

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-状態変化の評価(力学的影響)-

2020年7月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 現象の整理と検討手順.....	1
(1) 膨張現象.....	1
(2) 陥没現象.....	1
(3) 検討手順.....	2
3. 状態変化の評価に用いる初期条件.....	3
(1) 廃棄物(充填固化体).....	3
(2) 廃棄体容器.....	7
(3) 埋設設備中の鉄筋.....	8
(4) 廃棄物(均質・均一固化体).....	8
(5) 埋設設備.....	9
4. 状態変化(膨張)に必要となる条件設定.....	10
(1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定.....	10
(2) 金属腐食による金属の膨張量の設定.....	34
(3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定.....	38
(4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定.....	54
(5) 金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定.....	56
5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価.....	57
(1) 力学的影響評価の考え方.....	57
(2) 力学的影響評価手法.....	60
(3) 覆土の主な仕様.....	61
(4) 解析に用いる諸条件の設定.....	62
(5) 解析結果.....	75
(6) 1,000年後の力学的影響評価.....	79
6. 状態変化(陥没)に必要となる条件設定.....	80
(1) 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定に係る諸条件の設定.....	80
(2) 可溶性塩の溶出量の設定.....	80
(3) 埋設設備の陥没量の設定.....	81
7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価.....	84
(1) 力学的影響評価の考え方.....	84
(2) 力学的影響評価手法.....	85
(3) 覆土の主な仕様.....	85
(4) 解析に用いる諸条件の設定.....	86
(5) 解析結果.....	95
(6) 1,000年後の力学的影響評価.....	99
8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ.....	100
9. 参考文献.....	101

- 参考資料 1 設定値を超える金属廃棄物が埋設された場合の評価について
- 参考資料 2 金属腐食による腐食生成物並びに可溶性塩による二次鉱物に対し真密度を用いた力学的影響の評価を行う妥当性について
- 参考資料 3 埋設設備中の環境条件の設定に対する腐食生成物の設定の考え方と妥当性について
- 参考資料 4 力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算について

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、廃棄物埋設地の状態設定(力学的影響の評価)を補足説明するものである。補足説明に当たっては、廃棄物埋設地ごとの状態変化の評価(力学的影響)としてそれぞれに生じる現象を予測し情報を整理した上で、覆土の低透水性への力学的影響の評価を実施する。

2. 現象の整理と検討手順

廃棄物埋設地の状態設定のうち、状態変化の評価(力学的影響)に係る現象を整理する。

現象の整理に当たっては、覆土の設計要件である低透水性(透水係数及び厚さ)に影響を与える現象を対象に行う。覆土の透水係数及び厚さへの力学的影響は、覆土自身の変形やそれに伴う密度変化により生じる。覆土の変形は、隣接する埋設設備の変形に支配されることから、埋設設備に生じる現象を対象とする。

埋設設備に生じる現象は、埋設設備の膨張変形及び陥没変形を想定する。そのため、埋設設備の膨張及び陥没に分類して現象の整理を行う。

(1) 膨張現象

埋設設備及び充填固化体には、金属が含まれており、金属周辺の環境条件に依存した電気化学的腐食により金属が腐食し腐食生成物が生成されることで、金属の膨張が生じると想定する。

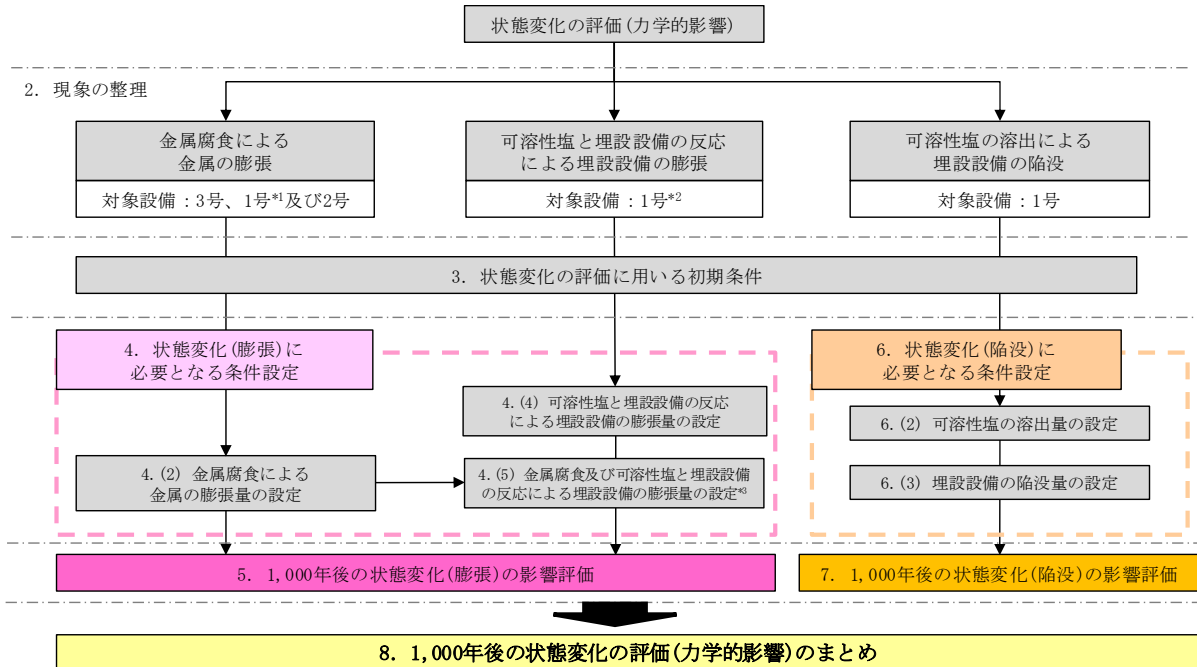
また、均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料の反応に伴い膨張性鉱物が生成するため、埋設設備が膨張することを想定する。

(2) 陥没現象

均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、埋設設備に浸入した地下水との反応により溶出し、空隙が生じること及び廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生し、陥没現象⁽¹⁾が生じると想定する。

(3) 検討手順

状態変化の評価(力学的影響)は、廃棄物埋設地ごとで生じる現象が複数存在するため、前項における現象の整理結果を踏まえて、覆土への力学的影響の評価に係る検討手順を体系的に整理する。状態変化の評価(力学的影響)の検討手順を第1図に示す。



*1：1号7群の埋設設備4基及び8群の埋設設備5基が対象となる。

*2：1号1群から6群までの埋設設備30基及び7群の埋設設備1基が対象となる。

*3：金属の膨張量を加味し評価する。

第1図 状態変化の評価(力学的影響)の検討手順

3. 状態変化の評価に用いる初期条件

状態変化の評価(力学的影響)は、埋設される廃棄体及び埋設設備の構成部材に起因した物理的・化学的相互作用を踏まえて、覆土の低透水性への力学的影響評価を行う必要がある。そのため、埋設される廃棄体及び埋設設備の構成部材に係る初期条件を整理する。

(1) 廃棄物(充填固化体)

「充填固化体の標準的な製作方法」⁽²⁾では、固体状廃棄物は以下のように分類されている。

- ・ 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合
- ・ 高圧圧縮処理を行う場合
- ・ 溶融処理を行う場合(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)

上記分類に関し、固化体ごとの特徴は以下のとおりである。

(i) 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合

固体状廃棄物の仕分け分類を第1表に、固体状廃棄物の分別(例)を第2表に示す。

第1表 固体状廃棄物の仕分け分類⁽²⁾

分類	仕分けする固体状廃棄物の性状	
強度分類	A	固体状廃棄物の強度が高いもの
	B	固体状廃棄物の強度が低いもの
形状分類	1	固型化材料等が内部に充填しやすい形状のもの
	2 ^{*1}	固型化材料等が内部に充填し難い形状のもの

*1: 切断又は圧縮処理を行うことにより、固体状廃棄物の充填効率の向上等のための減容を目的に「形状分類2」とするものもある。

第2表 固体状廃棄物の分別(例)⁽²⁾

仕分けする固体状廃棄物の種類				強度分類	形状分類	備考
金属類	・金属	金属片・板類	金属板、鋼材、金属棒等	A	1	
		金属配管類	金属配管等	A	1	
		塊状金属類	弁等	A	1	
		小物金属類等	ボルト・ナット類等	A	1	
		番線類	番線、針金等	A	1	
	缶類	一斗缶、ペール缶、スプレー缶等	A	2		
	・コンクリート類 ・ガラス類	コンクリート類	コンクリート片、石膏ボード、土砂等	A	1	
	ガラス類	ガラス瓶等	A	2	*2	
プラスチック類	・塩化ビニル類	管類	塩化ビニル配管等	A	1	
			塩化ビニルホース等	A	2	*1
	・プラスチック類	線類	ケーブル、コード等	A	1	
			片類	プラスチック片等	A	1
	・ゴム類	箱状類	ゴム片(ガスケット、ゴム板)等	B	1	
			塩化ビニル片等	B	2	
			プラスチック容器等	A	2	
シート類	防災シート、ビニルシート等、ゴムシート等	B	2			
保温材・フィルタ類	・保温材類 ・フィルタ類	保温材類	ガラスクロス、ケイ酸カルシウム、ロックウール、グラスウール等	B	2	*3
		フィルタ類	バグフィルタ、ロールフィルタ、プレフィルタ等	B	2	*3
その他	・多量の粉粒物			A	2	*4
	・所内ボイラの耐火煉瓦 ・焼却炉・溶融炉の耐火煉瓦及びセラミックフィルタ			A	1	*5

*1： 処理対象は、内径1cm以上、長さ50cm以上のもの

ただし、発生量が少ないと想定される内径1cm未満のものは「形状分類1」とする。

*2： ただし、片・板状のガラス類は「形状分類1」とする。

*3： 減容の観点から圧縮処理対象とするために「形状分類2」とした。

*4： 固型化材料等と一体化が困難となる多量の粉粒物について、小型混練固化の対象とする場合は、仕分けする。

*5： 「強度分類A」であるが、参考文献⁽²⁾Appendix-B(廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質について)に示す理由から、内籠収納又は内張り容器収納とするため仕分けする。

(ii) 高圧圧縮処理を行う場合

固体状廃棄物の仕分け分類を第3表に、固体状廃棄物の種類を第4表に示す。

第3表 固体状廃棄物の仕分け分類⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
金属類	—
非金属類	塩化ビニル類、プラスチック類、ゴム類、保温材類、フィルタ類
その他	・所内ボイラの耐火煉瓦 ^{*1} ・焼却炉・溶融炉の耐火煉瓦及びセラミックフィルタ ^{*1}

*1：参考文献⁽²⁾ Appendix-B(廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質について)に示す理由から、内籠収納又は内張り容器収納とするため仕分けする。

第4表 固体状廃棄物の種類⁽²⁾

仕分けする固体状廃棄物の種類				
金属類	金属類	・金属	金属片・板類	金属板、鋼材、金属棒等
			金属配管類	金属配管等
			塊状金属類	弁等
			小物金属類等	ボルト・ナット類等
			番線類	番線、針金等
			缶類	一斗缶、ペール缶、スプレー缶等
非金属類	プラスチック類	・塩化ビニル類	管類	塩化ビニル配管等 塩化ビニルホース等
			線類	ケーブル、コード等
			片類	プラスチック片等
				ゴム片(ガスケット、ゴム板)等
				塩化ビニル片等
			箱状類	プラスチック容器等
	シート類	防災シート、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

(iii) 溶融処理を行う場合(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)

固体状廃棄物の仕分け分類(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)を第5表及び第6表に示す。

高周波誘導溶融方式では、塊状アルミニウムを40wt%以下として鉄系金属廃棄物と混合溶融しており、塊状アルミニウム40wt%以下とすることで、鉄と同様のガス発生挙動となると考えられている⁽²⁾。

また、プラズマ溶融方式では、塊状アルミニウムと無機廃棄物を混合しているが、酸化アルミニウムと無機廃棄物とで均質な溶融体が形成される範囲としていることから、酸化アルミニウムとして安定した状態にあると考えられる⁽²⁾。

第5表 固体状廃棄物の仕分け分類(高周波誘導溶融方式)⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
塊状アルミニウム	混合処理するために仕分けする。
難溶融物 (土砂、セラミックフィルタ)	必要に応じて、投入量管理、溶融助剤の添加を行うため、仕分けする。
上記以外の固体状廃棄物	—

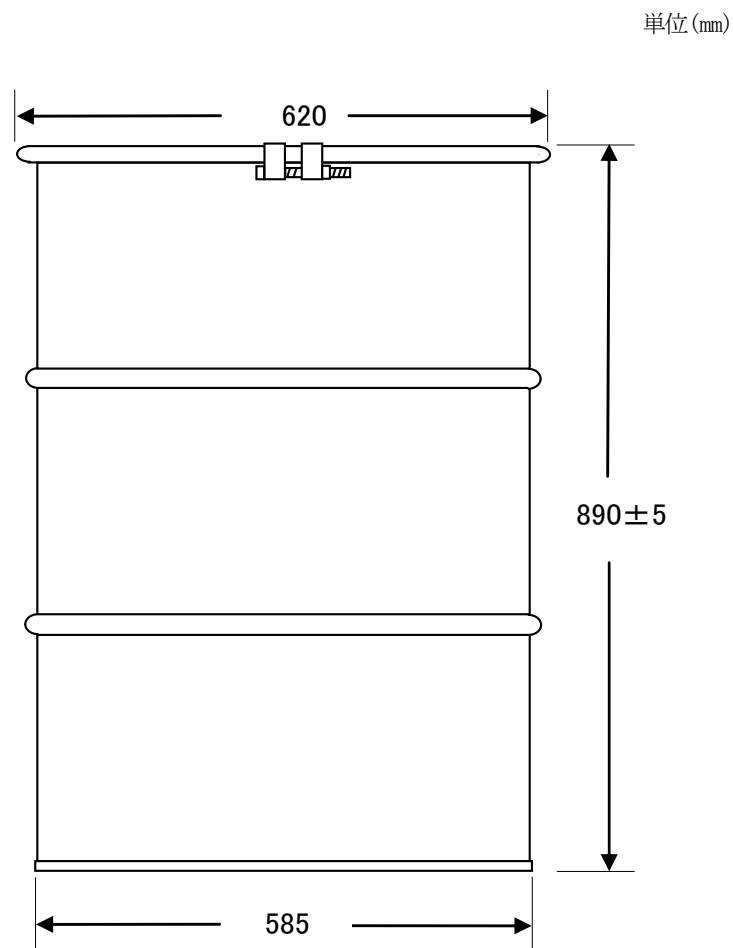
第6表 固体状廃棄物の仕分け分類(プラズマ溶融方式)⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
塊状アルミニウム	混合処理するために仕分けする。
難溶融物 (土砂、セラミックフィルタ)	必要に応じて、投入量管理を行うため、仕分けする。
上記以外の固体状廃棄物	—

(2) 廃棄体容器

廃棄物埋設地に使用される廃棄体容器(ドラム缶)の仕様は、鋼製オープンドラム：JIS Z 1600 H級(厚さ 1.6mm)又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものである。

また、ドラム缶のタイプは、固体危険物及び固体非危険物並びに液体危険物及び液体非危険物の輸送及び貯蔵容器として主に用いられているDタイプである⁽³⁾。ドラム缶の概念図を第2図に示す。



第2図 ドラム缶の概念図⁽³⁾

(3) 埋設設備中の鉄筋

鉄筋の仕様は、鉄筋コンクリート用棒鋼：JIS G 3112 SD345 異形鉄筋である⁽⁴⁾。

(4) 廃棄物(均質・均一固化体)

均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法⁽⁵⁾より均質・均一固化体の廃棄体の特徴を第7表に示す。

また、均質・均一固化体では、濃縮廃液等に由来する可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が含まれていることから、これまでの埋設実績を第8表に示す。

第7表 均質・均一固化体の廃棄体の特徴⁽⁵⁾

固化材	種類	セメント	アスファルト	プラスチック
	適合材料	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS R 5201 (1992) に定めるポルトランド(5種) ・ JIS R 5211 (1992) に定める高炉(A, B, C種) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS K 2207 (1990) に定める石油アスファルトで針入度が100以下のストレート、ブローン及び防水工事用アスファルト 	<ul style="list-style-type: none"> 不飽和ポリエステル樹脂 ・ エスター-SNO-100G ・ ポリマール 301NA ・ ポリマール 301NB ・ ポリマール 303SB
容器		JIS Z 1600 (1993) に定める1種H級ドラム缶(俵積み時に5tの荷重に耐える)		
固型化	配合	—	固化材/固化体 $\geq 50\%$	固化材/固化体 $\geq 30\%$
	物性	一軸圧縮強度 1,470kPa 以上	—	デュロメータ硬さ 25 以上
	練混ぜ	一様に混練		
	有害な空隙	少なくとも「上部空隙が30%を超えない」ものは有害ではない		
健全性を損なうおそれのある物質	<ul style="list-style-type: none"> 1. 爆発性の物質, 接水時に爆発的に反応する物質 →危険物第五類, 第三類で該当するもの 2. 揮発性の物質 →危険物第四類で該当するもの 3. 自然発火性の物質 →危険物第二類, 第三類で該当するもの 4. 廃棄体を著しく腐食させる物質 →危険物第一類, 第三類, 第六類で該当するもの 5. 多量にガスを発生させる物質 →危険物第二類, 第三類で該当するもの 			
耐埋設荷重	容器と同じ(埋設時の圧壊を防止する)			
その他の確認項目	著しい破損、放射能濃度、表面密度限度、表面線量等量率、放射性廃棄物を示す標識の表示、整理番号の表示及び固型化後の経過期間			

第8表 均質・均一固化体に含まれる可溶性塩の量

	平均重量(kg/本) ^{*1}	備考
硫酸塩	約 21	硫酸塩は、主に BWR 廃棄体に含まれている (BWR 廃棄体 1 本当たり、約 15kg～約 120kg 含まれている)。
ほう素 (ほう酸塩)	約 3.0	ほう素(ほう酸塩)は、主に PWR 廃棄体に含まれている (PWR 廃棄体 1 本当たり、約 3.0kg～約 18kg 含まれている)。

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

(5) 埋設設備

1 号埋設設備では、可溶性塩と埋設設備の反応による膨張を評価する必要があるため、埋設設備に用いられているセメント系材料を整理する。

1 号埋設設備は、外周仕切設備、内部仕切設備、セメント系充填材及び覆いから構成されているコンクリート構造物であるため、それぞれに使用されたセメント系材料の仕様を第9表に示す。

第9表 1号埋設設備のセメント系材料仕様

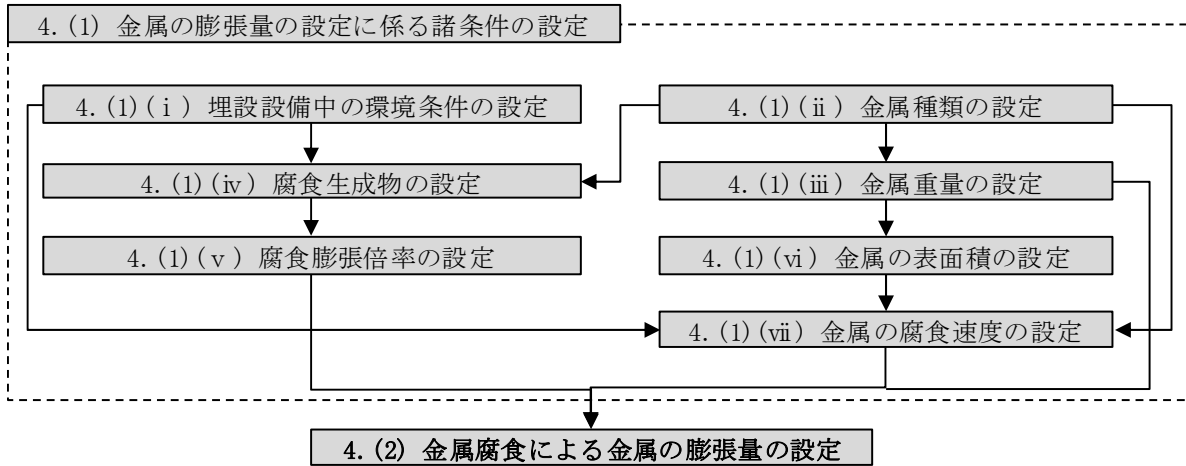
使用設備		セメント種類 (セメントと混和材の混合比)
充填モルタル		中庸熱ポルトランドセメント +高炉スラグ(1:9)
	1群から6群	
コンク リート	外周仕切	普通ポルトランドセメント +高炉スラグ(45:55)
	内部仕切	
	覆い	

4. 状態変化(膨張)に必要な条件設定

(1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定

金属の膨張量の設定は、埋設設備中の対象となる金属種類(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)に対し、環境条件として酸化還元環境のうち酸化還元電位(以下「ORP」という。)及びpHによる腐食生成物及び腐食生成物の生成による体積の膨張倍率を用いて行う。

金属の膨張量の設定手順を以下の第3図に示す。



第3図 金属腐食による金属の膨張量の設定手順

(i) 埋設設備中の環境条件の設定

金属は、周辺の環境(水や酸素)との相互作用(電気化学的腐食)を生じることが知られている。金属の電気化学的腐食に関連する環境条件としては、主に周辺環境の水質(ORP、pH 及び水温)並びに酸素(地下水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。

【確からしい設定】

(溶存酸素について)

埋設設備周辺の地下水中の溶存酸素は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、検出限界以下(0.2ppm 未満)であることが確認されている。また、覆土前の埋設設備に存在する溶存酸素濃度は、状態変化の評価期間において、外周仕切設備の鉄筋の腐食(酸素消費型)により消費されることが想定される。

(ORP について)

埋設設備周辺の ORP は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、-100mV 以下であることが確認されているため、嫌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～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、10℃～15℃程度であることからこれを参考に設定する。

なお、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、確からしい設定/厳しい設定で共通の設定とする。

【厳しい設定】

確からしい設定にて想定される埋設設備中の環境条件に対し、以下の変動要因を考慮して設定する。

(溶存酸素について)

- ・ 廃棄物埋設地周辺の地下水からの溶存酸素の供給量
- ・ 外周仕切設備に生じるひび割れ等による廃棄体容器及び金属廃棄物への溶存酸素の供給

(ORP について)

- ・ 金属類による溶存酸素の消費量

(pH について)

- ・ セメント系材料からのナトリウムやカリウムの溶解量

以上のことから、埋設設備中の環境条件の設定の考え方を踏まえ設定する。埋設設備中の環境条件の設定の考え方と設定を第 10 表に示す。

第 10 表 埋設設備中の環境条件の設定の考え方と設定

条件	設定	設定の考え方
ORP	【確からしい設定】 嫌気的条件	【確からしい設定】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された溶存酸素濃度(0.2ppm 未満)及び ORP(-100mV 以下)を参考に設定する。
	【厳しい設定】 嫌気的条件～好気的条件	【厳しい設定】 埋設設備中の溶存酸素の移行経路によっては、廃棄体容器及び金属廃棄物に供給されることが考えられる。また、廃棄物埋設地周辺の地下水に含まれる溶存酸素の供給量の変動した場合を考慮し、嫌気的条件～好気的条件を考慮する。
pH	【確からしい設定】 セメント系材料に生じる一般的な現象を考慮し、高い pH を設定	【確からしい設定】 状態変化の評価期間において、セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することにより高い pH の状態(pH11 以上)となることが考えられるため、これを考慮する。
	【厳しい設定】 上記に加え、セメント系材料から Na 及び K 成分が溶出した場合を考慮し、更に高い pH を設定	【厳しい設定】 セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することに加え、Na 及び K 成分が溶出した場合、pH が更に高い状態に推移する。金属腐食では、pH が変化した場合、腐食膨張倍率の異なる腐食生成物が生成され、金属の膨張量が増加する可能性があることから、これを考慮する。
水温	【共通】 廃棄物埋設地周辺の水温を参考に設定	【共通】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された水温(10℃～15℃程度)を参考に設定する。

(ii) 金属種類の設定

金属種類は、「3. 状態変化の評価に用いる初期条件」で整理している。充填固化体では、金属廃棄物として炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占め、その他に小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などが収納されている。

一方で、金属廃棄物は、金属の種類ごとの収納量に係る情報並びにその制限(ただし、アルミニウム等の除外物質を除く)がない⁽²⁾。そのため、評価の主軸となる金属種類を設定し、その他考慮する金属種類の混合率を設定し、金属が混合された状態での影響評価を行う必要がある。

よって、ここでは、充填固化体に含まれる金属種類を整理することで、代表とする金属種類とその他考慮する金属種類を設定する。

充填固化体中の金属種類を整理した結果、充填固化体中の主要な金属は鉄であることから、代表とする金属はこれを設定する。設定した金属種類を以下の第 11 表に示す。

第 11 表 金属種類の設定の考え方と設定

評価対象物	設定		設定の考え方
	代表とする金属種類	その他考慮する金属種類	
金属廃棄物	鉄	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	代表とする金属種類は、以下の「a. 固体状廃棄物の保管状況」～「c. 充填固化体の開缶調査(分別)結果」より、鉄とする。また、その他含まれている金属種類をあわせて考慮し、設定する。
廃棄体容器	鉄	亜鉛(メッキ)	廃棄体容器の金属種類は、JIS 規格 ⁽³⁾ に定められている金属種類を参考とし、設定する。
埋設設備中の鉄筋	鉄	-	鉄筋コンクリートに用いられる金属種類は、鉄として設定する ⁽⁴⁾ 。

a. 固体状廃棄物の保管状況

代表とする金属種類に関しては、平成5年度～7年度に実施した第一次、第二次開缶調査結果を参考とし、全国の原子力発電所に保管されている固体状廃棄物(ドラム缶への充填固化前)の保管量(当時)を基に算出した結果⁽⁶⁾より設定を行う。

開缶調査を実施するドラム缶の選定を行うため、原子力発電所に保管された固体状廃棄物の調査データが整理されている。全国の原子力発電所の固体状廃棄物の保管量を第12表に示す。

第12表 全国の原子力発電所の固体状廃棄物保管量(200Lドラム缶換算)⁽⁶⁾

ドラム缶分類	累積保管量(本)	構成比率(%)
金属類	138,035	47
塩ビ・ゴム類	36,492	12
保温材	36,194	12
フィルタ	30,474	10
コンクリート/ガラス類	13,050	4
その他	43,875	15
合計	298,120	100

b. 固体状廃棄物の重量構成

「a. 固体状廃棄物の保管状況」にて整理された構成比率の調査結果を基に、BWR 及び PWR より開缶調査対象とするサンプリング選定を行っている。開缶調査は、BWR が 104 本、PWR が 50 本のサンプリング本数であり、金属類のドラム缶の選定に関しては、全国の原子力発電所に保管されている重量分布に類似するように選定されている⁽⁶⁾。充填固化体の重量に関する調査をした結果を第 13 表に示す。

第 13 表より、充填固化体の力学的影響(膨張)の評価においては、構成比率が約 80%と大半を占める金属類を選定した。

第 13 表 ドラム缶分類別廃棄物総重量⁽⁶⁾

ドラム缶分類	ドラム缶数量(本)	総重量(kg)	構成比率(%)
金属類	90	12,225	79
塩ビ・ゴム類	24	1,100	7
保温材	24	863	6
廃フィルタ	10	257	2
コンクリート/ガラス類	6	867	6
合計	154	15,312	100

c. 充填固化体の開缶調査(分別)結果

第一次開缶調査により判明している廃棄物の分別結果を第 14 表に示す。

開缶調査結果⁽⁶⁾より、代表とする金属種類は、充填固化体に含まれる内容物に基づき、鉄が主要な金属種類であるとし、これを設定する。

第14表 第一次開缶調査結果の廃棄物の分別結果⁽⁶⁾

廃棄物分類	廃棄物分類		具体的廃棄物品名				判定	代表模擬 廃棄物品目	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 (%)	品名	寸法	
A1	金属片・板類	40.6	40.6	金属板	34.7	34.7	14.1	◎	金属板	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			
				ドラム缶	15.3	74.4	6.2	◎	金属板			
				足場クランプ	8.4	82.8	3.4	◎	足場クランプ			
				金属片	8.0	90.8	3.2	◎	金属板			
				工具類	1.6	92.4	0.7	-	-			
				アンカー	1.1	93.5	0.4	-	-			
				ベアリング	1.1	94.5	0.4	-	-			
				金網	1.0	95.6	0.4	-	-			
				配管	77.8	77.8	22.9	◎	配管			
				フランジ	13.9	91.7	4.1	◎	配管			
	金属配管類	29.4	70.0	電線管	3.3	95.0	1.0	-	-	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	
				カップリング	2.0	97.0	0.6	-	-			
				足場パイプ	1.6	98.7	0.5	-	-			
				弁	65.9	65.9	13.1	◎	弁			
	塊状金属類	19.8	89.8	スチームトラップ	18.3	84.2	3.6	◎	弁	形状が比較的複雑で内部空隙の残りやすい弁で代表 寸法は、配管と同一口径とし、開缶調査より得られた寸法分布の最頻値の弁も加えた	21	
				ストレーナ	7.3	91.5	1.4	◎	弁			
				マスク用フィルタ	2.1	93.6	0.4	-	-			
				ドアノブ	1.4	95.1	0.3	-	-			
				スイッチボックス	1.3	96.4	0.3	-	-			
				コンクリート	55.6	55.6	2.2	◎	コンクリート			
				石膏ボード	34.1	89.7	1.4	◎	石膏ボード			
	コンクリート片・ガラス類	4.0	93.9	サンダー刃	4.7	94.4	0.2	-	-	開缶調査結果より推定した標準的な寸法 開缶調査結果より推定した標準的な寸法	2	
				ガラス瓶	4.4	98.8	0.2	-	-			
				ガラス類	1.1	99.9	0.0	-	-			
				ボルト・ナット類	91.6	91.6	2.4	◎	ボルト・ナット			
				金属端子	7.8	99.4	0.2	-	-			
小物金属	2.6	96.4	番線	76.6	76.6	1.7	◎	番線	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		
			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	55.6	55.6	0.5	-	-				
			センサー	44.1	99.7	0.4	-	-				
番線類	2.3	98.7	ゴミ屑	77.0	77.0	0.3	-	-	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		
			砂	23.0	100.0	0.1	-	-				
			計器類	1.0	99.7	-	-	-				
冊	0.3	100.0	冊	-	-	-	-	-	-			
			冊	-	-	-	-	-				
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	標準的な寸法	52	
				PT缶	15.4	64.3	15.4	◎				
				一斗缶	14.4	78.7	14.4	◎				
				ペール缶	11.9	90.6	12.9	◎				
				スプレー缶	9.0	99.6	9.0	◎				
				スプレー缶	9.0	99.6	9.0	◎				
A 非圧縮	金属片・板類	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)					
				金属板	W500×L500×t3 W500×L600×t3 W500×L200×t3	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					
				アングル	W50×L700×t6 W50×L500×t6 W50×L200×t6	標準的な寸法	4					
	足場クランプ	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)					
				足場クランプ	H30×W70×L270	標準的な寸法	4					
	金属配管類	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)					
				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					
	配管(曲管)	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)					
				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					
	塊状金属類	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)					
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						
コンクリート片・ガラス類	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)						
			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	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)						
			石膏ボード	H200×W200×t10	開缶調査結果より推定した標準的な寸法	2						
小物金属	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)						
			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	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)						
			番線	外形φ3×L250	重量割合の多い番線で代表 寸法は通常使用される10番線(約3mm)を使用	2						
計器類	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)						
			計器類	-	-	-						
冊	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)						
			冊	-	-	-						
A 圧縮	缶類	-	-	品名	寸法	決定理由・根拠	模擬廃棄物組成(%)					
				一斗缶	240□×H350	標準的な寸法	52					
				ペール缶	290φ×H350	標準的な寸法	48					
				スプレー缶	70φ×H200	標準的な寸法	48					

(iii) 金属重量の設定

金属重量は、埋設設備ごとの仕様(設備形状、廃棄体の重量制限)により異なることから個別に算出し、設定する。

a. 金属廃棄物重量の設定

2号及び3号埋設設備の金属廃棄物の重量は、文献⁽⁶⁾の密収納時(非圧縮体)における最大重量が305kg(第15表参照)である。また、2号埋設設備の埋設実績より、2号埋設設備に対する平均値の最大重量279.8kg(第16表参照)であることから、これらを参考とする。

以上のことから、1本当たりの廃棄体重量を310kgとして設定し、埋設設備ごとの埋設本数を乗算することで設定する。

金属廃棄物重量の設定に当たっては、以下の観点から妥当である。

- ・金属腐食による金属の膨張は、埋設設備1基単位での変形挙動による評価であること
- ・2号埋設設備の埋設実績において、1本当たりの金属廃棄物の重量が大きな廃棄体(高圧圧縮体及び溶融体)の割合は、約6%であり非常に少ないこと
- ・廃棄体重量(310kg/本)は、廃棄体容器に密充填した際の金属重量(305kg/本)を包含していること

1号埋設設備は、2号及び3号埋設設備とは異なり重量制限(500kg/本)であることから、埋設実績を踏まえた金属廃棄物重量の設定を行うことが出来ない。

そのため、廃棄体製作技術⁽⁶⁾より廃棄体に含まれる上部空隙(約10%以下)及び理論上収納できる金属量を考慮し、設定する。

廃棄体製作技術⁽⁶⁾にて整理されている廃棄体の収納状態、重量及び試験実施状況を参考とし第15表に収納重量に関するデータを示す。

また、2号埋設設備の廃棄物の受入実績を第16表に示す。

第 15 表 固体状廃棄物の収納重量、固型化材料等の充填体積等⁽⁶⁾

固型化対象物の種類		収納容器	固体状廃棄物の 収納重量(kg)	固型化後重量 (kg)	固型化材料等の 充填体積 ^{*6} (L)
金属類		ドラム缶	301～305	662～694	163～165
プラスチック類		内籠容器	36～40	462～484	175～179
		内張容器	36	446	135
圧縮体 ^{*1}		ドラム缶	94 ^{*3}	350	102
圧縮体 ^{*2}		ドラム缶	178 ^{*4}	401	86
溶融体		ドラム缶	735～742 ^{*5}	867～878	50～53
高圧圧縮体 (非金属 類) ^{*7}	圧縮力約 1,000t 縦絞り縮径あり	ドラム缶	280 ^{*9}	436	58
	圧縮力約 1,500t 縦絞り縮径なし	ドラム缶	245 ^{*10}	392	59
高圧圧縮体 (金属類) ^{*8}	圧縮力約 1,000t 縦絞り縮径あり	ドラム缶	597 ^{*11}	808	82
	圧縮力約 1,500t 縦絞り縮径なし	ドラム缶	737 ^{*12}	894	71

*1： 保温材・フィルタ類及び圧縮対象のプラスチック類の圧縮体

*2： 圧縮対象の金属類の圧縮体

*3： 圧縮用容器(120L)の重量(約 45kg, 約 11kg×4 個)を含む

*4： 圧縮用容器(120L)の重量(約 90kg, 約 11kg×4 個)を含む

*5： キャニスタの重量(約 140kg)を含む

*6： 固型化材料等のドラム底部からの注入高さの目標値を非圧縮物及び圧縮体は 780mm、溶融体は 820mm とした。

*7： 高圧圧縮対象の非金属類の高圧圧縮体

*8： 高圧圧縮対象の金属類の高圧圧縮体

*9： 高圧圧縮処理用容器(200L)の重量(約 120kg, 約 30kg×4 個)を含む

*10： 高圧圧縮処理用容器(155L)の重量(約 63kg, 約 13kg×5 個)を含む

*11： 高圧圧縮処理用容器(200L)の重量(約 90kg, 約 30kg×3 個)を含む

*12： 高圧圧縮処理用容器(155L)の重量(約 63kg, 約 13kg×5 個)を含む

第 16 表 2 号埋設設備における廃棄物の受入実績

	1 群		2 群		3 群		4 群		5 群		6 群	平均 値
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	
平均廃棄物収 納重量(kg/本)	205.4	201.1	230.5	226.3	199.4	217.0	213.4	190.5	208.7	176.2	192.1	205.5
平均廃棄体重 量(kg/本)	598.9	581.8	589.8	574.6	565.0	567.2	556.9	539.2	544.9	530.9	531.0	561.8
金属類廃棄物 の割合(%)	88.9	83.2	81.0	72.1	74.5	75.5	71.0	62.5	66.6	64.6	58.8	72.6
溶融体、高圧圧 縮体の割合(%)	0.0	0.4	6.9	9.1	4.3	6.4	6.9	4.0	5.3	1.6	2.1	4.3
その他の割合 (%)	11.1	16.8	19.0	27.9	25.5	24.5	29.0	37.5	33.4	35.4	41.2	27.4
平均金属類廃 棄物収納重量 (kg/本)	220.2	225.2	263.2	279.8	237.6	256.3	263.9	252.0	261.5	221.6	255.0	248.8

ここで、金属廃棄物の重量の算出について、3号廃棄物埋設地を例に以下に示す。

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

上記の算出方法に従い、埋設設備ごとに算出した結果を第 17 表に示す。

第 17 表 金属廃棄物重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
金属廃棄物	8,184,000	282,624	4,017,600

*1：金属廃棄物重量(kg/基)は、1号埋設設備の重量制限(500kg/本)、鉄の密度(7,874kg/m³)及びモルタルの比重(2,100kg/m³)を用いて算定した55.2kg/本より、設定した。

b. 廃棄体容器重量の設定

1号、2号及び3号廃棄物埋設地に使用される廃棄体容器(ドラム缶)の仕様は、JIS Z 1600⁽³⁾のH級ドラム缶として共通であることから、同一の考え方に基づいて設定を行う。

H級ドラム缶は最小質量として27.0kgと規定されていることから、1本当たり30kgとして設定する。

ここで、廃棄体容器の重量の算出について、3号廃棄物埋設地を例に以下に示す。

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

上記の算出方法に従い、埋設設備ごとに算出した結果を第18表に示す。

第18表 廃棄体容器重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号	対象設備：2号
廃棄体容器	792,000	153,600	388,800

c. 埋設設備中の鉄筋重量の設定

埋設設備中の鉄筋の重量は、設計図書から鉄筋径、配置本数及び延長を算出し、設定する。

埋設設備ごとに算出した結果を第19表に示す。

第19表 埋設設備中の鉄筋重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号	対象設備：2号
埋設設備中の鉄筋	1,357,000	127,000	415,000

(iv) 腐食生成物の設定

腐食生成物の設定は、埋設設備中の環境条件により生成が予想される腐食生成物の形態が異なるため、確からしい設定／厳しい設定に区分けし、腐食生成物に関連するパラメータを考慮した上で設定する。

腐食生成物の設定では、「4. (1) (i) 埋設設備中の環境条件の設定」において設定した環境下に対し、生成される腐食生成物を定量的に同定した知見がないことから、以下の考え方にに基づき設定する。

確からしい設定は、「4. (1) (i) 埋設設備中の環境条件の設定」において設定した環境条件及び文献^{(7)~(9)}を参考に最も安定に存在し得る腐食生成物を抽出し、設定する。環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する場合又は、最も安定に存在し得る腐食生成物の設定が困難である場合は、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を選定する。

厳しい設定は、環境条件及び文献^{(9)~(13)}を参考に、覆土の低透水性への影響評価の観点から、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を設定する。

上記の設定方針に従い、代表とする金属種類及びその他考慮する金属種類ごとに確からしい設定／厳しい設定の考え方及び設定する腐食生成物を第 20 表に示す。

ここで、充填固化体では、金属廃棄物として炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占めていることから、代表とする金属種類である鉄に対する腐食生成物(マグネタイト)の設定の考え方について、参考資料 3「2. (3) 解析による推定」に詳細を示す。

腐食生成物は、金属腐食の進行とともに変化する環境条件及び生成される腐食生成物の影響により時間変遷とともに変化する。一方で、時間変遷を考慮した生成される腐食生成物の定量的な推定を行うことは、困難である。

そのため、腐食生成物の設定においては、金属腐食に伴う膨張量を評価するため、代表とする金属種類及びその他考慮する金属種類が第 20 表により設定した腐食生成物に全て変化することとした。

なお、1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩による腐食生成物への影響を考慮する。可溶性塩による腐食生成物への影響を評価した文献⁽⁹⁾に基づき、可溶性塩を考慮した環境条件下において、腐食膨張倍率が大きな腐食生成物である水酸化物を設定する。ここで、アルミニウムにおいては、文献⁽⁹⁾より腐食膨張倍率の大きな腐食生成物(7.1 倍)を生成する可能性が示唆されている。しか

しながら、アルミニウムは、文献⁽²⁾より除去する廃棄物として区分されており、分別除去後の調査結果としては、廃棄体1本当たりの平均重量が0.109kg(鉄の約1,000分の1以下)であることから、腐食膨張倍率の大きなアルミニウムの腐食生成物による影響は無視できる。

第20表 腐食生成物の設定及び設定の考え方

条件		設定	設定の考え方
代表とする 金属種類*1	鉄	【確からしい設定】 Fe ₃ O ₄	【確からしい設定】 複数の文献において生成すること及び安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ (マグネタイト)を設定する。
		【厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ (水酸化鉄(II))を設定する。
その他考慮 する 金属種類	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【確からしい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【確からしい設定】 それぞれの金属種類に対して複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、確からしい設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
		【厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

*1：1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体中に含まれる可溶性塩による影響を考慮している。

(v) 腐食膨張倍率の設定

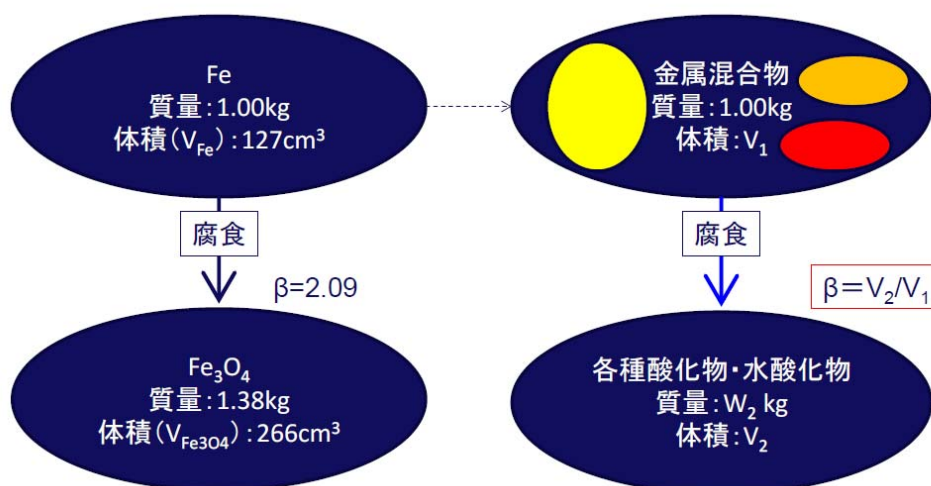
腐食膨張倍率は、第 20 表より設定した腐食生成物を用いて設定する。

埋設設備中の金属割合が文献⁽⁶⁾より定量的に設定することが困難であることから、「代表とする金属種類(鉄)」の腐食膨張倍率を基準とし、「その他考慮する金属種類」の金属単体ごとの腐食膨張倍率の混入率(wt%)をパラメータとし、金属が混合された状態での腐食膨張倍率の評価を行う。

a. 腐食生成物の腐食膨張倍率の算定

金属の腐食に伴う腐食生成物は、腐食に伴い酸素を取り込み形成される。そのため、拘束などがない環境において生成する腐食生成物は、かさ密度*1 と呼ばれるもので評価されることが実態である。一方で、廃棄物埋設地においては、埋設設備の周囲が覆土により拘束された状態である。いずれの場合においても、かさ密度を考慮した定量的な腐食生成物の膨張倍率に関する知見がない。そのため、ICSD の無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽⁹⁾に示される理論密度を用いて、重量 1.0kg の金属の体積 V_1 が腐食し、酸化物あるいは水酸化物となった場合の体積 V_2 の比より、理論的な膨張率(β)を求める。鉄を例とした際の算出方法を第 4 図に示す。

*1: かさ密度とは、質量からかさ容積を除いた密度を指す。また、かさ容積は、開気孔(外部に通じている気孔)閉気孔(固体内に閉じ込められている気孔)両方の体積を含んだ容積である⁽¹⁴⁾。



第 4 図 鉄の膨張倍率の算定方法

金属の膨張率の算定方法としては、第 21 表に示す金属のモル質量などから算出を行う。

ここで、金属元素 (A, B 及び C) としたとき、これらが含まれる化合物 (A_a, B_b, C_c, O_d 及び H_e) を考える。化合物 1mol 中には a, b 及び c mol の A, B 及び C が存在する。

よって、1mol の化合物 (体積 $L_{X,Comp} = L_{A_a B_b C_c O_d H_e}$ の中) に含まれる金属元素が金属として存在するときの総モル質量 ($\sum W_{X,Metal}$) 及び総モル体積 ($\sum L_{X,Metal}$) は以下の式で表される。

$$\sum W_{X,Metal} = aM_A + bM_B + cM_C$$

$$\sum L_{X,Metal} = aL_A + bL_B + cL_C$$

このとき、体積膨張率 (β) は、以下の式で表すことができる。

$$\beta_{A_a B_b C_c O_d H_e} = L_{A_a B_b C_c O_d H_e} / \sum L_{X,Metal}$$

すなわち、一般式は以下となる。

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

第 21 表 金属化合物の体積膨張率 (β) 一覧

	モル質量 (g/mol)	真密度 (g/cm ³)	L_{metal} (cm ³ /mol)	金属 原子数	L_{Comp} (cm ³ /mol)	β
Fe	55.845	7.860	7.105	1	7.105	1.00
Fe ₃ O ₄ (Magnetite)	231.533	5.170	7.105	3	14.928	2.10
Fe(OH) ₂	89.860	3.400	7.105	1	26.429	3.72
Ni	58.693	8.900	6.595	1	6.595	1.00
Ni(OH) ₂	92.708	4.100	6.595	1	22.612	3.43
Al	26.982	2.700	9.993	1	9.993	1.00
Al(OH) ₃ (Amorphous aluminum hydroxide)	78.004	2.420	9.993	1	32.233	3.23
Cu	63.546	8.960	7.092	1	7.092	1.00
Cu(OH) ₂	97.561	3.368	7.092	1	28.967	4.08
Zn	65.380	7.140	9.157	1	9.157	1.00
Zn(OH) ₂ (beta-Zn(OH) ₂)	99.395	3.053	9.157	1	32.557	3.56

第 20 表の腐食生成物の設定及び第 21 表の金属化合物の体積膨張率より、腐食膨張倍率の設定を行う。

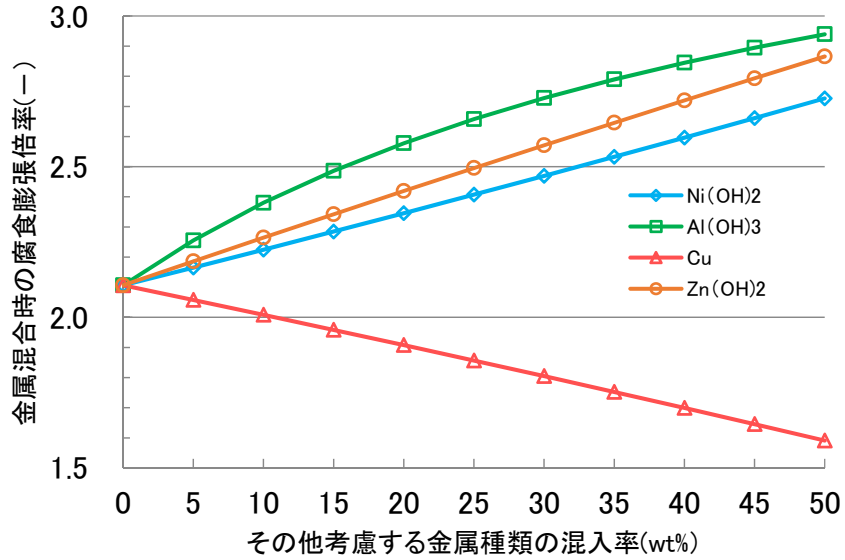
確からしい設定は、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物であるマグネタイト($\beta: 2.1$)を基準とし、その他考慮する金属種類の腐食生成物である水酸化物(例えば、 Ni(OH)_2 の $\beta: 3.43$)の金属単体ごとの混入率(wt%)をパラメータとし、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価したものを第 5 図に示す。

厳しい設定は、確からしい設定と同様の考え方にに基づき、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物である水酸化鉄(II) ($\beta: 3.72$)に対して評価したものを第 6 図に示す。

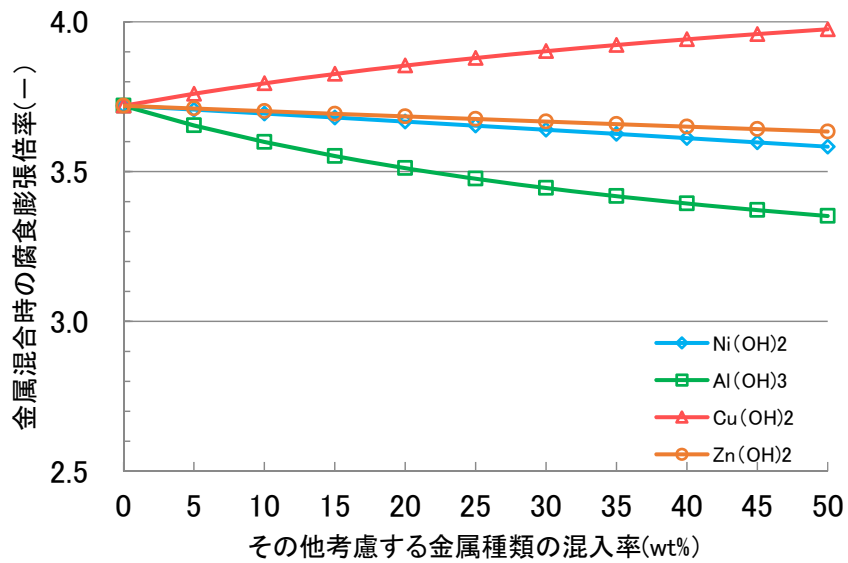
以上の設定・評価を踏まえ、腐食膨張倍率を第 22 表のとおり設定する。

第 22 表 腐食膨張倍率の設定値

条件	設定値	設定の考え方
腐食膨張倍率	【確からしい設定】 3 倍	【確からしい設定】 代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物を Fe_3O_4 (マグネタイト)とし、その他考慮する金属種類の混入率を 0wt%-50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 3 倍以下であることから、3 倍と設定する。
	【厳しい設定】 4 倍	【厳しい設定】 環境条件の変動を考慮し、設定した代表とする金属種類並びに非晶質の水酸化物を設定したその他考慮する金属種類の混入率を 0wt%~50wt%の幅で評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 4 倍以下であることから、4 倍と設定する。



第5図 確からしい設定 (Fe₃O₄(腐食膨張倍率：2.10)を基準)における
金属が混合された場合の腐食膨張倍率



第6図 厳しい設定 (Fe(OH)₂(腐食膨張倍率：3.72)を基準)における
金属が混合された場合の腐食膨張倍率

(vi) 金属の表面積の設定

金属の腐食膨張量を算出する際に必要となる表面積について、構成部材ごとの設定値を第 23 表に示す。

第 23 表 金属の表面積/比表面積の設定値

構成部材	対象設備	表面積/比表面積	備考
金属廃棄物	共通	$8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$	溶融体を除く
	共通	$2.18 (\text{m}^2/\text{本})$	溶融体のみ
廃棄体容器	共通	$4.36 (\text{m}^2/\text{本})$	
埋設設備中の鉄筋	3号	$19,000 (\text{m}^2)$	
	1号	$3,000 (\text{m}^2)$	
	2号	$11,000 (\text{m}^2)$	

a. 金属廃棄物

(a) 充填固化体のうち溶融処理を行わない場合

充填固化体には、金属板、番線、配管など様々な寸法・形状の廃棄物が含まれている。これら個々に対する表面積を設定することは、収納物の取扱上、困難であるため、文献⁽⁶⁾に記載されている調査・算出された廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積(第 24 表参照)のうち値の大きなものを設定する。

文献⁽⁶⁾では、金属廃棄物からのガス発生量の観点から、廃棄体に含まれる鉄系金属の表面積を固体状廃棄物の開缶調査より算定している。

算定に当たっては、廃棄体に収納する廃棄物量が 1 本ごとに異なると考えられることから、廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積(m^2/kg)を調査し、廃棄物の収納重量から金属の表面積($\text{m}^2/\text{本}$)を算出できるようにしている⁽⁶⁾。

具体的な鉄系金属の表面積は、金属片、配管、管、番線類等の代表的な廃棄物ごとに分類し、代表的な廃棄物の重量値及び表面積測定値から比表面積(鉄系金属の重量当たりの表面積)を算出した後、これに全鉄系金属の代表的な廃棄物ごとの総重量を乗じることで算出している⁽⁶⁾。算出された鉄系金属の表面積は、第 24 表のとおりである。第 24 表より、充填固化体のうち溶融処理を行わない場合の比表面積を $8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$ として設定する。

第 24 表 鉄系金属の表面積⁽⁶⁾

発電所炉形式	分類	鉄系金属総表面積(m ²)	廃棄物総重量(kg)	表面積(m ² /kg) ^{*1}
BWR	A	497.73	6,310	7.9×10 ⁻²
PWR	A	730.30	4,870	8.8×10 ⁻²

*1：廃棄物単位重量当たりの金属表面積(m²/kg) = 金属総表面積(m²) / 廃棄物総重量(kg)

(b) 充填固化体のうち溶融処理を行う場合

充填固化体のうち溶融処理を行う廃棄体は、ドラム缶に収納できる形状にて製作される。

そのため、溶融処理以外の廃棄体とは異なり表面積は、溶融処理後の形状に依存することから、ドラム缶の表面積と同様とする。表面積を以下のとおり設定する。

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

ドラム缶直径 φ	: 5.85×10 ⁻¹ (m)
ドラム缶半径 R	: $\varphi/2$ (m)
ドラム缶高さ h	: 8.95×10 ⁻¹ (m)

b. 廃棄体容器

充填固化体に用いられるドラム缶は標準的な製作方法に基づき、JIS Z 1600⁽³⁾のうちH級ドラム缶であることから、H級ドラム缶の寸法を参考に以下のとおり算出し設定を行う。

なお、表面積の算出においては、ドラム缶の内・外側両方の面積を合計した値とする。

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

ドラム缶直径 φ	: 5.85×10 ⁻¹ (m)
ドラム缶半径 R	: $\varphi/2$ (m)
ドラム缶高さ h	: 8.95×10 ⁻¹ (m)

c. 埋設設備中の鉄筋

埋設設備中の鉄筋に関しては、設計図書を参考に構成部材ごと(覆い、底版、側壁及び内部仕切)に含まれる鉄筋の重量、本数及び総延長から鉄筋径ごとに算出・集計した値を参考に設定を行う。

なお、鉄筋に係る単位質量、公称直径、断面積及び周長は JIS G 3112⁽⁴⁾に基づく。

(a) 3号埋設設備

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

(b) 1号埋設設備

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

(c) 2号埋設設備

$$\begin{aligned}\text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 5 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 1,942.7 + 2,586.0 + 2,362.2 + 3,711.4 \\ &= 10,602.3(\text{m}^2) \cong 11,000.0(\text{m}^2)\end{aligned}$$

(vii) 金属の腐食速度の設定

金属の腐食に伴う膨張量は、環境に応じた金属の腐食速度に状態変化の評価期間を掛け合わせた際の腐食生成物として失われた金属質量より求めることができる。

膨張量の算出に必要な金属の腐食速度を求める手法は、一般的に重量法⁽¹⁵⁾、ガス発生法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾及び電気化学法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾が知られている。

廃止措置の開始後の確からしい評価期間(1,000年後)の金属の腐食速度は、「4.(1)(i)埋設設備中の環境条件の設定」を考慮し、適切な分析手法により求められる値を参考に設定する。

a. 腐食速度の測定手法の選定

腐食速度の測定は、前述のとおり3つの手法により試験が実施されている。

なお、日本産業規格や学会基準などにより広く定義された測定手法はなく、実務者が測定手法に対して、精度良く分析すべく様々な手法が考案されているものである。

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 	

【確からしい設定】

第 10 表の環境条件の設定に基づき、第 25 表から環境条件に適用した測定手法を選定する。測定手法は、環境条件が嫌氣的条件であり、金属類が水素発生型の腐食挙動を示すと想定されることから、ガス発生法により取得された腐食速度が適切であると判断し、これを選定する。

【厳しい設定】

第 10 表の環境条件の設定では、ORP 及び pH が幅を持って変動すると整理されている。刻々と変化する環境条件下では、局部腐食(孔食)の発生や異種金属接触腐食が生じることが予想され、試験的に求める腐食速度を均一腐食として評価することが困難である。そのため、腐食速度の選定を行わない。

b. ガス発生法により取得された腐食速度の整理

第 10 表の確からしい設定の環境条件と試験条件が類似し、かつガス発生法により腐食速度を取得・評価した文献の一例を第 26 表に示す。

第 26 表のうち、温度環境が比較的高い状態で取得された腐食速度は、第 10 表の環境条件に適したものではないため、No. 1, 3, 9 及び 12(No. 12 は 25.5℃のデータのみ)により取得された値が適切であると判断する。

第 26 表 ガス発生法による腐食速度に関する知見*1,*2

No.	著者	腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	材料	環境条件
1	Kreis ら	0.005~0.01	炭素鋼	温度：20℃、水質：水酸化カルシウム系、pH：12.8、試験期間：240日
2		0.065~0.02		温度：20℃、水質：NaOH, KOH、pH：12.8、試験期間：80、240日
3	藤沢ら	0.002	炭素鋼	温度：15℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：365日
4		0.001		温度：30℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：365日
5		0.01		温度：45℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：2ヶ月
6	三原ら	0.4	炭素鋼	温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：10、試験期間：6ヶ月
7		0.02		温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：12、試験期間：6ヶ月
8		0.02		温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：13.5、試験期間：6ヶ月
9	廣永ら	0.003	炭素鋼	温度：15℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
10		0.01		温度：30℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
11		0.08		温度：45℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
12	(財)原子力環境整備促進・資金管理センター	0.03(25.5℃)~0.1(45.5℃)	炭素鋼	温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン 5ppm、pH：12.5、試験期間：190日
13		0.02(25.5℃)~0.06(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン 500ppm、pH：12.5、試験期間：190日
14		0.02(25.5℃)~0.07(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン 1,500ppm、pH：12.5、試験期間：190日
15		0.06(25.5℃)~0.2(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン 5,000ppm、pH：12.5、試験期間：190日

*1：No. 1~No. 8 は参考文献⁽¹⁶⁾より引用

*2：No. 9~No. 15 は参考文献⁽¹⁷⁾より引用

c. 腐食速度の設定

【確からしい設定】

腐食速度の設定は、第 25 表に整理したとおり、測定手法に内在する測定誤差があることが判明している。そのため、第 26 表から適切であると判断した腐食速度 ($0.002 \mu\text{m/y} \sim 0.01 \mu\text{m/y}$) に対して、最大の腐食速度である $0.01 \mu\text{m/y}$ の小数第 2 位を切り上げた値である $0.1 \mu\text{m/y}$ を設定する。

【厳しい設定】

「4. (1) (vii) a. 腐食速度の測定手法の選定」のとおり、試験的に求める腐食速度を均一腐食として評価することが困難であることから、腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定する。

以上の腐食速度の設定値及びその考え方を第 27 表に示す。

なお、1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩による腐食速度への影響を考慮する。可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)による腐食速度への影響は、文献⁽²¹⁾⁽²²⁾より埋設設備中の環境条件下において、腐食速度の低下、又は鉄が不動態化することから影響はない。そのため、文献⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾に示された様々な環境条件下(可溶性塩影響*1より金属の腐食環境として厳しい人工海水(NaCl)影響*2を含む)にて取得された腐食速度に対し、最大の腐食速度を選定している。

*1:均質・均一固化体を埋設する埋設設備内の間隙水における可溶性塩の濃度は、塩による収着影響との設定(硫酸塩 3%、ほう酸塩 0.1%)と同じ値である。

*2: 文献⁽¹⁶⁾に示される人工海水(NaCl)の濃度は、約 3%である。

第 27 表 腐食速度の設定値

条件	設定値	設定の考え方
腐食速度*1	【確からしい設定】 $0.1 \mu\text{m/y}$	【確からしい設定】 腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮し、値を設定する。
	【厳しい設定】 腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定	【厳しい設定】 腐食膨張量は、金属腐食を評価する上で必要となる環境条件による腐食速度に依存するが、局部腐食(孔食)や異種金属接触腐食、環境条件の変動に係る不確実性を考慮する。よって、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000年後)においては、腐食形態に係らず全量が瞬時に腐食すると設定する。

*1: 1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体中に含まれる可溶性塩による影響を考慮している。

(2) 金属腐食による金属の膨張量の設定

金属腐食による金属の膨張量は、「4. (1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定」までの設定値を踏まえ、廃棄物埋設地ごとに算出し、設定する。金属の膨張量の算出に必要となるパラメータを第 28 表に示す。

評価対象物(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)である金属のうち、金属廃棄物の重量割合は、第 28 表より埋設設備中の鉄筋及び廃棄体容器に対し、約 8 割と大半を占めている。

そのため、金属腐食による膨張方向は、金属廃棄物の膨張挙動に支配されることが想定されることから、金属廃棄物の収納状況を考慮し設定する。

金属廃棄物は、収納される金属の形状が様々であるが、廃棄体容器への収納は、容器が効率的に使用できるように極力密に入れて収納している。また、金属の腐食は、その材料の形状により腐食環境に接触する面積が多い箇所ほど促進する傾向を有する。

以上のことから、金属腐食による膨張方向の設定は、廃棄体容器へ収納される金属の形状及び収納状況により、腐食が進展する方向を正確に推測することが困難であるが、現実的な設定として、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ変形するものとする。

また、膨張方向の設定においては、鉛直・水平方向への変形に対する評価のみではなく、埋設設備の側部に必要に応じて碎石を混合した剛性の高い下部覆土が設置されていること、埋設設備の上部は覆土の上載圧による拘束のみであることから、鉛直方向に卓越した変形における膨張量の算出をあわせて実施する。

なお、厳しい設定における金属の膨張量に関しては、腐食に伴う挙動を定量的に評価することが困難であるため、内在する不確実性に対して腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定するなど、膨張量が大きくなるような設定を行っている。

第 28 表 金属の膨張量算出に必要なパラメータ一覧

項目			対象設備		
			3号	1号	2号
共通項目	埋設設備	寸法	東西方向：64.10(m) 南北方向：36.51(m) 鉛直方向：6.66(m)	東西方向：24.40(m) 南北方向：24.40(m) 鉛直方向：6.20(m)	東西方向：36.00(m) 南北方向：36.91(m) 鉛直方向：6.94(m)
		体積	約 15,587(m ³)	約 3,692(m ³)	約 9,222(m ³)
	金属重量	金属廃棄物	8,184,000(kg)	282,624(kg)	4,017,600(kg)
		廃棄体容器	792,000(kg)	153,600(kg)	388,800(kg)
		埋設設備中の鉄筋	1,357,000(kg)	127,000(kg)	415,000(kg)
		合計	10,333,000(kg)	563,224(kg)	4,821,400(kg)
	金属の表面積 /比表面積	金属廃棄物	8.8×10 ⁻² (m ² /kg)(溶融体を除く) 2.18(m ² /本)(溶融体のみ)		
		廃棄体容器	4.8(m ² /本)		
		埋設設備中の鉄筋	19,000(m ²)	3,000(m ²)	11,000(m ²)
	確からしい 設定	腐食膨張倍率	3倍		
腐食速度		0.1(μm/y)			
評価年数		1,000(y)			
厳しい設定	腐食膨張倍率	4倍			
	腐食速度	腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定			
	評価年数	腐食速度を設定しないことから、評価年数を設定しない			

(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

鉛直方向への変形による膨張量は、第3図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備中の金属量(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)、腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し、設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、埋設設備中の金属量が最も多く、膨張量としても大きくなることが予想される3号廃棄物埋設地を対象とし、確からしい設定のうち鉛直方向へ卓越した変形の算出過程を例に以下に示す。

金属の膨張による埋設設備の膨張量(鉛直方向)(m)

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

*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)

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

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

*5: 鉄の密度は、7,874(kg/m³)(²³)

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第29表に示す。

第29表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備:3号	対象設備:1号	対象設備:2号
	鉛直方向		
確からしい設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
厳しい設定	1.69×10^0	3.61×10^{-1}	1.39×10^0

(ii) 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

鉛直・水平方向への変形による膨張量は、第3図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備中の金属量(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)、腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、埋設設備中の金属量が最も多く、膨張量としても大きくなることが予想される3号廃棄物埋設地を対象とし、確からしい設定のうち鉛直・水平方向への変形の中から東西方向の算出過程を例に以下に示す。

金属の膨張による埋設設備の膨張量(東西方向) (m)

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

*1: 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張比}(-)^{*2}) \text{の三乗根}$$

*2: 埋設設備の体積膨張比(-)

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

*3: 埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ) (m³)

$$= (\text{単位年数当たりの腐食体積}(m^3/y)^{*4} \times \text{評価年数}(y) \times \text{金属の腐食膨張倍率}) - (\text{健全時の金属重量}(kg) / \text{鉄の密度}^{\ast 5}(kg/m^3))$$

*4: 「4.(2)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち単位年数当たりの腐食体積(m³/y)の算出結果を引用

*5: 鉄の密度は、7,874(kg/m³)⁽²³⁾

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第30表に示す。

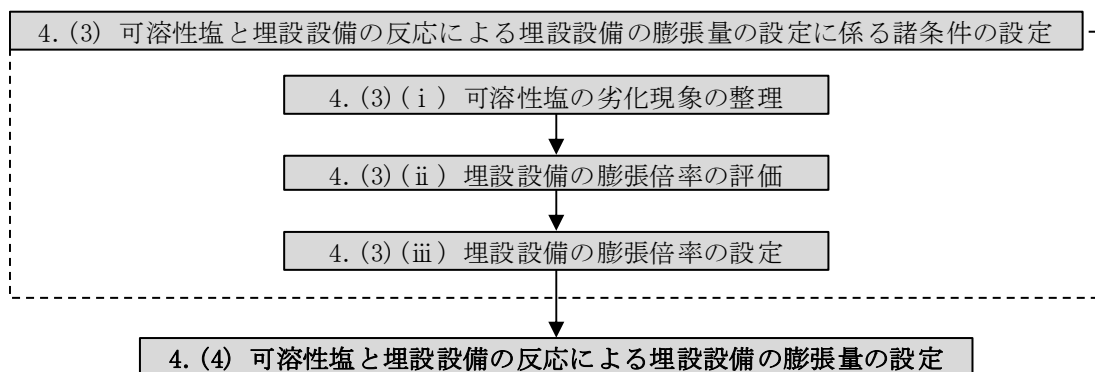
第30表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備: 3号			対象設備: 1号			対象設備: 2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	3.50×10 ⁻¹	2.00×10 ⁻¹	3.64×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	8.42×10 ⁻³	1.64×10 ⁻¹	1.68×10 ⁻¹	3.16×10 ⁻²
厳しい設定	5.00×10 ⁰	2.85×10 ⁰	5.20×10 ⁻¹	4.64×10 ⁻¹	4.64×10 ⁻¹	1.18×10 ⁻¹	2.25×10 ⁰	2.31×10 ⁰	4.34×10 ⁻¹

(3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定

可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量の設定は、廃棄体の内容物(可溶性塩：硫酸塩及びほう酸塩)に対し、想定している劣化現象の整理を行い、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料(充填材及びコンクリート)の反応による埋設設備の体積の膨張倍率を用いて行う。

可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量の設定手順を第7図に示す。



第7図 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定手順

(i) 可溶性塩の劣化現象の整理

a. 可溶性塩の劣化現象の整理(硫酸塩)

可溶性塩のうち、硫酸塩(Na₂SO₄)は、セメント系材料と接触することで、コンクリート構造体に劣化現象を発生させることが知られており⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、硫酸塩劣化と総称されている。

硫酸塩劣化のメカニズムは、硫酸塩とセメント水和物が化学反応を起こし、コンクリート中で反応生成物が結晶成長することで、反応生成物の物理的圧力が要因となり劣化するものである。

均質・均一固化体のうち、セメント固化体に硫酸塩が含まれているため、埋設設備の膨張影響は、化学的劣化により生じる膨張現象に着目し、評価する。

硫酸塩劣化のうち、化学的劣化のメカニズムを整理したものを第31表に示す。

第31表 硫酸塩(化学的劣化)のメカニズムの分類

メカニズムの分類		
化学的劣化	エトリンガイト生成	<ul style="list-style-type: none"> エトリンガイトの生成による結晶成長圧などがコンクリートを劣化させる。 $\text{monosulfate } CaSO_4 \cdot 2H_2O, H_2O \xrightarrow{C-A-H} \text{ettringite}$
	二水石こう生成	<ul style="list-style-type: none"> 二水石こうの生成による結晶成長圧でコンクリートが劣化する。 $Ca(OH)_2, SO_4^{2-}, H_2O \xrightarrow{C-S-H} CaSO_4 \cdot 2H_2O$
	ソーマサイト生成	<ul style="list-style-type: none"> 主に低温環境において、SO₄²⁻・CO₃²⁻の存在によりソーマサイトが生成し、コンクリートを劣化させる。 $Ca(OH)_2, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, H_2O \xrightarrow{C-S-H} \text{thaumasite}$
	Mg ²⁺ による劣化	<ul style="list-style-type: none"> 硫酸塩がMgSO₄の場合、以下の反応によりMg²⁺がセメント水和物を分解する。 $Ca(OH)_2, MgSO_4, H_2O \xrightarrow{C-S-H} CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 + SiO_2 \cdot xH_2O \rightarrow M-S-H$

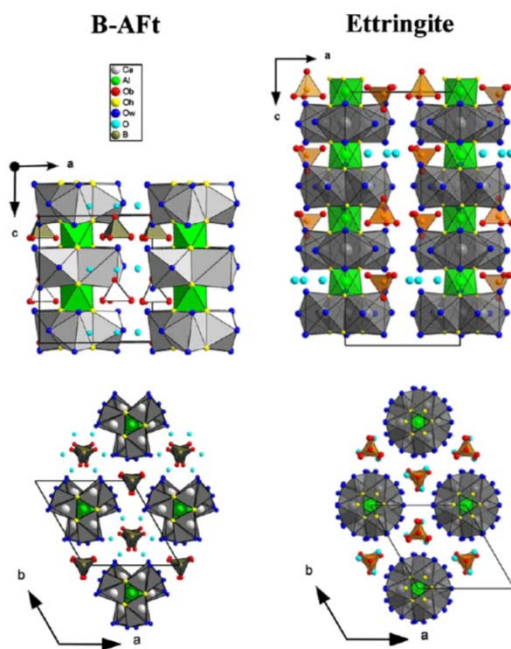
b. 可溶性塩の劣化現象の整理(ほう酸塩)

ほう酸塩は、コンクリート中の金属イオン(Na イオンや Ca イオン)と反応を示すが、ほう酸塩による反応生成物が硫酸塩劣化と同様の膨張影響を生じると直接的に示している文献は確認されていない⁽²⁶⁾。

一方で、エトリングタイトの SO_4 に対して BO_4 が置換すること^{(26)~(28)}が報告されていることから、埋設設備の膨張影響に関しては、覆土の低透水性への影響評価の観点を考慮し、膨張量を大きく算出するため、硫酸塩と同様の膨張影響として評価する。

ほう素を含む AFt*1 とエトリングタイトの結晶構造の比較を第 8 図に示す。

*1: ほう素を含む AFt は、カルシウム・アルミノフェライト・モノサルフェート水和物型化合物の総称を指す(エトリングタイトを主に指す)。



- ・ ほう酸は、エトリングタイト ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) に対して、3つの SO_4^{2-} イオンが4つの $B(OH)^{-}$ と2つの OH^- とに置き換わった構造をとる(エトリングタイトと結晶構造が類似)。



- ・ エトリングタイトの生成と同様に、膨張現象が生じる可能性が考えられるため、膨張影響では、覆土の低透水性への影響評価の観点を考慮し、膨張量を大きく算出するため、硫酸塩と埋設設備の反応と同様の挙動を示すと評価する。

第 8 図 ほう素を含む AFt とエトリングタイトの結晶構造の比較

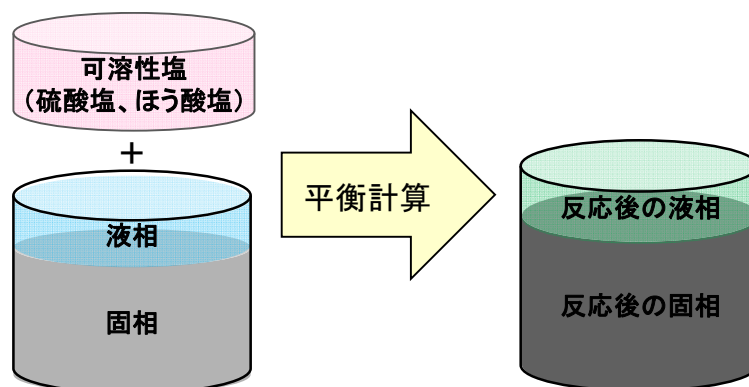
(ii) 埋設設備の膨張倍率の評価

可溶性塩による埋設設備の膨張倍率は、埋設設備に含まれる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)がセメント系材料と反応した後の固相の変化を考慮して設定する。

しかしながら、可溶性塩と埋設設備の反応による二次鉱物の膨張倍率を対象とした定量的な評価や知見がない。

そのため、地球化学計算コード PHREEQC^{(29)~(31)}を用いた評価期間に依存しない平衡計算を行うことで、鉱物の生成・溶解に伴う鉱物相の体積変化を求めることで、1号埋設設備の膨張倍率を評価する。PHREEQCを用いた評価の概念図を第9図に示す。

PHREEQCによる平衡計算は、可溶性塩により生成される膨張の特性を有する二次鉱物の生成量を確認するため、第8表にて整理している均質・均一固化体に含まれる可溶性塩の量を考慮し、実施する。



第9図 平衡計算の概念図

a. 解析プログラム

平衡計算においては、PHREEQC を使用する。解析では、高濃度の可溶性塩による反応に伴い、想定される二次鉱物の生成を考慮した検討が必要であることから、熱力学データベース (PHREEQC に同梱されている sit.dat より抽出、Thaumasite については、文献⁽³²⁾)を用いる。

b. 解析用物性値

PHREEQC の平衡計算に必要な入力物性値について、以下のとおり設定をする。

(a) 地下水組成

地下水組成は、事業所敷地内の鷹架層下部層、中部層及び第四紀層の地下水を対象に 1986 年 1 月～1987 年 10 月、1995 年 10 月及び 2011 年 10 月～11 月に取得された水質試験の結果を参考とし、濃度の平均値を用いて設定する。地下水組成を第 32 表に示す。

第 32 表 地下水組成(事業所敷地全体)

		測定結果	単位	設定値	単位
pH		5.3-8.3	-	PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	-
ナトリウムイオン	Na ⁺	7.2-31.5	mg/L	8.4×10 ⁻⁴	mol/L
カリウムイオン	K ⁺	0.5-5.6	mg/L	7.8×10 ⁻⁵	mol/L
カルシウムイオン	Ca ²⁺	0.1 未満-7.2	mg/L	9.1×10 ⁻⁵	mol/L
マグネシウムイオン	Mg ²⁺	0.1-3.8	mg/L	8.0×10 ⁻⁵	mol/L
炭酸水素イオン	HCO ₃ ⁻	5.6-51.9	mg/L	4.7×10 ⁻⁴	mol/L
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻	1.0-21.7	mg/L	1.2×10 ⁻⁴	mol/L
塩化物イオン	Cl ⁻	12.9-20.3	mg/L	4.7×10 ⁻⁴	mol/L

(b) 初期鉱物組成

1号埋設設備に用いられたセメント系材料仕様・化学組成から、セメント系材料の初期鉱物組成を設定する。

セメント系材料の仕様を第33表に、また、セメント系材料及び混和材の化学組成を第34表及び第35表に示す。

第34表及び第35表のセメント系材料の仕様及び化学組成から、セメント系材料の初期鉱物組成を文献⁽³³⁾の算定方法に従い設定する。セメント系材料の初期鉱物組成を第36表に示す。

これは、地層処分の検討に用いられたセメント条件設定に使用しているモデルであるが、第9図の平衡計算の概念図のようなセメント系材料のバッチ式浸漬実験との比較において普通ポルトランドセメント及びフライアッシュ高含有シリカフェームセメントの液相成分の再現性が高いことから、適用をした。

第 33 表 セメント系材料仕様

	間隙率*1	W/C(%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量(kg/m ³)			細・粗骨材料(kg/m ³)		
				中庸熟 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	153	279			1,911		
				126	153	-	1,023	533	355

*1：全容積に対する空間の容積の割合を指す。

第 34 表 セメント系材料の化学組成

(単位：wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	ig. loss
普通 ポルトランドセメント	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38	0.64
中庸熟 ポルトランドセメント	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.3	0.35	0.8

第 35 表 高炉スラグの化学組成

(単位：wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
高炉スラグ	34.19	14.87	0.84	41.97	6.09	0.02	0	0

第 36 表 セメント系材料の初期鉱物組成

鉱物	充填材		コンクリート		
	間隙率(-)*1	0.16	間隙率(-)*1	0.16	
	鉱物濃度				
	(mol/m ³)	(mol/L _{water})	(mol/m ³)	(mol/L _{water})	
エトリンガイト Ettringite	4.51	0.028	12.0	0.075	
ハイドロタルサイト Hydrotalcite	145.9	0.91	72.2	0.45	
CSH	CSH1.6	1,024.2	6.40	1,327.9	8.30
	CSH1.2	1,301.3	8.13	0.0	0.0
ギブサイト Gibbsite	427.1	2.67	0.0	0.0	
ハイドロガーネット C ₃ AH ₆	0.0	0.0	87.2	0.54	
ポルトランドイト Portlandite	0.0	0.0	29.9	0.17	
	Na ₂ O	2.03	0.013	4.07	0.025
	K ₂ O	1.56	0.01	5.08	0.032
骨材としてのカルサイト Calcite	8,762	55	10,220	64	

*1：全容積に対する空間の容積の割合を指す。

(c) 二次鉱物組成

PHREEQC では、設定する二次鉱物で平衡計算により算出される結果が異なることから、反応に寄与する条件(可溶性塩)を考慮し、以下の2種類の二次鉱物の設定による影響を確認する。

「埋設設備の環境におけるセメント二次鉱物設定(1)」は、セメント-ベントナイト環境における設定値である。

また、「ソーマサイトを含むセメントの検討における二次鉱物設定(2)」は、可溶性塩(硫酸塩)を起源として生成する可能性がある鉱物(ソーマサイト)による影響を把握するための設定値である。セメント系材料の二次鉱物の設定を第37表に示す。

第37表 セメント系材料の二次鉱物の設定

埋設設備の環境におけるセメント二次鉱物設定(1)		ソーマサイトを含むセメントの検討における二次鉱物設定(2)	
固相名	データベース内の名称	固相名	データベース内の名称
CSH ゲル	CSH0.8 ~ CSH1.6	CSH ゲル	CSH0.8 ~ CSH1.6
C_3ASH_4	Katoite	-	-
C_4AH_{13}	C_4AH_{13}	C_4AH_{13}	C_4AH_{13}
ゲーレンナイトハイドレート(C_2ASH_8)	Stratlingite	ゲーレンナイトハイドレート(C_2ASH_8)	Stratlingite
モノサルフェート	Monosulfoaluminate	モノサルフェート	Monosulfoaluminate
-	-	モノカルボアルミネート	Monocarboaluminate
-	-	ヘミカルボアルミネート	Hemicarboaluminate
カルサイト	Calcite	カルサイト	Calcite
ブルーサイト	Brucite	ブルーサイト	Brucite
ハイドロタルサイト	Hydrotalcite	ハイドロタルサイト	Hydrotalcite
-	-	アモルファスシリカ	SiO ₂ (am)
アナルサイム	Analcime	-	-
ローモンタイト	Laumontite	-	-
カオリナイト	Kaolinite	-	-
パイロフィライト	Pyrophyllite	-	-
フリーデル氏塩	Friedel-salt	-	-
2水石膏	Gypsum	2水石膏	Gypsum
硬石膏	Anhydrite	硬石膏	Anhydrite
ほう酸塩	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (s)	ほう酸塩	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (s)
	Ca ₃ B ₂ O ₆ (s)		Ca ₃ B ₂ O ₆ (s)
	CaB ₄ O ₇ (s)		CaB ₄ O ₇ (s)
	CaB ₂ O ₄ (s)		CaB ₂ O ₄ (s)
	NaBO ₂ (s)		NaBO ₂ (s)
硫酸塩 (Na ₂ SO ₄)	Thernardite	硫酸塩 (Na ₂ SO ₄)	Thernardite
ソーマサイト	Thaumasite	ソーマサイト	Thaumasite

(d) 可溶性塩濃度

可溶性塩濃度の設定は、可溶性塩による膨張性鉱物の生成に伴う膨張量に関して、定量的な知見がないことから、膨張性鉱物の体積膨張量が最大になると考えられる濃度を設定する。

そのため、可溶性塩濃度の設定値は、第 8 表に示された値を参考に、1 号埋設設備(1 群から 6 群)全体の体積における平均濃度が、1 号 7, 8 群の埋設設備へ作用するとして設定する。設定に当たっては、1 号埋設設備(1 群から 6 群)に含まれる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)の重量をモル量に換算した後、1 号埋設設備(7, 8 群)中の間隙水量により除算することで算出した。設定した可溶性塩の濃度を第 38 表に示す。

第 38 表 可溶性塩の濃度

ほう酸塩 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	硫酸塩 (Na_2SO_4)
0.84mol/L _{water} ^{*1}	4.5mol/L _{water} ^{*1}

*1：間隙水 1L に対する塩のモル量

(e) 解析ケース

「4. (3) (ii) b. (a) 地下水組成」から「4. (3) (ii) b. (d) 可溶性塩濃度」により設定したパラメータを踏まえて設定した解析ケースを第 39 表及び第 40 表に示す。

第 39 表 解析ケース-1

ケースNo.	セメント	間隙率 ^{*1}	塩 (1~6群の塩量全てが 7,8群へ反応する)	二次鉱物として ソーマサイト (沈殿あり/なし)	Stratlingite (C ₂ ASH ₈) 等の 二次鉱物 (あり/なし)	骨材を カルサイトと想定	二次鉱物設定
100	充填材	0.16	×	×	○	×	1
101			○	×	○	×	1
102			○	○	○	×	1
103			○	○	×	×	1
104			○	×	×	×	1
105			×	×	○	○	1
106			○	×	○	○	1
107			○	○	○	○	1
108			○	○	×	○	1
109			○	×	×	×	1
200	コンクリート	0.16	×	×	○	×	1
201			○	×	○	×	1
202			○	○	○	×	1
203			○	○	×	×	1
204			○	×	×	×	1
205			×	×	○	○	1
206			○	×	○	○	1
207			○	○	○	○	1
208			○	○	×	×	1
209			○	×	×	×	1

*1: 全容積に対する空間の容積の割合を指す。

第 40 表 解析ケース-2

ケースNo.	セメント	間隙率 ^{*1}	塩 (1~6群の塩量全てが 7,8群へ反応する)	二次鉱物として ソーマサイト (沈殿あり/なし)	Stratlingite (C ₂ ASH ₈) 等の 二次鉱物 (あり/なし)	骨材を カルサイトと想定	二次鉱物設定
100-2	充填材	0.16	×	×	○	×	2
101-2			○	×	○	×	2
102-2			○	○	○	×	2
103-2			○	○	×	×	2
104-2			○	×	×	×	2
105-2			×	×	○	○	2
106-2			○	×	○	○	2
108-2			○	○	×	○	2
109-2			○	×	×	○	2
200-2			コンクリート	0.16	×	×	○
201-2	○	×			○	×	2
202-2	○	○			○	×	2
203-2	○	○			×	×	2
204-2	○	×			×	×	2
205-2	×	×			○	○	2
206-2	○	×			○	○	2
207-2	○	○			○	○	2
208-2	○	○			×	×	2
209-2	○	×			×	×	2

*1: 全容積に対する空間の容積の割合を指す。

(f) 計算結果

PHREEQC を用いた平衡計算の計算結果を第 10 図～第 13 図に示す。

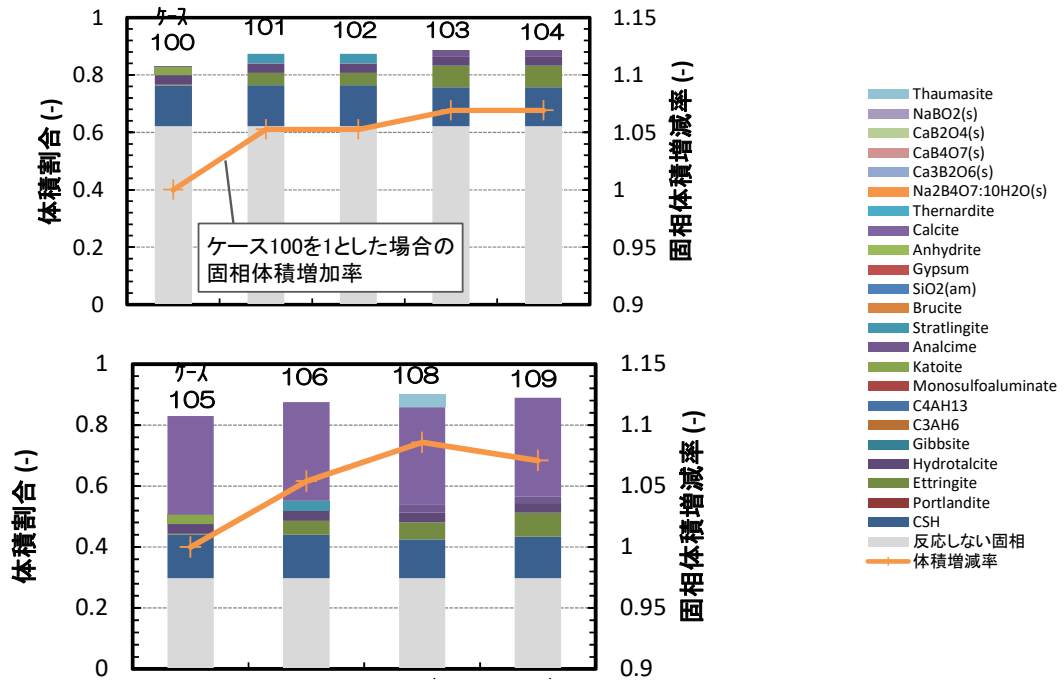
第 10 図より、充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、解析ケース 108 であり、約 9%の体積増加であった。第 11 図より、解析ケース 100-2～109-2 の計算結果では、解析ケース 103-2 及び 104-2 にて解析ケース 100～109 シリーズと同様の約 9%の体積増加であった。

また、第 12 図より、コンクリートを対象とした解析ケース 200～209 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、解析ケース 208 及び 209 であり、約 5%の体積増加であった。第 13 図より、解析ケース 200-2～209-2 の計算結果では、解析ケース 203-2、204-2、207-2 及び 208-2 にて約 4%の体積増加であった。

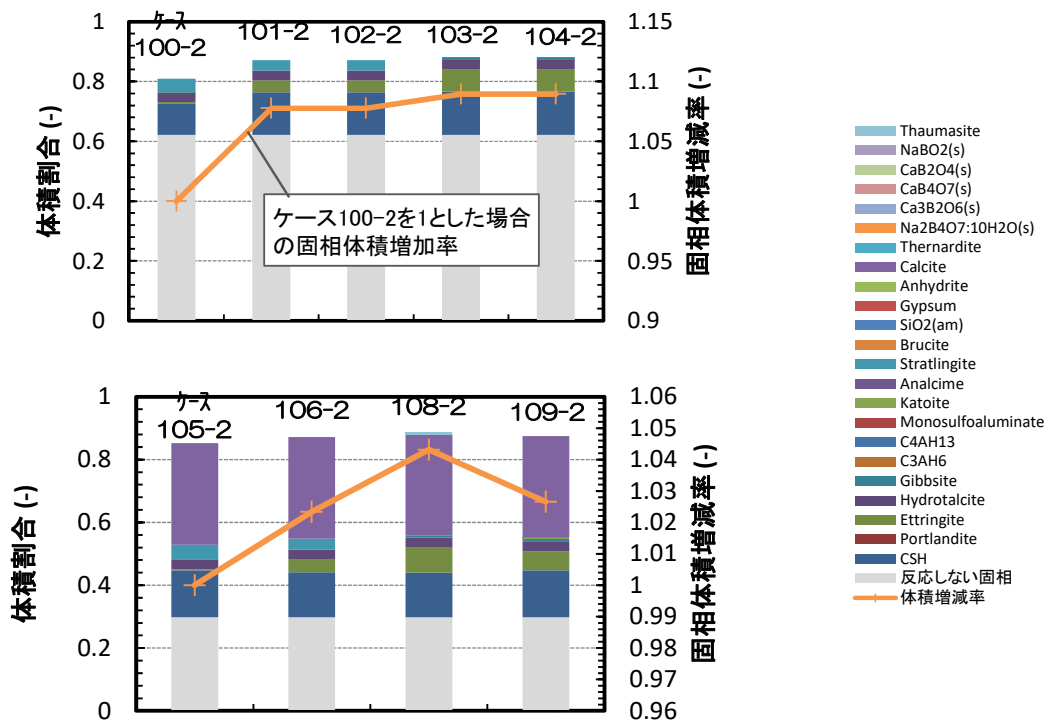
充填材及びコンクリートを対象とした解析結果より、それぞれの部材に生じ得る体積増加分は、「4. (3) (i) 可溶性塩の劣化現象の整理」のとおり、設定する物性値の評価に不確かさがあることから、以下のとおり最大の体積膨張倍率を設定する。

- ・ 充填材の体積膨張倍率は、1.09 倍とする。
- ・ コンクリートの体積膨張倍率は、1.05 倍とする。

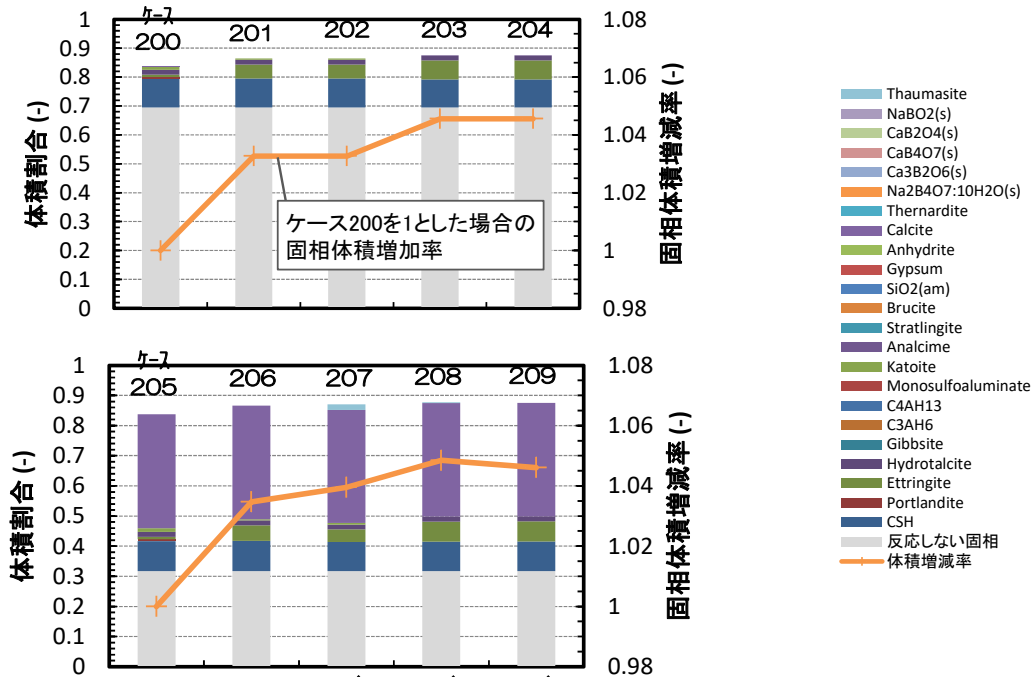
上記の設定に加えて、埋設設備の充填材、コンクリートの体積分率(第 41 表参照)を踏まえた埋設設備の体積膨張倍率を設定する。埋設設備の膨張倍率の設定値及びその考え方に関しては、次章の「4. (3) (iii) 埋設設備の膨張倍率の設定」にて詳述する。



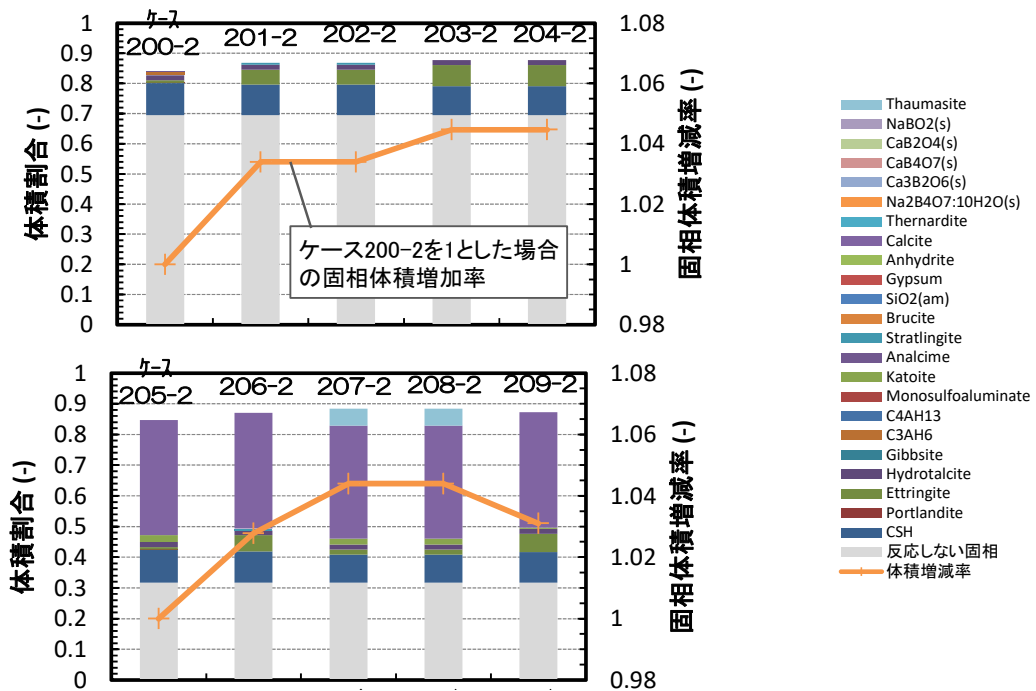
第 10 図 充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果



第 11 図 充填材を対象とした解析ケース 100-2～109-2 の計算結果



第 12 図 コンクリートを対象とした解析ケース 200～209 の計算結果



第 13 図 コンクリートを対象とした解析ケース 200-2～209-2 の計算結果

第 41 表 埋設設備の構成部材ごとの体積分率

部位	体積分率(-)
廃棄体中の充填材	0.194
廃棄体上部空隙	0.083
セメント系充填材	0.311
ポーラスコンクリート	0.042
コンクリート (覆い、外周及び内部仕切設備)	0.315

埋設設備の膨張倍率(-)^{*1}

= (廃棄体中の充填材の体積分率(-)+セメント系充填材の体積分率(-)) × 充填材の体積膨張倍率(-) + (ポーラスコンクリートの体積分率(-)+コンクリート体積分率(-)) × コンクリートの体積膨張倍率(-) + 廃棄体上部空隙(-)

*1：埋設設備の膨張倍率の算出に必要な体積分率は、第 41 表の埋設設備の構成部材ごとの値を用いる。

(iii) 埋設設備の膨張倍率の設定

「4. (3) (ii) 埋設設備の膨張倍率の評価」の結果を踏まえ、確からしい設定／厳しい設定を以下のとおりとする。埋設設備の膨張倍率の設定値を第 42 表に示す。

a. 確からしい設定

埋設設備の膨張倍率は、可溶性塩の溶出及び鉱物の生成に必要となる原料の消費による空隙の増加並びにセメント系材料及び廃棄体の初期空隙が存在することから、これを考慮し設定する。

b. 厳しい設定

埋設設備の膨張倍率は、セメント系材料(充填材及びコンクリート)の固相変化による膨張倍率の算出結果(充填材：1.09 倍、コンクリート：1.05 倍)を踏まえて設定する。

第 42 表 埋設設備の膨張倍率の設定値

条件	設定値	設定の考え方
膨張倍率	【確からしい設定】 1.0 倍 (変化なし)	【確からしい設定】 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張は、二次鉱物の生成に必要となる原料(他の鉱物)の消費に伴う空隙の増加又は他の鉱物の溶出による影響を考慮し、埋設設備の体積に変化が生じないものとして設定する。
	【厳しい設定】 1.1 倍	【厳しい設定】 セメント系材料の固相変化による膨張倍率の算出結果を踏まえて設定する。

(4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量は、「4. (3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定」の設定・評価を踏まえ、埋設設備の膨張倍率より算出し設定する。

可溶性塩は、廃棄体ごとに様々な濃度で分布しており、固型化時に形成される鉱物も多種多様である。また、可溶性塩は、廃棄体から溶出した際にセメント系材料と反応することで膨張性鉱物を生成するが、その膨張方向の規則性に係る定量的な知見はなく、特定することが出来ない。

そのため、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量は、「4. (2) 金属腐食による金属の膨張量の設定」と同様の2種類の変形方向に対して算出する。

(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

鉛直方向への変形による膨張量は、第7図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備の膨張倍率の設定を用いて算出し設定する。

膨張量の算出については、その算出過程がわかるものとして1号廃棄物埋設地のうち、厳しい設定の鉛直方向へ卓越した変形の算出過程を例に以下に示す。

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量(鉛直方向) (m)

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

*1: 埋設設備の体積膨張量(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)

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

*3: 埋設設備のセメント系材料の体積(m³)

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

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第43表に示す。

第43表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)
	対象設備: 1号
	鉛直方向
確からしい設定	—
厳しい設定	6.08×10 ⁻¹

(ii) 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

鉛直・水平方向への変形による膨張量は、第7図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備の膨張倍率の設定を用いて算出し、設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、1号埋設設備の厳しい設定のうち鉛直・水平方向への変形の中から東西方向の算出過程を例に以下に示す。

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量(東西方向)(m)

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

*1: 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張比}(-)^{*2}) \text{の三乗根}$$

*2: 埋設設備の体積膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(m^3) + \text{埋設設備の体積膨張量}^{*4}(m^3)) / \text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(m^3)$$

*3: 「4.(4)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち埋設設備のセメント系材料の体積の算出結果を引用

*4: 「4.(4)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち埋設設備の体積膨張量の算出結果を引用

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第44表に示す。

第44表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備: 1号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	-	-	-
厳しい設定	7.88×10^{-1}	7.88×10^{-1}	2.01×10^{-1}

(5) 金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定

(i) 膨張量の設定の考え方

「2. 現象の整理と検討手順」のとおり、1号廃棄物埋設地では、一部の群において混合埋設となることから、異なる条件により生じる現象(膨張)を加算することで膨張量の設定を行う。

1号廃棄物埋設地の膨張量の設定に当たっては、充填固化体由来の金属腐食に伴う現象(膨張)を、充填固化体が埋設される埋設設備に対してのみ考慮する。

また、均質・均一固化体由来の可溶性塩と埋設設備の反応に伴う現象(膨張)に関しては、廃棄物埋設地が地下水面下に敷設されることから、周辺の地下水により可溶性塩が充填固化体を含む埋設設備へ移行することを考慮する。

以上のことから、1号廃棄物埋設地のうち、7群の埋設設備1基及び8群の埋設設備5基に対してのみ2種類の現象(膨張)を重畳されることとする。

なお、重畳時の相互作用を定量的に推定・評価することが困難であることから膨張量を加算することで評価する。

(ii) 膨張量の設定値

「4. (2) 金属腐食による金属の膨張量の設定」及び「4. (4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定」により設定した膨張量を「4. (5) (i) 膨張量の設定の考え方」に基づき算出した結果を第45表及び第46表に示す。

第45表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
	鉛直方向		
確からしい設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
厳しい設定	1.69×10^0	9.69×10^{-1}	1.39×10^0

*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

第46表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備：3号			対象設備：1号*1			対象設備：2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	3.64×10^{-2}	3.32×10^{-2}	3.32×10^{-2}	8.42×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.68×10^{-1}	3.16×10^{-2}
厳しい設定	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}	1.26×10^0	1.26×10^0	3.19×10^{-1}	2.25×10^0	2.31×10^0	4.34×10^{-1}

*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量は、3号廃棄物埋設地で最大となり、確からしい設定で水平方向:0.35m(東西)、鉛直方向:0.0364m、厳しい設定で水平方向:5.0m(東西)、鉛直方向:0.52mである(第45表及び第46表参照)。確からしい設定及び厳しい設定の膨張量が直接的に覆土の変位量になると仮定した場合、覆土の形状変化は第14図c.及び第14図d.に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(第14図a.参照)。金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形として生じることとなる。埋設設備間の狭隘部に設置された下部覆土は、埋設設備の膨張に伴い、埋設設備に挟まれ圧縮された状態となり圧密(密度増加)することから、覆土の低透水性への影響はないと想定される。また、狭隘部は隣接する埋設設備により変形が拘束されることから、側部岩盤側の覆土方向へ変形が卓越すると想定される(第14図b.参照)。そのため、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ側部岩盤側の覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。

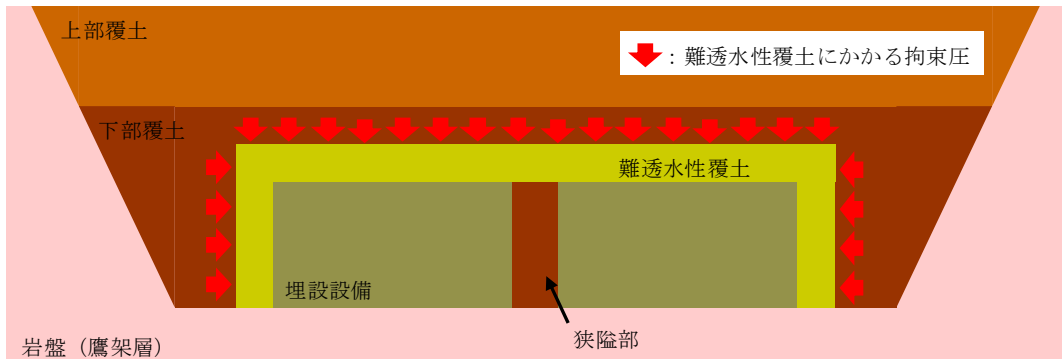
以上のことから、膨張による変形が卓越する隅角部(側部岩盤方向)の難透水性覆土に着目し、力学的影響を評価する。

確からしい設定における水平方向の変形量0.35mが難透水性覆土の厚さ2.0m以下であることから、難透水性覆土に20%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(第14図c.参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材としたCa型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果及びせん断透水試験結果を第15図に示す。第15図a.より、せん断ひずみ5%以降から30%までせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、20%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、第15図b.より、残留状態であるせん断ひずみ15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には20%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能の低下が生じないと考えられる。

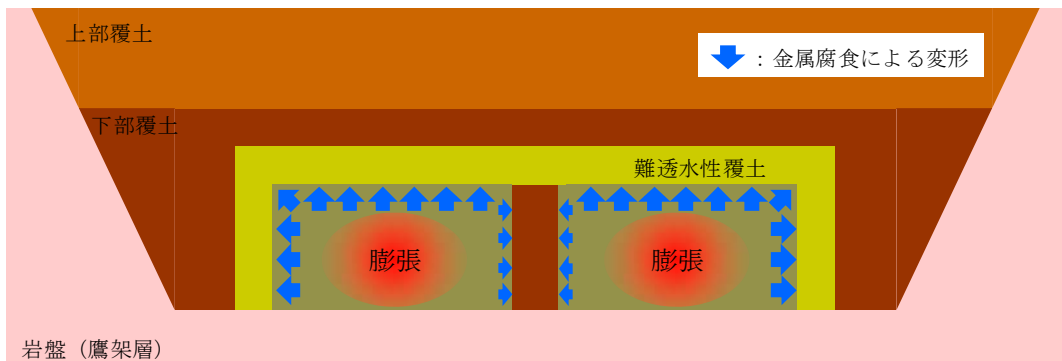
厳しい設定における水平方向の変形量5.0mが難透水性覆土の厚さ2.0m以上であることから、難透水性覆土に開口が生じる可能性がある(第14図d.参照)。地盤内の複雑な応力状態及び変形挙動を考慮し、開口の可能性について詳細に検討する必要がある。

以上のことから、厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数及び厚さ)への力学的影響評価を実施する。また、確からしい設定においては難透水性覆土に開口は生じないものの、覆土の低透水性(厚さの変化)を確認するため、力学的影響評価を同様に実施する。

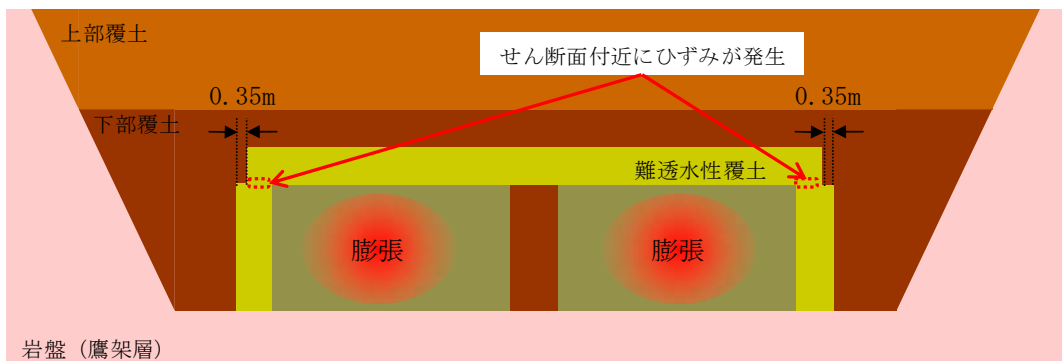
*1:残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



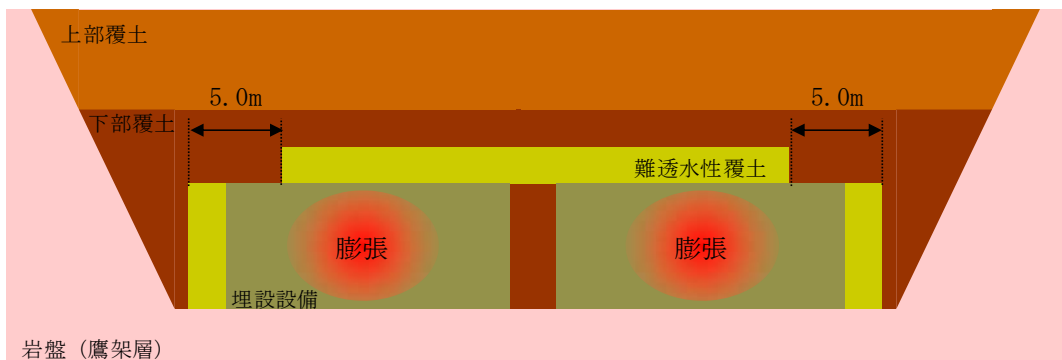
a. 初期状態(覆土完了後)



b. 金属腐食による変形

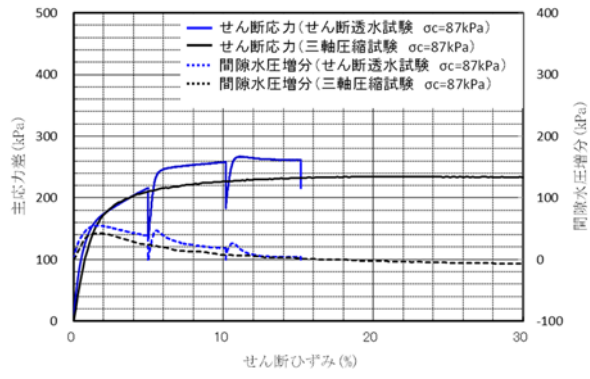


c. 確からしい設定における覆土の形状変化

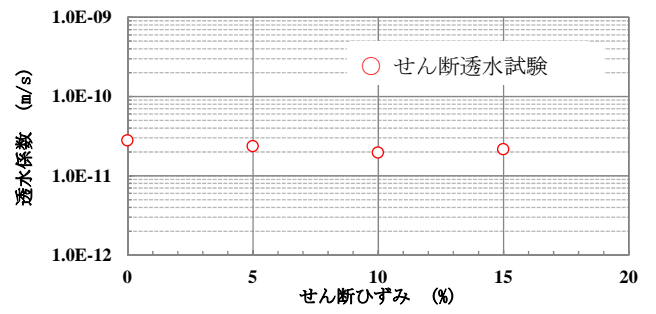


d. 厳しい設定における覆土の形状変化

第 14 図 埋設設備の膨張に伴う覆土の形状変化の概念図



a. 主応力差-せん断ひずみ



b. 透水係数-せん断ひずみ

第 15 図 三軸圧縮試験及びせん断透水試験による試験結果

(2) 力学的影響評価手法

力学的影響評価手法は、廃棄物埋設地の規模を考慮し、数値解析を用いた評価を実施する。

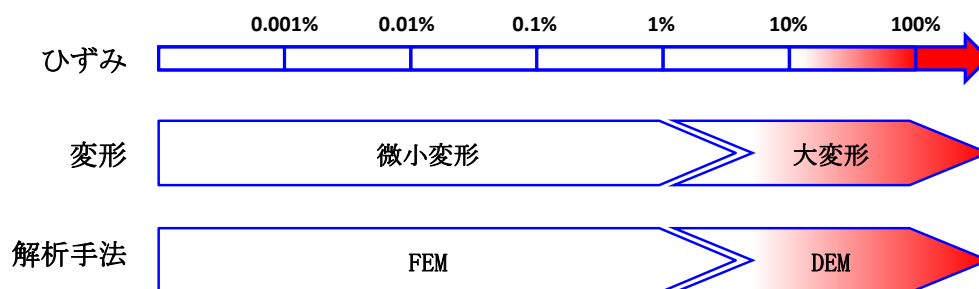
地盤工学の数値解析分野では、有限要素法(Finite Element Method) (以下「FEM」という。)が広く用いられている。文献⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾によると、FEMは計算格子を用いた計算手法であることから、地震時における地盤の安定性評価などの微小変形である数%程度までのひずみを対象として用いられている。数%のひずみを超える大変形においては、変形するにつれ要素に大きなひずみが生じ、計算精度を低下させる可能性がある。

大変形を扱うことができる解析手法の1つとして、個別要素法(Distinct Element Method) (以下「DEM」という。)がある。文献⁽³⁴⁾~⁽³⁶⁾によると、DEMは対象物を粒子の集合体(剛体)とし、粒子に運動方程式を適用することで、不連続体の挙動を再現する解析手法である。

上記の文献⁽³⁴⁾~⁽³⁶⁾より、解析手法とひずみレベルは第16図に示す関係があると整理される。

廃棄物埋設地の覆土に生じるひずみは、金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による膨張により、数十~数百%に及ぶことが予想される。大変形の領域においては、分離、すべり及び剥離のような不連続体としての挙動が顕著になることから、不連続体を対象とした解析としてDEMにより評価することが好ましい。

以上のことから、埋設設備の膨張によるメートルオーダーの大変形においては、不連続体を対象としたDEM解析手法を採用する。



第16図 解析手法とひずみレベルの関係

(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様を第 47 表に示す。難透水性覆土の材料はベントナイト混合土、下部覆土の材料は現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石、上部覆土の材料は現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合する。

第 47 表 覆土の主な仕様

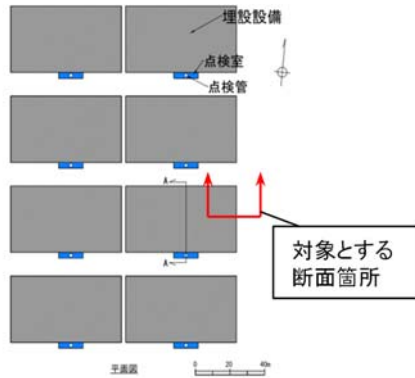
設備	主要な部位	仕様	
		材料	性能
覆土	難透水性覆土	・ ベントナイト混合土	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数^{*1}として1.0×10^{-10}m/s 以下 ・ 厚さ：2m 以上
	下部覆土	・ 現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数^{*1}として1.0×10^{-8}m/s 以下 ・ 厚さ：難透水性覆土側部及び難透水性覆土上面から層厚 2m 以上
	上部覆土	・ 現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 ・ 厚さ：下部覆土上面から現造成面又はそれ以上

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

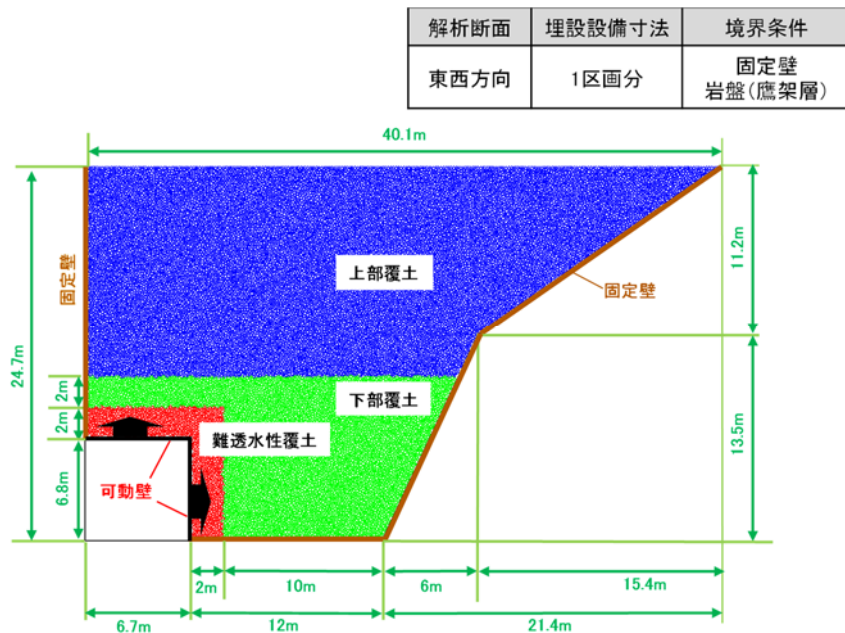
(4) 解析に用いる諸条件の設定

(i) 解析モデル

解析モデルの設定においては、膨張量の最も大きい廃棄物埋設地の断面を対象とする。金属廃棄体の配列数が多い水平方向に変形が卓越することから、隅角部付近の覆土に大きなひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、3号廃棄物埋設地の東西方向の断面とし、埋設設備端部の1区画を対象とする。解析対象断面の位置図を第17図に、解析モデルを第18図にそれぞれ示す。



第17図 3号廃棄物埋設地における解析対象断面の位置図



第18図 3号廃棄物埋設地の解析モデル

(ii) 埋設設備の膨張影響の方向

覆土の力学的影響(膨張影響)は、埋設設備中の金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応に起因し生じるが、その変形方向に関しては、これらの現象に起因する覆土への応力分布を定量的に把握することが困難であるため、変形方向の状態を設定する。埋設設備の膨張影響の方向の設定を第 48 表に示す。

第 48 表 埋設設備の膨張影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
<p>【確からしい設定/厳しい設定共通】</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>【確からしい設定/厳しい設定共通】</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いまま鉛直・水平方向へ作用するとして設定する。</p>	

(iii) 解析に用いる変形量

埋設設備中の金属廃棄物は、廃棄体 1 本ごとの金属重量が異なる。そのため、金属腐食に伴う膨張現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、膨張現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

a. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが膨張した場合に比較して、1 つの区画のみが膨張した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

b. 鉛直・水平方向への変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直・水平方向の膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直・水平方向に対する変形量は、埋設設備の区画ごとに生じる膨張量の合計であるため、鉛直方向に比較して水平方向への膨張が卓越し、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう「4. (5) (ii) 膨張量の設定値」を参考とした最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「5. (4) (ii) 埋設設備の膨張影響の方向」に従い埋設設備の変形比率を保ったまま一定として変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の第 49 表に示す。

第 49 表 DEM 解析に用いる変形量

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

(iv) 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要となる解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析及びフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

a. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係を第 19 図に示す。

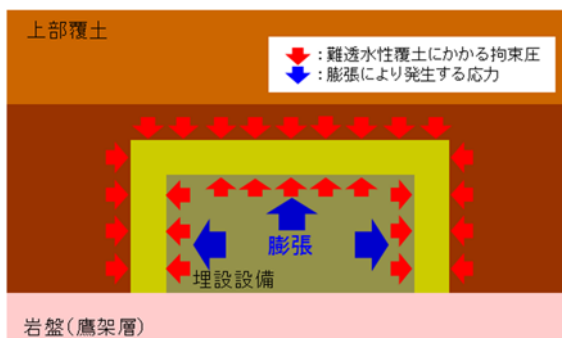
廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられる。そのため、埋設設備の膨張時において、覆土内部では圧縮応力及びせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。

文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験は、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるときに強度・変形特性及び主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の膨張時の圧縮応力及びせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

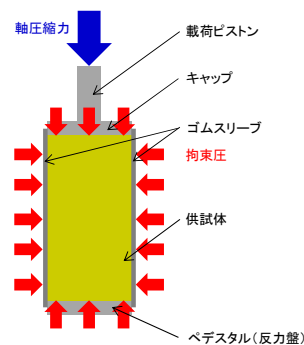
以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力及び軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態



b. 三軸圧縮試験の応力状態

第 19 図 廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係

b. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきのない砂及び有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(b) 下部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた下部覆土の供試体は、ベントナイト、砕砂及び砕石を混合しない現地発生土単体である。

下部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度及び粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じてベントナイト、砕砂及び砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂及び砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、下部覆土に砕砂及び砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(c) 上部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた上部覆土の供試体は、砕砂及び砕石を混合しない現地発生土単体である。

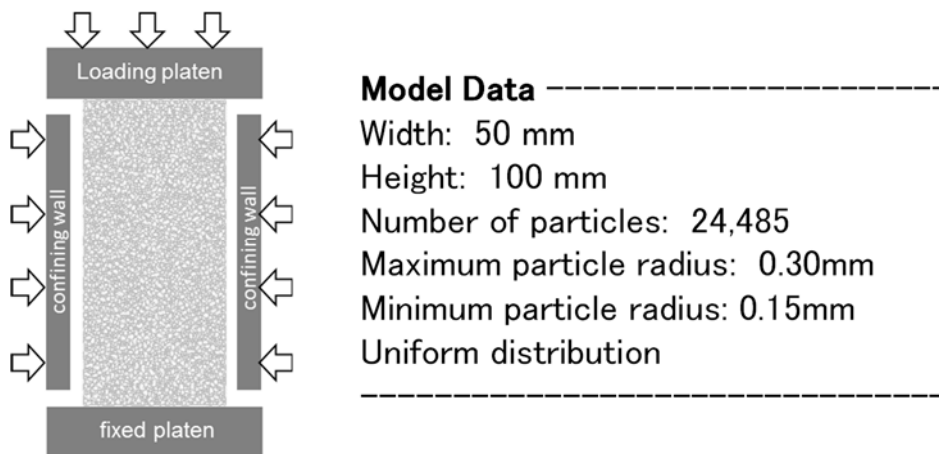
上部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度及び粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じて砕砂及び砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂及び砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、上部覆土に砕砂及び砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

c. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 20 図に示す。供試体モデルは、実際の三軸圧縮試験と同様に幅 50mm、高さ 100mm として作成した。粒子数は 24,485 個である。



第 20 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を第 21 図に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる膨張現象を考慮して設定する。廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられることから、覆土内部では圧縮応力及びせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの圧縮挙動及びせん断挙動の再現性が重要であり、法線方向及び接線方向にバネ及びスライダを直列で設定した。

一方で、上記の応力状態を考慮すると、粒子が離れようとするときのせん断挙動は限定的であり、覆土全体の挙動における再現性への影響が小さいことから、バネのみを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。

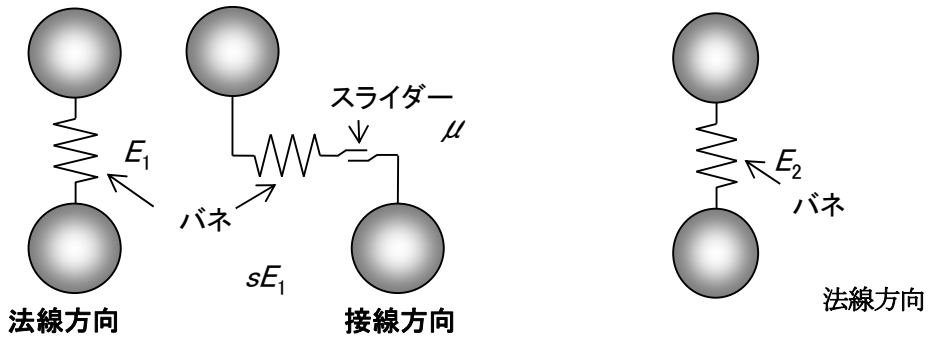
また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を第 50 表に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_l) : 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のバネ (sE_l) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のスライダ (μ) : せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_2) : 引張方向において覆土の剛性を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- 粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力及びスライダーによる摩擦力が作用する。
- 粒子同士が離れようとするときは、バネによる引張力が作用する。
- 引張力がバネの結合強度を超えるとバネが破断し粒子同士が離れ、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- 粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

第 21 図 粒子間結合モデルの概念図

第 50 表 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>
接線方向	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>	<p>—</p>

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の載荷盤を固定しておき、側部及び上部の載荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の載荷盤を動かすことにより実施した。

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

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を10個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

d. フィッティング

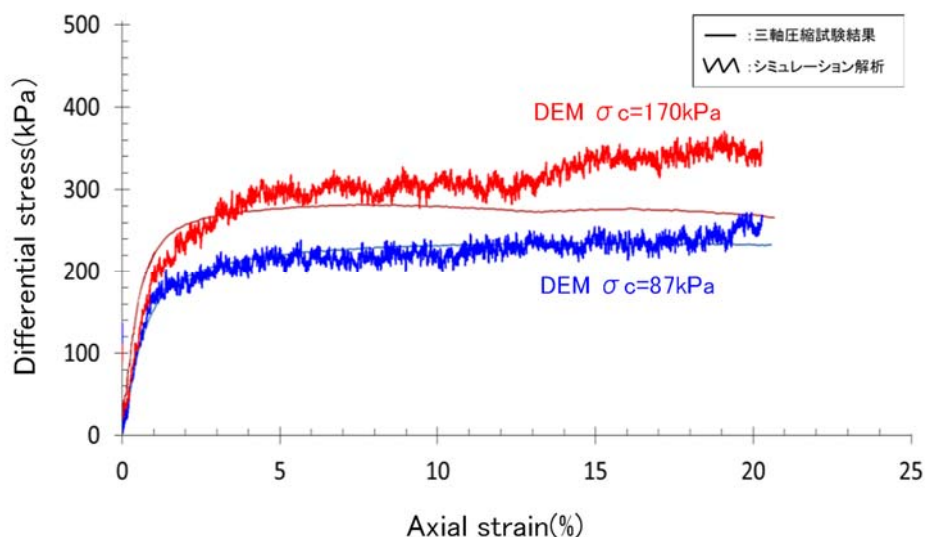
三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第 22 図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体壁を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押し戻す作用が働くために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、変形を押し戻す作用が生じていない。廃棄物埋設地モデルは、モデルサイズが大きく上部が解放されていることから、上記のような変形を押し戻す作用が生じないと考えられる。

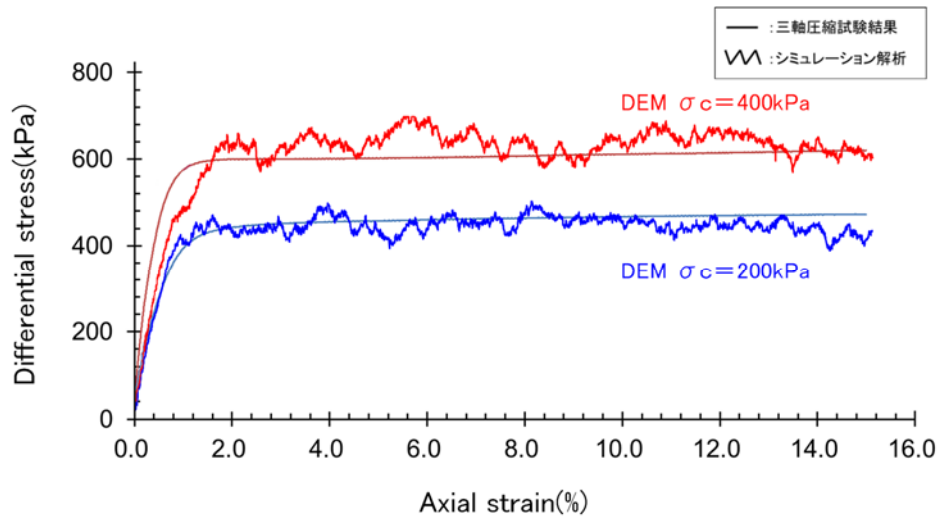


第 22 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

(b) 下部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第23図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。



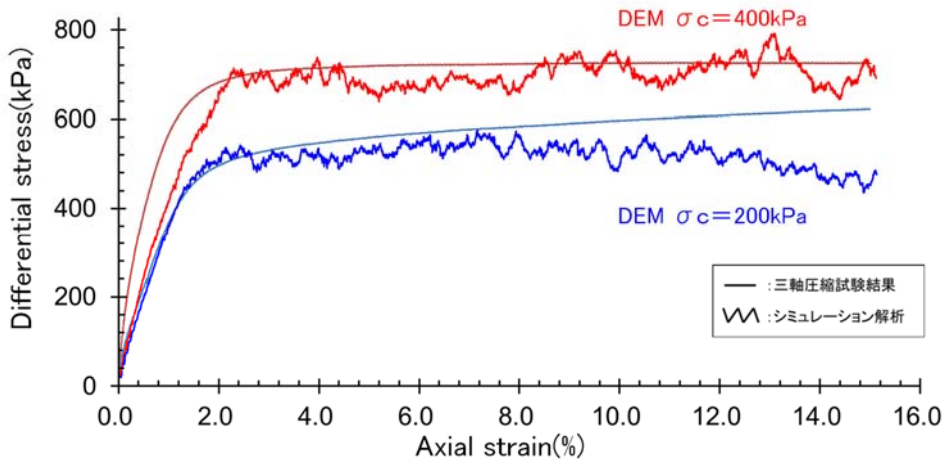
第23図 下部覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

(c) 上部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第24図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、上部覆土は、力学的影響評価の対象としている低透水性機能を有する難透水性覆土及び下部覆土への上載荷重が作用していれば良い。



第24図 上部覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

e. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土の解析用物性値を第 51 表に示す。

第 51 表 解析用物性値一覧

設定	設定値			単位	設定方法
	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土		
密度	1,649	1,940	1,500	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	100	100	100	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	50	50	50	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数(E_1)	55	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数(E_2)	600	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比(s)	1.0	1.0	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数(μ)	0.4	0.5	0.4	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度(σ_{max})	330	1,000	1,200	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値（せん断強さ）を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示す。

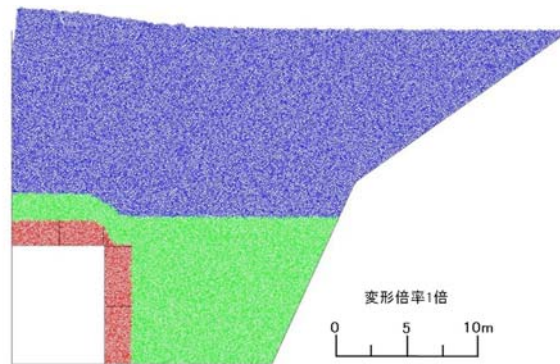
以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(5) 解析結果

(i) 覆土の変形方向による力学的影響の確認

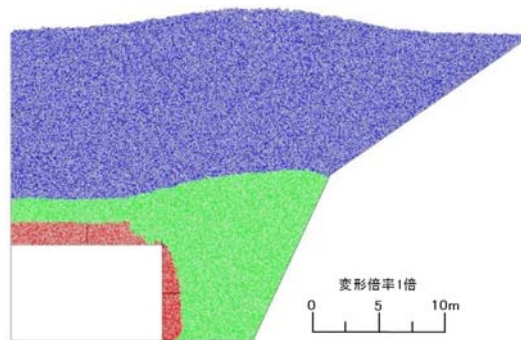
前項までに設定したパラメータを用いてDEM解析を実施した。解析では、覆土の形状変化に大きな影響を与える状態を確認するため、第48表で設定した変形方向の2種類の設定を併記することで形状変化を確認する。解析結果を第25図及び第26図に示す。第25図及び第26図より、第49表の変位を与えた際の覆土の形状変化は、鉛直・水平方向への変形による影響が大きいことが確認された。

そのため、覆土の透水係数及び厚さへの影響については、鉛直・水平方向への変形を対象に評価する。



変形量(鉛直方向 : 2.0m)

第25図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



変形量(東西方向 : 5.0m、鉛直方向 : 1.0m)

第26図 鉛直・水平方向への変形ケースにおける解析結果

(ii) 覆土の厚さの評価

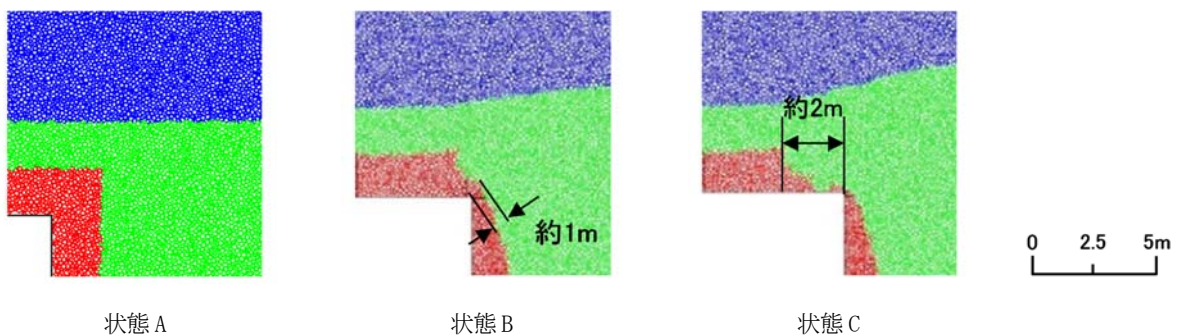
覆土の厚さは、弱部と考えられる隅角部に残存している難透水性覆土の厚さを確認することで評価する。

第 46 表の確からしい設定の膨張量(東西方向： $3.50 \times 10^{-1}m$ 、鉛直方向： $3.64 \times 10^{-2}m$)及び厳しい設定の膨張量(東西方向： 5.00×10^0m 、鉛直方向： $5.20 \times 10^{-1}m$)を考慮して鉛直・水平方向の変形ケースのうち、以下の 3 種類の変形状態に対する隅角部の拡大図を第 27 図に示す。

- ・ 状態 A 解析の初期状態
- ・ 状態 B 確からしい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： $3.0m$ 、鉛直方向： $0.6m$)
- ・ 状態 C 厳しい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： $5.0m$ 、鉛直方向： $1.0m$)

解析結果から、確からしい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、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 以上残る状態を確からしい設定の設定値とする。また、厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口(約 2m)が生じる可能性が確認されたため、隅角部に約 2m の開口が生じる状態を厳しい設定の設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。



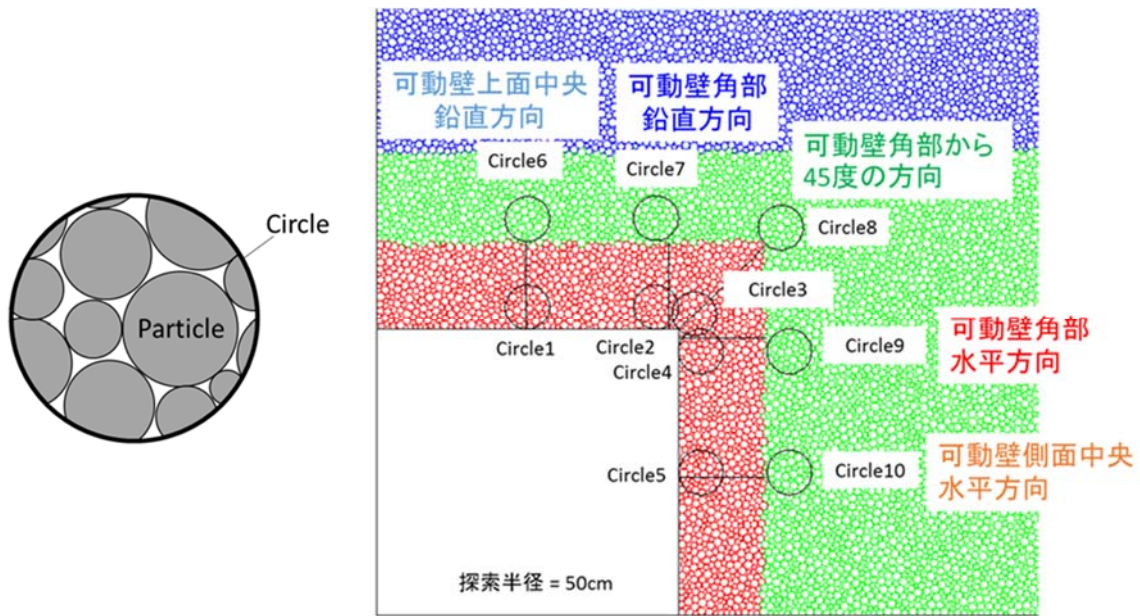
第 27 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける弱部(隅角部)の拡大図

(iii) 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、変形前後の密度を確認することで評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は第 28 図 b. に示すとおり、解析に半径 50cm の Circle を設定し、Circle 内に含まれる粒子の面積に粒子密度をかけたものを足し合わせ、Circle 面積により割り込むことで算出する。算出箇所に関しては、第 28 図に示したとおり難透水性覆土及び下部覆土を対象とした 10 箇所とする。密度の増加率を算出した結果を第 52 表に示す。

第 52 表より、覆土の密度減少は軽微であることから、密度変化により覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じない。



a. 密度の算出概念

b. 密度の算出位置*1、*2

*1 : Circle1～Circle5 : 難透水性覆土層と可動壁の接触位置

*2 : Circle6～Circle10 : 難透水性覆土層の外周

第 28 図 密度の算出方法の概念図

第 52 表 鉛直・水平方向への変形時における密度の増加率

測定位置	鉛直・水平方向への変形	
	第 27 図のうち状態 B	第 27 図のうち状態 C
	密度の増加率 (%) ^{*1}	密度の増加率 (%) ^{*1}
Circle1	-0.8	0.3
Circle2	-2.0	1.7
Circle3	12.3	12.3
Circle4	7.3	16.3
Circle5	21.8	30.9
Circle6	-0.9	-1.9
Circle7	-4.0	-7.1
Circle8	0.9	0.0
Circle9	-4.2	5.1
Circle10	7.8	11.5

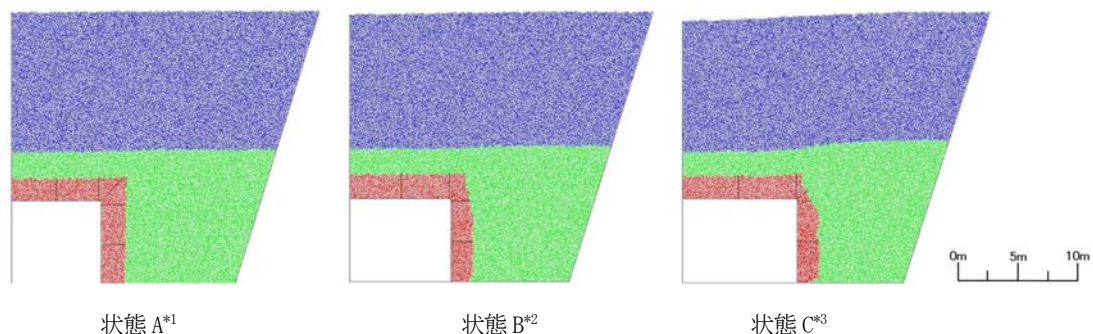
*1：負の値は、密度低下を示す。

1 号廃棄物埋設地に関しては、可溶性塩と埋設設備による反応を起因とする埋設設備の膨張影響をあわせて考慮しているため、第 27 図と同様に DEM 解析にて覆土への力学的影響を評価した。

覆土の形状変化に関して、解析を用いて確認した結果を第 29 図に示す。

解析結果から、確からしい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、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 以上残る状態を確からしい設定の設定値とする。また、厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じないものの、厚さがほぼ残らない状態を設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、透水係数及び覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。



- *1：状態 A 解析の初期状態
- *2：状態 B 確からしい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向：1.0m、鉛直方向：0.2m)
- *3：状態 C 厳しい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向：2.0m、鉛直方向：0.4m)

第 29 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける解析結果

(6) 1,000年後の力学的影響評価

金属及び埋設設備の膨張影響に起因する影響において、DEM解析により覆土の低透水性への影響評価を行った結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。金属及び埋設設備の膨張による覆土への力学的影響評価を第53表に示す。

なお、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合(参考資料4参照)においても、DEM解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないとする。

第53表 金属及び埋設設備の膨張による1,000年後の覆土への力学的影響評価

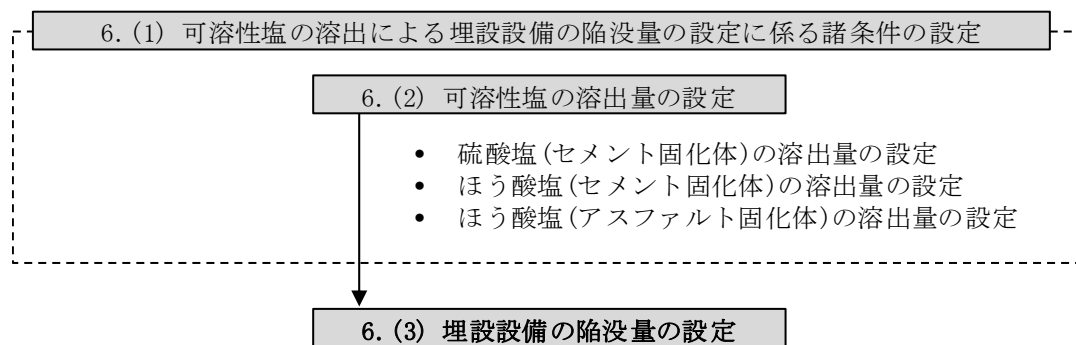
対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
2号及び3号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態

6. 状態変化(陥没)に必要な条件設定

(1) 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定に係る諸条件の設定

陥没量の設定は、埋設設備中の対象となる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が地下水との反応により溶出すること及び廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生するとし、空洞の発生に伴う陥没を考慮して行う。埋設設備の陥没量の設定手順^{*1}を第30図に示す。

*1：廃棄体の上部空隙を考慮し陥没量の設定を行う。



第30図 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定手順

(2) 可溶性塩の溶出量の設定

(i) 硫酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴¹⁾を参考に硫酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、**全量溶出した状態を設定する。**

(ii) ほう酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴¹⁾を参考にほう酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、**全量溶出した状態を設定する。**

(iii) ほう酸塩(アスファルト固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴²⁾を参考に**アスファルトの実態的な漏出防止性能を考慮し、設定する。**

(3) 埋設設備の陥没量の設定

埋設設備の陥没量は、埋設設備中の対象となる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が地下水との反応により溶出すること及び均質・均一固化体の固型化条件である有害な空隙(少なくとも「上部空隙が30%を超えない」ものは有害ではない)に起因し、陥没することから、「6. (2) 可溶性塩の溶出量の設定」を考慮し、設定する。

廃棄体中の可溶性塩が溶出することによる空隙の体積増加分及び廃棄体の初期条件である上部空隙の体積分を考慮し、埋設設備の区画ごとの最大沈下量を算出する。

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

沈下量の設定は、埋設設備の区画ごとに含まれる可溶性塩の量に応じて変化することから、1区画当たりの沈下量(沈下する底面積は、区画底面積とする。)とする。

なお、可溶性塩のうち、アスファルト固化体中のほう酸塩については、文献^{エラー! 参照元が見つかりません。}を参考に考慮する。

沈下量の算出式を以下に示す。

はじめに、廃棄体中の空隙量に従った初期空隙高さ L_i より、埋設設備中の区画の初期空隙体積 V_i を求める。

$$V_i = L_i \times S_{pit}$$

S_{pit} : 区画の投影面積(m²)

V_i よりドラム缶 1 本当たりの初期空隙体積 V_d を求める。ただし、区画には n 本あるとする(1号埋設設備のうち、1区画には320本(8段5列8行)のドラム缶が配置される。)

$$V_d = V_i/n$$

V_d よりドラム缶中の初期空隙高さ h を求める。

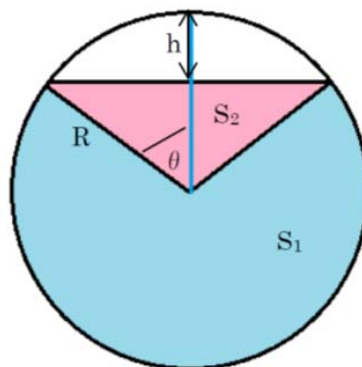
次に、ドラム缶断面の廃棄体投影面積 S を求める。投影面積に関する概念図を第31図に示す。

$$S = S_1 + S_2$$

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

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

ただし、ドラム缶の半径 R 、ドラム缶中の初期空隙高さ h であるため、 $\cos\theta = \frac{R-h}{R}$ となる。



第31図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積

よって、ドラム缶中の廃棄体の体積 V_w は、ドラム缶全長 H を用いて
 $V_w = S \times H$

S の式より、表面溶出する場合、一部の可溶性塩が残存する廃棄体のドラム缶断面の投影面積 S' を求める。

溶出については、表面から r だけ溶出するとし、 S_1 の部分は半径 $R \rightarrow (R-r)$ 、 S_2 の部分は空隙 $h \rightarrow (h-r)$ に存在する可溶性塩が溶出すると仮定する。

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

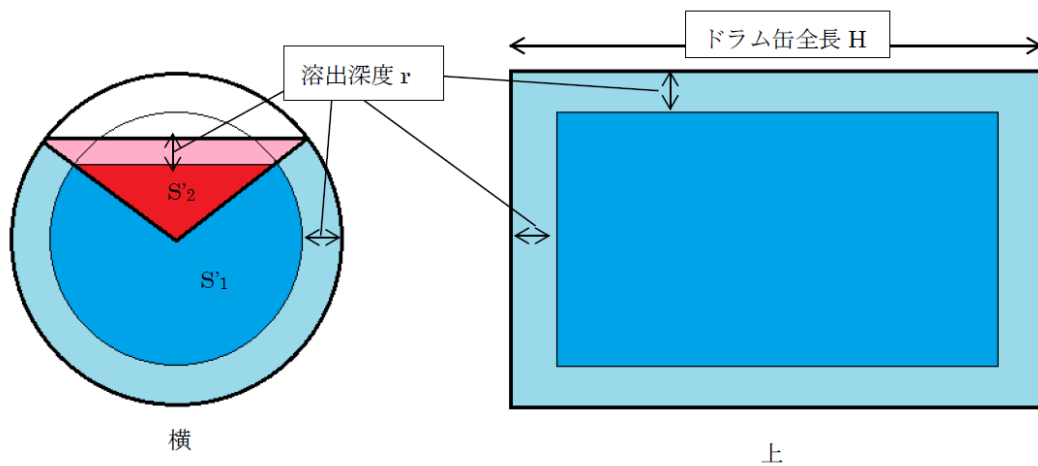
$$S'_1 = \pi(R-r)^2(1-\theta/\pi)$$

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

よって、可溶性塩の溶出が起こらないドラム缶中の廃棄体の体積 V'_w は
 $V'_w = S' \times (H - 2r)$

可溶性塩の溶出による区画の沈下量 L は以下の式より求められる。区画ごとの可溶性塩の含有量を V_{salt} とする。ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)を第 32 図に示す。

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



第 32 図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)

以上のことから、最大の沈下量を算出した結果、約 743mm である。

可溶性塩の溶出挙動に関しては、セメント系材料との反応による挙動の不確かさや溶出速度の知見など、定量的な沈下量を設定する根拠が乏しい。そのため、陥没量は最大の沈下量に対し、覆土の低透水性への影響評価の観点から大きく設定する。設定した値を第 54 表に示す。

第 54 表 鉛直方向へ卓越した変形による陥没量の設定

設定	陥没量(m)
	対象設備：1号
	鉛直方向
確からしい設定／厳 しい設定共通	1.0

7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

可溶性塩の溶出による陥没量は、第 54 表より、確からしい設定及び厳しい設定で鉛直方向：1.0m である。確からしい設定及び厳しい設定の陥没量が直接的に覆土の変形量になると仮定した場合、覆土の形状変化は第 33 図に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(第 33 図 a. 参照)。また、拘束圧が作用した場において、可溶性塩が地下水との反応により溶出することで、埋設設備に空洞が発生する。埋設設備の空洞の発生に伴い、覆土が追従することでせん断変形する状態となる。

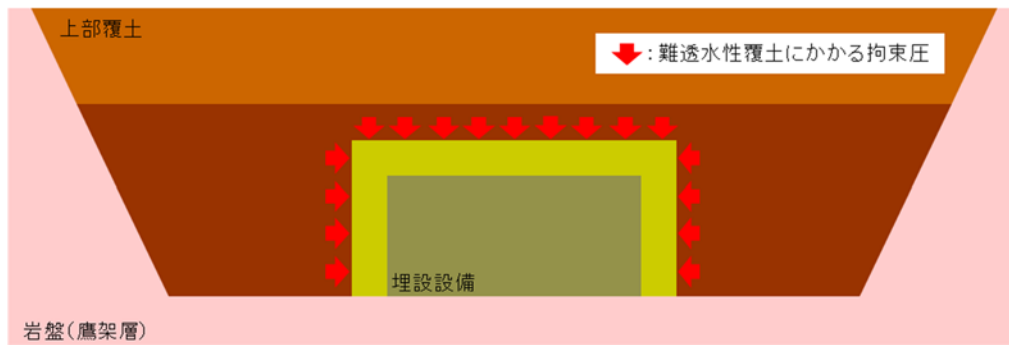
確からしい設定及び厳しい設定における鉛直方向の変形量 1.0m は難透水性覆土の厚さ 2.0m 以下であることから、難透水性覆土に 50%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(第 33 図 b. 参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果及びせん断透水試験結果を第 15 図に示す。

第 15 図 a. より、せん断ひずみ 5%以降でせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、50%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、第 15 図 b. より、残留状態であるせん断ひずみ 15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には 50%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能は低下しないと考えられる。

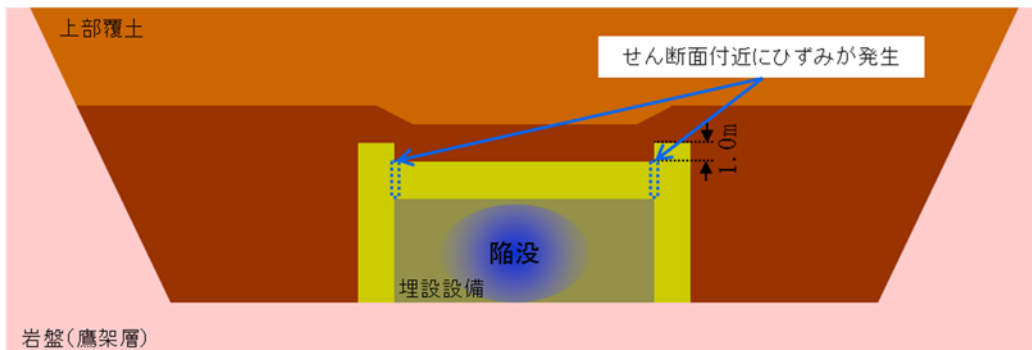
しかしながら、陥没現象では覆土が下方に緩むことにより、膨張現象に比べて複雑な応力場となることが考えられるため、上記について不確かさを否定できない。

以上のことから、確からしい設定及び厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数及び厚さ)への力学的影響評価を実施する。

*1：残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



a. 初期状態(覆土完了後)



b. 確からしい設定/厳しい設定における覆土の形状変化

第 33 図 埋設設備の陥没に伴う覆土の形状変化の概念図

(2) 力学的影響評価手法

覆土の力学的影響の評価手法は、埋設設備の陥没による覆土の大変形に応じた挙動を評価するため、膨張影響と同様の手法である DEM 解析を用いる。

なお、粒子間結合の設定では、粒子が沈下する際の滑り及び沈下後の圧密現象をより良く再現するため、変更している。

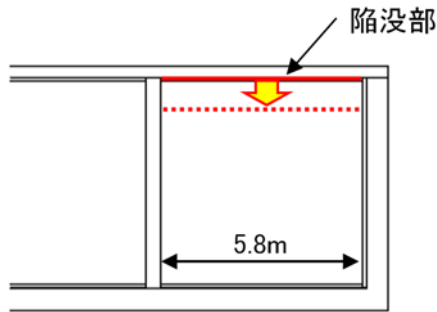
(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様は第 47 表に示すとおり難透水性覆土の材料はベントナイト混合土である。

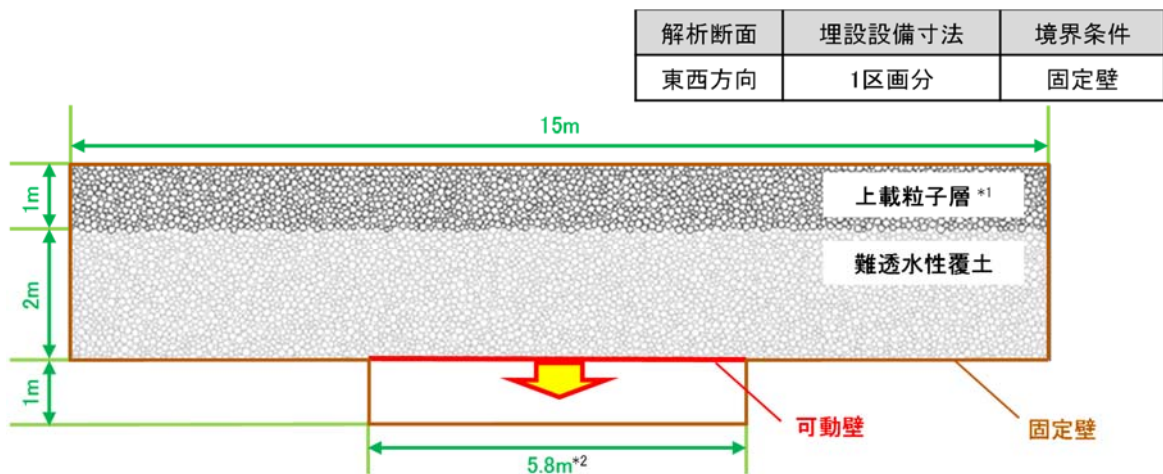
(4) 解析に用いる諸条件の設定

(i) 解析モデル

解析モデルの設定においては、陥没現象が生じる廃棄物埋設地の断面を対象とする。可溶性塩が含まれる埋設設備では、可溶性塩が徐々に溶出するに伴い分散した形で空隙が形成されることで陥没が生じ、覆土にひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、1号廃棄物埋設地の鉛直方向の断面とし、埋設設備の1区画を対象とする。解析対象の鉛直断面図を第34図に、解析モデルを第35図にそれぞれ示す。



第34図 1号埋設設備の鉛直断面図



*1：上載粒子層は、難透水性覆土へかかる有効拘束圧を与えるものである。

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

第35図 1号廃棄物埋設地の解析モデル

(ii) 埋設設備の陥没影響の方向

覆土への力学的影響(陥没影響)は、埋設設備中の可溶性塩の溶出及び廃棄体に含まれる上部空隙に起因し土圧に抵抗出来なくなることにより、鉛直方向へ卓越した変形が生じることが考えられるため、この変形方向の状態を設定する。埋設設備の陥没影響の方向の設定を第 55 表に示す。

第 55 表 埋設設備の陥没影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
【確からしい設定／厳しい設定共通】 鉛直方向へ卓越した変形	埋設設備の変形は、廃棄体に内蔵される可溶性塩の溶出に伴い、埋設設備が土圧に抵抗出来なくなることから、鉛直方向に卓越して生じる可能性が高いと考えられる。 そのため、可溶性塩の溶出に伴う変位が全て鉛直方向へ作用するとして設定する。	

(iii) 解析に用いる変形量

埋設設備中の可溶性塩は、廃棄体 1 本ごとに異なる。そのため、可溶性塩の溶出に伴う陥没現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、陥没現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

a. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設設備中の可溶性塩の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への陥没は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが陥没した場合に比較して、1 つの区画のみが陥没した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる陥没に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう「6. (3) 埋設設備の陥没量の設定」を参考とした最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「7. (4) (ii) 埋設設備の陥没影響の方向」に従い変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の第 56 表に示す。

第 56 表 DEM 解析に用いる変形量

設定	陥没量(m)
	対象設備：1号
	鉛直方向
確からしい設定／厳しい設定共通	1.0

(iv) 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要な解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析及びフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

a. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係を第 36 図に示す。

廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の陥没に伴い覆土が下方に緩むことによるせん断応力が支配的であり、圧縮応力が共に作用している状態となると考えられる。

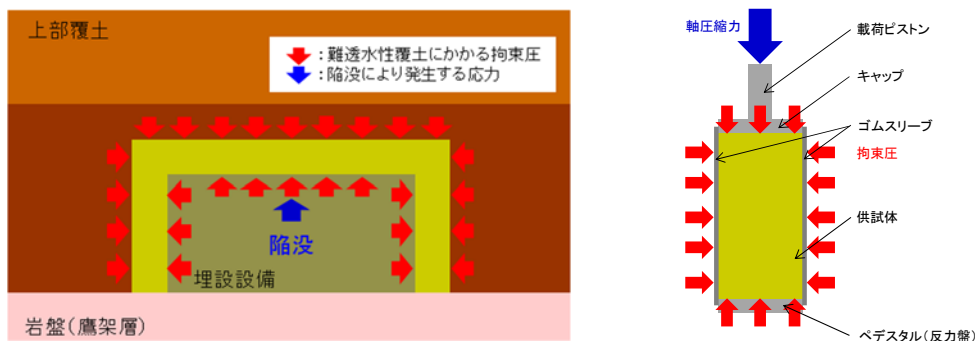
文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験では、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるとき強度・変形特性及び主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の陥没時の圧縮応力及びせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(C_U)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。

三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力及び軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態

b. 三軸圧縮試験の応力状態

第 36 図 廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係

b. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いる難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

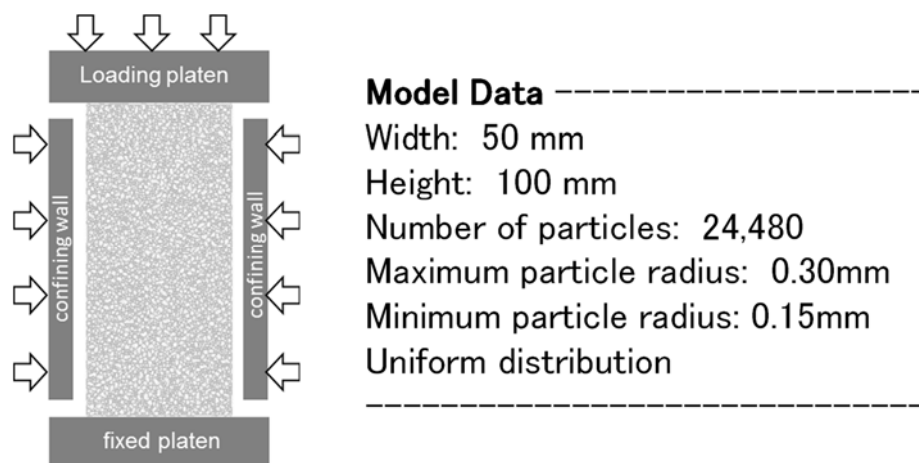
難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきのない砂及び有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

c. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 37 図に示す。供試体モデルは、幅 50mm、高さ 100mm(最大粒子半径 0.3mm、最小粒子半径 0.15mm)として作成した。粒子数は 24,480 個である。



第 37 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を第 38 図に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる陥没現象を考慮して設定する。

廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、可溶性塩の溶出に伴う陥没は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食による膨張のような強制変位とは異なり、覆土が下方に緩むことによるせん断変形となる。よって、覆土の緩みに伴い粒子が離れようとするときの挙動の重要性が増すと考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が離れようとするときの接線方向にバネとスライダを直列で設定した。

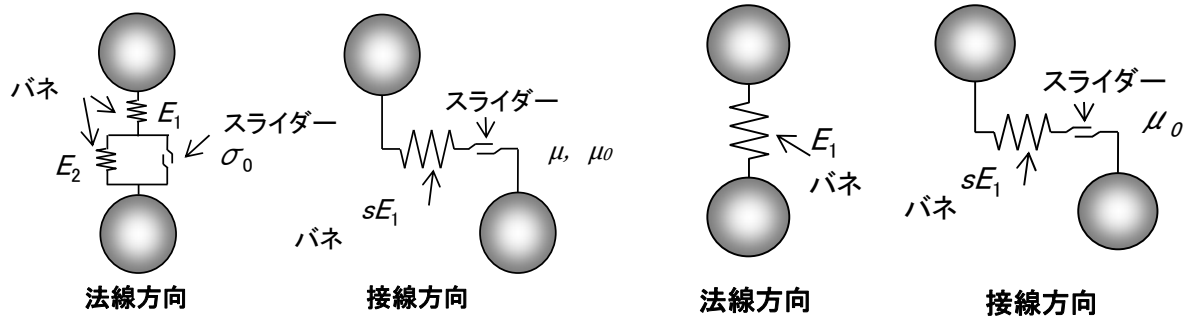
また、緩み後に上載覆土が再び積み重なることを想定し、覆土の圧縮方向の反発力を使い分ける必要があると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの法線方向にバネ単独及びスライダと並列したバネを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を第 57 表に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・法線方向のバネ(E_1) : 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・法線方向のバネ(E_2) : 圧縮方向において E_1 と共に降伏後の覆土の剛性を表現する
- ・法線方向のスライダ(σ_0) : 圧縮方向において摩擦抵抗力を表現する
- ・接線方向のバネ(sE_1) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・接線方向のスライダ(μ, μ_0) : せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- 法線方向のバネ (E_1) : 引張方向において覆土の剛性を表現する
- 接線方向のバネ (sE_1) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- 接線方向のスライダー (μ_0) : せん断方向において覆土の摩擦抵抗力を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- 粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力及びスライダーによる摩擦力が作用する。
- 粒子同士が離れようとするときは、バネにより引張力が作用する。
- 引張力がバネの結合強度を超えるとバネが破断し粒子同士が離れる、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- 粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

第 38 図 粒子間結合モデルの概念図

第 57 表 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向		
接線方向		

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の载荷盤を固定しておき、側部及び上部の载荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の载荷盤を動かすことにより実施した。

軸方向応力は、供試体モデル上端の粒子から上部の载荷盤に作用する反発力の総和を供試体モデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を 10 個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

d. フィッティング

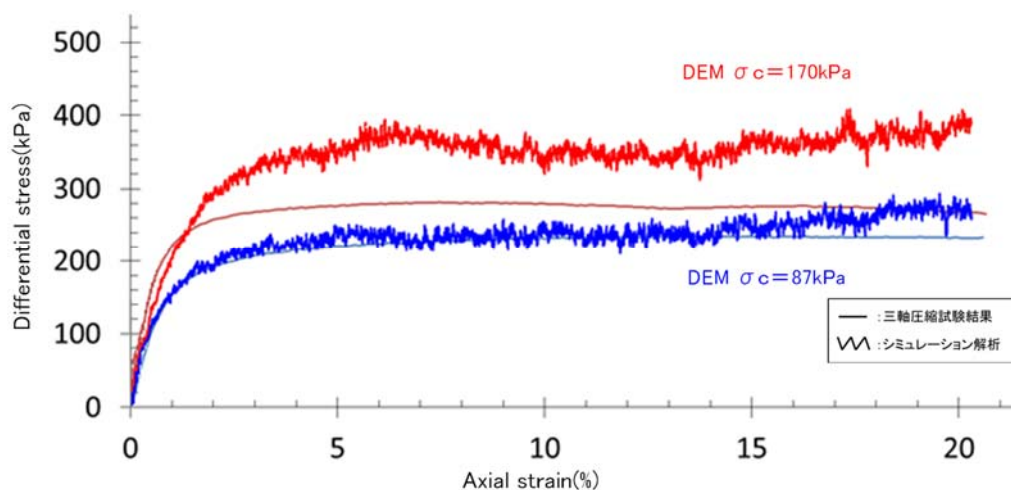
三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第 39 図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、第 39 図より、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押し戻す作用が働いているために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、同様の現象が生じていない。廃棄物埋設地モデルはモデルサイズが大きいことから、上記のような変形を押し戻す作用が生じないと考えられる。



第 39 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

e. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土の解析用物性値を第 58 表に示す。

第 58 表 解析用物性値一覧

設定	設定値	単位	設定方法
密度	1,649	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	60	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	30	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数 (E_1)	200	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数 (E_2)	50	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向スライダ降伏値 (σ_0)	10	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比 (s)	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数 (μ)	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
基準摩擦抵抗値 (μ_0)	1.5	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度 (σ_{max})	10	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加に因らず継続的に同じ性質を示す。

以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

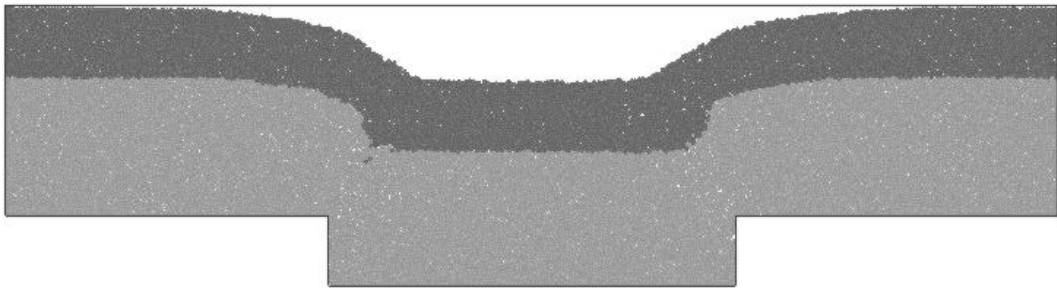
(5) 解析結果

(i) 覆土の厚さの評価

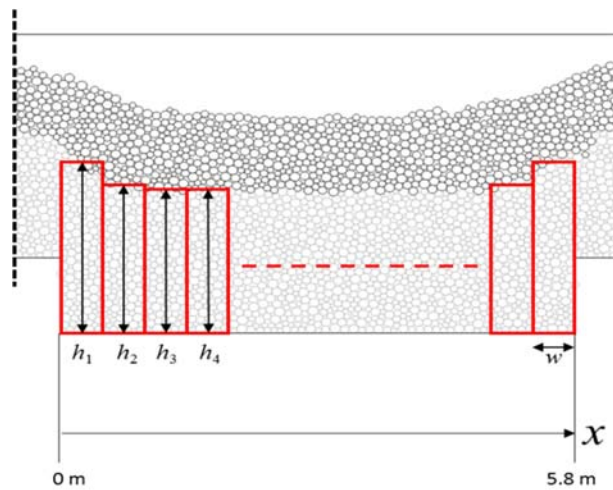
前項までに設定したパラメータを用いて DEM 解析を実施した。解析結果を第 40 図に示す。陥没現象では、第 55 表のとおり鉛直方向への変形に対する影響評価である。そのため、覆土の厚さは、第 40 図に示す解析結果*1 を対象に、第 41 図に示す算出方法のとおり算出し確認することで評価する。算出した難透水性覆土の厚さ分布を第 42 図に示す。

第 42 図より、難透水性覆土の厚さに大きな減少が確認されなかったことから、厚さに変化は生じないと設定する。

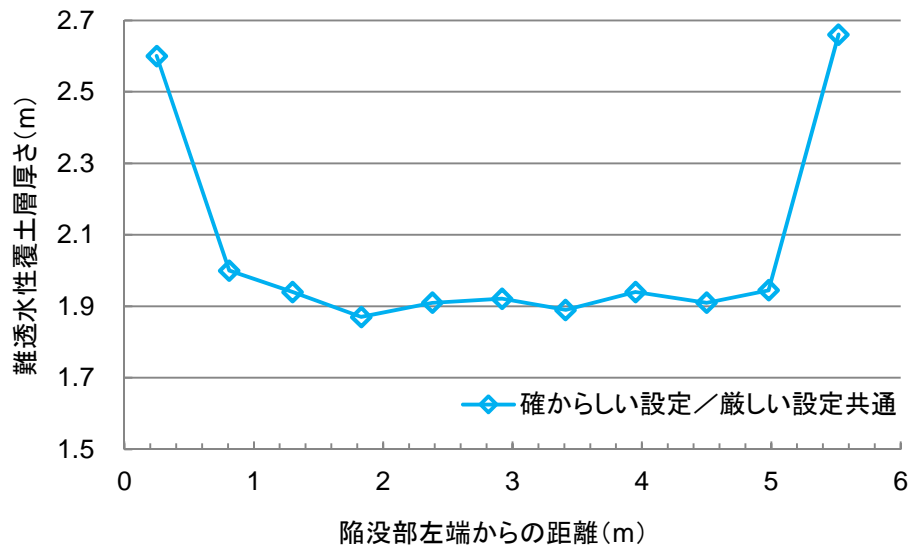
*1：解析結果は、確からしい設定／厳しい設定共通である。



第 40 図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



第 41 図 難透水性覆土の厚さ算出方法



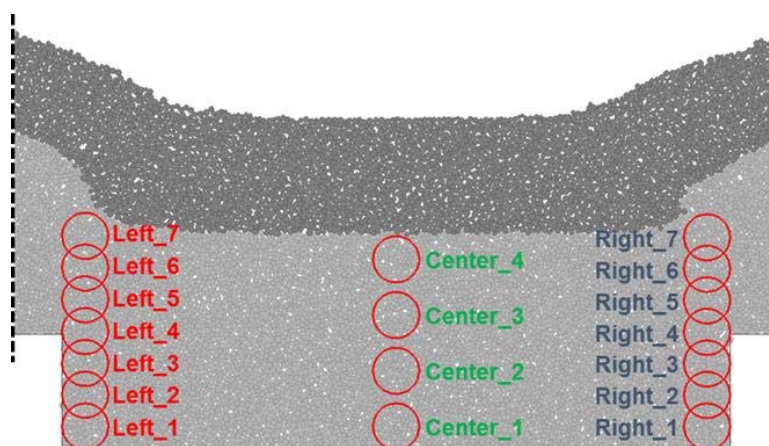
第 42 図 難透水性覆土の厚さ分布

(ii) 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、陥没前後の密度を確認し評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は第 43 図に示すとおり、陥没前後の陥没隅角部近傍(Left 及び Right 系列)並びに陥没中央部(Center 系列)における増加率を確認する。また、密度の増加率を算出した結果を第 59 表に示す。

第 59 表より、陥没隅角部近傍(Left 及び Right 系列)では、密度の減少が確認されたが、覆土の厚さに大きな変化が生じていないこと及び陥没中央部(Center 系列)の密度増加を考慮し、覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じないことが確認された。



第 43 図 難透水性覆土の密度測定位置

第 59 表 鉛直方向への変形時における密度の増加率

測定位置	密度の増加率(%)*1
Left_1	2.4
Left_2	-2.1
Left_3	-7.7
Left_4	-8.2
Left_5	-4.0
Left_6	-5.1
Left_7	-5.2
Center_1	8.6
Center_2	1.5
Center_3	2.6
Center_4	2.2
Right_1	6.7
Right_2	-4.4
Right_3	-2.6
Right_4	-5.0
Right_5	-5.5
Right_6	-1.5
Right_7	0.4

*1：負の値は、密度低下を示す。

(6) 1,000 年後の力学的影響評価

可溶性塩の溶出による陥没影響に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性への影響評価をした結果から、透水係数及び覆土厚さに力学的変形が生じないと設定する。可溶性塩の溶出による覆土への力学的影響評価を第 60 表に示す。

第 60 表 可溶性塩の溶出による 1,000 年後の覆土への力学的影響評価

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
1 号 (均質・均一固化体)	陥没	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態

8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

金属及び埋設設備の膨張並びに埋設設備の陥没に起因する影響において、DEM解析により覆土の低透水性(透水係数及び覆土厚さ)への影響評価をした結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。状態変化の評価(力学的影響)のまとめを第61表に示す。

なお、2号及び3号廃棄物埋設地における厳しい設定の膨張影響では、難透水性覆土に隅角部に約2mの開口*1が生じるが、埋設設備外周部に設置された難透水性覆土(3号の場合、東西方向の覆土施工範囲：約64m)に対し、限定的な範囲の影響である。

*1：難透水性覆土に対し開口すると設定した箇所は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土である。また、下部覆土の密度減少は解析結果から軽微であることから、密度変化による透水係数が増加する有意な影響は生じない。

第61表 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
2号及び3号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (充填固化体)		○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (均質・均一固化体)	陥没	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態

9. 参考文献

- (1) 牧野 隆吾(2010) : 石炭採掘後の陥没現象の解明およびその調査・対策に関する研究、応用地質 第51巻 第2号 p73-84
- (2) 北海道電力(株)ほか(2016) : 充填固化体の標準的な製作方法(改訂8版)
- (3) JIS Z 1600(2017) : 鋼製オープンヘッドドラム
- (4) JIS G 3112(2010) : 鉄筋コンクリート用棒鋼
- (5) 原子力安全基盤機構(2008) : 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について(一部改正)、JNESS-SS-0801
- (6) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月) : 低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)
- (7) 三沢 俊平(1985) : 鉄鋼の湿食形態と腐食生成物、日本金属学会会報
- (8) K. Tuutti(1982) : Corrosion of Steel in Concrete, CBI forskningsresearch
- (9) 藤原 和俊(2018) : 浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001
- (10) Juraj Majzlan et al. (2006) : Thermodynamic properties and crystal structure refinement of ferricopiapite, coquimbite, rhomboclase, and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_5$
- (11) 高橋 良ほか(2009) : 幌別硫黄鉱山地域における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴
- (12) Wenqian Xu et al. (2010) : $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ formed by dehydrating rhomboclase and its potential existence on Mars
- (13) Wenqian Xu et al. (2012) : Temperature and humidity effects on ferric sulfate stability and phase transformation
- (14) 一般社団法人 日本溶射学会(2017) : 溶射工学便覧、第10章 皮膜の性質と試験方法
- (15) 腐食防食協会(2005) : 第VI編 腐食試験法 第2章 腐食試験法、腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版
- (16) 三原 守弘ほか(2002) : 低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼、ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生及び腐食速度の評価
- (17) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター(平成16年) : 還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (18) 水流 徹(2011) : 水溶液系の腐食現象の計測技術、まてりあ 第50巻 第7号、p283-286
- (19) 小林 孝一ほか(2001) : 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究、土木学会論文集 No.669/V-50、p173-186
- (20) 朝倉 祝治ほか(1981) : 電気化学的方法による腐食状態の実時間計測技術、金属表面技術 32巻 6号、p280-290
- (21) 大塚 俊明ほか(1982) : 液抵抗補正短形波電流分極法による鉄腐食速度の測定、防食技術 31巻 5号、p336-342
- (22) 小澤 正義ほか(2018) : 炭素鋼の自己不働態化に及ぼす淡水中へのホウ酸塩添加の影響、材料と環境 67巻 10号、p426-434
- (23) 国立天文台(2005) : 理科年表 平成18年(机上版)、p367
- (24) 土木学会(2014) : コンクリート技術シリーズ No103 セメント系構造物と周辺地盤の化補 4-101

学的相互作用研究小委員会(345 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集

- (25) Jan Skalny et al. (2002): Sulfate Attack on Concrete
- (26) J.B.Champenois et al. (2013): Conditioning Highly Concentrated Borate Solutions with Calcium Sulfoaluminate Cement, Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage
- (27) Laszlo J et al. (1992): Borate Substituted Ettringites, MRS Online Proceedings Library
- (28) Jean-Baptiste Champenois al. (2012): Crystal structures of Boro-AFm and sBoro-AFt phase, Cement and concrete Research
- (29) Parkhurst, D. L. et al. (1999): User's guide to PHREEQC (ver.2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259
- (30) Parkhurst, D. L. et al. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA.
- (31) Diederik JACQUES, et. al. (2012): Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R(2012)3
- (32) Thomas Schmidt, Barbara Lothenbach, Michael Romer, Karen Scrivener, Daniel Rentsch, Renato Figi (2008): A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cement and Concrete Research, 38, p337-349
- (33) 日本原子力研究開発機構(2015):平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発-4 カ年研究成果の取りまとめ 報告書
- (34) 桐山 貴俊(2018): 粒子方に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用
- (35) 若井 明彦ほか(2013): 地すべりを再現するための数値解析手法の現状、日本地すべり学会誌 50 巻 1 号、p7-17
- (36) 公益社団法人 地盤工学会(2014): 地盤工学用語辞典、p10
- (37) JIS A 5005(2009): コンクリート用砕石及び砕砂
- (38) 社団法人 地盤工学会(2010): 地盤材料試験の方法と解説
- (39) 大河原 正文ほか(2001): 粘土の残留強度発現機構に関する基礎的研究 - 固体表面間の潤滑状態と摩擦の要因-, 土木学会 第 56 回年次学術講演会、p102-103
- (40) 村尾 英彦ほか(2015): リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較、Journal of the Japan Landside Society Vol. 52 No. 3、p123-131
- (41) 日本原子力研究所(1989): 低レベル放射性廃棄物固化体の長期浸出試験
- (42) 宮脇 健太郎ほか(2018): アスファルト固化体からの環境影響物質の長期浸出挙動と浸出機構、廃棄物資源循環学会論文誌

以上

設定値を超える金属廃棄物が
埋設された場合の評価について

目 次

1. はじめに	1
2. 金属廃棄物重量の設定の妥当性について	1
3. 想定を超える金属重量の廃棄体が埋設された場合の検討	1
4. 参考文献	3

1. はじめに

本資料は、設定値を超える金属廃棄物が埋設された場合を考慮した上で、金属廃棄物に対する金属重量の設定(310kg/本)を行うことの妥当性を示すものである。

2. 金属廃棄物重量の設定の妥当性について

3号埋設設備では、事業変更許可後に充填固化体が埋設されることから、2号埋設設備とは異なり埋設実績はない。

一方で、2号埋設設備では、金属廃棄物の収納効率を向上させる観点から、高圧圧縮処理又は熔融処理を行い、可能な限り多くの金属廃棄物を埋設しているため、3号埋設設備でも同様の金属廃棄物の重量にて埋設されると考えられる。

よって、2号埋設設備の埋設実績を用いた金属廃棄物重量の設定は妥当である。

なお、金属腐食による金属の膨張量の設定においては、高圧圧縮体又は熔融体に対し、「腐食速度の設定」として腐食速度を適用せず全量が腐食すると設定し、金属腐食による金属の膨張量を算出する際に、十分な保守性を与えている。

3. 想定を超える金属重量の廃棄物が埋設された場合の検討

金属重量の大きな廃棄物が将来埋設される不確実性の影響を検討するため、仮に3号埋設設備に最大収納重量となる金属廃棄物(高圧圧縮体又は熔融体)が埋設された場合を想定した際の厳しい設定において、金属腐食による金属の膨張量を算出した。

なお、高圧圧縮体及び熔融体は、処理方法の特性上、一つの金属の塊であると捉えられる。そのため、高圧圧縮体及び熔融体の表面積は、金属廃棄物が密収納された廃棄体に比して小さいことから、腐食の進行が遅いと考えられる。

よって、高圧圧縮体及び熔融体に対しては、金属廃棄物の全量が腐食するとはせず、腐食速度及び表面積を設定する。

金属腐食による金属の膨張量の算出に必要なパラメータを第1表に示す。

鉛直方向へ卓越した変形による膨張量及び鉛直・水平方向への変形による膨張量の算出結果を第2表及び第3表に示す。

第1表 厳しい設定における金属の膨張量算出に必要なパラメータ一覧

項目		対象設備
		3号
金属重量	金属廃棄物 ^{*1}	19,800,000 (kg)
	廃棄体容器	792,000 (kg)
	埋設設備中の鉄筋	1,357,000 (kg)
	合計	21,949,000 (kg)
腐食膨張倍率		4倍
金属の表面積 /比表面積	金属廃棄物 ^{*2}	$8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$
	廃棄体容器	4.8 ($\text{m}^2/\text{本}$)
	埋設設備中の鉄筋	19,000 (m^2)
埋設設備	寸法	東西方向：64.10 (m) 南北方向：36.51 (m) 鉛直方向：6.66 (m)
	体積	約 15,587 (m^3)
腐食速度 ^{*3}		0.1 ($\mu\text{m}/\text{y}$)
評価年数		1,000 (y)

*1：金属廃棄物重量は、廃棄体製作技術の溶融体重量(742kg)を参考に750kg/本として算定した。

*2：金属廃棄物の表面積は、廃棄体製作技術の鉄系金属の表面積(PWR)を参考に設定した。

*3：腐食速度は、腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮した値である0.1($\mu\text{m}/\text{y}$)を設定した。

第2表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

設定	膨張量(m/基)	
	対象設備：3号	
	鉛直方向	
厳しい設定	3.21×10^{-1}	
参考値 ^{*1}	1.69×10^0	

*1：金属重量(310kg/本)での厳しい設定の膨張量

第3表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

設定	膨張量(m/基)		
	対象施設：3号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向
厳しい設定	1.02×10^0	5.77×10^{-1}	1.06×10^{-1}
参考値 ^{*1}	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}

*1：金属重量(310kg/本)での厳しい設定の膨張量

第2表及び第3表より、1,000年後の金属腐食による膨張量を算出した結果は、金属重量(310kg/本)の厳しい設定にて算出した膨張量に比して約1/5倍である。

以上のことから、将来想定を超える金属重量の廃棄体が埋設された場合の不確実性は、金属重量(310kg/本)の厳しい設定に対し、「腐食速度の設定」を全量腐食と設定した際の膨張量の設定値以下であることから、金属重量を310kg/本として評価することは妥当である。

4. 参考文献

- (1) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月)：低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)

以 上

金属腐食による腐食生成物並びに
可溶性塩による二次鉱物に対し真密度を
用いた力学的影響の評価を行う
妥当性について

目 次

1. はじめに	1
2. 金属腐食による腐食生成物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について	1
(1) 「腐食生成物の設定」に係る考え方	1
(2) 「腐食膨張倍率の設定」に係る考え方	2
(3) 「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る考え方	5
3. 可溶性塩による二次鉱物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について	5
(1) 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る考え方	5
(2) 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る考え方	6
4. 参考文献	6

1. はじめに

本資料は、金属の腐食に伴う腐食生成物並びに可溶性塩と埋設設備の反応による二次鉱物によって生じる力学的影響(膨張)について、真密度を用いた力学的影響の評価を行うことの妥当性を示すものである。

2. 金属腐食による腐食生成物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について

金属腐食によって生じる腐食生成物の膨張量は、拘束がない環境において、かさ密度により評価されることが一般的である。

覆土完了後の廃棄物埋設地は、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧における圧縮場での拘束圧が作用した状態である。金属腐食による膨張では、周辺の拘束がある環境において、かさ密度から求めた体積の変化量を用いた定量的な腐食膨張倍率を評価した知見がないことから、かさ密度を考慮した定量的な評価を実施することが困難である。また、拘束圧が作用した状態においては、腐食生成物中のかさ容積^{*1}に含まれる気孔全てが膨張に寄与することは考え難い。そのため、金属腐食に伴う力学的影響(膨張)の評価では、腐食生成物に対し真密度から求めた体積の変化量を用いた評価を行うこととしている。

真密度を用いた評価では、かさ密度を用いた評価に比して力学的影響(膨張)が過小評価となるおそれがあることから、以下に示す「腐食生成物の設定」、「腐食膨張倍率の設定」及び「金属腐食による金属の膨張量の設定」の考え方を踏まえた上で、適切な保守性を与えた評価により実施している。

*1:かさ容積とは、開気孔(外部に通じている気孔)及び閉気孔(固体内に閉じ込められている気孔)両方の体積を含んだ容積である⁽¹⁾。

(1) 「腐食生成物の設定」に係る考え方

腐食生成物は、以下の考え方に基づき設定している。

文献⁽²⁾より、充填固化体に収納される金属廃棄物は、炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占め、その他に小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などである。充填固化体中に収納される金属廃棄物に対し、金属種類を整理した結果より、主要な金属種類は鉄であり、その他考慮する金属種類はアルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛である。腐食生成物の設定は、金属種類を整理した結果を踏まえて、金属種類(鉄、アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)ごとに個別で設定する。

金属種類ごとの腐食生成物に対する確からしい設定は、最も安定に存在し得る腐食生成物を設定する。環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する場合又は、最も安定に存在し得る腐食生成物の設定が困難である場合は、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を選定することとする。

金属種類ごとの腐食生成物に対する厳しい設定は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を設定する。

以上の考え方に基づき設定した腐食生成物を第1表に示す。

第1表 腐食生成物の設定及び設定の考え方

金属種類	設定	設定の考え方
鉄	【確からしい設定】 Fe ₃ O ₄	【確からしい設定】 複数の文献において生成すること及び安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ (マグネタイト)を設定する。
	【厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ (水酸化鉄(II))を設定する。
アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【確からしい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【確からしい設定】 それぞれの金属種類に対して複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、確からしい設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
	【厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

(2) 「腐食膨張倍率の設定」に係る考え方

金属種類ごとの腐食生成物に対する腐食膨張倍率は、第1表に示した腐食生成物に対し、ICSDの無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽³⁾に示される理論密度を用いて算出している。算出した腐食生成物の腐食膨張倍率を第2表に示す。

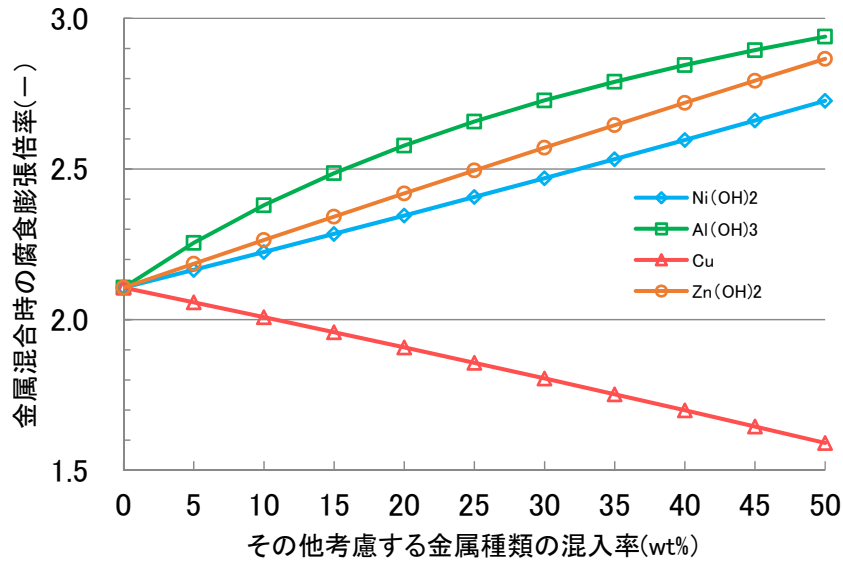
埋設設備中の金属の腐食膨張倍率の設定は、廃棄体中の金属の割合を考慮し設定する必要があるが、文献⁽²⁾より定量的な割合を整理出来ないため、金属の割合を設定することが困難である。そのため、主要な金属種類である鉄に対して、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)の混入率を0wt%~50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を算出する。

確からしい設定及び厳しい設定に対し、金属が混合された場合の腐食膨張倍率の算出結果を第1図及び第2図にそれぞれ示す。埋設設備中の金属の腐食膨張倍率の設定に当たっては、金属が混合された状態での腐食膨張倍率の最大値を包含する値を設定する。

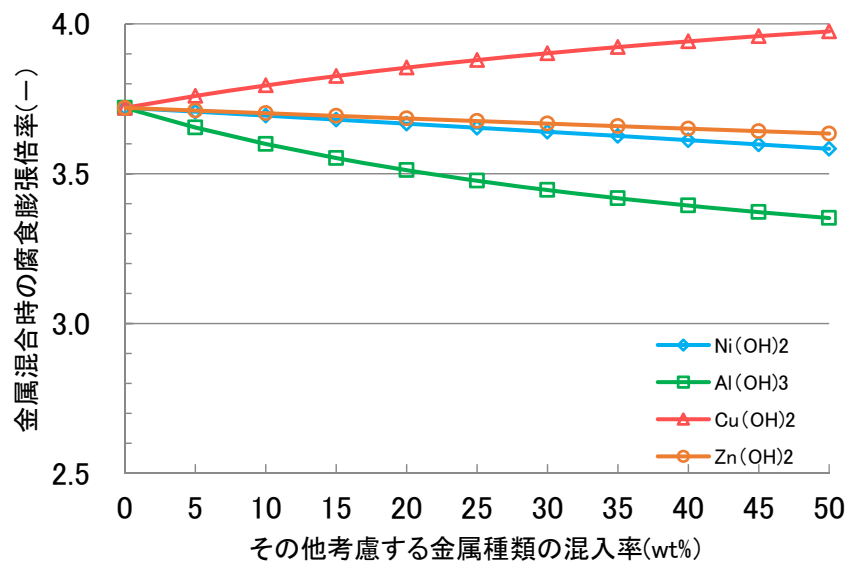
なお、文献⁽²⁾より、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)は、金属廃棄物のうち小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などである。そのため、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)の混入率は、埋設設備全体の金属量に対し、占める割合が小さいと考えられる。

第2表 腐食生成物の設定及び腐食膨張率

条件	腐食生成物の設定及び腐食膨張倍率	
鉄	【確からしい設定】	
	Fe_3O_4	2.10
	【厳しい設定】	
	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	3.72
アルミニウム	【確からしい設定／厳しい設定】	
	$\text{Al}(\text{OH})_3$	3.23
ニッケル	【確からしい設定／厳しい設定】	
	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	3.43
銅	【確からしい設定】	
	Cu	1.00
	【厳しい設定】	
	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	4.08
亜鉛	【確からしい設定／厳しい設定】	
	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	3.56



第1図 確からしい設定 (Fe_3O_4 (腐食膨張倍率: 2.10) を基準) における金属が混合された場合の腐食膨張倍率



第2図 厳しい設定 ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ (腐食膨張倍率: 3.72) を基準) における金属が混合された場合の腐食膨張倍率

(3) 「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る考え方

金属腐食による金属の膨張量は、埋設設備中の金属量(廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋及び金属廃棄物)、腐食生成物の腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し設定している。

金属腐食による金属の膨張量の設定に必要な腐食生成物の腐食膨張倍率は、第1表に示すとおり、主要な金属種類である鉄の確からしい設定を除き、安定な腐食生成物の設定が困難であるため、膨張に大きく寄与する水酸化物を設定している。水溶液中の水酸化物の特性として溶解度に従い溶出することが想定されるが、溶出する現象を考慮せず、金属腐食による金属の膨張量では、腐食生成物(水酸化物を含む)の腐食膨張倍率に従い、全てが埋設設備の膨張に寄与するとして設定している。

以上のことから、力学的影響(膨張)の評価においては、金属腐食による腐食生成物に対して、真密度を用いた評価を実施しているが、金属腐食による金属の膨張量の算出・設定に至るまでの考え方として、適切な保守性を与えた上で評価していることから、妥当であると判断している。

3. 可溶性塩による二次鉱物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について

可溶性塩による二次鉱物は、セメント系材料と反応した際のメカニズムは解明されているものの、二次鉱物の生成に伴う膨張量に関して、定量的な知見がない。

「埋設設備の膨張倍率の評価」では、二次鉱物の生成に伴う膨張量の定量的な知見がないため、地球化学計算コードを用いた真密度による評価を実施している。

そのため、可溶性塩による二次鉱物を真密度として評価するに当たっては、以下に示す「埋設設備の膨張倍率の評価」、「埋設設備の膨張倍率の設定」及び「可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定」の考え方を踏まえた上で、適切な保守性を与えた評価により実施している。

(1) 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る考え方

埋設設備の膨張倍率の評価は、可溶性塩による鉱物の生成・溶解に係る反応に対し、評価期間に依存しない平衡計算を行っている。また、解析用物性値である可溶性塩濃度においては、二次鉱物の体積膨張量が最大となるように、1号埋設設備(1群から6群)全体の体積における平均濃度が、1号7,8群の埋設設備へ作用させる設定としている。

(2) 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る考え方

埋設設備の膨張倍率の設定は、セメント系材料の固相変化による膨張倍率(充填材:1.09倍、コンクリート:1.05倍)と埋設設備の構成部材ごとの体積分率を乗算することで設定を行っている。

埋設設備の膨張倍率(-)

$$= (\text{廃棄体中の充填材の体積分率}(-) + \text{セメント系充填材の体積分率}(-)) \times \text{充填材の体積膨張倍率}(-) + (\text{ポーラスコンクリートの体積分率}(-) + \text{コンクリート体積分率}(-)) \times \text{コンクリートの体積膨張倍率}(-) + \text{廃棄体上部空隙}(-)$$

$$= (0.194 + 0.311) \times 1.09 + (0.042 + 0.315) \times 1.05 + 0.083$$

$$= 1.0083$$

一方で、埋設設備の膨張倍率の設定値は、二次鋳物の膨張倍率に係る定量的な知見がないことによる不確実性を考慮し、算出された埋設設備の膨張倍率に対し、切り上げた値(埋設設備の膨張倍率：1.1倍)を設定している。

また、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定においては、埋設設備の膨張倍率に従い、全てが埋設設備の膨張に寄与するとして評価している。

以上のことから、力学的影響(膨張)の評価においては、可溶性塩による二次鋳物に対して、真密度を用いた評価を実施しているが、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の算出・設定にいたるまでの考え方として、適切な保守性を与えた評価により実施していることから、妥当であると判断している。

4. 参考文献

- (1) 一般社団法人 日本溶射学会(2017)：溶射工学便覧、第10章 皮膜の性質と試験方法
- (2) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月)：低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)
- (3) 藤原 和俊(2018)：浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001

以 上

埋設設備中の環境条件の設定に対する
腐食生成物の設定の
考え方と妥当性について

目 次

1. はじめに	1
2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理	1
(1) 現象による推定	1
(2) 文献による推定	4
(3) 解析による推定	5
3. 腐食生成物の設定	8
(1) 確からしい設定	8
(2) 厳しい設定	8
4. まとめ	8
5. 参考文献	9

1. はじめに

本資料は、埋設設備中の環境条件の設定に対する腐食生成物の設定に係る詳細な考え方と設定の妥当性について示すものである。

2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理

埋設設備中の環境条件下で生成される腐食生成物について、現象、文献及び解析による推定により整理する。

(1) 現象による推定

状態変化の評価期間(1,000年後)において生じる現象から、腐食メカニズムを推定する。

覆土完了後、埋設設備内に周辺の地下水が比較的速やかに浸入することで、埋設設備は、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000年後)において、周辺の地下水により満たされた湿潤状態にある。

そのため、金属は、周辺の環境(水や酸素)と相互作用(電気化学的腐食)することで腐食生成物が生成される。

腐食生成物の生成過程に係る現象を推定するに当たっては、評価対象物となる金属(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)が複数あること、また、その配置や曝される環境が厳密には異なることから、腐食に伴う環境条件の変化を整理する必要がある。

よって、ここでは評価対象物ごとの代表的な環境条件を選定するため、代表とする金属種類である鉄に対し、埋設設備中の環境変化を以下のとおり整理する。

- ・埋設設備中の評価対象となる金属の配置は、埋設設備の内部から金属廃棄物、廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋の順に配置されている。
- ・金属廃棄物及び廃棄体容器は隣接している一方、埋設設備中の鉄筋は充填材の層を介して離れた場所に配置されている。
- ・埋設設備中の鉄筋は、主に周辺岩盤と接する底版及び周辺岩盤と距離が近い外周仕切設備のコンクリート中に存在することから、周辺地下水の組成などの埋設設備外の環境に大きく影響される。
- ・金属廃棄物及び廃棄体容器は、埋設設備中の鉄筋の腐食に伴う環境条件の変化を受けた地下水に曝されることから、埋設設備中の鉄筋とは異なった腐食挙動となることが予想される。

以上の環境条件の変化を踏まえ、評価対象物である金属が曝される代表的な環境は、大きく分けて2つの条件に分類することができる。代表的な環境条件を以下の第1表に示す。

第1表に整理される溶存酸素、pH及び酸化還元電位(以下「ORP」という。)に関しては、相互関係がある。

文献⁽¹⁾では、一般的にORPに対するpHの影響が大きく、次に溶存酸素の影響があるとされ、酸化剤の存在する環境下ではORPを上昇させる効果があるとしている。また、文献⁽²⁾では、中性の地下水を対象としたORPとpHに関する試験及び解析を用いた評価を行っており、文献⁽¹⁾と同様の相互関係があることを示している。

以上のことから、第1表の環境条件は、溶存酸素、pH及びORPの相互関係が正しく設定されている。

- ・①の環境においては、pHが高いアルカリ性であり、溶存酸素が存在する状態を設定していること。

- ・②の環境においては、pHが高いアルカリ性であり、溶存酸素が検出限界以下と限りなく少ない状態を設定していること。

第1表 評価対象物ごとの代表的な環境条件

項目	①	②
環境の状態 ^{*1}	廃棄物埋設地周辺の地下水環境(好氣的条件)	埋設設備中の鉄筋の腐食による影響を受けた地下水環境(嫌氣的条件)
評価対象物	埋設設備中の鉄筋	金属廃棄物及び廃棄体容器
溶存酸素	数 ppm 程度	検出限界以下(0.2ppm 未満)
ORP ^{*2}	約+50mV 以上 ^{*3}	約-100mV 以下 ^{*3}
pH	12.5 程度	
水温	10~15℃程度	

*1：環境の状態(好氣的条件及び嫌氣的条件)は、溶存酸素、ORP、pH及び水温を考慮して設定している。

*2：ORPは、対象とする溶液の溶存酸素、pH及び水温により変動するものである。

*3：ORP値は、文献⁽³⁾を参考に、廃棄物埋設地に流入する地下水(溶存酸素、pH及び水温を考慮)の値を想定したものである。

第1表より、2種類の環境条件における現象を以下のとおり整理する。

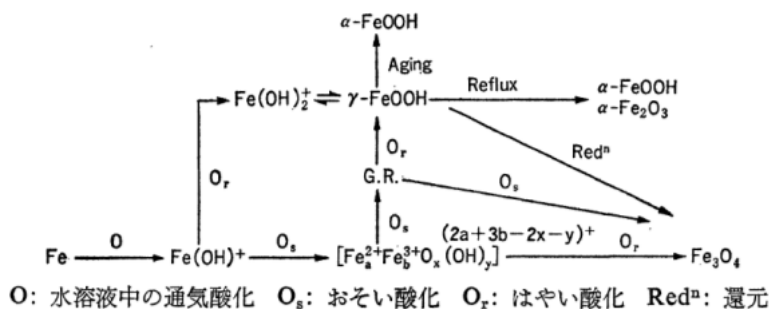
(①の環境下での腐食メカニズム)

埋設設備中の鉄筋は、周辺の地下水と反応することで生じる金属腐食によって、電子を放出する。放出された電子は、周辺の地下水又は、覆土前の埋設設備に存在する溶存酸素^{*1}に消費されることで、 α -FeOOH(以下「ゲーサイト」という。)が生成されると想定する。

そのため、「①の環境」では、酸素消費型の腐食^{(4)~(6)}が生じることが予想される。

酸素消費型の腐食に関しては、文献⁽⁴⁾により常温の水溶液中における鉄の腐食生成物に関する腐食メカニズムが整理されている。鉄さびの生成経路図を第1図に示す。

*1：溶存酸素は、周辺地下水中の溶存酸素(濃度：0.2ppm 未満)及び埋設設備に内在する溶存酸素(大気圧環境下の飽和濃度(想定)：約8ppm)を指す。なお、この溶存酸素は、供給量に対し、埋設設備中の鉄筋(3号の鉄筋重量：1,357,000kg)による金属腐食での消費により、状態変化の評価期間(1,000年後)において、十分に消費できる溶存酸素濃度である。

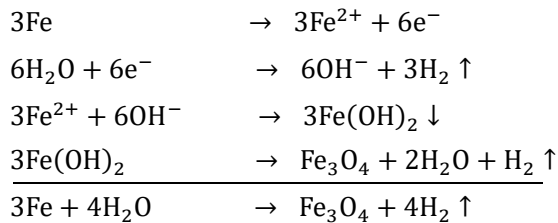


第1図 常温の水溶液中における鉄さび生成経路図⁽⁴⁾

(②の環境下での腐食メカニズム)

金属廃棄物及び廃棄体容器は、埋設設備中の鉄筋により溶存酸素が消費された後、充填材の層を介した地下水環境(酸素が非常に少ない状態)に曝される。よって、金属腐食により放出された電子は、水を分解して水素ガスを発生し、溶解した鉄は2価の水酸化物として沈殿した後、水酸化物が酸化されることで、 Fe_3O_4 (以下「マグネタイト」という。)が生成されると想定する。

そのため、「②の環境」では、水素発生型の腐食^{(4)~(6)}が生じることが予想される。マグネタイトの生成に至る反応式は、以下のとおりになる。



ここで、腐食生成物を設定するに当たり、更に代表的な環境条件を選定する。評価対象物である金属ごとの重量割合は、金属廃棄物：廃棄体容器：埋設設備中の鉄筋=8：1：1 の関係であるため、金属廃棄物及び廃棄体容器が埋設設備中の全金属重量の約9割と大半を占めている。

以上のことから、代表的な環境条件を「②の環境」として設定する。

そのため、確からしい設定の代表的な環境条件である「②の環境」下において、生成される代表的な腐食生成物は、マグネタイトであると整理する。

また、厳しい設定においては、マグネタイト、ゲーサイト及びマグネタイトの生成過程で生成する $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (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、確からしい設定としてマグネタイト、厳しい設定としてマグネタイト、ゲーサイト及び水酸化鉄(II)のいずれかであると推定する。

(2) 文献による推定

鉄は、状態変化の評価期間(1,000年後)において、「2. (1) 現象による推定」に基づき、溶存酸素の少ない嫌氣的条件及びセメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することによる高 pH の環境下に曝される。そのため、これらの環境に類似した条件下にて調査された知見を以下に整理する。

- ・森川ほか⁽⁷⁾は、電食試験(コンクリート中に埋め込んだ鉄筋材を NaCl 水溶液などの溶液中でアノード電解する促進腐食試験)によるコンクリート中の腐食生成物を X 線回折で同定することにより、さびの主成分は、マグネタイトであり、ゲーサイトも確認している。
- ・高谷ほか⁽⁸⁾は、実構造物(鉄道橋(40年経過)、道路橋(30年経過))、暴露試験材(防潮堤26年自然暴露)等を X 線回折で同定することにより、マグネタイトとゲーサイトを検出している。
- ・杉橋ほか⁽⁹⁾は、嫌氣的条件下の試験結果のほとんどでマグネタイトの生成を確認している。
- ・柴田⁽¹⁰⁾は、酸化還元反応式による理論、簡易な計算及び腐食試験などの多角的視点を踏まえた上で、高アルカリ性環境下においては、マグネタイトが生成することを確認している。
- ・三原ほか⁽¹¹⁾は、処分施設のコンクリート中鉄筋、地層処分環境下等を想定したガス発生法による試験から、マグネタイトが生成することを確認している。

以上のことから、確からしい設定の埋設設備中の環境条件に類似する試験条件下において、最も生成される可能性が高いものとしては、マグネタイトであると推定する。

また、厳しい設定においては、マグネタイト、ゲーサイトのうち、いずれかの腐食生成物が生成されると推定する。

(3) 解析による推定

埋設設備中の想定される環境条件下において、金属腐食に伴い生成される腐食生成物を評価するためには、Pourbaix による電位-pH 図を用いた評価がなされることがある⁽¹²⁾。Pourbaix の電位-pH 図は、評価対象とする元素に対し、電位-pH の座標軸を用いてイオン種や化学種の安定領域を示したものであり、水溶液中の酸化還元反応や酸-塩基反応を総括的に理解することができる。

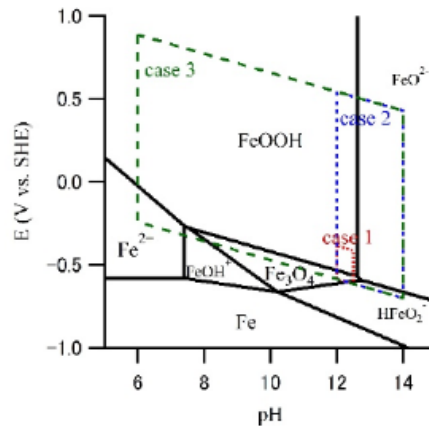
文献⁽¹²⁾では、上記の Pourbaix による電位-pH 図が 25°C の評価が中心であるとともに、特定の酸化物のみを対象にしており、一部の酸化物が考慮されていない。

そのため、文献⁽¹³⁾では、共存するアニオンの影響については情報が不足していることから、化学平衡計算ソフト HSC Chemistry for Windows Ver. 9.3.0 (以下「HSC Chemistry」という。)の Eh-pH Diagram モジュールを用いて電位-pH 図を作成し、環境に応じた腐食生成物の生成可否に関して解析的検討を行っている。

解析に用いられた環境条件を第 2 表に、Case1 の条件下で作図された電位-pH 図を第 2 図に示す。また、文献⁽¹³⁾においては、1 号廃棄物埋設地の廃棄体の特性である可溶性塩を考慮した条件 (Case2) に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。

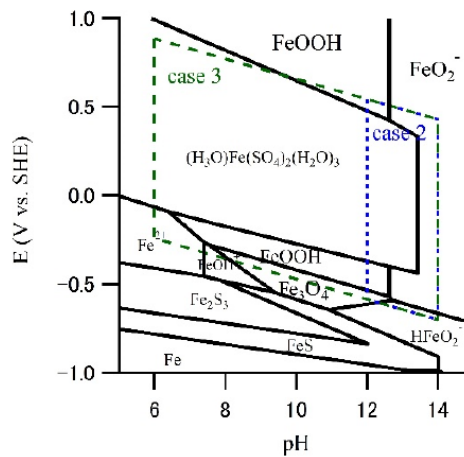
第 2 表 環境条件の設定

項目	Case1	Case2	Case3
温度	5, 15, 25°C	5, 15, 25°C	5, 15, 25°C
pH	12.0~12.5	12.0~14.0	6.0~14.0
溶存酸素	脱気	脱気~空気飽和	脱気~空気飽和
硫酸イオン	なし	あり	あり
ほう酸イオン	なし	あり	あり
塩化物イオン	なし	あり	あり
炭酸イオン	なし	なし	あり



注1：②の環境と類似するのはCase1（赤破線）の範囲である。

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



第3図 HSC Chemistryによる15°CにおけるFe-S-H₂O系での電位-pH図

第2図より、確からしい設定の埋設設備中の環境条件に類似する解析条件下において、生成される代表的な腐食生成物はマグネタイトであると整理する。

また、厳しい設定においては、第2図及び第3図より、主要な鉄の腐食生成物としては、マグネタイト、ヘマタイト、ゲーサイト及び $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_3$ (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。

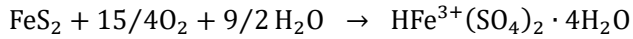
しかしながら、解析により作図される電位-pH図は、熱力学データベースに基づいた計算により熱力学的に安定な腐食生成物が選定されることから、腐食生成物の生成条件を考慮されていない。

そのため、「2. (1) 現象による推定」及び「2. (2) 文献による推定」にて整理した腐食生成物以外の腐食生成物(ロンボクレース)に対し、生成条件を精査する。

文献^{(14)~(15)}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^{(14)~(15)}に記載されている具体的な生成条件は、以下のとおりである。また、ロンボクレースが生成する

環境条件を第4図に示す。

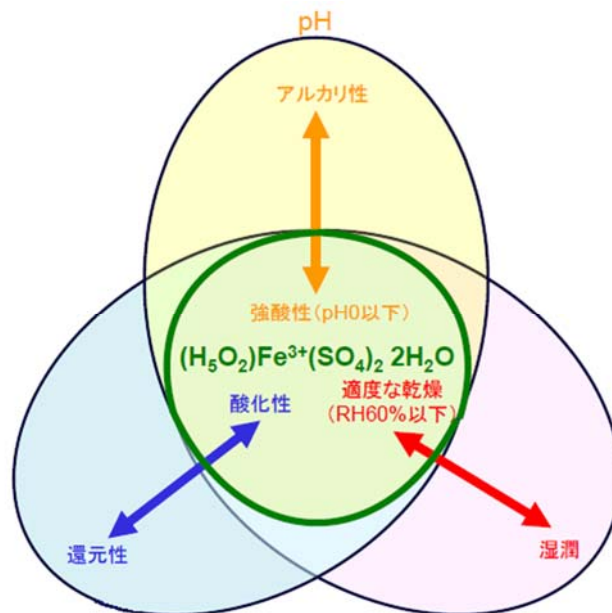
- ・高橋ほか⁽¹⁴⁾は、ロンボクレーズは pH が負の値を示すような著しい酸性の環境下において、黄鉄鉱や白鉄鉱の分解によって生じる鉄硫酸塩鉱物とし、以下の反応式によって生成するとしている。



- ・WENQIAN ほか⁽¹⁵⁾は、低温環境でフェリコピアタイトとロンボクレーズの混合物に関する試験を行い、相対湿度(以下「RH」という。)が35%~55%の環境での反応性を示していることから、湿润環境下では溶解するとしている。

以上のことから、厳しい設定では、ロンボクレーズを除いたマグネタイト、ヘマタイト及びゲーサイトのうち、いずれかの腐食生成物が生成されると整理する。

したがって、解析から推定される腐食生成物は、確からしい設定としてマグネタイト、厳しい設定としてマグネタイト、ヘマタイト及びゲーサイトのいずれかであると推定する。



第4図 ロンボクレーズが生成する環境条件

3. 腐食生成物の設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」の3つの推定を踏まえて、埋設設備中の環境条件における腐食生成物を設定する。

(1) 確からしい設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」より整理された結果を踏まえ、代表とする環境条件下において、安定に生成かつ結晶性を有する腐食生成物であるマグネタイト(β :2.1)を設定する。

(2) 厳しい設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」の3つの推定では、厳しい設定に対して複数の腐食生成物(ヘマタイト、マグネタイト、ゲーサイト及び水酸化鉄(II))が生成するとして整理している。金属腐食による腐食生成物の設定においては、金属腐食に伴う膨張に対し、覆土の低透水性への影響評価の観点から、膨張に大きく寄与すると考えられる腐食膨張倍率の最も大きな腐食生成物を設定することが必要である。

設定に当たっては、「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」にて生成するとして整理した腐食生成物に対し、ICSDの無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽¹³⁾に示される理論密度を用いて、重量1.0kgの金属の体積 V_1 が腐食し、酸化物あるいは水酸化物となった場合の体積 V_2 の比より、理論的な膨張率(β)を求めることで算出し、整理する。各腐食生成物の体積膨張倍率(β)の算出した結果を第3表に示す。

第3表より、腐食膨張倍率の最も大きな水酸化鉄(II)(β :3.72)を設定する。

第3表 各腐食生成物の体積膨張倍率

	モル質量(g/mol)	真密度(g/cm ³)	β
Fe	55.845	7.860	1.00
ヘマタイト	159.688	5.240	2.10
マグネタイト	231.533	5.170	2.14
ゲーサイト	88.852	4.260	2.94
水酸化鉄(II)	89.860	3.400	3.72

4. まとめ

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」及び「3. 腐食生成物の設定」より、埋設設備中の金属に対する腐食生成物は、埋設設備中の環境条件の設定に対し、3つの推定を踏まえても確からしい設定としてマグネタイト、厳しい設定として水酸化鉄(II)を設定することが妥当である。

5. 参考文献

- (1) 伊藤 伍郎(2010)：腐食化学と防食技術、第 25 版、p52-53
- (2) 岩月 輝希ほか(2009)：深部地下水の物理化学パラメータ (pH、酸化還元電位)の測定とその留意点、地下水学会誌、第 51 巻第 3 号、p205-214
- (3) 武藤 暢夫ほか(1986)：酸化還元電位値に影響を及ぼす要因に関する実験的検討、水質汚濁研究 第 9 巻 第 10 号、p661-667
- (4) 三沢 俊平(1983)：鉄さび生成の現状と未解明点、防食技術、32、p657-667
- (5) 三沢 俊平(1985)：鉄鋼の湿食形態と腐食生成物、日本金属学会会報、第 24 巻、第 3 号、p201-210
- (6) 三沢 俊平ほか(1974)：鉄さびの生成機構と耐候性さび層、防食技術、23、p17-275
- (7) 森川 雄行ほか(1987)：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究、土木学会論文集 第 378 号/V-6、p97-105
- (8) 高谷 哲ほか(2015)：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性、土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)、Vol. 71、No. 3、p235-247
- (9) 杉橋 直行ほか(2008)：余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食に関する一考察、土木学会第 63 回年次学術講演会、CS05-43、p253-254
- (10) 柴田 俊夫(2014)：材料と環境、63、p109-115
- (11) 三原 守弘ほか(2002)：低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼, ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生率及び腐食速度の評価、サイクル機構技報、JNC TN1340 2002-001、No. 15、p91-101
- (12) M. Pourbaix et al. (1974): Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution 2nd English edition. NACE international cebelcor. ISBN-10 : 0915567989
- (13) 藤原 和俊(2018)：浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001
- (14) 高橋 良ほか(2009)：幌別硫黄鉱山遅滞における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴、応用地質、Vol. 50、No. 4、p228-237
- (15) WENQIAN XU et al. (2010): $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ formed by dehydrating rhomboclase and its potential existence on Mars、American Mineralogist、Vol. 95、No. 10、p1408-1412

以上

力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ
与えた場合の等価透水係数の試算について

目 次

1. はじめに	1
2. 覆土形状の設定	1
(1) 埋設設備膨張量の算出	1
(2) 覆土形状	2
3. 覆土の状態設定	3
(1) 部位ごとの透水係数の設定	3
(2) 等価透水係数の設定	4
4. 線量評価への影響について	5
5. 覆土材料による影響について	5
6. その他	6
7. 参考文献	7

1. はじめに

本資料は、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算について示すものである。

2. 覆土形状の設定

埋設設備の膨張量が直接的に覆土の変形量になると仮定することで、覆土の変形量が最大となるように状態設定を行う。

(1) 埋設設備膨張量の算出

金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応を考慮して算出した埋設設備の膨張量を第1表及び第2表に示す。最も膨張量の大きい厳しい設定における3号廃棄物埋設地の東西方向を代表とし、東西断面に生じる膨張の概念図を第1図に示す。

第1表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
	鉛直方向		
確からしい設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
厳しい設定	1.69×10^0	9.69×10^{-1}	1.39×10^0

*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

第2表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備：3号			対象設備：1号*1			対象設備：2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	3.64×10^{-2}	3.32×10^{-2}	3.32×10^{-2}	8.42×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.68×10^{-1}	3.16×10^{-2}
厳しい設定	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}	1.26×10^0	1.26×10^0	3.19×10^{-1}	2.25×10^0	2.31×10^0	4.34×10^{-1}

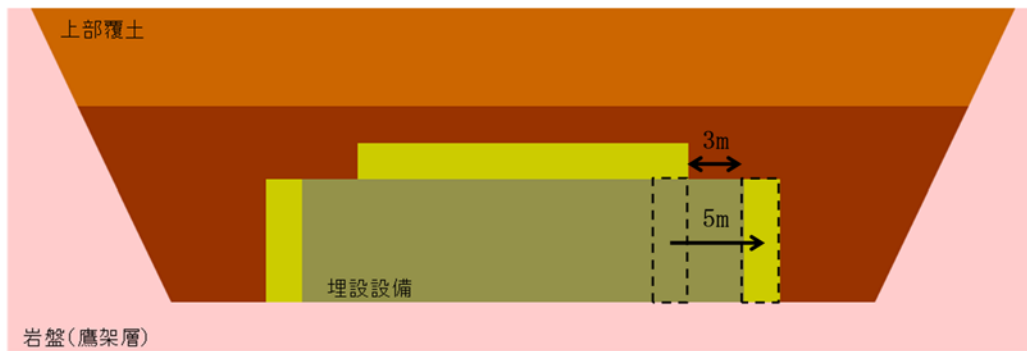
*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。



第1図 3号廃棄物埋設地膨張概念図(厳しい設定)

(2) 覆土形状

膨張により設定した覆土形状を第2図に示す。東西方向を代表断面とし、モデルの片側に5mの変位を与えた(本来は2.5m)。埋設設備側部の難透水性覆土が5m水平移動することにより、埋設設備両端の上面3mが、それぞれ下部覆土に置き換わるとする。



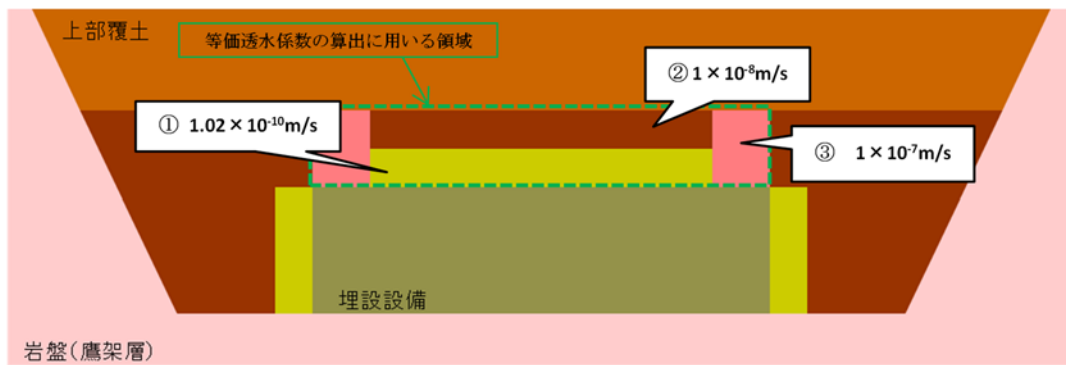
第2図 覆土形状の設定(3号廃棄物埋設地)

3. 覆土の状態設定

(1) 部位ごとの透水係数の設定

第2図の覆土形状に対し、化学的影響を考慮した透水係数の設定を第3図に示す。

透水係数の設定においては、「廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について 第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料5 廃棄物埋設地の状態設定-状態変化の評価(化学的影響)」(以下「化学的影響」という。)及び「廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について 第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料6 廃棄物埋設地の状態設定-透水係数の設定-」(以下「透水係数の設定」という。)と同様の考え方に基づく。①及び②の透水係数は、「化学的影響」の地球化学解析による評価結果に基づいて設定した。③の透水係数は、「透水係数の設定」の考え方に基づいて設定した。



第3図 覆土の状態設定

(2) 等価透水係数の設定

等価透水係数の算出に用いる領域における覆土の透水係数を第3表に示す。また、算出した覆土の等価透水係数を第4表に示す。等価透水係数の計算方法については、「透水係数の設定」と同様の考え方に基づく。

DEM 解析を使用しない場合の覆土の等価透水係数は、DEM 解析を使用した覆土の透水係数とほぼ同等であることを確認した。

第3表 覆土の透水係数設定(3号廃棄物埋設地)

時期	厳しい設定
1,000年後	<p style="text-align: center;"> $L_3=3.0, K_3=1.0 \times 10^{-7}$ $L_4=3.0, K_4=1.0 \times 10^{-7}$ $L_1=2.0, K_1=1.0 \times 10^{-8}$ $L_2=2.0, K_2=1.02 \times 10^{-10}$ $L_5=30.0, K_5=2.02 \times 10^{-10}$ </p>

L : 長さ (m)、K : 透水係数 (m/s)

第4表 覆土の等価透水係数(3号廃棄物埋設地)

1,000年後 厳しい設定	今回の覆土形状
等価透水係数 [m/s]	1.69×10^{-8}

4. 線量評価への影響について

DEMによる覆土形状と今回の覆土形状から算出された等価透水係数の比較を第5表に示す。力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合においても、DEM解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。

第5表 覆土の等価透水係数の比較(3号廃棄物埋設地)

1,000年後 厳しい設定	DEMによる覆土形状	今回の覆土形状
等価透水係数[m/s]	1.13×10^{-8}	1.69×10^{-8}

5. 覆土材料による影響について

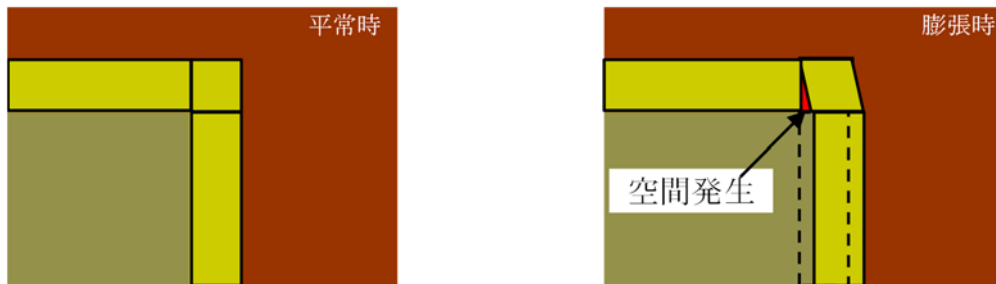
覆土材料は、材料調達状況を考慮した覆土施工時の施工試験結果により、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、最終決定された覆土材料に対しては、覆土の低透水性への力学的影響の評価を必要に応じて実施し、線量評価への影響の有無を確認する必要がある。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形が生じることとなる。これは、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。そのため、ベントナイト混合土(Ca型ベントナイト30wt%と砂70wt%の混合土)に対し、剛性が大きく変わらない覆土材料(Na型ベントナイト20wt%と砂80wt%の混合土)を用いた場合においても、金属腐食による膨張に伴い強制変位のような状態でせん断変形することが想定される。また、第5表に示すとおり、最も厳しい評価となる埋設設備の膨張量が直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算においても、覆土の等価透水係数は、DEM解析と同等であったことから、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響が生じない考えを示している。

以上のことから、覆土材料による影響については、覆土の変形に寄与する剛性が大きく変わらないため、等価透水係数に与える影響が軽微であり、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。

6. その他

埋設設備の膨張に伴い水平方向へ難透水性覆土が移動することで、難透水性覆土の上部が引き込まれ、卓越経路になり得る空間が生じると示唆される。そのため、空間が発生する可能性が示唆される現象(以下「示唆される現象」という。)について考察する。示唆される現象の概念図を第4図に示す。



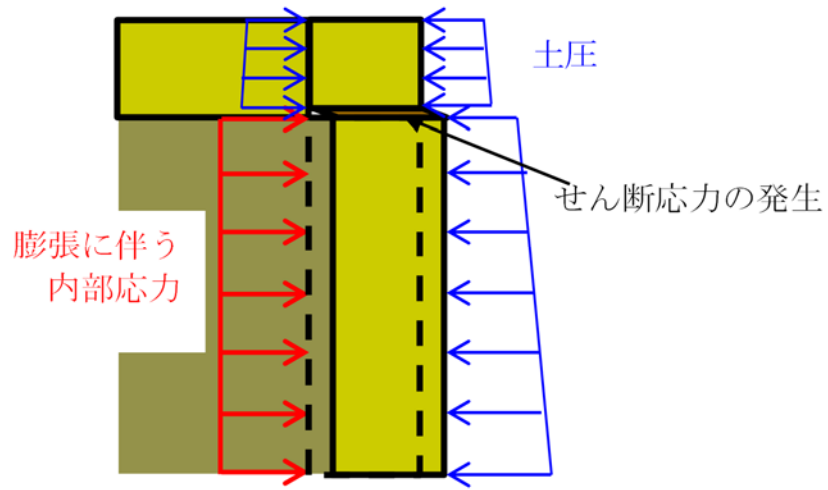
第4図 示唆される現象の概念図

文献⁽¹⁾によると、土や岩は、圧縮には強いがゆがみには比較的脆弱であり、外部や自重の作用によって地盤の内部にせん断応力が発生すると、地盤要素にゆがみによるせん断変形が生じるとされている。また、土の場合においては、せん断によってのみせん断破壊が生じるとされている。さらに、地盤材料がせん断変形を受けることでせん断面を形成している状況において、せん断面のひずみが集中している薄い層をせん断帯といい、粘土においては数十 μm オーダー、砂においては数 mm オーダーとされている。

ここで、示唆される現象が生じた場合の難透水性覆土周辺の応力場を第5図に示す。

難透水性覆土内部においては、周辺からの土圧の作用による押さえ込みにより等方圧縮応力場となっている。地盤の内部に廃棄物埋設地の膨張に伴い内部応力が発生し、内部応力は徐々に周辺土圧相当まで高まる。内部応力が周辺土圧と同等となると、埋設設備に接している覆土を押し込む状況が発生する。これは、内部応力が作用する面でのみ発生する現象であり、内部応力の発生しない部分との境界面においては、内部応力と土圧によるせん断応力が発生する。

以上のことから、せん断応力の発生する境界面において、極めて薄い層でのせん断破壊が発生することから、示唆される現象が発生する可能性はない。



第5図 示唆される現象が生じた場合の難透水性覆土周辺の応力場

7. 参考文献

- (1) 社団法人 地盤工学会 (2010) : 地盤材料試験の方法と解説

以 上