

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

第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等 (廃止措置開始以後の評価)

補足説明資料集

- 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 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）
- 補足説明資料 6 透水係数の設定
- 補足説明資料 7 埋設設備からの流出水量
- 補足説明資料 8 分配係数
- 補足説明資料 9 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）

2019年11月27日

日本原燃株式会社

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

第九条第二号：異常時の放射線障害の防止等
(廃止措置開始以後の評価)

地質環境に係る長期変動事象

2019年11月27日

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 |
| 3.1. | プレート運動に起因する事象 | 3 |
| 3.1.1. | 火山・火成活動 | 3 |
| (1) | 火砕物密度流 | 3 |
| (2) | 降下火砕物 | 3 |
| 3.1.2. | 地震・断層活動 | 4 |
| (1) | 地震 | 4 |
| (2) | 液状化(覆土) | 7 |
| (3) | 断層活動(地盤の変形) | 7 |
| 3.1.3. | 隆起・沈降運動 | 9 |
| (1) | 隆起・沈降 | 9 |
| 3.2. | 気候変動に起因する事象 | 13 |
| (1) | 海水準変動 | 13 |
| (2) | 気温 | 21 |
| (3) | 降水量 | 30 |
| (4) | 蒸発散量 | 35 |
| (5) | かん養量 | 41 |
| (6) | 地下水位 | 45 |
| (7) | 河川流量 | 50 |
| 3.3. | プレート運動と気候変動の両者に起因する事象 | 54 |
| (1) | 侵食 | 54 |
| 3.4. | その他の事象 | 66 |
| (1) | 生物学的事象 | 66 |
| (2) | 透水性の変化 | 66 |
| 4. | まとめ | 68 |

 : 補正に伴い変更する箇所 (コメント対応含む)

 : 上記以外の審査会合コメント反映箇所

緑字 : 第 298 回審査会合(2019/8/26)までに自主的に変更した箇所

赤字 : 第 298 回審査会合(2019/8/26)からの変更箇所

1. はじめに

本資料は、資料 1-2-1「第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等(廃止措置開始以後の評価)」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。本資料では、「第 279 回審査会合 2019 年 5 月 30 日 資料 2-2 想定される自然現象・人為事象の選定について」において選定した 16 事象について説明を行う。

第 1 表 長期状態設定において考慮すべき自然現象*1

| 起因事象 | 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火砕物密度流、②降下火砕物 |
| | 地震・断層活動 | ③地震、④液状化(覆土)、 ⑤断層活動(地盤の変形) |
| | 隆起・沈降運動 | ⑥隆起・沈降 |
| 気候変動に起因する事象 | | ⑦海水準変動、⑧気温、⑨降水量、 ⑩蒸発散量、⑪かん養量、⑫地下水位、 ⑬河川流量 |
| プレート運動と気候変動の両者に 起因する事象 | | ⑭侵食 |
| その他の事象 | | ⑮生物学的事象、⑯透水性の変化 |

*1：「第 279 回審査会合 2019 年 5 月 30 日 資料 2-2 想定される自然現象・人為事象の選定について」にて選定

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、自然現象等の影響を受け難いことから、地上に比べ比較的安定である。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は有意に変化することが予測される。

この地質環境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、基本及び変動設定を設定する。

- ・基本設定：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。
- ・変動設定：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。

状態設定を行う期間は、主要な放射性物質の半減期、放射エネルギー及び放射能濃度を踏まえ、1,000年程度までの期間とする。

なお、基本設定において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は、不確かさを考慮して保守側に設定し、基本設定と変動設定で同様の値を用いるものとする。また、事象同士が密接に関係しており、両方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

3.1. 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も、今後数10万年から数100万年程度継続すると考えられる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽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。

3.1.1. 火山・火成活動

火山・火成活動によって、直接的に設備が破壊されること、また、敷地周辺が高温になること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について検討する。長期変動事象としては、降下火砕物に加えて、廃棄物埋設地に与える影響を考慮し、火砕物密度流についても検討する。

(1)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、**評価期間においては、火砕物密度流の影響について、考慮する必要はない。**

(2)降下火砕物

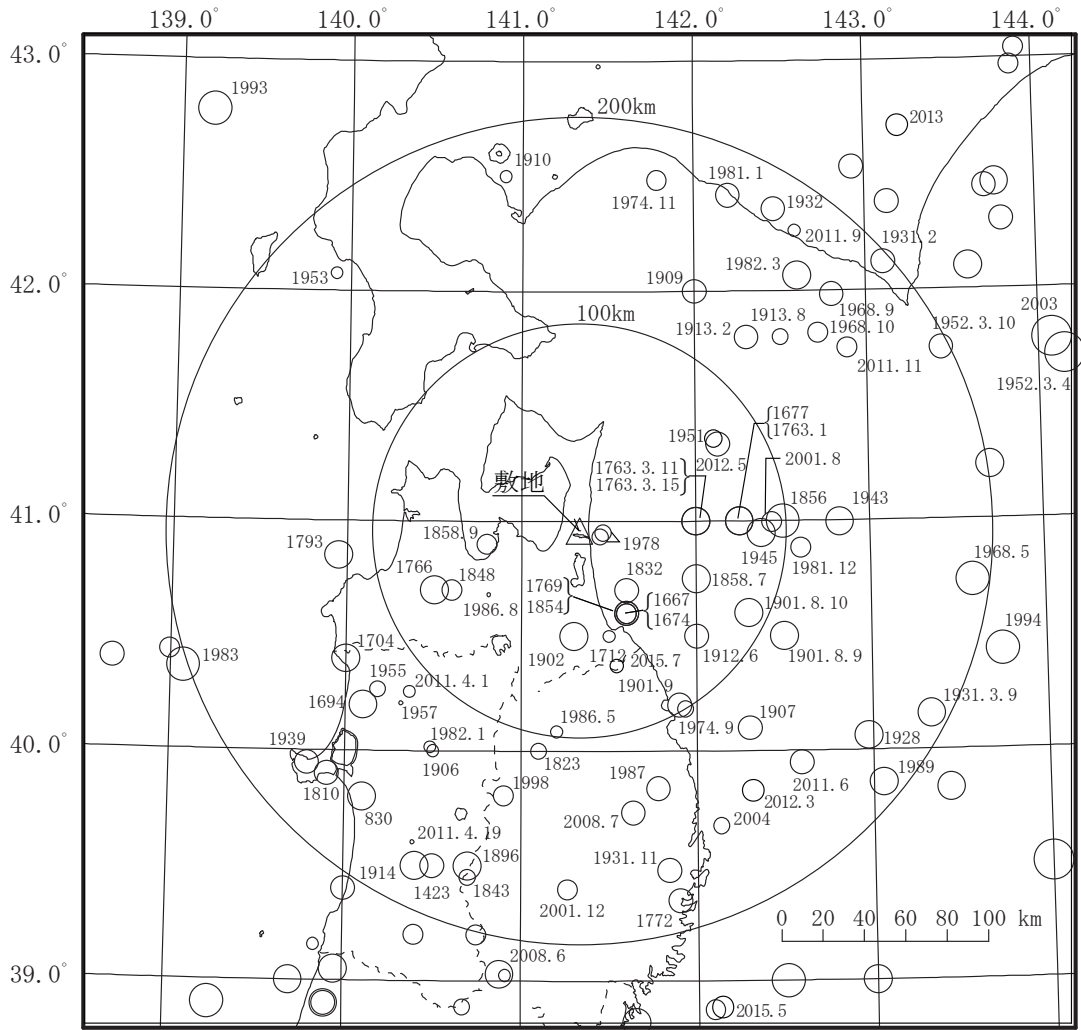
降下火砕物に含まれる成分によって地下水の水質変化(低 pH の水)が生じることが想定されるため、化学的影響について考慮する。

3.1.2. 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ことから、将来も同様の場所で繰り返し発生すると想定し、状態設定を行う。

(1) 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、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地域である。また、地震による力学的な変形は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。



*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))。

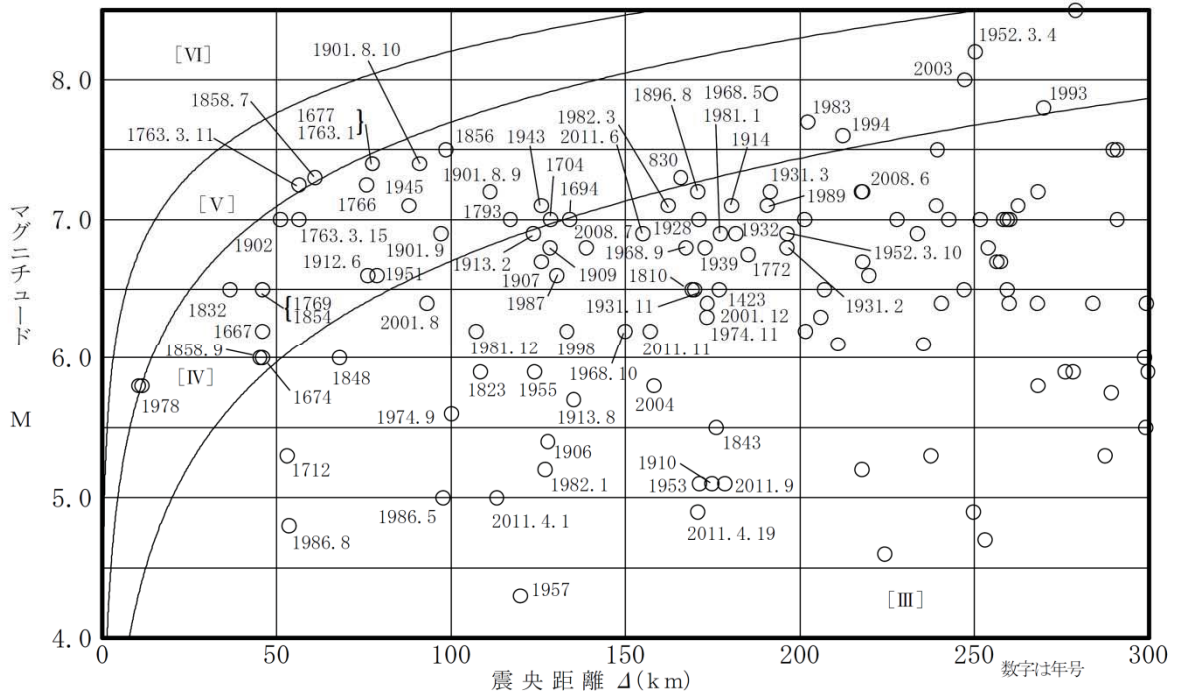
*2: 地震緒元は、1922年以前の地震については「日本被害地震総覧⁽⁵⁾」による値を、1923年以降の地震については「気象庁地震カタログ⁽⁶⁾」による値を用いている。

| 凡例 | |
|----|---------------|
| ○ | 8.0 ≤ M |
| ○ | 7.5 ≤ M < 8.0 |
| ○ | 7.0 ≤ M < 7.5 |
| ○ | 6.5 ≤ M < 7.0 |
| ○ | 6.0 ≤ M < 6.5 |
| ○ | 5.5 ≤ M < 6.0 |
| ○ | 5.0 ≤ M < 5.5 |
| ○ | M < 5.0 |

第1図 敷地周辺の被害地震の震央分布^{*1*2}

(敷地からの震央距離 200km 程度以内)

コメント No. 41 を踏まえ、
脚注を追記



第 2 図 敷地周辺の被害地震のマグニチュード-震央距離^{*1*2}

*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))。
 *2：[Ⅲ]～[Ⅵ]は気象庁震度階級で、村松(1969)⁽⁷⁾、勝又・徳永(1971)⁽⁸⁾による。
 1997年以降の気象庁震度10階級においては、[Ⅲ]が3に、[Ⅳ]が4に、[Ⅴ]が5弱及び5強に、[Ⅵ]が6弱及び6強に対応する。

(2) 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影響を評価する。

平成19年新潟県中越沖地震においては、管理値（締固め度90%以上）を設定し、埋戻し土（砂、砂質土）の締固めによる対策を実施した箇所では被災は生じていない。

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り、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。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、中越沖地震において被災をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土より相対的に液状化し難い材料であると判断される。

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ため、液状化(覆土)の影響については、考慮する必要はない。

(3) 断層活動(地盤の変形)

地震・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ことは想定できない。

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、地震・断層活動があったとしても、廃棄物埋設地には力学的影響は及ばないと想定される。

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ことは想定できないため、断層活動による廃棄物埋設地への影響については、考慮する必要はない。

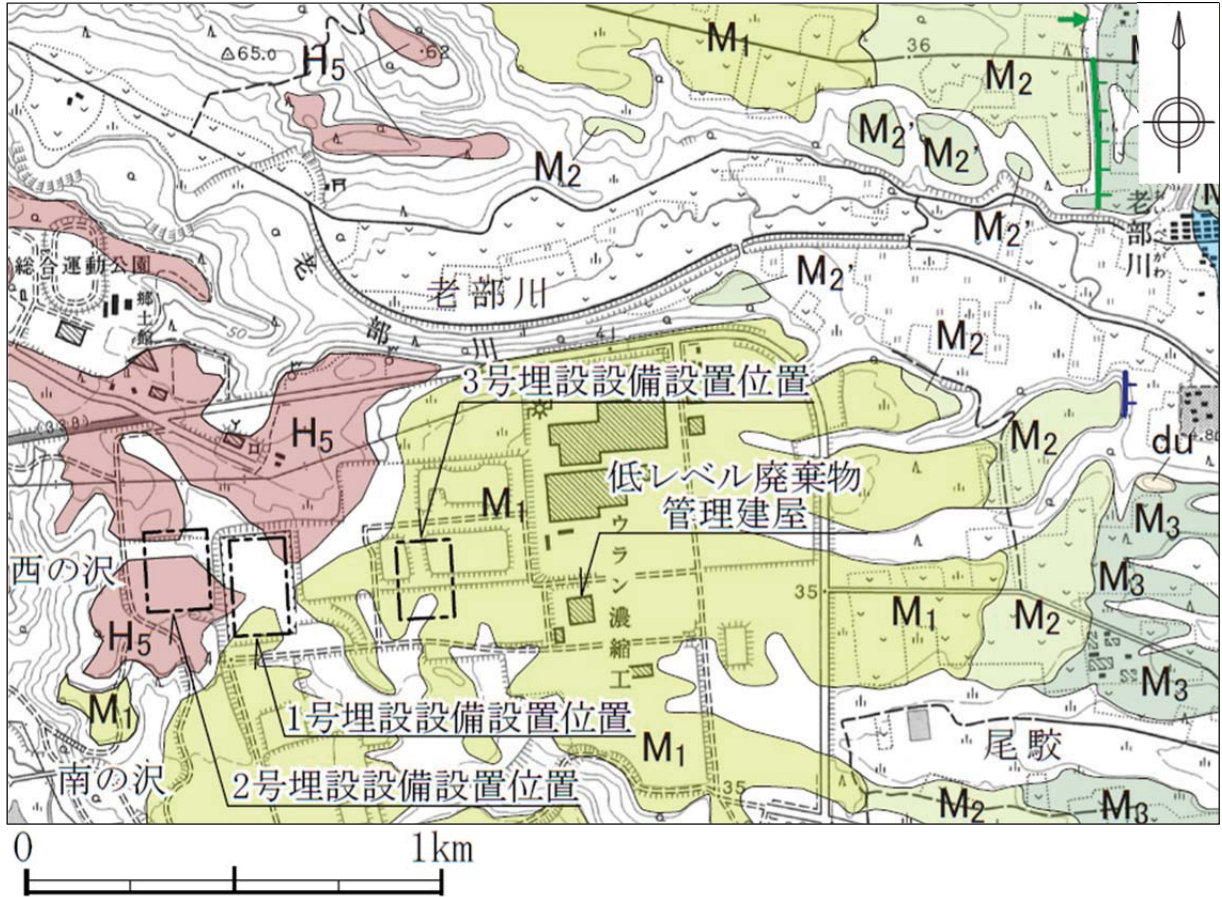
変動地形に基づいた
リニアメントの判読結果の凡例

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。
○ 短線の無いリニアメントは、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 | 高位面 |
| H ₅ | H ₅ 面 | |



第3図 敷地周辺の空中写真判読結果

3.1.3. 隆起・沈降運動

(1) 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う侵食・堆積環境の変化が想定される。侵食・堆積環境の変化により、地下水流動への影響や、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。

なお、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)⁽⁹⁾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標高等を考慮した隆起量について整理した結果を第 4 図に示す。

隆起速度は、廃棄物埋設施設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

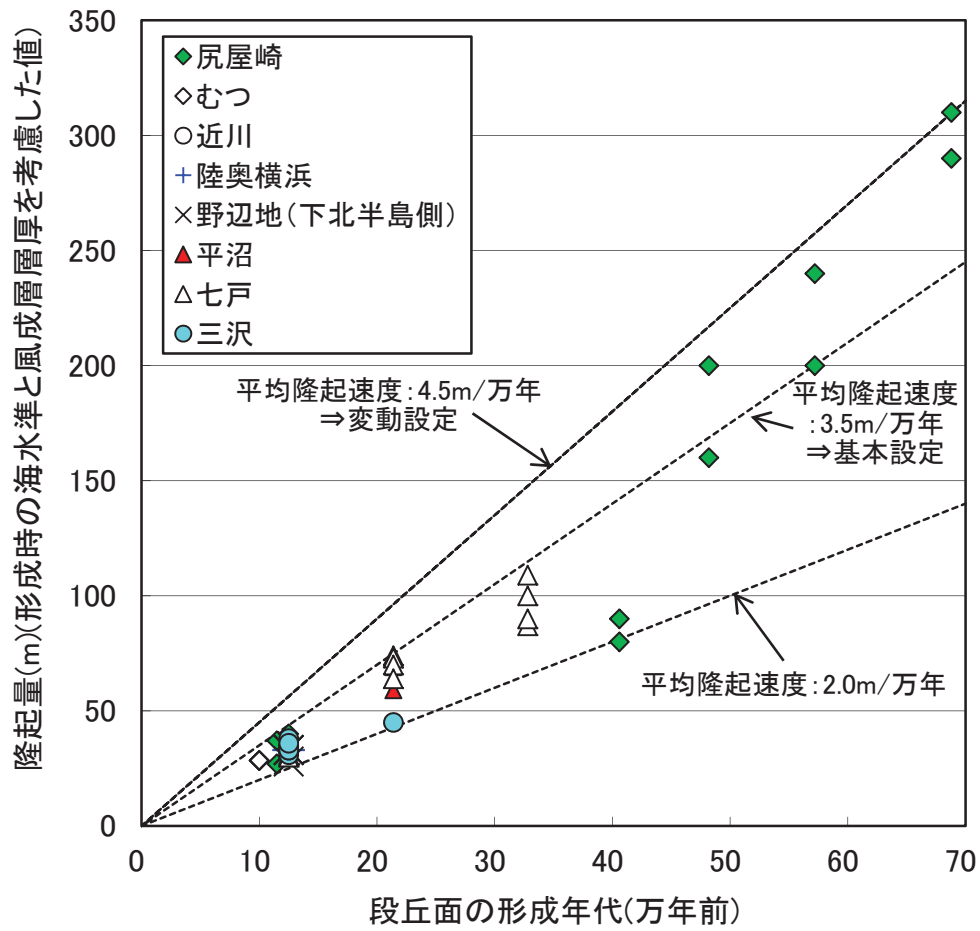
なお、下北半島周辺における海成段丘面の過去約 70 万年間の平均隆起速度は、2.0m/万年～4.5m/万年の範囲となる。

【基本設定】

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。基本設定における隆起速度は、廃棄物埋設施設付近に分布する 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。

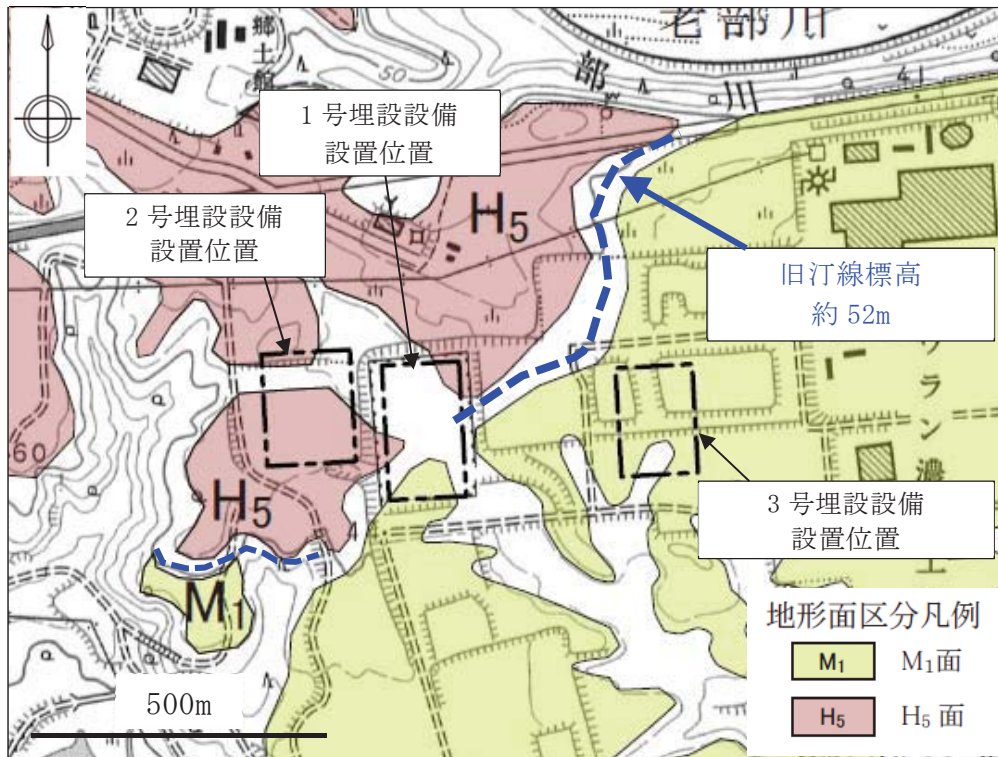
【変動設定】

変動設定においては、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、変動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)⁽⁹⁾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。

【基本設定】

廃棄物埋施設付近に分布するM1面の形成年代等から、隆起速度は3.5m/万年とする。

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

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

【変動設定】

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、最も隆起速度が速い地点を考慮し、4.5m/万年とする。

第3表 隆起速度の設定値

| ケース | 隆起速度 (m/万年) |
|------|----------------|
| 基本設定 | 3.5 |
| 変動設定 | 4.5 |

3.2. 気候変動に起因する事象

気候変動は、数 10 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⁽¹⁰⁾ことから、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。また、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、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⁾。

以上のことから、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した後、寒冷化に向かう場合(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「海水準変動」、「気温」、「降水量」、「蒸発散量」、「かん養量」、「地下水位」及び「河川流量」を長期変動事象として考慮する。

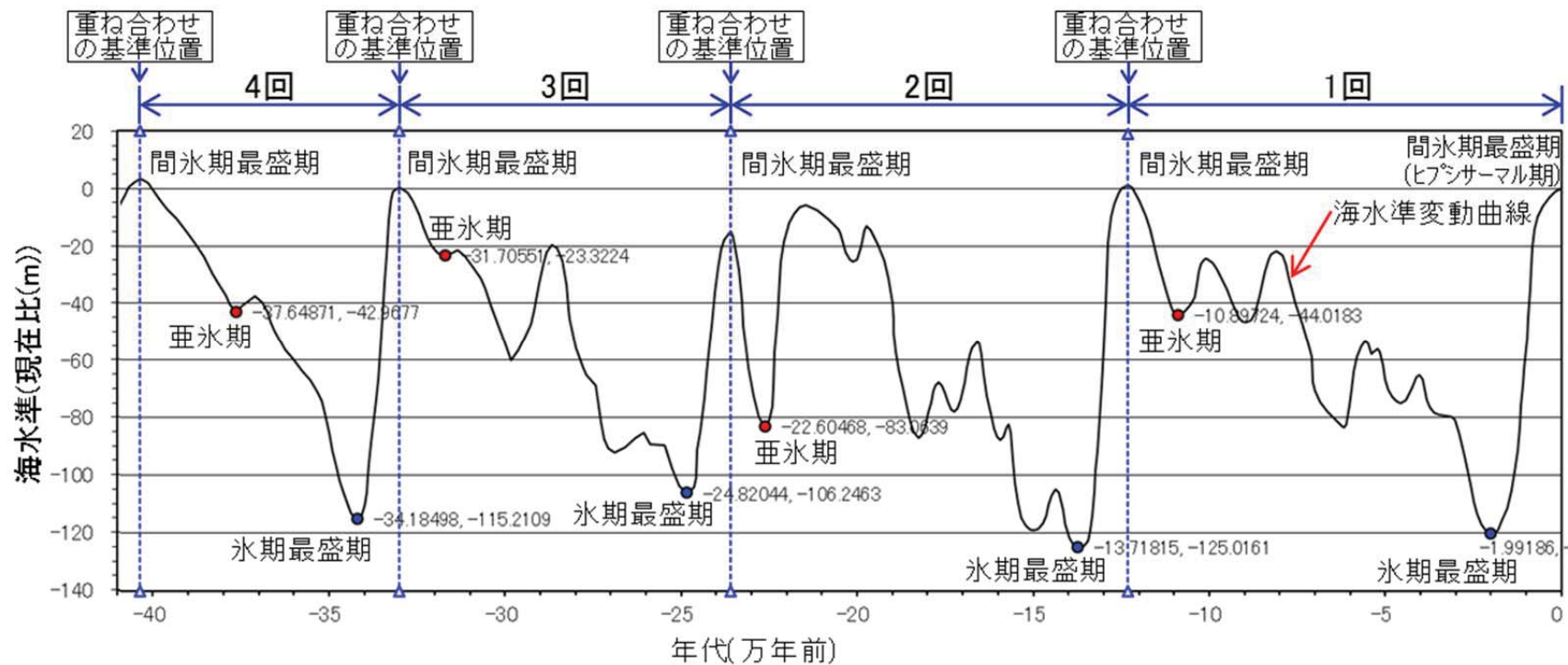
(1) 海水準変動

海水準変動は廃棄物埋設施設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。

a. 海水準変動の設定に関する考え方

過去 45 万年間の海水準変動曲線を第 6 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)⁽¹⁴⁾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⁽¹⁵⁾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6図 過去の海水準変動曲線*1

*1: Labeyrie et al. (2003) ⁽¹⁴⁾ に一部加筆

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定について第7図に示す。Labeyrie et al. (2003)⁽¹⁴⁾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。

(ii) 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。そのため、温暖期継続ケースの海水準は、IPCC(2013)⁽¹⁶⁾より、最終間氷期(およそ129,000年前～116,000年前)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を考慮して、過去の海水準の最大値を用いることとし、基本設定と変動設定は同様の値を用いるものとする。海水準が上昇する期間は、ANDRA(2005)⁽¹³⁾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。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定について第8図に示す。基本設定と同様に、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、変動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

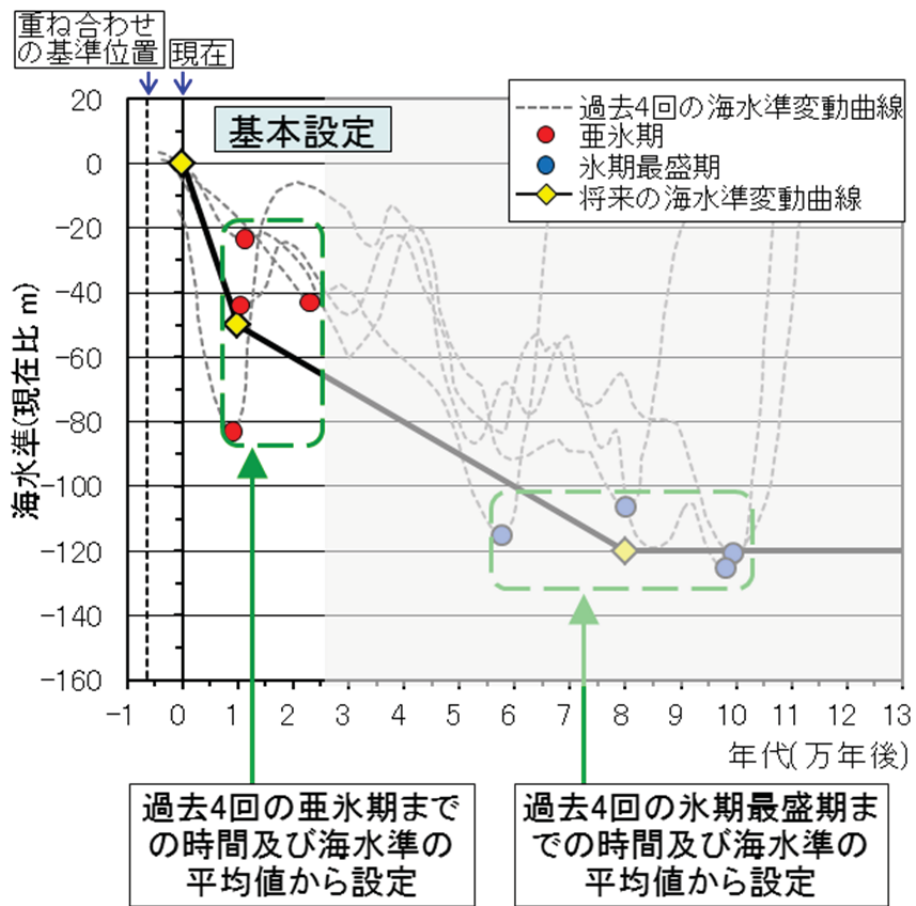
コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

最大値を結んだ直線を用いて求める。

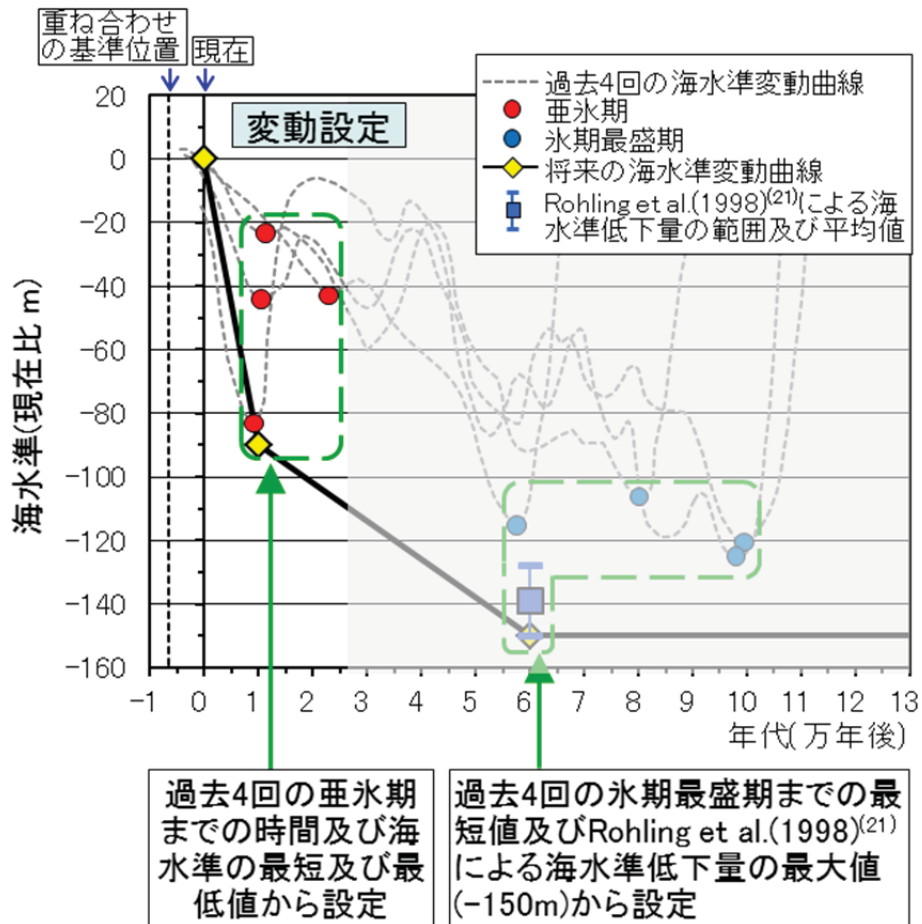
(ii) 温暖期継続ケース

基本設定において不確かさを考慮していることから、変動設定も同様の値とする。



第7図 過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定(基本設定)*¹

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al(2003)⁽¹⁴⁾ 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 8 図 過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定(変動設定)^{*1}

^{*1} : 海水準変動曲線は Labeyrie et al (2003)⁽¹⁴⁾ 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

【基本設定】

(i) 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。

(ii) 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。

【変動設定】

(i) 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。

(ii) 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、基本設定において不確かさを考慮していることから、変動設定は基本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 4 表に示す。海水準は後述する「3.3. (1) 侵食②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。

コメント No. 56 を踏まえ、
評価期間を適正化

第 4 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) |
|------|----------|--------------|------------|
| 基本設定 | 温暖期継続ケース | 現在*1~1,000年後 | 10 |
| 変動設定 | 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)

(2) 気温

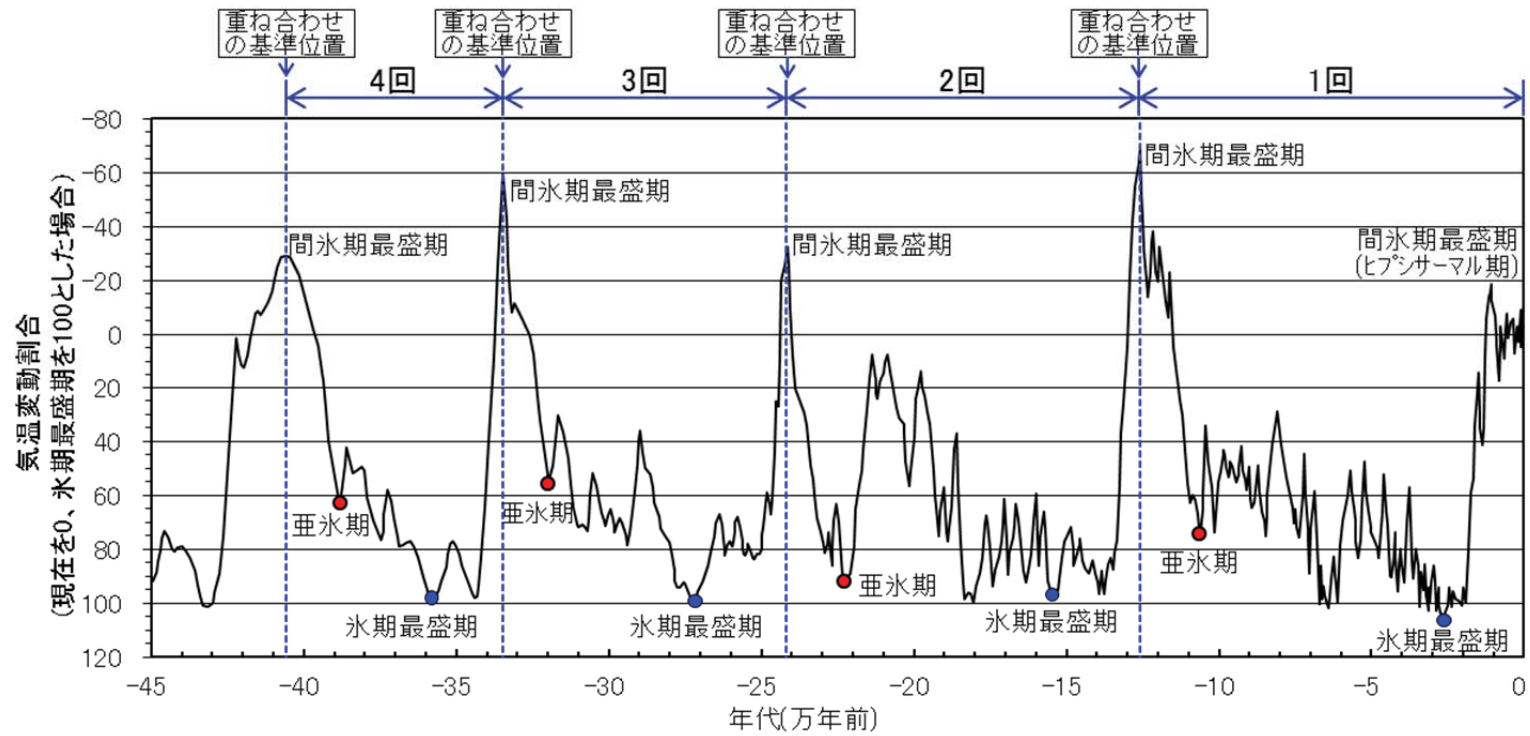
気温変化は、廃棄物埋設施設を直接損傷させることはないが、気温の変化により表層での水収支の変化に伴って、地下水流動及び表流水流動が変化することが想定されるため、気温変化を長期変動事象として考慮し、将来の気温を設定する。

a. 気温の設定に関する考え方

EPICA(2004)⁽¹⁰⁾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9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9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。

気温設定の前提として、気温は降水量と正の相関関係があり⁽¹⁷⁾、降水量は希釈水量に関連する。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。



第9図 過去の気温変動曲線*1

*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重ね合わせの基準位置とした。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

過去の気温変動曲線と将来の気温の設定について第 10 図に示す。

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)⁽¹⁸⁾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。

(ii) 温暖期継続ケース

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)⁽¹²⁾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。

【変動設定】

コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

(i) 寒冷化ケース

過去の気温変動曲線と将来の気温の設定について第 11 図に示す。

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、変動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。

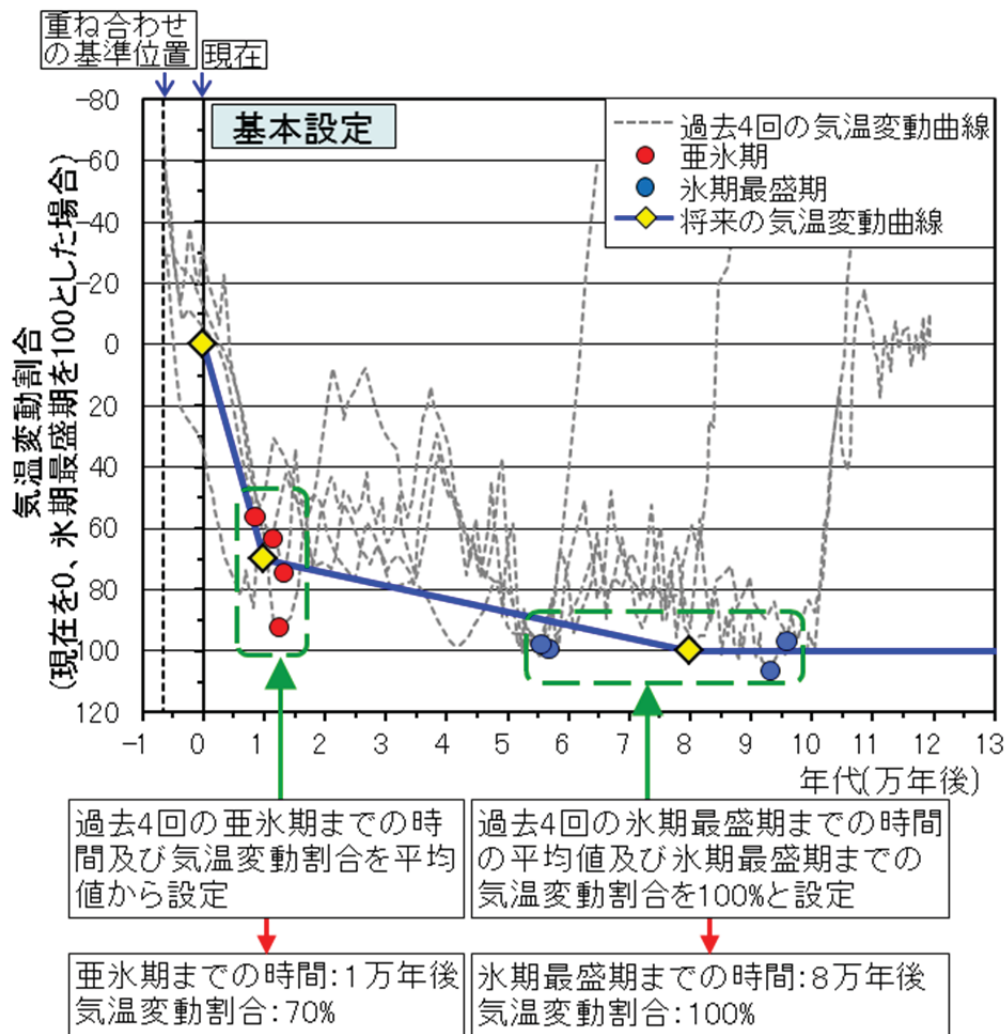
変動設定における現在の年平均気温及び将来の氷期最盛期の気温は、後述する降水量の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、変動設定には基本設定の気温を用いる。また、将来の亜氷期の気温は、気温の低下量が大きいほど保守的となるため、過去 4 回の亜氷期における気温変動割合の最大値から設定する。

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。

コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

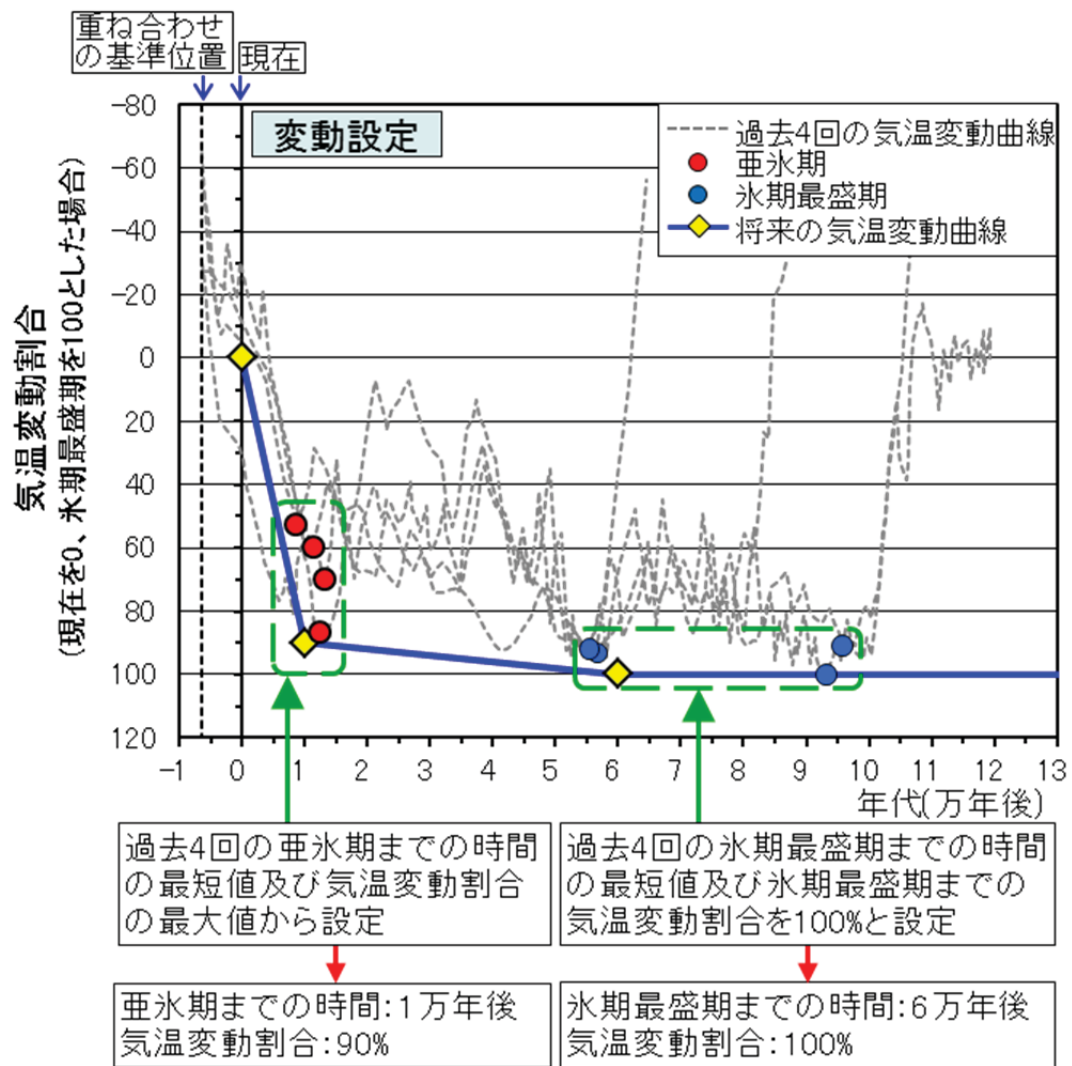
(ii) 温暖期継続ケース

気温の不確かさを考慮した変動設定は、気温と降水量の関係から、希積水量への影響を考慮して設定する。



第 10 図 過去の気温変動曲線と将来の気温の設定(基本設定)*1

*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 11 図 過去の気温変動曲線と将来の気温の設定(変動設定)*1

*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。

b. 気温変化

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

基本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)⁽¹⁹⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽²⁰⁾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 12 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。**

(ii) 温暖期継続ケース

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から、2090 年から 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⁽¹²⁾。過去 30 年間の敷地周辺の年平均気温である 9℃よりシミュレーションの平均的な上昇値である 3℃を加えた 12℃を基本設定とする。

一方、尾駱沼の沖積層堆積物から過去約 10,000 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)⁽¹⁹⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽²⁰⁾の手法により敷地周辺の間氷期最盛期の年平均気温を推定すると、それぞれ約 12.2℃と約 10.4℃であったと考えられる。この値は、花粉化石群集データより推定した 12.2℃と整合している。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

変動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、基本設定の 9℃と設定する。

将来の氷期最盛期の年平均気温は、松末ほか(2000)⁽¹⁹⁾における現在と最終氷期最盛期の

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

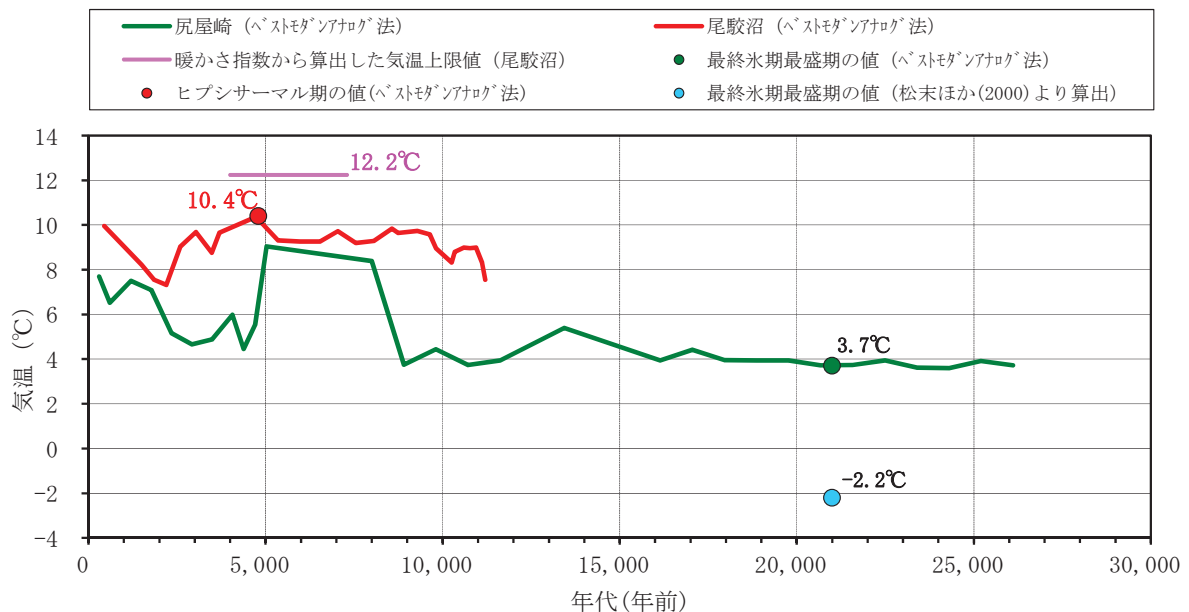
気温差の最大値から -13°C を想定し、前述した年平均最低値である 8°C から 13°C を低下させた -5°C となるが、降水量の不確かさを考慮した方が希釈水量は少なくなるため、基本設定の気温である 0°C と設定する。

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

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

(ii) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける気温は、過去約 30 年間(1975 年～2015 年)の敷地周辺の年平均気温である 9°C よりシミュレーションのほぼ最大上昇値である約 6°C を加えた 15°C 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、変動設定には基本設定の気温である 12°C と設定する。



第 12 図 花粉分析による過去 26,000 年間の気温変動

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

c. 気温の状態設定

気温の状態設定結果を第 5 表に示す。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。

第 5 表 気温の設定値

| ケース | | モデル化時期 | 気温(°C) |
|------|--------|----------|--------|
| 基本設定 | 寒冷化ケース | 現在 | 9 |
| | | 1,000 年後 | 8 |
| 変動設定 | 寒冷化ケース | 現在 | 9 |
| | | 1,000 年後 | 8 |

(3) 降水量

降水量変化は廃棄物埋設施設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。これらのことから、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

降水量変化については、現在の気温と降水量との関係に、大局的な正の相関がある⁽¹⁷⁾ことから、現在の気温と降水量との関係を基に、「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、将来の降水量を設定する。

降水量を変動させる気温以外の主な要因には、地形や海流等の気候因子が考えられる。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。

以上のことから、降水量の長期変動状態の設定については、敷地周辺と気候因子が類似する地点の気温・降水量データより、将来の降水量を想定する。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。

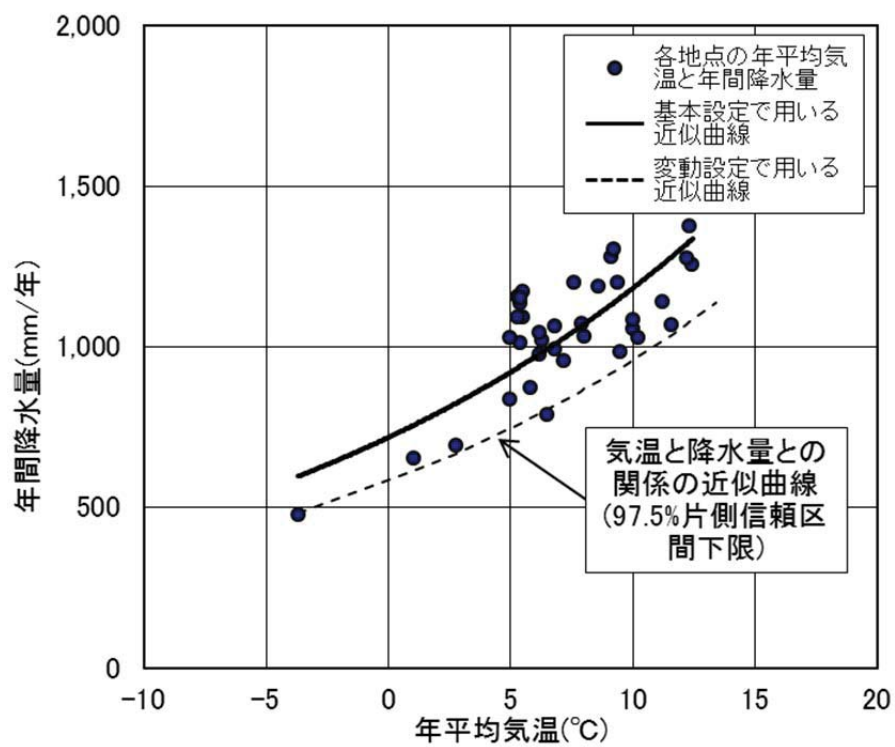
上記条件で抽出された地点のうち、過去 30 年以上の気象データの存在する 36 地点の年平均気温と年降水量との関係から、将来の気温変化に伴う降水量変化を予測する。気象データは、1981 年～2010 年の 30 年間の平年値データを使用する。平年値を用いた理由は、平年値がその時々々の気象や天候を評価する基準として利用され、その地点の気候を表す値として用いられること、局地的な短期変動が除去できるなど平均値としての安定性・均質性が考慮されているためである。36 地点の気温と降水量を第 6 表に、年平均気温と年降水量の関係を第 13 図に示す。

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関係式で設定する。

第6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/年) |
|-----|------------------------------|--------------|---------------|----------------|
| 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⁽²¹⁾⁽²²⁾を使用した。



第 13 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⁽²¹⁾⁽²²⁾を使用した。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

【基本設定】

36 地点の気温と降水量の関係は指数回帰式(第 13 図の実線近似曲線)で表されることから、基本設定においてはこの指数回帰式を用いて設定する。

【変動設定】

気温と降水量の関係のばらつきを考慮し、線量評価上、希釈水量が少なくなるように、気温と降水量の下限値の関係式(第 13 図の破線近似曲線)を用いて設定する。

b. 降水量の変化

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の降水量は、第 13 図に示す指数回帰式(実線)及び基本設定における気温の状態設定値から、1,000 年後に 1,070mm/年と設定する。

(ii) 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 13 図に示す指数回帰式(実線)及び基本設定における気温の状態設定値から、1,300mm/年と設定する。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の降水量は、第 13 図に示す指数回帰式(破線)及び変動設定における気温の状態設定値から、1,000 年後に 860mm/年と設定する。

(ii) 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 13 図に示す指数回帰式(破線)及び変動設定における気温の状態設定値から、1,050mm/年と設定する。

c. 降水量の状態設定

降水量の状態設定結果を第 7 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。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

第 7 表 降水量の設定値

| ケース | | モデル化時期 | 気温(°C) | 降水量(mm/年) |
|------|--------|----------|--------|-----------|
| 基本設定 | 寒冷化ケース | 現在 | 9 | 1,120 |
| | | 1,000 年後 | 8 | 1,070 |
| 変動設定 | 寒冷化ケース | 現在 | 9 | 910 |
| | | 1,000 年後 | 8 | 860 |

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

コメント No. 40 及び 67 を踏まえ、蒸
発散量の設定に関する考え方を整理

(4) 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

蒸発散量については、ソーンズウェイト法⁽²³⁾により、年平均気温を用いて可能蒸発散量として推定する手法がある。

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と考えられていることから、下記式で示すように敷地内の沢の流域面積に降った降水量から、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と考えられる。

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。

降水量と敷地内の表流水流量の観測結果(第 14 図) から求めた蒸発散量を、実蒸発散量とする。実蒸発散量の平均は可能蒸発散量の平均より少なく、その比率は 0.95 となった。

可能蒸発散量と実蒸発散量の関係を第 8 表に示す。

将来の蒸発散量は、「降水量」に示す敷地周辺と気候因子が類似した 36 地点の年平均気温と蒸発散量の関係式と、「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、「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、ソーンズ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)。

なお、将来の蒸発散量は、蒸発散量と年平均気温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関係式から設定する。

【基本設定】

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、基本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。

【変動設定】

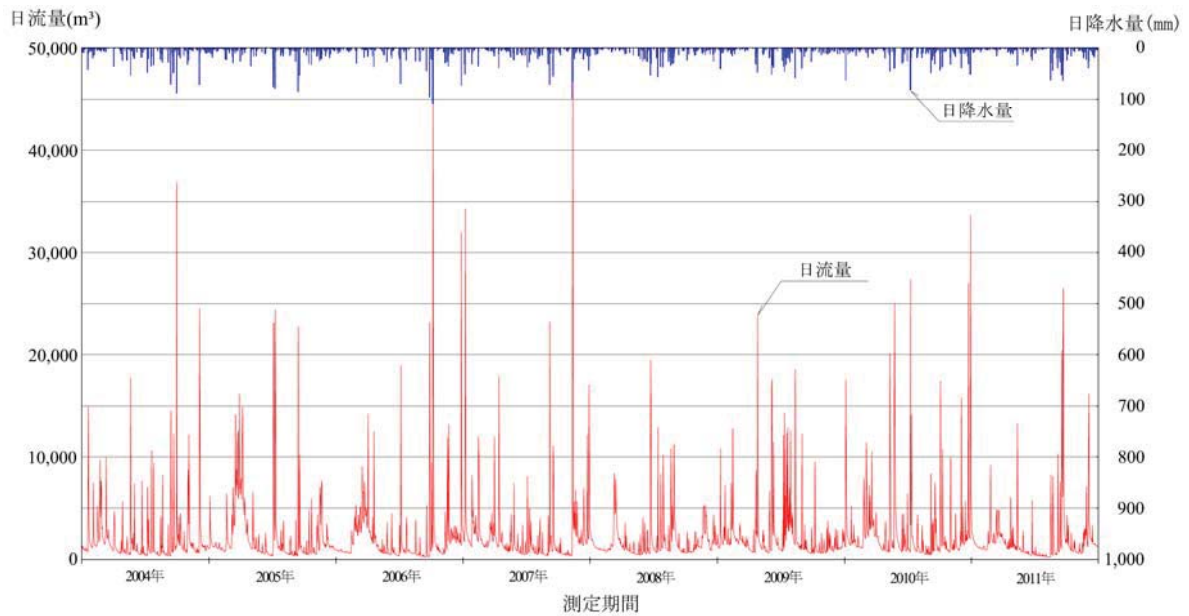
敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の蒸発散量と年平均気温の関係式から、変動設定における将来の気温の状態設定値を用いて設定する。

第 8 表 可能蒸発散量、実蒸発散量及び補正係数

| 観測年 | 年平均気温 (°C) | 年間降水量 (mm/年) | 可能蒸発散量*1 (mm/年) | 実蒸発散量*2 (mm/年) | 蒸発散量 補正係数 |
|--------|---------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------|
| 2004 年 | 10.1 | 1,546 | 640 | 762 | 1.19 |
| 2005 年 | 8.7 | 1,468 | 601 | 538 | 0.89 |
| 2006 年 | 8.9 | 1,380 | 603 | 537 | 0.89 |
| 2007 年 | 9.8 | 1,565 | 624 | 681 | 1.09 |
| 2008 年 | 9.4 | 1,198 | 620 | 492 | 0.79 |
| 2009 年 | 9.4 | 1,507 | 614 | 638 | 1.04 |
| 2010 年 | 9.8 | 1,437 | 637 | 438 | 0.69 |
| 2011 年 | 9.4 | 1,366 | 624 | 642 | 1.03 |
| 平均 | 9.4 | 1,433 | 620 | 591 | 0.95 |

*1：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。

*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 敷地内の表流水流量の観測結果(2004 年～2011 年)

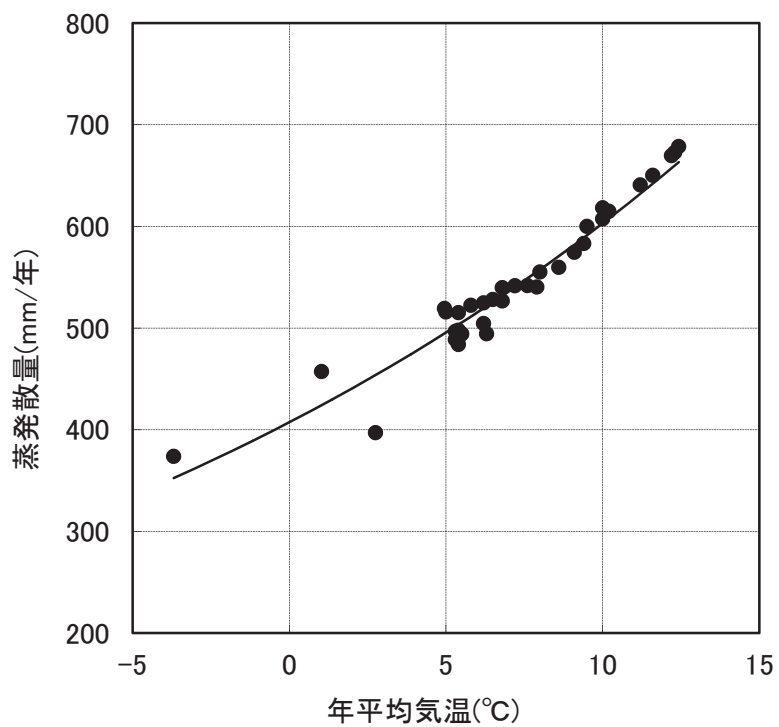
第9表 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と蒸発散量*1

| No. | 地点名 | 国/地域名 | 年平均気温 (°C) | 可能 蒸発散量*2 (mm/年) | 蒸発散量*3 (mm/年) |
|-----|-------------------------------|--------------|---------------|------------------------|------------------|
| 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⁽²¹⁾⁽²²⁾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⁽²¹⁾⁽²²⁾を使用した。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

b. 蒸発散量の変化

【基本設定】

(i) 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基本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/年と設定する。

(ii) 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基本設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、660mm/年と設定する。

【変動設定】

(i) 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変動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/年と設定する。

(ii) 温暖期継続ケース

変動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、基本設定の気温を用いていることから、蒸発散量も基本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。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

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/年) |
|----------|------------|----------|--------|----------------|
| 基本 設定 | 寒冷化 ケース | 現在 | 9 | 580 |
| | | 1,000 年後 | 8 | 560 |
| 変動 設定 | 寒冷化 ケース | 現在 | 9 | 580 |
| | | 1,000 年後 | 8 | 560 |

(5)かん養量

かん養量の変化は廃棄物埋施設を直接損傷させることはないが、かん養量が変わると廃棄物埋施設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)⁽²⁴⁾)とされていることから、以下の3つ方法から、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。

1)山本、高橋(1987)⁽²⁴⁾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/年
- ・蒸発散量・・・・・・・・650mm/年
- ・直接流出量・・・・・・・・750mm/年
- ・基底流出量・・・・・・・・400mm/年

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。

2)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/年に対して、流量観測堰の表面流出量から求めた基底流出量は138~289mm/年となる。したがって、基底流出量は降水量の11%~22%となる。

3)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)⁽²⁵⁾)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/年に対して、231~242mm/年となる。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

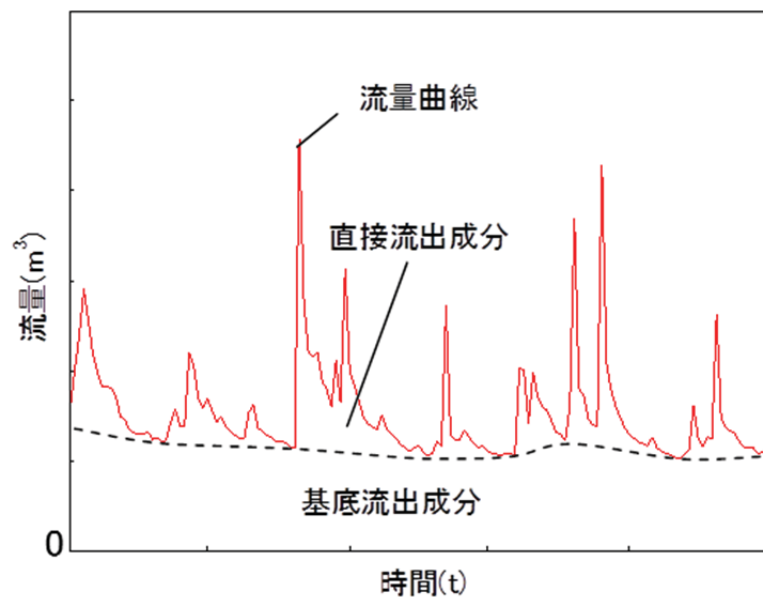
コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

設定する。

したがって、将来のかん養量は、「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、補足説明資料 7「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

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける将来のかん養量は、基本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/年と設定する。

(ii) 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、基本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/年と設定する。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける将来のかん養量は、変動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/年と設定する。

(ii) 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、変動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/年と設定する。

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、補足説明資料 7「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基本設定の値 1,300mm/年及び変動設定の値 1,050mm/年（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/年（ $=1,300 + (1,300 - 1,050)$ ）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/年（年平均降水量 1,550mm/年の 20%）と設定する。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

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/年) | かん養量 (mm/年) | 考え方 |
|----------------------------|--------|-------------|------------|---------------|----------------|--|
| 基本設定 | 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 | |
| 変動設定 | 寒冷化ケース | 現在 | 9 | 910 | 182 | 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 |
| | | 1,000 年後 | 8 | 860 | 172 | |
| 流出水量解析用パラメータ (温暖期継続ケース) | | 現在～1,000 年後 | 12 | 1,550*1 | 310 | |

*1:年平均降水量が大きい温暖期継続ケースの基本設定の値 1,300 に変動設定の値 1,050 との差分を加算(1,550mm/年=1,300+(1,300-1,050))

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記。

(6) 地下水位

地下水位は将来の地下水流動に影響する事象として選定する。地下水流動は単独事象としては廃棄物埋設施設を直接損傷させることはないが、廃棄物埋設施設周辺の地下水流動の変化によって放射性物質の希釈量が増加することが想定される。これらのことから、地下水流動の変化を長期変動事象として考慮し、廃棄物埋設地周辺の地下水の流動方向及び流出点並びに地下水流速について設定する。

なお、地下水流速は、動水勾配及び地盤の透水係数により求める。

a. 地下水の流動方向及び流出点の設定に関する考え方

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と考えられる。また、地下水面は主に第四紀層内にあり、地形と調和的な分布を呈する。降雨時及び融雪時に変動が認められるものの、大局的には地下水面の分布は変化しない。

廃棄物埋設地を通過した地下水は、廃棄物埋設地付近の動水勾配に従って主に南方に向かって流れており、中央沢を経て尾駸沼に流入する。

将来の地形変化を考慮しても大局的な地形は変わらないため、現状の地下水面等高線図から読み取れる地下水の流動方向と同様に、将来においても廃棄物埋設地を通過した地下水は廃棄物埋設地南側の中央沢を経て尾駸沼に流入するものとする。

b. 動水勾配の設定に関する考え方

現在の動水勾配は、敷地の地下水面が主に第四紀層内にあり、地形と調和的な分布を呈し、降雨時及び融雪時に変動が認められるものの、大局的には地下水面の分布は変化しないことから、敷地の地下水面等高線図により設定する。

動水勾配の算出位置図を第 17 図に、動水勾配の算出例を第 18 図に示す。将来の動水勾配は、現状の地下水面が主に第四紀層内にあり、地形と調和的であることから、1,000 年後の地形から設定する。設定箇所は、将来の地形の内、動水勾配が最も急となる箇所を設定する。

なお、埋設設備設置深度の動水勾配より将来の侵食地形を考慮した動水勾配の方が大きい場合、後者の動水勾配で設定する。

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースでは、海水準の低下に伴い、侵食基準面が低下する。侵食基準面の低下に

よる河食(以下「下刻」という。)が進むが、下流側に分布する沖積層の侵食によって平衡勾配に達した後、上流側(廃棄物埋設地付近)で隆起分だけ侵食が進む。よって、将来の動水勾配は、沖積層の浸食中はおおむね変化せず、平衡勾配に達した後は廃棄物埋設地の隆起量を考慮して設定する。隆起速度は、「隆起・沈降」によって設定した基本設定における将来の隆起速度を用いる。

(ii) 温暖期継続ケース

海水準の上昇に伴い、下流側(沖積層分布域)では下刻せず、上流域(廃棄物埋設地付近)では現在の河床勾配を保ち、隆起量分だけ侵食が進む。よって、将来の動水勾配は、廃棄物埋設地の隆起量を考慮して設定する。隆起速度は、「隆起・沈降」によって設定した基本設定における将来の隆起速度を用いる。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

基本設定と同様に、寒冷化により侵食基準面の低下により下刻が進むが、下流側に分布する沖積層の侵食によって平衡勾配に達した後、上流側(廃棄物埋設地付近)で隆起分だけ侵食が進む。よって、将来の動水勾配は、沖積層の浸食中はおおむね変化せず、平衡勾配に達した後は廃棄物埋設地の隆起量を考慮して設定する。隆起速度は、「隆起・沈降」によって設定した基本設定における将来の隆起速度を用いる。

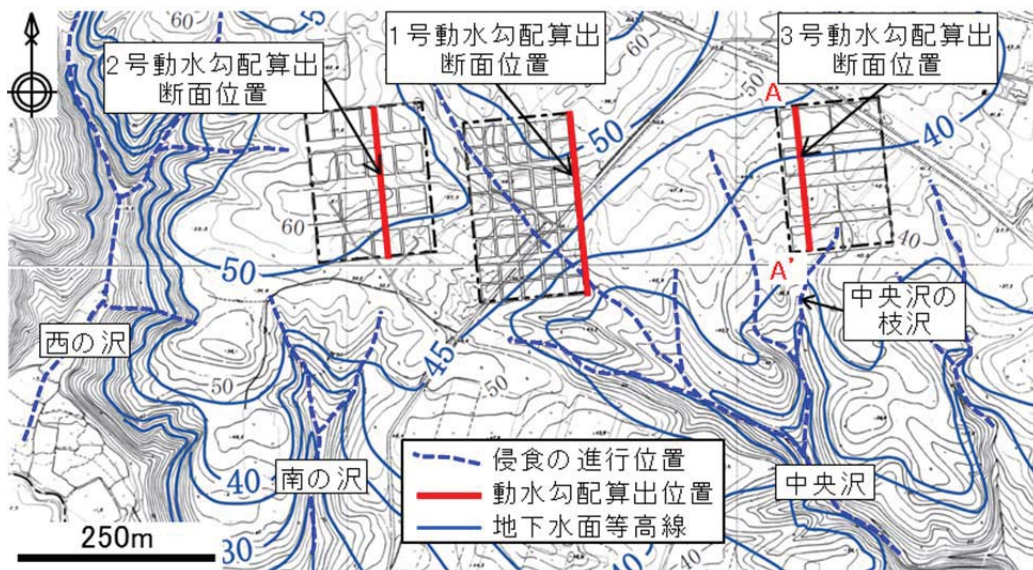
(ii) 温暖期継続ケース

基本設定と同様に、海水準の上昇に伴い、下流側(沖積層分布域)では下刻せず、上流域(廃棄物埋設地付近)では現在の河床勾配を保ち、隆起量分だけ侵食が進む。よって、将来の動水勾配は、廃棄物埋設地の隆起量を考慮して設定する。隆起速度は、「隆起・沈降」によって設定した変動設定における将来の隆起速度を用いる。

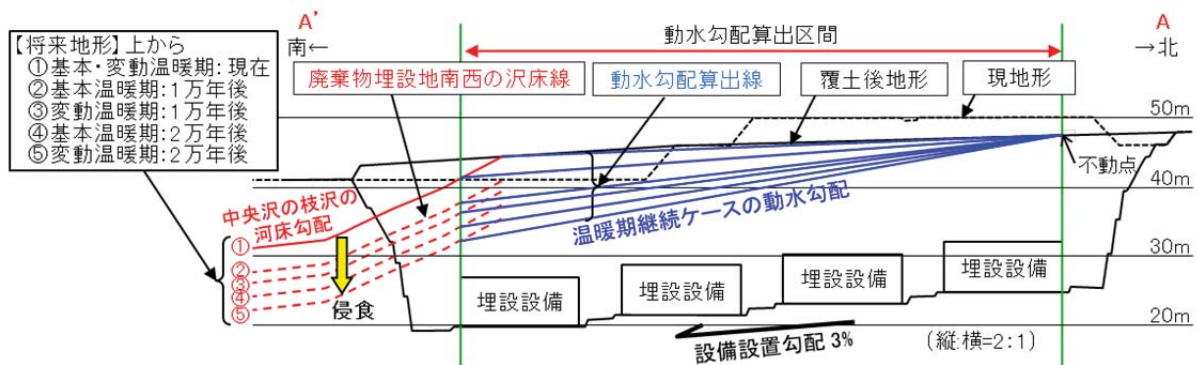
コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

c. 透水係数の設定に関する考え方

地盤の透水係数は、廃棄物埋設施設を設置する地盤の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、透水係数は基本設定と変動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。



第 17 図 動水勾配の算出位置



第 18 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。)

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記。

d. 動水勾配の変化

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースでは、上流域の下刻はほぼ進まないことを考慮し、現在から 1,000 年後までの動水勾配は 1, 2, 3 号廃棄物埋設地でいずれも 3%とする。

(ii) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースでは、現在の河床勾配を保ち隆起した分侵食するため、基本設定の侵食速度を考慮し、現在から 1,000 年後までの動水勾配は 1, 2, 3 号廃棄物埋設地でいずれも 3%とする。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースでは、上流域の下刻はほぼ進まないことを考慮し、現在から 1,000 年後までの動水勾配は 3 号廃棄物埋設地では 4%、1, 2 号廃棄物埋設地では 3%とする。

(ii) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースでは、現在の河床勾配を保ち隆起した分侵食するため、変動設定の侵食速度を考慮し、現在から 1,000 年後までの動水勾配は 3 号廃棄物埋設地では 4%、1, 2 号廃棄物埋設地では 3%とする。

e. 動水勾配の状態設定

現在から 1,000 年後までの動水勾配は寒冷化ケース及び温暖期継続ケースも大きな違いがないことから、第 12 表のように設定する。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記。

第 12 表 動水勾配の設定値

| ケース | モデル化 時期 | 動水勾配設定値 (%) | | |
|----------|------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 3 号廃棄物 埋設地 | 1 号廃棄物 埋設地 | 2 号廃棄物 埋設地 |
| 基本 設定 | 現在 | 3 | 3 | 3 |
| | 1,000 年後 | 3 | 3 | 3 |
| 変動 設定 | 現在 | 4 | 3 | 3 |
| | 1,000 年後 | 4 | 3 | 3 |

(7) 河川流量

河川流量の変化は廃棄物埋設施設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。これらのことから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。

a. 河川流量の設定に関する考え方

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)⁽²⁶⁾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/年とする。

現在の表流水流量は、現在の二又川(尾駱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/年及び蒸発散量590mm/年(水収支から算出)から、1.94×10⁷m³/年とする。

河川の水利用が二又川(尾駱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/年 ÷ 1.94×10⁷m³/年 = 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19図に示す。

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

基本設定における寒冷化ケースの将来の「降水量」及び「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駱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。

コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理

(ii) 温暖期継続ケース

基本設定における温暖期継続ケースの将来の「降水量」及び「蒸発散量」を用いる。流域面積は、現在の尾駮沼の流域⁽²⁶⁾と設定する。

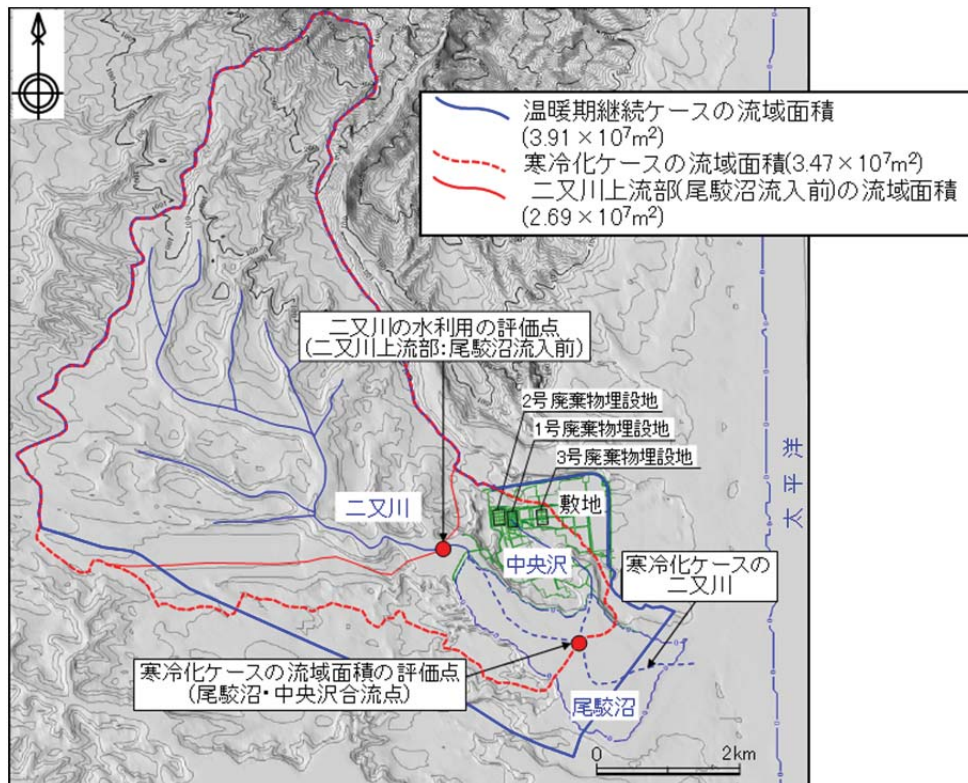
【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

変動設定における寒冷化ケースの将来の「降水量」及び「蒸発散量」を用いる。流域面積は、基本設定と同様に、二又川と中央沢の合流点より上流側の流域と設定する。

(ii) 温暖期継続ケース

変動設定における温暖期継続ケースの将来の「降水量」及び「蒸発散量」を用いる。流域面積は、基本設定と同様に、現在の尾駮沼の流域⁽²⁶⁾と設定する。



第 19 図 二又川流域の設定図

b. 河川流量の変化

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける河川流量は、基本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 $1.2 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ とする。

(ii) 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、基本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、 $1.7 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ とする。

【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける河川流量は、変動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 $7.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ とする。

(ii) 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、変動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、 $1.0 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ とする。

c. 河川流量の状態設定

河川流量の設定値を第 13 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。

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

第 13 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/年) | 蒸発散量 (mm/年) | 流域面積 (m ²) | 河川流量 (m ³ /年) |
|----------|------------|----------|------------|---------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|
| 基本 設定 | 寒冷化 ケース | 現在 | 9 | 1,120 | 580 | 3.47×10 ⁷ | 1.3×10 ⁷ |
| | | 1,000 年後 | 8 | 1,070 | 560 | | 1.2×10 ⁷ |
| 変動 設定 | 寒冷化 ケース | 現在 | 9 | 910 | 580 | 3.47×10 ⁷ | 8.0×10 ⁶ |
| | | 1,000 年後 | 8 | 860 | 560 | | 7.2×10 ⁶ |

3.3. プレート運動と気候変動の両者に起因する事象

(1) 侵食

侵食作用が継続することによって、埋設設備の地表近接及び露呈並びに廃棄物埋設地周辺の地形が変化することによる地下水位(動水勾配)の変化が想定される。これらのことから、侵食を長期変動事象として考慮し、将来の侵食速度を設定し、侵食速度を用いて埋設設備の位置及び沢の位置から露呈時期を設定する。また、隆起量を考慮した相対的な海水準を「相対海水準」とし、この相対海水準の低下によって生じる尾駁沼の河川化時期についても設定する。

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下刻を考慮する。

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く、流域ごとの沢の縦断勾配及び横断形状を保って下刻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。

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 20 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⁽²⁷⁾)。

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、最初に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。

①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 21 図に示す。寒冷化ケースの侵食では、沖積層の基底面の勾配を保ち、敷地の隆起を考慮した相対海水準の低下による下方への下刻が生じると設定する。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、鷹架層の下刻の影響は十分小さいと想定される。

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設定する。

コメント No. 58 を踏まえ、枝沢の考え方を追記

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、本流の侵食速度と同等の速度で枝沢も侵食されていくと考えられる。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、侵食速度の基本設定においては、温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度を侵食速度として設定する。温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度は、「3.2. (1)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 上昇するとしたことから、「3.1.3. (1)隆起・沈降」の隆起速度相当と設定できる。

【基本設定】

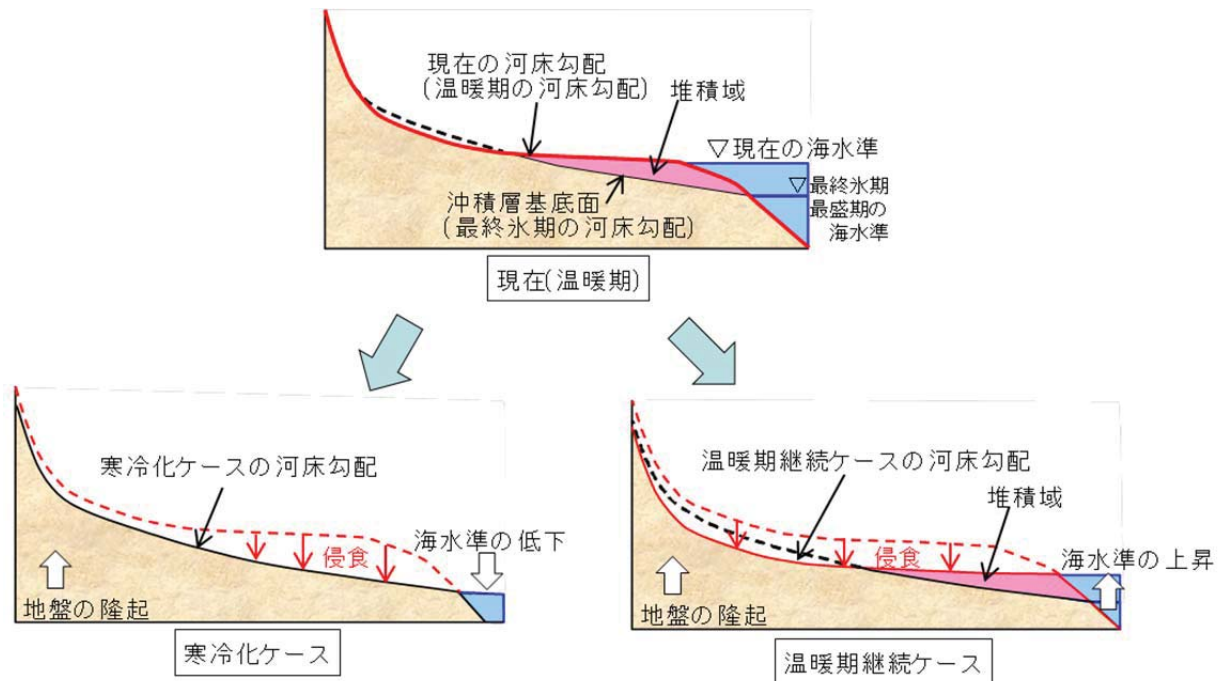
相対海水準の低下分が侵食されるため、侵食速度は基本設定における隆起速度と同等と

する。

【変動設定】

相対海水準の低下分が侵食されるため、侵食速度は変動設定における隆起速度と同等とする。

コメント No. 67 を踏まえ、
変動設定の考え方を整理



【寒冷化ケース】

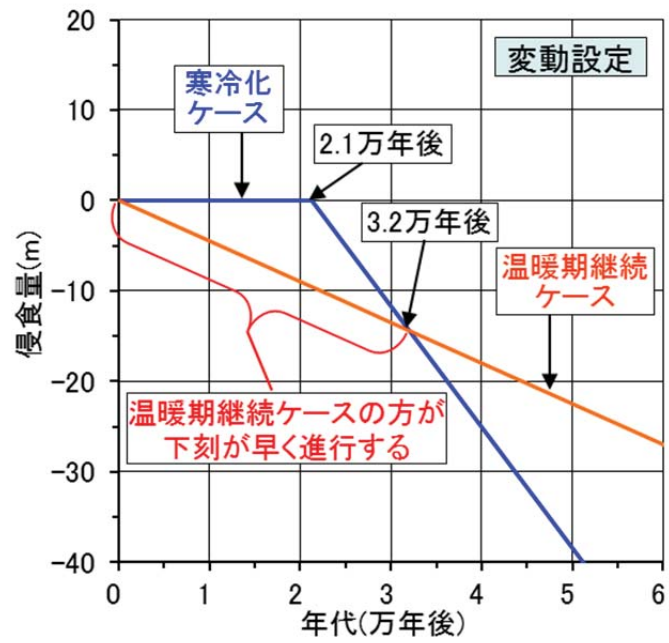
- ・降水量、河川流量の減少及び海水準が低下する。
- ・隆起するため、相対的な海水準は最終氷期最盛期よりも低下する。

⇒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 20 図 隆起域における河川侵食の概念図



第 21 図 侵食量の関係(変動設定の例)

b. 侵食速度の状態設定

侵食速度の状態設定値を第 14 表に示す。

【基本設定】

基本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。

【変動設定】

変動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 14 表 侵食速度の状態設定値

| ケース | 期間 | 侵食速度 (m/万年) |
|------|-------|----------------|
| 基本設定 | 評価期間中 | 3.5 |
| 変動設定 | | 4.5 |

②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 22 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 23 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。

コメント No. 58 を踏まえ、評価方法の妥当性を整理

【基本設定】

基本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。

【変動設定】

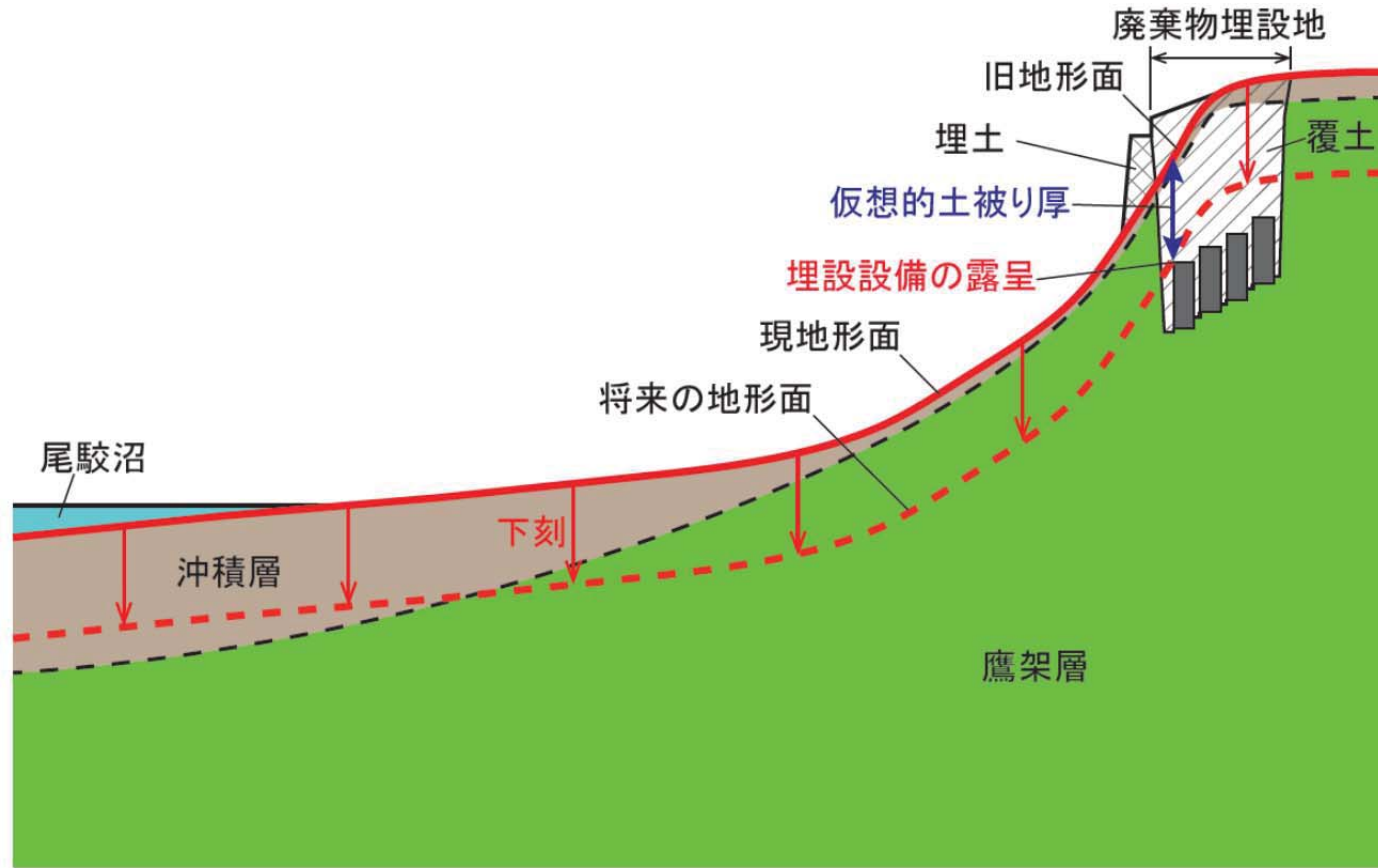
変動設定における隆起速度及び各廃棄物埋設地の仮想的土被り厚さから、埋設設備の露呈時期を求める。

コメント No. 67 を踏まえ、変動設定の考え方を整理

b. 埋設設備の露呈時期の状態設定

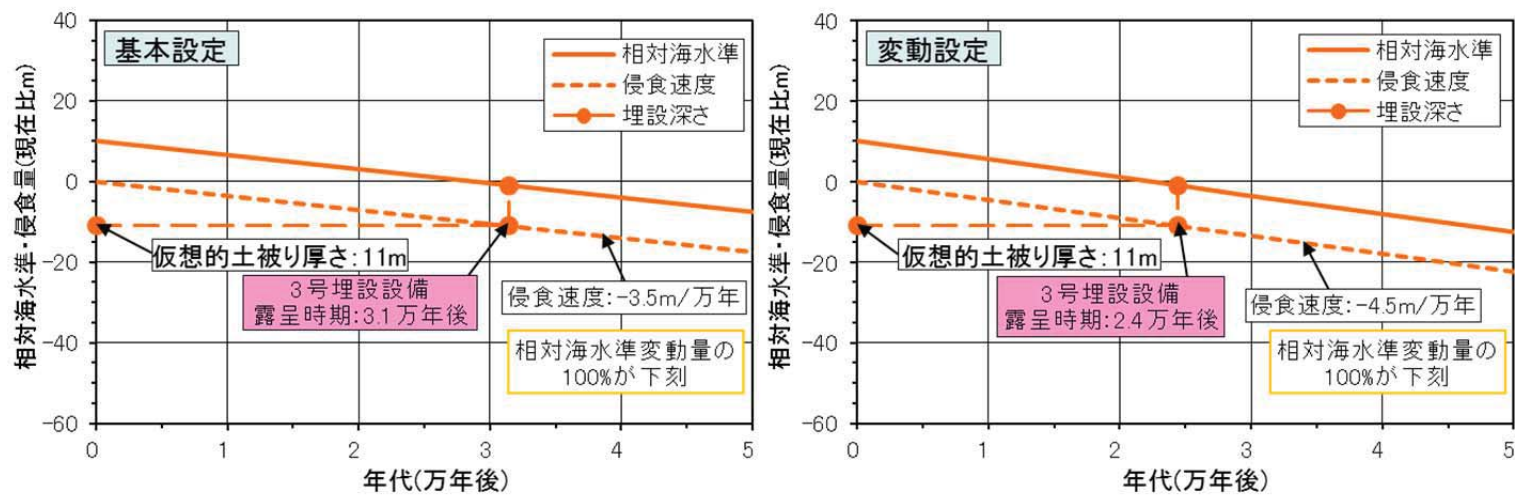
埋設設備の露呈時期を第 15 表に示す。埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後となるため、評価期間を踏まえると、埋設設備の露呈時期の状態設定については、考慮しないものとする。

コメント No. 58 を踏まえ、枝沢
の記載を追記



第 22 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 23 図 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(3号廃棄物埋設地の例)

第 15 表 埋設設備の露呈時期

| 項目 | 温暖期継続ケース | | | | | |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 基本設定 | | | 変動設定 | | |
| | 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 |

③尾駮沼の河川化時期

a. 尾駮沼の河川化時期の設定に関する考え方

将来の尾駮沼の河川化時期は、隆起量と海水準変動を組み合わせた相対海水準が尾駮沼の最深値(-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「隆起速度」及び「海水準変動」の設定値を用いる。

【基本設定】

基本設定における隆起速度及び海水準変動から、尾駮沼の河川化時期を求める。

【変動設定】

変動設定における隆起速度及び海水準変動から、尾駮沼の河川化時期を求める。

b. 尾駮沼の河川化時期の状態設定

相対海水準の低下による尾駮沼の河川化時期の関係を第 24 図に、尾駮沼の河川化時期の状態設定値を第 16 表に示す。

【基本設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける尾駮沼の河川化時期は、基本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。

(ii) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける尾駮沼の河川化時期は、基本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。**

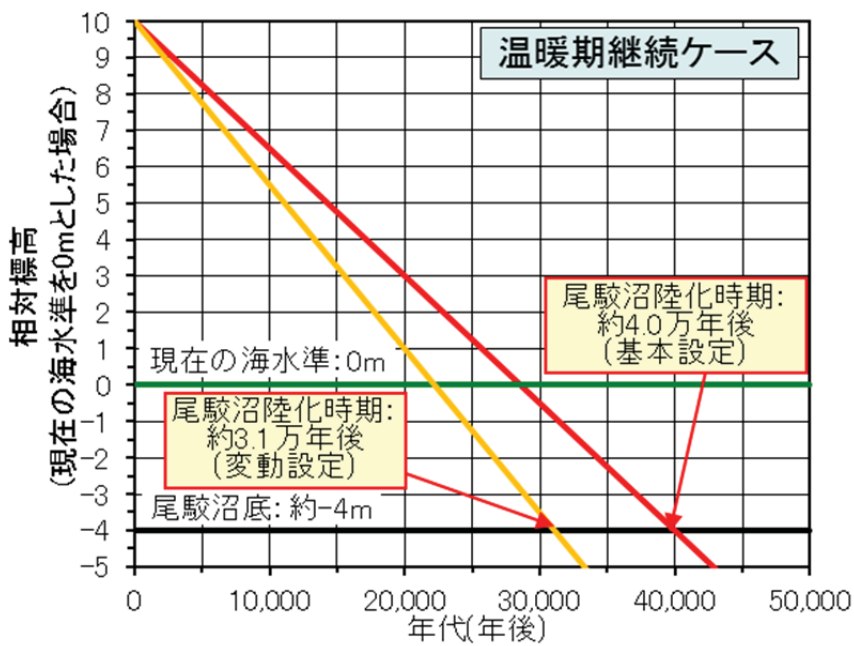
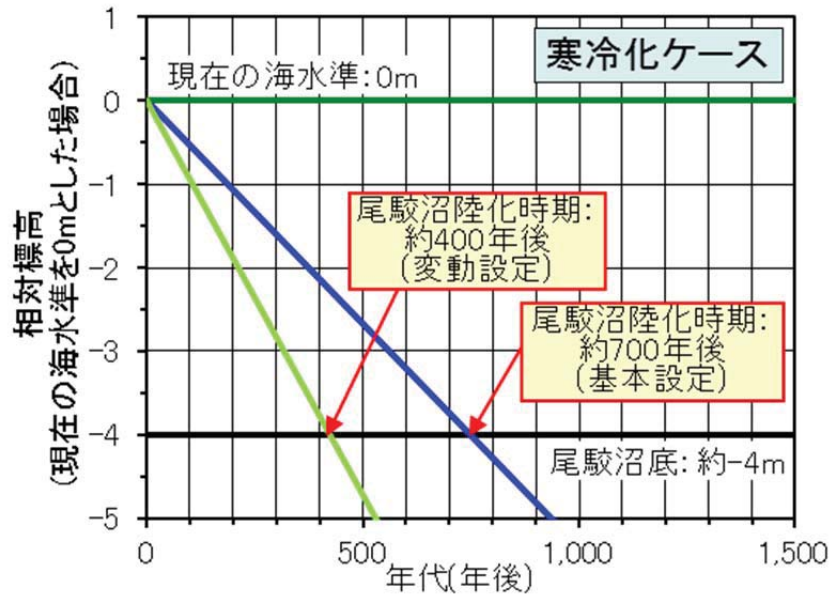
【変動設定】

(i) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける尾駮沼の河川化時期は、変動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。

(ii) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける尾駮沼の河川化時期は、基本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 24 図 相対海水準の低下による尾駮沼の河川化時期*1

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

第 16 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 | 基本設定 | 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。 |
| | 変動設定 | 約 400 年後 | |

3.4. その他の事象

(1) 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⁽²⁸⁾、樹木の根の影響範囲に包含される。

以上のことから、埋設設備は十分な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。

(2) 透水性の変化

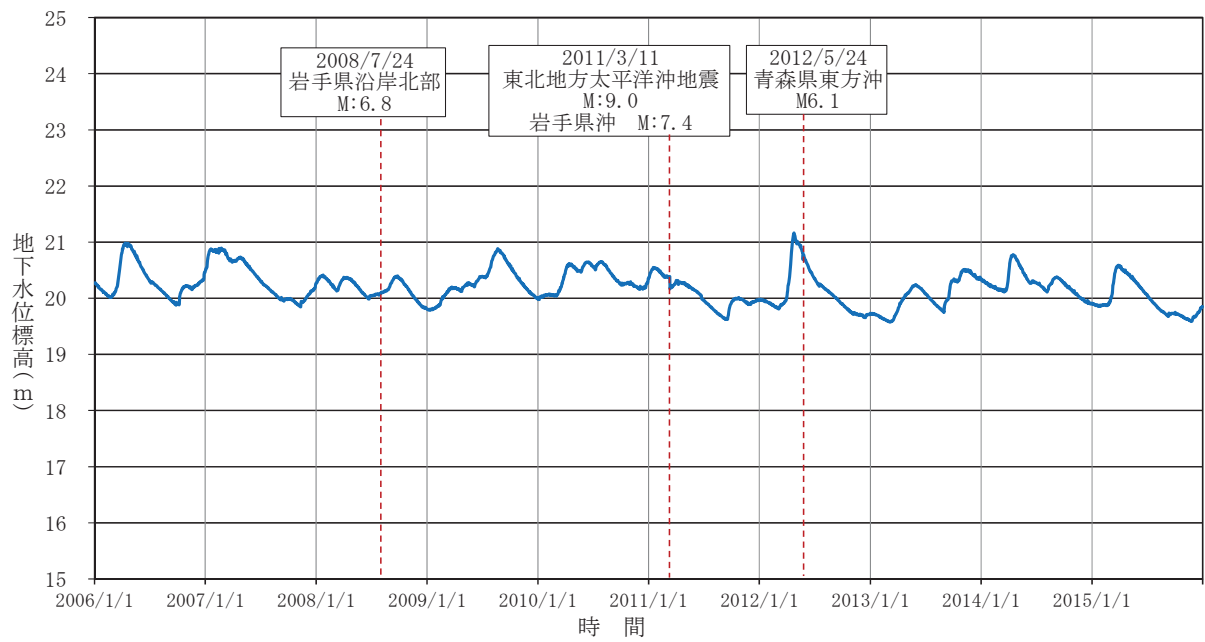
岩盤の透水性は、以下の点から大きく変化しないと判断し、長期変動事象として考慮しない。

①断層

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への破碎は発生しない。

②地震

敷地内における地下水観測結果を第 25 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ないと判断する。



第 25 図 地下水位観測結果(F0-20 孔)

4. まとめ

許可基準規則第九条第二号に規定する廃止措置開始以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17表に示す。

コメント No. 56 を踏まえ
1,000 年後の設定を追記

第 17 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 | 基本 | 変動 | 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。 | | 3.1.1 火山・火成活動 (1)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。 | | 3.1.1 火山・火成活動 (2)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。 | | 3.1.2 地震・断層活動 (1)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。 | | 3.1.2 地震・断層活動 (2)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。 | | 3.1.2 地震・断層活動 (3)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 | 3.1.3 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 (1)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 (2)気温 |
| | 降水量 | 寒冷化ケース 現在：1,120mm/年 1,000 年後：1,070mm/年 | 寒冷化ケース 現在：910mm/年 1,000 年後：860mm/年 | | 3.2. 気候変動に起因する事象 (3)降水量 |
| | 蒸発散量 | 寒冷化ケース 現在：580mm/年 1,000 年後：560mm/年 | 寒冷化ケース 現在：580mm/年 1,000 年後：560mm/年 | | 3.2. 気候変動に起因する事象 (4)蒸発散量 |
| | かん養量 | 寒冷化ケース 現在：224mm/年 1,000 年後：214mm/年 | 寒冷化ケース 現在：182mm/年 1,000 年後：172mm/年 | | 3.2. 気候変動に起因する事象 (5)かん養量 |
| 温暖期継続ケース 現在～1,000 年後：310mm/年 | | | | | |

コメント No. 56 を踏まえ、
1,000 年後の設定を追記

第 17 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 | 基本 | 変動 | 根拠記載箇所 |
|-------------|--------|---|---|----|----------------------------------|
| 気候変動 | 地下水位 | 動水勾配 | | | 3.2. 気候変動に起因する事象 (6) 地下水位 |
| | | 温暖期継続ケース 3号 現在：3%、1,000年後：3% 1号 現在：3%、1,000年後：3% 2号 現在：3%、1,000年後：3% | 温暖期継続ケース 3号 現在：4%、1,000年後：4% 1号 現在：3%、1,000年後：3% 2号 現在：3%、1,000年後：3% | | |
| プレート運動と気候変動 | 河川流量 | 寒冷化ケース | | | 3.2. 気候変動に起因する事象 (7) 河川流量 |
| | | 現在： 1.3×10^7 m ³ /年 1,000年後： 1.2×10^7 m ³ /年 | 現在： 8.0×10^6 m ³ /年 1,000年後： 7.2×10^6 m ³ /年 | | |
| 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 (1) 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。 | | | |
| 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 (1) 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 (2) 透水性の変化 |

参考文献：

- (1) 土木学会(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、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. 6、372p
- (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、Vol. 44、No. 4、pp. 195-216
- (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、116p
- (5) 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
- (6) 気象庁(1951~2011)：「地震年報」等・・・「気象庁地震カタログ」
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- (7) 村松郁栄(1969)：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
- (8) 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
- (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、CD-ROM 日本 I [北海道・東北]
- (10) EPICA community members(2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, NATURE, Vol. 429, pp. 623-628
- (11) 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, pp. 190-194
- (12) IPCC(2007)：Climate Change 2007: SYNTHESIS REPORT, A Report of the Intergovernmental Panel Climate Change
- (13) ANDRA(2005) Phenomenological evolution of a geological repository, 525p
- (14) 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
- (15) 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
- (16) 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)
- (17) 登坂博行(2006)地圏の水環境科学、東京大学出版会、pp.12-13、364p
- (18) 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
- (19) 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、 pp.93-103
- (20) 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
- (21) 気象庁(1981～2010)：過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (22) 気象庁(1981～2010)：世界の地点別年平均値、
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>
- (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) 山本荘毅、高橋裕(1987)：図説水文学(水文学講座)、共立出版、pp.62、221p
- (25) 菅原正巳(1972)：流出解析法(水文学講座7)、共立出版、257p
- (26) 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
- (27) 貝塚爽平(1977)：日本の地形 —特質と由来—、岩波書店、234p
- (28) 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

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

第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等
(廃止措置開始以後の評価)

生活環境の状態設定

2019年11月27日

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. 検討方法 | 1 |
| 4. 生活環境に関する設定 | 2 |
| (1) 自然環境の状態に関する設定 | 2 |
| (2) 人間の生活様式の状態に関する設定 | 4 |
| 5. 放射性物質が移行する範囲 | 4 |
| 6. 被ばく経路 | 5 |
| (1) 水利用に伴う被ばく経路 | 5 |
| (2) 土地利用に伴う被ばく経路 | 7 |
| 7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人) | 13 |
| 8. まとめ | 16 |
| 9. 参考文献 | 17 |



：補正に伴い変更する箇所（コメント対応含む）



：上記以外の審査会合コメント反映箇所

緑字

：第 298 回審査会合(2019/8/26)までに自主的に変更した箇所

赤字

：第 298 回審査会合(2019/8/26)からの変更箇所

桃色字

：第 306 回審査会合(2019/10/16)からの変更箇所

1. はじめに

本資料は、資料 1-2-1「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 第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等(廃止措置開始以後の評価)」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、廃止措置開始以後の将来の敷地及びその周辺の生活環境の状態を設定し、そ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及び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、人間を含む生物が生息する領域(生物圏)のうち、評価対象地点周辺で一般的な水の利用と土地の利用が想定される範囲及びその状況を意味する。

3. 検討方法

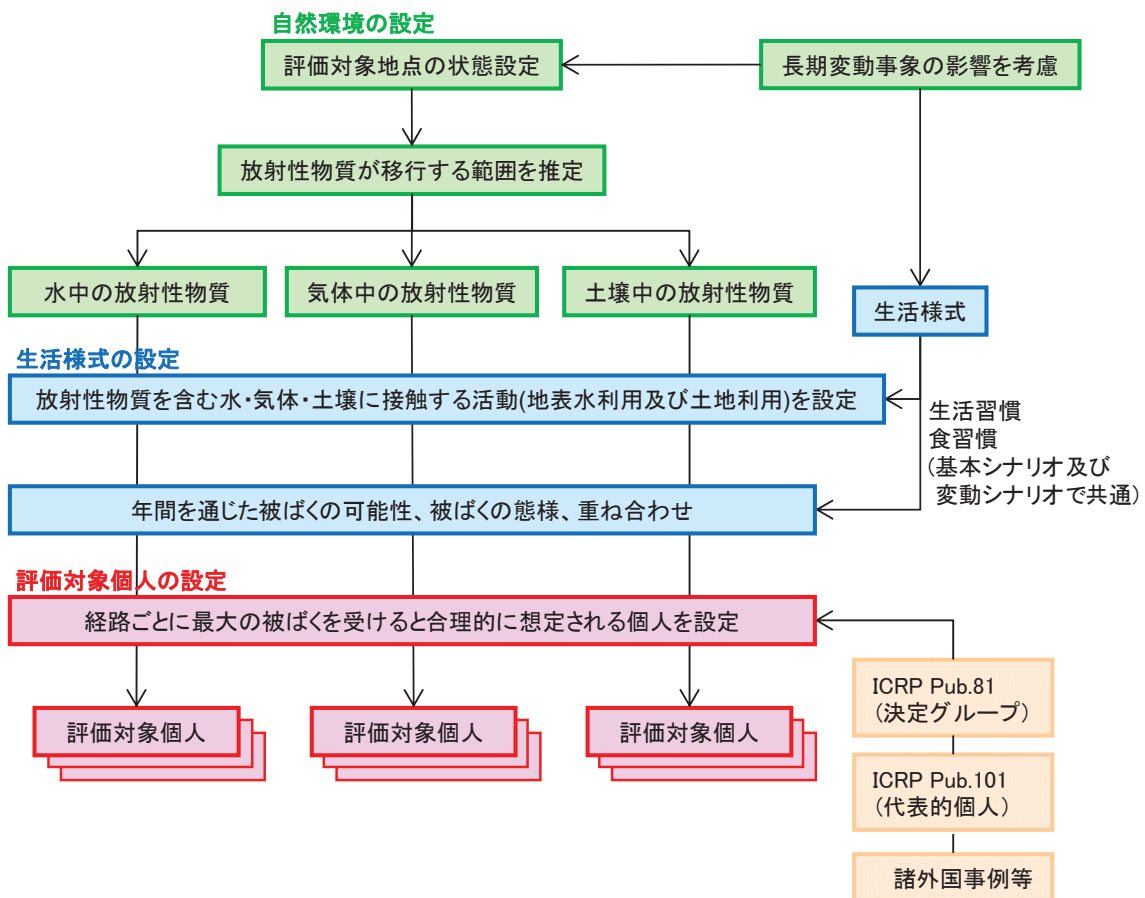
廃止措置開始以後の将来の敷地及びその周辺で活動する人間の生活環境は、自然環境の変化による影響を受けることが考えられるため、その前提として気温・降水量及び地形の状態変化を考慮する(気温・降水量及び地形の状態変化の詳細については、補足説明資料 1「地質環境に係る長期変動事象」を参照。)

生活環境の構成要素のうち廃止措置開始以後の将来の人間の生活様式(ある集団が共有する生活習慣、食習慣及び人間活動)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。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(基本シナリオ(確からしいシナリオ)及び変動シナリオ(厳しいシナリオ)で共通。)。基本シナリオ及び変動シナリオ(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。さらに、変動シナリオ(厳しいシナリオ)で考慮する人間活動は、基本シナリオ(確からしいシナリオ)で考慮する人間活動に加えて不確実性の高いものも考慮する。また、これらの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、基本・変動以外のシナリオ(人為事象シナリオ)で考慮する。また、放射性物質としての特性に着目して廃棄物を利用する形態や意図的な行為は含めない。ただし、生活習慣及び食習慣については、基本シナリオ及び変動シナリオ(自然事象シナリオ)と共通とする。

上記のとおり設定した自然環境及び生活様式に基づき、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. 生活環境に関する設定

(1) 自然環境の状態に関する設定

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自然環境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選定する。

現在から廃止措置開始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。廃棄物埋設地に起因した放射性物質を含む地下水のほぼ全てが敷地内の沢を經由し汽水性である尾駁沼に流入する。しかし、廃止措置開始以後の将来の敷地周辺の気候変動、海水準変動及び隆起・侵食による地表の状態変化を考慮すると、尾駁沼が河川化し、漁獲される水産物の種類が変化するとともに、漁獲量が減少することが考えられる。

また、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。

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自然環境の変化

| 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自然環境の変化を表中に赤枠で示す。

(2) 人間の生活様式の状態に関する設定

「4. (1) 自然環境の状態に関する設定」に示す自然環境の変化及び過去から現在の事業所周辺の社会環境の状態を踏まえ、廃止措置開始以後の評価にて用いる生活様式を「6. 被ばく経路」に示すとおり設定する。

5. 放射性物質が移行する範囲

現在から廃止措置開始以後の将来にかけての評価対象地点の自然環境や状態について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、

廃棄物埋設施設から、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、土壌に収着したものはやがて侵食作用によって土壌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場合がある。例えば、農業利用として河川水を灌漑したり、汚染された土壌を掘り返したりする行為などがこれに該当する。

6. 被ばく経路

(1) 水利用に伴う被ばく経路

廃棄物埋設地(近傍を含む。)における水利用に伴う被ばく経路の設定に当たっては、廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が覆土及び岩盤を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、その利用に伴う活動を考慮する。

廃棄物埋設地を通過する地下水は、敷地中央部の沢を経て尾駱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可能性は極めて小さい。また、**地下水の流入する**尾駱沼は汽水性の沼であるため、この水を生活用水等に利用する可能性も極めて小さい。

廃棄物埋設地及びその付近の地下水は第四紀層及び鷹架層を流れており、専ら降水によってかん養されている。地下水利用については、**廃棄物埋設地に**深井戸を設置しても鷹架層(透水係数： $5.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ (3号)、 $1.1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ (1号)、 $7.8 \times 10^{-8} \text{m/s}$ (2号))の透水性が大きくないことから、大量の水を得ることはできない。しかし、**浅井戸を設置する場合では、**第四紀層(透水係数： $2.6 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (3号)、 $4.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (1号)、 $5.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (2号))の透水性が比較的大きいことから、水を得ることができると考えられる(資料 1-2-1「第3表 透水試験結果」を参照。)

なお、敷地外の深井戸から大量の水を得ている例があるが、これはその地質・水理的特性によるものであり、富ノ沢及び尾駱集落では両地域に存在する透水性の比較的大きい鷹架層中部層の礫混り砂岩から主に集水している。これに対して、廃棄物埋設地周辺では、透水性が比較的小さい砂質軽石凝灰岩及び砂岩が主に分布しており、また、地質・地下水調査結果から、富ノ沢及び尾駱集落での深井戸の集水地層(礫混り砂岩)と同等の地層が地表面下百数十mまでは存在しないことを確認している。

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を水源とする水道の普及

率がほぼ 100%⁽⁵⁾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。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、また敷地中央部の沢の下流部では稲作が行われていたことを考慮する。

一方、廃止措置開始以後の将来の地形変化を考慮すると、尾駁沼が河川化し、汽水性の沼から淡水に変化することが考えられる。この場合、尾駁沼が現在の廃棄物埋設地からの影響を受けた地表水は淡水であり、豊富な水量となるため、これを生活用水等に利用する可能性がある。

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地下水や沢水を生活用水や畜産用水に利用することは考えられないが、尾駁沼が覆土完了直後から河川化すること及び沢水が利用されることを想定し、生活用水等に利用することに伴う被ばく経路として沢水の飲用、尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取、沢水を利用して生産される農畜産物の摂取及び灌漑作業を想定する。ただし、水産物の摂取において、河川化に伴う資源量(漁獲量)の長期的な減少により、水産物の摂取量のうち放射性物質で汚染された水産物の割合が減少することについては評価に含まない。

なお、廃棄物埋設地における岩盤中から取水する深井戸の利用による被ばくは生じ得ないが、浅井戸の利用の可能性は極めて小さく、一般的に生じるとは考えられないため、浅井戸の利用については変動シナリオ(厳しいシナリオ)において考慮することとし、基本シナリオ(確からしいシナリオ)において考慮していた沢水の飲用を井戸水の飲用に置き換えて評価を行う(線量の比較において、沢水の飲用よりも井戸水の飲用の方が線量が高くなるため)。

水利用に伴う被ばく経路として考慮する人間活動は以下のとおりである。

(i) 基本シナリオ(確からしいシナリオ)

- a. 沢水の飲用
- b. 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取
- c. 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取
- d. 沢水を利用して生産される畜産物の摂取
- e. 沢水を利用する灌漑作業

(ii) 変動シナリオ(厳しいシナリオ)

- f. 井戸水の飲用
- g. 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取
- h. 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取
- i. 沢水を利用して生産される畜産物の摂取
- j. 沢水を利用する灌漑作業

(2) 土地利用に伴う被ばく経路

廃棄物埋設地(近傍を含む。)における土地利用に伴う被ばく経路の設定に当たっては、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壤に移行し、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、その利用に伴う活動を考慮する。

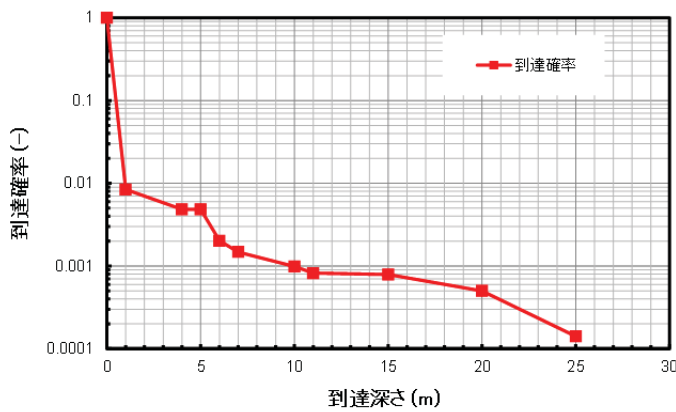
地下の掘削を伴う土地利用のひとつに構造物の建設がある。廃棄物埋設地は市街化区域の用途地域のうち工業専用地域に位置し、工業地域、準工業地域、商業地域、中高層住居専用地域及び低層住居専用地域に隣接しているため、工場及び住宅の建設等に利用される可能性がある。しかしながら、第2図に示す六ヶ所村における到達深さに対する到達確率(面積利用率)より、現状の六ヶ所村では地下数階を有するような大規模な構造物はほとんどみられず、面積利用率では10m以深の掘削を行う頻度は1%未満である。ここでいう到達確率(面積利用率)とは、六ヶ所村で確認される建物区分について、それぞれに仮定した平均深度ごとの施設面積が可住地面積に占める割合を求めたものである。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、敷地及びその周辺の社会環境を考慮しても、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、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残土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⁽⁶⁾⁽⁷⁾

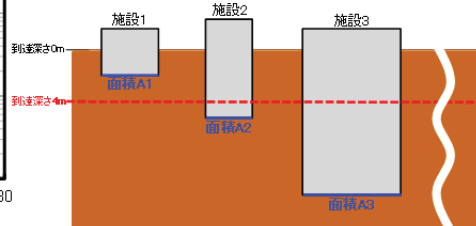
| 到達深さ(m) | 施設面積(m ²) ^{*1} | 番号 | 到達確率 ^{*2} | 計算式 |
|------------------|-------------------------------------|----|--------------------|---|
| 0 | 112,159,411 | ① | 1.00E+00 | $\Sigma(\text{①} \sim \text{①}) / \text{①}$ |
| 1 | 403,213 | ② | 8.40E-08 | $\Sigma(\text{②} \sim \text{①}) / \text{②}$ |
| 4 | 1,011 | ③ | 4.84E-08 | $\Sigma(\text{③} \sim \text{①}) / \text{③}$ |
| 5 | 317,525 | ④ | 4.83E-08 | $\Sigma(\text{④} \sim \text{①}) / \text{④}$ |
| 6 | 61,885 | ⑤ | 2.02E-08 | $\Sigma(\text{⑤} \sim \text{①}) / \text{⑤}$ |
| 7 | 55,186 | ⑥ | 1.48E-08 | $\Sigma(\text{⑥} \sim \text{①}) / \text{⑥}$ |
| 10 | 18,936 | ⑦ | 9.88E-04 | $\Sigma(\text{⑦} \sim \text{①}) / \text{⑦}$ |
| 11 | 3,733 | ⑧ | 8.21E-04 | $\Sigma(\text{⑧} \sim \text{①}) / \text{⑧}$ |
| 15 | 32,400 | ⑨ | 7.88E-04 | $\Sigma(\text{⑨} \sim \text{①}) / \text{⑨}$ |
| 20 | 40,700 | ⑩ | 5.01E-04 | $\Sigma(\text{⑩} \sim \text{①}) / \text{⑩}$ |
| 25 ^{*3} | 16,000 | ⑪ | 1.41E-04 | $\Sigma(\text{⑪} \sim \text{①}) / \text{⑪}$ |
| 合計 ^{*4} | 113,110,001 | ⑫ | | |



六ヶ所村における到達深さと到達確率

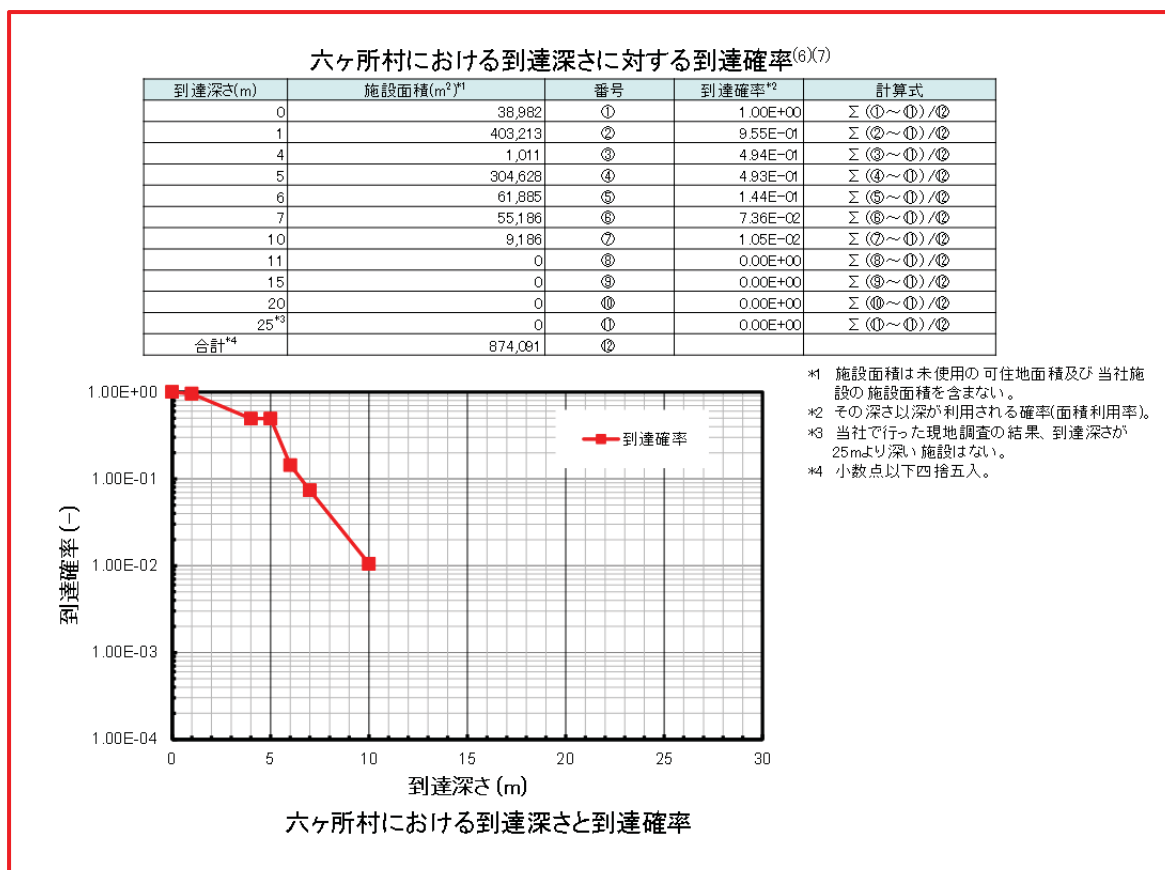
- *1 到達深さ0mの施設面積は未使用の可住地面積を含む。
- *2 その深さ以上が利用される確率(面積利用率)。
- *3 当社で行った現地調査の結果、到達深さが25mより深い施設はない。
- *4 小数点以下四捨五入。

【到達確率の計算例(到達深さ4mの場合)】



$$\text{到達確率} = \frac{A2 + A3 + \dots}{(\text{施設面積の合計})}$$

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、「6. (1) 水利用に伴う被ばく経路」に示すように浅井戸の掘削が考えられる。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、鉍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。

また、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、ここでは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に伴う被ばく経路が考えられる。

廃止措置開始以後から数千年、数万年以上の将来の地形変化に伴い敷地中央部の沢による河食が進行することによって廃棄物埋設地が露呈する場合には、地下水によって移行せずに残存する放射性物質を含む埋設設備が削剥され、周辺土壌と混合して廃棄物埋設地周辺の水域の下流域に比較的広く堆積するため、この堆積地(以下

「下流堆積地」という。)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)に伴う被ばく経路が考えられる。しかし、廃棄物埋設地の露呈が起こるのは廃止措置開始以後から数万年後のことであるため、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伴う被ばく経路として、住宅の建設作業等の屋外労働作業、掘削残土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等の大規模な掘削行為によって生じる被ばく及び当該掘削後の土地利用に伴う被ばくは、一般的に生じるとは考えられないため、基本・変動以外のシナリオ(人為事象シナリオ)において考慮する。

土地利用に伴う被ばく経路として考慮する人間活動は以下のとおりである。

- (i) 基本シナリオ及び変動シナリオ(自然事象シナリオ)
 - a. 廃棄物埋設地における屋外労働作業(建設作業等)
 - b. 廃棄物埋設地における居住
 - c. 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取
- (ii) 基本・変動以外のシナリオ(人為事象シナリオ)
 - d. 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
 - e. 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

これまでの検討結果に基づき、被ばく経路の選定結果を第2表に示す。

第 2 表 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 | — | 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 | ○ | 評価対象 | | | |
| | | 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 | | — |
| | | | | 畜産物摂取 | — | | | |
| | 地下水から土壌への収着 | — | 廃棄物埋設地又は周辺土壌 | 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 | |
| | | | | | 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 | ○ | | 評価対象 |
| | | | | | 土壌外部被ばく | ○ | | 評価対象 |
| | 建設作業 | 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 | ○ | 評価対象(沢水) | |
| | | | | | 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 | | ○ | 評価対象(沢水) | |
| 水産物消費 | | | | 水産物摂取 | ○ | 評価対象(河川・湖沼) | | |
| 水面活動 | | | 直接外部被ばく | — | 廃棄物埋設地又は周辺土壌の利用に包含されるため対象外 | | | |
| (海水) | | | 送風塩吸入 | 送風塩吸入 | — | 社会環境を踏まえ対象外 | | |
| (海水) | | | 海水利用(製塩) | 塩摂取 | — | | | |
| 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対象外 |
| | 土壌吸入 | — | | | | | | |
| | 土壌外部被ばく | — | | | | | | |
| | 岸利用(住居) | 土壌吸入 | | — | 廃棄物埋設地又は周辺土壌の利用に包含されるため対象外 | | | |
| | | 土壌外部被ばく | | — | | | | |
| | | 土壌吸入 | | — | | | | |
| 建設作業 | 土壌外部被ばく | — | | | | | | |

*1 被ばく経路の選定結果における「○」は「影響が考えられる」を、「—」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばくの選定結果として「影響が考えられる」ものを表中に赤枠で示す。

コメント No. 44 及び 62 を踏まえ下線部を追記

コメント No. 46 を踏まえ表を修正

第 2 表 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 | - | - | - | 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 <u>沢水</u> | 飲用水利用 | 飲用水摂取 | - |
| | | | | | | | 灌漑利用 | 農作物(米)摂取 | - |
| | | | | | | | 飼育水利用 | 土壌吸入 | - |
| | | | | | | | | 土壌外部被ばく | - |
| | | | | | | | 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 | - | | | | | | |
| | 海水利用(製塩) | 塩摂取 | - | | | | | | |
| 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 | ○ | | |
| | | | | | 評価対象(基本・変動以外のシナリオ) | | | | |
| | 地表への流出 | - | - | 水域への流入 | 河川水、湖沼水、海水又は <u>沢水</u> | 飲用水利用 | 飲用水摂取 | - | |
| | | | | | | 灌漑利用 | 農作物(米)摂取 | - | |
| | | | | | | 飼育水利用 | 土壌吸入 | - | |
| | | | | | | | 土壌外部被ばく | - | |
| | | | | | | 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るのは廃止措置開始以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「影響が考えられる」を、「-」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばくの選定結果として「影響が考えられる」ものを表中に赤枠で示す。

7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人)

「4. (2) 人間の生活様式の状態に関する設定」及び「6. 被ばく経路」に示す生活様式に基づき、基本シナリオ及び変動シナリオ(自然事象シナリオ)においては、被ばく経路に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、移行経路ごとの被ばく経路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。

被ばくの経路の重ね合わせにおいては、市場の流通の状況等を適切に考慮する。また、個人の持つ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及び基本・変動以外のシナリオ(人為事象シナリオ)で考慮する一般的ではない人間活動による被ばく経路については、重ね合わせを考慮しない。

生活様式については、現在認められる就労形態ごとに異なると想定される。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、生産活動を通じて起こると想定される被ばく及び生産物を摂取することによって起こると想定される被ばくを考慮する。また、放射性物質は、その移行特性や放射線学的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小さいと考えられ、**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。

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から考えて基本的に想定されない。このため、就労者が生産活動の結果、得られる食品については自家消費されることを想定するが、その他については市場から購入することを想定する。

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⁾。

(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、放射性物質が移行する水産物については**漁獲した水産物(汚染された水産物)のみを摂取する**ことを想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。

(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、放射性物質が移行する農産物については**栽培した農産物(汚染された農産物)のみを摂取する**ことを想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。

なお、地表水利用の場合は放射性物質を含む**沢水**を灌漑に利用する稲作とし、土地利用の場合は放射性物質を含む土壌上における畑作を想定する。

(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、放射性物質が移行する畜産物については**養畜した畜産物(汚染された畜産物)のみを摂取する**、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。

(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、一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。また、**廃棄物埋設地**において一般的な住宅等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、市場に流通した食品を摂取することを想定する。

第3表 六ヶ所村の就業者数⁽⁸⁾

| 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 |

8. まとめ

「6. 被ばく経路」及び「7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人)」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4表に示す。これを基に線量評価を行い、許可基準規則第九条第二号で要求されている基準値を下回ることを確認する。

第4表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路*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 | <u>沢水</u> 及び井戸水の飲 用 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 尾駁沼又は河川水中 の水産物の摂取 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | <u>沢水</u> を利用して生産 される灌漑農産物の 摂取 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | <u>沢水</u> を利用する灌漑 作業 | — | ○ | — | — | — | — |
| | <u>沢水</u> を利用して生産 される畜産物の摂取 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 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

9. 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(2013): 日本原子力学会標準 浅地中ピット処分の安全評価手法: 2012
- (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(2016): 平成 26 年度版 青森県の水道
- (6) ゼンリン(2013): 建物ポイントデータ 2013
- (7) 総務省統計局(2013): 統計でみる市区町村のすがた 2013
- (8) 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

第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等
(廃止措置開始以後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-影響事象分析-

2019年11月27日



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..... | 14 |

添付資料 影響評価により影響なしと判断した根拠

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

| | |
|---|---|
|  | : 補正に伴い変更する箇所 (コメント対応含む) |
|  | : 上記以外の審査会合コメント反映箇所 |
| 緑字 | : 第 298 回審査会合 (2019/8/26) までに自主的に変更した箇所 |
| 赤字 | : 第 298 回審査会合 (2019/8/26) からの変更箇所 |
| 桃色字 | : 第 306 回審査会合 (2019/10/16) からの変更箇所 |

1. はじめに

本資料は、資料 1-2-1「第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等(廃止措置開始後の評価)」のうち、廃棄物埋設地の状態設定(影響事象分析)について補足説明するものである。

廃止措置開始以後の評価に際しては、廃棄物埋設施設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・化学的状态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、廃棄物埋設施設の設計において、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～3 号廃棄物埋設施設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、施設通過流量(施設への浸入水量及び施設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、廃棄物埋設施設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、施設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ですが、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

廃止措置開始以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～3 号廃棄物埋設施設の FEP リストは、廃棄物埋設施設の対象廃棄体、施設形状、浅地中処分施設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「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、「(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表から第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) の影響並びに降下火砕物(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「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 | | CT04 | | | | | | |
| | WT04 | 廃棄体層の温度 | CT05 | 埋設設備の熱膨張 | 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 | | | | | | | | |
| 現象・特性 水理的 | 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。 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。 | <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。 |
| | 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)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、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)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、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。 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。 | <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)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、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)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 |
| | 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 | | 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) | |
|-----|-----------------------|---------------|--|--|---|---|---|---|--|--|
| 水理 | 廃棄体 | 充填材 | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | |
| | | | 埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) | ・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 | | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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 | | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) | ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) |
| | 岩盤・地下水 (地下水流、水理特性) | | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | ・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) | |
| | | | | ・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) | ・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%未満と推定されるため、水理的な影響は生じない。 | | | | | | |
| | | | 地震(NP01) | ・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) | ・液状化の発生により、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。 | ・液状化の発生により、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) | ・液状化の発生により、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。 | ・液状化の発生により、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) | ・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色、間接的な影響は薄黄色で識別

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) | 海水準変動 (NP04) | ・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) | ・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) | ・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) | ・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) | ・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) | ・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。 | ・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) | |
| | 気温、降水量・蒸発散量、かん養量、地下水水位 (NP04) | | ・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) | ・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) | ・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) | ・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) | ・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) | ・気候変動により地盤へのかん養量が増加しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 | ・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) | ・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) | ・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) | ・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) | ・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) | ・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) | ・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。 | ・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) | ・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。 | ・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。 | ・同左 | ・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、その他の水理的影響に包含されるため、影響は無視できる。 | ・同左 | ・風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響をけるのは、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。 | ・同左 | | |
| | 生物化学的現象 (SE03) | ・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。 | ・難透水性覆土及び下部覆土までは樹木の根(SE03)は到達しないため、水理的な影響は生じない。 | ・同左 | ・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、地下水水位との関係から、地下水水位に深における上部覆土の透水性への影響は生じない。 | ・同左 | ・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。 | ・同左 | | |
| | 津波(隕石落下) | ・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 | ・各項目参照 | | | | | | | | |

*1 各バリア機能への直接的な影響は黄色、間接的な影響は薄黄色で識別

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 | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| | 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"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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、下部覆土 | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | |
| | 上部覆土 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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) | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> 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色、間接的な影響は薄黄色で識別

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はあるが、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はあるのは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色、間接的な影響は薄黄色で識別

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し、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し、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し、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))。 | <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し、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し、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"> 鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化し、低透水性に影響は生じない。 | <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、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色、間接的な影響は薄黄色で識別

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。 ・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。 | ・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はあるが、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。 ・間隙水中でコロイド形成(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。 | ・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はあるが、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はあるが、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。 ・間隙水中でコロイド形成(RC10)は、低透水性に影響は生じない。 | ・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(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。 |
| | 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。 ・地下水の水質は「岩盤・地下水」参照 | | | | ・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。 | |
| | 風化(NP02) | ・風化によって上部覆土及び岩盤の鉱物に変質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色、間接的な影響は薄黄色で識別

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－

添付資料

影響評価により影響なしと判断した根拠

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想定されるガス発生及びガス移行のメカニズムについて既往知見をまとめるとともに、ガス圧の上昇を考慮したガス透気試験結果を用いて、ガス発生の影響評価を行う。

1.1. 廃棄物埋設地において想定されるガス発生及びガス移行のメカニズム

(1) ガスの発生源及び発生量

廃棄物埋設地において発生し得るガスの大部分は、廃棄物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。したがって、ガスによる影響検討は、金属廃棄物を埋設する廃棄物埋設地に対して行う。

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、周辺から廃棄物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物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）

覆土が完了し、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、廃棄物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。

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。埋設環境に近い条件におけるアルミニウムの腐食速度については、藤原らの報告⁽¹⁾によれば、 $10 \mu\text{m}/\text{y}$ 以下の小さい値で推移し、 $1 \mu\text{m}/\text{y}$ 以下まで低下することが知られている。

また、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、嫌氣的条件となるが、この地下水が廃棄物容器の内部に浸入して、廃棄物層内が嫌氣的条件になると、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⁽²⁾が測定した各液温の腐食速度に基づき作成したアレニウスプロットより、 $0.01 \mu\text{m}/\text{y}$ 程度と考えられる。

この時点における埋設設備全体から発生するガスの量としては、廃棄物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。

三菱マテリアル（株）ら⁽³⁾⁽⁴⁾によると、2号廃棄物埋設地を対象としたガス発生の影響について検討を行っており、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。

以上のことから、2号廃棄物埋設地においては、埋設設備1基当たりが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。

3号廃棄物埋設地においては、埋設設備1基当たりに埋設可能な廃棄体本数が2号廃棄物埋設地の約2倍（ $26,400 \text{本}/12,960 \text{本}=2.04$ ）であることから、同様な考え方に基づくと、埋設設備1基当たり最大で $1,000\text{Nm}^3/\text{y}$ と算定し得る。ここで、3号廃棄物埋設地においては、埋設する廃棄体が2号廃棄物埋設地の廃棄体と同じであるため、埋設設備体積当たりのガス発生量は2号廃棄物埋設地とほぼ同等である。

(2) ガスの移行経路

発生したガスは、ポーラスコンクリート層、覆いコンクリート・外周仕切設備の境界部を經由して、飽和した難透水性覆土の内側に到達する。到達したガスは難透水性覆土内に侵入し、局所的な覆土の変形・損傷を伴い卓越経路を形成しながら破過する。

1.2. ベントナイト系材料中のガス移行メカニズム

(1) 飽和したベントナイト系材料中のガス移行メカニズムに関する知見

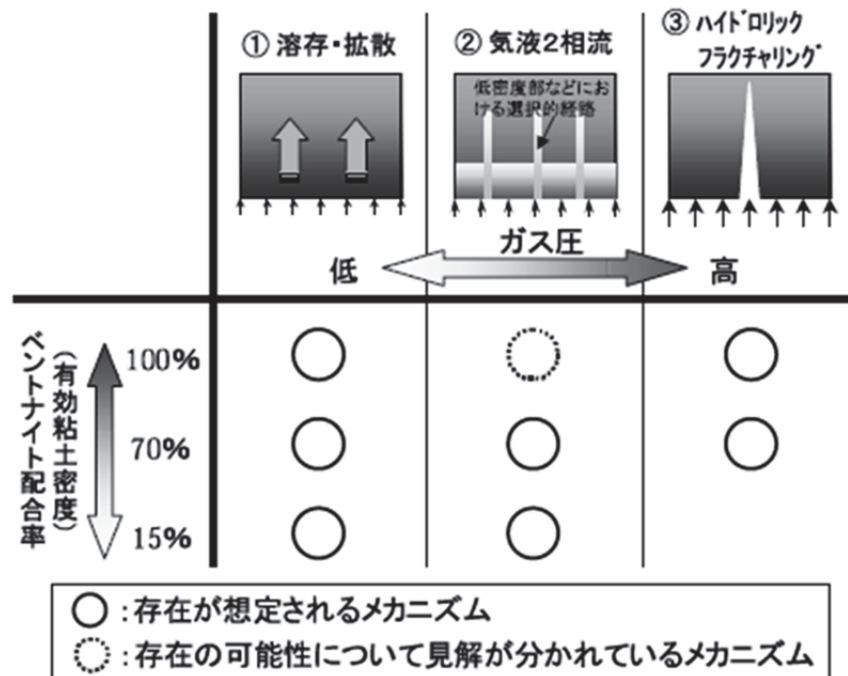
ガス移行メカニズムに関する既往知見を以下のとおり整理する。

a) 飽和ベントナイト系材料中のガス移行メカニズム

藤山ら⁽⁵⁾は、各種文献⁽⁶⁾⁽⁷⁾やデータを調査・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1図に示す概念図を提示し、以下のようにとりまとめた。

- ① 間隙水中の溶存ガス拡散による移行
- ② 気液2層流によるガス移行。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経路の形成を伴うガス移行
- ④ ①～③の共存。ベントナイト混合率が高く（有効粘土密度が大きい）、かつガス圧が高いほど、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。

廃棄物埋設地において想定されるガス影響としては、①～④の全てのパターンが考えられる。



第1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）⁽⁵⁾

(2) 低配合ベントナイト混合土のガス移行特性

前項で整理したガス移行メカニズムを踏まえ、埋設設備内のガス圧が上昇することで形成される局所的な卓越経路を考慮して、難透水性覆土の透水係数への影響について検討を行う。

第2図に示すガス移行試験装置により、ベントナイト配合率20%~30%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。試験の結果、ガス移行メカニズムは、②気液2層流又は③ドロリックフラクチャリングとなった。ガス破過後の難透水性覆土の低透水性については、後述するとおり、ガス破過前後で透水係数に変化は生じていない。

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15%~20%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、ガス破過前後で透水係数に変化は生じていない。

第3図に透気試験における圧力、応力及び排気量の例を示す。このケースでは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。この場合、ガス透気の直角方向の拘束は、相対的に弱く、透気に伴うベントナイト粒子の流出しやすい条件となっている。このような試験により、ガス破過前後の透水係数が変化しない結果となった。

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。

a) Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性

Ca 型ベントナイト混合土の自己修復性に関する実験的な考察については、田中ら⁽⁸⁾、大石ら⁽⁹⁾が行っている。

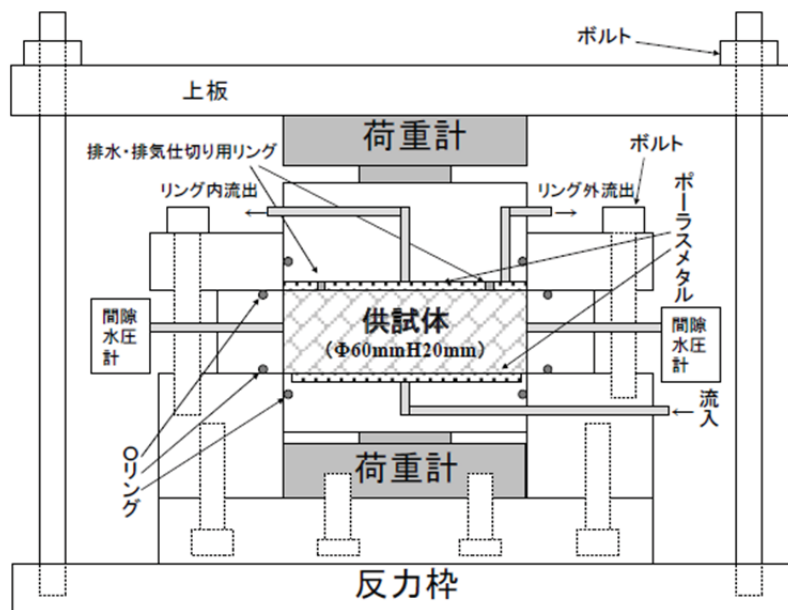
Ca 型ベントナイト混合土(難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 20%~30%)の透水・透気試験の試験条件及び試験結果を第 1 表に、ガス破過前後のベントナイト混合土(難透水性覆土相当)に対する透水係数の比較を第 4 図に示す。

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、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。

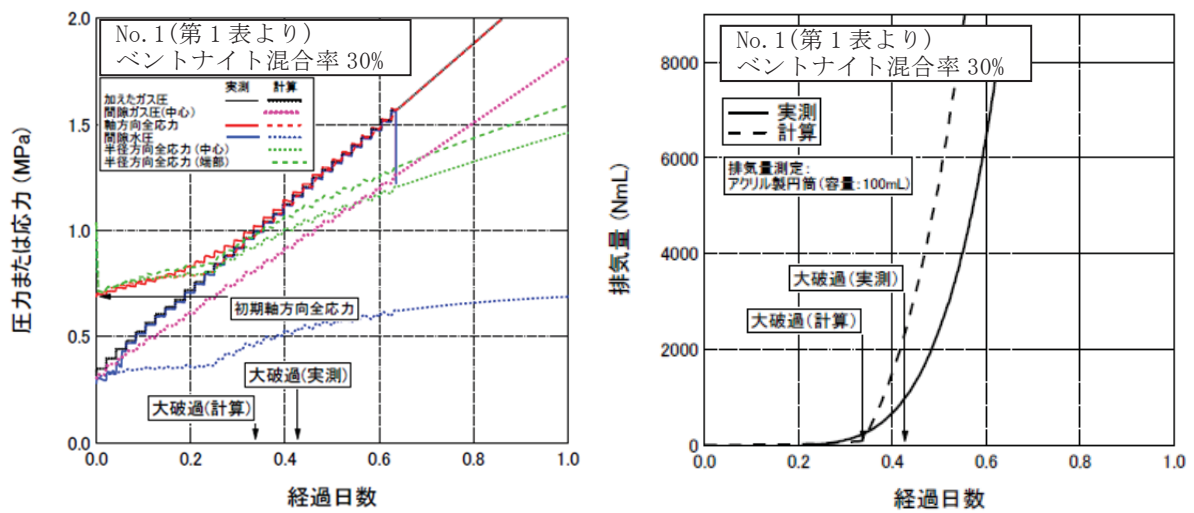
第1表 ベントナイト混合土の透水・透気試験の試験条件及び試験結果

| | | No. 1 ⁽⁸⁾ | No. 2 ⁽⁸⁾ | No. 3 ⁽⁹⁾ | No. 4 ⁽⁹⁾ | No. 5 ⁽⁸⁾ | No. 6 ⁽⁸⁾ |
|-------------------------|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 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 | | 急速載荷：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} |

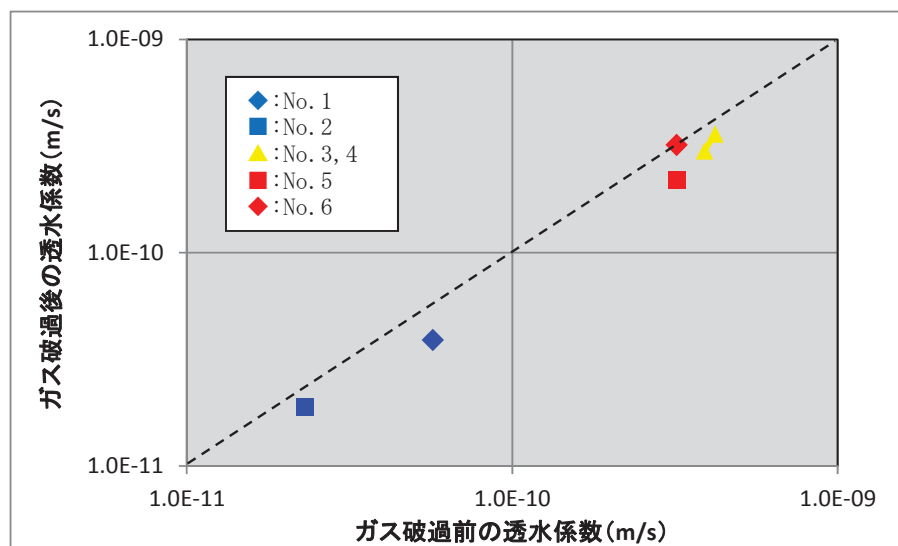
*1 「変位拘束」は軸方向変位を固定した状態で試料を膨潤させたことを、それ以外は軸方向有効圧力一定(有効土被り圧相当である約0.15MPa)で試料を膨潤させたことを示す。



第2図 ガス移行試験装置⁽⁸⁾



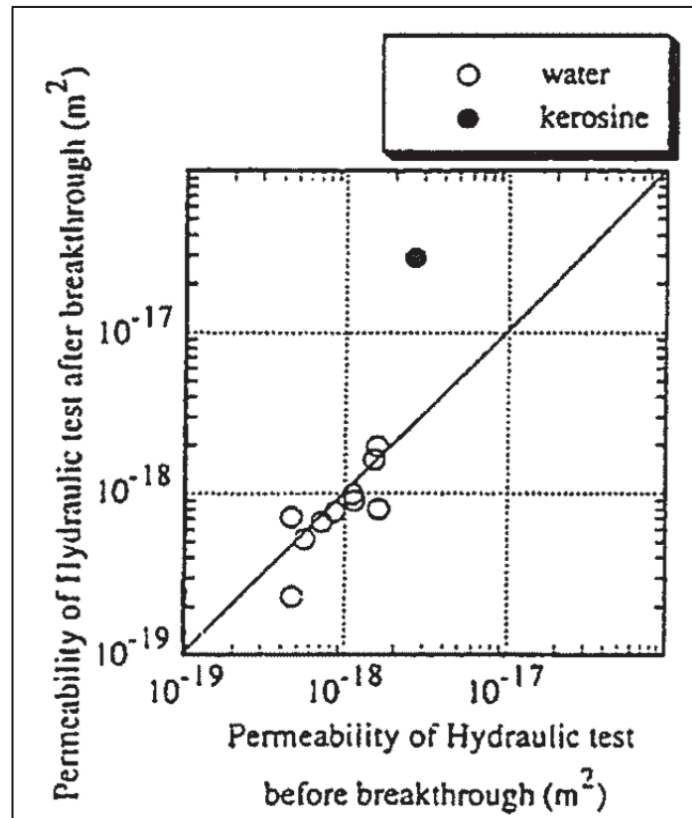
第3図 透気試験における圧力、応力及び排気量⁽⁸⁾



第4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^{(8), (9)}

b) Na 型ベントナイト混合土のガス移行特性

ベントナイト配合率 15%~20% の Na 型ベントナイト混合土に対する既往の研究⁽¹⁰⁾において実施した、ガス破過後の透水係数の測定結果によれば、第 5 図に示すとおり、ガス破過前後の水の浸透率に大きな変化は見られなかった。



第 5 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⁽¹⁰⁾

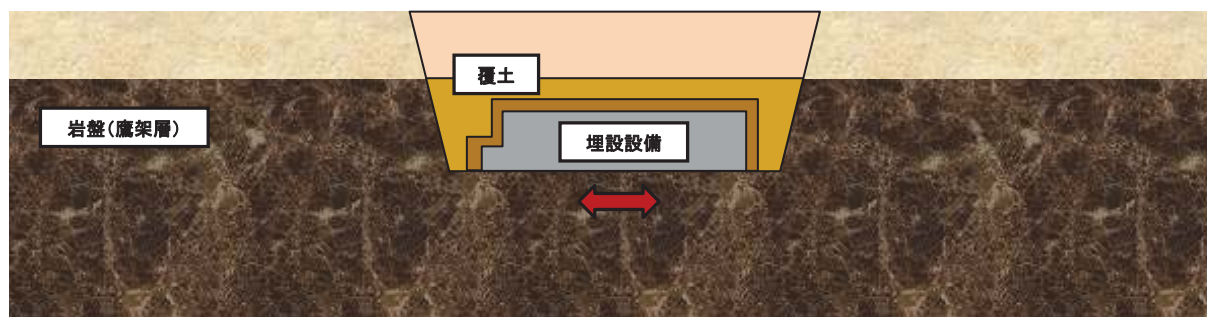
1.3. まとめ

実規模の難透水性覆土において想定されるガス移行メカニズムは、第1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 hidro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。

透気によりベントナイトが流出しやすい③ hidroリックフラクチャリングのケースにおいて、ガス破過前後の透水試験を行い、低透水性に対する自己修復性を確認しているため、ガス発生による覆土の低透水性への影響はない。

2. 地震の影響

地震力の影響によって、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6図に示す。



第6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、低透水性への影響を無視できる。

3. 液状化(覆土)の影響

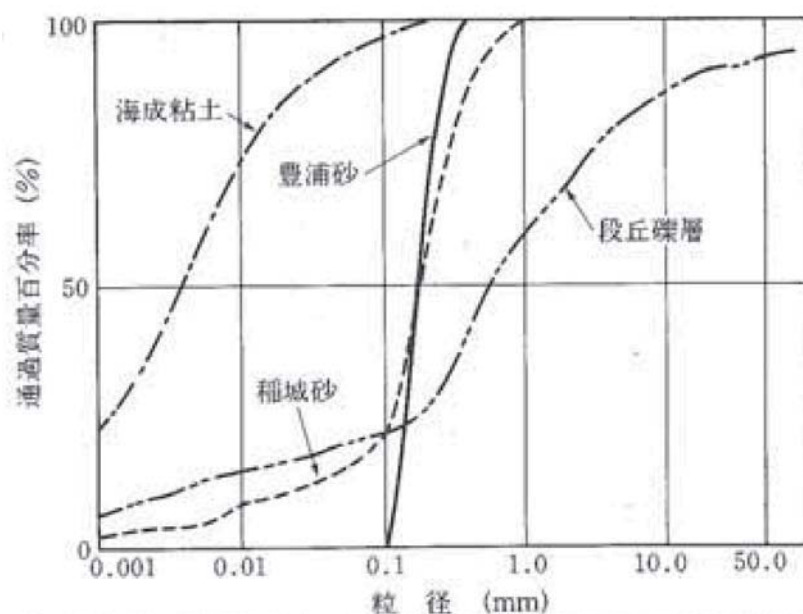
平成19年新潟県中越沖地震において、管理値(締固め度90%以上)を設定し、埋戻し土(砂、砂質土)の締固めによる対策を実施した箇所で被災は生じていない。

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」ではなく、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。これにより覆土は、中越沖地震において被災をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土より相対的に液状化し難い材料であると判断さ

れる。

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。

第7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を示す。これらの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、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7図 代表的な土の粒形加積曲線の例⁽¹¹⁾

4. 降下火砕物(化学)の影響

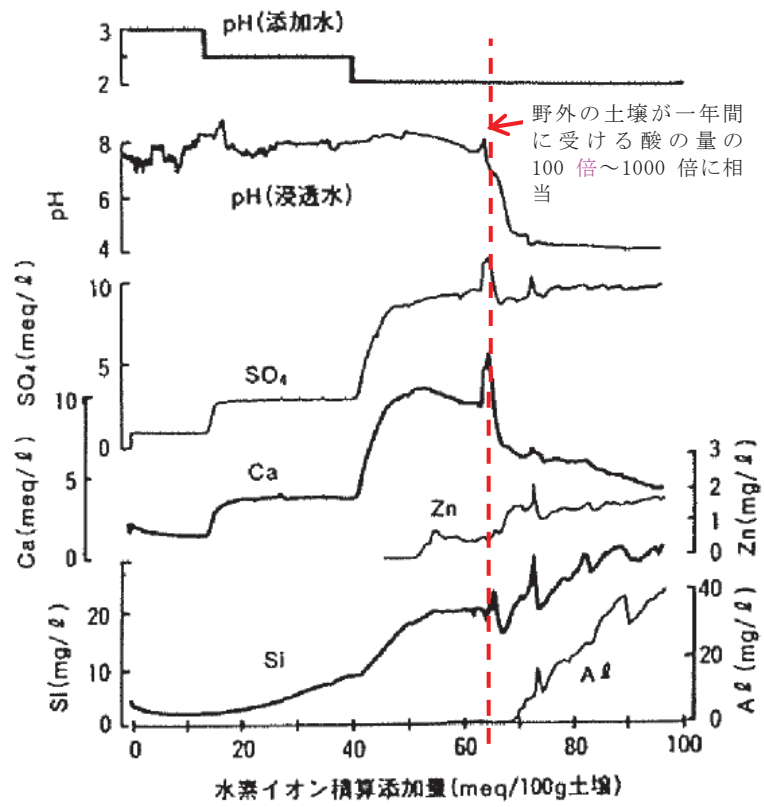
降下火砕物が堆積すると、これらに含まれる成分によって地下水の水質変化、低透水性及び収着性に影響が生じるおそれがある。

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⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾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⁽¹⁴⁾、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科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2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8図に示す。

第2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、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 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(-OH)やカルボキシル基(-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 8 図 希硫酸添加に伴う土壌カラム浸透水の水質変化⁽¹⁴⁾

5. 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)：低レベル放射性廃棄物の浅地中処分場におけるガス発生の影響評価
- (4) 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
- (5) 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
- (6) 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.
- (7) 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*
- (8) 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
- (9) 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
- (10) 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
- (11) 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
- (12) 松中照夫(2003)：土壌学の基礎、農文協、pp. 142-146

- (13) 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
- (14) 久保井徹(1989) : 地下水が酸性になる前にー土壌の緩衝能とその限界ー、国立環境研究所ニュース 8 卷 3 号、pp. 6-7

参 考 资 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

第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等
(廃止措置開始以後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定
-状態変化の評価(力学的影響)-

2019年11月27日

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 |
| 2.1. 膨張現象 | 1 |
| 2.2. 陥没現象 | 1 |
| 2.3. 検討手順 | 2 |
| 3. 状態変化の評価に用いる初期条件 | 3 |
| 3.1. 廃棄物(充填固化体) | 3 |
| 3.2. 廃棄体容器 | 7 |
| 3.3. 埋設設備中の鉄筋 | 8 |
| 3.4. 廃棄物(均質・均一固化体) | 8 |
| 3.5. 埋設設備 | 9 |
| 4. 状態変化(膨張)に必要な条件設定 | 10 |
| 4.1. 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定 | 10 |
| 4.1.1. 埋設設備中の環境条件の設定 | 11 |
| 4.1.2. 金属種類の設定 | 13 |
| 4.1.3. 金属重量の設定 | 16 |
| 4.1.4. 腐食生成物の設定 | 20 |
| 4.1.5. 腐食膨張倍率の設定 | 22 |
| 4.1.6. 金属の表面積の設定 | 26 |
| 4.1.7. 金属の腐食速度の設定 | 29 |
| 4.2. 金属腐食による金属の膨張量の設定 | 33 |
| 4.2.1. 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定 | 35 |
| 4.2.2. 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定 | 36 |
| 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 | 37 |
| 4.3.1. 可溶性塩の劣化現象の整理 | 37 |
| 4.3.2. 埋設設備の膨張倍率の評価 | 39 |
| 4.3.3. 埋設設備の膨張倍率の設定 | 51 |



| | | |
|----------|---------------------------------------|----|
| 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..... | 52 |
| 4. 4. 1. | 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定..... | 53 |
| 4. 4. 2. | 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定..... | 54 |
| 4. 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..... | 55 |
| 4. 5. 1. | 膨張量の設定の考え方..... | 55 |
| 4. 5. 2. | 膨張量の設定値..... | 56 |
| 5. | 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価..... | 57 |
| 5. 1. | 力学的影響評価の考え方..... | 57 |
| 5. 2. | 力学的影響評価手法..... | 57 |
| 5. 3. | 解析に用いる諸条件の設定の考え方..... | 57 |
| 5. 4. | 埋設設備の膨張影響の方向の設定..... | 58 |
| 5. 5. | 解析モデル..... | 59 |
| 5. 6. | 解析条件..... | 60 |
| 5. 7. | 解析結果..... | 65 |
| 5. 7. 1. | 覆土の変形方向による力学的影響の確認..... | 65 |
| 5. 7. 2. | 覆土の厚さの評価..... | 66 |
| 5. 7. 3. | 覆土の透水係数の評価..... | 67 |
| 5. 8. | 1,000年後の力学的影響評価..... | 69 |
| 6. | 状態変化(陥没)に必要な条件設定..... | 70 |
| 6. 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..... | 70 |
| 6. 2. | 可溶性塩の溶出量の設定..... | 70 |
| 6. 2. 1. | 硫酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定..... | 70 |
| 6. 2. 2. | ほう酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定..... | 70 |
| 6. 2. 3. | ほう酸塩(アスファルト固化体)の溶出量の設定..... | 70 |
| 6. 3. | 埋設設備の陥没量の設定..... | 71 |
| 7. | 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価..... | 74 |
| 7. 1. | 力学的影響評価の考え方..... | 74 |
| 7. 2. | 力学的影響評価手法..... | 74 |
| 7. 3. | 解析に用いる諸条件の設定の考え方..... | 74 |
| 7. 4. | 埋設設備の陥没影響の方向の設定..... | 75 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 7.5. 解析モデル..... | 76 |
| 7.6. 解析条件..... | 77 |
| 7.7. 解析結果..... | 81 |
| 7.7.1. 覆土の厚さの評価..... | 81 |
| 7.7.2. 覆土の透水係数の評価..... | 82 |
| 7.8. 1,000年後の力学的影響評価..... | 84 |
| 8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ..... | 84 |
| 9. 参考文献..... | 86 |

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.... 補 4 参 1-1

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(エトリンサイト等)を真密度として評価する妥当性について..... 補 4 参 2-1

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..... 補 4 参 3-1

| | |
|---|---|
|  | : 補正に伴い変更する箇所 (コメント対応含む) |
|  | : 上記以外の審査会合コメント反映箇所 |
| 緑字 | : 第 298 回審査会合 (2019/8/26) までに自主的に変更した箇所 |
| 赤字 | : 第 298 回審査会合 (2019/8/26) からの変更箇所 |
| 桃色字 | : 第 306 回審査会合 (2019/10/16) からの変更箇所 |

1. はじめに

本資料は、資料 1-2-1「**第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等（廃止措置開始以後の評価）**」のうち、廃棄物埋設地の状態設定(力学的影響評価)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。

2.1. 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。

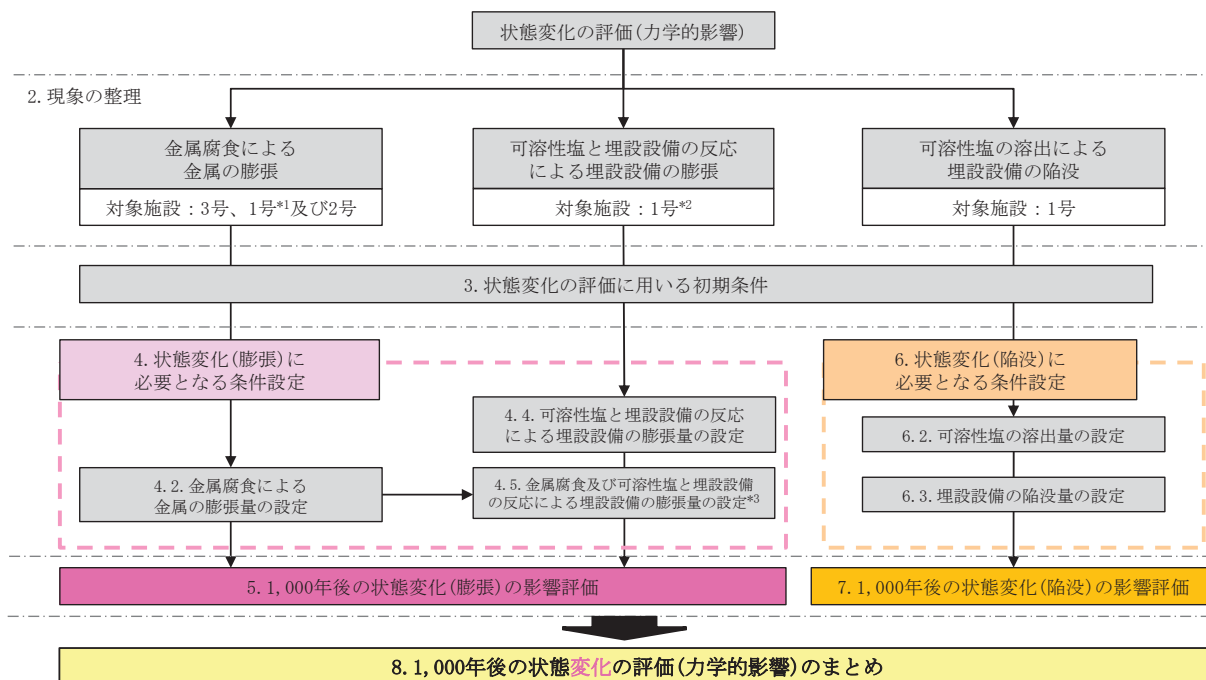
また、均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料の反応に伴い膨張性鉱物が生成するため、埋設設備が膨張することを想定する。

2.2. 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した際に溶出し、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。

2.3. 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。



第1図 状態変化の評価(力学的影響)の検討手順

*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。

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。

3.1. 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。

(1) 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合

固体状廃棄体の仕分け分類を第1表に、固体状廃棄体の分別(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易い形状のもの |
| | 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 | 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 塩化ビニルホース等 | A | 1 | |
| | | 線類 | ケーブル、コード等 | A | 2 | *1 |
| | ・プラスチック類 | 片類 | プラスチック片等 | A | 1 | |
| | | | ゴム片(ガスケット、ゴム板)等 | B | 1 | |
| | | | 塩化ビニル片等 | B | 2 | |
| | 箱状類 | プラスチック容器等 | A | 2 | | |
| | シート類 | 防炎シート、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。

(2) 高圧圧縮処理を行う場合

固体状廃棄体の仕分け分類を第3表に、固体状廃棄体の種類を第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 | 防災シート、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 |

(3) 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)

固体状廃棄体の仕分け分類(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 | — |

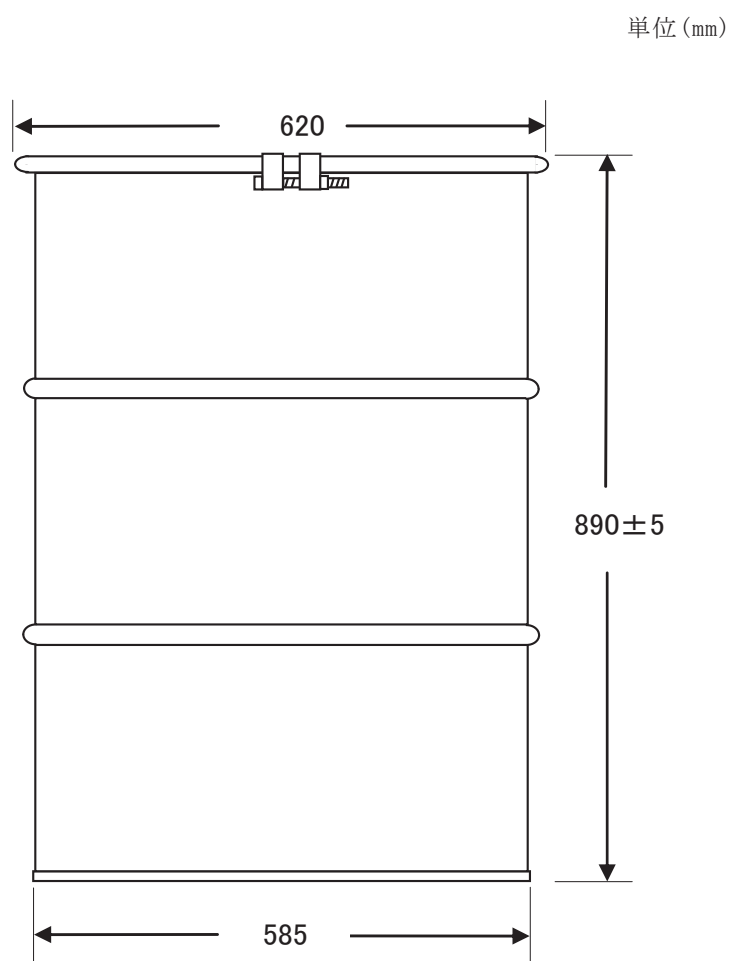
第 6 表 固体状廃棄物の仕分け分類(プラズマ溶融方式)⁽²⁾

| 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 | — |

3.2. 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⁾

3.3. 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⁾。

3.4. 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、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専用アスファルト | 不飽和ポリエステル樹脂 <ul style="list-style-type: none"> ・ エスター-SN0-100G ・ 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(依積み時に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 | 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。

3.5. 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

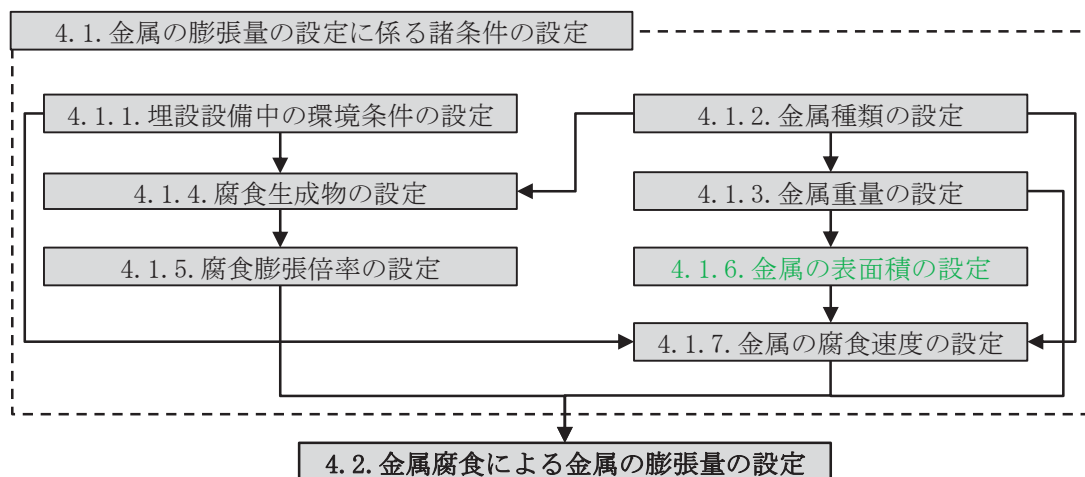
| 使用設備 | | セメント種類 (セメントと混和材の混合比) |
|------------|---------|----------------------------------|
| 充填モルタル | | 中庸熱ポルトランドセメント + 高炉スラグ(1 : 9) |
| | 1 群～6 群 | |
| コンク リート | 外周仕切 | 普通ポルトランドセメント + 高炉スラグ(45 : 55) |
| | 内部仕切 | |
| | 覆い | |

4. 状態変化(膨張)に必要な条件設定

4.1. 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

4.1.1. 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。

【基本設定】

(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～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～36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、負の値(0mV以下)であることが確認されているため、嫌氣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～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、確からしい評価期間(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、基本/変動共通の設定とする。

【変動設定】

基本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

以上より、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値を第 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値

| 条件 | 設定値 | 設定の考え方 |
|-----|---|--|
| ORP | 【基本設定】 嫌気的条件 | 【基本設定】 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(0mV 以下)を参考に設定する。 |
| | 【変動設定】 嫌気的条件～好気的条件 | 【変動設定】 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 | 【基本設定】 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 | 【基本設定】 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より高い pH の状態となることが考えられるため、これを考慮する。 |
| | 【変動設定】 上記に加え、セメント系材料から Na, K 成分が溶出した場合を考慮し、 更に高い pH を設定 | 【変動設定】 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 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 | 【基本／変動共通】 廃棄物埋設地周辺の水温を参考に設定 | 【基本／変動共通】 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。 |

4.1.2. 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、金属廃棄物として鉄を主な材料とする合金やメッキ加工された金属板が収納されている。

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割合による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値

| 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「(1) 固体状廃棄物の保管状況」から「(3) 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⁾ 。 |

(1) 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 5～7 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 |

(2) 固体状廃棄物の重量構成

「(1) 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 |

(3) 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 | | | 具体的廃棄物品名 | | | | | 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(%) | | | | | | | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|------------------|---------------|---------------|--------|---------------|----------------------|------------|--------------|--------------|---|--|--|-------|---------------|------------------|--------|-------------|--------------------|---|
| 廃棄物 分類名 | 重量割合 (%) | 累積重量 (%) | 具体的 廃棄物名 | 重量割合 (%) | 累積重量割合 (%) | 型式重量割合 (%) | 判定 | | | | 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 | 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 | | | | | | | | |
| | | | | 鋼材 | 24.4 | 59.1 | 9.9 | ◎ | アングル | | | W500×L600×t3 | | | | | | | | | | |
| | | | | ドラム缶 | 15.3 | 74.4 | 6.2 | ◎ | 金属板 | | W500×L200×t3 | アングル | W50×L700×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 | | | | | | | |
| | | | | 足場クランプ | 8.4 | 82.8 | 3.4 | ◎ | 足場クランプ | | W50×L500×t6 | | | | | | | | | | | |
| | | | | 金属片 | 8.0 | 90.8 | 3.2 | ◎ | 金属板 | | W50×L200×t6 | 足場クランプ | H30×W70×L270 | 標準的な寸法 | 4 | | | | | | | |
| | | | | 工具類 | 1.6 | 92.4 | 0.7 | - | - | | - | | | | | | | | | | | |
| | | | | アンカー | 1.1 | 93.5 | 0.4 | - | - | | - | 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 | | | | | | |
| | | | | ベアリング | 1.1 | 94.5 | 0.4 | - | - | | - | | | | | | | | | | | |
| | | | | 金網 | 1.0 | 95.6 | 0.4 | - | - | | - | 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 | | | | | | |
| | | | | 配管 | 77.8 | 77.8 | 22.9 | ◎ | 配管 | | - | | | | | | | | | | | |
| | 塊状 金属類 | 19.8 | 89.8 | 弁 | 65.9 | 65.9 | 13.1 | ◎ | 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 | | | | | | | | |
| | | | | スチームトラップ | 18.3 | 84.2 | 3.6 | ◎ | 弁 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 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 | - | - | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | コンクリート片 ・ガラス類 | 4.0 | 93.9 | 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 | 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 | H200×W200×t10 | | | | | |
| | | | | サンダー刃 | | | 4.7 | 94.4 | 0.2 | | | | | | - | - | - | | | | | |
| | | | | ガラス瓶 | | | 4.4 | 98.8 | 0.2 | | | | | | - | - | - | | | | | |
| | ガラス類 | 1.1 | 99.9 | 0.0 | | | - | - | - | | | | | | | | | | | | | |
| | 小物金属 | 2.6 | 96.4 | ボルト・ナット類 | 91.6 | 91.6 | 2.4 | ◎ | ボルト・ナット | 小物金属 | ボルト・ナット | M10×L100 | 重量割合の多いボルト・ナットで代表 寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値 | 3 | | | | | | | | |
| | 番線類 | 2.3 | 98.7 | 金属端子 | 7.8 | 99.4 | 0.2 | - | - | 番線類 | 番線 | 外形3φ×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 | | | | | | | | |
| | | | | 番線 | 76.6 | 76.6 | 1.7 | ◎ | 番線 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 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 | - | - | - | - | | | | | | | | | |
| 屑 | 0.3 | 100.0 | センサー | 44.1 | 99.7 | 0.4 | - | - | 屑 | - | - | - | - | | | | | | | | | |
| | | | ゴミ屑 | 77.0 | 77.0 | 0.3 | - | - | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 砂 | 23.0 | 100.0 | 0.1 | - | - | | | | | | | | | | | | | | |
| A2 | 缶類 | 100.0 | 100.0 | 缶 | 48.9 | 48.9 | 48.9 | ◎ | 一斗缶 ペール缶 スプレー缶 | 缶類 | 一斗缶 | 240□×H350 | 標準的な寸法 | 52 | | | | | | | | |
| | | | | PT缶 | 15.4 | 64.3 | 15.4 | ◎ | | | | ペール缶 | | | 290φ×H350 | | | | | | | |
| | | | | 一斗缶 | 14.4 | 78.7 | 14.4 | ◎ | | | スプレー缶 | 70φ×H200 | 標準的な寸法 | 48 | | | | | | | | |
| | | | | ペール缶 | 11.9 | 90.6 | 12.9 | ◎ | | | - | - | | | | | | | | | | |
| | | | | スプレー缶 | 9.0 | 99.6 | 9.0 | ◎ | | | - | - | | | | | | | | | | |
| | | | | - | - | - | - | - | | | - | - | | | | | | | | | | |

4.1.3. 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、廃棄体の重量制限等)により異なることから個別に算出し、設定する。

(1) 金属廃棄物重量の設定

3号及び2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。

以上より、1本当当たりの廃棄体重量を310kg/本として設定し、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体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 | | |
| 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号廃棄物埋設施設を例に以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{金属重量(kg/基)} &= \text{廃棄物重量(kg/本)} \times \text{廃棄体本数(本/基)} \\
 &= 310(\text{kg/本}) \times 26,400(\text{本/基}) \\
 &= 8,184,000(\text{kg/基})
 \end{aligned}$$

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) | | |
|-------|------------|-----------|-----------|
| | 対象施設：3号 | 対象施設：1号*1 | 対象施設：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)を用いて算出した55.2kg/本より、設定した。

(2) 廃棄体容器重量の設定

1号～3号廃棄物埋設施設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号廃棄物埋設施設を例に以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{金属重量(kg/基)} &= \text{廃棄物容器重量(kg/本)} \times \text{廃棄体本数(本/基)} \\ &= 30(\text{kg/本}) \times 26,400(\text{本/基}) \\ &= 792,000(\text{kg/基}) \end{aligned}$$

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) | | |
|-------|------------|---------|---------|
| | 対象施設：3号 | 対象施設：1号 | 対象施設：2号 |
| 廃棄体容器 | 792,000 | 153,600 | 388,800 |

(3) 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、設計図書等から鉄筋径、配置本数及び延長等を算出し、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) | | |
|----------|------------|---------|---------|
| | 対象施設：3号 | 対象施設：1号 | 対象施設：2号 |
| 埋設設備中の鉄筋 | 1,357,000 | 127,000 | 415,000 |

4.1.4. 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、基本／変動設定に区分けし、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、「4.1.1.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、以下の考え方に基づき設定することとする。

基本設定は、「4.1.1.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。

設定に当たっては、環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する又は、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を選定することとする。

変動設定は、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基本／変動設定の考え方及び設定する腐食生成物を第20表に示す。

腐食生成物は、金属腐食の進行と共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共に変化する。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。

第 20 表 腐食生成物の設定の考え方及び設定

| 条件 | | 設定 | 設定の考え方 |
|---------------------|------------------|--|---|
| 代表とする 金属種類 | 鉄 | 【基本設定】 Fe_3O_4 (マグネタイト) | 【基本設定】 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_3O_4 (マグネタイト)を設定する。 |
| | | 【変動設定】 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (水酸化鉄(Ⅱ)) | 【変動設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、安定な腐食生成物の設定が困難であることから膨張に大きく寄与する $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (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 | 【基本設定】 水酸化物 (銅を除く) | 【基本設定】 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、安定な腐食生成物の設定が困難であることから水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、基本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。 |
| | | 【変動設定】 水酸化物 | 【変動設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、安定な腐食生成物の設定が困難であることから膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。 |

4.1.5. 腐食膨張倍率の設定

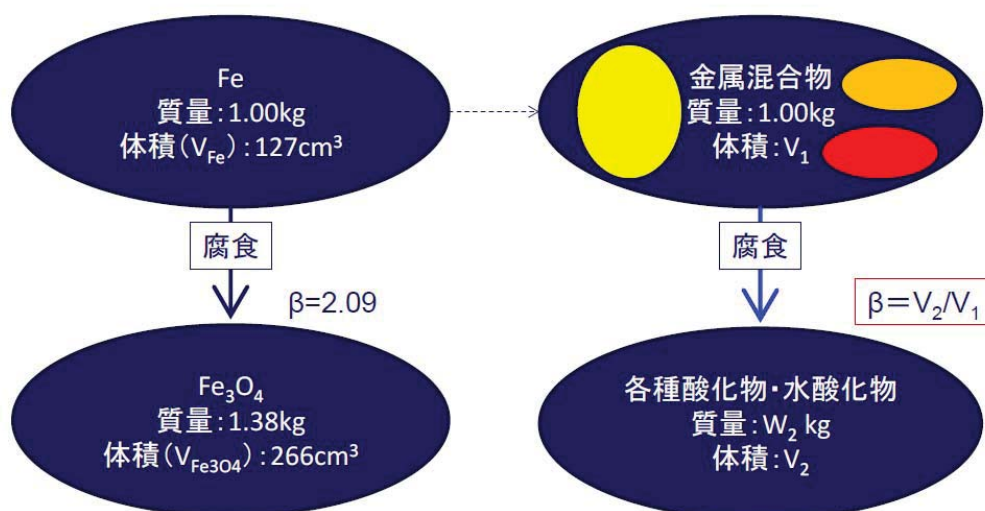
腐食膨張倍率は、第 20 表より設定した腐食生成物を用いて設定する。

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%)をパラメータとした評価を行う。

(1) 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。

$$\begin{aligned} \sum W_{X,Metal} &= aM_A + bM_B + cM_C \\ \sum L_{X,Metal} &= aL_A + bL_B + cL_C \end{aligned}$$

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、一変式は以下となる。

$$\beta_X = L_{X,Comp} / \sum L_{X,Metal}$$

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値及び第 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。

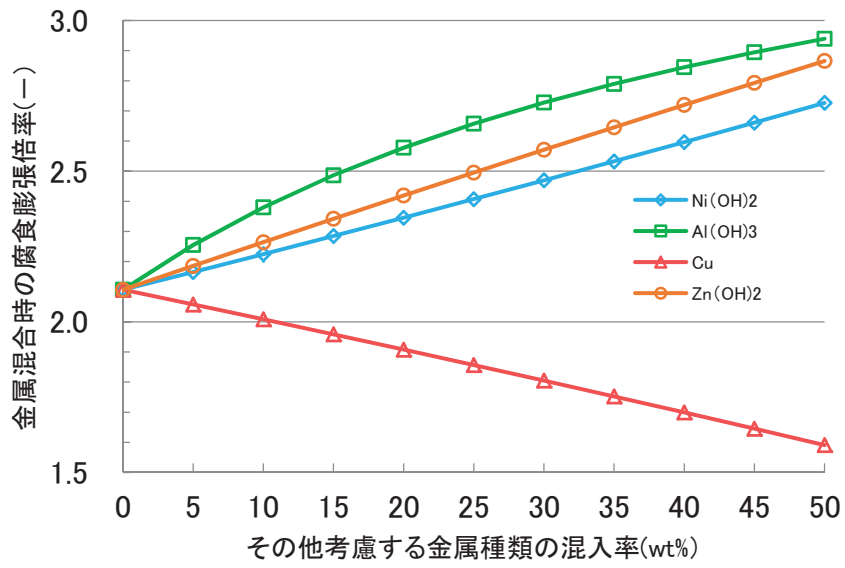
基本設定は、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物であるマグネタイト($\beta: 2.1$)を基準とし、その他考慮する金属種類の腐食生成物である水酸化物(例えば、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ の $\beta: 3.43$)の金属単体ごとの混入率(wt%)をパラメータとして評価したものを第 5 図に示す。

変動設定は、基本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。

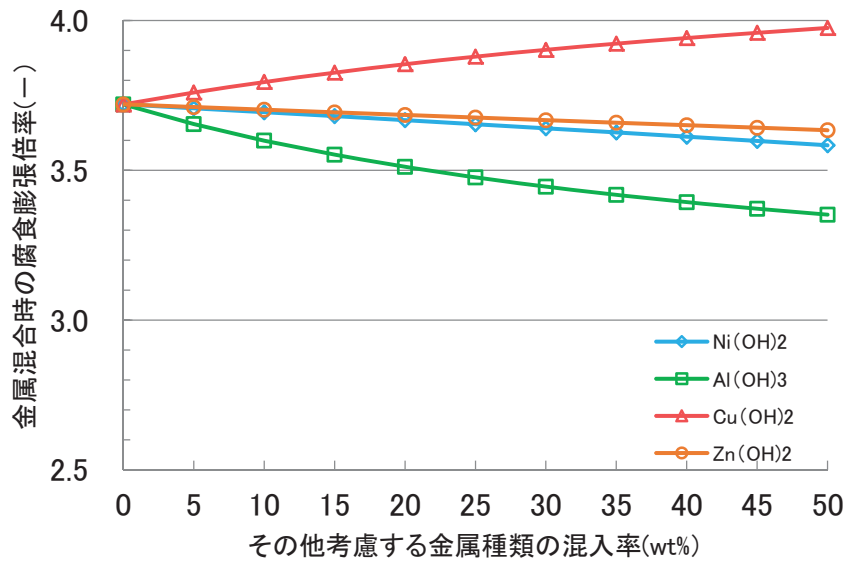
以上の設定・評価を踏まえ、腐食膨張倍率を第 22 表のとおり設定する。

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 | 【基本設定】 3 倍 | 【基本設定】 代表とする金属種類の腐食生成物を Fe_3O_4 (マグネタイト)と設定し、その他考慮する金属種類の混入率を 0-50wt%の幅で評価した結果、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。 |
| | 【変動設定】 4 倍 | 【変動設定】 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 0~50wt%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 基本設定における腐食膨張倍率への影響評価



第6図 変動設定における腐食膨張倍率への影響評価

4.1.6. 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 | 対象施設 | 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 | $11,000 (\text{m}^2)$ | |

(1) 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 | 鉄系金属総評面積(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。

$$\begin{aligned} \text{表面積} A &= (2 \times \pi \times R^2) + (2 \times \pi \times R \times h) \\ &= 2.182361(\text{m}^2/\text{本}) \approx 2.18(\text{m}^2/\text{本}) \end{aligned}$$

| | |
|------------------|-----------------------------------|
| ドラム缶直径 φ | : $5.85 \times 10^{-1}(\text{m})$ |
| ドラム缶半径 R | : $\varphi/2(\text{m})$ |
| ドラム缶高さ h | : $8.95 \times 10^{-1}(\text{m})$ |

(2) 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。

$$\begin{aligned} \text{表面積} A &= 2 \times (2 \times \pi \times R^2) + 2 \times (2 \times \pi \times R \times h) \\ &= 4.364722(\text{m}^2/\text{本}) \approx 4.36(\text{m}^2/\text{本}) \end{aligned}$$

| | |
|------------------|-----------------------------------|
| ドラム缶直径 φ | : $5.85 \times 10^{-1}(\text{m})$ |
| ドラム缶半径 R | : $\varphi/2(\text{m})$ |
| ドラム缶高さ h | : $8.95 \times 10^{-1}(\text{m})$ |

(3) 埋設設備中の鉄筋

埋設設備中の鉄筋に関しては、設計図書等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、本数及び総延長等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

$$\begin{aligned} \text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積} \\ &\quad \text{(東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積} \\ &\quad \text{(m}^2\text{)} \text{ (東西方向 10 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 3,416.4 + 4,948.6 + 3,517.5 + 6,243.2 \\ &= 18,125.7(\text{m}^2) \approx 19,000(\text{m}^2) \end{aligned}$$

b. 1号埋設設備

$$\begin{aligned} \text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積} \\ &\quad \text{(東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積} \\ &\quad \text{(m}^2\text{)} \text{ (東西方向 3 枚+南北方向 3 枚)} \\ &= 871.2 + 966.8 + 743.3 + 375.0 \\ &= 2,956.3(\text{m}^2) \approx 3,000.0(\text{m}^2) \end{aligned}$$

c. 2号埋設設備

$$\begin{aligned} \text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積} \\ &\quad \text{(東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積} \\ &\quad \text{(m}^2\text{)} \text{ (東西方向 5 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 1942.7 + 2,586.0 + 2,362.2 + 3,711.4 \\ &= 10,602.3(\text{m}^2) \approx 11,000.0(\text{m}^2) \end{aligned}$$

4.1.7. 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となる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。

廃止措置開始以後の確からしい評価期間(1,000年後)の金属の腐食速度は、「4.1.1.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。

(1) 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。

確からしい評価期間(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 | |

【基本設定】

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。

【変動設定】

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(孔食等)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。

(2) ガス発生法により取得された腐食速度の整理

第 10 表の基本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。

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載

第 26 表 ガス発生法による腐食速度に関する知見*1,*2

| No. | 著者等 | 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.1~5は参考文献⁽¹⁶⁾より引用

*2 No.6~15は参考文献⁽¹⁷⁾より引用

コメントNo.52_腐食形態に係わらず瞬時に全量が腐食する説明を記載
 コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載

(3) 腐食速度の設定

【基本設定】

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。

【変動設定】

「(1)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。

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 | 【基本設定】 $0.1 \mu\text{m}/\text{y}$ | 【基本設定】 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。 |
| | 【変動設定】 腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定 | 【変動設定】 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(孔食等)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、 <u>廃止措置開始以後の状態変化の評価期間(1,000年後)においては、腐食形態に係らず瞬時に全量が腐食すると設定する。</u> |

4.2. 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なパラメータを第 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等を考慮し設定する。

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砕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。

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載

第 28 表 金属の膨張量算出に必要なパラメーター一覧

| 項目 | | 対象施設 | | |
|-----------------|----------|---|--|--|
| | | 3号 | 1号 | 2号 |
| 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) |
| 腐食膨張倍率 | 基本設定 | 【共通】 3倍 | | |
| | 変動設定 | 【共通】 4倍 | | |
| 金属の表面積 /比表面積 | 金属廃棄物 | 【共通】 $8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$ (溶融体を除く) $2.18 (\text{m}^2/\text{本})$ (溶融体のみ) | | |
| | 廃棄体容器 | 【共通】 $4.8 (\text{m}^2/\text{本})$ | | |
| | 埋設設備中の鉄筋 | 19,000(m ²) | 3,000(m ²) | 11,000(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) | 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) |
| 腐食速度 | 基本設定 | 【共通】 $0.1 (\mu\text{m}/\text{y})$ | | |
| | 変動設定 | 【共通】 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 | 基本設定 | 【共通】 1,000(y) | | |
| | 変動設定 | 【共通】 腐食速度を設定しないことから、評価年数を設定しない | | |

4.2.1. 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(廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋及び金属廃棄物)、腐食膨張倍率等を用いて算出し、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号廃棄物埋設施設を対象とし、基本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)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)}^{*1}(\text{m}^3) / \text{埋設設備の水平面積}^{*2}(\text{m}^2))$$

*1 埋設設備の体積膨張量(m³)(金属腐食の膨張のみ)

$$= (\text{単位年数当たりの腐食体積}(\text{m}^3/\text{y})^{*3} \times \text{評価年数}(\text{y}) \times \text{金属の腐食膨張倍率}) - (\text{健全時の金属重量}(\text{kg}) / \text{鉄の密度}^{*5}(\text{kg}/\text{m}^3))$$

*2 埋設設備の水平面積(m²)

$$= \text{埋設設備(東西方向)長さ}(\text{m}) \times \text{埋設設備(南北方向)長さ}(\text{m})$$

*3 単位年数当たりの腐食体積(m³/y)

$$= \text{金属の総表面積}(\text{m}^2)^{*4} \times \text{腐食速度}(\text{m}/\text{y})$$

*4 金属の総表面積(m²/y)

$$= (\text{廃棄体容器の表面積}(\text{m}^2) + \text{埋設設備中の鉄筋の表面積}(\text{m}^2) + \text{金属廃棄物の表面積}(\text{m}^2))$$

$$= (1 \text{ 本当りの表面積}(\text{m}^2/\text{本}) \times \text{本数}(\text{本})) + \text{埋設設備中の鉄筋の表面積}(\text{m}^2) + (\text{金属廃棄物の重量}(\text{kg}) \times \text{充填固化体のうち溶融処理を行わない場合の比表面積}(\text{m}^2/\text{kg}))$$

*5 鉄の密度は、7,874(kg/m³)⁽²¹⁾

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) | | |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 対象施設：3号 | 対象施設：1号 | 対象施設：2号 |
| | 鉛直方向 | | |
| 基本設定 | 1.10×10 ⁻¹ | 2.53×10 ⁻² | 9.51×10 ⁻² |
| 変動設定 | 1.69×10 ⁰ | 3.61×10 ⁻¹ | 1.39×10 ⁰ |

4.2.2. 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(廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋及び金属廃棄物)、腐食膨張倍率等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号廃棄物埋設施設を対象とし、基本設定のうち鉛直・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)

= (埋設設備(東西寸法)(m) × 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)^{*1}) - 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(-)

= (埋設設備の体積膨張比(-)^{*2})の三乗根

*2 埋設設備の体積膨張比(-)

= (埋設設備の体積(健全時)(m³) + 埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)(m³)^{*3}) / 埋設設備の体積(健全時)(m³)

*3 埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)(m³)

= (単位年数当たりの腐食体積(m³/y)^{*4} × 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))

*4 「4.2.1.鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち^{*3}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)⁽²¹⁾

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。

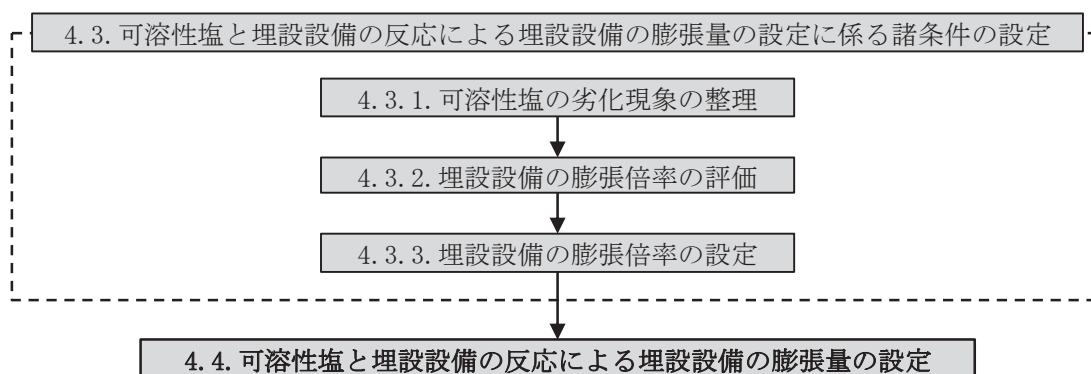
第30表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

| 設定 | 膨張量(m/基) | | | | | | | | |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 対象施設：3号 | | | 対象施設：1号 | | | 対象施設：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 |
| 基本設定 | 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 |
| 変動設定 | 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 |

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

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、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

4.3.1. 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(Na_2SO_4)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⁽²²⁾⁽²³⁾、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

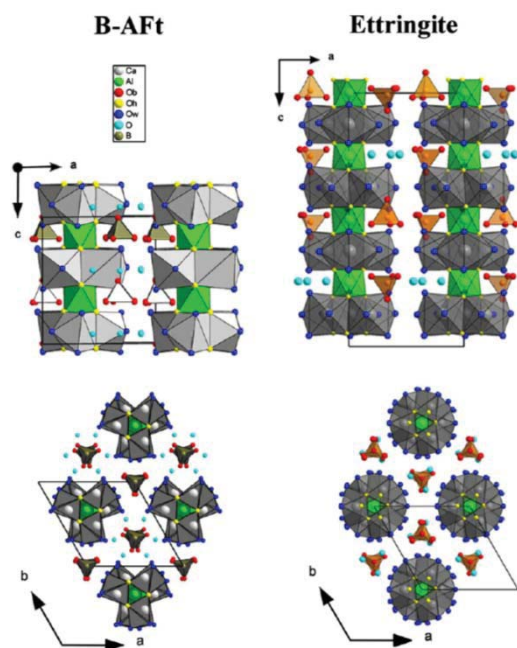
| メカニズムの分類 | |
|----------|---|
| 化学的劣化 | エトリンガイト生成 • エトリンガイトの生成による結晶成長圧などがコンクリートを劣化させる。 $\text{C-A-H} \xrightarrow{\text{monosulfate CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2\text{O}} \text{ettringite}$ |
| | 二水石こう生成 • 二水石こうの生成による結晶成長圧でコンクリートが劣化する。 $\text{C-S-H} \xrightarrow{\text{Ca(OH)}_2 \text{SO}_4^{2-}, \text{H}_2\text{O}} \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| | ソーマサイト生成 • 主に低温環境において、 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-}$ 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。 $\text{C-S-H} \xrightarrow{\text{Ca(OH)}_2 \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{H}_2\text{O}} \text{thaumasite}$ |
| | Mg ²⁺ による劣化 • 硫酸塩がMgSO ₄ の場合、以下の反応によりMg ²⁺ がセメント水和物を分解する。 $\text{C-S-H} \xrightarrow{\text{Ca(OH)}_2 \text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}} \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Mg(OH)}_2 + \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{M-S-H}$ |

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 イオン等)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する直接的な文献は確認されていない⁽²⁴⁾。

一方で、エトリンガイトの SO₄ に対して BO₄ が置換すること^{(24)~(26)}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 とエトリンガイトの結晶構造の比較を第 8 図に示す。



- ・ ほう酸は、エトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) に対して、3 つの SO_4^{2-} イオンが 4 つの $\text{B}(\text{OH})^{4-}$ と 2 つの OH^- とに置き換わった構造をとる (= エトリンガイトと結晶構造が類似)。



- ・ エトリンガ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*1 とエトリンガイトの結晶構造の比較

*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 (エトリンガイトを主に指す)。

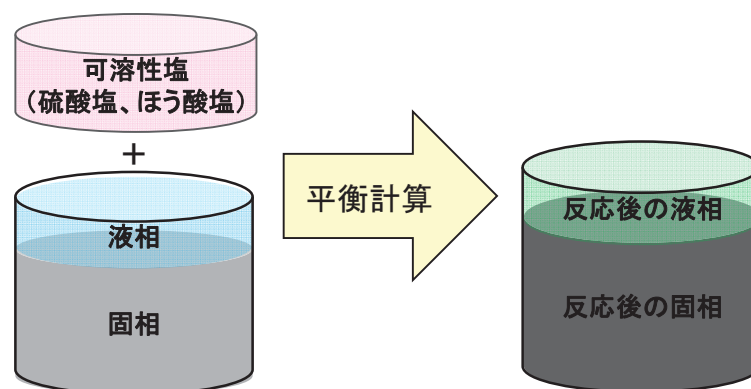
4.3.2. 埋設設備の膨張倍率の評価

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、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エトリンガイト等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^{(27)~(29)}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(エトリンガイト等)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

(1) 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⁽³⁰⁾)を用いる。

(2) 解析用物性値

PHREEQC の平衡計算に必要となる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(敷地全体)

| | | 濃度 (mg/L) | 設定値 (mol/L) |
|-----------|-------------------------------|------------|----------------------|
| pH | | 5.3-8.3 | 地下水組成より地 化学計算される値 |
| ナトリウムイオン | Na ⁺ | 7.2-31.5 | 8.4×10 ⁻⁴ |
| カリウムイオン | K ⁺ | 0.5-5.6 | 7.8×10 ⁻⁵ |
| カルシウムイオン | Ca ²⁺ | 0.1 未満-7.2 | 9.1×10 ⁻⁵ |
| マグネシウムイオン | Mg ²⁺ | 0.1-3.8 | 8.0×10 ⁻⁵ |
| 炭酸水素イオン | HCO ₃ ⁻ | 5.6-51.9 | 4.7×10 ⁻⁴ |
| 硫酸イオン | SO ₄ ²⁻ | 1.0-21.7 | 1.2×10 ⁻⁴ |
| 塩化物イオン | Cl ⁻ | 12.9-20.3 | 4.7×10 ⁻⁴ |

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。

上記、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⁽³¹⁾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 (%) | W/C (%) | 単位 水量 (kg/m ³) | 単位 セメント量 (kg/m ³) | | | 細・粗骨 材量 (kg/m ³) | | | |
|--------|------------|------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----|------------------------------------|-----|-----|--|
| | | | | 中庸熟 ポルトランドセメント | 高炉 スラグ 微粉末 | 膨張材 | 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 | 55.0 | 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 | |

第 34 表 セメント系材料の化学組成

| wt% | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | 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 | 0.20 | 0.38 | 0.64 |
| 中庸熟ポルトランドセメント | 23.3 | 3.8 | 3.9 | 63.3 | 0.9 | 2.4 | 0.30 | 0.35 | 0.8 |

第 35 表 高炉スラグの化学組成

| wt% | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|
| 高炉スラグ | 34.19 | 14.87 | 0.84 | 41.97 | 6.09 | 0.02 | 0.0 | 0.0 |

第 36 表 セメント系材料の初期鉱物組成

| | | 充填材 | | コンクリート | |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | 間隙率 (-) | 0.16 | 間隙率 (-) | 0.16 |
| | | 鉱物濃度 | | | |
| | | (mol/m ³) | (mol/L _{water}) | (mol/m ³) | (mol/L _{water}) |
| エトリンサイト | 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 |

c. 初期鉱物組成

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(可溶性塩等)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 | テータース内での名称 | 固相名 | テータース内での名称 |
| 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} |
| ゲーライトハイドレート(C_2ASH_8) | Stratlingite | ゲーライトハイドレート(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)の施設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(ほう酸塩及び硫酸塩)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。廃棄体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. 計算ケース

a. 地下水組成から 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 計算ケース-1

| ケースNo. | セメント | 間隙率 | 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 |

第 40 表 計算ケース-2

| ケースNo. | セメント | 間隙率 | 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 |

f. 計算結果

PHREEQC を用いた平衡計算の計算結果を第 10 図から第 13 図に示す。

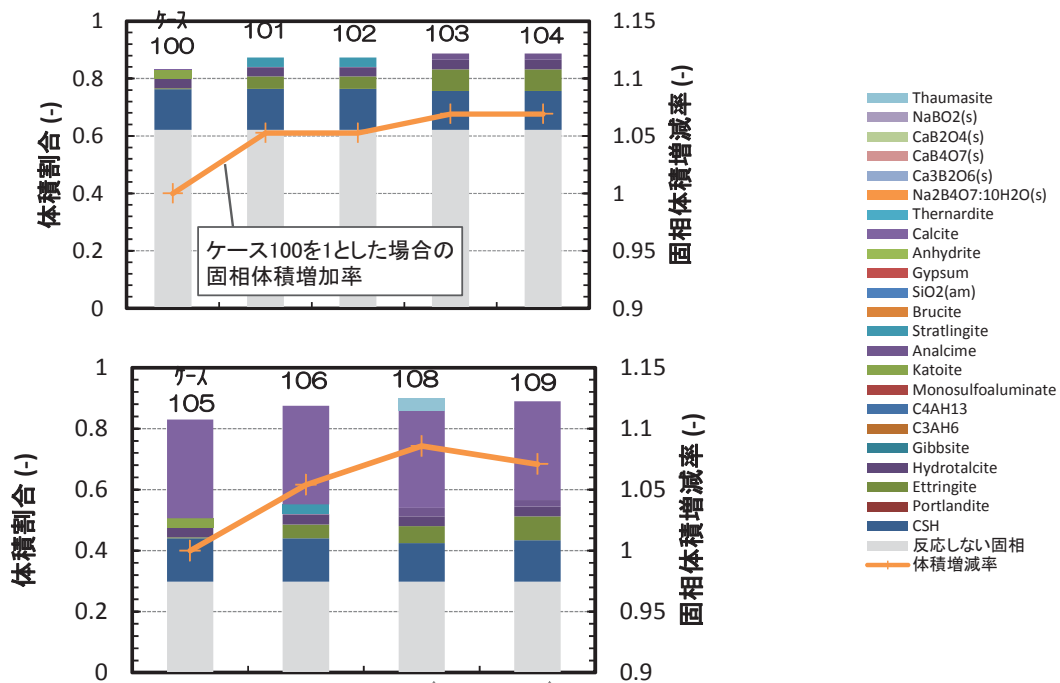
第 10 図より、充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、計算ケース 108 であり、約 9%の体積増加であった。第 11 図より、解析ケース 100-2～109-2 の計算結果では、計算ケース 103-2、104-2 にて解析ケース 100～109 シリーズと同様の約 9%の体積増加であった。

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、計算ケース 208、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、計算ケース 203-2、204-2、207-2 及び 208-2 にて約 4%の体積増加であった。

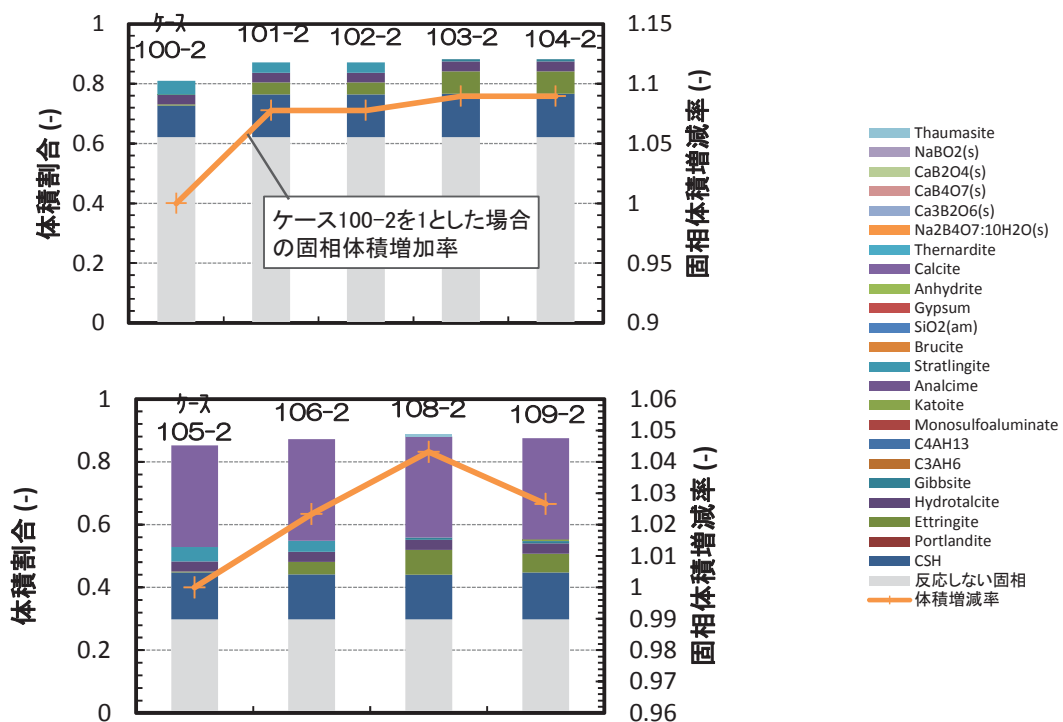
充填材及びコンクリートを対象とした解析結果より、それぞれの部材に生じ得る体積増加分は、「4.3.1. 可溶性塩の劣化現象の整理」のとおり、設定する物性値の評価に不確かさがあることから、以下のとおり最大の体積膨張倍率を設定する。

- ・ 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。

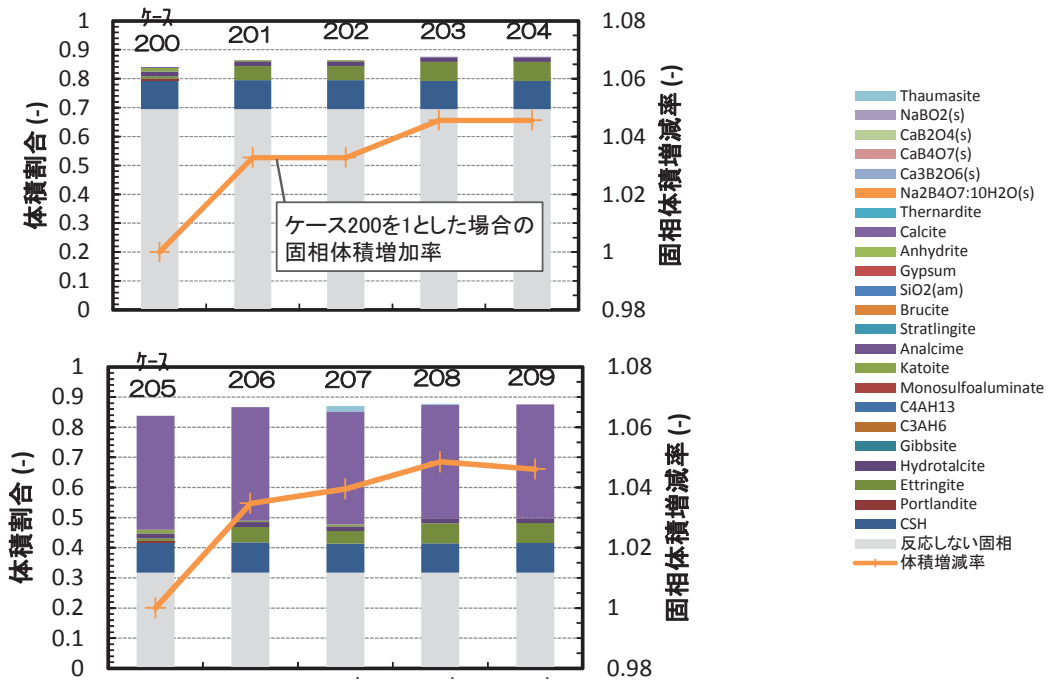
上記の設定に加えて、埋設設備の充填材、コンクリートの体積分率(第 41 表参照)を踏まえた埋設設備の体積膨張倍率を設定する。埋設設備の膨張倍率の設定値及びその考え方に関しては、次章の「4.3.3. 埋設設備の膨張倍率の設定」にて詳述する。



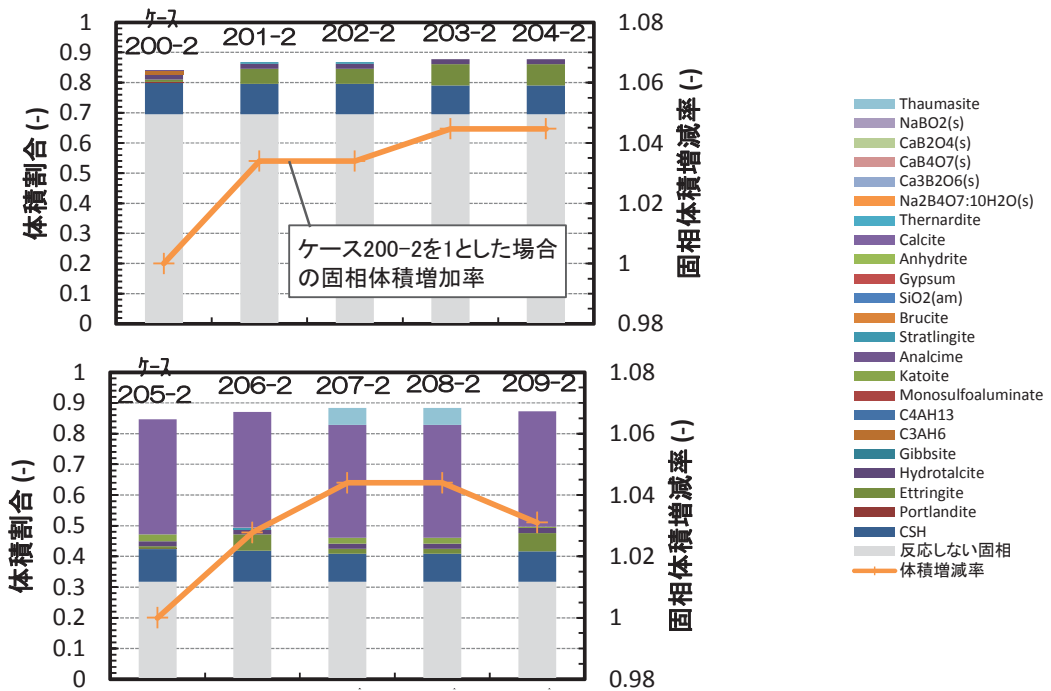
第10図 充填材を対象とした解析ケース 100~109 の計算結果



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となる体積分率は、第 41 表の埋設設備の構成部材ごとの値を用いる。

4.3.3. 埋設設備の膨張倍率の設定

「4.3.2. 埋設設備の膨張倍率の評価」の結果を踏まえ、基本／変動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. 基本設定

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. 変動設定

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 | 【基本設定】 1.0倍 (変化なし) | 【基本設定】 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張は、エトリンガイト等の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。 |
| | 【変動設定】 1.1倍 | 【変動設定】 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。 |

4.4. 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。

4.4.1. 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号廃棄物埋施設のうち、変動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(m³)

$$= (\text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(\text{m}^3) \times \text{埋設設備の体積膨張倍率}(-)) - \text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(\text{m}^3)$$

*2 埋設設備の水平面積(m²)

$$= \text{埋設設備(東西方向)長さ(m)} \times \text{埋設設備(南北方向)長さ(m)}$$

*3 埋設設備のセメント系材料の体積(m³)

$$= \text{埋設設備の体積}(\text{m}^3) (\text{東西方向長さ(m)} \times \text{南北方向長さ(m)} \times \text{鉛直方向高さ(m)}) - (\text{埋設設備中の健全時の金属重量(kg)} / \text{鉄の密度(kg/m}^3))$$

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) |
|------|-----------------------|
| | 対象施設:1号 |
| | 鉛直方向 |
| 基本設定 | — |
| 変動設定 | 6.08×10 ⁻¹ |

4.4.2. 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号埋設設備の変動設定のうち鉛直・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 「4.4.1. 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 「4.4.1. 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) | | |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 対象施設: 1号 | | |
| | 東西方向 | 南北方向 | 鉛直方向 |
| 基本設定 | - | - | - |
| 変動設定 | 7.88×10^{-1} | 7.88×10^{-1} | 2.01×10^{-1} |

4.5. 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

4.5.1. 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号廃棄物埋設施設では、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こととする。

1号廃棄物埋設施設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こととする。

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こととする。

以上より、1号廃棄物埋設施設のうち、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こととする。

4.5.2. 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「4.5.1. 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) | | |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 対象施設：3号 | 対象施設：1号*1 | 対象施設：2号 |
| | 鉛直方向 | | |
| 基本設定 | 1.10×10^{-1} | 2.53×10^{-2} | 9.51×10^{-2} |
| 変動設定 | 1.69×10^0 | 9.69×10^{-1} | 1.39×10^0 |

*1 1号廃棄物埋設施設のうち変動設定は、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) | | | | | | | | |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 対象施設：3号 | | | 対象施設：1号*1 | | | 対象施設：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 |
| 基本設定 | 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} |
| 変動設定 | 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号廃棄物埋設施設のうち変動設定は、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

5.1. 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、「4.状態変化(膨張)に必要な条件設定」にて設定したとおり、メートルオーダーの大変形であることから、覆土の低透水性へ影響を与えると予想される。

そのため、覆土の状態変化による低透水性への影響を確認するため、解析を用いた状態変化の評価を行う。

5.2. 力学的影響評価手法

覆土への力学的影響の評価手法は、埋設設備の膨張による覆土の大変形に応じた挙動の評価に対して、粒状体個別要素法(Distinct Element Method)(以下「DEM」という。)解析がある。

DEM解析は、不連続体を対象とした評価のために開発されたものであり、解析対象を粒子の集合体(剛体)とし、粒子間結合をバネ、ダッシュポッド、スライダー等でモデル化することで、物体の挙動を再現する解析手法である。

粒子にバネによる粒子間作用力及び粒子の運動方程式を適用することで、大変形に対する覆土への力学的作用を良好に再現できることから、DEM解析による力学特性の変化を考慮した状態変化の評価を行うことは可能である。また、解析用物性値は、難透水性覆土及び下部覆土の材料仕様を参考に、地盤工学会基準「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)の結果を用いたシミュレーション解析により設定できる。

したがって、埋設設備の膨張による覆土の大変形に対する力学的影響評価手法としては、DEM解析により行うことが適切であると判断する。

また、DEM解析に用いるコードは、岩石や粘土の挙動評価のために開発されたコード⁽³²⁾を用いる。

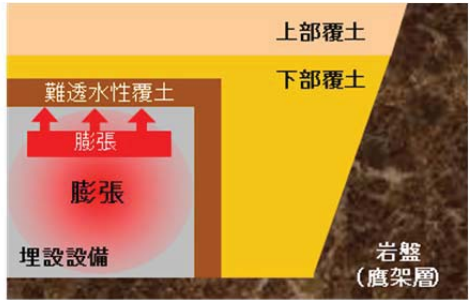

5.3. 解析に用いる諸条件の設定の考え方

DEM解析に用いる諸条件は、埋設設備に生じる膨張挙動の不確実性を考慮し、必要に応じて設定する。具体的な設定の考え方に関しては、解析条件ごとの設定項目にて詳述する。

5.4. 埋設設備の膨張影響の方向の設定

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47表に示す。

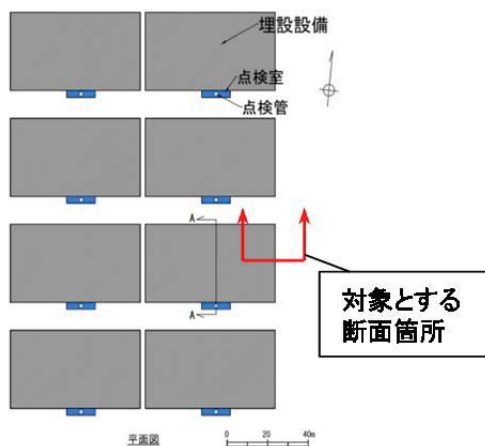
第47表 埋設設備の膨張影響の方向の設定

| 設定 | 設定の考え方 | 変形概念図 |
|-------------------------------------|---|--|
| <p>【基本/変動共通】</p> <p>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>【基本/変動共通】</p> <p>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ま鉛直・水平方向へ作用するとして設定する。</p> |  |

5.5. 解析モデル

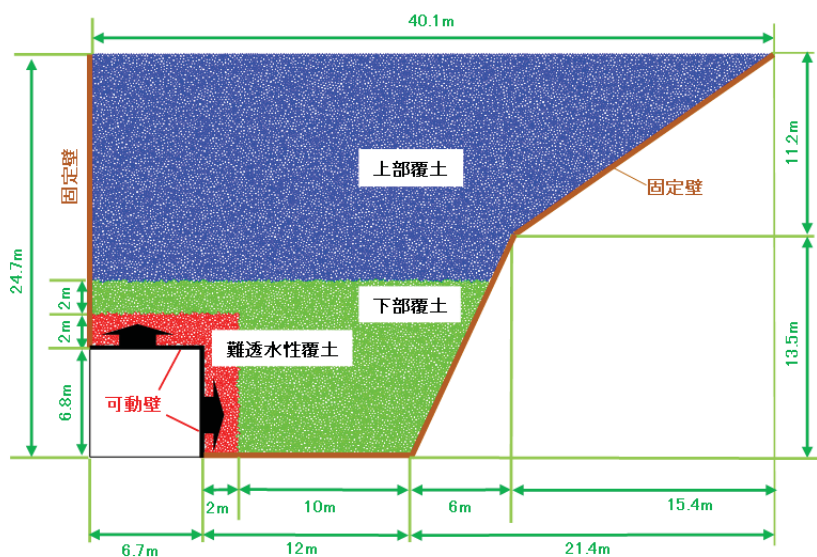
解析モデルの設定においては、膨張量の最も大きな3号廃棄物埋設地を代表とする。

金属廃棄体の配列数が多い東西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14図に、解析モデルを第15図にそれぞれ示す。



第14図 3号廃棄物埋設地における解析対象断面の位置図

| 解析断面 | 埋設設備寸法 | 境界条件 |
|------|--------|----------------|
| 東西方向 | 1区画分 | 固定壁 岩盤(鷹架層) |



第15図 3号廃棄物埋設地の解析モデル

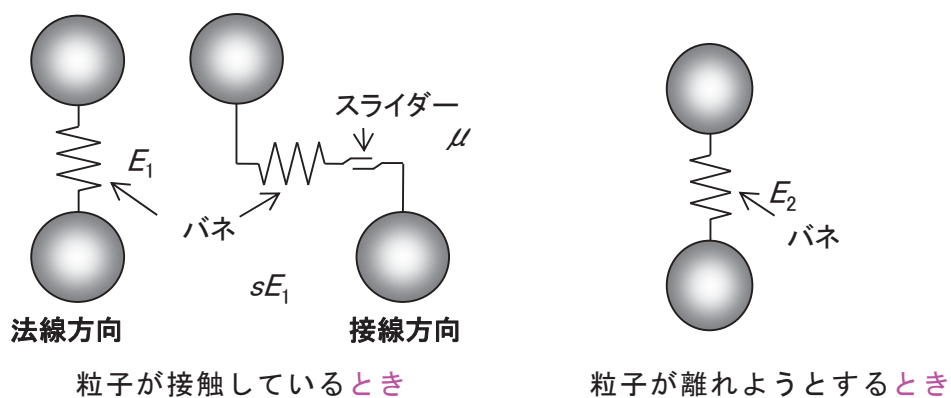
5.6. 解析条件

a. 粒子間結合モデルの設定

難透水性覆土は、砂を母材としたベントナイト混合土とする。下部覆土は、現地発生土を用いるため、品質（粒度分布）が変動することから、必要に応じて砕石やベントナイトにより調整を行うこととしている。そのため、DEM 解析においては、強度が小さくなる砕石及びベントナイトを混合しない現地発生土単体とする。

本解析に用いる粒子間結合モデルの設定は、粘土を含む土質材料の性質を表現するため、粒子の中心間を一本のバネで接続することによって結合量を再現したものである。接続された粒子同士が離れようとするときバネによる引力が働き、粒子同士が接触している場合には反発力と摩擦力が作用する。このとき、岩石モデルのような回転バネが存在しないため、粒子は結合を保ったままある程度互いに回転することができる。

さらに、引張力がバネの強度を超えるとバネが破断するようにし、粒子同士が接触することによって結合力が再生するものとする。これにより本モデルは、粘土を含む土質材料の性質である結合力の消滅・再生を繰り返し表現できるような設定とする。粒子間結合モデルの概念図を第 16 図に示す。



第 16 図 粒子間結合モデルの概念図

b. 解析用物性値

解析用物性値は、解析対象である難透水性覆土及び下部覆土の材料仕様を参考に、地盤工学会基準「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)の結果を用いたシミュレーション解析により設定した。三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 17 図に示す。

モデルは、円形粒子の集合体で表現されている。モデルの作成方法については、設定した区間(最小粒子半径及び最大粒子半径)の一樣乱数により半径を決定した粒子を、すでに配置されている粒子と重なり合わず接触できる位置を探索して配置し、モデル内の空間がなくなり、あらかじめ設定した最小の半径を有する新しい粒子が配置できなくなるまでこの手順を繰り返す手法を用いた。

三軸圧縮試験のシミュレーションは、モデル下部の載荷版を固定しておき、左右から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の載荷版をゆっくりと動かすことにより実施した。このとき試験片モデルと壁面の間の摩擦係数は 0 とした。これは、摩擦による不要な応力集中を避けるためである。

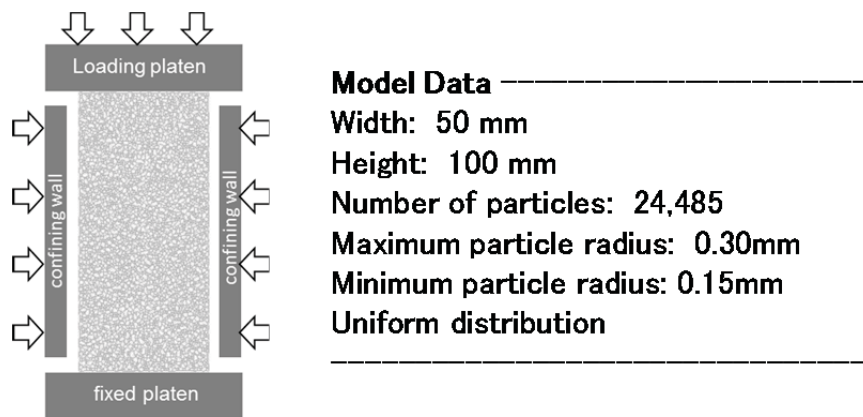
軸方向応力は、モデル上端の粒子から上部の載荷版に作用する反発力の総和をモデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、試験片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。

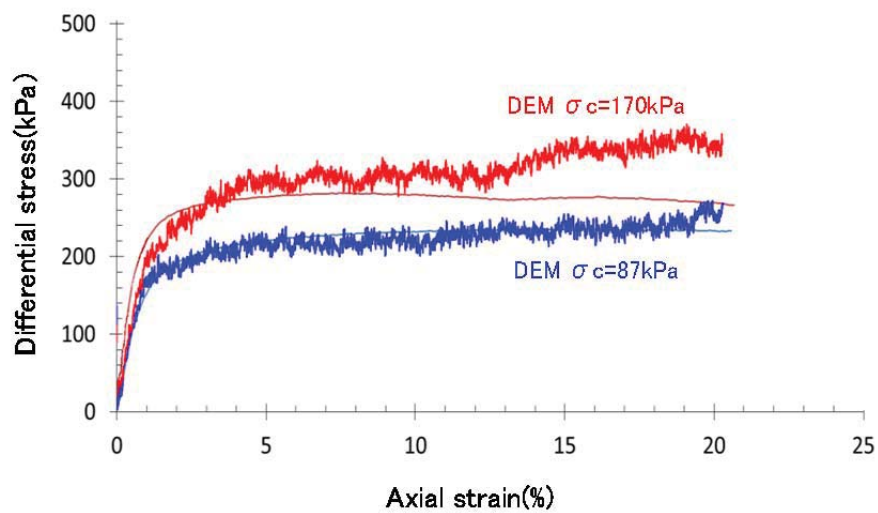
三軸圧縮試験のシミュレーションに用いる供試体モデルは、幅 50mm、高さ 100mm(最大粒子半径 0.3mm、最小粒子半径 0.15mm)として作成した。粒子数は 24,485 個である。入力パラメータは拘束圧 87kPa、170kPa の結果を対象として決定した。

上記条件により実施した難透水性覆土及び下部覆土の三軸圧縮試験シミュレーションにより得られた軸差応力-ひずみ線図及び三軸圧縮試験結果を第 18 図及び第 19 図に示す。

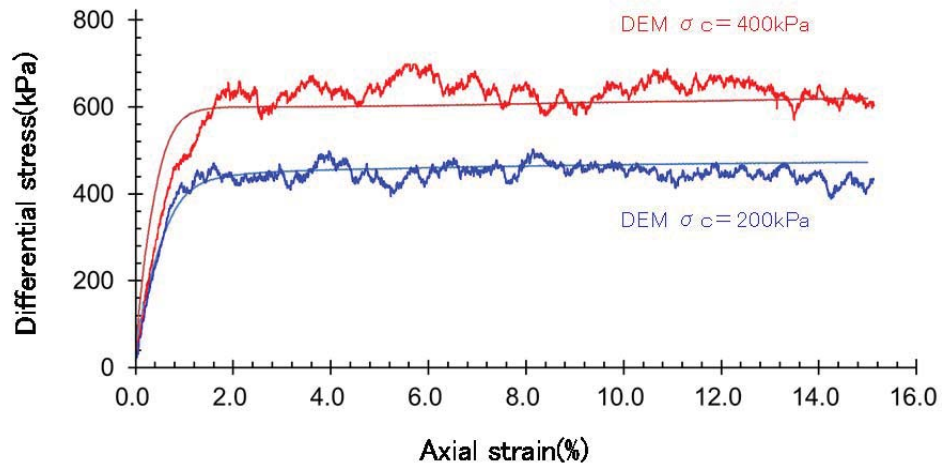
また、決定された難透水性覆土及び下部覆土の入力パラメータを第 48 表に示す。



第 17 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル



第 18 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験のシミュレーションと実験結果の比較



第 19 図 下部覆土に対する三軸圧縮試験のシミュレーションと実験結果の比較*1

*1 上記の力学解析においては、強度が小さくなる砕石及びベントナイトを混合しない現地発生土単体の力学特性を用いて入力パラメータを設定している。

第 48 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 | | |
| 密度 | 1,649 | 1,940 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | - | 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 | - | 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_{amax}) | 330 | 1,000 | kPa | 三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。 |

c. 解析に用いる変形量

「4.5. 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」を基に、解析に必要となる変形方向及び変形量を設定する。

解析の変形挙動は、「4.5.2. 膨張量の設定値」を参考とした変形量とし、「5.4. 埋設設備の膨張影響の方向の設定」に従い埋設設備の変形比率を保ったまま一定として設定、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。

なお、変形量の値は、膨張量の大きさを1号～3号廃棄物埋設施設で比較し、最も大きな値を参考に設定する。

第49表 DEM解析に用いる変形量

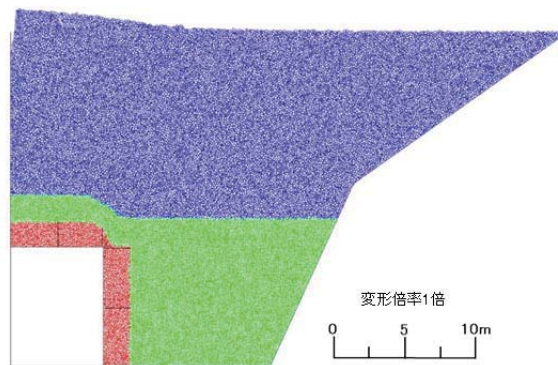
| 変形方向 | 変形量(m/基) | |
|-------------|----------|------|
| | 東西方向 | 鉛直方向 |
| 鉛直方向へ卓越した変形 | 0.0 | 2.0 |
| 鉛直・水平方向への変形 | 5.0 | 1.0 |

5.7. 解析結果

5.7.1. 覆土の変形方向による力学的影響の確認

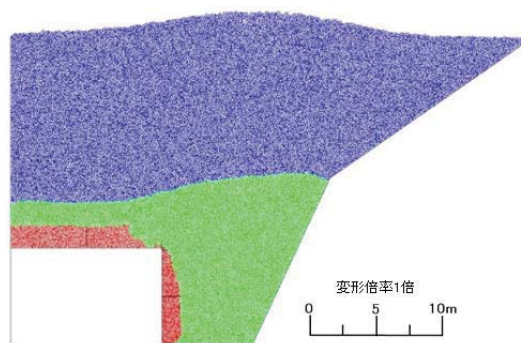
前項までに設定したパラメータを用いて DEM 解析を実施した。解析では、覆土の形状変化に大きな影響を与える状態を確認するため、第 47 表で設定した変形方向の 2 種類の設定を併記することで形状変化を確認する。解析結果を第 20 図及び第 21 図に示す。第 20 図及び第 21 図より、第 49 表の変位を与えた際の覆土の形状変化は、鉛直・水平方向への変形による影響が大きいことが確認された。

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。



変形量(鉛直方向：2.0m)

第 20 図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



変形量(東西方向：5.0m、鉛直方向：1.0m)

第 21 図 鉛直・水平方向への変形ケースにおける解析結果

5.7.2. 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 表の基本設定の膨張量(東西方向： $3.50 \times 10^{-1} \text{m}$ 、鉛直方向： $3.64 \times 10^{-2} \text{m}$)及び変動設定の膨張量(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 22 図に示す。

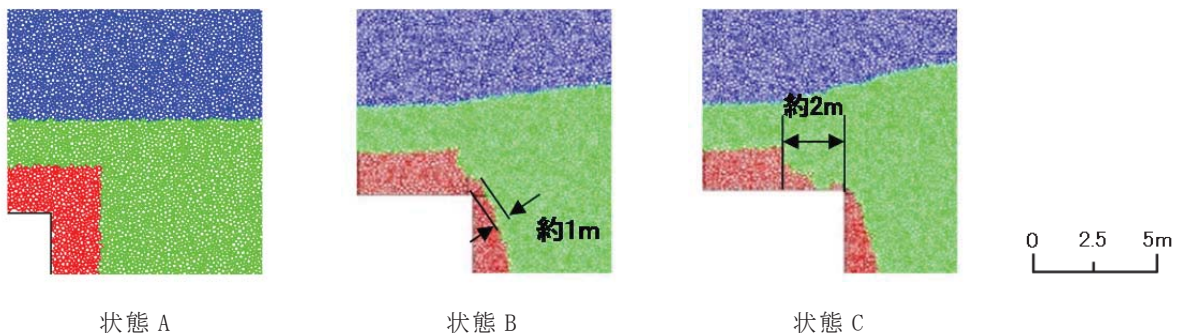
- ・ 状態 A 解析の初期状態
- ・ 状態 B 基本設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： 3.0m 、鉛直方向： 0.6m)
- ・ 状態 C 変動設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： 5.0m 、鉛直方向： 1.0m)

解析結果から、基本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 以上残る状態を基本設定の設定値とする。

また、変動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変動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。



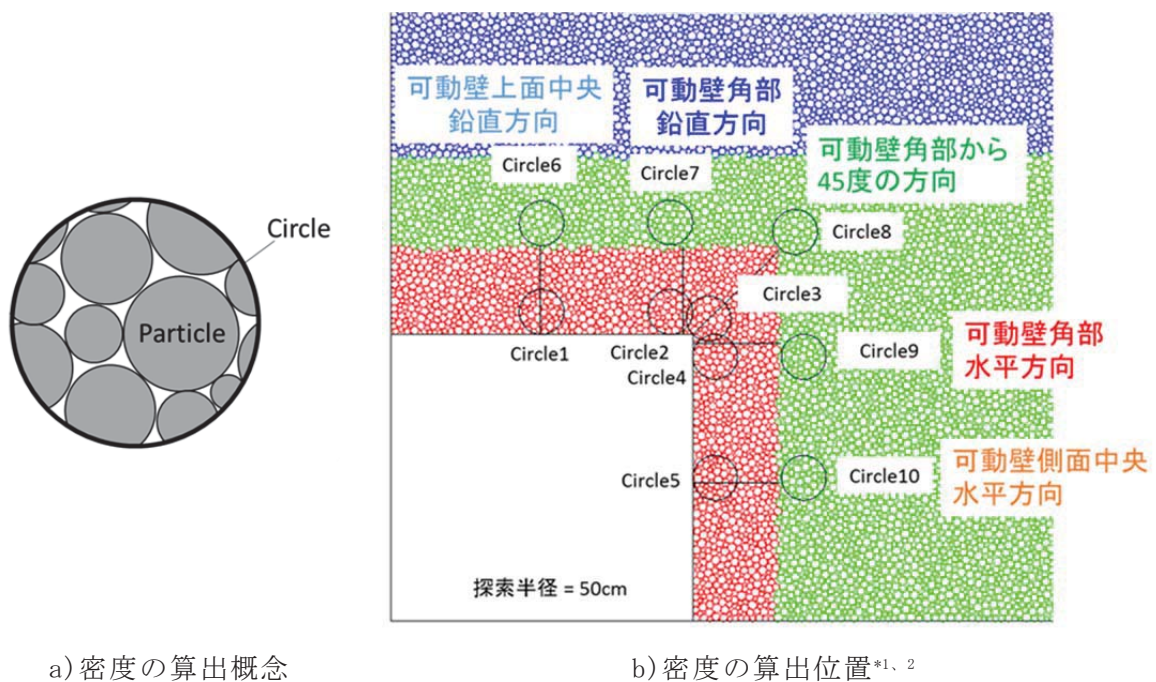
第 22 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける弱部(隅角部)の拡大図

5.7.3. 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 23 図の 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 23 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 50 表に示す。

第 50 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。



第 23 図 密度の算出方法の概念図

*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

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載

コメントNo.110_を踏まえ、記載の適正化

第 50 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 22 図のうち状態 B | 第 22 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、密度低下部を示す。

1 号廃棄物埋設施設に関しては、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 22 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 24 図に示す。

解析結果から、基本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 以上残る状態を基本設定の設定値とする。

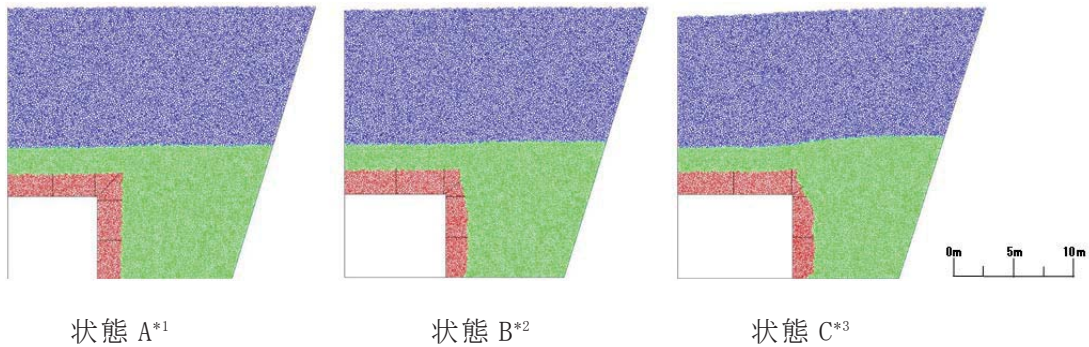
また、変動設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じないものの、厚さがほぼ残らない状態を設定値とする。

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。

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載
 コメントNo.110_埋設する廃棄体による力学的影響に関する説明を記載

コメントNo.110_を踏まえ、記載の適正化



第 24 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける解析結果

- *1 状態 A 解析の初期状態
- *2 状態 B 基本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 変動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)

5.8. 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 51 表に示す。

第 51 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

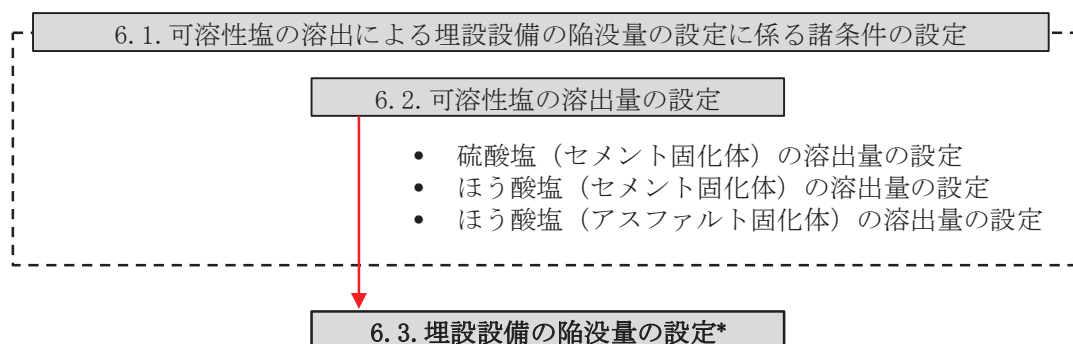
| 対象移設 (対象廃棄物) | 変形 形態 | 力学的変形 | |
|-------------------|----------|--|--|
| | | 基本設定 | 変動設定 |
| 2号及び3号 (充填固化体) | 膨張 | ○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態 | ○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態 |
| 1号 (充填固化体) | 膨張 | ○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態 | ○難透水性覆土 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

6.1. 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を第 25 図に示す。



第 25 図 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定手順^{*1}

*1 廃棄体の上部空隙を考慮し陥没量の設定を行う。

6.2. 可溶性塩の溶出量の設定

6.2.1. 硫酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置開始以後の状態変化の評価においては、文献⁽³³⁾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。

6.2.2. ほう酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置開始以後の状態変化の評価においては、文献⁽³³⁾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。

6.2.3. ほう酸塩(アスファルト固化体)の溶出量の設定

廃止措置開始以後の状態変化の評価においては、文献⁽³⁴⁾を参考にアスファルトの実態的な閉じ込め性能を考慮し、設定する。

6.3. 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。

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⁽³⁴⁾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 (m^2)

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。

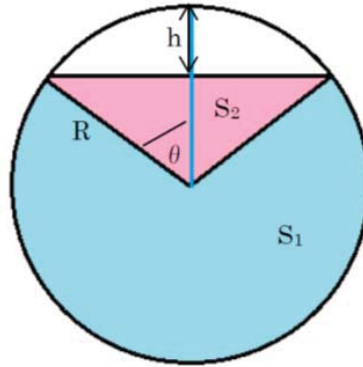
次に、ドラム缶断面の廃棄体投影面積 S を求める、投影面積に関する概念図を第 26 図に示す。

$$S = S_1 + S_2$$

$$S_1 = \pi R^2(1 - \theta/\pi)$$

$$S_2 = \frac{R^2}{2}(2\sin\theta\cos\theta)$$

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 26 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。

$$S' = S'_1 + S'_2$$

$$S'_1 = \pi(R-r)^2(1 - \theta/\pi)$$

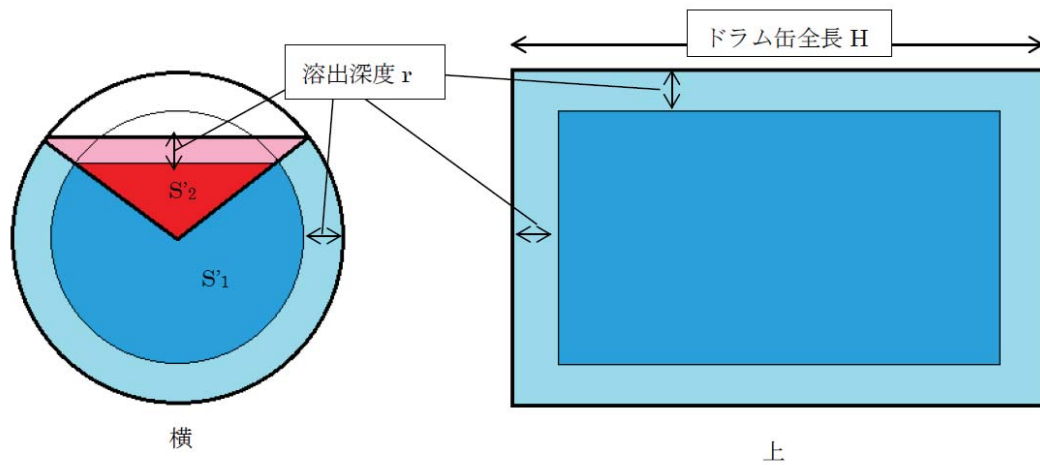
$$S'_2 = \frac{R^2}{2}(2\sin\theta\cos\theta)\left(\frac{R-h-r}{R-h}\right)^2$$

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 27 図に示す。

$$L = V_{salt} \times \frac{V_w - V'_w}{V_w} / S_{pit}$$



第 27 図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)

以上より、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 52 表に示す。

第 52 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) |
|---------|---------|
| | 対象施設：1号 |
| | 鉛直方向 |
| 基本／変動共通 | 1.0 |

7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価

7.1. 力学的影響評価の考え方

可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量は、「6.状態変化(陥没)に必要となる条件設定」にて設定したとおり、メートルオーダーの大変形であることから、覆土の低透水性へ影響を与えると予想される。

そのため、覆土の状態変化による低透水性へ与える影響を確認するため、解析を用いた状態変化の評価を行う。

7.2. 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並びに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。

7.3. 解析に用いる諸条件の設定の考え方

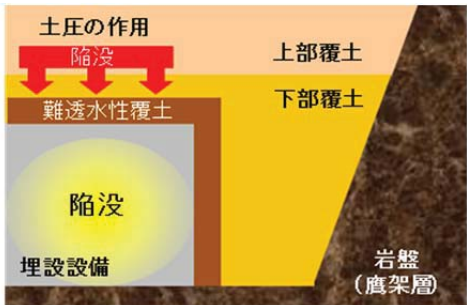
可溶性塩が含まれる埋設設備では、可溶性塩が徐々に溶出するに伴い分散した形で空隙が形成され、陥没が生じる。そのため、分散した空隙に難透水性覆土が追従して変形すると考えられる。

しかし、分散した陥没量を精度良く設定することが困難であること、難透水性覆土の変形が特定の箇所に集中した場合にひずみ変形が大きく算定されることから、埋設設備の区画内部が一律に陥没した状態を設定する。

7.4. 埋設設備の陥没影響の方向の設定

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 53 表に示す。

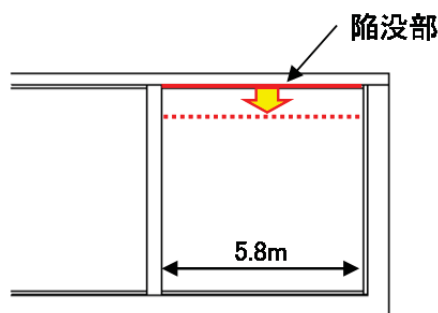
第 53 表 埋設設備の陥没影響の方向の設定

| 設定 | 設定の考え方 | 変形概念図 |
|-------------------------------------|---|---|
| <p>【基本／変動共通】</p> <p>鉛直方向へ卓越した変形</p> | <p>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。</p> <p>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。</p> |  |

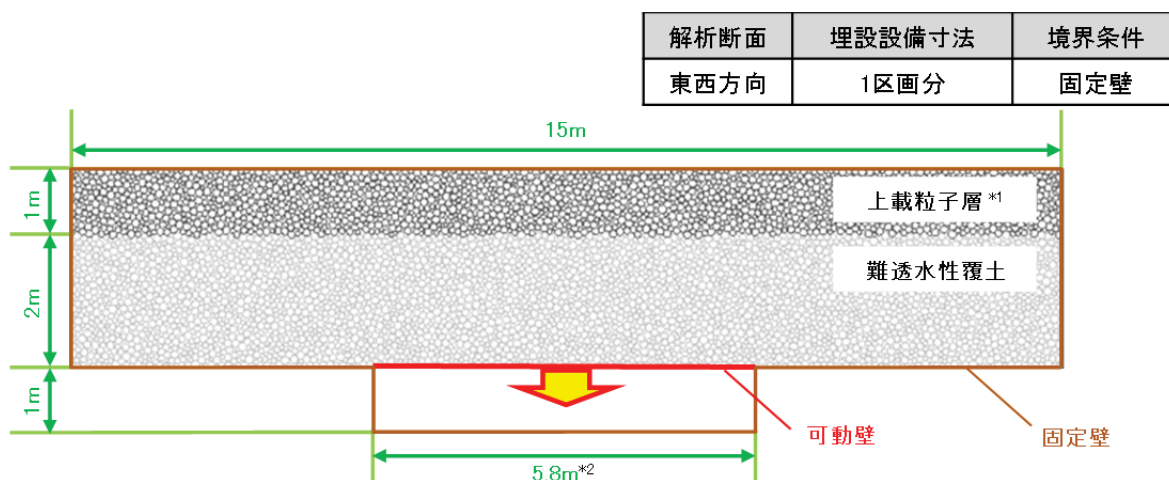
7.5. 解析モデル

DEM 解析に用いる解析モデルは、1号廃棄物埋設地とする。

解析モデルは、陥没による区画上面並びにその周辺の覆土への力学的影響の評価を行うため、1区画を対象とし、隣接する区画は陥没しない境界として設定する。対象とする断面箇所を第28図に、解析モデルを第29図にそれぞれ示す。



第28図 1号埋設設備の鉛直断面図



第29図 1号廃棄物埋設地の解析モデル

*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。

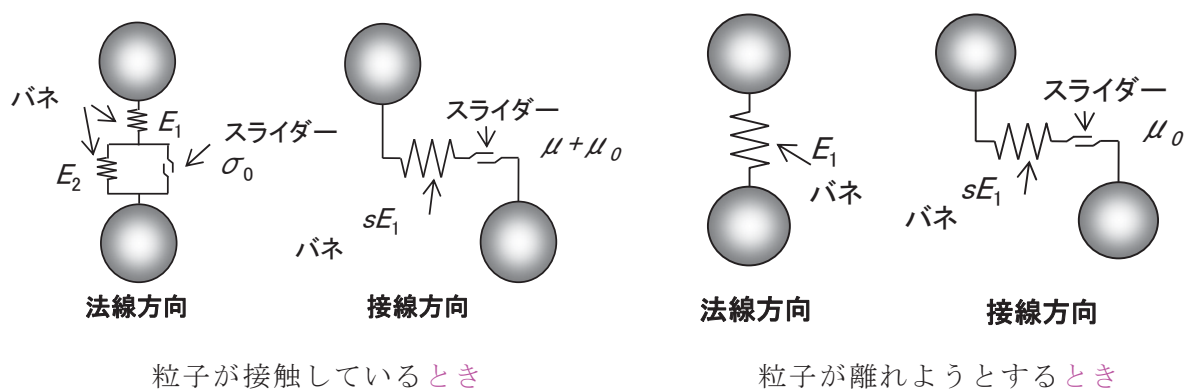
*2 陥没する幅は、1号埋設設備のうち、1区画当たりの内側寸法として設定する。

7.6. 解析条件

a. 粒子間結合モデルの設定

陥没影響は、覆土に生じる変形が膨張現象とは異なり、陥没現象により覆土が圧密されることが想定される。そのため、粒子間結合モデルは、文献⁽³⁵⁾を参考に粒子間の法線方向の結合を膨張現象にて使用した一本バネによる結合から二本のバネとスライダを組み合わせたものに変更した。陥没現象にて設定する粒子間結合モデルの概念図を第 30 図に示す。

第 30 図に示すとおり、粒子が接触しているときは、粒子間結合は弾性バネ (E_1) のみの部分と弾性バネ (E_2) と法線方向スライダ (σ_0) を並列に設置した部分を直列に配置することで、構成されている。法線方向スライダは粒子同士が近づく方向にのみ作用するものとする。接線方向については、膨張現象と同一の接線方向弾性バネ (sE_1) と摩擦スライダ (μ_0) を直列配置したモデルとなっている。



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

第 30 図 粒子間結合モデルの概念図

b. 解析用物性値

解析用物性値は、解析対象である難透水性覆土の材料仕様を参考に、地盤工学会基準「土の圧密非排水 (C \bar{U}) 三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009) を用いたシミュレーション解析により設定した。三軸圧縮試験のシミュレーションのモデルを第 31 図に示す。

三軸圧縮試験のシミュレーションは、モデル下部の載荷板を固定しておき、左右から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の載荷板をゆっくりと動かすことにより実施した。このとき試験片モデルと壁面との摩擦係数は 0 としている。これは、

摩擦による不要な応力集中を避けるためである。

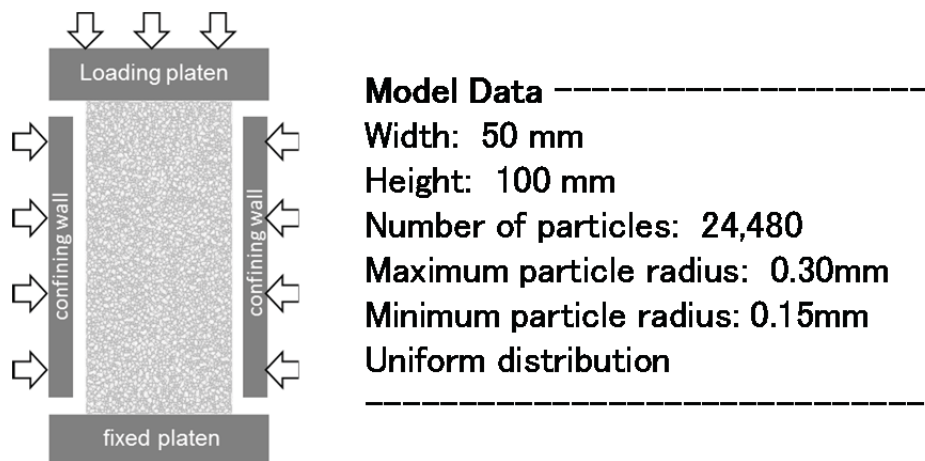
軸方向応力は、モデル上端の粒子から上部の載荷板に作用する反発力の総和をモデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、試験片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。

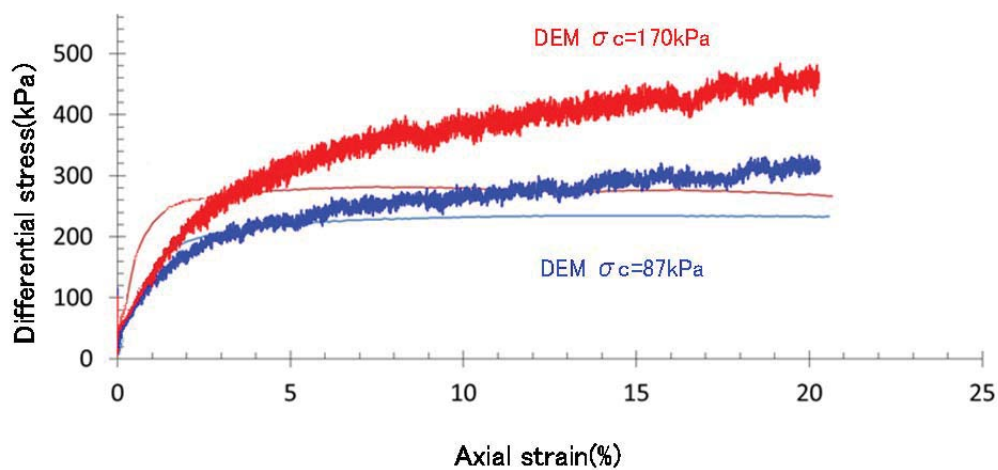
三軸圧縮試験のシミュレーションに用いる供試体モデルは、幅 50mm、高さ 100mm(最大粒子半径 0.3mm、最小粒子半径 0.15mm)として作成した。粒子数は 24,480 個である。

入力パラメータは拘束圧 87kPa、170kPa の結果を対象として決定した。上記条件により実施した三軸圧縮試験のシミュレーションにより得られた軸差応力-ひずみ線図及び三軸圧縮試験結果を第 32 図に示す。

また、決定された入力パラメータを第 54 表に示す。



第 31 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル



第 32 図 三軸圧縮試験のシミュレーションと実験結果の比較

第 54 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。 |
| 法線方向スライダー降伏値 (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。 |

c. 解析に用いる変形量

「6.2. 可溶性塩の溶出量の設定」を基に、解析に必要となる変形方向及び変形量を設定する。

解析の変形挙動は、「6.3. 埋設設備の陥没量の設定」を参考とした変形量とし、「7.4. 埋設設備の陥没影響の方向の設定」に従い、埋設設備の1区画を対象として、設定、変形するものとする。解析に用いる変形量を第 55 表に示す。

第 55 表 DEM 解析に用いる変形量

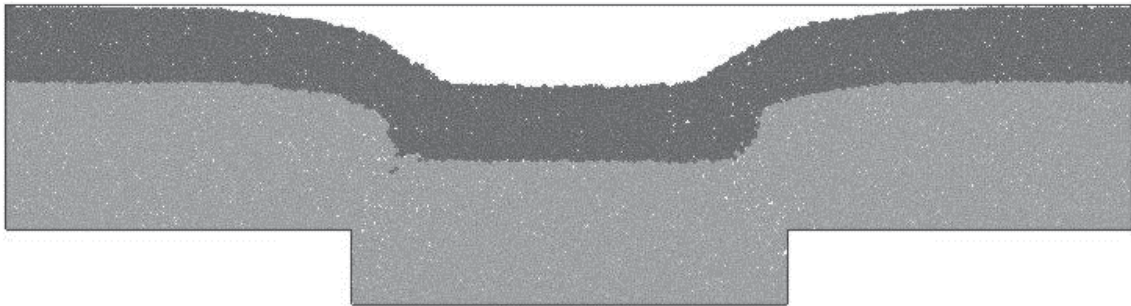
| 設定 | 陥没量(m) |
|---------|---------|
| | 対象施設：1号 |
| | 鉛直方向 |
| 基本／変動共通 | 1.0 |

7.7. 解析結果

7.7.1. 覆土の厚さの評価

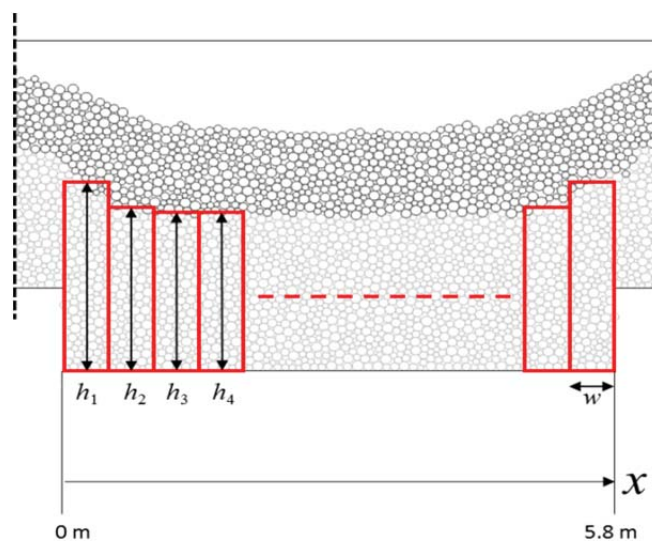
前項までに設定したパラメータを用いて DEM 解析を実施した。解析結果を第 33 図に示す。陥没現象では、第 53 表のとおり鉛直方向への変形に対する影響評価である。そのため、覆土の厚さは、第 33 図に示す解析結果を対象に、第 34 図に示す算出方法のとおり算出し確認することで評価する。算出した難透水性覆土の厚さ分布を第 35 図に示す。

第 35 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。



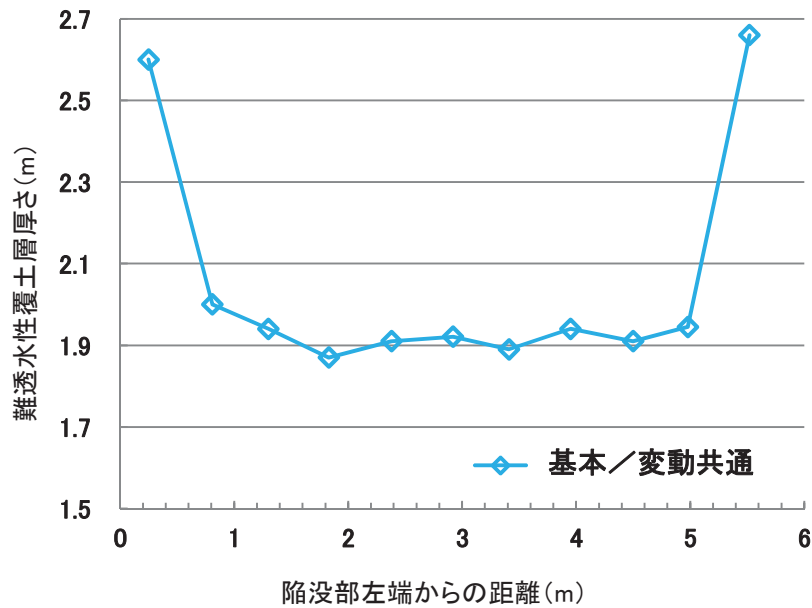
第 33 図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果*1

*1 解析結果は、基本／変動設定共通である。



第 34 図 難透水性覆土の厚さ算出方法

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載



第 35 図 難透水性覆土の厚さ分布

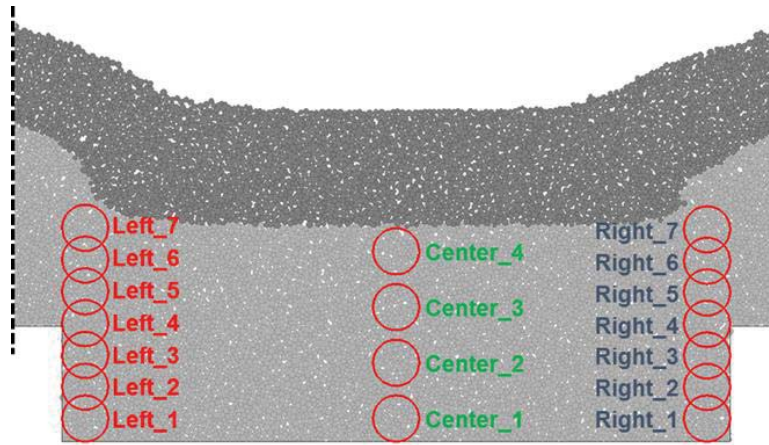
7.7.2. 覆土の透水係数の評価

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 36 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 56 表に示す。

第 56 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。

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載



第 36 図 難透水性覆土の密度測定位置

第 56 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、密度低下部を示す。

コメントNo.56_千年程度までの廃棄物埋設地の状態設定の考え方や根拠を整理した上で、その評価方法の妥当性に関する説明を記載
 コメントNo.110_埋設する廃棄体による力学的影響に関する説明を記載

コメントNo.110_を踏まえ、記載の適正化

7.8. 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57表に示す。

第57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

| 対象施設 (対象廃棄物) | 変形 形態 | 力学的変形 | |
|------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | 基本設定 | 変動設定 |
| 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58表に示す。

なお、3号及び2号廃棄物埋設施設における変動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。

また、変動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。

*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 58 表 1,000 年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

| 対象施設 (対象廃棄物) | 変形 形態 | 力学的変形 | |
|-------------------|----------|--|--|
| | | 基本設定 | 変動設定 |
| 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 |
| | | ○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 forskningresearch
- (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) 国立天文台(2005) : 理科年表 平成 18 年(机上版)、p367
- (22) 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
- (23) Jan Skalny et al. (2002) : Sulfate Attack on Concrete
- (24) J. B. Champenois et al. (2013) : Conditioning Highly Concentrated Borate Solutions with Calcium Sulfoaluminate Cement, Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage
- (25) Laszlo J et al. (1992) : Borate Substituted Ettringites, MRS Online Proceedings Library
- (26) Jean-Baptiste Champenois al. (2012) : Crystal structures of Boro-AFm and sBoro-AFt phase, Cement and concrete Research
- (27) 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
- (28) 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.
- (29) Diederik JACQUES, et. al. (2012) : Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R(2012)3
- (30) 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
- (31) 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

- (32) C. Yu, et. al. (2013) : Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions, Cement and Concrete Research, Vol.43, p105-111
- (33) 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
- (34) 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
- (35) 柴田 徹(1960) : 粘土の圧密に関するレオロジー的考察、土木学会論文集第 69 号、p29-37

以 上

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

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、高圧圧縮処理又は溶融処理を行い、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、高圧圧縮体又は溶融体に対し、「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(高圧圧縮体又は溶融体)が埋設された場合を想定した際の変動設定において、金属腐食による金属の膨張量を算出した。

なお、高圧圧縮体及び溶融体は、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、高圧圧縮体及び溶融体の表面積は、金属廃棄物が密収納された廃棄体に比べて小さいことから、腐食の進行が遅いと考えられる。

よって、高圧圧縮体及び溶融体に対しては、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 変動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 | | 対象施設 |
|-----------------|----------|--|
| | | 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 | $19,000 (\text{m}^2)$ |
| 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 $15,587 (\text{m}^3)$ |
| 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) | |
|-------|-----------------------|--|
| | 対象施設：3号 | |
| | 鉛直方向 | |
| 変動設定 | 3.21×10^{-1} | |
| 参考値*1 | 1.69×10^0 | |

*1 金属重量(310kg/本)での変動設定の膨張量

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 |
| 変動設定 | 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)での変動設定の膨張量

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)**の変動設定にて算出した膨張量に比して約 1/5 倍である。

以上より、**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)の変動設定に対し、「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

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(エトリンサイト等)を
真密度として評価する妥当性について

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(エトリンガイト等)によって生じる力学的影響(膨張)について、真密度として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る妥当性について

金属腐食によって生じる腐食生成物は、拘束がない環境において、かさ密度による評価されることが実態である。

一方で、廃棄物埋設地は、埋設設備の周囲が覆土により拘束された状態であること、かさ密度の評価は、拘束の有無に係らず腐食生成物ごとの定量的な腐食膨張倍率を評価した知見がないことから、金属の腐食に係る評価においては、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。

そのため、金属腐食に伴う腐食生成物を真密度として評価するに当たっては、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」に十分な保守性を与えている。

a. 「腐食膨張倍率の設定」に係る保守性

腐食生成物の設定においては、代表とする金属種類のうち変動設定($\text{Fe}(\text{OH})_2$)及びその他考慮する金属種類の基本設定(水酸化物(銅を除く))並びに変動設定(水酸化物)の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ものの、最も安定した腐食生成物を設定するのではなく、力学的影響(膨張)に大きく寄与するものを選択し、腐食膨張倍率を設定していることから、十分な保守性がある。

例として、文献⁽¹⁾に示される Ni(ニッケル)においては、「埋設設備中の環境条件の設定」と類似する環境下にて、水酸化物である $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (β : 3.43) だけでなく NiO (β : 1.7) などが生成する可能性として整理されている。そのため、腐食生成物は、金属腐食による膨張に大きく寄与する水酸化物を設定している。

b. 「腐食生成物の設定」及び「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る保守性

代表とする金属種類(鉄)のうち変動設定及びその他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅、亜鉛)の基本/変動設定においては、水酸化物を設定している。

いずれの水酸化物は、非晶質であることから、 Fe_3O_4 (マグネタイト)などの結晶質とは異なり剛体ではないこと。腐食生成物が生成される周辺環境には潤沢な地下水が存

在し、溶解度に従い一部の腐食生成物は地下水に溶出すること。または、地下水と共に流出することが想定される。

上述のとおり様々な特性があるものの、金属腐食による金属の膨張量の設定においては、金属の腐食に伴う腐食生成物の生成が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評価を行うことで、十分な保守性がある。

以上より、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行うことは妥当である。

3. 可溶性塩による二次鉱物(エトリンサイト等)に真密度を用いる妥当性について

可溶性塩による二次鉱物(エトリンサイト等)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」に十分な保守性を与えている。

a. 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る保守性

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こと。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)の施設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。以上の設定を行うことで、十分な保守性がある。

b. 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る保守性

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(-)

= (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

$$\begin{aligned} & (-) \times \text{コンクリートの体積膨張倍率}(-) + \text{廃棄体上部空隙}(-) \\ & = (0.194 + 0.311) \times 1.09 + (0.042 + 0.315) \times 1.05 + 0.083 \\ & = 1.0083 \end{aligned}$$

一方で、埋設設備の膨張倍率の設定値は、エトリンガイト等の膨張倍率に係る定量的な知見がない等の不確実性を考慮し、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を行うことで、十分な保守性がある。

以上より、可溶性塩による二次鉱物(エトリンガイト等)に対して、真密度を用いた評価を行うことは妥当である。

4. 参考文献

- (1) 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

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

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。

a. 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、廃止措置開始以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（正の値）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。

以上より、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すると共にORPを正の値として設定していること。
- ・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すると共にORPを負の値として設定していること。

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 | 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 | 正の値(0mV以上) | 負の値(0mV未満) |
| pH | 12.5程度 | |
| 水温 | 10～15℃程度 | |

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。

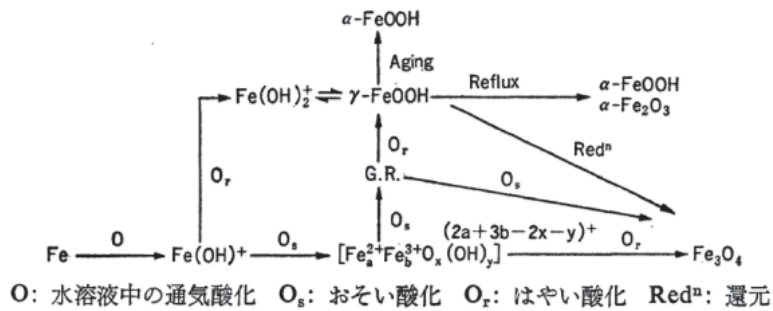
(①の環境下での腐食メカニズム)

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^{(3)~(5)}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⁽³⁾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。

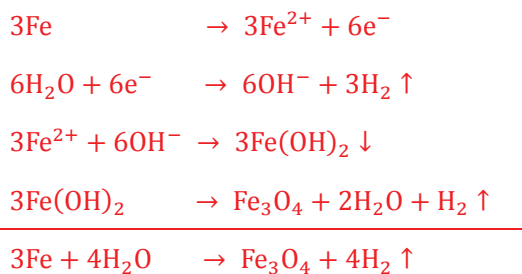


第1図 常温の水溶液中における鉄さび生成経路図⁽³⁾

(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^{(3)~(5)}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。

以上より、代表的な環境条件を「②の環境」として設定する。

そのため、基本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、変動設定においては、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、基本設定としてマグネタイト、変動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。

b. 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、「a. 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⁽⁶⁾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、錆の主成分は、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⁽⁷⁾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⁽⁸⁾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⁽⁹⁾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⁽¹⁰⁾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。

以上より、基本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、変動設定においては、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。

c. 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⁽¹¹⁾。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。

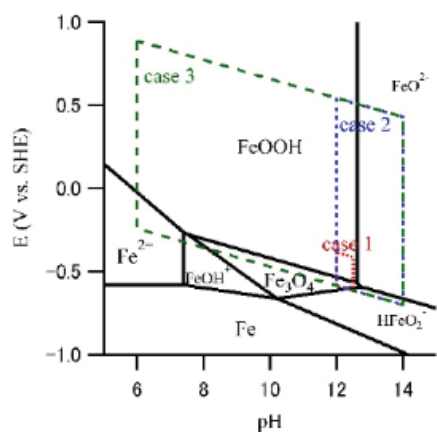
文献⁽¹¹⁾では、上記のPourbaixによる電位-pH図が25℃の評価が中心であるとともに、特定の酸化物のみを対象にしており、一部の酸化物が考慮されていない。

そのため、文献⁽¹²⁾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⁽¹²⁾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)に関し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。

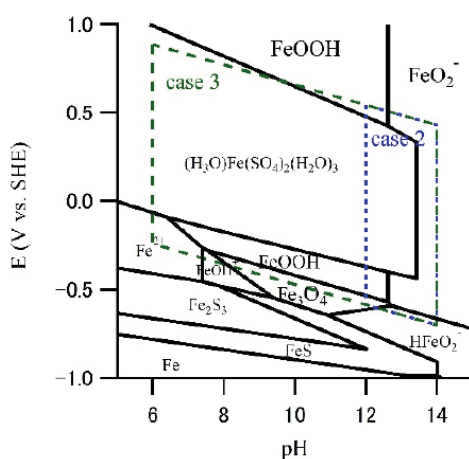
第2表 環境条件の設定

| 項目 | Case1 | Case2 | Case3 |
|--------|------------|------------|------------|
| 温度 | 5, 15, 25℃ | 5, 15, 25℃ | 5, 15, 25℃ |
| 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 |



第2図 HSC Chemistryによる15°CにおけるFe-H₂O系での電位-pH図

*1 ②の環境と類似するのはCase1（赤破線）の範囲である。



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、基本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、変動設定においては、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「ロンボクレース」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、「a. 現象による推定」及び「b. 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(ロンボクレース)に対し、生成条件を精査する。

文献^{(13)~(14)}では、ロンボクレー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^{(13)~(14)}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、ロンボクレースが生成する環境条件を第4図に示す。

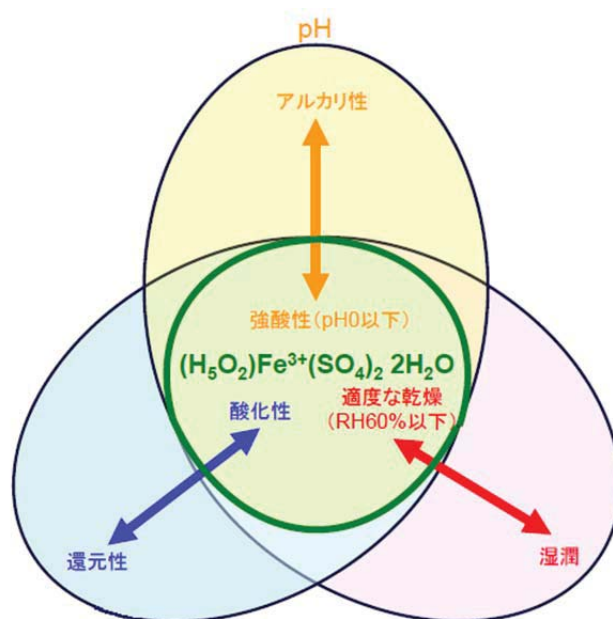
- ・高橋ほか⁽¹³⁾は、ロンボクレースは pH が負の値を示すような著しい酸性の環境下において、黄鉄鉱や白鉄鉱の分解によって生じる鉄硫酸塩鉱物とし、以下の反応式によって生成するとしている。



- ・WENQIAN ほか⁽¹⁴⁾は、低温環境でフェリコピアイトとロンボクレース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、湿潤環境下では溶解するとしている。

以上より、変動設定では、ロンボクレース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、基本設定としてマグネタイト、変動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 ロンボクレース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。

a. 基本設定

「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。

b. 変動設定

「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、変動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)⁽¹²⁾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基本設定としてマグネタイト、変動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)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
- (4)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
- (5)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、p17-27
- (6)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
- (7)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
- (8)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
- (9)柴田俊夫(2014)：材料と環境、63、p109-115
- (10)三原ほか(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
- (11)M. Pourbaix et al. (1974)：Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution 2nd English edition. NACE international cebelcor. ISBN-10 : 0915567989
- (12)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
- (13)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

(14) 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

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

第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等
(廃止措置開始以後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定
-状態変化の評価(化学的影響)-

2019年11月27日

日本原燃株式会社



目次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 解析条件 | 1 |
| 2.1 解析コード | 1 |
| 2.2 解析モデル | 2 |
| 2.3 地下水組成 | 3 |
| 2.4 難透水性覆土の設定..... | 4 |
| 2.4.1 難透水性覆土の鉱物組成..... | 4 |
| 2.4.2 モンモリロナイトの溶解速度..... | 4 |
| 2.4.3 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式..... | 5 |
| 2.4.4 難透水性覆土の拡散係数..... | 7 |
| 2.5 セメント系材料の設定..... | 7 |
| 2.5.1 セメント系材料の鉱物組成..... | 7 |
| 2.5.2 廃棄体に含まれる塩量(1号 廃棄物 埋施設で設定) | 9 |
| 2.5.3 セメント系材料の拡散係数..... | 9 |
| 2.6 生成を想定した二次鉱物..... | 10 |
| 2.7 熱力学データベース..... | 11 |
| 3. 解析結果 | 12 |
| 4. 参考文献 | 28 |

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

| | |
|---|---|
|  | : 補正に伴い変更する箇所 (コメント対応含む) |
|  | : 上記以外の審査会合コメント反映箇所 |
| 緑字 | : 第 298 回審査会合 (2019/8/26) までに自主的に変更した箇所 |
| 赤字 | : 第 298 回審査会合 (2019/8/26) からの変更箇所 |
| 桃色字 | : 第 306 回審査会合 (2019/10/16) からの変更箇所 |

コメントNo.56_千年程度の期間に想定されるより確からしい状態変化のうち覆土への化学的影響を評価するための地球化学解析について記載(補正申請書は本資料を基に構成する)

1. はじめに

本資料は、資料 1-2-1「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 第九条第二号 異常時の放射線障害の防止等(廃止措置開始以後の評価)」のうち廃棄物埋設地の状態設定(地下水との反応による化学的影響評価)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、使用される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として多量のセメント系材料が用いられている。セメント系材料と接触した地下水は、セメント系材料から溶出するセメント成分や、1号廃棄物埋設施設(以下「廃棄物埋設施設」は「埋設施設」という。)においては埋設された廃棄体に含有さ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)とした。

なお、廃棄物埋設地も解析対象範囲であるが、用語の統一性のため、本資料に限り廃棄物埋設地の範囲も「埋設施設」という。

2. 解析条件

2.1 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の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、拡散係数等)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。

2.2 解析モデル

本解析では、地下水は廃棄物埋設施設の下部より流入し、埋設施設内を通過して再び埋設施設下部より流出することから、セメント系材料から難透水性覆土への移流成分は少ないと想定されるため、地球化学解析における物質移行は拡散によってのみ起こるものとした。なお、埋設設備周辺の難透水性覆土及び下部覆土において、ペクレ数分布より、評価期間内で拡散場が継続することを確認している。(補足説明資料6及び補足説明資料7を参照。)

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

ここで、難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解量は、セメント系材料から溶出し難透水性覆土へ移行して化学反応に寄与するアルカリ量で決定される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合に加え、体積により決定される。1次元体系では、体積は各材料のモデル長さに反映される。そこで、セメント系材料のモデル長さは、難透水性覆土に対して十分な長さとして、ピット最大幅の半分(3号では64mの半分の32m、1号では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の体積比は2mとピット長さの半分より小さい。)

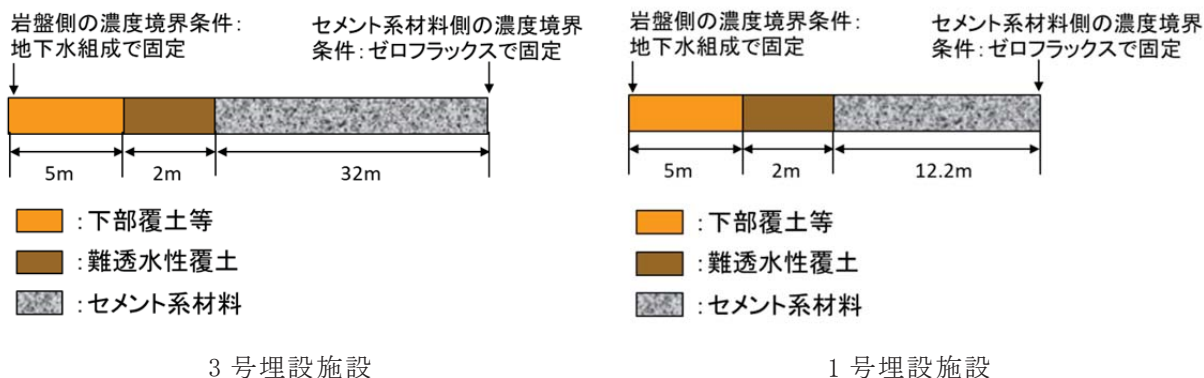
なお、2号埋設施設は、3号埋設施設と同種の廃棄体(充填固化体)及び類似施設であり、解析結果はいずれかで代表することができる。ピット幅の半分の長さをセメント系材料のモデル長さに設定した場合、2号と比べ3号の方が長く、その分アルカリ量を多く設定されることから、3号埋設施設の解析結果で代表することとした。一方、1号廃棄体(均質・均一固化体)には塩類(硫酸塩、ほう酸塩)が含まれている。セメント系材料から浸出してくるアルカリ成分に加え、廃棄体から溶出する塩が難透水性覆土に含まれるモンモリロナイトの変質に影響を及ぼす可能性があり評価が必要であると考えられる。そのため、3号埋設施設とは別に解析を行うこととし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

また、本解析では、難透水性覆土とセメント系材料の相互作用に着目するため、難透水性覆土とセメント系材料のみ反応し、下部覆土等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号埋設施設及び1号埋設施設の解析体系の概念図を第1図に示す。



第1図 解析体系概念図

2.3 地下水組成

埋設施設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地表付近の淡水を大気圧との平衡等を考慮したモデル地下水 FOHP⁽⁵⁾を参照することとした(Fresh-Oxidizing-High-pH)。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 | $3.40 \times 10^{-4} \text{mol/L}$ |
|----|------------------------------------|

2.4 難透水性覆土の設定

2.4.1 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 に対する鉱物のモル量 | | | | | |

2.4.2 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 TRU-2 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 式の適用した。

なお、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 $7 \text{m}^2/\text{g}$ を用いてモンモリロナイト 1mol 当たりの反応表面積に換算して使用した。

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

(数式 1)

Rate: モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

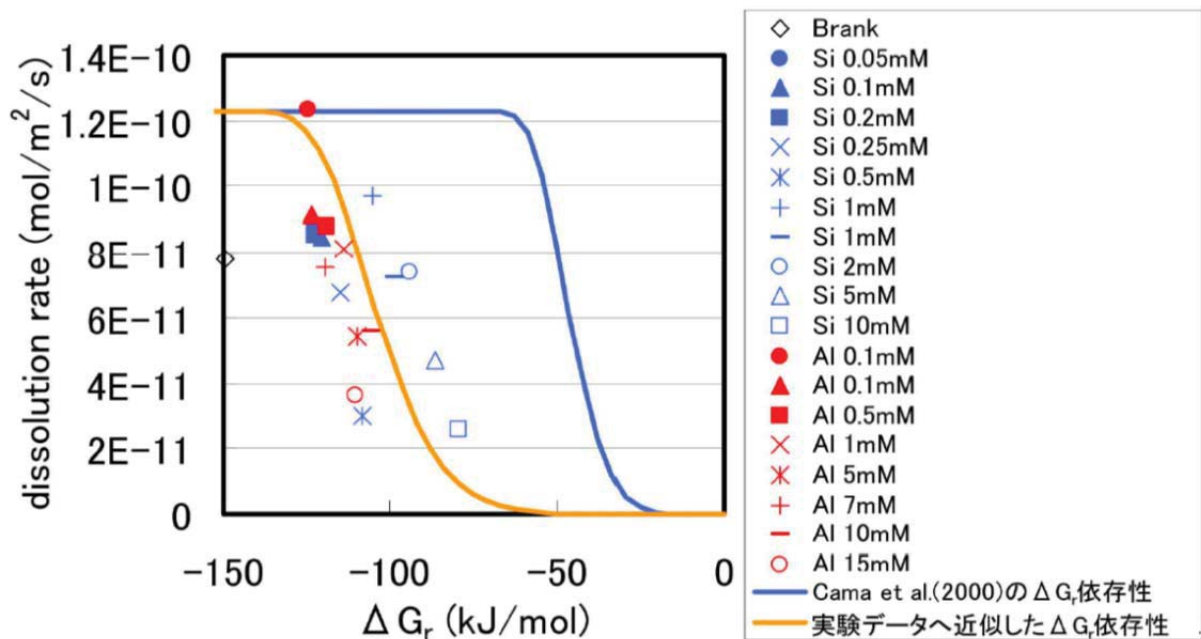
R: 気体定数 [kJ/(K・mol)]

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 ΔGr の関係(文献⁽⁹⁾)

2.4.3 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、TRU-2 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、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

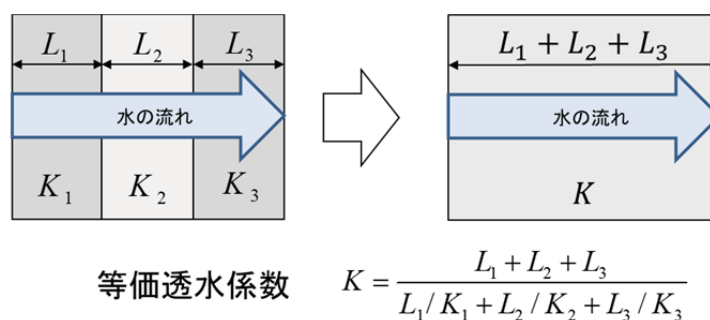
C_i : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

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。



第3図 等価透水係数の設定(直列)

2.4.4 難透水性覆土の拡散係数

難透水性覆土中の拡散係数は、TRU-2 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。)

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

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

$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数[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供給速度を大きく見積もる)となる(数式 4)。数式 4 を用いた解析も行った(以下「ケース②」という。)

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

2.5 セメント系材料の設定

2.5.1 セメント系材料の鉱物組成

埋設施設で使用されているセメント系材料のうち、充填モルタルの配合を参照した。また、3号埋設施設の充填モルタルは候補配合とした。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 CSH、ハイドロタルサイト、エトリンサイト、(余剰 Al₂O₃ 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。

(1) 3号廃棄物埋設施設

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

第3表 セメント系材料の初期鉱物組成(3号)

| | 結合材(C) | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------|-------------|-------|------|------|
| | CSH | ハイドロタルサイト | エトリン サイト | 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 に対する鉱物のモル量 | | | | | | |

(2) 1号廃棄物埋設施設

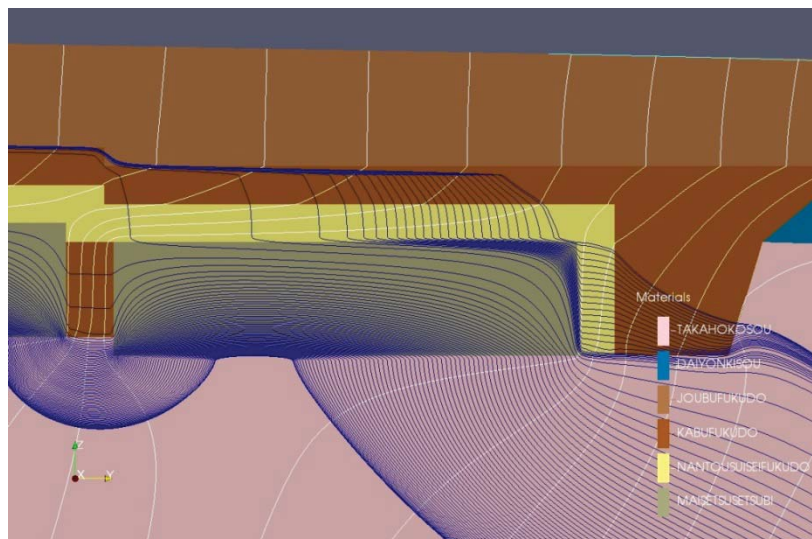
1号埋設施設で使用されている配合を参照した。1号埋設施設の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第4表に示す。

第4表 セメント系材料の初期鉱物組成(1号)

| | 結合材(C) | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------|-------------|-------|------|------|
| | CSH | ハイドロタルサイト | エトリン サイト | 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 に対する鉱物のモル量 | | | | | | |

2.5.2 廃棄体に含まれる塩量(1号廃棄物埋設施設で設定)

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



第4図 埋設施設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 に対する鉱物のモル量 | |

2.5.3 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(ひび割れ等)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を大きく見積もる。)

2.6 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等の溶解が生じると、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、空隙率等が変化し、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)等に分類し、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 |
| エトリンガイト | カリ長石 | カオリナイト |
| モノサルフェート | アナルサイム | パイロフィライト |
| ハイドロタルサイト | ローモンタイト | フリーデル氏塩 |
| セピオライト | イライト | 2 水石膏 |
| ポルトランダイト | | |

また、1 号埋施設では、廃棄体に含有さ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 号埋施設を対象とした解析では、第 6 表に加え第 7 表を設定した。

第 7 表 塩影響を考慮した際に生成を想定した二次鉱物(1 号で設定)

| ほう酸塩 | 硫酸塩 |
|--------------|-------------------------|
| $Ca_3B_2O_6$ | $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ |
| CaB_4O_7 | Thaumasite |
| CaB_2O_4 | エトリンガイト |
| $NaBO_2$ | 2 水石膏 |
| Colemanite | |

2.7 熱力学データベース

熱力学データベースは、TRU-2 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 号埋施設ではセメント・ベントナイト相互作用だけでなく廃棄体含有塩による影響も評価するため、液相中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

(a) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)

難透水性覆土の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号埋設施設の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第5図に、1号埋設施設の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第6図に示す。また、3号埋設施設の鉱物組成と透水係数の分布図を第7図に、**難透水性覆土内の液相組成分布図を第8図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第9図に示す。1号埋設施設においても同様に、鉱物組成と透水係数の分布図を第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号埋設施設の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後には、セメント系材料と接する面ではベントナイトが若干溶解することにより透水係数がわずかに上昇するものの、その他の面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号埋設施設の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後の段階で、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号埋設施設の結果よりも早い段階からベントナイトの変質が見られた。

(b) 難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合(ケース②)

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

分布図を第 17 図に示す。1 号埋設施設においても同様に、鉱物組成と透水係数の分布図を第 18 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 19 図に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 20 図に示す。

3 号埋設施設の難透水性覆土のベントナイトの変質について、1,000 年後の段階では、(a) 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 号埋設施設の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000 年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。

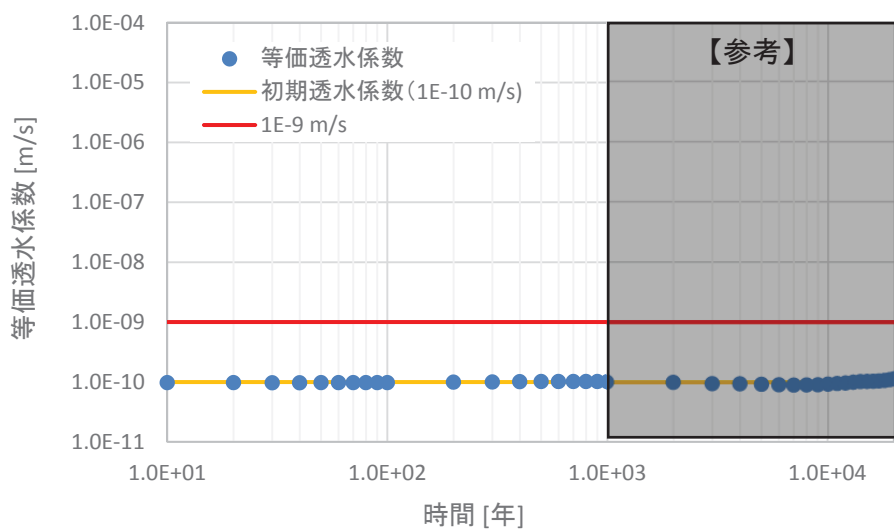
以上より、長期的な化学的影響を考慮した難透水性覆土の線量評価上の透水係数は 1,000 年後において下記の値を設定する(第 8 表)。

第 8 表 化学的影響の評価結果

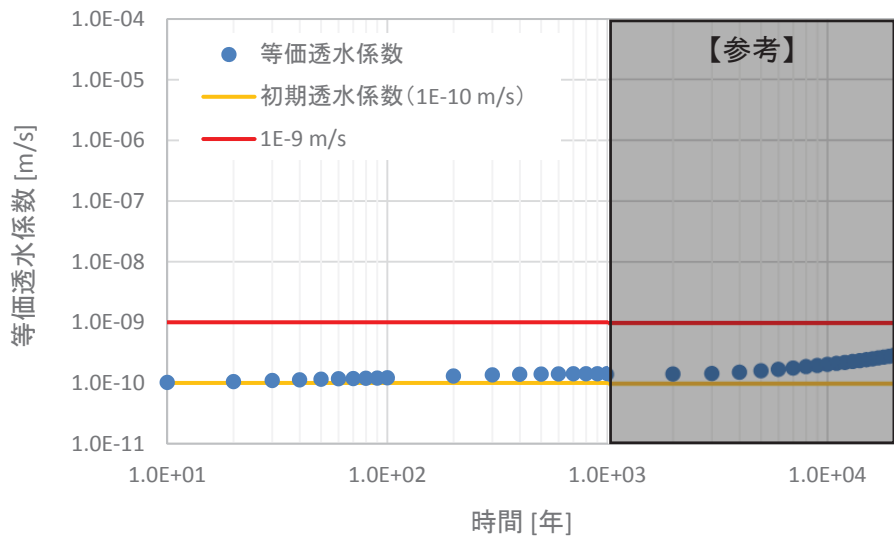
| | 3 号埋設施設 [m/s] | | 1 号埋設施設 [m/s] | |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | ケース①*1 | ケース②*2 | ケース①*1 | ケース②*2 |
| 0 年 | 1.00×10^{-10} | 1.00×10^{-10} | 1.00×10^{-10} | 1.00×10^{-10} |
| 1,000 年後 | 1.01×10^{-10} | 1.02×10^{-10} | 1.42×10^{-10} | 1.84×10^{-10} |

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

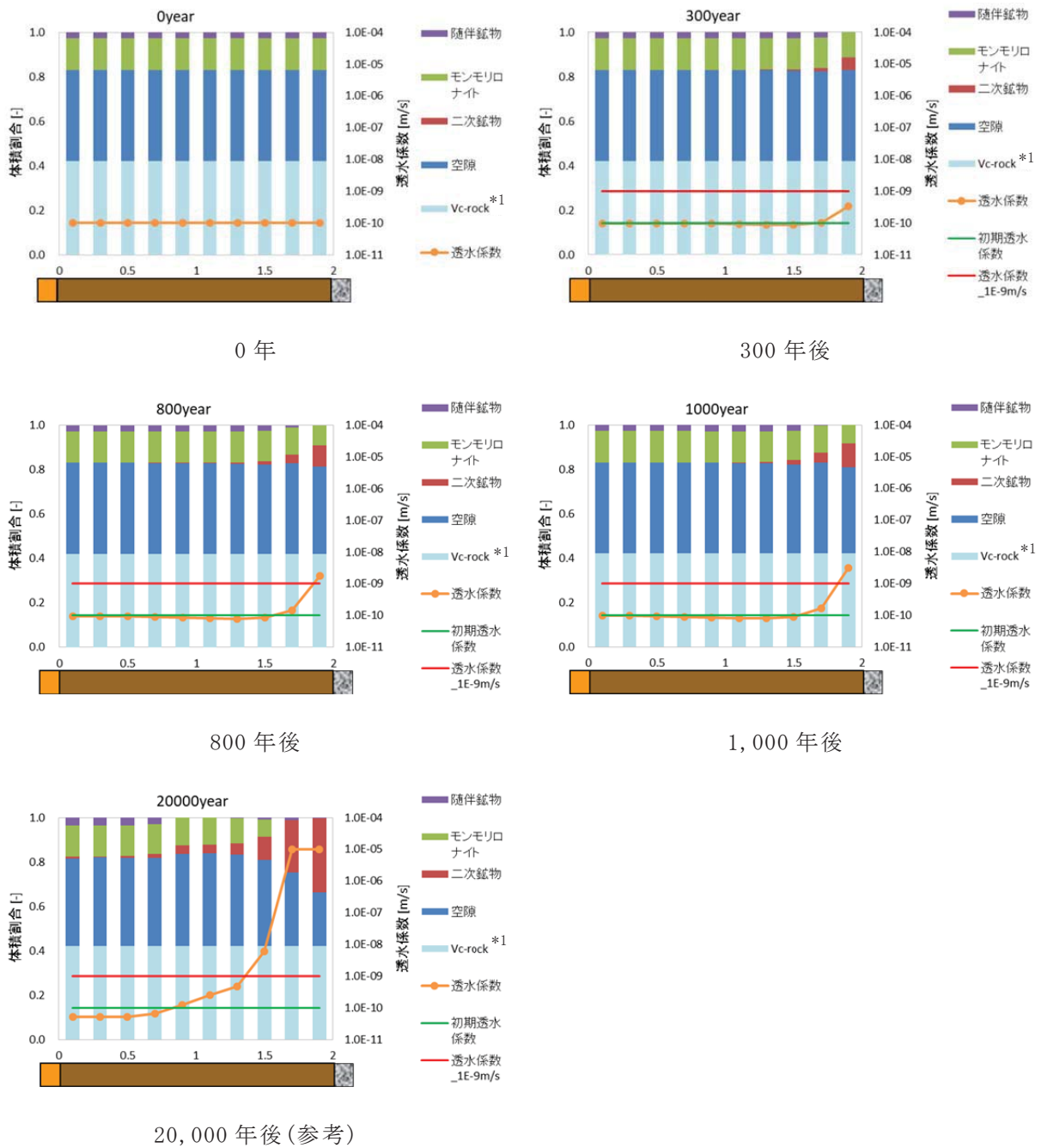
*2 難透水性覆土の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を 0 とし単純に空隙率に比例するという単純な設定(数式 4)とした場合



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



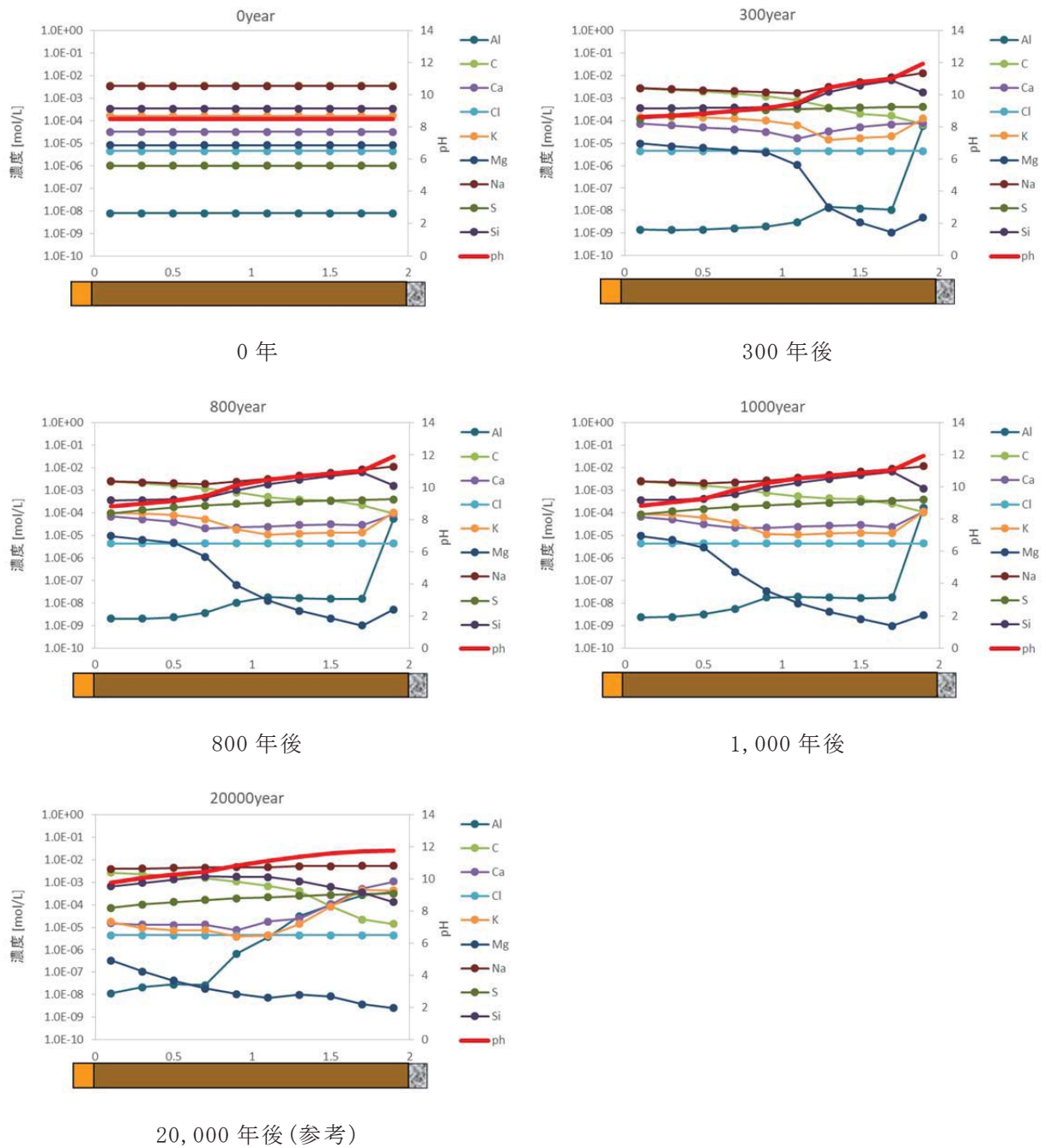
第 6 図 1 号埋設施設のうち難透水性覆土の等価透水係数の結果
(ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



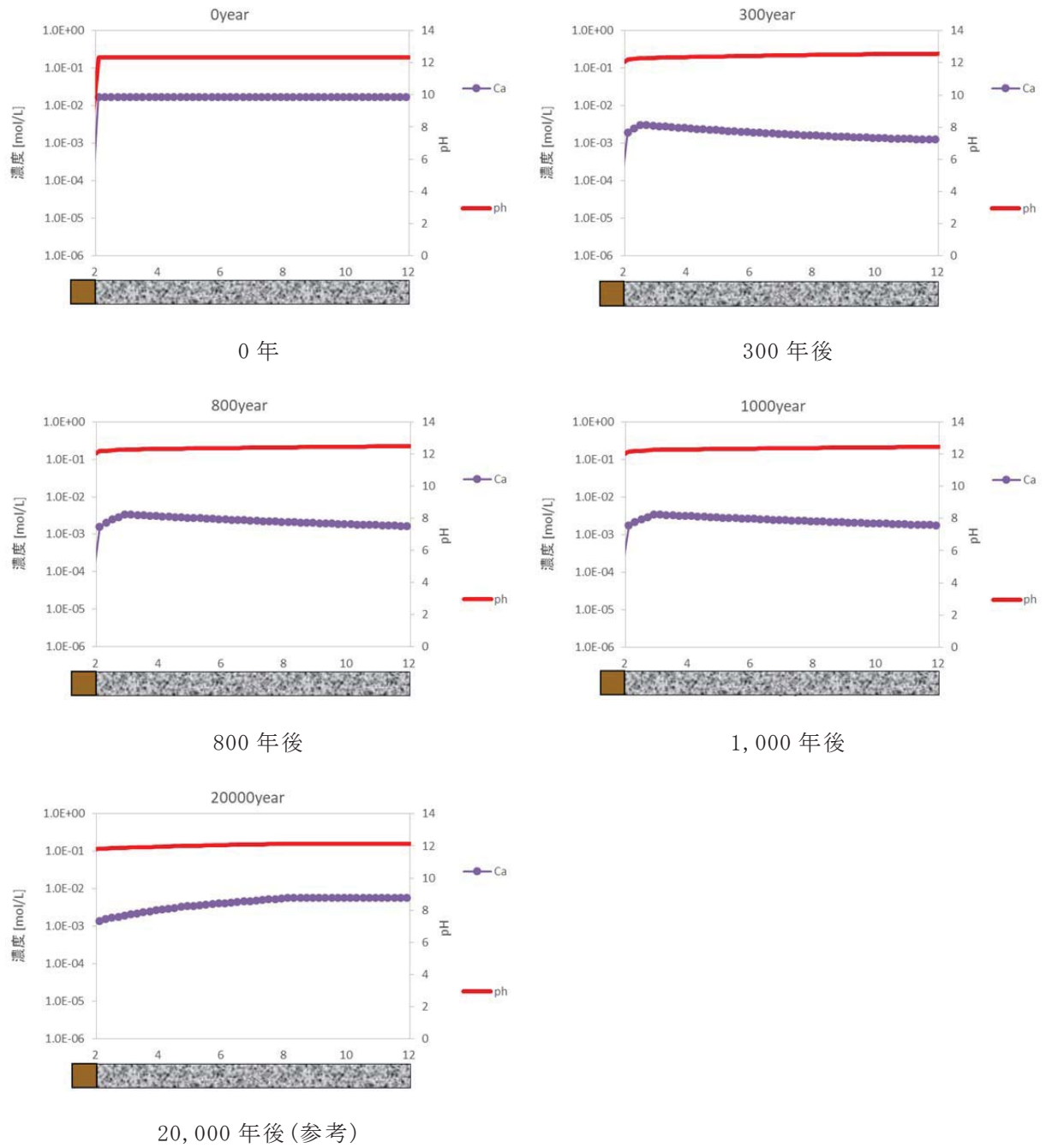
*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

第 7 図 3 号埋設施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図

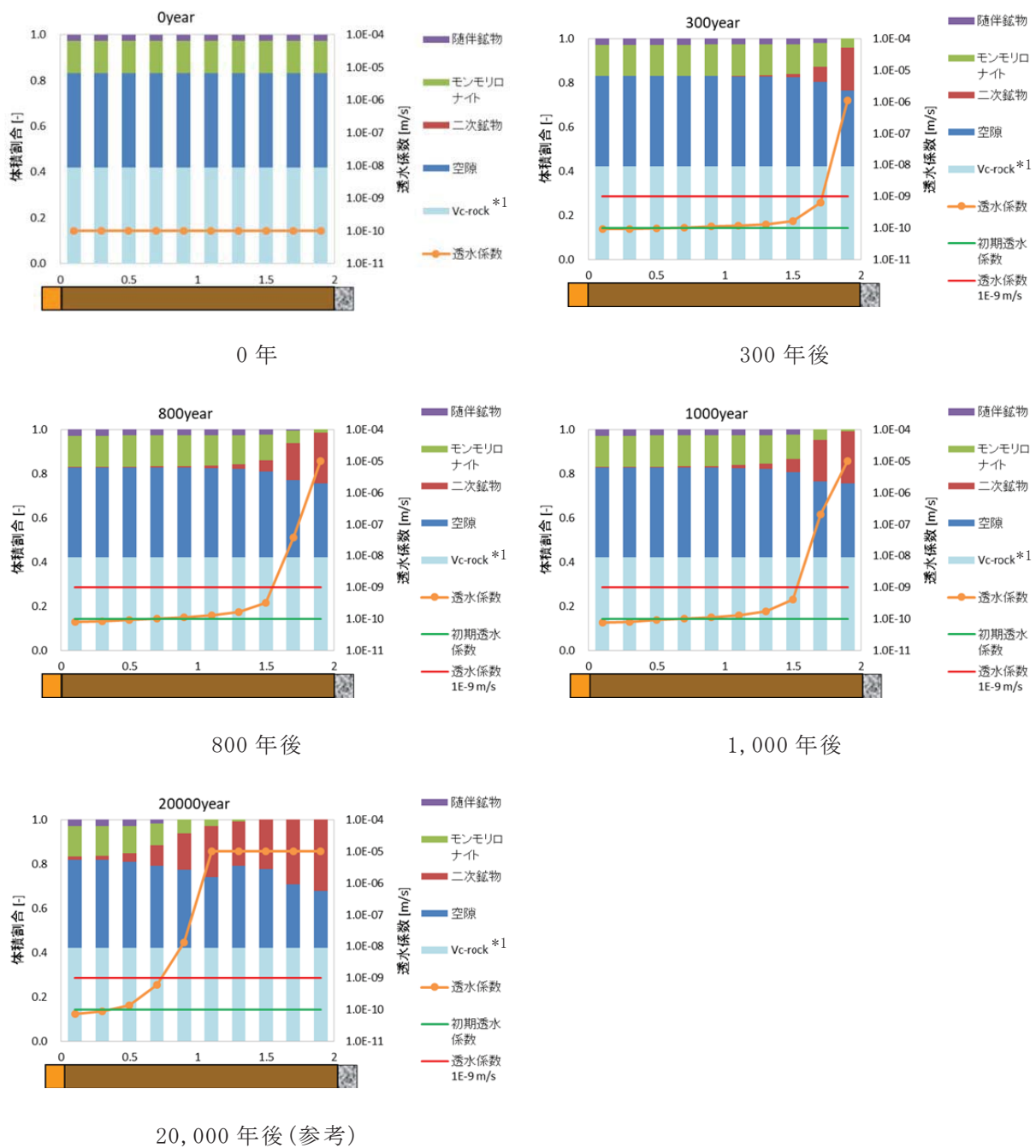
(ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



第 8 図 3 号埋設施設のうち難透水性覆土の液相組成の分布図
 (ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

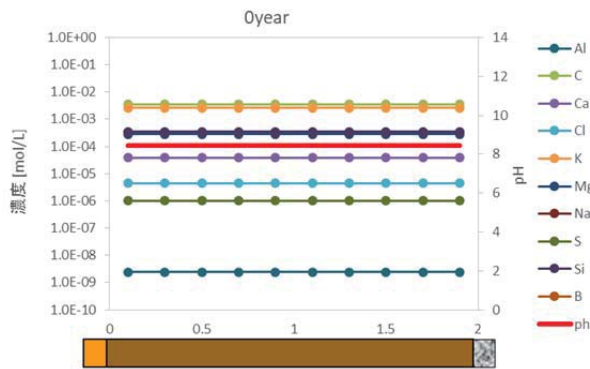


第 9 図 3 号埋設施設のうち埋設設備の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)

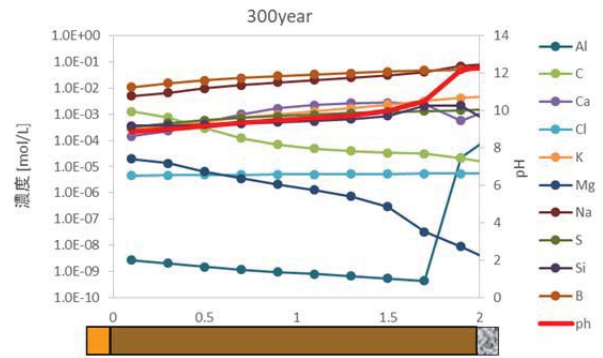


*1 Vc_{rock} : 化学反応に寄与しない固相

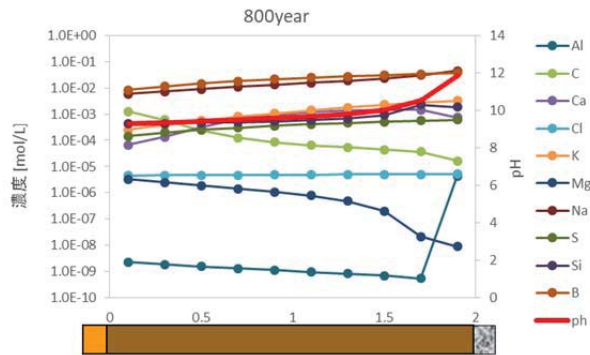
第 10 図 1 号埋設施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース① : 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



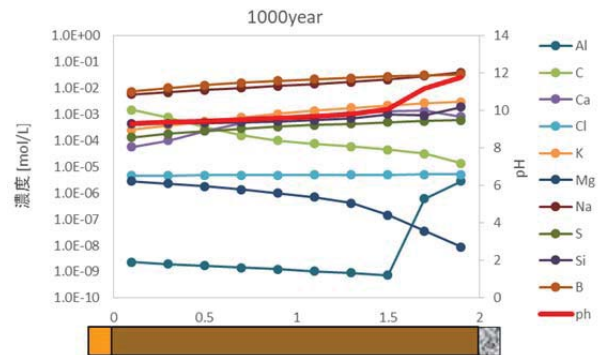
0 年



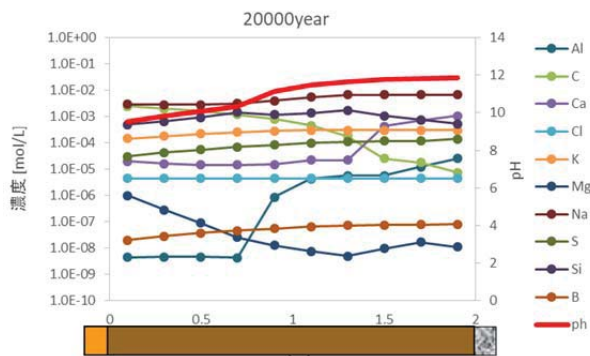
300 年後



800 年後

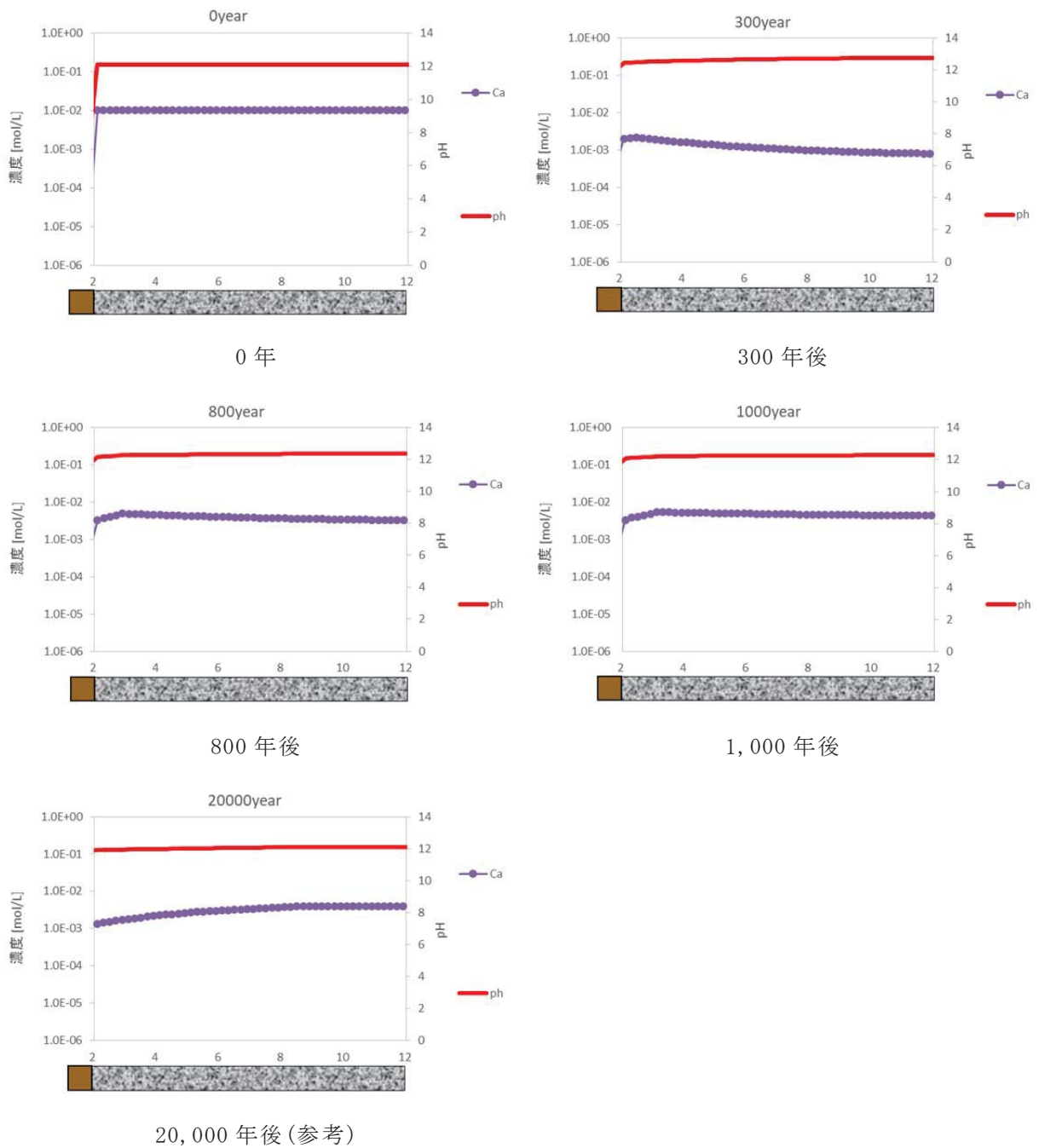


1,000 年後

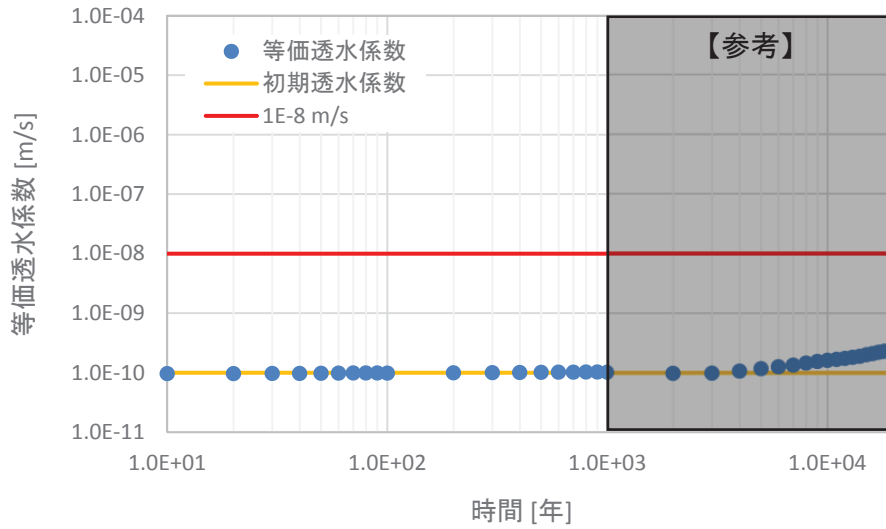


20,000 年後 (参考)

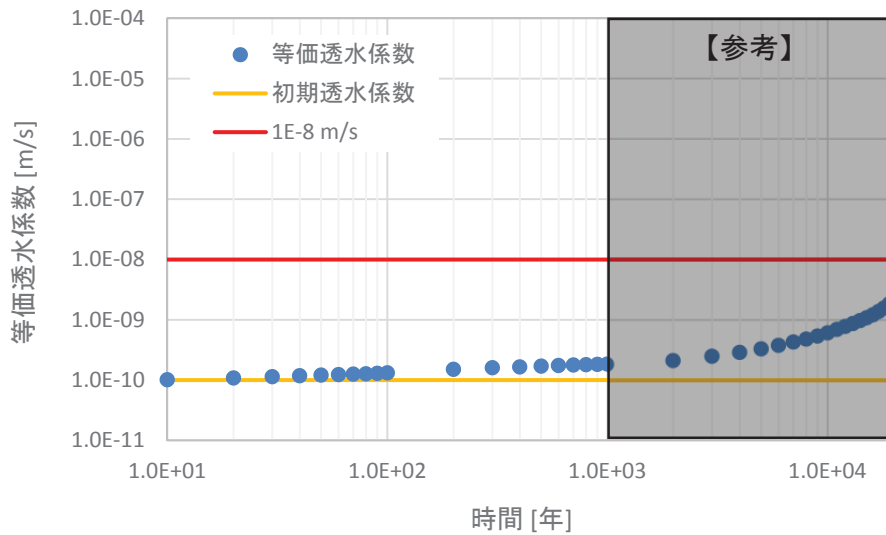
第 11 図 1 号埋設施設のうち難透水性覆土の液相組成の分布図
(ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



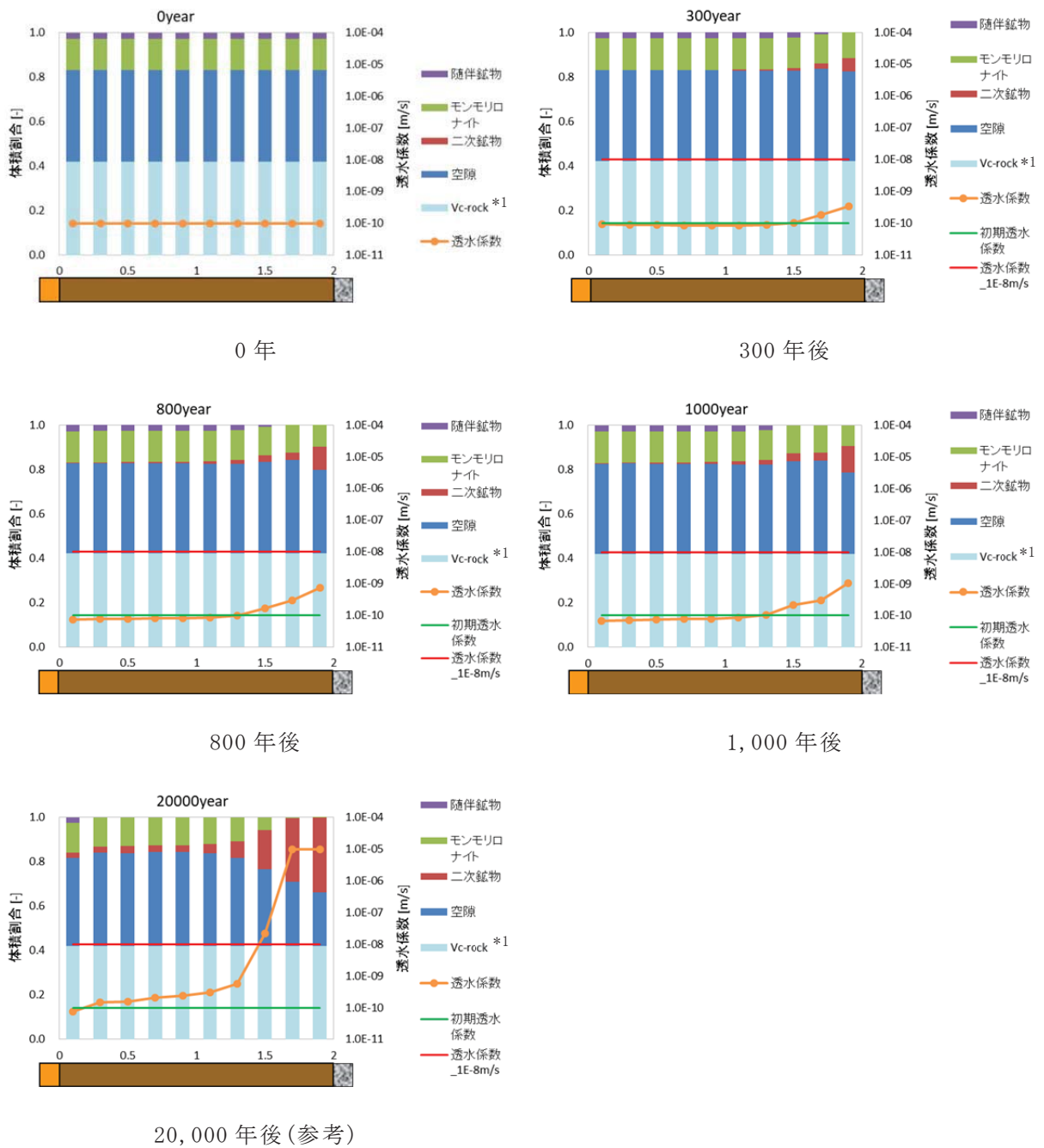
第 12 図 1号埋設施設のうち埋設設備の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース①：難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合)



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



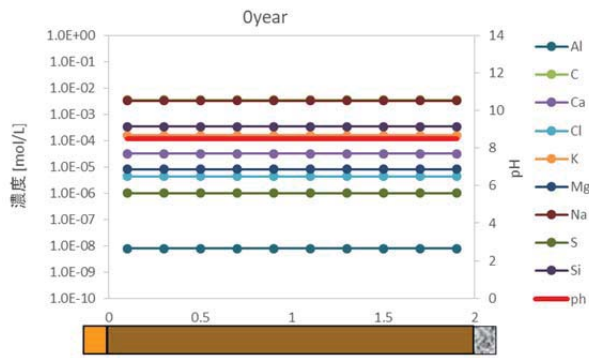
第 14 図 1号埋設施設のうち難透水性覆土の等価透水係数の結果
 (ケース②：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



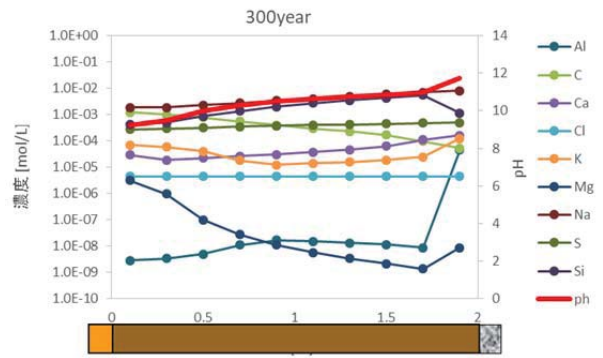
*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

第 15 図 3 号埋設施設のうち難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図

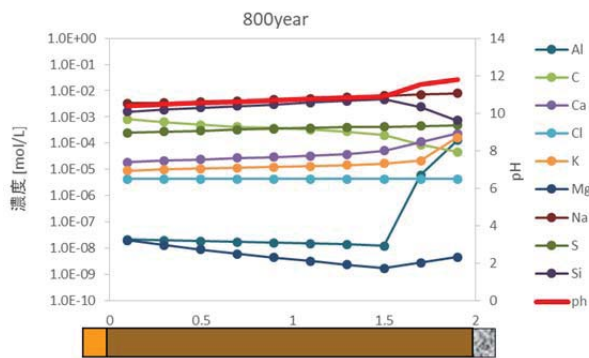
(ケース②) : 難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



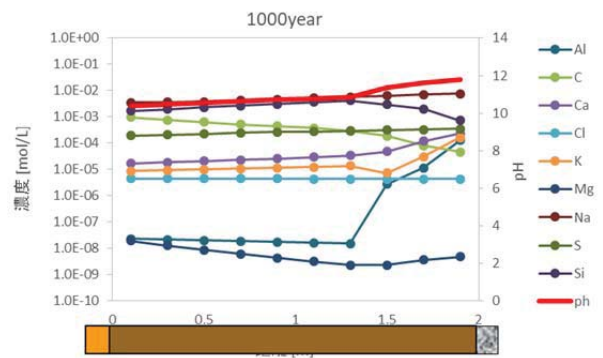
0 年



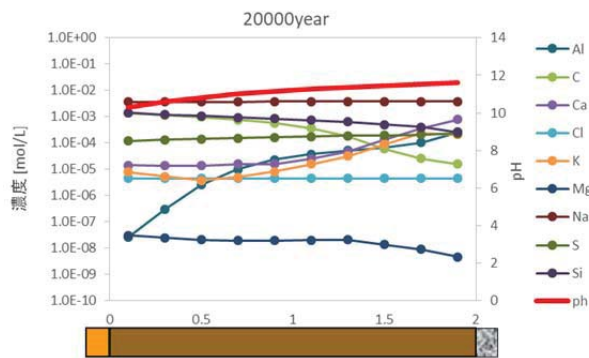
300 年後



800 年後

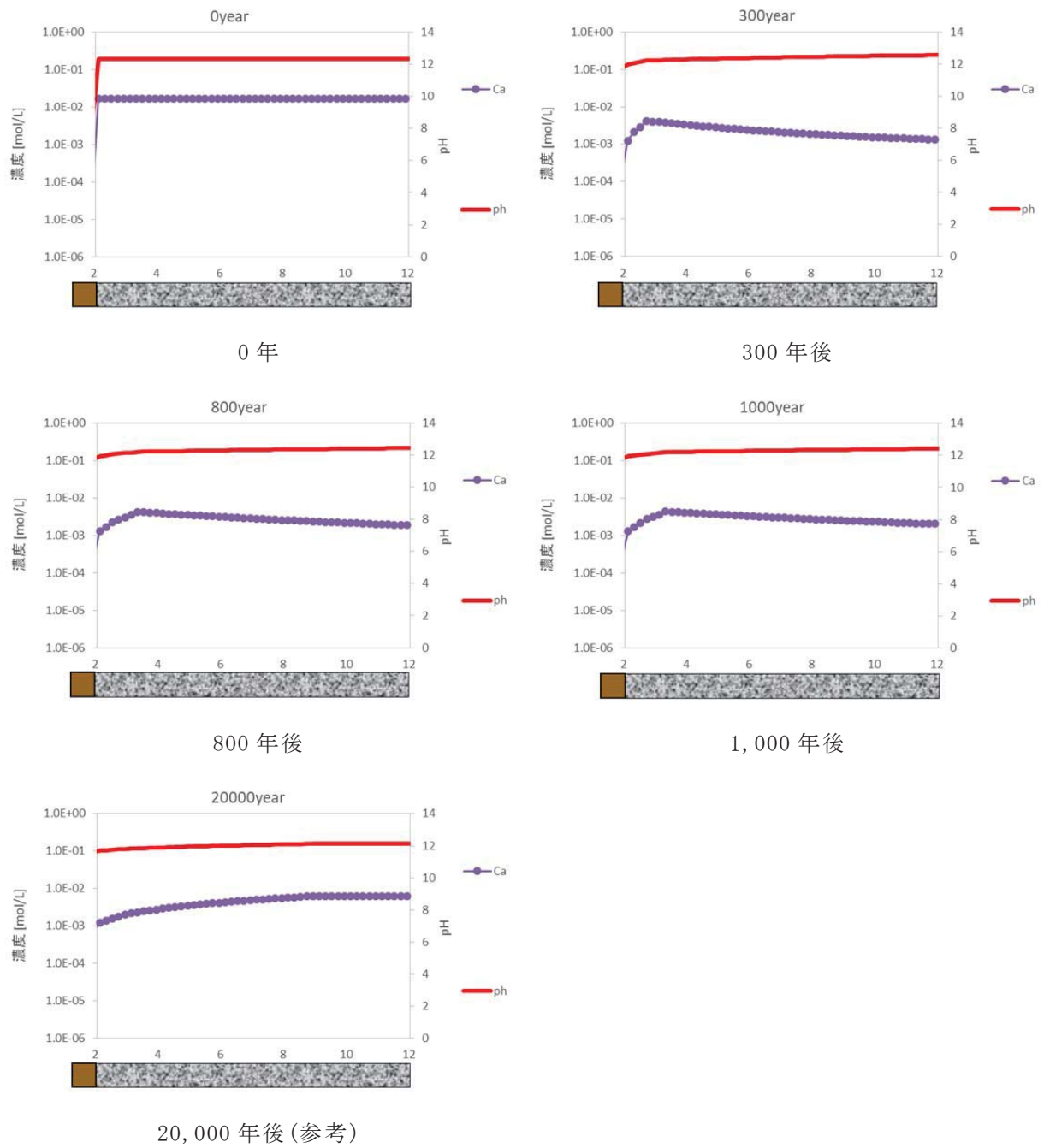


1,000 年後

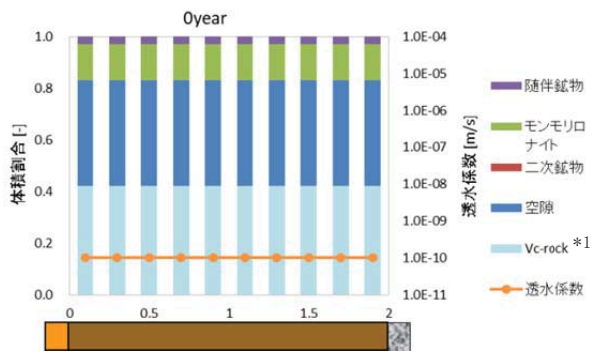


20,000 年後 (参考)

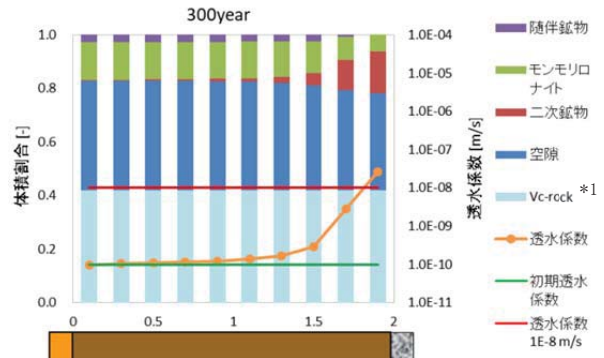
第 16 図 3 号埋設施設のうち難透水性覆土の液相組成の分布図
(ケース②)：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



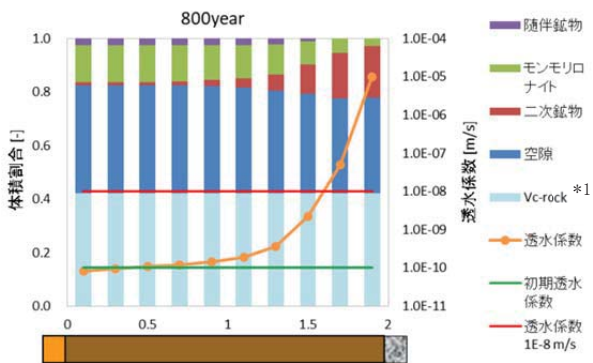
第 17 図 3号埋設施設のうち埋設設備の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②)：難透水性覆土の拡散を単純なモデルとした場合)



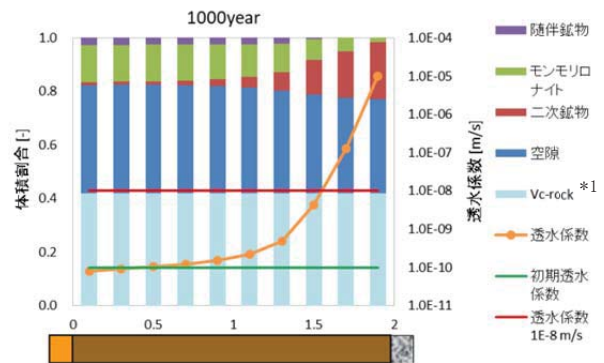
0 年



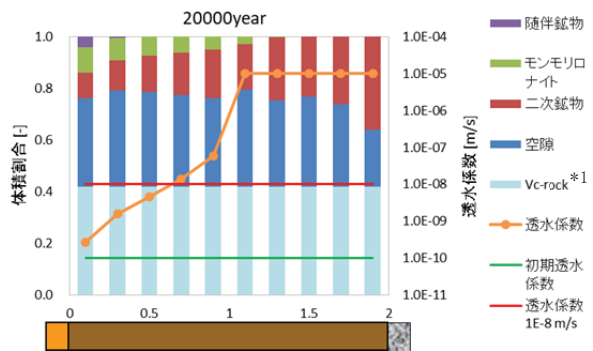
300 年後



800 年後



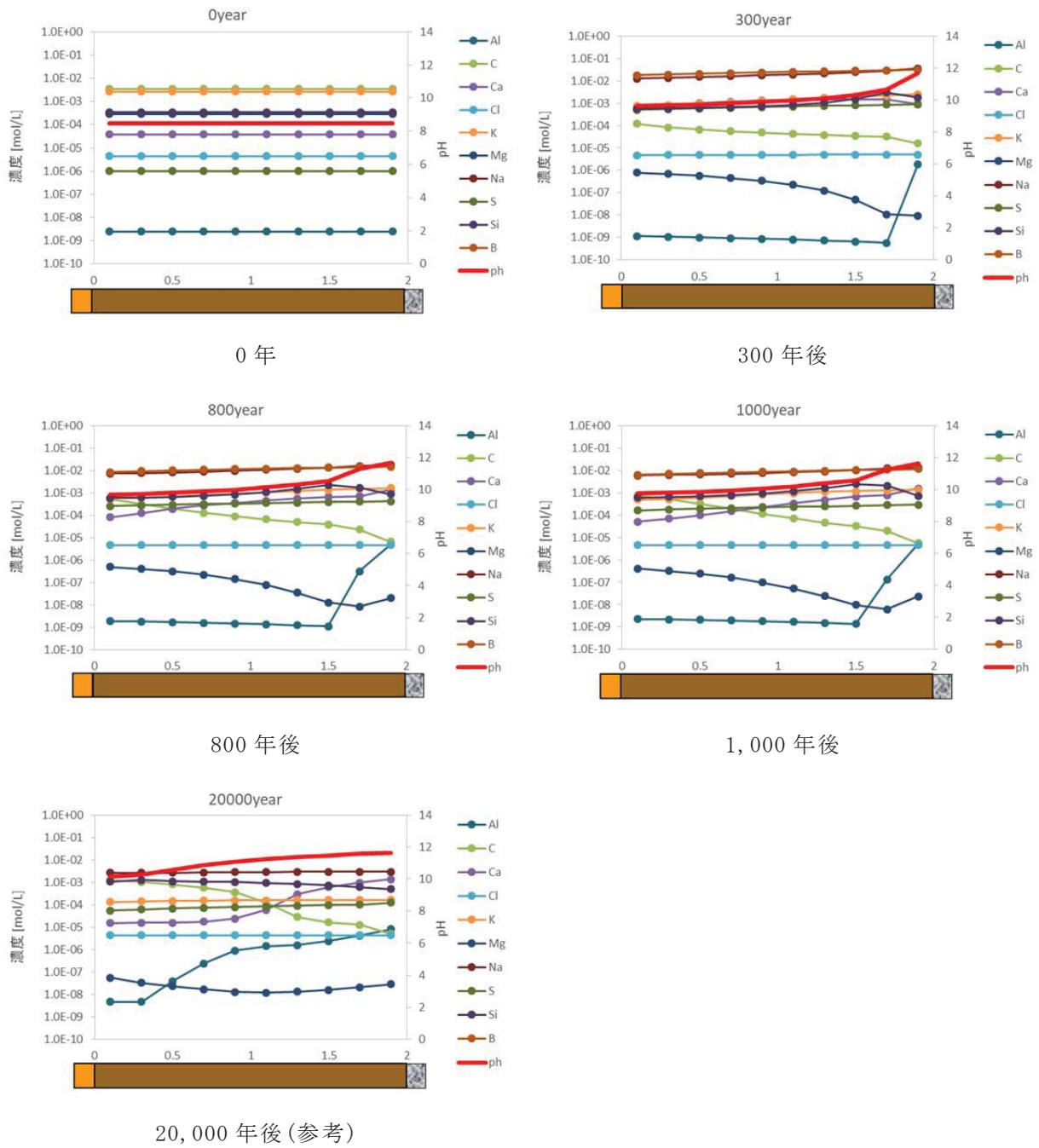
1,000 年後



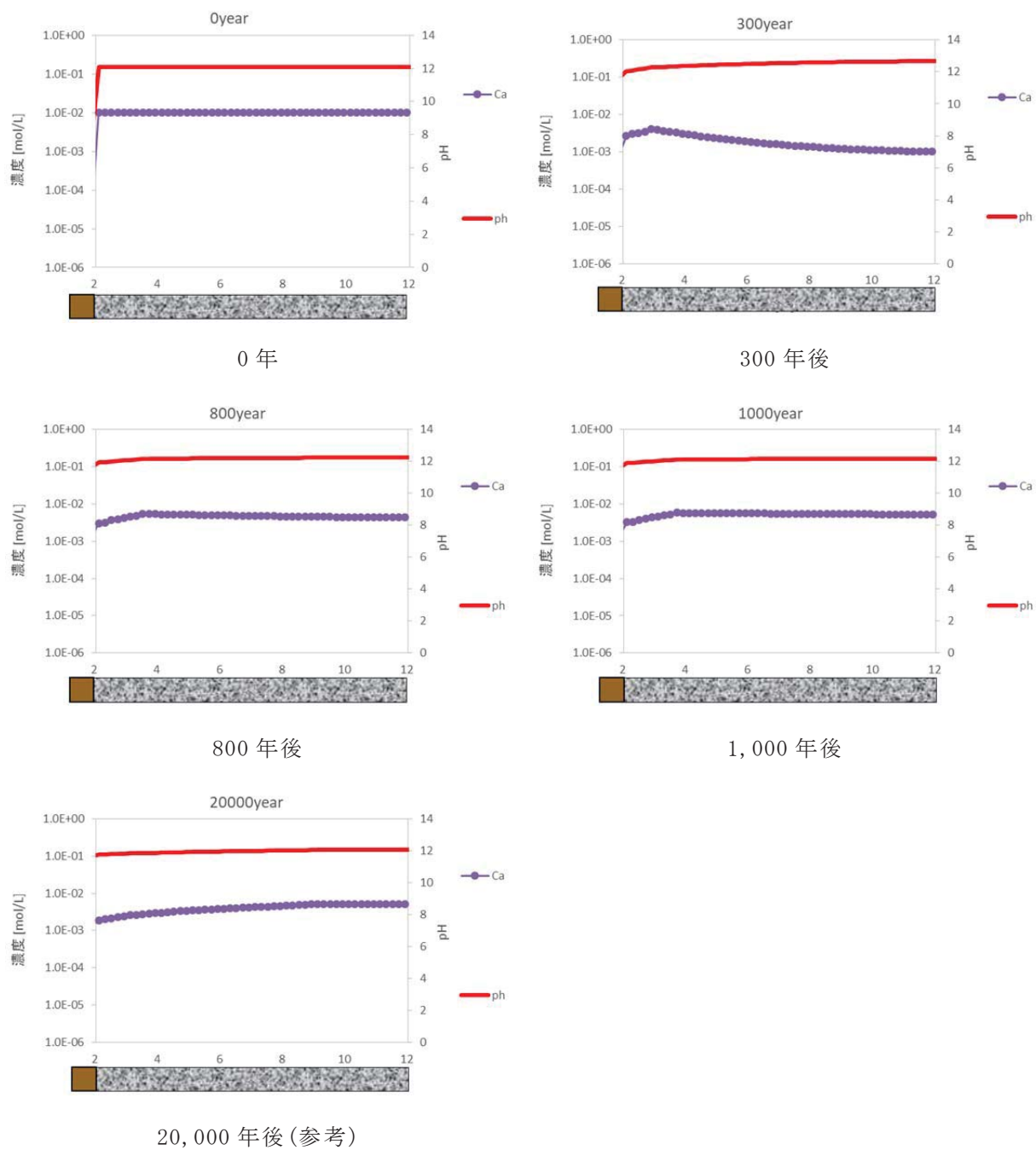
20,000 年後 (参考)

*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

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



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



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

4 . 参考文献

- (1)伊藤弘之、三原守弘(2005) : ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式、JNC TN8400 2005-029
- (2)Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (1999) : User' s guide to PHREEQC (ver.2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259
- (3)Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J. (2013) : Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA
- (4)Diederik JACQUES, Lian WANG, Evelien MARTENS and Dirk MALLANTS(2012) : Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R
- (5)Mikazu Yui, Hiroshi Sasamoto, Randolph C Arthur(1999) : Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC TN8400 99-030
- (6)電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005)、TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02
- (7)Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004) : Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05
- (8)Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000) : Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.64, No.15, pp. 2701-2717
- (9)(独)日本原子力研究開発機構(2009) : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 20 年度報告－JAEA-Research 2009-046
- (10)Yokoyama, S. *et al.* (2005) : Atomic force microscopy study of montmorillonite

dissolution under highly alkaline conditions. *Clays and Clay Minerals* 53(2), 147-154

- (11) 原子力発電環境整備機構(2007): 処分システムに求められる閉鎖性能の考え方ー処分場パネル規模の水理に関する試解析ー、NUMO-TR-06-01
- (12) Morihiro MIHARA, Ryouichi SASAKI(2005): Radio-nuclides Migration DATasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027
- (13) (独) 日本原子力研究開発機構(2015): 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書
- (14) 日本化学会(2004): 化学便覧 基礎編 改定 5 版、丸善、東京、p-II. 64
- (15) 小田治恵、佐々木良一、David Savage、Randolph C. Arthur、本田明(2005): 緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ、JNC TN8400 2005-020
- (16) Randolph C. Arthur *et al.* (2005): Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010
- (17) A. Atkinson *et al.* (1991): Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO₂-H₂O gels at 80 °C, DoE, DoE-HMIP-RR-91-045

添付資料 1

パラメータ設定根拠集

添付資料1 パラメータ設定根拠集

パラメータの設定根拠を示す。

設定根拠集 目次

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

| | |
|-------|--|
| パラメータ | ① 解析のモデル形状(3号及び2号) |
| 設定値 | 難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 32m |
| 設定根拠 | <p>難透水性覆土のモデル長さは申請書に記載されている値から設定した。 セメント系材料のモデル長さについて、3号埋設施設の形状を想定し、ピット幅(64m)の半分の長さを設定した。なお、2号埋設施設は、3号埋設施設と同種の廃棄体及び類似施設でありピット長さの観点(*1)で3号埋設施設の解析結果で代表する。</p> <p>・3号 ピット寸法 64m×37m×7m (2号 ピット寸法 37m×36m×7m)</p> <p>*1 セメント系材料のモデル長さをピット半分の長さに設定したことについて検討する。</p> <p>3号及び2号埋設施設の鉛直断面を考える。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)へ移動していく中で、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(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。</p> <p>難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2号で2.7、3号では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号で5.4m、3号では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> <div data-bbox="427 1182 1257 1653" style="text-align: center;"> <p>鉛直断面図の構成要素と体積:</p> <ul style="list-style-type: none"> 上面 (A): 2号: 82m³, 3号: 136m³ 側面 (C): 14m³ 側面 (D): 14m³ 中心 (セメント系材料): 2号: 259m³, 3号: 448m³ 底部 (B): 2m <p>寸法:</p> <ul style="list-style-type: none"> 高さ: 2m (A), 7m (C, D), 2m (B) 幅: 2m (C), 37m (2号), 64m (3号), 2m (D) </div> <p>3号及び2号埋設施設の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ 1m とする)</p> |
| 参考文献 | |

| | |
|-------|--|
| パラメータ | ② 解析のモデル形状(1号) |
| 設定値 | 難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 12.2m |
| 設定根拠 | <p>難透水性覆土のモデル長さは申請書に記載されている値から設定した。 セメント系材料のモデル長さについて、1号埋施設の形状を想定し、ピット幅(24.4m)の半分の長さを設定した。</p> <p>・1号 ピット寸法 24.4m×24.4m×6.2m</p> <p>セメント系材料のモデル長さをピット半分の長さに設定したことについて検討する。 1号埋施設の鉛直断面を考える。①と同様、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> <p>The diagram shows a cross-section of a pit. At the top is a brown layer labeled 'A (56m³)' with a thickness of 2m. Below it is a grey layer labeled 'セメント系材料 (144m³)' with a thickness of 6m (labeled '1号: 6m'). At the bottom is an orange layer labeled 'B' with a thickness of 2m. The total height is 10m. The width is 24m (labeled '1号: 24m'), with 2m margins on both sides. Two vertical brown layers labeled 'C (12m³)' and 'D' are shown on the left and right sides of the cement layer, respectively.</p> <p>1号埋施設の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ 1m とする)</p> |
| 参考文献 | |

| パラメータ | ③ 地下水組成 |
|-------|--|
| 設定値 | <p>pH 8.46</p> <p>Na $3.22 \times 10^{-3} \text{mol/L}^{*1}$</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>埋設地周辺の淡水地下水は、埋設施設で用いられるセメント系材料と反応すると、セメント系材料中の成分が溶脱し、イオン強度が高く、高アルカリ性の組成になると考えられる。4種類の地下水組成を対象にセメント系材料との平衡計算を行い、組成の変化の有無を確認した。セメント系材料の組成は⑥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 | 3.60E-04*1 | 6.40E-04*1 | 1.10E-03*1 | 3.22E-03*1 |
| K | 1.30E-05 | 7.80E-05 | 1.40E-04 | 5.79E-05 |
| Ca | 2.50E-06 | 9.10E-05 | 1.80E-04 | 1.01E-04 |
| Mg | 4.10E-06 | 8.00E-05 | 1.60E-04 | 6.50E-05 |
| C | 9.20E-05 | 4.70E-04 | 8.50E-04 | 3.54E-03 |
| S | 1.00E-05 | 1.20E-04 | 2.30E-04 | 1.00E-06 |
| Cl | 3.60E-04 | 4.70E-04 | 5.70E-04 | 4.40E-06 |
| Al | — | — | — | 3.61E-07 |
| Si | — | — | — | 3.40E-04 |

(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

結果を下記に示す。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変化は見られなかった。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 | 3.46E-02 | 3.49E-02 | 3.53E-02 | 3.74E-02 |
| K | 2.62E-02 | 2.63E-02 | 2.64E-02 | 2.63E-02 |
| Ca | 3.78E-03 | 3.95E-03 | 4.10E-03 | 5.22E-03 |
| Mg | 1.83E-10 | 1.86E-10 | 1.87E-10 | 1.99E-10 |
| C | 9.21E-05 | 4.70E-04 | 8.50E-04 | 3.34E-03 |
| S | 2.28E-05 | 2.27E-05 | 2.27E-05 | 2.25E-05 |
| Cl | 3.60E-04 | 4.70E-04 | 5.70E-04 | 4.40E-06 |
| Al | 3.52E-03 | 3.51E-03 | 3.51E-03 | 3.47E-03 |
| Si | 3.51E-06 | 3.50E-06 | 3.50E-06 | 3.46E-06 |

(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> <ul style="list-style-type: none"> ・ 乾燥密度：1.61Mg/m³(室内試験結果) ・ 初期空隙率：⑤参照 ・ 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、一軸圧縮強度及び弾性係数－,PNC TN8410 98-021</p> <p>[2] 直井優、小峰秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴(2005)：各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響、土木学会論文集 No.785/III-70, 39-49</p> |

| | |
|-------|--|
| パラメータ | ⑤ 難透水性覆土の初期空隙率 |
| 設定値 | 0.41 |
| 設定根拠 | 空隙率の設定値 40.6% (乾燥密度 1.61Mg/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) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|--------------------------------|------|------|--------------------------|-------------------|------------------|--|--------|--|--------|--|---------------|----------|----|----|-----|-----|-----|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----------------|-------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 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号埋設施設で充填モルタルの候補材料の配合を参照した。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ームセメント(HFSC)の初期鉱物組成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;">3号充填モルタルの配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">単位量 [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> | | | | 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 |
| 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 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

高炉スラグ微粉末の化学組成

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|
| 34.2 | 14.9 | 0.84 | 42.0 | 6.09 | 0.02 | 0.00 | 0.00 |

(単位は wt%)

・水和鉱物量の算定方法[2]

①SO₃の全量をエトリンサイトとして配分する。

②Fe₂O₃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。)

③MgOの全量をハイドロタルサイトとして配分する。

④SiO₂量及び残りの CaO 量に対し、これらの両成分が完全に消費されるような2種類の連続した Ca/Si 比を持つ C-S-H ゲルを設定する。

残りの 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。

C-S-H ゲルに取り込まれる Al 量の算定式

$$[Al/Ca \text{ モル比}] = 0.2723 \times [Si/Ca \text{ モル比}] - 0.0692$$

⑤Na₂O、K₂O はそれぞれ NaOH、KOH として配分する。

・初期空隙率：⑨参照

参考文献

- [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
 [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

| パラメータ | ⑦ セメント系材料の初期鉱物組成(1号) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|----------------------------|-----|--|--------------------------|--|--|--|--------|--|--------|--|---------------|----------|----|----|----|-----|-----|-----|
| 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号埋設施設で実際に使用されている配合を参照した。各水和鉱物量の算定方法は、⑥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号埋設施設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;">中庸熟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>・中庸熟ポルトランドセメントの化学組成：⑥参照 ・高炉スラグ微粉末の化学組成：⑥参照 ・水和鉱物量の算定方法：⑥参照 ・初期空隙率：⑨参照</p> | | | | 単位量 [kg/m ³] | | | | 結合材(C) | | 細骨材(S) | | 中庸熟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) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 中庸熟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 本当りに含まれる塩量の平均値から 1 号埋設施設のピット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 本当り)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 <p>①1 ピットに埋設されるドラム缶の本数(5, 120 本)より、1 ピットに埋設された塩量を算出 ほう酸塩 68t/ピット 硫酸塩 131t/ピット</p> <p>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/ピット 硫酸塩 13.10t/ピット</p> <p>③廃棄体中の塩がピット全体に均質に分布していると仮定し、1 号ピット(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 3.79 kg/m³</p> <p>④単位換算(kg/m³→mol/L) ほう酸塩 0.01mol/L 硫酸塩 0.03mol/L</p> <p>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</p> <ul style="list-style-type: none"> ・初期空隙率：⑨参照 <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等より設定した。</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、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$ $K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.00}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$ <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="638 1120 1141 1489" style="text-align: center;"> <p>Figure 4 Relationship between porosity and effective diffusion coefficients of HTO in Kunigel V1</p> </div> <p>([1]より引用)</p> |
| 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(ひび割れ等)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>Rate : モンモリロナイト溶解速度 [mol/s] R : 気体定数 [kJ/(K・mol)] T : 絶対温度 [K] 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 [kJ/mol]</p> |
| 設定根拠 | TRU-2 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。 |
| 参考文献 | [1] 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ— JNC TY1400 2005-013 FEPC TR2-2005-02 [2] Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.64, No.15, pp.2701-2717. [3] Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05. |

| パラメータ | ⑭ 二次鉱物 | | |
|-------|---|--|--|
| 設定値 | フィリップサイト クリノプチロライト ヒューランダイト C-S-H ゲル エトリングイト 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 | TRU-2 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、TRU-2 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 | | |

| | |
|-------|---|
| パラメータ | ⑮ 塩影響を考慮した二次鉱物(1号) |
| 設定値 | $\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ CaB_4O_7 Thaumasite CaB_2O_4 エトリンサイト NaBO_2 2水石膏 Colemanite |
| 設定根拠 | 塩影響に関わり得る鉱物(Na及びCaを含むほう酸塩及び硫酸塩)を熱力学データベース(PHREEQCに同梱されている sit.dat より抽出、ただし、Colemaniteについては、PHREEQCに同梱されている 1lnl.dat より、Thaumasiteについては文献[1])より抽出した。 |
| 参考文献 | [1]Thomas Schmidt, Barbara Lothenbach, Michael Romer, Karen Scrivener, Daniel Rentsch, Renato Figi(2008): A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cement and Concrete Research, 38, 337-349 |

添付資料 2

地下水組成のチャージバランス計算

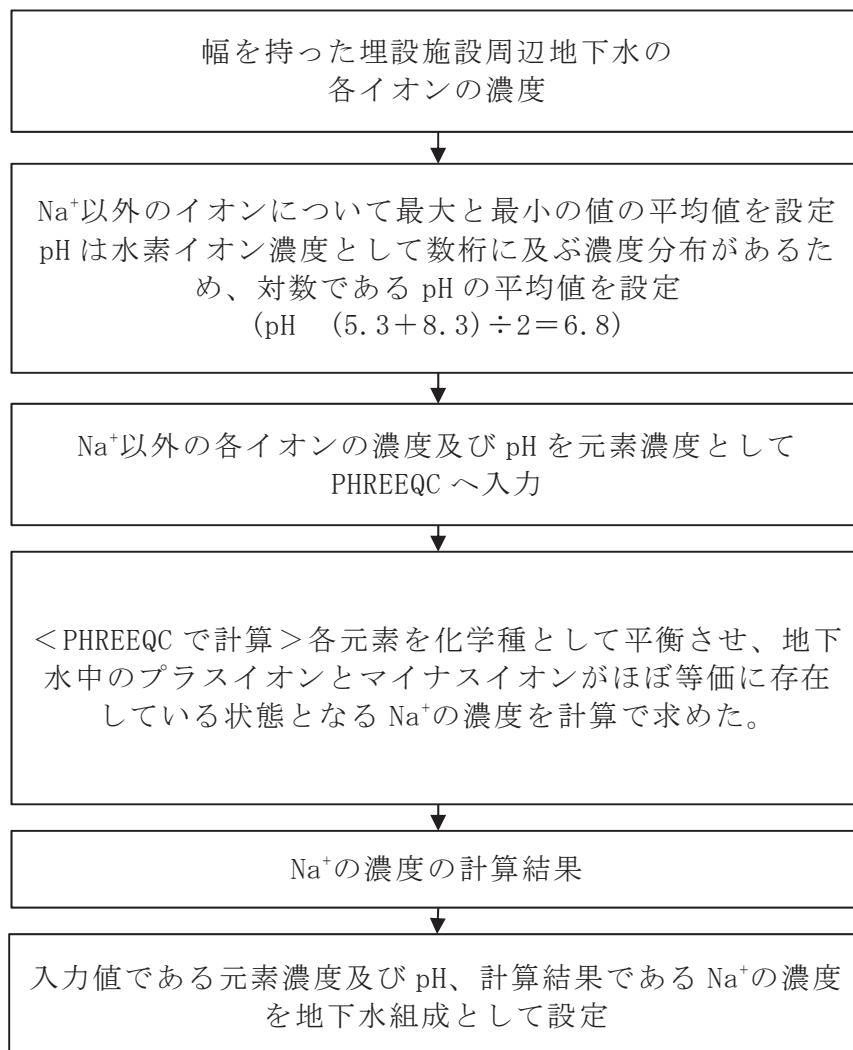
添付資料 2 地下水組成のチャージバランス計算

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

参考として、Na⁺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号申請書の水質試験結果)

| | |
|-------------------------------|---------------|
| 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 | |

第4表 (参考)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 | |

添付資料 3

覆土が長期間にわたり低透水性を維持することが
できる要因

1. はじめに

本資料は、補足説明資料 5(以下「補足 5」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 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「2.4.3 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。透水係数が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、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

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

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

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.00}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$$

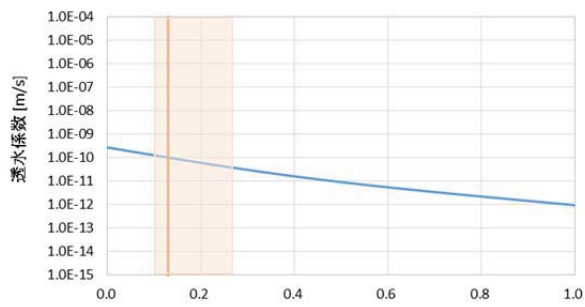
ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

C_i : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

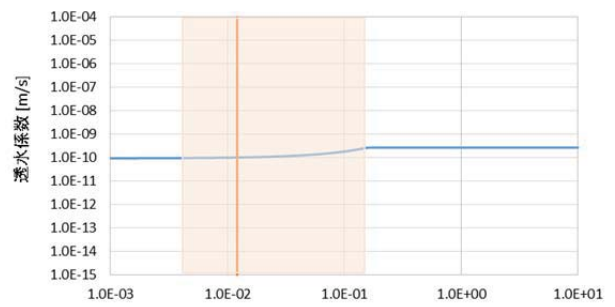
ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]

e_{sme} : スメクタイト間隙比 [-]

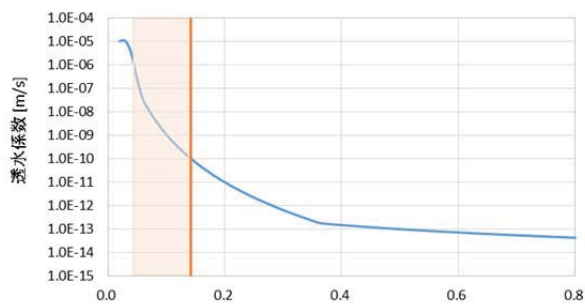
K : 透水係数 [m/s]



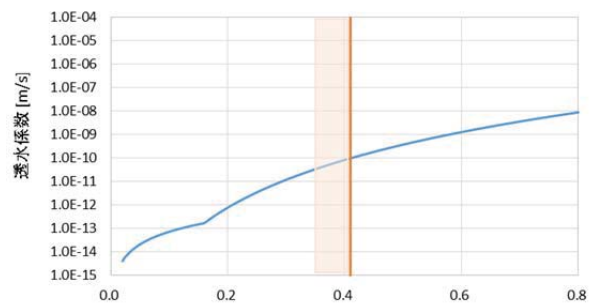
交換性ナトリウム割合ESP[-]
モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合 (ESP)



当量イオン濃度 C_i [eq/L]
空隙水の当量イオン濃度 (C_i)



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



空隙率 ϵ [-]
空隙率 (ϵ)

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

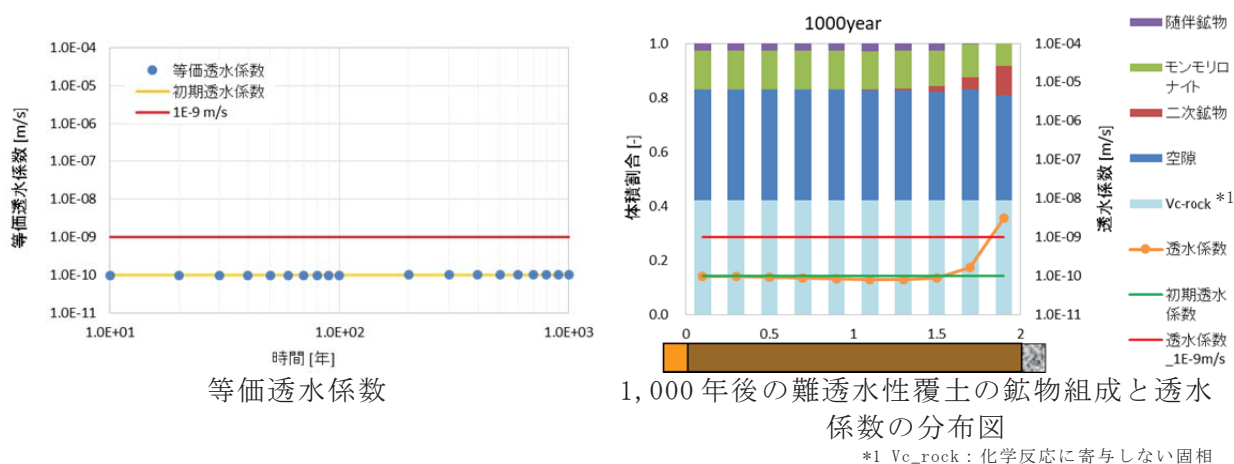
以上より、難透水性覆土の透水性に大きな影響を与える因子は「モンモリロナイトの体積割合」であると考えられる。すなわち、難透水性覆土が低透水性を維持するためにはセメント由来のアルカリ成分によるモンモリロナイトの溶解という化学劣化影響を加味しても十分なモンモリロナイトの体積が残存していることが重要な要因である。

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

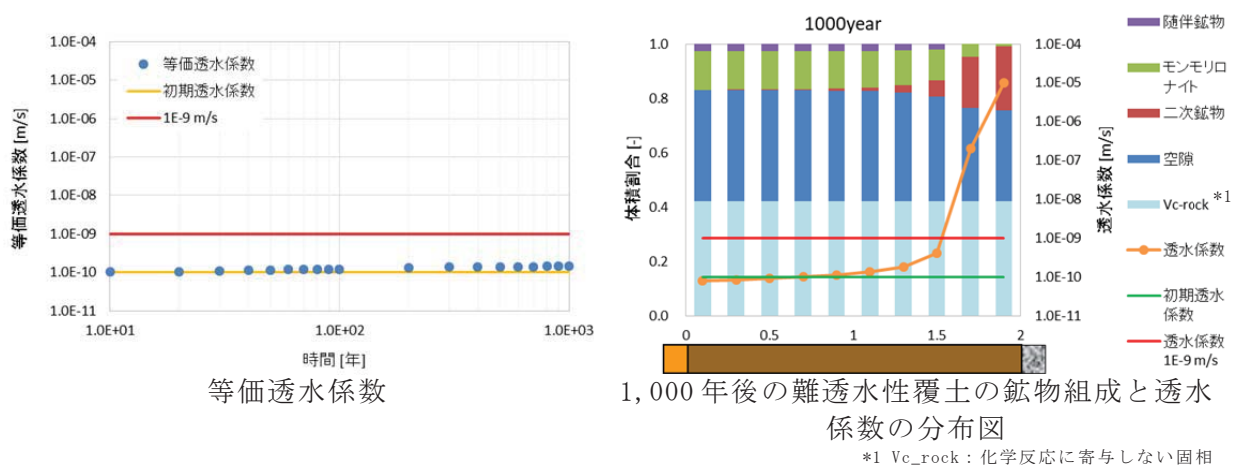
「2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析」では、難透水性覆土の透水性に大きな影響を与える因子はモンモリロナイトの体積であることを確認し、難透水性覆土の低透水性が維持される要因は、セメント由来のアルカリ成分による化学劣化影響を加味しても十分にモンモリロナイトが残存していることだと考えた。そこで難透水性覆土の化学変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与え得る要因に着目

した極端なケーススタディを実施し、モンモリロナイト体積割合への影響および難透水性覆土の低透水性が維持されるとの結論の妥当性を評価した。

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



第2図 補足5の第5図及び第7図における3号埋設施設の解析結果



第3図 補足5の第6図及び第10図における1号埋設施設の解析結果

3.1 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を分析するため、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「2.4.2 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「3. (a) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3号埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第4図に、1号埋設施設の解析結果を第5図に示す。モンモリロナイトの溶解速度を経験式(補足5「2.4.2 モンモリロナイトの溶解速度」の数式1とした場合)の解析結果と比べ、セメント系材料の境界面において、モンモリロナイトの溶解量は多くなり透水係数も上昇する結果となった。ただし、変質は部分的であり、等価透水係数もわずかに上昇するだけで、全体的には大きな影響はなかった。

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

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

(数式 1)

Rate : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

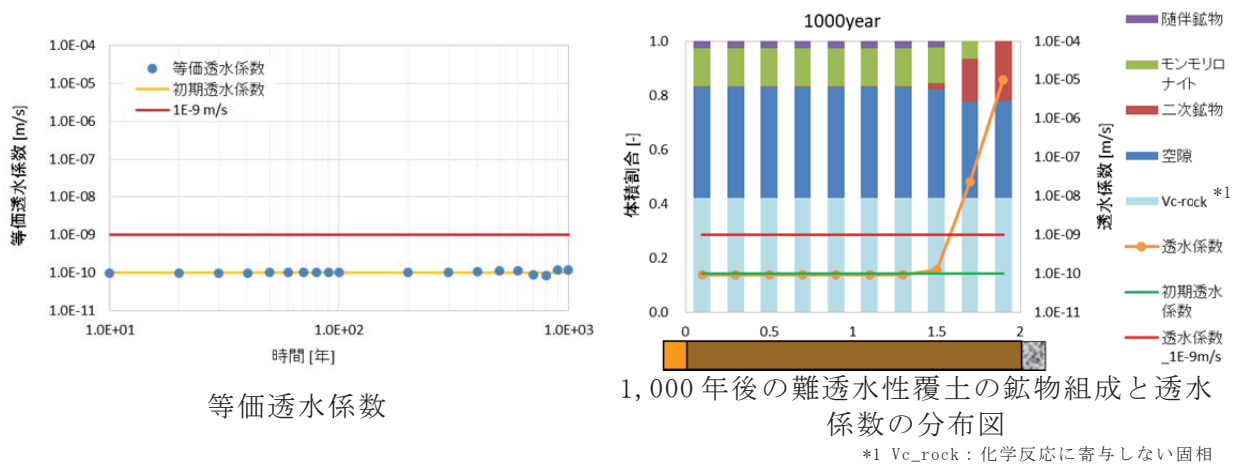
R : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

T : 絶対温度 [K]

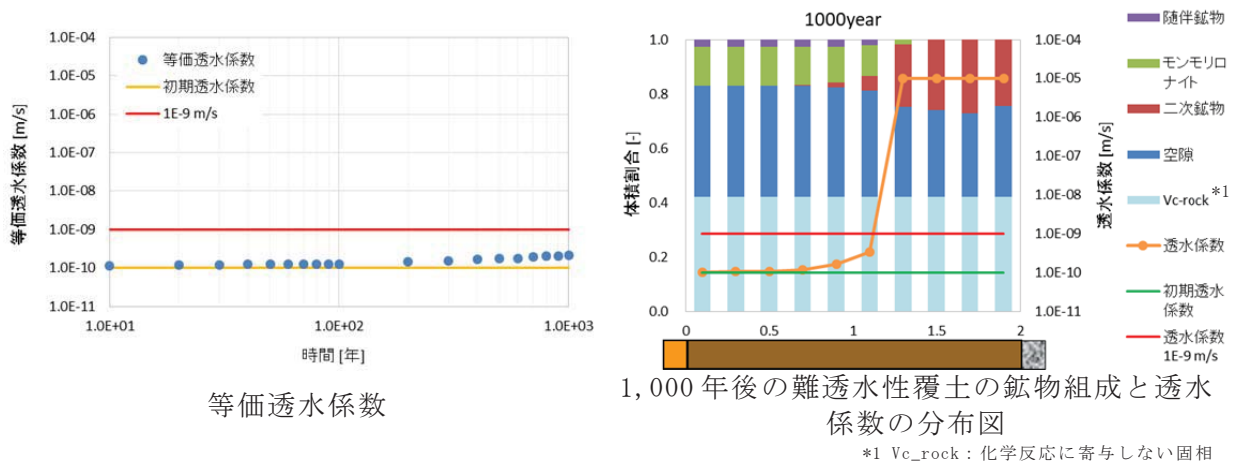
a_{OH⁻} : OH⁻イオンの活量

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号埋設施設の解析結果(モンモリロナイトの溶解速度: 瞬時平衡)



第5図 1号埋設施設の解析結果(モンモリロナイトの溶解速度: 瞬時平衡)

3.2 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を分析するため、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「2.4.4 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に記載されている条件と同様とした。

3号埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第6図に、1号埋設施設の解析結果を第7図に示す。経験式(補足5「2.4.4 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号埋設施設の解析結果については、全体的なモンモリロナイトの体積割合に大きな差は見られなかったため、等価透水係数にもほとんど影響は見られなかった。一方、1号埋設施設の解析結果については、全体的なモンモリロナイトの体積割合が減少しており、等価透水係数もわずかに上昇する結果となった。

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

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

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

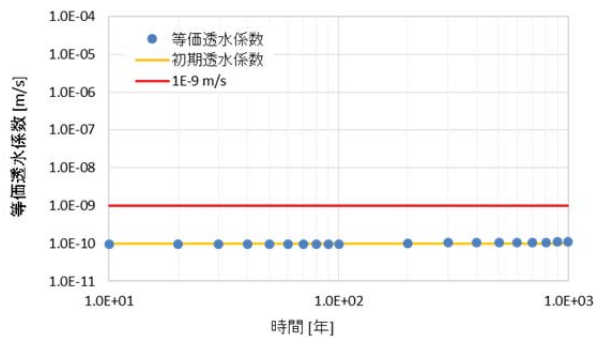
$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数[m²/s]

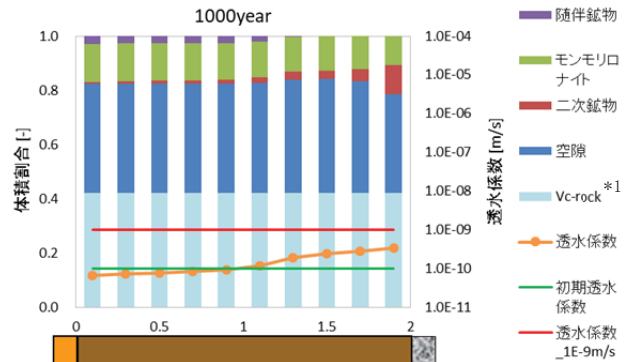
ε : 空隙率[-]

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[-]



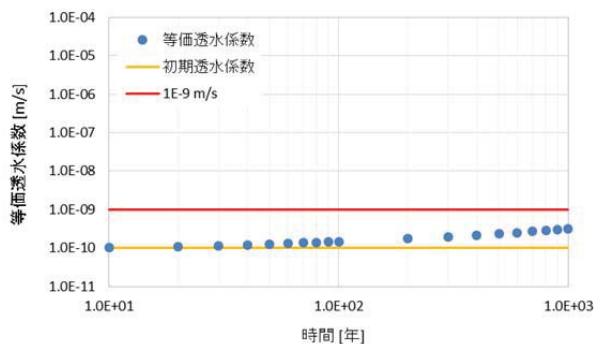
等価透水係数



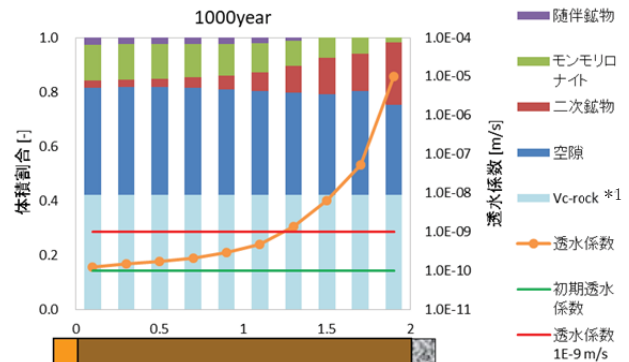
1,000年後の難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図

*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

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



等価透水係数



1,000年後の難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図

*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

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

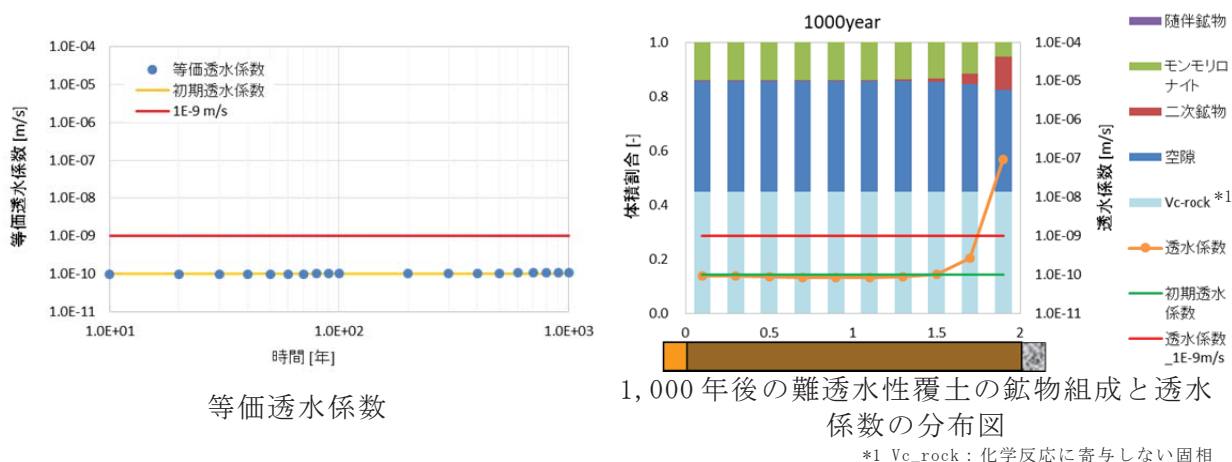
3.3 ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響

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を分析するため、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。

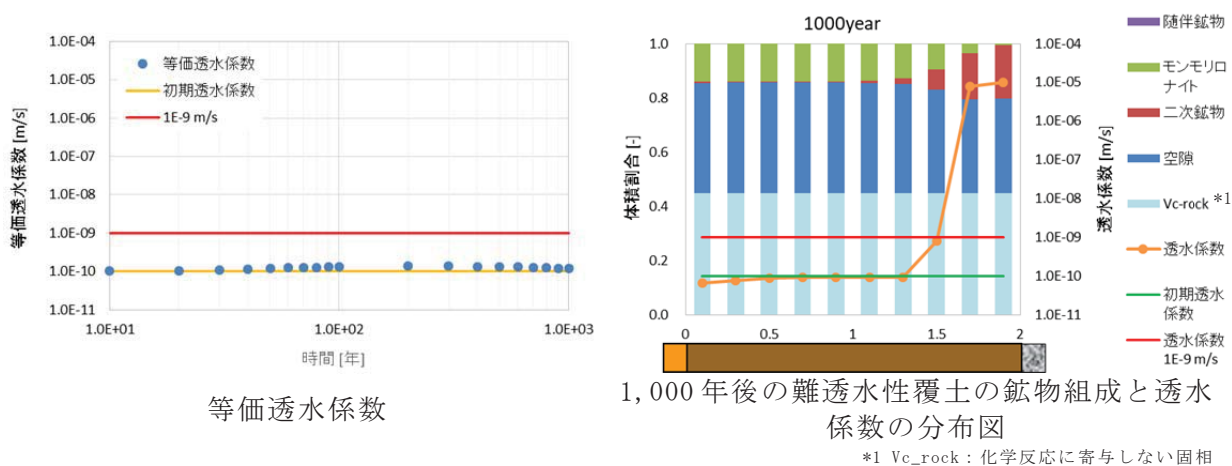
難透水性覆土中の初期鉱物組成として、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイトの他、ベントナイト中の随伴鉱物を設定し、補足5における解析では随伴鉱物の反応(緩衝作用)を考慮している。これらの随伴鉱物の溶解反応によって放出されるSiがモンモリロナイトの溶解反応や二次鉱物の沈殿反応に寄与する溶存Si濃度に直接影響することから、これらの反応の有無は解析結果に影響を与える可能性がある。そこで、ここでは随伴鉱物の反応を考慮しない解析を行い、随伴鉱物の反応によるアルカリ緩衝性の有無がモンモリロナイトの溶解に与える影響についてについて検討した。なお、その他の解析条件は補足5「3. (a) 難透水性覆土の拡散を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3号埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第8図に、1号埋設施設の解析結果を第9図に示す。

解析結果から、ベントナイトに含まれる随伴鉱物を地球化学反応において考慮しなかった場合でも解析結果に与える影響が小さいことが確認された。



第 8 図 3 号埋設施設の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)



第 9 図 1 号埋設施設の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)

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

3号埋設施設の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉍物分布と透水係数の分布図)を第10図に、1号埋設施設の解析結果を第11図に示す。セメント系材料の仕様をOPCに変更するとモンモリロナイトの溶解量が多くなる結果となった。しかし、セメント境界面ではモンモリロナイトの溶解が促進されるものの局的であり、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鉍物組成(アルカリ成分の供給が多い条件)(3号)

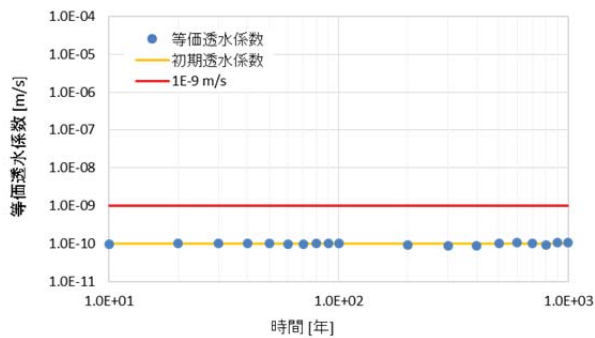
| | 結合材(c) | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------|---------|-----------|------|------|
| | CSH | ハイドロタルサイト | エトリンサイト | ポルトランドサイト | NaOH | KOH |
| mol/L _{water} ^{*1} | 12.1 | 0.21 | 0.17 | 6.95 | 0.12 | 0.15 |

*1 空隙水 1L に対する鉍物のモル量

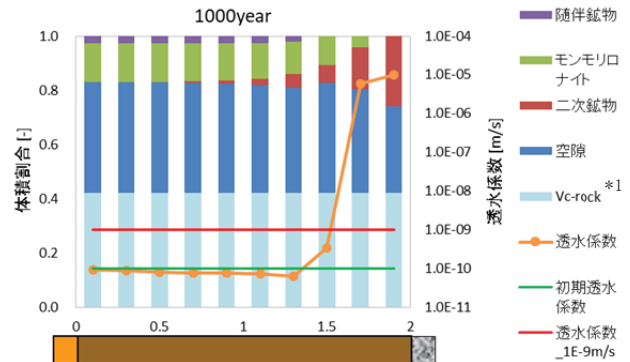
第4表 セメント系材料の初期鉍物組成(アルカリ成分の供給が多い条件)(1号)

| | 結合材(c) | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------|---------|-----------|------|------|
| | CSH | ハイドロタルサイト | エトリンサイト | ポルトランドサイト | NaOH | KOH |
| mol/L _{water} ^{*1} | 6.71 | 0.21 | 0.17 | 8.29 | 0.12 | 0.15 |

*1 空隙水 1L に対する鉍物のモル量



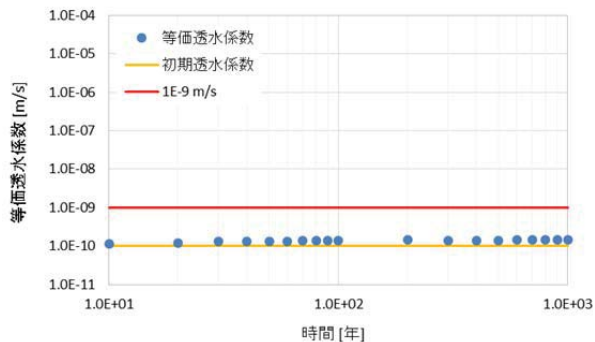
等価透水係数



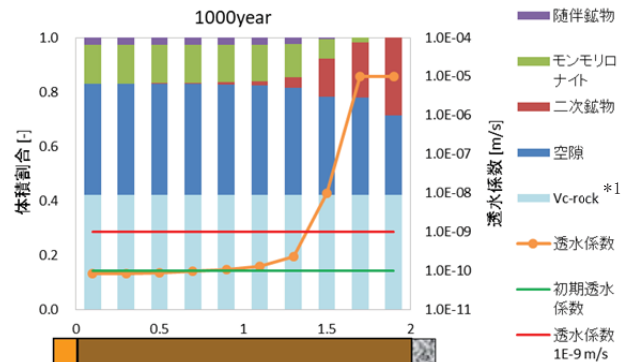
1,000年後の難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図

*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

第10図 3号埋設施設の解析結果(セメント系材料の仕様:0PC)



等価透水係数



1,000年後の難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図

*1 Vc_rock : 化学反応に寄与しない固相

第11図 1号埋設施設の解析結果(セメント系材料の仕様:0PC)

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いため、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である。

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】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。そこで、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検討した。

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

セメント系材料に接する第 9 層～第 10 層では、交換性ナトリウム割合がごくわずかに上昇しており、特に 1 号埋施設では、固化体に含まれる Na 塩の影響によりモンモリロナイトの Na 型割合がわずかに多い結果であった。それでも、難透水性覆土の止水性を大きく向上させるほどの Na 型化は見られなかった。また、Na 型が見られた第 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。



第 12 図 難透水性覆土の層の定義