

東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所

第二種廃棄物埋設事業許可申請

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び

設備の基準に関する規則

への適合性について

廃棄物埋設地の設計

2023年9月

日本原子力発電株式会社

目 次

1	はじめに.....	1
2	E P A (1993) ⁽¹⁾	1
2. 1	E P A (1993) ⁽¹⁾ の概要	1
2. 2	M S W L F Criteria 及び E P A (1993) ⁽¹⁾ の規制要求.....	1
2. 3	E P A (1993) ⁽¹⁾ の記載内容と廃棄物埋設地の設計方針	5
3	廃棄物埋設地の設計	13
3. 1	構成及び設置位置	13
3. 2	主要設備	17
3. 2. 1	覆土	17
3. 2. 2	表面遮水	30
3. 2. 3	雨水防止テント	36
3. 2. 4	雨養生	38
3. 2. 5	排水溝	40
3. 2. 6	保護工（じゃかご等）	42
4	参考文献	43

添付資料 1 侵食評価

添付資料 2 浸透水による土壌への影響評価

参考資料 1 E P A (1993)における代替最終覆土の例と廃棄物埋設地との比較

参考資料 2 植生工と保護工（じゃかご等）の比較検討

参考資料 3 掘削抵抗性層内の粒調碎石等の粒径の検討方針

1 はじめに

本資料では、Solid Waste Disposal Facility Criteria, Technical Manual, Environmental Protection Agency (1993) (以下「E P A (1993)」という。)

⁽¹⁾の記載内容を考慮した東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所廃棄物埋設施設の廃棄物埋設地 (以下「廃棄物埋設地」という。) の設計について説明する。

2 E P A (1993) ⁽¹⁾

2. 1 E P A (1993) ⁽¹⁾ の概要

E P A (1993) ⁽¹⁾ は、1993年11月に、40 CFR Part 258 Criteria for Municipal Solid Waste Landfills (以下「MSWLF Criteria」という。)

(1991年10月9日公布)の添付として発行されたものである。E P A (1993) ⁽¹⁾ そのものは規制文書ではないため、強制的な技術指針を提供するものではなく、一般廃棄物最終処分基準の技術的側面を遵守するための支援を提供するものである。MSWLF Criteria 及びE P A (1993) ⁽¹⁾ が対象とする埋設施設 (以下「埋設施設」という。) の受入対象廃棄物は、一般廃棄物、汚泥及び焼却灰である。

2. 2 MSWLF Criteria 及びE P A (1993) ⁽¹⁾ の規制要求

MSWLF Criteria 及びE P A (1993) ⁽¹⁾ では、Composite liner (低透水土層とFlexible membrane linerで構成) 及び集水システムを設置することが記載されており、廃棄物よりも下部で浸出水を制御する設計である。これに対して、廃棄物埋設地の設計方針は、可能な限り埋設トレンチへの浸透水を抑えることにより漏出低減機能を達成するというものであり、漏出低減の方針が異なる。一方で、可能な限り廃棄物埋設施設からの水の漏出を低減

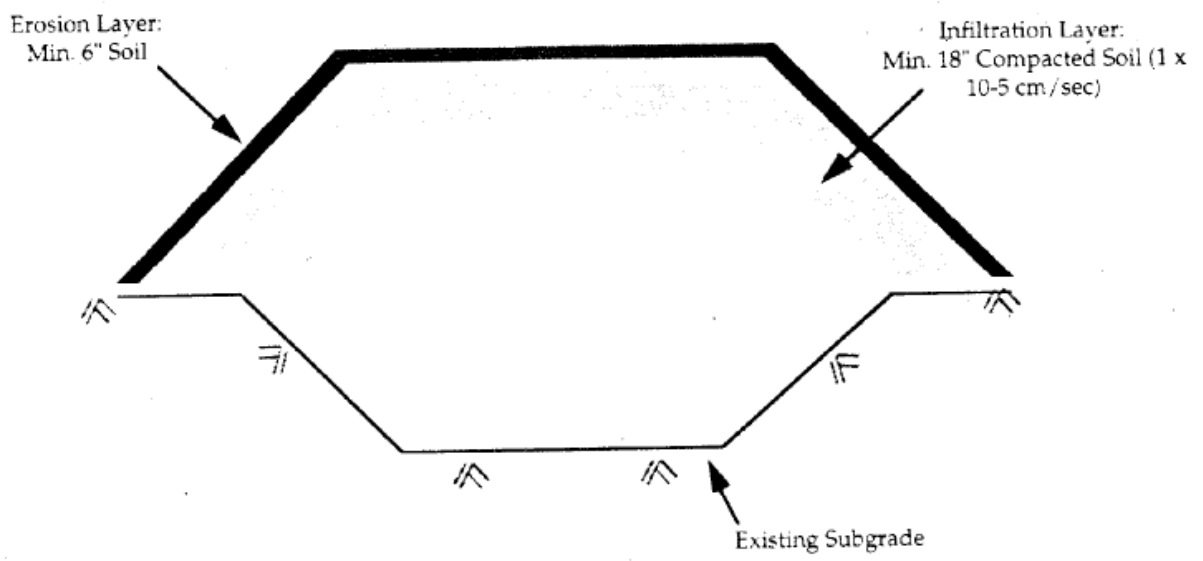
するという点においては，E P A (1993) ⁽¹⁾ の記載内容と廃棄物埋設地の設計方針は共通する。このため，廃棄物埋設地の最終覆土の設計は，MSWLF Criteria 及びE P A (1993) ⁽¹⁾ の記載内容と整合するものとなっている。

最終覆土設計の規制要求（40 CFR Part 258.60 (a)）と廃棄物埋設地の設計の適合を第1表に示す。また，規制要求の最小限の例を第1図に示す。

第1表 最終覆土設計の規制要求（40 CFR Part 258.60(a)）と廃棄物埋設地の設計の適合

最終覆土設計の規制要求（40 CFR Part 258.60(a)）			廃棄物埋設地の設計	
層名称	規制要求	備考	層名称※	仕様
Infiltration layer	<ul style="list-style-type: none"> 透水性係数 1×10^{-7} m/s 以下 厚さ約 46 cm 以上 	Infiltration layer の要求を満たせば、最終覆土に代替の材料や厚さが適用できる。	低透水性土層	<ul style="list-style-type: none"> 透水性係数 1.0×10^{-10} m/s 以下 厚さ 100 cm 以上
			側部低透水性覆土	<ul style="list-style-type: none"> 透水性係数 1.0×10^{-10} m/s 以下 厚さ 60 cm 以上
Erosion layer	<ul style="list-style-type: none"> 厚さ約 15 cm 以上 野生植物の育成を維持できる 	Erosion layer の代替として、礫や岩石を用いた保護表面を用いることができる。	保護工（じゃかご等）	<ul style="list-style-type: none"> 割栗石（粒径 5 cm～15 cm, 厚さ 30 cm を想定）を使用
			保護土層	<ul style="list-style-type: none"> 基礎層、低透水性土層及び掘削抵抗性層をあわせて厚さ 250 cm 以上

※：第7図及び第8図参照



第 1 図 規制要求の最小限の例

2. 3 E P A (1993) ⁽¹⁾ の記載内容と廃棄物埋設地の設計方針

E P A (1993) ⁽¹⁾, Chapter 6, subpart F, closure and post-closure では、最終覆土設計の規制要求 (40 CFR Part 258.60 (a)) に加えて、最終覆土の設計に関連する事項が記載されている。

E P A (1993) ⁽¹⁾ の記載内容と、それらを考慮した廃棄物埋設地の設計について、以下に示す。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.2 最終覆土設計 (40 CFR 258.60 (a))

6.2.1 規制文

(a) 浸透と侵食を最小限に抑える最終覆土を設置すること。最終覆土は以下の設計で建設すること。

(1) 透水係数は、埋設施設の Bottom liner system 又は天然土壤の透水係数もしくは 1×10^{-7} m/s 以下とする。

(2) 厚さ約 46 cm 以上の Infiltration layer を用いて、施設への浸透を最小化する。

(3) 野生植物の発育を維持できる厚さ約 15 cm 以上の Erosion layer を用いて、最終覆土の侵食を最小化する。

以下のとおり、廃棄物埋設地は 40 CFR 258.60 (a) (1) 及び (a) (2) を満足する。

- ・ Infiltration layer として低透水性土層 (透水係数 1.0×10^{-10} m/s) 及び側部低透水性覆土 (透水係数 1.0×10^{-10} m/s) を設置
- ・ 低透水性土層の厚さは 100 cm 以上、側部低透水性覆土の厚さは 60 cm 以上

40 CFR 258.60 (a) (3) については、40 CFR 258.60 (b) の代替最終覆土

としての規制要求を満足する保護工（じゃかご等）及び保護土層を設置している。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3 代替最終覆土設計 (40 CFR 258.60 (b))

6.3.1 規制文

(b) 代替最終覆土設計は以下を満足すること。

(1) Infiltration layer は、40 CFR 258.60 (a) (1) 及び (a)

(2) に示す Infiltration layer と同程度に浸透低減ができる。

(2) Erosion layer は、40 CFR 258.60 (a) (3) に示す Erosion layer と同程度に風と水による侵食からの防護ができる。

40 CFR 258.60 (b) (1) について、低透水性土層及び側部低透水性覆土は 40 CFR 258.60 (a) (1) 及び (a) (2) の要求を満足しており、Infiltration layer の代替はない。

40 CFR 258.60 (b) (2) について、廃棄物埋設地には、Erosion layer の代替となる保護工（じゃかご等）及び保護土層を設置している。以下のとおり、保護工（じゃかご等）及び保護土層は 40 CFR 258.60 (b) (2) を満足する。

- ・ 風（台風）により保護工（じゃかご等）への影響はないことを確認（添付資料 1 参照）
- ・ 低透水性土層及び側部低透水性覆土の低透水性に影響を及ぼすような保護土層の侵食は発生しないことを確認（添付資料 1 参照）

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3.2 適用性

40 CFR 258.60 (a) で規定される要求を最小限の設計として、それと同程度の能力を達成できる代替最終覆土とすることができる。これにより、覆土設計に多様な技術の導入や改善を加え、サイト固有の条件に対応する余地を与える。

「6.3.2 適用性」の記載内容について、Erosion layer の代替に相当するものとして保護工（じゃかご等）及び保護土層を設置している。保護工（じゃかご等）及び保護土層が 40 CFR 258.60 (b) (2) の記載内容を満足するため、廃棄物埋設地は 40 CFR 258.60 (a) の規制要求を満足する。長期的に維持管理が行われない廃止措置の開始後 1,000 年の状態設定を行うという廃棄物埋設地に固有の条件に鑑み、植生工ではなく保護工（じゃかご等）を用いる（参考資料 2 参照）。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3.3 技術的考慮事項

40 CFR 258.60 (a) (1) 及び (a) (2) に示す Infiltration layer の要求を満たせば、代替の材料や厚さが適用できる。

例えば、厚さ約 15 cm の Erosion layer の代替として、保護表面（礫や風化した岩片が十分に混じった土で構成されるもの）を用いることができる。

保護表面（硬質キャップ）は、土壌損失や流出により植生の実施や維持管理が阻害されるような乾燥地域や急傾斜では一般的に用いられる。

保護表面に用いられる材料は次のようなものであること。

- ・降雨や風などの極端な気象において、下部の Infiltration layer を保護できる。
- ・覆土の構成要素を犠牲にすることなく、下部の物質の沈下の影響を許容できる。
- ・下部の土壌と同様の表面勾配（最低 2%）で設計する。土壌侵食割合をコントロールできる。

風、強雨、気温などが植生カバーの劣化要因となるような地域では、覆土上に砕石が敷設される。

「6.3.3 技術的考慮事項」の記載内容について、以下のとおり、保護工（じゃかご等）及び保護土層が Erosion layer の代替に相当する。

- ・ 40 CFR 258.60 (a) (1) 及び (a) (2) に示す Infiltration layer の要求を満たす場合、Erosion layer の代替を用いることができる。
- ・ 長期的に維持管理が行われない廃止措置の開始後 1,000 年の状態設定を行うという廃棄物埋設地に固有の条件に鑑み、植生工ではなく保護工（じゃかご等）を用いる（参考資料 2 参照）。
- ・ 保護工（じゃかご等）は、保護土層、低透水性土層及び側部低透水性覆土を保護する。また、沈下の影響を踏まえて、低透水性土層及び側部低透水性覆土の透水係数を設定している。保護工（じゃかご等）の表面勾配は 5% である。保護工（じゃかご等）を考慮した侵食評価を行い、低透水性土層及び側部低透水性覆土の低透水性に影響を及ぼすような保護土層の侵食は発生しないことを確認している（添付資料 1 参照）。
- ・ 保護工（じゃかご等）の材料は、割栗石（粒径 5 cm～15 cm、厚さ 30 cm を想定）を用いる。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3.3 技術的考慮事項

その他の考慮事項

カバーシステムの追加要素

施設閉鎖後の浸出水の発生を可能な限り減らすために、ジオメンブレ
ンと低透水性を有する土壌から成る Composite cover を設置すること
ができる。これら要素の透水特性については、Chapter 4 を参照。

最終覆土システムで使用される他の構成要素には、Drainage layer,
Gas vent layer, Biotic layer が含まれる。

「6.3.3 技術的考慮事項 その他の考慮事項 カバーシステムの追加要素」
の記載内容について、廃棄物埋設地においては、Composite cover に相当す
る低透水性土層及び側部低透水性覆土を設置している。これらは、Composite
cover と同程度以上の低透水性及び厚さを有する。また、廃棄物埋設地には、
Drainage layer 及び Biotic layer に相当する掘削抵抗性層を設置している。
なお、Gas vent layer については、ガスの発生は考えられないため設置しな
い。（「カバーシステムの追加要素」については、参考資料 1 参照）

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3.3 技術的考慮事項

その他の考慮事項

Drainage layer

Erosion layer と下部の Infiltration layer との間に Drainage layer
を設けることができる。Drainage layer は、Erosion layer を通った

浸透水を除去する。低透水性層に接触する水を除去することで、浸出水の発生を防ぐ。

Drainage layer を使用する際は、根や土粒子による Drainage layer の目詰まりを最小限に抑える方法を検討する必要がある。目詰まりを最小限に抑えるために、Drainage layer と覆土の間に Filter layer を設けることができる。粒状の排水材料を使用する場合は、Filter layer は少なくとも厚さ約 30 cm、透水係数 1×10^{-4} m/s から 1×10^{-5} m/s とし、層の底部は少なくとも勾配 3% とする。

粒状の排水材料は、現地で入手可能で経済的な事情により、サイトごとに異なる。

一般的には、粒径は約 0.95 cm 以下の粗さで、ユニバーサル土壌分類規格（USCS）のタイプ SP に分類され、滑らかで丸みを帯びており、下層のジオメンブレンに損傷を与えるような破片がないものとする。

「6.3.3 技術的考慮事項 その他の考慮事項 Drainage layer」の記載内容について、以下のとおり掘削抵抗性層より排水される（添付資料 2 参照）。

- ・ 降雨時の雨水の大部分は保護土層表面を流れるが、一部は保護土層に浸透し、浸透水の大部分は掘削抵抗性層から排水される。
- ・ 保護土層の土粒子が掘削抵抗性層に流出し、保護土層の下部が削れるパイピング（流体浸食）が発生するのを防止するために、掘削抵抗性層内の上部には粒調碎石等（添付資料 2 第 1 図参照）を施工する構造である（参考資料 3 参照）。
- ・ 粒調碎石等が流出し、粒調碎石等の下部が削れるパイピング（流体浸食）が発生するのを防止するために、掘削抵抗性層の碎石又は石（栗石等の粒径が大きなもの）の粒径は粒調碎石等が流出しない大きさとする。加

えて、粒調碎石等のパイピング（流体浸食）を防止するため、掘削抵抗性層に砂又は砂質土を詰める構造である。

- ・ 保護土層及び粒調碎石等のパイピング（流体浸食）を防止することにより、掘削抵抗性層の目詰まりは防止される。
- ・ 掘削抵抗性層は厚さ 30 cm 以上、勾配 5% である。
- ・ 透水係数は、透水試験結果より 1.0×10^{-3} m/s と設定する。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3.3 技術的考慮事項

その他の考慮事項

Biotic layer

深い植物の根や穴を掘った動物は、Drainage layer や低透水性層を破壊し、排水能力に影響する可能性がある。Erosion layer の直下の厚さ約 30 cm の玉石の Biotic barrier は、植物と動物の侵入を阻止することができる。

「6.3.3 技術的考慮事項 その他の考慮事項 Biotic layer」の記載内容について、掘削抵抗性層により樹木の根による低透水性土層の損傷は防止される。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.3.3 技術的考慮事項

すべり不安定性

境界面に沿って上昇する土壌水の間隙水圧は、安定性を劇的に低下させる可能性がある。

「6.3.3 技術的考慮事項 すべり不安定性」の記載内容について、以下のと

おり掘削抵抗性層を設計している。

- ・掘削抵抗性層から排水することで、保護土層及び低透水性土層の境界面での土壌水の間隙水圧の上昇を抑制する。
- ・掘削抵抗性層内の上部の粒調砕石等の施工、掘削抵抗性層の砕石又は石の粒径の設定、掘削抵抗性層への砂又は砂質土の充填により、掘削抵抗性層の目詰まりは防止され、掘削抵抗性層からの排水が維持される（添付資料 2 参照）。

E P A (1993) ⁽¹⁾ (要旨)

6.6 閉鎖後の管理要求 (40 CFR 258.61)

6.6.1 規制文

(a) 埋設施設の閉鎖後 30 年間は管理を行う必要がある。

(1) 必要に応じて侵食等の影響を修復することで、最終覆土の健全性と機能を維持する。

40 CFR 258.61 では、埋設施設の閉鎖後 30 年間（人間及び環境の保護の状態に応じて、期間は増減する）、最終覆土の植生等を維持管理することによって、侵食による影響を解消することを求めている。廃棄物埋設地では、廃止措置の開始まで（埋設の終了後 50 年程度）は維持管理を行うため、40 CFR 258.61 を満足する。

なお、長期的に維持管理が行われない廃止措置の開始後 1,000 年の状態設定を行うという廃棄物埋設地に固有の条件に鑑み、植生工ではなく保護工（じゃかご等）を用いる（参考資料 2 参照）。

3 廃棄物埋設地の設計

廃棄物埋設地の設計内容について説明する。

3. 1 構成及び設置位置

廃棄物埋設地は、第二種廃棄物埋設を行う放射性廃棄物を埋設する埋設トレンチ及び覆土により構成する。

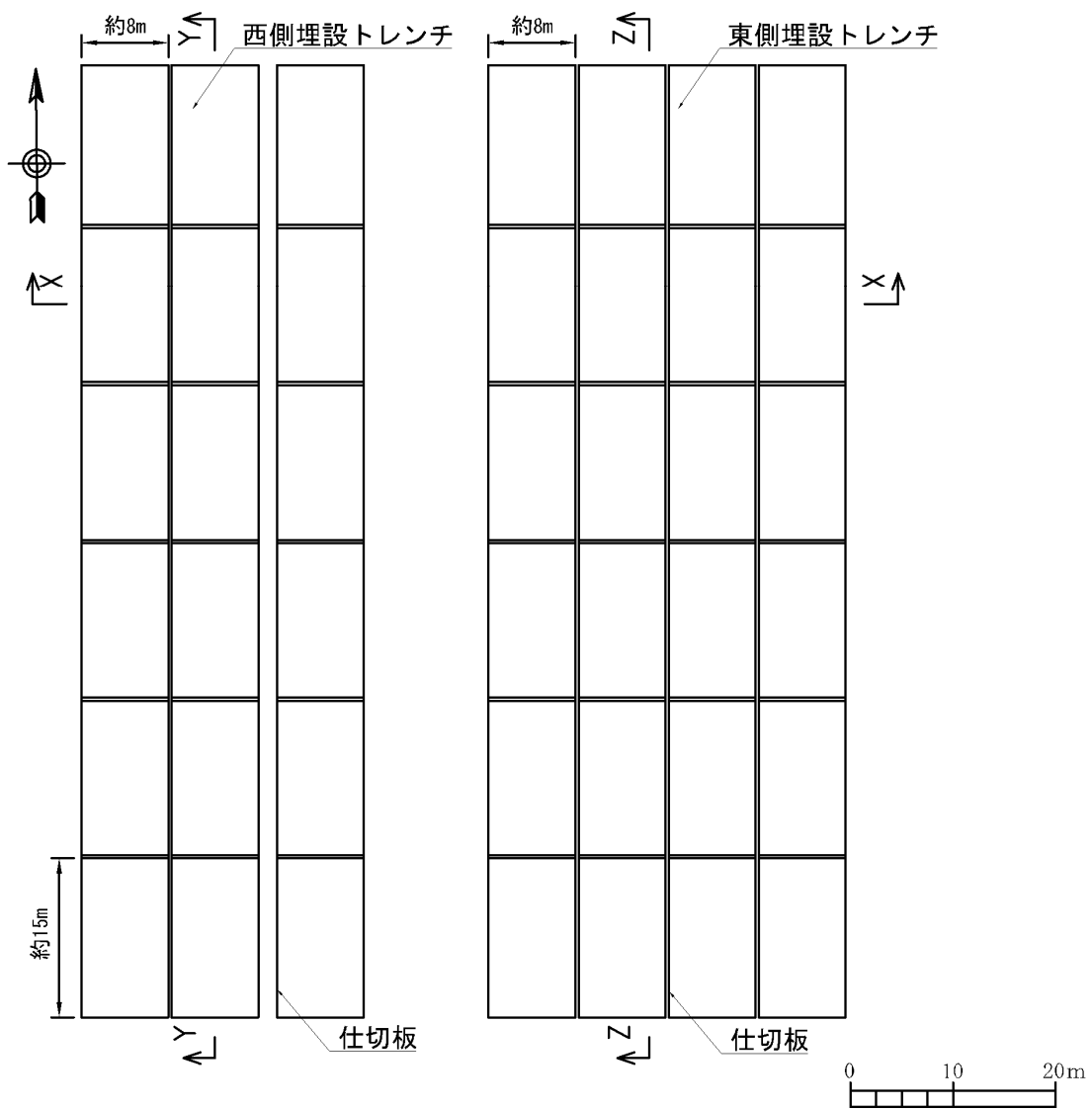
廃棄物埋設地の埋設トレンチの最大埋設能力は、最大約 24,000 m³である。

埋設トレンチは、放射性廃棄物の底面が東京湾中等潮位（以下「T.P.」という。）約+4 mとなるように掘り下げて設置し、1区画が約8 m×約15 mとなるようにH形鋼と矢板（以下「仕切板」という。）により区分し、合計で42区画設ける。なお、埋設トレンチは、西側18区画と東側24区画に分ける（第2図及び第3図参照）。

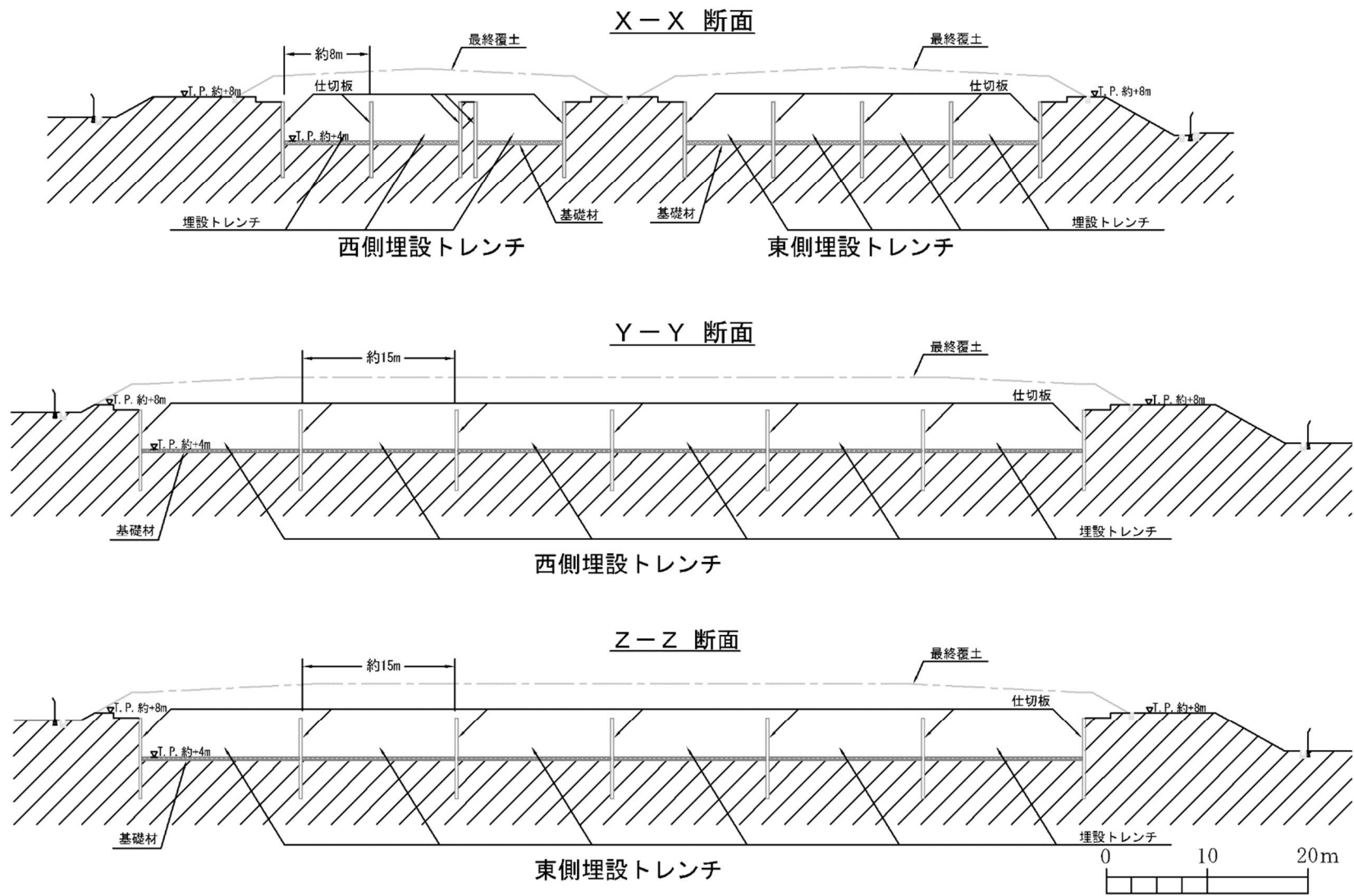
廃棄物埋設地は、自重及び操業時の荷重等に加え、耐震重要度の分類に応じて算定する地震力が作用した場合においても、接地圧に対する十分に支持性能を有する地盤に設置する。

覆土は、充填砂、側部低透水性覆土、中間覆土及びその上面を覆う最終覆土で構成するが、最終覆土の設置完了までの間は、充填砂、側部低透水性覆土、中間覆土、最終覆土のうち基礎層の一部で覆土を構成し、その上面に表面遮水を設置する（第5図、第6図、第7図、第8図及び第9図参照）。

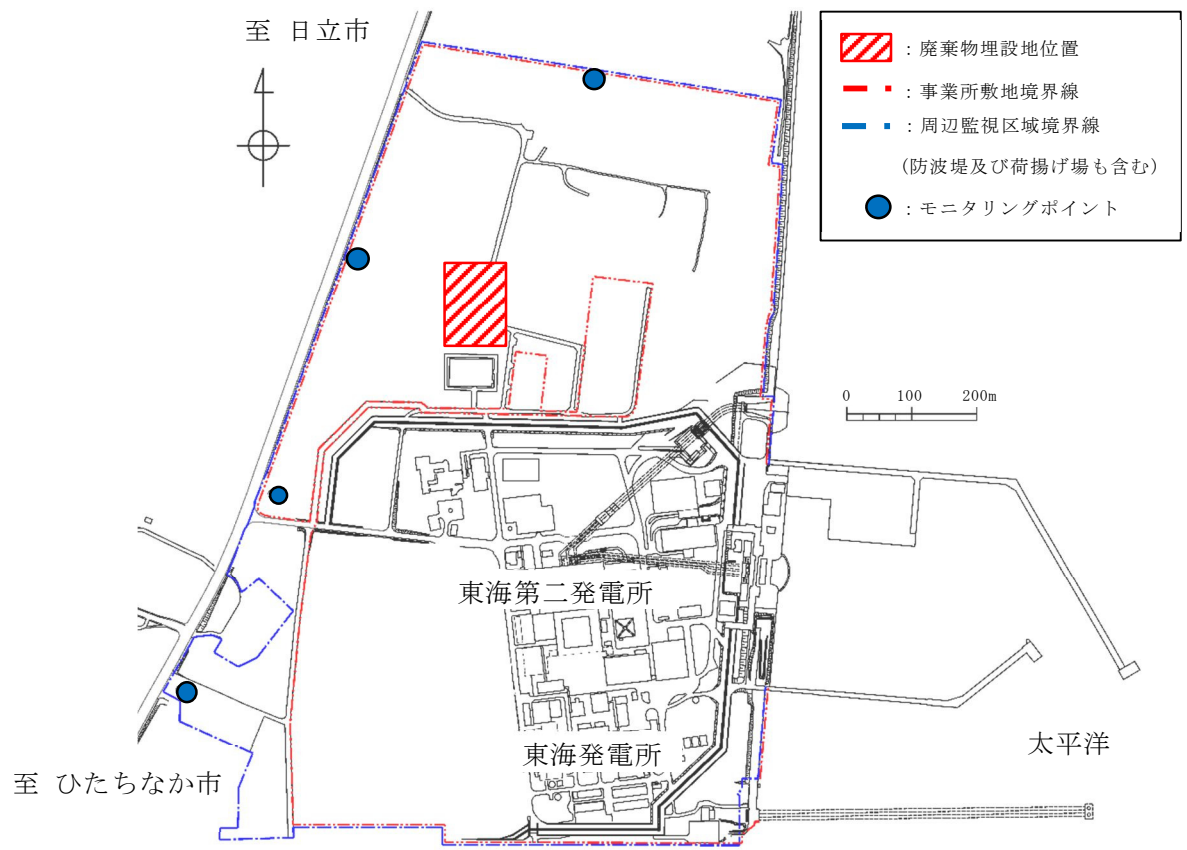
廃棄物埋設地は、東海発電所及び東海第二発電所の周辺監視区域内に設置する（第4図参照）。



第2図 埋設トレンチの平面図



第3図 埋設トレンチの断面図



第 4 図 廃棄物埋設地位置図

3. 2 主要設備

3. 2. 1 覆土

(1) 構成及び安全機能

覆土は、充填砂、中間覆土、側部低透水性覆土及び最終覆土により構成し、最終覆土は、保護土層、掘削抵抗性層、低透水性土層及び基礎層により構成する。

側部低透水性覆土及び低透水性土層の低透水性により放射性物質の漏出を低減し、中間覆土の遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

(2) 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

覆土の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第2表に示す。

a. 技術要件及び設計項目

土構造物の一般的な設計・施工に係る事項については、「道路土工要綱」⁽²⁾、「道路土工—盛土工指針」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」⁽⁴⁾等の基準類に従う。

覆土の主な設計項目については、安全機能に係る技術要件及びそれに必要な特性を踏まえ、次のとおり整理する。

(a) 漏出低減機能

覆土の漏出低減機能は、埋設トレンチ内を通過する雨水等に伴う浸透水量を低減することである。

埋設トレンチを通過する浸透水量（通過流量）は、低透水性土層及び側部低透水性覆土の透水特性によって影響を受けることから、低透水性土層及び側部低透水性覆土に対する技術要件は透水特性（低透水性）であり、その設計項目は、透水係数及び厚さである。

また、漏出低減機能については、長期にわたり機能を維持する必要

があるため、透水係数、厚さの変化に影響を及ぼす要因について抽出する。長期状態において低透水性土層及び側部低透水性覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構を第3表に示す。影響要因の抽出については、周辺土壌などの外部環境も含めた施設の構成及び影響要因の相互作用を網羅的に考慮する（影響要因の抽出・分析結果については、「東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設事業許可申請 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第十三条（ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地）第1項第三号及び第四号への適合性について 廃棄物埋設地の状態設定（影響事象分析）」を参照）。抽出した要因は、廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物の容器内に残存する空隙に起因する陥没に伴う、有効粘土密度の変化及び間隙の変化並びにコンクリート類の廃棄物からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト材料の溶解に伴う、有効密度低下である。低透水性土層及び側部低透水性覆土の技術要件は、これらの要因に対する機能維持特性（変形追従性及び化学的安定性）であり、その設計項目は透水係数及び厚さである。

(b) 遮蔽機能

覆土の遮蔽機能は、放射線を遮蔽する機能であるため、技術要件は遮蔽性であり、その設計項目は密度及び厚さである。

b. 設計要件

設計項目である透水係数、厚さ及び密度については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

第2表 覆土の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		最終覆土				側部低透水性覆土	充填砂	中間覆土	設計要件	
	技術要件 (必要な特性)	設計項目	保護土層	掘削抵抗性層	低透水性土層	基礎層					
漏出低減機能 ^{※4}	透水特性	低透水性	透水係数	—	—	○	—	○	—	—	必要な透水係数を有すること。 ^{※2}
			厚さ	—	—	○	—	○	—	—	必要な厚さを有すること。 ^{※3}
漏出低減機能を維持するための要求機能	機能維持特性	変形 ^{※1} 追従性	透水係数	—	—	○	—	○	—	—	廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
			厚さ	—	—	○	—	○	—	—	廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
		化学的 ^{※1} 安定性	透水係数	—	—	—	—	○	—	—	廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
遮蔽機能 ^{※4}	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	—	—	—	—	—	—	○	被ばく低減のために必要な遮蔽性能を有すること。
			厚さ	—	—	—	—	—	—	—	○

※1：影響要因及び影響機構を第3表に整理している。

※2：低透水性土層及び側部低透水性覆土は 1.0×10^{-10} m/sの透水係数を施工時点で確保する。

※3：低透水性土層は厚さ1 m以上、側部低透水性覆土は横方向で厚さ0.6 m以上、中間覆土（最上段を除く）は厚さ0.2 m以上、中間覆土（最上段）は厚さ0.5 m以上を施工時点で確保する。

※4：その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるもの。

第3表 低透水性土層及び側部低透水性覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構

設計項目	長期状態における影響要因			影響機構	要求性能 (技術要件)
透水係数	有効粘土密度 ※ ¹ の変化	力学的影響	容器内に残存する空隙	容器内の空隙に起因する陥没により、低透水性土層の変位に伴う透水性が変化した領域の発生。	変形追従性
		化学的影響	モンモリロナイトの溶出	コンクリート類の廃棄物からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト材料の溶解に伴う密度低下。	化学的安定性

※1：単位体積当たりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれぞれ自身の体積で割ることにより得られる密度であり、ベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標の一つ。

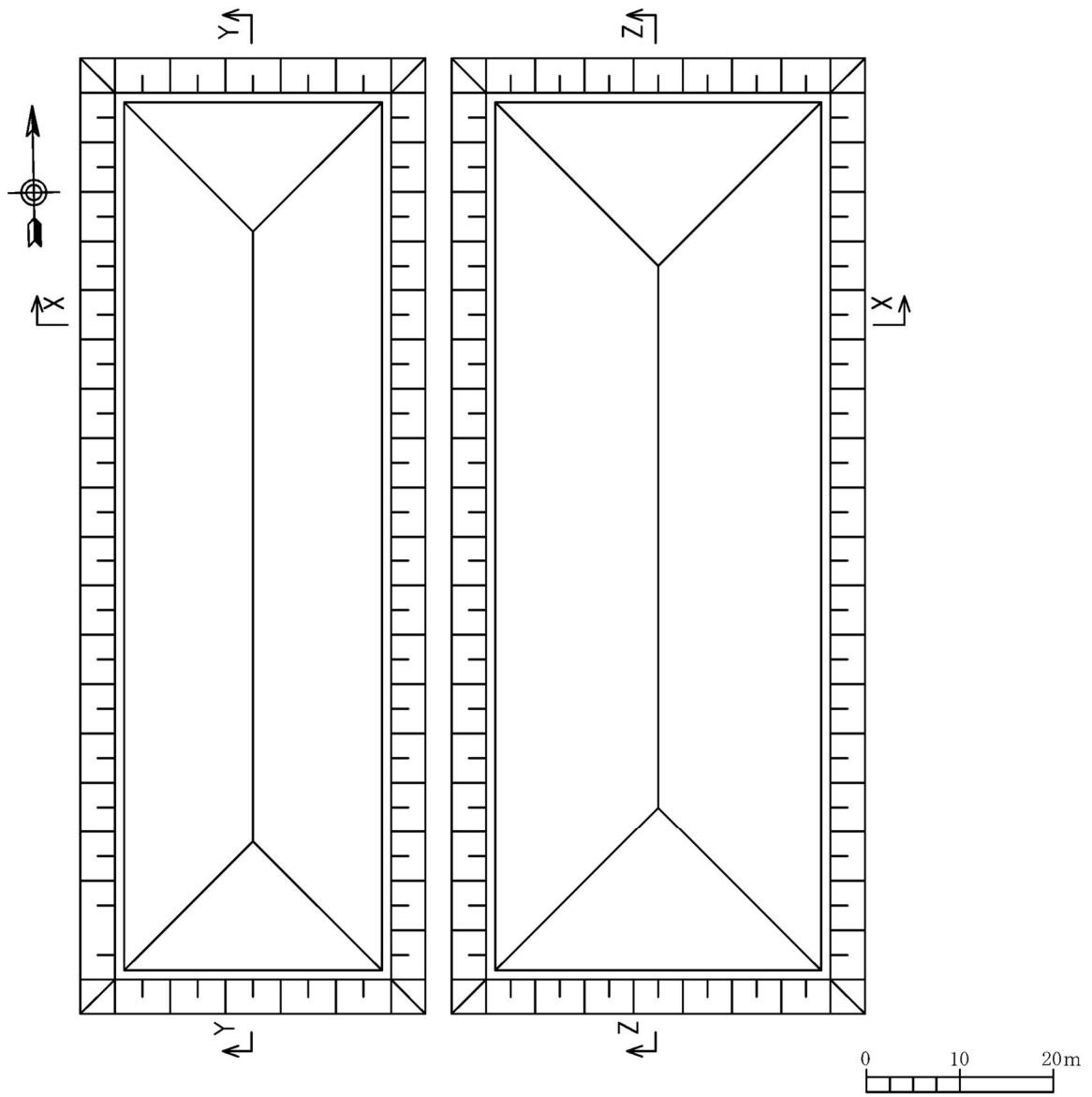
(3) 構造及び仕様

充填砂は、埋設トレンチの放射性廃棄物間及び放射性廃棄物と仕切板の空隙（側部低透水性覆土を設置しない箇所）に充填する。中間覆土は、放射性廃棄物の上部に設置する。側部低透水性覆土は、埋設トレンチの放射性廃棄物と仕切板の間に設置する。最終覆土は、最上段の中間覆土の上部に設置する。

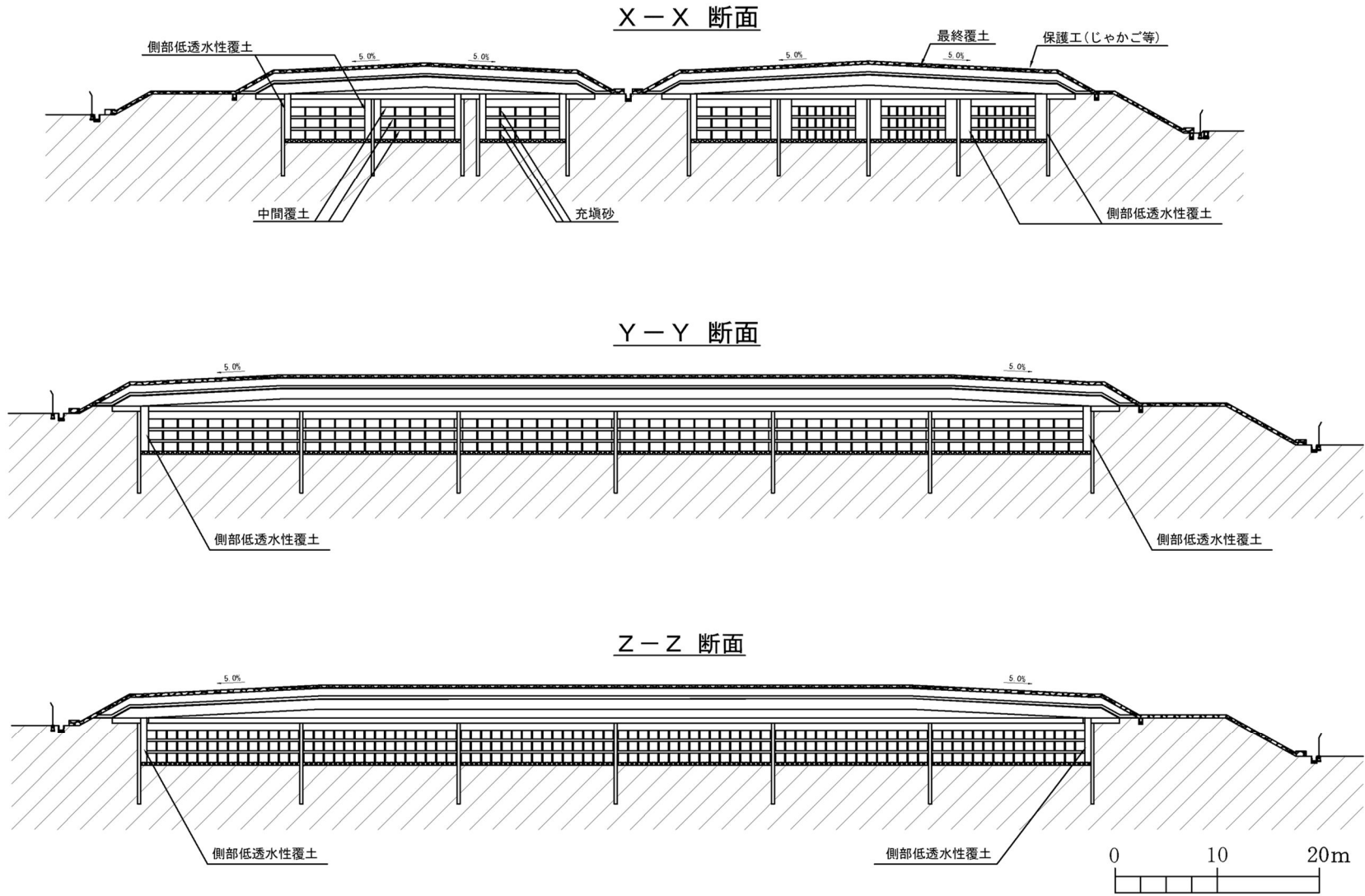
漏出低減機能を確保する観点から、覆土の低透水性は、力学的影響による長期的な性能低下に配慮した設計とする。

覆土の平面図を第5図に、覆土の断面図を第6図に、覆土の断面図（西側X-X断面）を第7図に、保護工（じゃかご等）・最終覆土断面詳細図を第8図に示す。

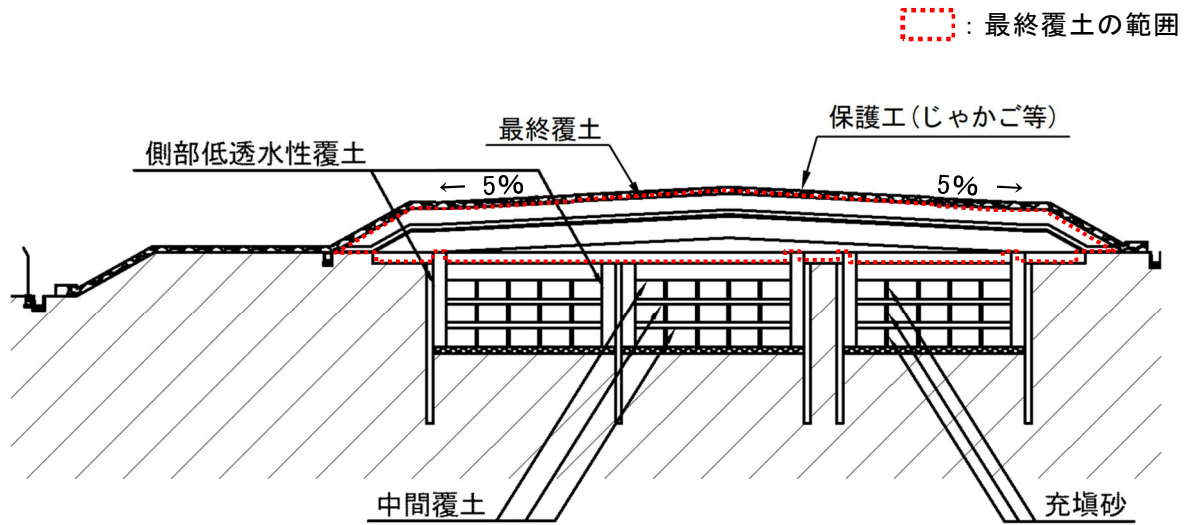
覆土の主要な部位と主要な仕様を第4表に示す。



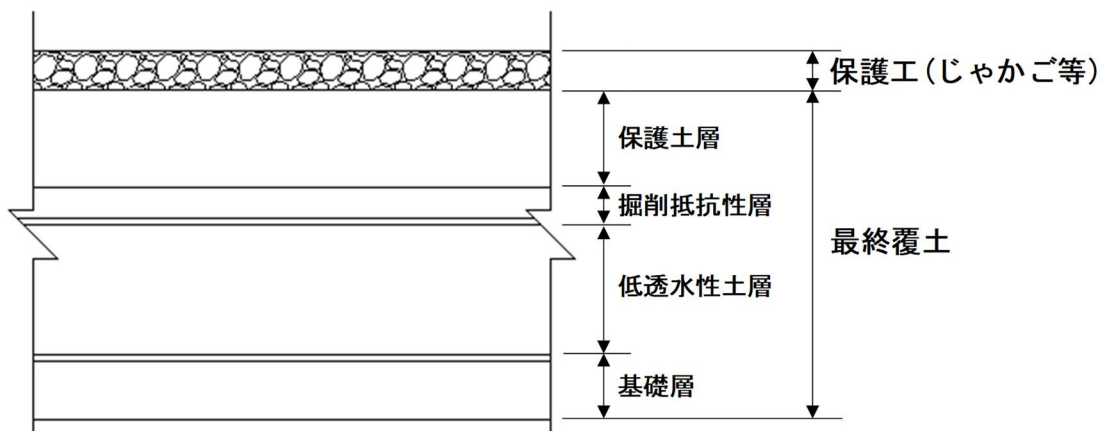
第 5 図 覆土の平面図



第 6 図 覆土の断面図



第7図 覆土の断面図（西側 X-X断面）



第8図 保護工（じゃかご等）・最終覆土断面詳細図

第4表 覆土の主要な部位及び主要な仕様

設備	主要な部位		主要な仕様
覆土	最終覆土	保護土層	<ul style="list-style-type: none"> 材料：砂又は砂質土（現地発生土を含む） 透水係数：埋設トレンチ周辺の土砂と同程度の透水係数 厚さ^{※1}：基礎層，低透水性土層及び掘削抵抗性層をあわせて2.5 m以上
		掘削抵抗性層	<ul style="list-style-type: none"> 材料：碎石又は石（栗石等の粒径が大きなもの）及び砂又は砂質土 厚さ^{※1}：0.3 m以上
		低透水性土層	<ul style="list-style-type: none"> 材料：ベントナイト混合土 透水係数^{※1}：1.0×10^{-10} m/s以下 厚さ^{※1, ※2}：1 m以上
		基礎層	<ul style="list-style-type: none"> 材料：碎石
	側部低透水性覆土	<ul style="list-style-type: none"> 材料：ベントナイト混合土 透水係数^{※1}：1.0×10^{-10} m/s以下 厚さ^{※1}：0.6 m以上 	
	中間覆土	<ul style="list-style-type: none"> 材料：砂又は砂質土（現地発生土を含む） 厚さ^{※1}：0.5 m以上（最上段），0.2 m以上（最上段を除く） 密度：1,300 kg/m³以上 	
	充填砂	<ul style="list-style-type: none"> 材料：砂又は砂質土（現地発生土を含む）。ただし，流動性を期待できるもの 	

※1：施工時点の値

※2：埋設トレンチ上部の厚さ

a. 最終覆土

(a) 概要

最終覆土は、保護土層、掘削抵抗性層、低透水性土層及び基礎層により構成し、最上段の中間覆土の上部に設置する（第7図及び第8図参照）。

なお、保護土層の表面は侵食を抑制する観点から、最終覆土の上部に割栗石等を主材料とした保護工（じゃかご等）を設置する。また、廃棄物埋設地直上において掘削作業が計画された場合、表面に保護工（じゃかご等）が設置されていることにより、その下部に埋設物が存在していることを察し、計画変更に至ることを期待する。各層の役割等については以下のとおり。

i. 保護土層

保護土層は、低透水性土層（ベントナイト混合土）の乾燥を軽減するとともに侵食を防護することを目的として、砂又は砂質土（現地発生土を含む）により構成した層を掘削抵抗性層の上部に設置する。

ii. 掘削抵抗性層

掘削抵抗性層は、下層の低透水性土層（ベントナイト混合土）上面の勾配により浸透した雨水が横方向に排水される働きを阻害しないように、主材料として碎石又は石（栗石等の粒径が大きなもの）及び砂又は砂質土により構成した層を低透水性土層の上部に設置する。

なお、保護土層の土粒子が掘削抵抗性層に流出し、保護土層の下部が削れるパイピング（流体浸食）及び掘削抵抗性層の目詰まりを防止するために、掘削抵抗性層内の上部に粒調碎石等を用いて構成

する。

また、掘削抵抗性層は、廃棄物埋設地直上における掘削作業が進められた場合、その途中で他の材料物性と異なる掘削抵抗性層を認知し、その後の作業の継続を抑制させることを期待する。

iii. 低透水性土層

低透水性土層は、埋設トレンチへの雨水等の浸透水量を低減することにより、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減することを目的として、基礎層の上部に設置する。

なお、低透水性土層は、埋設する放射性廃棄物のうち金属類を収納する容器等である鉄箱（鉄箱に収納する廃棄物の隙間には砂を充填して陥没防止を図っている。）が、万が一陥没して低透水性土層の漏出低減機能が喪失することのないように、長期的な状態維持を考慮し、長期的に性質が安定し、自己修復性（地盤追従性）を持った天然材料であるベントナイトと砂を母材としたベントナイト混合土で構成する。

iv. 基礎層

基礎層は、低透水性土層等の設置時の反力確保等を目的として、碎石により構成した層を最上段の中間覆土の上部に設置する。

(b) 設計方針

最終覆土には、最終覆土完了後から廃止措置の開始までの間の漏出低減機能を求める。

漏出低減機能に対しては、透水特性を確保し、埋設トレンチへの雨水等の浸透水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。

漏出低減機能を維持するための変形追従性は、廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(c) 仕様

i. 透水特性

低透水性土層は、 1.0×10^{-10} m/s 以下の透水係数を施工時点で確保する。また、埋設した放射性廃棄物の空隙に起因する沈下に伴い鉛直方向に変形した場合でも低透水性を維持できるよう、低透水性土層の厚さは、1 m 以上とする。

最終覆土のうち掘削抵抗性層の厚さは、0.3 m 以上とする。

最終覆土のうち保護土層は、施工時点において周辺の土壌と同程度の透水係数を目安に確保する。また、保護土層の厚さは、基礎層、低透水性土層及び掘削抵抗性層をあわせて 2.5 m 以上とする。

ii. 機能維持特性

①変形追従性

力学的影響により低透水性土層が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設トレンチへの雨水等の浸透水量の増加を抑制する設計とする。

b. 側部低透水性覆土

(a) 概要

側部低透水性覆土は、廃棄物埋設地の横方向から埋設トレンチへの雨水等の浸透水量を低減することにより、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減することを目的として、埋設トレンチの放射性廃棄物と仕切板の間に設置する（第 6 図及び第 7 図参照）。

なお、側部低透水性覆土は、長期的な状態維持を考慮し、長期的に性質が安定し、自己修復性（地盤追従性）を持った天然材料であるベントナイトと砂を母材としたベントナイト混合土で構成する。

(b) 設計方針

側部低透水性覆土には、埋設する放射性廃棄物の受入れ開始から廃止措置の開始までの間の漏出低減機能を求める。

漏出低減機能に対しては、透水特性を確保し、埋設トレンチへの雨水等の浸透水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。

漏出低減機能を維持するための変形追従性及び化学的安定性は、廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(c) 仕様

i. 透水特性

側部低透水性覆土は、 1.0×10^{-10} m/s 以下の透水係数を施工時点で確保する。また、側部低透水性覆土の厚さは、0.6 m 以上とする。

ii. 機能維持特性

①変形追従性

力学的影響により側部低透水性覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設トレンチへの雨水等の浸透水量の増加を抑制する設計とする。

②化学的安定性

化学的影響により側部低透水性覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質材料を使用する。

c. 中間覆土

(a) 概要

中間覆土は、砂又は砂質土（現地発生土を含む）により構成し、放射性廃棄物の上部に設置する（第6図及び第7図参照）。

(b) 設計方針

中間覆土には、中間覆土施工後から廃止措置の開始までの間の遮蔽機能を求める。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

(c) 仕様

i. 遮蔽性

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減できるような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,300 \text{ kg/m}^3$ 以上、中間覆土（最上段を除く）の厚さは 0.2 m 以上、中間覆土（最上段）の厚さは 0.5 m 以上とする。

d. 充填砂

(a) 概要

充填砂は、埋設トレンチの放射性廃棄物の間に充填する砂であり、埋設トレンチの放射性廃棄物間及び放射性廃棄物と仕切板の空隙（側部低透水性覆土を設置しない箇所）に有害な空隙が残らないようにする（第7図参照）。

(b) 設計方針

充填砂は、充填後に有害な空隙が残らないように、充填時に流動性を期待できる土質材料を使用する。

(c) 仕様

充填砂は、砂又は砂質土（現地発生土を含む）のうち、流動性を期待できるものとする。

3. 2. 2 表面遮水

(1) 構成及び安全機能

表面遮水は、遮水シートにより構成する。

表面遮水の透水特性により放射性物質の漏出を低減する。

(2) 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

設定した要求性能及び設計要件を第5表に示す。

a. 技術要件及び設計項目

(a) 漏出低減機能

表面遮水の漏出低減機能は、埋設トレンチ内を通過する雨水等に伴う浸透水量を低減することである。

埋設トレンチを通過する浸透水量（通過流量）は、表面遮水の透水特性によって影響を受けることから、表面遮水に対する技術要件は透水特性（低透水性）であり、その設計項目は透水係数及び厚さである。

なお、表面遮水による漏出低減機能は、最終覆土完了までの間、透水特性（低透水性）を期待するものである。

b. 設計要件

設計項目である透水係数及び厚さについては、要求性能を満足するための設計要件を設定する。

第 5 表 表面遮水の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		表面遮水	設計要件
	技術要件 (必要な特性)			
漏出低減機能 ^{※3}	透水特性	低透水性	透水係数	○ 必要な透水係数を有すること。 ^{※1}
			厚さ	○ 必要な厚さを有すること。 ^{※2}

※1： 1.0×10^{-10} m/s 以下の透水係数を確保する。

※2：厚さ 1.5 mm 以上を確保する。

※3：その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるもの。

(3) 構造及び仕様

表面遮水は、最終覆土のうち基礎層の一部を施工した後、その上面に設置する。

表面遮水の設置例を第9図に示す。

表面遮水の主要な仕様を第6表に示す。

a. 表面遮水

(a) 概要

表面遮水は、遮水シートにより構成し、最終覆土のうち基礎層の一部を施工した後、その上面に設置する（第9図参照）。

なお、遮水シートの上部は保護砕石等の保護工を施工する。

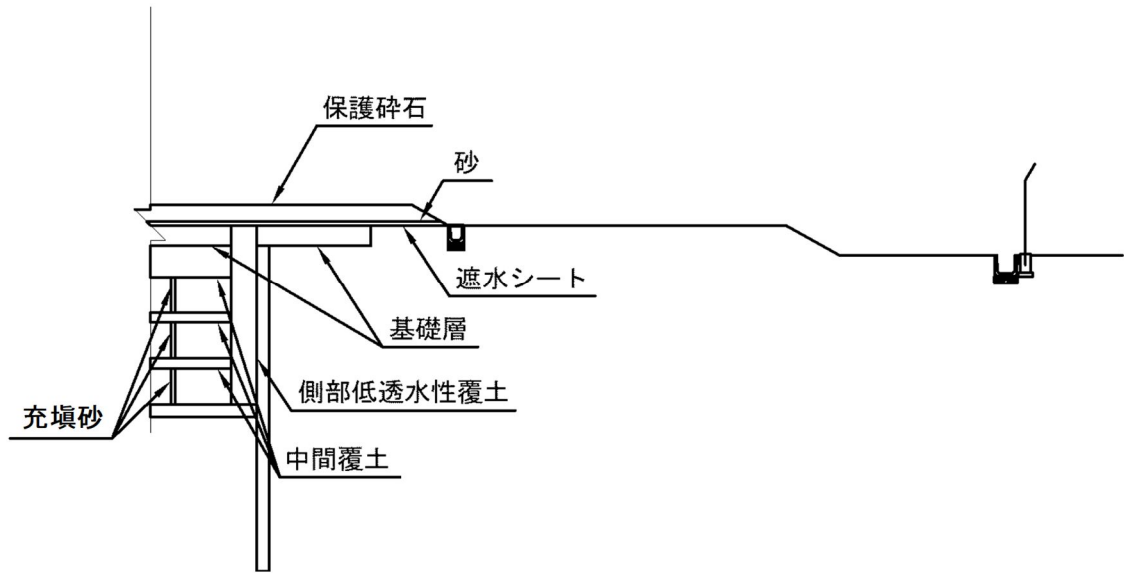
(b) 設計方針

漏出低減機能に対しては、透水特性を確保し、埋設トレンチへの雨水の浸透水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。

(c) 仕様

i. 透水特性

遮水シートは、透水係数が 1.0×10^{-10} m/s 以下の性能を有し、厚さ 1.5 mm 以上の材料を用いる。



第9図 表面遮水の設置例

第 6 表 表面遮水の主要な仕様

設備	主要な部位	主要な仕様
表面遮水	遮水シート	材料：合成ゴム及び合成樹脂系 透水係数： 1.0×10^{-10} m/s 以下 厚さ：1.5 mm 以上

3. 2. 3 雨水防止テント

(1) 構成

雨水防止テントは、テント支柱・梁及び膜材により構成する。

(2) 構造及び仕様

雨水防止テントは、放射性廃棄物の受入れを行う区画の上面に設置する。

雨水防止テントの設置例を第 10 図に示す。

a. 概要

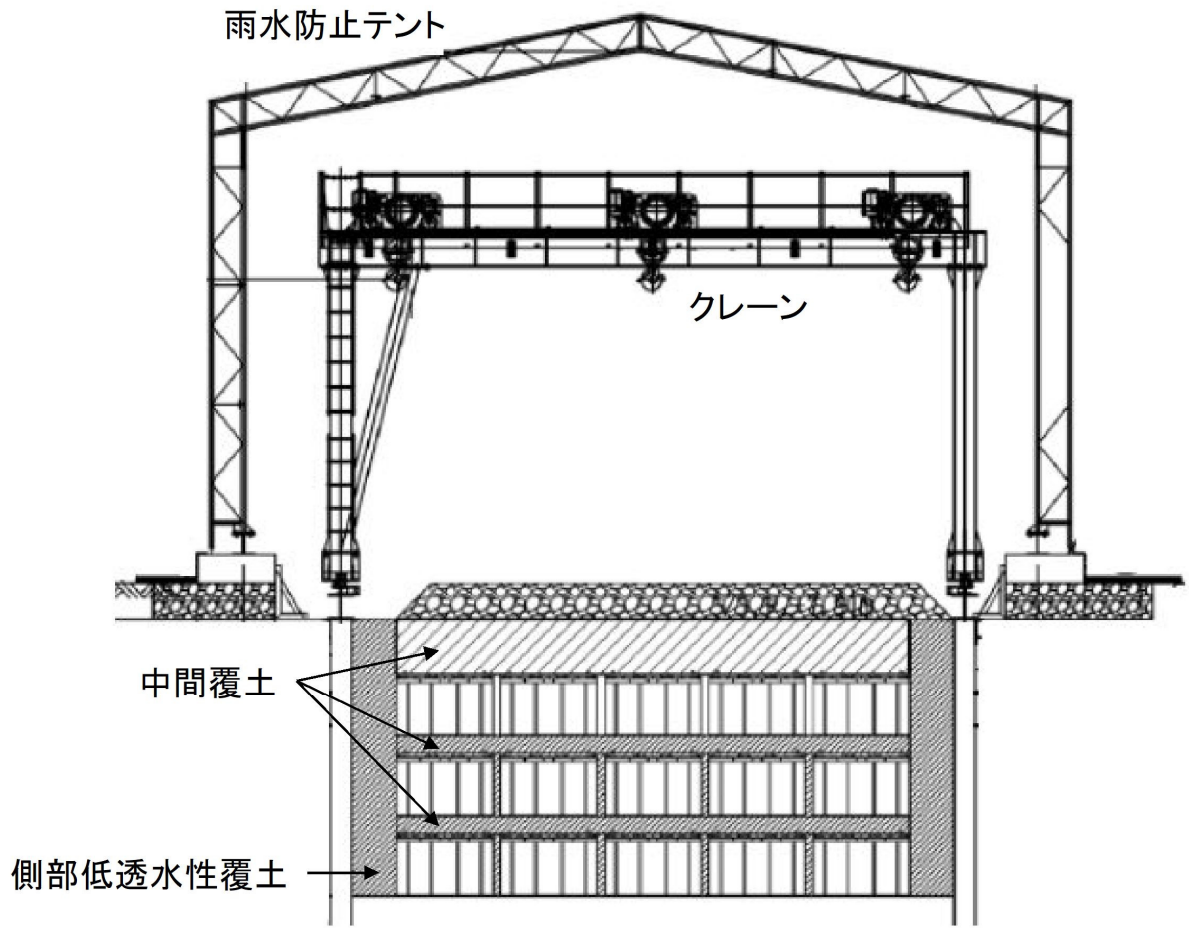
雨水防止テントは、テント支柱・梁及び膜材により構成し、放射性廃棄物の受入れを行う区画の上面に設置する（第 10 図参照）。

b. 設計方針

埋設トレンチへの雨水等の浸入を抑制するために、耐水性を考慮した設計とする。

c. 仕様

膜材には、耐水性及び耐候性を有するシートを用いる。



第 10 図 雨水防止テントの設置例

3. 2. 4 雨養生

(1) 構成

雨養生は、シートにより構成する。

(2) 構造及び仕様

雨養生は、最終覆土の設置において表面遮水を撤去したエリアに設置する。

雨養生の設置例を第 11 図に示す。

a. 概要

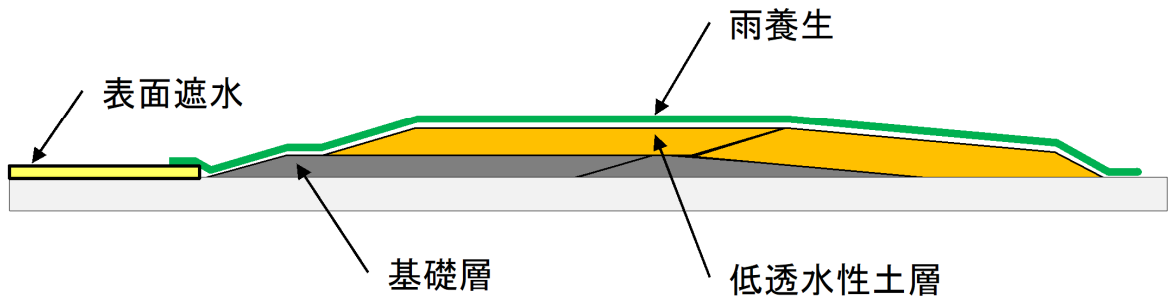
雨養生は、シートにより構成し、最終覆土の設置において表面遮水を撤去したエリアに設置する（第 11 図参照）。

b. 設計方針

埋設トレンチへの雨水等の浸入を抑制するために、耐水性を考慮した設計とする。

c. 仕様

雨養生は、耐水性及び耐候性を有するシートを用いる。



第 11 図 雨養生の設置例

3. 2. 5 排水溝

(1) 構成

排水溝は，側溝により構成する。

(2) 構造及び仕様

排水溝は，最終覆土の法尻部に設置する。

排水溝の設置例を第 12 図に示す。

a. 概要

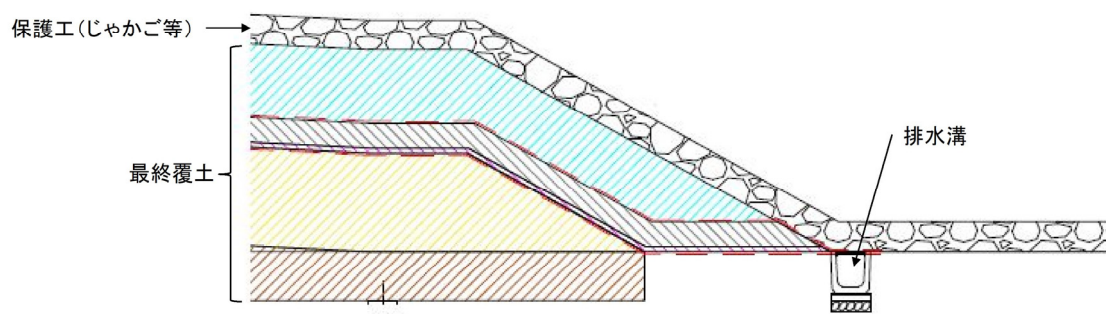
排水溝は，側溝により構成し，最終覆土の法尻部に設置する（第 12 図参照）。

b. 設計方針

排水溝を設置することにより，最終覆土の表面を流下する雨水等を廃棄物埋設地の外に排水する設計とする。

c. 仕様

排水溝は，廃棄物埋設地の外に排水できるものとする。



第 12 図 排水溝の設置例

3. 2. 6 保護工（じゃかご等）

（1）構成

保護工（じゃかご等）は，割栗石を主材料として構成する。

（2）構造及び仕様

保護工（じゃかご等）は，最終覆土の上部に設置する。

保護工（じゃかご等）の設置例を第7図及び第8図に示す。

a. 概要

保護土層の侵食を防止するため，保護工（じゃかご等）を設置する。

保護工（じゃかご等）は，割栗石等を主材料として構成し，最終覆土の上部に設置する（第7図及び第8図参照）。また，廃棄物埋設地直上において掘削作業が計画された場合，表面に保護工（じゃかご等）が設置されていることにより，その下部に埋設物が存在していることを察し，計画変更に至ることを期待する。

b. 設計方針

保護土層の侵食を防止するために，降雨時の雨滴が直接保護土層に落下しない設計とする。

c. 仕様

保護工（じゃかご等）は，割栗石を用いる。

4 参考文献

- (1) Solid Waste Disposal Facility Criteria, Technical Manual,
Environmental Protection Agency (1993)
- (2) 日本道路協会 (2009) : 道路土工要綱
- (3) 日本道路協会 (2010) : 道路土工－盛土工指針
- (4) 国土技術研究センター (2009) : 河川土工マニュアル

以上

侵食評価

目 次

1	侵食.....	1
1. 1	風（台風）及び風化による保護工（じゃかご等）への影響.....	1
1. 1. 1	風（台風）による影響評価.....	1
1. 1. 2	風化による影響評価.....	5
1. 2	侵食による保護土層への影響.....	6
1. 2. 1	保護土層で想定される侵食.....	6
1. 2. 2	保護土層の侵食量の算出.....	7
1. 2. 3	侵食による影響.....	32
2	参考文献.....	33

1 侵食

侵食による廃棄物埋設地の低透水性土層及び側部低透水性覆土の低透水性への影響を確認する。

低透水性を有する低透水性土層及び側部低透水性覆土の上部には掘削抵抗性層及び保護土層がある。このうち、侵食により保護土層は土砂が流出する可能性があるため、保護土層の侵食評価を行う。

また、保護土層の上部には保護工（じゃかご等）があることから、保護土層の侵食評価に当たり保護工（じゃかご等）の効果を考慮する。このため、保護工（じゃかご等）に影響を及ぼす可能性のある自然現象として、風（台風）及び風化による影響を評価する。

1. 1 風（台風）及び風化による保護工（じゃかご等）への影響

1. 1. 1 風（台風）による影響評価

（1）評価方針

低透水性土層及び側部低透水性覆土の上部に保護土層を設置し、保護土層の表面の侵食を抑制する観点から保護工（じゃかご等）を設置する。保護工（じゃかご等）は線材の中に中詰材として割栗石（粒径 0.05 m ～ 0.15 m を想定）を充填したものである。線材の長期間の健全性を評価するのは困難であるため、線材は考慮せず、割栗石のみを考慮する。

風（台風）による影響として保護工（じゃかご等）の割栗石の飛散が考えられるため、飛散発生の有無を評価する。

（2）評価方法

西村他⁽¹⁾による飛散条件の式を用いて、風（台風）により割栗石が動き出す風速を算出し、廃棄物埋設地周辺における日最大瞬間風速と比較する。

西村他⁽¹⁾に基づき、以下のとおり U を求める。

$$\frac{1}{2}\rho_a U^2 C_F = \rho_m \ell g l$$

$$U = \sqrt{\frac{2\rho_m \ell g l}{\rho_a C_F}} \quad \dots (1) \text{ 式}$$

ここで、

U : 割栗石が動き出す風速 (m/s)

また、割栗石が動き出す風速の算出に用いた係数は第1表のとおり設定する。

第 1 表 割栗石が動き出す風速の算出に用いた係数

記号	値	単位	備考
ρ_a	1.205	kg/m ³	空気密度 理科年表（平成 26 年度版） ⁽²⁾ に記載されている空気密度（20℃，760 torr）を適用する。
C_F	1	—	空気力係数 西村他 ⁽¹⁾ によると，コンパクトな物体では， C_F はさまざまな方向に回転することにより時間とともに変化するが，平均的な空気力係数に近くなり， C_F の値は 1 に近づく。
ρ_m	2,640	kg/m ³	割栗石密度 林他 ⁽³⁾ に記載されている，稲田花崗岩（茨城県）の湿潤密度を代表値として設定。
ℓ	0.05	m	割栗石の最小粒径
	0.15	m	割栗石の最大粒径
g	9.8	m/s ²	重力加速度
I	1	—	固定強度のパラメータ 西村他 ⁽¹⁾ によると， I は広い定義の摩擦係数で，置かれているだけの「ルーズ」な物体では 1 である。

(3) 評価結果

(1) 式により算出した割栗石が動き出す風速を第2表に示す。

割栗石の最小粒径 0.05 m であっても、風（台風）により割栗石が動き出す風速は 46.4 m/s であった。

廃棄物埋設地周辺において想定する風速として、平年値を算出する期間である 1991 年から 2020 年までの 30 年間の水戸地方気象台の観測記録から、日最大瞬間風速の最大値である 36.3 m/s (1996 年 9 月 22 日) を採用して比較した結果、風（台風）により割栗石が動き出す風速を下回ることから、割栗石が動き出すことはない。なお、平年値は、その時々気象や天候を評価する基準として利用されるとともに、その地点の気候を表す値として用いられることから、平年値を算出する期間から観測記録の最大値を採用した。

以上より、風（台風）により割栗石が飛散することはない、保護工（じゃかご等）への影響はない。

なお、風速 36.3 m/s で動き出す割栗石の粒径は 0.031 m であった。

第2表 割栗石が動き出す風速

割栗石の粒径 ℓ (m)	割栗石が動き出す風速 U (m/s)
0.05	46.4
0.15	80.3

1. 1. 2 風化による影響評価

風化により、廃棄物埋設地の最上部の保護工（じゃかご等）の割栗石への影響の可能性がある。

松倉⁽⁴⁾によると、割栗石の原料として想定する花崗岩の風化速度は2.9～15（mm／1,000年）とされている。割栗石の最小粒径は50 mmであるため、1,000年間の最も保守的な条件では、割栗石の最小粒径は35 mmとなる。

このため、保護工（じゃかご等）表層部の割栗石の風化が想定されるものの、保護工（じゃかご等）全体への影響はない。なお、割栗石の原料の別の候補として想定する安山岩の風化速度は5.6～9（mm／1,000年）であり、最大値は花崗岩よりも小さい。

1. 2 侵食による保護土層への影響

1. 2. 1 保護土層で想定される侵食

北原⁽⁵⁾によると、降雨による侵食は以下のとおりとされている。

最初に雨滴衝撃による土粒子の飛散から開始される。降雨開始後間もなくあるいは浸透能のよい土壌の場合には、雨滴衝撃による侵食が発生するが、侵食量はごく僅かである。

降雨が続き土壌の浸透能を降雨強度が上回ると、土壌中に浸透できなくなった雨滴は表流水となって流下し始める。流速が増してもそれだけでは土粒子は剥離されにくく、表流水による侵食の侵食量は小さい。

表流水に雨滴が当たったものを雨水流と呼び、雨水流が侵食を飛躍的に増大させる。表流水に雨滴が当たると、表流水中に直径1cm～数cmの半球形のくぼみ（水中ドーム）が形成される。この水中ドームが形成される際と解消される際に、表流水の水底の土粒子が水中ドームの底から巻き上げられる。水中ドームによって巻き上げられた土粒子は、表流水によって運搬される。すなわち雨水流とは、雨滴が土粒子を水中に巻き上げ、表流水がその土粒子を運搬するものであり、斜面全体で雨水流による侵食が発生する。

降雨による侵食で形成された微小なくぼみに水が集まり、水の掃流力により洗掘されることでリル侵食が発生する。リル侵食は斜面下部に流下する際、隣のリルと合流して太いリルとなっていく。合流によって流量流速が増したリルは、傾斜の転換点を掃流により選択的に侵食し、ここが起点となってガリ侵食が発生する。

廃棄物埋設地では、雨滴は保護工（じゃかご等）表面に落下する。このため、保護土層においては、雨滴衝撃による侵食は発生しないと考えられる。また、表流水に雨滴が当たることはないため、雨水流による侵食は発生しないと考えられる。

一方、表流水による侵食については、侵食量は小さいものの、割栗石によって保護土層表面の流路が制限されることにより表流水の流速が増し、侵食が発生する可能性がある。また、表流水による侵食で形成された微小なくぼみに水が集まり、水の掃流力により洗堀されることでリル侵食に発展する可能性がある。

以上より、表流水による侵食及び表流水による侵食が発展したリル侵食の発生を想定して、保護土層の侵食量を算出する。

1. 2. 2 保護土層の侵食量の算出

(1) 評価方針

保護土層の侵食量については、気象、地形、地質、保護などの要因を考慮した侵食量予測式を用いて算出することが可能である。

Solid Waste Disposal Facility Criteria, Technical Manual, Environmental Protection Agency (1993)⁽⁶⁾ (以下「E P A (1993)」という。)によると、地表水流による土壌流亡量の予想は、“USDA Universal Soil Loss Equation (以下「U S L E」という。)”を用いて算出できるとされている。

E P A (1993)⁽⁶⁾で示されているU S L Eは、Agriculture Handbook No.537 (1978), United States Department of Agricultureにて提示され、Agriculture Handbook No.703 (1997), United States Department of Agriculture⁽⁷⁾ (以下「A H703」という。)にて、Revised Universal Soil Loss Equation (以下「R U S L E」という。)に改訂された。また、User's Reference Guide, Revised Universal Soil Loss Equation Version 2⁽⁸⁾ (R U S L E 2) (2008) (以下「U G 2008」という。)が発行されている。

以上を踏まえて、EPA(1993)⁽⁶⁾の方針に基づき、AH703⁽⁷⁾及びUG2008⁽⁸⁾を参照して、USLE(USLE, RUSLE, RUSLE2をまとめて以下「RUSLE」という。)を用いた保護土層の侵食量を算出する。

評価対象は、侵食が想定される保護土層とし、保護土層の勾配と面積を考慮して、勾配5%で最も面積が大きくなる斜面(以下「勾配5%面」という。)及び勾配約56%で最も面積が大きくなる斜面(以下「勾配56%面」という。)の2つを対象とし、各面の侵食量を算出する(第1図参照)。

(2) RUSLEの適用

RUSLEは、長期間の年平均土壌損失量を予測するものである。

RUSLEでは、リル侵食及びリルとリルとの間におけるインターリル侵食(保護土層においては表流水による侵食)を対象とした傾斜モデルを用いて、リル侵食及びインターリル侵食による土壌損失量を算出する⁽⁸⁾。土壌損失量の算出においては、評価対象の土地利用状況、気象条件、保護管理手法等を反映して固有の係数を設定するとしており、具体的には、農地や建設地の侵食性、勾配等の地形要素、牧草地や森林の保護、耕作地の保全管理手法、侵食抑制対策の改善等の要素を考慮する⁽⁷⁾。また、侵食面の保護として、植生、落葉、コケ、礫、石、岩片等が例示されており、特に岩石カバーについては、植生と同様に侵食を抑制するとされている⁽⁸⁾。

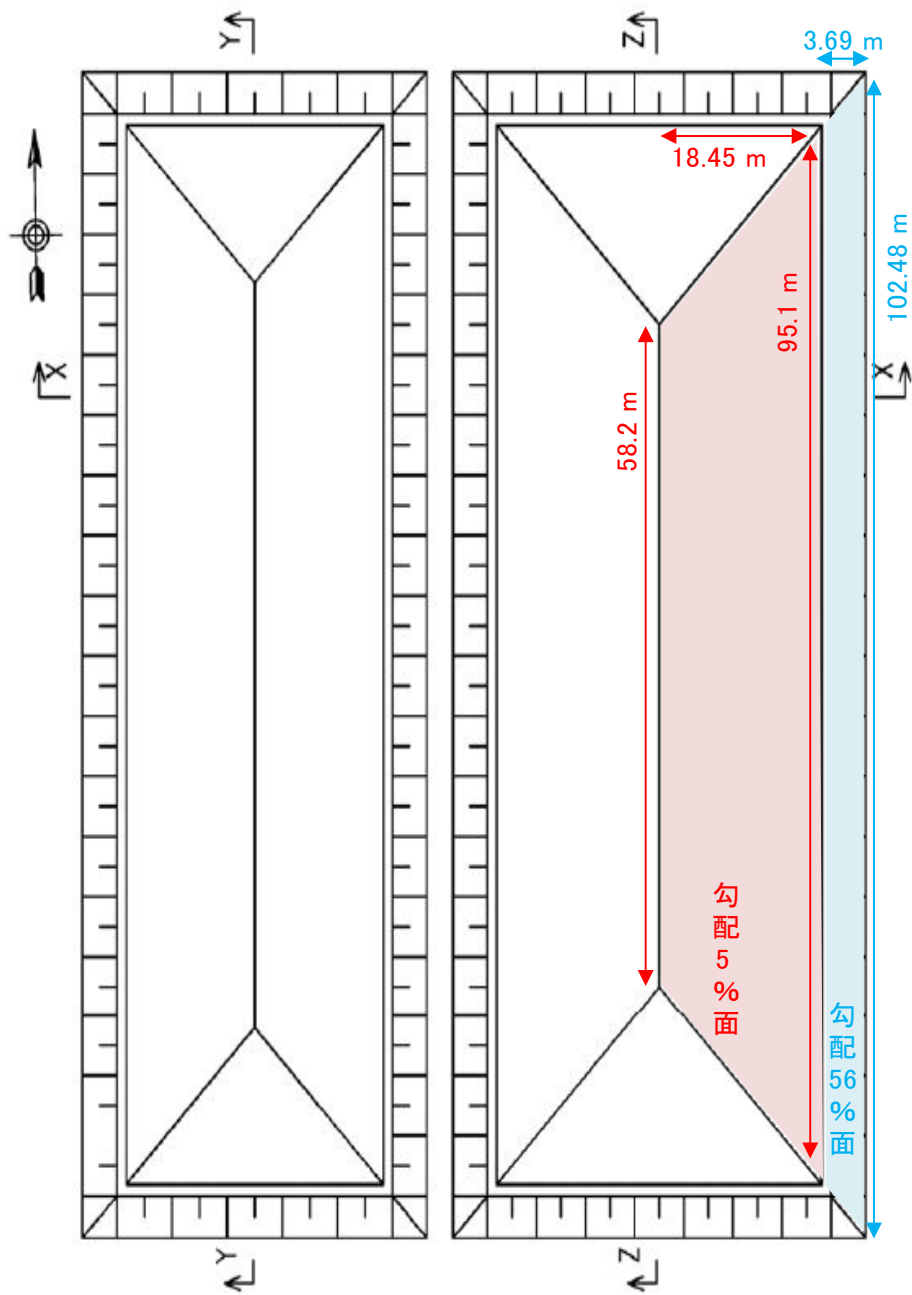
Ground coverは、地表面に直接置かれた物質であり、地表面の流水の速度を落とし、雨滴や水滴を阻止する。岩片はGround coverの一例である。その効果はGround cover subfactorの式で表されるとされている⁽⁸⁾。

EPA(1993)⁽⁶⁾では、USLEを用いて侵食量を算出することで設計を最適化すべきとされている。また、最終覆土の浸透層(低透水性層)の

設計要件を満たしていれば、植生を施す侵食層の代わりに礫や石の表面保護材を使用し、厚さも変えることができるとされている⁽⁶⁾。

以上を踏まえて、表流水による侵食及び表流水による侵食が発展したり、
ル侵食の発生を想定した保護土層の侵食評価として、RUSLEを適用し、
廃棄物埋設地の設計を考慮した固有のパラメータを設定して侵食量を算出
する。

固有のパラメータとして、降雨侵食係数 (R)、土壌侵食係数 (K)、傾斜
長及び勾配係数 (LS)、保護管理係数 (C) を設定する。降雨侵食係数 (R)
の設定に当たり、廃棄物埋設地周辺の降水量を反映する。土壌侵食係数 (K)
の設定に当たり、保護土層の土砂の粒径、粒度分布、構造、透水性を反映
する。傾斜長及び勾配係数 (LS) の設定に当たり、廃棄物埋設地の勾配及
び長さを反映する。保護管理係数 (C) の設定に当たり、施工する保護工 (じ
ゃかご等) の設計を反映する。なお、廃棄物埋設地の最上部の保護工 (じ
ゃかご等) は、RUSLEにおける Ground cover に相当し、保護工 (じゃ
かご等) による影響は g_c (Ground cover) に反映する。



第 1 図 廃棄物埋設地 平面図

(3) 評価方法

侵食量の算出にはAH703⁽⁷⁾の「1-2式」より(2)式を用いる。

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \cdots (2) \text{式}$$

ここで、

A : 1ヘクタール当たりの年間侵食重量 (t)

R : 降雨侵食係数

降雨の運動エネルギー及び降雨強度の2つの特性の関数として
与えられる一年間の降雨の侵食性を表すパラメータ

K : 土壌侵食係数

単位降雨当たりの流亡土量を与える係数で、その地域の土壌の
受食性を示すパラメータ

LS : 傾斜長及び勾配係数

傾斜地における勾配と斜面長が侵食に及ぼす影響を表すパラメ
ータ。なお、(2)式では、AH703⁽⁷⁾の「1-2式」より「 $L \cdot S$ 」
と記載しているが、AH703⁽⁷⁾の評価手法に基づき、係数は L
(傾斜長係数)と S (勾配係数)を合わせて LS とする。

C : 保護管理係数

作物被覆と営農管理の影響を表す係数で、裸地区に対する流亡
土量の比

P : 補助手法係数

畝立て、台地での耕作、傾斜栽培など、耕作の補助手法の影響
を表すパラメータ

R , K , LS , C , P については、廃棄物埋設地周辺の環境及び廃棄物埋設

地の設計を考慮して以下のとおり設定する。

a. 降雨侵食係数 (R)

AH703⁽⁷⁾の「Appendix B」に基づき、 R を求める。

R は過去の降雨記録より計算する。 R が大きいほど厳しい評価となるため、平年値を算出する期間である1991年から2020年までの30年間の水戸地方気象台の観測記録から、保守的に最も降水量が多かった1991年の降雨記録を用いる。

R は、降雨の開始から終了までの一連続降雨における $E \times I_{30}$ を計算し、一年間の全ての一連続降雨の $E \times I_{30}$ を合算することにより求める。なお、AH703⁽⁷⁾では6時間以上の降雨がない場合を降雨終了としているため、本評価においては、気象庁の記録より降水量が0の場合が6時間以上継続する場合を降雨終了とする。

以下のとおり、各一連続降雨の $E \times I_{30}$ を計算する。

$$e_k = 916 + 331 \text{Log}_{10}(i_r) \quad \cdots (3) \text{式}$$

より、細山田他⁽⁹⁾に基づきメートル単位の式に換算する。

$$e_k = 210 + 89 \text{Log}_{10}(i_r) \quad \cdots (4) \text{式}$$

ここで、

e_k : 60分間の1 cmあたり降雨エネルギー (m・t/ha/cm)

i_r : 60分間降雨強度 (cm/h)

なお、記録の入手が可能な60分間の降水量を用いる。

$$E = e_k \times r \quad \cdots (5) \text{式}$$

ここで,

E : 60 分間の降雨エネルギー ($\text{m} \cdot \text{t}/\text{ha}$)

r : 60 分間の降水量 (cm)

以下のとおり, 一年間の全ての一連続降雨の $E \times I_{30}$ を合算して R を求める。

$$R = \Sigma (E \times I_{30} / 100) \quad \dots (6) \text{ 式}$$

ここで,

R : 年間の一連続降雨中を合計した降雨侵食係数
($\text{m}^2 \cdot \text{t}/\text{ha}/\text{h}/\text{y}$)

I_{30} : 一連続降雨中の最大 30 分間降雨強度 (cm/h)

なお, 記録の入手が可能な一連続降雨中の最大 60 分間降雨強度 (cm/h) を用いる。

R と土壤侵食係数 (K) との単位を合わせるため, $1 (\text{m}^2 \cdot \text{t}) = 9.80665 (\text{MJ} \cdot \text{mm})$ を用いて単位を ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha}/\text{h}/\text{y}$) に変換する。

以上より, 降雨侵食係数 (R) を第 3 表のとおり設定する。

第 3 表 降雨侵食係数 (R)

	勾配 5% 面	勾配 56% 面
降雨侵食係数 (R) ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{ha}/\text{h}/\text{y}$)	4,698	

b. 土壌侵食係数 (K)

土壌は、土壌固有の特性により侵食に対して固有の侵食性をもつ。土壌侵食係数 (K) は、長期間の平均的な土壌固有の侵食性を表すパラメータである。土壌侵食係数 (K) の測定は、除草や土壌のクラスト防止のための耕耘を定期的に行い、長期間の連続休耕状態を維持している単位区画において行われる。このため、雨滴の衝突、表流水による土粒子の剥離、土粒子の運搬、地形や粗度による局所的な堆積、浸透といった、侵食や水理的影響への土壌固有の侵食性は、土壌侵食係数 (K) に統合され、年平均値として表される。土壌侵食係数 (K) の測定が困難な場合に、土壌特性に基づき土壌侵食係数 (K) を算出する手法としては、Soil Erodibility Nomograph が広く用いられる。これは、土壌特性として、Percent organic matter (%), silt & very fine sand (%), silt & sand (%), Class for structure 及び Permeability の5つのパラメータを用いて、土壌侵食係数 (K) を得るものである。また、土壌のシルト率が70%を超えない場合は、Soil Erodibility Nomograph の近似式 (AH703⁽⁷⁾ の「3-1式」) が提案されている。⁽⁷⁾

以上より、保護土層の土壌侵食係数 (K) の算出においては、保護土層の土壌特性を反映して、AH703⁽⁷⁾ の「3-1式」に基づき、以下のとおり K を求める。

$$K = \{2.1 \times 10^{-4} \times (12 - OM) \times M^{1.14} + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)\} / 100 / 7.59 \quad \dots (7) \text{式}$$

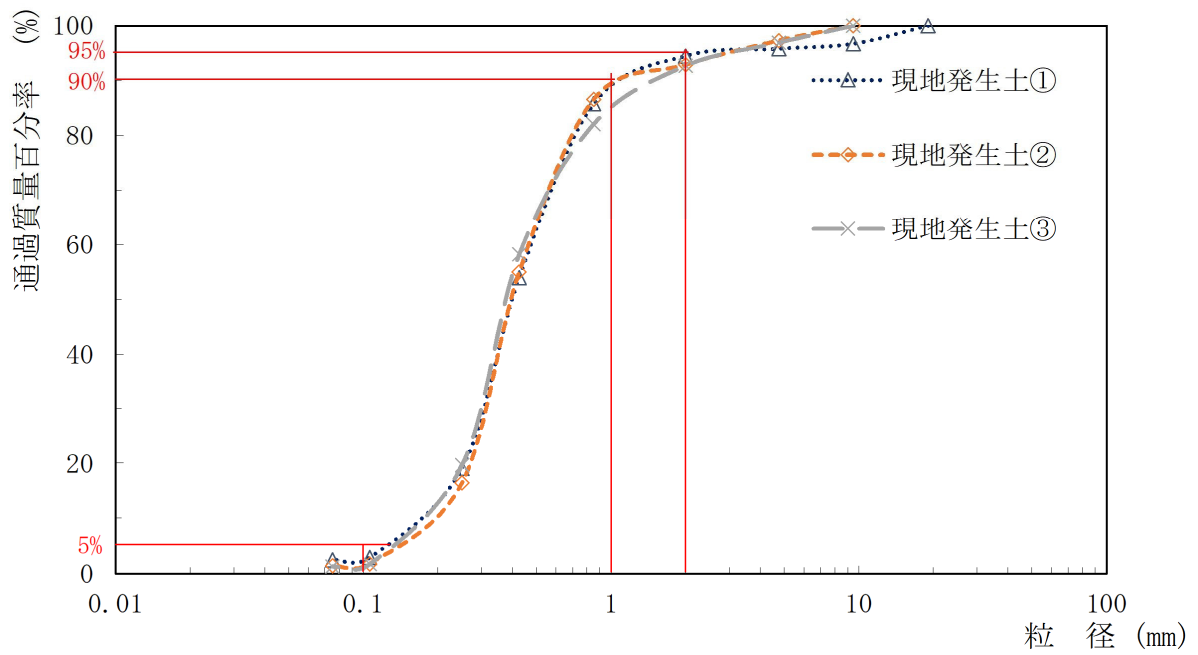
ここで、土壌侵食係数 (K) の係数は第4表のとおり設定する。

第4表 土壌侵食係数 (K) の係数

係数	値	備考
OM (%)	0	Percent organic matter (%) (有機物含有率) OMが小さいほど土壌侵食係数 (K) が大きくなり、厳しい評価となるため、保守的に0%と設定する。
M	475	Product of the primary particle size fraction (主要な粒子サイズの土粒子含有率の積) silt & very fine sand×silt & sandより算出する。
silt & very fine sand (%)	5	UG2008 ⁽⁸⁾ の「Table7.2」を参考に、保護土層の粒径0.1mm以下の土粒子の含有率とする。第2図より、粒径0.1mm以下の土粒子は数%だが、値が大きいほど土壌侵食係数(K)が大きくなり、厳しい評価となるため、保守的に5%と設定する。
silt & sand (%)	95	UG2008 ⁽⁸⁾ の「Table7.2」を参考に、保護土層の粒径2mm以下の土粒子の含有率とする。第2図より、粒径2mm以下の土粒子は約90%だが、値が大きいほど土壌侵食係数(K)が大きくなり、厳しい評価となるため、保守的に95%と設定する。

係数	値	備考
s	1	<p>Class for structure (構造クラス)</p> <p>Soil Survey Manual 2017⁽¹⁰⁾の「Figure3-16, Table3-6」より、保護土層の粒径 1 mm 以下の土粒子が very fine granular に該当する。第 2 図より、保護土層は 90%が粒径 1 mm 以下なので very fine granular と判断する。A H703⁽⁷⁾の「Figure3-1, soil structure」より、very fine granular に該当する「1」と設定する。</p>
p	4	<p>Permeability (透水性)</p> <p>保護土層の透水係数を考慮して、A H703⁽⁷⁾の「Figure 3-1, permeability」より「4」と設定する。</p> <p>保護土層の飽和透水係数は 1.04×10^{-4} m/s であり、Soil Survey Manual 2017 の「table 3-22」にて「Very high」に該当するため、A H703⁽⁷⁾の「Figure 3-1」では permeability「1」に相当する。この場合、土壌侵食係数(K)はマイナスとなり侵食は発生しない評価となる。しかしながら、保護工(じゃかご等)の設置を想定した場合、保護工(じゃかご等)により保護土層表面の流路が制限されるため、単位面積あたりの表流水の流量が増加し、流速が速くなる可能性がある。この場合、保護土層表面の土粒子が剥離されやすくなり、表流水による侵食の影響が大きくなると考えられる。</p> <p>R U S L Eには表流水の流速を直接入力するパラメータはないため、表流水の流量が多くなるという観点で関連する</p>

係数	値	備考
		<p>パラメータである Permeability を保守的に設定することで、表流水による侵食の影響を考慮する。</p> <p>表面流出が発生する状態を想定して、土壌侵食係数 (K) がマイナスにならない設定として、Permeability「4」とする。</p> <p>Permeability「4」の設定は、Soil Survey Manual 2017⁽¹⁾の「table 3-22」にて「Moderately low」に相当し、飽和透水係数は 1×10^{-7} m/s から 1×10^{-6} m/s である。保護土層の飽和透水係数が 1.04×10^{-4} m/s であることを踏まえれば、単位面積あたりの表流水の流量が増加し、流速が速くなることを考慮しても、Permeability「4」の設定は保守的と考えられる。</p>



試料番号	現地発生土①	現地発生土②	現地発生土③
石分 (75mm 以上) %	0.0	0.0	0.0
礫分 (2~75mm) %	5.5	7.1	7.3
砂分 (0.075~2mm) %	92.0	91.5	91.4
細粒分 (0.075mm 未満) %	2.5	1.4	1.3
最大粒径 mm	19	9.5	9.5

(注) 保護土層には砂又は砂質土（現地発生土を含む）を用いる

第 2 図 保護土層の土粒子の粒径

以上より，土壤侵食係数（ K ）を第5表のとおり設定する。

第5表 土壤侵食係数（ K ）

	勾配 5%面	勾配 56%面
土壤侵食係数（ K ）（ $t \cdot ha \cdot h / ha / MJ / mm$ ）	0.0027	

c. 傾斜長及び勾配係数 (LS)

AH703⁽⁷⁾に基づき LS を求める。

AH703⁽⁷⁾の「4-1式」に基づき、以下のとおり L を求める。

$$L = (\lambda/72.6)^m \quad \cdots (8) \text{ 式}$$

$$m = \beta/(1 + \beta) \quad \cdots (9) \text{ 式}$$

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / \{3.0 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56\} \quad \cdots (10) \text{ 式}$$

また、AH703⁽⁷⁾の「4-4式及び4-6式」に基づき、以下のとおり S を求める。

$$S = 10.8 \times \sin \theta + 0.03 \quad \cdots (11) \text{ 式}$$

$$S = 3.0 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56 \quad \cdots (12) \text{ 式}$$

ここで、(11)式及び(12)式は、それぞれ勾配5%面及び勾配56%面の S の算出に用いる。

L (傾斜長係数) の計算結果及び係数は第6表のとおり設定する。また、 S (勾配係数) の計算結果及び係数は第7表のとおり設定する。

第6表 L (傾斜長係数) の計算結果及び係数

係数	値		備考
	勾配 5%面	勾配 56%面	
L	0.93	1.00	<p>傾斜長が侵食に及ぼす影響を表すパラメータ (8)式より計算する。(8)式は、72.6 ftの 単位プロットにおいて得られたプロットデー タに基づき得られた式であり、傾斜長の水平投 影長さ λ 及び m で表されるリル侵食の影響 が反映される⁽⁷⁾。 λ が大きいほど L が大きくなり、厳しい評価と なる。 m については、勾配56%面を例にとると、θ が 大きいほど β が大きくなり、それに伴い m が 大きくなり、その結果 L が大きくなるため、厳 しい評価となる。これは、勾配56%面のように、 λ が単位プロット(72.6 ft)よりも長くなるよ うな傾斜においては、勾配が急になるほどリル 侵食の影響が大きくなり、侵食量が増えること を表している。</p>
λ (ft)	60.53	72.64	<p>傾斜長の水平投影長さ 第1図にて、1 (ft) = 0.3048 (m) として単位 を ft に換算して設定する。 なお、傾斜の起点は表流水の開始地点である最</p>

			終覆土頂点とし、勾配 56% 面については、勾配 5% 面の傾斜長も考慮する。
m	0.40	0.71	斜面長指数 (9) 式より計算する。
β	0.67	2.42	インターリル侵食に対するリル侵食の比率 (10) 式より計算する。
θ (°)	2.86	29.05	勾配 5% 面及び勾配 56% 面の角度

第 7 表 S (勾配係数) の計算結果及び係数

係数	値		備考
	勾配 5% 面	勾配 56% 面	
S	0.57	2.24	勾配が侵食に及ぼす影響を表すパラメータ (11) 式 (勾配 5% 面) 及び (12) 式 (勾配 56% 面) より計算する。
θ (°)	2.86	29.05	勾配 5% 面及び勾配 56% 面の角度 θ が大きいほど S が大きくなり、厳しい評価となる。

以上より、傾斜長及び勾配係数 (LS) を L と S の積により計算し、第 8 表のとおり設定する。

第 8 表 傾斜長及び勾配係数 (LS)

	勾配 5%面	勾配 56%面
傾斜長及び勾配係数 (LS)	0.53	2.24

d. 保護管理係数 (C)

CについてはA H 703⁽⁷⁾ 及びU G 2008⁽⁸⁾ に設定方法が記載されており、特にU G 2008⁽⁸⁾ においてより詳細な係数設定が記載されているため、U G 2008⁽⁸⁾ に基づき求める。

U G 2008⁽⁸⁾ の「9.1式」に基づき、以下のとおりCを求める。

$$C = c_c \cdot g_c \cdot s_r \cdot r_h \cdot s_b \cdot s_c \cdot P_p \cdot a_m \cdots (13) \text{ 式}$$

ここで、Cの係数については、保護土層の状況を考慮して以下のとおり設定する。また、Cの係数設定値を第11表に整理する。

各係数を用いて(13)式より算出した保護管理係数(C)を第12表のとおり設定する。

(a) c_c (Canopy cover)

植物の林冠等 (Canopy) により、降雨時の地面への雨滴落下のエネルギーによる侵食の軽減を表す係数である。R U S L Eでは、植物のうち地表に接している部分は Ground cover として扱われており、保護工 (じゃかご等) の侵食低減効果は、 g_c (Ground cover) により考慮し、 c_c については考慮しない。

(b) g_c (Ground cover)

地表面に接する物質 (Ground cover) が降雨の雨滴を防ぎ掃流力を抑制することによる侵食の軽減を表す係数である。

Ground cover は、地表面に接する全ての物質を対象とし、岩片、植生、落葉、コケ、作物残留物等がある。岩石による保護 (Rock cover)

の場合は、大きさが 10 mm 以上であれば Ground cover と判断される⁽⁸⁾。

このため、保護土層に対して Ground cover となる保護工（じゃかご等）を考慮して、当該係数を設定する。

UG2008⁽⁸⁾の「9.6式」に基づき、以下のとおり g_c を求める。

$$g_c = \exp(-b \times f_g) \quad \cdots (14) \text{式}$$

ここで、 g_c の係数は第9表のとおり設定する。

各係数を用いて(14)式より算出し、 g_c は0.063と設定する。

第9表 g_c の係数

係数	値	備考
b	0.046	<p>Empirical coefficient (経験的定数)</p> <p>Ground coverの有効性を示す係数であり、インターリル侵食における0.025からリル侵食における0.06までの値をとる(UG2008⁽⁸⁾の「p146」)。インターリル侵食はリルとリルとの間における表流水による侵食が想定される。表流水による侵食量は少ないが、表流水による侵食が発展してリル侵食が発生する場合、リル侵食が支配的と推定される。リル侵食が支配的な場合は、$b=0.046$(UG2008⁽⁸⁾の「p146」)、$b=0.050$(AH703⁽⁷⁾の「p159」)が示されている。このため、保守的に評価が厳しくなる0.046と設定する。</p>
f_g (%)	60	<p>Percentage of land area covered by ground cover (Ground coverにより覆われる地表面割合)</p> <p>Ground coverである保護工(じゃかご等)の割栗石が保護土層に接地している割合。割栗石は保護土層の大部分に接地しているため、f_gは高い値となることが推定されるが、UG2008⁽⁸⁾の「p270」より、保守的に60%と設定する。</p>

(c) s_r (Soil surface roughness)

かく乱によって生じた地表面のランダムな粗さによる侵食への影響を表す係数である。長期において自然現象により地表面の粗さが形成されることを想定し、当該係数を設定する。

UG2008⁽⁸⁾の「9.10式」に基づき、以下のとおり s_r を求める。

$$s_r = \exp \{-0.66 \times (R_a - 0.24)\} \quad \dots (15) \text{式}$$

ここで、 s_r の係数は第10表のとおり設定する。

係数を用いて(15)式より算出し、 s_r は0.79と設定する。

第10表 s_r の係数

係数	値	備考
R_a	0.6	Adjusted roughness value (補正粗さ値) 長期的な値が提示されているUG2008 ⁽⁸⁾ の「Table10.6, “Bare with rock fragments”」より0.6と設定する。

(d) r_h (Ridge heigh)

耕作において作られる畝と畝間による侵食への影響を表す係数である。保護土層に畝は存在しないため、 r_h については考慮しない。

(e) s_b (Soil biomass subfactor)

植物の根、作物残留物耕作等による侵食への影響を表す係数である。保護土層にはこれらが存在しないため、 s_b については考慮しな

い。

(f) s_c (Soil consolidation)

耕作地等において、年数が経過するにしたがって、乾湿影響や生物影響により土粒子の凝結が起こり、侵食抑制効果が高まることを表す係数である。締固め施工を行う保護土層にはこのような侵食抑制効果は期待できないため、 s_c については考慮しない。

(g) P_p (Ponding effect)

平地において、降雨強度の強い降雨により水面ができ、侵食抑制効果が高まることを表す係数である。勾配を設ける保護土層にはこのような侵食抑制効果は期待できないため、 P_p については考慮しない。

(h) a_m (Antecedent soil moisture)

降雨が少なく土壌が乾燥しやすい作物栽培地域（米国 Northwest Wheat and Range Region (req zone)）での侵食量の算出において適用される係数である。保護土層には該当しないため、 a_m については考慮しない。

第 11 表 保護管理係数 (C) の係数

係数	設定値	備考
c_c	—	考慮しない
g_c	0.063	UG2008 ⁽⁸⁾ の「9.6 式」より
b	0.046	UG2008 ⁽⁸⁾ の「p146」より
f_g	60	UG2008 ⁽⁸⁾ の「p270」より
s_r	0.79	UG2008 ⁽⁸⁾ の「9.10 式」より
R_a	0.6	UG2008 ⁽⁸⁾ の「Table10.6」より
r_h	—	考慮しない
s_b	—	考慮しない
s_c	—	考慮しない
P_p	—	考慮しない
a_m	—	考慮しない

第 12 表 保護管理係数 (C)

	勾配 5%面	勾配 56%面
保護管理係数 (C)	0.050	

e. 補助手法係数 (P)

補助手法係数は、植生や残留物による侵食抑制手法に加えて、補助的な効果をもたらす手法に適用される係数である。この手法には、土地の輪郭部分の形成、フィルター、密集した植物の間引き、段丘、分水路、貯水池などが含まれる。廃棄物埋設地にはこれらは存在しないことから、 P については考慮しない。

(4) 評価結果

(2) 式に基づき算出した保護土層の侵食量を第13表に示す。また、評価に用いたパラメータを第14表にまとめる。

(2) 式によって求めた1ヘクタール当たりの年間侵食重量(A)は、0.34 (t/ha/y) (勾配5%面) 及び1.45 (t/ha/y) (勾配56%面) である。

第13表 保護土層の侵食量

	勾配5%面	勾配56%面
1ヘクタール当たりの年間侵食重量 (A) (t/ha/y)	0.34	1.45

第14表 侵食量の評価パラメータ

	勾配5%面	勾配56%面
降雨侵食係数 (R) (MJ・mm/ha/h/y)	4,698	
土壌侵食係数 (K) (t・ha・h/ha/MJ/mm)	0.0027	
傾斜長及び勾配係数 (LS)	0.53	2.24
保護管理係数 (C)	0.050	
補助手法係数 (P)	—	
保護土層の面積 (m ²)	1,416	417
傾斜長 (m)	18.45	3.69
保護土層の勾配 (°)	2.86	29.05
保護土層の密度 (g/cm ³)	2.68	

1. 2. 3 侵食による影響

保護土層において、雨滴衝撃による侵食及び雨水流による侵食は発生しないと考えられる。一方で、表流水による侵食が発生し、表流水による侵食が進展したリル侵食が発生する可能性がある。このため、RUSLEを用いて、表流水による侵食及び表流水による侵食が進展したリル侵食の発生を想定した保護土層の侵食量の算出を行った結果、侵食量が多い勾配56%面において、年間侵食量は 1.45 t/ha/y となった。廃棄物処分場の最終カバー⁽¹¹⁾において、土壌侵食の速さの許容水準である 4.5 t/ha/y 以下に抑えることが求められており、保護土層の年間侵食量は許容水準以下である。

以上より、廃棄物埋設地において、低透水性土層及び側部低透水性覆土の低透水性に影響を及ぼすような保護土層の侵食は発生しないと考えられるため、侵食は影響事象として考慮しない。

なお、保護工（じゃかご等）は、最終覆土の外周部にも設置され、設置箇所には、部分的に勾配が約56%となる斜面が存在する。この斜面は廃棄物埋設地の外側であり、斜面の下部には低透水性土層及び側部低透水性覆土は存在しないため、侵食による影響はないと考えられる。

2 参考文献

- (1) 西村宏昭・谷口徹郎・丸山敬 (2009) : 飛散物の軌跡の解析と建材の耐衝撃試験, 一般財団法人 日本建築総合試験所 機関誌 G B R C Vol. 34, No. 1
- (2) 平成 26 年理科年表 国立天文台編, 丸善出版
- (3) 林為人・中村敏明・高橋学 (2003) : 稲田花崗岩の熱特性, 超音波速度, 強度および変形特性の異方性
- (4) 松倉公憲 (1997) : 斜面を構成する岩石・岩盤の風化速度
- (5) 北原曜 (2002) : 植生の表面侵食防止機能, 砂防学会誌 vol.54 No.5
- (6) Solid Waste Disposal Facility Criteria, Technical Manual, Environmental Protection Agency (1993)
- (7) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) , Agriculture Handbook Number 703, United States Department of Agriculture (1997)
- (8) User' s Reference Guide, Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (R U S L E 2) (2008)
- (9) 細山田健三・藤原輝男 (1984) : 侵食流亡土量の予測に関する USLE の適用について (I)
- (10) Soil Survey Manual, Agriculture Handbook Number 18, United States Department of Agriculture (2017)
- (11) Robert M. Koerner and David E. Daniel (2004) : 廃棄物処分場の最終カバー, 技報堂出版

以上

浸透水による土壌への影響評価

目 次

1	はじめに.....	1
2	浸透水による土壌への影響.....	1
2. 1	保護土層.....	1
2. 2	掘削抵抗性層.....	2
2. 3	低透水性土層.....	3
2. 3. 1	流出試験.....	3
2. 3. 2	ベントナイト混合土の流出.....	5
3	参考文献.....	6

1 はじめに

廃棄物埋設地では、降雨時の雨水の大部分は保護土層表面を流れるが、一部は保護土層に浸透し、浸透水の大部分は掘削抵抗性層から排水される。この過程で、浸透水が、保護土層、掘削抵抗性層及び低透水性土層に影響を及ぼす可能性があるため、影響を評価する。

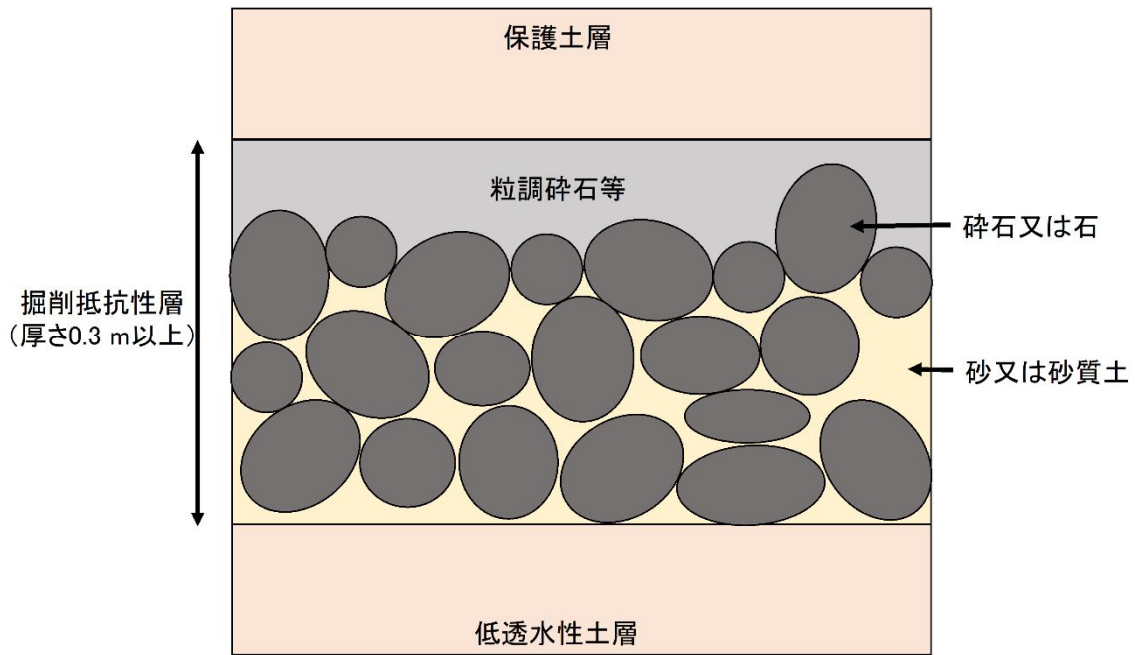
2 浸透水による土壌への影響

2. 1 保護土層

保護土層中の浸透水は、保護土層の下端から掘削抵抗性層に浸透する。この際、保護土層の土粒子よりも粒径の大きな砕石又は石で構成される掘削抵抗性層に浸透するため、保護土層の土粒子が掘削抵抗性層に流出し、保護土層の下部が削れるパイピング（流体浸食）が発生する可能性がある。

保護土層のパイピング（流体浸食）を防止するために、掘削抵抗性層内の上部には粒調砕石等を施工する構造とする。粒調砕石等により、保護土層のパイピング（流体浸食）を防止するために、保護土層の粒度分布に基づき粒調砕石等の粒径を検討する（参考資料 3 参照）。保護土層のパイピング（流体浸食）を防止することにより、掘削抵抗性層の目詰まりは防止される。

保護土層のパイピング（流体浸食）への対策を踏まえた掘削抵抗性層の構造を第 1 図に示す。



第 1 図 掘削抵抗性層の構造

2. 2 掘削抵抗性層

掘削抵抗性層内の上部に施工した粒調碎石等が流出し、粒調碎石等の下部が削れるパイピング（流体浸食）が発生する可能性がある。

粒調碎石等のパイピング（流体浸食）を防止するために、掘削抵抗性層の碎石又は石（割栗石等の粒径が大きなもの）の粒径は粒調碎石等が流出しない大きさとする。碎石又は石の粒径は、粒調碎石等の粒径の検討内容と同様の方法で、粒調碎石等の粒度分布に基づき検討する。また、粒調碎石等のパイピング（流体浸食）を防止するために、掘削抵抗性層に砂又は砂質土を詰める構造である。粒調碎石等のパイピング（流体浸食）を防止することにより、掘削抵抗性層の目詰まりは防止される。

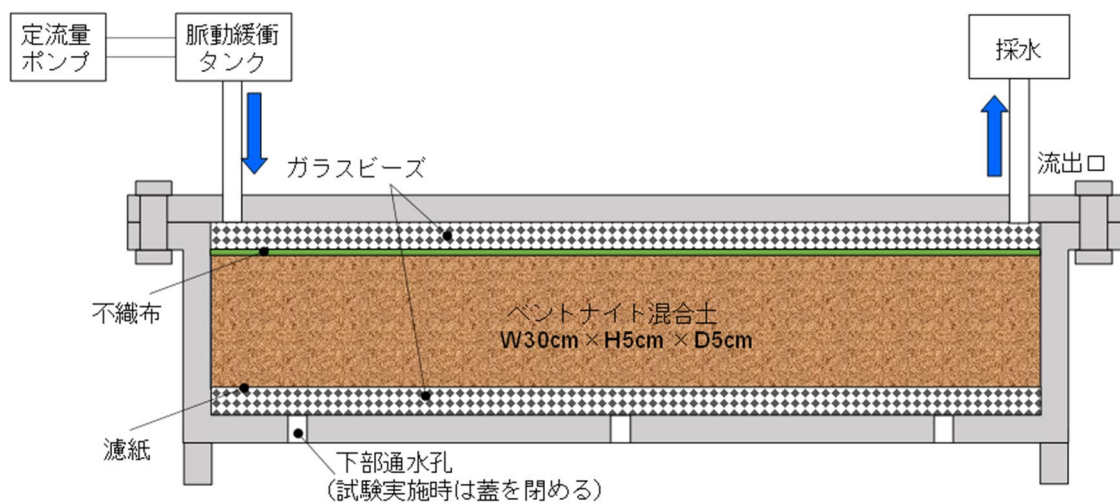
掘削抵抗性層内での粒調碎石等のパイピング（流体浸食）への対策を踏まえた掘削抵抗性層の構造を第 1 図に示す。

2. 3 低透水性土層

掘削抵抗性層で排水される浸透水の一部は低透水性土層に至り、低透水性土層の上面を流れることが想定される。この際、浸透水により低透水性土層のベントナイト混合土が流出する可能性がある。

2. 3. 1 流出試験

ベントナイト混合土の表面侵食の影響を確認することを目的として、第2図に示す試験装置を用いて、試験容器に充填したベントナイト混合土（クニゲルU：洗砂＝15：85）の上部に設置したガラスビーズ（洗砂を想定し、砂質土の代表粒D50と同等粒径を使用）内に一定流量で水溶液を通過させ、通過した水溶液の濁度を測定し、ベントナイト混合土の流出量を確認した。

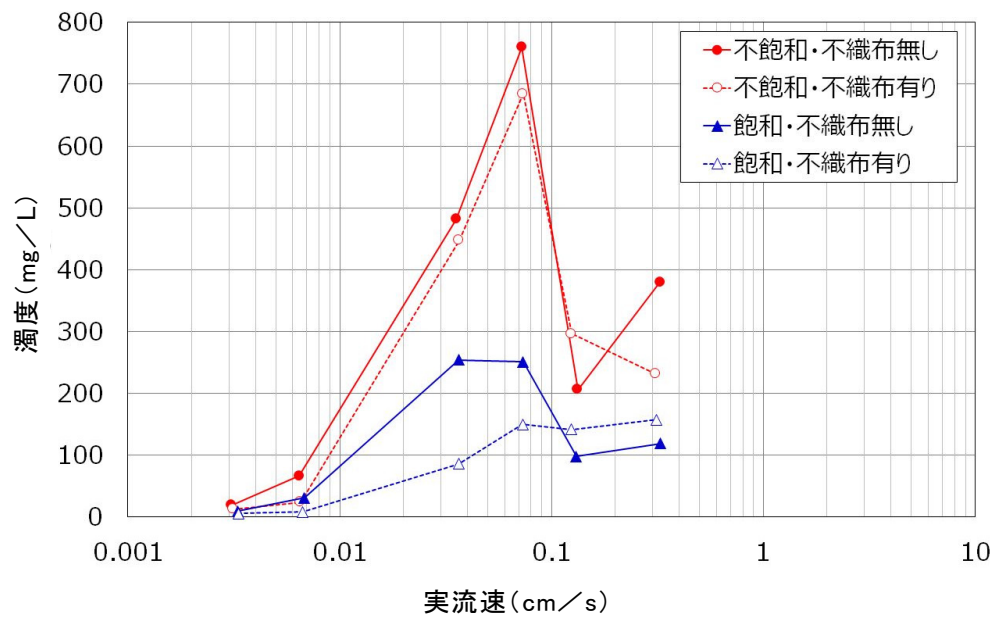


第2図 流出試験装置の概略図

第1表に示す試験条件における流出試験の結果を第3図に示す。本試験においては、実流速 $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.003 cm/s) 未満であれば、ベントナイト混合土の流出は生じにくい結果となった。

第 1 表 流出試験の試験条件

試験条件	
使用材料	クニゲルU 洗砂
ベントナイト混合率	15%
初期乾燥密度	1.82 Mg/m ³
供試体条件 (計 4 ケース)	飽和／不飽和 不織布の有無



第 3 図 流出試験の結果 (濁度と実流速の関係)

2. 3. 2 ベントナイト混合土の流出

低透水性土層の上面においては、ベントナイト混合土の上に水面ができ、その水面の水深に応じた流量及び流速が発生し、飽和状態で浸透水が低透水性土層の上面を流れると考えられる。このため、ベントナイト混合土の流出を防止するために、低透水性土層の上面の流速については、「2. 3. 1」に示す流出試験にてベントナイト混合土の流出が生じにくい結果となった 3×10^{-5} m/s 未満に抑える構造とする。

また、ベントナイト中のモンモリロナイトがコロイド化し、表流水によって流出することが懸念される。モンモリロナイトの流出が顕著に生じるためには、ベントナイト中のモンモリロナイトがゾル化（コロイド化）する必要があるが、外部溶液のイオン強度が低い場合に生じることが知られている⁽¹⁾。

「2. 3. 1」に示す流出試験では、実環境での不確実性を考慮して、降雨による浸透水に比べてイオン強度が低い純水を用いている。このため、実環境に比べて、ベントナイト中のモンモリロナイトがゾル形成（コロイド化）しやすい条件であり、化学的な観点で保守的な試験環境となっている。この試験環境で実施した流出試験の結果、低透水性土層の上面の流速が 3×10^{-5} m/s 未満であればベントナイト混合土の流出が生じにくいことから、低透水性土層の上面の流速を 3×10^{-5} m/s 未満に抑える構造とすることで、ベントナイト中のモンモリロナイトがコロイド化し、流出することは抑制されることが考えられる。

3 参考文献

- (1) 原子力発電環境整備機構（2021）：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現 ―適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築― 本編 および 付属書，NUMO-TR-20-03

以上

E P A (1993) における代替最終覆土の
例と廃棄物埋設地との比較

目 次

1	はじめに.....	1
2	代替最終覆土設計の追加要素の例.....	1
3	参考文献.....	5

1 はじめに

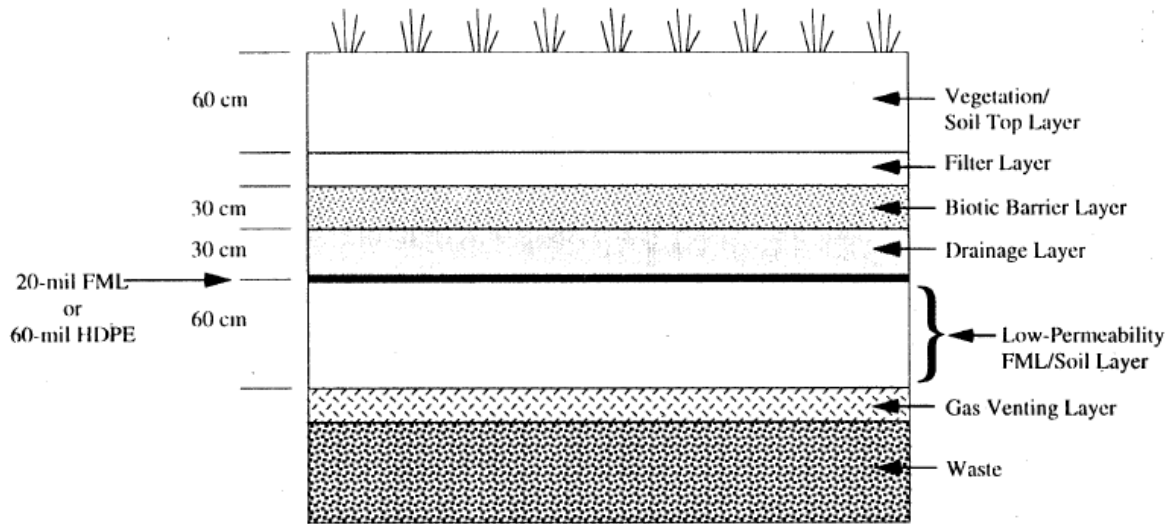
E P A (1993)⁽¹⁾においては、最小限の規制要求の他に、代替最終覆土設計の追加要素の例が示されている。本資料では、E P A (1993)⁽¹⁾における代替最終覆土設計の追加要素の例と廃棄物埋設地の設計とを比較する。

2 代替最終覆土設計の追加要素の例

E P A (1993)⁽¹⁾における代替最終覆土設計の追加要素の例を第1図に示す。また、E P A (1993)⁽¹⁾における代替最終覆土設計の追加要素の例と廃棄物埋設地の設計との比較を第1表に示す。

E P A (1993)⁽¹⁾における代替最終覆土設計の追加要素の例では、浸出水の流出を抑制することを目的として、ジオメンブレンと土で構成されるComposite coverが示されている。また、その他の追加要素として、排水層、排気層、生物バリア層が例示されている。このような追加要素の例は、最低限のE P A (1993)⁽¹⁾の要求に加えて、廃棄物埋設施設の固有の条件を考慮して検討されるべきものである。

以上を踏まえた上で、E P A (1993)⁽¹⁾における代替最終覆土設計の追加要素の例と廃棄物埋設地の設計とを比較すると、第1表に示す通り、E P A (1993)⁽¹⁾と廃棄物埋設地とはおおむね整合する。



第 1 図 E P A (1993) ⁽¹⁾ における代替最終覆土設計の追加要素の例

第1表 EPA (1993) ⁽¹⁾ における代替最終覆土設計の追加要素の例と廃棄物埋設地の設計との比較 (1/2)

EPA (1993) ⁽¹⁾ における代替最終覆土設計の追加要素の例		廃棄物埋設地の設計	
名称	仕様	名称	仕様
Vegetation/ Soil top layer	<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 60 cm 	保護工 (じゃかご等)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 割栗石 (粒径 5 cm~15 cm, 厚さ 30 cm を想定) を使用
		保護土層	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎層, 低透水性土層及び掘削抵抗性層をあわせて厚さ 250 cm 以上
Filter layer	粒子状の Drainage layer を用いる場合, <ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 30 cm ・ 透水係数 1×10^{-4} m/s から 1×10^{-5} m/s ・ 勾配 3% 以上 	掘削抵抗性層	<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 30 cm 以上 ・ 透水係数 1.0×10^{-3} m/s (透水試験の結果に基づく想定値) ・ 勾配 5% ※浸透水の大部分は, 掘削抵抗性層から排水される。掘削抵抗性層内には, 保護土層のパイピング (流体浸食) 防止のための粒調碎石等を施工する。また, 掘削抵抗性層により, 樹木の根による低透水性土層の損傷を防止する。
Biotic barrier layer	<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 30 cm 		
Drainage layer	<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 30 cm 		

第1表 EPA (1993) ⁽¹⁾ における代替最終覆土設計の追加要素の例と廃棄物埋設地の設計との比較 (2/2)

EPA (1993) ⁽¹⁾ における代替最終覆土設計の追加要素の例		廃棄物埋設地の設計	
名称	仕様	名称	仕様
FML or HDPE	<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 0.5 mm 以上 (HDPEを用いる場合は 1.5 mm (60 mils) 以上) 	低透水性土層／ 側部低透水性覆土	低透水性土層 <ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数 1.0×10^{-10} m/s 以下 ・ 厚さ 100 cm 以上 側部低透水性覆土 <ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数 1.0×10^{-10} m/s 以下 ・ 厚さ 60 cm 以上
Low permeability FML／ Soil layer	Low permeability FML <ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 0.75 mm (30 mils) 以上 (HDPEを用いる場合は 1.5 mm (60 mils) 以上) Soil layer (締固め土) <ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ約 60 cm ・ 透水係数 1×10^{-9} m/s 以下 		※金属類及びコンクリート類の廃棄物を対象としており，一般廃棄物で想定されるメタンガス及び硫化水素ガス等の発生は考えられないため，Gas venting layer は不要。
Gas venting layer	<ul style="list-style-type: none"> ・ 厚さ 30 cm 		

3 参考文献

- (1) Solid Waste Disposal Facility Criteria, Technical Manual,
Environment Protection Agency (1993)

以上

植生工と保護工（じゃかご等）の比較検討

目 次

1	はじめに.....	1
2	植生工と保護工（じゃかご等）の比較検討.....	1
3	参考文献.....	4

1 はじめに

E P A (1993) ⁽¹⁾ では、野生植物の育成を維持できる Erosion layer の設置を要求しており、Erosion layer の植生によって、侵食を抑制することを期待している。また、礫や岩石を用いた保護表面を、Erosion layer の代替として用いることができるとしている。

廃棄物埋設地においては、Erosion layer の植生の代替として、保護工（じゃかご等）を設置する計画である。

本資料では、E P A (1993) ⁽¹⁾ で期待される植生（以下「植生工」という。）と廃棄物埋設地における保護工（じゃかご等）の比較検討の内容を示す。

2 植生工と保護工（じゃかご等）の比較検討

植生工と保護工（じゃかご等）の比較を第1表に示す。

侵食抑制の観点では、植生工及び保護工（じゃかご等）ともに優れている。保護工（じゃかご等）については、保護工（じゃかご等）による侵食抑制効果を適切に反映した侵食量の評価を行う必要がある。

蒸発散による廃棄物埋設施設内への浸透水量の低減の観点では、保護工（じゃかご等）は水分の蒸発が促進されないため、蒸発散を促進する植生工が優位である。このため、保護工（じゃかご等）の場合は、浸透流解析において、蒸発散量を見込まない条件で施設通過流量を評価する必要がある。

長期の状態設定の観点では、植生工は、地域の気候条件等を考慮した植物を選択することで状態が維持されると考えられる。また、割栗石を用いる保護工（じゃかご等）は、長期においても状態が維持されると考えられる。

実用例の観点では、植生土が最も一般的に用いられるが、植生被覆を維持することが難しい乾燥立地では、保護工（じゃかご等）のような粗石が用いられる。

上記を踏まえて、特に長期的に維持管理が行われない廃止措置の開始後
1,000 年の長期の状態設定を行うという廃棄物埋設地に固有の条件に鑑み、
保護工（じゃかご等）を用いる。

第1表 廃棄物埋設地における植生工と保護工（じゃかご等）の比較

比較項目	植生工	保護工（じゃかご等）
侵食抑制	<ul style="list-style-type: none"> ● 表土上に群葉カバーを生成して土壌表面に与える降雨の影響を減じ、風速を弱める働きがあり、侵食を最小化する⁽²⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 雨滴が保護土層に直接落下するのを防ぐため、雨滴衝撃による侵食及び雨水流による侵食が発生しないと考えられる。 ● 表流水による侵食が発生する可能性があるため、保護工（じゃかご等）による侵食抑制効果を適切に反映した侵食量の評価を行う必要がある。
蒸発散	<ul style="list-style-type: none"> ● 浸透した水を貯留し、蒸発散を促進する⁽²⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 降水は保護工（じゃかご等）を通過して下方に浸透するが、保護土層から水分を除去して大気中に蒸発還元させる植物が存在しないため、水分の蒸発が促進されない⁽²⁾。
長期の状態設定	<ul style="list-style-type: none"> ● 植生工に影響する可能性がある気温及び降水量は、長期的に大きく変化しないことから^(※1)、地域の気候条件等を考慮した植物を選択することで、植生工の状態が維持されると考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 長期の状態設定において、割栗石を用いる保護工（じゃかご等）への自然現象による影響はない。
実用例	<ul style="list-style-type: none"> ● 植生土が最も一般的に用いられる⁽²⁾。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 植生被覆を維持することが難しい乾燥立地では粗石が用いられてきた⁽²⁾。

※1：「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第十三条（ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地）第1項第三号及び第四号への適合性について 地質環境等の状態設定」より

3 参考文献

- (1) Solid Waste Disposal Facility Criteria, Technical Manual,
Environmental Protection Agency (1993)
- (2) Robert M. Koerner and David E. Daniel (2004) : 廃棄物処分場の
最終カバー, 技報堂出版

以上

掘削抵抗性層内の粒調碎石等の 粒径の検討方針

目 次

1	はじめに.....	1
2	粒調砕石等の粒径の検討方針.....	1
2. 1	パイピング則に基づく粒径の検討.....	1
2. 2	透水則に基づく粒径の検討.....	3
2. 3	粒調砕石等の粒径の例.....	3
3	まとめ.....	4
4	参考文献.....	5

1 はじめに

保護土層中の浸透水は、保護土層の下端から掘削抵抗性層に浸透する。この際、保護土層の土粒子よりも粒径の大きな掘削抵抗性層に浸透するため、保護土層の土粒子が掘削抵抗性層に流出し、保護土層の下部が削れるパイピング（流体浸食）が発生する可能性がある。

保護土層のパイピング（流体浸食）を防止するために、掘削抵抗性層内の上部には粒調碎石等を施工する構造である。粒調碎石等により、保護土層のパイピング（流体浸食）を防止するためには、保護土層の粒度分布に基づき粒調碎石等の粒径を検討する必要がある。

本資料では、粒調碎石等を例に、保護土層のパイピング（流体浸食）を防止するための、粒調碎石等の粒径の検討方針を示す。

2 粒調碎石等の粒径の検討方針

2. 1 パイピング則に基づく粒径の検討

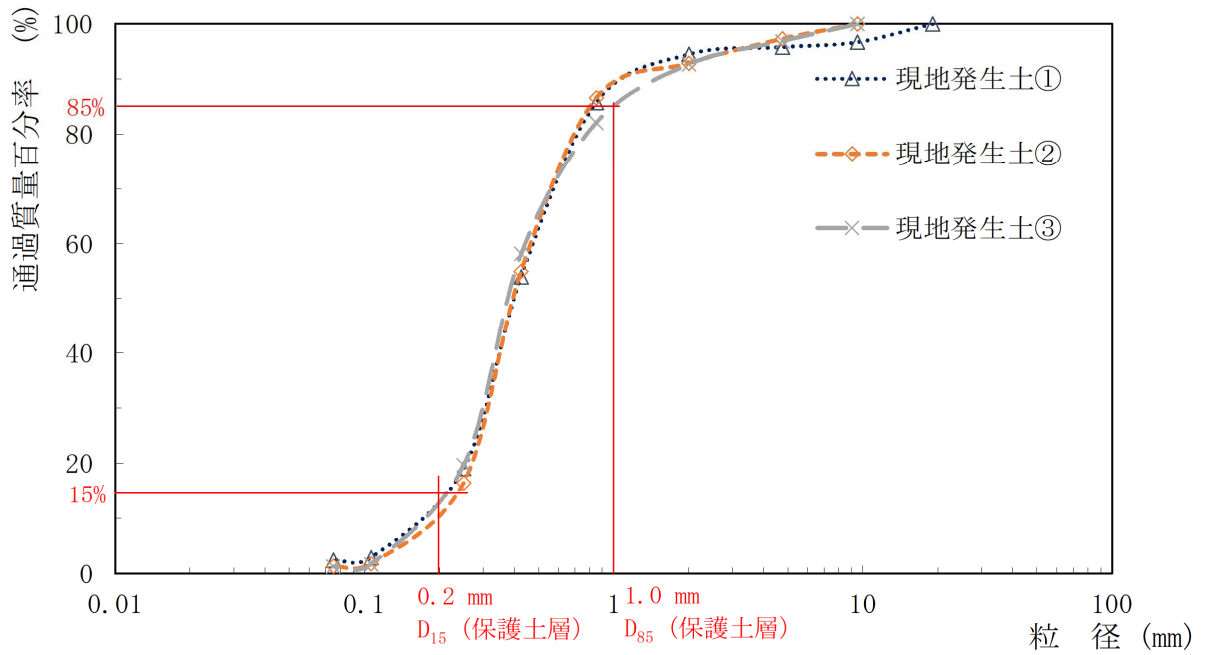
廃棄物処分場の最終カバー⁽¹⁾では、以下のとおりパイピング則が定められている。

パイピング予防のため：

$$D_{15} \text{ (フィルター)} / D_{85} \text{ (表土層)} < 4\sim 5 \text{ (2. 4a)}$$

ここで、「 D_{15} (フィルター)」は、乾燥重量で 15% だけがふるいを通過する粒径（通過質量百分率 15% における粒径）であり、廃棄物埋設地では粒調碎石等がフィルタに相当するため「 D_{15} (粒調碎石等)」となる。また、「 D_{85} (表土層)」は、乾燥重量で 85% だけがふるいを通過する粒径（通過質量百分率 85% における粒径）であり、廃棄物埋設地では保護土層が表土層に相当するため「 D_{85} (保護土層)」となる。

保護土層の粒度分布と D_{85} (保護土層) を第 1 図に示す。



第 1 図 保護土層の粒度分布と D_{85} (保護土層) 及び D_{15} (保護土層)

パイピング則に基づき、以下の式により D_{15} (粒調碎石等) を算出する。

$$D_{15} \text{ (粒調碎石等)} / D_{85} \text{ (保護土層)} < 4 \sim 5 \quad \dots (1) \text{ 式}$$

ここで、第 1 図より、 D_{85} (保護土層) = 1.0 mm とすると、

$$D_{15} \text{ (粒調碎石等)} < 4 \sim 5 \times 1.0 \text{ mm} = 4.0 \text{ mm} \sim 5.0 \text{ mm} \quad \dots (2) \text{ 式}$$

2. 2 透水則に基づく粒径の検討

廃棄物処分場の最終カバー⁽¹⁾では、以下のとおり透水則が定められている。

透水性の維持のため：

$$D_{15}(\text{フィルター}) / D_{15}(\text{表土層}) > 4\sim 5 \quad (2.5a)$$

ここで、「 D_{15} (表土層)」は、乾燥重量で15%だけがふるいを通過する粒径(通過質量百分率15%における粒径)であり、廃棄物埋設地では保護土層が表土層に相当するため「 D_{15} (保護土層)」となる。

保護土層の粒度分布と D_{15} (保護土層)を第1図に示す。

透水則に基づき、以下の式により D_{15} (粒調砕石等)を算出する。

$$D_{15}(\text{粒調砕石等}) / D_{15}(\text{保護土層}) > 4\sim 5 \quad \cdots (3) \text{式}$$

ここで、第1図より、 D_{15} (保護土層) = 0.2 mmとすると、

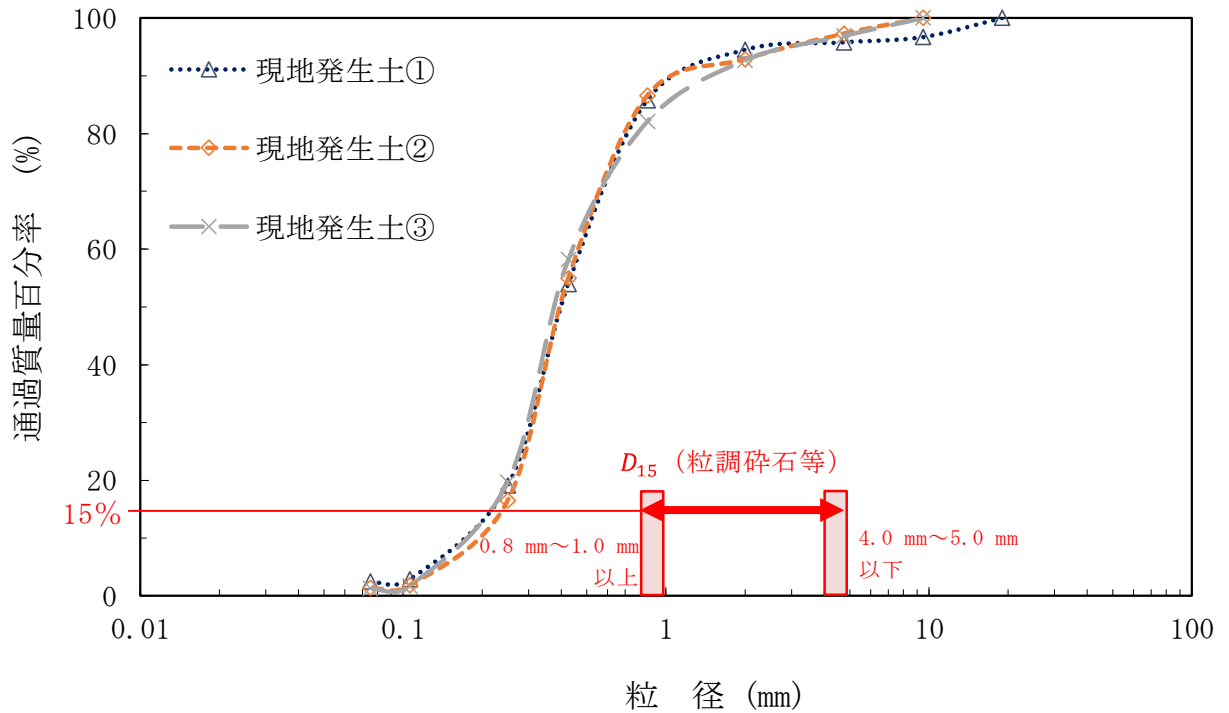
$$D_{15}(\text{粒調砕石等}) > 4\sim 5 \times 0.2 \text{ mm} = 0.8 \text{ mm}\sim 1.0 \text{ mm} \quad \cdots (4) \text{式}$$

2. 3 粒調砕石等の粒径の例

パイピング則及び透水則に基づき粒調砕石等の粒径を検討した結果、 D_{15} (粒調砕石等)は以下のとおりとなる。

$$0.8 \text{ mm}\sim 1.0 \text{ mm} < D_{15}(\text{粒調砕石等}) < 4.0 \text{ mm}\sim 5.0 \text{ mm} \quad \cdots (5) \text{式}$$

このため、通過質量百分率15%における粒径が0.8 mm~1.0 mm以上、4.0 mm~5.0 mm以下となる粒調砕石等を設置する必要がある。粒調砕石等の粒度分布範囲の例を第2図に示す。



第 2 図 粒調碎石等の粒度分布範囲の例

3 まとめ

パイピング則及び透水則に基づき粒調碎石等の粒径を検討すると、粒調碎石等の通過質量百分率 15%における粒径は 0.8 mm~1.0 mm 以上、4.0 mm~5.0 mm 以下となる。

なお、施工時に保護土層のサンプリングを十分に行い、粒度分布を確認した上で、その結果に基づき粒調碎石等の粒径を決定する。

また、掘削抵抗性層内の碎石又は石においても、パイピング防止及び透水性確保の観点から、粒調碎石等の粒径の検討と同様にパイピング則及び透水則に基づき粒径の検討を行う。

4 参考文献

- (1) Robert M. Koerner and David E. Daniel (2004) : 廃棄物処分場の
最終カバー, 技報堂出版

以上