

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

(1号、2号及び3号廃棄物埋設施設)

2021年6月

日本原燃株式会社

目 次

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第四号及びその解釈	1
2. 評価対象設備	2
3. 許可基準規則への適合のための評価方針	2
4. 許可基準規則への適合性説明	3
(1) 評価方法	3
(2) 廃止措置の開始後の評価	4
5. 参考文献	87

補足説明資料 1	地質環境に係る長期変動事象
補足説明資料 2	生活環境の状態設定
補足説明資料 3	廃棄物埋設地の状態設定 -影響事象分析-
補足説明資料 4	廃棄物埋設地の状態設定 -状態変化の評価(力学的影響)-
補足説明資料 5	廃棄物埋設地の状態設定 -状態変化の評価(化学的影響)-
補足説明資料 6	廃棄物埋設地の状態設定 -透水係数の設定-
補足説明資料 7	線量評価パラメータ -埋設設備からの流出水量-
補足説明資料 8	線量評価パラメータ -分配係数-
補足説明資料 9	線量評価パラメータ -パラメータ根拠集-
補足説明資料 10	線量評価結果 -経年変化グラフ-

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第四号及びその解釈

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
(廃棄物埋設地) 第十条 廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。 四 廃止措置の開始までに廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
第10条(廃棄物埋設地) 第6項 第4号に規定する「廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるもの」とは、設計時点における知見に基づき、廃棄物埋設施設の基本設計について、廃止措置の開始後における埋設した放射性廃棄物に起因して発生することが想定される放射性物質が公衆に及ぼす影響が、以下に掲げる各シナリオに基づく評価の結果、それぞれの基準を満たすよう設計されていることをいう。 これらの評価は、廃棄物埋設施設の敷地及びその周辺に係る過去の記録や、現地調査等の最新の科学的・技術的知見に基づき、人工バリア及び天然バリア(埋設された放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設された放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う岩盤又は地盤等をいう。以下同じ。)の状態の変化、被ばくに至る経路等に影響を与える自然現象及び土地利用による人間活動を考慮した上で行うこと。なお、廃止措置の開始後において評価の対象とする期間は、シナリオごとに公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまでの期間とする。 一 自然事象シナリオ 自然現象による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行、河川等への移行及び一般的な土地利用(廃棄物埋設地の掘削を伴うものを除く。)を考慮したシナリオを対象として、以下のとおりであること。この際、同一の事業所内に複数の廃棄物埋設施設の設置が予定される場合は、これらの重畳を考慮すること。 イ 科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアと天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組み合わせのうち最も厳しいシナリオであっても、評価される公衆の受ける線量が、300 マイクロシーベルト/年を超えないこと。 ロ 科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組み合わせのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定し、評価される公衆の受ける線量が、10 マイクロシーベルト/年を超えないこと。 二 人為事象シナリオ 廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行及び当該掘削後の土地利用を考慮したシナリオに基づき、評価される公衆の受ける線量が、ピット処分にあっては1 ミリシーベルト/年を超えないこと。

2. 評価対象設備

許可基準規則第十条第四号の対象設備は、廃棄物埋設地に設置する埋設設備及び覆土とし、第1表に示す安全機能のうち廃止措置の開始後の移行抑制機能*1を対象に公衆の受ける線量を評価する。

*1：本資料では、放射性物質の漏出を低減する機能及び生活環境への移行を抑制する機能を「移行抑制機能」という。

第1表 ピット処分における安全機能

安全機能	廃止措置の開始前	
	放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了*1まで	覆土完了*1から廃止措置の開始まで
漏出防止機能	○	—
移行抑制機能	—	○
遮蔽機能	○	○

○：安全機能を維持する

—：考慮しない

*1：覆土完了の時点を埋設の終了とする。

3. 許可基準規則への適合のための評価方針

廃止措置の開始後の評価においては、ICRP Pub. 81⁽¹⁾に基づいて、自然過程を考慮する自然事象シナリオ及び人間侵入を考慮する人為事象シナリオについて、本施設に起因して発生すると想定される公衆の受ける線量を評価し、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しのある設計とする。

具体的には、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「最も可能性が高い自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「最も厳しい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $300 \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、自然事象シナリオ以外の廃棄物埋設地の掘削による放射性

物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行及び当該掘削後の土地利用を考慮した人為事象シナリオで評価される公衆の受ける線量が 1mSv/y を超えないことをいう。

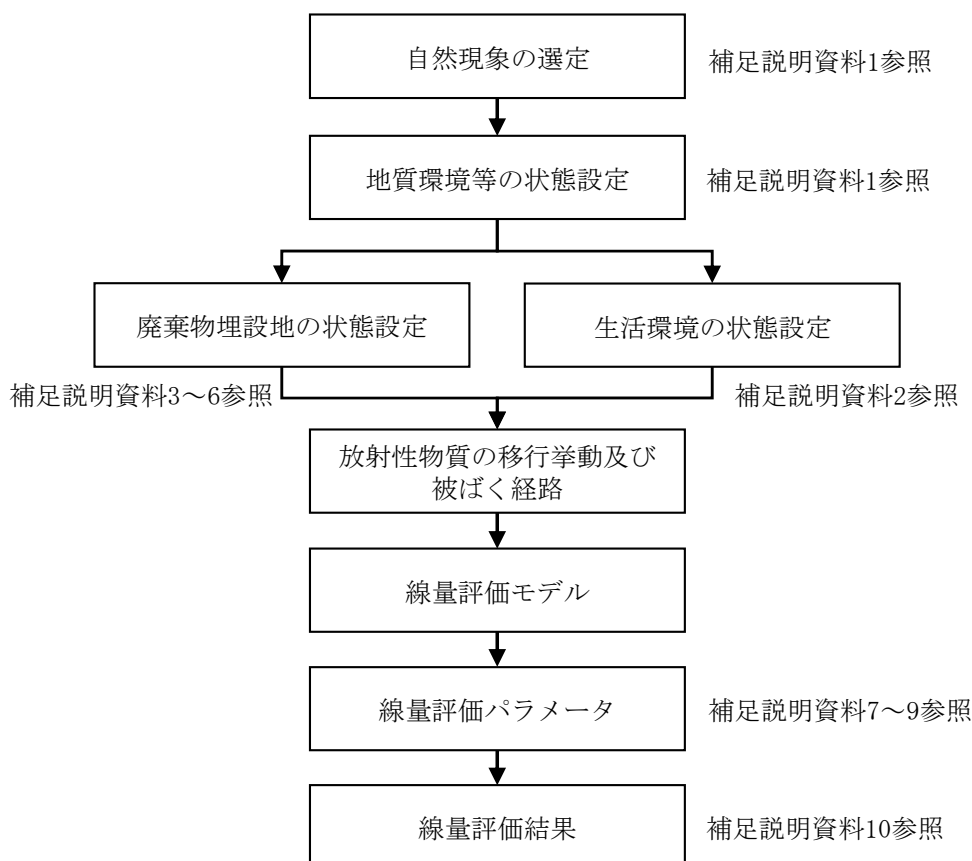
なお、同一事業所内の複数の廃棄物埋設施設の重畳を考慮するため、1号、2号及び3号廃棄物埋設施設について評価する。

4. 許可基準規則への適合性説明

許可基準規則第十条第四号 廃棄物埋設地(廃止措置の開始後の評価)に対する適合性について確認した結果を以下にまとめる。

(1) 評価方法

公衆の受ける線量の評価は、「許可基準規則」及び「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」(以下「許可基準規則解釈」という。)に基づいて行う。検討フローを第1図に示す。



第1図 検討フロー

(2) 廃止措置の開始後の評価

廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態へ移行できる見通しを得るため、廃止措置の開始後において、埋設する廃棄体に起因して発生すると想定される公衆の受ける線量が、最も可能性が高い自然事象シナリオにあつては $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、最も厳しい自然事象シナリオにあつては $300 \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと及び人為事象シナリオにあつては 1mSv/y を超えないことを評価する。

評価の対象とする期間は、評価する線量の最大値が出現する時期を含む期間とし、主要な放射性物質のうち半減期の長い放射性物質の放射エネルギー及び放射能濃度が十分に小さいことを考慮して、10,000年程度までを目安とする。また、廃棄物埋設地等の状態の設定を行う将来の期間は、廃止措置の開始までの十分な減衰及び岩盤(鷹架層)中の移行遅延を期待できない放射性物質の影響が、比較的有意に生じると想定される時期を含む期間である1,000年程度とし、線量評価においては、覆土完了時点において廃棄物埋設地及びその周辺環境は1,000年後の状態になるものとし、その状態が継続するものとする。

評価に当たっては、地盤、地質、水理及び社会環境に関する廃棄物埋設地の敷地及びその周辺に係る過去の記録や現地調査等の最新の科学的・技術的知見に基づき、人工バリア及び天然バリアの状態の変化、被ばく経路等に影響を与える自然現象及び土地利用による人間活動を考慮して、人工バリア及び天然バリアの状態の変化に関する要素を体系的に収集・分析し、評価すべきシナリオを設定する。

(i) 自然事象シナリオ

自然事象シナリオでは、以下に示すような自然事象による廃棄物埋設地からの放射性物質の移行及び公衆の受ける線量を評価する。

廃棄物埋設地に埋設処分する放射性廃棄物に含まれる放射性物質は、埋設設備に浸入する地下水を介して、人の活動する領域に到達し、放射性物質を含んだ水及び土地を利用した様々な生産活動、生産物の摂取等の人間活動により、公衆が被ばくすることが想定される。人が活動する領域のうち、放射性物質が到達する領域で、一般的な水の利用と土地の利用が想定される範囲における人間活動の状況を生活環境という。

廃止措置の開始後の公衆の受ける線量の評価に当たっては、将来の地質環境、気象環境及び水理環境(以下「地質環境等」という。)と、将来の廃棄物埋設地の状態並びに将来の公衆の生活環境を設定する。将来の地質環境等については、プレート運動、気候変動等による廃棄物埋設地の取り巻く環境を設定する。将来の廃棄物埋設地の状態につい

ては、廃棄物埋設地を構成する各部材の変質等による廃棄物埋設地の物理的、化学的性質の変化を考慮して、期待するバリア機能の状態を設定する。将来の公衆の生活環境については、ICRP Pub. 81⁽¹⁾及びICRP Pub. 101⁽²⁾の考え方を参考に、廃棄物埋設地に起因して被ばくを受けると合理的に想定される集団を代表する個人(以下「評価対象個人」という。)及び評価対象個人の時間の過ごし方等の人間活動の程度(以下「生活様式」という。)を設定する。ここで、地質環境等と将来の廃棄物埋設地の状態に関しては、自然現象であることから、過去の記録や現地調査等の最新の科学的・技術的知見に基づき合理的に設定する。将来の公衆の生活環境に関しては、ICRP Pub. 81⁽¹⁾を踏まえて、現在の生活様式が将来も継続すると仮定する。

最も可能性が高い自然事象シナリオは、平均的な被ばくを受けると想定される評価対象個人の線量が、低く抑えられていることを確認するため、科学的に合理的と考えられる範囲の廃棄物埋設地の人工バリアや天然バリアの状態及び生活環境における被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを用いて評価する。本シナリオの評価に当たって、地質環境等は、公衆の受ける線量が現実的な値となるように、データの不確かさ(変動幅)を踏まえて、気温、降水量等を現実的(平均値等の代表性が高い値)に設定する。将来の廃棄物埋設地の状態も同様に公衆の受ける線量が現実的な値となるようにデータの不確かさ(変動幅)を踏まえて、人工バリア及び天然バリアの機能として期待する透水係数、分配係数等を現実的(平均値等の代表性が高い値)に設定する。生活様式については、「日本原燃(株)廃棄物埋設事業変更許可申請における廃止措置の開始後の公衆の被ばく線量評価に係る審査方針について～将来の人間活動に関する設定～」⁽³⁾(以下「審査方針」という。)に基づき、現在の生活様式を考えて現実的でもっともらしい仮定に基づいて設定する。

最も厳しい自然事象シナリオは、最大の被ばくを受けると想定される評価対象個人の線量であっても、著しい被ばくを受けないことを確認するため、科学的に合理的と考えられる範囲の廃棄物埋設地の人工バリアや天然バリアの状態及び生活環境における被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを用いて評価する。本シナリオの評価に当たって、地質環境等は、公衆の受ける線量が大きく厳しくなるようにデータの不確かさ(変動幅)を踏まえて、気温、降水量等を保守的に設定する。将来の廃棄物埋設地の状態も同様に、公衆の受ける線量が大きく厳しくなるようにデータの不確かさ(変動幅)を踏まえて、人工バリア及び天然バリアの機能として期待する透水係数、分配

係数等を保守的に設定する。将来の公衆の生活様式については、「審査方針」に基づき、現在の生活様式を考えて合理的に保守的でもっともらしい仮定に基づいて設定する。

なお、最も可能性が高いと考えられる状態の設定が困難である場合又は様々な不確かさを考慮したとしても線量への影響が小さいと考えられる場合は、不確かさを考慮して保守的な状態を設定する。

a. 地質環境等の状態設定

埋設設備を設置する地下の環境は、自然現象の影響を受け難いことから、地上に比べ安定である。

しかし、長期的な観点で見ると、プレート運動及び気候変動によって、廃棄物埋設地を取り巻く地質環境等は有意に変化することが予測される。

この地質環境等に係る長期変動事象について、「プレート運動に起因する事象」、「気候変動に起因する事象」及び「プレート運動と気候変動の両者に起因する事象」に区分する⁽⁴⁾。区分した各事象については、プレート運動や気候変動が過去から現在までの変動傾向とその要因が今後も継続するとみなし、それらを外挿して状態設定を行う。

(a) プレート運動に起因する事象

日本周辺には、大陸プレートであるユーラシアプレート及び北米プレート並びに海洋プレートであるフィリピン海プレート及び太平洋プレートがあり、大陸プレートの下に海洋プレートが沈み込んでいる。敷地の位置する東北日本弧は北米プレートに位置し、東側から太平洋プレートが沈み込むことで、おおむね東西方向の圧縮の力が生じている。

将来の日本列島周辺のプレート運動については、今後数十万年から数百万年程度継続すると考えられる^{(4)~(7)}。したがって、状態設定においては、現在のプレート運動が継続するものとして設定する。

プレート運動に起因する事象には、「火山・火成活動」、「地震・断層活動」及び「隆起・沈降運動」があげられる。

(一) 火山・火成活動

火山・火成活動によって、直接的に廃棄物埋設地が損傷すること、また、敷地周辺が高温になること及び地下水の水質の変化によって地下水流動場が変化することが想定されることから、火山・火成活動による状態設定を行う。覆土完了までの間において、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性のある火山・火成活動は

降下火砕物だけであるが、覆土完了後においては火砕物密度流についても想定する。長期変動事象としては、直接的に廃棄物埋設地が損傷することが想定される事象として、新しい火口の開口を想定する。

以上より、火山・火成活動として降下火砕物、火砕物密度流及び火口の開口を想定する。

(ア) 降下火砕物

覆土完了後において、降下火砕物が堆積することにより、降下火砕物に含まれる成分によって地下水の水質変化が生じることが想定されるため、廃棄物埋設地の状態設定において化学的影響を考慮する。

(イ) 火砕物密度流

火砕物密度流は、今後数百年から数千年スケールには、敷地に到達する可能性は十分に低く⁽⁸⁾、仮に敷地に到達したとしても、火砕物密度流の影響範囲は表層に限定されるため、火砕物密度流の熱的影響及び化学的影響は長期変動事象として考慮しない。

(ウ) 火口の開口

新しい火口の開口は、敷地が廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の過去の火口及びその近傍に位置しないこと、並びに火山フロントより前弧側(東方)に位置することから、これらの火山事象が敷地において発生する可能性はない。よって、新しい火口の開口は長期変動事象として考慮しない。

(二) 地震・断層活動

地震・断層活動は、現在のプレート運動が継続するとされていることから、将来も同様の場所で繰返し発生すると想定する。

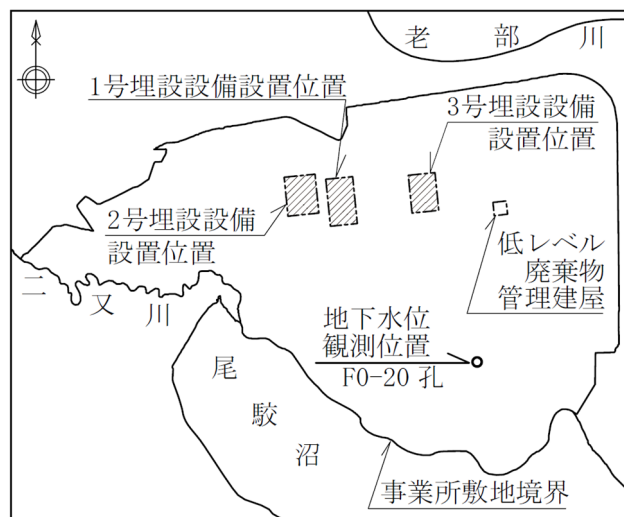
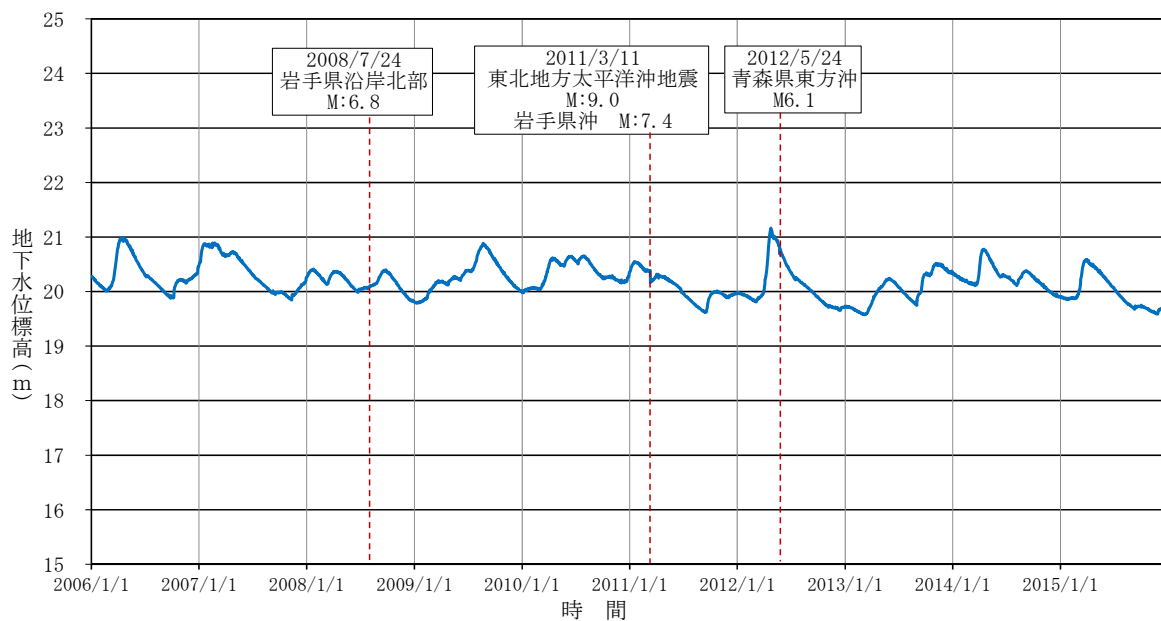
(ア) 地震

敷地付近は、マグニチュード6を超える地震の発生はなく、震度5強を超える地震の発生もない地域である。

覆土(難透水性覆土及び下部覆土)に力学的な変形が生じることにより、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において力学的影響を評価する。

震度4程度の地震時において、敷地内の観測孔で地下水位の変動が確認されている(第2図参照)。観測結果によると、震度4程度の地震では地下水位の

変動は小さく、季節変動に内包される程度であった。したがって、地震活動による水理的影響は小さく、一時的なものであることから、地震の水理的影響は長期変動事象として考慮しない。



第2図 地下水位観測結果 (F0-20 孔)

(イ) 断層活動(地盤の変形)

断層活動に伴う地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊されることが想定される。

空中写真判読結果及び地質調査から、活断層は廃棄物埋設地付近には分布しておらず、最も近い活断層は、敷地近傍の六ヶ所村出戸付近に分布する出戸西方断層である。出戸西方断層は、西傾斜の逆断層であり、その長さを約 11km と評価している。しかし、敷地には、出戸西方断層に起因する変動地形及びリニアメント並びに出戸西方断層に関連した地質構造は確認されていない。したがって、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊される可能性は十分低い。

出戸西方断層以外の活断層については、廃棄物埋設地から更に離れており、断層活動があったとしても、廃棄物埋設地に力学的影響は及ばない。

以上より、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊される可能性は十分低いため、断層活動の力学的影響は長期変動事象として考慮しない。

(ウ) 液状化(覆土)

覆土(難透水性覆土及び下部覆土)が液状化することによって、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において液状化による影響を考慮する。

(三) 隆起・沈降運動

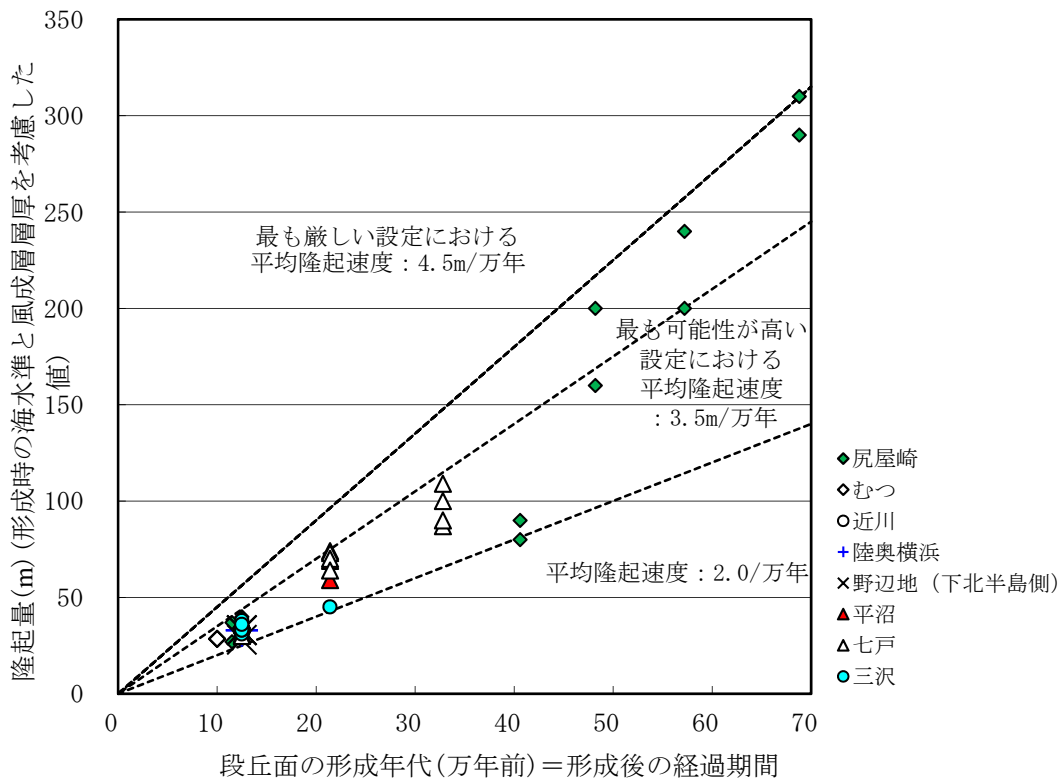
隆起・沈降運動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形勾配の変化や侵食基準面から廃棄物埋設地までの比高の変化に伴い侵食・堆積環境が変化する。侵食・堆積環境の変化により、地下水流動に影響すること、また、埋設設備が地表に接近する可能性があることから、隆起・沈降運動を長期変動事象として考慮し、隆起・沈降運動の速度を設定する。

敷地の位置する下北半島付近には、過去約 70 万年間に形成された海成段丘が分布することから、敷地及びその周辺は、少なくとも同期間において大局的には隆起域と考えられる。小池・町田(2001)⁽⁹⁾から、下北半島周辺の海成段丘面の形成年代と旧汀線高度及び相対海水準を考慮した隆起量について整理したものを第 3 図に示す。下北半島周辺の過去約 70 万年間の平均隆起速度は、2.0m/万年～

4.5m/万年である。

また、廃棄物埋設地付近に分布する海成段丘面(M1面、12.5万年)の形成年代と旧汀線高度及び相対海水準を考慮して平均隆起速度を計算すると最大で3.5m/万年である。

以上より、敷地周辺の海成段丘に基づき求めた平均隆起速度である3.5m/万年を最も可能性が高い設定とする。また、下北半島周辺の隆起速度のばらつきを考慮し、隆起速度が最も大きい4.5m/万年を最も厳しい設定とする。



注1：段丘面の形成年代及び隆起量は、小池・町田(2001)⁽⁹⁾に基づき作成。

第3図 下北半島の海成段丘面の形成年代と隆起量の関係

(b) 気候変動に起因する事象

気候変動は、数十万年前から現在まで約8万年周期から約12万年周期で氷期と間氷期を繰り返していることから⁽¹⁰⁾、大局的には将来もこの周期の気候変動を繰り返すと考えられる。過去の気候変動の傾向から、今後氷期へ向かうと考えられる

ことから⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、将来は寒冷化すると予測される。

一方で、人間活動に伴う温室効果ガス排出により、温暖化が進行する可能性があるとする報告⁽¹⁰⁾や、現在の温室効果ガス濃度を基準として、炭素循環のメカニズムを仮定した気候シミュレーションにより、将来5万年程度は温暖期が継続する可能性があるとする報告もある⁽¹³⁾。

以上より、気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定については、過去の気候変動と同様に現在から寒冷化に向かう場合(以下「寒冷化ケース」という。)と、温暖期が数万年程度継続する場合(以下「温暖期継続ケース」という。)の2ケースに大別し、これらの2ケースについて、それぞれ「気温・降水量変化」及び「海水準変動」を長期変動事象として考慮する⁽⁴⁾。

(一) 気温・降水量変化

気温・降水量の変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、気温・降水量の変化により表層での水収支の変化に伴って地下水流動及び表流水流動が変化することが想定される。よって、気温・降水量の変化を長期変動事象として考慮し、将来の気温及び降水量を設定する。

気温と降水量は正の相関関係があり⁽¹⁴⁾、降水量が低下するほど希釈に寄与する交換水量が少なくなるため、気温及び降水量は低いほど保守的な設定となる。したがって、以下に示す寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの検討結果に基づいて、保守的となる寒冷化ケースの状態を設定する。設定した気温と降水量の値を第3表に示す。

(ア) 気温変化

将来の気温変化については、花粉化石及び南極氷床コアの水素同位体比を用いた過去の気温の推定に関する知見⁽¹⁰⁾及び人間活動による温室効果ガス濃度を考慮した気温変動予測結果に基づいて設定する。

花粉化石は、Yamanaka et al. (1990)⁽¹⁵⁾で取得されている下北半島の北部の尻屋崎湿原における最終氷期最盛期頃の花粉化石群集データ及び敷地近傍の尾駱沼の沖積層堆積物における過去約1万年間の花粉化石群集データを用いた。

花粉化石を用いた過去の気温の推定方法は、松末ほか(2000)⁽¹⁶⁾の手法及びNakagawa et al. (2002)⁽¹⁷⁾の手法を用いた。

【寒冷化ケースにおける気温設定】

寒冷化ケースにおいては、氷期最盛期の年平均気温から求めた気温変動割合を用いて将来の気温を設定する。

松末ほか(2000)⁽¹⁶⁾及びNakagawa et al. (2002)⁽¹⁷⁾の手法により下北半島付近の最終氷期最盛期の年平均気温を推定すると、それぞれ約 -2.2°C と約 3.7°C であった(第4図参照)。このことから、将来の寒冷化ケースの年平均気温の最も可能性が高い設定は、両手法の平均的な値から 0°C とする。

将来の氷期最盛期の年平均気温の最も厳しい設定は、松末ほか(2000)⁽¹⁶⁾における現在と過去の氷河期の気温差の最大値が約 13°C であったことから、敷地周辺における1975年～2015年の年平均気温の最低値である 8°C から 13°C を低下させると -5°C となる。しかし、氷期最盛期は主な評価対象期間より1万年以上先であること、降水量の状態設定においては気温と降水量の相関関係の不確かさを考慮することから、ここでは最も可能性が高い設定の気温である 0°C と設定する。

氷期最盛期に至るまでの気温変化については、過去約45万年間の連続的なデータが取得されている南極氷床コアの水素同位体比⁽¹⁰⁾に基づいて整理された年平均気温の変化量の変動グラフを用いて設定する。

将来の気温の変動曲線を第5図に示す。同図から、最も可能性が高い設定では約8万年後に氷期最盛期になると想定し、最も厳しい設定では約6万年後に氷期最盛期になると想定する。

上記の現在及び氷期最盛期の気温並びに気温の変動曲線を踏まえ、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定において、寒冷化ケースにおける1,000年後の気温を 8°C と設定する(第3表参照)。

【温暖期継続ケースにおける気温設定】

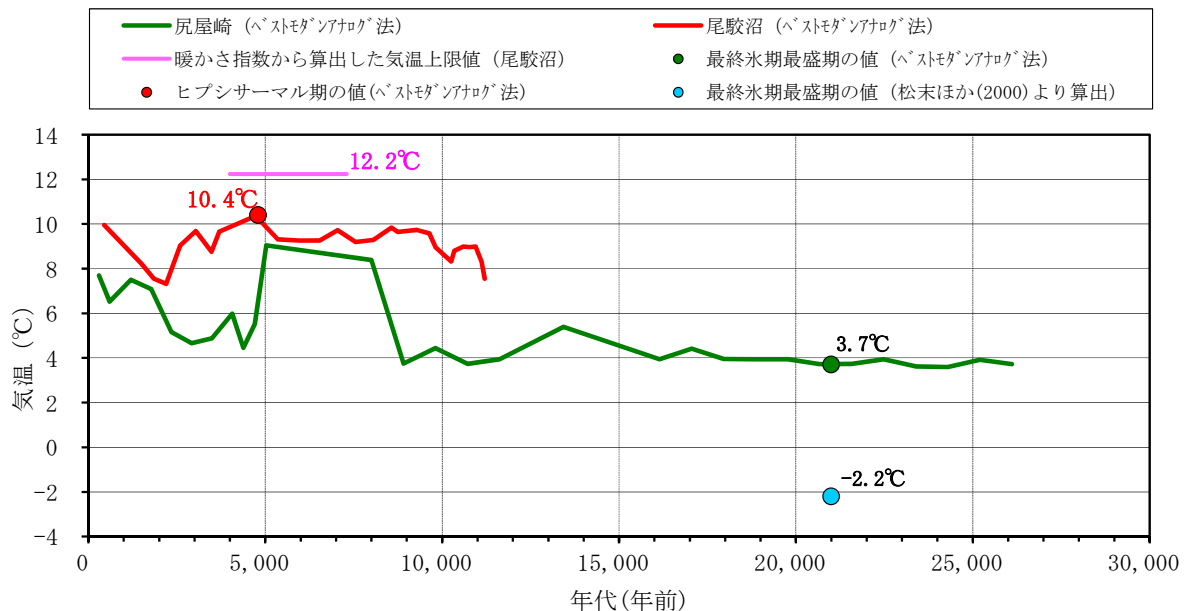
温暖期継続ケースにおいては、温暖期における最高気温のみを設定し、その気温が現在から継続すると想定する。

尾駱沼の沖積層堆積物から過去約1万年間の花粉化石群集データを取得し、そのデータを用いて松末ほか(2000)⁽¹⁶⁾の手法及びNakagawa et al. (2002)⁽¹⁷⁾の手法により敷地周辺のヒプシサーマル期の年平均気温を推定すると、それぞれ約 12.2°C と約 10.4°C であった(第4図参照)。

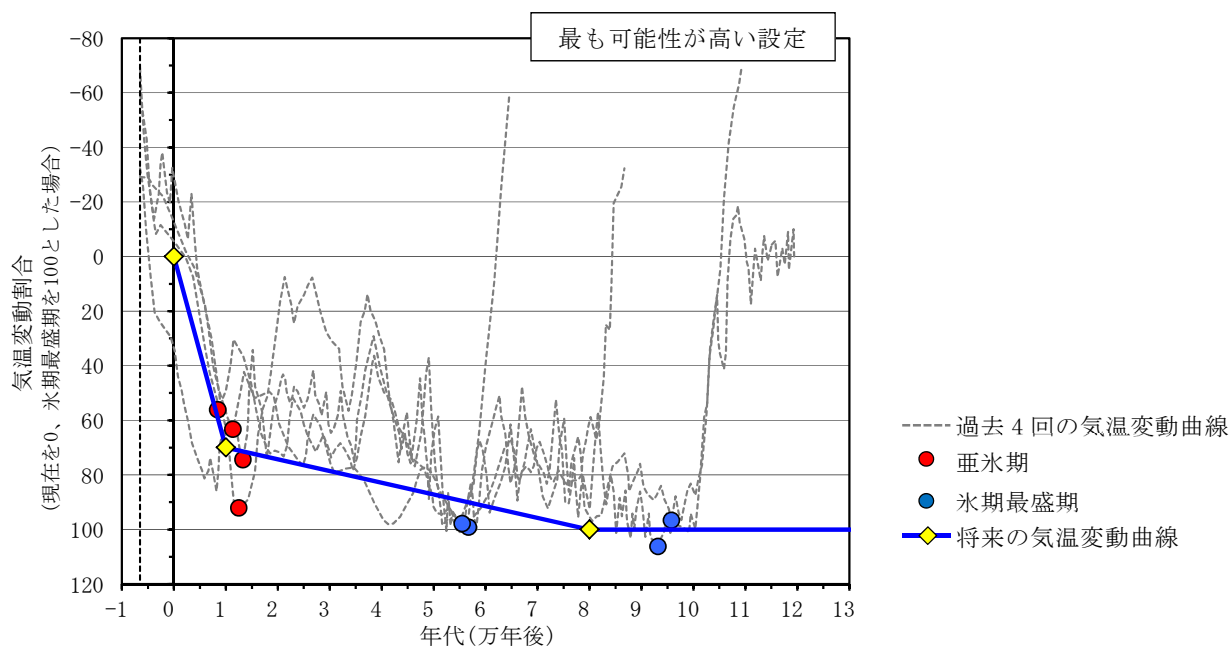
一方、人間活動による温室効果ガス濃度を考慮したシミュレーション結果によれば、2090年～2099年には世界平均で現在より0.3℃～6.4℃上昇する可能性が指摘されている⁽¹¹⁾。よって、過去30年間の敷地周辺の年平均気温である9℃にシミュレーション結果の平均的な上昇値である3℃を加えた12℃を最も可能性が高い設定とする。この値は、花粉化石群集データより推定した12.2℃とも整合している。

また、最も厳しい設定においては、過去30年間の敷地周辺の年平均気温である9℃にシミュレーション結果のほぼ最大上昇値である6℃を加えると15℃となる。しかし、寒冷化ケースと同様に後述する降水量の状態設定における気温と降水量の相関関係において、不確かさを考慮した方が希釈に寄与する交換水量は少なくなることから、ここでは最も可能性が高い設定の気温である12℃とする。

上記の設定を踏まえ、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定において、温暖期継続ケースにおける1,000年後の気温を12℃と設定する。

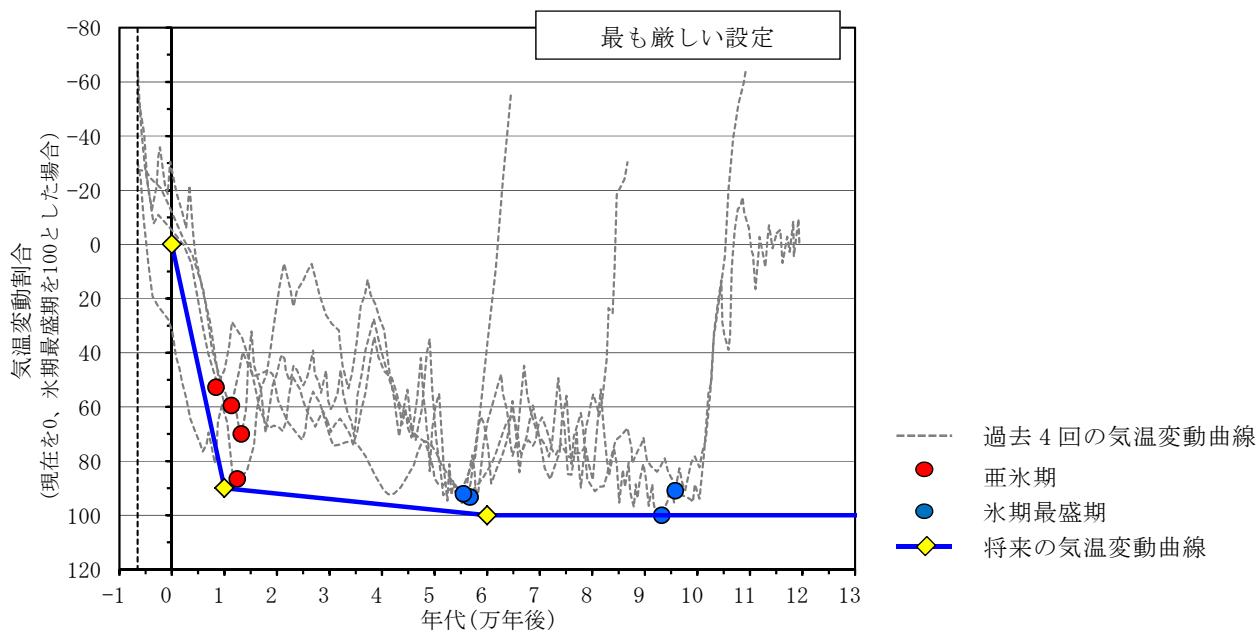


第4図 花粉分析による過去26,000年間の気温変動



注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽¹⁰⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第5図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース)(1/2)



注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽¹⁰⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第5図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース)(2/2)

(イ) 降水量変化

気温と降水量との関係には、正の相関がある⁽¹⁴⁾。また、地形や海流等の気候因子も降水量と相関がある。そこで、将来の降水量の設定に当たっては、敷地周辺と気候因子が類似する地点の気温と降水量の関係に基づき、将来の気温に対応する降水量を設定する。将来の気温は、「(ア) 気温変化」で設定した気温を用いる。

敷地周辺と気候因子が類似する地点の現在の気温と降水量の関係を求める。気候因子が類似する地点の判断に使用した項目は以下のとおりである。

- ・北半球の太平洋側西部に位置すること。
- ・アリソフの気候区分が亜極帯～寒帯であること。
- ・沿岸海流が寒流であること。
- ・陸度(半径 50km 円内の陸域の占める割合)が 1/10～9/10 であること。
- ・開放度(半径 15km 円内で対象地点より標高が 200m 以上高い範囲を除く角度)が 240° ～360° であること。

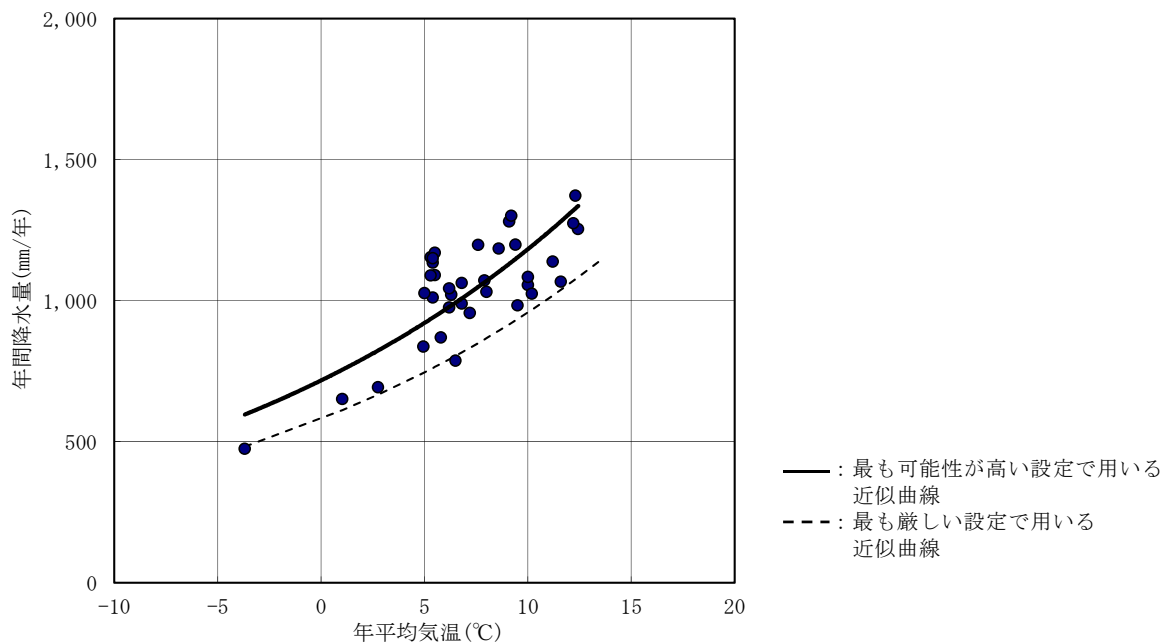
上記条件で抽出された地点のうち、過去 30 年以上の気象データの存在する 36 地点の年平均気温と年降水量を整理し(第 2 表参照)、36 地点の気温と降水量の関係(第 6 図参照)を指数回帰式で表した。将来の降水量は、年平均気温と年降水量との関係から求めるため、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースは同様の指数回帰式で設定する。

最も可能性が高い設定においては、この指数回帰式を用いて降水量を設定し、最も厳しい設定においては、気温と降水量の関係のばらつきを考慮し、交換水量が少なくなるように、気温と降水量の下限値の指数回帰式を用いて設定する(第 3 表参照)。

第2表 敷地周辺と類似する気候因子をもつ地点の年平均気温と年降水量

No.	地点名	国名	年平均気温(°C)	年降水量(mm/y)
1	OKHOTSK	RUSSIAN FED.	-3.7	475
2	VLADIVOSTOK	RUSSIAN FED.	5.0	837
3	ALEKSANDROVSK-SAKHALINSKII	RUSSIAN FED.	1.0	651
4	NIKOL' SKOJE (OSTROV BERINGA)	RUSSIAN FED.	2.8	693
5	稚内	JAPAN	6.8	1,063
6	網走	JAPAN	6.5	788
7	別海	JAPAN	5.4	1,135
8	根室	JAPAN	6.3	1,021
9	厚床	JAPAN	5.3	1,154
10	榑町	JAPAN	5.4	1,011
11	太田	JAPAN	5.5	1,170
12	白糠	JAPAN	5.5	1,090
13	釧路	JAPAN	6.2	1,043
14	池田	JAPAN	5.8	870
15	浦幌	JAPAN	6.2	976
16	糠内	JAPAN	5.0	1,026
17	大津	JAPAN	5.3	1,090
18	大樹	JAPAN	5.4	1,150
19	苫小牧	JAPAN	7.6	1,198
20	鶴川	JAPAN	6.8	989
21	室蘭	JAPAN	8.6	1,185
22	日高門別	JAPAN	7.2	956
23	静内	JAPAN	8.0	1,032
24	浦河	JAPAN	7.9	1,072
25	小田野沢	JAPAN	9.1	1,281
26	三沢	JAPAN	10.0	1,056
27	十和田	JAPAN	9.5	983
28	八戸	JAPAN	10.2	1,025
29	三戸	JAPAN	10.0	1,084
30	種市	JAPAN	9.4	1,198
31	鹿島台	JAPAN	11.2	1,138
32	石巻	JAPAN	11.6	1,067
33	仙台	JAPAN	12.4	1,254
34	亶理	JAPAN	12.2	1,274
35	相馬	JAPAN	12.3	1,373
36	六ヶ所	JAPAN	9.2	1,301

注1：気温及び年降水量は気象庁の発表⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾に基づき作成。



注 1 : 36 地点の年降水量及び年平均気温は、気象庁のデータ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を使用した。

第 6 図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の年平均気温と年間降水量の関係

第 3 表 将来想定される気温、降水量、蒸発散量及び表流水流量

ケース	モデル化時期	気温(°C)	降水量 (mm/y)	蒸発散量 (mm/y)	表流水流量 (m ³)
最も可能性が高い設定	現在 ^{*1}	9	1,120	580	1.3×10 ⁷
	1,000 年後	8	1,070	560	1.2×10 ⁷
最も厳しい設定	現在 ^{*1}	9	910	580	8.0×10 ⁶
	1,000 年後	8	860	560	7.2×10 ⁶

*1 : 覆土完了時期までを表す(第 4 表も同様)。

(二) 海水準変動

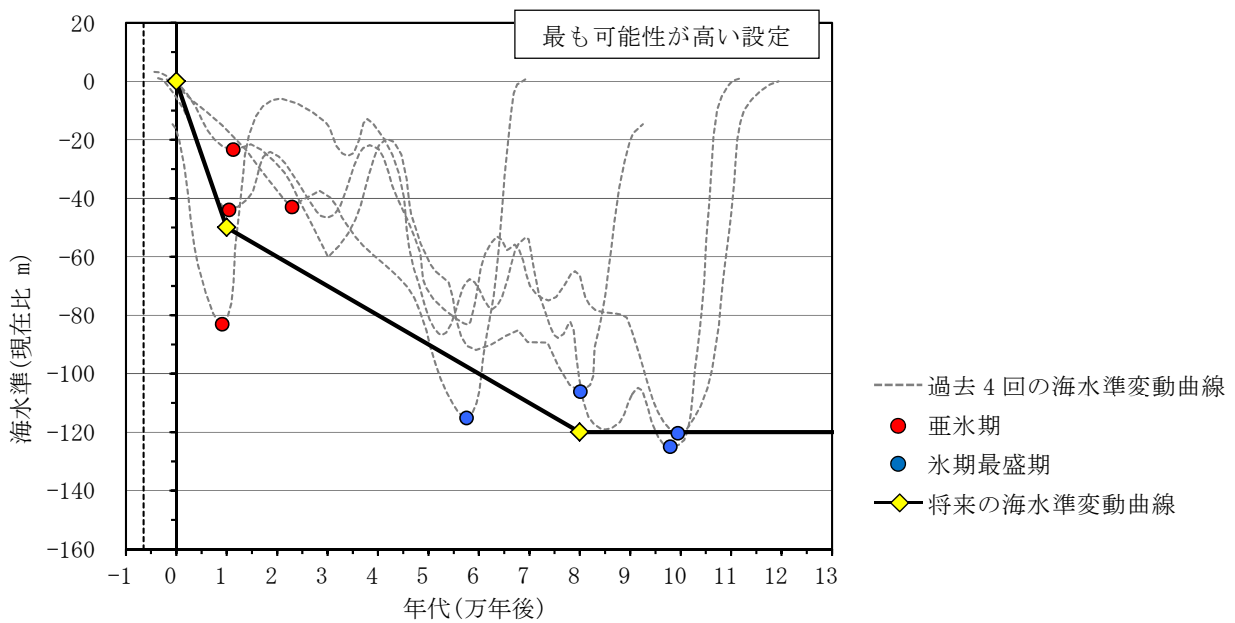
海水準変動は、廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、海水準変動が生

じると、敷地及びその周辺における河川、湖沼及び海の分布域が変化し、将来の人の生活環境及び生活様式に影響を及ぼすことが想定される。また、海水準変動及びそれに伴う地形変化並びに地下水位及び地表水流动の変化が想定されるため、海水準変動を長期変動事象として考慮し、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける海水準の変動時期及び変動量を設定する。交換水量に用いる流域面積は、海水準が低下した方が交換水量が少なくなるため、寒冷化ケースの方が保守的となる。

(ア) 寒冷化ケースにおける海水準の設定

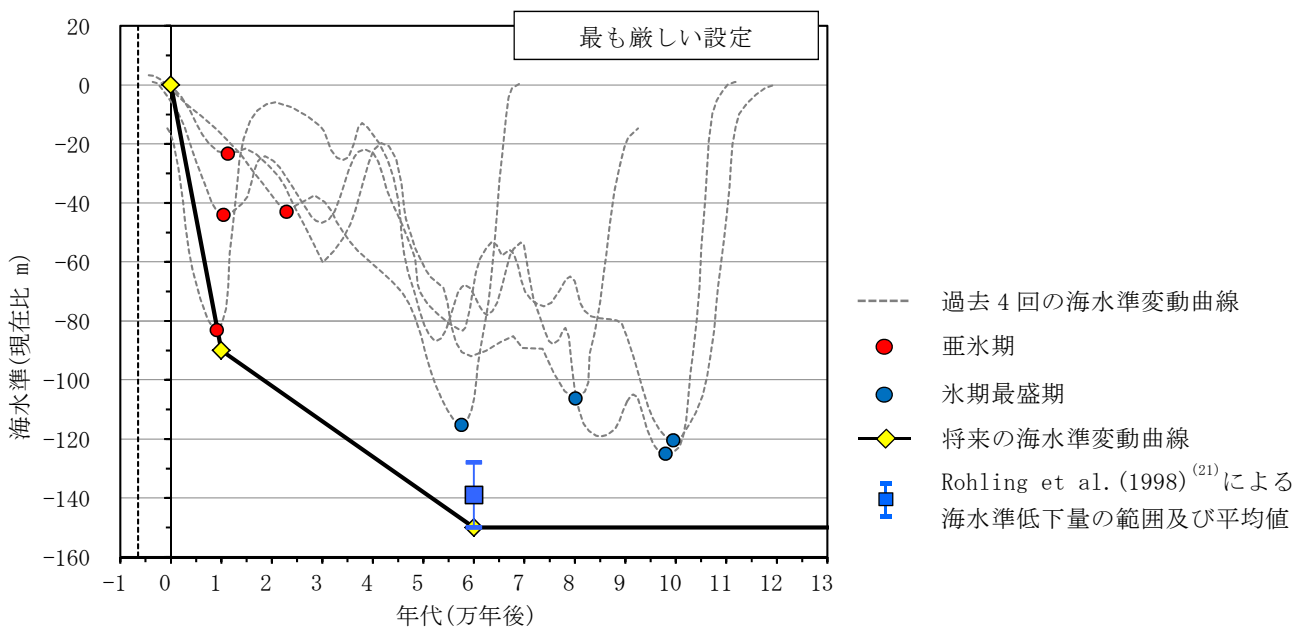
世界的な海水準変動は、気候変動に伴う大陸氷床の拡大・縮小に伴って生じる現象と考えられており、過去の海水準変動は気候変動と同様に、約8万年周期から約12万年周期で低海水準期と高海水準期を繰り返している⁽²⁰⁾。

したがって、海水準変動の長期変動状態の設定のうち、寒冷化ケースにおける将来の氷期最盛期に至るまでの海水準変動は、気温変動と同様に、過去約45万年間の低海水準期と高海水準期の平均値及び変動幅⁽²⁰⁾を考慮して設定する。第7図に将来の海水準の変動曲線(最も可能性が高い設定)及び将来の海水準の変動曲線(最も厳しい設定)を示す。



注1：海水準変動曲線は L.Labeyrie et al(2003)⁽²⁰⁾に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第7図 将来の海水準の変動曲線(1/2)



注1：海水準変動曲線は L.Labeyrie et al(2003)⁽²⁰⁾に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第7図 将来の海水準の変動曲線(2/2)

(イ) 温暖期継続ケースにおける海水準の設定

過去 300 万年間の温暖期における海面水位は、世界平均で現在より 5m 上回っており、最終間氷期(約 12.9 万年前～約 11.6 万年前)のうち数千年にわたっては、現在より海面水位が 5m より高く、10m 以上は高くなかったという報告⁽²²⁾がある。この結果を参考に、温暖期継続ケースにおける海水準変動は、不確かさを考慮して現在の海水準より 10m 海水準が上昇し、継続すると設定する。

なお、温暖期継続ケースにおける海水準の設定に当たっては、最も可能性が高い設定において不確かさを考慮していることから、最も可能性が高い設定と最も厳しい設定は同様に、現在の海水準より 10m 海水準が上昇し、継続すると設定する。

(c) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象

プレート運動と気候変動の両者に起因する事象は、「地形変化」、「地下水流動」及び「表流水流動」を対象とする⁽⁴⁾。気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定と同様に、寒冷化ケースと温暖期継続ケースの 2 ケースについて、それぞれ「地形変化」、「地下水流動」及び「表流水流動」を長期変動事象として考慮する。

(一) 地形変化

「(a) プレート運動に起因する事象 (三) 隆起・沈降運動」及び「(b) 気候変動に起因する事象 (二) 海水準変動」に伴い、侵食作用が継続することによる廃棄物埋設地の侵食に伴う埋設設備の地表接近及び露呈並びに放射性物質を含んだ土砂の下流域への堆積が想定される。そのた侵食作用が継続することによる廃棄物埋設地の侵食に伴う埋設設備の地表接近及び露呈並びに放射性物質を含んだ土砂の下流域への堆積が想定される。そのため、地形変化を長期変動事象として考慮し、侵食速度を設定する。

地形変化は、湖沼の河川化及び沿岸流や河川等による侵食がある。

侵食は、沿岸部における沿岸流と波浪等による侵食(以下「海食」という。)と、河川及び沢部における表流水による侵食(以下「河食」という。)が想定される。

敷地東方の沿岸部汀線付近では海食が生じているが、廃棄物埋設地は現在の汀線から内陸に約 3km 離れており、十分な離隔がある。仮に温暖期の海進により尾

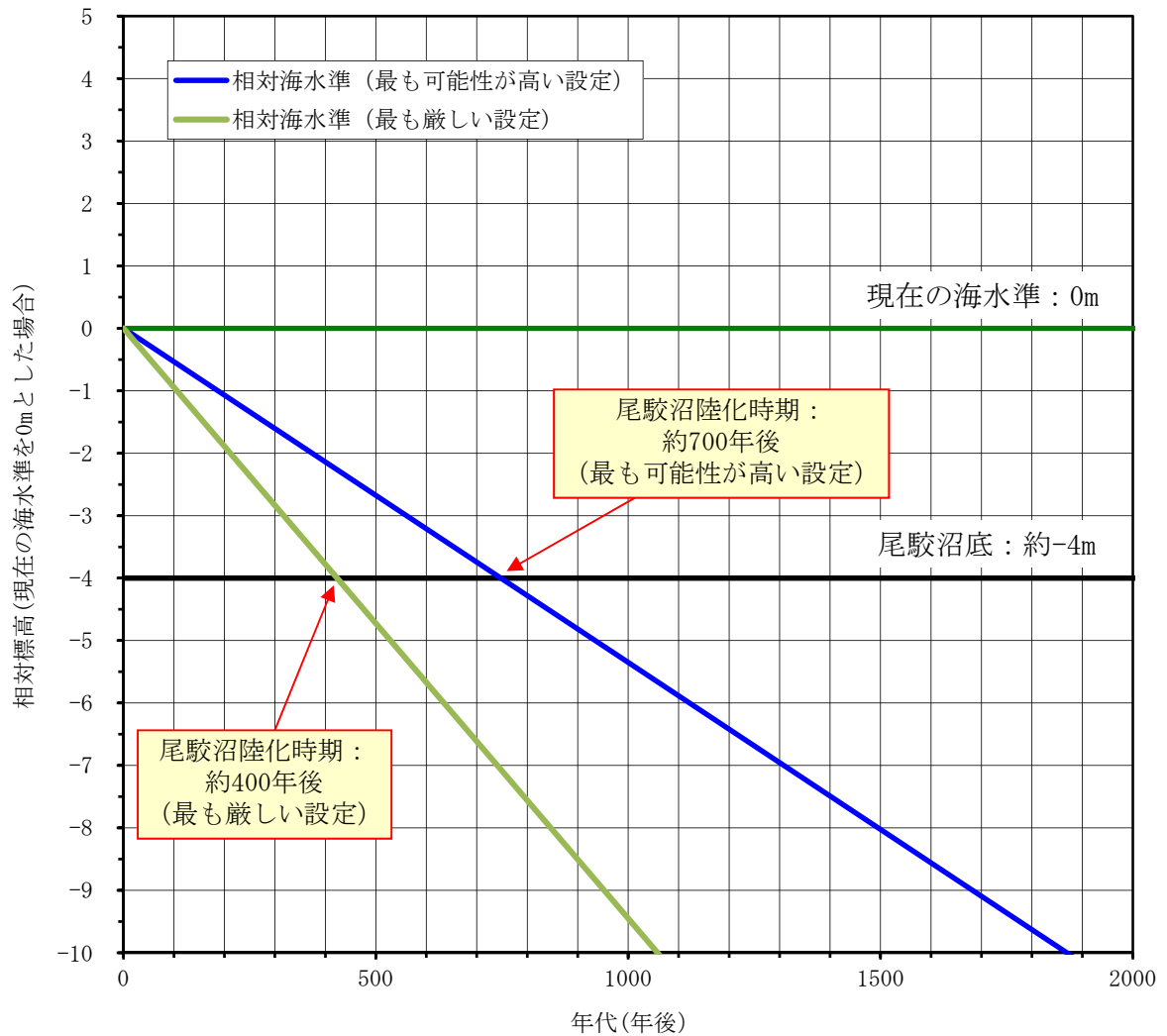
駁沼が内湾となっても、海食による影響は生じないものと考えられる。

敷地及び敷地近傍の沢部においては第四紀層及び基盤である岩盤(鷹架層)が削剥されており、河食が生じていると考えられる。廃棄物埋設地付近は二又川の流域であることから、二又川及び敷地から二又川に流れ込む沢による河食を考慮する。

なお、敷地及び敷地近傍における台地と河川及び沢との位置関係等の大局的な地形状況は、数万年程度の将来において大きく変化することはないと、流域ごとの沢の縦断勾配及び横断形状を保持して河食が進むと想定する。

また、湖沼の河川化としては、相対海水準の低下に伴い、尾駁沼が河川化すると考えられる(第8図及び第9図参照)。

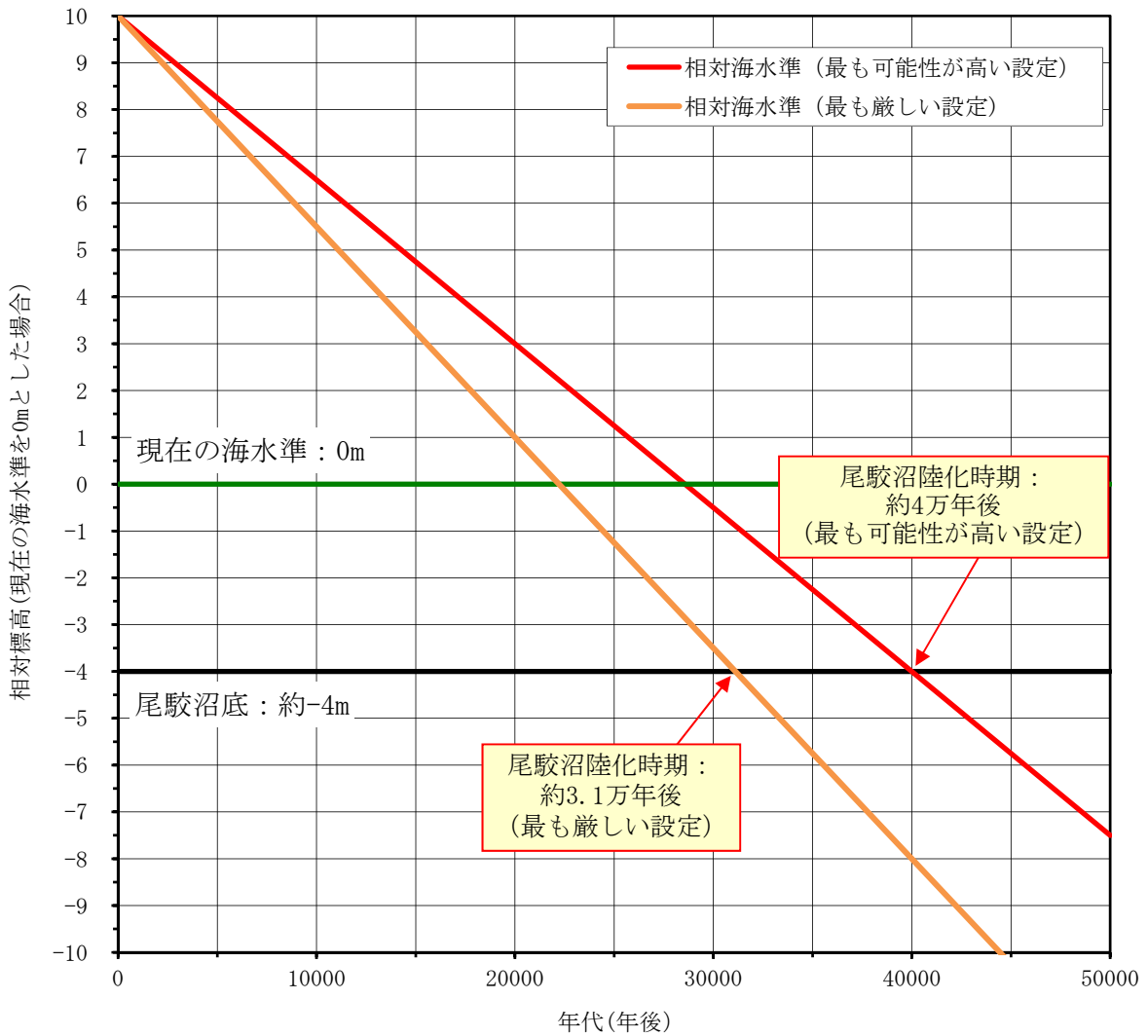
地形変化は、温暖期継続ケースの方が侵食速度が速く保守的となるため、以下に示す寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの検討結果に基づいて、保守的となる温暖期継続ケースの状態を設定する。



注1：尾駁沼底の標高は、国土地理院発行2万5千分の1地形図「戸鎖」を参照。

第8図 寒冷化ケースにおける尾駁沼の河川化時期の予測

(最も可能性が高い設定・最も厳しい設定)



注1：尾駁沼底の標高は、国土地理院発行2万5千分の1地形図「戸鎖」を参照。

第9図 温暖期継続ケースにおける尾駁沼の河川化時期の予測
(最も可能性が高い設定・最も厳しい設定)

(7) 侵食速度

寒冷化ケースでは、沖積層の基底面の勾配を保ち、敷地の隆起に伴う相対海水準の低下による下方への侵食(以下「下刻」という。)が生じると想定する。したがって、寒冷化の当初は勾配の緩い下流部に堆積した沖積層の上限面から下刻することとなり、沖積層の下刻後は河床勾配と海退量との関係から下刻量が求められる。沖積層の下刻に数万年を要し、それまでの期間、岩盤(鷹架層)

の下刻は発生しない。

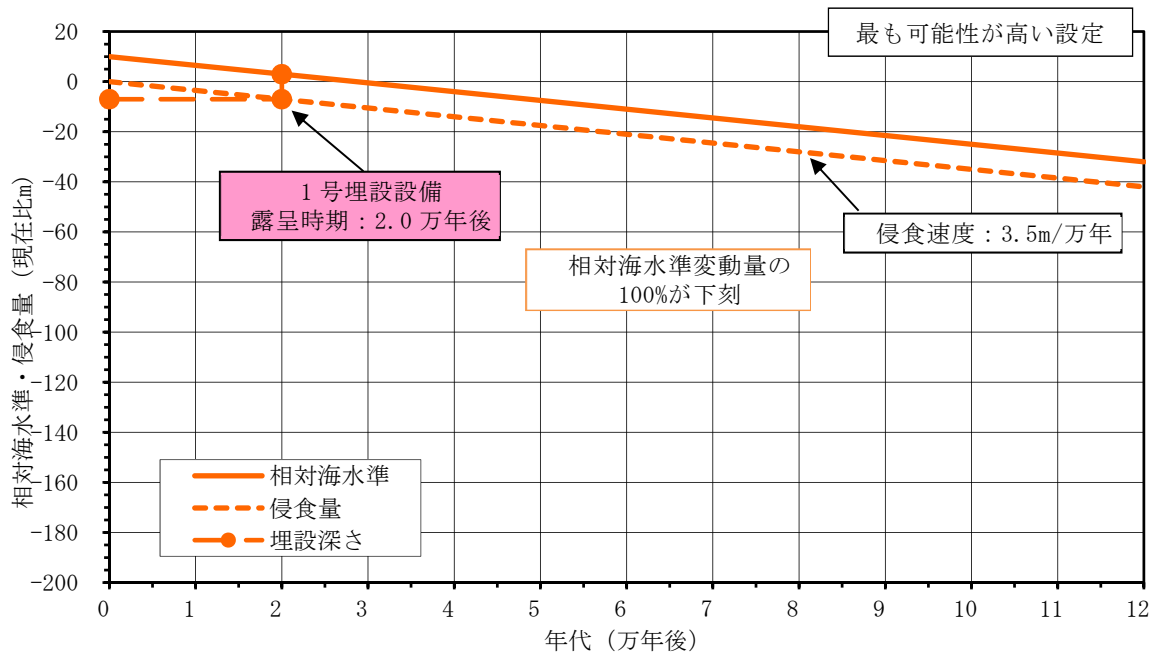
温暖期継続ケースでは、現在の河床勾配を保ち、相対海水準低下に伴った下刻が生じると想定する。ここでいう温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度は、「(b) 気候変動に起因する事象 (二) 海水準変動」において、海水準変動を現在から将来にわたり、現在の海水準より一律で 10m 上昇すると設定したことから、「(a) プレート運動に起因する事象 (三) 隆起・沈降運動」で設定した隆起速度相当と設定する。

廃棄物埋設地周辺には、中央沢、南の沢、西の沢及びそれらの枝沢が分布する。枝沢は本流の沢に流れ込むことから、本流の沢との合流点が侵食基準面となる。枝沢の侵食基準面は、本流が侵食されることで低下するため、枝沢も本流の侵食速度と同等の速度で侵食される。したがって、枝沢における侵食速度は、本流の沢の寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの侵食速度と同じと設定する。

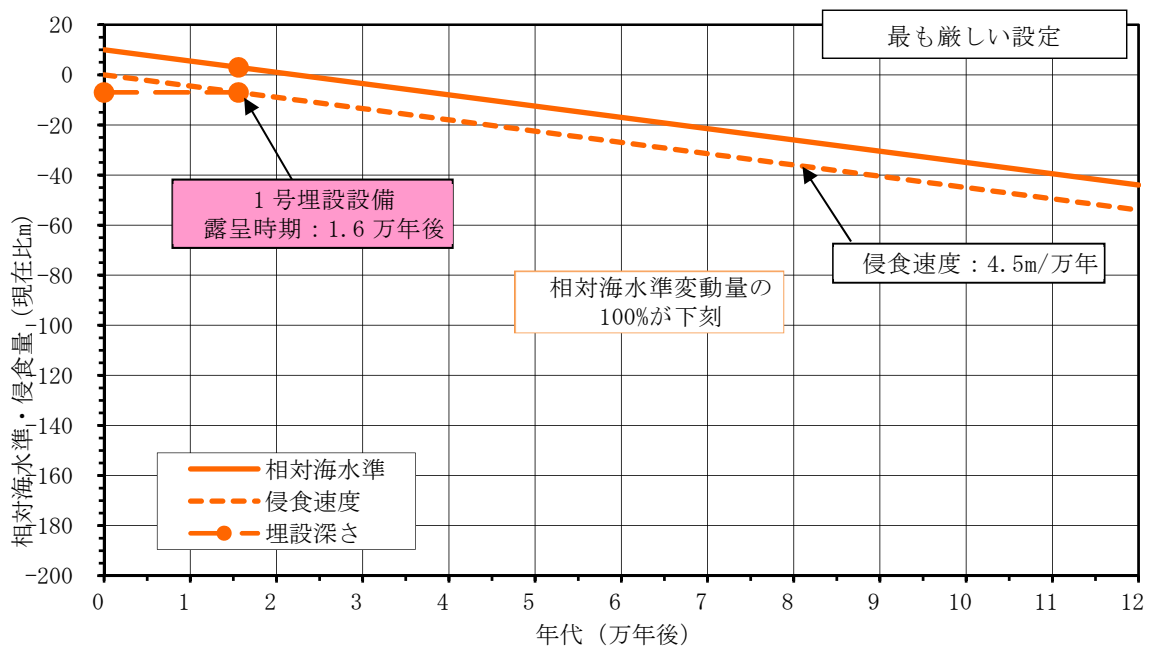
寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける侵食量を比較すると、寒冷化ケースは下流域の沖積層の侵食等により上流部の侵食が進行しないと設定していることから、温暖期継続ケースの方が侵食が早く進行する。

(イ) 露呈時期

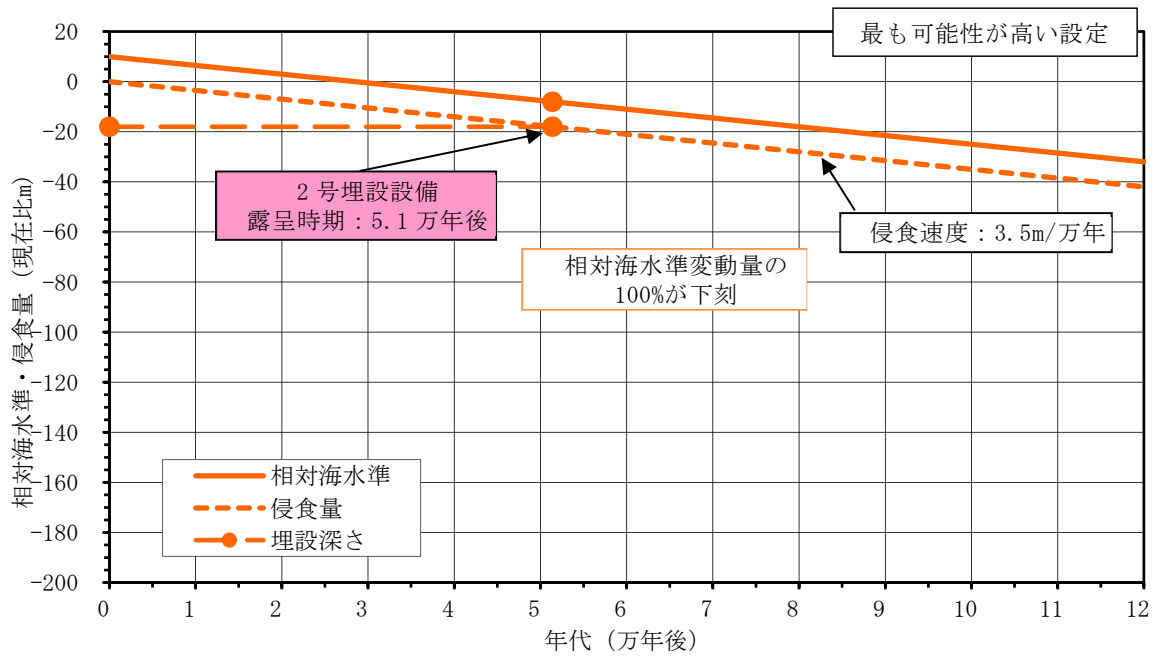
埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後(第 10 図参照)となるため、評価の対象とする期間を踏まえ、長期変動事象として影響を考慮しない。



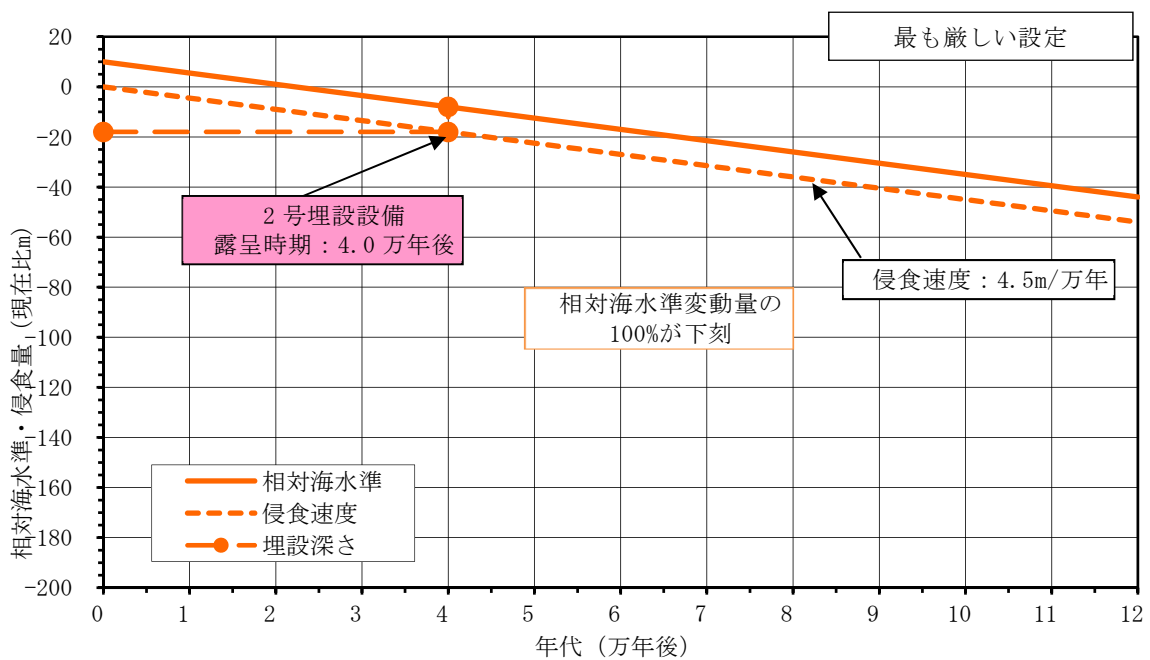
第10図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期 (1/6)



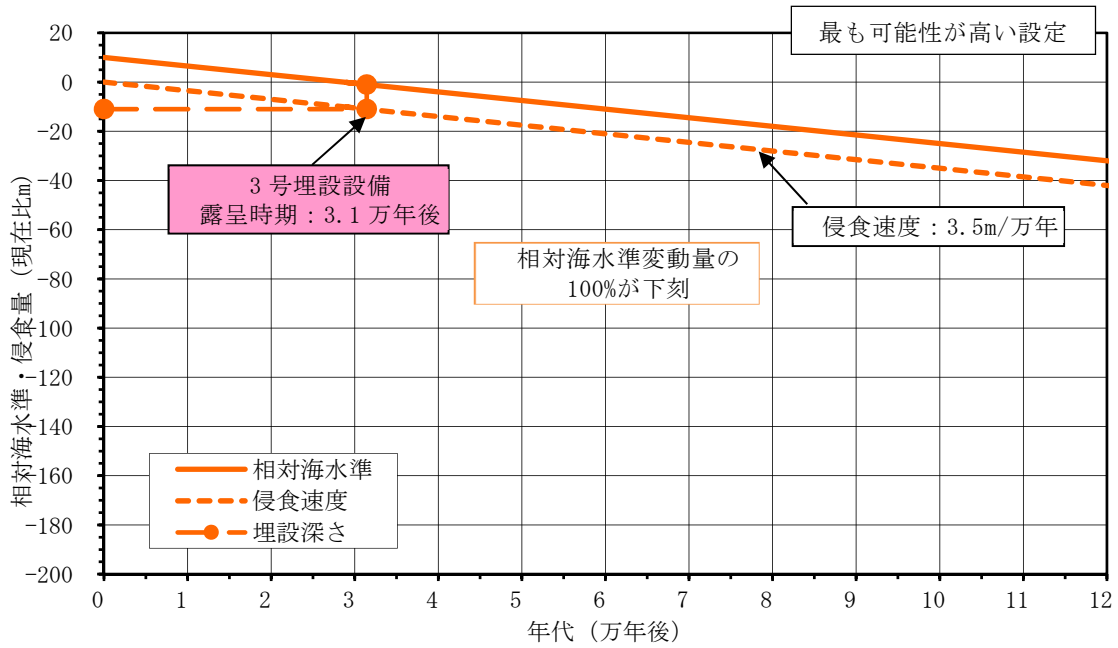
第10図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期 (2/6)



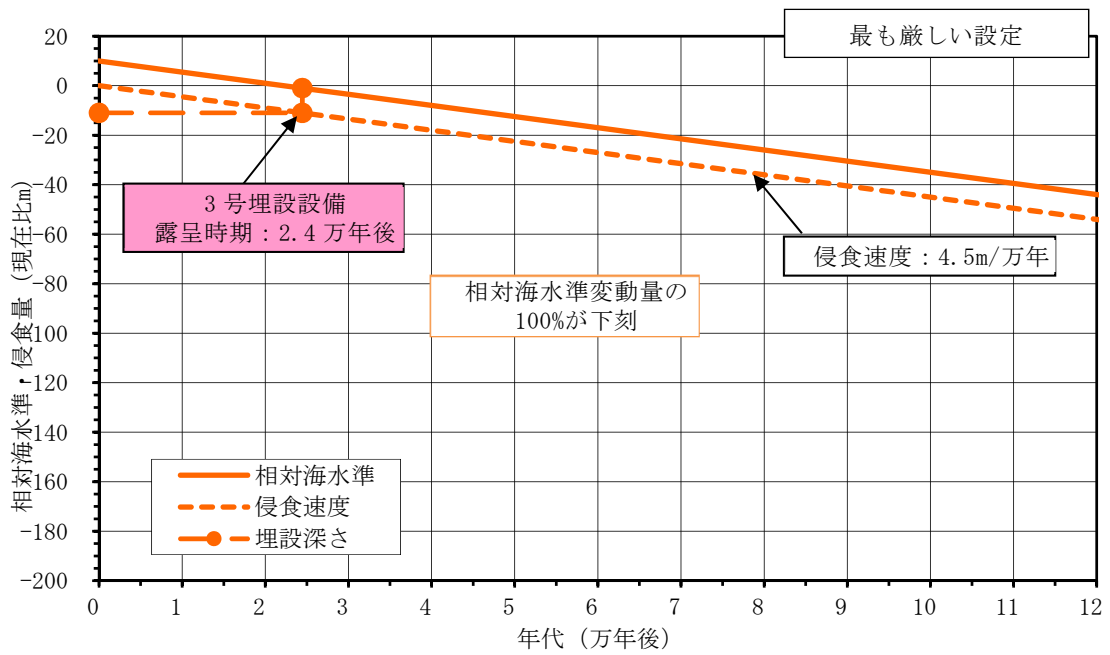
第10図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期 (3/6)



第10図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期 (4/6)



第10図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期 (5/6)



第10図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期 (6/6)

(二) 地下水流動

地下水流動は単独の事象として廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形変化や海水準変動による地下水流動の変化が、地下水の流動方向、地下水の流出点、地下水流速及び埋設設備から上部覆土や岩盤(鷹架層)への流出水量に影響する。

地下水流動は、侵食速度を考慮したときに1,000年後の将来の地形が現状とほぼ同様と考えられるため、寒冷化ケースと温暖期継続ケースは同様の設定とし、現在の状態を考慮する。

(ア) 地下水の流動方向及び地下水の流出点

敷地は北西から南東に緩く傾斜する台地からなり、地下水は主に降水によってかん養されている。また、台地の地下水面は降雨時及び融雪時に変動が認められるものの、主に表層に分布している第四紀層内にある。これは、岩盤(鷹架層)の透水係数が第四紀層より約2桁小さく、地表面から浸透した雨水が容易に岩盤(鷹架層)に浸透できないためと考えられる。埋設設備は岩盤(鷹架層)を掘り下げて設置し、難透水性覆土及び下部覆土は、岩盤(鷹架層)の透水係数以下となるように設置する。また、上部覆土は廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数程度となるように設置し、原地形及び原水理地質構造に近くなることから、覆土後の地下水面は、原地形と同様に廃棄物埋設地周辺の第四紀層内にあると考えられる。したがって、廃棄物埋設地付近を通過した地下水は、原地形の地下水面等高線から読み取れる地下水の流動方向と同様に、主に南に向かって流れ、中央沢を経て尾駁沼に流入するものとする。「(一) 地形変化」に示すとおり、1,000年後の将来の地形は現状とほぼ同様と考えられるため、将来においても廃棄物埋設地を通過した地下水は南に向かって流れ、中央沢を経て尾駁沼に流入するものとする。

(イ) 地下水流速

廃棄物埋設地付近の岩盤(鷹架層)及び上部覆土中の地下水流速は、その位置の動水勾配及び透水係数により設定する。

【動水勾配】

廃棄物埋設地付近の地下水流動は、「(ア) 地下水の流動方向及び地下水の流出点」に示すとおり、覆土後1,000年程度までの間は、原地形の地下水流動と

同様になると想定し、間隙水圧測定実施位置を通る鉛直断面内の全水頭等高線図から求めた埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配に基づき、最も可能性が高い設定では平均値、最も厳しい設定では最大値を用いて設定する(第4表参照)。

【透水係数】

地盤の透水係数は、廃棄物埋設地を設置する地盤のN値が50以上の岩盤であること、天然バリアを著しく損傷する事象は想定されないことから、将来においても大きく変化する要因がない。

(ウ) 埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出水量

埋設設備から上部覆土や岩盤(鷹架層)への流出水量は、地下水浸透流解析により計算する。浸透流解析には、覆土や地盤の透水係数及び境界条件として動水勾配を用いる。

動水勾配は、「(イ) 地下水流速」に示す値とする(第4表参照)。

第4表 将来の動水勾配

廃棄物埋設地	ケース	モデル化時期	動水勾配(%)
1号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	現在～	3.5
	最も厳しい設定	1,000年後	5.0
2号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	現在～	5.5
	最も厳しい設定	1,000年後	5.5
3号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	現在～	5.0
	最も厳しい設定	1,000年後	8.0

(三) 表流水流動

表流水流動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、河川及び湖沼の表流水流量の変化によって放射性物質の希釈に寄与する交換水量が変化することが想定される。よって、地表水流動を長期変動事象として考慮し、河川及び湖沼の表流水流量を設定するために、蒸発散量を設定する。

蒸発散量は、年平均気温を用いて可能蒸発散量として推定するソーンズウェイ

ト法⁽²³⁾により求める(第5表)。

一方、地下水は主に降水によってかん養され、第四紀層及び岩盤(鷹架層)表層部の風化部を流れ、中央沢を経て尾駸沼に流出している。そのため、敷地内の沢の流域面積における降水量から、その沢を流れる表流水流量を差し引いたものが、蒸発散量に相当する。降水量及び敷地内の表流水流量の観測結果(第11図参照)に基づく河川流出高を用いて求めた実蒸発散量を第5表に示す。実蒸発散量の平均に対する可能蒸発散量の平均の比率は0.95である。

将来の蒸発散量は、「(b) 気候変動に起因する事象 (一) 気温・降水量変化」に示す敷地周辺と気候因子が類似した36地点の年平均気温から可能蒸発散量を計算し、実蒸発散量と可能蒸発散量の比0.95を用いて、36地点の年平均気温と蒸発散量の関係を得た(第12図参照)。将来の蒸発散量は、この関係式から、最も可能性が高い設定又は最も厳しい設定の気温を用いて設定する。設定した将来の蒸発散量を第3表に示す。

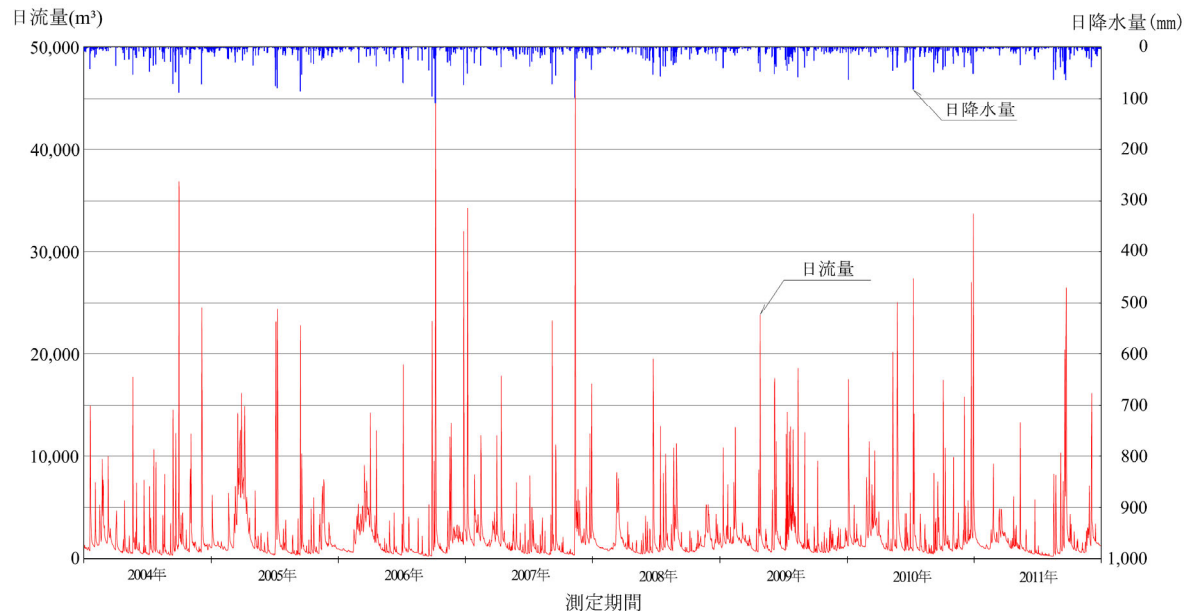
蒸発散量は、気温及び降水量と同様に、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースについて検討した上で、交換水量が少なくなるように寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第5表 ソーンズウェイト法により求めた可能蒸発散量と

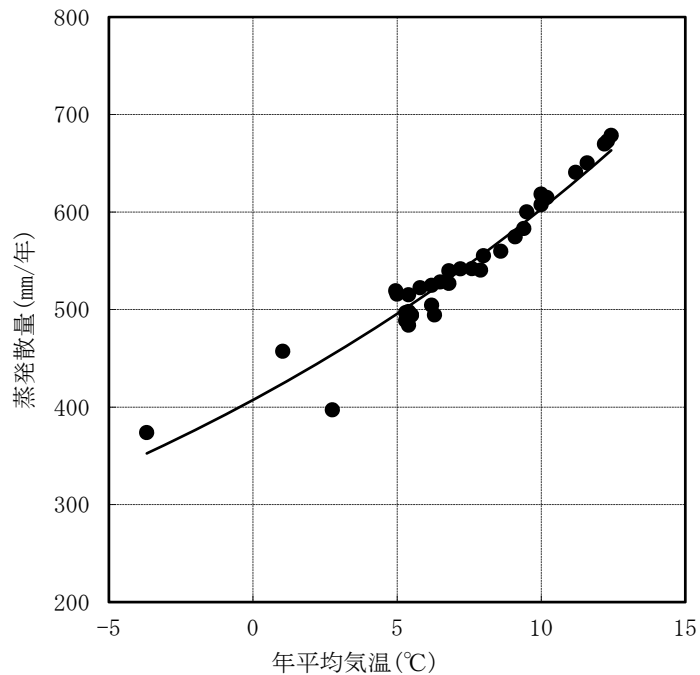
観測から求められた実蒸発散量(2004年～2011年)

観測年	気温 (°C)	年降水量 (mm/y)	①可能蒸発散量 [ソーンズウェイト 法] (mm/y)	河川流出高 (mm/y)	②実蒸発散量 [水収支式] (mm/y)	補正係数 ②÷①
2004年	10.1	1,546	640	784	762	1.19
2005年	8.7	1,468	601	930	538	0.89
2006年	8.9	1,380	603	843	537	0.89
2007年	9.8	1,565	624	884	681	1.09
2008年	9.4	1,198	620	706	492	0.79
2009年	9.4	1,507	614	869	638	1.04
2010年	9.8	1,437	637	999	438	0.69
2011年	9.4	1,366	624	724	642	1.03
平均	9.4	1,433	620	842	591	0.95

注1：気温及び年降水量は気象庁の発表⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾に基づき作成。



第11図 敷地内の表流水流量の観測結果(2004年～2011年)



注1：36地点の年平均気温は、気象庁のデータ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を使用した。

第12図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と蒸発散量の関係

(d) その他の事象

(一) 生物学的事象

敷地内における樹木の根に関する調査結果から、樹木の根の深さは最大で2.3mである。

モグラ類による覆土の擾乱が想定されるが、地表から1m未満である場合が多く⁽²⁴⁾、樹木の根の影響範囲に包含される。

以上より、廃棄物埋設地には十分な厚さの覆土を設置することから、生物学的事象による影響はなく、長期変動事象として考慮しない。

(二) 透水性の変化

岩盤の透水性は、「(a) プレート運動に起因する事象 (二) 地震・断層活動」に示すように、敷地内に将来活動する断層が認められないことから、断層運動による岩盤の破碎はなく、地震による透水性の変化もないため、長期変動事象として考慮しない。

b. 廃棄物埋設地の状態設定^{(4)(25)~(27)}

放射性物質の生活環境への移行を考慮する際の廃棄物埋設地の状態設定を行うバリア機能は、廃棄物埋設地からの影響を受ける周辺岩盤も含めることとし、廃棄物埋設地及び周辺岩盤の低透水性と収着性とする(第6表参照)。

廃棄物埋設地の状態設定は、覆土完了時点を初期状態とし、長期の状態については、廃棄物埋設地の移行抑制機能に係る特性に影響を与える事象を抽出し、それら影響事象を考慮して行う。

状態設定においては、移行抑制機能を期待するベントナイトを混合する覆土(難透水性覆土、下部覆土)及び岩盤(鷹架層)の低透水性並びにセメント系材料(廃棄体の固型化材及び埋設設備)、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性に着目する。

なお、覆土の遮蔽機能は、覆土が侵食されて遮蔽厚さが薄くなる時期は数万年後であり、その時点では遮蔽機能を必要としないことから、覆土の長期的な遮蔽機能の状態は変わらないものとする。

第6表 各構成部材に期待する機能

構成部材	移行抑制機能	移行抑制機能の内容
難透水性覆土、下部覆土*1	低透水性	ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土及び下部覆土に対して低透水性を期待することにより、廃棄物埋設地の通過流量(埋設設備への浸入水量並びに埋設設備上部及び生活環境への地下水の流出)を低減させる。
岩盤(鷹架層)		岩盤(鷹架層)の低透水性によって、廃棄物埋設地への地下水浸入量の低減を期待するとともに、生活環境までの移行遅延を期待する。
セメント系材料(廃棄体固型化材、埋設設備)	収着性	セメント系材料、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性を期待することにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えい量を低減し、移行を遅延させる。 基本的に収着性が大きい方が移行抑制効果は大きい。土地(土壌)の利用が想定される場合は、上部覆土の収着性が小さい方が線量低減に寄与する。
難透水性覆土		
上部覆土		
岩盤(鷹架層)		

*1: 下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

(a) 着目する移行抑制機能に関連する物理的・化学的性質

廃棄物埋設地の低透水性は、主に廃棄体の固型化材、埋設設備、難透水性覆土、下部覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)のそれぞれの間隙率、密度並びにひび割れの有無に対する物理的性質及び力学条件に依存する。

また、廃棄物埋設地の収着性は、主に廃棄体、埋設設備、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の鉱物組成並びにそれぞれの間隙水の水質に対する化学的性質及び化学条件に依存する。

(b) 影響事象の抽出・分析(熱-水理-力学-化学)

低透水性及び収着性に影響する事象を把握するため、各部材相互の影響事象を体系的に抽出・分析する。抽出・分析に当たっては、各部材相互の影響事象を熱、水理、力学及び化学の観点で整理する。影響事象については、OECD/NEA⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾、廃棄物安全小委員会報告書⁽³⁰⁾及びIAEA-ISAM⁽³¹⁾のFEP(Feature、Event、Process)を参考に、廃棄物埋設地の特徴及び「a. 地質環境等の状態設定」で設定した長期変動事象を考慮する。

影響事象分析の結果は、以下に示すとおりである。

(一) 熱

低透水性及び収着性に与える熱的影響事象としては、放射性物質の崩壊熱、セメント系材料の水和熱及び気温変化による地表環境の温度変化があげられる⁽²⁵⁾。これらの事象によって、難透水性覆土及び埋設設備を構成するセメント系材料の熱変質が生じ、それぞれの鉱物組成及び密度が変化することにより、難透水性覆土の低透水性及びセメント系材料の収着性に影響を及ぼすことが考えられる。

(ア) 崩壊熱

廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊によって発生する崩壊熱は、埋設する廃棄体に含まれる放射性物質の量が少ないことから、各部材の熱変質が生じる温度^{(32)~(34)}より十分に小さい。そのため、崩壊熱は影響事象として考慮しない。

(イ) 水和熱

セメント系材料で構成される埋設設備は、外周仕切設備構築時と充填材充填時の水和反応に伴う熱により、部材自体の膨張変化による温度応力が発生する⁽³⁵⁾。しかし、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行は水和熱が低下した後の覆土完了後に生じること及びセメント系材料の収着性は水和後の特性に期待していることから、水和熱は影響事象として考慮しない。

(ウ) 気温変化

覆土及び岩盤(鷹架層)は、それ自体が発熱することはないが、地表環境の温度変化による影響を受けると考えられる。覆土前の埋設設備は年間の気温の変化の影響を直接受けるが、それによって熱変質が生じるほど温度が上昇しないと考えられる。また、覆土完了後の埋設設備は、地表から 20m 程度の深度に設置されることから、埋設設備の設置位置近傍で想定される温度変化は十分小さい。そのため、年間の気温の変化以上に廃棄物埋設地の温度が変化しないと考えられることから、気温変化は影響事象として考慮しない。

(二) 水理

低透水性及び収着性に与える水理的影響事象としては、地下水流動があげられる⁽²⁵⁾。この事象によって、難透水性覆土及び下部覆土の流出に伴い密度が変化し、これら部材の低透水性に影響が生じることが考えられる。

(ア) 地下水流動

一般にベントナイトは膨潤力が大きく、難透水性覆土及び下部覆土の砂粒子の間から膨出したベントナイトが周辺の地下水流動によって流出することが考えられる。しかし、廃棄物埋設地周辺の地下水流速は十分に小さいため、地下水流動による直接的な影響が生じないことから、地下水流動によるベントナイトの流出は影響事象として考慮しない。

(三) 力学

低透水性及び収着性に与える力学的影響事象としては、金属腐食による体積膨張、ガス発生、ベントナイトの膨潤圧及び地震があげられる⁽²⁵⁾。これらの事象によって、埋設設備、難透水性覆土及び下部覆土に変形・損傷又はひび割れが発生することにより、透水性に影響が生じることが考えられる。

(ア) 金属腐食による体積膨張

埋設設備内に含まれる金属の腐食による体積膨張に伴い、各部材が変形・損傷し、低透水性に影響することが考えられる。そのため、金属腐食による体積膨張を影響事象として考慮する。

(イ) ガス発生

埋設設備内に含まれる金属の腐食及び有機物の分解に伴い発生するガスによるガス圧・間隙水圧の上昇又はガスの移行により難透水性覆土及び下部覆土が変形・損傷し低透水性に影響することが考えられる。

埋設設備内におけるガスの発生源は、廃棄体中に含まれる金属又は有機物、廃棄体の容器及び埋設設備内の鉄筋であり、ガス発生量の大半を占めるガス発生源は、埋設設備内に存在する金属である。

ガス発生の影響については、埋設設備内に存在する金属量に加え塩影響を考慮しても、1号及び2号埋設設備の単位体積当たりのガス発生量が3号埋設設備と同等であることから、3号埋設設備のガス発生による影響評価を行うことにより代表する。

単位時間当たりのガス発生量が最も大きくなるのは、金属類廃棄体⁽³⁶⁾であり、文献⁽³⁷⁾によると、埋設設備1基から1年間に発生する標準状態(0°C、1atm)のガス発生量は、pH12.5～pH13.0及び水温15°C～45°Cの条件での腐食速度試験の結果に基づくと、最大で1,000m³(埋設設備1m³当たり0.064m³/y)と推定さ

れ、時間の経過とともに減少すると考えられる。

ベントナイト系材料中のガス移行メカニズムに関する藤山らの調査結果⁽³⁸⁾によれば、難透水性覆土の内側に蓄積したガスは、気液 2 相流、卓越流路の形成を伴うハイドロリックフラクチャリングのいずれか、又はこれらの両方が共存するガス移行メカニズムに従い、飽和した難透水性覆土中を移行し破過に至ると考えられており、廃棄物埋設地においてもこれらのガス移行メカニズムが共存する状態であると考えられる。

田中らが実施したベントナイト混合土のガス透気試験⁽³⁹⁾では、廃棄物埋設地で想定される上記のガス移行メカニズムによりガス破過が生じていると考えられるが、この試験ではガス破過前後の透水係数に変化は見られなかったことから、難透水性覆土の透水係数の変化は生じないと考えられる。

また、下部覆土については、難透水性覆土の外側にあり、施工時点において確保する透水係数が難透水性覆土よりも 2 桁程度大きいため、難透水性覆土に比べて容易に水及びガスが移行すると考えられる。このため、下部覆土の低透水性に対するガス破過の影響は、難透水性覆土に対するその影響に包含されるものとする。

以上より、ガス発生による難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に有意な影響は生じないことから、ガス発生は影響事象として考慮しない。

(ウ) ベントナイトの膨潤圧

ベントナイトを混合する難透水性覆土及び下部覆土は、地下水により飽和し膨潤することによる圧力(膨潤圧)が発生することに伴い、各部材が変形・損傷し、低透水性に影響することが考えられる。しかし、膨潤圧は周辺の地圧と比較して小さいため⁽⁴⁰⁾、ベントナイトの膨潤圧は影響事象として考慮しない。

(エ) 地震

過去及び現在の状況から、繰り返し地震が発生することが想定される。地震によって各部材が変形・損傷し、低透水性に影響すると考えられるため、地震による影響評価として、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に対する力学的影響について評価する。地震力の作用により覆土で発生が想定される事象として、力学的な変形及び液状化があげられる。

力学的な変形については、埋設設備は岩盤(鷹架層)に直接支持されており、

内部空洞のない充填されたコンクリート構造物であることから、地震動による構造物の変形は限定的であり、周辺覆土へ与える変形量は小さい。覆土自体においても、地すべりといった大変形を引き起こす斜面地盤ではなく水平地盤であり、周囲を堅固な岩盤(鷹架層)に囲まれ変形抑制されていることから、地震における変形量は小さい。よって、覆土の変形量が「(d) 各物理的・化学的性質の長期的な状態変化の評価 (一) 金属腐食による体積膨張及び塩影響」に示す金属腐食に伴う埋設設備の変形量と比較して非常に小さいと想定されることから、金属腐食の評価に包含される。

液状化については、過去の液状化対策事例として、平成 19 年新潟県中越沖地震がある。施工管理値として締固め度 90%以上を設定し、砂及び砂質土からなる埋戻し土を用いた締固めによる対策を実施した箇所では、震度 6 弱の揺れが発生しているものの、液状化は生じていないと報告されている⁽⁴¹⁾。

廃棄物埋設地においても、覆土施工における管理値を上記の液状化対策事例と同等以上に設定する。また、覆土は、現地発生土、購入砂、ベントナイト及び礫を仕様に応じて混合した混合土である。覆土は、文献⁽⁴²⁾に例示されるような購入砂と異なる粒径分布を持つ材料を混合して製造することから、一般に液状化しやすいと知られている「砂分を多く含む、集中粒径の土」ではない。つまり、上記の液状化対策事例において液状化をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土⁽⁴¹⁾と比較して、覆土は、液状化抵抗性に関連する締固め性能が良いとされている「粒径幅が広い土」であるため、相対的に液状化し難い材料であると考えられる。

また、廃棄物埋設地で発生すると考えられる地震は、「a. 地質環境等の状態設定 (a) (二) (7) 地震」より震度 5 強を超えない。これは、過去事例における締固めによる対策を実施したことで液状化が発生しなかった箇所で発生した地震よりも小さい。

以上より、適切な施工管理及び材料を選定することで、地震によって難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に有意な影響は生じないことから、地震は影響事象として考慮しない。

(四) 化学

低透水性及び収着性に与える化学的影響事象としては、地下水との反応、化学

的変質、金属腐食、セメント系材料の溶脱、有機物影響、塩影響、コロイド影響、微生物影響及び降下火砕物があげられる⁽²⁵⁾。これらの事象によって、各部材の鉱物組成及び間隙水の水質が変化し、低透水性及び収着性に影響することが考えられる。

(ア) 地下水との反応(化学的変質、セメント系材料の溶脱を含む)

地下水が埋設設備を通過することにより、セメント系材料のカルシウム成分等の溶脱が発生し、鉱物組成及び間隙水の水質の変化が生じる。また、セメント成分が溶解した間隙水と覆土及び岩盤(鷹架層)が反応⁽³⁴⁾⁽⁴³⁾し、覆土及び岩盤(鷹架層)の鉱物の溶解並びに二次鉱物が生成することにより、低透水性及び収着性に影響することが考えられる。そのため、地下水との反応を影響事象として考慮する。

(イ) 金属腐食

埋設設備内に含まれる金属が腐食することによって、地下水に含まれる溶存酸素が消費され、酸化還元環境が変化し⁽⁴⁴⁾、収着性に影響することが考えられる。そのため、金属腐食を影響事象として考慮する。

(ウ) 有機物影響

埋設設備内に含まれる有機物のアルカリ分解反応により放射性物質を捕捉する分解物が生成することが考えられる。有機物及びその分解生成物が間隙水中に存在する場合には、放射性物質と錯体を形成し、収着性に影響することが考えられる。そのため、有機物の分解生成物を影響事象として考慮する。

(エ) 塩影響

均質・均一固化体のうち、セメント固化体中の硫酸塩及びほう酸塩並びにアスファルト固化体中のほう酸塩(以下「可溶性塩」という。)が地下水中に溶解することによって、間隙水の水質の変化が生じる。さらに、塩が溶解した間隙水とセメント、覆土及び岩盤(鷹架層)が反応⁽⁴⁵⁾し、覆土及び岩盤(鷹架層)の鉱物の溶解並びに二次鉱物の生成等により、これらの固相に変質が生じ、低透水性及び収着性に影響することが考えられる。

可溶性塩を含まない充填固化体を埋設する廃棄物埋設地については、塩影響を影響事象として考慮しない。均質・均一固化体を埋設する廃棄物埋設地については、可溶性塩の溶解による液性変化及び可溶性塩と各部材との反応を影響

事象として考慮する。

(イ) コロイド影響

各部材の間隙水中にコロイドが存在する場合には、コロイドに放射性物質が収着し、各部材への収着が阻害され、放射性物質の移行が促進されることが考えられる。

収着性に影響を与える可能性のあるコロイド影響については、埋設設備の間隙水はセメント平衡水であり、コロイドが安定に分散できる環境ではなく収着性に影響は生じないと考えられることから、コロイド影響は影響事象として考慮しない。

(ロ) 微生物影響

廃棄物埋設地近傍に存在する微生物の活動によって、岩盤(鷹架層)中では有機物が無機化し、収着性が低下することが考えられる。そのため、収着性の評価に当たっては微生物影響のうち有機物の無機化を影響事象として考慮する。

なお、有機物の分解によりガスが発生すること及び金属の腐食反応が促進されることが考えられる。しかし、微生物は高 pH 環境となる埋設設備内においてその活性は低く⁽⁴⁵⁾、このような活動で生じる化学環境の変化はその他の影響事象に包含されると考えられるため、これらの微生物影響は影響事象として考慮しない。

(ハ) 降下火砕物

降下火砕物が堆積すると、地下水の水質変化が生じ、鉍物の溶解及び二次鉍物の生成により低透水性及び収着性に影響すること並びに上部覆土については化学的変質の影響を直接受けることが考えられる。

しかし、降下火砕物による化学的な影響については、十分な厚さの上部覆土を設置するため、pH 変化等の化学的変化は上部覆土により緩衝される。よって、溶解・変質等の化学的影響は十分低減されることから、埋設設備、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性及び収着性への影響は無視できる。また、上部覆土に関しては、化学的影響を受ける範囲が表層に限定されることに加え、上部覆土の収着性に影響が生じても線量への感度が小さいことから、降下火砕物は影響事象として考慮しない。

(c) 廃棄物埋設地の初期状態の設定

線量の評価においては覆土完了時点を初期状態とし、各部材の初期状態は、第7表から第15表に示す廃棄体及び廃棄物埋設地の寸法、材料等の仕様、性状に基づき、各状態設定の評価においてそれぞれ設定する。状態設定の評価に用いる埋設設備及び覆土の材料仕様は、設計において期待する性能を満たすことができる候補材料から設定する。施工時点において材料仕様が変更になることも予想されるが、期待性能を満たす材料を適切に設定する。

第7表 埋設する廃棄体の仕様

廃棄物埋設地	3号	1号		2号
種類	充填固化体*1	均質・均一固化体	充填固化体*1	充填固化体*1
重量	1本当たり1,000kgを超えないもの	1本当たり500kgを超えないもの		1本当たり1,000kgを超えないもの
内容物	金属類、 プラスチック類、 保温材・フィルタ類	廃液、 使用済樹脂、 スラッジ、 焼却灰	金属類、 プラスチック類、 保温材・フィルタ類、 均質・均一固化体として製作したセメント固化体の破砕物	金属類、 プラスチック類、 保温材・フィルタ類
固化材	セメント*2	セメント*2、 アスファルト*3、 プラスチック*4	セメント*2	セメント*2
状態変化で考慮する内容物	有機物、金属類	塩類 (硫酸塩、ほう酸塩)	有機物、金属類、 塩類 (硫酸塩、ほう酸塩)	有機物、金属類

*1: 充填固化体の標準的な製作方法⁽³⁶⁾により製作。

*2: 「JIS R 5210(1992)」若しくは「JIS R 5211(1992)」に定めるセメント又はこれと同等以上の品質を有するセメント。

*3: 「JIS K 2207(1990)」に定める石油アスファルトで針入度が100以下のもの又はこれと同等以上の品質を有するアスファルト。

*4: スチレンに溶解した不飽和ポリエステル。

第8表 バリア機能への影響を評価する上で考慮する廃棄体の内容物

均質・均一固化体*1		
内容物	平均重量(kg/本) ^{*2}	備考
硫酸塩	約 21	硫酸塩は、主に BWR 廃棄体に含まれている (BWR 廃棄体 1 本当たり、約 15kg～約 120kg 含まれている)。
ほう素 (ほう酸塩)	約 3.0	ほう素(ほう酸塩)は、主に PWR 廃棄体に含まれている (PWR 廃棄体 1 本当たり、約 3.0kg～約 18kg 含まれている)。
充填固化体		
内容物	平均重量(kg/本) ^{*3}	備考
天然有機物	0.152 ^{*4}	分別除去後の調査結果。廃棄物重量当たりの含有率は 1.7g/kg。
アルミニウム	0.109 ^{*4}	分別除去後の調査結果。廃棄物重量当たりの含有率は 1.2g/kg。
金属類	301～305	対象廃棄物の種類のうち、金属を多く含むもので、鉄が大半を占める。

*1:均質・均一固化体として製作されたセメント固化体を破碎し、セメント系充填材で一体に固型化した充填固化体を含む。

*2:これまでの埋設実績から、炉型別の区別をせずに廃棄体 1 本あたりに含まれる平均重量を算定。

*3:充填固化体の標準的な製作方法⁽³⁶⁾に基づいて設定。

*4:代表的な固体状廃棄物(ドラム缶 154 本相当)の調査結果であるが、全体的にも同程度の量の内容物が含まれているものとして、平均値として設定した。

第9表 埋設設備の寸法*1

埋設設備		1号	1号	2号
埋設設備構成		8群×5基/群	8群×5基/群	8基
1基当たり の大きさ	奥行き(南北)	24.4m	36.91m	36.51m
	幅(東西)	24.4m	36m	64.1m
	高さ	6.2m	6.94m	6.66m*1
区画/基		16区画/基	36区画/基	66区画/基
部材厚さ	外周仕切設備(側壁)	50cm	60cm	60cm
	外周仕切設備(底版)	60cm	80cm	60cm
	内部仕切設備	40cm	40cm	40cm
	ポーラスコンクリート 層と廃棄体間の厚さ (セメント系充填材)	40cm	40cm	20cm
	覆い	50cm	50cm	30cm

*1: 勾配調整コン、ひび割れ対策に伴う覆い厚さ変更予定を含まないもの

第10表 コンクリートの配合(1/3)

1号廃棄物埋設地					
水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	結合材*1	混和材*2	細骨材*3	粗骨材
55	159	290	85	852	973
47	155	333	60	729	1019

*1: 普通ポルトランドセメント 45%及び高炉スラグ微粉末 55%の混合セメントとし、必要に応じて膨張材を置換する。また、施工時には所定のフレッシュ性状確保のため結合材料に比例して混和剤を添加する。

*2: 石灰石微粉末

*3: 陸砂と砕砂の混合品

第10表 コンクリートの配合(2/3)

2号廃棄物埋設地					
水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	結合材*1	混和材*2	細骨材*3	粗骨材
47	155	333	60	729	1019

*1: 中庸熱ポルトランドセメント 70%及びフライアッシュ 30%の混合セメントとし、必要に応じて膨張材を置換する。また、施工時には所定のフレッシュ性状確保のため結合材料に比例して混和剤を添加する。

*2: 石灰石微粉末

*3: 陸砂と砕砂の混合品

第 10 表 コンクリートの配合 (3/3)

3号廃棄物埋設地					
水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水	結合材*1	混和材*2	細骨材*3	粗骨材
47	155	333	60	729	1019

*1: 中庸熟ポルトランドセメント 70%及びフライアッシュ 30%の混合セメントとし、必要に応じて膨張材を置換する。また、施工時には所定のフレッシュ性状確保のため結合材料に比例して混和剤を添加する。

*2: 石灰石微粉末

*3: 陸砂と砕砂の混合品

第 11 表 難透水性覆土に用いるベントナイト混合土の仕様

項目	仕様	備考
ベントナイト混合率	30%*1	Ca 型ベントナイト
含水比	最適含水比+4%±2%	最適含水比+4%=19.6%

*1: Na 型ベントナイトの場合は 20%

第 12 表 難透水性覆土に用いるベントナイト混合土の主要材料

項目	仕様
Ca 型ベントナイト*1	MBC*2120 以上
コンクリート用細骨材	青森県三沢市砂森産

*1: 参考として Na 型ベントナイトも評価した

*2: メチレンブルー吸着量

第 13 表 廃棄物埋設地付近の土質特性(盛土及び第四紀層)

廃棄物埋設地	地 層	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	土粒子の密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)
1 号	盛 土	1.77	14.2	2.71	42.8
	火山灰層	1.68	47.3	2.69	56.8
	段丘堆積層	1.90	33.2	2.68	45.1
2 号	盛 土	1.74	40.1	2.68	53.1
	火山灰層	1.56	55.8	2.71	62.2
	段丘堆積層	1.85	28.7	2.69	46.0
3 号	盛 土	1.79	26.2	2.72	47.9
	火山灰層	1.54	58.1	2.68	62.7
	段丘堆積層	1.79	29.4	2.66	48.1

第 14 表 廃棄物埋設地付近の鷹架層の特性

廃棄物埋設地	区分		湿潤密度 (g/cm ³)		含水比 (%)		土粒子の密度 (g/cm ³)		間隙率 (%)		試料数 (個)
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
1 号	鷹架層中部層 軽石凝灰岩層		1.71	0.05	41.2	4.7	2.54	0.08	52.1	2.7	27
	鷹架層中部層 粗粒砂岩層		1.94	0.07	27.9	3.9	2.73	0.03	44.3	3.5	48
2 号	鷹架層中部層 軽石凝灰岩層		1.81	0.14	35.8	8.5	2.60	0.11	48.3	6.2	46
	鷹架層中部層 粗粒砂岩層		1.91	0.10	30.8	7.8	2.76	0.04	46.7	5.8	31
	鷹架層下部層 泥岩層		1.80	0.02	37.5	3.2	2.02	0.02	50.0	1.8	9
3 号	鷹架層 中部層	軽石 凝灰岩	1.59	0.03	52.1	4.4	2.39	0.01	56.1	2.1	39 (18) ^{*1}
	鷹架層 灰岩層	砂質軽石 凝灰岩	1.70	0.03	38.8	2.9	2.48	0.03	50.3	1.9	159 (76) ^{*1}

*1 : ()内の数字は土粒子の密度を測定した試料数を示す。

第 15 表 廃棄物埋設地付近の地下水の水質

項目	単位	測定結果
マグネシウムイオン	Mg ²⁺ mg/L	0.1~3.8
カルシウムイオン	Ca ²⁺ mg/L	0.1 未満~7.2
ナトリウムイオン	Na ⁺ mg/L	7.2~31.5
カリウムイオン	K ⁺ mg/L	0.5~5.6
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻ mg/L	1.0~21.7
炭酸水素イオン	HCO ₃ ⁻ mg/L	5.6~51.9
塩化物イオン	Cl ⁻ mg/L	12.9~20.3
溶存鉄	Fe mg/L	0.05 未満~21.0
pH	—	5.3~8.3
電気伝導度	mS/m	7.2~18.9

(d) 各物理的・化学的性質の長期的な状態変化の評価

「(b) 影響事象の抽出・分析(熱-水理-力学-化学)」に基づき、移行抑制機能を期待する難透水性覆土、下部覆土及び岩盤(鷹架層)の低透水性並びにセメント系材料(廃棄体の固化化材及び埋設設備)、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性に係る各物理的・化学的性質の長期的な変化を評価する。評価に当たっては、FEPにより抽出した影響事象ごとに適切に不確かさを考慮する。

(一) 金属腐食による体積膨張及び塩影響

低透水性を有する難透水性覆土及び下部覆土は金属腐食による体積膨張並びに可溶性塩の溶出による膨張及び陥没に伴う鉛直方向の変形に対して破断しないように配慮した厚さで設計しており、当該部位に破断が生じる可能性は低いものと考えられる。しかし、難透水性覆土の隅角部には、厚さの減少及び変形に伴う透水性が変化した領域の発生が予想される。そのため、長期状態においては、廃棄物埋設地に生じる現象の不確かさ及び金属廃棄物の多様性を考慮した埋設設備の変形量を設定し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性への力学的影響を評価する。

金属腐食による体積膨張及び塩影響に係る条件を第16表～第17表に示す。

金属の腐食は、金属と廃棄物埋設地の周辺環境(溶存酸素、酸化還元電位、pH及び水温)との相互作用(電気化学的腐食)により生じる。そのため、埋設設備中の環境条件、金属種類、腐食生成物、腐食膨張倍率及び腐食速度を設定し、状態設定を行う期間(1,000年)において埋設設備の膨張変形を想定する。最も可能性が高い状態設定では、埋設設備内の金属の腐食速度及び腐食生成物の熱力学的な安定性等を考慮し、最も厳しい設定では、金属の全量が瞬時に腐食し、腐食膨張倍率が大きい腐食生成物が生じるものと設定する。

1号廃棄物埋設地における可溶性塩の溶出に伴う埋設設備の膨張は、廃棄体の内容物(可溶性塩：硫酸塩及びほう酸塩)と埋設設備中のセメント系材料(充填材及びコンクリート)の反応により生じるため、埋設設備の体積の膨張倍率を設定し、埋設設備の膨張変形を想定する。

また、可溶性塩の溶出に伴う埋設設備の陥没は、廃棄体の内容物と地下水が反応すること及び廃棄体の上部空隙により生じるため、可溶性塩の溶出量及び廃棄体の上部空隙を設定し、埋設設備の陥没変形を想定する。

セメント固化体からの溶出量は、文献⁽⁴⁶⁾を参考に硫酸塩及びほう酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、全量溶出した状態を設定する。アスファルト固化体からの溶出量は、文献⁽⁴⁷⁾を参考にアスファルトの実態的な性能を考慮し、ほう酸塩の溶出量を設定する。

また、廃棄体の上部空隙については、覆土の低透水性への影響評価の観点から、均質・均一固化体の固型化条件の最大値である上部空隙 30%の体積分を用いる。

金属の腐食による体積膨張並びに可溶性塩の溶出による膨張及び陥没に起因する力学的影響評価においては、粒状体個別要素法(Distinct Element Method)解析を用いる。この結果に基づき、力学的変形により、最も可能性が高い状態としては、難透水性覆土及び下部覆土の密度は変化せず透水係数に変化は生じないものの、厚さが変化する状態を設定する(第 18 表参照)。また、最も厳しい状態としては、難透水性覆土及び下部覆土の密度は変化せず透水係数に変化は生じないものの、2 号及び 3 号廃棄物埋設地については開口が生じる状態、1 号廃棄物埋設地については開口が生じず、厚さが変化する状態を設定する(第 18 表参照)。

第 16 表 埋設設備中の環境条件及び金属種類による腐食生成物の設定

条件		設定	設定の考え方
ORP*1		【最も可能性が高い設定】 嫌氣的条件	【最も可能性が高い設定】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された溶存酸素濃度(0.2ppm未滿)及びORP*1(-100mV以下)を参考に設定する。
		【最も厳しい設定】 嫌氣的条件～好氣的条件	【最も厳しい設定】 埋設設備中の溶存酸素の移行経路によっては、廃棄体容器及び金属廃棄物に供給されることが考えられる。また、廃棄物埋設地周辺の地下水に含まれる溶存酸素の供給量の変動した場合を考慮し、嫌氣的条件～好氣的条件を考慮する。
pH		【最も可能性が高い設定】 セメント系材料に生じる一般的な現象を考慮し、高い pH を設定	【最も可能性が高い設定】 状態変化の評価期間において、セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することにより高い pH の状態(pH11以上)となることが考えられるため、これを考慮する。
		【最も厳しい設定】 上記に加え、セメント系材料から Na 及び K 成分が溶出した場合を考慮し、更に高い pH を設定	【最も厳しい設定】 セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することに加え、Na 及び K 成分が溶出した場合、pH が更に高い状態に推移する。金属腐食では、pH が変化した場合、腐食膨張倍率の異なる腐食生成物が生成され、金属の膨張量が増加する可能性があることから、これを考慮する。
水温		【共通】 廃棄物埋設地周辺の水温を参考に設定	【共通】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された水温(10℃～15℃程度)を参考に設定する。
代表とする 金属種類	鉄	【最も可能性が高い設定】 Fe ₃ O ₄	【最も可能性が高い設定】 安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ を設定する。
		【最も厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【最も厳しい設定】 金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ を設定する。
その他 考慮する 金属種類	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【最も可能性が高い設定】 ・Al(OH) ₃ ・Ni(OH) ₂ ・Cu ・Zn(OH) ₂	【最も可能性が高い設定】 金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、最も可能性が高い設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
		【最も厳しい設定】 ・Al(OH) ₃ ・Ni(OH) ₂ ・Cu(OH) ₂ ・Zn(OH) ₂	【最も厳しい設定】 金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

*1：酸化還元環境のうち、酸化還元電位を指す。

第 17 表 腐食膨張倍率及び腐食速度並びに埋設設備の膨張倍率の設定値

対象施設	条件	設定値	設定の考え方	
1号、2号及び 3号廃棄物埋設地	腐食膨張 倍率	【最も可能性が高い設 定】 3倍	【最も可能性が高い設定】 代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物を Fe_3O_4 とし、 その他考慮する金属種類の混入率を 0wt%~50wt%の幅 で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を 評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 3 倍以下であ ることから、3 倍と設定する。	
		【最も厳しい設定】 4倍	【最も厳しい設定】 環境条件の変動を考慮し、設定した代表とする金属 種類並びに非晶質の水酸化物を設定したその他考慮す る金属種類の混入率を 0wt%~50wt%の幅で評価した結 果、いずれも腐食膨張倍率は 4 倍以下であることから、 4 倍と設定する。	
	腐食速度	【最も可能性が高い設 定】 0.1 $\mu m/y$	【最も可能性が高い設定】 腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮し、 値を設定する。	
		【最も厳しい設定】 腐食速度を設定せず金属 の全量が瞬時に腐食する と設定	【最も厳しい設定】 腐食膨張量は、金属腐食を評価する上で必要となる 環境条件による腐食速度に依存するが、局部腐食(孔 食)や異種金属接触腐食、環境条件の変動に係る不確実 性を考慮する。よって、廃止措置の開始後の状態変化の 評価期間(1,000年後)においては、腐食形態に係らず全 量が瞬時に腐食すると設定する。	
	1号廃棄物埋設地	膨張 倍率	【最も可能性が高い設 定】 1.0 倍 (変化なし)	【最も可能性が高い設定】 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張は、 二次鉱物の生成に必要となる原料(他の鉱物)の消費に 伴う空隙の増加又は他の鉱物の溶出による影響を考慮 し、埋設設備の体積に変化が生じないものとして設定 する。
			【最も厳しい設定】 1.1 倍	【最も厳しい設定】 セメント系材料の固相変化による膨張倍率の計算結 果を踏まえて設定する。

第 18 表 金属腐食による体積膨張及び塩影響に係る覆土への力学的影響評価

対象施設 (対象廃棄物)		変形 形態	力学的変形(1,000 年後)	
			最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
1 号 廃棄物 埋設地	(充填 固化体)	膨張	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土 隅角部の厚さが 1m 以上 残る状態 (開口無し) 下部覆土 破断や厚さの変化が生じ ない状態 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残ら ない状態 (開口無し) 下部覆土 破断や厚さの変化が生じ ない状態
	(均質・均一固 体化体)	陥没	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土／下部覆土 共通 破断や厚さの変化が生じ ない状態 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土／下部覆土 共通 破断や厚さの変化が生じ ない状態
2 号及び 3 号 廃棄物埋設地 (充填固化体)		膨張	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土 隅角部の厚さが 1m 以上 残る状態 (開口無し) 下部覆土 破断や厚さの変化が生じ ない状態 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土 隅角部に約 2m の開口が 生じる状態 下部覆土 破断や厚さの変化が生じ ない状態

(二) 地下水との反応及び塩による影響

廃棄物埋設地における地下水(1号廃棄物埋設地については廃棄体から溶解した可溶性塩を含む)との反応による影響は、各部材と地下水との反応とそれに伴う難透水性覆土及び下部覆土の透水性並びに埋設設備等のセメント系材料の収着性の変化を考慮する。各部材と地下水との反応は、主に埋設設備内に浸入する地下水量や各部材を構成する鉱物の溶解度に依存する。

セメント系材料で構成される埋設設備に接する難透水性覆土の透水性は、モンモリロナイトの溶解及び二次鉱物の生成による変質の影響を受けると考えられる。

埋設設備のセメント系材料の収着性は、主要鉱物であるケイ酸カルシウム水和物(C-S-Hゲル)の溶脱や二次鉱物の生成、また、そのような固相変化に応じた間隙水の pH の変化の影響を受けると考えられる⁽⁴⁵⁾。

このような長期的な変化は、化学反応モデルと物質移行モデルを連成させた地

化学解析コード PHREEQC-TRANS⁽⁴³⁾を用いて求める。

(ア) 難透水性覆土及び下部覆土

地化学解析によって、鉱物組成、密度、空隙率、間隙水の液性及び覆土の低透水性の変化を評価する。難透水性覆土中の物質移行は、最も可能性が高い設定では、ベントナイト中の拡散挙動を空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式で設定する。また、最も厳しい設定では、保守的となるようモンモリロナイトの割合を0とし、空隙率に比例するとして設定する。

この解析の結果を基に、難透水性覆土の透水係数は、モンモリロナイトの密度及び空隙率に応じて変化するものとして設定する。

難透水性覆土の透水係数の化学的影響の評価結果を第19表に示す。また、下部覆土の透水係数は、化学的影響を受けた場合においても難透水性覆土中のモンモリロナイトが残存しており、化学的影響が難透水性覆土により緩衝されるため、透水係数の変化は生じないものとする。

第19表 難透水性覆土の透水係数の化学的影響の評価結果

評価期間	透水係数 (m/s)					
	1号廃棄物埋設地		2号廃棄物埋設地		3号廃棄物埋設地	
	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
0年	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}
1,000年後	1.42×10^{-10}	1.84×10^{-10}	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}

(イ) 埋設設備等のセメント系材料

埋設設備を構成するセメント系材料の主要な水和鉱物であるケイ酸カルシウム水和物(C-S-Hゲル)は、地下水との反応により緩やかに溶脱しCa/Si比は徐々に低下する。しかしながら、廃棄物埋設地内への地下水浸入量はセメント量に対して十分少ないため、状態設定を行う評価期間内において、収着性に影響を与えるような著しいCa/Si比の低下は生じず、埋設設備内は高pH環境(pH11以上)となると考えられる。そのため、固相の変化は収着性に影響を生じないものとし、埋設設備内の間隙水は高pHが維持されるものとして、この

ような環境条件を想定した試験に基づき収着性を設定する。

(三) 有機物影響

埋設設備に存在する可能性のある有機物は、主にセルロースである⁽³⁶⁾。セルロースはアルカリ性の環境下において分解し、生成したイソサッカリン酸(以下「ISA」という。)が放射性物質と錯体を形成することで、収着性に影響することが考えられる。その影響は、間隙水中の分解生成物の濃度に依存する⁽⁴³⁾。

アルカリ環境でのセルロース分解試験結果⁽⁴⁸⁾に基づいて、最も可能性が高い設定ではセルロースの5%、最も厳しい設定では30%が分解することとし、セメント系材料への収着⁽⁴³⁾を考慮して、間隙水中の分解生成物の濃度を設定する。

(四) 微生物影響

微生物影響として、岩盤(鷹架層)中において微生物活動により有機物が無機化すると考えられるため、収着性の設定に当たっては炭素(C-14)の化学形態が無機形態となることを考慮する。

(e) 着目した移行抑制機能の状態変化の設定

「(b) 影響事象の抽出・分析(熱-水理-力学-化学)」、「(c) 廃棄物埋設地の初期状態の設定」及び「(d) 各物理的・化学的性質の長期的な状態変化の評価」の結果に基づき、廃棄物埋設地及び周辺岩盤(鷹架層)の低透水性及び収着性の長期的な状態変化を設定する。

(一) 低透水性

難透水性覆土及び下部覆土の低透水性は、力学的影響(金属腐食による体積膨張及び塩影響)及び化学的影響(地下水との反応及び塩による影響)によって変化が生じる。これらの変化は、覆土完了時点である初期状態から、埋設設備への地下水の浸入によって徐々に進行する。

力学的影響及び化学的影響は相互干渉せずに、独立して覆土に影響を与えると考えられるが、状態設定においては、透水係数の増加を局所的に見込むものとする。最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定の開口が生じないケースでは、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。最も厳しい設定の開口が生じるケースでは、開口部付近において化学変質が促進されるものとして、透水係数を変質後から更に2桁以上高い値に設定する。

最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定における難透水性覆土及び下部覆

土の等価透水係数を第 20 表に示す。等価透水係数は、上記の状態設定に基づき、難透水性覆土及び下部覆土の厚さと透水係数から計算する。

なお、周辺岩盤についても、覆土と同様の化学的影響により低透水性に変化が生じると考えられるが、その範囲は極めて限定的であり、化学的影響は無視できる。

第 20 表 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数

廃棄物埋設地	透水係数 (m/s) (評価期間：1,000 年後)	
	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
1 号廃棄物埋設地	2.5×10^{-9}	3.0×10^{-9}
2 号廃棄物埋設地	2.0×10^{-10}	1.5×10^{-8}
3 号廃棄物埋設地	2.0×10^{-10}	1.5×10^{-8}

(二) 収着性

埋設設備及び廃棄体に含まれる有機物の分解生成物が、放射性物質と錯体を形成すること及び 1 号廃棄物埋設地については可溶性塩が溶解することで収着性が低下する。

収着性に対する影響のうち、有機物影響については現実的なセルロースの分解率とし、分解生成物である ISA の濃度に応じて収着性を設定する。

また、微生物影響については、有機物が微生物活動によって無機化することを考慮し、炭素(C-14)は無機形態であるとして岩盤(鷹架層)の収着性を設定する。

なお、金属腐食は、廃棄物埋設地周辺は酸化雰囲気であること、還元雰囲気下の分配係数は酸化雰囲気下と比較して大きな値となる傾向がある⁽⁴⁹⁾ことから、核種の還元が生じるような金属腐食の収着影響は考慮しないものとする。

c. 生活環境の状態設定

廃止措置の開始後における将来の敷地及びその周辺的生活環境の状態を設定する。

敷地及びその周辺の地質環境等の状態と社会環境の状態から被ばくが生じると考えられる人間活動を設定する。さらに、就労形態を考慮して評価対象個人を設定する。

廃止措置の開始後の将来における敷地及びその周辺で活動する人間の生活環境は、地質環境等の変化による影響を受けることが考えられるため、その前提として、「a. 地質環境等の状態設定」に基づいた、気温・降水量及び地形の状態変化を考慮する。

生活環境の構成要素のうち廃止措置の開始後の将来の人間の生活様式については、これを長期的な不確かさを考慮して予測することは困難であるため、現世代の人間の生活様式に関する情報を基に、敷地及びその周辺の社会環境又はわが国で現在一般的とされる生活様式を前提とする。自然事象シナリオで考慮する人間活動は、ICRP Pub. 81⁽¹⁾及び ICRP Pub. 101⁽²⁾を参考に合理性、持続可能性及び均一性を持つ一般的な人間活動を想定する。また、自然事象シナリオで考慮すべき合理性、持続可能性及び均一性を持たず一般的に生じるとは考えられない人間活動については、人為事象シナリオで考慮する。

なお、全てのシナリオにおいて、放射性物質としての特性に着目した意図的な行為は含めない。

(a) 生活環境に影響を及ぼす敷地及びその周辺における地質環境等の変化

「a. 地質環境等の状態設定」に基づき、生活環境に影響を及ぼすと考えられる敷地及びその周辺における地質環境等の変化を以下に整理する。

- ・ 現在から廃止措置の開始直後までの敷地及びその周辺の地形は現状とほぼ同様であり、廃棄物埋設地に起因した放射性物質を含む地下水は全てが敷地内の沢を經由し汽水性である尾駸沼に流入する。
- ・ 気候変動によって、平均気温が変化することに伴い、敷地及びその周辺で生産される農産物の種類が変化することが考えられるが、「a. 地質環境等の状態設定 (b) (一) 気温・降水量変化」に示すとおり、1,000年後の気温の変化は大きくないことから、現在の敷地周辺で収穫される農産物を想定する。
- ・ 将来の敷地及びその周辺のプレート運動及び気候変動に起因する事象(隆起・沈降、海水準変動及び侵食)に伴う地表の状態変化によって、尾駸沼が河川化し、漁獲される水産物種類が変化するとともに、資源量(漁獲量)が減少することが考えられるが、淡水化による水産物種類の変化を考慮しても、水産物の摂取による線量は小さくなることから、水産物種類の変化及び資源量(漁獲量)の減少は考慮しない。
- ・ 地形変化が進行すると埋設設備が河食によって侵食され、放射性物質を含む土壌が下流域へ堆積することが考えられるが、埋設設備の露呈時期は数万年以降であり、侵食による影響は無視できる。
- ・ 降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位及び河川流量の変化によって、交換水

量に影響するが、生活様式への影響はない。

(b) 敷地及びその周辺における地質環境等及び社会環境の状態を踏まえた人間活動の設定

「(a) 生活環境に影響を及ぼす敷地及びその周辺における地質環境等の変化」に示す敷地及びその周辺の地質環境等の変化及び社会環境の状態を踏まえ、放射性物質が移行する範囲ごとに人間活動を以下のとおり設定する。

(一) 水利用

廃棄物埋設地を通過する地下水は、主に中央沢を経て尾駸沼に流出し太平洋に至るため、現在の二又川や老部川へ移行することは想定されない。また、地下水の流入する尾駸沼は汽水性の沼であるため、この水を生活用水、農業用水及び畜産用水に利用することも想定されない。

六ヶ所村の利水状況⁽⁵⁰⁾としては、豊富な地下水のある地点を水源とする水道の普及率が100%⁽⁵¹⁾であり、専らこれを生活用水及び畜産用水として利用している。また、水田灌漑用水としては、河川水を利用している⁽⁵²⁾。1988年の調査結果⁽⁵⁰⁾に基づく浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるが、その割合は約1%と極めて小さい。

沢水の利用については、現在は利用されていないが、敷地造成前においては、広範囲で畑作が、また中央沢の下流部で稲作が行われていたことを考慮する。

なお、将来には尾駸沼の河川化が想定されるが、現状の水理及び利水状況を前提にすると、河川化後にその水を生活用水や畜産用水に利用することは想定されない。また、農業用水に利用することについては、より交換水量の少ない沢水の利用に包含されるため、考慮しない。

以上より、水利用に関しては、現状の水理及び利水状況を前提にすると、廃棄物埋設地からの影響を受ける井戸水や沢水を生活用水や畜産用水に利用することは考え難い。しかし、敷地造成前においては畑作及び稲作が行われていたことを考慮して、生活用水等に利用することに伴う人間活動としては、尾駸沼の水産物の摂取、沢水を利用して生産される農産物の摂取及び灌漑作業を想定する。

(二) 土地利用

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が廃棄物埋設地表面付近の土壌に移行し、被ばくを受ける可能性があるため、廃棄物埋設地及びその近傍における土地

利用に伴う人間活動を考慮する。

地下の掘削を伴う土地利用の一つに構造物の建設がある。2019年の統計⁽⁵³⁾によれば、近年の六ヶ所村においては専用住宅、倉庫、店舗等の建築確認申請が行われている。加えて、廃棄物埋設地は市街化区域の用途地域のうち工業専用地域に位置し、工業地域、準工業地域、商業地域、中高層住居専用地域及び低層住居専用地域に隣接しているため、工場及び住宅の建設等に利用される可能性がある。ただし、現在の六ヶ所村では地下数階を有するような大規模な構造物はほとんどみられず、面積利用率では10m以深の掘削を行う頻度は1%未満である。さらに、可住地のうち構造物が建設される土地は一部であることを含めて敷地周辺の社会環境を考慮すると、大規模な構造物の建設は代表的な事例ではない。そのため、代表的な事例として一般的な住宅の建設及びそれに伴って発生する掘削土壌上での居住を想定する。

なお、面積利用率は、六ヶ所村で確認される建物区分について、それぞれに仮定した平均深度ごとの利用面積が可住地面積に占める割合を求めたものである。

この他に地下を掘削する目的として、井戸の掘削や地下資源の開発があげられる。井戸については水利用の状況から浅井戸の掘削が考えられるが、「(一) 水利用」に示すように、水道の普及率が100%であり、また、浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるが、その割合は約1%と極めて小さいことから考慮しない。地下資源の開発については、廃棄物埋設地及びその近傍において、採掘規模の石炭、鉱石等の天然資源は認められていないため、このような土地利用を考慮する必要はない。

さらに、地下の掘削を伴わない土地利用としては、農産物の生産があり、廃棄物埋設地表面付近の土壌又は地下水から農産物に放射性物質が移行し、その農産物を摂取することが考えられる。

以上より、土地利用に関しては、廃棄物埋設地の利用による人間活動として、住宅の建設作業、掘削土壌上での居住及び廃棄物埋設地を利用して生産される農産物の摂取を考慮する。

なお、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による大規模な掘削行為及び当該掘削後の土地利用は、一般的に生じるとは考えられないため、人為事象シナリオにおいて考慮する。

(三) 水利用及び土地利用によって得られる各種生産物

「(一) 水利用」及び「(二) 土地利用」に示す水や土地の利用によって得られる生産物の種類を水産物及び農産物と設定する。

水産物については、現在の汽水性である尾駁沼に生息する代表的な水産物とする。

農産物については、沢水を灌漑用水として利用し生産される米(以下「灌漑農産物」という。)及び廃棄物埋設地で生産される野菜(以下「農耕農産物」という。)とする。

(c) 評価対象個人の設定

「(b) 敷地及びその周辺における地質環境等及び社会環境の状態を踏まえた人間活動の設定」に示す人間活動に基づき、自然事象シナリオにおいては、様々な個人の生活様式に係る場合には、それらの重ね合わせを考慮し、評価対象個人を設定する。

評価対象個人は、生活様式の特徴を表した個人で、年間を通して被ばくする可能性がある個人を代表として設定する。また、敷地及びその周辺又はわが国で現在認められる一般的な生活様式を持つ個人とし、比較的高い被ばくを受ける集団を代表する成人とする。

ただし、生産物の摂取においては、市場の流通の状況を適切に考慮する。生活様式として同時に存在することの合理性がないものは、重ね合わせを考慮しない。

生活様式は、現在認められる就労形態ごとに異なると考えられる。就労形態によって、様々な生産活動が行われる可能性があるが、評価の観点からは放射性物質が移行する水又は土壤に接触する生産活動に従事する就労者を対象とすることが合理的である。そのため、評価対象個人の設定に当たっては、就労形態に応じた生産活動及び生産物の摂取を考慮する。また、放射性物質は、その移行特性や放射線影響が種類ごとに異なることから、評価対象個人を複数の集団から設定する。

現在の敷地及びその周辺の社会環境・産業構造において、被ばくの可能性がある就労形態は、第一次産業としては、漁業及び農業(畜産業を含む。)が代表的であり、第二次産業では、建設業が代表的である。第三次産業やその他の業種については、労働作業に伴う被ばくの可能性が低く、廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられる。

最新の統計⁽⁵⁴⁾に基づく、六ヶ所村の産業別就業者数のほぼ半数を第三次産業が占めている。第三次産業については廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられることから、最も可能性が高い自然事象シナリオにおいては評価対象個人を居住者とする。居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、家庭菜園により生産される農産物及び市場に流通した食品を摂取すると想定する。

最も厳しい自然事象シナリオにおいては、評価対象個人を漁業従事者、農業従事者、畜産業従事者、建設業従事者及び居住者とする。

ただし、年間を通じて摂取する全ての食品が、廃棄物埋設地起源の放射性物質を含む生産品とすることは現在の市場の流通状況を考慮すると基本的に想定されない。このため、それぞれの就労者が生産活動により得られる食品を自家消費すると想定し、その他については市場から購入すると想定する。市場に流通する食品のうち、水産物、灌漑農産物及び農耕農産物は、廃棄物埋設地に起因する放射性物質を含むそれらの食品が市場希釈係数に応じて含まれ、畜産物は廃棄物埋設地に起因する放射性物質を含まないものとする。

(一) 漁業従事者

漁業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、放射性物質が移行する水産物を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

(二) 農業従事者

農業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、放射性物質が移行する農産物については自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

なお、水利用の場合は放射性物質を含む沢水を灌漑に利用する灌漑作業、土地利用の場合は放射性物質を含む土壌上における農耕作業を想定する。

(三) 畜産業従事者

畜産業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、放射性物質が移行する畜産物を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

ただし、現状の水理及び利水状況を前提にすると、放射性物質が移行する畜産物を摂取することによる被ばくは想定しない。

(四) 建設業従事者

建設業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。また、廃棄物埋設地において一般的な住宅の建設作業を行うことを想定する。

(五) 居住者

居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、家庭菜園により生産される農産物及び市場に流通した食品を摂取すると想定する。

d. 放射性物質の移行挙動及び被ばく経路

覆土完了後に地下水が再冠水することによって埋設設備の間隙は地下水によって満たされていくこととなる。地下水を介して放射性物質が移行することを評価する場合は、この過渡的な現象は比較的速やかに進行するものとし、線量の評価上は覆土完了直後に地下水で飽和するものとして設定する。

廃棄体は、放射性物質によって汚染された廃棄物を容器に固型化したものであるため、放射性物質が容易に漏出することはない。また、覆土完了後において長期的に腐食速度が小さい環境となる可能性が高いため、鋼製である容器は腐食し難いが、長期的な評価を行う上では、容器による移行抑制機能は考慮しないものとする。

廃棄体内への地下水の浸入に伴い放射性物質が埋設設備内の間隙水中に溶出する。廃棄体から溶出した放射性物質は、速やかに埋設設備内に均一に分布し、埋設設備内の廃棄体の固型化材、充填材、埋設設備等の収着性に応じて間隙水中に溶出するものとする。

埋設設備内の間隙水に溶出した放射性物質は、覆土と岩盤(鷹架層)へそれぞれ漏出する。漏出した放射性物質は覆土又は岩盤(鷹架層)とそれぞれの間隙水中を移行し、沢及び尾駁沼に流入する。

地下水の流入した尾駁沼で得られる水産物及び水を利用して生産された農産物には、それぞれ水産物への濃縮係数及び農産物への移行係数に応じて放射性物質が移行する。よって、これらの水産物及び農産物の摂取を含む水の利用によって公衆の被ばくが生じるものとする。

また、廃棄物埋設地の近傍土壌及び周辺岩盤への放射性物質の移行は基本的に地下水を介して生じる。漏出した放射性物質は覆土又は岩盤(鷹架層)とそれぞれの間隙水中を移行するため、放射性物質が収着し、土壌や岩盤(鷹架層)中に残存するものとし

て、廃棄物埋設地における土地の利用によって公衆の被ばくが生じるものとする。

以上の放射性物質の移行挙動を踏まえ、「a. 地質環境等の状態設定」、「b. 廃棄物埋設地の状態設定」及び「c. 生活環境の状態設定」で設定した状態設定のもとで、沢水の利用、尾駁沼の利用及び廃棄物埋設地の利用を対象として、明らかに線量が小さいもの及び他の被ばく経路で代表されるものを除外した以下の被ばく経路を設定し、評価対象個人の線量を評価する。最も可能性が高い自然事象シナリオでは評価対象個人を居住者とするため、沢水を利用する灌漑作業及び廃棄物埋設地における屋外労働作業による被ばくは考慮しない。

- ・尾駁沼の水産物の摂取による内部被ばく。
- ・沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく。
- ・沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく。
- ・廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく。
- ・廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく。
- ・廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物(家庭菜園を含む)の摂取による内部被ばく。

なお、仮に廃棄物埋設地から北側の老部川へ流出した場合と南側の尾駁沼へ流出した場合を比較すると、老部川までの放射性物質の移行距離が尾駁沼への移行距離よりも長いこと及び老部川の交換水量が中央沢を含む評価対象地点の交換水量よりも多いことにより、北側の老部川へ流出した場合の方が線量は低くなる。したがって、地下水の流動方向が変化したとしても影響はない。

e. 線量評価モデル

線量評価モデルは、廃棄物埋設地の状態や現象の特徴を適切に、かつ簡潔に表現でき、線量が保守的になるよう考慮する。

線量評価モデルの不確かさについては、線量評価パラメータを保守的に設定することで考慮する。例えば、廃棄体の開口部分、埋設設備内の水みち(ひび割れ)の不確かさに関しては、埋設設備全体を砂程度の透水性と仮定し、埋設設備全体に放射性物質が拡がっている状態を想定する。また、三次元的に拡がる放射性物質の移行経路の不確かさに関しては、一次元的に移行するものと仮定し、生活環境までの移行経路は直線距離を想定する。

線量評価モデルとして、評価の対象となる領域における放射性物質の移行に関する

評価モデル及び被ばく経路に対応した線量を計算するための生活環境における被ばくに関する評価モデルを以下に示す。

(a) 放射性物質の移行に関する評価モデル

(一) 埋設設備及び難透水性覆土内の地下水中の移行

廃棄体に含まれる放射性物質は、埋設設備内に浸入した地下水に溶出し、埋設設備内の固相である固型化材、セメント系充填材及び埋設設備のセメント系材料と分配平衡の状態にあるものとして評価する。埋設設備内の放射性物質は、材料の透水性と拡散性に依存するため、放射能濃度の分布が均一とはならないが、放射性物質の漏出を評価する上では単純化して均一であるものとして評価する。

埋設設備及び難透水性覆土内の地下水中の核種 i の濃度は(1)式～(3)式を用いて計算する。

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} \cdot V_{meq} \cdot \frac{\partial C_{ww}(t, i)}{\partial t} &= S_b \cdot De_b \cdot \left. \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial z} \right|_{z=0} \\ &\quad - \{Q_{co}(t) + Q_{go}(t)\} \cdot C_{ww}(t, i) \\ &\quad - \lambda(i) \cdot \overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} \cdot V_{meq} \cdot C_{ww}(t, i) \\ &\quad + \lambda(i) \cdot \overline{\varepsilon \cdot Rf(i+1)} \cdot V_{meq} \cdot C_{ww}(t, i+1) \quad \dots (1) \end{aligned}$$

(初期条件)

$$C_{ww}(0, i) = \frac{A_0(i)}{\overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} \cdot V_{meq}}$$

$$\overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} = \sum_j [P(j) \cdot \varepsilon(j) \cdot Rf(i, j)] \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_b \cdot Rf_b(i) \cdot \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial t} &= De_b \cdot \frac{\partial^2 C_{bw}(z, t, i)}{\partial z^2} - U_b(t) \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial z} \\ &\quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_b \cdot Rf_b(i) \cdot C_{bw}(z, t, i) \\ &\quad + \lambda(i) \cdot \varepsilon_b \cdot Rf_b(i+1) \cdot C_{bw}(z, t, i+1) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

(初期条件) $C_{bw}(z, 0, i) = 0$; $0 < z \leq L_b$

(境界条件) $C_{bw}(L_b, t, i) = 0$

$$C_{bw}(0, t, i) = C_{ww}(t, i)$$

$C_{ww}(t, i)$: 埋設設備内の時刻 t における核種 i の間隙水中濃度

	(Bq/m ³)
t	: 覆土完了後の経過時間 (y)
$A_0(i)$: 核種 i の総放射エネルギー (Bq)
V_{meq}	: 分配平衡となる埋設設備の体積 (m ³)
$P(j)$: 埋設設備内の媒体 j の体積分率 (-)
$\varepsilon(j)$: 埋設設備内の媒体 j の間隙率 (-)
$Rf(i, j)$: 埋設設備内の媒体 j の核種 i の遅延係数 (-) ; $= 1 + \frac{1 - \varepsilon(j)}{\varepsilon(j)} \cdot \rho(j) \cdot Kd(i, j)$
$\rho(j)$: 埋設設備内の媒体 j の粒子密度 (kg/m ³)
$Kd(i, j)$: 埋設設備内の媒体 j の核種 i の分配係数 (m ³ /kg)
S_b	: 難透水性覆土の拡散寄与面積 (m ²)
De_b	: 難透水性覆土の実効拡散係数 (m ² /y)
$C_{bw}(z, t, i)$: 難透水性覆土の位置 z 、時刻 t における核種 i の間隙水中濃度 (Bq/m ³)
z	: 難透水性覆土における埋設設備からの距離 (m)
$Q_{co}(t)$: 埋設設備から上部覆土への流出水量 (m ³ /y)
$Q_{go}(t)$: 埋設設備から鷹架層への流出水量 (m ³ /y)
$\lambda(i)$: 核種 i の崩壊定数 (1/y) ; = $\ln 2 / T_{1/2}(i)$
$T_{1/2}(i)$: 核種 i の半減期 (y)
ε_b	: 難透水性覆土の間隙率 (-)
$Rf_b(i)$: 難透水性覆土の核種 i の遅延係数 (-) ; $= 1 + \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \cdot \rho_b \cdot Kd_b(i)$
ρ_b	: 難透水性覆土の粒子密度 (kg/m ³)
$Kd_b(i)$: 難透水性覆土の核種 i の分配係数 (m ³ /kg)
L_b	: 難透水性覆土の厚さ (m)
$U_b(t)$: 難透水性覆土の地下水流速 (m/y) ; = $Q_{co}(t) / S_b$

(二) 上部覆土内地下水中の移行

上部覆土内地下水中の核種 i の濃度は、(4)式を用いて計算する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_c \cdot Rf_c(i) \cdot \frac{\partial C_{cw}(x, t, i)}{\partial t} &= De_c \frac{\partial^2 C_{cw}(x, t, i)}{\partial x^2} - U_c \frac{\partial C_{cw}(x, t, i)}{\partial x} \\ &\quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_c \cdot Rf_c(i) \cdot C_{cw}(x, t, i) \\ &\quad + \lambda(i) \cdot \varepsilon_c \cdot Rf_c(i+1) \cdot C_{cw}(x, t, i+1) + f_c(t, i) \end{aligned} \quad \dots (4)$$

(初期条件) $C_{cw}(x, 0, i) = 0$; $-\infty < x < +\infty$

(境界条件) $C_{cw}(\infty, t, i) = 0$

$$U_c \cdot C_{cw}(-L_c, t, i) = De_c \cdot \left. \frac{\partial C_{cw}(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=-L_c}$$

$C_{cw}(x, t, i)$: 距離 x 、時刻 t における上部覆土内地下水中の核種 i の濃度
(Bq/m³)

x : 核種が流入する上部覆土下流端からの距離(m)

L_c : 核種が流入する上部覆土の地下水流向方向長さ(m)

De_c : 上部覆土の実効分散係数(m²/y) ;
自由水中の拡散係数と同様な値に設定

$Rf_c(i)$: 上部覆土の核種 i の遅延係数(-) ;

$$= 1 + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \cdot \rho_c \cdot Kd_c(i)$$

ε_c : 上部覆土の間隙率(-)

ρ_c : 上部覆土の粒子密度(kg/m³)

$Kd_c(i)$: 上部覆土の核種 i の分配係数(m³/kg)

$f_c(t, i)$: 核種 i の上部覆土への単位体積当たりの漏出量
(Bq/(m³・y)) ;

$$= \begin{cases} S_c(t, i)/V_{fc}(t) & (-L_c \leq x \leq 0) \\ 0 & (x < -L_c, 0 < x) \end{cases}$$

$S_c(t, i)$: 核種 i の漏出量(Bq/y) ;

$$= -S_b \cdot De_b \cdot \left. \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial z} \right|_{z=L_b}$$

$$+ Q_{co}(t) \cdot C_{bw}(L_b, t, i)$$

$V_{fc}(t)$: 漏出核種が流入する上部覆土の体積(m³) ;

$$= Q_c(t) \cdot L_c / U_c$$

$Q_c(t)$: 上部覆土内地下水流量 (m³/y)

U_c : 上部覆土の地下水流速 (m/y)

(三) 岩盤(鷹架層)内地下水中の移行

岩盤(鷹架層)内地下水中の核種*i*の濃度は、(5)式を用いて計算する。

$$\begin{aligned} & \varepsilon_g \cdot Rf_g(i) \cdot \frac{\partial C_{gw}(x, t, i)}{\partial t} \\ &= De_g \cdot \frac{\partial^2 C_{gw}(x, t, i)}{\partial x^2} - U_g \cdot \frac{\partial C_{gw}(x, t, i)}{\partial x} \\ & \quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_g \cdot Rf_g(i) \cdot C_{gw}(x, t, i) \\ & \quad + \lambda(i) \cdot \varepsilon_g \cdot Rf_g(i+1) \cdot C_{gw}(x, t, i+1) + f_g(t, i) \quad \dots (5) \end{aligned}$$

(初期条件) $C_{gw}(x, 0, i) = 0$; $-\infty < x < +\infty$

(境界条件) $C_w(\infty, t, i) = 0$

$$U_g \cdot C_{gw}(-L_g, t, i) = De_g \cdot \left. \frac{\partial C_{gw}(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=-L_g}$$

$C_{gw}(x, t, i)$: 距離*x*、時刻*t*における鷹架層内地下水中の核種*i*の濃度 (Bq/m³)

x : 核種が流入する鷹架層下流端からの距離 (m)

L_g : 核種が流入する鷹架層の地下水流向方向長さ (m)

De_g : 鷹架層の実効分散係数 (m²/y) ;
自由水中の拡散係数と同様な値に設定

$Rf_g(i)$: 鷹架層の核種*i*の遅延係数(-) ;

$$= 1 + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \cdot \rho_g \cdot Kd_g(i)$$

ε_g : 鷹架層の間隙率(-)

ρ_g : 鷹架層の粒子密度 (kg/m³)

$Kd_g(i)$: 鷹架層の核種*i*の分配係数 (m³/kg)

$f_g(t, i)$: 核種*i*の鷹架層への単位体積当たりの漏出量 (Bq/(m³ · y)) ;

$$= \begin{cases} S_g(t, i)/V_{fg}(t) & (-L_g \leq x \leq 0) \\ 0 & (x < -L_g, 0 < x) \end{cases}$$

$S_g(t, i)$: 核種*i*の漏出量 (Bq/y) ; $= Q_{go}(t) \cdot C_{ww}(t, i)$

$V_{fg}(t)$: 漏出核種が流入する鷹架層の体積 (m ³) ; = $Q_g(t) \cdot L_g / U_g$
$Q_g(t)$: 鷹架層内地下水流量 (m ³ /y)
U_g	: 鷹架層の地下水流速 (m/y)

(四) 尾駁沼又は沢水中の放射性物質の濃度

尾駁沼又は沢水中の核種*i*の濃度は、(6)式を用いて計算する。

$$C_{sw}(t, i) = \frac{C_{cw}(X_{cs}, t, i) \cdot Q_{cs}(t) + C_{gw}(X_{gs}, t, i) \cdot Q_{gs}(t)}{Q_s(t)} \quad \dots (6)$$

$C_{sw}(t, i)$: 時刻 <i>t</i> における尾駁沼又は沢水中の核種 <i>i</i> の濃度 (Bq/m ³)
X_{cs}	: 核種が流入する上部覆土下流端から尾駁沼又は沢までの評価上の距離 (m)
X_{gs}	: 核種が流入する鷹架層下流端から尾駁沼又は沢までの評価上の距離 (m)
$Q_{cs}(t)$: 核種が流入する上部覆土から尾駁沼又は沢への地下水流入量 (m ³ /y)
$Q_{gs}(t)$: 核種が流入する鷹架層から尾駁沼又は沢への地下水流入量 (m ³ /y)
$Q_s(t)$: 尾駁沼又は沢の交換水量 (m ³ /y)

(五) 沢水を利用する灌漑土壤中の放射性物質の濃度

沢水を利用する灌漑土壤中の核種*i*の濃度は、(7)式を用いて計算する。

$$\frac{dC_{soil}^{ir}(t, i)}{dt} = \frac{C_{ir}(t, i) \cdot F_{ir} \cdot Q_{ir}}{V_{ir} \cdot (1 - \varepsilon_{ir}) \cdot \rho_{ir}} - \frac{Qp_{ir} \cdot C_{soil}^{ir}(t, i)}{V_{ir} \cdot \{\varepsilon_{ir} + (1 - \varepsilon_{ir}) \cdot \rho_{ir} \cdot Kd_{ir}(i)\}} - \lambda(i) \cdot C_{soil}^{ir}(t, i) + \lambda(i) \cdot C_{soil}^{ir}(t, i + 1) \quad \dots (7)$$

$C_{soil}^{ir}(t, i)$: 灌漑土壤中の核種 <i>i</i> の濃度 (Bq/kg)
$C_{ir}(t, i)$: 灌漑用水中の核種 <i>i</i> の濃度 (Bq/m ³) ; = $f u_{ir} \cdot C_{sw}(t, i)$
$f u_{ir}$: 灌漑における放射性物質を含む沢水の利用率 (-)
F_{ir}	: 灌漑土壤への放射性物質の残留割合 (-)
Q_{ir}	: 単位面積当たりの灌漑水量 (m ³ / (m ² · y))
V_{ir}	: 灌漑土壤の有効体積 (m ³ /m ²)

ε_{ir}	: 灌漑土壌の間隙率(-)
ρ_{ir}	: 灌漑土壌の粒子密度 (kg/m ³)
Qp_{ir}	: 灌漑土壌浸透水量 (m ³ /(m ² ・y))
$Kd_{ir}(i)$: 灌漑土壌の核種 <i>i</i> の分配係数 (m ³ /kg)

(六) 廃棄物埋設地の土壌中の放射性物質の濃度

上部覆土内地下水に含まれる放射性物質が、廃棄物埋設地の土壌に残留したときの土壌中の核種*i*の濃度は、(8)式を用いて計算する。

$$C_{soil}^d(t, i) = C_{cw}(X_d, t, i) \cdot \left(\frac{\varepsilon_d}{(1 - \varepsilon_d) \cdot \rho_d} + Kd_d(i) \right) \cdot G_d \quad \dots (8)$$

$C_{soil}^d(t, i)$: 廃棄物埋設地の土壌中の核種 <i>i</i> の濃度 (Bq/kg)
X_d	: 核種が流入する上部覆土下流端から濃度計算地点までの評価上の距離 (m)
ε_d	: 廃棄物埋設地の土壌の間隙率(-)
ρ_d	: 廃棄物埋設地の土壌の粒子密度 (kg/m ³)
$Kd_d(i)$: 廃棄物埋設地の土壌の核種 <i>i</i> の分配係数 (m ³ /kg)
G_d	: 廃棄物埋設地の土壌の希釈係数(-)

(b) 生活環境における被ばくに関する評価モデル

(一) 尾駮沼の水産物の摂取による内部被ばく

尾駮沼の水産物の摂取により内部被ばくする場合の線量は、(9)式を用いて計算する。

$$D_{aq}(p, t) = \sum_i \left(\sum_m \{ C_{sw}(t, i) \cdot CF_{aq}(i, m) \cdot M_{aq}(m) \cdot f_{aq}(p, m) \cdot DCF_{ing}(i) \} \right) \quad \dots (9)$$

$D_{aq}(p, t)$: 公衆 <i>p</i> の尾駮沼の水産物の摂取による線量 (Sv/y)
$CF_{aq}(i, m)$: 水産物 <i>m</i> における核種 <i>i</i> の濃縮係数 (m ³ /kg)
$M_{aq}(m)$: 水産物 <i>m</i> の摂取量 (kg/y)
$f_{aq}(p, m)$: 公衆 <i>p</i> の水産物 <i>m</i> の市場希釈係数(-)

(二) 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく

沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取により内部被ばくする場合の線

量は、(10)式及び(11)式を用いて計算する。

(ア) 灌漑農産物中の放射性物質の濃度

$$C_{ag}^{ir}(t, i) = C_{soil}^{ir}(t, i) \cdot B_{ag}^{ir}(i) \quad \dots (10)$$

$C_{ag}^{ir}(t, i)$: 灌漑農産物中の核種*i*の濃度 (Bq/kg)

$B_{ag}^{ir}(i)$: 灌漑農産物への核種*i*の移行係数
((Bq/kg-wet 農産物)/(Bq/kg-dry 土壌))

(イ) 灌漑農産物の摂取による内部被ばく

$$D_{ag}^{ir}(p, t) = \sum_i \{C_{ag}^{ir}(t, i) \cdot M_{ag}^{ir} \cdot f_{ag}(p) \cdot DCF_{ing}(i)\} \quad \dots (11)$$

$D_{ag}^{ir}(p, t)$: 公衆*p*の沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による線量 (Sv/y)

M_{ag}^{ir} : 灌漑農産物の摂取量 (kg/y)

$f_{ag}(p)$: 公衆*p*の農産物の市場希釈係数 (-)

(三) 沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく

沢水を利用する灌漑作業による地表面からの外部被ばく及び地表面の放射性物質を含むダストの吸入摂取により内部被ばくする場合の線量は、沢水中の放射性物質の濃度、土壌への残留割合から求めた土壌中の放射性物質の濃度に基づき、

(12)式及び(13)式を用いて計算する。

(ア) 外部被ばく

$$D_{farm_ext}^{ir}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}^{ir}(t, i) \cdot Sh_{work}(p, i) \cdot T_{farm}^{ir}(p) \cdot DCF_{ext}(i)\} \quad \dots (12)$$

$D_{farm_ext}^{ir}(p, t)$: 公衆*p*の沢水を利用する灌漑作業時における外部放射線に係る線量 (Sv/y)

$Sh_{work}(p, i)$: 公衆*p*の屋外労働作業時の核種*i*の遮蔽係数 (-)

$T_{farm}^{ir}(p)$: 公衆*p*の灌漑作業時間 (h/y)

$DCF_{ext}(i)$: 核種*i*の外部放射線に係る線量換算係数
((Sv/h)/(Bq/kg))

(イ) 内部被ばく

$$D_{farm_inh}^{ir}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}^{ir}(t, i) \cdot f d_{farm}^{ir} \cdot I_{work} \cdot T_{farm}^{ir}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (13)$$

$D_{farm_inh}^{ir}(p, t)$: 公衆 p の沢水を利用する灌漑作業時における吸入摂取による線量(Sv/y)

$f d_{farm}^{ir}$: 灌漑作業時の空气中ダスト濃度(kg/m³)

I_{work} : 屋外労働作業時の呼吸率(m³/h)

$DCF_{inh}(i)$: 核種 i の吸入摂取による線量換算係数(Sv/Bq)

(四) 廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく

廃棄物埋設地における屋外労働作業により外部被ばく及び内部被ばくする場合の線量は、土壌中の放射性物質の濃度に基づき、(14)式及び(15)式を用いて計算する。

(ア) 屋外労働作業による外部被ばく

$$D_{work_ext}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot S h_{work}(p, i) \cdot T_{work}(p) \cdot DCF_{ext}(i)\} \quad \dots (14)$$

$D_{work_ext}(p, t)$: 公衆 p の屋外労働作業時の外部放射線に係る線量(Sv/y)

$C_{soil}(t, i)$: 土壌中の核種 i の濃度(Bq/kg)

$T_{work}(p)$: 公衆 p の屋外労働作業時間(h/y)

(イ) 屋外労働作業による内部被ばく

$$D_{work_inh}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot f d_{work} \cdot I_{work} \cdot T_{work}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (15)$$

$D_{work_inh}(p, t)$: 公衆 p の屋外労働作業時の吸入摂取による線量(Sv/y)

$f d_{work}$: 屋外労働作業時の空气中ダスト濃度(kg/m³)

(五) 廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく

廃棄物埋設地での居住により屋外において外部被ばく及び内部被ばくする場合

合の線量並びに居住により屋内において内部被ばくする場合の線量は、それぞれの土壌中の放射性物質の濃度に基づき、(16)式～(18)式を用いて計算する。

(ア) 居住時の屋外における被ばく

【外部被ばく】

$$D_{haboh_ext}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot Sh_{haboh}(i) \cdot T_{haboh}(p) \cdot DCF_{ext}(i)\} \quad \dots (16)$$

$D_{haboh_ext}(p, t)$: 公衆 p の居住時の屋外活動による外部放射線に係る線量(Sv/y)

$Sh_{haboh}(i)$: 居住者の屋外における核種 i の遮蔽係数(-)

$T_{haboh}(p)$: 公衆 p の居住時の屋外における滞在時間(h/y)

【内部被ばく】

$$D_{haboh_inh}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot fd_{haboh} \cdot I_{inh} \cdot T_{haboh}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (17)$$

$D_{haboh_inh}(p, t)$: 公衆 p の居住時の屋外活動による吸入摂取による線量(Sv/y)

fd_{haboh} : 屋外における空気中ダスト濃度(kg/m³)

I_{inh} : 居住時の呼吸率(m³/h)

(イ) 居住時の屋内における内部被ばく

$$D_{habih_inh}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot fd_{habih} \cdot I_{inh} \cdot T_{habih}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (18)$$

$D_{habih_inh}(p, t)$: 公衆 p の屋内における吸入摂取による線量(Sv/y)

fd_{habih} : 屋内における空気中ダスト濃度(kg/m³)

$T_{habih}(p)$: 公衆 p の居住時の屋内における滞在時間(h/y)

(六) 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物(家庭菜園を含む)の摂取による被ばく

廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物(家庭菜園を含む)を摂取する

ことにより内部被ばくする場合の線量は、(19)式及び(20)式を用いて計算する。

$$C_{ag}^v(t, i) = C_{soil}(t, i) \cdot B_{ag}^v(i) \quad \dots (19)$$

$$D_{ag}^v(p, t) = \sum_i \{C_{ag}^v(t, i) \cdot M_{ag}^v \cdot f_{ag}(p) \cdot DCF_{ing}(i)\} \quad \dots (20)$$

$C_{ag}^v(t, i)$: 生産される農耕農産物中の核種*i*の濃度 (Bq/kg)

$B_{ag}^v(i)$: 農耕農産物への核種*i*の移行係数
((Bq/kg-wet 農産物) / (Bq/kg-dry 土壌))

$D_{ag}^v(p, t)$: 公衆*p*の生産される農耕農産物の摂取による線量
(Sv/y)

M_{ag}^v : 農耕農産物の摂取量 (kg/y)

f. 線量評価パラメータ

放射性物質の生活環境への移行挙動に関しては、最も可能性が高い自然事象シナリオでは、「a. 地質環境等の状態設定」及び「b. 廃棄物埋設地の状態設定」で設定した最も可能性が高い設定、最も厳しい自然事象シナリオでは、最も厳しい設定に基づいて線量評価パラメータを設定する。また、生活環境における公衆の被ばくに係る線量評価パラメータに関しては、最新の統計、調査及び文献に基づいて、最も可能性が高い自然事象シナリオでは線量が平均的となる現実的な値、最も厳しい自然事象シナリオでは線量が厳しくなる保守的な値を設定する。

最も可能性が高い自然事象シナリオと最も厳しい自然事象シナリオとで異なる設定とする線量評価パラメータは、「埋設設備から上部覆土への流出水量」、「埋設設備から岩盤(鷹架層)への流出水量」、「各核種の分配係数」、「尾駱沼の交換水量」及び「廃棄物埋設地の土壌の希釈係数」とする。

また、これら以外の線量評価パラメータにも、様々な不確かさがあると考えられるが、最も可能性が高いと考えられるパラメータの設定が困難なもの、不確かさを考慮しても線量影響が小さいと考えられるものは、最も可能性が高い自然事象シナリオと最も厳しい自然事象シナリオで共通の値とし、適切な保守性を考慮した設定とする。

地質環境等及び廃棄物埋設地の状態設定に基づいて設定する線量評価パラメータである流出水量、分配係数及び交換水量は以下のとおり設定する。

その他の各線量評価パラメータの詳細は補足説明資料9を参照。

(a) 流出水量

「b. 廃棄物埋設地の状態設定 (e) (一) 低透水性」に示す状態設定に基づき、埋設設備から上部覆土への流出水量 ($Q_{co}(t)$) 及び埋設設備から鷹架層への流出水量 ($Q_{go}(t)$) を有限要素法による鉛直断面 2 次元地下水浸透流解析により計算し設定する。地下水浸透流解析に用いる動水勾配の設定値を第 4 表、透水係数の設定値を第 21 表、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定における埋設設備から上部覆土への流出水量及び埋設設備から岩盤(鷹架層)への流出水量の設定値を第 22 表に示す。

(b) 分配係数

分配係数は、「b. 廃棄物埋設地の状態設定 (e) (二) 収着性」に示す影響事象の状態変化の評価及び状態設定を踏まえ、想定される廃棄物埋設地の環境条件で取得した試験データ又は文献値により設定する。具体的には、実際に廃棄物埋設地を構成する埋設設備及び覆土の各バリア材料並びに廃棄物埋設地周辺から採取した岩盤(鷹架層)を使用し、想定される環境条件(温度、pH 及び地下水組成)及び放射性物質の化学形態を考慮した試験系で実測された分配係数を適用することを基本とする。

(c) 交換水量

廃棄物埋設地を通過した地下水中の放射性物質濃度は、その地下水が地表に流出した地点で、そこを流れる河川及び湖沼の表流水によって希釈される。廃棄物埋設地は二又川の流域にあり、希釈に寄与する交換水量となる表流水流量は二又川の河川流量に相当する。

河川流量は、降水量から蒸発散量を差し引いた河川流出高に流域面積を乗じて求める。降水量及び蒸発散量は、「a. 地質環境等の状態設定 (b) 気候変動に起因する事象」に示す気候変動に伴う将来の変化傾向を、流域面積は、「a. 地質環境等の状態設定 (c) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象」に示す相対海水準の変動を考慮し設定する。最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定における表流水流量の値を第 3 表に示す。

第 21 表 地下水浸透流解析に用いる透水係数

地盤 又は覆土	計算 ケース	透水係数(m/s)			設定の考え方	
		1号廃棄物 埋設地	2号廃棄物 埋設地	3号廃棄物 埋設地		
廃棄物埋設地周辺地盤	鷹架層	最も可能性 が高い設定	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}	5.0×10^{-8}	廃棄物埋設地付近 で取得した N 値 50 以上の鷹架層中部 層の透水係数の対 数平均値*1とする。
		最も厳しい 設定	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}	5.0×10^{-8}	
	第四紀層	最も可能性 が高い設定	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}	3.0×10^{-6}	廃棄物埋設地付近 で取得した盛土、第 四紀層及び N 値 50 未満の風化した鷹 架層中部層の透水 係数の対数平均値 とする。
		最も厳しい 設定	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}	3.0×10^{-6}	
廃棄物埋設地	上部覆土	最も可能性 が高い設定	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}	3.0×10^{-6}	周辺土壌と同程度 とする(第四紀層の 透水係数と同じ値 とする)。
		最も厳しい 設定	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}	3.0×10^{-6}	
	下部覆土	最も可能性 が高い設定	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	周辺岩盤*2 よりも 若干小さい透水係 数とする。
		最も厳しい 設定	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	
	難透水性 覆土	最も可能性 が高い設定	2.5×10^{-9}	2.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}	1,000 年後の力学 及び化学影響を考 慮した等価透水係 数とする。
		最も厳しい 設定	3.0×10^{-9}	1.5×10^{-8}	1.5×10^{-8}	
	埋設設備	最も可能性 が高い設定	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	砂程度に劣化した 状態の透水係数と する。
		最も厳しい 設定	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	

*1:原位置試験の対数平均値と巨視的透水係数(割目と基質部における原位置透水試験の透水係数とボーリングや掘削面の地質観察で得た割目のデータから計算)が同程度であることから、簡単に求められる原位置試験の対数平均値を採用した。なお、これらの透水係数を用いて敷地の調査坑道の空洞からの湧水量を3次元地下水浸透流解析で計算し、実測値とほぼ一致していることを確認している。

*2:想定した周辺岩盤は N 値 50 以上の鷹架層とした(透水係数： $5.0 \times 10^{-8} \sim 1.1 \times 10^{-7}$ (m/s))

第 22 表 線量の評価に用いる埋設設備から上部覆土及び

埋設設備から鷹架層への流出水量

廃棄物埋設地	設定	埋設設備から上部覆土への流出水量 (m ³ /y)	埋設設備から鷹架層への流出水量 (m ³ /y)
1号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	160	2,500
	最も厳しい設定	250	3,600
2号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	40	1,700
	最も厳しい設定	630	2,300
3号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	10	1,100
	最も厳しい設定	990	2,800

g. 線量評価結果

廃止措置の開始後の評価における最も可能性が高い自然事象シナリオの線量の計算結果を第 23 表に示す。評価対象個人の最大線量は約 0.20 μ Sv/y(1号廃棄物埋設地)、約 0.18 μ Sv/y(2号廃棄物埋設地)及び約 8.8×10^{-2} μ Sv/y(3号廃棄物埋設地)である。

また、事業所内の各廃棄物埋設地の重畳を考慮しても最大線量は約 0.46 μ Sv/y であり、「許可基準規則解釈」に示されている線量の 10 μ Sv/y を超えない。

廃止措置の開始後の評価における最も厳しい自然事象シナリオの線量の計算結果を第 24 表に示す。評価対象個人の最大線量は約 3.3 μ Sv/y(1号廃棄物埋設地)、約 4.0 μ Sv/y(2号廃棄物埋設地)及び約 3.8 μ Sv/y(3号廃棄物埋設地)である。

また、事業所内の各廃棄物埋設地の重畳を考慮しても最大線量は約 11 μ Sv/y であり、「許可基準規則解釈」に示されている線量の 300 μ Sv/y を超えない。

なお、各廃棄物埋設地の重畳を考慮した最大線量は、各廃棄物埋設地の土地利用に伴う被ばくの重畳は考えられないが、水利用に伴う経路に比べて線量が低いこと及び線量が最大となる覆土完了後の時期がほぼ同じであることから、それぞれの最大線量を足し合わせている。

また、各バリア材の機能喪失を仮定した各廃棄物埋設地の線量評価結果を第 25 表に示す。バリア機能の一部が喪失した場合を仮定した評価における線量は、最も厳しい線量でも、線量拘束値⁽¹⁾である $300 \mu\text{Sv/y}$ に比べ十分に小さく、各バリアが有する機能については、その機能を構成する特性の一つに過度に依存していない。

第 23 表 廃止措置の開始後における評価の結果
(最も可能性が高い自然事象シナリオ) (1/3)

評価対象個人	1号廃棄物埋設地 線量 ($\mu\text{Sv/y}$)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)	各廃棄物埋設地の重 畳を考慮した線量*1 ($\mu\text{Sv/y}$)
(a) 居住者	約 0.20	約 300	約 0.46

*1：各廃棄物埋設地の最大線量を足し合わせた値。

第 23 表 廃止措置の開始後における評価の結果
(最も可能性が高い自然事象シナリオ) (2/3)

評価対象個人	2号廃棄物埋設地 線量 ($\mu\text{Sv/y}$)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)	各廃棄物埋設地の重 畳を考慮した線量*1 ($\mu\text{Sv/y}$)
(a) 居住者	約 0.18	約 400	約 0.46

*1：各廃棄物埋設地の最大線量を足し合わせた値。

第 23 表 廃止措置の開始後における評価の結果
(最も可能性が高い自然事象シナリオ) (3/3)

評価対象個人	3号廃棄物埋設地 線量 ($\mu\text{Sv/y}$)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)	各廃棄物埋設地の重 畳を考慮した線量*1 ($\mu\text{Sv/y}$)
(a) 居住者	約 8.8×10^{-2}	約 430	約 0.46

*1：各廃棄物埋設地の最大線量を足し合わせた値。

第 24 表 廃止措置の開始後における評価の結果
(最も厳しい自然事象シナリオ) (1/3)

評価対象個人	1号廃棄物埋設地 線量(μ Sv/y)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)	各廃棄物埋設地の重 量を考慮した線量*1,2 (μ Sv/y)
(a) 漁業従事者	約 3.3	約 300	約 11
(b) 農業従事者(米)	約 1.8	約 3,400	
(c) 農業従事者(米以外)	約 0.89	約 1,000	
(d) 畜産業従事者	約 0.66	約 1,150	
(e) 建設業従事者	約 0.77	約 1,200	
(f) 居住者	約 0.82	約 1,200	

*1：各廃棄物埋設地の最大線量を足し合わせた値。

*2：評価対象個人のうち、被ばく線量が最大となる漁業従事者の線量を記載している。

第 24 表 廃止措置の開始後における評価の結果
(最も厳しい自然事象シナリオ) (2/3)

評価対象個人	2号廃棄物埋設地 線量(μ Sv/y)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)	各廃棄物埋設地の重 量を考慮した線量*1,2 (μ Sv/y)
(a) 漁業従事者	約 4.0	約 390	約 11
(b) 農業従事者(米)	約 3.4	約 10,700	
(c) 農業従事者(米以外)	約 0.66	約 9,880	
(d) 畜産業従事者	約 0.63	約 10,200	
(e) 建設業従事者	約 0.80	約 10,300	
(f) 居住者	約 0.87	約 10,300	

*1：各廃棄物埋設地の最大線量を足し合わせた値。

*2：評価対象個人のうち、被ばく線量が最大となる漁業従事者の線量を記載している。

第 24 表 廃止措置の開始後における評価の結果
(最も厳しい自然事象シナリオ) (3/3)

評価対象個人	3号廃棄物埋設地 線量(μ Sv/y)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)	各廃棄物埋設地の重 量を考慮した線量*1,2 (μ Sv/y)
(a) 漁業従事者	約 3.8	約 400	約 11
(b) 農業従事者(米)	約 1.9	約 6,600	
(c) 農業従事者(米以外)	約 0.63	約 6,200	
(d) 畜産業従事者	約 0.62	約 6,200	
(e) 建設業従事者	約 0.79	約 6,200	
(f) 居住者	約 0.85	約 6,200	

*1：各廃棄物埋設地の最大線量を足し合わせた値。

*2：評価対象個人のうち、被ばく線量が最大となる漁業従事者の線量を記載している。

第 25 表 各バリア材の機能喪失を仮定した各廃棄物埋設地の線量評価結果(1/3)

1号廃棄物埋設地					
考慮した状態設定	状態設定に基づく線量評価パラメータ設定値		設定の考え方	線量(μ Sv/y) (居住者*1)	
人工バリアの 取着性を喪失した ケース	分配 係数	廃棄体(m ³ /kg)	全核種 0	人工バリアの取着性を無視したケースとして、覆土完了時点から分配平衡領域の分配係数を全核種 0m ³ /kg と設定する。	約 0.71 支配核種：C-14
		充填モルタル(m ³ /kg)	全核種 0		
		コンクリート(m ³ /kg)	全核種 0		
天然バリアの 取着性を喪失した ケース	分配 係数	岩盤(鷹架層)(m ³ /kg)	全核種 0	天然バリアの化学的遅延機能を無視したケースとして、覆土完了時点から鷹架層の分配係数を全核種 0m ³ /kg と設定する。	約 14 支配核種： Ni-63*2
人工バリアの 低透水性を喪失した ケース*3*4	埋設設備から 覆土への 流出水量(m ³ /y)		5,300	人工バリアの低透水性を無視したケースとして、覆土完了時点から各バリアの透水係数を最も厳しい自然事象シナリオの設定(1.5×10 ⁻⁸ m/s)よりも更に厳しい設定(1.0×10 ⁻⁷ m/s)とする。*3	約 41 支配核種：Ni-63
	埋設設備から 鷹架層への 流出水量(m ³ /y)		11,000		
最も可能性が高い 自然事象シナリオ	-		-	-	約 0.20 支配核種：C-14

*1：最も可能性が高い自然事象シナリオにおける全ての被ばく経路を対象とした。

*2：最も可能性が高い自然事象シナリオの支配核種である C-14 は天然バリアの取着性(分配係数)が小さいことから、支配核種は放射エネルギーの大きい Ni-63 に変わっている。

*3：人工バリアの低透水性の喪失したケースとして、難透水性覆土及び下部覆土の膨潤性が損なわれ、細粒子が残留する状態を想定し、透水係数を 1.0×10⁻⁷m/s と設定する。

*4：本ケースの埋設設備から覆土への流出水量及び埋設設備から鷹架層への流出水量は、設定した透水係数を基に 2 次元地下水浸透流解析により計算を行った。最も可能性が高い自然事象シナリオの設定値はそれぞれ 160m³/y、2,500m³/y、最も厳しい自然事象シナリオの設定値はそれぞれ 250m³/y、3,600m³/y である。

第 25 表 各バリア材の機能喪失を仮定した各廃棄物埋設地の線量評価結果(2/3)

2号廃棄物埋設地					
考慮した状態設定	状態設定に基づく線量評価パラメータ設定値		設定の考え方	線量(μSv/y) (居住者*1)	
人工バリアの 収着性を喪失した ケース	分配 係数	廃棄体(m ³ /kg)	全核種 0	人工バリアの収着性を無視したケースとして、覆土完了時点から分配平衡領域の分配係数を全核種 0m ³ /kg と設定する。	約 3.0 支配核種：C-14
		充填モルタル(m ³ /kg)	全核種 0		
		コンクリート(m ³ /kg)	全核種 0		
天然バリアの 収着性を喪失した ケース	分配 係数	岩盤(鷹架層)(m ³ /kg)	全核種 0	天然バリアの化学的遅延機能は無視したケースとして、覆土完了時点から鷹架層の分配係数を全核種 0m ³ /kg と設定する。	約 7.2 支配核種： Ni-63*2
人工バリアの 低透水性を喪失した ケース*3*4	埋設設備から 覆土への 流出水量(m ³ /y)		3,000	人工バリアの低透水性を無視したケースとして、覆土完了時点から各バリアの透水係数を最も厳しい自然事象シナリオの設定(1.5×10 ⁻⁸ m/s)よりも更に厳しい設定(1.0×10 ⁻⁷ m/s)とする。*3	約 0.67 支配核種：C-14
	埋設設備から 鷹架層への 流出水量(m ³ /y)		3,900		
最も可能性が高い 自然事象シナリオ	-		-	-	約 0.18 支配核種：C-14

*1：最も可能性が高い自然事象シナリオにおける全ての被ばく経路を対象とした。

*2：最も可能性が高い自然事象シナリオの支配核種である C-14 は天然バリアの収着性(分配係数)が小さいことから、支配核種は放射エネルギーの大きい Ni-63 に変わっている。

*3：人工バリアの低透水性の喪失したケースとして、難透水性覆土及び下部覆土の膨潤性が損なわれ、細粒子が残留する状態を想定し、透水係数を 1.0×10⁻⁷m/s と設定する。

*4：本ケースの埋設設備から覆土への流出水量及び埋設設備から鷹架層への流出水量は、設定した透水係数を基に 2次元地下水浸透流解析により計算を行った。最も可能性が高い自然事象シナリオの設定値はそれぞれ 40m³/y、1,700m³/y、最も厳しい自然事象シナリオの設定値はそれぞれ 630m³/y、2,300m³/y である。

第 25 表 各バリア材の機能喪失を仮定した各廃棄物埋設地の線量評価結果 (3/3)

3号廃棄物埋設地					
考慮した状態設定	状態設定に基づく線量評価パラメータ設定値		設定の考え方	線量 ($\mu\text{Sv/y}$) (居住者*1)	
人工バリアの収着性を喪失したケース	分配係数	廃棄体 (m^3/kg)	全核種 0	人工バリアの収着性を無視したケースとして、覆土完了時点から分配平衡領域の分配係数を全核種 $0\text{m}^3/\text{kg}$ と設定する。	約 1.9 支配核種 : C-14
		充填モルタル (m^3/kg)	全核種 0		
		コンクリート (m^3/kg)	全核種 0		
天然バリアの収着性を喪失したケース	分配係数	岩盤 (鷹架層) (m^3/kg)	全核種 0	天然バリアの化学的遅延機能を無視したケースとして、覆土完了時点から鷹架層の分配係数を全核種 $0\text{m}^3/\text{kg}$ と設定する。	約 0.76 支配核種 : Am-241*2
人工バリアの低透水性を喪失したケース*3*4		埋設設備から覆土への流出水量 (m^3/y)	5,200	人工バリアの低透水性を無視したケースとして、覆土完了時点から各バリアの透水係数を最も厳しい自然事象シナリオの設定 ($1.5 \times 10^{-8}\text{m/s}$) よりも更に厳しい設定 ($1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$) とする。*3	約 0.77 支配核種 : C-14
		埋設設備から鷹架層への流出水量 (m^3/y)	6,200		
最も可能性が高い自然事象シナリオ		-	-	-	約 8.8×10^{-2} 支配核種 : C-14

*1 : 最も可能性が高い自然事象シナリオにおける全ての被ばく経路を対象とした。

*2 : 最も可能性が高い自然事象シナリオの支配核種である C-14 は天然バリアの収着性 (分配係数) が小さいことから、支配核種は天然バリアの収着性 (分配係数) の大きい Am-241 に変わっている。

*3 : 人工バリアの低透水性の喪失したケースとして、難透水性覆土及び下部覆土の膨潤性が損なわれ、細粒子が残留する状態を想定し、透水係数を $1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$ と設定する。

*4 : 本ケースの埋設設備から覆土への流出水量及び埋設設備から鷹架層への流出水量は、設定した透水係数を基に 2次元地下水浸透流解析により計算を行った。最も可能性が高い自然事象シナリオの設定値はそれぞれ $10\text{m}^3/\text{y}$ 、 $1,100\text{m}^3/\text{y}$ 、最も厳しい自然事象シナリオの設定値はそれぞれ $990\text{m}^3/\text{y}$ 、 $2,800\text{m}^3/\text{y}$ である。

(ii) 人為事象シナリオ

人為事象シナリオは、廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行及び当該掘削後の土地利用を考慮して、典型的なもつともらしい様式化された人間侵入を考慮し、侵入者の受ける線量及びその他の公衆の受ける線量を評価する。

人為事象シナリオでは、敷地及びその周辺の一般的な土地利用では生じるとは考えられない廃棄物埋設地のバリアの損傷をもたらす人間活動を対象とし、廃棄物埋設地の偶発的な大規模掘削を行う建設業従事者及び掘削土壌上に居住する居住者が受ける線量

を評価する。

居住者の受ける線量の評価に当たって、廃棄物埋設地のうち掘削による擾乱を受ける範囲の状態設定は、バリア機能の一部喪失を考慮するものとし、それ以外の状態設定は、人為事象シナリオが発生の可能性の小さい仮想的なシナリオであることから、過度な保守性を避けるため、最も可能性が高い自然事象シナリオと同様とする。また、人為事象によって擾乱を受けない廃棄物埋設地からの線量寄与は考慮しない。

a. 地質環境等の状態設定

(a) 建設業従事者

建設業従事者の建設作業によって受ける線量の評価においては、地質環境等の状態は影響しない。

(b) 居住者

大規模掘削後の土地利用及び水利用に伴う居住者の受ける線量の評価においては、発生の可能性の小さい仮想的なシナリオであることから、過度な保守性を避けるため、地質環境等の状態は最も可能性が高い自然事象シナリオと同様とする。

b. 廃棄物埋設地の状態設定

(a) 建設業従事者

建設業従事者の評価においては、掘削深度の予測が困難であることから、大規模な掘削として、掘削される土壤に含まれる放射性物質の量が多く、保守的となるよう埋設設備底部まで掘削されるものと想定する。また、廃棄物埋設地内の放射性物質の残存量を現実的に設定することが困難であることから、保守的となるよう掘削が生じるまでの期間に放射性物質の漏出が生じないものと想定し、減衰のみを考慮する。

(b) 居住者

居住者の評価においては、大規模な掘削に伴い、廃棄物埋設地の物理的バリア機能である難透水性覆土及び下部覆土の低透水性の機能が周辺土壤程度まで低下するものとし、化学的バリア機能である各バリアの収着性の機能には影響が生じないものと設定する。大規模な掘削に伴うバリア機能喪失の範囲は、掘削範囲と難透水性覆土の施工範囲を考慮して設定する。また、建設業従事者の評価と同様に、掘削による擾乱を受けるまでの期間に放射性物質の漏出が生じないものと想定し、減衰のみを考慮する。

c. 生活環境の状態設定

廃棄物埋設地の大規模な掘削を行う建設業従事者と掘削後の土地利用を行う居住者を線量の評価対象とする。

(a) 建設業従事者

建設業従事者については、自然事象シナリオと同様に放射性物質を含む土壌に接近する掘削作業を設定する。ただし、自然事象シナリオで考慮するその他の人間活動による被ばくは考慮しない。

よって、建設業従事者は、廃棄物埋設地以外に居住する人を対象として、廃棄物埋設地に起因する放射性物質を含まない食品を摂取すると想定する。

(b) 居住者

居住者については、廃棄物埋設地の大規模な掘削後の土地利用として、掘削に伴うバリア機能喪失後の廃棄物埋設地からの地下水移行によって生じる被ばくに関する人間活動(最も可能性が高い自然事象シナリオの水利用と同じ)も考慮する。

よって、居住者は、大規模な掘削後の廃棄物埋設地に居住する人を対象として、家庭菜園により生産される農産物及び市場に流通した食品を摂取すると想定する。

d. 放射性物質の移行挙動及び被ばく経路

廃棄物埋設地の大規模な掘削に伴い、放射性物質は埋設設備、覆土、岩盤(鷹架層)及び周辺土壌と混合した土壌に移行する。また、大規模な掘削による擾乱を受けた後の地下水による沢及び尾駁沼への放射性物質の移行は、自然事象シナリオと同様とする。

このような放射性物質の移行挙動を踏まえ、人為事象シナリオの線量の評価対象とする被ばく経路を以下のとおり設定する。

(a) 建設業従事者

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による外部被ばく及び内部被ばく

(b) 居住者

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による外部被ばく。

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上で生産される農耕農産物(家庭菜園)の摂取による内部被ばく。

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による覆土の低透水性機能喪失後の廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が移行する尾駈沼の水産物の摂取による内部被ばく。

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による覆土の低透水性機能喪失後の廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が移行する沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく。

e. 線量評価モデル

人為事象シナリオにおける評価モデルとして、評価の対象となる領域における放射性物質の移行に関する評価モデル及び被ばく経路に対応した線量を計算するための生活環境における被ばくに関する評価モデルを以下に示す。

(a) 放射性物質の移行に関する評価モデル

(一) 建設作業における土壤中の放射性物質濃度

地下数階を有する建物の建設作業において、掘削された埋設設備を含む土壤中の核種*i*の濃度は(21)式及び(22)式を用いて計算する。

なお、土壤中の核種*i*の濃度の計算において、建設作業が生じるまでの期間に廃棄物埋設地からの核種の漏出は考慮しない。

$$C_d(t, i) = \frac{A(t, i)}{V_w \cdot (1 - \varepsilon_s) \cdot \rho_s} \cdot G_p \quad \dots (21)$$

$$\frac{dA(t, i)}{dt} = -\lambda(i)A(t, i) + \lambda(i)A(t, i + 1) \quad \dots (22)$$

$C_d(t, i)$: 土壤中の核種*i*の濃度 (Bq/kg)

$A(t, i)$: 時刻*t*における核種*i*の総放射エネルギー (Bq) ;

$$A(0, i) = A_0(i)$$

V_w : 廃棄体の総体積 (m³)

ε_s : 土壌の間隙率 (-)

ρ_s : 土壌の粒子密度 (kg/m³)

G_p : 土壌の希釈係数 (-)

(二) 建設作業後の廃棄物埋設地からの地下水による放射性物質の移行

(ア) 埋設設備及び難透水性覆土内の地下水中の移行

埋設設備及び難透水性覆土内の地下水中の核種*i*の濃度は(1)式～(3)式を用

いて計算する。

(イ) 上部覆土内地下水中の移行

上部覆土内地下水中の核種 i の濃度は、(4)式を用いて計算する。

(ウ) 岩盤(鷹架層)内地下水中の移行

岩盤(鷹架層)内地下水中の核種 i の濃度は、(5)式を用いて計算する。

(エ) 尾駮沼水中又は沢水中の放射性物質の濃度

尾駮沼水中又は沢水中の核種 i の濃度は、(6)式を用いて計算する。

(オ) 沢水を利用する灌漑土壤中の放射性物質の濃度

沢水を利用する灌漑土壤中の核種 i の濃度は、(7)式を用いて計算する。

(b) 生活環境における被ばくに関する評価モデル

(一) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による外部被ばく及び内部被ばく

廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業により外部被ばく及び内部被ばくする場合の線量は、それぞれ(14)式及び(15)式を用いて計算する。ただし、土壤中の核種 i の濃度 $C_{soil}(t, i)$ を $C_d(t, i)$ に置き換える。

(二) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による外部被ばく

廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住により外部被ばくする場合の線量は、(16)式を用いて計算する。ただし、土壤中の核種 i の濃度 $C_{soil}(t, i)$ を $C_d(t, i)$ に置き換える。

(三) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上で生産される農耕農産物(家庭菜園)の摂取による内部被ばく

廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌を利用して生産される農耕農産物(家庭菜園)の摂取により内部被ばくする場合の線量は、(19)式及び(20)式を用いて計算する。ただし、土壤中の核種 i の濃度 $C_{soil}(t, i)$ を $C_d(t, i)$ に置き換える。

(四) 尾駮沼の水産物の摂取による内部被ばく

尾駮沼の水産物の摂取により内部被ばくする場合の線量は、(9)式を用いて計算する。

(五) 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく

沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取により内部被ばくする場合の線量は、(10)式及び(11)式を用いて計算する。

f. 線量評価パラメータ

人為事象シナリオは、発生の可能性の小さい仮想的なシナリオであることから、過度な保守性を避けるため、土壌の希釈係数、居住者の屋外における遮蔽係数及び埋設設備からの流出水量以外は、最も可能性が高い自然事象シナリオと同じ値を用いる。各線量評価パラメータの詳細は補足説明資料9を参照。

(a) 建設業従事者

大規模建設作業では、大規模な掘削として埋設設備底部までの掘削を想定し、埋設設備寸法、掘削形状、掘削深度等を考慮して、土壌の希釈係数を設定する。また、掘削時点で廃棄物埋設地に残存する放射エネルギーは掘削までの間の放射性物質の漏出はないものとして設定し、その他の線量評価パラメータは状態設定を踏まえて現実的な値を設定する。

(b) 居住者

掘削土壌にはコンクリート構造物である埋設設備が含まれるため、大規模な掘削によって発生する土壌上での居住に際しては、客土が施されるものとして、居住者の遮蔽係数を設定する。また、掘削の影響を受けた後の埋設設備から上部覆土への流出水量及び埋設設備から岩盤(鷹架層)への流出水量は、覆土の低透水性が損なわれた状態を考慮して、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性の機能が周辺土壌程度まで低下するものとして設定し、その他の線量評価パラメータは、最も可能性が高い自然事象シナリオと同じ値を用いる。

g. 線量評価結果

廃止措置の開始後の評価における人為事象シナリオの線量の計算結果を第26表に示す。

廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による建設業従事者の線量は、約 $5.9 \times 10^{-3} \text{mSv/y}$ (1号廃棄物埋設地)、約 $5.8 \times 10^{-3} \text{mSv/y}$ (2号廃棄物埋設地) 及び約 $2.5 \times 10^{-3} \text{mSv/y}$ (3号廃棄物埋設地) である。

また、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上に居住する居住者の線量は約 $4.2 \times 10^{-2} \text{mSv/y}$ (1号廃棄物埋設地)、約 3.1×10^{-2}

2mSv/y (2号廃棄物埋設地) 及び約 $1.6 \times 10^{-2}\text{mSv/y}$ (3号廃棄物埋設地) であり、「許可基準規則解釈」に示されている線量の 1mSv/y を超えない。

第 26 表 廃止措置の開始後における評価の結果

(人為事象シナリオ) (1/3)

評価対象個人	1号廃棄物埋設地 線量(mSv/y)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)
(a) 建設業従事者	約 5.9×10^{-3}	約 300
(b) 居住者	約 4.2×10^{-2}	約 300

第 26 表 廃止措置の開始後における評価の結果

(人為事象シナリオ) (2/3)

評価対象個人	2号廃棄物埋設地 線量(mSv/y)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)
(a) 建設業従事者	約 5.8×10^{-3}	約 300
(b) 居住者	約 3.1×10^{-2}	約 300

第 26 表 廃止措置の開始後における評価の結果

(人為事象シナリオ) (3/3)

評価対象個人	3号廃棄物埋設地 線量(mSv/y)	線量が最大となる 覆土完了後の時期 (y)
(a) 建設業従事者	約 2.5×10^{-3}	約 300
(b) 居住者	約 1.6×10^{-2}	約 300

5. 参考文献

- (1) International Commission on Radiological Protection(1998): Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 81
- (2) International Commission on Radiological Protection(2006): Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101
- (3) 原子力規制庁: 日本原燃(株)廃棄物埋設事業変更許可申請における廃止措置の開始後の公衆の被ばく線量評価に係る審査方針について～将来の人間活動に関する設定～、第31回原子力規制委員会
- (4) 社団法人 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に
関する研究小委員会(2008): 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用い
る核種移行評価パラメータ設定の考え方
- (5) 高橋雅紀(2004): 日本列島のE-W短縮テクトニクスの原因とその開始時期、日本地震
学会 2004年秋季大会講演予稿集、B048
- (6) 吉田武義、中島淳一、長谷川昭、佐藤比呂志、長橋良隆、木村純一、田中明子、Prima,
O. D. A.、大口健志(2005): 後期新生代、東北本州弧における火成活動史と地殻・マン
トル構造、第四紀研究
- (7) 産業技術総合研究所(2012): 地質・気候関連事象の時間スケールに対する不確実性の
検討、独立行政法人産業技術総合研究所 深部地質環境研究コア
- (8) 工藤崇、小林淳、山元孝広、岡島靖司、水上啓治(2011): 十和田火山における噴火活動
様式の時代変遷と長期予測、日本第四紀学会講演会要旨集、Vol. 41、pp. 82-83
- (9) 小池一之、町田洋編(2001): 日本の海成段丘アトラス、東京大学出版会
- (10) EPICA community members(2004): Eight glacial cycles from an Antarctic ice
core, NATURE, 429
- (11) IPCC(2007): Climate Change 2007: SYNTHESIS REPORT, A Report of the
Intergovernmental Panel Climate Change
- (12) Ayako Abe-Ouchi, Fuyuki Saito, Kenji Kawamura, Maureen E. Raymo, Jun'ichi
Okuno, Kunio Takahashi, Heinz Blatter. (2016): Isolation-driven 100,000-year

glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, vol.500, p.190-194

- (13) ANDRA(2005): Phenomenological evolution of a geological repository
- (14) 登坂博行(2006): 地圏の水環境科学, 東京大学出版会
- (15) Yamanaka, M., Ishikawa, S. and Sugawara, K. (1990): PALYNOLOGICAL STUDIES OF QUATERNARY SEDIMENTS, IN NORTHEAST JAPAN, VII. SHIRIYA-ZAKI MOOR IN SHIMOKITA PENINSULA, *ECOLOGICAL REVIEW*, 22, 1
- (16) 松末和之、藤原治、末吉哲雄(2000): 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候、サイクル機構技報、vol.6
- (17) Nakagawa, T., Tarasova, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002): Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra
- (18) 気象庁(1981~2011): 過去の気象データ検索、
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (19) 気象庁(1981~2011): 世界の地点別年平均値、
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>
- (20) L.Labeyrie, J.Cole, K.Alverson and T.Stocker(2003): The History of Climate Dynamics in the Late Quaternary, *Paleoclimate, Global Change and the Future*, p.33-71.
- (21) Rohling et al.(1998): Magnitudes of sea-level lowstands of the past 500,000 years, *NATURE*, (394), pp.162-165
- (22) IPCC(2013): Climate Change 2013:The Physical Science Basis, AR5, WG I, 第5次評価報告書第1作業部会報告書-技術要約-、気象庁翻訳(2013)
- (23) C.W.Thornthwaite(1948): An Approach toward a Rational Classification of Climate, *Geographical Review* Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94
- (24) 亀井翼(2013): モグラによる遺物の埋没と埋没後擾乱-茨城県稲敷郡美浦村陸平貝塚を対象として-、*第四紀研究*、Vol.52、No.1、pp.1-12
- (25) 一般社団法人 日本原子力学会(2018): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法:2016
- (26) 社団法人 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に

- 関する研究小委員会(2009)：余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方
- (27) 原子力安全委員会(平成 22 年)：余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方
- (28) Nuclear Energy Agency(2000)： Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database
- (29) Nuclear Energy Agency(2006)： The NEA International FEP Database: Version2.1
- (30) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会(平成 15 年)：廃棄物安全小委員会報告書－高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて－
- (31) International Atomic Energy Agency(2004)： Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Results of a co-ordinated research project
- (32) 一般社団法人 日本機械学会(2014)：発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格
- (33) 一般社団法人 日本建築学会(2013)：原子力施設鉄筋コンクリート構造 計算規準・同解説、pp. 76～77
- (34) 横山信吾、佐藤努、大谷祐介、高山英樹、中村邦彦、田中幸久、廣永道彦(平成 19 年)：低レベル放射性廃棄物処分施設における人工バリアの耐久性評価、-アルカリ環境下でのベントナイト系材料中のモンモリロナイト溶解に関する研究-、電力中央研究所研究報告、N07006
- (35) 公益財団法人 土木学会(平成 25 年)：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]、pp. 91-98
- (36) 北海道電力株式会社、東北電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、関西電力株式会社、中国電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社、日本原子力発電株式会社(2016)：充填固化体の標準的な製作方法
- (37) 三菱マテリアル株式会社・日揮株式会社・大成建設株式会社・清水建設株式会社、鹿島建設株式会社(平成 9 年)：六ヶ所 2 号廃棄物埋設施設に関するガスの透気評価
- (38) 藤山哲雄、田中幸久、廣永道彦、森敦史(平成 20 年)：ベントナイト・セメント系材料のガス移行評価に関する文献調査、電力中央研究所 調査報告、N07021
- (39) 田中幸久、廣永道彦(平成 26 年)：飽和した Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性

評価、電力中央研究所報告、N13011

- (40) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘(1998)：カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性－膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数－、PNC TN8410 98-021
- (41) 下水道地震対策技術検討委員会(平成 20 年)：下水道地震対策技術検討委員会報告書 能登半島地震・新潟県中越沖地震の総括と耐震対策の評価および下水道の担うべき機能を継続的に確保する方法の考え方
- (42) 社団法人 地盤工学会(2009)：地盤材料試験の方法と解説
- (43) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(平成 17 年)：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－
- (44) 金子昌章、三浦律彦、藤原愛、山本正史(平成 16 年)：還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (45) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005)：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－根拠資料集 分冊 3 FEP
- (46) 日本原子力研究所(1989)：低レベル放射性廃棄物固化体の長期浸出試験
- (47) 宮脇健太郎、鈴木泰博、本山光志(2018)：アスファルト固化体からの環境影響物質の長期浸出挙動と浸出機構、廃棄物資源循環学会論文誌 Vol.29、pp.127-138
- (48) MARTIN A. GLAUS AND LUC R. VAN LOON(2008)：Degradation of Cellulose under Alkaline Conditions: New Insights from a 12 Years Degradation Study, Environ. Sci. Technol. 42, 2906-2911
- (49) Erich Wieland, Luc R. Van Loon(2003)：Cementitious Near-Field Sorption Data Base for Performance Assessment of an ILW Repository in Opalinus Clay, PSI Bericht Nr. 03-06
- (50) 日本エヌ・ユー・エス株式会社(1988)：六ヶ所村周辺の社会環境実態調査結果報告書
- (51) 青森県健康福祉部保健衛生課(2020)：平成 30 年度版 青森県の水道
- (52) 青森県(平成 19 年)：新むつ小川原開発基本計画素案に係る環境影響評価書
- (53) 六ヶ所村(平成 31 年)：平成 30 年度版 六ヶ所村統計書
- (54) 総務省統計局(2016)：平成 27 年 国勢調査

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

地質環境に係る長期変動事象

2021年6月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 地質環境に係る長期変動事象の考え方.....	2
3. 状態設定.....	3
(1) プレート運動に起因する事象.....	3
(2) 気候変動に起因する事象.....	13
(3) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象.....	51
(4) その他の事象.....	79
4. まとめ.....	81

添付資料1 想定される自然現象の選定について

添付資料2 事業所敷地周辺の地震の発生状況について

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、地質環境に係る長期変動事象について補足説明するものである。

長期状態設定において考慮すべき自然現象を第1表に示す。

第1表 長期状態設定において考慮すべき自然現象^{*1}

起回事象	長期事象	項目
プレート運動に 起因する事象	火山・火成活動	①火山の影響（火砕物密度流、降下火砕物及び火口の開口）
	地震・断層活動	②地震、③断層活動（地盤の変形）、 ④液状化（覆土）
	隆起・沈降運動	⑤隆起・沈降
気候変動に起因する事象		⑥降水量、⑦気温（高温、低温・凍結）、 ⑧海水準変動、⑨蒸発散量、⑩かん養量
プレート運動と気候変動の両者に 起因する事象		⑪河川流量、⑫地下水位（地下水流動）、 ⑬侵食
その他の事象		⑭透水性の変化、⑮生物学的事象

*1：長期状態設定において考慮すべき自然現象の選定については、添付資料1に詳細を示す。

2. 地質環境に係る長期変動事象の考え方

埋設設備を設置する地下の環境は、自然現象の影響を受け難いことから、地上に比べ安定である。しかし、長期的な観点でみると、プレート運動及び気候変動によって、廃棄物埋設地を取り巻く地質環境等は有意に変化することが予測される。

この地質環境等に係る長期変動事象について、「プレート運動に起因する事象」、「気候変動に起因する事象」及び「プレート運動と気候変動の両者に起因する事象」に区分する⁽¹⁾。区分した各事象については、プレート運動や気候変動が過去から現在までの変動傾向とその要因が今後も継続するとみなし、それらを外挿して状態設定を行う。状態設定は、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定を設定する。

- ・最も可能性が高い設定：将来起こり得るなかで最も可能性が高いと考えられる状態とする。
- ・最も厳しい設定：過去の変化傾向とその要因の不確かさを網羅的に考慮し、科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい状態とする。

廃棄物埋設地等の状態の設定を行う将来の期間は、廃止措置の開始までの十分な減衰及び岩盤(鷹架層)中の移行遅延を期待できない放射性物質の影響が、比較的有意に生じると想定される時期を含む期間である1,000年程度とし、線量評価においては、覆土完了時点において廃棄物埋設地及びその周辺環境は1,000年後の状態になるものとし、その状態が継続するものとする。なお、最も可能性が高いと考えられる状態の設定が困難である場合又は様々な不確かさを考慮したとしても線量への影響が小さいと考えられる場合は、不確かさを考慮して保守的な状態を設定する。また、事象同士が密接に関係しており、両者で不確かさを考慮するのが適切でないと考えられる場合は、評価において保守的となる事象で不確かさを考慮して設定する。

3. 状態設定

(1) プレート運動に起因する事象

日本周辺には、大陸プレートであるユーラシアプレート及び北米プレート並びに海洋プレートであるフィリピン海プレート及び太平洋プレートがあり、大陸プレートの下に海洋プレートが沈み込んでいる。敷地の位置する東北日本弧は北米プレートに位置し、東側から太平洋プレートが沈み込むことで、おおむね東西方向の圧縮の力が生じている。

将来の日本列島周辺のプレート運動については、今後数十万年から数百万年程度継続すると考えられる^{(1)~(4)}。したがって、状態設定においては、現在のプレート運動が継続するものとして設定する。

プレート運動に起因する事象には、「火山・火成活動」、「地震・断層活動」及び「隆起・沈降運動」があげられる。

(i) 火山・火成活動

火山・火成活動によって、直接的に廃棄物埋設地が損傷すること、また、敷地周辺が高温になること及び地下水の水質の変化によって地下水流動場が変化することが想定されることから、火山・火成活動による状態設定を行う。覆土完了までの間において、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性のある火山・火成活動は降下火砕物だけであるが、覆土完了後においては火砕物密度流についても想定する。長期変動事象としては、直接的に廃棄物埋設地が損傷することが想定される事象として、新しい火口の開口を想定する。

以上より、火山・火成活動として降下火砕物、火砕物密度流及び火口の開口を想定する。

a. 降下火砕物

覆土完了後において、降下火砕物が堆積することにより、降下火砕物に含まれる成分によって地下水の水質変化が生じることが想定されるため、廃棄物埋設地の状態設定において化学的影響を考慮する。

b. 火砕物密度流

火砕物密度流は、今後数百年から数千年スケールには、敷地に到達する可能性は十分に低く⁽⁵⁾、仮に敷地に到達したとしても、火砕物密度流の影響範囲は

表層に限定されるため、火砕物密度流の熱的影響及び化学的影響は長期変動事象として考慮しない。

c. 火口の開口

新しい火口の開口は、敷地が廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の過去の火口及びその近傍に位置しないこと、並びに火山フロントより前弧側（東方）に位置することから、これらの火山事象が敷地において発生する可能性はない。よって、新しい火口の開口は長期変動事象として考慮しない。

(ii) 地震・断層活動

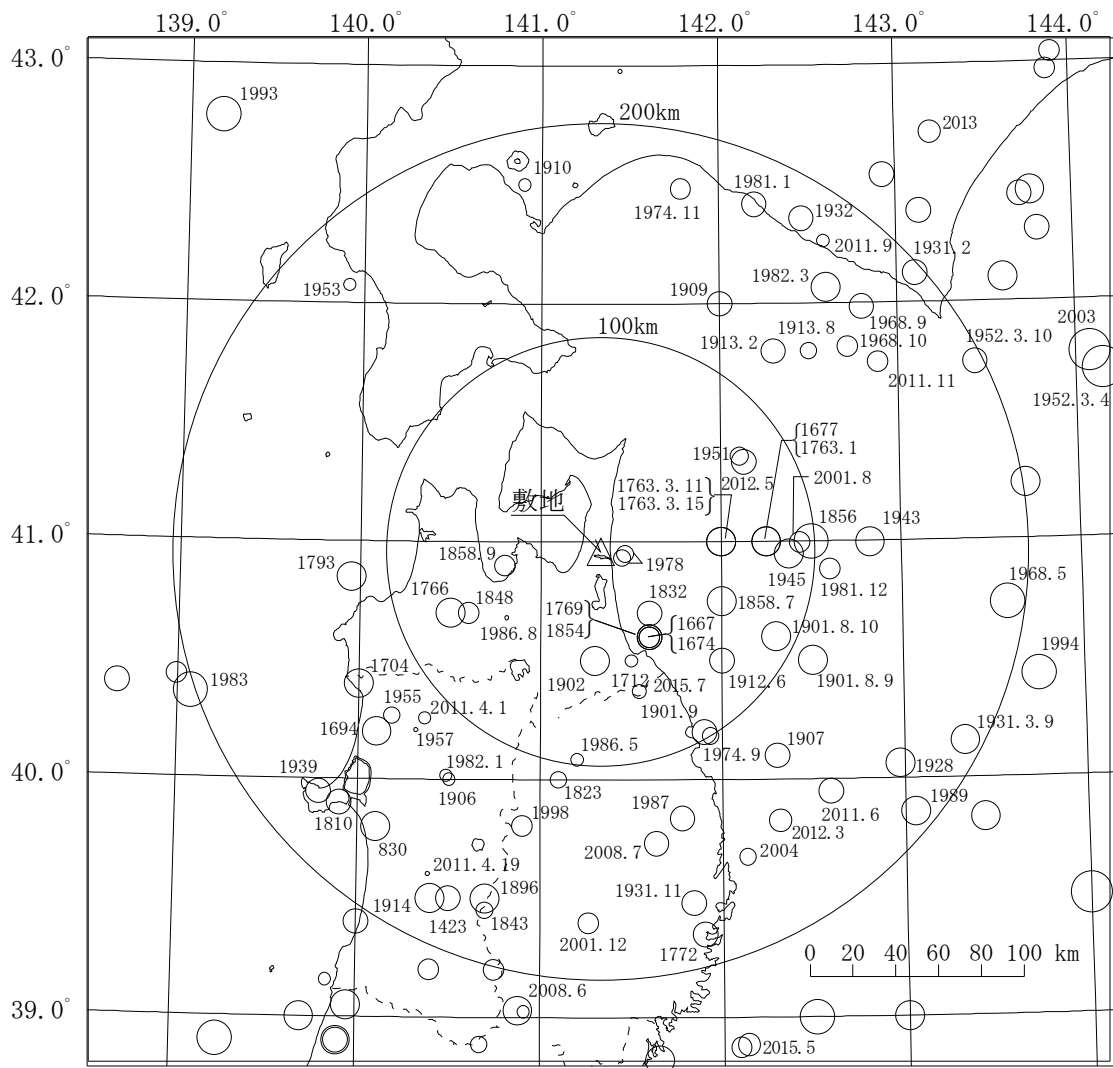
地震・断層活動については、現在のプレート運動が継続するとされていることから、将来も同様の場所で繰り返し発生すると想定する。

a. 地震

敷地周辺の被害地震の震央分布（敷地からの震央距離 200km 程度以内）を第 1 図に、敷地周辺の被害地震のマグニチュードと震央距離の関係を第 2 図に示す。敷地付近は、過去の被害地震から、マグニチュード 6 を超える地震の発生はなく、震度 5 強を超える地震の発生もない地域である（添付資料 2）。

覆土（難透水性覆土及び下部覆土）に力学的な変形が生じることにより、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において力学的影響を評価する。

震度 4 程度の地震時において、敷地内の観測孔で地下水位の変動が確認されている（第 1 図参照）。観測結果によると、震度 4 程度の地震では地下水位の変動は小さく、季節変動に内包される程度であった。したがって、地震活動による水理的影響は小さく、一時的なものであることから、地震の水理的影響は長期変動事象として考慮しない。



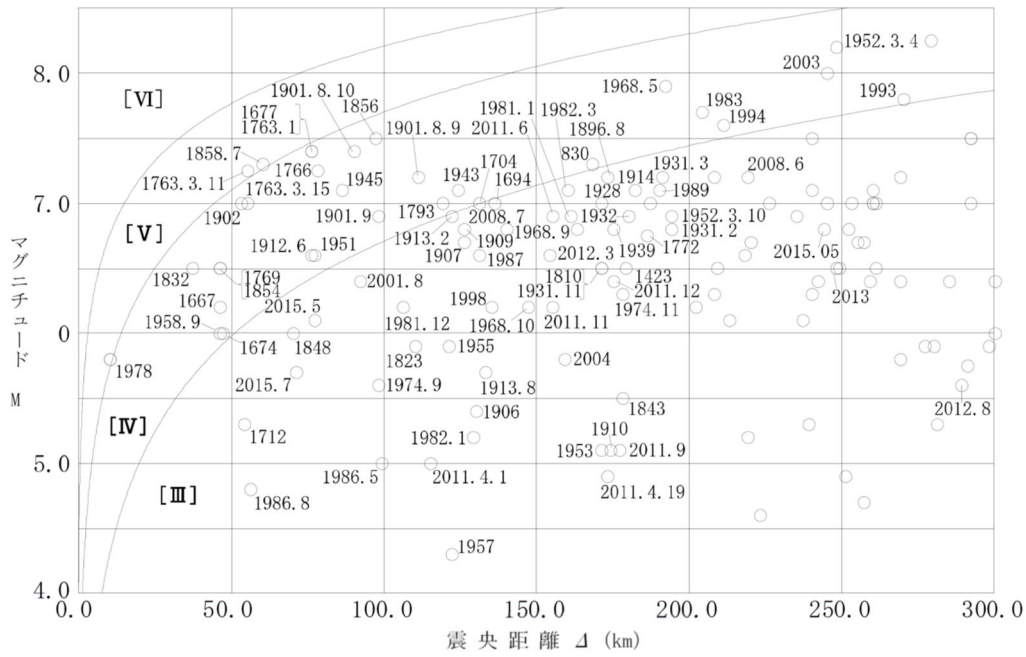
注1：図中の数字は地震発生年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。

注2：地震緒元は、1884年以前の地震については「日本被害地震総覧」⁽⁶⁾による値を、1885年以降1922年以前の地震については「宇津カタログ(1982)」⁽⁷⁾による値を、さらに1923年以降の地震については「気象庁地震カタログ」⁽⁸⁾による値をそれぞれ用いている。

凡例	
	$8.0 \leq M$
	$7.5 \leq M < 8.0$
	$7.0 \leq M < 7.5$
	$6.5 \leq M < 7.0$
	$6.0 \leq M < 6.5$
	$5.5 \leq M < 6.0$
	$5.0 \leq M < 5.5$
	$M < 5.0$

第1図 敷地周辺の被害地震の震央分布

(敷地からの震央距離 200km 程度以内)



注1：図中の数字は地震発生年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。

注2：[Ⅲ]～[Ⅵ]は気象庁震度階級で、村松(1969)⁽⁹⁾、勝又・徳永(1971)⁽¹⁰⁾による。

第2図 敷地周辺の被害地震のマグニチュード-震央距離

b. 断層活動(地盤の変形)

断層活動に伴う地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊されることが想定される。

第 3 図に敷地周辺の空中写真判読結果を示す。空中写真判読結果及び地質調査から、活断層は廃棄物埋設地付近には分布しておらず、最も近い活断層は、敷地近傍の六ヶ所村出戸付近に分布する出戸西方断層である。出戸西方断層は、西傾斜の逆断層であり、その長さを約 11km と評価している。しかし、敷地には、出戸西方断層に起因する変動地形及びリニアメント並びに出戸西方断層に関連した地質構造は確認されていない。したがって、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊される可能性は十分低い。

出戸西方断層以外の活断層については、廃棄物埋設地から更に離れており、断層活動があったとしても、廃棄物埋設地に力学的影響は及ばない。

以上より、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊される可能性は十分低いと、断層活動の力学的影響は長期変動事象として考慮しない。

c. 液状化(覆土)

覆土(難透水性覆土、下部覆土)が液状化することによって、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において液状化による影響を考慮する。

液状化(覆土)の詳細な評価については、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 廃棄物埋設地の状態設定-影響事象分析-」に示す。

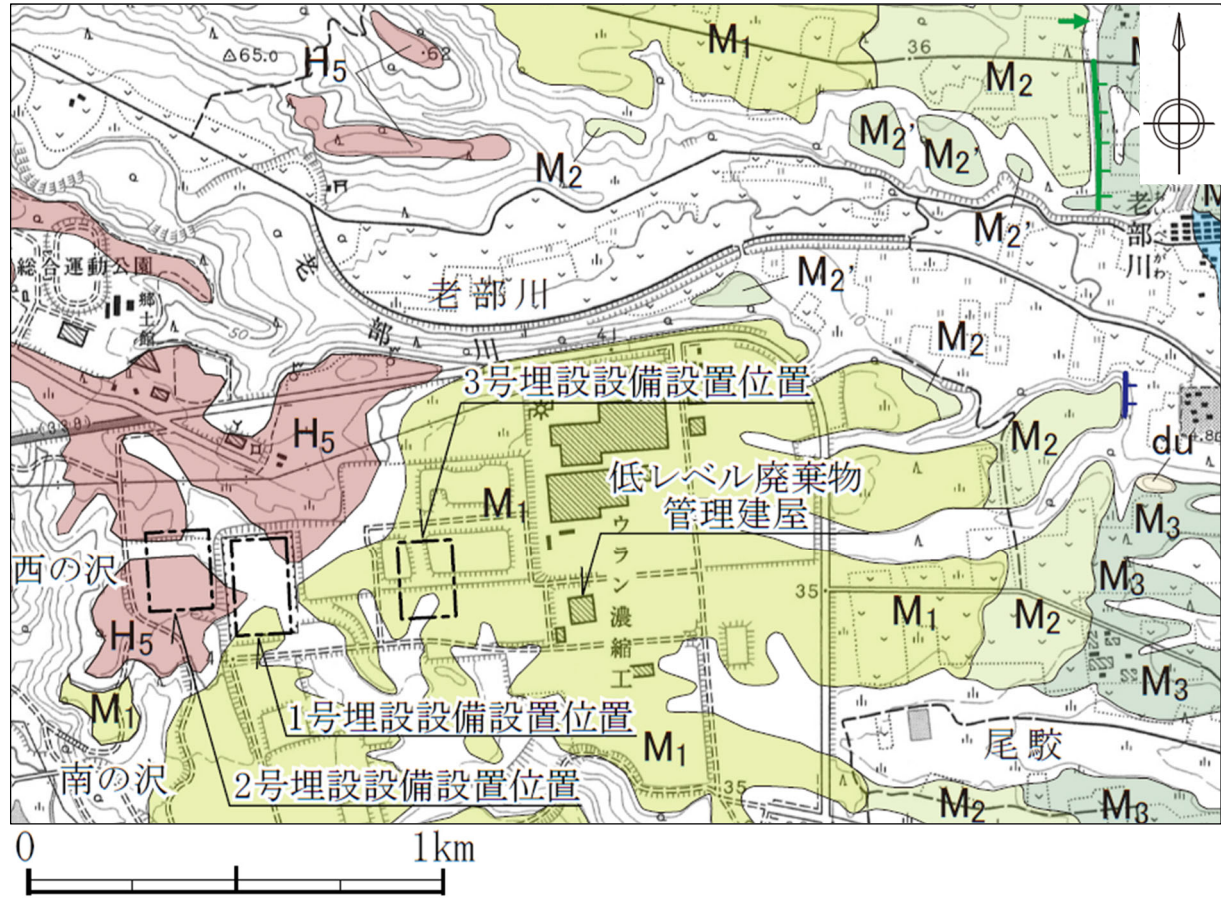
変動地形に基づいた
リアメントの判読結果の凡例

L_A 変動地形である可能性が高い
L_B 変動地形である可能性がある
L_C 変動地形である可能性が低い
L_D 変動地形である可能性は非常に低い

○ 短線の方向は、低い地形の方向を示す。
○ 短線の無いリアメントは、その両側で高度の不連続が認められないもの。
↓↓ 段丘面上の急傾斜部矢印の方向は傾斜方向を示す。

地形面区分凡例

du	砂丘	
L ₁	L ₁ 面	低位面
M _{3'}	M _{3'} 面	中位面
M ₃	M ₃ 面	
M _{2'}	M _{2'} 面	
M ₂	M ₂ 面	
M ₁	M ₁ 面	
H ₅	H ₅ 面	高位面



第3図 敷地周辺の空中写真判読結果

(iii) 隆起・沈降運動

a. 隆起・沈降

隆起・沈降運動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形勾配の変化や侵食基準面から廃棄物埋設地までの比高の変化に伴い侵食・堆積環境が変化する。侵食・堆積環境の変化により、地下水流動に影響すること、また、埋設設備が地表に接近する可能性があることから、隆起・沈降運動を長期変動事象として考慮し、隆起・沈降運動の速度を設定する。

敷地の位置する下北半島付近には、過去約 70 万年間に形成された海成段丘が分布することから、敷地及びその周辺は、少なくとも同期間において大局的には隆起域と考えられる。したがって、敷地周辺では将来も隆起運動が継続すると想定し、状態設定として隆起速度を設定する。

(a) 隆起速度の設定に関する考え方

小池・町田(2001)⁽¹¹⁾から、下北半島周辺(むつ-野辺地以東の尻屋崎～三沢間)の海成段丘面の形成年代と旧汀線高度及び相対海水準を考慮した隆起量について整理したものを第 4 図に示す。

隆起速度は、廃棄物埋設地付近に分布する海成段丘面の形成年代と旧汀線標高及び海水準変動等を考慮して、下記の式から算出する。

隆起速度 = (旧汀線標高 - 段丘面形成時の海水準 - 火山灰層層厚) / 段丘面形成年代

なお、下北半島周辺における海成段丘面の過去約 70 万年間の平均隆起速度は、2.0m/万年～4.5m/万年である。

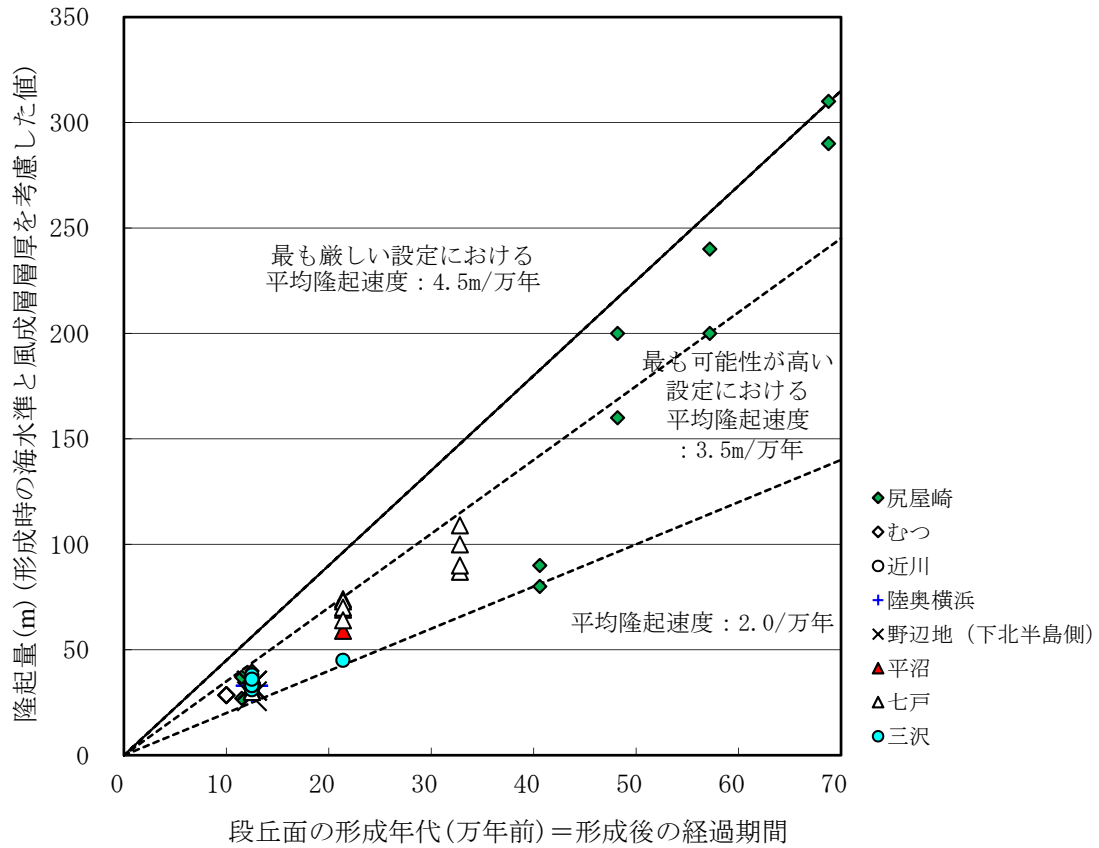
(一) 最も可能性が高い設定

敷地内の海成段丘面(M1 面、12.5 万年前)の旧汀線分布を第 5 図に、敷地における M1 面の状況を第 2 表に示す。最も可能性が高い設定における隆起速度は、廃棄物埋設地付近に分布する M1 面の形成年代と旧汀線標高及び海水準変動等を考慮して算出する。

(二) 最も厳しい設定

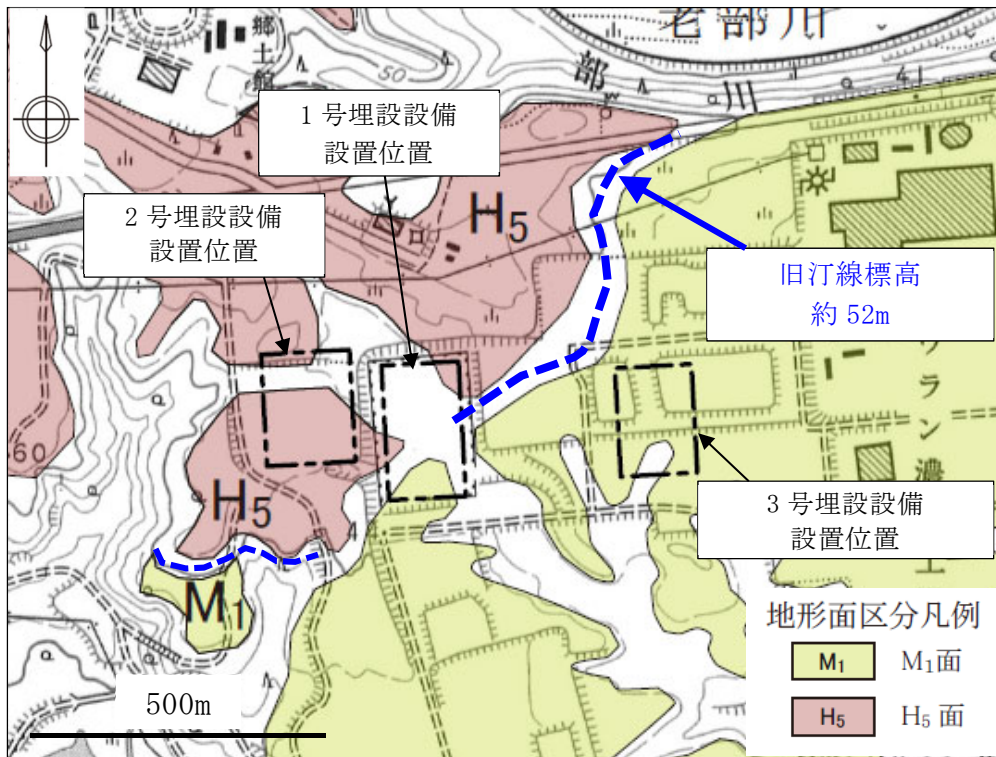
最も厳しい設定においては、隆起速度が速い方が相対的な海水準が低下し、河川の侵食が進むため、埋設設備の露呈時期が早くなることを考慮する。したがって、最も厳しい設定における隆起速度は、最も隆起速度が速い地点を

包含する速度を設定する。



第4図 尻屋崎～三沢の海成段丘面の形成年代と平均隆起量との関係*1

*1：段丘面の形成年代及び隆起量は、小池・町田(2001)⁽¹¹⁾に基づき作成。



第5図 敷地内のM1面の旧汀線分布と標高

第2表 敷地におけるM1面の状況

旧汀線標高(分布境界)	EL52m
火山灰層層厚(敷地平均値)	3m
段丘面形成年代	12.5万年前
段丘面形成時の海水準(現在比+)	+5m

(b) 隆起速度の状態設定

隆起速度の状態設定結果を第3表に示す。

(一) 最も可能性が高い設定

廃棄物埋設地付近に分布する海成段丘面(M1面、12.5万年)の形成年代と旧汀線高度及び相対海水準を考慮して平均隆起速度を計算すると最大で3.5m/万年である。

隆起速度 = (旧汀線標高 - 段丘面形成時の海水準 - 火山灰層層厚) / 段丘面形成年代

$$\text{隆起速度} = (52\text{m} - 5\text{m} - 3\text{m}) / 12.5 \text{ 万年} \approx 3.5\text{m/万年}$$

(二) 最も厳しい設定

下北半島周辺の平均隆起速度は、2.0m/万年～4.5m/万年の範囲となるため、下北半島周辺の隆起速度のばらつきを考慮し、隆起速度が最も大きい4.5m/万年を最も厳しい設定とする。

第3表 隆起速度の設定値

ケース	隆起速度 (m/万年)
最も可能性が高い 設定	3.5
最も厳しい設定	4.5

(2) 気候変動に起因する事象

気候変動は、数十万年前から現在まで約 8 万年周期から約 12 万年周期で氷期と間氷期を繰り返していることから⁽¹²⁾、大局的には将来もこの周期の気候変動を繰り返すと考えられる。過去の気候変動の傾向から、今後氷期へ向かうと考えられることから⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、将来は寒冷化すると予測される。

一方で、人間活動に伴う温室効果ガス排出により、温暖化が進行する可能性があるとする報告⁽¹²⁾や、現在の温室効果ガス濃度を基準として、炭素循環のメカニズムを仮定した気候シミュレーションにより、将来 5 万年程度は温暖期が継続する可能性があるとする報告もある⁽¹⁵⁾。

以上より、気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定については、過去の気候変動と同様に現在から寒冷化に向かう場合(以下「寒冷化ケース」という。)と、温暖期が数万年程度継続する場合(以下「温暖期継続ケース」という。)の 2 ケースに大別し、これらの 2 ケースについて、それぞれ「気温」、「降水量」、「海水準変動」、「蒸発散量」「かん養量」を長期変動事象として考慮する⁽¹⁾。

(i) 気温

気温変化は、廃棄物埋施設を直接損傷させることはないが、気温の変化により表層での水収支の変化に伴って地下水流動及び表流水流動が変化することが想定される。よって、気温変化を長期変動事象として考慮し、将来の気温を設定する。

a. 気温の設定に関する考え方

将来の気温変化については、花粉化石及び南極氷床コアの水素同位体比を用いた過去の気温の推定に関する知見⁽¹²⁾及び人間活動による温室効果ガス濃度を考慮した気温変動予測結果に基づいて設定する。EPICA(2004)⁽¹²⁾に示される過去 45 万年間の氷床コアの同位体比に基づく気温変動曲線を第 6 図に示す。氷床コアの同位体比の変動を気温変動の指標とし、過去 4 回の気温変動(氷期及び間氷期の繰り返し)の間氷期最盛期のピークを基準として重ね合わせ、亜氷期までの時間及び気温変動割合を設定する。気温変動割合は、第 6 図に示した変動曲線において、現在を 0 とし、氷期最盛期を 100 としたときの気温の変動割合を示す。

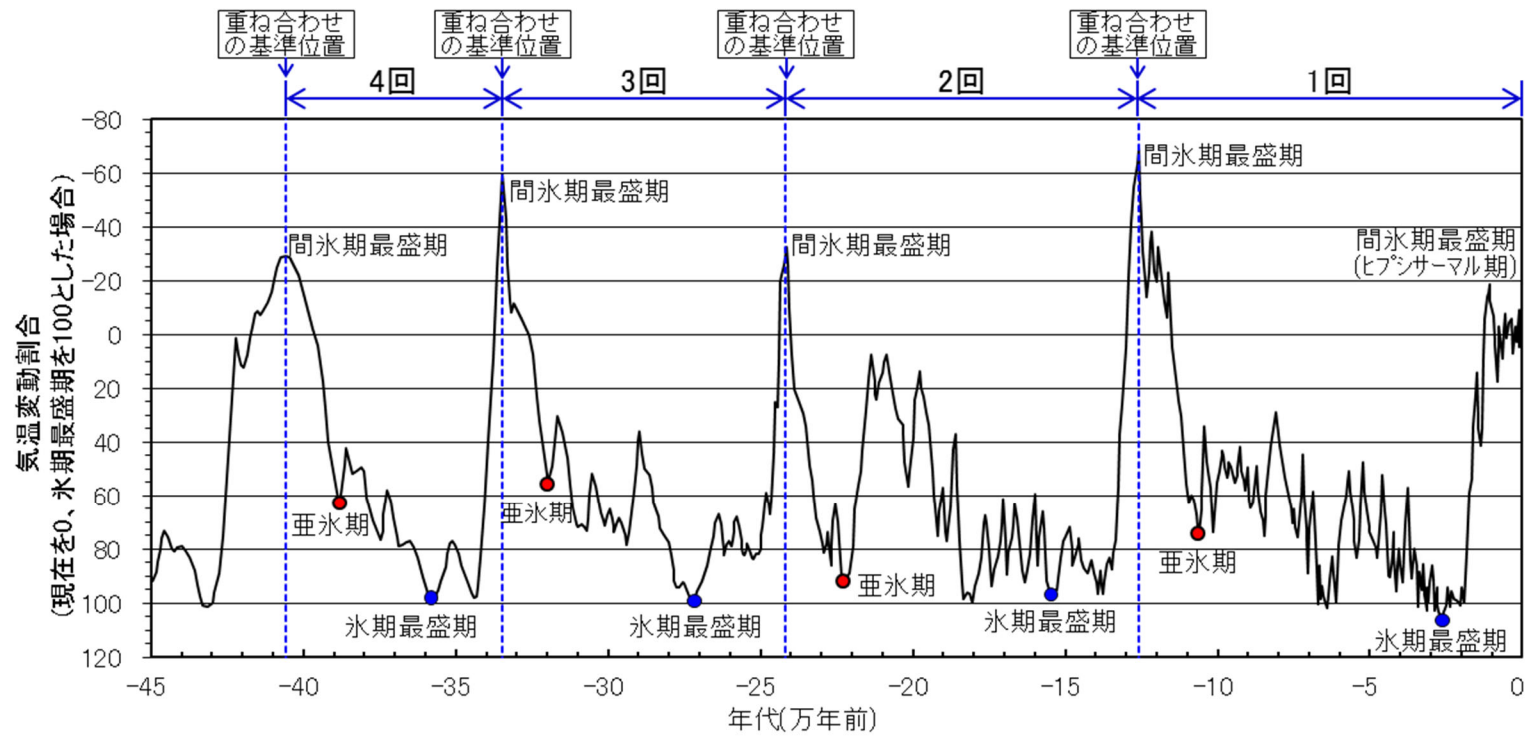
将来の気温は、気温変動割合及び氷期最盛期の気温から設定することとし、氷期最盛期の気温は、花粉化石を用いて推定された最終氷期最盛期の気温から設定する。

花粉化石は、Yamanaka et al. (1990)⁽¹⁶⁾で取得されている下北半島の北部の尻屋崎湿原における最終氷期最盛期頃の花粉化石群集データ及び敷地近傍の尾駁沼の沖積層堆積物における過去約1万年間の花粉化石群集データを用いた。

花粉化石を用いた過去の気温の推定方法は、松末ほか(2000)⁽¹⁷⁾の手法及びNakagawa et al. (2002)⁽¹⁸⁾の手法を用いた。

気温は降水量と正の相関関係があり⁽¹⁹⁾、降水量が低下するほど希釈に寄与する交換水量が少なくなるため、気温及び降水量は低いほど保守的な設定となるが、降水量の推定そのものにも不確かさがある。

希釈水量の設定の観点で、気温変動の不確かさと、気温と降水量の相関性の不確かさを考慮するが、気温と降水量の相関性においては降水量の設定で後述するように一定程度の統計的な不確かさの情報が得られることから、将来の気温の設定は、最も可能性が高い設定と最も厳しい設定では同一とする。



第 6 図 過去の気温変動曲線*1

*1：気温変動曲線は EPICA (2004)⁽¹²⁾ に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を重ね合わせの基準位置とした。

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおいては、氷期最盛期の年平均気温から求めた気温変動割合を用いて将来の気温を設定する。氷期最盛期に至るまでの気温変化については、過去約 45 万年間の連続的なデータが取得されている南極氷床コアの水素同位体比⁽¹²⁾に基づいて整理された年平均気温の変化量の変動グラフを用いて設定する。将来の気温の変動曲線を第 7 図に示す。同図から、最も可能性が高い設定では約 8 万年後に氷期最盛期になると想定する。

将来の亜氷期までの時間は、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期及び氷期最盛期までの時間の平均値から設定する。

現在の年平均気温は、六ヶ所地域気象観測所の観測値(1975 年～2015 年)の平均値とする。

将来の氷期最盛期の気温は、Yamanaka et al. (1990)⁽¹⁶⁾で取得されている下北半島北部の尻屋崎湿原における最終氷期最盛期頃の花粉化石群集データを用いて推定した気温の平均値から設定する。また、将来の亜氷期の気温は、過去 4 回の亜氷期における気温変動割合の平均値から設定する。

1,000 年後の気温は、現在から亜氷期までの時間及び気温変動割合の平均値を結んだ直線を用いて求める。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおいては、温暖期における最高気温のみを設定し、その気温が現在から継続すると想定する。温暖期継続ケースの気温は、人間活動による影響を考慮した IPCC(2007)⁽¹³⁾による温暖化の知見及び過去 30 年間の敷地周辺の年平均気温を考慮し、その気温が現在から評価期間中継続すると想定して設定する。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

将来の気温の変動曲線を第 8 図に示す。同図から、最も厳しい設定では約 6 万年後に氷期最盛期になると想定する。

気温は低下量が大きく、低下時期が早いほど保守的な設定となるため、最

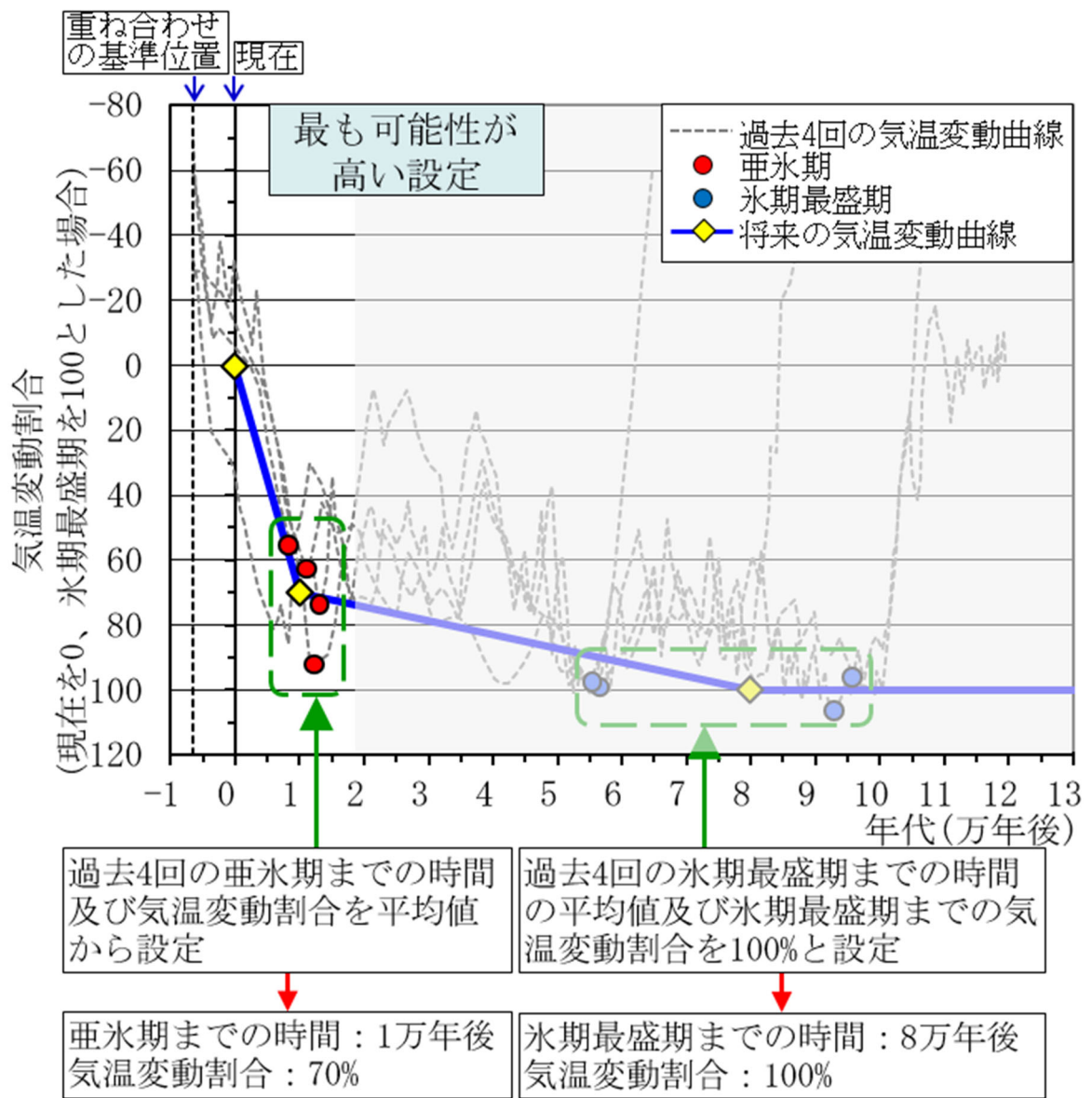
も厳しい設定における将来の亜氷期までの時間は、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期までの時間の最短値から設定する。

最も厳しい設定における現在の年平均気温及び将来の氷期最盛期の気温は、後述する気温と降水量の相関性の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、最も厳しい設定には最も可能性が高い設定の気温を用いる。また、将来の亜氷期の気温は、気温の低下量が大きいほど保守的となるため、過去 4 回の亜氷期における気温変動割合の最大値から設定する。

1,000 年後の気温は、現在から亜氷期までの時間の最短値及び気温変動割合の最大値を結んだ直線を用いて求める。

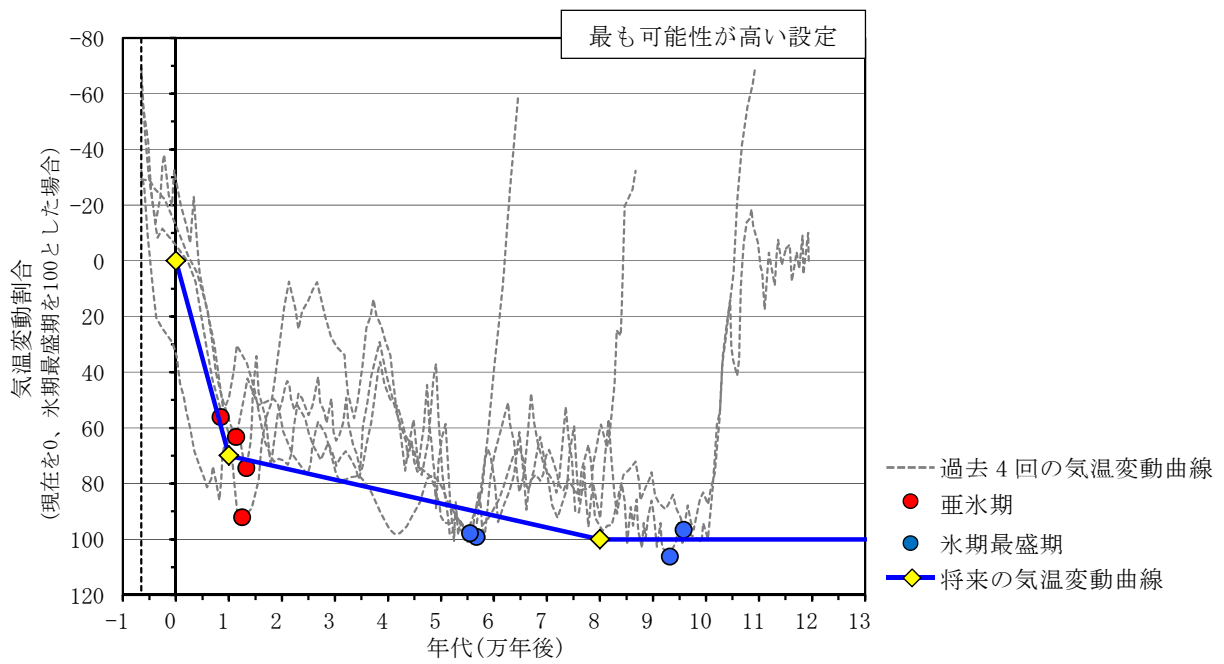
(二) 温暖期継続ケース

寒冷化ケースと同様に後述する降水量の状態設定における気温と降水量の相関関係において、不確かさを考慮した方が希積に寄与する交換水量は少なくなることから、ここでは最も可能性が高い設定の気温を用いる。



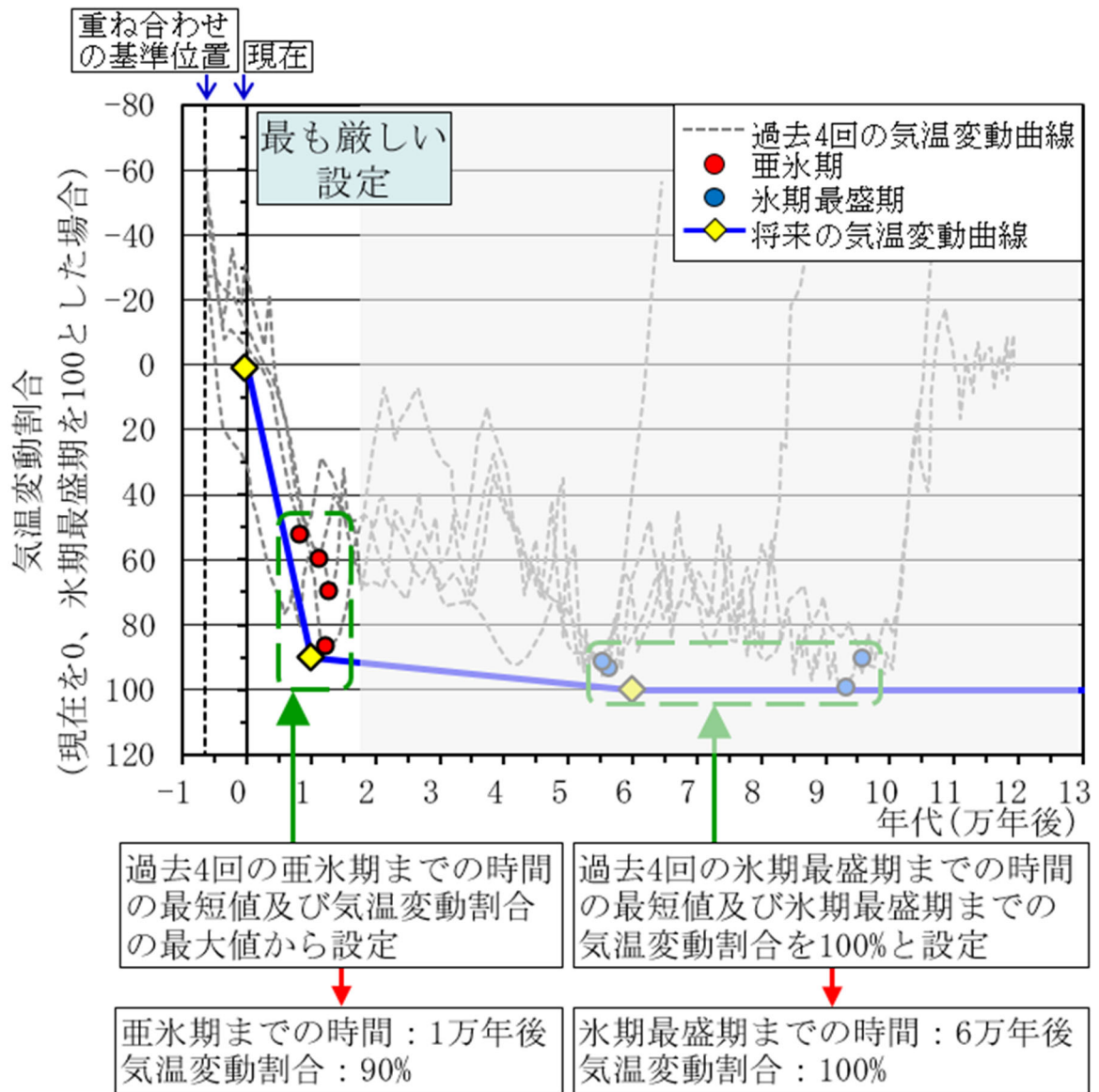
注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽¹²⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第7図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース)(最も可能性が高い設定)(1/2)



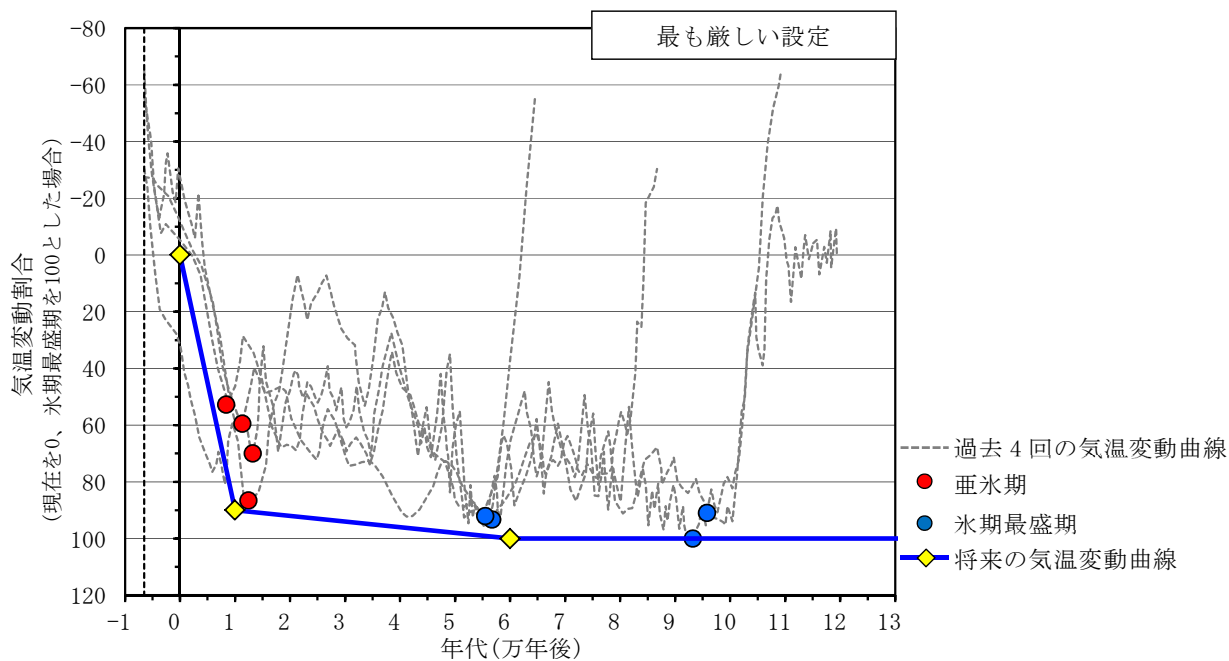
注 1 : 気温変動曲線は EPICA (2004) ⁽¹²⁾ に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。

第 7 図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース) (最も可能性が高い設定)*1 (2/2)



注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽¹²⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第8図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース)(最も厳しい設定)*¹(1/2)



注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽¹²⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第8図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース)(最も厳しい設定)^{*1(2/2)}

b. 気温変化

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

最も可能性が高い設定における現在の年平均気温は、六ヶ所地域気象観測所の観測値(1975年～2015年)の平均値である9℃とする。

花粉化石群集データを用いて松末ほか(2000)⁽¹⁷⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽¹⁸⁾の手法により敷地周辺の最終氷期最盛期の年平均気温を推定すると、それぞれ約-2.2℃と約3.7℃であった(第9図)。

このことから、将来の氷期最盛期の年平均気温は両手法の値から、平均的な値として0℃とする。

10,000年後の亜氷期の気温は、現在の気温(9℃)及び氷期最盛期(0℃)から気温変動割合(70%)を考慮し、3℃と設定する。

1,000年後の気温は、現在の気温(9℃)から10,000年後の亜氷期における気温(3℃)の変化率を考慮して、8.4℃となることから保守側に切り下げて、8℃と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

尾駁沼の沖積層堆積物から過去約1万年間の花粉化石群集データを取得し、そのデータを用いて松末ほか(2000)⁽¹⁷⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽¹⁸⁾の手法により敷地周辺のヒブシサーマル期の年平均気温を推定すると、それぞれ約12.2℃と約10.4℃であった(第9図参照)。

一方、人間活動による温室効果ガス濃度を考慮したシミュレーション結果によれば、2090年～2099年には世界平均で現在より0.3℃～6.4℃上昇する可能性が指摘されている⁽¹³⁾。よって、過去30年間の敷地周辺の年平均気温である9℃にシミュレーション結果の平均的な上昇値である3℃を加えた12℃を最も可能性が高い設定とする。この値は、花粉化石群集データより推定した12.2℃とも整合している。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

最も厳しい設定における現在の年平均気温は、六ヶ所地域気象観測所の観測値(1975年～2015年)における年平均気温の最低値である8℃となるが、降水量の不確かさを考慮した方が希釈水量は少なくなるため、最も可能性が高い設定の9℃と設定する。

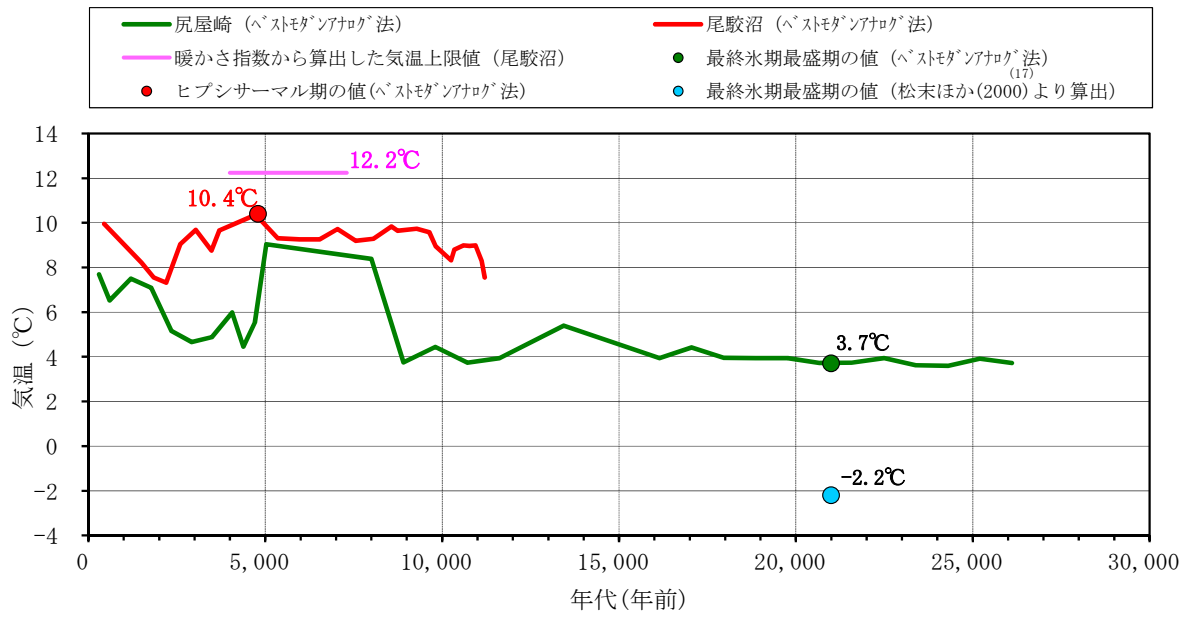
将来の氷期最盛期の年平均気温の最も厳しい設定は、松末ほか(2000)⁽¹⁷⁾における現在と過去の氷河期の気温差の最大値が約13℃であったことから、敷地周辺における1975年～2015年の年平均気温の最低値である8℃から13℃を低下させると-5℃となる。しかし、氷期最盛期は主な評価対象期間より1万年以上先であること、降水量の状態設定においては気温と降水量の相関関係の不確かさを考慮することから、ここでは最も可能性が高い設定の気温である0℃と設定する。

10,000年後の亜氷期の気温は、現在の気温(9℃)及び氷期最盛期(0℃)からの気温変動割合(90%)を考慮し、0℃と設定する。

1,000年後の気温は、現在の気温(9℃)から10,000年後の亜氷期における気温(0℃)の変化率を考慮して、8.1℃となることから保守側に切り下げて、8℃と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

最も厳しい設定においては、過去30年間の敷地周辺の年平均気温である9℃にシミュレーション結果のほぼ最大上昇値である6℃を加えると15℃となる。しかし、寒冷化ケースと同様に後述する降水量の状態設定における気温と降水量の相関関係において、不確かさを考慮した方が希釈に寄与する交換水量は少なくなることから、ここでは最も可能性が高い設定の気温である12℃とする。



第9図 花粉分析による過去26,000年間の気温変動

c. 気温の状態設定

上記の現在及び氷期最盛期の気温並びに気温の変動曲線を踏まえ、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定において、寒冷化ケースにおける 1,000 年後の気温を 8℃と設定する。また、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定において、温暖期継続ケースにおける 1,000 年後の気温を 12℃と設定する。

気温と降水量は正の相関関係があり、降水量が低下するほど希釈水量が少なくなるため、気温が低いほど保守的な設定となる。したがって、寒冷化ケースを状態設定の対象とする。気温の状態設定結果を第 4 表に示す。

第 4 表 気温の設定値

ケース		モデル化時期	気温(℃)
最も可能性が高い設定	寒冷化ケース	現在	9
		1,000 年後	8
最も厳しい設定	寒冷化ケース	現在	9
		1,000 年後	8

(ii) 降水量

降水量の変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、降水量の変化により表層での水収支の変化に伴って地下水流動及び表流水流動が変化することが想定される。よって、降水量の変化を長期変動事象として考慮し、将来の降水量を設定する。

a. 降水量の設定に関する考え方

気温と降水量との関係には、正の相関がある⁽¹⁹⁾。また、地形や海流等の気候因子も降水量と相関がある。したがって、敷地周辺と地形や海流等が類似した地点のデータを用いることで、その影響を除けば、気温と降水量との相関関係が求められる。そこで、将来の降水量の設定に当たっては、敷地周辺と気候因子が類似する地点の気温と降水量の関係に基づき、将来の気温に対応する降水量を設定する。将来の気温は、「(i)c. 気温の状態設定」で設定した気温を用いる。

敷地周辺と気候因子が類似する地点の現在の気温と降水量の関係を求める。気候因子が類似する地点の判断に使用した項目は以下のとおりである。

- ① 北半球の太平洋側西部に位置すること。
- ② アリソフの気候区分が亜極帯～寒帯であること。
- ③ 沿岸海流が寒流であること。
- ④ 陸度(半径 50km 円内の陸域の占める割合)が 1/10～9/10 であること。
- ⑤ 開放度(半径 15km 円内で対象地点より標高が 200m 以上高い範囲を除く角度)が 240° ～360° であること。

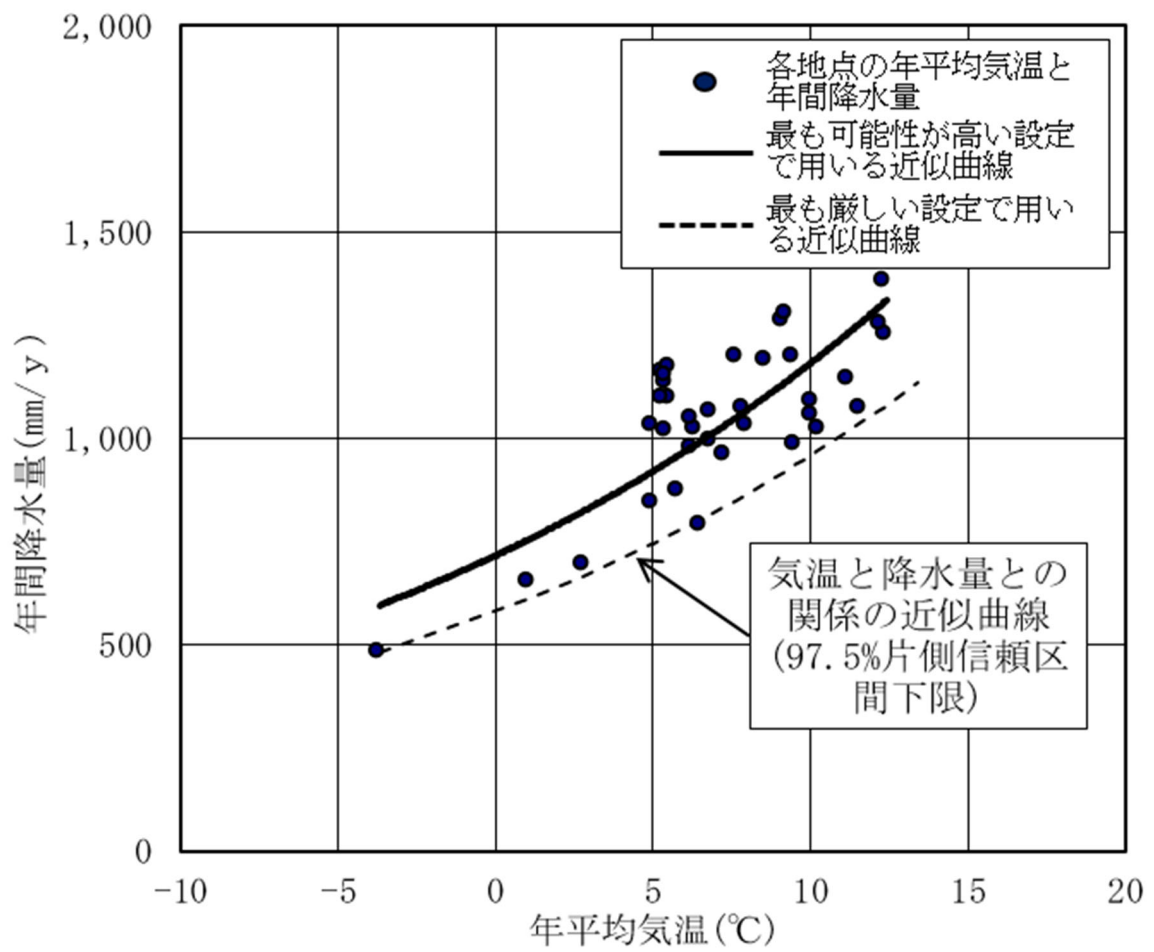
上記条件で抽出された地点のうち、過去 30 年以上の気象データの存在する 36 地点の年平均気温と年降水量を整理し(第 5 表参照)、36 地点の気温と降水量の関係(第 10 図)を指数回帰式で表した。気象データは、1981 年～2010 年の 30 年間の平年値データを使用する。平年値を用いた理由は、平年値がその時々々の気象や天候を評価する基準として利用され、その地点の気候を表す値として用いられること、局地的な短期変動が除去できるなど平均値としての安定性・均質性が考慮されているためである。

なお、将来の降水量は、年平均気温と年降水量との関係から求めるため、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースは同様の指数回帰式で設定する。

第5表 敷地周辺と類似する気候因子を持つ地点の気温と降水量*1

No.	地点名	国名	年平均気温 (°C)	年降水量 (mm/y)
1	OKHOTSK	RUSSIAN FED.	-3.7	475
2	VLADIVOSTOK	RUSSIAN FED.	5.0	837
3	ALEKSANDROVSK-SAKHALINSKII	RUSSIAN FED.	1.0	651
4	NIKOL'SKOJE (OSTROV BERINGA)	RUSSIAN FED.	2.8	693
5	稚内	JAPAN	6.8	1,063
6	網走	JAPAN	6.5	788
7	別海	JAPAN	5.4	1,135
8	根室	JAPAN	6.3	1,021
9	厚床	JAPAN	5.3	1,154
10	榺町	JAPAN	5.4	1,011
11	太田	JAPAN	5.5	1,170
12	白糠	JAPAN	5.5	1,090
13	釧路	JAPAN	6.2	1,043
14	池田	JAPAN	5.8	870
15	浦幌	JAPAN	6.2	976
16	糠内	JAPAN	5.0	1,026
17	大津	JAPAN	5.3	1,090
18	大樹	JAPAN	5.4	1,150
19	苫小牧	JAPAN	7.6	1,198
20	鷓川	JAPAN	6.8	989
21	室蘭	JAPAN	8.6	1,185
22	日高門別	JAPAN	7.2	956
23	静内	JAPAN	8.0	1,032
24	浦河	JAPAN	7.9	1,072
25	小田野沢	JAPAN	9.1	1,281
26	三沢	JAPAN	10.0	1,056
27	十和田	JAPAN	9.5	983
28	八戸	JAPAN	10.2	1,025
29	三戸	JAPAN	10.0	1,084
30	種市	JAPAN	9.4	1,198
31	鹿島台	JAPAN	11.2	1,138
32	石巻	JAPAN	11.6	1,067
33	仙台	JAPAN	12.4	1,254
34	亘理	JAPAN	12.2	1,274
35	相馬	JAPAN	12.3	1,373
36	六ヶ所	JAPAN	9.2	1,301

*1 : 36 地点の年平均気温及び年間降水量は、気象庁のデータ⁽²⁰⁾⁽²¹⁾を使用した。



第 10 図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の年平均気温と年降水量の関係*1

*1 : 36 地点の年降水量及び年平均気温は、気象庁のデータ⁽²⁰⁾⁽²¹⁾を使用した。

(a) 最も可能性が高い設定

36 地点の気温と降水量の関係は指数回帰式(第 10 図の実線近似曲線)で表されることから、最も可能性が高い設定においてはこの指数回帰式を用いて設定する。

(b) 最も厳しい設定

最も厳しい設定においては、気温と降水量の関係のばらつきを考慮し、交換水量が少なくなるように、気温と降水量の下限値の指数回帰式を用いて設定する(第 10 図の破線近似曲線)。

b. 降水量の変化

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の降水量は、第 10 図に示す指数回帰式(実線)及び最も可能性が高い設定における気温の状態設定値から、1,000 年後に 1,070mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの将来の降水量は、第 10 図に示す指数回帰式(実線)及び最も可能性が高い設定における気温の状態設定値から、1,300mm/y と設定する。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の降水量は、第 10 図に示す指数回帰式(破線)及び最も厳しい設定における気温の状態設定値から、1,000 年後に 860mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの将来の降水量は、第 10 図に示す指数回帰式(破線)及び最も厳しい設定における気温の状態設定値から、1,050mm/y と設定する。

c. 降水量の状態設定

降水量の状態設定結果を第 6 表に示す。降水量が低下するほど希釈水量が少なくなるため、保守的な設定となる。したがって、寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第6表 降水量の設定値

ケース		モデル化時期	気温(°C)	降水量(mm/y)
最も可能性 が高い設定	寒冷化ケース	現在	9	1,120
		1,000年後	8	1,070
最も厳しい 設定	寒冷化ケース	現在	9	910
		1,000年後	8	860

(iii) 海水準変動

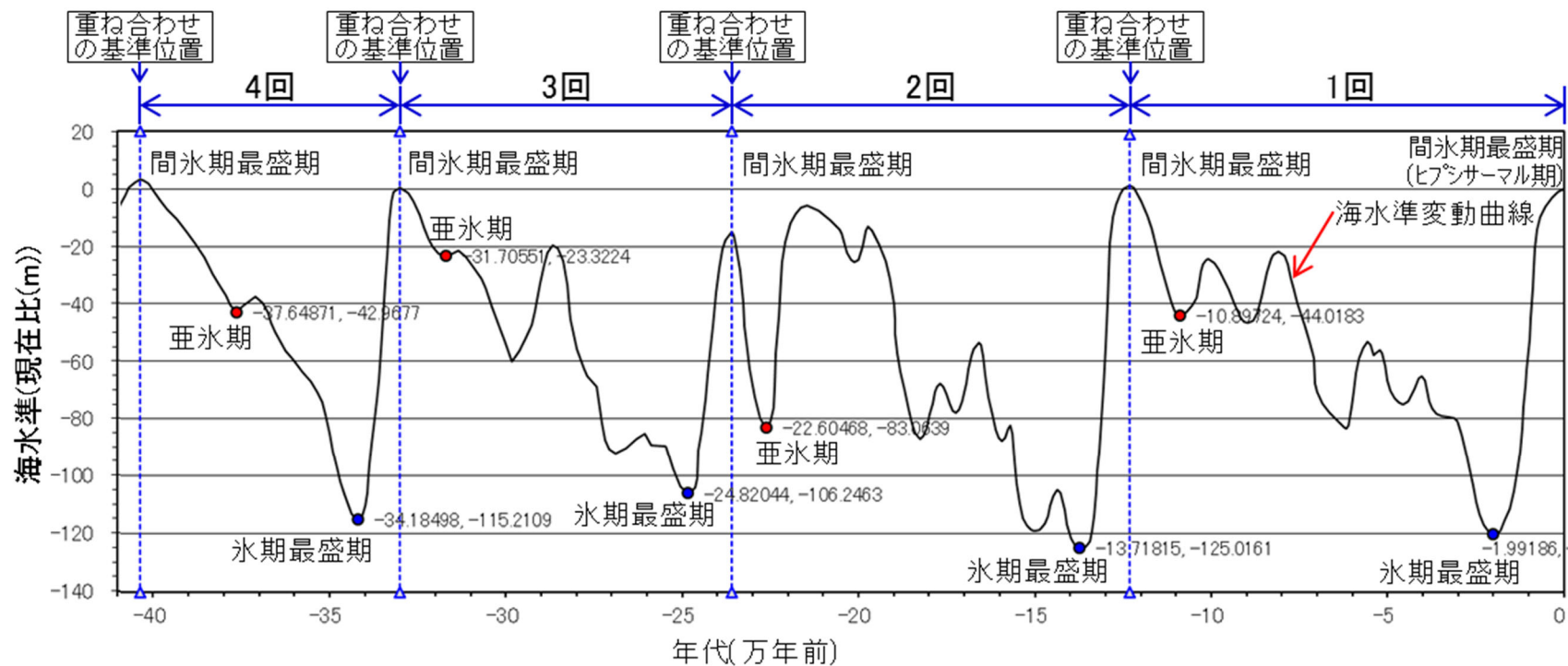
海水準変動は、廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、海水準変動が生じると、敷地及びその周辺における河川、湖沼及び海の分布域が変化し、将来の人の生活環境及び生活様式に影響を及ぼすことが想定される。また、海水準変動及びそれに伴う地形変化並びに地下水位及び地表水流動の変化が想定されるため、海水準変動を長期変動事象として考慮し、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける海水準の変動時期及び変動量を設定する。

a. 海水準変動の設定に関する考え方

世界的な海水準変動は、気候変動に伴う大陸氷床の拡大・縮小に伴って生じる現象と考えられており、過去の海水準変動は気候変動と同様に、約 8 万年周期から約 12 万年周期で低海水準期と高海水準期を繰り返している⁽²²⁾。

したがって、海水準変動の長期変動状態の設定のうち、寒冷化ケースにおける将来の氷期最盛期に至るまでの海水準変動は、気温変動と同様に、過去約 45 万年間の低海水準期と高海水準期の平均値及び変動幅⁽²²⁾を考慮して設定する。過去 45 万年間の海水準変動曲線を第 11 図に示す。将来の海水準の設定に当たっては、過去 45 万年間の汎世界的な海水準変動を酸素同位体比から推定している Labeyrie et al. (2003)⁽²²⁾を用いる。

なお、日本の海成段丘面等の形成年代と汎世界的な海水準変動は調和的⁽²³⁾であることから、汎世界的な海水準変動は敷地においても同様とする。



第 11 図 過去の海水準変動曲線*1

*1: Labeyrie et al. (2003)⁽²²⁾ に一部加筆

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

第 12 図に将来の海水準の変動曲線(最も可能性が高い設定)を示す。

Labeyrie et al. (2003)⁽²²⁾を基に、過去 4 回の海水準変動曲線の間氷期最盛期のピークを基準として重ね合わせ、亜氷期までの時間及び海水準を設定する。設定した時間及び海水準を結んだ直線を将来の海水準とする。

将来の亜氷期までの時間については、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期までの時間の平均値を用いる。

将来の亜氷期の海水準については、過去 4 回の亜氷期における海水準の平均値を用いる。

また、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの時間及び海水準の平均値を結んだ直線を用いて求める。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける海水準変動については、過去の海水準変動の傾向から現在は間氷期最盛期になると考えられるため、将来の海水準変動の設定には不確かさが大きく状態設定が困難である。しかし、過去 300 万年間の温暖期における海面水位は、世界平均で現在より 5m 上回っており、最終間氷期(約 12.9 万年前～約 11.6 万年前)のうち数千年にわたっては、現在より海面水位が 5m より高く、10m 以上は高くなかったという報告⁽²⁴⁾がある。この結果を参考に、温暖期継続ケースにおける海水準変動は、不確かさを考慮して現在の海水準より 10m 海水準が上昇し、継続すると設定する。海水準が上昇する期間は、ANDRA(2005)⁽¹⁵⁾より、将来 5 万年程度は温暖期が継続するとされることから、評価期間中継続すると設定する。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

第 13 図に将来の海水準の変動曲線(最も厳しい設定)を示す。最も可能性が高い設定と同様に、過去 4 回の海水準変動曲線の間氷期最盛期のピークを基準として重ね合わせ、亜氷期までの時間及び海水準から設定する。

海水準は低下量が大きく、低下時期が早いほど、埋設設備の露呈時期及び希釈水量の観点から保守的な設定となるため、最も厳しい設定における将来

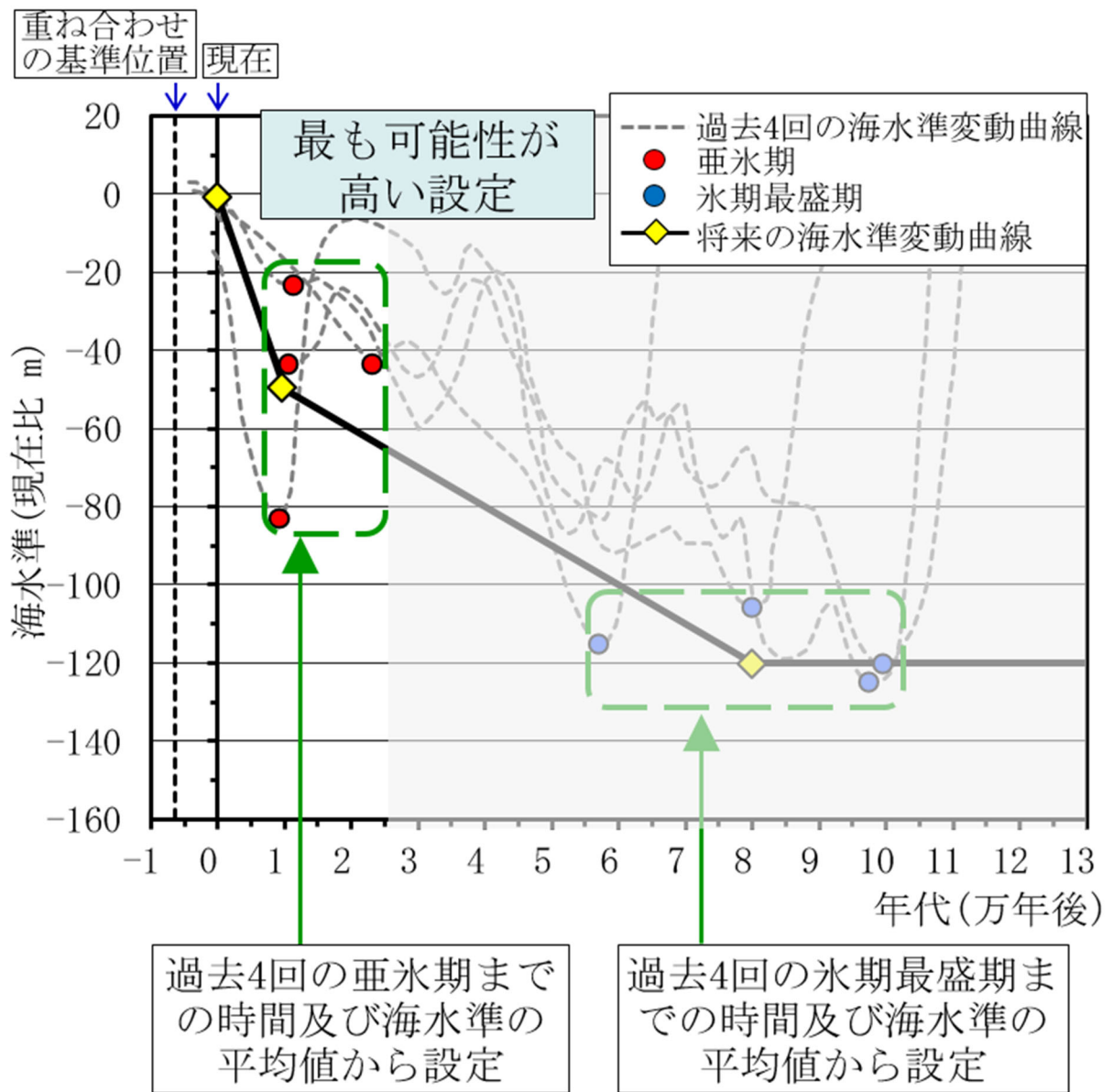
の亜氷期までの時間については、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期までの時間の最短値を用いる。

将来の亜氷期までの海水準については、亜氷期は海水準低下量の最大値から設定する。

また、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの時間の最短値及び海水準低下量の最大値を結んだ直線を用いて求める。

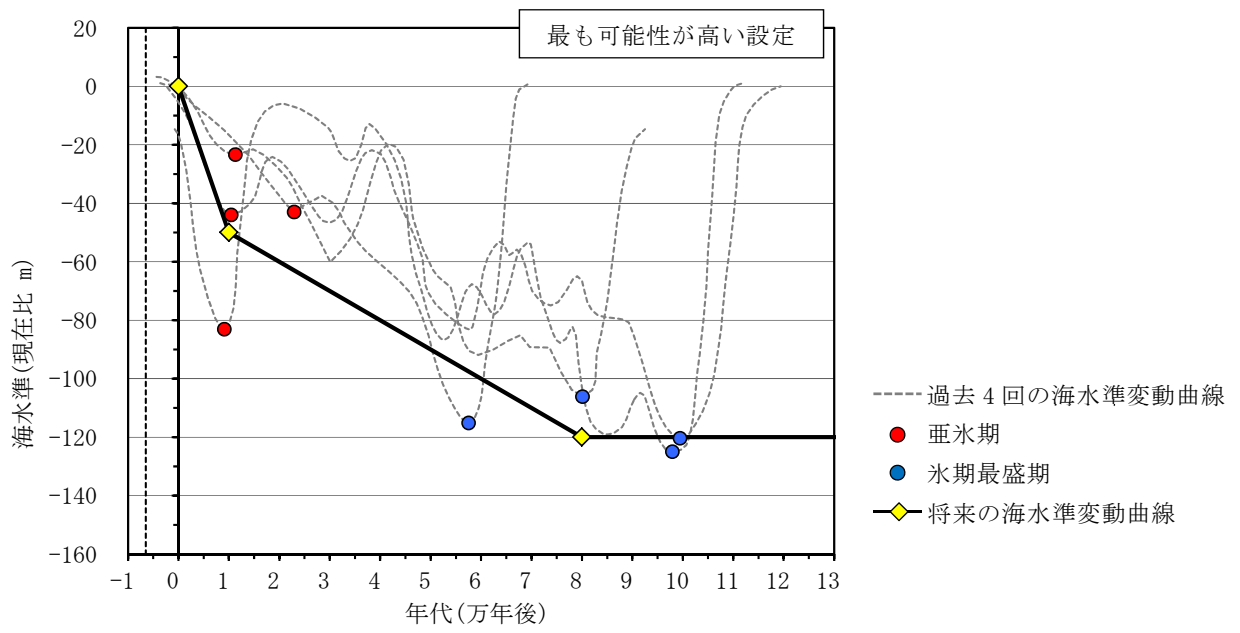
(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける海水準の設定に当たっては、最も可能性が高い設定において不確かさを考慮していることから、最も可能性が高い設定と最も厳しい設定は同様に、現在の海水準より 10m 海水準が上昇し、継続すると設定する。



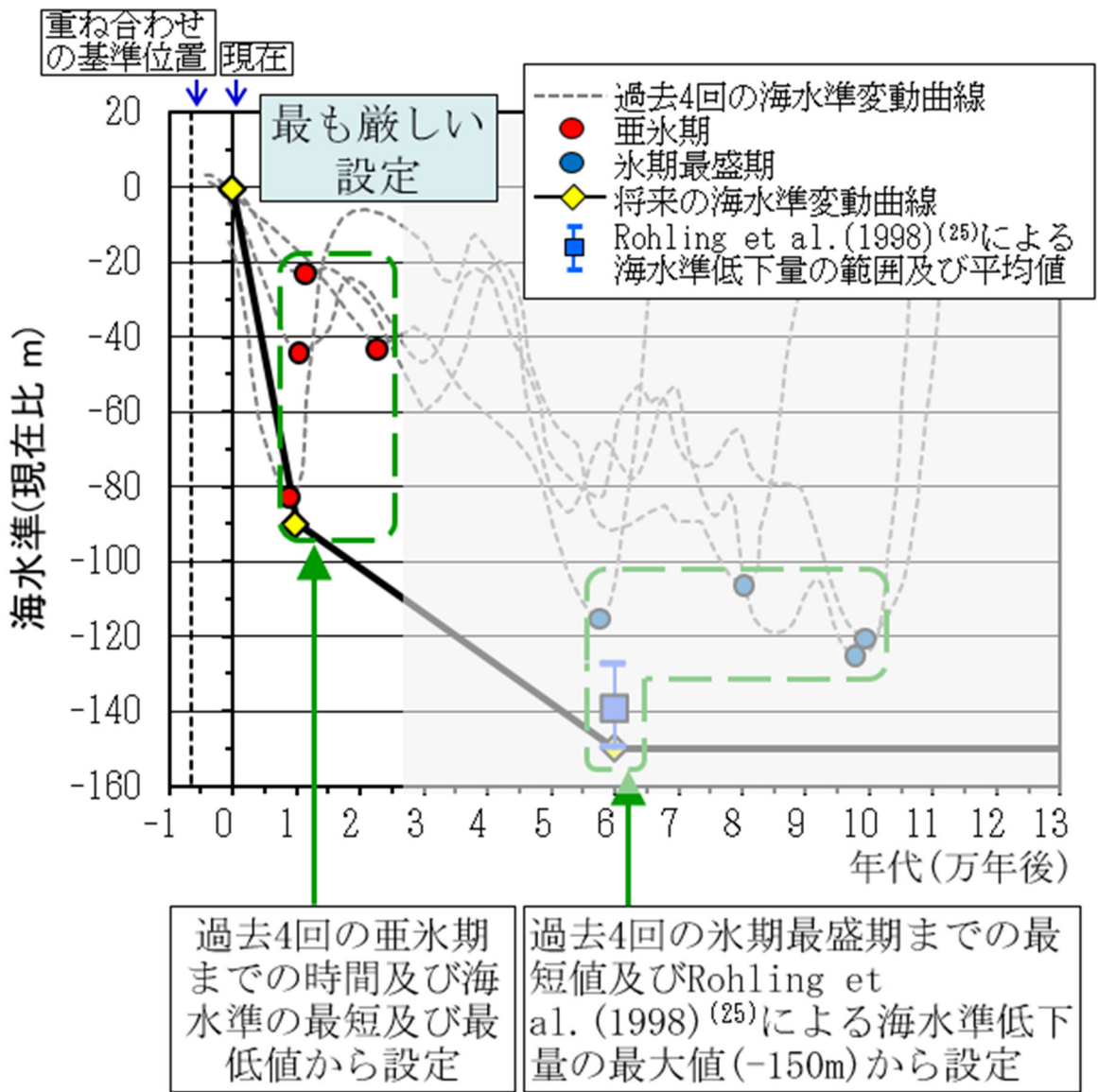
第 12 図 将来の海水準の変動曲線(最も可能性が高い設定)*1(1/2)

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al (2003)⁽²²⁾ に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。



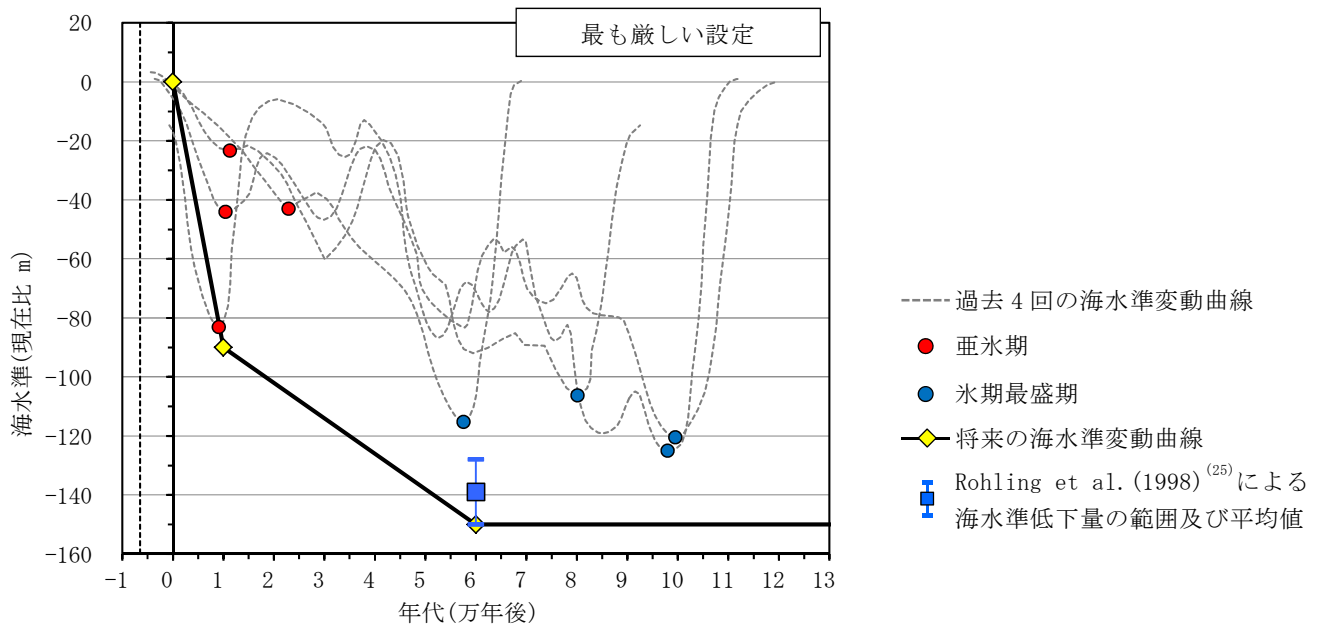
第12図 将来の海水準の変動曲線(最も可能性が高い設定)*1(2/2)

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al (2003)⁽²²⁾ に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。



第 13 図 将来の海水準の変動曲線(最も厳しい設定)*1(1/2)

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al (2003)⁽²²⁾ に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。



第 13 図 将来の海水準の変動曲線(最も厳しい設定)*1(2/2)

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al(2003)⁽²²⁾ に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。

b. 海水準変動

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

過去 4 回の亜氷期までの時間及び海水準の平均値から、亜氷期の海水準は 10,000 年後に-50m とし、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの直線を将来の海水準とすることから、-5m とする。

(二) 温暖期継続ケース

最終間氷期の数千年は、海面水位が現在より 5m 高く、10m 以上は高くなかったとされていることから、不確かさを考慮して現在の海水準より 10m 上昇すると設定する。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

過去 4 回の亜氷期までの時間及び海水準の最大値から、亜氷期の海水準は 10,000 年後に-90m とし、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの直線を将来の海水準とすることから、-9m とする。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける海水準変動の設定値の推定には不確かさが大きく状態設定が困難であり、最も可能性が高い設定において不確かさを考慮していることから、最も厳しい設定は最も可能性が高い設定と同様に現在の海水準より 10m 上昇すると設定する。

c. 海水準変動の状態設定

海水準変動の状態設定結果を第 7 表に示す。海水準は後述する「(3)(i)c. 埋設設備の露呈時期」に影響する。埋設設備の露呈時期は、温暖期継続ケースの方が保守的となるため、温暖期継続ケースを状態設定の対象とする。

第7表 海水準変動の設定値

ケース		モデル化時期	海水準(現在比:m)
最も可能性が高い 設定	温暖期継続ケース	現在*1~1,000年後	10
最も厳しい設定	温暖期継続ケース	現在*1~1,000年後	10

*1: 覆土完了時期までを表す(以降、同様)

(iv) 蒸発散量

蒸発散量は、後述する河川流量の設定に必要となるため設定する。

a. 蒸発散量の設定に関する考え方

蒸発散量は、年平均気温を用いて可能蒸発散量として推定するソーンスウェイト法⁽²⁶⁾により求める(第8表)。

一方、地下水は主に降水によってかん養され、第四紀層及び岩盤(鷹架層)表層部の風化部を流れ、中央沢を経て尾駁沼に流出している。そのため、敷地内の沢の流域面積における降水量から、その沢を流れる表流水流量を差し引いたものが、蒸発散量に相当する。

降水量 = 実蒸発散量 + 表流水流量 + 貯留変化量

ここで、貯留変化量=0 と仮定する。

降水量及び敷地内の表流水流量の観測結果(第14図参照)に基づく河川流出高を用いて求めた実蒸発散量を第8表に示す。実蒸発散量の平均に対する可能蒸発散量の平均の比率は0.95である。

将来の蒸発散量は、「(ii) 降水量」に示す敷地周辺と気候因子が類似した36地点の年平均気温から可能蒸発散量を計算し、実蒸発散量と可能蒸発散量の比0.95を用いて、36地点の年平均気温と蒸発散量の関係を得た(第15図参照)。

ここで、蒸発散量の計算に使用する気温は、「(i)c. 気温の状態設定」で求めた現在、1,000年後の気温の状態設定値から設定する。

ここで用いる36地点の年平均気温は、「(ii) 降水量」の状態設定と同様に、1981年～2010年の気象データの年平均気温である。

36地点の年平均気温と蒸発散量の関係式は、ソーンスウェイト法を用いて可能蒸発散量を算出し、上記で求めた実蒸発散量と可能蒸発散量の比0.95を考慮した蒸発散量を用いて作成する(第9表及び第15図)。

将来の蒸発散量は、この関係式から、最も可能性が高い設定又は最も厳しい設定の気温を用いて設定する。

(a) 最も可能性が高い設定

敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の蒸発散量と年平均気温の関係式から、最も可能性が高い設定における将来の気温の状態設定値を用いて設定する。

(b) 最も厳しい設定

敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の蒸発散量と年平均気温の関係式から、最も厳しい設定における将来の気温の状態設定値を用いて設定する。

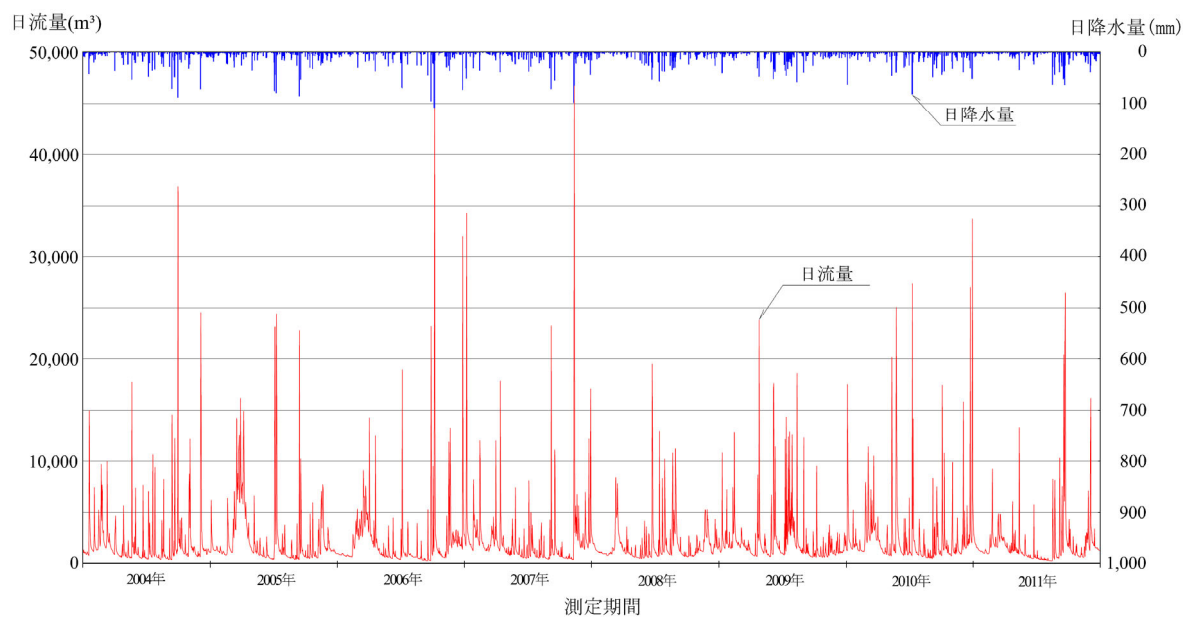
第 8 表 ソーンズウェイト法により求めた可能蒸発散量と

観測から求められた実蒸発散量(2004 年～2011 年)

観測年	気温 (°C)	年降水量 (mm/y)	①可能蒸発散量 *1 [ソーンズウェイト 法]	河川流出 高 (mm/y)	②実蒸発散 量*2 [水収支式] (mm/y)	補正係数 ②÷①
2004 年	10.1	1,546	640	784	762	1.19
2005 年	8.7	1,468	601	930	538	0.89
2006 年	8.9	1,380	603	843	537	0.89
2007 年	9.8	1,565	624	884	681	1.09
2008 年	9.4	1,198	620	706	492	0.79
2009 年	9.4	1,507	614	869	638	1.04
2010 年	9.8	1,437	637	999	438	0.69
2011 年	9.4	1,366	624	724	642	1.03
平均	9.4	1,433	620	842	591	0.95

*1：可能蒸発散量はソーンズウェイト法により、年平均気温から算出した。

*2：降水量と敷地内の表流水流量の観測結果から求めた河川流出高を用いて求めた蒸発散量を、実蒸発散量とした。



第 14 図 降水量及び敷地内の表流水流量の観測結果(2004 年～2011 年)

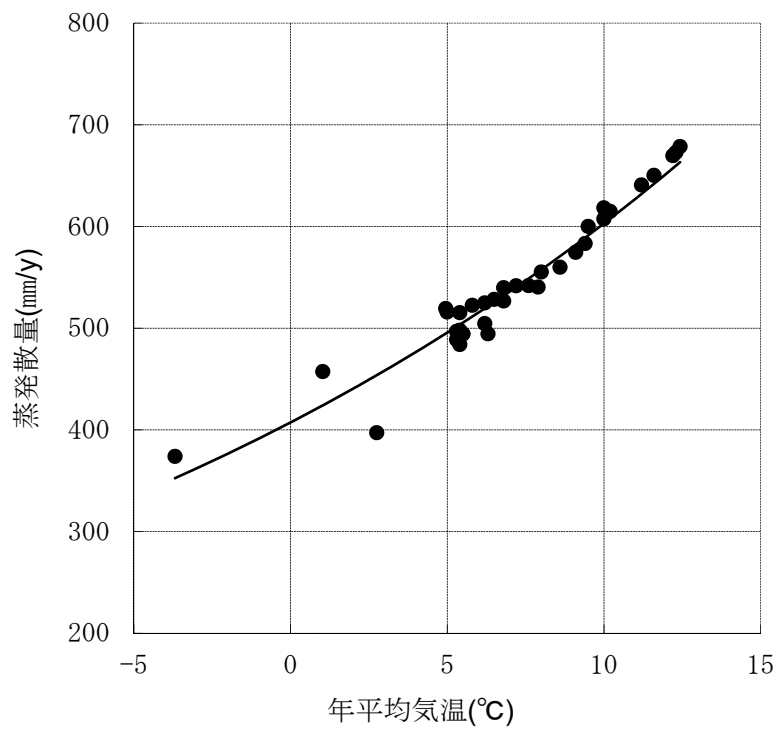
第9表 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と蒸発散量*1

No.	地点名	国／地域名	年平均気温 (°C)	可能 蒸発散量*2 (mm/y)	蒸発散量*3 (mm/y)
1	OKHOTSK	RUSSIAN FED.	-3.7	393	374
2	VLADIVOSTOK	RUSSIAN FED.	5.0	547	519
3	ALEKSANDROVSK-SAKHALINSKII	RUSSIAN FED.	1.0	481	457
4	NIKOL' SKOJE (OSTROV BERINGA)	RUSSIAN FED.	2.8	418	397
5	稚内	JAPAN	6.8	554	527
6	網走	JAPAN	6.5	556	528
7	別海	JAPAN	5.4	524	498
8	根室	JAPAN	6.3	520	494
9	厚床	JAPAN	5.3	514	489
10	榑町	JAPAN	5.4	509	484
11	太田	JAPAN	5.5	520	494
12	白糠	JAPAN	5.5	520	494
13	釧路	JAPAN	6.2	531	504
14	池田	JAPAN	5.8	550	522
15	浦幌	JAPAN	6.2	552	525
16	糠内	JAPAN	5.0	543	516
17	大津	JAPAN	5.3	523	497
18	大樹	JAPAN	5.4	542	515
19	苫小牧	JAPAN	7.6	570	542
20	鶴川	JAPAN	6.8	568	540
21	室蘭	JAPAN	8.6	589	560
22	日高門別	JAPAN	7.2	570	542
23	静内	JAPAN	8.0	584	555
24	浦河	JAPAN	7.9	569	540
25	小田野沢	JAPAN	9.1	605	575
26	三沢	JAPAN	10.0	639	607
27	十和田	JAPAN	9.5	632	600
28	八戸	JAPAN	10.2	647	615
29	三戸	JAPAN	10.0	651	618
30	種市	JAPAN	9.4	614	583
31	鹿島台	JAPAN	11.2	674	641
32	石巻	JAPAN	11.6	684	650
33	仙台	JAPAN	12.4	714	678
34	亘理	JAPAN	12.2	705	670
35	相馬	JAPAN	12.3	708	673
36	六ヶ所	JAPAN	9.2	614	583

*1：36地点年平均気温は、気象庁のデータ⁽²⁰⁾⁽²¹⁾を使用した。

*2：可能蒸発散量はソーンスウェイト法により、年平均気温から算出した。

*3：蒸発散量は、可能蒸発散量に補正係数(0.95)を乗じて算出した。



第 15 図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の年平均気温と蒸発散量の関係*1

*1 : 36 地点の年平均気温は、気象庁のデータ⁽²⁰⁾⁽²¹⁾を使用した。

b. 蒸発散量の変化

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の蒸発散量は、第 15 図に示す関係式及び最も可能性が高い設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、1,000 年後に 560mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの将来の蒸発散量は、第 15 図に示す関係式及び最も可能性が高い設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、660mm/y と設定する。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の蒸発散量は、第 15 図に示す関係式及び最も厳しい設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、1,000 年後に 560mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

最も厳しい設定における温暖期継続ケースの気温は、降水量の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、最も可能性が高い設定の気温を用いていることから、蒸発散量も最も可能性が高い設定と同様の値とする。

c. 蒸発散量の設定値

蒸発散量の状態設定結果を第 10 表に示す。蒸発散量は河川流量の設定に関連しており、河川流量は降水量の影響を考慮した方が保守的な設定となる。したがって、河川流量が保守的となる寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第 10 表 蒸発散量の状態設定値

ケース		モデル化時期	気温(°C)	蒸発散量 (mm/y)
最も可能性 が高い設定	寒冷化 ケース	現在	9	580
		1,000 年後	8	560
最も厳しい 設定	寒冷化 ケース	現在	9	580
		1,000 年後	8	560

(v) かん養量

かん養量の変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、かん養量が増加すると廃棄物埋設地周辺において表流水流量に係る地下水の流出量(基底流出量)及び地表面を流れる直接流出量に影響を及ぼすと考えられる。これらのことから、かん養量の変化を長期変動事象として考慮し、将来のかん養量を設定する。

a. かん養量の設定に関する考え方

基底流出量は、おおむねかん養量に相当する(山本、高橋(1987)⁽²⁷⁾)とされていることから、以下の3つの方法から、現在の降水量に対する基底流出量(=かん養量)の割合を設定し、この割合が将来も同様と考え、将来のかん養量を設定する。

山本、高橋(1987)⁽²⁷⁾によると、日本の平均的な降水量、蒸発散量、直接流出量及び基底流出量は以下のように記載される。

- ・年平均降水量・・・1,800mm/y
- ・蒸発散量・・・・・・・・650mm/y
- ・直接流出量・・・・・・・・750mm/y
- ・基底流出量・・・・・・・・400mm/y

$$\text{基底流出量/年平均降水量} = 400/1,800 = 0.22$$

上記より、基底流出量と年平均降水量との関係は、降水量の約22%となる。

敷地周辺の降水量及び敷地における表流水流量観測の結果(ハイドログラフ)から、基底流出量を求めることができる。表流水流量における基底流出量の概念図を第16図に示す。本手法は、表面流出水量観測堰の流量経時変化曲線の変動振幅の下端を結んだ曲線を引くことにより、分割される面積比率(直接流出量/基底流出量の割合)から求める方法である。

年間降水量 1,310mm/y に対して、流量観測堰の表面流出量から求めた基底流出流量は 138mm/y～289mm/y となる。したがって、基底流出量は降水量の 11%～22%となる。

敷地周辺の降水量及び敷地に適用したタンクモデル(菅原(1972)⁽²⁸⁾)から想定される表流水流量から求めた基底流出量は、年間降水量 1,310mm/y に対して、231mm/y～242mm/y となる。したがって、基底流出量は降水量の約18%となる。

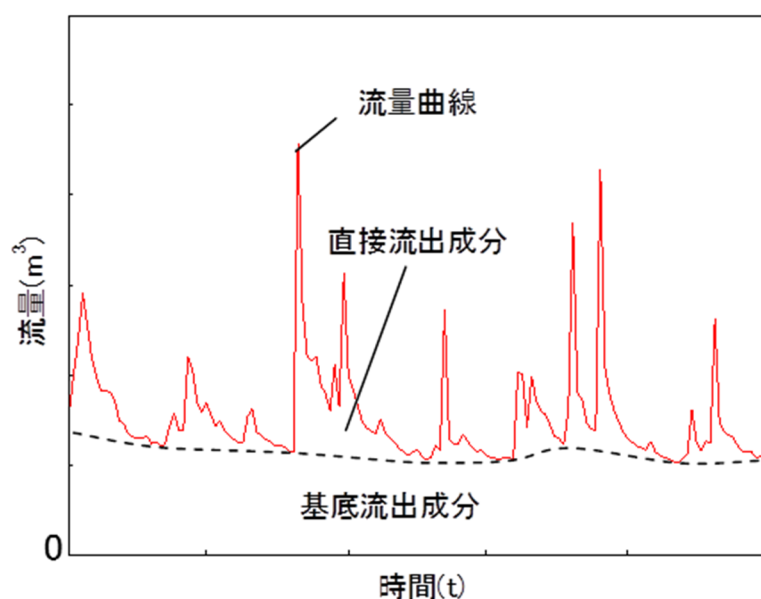
以上の3つの手法における基底流出量と降水量の関係から、かん養量は降水量の

20%と設定する。

したがって、将来のかん養量は、「(iii) c. 降水量の状態設定」で求めた現在、1,000年後の降水量の状態設定値の20%と設定する。

降水量は希釈水量に関連しており、降水量が少ない方が表流水流量も少なくなるため希釈水量は保守的となる。したがって、かん養量の設定値は、降水量が少なくなる値を用いて求める。

なお、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）線量評価パラメータ 埋設設備からの流出水量」で使用する降雨浸透量(かん養量)は、埋設設備からの流出水量と関連があり、埋設設備からの流出水量が多くなると、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出量が増加するため、降水量が多くなることを考慮した値を用いることとする。



第16図 表流水流量における基底流出量の概念図(ハイドログラフ)

b. かん養量の変化

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける将来のかん養量は、最も可能性が高い設定における寒冷化ケースの降水量の状態設定値から、1,000年後に214mm/yと設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける将来のかん養量は、最も可能性が高い設定における温暖期継続ケースの降水量の状態設定値から、260mm/yと設定する。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける将来のかん養量は、最も厳しい設定における寒冷化ケースの降水量の状態設定値から、1,000年後に172mm/yと設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける将来のかん養量は、最も厳しい設定における温暖期継続ケースの降水量の状態設定値から、210mm/yと設定する。

c. かん養量の状態設定

かん養量の状態設定結果を第11表に示す。かん養量は、地表面を流れる直接流出量に影響を及ぼすと考えられるため、降水量と同様に寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

また、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）線量評価パラメータ 埋設設備からの流出水量」において求める埋設設備からの流出水量は、降雨浸透量（かん養量）が増えると大きくなる傾向があることから、降雨浸透量を求めるための年平均降水量は、保守的に大きい値となるように設定する。年平均降水量は温暖期継続ケースの最も可能性が高い設定の値1,300mm/y及び最も厳しい設定の値1,050mm/y（ばらつきの小さい側）を用いて、年平均降水量のばらつきの大きい側の値1,550mm/y（ $=1,300 + (1,300 - 1,050)$ ）とする。したがって、流出水量の算出に用いる降雨浸透量は310mm/y（年平均降水量1,550mm/yの20%）と設定する。

第 11 表 かん養量の設定値

ケース		モデル化時期	気温 (°C)	降水量 (mm/y)	かん養量 (mm/y)	考え方
最も可能性 が高い設定	寒冷化ケース	現在	9	1,120	224	かん養量は降水量の 20%と設定 希釈水量の観点から、降水量が 少なくなる値を使用して設定
		1,000 年後	8	1,070	214	
最も厳しい 設定	寒冷化ケース	現在	9	910	182	
		1,000 年後	8	860	172	
解析用パラメータ (温暖期継続ケース)		現在～1,000 年後	12	1,550*1	310	かん養量は降水量の 20%と設定 流出水量の観点から、降水量が 多くなる値を使用して設定

*1：年平均降水量が大きい温暖期継続ケースの最も可能性が高い設定の値 1,300 に最も厳しい設定の値 1,050 との差分を加算

$$(1,550\text{mm}/y=1,300+(1,300-1,050))$$

(3) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象

プレート運動と気候変動の両者に起因する事象は、「地形変化」、「地下水流動」及び「表流水流動」を対象とする⁽¹⁾。気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定と同様に、寒冷化ケースと温暖期継続ケースの2ケースについて、それぞれ「地形変化(侵食、湖沼の河川化)」、「地下水流動」及び「表流水流動」を長期変動事象として考慮する。

(i) 地形変化(侵食、湖沼の河川化)

「(1) (iii) 隆起・沈降運動」及び「(2) (iii) 海水準変動」に伴い、侵食作用が継続することによる廃棄物埋設地の侵食に伴う埋設設備の地表接近及び露呈並びに放射性物質を含んだ土砂の下流域への堆積が想定される。そのため、地形変化を長期変動事象として考慮し、侵食速度を設定する。

地形変化は、湖沼の河川化及び沿岸流や河川等による侵食がある。

侵食は、沿岸部における沿岸流と波浪等による侵食(以下「海食」という。)と、河川及び沢部における表流水による侵食(以下「河食」という。)が想定される。

敷地東方の沿岸部汀線付近では海食が生じているが、廃棄物埋設地は現在の汀線から内陸に約3km離れており、十分な離隔がある。仮に温暖期の海進により尾駁沼が内湾となっても、海食による影響は生じないものと考えられる。

敷地及び敷地近傍の沢部においては第四紀層及び基盤である岩盤(鷹架層)が削剥されており、河食が生じていると考えられる。廃棄物埋設地付近は二又川の流域であることから、二又川及び敷地から二又川に流れ込む沢による河食を考慮する。

なお、敷地及び敷地近傍における台地と河川及び沢との位置関係等の大局的な地形状況は、数万年程度の将来において大きく変化することはないと、流域ごとの沢の縦断勾配及び横断形状を保持して河食が進むと想定するため、第四紀層及び鷹架層における侵食速度の差異は十分小さいと考えられる。敷地の位置する台地上には、段丘堆積層が10数万年以上の間残っていることから、後述する河川及び沢の侵食速度を考慮しても、将来数万年程度においては、侵食により敷地及び敷地近傍の大局的な地形状況が大きく変わることはないと考えられる。

なお、台地上及び沢の上流部では沖積層は厚く堆積していないため、沖積層による侵食速度への影響は十分小さいと考えられる。

隆起域における河川侵食の概念図を第17図に示す。下刻は、相対海水準と降水量

の影響を受けるため、寒冷化ケースと温暖期継続ケースでは、大局的には以下のような下刻過程となる(貝塚、1977⁽²⁹⁾)。

寒冷化ケースでは、降水量が減少し、河川流量が少なくなる。そのため、上流域では土砂が発生しない、若しくは凍結融解作用などにより土砂が発生してもほとんど下流域に運搬されず、現在の下流域に相当する地域では、海水準低下に伴い侵食基準面が低下し、下刻が進む。相対海水準の低下に伴い、最初の下流域に堆積している沖積層(間氷期堆積物)が侵食される。沖積層は比較的軟質なため、相対海水準に対して勾配を持たずに侵食される。沖積層削剥後、相対海水準の低下に伴い、氷期の平衡河床勾配を保って下流域～上流域まで侵食が進む。

温暖期(温暖期継続ケース)では、降水量が増加し、河川流量が多くなるため、上流域では下刻が進み、下流域ではその土砂が堆積する。相対海水準の低下に伴い、間氷期の平衡河床勾配を保ったまま、相対海水準変化量(隆起量相当)の下刻が進む。

なお、以下の理由から河食以外の侵食は考慮しない。

海食：廃棄物埋設地は現在の汀線から内陸に約 3km 離れており、十分な離隔があることから、考慮しない。

溶食：石灰岩等の分布域でないことから、考慮しない。

風食：乾燥地帯ではなく、影響は河食に包含されることから、考慮しない。

なお、ガリー侵食は、河床より下刻することはないため河食に包含される。

a. 侵食速度

(a) 侵食速度の設定に関する考え方

寒冷化ケースと温暖期継続ケースの侵食量の関係を第 18 図に示す。

寒冷化ケースでは、沖積層の基底面の勾配を保ち、敷地の隆起に伴う相対海水準の低下による下方への侵食(以下「下刻」という。)が生じると想定する。したがって、寒冷化の当初は勾配の緩い下流部に堆積した沖積層の上限面から下刻することとなり、沖積層の下刻後は河床勾配と海退量との関係から下刻量が求められる。沖積層の下刻に数万年を要し、それまでの期間、岩盤(鷹架層)の下刻は発生しない。

温暖期継続ケースでは、現在の河床勾配を保ち、相対海水準低下に伴った下刻が生じると想定する。ここでいう温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度は、「(2) (iii) 海水準変動」において、海水準変動を現在から将来にわたり、現

在の海水準より一律で 10m 上昇すると設定したことから、「(1) (iii) 隆起・沈降運動」で設定した隆起速度相当と設定する。

廃棄物埋設地周辺には、中央沢、南の沢、西の沢及びそれらの枝沢が分布する。枝沢は本流の沢に流れ込むことから、本流の沢との合流点が侵食基準面となる。枝沢の侵食基準面は、本流が侵食されることで低下するため、枝沢も本流の侵食速度と同等の速度で侵食される。したがって、枝沢における侵食速度は、本流の沢の寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの侵食速度と同じと設定する。

寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける侵食量を比較すると、寒冷化ケースは下流域の沖積層の侵食等により上流部の侵食が進行しないと設定していることから、3.2 万年後までは、温暖期継続ケースの方が侵食が早く進行する。

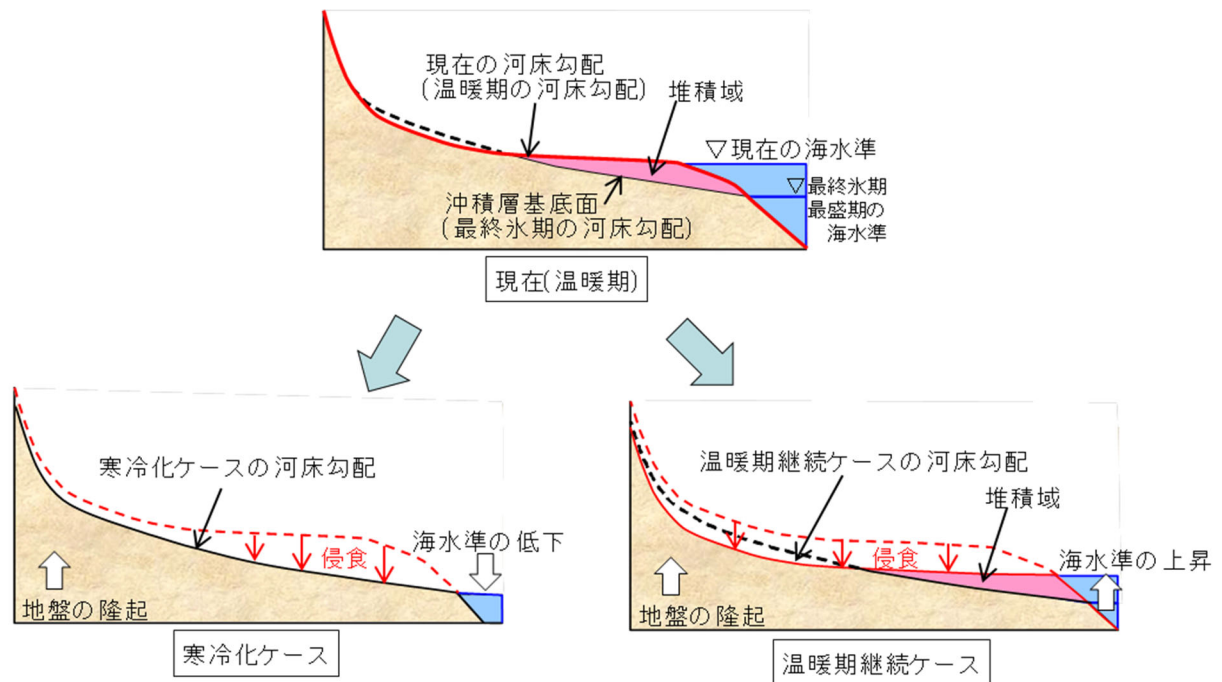
このことから、温暖期継続ケースの方が侵食速度が速く保守的となるため、以下に示す寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの検討結果に基づいて、保守的となる温暖期継続ケースの状態を設定する。

(一) 最も可能性が高い設定

相対海水準の低下分が侵食されるため、侵食速度は最も可能性が高い設定における隆起速度と同等とする。

(二) 最も厳しい設定

相対海水準の低下分が侵食されるため、侵食速度は最も厳しい設定における隆起速度と同等とする。



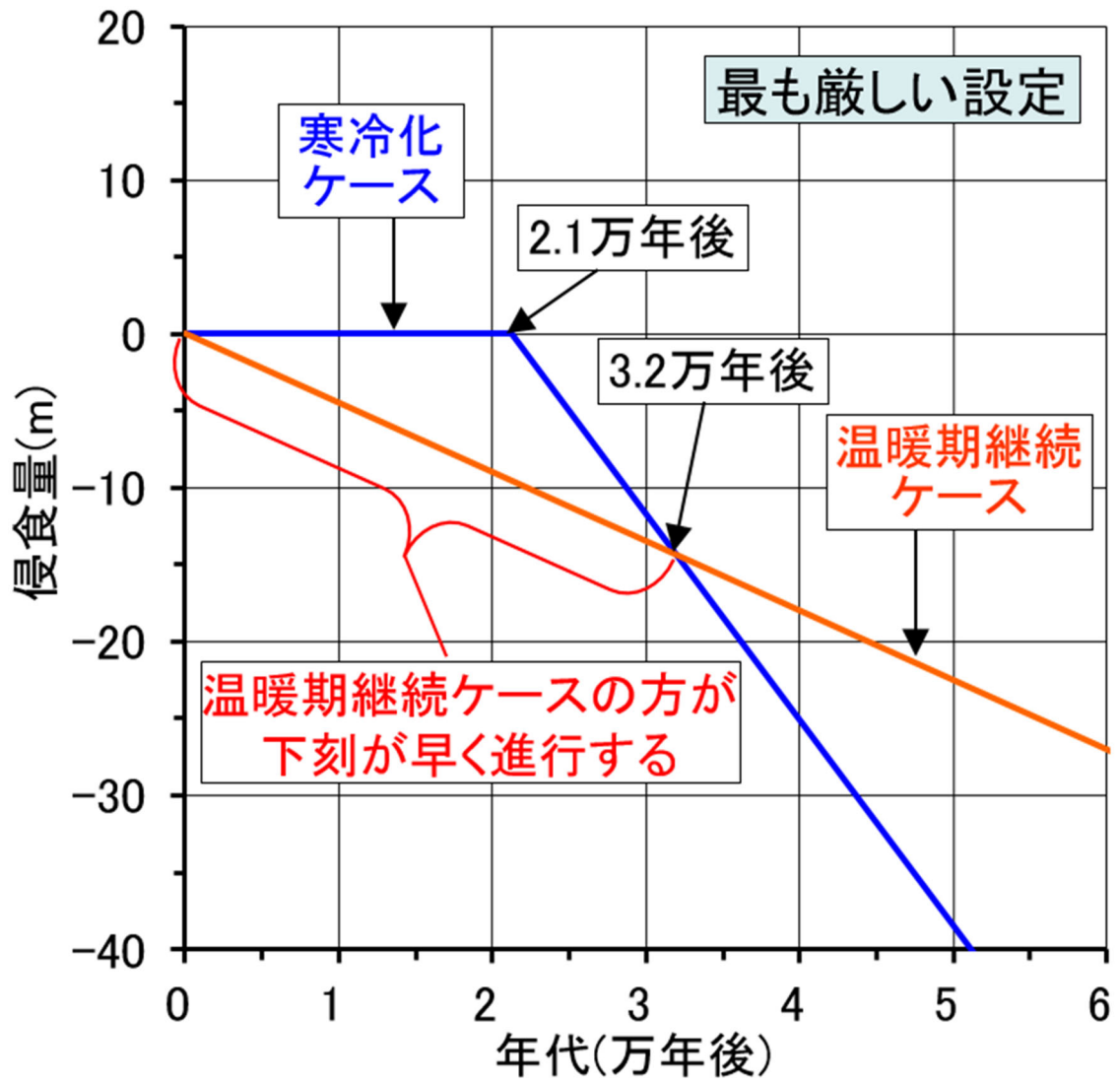
【寒冷化ケース】

- ・降水量、河川流量の減少及び海水準が低下する。
 - ・隆起するため、相対的な海水準は最終氷期最盛期よりも低下する。
- ⇒主に下流域で沖積層の侵食が始まり、平衡河床勾配に達した後上流側にも侵食が及ぶ。

【温暖期継続ケース】

- ・降水量、河川流量の増加及び海水準が上昇する。
- ・河床勾配は現在(温暖期)と変わらないが、隆起するため、全体に侵食が進む。

第 17 図 隆起域における河川侵食の概念図



第 18 図 侵食量の関係(最も厳しい設定の例)

b. 侵食速度の状態設定

侵食速度の状態設定値を第 12 表に示す。

(a) 最も可能性が高い設定

最も可能性が高い設定における隆起速度は 3.5m/万年であるため、侵食速度は 3.5m/万年とする。

(b) 最も厳しい設定

最も厳しい設定における隆起速度は 4.5m/万年であるため、侵食速度は 4.5m/万年とする。

第 12 表 侵食速度の状態設定値

ケース	期間	侵食速度 (m/万年)
最も可能性が高い設定	現在～1,000 年後	3.5
最も厳しい設定		4.5

c. 埋設設備の露呈時期

(a) 埋設設備の露呈時期の設定に関する考え方

埋設設備の露呈については、寒冷化ケースと温暖期継続ケースを比較すると、廃棄物埋設地付近は、温暖期継続ケースの方が早く侵食が生じるため、埋設設備には温暖期継続ケースの侵食の方が早く到達することとなる。したがって、侵食に係る長期変動事象の状態設定は、保守的に廃棄物埋設地付近の侵食が早く生じる温暖期継続ケースの値を採用することとする。

温暖期継続ケースにおける侵食の概念図を第 19 図に、温暖期継続ケースにおける侵食速度と埋設設備の露呈時期の例を第 20 図に示す。

温暖期継続ケースの侵食は、現河床勾配を保ったまま主要な河川及び沢からの侵食が進行する。埋設設備の露呈時期の算出に当たっては、廃棄物埋設地の周辺に埋土があるが、安全評価上の移行距離としても考慮していないことから、廃棄物埋設地の周辺における旧地形面より上位の埋土及び覆土は考慮せず、旧地形面から埋設設備上端までを仮想的土被りとする。仮想的土被りの層厚を隆起速度で除した値を露呈開始までの時間とする。

なお、廃棄物埋設地において上部覆土は、締固め度 90%以上に管理された状態で施工する。上部覆土については、周辺の土壌・岩盤と水理的に連続性を持たせる観点からおおむね廃棄物埋設施設周辺の第四紀層と同等の透水係数を目安に施工するため、覆土上部だけが大きく削られることは考え難く、廃棄物埋設地における侵食速度は周辺岩盤と同等程度と考えられる。

(一) 最も可能性が高い設定

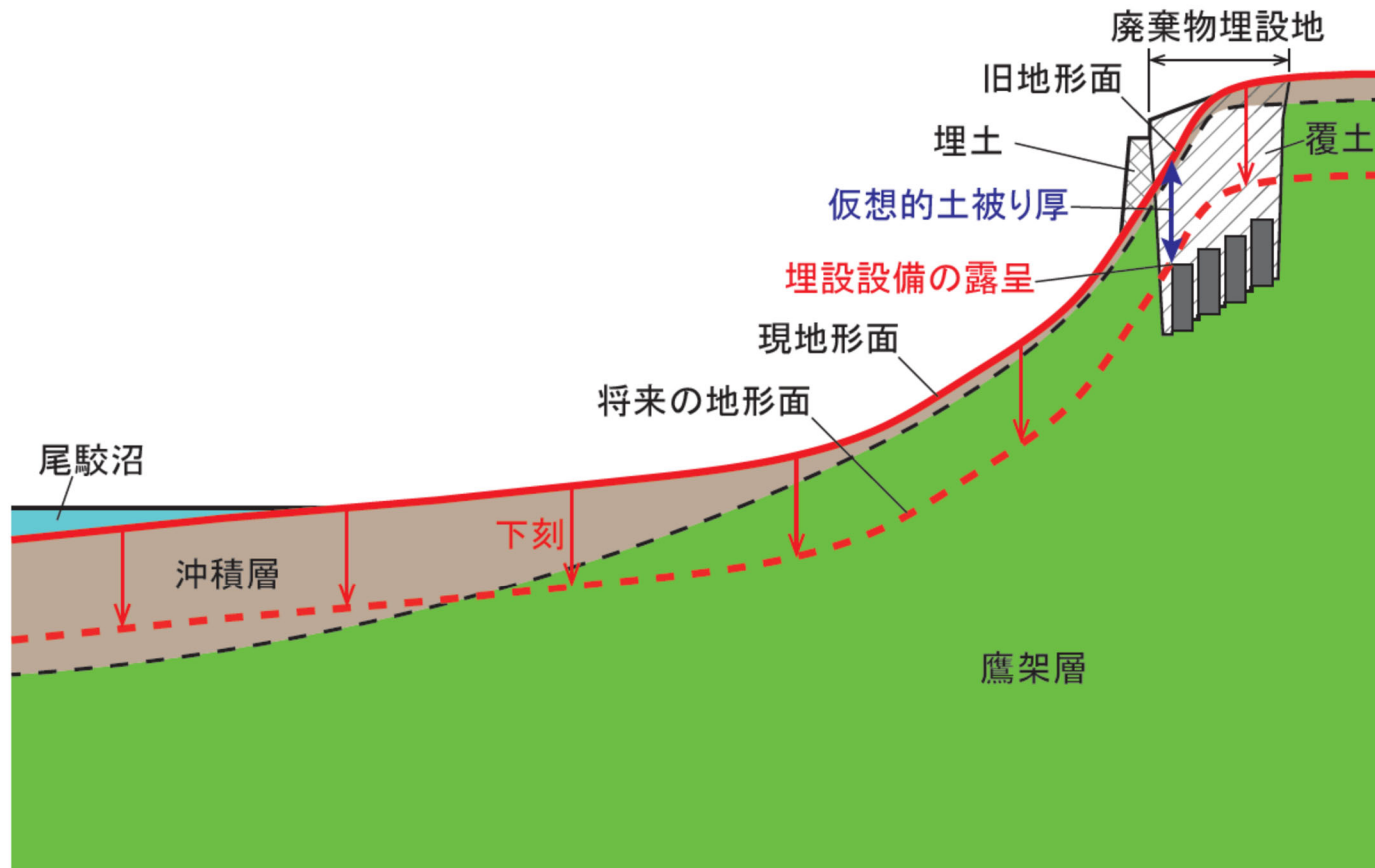
最も可能性が高い設定における隆起速度及び各廃棄物埋設地の仮想的土被り厚さから、埋設設備の露呈時期を求める。

(二) 最も厳しい設定

最も厳しい設定における隆起速度及び各廃棄物埋設地の仮想的土被り厚さから、埋設設備の露呈時期を求める。

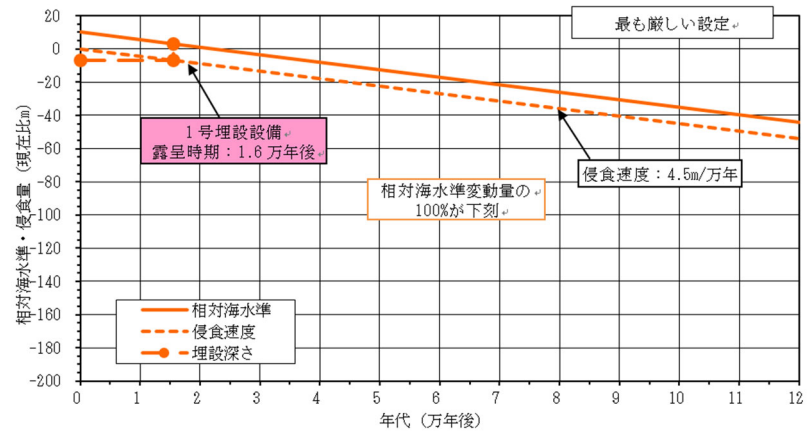
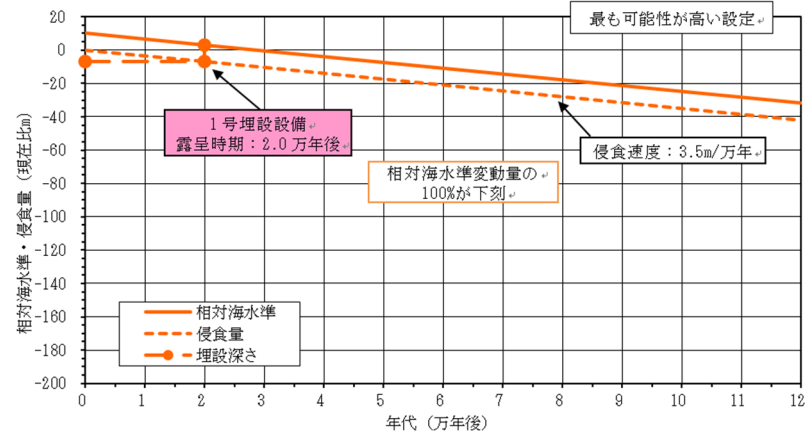
(b) 埋設設備の露呈時期の状態設定

埋設設備の露呈時期を第 13 表に示す。埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後(第 20 図)となるため、評価の対象とする期間を踏まえ、埋設設備の露呈時期の状態設定については、長期変動事象として影響を考慮しない。

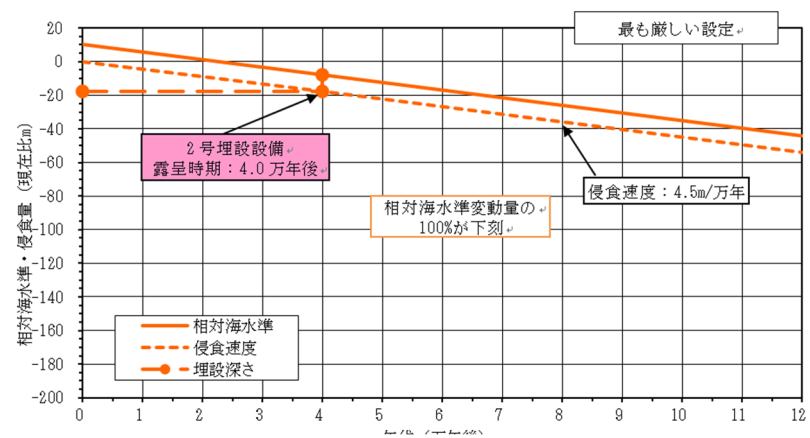
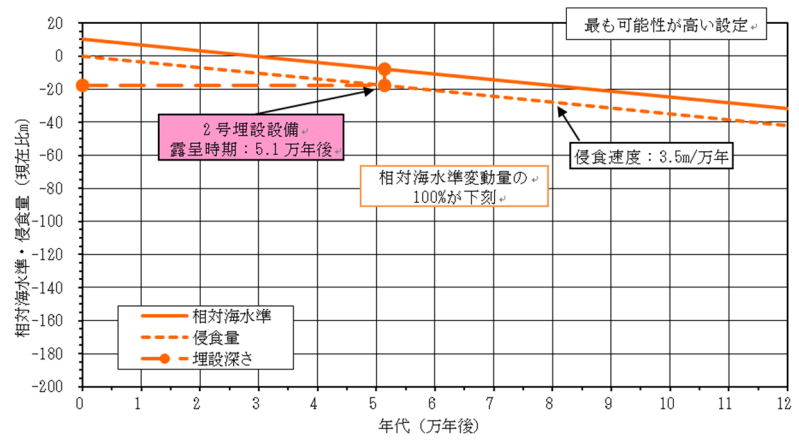


第 19 図 侵食の概念図(温暖期継続ケースの場合*1)

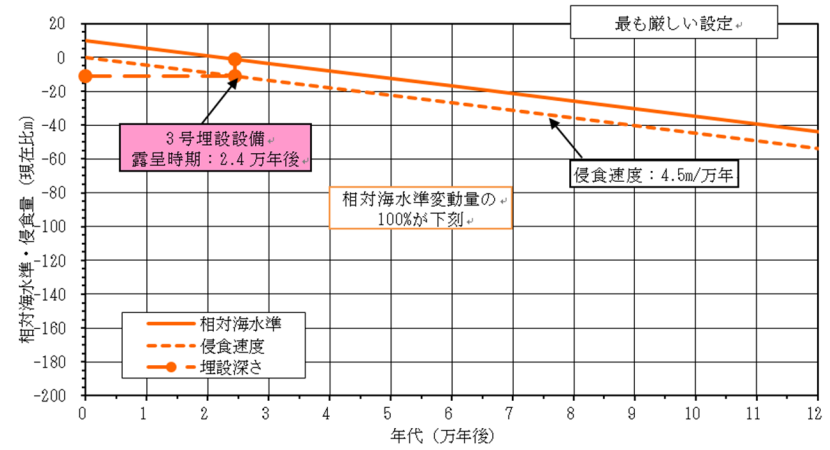
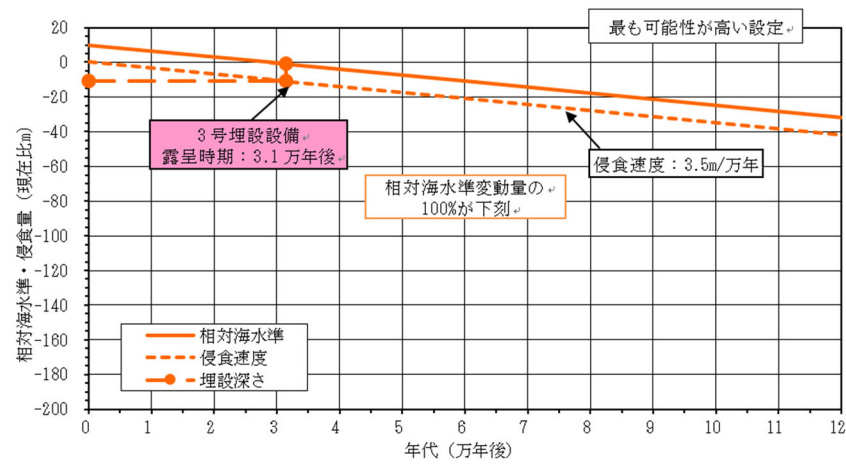
*1：温暖期継続ケースの侵食は、主要な河川及び沢の現河床勾配(図中の赤実線：現地形面及び埋土覆土部分は旧地形面を示す)を保ったまま侵食が進行する。また、仮想的土被り厚は、旧地形面よりも上位にある埋土及び覆土を除いた厚さを考慮する。



第20図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期(1/3) (1号埋設設備)



第20図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期(2/3) (2号埋設設備)



第 20 図 温暖期継続ケースにおける侵食量と埋設設備の露呈時期(3/3) (3号埋設設備)

第 13 表 埋設設備の露呈時期

項目	温暖期継続ケース					
	最も可能性が高い設定			最も厳しい設定		
	3号廃棄物 埋設地	1号廃棄物 埋設地	2号廃棄物 埋設地	3号廃棄物 埋設地	1号廃棄物 埋設地	2号廃棄物 埋設地
隆起速度(m/万年)	3.5			4.5		
海水準変動量(現在比:m)	10			10		
露呈開始位置の 仮想的土被り厚さ(m)	11	7	18	11	7	18
埋設設備 露呈開始時期(万年後)	3.1	2.0	5.1	2.4	1.6	4.0

d. 尾駁沼の河川化時期

(a) 尾駁沼の河川化時期の設定に関する考え方

湖沼の河川化としては、相対海水準の低下に伴い、尾駁沼が河川化すると考えられる(第 21 図参照)。将来の尾駁沼の河川化時期は、隆起量と海水準変動を組み合わせた相対海水準が尾駁沼の最深値(-4m)になる時期を河川化時期とする。

隆起量及び海水準変動は、前述の「(1)(iii) 隆起・沈降運動」及び「(2)(i) 海水準変動」の設定値を用いる。

(一) 最も可能性が高い設定

最も可能性が高い設定における隆起速度及び海水準変動から、尾駁沼の河川化時期を求める。

(二) 最も厳しい設定

最も厳しい設定における隆起速度及び海水準変動から、尾駁沼の河川化時期を求める。

(b) 尾駁沼の河川化時期の状態設定

相対海水準の低下による尾駁沼の河川化時期の関係を第 21 図に、尾駁沼の河川化時期の状態設定値を第 14 表に示す。

(一) 最も可能性が高い設定

(ア) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、最も可能性が高い設定における寒冷化ケースの海水準(現在比 0m からの低下量)及び隆起速度 3.5m/万年から、約 700 年後とする。

(イ) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、最も可能性が高い設定における温暖期継続ケースの海水準(現在比+10m)及び隆起速度 4.5m/万年から、約 4.0 万年後となるため、評価期間を踏まえ、考慮しないものとする。

(二) 最も厳しい設定

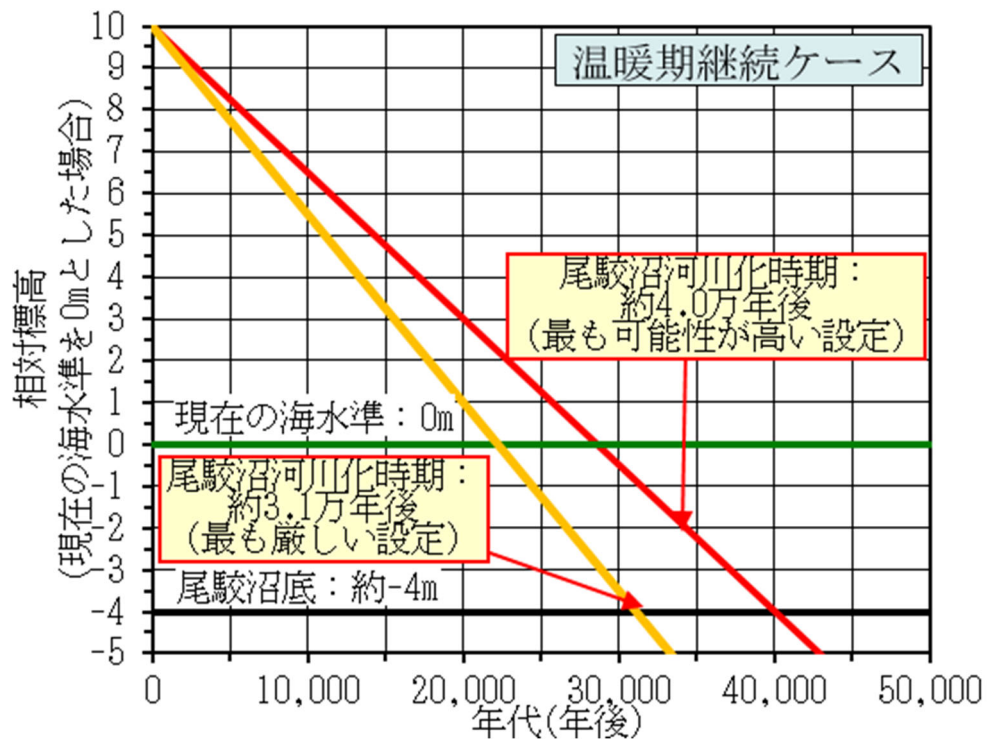
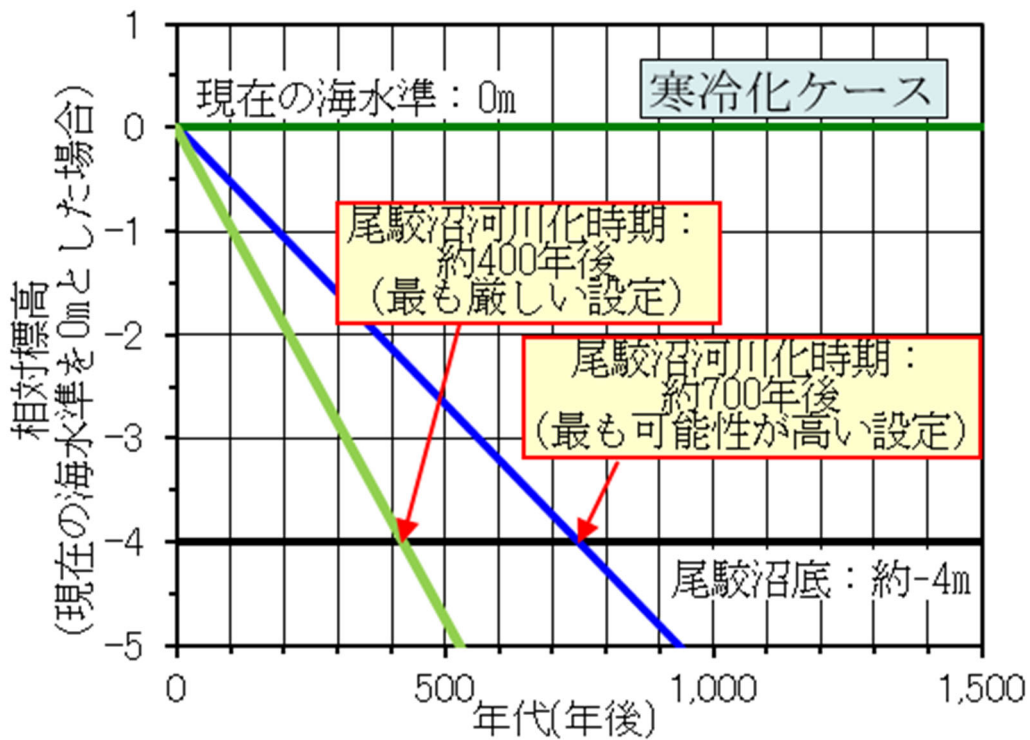
(ア) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、最も厳しい設定における

寒冷化ケースの海水準(現在比 0m からの低下量)及び隆起速度 3.5m/万年から、約 400 年後とする。

(イ) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、最も可能性が高い設定における温暖期継続ケースの海水準(現在比+10m)及び隆起速度 4.5m/万年から、約 3.1 万年後となるため、評価期間を踏まえ、考慮しないものとする。



第 21 図 相対海水準の低下による尾駱沼の河川化時期*1

*1: 尾駱沼底の標高は、国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「戸鎖」を参照。

第 14 表 尾駁沼の河川化時期の設定値

ケース		尾駁沼の 河川化時期	考え方
寒冷化 ケース	最も可能性 が高い設定	約 700 年後	寒冷化ケースの現在の海水準から将来の海水準 と隆起量を考慮した相対海水準が尾駁沼の基底 (標高-4m)に達するまでの時間とする。
	最も厳しい 設定	約 400 年後	

(ii) 地下水位(地下水流動)

地下水位(地下水流動)は単独事象としては廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形変化や海水準変動による地下水流動の変化が、地下水の流動方向、地下水の流出点、地下水流速及び埋設設備から上部覆土や岩盤(鷹架層)への流出水量に影響する。

地下水流動は、侵食速度を考慮したときに 1,000 年後の将来の地形が現状とほぼ同様と考えられるため、寒冷化ケースと温暖期継続ケースは同様の設定とし、現在の状態を考慮する。

a. 地下水の流動方向及び地下水の流出点

敷地は北西から南東に緩く傾斜する台地からなり、地下水は主に降水によってかん養されている。また、台地の地下水面は降雨時及び融雪時に変動が認められるものの、主に表層に分布している第四紀層内にある。これは、岩盤(鷹架層)の透水係数が第四紀層より約 2 桁小さく、地表面から浸透した雨水が容易に岩盤(鷹架層)に浸透できないためと考えられる。埋設設備は岩盤(鷹架層)を掘り下げて設置し、難透水性覆土及び下部覆土は、岩盤(鷹架層)の透水係数以下となるように設置する。また、上部覆土は廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数程度となるように設置し、原地形及び原水理地質構造に近くなることから、覆土後の地下水面は、原地形と同様に廃棄物埋設地周辺の第四紀層内にあると考えられる。したがって、廃棄物埋設地付近を通過した地下水は、原地形の地下水面等高線から読み取れる地下水の流動方向と同様に、主に南に向かって流れ、中央沢を経て尾駈沼に流入するものとする。「(i) 地形変化(侵食、湖沼の河川化)」に示すとおり、1,000 年後の将来の地形は現状とほぼ同様と考えられるため、将来においても廃棄物埋設地を通過した地下水は南に向かって流れ、中央沢を経て尾駈沼に流入するものとする。

b. 地下水流速

廃棄物埋設地付近の岩盤(鷹架層)及び上部覆土中の地下水流速^{*1}は、その位置の動水勾配及び透水係数により設定する。

*1：ここで地下水流速は、みかけの流速(実流速×間隙率)を示す。

(a) 動水勾配

廃棄物埋設地付近の地下水流動は、「a. 地下水の流動方向及び流出点」に示すとおり、覆土後 1,000 年程度までの間は、原地形の地下水流動と同様になると想定し、間隙水圧測定実施位置を通る鉛直断面内の全水頭等高線図から求めた埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配に基づき、最も可能性が高い設定では平均値、最も厳しい設定では最大値を用いて設定する。

なお、覆土後 1,000 年程度までの間における地形の侵食を考慮した動水勾配を算出しても、それらの動水勾配は、現在の動水勾配と大きく変わらないことを確認した。将来の地形の侵食を考慮した動水勾配の算出位置及び算出例を第 22 図及び第 23 図に示す。

(一) 鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の設定に関する考え方

鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配は、廃棄物埋設地付近で実施した間隙水圧測定値(標高換算全水頭)を基に作成した全水頭等高線図を用いて設定した。

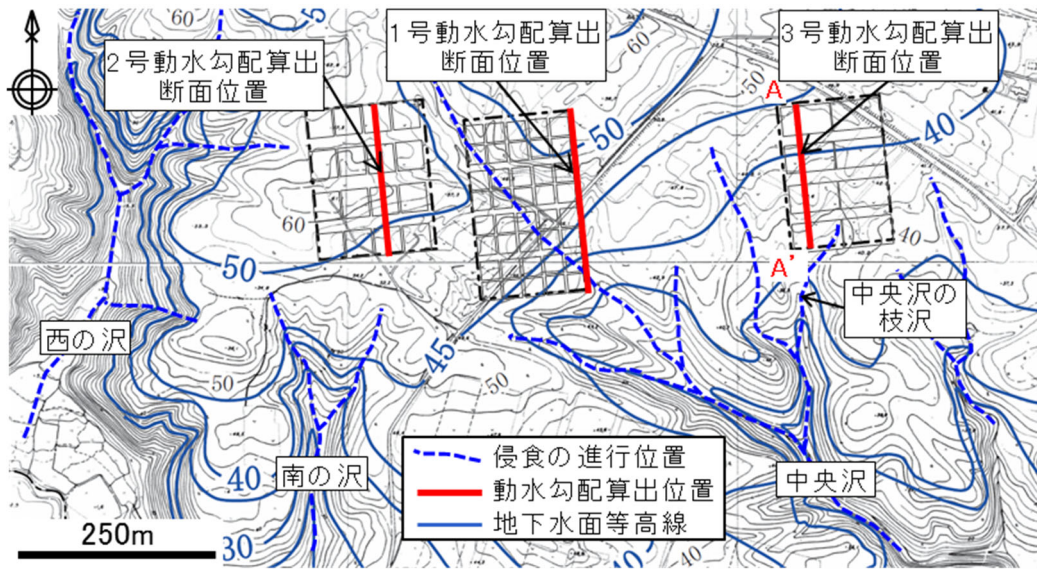
最も可能性が高い設定の動水勾配では実測に基づいて求めた動水勾配の平均を、最も厳しい設定の動水勾配では実測に基づいて求めた動水勾配の最大値を基に、それぞれ埋設設備からの流出水量が大きくなる側に 0.5%単位で丸めた値とした。

鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の設定方法の詳細については、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号 (廃止措置の開始後の評価) 線量評価パラメータ 埋設設備からの流出水量 2. (3)埋設設備設置地盤付近の地下水の流動状況」に示す。

(二) 鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の状態設定

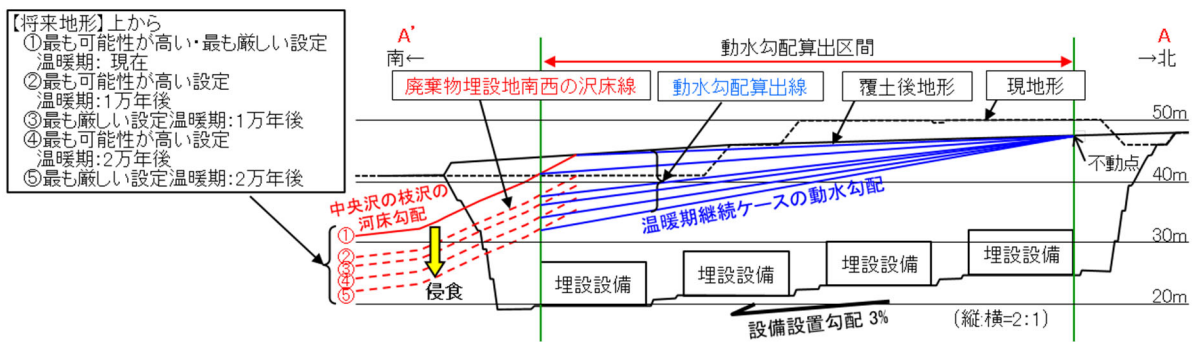
第 24 図に間隙水圧測定結果から作成した全水頭等高線を示す。

また、第 24 図から求めた埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配及び現在から 1,000 年後までの動水勾配の状態設定値を第 15 表及び第 16 表に示す。



第 22 図 動水勾配の算出位置*1

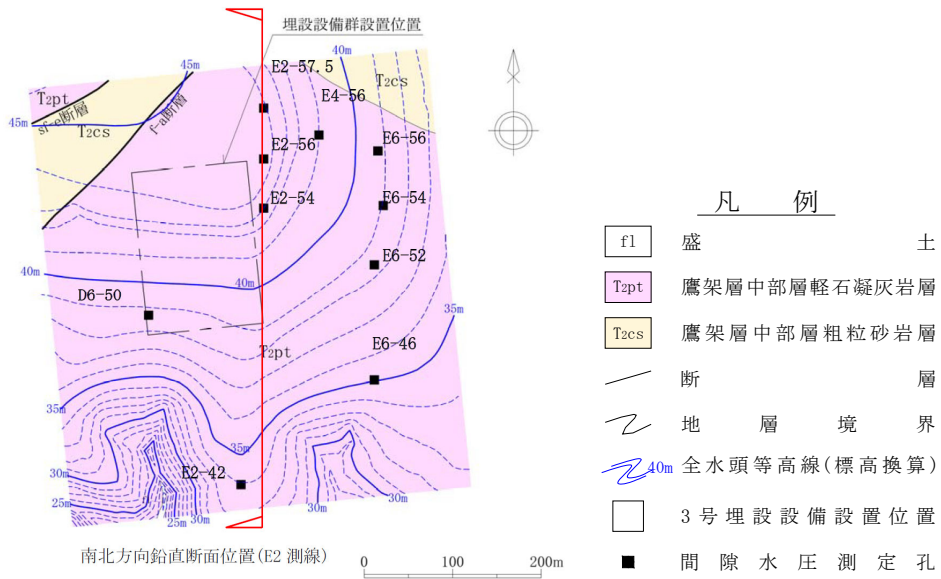
*1：将来の地形変化に基づく動水勾配の算出断面は、地下水面の勾配と地形勾配が調和的であることを考慮し、廃棄物埋設地における地下水面等高線の上流側から下流側にかけて地形勾配が最も急となる位置とした。



第 23 図 3号廃棄物埋設地南北断面における将来の地形変化と動水勾配の算出*1

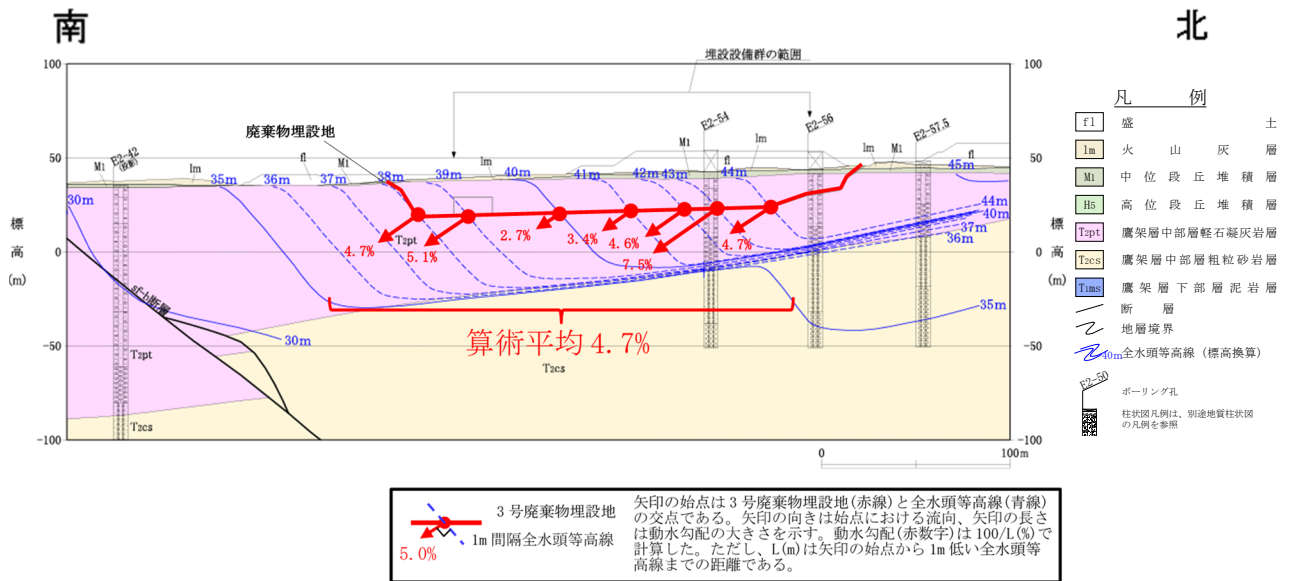
*1：将来の動水勾配は、埋設設備設置位置の範囲(緑縦線)において設定することとし、上流部(北側)の不動点と下流部(南側)の侵食を考慮した中央沢の枝沢等の交点から算出する。

(沢底の地下水位は地形と調和的であることから将来も同様とし、将来の動水勾配は沢地形から設定する。)



標高+22m 水平断面*1

*1：埋設設備群設置標高の水平断面における埋設設備群設置範囲では、地下水の流向はおおむね南北方向であり、動水勾配も同様の傾向となる。3号廃棄物埋設地付近ではE2側線が南北方向に間隙水圧測定孔を多く配置していることから、この測線を3号廃棄物埋設地付近の南北方向の代表鉛直断面作成位置とした。

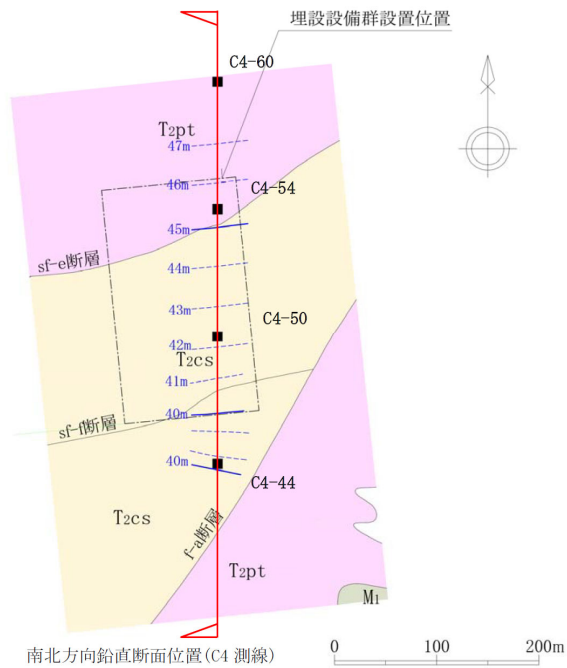


注1：矢印で示す動水勾配は、全水頭等高線から求めた局所的な値である。

南北方向 E2 測線鉛直断面

第 24 図 廃棄物埋設地付近の全水頭分布図 (1/3)

(3号廃棄物埋設地付近、2017年6月)

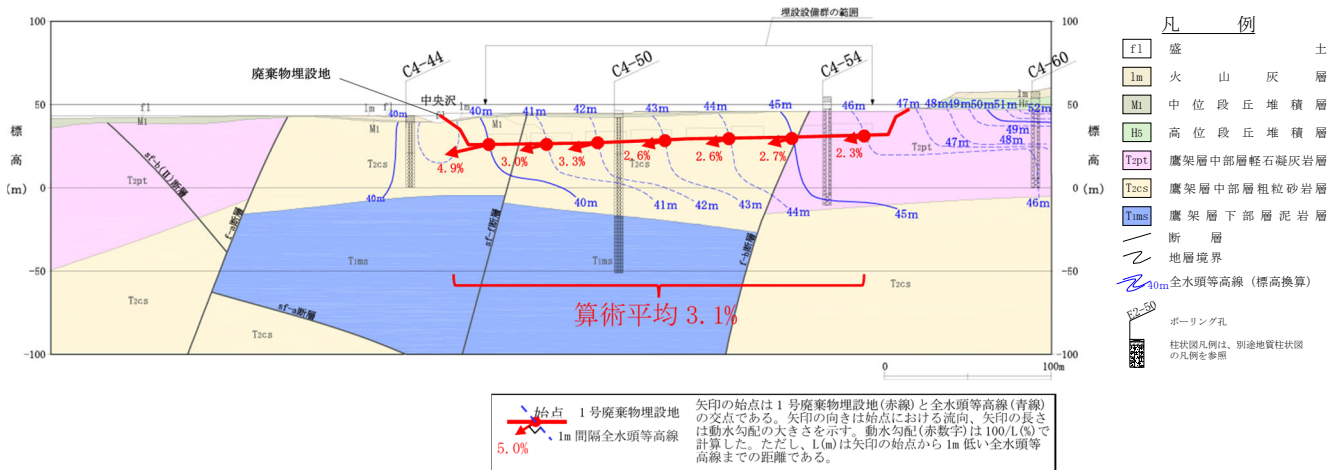


*1：埋設設備設置標高の水平断面における埋設設備群設置範囲では、地下水の流向がおおむね南北方向であり、動水勾配も同様の傾向となる。1号廃棄物埋設地では、C4 側線が南北方向に間隙水圧測定孔を多く配置していることから、この測線を 1号廃棄物埋設地付近の南北方向の代表鉛直断面作成位置とした。

凡 例

- M1 中位段丘堆積層
- T2pt 鷹架層中部層軽石凝灰岩層
- T2cs 鷹架層中部層粗粒砂岩層
- 断 層
- 〰 地 層 界 界
- 〰 40m 全水頭等高線 (標高換算)
- 1号埋設設備設置位置
- 間 隙 水 圧 測 定 孔

標高+30m 水平断面*1

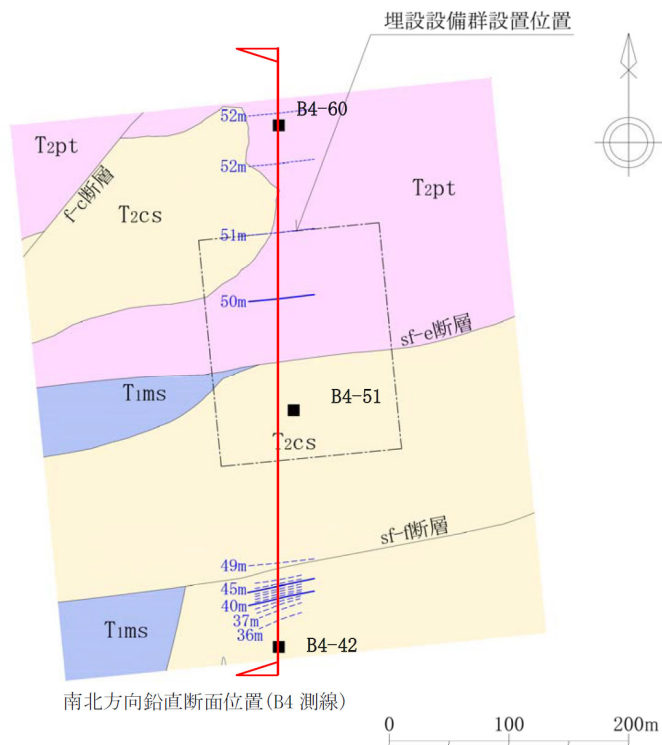


注 1：矢印で示す動水勾配は、全水頭等高線から求めた局所的な値である。

南北方向 C4 測線鉛直断面

第 24 図 廃棄物埋設地付近の全水頭分布図 (2/3)

(1号廃棄物埋設地付近、1990年6月)

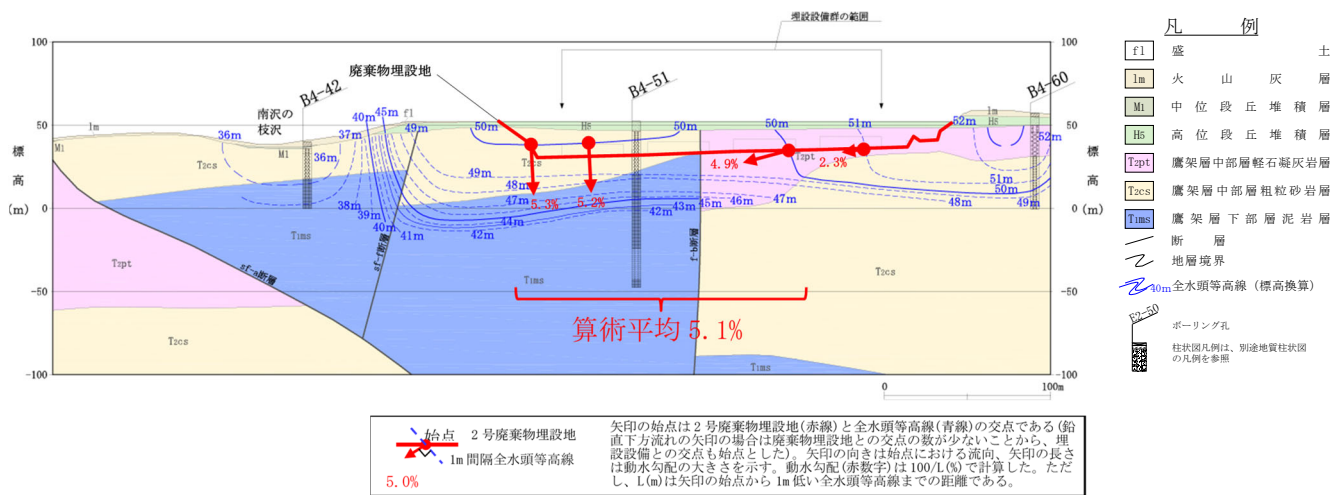


*1：埋設設備設置標高の水平断面における埋設設備群設置範囲では、地下水の流向がおおむね南北方向であり、動水勾配も同様の傾向となる。2号廃棄物埋設地では、B4側線が南北方向に間隙水圧測定孔を多く配置していることから、この測線を2号廃棄物埋設地付近の南北方向の代表鉛直断面作成位置とした。

凡 例

- T2pt 鷹架層中部層軽石凝灰岩層
- T2cs 鷹架層中部層粗粒砂岩層
- T1ms 鷹架層下部層泥岩層
- 断 層
- 地 層 境 界
- 40m 全水頭等高線 (標高換算)
- 2号埋設設備設置位置
- 間 隙 水 圧 測 定 孔

標高+34m 水平断面*1



矢印の始点は2号廃棄物埋設地(赤線)と全水頭等高線(青線)の交点である(鉛直下方流れの矢印の場合は廃棄物埋設地との交点の数がないことから、埋設設備との交点も始点とした)。矢印の向きは始点における流向、矢印の長さは動水勾配の大きさを示す。動水勾配(赤数字)は $100/L(\%)$ で計算した。ただし、L(m)は矢印の始点から1m低い全水頭等高線までの距離である。

注1：矢印で示す動水勾配は、全水頭等高線から求めた局所的な値である。

南北方向 B4 測線鉛直断面

第 24 図 廃棄物埋設地付近の全水頭分布図 (3/3)

(2号廃棄物埋設地付近、1995年6月)

第 15 表 埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配及び動水勾配の状態設定値

廃棄物埋設地	断面位置	埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配(%) ^{*1}		動水勾配の状態設定値(%)	
		平均 ^{*2}	範囲	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
3号廃棄物埋設地	E2 測線	4.7	2.7～7.5	5.0	8.0
1号廃棄物埋設地	C4 測線	3.1	2.3～4.9	3.5	5.0
2号廃棄物埋設地	B4 測線	5.1	2.3～5.3	5.5	5.5

*1：間隙水圧測定結果の実測値から作成した全水頭等高線を基に求めた(第 24 図参照)。

*2：個々の値の算術平均とした。

第 16 表 将来の動水勾配

廃棄物埋設地	ケース	モデル化時期	動水勾配(%)
1号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	現在～	3.5
	最も厳しい設定	1,000年後	5.0
2号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	現在～	5.5
	最も厳しい設定	1,000年後	5.5
3号廃棄物埋設地	最も可能性が高い設定	現在～	5.0
	最も厳しい設定	1,000年後	8.0

(b) 透水係数の設定に関する考え方

地盤の透水係数は、廃棄物埋設地を設置する地盤の N 値が 50 以上の岩盤であること、天然バリアを著しく損傷する事象は想定されないことから、将来においても大きく変化する要因がない。したがって、透水係数は最も可能性が高い設定と最も厳しい設定では同じ値とし、鷹架層中部層の平均的な透水係数とする。

c. 埋設設備から上部覆土や岩盤(鷹架層)への流出水量

埋設設備から上部覆土や岩盤(鷹架層)への流出水量は、地下水浸透流解析により計算する。浸透流解析には、覆土や地盤の透水係数及び境界条件として動水勾配を用いる。

動水勾配は、「(二) 鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の状態設定」に示す値とする。

(iii) 河川流量(表流水流動)

表流水流動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、廃棄物埋設施設を通過した地下水中の放射性物質の濃度は、その地下水が地表に流出した地点で、そこを流れる河川や湖沼などの表流水によって希釈されるため、河川及び湖沼の表流水流量の変化によって放射性物質の希釈に寄与する交換水量が変化することが想定される。よって、河川流量の変化を長期変動事象として考慮し、将来の河川流量を設定する。なお、河川及び湖沼の表流水流量を設定するために「(2)(iv)蒸発散量」で蒸発散量を設定する。

a. 河川流量の設定に関する考え方

降水量及び蒸発散量は気候変動に伴う将来の変化傾向を、流域面積は気候変動及びプレート運動に伴う相対海水準の変動を考慮し設定する。廃棄物埋設地は二又川の流域にあるため、希釈水量となる流量は二又川の河川流量に相当する。

河川流量は、下式で表される。

河川流量 = (降水量 - 蒸発散量)

= [河川流出高] × 流域面積 × 河川の水利用量(飲料水、農業用水、工業用水等)

・ 将来の降水量及び蒸発散量として、現在、1,000年後の「降水量」及び「蒸発散量」の設定値を用いて、河川流量を算出する。

・ 将来の水利用率は、現在と同じと設定する。

現在の二又川の水利用量は、青森県(2007)⁽³⁰⁾に示される工業用水(9,500m³/d)と農業用水(0.03m³/s)の合計である4.41×10⁶m³/yとする。

現在の表流水流量は、現在の二又川(尾駸沼への流入地点より上流域)の流域面積26.9km²、現在の年降水量1,310mm/y及び蒸発散量590mm/y(水収支から算出)から、1.94×10⁷m³/yとする。

河川の水利用が二又川(尾駸沼への流入地点より上流域)に限られることを考慮し、現在の二又川水利用率を、4.41×10⁶m³/y ÷ 1.94×10⁷m³/y = 0.227 ≒ 0.3とし、将来もこの利用率が変わらないと設定する。

したがって、将来の二又川の河川流量は、下式により算出する。

(将来の降水量 - 将来の蒸発散量) × 将来の二又川の流域面積 × (1 - 0.3)

二又川流域の設定図を第 25 図に示す。

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

最も可能性が高い設定における寒冷化ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(3)(iii) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、相対海水準の低下により尾駁沼が河川化するため、二又川と中央沢の合流点より上流側の流域と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

最も可能性が高い設定における温暖期継続ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(3)(iii) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、現在の尾駁沼の流域⁽²⁹⁾と設定する。

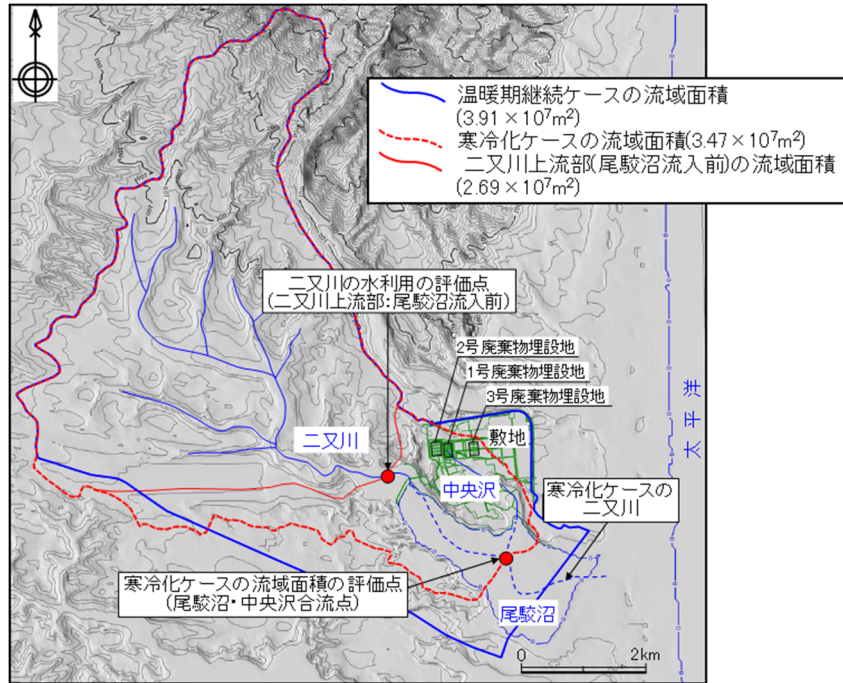
(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

最も厳しい設定における寒冷化ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(3)(iii) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、最も可能性が高い設定と同様に、二又川と中央沢の合流点より上流側の流域と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

最も厳しい設定における温暖期継続ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(3)(iii) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、最も可能性が高い設定と同様に、現在の尾駁沼の流域⁽³⁰⁾と設定する。



第 25 図 二又川流域の設定図

b. 河川流量の変化

(a) 最も可能性が高い設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける河川流量は、最も可能性が高い設定における寒冷化ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、1,000年後に $1.2 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける河川流量は、最も可能性が高い設定における温暖期継続ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、 $1.7 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

(b) 最も厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける河川流量は、最も厳しい設定における寒冷化ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、1,000年後に $7.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける河川流量は、最も厳しい設定における温暖期継続ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、 $1.0 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

c. 河川流量の状態設定

河川流量の設定値を第 17 表に示す。河川流量は少ないほど希釈水量が少なくなるため、保守的となる。したがって、寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第 17 表 河川流量の設定値

ケース	モデル化時期	気温(°C)	降水量 (mm/y)	蒸発散量 (mm/y)	表流水流量 (m ³)
最も可能性が高い設定	現在*1	9	1,120	580	1.3×10 ⁷
	1,000 年後	8	1,070	560	1.2×10 ⁷
最も厳しい設定	現在*1	9	910	580	8.0×10 ⁶
	1,000 年後	8	860	560	7.2×10 ⁶

(4) その他の事象

(i) 生物学的事象

敷地内における樹木の根に関する調査結果から、樹木の根の深さは最大で 2.3m である。

モグラ類による覆土の擾乱が想定されるが、地表から 1m 未満である場合が多く⁽³¹⁾、樹木の根の影響範囲に包含される。

以上より、廃棄物埋設地には十分な厚さの覆土を設置することから、生物学的事象による影響はなく、長期変動事象として考慮しない。

(ii) 透水性の変化

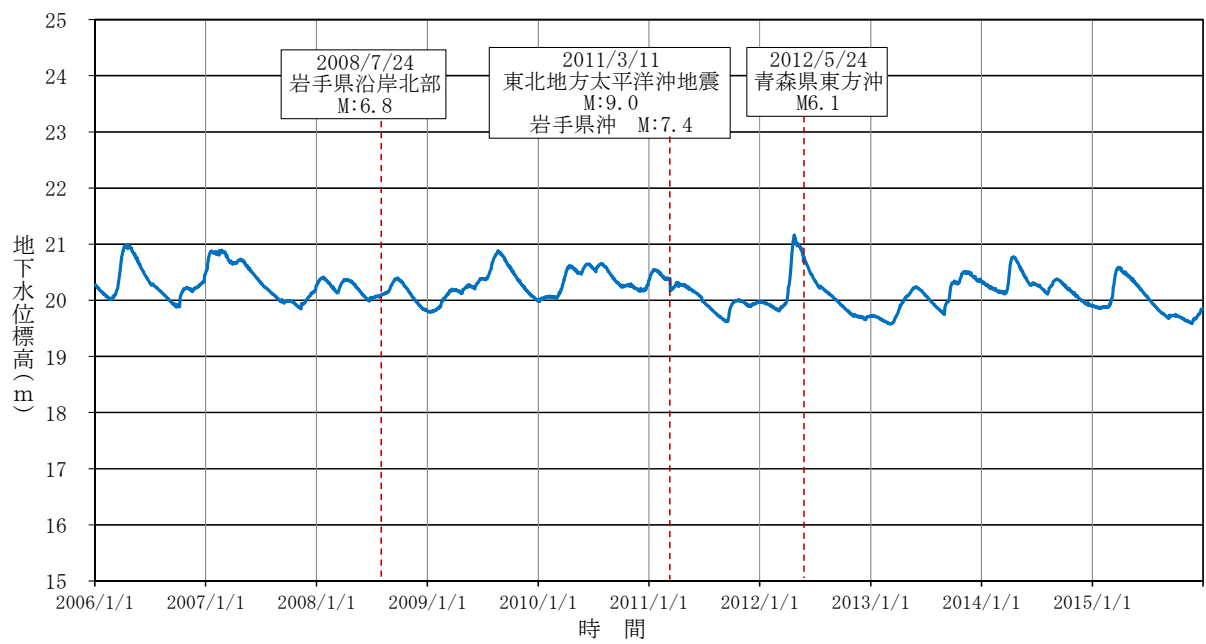
岩盤の透水性は、以下の点から大きく変化しないと判断し、長期変動事象として考慮しない。

a. 断層

「(1)(ii)地震・断層活動」に示すように、敷地内に将来活動する断層が認められないことから、断層運動による岩盤の破碎は発生しない。

b. 地震

敷地内における地下水観測結果を第 26 図に示す。地下水位観測結果から、地震による地下水位の変動が認められるものの、その変動量は季節変動に内包され、一定期間後には元の地下水位に戻っている。このことから、地震による透水性の変化は考慮しない。



第 26 図 地下水位観測結果 (F0-20 孔)

4. まとめ

廃止措置の開始後の評価における線量評価シナリオの設定に当たって、人工バリア及び天然バリアの機能並びに被ばく経路等に影響を与える自然現象を考慮した地質環境に係る長期変動事象の状態設定結果を第 18 表に示す。

第 18 表 長期変動事象の状態設定結果 (1/2)

起因	長期事象	長期変動項目	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定	根拠記載箇所
プレート運動	火山・火成活動	火砕物密度流	短期的(数百年～数千年スケール)には、敷地に到達する可能性は十分に小さいため、火砕物密度流の影響は考慮しない。		3. (1) (i) 火山・火成活動 a. 火砕物密度流
		降下火砕物	化学成分溶出による低 pH の水が発生すると想定する。		3. (1) (i) 火山・火成活動 b. 降下火砕物
	地震・断層活動	地震	金属腐食に伴う埋設設備の変形量と比較して非常に小さいことから、地震による力学的影響を考慮しない。		3. (1) (ii) 地震・断層活動 a. 地震
		液状化(覆土)	覆土は容易に液状化し難く、低透水性への影響は生じないと考えられるため、考慮しない。		3. (1) (ii) 地震・断層活動 b. 液状化(覆土)
		断層活動(地盤の変形)	敷地内に活断層が分布しないことから、断層活動による影響について考慮しない。		3. (1) (ii) 地震・断層活動 c. 断層活動(地盤の変形)
隆起・沈降	隆起・沈降	隆起速度：3.5m/万年	隆起速度：4.5m/万年	3. (1) (iii) 隆起・沈降運動	
気候変動	海水準変動	海水準(現在比 m)			3. (2) 気候変動に起因する事象 (i) 海水準変動
		温暖期継続ケース 現在～1,000年後：+10m	温暖期継続ケース 現在～1,000年後：+10m		
	気温	寒冷化ケース 現在：9℃、1,000年後：8℃	寒冷化ケース 現在：9℃、1,000年後：8℃	3. (2) 気候変動に起因する事象 (ii) 気温	
	降水量	寒冷化ケース 現在：1,120mm/y 1,000年後：1,070mm/y	寒冷化ケース 現在：910mm/y 1,000年後：860mm/y	3. (2) 気候変動に起因する事象 (iii) 降水量	
	かん養量	寒冷化ケース 現在：224mm/y 1,000年後：214mm/y	寒冷化ケース 現在：182mm/y 1,000年後：172mm/y	3. (2) 気候変動に起因する事象 (iv) かん養量	
温暖期継続ケース 現在～1,000年後：310mm/y					

第 18 表 長期変動事象の状態設定結果 (2/2)

起因	長期事象	長期変動項目	最も可能性が高い設定	最も厳しい設定	根拠記載箇所
プレート運動と 気候変動	侵食	侵食速度(温暖期継続ケース)			3. (3)プレート運動と気候変動に起因する事象 (i)侵食
		3. 5m/万年		4. 5m/万年	
		尾駁沼の河川化時期			
		寒冷化ケース：約 700 年後		寒冷化ケース：約 400 年後	
		埋設設備の露呈時期			
		埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後となるため、評価期間を踏まえると、埋設設備の露呈時期の状態設定については、考慮しないものとする。			
プレート運動と 気候変動	地下水位	動水勾配			3. (3)プレート運動と気候変動に起因する事象 (ii)地下水位
		3号 現在～1,000年後：5%		3号 現在～1,000年後：8%	
		1号 現在～1,000年後：3.5%		1号 現在～1,000年後：5.0%	
		2号 現在～1,000年後：5.5%		2号 現在～1,000年後：5.5%	
プレート運動と 気候変動	蒸発散量	寒冷化ケース 現在：580mm/y 1,000年後：560mm/y		寒冷化ケース 現在：580mm/y 1,000年後：560mm/y	3. (3)プレート運動と気候変動に起因する事象 (iii)蒸発散量
		寒冷化ケース 現在：1.3×10 ⁷ m ³ /y 1,000年後：1.2×10 ⁷ m ³ /y		寒冷化ケース 現在：8.0×10 ⁶ m ³ /y 1,000年後：7.2×10 ⁶ m ³ /y	
その他	生物学的事象	埋設設備は十分な厚さの覆土に覆われることから、生物学的事象による影響はなく、長期変動事象として考慮しない。			3. (4)その他の事象 (i)生物学的事象
	透水性の変化	岩盤の透水性は大きく変化しないと判断し、長期変動事象として考慮しない。			3. (4)その他の事象 (ii)透水性の変化

参考文献：

- (1) 社団法人 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会(2008)：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方
- (2) 高橋雅紀(2004)：日本列島の E-W 短縮テクトニクスの原因とその開始時期、日本地震学会 2004 年秋季大会講演予稿集、B048
- (3) 吉田武義、中島淳一、長谷川昭、佐藤比呂志、長橋良隆、木村純一、田中明子、Prima, O.D.A.、大口健志(2005)：後期新生代、東北本州弧における火成活動史と地殻・マントル構造、第四紀研究
- (4) 産業技術総合研究所(2012)：地質・気候関連事象の時間スケールに対する不確実性の検討、独立行政法人産業技術総合研究所 深部地質環境研究コア
- (5) 工藤崇、小林淳、山元孝広、岡島靖司、水上啓治(2011)：十和田火山における噴火活動様式の時代変遷と長期予測、日本第四紀学会講演会要旨集、Vol. 41、pp. 82-83
- (6) 宇佐美龍夫、石井寿、今村隆正、武村雅之、松浦律子(2013)：日本被害地震総覧 [599-2012]、東京大学出版会
- (7) 宇津徳治(1982)：日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表：1885 年～1980 年、東京大学地震研究所彙報 Vol. 57・・・「宇津カタログ(1982)」
- (8) 気象庁(1951～2015)：「地震年報」等・・・「気象庁地震カタログ」
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- (9) 村松郁栄(昭和 44 年)：震度分布と地震のマグニチュードとの関係、岐阜大学教育学部研究報告、自然科学、第 4 号
- (10) 勝又護、徳永規一(1971)：震度Ⅳの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応、驗震時報、vol. 36
- (11) 小池一之、町田洋編(2001)：日本の海成段丘アトラス、東京大学出版会
- (12) EPICA community members(2004)：Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, NATURE, 429
- (13) IPCC(2007)：Climate Change 2007: SYNTHESIS REPORT, A Report of the Intergovernmental Panel Climate Change

- (14) Ayako Abe-Ouchi, Fuyuki Saito, Kenji Kawamura, Maureen E. Raymo, Jun'ichi Okuno, Kunio Takahashi, Heinz Blatter. (2016): Isolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, vol.500, p.190-194
- (15) ANDRA(2005) Phenomenological evolution of a geological repository
- (16) Yamanaka, M., Ishikawa, S. and Sugawara, K. (1990): PALYNOLOGICAL STUDIES OF QUATERNARY SEDIMENTS, IN NORTHEAST JAPAN, VII. SHIRIYA-ZAKI MOOR IN SHIMOKITA PENINSULA, *ECOLOGICAL REVIEW*, 22, 1
- (17) 松末和之、藤原治・末吉哲雄(2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候、サイクル機構技報、vol.6
- (18) Nakagawa, T., Tarasova, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002): Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra
- (19) 登坂博行(2006) 地圏の水環境科学、東京大学出版会、pp.12-13、364p
- (20) 気象庁(1981~2011) : 過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (21) 気象庁(1981~2011) : 世界の地点別年平均値、
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>
- (22) L.Labeyrie, J.Cole, K.Alverson and T.Stocker(2003) : The History of Climate Dynamics in the Late Quaternary, *Paleoclimate, Global Change and the Future*, p. 33-71
- (23) 日本第四紀学会(1987) : 百年千年万年後の日本の自然と人類—第四紀研究にもとづく将来予測、pp.38-59、231p
- (24) IPCC(2013) : Climate Change 2013:The Physical Science Basis, AR5, WG I, 第5次評価報告書第1作業部会報告書—技術要約—、気象庁翻訳(2013)
- (25) Rohling E. J., Fenton M., Jorissen F. J., Bertrand P., Ganssen G., Caulet J. P. (1998) : Magnitudes of sea-level lowstands of the past 500,000 years, *Nature*, Vol.394, No.6689, pp.162-165
- (26) C.W.Thornthwaite(1948) :An Approach toward a Rational Classification of Climate , *Geographical Review* Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94
- (27) 山本莊毅、高橋裕(1987) : 図説水文学(水文学講座)、共立出版、pp.62、221p

- (28) 菅原正巳(1972):流出解析法(水文学講座 7), 共立出版, 257p
- (29) 貝塚爽平(1977):日本の地形 ー特質と由来ー, 岩波書店, 234p
- (30) 青森県(2007):新むつ小川原開発基本計画素案に係る環境影響評価書、516p
- (31) 亀井翼(2013):モグラによる遺物の埋没と埋没後擾乱-茨城県稲敷郡美浦村陸平貝塚を対象として-, 第四紀研究、Vol. 52、No. 1、pp. 1-12

想定される自然現象の選定について

目 次

1. 自然現象の選定の位置づけ.....	1
2. 選定の基本方針.....	1
3. 自然現象の抽出.....	1
(1) 自然現象の選定の考え方及びフロー	1
(2) 自然現象を抽出した国内外の文献	1
4. 自然現象の選定.....	2
5. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象.....	2

1. 自然現象の選定の位置づけ

本資料は、許可基準規則第十条第四号に関する適合性を示す上で考慮する自然現象について、その基本的考え方及び選定結果までを説明する。

2. 選定の基本方針

第十条第四号を考慮した自然現象の選定の基本方針としては、「廃止措置の開始後」の期間に対して、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象を選定する。

3. 自然現象の抽出

(1) 自然現象の選定の考え方及びフロー

自然現象の選定の考え方としては、自然現象等を国内外の基準及び文献から網羅的に抽出し、立地特性、地質調査結果、埋設設備の状態及び自然現象の特徴等を考慮して、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼさない事象は除外し、詳細評価をすべき事象を選定する。

自然現象等の選定の流れとしては、国内外の基準及び文献調査により自然現象を網羅的に抽出し、立地特性、地質調査結果、埋設設備の状態及び自然現象の特徴を考慮し、海外での評価手法を参考に、以下の基準のいずれかに該当するものを除外する。

なお、除外基準の詳細な考え方については根拠資料 1 に示す。

- ① 発生頻度が極低頻度と判断される事象
- ② 施設周辺では起こり得ない事象
- ③ 事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象
- ④ 施設に影響を及ぼさない事象
- ⑤ 他の事象に包含できる事象

除外基準に該当しない事象は、廃止措置の開始後の各期間において、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象として選定する。

(2) 自然現象を抽出した国内外の文献

国内外の基準及び文献を参考にし、安全機能を有する施設の安全機能に影響を与えると考えられる自然現象等の抽出を行った。国内外の基準及び文献は自然災害、

産業事故、原子力発電所の安全性に影響を与える可能性のある外部ハザード、放射性廃棄物処分施設の地質環境及び安全評価に係る情報が網羅的に示されているものを参考にした。自然現象等を抽出した国内外の文献の一覧を第1表に示す。

4. 自然現象の選定

第1表に示される国内外の基準及び文献調査により網羅的に抽出された現象を第2表に示す。

なお、自然現象を抽出した国内外の基準及び文献から廃棄物埋設施設の安全性に影響を与えると考えられる自然現象及び人為事象を網羅的に抽出した時点で、明らかに類似した現象及び事象は統合した。そのうえで、国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

抽出された現象のうち、検討対象とした事象の選定結果を第3表に示す。

5. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象

第十条第四号を考慮した廃止措置の開始後に廃棄物埋設地へ影響を及ぼし得る自然現象として、①火山の影響、②地震、③断層活動（地盤の変形）、④液状化（覆土）、⑤隆起・沈降、⑥降水量、⑦気温（高温、低温・凍結）、⑧海水準変動、⑨蒸発散量、⑩かん養量、⑪河川流量、⑫地下水位（地下水流動）、⑬侵食、⑭透水性の変化、⑮生物学的事象の15事象を選定した。

第1表 自然現象を抽出した国内外の文献一覧

No.	文献名
1	一般社団法人 日本原子力学会(2014)：外的ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準：2014(AESJ-SC-RK008)
2	国会資料編纂会(1998)：日本の自然災害
3	日外アソシエーツ(2010)：日本災害史事典 1868-2009
4	日外アソシエーツ(2010)：産業災害全史<シリーズ災害・事故史 4>
5	IAEA(2003)：Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Requirements Series No.NS-R-3(Rev.1)
6	IAEA(2010)：Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide No.SSG-3
7	NRC(1983)：PRA PROCEDURES GUIDE(Vol.1, Vol.2), NUREG/CR-2300
8	NRC(1991)：Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407
9	NRC(1987)：Evaluation of External Hazards to Nuclear Power Plants in the United States, NUREG/CR-5042
10	NEI(2012)：DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES (FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE, NEI 12-06
11	IAEA(2015)：Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No.SSG-35
12	ASME(2009)：Addenda to ASME/ANS RA-S-2008 Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications, ASME/ANS RA-Sa-2009
13	OECD/NEA(2000)：Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste
14	OECD/NEA(2014)：Updating the NEA International FEP List: An Integration Group for the Safety Case Technical Note
15	総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会(平成15年)：廃棄物安全小委員会報告書 -高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて-
16	IAEA(2004)：Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Volume1
17	IAEA(2004)：Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Volume2
18	社団法人 土木学会(2006)：精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方
19	原子力安全基盤機構(平成18年)：地層処分に係る調査に関する報告書
20	産業技術総合研究所(平成19年)：概要調査の調査・評価項目に関する技術資料
21	原子力安全基盤機構(2008)：地層処分の立地選定段階の調査に係わるガイドラインの検討ー将来の安全評価に必要な調査のあり方と調査活動に関する品質保証についてー
22	社団法人 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会(2008)：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行パラメータ設定の考え方
23	原子力安全委員会(平成22年)：余裕深度処分の管理終了以後における安全評価に関する技術資料
24	IAEA(2011)：Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-14
25	IAEA(2014)：Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-29

No.1~121：自然災害及び産業事故に関する文献 No.132~254：放射性廃棄物処分施設の地質環境及び安全評価に係る文献

なお、上記論文に記載される内部事象については、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号 補足説明資料3 影響事象分析」で説明する。

第2表 文献調査の結果抽出された自然現象(1/4)

全現象	許可基準規則 解釈*1、 火山影響評価 ガイド*2	既往の国内外文献による自然現象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す											既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す											埋設施設へ影響を与える可能性の ある事象の整理と抽出	
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	25	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23	24		
1	地震	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	地震
2	地盤沈下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2	地盤の変形
3	地盤隆起	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3	地盤の変位
4	断層活動・地割れ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
5	地滑り	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
6	豪雨による地滑り	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
7	融雪による地滑り	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
8	地下水による地滑り	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
9	液状化現象	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5	液状化現象
10	泥湧出	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6	泥湧出
11	斜面の不安定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
12	斜面の不安定 崖崩れor陥没	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	7	斜面の不安定
13	地震による津波	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
14	火山による津波	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
15	静振	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	9	静振
16	高潮	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10	高潮
17	波浪・高波	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
18	高潮位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
19	異常潮位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
20	高湖水位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
21	高河水位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
22	低潮位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
23	低水位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
24	海流異変	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
25	風(台風)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
26	氷嵐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
27	雪嵐(吹雪)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
28	強い直線風	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
29	竜巻	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
30	暴風による砂嵐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
31	高圧	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
32	低圧	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
33	急激な気圧変化	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
34	豪雨	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
35	地震による洪水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
36	豪雨による洪水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
37	融雪による洪水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
38	高水位による洪水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
39	近隣河川、湖、貯水池 による洪水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
40	地滑りによる洪水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
41	豪雨による鉄砲水	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		

*1：第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈(以下「許可基準規則解釈」という。)に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2：「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第2表 文献調査の結果抽出された自然現象(2/4)

全現象	許可基準規則 解釈*1、 火山影響評価 ガイド*2	既往の国内外文献による自然現象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										埋設施設へ影響を与える可能性の ある事象の整理と抽出						
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	25	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22		23	24				
42	地震による土石流	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	土石流			
43	暴雨による土石流	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
44	降雹	—	○	○	○	○	—	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	降雹			
45	落雷(電流)	—	○	○	○	○	○	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	落雷(電流)			
46	森林火災	—	○	—	—	○	○	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	森林火災			
47	草原火災	—	○	○	—	○	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	草原火災			
48	高温	—	○	—	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26	高温			
49	低温・凍結	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	—	○	○	○	○	—	—	27	低温・凍結			
50	氷結	—	○	—	○	○	—	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	氷結			
51	氷晶	—	○	○	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	氷晶			
52	氷壁	—	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	氷壁			
53	高水温	—	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	高水温			
54	低水温	—	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32	低水温			
55	干ばつ	—	○	○	○	○	○	—	—	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33	干ばつ			
56	霜	—	○	○	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34	霜			
57	霧	—	○	○	—	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35	霧			
58	火山弾 (大きな噴石)	○	○	○																					36	火山の 影響	火山から発生する飛来物 (噴石)	
59	火山礫 (小さな噴石)		○	○																							火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
60	火砕流	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
61	溶岩流	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
62	火砕サージ	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
63	爆風	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
64	洪水	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
65	降灰	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
66	火災(山林火災)	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
67	火山ガス滞留	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
68	熱湯	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
69	山体崩壊	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
70	新しい火口の開口	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
71	津波及び静振	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
72	大気現象	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
73	地殻変動	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性土石流、火山泥流及び 洪水	
74	火山性地震とこれに関 連する事象	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性地震とこれに関連する 事象	
75	熱湯	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	火山性地震とこれに関連する 事象	
76	積雪	—	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	37	積雪
77	豪雪による雪崩	—	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	38	雪崩
78	融雪による雪崩	—	○	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	38	雪崩

*1：許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2：「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第2表 文献調査の結果抽出された自然現象(3/4)

全現象	許可基準規則 解釈*1、 火山影響評価 ガイド*2	既往の国内外文献による自然現象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す											既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す											埋設施設へ影響を与える可能性の ある事象の整理と抽出				
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	25	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23	24					
79	生物学的事象	—	○	○	○	○	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39	生物学的事象		
80	動物	—	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
81	塩害:海塩粒子による 絶縁破壊	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	塩害		
82	塩害:腐食	—	○	—	—	○	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
83	隕石	—	○	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	41	隕石		
84	隕石による衝撃波	—	○	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
85	陥没	—	—	○	○	○	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	42	陥没		
86	土壌の収縮・膨張	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	43	土壌の収縮・膨張		
87	隆起・沈降運動	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	44	隆起・沈降		
88	地形及び陸水の変化	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	45	地形及び陸水の変化		
89	地盤の侵食	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	46	地盤の侵食		
90	海岸浸食	—	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47	海岸浸食		
91	海面下の侵食	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	48	海面下の侵食		
92	強い水流、地下水による 侵食	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49	地下水による侵食		
93	カルスト	—	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	カルスト		
94	海氷による川の閉塞	—	○	—	○	—	—	—	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	51	海氷による川の閉塞		
95	湖若しくは川の水位降 下	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	52	湖若しくは川の水位降下		
96	河川の流路変更	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	53	河川の流路変更		
97	有毒ガス	—	—	—	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	〔人為の有毒ガスに含める〕	
98	太陽フレアによる磁気 (再処理の「太陽フレ ア・磁気嵐」に相当)	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	〔電磁的障害含める〕	
99	気候変動・サイクル	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
100	氷期-間氷期サイク ル	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	気候変動による海水準変動や気 象の変化として個別に考慮	
101	温暖化	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
102	海水準変動	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	54	海水準変動	
103	構造運動	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	断層・火山・隆起等として考慮
104	変成作用	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55	変成作用	
105	塑性変形作用	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	56	塑性変形作用	
106	続成作用	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57	続成作用	
107	岩塩ダイヤピル	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58	岩塩ダイヤピル	
108	地殻変動	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	断層・火山・隆起等として考慮
109	海象	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	海象⇒高潮、潮位、津波で検討
110	地質・地質構造の性 状・特性	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)
111	天然資源・鉱物資源	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)

*1: 許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2: 「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第2表 文献調査の結果抽出された自然現象(4/4)

全現象	許可基準規則 解釈*1、 火山影響評価 ガイド*2	既往の国内外文献による自然現象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す											既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す											埋設施設へ影響を与える可能性の ある事象の整理と抽出			
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	25	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23	24				
112	風化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	-	-	○	○	○	-	-	○	59	風化	
113	変質	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	○	○	○	○	○	-	-	-	○	60	変質	
114	力学・変形特性(掘削 影響範囲・力学的安定 性を含む)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)	
115	熱特性	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	-	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)	
116	蒸発散量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	○	○	-	-	○	○	-	-	○	61	蒸発散量	
117	涵養量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	-	62	涵養量	
118	季節的な氷の量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	季節的な氷の量	
119	風速・風向	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	-	風速・風向	
120	極端な気象パターン	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	台風、異常低温、豪雪に包含	
121	永久凍土	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	63	永久凍土	
122	水収支	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	-	涵養量、河川流量等で考慮
123	河川流量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	-	64	河川流量	
124	流出地点の状態(河 川・沼)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	-	○	65	流出地点の状態(河川・沼)	
125	透水係数	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	66	透水係数
126	地下水位 (地下水流動)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	67	地下水位(地下水流動)
127	地下水の流動特性	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	地下水の流動特性
128	深部流体	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	○	-	-	-	-	-	68	深部流体
129	天水の水質、化学組 成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	69	天水の水質
130	表流水・地下水の水 質、化学組成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	70	表流水・地下水の水質
131	岩盤の鉱物・化学組成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	-	○	○	-	-	-	○	○	-	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)	
132	地下水の水質、化学 組成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	○	○	-	-	-	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)	
133	生物学・生化学的現 象・微生物	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	80.生物学的現象に包含	
134	コロイド	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	○	○	○	○	-	-	○	○	-	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)	
135	有機物	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	○	○	-	-	-	○	○	-	地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)	

*1: 許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2: 「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第2表 自然現象の選定 (1/6)

国内外の文献から抽出した事象		除外の基準					評価	事象に対する考え方		
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤				
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象	廃止措置開始後			
プレート運動に起因する事象	火山・火成活動	火山の影響	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「火山の影響」として考慮する。	
	地震・断層活動	地震	—	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「地震」として考慮する。
		断層活動(地盤の変形)	—	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、出戸西方断層の断層活動によって広域に地盤が傾斜する可能性があるため、第十条第四号にて「断層活動(地盤の変形)」として考慮する。
		地盤の変位	—	○	—	—	—	—	不要	敷地内に将来活動する可能性のある断層がないことから、地盤の変位は発生しないため、考慮しない。第三条(安全機能を有する施設の地盤)にて別途詳細な説明をする。
		液状化	—	—	—	—	—	—	要	安全機能を有する施設はN値50以上の岩盤(鷹架層)に設置しているため、地盤の液状化は発生しない。地盤の液状化は、第三条(安全機能を有する施設の地盤)にて別途詳細な説明をする。廃止措置の開始後の覆土については、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。
		津波	—	—	—	○	—	—	不要	廃止措置の開始後は、安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置すること及び既往津波並びに公表された津波シミュレーション結果から、津波は到達しない。また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	沈降運動・隆起	隆起・沈降	—	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「隆起・沈降」として考慮する。
	その他	変成作用	—	○	—	—	—	—	不要	変成作用を被るような地質構造場(地温・圧力)ではないため、考慮しない。
		塑性変形作用	—	○	—	—	—	—	不要	塑性変形を被るような地質構造場(褶曲構造)ではないため、考慮しない。
		続成作用	—	○	—	—	—	—	不要	続成作用を被るような地質構造場(沈降場)ではないため、考慮しない。

第2表 自然現象の選定 (2/6)

国内外の文献から抽出した事象		除外の基準					評価	事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始後	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象		
気象変動に起因する事象	静振	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	高潮	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	波浪・高波	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	高潮位	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	低潮位	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	海流異変	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
	風(台風)	—	—	—	○	—	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下にあることから、影響はないため、考慮しない。
	竜巻	—	—	—	○	—	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下にあることから、影響はないため、考慮しない。
	砂嵐	—	○	—	—	—	不要	敷地周辺に砂塵が舞い上がるような砂漠や大規模な砂丘は分布しないため、考慮しない。

第2表 自然現象の選定 (3/6)

国内外の文献等から抽出した事象		除外の基準					評価	事象に対する考え方
		基準① 発生頻度が極低頻度と判断される事象	基準② 施設周辺では起こり得ない事象	基準③ 事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	基準④ 施設に影響を及ぼさない事象	基準⑤ 他の事象に包含できる事象	廃止措置開始後	
気象変動に起因する事象	極端な気圧	—	—	—	—	○	不要	高気圧、低気圧による気圧の変化により、安全機能を有する施設の安全機能が損なわれるおそれはないため、考慮しない。なお、竜巻による急激な気圧変化が想定されるが、これは「竜巻」の影響評価に包含される。
	降水（量）	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「降水量」として考慮する。
	洪水	—	○	—	—	—	不要	周辺河川において洪水が発生したとしても、標高30m以上の台地に位置する安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。（老部川は標高5m～20m、二又川は標高1m～5mを流れる。）
	降雹	—	—	—	—	○	不要	「竜巻」の影響評価（飛来物）に包含される。
	落雷（電流）	—	—	—	○	—	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
	高温（気温）	—	—	—	—	—	要*1	廃止措置の開始後は、降水量及び蒸発散量に影響するため第十条第四号にて「気温」として考慮する。
	低温・凍結（気温）	—	—	—	—	—	要*1	廃止措置の開始後は、降水量及び蒸発散量に影響するため第十条第四号にて「気温」として考慮する。
	氷結	—	—	—	—	○	不要	「低温・凍結」の影響評価に包含される。
	氷晶	—	—	—	—	○	不要	氷晶による荷重の影響については、「降下火砕物」、「積雪」の荷重の影響評価に包含される。
	氷壁	—	○	—	—	—	不要	敷地周辺には氷壁が形成されるような環境がなく、取水及び冷却を行う設備はないことから、影響はないため、考慮しない。
	高水温	—	—	—	○	—	不要	海洋及び河川から取水する設備はなく、影響はないため、考慮しない。
	低水温	—	—	—	○	—	不要	海洋及び河川から取水する設備はなく、影響はないため、考慮しない。
	干ばつ	—	—	—	○	—	不要	顕著な変化がなく、安全機能を有する施設に与える影響が小さいことから、考慮しない。
	霜	—	—	—	○	—	不要	霜による安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。

*1：高温及び低温・凍結は廃止措置の開始後の状態設定では降水量及び蒸発散量に影響するため、まとめて「気温」として考慮する。

第2表 自然現象の選定 (4/6)

国内外の文献等から抽出した事象		除外の基準					評価	事象に対する考え方
		基準① 発生頻度が極低頻度と判断される事象	基準② 施設周辺では起こり得ない事象	基準③ 事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	基準④ 施設に影響を及ぼさない事象	基準⑤ 他の事象に包含できる事象	廃止措置開始後	
気象変動に起因する事象	霧	—	—	—	○	—	不要	霧による安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。
	積雪	—	—	—	○	—	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
	雪崩	—	○	—	—	—	不要	埋設設備周囲の斜面の形状を考慮すると、埋設設備を損傷させるような雪崩が発生しにくいいため、考慮しない。
	土壌の収縮・膨張	—	—	—	○	—	不要	安全機能を有する施設は岩盤(鷹架層)に設置することから、影響はないため、考慮しない。
	海氷による川の閉塞	—	—	—	○	—	不要	海洋及び河川から取水、冷却を行う設備はなく、安全機能を有する施設に影響はないため、考慮しない。
	湖若しくは川の水位降下	—	—	—	—	○	不要	安全機能を有する施設は、取水、冷却を行う設備はないことから、影響はないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、沼・河川の変化は、「隆起・侵食」及び「海水準変動」において考慮する。
	海水準変動	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため、第十条第四号にて「海水準変動」として考慮する。
	風化	—	—	—	○	—	不要	事象の進展(岩盤の風化)が非常に緩慢なため、考慮しない。
	蒸発散(量)	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「蒸発散量」考慮する。
	かん養(量)	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「かん養量」として考慮する。
永久凍土	—	○	—	—	—	不要	将来の気温低下を考慮しても、永久凍土が問題となるような状況になるとは考えにくいいため考慮しない。	

第2表 自然現象の選定 (5/6)

国内外の文献から抽出した事象	除外の基準					評価 廃止措置開始後	事象に対する考え方	
	基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤			
	発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象			
プレート運動と気候変動の両者に起因する事象	河川流量	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、希釈水量に影響するため第十条第四号にて「河川流量」として考慮する。
	地下水位 (地下水流動)	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「地下水位(地下水流動)」として考慮する。
	土石流	—	○	—	—	—	不要	周辺河川において土石流が発生したとしても、標高 30m 以上の台地に位置する安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。(老部川は標高 5m~20m、二又川は標高 1m~5m を流れる。)
	陥没	—	○	—	—	—	不要	陥没が発生するような地質ではないため、考慮しない。
	地形及び陸水の変化	—	—	—	—	○	不要	廃止措置の開始後は、「隆起・沈降」、「侵食」、「海水準変動」に包含される。
	地盤(地表面)の侵食	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「侵食」として考慮する。
	海岸侵食	—	—	—	—	○	不要	廃止措置の開始後は、「侵食」に包含される。
	海面下の侵食	—	—	—	○	—	不要	敷地は海岸から約 3km 離れていることから、考慮しない。また、海洋及び河川から取水及び冷却を行う設備はないことから、影響はないため、考慮しない。
	地下水による侵食	—	○	—	—	—	不要	地下水による侵食を受けるような地質及び地下水質ではないため、考慮しない。
	河川の流路変更	—	—	—	—	○	不要	廃止措置の開始後は、沼・河川の変化は、「隆起・侵食」及び「海水準変動」において考慮する。
	変質	—	○	—	—	—	不要	変質(風化除く)を被るような地質環境にないため、考慮しない。
	流出点の状態 (河川・沼)	—	—	—	—	○	不要	廃止措置の開始後は、侵食や海水準変動の評価に内包する。
	泥湧出(泥火山)	—	○	—	—	—	不要	泥が湧出(泥火山が発生)する地質構造(泥岩破碎層、地中ガス貯存及び背斜構造)ではないため、考慮しない。
	地すべり	—	○	—	—	—	不要	埋設地及びその付近に地すべり地形はなく、すべり面となるような弱層も確認されていないため、考慮しない。第三条(安全機能を有する施設の地盤)にて別途説明する。

第2表 自然現象の選定 (6/6)

国内外の文献から抽出した事象		除外の基準					評価	事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始後	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象		
その他	透水性の変化	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、施設通過流量に影響するため第十条第四号にて「透水性の変化」として考慮する。
	斜面の不安定	—	○	—	—	—	不要	廃棄物埋設地及びその付近の自然斜面においては、崖崩れや山崩れが発生するような不安定な斜面は存在しないため、考慮しない。
	森林火災	—	—	—	○	—	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
	草原火災	—	—	—	○	○	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
	生物学的事象	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「生物学的事象」として考慮する。
	塩害	—	—	—	○	—	不要	廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
	隕石	○	—	—	—	—	不要	隕石の衝突は発生の可能性が著しく低い。また、非常に大きな隕石については、衝突による影響が放射性廃棄物による影響を有意に上回るため、考慮しない。
	カルスト	—	○	—	—	—	不要	敷地周辺はカルスト地形ではない（石灰岩分布地域ではない）ため、考慮しない。
	岩塩ダイアピル	—	○	—	—	—	不要	岩塩ダイアピルを生じるような岩塩層は分布しないため、考慮しない。
	深部流体	—	○	—	—	—	不要	敷地は火山フロントの海溝側にあること、水みちとなるような大規模な構造線が分布しないことから、施設に影響を与える深部流体はないため、考慮しない。
	天水の水質	—	○	—	—	—	不要	現状の天水は、安全機能を有する施設に影響を及ぼす水質ではないため、考慮しない。 長期的にも、天水の水質が急激に変化することは想定しづらいので考慮しない。
表流水・地下水の水質	—	○	—	—	—	不要	現状の地表水・地下水は安全機能を有する施設に影響を及ぼす水質ではないため、考慮しない。 長期的にも、水質が急激に変化することは想定しづらいので、考慮しない。	

事業所敷地周辺の地震の発生状況について

目 次

1. 事業所敷地周辺の地震発生状況.....	1
2. 被害地震.....	1
3. 被害地震の調査.....	8
4. 参考文献.....	10

1. 事業所敷地周辺の地震発生状況

敷地が位置する東北地方及び隣接する北海道地方では、海洋プレートである太平洋プレートが陸域に向かって近づき、日本海溝から陸のプレートの下方へ沈み込んでいることが知られている。また、東北地方における活断層の多くは南北方向の走向を示す逆断層であり、この地域が東西方向に圧縮されていることを示唆している⁽¹⁾。

東北地方及び北海道地方では上記に対応するように地震が発生しており、その発生様式等から「プレート間地震」、「海洋プレート内地震」、「内陸地殻内地震」及び「日本海東縁部の地震」の4種類に大別される。これらの地震のうち、敷地周辺ではプレート間地震の発生数が最も多く、また、マグニチュード(以下「M」という。)7～8程度の大地震も発生している。

2. 被害地震

日本国内の地震被害に関する記録は古くからみられ、これらを収集、編集したものとして、増訂大日本地震史料⁽²⁾、日本地震史料⁽³⁾、新収日本地震史料⁽⁴⁾、日本の歴史地震史料⁽⁵⁾等の地震史料がある。

また、地震史料及び明治以降の地震観測記録を基に、主な地震の震央位置、地震規模等を取りまとめた地震カタログとして、理科年表⁽⁶⁾、日本被害地震総覧⁽⁷⁾、宇佐美カタログ(1979)⁽⁸⁾、宇津カタログ(1982)⁽⁹⁾、気象庁地震カタログ⁽¹⁰⁾、地震活動総説⁽¹¹⁾等がある。

日本被害地震総覧⁽⁷⁾及び気象庁地震カタログ⁽¹⁰⁾に記載されている被害地震のうち、敷地からの震央距離が200km程度以内の被害地震の震央分布を第1図に示す。また、同図に示した被害地震の諸元を第1表に示す。ここで、地震規模及び震央位置は、1884年以前の地震については日本被害地震総覧⁽⁷⁾による値を、1885年以降1922年以前の地震については宇津カタログ(1982)⁽⁹⁾による値を、さらに1923年以降の地震については気象庁地震カタログ⁽¹⁰⁾による値をそれぞれ用いている。

プレート間地震に関しては、第1図によると、太平洋側の海域では、東経144°付近における1952年十勝沖地震(M8.2)及び2003年十勝沖地震(M8.0)のようにM8クラスの地震が発生している。また、青森県東方沖から日本海溝付近にかけての海域においてはM7クラスの地震が数多く発生しており、それらの中には、1968年十勝沖地震(M7.9)や1994年三陸はるか沖地震(M7.6)のように近年青森県に大きな被害をもたらした地震も

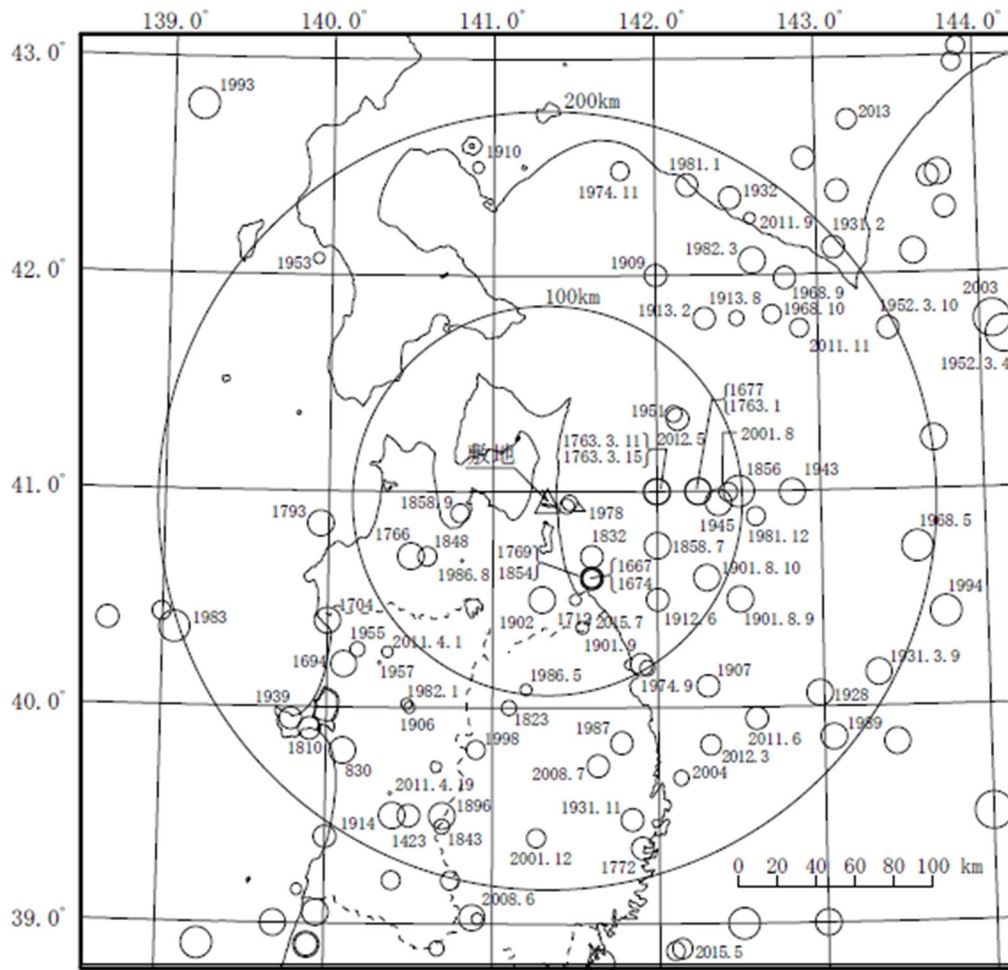
存在する⁽¹²⁾⁽¹³⁾。また、敷地から 300km 以上離れているが、国内の既往最大のプレート間地震として、2011 年東北地方太平洋沖地震(モーメントマグニチュード(以下「Mw」という。)9.0)が発生している。

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生位置を第 2 図に示す。

海洋プレート内地震に関しては、第 1 図によると、2008 年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)のように被害をもたらした地震が発生している。また、敷地から 300km 以上離れているが、1933 年昭和三陸地震(M8.1)、1993 年釧路沖地震(M7.5)、1994 年北海道東方沖地震(M8.2)及び 2011 年宮城県沖の地震(M7.2)が発生している。上記の敷地から 300km 以上離れた位置で発生した 4 地震の発生位置を第 2 図に示す。

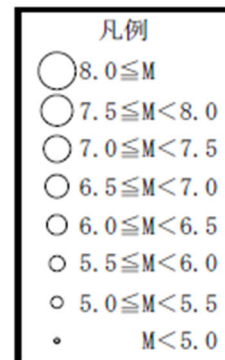
内陸地殻内地震に関しては、陸域では、東経 141° 付近よりも西側において、1766 年津軽の地震(M7 1/4)のように M7 クラスの地震が発生しており、また、敷地から 200km 以上離れているが、2008 年岩手・宮城内陸地震(M7.2)が発生している。一方、海域では、敷地周辺において、敷地の東側で発生した 1978 年青森県東岸の 2 地震(M5.8)以外に被害地震は発生していない。

日本海東縁部の地震に関しては、1983 年日本海中部地震(M7.7)及び 1993 年北海道南西沖地震(M7.8)のように M7 を上回る地震が発生している。



注1：図中の数字は地震発生年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。

注2：地震緒元は、1884年以前の地震については「日本被害地震総覧」⁽⁷⁾による値を、1885年以降1922年以前の地震については「宇津カタログ(1982)」⁽⁸⁾による値を、さらに1923年以降の地震については「気象庁地震カタログ」⁽¹⁰⁾による値をそれぞれ用いている。



第1図 事業所敷地周辺の被害地震の震央分布

(事業所敷地からの震央距離 200km 程度以内)

第1表 事業所敷地周辺の被害地震(1/3)

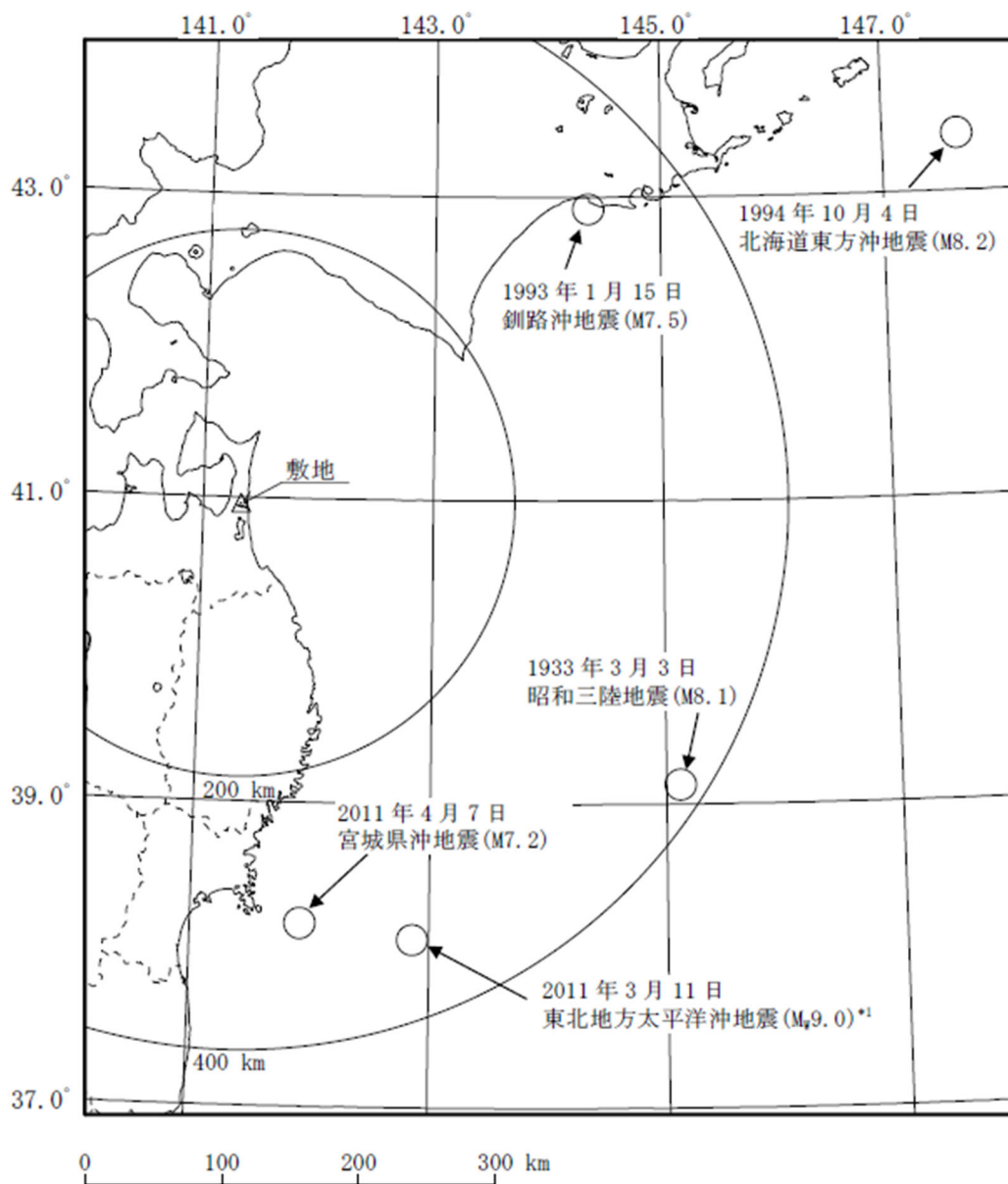
No.	年.月.日	北緯	東経	マグニ チュード (M)	震央距離 △ (km)	地名
1	830. 2. 3	39.8°	140.1°	7.3	168	出羽
2	1423.11.23	39.5°	140.5°	6.5	179	羽後
3	1667. 8.22	40.6°	141.6°	6.2	46	八戸
4	1674. 4.15	40.6°	141.6°	6.0	46	八戸
5	1677. 4.13	41.0°	142.25°	7.4	76	陸中
6	1694. 6.19	40.2°	140.1°	7.0	136	能代地方
7	1704. 5.27	40.4°	140.0°	7.0	131	羽後・津軽
8	1712. 5.28	40.5°	141.5°	5.3	54	八戸
9	1763. 1.29	41.0°	142.25°	7.4	76	陸奥八戸
10	1763. 3.11	41.0°	142.0°	7 1/4	55	陸奥八戸
11	1763. 3.15	41.0°	142.0°	7.0	55	陸奥八戸
12	1766. 3. 8	40.7°	140.5°	7 1/4	78	津軽
13	1769. 7.12	40.6°	141.6°	6.5	46	八戸
14	1772. 6. 3	39.35°	141.9°	6 3/4	186	陸前・陸中
15	1793. 2. 8	40.85°	139.95°	7.0	119	西津軽
16	1810. 9.25	39.9°	139.9°	6.5	171	羽後
17	1823. 9.29	40.0°	141.1°	5.9	110	陸中岩手山
18	1832. 3.15	40.7°	141.6°	6.5	37	八戸
19	1843. 6.29	39.45°	140.7°	5.5	178	陸中沢内
20	1848. 1.14	40.7°	140.6°	6.0	70	津軽
21	1854. 8.28	40.6°	141.6°	6.5	46	陸奥
22	1856. 8.23	41.0°	142.5°	7.5	97	日高・胆振・渡島・津軽・南部
23	1858. 7. 8	40.75°	142.0°	7.3	60	八戸・三戸
24	1858. 9.29	40.9°	140.8°	6.0	47	青森
25	1896. 8.31	39.5°	140.7°	7.2	173	秋田・岩手県境(陸羽地震)
26	1901. 8. 9	40.5°	142.5°	7.2	111	青森県東方沖
27	1901. 8.10	40.6°	142.3°	7.4	90	青森県東方沖
28	1901. 9.30	40.2°	141.9°	6.9	98	岩手県久慈沖
29	1902. 1.30	40.5°	141.3°	7.0	53	三戸地方
30	1906.10.12	40.0°	140.5°	5.4	130	秋田県北部

第1表 事業所敷地周辺の被害地震(2/3)

No.	年.月.日	北緯	東経	マグニ チュード (M)	震央距離 △ (km)	地名
31	1907.12.2	40.1°	142.3°	6.7	126	青森県東方沖
32	1909.9.17	42.0°	142.0°	6.8	126	襟裳岬沖
33	1910.7.24	42.5°	140.9°	5.1	174	有珠山
34	1912.6.8	40.5°	142.0°	6.6	76	青森県東方沖
35	1913.2.20	41.8°	142.3°	6.9	122	日高沖
36	1913.8.1	41.8°	142.5°	5.7	133	浦河沖
37	1914.3.15	39.5°	140.4°	7.1	182	秋田県仙北郡(秋田仙北地震)
38	1928.5.27	40° 3.7'	142° 58.4'	7.0	171	三陸沖
39	1931.2.17	42° 7.3'	143° 6.2'	6.8	194	浦河付近
40	1931.3.9	40° 9.3'	143° 19.9'	7.2	191	青森県南東沖
41	1931.11.4	39° 28.9'	141° 50.4'	6.5	171	岩手県小国付近
42	1932.11.26	42° 21.4'	142° 28.0'	6.9	180	新冠川流域
43	1939.5.1	39° 56.8'	139° 47.2'	6.8	175	男鹿半島(男鹿地震)
44	1943.6.13	40° 59.7'	142° 49.6'	7.1	124	八戸東方沖
45	1945.2.10	40° 56.8'	142° 22.5'	7.1	86	八戸北東沖
46	1951.10.18	41° 20.1'	142° 7.7'	6.6	77	青森県北東沖
47	1952.3.4	41° 42.3'	144° 9.1'	8.2	248	十勝沖(十勝沖地震)
48	1952.3.10	41° 44.7'	143° 26.0'	6.9	194	十勝沖
49	1953.7.14	42° 4.5'	139° 54.9'	5.1	171	檜山沖
50	1955.10.19	40° 17.3'	140° 13.7'	5.9	121	米代川下流(二ツ井地震)
51	1957.3.1	40° 12.4'	140° 19.0'	4.3	122	秋田県北部
52	1968.5.16	40° 42.0'	143° 35.7'	7.9	192	青森県東方沖 (1968年十勝沖地震)
53	1968.9.21	41° 59.1'	142° 45.7'	6.8	163	浦河沖
54	1968.10.8	41° 51.7'	142° 39.2'	6.2	147	浦河沖
55	1974.9.4	40° 12.1'	141° 54.7'	5.6	98	岩手県北岸
56	1974.11.9	42° 32.5'	141° 45.5'	6.3	178	苫小牧付近
57	1978.5.16	40° 57'	141° 28'	5.8	10	青森県東岸
58	1978.5.16	40° 56'	141° 27'	5.8	10	青森県東岸
59	1981.1.23	42° 25'	142° 12'	6.9	161	日高支庁西部
60	1981.12.2	40° 53'	142° 36'	6.2	106	青森県東方沖
61	1982.1.8	40° 1'	140° 29'	5.2	129	秋田県中部
62	1982.3.21	42° 4'	142° 36'	7.1	160	浦河沖

第1表 事業所敷地周辺の被害地震(3/3)

No.	年.月.日	北緯	東経	マグニ チュード (M)	震央距離 △ (km)	地名
63	1983. 5. 26	40° 21.6′	139° 4.4′	7.7	204	秋田県沖(1983年(昭和58年)日本海中部地震)
64	1986. 5. 26	40° 5.1′	141° 12.1′	5.0	99	岩手県北部
65	1986. 8. 10	40° 40.9′	140° 48.7′	4.8	56	青森県南部
66	1987. 1. 9	39° 50.2′	141° 46.6′	6.6	131	岩手県北部
67	1989. 11. 2	39° 51.5′	143° 3.2′	7.1	190	三陸はるか沖
68	1993. 7. 12	42° 46.9′	139° 10.8′	7.8	270	北海道南西沖(1993年(平成5年)北海道南西沖地震)
69	1994. 12. 28	40° 25.8′	143° 44.7′	7.6	211	三陸はるか沖(1994年(平成6年)三陸はるか沖地震)
70	1998. 9. 3	39° 48.4′	140° 54.1′	6.2	135	雫石付近
71	2001. 8. 14	40° 59.7′	142° 26.2′	6.4	92	青森県東方沖
72	2001. 12. 2	39° 23.9′	141° 15.8′	6.4	175	岩手県内陸南部
73	2003. 9. 26	41° 46.7′	144° 4.7′	8.0	245	釧路沖(2003年(平成15年)十勝沖地震)
74	2004. 8. 10	39° 40.4′	142° 7.9′	5.8	159	岩手県沖
75	2008. 6. 14	39° 1.8′	140° 52.8′	7.2	219	岩手県内陸南部(2008年(平成20年)岩手・宮城内陸地震)
76	2008. 7. 24	39° 43.9′	141° 38.1′	6.8	140	岩手県沿岸北部
77	2011. 4. 1	40° 15.4′	140° 21.8′	5.0	115	秋田県内陸北部
78	2011. 4. 19	39° 36.2′	140° 23.2′	4.9	173	秋田県内陸南部
79	2011. 6. 23	39° 56.9′	142° 35.5′	6.9	155	岩手県沖
80	2011. 9. 7	42° 15.6′	142° 35.4′	5.1	177	日高地方中部
81	2011. 11. 24	41° 45.0′	142° 53.2′	6.2	155	浦河沖
82	2012. 3. 27	39° 48.4′	142° 20.0′	6.6	154	岩手県沖
83	2012. 5. 24	41° 20.6′	142° 7.4′	6.1	77	青森県東方沖
84	2012. 8. 30	38° 24.5′	141° 54.9′	5.6	289	宮城県沖
85	2013. 2. 2	42° 42.1′	143° 13.7′	6.5	248	十勝地方南部
86	2015. 5. 13	38° 51.8′	142° 9.0′	6.8	244	宮城県沖
87	2015. 7. 10	40° 21.2′	141° 33.6′	5.7	71	岩手県内陸北部



*1: Mw=モーメントマグニチュード。

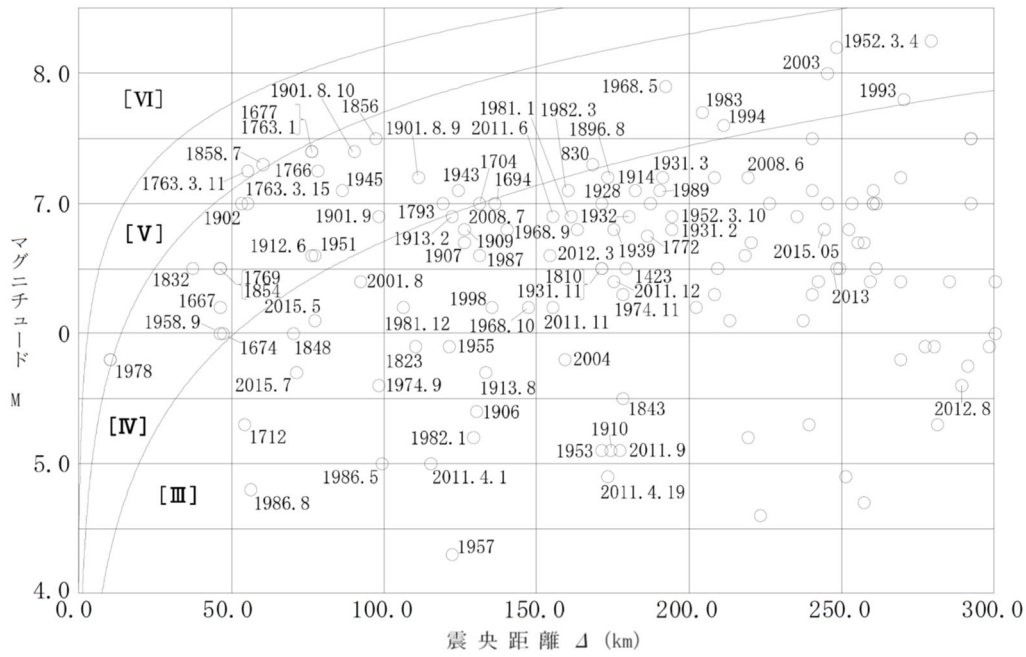
第2図 事業所敷地周辺の被害地震の震央分布
 (事業所敷地からの震央距離 200km 程度以遠)

3. 被害地震の調査

地震によって建物等に被害が発生するのは震度 5 弱(1996 年以前は震度 V)程度以上であるとされている(14)。

日本被害地震総覧(7)に記載されている震度分布図及び気象庁で公表されている震度分布図によると、敷地の震度が V 程度であったと推定される地震は 1763 年 1 月陸奥八戸の地震、1856 年日高・胆振・渡島・津軽・南部の地震、1968 年十勝沖地震、1978 年青森県東岸の 2 地震及び 1994 年三陸はるか沖地震の 6 地震がある。

また、第 1 表に示した被害地震について、震央距離と地震規模及び敷地で想定される震度との関係を第 3 図に示す。この図から、敷地での震度が不明な地震について敷地に与えた影響度をみると、震度分布図による上記 6 地震のほかに敷地で震度 V と推定される地震は、1763 年 3 月 11 日陸奥八戸の地震及び 1858 年八戸・三戸の地震の 2 地震がある。敷地付近では M6 を超える地震の発生はなく、震度 5 強を超える地震の発生もない。



第 3 図 事業所敷地周辺の被害地震のマグニチュード—震央距離

4. 参考文献

- (1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会編(平成 21 年)：日本の地震活動－被害地震から見た地域別の特徴－、第 2 版、財団法人地震予知総合研究振興会
- (2) 文部省震災予防評議会編(昭和 16 年～昭和 18 年)：増訂 大日本地震史料、第一巻～第三巻、鳴鳳社
- (3) 武者金吉(昭和 26 年)：日本地震史料、毎日新聞社
- (4) 東京大学地震研究所編(昭和 56 年～平成 5 年)：新収 日本地震史料、第一巻～第五巻、補遺、続補遺
- (5) 宇佐美龍夫編(平成 10 年～平成 17 年)：日本の歴史地震史料、拾遺、拾遺別巻、拾遺二、拾遺三
- (6) 国立天文台編(平成 26 年)：理科年表 平成 27 年、丸善
- (7) 宇佐美龍夫、石井寿、今村隆正、武村雅之、松浦律子(2013)：日本被害地震総覧 [599－2012]、東京大学出版会
- (8) Tatsuo USAMI(1979)：Study of Historical Earthquakes in Japan, BULLETIN OF THE EARTHQUAKE RESEARCH INSTITUTE Vol.54・・・「宇佐美カタログ(1979)」
- (9) 宇津徳治(1982)：日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表：1885 年～1980 年、東京大学地震研究所彙報 Vol.57・・・「宇津カタログ(1982)」
- (10) 気象庁(1951～2015)：「地震年報」等・・・「気象庁地震カタログ」
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- (11) 宇津徳治(1999)：地震活動総説、東京大学出版会
- (12) 青森県(昭和 44 年)：青森県大震災の記録－昭和 43 年の十勝沖地震－
- (13) 気象庁(平成 7 年)：災害時地震・津波速報、平成 6 年(1994 年)三陸はるか沖地震
- (14) 気象庁・消防庁(平成 21 年)：震度に関する検討会報告書
- (15) 村松郁栄(昭和 44 年)：震度分布と地震のマグニチュードとの関係、岐阜大学教育学部研究報告、自然科学、第 4 号
- (16) 勝又護、徳永規一(1971)：震度Ⅳの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応、験震時報、vol.36

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

生活環境の状態設定

2021年6月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 生活環境の状態設定の考え方.....	1
3. 生活環境の状態設定の検討方法.....	1
4. 生活環境の状態設定.....	3
(1) 自然事象シナリオ.....	3
(2) 人為事象シナリオ.....	14
5. 放射性物質の移行挙動及び被ばく経路.....	14
(1) 自然事象シナリオ.....	14
(2) 人為事象シナリオ.....	19
6. まとめ.....	22
7. 参考文献.....	25

添付資料1 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、生活環境の状態設定について補足説明するものである。

2. 生活環境の状態設定の考え方

「生活環境の状態設定」では、様々な人間活動によって生じる被ばく経路(被ばくをもたらす人間活動)を設定するに当たって、廃止措置の開始後における将来の敷地及びその周辺の地質環境等の状態と現在の敷地及びその周辺の社会環境から被ばくが生じると考えられる人間活動(水利用及び土地利用)を設定する。さらに、六ヶ所村の就労形態を考慮して最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(以下「評価対象個人」という。)を設定する。

なお、生活環境とは、人が活動する領域のうち、放射性物質が到達する領域で、一般的な水の利用と土地の利用が想定される範囲における人間活動の状況を意味する。

また、上記の「生活環境の状態設定」に加え、「地質環境等の状態設定」及び「廃棄物埋設地の状態設定」を踏まえ、放射性物質の移行挙動及び被ばく経路を設定する(「地質環境等の状態設定」の詳細については補足説明資料1「地質環境に係る長期変動事象」を、「廃棄物埋設地の状態設定」の詳細については補足説明資料3「影響事象分析」、補足説明資料4「状態変化の評価(力学的影響)」、補足説明資料5「状態変化の評価(化学的影響)」及び補足説明資料6「透水係数の設定」を参照。)

3. 生活環境の状態設定の検討方法

廃止措置の開始後の将来における敷地及びその周辺で活動する人間の生活環境は、地質環境等の変化による影響を受けることが考えられるため、その前提として気温・降水量及び地形の状態変化を考慮する(気温・降水量及び地形の状態変化の詳細については、補足説明資料1「地質環境に係る長期変動事象」を参照。)

生活環境の構成要素のうち廃止措置の開始後の将来の人間の生活様式(評価対象個人の時間の過ごし方等の人間活動の程度)については、これを長期的な不確かさを考慮して予測することは困難であるため、現世代の人間の生活様式に関する情報(利用可能な最新の統計等であり、ある時点から更新のない統計等については、調査時点の統計等)を基に、敷地及びその周辺の社会環境又はわが国で現在一般的とされる生活様式を前提とする。具体的には、生活様式の設定に当たっては現世代の人間の生活習慣及び食習慣を考慮する(最も可能性が

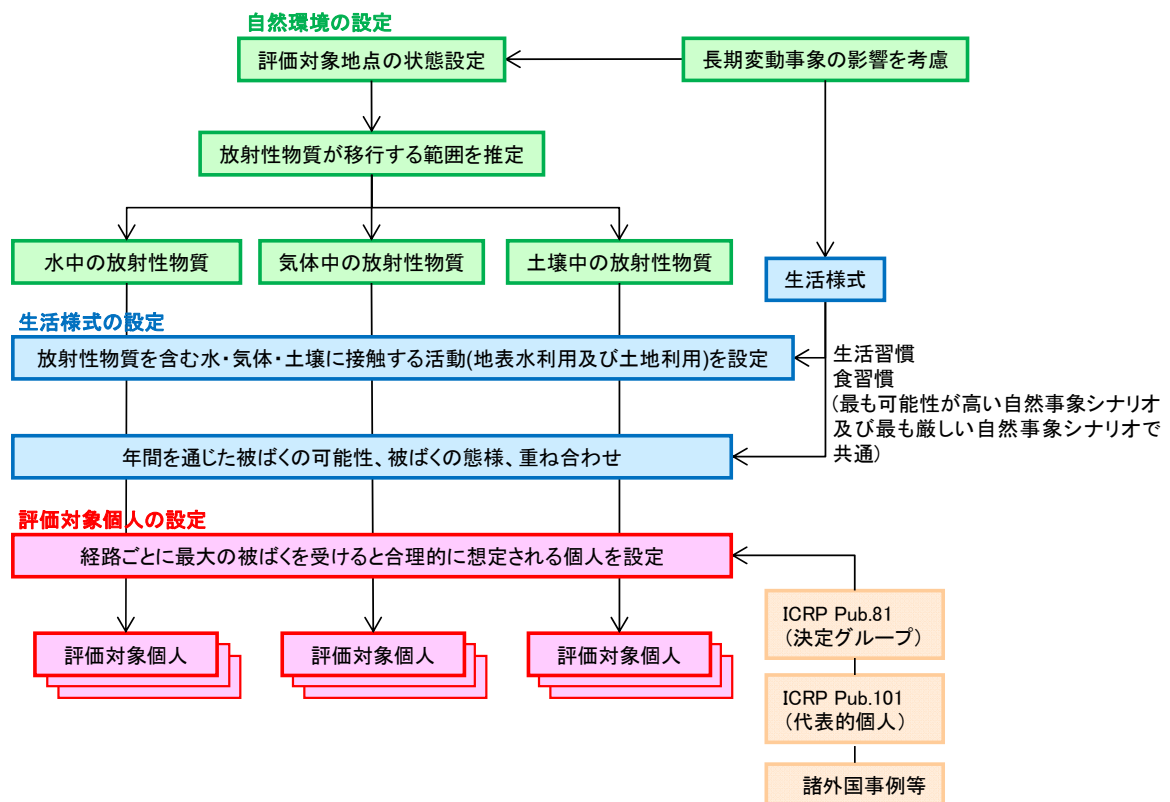
高い自然事象シナリオ及び最も厳しい自然事象シナリオで共通。)。また、最も可能性が高い自然事象シナリオ及び最も厳しい自然事象シナリオで考慮する人間活動は、ICRP Pub. 81⁽¹⁾、ICRP Pub. 101⁽²⁾及び諸外国事例等の考え方を参考に合理性、持続可能性及び均一性を持つ一般的な人間活動を想定する。

また、最も可能性が高い自然事象シナリオ及び最も厳しい自然事象シナリオで考慮すべき合理性、持続可能性及び均一性を持たず、一般的に生じるとは考えられない人間活動については、人為事象シナリオで考慮する。また、生活習慣及び食習慣については、最も可能性が高い自然事象シナリオ及び最も厳しい自然事象シナリオと共通とする。

なお、全てのシナリオにおいて、放射性物質としての特性に着目した意図的な行為は含まない。

上記のとおり設定した、地質環境等の状態と社会環境の状態から生じると考えられる人間活動に基づき、六ヶ所村の就労形態を考慮して評価対象個人を設定する。

第1図に生活環境の状態設定の検討フローを示す。



第1図 生活環境の状態設定の検討フロー⁽³⁾

4. 生活環境の状態設定

(1) 自然事象シナリオ

(i) 生活環境に影響を及ぼす敷地及びその周辺における地質環境等の変化

補足説明資料1「地質環境に係る長期変動事象」の検討結果に基づき、生活環境に影響を及ぼすと考えられる敷地及びその周辺における地質環境等の変化を設定したものを第1表に示す。設定したものの中から、放射性物質の移行する範囲及び資源量の持続可能性への影響が考えられるものを以下のとおり整理する。

- ・現在から廃止措置の開始直後までの敷地及びその周辺の地形は、数百年という期間の短さから現状とほぼ同様であると考えられる。よって、廃棄物埋設地に起因した放射性物質を含む地下水の全てが敷地内の沢を經由し汽水性である尾駸沼に流入する。
- ・気候変動によって、平均気温が変化することに伴い、敷地及びその周辺で生産される農産物の種類が変化することが考えられるが、補足説明資料1「地質環境に係る長期変動事象」に示すとおり、1,000年後の将来の気温の変化は大きくないことから、生産される農産物の種類は現在の敷地周辺で収穫される農産物を想定する。
- ・廃止措置の開始後の将来の敷地及びその周辺のプレート運動及び気候変動に起因する事象(隆起・沈降、海水準変動及び侵食)に伴う地表の状態変化によって、尾駸沼が河川化し、漁獲される水産物種類が変化するとともに、資源量(漁獲量)が減少することが考えられるが、淡水化による水産物種類の変化を考慮しても、水産物の摂取による線量は小さくなることから、資源量(漁獲量)の減少は考慮しない。
- ・地形変化が進行すると埋設設備が河食によって侵食され、放射性物質を含む土壌が下流域へ堆積することが考えられるが、埋設設備の露呈時期は数万年以降であり、侵食による影響は無視できる。そのため、河食により生じる放射性物質を含む土壌の堆積地(下流堆積地)を利用した様々な人間活動(屋外労働作業、住宅の建設及び居住並びに農畜産物の生産)は考慮しない。
- ・降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位及び河川流量の変化によって、交換水量に影響するが、生活様式への影響はない。

第1表 生活環境に影響を及ぼすと考えられる敷地及びその周辺における地質環境等の変化

起回事象	長期事象	長期変動項目	長期変動事象により予測される影響	生活環境への影響 ^{*1}
プレート運動に起因する事象	火山・火成活動	①火砕物密度流	・地下水質、熱的影響	—
		②降下火砕物	・地下水質への影響	—
	地震・断層活動	③地震	・地下水流動への影響	—
		④液状化(覆土)	・覆土の透水性変化・力学的な影響(拘束圧の減少等)	—
		⑤断層活動(地盤の変形)	・出戸西方断層の断層活動による力学的影響	—
	隆起・沈降運動	⑥隆起・沈降	・隆起に伴う地下水流動への影響(動水勾配等)	○
気候変動に起因する事象		⑦海水準変動	・侵食による地形変化に伴う地下水流動への影響	○
		⑧気温	・地下水位分布、動水勾配、施設通過流量への影響	○
		⑨降水量		○
		⑩蒸発散量		○
		⑪かん養量		○
		⑫地下水位		○
		⑬河川流量	・希釈水量への影響	○
プレート運動と気候変動の両者に起因する事象		⑭侵食	・地形変化に伴う地下水流動への影響 ・廃棄物埋設地の削剥	○
	その他の事象	⑮生物学的事象	・水理・化学的影響	—
⑯透水性の変化		・岩盤の透水性の変化	—	

*1：○：影響が考えられる、—：評価対象外

なお、上記の生活環境への影響が考えられる地質環境等の変化を表中に赤枠で示す。

(ii) 放射性物質が移行する範囲

現在から廃止措置の開始後の将来にかけての評価対象地点の地質環境等の状態の時間的な変化を考慮して、放射性物質が移行する範囲を推定する。放射性物質は、廃棄物埋設地から基本的に地下水を介して徐々に生活環境へ広がっていく。その際に、土壤に収着したものは、やがて侵食作用によって土壤ごと下方へ移動する。

また、自然環境以外によるものとして、地表における人間の活動によって放射性物質が移行する可能性がある。例えば、汚染された土壤を掘り返す行為などがこれに該当する。

(iii) 敷地及びその周辺における地質環境等及び社会環境の状態を踏まえた人間活動の設定

「(i) 生活環境に影響を及ぼす敷地及びその周辺における地質環境等の変化」に示す敷地及びその周辺の地質環境等の変化及び過去から現在までの敷地周辺の社会環境の状態を踏まえ、放射性物質が移行する範囲ごとに人間活動を以下のとおり設定する。

a. 水利用

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が覆土及び岩盤へ地下水を通じて移行し、その周辺における人間活動に伴って被ばくを受ける可能性があるため、廃棄物埋設地及びその近傍における水利用に伴う人間活動を考慮する。

廃棄物埋設地を通過する地下水は、主に敷地中央部の沢(以下、「中央沢」という。)を経て尾駸沼に流出し太平洋に至るため、現在の二又川や老部川へ移行することは想定されない。また、地下水の流入する尾駸沼は汽水性の沼であるため、この水を生活用水、農業用水及び畜産用水に利用することも想定されない。

六ヶ所村の利水状況⁽⁴⁾としては、豊富な地下水のある地点(敷地周辺外の深井戸及び浅井戸(伏流水))を水源とする水道の普及率が100%⁽⁵⁾であり、1998年に当社が実施した調査によれば、専らこれを生活用水及び畜産用水として利用している。また、水田灌漑用水としては、河川水を利用している⁽⁶⁾。1988年の調査結果⁽⁴⁾に基づく浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるが、その割合は約1%と極めて小さい。

なお、六ヶ所村における家畜用水の水源としては、上水道の非給水区域においては、深井戸より取水した小規模水道又は深井戸より取水した地下水が利用されているものの、河川水及び沢水の利用はない。

沢水の利用については、現在は利用されていないこと、河川の水量を比較すると敷地中央部の沢の水量は小さいこと、現在の敷地周辺においては水道が十分普及してい

ること及び農地等が減少傾向にある⁽⁷⁾こと等から、沢水の利用に伴い被ばくが生じる可能性は河川の利用の場合よりも小さい。しかしながら、評価に当たっては河川と沢の水量の違いによる利用の可能性(被ばくが生じる可能性)を定量的に示すことが困難であること、敷地造成前においては、広範囲で畑作が、また、中央沢の下流部で稲作が行われていたことを考慮する。

なお、将来には尾駁沼の河川化が想定されるが、現状の水理及び利水状況を前提にすると、河川化後にその水を生活用水や畜産用水に利用することは想定されない。また、農業用水に利用することについては、より交換水量の少ない沢水の利用に包含されるため、考慮しない。

以上より、水利用に関しては、現状の水理及び利水状況を前提にすると、廃棄物埋設地からの影響を受ける井戸水や沢水を生活用水や畜産用水に利用することは考え難い。しかし、敷地造成前においては畑作及び稲作が行われていたことを考慮して、生活用水等に利用することに伴う人間活動としては、尾駁沼の水産物の摂取、沢水を利用して生産される農産物の摂取及び灌漑作業を想定する。

b. 土地利用

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が廃棄物埋設地表面付近の土壌に移行し、その周辺における人間活動に伴って被ばくを受ける可能性があるため、廃棄物埋設地及びその近傍における土地利用に伴う人間活動を考慮する。

地下の掘削を伴う土地利用の一つに構造物の建設がある。2019年の統計⁽⁷⁾によれば、近年の六ヶ所村においては専用住宅、倉庫、店舗等の建築確認申請が行われている。加えて、廃棄物埋設地は市街化区域の用途地域のうち工業専用地域に位置し、工業地域、準工業地域、商業地域、中高層住居専用地域及び低層住居専用地域に隣接しているため、工場及び住宅の建設等に利用される可能性がある。しかしながら、第2図に示す六ヶ所村における到達深さに対する到達確率(面積利用率)より、現状の六ヶ所村では地下数階を有するような大規模な構造物はほとんどみられず、面積利用率では10m以深の掘削を行う頻度は1%未満である。ここでいう到達確率(面積利用率)とは、六ヶ所村で確認される建物区分について、それぞれに仮定した平均深度ごとの施設面積が可住地面積に占める割合を求めたものである。六ヶ所村における利用用途ごとの平均深度の設定値を第2表に示す。

なお、第2図における数値中のEは、指数表記における基数の10を示す(例えば、

1E+02 は 1×10^2 を示す。以下、同様。)

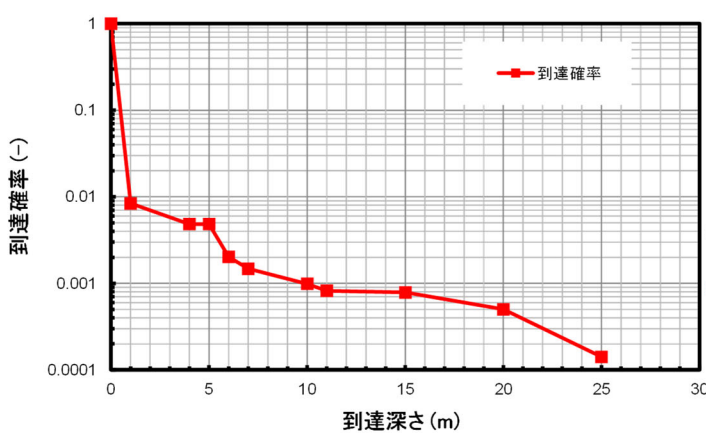
また、第3図に未使用の可住地面積及び当社施設の施設面積を除いた場合の到達確率(面積利用率)を示す。第3図に示すように、原子力施設である当社施設を除外し、六ヶ所村における住宅や工場等の一般的な施設に着目した場合には、10m以深の掘削を行う施設は存在しない。

以上のことから、可住地のうち構造物が建設される土地は一部であることを含めて敷地及びその周辺の社会環境を考慮すると、大規模な構造物の建設は土地利用の代表的な事例ではない。そのため、自然事象シナリオでは代表的な事例として一般的な住宅の建設及びそれに伴って発生する掘削土壌上での居住を想定する。

なお、大規模な構造物の建設に当たっては、法令等(例：都市計画法、工場立地法)により事前に記録の確認が行われるため、廃棄物埋設地の存在が認知されることを踏まえても、大規模な構造物が建設されることは一般的とは考えられない。

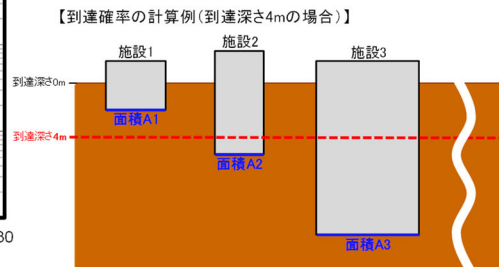
六ヶ所村における到達深さに対する到達確率⁽⁸⁾⁽⁹⁾

到達深さ(m)	施設面積(m ²) ^{*1}	番号	到達確率 ^{*2}	計算式
0	112,159,411	①	1.00E+00	$\Sigma ((1 \sim (11)) / (12))$
1	403,213	②	8.40E-03	$\Sigma ((2 \sim (11)) / (12))$
4	1,011	③	4.84E-03	$\Sigma ((3 \sim (11)) / (12))$
5	317,525	④	4.83E-03	$\Sigma ((4 \sim (11)) / (12))$
6	61,885	⑤	2.02E-03	$\Sigma ((5 \sim (11)) / (12))$
7	55,186	⑥	1.48E-03	$\Sigma ((6 \sim (11)) / (12))$
10	18,936	⑦	9.88E-04	$\Sigma ((7 \sim (11)) / (12))$
11	3,733	⑧	8.21E-04	$\Sigma ((8 \sim (11)) / (12))$
15	32,400	⑨	7.88E-04	$\Sigma ((9 \sim (11)) / (12))$
20	40,700	⑩	5.01E-04	$\Sigma ((10 \sim (11)) / (12))$
25 ^{*3}	16,000	⑪	1.41E-04	$\Sigma ((11 \sim (11)) / (12))$
合計 ^{*4}	113,110,001	⑫		



六ヶ所村における到達深さと到達確率

- *1 到達深さ0mの施設面積は未使用の可住地面積を含む。
- *2 その深さ以上が利用される確率(面積利用率)。
- *3 当社で行った現地調査の結果、到達深さが25mより深い施設はない。
- *4 小数点以下四捨五入。



$$\text{到達確率} = \frac{A2 + A3 + \dots}{(\text{施設面積の合計})}$$

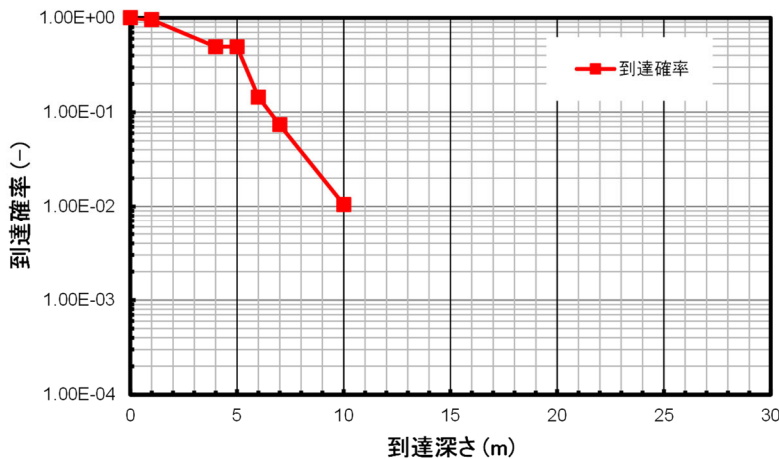
第2図 六ヶ所村における到達深さに対する到達確率(面積利用率)

第2表 六ヶ所村における利用用途ごとの平均深度の設定値

利用用途	内訳	平均深度 (m)
戸建住宅	個人宅	1
集合住宅	—	4
飲食店	レストラン、居酒屋等	5
商店	食料品店、たばこ屋、クリーニング、美容室、郵便局等	5
量販店	スーパー、コンビニ等	5
事業所・事務所	銀行、法律事務所、警備等	5
インフラ	変電所、GS、浄水場等	5
スポーツ興業施設	体育館、公園等	5
宿泊遊興施設	温泉、ホテル旅館等	5
医療・福祉	診療所、歯科医院、老人福祉センター等	6
公共施設	役場、消防署、交番、図書館等	7
学校	幼稚園、保育所、小学校、中学校、高等学校、塾等	6
宗教関連	寺院、神社等	5
オフィスビル	オフィス系の事業所	6
倉庫	倉庫、貯蔵庫、冷蔵庫	5
工場	—	5
エネルギー関連施設	石油備蓄、風力発電所等	10
廃棄物処分場	—	10
作業場・資材置場	—	5
駐車場	—	0
牧場	—	0
その他(戸建住宅、集合住宅以外の家屋)	—	0

六ヶ所村における到達深さに対する到達確率⁽⁸⁾⁽⁹⁾

到達深さ(m)	施設面積(m ²) ^{*1}	番号	到達確率 ^{*2}	計算式
0	38,982	①	1.00E+00	$\Sigma ((1 \sim (11)) / (12))$
1	403,213	②	9.55E-01	$\Sigma ((2 \sim (11)) / (12))$
4	1,011	③	4.94E-01	$\Sigma ((3 \sim (11)) / (12))$
5	304,628	④	4.93E-01	$\Sigma ((4 \sim (11)) / (12))$
6	61,885	⑤	1.44E-01	$\Sigma ((5 \sim (11)) / (12))$
7	55,186	⑥	7.36E-02	$\Sigma ((6 \sim (11)) / (12))$
10	9,186	⑦	1.05E-02	$\Sigma ((7 \sim (11)) / (12))$
11	0	⑧	0.00E+00	$\Sigma ((8 \sim (11)) / (12))$
15	0	⑨	0.00E+00	$\Sigma ((9 \sim (11)) / (12))$
20	0	⑩	0.00E+00	$\Sigma ((10 \sim (11)) / (12))$
25 ^{*3}	0	⑪	0.00E+00	$\Sigma ((11 \sim (11)) / (12))$
合計 ^{*4}	874,091	⑫		



- *1 施設面積は未使用の可住地面積及び当社施設の施設面積を含まない。
- *2 その深さより深が利用される確率(面積利用率)。
- *3 当社で行った現地調査の結果、到達深さが25mより深い施設はない。
- *4 小数点以下四捨五入。

六ヶ所村における到達深さと到達確率

第3図 六ヶ所村における到達深さに対する到達確率

(未使用の可住地面積及び当社施設の施設面積を除く)

この他に地下を掘削する目的として、井戸の掘削や地下資源の開発(ボーリングを含む。)があげられる。井戸については水利用の状況から浅井戸の掘削が考えられるが、「a. 水利用」に示すように、水道の普及率が100%であり、また、浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるが、その割合は約1%と極めて小さいことから考慮しない。地下資源の開発については、廃棄物埋設地及びその近傍において採掘規模の石炭、鉱石等の天然資源は認められていないため、このような土地利用を考慮する必要はない。

さらに、地下の掘削を伴わない土地利用としては農産物(飼料作物を含む。)の生産があり、廃棄物埋設地表面付近の土壌又は地下水から農産物に放射性物質が移行し、その農産物を摂取することが考えられる。ただし、飼料作物については、根の深さと地下水位との関係から、放射性物質の移行は生じないため、評価対象外とする。

以上より、土地利用に関しては、廃棄物埋設地の利用による人間活動として、住宅の建設作業、掘削土壌上での居住及び廃棄物埋設地を利用して生産される農産物の摂取を考慮する。

なお、廃棄物埋設地を利用して生産される農産物の摂取については、一般的な住居の建設作業によって発生する土壌上で生産される農産物(家庭菜園を含む)の摂取を考慮する。

また、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による大規模な掘削行為及び当該掘削後の土地利用は、一般的に生じるとは考えられないため、人為事象シナリオにおいて考慮する。

(iv) 水利用及び土地利用によって得られる各種生産物

「(iii) 敷地及びその周辺における地質環境等及び社会環境の状態を踏まえた人間活動の設定 a. 水利用」及び「(iii) 敷地及びその周辺における地質環境等及び社会環境の状態を踏まえた人間活動の設定 b. 土地利用」に示す水や土地の利用によって得られる生産物の種類を水産物及び農産物と設定する。

水産物については、尾駁沼の河川化による水産物種類の変化を考慮せず、現在の汽水性である尾駁沼に生息する代表的な水産物とする。

農産物については、現在の敷地周辺で収穫される農産物を想定し、沢水を灌漑用水として利用して生産される米(以下「灌漑農産物」という。)及び廃棄物埋設地で生産される野菜(以下「農耕農産物」という。)とする。

(v) 評価対象個人の設定

「(iii) 敷地及びその周辺における地質環境等及び社会環境の状態を踏まえた人間活動の設定」に示す人間活動に基づき、自然事象シナリオにおいては、様々な個人の生活様式に係る場合には、それらの重ね合わせを考慮し、評価対象個人を設定する。評価対象個人の設定に当たっては ICRP Pub. 81⁽¹⁾の決定グループ(最高の年線量を受けると予想される集団における個人を代表する人々のグループであり、年齢、飲食物及び受ける年線量に影響する行動という観点からみて比較的均質であるように十分小さいグループのこと)、ICRP Pub. 101⁽²⁾の代表的個人(公衆の防護の目的のために、線量拘束値の遵守の判断に用いられる人。被ばく経路、空間分布、持続可能性、年齢カテゴリー等を考慮する必要がある。)及び諸外国事例等を参考にする。

評価対象個人は、生活様式の特徴を表した個人で、年間を通して被ばくする可能性がある個人を代表として設定する。また、敷地及びその周辺又はわが国で現在認められる一般的な生活様式をもつ個人とし、比較的高い被ばくを受ける集団を代表する成人とする。

ただし、生産物の摂取においては、市場の流通の状況を適切に考慮する。また、生活様式として同時に存在することの合理性がないものは、重ね合わせを考慮しない。

生活様式は、現在認められる就労形態ごとに異なると考えられる。就労形態によって、様々な生産活動が行われる可能性があるが、評価の観点からは放射性物質が移行する水又は土壌に接触する生産活動に従事する就労者を対象とすることが合理的である。そのため、評価対象個人の設定に当たっては、就労形態に応じた生産活動及び生産物の摂取を考慮する。また、放射性物質は、その移行特性や放射線影響が種類ごとに異なることから、評価対象個人を複数の集団から設定する(例えば、漁業を営む集団だけではなく、農業や畜産業を営む集団からもそれぞれ評価対象個人を設定する。)

第3表に六ヶ所村の就業者数を示す。現在の敷地及びその周辺の社会環境・産業構造において、被ばくの可能性がある就労形態は、第一次産業としては、漁業及び農業(畜産業を含む。)が代表的であり、第二次産業では、建設業が代表的である。第三次産業やその他の業種については、労働作業に伴う被ばくの可能性が低く、廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられる。

第3表に示すように、最新の統計に基づく、六ヶ所村の産業別就業者数のほぼ半数を第三次産業が占めている。第三次産業については廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられることから、最も可能性が高い自然事象シナリオにおいては評価対象個人を居住者とする。居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、家庭菜園により生産される農産物及び市場に流通した食品を摂取すると想定する。

また、第3表に示す六ヶ所村における代表的な就労形態を考慮して、最も厳しい自然事象シナリオにおいては、評価対象個人を漁業従事者、農業従事者、畜産業従事者、建設業従事者及び居住者とする。

ただし、年間を通じて摂取する全ての食品が、廃棄物埋設地起源の放射性物質を含む生産品とすることは現在の市場の流通状況を考慮すると基本的に想定されない。このため、それぞれの就労者が生産活動により得られる食品を自家消費すると想定し、その他については市場から購入すると想定する。市場に流通する食品のうち、水産物、灌漑農

産物及び農耕農産物は、廃棄物埋設地に起因する放射性物質を含むそれらの食品が市場希釈係数に応じて含まれ、畜産物は廃棄物埋設地に起因する放射性物質を含まないものとする。

このような状況を考慮して、生活様式の異なる就労形態の分類に応じて、評価対象個人を以下のとおり設定する⁽³⁾。

a. 漁業従事者

漁業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、放射性物質が移行する水産物(汚染された水産物)を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

b. 農業従事者

農業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、放射性物質が移行する農産物(汚染された農産物)を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

なお、水利用の場合は放射性物質を含む沢水を灌漑に利用する灌漑作業、土地利用の場合は放射性物質を含む土壌上における農耕作業を想定する。

c. 畜産業従事者

畜産業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、放射性物質が移行する畜産物(汚染された畜産物)を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

ただし、現状の水理及び利水状況を前提にすると、放射性物質が移行する畜産物を摂取することによる被ばくは想定しない。

d. 建設業従事者

建設業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。また、廃棄物埋設地において一般的な住宅の建設作業を行うと想定する。

e. 居住者

居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象として、家庭菜園により栽培される農産物及び市場に流通した食品を摂取すると想定する。

第3表 六ヶ所村の就業者数⁽¹⁰⁾

業種別			産業別		
区分	人数(人)	割合(%)	区分	人数(人)	割合(%)
農業・林業	574	9.4	第一次産業	787	12.9
(うち農業)	(566)	(9.3)			
漁業	213	3.5			
鉱業、採石業、砂利採取業	23	0.4	第二次産業	2,346	38.5
建設業	921	15.1			
製造業	1,402	23.0			
電気・ガス・熱供給・水道業	33	0.5	第三次産業	2,931	48.1
情報通信業	34	0.6			
運輸業、郵便業	182	3.0			
卸売業、小売業	376	6.2			
金融業、保険業	24	0.4			
不動産業、物品賃貸業	66	1.1			
学術研究、専門・技術サービス業	429	7.0			
宿泊業、飲食サービス業	237	3.9			
生活関連サービス業、娯楽業	105	1.7			
教育、学習支援業	140	2.3			
医療・福祉	350	5.7			
複合サービス業	99	1.6			
サービス業 (他に分類されないもの)	633	10.4			
公務 (他に分類されないもの)	223	3.7			
分類不能な産業	31	0.5			
計	6,095	100.0	計	6,095	100.0

(2) 人為事象シナリオ

「(1) 自然事象シナリオ (iii)b. 土地利用」に示すように、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業等の大規模な掘削行為(保守的に埋設設備底面までの掘削)及び当該掘削後の土地利用を伴う人間活動は、一般的に生じるとは考えられないため、人為事象シナリオにおいて考慮する。よって、侵入者として廃棄物埋設地の大規模な掘削を行う建設業従事者¹⁾とその他公衆として掘削後の土地利用を行う居住者を線量の評価対象とし、その生活環境を以下のとおり設定する。

(i) 建設業従事者

建設業従事者については、自然事象シナリオと同様に放射性物質を含む土壤に接近する掘削作業を想定する。ただし、自然事象シナリオで考慮するその他の人間活動による被ばくは考慮しない。

よって、建設業従事者は、廃棄物埋設地以外に居住する人を対象として、廃棄物埋設地に起因する放射性物質を含まない食品を摂取すると想定する。

(ii) 居住者

居住者については、廃棄物埋設地の大規模な掘削後の土地利用として、掘削に伴うバリア機能喪失後の廃棄物埋設地からの地下水移行によって生じる被ばくに関する人間活動(最も可能性が高い自然事象シナリオの水利用と同様)も考慮する。

よって、居住者は、大規模な掘削後の廃棄物埋設地に居住する人を対象として、家庭菜園により生産される農産物及び市場に流通した食品を摂取すると想定する。

5. 放射性物質の移行挙動及び被ばく経路

(1) 自然事象シナリオ

覆土完了後に地下水が再冠水することによって埋設設備の間隙は地下水によって満たされていくこととなる。地下水を介して放射性物質が移行することを評価する場合は、この過渡的な現象は比較的速やかに進行するものとし、線量の評価上は覆土完了直後に地下水で飽和するものとして設定する。

廃棄体は、放射性物質によって汚染された廃棄物を容器に固型化したものであるため、放射性物質が容易に漏出することはない。また、覆土完了後において長期的に腐食速度が小さい環境となる可能性が高いため、鋼製である容器は腐食し難いが、長期的な評価を行う上では、容器による移行抑制機能は考慮しないものとする。

廃棄体内への地下水の浸入に伴い放射性物質が埋設設備内の間隙水中に溶出する。廃棄体から溶出した放射性物質は、速やかに埋設設備内に均一に分布し、埋設設備内の廃棄体の固型化材、充填材、埋設設備等の収着性に応じて間隙水中に溶出するものとする。

埋設設備内の間隙水に溶出した放射性物質は、覆土と鷹架層へそれぞれ漏出する。漏出した放射性物質は覆土又は鷹架層とそれぞれの間隙水中を移行し、沢及び尾駸沼に流入する(地下水流動の詳細については、補足説明資料 1「地質環境に係る長期変動事象」を参照)。

地下水の流入した尾駸沼で得られる水産物及び水を利用して生産された農産物には、それぞれ水産物への濃縮係数及び農産物への移行係数に応じて放射性物質が移行する。よって、これらの水産物及び農産物の摂取を含む水の利用によって公衆の被ばくが生じるものとする。

また、廃棄物埋設地の近傍土壌及び周辺岩盤への放射性物質の移行は基本的に地下水を介して生じる。漏出した放射性物質は覆土又は鷹架層とそれぞれの間隙水中を移行するため、放射性物質が収着し、土壌や鷹架層中に残存するものとして、廃棄物埋設地における土地の利用によって公衆の被ばくが生じるものとする。

以上の放射性物質の移行挙動を踏まえ、「地質環境等の状態」、「廃棄物埋設地の状態設定」及び「4. 生活環境の状態設定」で設定した状態設定のもとで、沢水の利用、尾駸沼の利用及び廃棄物埋設地の利用を対象として、明らかに線量が小さいもの及び他の被ばく経路で代表されるものを除外した以下の被ばく経路を設定し、評価対象個人の線量を評価する(被ばく経路の選定結果の詳細については第 4 表を参照)。

なお、最も可能性が高い自然事象シナリオでは評価対象個人を居住者とするため、沢水を利用する灌漑作業及び廃棄物埋設地における屋外労働作業による被ばくは考慮しない。

- ・尾駸沼の水産物の摂取による内部被ばく
- ・沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく
- ・沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく
- ・廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく
- ・廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく
- ・廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物(家庭菜園を含む)の摂取による内部被ばく

なお、仮に廃棄物埋設地から北側の老部川へ流出した場合と南側の尾駸沼へ流出した場

合を比較すると、老部川までの放射性物質の移行距離が尾駸沼への移行距離よりも長いこと及び老部川の交換水量が中央沢を含む評価対象地点の交換水量よりも多いことにより、北側の老部川へ流出した場合の方が線量は低くなる。したがって、地下水の流動方向が変化したとしても影響はない。

第4表 自然事象シナリオにおける被ばく経路の選定結果(1/2)

放射性物質の放出	放射性物質の移行経路		被汚染物	利用形態	被ばく形態	被ばく経路の選定結果*1			
地下水への漏出	地下水移行	地下水	-	浅層地下水	飲用水利用	飲用水摂取	-	地下水の利用が想定されないため評価対象外	
					灌漑利用	農作物(米)摂取			
						土壌吸入			
				土壌外部被ばく					
				飼育水利用	畜産物摂取				
				深層地下水	飲用水利用	飲用水摂取			
		灌漑利用	農作物(米)摂取						
			土壌吸入						
		土壌外部被ばく							
		飼育水利用	畜産物摂取						
		植物による吸上げ	浅層地下水	-	地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	○		評価対象
					畜産物摂取	-	牧草の根の深さと地下水位の関係から評価対象外		
					地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-	掘削深さから放射性物質を含む土壌が掘削されることはないため評価対象外	
		地下水から土壌への収着	-	-	廃棄物埋設地又は周辺土壌	土壌吸入	-		
						土壌外部被ばく	-		
	畜産物摂取					-			
	地表利用(居住)					農作物(米以外)摂取	○	評価対象(家庭菜園)	
	土壌吸入					○	評価対象		
	土壌外部被ばく					○	評価対象		
	地表への漏出	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	飲用水利用	飲用水摂取	○	現在の生活様式を考慮して評価対象外		
					灌漑利用	農作物(米)摂取	○	評価対象(沢水)	
						土壌吸入	○	評価対象(沢水)	
				土壌外部被ばく	○	評価対象(沢水)			
				飼育水利用	畜産物摂取	-	社会環境を踏まえ評価対象外		
				水産物消費	水産物摂取	○	評価対象(湖沼)		
	地表への漏出	土壌への収着(海水準変動によって利用可能な土地も含む)	河川岸、湖沼岸、海岸又は沢岸	岸利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-	灌漑利用及び飼育水利用に包含されるため評価対象外		
					土壌吸入	-			
土壌外部被ばく					-				
畜産物摂取				-					
岸利用(住居)				農作物(米以外)摂取	-	廃棄物埋設地又は周辺土壌に比べ明らかに濃度が低く、廃棄物埋設地又は周辺土壌の利用に包含されるため評価対象外			
				土壌吸入	-				
	土壌外部被ばく	-							
建設作業	土壌吸入	-							
	土壌外部被ばく	-							
	送風塩吸入	送風塩吸入	-	社会環境を踏まえ評価対象外					
(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取	-						

*1: 被ばく経路の選定結果における「○」は「評価対象」を、「-」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばく経路の選定結果として「評価対象」としたものを表中に赤枠で示す。

第4表 自然事象シナリオにおける被ばく経路の選定結果(2/2)

放射性物質の放出	放射性物質の移行経路			被汚染物	利用形態	被ばく形態	被ばく経路の選定結果*1		
廃棄物の露呈	-	-	-	廃棄物埋設地又は周辺土壌の侵食面	地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-		
						土壌吸入	-		
						土壌外部被ばく	-		
						畜産物摂取	-		
						地表利用(居住)	土壌吸入	-	
						土壌外部被ばく	-		
	侵食に伴う移行	削剥土壌	-	-	堆積土壌	地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-	
							土壌吸入	-	
							土壌外部被ばく	-	
							畜産物摂取	-	
						地表利用(居住)	土壌吸入	-	
							土壌外部被ばく	-	
							建設作業	土壌吸入	-
								土壌外部被ばく	-
		降雨のかん養水	-	-	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	飲用水利用	飲用水摂取	-
							灌漑利用	農作物(米)摂取	-
								土壌吸入	-
								土壌外部被ばく	-
							飼育水利用	畜産物摂取	-
							水産物消費	水産物摂取	-
水面活動	直接外部被ばく	-							
(海水)	送風塩吸入	送風塩吸入	-						
(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取	-						

廃棄物埋設地の露呈が起これるのは廃止措置の開始後から数万年後のことであるため、評価対象外

*1: 被ばく経路の選定結果における「○」は「評価対象」を、「-」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばく経路の選定結果として「評価対象」としたものを表中に赤枠で示す。

(2) 人為事象シナリオ

廃棄物埋設地の大規模な掘削に伴い、放射性物質は埋設設備、覆土、岩盤(鷹架層)及び周辺土壌と混合した土壌に移行する。また、大規模な掘削による擾乱を受けた後の地下水による沢及び尾駁沼への放射性物質の移行は、自然事象シナリオと同様とする。

このような放射性物質の移行挙動を踏まえ、人為事象シナリオの線量の評価対象とする被ばく経路を以下のとおり設定する(被ばく経路の選定結果の詳細については第5表を参照。)

(i) 建設業従事者

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による外部被ばく及び内部被ばく

(ii) 居住者

- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による外部被ばく
- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上で生産される農耕農産物(家庭菜園)の摂取による内部被ばく
- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による覆土の低透水性機能喪失後の廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が移行する尾駁沼の水産物の摂取による内部被ばく
- ・廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による覆土の低透水性機能喪失後の廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が移行する沢の利用によって生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく

第5表 人為事象シナリオにおける被ばく経路の選定結果(1/2)

放射性物質の放出	放射性物質の移行経路		被汚染物	利用形態	被ばく形態	被ばく経路の選定結果*1				
廃棄物埋設地又は近傍へのボーリング	地下水移行	地下水	—	地下水	飲用水利用	飲用水飲用	—	ボーリングによる廃棄物埋設地の機能損失の範囲は掘削と比べて小さく、廃棄物埋設地の掘削における地下水移行時の利用形態に包含されるため評価対象外		
			—	地下水	飲用水利用	飲用水摂取	—			
		地表への流出	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	—	灌漑利用	農作物(米)摂取		—	
							土壌吸入		—	
						土壌外部被ばく	—			
						飼育水利用	畜産物摂取		—	
					水産物消費	水産物摂取	—			
					水面活動	直接外部被ばく	—			
		(海水)	送風塩吸入	送風塩吸入	—					
		(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取	—					
廃棄物埋設地の掘削	地下水移行	地表への流出	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	飲用水利用	飲用水摂取	—	現在の生活様式を考慮して評価対象外 評価対象(廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による覆土の透水性機能喪失後の廃棄物埋設地から移行する放射性物質が汚染水による灌漑農産物の摂取)		
					灌漑利用	農作物(米)摂取	○			
						土壌吸入	—			
						土壌外部被ばく	—			
					飼育水利用	畜産物摂取	—		社会環境を踏まえ評価対象外	
					水産物消費	水産物摂取	○		評価対象(廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による覆土の透水性機能喪失後の廃棄物埋設地から移行する尾駁沼の水産物の摂取)	
							—		廃棄物又は掘削土壌の利用に包含されるため評価対象外	
					水面活動	直接外部被ばく	—			
					(海水)	送風塩吸入	送風塩吸入		—	社会環境を踏まえ評価対象外
					(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取		—	

*1: 被ばく経路の選定結果における「○」は「評価対象」を、「—」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばく経路の選定結果として「評価対象」としたものを表中に赤枠で示す。

第5表 人為事象シナリオにおける被ばく経路の選定結果(2/2)

放射性物質の放出	放射性物質の移行経路		被汚染物	利用形態	被ばく形態	被ばく経路の選定結果*1					
廃棄物埋設地の掘削	廃棄物の掘り返し	-	-	廃棄物	建設作業	土壌吸入	○	評価対象(廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業)			
						土壌外部被ばく	○	評価対象(廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業)			
					処分作業	土壌吸入	-	建設作業に含まれるため評価対象外			
						土壌外部被ばく	-				
				地表土壌利用(農畜産業)	-	-	掘削土壌	地表利用(居住)	農作物(米以外)摂取	-	大規模な掘削行為は農牧地としての利用を目的としたものではないことから評価対象外
									土壌吸入	-	
									土壌外部被ばく	-	
									畜産物摂取	-	
				地表利用(居住)	-	-	掘削土壌	地表利用(居住)	土壌吸入	-	コンクリート構造物である埋設設備が掘削土壌に含まれるため、掘削土壌の利用に際しては客土を施すことから評価対象外
									土壌外部被ばく	○	評価対象(廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住)
				掘削土壌からの流出	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	-	飲用水利用	飲用水摂取	-	廃棄物埋設地の掘削後の地下水移行時の利用形態では、保守的に掘削土壌からの流出も考慮し、掘削土壌に含まれる放射エネルギーを、廃棄物埋設地の放射エネルギーを含めて評価する
								灌漑利用	農作物(米)摂取	-	よって、掘削土壌からの流出時の利用形態は、廃棄物埋設地の掘削における地下水移行時の利用形態に含まれるため評価対象外
									土壌吸入	-	
									土壌外部被ばく	-	
飼育水利用	畜産物摂取	-									
水産物消費	水産物摂取	-									
水面活動	直接外部被ばく	-									

*1: 被ばく経路の選定結果における「○」は「評価対象」を、「-」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばく経路の選定結果として「評価対象」としたものを表中に赤枠で示す。

6. まとめ

「4. 生活環境の状態設定」及び「5. 放射性物質の移行挙動及び被ばく経路」で設定した、評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路を第6表、第7表及び第8表に示す。これを基に線量評価を行い、許可基準規則第十条第四号で要求されている基準値を下回ることを確認する。

なお、被ばく経路ごとの線量評価パラメータの設定値については添付資料1「被ばく経路ごとの線量評価パラメータ」を参照。

第6表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路

(最も可能性が高い自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		居住者
水利用	尾駁沼の水産物の 摂取	○
	沢水を利用して生産 される灌漑農産物の 摂取	○
	沢水を利用する 灌漑作業	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—
	居住	○
	農耕農産物の摂取	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

第7表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(最も厳しい自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		漁業 従事者	農業 従事者 (米)	農業 従事者 (米以 外)	畜産業 従事者	建設業 従事者	居住者
水利用	尾駁沼の水産物の 摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用して生産 される灌漑農産物の 摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用する 灌漑作業	—	○	—	—	—	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—	—	—	—	○	—
	居住	○	○	○	○	○	○
	農耕農産物の摂取	○	○	○	○	○	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

第8表 被ばく経路(人為事象シナリオ)*1

被ばく経路		建設業従事者	居住者
水利用	尾駁沼の水産物の摂取	—	○
	沢水を利用して生産される 灌漑農産物の摂取	—	○
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業(建設作業)	○	—
	居住	—	○
	農耕農産物の摂取	—	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

7. 参考文献

- (1) International Commission on Radiological Protection(1998): Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 81
- (2) International Commission on Radiological Protection(2006): Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101
- (3) 一般社団法人 日本原子力学会(2018): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法: 2016
- (4) 日本エヌ・ユー・エス株式会社(1988): 六ヶ所村周辺の社会環境実態調査結果報告書
- (5) 青森県健康福祉部保健衛生課(2020): 平成 30 年度版 青森県の水道
- (6) 青森県(平成 19 年): 新むつ小川原開発基本計画素案に係る環境影響評価書
- (7) 六ヶ所村(平成 31 年): 平成 30 年度版 六ヶ所村統計書
- (8) ゼンリン(2013): 建物ポイントデータ 2013
- (9) 総務省統計局(2013): 統計でみる市区町村のすがた 2013
- (10) 総務省統計局(2016): 平成 27 年 国勢調査

以 上

被ばく経路ごとの線量評価パラメータ

1. はじめに

本資料は、安全評価に用いる線量評価パラメータのうち生活様式に関連する評価パラメータを、被ばく経路ごとに取りまとめたものである。被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧を第1表に示す。また、評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路を第3表及び第4表に示す。

なお、線量パラメータの設定の詳細については「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料9 線量評価パラメータ-パラメータ根拠集-」を参照。

第1表 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧表(生活様式に関連する評価パラメータのみ)(1/3)

被ばく経路	生活様式に関連する評価パラメータ	単位	設定値*1	
			最も可能性が高い自然事象シナリオ	最も厳しい自然事象シナリオ
沢水又は井戸水の飲用による内部被ばく	水の摂取量	[m ³ /y]	-	-
	飲用における放射性物質を含む沢水又は井戸水の利用率	[-]	-	-
	公衆 <i>p</i> の飲用水の市場希釈係数	[-]	-	-
尾駸沼の水産物の摂取による内部被ばく	水産物 <i>m</i> の摂取量	[kg/y]	魚類 : 5.7 無脊椎動物 : 1.4	魚類 : 5.7 無脊椎動物 : 1.4
	公衆 <i>p</i> の水産物 <i>m</i> の市場希釈係数	[-]	居住者 : 0.1	漁業従事者 : 1 上記以外 : 0.1

*1 : 表中の「-」は、2020年10月7日の第31回原子力規制委員会において了承された議題3「日本原燃(株)廃棄物埋設事業変更許可申請における廃止措置の開始後の公衆の被ばく線量評価に係る審査方針について(第3回)～将来の人間活動に関する設定～」で示された審査方針(以下「審査方針」という。)を踏まえた生活環境の状態設定及び評価対象個人の設定の見直しに伴い、安全評価において使用しない線量評価パラメータを示す。

第1表 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧表(生活様式に関連する評価パラメータのみ) (2/3)

被ばく経路	生活様式に関連する評価パラメータ	単位	設定値*1	
			最も可能性が高い自然事象シナリオ	最も厳しい自然事象シナリオ
沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく	灌漑農産物の摂取量	[kg/y]	100	100
	公衆 <i>p</i> の灌漑農産物の市場希釈係数	[-]	居住者 : 0.1	農業従事者(米) : 1 上記以外 : 0.1
	灌漑における放射性物質を含む沢水の利用率	[-]	1	1
沢水を利用して生産される畜産物の摂取による内部被ばく	畜産における放射性物質を含む沢水の利用率	[-]	-	-
	家畜 <i>n</i> の家畜用水摂取量	[m ³ /d]	-	-
	畜産物 <i>n</i> の摂取量	[kg/y]	-	-
	公衆 <i>p</i> の畜産物 <i>n</i> の市場希釈係数	[-]	-	-
沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく	公衆 <i>p</i> の屋外労働作業中の核種 <i>i</i> の遮蔽係数	[-]	-	第2表参照
	公衆 <i>p</i> の灌漑作業時間	[h/y]	-	500
	屋外労働作業中の空気中ダスト濃度	[kg/m ³]	-	3.0×10^{-8}
	屋外労働作業中の呼吸率	[-]	-	1.2

*1 : 表中の「-」は、審査方針を踏まえた評価対象個人の設定の見直しに伴い当該被ばく経路の線量評価を行わないため、使用しなくなった線量評価パラメータを示す。

第1表 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧表(生活様式に関連する評価パラメータのみ)(3/3)

被ばく経路	生活様式に関連する評価パラメータ	単位	設定値*1	
			最も可能性が高い自然事象シナリオ	最も厳しい自然事象シナリオ
廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく	公衆 <i>p</i> の屋外労働作業中の核種 <i>i</i> の遮蔽係数	[-]	-	第2表参照
	廃棄物埋設地における公衆 <i>p</i> の屋外労働作業時間	[h/y]	-	500
	屋外労働作業中の空气中ダスト濃度	[kg/m ³]	-	1.0×10 ⁻⁷
	屋外労働作業中の呼吸率	[-]	-	1.2
廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく	居住者の屋外における核種 <i>i</i> の遮蔽係数	[-]	全核種：1	全核種：1
	公衆 <i>p</i> の居住中の屋外における居住時間	[h/y]	居住者：1,000	居住者：1,000 居住者以外：700
	居住中の空气中ダスト濃度(屋外)	[kg/m ³]	2.0×10 ⁻⁸	2.0×10 ⁻⁸
	公衆 <i>p</i> の居住中の屋内における居住時間	[h/y]	居住者：7,760	居住者：7,760 居住者以外：6,060
	居住中の空气中ダスト濃度(屋内)	[kg/m ³]	5.0×10 ⁻⁹	5.0×10 ⁻⁹
	居住時の呼吸率	[m ³ /h]	0.93	0.93
廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取による内部被ばく	農耕農産物の摂取量	[kg/y]	100	100
	公衆 <i>p</i> の農耕農産物の市場希釈係数	[-]	居住者：0.3	農業従事者(米以外)：1 上記以外：0.3

*1：表中の「-」は、審査方針を踏まえた評価対象個人の設定の見直しに伴い当該被ばく経路の線量評価を行わないため、使用しなくなった線量評価パラメータを示す。

第2表 公衆 p の屋外労働作業中の核種 i の遮蔽係数

評価対象個人	核種	設定値	核種	設定値
建設業従事者	H-3	0.02	Ra-226	0.4
	C-14	0.02	Ac-227	0.3
	Cl-36	0.02	Th-229	0.4
	Co-60	0.4	Th-230	0.02
	Ni-59	0.02	Pa-231	0.2
	Ni-63	0.02	U-233	0.02
	Sr-90	0.02	U-234	0.02
	Nb-94	0.4	U-235	0.2
	Tc-99	0.02	Np-237	0.2
	I-129	0.02	Pu-238	0.02
	Cs-137	0.3	Pu-239	0.02
	Pb-210	0.2	Pu-240	0.02
	Po-210	0.02	Am-241	0.02
上記 以外	全核種 1			

第3表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(最も可能性が高い自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		居住者
水利用	尾駁沼の水産物の 摂取	○
	沢水を利用して生産 される灌漑農産物の 摂取	○
	沢水を利用する 灌漑作業	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—
	居住	○
	農耕農産物の摂取	○

*1 : ○ : 考慮する被ばく経路、— : 考慮しない被ばく経路

第4表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(最も厳しい自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		漁業 従事者	農業 従事者 (米)	農業 従事者 (米以外)	畜産業 従事者	建設業 従事者	居住者
水利用	尾駁沼の水産物の 摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用して 生産される 灌漑農産物の摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用する 灌漑作業	—	○	—	—	—	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—	—	—	—	○	—
	居住	○	○	○	○	○	○
	農耕農産物の摂取	○	○	○	○	○	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

以 上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-影響事象分析-

2021年6月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 検討内容.....	1
(1) 各バリアに期待する性能.....	1
(2) FEP の整理.....	2
(3) 影響事象分析.....	3
3. 検討結果.....	3
4. 参考文献.....	15

添付資料 1 影響評価により影響なしと判断した根拠

参考資料 1 IAEA ISAM 及び廃棄物安全小委員会報告書の人工バリアに関する FEP リスト

1. はじめに

廃止措置の開始後の評価に際しては、廃棄物埋設地の人工バリア及び天然バリアの機能の状態の変化を十分に把握し、その変化を適切に評価に反映する。

人工バリア及び天然バリアの機能に係る物理的・化学的状態の長期的な変化を予測し、長期的な廃棄物埋設地等の状態を設定する(状態設定)に当たって、廃棄物埋設地の設計において、安全機能のうち長期的な機能を期待する移行抑制機能に影響する可能性のある事象を体系的に分析した結果を説明する。

分析に当たっては、各部材相互の影響事象を熱、水理、力学及び化学の観点で整理する。影響事象については、OECD/NEA⁽¹⁾⁽²⁾、廃棄物安全小委員会⁽³⁾及びIAEA⁽⁴⁾で整理されたFEPを参考に、網羅的・包括的に検討し、抽出・整理を行う。

2. 検討内容

(1) 各バリアに期待する性能

覆土完了後に期待する移行抑制機能は、放射性物質の移行する量を低減又は遅延させる機能であり、この機能を期待できる性能としては、低溶出性、低拡散性、低透水性及び収着性がある。

これらのうち1号、2号及び3号廃棄物埋設地の各バリアに期待する性能は低透水性と収着性とし、影響事象分析における前提条件とする。各バリアに期待する性能を第1表に示す。

第1表 各バリアに期待する性能

バリア(部材)	性能	安全機能の内容
難透水性覆土、 下部覆土*1	低透水性	ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土及び下部覆土に対して低透水性を期待することにより、廃棄物埋設地の通過流量(埋設設備への浸入水量及び埋設設備上部並びに生活環境への地下水の流出)をできるだけ低下させる。また、比較的透水性の大きい覆土側への施設浸入地下水の流出割合を低減する。
岩盤(鷹架層)		岩盤(鷹架層)の低透水性によって、廃棄物埋設地への地下水浸入量の低減を期待するとともに、生活環境までの放射性物質の移行遅延を期待する。
セメント系材料 (廃棄体の固型化材、 埋設設備)	収着性	セメント系材料、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性を期待することにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出量を低減し、移行を遅延させる。 基本的に収着性が大きい方が移行抑制効果は大きい が、土地(土壌)の利用が想定される場合は、収着性が小さい方が線量低減に寄与する場合もある。
難透水性覆土		
上部覆土		
岩盤(鷹架層)		

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、保守側に下部覆土の収着性は考慮しない。

(2) FEPの整理

廃止措置の開始後の評価における評価シナリオ選定においては、廃棄体、廃棄物埋設地及び周囲の地質環境条件について網羅されたFEP(Features, Events, Processes)からスクリーニング作業によって安全評価において考慮すべき影響事象を抽出する。

ピット処分である1号、2号及び3号廃棄物埋設地のFEPリストは、廃棄物埋設地の対象廃棄体、設備形状、浅地中処分地独自の特徴を考慮しつつ、以下のFEPを参考にピット処分のFEPリストを作成した。

- ① OECD/NEAの国際FEPリスト⁽¹⁾⁽²⁾
- ② 廃棄物安全小委員会報告書のFEPリスト⁽³⁾
- ③ IAEA-ISAMのFEPリスト⁽⁴⁾

作成したピット処分におけるFEPリストを第2表に示した。本FEPリストは、廃棄物安全小委員会報告書のFEPのうち、セメント系材料及びベントナイト系材料が用いられる人工バリア(緩衝材/埋め戻し材、プラグ・グラウト・支保工)のFEP(参考資料1「IAEA ISAM

及び廃棄物安全小委員会報告書の人工バリアに関する FEP リスト」を参照。)を網羅した
ものとなっている。

なお、第 2 表に示す FEP のうち、核種移行現象・特性(放射線分解を除く。)はバリア機
能に直接影響するものではないため評価モデルの検討に際して考慮すること、施工不良に
ついては適切な品質管理が行われることから、影響事象より除外する。また、人間活動に
ついては生活環境の状態設定において考慮する。

(3) 影響事象分析

実際の処分システムでは、外部事象及び内部事象に関連する様々な事象が相互に関連
しあっているが、設計・評価に当たって、全ての事象を考慮する必要は必ずしもなく、
移行抑制機能に係る重要なものを適切に考慮すれば良い。重要な事象を選定する方法と
して、「2. (1) 各バリアに期待する性能」に示した各バリアに期待する性能に着目して考
慮すべき事象の絞り込みを行った。

具体的には、熱(T)、水理(H)、力学(M)及び化学(C)の観点からマトリクス形式の表を
整理し、影響元となる部材(外部事象を含む。)の特性、そこで生じる事象やプロセスに
よって、対象とする各バリアに期待する性能に影響するか否かを分析した。分析の際に
は第 2 次 TRU レポートの FEP 辞書⁽⁶⁾等を参考とした。

3. 検討結果

影響事象分析表を第 3 表～第 6 表に示した。この分析の結果から、状態設定において考
慮すべき影響事象として、以下を抽出した。これらの事象については、廃棄物埋設地の状
態設定において適切に考慮することとする。

a) 熱

- ・第 3 表に示すとおり考慮すべき影響事象はない

b) 水理

- ・各部材の水理特性
- ・各部材の地下水流動(→地下水との反応)
- ・各部材の飽和(不飽和)(→地下水流動)
- ・液状化(覆土)
- ・隆起

- ・海水準変動
- ・気温、降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位
- ・侵食

c) 力学

- ・各部材の力学特性
- ・各部材の応力
- ・廃棄体中の金属廃棄物及び容器の腐食(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・埋設設備中の鉄筋の腐食(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・上記の腐食に伴うガス発生(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・各部材の破壊とひび割れ
- ・廃棄体、充填材、埋設設備、難透水性覆土及び下部覆土の変形
- ・地震
- ・液状化(覆土)
- ・侵食

d) 化学

- ・各部材の化学特性
- ・各部材中の地下水化学
- ・各部材の地下水との反応
- ・各部材の化学的変質
- ・廃棄体中の金属廃棄物及び容器の腐食(→地下水化学)
- ・埋設設備中の鉄筋の腐食(→地下水化学)
- ・廃棄体の固型化材、充填材、埋設設備の溶脱
- ・各部材中の有機物影響
- ・各部材中の微生物影響
- ・各部材中でのコロイド形成
- ・降下火砕物
- ・表流水・地下水の水質

なお、抽出した影響事象のうち、ガス発生の影響、地震による影響、液状化(覆土)の影響、コロイド影響、微生物影響のうちガス発生、微生物影響のうち金属腐食の促進及び降下火砕物(化学)の影響については、設計を踏まえた影響評価を行った結果、影響を無視できる

と判断した(添付資料1「影響評価により影響なしと判断した根拠」を参照。)

第2表 ピット処分におけるFEPリスト(1/2)

環境 分類	廃棄体層(充填材・ポーラスコンクリート層含む)		埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		ベントナイト混合土層(難透水性覆土、下部覆土*)		覆土(上部覆土)		母岩(岩盤)	
	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP
熱的現象・特性	WT01	廃棄体層の熱特性	CT01	埋設設備の熱特性	BT01	ベントナイト混合土層の熱特性	XT01	覆土の熱特性	RT01	母岩の熱特性
	WT02	廃棄体の崩壊熱	CT03	セメント系材料の水和熱	BT04	ベントナイト混合土層の温度	XT04	覆土の温度	RT04	母岩の温度
	WT03	セメント系材料の水和熱								
	WT04	廃棄体層の温度	CT04	埋設設備の温度	BT05	ベントナイト混合土層の熱膨張	XT05	覆土の熱膨張	RT05	母岩の熱膨張
	WT05	廃棄体層の熱膨張	CT05	埋設設備の熱膨張						
現象・水理的・特性	WH01	廃棄体層の水理特性	CH01	埋設設備の水理特性	BH01	ベントナイト混合土層の水理特性	XH01	覆土の水理特性	RH01	母岩の水理特性
	WH02	廃棄体層の地下水流動	CH02	埋設設備の地下水流動	BH02	ベントナイト混合土層の地下水流動	XH02	覆土の地下水流動	RH02	母岩の地下水流動
	WH03	廃棄体層の飽和	CH03	埋設設備の飽和	BH03	ベントナイト混合土層の飽和	XH03	覆土の飽和	RH03	母岩の飽和
力学的現象・特性	WM01	廃棄体層の力学特性	CM01	埋設設備の力学特性	BM01	ベントナイト混合土層の力学特性	XM01	覆土の力学特性	RM01	母岩の力学特性
	WM02	廃棄体層の応力	CM02	埋設設備の応力	BM02	ベントナイト混合土層の応力	XM02	覆土の応力	RM02	母岩の応力
	WM03	廃棄体層の破壊とひび割れ	CM03	埋設設備の破壊とひび割れ	BM03	ベントナイト混合土層の破壊とひび割れ	XM03	覆土の破壊とひび割れ	RM03	母岩のクリープ
	WM04	廃棄体層の変形	CM04	埋設設備の変形	BM04	ベントナイト混合土層の変形	XM04	覆土の変形	RM04	EDZの進展
化学的現象・特性	WC01	廃棄体層の化学特性	CC01	埋設設備の化学特性	BC01	ベントナイト混合土層の化学特性	XC01	覆土の化学特性	RC01	母岩の化学特性
	WC02	廃棄体層の地下水化学	CC02	埋設設備の地下水化学	BC02	ベントナイト混合土層の地下水化学	XC02	覆土の地下水化学	RC02	母岩の地下水化学
	WC03	廃棄体層の地下水との反応	CC03	埋設設備の地下水との反応	BC03	ベントナイト混合土層の地下水との反応	XC03	覆土の地下水との反応	RC03	母岩の地下水との反応
	WC04	廃棄体層の化学的変質	CC04	埋設設備の化学的変質	BC04	ベントナイト混合土層の化学的変質	XC04	覆土の化学的変質	RC04	母岩の化学的変質
	WC05	金属廃棄物、容器の腐食 充填材とコンクリートの溶脱	CC05	鉄筋の腐食	BC07	ベントナイト混合土層の侵食性イオン影響	XC07	覆土の侵食性イオン影響	RC07	母岩の侵食性イオン影響
	WC06		埋設設備の溶脱							
	WC07	廃棄体層の侵食性イオン影響	CC07	埋設設備の侵食性イオン影響	BC08	ベントナイト混合土層の微生物影響	XC08	覆土の微生物影響	RC08	母岩の微生物影響
	WC08	廃棄体層の微生物影響	CC08	埋設設備の微生物影響	BC09	ベントナイト混合土層の有機物影響	XC09	覆土の有機物影響	RC09	母岩の有機物影響
	WC09	廃棄体層の有機物影響	CC09	埋設設備の有機物影響	BC10	ベントナイト混合土層のコロイド形成	XC10	覆土のコロイド形成	RC10	母岩のコロイド形成
	WC10	廃棄体層のコロイド形成	CC10	埋設設備のコロイド形成	BC11	ベントナイト混合土層のガス発生影響	XC11	覆土のガス発生影響	RC11	母岩のガス発生影響
	WC11	廃棄体層のガス発生影響	CC11	埋設設備のガス発生影響						

第2表 ピット処分におけるFEPリスト(2/2)

環境 分類	廃棄体層(充填材・ポーラスコンクリート層含む)		埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		ベントナイト混合土層 (難透水性覆土、下部覆土*1)		覆土 (上部覆土)		母岩 (岩盤)	
	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP
現象・放射線学的 ・特性	WR01	廃棄体層での核種の放射線崩壊	CR01	埋設設備での核種の放射線崩壊	BR01	ベントナイト混合土層での核種の放射線崩壊	XR01	覆土での核種の放射線崩壊	RR01	母岩での核種の放射線崩壊
	WR02	廃棄体層の地下水の放射線分解	CR02	埋設設備の地下水の放射線分解	BR02	ベントナイト混合土層の地下水の放射線分解	XR02	覆土の地下水の放射線分解	RR02	母岩の地下水の放射線分解
現象・核種移行 ・特性	WN01	廃棄体層の物質移動特性	CN01	埋設設備の物質移動特性	BN01	ベントナイト混合土層の物質移動特性	XN01	覆土の物質移動特性	RN01	母岩の物質移動特性
	WN02	廃棄体層の幾何形状・間隙構造	CN02	埋設設備の幾何形状・間隙構造	BN02	ベントナイト混合土層の幾何形状・間隙構造	XN02	覆土の幾何形状・間隙構造	RN02	母岩の幾何形状・間隙構造
	WN03	廃棄体層の核種移行	CN03	埋設設備の核種移行	BN03	ベントナイト混合土層の核種移行	XN03	覆土の核種移行	RN03	母岩の核種移行
	WN04	移流／分散	CN04	移流／分散	BN04	移流／分散	XN04	移流／分散	RN04	移流／分散
	WN05	拡散	CN05	拡散	BN05	拡散	XN05	拡散	RN05	拡散
	WN06	収着	CN06	収着	BN06	収着	XN06	収着	RN06	収着
	WN07	沈殿溶解	CN07	沈殿溶解	BN07	沈殿溶解	XN07	沈殿溶解	RN07	沈殿溶解
	WN08	コロイド移行	CN08	コロイド移行	BN08	コロイド移行	XN08	コロイド移行	RN08	コロイド移行
	WN09	ガスによる移行	CN09	ガスによる移行	BN09	ガスによる移行	XN09	ガスによる移行	RN09	ガスによる移行
						XN10	臨界	RN10	臨界	
施工不良	WQ01	廃棄体層の製作・施工不良	CQ01	コンクリートの製作・施工不良	BQ01	ベントナイト混合土層の製作・施工不良	XQ01	覆土の製作・施工不良	RQ01	調査用ボーリング孔のシール不良

*1：下部覆土にベントナイト混合土を用いない場合は覆土として取り扱う

第3表 影響事象分析表(熱(T))

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)		
熱	廃棄体		<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、セメント系材料の熱による化学的変質(WC04, CC04)が生じる温度(約 60℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(WC04)が生じる温度(約 80℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(WC04)が生じる温度(約 80℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、上部覆土の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、上部覆土の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、岩盤の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、岩盤の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 		
			<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体は発電所で製作されるため固型化時の水和熱(WT03)の影響は生じない。 								
		充填材	<ul style="list-style-type: none"> 充填材の充填時に水和熱(WT03)が発生するが、放射性物質の移行は水和熱(WT03)が低下した後に生じること、安全機能は水和後のセメント系材料の特性に期待しているため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に難透水性覆土及び下部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に難透水性覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は無視できる。 		
		埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート構築時に水和熱(CT03)が発生するが、放射性物質の移行は水和熱(CT03)が低下した後に生じること、安全機能は水和後のセメント系材料の特性に期待しているため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に難透水性覆土及び下部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に難透水性覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は無視できる。 		
		<ul style="list-style-type: none"> 熱による影響は生じないため、熱特性(CT01)、温度(CT04)、熱膨張(CT05)を考慮する必要はない。 									
		難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 発熱しないので、熱特性(BT01)、温度(BT04)、熱膨張(BT05)を考慮する必要はない。 								
		上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 発熱しないので、熱特性(XT01)、温度(XT04)、熱膨張(XT05)を考慮する必要はない。 								
	岩盤・地下水	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、セメント系材料の熱による化学的変質(WC04, CC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(BC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(BC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、上部覆土の熱による化学的変質(XC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、上部覆土の熱による化学的変質(XC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、岩盤の熱による化学的変質(RC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、岩盤の熱による化学的変質(RC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 			
自然事象	火砕物密度流(NP02)	<ul style="list-style-type: none"> 火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。 									

第4表 影響事象分析表(水理(H)) (1/2)*1

影響元 先	影響	固化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
水理	廃棄体	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、埋設設備内の水理特性及び化学特性に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、難透水性覆土及び下部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、難透水性覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、岩盤内の水理、化学特性に関係し、岩盤の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、岩盤内の水理、化学特性に関係し、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	
	充填材								
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	
	難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	
	上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	
			<ul style="list-style-type: none"> ・上部覆土の地下水流動(XH02)に伴う難透水性覆土及び下部覆土の流出(BM05)に関しては、上部覆土内の地下水流速が十分に小さいことから、影響は生じない。 						
	岩盤・地下水 (地下水流、水理特性)	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、埋設設備内の水理特性及び化学特性に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、難透水性覆土及び下部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、難透水性覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、上部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、上部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、自身の水理特性及び化学特性に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、自身の水理特性及び化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	
			<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の地下水流動(RH02)に伴う難透水性覆土及び下部覆土の流出(BM05)に関しては、岩盤の地下水流速が十分に小さいことから、影響は生じない。 						
	自然事象	火砕物密度流(NP02)	<ul style="list-style-type: none"> ・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。 						
		断層活動(変形)(NP01)	<ul style="list-style-type: none"> ・断層活動による変形は、出戸西方断層の活動による地盤の傾斜を想定しているが、同断層の規模や平均変位速度を考慮した地表変位を仮定した場合でも、廃棄物埋設地における地盤傾斜は0.1%未満と推定されるため、水理的な影響は生じない。 						
地震(NP01)		<ul style="list-style-type: none"> ・地震動による地下水流動(WH02, CH02, BH02, XH02, RH02)の変化は一時的であり、水理的な影響は生じない。 							
液状化(覆土)(NP01)		<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、埋設設備内の地下水流動(WH02, CH02)に変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土及び下部覆土内の間隙水圧が一時的に変化するなど、難透水性覆土及び下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、地下水流動(BH02)に変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、上部覆土内の間隙水圧が一時的に変化するなど、下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、地下水流動(XH02)に変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・N値50以上の岩盤であるため、影響は生じない。 		

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第4表 影響事象分析表(水理(H)) (2/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
自然事象	隆起 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 隆起及び海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、難透水性覆土及び下部覆土内の地下水流動 (BH02) が変化することで、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) が変化することで、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、岩盤の地下水流動 (RH02) が変化することで、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
	海水準変動 (NP04)							
	気温、降水量・蒸発散量、かん養量、地下水位 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) も変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、難透水性覆土及び下部覆土内の地下水流動 (BH02) も変化することで、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) も変化することで、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 気候変動により地盤へのかん養量の変化しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、廃棄物埋設地近傍の岩盤の地下水流動 (RH02) も変化することで、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
	侵食 (NP03)	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには埋設設備が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) も変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには難透水性覆土及び下部覆土が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、難透水性覆土及び下部覆土の地下水流動 (BH02) も変化することで、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには上部覆土が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) も変化することで、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により廃棄物埋設地周辺の地形が変化した場合においても、廃棄物埋設地近傍の岩盤の低透水性に影響は生じない。ただし、岩盤が侵食されることにより、移行距離が短くなることは考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により廃棄物埋設地周辺の地形が変化し、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、岩盤の地下水流動 (RH02) も変化することで、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
	風化 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響をうけるのは、将来数万年後の地表に近接時であるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、難透水性覆土及び下部覆土が風化の影響をうけるのは、将来数万年後の地表に近接時であるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の浅い部分が物理的・化学的風化により、地化学環境が変化し、水理特性 (XH01)、地下水流動 (XH02) が変化する可能性があるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の水理的な影響に包含されるため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響をうけるのは、将来数万年後の地表に近接時で、設置岩盤は更に深い位置にあるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
	生物化学的現象 (SE03)	<ul style="list-style-type: none"> 埋設設備まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 微生物活動によって水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土及び下部覆土まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土表面は、樹木に覆われて樹木の根 (SE03) が上部覆土内に伸長することが推定されるが、その長さは3m程度で浅く、地下水位との関係から、地下水位以深における上部覆土の透水性への影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
	津波 (隕石落下)	<ul style="list-style-type: none"> 巨大津波に伴う地下水流動への影響は一時的なものであり、水理的な影響は無視できる。 						
透水性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 各項目参照 							

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第5表 影響事象分析表(力学(M)) (1/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
力学	廃棄体	・金属廃棄物及び容器の腐食(WC05)膨張及びガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、廃棄体領域の力学特性(WM01)を考慮すると、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)が生じる可能性があり、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・金属廃棄物及び容器の腐食(WC05)膨張及びガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、難透水性覆土及び下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じることで、密度低下が生じ、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・金属廃棄物及び容器の腐食(WC05)膨張及びガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じる可能性があり、難透水性覆土の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・埋設設備の上部に設置され、十分な厚さがあることから、廃棄体層の力学特性(WM01)、応力(WM02)、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)による影響は無視できる。		・安定な岩盤に設置されることから、廃棄体層の力学特性(WM01)、応力(WM02)、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)による影響は無視できる。		
	充填材								
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	・鉄筋の腐食(CC05)膨張及びガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)が生じる可能性があり、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・鉄筋の腐食(CC05)膨張及びガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、難透水性覆土及び下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じることで、密度低下が生じ、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・鉄筋の腐食(CC05)膨張及びガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)が生じる可能性があり、難透水性覆土の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・埋設設備の上部に設置され、十分な厚さがあることから、コンクリートの力学特性(CM01)、応力(CM02)、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)による影響は無視できる。			・安定な岩盤に設置されることから、コンクリートの力学特性(CM01)、応力(CM02)、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)による影響は無視できる。	
	難透水性覆土、下部覆土	・難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、自身の低透水性に影響するものである。	・難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、自身の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・難透水性覆土及び下部覆土の上部に設置され、十分な厚さがあることから、難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)による影響は無視できる。			・安定な岩盤に設置されることから、難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)による影響は無視できる。	
		・難透水性覆土及び下部覆土は、地下水により飽和し膨潤することによる応力(BM02)が発生するが、周辺の地圧等と比較してその膨潤圧は小さいため、影響は生じない。							
	上部覆土	・上部覆土の力学特性(XM01)及び応力(XM02)の状態から、セメント系材料の収着性に影響は生じない。	・上部覆土の上載圧(応力(XM02))による難透水性覆土及び下部覆土の圧密沈下による変形(BM04)が生じる可能性があるが、透水係数が小さくなる方向であり、影響は生じない。	・上部覆土の力学特性(XM01)及び応力(XM02)の状態から、難透水性覆土の収着性への影響は生じない。	・上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)は、自身の低透水性に影響するものである。	・上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)は、自身の水理特性、化学特性が変化することで、収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)		・安定な岩盤に設置されることから、上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)による影響は無視できる。	
	岩盤・地下水(地圧・水圧)	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、セメント系材料の収着性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、難透水性覆土の収着性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、上部覆土の低透水性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、上部覆土の収着性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)、応力(RM02)、破壊とひび割れ(RM03)、変形(RM04)は、自身の低透水性に影響するものである。	・岩盤の力学特性(RM01)、応力(RM02)、破壊とひび割れ(RM03)、変形(RM04)は、自身の水理特性、化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	
			・掘削時の岩盤の応力(RM02)開放によって岩盤のEDZが進展し、流出(BM05)が生じる可能性があるが、応力開放は小さくEDZの進展は生じないため、影響は生じない。						

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第5表 影響事象分析表(力学(M)) (2/2)*1

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
力学	自然事象	降下火砕物 (NP02)	・覆土上に降下火砕物が堆積する可能性があるが、その層厚は2m以下と推定されるため、影響は生じない。						
		火砕物密度流 (NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。						
		断層活動(変形) (NP01)	・断層活動による変形は、出戸西方断層の活動による地盤の傾斜を想定しているが、同断層の規模や平均変位速度を考慮した地表変位を仮定した場合でも、廃棄物埋設地における地盤傾斜は0.1%未満と推定され、傾斜にともなう応力(WM02)発生による影響は生じない。						
		地震(NP01)	・地震によって埋設設備内が変形(CM04)・損傷しても、埋設設備の収着性への影響は生じない。	・地震によって、難透水性覆土及び下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)することによって、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって難透水性覆土及び下部覆土が変形(BM04)しても、難透水性覆土の収着性への影響は生じない。	・地震によって、上部覆土に応力(XM02)が発生し、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)することによって、上部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって上部覆土が変形(BM04)・損傷しても、上部覆土の収着性への影響は生じない。	・地震によって、岩盤に応力(XM02)が発生し、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)することによって、岩盤の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって岩盤が変形(BM04)・損傷しても、上部覆土の収着性への影響は生じない。
		液状化(覆土) (NP01)	・液状化(覆土)の発生により、埋設設備内の地下水流動(WH02, CH02)に変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。(→化学：地下水との反応)	・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土及び下部覆土の密度、間隙率等に変化が生じ、難透水性覆土及び下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土及び覆土内の地下水流動(BH02)に変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。(→化学：地下水との反応)	・液状化(覆土)の発生により、下部覆土の密度、間隙率等に変化が生じ、下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化(覆土)の発生により、下部覆土内の地下水流動(XH02)に変化が生じ、下部覆土の収着性に影響する可能性がある。(→化学：地下水との反応)	・N値50以上の岩盤であるため、液状化(覆土)の発生は考え難く、影響は生じない。	・N値50以上の岩盤であるため、液状化(覆土)の発生は考え難く、影響は生じない。
		侵食(NP03)	・コンクリートが侵食され、喪失した場合は、セメント系材料の全ての機能に影響する可能性がある。	・難透水性覆土及び下部覆土が侵食され、喪失した場合は、難透水性覆土及び下部覆土の全ての機能に影響する可能性がある。	・上部覆土が侵食され、喪失した場合は、覆土の全ての機能に影響する可能性がある。	・岩盤が侵食され、喪失した場合は、岩盤の全ての機能に影響する可能性がある。			
風化(NP04)	・風化によって上部覆土及び岩盤の空隙構造等が変化することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の力学的影響に包含されるため、影響は無視できる。								

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第6表 影響事象分析表(化学(C)) (1/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
化学	廃棄体、充填材	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が上部覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)
		<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化する可能性があるが、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化する可能性があるが、上部覆土の透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化する可能性があるが、低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、収着性に影響する可能性がある。
		<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある(有機物影響(WC09))。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成する可能性がある(有機物影響(BC09))が、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある(有機物影響(BC09))。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成する可能性がある(有機物影響(XC09))が、上部覆土の透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある(有機物影響(XC09))。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成する可能性がある(有機物影響(RC09))が、低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成し、収着性に影響する可能性がある(有機物影響(RC09))。
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))がセメント系材料の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))が覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)
		<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化する可能性があるが、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化する可能性があるが、透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化する可能性があるが、低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、収着性に影響する可能性がある。
	難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> ・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が各部材の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)
上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> ・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が各部材の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> ・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第6表 影響事象分析表(化学(C)) (2/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)		
化学	岩盤・地下水	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))がセメント系材料の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))が上部覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)		
	各部材共通	・微生物の活動に(微生物影響(WC08, CC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進、放射性物質の化学特性の変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・微生物の活動(微生物影響(BC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性があるが、その他の化学的影響に包含されるため、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性への影響は無視できる。	・微生物の活動(微生物影響(BC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。	・微生物の活動(微生物影響(XC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性があるが、その他の化学的影響に包含されるため、上部覆土の低透水性への影響は無視できる。	・微生物の活動(微生物影響(XC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・微生物の活動(微生物影響(RC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性があるが、その他の化学的影響に包含されるため、上部覆土の低透水性への影響は無視できる。	・微生物の活動(微生物影響(RC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。		
		・間隙水中でコロイド形成(WC10, CC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。	・間隙水中でのコロイド形成(BC10)は、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・間隙水中でコロイド形成(BC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。	・間隙水中でのコロイド形成(XC10)は、上部覆土の透水性に影響は生じない。	・間隙水中でコロイド形成(XC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。	・間隙水中でのコロイド形成(RC10)は、低透水性に影響は生じない。	・間隙水中でコロイド形成(RC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。		
		・地下水(間隙水)の放射線分解(WR02, CR02, BR02, XR02, RR02)によって、ガスが発生する可能性はあるが、廃棄体の放射線量は小さく、影響は無視できる。								
	自然事象	降下火砕物(NP02)	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。			・上部覆土は、降下火砕物の溶出成分により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・上部覆土は、降下火砕物からの溶出成分により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。		
		火砕物密度流(NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。							
		表流水・地下水の水質(NP02)	・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。			・上部覆土は、酸性雨により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・上部覆土は、酸性雨により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。		
			・地下水の水質は「岩盤・地下水」参照							
		風化(NP02)	・風化によって上部覆土及び岩盤の鉱物の変質が考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。							
	生物学的現象	・「微生物影響」参照。								
津波(隕石落下)	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。									

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

4. 参考文献

- (1) Nuclear Energy Agency(2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database
- (2) Nuclear Energy Agency(2006): The NEA International FEP Database: Version2.1
- (3) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会(平成15年): 廃棄物安全小委員会報告書－高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて－
- (4) International Atomic Energy Agency(2004): Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Results of a coordinated research project
- (5) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－

影響評価により影響なしと判断した根拠

目 次

1. ガス発生の影響.....	1
(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理.....	2
(2) ベントナイト混合土を用いた室内試験（透気・透水試験）によるガス発生の影響評価.....	8
(3) 廃棄物埋設地におけるガス発生影響について.....	13
(4) まとめ.....	15
2. 地震の影響.....	16
3. 液状化(覆土)の影響.....	17
4. コロイド影響.....	19
5. 微生物影響.....	19
6. 降下火砕物(化学)の影響.....	19
7. 参考文献.....	21

1. ガス発生の影響

埋設設備内に含まれる金属の腐食及び有機物の分解に伴いガスが発生する。ガスの発生により埋設設備内のガス圧が上昇し、ガスが移行することで、覆土の変形・損傷に伴い透水係数が増加するおそれがある。

廃棄物埋設地において発生し得るガスの大部分は、廃棄体層に存在する金属が水と接触して腐食することにより発生する水素ガスである。基本的には、発生したガスが埋設設備内に充満することにより、地下水の浸入が抑制され、金属腐食の進展が滞ることから、大きなガス圧が覆土に作用することは考え難い。また、難透水性覆土はベントナイトの膨張に起因する自己修復性を持つ土質系材料であり、上載圧による拘束も作用していることから、仮にガスによって変形・損傷を受けた場合においても、元の状態が復元されると想定できる。そのため、覆土に対するガス発生の影響はその他の力学的影響に比べ軽微であると考えられる。

しかしながら、上記の考えには廃棄物埋設地の持つ不均質性などによる不確実性を含むことから、ガス発生の影響に対して定量的な判断を実施するため、以下の手順により検討を行う。

- ・ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理
- ・ベントナイト混合土を用いた室内試験（透気・透水試験）によるガス発生の影響評価
- ・実際の廃棄物埋設地におけるガス発生影響の検討

(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理

(i) ガスの発生速度

a. 覆土完了までの期間

外周仕切設備・覆いコンクリートに対する材料・施工に係る品質管理により防水対策を施すこと、ポーラスコンクリート層に接続した排水管を通じて排水を行うことから、周辺から廃棄体層に浸入する水の量は極めて少ない。このため、この期間における廃棄体層からのガス発生は無視できる。

b. 覆土完了後（排水・監視設備による排水の終了後）

排水・監視設備による排水の終了後は、周辺の地下水が埋設設備の内部に浸入し、廃棄体層に到達すると考えられる。このため、ガスの発生を想定し検討する必要がある。

埋設設備はセメント系材料によって構成されている。その間隙水には、セメントの主成分である水酸化カルシウムが飽和するまで溶解し、微量成分のナトリウムやカリウムが溶解することから、pH12.5～pH13、水温 15℃程度となる。廃棄体内に分別除去後に少量残存し得るアルミニウムと、高い pH であるセメント系材料中の間隙水が反応することにより、水素ガスが発生する。埋設設備内の環境に近い条件におけるアルミニウムの腐食速度は、藤原らの報告⁽¹⁾によれば、pH11.5～pH12.5、水温 15℃の条件においては 10 μm/y 以下の値で推移し、1 μm/y 以下まで低下することが知られている。

また、廣永らの報告⁽²⁾によると、pH12.5～pH13 と想定されるモルタル粉砕粒子共存中での水温 15℃におけるアルミニウムの腐食速度は、100 μm/y 以下まで 3 週間程度で低下し、最終的に 10 μm/y に達するとされている。埋設設備に浸入した地下水は、外周仕切設備の鉄筋に接触して、金属の腐食（酸素消費型）が生じることで溶存酸素が消費され、嫌气的条件となるが、この地下水が廃棄体容器の内部に浸入して、廃棄体層内が嫌气的条件になると、鉄の嫌気性腐食に伴う水素ガスも発生する。鉄の嫌気性腐食速度については、廣永らの報告⁽²⁾によると、pH12.4、水温 15℃においては 0.002 μm/y 程度と考えられる。

覆土完了後における埋設設備全体から発生するガスの量としては、廃棄体層から発生する水素ガスの量に加え、鉄筋コンクリート中の鉄筋の嫌気性腐食に伴い発生する水素ガスの量を加味する必要がある。

よって、ガス発生量はアルミニウムのアルカリ腐食と鉄の嫌気性腐食を考慮する。

1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩によるガスの発生速度への影響があると考えられる。廃棄物埋設地におけるガスの発生量の評価においては、可溶性塩の存在により腐食速度が変化することを考慮する。

(ii) ガスの発生量

既往知見⁽²⁾⁽³⁾により整理された pH12.5～pH13.0 及び水温 15℃～45℃の条件での腐食速度試験の結果に基づいて、アルミニウムの腐食速度を $30\mu\text{m}/\text{y}$ (極薄物については、1年以内に全量腐食すると設定)、鉄の腐食速度を $0.01\mu\text{m}/\text{y}$ と設定して2号廃棄物埋設地を対象に評価したガス発生量を第1表及び第1図に示す。埋設設備1基当たり1年間に発生するガスの量は、標準状態において最大 $500\text{Nm}^3/\text{y}$ であると評価されている。

3号廃棄物埋設地においては、埋設設備1基当たり埋設可能な廃棄体本数が2号廃棄物埋設地の約2倍 (26,400本/12,960本=2.04) であることから、同様な考え方に基づくくと、埋設設備1基当たり最大で $1,000\text{Nm}^3/\text{y}$ (埋設設備 1m^3 当たり $0.064\text{m}^3/\text{y}$) と算定できる。ここで、3号廃棄物埋設地においては、埋設する廃棄体種類が2号廃棄物埋設地と同じであり、3号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 ($0.064\text{m}^3/\text{y}$) は、2号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 ($0.054\text{m}^3/\text{y}$) とほぼ同等である。

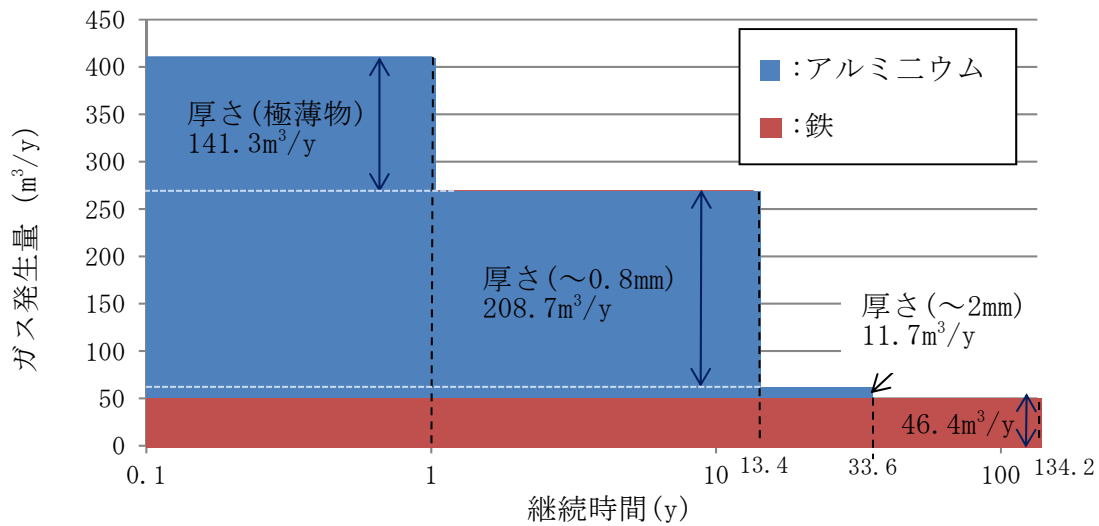
1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩によるガスの発生量への影響が生じる。廃棄物埋設地におけるガスの総発生量は、埋設される廃棄体に含まれる金属の量と正の相関を持つ。均質・均一固化体に含まれる金属量は、充填固化体に含まれる金属量に比べ非常に少ないため、1号埋設設備のうち充填固化体を埋設する埋設設備を対象に、可溶性塩による影響を考慮したガス発生量を評価する。1号廃棄物埋設地に埋設される充填固化体の重量は、3号廃棄物埋設地に埋設される充填固化体の重量の半分程度であることを考慮して、第1図を参考にガス発生量を評価した。その結果、可溶性塩の存在により鉄の腐食速度が仮に10倍程度⁽⁴⁾⁽⁵⁾になったとしても、ガス発生について支配的であるアルミニウムの腐食速度は大きく変化しない⁽⁶⁾ことから、2号及び3号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 (2号: $0.054\text{m}^3/\text{y}$ 、3号: $0.064\text{m}^3/\text{y}$) は、1号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 ($0.053\text{m}^3/\text{y}$) とほぼ同等である。

以上のことから、1号廃棄物埋設地における可溶性塩の影響を考慮しても、3号廃棄物埋設地におけるガス発生による影響評価で代表できるといえる。

第1表 2号廃棄物埋設地の埋設設備1基当たりガス発生量の内訳⁽³⁾

	鉄	アルミニウム			合計
		極薄物	~0.8mm	~2mm	
ガス発生量	46.4m ³ /y	141.3m ³ /y ^{*1}	208.7m ³ /y	11.7m ³ /y	408.1m ³ /y
継続時間	考慮せず	1y ^{*1}	13.4y	33.6y	134.2y

*1: 厚さ数10μmの極薄物については、1年以内に全量腐食するものとした。

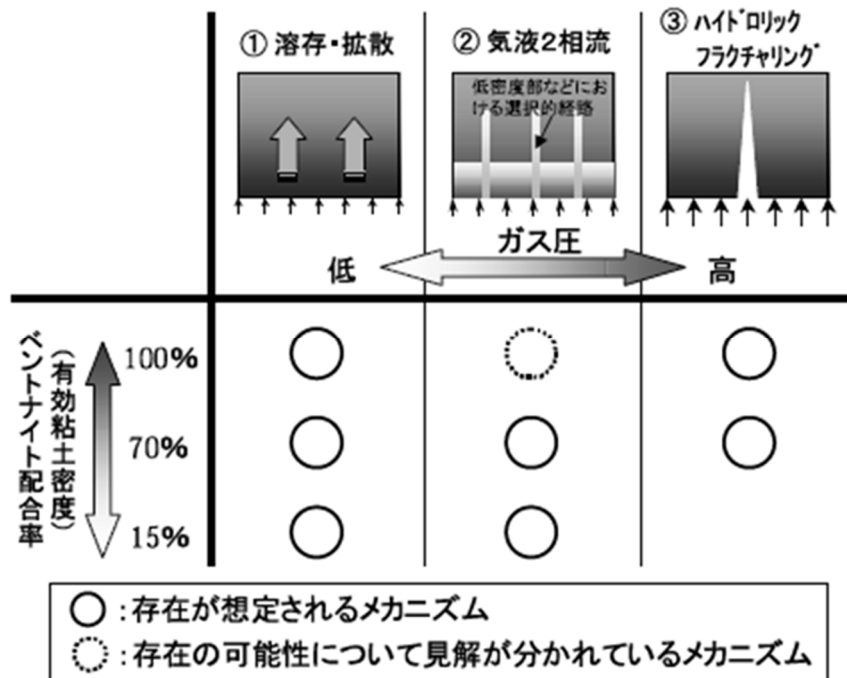


第1図 2号廃棄物埋設地の埋設設備1基当たりガス発生量の経時変化

(iii) ベントナイト系材料中のガス移行メカニズム

藤山ら⁽⁷⁾は、例えば Graham ら⁽⁸⁾及び Hoch ら⁽⁹⁾による文献及び各種データを調査・整理し、飽和ベントナイト系材料中のガス移行メカニズムに対して第2図に示す概念図を提示し、以下のようにとりまとめた。

- ① 間隙水中のガスの溶存・拡散による移行。
- ② 気液2相流によるガス移行。密度が相対的に低い部分等において、選択的な経路を形成する可能性が高いと想定される。
- ③ ハイドロリックフラクチャリングによる卓越流路の形成を伴うガス移行。
- ④ ①～③の共存。ベントナイト配合率が高く（有効粘土密度が大きい）、かつガス圧力が高いほど、③の挙動が支配的であり、低いと①②の挙動が支配的である。



第2図 飽和ベントナイト系材料のガス移行メカニズム（概念図）⁽⁷⁾

ガス移行メカニズムのうち②気液2相流と③ハイドロリックフラクチャリングについて、田中ら⁽¹⁰⁾による室内試験の試験体内部の応力状態に着目した考察は以下のとおりである。また、ガス移行メカニズムを説明するための概念図を第3図に示す。

a. 気液 2 相流によるガス移行

ガス発生と埋設設備内のガス移行に伴い、ベントナイト混合土にガス圧がかかる。ガス圧がベントナイト混合土中の間隙水圧を超えた際、ガスは間隙水を押し出す様にベントナイト混合土内に侵入する。同時に、押された間隙水は一時的に圧縮されることから、間隙水圧が上昇し、ガス圧とつり合うことでガスの侵入を抑制させる。その後、一時的に上昇した間隙水圧は徐々に消散し、ガス圧よりも小さくなると、再度、ガスが侵入する。この侵入と抑制を繰り返すことによってベントナイト混合土内をガスが移行する。ここでは、このメカニズムによってガスが移行する現象を「破過」と定義する。

破過が生じる場合は、ベントナイト混合土内で過剰間隙水圧が発生することから、ガス圧は常に軸方向全応力より小さい値となる。

b. ハイドロリックフラクチャリングによるガス移行

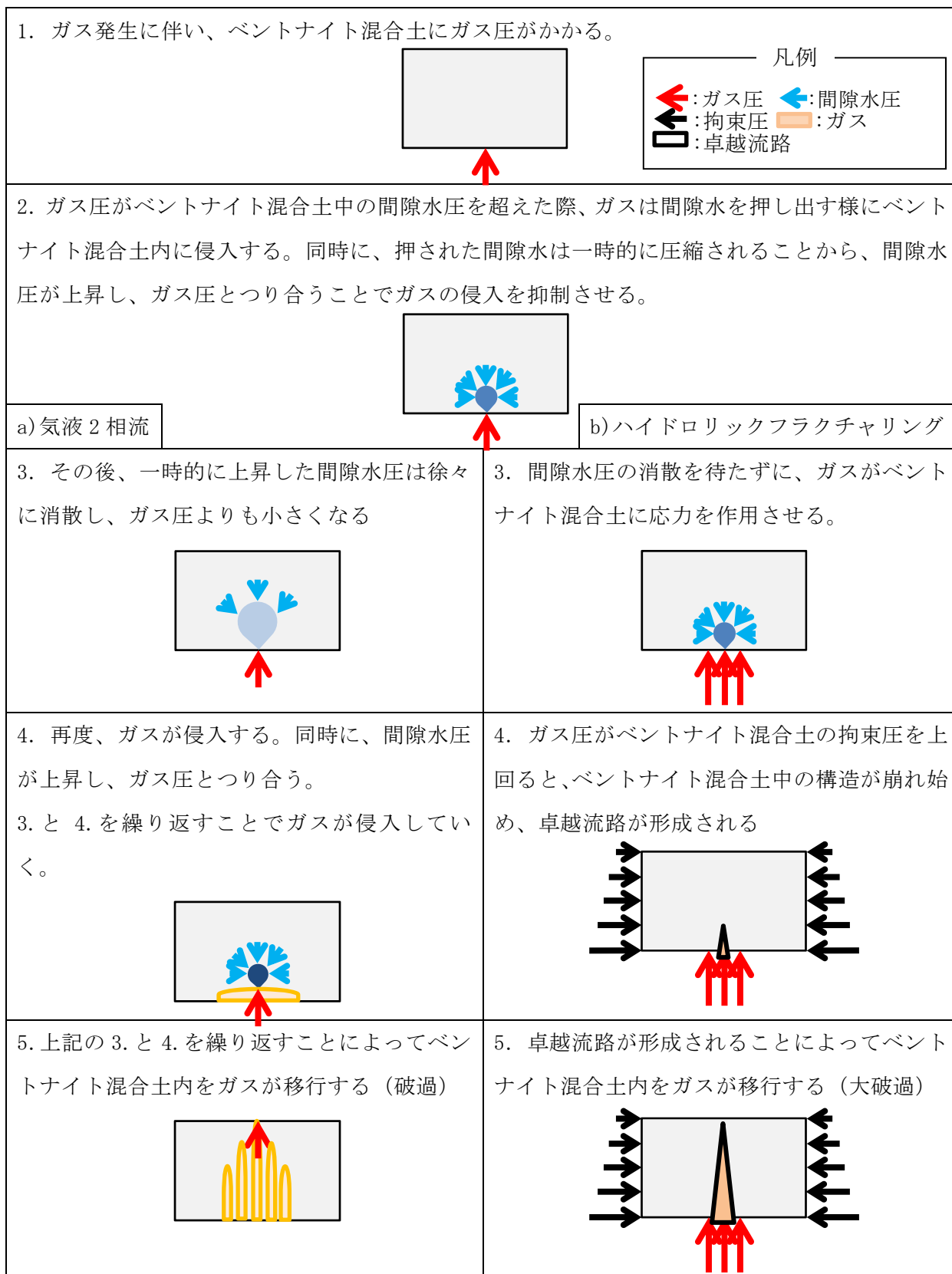
ガス発生と埋設設備内のガス移行に伴い、ベントナイト混合土にガス圧がかかる。ガスの昇圧速度（発生速度）が早い場合、気液 2 相流のガス移行で説明される間隙水圧の消散を待たずに、ガスがベントナイト混合土に応力を作用させることとなる。そのガス圧がベントナイト混合土の拘束圧を上回ると、ベントナイト混合土中の構造が崩れ始め、卓越流路が形成されることで、そこをガスが大量に通過する。ここでは、このメカニズムによってガスが移行する現象を「大破過」と定義する。

大破過が生じる場合は、ガス圧が直接的にベントナイト混合土内を伝達されることから、ガスの昇圧に伴いガス圧は軸方向全応力と等しい値となる。

c. その他の補足知見

周辺材料の剛性が相対的に高く、水平方向の応力分散を妨げるような状況である場合には、水平方向の圧力が蓄積されることで拘束圧が擬似的に増加することとなり、ガス移行に際してはより高い圧力が生じる。

以上のことから、①溶存・拡散を除くガス移行メカニズムは、ベントナイト混合土内における間隙水圧の消散速度とガスの昇圧速度（発生速度）の大小関係により、②気液 2 相流（破過）あるいは③ハイドロリックフラクチャリング（大破過）に分類される。ガス破過は破過と大破過の双方を指す。



第 3 図 時系列によるガス移行メカニズムの概念図

(2) ベントナイト混合土を用いた室内試験（透気・透水試験）によるガス発生の影響評価
埋設設備内のガス圧が上昇することを考慮して、難透水性覆土の透水係数への影響につ
いて検討を行う。

ベントナイト配合率 20wt%～30wt%の Ca 型ベントナイト混合土を用いて透気・透水試験
を行った。

なお、難透水性覆土として Na 型ベントナイト混合土を用いることも考えられるため、
ベントナイト配合率 15wt%～20wt%の Na 型ベントナイト混合土における同様の試験を実施
した結果を以下に示す。

(i) Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性（田中ら⁽¹⁰⁾、大石ら⁽¹¹⁾）

Ca 型ベントナイト混合土（難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 20wt%～30wt%）の
透水・透気試験の試験条件及び試験結果を第 2 表に、ガス移行試験装置を第 4 図に、透
気試験における圧力、応力及び排気量を第 5 図に、ガス破過前後の Ca 型ベントナイト
混合土（難透水性覆土相当）に対する透水係数の比較を第 6 図に示す。なお、第 6 図にお
ける数値中の E は、指数表記における基数の 10 を示す（例えば、1E+02 は 1×10^2 を示
す。以下、同様。）。

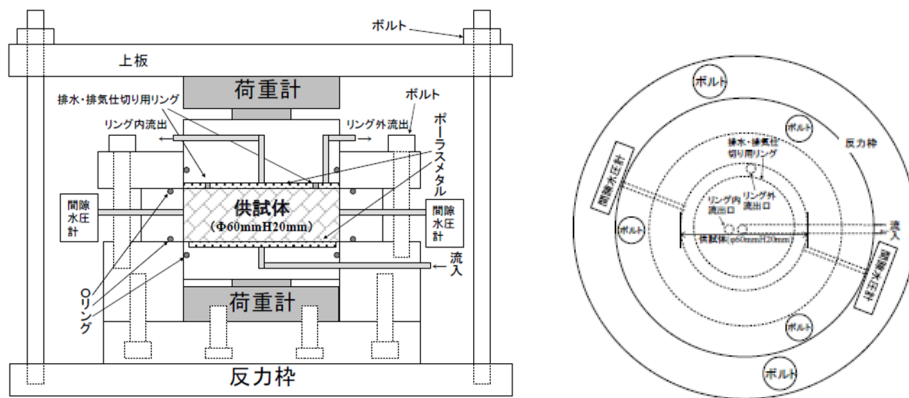
供試体の拘束圧は、廃棄物埋設地の難透水性覆土に対する有効土被り圧相当である約
0.15MPa とした。昇圧速度は、廃棄物埋設地で発生するガスの発生量を用いて、覆土へ
の影響が大きくなるよう、埋設設備内の空隙における圧力の増加量を保守的に大きく設
定し、0.04MPa/30min とした。

これらの図表からわかるように、Ca 型ベントナイト混合土（難透水性覆土相当）の透
気後の透水試験において、配合率 30wt%の場合はガス破過前後で透水係数が 2.3×10^{-11}
 $\text{m/s} \sim 5.7 \times 10^{-11} \text{m/s}$ から $1.9 \times 10^{-11} \text{m/s} \sim 3.9 \times 10^{-11} \text{m/s}$ に、配合率 20wt%の場合は
 $3.2 \times 10^{-10} \text{m/s} \sim 4.2 \times 10^{-10} \text{m/s}$ から $2.2 \times 10^{-10} \text{m/s} \sim 3.6 \times 10^{-10} \text{m/s}$ に変化するが、ベント
ナイトの配合率や拘束条件によらず、ガス破過前後の透水係数に大きな変化は見られな
かった。

第2表 ベントナイト混合土の透水・透気試験の試験条件及び試験結果

		No. 1 ⁽¹⁰⁾	No. 2 ⁽¹⁰⁾	No. 3 ⁽¹¹⁾	No. 4 ⁽¹¹⁾	No. 5 ⁽¹⁰⁾	No. 6 ⁽¹⁰⁾
Ca型ベントナイト配合率(wt%)		30	30	20	20	20	20
購入砂配合率(wt%)		70	70	80	80	80	80
吸水膨潤時拘束条件 ^{*1}		変位拘束	0.16MPa	0.14MPa	0.14MPa	変位拘束	0.15MPa
昇圧条件		急速载荷：0.04MPa/30min					
有効破過圧(MPa)	外側	-	-	0.087	0.044	0.09	-
	内側	0.76	0.25	0.123	0.120	-	0.09
有効大破過圧(MPa)	両側	1.25	0.85	0.166	0.138	0.22	0.21
ガス破過前の透水係数(m/s)		2.3×10^{-11}	5.7×10^{-11}	3.9×10^{-10}	4.2×10^{-10}	3.2×10^{-10}	3.2×10^{-10}
ガス破過後の透水係数(m/s)		1.9×10^{-11}	3.9×10^{-11}	3.0×10^{-10}	3.6×10^{-10}	2.2×10^{-10}	3.2×10^{-10}

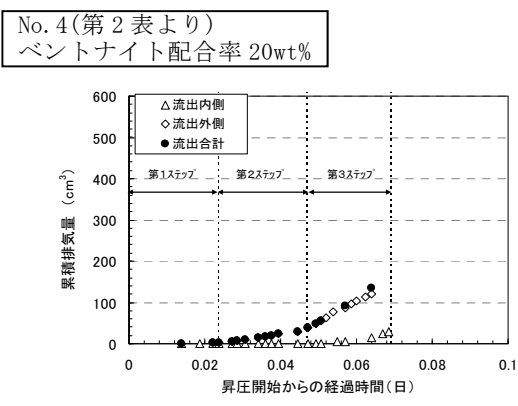
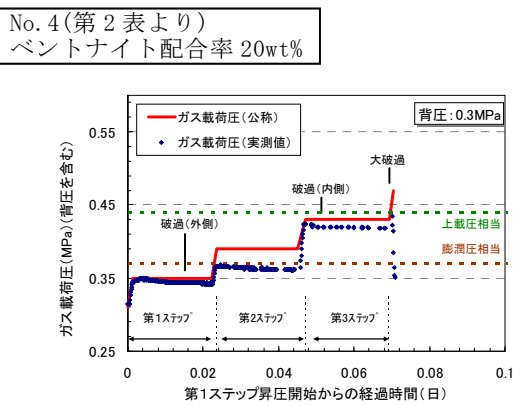
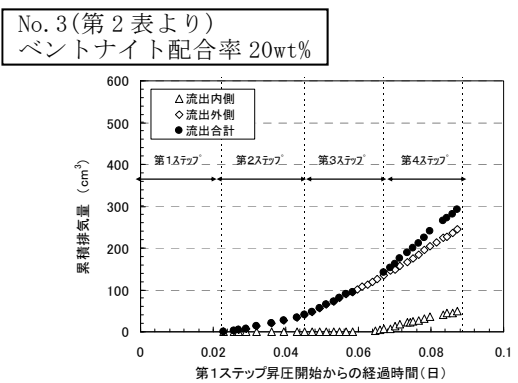
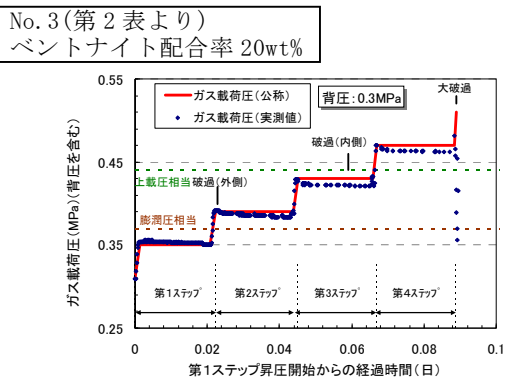
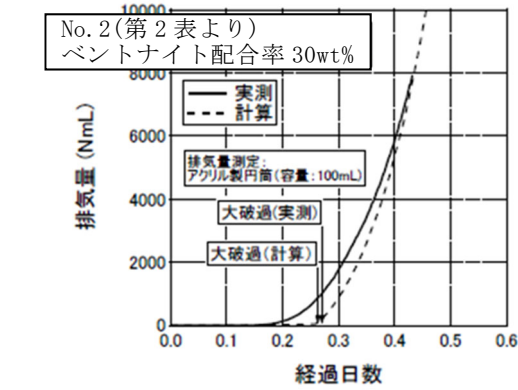
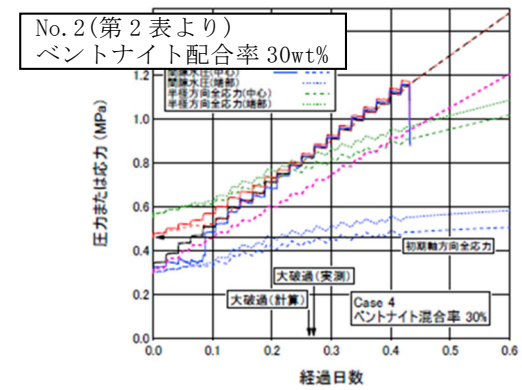
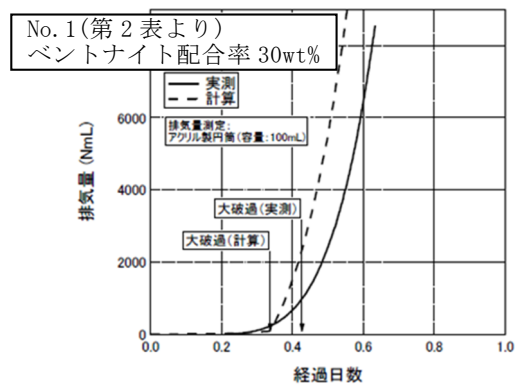
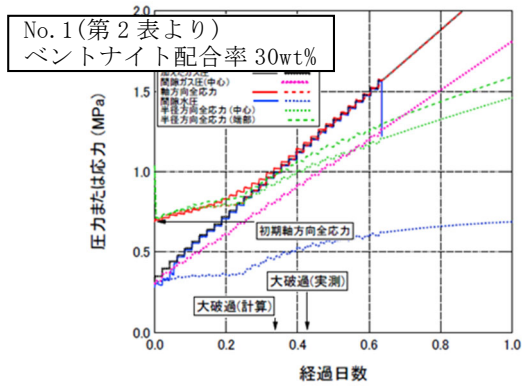
*1:「変位拘束」は軸方向変位を固定した状態で試料を膨潤させたことを、それ以外は軸方向有効圧力一定(有効土被り圧相当である約0.15MPa)で試料を膨潤させたことを示す。



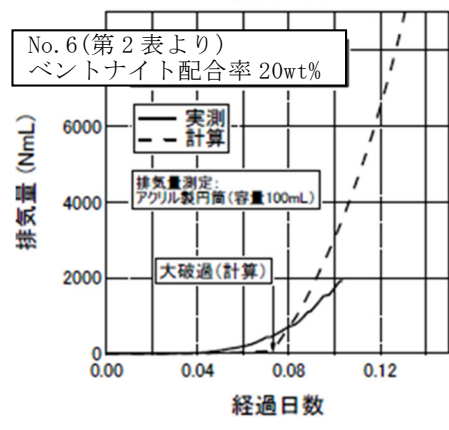
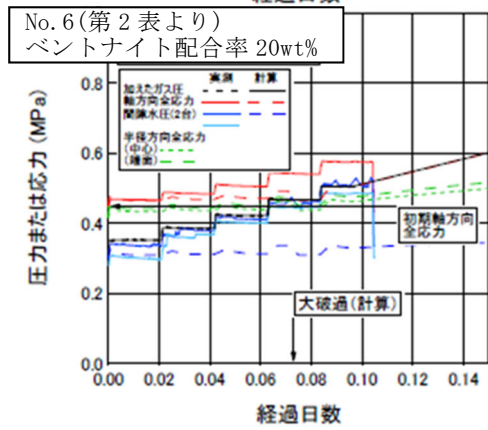
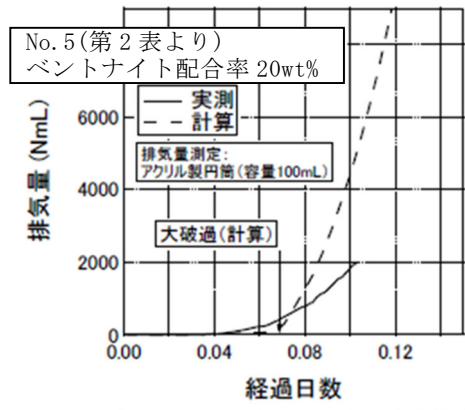
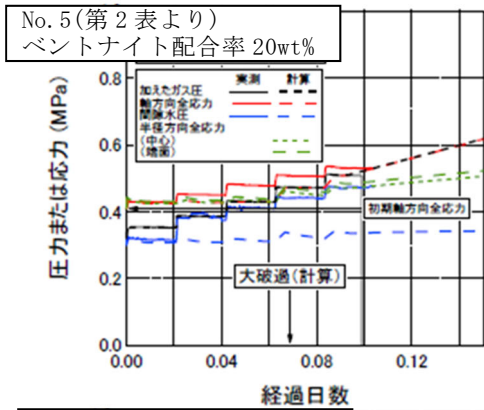
軸方向断面図

半径方向断面図

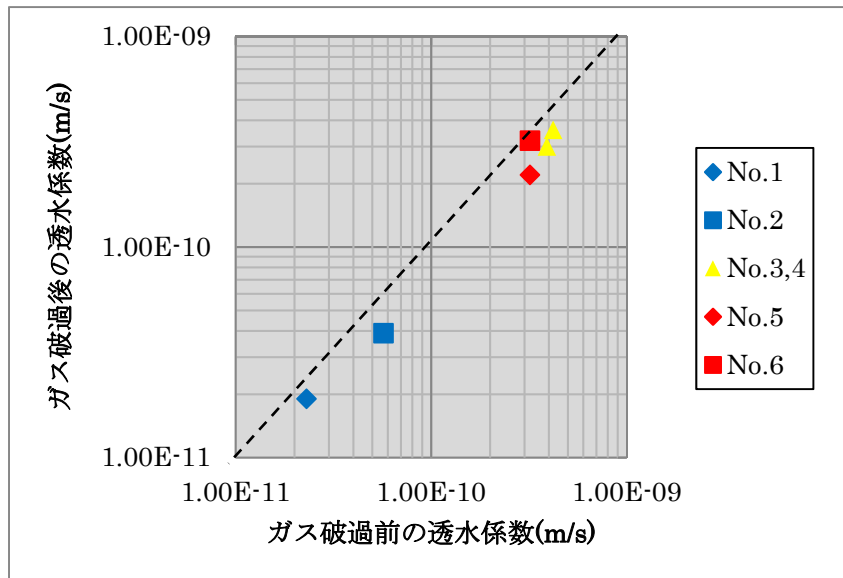
第4図 ガス移行試験装置⁽¹⁰⁾



第5図 透気試験における圧力、応力及び排気量⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ (1/2)



第5図 透気試験における圧力、応力及び排気量⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ (2/2)

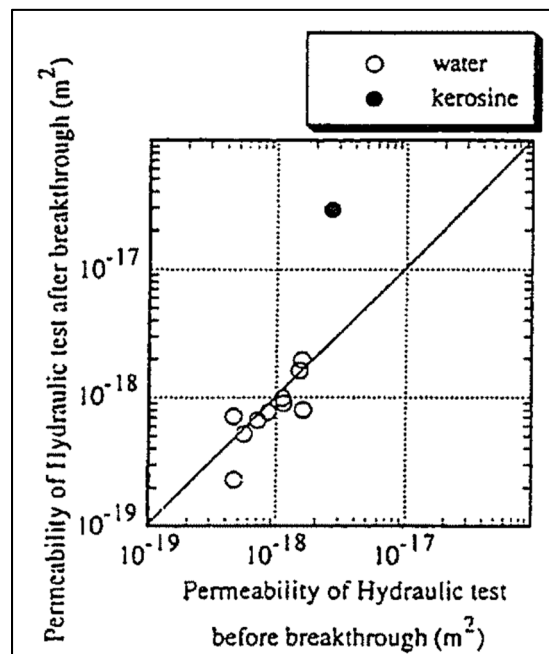


第6図 ガス破過前後のCa型ベントナイト混合土(難透水性覆土相当)の透水係数の比較⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

(ii) Na 型ベントナイト混合土のガス移行特性(穂刈ら⁽¹²⁾)

Na 型ベントナイト混合土(代替可能性のある難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 15wt%~20wt%)のガス破過前後のベントナイト混合土に対する浸透率の比較を第 7 図に示す。

この図からわかるように、Na 型ベントナイト混合土(代替可能性のある難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 15wt%~20wt%)の透気後の透水試験において、ベントナイトの配合率によらず、ガス破過前後の浸透率(透水係数)に大きな変化は見られなかった。



第 7 図 ガス破過前後の透水試験における Na 型ベントナイト混合土の浸透率の比較⁽¹²⁾

(3) 廃棄物埋設地におけるガス発生影響について

廃棄物埋設地におけるガス発生影響について検討するため、田中ら⁽¹⁰⁾、大石ら⁽¹¹⁾が実施した室内試験結果の適用性に関して以下のとおり考察する。

(i) 室内試験結果の考察

a. ベントナイト配合率 30wt%のケース (No. 1 及び No. 2)

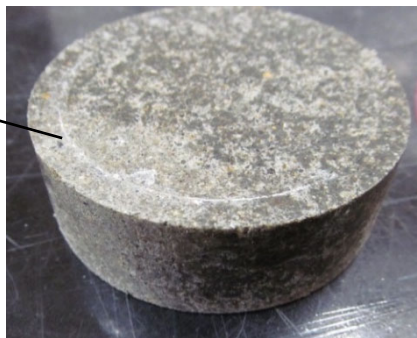
ベントナイト配合率 30wt%のケース (No. 1 及び No. 2) では、ガスの昇圧に伴いガス圧が軸方向全応力と等しい値となり、排気量が急激に増大する現象を確認できていることから、ガス圧の昇圧に伴い供試体にガスの透気方向に亀裂の発生などの損傷が生じている可能性が高い(③ハイドロリックフラクチャリング)。

この際、排気量の急増により 7Nm³ の容量のガスボンベ中のガスが全て透気し、加圧側ガス圧が背圧程度まで低下したことを確認している。廃棄物埋設地ではガス圧が上載荷重による拘束圧をやや超えたところで大破過が発生し、ガス圧の低下に伴い比較的速やかに大破過が収まるとすると、多量のガスを透気している本試験では卓越流路を通過するガスによるベントナイト流失といった損傷影響を保守的に大きく再現できていると考えられる。

なお、Ca 型ベントナイト混合土の室内試験結果 No. 1 及び No. 2 において、有効上載圧に対して大破過圧が倍以上に大きくなっている結果を示しているが、供試体周辺が剛性の高い鋼製材料に囲まれ、半径方向の応力分散を妨げるような状況であるため、半径方向の圧力が蓄積されることで拘束圧が擬似的に増加し、有効上載圧付近においても大破過に至らずガス圧が上昇したことによる。

参考として、同様の透気試験後にガス流路の拡張を目的として通気し続けた別試験⁽¹³⁾の試験後供試体を第 8 図に示す。透気試験においてはリング内外で大破過が認められているにも関わらず、供試体には目視できる損傷は確認できていない。

白く見える円形は
内外仕切り板の跡



第 8 図 気みち拡張後供試体の側部表面状態

b. ベントナイト配合率 20wt%のケース (No. 3～No. 6)

ベントナイト配合率 20wt%のケース (No. 5 及び No. 6) では、ガス圧は常に軸方向全応力より小さい値であり、排気量の急激な増大を確認し難いことから、明確な亀裂の発生などの損傷が生じていない可能性が高い(②気液 2 相流)。また、ベントナイト配合率 20%のケース (No. 3 及び No. 4) でも大破過に至る場合もあるが、試験結果より、透水係数に有意な影響がないことを確認している。

(ii) 試験結果から推定される廃棄物埋設地におけるガス移行メカニズムの考察

室内試験におけるガス移行メカニズムは、「(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見」で整理したメカニズムのうち、②気液 2 相流又は③ハイドロリックフラクチャリングであると推定される。前述のとおり、室内試験においてハイドロリックフラクチャリングが発生する際には、廃棄物埋設地に設置される難透水性覆土に比べ小さい供試体に対し、短時間で想定以上の量のガスが透気する。このため、「(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理」で整理したガス発生量(最大 1,000Nm³/y)を考慮すると、難透水性覆土へのガスの影響評価において、室内試験は廃棄物埋設地より厳しい条件での結果であると判断される。

(iii) 廃棄物埋設地におけるガス発生影響

室内試験においては、ガス破過前後の透水係数が変化しない結果を確認した。

廃棄物埋設地においては、室内試験に比べて大破過時に通過するガス量が少なく、昇圧速度が遅いことから、室内試験よりも影響が小さいと考えられる。

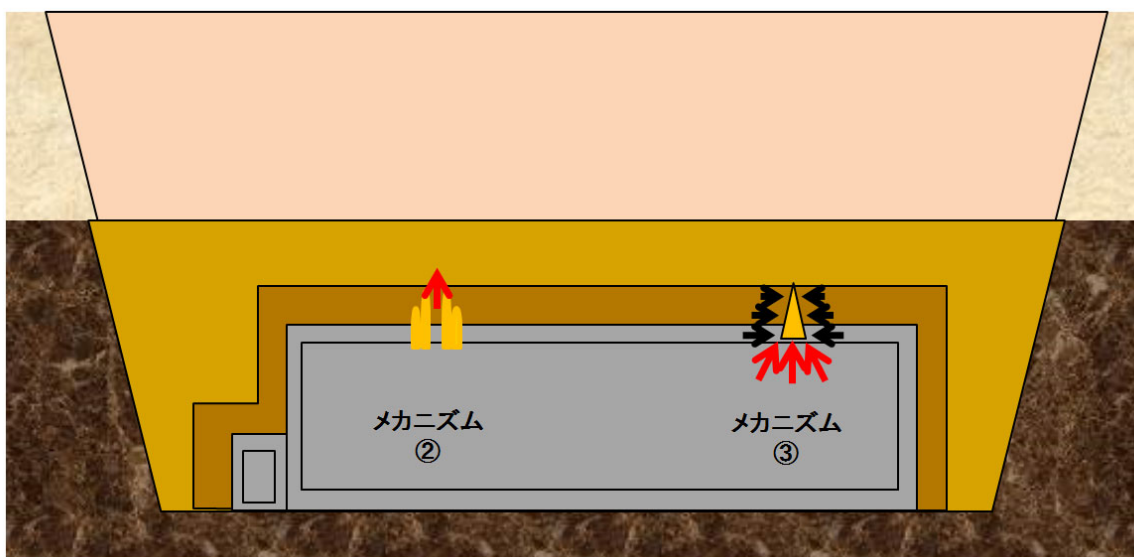
なお、下部覆土については、難透水性覆土の外側にあり、施工時点において確保する透水係数が難透水性覆土よりも 2 オーダー程度大きいため、難透水性覆土に比べて容易に水・ガスが移行すると考えられる。このため、下部覆土の低透水性に対するガス破過の影響は、難透水性覆土に対するその影響に包含されるものとする。

(4) まとめ

前項までで整理したように、想定されるガス移行メカニズムは、第2図に記載した3つのメカニズム(①溶存・拡散、②気液2相流、③ハイドロリックフラクチャリング)及びそれらの共存状態が考えられる。

第9図に示すように、廃棄物埋設地では上記のメカニズムが共存すると考えられるが、②の移行が生じる場合は、有効土被り圧よりも小さい圧力でガスの移行が生じ、③の移行が生じる場合でも、有効土被り圧と同等の圧力でガスの移行が生じる。また、②又は③の移行メカニズムでガス移行が生じているベントナイト混合土のガス破過後の透水試験において、ベントナイトの配合率や拘束条件によらず、ガス破過前後の透水係数に大きな変化は見られなかった。加えて、廃棄物埋設地においては、室内試験に比べて大破過時に通過するガス量が少なく、昇圧速度が遅い。よって、廃棄物埋設地においてガス破過によって透水係数の変化は生じないと考えられる。

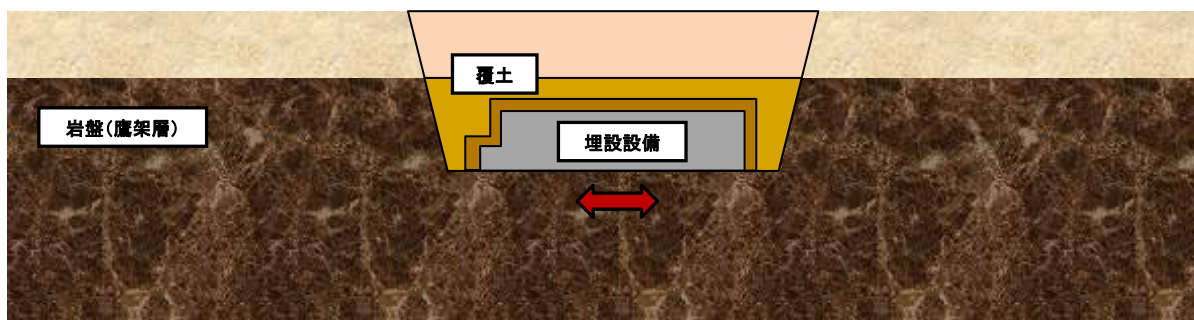
以上のことから、ガス発生による覆土の低透水性への影響は生じないと判断する。



第9図 廃棄物埋設地におけるガス移行挙動の概念図

2. 地震の影響

地震力の作用により、覆土(難透水性覆土及び下部覆土)に変形が生じ、低透水性に影響が生じるおそれがある。地震動による埋設設備への影響図を第 10 図に示す。



第 10 図 地震動による埋設設備への影響図

埋設設備は岩盤に直接支持されており、内部空洞のない充填されたコンクリート構造物であることから、地震動による構造物の変形は限定的であり、周辺覆土へ与える変形量は小さい。また、覆土自体においても、水平地盤であり、周囲を岩盤に囲まれていることから、地震における変形量は小さい。

以上から、廃棄物埋設地が地震を受けた際に難透水性覆土が受ける影響について、変位量は小さいと考えられる。地震の影響による覆土の変形量は金属腐食による埋設設備の変形量(補足説明資料 4「廃棄物埋設地の状態設定-状態変化の評価(力学的影響)-」を参照。)と比較して非常に小さく、金属腐食の評価に包含されるため、低透水性への影響を無視できる。

3. 液状化(覆土)の影響

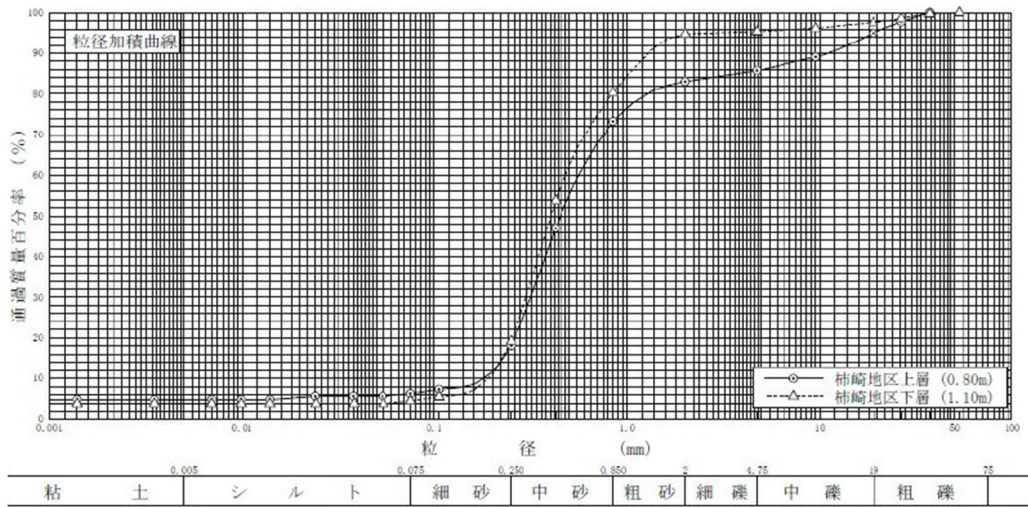
過去の液状化対策事例として、平成 19 年新潟県中越沖地震において、管理値(締固め度 90%以上)を設定し、埋戻し土(砂及び砂質土)の締固めによる対策を実施した箇所では、震度 6 弱が発生しているものの、液状化は生じていないと報告されている⁽¹⁴⁾。

廃棄物埋設地においても、覆土施工における管理値を同等以上に設定する。覆土は、現地発生土、購入砂、ベントナイト及び礫を仕様に応じて混合した混合土である。よって覆土は、一般に液状化しやすいと知られている「砂分を多く含む、粒度分布が偏った土砂」ではない。上記の液状化対策事例において液状化をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土⁽¹⁴⁾(第 11 図に粒径加積曲線を示す)と比較して、覆土は、液状化抵抗性に関連する締固め性能が良いとされている「粒径分布に広がりを持った材料」であるため、相対的に液状化し難い材料であると判断される。

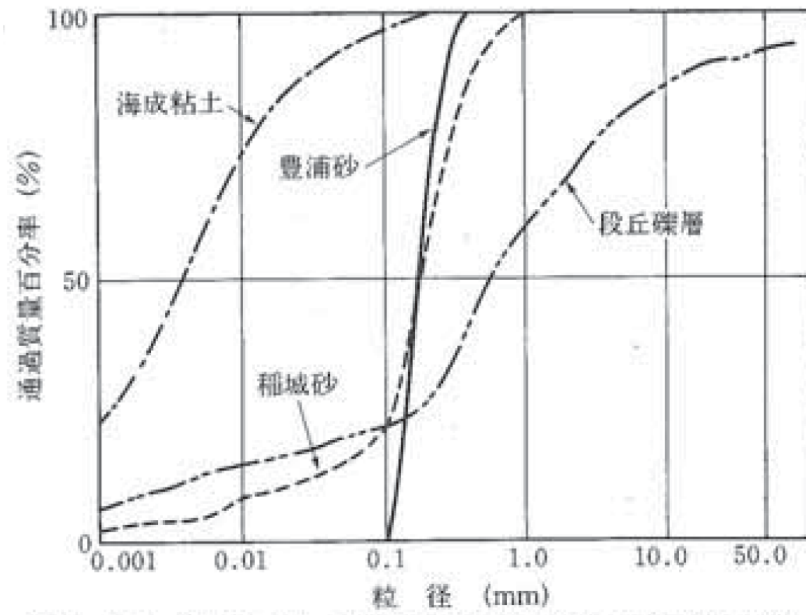
廃棄物埋設地で発生すると考えられる地震は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)、補足説明資料 1 地質環境に係る長期変動事象 3. (1) (ii) a. 地震」より震度 5 強を超えないため、過去事例における締固めによる対策を実施した箇所が発生した地震より小さい。

以上のことから、覆土は容易に液状化し難く、低透水性への影響は生じないと考えられる。

なお、参考として、第 12 図に覆土材料として想定している購入砂、ベントナイト及び礫と同等な材料として、豊浦砂、海成粘土及び段丘礫層の粒形加積曲線の例⁽¹⁵⁾を示す。文献⁽¹⁵⁾に例示されるような購入砂と異なる粒径分布を持つ材料を混合し覆土を製造することから、購入砂単体と比較し、覆土は粒度分布に広がりを持つ液状化し難い材料であると考えられる。



第 11 図 液状化対策事例における
埋戻し土(砂、砂質土)の粒径加積曲線⁽¹⁴⁾



第 12 図 代表的な土の粒形加積曲線の例⁽¹⁵⁾

4. コロイド影響

各部材の間隙水中にコロイドが存在する場合には、コロイドに放射性物質が収着し、放射性物質の移行が促進される(収着性が阻害される)ことが考えられる。

収着性に影響を与える可能性のあるコロイド影響については、埋設設備の間隙水はセメント平衡水でありコロイドが安定に分散できる環境ではなく、収着性に影響は生じないと考えられる。

5. 微生物影響

廃棄物埋設地近傍に存在する微生物の活動によって、岩盤(鷹架層)中では有機物が無機化し、収着性が低下することが考えられる。そのため、収着性の評価に際して微生物影響のうち有機物の無機化を影響事象として考慮する。

なお、有機物が分解してガスが発生すること及び金属の腐食反応が促進されることが考えられる。しかし、微生物は高 pH 環境となる埋設設備内や難透水性覆土中においてその活性は低く⁽¹⁶⁾、このような活動で生じる化学環境の変化はその他の影響事象に含まれると考えられる。

6. 降下火砕物(化学)の影響

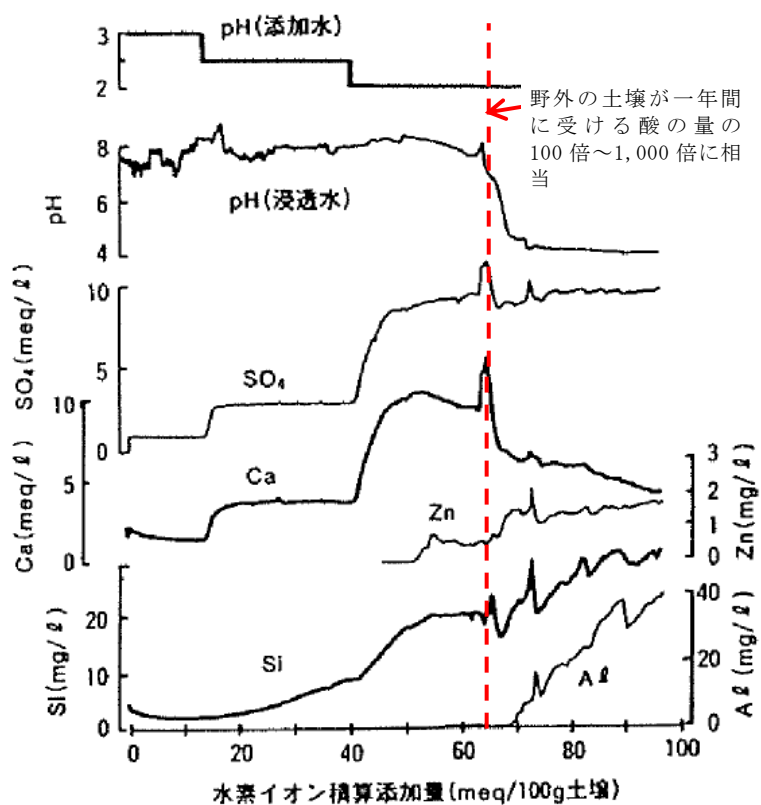
降下火砕物が堆積すると、これらに含まれる成分によって地下水の水質変化、低透水性及び収着性に影響が生じるおそれがある。

pH の変化などの化学的变化に対し、土壌は影響を和らげる緩衝作用⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を持っている。例として、水素イオンが土壌中の粘土や有機物に吸着している陽イオンと置き換えられる陽イオン交換反応、アルミニウム水酸化物の溶解などがある。pH2~3 の希硫酸を火山灰土壌カラムに浸透させた際の水質変化から⁽¹⁹⁾、継続的な酸の流入に対しても、数百年単位で土壌の pH が保たれる。降下火砕物から溶出した成分による pH は、この条件と同等かそれよりも高く、また、一時的なものであるため影響は小さい。

上部覆土は十分な厚さを有するため、上部覆土の緩衝作用により、各バリアの変質などの化学的影響は十分低減され、透水係数及び収着性への影響は無視できる。また、上部覆土の化学的な影響を受ける範囲は限定的であり、十分な厚さを有することから収着性への影響は無視できる。土壌の緩衝作用を第 3 表に、希硫酸添加に伴う土壌カラム浸透水の水質変化を第 13 図に示す。

第3表 土壌の緩衝作用

陽イオン交換反応	土壌中の粘土や有機物は通常マイナスに帯電しており、 Ca^{2+} などの陽イオンを吸着している。 H^+ は土壌の負荷電と親和性が高いため、吸着イオンは置き換えられ、 CaSO_4 などとして溶出する。
アルミニウム水酸化物の溶解	H^+ 及び OH^- が過剰となる時、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 及び $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ の加水分解反応の平衡が崩れて pH の変化を抑制する。
変異荷電の発生・消滅	土壌の水酸基 ($-\text{OH}$) やカルボキシル基 ($-\text{COOH}$) は H^+ を吸着して正電荷を生じ pH の低下を抑制する。また OH^- と官能基末端の H^+ が結合して H_2O を形成し、pH の上昇を抑制する。
炭酸カルシウムの溶解	炭酸-重炭酸平衡反応により、 H^+ が消費される。



第13図 希硫酸添加に伴う土壌カラム浸透水の水質変化⁽¹⁹⁾

7. 参考文献

- (1) 藤原和俊、谷純一、田中幸久(平成 28 年)：処分環境条件を考慮したアルミニウムの腐食挙動の検討(その 1)－腐食挙動に及ぼす乾燥保管の影響－、電力中央研究所研究報告、Q15010
- (2) 廣永道彦、馬原保典(平成 10 年)：セメント中でのアルミニウムおよび鉄の腐食による水素ガス発生挙動、電力中央研究所研究報告、U97109
- (3) 三菱マテリアル株式会社・日揮株式会社・大成建設株式会社・清水建設株式会社、鹿島建設株式会社(平成 9 年)：六ヶ所 2 号廃棄物埋設施設に関するガスの透気評価
- (4) 三原守弘、西村務、和田隆太郎、本田明(2002)：低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼、ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生率及び腐食速度の評価、サイクル機構技報、No. 15
- (5) 金子昌章、三浦律彦、藤原愛、山本正史(平成 16 年)：還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (6) 伊藤伍郎(1981)：アルミニウムの腐食、軽金属、Vol. 31, No. 10
- (7) 藤山哲雄ら(平成 20 年)：ベントナイト・セメント系材料のガス移行評価に関する文献調査、電力中央研究所 調査報告、N07021
- (8) Graham, J., Halayko, K. G., Hume, H., Kirkham, T., Malcom, G. and Oscarson, D.: A capillarity-advective model for gas break-through in clays, Engineering Geology 64, pp.273-286, 2002.
- (9) Hoch, A.R., Cliffe, K.A., Swift, B.T. and Rodwell, W.R. : Modeling gas migration in compacted bentonite, GAMBIT Club Phase 3 Final Report, Posiva Report
- (10) 田中幸久、廣永道彦(平成 26 年)：飽和した Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性評価、電力中央研究所報告、N13011
- (11) 大石英希、熊谷守、森敦史、田中幸久、廣永道彦、山本修一(2012)：Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性に関する検討 (1)室内ガス移行試験とガス移行前後の透水性、日本原子力学会 2012 年春の年会
- (12) 穂刈利之、沖原光信、石井卓、小島圭二(1996)：ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察、放射性廃棄物研究、Vol. 3、No. 1、pp. 15-23
- (13) 株式会社大林組・株式会社セレス(平成25年)：3号埋設施設の基本設計(その2)のう

ち安全評価に係るガス影響の検討

- (14) 下水道地震対策技術検討委員会(平成 20 年)：下水道地震対策技術検討委員会報告書 能登半島地震・新潟県中越沖地震の総括と耐震対策の評価および下水道の担うべき機能を継続的に確保する方法の考え方
- (15) (社法)地盤工学会(2009)：地盤材料試験の方法と解説
- (16) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005)：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－根拠資料集 分冊 3 FEP
- (17) 松中照夫(2003)：土壌学の基礎、農文協、pp. 142-146
- (18) 石塚和裕(1992)：酸性降下物に対する土壌緩衝能の実態と評価、森林立地 34(1)、pp. 26-35
- (19) 久保井徹(1989)：地下水が酸性になる前に－土壌の緩衝能とその限界－、国立環境研究所ニュース 8 巻 3 号、pp. 6-7

参考資料 1

参 考 資 料

IAEA ISAM 及び廃棄物安全小委員会報告書の人工バリアに関する FEP リスト

特性	IAEA ISAM の FEP リスト	廃棄物安全小委員会報告書の FEP*1	
	廃棄体及び人工バリア (浅地中処分)	人工バリアの構成材料(高レベル放射性廃棄物処分)	
		緩衝材／埋め戻し材	プラグ・グラウト ・支保工
温度	2.1.11 熱的プロセスと状態	B1.1 熱特性 B1.2 温度	D1.1 熱特性 D1.2 温度
水理	2.1.05 人工バリアシステムの 特性と変質過程 2.1.08 水理学／水文地質学的 プロセスと状態 2.1.12 ガス発生源と影響	B2.1 水理特性 B2.2 地下水流動 B2.3 飽和	D2.1 水理特性 D2.2 地下水流動 D2.3 飽和
力学	2.1.02 廃棄体の材料、特性、変 質過程 2.1.03 容器の材料、特性、変質 過程 2.1.04 緩衝材／埋め戻し材の 材料、特性、変質過程 2.1.05 人工バリアシステムの 特性と変質過程 2.1.06 他の人工バリアの材料、 特性、変質過程 2.1.07 力学的プロセスと状態 2.1.12 ガス発生源と影響	B3.1 力学特性 B3.2 応力 B3.3 膨潤 B3.4 変形 B3.5 流出	D3.1 力学特性 D3.2 応力 D3.3 膨潤 D3.4 変形 D3.5 流出
化学	2.1.02 廃棄体の材料、特性、変 質過程 2.1.03 容器の材料、特性、変質 過程 2.1.04 緩衝材／埋め戻し材の 材料、特性、変質過程 2.1.05 人工バリアシステムの 特性と変質過程 2.1.06 他の人工バリアの材料、 特性、変質過程 2.1.09 化学／地球化学的プロ セスと状態 2.1.10 生物学／生化学的プロ セスと状態 2.1.12 ガス発生源と影響	B4.1 化学特性 B4.2 地下水化学 B4.3 地下水との反応 B4.4 化学的変質 B4.5 微生物影響 B4.6 有機物影響 B4.7 コロイドの形成 B4.8 ガスの発生／影響 B4.9 塩の蓄積	D4.1 化学特性 D4.2 地下水化学 D4.3 地下水との反応 D4.4 化学的変質 D4.5 微生物影響 D4.6 有機物影響 D4.7 コロイドの形成 D4.8 ガスの発生／影響 D4.9 塩の蓄積

*1 : ガラス固化体及びオーバーパックに関する記載を除外した。

特性	IAEA ISAM の FEP リスト	廃棄物安全小委員会報告書の FEP*1	
	廃棄体及び人工バリア (浅地中処分)	人工バリアの構成材料(高レベル放射性廃棄物処分)	
		緩衝材／埋め戻し材	プラグ・グラウト ・支保工
放射線	2.1.13 放射線影響 2.1.14 臨界	B5.1 核種の放射性崩壊 B5.2 地下水の放射線分解	B5.1 核種の放射性崩壊 B5.2 地下水の放射線分解
核種移行	2.1.01 インベントリ、核種と他の材料 3.2.01 汚染物質の溶解、沈殿、結晶化 3.2.02 汚染物質の化学種、溶解度 3.2.03 汚染物質の収着・脱着プロセス 3.2.04 コロイドと汚染物質の相互作用と移行 3.2.05 錯体生成による汚染物質の化学種／移行への影響 3.2.06 汚染物質の微生物／生物／植物を介したプロセス 3.2.07 水を媒介とした汚染物質の移行 3.2.08 固体を媒介とした汚染物質の移行 3.2.09 ガスを媒介とした汚染物質の移行	B6.1 物質移動特性 B6.2 幾何形状・間隙構造 B6.3 核種移行 B6.3.1 移流／分散 B6.3.2 拡散 B6.3.3 収着 B6.3.4 沈殿溶解 B6.3.5 コロイド移行 B6.3.6 ガスによる移行 B6.4 物質移動	D6.1 物質移動特性 D6.2 幾何形状・間隙構造 D6.3 核種移行 D6.3.1 移流／分散 D6.3.2 拡散 D6.3.3 収着 D6.3.4 沈殿溶解 D6.3.5 コロイド移行 D6.3.6 ガスによる移行 D6.4 物質移動
他	2.1.15 外来物質	—	—

*1: ガラス固化体及びオーバーパックに関する記載を除外した。

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-状態変化の評価(力学的影響)-

2021年6月

日本原燃株式会社

目次

1. はじめに.....	1
2. 現象の整理と検討手順.....	1
(1) 膨張現象.....	1
(2) 陥没現象.....	1
(3) 検討手順.....	2
3. 状態変化の評価に用いる初期条件.....	3
(1) 廃棄物(充填固化体).....	3
(2) 廃棄体容器.....	7
(3) 埋設設備中の鉄筋.....	8
(4) 廃棄物(均質・均一固化体).....	8
(5) 埋設設備.....	9
4. 状態変化(膨張)に必要となる条件設定.....	10
(1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定.....	10
(2) 金属腐食による金属の膨張量の設定.....	34
(3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定.....	38
(4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定.....	54
(5) 金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定.....	56
5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価.....	57
(1) 力学的影響評価の考え方.....	57
(2) 力学的影響評価手法.....	60
(3) 覆土の主な仕様.....	61
(4) 解析に用いる諸条件の設定.....	62
(5) 解析結果.....	75
(6) 1,000年後の力学的影響評価.....	79
6. 状態変化(陥没)に必要となる条件設定.....	80
(1) 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定に係る諸条件の設定.....	80
(2) 可溶性塩の溶出量の設定.....	80
(3) 埋設設備の陥没量の設定.....	81
7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価.....	84
(1) 力学的影響評価の考え方.....	84
(2) 力学的影響評価手法.....	85
(3) 覆土の主な仕様.....	85
(4) 解析に用いる諸条件の設定.....	86
(5) 解析結果.....	95
(6) 1,000年後の力学的影響評価.....	99
8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ.....	100
9. 参考文献.....	101

- 参考資料 1 設定値を超える金属廃棄物が埋設された場合の評価について
- 参考資料 2 金属腐食による腐食生成物並びに可溶性塩による二次鉱物に対し真密度を用いた力学的影響の評価を行う妥当性について
- 参考資料 3 埋設設備中の環境条件の設定に対する腐食生成物の設定の考え方と妥当性について
- 参考資料 4 力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算について

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、廃棄物埋設地の状態設定(力学的影響の評価)を補足説明するものである。補足説明に当たっては、廃棄物埋設地ごとの状態変化の評価(力学的影響)としてそれぞれに生じる現象を予測し情報を整理した上で、覆土の低透水性への力学的影響の評価を実施する。

2. 現象の整理と検討手順

廃棄物埋設地の状態設定のうち、状態変化の評価(力学的影響)に係る現象を整理する。

現象の整理に当たっては、覆土の設計要件である低透水性(透水係数及び厚さ)に影響を与える現象を対象に行う。覆土の透水係数及び厚さへの力学的影響は、覆土自身の変形やそれに伴う密度変化により生じる。覆土の変形は、隣接する埋設設備の変形に支配されることから、埋設設備に生じる現象を対象とする。

埋設設備に生じる現象は、埋設設備の膨張変形及び陥没変形を想定する。そのため、埋設設備の膨張及び陥没に分類して現象の整理を行う。

(1) 膨張現象

埋設設備及び充填固化体には、金属が含まれており、金属周辺の環境条件に依存した電気化学的腐食により金属が腐食し腐食生成物が生成されることで、金属の膨張が生じると想定する。

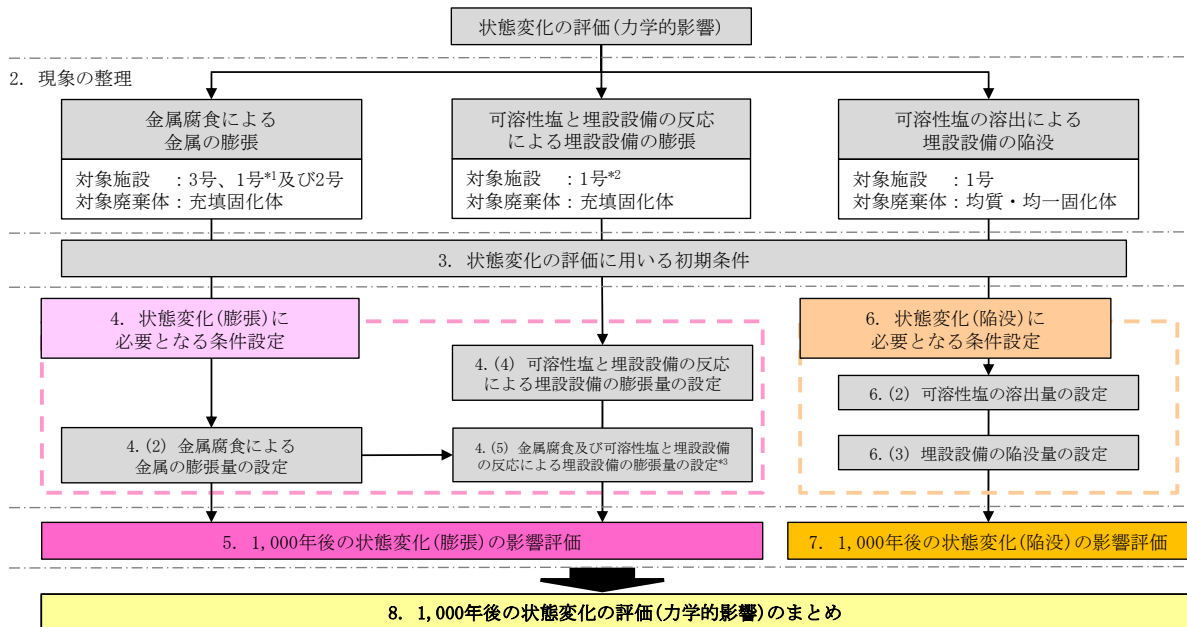
また、均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料の反応に伴い膨張性鉱物が生成するため、埋設設備が膨張することを想定する。

(2) 陥没現象

均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、埋設設備に浸入した地下水との反応により溶出し、空隙が生じること及び廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生し、陥没現象⁽¹⁾が生じると想定する。

(3) 検討手順

状態変化の評価(力学的影響)は、廃棄物埋設地ごとで生じる現象が複数存在するため、前項における現象の整理結果を踏まえて、覆土への力学的影響の評価に係る検討手順を体系的に整理する。状態変化の評価(力学的影響)の検討手順を第1図に示す。



*1 : 1号7群の埋設設備4基及び8群の埋設設備5基が対象となる。

*2 : 1号1群から6群までの埋設設備30基及び7群の埋設設備1基が対象となる。

*3 : 金属の膨張量を加味し評価する。

第1図 状態変化の評価(力学的影響)の検討手順

3. 状態変化の評価に用いる初期条件

状態変化の評価(力学的影響)は、埋設される廃棄体及び埋設設備の構成部材に起因した物理的・化学的相互作用を踏まえて、覆土の低透水性への力学的影響評価を行う必要がある。そのため、埋設される廃棄体及び埋設設備の構成部材に係る初期条件を整理する。

(1) 廃棄物(充填固化体)

「充填固化体の標準的な製作方法」⁽²⁾では、固体状廃棄物は以下のように分類されている。

- ・ 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合
- ・ 高圧圧縮処理を行う場合
- ・ 溶融処理を行う場合(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)

上記分類に関し、固化体ごとの特徴は以下のとおりである。

(i) 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合

固体状廃棄物の仕分け分類を第1表に、固体状廃棄物の分別(例)を第2表に示す。

第1表 固体状廃棄物の仕分け分類⁽²⁾

分類	仕分けする固体状廃棄物の性状	
強度分類	A	固体状廃棄物の強度が高いもの
	B	固体状廃棄物の強度が低いもの
形状分類	1	固型化材料等が内部に充填しやすい形状のもの
	2 ^{*1}	固型化材料等が内部に充填し難い形状のもの

*1: 切断又は圧縮処理を行うことにより、固体状廃棄物の充填効率の向上等のための減容を目的に「形状分類2」とするものもある。

第2表 固体状廃棄物の分別(例)⁽²⁾

仕分けする固体状廃棄物の種類				強度分類	形状分類	備考
金属類	・金属	金属片・板類	金属板、鋼材、金属棒等	A	1	
		金属配管類	金属配管等	A	1	
		塊状金属類	弁等	A	1	
		小物金属類等	ボルト・ナット類等	A	1	
		番線類	番線、針金等	A	1	
	缶類	一斗缶、ペール缶、スプレー缶等	A	2		
	・コンクリート類 ・ガラス類	コンクリート類	コンクリート片、石膏ボード、土砂等	A	1	
	ガラス類	ガラス瓶等	A	2	*2	
プラスチック類	・塩化ビニル類	管類	塩化ビニル配管等	A	1	
			塩化ビニルホース等	A	2	*1
	・プラスチック類	線類	ケーブル、コード等	A	1	
			片類	プラスチック片等	A	1
	・ゴム類	箱状類	ゴム片(ガスケット、ゴム板)等	B	1	
			塩化ビニル片等	B	2	
			プラスチック容器等	A	2	
シート類	防災シート、ビニルシート等、ゴムシート等	B	2			
保温材・フィルタ類	・保温材類 ・フィルタ類	保温材類	ガラスクロス、ケイ酸カルシウム、ロックウール、グラスウール等	B	2	*3
		フィルタ類	バグフィルタ、ロールフィルタ、プレフィルタ等	B	2	*3
その他	・多量の粉粒物			A	2	*4
	・所内ボイラの耐火煉瓦 ・焼却炉・溶融炉の耐火煉瓦及びセラミックフィルタ			A	1	*5

*1： 処理対象は、内径1cm以上、長さ50cm以上のもの

ただし、発生量が少ないと想定される内径1cm未満のものは「形状分類1」とする。

*2： ただし、片・板状のガラス類は「形状分類1」とする。

*3： 減容の観点から圧縮処理対象とするために「形状分類2」とした。

*4： 固型化材料等と一体化が困難となる多量の粉粒物について、小型混練固化の対象とする場合は、仕分けする。

*5： 「強度分類A」であるが、参考文献⁽²⁾Appendix-B(廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質について)に示す理由から、内籠収納又は内張り容器収納とするため仕分けする。

(ii) 高圧圧縮処理を行う場合

固体状廃棄物の仕分け分類を第3表に、固体状廃棄物の種類を第4表に示す。

第3表 固体状廃棄物の仕分け分類⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
金属類	—
非金属類	塩化ビニル類、プラスチック類、ゴム類、保温材類、フィルタ類
その他	・所内ボイラの耐火煉瓦 ^{*1} ・焼却炉・溶融炉の耐火煉瓦及びセラミックフィルタ ^{*1}

*1：参考文献⁽²⁾Appendix-B(廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質について)に示す理由から、内籠収納又は内張り容器収納とするため仕分けする。

第4表 固体状廃棄物の種類⁽²⁾

仕分けする固体状廃棄物の種類				
金属類	金属類	・金属	金属片・板類	金属板、鋼材、金属棒等
			金属配管類	金属配管等
			塊状金属類	弁等
			小物金属類等	ボルト・ナット類等
			番線類	番線、針金等
			缶類	一斗缶、ペール缶、スプレー缶等
非金属類	プラスチック類	・塩化ビニル類	管類	塩化ビニル配管等 塩化ビニルホース等
			線類	ケーブル、コード等
			片類	プラスチック片等
				ゴム片(ガスケット、ゴム板)等
				塩化ビニル片等
			箱状類	プラスチック容器等
	シート類	防炎シート、ビニルシート等、ゴムシート等		
	保温材・フィルタ類	・保温材類 ・フィルタ類	保温材類	ガラスクロス、ケイ酸カルシウム、ロックウール、グラスウール等
			フィルタ類	バグフィルタ、ロールフィルタ、プレフィルタ等

(iii) 溶融処理を行う場合(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)

固体状廃棄物の仕分け分類(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)を第5表及び第6表に示す。

高周波誘導溶融方式では、塊状アルミニウムを40wt%以下として鉄系金属廃棄物と混合溶融しており、塊状アルミニウム40wt%以下とすることで、鉄と同様のガス発生挙動となると考えられている⁽²⁾。

また、プラズマ溶融方式では、塊状アルミニウムと無機廃棄物を混合しているが、酸化アルミニウムと無機廃棄物とで均質な溶融体が形成される範囲としていることから、酸化アルミニウムとして安定した状態にあると考えられる⁽²⁾。

第5表 固体状廃棄物の仕分け分類(高周波誘導溶融方式)⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
塊状アルミニウム	混合処理するために仕分けする。
難溶融物 (土砂、セラミックフィルタ)	必要に応じて、投入量管理、溶融助剤の添加を行うため、仕分けする。
上記以外の固体状廃棄物	—

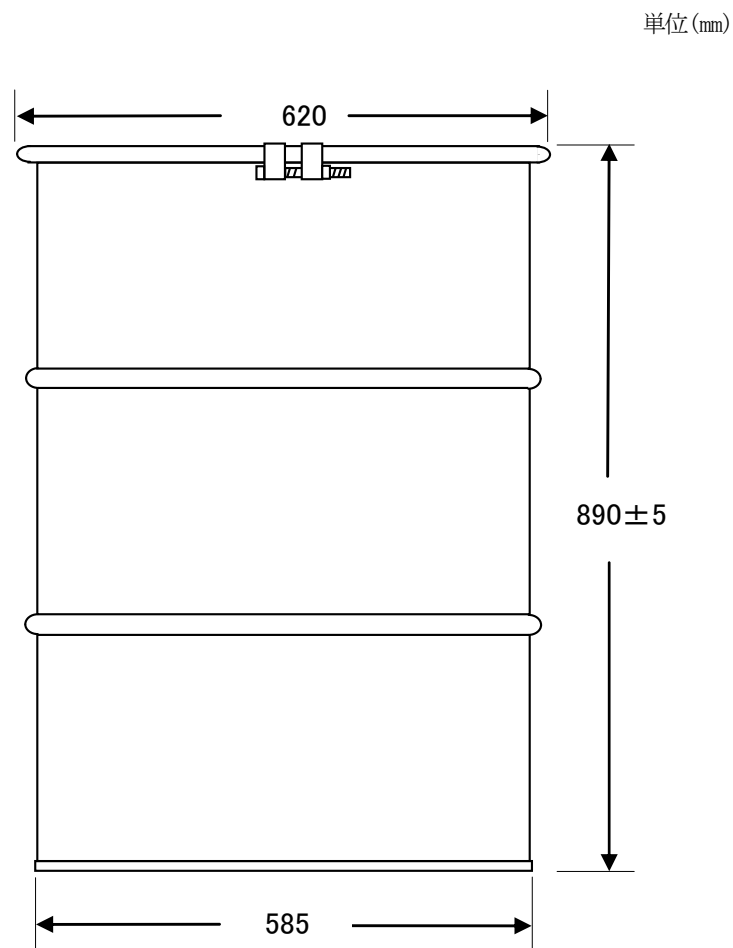
第6表 固体状廃棄物の仕分け分類(プラズマ溶融方式)⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
塊状アルミニウム	混合処理するために仕分けする。
難溶融物 (土砂、セラミックフィルタ)	必要に応じて、投入量管理を行うため、仕分けする。
上記以外の固体状廃棄物	—

(2) 廃棄体容器

廃棄物埋設地に使用される廃棄体容器(ドラム缶)の仕様は、鋼製オープンドラム：JIS Z 1600 H級(厚さ 1.6mm)又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものである。

また、ドラム缶のタイプは、固体危険物及び固体非危険物並びに液体危険物及び液体非危険物の輸送及び貯蔵容器として主に用いられているDタイプである⁽³⁾。ドラム缶の概念図を第2図に示す。



第2図 ドラム缶の概念図⁽³⁾

(3) 埋設設備中の鉄筋

鉄筋の仕様は、鉄筋コンクリート用棒鋼：JIS G 3112 SD345 異形鉄筋である⁽⁴⁾。

(4) 廃棄物(均質・均一固化体)

均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法⁽⁵⁾より均質・均一固化体の廃棄体の特徴を第7表に示す。

また、均質・均一固化体では、濃縮廃液等に由来する可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が含まれていることから、これまでの埋設実績を第8表に示す。

第7表 均質・均一固化体の廃棄体の特徴⁽⁵⁾

固化材	種類	セメント	アスファルト	プラスチック
	適合材料	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS R 5201 (1992) に定めるポルトランド(5種) ・ JIS R 5211 (1992) に定める高炉(A, B, C種) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS K 2207 (1990) に定める石油アスファルトで針入度が100以下のストレート、ブローン及び防水工事用アスファルト 	<ul style="list-style-type: none"> 不飽和ポリエステル樹脂 ・ エスター-SNO-100G ・ ポリマール 301NA ・ ポリマール 301NB ・ ポリマール 303SB
容器		JIS Z 1600 (1993) に定める1種H級ドラム缶(表積み時に5tの荷重に耐える)		
固型化	配合	—	固化材/固化体 $\geq 50\%$	固化材/固化体 $\geq 30\%$
	物性	一軸圧縮強度 1,470kPa 以上	—	デュロメータ硬さ 25 以上
	練混ぜ	一様に混練		
	有害な空隙	少なくとも「上部空隙が30%を超えない」ものは有害ではない		
健全性を損なうおそれのある物質	<ul style="list-style-type: none"> 1. 爆発性の物質, 接水時に爆発的に反応する物質 →危険物第五類, 第三類で該当するもの 2. 揮発性の物質 →危険物第四類で該当するもの 3. 自然発火性の物質 →危険物第二類, 第三類で該当するもの 4. 廃棄体を著しく腐食させる物質 →危険物第一類, 第三類, 第六類で該当するもの 5. 多量にガスを発生させる物質 →危険物第二類, 第三類で該当するもの 			
耐埋設荷重	容器と同じ(埋設時の圧壊を防止する)			
その他の確認項目	著しい破損、放射能濃度、表面密度限度、表面線量等量率、放射性廃棄物を示す標識の表示、整理番号の表示及び固型化後の経過期間			

第8表 均質・均一固化体に含まれる可溶性塩の量

	平均重量(kg/本)*1	備考
硫酸塩	約 21	硫酸塩は、主に BWR 廃棄体に含まれている (BWR 廃棄体 1 本当たり、約 15kg～約 120kg 含まれている)。
ほう素 (ほう酸塩)	約 3.0	ほう素(ほう酸塩)は、主に PWR 廃棄体に含まれている (PWR 廃棄体 1 本当たり、約 3.0kg～約 18kg 含まれている)。

*1：これまでの埋設実績から、炉型別の区別をせずに廃棄体 1 本あたりに含まれる平均重量を算定。

(5) 埋設設備

1 号埋設設備では、可溶性塩と埋設設備の反応による膨張を評価する必要があるため、埋設設備に用いられているセメント系材料を整理する。

1 号埋設設備は、外周仕切設備、内部仕切設備、セメント系充填材及び覆いから構成されているコンクリート構造物であるため、それぞれに使用されたセメント系材料の仕様を第9表に示す。

第9表 1号埋設設備のセメント系材料仕様

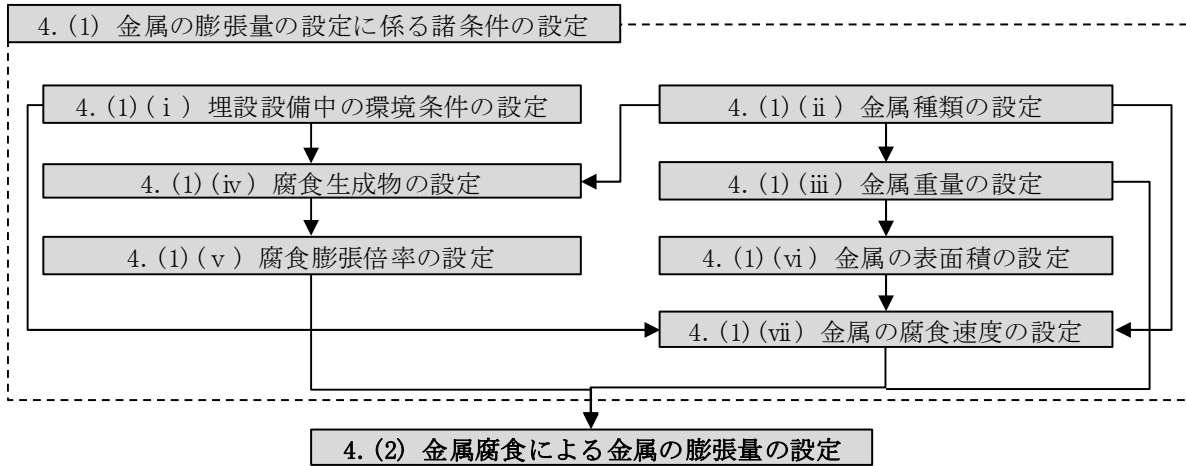
使用設備		セメント種類 (セメントと混和材の混合比)
充填モルタル		中庸熱ポルトランドセメント +高炉スラグ(1:9)
1 群から 6 群		
コンク リート	外周仕切	普通ポルトランドセメント +高炉スラグ(45:55)
	内部仕切	
	覆い	
1 群から 6 群		

4. 状態変化(膨張)に必要な条件設定

(1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定

金属の膨張量の設定は、埋設設備中の対象となる金属種類(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)に対し、環境条件として酸化還元環境のうち酸化還元電位(以下「ORP」という。)及びpHによる腐食生成物及び腐食生成物の生成による体積の膨張倍率を用いて行う。

金属の膨張量の設定手順を以下の第3図に示す。



第3図 金属腐食による金属の膨張量の設定手順

(i) 埋設設備中の環境条件の設定

金属は、周辺の環境(水や酸素)との相互作用(電気化学的腐食)を生じることが知られている。金属の電気化学的腐食に関連する環境条件としては、主に周辺環境の水質(ORP、pH 及び水温)並びに酸素(地下水中に含まれる溶存酸素)である。

そのため、埋設設備中の環境条件の設定は、状態変化の評価期間において埋設設備中の環境条件が変化することから、以下の想定される状態を考慮する。

【最も可能性が高い設定】

(溶存酸素について)

埋設設備周辺の地下水中の溶存酸素は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、検出限界以下(0.2ppm 未満)であることが確認されている。また、覆土前の埋設設備に存在する溶存酸素濃度は、状態変化の評価期間において、外周仕切設備の鉄筋の腐食(酸素消費型)により消費されることが想定される。

(ORP について)

埋設設備周辺の ORP は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、-100mV 以下であることが確認されているため、嫌気的条件であることが想定される。

(pH について)

埋設設備中の pH は、埋設設備中の間隙水に、セメントの主成分である水酸化カルシウム、微量成分のナトリウム並びにカリウムが溶解することから、高いアルカリ性を示すことが想定される。

(水温について)

廃棄物埋設地周辺の水温は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、10℃～15℃程度であることからこれを参考に設定する。

なお、最も可能性が高い評価期間(1,000 年後)においては、気候変動に大きな変化が生じないことから、最も可能性が高い設定/最も厳しい設定で共通の設定とする。

【最も厳しい設定】

最も可能性が高い設定にて想定される埋設設備中の環境条件に対し、以下の変動要因を考慮して設定する。

(溶存酸素について)

- ・ 廃棄物埋設地周辺の地下水からの溶存酸素の供給量
- ・ 外周仕切設備に生じるひび割れ等による廃棄体容器及び金属廃棄物への溶存酸素の供給

(ORP について)

- ・ 金属類による溶存酸素の消費量

(pH について)

- ・ セメント系材料からのナトリウムやカリウムの溶解量

以上のことから、埋設設備中の環境条件の設定の考え方を踏まえ設定する。埋設設備中の環境条件の設定の考え方と設定を第 10 表に示す。

第 10 表 埋設設備中の環境条件の設定の考え方と設定

条件	設定	設定の考え方
ORP	【最も可能性が高い設定】 嫌気的条件	【最も可能性が高い設定】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された溶存酸素濃度(0.2ppm 未満)及び ORP(-100mV 以下)を参考に設定する。
	【最も厳しい設定】 嫌気的条件～好気的条件	【最も厳しい設定】 埋設設備中の溶存酸素の移行経路によっては、廃棄体容器及び金属廃棄物に供給されることが考えられる。また、廃棄物埋設地周辺の地下水に含まれる溶存酸素の供給量の変動した場合を考慮し、嫌気的条件～好気的条件を考慮する。
pH	【最も可能性が高い設定】 セメント系材料に生じる一般的な現象を考慮し、高い pH を設定	【最も可能性が高い設定】 状態変化の評価期間において、セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することにより高い pH の状態 (pH11 以上) となることが考えられるため、これを考慮する。
	【最も厳しい設定】 上記に加え、セメント系材料から Na 及び K 成分が溶出した場合を考慮し、更に高い pH を設定	【最も厳しい設定】 セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することに加え、Na 及び K 成分が溶出した場合、pH が更に高い状態に推移する。金属腐食では、pH が変化した場合、腐食膨張倍率の異なる腐食生成物が生成され、金属の膨張量が増加する可能性があることから、これを考慮する。
水温	【共通】 廃棄物埋設地周辺の水温を参考に設定	【共通】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された水温(10℃～15℃程度)を参考に設定する。

(ii) 金属種類の設定

金属種類は、「3. 状態変化の評価に用いる初期条件」で整理している。充填固化体では、金属廃棄物として炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占め、その他に小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などが収納されている。

一方で、金属廃棄物は、金属の種類ごとの収納量に係る情報並びにその制限(ただし、アルミニウム等の除外物質を除く)がない⁽²⁾。そのため、評価の主軸となる金属種類を設定し、その他考慮する金属種類の混合率を設定し、金属が混合された状態での影響評価を行う必要がある。

よって、ここでは、充填固化体に含まれる金属種類を整理することで、代表とする金属種類とその他考慮する金属種類を設定する。

充填固化体中の金属種類を整理した結果、充填固化体中の主要な金属は鉄であることから、代表とする金属はこれを設定する。設定した金属種類を以下の第 11 表に示す。

第 11 表 金属種類の設定の考え方と設定

評価対象物	設定		設定の考え方
	代表とする金属種類	その他考慮する金属種類	
金属廃棄物	鉄	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	代表とする金属種類は、以下の「a. 固体状廃棄物の保管状況」～「c. 充填固化体の開缶調査(分別)結果」より、鉄とする。また、その他含まれている金属種類をあわせて考慮し、設定する。
廃棄体容器	鉄	亜鉛(メッキ)	廃棄体容器の金属種類は、JIS 規格 ⁽³⁾ に定められている金属種類を参考とし、設定する。
埋設設備中の鉄筋	鉄	-	鉄筋コンクリートに用いられる金属種類は、鉄として設定する ⁽⁴⁾ 。

a. 固体状廃棄物の保管状況

代表とする金属種類に関しては、平成5年度～7年度に実施した第一次、第二次開缶調査結果を参考とし、全国の原子力発電所に保管されている固体状廃棄物(ドラム缶への充填固化前)の保管量(当時)を基に算出した結果⁽⁶⁾より設定を行う。

開缶調査を実施するドラム缶の選定を行うため、原子力発電所に保管された固体状廃棄物の調査データが整理されている。全国の原子力発電所の固体状廃棄物の保管量を第12表に示す。

第12表 全国の原子力発電所の固体状廃棄物保管量(200Lドラム缶換算)⁽⁶⁾

ドラム缶分類	累積保管量(本)	構成比率(%)
金属類	138,035	47
塩ビ・ゴム類	36,492	12
保温材	36,194	12
フィルタ	30,474	10
コンクリート/ガラス類	13,050	4
その他	43,875	15
合計	298,120	100

b. 固体状廃棄物の重量構成

「a. 固体状廃棄物の保管状況」にて整理された構成比率の調査結果を基に、BWR 及び PWR より開缶調査対象とするサンプリング選定を行っている。開缶調査は、BWR が 104 本、PWR が 50 本のサンプリング本数であり、金属類のドラム缶の選定に関しては、全国の原子力発電所に保管されている重量分布に類似するように選定されている⁽⁶⁾。充填固化体の重量に関する調査をした結果を第 13 表に示す。

第 13 表より、充填固化体の力学的影響(膨張)の評価においては、構成比率が約 80%と大半を占める金属類を選定した。

第 13 表 ドラム缶分類別廃棄物総重量⁽⁶⁾

ドラム缶分類	ドラム缶数量(本)	総重量(kg)	構成比率(%)
金属類	90	12,225	79
塩ビ・ゴム類	24	1,100	7
保温材	24	863	6
廃フィルタ	10	257	2
コンクリート/ガラス類	6	867	6
合計	154	15,312	100

c. 充填固化体の開缶調査(分別)結果

第一次開缶調査により判明している廃棄物の分別結果を第 14 表に示す。

開缶調査結果⁽⁶⁾より、代表とする金属種類は、充填固化体に含まれる内容物に基づき、鉄が主要な金属種類であるとし、これを設定する。

第14表 第一次開缶調査結果の廃棄物の分別結果⁽⁶⁾

廃棄物分類	廃棄物分類名	重量割合 (%)	累積重量 (%)	具体的廃棄物品名				判定	代表模擬廃棄物品目	廃棄版型式	廃棄物分類名	選定した模擬廃棄物の寸法			模擬廃棄物組成 (%)			
				具体的廃棄物名	重量割合 (%)	累積重量割合 (%)	型式重量割合 (%)					品名	寸法	決定理由・根拠				
A1	金属片・板類	40.6	40.6	金属板	34.7	34.7	14.1	◎	金属板	金属片・板類	金属板	W500×L500×t3 W500×L600×t3 W500×L200×t3	平板状の金属廃棄物を重量割合の多い金属板で代表寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値	26				
				ドラム缶	15.3	74.4	6.2	◎	金属板									
				足場クランプ	8.4	82.8	3.4	◎	足場クランプ									
				金属片	8.0	90.8	3.2	◎	金属板		アングル	W50×L700×t6 W50×L500×t6 W50×L200×t6	L型アングル、H鋼などの鋼材を重量割合の多いアングルで代表寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値	11				
				工具類	1.6	92.4	0.7	-	-									
				アンカー	1.1	93.5	0.4	-	-									
				ベアリング	1.1	94.5	0.4	-	-		足場クランプ	H30×W70×L270	標準的な寸法	4				
				金網	1.0	95.6	0.4	-	-									
				配管	77.8	77.8	22.9	◎	配管									
				金属配管類	29.4	70.0	フランジ	13.9	91.7		4.1	◎	配管	金属配管類	配管(直管)	20A×L300、600	フランジ等を注入性の劣る配管で代表寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値かつ空隙評価結果より注入性を確保すべき最小径	27
							電線管	3.3	95.0		1.0	-	-					
	カップリング	2.0	97.0				0.6	-	-	配管(曲管)	" (単片L100)	寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値かつ空隙評価結果より注入性を確保すべき最小径	3					
	足場パイプ	1.6	98.7				0.5	-	-									
	弁	65.9	65.9				13.1	◎	弁									
	塊状金属類	19.8	89.8	スチームトラップ	18.3	84.2	3.6	◎	弁	塊状金属類	弁	20A、50A	形状が比較的複雑で内部空隙の残りやすい弁で代表寸法は、配管と同一口径とし、開缶調査より得られた寸法分布の最頻値の弁も加えた	21				
				ストレーナ	7.3	91.5	1.4	◎	弁									
				マスク用フィルタ	2.1	93.6	0.4	-	-									
				ドアノブ	1.4	95.1	0.3	-	-									
				スイッチボックス	1.3	96.4	0.3	-	-									
				コンクリート	55.6	55.6	2.2	◎	コンクリート						コンクリート片・ガラス類	コンクリート H70×W70×L70 石膏ボード H200×W200×t10	開缶調査結果より推定した標準的な寸法 開缶調査結果より推定した標準的な寸法	2
				石膏ボード	34.1	89.7	1.4	◎	石膏ボード									
				小物金属	2.6	96.4	サンダー刃	4.7	94.4						0.2	-	-	小物金属
	ガラス瓶	4.4	98.8				0.2	-	-									
	ガラス類	1.1	99.9				0.0	-	-									
	ボルト・ナット類	91.6	91.6				2.4	◎	ボルト・ナット									
	金属端子	7.8	99.4				0.2	-	-									
	番線類	2.3	98.7	番線	76.6	76.6	1.7	◎	番線	番線類	番線	外形φ3×L250	重量割合の多い番線で代表寸法は通常使用される10番線(約3mm)を使用	2				
				針金	10.8	87.4	0.2	◎	番線									
				溶接棒	4.6	92.0	0.1	◎	番線									
				ワイヤ	4.4	96.4	0.1	-	-									
				ケーブル線	1.8	98.1	0.0	-	-									
				計器類	1.0	99.7	計器	55.6	55.6						0.5	-	-	計器類
センサー	44.1	99.7	0.4	-	-													
屑	0.3	100.0	ゴミ屑	77.0	77.0	0.3	-	-	屑	-	-	-	-					
			砂	23.0	100.0	0.1	-	-										
			缶	48.9	48.9	48.9	◎	缶										
A2	缶類	100.0	PT缶	15.4	64.3	15.4	◎	一斗缶	缶類	一斗缶	240□×H350	標準的な寸法	52					
			一斗缶	14.4	78.7	14.4	◎	ペール缶										
			ペール缶	11.9	90.6	12.9	◎	スプレー缶		スプレー缶	70φ×H200	標準的な寸法	48					
			スプレー缶	9.0	99.6	9.0	◎	-										
			-	-	-	-	-	-										

(iii) 金属重量の設定

金属重量は、埋設設備ごとの仕様(設備形状、廃棄体の重量制限)により異なることから個別に算出し、設定する。

a. 金属廃棄物重量の設定

2号及び3号埋設設備の金属廃棄物の重量は、文献⁽⁶⁾の密収納時(非圧縮体)における最大重量が305kg(第15表参照)である。また、2号埋設設備の埋設実績より、2号埋設設備に対する平均値の最大重量279.8kg(第16表参照)であることから、これらを参考とする。

以上のことから、1本当たりの廃棄体重量を310kgとして設定し、埋設設備ごとの埋設本数を乗算することで設定する。

金属廃棄物重量の設定に当たっては、以下の観点から妥当である。

- ・金属腐食による金属の膨張は、埋設設備1基単位での変形挙動による評価であること
- ・2号埋設設備の埋設実績において、1本当たりの金属廃棄物の重量が大きな廃棄体(高圧圧縮体及び溶融体)の割合は、約6%であり非常に少ないこと
- ・廃棄体重量(310kg/本)は、廃棄体容器に密充填した際の金属重量(305kg/本)を包含していること

1号埋設設備は、2号及び3号埋設設備とは異なり重量制限(500kg/本)であることから、埋設実績を踏まえた金属廃棄物重量の設定を行うことが出来ない。

そのため、廃棄体製作技術⁽⁶⁾より廃棄体に含まれる上部空隙(約10%以下)及び理論上収納できる金属量を考慮し、設定する。

廃棄体製作技術⁽⁶⁾にて整理されている廃棄体の収納状態、重量及び試験実施状況を参考とし第15表に収納重量に関するデータを示す。

また、2号埋設設備の廃棄物の受入実績を第16表に示す。

第 15 表 固体状廃棄物の収納重量、固型化材料等の充填体積等⁽⁶⁾

固型化対象物の種類		収納容器	固体状廃棄物の 収納重量(kg)	固型化後重量 (kg)	固型化材料等の 充填体積 ^{*6} (L)
金属類		ドラム缶	301～305	662～694	163～165
プラスチック類		内籠容器	36～40	462～484	175～179
		内張容器	36	446	135
圧縮体 ^{*1}		ドラム缶	94 ^{*3}	350	102
圧縮体 ^{*2}		ドラム缶	178 ^{*4}	401	86
溶融体		ドラム缶	735～742 ^{*5}	867～878	50～53
高圧圧縮体 (非金属 類) ^{*7}	圧縮力約 1,000t 縦絞り縮径あり	ドラム缶	280 ^{*9}	436	58
	圧縮力約 1,500t 縦絞り縮径なし	ドラム缶	245 ^{*10}	392	59
高圧圧縮体 (金属類) ^{*8}	圧縮力約 1,000t 縦絞り縮径あり	ドラム缶	597 ^{*11}	808	82
	圧縮力約 1,500t 縦絞り縮径なし	ドラム缶	737 ^{*12}	894	71

*1： 保温材・フィルタ類及び圧縮対象のプラスチック類の圧縮体

*2： 圧縮対象の金属類の圧縮体

*3： 圧縮用容器(120L)の重量(約 45kg, 約 11kg×4 個)を含む

*4： 圧縮用容器(120L)の重量(約 90kg, 約 11kg×4 個)を含む

*5： キャニスタの重量(約 140kg)を含む

*6： 固型化材料等のドラム底部からの注入高さの目標値を非圧縮物及び圧縮体は 780mm、溶融体は 820mm とした。

*7： 高圧圧縮対象の非金属類の高圧圧縮体

*8： 高圧圧縮対象の金属類の高圧圧縮体

*9： 高圧圧縮処理用容器(200L)の重量(約 120kg, 約 30kg×4 個)を含む

*10： 高圧圧縮処理用容器(155L)の重量(約 63kg, 約 13kg×5 個)を含む

*11： 高圧圧縮処理用容器(200L)の重量(約 90kg, 約 30kg×3 個)を含む

*12： 高圧圧縮処理用容器(155L)の重量(約 63kg, 約 13kg×5 個)を含む

第 16 表 2 号埋設設備における廃棄物の受入実績

	1 群		2 群		3 群		4 群		5 群		6 群	平均 値
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	
平均廃棄物収 納重量(kg/本)	205.4	201.1	230.5	226.3	199.4	217.0	213.4	190.5	208.7	176.2	192.1	205.5
平均廃棄体重 量(kg/本)	598.9	581.8	589.8	574.6	565.0	567.2	556.9	539.2	544.9	530.9	531.0	561.8
金属類廃棄物 の割合(%)	88.9	83.2	81.0	72.1	74.5	75.5	71.0	62.5	66.6	64.6	58.8	72.6
溶融体、高圧圧 縮体の割合(%)	0.0	0.4	6.9	9.1	4.3	6.4	6.9	4.0	5.3	1.6	2.1	4.3
その他の割合 (%)	11.1	16.8	19.0	27.9	25.5	24.5	29.0	37.5	33.4	35.4	41.2	27.4
平均金属類廃 棄物収納重量 (kg/本)	220.2	225.2	263.2	279.8	237.6	256.3	263.9	252.0	261.5	221.6	255.0	248.8

ここで、金属廃棄物の重量の算出について、3号廃棄物埋設地を例に以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{金属重量(kg/基)} &= \text{金属廃棄物重量(kg/本)} \times \text{廃棄体本数(本/基)} \\
 &= 310(\text{kg/本}) \times 26,400(\text{本/基}) \\
 &= 8,184,000(\text{kg/基})
 \end{aligned}$$

上記の算出方法に従い、埋設設備ごとに算出した結果を第 17 表に示す。

第 17 表 金属廃棄物重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
金属廃棄物	8,184,000	282,624	4,017,600

*1：金属廃棄物重量(kg/基)は、1号埋設設備の重量制限(500kg/本)、鉄の密度(7,874kg/m³)及びモルタルの比重(2,100kg/m³)を用いて算定した55.2kg/本より、設定した。

b. 廃棄体容器重量の設定

1号、2号及び3号廃棄物埋設地に使用される廃棄体容器(ドラム缶)の仕様は、JIS Z 1600⁽³⁾のH級ドラム缶として共通であることから、同一の考え方に基づいて設定を行う。

H級ドラム缶は最小質量として27.0kgと規定されていることから、1本当たり30kgとして設定する。

ここで、廃棄体容器の重量の算出について、3号廃棄物埋設地を例に以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{金属重量(kg/基)} &= \text{廃棄体容器重量(kg/本)} \times \text{廃棄体本数(本/基)} \\ &= 30(\text{kg/本}) \times 26,400(\text{本/基}) \\ &= 792,000(\text{kg/基}) \end{aligned}$$

上記の算出方法に従い、埋設設備ごとに算出した結果を第18表に示す。

第18表 廃棄体容器重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号	対象設備：2号
廃棄体容器	792,000	153,600	388,800

c. 埋設設備中の鉄筋重量の設定

埋設設備中の鉄筋の重量は、設計図書から鉄筋径、配置本数及び延長を算出し、設定する。

埋設設備ごとに算出した結果を第19表に示す。

第19表 埋設設備中の鉄筋重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号	対象設備：2号
埋設設備中の鉄筋	1,357,000	127,000	415,000

(iv) 腐食生成物の設定

腐食生成物の設定は、埋設設備中の環境条件により生成が予想される腐食生成物の形態が異なるため、最も可能性が高い設定／最も厳しい設定に区分けし、腐食生成物に関連するパラメータを考慮した上で設定する。

腐食生成物の設定では、「4. (1) (i) 埋設設備中の環境条件の設定」において設定した環境下に対し、生成される腐食生成物を定量的に同定した知見がないことから、以下の考え方にに基づき設定する。

最も可能性が高い設定は、「4. (1) (i) 埋設設備中の環境条件の設定」において設定した環境条件及び文献^{(7)~(9)}を参考に最も安定に存在し得る腐食生成物を抽出し、設定する。環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する場合又は、最も安定に存在し得る腐食生成物の設定が困難である場合は、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を選定する。

最も厳しい設定は、環境条件及び文献^{(9)~(13)}を参考に、覆土の低透水性への影響評価の観点から、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を設定する。

上記の設定方針に従い、代表とする金属種類及びその他考慮する金属種類ごとに最も可能性が高い設定／最も厳しい設定の考え方及び設定する腐食生成物を第20表に示す。

ここで、充填固化体では、金属廃棄物として炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占めていることから、代表とする金属種類である鉄に対する腐食生成物(マグネタイト)の設定の考え方について、参考資料3「2. (3) 解析による推定」に詳細を示す。

腐食生成物は、金属腐食の進行とともに変化する環境条件及び生成される腐食生成物の影響により時間変遷とともに変化する。一方で、時間変遷を考慮した生成される腐食生成物の定量的な推定を行うことは、困難である。

そのため、腐食生成物の設定においては、金属腐食に伴う膨張量を評価するため、代表とする金属種類及びその他考慮する金属種類が第20表により設定した腐食生成物に全て変化することとした。

なお、1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩による腐食生成物への影響を考慮する。可溶性塩による腐食生成物への影響を評価した文献⁽⁹⁾に基づき、可溶性塩を考慮した環境条件下において、腐食膨張倍率が大きな腐食生成物である水酸化物を設定する。ここで、アルミニウムにおいては、文献⁽⁹⁾より腐

食膨張倍率の大きな腐食生成物(7.1 倍)を生成する可能性が示唆されている。しかしながら、アルミニウムは、文献⁽²⁾より除去する廃棄物として区分されており、分別除去後の調査結果としては、廃棄体1本当たりの平均重量が0.109kg(鉄の約1,000分の1以下)であることから、腐食膨張倍率の大きなアルミニウムの腐食生成物による影響は無視できる。

第20表 腐食生成物の設定及び設定の考え方

条件		設定	設定の考え方
代表とする 金属種類*1	鉄	【最も可能性が高い設定】 Fe ₃ O ₄	【最も可能性が高い設定】 複数の文献において生成すること及び安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ (マグネタイト)を設定する。
		【最も厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【最も厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ (水酸化鉄(II))を設定する。
その他考慮 する 金属種類	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【最も可能性が高い設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【最も可能性が高い設定】 それぞれの金属種類に対して複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、最も可能性が高い設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
		【最も厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【最も厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

*1：1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体中に含まれる可溶性塩による影響を考慮している。

(v) 腐食膨張倍率の設定

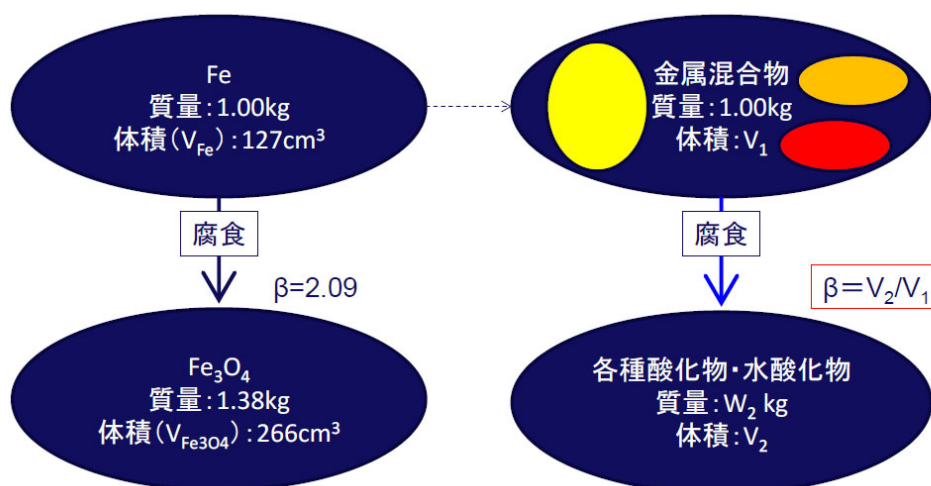
腐食膨張倍率は、第 20 表より設定した腐食生成物を用いて設定する。

埋設設備中の金属割合が文献⁽⁶⁾より定量的に設定することが困難であることから、「代表とする金属種類(鉄)」の腐食膨張倍率を基準とし、「その他考慮する金属種類」の金属単体ごとの腐食膨張倍率の混入率(wt%)をパラメータとし、金属が混合された状態での腐食膨張倍率の評価を行う。

a. 腐食生成物の腐食膨張倍率の算定

金属の腐食に伴う腐食生成物は、腐食に伴い酸素を取り込み形成される。そのため、拘束などがない環境において生成する腐食生成物は、かさ密度*1 と呼ばれるもので評価されることが実態である。一方で、廃棄物埋設地においては、埋設設備の周囲が覆土により拘束された状態である。いずれの場合においても、かさ密度を考慮した定量的な腐食生成物の膨張倍率に関する知見がない。そのため、ICSD の無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽⁹⁾に示される理論密度を用いて、重量 1.0kg の金属の体積 V_1 が腐食し、酸化物あるいは水酸化物となった場合の体積 V_2 の比より、理論的な膨張率(β)を求める。鉄を例とした際の算出方法を第 4 図に示す。

*1: かさ密度とは、質量からかさ容積を除いた密度を指す。また、かさ容積は、開気孔(外部に通じている気孔)閉気孔(固体内に閉じ込められている気孔)両方の体積を含んだ容積である⁽¹⁴⁾。



第 4 図 鉄の膨張倍率の算定方法

金属の膨張率の算定方法としては、第 21 表に示す金属のモル質量などから算出を行う。

ここで、金属元素 (A, B 及び C) としたとき、これらが含まれる化合物 (A_a, B_b, C_c, O_d 及び H_e) を考える。化合物 1mol 中には a, b 及び c mol の A, B 及び C が存在する。

よって、1mol の化合物 (体積 $L_{X,Comp} = L_{A_a B_b C_c O_d H_e}$ の中) に含まれる金属元素が金属として存在するときの総モル質量 ($\sum W_{X,Metal}$) 及び総モル体積 ($\sum L_{X,Metal}$) は以下の式で表される。

$$\sum W_{X,Metal} = aM_A + bM_B + cM_C$$

$$\sum L_{X,Metal} = aL_A + bL_B + cL_C$$

このとき、体積膨張率 (β) は、以下の式で表すことができる。

$$\beta_{A_a B_b C_c O_d H_e} = L_{A_a B_b C_c O_d H_e} / \sum L_{X,Metal}$$

すなわち、一般式は以下となる。

$$\beta_X = L_{X,Comp} / \sum L_{X,Metal}$$

第 21 表 金属化合物の体積膨張率 (β) 一覧

	モル質量 (g/mol)	真密度 (g/cm ³)	L_{metal} (cm ³ /mol)	金属 原子数	L_{Comp} (cm ³ /mol)	β
Fe	55.845	7.860	7.105	1	7.105	1.00
Fe ₃ O ₄ (Magnetite)	231.533	5.170	7.105	3	14.928	2.10
Fe(OH) ₂	89.860	3.400	7.105	1	26.429	3.72
Ni	58.693	8.900	6.595	1	6.595	1.00
Ni(OH) ₂	92.708	4.100	6.595	1	22.612	3.43
Al	26.982	2.700	9.993	1	9.993	1.00
Al(OH) ₃ (Amorphous aluminum hydroxide)	78.004	2.420	9.993	1	32.233	3.23
Cu	63.546	8.960	7.092	1	7.092	1.00
Cu(OH) ₂	97.561	3.368	7.092	1	28.967	4.08
Zn	65.380	7.140	9.157	1	9.157	1.00
Zn(OH) ₂ (beta-Zn(OH) ₂)	99.395	3.053	9.157	1	32.557	3.56

第 20 表の腐食生成物の設定及び第 21 表の金属化合物の体積膨張率より、腐食膨張倍率の設定を行う。

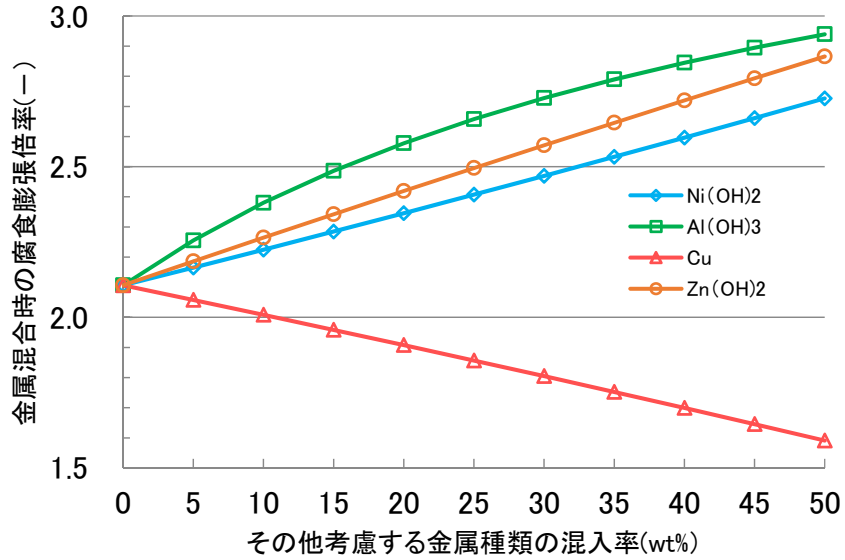
最も可能性が高い設定は、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物であるマグネタイト($\beta: 2.1$)を基準とし、その他考慮する金属種類の腐食生成物である水酸化物(例えば、 Ni(OH)_2 の $\beta: 3.43$)の金属単体ごとの混入率(wt%)をパラメータとし、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価したものを第 5 図に示す。

最も厳しい設定は、最も可能性が高い設定と同様の考え方にに基づき、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物である水酸化鉄(II) ($\beta: 3.72$)に対して評価したものを第 6 図に示す。

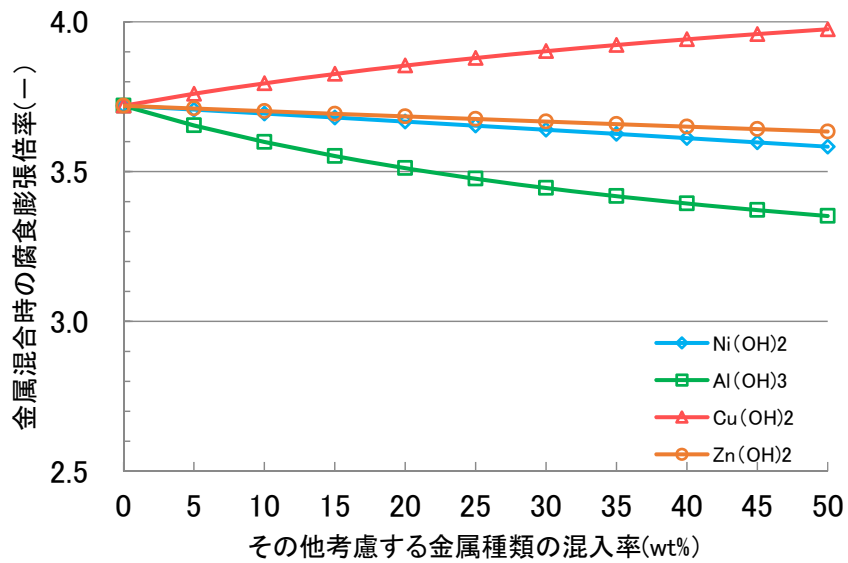
以上の設定・評価を踏まえ、腐食膨張倍率を第 22 表のとおり設定する。

第 22 表 腐食膨張倍率の設定値

条件	設定値	設定の考え方
腐食膨張倍率	【最も可能性が高い設定】 3 倍	【最も可能性が高い設定】 代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物を Fe_3O_4 (マグネタイト)とし、その他考慮する金属種類の混入率を 0wt%-50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 3 倍以下であることから、3 倍と設定する。
	【最も厳しい設定】 4 倍	【最も厳しい設定】 環境条件の変動を考慮し、設定した代表とする金属種類並びに非晶質の水酸化物を設定したその他考慮する金属種類の混入率を 0wt%~50wt%の幅で評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 4 倍以下であることから、4 倍と設定する。



第5図 最も可能性が高い設定(Fe₃O₄(腐食膨張倍率：2.10)を基準)における
金属が混合された場合の腐食膨張倍率



第6図 最も厳しい設定(Fe(OH)₂(腐食膨張倍率：3.72)を基準)における
金属が混合された場合の腐食膨張倍率

(vi) 金属の表面積の設定

金属の腐食膨張量を算出する際に必要となる表面積について、構成部材ごとの設定値を第 23 表に示す。

第 23 表 金属の表面積/比表面積の設定値

構成部材	対象設備	表面積/比表面積	備考
金属廃棄物	共通	$8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$	溶融体を除く
	共通	$2.18 (\text{m}^2/\text{本})$	溶融体のみ
廃棄体容器	共通	$4.36 (\text{m}^2/\text{本})$	
埋設設備中の鉄筋	3号	$19,000 (\text{m}^2)$	
	1号	$3,000 (\text{m}^2)$	
	2号	$11,000 (\text{m}^2)$	

a. 金属廃棄物

(a) 充填固化体のうち溶融処理を行わない場合

充填固化体には、金属板、番線、配管など様々な寸法・形状の廃棄物が含まれている。これら個々に対する表面積を設定することは、収納物の取扱上、困難であるため、文献⁽⁶⁾に記載されている調査・算出された廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積(第 24 表参照)のうち値の大きなものを設定する。

文献⁽⁶⁾では、金属廃棄物からのガス発生量の観点から、廃棄体に含まれる鉄系金属の表面積を固体状廃棄物の開缶調査より算定している。

算定に当たっては、廃棄体に収納する廃棄物量が 1 本ごとに異なると考えられることから、廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積(m^2/kg)を調査し、廃棄物の収納重量から金属の表面積($\text{m}^2/\text{本}$)を算出できるようにしている⁽⁶⁾。

具体的な鉄系金属の表面積は、金属片、配管、管、番線類等の代表的な廃棄物ごとに分類し、代表的な廃棄物の重量値及び表面積測定値から比表面積(鉄系金属の重量当たりの表面積)を算出した後、これに全鉄系金属の代表的な廃棄物ごとの総重量を乗じることで算出している⁽⁶⁾。算出された鉄系金属の表面積は、第 24 表のとおりである。第 24 表より、充填固化体のうち溶融処理を行わない場合の比表面積を $8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$ として設定する。

第 24 表 鉄系金属の表面積⁽⁶⁾

発電所炉形式	分類	鉄系金属総表面積(m ²)	廃棄物総重量(kg)	表面積(m ² /kg) ^{*1}
BWR	A	497.73	6,310	7.9×10 ⁻²
PWR	A	730.30	4,870	8.8×10 ⁻²

*1：廃棄物単位重量当たりの金属表面積(m²/kg) = 金属総表面積(m²)/廃棄物総重量(kg)

(b) 充填固化体のうち溶融処理を行う場合

充填固化体のうち溶融処理を行う廃棄体は、ドラム缶に収納できる形状にて製作される。

そのため、溶融処理以外の廃棄体とは異なり表面積は、溶融処理後の形状に依存することから、ドラム缶の表面積と同様とする。表面積を以下のとおり設定する。

$$\begin{aligned} \text{表面積} A &= (2 \times \pi \times R^2) + (2 \times \pi \times R \times h) \\ &= 2.182361(\text{m}^2/\text{本}) \cong 2.18(\text{m}^2/\text{本}) \end{aligned}$$

ドラム缶直径 φ	: 5.85×10 ⁻¹ (m)
ドラム缶半径 R	: $\varphi/2$ (m)
ドラム缶高さ h	: 8.95×10 ⁻¹ (m)

b. 廃棄体容器

充填固化体に用いられるドラム缶は標準的な製作方法に基づき、JIS Z 1600⁽³⁾のうちH級ドラム缶であることから、H級ドラム缶の寸法を参考に以下のとおり算出し設定を行う。

なお、表面積の算出においては、ドラム缶の内・外側両方の面積を合計した値とする。

$$\begin{aligned} \text{表面積} A &= 2 \times (2 \times \pi \times R^2) + 2 \times (2 \times \pi \times R \times h) \\ &= 4.364722(\text{m}^2/\text{本}) \cong 4.36(\text{m}^2/\text{本}) \end{aligned}$$

ドラム缶直径 φ	: 5.85×10 ⁻¹ (m)
ドラム缶半径 R	: $\varphi/2$ (m)
ドラム缶高さ h	: 8.95×10 ⁻¹ (m)

c. 埋設設備中の鉄筋

埋設設備中の鉄筋に関しては、設計図書を参考に構成部材ごと(覆い、底版、側壁及び内部仕切)に含まれる鉄筋の重量、本数及び総延長から鉄筋径ごとに算出・集計した値を参考に設定を行う。

なお、鉄筋に係る単位質量、公称直径、断面積及び周長は JIS G 3112⁽⁴⁾に基づく。

(a) 3号埋設設備

$$\begin{aligned}\text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 10 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 3,416.4 + 4,948.6 + 3,517.5 + 6,243.2 \\ &= 18,125.7(\text{m}^2) \cong 19,000(\text{m}^2)\end{aligned}$$

(b) 1号埋設設備

$$\begin{aligned}\text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 3 枚+南北方向 3 枚)} \\ &= 871.2 + 966.8 + 743.3 + 375.0 \\ &= 2,956.3(\text{m}^2) \cong 3,000.0(\text{m}^2)\end{aligned}$$

(c) 2号埋設設備

$$\begin{aligned}\text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 5 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 1,942.7 + 2,586.0 + 2,362.2 + 3,711.4 \\ &= 10,602.3(\text{m}^2) \cong 11,000.0(\text{m}^2)\end{aligned}$$

(vii) 金属の腐食速度の設定

金属の腐食に伴う膨張量は、環境に応じた金属の腐食速度に状態変化の評価期間を掛け合わせた際の腐食生成物として失われた金属質量より求めることができる。

膨張量の算出に必要な金属の腐食速度を求める手法は、一般的に重量法⁽¹⁵⁾、ガス発生法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾及び電気化学法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾が知られている。

廃止措置の開始後の最も可能性が高い評価期間(1,000年後)の金属の腐食速度は、「4.(1)(i)埋設設備中の環境条件の設定」を考慮し、適切な分析手法により求められる値を参考に設定する。

a. 腐食速度の測定手法の選定

腐食速度の測定は、前述のとおり3つの手法により試験が実施されている。

なお、日本産業規格や学会基準などにより広く定義された測定手法はなく、実務者が測定手法に対して、精度良く分析すべく様々な手法が考案されているものである。

最も可能性が高い評価期間(1,000年後)においては、想定する環境条件に適した測定手法により取得された値を参考に、腐食速度を設定する必要がある。

そのため、腐食速度の測定手法に関して、手法ごとの特徴、測定誤差の要因及び対応する環境を整理することで適した測定手法の選定を行う。腐食速度の測定手法の特徴を第25表に示す。

第 25 表 腐食速度の測定手法の特徴

測定手法		特徴	測定誤差の要因	対応する環境条件
重量法		試験前後の重量差から直接的に腐食速度を求める。 表面に皮膜が形成する場合には、化学的あるいは電解により除去し、母材の腐食減量を測定する。	<ul style="list-style-type: none"> 腐食生成物の除去率のばらつき(脱スケールの処理) 天秤の測定誤差 試験前後の試験片の乾燥処理 	好氣的／嫌氣的条件
ガス発生法		腐食反応に伴う水素ガスの発生量を計測し、ファラデーの法則により間接的に腐食速度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> 溶存酸素の試験系内への混入 水素発生を伴わないカソード反応(酸化還元反応) 	嫌氣的条件
電気化学法 (20)	ターフェル外挿法	定常分極曲線の半対数プロットで逆反応が無視できる分極範囲(>70mV)から外挿により電流密度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> 皮膜成長の影響 	好氣的／嫌氣的条件
	直接分極抵抗法	腐食電位近傍の分極曲線の直線部分の勾配から腐食速度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> 比例定数の正確さ 	

【最も可能性が高い設定】

第 10 表の環境条件の設定に基づき、第 25 表から環境条件に適用した測定手法を選定する。測定手法は、環境条件が嫌氣的条件であり、金属類が水素発生型の腐食挙動を示すと想定されることから、ガス発生法により取得された腐食速度が適切であると判断し、これを選定する。

【最も厳しい設定】

第 10 表の環境条件の設定では、ORP 及び pH が幅を持って変動すると整理されている。刻々と変化する環境条件下では、局部腐食(孔食)の発生や異種金属接触腐食が生じることが予想され、試験的に求める腐食速度を均一腐食として評価することが困難である。そのため、腐食速度の選定を行わない。

b. ガス発生法により取得された腐食速度の整理

第 10 表の最も可能性が高い設定の環境条件と試験条件が類似し、かつガス発生法により腐食速度を取得・評価した文献の一例を第 26 表に示す。

第 26 表のうち、温度環境が比較的高い状態で取得された腐食速度は、第 10 表の環境条件に適したものではないため、No. 1, 3, 9 及び 12(No. 12 は 25.5℃のデータのみ)により取得された値が適切であると判断する。

第 26 表 ガス発生法による腐食速度に関する知見*1,*2

No.	著者	腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	材料	環境条件
1	Kreis ら	0.005~0.01	炭素鋼	温度：20℃、水質：水酸化カルシウム系、pH：12.8、試験期間：240日
2		0.065~0.02		温度：20℃、水質：NaOH, KOH、pH：12.8、試験期間：80、240日
3	藤沢ら	0.002	炭素鋼	温度：15℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：365日
4		0.001		温度：30℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：365日
5		0.01		温度：45℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：2ヶ月
6	三原ら	0.4	炭素鋼	温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：10、試験期間：6ヶ月
7		0.02		温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：12、試験期間：6ヶ月
8		0.02		温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：13.5、試験期間：6ヶ月
9	廣永ら	0.003	炭素鋼	温度：15℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
10		0.01		温度：30℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
11		0.08		温度：45℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
12	(財)原子力環境整備促進・資金管理センター	0.03(25.5℃)~0.1(45.5℃)	炭素鋼	温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン5ppm、pH：12.5、試験期間：190日
13		0.02(25.5℃)~0.06(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン500ppm、pH：12.5、試験期間：190日
14		0.02(25.5℃)~0.07(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン1,500ppm、pH：12.5、試験期間：190日
15		0.06(25.5℃)~0.2(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン5,000ppm、pH：12.5、試験期間：190日

*1：No. 1~No. 8 は参考文献⁽¹⁶⁾より引用

*2：No. 9~No. 15 は参考文献⁽¹⁷⁾より引用

c. 腐食速度の設定

【最も可能性が高い設定】

腐食速度の設定は、第 25 表に整理したとおり、測定手法に内在する測定誤差があることが判明している。そのため、第 26 表から適切であると判断した腐食速度 ($0.002 \mu\text{m}/\text{y} \sim 0.01 \mu\text{m}/\text{y}$) に対して、最大の腐食速度である $0.01 \mu\text{m}/\text{y}$ の小数第 2 位を切り上げた値である $0.1 \mu\text{m}/\text{y}$ を設定する。

【最も厳しい設定】

「4. (1) (vii) a. 腐食速度の測定手法の選定」のとおり、試験的に求める腐食速度を均一腐食として評価することが困難であることから、腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定する。

以上の腐食速度の設定値及びその考え方を第 27 表に示す。

なお、1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩による腐食速度への影響を考慮する。可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)による腐食速度への影響は、文献⁽²¹⁾⁽²²⁾より埋設設備中の環境条件下において、腐食速度の低下、又は鉄が不動態化することから影響はない。そのため、文献⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾に示された様々な環境条件下(可溶性塩影響*1 より金属の腐食環境として最も厳しい人工海水(NaCl) 影響*2 を含む)にて取得された腐食速度に対し、最大の腐食速度を選定している。

*1:均質・均一固化体を埋設する埋設設備内の間隙水における可溶性塩の濃度は、塩による収着影響との設定(硫酸塩 3%、ほう酸塩 0.1%)と同じ値である。

*2: 文献⁽¹⁶⁾に示される人工海水(NaCl)の濃度は、約 3%である。

第 27 表 腐食速度の設定値

条件	設定値	設定の考え方
腐食速度*1	【最も可能性が高い設定】 $0.1 \mu\text{m}/\text{y}$	【最も可能性が高い設定】 腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮し、値を設定する。
	【最も厳しい設定】 腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定	【最も厳しい設定】 腐食膨張量は、金属腐食を評価する上で必要となる環境条件による腐食速度に依存するが、局部腐食(孔食)や異種金属接触腐食、環境条件の変動に係る不確実性を考慮する。よって、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000 年後)においては、腐食形態に係らず全量が瞬時に腐食すると設定する。

*1: 1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体中に含まれる可溶性塩による影響を考慮している。

(2) 金属腐食による金属の膨張量の設定

金属腐食による金属の膨張量は、「4. (1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定」までの設定値を踏まえ、廃棄物埋設地ごとに算出し、設定する。金属の膨張量の算出に必要となるパラメータを第 28 表に示す。

評価対象物(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)である金属のうち、金属廃棄物の重量割合は、第 28 表より埋設設備中の鉄筋及び廃棄体容器に対し、約 8 割と大半を占めている。

そのため、金属腐食による膨張方向は、金属廃棄物の膨張挙動に支配されることが想定されることから、金属廃棄物の収納状況を考慮し設定する。

金属廃棄物は、収納される金属の形状が様々であるが、廃棄体容器への収納は、容器が効率的に使用できるように極力密に入れて収納している。また、金属の腐食は、その材料の形状により腐食環境に接触する面積が多い箇所ほど促進する傾向を有する。

以上のことから、金属腐食による膨張方向の設定は、廃棄体容器へ収納される金属の形状及び収納状況により、腐食が進展する方向を正確に推測することが困難であるが、現実的な設定として、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ変形するものとする。

また、膨張方向の設定においては、鉛直・水平方向への変形に対する評価のみではなく、埋設設備の側部に必要に応じて碎石を混合した剛性の高い下部覆土が設置されていること、埋設設備の上部は覆土の上載圧による拘束のみであることから、鉛直方向に卓越した変形における膨張量の算出をあわせて実施する。

なお、最も厳しい設定における金属の膨張量に関しては、腐食に伴う挙動を定量的に評価することが困難であるため、内在する不確実性に対して腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定するなど、膨張量が大きくなるような設定を行っている。

第 28 表 金属の膨張量算出に必要なパラメータ一覧

項目			対象設備		
			3号	1号	2号
共通項目	埋設設備	寸法	東西方向：64.10(m) 南北方向：36.51(m) 鉛直方向：6.66(m)	東西方向：24.40(m) 南北方向：24.40(m) 鉛直方向：6.20(m)	東西方向：36.00(m) 南北方向：36.91(m) 鉛直方向：6.94(m)
		体積	約 15,587(m ³)	約 3,692(m ³)	約 9,222(m ³)
	金属重量	金属廃棄物	8,184,000(kg)	282,624(kg)	4,017,600(kg)
		廃棄体容器	792,000(kg)	153,600(kg)	388,800(kg)
		埋設設備中の鉄筋	1,357,000(kg)	127,000(kg)	415,000(kg)
		合計	10,333,000(kg)	563,224(kg)	4,821,400(kg)
	金属の表面積 /比表面積	金属廃棄物	8.8×10 ⁻² (m ² /kg)(溶融体を除く) 2.18(m ² /本)(溶融体のみ)		
		廃棄体容器	4.8(m ² /本)		
		埋設設備中の鉄筋	19,000(m ²)	3,000(m ²)	11,000(m ²)
	最も可能性 が高い設定	腐食膨張倍率		3倍	
腐食速度		0.1(μm/y)			
評価年数		1,000(y)			
最も厳しい 設定	腐食膨張倍率		4倍		
	腐食速度		腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定		
	評価年数		腐食速度を設定しないことから、評価年数を設定しない		

(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

鉛直方向への変形による膨張量は、第3図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備中の金属量(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)、腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し、設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、埋設設備中の金属量が最も多く、膨張量としても大きくなることが予想される3号廃棄物埋設地を対象とし、最も可能性が高い設定のうち鉛直方向へ卓越した変形の算出過程を例に以下に示す。

金属の膨張による埋設設備の膨張量(鉛直方向) (m)

=埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)^{*1} (m³) /埋設設備の水平面積^{*2} (m²)

*1: 埋設設備の体積膨張量(m³) (金属腐食の膨張のみ)

= (単位年数当たりの腐食体積(m³/y)^{*3} × 評価年数(y) × 金属の腐食膨張倍率) - (健全時の金属重量(kg) / 鉄の密度^{*5} (kg/m³))

*2: 埋設設備の水平面積(m²)

=埋設設備(東西方向)長さ(m) × 埋設設備(南北方向)長さ(m)

*3: 単位年数当たりの腐食体積(m³/y)

=金属の総表面積(m²)^{*4} × 腐食速度(m/y)

*4: 金属の総表面積(m²/y)

= (廃棄体容器の表面積(m²) + 埋設設備中の鉄筋の表面積(m²) + 金属廃棄物の表面積(m²))

= (1本当たりの表面積(m²/本) × 本数(本)) + 埋設設備中の鉄筋の表面積(m²) + (金属廃棄物の重量(kg) × 充填固化体のうち熔融処理を行わない場合の比表面積(m²/kg))

*5: 鉄の密度は、7,874(kg/m³)⁽²³⁾

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第29表に示す。

第29表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備: 3号	対象設備: 1号	対象設備: 2号
	鉛直方向		
最も可能性が高い設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
最も厳しい設定	1.69×10^0	3.61×10^{-1}	1.39×10^0

(ii) 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

鉛直・水平方向への変形による膨張量は、第3図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備中の金属量(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)、腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、埋設設備中の金属量が最も多く、膨張量としても大きくなることが予想される3号廃棄物埋設地を対象とし、最も可能性が高い設定のうち鉛直・水平方向への変形の中から東西方向の算出過程を例に以下に示す。

金属の膨張による埋設設備の膨張量(東西方向) (m)

$$= (\text{埋設設備(東西寸法)}(m) \times 1 \text{ 方向当たりの埋設設備の膨張比}(-)^{*1}) - \text{埋設設備(東西寸法)}(m)$$

*1: 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張比}(-)^{*2}) \text{の三乗根}$$

*2: 埋設設備の体積膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積(健全時)}(m^3) + \text{埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)}(m^3)^{*3}) / \text{埋設設備の体積(健全時)}(m^3)$$

*3: 埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ) (m³)

$$= (\text{単位年数当たりの腐食体積}(m^3/y)^{*4} \times \text{評価年数}(y) \times \text{金属の腐食膨張倍率}) - (\text{健全時の金属重量}(kg) / \text{鉄の密度}^{\ast 5}(kg/m^3))$$

*4: 「4. (2) (i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち単位年数当たりの腐食体積(m³/y)の算出結果を引用

*5: 鉄の密度は、7,874(kg/m³)⁽²³⁾

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第30表に示す。

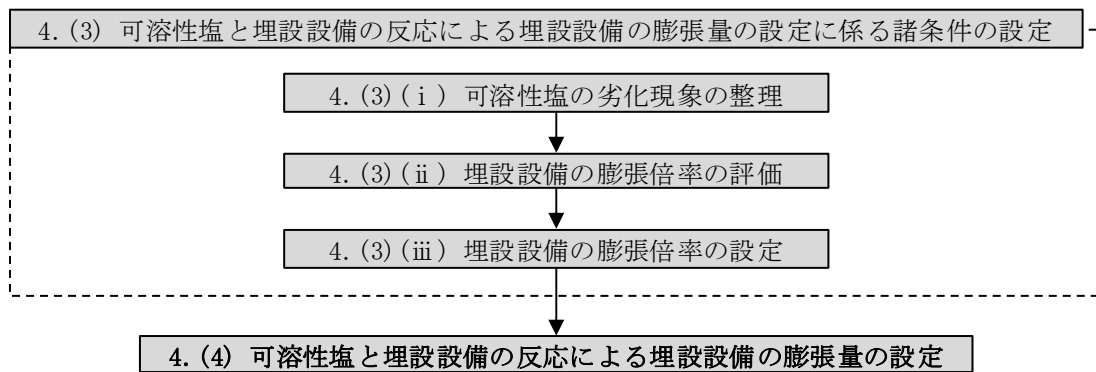
第30表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備: 3号			対象設備: 1号			対象設備: 2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
最も可能性が高い設定	3.50×10 ⁻¹	2.00×10 ⁻¹	3.64×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	8.42×10 ⁻³	1.64×10 ⁻¹	1.68×10 ⁻¹	3.16×10 ⁻²
最も厳しい設定	5.00×10 ⁰	2.85×10 ⁰	5.20×10 ⁻¹	4.64×10 ⁻¹	4.64×10 ⁻¹	1.18×10 ⁻¹	2.25×10 ⁰	2.31×10 ⁰	4.34×10 ⁻¹

(3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定

可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量の設定は、廃棄体の内容物(可溶性塩：硫酸塩及びほう酸塩)に対し、想定している劣化現象の整理を行い、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料(充填材及びコンクリート)の反応による埋設設備の体積の膨張倍率を用いて行う。

可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量の設定手順を第7図に示す。



第7図 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定手順

(i) 可溶性塩の劣化現象の整理

a. 可溶性塩の劣化現象の整理(硫酸塩)

可溶性塩のうち、硫酸塩(Na₂SO₄)は、セメント系材料と接触することで、コンクリート構造体に劣化現象を発生させることが知られており⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、硫酸塩劣化と総称されている。

硫酸塩劣化のメカニズムは、硫酸塩とセメント水和物が化学反応を起こし、コンクリート中で反応生成物が結晶成長することで、反応生成物の物理的圧力が要因となり劣化するものである。

均質・均一固化体のうち、セメント固化体に硫酸塩が含まれているため、埋設設備の膨張影響は、化学的劣化により生じる膨張現象に着目し、評価する。

硫酸塩劣化のうち、化学的劣化のメカニズムを整理したものを第31表に示す。

第31表 硫酸塩(化学的劣化)のメカニズムの分類

メカニズムの分類		
化学的劣化	エトリンガイト生成	<ul style="list-style-type: none"> エトリンガイトの生成による結晶成長圧などがコンクリートを劣化させる。 $\text{monosulfate } CaSO_4 \cdot 2H_2O, H_2O \xrightarrow{C-A-H} \text{ettringite}$
	二水石こう生成	<ul style="list-style-type: none"> 二水石こうの生成による結晶成長圧でコンクリートが劣化する。 $Ca(OH)_2, SO_4^{2-}, H_2O \xrightarrow{C-S-H} CaSO_4 \cdot 2H_2O$
	ソーマサイト生成	<ul style="list-style-type: none"> 主に低温環境において、SO₄²⁻・CO₃²⁻の存在によりソーマサイトが生成し、コンクリートを劣化させる。 $Ca(OH)_2, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, H_2O \xrightarrow{C-S-H} \text{thaumasite}$
	Mg ²⁺ による劣化	<ul style="list-style-type: none"> 硫酸塩がMgSO₄の場合、以下の反応によりMg²⁺がセメント水和物を分解する。 $Ca(OH)_2, MgSO_4, H_2O \xrightarrow{C-S-H} CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 + SiO_2 \cdot xH_2O \rightarrow M-S-H$

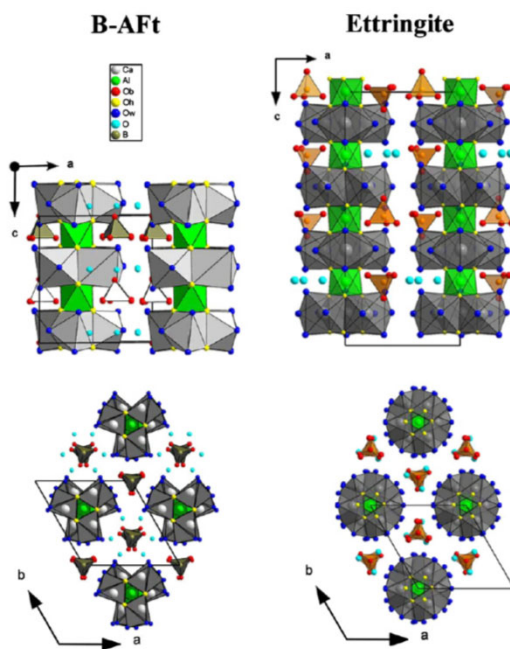
b. 可溶性塩の劣化現象の整理(ほう酸塩)

ほう酸塩は、コンクリート中の金属イオン(Na イオンや Ca イオン)と反応を示すが、ほう酸塩による反応生成物が硫酸塩劣化と同様の膨張影響を生じると直接的に示している文献は確認されていない⁽²⁶⁾。

一方で、エトリングタイトの SO_4 に対して BO_4 が置換すること^{(26)~(28)}が報告されていることから、埋設設備の膨張影響に関しては、覆土の低透水性への影響評価の観点を考慮し、膨張量を大きく算出するため、硫酸塩と同様の膨張影響として評価する。

ほう素を含む AFt*1 とエトリングタイトの結晶構造の比較を第 8 図に示す。

*1: ほう素を含む AFt は、カルシウム・アルミノフェライト・モノサルフェート水和物型化合物の総称を指す(エトリングタイトを主に指す)。



- ・ ほう酸は、エトリングタイト ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) に対して、3つの SO_4^{2-} イオンが4つの $B(OH)^{-}$ と2つの OH^- とに置き換わった構造をとる(エトリングタイトと結晶構造が類似)。

- ・ エトリングタイトの生成と同様に、膨張現象が生じる可能性が考えられるため、膨張影響では、覆土の低透水性への影響評価の観点を考慮し、膨張量を大きく算出するため、硫酸塩と埋設設備の反応と同様の挙動を示すと評価する。

第 8 図 ほう素を含む AFt とエトリングタイトの結晶構造の比較

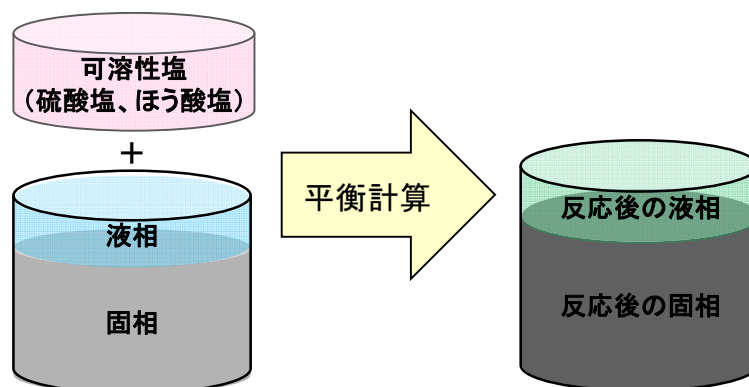
(ii) 埋設設備の膨張倍率の評価

可溶性塩による埋設設備の膨張倍率は、埋設設備に含まれる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)がセメント系材料と反応した後の固相の変化を考慮して設定する。

しかしながら、可溶性塩と埋設設備の反応による二次鉱物の膨張倍率を対象とした定量的な評価や知見がない。

そのため、地球化学計算コード PHREEQC^{(29)~(31)}を用いた評価期間に依存しない平衡計算を行うことで、鉱物の生成・溶解に伴う鉱物相の体積変化を求めることで、1号埋設設備の膨張倍率を評価する。PHREEQCを用いた評価の概念図を第9図に示す。

PHREEQCによる平衡計算は、可溶性塩により生成される膨張の特性を有する二次鉱物の生成量を確認するため、第8表にて整理している均質・均一固化体に含まれる可溶性塩の量を考慮し、実施する。



第9図 平衡計算の概念図

a. 解析プログラム

平衡計算においては、PHREEQC を使用する。解析では、高濃度の可溶性塩による反応に伴い、想定される二次鉱物の生成を考慮した検討が必要であることから、熱力学データベース (PHREEQC に同梱されている sit.dat より抽出、Thaumasite については、文献⁽³²⁾)を用いる。

b. 解析用物性値

PHREEQC の平衡計算に必要な入力物性値について、以下のとおり設定をする。

(a) 地下水組成

地下水組成は、事業所敷地内の鷹架層下部層、中部層及び第四紀層の地下水を対象に 1986 年 1 月～1987 年 10 月、1995 年 10 月及び 2011 年 10 月～11 月に取得された水質試験の結果を参考とし、濃度の平均値を用いて設定する。地下水組成を第 32 表に示す。

第 32 表 地下水組成(事業所敷地全体)

		測定結果	単位	設定値	単位
pH		5.3-8.3	-	PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	-
ナトリウムイオン	Na ⁺	7.2-31.5	mg/L	8.4×10 ⁻⁴	mol/L
カリウムイオン	K ⁺	0.5-5.6	mg/L	7.8×10 ⁻⁵	mol/L
カルシウムイオン	Ca ²⁺	0.1未満-7.2	mg/L	9.1×10 ⁻⁵	mol/L
マグネシウムイオン	Mg ²⁺	0.1-3.8	mg/L	8.0×10 ⁻⁵	mol/L
炭酸水素イオン	HCO ₃ ⁻	5.6-51.9	mg/L	4.7×10 ⁻⁴	mol/L
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻	1.0-21.7	mg/L	1.2×10 ⁻⁴	mol/L
塩化物イオン	Cl ⁻	12.9-20.3	mg/L	4.7×10 ⁻⁴	mol/L

(b) 初期鉱物組成

1号埋設設備に用いられたセメント系材料仕様・化学組成から、セメント系材料の初期鉱物組成を設定する。

セメント系材料の仕様を第33表に、また、セメント系材料及び混和材の化学組成を第34表及び第35表に示す。

第34表及び第35表のセメント系材料の仕様及び化学組成から、セメント系材料の初期鉱物組成を文献⁽³³⁾の算定方法に従い設定する。セメント系材料の初期鉱物組成を第36表に示す。

これは、地層処分の検討に用いられたセメント条件設定に使用しているモデルであるが、第9図の平衡計算の概念図のようなセメント系材料のバッチ式浸漬実験との比較において普通ポルトランドセメント及びフライアッシュ高含有シリカフェームセメントの液相成分の再現性が高いことから、適用をした。

第 33 表 セメント系材料仕様

	間隙率*1	W/C(%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量(kg/m ³)			細・粗骨材料(kg/m ³)		
				中庸熱 ポルトランドセメント	高炉スラグ 微粉末	膨張材	粗骨材	砕砂	陸砂
充填材	0.16	67.1	283	422			1,462		
				42	380	-	877	585	
コンクリート	0.16	55	153	279			1,911		
				普通 ポルトランドセメント	高炉スラグ 微粉末	膨張材	粗骨材	砕砂	陸砂
				126	153	-	1,023	533	355

*1：全容積に対する空間の容積の割合を指す。

第 34 表 セメント系材料の化学組成

(単位：wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	ig. loss
普通 ポルトランドセメント	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38	0.64
中庸熱 ポルトランドセメント	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.3	0.35	0.8

第 35 表 高炉スラグの化学組成

(単位：wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
高炉スラグ	34.19	14.87	0.84	41.97	6.09	0.02	0	0

第 36 表 セメント系材料の初期鉱物組成

鉱物	充填材		コンクリート		
	間隙率(-)*1	0.16	間隙率(-)*1	0.16	
	鉱物濃度				
	(mol/m ³)	(mol/L _{water})	(mol/m ³)	(mol/L _{water})	
エトリンガイト Ettringite	4.51	0.028	12.0	0.075	
ハイドロタルサイト Hydrotalcite	145.9	0.91	72.2	0.45	
CSH	CSH1.6	1,024.2	6.40	1,327.9	8.30
	CSH1.2	1,301.3	8.13	0.0	0.0
ギブサイト Gibbsite	427.1	2.67	0.0	0.0	
ハイドロガーネット C ₃ AH ₆	0.0	0.0	87.2	0.54	
ポルトランドイト Portlandite	0.0	0.0	29.9	0.17	
	Na ₂ O	2.03	0.013	4.07	0.025
	K ₂ O	1.56	0.01	5.08	0.032
骨材としてのカルサイト Calcite	8,762	55	10,220	64	

*1：全容積に対する空間の容積の割合を指す。

(c) 二次鉱物組成

PHREEQC では、設定する二次鉱物で平衡計算により算出される結果が異なることから、反応に寄与する条件(可溶性塩)を考慮し、以下の2種類の二次鉱物の設定による影響を確認する。

「埋設設備の環境におけるセメント二次鉱物設定(1)」は、セメント-ベントナイト環境における設定値である。

また、「ソーマサイトを含むセメントの検討における二次鉱物設定(2)」は、可溶性塩(硫酸塩)を起源として生成する可能性がある鉱物(ソーマサイト)による影響を把握するための設定値である。セメント系材料の二次鉱物の設定を第37表に示す。

第37表 セメント系材料の二次鉱物の設定

埋設設備の環境におけるセメント二次鉱物設定(1)		ソーマサイトを含むセメントの検討における二次鉱物設定(2)	
固相名	データベース内の名称	固相名	データベース内の名称
CSH ゲル	CSH0.8 ~ CSH1.6	CSH ゲル	CSH0.8 ~ CSH1.6
C_3ASH_4	Katoite	-	-
C_4AH_{13}	C_4AH_{13}	C_4AH_{13}	C_4AH_{13}
ゲーレンナイトハイドレート(C_2ASH_8)	Stratlingite	ゲーレンナイトハイドレート(C_2ASH_8)	Stratlingite
モノサルフェート	Monosulfoaluminate	モノサルフェート	Monosulfoaluminate
-	-	モノカルボアルミネート	Monocarboaluminate
-	-	ヘミカルボアルミネート	Hemicarboaluminate
カルサイト	Calcite	カルサイト	Calcite
ブルーサイト	Brucite	ブルーサイト	Brucite
ハイドロタルサイト	Hydrotalcite	ハイドロタルサイト	Hydrotalcite
-	-	アモルファスシリカ	SiO ₂ (am)
アナルサイム	Analcime	-	-
ローモンタイト	Laumontite	-	-
カオリナイト	Kaolinite	-	-
パイロフィライト	Pyrophyllite	-	-
フリーデル氏塩	Friedel-salt	-	-
2水石膏	Gypsum	2水石膏	Gypsum
硬石膏	Anhydrite	硬石膏	Anhydrite
ほう酸塩	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (s)	ほう酸塩	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (s)
	Ca ₃ B ₂ O ₆ (s)		Ca ₃ B ₂ O ₆ (s)
	CaB ₄ O ₇ (s)		CaB ₄ O ₇ (s)
	CaB ₂ O ₄ (s)		CaB ₂ O ₄ (s)
	NaBO ₂ (s)		NaBO ₂ (s)
硫酸塩 (Na ₂ SO ₄)	Thernardite	硫酸塩 (Na ₂ SO ₄)	Thernardite
ソーマサイト	Thaumasite	ソーマサイト	Thaumasite

(d) 可溶性塩濃度

可溶性塩濃度の設定は、可溶性塩による膨張性鉱物の生成に伴う膨張量に関して、定量的な知見がないことから、膨張性鉱物の体積膨張量が最大になると考えられる濃度を設定する。

そのため、可溶性塩濃度の設定値は、第 8 表に示された値を参考に、1 号埋設設備(1 群から 6 群)全体の体積における平均濃度が、1 号 7, 8 群の埋設設備へ作用するとして設定する。設定に当たっては、1 号埋設設備(1 群から 6 群)に含まれる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)の重量をモル量に換算した後、1 号埋設設備(7, 8 群)中の間隙水量により除算することで算出した。設定した可溶性塩の濃度を第 38 表に示す。

第 38 表 可溶性塩の濃度

ほう酸塩 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	硫酸塩 (Na_2SO_4)
0.84mol/L _{water} ^{*1}	4.5mol/L _{water} ^{*1}

*1：間隙水 1L に対する塩のモル量

(e) 解析ケース

「4. (3) (ii) b. (a) 地下水組成」から「4. (3) (ii) b. (d) 可溶性塩濃度」により設定したパラメータを踏まえて設定した解析ケースを第 39 表及び第 40 表に示す。

第 39 表 解析ケース-1

ケースNo.	セメント	間隙率 ^{*1}	塩 (1~6群の塩量全てが 7,8群へ反応する)	二次鉱物として ソーマサイト (沈殿あり/なし)	Stratlingite (C ₂ ASH ₈) 等の 二次鉱物 (あり/なし)	骨材を カルサイトと想定	二次鉱物設定
100	充填材	0.16	×	×	○	×	1
101			○	×	○	×	1
102			○	○	○	×	1
103			○	○	×	×	1
104			○	×	×	×	1
105			×	×	○	○	1
106			○	×	○	○	1
107			○	○	○	○	1
108			○	○	×	○	1
109			○	×	×	○	1
200	コンクリート	0.16	×	×	○	×	1
201			○	×	○	×	1
202			○	○	○	×	1
203			○	○	×	×	1
204			○	×	×	×	1
205			×	×	○	○	1
206			○	×	○	○	1
207			○	○	○	○	1
208			○	○	○	×	1
209			○	×	×	×	1

*1: 全容積に対する空間の容積の割合を指す。

第 40 表 解析ケース-2

ケースNo.	セメント	間隙率 ^{*1}	塩 (1~6群の塩量全てが 7,8群へ反応する)	二次鉱物として ソーマサイト (沈殿あり/なし)	Stratlingite (C ₂ ASH ₈) 等の 二次鉱物 (あり/なし)	骨材を カルサイトと想定	二次鉱物設定
100-2	充填材	0.16	×	×	○	×	2
101-2			○	×	○	×	2
102-2			○	○	○	×	2
103-2			○	○	×	×	2
104-2			○	×	×	×	2
105-2			×	×	○	○	2
106-2			○	×	○	○	2
108-2			○	○	×	○	2
109-2			○	×	×	○	2
200-2			コンクリート	0.16	×	×	○
201-2	○	×			○	×	2
202-2	○	○			○	×	2
203-2	○	○			×	×	2
204-2	○	×			×	×	2
205-2	×	×			○	○	2
206-2	○	×			○	○	2
207-2	○	○			○	○	2
208-2	○	○			○	×	2
209-2	○	×			×	×	2

*1: 全容積に対する空間の容積の割合を指す。

(f) 計算結果

PHREEQC を用いた平衡計算の計算結果を第 10 図～第 13 図に示す。

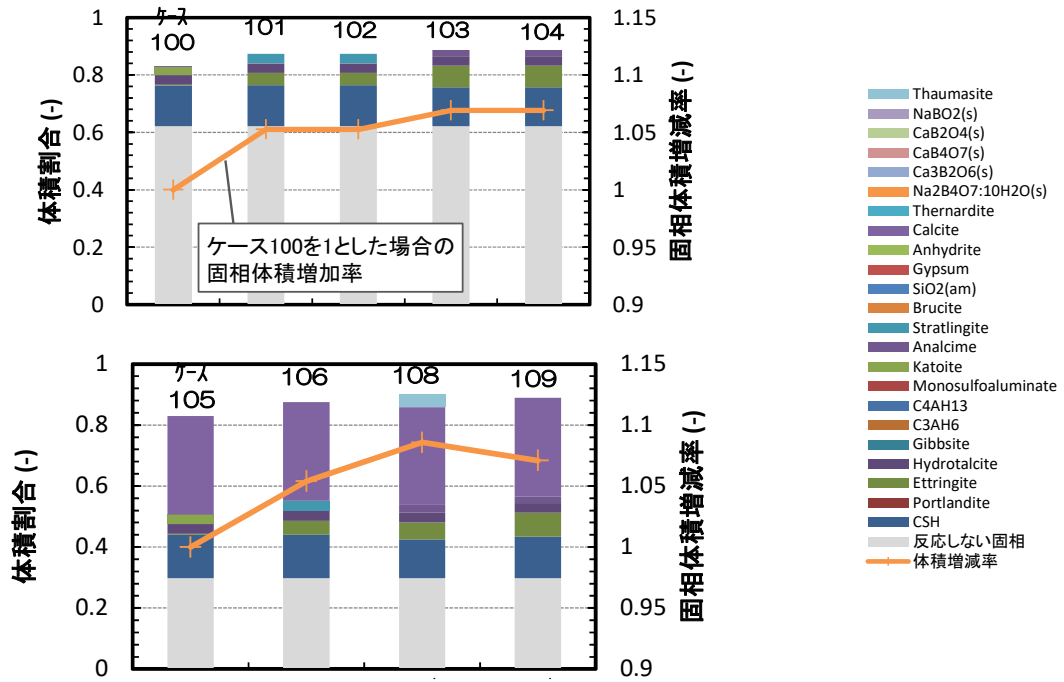
第 10 図より、充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、解析ケース 108 であり、約 9%の体積増加であった。第 11 図より、解析ケース 100-2～109-2 の計算結果では、解析ケース 103-2 及び 104-2 にて解析ケース 100～109 シリーズと同様の約 9%の体積増加であった。

また、第 12 図より、コンクリートを対象とした解析ケース 200～209 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、解析ケース 208 及び 209 であり、約 5%の体積増加であった。第 13 図より、解析ケース 200-2～209-2 の計算結果では、解析ケース 203-2、204-2、207-2 及び 208-2 にて約 4%の体積増加であった。

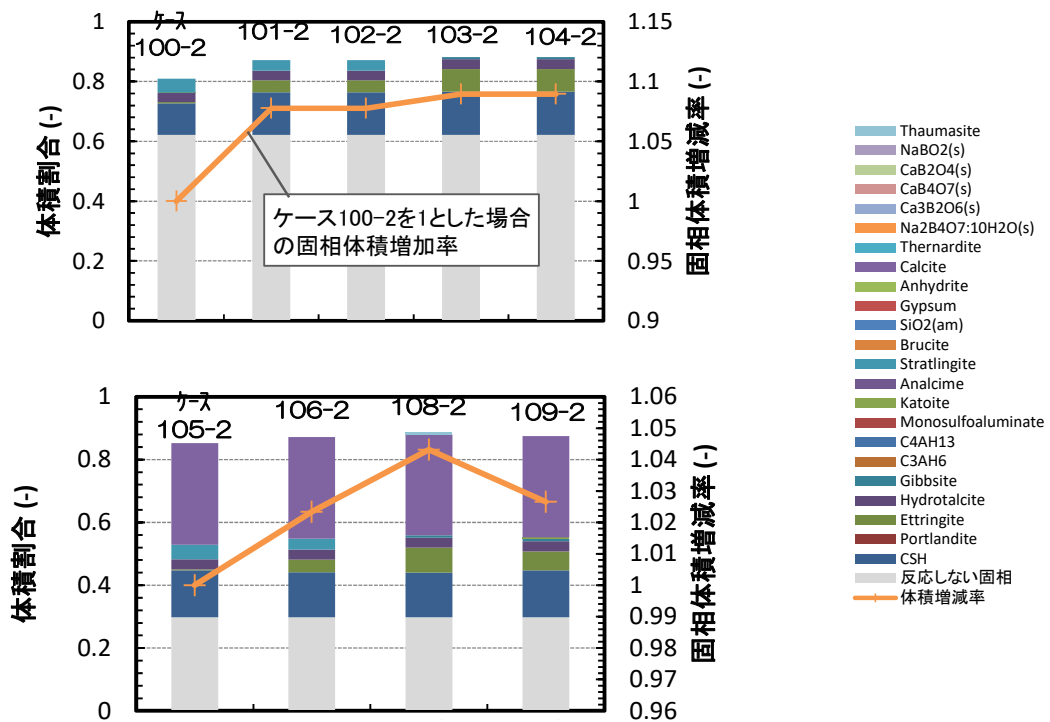
充填材及びコンクリートを対象とした解析結果より、それぞれの部材に生じ得る体積増加分は、「4. (3) (i) 可溶性塩の劣化現象の整理」のとおり、設定する物性値の評価に不確かさがあることから、以下のとおり最大の体積膨張倍率を設定する。

- ・ 充填材の体積膨張倍率は、1.09 倍とする。
- ・ コンクリートの体積膨張倍率は、1.05 倍とする。

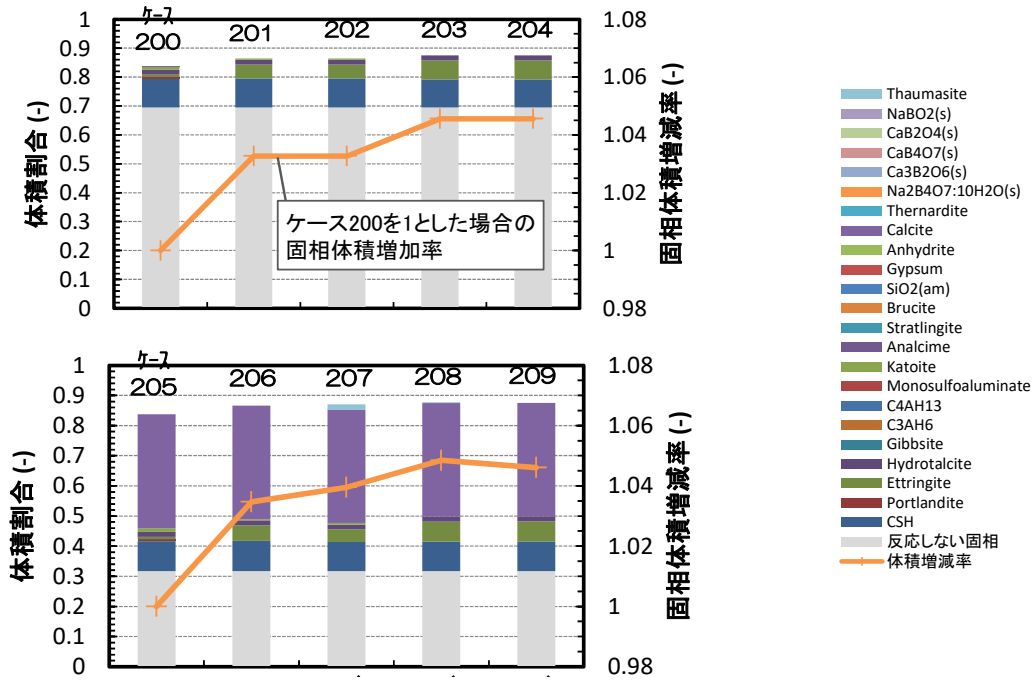
上記の設定に加えて、埋設設備の充填材、コンクリートの体積分率(第 41 表参照)を踏まえた埋設設備の体積膨張倍率を設定する。埋設設備の膨張倍率の設定値及びその考え方に関しては、次章の「4. (3) (iii) 埋設設備の膨張倍率の設定」にて詳述する。



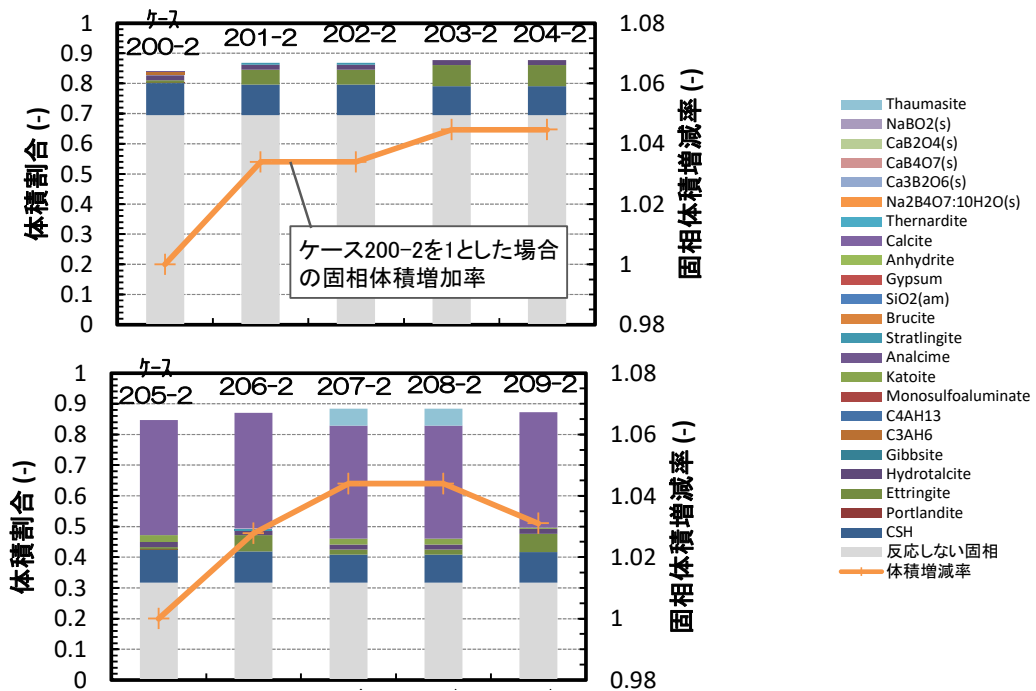
第 10 図 充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果



第 11 図 充填材を対象とした解析ケース 100-2～109-2 の計算結果



第 12 図 コンクリートを対象とした解析ケース 200～209 の計算結果



第 13 図 コンクリートを対象とした解析ケース 200-2～209-2 の計算結果

第 41 表 埋設設備の構成部材ごとの体積分率

部位	体積分率(-)
廃棄体中の充填材	0.194
廃棄体上部空隙	0.083
セメント系充填材	0.311
ポーラスコンクリート	0.042
コンクリート (覆い、外周及び内部仕切設備)	0.315

埋設設備の膨張倍率(-)^{*1}

= (廃棄体中の充填材の体積分率(-)+セメント系充填材の体積分率(-)) × 充填材の体積膨張倍率(-) + (ポーラスコンクリートの体積分率(-)+コンクリート体積分率(-)) × コンクリートの体積膨張倍率(-) + 廃棄体上部空隙(-)

*1：埋設設備の膨張倍率の算出に必要な体積分率は、第 41 表の埋設設備の構成部材ごとの値を用いる。

(iii) 埋設設備の膨張倍率の設定

「4. (3) (ii) 埋設設備の膨張倍率の評価」の結果を踏まえ、最も可能性が高い設定／最も厳しい設定を以下のとおりとする。埋設設備の膨張倍率の設定値を第 42 表に示す。

a. 最も可能性が高い設定

埋設設備の膨張倍率は、可溶性塩の溶出及び鉱物の生成に必要となる原料の消費による空隙の増加並びにセメント系材料及び廃棄体の初期空隙が存在することから、これを考慮し設定する。

b. 最も厳しい設定

埋設設備の膨張倍率は、セメント系材料(充填材及びコンクリート)の固相変化による膨張倍率の算出結果(充填材：1.09 倍、コンクリート：1.05 倍)を踏まえて設定する。

第 42 表 埋設設備の膨張倍率の設定値

条件	設定値	設定の考え方
膨張倍率	【最も可能性が高い設定】 1.0 倍 (変化なし)	【最も可能性が高い設定】 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張は、二次鉱物の生成に必要となる原料(他の鉱物)の消費に伴う空隙の増加又は他の鉱物の溶出による影響を考慮し、埋設設備の体積に変化が生じないものとして設定する。
	【最も厳しい設定】 1.1 倍	【最も厳しい設定】 セメント系材料の固相変化による膨張倍率の算出結果を踏まえて設定する。

(4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量は、「4. (3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定」の設定・評価を踏まえ、埋設設備の膨張倍率より算出し設定する。

可溶性塩は、廃棄体ごとに様々な濃度で分布しており、固型化時に形成される鉱物も多種多様である。また、可溶性塩は、廃棄体から溶出した際にセメント系材料と反応することで膨張性鉱物を生成するが、その膨張方向の規則性に係る定量的な知見はなく、特定することが出来ない。

そのため、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量は、「4. (2) 金属腐食による金属の膨張量の設定」と同様の2種類の変形方向に対して算出する。

(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

鉛直方向への変形による膨張量は、第7図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備の膨張倍率の設定を用いて算出し設定する。

膨張量の算出については、その算出過程がわかるものとして1号廃棄物埋設地のうち、最も厳しい設定の鉛直方向へ卓越した変形の算出過程を例に以下に示す。

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量(鉛直方向) (m)

$$= \text{埋設設備の体積膨張量}^{*1} (\text{m}^3) / \text{埋設設備の水平面積}^{*2} (\text{m}^2)$$

*1: 埋設設備の体積膨張量(m^3)

$$= (\text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3} (\text{m}^3) \times \text{埋設設備の体積膨張倍率} (-) - \text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3} (\text{m}^3))$$

*2: 埋設設備の水平面積(m^2)

$$= \text{埋設設備(東西方向)長さ} (\text{m}) \times \text{埋設設備(南北方向)長さ} (\text{m})$$

*3: 埋設設備のセメント系材料の体積(m^3)

$$= \text{埋設設備の体積} (\text{m}^3) (\text{東西方向長さ} (\text{m}) \times \text{南北方向長さ} (\text{m}) \times \text{鉛直方向高さ} (\text{m})) - (\text{埋設設備中の健全時の金属重量} (\text{kg}) / \text{鉄の密度} (\text{kg}/\text{m}^3))$$

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第43表に示す。

第43表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)
	対象設備: 1号
	鉛直方向
最も可能性が高い設定	—
最も厳しい設定	6.08×10^{-1}

(ii) 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

鉛直・水平方向への変形による膨張量は、第7図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備の膨張倍率の設定を用いて算出し、設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、1号埋設設備の最も厳しい設定のうち鉛直・水平方向への変形の中から東西方向の算出過程を例に以下に示す。

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量(東西方向)(m)

$$= (\text{埋設設備(東西寸法)}(m) \times 1 \text{ 方向当たりの埋設設備の膨張比}(-)^{*1}) - \text{埋設設備(東西寸法)}(m)$$

*1: 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張比}(-)^{*2}) \text{の三乗根}$$

*2: 埋設設備の体積膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(m^3) + \text{埋設設備の体積膨張量}^{*4}(m^3)) / \text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(m^3)$$

*3: 「4.(4)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち埋設設備のセメント系材料の体積の算出結果を引用

*4: 「4.(4)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち埋設設備の体積膨張量の算出結果を引用

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第44表に示す。

第44表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備: 1号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向
最も可能性が高い設定	-	-	-
最も厳しい設定	7.88×10^{-1}	7.88×10^{-1}	2.01×10^{-1}

(5) 金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定

(i) 膨張量の設定の考え方

「2. 現象の整理と検討手順」のとおり、1号廃棄物埋設地では、一部の群において混合埋設となることから、異なる条件により生じる現象(膨張)を加算することで膨張量の設定を行う。

1号廃棄物埋設地の膨張量の設定に当たっては、充填固化体由来の金属腐食に伴う現象(膨張)を、充填固化体が埋設される埋設設備に対してのみ考慮する。

また、均質・均一固化体由来の可溶性塩と埋設設備の反応に伴う現象(膨張)に関しては、廃棄物埋設地が地下水面下に敷設されることから、周辺の地下水により可溶性塩が充填固化体を含む埋設設備へ移行することを考慮する。

以上のことから、1号廃棄物埋設地のうち、7群の埋設設備1基及び8群の埋設設備5基に対してのみ2種類の現象(膨張)を重畳されることとする。

なお、重畳時の相互作用を定量的に推定・評価することが困難であることから膨張量を加算することで評価する。

(ii) 膨張量の設定値

「4. (2) 金属腐食による金属の膨張量の設定」及び「4. (4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定」により設定した膨張量を「4. (5) (i) 膨張量の設定の考え方」に基づき算出した結果を第45表及び第46表に示す。

第45表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
	鉛直方向		
最も可能性が高い設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
最も厳しい設定	1.69×10^0	9.69×10^{-1}	1.39×10^0

*1：1号廃棄物埋設地のうち最も厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している

第46表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備：3号			対象設備：1号*1			対象設備：2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
最も可能性が高い設定	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	3.64×10^{-2}	3.32×10^{-2}	3.32×10^{-2}	8.42×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.68×10^{-1}	3.16×10^{-2}
最も厳しい設定	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}	1.26×10^0	1.26×10^0	3.19×10^{-1}	2.25×10^0	2.31×10^0	4.34×10^{-1}

*1：1号廃棄物埋設地のうち最も厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量は、3号廃棄物埋設地で最大となり、最も可能性が高い設定で水平方向：0.35m(東西)、鉛直方向：0.0364m、最も厳しい設定で水平方向：5.0m(東西)、鉛直方向：0.52mである(第45表及び第46表参照)。最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定の膨張量が直接的に覆土の変位量になると仮定した場合、覆土の形状変化は第14図c.及び第14図d.に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(第14図a.参照)。金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形として生じることとなる。埋設設備間の狭隘部に設置された下部覆土は、埋設設備の膨張に伴い、埋設設備に挟まれ圧縮された状態となり圧密(密度増加)することから、覆土の低透水性への影響はないと想定される。また、狭隘部は隣接する埋設設備により変形が拘束されることから、側部岩盤側の覆土方向へ変形が卓越すると想定される(第14図b.参照)。そのため、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ側部岩盤側の覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。

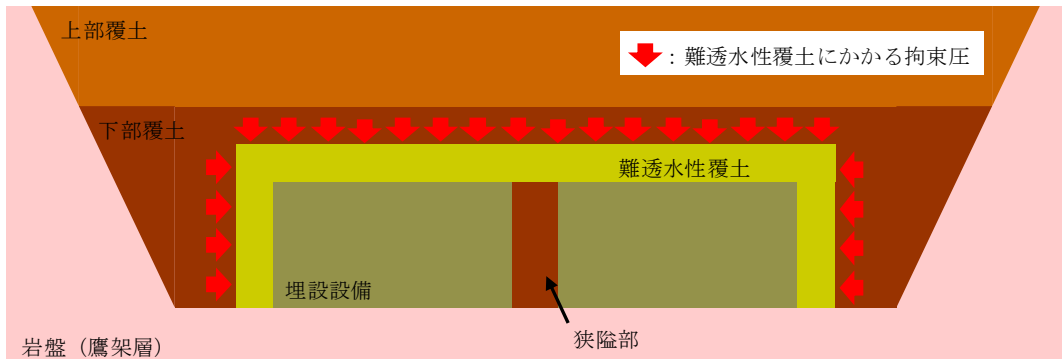
以上のことから、膨張による変形が卓越する隅角部(側部岩盤方向)の難透水性覆土に着目し、力学的影響を評価する。

最も可能性が高い設定における水平方向の変形量0.35mが難透水性覆土の厚さ2.0m以下であることから、難透水性覆土に20%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(第14図c.参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材としたCa型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果及びせん断透水試験結果を第15図に示す。第15図a.より、せん断ひずみ5%以降から30%までせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、20%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、第15図b.より、残留状態であるせん断ひずみ15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には20%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能の低下が生じないと考えられる。

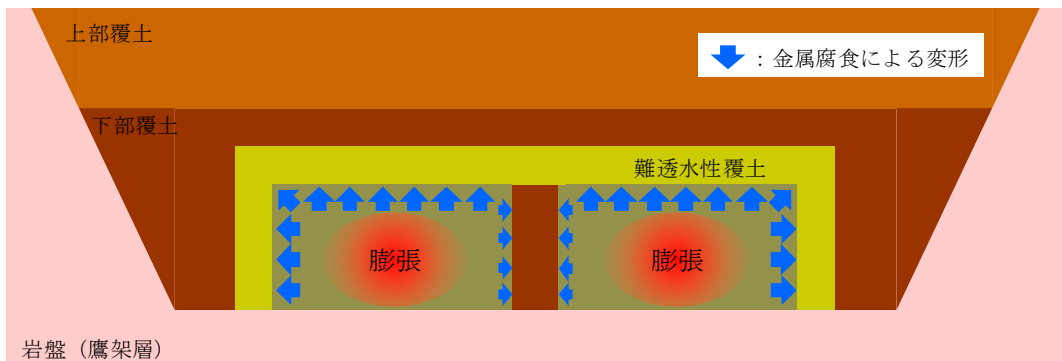
最も厳しい設定における水平方向の変形量5.0mが難透水性覆土の厚さ2.0m以上であることから、難透水性覆土に開口が生じる可能性がある(第14図d.参照)。地盤内の複雑な応力状態及び変形挙動を考慮し、開口の可能性について詳細に検討する必要がある。

以上のことから、最も厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数及び厚さ)への力学的影響評価を実施する。また、最も可能性が高い設定においては難透水性覆土に開口は生じないものの、覆土の低透水性(厚さの変化)を確認するため、力学的影響評価を同様に実施する。

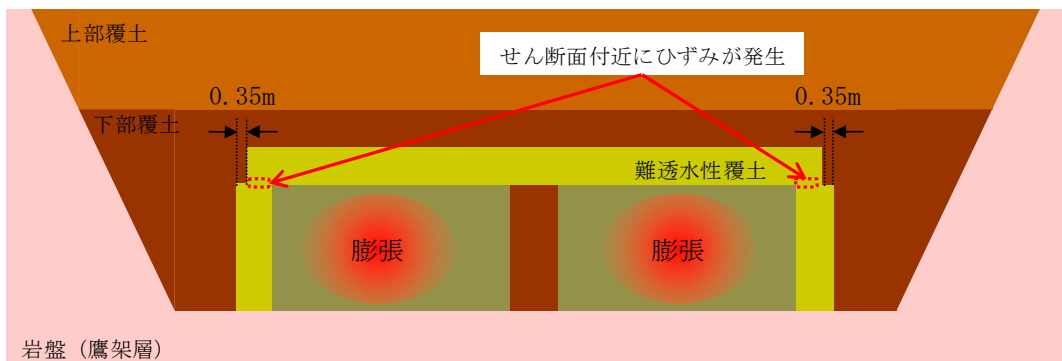
*1：残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



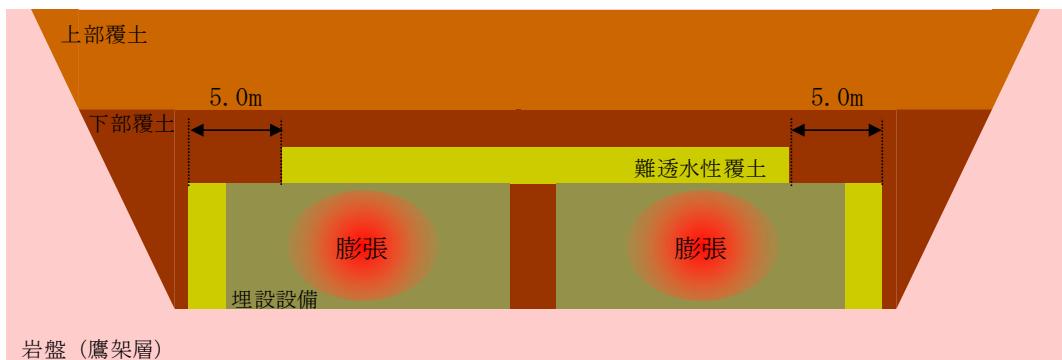
a. 初期状態(覆土完了後)



b. 金属腐食による変形

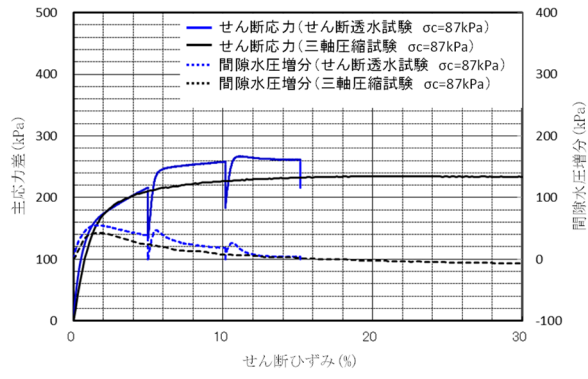


c. 最も可能性が高い設定における覆土の形状変化

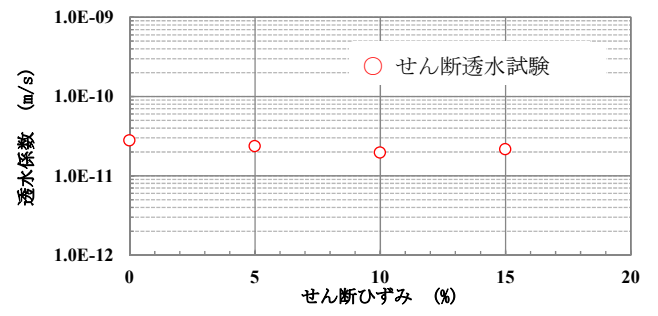


d. 最も厳しい設定における覆土の形状変化

第 14 図 埋設設備の膨張に伴う覆土の形状変化の概念図



a. 主応力差-せん断ひずみ



b. 透水係数-せん断ひずみ

第 15 図 三軸圧縮試験及びせん断透水試験による試験結果

(2) 力学的影響評価手法

力学的影響評価手法は、廃棄物埋設地の規模を考慮し、数値解析を用いた評価を実施する。

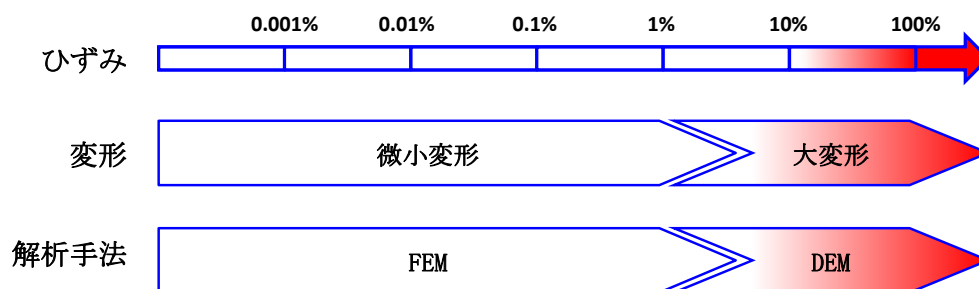
地盤工学の数値解析分野では、有限要素法(Finite Element Method) (以下「FEM」という。)が広く用いられている。文献⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾によると、FEMは計算格子を用いた計算手法であることから、地震時における地盤の安定性評価などの微小変形である数%程度までのひずみを対象として用いられている。数%のひずみを超える大変形においては、変形するにつれ要素に大きなひずみが生じ、計算精度を低下させる可能性がある。

大変形を扱うことができる解析手法の1つとして、個別要素法(Distinct Element Method) (以下「DEM」という。)がある。文献⁽³⁴⁾~⁽³⁶⁾によると、DEMは対象物を粒子の集合体(剛体)とし、粒子に運動方程式を適用することで、不連続体の挙動を再現する解析手法である。

上記の文献⁽³⁴⁾~⁽³⁶⁾より、解析手法とひずみレベルは第16図に示す関係があると整理される。

廃棄物埋設地の覆土に生じるひずみは、金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による膨張により、数十~数百%に及ぶことが予想される。大変形の領域においては、分離、すべり及び剥離のような不連続体としての挙動が顕著になることから、不連続体を対象とした解析としてDEMにより評価することが好ましい。

以上のことから、埋設設備の膨張によるメートルオーダーの大変形においては、不連続体を対象としたDEM解析手法を採用する。



第16図 解析手法とひずみレベルの関係

(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様を第 47 表に示す。難透水性覆土の材料はベントナイト混合土、下部覆土の材料は現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石、上部覆土の材料は現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合する。

第 47 表 覆土の主な仕様

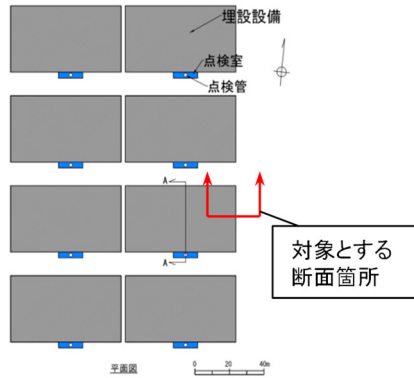
設備	主要な部位	仕様	
		材料	性能
覆土	難透水性覆土	・ ベントナイト混合土	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数^{*1}として1.0×10^{-10}m/s 以下 ・ 厚さ：2m 以上
	下部覆土	・ 現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数^{*1}として1.0×10^{-8}m/s 以下 ・ 厚さ：難透水性覆土側部及び難透水性覆土上面から層厚 2m 以上
	上部覆土	・ 現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 ・ 厚さ：下部覆土上面から現造成面又はそれ以上

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

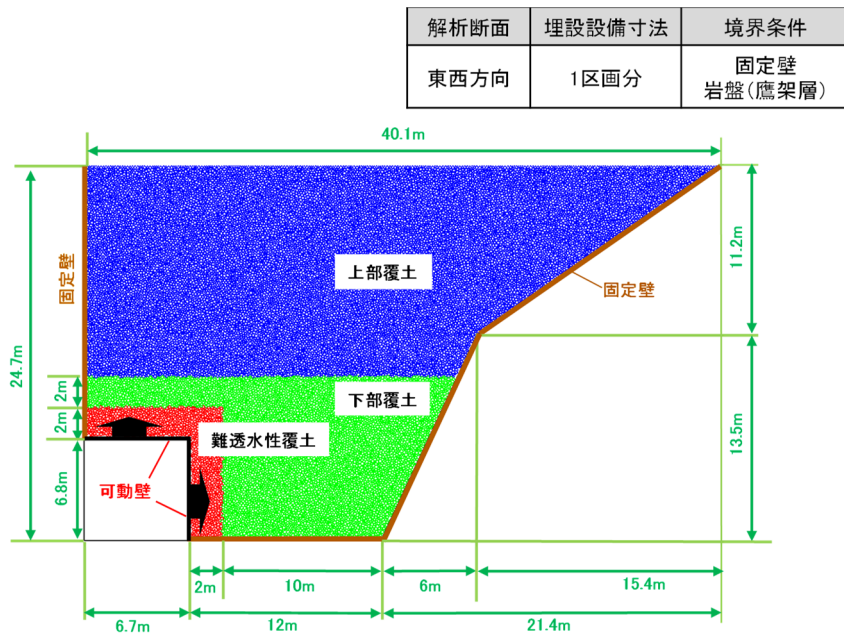
(4) 解析に用いる諸条件の設定

(i) 解析モデル

解析モデルの設定においては、膨張量の最も大きい廃棄物埋設地の断面を対象とする。金属廃棄体の配列数が多い水平方向に変形が卓越することから、隅角部付近の覆土に大きなひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、3号廃棄物埋設地の東西方向の断面とし、埋設設備端部の1区画を対象とする。解析対象断面の位置図を第17図に、解析モデルを第18図にそれぞれ示す。



第17図 3号廃棄物埋設地における解析対象断面の位置図

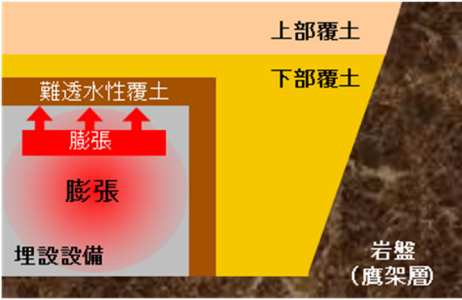
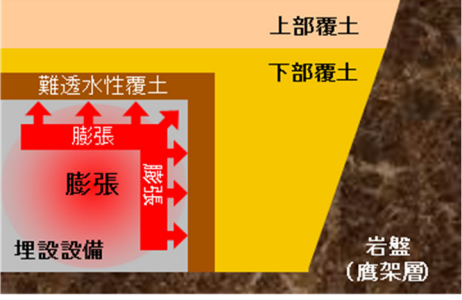


第18図 3号廃棄物埋設地の解析モデル

(ii) 埋設設備の膨張影響の方向

覆土の力学的影響(膨張影響)は、埋設設備中の金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応に起因し生じるが、その変形方向に関しては、これらの現象に起因する覆土への応力分布を定量的に把握することが困難であるため、変形方向の状態を設定する。埋設設備の膨張影響の方向の設定を第 48 表に示す。

第 48 表 埋設設備の膨張影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
<p>【最も可能性が高い設定 ／最も厳しい設定共通】 鉛直方向へ卓越した変形</p>	<p>埋設設備の変形は、埋設設備の側部に必要に応じて碎石を混合した剛性の高い下部覆土を設置することから、鉛直方向に卓越して生じる可能性が高いと考えられる。</p> <p>そのため、埋設設備の膨張に伴う変位は、全て鉛直方向へ作用するとして設定する。</p>	
<p>【最も可能性が高い設定 ／最も厳しい設定共通】 鉛直・水平方向への変形</p>	<p>埋設設備の変形は、構造上躯体が水平方向に大きいことから、水平方向に変位が生じる可能性がある。</p> <p>そのため、埋設設備の膨張に伴う変位は、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持され、たまた鉛直・水平方向へ作用するとして設定する。</p>	

(iii) 解析に用いる変形量

埋設設備中の金属廃棄物は、廃棄体 1 本ごとの金属重量が異なる。そのため、金属腐食に伴う膨張現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、膨張現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

a. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが膨張した場合に比較して、1 つの区画のみが膨張した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

b. 鉛直・水平方向への変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直・水平方向の膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直・水平方向に対する変形量は、埋設設備の区画ごとに生じる膨張量の合計であるため、鉛直方向に比較して水平方向への膨張が卓越し、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう「4. (5) (ii) 膨張量の設定値」を参考とした最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「5. (4) (ii) 埋設設備の膨張影響の方向」に従い埋設設備の変形比率を保ったまま一定として変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の第 49 表に示す。

第 49 表 DEM 解析に用いる変形量

変形方向	変形量(m/基)	
	東西方向	鉛直方向
鉛直方向へ卓越した変形	0.0	2.0
鉛直・水平方向への変形	5.0	1.0

(iv) 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要となる解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析及びフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

a. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係を第 19 図に示す。

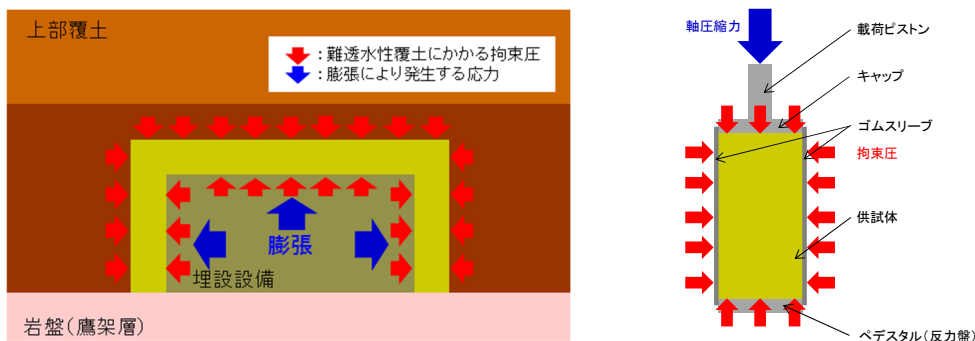
廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられる。そのため、埋設設備の膨張時において、覆土内部では圧縮応力及びせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。

文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験は、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるとき強度・変形特性及び主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の膨張時の圧縮応力及びせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力及び軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態

b. 三軸圧縮試験の応力状態

第 19 図 廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係

b. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきのない砂及び有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(b) 下部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた下部覆土の供試体は、ベントナイト、砕砂及び砕石を混合しない現地発生土単体である。

下部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度及び粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じてベントナイト、砕砂及び砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂及び砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、下部覆土に砕砂及び砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(c) 上部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた上部覆土の供試体は、砕砂及び砕石を混合しない現地発生土単体である。

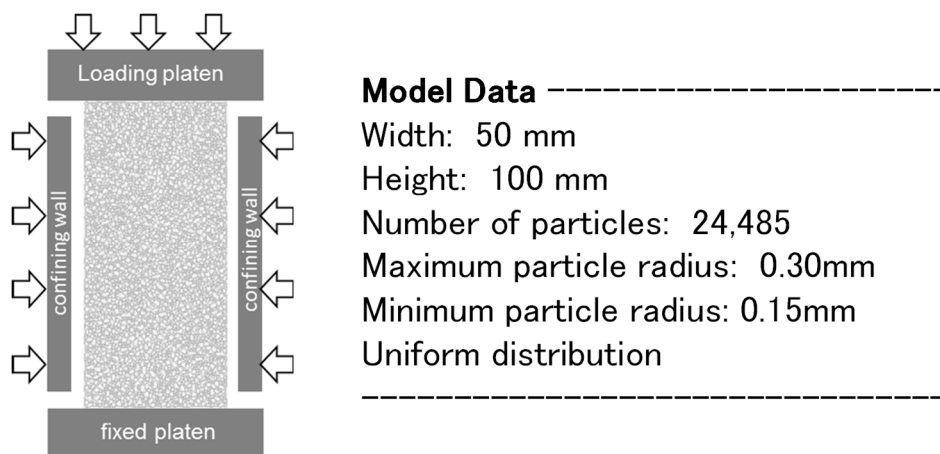
上部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度及び粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じて砕砂及び砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂及び砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、上部覆土に砕砂及び砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

c. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 20 図に示す。供試体モデルは、実際の三軸圧縮試験と同様に幅 50mm、高さ 100mm として作成した。粒子数は 24,485 個である。



第 20 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を第 21 図に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる膨張現象を考慮して設定する。廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられることから、覆土内部では圧縮応力及びせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの圧縮挙動及びせん断挙動の再現性が重要であり、法線方向及び接線方向にバネ及びスライダを直列で設定した。

一方で、上記の応力状態を考慮すると、粒子が離れようとするときのせん断挙動は限定的であり、覆土全体の挙動における再現性への影響が小さいことから、バネのみを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。

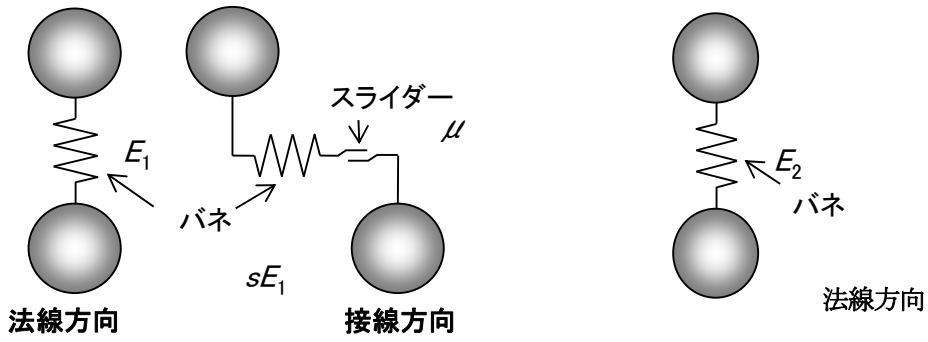
また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を第 50 表に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_l) : 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のバネ (sE_l) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のスライダ (μ) : せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_2) : 引張方向において覆土の剛性を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- 粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力及びスライダーによる摩擦力が作用する。
- 粒子同士が離れようとするときは、バネによる引張力が作用する。
- 引張力がバネの結合強度を超えるとバネが破断し粒子同士が離れ、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- 粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

第 21 図 粒子間結合モデルの概念図

第 50 表 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>
接線方向	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>	<p>—</p>

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の載荷盤を固定しておき、側部及び上部の載荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の載荷盤を動かすことにより実施した。

軸方向応力は、供試体モデル上端の粒子から上部の載荷盤に作用する反発力の総和を供試体モデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を10個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

d. フィッティング

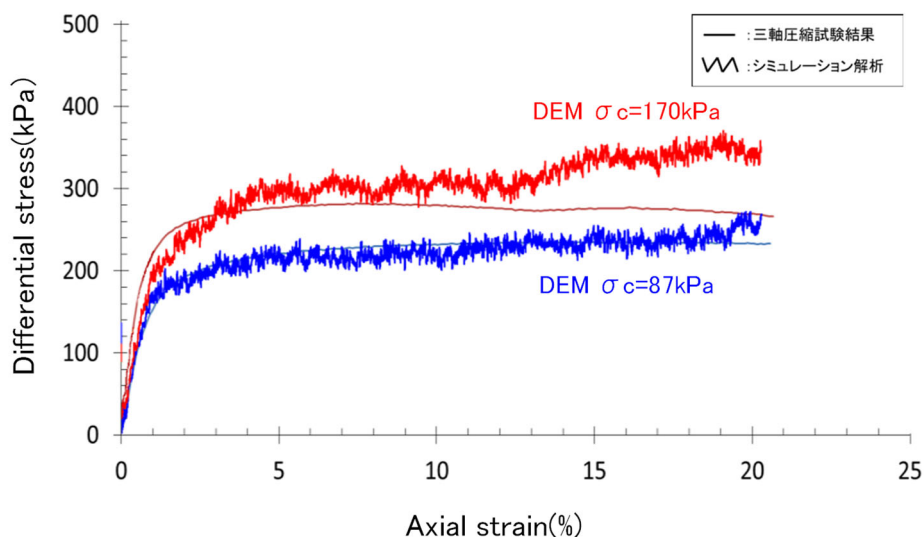
三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第22図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体壁を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押し戻す作用が働くために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、変形を押し戻す作用が生じていない。廃棄物埋設地モデルは、モデルサイズが大きく上部が解放されていることから、上記のような変形を押し戻す作用が生じないと考えられる。

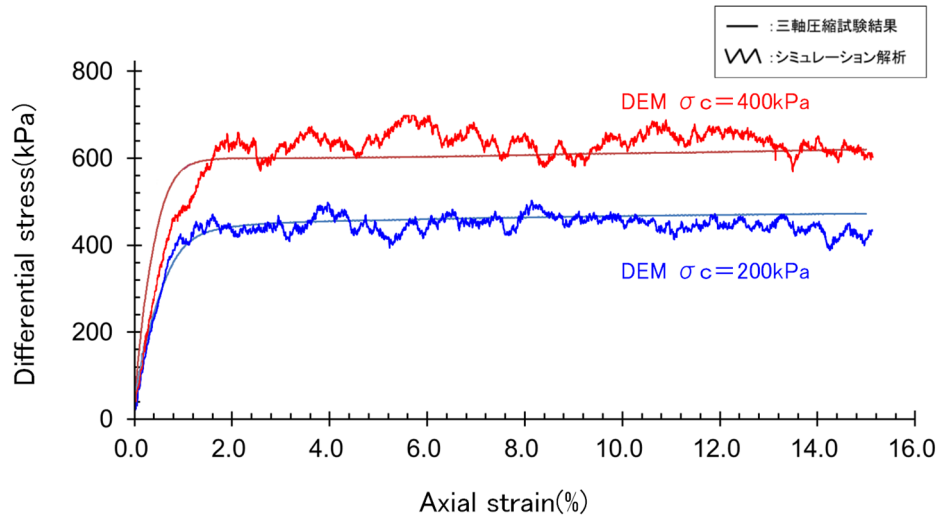


第 22 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

(b) 下部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第 23 図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。



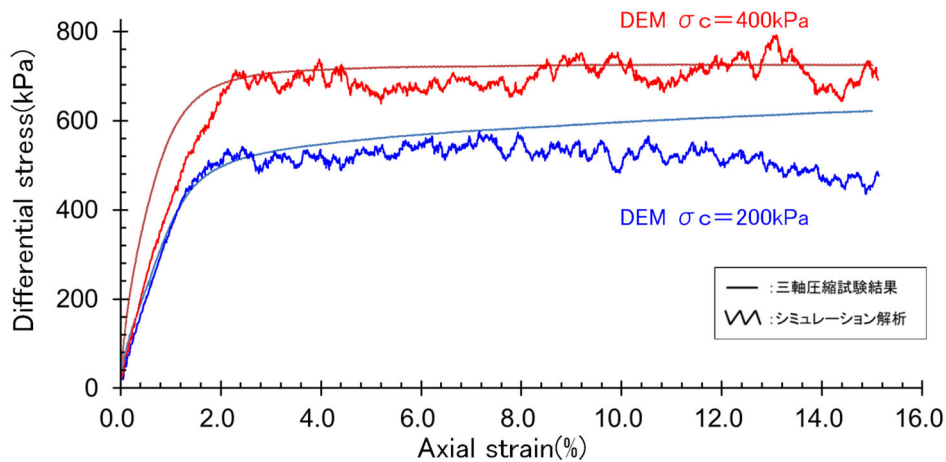
第 23 図 下部覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

(c) 上部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第24図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、上部覆土は、力学的影響評価の対象としている低透水性機能を有する難透水性覆土及び下部覆土への上載荷重が作用していれば良い。



第24図 上部覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

e. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土の解析用物性値を第 51 表に示す。

第 51 表 解析用物性値一覧

設定	設定値			単位	設定方法
	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土		
密度	1,649	1,940	1,500	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	100	100	100	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	50	50	50	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数(E_1)	55	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数(E_2)	600	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比(s)	1.0	1.0	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数(μ)	0.4	0.5	0.4	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度(σ_{max})	330	1,000	1,200	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値（せん断強さ）を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示す。

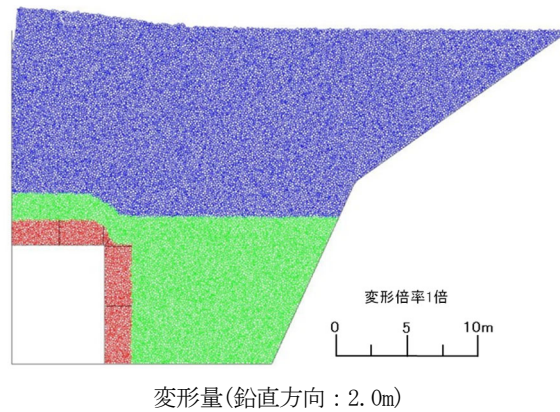
以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(5) 解析結果

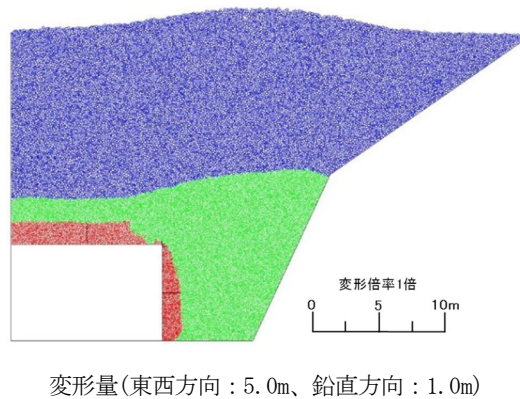
(i) 覆土の変形方向による力学的影響の確認

前項までに設定したパラメータを用いてDEM解析を実施した。解析では、覆土の形状変化に大きな影響を与える状態を確認するため、第48表で設定した変形方向の2種類の設定を併記することで形状変化を確認する。解析結果を第25図及び第26図に示す。第25図及び第26図より、第49表の変位を与えた際の覆土の形状変化は、鉛直・水平方向への変形による影響が大きいことが確認された。

そのため、覆土の透水係数及び厚さへの影響については、鉛直・水平方向への変形を対象に評価する。



第25図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



第26図 鉛直・水平方向への変形ケースにおける解析結果

(ii) 覆土の厚さの評価

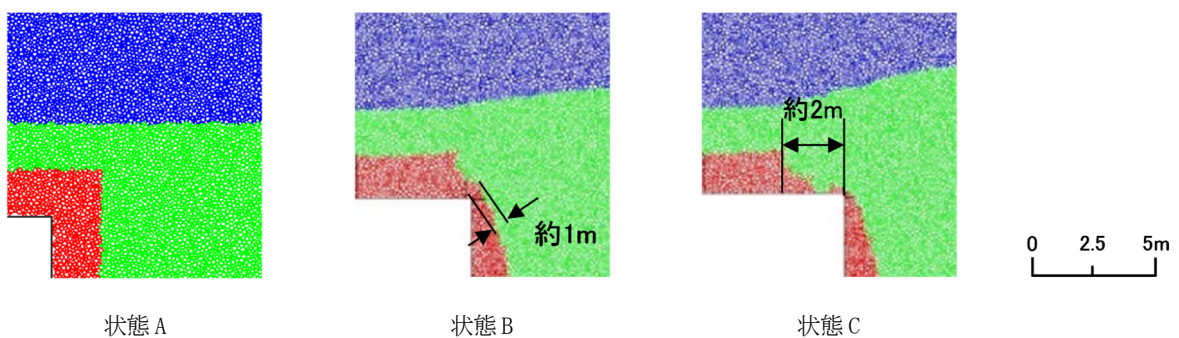
覆土の厚さは、弱部と考えられる隅角部に残存している難透水性覆土の厚さを確認することで評価する。

第 46 表の最も可能性が高い設定の膨張量(東西方向： $3.50 \times 10^{-1} \text{m}$ 、鉛直方向： $3.64 \times 10^{-2} \text{m}$)及び最も厳しい設定の膨張量(東西方向： $5.00 \times 10^0 \text{m}$ 、鉛直方向： $5.20 \times 10^{-1} \text{m}$)を考慮して鉛直・水平方向の変形ケースのうち、以下の 3 種類の変形状態に対する隅角部の拡大図を第 27 図に示す。

- ・ 状態 A 解析の初期状態
- ・ 状態 B 最も可能性が高い設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： 3.0m 、鉛直方向： 0.6m)
- ・ 状態 C 最も厳しい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： 5.0m 、鉛直方向： 1.0m)

解析結果から、最も可能性が高い設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、厚さが約 1m 残る状態が確認されたが、金属腐食の膨張量が解析の変形量に比して十分小さいことから、厚さが 1m 以上残る状態を最も可能性が高い設定の設定値とする。また、最も厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口(約 2m)が生じる可能性が確認されたため、隅角部に約 2m の開口が生じる状態を最も厳しい設定の設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。



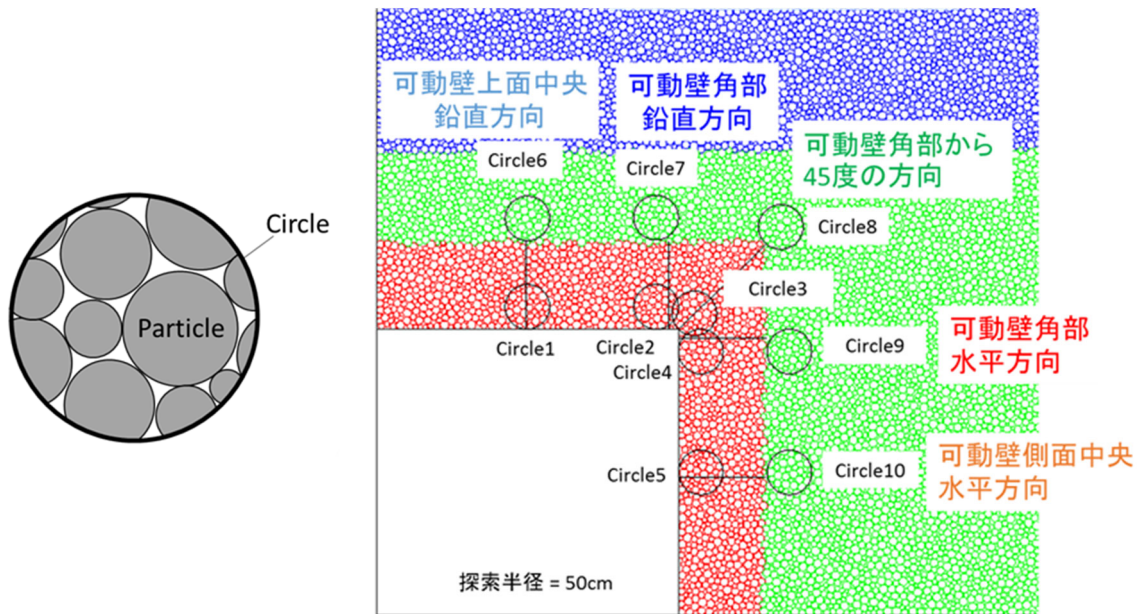
第 27 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける弱部(隅角部)の拡大図

(iii) 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、変形前後の密度を確認することで評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は第 28 図 b. に示すとおり、解析に半径 50cm の Circle を設定し、Circle 内に含まれる粒子の面積に粒子密度をかけたものを足し合わせ、Circle 面積により割り込むことで算出する。算出箇所に関しては、第 28 図に示したとおり難透水性覆土及び下部覆土を対象とした 10 箇所とする。密度の増加率を算出した結果を第 52 表に示す。

第 52 表より、覆土の密度減少は軽微であることから、密度変化により覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じない。



a. 密度の算出概念

b. 密度の算出位置^{*1, *2}

*1 : Circle1~Circle5 : 難透水性覆土層と可動壁の接触位置

*2 : Circle6~Circle10 : 難透水性覆土層の外周

第 28 図 密度の算出方法の概念図

第 52 表 鉛直・水平方向への変形時における密度の増加率

測定位置	鉛直・水平方向への変形	
	第 27 図のうち状態 B	第 27 図のうち状態 C
	密度の増加率 (%) ^{*1}	密度の増加率 (%) ^{*1}
Circle1	-0.8	0.3
Circle2	-2.0	1.7
Circle3	12.3	12.3
Circle4	7.3	16.3
Circle5	21.8	30.9
Circle6	-0.9	-1.9
Circle7	-4.0	-7.1
Circle8	0.9	0.0
Circle9	-4.2	5.1
Circle10	7.8	11.5

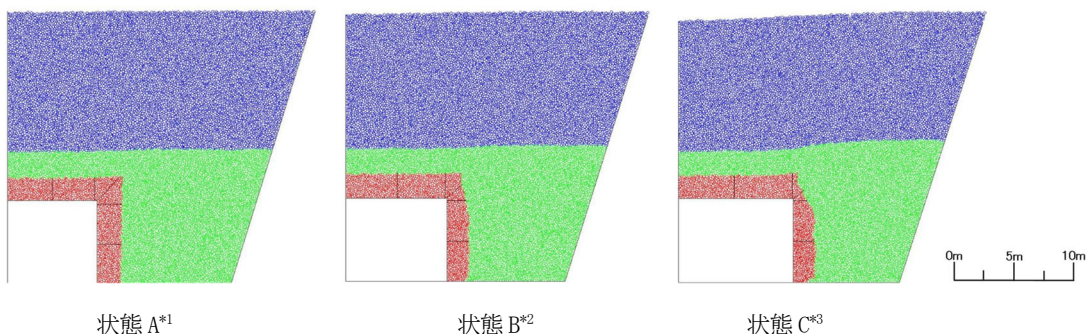
*1：負の値は、密度低下を示す。

1 号廃棄物埋設地に関しては、可溶性塩と埋設設備による反応を起因とする埋設設備の膨張影響をあわせて考慮しているため、第 27 図と同様に DEM 解析にて覆土への力学的影響を評価した。

覆土の形状変化に関して、解析を用いて確認した結果を第 29 図に示す。

解析結果から、最も可能性が高い設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、厚さが約 1m 残る状態が確認されたが、金属腐食の膨張量が解析の変形量に比して十分小さいことから、厚さが 1m 以上残る状態を最も可能性が高い設定の設定値とする。また、最も厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じないものの、厚さがほぼ残らない状態を設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、透水係数及び覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。



*1：状態 A 解析の初期状態

*2：状態 B 最も可能性が高い設定以上に変形した状態(変形量 東西方向：1.0m、鉛直方向：0.2m)

*3：状態 C 最も厳しい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向：2.0m、鉛直方向：0.4m)

第 29 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける解析結果

(6) 1,000 年後の力学的影響評価

金属及び埋設設備の膨張影響に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性への影響評価を行った結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。金属及び埋設設備の膨張による覆土への力学的影響評価を第 53 表に示す。

なお、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合(参考資料 4 参照)においても、DEM 解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないとする。

第 53 表 金属及び埋設設備の膨張による 1,000 年後の覆土への力学的影響評価

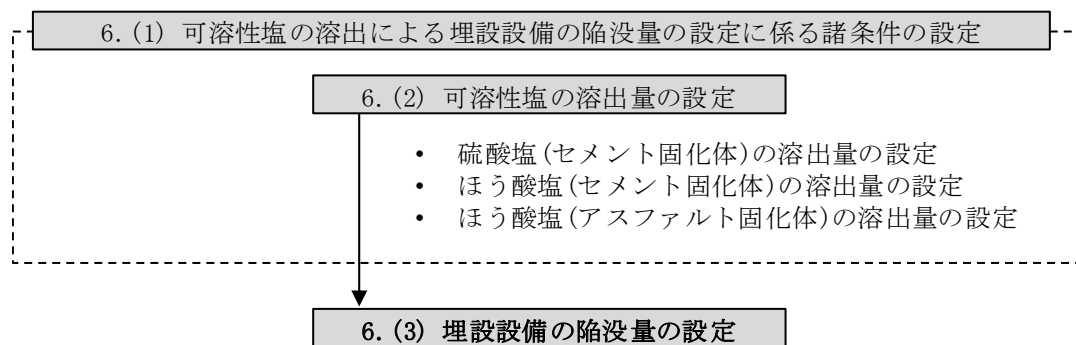
対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
2 号及び 3 号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが 1m 以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約 2m の開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1 号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが 1m 以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態

6. 状態変化(陥没)に必要な条件設定

(1) 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定に係る諸条件の設定

陥没量の設定は、埋設設備中の対象となる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が地下水との反応により溶出すること及び廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生するとし、空洞の発生に伴う陥没を考慮して行う。埋設設備の陥没量の設定手順^{*1}を第30図に示す。

*1：廃棄体の上部空隙を考慮し陥没量の設定を行う。



第30図 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定手順

(2) 可溶性塩の溶出量の設定

(i) 硫酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴¹⁾を参考に硫酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、**全量溶出した状態を設定する。**

(ii) ほう酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴¹⁾を参考にほう酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、**全量溶出した状態を設定する。**

(iii) ほう酸塩(アスファルト固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴²⁾を参考に**アスファルトの実態的な性能を考慮し、設定する。**

(3) 埋設設備の陥没量の設定

埋設設備の陥没量は、埋設設備中の対象となる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が地下水との反応により溶出すること及び均質・均一固化体の固型化条件である有害な空隙(少なくとも「上部空隙が30%を超えない」ものは有害ではない)に起因し、陥没することから、「6. (2) 可溶性塩の溶出量の設定」を考慮し、設定する。

廃棄体中の可溶性塩が溶出することによる空隙の体積増加分及び廃棄体の初期条件である上部空隙の体積分を考慮し、埋設設備の区画ごとの最大沈下量を算出する。

廃棄体の初期条件である上部空隙については、覆土の低透水性への影響評価の観点から、均質・均一固化体の固型化条件の最大値である上部空隙30%の体積分を用いる。

沈下量の設定は、埋設設備の区画ごとに含まれる可溶性塩の量に応じて変化することから、1区画当たりの沈下量(沈下する底面積は、区画底面積とする。)とする。

なお、可溶性塩のうち、アスファルト固化体中のほう酸塩については、文献⁽⁴²⁾を参考に考慮する。

沈下量の算出式を以下に示す。

はじめに、廃棄体中の空隙量に従った初期空隙高さ L_i より、埋設設備中の区画の初期空隙体積 V_i を求める。

$$V_i = L_i \times S_{pit}$$

S_{pit} : 区画の投影面積(m²)

V_i よりドラム缶 1 本当たりの初期空隙体積 V_d を求める。ただし、区画には n 本あるとする(1号埋設設備のうち、1区画には320本(8段5列8行)のドラム缶が配置される。)

$$V_d = V_i/n$$

V_d よりドラム缶中の初期空隙高さ h を求める。

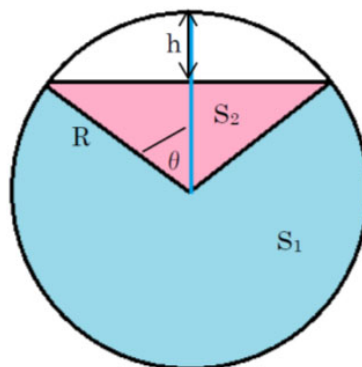
次に、ドラム缶断面の廃棄体投影面積 S を求める。投影面積に関する概念図を第31図に示す。

$$S = S_1 + S_2$$

$$S_1 = \pi R^2(1 - \theta/\pi)$$

$$S_2 = \frac{R^2}{2}(2\sin\theta\cos\theta)$$

ただし、ドラム缶の半径 R 、ドラム缶中の初期空隙高さ h であるため、 $\cos\theta = \frac{R-h}{R}$ となる。



第31図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積

よって、ドラム缶中の廃棄体の体積 V_w は、ドラム缶全長 H を用いて
 $V_w = S \times H$

S の式より、表面溶出する場合、一部の可溶性塩が残存する廃棄体のドラム缶断面の投影面積 S' を求める。

溶出については、表面から r だけ溶出するとし、 S_1 の部分は半径 $R \rightarrow (R-r)$ 、 S_2 の部分は空隙 $h \rightarrow (h-r)$ に存在する可溶性塩が溶出すると仮定する。

$$S' = S'_1 + S'_2$$

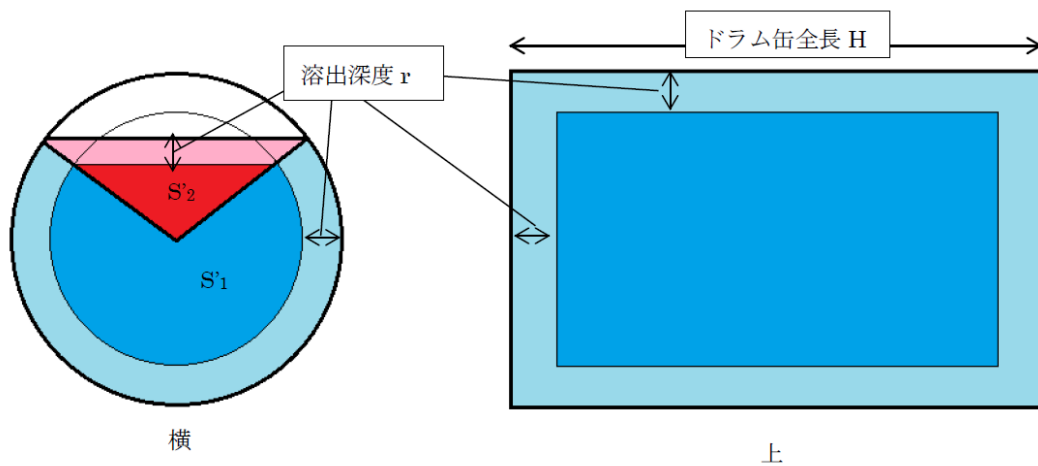
$$S'_1 = \pi(R-r)^2(1-\theta/\pi)$$

$$S'_2 = \frac{R^2}{2}(2\sin\theta\cos\theta)\left(\frac{R-h-r}{R-h}\right)^2$$

よって、可溶性塩の溶出が起こらないドラム缶中の廃棄体の体積 V'_w は
 $V'_w = S' \times (H - 2r)$

可溶性塩の溶出による区画の沈下量 L は以下の式より求められる。区画ごとの可溶性塩の含有量を V_{salt} とする。ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)を第 32 図に示す。

$$L = V_{salt} \times \frac{V_w - V'_w}{V_w} / S_{pit}$$



第 32 図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)

以上のことから、最大の沈下量を算出した結果、約 743mm である。

可溶性塩の溶出挙動に関しては、セメント系材料との反応による挙動の不確かさや溶出速度の知見など、定量的な沈下量を設定する根拠が乏しい。そのため、陥没量は最大の沈下量に対し、覆土の低透水性への影響評価の観点から大きく設定する。設定した値を第 54 表に示す。

第 54 表 鉛直方向へ卓越した変形による陥没量の設定

設定	陥没量(m)
	対象設備：1号
	鉛直方向
最も可能性が高い設定／最も厳しい設定 共通	1.0

7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

可溶性塩の溶出による陥没量は、第54表より、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定で鉛直方向：1.0mである。最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定の陥没量が直接的に覆土の変形量になると仮定した場合、覆土の形状変化は第33図に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(第33図 a. 参照)。また、拘束圧が作用した場において、可溶性塩が地下水との反応により溶出することで、埋設設備に空洞が発生する。埋設設備の空洞の発生に伴い、覆土が追随することでせん断変形する状態となる。

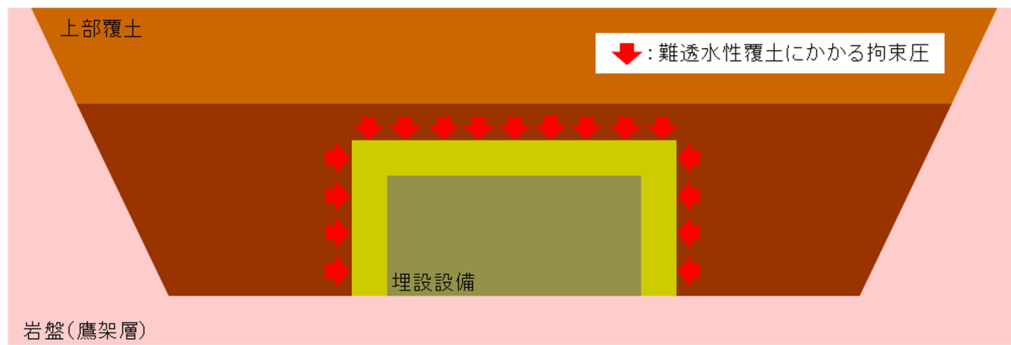
最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定における鉛直方向の変形量 1.0m は難透水性覆土の厚さ 2.0m 以下であることから、難透水性覆土に 50%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(第33図 b. 参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果及びせん断透水試験結果を第15図に示す。

第15図 a. より、せん断ひずみ 5%以降でせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、50%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、第15図 b. より、残留状態であるせん断ひずみ 15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には 50%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能は低下しないと考えられる。

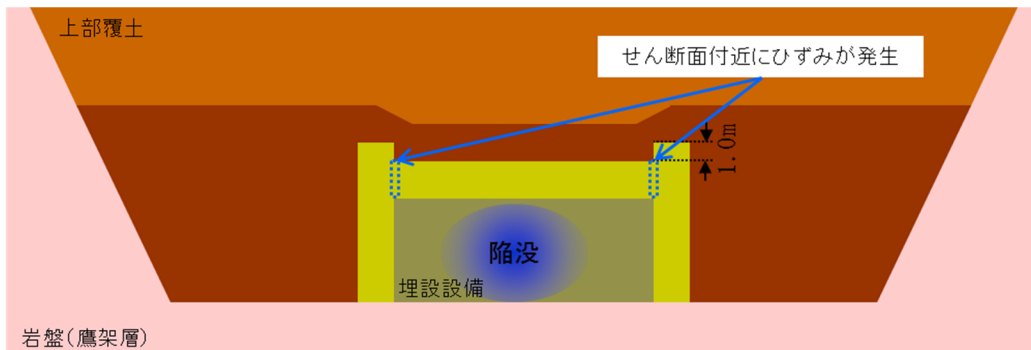
しかしながら、陥没現象では覆土が下方に緩むことにより、膨張現象に比べて複雑な応力場となることが考えられるため、上記について不確かさを否定できない。

以上のことから、最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数及び厚さ)への力学的影響評価を実施する。

*1：残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



a. 初期状態(覆土完了後)



b. 最も可能性が高い設定/最も厳しい設定における覆土の形状変化

第 33 図 埋設設備の陥没に伴う覆土の形状変化の概念図

(2) 力学的影響評価手法

覆土の力学的影響の評価手法は、埋設設備の陥没による覆土の大変形に応じた挙動を評価するため、膨張影響と同様の手法である DEM 解析を用いる。

なお、粒子間結合の設定では、粒子が沈下する際の滑り及び沈下後の圧密現象をより良く再現するため、変更している。

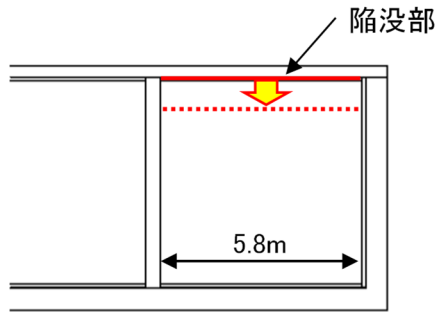
(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様は第 47 表に示すとおり難透水性覆土の材料はベントナイト混合土である。

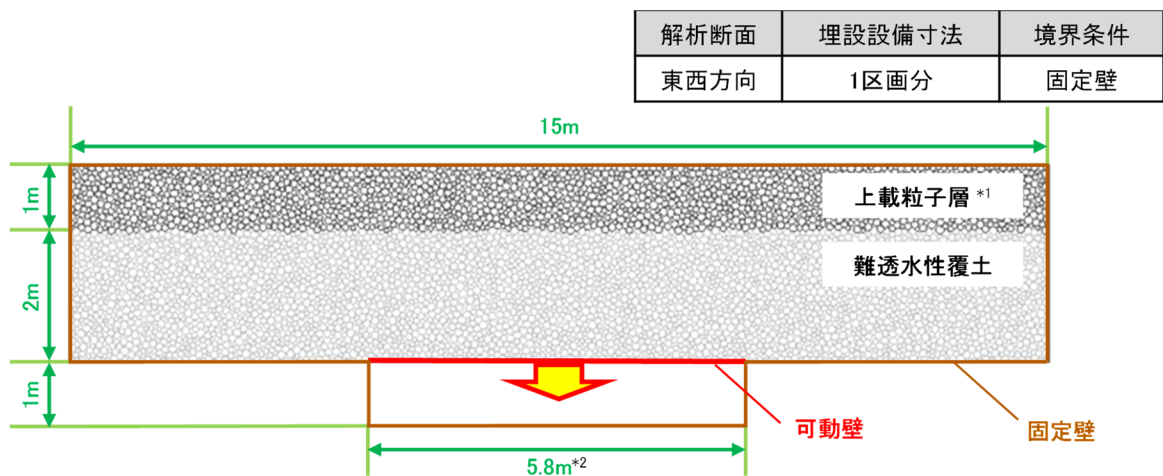
(4) 解析に用いる諸条件の設定

(i) 解析モデル

解析モデルの設定においては、陥没現象が生じる廃棄物埋設地の断面を対象とする。可溶性塩が含まれる埋設設備では、可溶性塩が徐々に溶出するに伴い分散した形で空隙が形成されることで陥没が生じ、覆土にひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、1号廃棄物埋設地の鉛直方向の断面とし、埋設設備の1区画を対象とする。解析対象の鉛直断面図を第34図に、解析モデルを第35図にそれぞれ示す。



第34図 1号埋設設備の鉛直断面図



*1：上載粒子層は、難透水性覆土へかかる有効拘束圧を与えるものである。

*2：陥没する幅は、1号埋設設備のうち、1区画当たりの内側寸法として設定する。

第35図 1号廃棄物埋設地の解析モデル

(ii) 埋設設備の陥没影響の方向

覆土への力学的影響(陥没影響)は、埋設設備中の可溶性塩の溶出及び廃棄体に含まれる上部空隙に起因し土圧に抵抗出来なくなることにより、鉛直方向へ卓越した変形が生じることが考えられるため、この変形方向の状態を設定する。埋設設備の陥没影響の方向の設定を第 55 表に示す。

第 55 表 埋設設備の陥没影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
【最も可能性が高い設定 ／最も厳しい設定共通】 鉛直方向へ卓越した変形	埋設設備の変形は、廃棄体に内蔵される可溶性塩の溶出に伴い、埋設設備が土圧に抵抗出来なくなることから、鉛直方向に卓越して生じる可能性が高いと考えられる。 そのため、可溶性塩の溶出に伴う変位が全て鉛直方向へ作用するとして設定する。	

(iii) 解析に用いる変形量

埋設設備中の可溶性塩は、廃棄体 1 本ごとに異なる。そのため、可溶性塩の溶出に伴う陥没現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、陥没現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

a. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設設備中の可溶性塩の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への陥没は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが陥没した場合に比較して、1 つの区画のみが陥没した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる陥没に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう「6. (3) 埋設設備の陥没量の設定」を参考とした最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「7. (4) (ii) 埋設設備の陥没影響の方向」に従い変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の第 56 表に示す。

第 56 表 DEM 解析に用いる変形量

設定	陥没量(m)
	対象設備：1号
	鉛直方向
最も可能性が高い設定／最も厳しい設定共通	1.0

(iv) 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要となる解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析及びフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

a. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係を第 36 図に示す。

廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の陥没に伴い覆土が下方に緩むことによるせん断応力が支配的であり、圧縮応力が共に作用している状態となると考えられる。

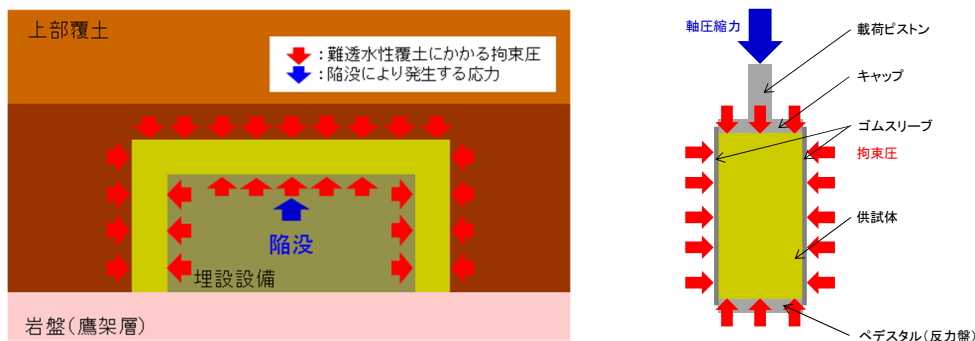
文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験では、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるとき強度・変形特性及び主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の陥没時の圧縮応力及びせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(C_U)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。

三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力及び軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態

b. 三軸圧縮試験の応力状態

第 36 図 廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係

b. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いる難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

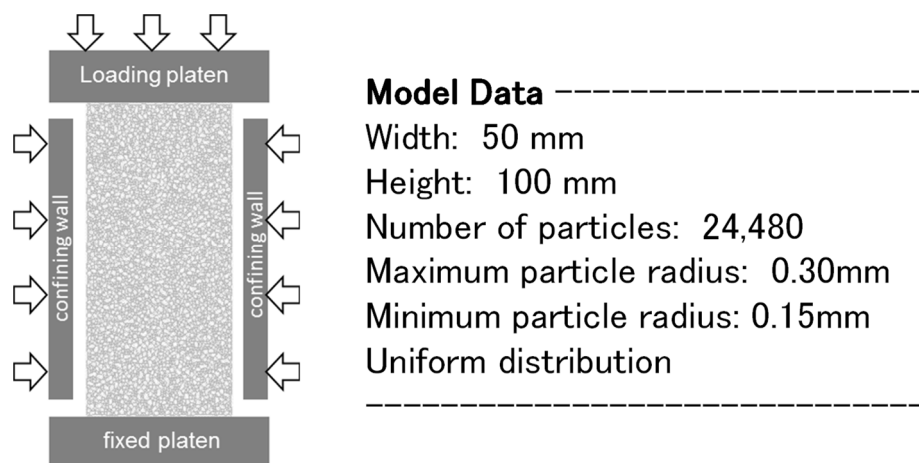
難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきのない砂及び有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

c. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 37 図に示す。供試体モデルは、幅 50mm、高さ 100mm (最大粒子半径 0.3mm、最小粒子半径 0.15mm) として作成した。粒子数は 24,480 個である。



第 37 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を第 38 図に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる陥没現象を考慮して設定する。

廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、可溶性塩の溶出に伴う陥没は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食による膨張のような強制変位とは異なり、覆土が下方に緩むことによるせん断変形となる。よって、覆土の緩みに伴い粒子が離れようとするときの挙動の重要性が増すと考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が離れようとするときの接線方向にバネとスライダを直列で設定した。

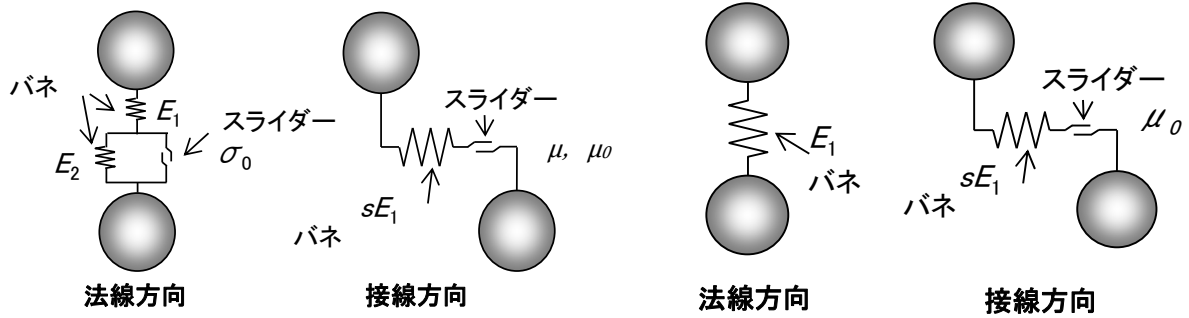
また、緩み後に上載覆土が再び積み重なることを想定し、覆土の圧縮方向の反発力を使い分ける必要があると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの法線方向にバネ単独及びスライダと並列したバネを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を第 57 表に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・法線方向のバネ (E_1) : 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・法線方向のバネ (E_2) : 圧縮方向において E_1 と共に降伏後の覆土の剛性を表現する
- ・法線方向のスライダ (σ_0) : 圧縮方向において摩擦抵抗力を表現する
- ・接線方向のバネ (sE_1) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・接線方向のスライダ (μ, μ_0) : せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- 法線方向のバネ (E_1) : 引張方向において覆土の剛性を表現する
- 接線方向のバネ (sE_1) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- 接線方向のスライダー (μ_0) : せん断方向において覆土の摩擦抵抗力を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- 粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力及びスライダーによる摩擦力が作用する。
- 粒子同士が離れようとするときは、バネにより引張力が作用する。
- 引張力がバネの結合強度を超えるとバネが破断し粒子同士が離れる、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- 粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

第 38 図 粒子間結合モデルの概念図

第 57 表 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向		
接線方向		

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の载荷盤を固定しておき、側部及び上部の载荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の载荷盤を動かすことにより実施した。

軸方向応力は、供試体モデル上端の粒子から上部の载荷盤に作用する反発力の総和を供試体モデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を 10 個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

d. フィッティング

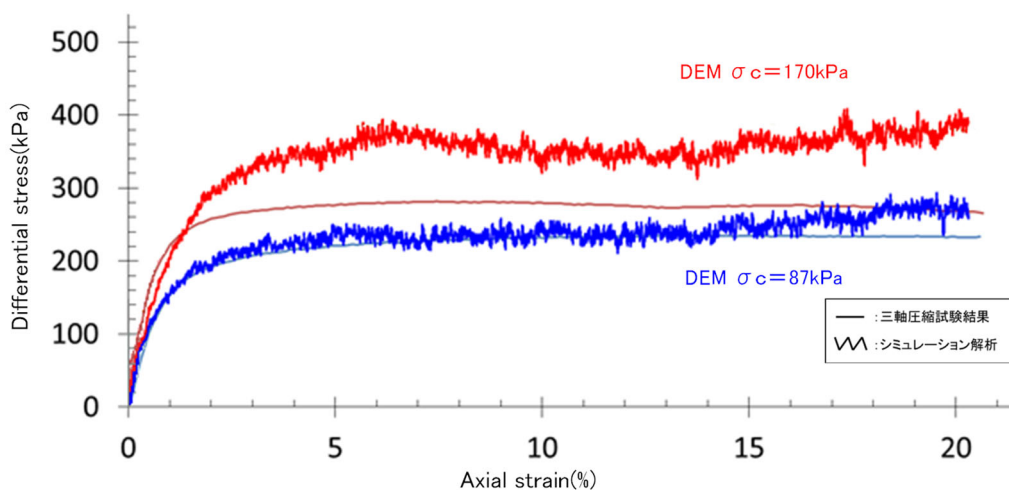
三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第 39 図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、第 39 図より、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押し戻す作用が働いているために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、同様の現象が生じていない。廃棄物埋設地モデルはモデルサイズが大きいことから、上記のような変形を押し戻す作用が生じないと考えられる。



第 39 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

e. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土の解析用物性値を第 58 表に示す。

第 58 表 解析用物性値一覧

設定	設定値	単位	設定方法
密度	1,649	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	60	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	30	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数 (E_1)	200	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数 (E_2)	50	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向スライダ降伏値 (σ_0)	10	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比 (s)	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数 (μ)	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
基準摩擦抵抗値 (μ_0)	1.5	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度 (σ_{max})	10	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加に因らず継続的に同じ性質を示す。

以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

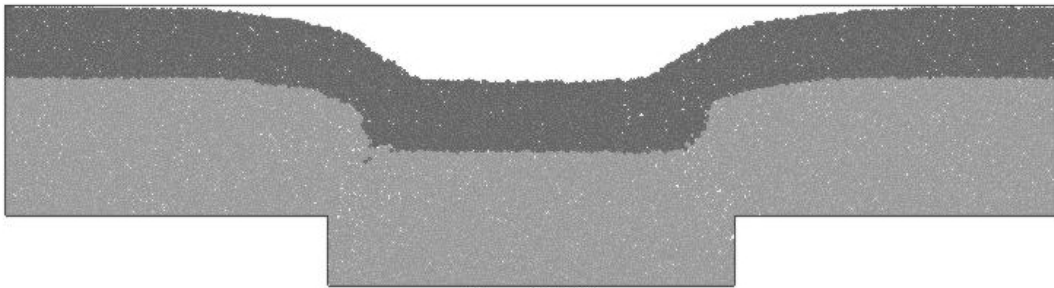
(5) 解析結果

(i) 覆土の厚さの評価

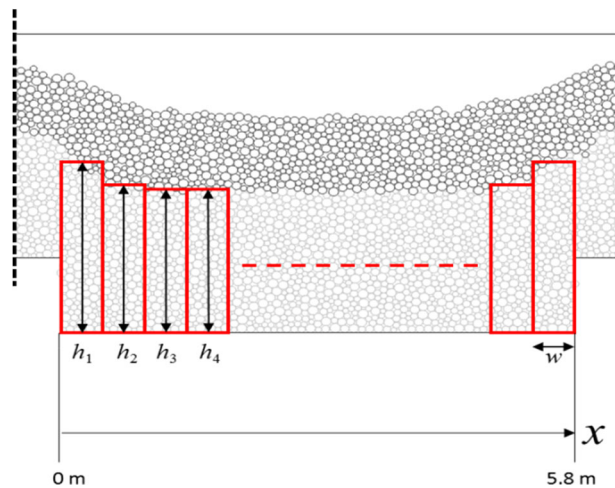
前項までに設定したパラメータを用いて DEM 解析を実施した。解析結果を第 40 図に示す。陥没現象では、第 55 表のとおり鉛直方向への変形に対する影響評価である。そのため、覆土の厚さは、第 40 図に示す解析結果*1 を対象に、第 41 図に示す算出方法のとおり算出し確認することで評価する。算出した難透水性覆土の厚さ分布を第 42 図に示す。

第 42 図より、難透水性覆土の厚さに大きな減少が確認されなかったことから、厚さに変化は生じないと設定する。

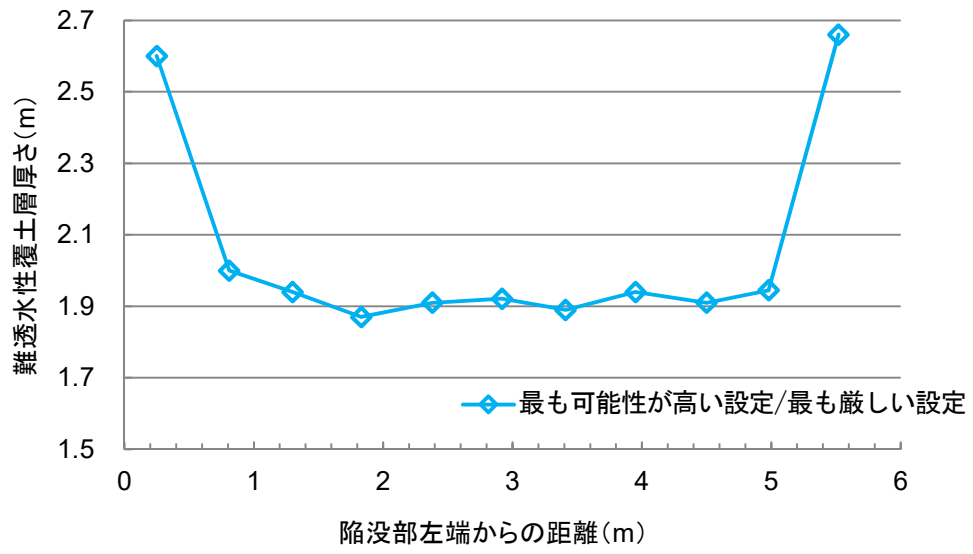
*1：解析結果は、最も可能性が高い設定／最も厳しい設定共通である。



第 40 図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



第 41 図 難透水性覆土の厚さ算出方法



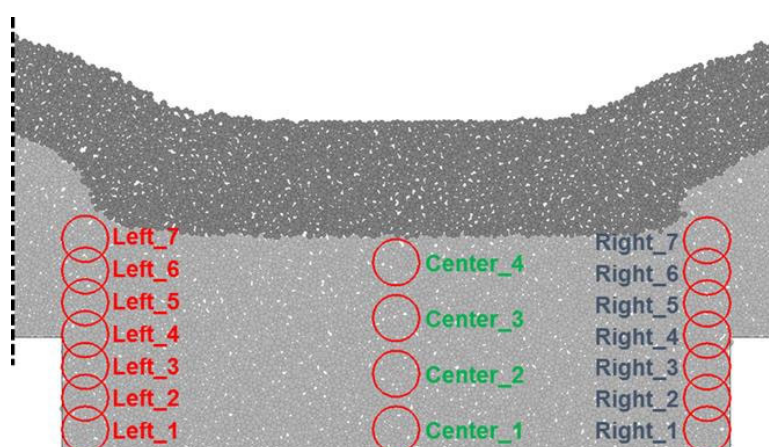
第 42 図 難透水性覆土の厚さ分布

(ii) 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、陥没前後の密度を確認し評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は第 43 図に示すとおり、陥没前後の陥没隅角部近傍(Left 及び Right 系列)並びに陥没中央部(Center 系列)における増加率を確認する。また、密度の増加率を算出した結果を第 59 表に示す。

第 59 表より、陥没隅角部近傍(Left 及び Right 系列)では、密度の減少が確認されたが、覆土の厚さに大きな変化が生じていないこと及び陥没中央部(Center 系列)の密度増加を考慮し、覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じないことが確認された。



第 43 図 難透水性覆土の密度測定位置

第 59 表 鉛直方向への変形時における密度の増加率

測定位置	密度の増加率(%)*1
Left_1	2.4
Left_2	-2.1
Left_3	-7.7
Left_4	-8.2
Left_5	-4.0
Left_6	-5.1
Left_7	-5.2
Center_1	8.6
Center_2	1.5
Center_3	2.6
Center_4	2.2
Right_1	6.7
Right_2	-4.4
Right_3	-2.6
Right_4	-5.0
Right_5	-5.5
Right_6	-1.5
Right_7	0.4

*1：負の値は、密度低下を示す。

(6) 1,000年後の力学的影響評価

可溶性塩の溶出による陥没影響に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性への影響評価をした結果から、透水係数及び覆土厚さに力学的変形が生じないと設定する。可溶性塩の溶出による覆土への力学的影響評価を第 60 表に示す。

第 60 表 可溶性塩の溶出による 1,000 年後の覆土への力学的影響評価

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
1号 (均質・均一固化体)	陥没	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態

8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

金属及び埋設設備の膨張並びに埋設設備の陥没に起因する影響において、DEM解析により覆土の低透水性(透水係数及び覆土厚さ)への影響評価をした結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。状態変化の評価(力学的影響)のまとめを第61表に示す。

なお、2号及び3号廃棄物埋設地における最も厳しい設定の膨張影響では、難透水性覆土に隅角部に約2mの開口^{*1}が生じるが、埋設設備外周部に設置された難透水性覆土(3号の場合、東西方向の覆土施工範囲：約64m)に対し、限定的な範囲の影響である。

*1：難透水性覆土に対し開口すると設定した箇所は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土である。また、下部覆土の密度減少は解析結果から軽微であることから、密度変化による透水係数が増加する有意な影響は生じない。

第61表 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
2号及び3号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (充填固化体)		○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (均質・均一固化体)	陥没	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態

9. 参考文献

- (1) 牧野 隆吾(2010) : 石炭採掘後の陥没現象の解明およびその調査・対策に関する研究、応用地質 第51巻 第2号 p73-84
- (2) 北海道電力(株)ほか(2016) : 充填固化体の標準的な製作方法(改訂8版)
- (3) JIS Z 1600(2017) : 鋼製オープンヘッドドラム
- (4) JIS G 3112(2010) : 鉄筋コンクリート用棒鋼
- (5) 原子力安全基盤機構(2008) : 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について(一部改正)、JNESS-SS-0801
- (6) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月) : 低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)
- (7) 三沢 俊平(1985) : 鉄鋼の湿食形態と腐食生成物、日本金属学会会報
- (8) K. Tuutti(1982) : Corrosion of Steel in Concrete, CBI forskningsresearch
- (9) 藤原 和俊(2018) : 浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001
- (10) Juraj Majzlan et al. (2006) : Thermodynamic properties and crystal structure refinement of ferricopiapite, coquimbite, rhomboclase, and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_5$
- (11) 高橋 良ほか(2009) : 幌別硫黄鉱山地域における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴
- (12) Wenqian Xu et al. (2010) : $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ formed by dehydrating rhomboclase and its potential existence on Mars
- (13) Wenqian Xu et al. (2012) : Temperature and humidity effects on ferric sulfate stability and phase transformation
- (14) 一般社団法人 日本溶射学会(2017) : 溶射工学便覧、第10章 皮膜の性質と試験方法
- (15) 腐食防食協会(2005) : 第VI編 腐食試験法 第2章 腐食試験法、腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版
- (16) 三原 守弘ほか(2002) : 低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼、ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生及び腐食速度の評価
- (17) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター(平成16年) : 還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (18) 水流 徹(2011) : 水溶液系の腐食現象の計測技術、まてりあ 第50巻 第7号、p283-286
- (19) 小林 孝一ほか(2001) : 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究、土木学会論文集 No.669/V-50、p173-186
- (20) 朝倉 祝治ほか(1981) : 電気化学的方法による腐食状態の実時間計測技術、金属表面技術 32巻 6号、p280-290
- (21) 大塚 俊明ほか(1982) : 液抵抗補正短形波電流分極法による鉄腐食速度の測定、防食技術 31巻 5号、p336-342
- (22) 小澤 正義ほか(2018) : 炭素鋼の自己不働態化に及ぼす淡水中へのホウ酸塩添加の影響、材料と環境 67巻 10号、p426-434
- (23) 国立天文台(2005) : 理科年表 平成18年(机上版)、p367
- (24) 土木学会(2014) : コンクリート技術シリーズ No103 セメント系構造物と周辺地盤の化補 4-101

学的相互作用研究小委員会(345 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集

- (25) Jan Skalny et al. (2002): Sulfate Attack on Concrete
- (26) J.B. Champenois et al. (2013): Conditioning Highly Concentrated Borate Solutions with Calcium Sulfoaluminate Cement, Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage
- (27) Laszlo J et al. (1992): Borate Substituted Ettringites, MRS Online Proceedings Library
- (28) Jean-Baptiste Champenois al. (2012): Crystal structures of Boro-AFm and sBoro-AFt phase, Cement and concrete Research
- (29) Parkhurst, D. L. et al. (1999): User's guide to PHREEQC (ver. 2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259
- (30) Parkhurst, D. L. et al. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA.
- (31) Diederik JACQUES, et. al. (2012): Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R(2012)3
- (32) Thomas Schmidt, Barbara Lothenbach, Michael Romer, Karen Scrivener, Daniel Rentsch, Renato Figi (2008): A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cement and Concrete Research, 38, p337-349
- (33) 日本原子力研究開発機構(2015): 平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発-4 カ年研究成果の取りまとめ 報告書
- (34) 桐山 貴俊(2018): 粒子方に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用
- (35) 若井 明彦ほか(2013): 地すべりを再現するための数値解析手法の現状、日本地すべり学会誌 50 巻 1 号、p7-17
- (36) 公益社団法人 地盤工学会(2014): 地盤工学用語辞典、p10
- (37) JIS A 5005(2009): コンクリート用砕石及び砕砂
- (38) 社団法人 地盤工学会(2010): 地盤材料試験の方法と解説
- (39) 大河原 正文ほか(2001): 粘土の残留強度発現機構に関する基礎的研究 -固体表面間の潤滑状態と摩擦の要因-, 土木学会 第 56 回年次学術講演会、p102-103
- (40) 村尾 英彦ほか(2015): リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較、Journal of the Japan Landside Society Vol. 52 No. 3、p123-131
- (41) 日本原子力研究所(1989): 低レベル放射性廃棄物固化体の長期浸出試験
- (42) 宮脇 健太郎ほか(2018): アスファルト固化体からの環境影響物質の長期浸出挙動と浸出機構、廃棄物資源循環学会論文誌

以上

設定値を超える金属廃棄物が
埋設された場合の評価について

目 次

1. はじめに	1
2. 金属廃棄物重量の設定の妥当性について	1
3. 想定を超える金属重量の廃棄体が埋設された場合の検討	1
4. 参考文献	3

1. はじめに

本資料は、設定値を超える金属廃棄物が埋設された場合を考慮した上で、金属廃棄物に対する金属重量の設定(310kg/本)を行うことの妥当性を示すものである。

2. 金属廃棄物重量の設定の妥当性について

3号埋設設備では、事業変更許可後に充填固化体が埋設されることから、2号埋設設備とは異なり埋設実績はない。

一方で、2号埋設設備では、金属廃棄物の収納効率を向上させる観点から、高圧圧縮処理又は熔融処理を行い、可能な限り多くの金属廃棄物を埋設しているため、3号埋設設備でも同様の金属廃棄物の重量にて埋設されると考えられる。

よって、2号埋設設備の埋設実績を用いた金属廃棄物重量の設定は妥当である。

なお、金属腐食による金属の膨張量の設定においては、高圧圧縮体又は熔融体に対し、「腐食速度の設定」として腐食速度を適用せず全量が腐食すると設定し、金属腐食による金属の膨張量を算出する際に、十分な保守性を与えている。

3. 想定を超える金属重量の廃棄物が埋設された場合の検討

金属重量の大きな廃棄物が将来埋設される不確実性の影響を検討するため、仮に3号埋設設備に最大収納重量となる金属廃棄物(高圧圧縮体又は熔融体)が埋設された場合を想定した際の最も厳しい設定において、金属腐食による金属の膨張量を算出した。

なお、高圧圧縮体及び熔融体は、処理方法の特性上、一つの金属の塊であると捉えられる。そのため、高圧圧縮体及び熔融体の表面積は、金属廃棄物が密収納された廃棄体に比して小さいことから、腐食の進行が遅いと考えられる。

よって、高圧圧縮体及び熔融体に対しては、金属廃棄物の全量が腐食するとはせず、腐食速度及び表面積を設定する。

金属腐食による金属の膨張量の算出に必要なパラメータを第1表に示す。

鉛直方向へ卓越した変形による膨張量及び鉛直・水平方向への変形による膨張量の算出結果を第2表及び第3表に示す。

第1表 最も厳しい設定における金属の膨張量算出に必要なパラメーター一覧

項目		対象設備
		3号
金属重量	金属廃棄物 ^{*1}	19,800,000 (kg)
	廃棄体容器	792,000 (kg)
	埋設設備中の鉄筋	1,357,000 (kg)
	合計	21,949,000 (kg)
腐食膨張倍率		4倍
金属の表面積 /比表面積	金属廃棄物 ^{*2}	$8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$
	廃棄体容器	4.8 ($\text{m}^2/\text{本}$)
	埋設設備中の鉄筋	19,000 (m^2)
埋設設備	寸法	東西方向：64.10 (m) 南北方向：36.51 (m) 鉛直方向：6.66 (m)
	体積	約 15,587 (m^3)
腐食速度 ^{*3}		0.1 ($\mu\text{m}/\text{y}$)
評価年数		1,000 (y)

*1：金属廃棄物重量は、廃棄体製作技術の溶融体重量(742kg)を参考に750kg/本として算定した。

*2：金属廃棄物の表面積は、廃棄体製作技術の鉄系金属の表面積(PWR)を参考に設定した。

*3：腐食速度は、腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮した値である0.1($\mu\text{m}/\text{y}$)を設定した。

第2表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号		
	鉛直方向		
最も厳しい設定	3.21×10^{-1}		
参考値 ^{*1}	1.69×10^0		

*1：金属重量(310kg/本)での最も厳しい設定の膨張量

第3表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

設定	膨張量(m/基)		
	対象施設：3号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向
最も厳しい設定	1.02×10^0	5.77×10^{-1}	1.06×10^{-1}
参考値 ^{*1}	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}

*1：金属重量(310kg/本)での最も厳しい設定の膨張量

第2表及び第3表より、1,000年後の金属腐食による膨張量を算出した結果は、金属重量(310kg/本)の最も厳しい設定にて算出した膨張量に比して約1/5倍である。

以上のことから、将来想定を超える金属重量の廃棄体が埋設された場合の不確実性は、金属重量(310kg/本)の最も厳しい設定に対し、「腐食速度の設定」を全量腐食と設定した際の膨張量の設定値以下であることから、金属重量を310kg/本として評価することは妥当である。

4. 参考文献

- (1) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月)：低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)

以 上

金属腐食による腐食生成物並びに
可溶性塩による二次鉱物に対し真密度を
用いた力学的影響の評価を行う
妥当性について

目 次

1. はじめに	1
2. 金属腐食による腐食生成物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について	1
(1) 「腐食生成物の設定」に係る考え方	1
(2) 「腐食膨張倍率の設定」に係る考え方	2
(3) 「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る考え方	5
3. 可溶性塩による二次鉱物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について	5
(1) 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る考え方	5
(2) 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る考え方	6
4. 参考文献	6

1. はじめに

本資料は、金属の腐食に伴う腐食生成物並びに可溶性塩と埋設設備の反応による二次鉱物によって生じる力学的影響(膨張)について、真密度を用いた力学的影響の評価を行うことの妥当性を示すものである。

2. 金属腐食による腐食生成物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について

金属腐食によって生じる腐食生成物の膨張量は、拘束がない環境において、かさ密度により評価されることが一般的である。

覆土完了後の廃棄物埋設地は、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧における圧縮場での拘束圧が作用した状態である。金属腐食による膨張では、周辺の拘束がある環境において、かさ密度から求めた体積の変化量を用いた定量的な腐食膨張倍率を評価した知見がないことから、かさ密度を考慮した定量的な評価を実施することが困難である。また、拘束圧が作用した状態においては、腐食生成物中のかさ容積^{*1}に含まれる気孔全てが膨張に寄与することは考え難い。そのため、金属腐食に伴う力学的影響(膨張)の評価では、腐食生成物に対し真密度から求めた体積の変化量を用いた評価を行うこととしている。

真密度を用いた評価では、かさ密度を用いた評価に比して力学的影響(膨張)が過小評価となるおそれがあることから、以下に示す「腐食生成物の設定」、「腐食膨張倍率の設定」及び「金属腐食による金属の膨張量の設定」の考え方を踏まえた上で、適切な保守性を与えた評価により実施している。

*1:かさ容積とは、開気孔(外部に通じている気孔)及び閉気孔(固体内に閉じ込められている気孔)両方の体積を含んだ容積である⁽¹⁾。

(1) 「腐食生成物の設定」に係る考え方

腐食生成物は、以下の考え方に基づき設定している。

文献⁽²⁾より、充填固化体に収納される金属廃棄物は、炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占め、その他に小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などである。充填固化体中に収納される金属廃棄物に対し、金属種類を整理した結果より、主要な金属種類は鉄であり、その他考慮する金属種類はアルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛である。腐食生成物の設定は、金属種類を整理した結果を踏まえて、金属種類(鉄、アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)ごとに個別で設定する。

金属種類ごとの腐食生成物に対する最も可能性が高い設定は、最も安定に存在し得る腐食生成物を設定する。環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する場合又は、最も安定に存在し得る腐食生成物の設定が困難である場合は、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を選定することとする。

金属種類ごとの腐食生成物に対する最も厳しい設定は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を設定する。

以上の考え方に基づき設定した腐食生成物を第1表に示す。

第1表 腐食生成物の設定及び設定の考え方

金属種類	設定	設定の考え方
鉄	【最も可能性が高い設定】 Fe ₃ O ₄	【最も可能性が高い設定】 複数の文献において生成すること及び安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ (マグネタイト)を設定する。
	【最も厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【最も厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ (水酸化鉄(II))を設定する。
アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【最も可能性が高い設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【最も可能性が高い設定】 それぞれの金属種類に対して複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、最も可能性が高い設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
	【最も厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【最も厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

(2) 「腐食膨張倍率の設定」に係る考え方

金属種類ごとの腐食生成物に対する腐食膨張倍率は、第1表に示した腐食生成物に対し、ICSDの無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽³⁾に示される理論密度を用いて算出している。算出した腐食生成物の腐食膨張倍率を第2表に示す。

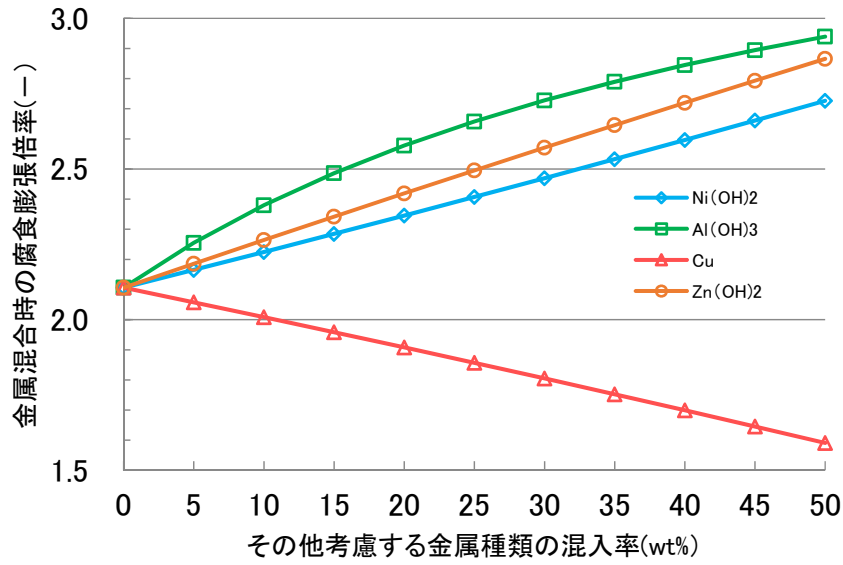
埋設設備中の金属の腐食膨張倍率の設定は、廃棄体中の金属の割合を考慮し設定する必要があるが、文献⁽²⁾より定量的な割合を整理出来ないため、金属の割合を設定することが困難である。そのため、主要な金属種類である鉄に対して、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)の混入率を0wt%~50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を算出する。

最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定に対し、金属が混合された場合の腐食膨張倍率の算出結果を第1図及び第2図にそれぞれ示す。埋設設備中の金属の腐食膨張倍率の設定に当たっては、金属が混合された状態での腐食膨張倍率の最大値を包含する値を設定する。

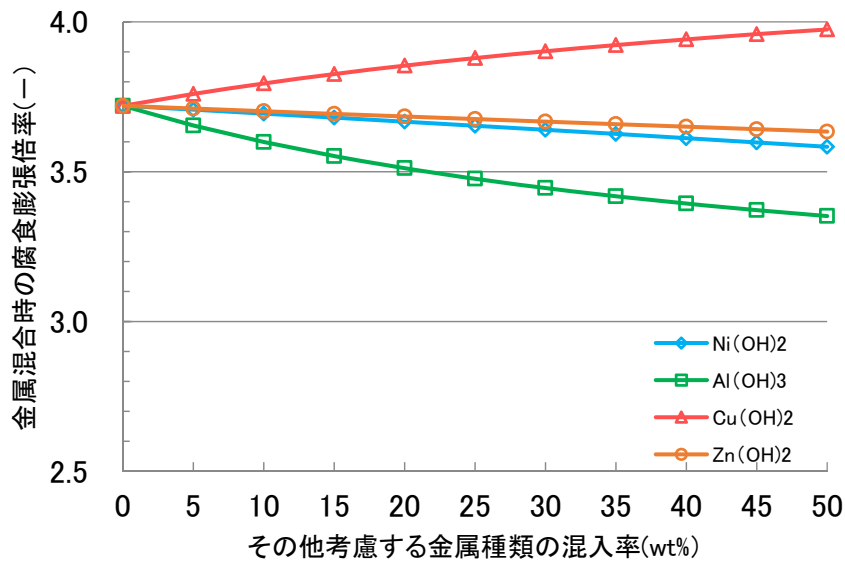
なお、文献⁽²⁾より、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)は、金属廃棄物のうち小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などである。そのため、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)の混入率は、埋設設備全体の金属量に対し、占める割合が小さいと考えられる。

第2表 腐食生成物の設定及び腐食膨張率

条件	腐食生成物の設定及び腐食膨張倍率	
鉄	【最も可能性が高い設定】	
	Fe_3O_4	2.10
	【最も厳しい設定】	
	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	3.72
アルミニウム	【最も可能性が高い設定／最も厳しい設定】	
	$\text{Al}(\text{OH})_3$	3.23
ニッケル	【最も可能性が高い設定／最も厳しい設定】	
	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	3.43
銅	【最も可能性が高い設定】	
	Cu	1.00
	【最も厳しい設定】	
	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	4.08
亜鉛	【最も可能性が高い設定／最も厳しい設定】	
	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	3.56



第1図 最も可能性が高い設定 (Fe₃O₄ (腐食膨張倍率: 2.10) を基準) における金属が混合された場合の腐食膨張倍率



第2図 最も厳しい設定 (Fe(OH)₂ (腐食膨張倍率: 3.72) を基準) における金属が混合された場合の腐食膨張倍率

(3) 「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る考え方

金属腐食による金属の膨張量は、埋設設備中の金属量(廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋及び金属廃棄物)、腐食生成物の腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し設定している。

金属腐食による金属の膨張量の設定に必要な腐食生成物の腐食膨張倍率は、第1表に示すとおり、主要な金属種類である鉄の最も可能性が高い設定を除き、安定な腐食生成物の設定が困難であるため、膨張に大きく寄与する水酸化物を設定している。水溶液中の水酸化物の特性として溶解度に従い溶出することが想定されるが、溶出する現象を考慮せず、金属腐食による金属の膨張量では、腐食生成物(水酸化物を含む)の腐食膨張倍率に従い、全てが埋設設備の膨張に寄与するとして設定している。

以上のことから、力学的影響(膨張)の評価においては、金属腐食による腐食生成物に対して、真密度を用いた評価を実施しているが、金属腐食による金属の膨張量の算出・設定に至るまでの考え方として、適切な保守性を与えた上で評価していることから、妥当であると判断している。

3. 可溶性塩による二次鉱物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について

可溶性塩による二次鉱物は、セメント系材料と反応した際のメカニズムは解明されているものの、二次鉱物の生成に伴う膨張量に関して、定量的な知見がない。

「埋設設備の膨張倍率の評価」では、二次鉱物の生成に伴う膨張量の定量的な知見がないため、地球化学計算コードを用いた真密度による評価を実施している。

そのため、可溶性塩による二次鉱物を真密度として評価するに当たっては、以下に示す「埋設設備の膨張倍率の評価」、「埋設設備の膨張倍率の設定」及び「可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定」の考え方を踏まえた上で、適切な保守性を与えた評価により実施している。

(1) 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る考え方

埋設設備の膨張倍率の評価は、可溶性塩による鉱物の生成・溶解に係る反応に対し、評価期間に依存しない平衡計算を行っている。また、解析用物性値である可溶性塩濃度においては、二次鉱物の体積膨張量が最大となるように、1号埋設設備(1群から6群)全体の体積における平均濃度が、1号7,8群の埋設設備へ作用させる設定としている。

(2) 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る考え方

埋設設備の膨張倍率の設定は、セメント系材料の固相変化による膨張倍率(充填材：1.09倍、コンクリート：1.05倍)と埋設設備の構成部材ごとの体積分率を乗算することで設定を行っている。

埋設設備の膨張倍率(-)

$$= (\text{廃棄体中の充填材の体積分率}(-) + \text{セメント系充填材の体積分率}(-)) \times \text{充填材の体積膨張倍率}(-) + (\text{ポーラスコンクリートの体積分率}(-) + \text{コンクリート体積分率}(-)) \times \text{コンクリートの体積膨張倍率}(-) + \text{廃棄体上部空隙}(-)$$

$$= (0.194 + 0.311) \times 1.09 + (0.042 + 0.315) \times 1.05 + 0.083$$

$$= 1.0083$$

一方で、埋設設備の膨張倍率の設定値は、二次鋳物の膨張倍率に係る定量的な知見がないことによる不確実性を考慮し、算出された埋設設備の膨張倍率に対し、切り上げた値(埋設設備の膨張倍率：1.1倍)を設定している。

また、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定においては、埋設設備の膨張倍率に従い、全てが埋設設備の膨張に寄与するとして評価している。

以上のことから、力学的影響(膨張)の評価においては、可溶性塩による二次鋳物に対して、真密度を用いた評価を実施しているが、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の算出・設定にいたるまでの考え方として、適切な保守性を与えた評価により実施していることから、妥当であると判断している。

4. 参考文献

- (1) 一般社団法人 日本溶射学会(2017)：溶射工学便覧、第10章 皮膜の性質と試験方法
- (2) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月)：低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)
- (3) 藤原 和俊(2018)：浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001

以 上

埋設設備中の環境条件の設定に対する
腐食生成物の設定の
考え方と妥当性について

目次

1. はじめに	1
2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理	1
(1) 現象による推定	1
(2) 文献による推定	4
(3) 解析による推定	5
3. 腐食生成物の設定	8
(1) 最も可能性が高い設定	8
(2) 最も厳しい設定	8
4. まとめ	8
5. 参考文献	9

1. はじめに

本資料は、埋設設備中の環境条件の設定に対する腐食生成物の設定に係る詳細な考え方と設定の妥当性について示すものである。

2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理

埋設設備中の環境条件下で生成される腐食生成物について、現象、文献及び解析による推定により整理する。

(1) 現象による推定

状態変化の評価期間(1,000年後)において生じる現象から、腐食メカニズムを推定する。

覆土完了後、埋設設備内に周辺の地下水が比較的速やかに浸入することで、埋設設備は、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000年後)において、周辺の地下水により満たされた湿潤状態にある。

そのため、金属は、周辺の環境(水や酸素)と相互作用(電気化学的腐食)することで腐食生成物が生成される。

腐食生成物の生成過程に係る現象を推定するに当たっては、評価対象物となる金属(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)が複数あること、また、その配置や曝される環境が厳密には異なることから、腐食に伴う環境条件の変化を整理する必要がある。

よって、ここでは評価対象物ごとの代表的な環境条件を選定するため、代表とする金属種類である鉄に対し、埋設設備中の環境変化を以下のとおり整理する。

- ・埋設設備中の評価対象となる金属の配置は、埋設設備の内部から金属廃棄物、廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋の順に配置されている。
- ・金属廃棄物及び廃棄体容器は隣接している一方、埋設設備中の鉄筋は充填材の層を介して離れた場所に配置されている。
- ・埋設設備中の鉄筋は、主に周辺岩盤と接する底版及び周辺岩盤と距離が近い外周仕切設備のコンクリート中に存在することから、周辺地下水の組成などの埋設設備外の環境に大きく影響される。
- ・金属廃棄物及び廃棄体容器は、埋設設備中の鉄筋の腐食に伴う環境条件の変化を受けた地下水に曝されることから、埋設設備中の鉄筋とは異なった腐食挙動となることが予想される。

以上の環境条件の変化を踏まえ、評価対象物である金属が曝される代表的な環境は、大きく分けて2つの条件に分類することができる。代表的な環境条件を以下の第1表に示す。

第1表に整理される溶存酸素、pH及び酸化還元電位(以下「ORP」という。)に関しては、相互関係がある。

文献⁽¹⁾では、一般的にORPに対するpHの影響が大きく、次に溶存酸素の影響があるとされ、酸化剤の存在する環境下ではORPを上昇させる効果があるとしている。また、文献⁽²⁾では、中性の地下水を対象としたORPとpHに関する試験及び解析を用いた評価を行っており、文献⁽¹⁾と同様の相互関係があることを示している。

以上のことから、第1表の環境条件は、溶存酸素、pH及びORPの相互関係が正しく設定されている。

- ・①の環境においては、pHが高いアルカリ性であり、溶存酸素が存在する状態を設定していること。

- ・②の環境においては、pHが高いアルカリ性であり、溶存酸素が検出限界以下と限りなく少ない状態を設定していること。

第1表 評価対象物ごとの代表的な環境条件

項目	①	②
環境の状態 ^{*1}	廃棄物埋設地周辺の地下水環境(好氣的条件)	埋設設備中の鉄筋の腐食による影響を受けた地下水環境(嫌氣的条件)
評価対象物	埋設設備中の鉄筋	金属廃棄物及び廃棄体容器
溶存酸素	数 ppm 程度	検出限界以下(0.2ppm 未満)
ORP ^{*2}	約+50mV 以上 ^{*3}	約-100mV 以下 ^{*3}
pH	12.5 程度	
水温	10~15℃程度	

*1：環境の状態(好氣的条件及び嫌氣的条件)は、溶存酸素、ORP、pH及び水温を考慮して設定している。

*2：ORPは、対象とする溶液の溶存酸素、pH及び水温により変動するものである。

*3：ORP値は、文献⁽³⁾を参考に、廃棄物埋設地に流入する地下水(溶存酸素、pH及び水温を考慮)の値を想定したものである。

第1表より、2種類の環境条件における現象を以下のとおり整理する。

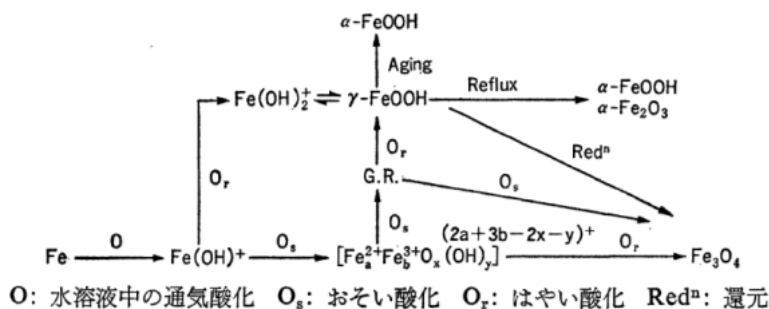
(①の環境下での腐食メカニズム)

埋設設備中の鉄筋は、周辺の地下水と反応することで生じる金属腐食によって、電子を放出する。放出された電子は、周辺の地下水又は、覆土前の埋設設備に存在する溶存酸素^{*1}に消費されることで、 α -FeOOH(以下「ゲーサイト」という。)が生成されると想定する。

そのため、「①の環境」では、酸素消費型の腐食^{(4)~(6)}が生じることが予想される。

酸素消費型の腐食に関しては、文献⁽⁴⁾により常温の水溶液中における鉄の腐食生成物に関する腐食メカニズムが整理されている。鉄さびの生成経路図を第1図に示す。

*1：溶存酸素は、周辺地下水中の溶存酸素(濃度：0.2ppm 未満)及び埋設設備に内在する溶存酸素(大気圧環境下の飽和濃度(想定)：約8ppm)を指す。なお、この溶存酸素は、供給量に対し、埋設設備中の鉄筋(3号の鉄筋重量：1,357,000kg)による金属腐食での消費により、状態変化の評価期間(1,000年後)において、十分に消費できる溶存酸素濃度である。

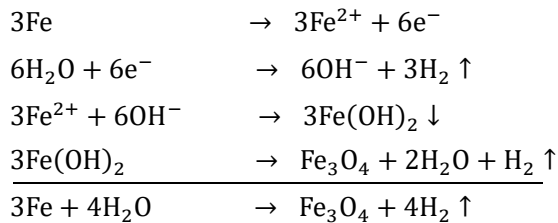


第1図 常温の水溶液中における鉄さび生成経路図⁽⁴⁾

(②の環境下での腐食メカニズム)

金属廃棄物及び廃棄体容器は、埋設設備中の鉄筋により溶存酸素が消費された後、充填材の層を介した地下水環境(酸素が非常に少ない状態)に曝される。よって、金属腐食により放出された電子は、水を分解して水素ガスを発生し、溶解した鉄は2価の水酸化物として沈殿した後、水酸化物が酸化されることで、Fe₃O₄(以下「マグネタイト」という。)が生成されると想定する。

そのため、「②の環境」では、水素発生型の腐食^{(4)~(6)}が生じることが予想される。マグネタイトの生成に至る反応式は、以下のとおりになる。



ここで、腐食生成物を設定するに当たり、更に代表的な環境条件を選定する。評価対象物である金属ごとの重量割合は、金属廃棄物：廃棄体容器：埋設設備中の鉄筋=8：1：1 の関係であるため、金属廃棄物及び廃棄体容器が埋設設備中の全金属重量の約9割と大半を占めている。

以上のことから、代表的な環境条件を「②の環境」として設定する。

そのため、最も可能性が高い設定の代表的な環境条件である「②の環境」下において、生成される代表的な腐食生成物は、マグネタイトであると整理する。

また、最も厳しい設定においては、マグネタイト、ゲーサイト及びマグネタイトの生成過程で生成するFe(OH)₂(以下「水酸化鉄(Ⅱ)」という。)のうち、いずれかの腐食生成物が生成されると整理する。

したがって、現象から推定される腐食生成物は、最も可能性が高い設定としてマグネタイト、最も厳しい設定としてマグネタイト、ゲーサイト及び水酸化鉄(Ⅱ)のいずれかであると推定する。

(2) 文献による推定

鉄は、状態変化の評価期間(1,000年後)において、「2. (1) 現象による推定」に基づき、溶存酸素の少ない嫌氣的条件及びセメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することによる高 pH の環境下に曝される。そのため、これらの環境に類似した条件下にて調査された知見を以下に整理する。

- ・森川ほか⁽⁷⁾は、電食試験(コンクリート中に埋め込んだ鉄筋材を NaCl 水溶液などの溶液中でアノード電解する促進腐食試験)によるコンクリート中の腐食生成物を X 線回折で同定することにより、さびの主成分は、マグネタイトであり、ゲーサイトも確認している。
- ・高谷ほか⁽⁸⁾は、実構造物(鉄道橋(40年経過)、道路橋(30年経過))、暴露試験材(防潮堤26年自然暴露)等を X 線回折で同定することにより、マグネタイトとゲーサイトを検出している。
- ・杉橋ほか⁽⁹⁾は、嫌氣的条件下の試験結果のほとんどでマグネタイトの生成を確認している。
- ・柴田⁽¹⁰⁾は、酸化還元反応式による理論、簡易な計算及び腐食試験などの多角的視点を踏まえた上で、高アルカリ性環境下においては、マグネタイトが生成することを確認している。
- ・三原ほか⁽¹¹⁾は、処分施設のコンクリート中鉄筋、地層処分環境下等を想定したガス発生法による試験から、マグネタイトが生成することを確認している。

以上のことから、最も可能性が高い設定の埋設設備中の環境条件に類似する試験条件下において、最も生成される可能性が高いものとしては、マグネタイトであると推定する。

また、最も厳しい設定においては、マグネタイト、ゲーサイトのうち、いずれかの腐食生成物が生成されると推定する。

(3) 解析による推定

埋設設備中の想定される環境条件下において、金属腐食に伴い生成される腐食生成物を評価するためには、Pourbaix による電位-pH 図を用いた評価がなされることがある⁽¹²⁾。Pourbaix の電位-pH 図は、評価対象とする元素に対し、電位-pH の座標軸を用いてイオン種や化学種の安定領域を示したものであり、水溶液中の酸化還元反応や酸-塩基反応を総括的に理解することができる。

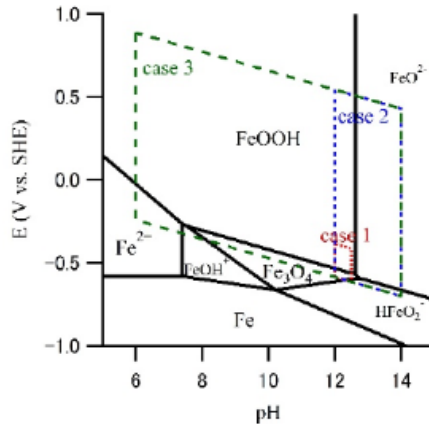
文献⁽¹²⁾では、上記の Pourbaix による電位-pH 図が 25°C の評価が中心であるとともに、特定の酸化物のみを対象にしており、一部の酸化物が考慮されていない。

そのため、文献⁽¹³⁾では、共存するアニオンの影響については情報が不足していることから、化学平衡計算ソフト HSC Chemistry for Windows Ver. 9.3.0 (以下「HSC Chemistry」という。)の Eh-pH Diagram モジュールを用いて電位-pH 図を作成し、環境に応じた腐食生成物の生成可否に関して解析的検討を行っている。

解析に用いられた環境条件を第 2 表に、Case1 の条件下で作図された電位-pH 図を第 2 図に示す。また、文献⁽¹³⁾においては、1 号廃棄物埋設地の廃棄体の特性である可溶性塩を考慮した条件 (Case2) についても解析を実施しているため、Case2 の条件下で作図された電位-pH 図を第 3 図に示す。

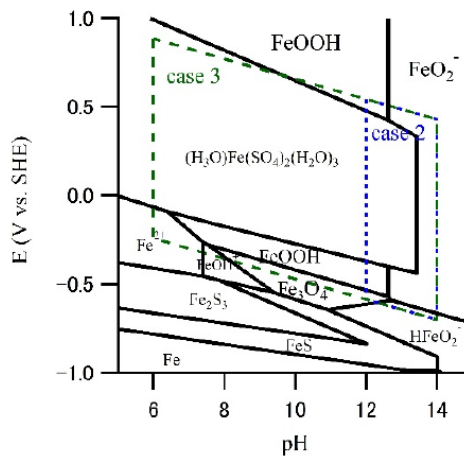
第 2 表 環境条件の設定

項目	Case1	Case2	Case3
温度	5, 15, 25°C	5, 15, 25°C	5, 15, 25°C
pH	12.0~12.5	12.0~14.0	6.0~14.0
溶存酸素	脱気	脱気~空気飽和	脱気~空気飽和
硫酸イオン	なし	あり	あり
ほう酸イオン	なし	あり	あり
塩化物イオン	なし	あり	あり
炭酸イオン	なし	なし	あり



注1：②の環境と類似するのはCase1（赤破線）の範囲である。

第2図 HSC Chemistryによる15°CにおけるFe-H₂O系での電位-pH図



第3図 HSC Chemistryによる15°CにおけるFe-S-H₂O系での電位-pH図

第2図より、最も可能性が高い設定の埋設設備中の環境条件に類似する解析条件下において、生成される代表的な腐食生成物はマグネタイトであると整理する。

また、最も厳しい設定においては、第2図及び第3図より、主要な鉄の腐食生成物としては、マグネタイト、ヘマタイト、ゲーサイト及び(H₃O)Fe(SO₄)₂(H₂O)₃(以下「ロンボクレス」という。)のいずれかの腐食生成物が生成される可能性がある。

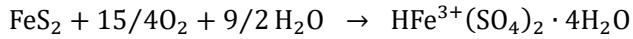
しかしながら、解析により作図される電位-pH図は、熱力学データベースに基づいた計算により熱力学的に安定な腐食生成物が選定されることから、腐食生成物の生成条件を考慮されていない。

そのため、「2. (1) 現象による推定」及び「2. (2) 文献による推定」にて整理した腐食生成物以外の腐食生成物(ロンボクレス)に対し、生成条件を精査する。

文献^{(14)~(15)}では、ロンボクレスが生成する環境が限定的であるとしている。よって、埋設設備中の環境条件(②の環境)下においては、生成しない腐食生成物であると判断する。文献^{(14)~(15)}に記載されている具体的な生成条件は、以下のとおりである。また、ロンボクレスが生成する

環境条件を第4図に示す。

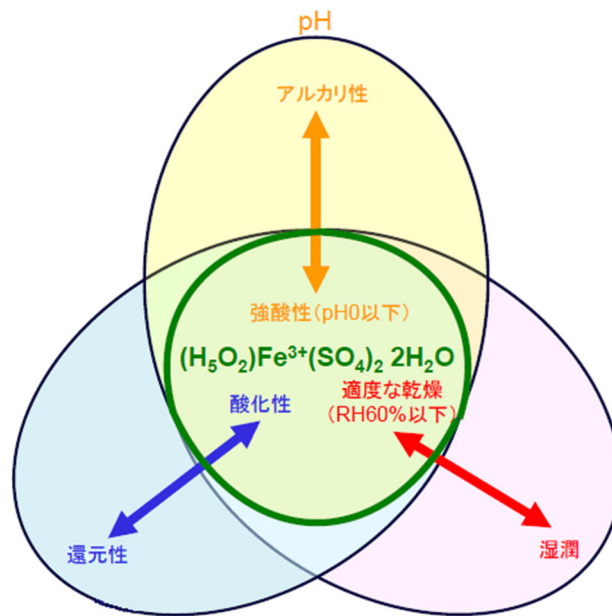
- ・高橋ほか⁽¹⁴⁾は、ロンボクレーズは pH が負の値を示すような著しい酸性の環境下において、黄鉄鉱や白鉄鉱の分解によって生じる鉄硫酸塩鉱物とし、以下の反応式によって生成するとしている。



- ・WENQIAN ほか⁽¹⁵⁾は、低温環境でフェリコピアタイトとロンボクレーズの混合物に関する試験を行い、相対湿度(以下「RH」という。)が35%~55%の環境での反応性を示していることから、湿润環境下では溶解するとしている。

以上のことから、最も厳しい設定では、ロンボクレーズを除いたマグネタイト、ヘマタイト及びゲーサイトのうち、いずれかの腐食生成物が生成されると整理する。

したがって、解析から推定される腐食生成物は、最も可能性が高い設定としてマグネタイト、最も厳しい設定としてマグネタイト、ヘマタイト及びゲーサイトのいずれかであると推定する。



第4図 ロンボクレーズが生成する環境条件

3. 腐食生成物の設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」の3つの推定を踏まえて、埋設設備中の環境条件における腐食生成物を設定する。

(1) 最も可能性が高い設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」より整理された結果を踏まえ、代表とする環境条件下において、安定に生成かつ結晶性を有する腐食生成物であるマグネタイト(β :2.1)を設定する。

(2) 最も厳しい設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」の3つの推定では、最も厳しい設定に対して複数の腐食生成物(ヘマタイト、マグネタイト、ゲーサイト及び水酸化鉄(II))が生成するとして整理している。金属腐食による腐食生成物の設定においては、金属腐食に伴う膨張に対し、覆土の低透水性への影響評価の観点から、膨張に大きく寄与すると考えられる腐食膨張倍率の最も大きな腐食生成物を設定することが必要である。

設定に当たっては、「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」にて生成するとして整理した腐食生成物に対し、ICSDの無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽¹³⁾に示される理論密度を用いて、重量1.0kgの金属の体積 V_1 が腐食し、酸化物あるいは水酸化物となった場合の体積 V_2 の比より、理論的な膨張率(β)を求めることで算出し、整理する。各腐食生成物の体積膨張倍率(β)の算出した結果を第3表に示す。

第3表より、腐食膨張倍率の最も大きな水酸化鉄(II)(β :3.72)を設定する。

第3表 各腐食生成物の体積膨張倍率

	モル質量(g/mol)	真密度(g/cm ³)	β
Fe	55.845	7.860	1.00
ヘマタイト	159.688	5.240	2.10
マグネタイト	231.533	5.170	2.14
ゲーサイト	88.852	4.260	2.94
水酸化鉄(II)	89.860	3.400	3.72

4. まとめ

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」及び「3. 腐食生成物の設定」より、埋設設備中の金属に対する腐食生成物は、埋設設備中の環境条件の設定に対し、3つの推定を踏まえても最も可能性が高い設定としてマグネタイト、最も厳しい設定として水酸化鉄(II)を設定することが妥当である。

5. 参考文献

- (1) 伊藤 伍郎(2010)：腐食化学と防食技術、第 25 版、p52-53
- (2) 岩月 輝希ほか(2009)：深部地下水の物理化学パラメータ (pH、酸化還元電位)の測定とその留意点、地下水学会誌、第 51 巻第 3 号、p205-214
- (3) 武藤 暢夫ほか(1986)：酸化還元電位値に影響を及ぼす要因に関する実験的検討、水質汚濁研究 第 9 巻 第 10 号、p661-667
- (4) 三沢 俊平(1983)：鉄さび生成の現状と未解明点、防食技術、32、p657-667
- (5) 三沢 俊平(1985)：鉄鋼の湿食形態と腐食生成物、日本金属学会会報、第 24 巻、第 3 号、p201-210
- (6) 三沢 俊平ほか(1974)：鉄さびの生成機構と耐候性さび層、防食技術、23、p17-275
- (7) 森川 雄行ほか(1987)：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究、土木学会論文集 第 378 号/V-6、p97-105
- (8) 高谷 哲ほか(2015)：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性、土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)、Vol. 71、No. 3、p235-247
- (9) 杉橋 直行ほか(2008)：余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食に関する一考察、土木学会第 63 回年次学術講演会、CS05-43、p253-254
- (10) 柴田 俊夫(2014)：材料と環境、63、p109-115
- (11) 三原 守弘ほか(2002)：低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼, ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生率及び腐食速度の評価、サイクル機構技報、JNC TN1340 2002-001、No. 15、p91-101
- (12) M. Pourbaix et al. (1974): Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution 2nd English edition. NACE international cebelcor. ISBN-10 : 0915567989
- (13) 藤原 和俊(2018)：浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001
- (14) 高橋 良ほか(2009)：幌別硫黄鉱山遅滞における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴、応用地質、Vol. 50、No. 4、p228-237
- (15) WENQIAN XU et al. (2010): $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ formed by dehydrating rhomboclase and its potential existence on Mars、American Mineralogist、Vol. 95、No. 10、p1408-1412

以上

力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ
与えた場合の等価透水係数の試算について

目 次

1. はじめに	1
2. 覆土形状の設定	1
(1) 埋設設備膨張量の算出	1
(2) 覆土形状	2
3. 覆土の状態設定	3
(1) 部位ごとの透水係数の設定	3
(2) 等価透水係数の設定	4
4. 線量評価への影響について	5
5. 覆土材料による影響について	5
6. その他	6
7. 参考文献	7

1. はじめに

本資料は、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算について示すものである。

2. 覆土形状の設定

埋設設備の膨張量が直接的に覆土の変形量になると仮定することで、覆土の変形量が最大となるように状態設定を行う。

(1) 埋設設備膨張量の算出

金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応を考慮して算出した埋設設備の膨張量を第1表及び第2表に示す。最も膨張量の大きい最も厳しい設定における3号廃棄物埋設地の東西方向を代表とし、東西断面に生じる膨張の概念図を第1図に示す。

第1表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

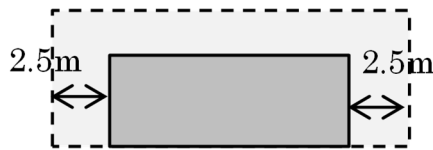
設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
	鉛直方向		
最も可能性が高い設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
最も厳しい設定	1.69×10^0	9.69×10^{-1}	1.39×10^0

*1：1号廃棄物埋設地のうち最も厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

第2表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備：3号			対象設備：1号*1			対象設備：2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
最も可能性が高い設定	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	3.64×10^{-2}	3.32×10^{-2}	3.32×10^{-2}	8.42×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.68×10^{-1}	3.16×10^{-2}
最も厳しい設定	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}	1.26×10^0	1.26×10^0	3.19×10^{-1}	2.25×10^0	2.31×10^0	4.34×10^{-1}

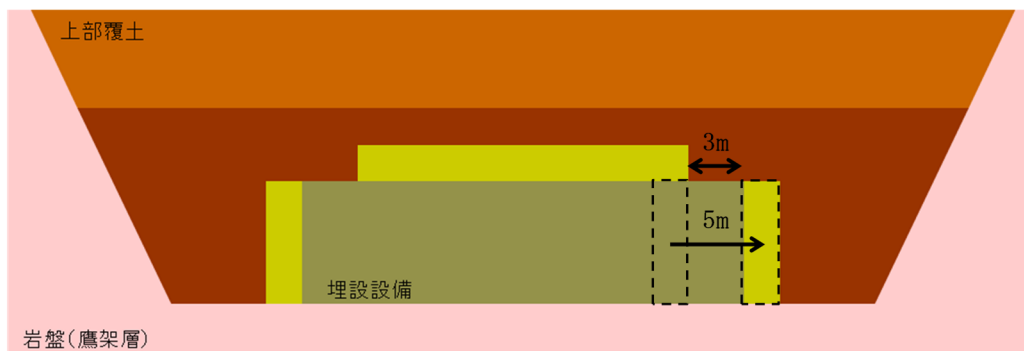
*1：1号廃棄物埋設地のうち最も厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。



第1図 3号廃棄物埋設地膨張概念図(最も厳しい設定)

(2) 覆土形状

膨張により設定した覆土形状を第2図に示す。東西方向を代表断面とし、モデルの片側に5mの変位を与えた(本来は2.5m)。埋設設備側部の難透水性覆土が5m水平移動することにより、埋設設備両端の上面3mが、それぞれ下部覆土に置き換わるとする。



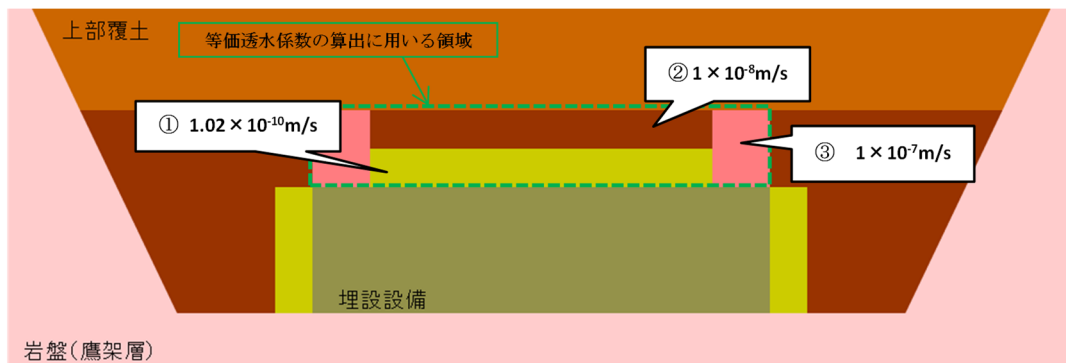
第2図 覆土形状の設定(3号廃棄物埋設地)

3. 覆土の状態設定

(1) 部位ごとの透水係数の設定

第2図の覆土形状に対し、化学的影響を考慮した透水係数の設定を第3図に示す。

透水係数の設定においては、「廃棄物埋設地における許可基準規則への適合性について 第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料5 廃棄物埋設地の状態設定-状態変化の評価(化学的影響)」(以下「化学的影響」という。)及び「廃棄物埋設地における許可基準規則への適合性について 第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料6 廃棄物埋設地の状態設定-透水係数の設定-」(以下「透水係数の設定」という。)と同様の考え方に基づく。①及び②の透水係数は、「化学的影響」の地球化学解析による評価結果に基づいて設定した。③の透水係数は、「透水係数の設定」の考え方に基づいて設定した。



第3図 覆土の状態設定

(2) 等価透水係数の設定

等価透水係数の算出に用いる領域における覆土の透水係数を第3表に示す。また、算出した覆土の等価透水係数を第4表に示す。等価透水係数の計算方法については、「透水係数の設定」と同様の考え方に基づく。

DEM 解析を使用しない場合の覆土の等価透水係数は、DEM 解析を使用した覆土の透水係数とほぼ同等であることを確認した。

第3表 覆土の透水係数設定(3号廃棄物埋設地)

時期	最も厳しい設定
1,000年後	<p> $L_3=3.0$、$K_3=1.0 \times 10^{-7}$ $L_1=3.0$、$K_1=1.0 \times 10^{-7}$ $L_2=2.0$、$K_2=1.02 \times 10^{-10}$ $L_4=3.0$、$K_4=1.0 \times 10^{-7}$ $L_5=30.0$、$K_5=2.02 \times 10^{-10}$ </p>

L : 長さ (m)、K : 透水係数 (m/s)

第4表 覆土の等価透水係数(3号廃棄物埋設地)

1,000年後 最も厳しい設定	今回の覆土形状
等価透水係数 [m/s]	1.69×10^{-8}

4. 線量評価への影響について

DEMによる覆土形状と今回の覆土形状から算出された等価透水係数の比較を第5表に示す。力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合においても、DEM解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。

第5表 覆土の等価透水係数の比較(3号廃棄物埋設地)

1,000年後 最も厳しい設定	DEMによる覆土形状	今回の覆土形状
等価透水係数[m/s]	1.13×10^{-8}	1.69×10^{-8}

5. 覆土材料による影響について

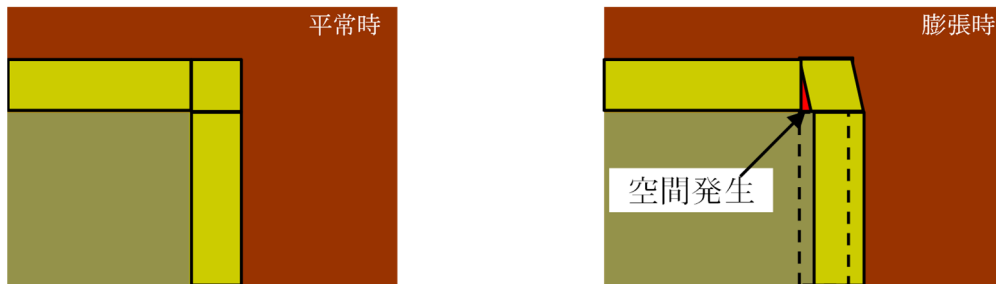
覆土材料は、材料調達状況を考慮した覆土施工時の施工試験結果により、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、最終決定された覆土材料に対しては、覆土の低透水性への力学的影響の評価を必要に応じて実施し、線量評価への影響の有無を確認する必要がある。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形が生じることとなる。これは、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。そのため、ベントナイト混合土(Ca型ベントナイト30wt%と砂70wt%の混合土)に対し、剛性が大きく変わらない覆土材料(Na型ベントナイト20wt%と砂80wt%の混合土)を用いた場合においても、金属腐食による膨張に伴い強制変位のような状態でせん断変形することが想定される。また、第5表に示すとおり、最も厳しい評価となる埋設設備の膨張量が直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算においても、覆土の等価透水係数は、DEM解析と同等であったことから、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響が生じない考えを示している。

以上のことから、覆土材料による影響については、覆土の変形に寄与する剛性が大きく変わらないため、等価透水係数に与える影響が軽微であり、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。

6. その他

埋設設備の膨張に伴い水平方向へ難透水性覆土が移動することで、難透水性覆土の上部が引き込まれ、卓越経路になり得る空間が生じると示唆される。そのため、空間が発生する可能性が示唆される現象(以下「示唆される現象」という。)について考察する。示唆される現象の概念図を第4図に示す。



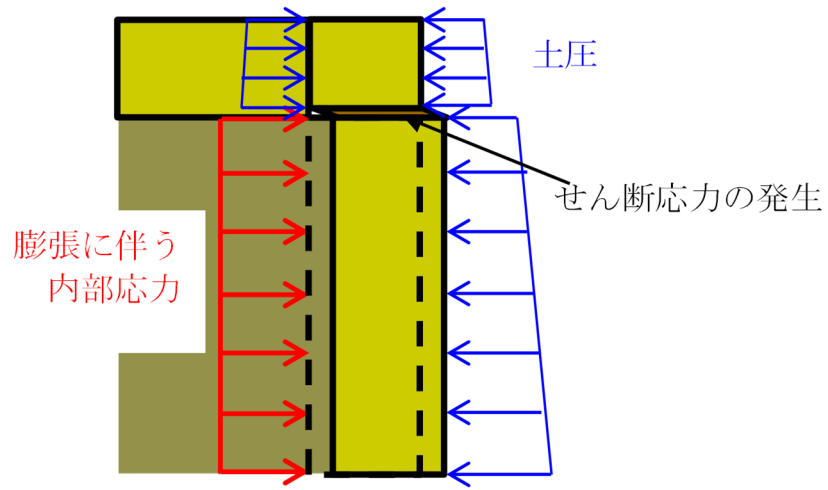
第4図 示唆される現象の概念図

文献⁽¹⁾によると、土や岩は、圧縮には強いがゆがみには比較的脆弱であり、外部や自重の作用によって地盤の内部にせん断応力が発生すると、地盤要素にゆがみによるせん断変形が生じるとされている。また、土の場合においては、せん断によってのみせん断破壊が生じるとされている。さらに、地盤材料がせん断変形を受けることでせん断面を形成している状況において、せん断面のひずみが集中している薄い層をせん断帯といい、粘土においては数十 μm オーダー、砂においては数 mm オーダーとされている。

ここで、示唆される現象が生じた場合の難透水性覆土周辺の応力場を第5図に示す。

難透水性覆土内部においては、周辺からの土圧の作用による押さえ込みにより等方圧縮応力場となっている。地盤の内部に廃棄物埋設地の膨張に伴い内部応力が発生し、内部応力は徐々に周辺土圧相当まで高まる。内部応力が周辺土圧と同等となると、埋設設備に接している覆土を押し込む状況が発生する。これは、内部応力が作用する面でのみ発生する現象であり、内部応力の発生しない部分との境界面においては、内部応力と土圧によるせん断応力が発生する。

以上のことから、せん断応力の発生する境界面において、極めて薄い層でのせん断破壊が発生することから、示唆される現象が発生する可能性はない。



第5図 示唆される現象が生じた場合の難透水性覆土周辺の応力場

7. 参考文献

- (1) 社団法人 地盤工学会(2010)：地盤材料試験の方法と解説

以 上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-状態変化の評価(化学的影響)-

2021年6月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 解析条件.....	1
(1) 解析コード.....	1
(2) 解析モデル.....	2
(3) 地下水組成.....	4
(4) 難透水性覆土の設定.....	4
(5) セメント系材料の設定.....	8
(6) 生成を想定した二次鉱物.....	10
(7) 熱力学データベース.....	12
3. 解析結果.....	12
(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)	12
(2) 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合(ケース②)	21
4. 参考文献.....	30

添付資料1 パラメータ設定根拠集

添付資料2 地下水組成のチャージバランス計算

添付資料3 覆土が長期間にわたり低透水性を維持することができる要因

参考資料1 ペクレ数分布

参考資料2 難透水性覆土の材料仕様をNa型ベントナイトとした場合

1. はじめに

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

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

なお、1号及び3号廃棄物埋設地の評価結果は併記する。

2. 解析条件

(1) 解析コード

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

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

(2) 解析モデル

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

なお、埋設設備周辺の難透水性覆土及び下部覆土において、ペクレ数分布より、評価期間内で拡散場が継続することを確認している。(参考資料 1「ペクレ数分布」、補足説明資料 6「透水係数の設定」参考資料 1「3. 確認結果」及び補足説明資料 7「埋設設備からの流出水量」添付資料 5「放射性物質を含む地下水が分水界の北側へ移行した場合の線量評価について」を参照。)

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

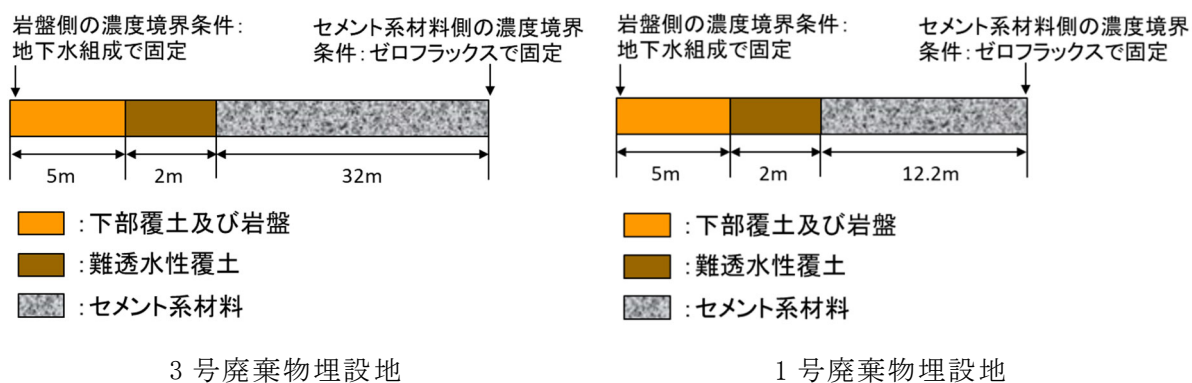
ここで、難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解量は、セメント系材料から溶出し難透水性覆土へ移行して化学反応に寄与するアルカリ量で決定される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合に加え、体積により決定される。1 次元体系では、体積は各材料のモデル長さに反映される。そこで、セメント系材料のモデル長さは、難透水性覆土に対して十分な長さとして、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分(3号廃棄物埋設地では 64m の半分の 32m、1号廃棄物埋設地では 24.4m の半分の 12.2m)の長さを設定した。(難透水性覆土とセメント系材料の体積比を考慮すると、難透水性覆土 2m に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

なお、2号廃棄物埋設地は、3号廃棄物埋設地と同種の廃棄体(充填固化体)及び類似施設であり、解析結果はいずれかの廃棄物埋設地で代表することができる。埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さをセメント系材料のモデル長さに設定する場合、2号廃棄物埋設地と比べ3号廃棄物埋設地の方が長く、その分アルカリ量は多くなることから、3号廃棄物埋設地の解析結果で代表することとした。一方、1号廃棄物埋設地については、廃棄体(均質・均一固化体)に塩類(硫酸塩、ほう酸塩)が含まれているため、セメント系材料から浸出してくるアルカリ成分に加え、廃棄体から溶出する塩が難透水性覆土に含まれるモンモリロナイトの変質に影響を及ぼす可能性

がある。そのため、3号廃棄物埋設地とは別に解析を行うこととした。

以上より、解析では3号及び1号廃棄物埋設地を評価対象とした。

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



第1図 解析体系概念図

(3) 地下水組成

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

第1表 設定した地下水組成

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

(4) 難透水性覆土の設定

(i) 難透水性覆土の鉱物組成

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

第2表 難透水性覆土の初期鉱物組成

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

*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(ii) モンモリロナイトの溶解速度

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

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

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

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

(数式 1)

Rate : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

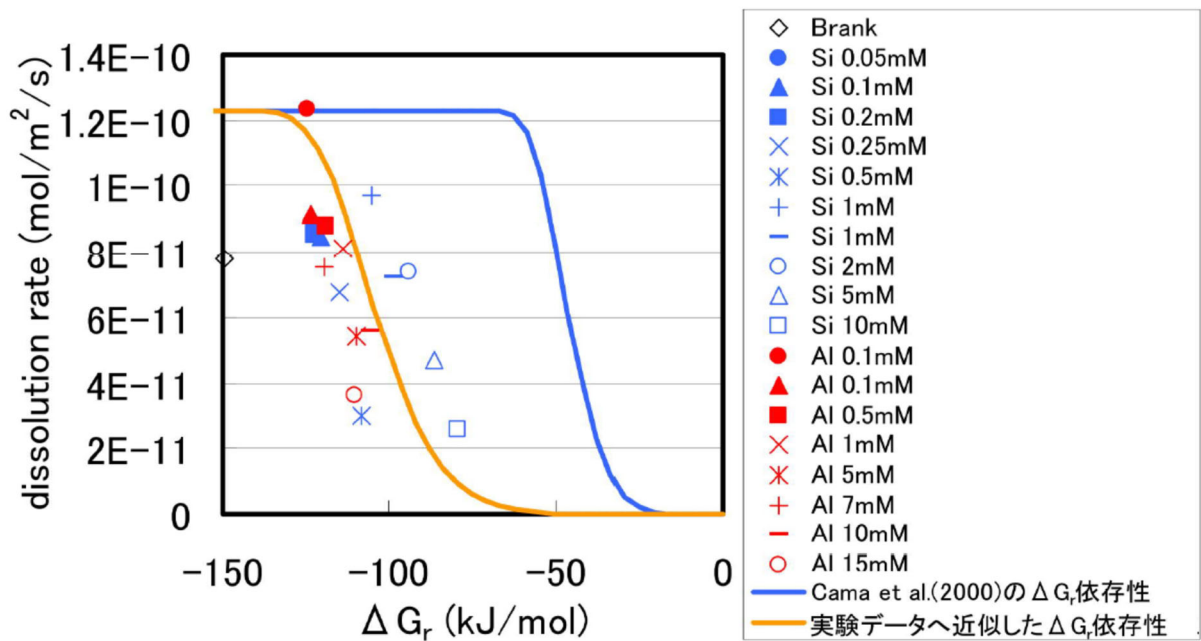
R : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

T : 絶対温度 [K]

a_{OH^-} : OH⁻イオンの活量

A_{min} : 鉱物の反応表面積 [m²]

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力) [kJ/mol]



第2図 モンモリロナイトの溶解速度と化学親和力 ΔG_r の関係(文献⁽⁹⁾)

(iii) 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式

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

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

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

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

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

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

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

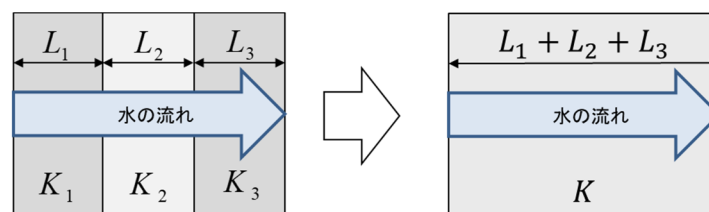
C_i : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]

e_{sme} : スメクタイト間隙比 [-]

K : 透水係数 [m/s]

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



等価透水係数

$$K = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_1 / K_1 + L_2 / K_2 + L_3 / K_3}$$

第3図 等価透水係数の設定(直列)

(iv) 難透水性覆土の拡散係数

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

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

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

$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数 [m²/s]

ε : 空隙率 [-]

a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合 [-]

f_b : ベントナイトの配合割合 [-]

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

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

(5) セメント系材料の設定

(i) セメント系材料の鉱物組成

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

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

なお、どちらの条件においても、骨材については反応しないものとした。

a. 3 号廃棄物埋設地

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

第3表 セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)

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

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

b. 1号廃棄物埋設地

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

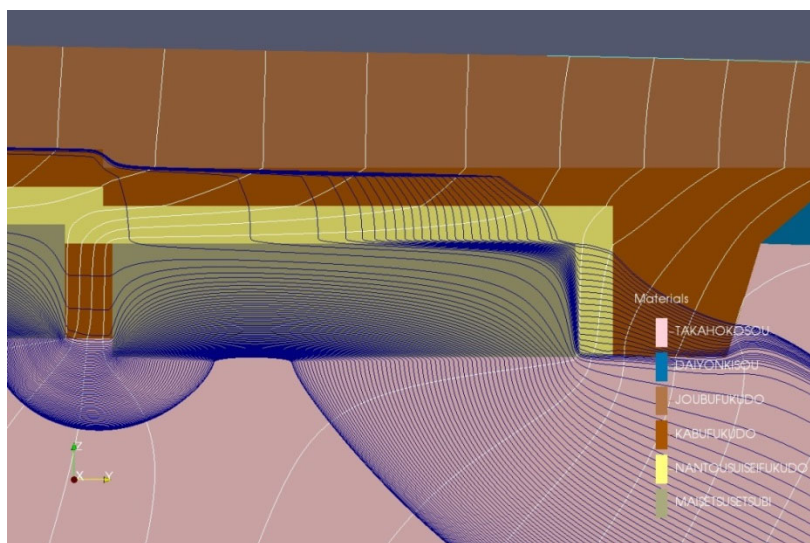
第4表 セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設地)

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

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(ii) 廃棄体に含まれる塩量(1号廃棄物埋設地で設定)

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



第 4 図 廃棄物埋設地の地下水流動概念図

第 5 表 解析で設定した塩濃度

ほう酸塩 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	硫酸塩 (Na_2SO_4)
0.01mol/L_water*1	0.07mol/L_water*1

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(iii) セメント系材料の拡散係数

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

(6) 生成を想定した二次鉱物

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

文献⁽¹⁵⁾では、セメント系材料と反応した溶液と接する緩衝材(ベントナイト系材料)の鉱物学的変化の可能性について、室内試験結果、関連する天然事例から得られる情報に基づき考察を行い、多様な系の特徴に応じて生成頻度が高いと判断された鉱物をまとめている。

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

第6表 生成を想定した二次鉱物

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

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

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

ほう酸塩	硫酸塩
Ca ₃ B ₂ O ₆	Na ₂ SO ₄ ・10H ₂ O
CaB ₄ O ₇	Thaumasite
CaB ₂ O ₄	エトリンガイト
NaBO ₂	2水石膏
Colemanite	

(7) 熱力学データベース

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

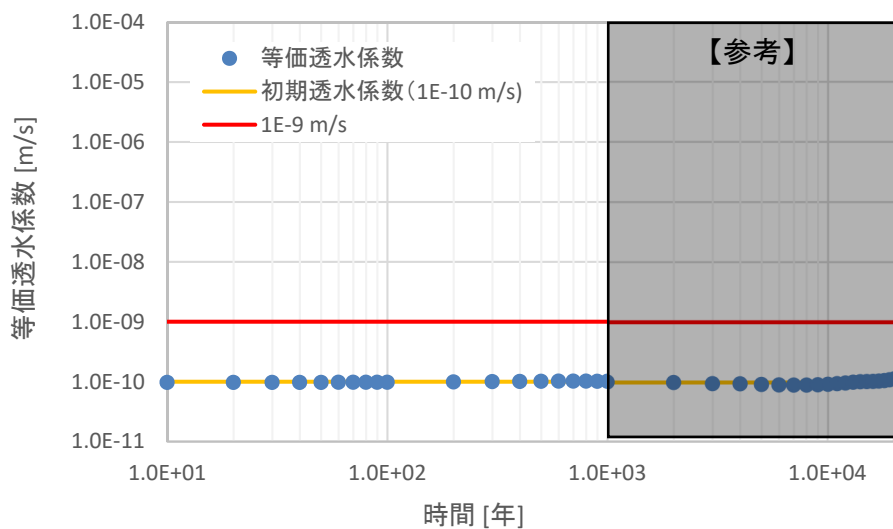
3. 解析結果

(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)

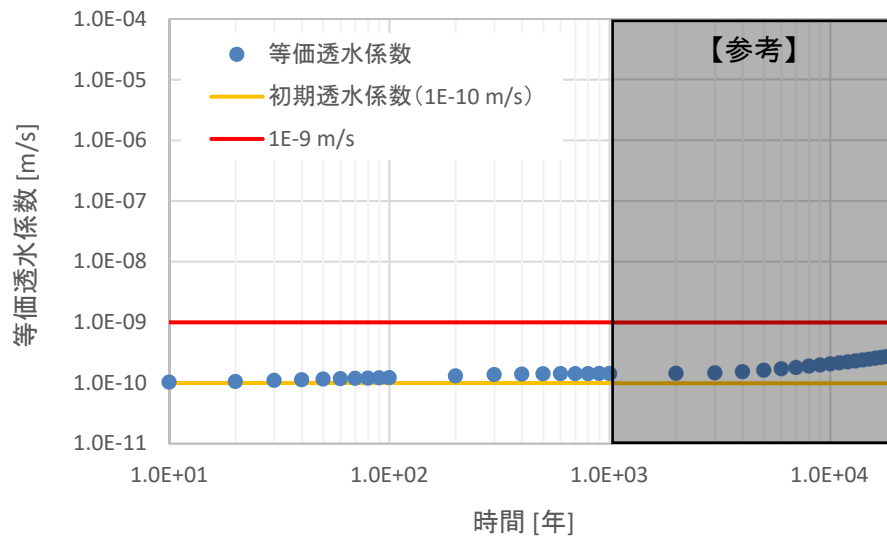
難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第5図に、1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第6図に示す。また、3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第7図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第8図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第9図に示す。1号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土にお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

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

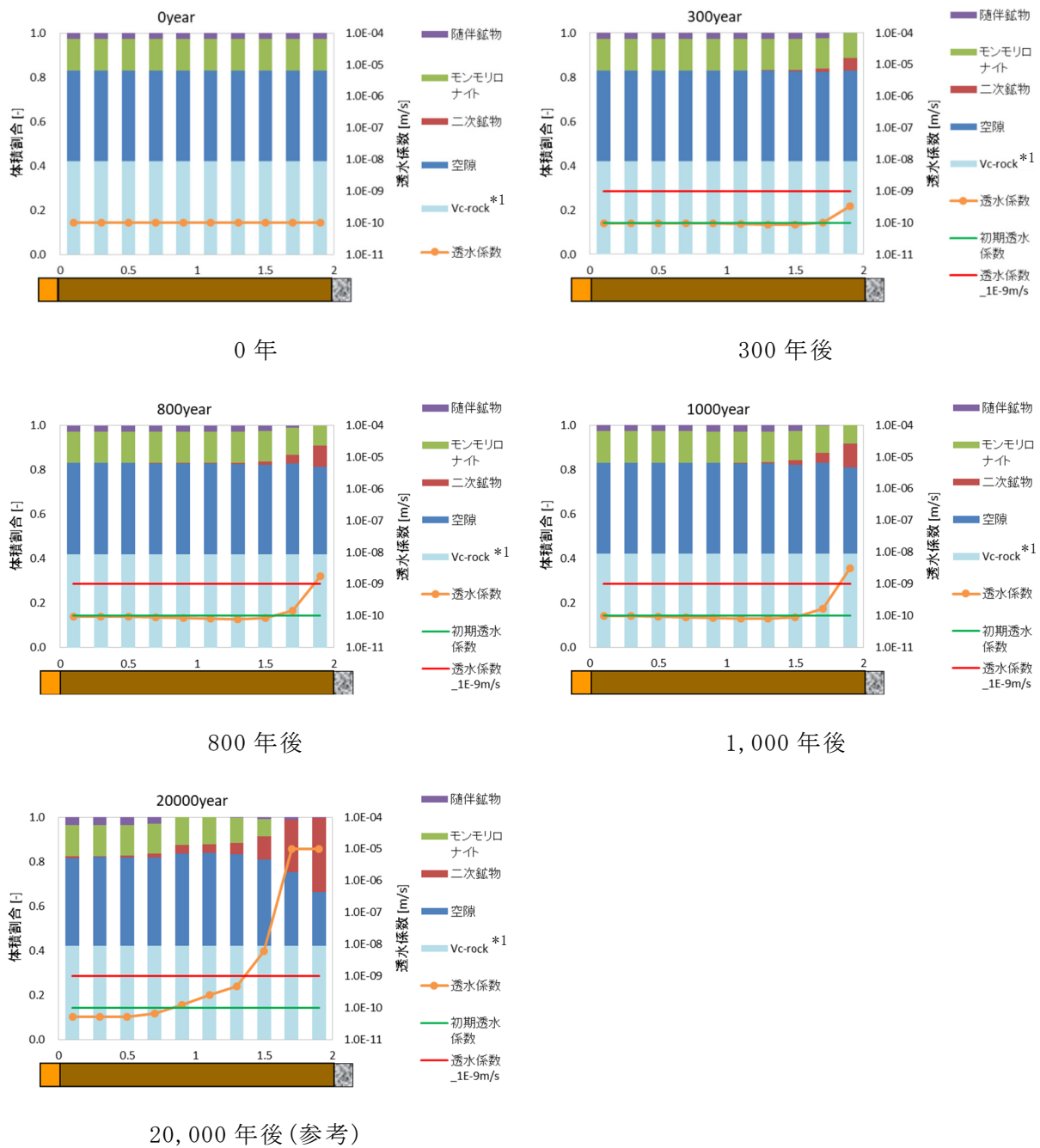
料と接する面ではベントナイトが若干溶解することにより透水係数がわずかに上昇するものの、それより内側の領域ではベントナイトの変質は見られず透水係数も初期値を維持していた。一方で、岩盤側ではベントナイトの変質はごくわずかであり透水係数の上昇も見られなかった。1号廃棄物埋設地のベントナイトの変質については、1,000年後の段階で、セメント系材料境界近傍のベントナイトが全溶解している層があった。セメント系材料由来のアルカリ成分の他に廃棄体に含まれる塩の影響を受け、3号廃棄物埋設地の結果よりも早い段階からベントナイトの変質が見られた。



第5図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

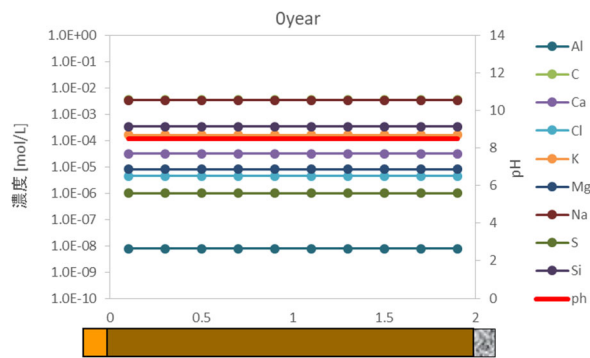


第 6 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水性係数の時間変化の結果
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

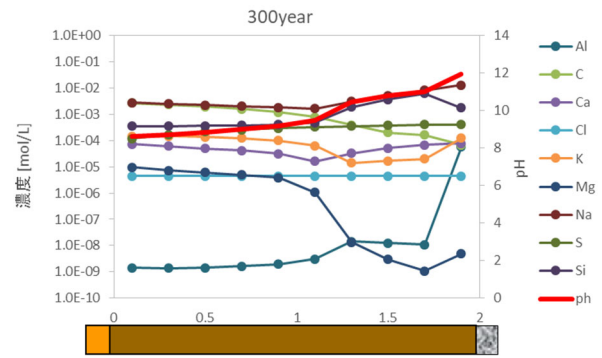


*1 : Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

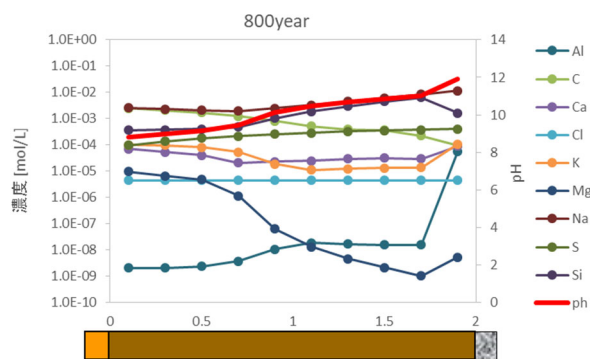
第7図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース① : 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



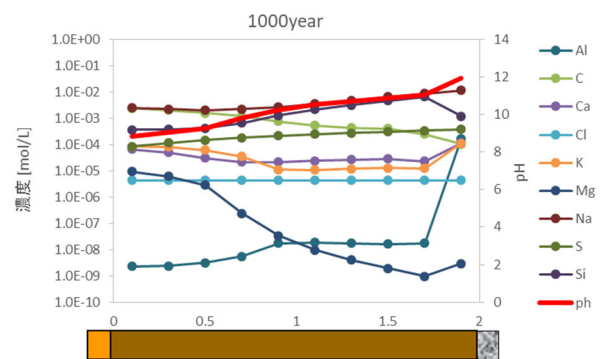
0年



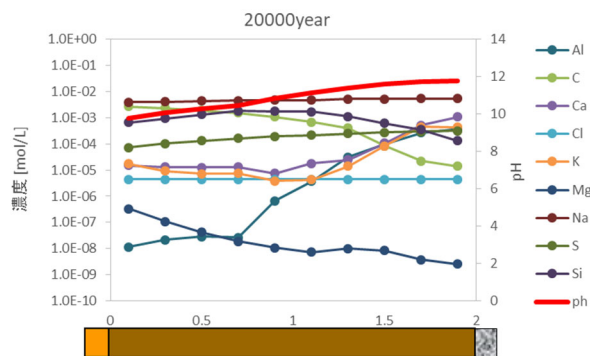
300年後



800年後

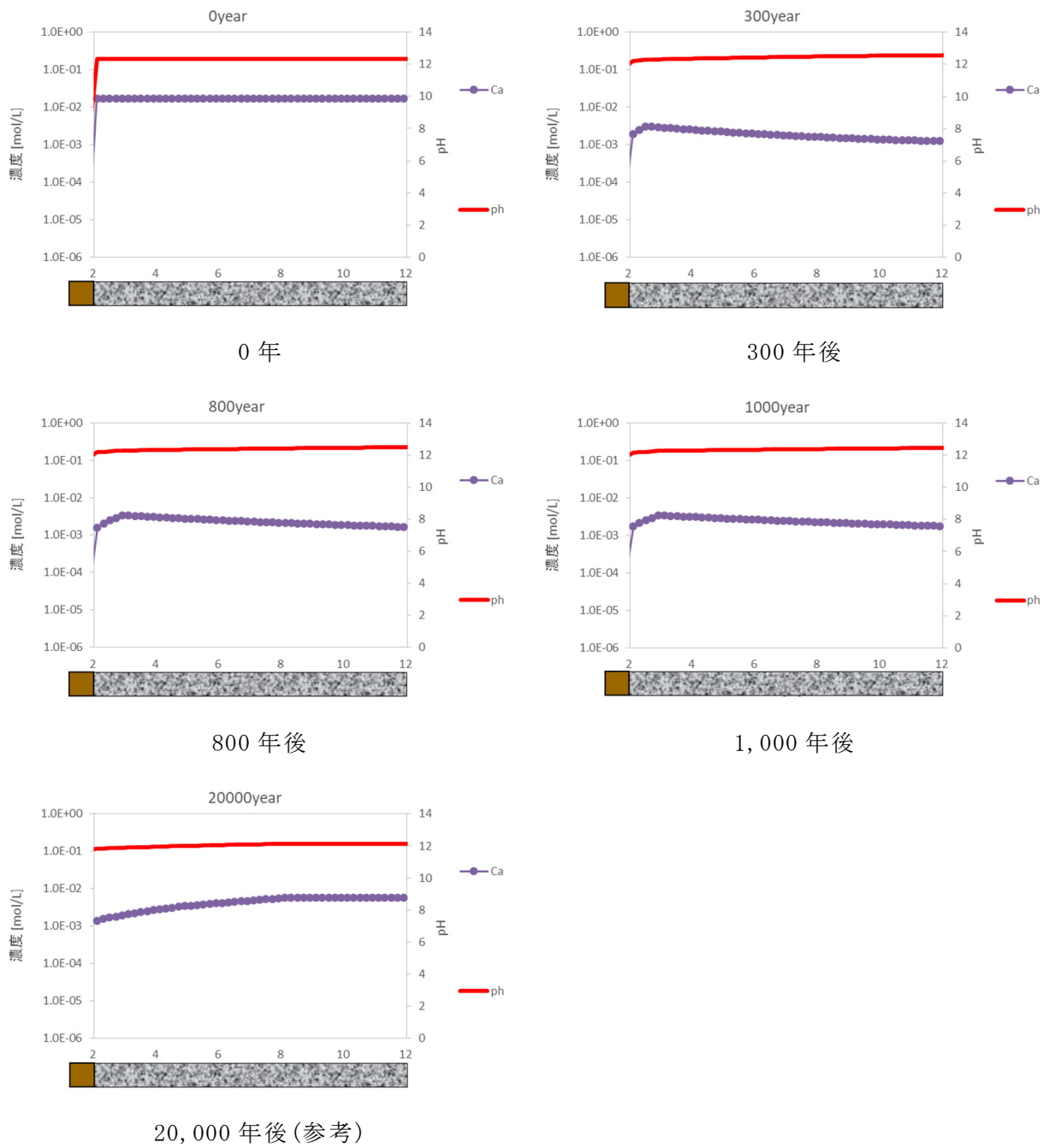


1,000年後

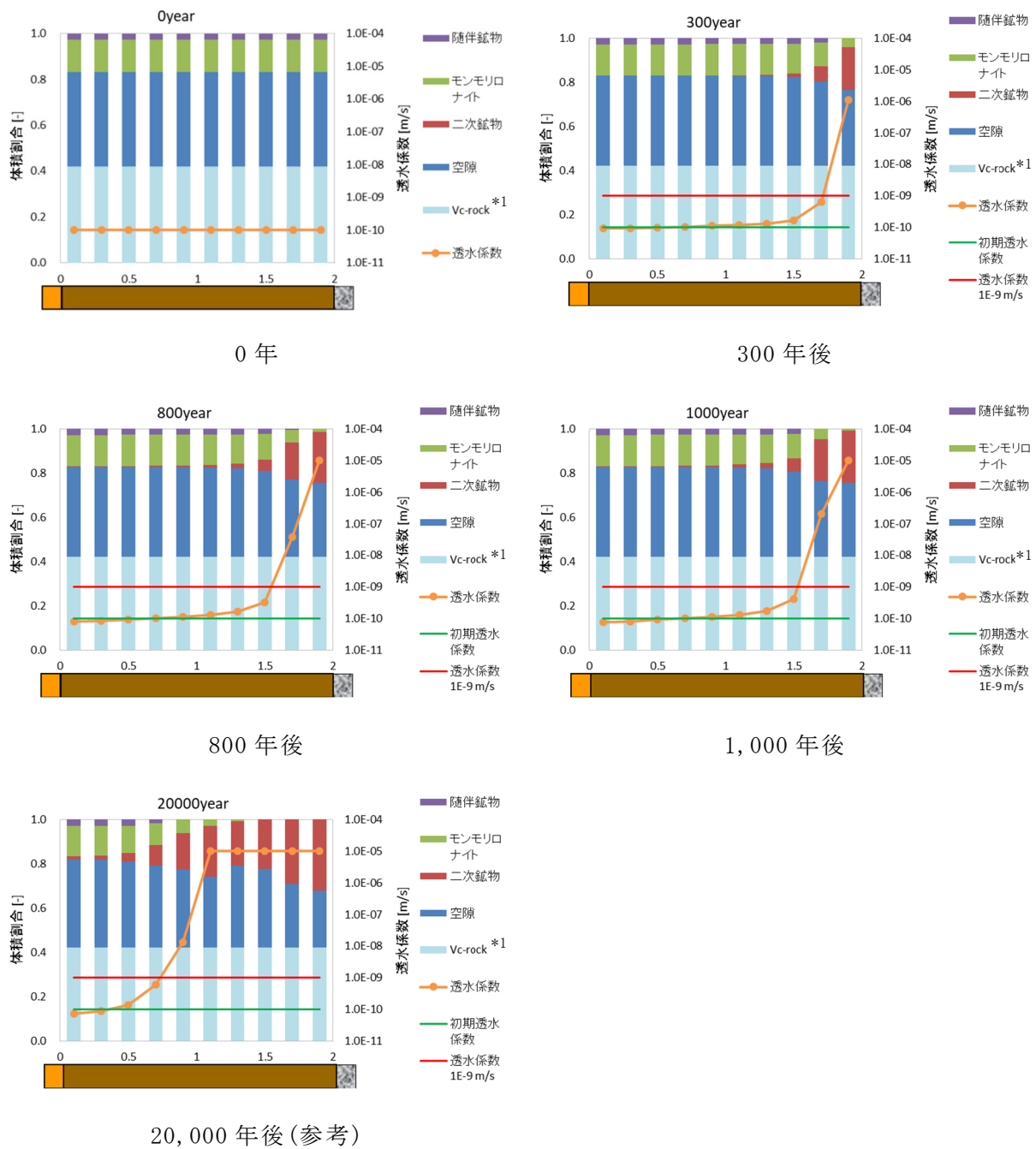


20,000年後(参考)

第8図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土内の液相組成の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

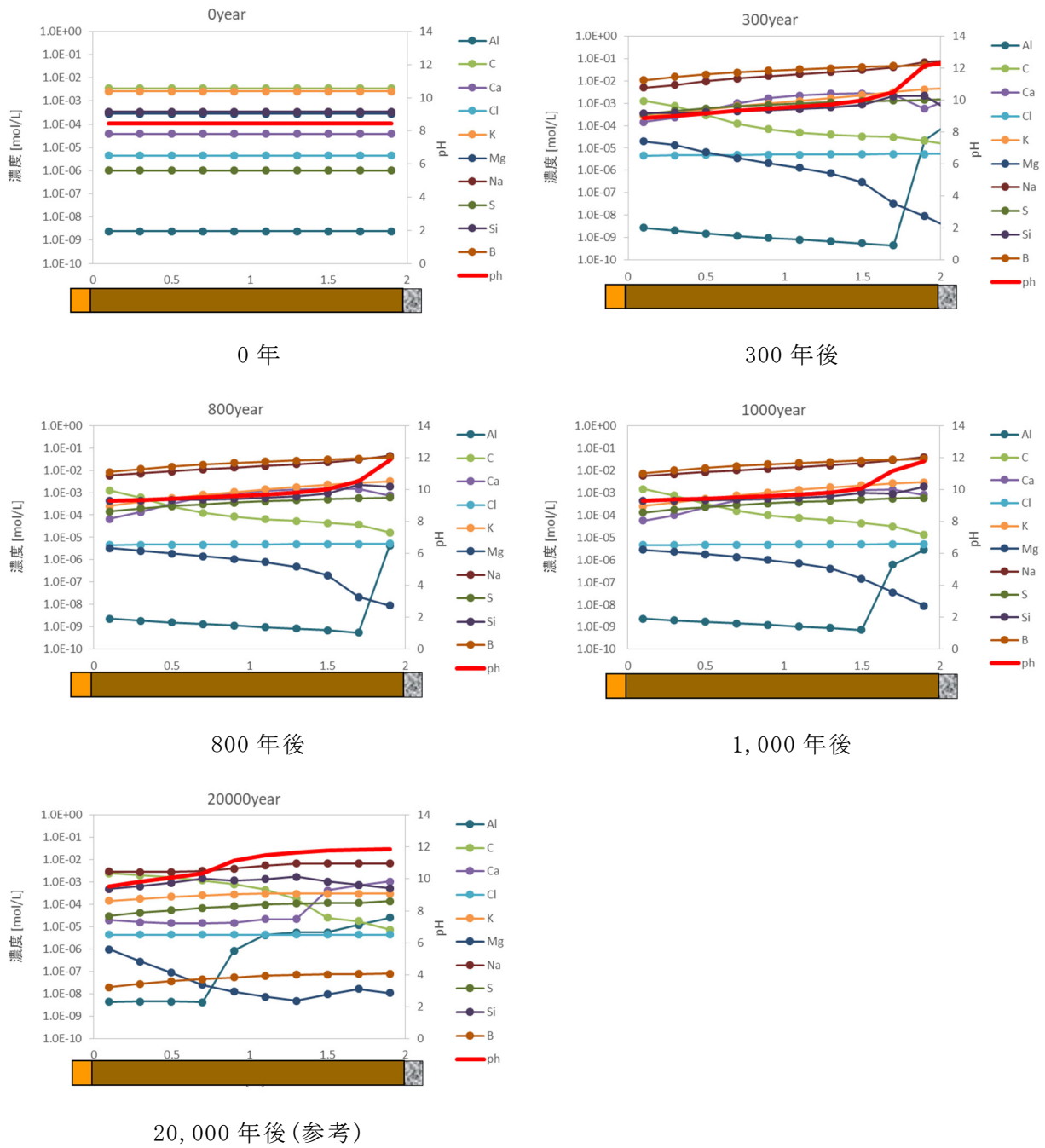


第9図 3号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

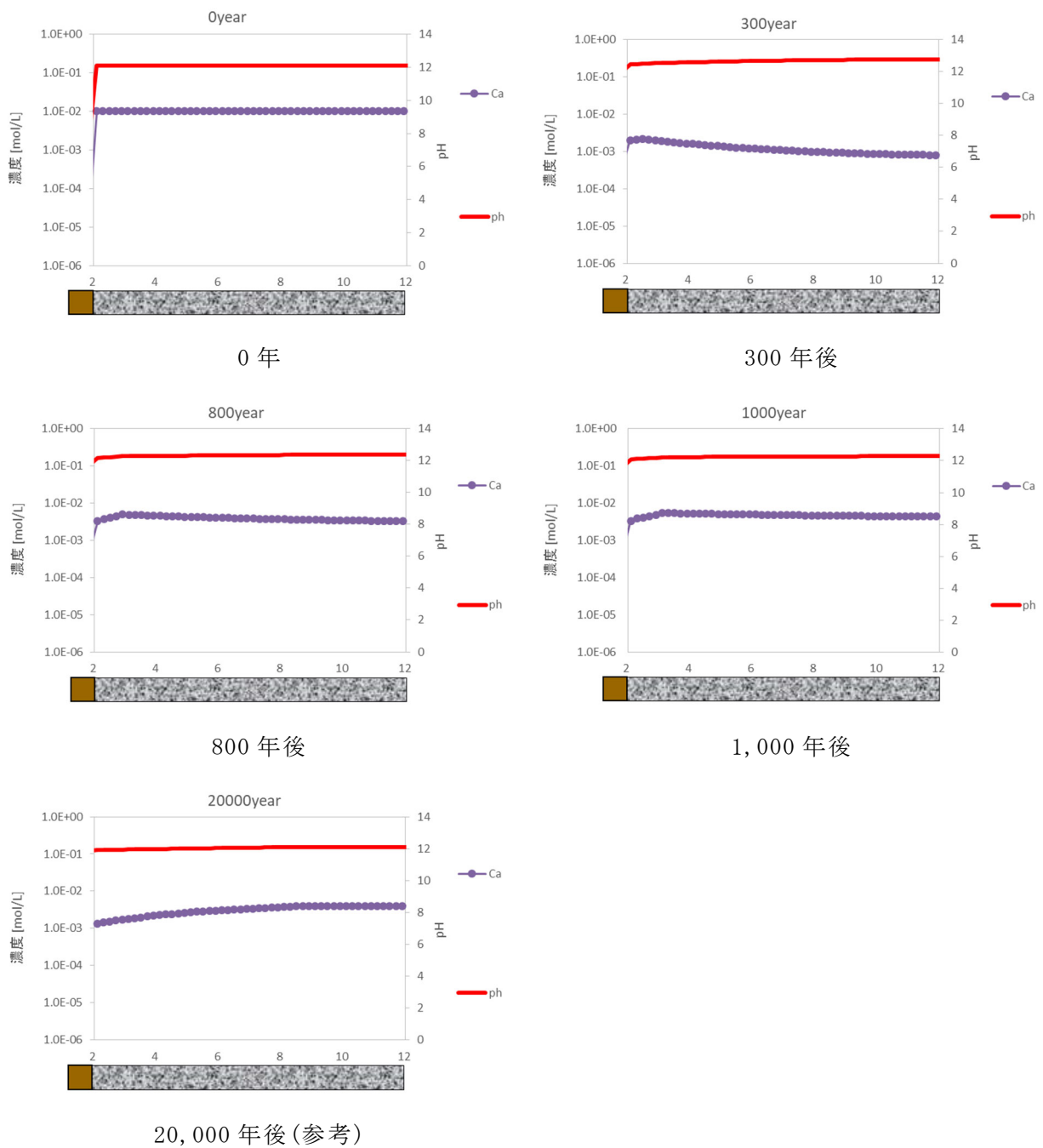


*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

第 10 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



第 11 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土内の液相組成の分布図
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



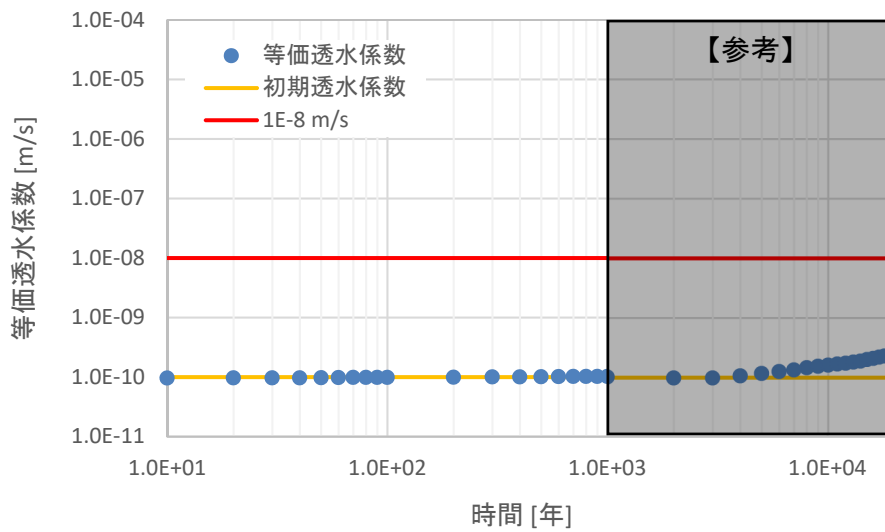
第 12 図 1 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

(2) 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合(ケース②)

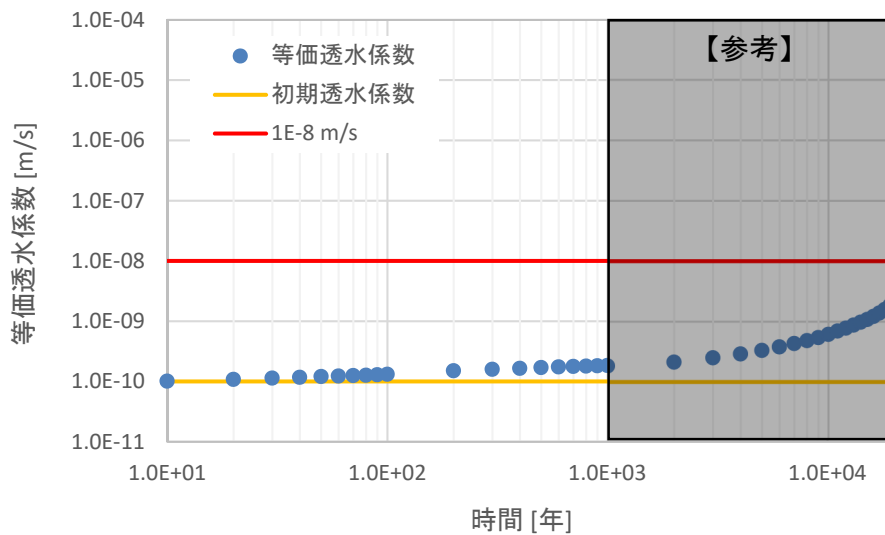
難透水性覆土中の拡散係数モデルについて、モンモリロナイトの割合を0とし、単純に空隙率に比例するとしたモデル(数式 4)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第13図に、1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第14図に示す。また、3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第15図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第16図に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内のpH、Ca濃度分布図を第17図に示す。1号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性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

3号廃棄物埋設地のベントナイトの変質については、1,000年後の段階では、「(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」と同様、セメント境界近傍ではわずかに変質が見られる程度であった。

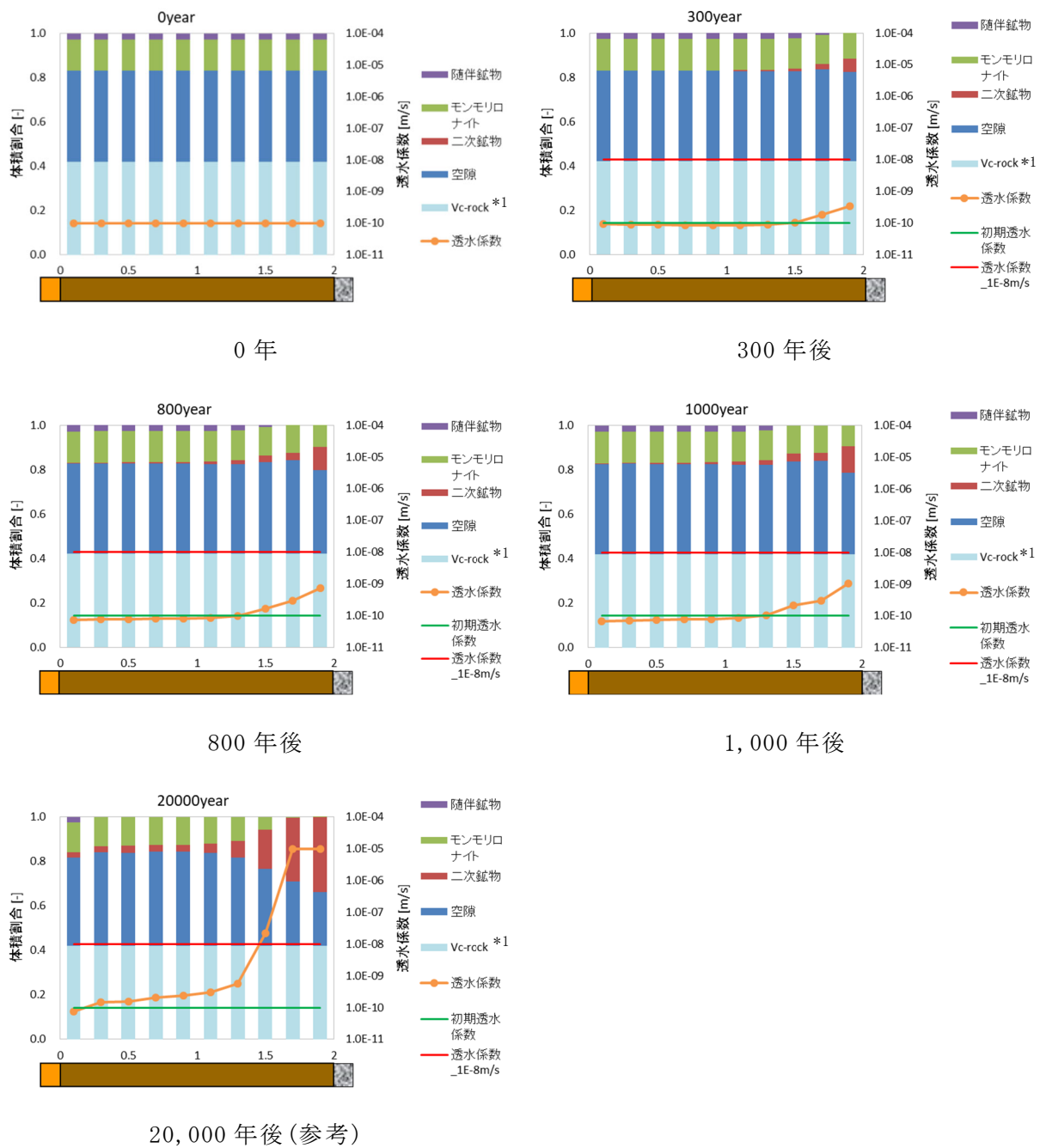
1号廃棄物埋設地の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。



第 13 図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

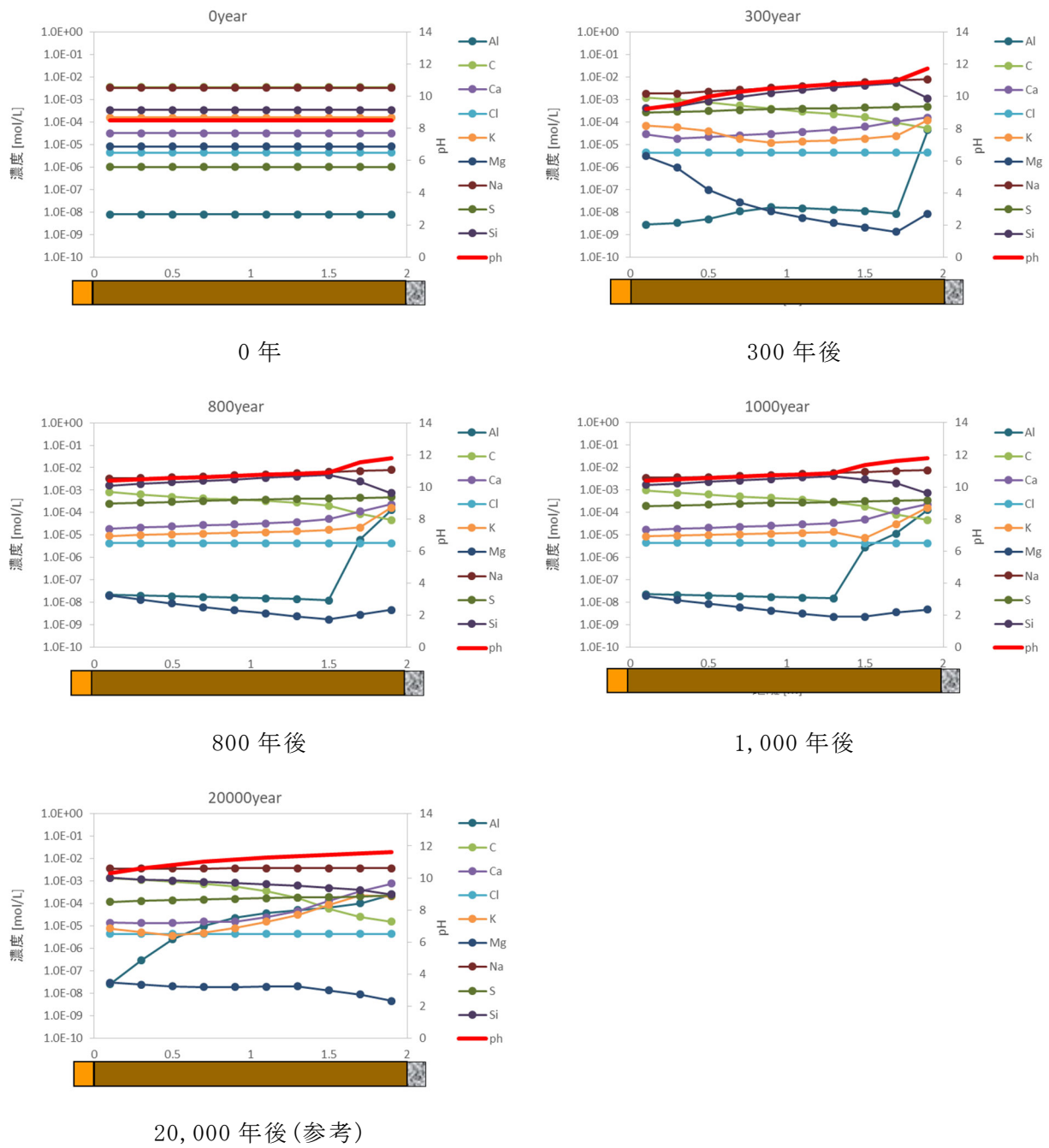


第 14 図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

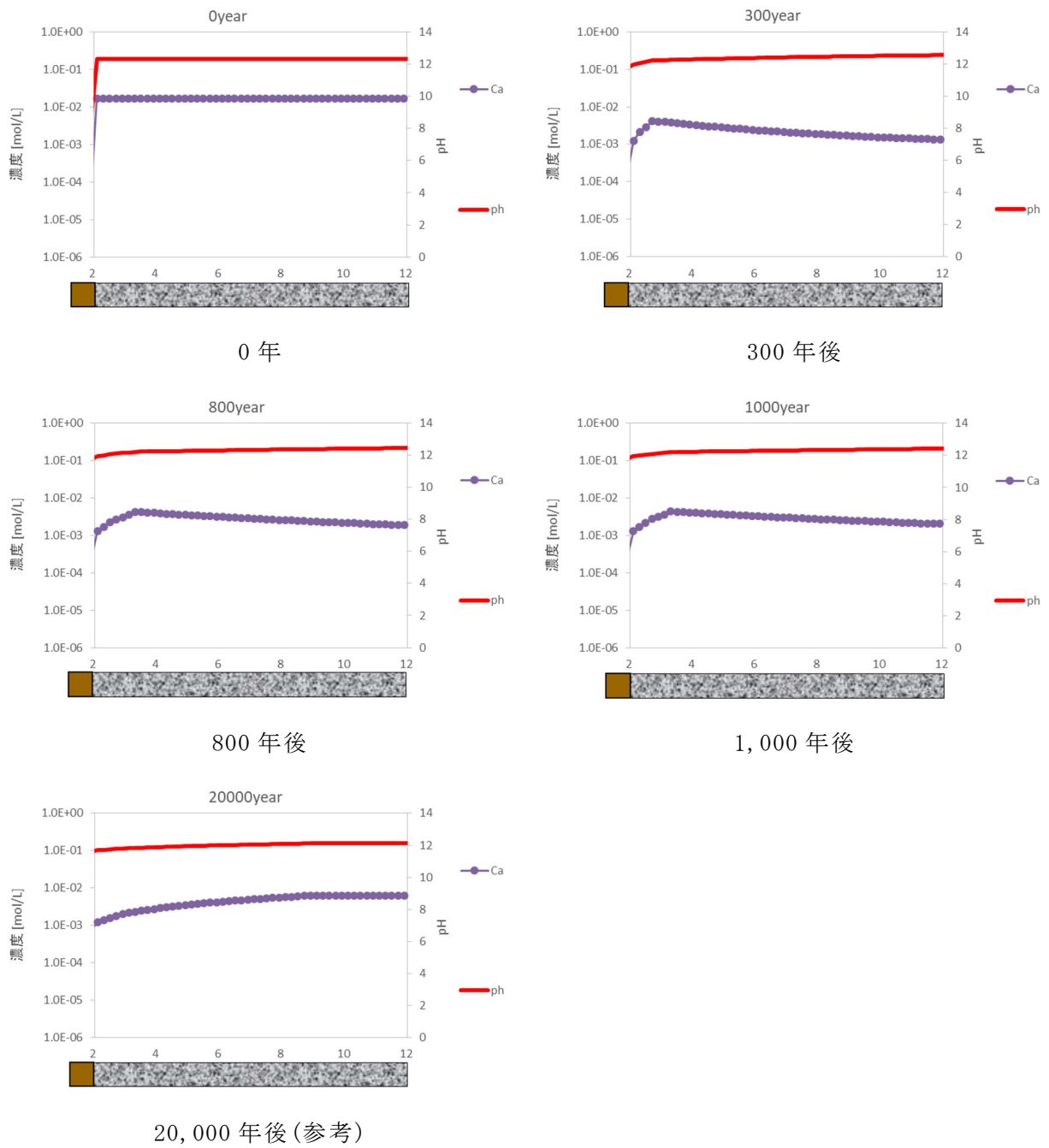


*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

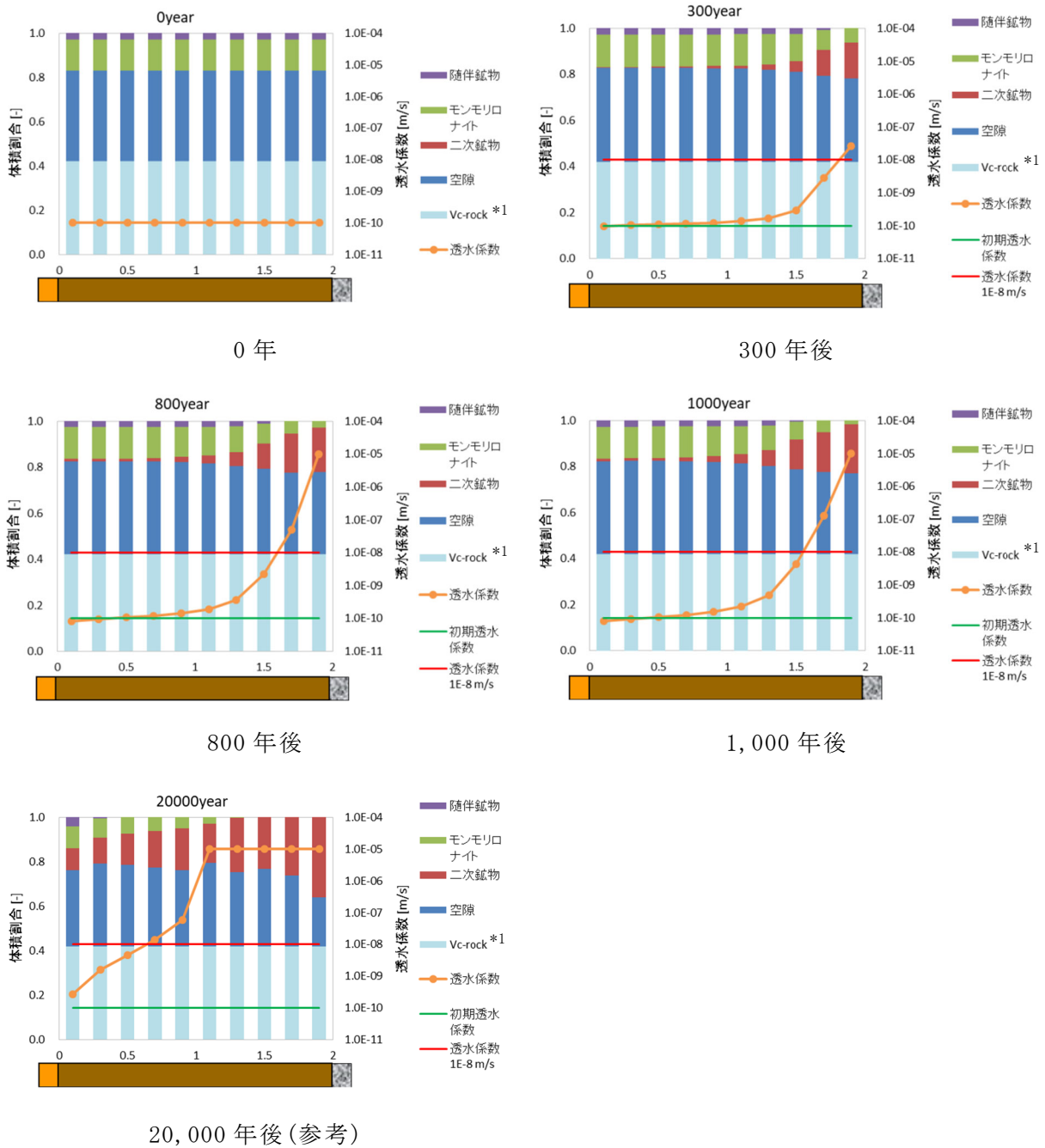
第 15 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 16 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における液相組成の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

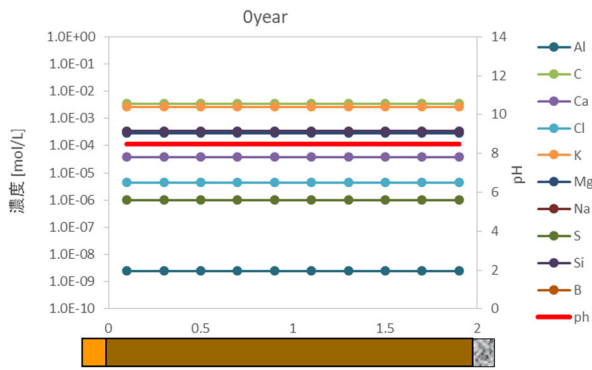


第 17 図 3 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

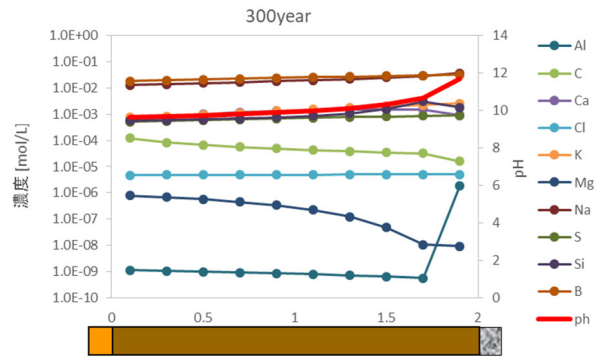


*1 : Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

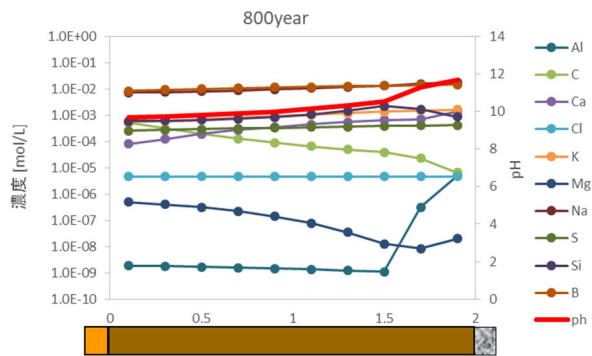
第 18 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース② : 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



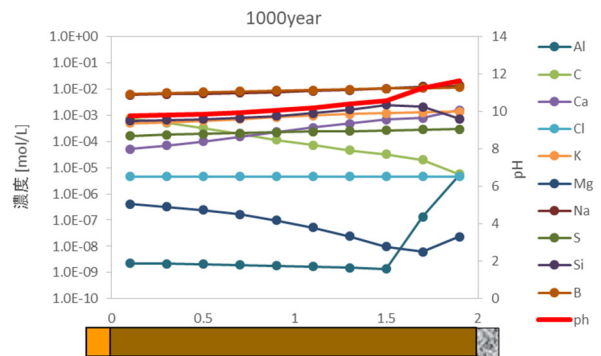
0年



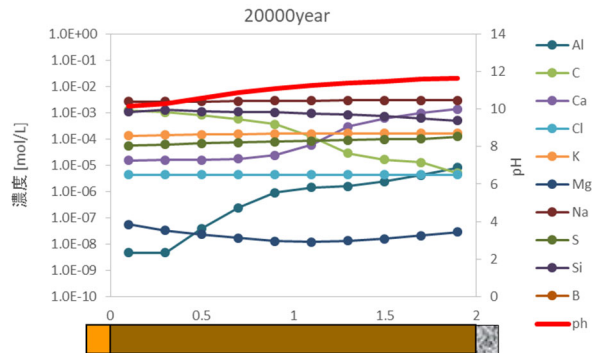
300年後



800年後

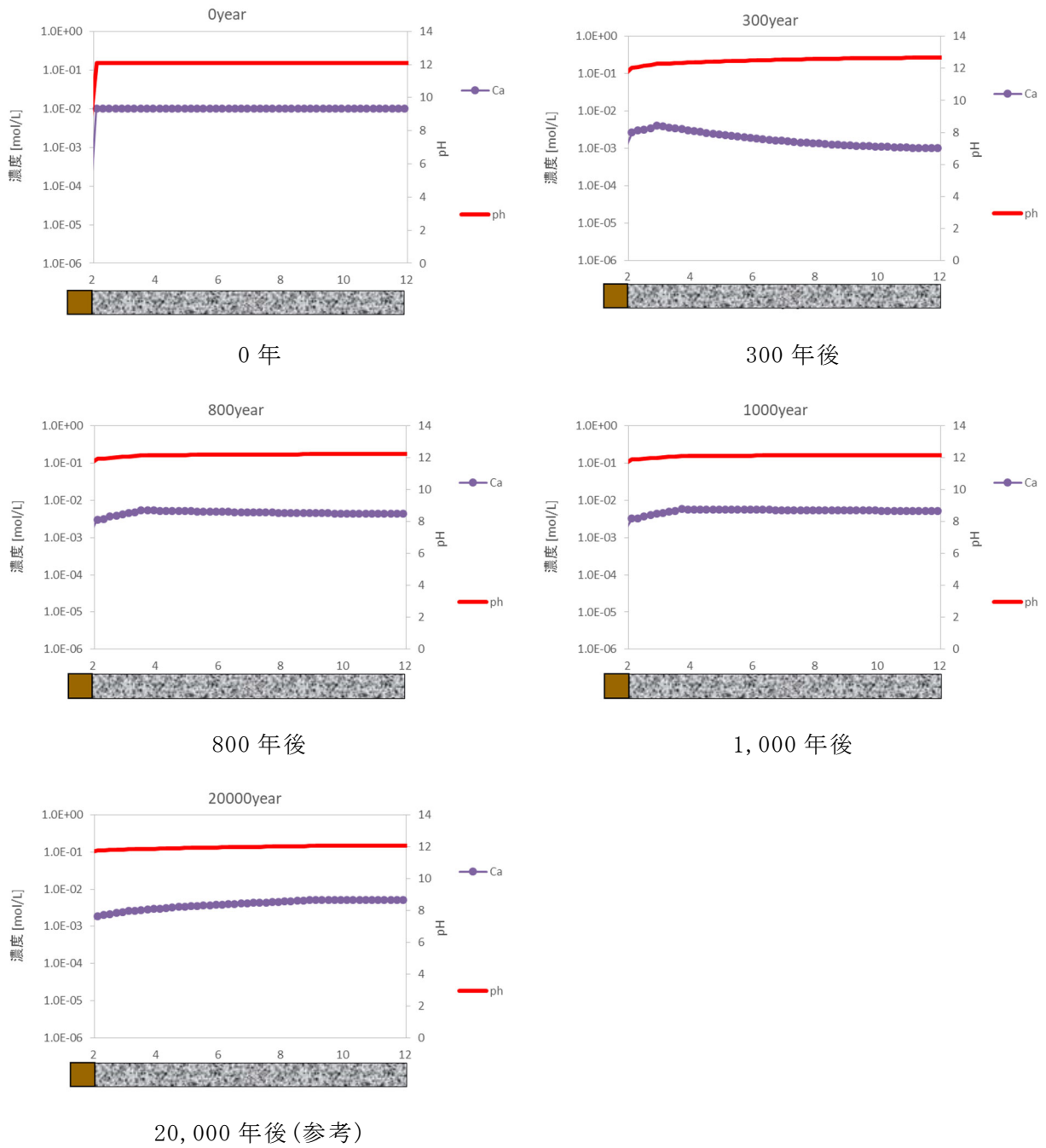


1,000年後



20,000年後(参考)

第 19 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における液相組成の分布図
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 20 図 1 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

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

また、化学的影響を受けた場合においても難透水性覆土中のモンモリロナイトが残存することから、難透水性覆土の周囲に設置する下部覆土は、化学的な影響による透水係数の変化は生じないものとする。

なお、下部覆土相当の材料で施工する1号廃棄物埋設地の南北方向の埋設設備間の狭隘部については、両側から化学的変質が生じることに加え、移流による化学物質の移行が生じることから、第10図及び第18図に示す難透水性覆土の透水係数の分布図に基づくと、ケース①及びケース②ともに1,000年後において砂程度の透水係数($1 \times 10^{-5} \text{m/s}$)になることが想定されるが、補足説明資料7「埋設設備からの流出水量」添付資料9「1号埋設設備狭隘部の充填材が劣化した場合の埋設設備からの流出水量について」に示すように、埋設設備からの流出水量は、狭隘部の透水係数による影響を受けない。

第8表 化学的影響の評価結果

	3号廃棄物埋設地[m/s]		1号廃棄物埋設地[m/s]	
	ケース①*1	ケース②*2	ケース①*1	ケース②*2
0年	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}
1,000年後	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.42×10^{-10}	1.84×10^{-10}

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

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

4. 参考文献

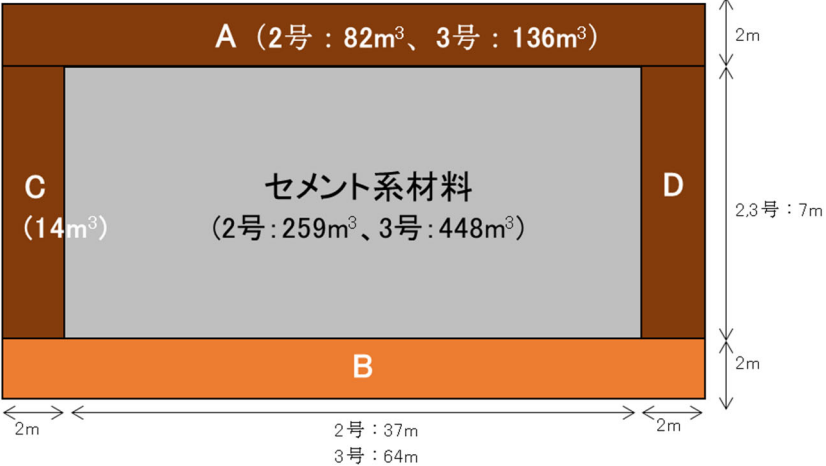
- (1) 伊藤弘之、三原守弘(2005)：ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式、JNC TN8400 2005-029
- (2) Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J.(1999): User's guide to PHREEQC (ver.2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259
- (3) Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J.(2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA
- (4) Diederik JACQUES, Lian WANG, Evelien MARTENS and Dirk MALLANTS(2012):Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R
- (5) Mikazu Yui, Hiroshi Sasamoto, Randolph C Arthur(1999):Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment(PA) Report, JNC TN8400 99-030
- (6) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005)、TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02
- (7) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05
- (8) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.64, No.15, pp.2701-2717
- (9) (独)日本原子力研究開発機構(2009)：TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成20年度報告－JAEA-Research 2009-046
- (10) Yokoyama, S. et al. (2005): Atomic force microscopy study of

- montmorillonite dissolution under highly alkaline conditions. *Clays and Clay Minerals* 53(2), 147-154
- (11) 原子力発電環境整備機構(2007)：処分システムに求められる閉鎖性能の考え方－処分場パネル規模の水理に関する試解析－、NUMO-TR-06-01
- (12) Morihito MIHARA, Ryouichi SASAKI(2005):Radio-nuclides Migration DATasets(RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027
- (13) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：平成26年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書
- (14) 日本化学会(2004)：化学便覧 基礎編 改定5版、丸善、東京、p-II.64
- (15) 小田治恵、佐々木良一、David Savage、Randolph C. Arthur、本田明(2005)：緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ、JNC TN8400 2005-020
- (16) Randolph C. Arthur et al. (2005): Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010
- (17) A. Atkinson et al. (1991): Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO₂-H₂O gels at 80 °C, DoE, DoE-HMIP-RR-91-045

パラメータ設定根拠集

目 次

1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋設地)	1
2. 解析のモデル形状(1号廃棄物埋設地)	2
3. 地下水組成	3
4. 難透水性覆土の初期鉱物組成	5
5. 難透水性覆土の初期空隙率	6
6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)	7
7. セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設地)	9
8. 廃棄体の塩量	10
9. セメント系材料の初期空隙率	11
10. 難透水性覆土の透水係数	12
11. 難透水性覆土の拡散係数	13
12. セメント系材料の拡散係数	14
13. モンモリロナイトの溶解速度	15
14. 二次鉱物	16
15. 塩影響を考慮した二次鉱物(1号廃棄物埋設地)	17

パラメータ	1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋設地)
設定値	難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 32m
設定根拠	<p>難透水性覆土のモデル長さは難透水性覆土の設計に基づき設定した。 セメント系材料のモデル長さについて、3号廃棄物埋設地の形状を想定し、埋設設備の一基当たりの外形寸法の幅(64m)の半分の長さを設定した。なお、2号廃棄物埋設地は、3号廃棄物埋設地と同種の廃棄体及び類似施設であり埋設設備の一基当たりの外形寸法の長さの観点*1で3号廃棄物埋設地の解析結果で代表する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 3号廃棄物埋設地 埋設設備の一基当たりの外形寸法 64m×37m×7m (2号廃棄物埋設地 埋設設備の一基当たりの外形寸法 37m×36m×7m) <p>*1：セメント系材料のモデル長さを埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さ設定したことについて補足する。3号及び2号廃棄物埋設地の鉛直断面概念図を下図に示す。中心のセメント系材料のアルカリ成分が、周囲の難透水性覆土(A、C、D)及び岩盤(B)へ移動していく現象に対して、難透水性覆土へのアルカリ成分の影響を大きく見積もるため、上面Aと側面Cのみにアルカリ成分が全て移動し側面(D)及び岩盤(B)への移行はないとしたケースについて考える。難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2号廃棄物埋設地で2.7、3号廃棄物埋設地では3.0である。これより、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、2号廃棄物埋設地で5.4m、3号廃棄物埋設地では6.0mとなる。 本解析では、32mを設定しており、覆土に対して十分な長さといえる。</p>  <p>3号及び2号廃棄物埋設地の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ1mとする)</p>
参考文献	

パラメータ	2. 解析のモデル形状(1号廃棄物埋設地)
設定値	難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 12.2m
設定根拠	<p>難透水性覆土のモデル長さは難透水性覆土の設計に基づき設定した。 セメント系材料のモデル長さについて、1号廃棄物埋設地の形状を想定し、埋設設備の一基当たりの外形寸法の幅(24.4m)の半分の長さを設定した。</p> <p>・1号廃棄物埋設地 埋設設備の一基当たりの外形寸法 24.4m×24.4m×6.2m</p> <p>セメント系材料のモデル長さを埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さに設定したことについて補足する。 1号廃棄物埋設地の鉛直断面概念図を下図に示す。「1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋設地)」と同様にして、難透水性覆土へのアルカリ成分の影響を大きく見積もるケースについて考える。 難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2.1である。これより、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、4.2mとなる。本解析では、12.2mを設定しており、覆土に対して十分な長さといえる。</p> <div data-bbox="491 1131 1305 1572" data-label="Diagram"> <p>鉛直断面概念図は、中央に「セメント系材料 (144m³)」が示されています。その周囲には、厚さ2mの「難透水性覆土」が設けられています。覆土は上下2層（A: 56m³, B）と左右2層（C: 12m³, D）に分かれています。中央のセメント系材料の幅は「1号: 24m」と表示されています。また、左右のセメント系材料の幅はそれぞれ「2m」と表示されています。右側の縦軸には「1号: 6m」と表示されています。</p> </div> <p>1号廃棄物埋設地の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ1mとする)</p>
参考文献	

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

検討した地下水の組成

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

(濃度の単位は mol/L)

*1 : Na 濃度をチャージバランスにて設定

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

セメント系材料と反応した地下水の組成

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

(濃度の単位は mol/L)

参考文献

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

パラメータ	4. 難透水性覆土の初期鉱物組成
設定値	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイト(クニボンド) Na 型モンモリロナイト 0.33mol/L_{water} Ca 型モンモリロナイト 1.94mol/L_{water} K 型モンモリロナイト 0.06mol/L_{water} Mg 型モンモリロナイト 0.23mol/L_{water} カルセドニ 2.94mol/L_{water}
設定根拠	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイト(クニボンド)の配合率:30wt% ・ ベントナイト(クニボンド)の鉱物組成⁽¹⁾ <ul style="list-style-type: none"> モンモリロナイト 80% 石英 5% クリストバライト 15% <p>(解析の都合上、クリストバライトと比べ石英は安定な鉱物のため、解析では反応しない鉱物として設定した。また、クリストバライトは熱力学データベースに存在しないため、カルセドニとして設定した。)</p> ・ 乾燥密度: 1.61Mg/m³(室内試験結果) ・ 初期空隙率: 「5. 難透水性覆土の初期空隙率」を参照 ・ 混合砂は反応しないものとした。(シリカ成分は、高アルカリ側の溶存化学種の加水分解により pH 緩衝性を有する。混合砂には多くのシリカ成分が含まれるが、本解析では緩衝性を無視するため反応しないものとした。) ・ クニボンドの陽イオン組成⁽²⁾ <ul style="list-style-type: none"> NaZ 10.3meq/100g^{*1} CaZ₂ 60.1meq/100g^{*1} KZ 1.9meq/100g MgZ₂ 7.2meq/100g <p>*1: 初期透水係数が 1.0×10^{-10} m/s となるように調整した。</p>
参考文献	<p>(1) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘(1998): カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性—膨潤圧、透水係数、—軸圧縮強度及び弾性係数—, PNC TN8410 98-021</p> <p>(2) 直井優、小峰秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴(2005): 各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響、土木学会論文集 No. 785/III-70, 39-49</p>

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

パラメータ	6. セメント系材料の初期鉱物組成 (3号廃棄物埋設地)																																																			
設定値	C-S-H ゲル	9.51mol/L_water																																																		
	ハイドロタルサイト	0.33mol/L_water																																																		
	エトリンサイト	0.04mol/L_water																																																		
	ギブサイト	0.94mol/L_water																																																		
	NaOH	0.03mol/L_water																																																		
	KOH	0.03mol/L_water																																																		
設定根拠	<p>3号廃棄物埋設地の充填モルタルの候補配合を参照した。参照したセメントの配合では、高炉スラグ微粉末が多く配合されていることから普通ポルトランドセメントと比べSi成分が多い。そこで、初期鉱物組成の算定方法は、文献⁽¹⁾に記載されているフライアッシュ高含有シリカフェュームセメント (HFSC) の初期鉱物組成の算定方法を参照した。</p> <p>なお、骨材 (砕砂、陸砂) は反応しないものとした。</p> <p style="text-align: center;">3号廃棄物埋設地の充填モルタルの候補配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">単位量 [kg/m³]</th> </tr> <tr> <th colspan="2">結合材 (C)</th> <th colspan="2">細骨材 (S)</th> </tr> <tr> <th>中庸熱ポルトランドセメント</th> <th>高炉スラグ微粉末</th> <th>砕砂</th> <th>陸砂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>127</td> <td>295</td> <td>440</td> <td>1026</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">中庸熱ポルトランドセメントの化学組成⁽¹⁾</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>Fe₂O₃</th> <th>CaO</th> <th>MgO</th> <th>SO₃</th> <th>Na₂O</th> <th>K₂O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23.3</td> <td>3.80</td> <td>3.90</td> <td>63.3</td> <td>0.90</td> <td>2.40</td> <td>0.30</td> <td>0.35</td> </tr> </tbody> </table> <p>(単位は wt%)</p> <p style="text-align: center;">高炉スラグ微粉末の化学組成</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>Fe₂O₃</th> <th>CaO</th> <th>MgO</th> <th>SO₃</th> <th>Na₂O</th> <th>K₂O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34.2</td> <td>14.9</td> <td>0.84</td> <td>42.0</td> <td>6.09</td> <td>0.02</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table> <p>(単位は wt%)</p>				単位量 [kg/m ³]				結合材 (C)		細骨材 (S)		中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂	127	295	440	1026	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	23.3	3.80	3.90	63.3	0.90	2.40	0.30	0.35	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	34.2	14.9	0.84	42.0	6.09	0.02	0.00	0.00
単位量 [kg/m ³]																																																				
結合材 (C)		細骨材 (S)																																																		
中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂																																																	
127	295	440	1026																																																	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O																																													
23.3	3.80	3.90	63.3	0.90	2.40	0.30	0.35																																													
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O																																													
34.2	14.9	0.84	42.0	6.09	0.02	0.00	0.00																																													

	<p>・水和鉱物量の算定方法⁽²⁾</p> <p>(1) SO₃の全量をエトリンサイトとして配分する。</p> <p>(2) Fe₂O₃の全量を C₃FH₆として配分する。(ただし、C₃FH₆は反応しないものとした。)</p> <p>(3) MgOの全量を hidroタルサイトとして配分する。</p> <p>(4) SiO₂量及び残りの CaO 量に対し、これらの両成分が完全に消費されるような 2 種類の連続した Ca/Si 比を持つ C-S-H ゲルを設定する。</p> <p>残りの Al₂O₃量から C-S-H ゲルに取り込まれる Al₂O₃量を下式に従って差し引く。その後、Al₂O₃が更に余剰するようであれば残りの Al₂O₃をギブサイトとして配分する。</p> <p>C-S-H ゲルに取り込まれる Al 量の算定式</p> $[Al/Ca \text{ モル比}] = 0.2723 \times [Si/Ca \text{ モル比}] - 0.0692$ <p>(5) Na₂O、K₂O はそれぞれ NaOH、KOH として配分する。</p> <p>・初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照</p>
参考文献	<p>(1) 五十嵐豪、寺本篤史、丸山一平(2012)：各種ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の結合水量と水蒸気 BET 比表面積の関係、日本建築学会構造系論文集、Vol. 77、No. 682、pp. 1819-1828</p> <p>(2) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書</p>

パラメータ	7. セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設地)																			
設定値	C-S-H ゲル	6.46mol/L _{water}																		
	ハイドロタルサイト	0.41mol/L _{water}																		
	エトリンサイト	0.01mol/L _{water}																		
	ギブサイト	1.19mol/L _{water}																		
	NaOH	0.01mol/L _{water}																		
	KOH	0.01mol/L _{water}																		
設定根拠	<p>1号廃棄物埋設地で実際に使用されている配合を参照した。各水和鉱物量の算定方法は、「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」と同様、文献⁽¹⁾のHFSCの算定方法を参照した。 なお、骨材(砕砂、陸砂)は反応しないものとした。</p> <p style="text-align: center;">1号廃棄物埋設地の充填モルタルの配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">単位量 [kg/m³]</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">結合材(C)</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">細骨材(S)</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">中庸熱ポルトランドセメント</th> <th style="text-align: center;">高炉スラグ微粉末</th> <th style="text-align: center;">砕砂</th> <th style="text-align: center;">陸砂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">42</td> <td style="text-align: center;">380</td> <td style="text-align: center;">877</td> <td style="text-align: center;">585</td> </tr> </tbody> </table> <p>・中庸熱ポルトランドセメントの化学組成：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」参照 ・高炉スラグ微粉末の化学組成：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」参照 ・水和鉱物量の算定方法：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」参照 ・初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照</p>				単位量 [kg/m ³]				結合材(C)		細骨材(S)		中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂	42	380	877	585
単位量 [kg/m ³]																				
結合材(C)		細骨材(S)																		
中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂																	
42	380	877	585																	
参考文献	(1) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：平成26年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書																			

パラメータ	8. 廃棄体の塩量
設定値	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.01mol/L_water Na_2SO_4 0.07mol/L_water
設定根拠	<p>廃棄体 1 本あたりに含まれる塩量の平均値から 1 号廃棄物埋設地の埋設設備の一基当たりの外形寸法の間隙に均一に分布していると仮定して設定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄体(ドラム缶 1 本あたり)に含まれる塩量の平均値 ほう酸塩 13kg/ドラム缶 1 本、 硫酸塩 25.6kg/ドラム缶 1 本 ・ 塩濃度の算出 <ol style="list-style-type: none"> (1) 一基に埋設されるドラム缶の本数(5, 120 本)より、一基に埋設された塩量を算出 ほう酸塩 68t/基 硫酸塩 131t/基 (2) 廃棄体に含まれる塩量のうち、1/10 が岩盤側に流出したと仮定*1し、塩量を算出 ほう酸塩 6.80t/基 硫酸塩 13.10t/基 (3) 廃棄体中の塩が埋設設備の一基当たりの外形寸法全体に均質に分布していると仮定し、1 号廃棄物埋設地の埋設設備の一基当たりの外形寸法(24m×24m×6m)で上記の塩量を割って、1m³当たりの塩量を算出 ほう酸塩 1.98kg/m³ 硫酸塩 3.79kg/m³ (4) 単位換算(kg/m³→mol/L) ほう酸塩 0.01mol/L 硫酸塩 0.03mol/L (5) 空隙水 1L に対する塩濃度を算出(空隙率で割る) ほう酸塩 0.01mol/L_water 硫酸塩 0.07mol/L_water ・ 初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照 <p>*1: 廃棄体に含まれる塩量のうち岩盤側へ流出する割合については、地下水流動解析の結果より設定した。</p>
参考文献	

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

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

パラメータ	11. 難透水性覆土の拡散係数																		
設定値	$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^n$ $n = 2.22 f_s^{0.13} + 1$ $f_s = a \times f_b$ D_e : 実効拡散係数[m ² /s] ε : 空隙率[-] a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合[-] f_b : ベントナイトの配合割合[-]																		
設定根拠	<p>空隙率と実効拡散係数の実測値にフィッティングした式⁽¹⁾を用いて、実効拡散係数を設定した。Na型ベントナイトをCa型化して取得した実効拡散係数を既存のNa型ベントナイトの値と比較し、ほぼ同程度の値であると推定されている⁽²⁾。</p> <div data-bbox="635 1041 1136 1411" data-label="Figure"> <table border="1"> <caption>Approximate data points from Figure 4</caption> <thead> <tr> <th>Porosity</th> <th>Effective diffusion coefficient (m²/s)</th> <th>Source</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.25</td> <td>~5.0E-11</td> <td>PNC, 1994</td> </tr> <tr> <td>0.35</td> <td>~1.0E-10</td> <td>Shimura et al., 1995</td> </tr> <tr> <td>0.45</td> <td>~2.0E-10</td> <td>PNC, 1994</td> </tr> <tr> <td>0.65</td> <td>~5.0E-10</td> <td>PNC, 1994</td> </tr> <tr> <td>0.85</td> <td>~1.0E-09</td> <td>Kato et al., 1995</td> </tr> </tbody> </table> </div> <p>(1) より引用</p>	Porosity	Effective diffusion coefficient (m ² /s)	Source	0.25	~5.0E-11	PNC, 1994	0.35	~1.0E-10	Shimura et al., 1995	0.45	~2.0E-10	PNC, 1994	0.65	~5.0E-10	PNC, 1994	0.85	~1.0E-09	Kato et al., 1995
Porosity	Effective diffusion coefficient (m ² /s)	Source																	
0.25	~5.0E-11	PNC, 1994																	
0.35	~1.0E-10	Shimura et al., 1995																	
0.45	~2.0E-10	PNC, 1994																	
0.65	~5.0E-10	PNC, 1994																	
0.85	~1.0E-09	Kato et al., 1995																	
参考文献	<p>(1) Mihara, M. and Sasaki, R. (2005): RAMDA; Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027.</p> <p>(2) 三原守弘、伊藤勝、加藤博康、上田真三(1999) : カルシウム型ベントナイトのトリチウム、セシウム、ヨウ素及び炭素の実効拡散係数の取得(試験報告)、JNC TN8430 99-011.</p>																		

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

パラメータ	13. モンモリロナイトの溶解速度
設定値	$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \right. \\ \left. \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \\ \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$ <p><i>Rate</i> : モンモリロナイト溶解速度 [mol/s] <i>R</i> : 気体定数 [kJ/(K・mol)] <i>T</i> : 絶対温度 [K] <i>a_{OH⁻}</i> : OH⁻イオンの活量 <i>A_{min}</i> : 鉱物の反応表面積 [m²] <i>ΔGr</i> : 反応のギブス自由エネルギー変化 [kJ/mol]</p>
設定根拠	<p>TRU2 次レポート⁽¹⁾の地化学解析で使用されている式を使用する。 モンモリロナイトが液相と平衡に近い状態になったときの溶解速度を表現可能な飽和濃度依存性⁽²⁾と、高 pH の液相中の溶解速度へ適用するための pH 依存性⁽³⁾を含んでいる。</p>
参考文献	<p>(1) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005) : TRU 廃棄物分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－ JNC TY1400 2005-013 FEPC TR2-2005-02</p> <p>(2) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, <i>Geochimica et Cosmochimica Acta</i>, Vol.64, No.15, pp.2701-2717.</p> <p>(3) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05.</p>

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

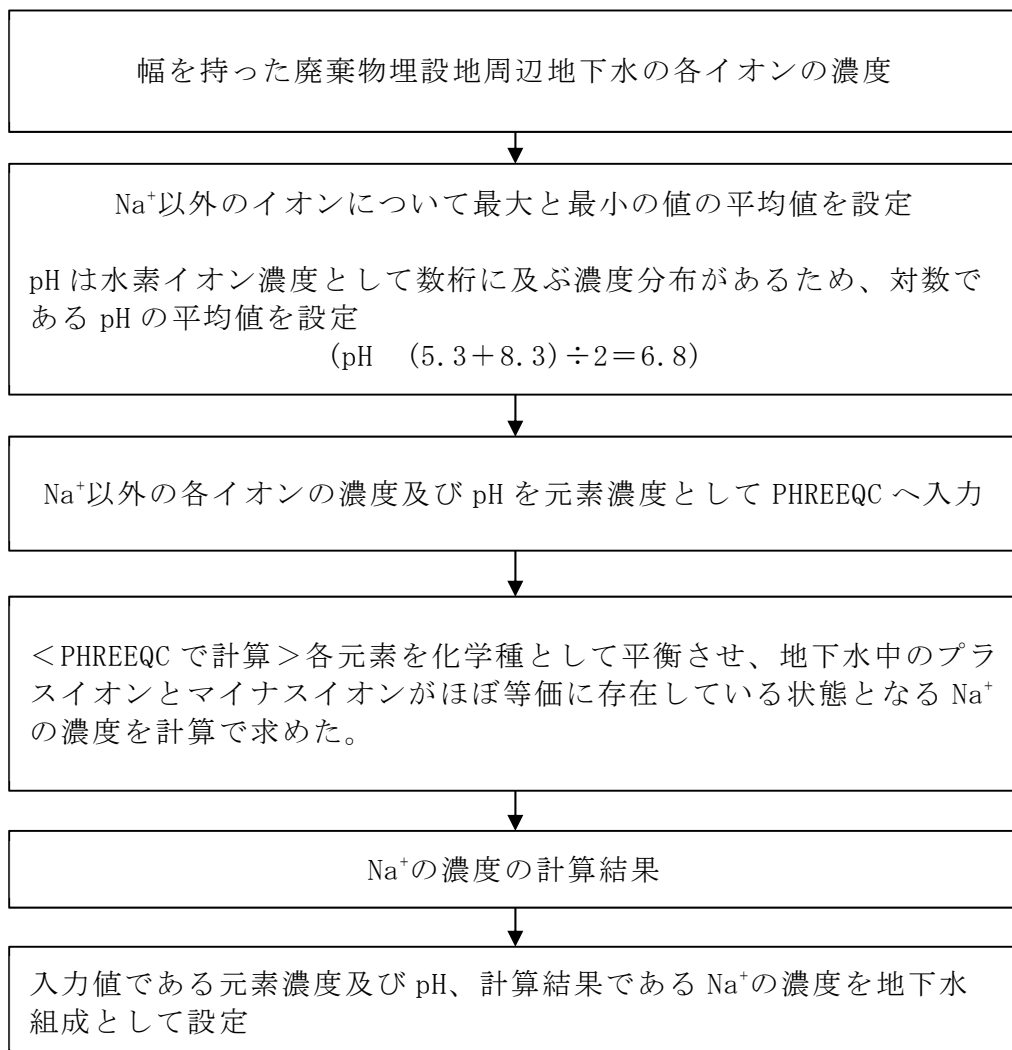
地下水組成のチャージバランス計算

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

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

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

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



第1図 地下水組成設定計算フロー

第1表 六ヶ所サイトの水質試験結果(3号廃棄物埋設地の水質試験結果)

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

第2表 六ヶ所サイトの水質試験結果の平均値

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

第3表 Na でチャージバランスを計算した後の地下水組成

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

(参考) 第4表 pH でチャージバランスを調整した場合

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

覆土が長期間にわたり低透水性を
維持することができる要因

目 次

1. はじめに	1
2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析	1
3. 難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性評価	4
(1) モンモリロナイトの溶解速度の影響	5
(2) 難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)の影響	7
(3) ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響	9
(4) セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)の影響	11
4. まとめ	14

1. はじめに

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

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

2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析

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

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

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

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

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

K_0

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

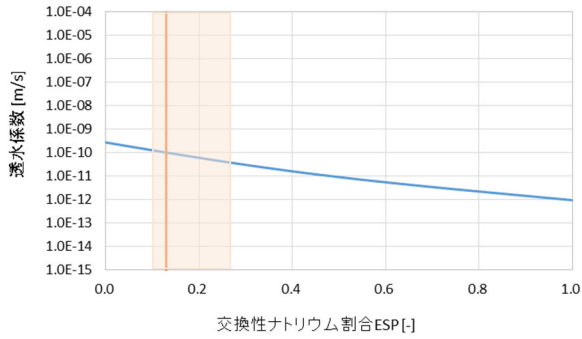
ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

C_i : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

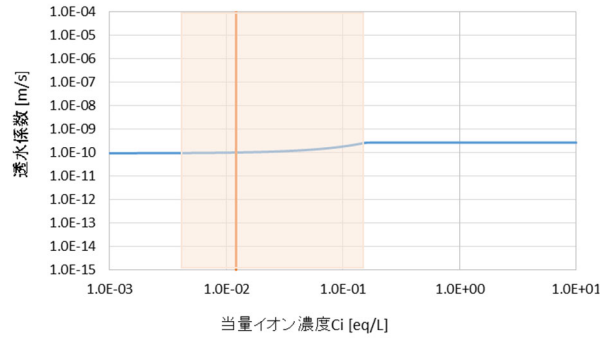
ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]

e_{sme} : スメクタイト間隙比 [-]

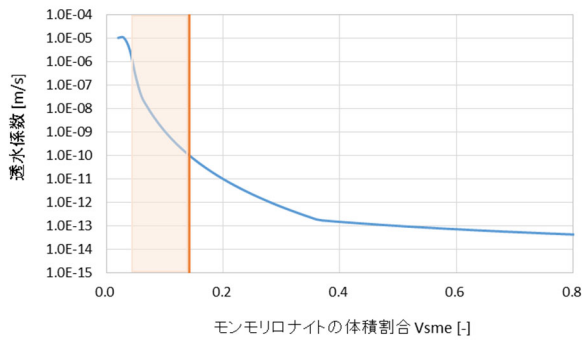
K : 透水係数 [m/s]



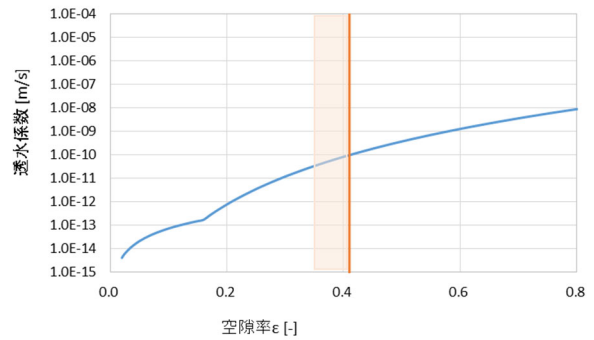
交換性ナトリウム割合ESP [-]
モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合 (ESP)



当量イオン濃度Ci [eq/L]
空隙水の当量イオン濃度 (C_i)



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



空隙率ε [-]
空隙率 (ϵ)

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

注 2 : 変化させた因子以外のパラメータは、初期値で固定した。

第 1 図 各因子の透水係数への影響

○交換性ナトリウム割合 (ESP)

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

○当量イオン濃度 (C_i) (溶液濃度)

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

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

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

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

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

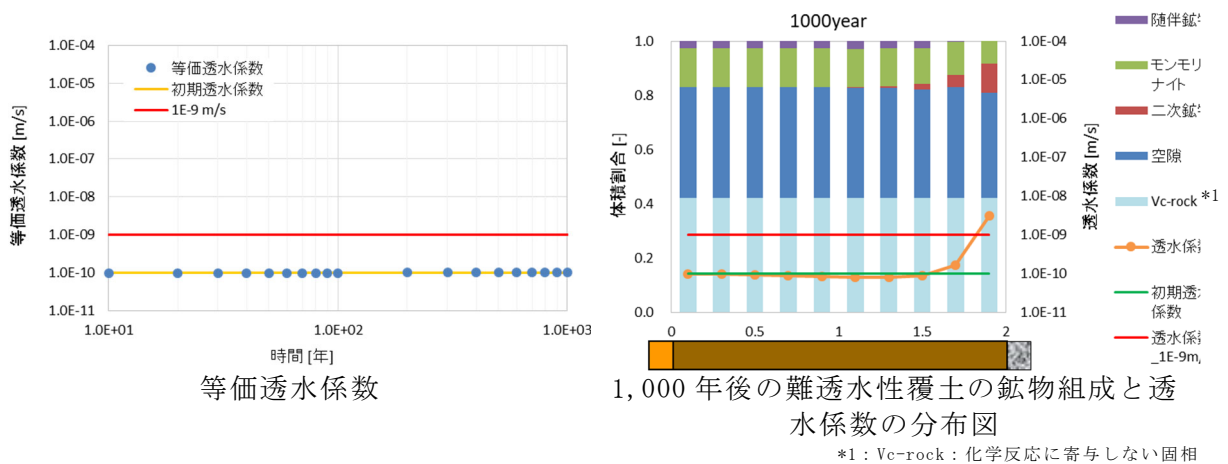
補足 5 本文「3. 解析結果」は、セメント境界面では、二次鉱物の生成により空隙率がわずかに減少している結果となっている一方で、透水係数は上昇している結果であった。これは、モンモリロナイトが溶解しモンモリロナイトの体積割合が減少する効果の方が大きいためであると考えられる。したがって、本解析では、透水係数に与える空隙率の影響はモンモリロナイトの体積割合に比べ小さいものと考えられる。

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

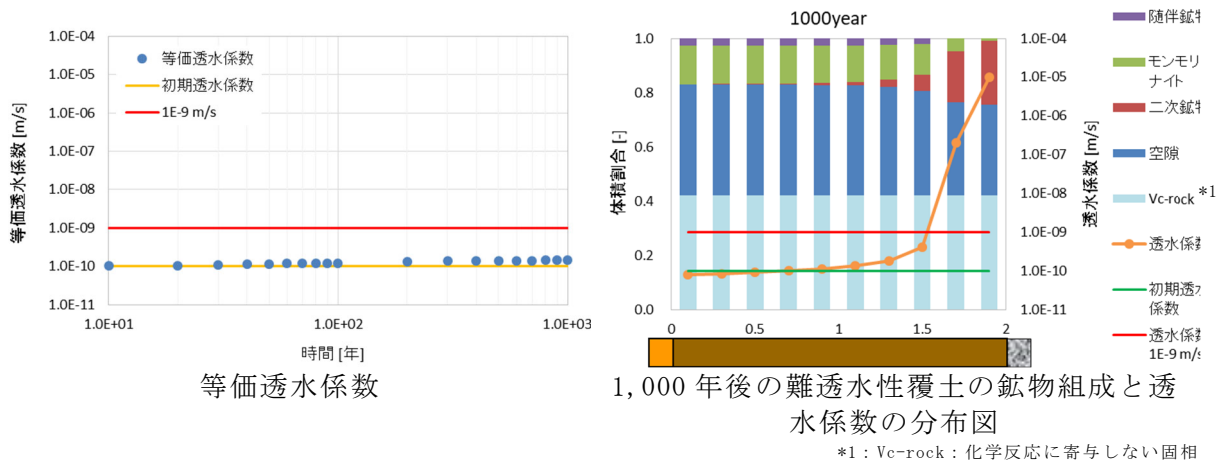
3. 難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性評価

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

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



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



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

(1) モンモリロナイトの溶解速度の影響

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

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

析を実施し、モンモリロナイトの溶解速度がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。

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

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

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

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

(数式 1)

Rate : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

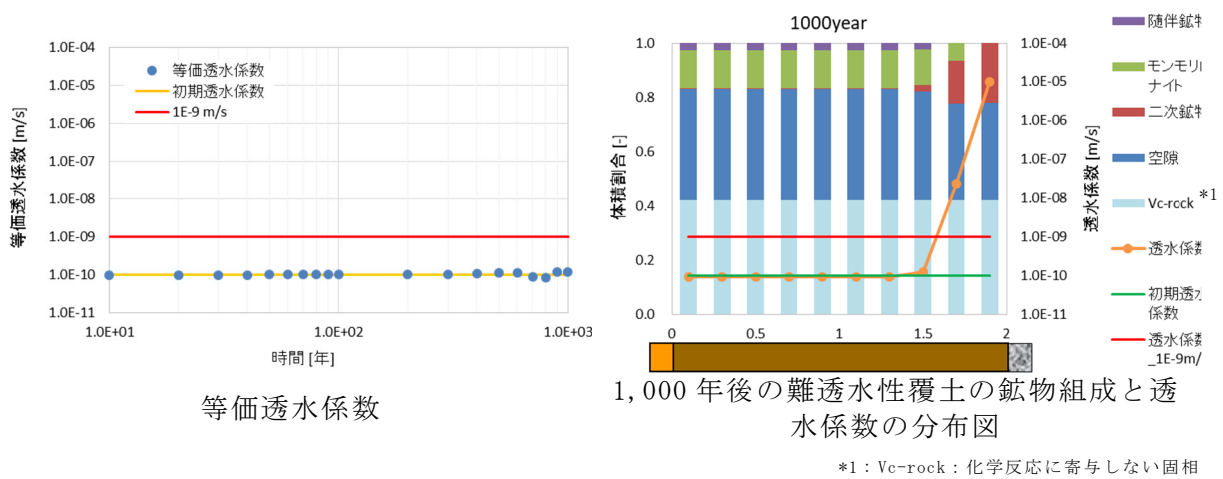
R : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

T : 絶対温度 [K]

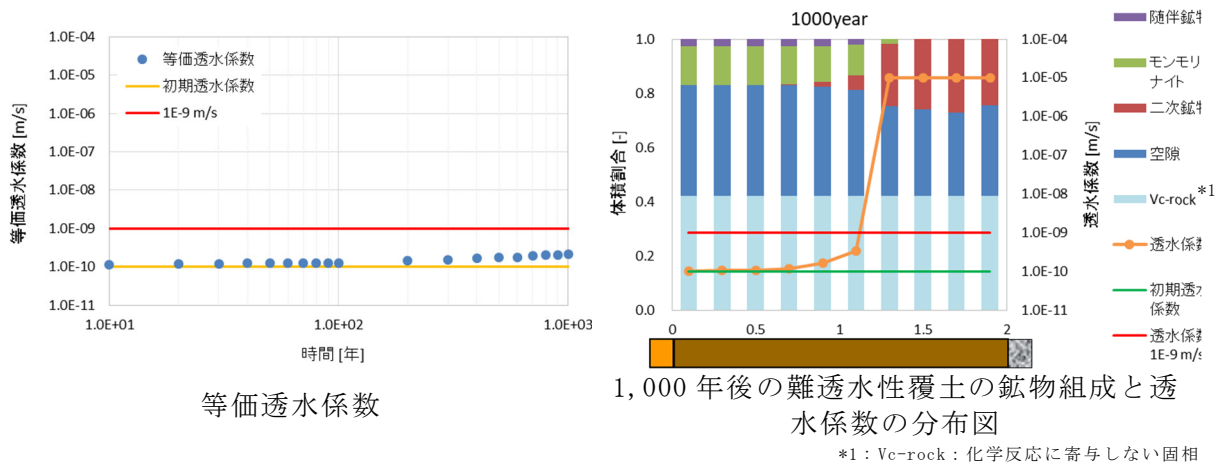
a_{OH⁻} : OH⁻イオンの活量

A_{min} : 鉱物の反応表面積 [m²]

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力) [kJ/mol]



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



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

(2) 難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)の影響

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

水中のトリチウム水の拡散係数 ($2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$) を設定し解析を実施し、物質の移動速度がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。

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

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

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

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

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

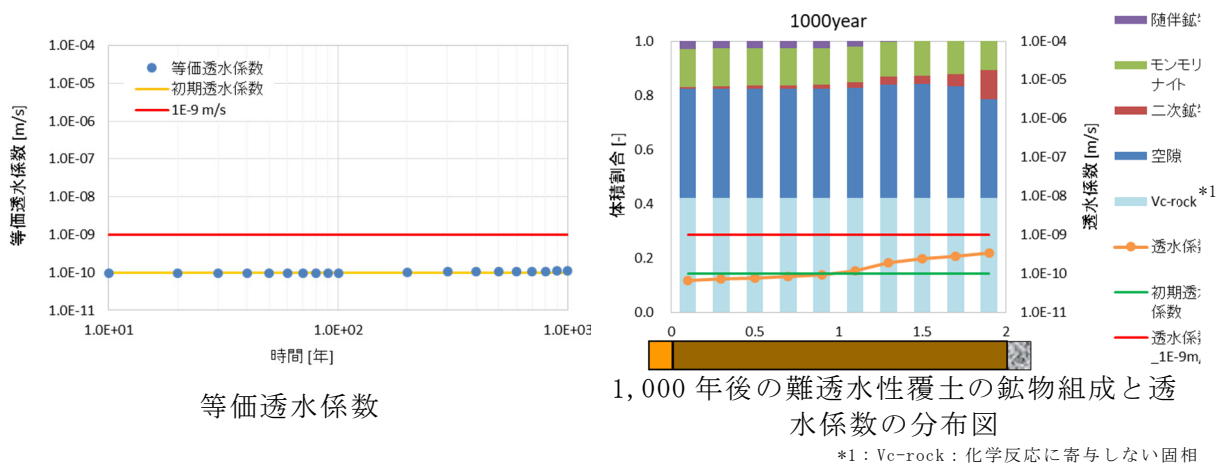
$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数 [m^2/s]

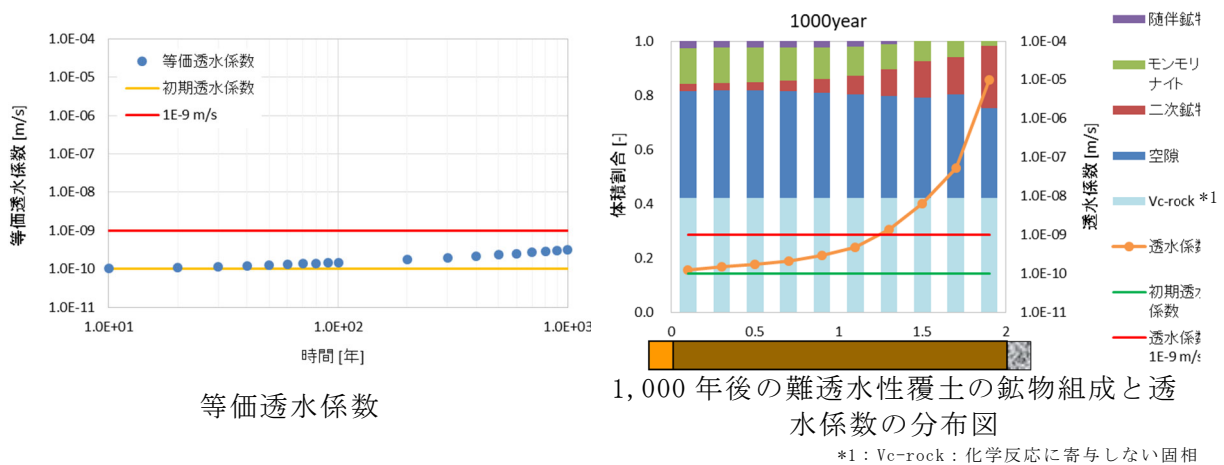
ε : 空隙率 [-]

a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合 [-]

f_b : ベントナイトの配合割合 [-]



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



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

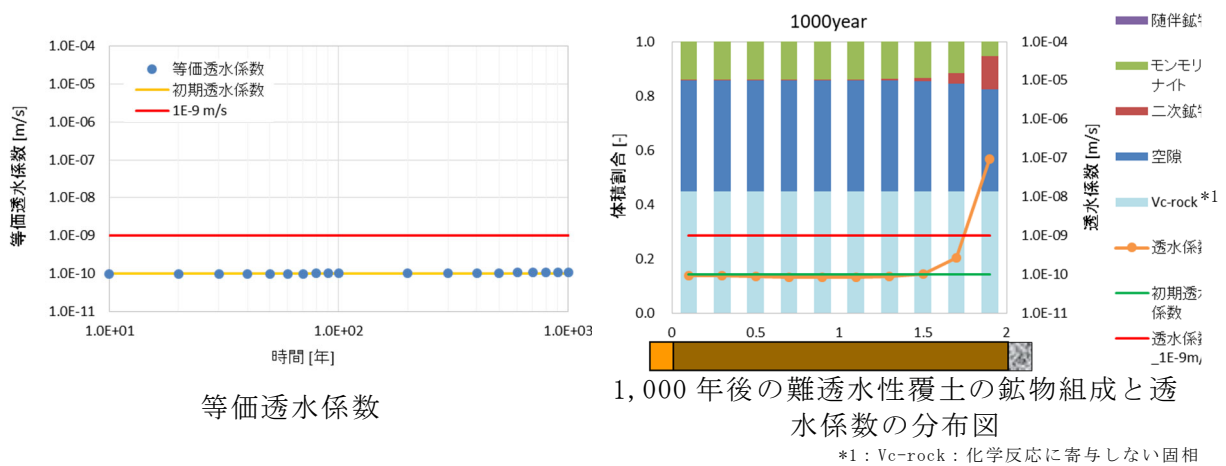
(3) ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響

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

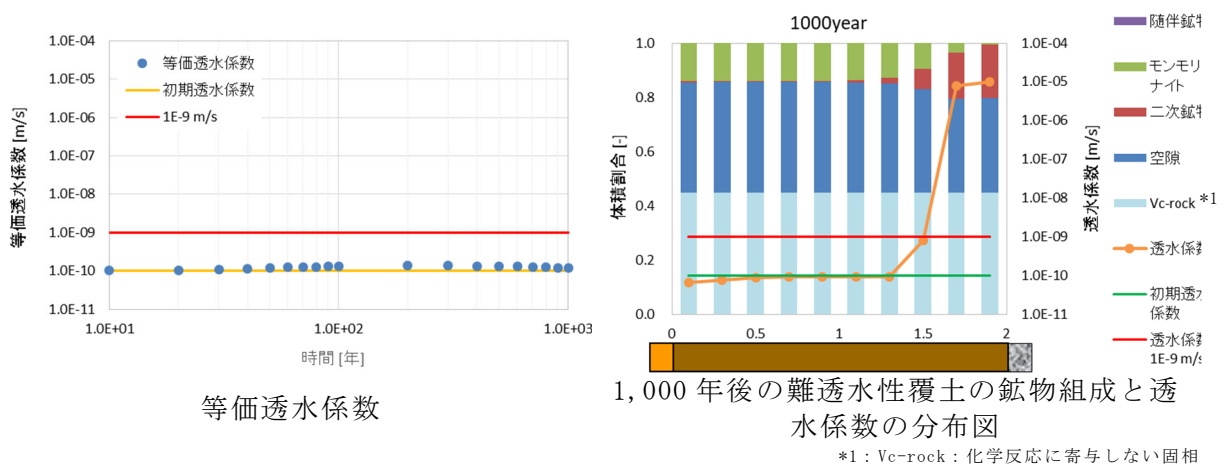
難透水性覆土中の初期鉱物組成として、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイトの他、ベントナイト中の随伴鉱物を設定し、補足5本文における解析では随伴鉱物の反応(緩衝作用)を考慮している。これらの随伴鉱物の溶解反応によって放出されるSiがモンモリロナイトの溶解反応や二次鉱物の沈殿反応に寄与する溶存Si

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

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



第8図 3号廃棄物埋設地の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)



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

(4) セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)の影響

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

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

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

かった。

第 1 表 コンクリート (OPC) の配合

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

第 2 表 普通ポルトランドセメント (OPC) の化学組成

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

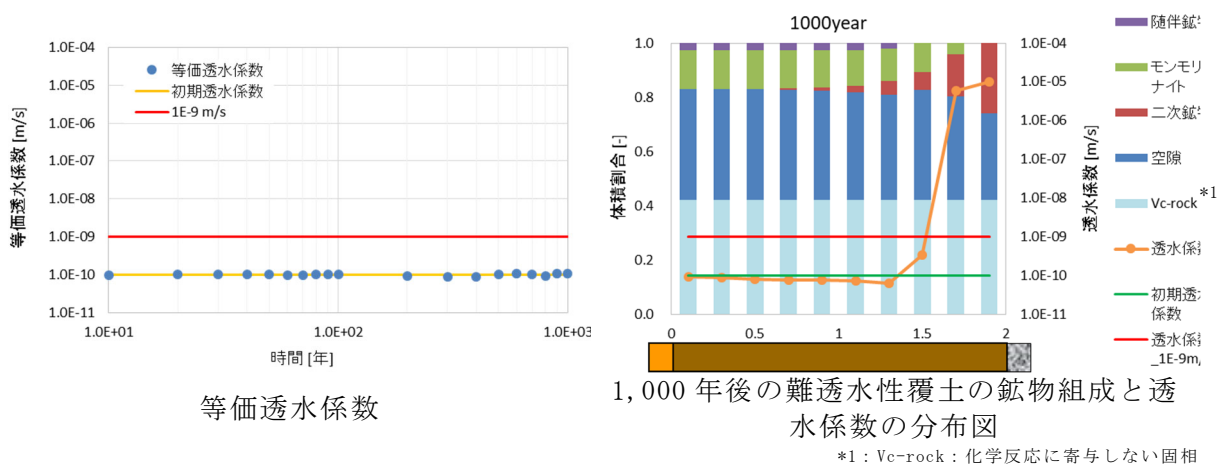
(単位は wt%)

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

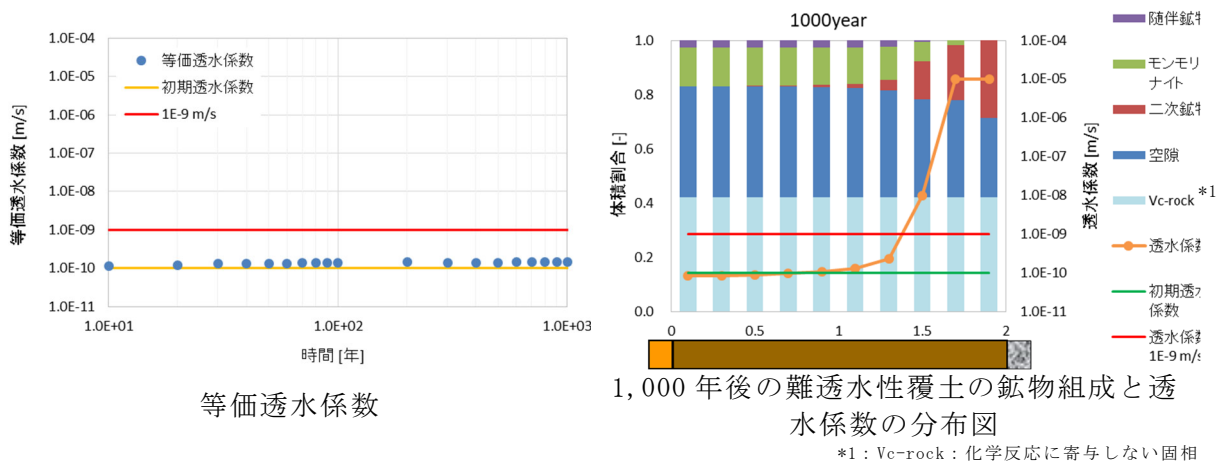
	結合材 (c)					
	C-S-H ゲル	ハイドロタルサイト	エトリンガイト	ポルトランドダイト	NaOH	KOH
mol/L _{water} *1	12.1	0.21	0.17	6.95	0.12	0.15
*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質量						

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

	結合材 (c)					
	C-S-H ゲル	ハイドロタルサイト	エトリンガイト	ポルトランドダイト	NaOH	KOH
mol/L _{water} *1	6.71	0.21	0.17	8.29	0.12	0.15
*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質量						



第 10 図 3 号廃棄物埋設地の解析結果(セメント系材料の仕様：OPC)



第 11 図 1 号廃棄物埋設地の解析結果(セメント系材料の仕様：OPC)

4. まとめ

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

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

【参考】要因分析に資する参考データについて

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

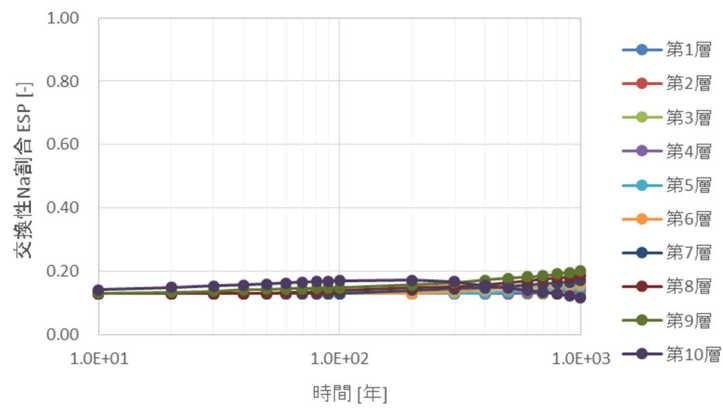
1. モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について

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

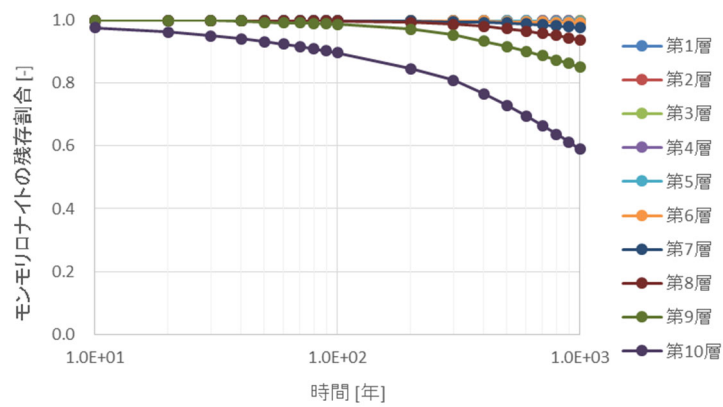
補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、難透水性覆土の透水係数)について、3号廃棄物埋設地は第 12 図に、1号廃棄物埋設地は第 13 図に示す。難透水性覆土について等間隔に十層に分割し、岩盤・下部覆土側の難透水性覆土から第 1 層とし、セメント系材料に接する難透水性覆土を第 10 層とした(第 14 図)。

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

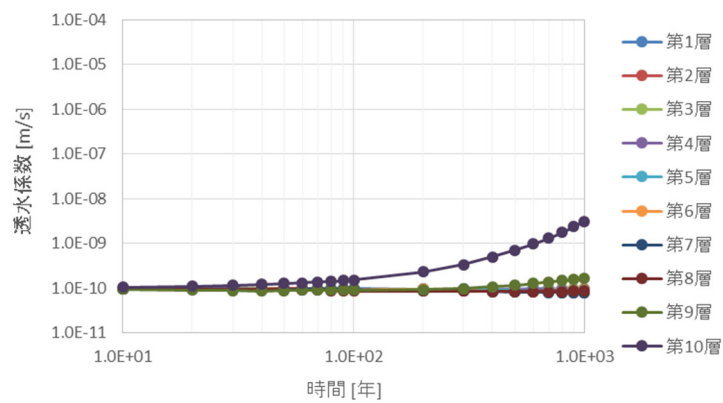
したがって、モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について、セメント系材料から Na の供給による難透水性覆土中のモンモリロナイトの Na 型化はごくわずかであり、Na 型化による止水性能の上昇よりも、モンモリロナイトの溶解に伴う止水性能の低下の影響の方が大きいことが確認された。



モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合

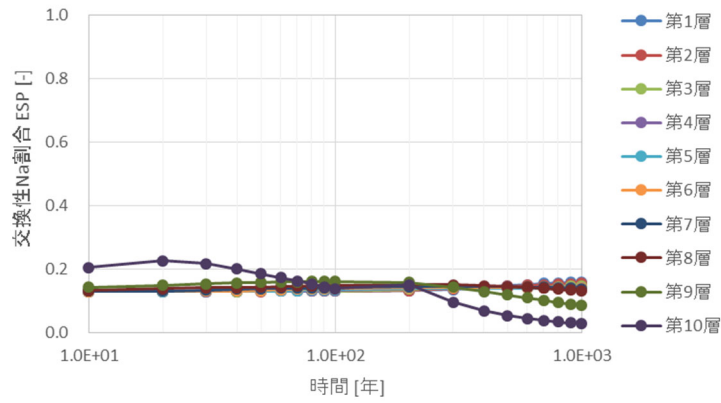


モンモリロナイトの残存割合

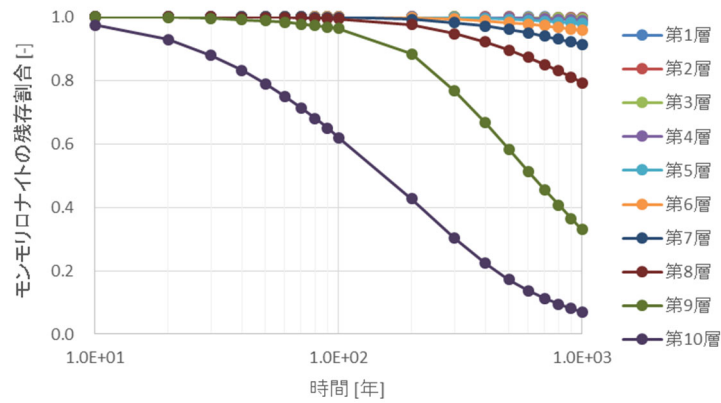


難透水性覆土の透水係数

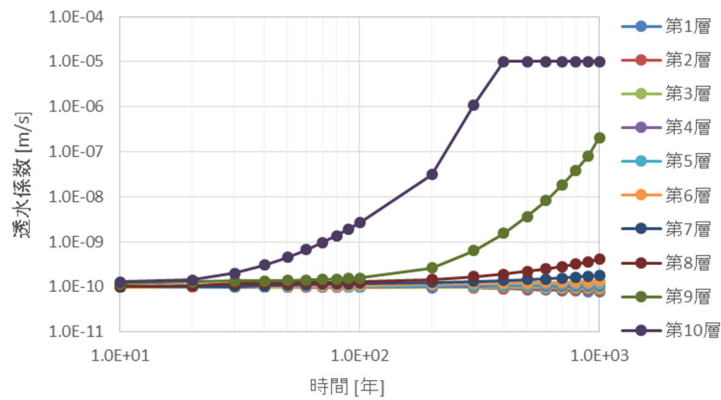
第 12 図 3 号廃棄物埋設地の解析結果
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)



モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合



モンモリロナイトの残存割合



難透水性覆土の透水係数

第 13 図 1 号廃棄物埋設地の解析結果
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)



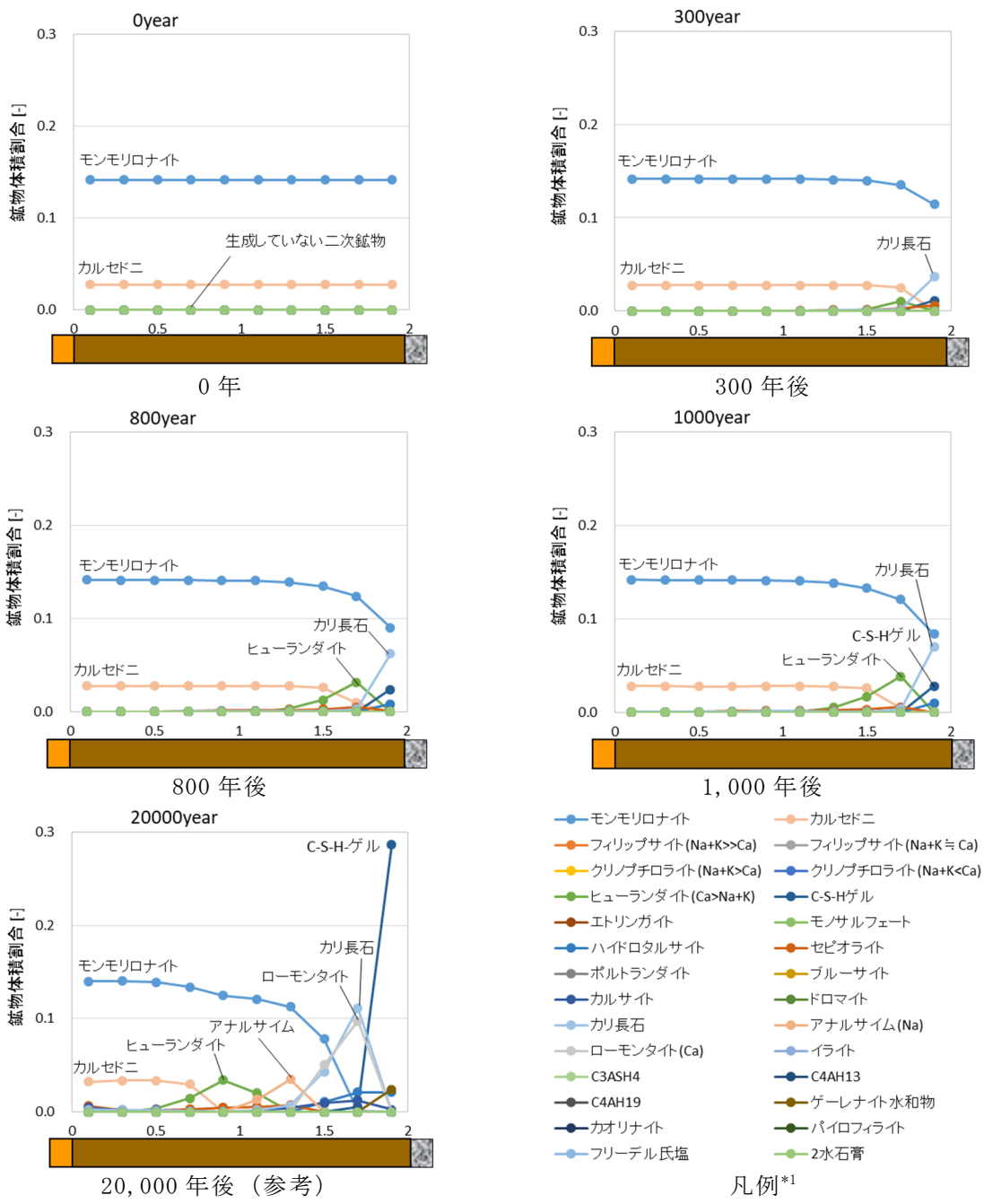
第 14 図 難透水性覆土の層の定義

2. 難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類について

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

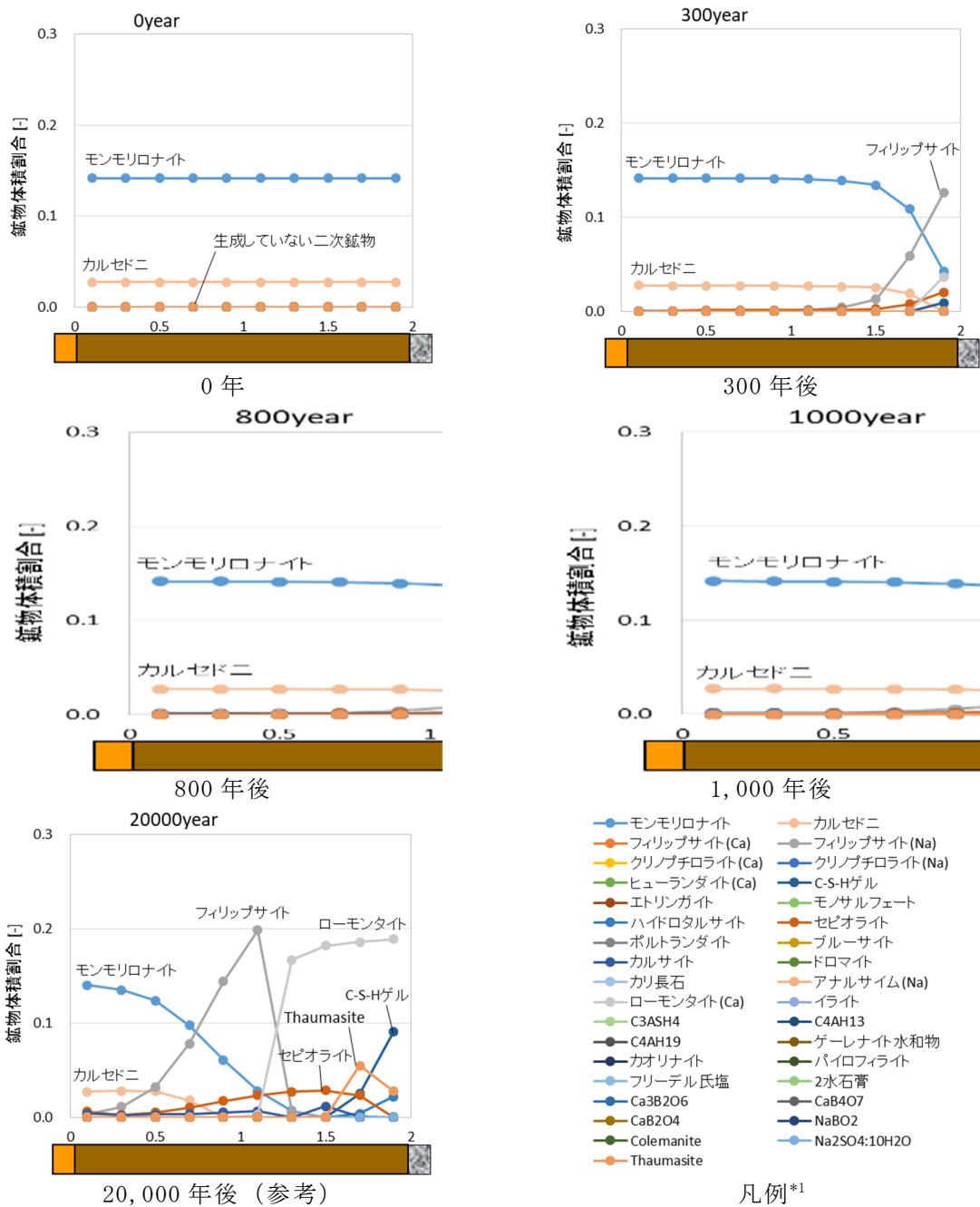
そこで、難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類(鉱物体積割合)について、モンモリロナイトを構成する代表的な成分 (Al、Mg、Si) 及びセメント系材料から供給されたアルカリ成分 (Na、K、Ca) に着目しながら確認することで、覆土が長期間にわたり低透水性を維持することができる要因分析の参考とした。

補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)について、3号廃棄物埋設地は第 15 図に、1号廃棄物埋設地は第 16 図に示す。二次鉱物として、カリ長石、ゼオライト(ヒューランダイト、フィリップサイト、ローモンタイト)が支配的であり、その他セピオライトや C-S-H ゲルも生成していることを確認した。セメント系材料から供給されるアルカリ成分について、Na はフィリップサイト ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、K はカリ長石 (KAlSi_3O_8)、Ca は主に C-S-H ゲル、ローモンタイト ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 及びヒューランダイト ($\text{Na}_{0.167}\text{K}_{0.066}\text{Ca}_{0.55}\text{Al}_{1.333}\text{Si}_{4.667}\text{H}_{8.67}\text{O}_{16.335}$) により消費されているものと考えられる。一方、モンモリロナイトの溶解で生じた Al、Mg 及び Si について、Al は主にカリ長石とゼオライトに、Mg は主にセピオライト ($\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) に、Si は生成した二次鉱物全般により消費されているものと考えられる。



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

第 15 図 3 号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)



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

第 16 図 1 号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)

以上

ペクレ数分布

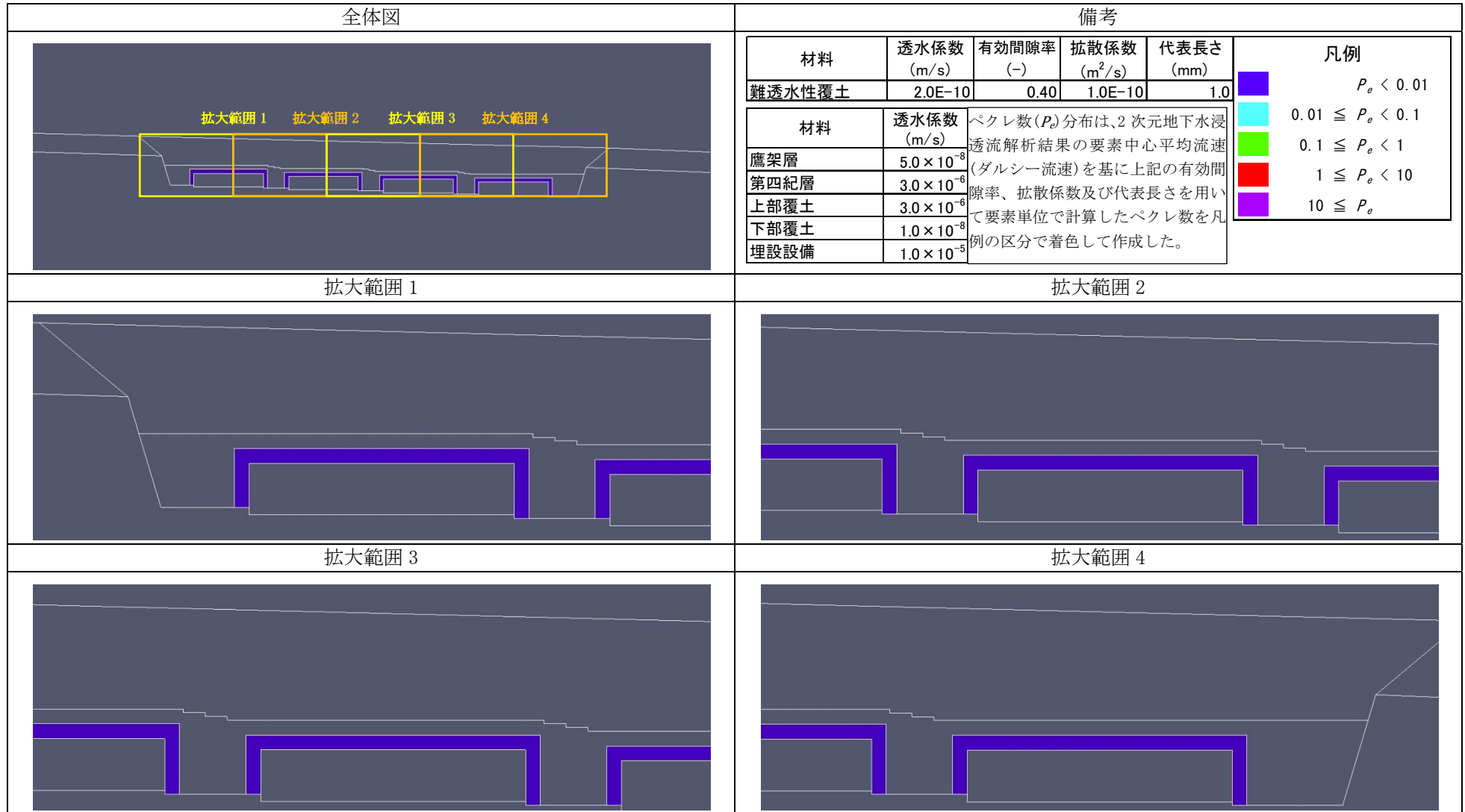


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(1/6)【3号廃棄物埋設地】(最も可能性が高い設定 1,000年後)

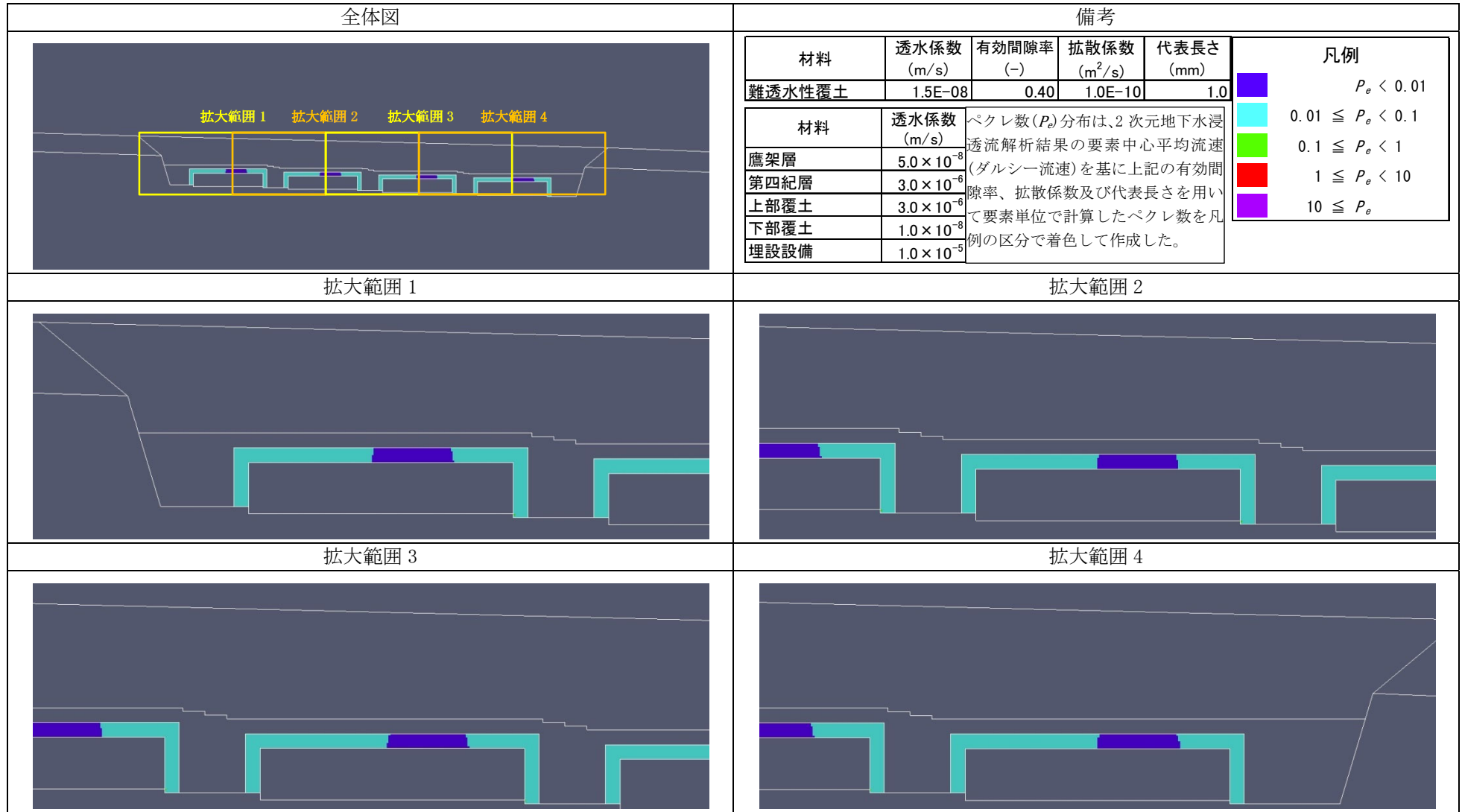


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(2/6)【3号廃棄物埋設地】(最も厳しい設定1,000年後)

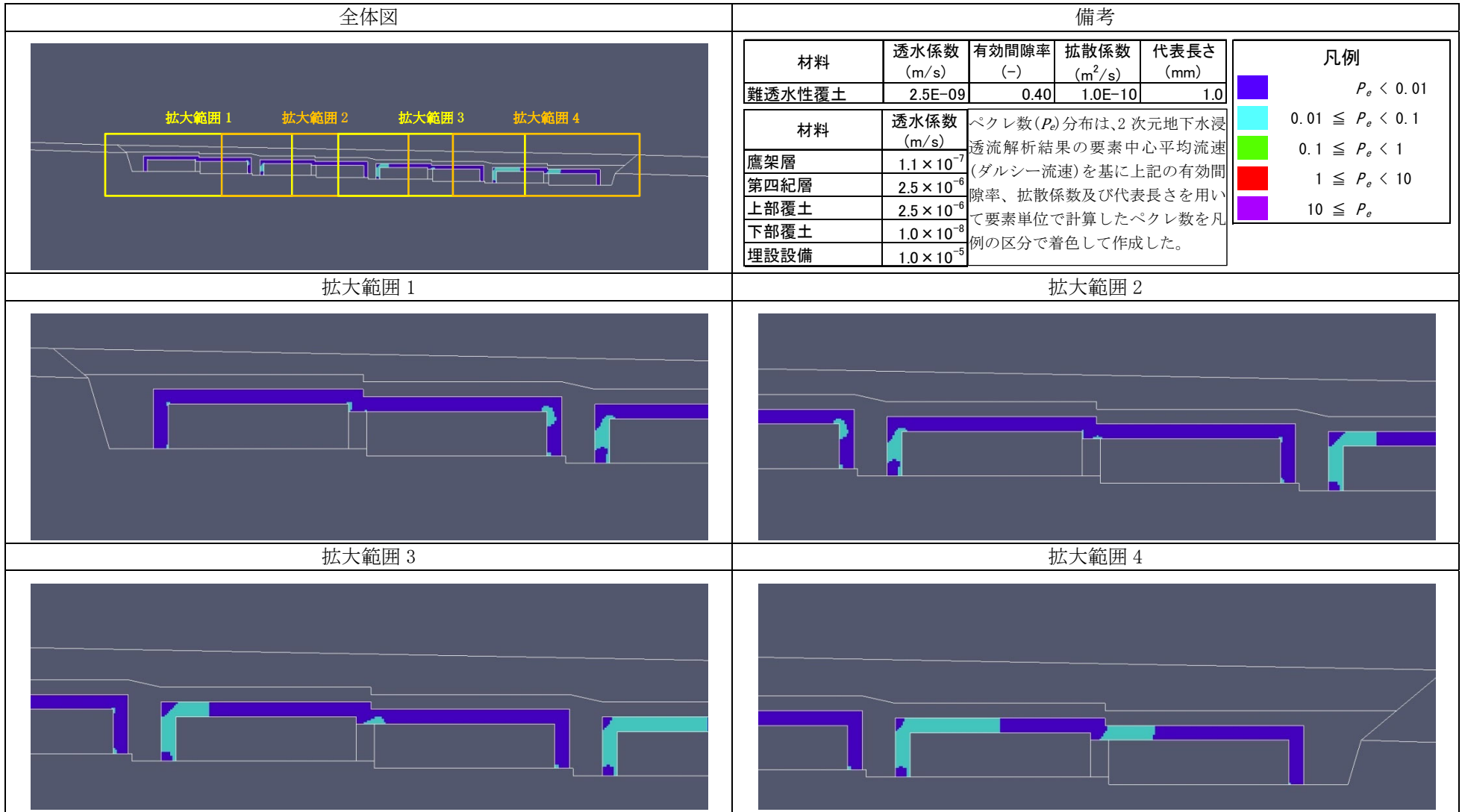


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(3/6) 【1号廃棄物埋設地】(最も可能性が高い設定 1,000年後)

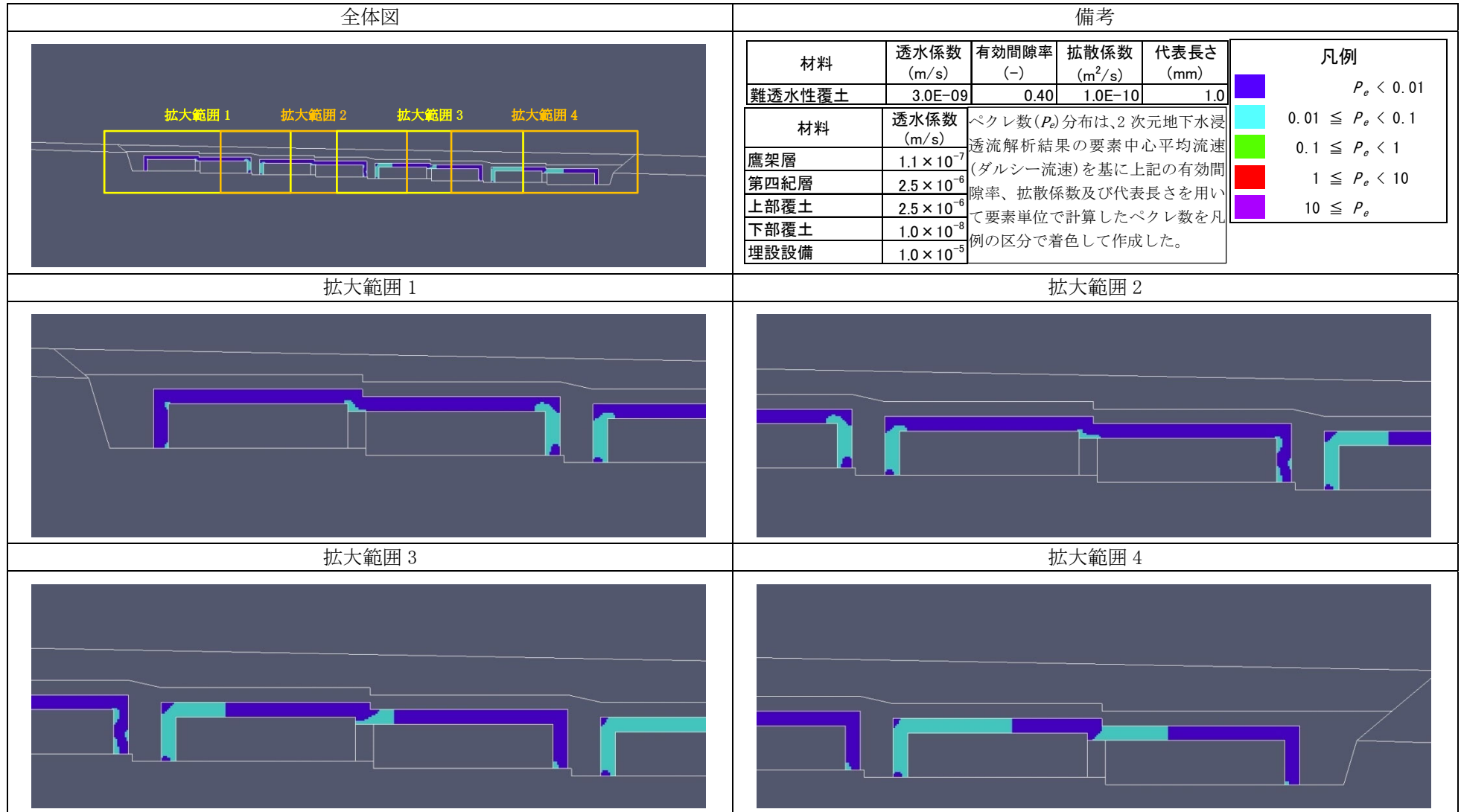


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(4/6)【1号廃棄物埋設地】(最も厳しい設定 1,000年後)

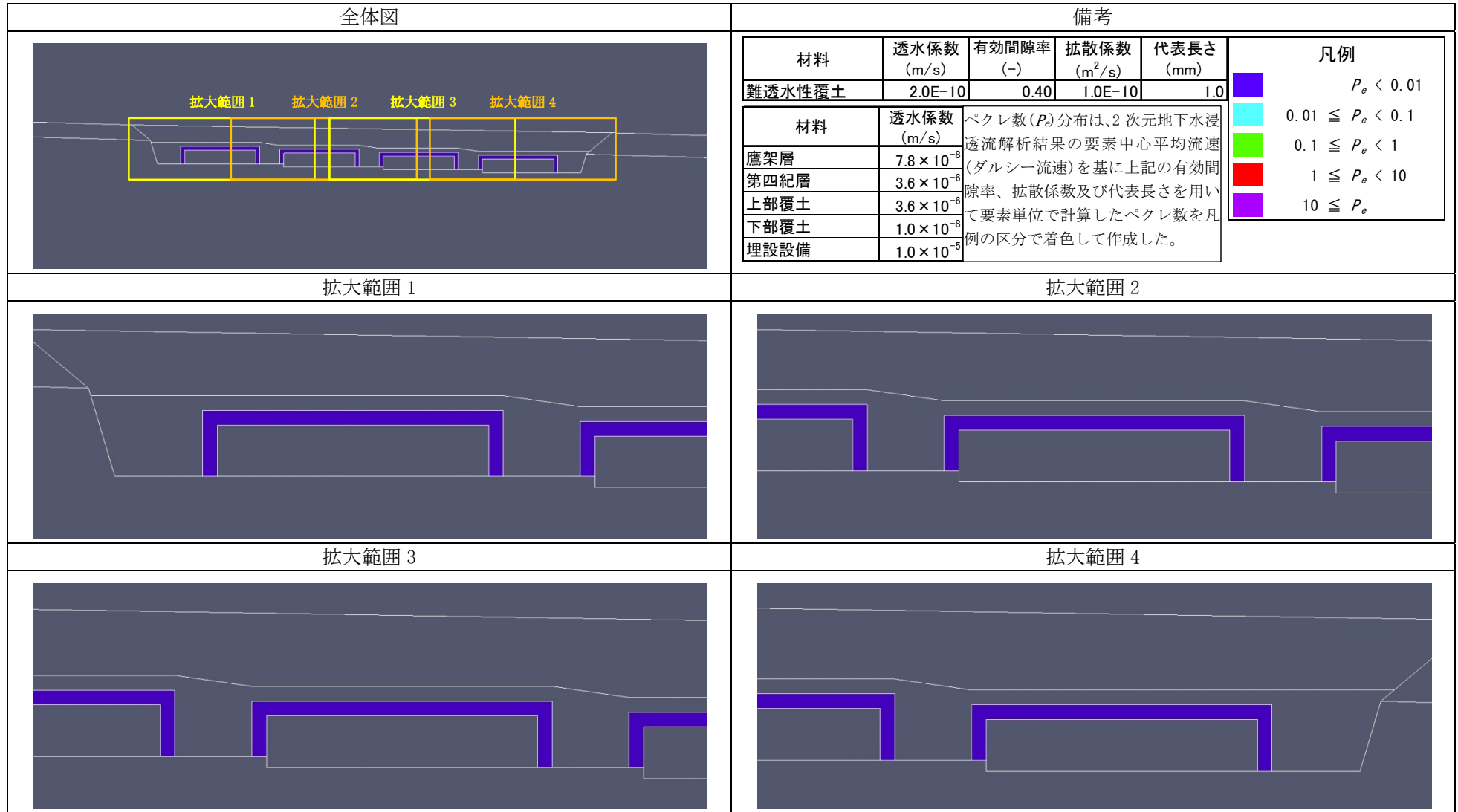


図 難透水性覆土内のペクレ数 (P_e) 分布 (5/6) 【2号廃棄物埋設地】(最も可能性が高い設定 1,000年後)

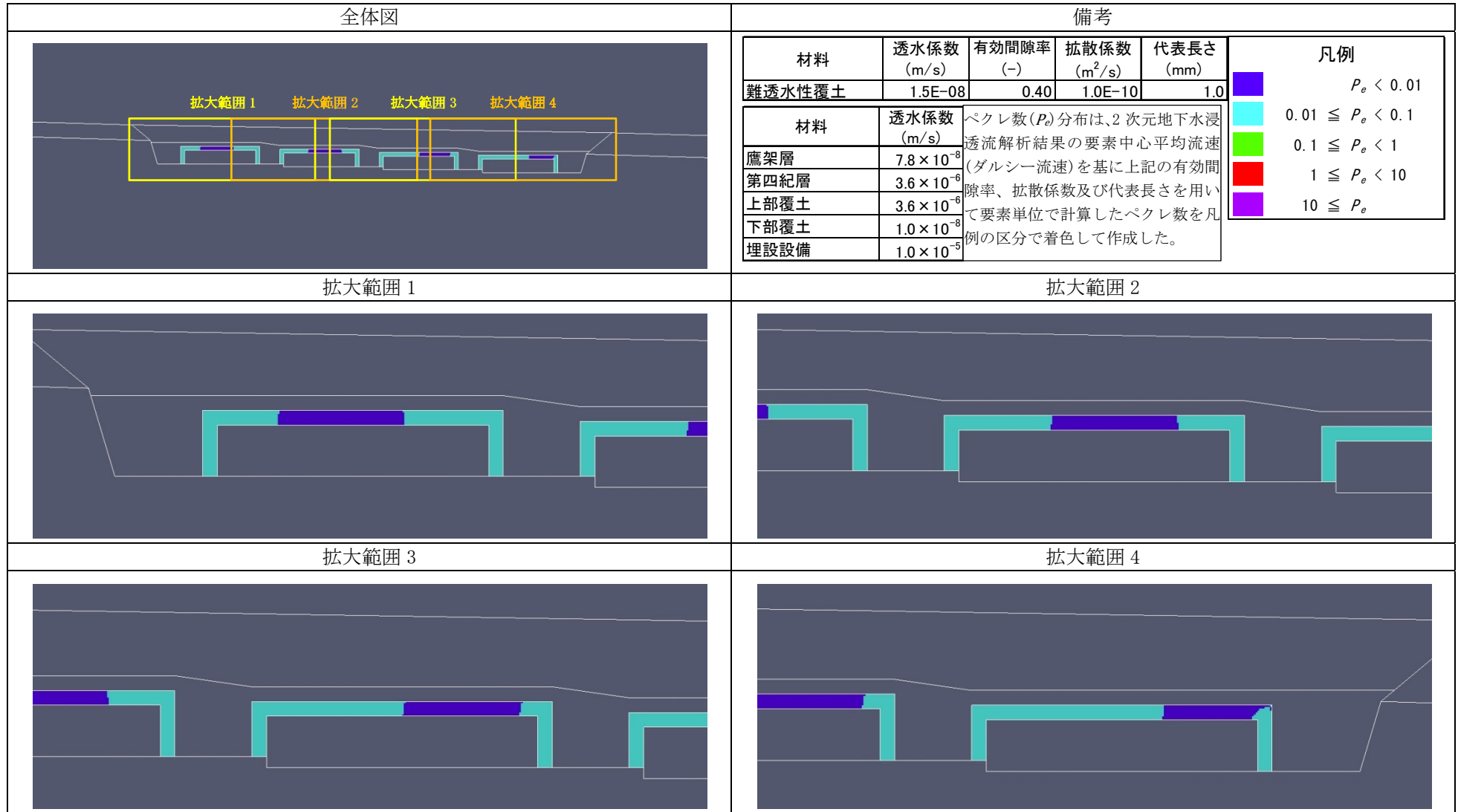


図 難透水性覆土内のペクレ数 (P_e) 分布 (6/6) 【2号廃棄物埋設地】 (最も厳しい設定 1,000年後)

難透水性覆土の材料仕様を Na 型ベントナイトとした場合

1. はじめに

本資料は、補足説明資料 5(以下「補足 5」という。)のうち、難透水性覆土の材料仕様を変更した場合について追加説明するものである。

難透水性覆土の材料仕様について、補足 5 では Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様(以下、「Ca 型難透水性覆土」とする)とした。しかし、難透水性覆土として Na 型ベントナイトを用いることも考えられる。Na 型ベントナイトは、Ca 型ベントナイトと比べ、優れた膨潤性により高い止水性が期待される。一方、セメント系材料から供給される Ca により、ベントナイトの主成分のモンモリロナイトの交換性陽イオンが Na から Ca に置き換わった場合、モンモリロナイトの膨潤特性を低下させ、難透水性覆土の止水性に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、難透水性覆土の材料仕様を Na 型ベントナイトに変更した場合における、難透水性覆土中の等価透水係数の変遷を評価した。

2. 解析条件

(1) 難透水性覆土の鉱物組成

ここでは、Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を 2 割配合した材料仕様(以下、「難透水性覆土(Na 型)」とする)とした。難透水性覆土の乾燥密度は 1.95Mg/m^3 と設定した。難透水性覆土の初期鉱物組成を第 1 表に示す。

第 1 表 難透水性覆土の初期鉱物組成

	Na 型ベントナイト(クニゲル V1)					
	モンモリロナイト				随伴鉱物	
	Na-Mont	Ca-Mont	K-Mont	Mg-Mont	カルセドニ	カルサイト
mol/L _{water} *1	1.25	0.31	0.02	0.02	8.22	0.31
*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質質量						

なお、その他の条件は補足 5 と同様とした。

3. 解析結果

(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)

難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(補足 5 数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 1 図に、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 2 図に示す。また、3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第 3 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 4 図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 5 図に示す。1 号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第 6 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 7 図に、参

考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 8 図に示す。

難透水性覆土の材料仕様を、Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様から Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を 2 割配合した材料仕様に変更した場合、Na 型ベントナイトの主成分である Na 型モンモリロナイトの膨潤性により、初期の透水係数値は難透水性覆土(Ca 型)よりも低い値であった。

3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、難透水性覆土(Ca 型)と同様、1,000 年後においても初期の透水係数値を維持していた。

一方、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、1,000 年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。難透水性覆土(Na 型)は、ベントナイトの配合率の減少及びベントナイト中のモンモリロナイトの割合の減少により、難透水性覆土中のモンモリロナイトの体積割合が大きく減少している。そのため、モンモリロナイトが溶解すると透水係数は大きく上昇する結果となった。それでも、高い止水性は維持されていることが確認された。

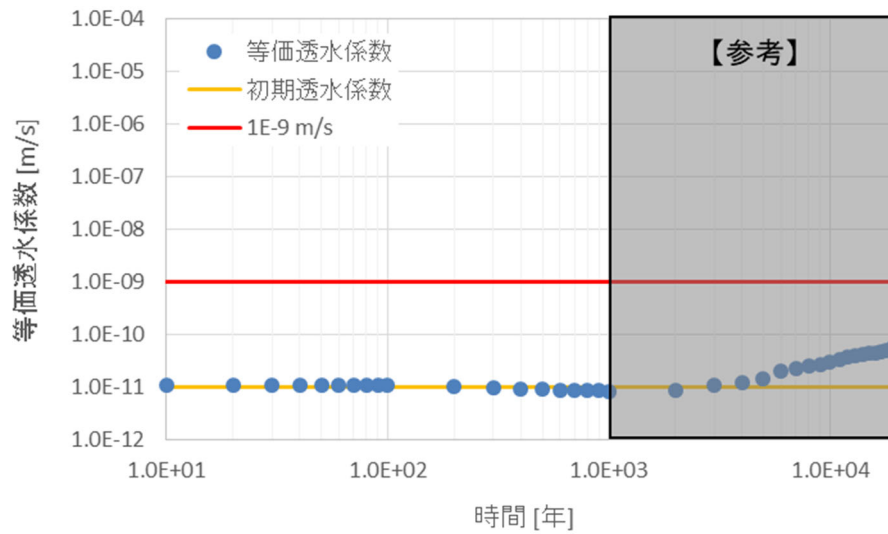
(2) 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合(ケース②)

難透水性覆土中の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を 0 とし、単純に空隙率に比例するとしたモデル(補足 5 数式 4)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。

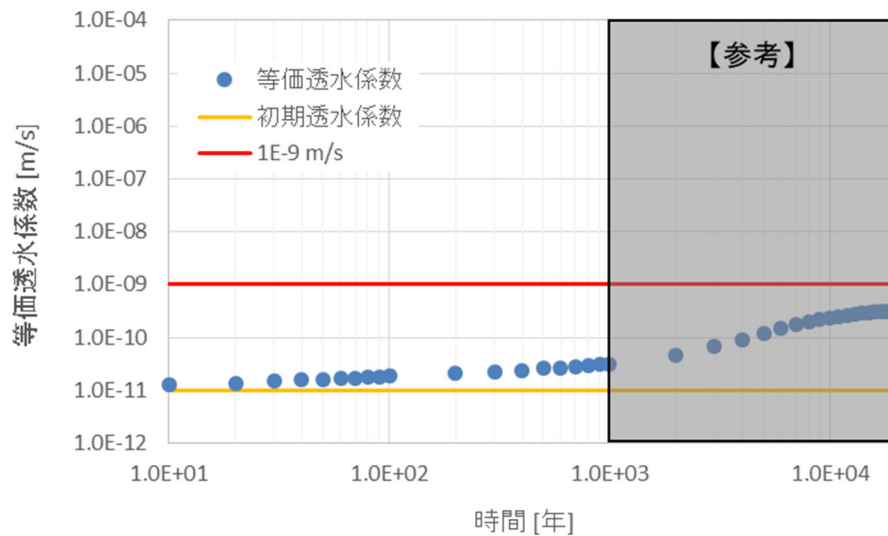
3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 9 図に、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 10 図に示す。また、3 号廃棄物埋設地の鉱物組成と透水係数の分布図を第 11 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 12 図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 13 図に示す。1 号廃棄物埋設地においても同様に、鉱物組成と透水係数の分布図を第 14 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 15 図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 16 図に示す。

3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、(a)と同様、1,000 年後においても初期値を維持していた。

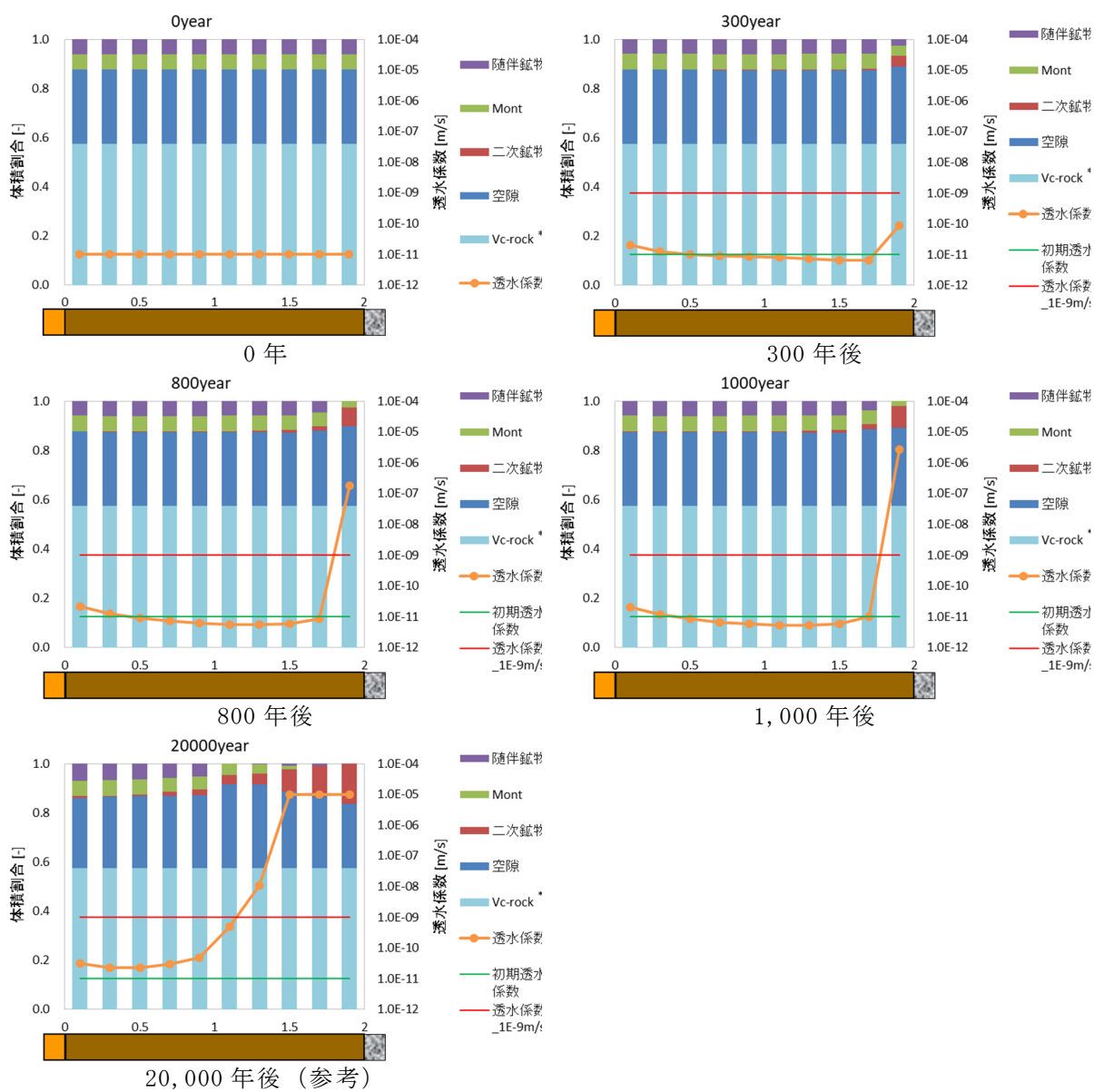
1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、(a)と同様、1,000 年後の段階で初期の透水係数値よりも上昇した。それでも、低透水性が維持できる結果となった。



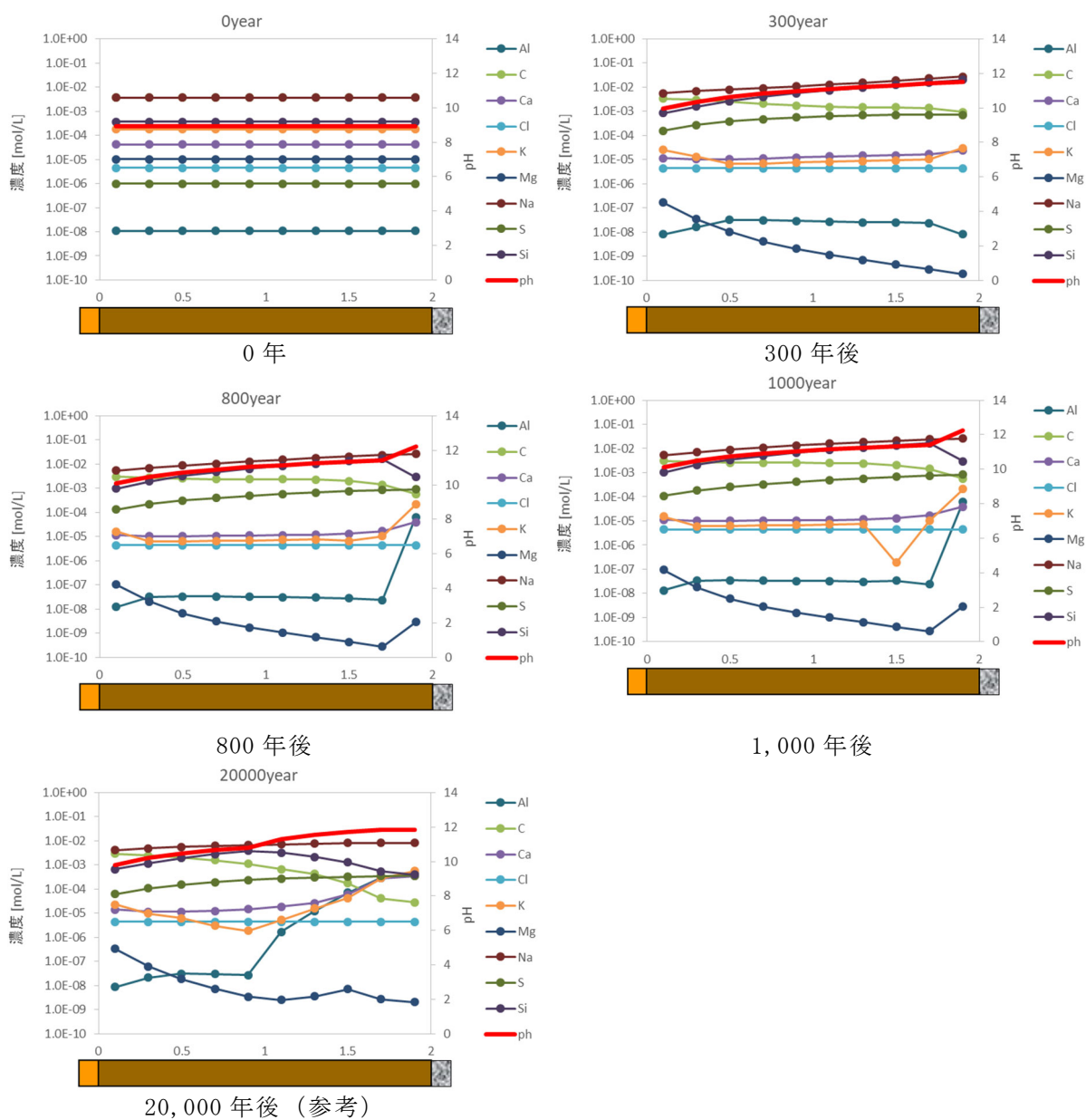
第 1 図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



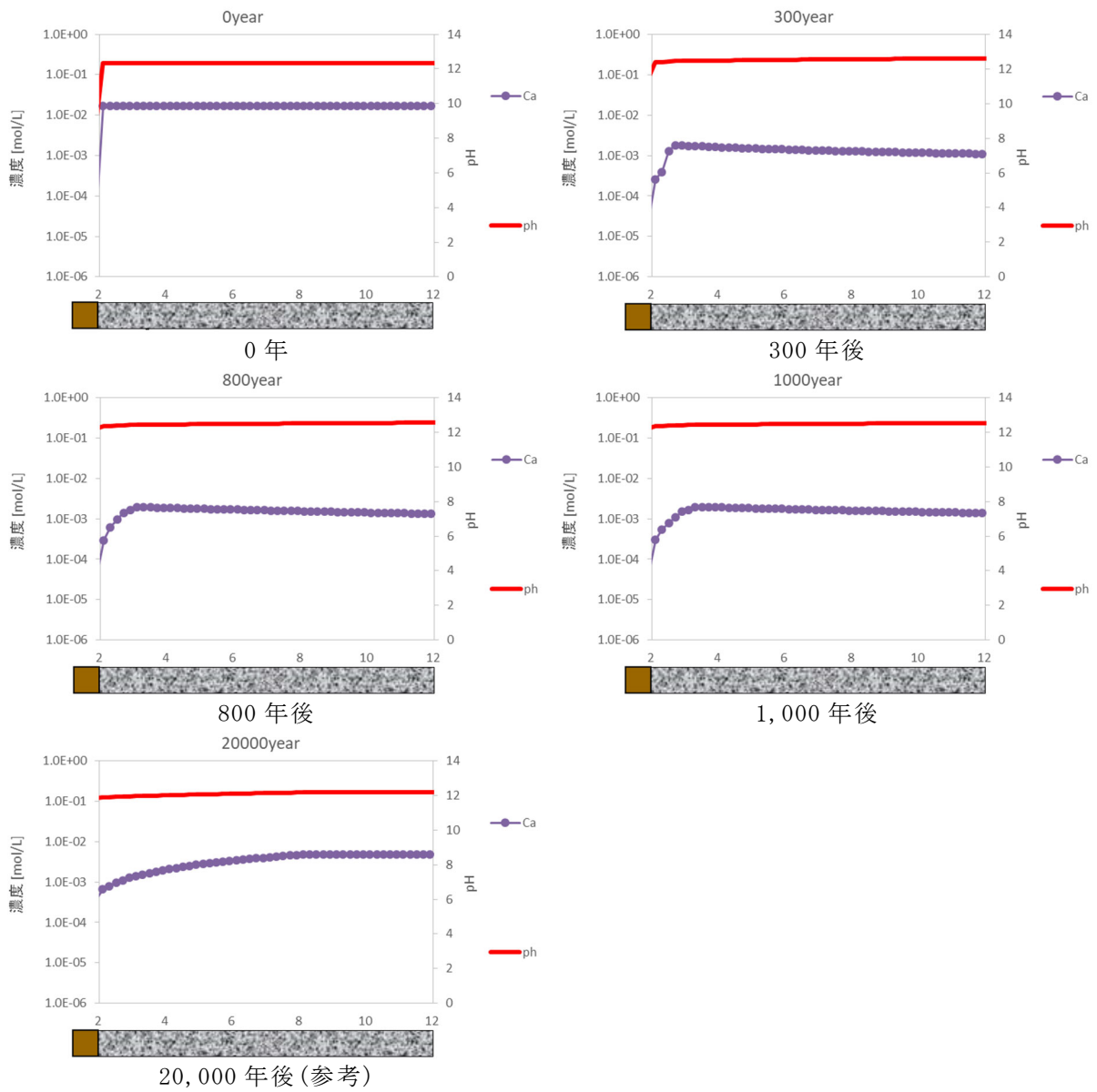
第 2 図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



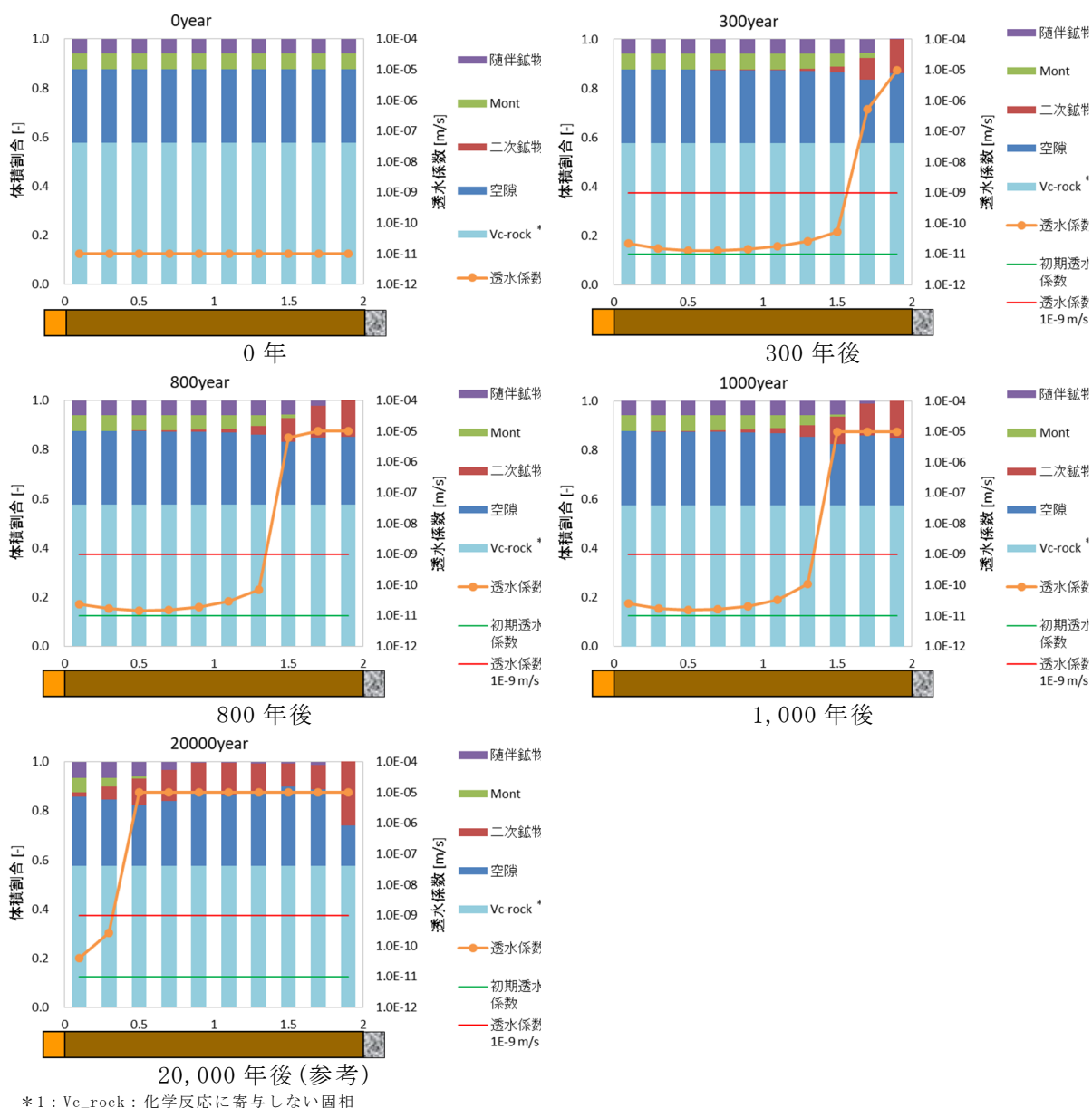
第 3 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における鉱物組成と透水係数の分布図
 (ケース① : 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



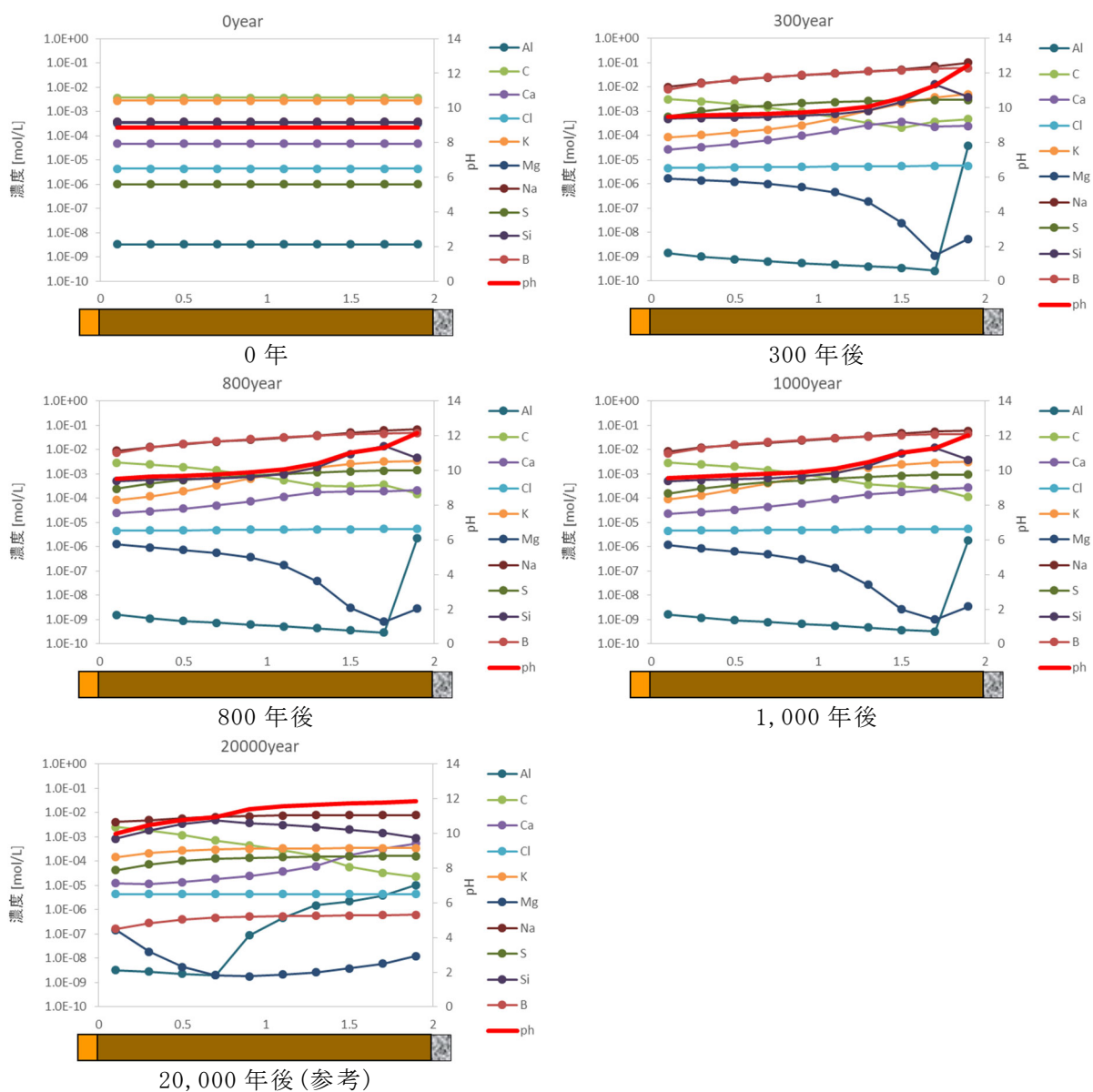
第4図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)内の液相組成の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



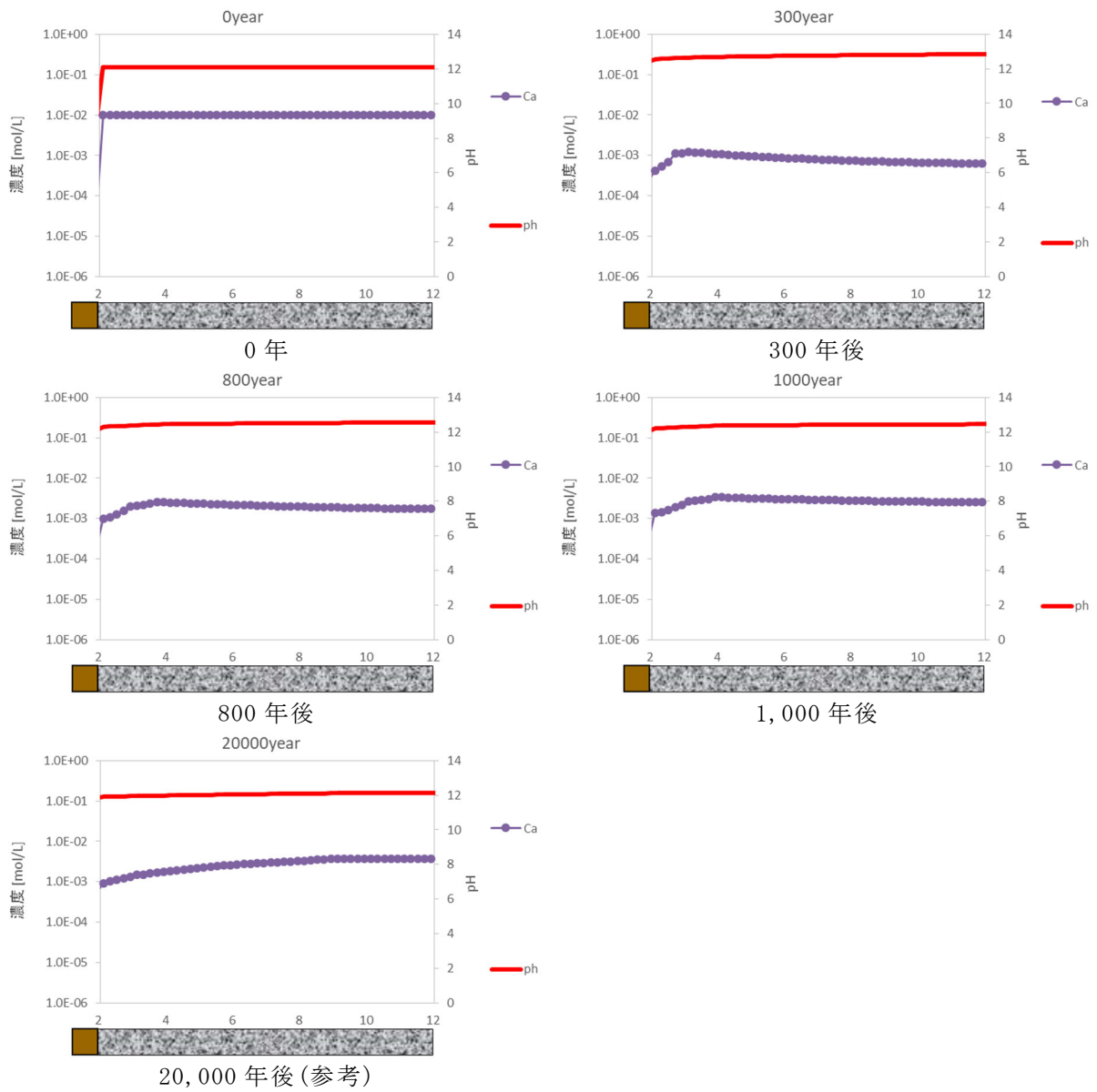
第5図 3号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



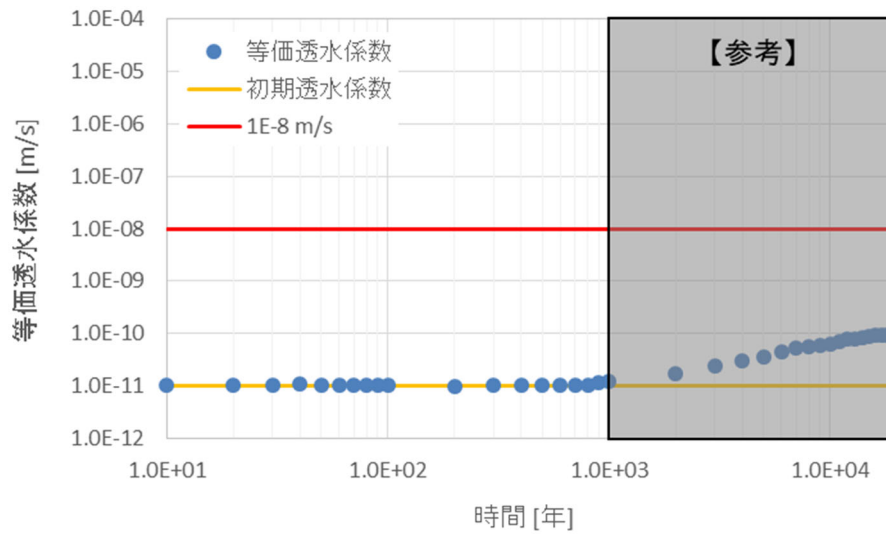
第 6 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における鉱物組成と透水係数の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



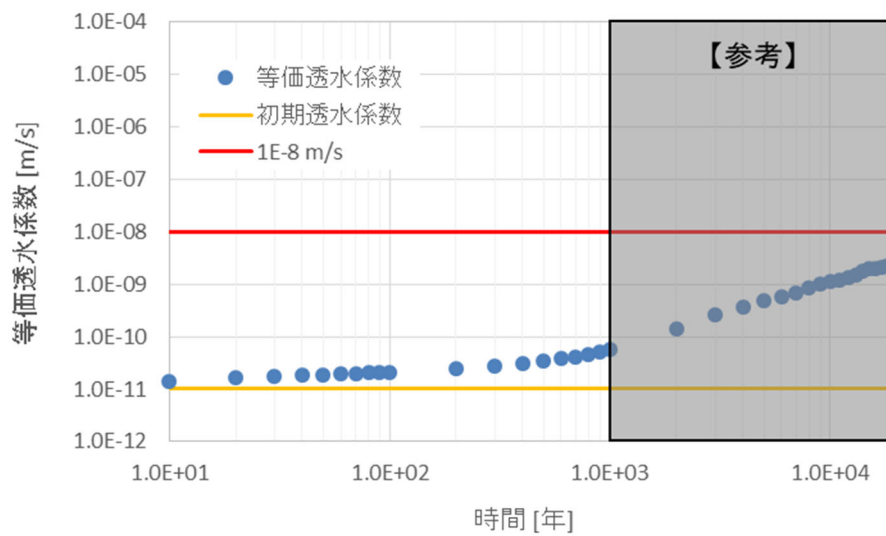
第7図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)内の液相組成の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



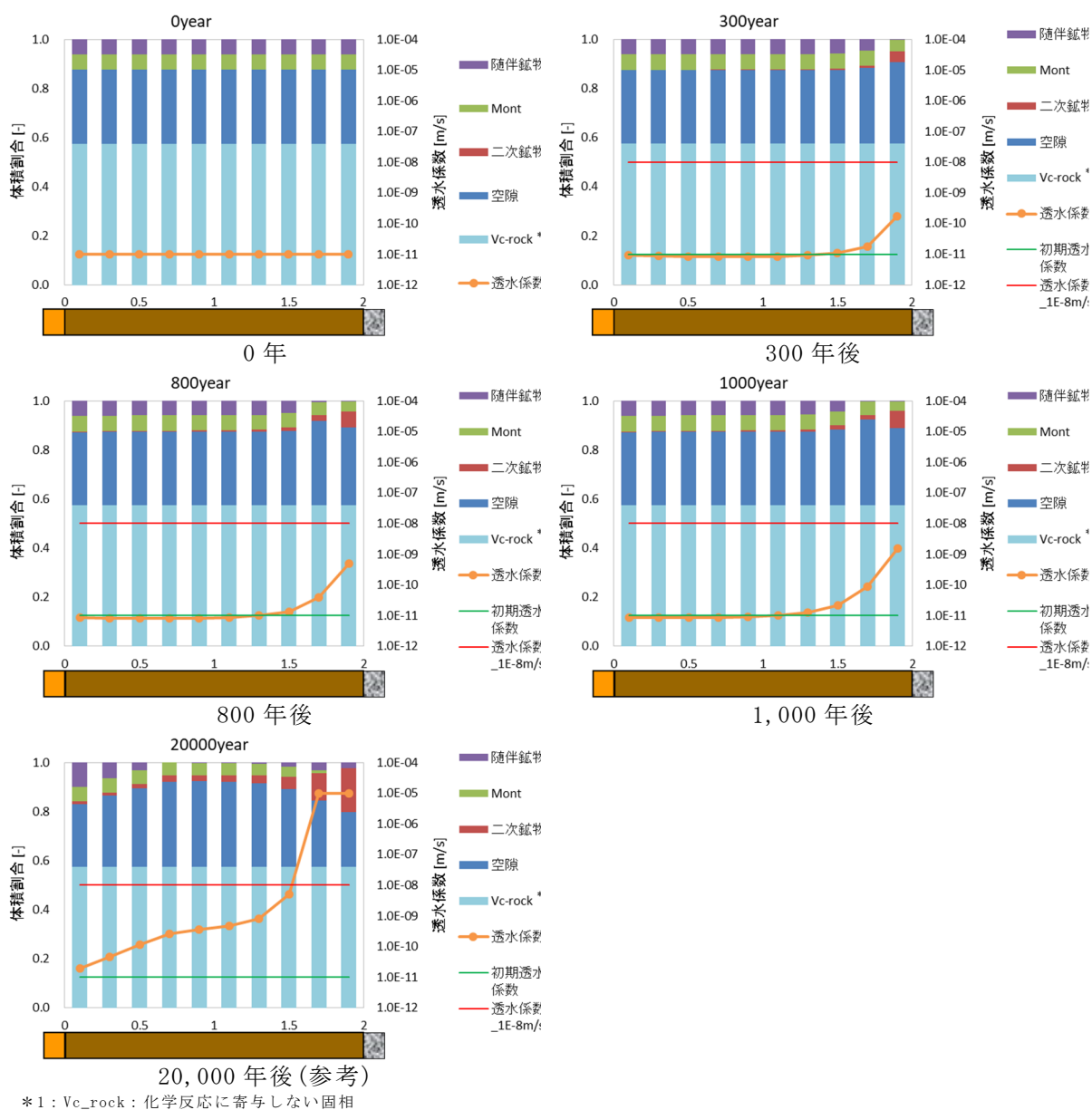
第 8 図 1号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



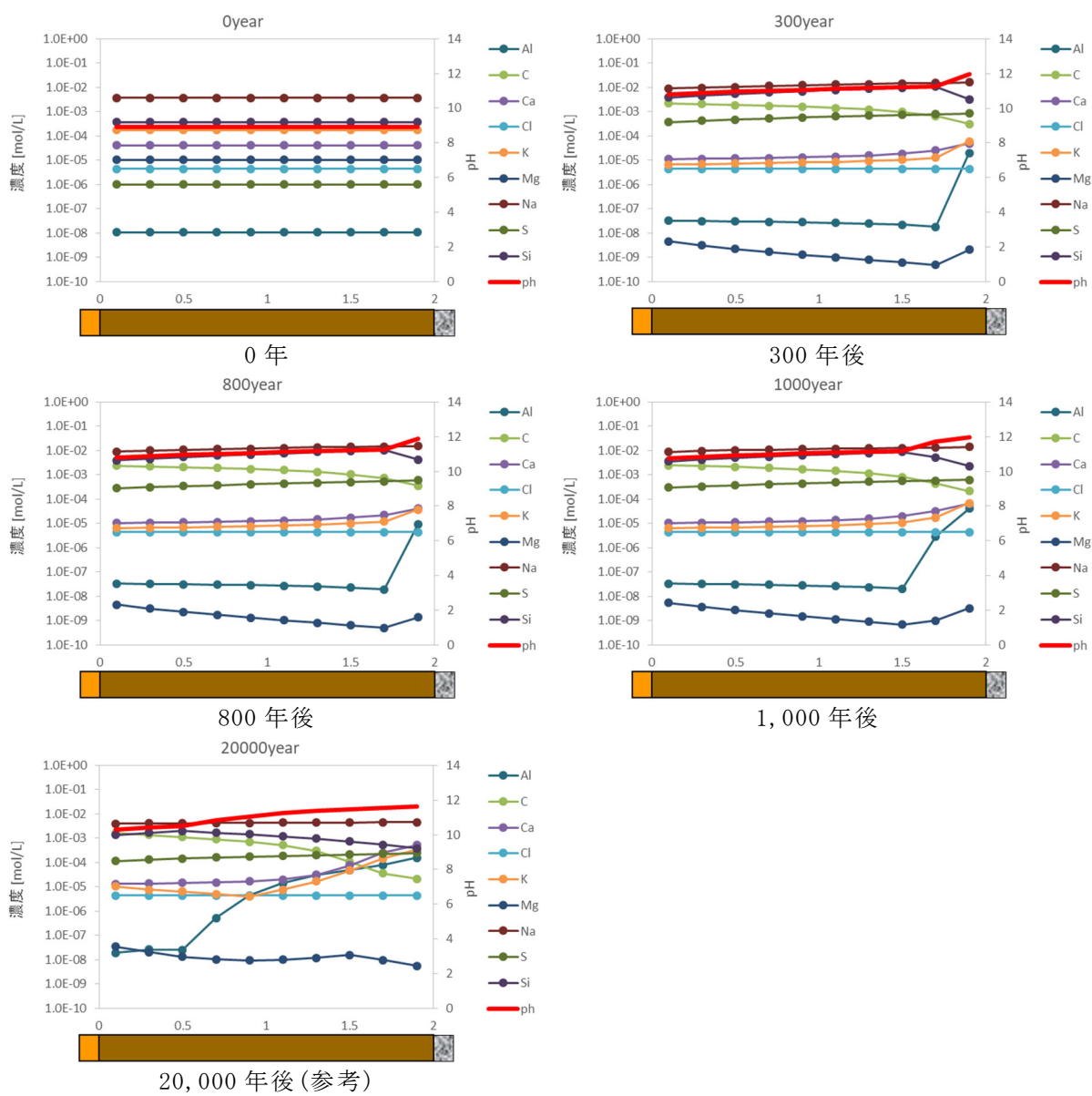
第 9 図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



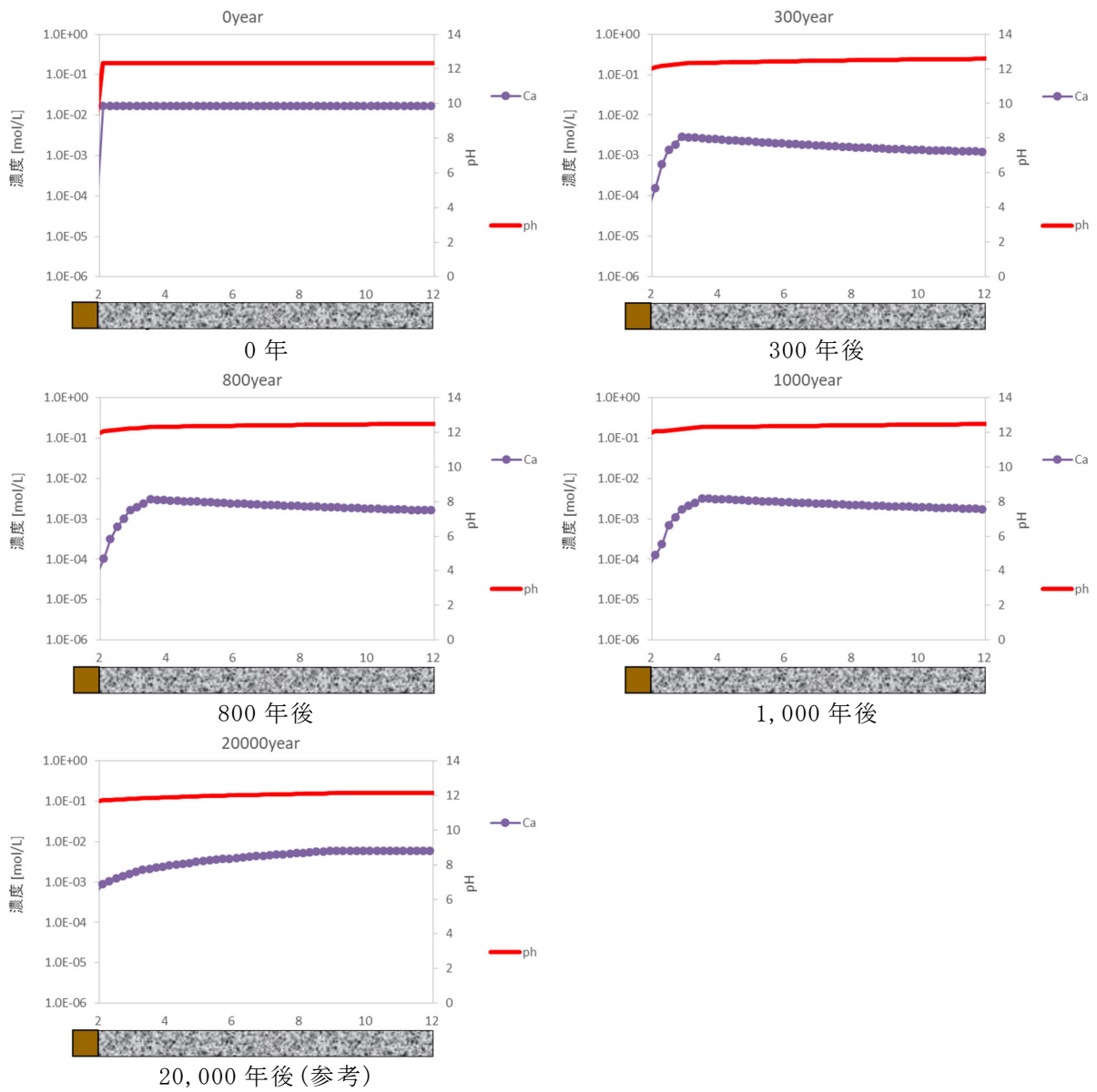
第 10 図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



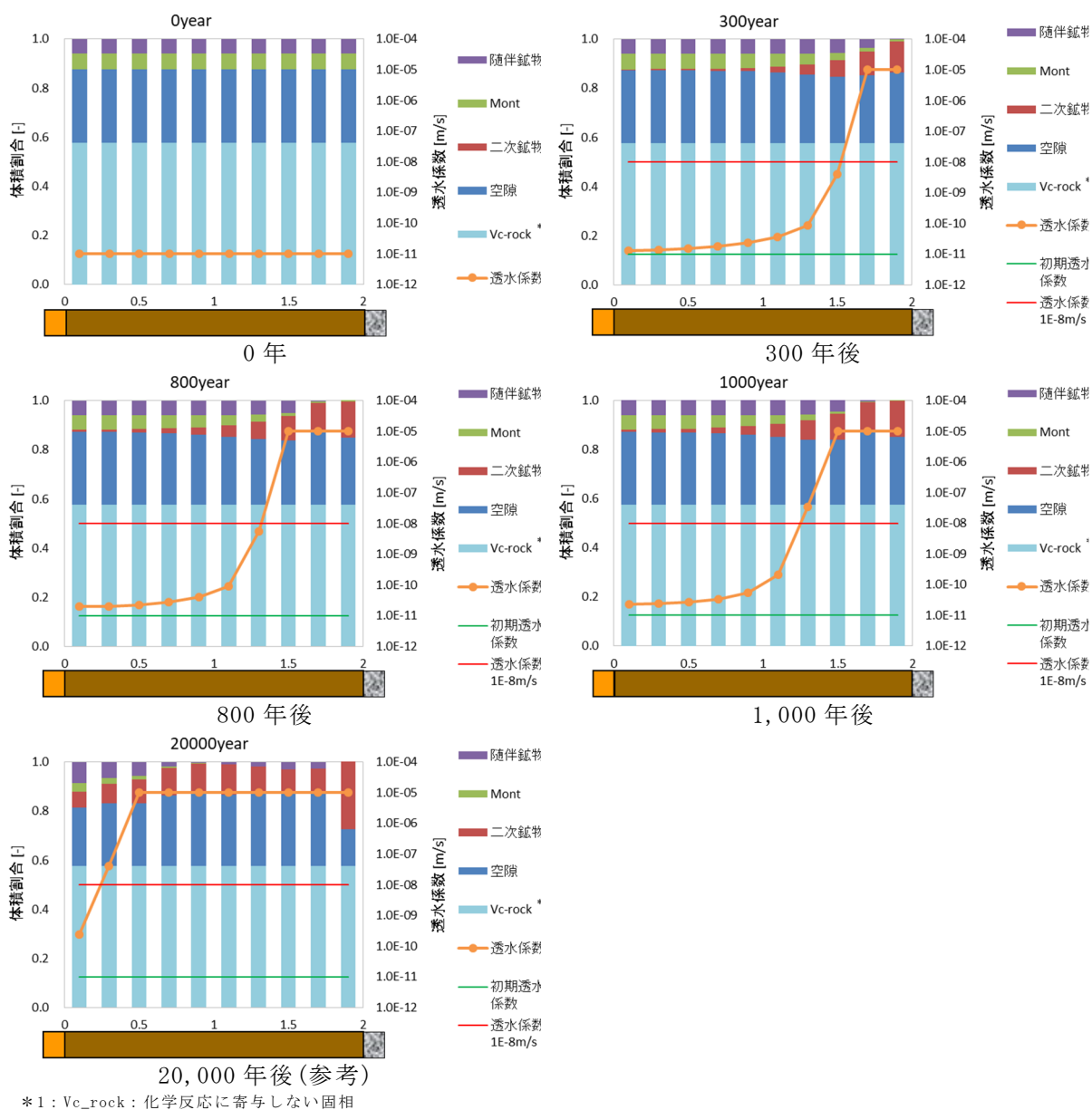
第 11 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



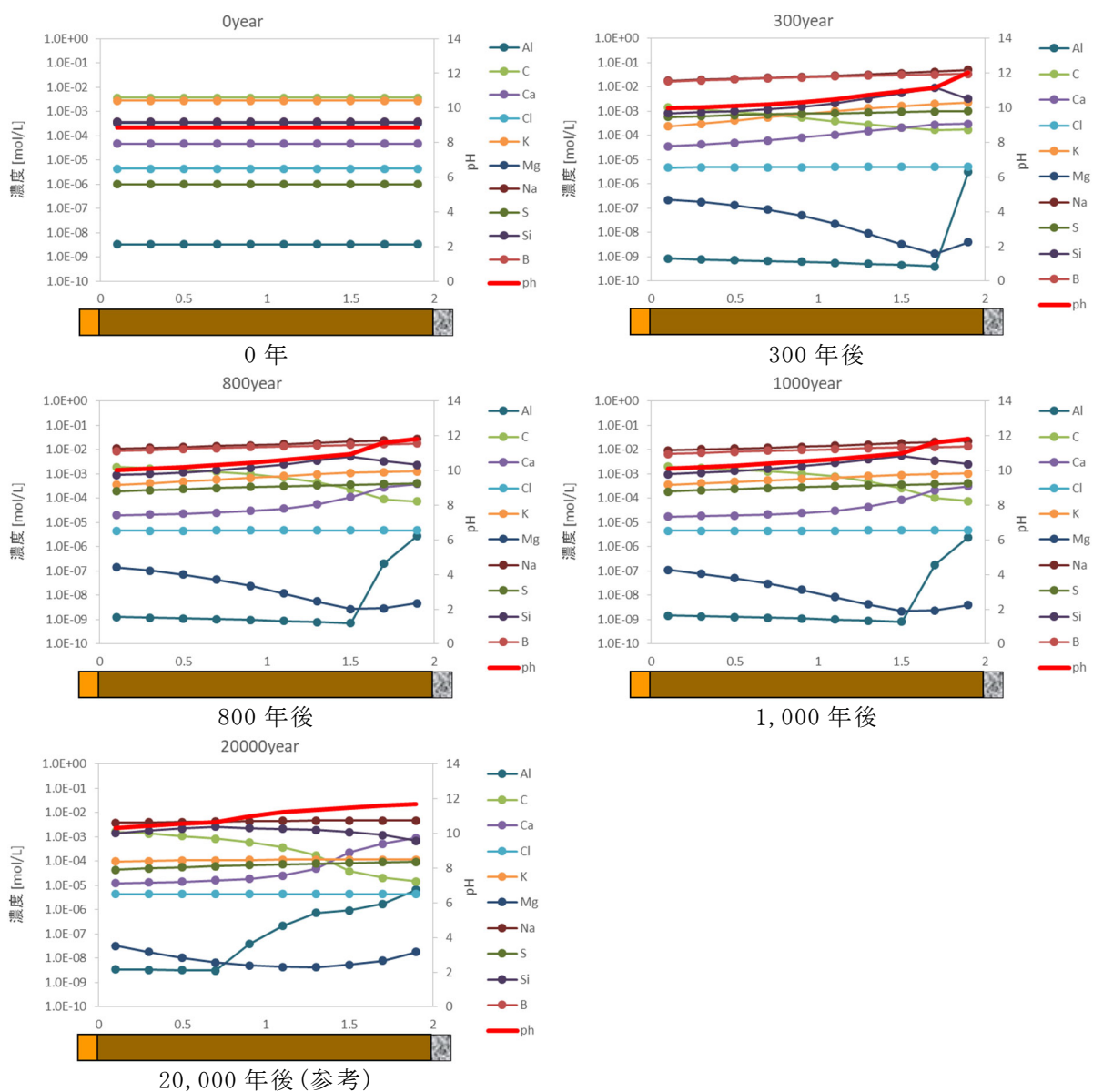
第 12 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における液相組成の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



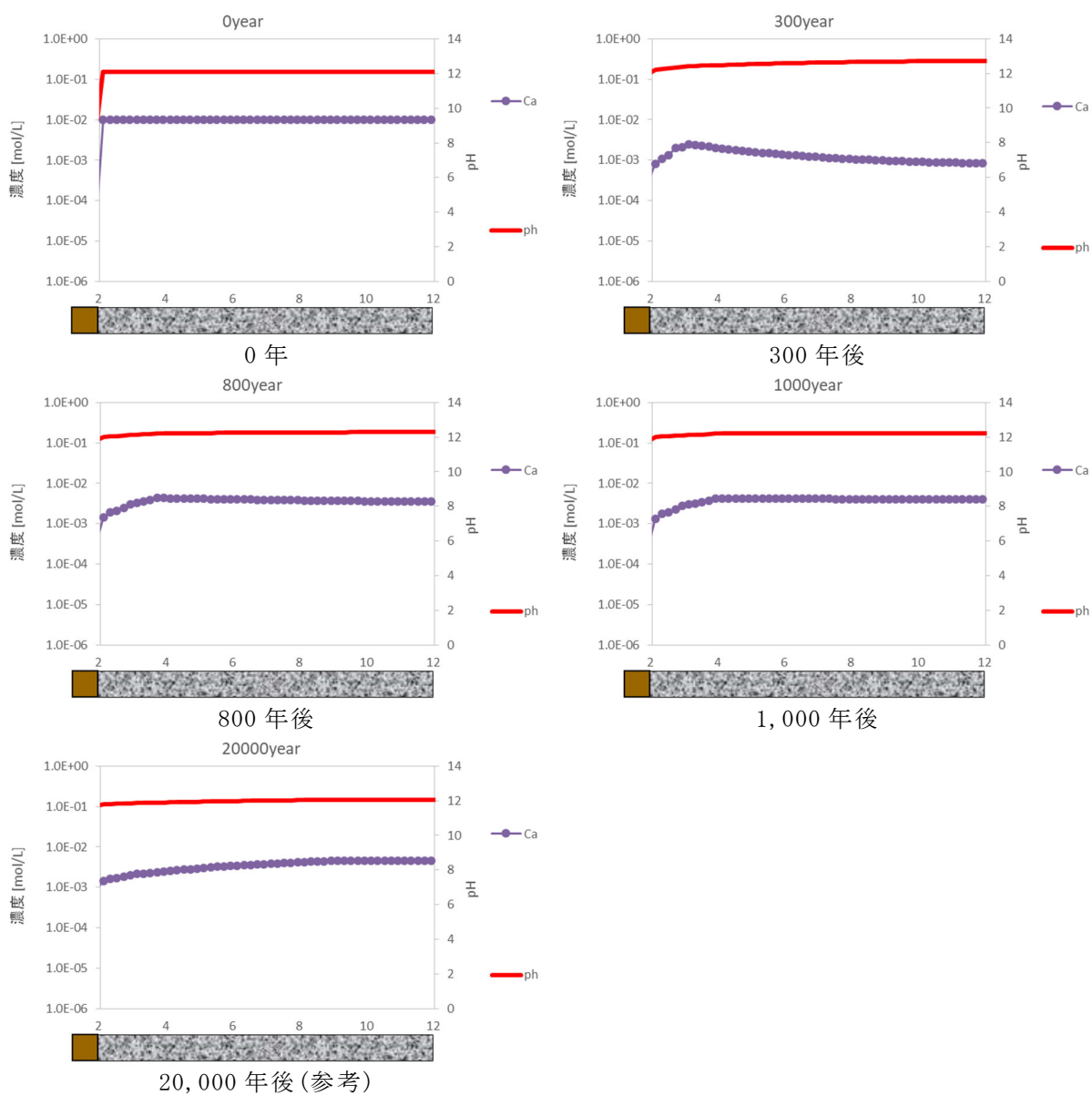
第 13 図 3 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 14 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 15 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における液相組成の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 16 図 1 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

4. まとめ

難透水性覆土の材料仕様を、Ca型ベントナイト(クニボンド)を3割配合した材料仕様から、Na型ベントナイト(クニゲルV1)を2割配合した材料仕様に変更した場合、Na型ベントナイトの主成分であるNa型モンモリロナイトの優れた膨潤性より高い止水性を示していた。1,000年後においても、3号廃棄物埋設地では、その高い止水性が維持される結果となった。一方、難透水性覆土中のモンモリロナイトの体積割合が難透水性覆土(Ca型)と比べて低いため、1号廃棄物埋設地では、モンモリロナイトが溶解し透水係数は大きく上昇する結果となった。それでも、1,000年後において、高い止水性が維持されていることが確認された。

以上より、長期的な化学的影響を考慮した難透水性覆土(Na型)の線量評価上の透水係数は1,000年後において下記の値を基に設定する(第2表)。

第2表 化学的影響の評価結果(難透水性覆土のベントナイトをNa型にした場合)

	3号廃棄物埋設地[m/s]		1号廃棄物埋設地[m/s]	
	ケース①*1	ケース②*2	ケース①*1	ケース②*2
0年	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}
1,000年	1.07×10^{-11}	1.23×10^{-11}	3.20×10^{-11}	5.73×10^{-11}

*1：難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式(補足5 数式3)とする現実的な設定をした場合

*2：難透水性覆土中の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を0とし単純に空隙率に比例するという単純な設定(補足5 数式4)とした場合

以上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

－透水係数の設定－

2021年6月

日本原燃株式会社

目 次

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

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

参考資料 2 特性の異なるベントナイト混合土を用いた場合の等価透水係数の確認

1. はじめに

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

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

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

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

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

2. 状態変化の評価

(1) 力学的影響

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

(i) 難透水性覆土の変形

a. 埋設設備の膨張による覆土の変形

難透水性覆土の状況を第 1 表に示す。最も可能性が高い設定においては開口が生じず、膨張量の大きい 2 号及び 3 号埋設設備の最も厳しい設定において 2m の開口が生じると評価する。

第 1 表 埋設設備膨張量及び覆土状況

		1,000 年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
3 号	埋設設備膨張量[m]	0.35	5.0
	難透水性覆土の状況	厚さが 1m 以上残る (開口無し)	隅角部が 2m 開口
1 号	埋設設備膨張量[m]	0.0332	1.26
	難透水性覆土の状況	厚さが 1m 以上残る (開口無し)	埋設設備隅角部に 厚さがほぼ残らない (開口無し)
2 号	埋設設備膨張量[m]	0.164	2.25
	難透水性覆土の状況	厚さが 1m 以上残る (開口無し)	隅角部が 2m 開口

b. 埋設設備の陥没による覆土の変形

難透水性覆土の状況を第2表に示す。最も可能性が高い設定及び最も厳しい設定において、ともに破断や厚さの変化が生じないと評価する。

第2表 埋設設備陥没量及び覆土状況

		1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
1号	埋設設備陥没量 [m]	1.0	1.0
	難透水性覆土 の状況	厚さの変化 無し	厚さの変化 無し

(ii) 下部覆土の変形

破断や厚さの変化が生じないと評価する。

(2) 化学的影響

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

(i) 難透水性覆土の変質

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

第3表 変質後の難透水性覆土の透水係数及び健全部残長

		1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}
	健全部残長[m]	1.6	1.2
1号	透水係数[m/s]	1.42×10^{-10}	1.84×10^{-10}
	健全部残長[m]	0.8	0.2
2号*1	透水係数[m/s]	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}
	健全部残長[m]	1.6	1.2

*1:3号の結果を流用

(ii) 下部覆土の変質

下部覆土の変質後における透水係数及び健全部残長を第4表に示す。下部覆土は化学的影響により変質を受けないと評価する。

第4表 変質後の下部覆土の透水係数及び健全部残長

		1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0
1号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0 ^{*1}	2.0 ^{*1}
2号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0

*1:難透水性覆土の影響度合いが最も大きい1号廃棄物埋設地については、下部覆土に変質影響が及ぶと仮定し、「3. (ii) 1号廃棄物埋設地」においては、下部覆土の健全部残長は1.0mであるとして扱う。なお、変質後の透水係数は 1×10^{-7} m/s以下であると評価する。

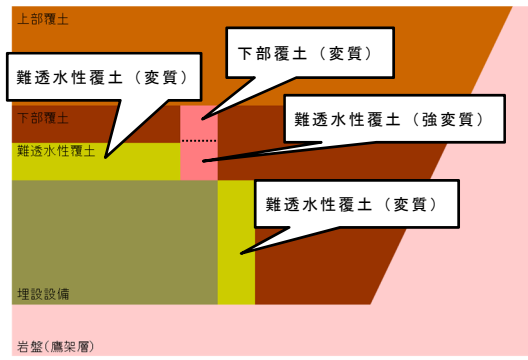
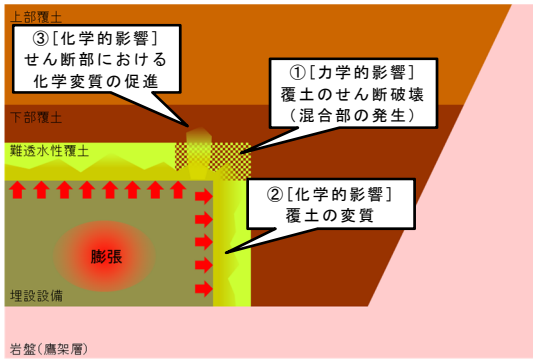
(3) 状態変化の重畳

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

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

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

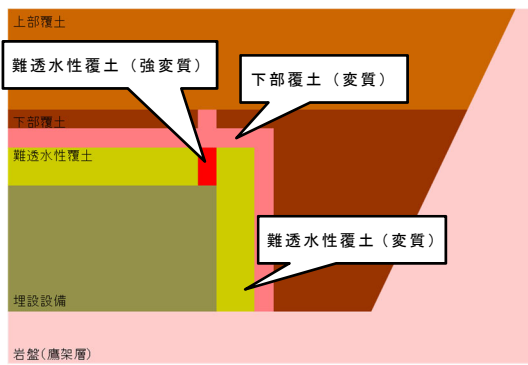
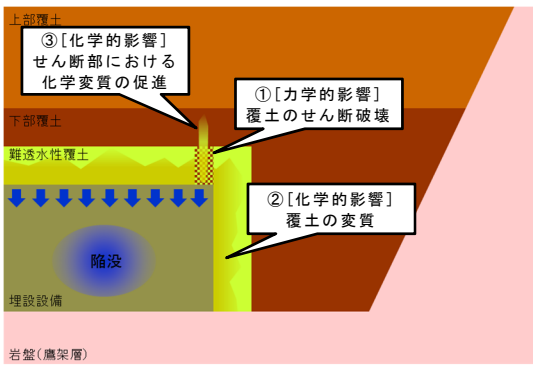
力学的影響及び化学的影響を重ね合わせた概念図について、力学的影響における変形形態の整理に倣い、埋設設備膨張時の状態変化及び状態設定の概念図を第1図に、埋設設備陥没時の状態変化及び状態設定の概念図を第2図に示す。



a. 状態設定で想定する状態変化の重畳

b. 覆土の状態設定

第 1 図 埋設設備膨張時の状態変化及び状態設定の概念図



a. 状態設定で想定する状態変化の重畳

b. 覆土の状態設定

第 2 図 埋設設備陥没時の状態変化及び状態設定の概念図

3. 廃棄物埋設地の状態設定

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

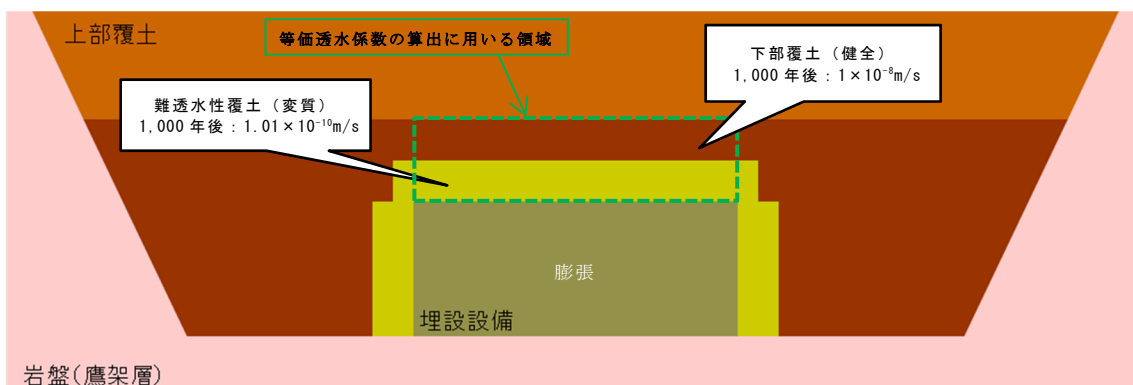
なお、側方の覆土状態に比べ、上方の覆土状態の変質度合いが大きいことから、埋設設備を取り囲む覆土の等価透水係数を算出する際には、上方の覆土状態を対象とした等価透水係数にて代表させる。

(1) 覆土の状態設定

(i) 3号廃棄物埋設地

a. 最も可能性が高い設定（開口が生じないケース）

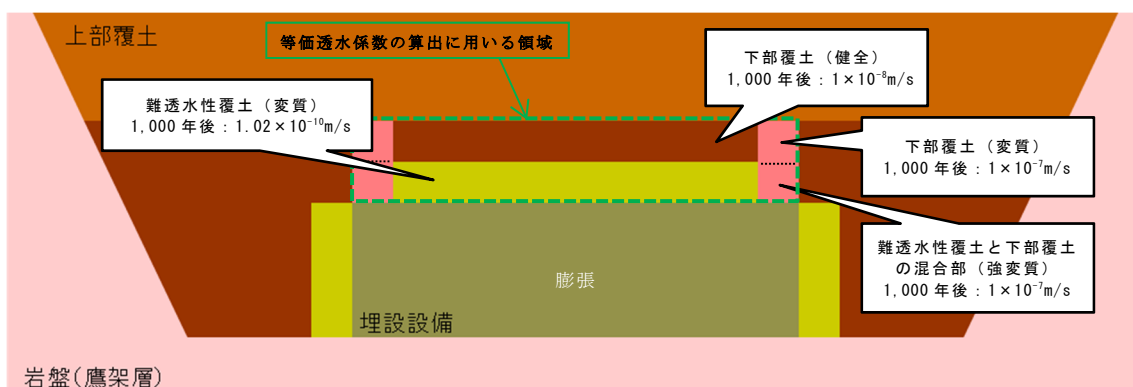
力学的影響により開口を生じないことから、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。設定した状態を第3図に示す。



第3図 3号廃棄物埋設地の状態設定（最も可能性が高い設定）

b. 最も厳しい設定（2mの開口が生じるケース）

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

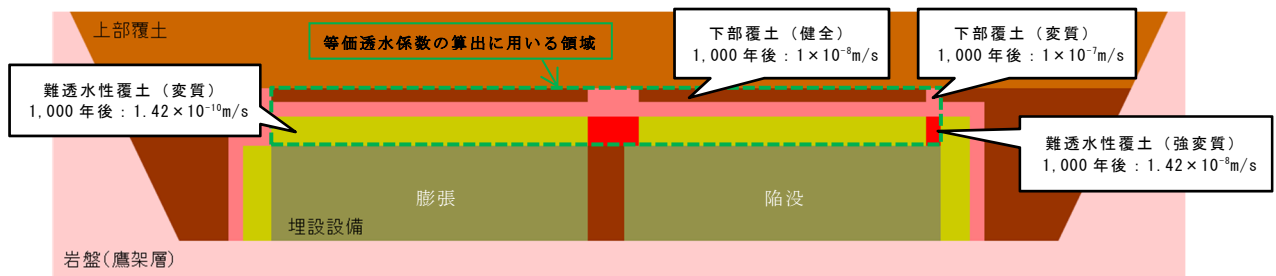


第4図 3号廃棄物埋設地の状態設定（最も厳しい設定）

(ii) 1号廃棄物埋設地

a. 最も可能性が高い設定（開口が生じないケース）

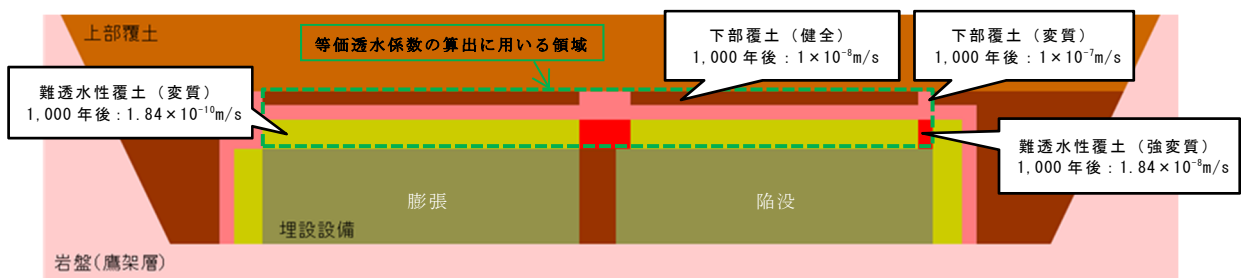
力学的影響により開口を生じないが、陥没によるせん断部付近の「難透水性覆土（強変質）」においては、化学変質が促進されるものとして透水係数を「難透水性覆土（変質）」から更に2オーダー引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第5図に示す。



第5図 1号廃棄物埋設地の状態設定（最も可能性が高い設定）

b. 最も厳しい設定（開口が生じないケース）

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

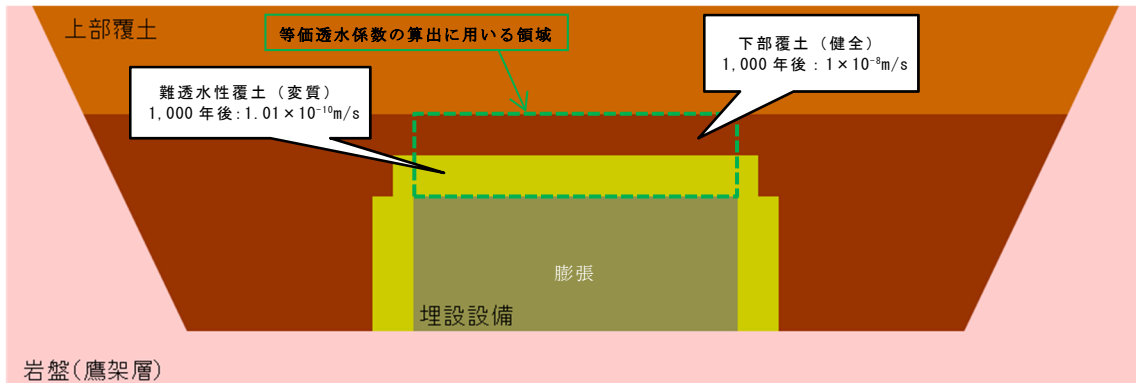


第6図 1号廃棄物埋設地の状態設定（最も厳しい設定）

(iii) 2号廃棄物埋設地

a. 最も可能性が高い設定（開口が生じないケース）

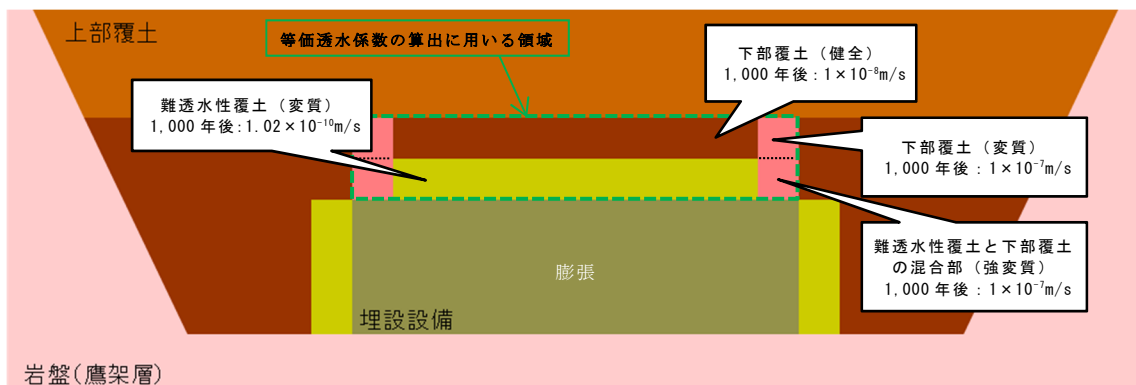
力学的影響により開口を生じないことから、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。設定した状態を第7図に示す。



第7図 2号廃棄物埋設地の状態設定（最も可能性が高い設定）

b. 最も厳しい設定（2mの開口が生じるケース）

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



第8図 2号廃棄物埋設地の状態設定（最も厳しい設定）

(2) 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数

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

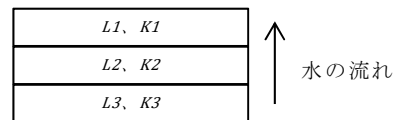
なお、透水係数の異なる複数の土質材料が存在していることから、以下に示す直列方向の合成と並列方向の合成を組み合わせることで、覆土の等価透水係数を算出する。

<鉛直直列方向の合成式>

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

L_i : i 番目の層の覆土厚さ [m]

K_i : i 番目の層の透水係数 [m/s]

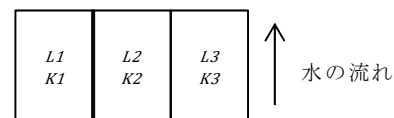


<鉛直並列方向の合成式>

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

L_i : i 列目の覆土幅 [m]

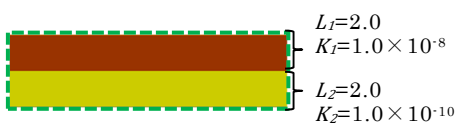
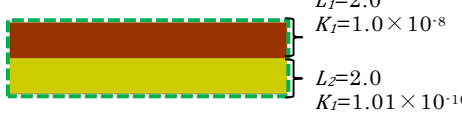
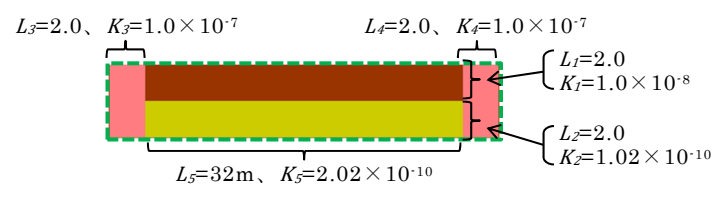
K_i : i 列目の透水係数 [m/s]



(i) 3号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第5表及び第6表に示す。

第5表 覆土の透水係数設定 (3号廃棄物埋設地)

時期	—
0年 (初期)	
時期	最も可能性が高い設定
1,000年後	
時期	最も厳しい設定
1,000年後	

L : 長さ (m)、 K : 透水係数 (m/s)

第6表 覆土の等価透水係数 (3号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
計算値[m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}
設定値[m/s]	—	2.00×10^{-10}	1.50×10^{-8}

(ii) 1号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第7表及び第8表に示す。

第7表 覆土の透水係数設定 (1号廃棄物埋設地)

時期	—	
0年 (初期)		
時期	最も可能性が高い設定	
1,000年後		
時期	最も厳しい設定	
1,000年後		

L : 長さ (m)、 K : 透水係数 (m/s)

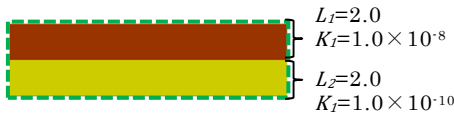
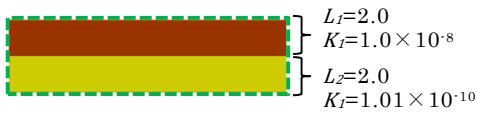
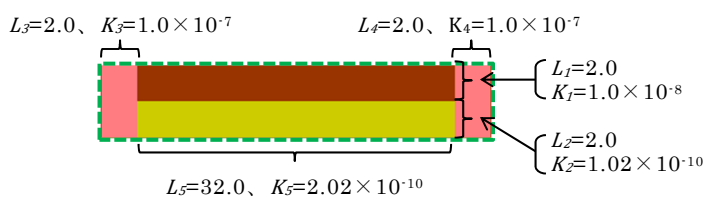
第8表 覆土の等価透水係数 (1号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
計算値[m/s]	1.98×10^{-10}	2.39×10^{-9}	3.00×10^{-9}
設定値[m/s]	—	2.50×10^{-9}	3.00×10^{-9}

(iii) 2号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第9表及び第10表に示す。

第9表 覆土の透水係数設定 (2号廃棄物埋設地)

時期	—
0年 (初期)	
時期	最も可能性が高い設定
1,000年後	
時期	最も厳しい設定
1,000年後	

L : 長さ (m)、 K : 透水係数 (m/s)

第10表 覆土の等価透水係数 (2号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
計算値 [m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}
設定値 [m/s]	—	2.00×10^{-10}	1.50×10^{-8}

(3) その他の廃棄物埋設地の状態設定

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

(i) 埋設設備

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

(ii) 岩盤（「補足説明資料 1_地質環境に係る長期変動事象」を参照）

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

第 11 表 地盤の透水係数

ケース	材料区分	3号廃棄物埋設地 [m/s]	1号廃棄物埋設地 [m/s]	2号廃棄物埋設地 [m/s]
最も可能性 が高い設定	第四紀層	3.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}
	鷹架層	5.0×10^{-8}	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}
最も厳しい 設定	第四紀層	3.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}
	鷹架層	5.0×10^{-8}	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}

低透水性を有する覆土に対して
等価透水係数を設定することの妥当性

目次

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

1. はじめに

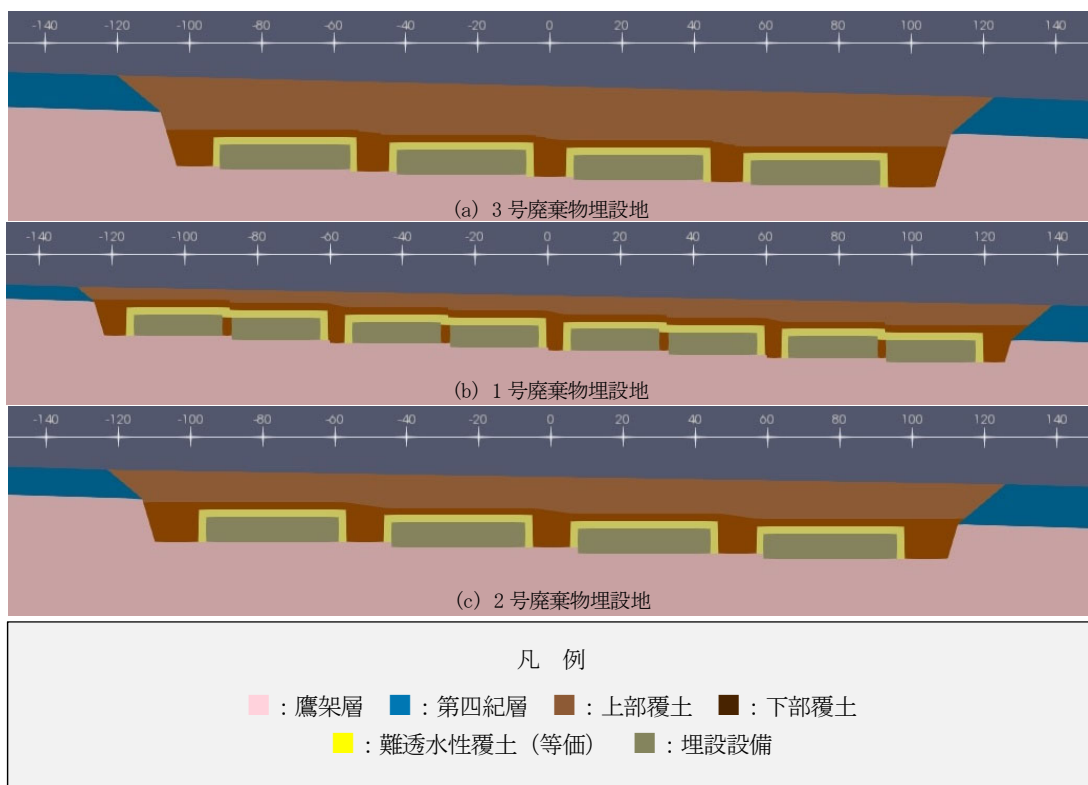
本資料は、2次元地下水浸透流解析で等価透水係数を設定することの妥当性を示すものである。

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

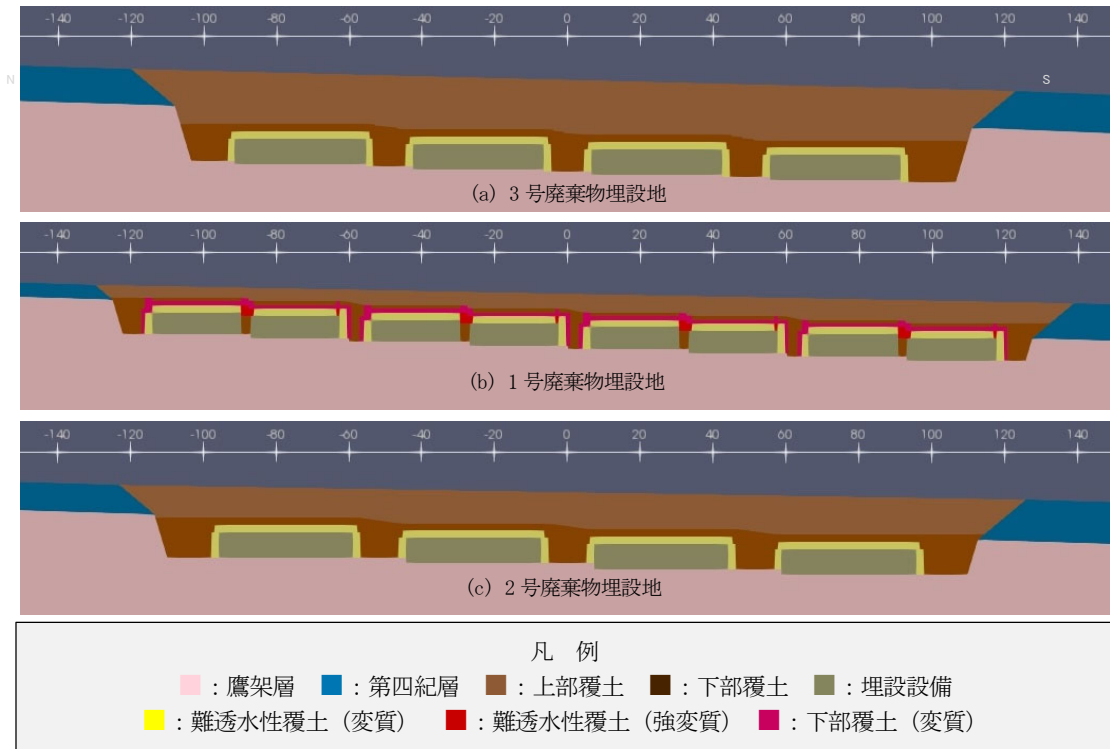
2. 妥当性の確認方法

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

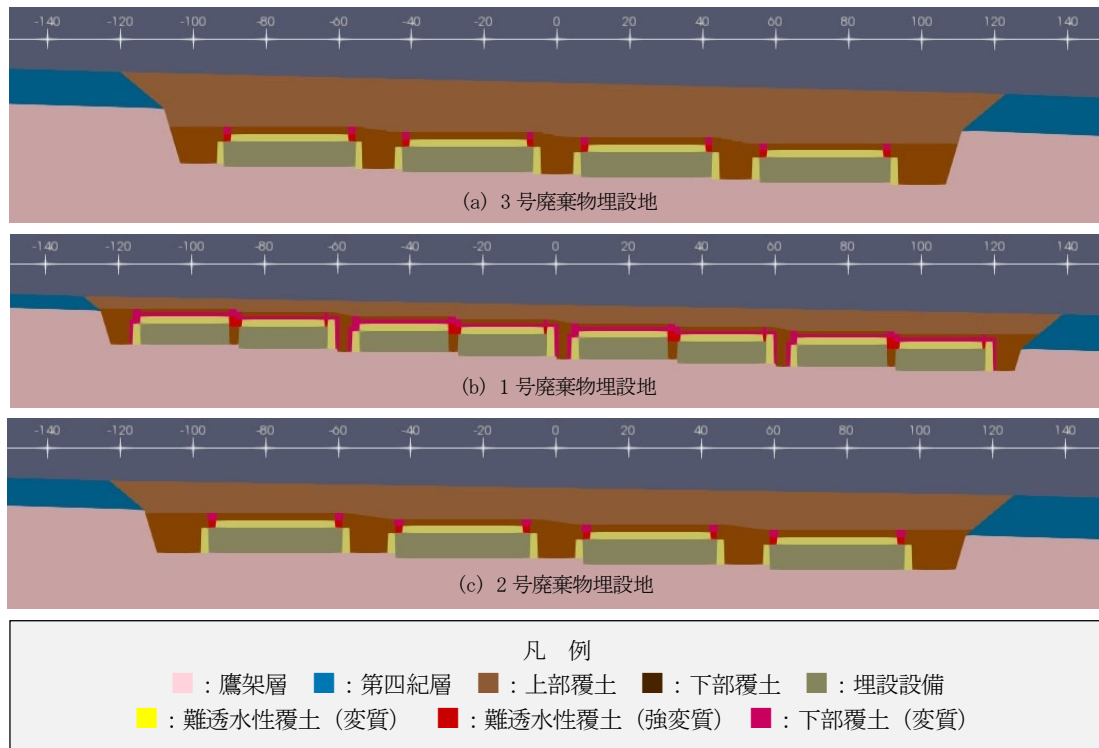
なお、モデル以外の解析条件は「補足説明資料7_埋設設備からの流出水量」のうち「4. 埋設設備から覆土及び鷹架層への流出水量の計算に必要な条件設定及び計算結果」と同様とする。



第1図 廃棄物埋設地付近の材料分布(等価透水係数モデル)



第2図 廃棄物埋設地付近の材料分布(劣化箇所反映モデル 最も可能性が高い設定)



第3図 廃棄物埋設地付近の材料分布(劣化箇所反映モデル 最も厳しい設定)

3. 確認結果

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

第1表 等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルの埋設設備からの流出水量

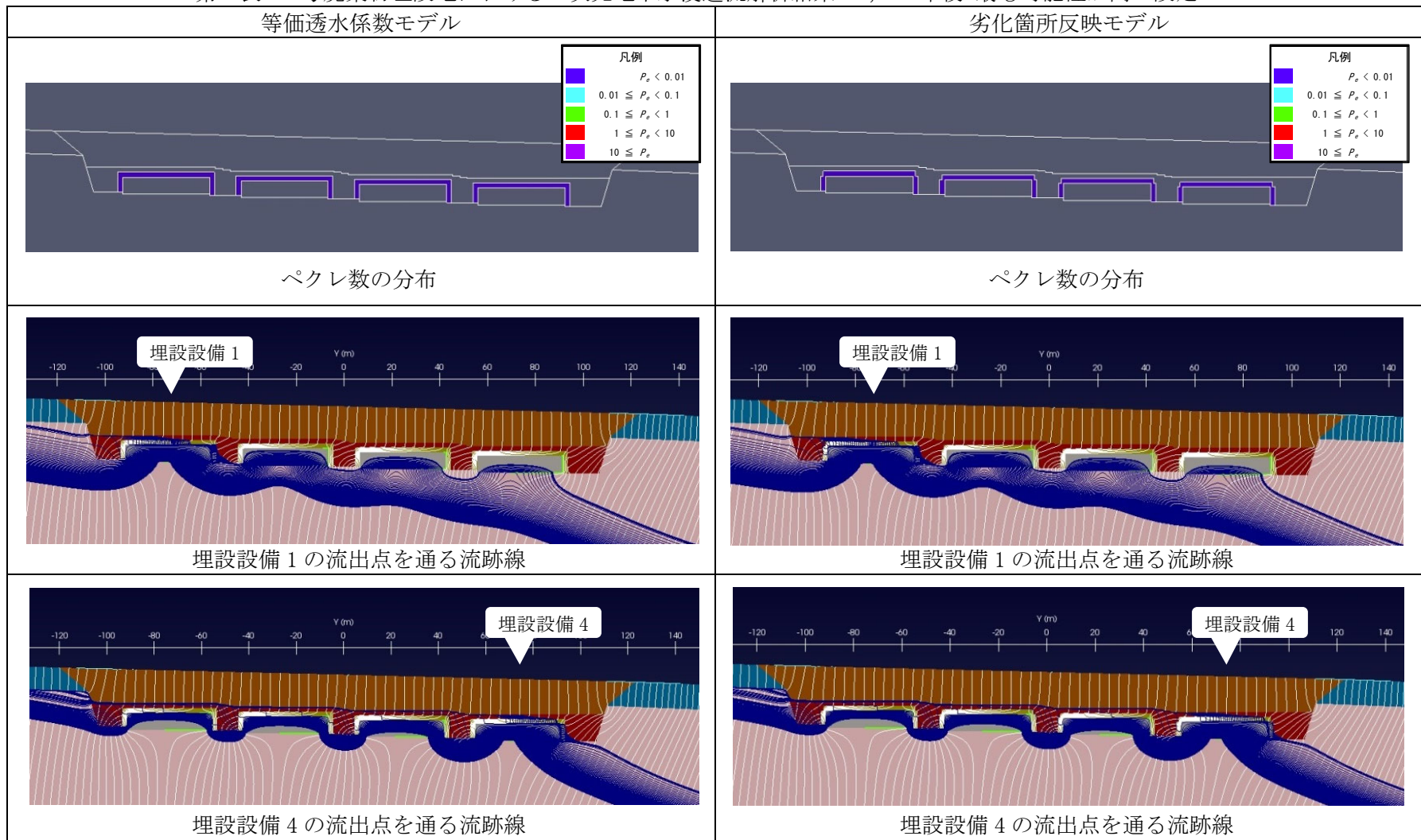
計算ケース	モデル	3号廃棄物埋設地		1号廃棄物埋設地		2号廃棄物埋設地		
		$Q_{co}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{go}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{co}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{go}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{co}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{go}(t)$ [m ³ /y]	
最も可能性が高い設定	寒冷化ケース	①等価透水係数モデル	10	630	130	2,200	20	920
		②劣化箇所反映モデル	10	630	110	2,200	20	910
		差(②-①)	0	0	-20	0	0	-10
	温暖期継続ケース	①等価透水係数モデル	10	630	130	2,200	20	920
		②劣化箇所反映モデル	10	630	110	2,200	20	910
		差(②-①)	0	0	-20	0	0	-10
最も厳しい設定	寒冷化ケース	①等価透水係数モデル	510	1,500	150	2,200	350	1,300
		②劣化箇所反映モデル	460	1,500	130	2,200	280	1,300
		差(②-①)	-50	0	-20	0	-70	0
	温暖期継続ケース	①等価透水係数モデル	510	1,500	150	2,200	350	1,300
		②劣化箇所反映モデル	460	1,500	130	2,200	280	1,300
		差(②-①)	-50	0	-20	0	-70	0

*1: $Q_{co}(t)$: 埋設設備から覆土への流出水量[m³/y]
 $Q_{go}(t)$: 埋設設備から鷹架層への流出水量[m³/y]

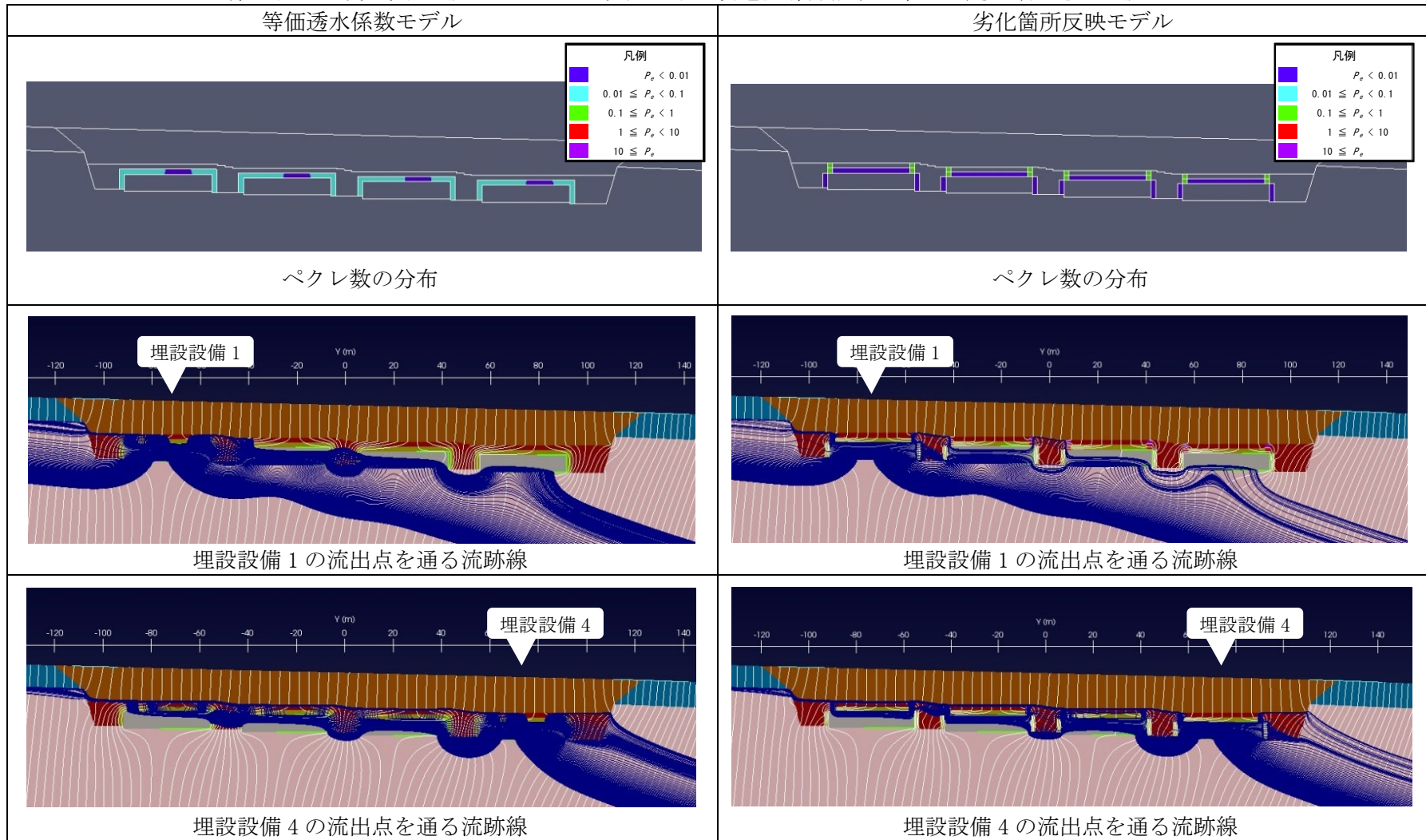
また、等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルのペクレ数分布及び流跡線を第2表から第7表に示す。低透水性を期待する難透水性覆土及び下部覆土において、両モデルともにペクレ数が1未満であることから、拡散場となっていることを確認した。流跡線についても、両モデルで傾向に大きな差異はなく、同等であることを確認した。

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

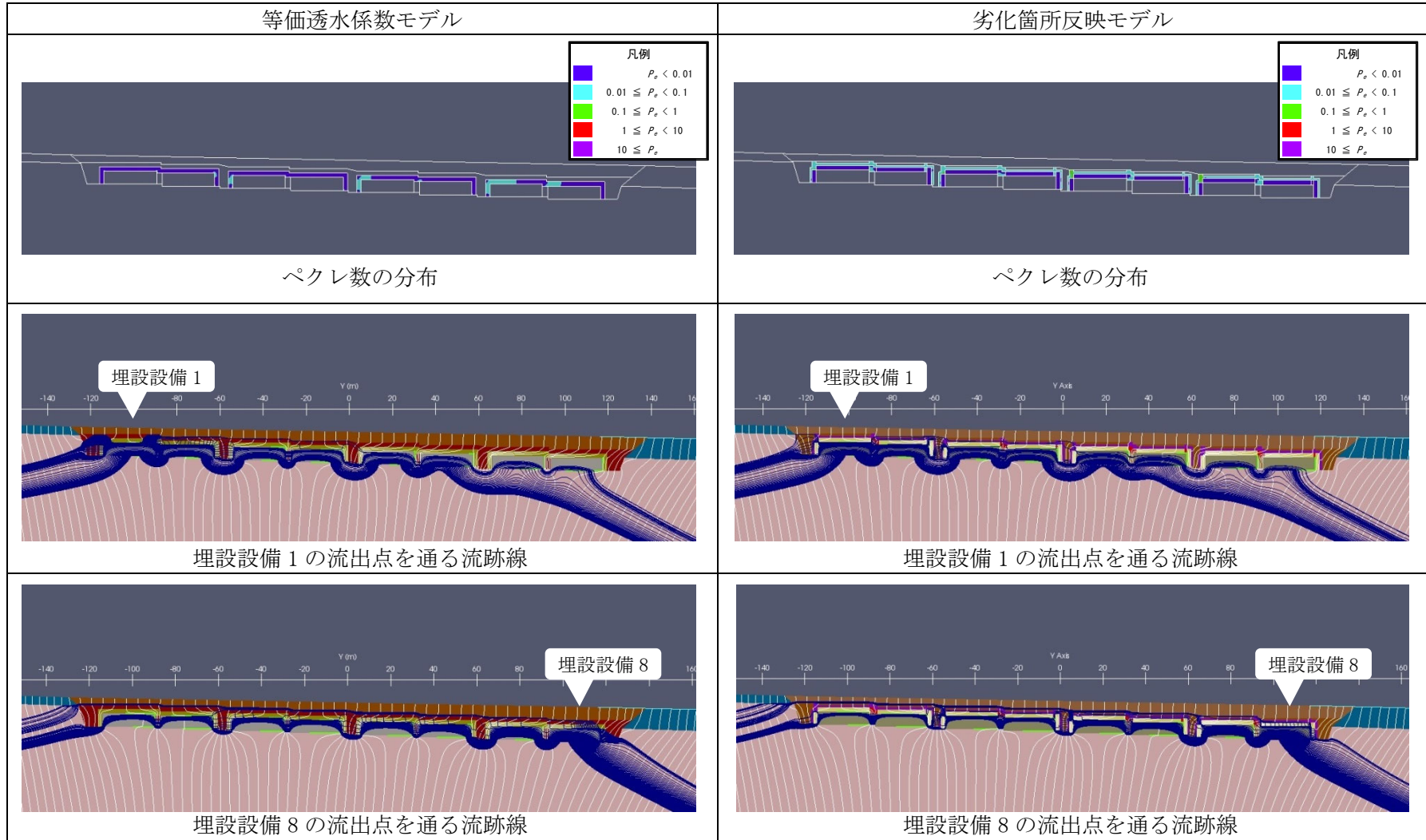
第2表 3号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 最も可能性が高い設定>



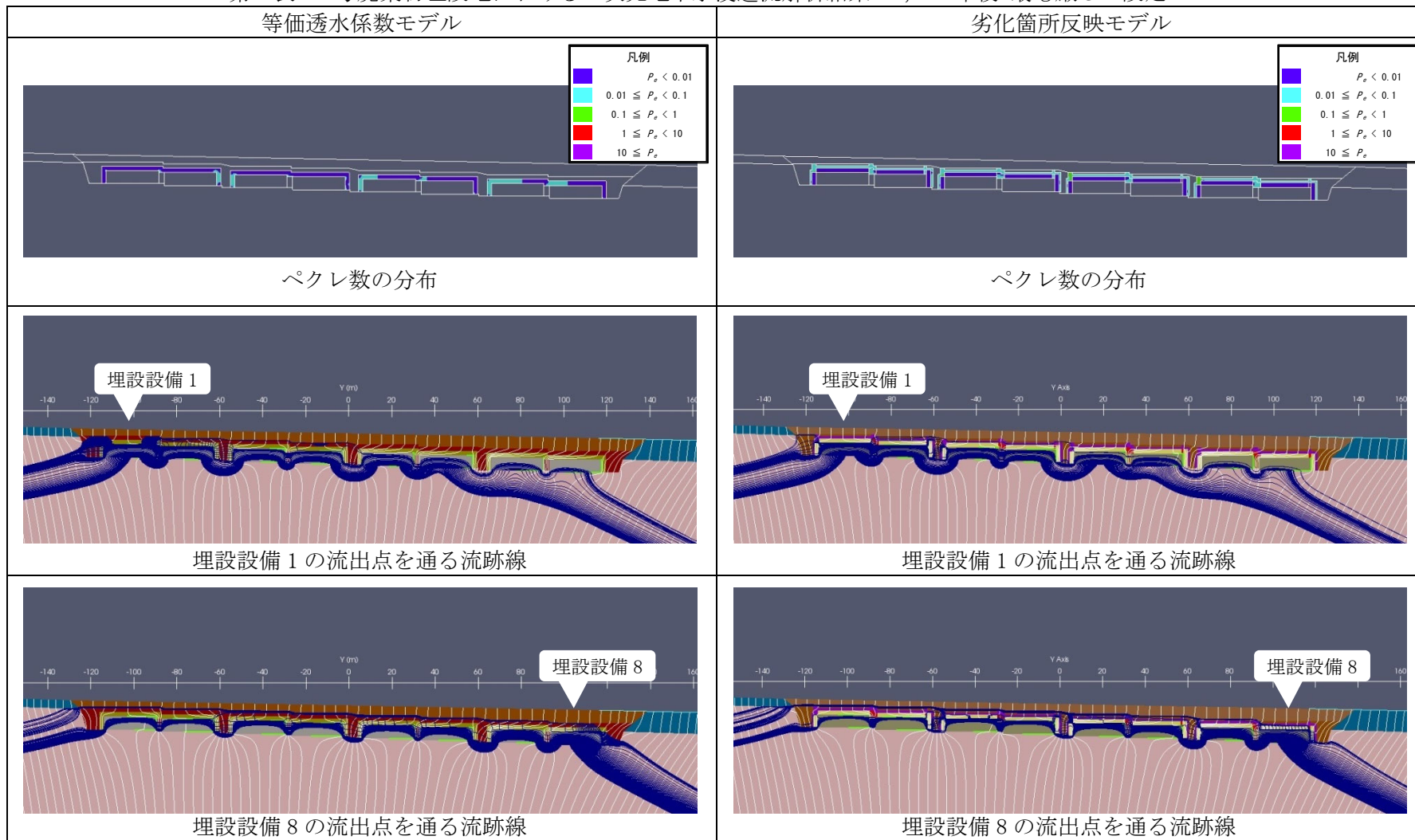
第3表 3号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 最も厳しい設定>



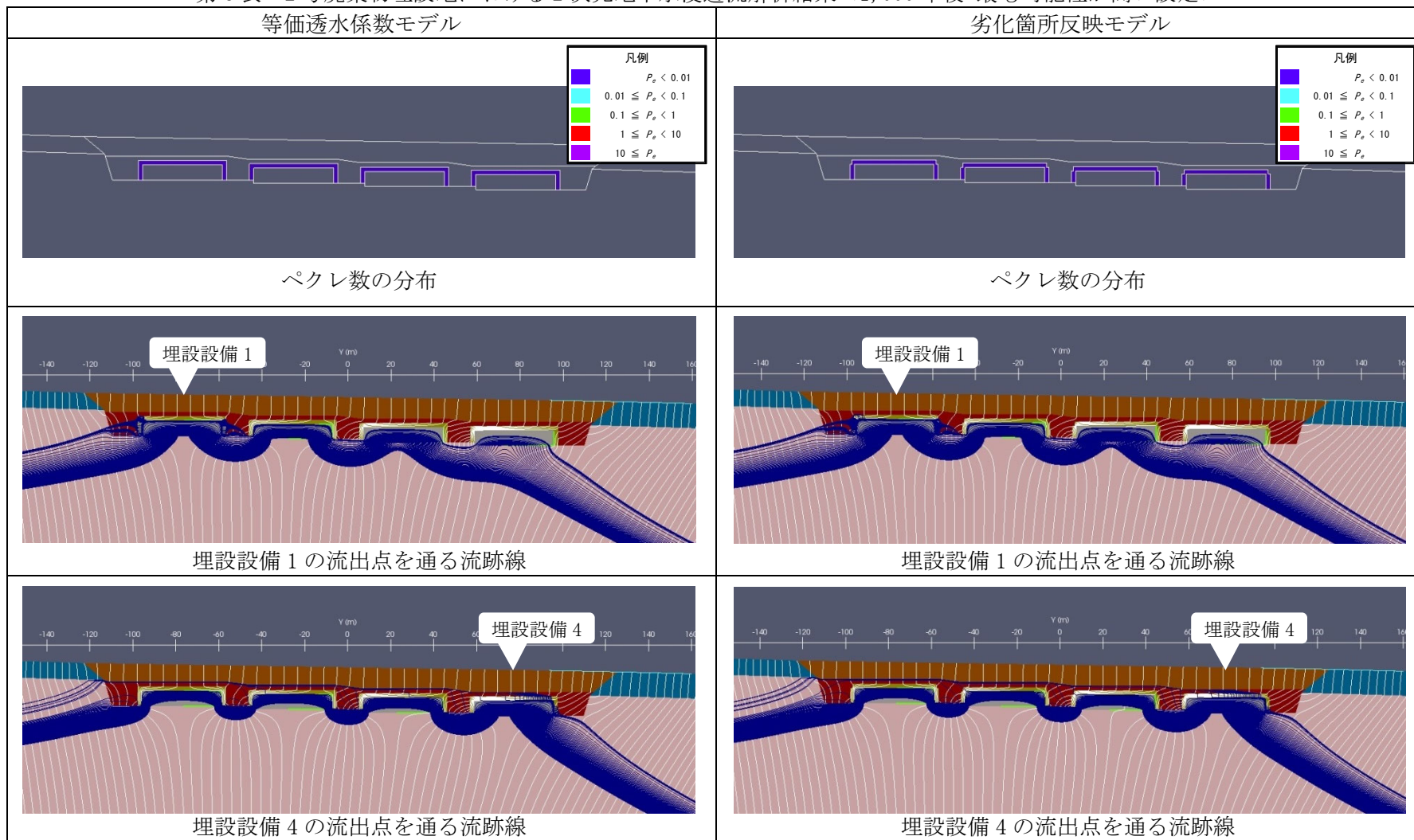
第4表 1号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 最も可能性が高い設定>



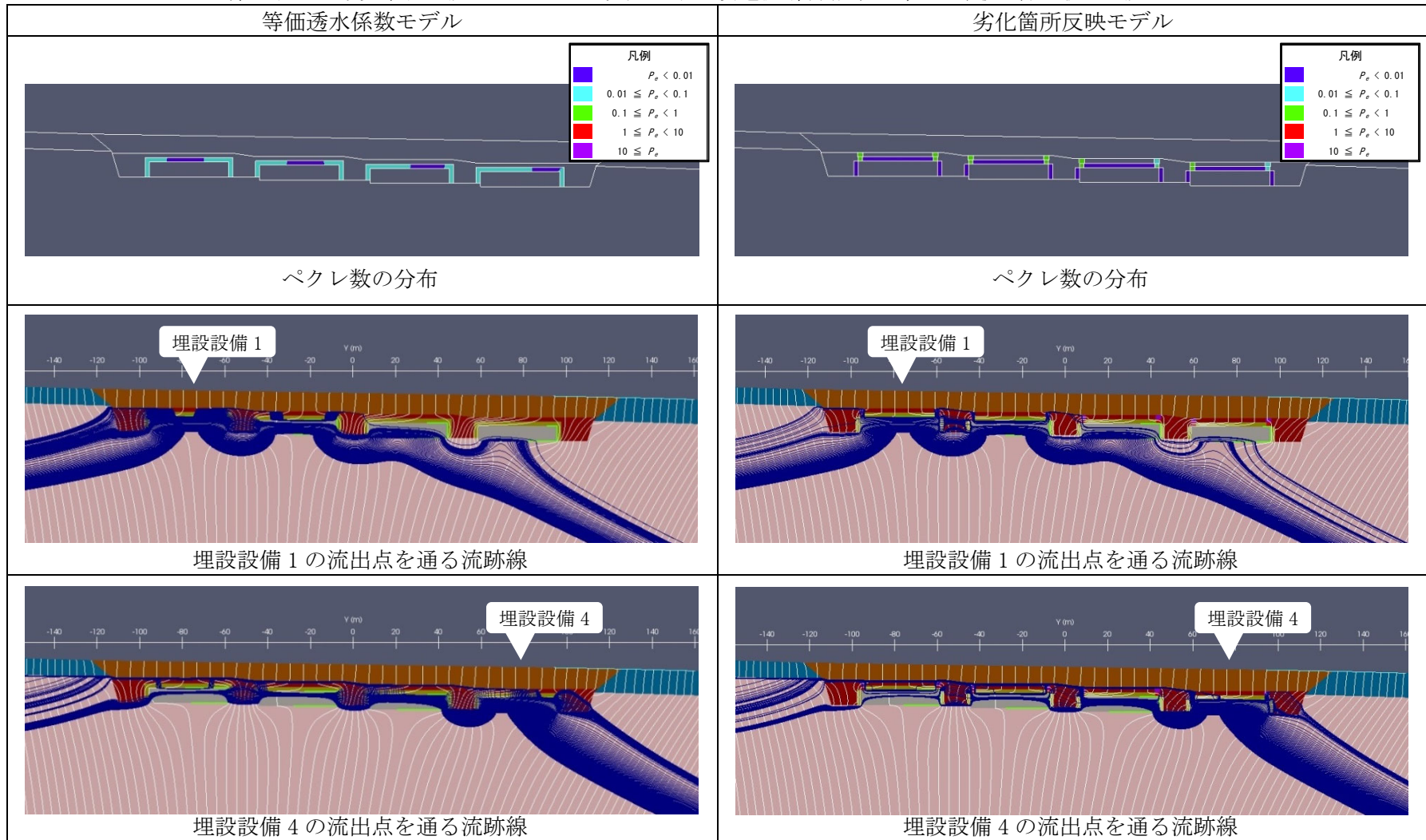
第5表 1号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 最も厳しい設定>



第6表 2号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 最も可能性が高い設定>



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



特性の異なるベントナイト混合土を用いた
場合の等価透水係数の確認

目 次

1. はじめに.....	1
2. 状態変化の評価.....	1
(1) 力学的影響.....	1
(2) 化学的影響.....	1
3. 廃棄物埋設地の状態設定.....	2
4. まとめ.....	2

1. はじめに

覆土材料は、材料調達状況を考慮した覆土施工時の施工試験結果により、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、難透水性覆土に特性の異なるベントナイト混合土（Na型ベントナイト 20wt%と砂 80wt%の混合土）を用いた場合を想定し、線量評価に用いる覆土の等価透水係数を確認する。

なお、以下に説明のない条件については、既往の検討と同様である。

2. 状態変化の評価

(1) 力学的影響

変形に寄与する力学的な特性（剛性）の異なる覆土材料を用いた場合においても同様に、力学的影響（膨張量）による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。（詳細は「補足説明資料 4_力学的影響」のうち「参考資料 4」を参照）

以上のことから、特性の異なるベントナイト混合土を用いた場合においても、力学的影響は既往の検討と同様であるとする。

(2) 化学的影響

地球化学解析を用いて等価透水係数の変遷を評価した結果から、透水係数に化学的変質が生じると評価する。（詳細は「補足説明資料 5_化学的影響」のうち「参考資料 2」を参照）

(i) 難透水性覆土の変質

難透水性覆土の変質後における透水係数を第1表に示す。特性の異なるベントナイト混合土において、変質後の難透水性覆土の透水係数が既往の検討よりも小さい。

第1表 変質後の難透水性覆土の透水係数

		1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	1.07×10^{-11}	1.23×10^{-11}
1号	透水係数[m/s]	3.20×10^{-11}	5.73×10^{-11}
2号*1	透水係数[m/s]	1.07×10^{-11}	1.23×10^{-11}

*1:3号の結果を流用

(ii) 下部覆土の変質

特性の異なるベントナイト混合土において、変質後の難透水性覆土の透水係数が既往の検討よりも小さいため、下部覆土の変質は相対的に小さいと考えられるが、下部覆土の劣化は既往の検討と同様の評価とする。

3. 廃棄物埋設地の状態設定

特性の異なるベントナイト混合土に対する評価結果を基に、力学的影響及び化学的影響を考慮した廃棄物埋設地の状態を設定する。力学的影響は既往の検討と同様であることから覆土の形状は同様とし、化学的影響による変質後の透水係数を特性の異なるベントナイト混合土の値とする。

算出した等価透水係数を第2表から第4表に示す。

第2表 覆土の等価透水係数 (3号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
今回[m/s]	2.00×10^{-11}	2.14×10^{-11}	1.12×10^{-8}
既往検討[m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}

第3表 覆土の等価透水係数 (1号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
今回[m/s]	2.00×10^{-11}	5.91×10^{-10}	1.04×10^{-9}
既往検討[m/s]	1.98×10^{-10}	2.39×10^{-9}	3.00×10^{-9}

第4表 覆土の等価透水係数 (2号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
今回[m/s]	2.00×10^{-11}	2.14×10^{-11}	1.12×10^{-8}
既往検討[m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}

4. まとめ

難透水性覆土に特性の異なるベントナイト混合土 (Na型ベントナイト 20wt%と砂 80wt%の混合土) を用いた場合の等価透水係数は、既往のベントナイト混合土 (Ca型ベントナイト 30wt%と砂 70wt%の混合土) を用いた等価透水係数よりも小さく、十分な低透水性があることを確認した。