所的な間隙閉塞の影響が強く表れていることがわかる。また、case15P~17P においてはモンモリロナイト消失のタイミングと同時期に  $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  まで上昇しており、モンモリロナイト溶解が透水係数に影響を与えることが表す結果となっている。図 5.3-16 の pH では case1 と case13P でそれぞれ 18,000 年後、28,000 年後近辺で pH10.4 から 9.7 程度まで低下していることが確認できる。さらに図 5.3-17 の Eh をみても同時期に約 -520 mV から約 -660mV に低下していることがわかる。これは、緩衝材領域における Calcite の消滅に向かうことにより  $\text{CO}_3^{2-}$  が全て還元したために  $\text{H}_2$  が支配的となり、Eh も低下することで Berthierine が安定となり緩衝材領域に生成することで pH を低下させているものと推測される。

以上の解析結果より、乾燥密度による影響は傾向的にはほぼ一定であると判断できることから、人工バリア変遷シナリオについて安全評価へリンクするケースは施工において緩衝材が約 20%流出する想定として  $1.3 \text{ g/cm}^3$  の case15P を採用した。case15P の経時変化分布および空間分布については、Appendix I -A に示す。

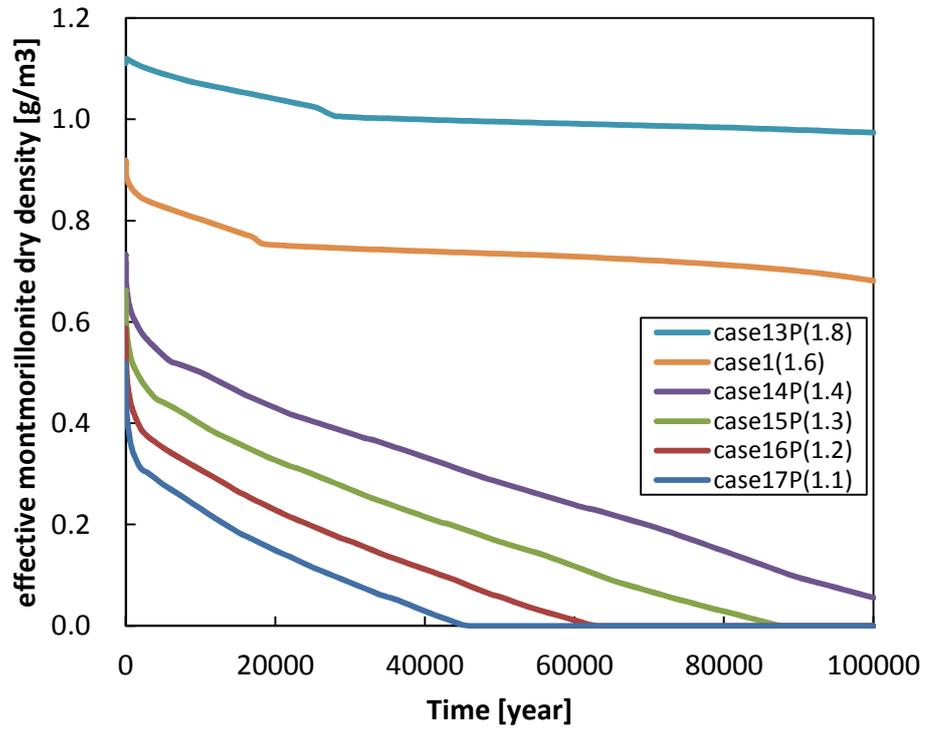


図 5.3-13 緩衝材領域の有効モンモリロナイト密度の経時変化分布（乾燥密度）

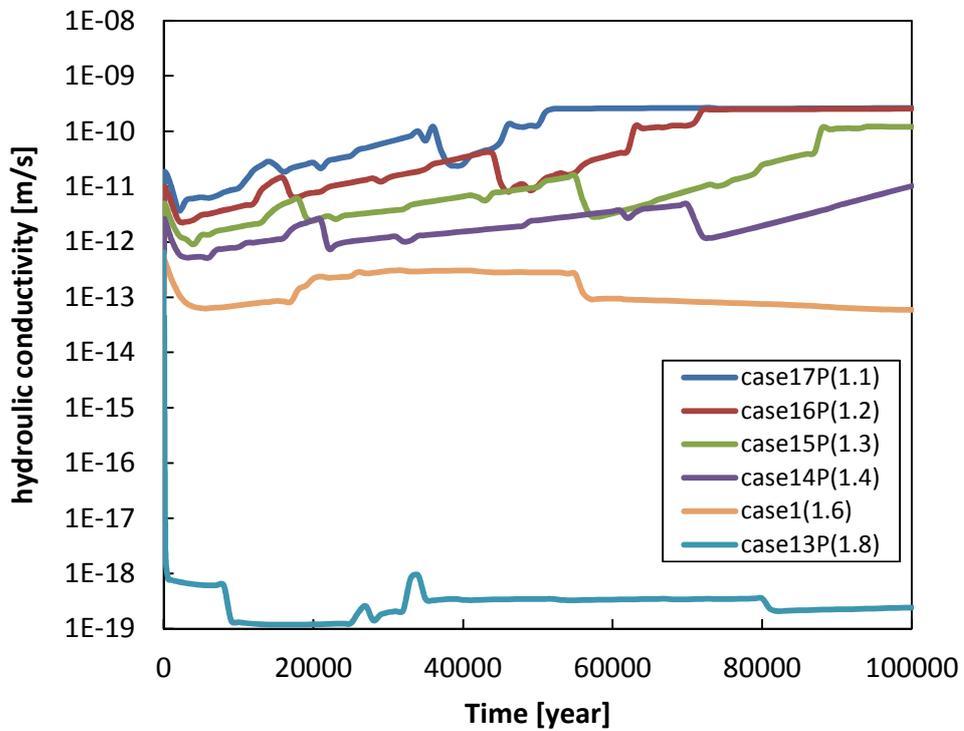


図 5.3-14 緩衝材領域の透水係数の経時変化分布（乾燥密度）

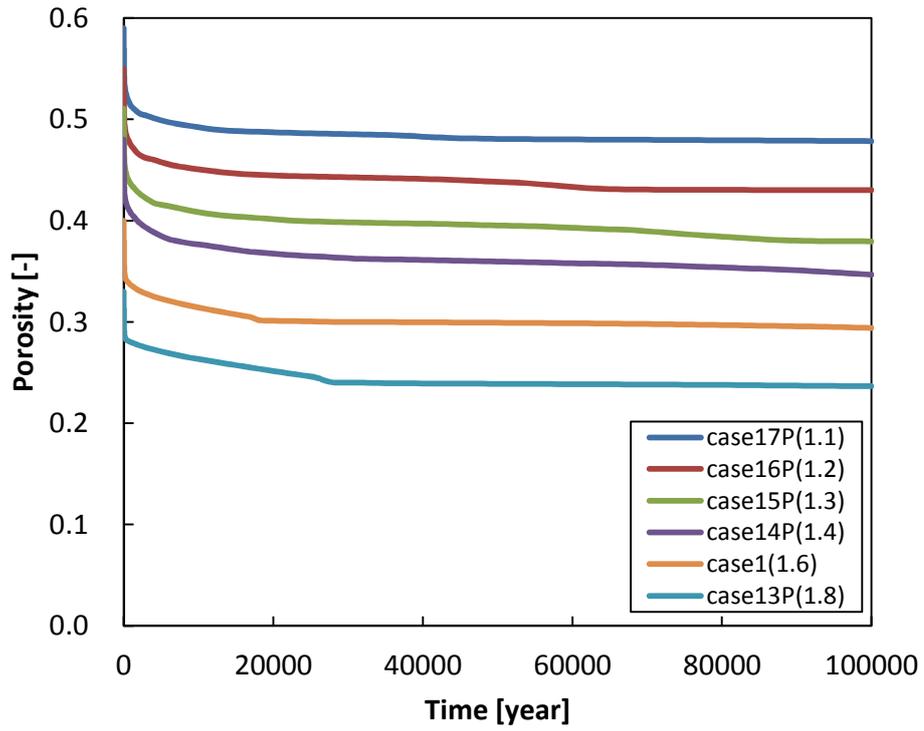


図 5.3-15 緩衝材領域の間隙率の経時変化分布（乾燥密度）

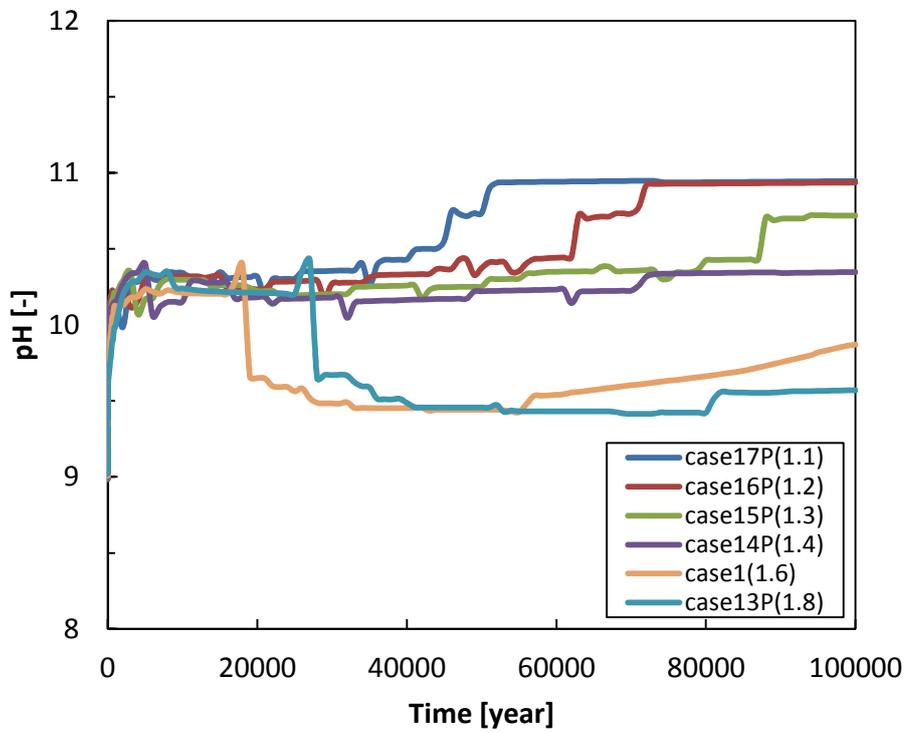


図 5.3-16 緩衝材領域の pH の経時変化分布（乾燥密度）

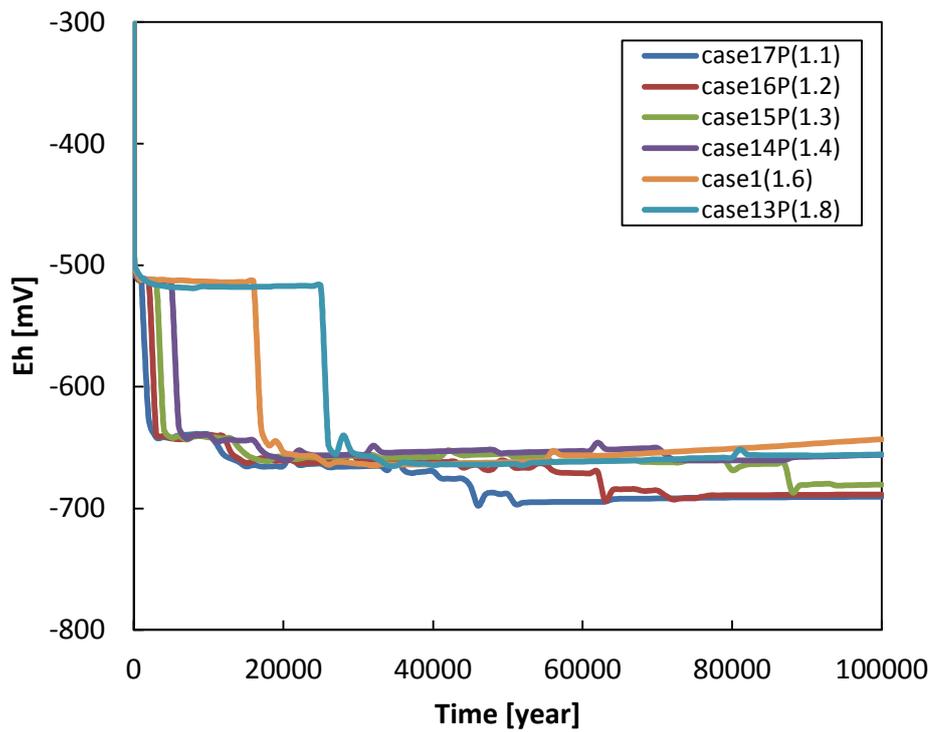


図 5.3-17 OP 近傍における緩衝材領域の Eh の経時変化分布（緩衝材厚さ）

(d) 混合比率による影響解析

case1 および case18P～case21P のベントナイト-ケイ砂混合比率（ベントナイト：ケイ砂＝1:9～10:0）を考慮した影響解析結果を図 5.3-18～図 5.3-22 に示す。モンモリロナイトは図 5.3-18 に示すとおり、最もベントナイト混合比が低い case21P ではわずか 400 年間で消失する結果となり、ベントナイトのみとなる case18P においては 100,000 年間で  $0.97 \text{ g/cm}^3$  残存する結果となった。図 5.3-19 の透水係数についても case20P および case21P の混合比ではモンモリロナイト消失のタイミングと同時期に  $10^{-10} \text{ m/s}$  以上まで上昇しており、モンモリロナイト溶解が透水係数に影響を与える結果となっている。しかし、case18P では逆に開始直後から 7,000 年後にかけて透水係数の低下がみられた。これは支保工近辺の緩衝材領域において 8,000 年後あたりから局所的な間隙閉塞がみられ、100,000 年後においても解消・変遷されることなく閉塞し続けたためにこのような現象がみられた。図 5.3-21 の pH では case21P においては早期にモンモリロナイトが消失しているため支保工からのアルカリ成分が緩衝されず約 18,000 年で pH11 近くまで上昇しほぼそのまま 100,000 年後まで推移している。また、case1 と case18P でそれぞれ 18000 年後、29000 年後近辺で pH10.4 から 9.7 程度まで低下していることが確認できる。さらに図 5.3-22 の Eh をみても同時期に約-510 mV から約-650mV に低下していることがわかる。これは、(c) 項で述べた現象と同様に、緩衝材領域における Calcite の消滅に向かうことにより  $\text{CO}_3^{2-}$  が全て還元したために  $\text{H}_2$  が支配的となり、Eh も低下することで Berthierine が安定となり緩衝材領域に生成することで pH を低下させているものと推測される。

以上の解析結果より、混合比率による影響は傾向的にほぼ一定であると判断できることから、人工バリア変遷シナリオについて安全評価へリンクするケースは施工時の人為ミスを想定した場合に現実的な 5:5 の混合比の case19P を採用した。case19P の経時変化分布および空間分布については、Appendix I -A に示す。

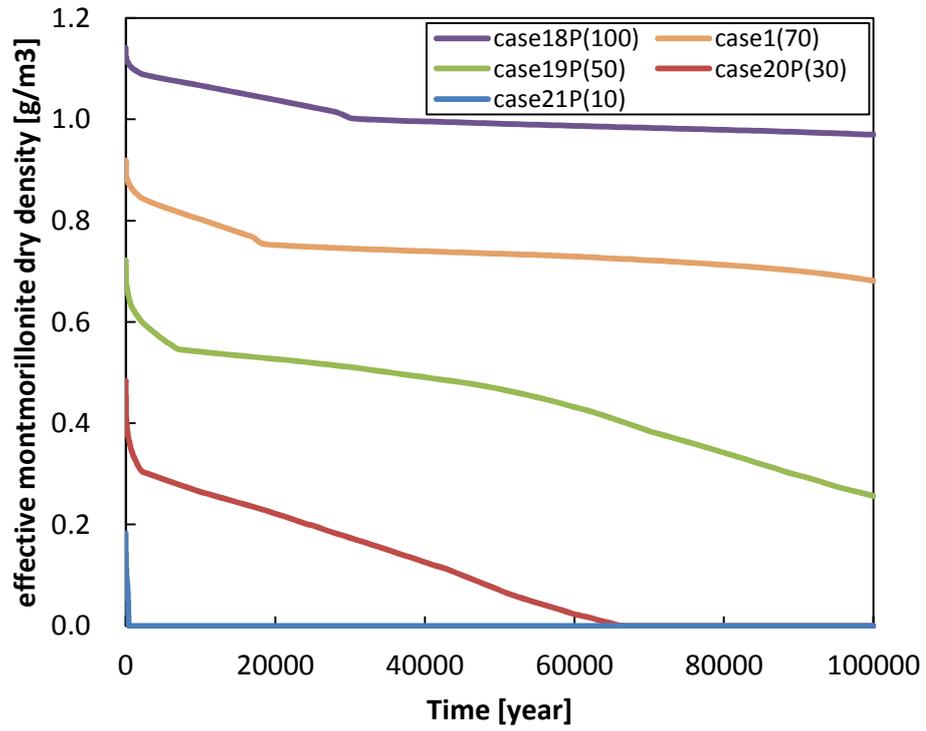


図 5.3-18 緩衝材領域の有効モンモリロナイト密度の経時変化分布（混合比）

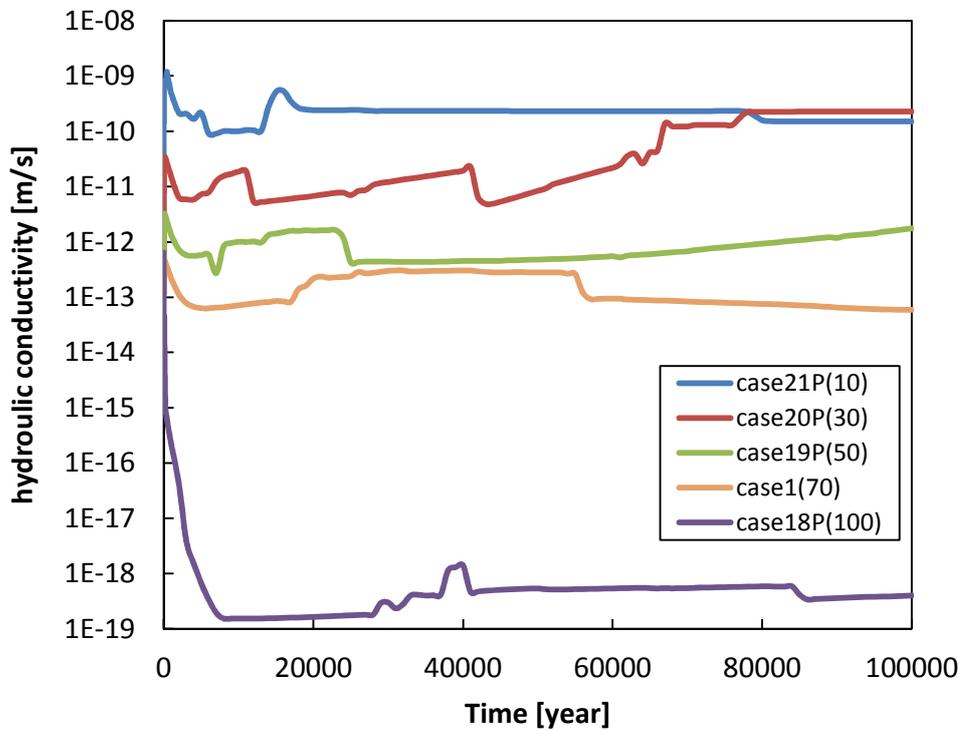


図 5.3-19 緩衝材領域の透水係数の経時変化分布（混合比）

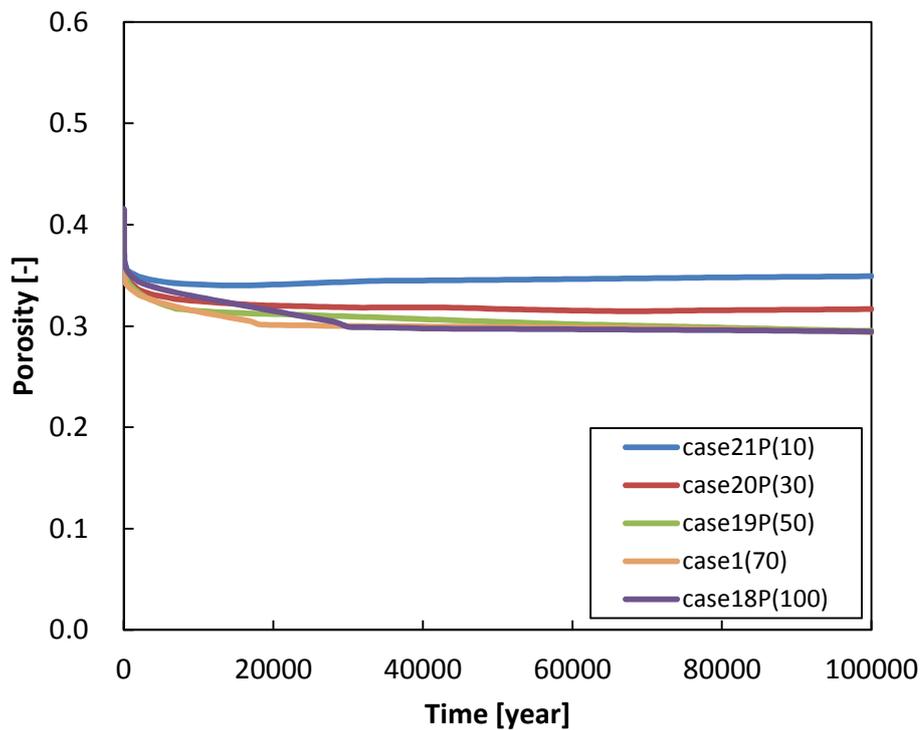


図 5.3-20 緩衝材領域の間隙率の経時変化分布（混合比）

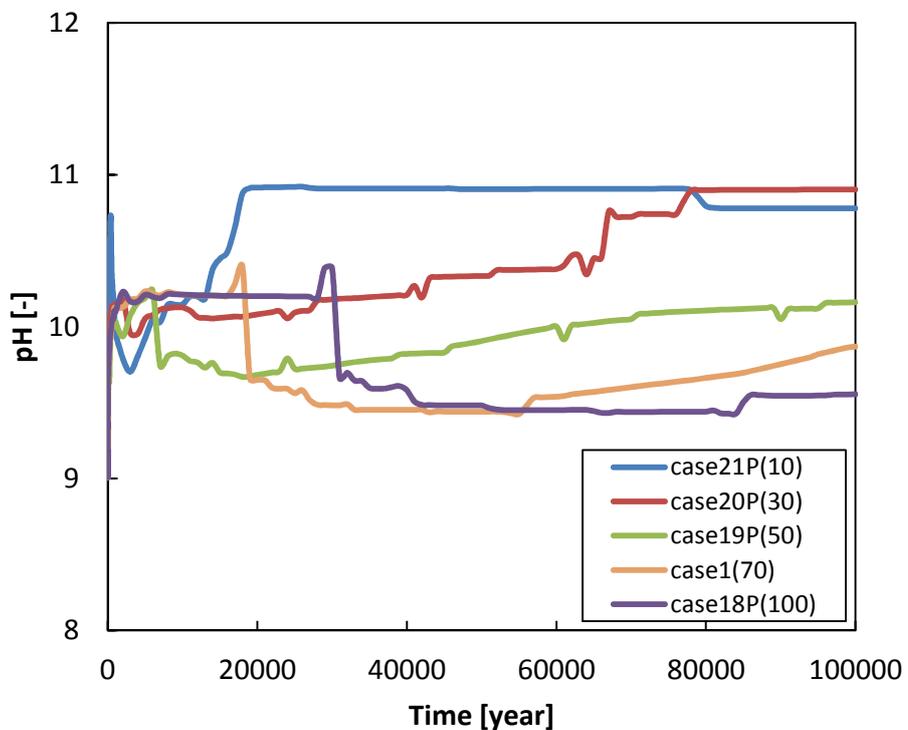


図 5.3-21 緩衝材領域の pH の経時変化分布（混合比）

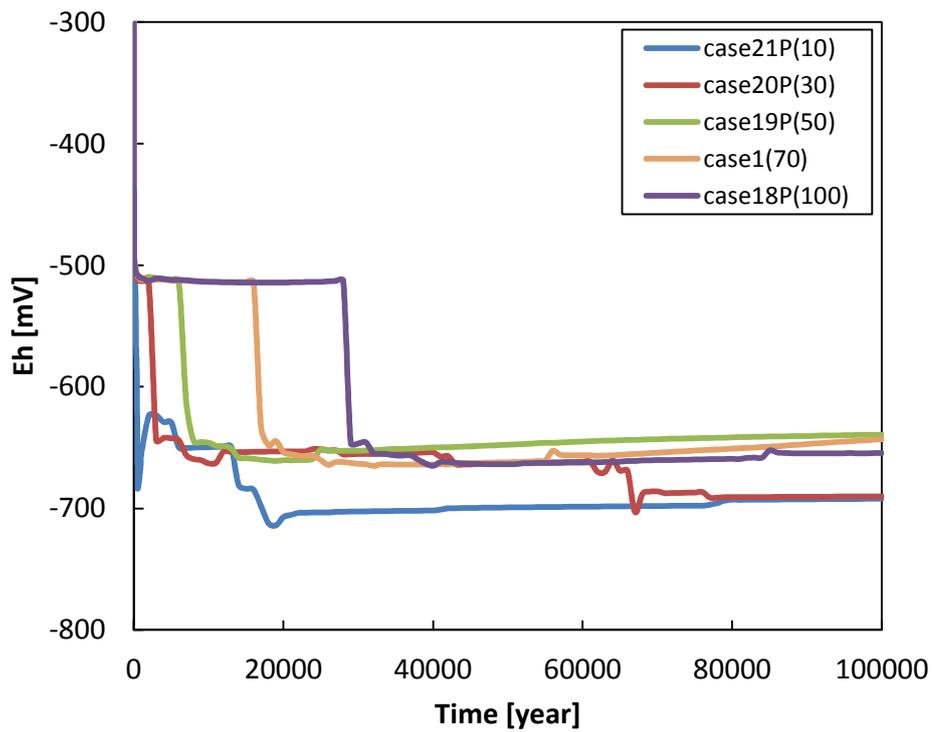


図 5.3-22 OP 近傍における緩衝材領域の Eh の経時変化分布 (混合比)

(e) 支保工厚さによる影響解析

case1 および case22～case26 の支保工厚さ(10cm～60cm)を考慮した影響解析結果を図 5.3-23～図 5.3-27 に示す。モンモリロナイトは図 5.3-23 に示すとおり、すべてのケースにおいて100,000年間残存する結果となった。case1 において18,000年後で横ばいになる傾向が確認できるが、これは(b)項で述べた通り、これは支保工付近の緩衝材領域において局所的に起こるCSHおよびLmtによる間隙閉塞によるものである。case22P(支保工厚さ10cm)のみ初期の挙動が他と異なっているように見えるが、これは支保工から緩衝材に流入するアルカリ成分が3,000年間で枯渇しており、他のケースと比較してモンモリロナイトの溶解が抑制されたためと思われる。平成25年度に実施した、海水系地下水による解析では、支保工厚さが厚くなるほど緩衝材領域に流入するアルカリ成分量が多くなることでモンモリロナイトの溶解が促進される傾向が見られたが、今回の20cm～60cmにおける100,000年後のモンモリロナイト残存量はこれとは逆の傾向となる結果となった。これは20cm～60cmにおける支保工付近の緩衝材領域における間隙率低下の度合いが、支保工厚さが厚いほど間隙率が低下しており(20～50cmは閉塞までは至っていない)、また厚いほどその状態が解消されるのに時間を要しているため、このような結果となって表れたものだと考えられる。図 5.3-26 をみると、case23P～25P においてpHは12,000年後に10.4から10.1程度に、case22P においては15,000年度に10.4から9.9程度に、case1 においては、10.4から9.7程度に低下していることが確認できる。さらに図 5.3-27 のEhをみると同時期に約-510 mVから約-640mVに低下していることがわかる。これは、(c)項で述べた現象と同様に、緩衝材領域におけるCalciteの消滅に向かうことにより $\text{CO}_3^{2-}$ が全て還元したために $\text{H}_2$ が支配的となり、Ehも低下することでBerthierineが安定となり緩衝材領域に生成することでpHを低下させているものと推測される。

以上の解析結果より、支保工厚さによる傾向は一定でないため、人工バリア変遷シナリオについて安全評価へリンクするケースはcase22P～case26P 全てを採用した。case22～case26の経時変化分布および空間分布については、Appendix I -A に示す。

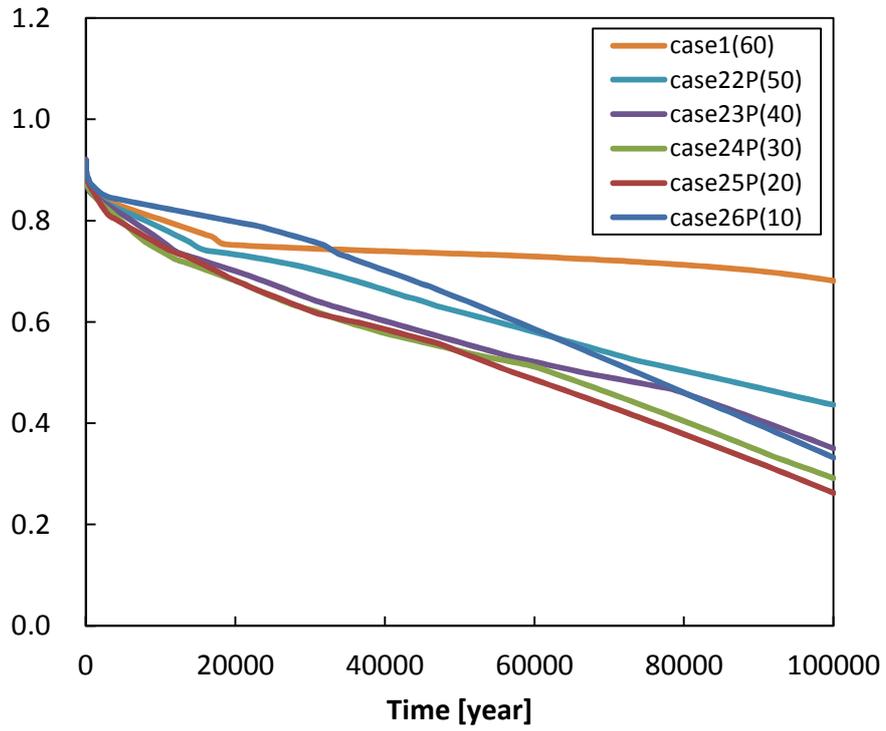


図 5.3-23 緩衝材領域の有効モンモリロナイト密度の経時変化分布（支保工厚さ）

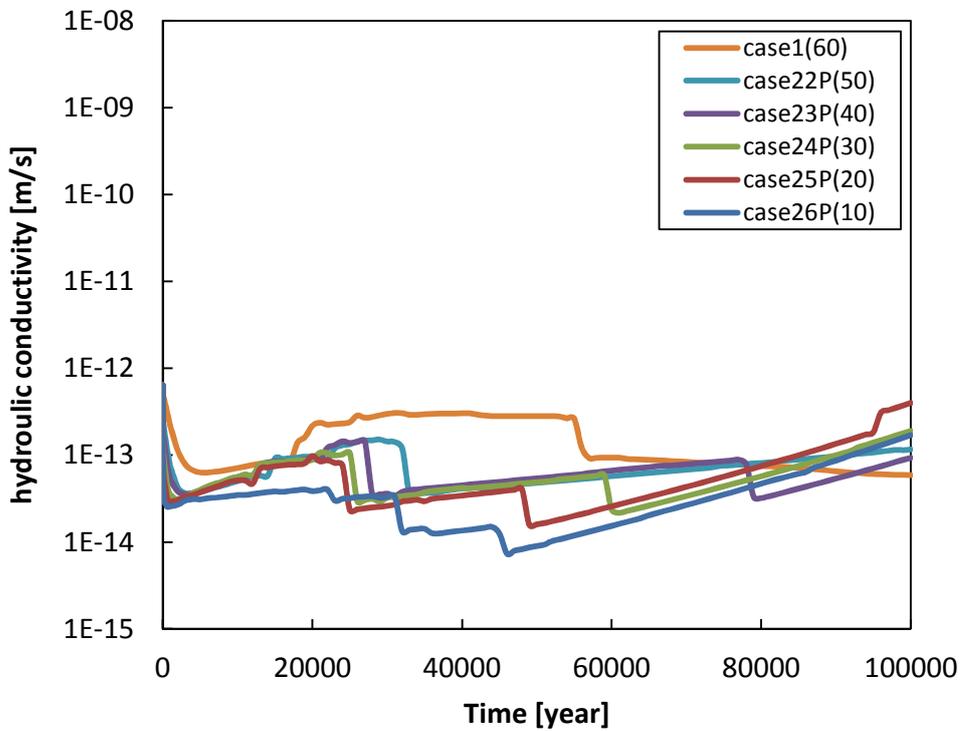


図 5.3-24 緩衝材領域の透水係数の経時変化分布（支保工厚さ）

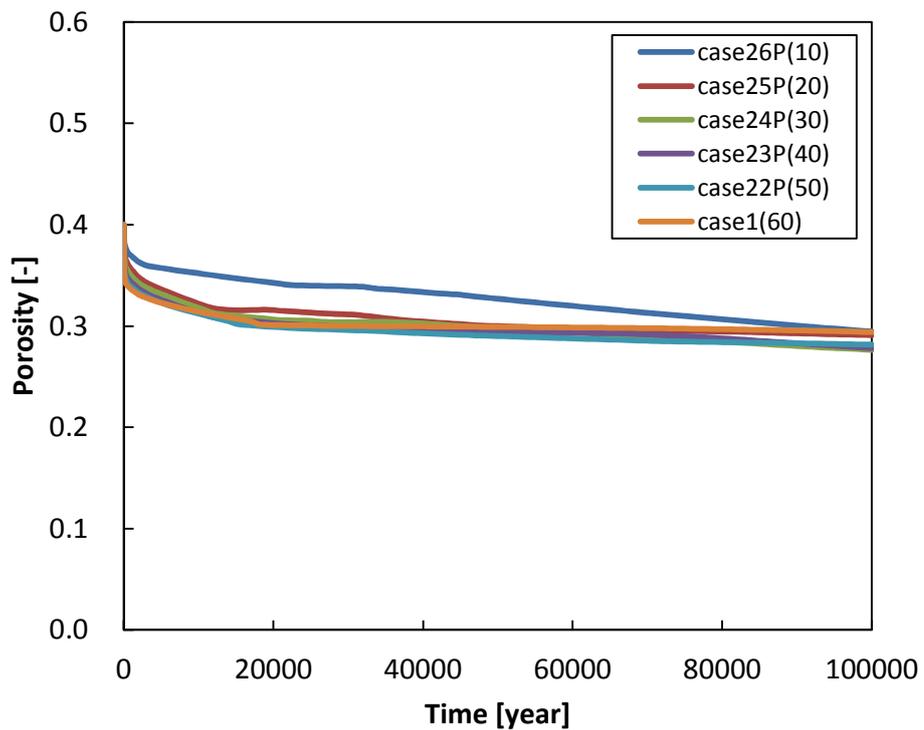


図 5.3-25 緩衝材領域の間隙率の経時変化分布（支保工厚さ）

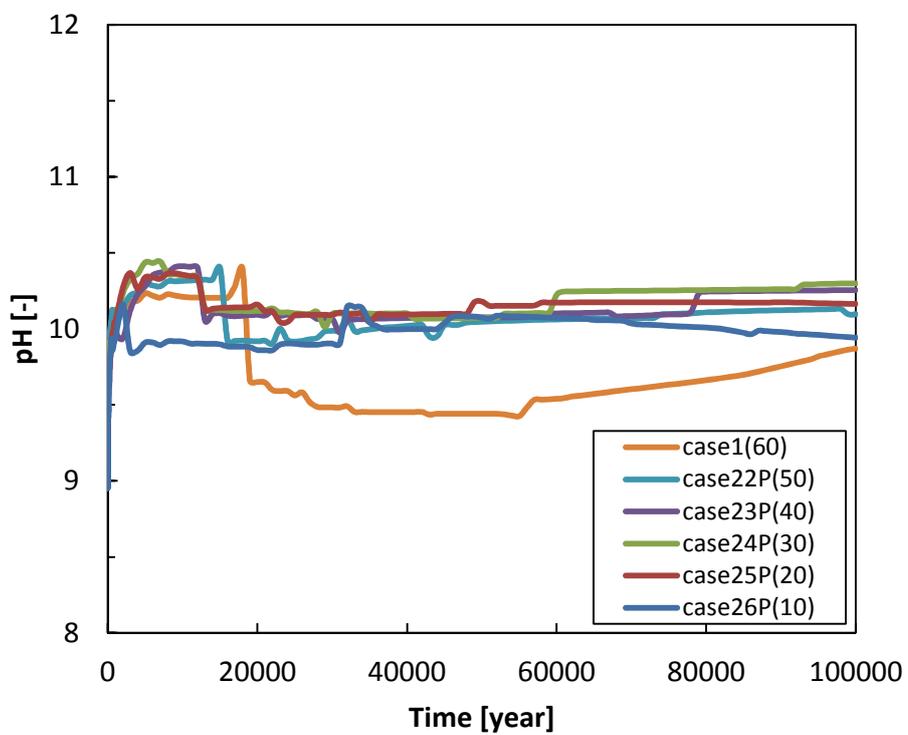


図 5.3-26 緩衝材領域の pH の経時変化分布（支保工厚さ）

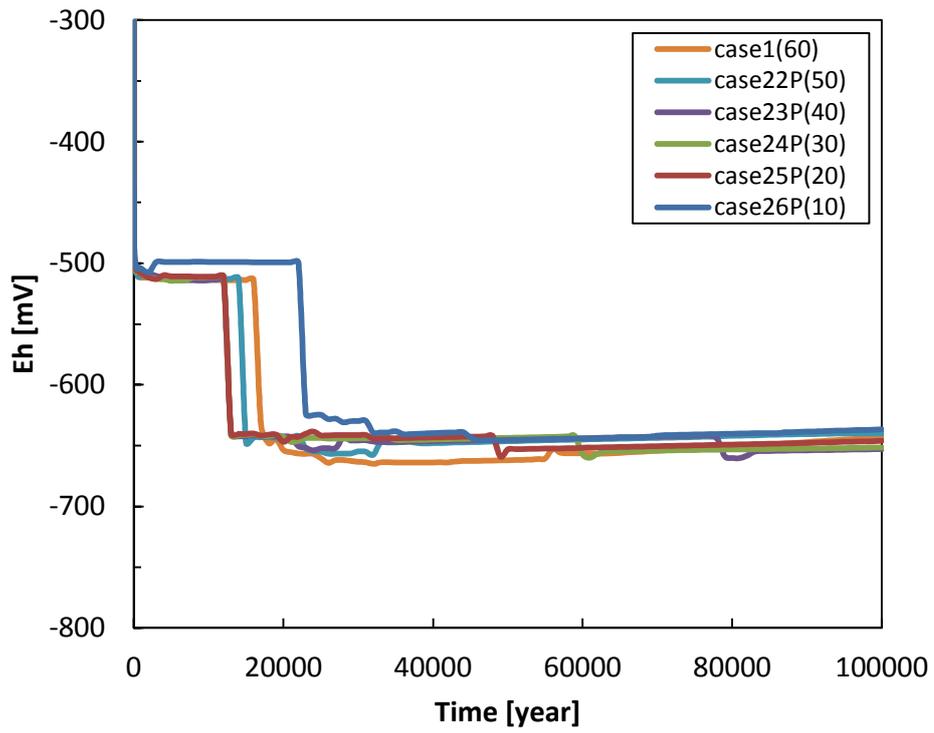


図 5.3-27 OP 近傍における緩衝材領域の Eh の経時変化分布 (支保工厚さ)

(f) 高アルカリ地下水による影響解析

case27C～case33Cおよびcase30C#の高アルカリ地下水を考慮した影響解析結果を図 5.3-28～図 5.3-32 に示す。モンモリロナイトは図 5.3-28 に示すとおり、すべてのケースにおいて 100,000 年間残存する結果となった。これらのケースでは地下水質を途中で切り替えて計算を実施していることも影響し、開始直後から曲線を描いて有効モンモリロナイト密度が変化しているが、途中よりその変化がなくなり、以降は線形的な変化を見せている。これは地下水質を pH の高いものから徐々に下げて変化させているためにすべてのケースにおいて途中でアルカリ成分が枯渇しているが、そのタイミングと線形的な変化を示し始めるのがほぼ同時期となっている。高 pH (pH12.8 から pH10 まで変化) の期間が 500 年間の case27C から 80,000 年間の case33C までの 7 ケースの比較から、高 pH の期間がより長いほど溶解が促進されている結果となった。高 pH の期間が 10,000 年間である case30C と、同じく 10,000 年間であるが初期によりより高 pH の地下水 (pH=13.6) を与えた case30C#を比較すると、pH のより高い地下水を与えた case30C#の方がモンモリロナイト溶解へ影響を及ぼす結果となった。この 2 ケース間で与えた異なる地下水条件は初期の 400 年間であり、それ以降は同条件であるが、case30C#をみると約 8,000 年後まで速い速度で溶解が進んでおり、初期に与えた高 pH 地下水がその後のモンモリロナイト溶解に影響していることがわかる。高 pH である期間が長い case31C～case33C だけが複雑な曲線を描いているように見えるが、case27C～case30C においても初期の短い期間で同様の変化を見せている。例えば case32C の変化について考察すると、EDZ 側付近の緩衝材領域において 3,000 年後までに間隙閉塞が発生するが、その後間隙率が上昇することにより地下水流入の抑制が緩和され、約 7,000 年後頃からモンモリロナイト溶解が促進される。しかし、約 28,000 年後には初期に比べ比較的低い pH の地下水へと変化するために、モンモリロナイト溶解も緩和されることで、以降は一定に近いモンモリロナイト溶解で推移しているものと考えられる。

以上の解析結果より、高アルカリ地下水による傾向は特に高アルカリである期間が短いもの (case27C～case30C) については傾向的に有意な差異が見られないため、人工バリア変遷シナリオについて安全評価へリンクするケースは case30C の 1 つに絞り込み、残りの case31C～case33C および case30C#をすべて採用した。case30C～case33C および case30C#の経時変化分布および空間分布については、Appendix I -A に示す。

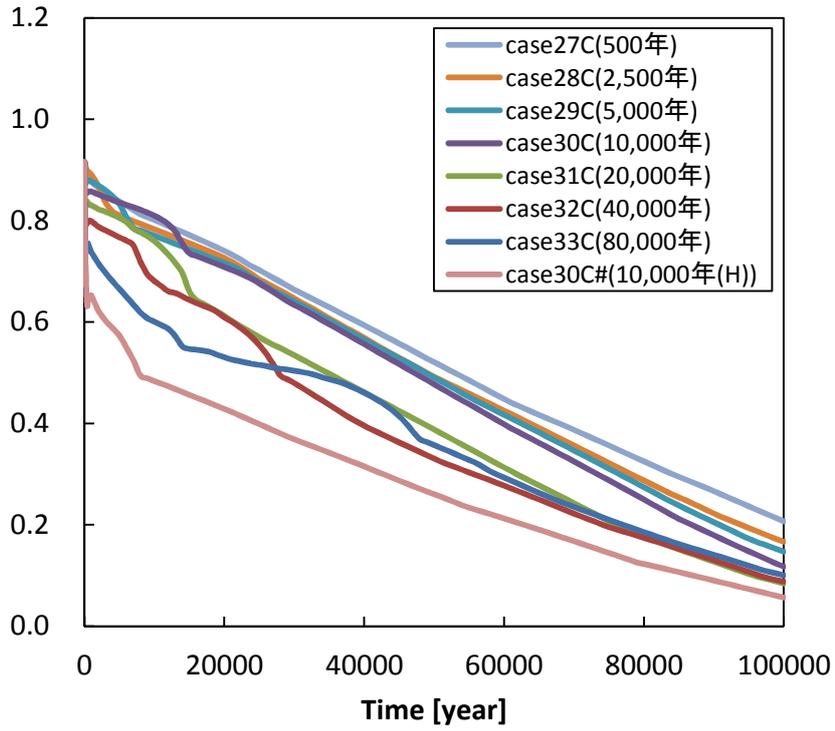


図 5.3-28 緩衝材領域の有効モンモリロナイト密度の経時変化分布（高アルカリ地下水）

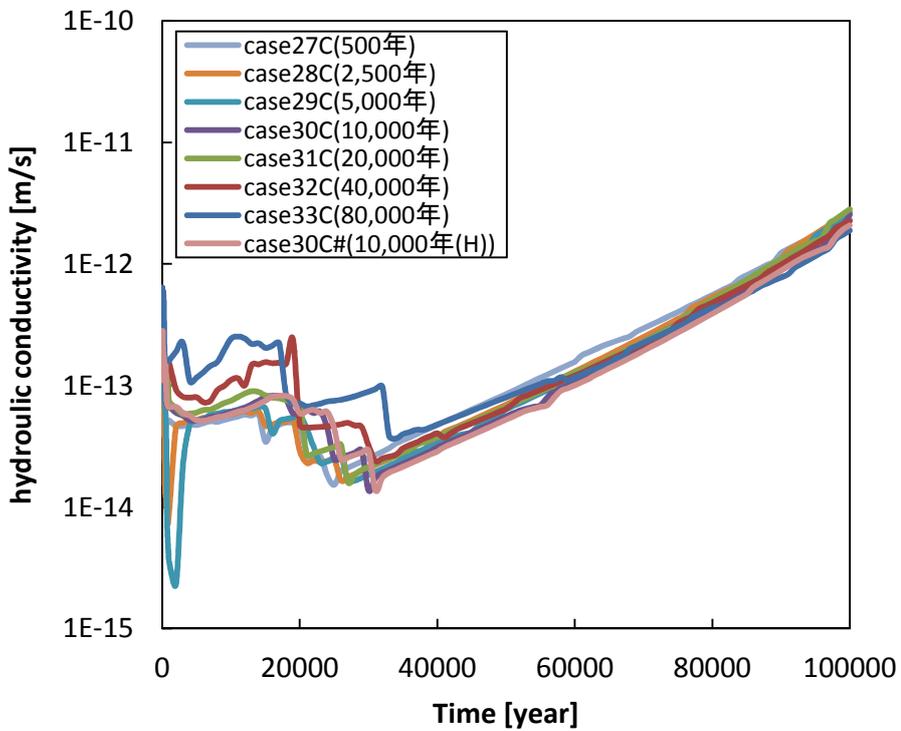


図 5.3-29 緩衝材領域の透水係数の経時変化分布（高アルカリ地下水）

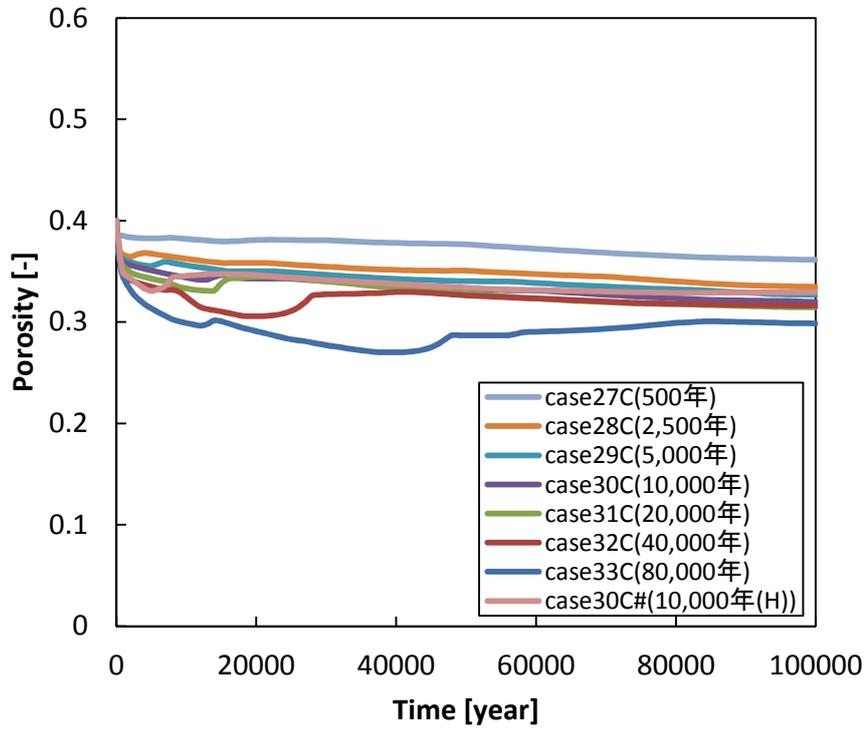


図 5.3-30 緩衝材領域の間隙率の経時変化分布 (高アルカリ地下水)

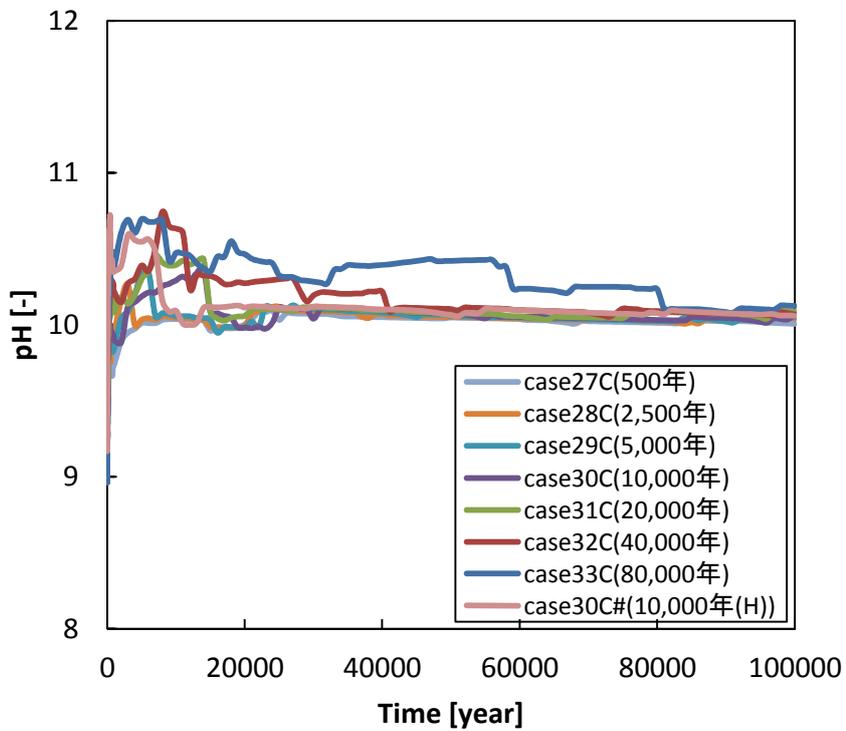


図 5.3-31 緩衝材領域の pH の経時変化分布 (高アルカリ地下水)

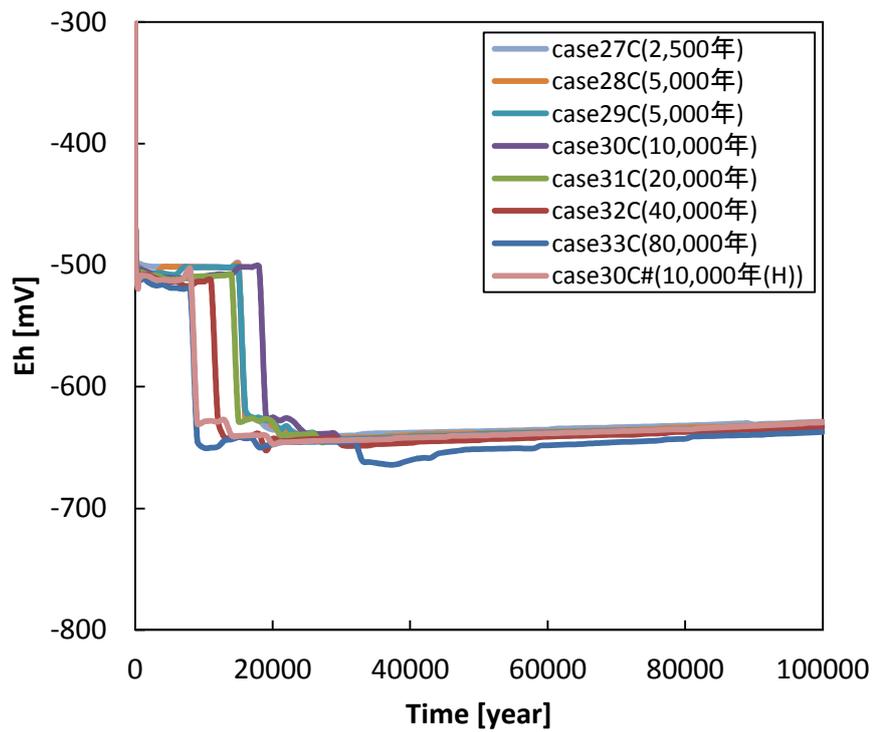


図 5.3-32 OP 近傍における緩衝材領域の Eh の経時変化分布 (高アルカリ地下水)

(5) 各評価へのデータのリンケージ

人工バリアの変遷シナリオを対象とした安全評価として、(4) 項の解析結果より検討した15 ケースについて実施することとした。選定した人工バリア変遷シナリオ対象ケースを①及び②に分けて以下に示す。

表 5.3-8 人工バリア変遷シナリオ対象ケース (①降水系地下水ケース)

ケース	緩衝材厚さ [cm]	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	混合率 [Bnt.:Qtz.]	支保工厚さ [cm]	地下水質特性
1	70	1.6	7:3	60	降水系
8P	50	1.6	7:3	60	降水系
11P	20				
15P	70	1.3	7:3	60	降水系
19P	70	1.6	5:5	60	降水系
22P	70	1.6	7:3	50	降水系
23P				40	
24P				30	
25P				20	
26P				10	

表 5.3-9 人工バリア変遷シナリオ対象ケース (②高アルカリ地下水ケース)

ケース	緩衝材厚さ [cm]	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	混合率 [Bnt.:Qtz.]	支保工厚さ [cm]	地下水質特性	pHが10まで低下するまでの期間 [年]
30C	70	1.6	7:3	0	セメント溶出水1	10,000
31C						20,000
32C						40,000
33C						80,000
30C#	70	1.6	7:3	0	セメント溶出水2	10,000

以上のケースについて、各評価への人工バリア変遷解析データの提供を行った。提供するリンケージデータについては以下に示すとおりである。

(a) 炭素鋼オーバーパックスの腐食寿命解析

オーバーパックス腐食寿命評価へのリンケージは、以下のデータを提供する。

- ・塩化物イオン濃度 (オーバーパックス接触領域)
- ・炭酸イオン濃度 (オーバーパックス接触領域)
- ・炭酸水素イオン濃度 (オーバーパックス接触領域)
- ・溶存酸素濃度 (オーバーパックス接触領域)
- ・pH (オーバーパックス接触領域)

( b ) ガラス溶解速度評価

ガラス溶解速度評価へのリンクージは、以下のデータを提供する。

- ・ 間隙水 Mg 濃度 (緩衝材接触支保工領域)

( c ) 核種移行パラメータ評価

核種移行パラメータ評価へのリンクージは、以下のデータを提供する。

- ・ 間隙水 Na 濃度 (オーバーパック接触領域、支保工接触領域、緩衝材平均)
- ・ 間隙水  $\text{HCO}_3$  濃度 (オーバーパック接触領域、支保工接触領域、緩衝材平均)
- ・ 間隙水  $\text{CO}_3^{2-}$  濃度 (オーバーパック接触領域、支保工接触領域、緩衝材平均)
- ・ 間隙水  $\text{K}^+$  濃度 (オーバーパック接触領域、支保工接触領域、緩衝材平均)
- ・ pH (オーバーパック接触領域、支保工接触領域、緩衝材平均)
- ・ pe (オーバーパック接触領域、支保工接触領域、緩衝材平均)
- ・ 鉍物組成 (緩衝材平均)
- ・ 間隙率 (緩衝材平均)
- ・ 乾燥密度 (緩衝材平均)

( d ) ニアフィールド地下水流動評価

地下水流動評価へのリンクージは、以下のデータを提供する。

- ・ 透水係数 (緩衝材各セル)
- ・ 間隙率 (緩衝材各セル)

### 5.3.2 炭素鋼オーバーパックスの腐食寿命解析

人工バリアの変遷シナリオを対象とした安全評価で実施するオーバーパックス腐食寿命解析において使用する腐食寿命モデルの概要は平成 25 年度報告書 2.4<sup>(3)</sup>に示した。オーバーパックスの腐食形態に影響を及ぼす緩衝材間隙水の組成は 5.3.1 の緩衝材変質・間隙水の変遷評価結果に基づいた。この結果によると、すべてのケースにおいてオーバーパックスの表面に酸素が到達しない結果となっており、平成 24 年度までに実施した浸漬試験に基づいて改良した局部腐食判定モデルを用いると、すべてのケースにおいて局部腐食は発生しない。また、低炭酸塩濃度及び高 pH 条件のためすべてのケースにおいて応力腐食割れは生起しない結果となった。

これらのことから、オーバーパックスの腐食形態は 5.3.1 で設定したすべてのケースに対して全面腐食となった。全面腐食の腐食速度は  $10\ \mu\text{m}/\text{y}$  とし、時間に依存しない一定速度として進むものとした。この値は室内試験結果から得られた平均的な腐食速度であり、実際には局所的に凹凸を伴いながら腐食が進行するものと考えられる。この凹凸の影響を考慮したオーバーパックスの最大腐食深さとして、腐食速度  $10\ \mu\text{m}/\text{y}$  から計算した腐食深さの 2 倍とした<sup>(11)</sup>。次に、オーバーパックスの耐圧厚さは、炭素鋼オーバーパックスの耐圧強度に関する既往の解析結果に基づいて最も保守側となる  $110\text{mm}$ <sup>(12)</sup>とし、最大腐食深さが  $80\text{mm}$  (=190-110mm) に到達した時間をオーバーパックスの腐食寿命とした。以上に基いて腐食寿命解析を行った結果、オーバーパックスの腐食寿命は 4,000 年となった。

### 5.3.3 ガラス溶解速度評価

Mg イオンの影響については、平成 25 年度<sup>(3)</sup>に使用した Mg 影響モデルを採用した。すなわち、「ガラス固化体が接触する溶液中に Mg イオンが供給されると、ガラス固化体表面に供給された Mg イオンとガラス固化体の Si が反応して、ある Mg/Si モル比の Mg ケイ酸塩を生成し、その生成量に応じた溶解速度でガラス固化体が溶解/変質する」ものとした。

平成 25 年度に提示した Mg 影響モデルの計算方法に沿って、各ケースにおける 10 万年間のガラス固化体の溶解速度の平均値を試算し、この値が、第 2 次取りまとめ<sup>(12)</sup>の評価で用いられた溶解速度 ( $1.0 \times 10^{-3}\ \text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ ) 以下の場合、Mg イオン影響を無視することとし、ガラス固化体の溶解速度として  $1.0 \times 10^{-3}\ \text{g}/\text{m}^2/\text{day}$  を設定することとしている。

試算の結果、いずれのケースについても、Mg イオンの影響はほぼ無視することができることから、全てのケースにおけるガラス固化体の溶解速度は  $1.0 \times 10^{-3}\ \text{g}/\text{m}^2/\text{day}$  に設定した。

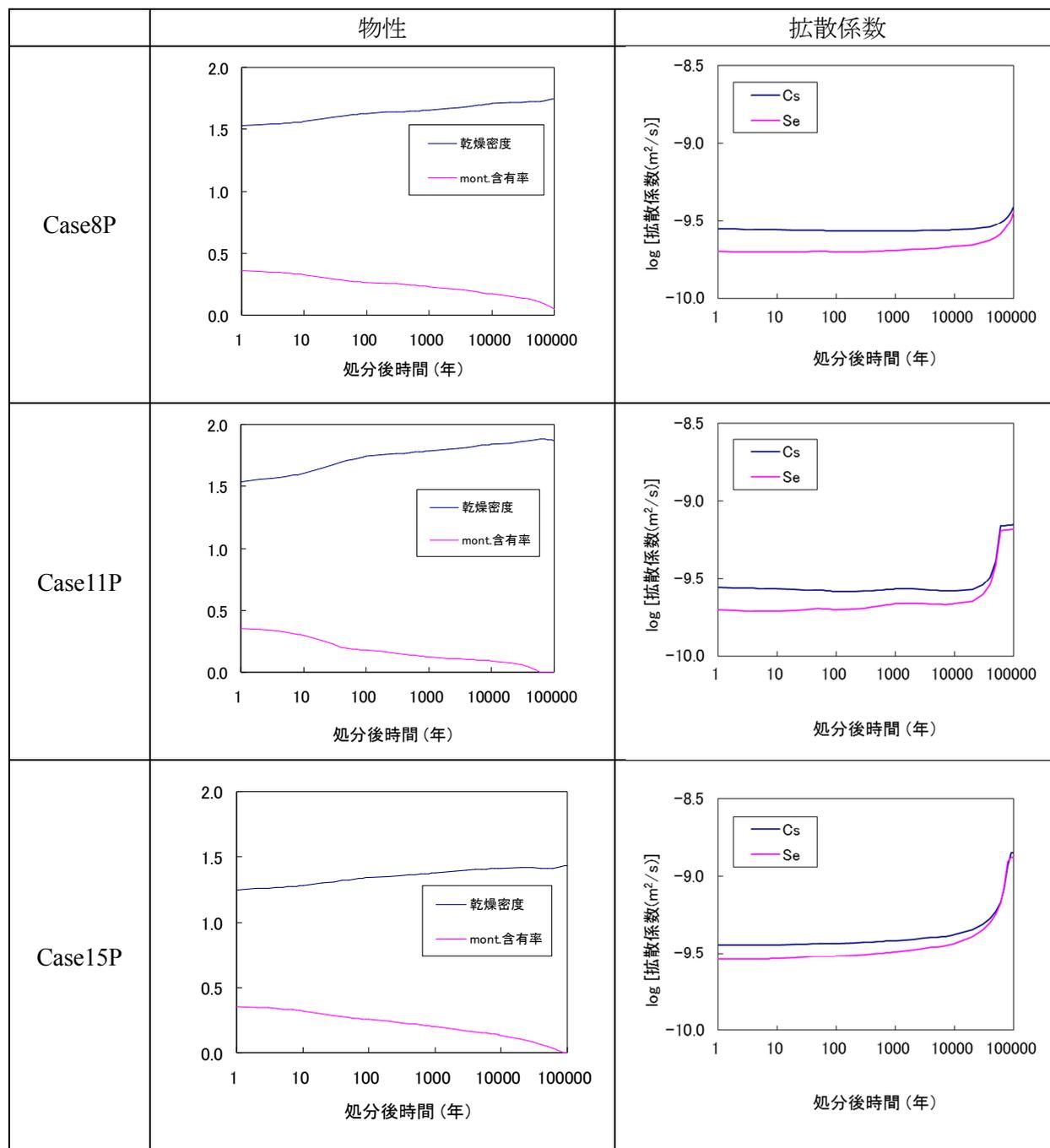
### 5.3.4 核種移行パラメータ

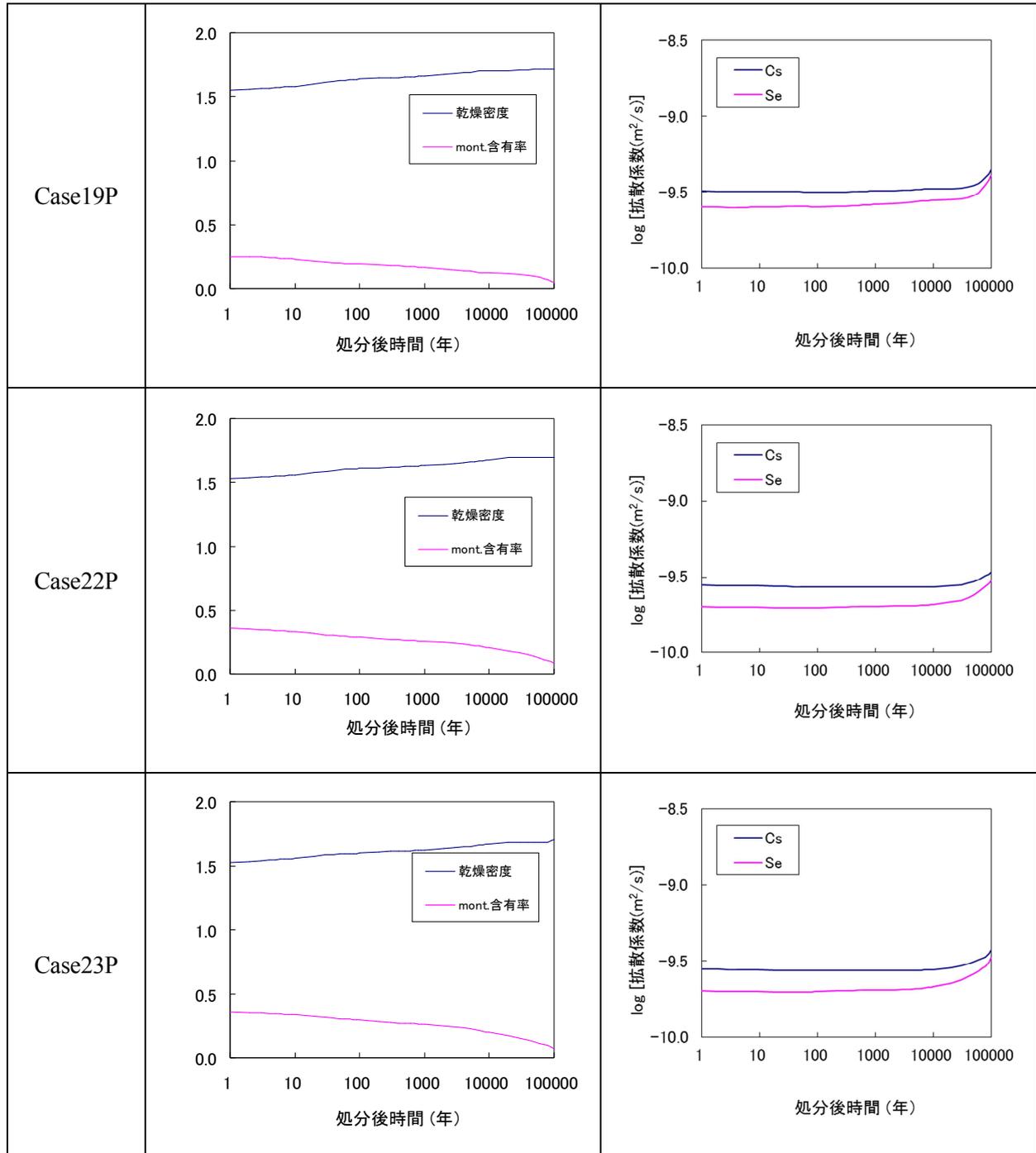
#### (1) 溶解度

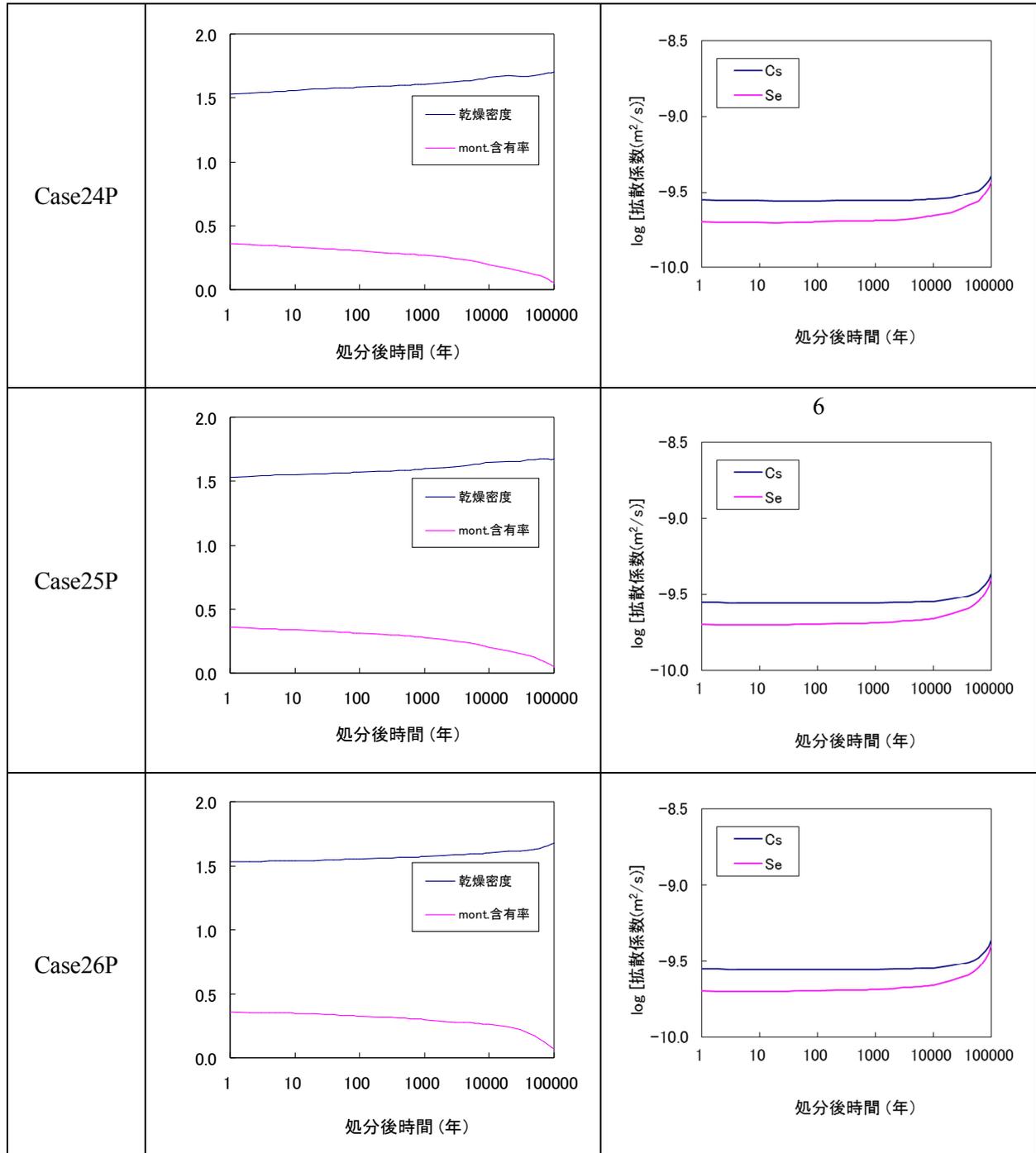
Se、Cs とともに可溶性とし、溶解度律速は考慮しない設定とした。

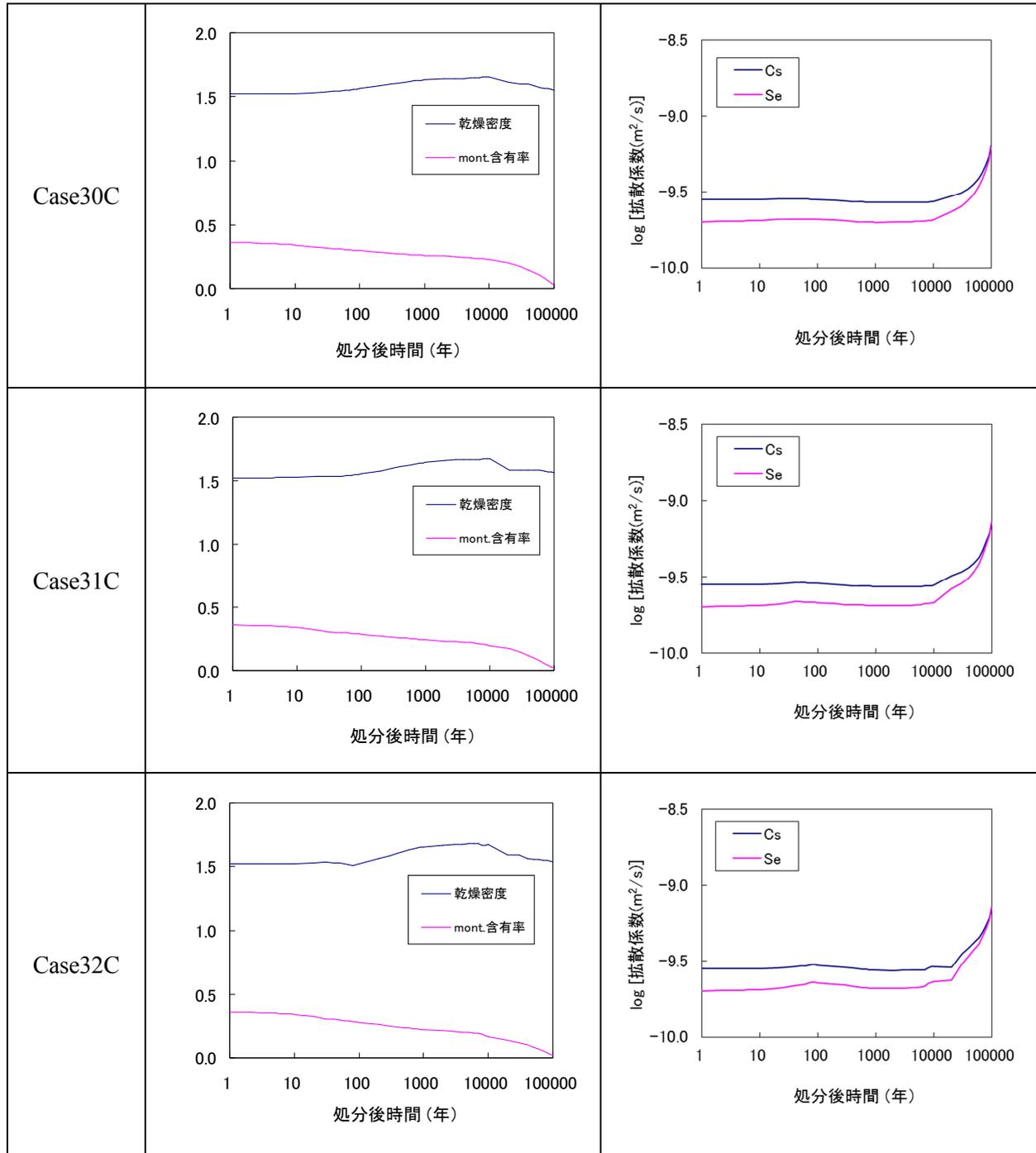
(2) 拡散係数

5.3.1 の解析によって得られた各解析ケースの緩衝材中の間隙水組成に基づいて、放射性核種の拡散係数を求めた。昨年度と同様に、Se は陰イオン排除モデルから、Cs は細孔拡散モデルから拡散係数を算出した<sup>(2)</sup>。各解析ケースにおける拡散係数の経時変化を図 5.3-33 に示す。









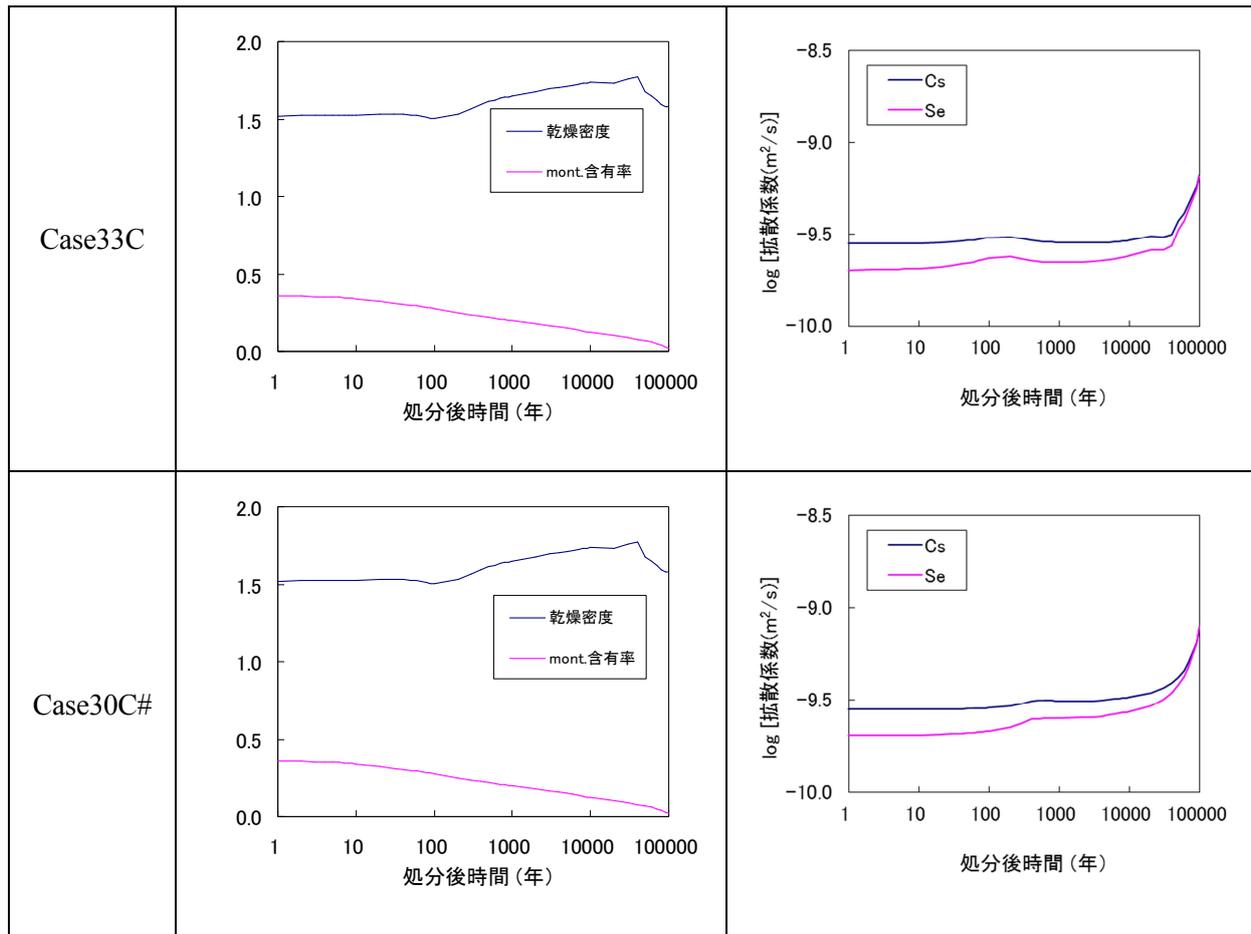
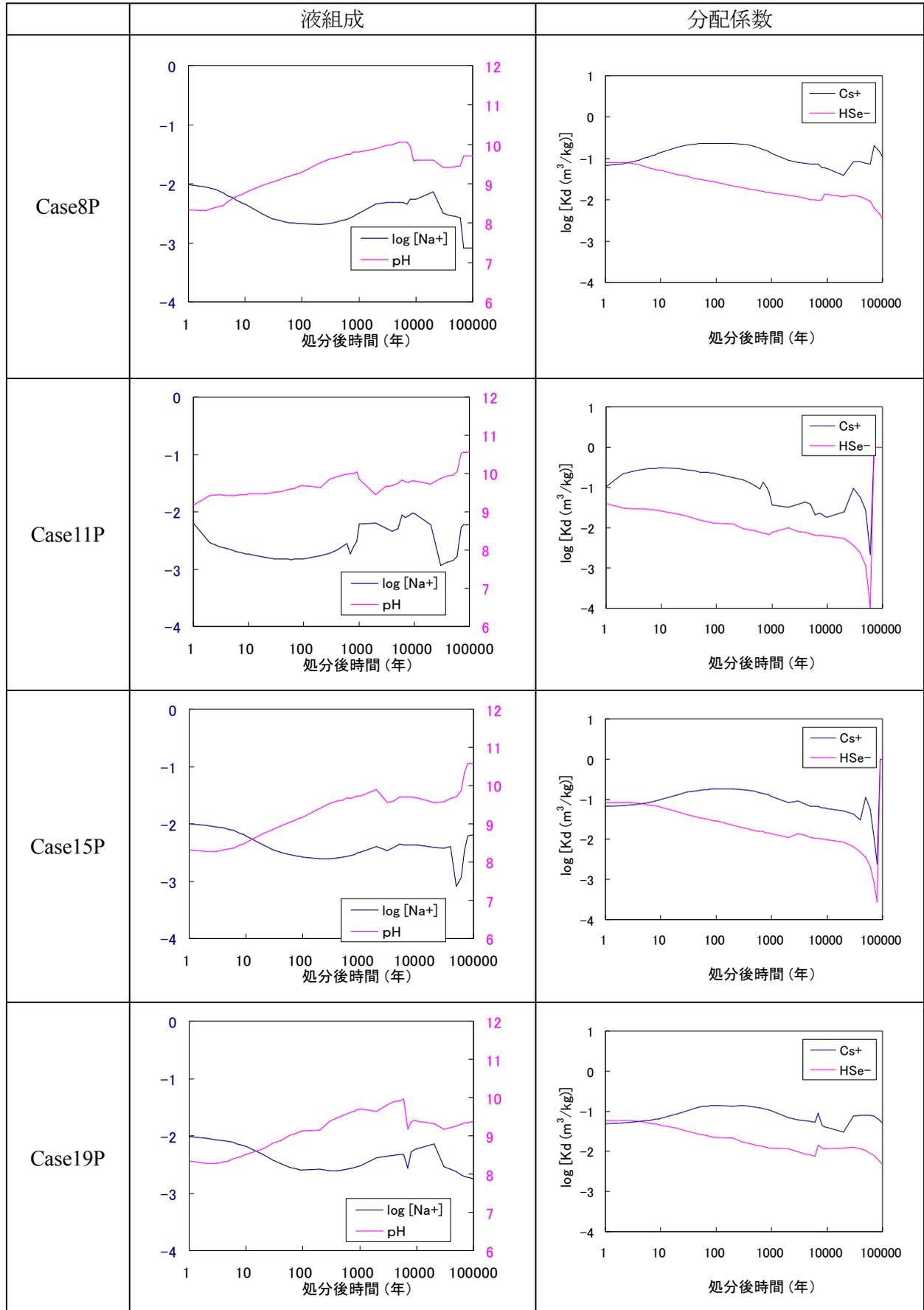
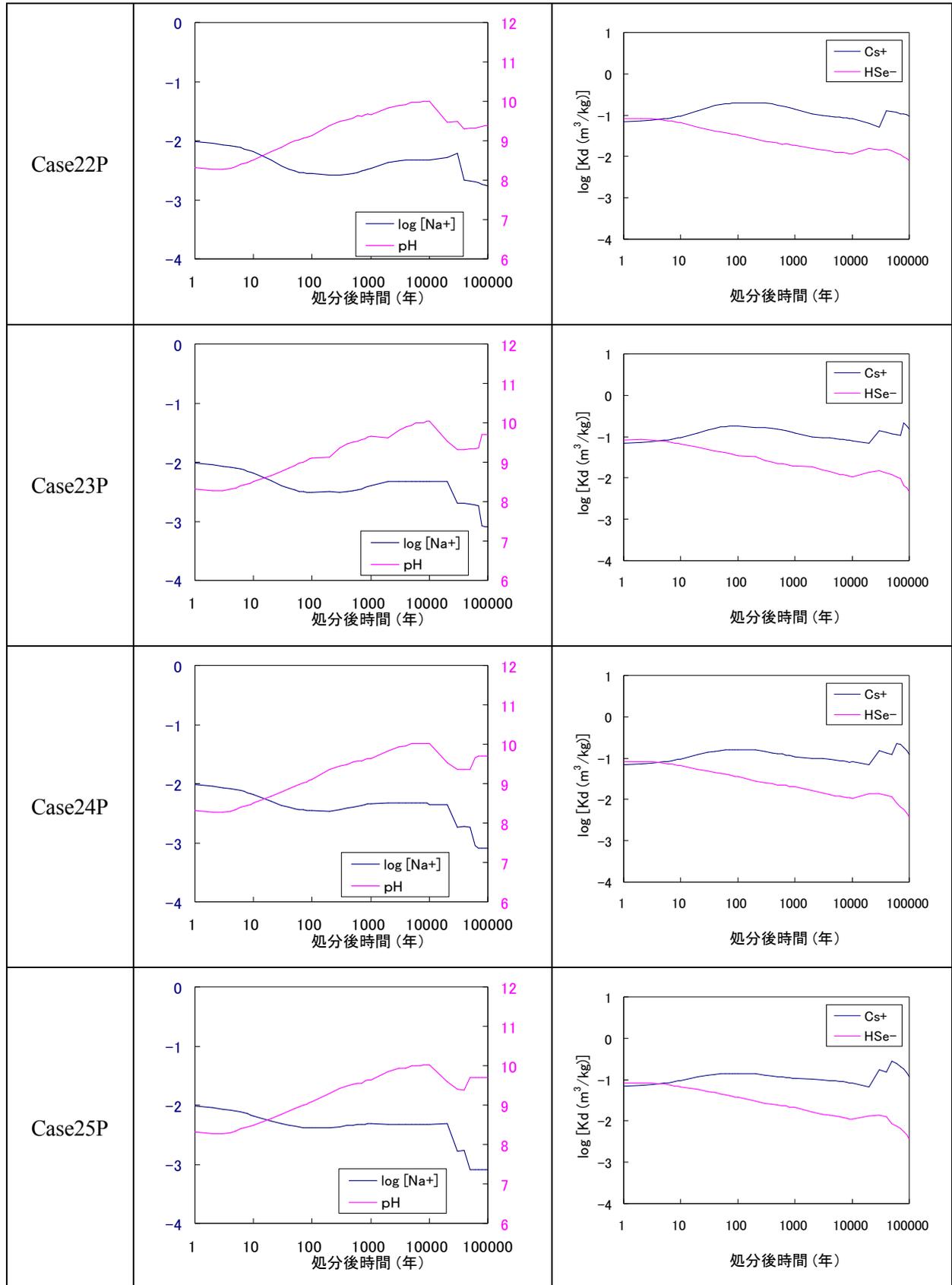


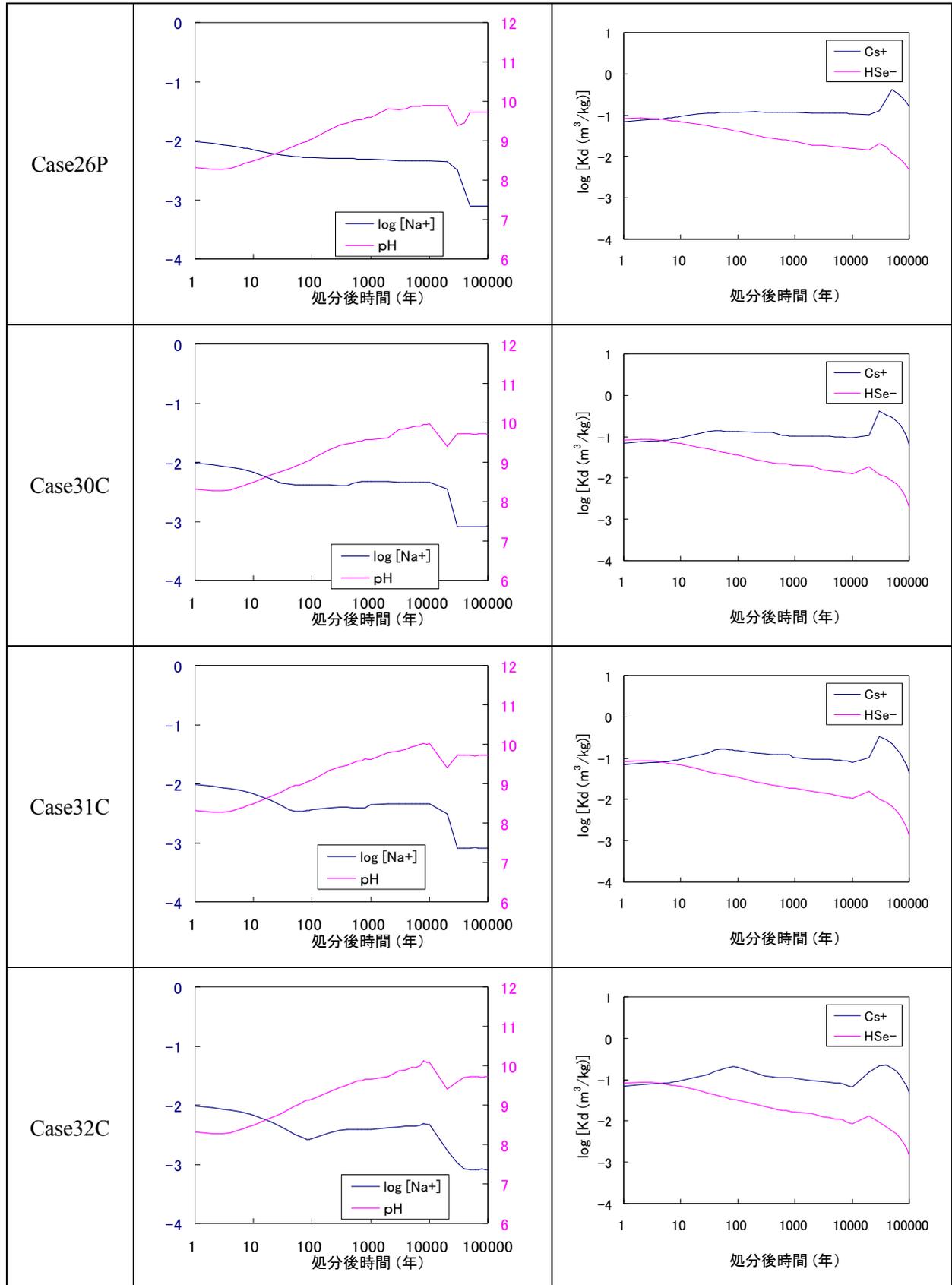
図 5.3-33 各解析ケースにおける拡散係数の経時変化

### (3) 収着分配係数：人工バリア

5.3.1 の解析によって得られた各解析ケースの緩衝材中の間隙水組成に基づいて、放射性核種の分配係数を求めた。昨年度と同様にモンモリロナイトを収着鉱物とし、Se は分配係数の実測値から、Cs はイオン交換モデルから分配係数を算出した<sup>(2)</sup>。各解析ケースにおける分配係数の経時変化を図 5.3-34 に示す。







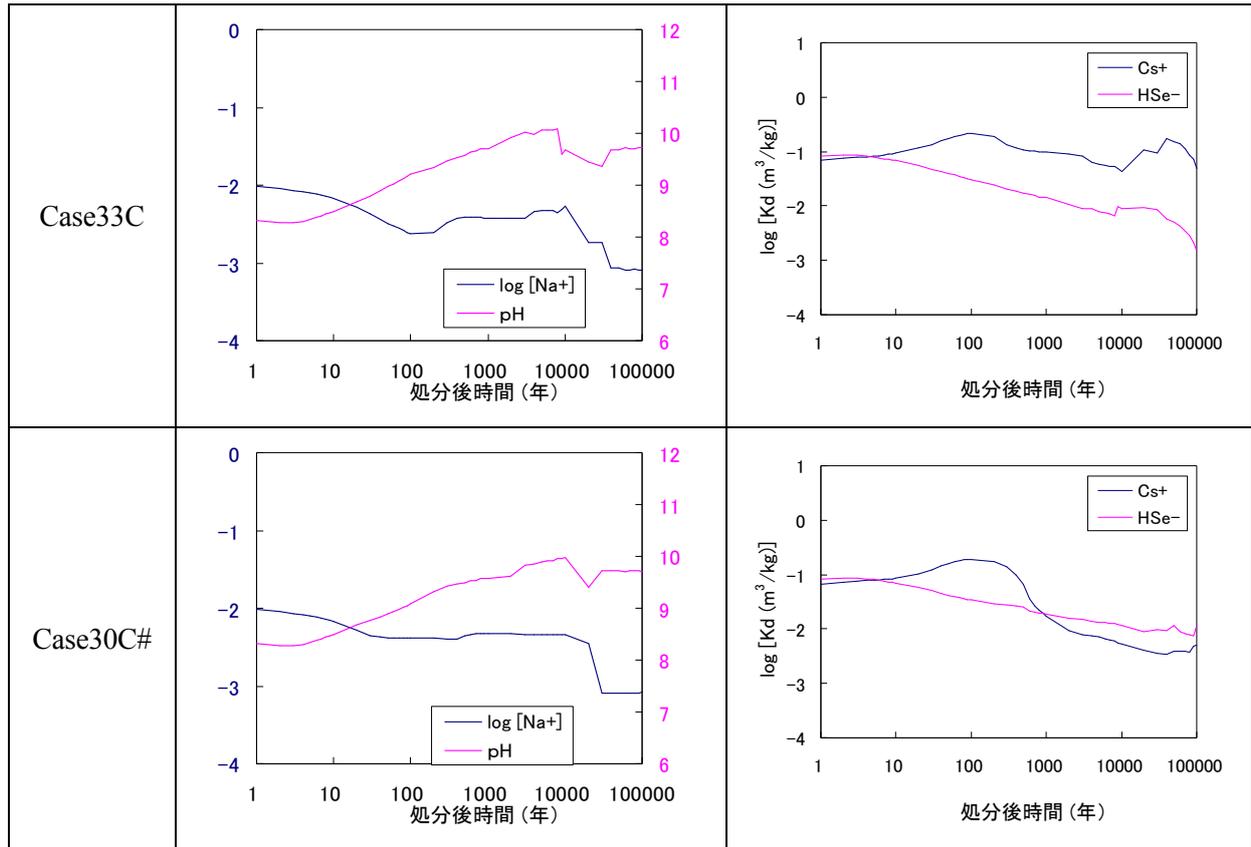


図 5.3-34 各解析ケースにおける Se および Cs の収着分配係数の経時変化

(4) 収着分配係数：天然バリア

天然バリア収着分配係数の設定を表 5.3-10 に示す。

表 5.3-10 天然バリアにおける収着分配係数

< m<sup>3</sup>/kg >

元素	液相分類	設定値	設定根拠
Se	降水系	5E-3	H24 報告書 <sup>(2)</sup>
	海水系	5E-3	H24 報告書 <sup>(2)</sup>
Cs	降水系	5E-2	H23 報告書 <sup>(1)</sup>
	海水系	5E-2	H23 報告書 <sup>(1)</sup>

### 5.3.5 ニアフィールド地下水流動

緩衝材変質の進行に伴う緩衝材中の地下水流速の変化は、平成 25 年度に実施した解析結果<sup>(3)</sup>に基づき設定した。

### 5.3.6 核種移行解析

5.3.1～5.3.5 では、緩衝材変質の進行に伴う収着分配係数、緩衝材中の地下水実流速などの核種移行パラメータの変動を評価した。ここでは、全 26 ケースのうち、5.3.1(4)で選定された 14 ケースに対して、これらの核種移行パラメータの解析結果に基づいて、確率論的安全評価コード GSRW-PSA<sup>(13)(14)</sup>コードを用いて人工バリアフラックス、天然バリアフラックス及び被ばく線量を計算した。人工バリア及び天然バリア中の核種移行解析の条件及び解析結果を以下に示す。なお、被ばく線量の解析条件及び解析結果は、AppendixIII に記述した。

#### (1) 解析条件

##### (a) 評価モデルの概要

本解析に使用した GSRW-PSA コードの核種移行評価の概念モデルを以下に示す。なお、評価モデルの詳細については、「平成 23 年度 地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備 報告書 [添付資料編]」<sup>(15)</sup>を参照されたい。

##### ① 人工バリア

人工バリアの核種移行解析では、人工バリアの構成要素であるガラス固化体、炭素鋼オーバーパック、緩衝材及び岩盤を一次元体系として、これらの連続したコンパートメントとして考えることにより核種移行解析を行う。オーバーパックの破損後、ガラスの溶解により溶出した核種の濃度は、溶解度限度よりも高い場合、その溶解度に核種濃度は制限される。核種の溶解及び沈殿の現象は瞬時／可逆を仮定し、溶解度を制限する固層が沈殿している場合、溶解度を維持するための再溶解が生じる。緩衝材中の核種は移流－拡散により移行する。なお、オーバーパックは破損によりバリア機能を失うとし、破損後の核種移行の遅延機能は考慮しない。また、支保工についても核種移行に対するバリア機能は考慮せず、評価体系に組み込んでいない。したがって、解析結果の一つとして示す人工バリア移行フラックスは、緩衝材外側のフラックスである。

##### ② 天然バリア

天然バリアは人工バリア外側から移行経路に沿って、100m 長さの母岩領域、800m 長さの亀裂体から構成される。天然バリアの核種移行解析では、亀裂性媒体モデルを用いる。亀裂性媒体モデルでは、岩盤内に放出された核種は地下水の流れが支配的な亀裂内を移行すると考える。亀裂性媒体中の核種移行は、亀裂中の移流及び分散、亀裂内の収着、亀裂に接する岩石マトリクス部の拡散及び収着遅延の移行現象であると考えられる。なお、亀裂は平衡平板亀裂を仮定した。

##### (b) 評価対象核種

評価対象核種については、Se-79、Cs-135 を対象とした本解析で用いる埋設直後のガラス固化体 1 本中の放射能インベントリを表 5.3-11 に示す。

表 5.3-11 埋設直後及び 1000 年後のガラス固化体 1 本の放射能インベントリ

核種		半減期 year	モル数 (mol)		放射エネルギー (Bq)	
			0 年	1000 年	0 年	1000 年
非系列	Se-79	$2.95 \times 10^5$	$8.11 \times 10^{-2}$	$8.09 \times 10^{-2}$	$3.64 \times 10^9$	$3.63 \times 10^9$
	Se 安定同位体		$6.86 \times 10^{-1}$	$6.86 \times 10^{-1}$	—	—
	Cs-135	$2.3 \times 10^6$	3.19	3.19	$1.84 \times 10^{10}$	$1.84 \times 10^{10}$
	Cs 安定同位体		8.44	8.44	—	—

## (2) 解析結果

### (a) 人工バリア出口核種移行フラックス

人工バリア緩衝材の外側に放出される核種別の年間フラックスについて全 14 ケースの評価結果を図 5.3-35 に示す。以下では、核種別の移行挙動の違いをケース別に整理する。

#### ① Se-79

残存溶解速度 (Stage II) の遅いガラス溶解速度 ( $0.001 \text{ g/m}^3/\text{day}$ ) に律速されるため、すべてのケースにおいて移行フラックスの Se-79 のピーク値はほとんど差のない結果となった。

緩衝材厚さ 50cm のケース 8P と緩衝材厚さを 20cm としたケース 11P を比較すると、ケース 11P は Se-79 フラックスの立ち上がりの傾きがわずかに急になっている。平成 25 年度の評価においても緩衝材厚さの差により移行距離が短くなることと緩衝材体積の減少により収着容量が小さいことによってフラックスの立ち上がりが急峻になることが指摘されており、本ケースもそれと同様であると考えられる。

混合率を 5:5 としたケース 19P ではピークに達した後 5,000 年から 10,000 年にかけてわずかに極小値を示している。これは図 5.3-34 の分配係数の変化に対応している。また、支保工厚さを変化させたケース 22P~26P では Se-79 フラックスの挙動に差異は見られなかった。さらに、時間軸への割り当てを変化させた 30C~33C においても、Se-79 の挙動の違いは見られなかった。

#### ② Cs-135

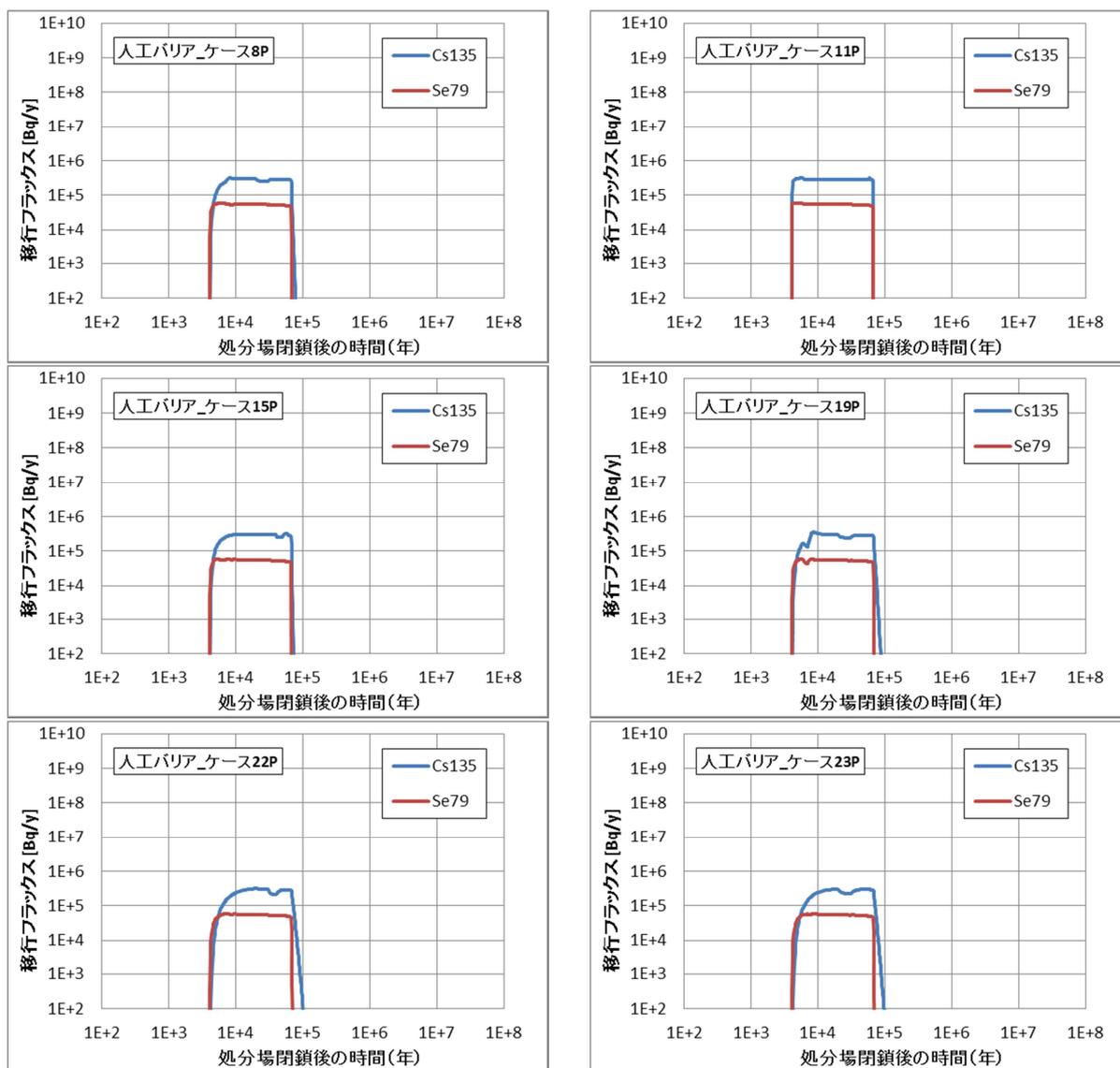
Se-79 同様、すべてのケースで、移行フラックスは残存溶解速度 (Stage II) の遅いガラス溶解速度 ( $0.001 \text{ g/m}^3/\text{day}$ ) に律速された形となっており、移行フラックスの Cs-135 のピーク値はほとんど差のない結果となった。

緩衝材厚さ 50cm のケース 8P と緩衝材厚さを 20cm としたケース 11P を比較すると、ケース 11P は Cs-135 フラックスの立ち上がりの傾きが急になっており、矩形形状とみなせるのに対し、ケース 8P ではオーバーパックの閉じ込め機能が失われる 4,000 年より Cs-135 移行フラックスが急速に立ち上がるが 5,000 年から 1 万年にかけてやや緩やかに上昇している。これは Se-79 でも述べたように、緩衝材厚さが薄くなることにより移行距離が短くなることと緩衝材体積の減少により収着容量が小さくなるためである。

乾燥密度が 1.3 となるケース 15P では 5 万年以降にわずかに極小値が現れている。これはその時期に Cs の分配係数が変化することに対応するものである。また、Se-79 でも変化が表れていたケース 19P では Cs-135 が立ち上がる途中で極小値を示している。これも図 5.3-34 に示すように分配係数の変化に対応している。

ケース 22P~26P においても、11P では一定値を示した 1 万年から 8 万年程度の期間で分配係数の変化に応じて核種移行フラックスが変化している。また、フラックスが減少する傾きがケース 8P と比較して緩やかになっている。特に 10 万年時点での分配係数が一番高いケース 26P ではフラックスが  $10^2$  に達するまでに時間を要している。

以上のように、Cs-135 の人工バリアフラックスに対して感度の高いパラメータとして、収着分配係数が挙げられる。



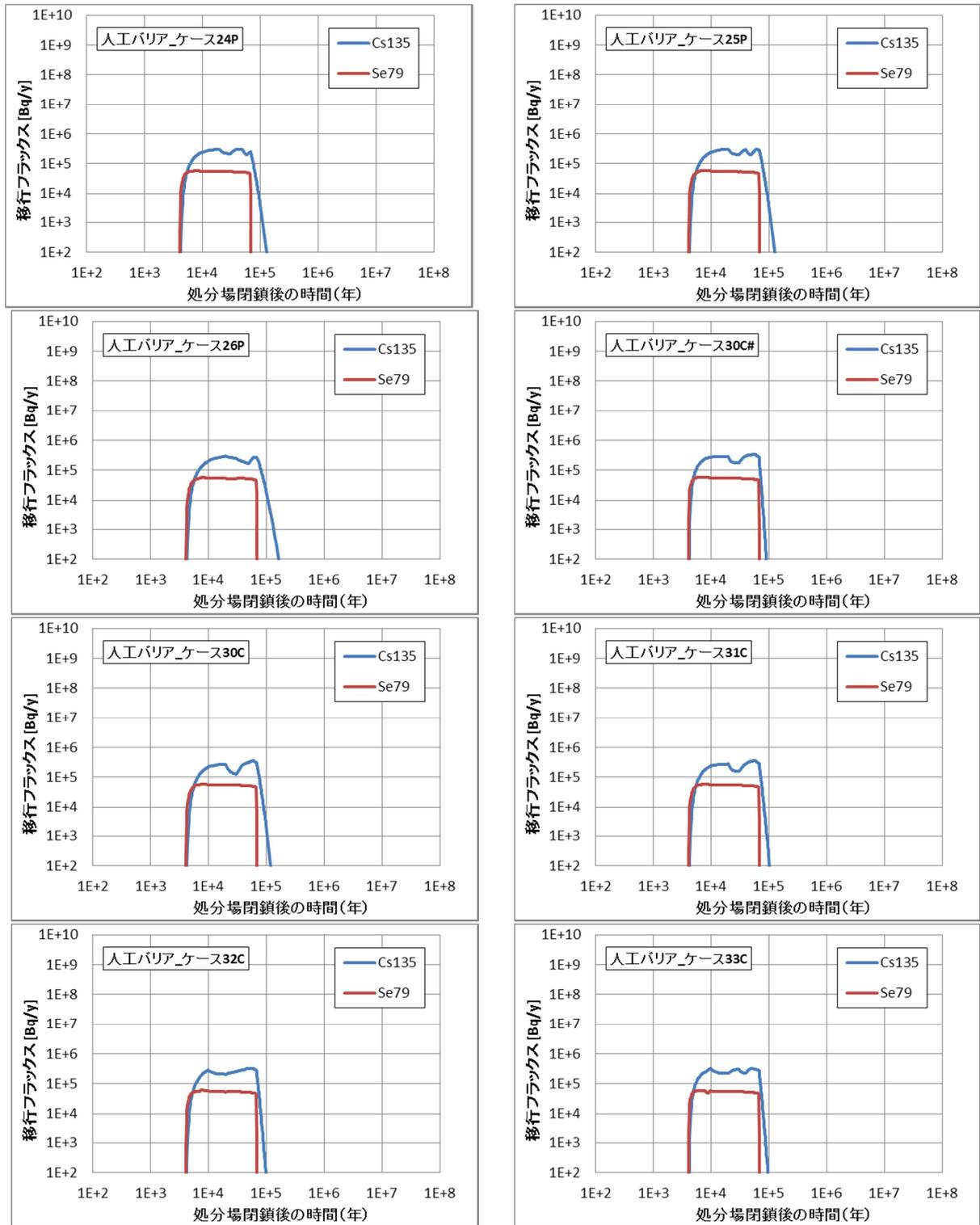


図 5.3-35 ガラス固化体 1 本当たりの地下水移行による人工バリア出口フラックス

### (b) 天然バリア出口核種移行フラックス

天然バリア出口（亀裂帯出口）に放出される核種別の年間フラックスについて全 14 ケースの評価結果を図 5.3-36 に示す。Se-79、Cs-135 それぞれすべてのケースで同一曲線上にあり、ピーク発生時期及びフラックスピーク値が同一となり、人工バリア出口における移行フラックス挙動の差が天然バリア出口には現れない結果となった。

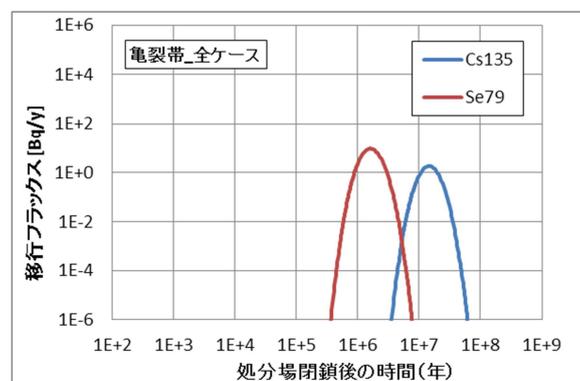


図 5.3-36 ガラス固化体 1 本当当たりの地下水移行による亀裂帯出口フラックス  
(すべてのケース同一曲線上にある)

### (3) まとめ

緩衝材変質の進行に伴うバリア機能の変遷を評価するために、Se-79 及び Cs-135 を対象にして緩衝材変質・間隙水組成の変遷評価に基づいて示された解析結果に基づいて、GSRW-PSA コードを用いて人工バリアフラックス及び天然バリアフラックスの解析を実施した。解析結果は以下のようにまとめられる。

Se-79 及び Cs-135 の人工バリアの移行フラックスは、ピーク値はガラス溶解速度ではほぼ律速されているが収着分配係数の違いによってフラックスの形状にやや違いが見られた。一方、緩衝材の実流速の影響に関しては本解析の設定条件では拡散律速が維持され、移行フラックスにはほとんど違いがみられなかった。

以上から、本年度の解析条件では、人工バリアの移行フラックスに対して感度が高いパラメータとして Se-79、Cs-135 については昨年度と同様に収着分配係数が挙げられる。

天然バリア（亀裂帯）の移行フラックスに関しては、本解析で設定した条件では、Se-79 及び Cs-135 については人工バリアのフラックスの違いが、天然バリア出口におけるの核種移行フラックスの違いに現れていない。